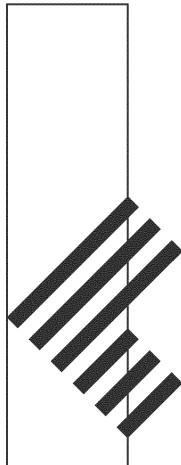


工学院大学  
総合研究所年報  
第19号 2011年度



平成24年6月発行

工学院大学総合研究所

RESEARCH INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
KOGAKUIN UNIVERSITY





## 研究の方向づけについて

学長 水野 明哲

戦前には滝川事件をはじめとする研究への政治の介入があり、混乱があった。政府にとって都合の悪い研究は圧迫を受けた。滝川教授が属する京都帝国大学法学部では、全教官が辞表を出し抵抗したという。時代が変わって、私が大学に在学した 1960 年代後半は、学生運動はなやかなりし頃で、学生の活動家たちは大学の先生が軍需関連の研究をしているのではないか、と批判的な議論を展開していた。のみならず、企業からの受託研究をすること自体が悪である、ということで批判していた。

現在は平和な時代で、そのような議論が影をひそめたかに見える。しかし、考えてみると、科研費のような研究費の配分も、最終的には国が決めるのであるから、国が気に入る研究とそうでない研究で重みづけされた配分がなされているということを否定することはできないかもしれない。

最近、本学の学園において、研究の方向づけをするべきであるという議論がある。たしかに、大学の教員が一人ひとり独自の研究をしているよりも、同じ方向を目指して協力し合って研究する方が、より大きな成果につながるということは考えられる。しかし、他方では先生方の研究の自由を奪う、ないしは制約することになるかもしれない。

総合研究所では、1997 年以来さまざまな研究センターを設置して研究を開拓してきた。AMC、EEC、SMBC、NASIC、BERC、UDM、ECEC などの略語で表される研究センターである。これらはいずれも教員の中から自主的に組まれた研究チームである。経営者、ないしは大学中枢からの指令によるものではなかった。

工学院大学の研究は、基本的にこのように、自主的な活動からまとまりを醸し出していくのがもっとも自然で望ましいように思われる。プロジェクト研究も、審査委員のフェアな審査により採択された課題が、活発な研究活動の呼び水となり、将来的により大きな外部資金による研究として花開くことを願うものである。

AMC: Advanced Materials Center (アドバンストマテリアルズセンター)

EEC: Environmental & Earthquake Engineering Research Center (地震防災・環境研究センター)

SMBC: Smart Machine and Micro-Bio systems Research Center (マイクロ先進スマート機械・マイクロバイオシステム研究センター)

NASIC : Nano Structured Surfaces and Interfaces Research Center (ナノ表面・界面研究センター)

BERC: Biomedical Engineering Research Center (生体医工学研究センター)

UDM: Research Center for Urban Disaster Mitigation (都市減災研究センター)

ECEC: Energy Conversion Ecomaterials Center (エネルギー変換エコマテリアルセンター)



## 本学の研究活動支援制度、および学生の潜在能力について

総合研究所 所長 小野幸子

本年報は、工学院大学における研究活動の活性化を目的とした、独自の研究助成であるプロジェクト研究（本学教員を中心とした学内外のグループによる連携研究）の2011年度に終了あるいは継続の研究、また、2011年度に実施された一般研究（学内の個人研究助成）の成果を報告するものです。これらの研究助成制度は科研費申請を応募条件としており、特にプロジェクト研究は、以前は最大5年間、現在でも最大3年間継続して研究費が配分されるため、研究活性化の維持に大きな役割を果たしてきましたが、文科省からの補助金の廃止を受けて資金が低減し、改革の必要性が顕在化しました。そこで昨年度、総合研究所では、まず、一般研究に代えて新たに「科研費採択奨励研究費」制度を提案し、折衝の末に無事発足しました。これは科研費審査の評価点に基づき、採択にもう一歩の研究者に厚く配分する助成金制度で、特にボーダーで採択から漏れた研究者の研究意欲を大いに刺激する役割があると期待しております。これに伴い、プロジェクト研究制度も新たな理念の下で再構築する時期に来ており、総合研究所では本年度中の新規程の策定を目指しております。

本学研究者による外部資金の導入額はここ数年顕著な増加を見ており、このことは機関収入である間接経費の増加に繋がっているため、これら資金の有効活用を図ることが肝心です。本学教員、特に意欲の高い若手教員の研究活動の活性化支援に役立つ施策を準備する必要を感じています。しかしながら、競争的資金は、あくまで競争に耐えうる成果を生み出すポテンシャルのある研究者に厚く配分することが公正であり、良い意味で切磋琢磨の意識の醸成が望まれます。忘れてならないのは、意欲を持ち社会に発信する教員の研究活動こそが最も効率的に学生の潜在能力を引き出すこと、すなわち豊かな教育へと繋がることです。

元学部7年生で、私の研究室を3年ほど前に修士で卒業した、ある技術者が寄稿した文章を以下に引用させて頂きます。工学院大学の教育の特徴を端的に示しているのではと思います。「弊社の社長や採用担当の方たちから以前、『工学院大学ってどんな大学？』と質問されたことがあります、私が『先生が学生の事を学生と思わず、一研究者として全力でぶつかってきます。』と答えると、『ああ、なるほどね。』という返事が返ってきました。私を含めて過去に数人の工学院OBが弊社にいたそうで、その全員が共に向上心が高く、プレッシャーに負けない精神力を持っていて、肝が据わっていると仰られていました。」

# 目 次

学長 水野 明哲  
総合研究所所長 小野 幸子

1.	総合研究所プロジェクト研究報告（2011年度研究終了）	
・	高压プラント設備におけるねじ構造の設計指針の拡大	責任者 小林 光男…………… 15
・	原子間力顕微鏡による上皮成長因子受容体の1分子計測技術の開発及び数理モデルベース解析への応用に関する研究	責任者 中茎 隆…………… 21
・	湿式プロセスを用いた半導体ナノ・マイクロ規則構造の創製と高効率デバイスへの応用	責任者 小野 幸子…………… 29
・	集積化近紫外発光素子のための透明導電膜の検討	責任者 本田 徹…………… 39
・	高密度情報ストレージシステムにおける多端子情報理論に基づく多次元信号処理方式の研究	責任者 斎藤 秀俊…………… 49
・	ストリートファッショング画像データベースの構築とトレンド検知手法の研究	責任者 小西 克巳…………… 59
・	人口過疎地域における人口、生活圏域、域内生活基盤施設の相互関係	責任者 山下てつろう…………… 65
・	Innovative Identity Matrixing Model in the Trans-Cultural Era	責任者 カーニー マイケル…………… 71
・	政党政治再編成期ドイツにおける3政党間関係の変容に関する理論的・実証的分析	責任者 小野 一…………… 81
・	憲法と制度改革：国際化と地域化の市民生活への影響に関する研究 （2006年度研究終了・追加報告）	責任者 長谷川 憲…………… 97
2.	総合研究所プロジェクト研究報告（2012年度継続研究）	
・	氷海船舶の船体氷荷重分布推定手法の高度化	責任者 金野 祥久…………… 109
・	シンセティックジェットの流動特性に関する研究	責任者 佐藤光太郎…………… 117
・	キチンの潜在能力を化学とバイオテクノロジーで拓く	責任者 小山 文隆…………… 129
・	複雑な多環性構造を有する新規抗腫瘍天然物の全合成研究	責任者 南雲 紳史…………… 135

・ 血液環境で使用される医療機器の生体適合性の改善	責任者 木村 雄二	139
・ 解体を迎える半世紀供用した鉄筋コンクリート造建築物の後期健全度評価と解体排出物のゼロエミッション型再資源化モデルの構築	責任者 田村 雅紀	143
・ 古代東アジアにおける学術と支配制度に関する研究	責任者 榎本 淳一	153
・ 科学衛星搭載用放射線検出器の開発	責任者 幸村 孝由	163
・ 廃棄物系バイオマス由来燃料を用いたデュアルフューエルディーゼル発電	責任者 小林 潤	171
・ 新規ナノ構造高熱伝導高分子の創生と熱伝導メカニズムの解析	責任者 伊藤 雄三	177
・ 細胞の増殖、分化、機能維持を制御する蛇毒因子の単離とその機能に関する研究	責任者 辛 英哲	183
・ オーバーレイネットワークによるアプリケーションレイヤリンクアグリゲーションの研究	責任者 浅谷 耕一	187
・ 生体機能分子の固定化制御による軟組織適合性に優れた金属材料表面の創製	責任者 大家 渥	193

### 3. 総合研究所一般研究報告（個人研究）

・ 超臨界ジメチルエーテル噴霧の活用によるディーゼルエンジンの高性能化研究	是松 孝治	199
・ マイクロ部品の転造による増径加工技術の開発	久保木 功	200
・ 原子炉心流力振動に関する研究	菱田 博俊	201
・ マイクロ・ナノ構造による表面機能の制御	鈴木 健司	202
・ 小型レスキューロボットをもちいたセンサネット構築のための基礎実験	見崎 大悟	203
・ 水素生成のための尿素エネルギー・システムに関する研究	雜賀 高	204
・ 高エネルギー・ビームを用いた磁性体の形状および機能制御に関する研究	武沢 英樹	205
・ コロイド結晶テンプレート法を応用したアルミニウム表面の構造制御	阿相 英孝	206
・ チェタノシン誘導体の合成とその血管新生作用の検討	安井 英子	207

・ 植物性油脂の水素添加におけるトランス脂肪酸生成量の低減のための担持白金系触媒の高機能化	飯田 肇	208
・ 細菌由来糖質分解酵素の取得と産物解析	坂口 政吉	209
・ リン酸塩ガラス異常現象を利用した高レベル放射性廃棄物固化ガラスの開発	大倉 利典	210
・ 二塔式木質バイオマスガス化装置の高度低タール化	長本 英俊	211
・ 超音波霧化微細ミストを用いた環境中超微粒子の捕集技術の確立	並木 則和	212
・ ガラス被覆溶融紡糸法による熱電材料のナノワイヤー化	桑折 仁	213
・ イオンビーム照射による高分子材料表面の高機能化	鷹野 一朗	214
・ モータのトルクリップル除去技術の開発	森下 明平	215
・ 光ファイバアクセスによる機能分散型次世代移動通信方式の研究	大塚 裕幸	216
・ 出力バッファ型ネットワークインターフェースの研究	高瀬 柔郎	217
・ モバイル環境を考慮した I/O 性能の高いクラウド基盤	山口 実靖	218
・ ピクトグラム走査型ブレインマシンインターフェースの研究	田中 久弥	219
・ クリフォード代数を用いるパターン認識	橋 完太	220
・ 教育施設における廃棄物資源回収と環境性能評価に関する調査研究	西川 豊宏	221
・ 家具（プロダクト）、インテリア、建築を横断する領域を対象とする新しい教科書のあり方に関する基礎的研究	鈴木 敏彦	222
・ 格子耐震壁の耐震性能に関する研究	山下 哲郎	223
・ 中世・近世ヨーロッパにおける都市防禦施設の更新とそれがもたらした建築・都市の変容	中島 智章	224
・ 科学言説と探偵小説のトランスナショナルな移動と交差をめぐる文化研究	吉田 司雄	225
・ MPGD を用いたガス検出器における電子増幅機構に関する研究	渡部 隆史	226

- ・ 擬微分作用素による経路積分の研究  
熊ノ郷直人…………… 227
- ・ 近世関東の村における剣術流派の普及に関する基礎的研究  
数馬 広二…………… 228
- ・ 素粒子標準模型を超える TeV スケールの物理  
進藤 哲央…………… 229
- ・ 有機分子を用いた分子型量子ドットセル中の電子移動シミュレーション  
徳永 健…………… 230

## 2012年度総合研究所運営委員

総合研究所所長 小野 幸子（応用化学科教授）

所長代理 浅谷 耕一（情報通信工学科教授）

大学院運営委員会委員長 馬場 則男（コンピュータ科学科教授）

機械系学科互選 鈴木 健司（機械システム工学科教授）

化学系学科互選 山田 昌治（応用化学科教授）

電気系学科互選 浅谷 耕一（情報通信工学科教授）

建築学部互選 吉田 哲郎（建築学科教授）

情報学部互選 椎塚 久雄（情報デザイン学科教授）

グローバル  
エンジニアリング学部互選 斉田 光孝（機械創造工学科教授）

基礎・教養教育部門 藏原 清人（基礎・教養教育部門教授）

B E R C センター長 大竹 浩靖（機械工学科教授）

U D M センター長 久田 嘉章（まちづくり学科教授）

E C E C センター長 鷹野 一朗（電気システム工学科教授）

**2011 年度総合研究所研究一覧（学内研究費）**  
**(プロジェクト研究)**

研究課題	研究責任者	所属学科・職名は 2012 年度
<b>・ 2011 年度研究終了</b>		
高圧プラント設備におけるねじ構造の設計指針の拡大	小林 光男	機械システム工学科教授
原子間力顕微鏡による上皮成長因子受容体の 1 分子計測技術の開発及び数理モデルベース解析への応用に関する研究	中茎 隆	機械システム工学科准教授
湿式プロセスを用いた半導体ナノ・マイクロ規則構造の創製と高効率デバイスへの応用	小野 幸子	応用化学科教授
集積化近紫外発光素子のための透明導電膜の検討	本田 徹	情報通信工学科教授
高密度情報ストレージシステムにおける多端子情報理論に基づく多次元信号処理方式の研究	斎藤 秀俊	情報通信工学科教授
ストリートファッショング画像データベースの構築とトレンド検知手法の研究	小西 克巳	コンピュータ科学科准教授
人口過疎地域における人口、生活圏域、域内生活基盤施設の相互関係	山下てつろう	建築学科教授
Innovative Identity Matrixing Model in the Trans-Cultural Era	カーニー マイケル	建築学科准教授
政党政治再編成期ドイツにおける 3 政党間関係の変容に関する理論的・実証的分析	小野 一	基礎・教養教育部門准教授
憲法と制度改革:国際化と地域化の市民生活への影響に関する研究 (2006 年度研究終了・追加報告)	長谷川 憲	基礎・教養教育部門教授
<b>・ 2012 年度継続研究</b>		
氷海船舶の船体氷荷重分布推定手法の高度化	金野 祥久	機械工学科准教授
シンセティックジェットの流動特性に関する研究	佐藤光太郎	機械創造工学科教授
キチンの潜在能力を化学とバイオテクノロジーで拓く	小山 文隆	応用化学科教授
複雑な多環性構造を有する新規抗腫瘍天然物の全合成研究	南雲 紳史	応用化学科教授
血液環境で使用される医療機器の生体適合性の改善	木村 雄二	環境エネルギー化学科教授
解体を迎える半世紀供用した鉄筋コンクリート造建築物の後期健全度評価と解体排出物のゼロエミッション型再資源化モデルの構築	田村 雅紀	建築学科准教授
古代東アジアにおける学術と支配制度に関する研究	榎本 淳一	基礎・教養教育部門教授

・2012年度継続研究

科学衛星搭載用放射線検出器の開発	幸村 孝由	基礎・教養教育部門准教授
廃棄物系バイオマス由来燃料を用いたデュアルフューエルディーゼル発電	小林 潤	機械工学科准教授
新規ナノ構造高熱伝導高分子の創生と熱伝導メカニズムの解析	伊藤 雄三	応用化学科教授
細胞の増殖、分化、機能維持を制御する蛇毒因子の単離とその機能に関する研究	辛 英哲	応用化学科准教授
オーバーレイネットワークによるアプリケーションレイヤリンクアグリゲーションの研究	淺谷 耕一	情報通信工学科教授
生体機能分子の固定化制御による軟組織適合性に優れた金属材料表面の創製	大家 渓	総合研究所助教

(一般研究)

研究課題		研究者	所属学科・職名は2012年度
個 人 研 究	超臨界ジメチルエーテル噴霧の活用によるディーゼルエンジンの高性能化研究	是松 孝治	機械工学科教授
	マイクロ部品の転造による増径加工技術の開発	久保木 功	機械工学科准教授
	原子炉心流力振動に関する研究	菱田 博俊	機械工学科准教授
	マイクロ・ナノ構造による表面機能の制御	鈴木 健司	機械システム工学科教授
	小型レスキューロボットをもちいたセンサネット構築のための基礎実験	見崎 大悟	機械システム工学科准教授
	水素生成のための尿素エネルギー・システムに関する研究	雑賀 高	機械創造工学科教授
	高エネルギー・ビームを用いた磁性体の形状および機能制御に関する研究	武沢 英樹	機械創造工学科教授
	コロイド結晶テンプレート法を応用したアルミニウム表面の構造制御	阿相 英孝	応用化学科准教授
	チエタノシン誘導体の合成とその血管新生作用の検討	安井 英子	応用化学科准教授
	植物性油脂の水素添加におけるトランス脂肪酸生成量の低減のための担持白金系触媒の高機能化	飯田 肇	応用化学科講師
	細菌由来糖質分解酵素の取得と産物解析	坂口 政吉	応用化学科講師
	リン酸塩ガラス異常現象を利用した高レベル放射性廃棄物固化ガラスの開発	大倉 利典	環境エネルギー工学科教授
	二塔式木質バイオマスガス化装置の高度低タール化	長本 英俊	環境エネルギー工学科教授
	超音波霧化微細ミストを用いた環境中超微粒子の捕集技術の確立	並木 則和	環境エネルギー工学科准教授
	ガラス被覆溶融紡糸法による熱電材料のナノワイヤ化	桑折 仁	環境エネルギー工学科准教授
	イオンビーム照射による高分子材料表面の高機能化	鷹野 一朗	電気システム工学科教授
	モータのトルクリップル除去技術の開発	森下 明平	電気システム工学科教授
	光ファイバアクセスによる機能分散型次世代移動通信方式の研究	大塙 裕幸	情報通信工学科教授
	出力バッファ型ネットワークインターフェースの研究	高瀬 柔郎	情報通信工学科准教授

研究課題		研究者	所属学科・職名は 2012 年度
個人研究	モバイル環境を考慮した I/O 性能の高いクラウド基盤	山口 実靖	情報通信工学科准教授
	ピクトグラム走査型ブレインマシンインターフェースの研究	田中 久弥	情報デザイン学科准教授
	クリフォード代数を用いるパターン認識	橘 完太	情報デザイン学科准教授
	教育施設における廃棄物資源回収と環境性能評価に関する調査研究	西川 豊宏	まちづくり学科准教授
	家具(プロダクト)、インテリア、建築を横断する領域を対象とする新しい教科書のあり方に関する基礎的研究	鈴木 敏彦	建築学科教授
	格子耐震壁の耐震性能に関する研究	山下 哲郎	建築学科准教授
	中世・近世ヨーロッパにおける都市防禦施設の更新とそれがもたらした建築・都市の変容	中島 智章	建築デザイン学科准教授
	科学言説と探偵小説のトランスナショナルな移動と交差をめぐる文化研究	吉田 司雄	基礎・教養教育部門教授
	MPGD を用いたガス検出器における電子増幅機構に関する研究	渡部 隆史	基礎・教養教育部門教授
	擬微分作用素による経路積分の研究	熊ノ郷直人	基礎・教養教育部門教授
	近世関東の村における剣術流派の普及に関する基礎的研究	数馬 広二	基礎・教養教育部門教授
	素粒子標準模型を超える TeV スケールの物理	進藤 哲央	基礎・教養教育部門准教授
	有機分子を用いた分子型量子ドットセル中の電子移動シミュレーション	徳永 健	基礎・教養教育部門助教



# 1. 総合研究所プロジェクト研究報告 (2011年度研究終了)



## 高圧プラント設備におけるねじ構造の設計指針の拡大

工学院大学 工学部 機械システム工学科 小林光男

信州大学 工学部 機械システム工学科 田中道彦

岩手大学 教育学部 技術科 田中 稔

### Expansion of The Design Guidance of Screw Structure in High-Pressure Plant Facilities

Mitsuo Kobayashi,  
Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University  
Michihiko Tanaka,  
Department of Mechanical Systems Engineering, Shinsyu University  
Minoru Tanaka,  
Department of Technical Education, Iwate University

**ABSTRACT:** One of the design methods for closing the end of a pressure cylinder is to screw down a screw plug on the threaded end of the cylinder. In this case, there is the problem of stress concentration in the threaded end of the pressure cylinder. To solve the problem, it is necessary to know accurately the load distribution on the threaded end of the cylinder. To find the load distribution on the threaded end of the pressure cylinder engaged with the screw plug, the following experiments are carried out. Applying the tensile load between the plug and the pressure cylinder and regarding the situation above as equivalent to the situation in which the internal pressure is applied, the load distribution is measured with the strain gauge. The influence of material of engaged thread on the load distribution on the threaded end of pressure cylinder is presented and an expansion of design manual is discussed.

**Key words:** High-pressure Equipment, Screw Structure, Pressure Cylinder, Threaded End, Load Distribution, Materials of Screw Part

### 1 緒 言

圧力円筒の端部を閉じる設計方法の一つに、円筒形の胴や管の端部に直接ねじを切り、これで蓋やフランジを結合したりねじ栓をねじ込んだりする設計事例がある。この事例では、圧力円筒ねじ部のかみ合いにおいて不均等な荷重分布による応力集中の問題があり、疲労などの強度設計上この荷重分布を正確に知る必要がある<sup>1)</sup>。

一方、ねじの強度設計に関して、全荷重が全かみ合いねじ部に均等に分布するのではなく、何れかのねじ山に最大荷重が生じるという不均等分布を示す理論的研究<sup>2), 3)</sup>があるが、圧力容器用の大径ねじを設計する場合にもこれらの点を考慮した設計指針が必要であり高压ガス保安協会により示されている<sup>1)</sup>。同協会の圧力円筒ねじ端の強度設計指針は、修正 Sopwith の式を採用しているが、圧力円筒ねじ端の荷重分布に関する実験は少なく、この設計指針の評価に関する必要性から著者により実験的に検証が行われ<sup>4)</sup>、更なる設計指針の拡大が望まれている。

本報告は、圧力円筒ねじ端の設計指針に関して、更に適用範囲の拡大と補強する観点から、鋼製円筒ねじ部に対してねじ栓部が異種材料(黄銅)の場合について、圧力円筒ねじ端の荷重分布へ与える影響を調べ検討したものである。

### 2. 圧力容器ねじ端の荷重分布

図 1(a)は、実際の円筒形圧力容器のねじ端とねじ栓の例で、ねじ込み式と呼ばれる構造である。ここで内圧が負荷されると、ねじ栓は押し上げられ圧縮を受け、円筒部には引張りが作用することになる。この圧力容器ねじ端の荷重分布を実験的に求める。この実験で図 1(b)に示すように、ねじ栓を内圧で押し上げる代わりにねじ栓のロッドに引張荷重を作用させる。この場合ねじ栓は圧縮、円筒部は引張りとなり、断面積 A<sub>1</sub>が A<sub>2</sub>に比べて大きいので、図 1(a)の円筒ねじ部の応力状態は、図 1(b)の場合とほとんど等値となる<sup>5)</sup>。

## 2.1 円筒ねじ部の設計指針

円筒ねじ部の荷重分布の設計指針は、修正 Sopwith の理論が基礎としている。図 1(b)に示すように、円筒形圧力容器ねじ端とねじ栓を結合し、ねじ栓に軸引張荷重  $P$  が作用した場合、弾性域での各ねじ山の分担する荷重は互いにかみ合うねじ山の相対変位によって荷重分担の伝達が行われると考える事が出来る。そこで、ねじ端からねじのつるまき線に沿った距離  $s$  で、単位長さあたりのねじ山にかかる荷重を  $w$  とすると、軸直角断面に作用しているボルトの引張荷重とナットの圧縮荷重による、位置  $s$  におけるボルトの伸びひずみ及びナットの圧縮ひずみは次式で与えられる。

$$\text{ボルトの伸びひずみ} = \frac{P - \int_0^s wds}{EA_1} \quad (1)$$

$$\text{ナットの圧縮ひずみ} = \frac{P - \int_0^s wds}{EA_2} \quad (2)$$

ここで、 $A_1$  及び  $A_2$  は、それぞれボルト・ナット軸直角断面積であり、次式より求められる。

$$A_1 = \pi(D^2 - D_0^2)/4 \quad (3)$$

$$A_2 = \pi(D_3^2 - D^2)/4 \quad (4)$$

ただし、 $D$  はねじの有効径、 $D_0$  はボルトの穴径、 $D_3$  はナットの等価外径、 $E$  は綫弾性係数である。

軸方向単位長さ当たりの  $s$  点での  $ds$  間のボルト・ナットの変位差は、式(2)より、

$$\frac{P - \int_0^s wds}{E} \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \quad (5)$$

で表され、これをねじ単位長さ当たりの軸方向変位差に換算すると、

$$\frac{\alpha \cdot ds}{\pi D} \cdot \frac{P - \int_0^s wds}{E} \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \quad (6)$$

ただし、 $\alpha$  はねじのピッチである。

一方、ねじ単位長さ当たりの  $s$  点から  $(s+ds)$  点間でのねじ山弾性変位差(相対変位量)の総和は次式より与えられる。

$$-\frac{dw}{E} (h_1 + h_2 + f_1 + f_2 + k_1 + k_2) \quad (7)$$

$h_1$  はおねじ山基底を固定した場合のねじ山のたわみによる相対変位係数、 $h_2$  はめねじ山基底を固定した場合のねじ山のたわみによる相対変位係数、 $f_1$  はおねじ山基底の弾性的傾きの影響による相対変位係数、 $f_2$  おめねじ山基底の弾性的傾きの影響による相対変位係数、 $k_1$  はおねじの中心部円筒の半径方向圧縮によるねじ山の相対変位係数、 $k_2$  はめねじの外周部円筒の半径方向拡張によるね

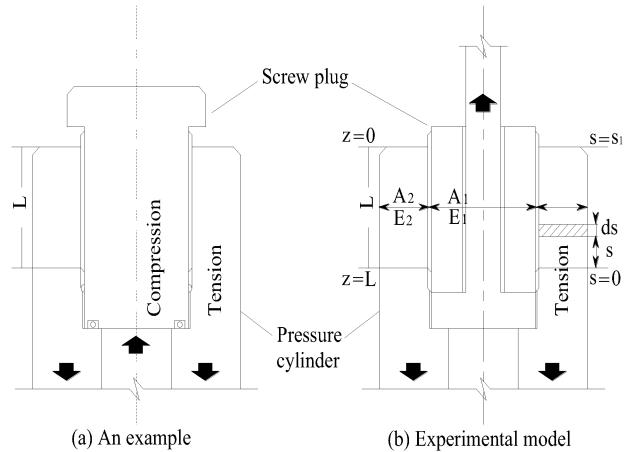


Fig. 1 An example and experimental model

じ山の相対変位係数である。ここで、 $h_1, h_2, f_1, f_2, k_1, k_2$  は次の通りである。

$$h = (1 - \nu^2) \left\{ B_1 \log_e C - \frac{C-1}{C} \left( B_2 + B_3 \frac{C-1}{C} \right) \right\} \quad (8)$$

ただし、

$$B_1 = \frac{2 \left( \frac{2 \sin 2\beta}{2\beta - \sin 2\beta} + T \right)}{2\beta + \sin 2\beta} \quad (9)$$

$$B_2 = \frac{2}{2\beta - \sin 2\beta} + \frac{1 - 2\nu}{(1 - \nu) \sin 2\beta} - 2T \frac{1 - \cos 2\nu}{\sin 2\beta - 2\beta \cos 2\beta} \quad (10)$$

$$B_3 = \frac{2T}{\sin 2\beta - 2\beta \cos 2\beta} \quad (11)$$

$$T = 1 + \tan \beta \cdot \tan(\beta - \phi) \quad (12)$$

$$= \frac{2}{1 + \cos 2\beta + \mu \sin 2\beta}$$

$$C = \frac{b}{b+d} = \frac{2(b-e)}{b} \quad (13)$$

ここで、 $d$  はねじ山高さ、 $e$  はねじ山の切取高さ、 $\beta$  はねじ山の半角、 $\nu$  はねじ山材料のポアソン比、摩擦角と摩擦係数の関係は  $\phi = \tan^{-1} \mu$  として摩擦角を算出する。

$$f = \frac{(1 - \nu^2) \cdot 6(C-1)(C-T)}{\pi C^2 \tan^2 \beta} \cdot m \quad (14)$$

ここで、 $m$  は設計指針から標準値の 0.3 としている。

$$k_1 = \tan \beta \left\{ \frac{D}{a} \left( \frac{A}{A_1} - \frac{1+\nu}{2} \right) \tan(\beta - \phi) - 2\nu \frac{A}{A_1} \right\} \quad (15)$$

$$k_2 = \tan \beta \left\{ \frac{D}{a} \left( \frac{A}{A_2} + \frac{1+\nu}{2} \right) \tan(\beta - \phi) - 2\nu \frac{A}{A_2} \right\} \quad (16)$$

ただし、A は有効系 D を直径とする円の面積

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (17)$$

ボルトとナットのねじ山は接触しているので、式(7)の変位は、ボルト・ナットの軸方向変位差、つまり式(6)に等しくなければならない。したがって、

$$\begin{aligned} & \frac{a}{\pi D} \left( P - \int_0^s w ds \right) \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \\ &= - \frac{dw}{ds} (h_1 + h_2 + f_1 + f_2 + k_1 + k_2) \end{aligned} \quad (18)$$

この式(18)を s について微分すれば、

$$\frac{d^2 w}{ds^2} = \alpha^2 w \quad (19)$$

となる。ただし、

$$\alpha = \sqrt{\frac{a/\pi D}{h_1 + h_2 + f_1 + f_2 + k_1 + k_2}} \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \quad (20)$$

である。式(19)の一般解は、

$$w = C_1 \cosh \alpha s + C_2 \sinh \alpha s \quad (21)$$

で与えられる。境界条件は、 $s = S_1 = n \pi D$ において

$$\begin{aligned} \int_0^s w ds &= P \quad s = s_1 \text{ において} \\ dw / ds &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、n は有効ねじ山かみ合い山数である。この境界条件より、 $C_1$  および  $C_2$  を決定すれば式(21)は、

$$w = \alpha P (\cosh \alpha s_1 \bullet \cosh \alpha s - \sinh \alpha s) \quad (23)$$

となる。

今、 $\theta = \alpha s$ 、 $\theta_1 = \alpha s_1$ 、ねじのつるまき線に沿った軸方向の平均荷重  $w_m = P/n\pi D = P\alpha/\theta_1$  とすれば、

$$H = \frac{w}{w_m} = \frac{\theta_1}{\sinh \theta_1} \bullet \cosh(\theta_1 - \theta) \quad (24)$$

となる。この H はねじ山荷重分布と平均荷重との比で与えられ、この荷重の最大値を  $H_{max}$  とすれば、 $H_{max}$  は  $\theta = 0$  (ナット座面) で生じ、ねじ山荷重分布率の最大値  $H_{max}$  は、

$$H_{max} = \frac{W_{max}}{W_m} = \theta \bullet \coth \theta_1 \quad (25)$$

で与えられる。

今、任意の点 Z について、ねじのかみ合い長さ L に対する

るねじ自由端から点 Z 間の距離  $\bar{Z}$  の割合を x とすると、

$w_x/w_m$  は次式により求められる。

$$x = \bar{Z}/L \quad (26)$$

$$\frac{w_m}{w_x} = \frac{\theta_1 \cdot \cosh x \theta_1}{\sinh \theta_1} \quad (27)$$

また、ねじ自由端から距離 x にある断面積に作用する荷重  $P_x$  は、次式より求められる。

$$P_x = \frac{P \sinh x \bullet \theta_1}{\sinh \theta_1} \quad (28)$$

ここで、 $\theta_1$  は部材及びねじ山の剛性と噛み合い長さに関する定数で、ねじ山の形状及び材料により求式(28)の理論値から、める事が出来る。本報告のようにねじ栓の材料が変わった場合、ポアソン比などの弾性係数が変化するが、理論値を構成する  $\theta_1$  には影響がほとんど無く、 $\theta_1$  値ねじ山形状及び寸法に依存する傾向があり、鋼の場合 2.440、黄銅の場合 2.664、銅の場合 2.665 となる。また、荷重分布状態は、圧力円筒ねじ端の  $x = Z/L = 1$  の点で、最大値となり、最大分担荷重を生じる事を示し、 $x = Z/L = 0$  の点に向かって分担荷重が減少していく事が分かり、圧力円筒ねじ端の荷重分布が相当に不等分布となる事を表している。

### 3. 実験

圧力容器のエンドプレートに相当する部分をねじ込み式により閉じる場合のねじ部の応力及びひずみを求める実験として図 2 に示す試験体を製作した。試験体は、円筒部、ねじ栓、座金、及びロッドからなり、材質は、各々円筒部及び座金は S15C、ねじ栓は黄銅、ロッドは SCM 鋼である。図 2(b)は、円筒部形状・寸法で、ねじ部は M90 に相当する三角ねじ山とし、その主要寸法は表 1 に示すとおりである。

#### 3.1 実験方法

図 3 は、図 2 の一端の圧力円筒ねじ端部を示し、円筒部に貼付したひずみゲージの位置を示している。但し、図の右側は軸方向ひずみゲージで、左側は円周方向ひずみゲージである。本実験では、前述の円筒表面に対して、円筒内側に 7 mm の幅の溝をねじ底まで軸方向に機械加工し、軸方向ひずみゲージを貼付している。

実験は、負荷荷重を 50kN 毎に 150kN まで負荷し、各荷重に対する表面及び内面の軸方向ひずみと表面の円周方向ひずみを測定する。負荷速度は 15mm/min(引張試験機の無負荷クロスヘッド速度)である。使用した試験機は、アムスラー型万能試験機(FSA-50、最大容量 500kN)、ひずみ

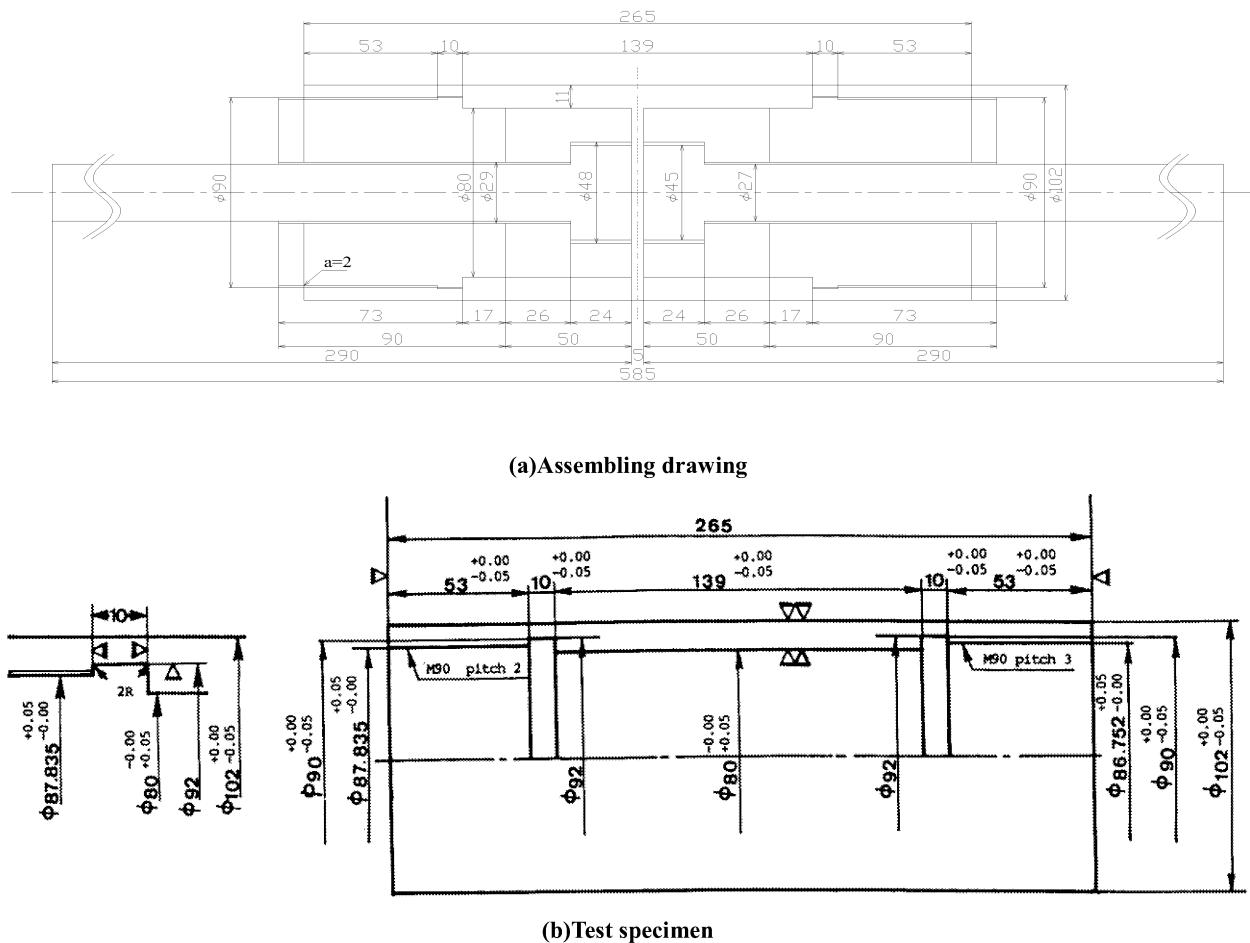


Fig.2 Structural model for threaded end of cylinder

Table 1. Measured dimensions of the screw thread

Measured dimensions	Experimental Value		
	Int. thread(steel)	Ext. thread(brass)	
Depth of thread	D(mm)	0.21	1.38
Depth of fundamental triangle of thread	B(mm)	1.83	1.73
Semi-angle of thread	B(deg)	0.524	0.524
Mean diameter of thread	D(mm)	89.08	88.15
Diameter of hole in external thread	D <sub>0</sub> (mm)		27.0
Equivalent outside diameter of internal thread	D <sub>3</sub> (mm)	102.0	
Mean cross-sectional area of thread	A(mm <sup>2</sup> )	6232.33	6102.18
Cross-sectional area of external thread respectively	A <sub>1</sub> (mm <sup>2</sup> )		5529.63
Cross-sectional area of internal thread respectively	A <sub>2</sub> (mm <sup>2</sup> )	1938.95	
Length of thread in engagement	L(mm)	53.0	53.0
Number of thread in engagement	N	26.0	26.0
Distance along thread helix	S <sub>1</sub> (mm)	7276.37	7200.0
Coefficient of friction	M	0.2	0.2
Friction angle	Φ(deg)	0.197	0.197
Young's modulus	E(GPa)	206.4	206.4
Poisson's ratio	N	0.28	0.33
Pitch	A(mm)	2	2

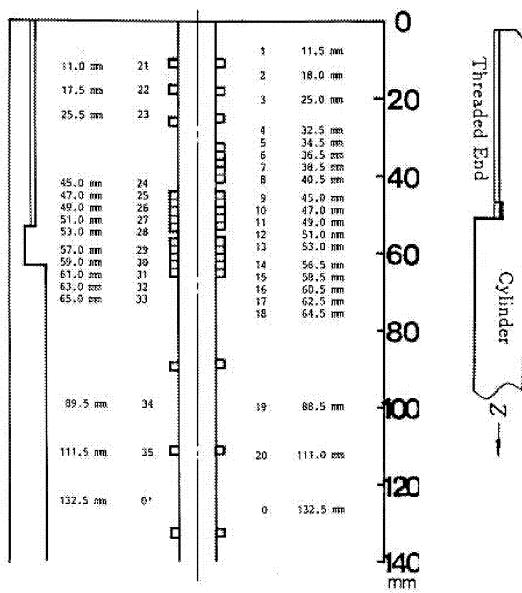


Fig.3 Strain gauge and its position in threaded end of pressure cylinder

測定器は、PORTABLE DATA LOGGER であり、各3回の実験により実験値としている。

### 3.2 実験の信頼性

円筒中央部の応力を求め、実験の精度及び両端のかみ合いねじ部への影響を検討する。円筒中央部の軸直角方向の断面積が  $A_4$ 、外形  $D_3=102\text{mm}$ 、内径  $D_4=80\text{mm}$  であるので、荷重  $P=150\text{kN}$  のときの応力は、 $\sigma_{th}=P/A_4 \times 4/\pi(D_3^2-D_4^2)=47.7\text{MPa}$  となる。一方、中央部のひずみゲージ(ひずみゲージ No.22；軸方向ひずみ  $\epsilon_1$ )の実験値から引張荷重  $P=150\text{kN}$  におけるひずみについて応力を求めると、 $\sigma_1=\epsilon_1 E=44.3\text{MPa}$  となる。従って、応力の理論値  $\sigma_{th}$  に対して実験値  $\sigma_1$  は 7.1% の差が生じ、本実験の実験精度は 10% 以内である。表1のねじ諸元数値表より算出した理論値を求めるための係数を計算した結果を表2に示す。

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 圧力円筒噛み合いねじ部のひずみ分布

図4は、円筒先端を原点に座標を取り円筒各部の軸方向における外側表面にひずみを 50kN, 100kN, 150kN の各荷重ごとに等高線分布として示した呼び径 M90 の場合の実験例である。図5, 図6は、同様に円筒内側表面の軸方向と円筒外側円周方向のひずみ分布を示す。

図4より、荷重が低い 50kN の場合は等分布状態に近く、荷重が高くなると最大値を持ついわゆる一山分布を呈する。その場合の最大値の位置は、アンダーカット部より 1~2 ピッチ先端側に生じている。図5より、円筒内側部のひずみ分布は、円筒先端から  $z=20\text{mm}$  くらいまでひずみは荷重の大きさに影響せずほとんど一定でしかも小さく、その後は、荷重の大きさに従い、 $z=53\text{mm}$  に向かい急激に増加している。また図6より、円周方向ひずみは

Table 2. Calculated value of various factors on load distribution

Measured dimensions	Experimental Value	
	Int. thread(steel)	Int. thread(steel)
h1		0.63
h2	0.04	
B1	11.24	11.24
B2	10.68	10.16
B3	6.98	6.98
T	1.20	1.20
C	1.11	1.80
f1		0.23
f2	-0.01	
m	0.3	0.3
k1		3.36
k2	32.51	
$h1+h2+f1+f2+k1+k2$		36.76
$a$		$3.70 \times 10^{-4}$

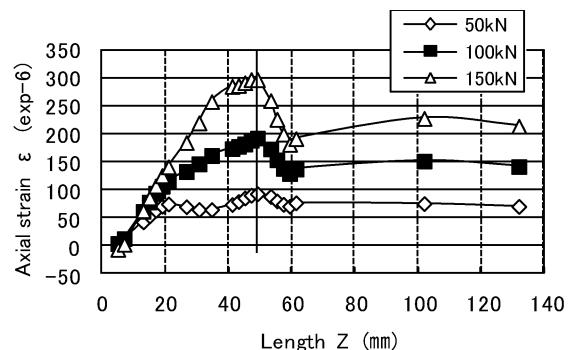


Fig.4 Distribution of axial strain along the length of a threaded end of pressure cylinder

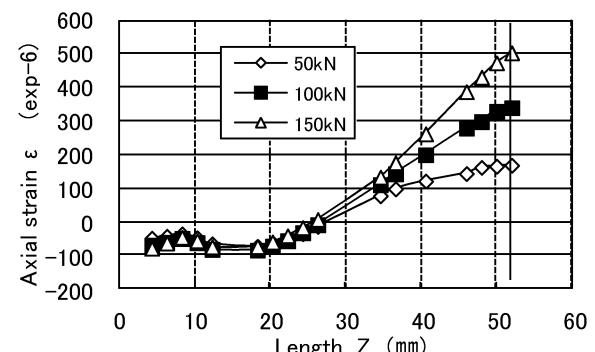
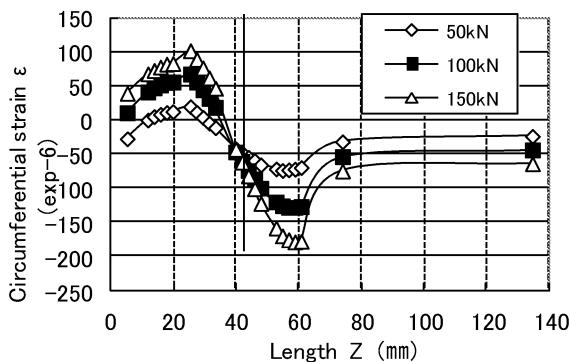
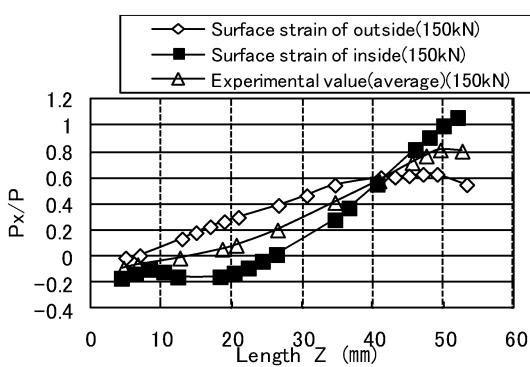


Fig.5 Distribution of axial strain along the length of a threaded end of pressure cylinder

軸方向ひずみが最大値近傍で急激に減少しアンダーカット部付近で負の最大値をとっている。このことから軸方向ひずみと円周方向ひずみの挙動から自由端付近の径に対して、アンダーカット部付近の径が縮むラッパ状の変形形態をしていることがわかる。ここで軸方向及び円周



**Fig.6 Distribution of circumferential strain along the length of a threaded end of pressure cylinder**



**Fig.7 Distribution of axial load ratio along the length of a threaded end of pressure cylinder**

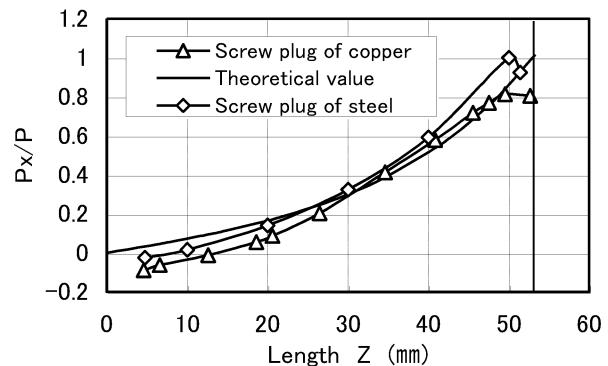
方向ひずみとともに円筒中央部のひずみは各負荷荷重に対してひずみが等間隔に増加し、ねじ部以外の場所では荷重が等間隔に分布していることがわかる。

#### 4.2 圧力円筒ねじ端の荷重分布の実験値

図7は円筒ねじ部において、図4の表面軸方向ひずみと図5の内側軸方向ひずみを荷重分布にして、更に全荷重の比で分担荷重として示したものである。実験値は、これらの平均値すなわち表面の軸方向ひずみと内側の軸方向ひずみの平均値として示している。図7より、かみ合いねじ部の荷重分布における実験値は、 $z = 50\text{mm}$ 付近に最大値を持つ一山分布となり、その大きさは理論値よりも20%低下し設計上の問題である荷重集中を低減させている。また、円筒ねじ部先端から $z = 15\text{mm}$ 程度まで荷重を分担せず、かみ合い長さ $L$ を約25%程度短くできることを示し、設計上の有効長さを規定できることをされている。

#### 4.3 鋼製ねじ栓と黄銅製ねじ栓の荷重分布の比較

図8は、図7の理論値に対して圧力円筒ねじ端のねじ栓が黄銅の場合の荷重分布を示し、理論値とともにねじ栓が鋼製である場合と比較した。ねじ栓が黄銅の場合も鋼製の場合の実験値とも荷重分布の分布傾向がほとんど同様な分布形態を示す。また、黄銅のねじ栓場合は鋼製のねじ栓の場合と同様に最大分担荷重は円筒形圧力容器ね



**Fig.8 Distribution of axial load ratio along the length of a threaded end of pressure cylinder**

じ端のアンダーカット部から自由端側に一ピッチほど変化した位置で生じ、最大分担荷重は理論値より約18%低下し、鋼製の場合と比較すると最大分担荷重は約18%低くその位置はほぼ一致している。

#### 5. 結 言

圧力円筒用機のねじ構造として使用されているねじ栓方式の噛み合いねじ部の荷重分布について、鋼製円筒部と黄銅製ねじ栓の組み合わせによる異種材料の場合の実験を行い、主な結論を以下に示す。

- 1) 黄銅製ねじ栓の場合も鋼製のねじ栓と同様にかみ合いねじ部の荷重分布が修正 Sopwith の計算式による理論値と分布傾向がほぼ一致する。
- 2) 最大分担荷重の位置はアンダーカット部から自由端側に1ピッチ程度変化し、その大きさは理論値及び鋼製ねじ栓の場合よりも約20%低下する。
- 3) 異種材料の噛み合いに於いて、黄銅製ねじ栓の場合は設計上安全側にあり、設計指針により適用可能である。

#### 参考文献

- 1) 鵜戸口英善：高圧設備におけるねじ構造の強度設計指針、高圧設備担当者会議講演要旨(1985)高圧ガス保安協会編、1。
- 2) D. G. Sopwith: The distribution of load in screw threads, Pro. of Inst. of Mech. Eng., No. , No. 159, 1948) 373.
- 3) 山本晃：ねじ締結の理論と計算、養賢堂(1970)49。
- 4) 小林光男、田中道彦、丹羽直毅、北郷薰：高圧設備における圧力円筒ねじ端の荷重分布,JCOSSAR 論文集 Vol.4,86-A(2000)519。
- 5) 小林光男、高畠優、赤井英夫、田中道彦、丹羽直毅、北郷薰：軸荷重と内圧を受ける圧力円筒ねじ端の荷重分布の比較、設計工学, Vol.36, No.4(2001)176。

#### 研究成果

- ① 研究論文：J C O S S A R 2011(A論文) 1件
- ② 学会発表：日本機械学会 M&M2011 他5件
- ③ 特許出願：なし

# 原子間力顕微鏡による上皮成長因子受容体の1分子計測技術の開発 及び数理モデルベース解析への応用に関する研究 —原子間力顕微鏡のステージ位置制御系の性能改善—

工学院大学 機械システム工学科 中茎隆

理化学研究所 免疫・アレルギー科学総合研究センター 佐伯夕子

Development of high-speed AFM for single molecule imaging of EGF Receptors

— Performance enhancement of stage positioning control of AFM —

Takashi Nakakuki, Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University

Yuko Saeki, Research Center for Allergy and Immunology, RIKEN

**ABSTRACT :** This paper propose a robust nonlinear controller for a stage control of a vertical scanner in atomic force microscope to improve a settling time compared to a conventional PI controller, which results in a large increase in speed of scanning on a sample surface. The physical model of the whole measurement system with respect to a vertical stage control is mainly described by two linear subsystems and a nonlinear and nonsmooth subsystem with an unmatched disturbance generated from a change of shape in a sample surface. First, we propose an approximation model in which the nonsmooth one that is generated by repetitive collisions between cantilever and sample surface is virtually converted into an additional nonsmooth disturbance. Then, the control problem is to design a feedback controller to compensate the two unmatched disturbances as fast as possible. With the object of a specification of a general AFM product, we assume that only output signal is available. Then, a controller including both a softened switching action and a PID compensator is introduced. A series of simulation results show our superiority in fast response compared to a PI controller and a sliding mode servo.

## 1. Introduction

Atomic force microscope (AFM) is a scanning probe microscope and visualizes a three dimensional shape of sample by tracing the surface with a tiny tip of probe called cantilever. The remarkable features of measurement by AFM are that the maximum spatial resolution is about one angstrom and it is possible to measure a sample in liquid that enables us to observe a biological sample under near physiological condition. The latter feature is quite unique as a scanning probe microscope that we have no other choices for a

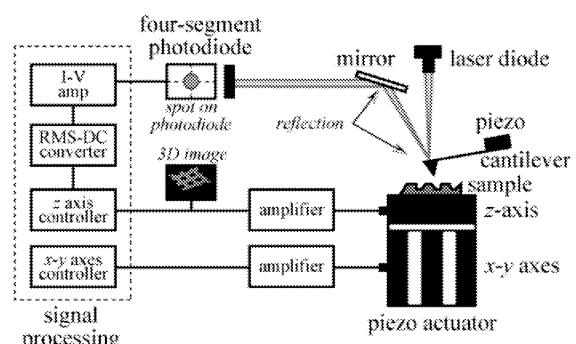


Fig.1 System configuration of tapping mode.

microscope with a nano-order resolution in liquid.

Therefore, AFM is expected as a useful tool to observe detailed structures on a biological sample such as a molecule on cell membrane in the field of life science [1]. In fact, many results with AFM are available in which it plays an important role in their verification experiments [1,2].

However, there is a drawback in AFM measurement that the temporal resolution is as low as minute-order to obtain a scanning image on an area of interest. The drawback inhibits a measurement of living biological sample. For example, a diffusion speed of molecules on cell membrane such as epidermal growth factor (EGF) receptors is about  $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{sec}$ , which is enough large to walk around a scanning area in a measurement [3], as a result, AFM cannot capture the snap shot of a living molecule. The reason for such a slow scanning is originated from the fact that the principle of measurement is based on direct contact between probe and sample surface. AFM has mainly two operating modes for measurement of a surface shape. One is called a contact mode since a cantilever traces a sample surface in maintaining contact, which is applicable for a sample that is harder than cantilever such as metal or a cantilever would seriously hurt the surface shape due to the scabbly scanning, followed by an inaccurate image. Therefore, the mode is not adequate for a soft or fragile sample such as biological one whereas the scan speed can be increased up to an upper limitation established by resonance frequency of cantilever.

On the other hand, the other one, which is our interest in this study and therefore explained in the following section, is called a tapping mode and can be applicable for a biological sample. An upper limitation of the temporal resolution is determined by resonance frequency of cantilever and settling time of stage control. Regarding the former, by developing a cantilever with a higher resonance frequency the temporal resolution can be improved although it is still a challenging work [4]. The latter can be shortened by a better controller design where the stage control system is composed of a horizontal scanner on  $x-y$  plane and a vertical scanner on  $z$ -axis (Fig.1). Since the control of a horizontal scanner is performed in just an open loop system, the main interest of controller design has been devoted to a vertical scanner [5-9]. For example, Shiraishi et al proposed a surface topography observer to obtain a better image of sample surface in a fast scanning in which they approximate the nonsmooth physical

model by a linear model and find the model parameters by frequency analysis [8]. In a famous project by Ando et al for a development of a fast scanning AFM, a PID-based controller has been proposed [4]. Although these studies show a better performance than a conventional PI controller, other approaches including nonlinear controllers should be explored since the control system has not only a nonsmooth property by repetitive collisions between cantilever and sample surface but also an unmatched disturbance generated from a change of surface shape.

In this study, a robust nonlinear controller is designed for a vertical scanner on  $z$ -axis to improve the performance of a conventional PI controller. There are two main results regarding model approximation and smoothed switching controller. First, we propose a method for model approximation in which a highly nonlinear and nonsmooth motion of equation of the measurement system on  $z$ -axis is approximated by linear system with virtually introduced nonsmooth disturbance.

Second, a switching controller is designed to attenuate unmatched and nonsmooth disturbances. Unlike a typical stage control problem, the control input signal is employed to create a three dimensional image of sample surface, which means that even if the controlled performance is satisfactory enough with respect to position error, a hard switching action in a sliding mode controller critically ruins the resulting image. Then, we introduce a continuous approximation of discontinuous control law proposed in [10]. The simulation results show that our modeling and the subsequent robust nonlinear controller design including continuous approximation improve the controlled performance compared with a PI controller.

## 2. Modeling of dynamics of AFM in tapping mode

### 2. 1 Principle of operation of tapping mode

This section outlines the principle of operation of tapping mode (Fig.1) although many references describing it in detail are available [1,7,8,12,13]. As is expected from the terminology of tapping, a cantilever is forcibly excited by piezo oscillator at around the resonance frequency that is determined by specification of cantilever (length, width, thickness, etc) and measurement environment (in liquid or the atmosphere). For example, a resonance frequency of a commonly-used cantilever is about hundreds of kilohertz in the atmosphere or at most about ten kilohertz in liquid. The

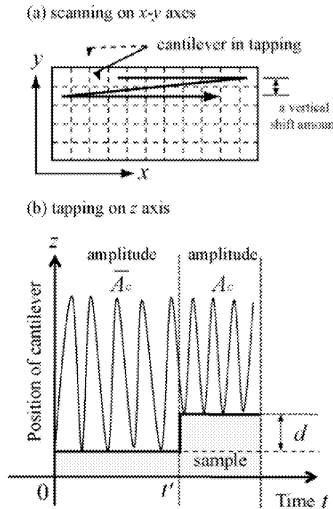


Fig.2 Illustrations of scanning on  $x$ - $y$  plane (upper) and a change of amplitude of oscillating cantilever on  $z$ -axis (lower).

scan of sample surface is accomplished by using this vibrating cantilever. First, the root-mean-square (RMS) value of an amplitude of an oscillating cantilever in the situation of moderately tapping at a starting point of surface is calculated, which is employed as a reference value of stage feedback control. Then, the scan on  $x$ - $y$  plane is performed tapping the surface (Fig.2, upper panel) where a resolution on  $y$ -axis is determined by a presetting shift amount of scanning cantilever between scan lines and a resolution of  $x$ -axis is determined by both a presetting pixel count and a time frequency of a RMS signal that is established by tapping frequency, a performance of a RMS-DC converter and a settling time of stage control. The RMS value changes up and down depending on a surface shape and decreases and increases at a convex and a concave points from the reference value in scanning, respectively (Fig.2, lower panel). Suppose that a RMS value is shifted to a lower value at a convex point. The shift can be compensated by lowering the stage, and therefore the height of convex point,  $d$ , is obtained from the travel distance of stage for the compensation. The three dimensional surface shape can be constructed by collecting such a height information for each of coordinate points. It should be noted that the scan on  $x$ - $y$  plane must be performed as slowly as the speed satisfying a setting time of stage feedback control with respect to  $z$ -axis in order to obtain the accurate surface shape. As a result, the scan speed on  $x$ - $y$  plane, which determines the measurement time of objective, is virtually limited by the performance of a vertical stage control on  $z$ -axis. In what follows, we focus on the equation of motion with respect to only  $z$ -axis since shortening of measurement time for the whole scanning area results in shortening of setting time of stage feedback control for each point, which enables us to exclude motion of equation on  $x$ - $y$  plane.

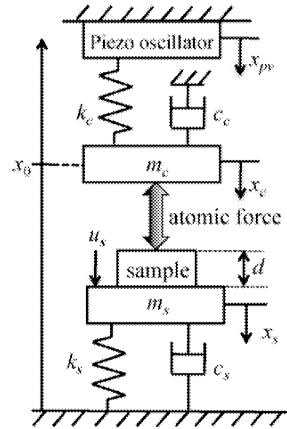


Fig.3 Physical model of tapping mode.

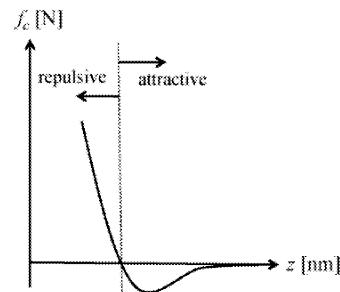


Fig.4 Atomic force between cantilever and sample surface.

## 2. 2 Physical Model

A mechanical model for tapping mode is illustrated in Fig.3 where the dynamics of piezo oscillator and elastic deformation of a sample by tapping on stage are ignored for the sake of simplicity [13]. Since only the motion in  $z$ -axis is considered here and an explicit modeling of scanning on  $x$ - $y$  plane is excluded in this problem setting, we assume that a height of sample changes over time,  $d(t)$ , which is a disturbance to be compensated by feedback control.

An oscillating motion of piezo oscillator,  $x_{pv}(t)$ , excites that of cantilever,  $x_c(t)$ , via second-order mass-spring-damper system ( $m_c$ ,  $k_c$  and  $c_c$ ), which is described by the following motion of equation.

$$m_c \frac{d^2 x_c}{dt^2} + c_c \frac{dx_c}{dt} + k_c(x_c - x_{pv}) = -f_c(z(t)) \quad (1)$$

where  $f_c : R \rightarrow R$  denotes an atomic force between cantilever and sample surface, and is a function of the distance  $z(t)$  between them as follows (Fig.4):

$$f_c(z) = 4\varepsilon \cdot \left( 12 \frac{\sigma^{12}}{z^{13}} - 6 \frac{\sigma^6}{z^7} \right) \quad (2)$$

where  $\varepsilon$  and  $\sigma$  are positive constants [8,12,13]. Setting  $x_0$  as an absolute position of center of oscillation for  $x_c(t)$  and  $x_s(t)$  as a position of piezo actuator (See Fig.3),  $z(t)$  is calculated by

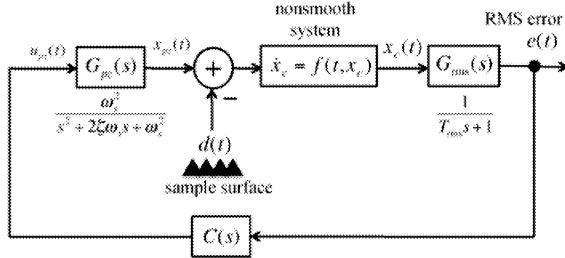


Fig.5 Block diagram of the whole measurement system.

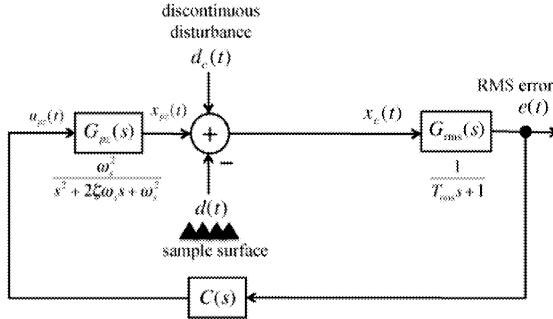


Fig.6 Block diagram of the approximation model (proposed).

$$z(t) = x_0 + x_c(t) - (d(t) + x_s(t)) \quad (3)$$

The piezo actuator is modeled by second-order mass-spring-damper system ( $m_s$ ,  $k_s$  and  $c_s$ ) as follows and the control input  $u_s(t)$  is designed to compensate the effect of disturbance  $d(t)$ .

$$x_s(t) = G_{pz}(s)u_s(s) = \frac{\omega_s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_s s + \omega_s^2} u_s(s) \quad (4)$$

where  $\omega_s$  and  $\zeta$  are a resonance angular frequency and a damping ratio for the piezo actuator, respectively. Since the tapping mode operates under a condition when there exists a time sequence  $\{t_i\}$  ( $i=1,2,\dots$ ) such that

$$z(t_i) \approx 0, \quad \forall i$$

the nonlinear system (1) is discontinuous and the dynamics becomes highly complicated by repetitive collisions of cantilever to sample surface (Fig.2).

Define a RMS error of oscillating motion  $x_c(t)$  at a time  $t$  by  $e(t)$  and consider a mapping from  $x_c(t)$  to  $e(t)$ . Since  $e(t)$  is conventionally calculated with RMS-DC converter of which dynamics is approximated by first-order linear system due to the characteristics of the electric circuit, we have

$$e(s) = G_{rms}(s)x_c(s) = \frac{1}{T_{rms}s + 1} x_c(s) \quad (5)$$

where  $T_{rms}$  is a time constant. For the end of this subsection, the block diagram is depicted in Fig.5.

### 2. 3 Problem Statement

As described in Section 2.1, the stage feedback control is accomplished to compensate an RMS error  $e(t)$  that is a gap between the reference RMS value established before scanning and a present RMS value

in scanning. The system has a discontinuous property due to repetitive collisions of cantilever to sample surface. It is well known that a switching controller including sliding mode control is applicable for some nonsmooth systems. However, it should be noted that since the three dimensional image of sample surface is pictured in terms of control input  $u_s(t)$ , a smooth control input signal is critically required, otherwise a resulting picture becomes useless even if  $u_s(t)$  realizes a very short settling time in stage control. Taken together, the problem statement is summarized as follows.

#### Problem statement:

For the system (1)-(5), design a *continuous* control law  $u_s(t)$  to compensate the effect of disturbance  $d(t)$  on the RMS error  $e(t)$  where only RMS error  $e(t)$  is available because of a hardware specification of a general AFM product.

### 3. Approximation of physical model

Since the systems (4) and (5) are linear, we focus on the discontinuous system (1)-(3). The reference [8] has proposed a linearization of Eq. (2) by introducing "negative" spring constant in which the forces in an attractive and an repulsive areas are approximated by spring forces with a positive and a negative spring constants, respectively. However, this modeling leads to a switched system between attractive and repulsive regions, which induces a new discontinuity and in addition their spring constants should be estimated that is technically difficult. In what follows, we propose a new method for approximation.

Fig.2 illustrates the effect of  $d(t)$  on an amplitude of  $x_c(t)$  where amplitudes during periods of  $t < t'$  and  $t > t'$  are denoted by  $A_c$  and  $A_c'$ , respectively. It is obvious that an amount of change of amplitude is equivalent to that of  $d(t)$  and instantly appears within a cycle of oscillation. Then, the change is measured as a level shift of RMS signal via RMS-DC converter. Although smoothness of RMS signal (or a property of low pass filter) depends on a time constant  $T_{rms}$ , nonsmooth noise by repetitive collisions considerably appears on the RMS signal. Then, the characteristics of system (1) is approximately converted into a unity gain  $G_c(s)=1$  with nonsmooth disturbance  $d_c(t)$ , that is  $G_c(s)+d_c(t)$ . Fig.6 shows the block diagram of proposed model, and the following control design devotes a attenuation of  $d_c(t)$  in addition to  $d(t)$ .

#### Remark:

The nonsmooth noise can be attenuated with a larger

$T_{\text{rms}}$ . However, such a selection limits the readiness of controller due to a larger time delay. In fact, one of the main approaches for fast scanning in AFM is to reduce the time delay caused in the RMS-DC converter, and a research has proposed a breakthrough converter that can detect an amount of change of amplitude within a cycle of oscillation [4]. Then, the nonsmoothness of system (1) critically appears more in a RMS signal.

#### 4. Controller design

First, we construct a LgV structure-based switching controller according to [10,11].

$$u_s = \alpha_0(e) - k \cdot \text{sgn}(y(e, \dot{e})) \quad (6)$$

where  $\alpha_0$  is a stabilizing controller for the nominal system without  $d(t)$  and  $d_c(t)$  and a PID controller is employed.

$$\alpha_0(e) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \dot{e}(t) \quad (7)$$

where  $K_p$ ,  $K_I$  and  $K_D$  are positive PID parameters.  $k$  is a positive constant and  $y$  is defined by

$$y(e, \dot{e}) = \alpha_1 \dot{e} + \alpha_2 e, \quad \alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0 \quad (8)$$

Since the controller (6) has a hard switching action, then we adopt the continuous approximation of (6) according to [10] and obtain the following continuous controller with a softened switching action.

$$\begin{aligned} u_s &= \alpha_0(e) + \theta \\ \dot{\theta} &= -y - \alpha_3 |y| (\theta + k \text{sgn}(y)) \end{aligned} \quad (9)$$

#### 5. Simulation

##### 5. 1 Parameter identification

The approximate model has three model parameters that are  $\omega_s$  and  $\zeta$  in Eq. (4) and  $T_{\text{rms}}$  in Eq. (5). Since it is known that a typical resonance frequency of piezo actuator,  $F_s$ , is about  $1 \times 10^3$  Hz, we estimate  $\omega_s = 2\pi F_s = 6.28 \times 10^3$  rad/s. The remaining unknown parameters are determined by parameter identification with experimental data. A commercially available AFM (Veeco Instruments Inc., Nanoscope IIIa) is employed (Fig.7, left panel) and a time-series control signal  $u_s(t)$  as an input and a RMS error  $e(t)$  as an output in measuring a standard metal sample (pitch: 10  $\mu\text{m}$ , depth: 200 nm, also see Fig.7, right panel) in liquid are collected (Fig.7, lower panel). Since the model describes the dynamics regarding z-axis whereas the experimental data is a surface shape that is a spatial information, a preprocessing that converts pictures into time-series data by considering scan speed on x-y plane is accomplished.

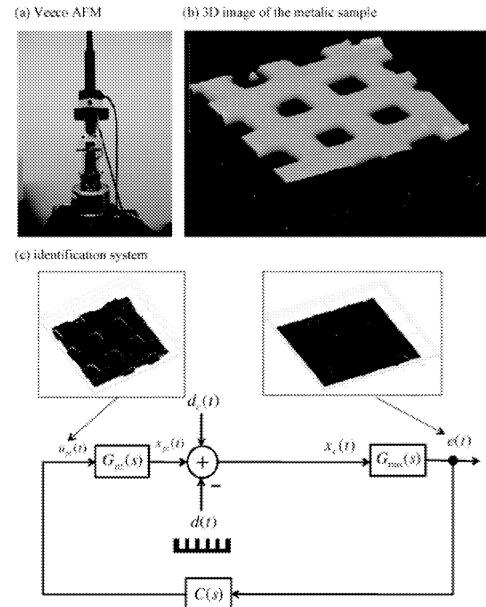


Fig.7 AFM employed in parameter identification (left), metallic sample (right) and input-output signals (lower).

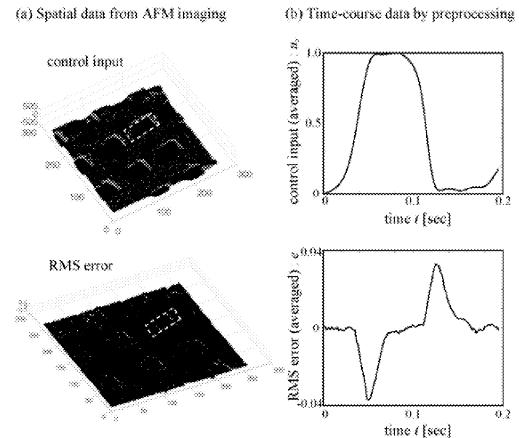


Fig.8 Spatial data obtained from AFM measurement (left) and time-course data generated by preprocessing (right).

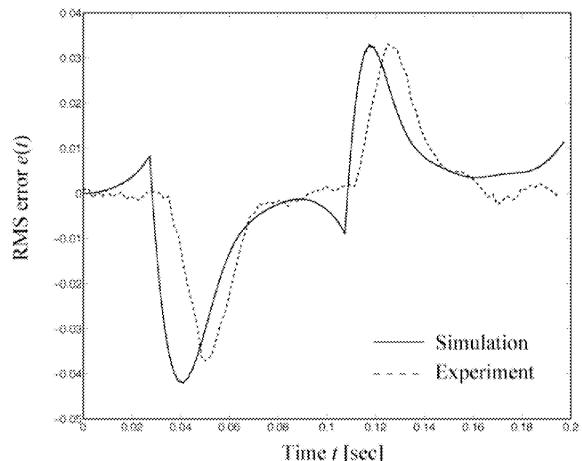


Fig.9 Comparison between simulation with identified parameters and experimental data.

In addition, noise reduction of the data is performed in which 60 lines in the domain bounded by a dashed

line in left panels of Fig.8 are averaged. Right panels of Fig.8 show a pair of the averaged time-series data of  $u_s(t)$  and  $e(t)$ . Time-series data of  $d(t)$  is artificially generated in a similar manner where we assume that the surface shape of the measured metal sample is the same with the data sheet. Since there are only two parameters to be identified, we manually estimate their parameter values through a trial and error process, followed by  $\zeta=0.0637$  and  $T=0.01$  (Fig.9).

## 5. 2 Results

It is often the case that a PI controller is implemented in a commercially available AFM. After some initial settings for measurement, a user manually sets a PI parameter checking the response of stage controller on PC. In a case that a response curve with a PI parameter seems to be unsatisfactory for an accurate imaging, readjustment of PI parameter and/or decrease of scanning speed should be required in addition to readjustment of other parameters such as tapping force. Fig.10a shows a successful result of a PI controller in measuring the metallic sample with a typical scan speed ( $60 \mu\text{m/sec}$ ) where the upper and the lower panels denote the RMS error  $e(t)$  and the control input  $u_s(t)$ , respectively. However, in a case of a ten-fold improvement in scan speed ( $600 \mu\text{m/sec}$ ), unfortunately the best PI parameter cannot track the sample surface, followed by an inaccurate three dimensional image (Fig.10b). Then, we apply a typical sliding mode servo. If a response of actuator is fast enough ( $\alpha_1$  is almost the same with  $u_s$ ), the sliding mode controller successfully compensates the effect of disturbance. However, it is not the case. In fact, the time constant of actuator dynamics is considerably large (about 3 msec) and even worse the actuator dynamics is very oscillatory with the damping ratio  $\zeta = 0.0637$ . As is well known, since a typical sliding mode controller is effective for a matched disturbance, for this case with an unmatched one the performance does not meet the required specification (figure not shown).

Finally, Fig.11 indicates a result of the proposed controller, indicating that (i) a hard switching action in  $u_s$  is greatly reduced and (ii) the accuracy of measurement is reasonably improved with our controller in the fast scan (Also see Fig.12 for the corresponding 3D images). Since it might be difficult to ideally compensate the actuator dynamics, which is an oscillatory response with a large time constant, without state feedback, both a conventional PI and a

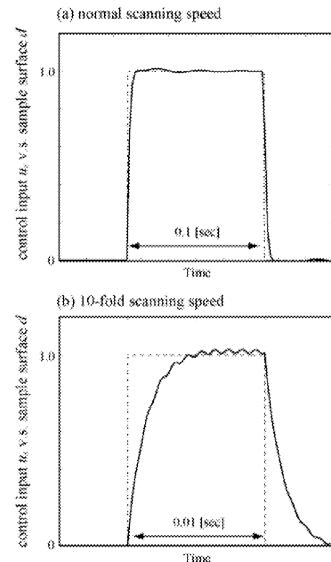


Fig.10 Results of a conventional PI controller, normal speed (upper) and ten-fold speed (lower).

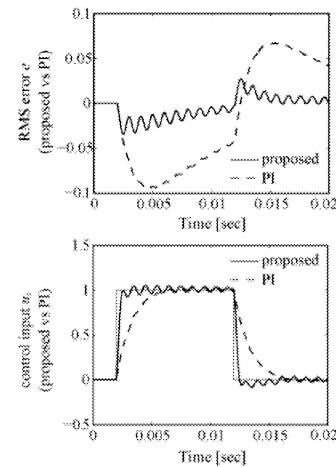


Fig.11 Results of the proposed controller at ten-fold speed.

proposed controllers show an oscillatory response after a transient response. Thus, a further challenge for more improvement should be addressed.

## 6. Conclusions

In this paper, we have proposed a robust nonlinear controller for a vertical stage control system in AFM, aiming to a faster scanning. Since one of the technical issues of inhibiting a realization of a faster scanning is the response speed (more precisely, settling time) of stage control with respect to  $z$ -axis, we focus on modeling and control problem in  $z$ -axis. Regarding modeling, the highly nonlinear and discontinuous motion of equation due to the presence of atomic force and repetitive collisions between cantilever and sample surface in tapping mode is approximated by uncertain nonsmooth disturbance, which results in a disturbance attenuation controller design of a linear

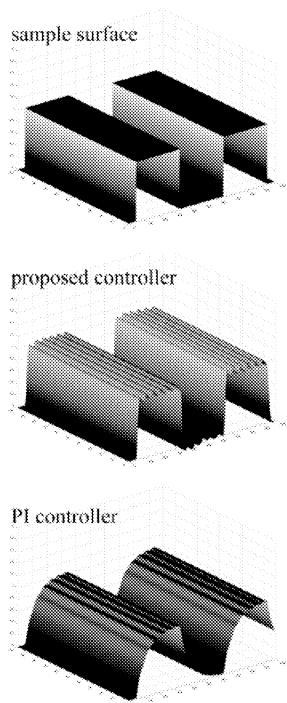


Fig.12 Three dimensional images in the fast scanning.

system with an unmatched disturbance. However, since the control objective is not only a realization of a shorter settling time but also a design of a smooth control input signal for creating three dimensional image of sample surface, just discontinuous controller cannot be a solution of this control problem, which motivates us to introduce a method for attenuating a hard switching action. First, a switching controller is designed to deal with both the step disturbance by sample surface and the nonsmooth disturbance by model approximation. Then, the hard switching of the discontinuous controller is attenuated by introducing a method for continuous approximation. The simulation results demonstrate that the proposed controller realizes a ten-fold improvement in scan speed compared to a conventional PI controller that is generally implemented in a commercially available AFM.

### References

- (1) I. Sokolov. "Atomic Force Microscopy in Cancer Cell Research", in *Cancer Nanotechnology – Nanomaterials for Cancer Diagnosis and Therapy* (eds by Hari Singh Nalwa, Thomas Webster, ASP), 43–59, 2007.
- (2) S. E. Cross, Y. S. Jin, J. Rao and J. K. Gimzewski. "Nanomechanical analysis of cells from cancer patients", *Nature Nanotechnology*, 2, 780–783, 2007.
- (3) K. Mayawala, D. G. Vlachos and J. S. Edwards. "Computational modeling reveals molecular details of epidermal growth factor binding", *BMC Cell Biology*, 6, 41, 1–11, 2005.
- (4) T. Ando, T. Kodera, E. Takai, D. Maruyama, K. Saito and A. Toda. "A high-speed atomic force microscope for studying biological macromolecules", *PNAS*, 98, 12468–12472, 2001.
- (5) N. Kodera, M. Sakashita and T. Ando. "Dynamic proportional integral-differential controller for high-speed atomic force microscopy", *Rev. Sci. Instrum.*, 77, 083704, 2006.
- (6) T. Uchihashi, N. Kodera, H. Itoh, H. Yamashita and T. Ando. "Feed-Forward Compensation for High-Speed Atomic Force Microscopy Imaging of Biomolecules", *JJAP*, 45, 3B, 1904–1908, 2006.
- (7) G. Schitter, A. Stemmer and F. Allgower. "Robust two-degree-of-freedom control of an atomic force microscope", *Asian Journal of Control*, 6, 2, 156–163, 2004.
- (8) T. Shiraishi and H. Fujimoto. "Realization of High-speed Measurement AM-AFM Using Surface Topology Learning Observers", *SICE Annual Conference 2008*, 2568–2573, Tokyo, August, 2008.
- (9) T. Fujimoto and F. Y. Cao. "Sliding Mode Control of a Magnetic Levitation System with Displacement Disturbances", *Dynamics & Design Conference*, 2002.
- (10) T. Nakakuki, T. Shen and K. Tamura. "Soft-LgV Structure-Based Switching Control of Nonsmooth Systems", *10th SICE System Integration (SI2009)*, Tokyo, December, 2009.
- (11) T. Nakakuki, T. Shen and K. Tamura, "Stabilizing control design for a class of discontinuous systems", *T. SICE*, 41, 7, 564–571, 2005.

## ① 発表論文

- (1) T. Nakakuki, M. Ogawa and C. Ishii. "Nonlinear robust stage control of atomic force microscope", *Proc. of the 2012 IEEE Multi-conference on Systems and Control* (under review).
- (2) R. Kenmochi, T. Hanai, T. Nakakuki, M. Okada and C. Ishii, "Particle Simulation of Epidermal Growth Factor Receptor in Prostate Cancer Cells", *Proc. of the 18th IFAC World Congress*, Milano, Italy, August, 2011.
- (3) T. Hanai and T. Nakakuki, "Indentation Analysis of Tamoxifen-Resistant MCF-7 cells by Using Atomic Force Microscope", *Proc. of SICE Annual Conference (SICE2011)*, Tokyo, Japan, September, 2011.

## ② 学会発表

- (1) 花井辰矩, 中茎隆, 原子間力顕微鏡を用いたタモキシフェン耐性MCF-7細胞の力学特性の解析, 日本機械学会2011年度年次大会(MECJ-11), 2011年9月14日.
- (2) 小川真, 劍持竜介, 中茎隆, 石井千春, 非線形ロバスト制御による原子間力顕微鏡のステージ位置制御系の性能改善, 日本機械学会 第12回「運動と振動の制御」シンポジウム(MOVIC2011), 2011年6月29日.
- (3) 劍持竜介, 中茎隆, 岡田眞里子, 石井千春, 前立腺癌細胞における上皮成長因子受容体の粒子シミュレーション, 第53回自動制御連合講演会, 2010年11月3日.

# 湿式プロセスを用いた半導体ナノ・マイクロ規則構造の創製と 高効率デバイスへの応用

工学院大学 応用化学科 小野幸子

工学院大学 応用化学科 阿相英孝

東京大学大学院新領域創成科学研究所 大友順一郎

スイス連邦材料試験研究所 Laetitia Philippe

Fabrication of nano- and micro-structured semiconductors by wet process  
and their application to high efficiency devices

Sachiko Ono, Department of Applied Chemistry, Kogakuin University

Hidetaka Asoh, Department of Applied Chemistry, Kogakuin University

Junichiro Otomo, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

Laetitia Philippe, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

**ABSTRACT :** To fabricate ordered geometric patterns consisting of InP nanoporous structures, a photoresist mask with periodic opening arrays was prepared by sphere photolithography. The diameter and interval of the openings of the photoresist mask could be controlled independently by adjusting the diameter of silica spheres used as a lens and exposure time. Through this resist mask with a two-dimensional (2D) hexagonal array of openings, the pore growth of InP during anodic etching was investigated. The isolated openings could act as initiation sites for the radial growth of pores, resulting in the formation of hexagonal geometric patterns based on Voronoi tessellation in 2D space. With further anodic etching, inside the substrate, the growth direction of the pores changed from radial to perpendicular relative to the substrate. Moreover, by removing domains consisting of nanopores by anisotropic chemical etching, the fabrication of InP microhole arrays with circular and triangular cross sections was also achieved.

## 1. はじめに

本研究は、シリコンを始めとする半導体基板、GaAsに代表される化合物半導体、さらに亜鉛やチタンなどの金属基板上に、物質固有の自己組織化能を最大限に活かし、既存のフォトリソグラフィー技術を用いずに高精度のナノ・マイクロ規則構造体を容易に作製するプロセスを開発すること、さらにその構造由来の特性を利用した高効率デバイスの創製をその分野の先端的研究者と国内・国際共同研究を通じて実現することを目的とする。

## 2. 研究計画

我々は、既存のリソグラフィー技術の抱える、高コスト、複雑な加工工程などの課題を克服すべく、物質固有の規則構造に着目し、種々の化学処理を併用することで新たな発想に基づくナノ・マイクロ規則構造作製技術の開発に取り組んできた。この基本概念は、現在実用段階にあるナノインプリント技術などとも類似し、普通の実験室で特別な設備を用いずに大面積でナノ・マイクロ加工を実現することを目的にしている。我々の提案するプロセスは、単純なネガ・ポジの転写プロセスに留まらず、様々な湿式プロセスを組み合わせることで、マスター構造から位置情報のみを抽出し、多様なパターンを生み出すことが可能である。また、マスター構造の作製も既存

のリソグラフィー技術に依存せず、物質固有の自己組織化能を利用する。具体的には、以下に示す3つの研究テーマを中心に平成21年度（2009年度）から平成23年度（2011年度）までの3年間でプロジェクト研究を推進してきた。

- ① 代表的な半導体であるシリコン基板を加工対象として、シリコン基板上に形成したポリスチレン微粒子の自己集積膜をマスクとして用いた、湿式プロセスによるナノ・マイクロメートルオーダーの規則的な周期を持つ二次元パターンの形成法を確立する。さらに、機能発現を目指した汎用性のある材料創製技術として種々の半導体（GaAs, InPなど）・金属材料（亜鉛、チタン、ニオブ）への適用を検討する。
- ② 化学反応（めつき、化学エッティング）、化学修飾（自己組織化单分子被覆）、電気化学反応（アノード酸化、電解エッティング）などの湿式プロセスを組み合わせた二次加工により、さらに複雑な高次構造を持つナノ・マイクロ構造体を構築する。
- ③ 亜鉛やチタンの酸化物は化合物半導体として色素増感太陽電池への応用が期待される。酸化物の微細構造(比表面積・結晶性)をアノード酸化の手法を適用することで制御し、東大友准教授との共同研究により太陽電池セルを試作して特性評価を行う。

### 3. 湿式プロセスを用いた半導体基板上への二次元パターンの形成

プロジェクトの初年度（平成21年度）は、主にポリスチレン(PS)微粒子の自己組織化構造をマスクとして利用し、金属触媒エッティングを施すことによってSi(100)基板あるいはSi(111)基板に対して、ミクロン周期の開口部を持つSiホールアレイを作製した<sup>1)</sup>。

平成22年度は、湿式プロセスに基づく二次元パターンの作製に関して、Siの微細加工条件の最適化<sup>2,3)</sup>を検討すると共に、Si以外の半導体基板への適用性を確認するため、化合物半導体（GaAs<sup>4-7)</sup>あるいはInP<sup>8)</sup>を加工対象として規則的な孔周期を持つポーラス構造体の作製を中心に検討を進めた。さらに平成23年度は、電気化学をベースとした加工プロセスに結晶異方性エッティングなどの二次加工を組み合わせることで、初期パターンの周期を維持しつつ、既存のリソグラフィー技術では作製困難な高次構造を持つナノ・マイクロ構造体の作製に関して補足実験を進めた<sup>9)</sup>。

#### 3. 1 アノードエッティングによるポーラスInPの構造制御<sup>9)</sup>

Si基板上にレジストを塗布後、自己組織化したSiO<sub>2</sub>微粒子を集光レンズとして利用した微粒子フォトリソグラフィーを行うことで、開口部がミクロン周期で最密充填配置したレジスト製ハニカムマスクを作製した（図1）。

自己組織化したSiO<sub>2</sub>微粒子を介して露光することで微粒子が集光レンズとして作用し、微粒子直下のレジストのみ選択的に感光させることができた。SiO<sub>2</sub>微粒子/レジスト界面に集光した光はレジスト表面でやや拡散するものの、レジスト内を垂直に伝播したため、露光/現像を経て、スルーホールマスクを形成した。レジスト製ハニカムマスクの開口径および厚さはSiO<sub>2</sub>微粒子径、露光時間およびレジスト塗布条件により制御可能であり、下地基板が平滑であればInP基板であっても同一の結果が得られた（図2）。

レジスト製ハニカムマスクを介してn-InP(111)基板をアノードエッティングすることで、マスク開口部の配列を反映した二次元幾何学パターンを持つポーラスInPを作製した（図3）。孔発生位置をマスク開口部に限定することで、マスク開口部を起点として結晶方向によらず放射状に孔が成長した（図3a, c, e）。同心円状に成長したポーラス構造（ドメイン）は隣接するドメインと接することで基板表面において正六角形のタイリングを自己組織的に実現している（図3c）。ドメインの境界線はマスク開口部間の垂直二等

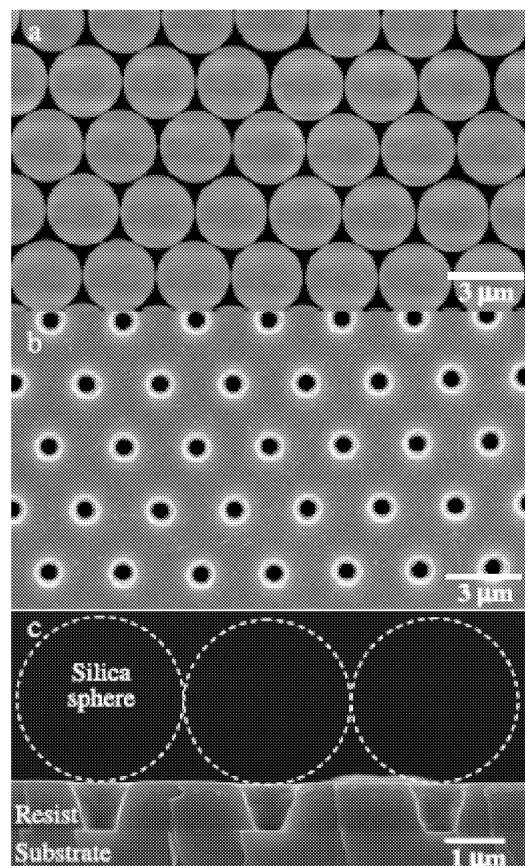


Fig. 1 SEM images of (a) self-assembled silica spheres on silicon substrate, (b) honeycomb photoresist mask formed by sphere lithography, and (c) cross-sectional view of resist mask formed on Si substrate. The periodicity of the openings was 3  $\mu\text{m}$ . The exposure time was 0.2 s.

分線に相当することから、得られた幾何学パターンは各ドメインの勢力圏を反映したボロノイ分割図とも言える（図4）。基板内部では交差することなく、孔の成長方向が自発的に放射状から基板垂直方向に変化し、流線型のポーラス構造を形成した（図3b, d, f）。アノードエッチングによる孔の成長過程は基板の結晶方向に依存しない等方的なエッチングであるが、基板結晶面に依存した異方性エッチングを併用することで、図5に示す三角形断面を持つInPマイクロホールアレイも作製できた。アノードエッチングによりマスク開口部を起点として放射状に生成したポーラスInP層を、化学エッチングで溶解除去することで開口径約2.2 μm、深さ約1.2 μmのホールが形成された（図5a, c）。化学エッチング時間を1 sから15 sに延長したところ、バルク部分の化学溶解と同時に{100}への選択的な異方性エッチングの影響が顕著に現れ、ホール形状は半球状から深さ約1.8 μmの三角錐形状に変化した（図5b, d）。このよう

に自発的に生じる規則的なパターンを利用したナチュラルリソグラフィーは、既存のリソグラフィー技術では作製困難な複雑なパターンを低コストかつ大面積で処理できる新たなパターニング手法であり、次世代の材料・デバイスを作り出すキーテクノロジーとして今後の発展が期待される。ここまで、二次元の微粒子集合体（コロイド結晶）に関しては最密充填配置に限定して研究結果を紹介したが、スピンドル法を用いれば非最密充填配置のコロイド結晶が作製できることも知られている。自己組織化材料を利用したパターン形成技術は、パターンの制御性が課題に挙げられるが、スピンドル法を用いてウェハサイズ（4インチ）でコロイド結晶が作製できることも実証されており、コロイド結晶を出発構造とした安価かつ高精度なナノ・マイクロ構造作製プロセスが確立されれば、既存のリソグラフィー技術同様に製品展開を目指した要素技術として実用化が進むであろう。

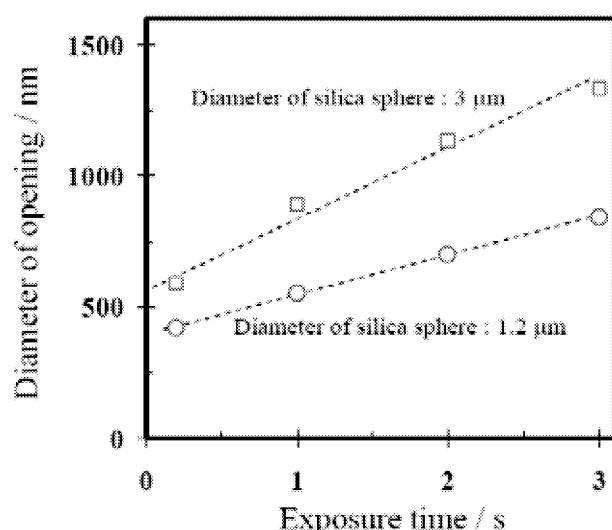
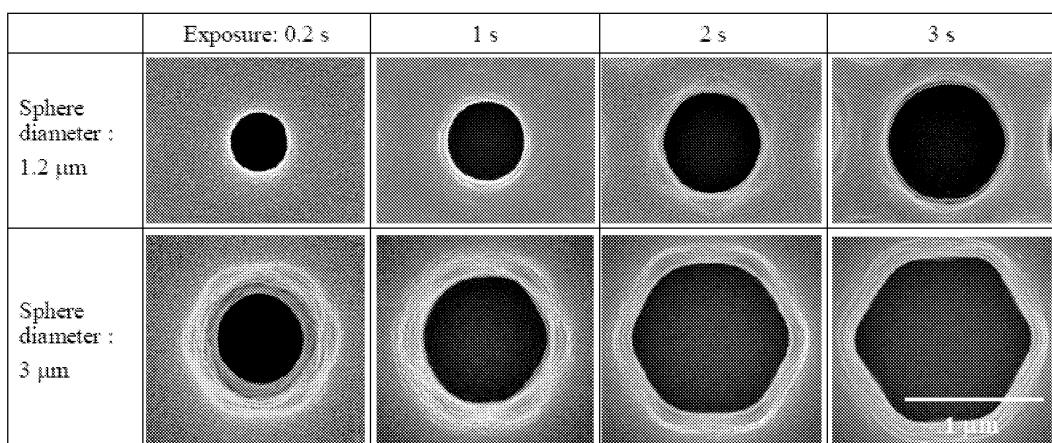


Fig. 2 Relationship between diameter of openings of resist mask formed on silicon substrate and exposure time. (upper) SEM images of opening of photoresist mask. (lower) Change in diameter with exposure time.

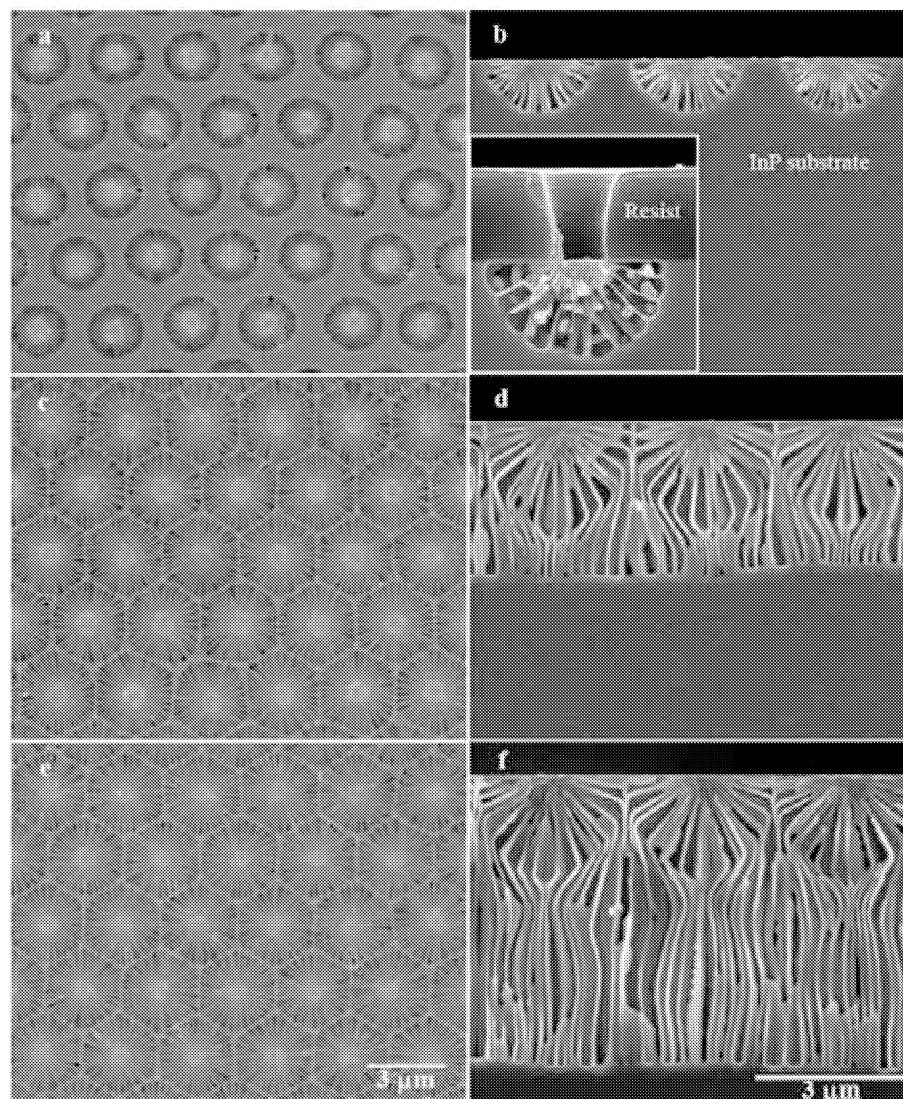


Fig. 3 SEM images of InP (100) substrate after anodic etching in  $2 \text{ mol dm}^{-3}$  HCl at 6 V at  $20^\circ\text{C}$  through honeycomb photoresist mask. The anodic etching times were (a, b) 1 s, (c, d) 5 s, and (e, f) 10 s. (a, c, e) Plane view and (b, d, f) cross-sectional view.

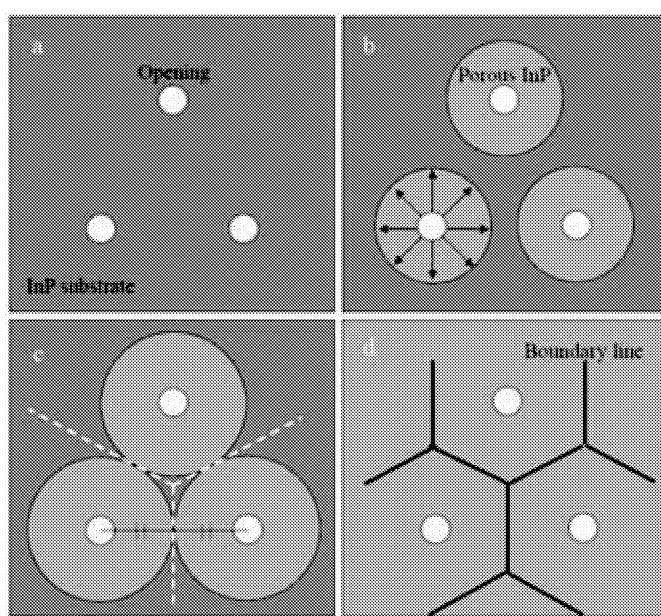


Fig. 4 Schematic model of growth of hexagonal geometric pattern based on Voronoi tessellation: (a) resist mask with 2D hexagonal array of openings, (b) initial stage of nanopore growth, (c) contact of two adjacent domains, and (d) hexagonal domain in steady state. A polygon vertex is formed where three boundary lines intersect.

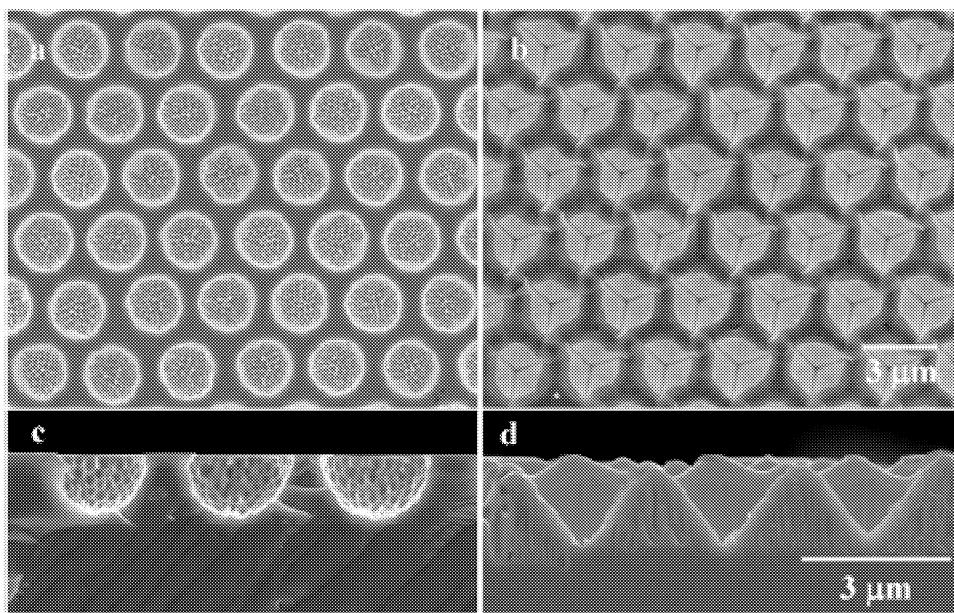


Fig. 5 SEM images of anodized InP (111) substrate after chemical etching in mixed solution of  $5.5 \text{ mol dm}^{-3}$  HCl and  $6.5 \text{ mol dm}^{-3}$  HNO<sub>3</sub> for (a, c) 1 s and (b, d) 15 s. Anodic etching was conducted in  $2 \text{ mol dm}^{-3}$  HCl at 6 V for 1 s at 20 °C through a honeycomb photoresist mask. (a, b) Plane view and (c, d) cross-sectional view.

#### 4. 有機一金属酸化物複合型太陽電池の作製

有機薄膜太陽電池は、低コスト化、用途拡大などの観点から次世代太陽電池として関心が高い。変換効率向上のためには、有機半導体の特性向上のみならず、p型、n型の3次元的な界面構造の制御が重要である。本研究では、p型に有機半導体（銅フタロシアニン）、n型に金属酸化物としてアノード酸化で形成したポーラス酸化チタン（チタニアナノチューブ）を用い、光電変換効率の向上を目的として研究を進めてきた。しかしながら、酸化チタンとフタロシアニンを組み合わせたセルによって一部光电流が確認されることもあったが、極めて不安定であり、すぐに失活する現象が確認された。光照射時の界面構造が非常に不安定であると推察されることから、試料調製時の条件の最適化、特に酸化チタン孔内へのp型半導体の充填条件の確立が課題であった。また、有機一無機接合型と並行して、無機一無機接合型等の他の界面モデルに関する再設計、モデルシミュレーションを行った。ここでは、n型半導体にナノ細孔を有するTiO<sub>2</sub>アノード酸化膜、吸収層にSb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>を用い、Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>をTiO<sub>2</sub>細孔へ導入するプロセスを試みた結果を示す。また、数値計算を行いセル構造と変換効率の相関についても検討した。

##### 4. 1 モデルシミュレーション

有限要素法を用いて数値計算を行い、セル構造の違いを比較した。p-i-n型セルモデルを図6に示す。i層が光を吸収し、発生した生成キャリアの輸送を考える。生成キャリアは濃度拡散、内部電圧により輸送される。従って連続の式より以下のように表される。

$$\frac{dn_{e,h}}{dt} = \alpha I_0 \exp(-\alpha x) + D_{e,h} \frac{d^2 n_{e,h}(x)}{dx^2} + \mu_{e,h} E \frac{dn_{e,h}(x)}{dx} - \frac{n_{e,h}(x)}{\tau} \quad (1)$$

( $\alpha$  : 吸収係数,  $I_0$  : 光子密度,  $n_{e,h}$  : 電子濃度, 正孔濃度,  $D$  : 拡散係数,  $\mu$  : 電子, 正孔移動度,  $\tau$  : 電子寿命) また、電場  $E$  は、以下のポアソン方程式によって求めた。

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{q}{\epsilon} (n_s(x) - n_i(x) - N_{A^+}^- + N_{D^+}^+) \quad (2)$$

これらを連立して数値的に解くことにより界面に到達する電子及び正孔の濃度を求めた。また、計算に必要な値は文献値 [G. A. Swartz, *J. Appl. Phys.* **53**, 712 (1982)]を参考にした。界面に到達した電子と正孔をすべて外部に取り出せる理想的な状態を仮定することにより短絡電流  $J_{sc}$  を算出し、変換効率を求めた。セル構造は図6で示すとおり,  $h = 500 \text{ nm}$ ,  $w = 100 \text{ nm}$  で計算した。

その結果、変換効率は平面ヘテロ接合では約 18 %、無機バルクヘテロ接合型構造は約 25 %であり、平面ヘテロ接合型構造よりも約 7 %高い結果となった。この結果より、無機バルクヘテロ接合型構造の有効性が示唆された。

##### 4. 2 アノード酸化 TiO<sub>2</sub>への Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> の導入

アノード酸化 TiO<sub>2</sub>は Ti 基板を NH<sub>4</sub>F-エチレングリコール溶液にてアノード酸化することにより作製した。吸収層である Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>は既往の研究に従い、電解析出法で作製し、TiO<sub>2</sub>の垂直細孔内部への導入を試みた。電解析出法では、Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、EDTA 混合溶液を用意し、ポテンショスタットを用いて  $2.0 \text{ mA/cm}^2$  の電流を流し電解析出を行った。対極には Cu を用いた。また、電解析出法ではチタニア細孔内に選択的

析出を実現するため、表面処理としてオクタデシルホスホン酸(ODPA)を  $\text{TiO}_2$  上部表面に吸着させることにより、絶縁層を形成させた。走査型電子顕微鏡(SEM)により  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  の析出形態を評価した。

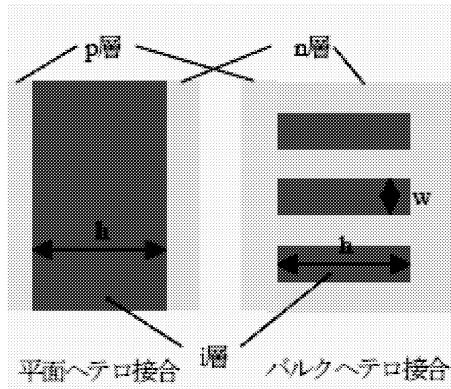


Fig. 6 p-i-n solar cell structures.

ODPA処理後の析出状態の表面及び断面のSEM画像を図7に示す。未処理の場合では、細孔入り口付近での析出が確認された。細孔内部で  $\text{S}^{2-}$  や  $\text{Sb}^{3+}$  が拡散する前に細孔入り口付近で析出したと考えられる。一方、表面にODPA処理を施した場合では細孔内部から  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  の析出が確認された。しかし、細孔入り口付近にも  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  の析出が観察され、また析出も不均一であることから現時点では、電解析出条件の確立には至っていない。

無機バルクヘテロ接合型構造の変換効率に対する有効性は数値計算により示唆され、 $\text{TiO}_2$  細孔内への  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  の導入については、 $\text{TiO}_2$  表面上部に絶縁層を形成することで細孔内部からの析出を誘導できることから、本プロセスの有効性は示されている。しかしながら、吸収層として用いる  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  の析出形態とIV特性の相関など不明な点も多いことから、数値シミュレーションによるセル寸法の最適化と並行してデバイス構築を早期に実現する必要がある。

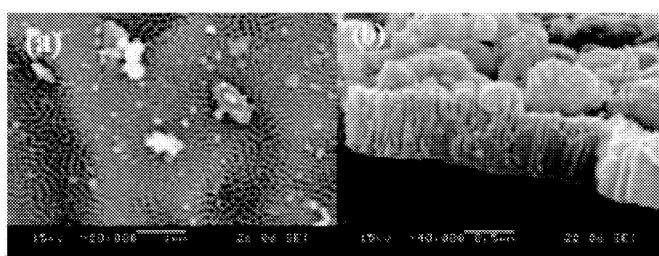


Fig. 7 SEM images of (a) surface and (b) cross-sectional view of porous  $\text{TiO}_2$  layer after electrodeposition of  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ .

## 5. まとめ

半導体基板を湿式プロセスにより直接加工する研究課題に関しては、基礎データの集積を通じて、実験条件の最適化が進

み、有益な知見が得られた。本プロジェクトを通じて得られた知見・技術は、国内外で開催される会議等で積極的に発表を行い、その一部は既に学術論文として投稿・掲載に至っている。今後も継続して、研究成果を補足し、論文発表を行うと共に、作製した種々の規則構造体の応用研究分野に関しても模索したい。

一方、有機-金属酸化物複合型太陽電池の開発に関しては、数値シミュレーションの結果より無機バルクヘテロ接合型構造の変換効率に対する有効性は示されたものの、モデル電極の作製条件の最適化に課題が残されている。再現性に優れた材料創製技術は、デバイス特性をも左右する重要なプロセスであるため、本プロジェクトの研究期間は終了したが、今後も引き続き残された課題に関して、実験条件の修正・改善を進めたい。

## 参考文献

1. H. Asoh, F. Arai and S. Ono, *Electrochimica Acta*, **54** (22), 5142-5148 (2009).
2. S. Bauer, J. Brunner, H. Jha, Y. Yasukawa, H. Asoh, S. Ono, H. Bohm, J. P. Spatz and P. Schmuki, *Electrochemistry Communications*, **12** (4), 565-569 (2010).
3. H. Asoh, K. Fujihara, S. Ono, in preparation for publication.
4. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, *J. Electrochemical Society*, **156** (10), H777-H781 (2009).
5. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 116502/1-116502/4 (2010).
6. H. Asoh, S. Kotaka and S. Ono, *Electrochemistry Communications*, **13** (5), 458-461 (2011).
7. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, *Journal of The Electrochemical Society*, **159** (5), D328-D332 (2012).
8. T. Yokoyama, H. Asoh and S. Ono, *Phys. Status Solidi A*, **207** (4), 943-946 (2010).
9. H. Asoh, T. Yokoyama and S. Ono, *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 046505/1-046505/5 (2010).
10. H. Asoh, J. Iwata, S. Ono, *Nanotechnology* (in press).

## <研究成果>

### ① 発表論文（査証つき）

1. H. Asoh, J. Iwata, S. Ono, *Nanotechnology* (in press).
2. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, *Journal of The Electrochemical Society*, **159** (5), D328-D332 (2012).
3. T. Ruff, R. Hahn, M.S. Killian, H. Asoh, S. Ono and P. Schmuki, *Electrochimica Acta*, **62** (2), 402-407 (2012).
4. H. Asoh, K. Uchibori and S. Ono, *Semiconductor Science and Technology*, **26**, 102001/1-102001/4 (2011).
5. H. Asoh, S. Kotaka and S. Ono, *Electrochemistry Communications*, **13** (5), 458-461 (2011).
6. 阿相英孝, 小野幸子(解説), *表面技術*, **62** (2), 92-97 (2011).

7. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 116502/1-116502/4 (2010).
8. 小野幸子（解説），材料の科学と工学，**47** (2), 2-7 (2010).
9. H. Asoh, T. Yokoyama and S. Ono, *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 046505/1-046505/5 (2010).
10. T. Yokoyama, H. Asoh and S. Ono, *Phys. Status Solidi A*, **207** (4), 943-946 (2010).
11. S. Bauer, J. Brunner, H. Jha, Y. Yasukawa, H. Asoh, S. Ono, H. Bohm, J. P. Spatz and P. Schmuki, *Electrochemistry Communications*, **12** (4), 565-569 (2010).
12. H. Asoh, F. Arai and S. Ono, *Electrochimica Acta*, **54** (22), 5142-5148 (2009).
13. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, *J. Electrochemical Society*, **156** (10), H777-H781, (2009).
14. S. Ono, K. Kuramochi and H. Asoh, *Corrosion Science*, **51** (7), 1513-1518 (2009).
15. S. Ono, F. Arai and H. Asoh, *ECS Transactions*, **19** (3), 393-402 (2009).

② 著書

1. Noble Metals

分担執筆 (Y. Su 編) : InTech, Chapter 11 p225-248 (2012.2)  
全416ページ

“Nano/Micro-Patterning of Semiconductors using Noble Metal Particles as Catalyst for Site-Selective Chemical Etching”, S. Ono and H. Asoh

2. Handbook of Nanophysics : Functional Nanomaterials

分担執筆 (K. Sattler 編) : Taylor & Francis Books, Inc. Chapter 28 p28-1 – 28-14 (2010.9) 全 787 ページ

“Nanohole arrays on silicon”, H. Asoh and S. Ono

③ 学会発表（国際会議）

1. S. Ono, S. Kotaka, J. Iwata, K. Fujihara, H. Asoh, Porous Semiconductors-Science and Technology 2012 (Malaga, Spain, 3/25-30, 2012)
2. S. Kotaka, H. Asoh and S. Ono, The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-10th) (Beijing, China, 11/16-19, 2011)
3. S. Ono, S. Kotaka, J. Iwata and H. Asoh, 220th Meeting of the Electrochemical Society (Boston, USA, 10/9-14, 2011)
4. C. Higaki, H. Asoh and S. Ono, 220th Meeting of the Electrochemical Society (Boston, USA, 10/9-14, 2011)
5. J. Iwata, H. Asoh and S. Ono, 220th Meeting of the Electrochemical Society (Boston, USA, 10/9-14, 2011)
6. H. Asoh, K. Fujihara and S. Ono, 62nd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (Nigata, Japan, 9/11-16, 2011)
7. C. Higaki, H. Asoh and S. Ono, 62nd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (Nigata, Japan, 9/11-16, 2011)
8. S. Kotaka, H. Asoh and S. Ono, 62nd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (Nigata, Japan, 9/11-16, 2011)
9. H. Asoh, S. Kotaka and S. Ono, XX International Materials Research Congress (IMRC-20) (Cancun, Mexico, 8/14-19, 2011)
10. K. Fujihara, H. Asoh and S. Ono, 9th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-9th) (Tokyo, Japan, 11/3-6, 2010)
11. Y. Okamoto, H. Asoh and S. Ono, 9th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-9th) (Tokyo, Japan, 11/3-6, 2010)
12. C. Higaki, H. Asoh and S. Ono, 218th Meeting of the Electrochemical Society (Las Vegas, USA, 10/10-15, 2010)
13. Y. Okamoto, H. Asoh and S. Ono, 218th Meeting of the Electrochemical Society (Las Vegas, USA, 10/10-15, 2010)
14. M. Santamaria, F. D. Franco, F. D. Quarto, K. Nishimura and S. Ono, Giornate dell'Elettrochimica Italiana Elettrochimica per il Recupero Ambientale (GEI-E.R.A. 2010) (Modena, Italia, 9/5-10, 2010)
15. H. Asoh and S. Ono, The 2nd Japan-Korea Joint Symposium for ARS Capacitor (Gyeongju, Korea, 6/27-28, 2010)
16. T. Yokoyama, H. Asoh and S. Ono, The 1st Joint Symposium between Kogakuin University and Institute of Chemistry, Chinese Academy of Science (KU-ICCAS; JS1-2009) (Tokyo, Japan, 12/8-11, 2009)
17. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, The 1st Joint Symposium between Kogakuin University and Institute of Chemistry, Chinese Academy of Science (KU-ICCAS; JS1-2009) (Tokyo, Japan, 12/8-11, 2009)
18. M. Hori, H. Asoh and S. Ono, The 1st Joint Symposium between Kogakuin University and Institute of Chemistry, Chinese Academy of Science (KU-ICCAS; JS1-2009) (Tokyo, Japan, 12/8-11, 2009)
19. S. Ono and H. Asoh (Invited lecture), The 1st Joint Symposium between Kogakuin University and Institute of Chemistry, Chinese Academy of Science (KU-ICCAS; JS1-2009) (Tokyo, Japan, 12/8-11, 2009)
20. M. Hori, H. Asoh and S. Ono, 8th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-8th) (Tainan, Taiwan, 11/20-22, 2009)
21. S. Ono and H. Asoh (Invited lecture), 8th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-8th) (Tainan, Taiwan, 11/20-22, 2009)
22. S. Ono (Invited lecture), Seminar at Laboratory for Mechanics of Materials and Nanostructures in EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) (EMPA, Thun, Switzerland, 10/9, 2009)
23. T. Yokoyama, H. Asoh and S. Ono, 216th Meeting of the Electrochemical Society (Vienna, Austria, 10/4-9, 2009)
24. M. Hori, H. Asoh and S. Ono, 216th Meeting of the Electrochemical Society (Vienna, Austria, 10/4-9, 2009)
25. T. Kameyama, H. Asoh and S. Ono, 60th Annual Meeting of

- the International Society of Electrochemistry (Beijing, China, 8/16-21, 2009)
26. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, 60th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (Beijing, China, 8/16-21, 2009)
  27. S. Ono and H. Asoh (Invited lecture), 215th Meeting of the Electrochemical Society (San Francisco, USA, 5/24-29, 2009)
  28. Y. Yasukawa, H. Asoh and S. Ono, 215th Meeting of the Electrochemical Society (San Francisco, USA, 5/24-29, 2009)
  29. S. Ono, K. Nishimura and H. Asoh (Invited lecture), 5th KURT SCHWABE SYMPOSIUM FROM CORROSION TO SEMICONDUCTORS (Erlangen, Germany, 5/24-28, 2009)
- ④ 学会発表（国内会議）
1. 阿相英孝, 小鷹俊介, 小野幸子, 電気化学会 第 79 回大会 (2012/3/29-31 アクトシティ浜松, 静岡)
  2. 羽野修平, 大友順一郎, 大島義人, 阿相英孝, 小野幸子, 化学工学会 第 77 年会 (2012/3/15-17 工学院大学, 東京)
  3. 小野幸子 (依頼講演), 表面技術協会 第 125 回講演大会 (2012/3/13-14 東京都市大学, 東京)
  4. 檜垣知恵, 阿相英孝, 小野幸子, 表面技術協会 第 125 回講演大会 (2012/3/13-14 東京都市大学, 東京)
  5. Y. C. Yang, D. Tian, H. Cheng, H. Asoh and S. Ono, 表面技術協会 第 125 回講演大会 (2012/3/13-14 東京都市大学, 東京)
  6. 檜垣知恵, 阿相英孝, 小野幸子, 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 28 回神戸コンファレンス (2011/10/11 ホテル北野プラザ六甲荘, 兵庫)
  7. 小鷹俊介, 阿相英孝, 小野幸子, 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 28 回神戸コンファレンス (2011/10/11 ホテル北野プラザ六甲荘, 兵庫)
  8. 岩田惇, 阿相英孝, 小野幸子, 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 28 回神戸コンファレンス (2011/10/11 ホテル北野プラザ六甲荘, 兵庫)
  9. 阿相英孝, 小鷹俊介, 小野幸子, 表面技術協会 第 124 回講演大会 (2011/9/21-22 名古屋大学, 愛知)
  10. 檜垣知恵, 阿相英孝, 小野幸子, 表面技術協会 第 124 回講演大会 (2011/9/21-22 名古屋大学, 愛知)
  11. 岩田惇, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会秋季大会 (2011/9/9-11 朱鷺メッセ, 新潟)
  12. 小鷹俊介, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会 第 78 回大会 (2011/3/29-31 横浜国立大学, 神奈川)
  13. 檜垣知恵, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会 第 78 回大会 (2011/3/29-31 横浜国立大学, 神奈川)
  14. 岩田惇, 阿相英孝, 小野幸子, 表面技術協会 第 123 回講演大会 (2011/3/17-18 関東学院大学, 神奈川)
  15. 小野幸子 (依頼講演), 工学院大学後援会新潟支部 支部研修会 (2010/11/27-28 越後浦佐温泉てじまや, 新潟)
  16. 小野幸子 (依頼講演), 平成 22 年度 日本セラミックス協会北陸支部 秋季特別講演会 (2010/11/26 リファーレ金沢, 石川)
  17. 藤原洸輔, 阿相英孝, 小野幸子, 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 27 回鎌倉コンファレンス (2010/11/18-19 KKR 江ノ島ニュー向洋, 神奈川)
  18. 岡本勇気, 阿相英孝, 小野幸子, 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 27 回鎌倉コンファレンス (2010/11/18-19 KKR 江ノ島ニュー向洋, 神奈川)
  19. 阿相英孝, 岡本勇気, 小野幸子, 無機マテリアル学会 第 121 回学術講演会 (2010/11/4-5 東北大学, 宮城)
  20. 岡本勇気, 阿相英孝, 小野幸子, 表面技術協会 第 122 回講演大会 (2010/9/6-7 東北大学, 宮城)
  21. 藤原洸輔, 阿相英孝, 小野幸子, 表面技術協会 第 122 回講演大会 (2010/9/6-7 東北大学, 宮城)
  22. 岩田惇, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会秋季大会 (2010/9/2-3 神奈川工科大学, 神奈川)
  23. 小鷹俊介, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会秋季大会 (2010/9/2-3 神奈川工科大学, 神奈川)
  24. 小野幸子 (依頼講演), 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 76 回例会 (2010/7/23 近畿大学, 大阪)
  25. 岩田惇, 横山誉幸, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会 第 77 回大会 (2010/3/29-31 富山大学, 富山)
  26. 小鷹俊介, 三上幸彦, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会 第 77 回大会 (2010/3/29-31 富山大学, 富山)
  27. 藤原洸輔, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会 第 77 回大会 (2010/3/29-31 富山大学, 富山)
  28. 檜垣知恵, 堀真雄, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会 第 77 回大会 (2010/3/29-31 富山大学, 富山)
  29. 松木健祐, 大友順一郎, 大島義人, 阿相英孝, 小野幸子, 化学工学会 第 75 年会 (2010/3/18-20 鹿児島大学, 鹿児島)
  30. 小野幸子 (平成 22 年度協会賞受賞講演), 表面技術協会 第 121 回講演大会 (2010/3/15-16 成蹊大学, 東京)
  31. 阿相英孝, 横山誉幸, 小野幸子, 表面技術協会 第 121 回講演大会 (2010/3/15-16 成蹊大学, 東京)
  32. 岡本勇気, 阿相英孝, 小野幸子, 表面技術協会 第 121 回講演大会 (2010/3/15-16 成蹊大学, 東京)
  33. 小野幸子 (依頼講演), 平成 22 年度電気化学会関東支部 サイエンスレクチャー (2010/2/16 (社) 電気化学会会議室, 東京)
  34. 小野幸子 (依頼講演), 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 26 回知多コンファレンス (2009/10/29-30 師崎荘, 愛知)
  35. 小野幸子 (依頼講演), 2009 JEOL EPMA・表面分析ユーザーズミーティング (2009/10/15-16 東京大学・武田ホール, 東京)
  36. 阿相英孝, 小野幸子 (依頼講演), 金属のアノード酸化皮膜の機能化部会 第 73 回例会 (2009/10/1 工学院大学, 東京)
  37. 堀真雄, 阿相英孝, 小野幸子, 電気化学会秋季大会

(2009/9/10-11 東京農工大学, 東京)

38. 横山 誉幸, 阿相 英孝, 小野 幸子, 電気化学秋季大会  
(2009/9/10-11 東京農工大学, 東京)
39. 安川 雪子, 阿相 英孝, 小野 幸子, 電気化学秋季大会  
(2009/9/10-11 東京農工大学, 東京)
40. 藤原 洋輔, 阿相 英孝, 小野 幸子, 電気化学秋季大会  
(2009/9/10-11 東京農工大学, 東京)
41. 小野 幸子 (依頼講演), 表面技術協会・ライトメタル表面技術部会 第29回表面技術協会ライトメタル・サマーセミナー (2009/7/17 工学院大学, 東京)
42. 小野 幸子 (依頼講演), 第一回タンタルセミナー  
(2009/5/18 ホテル日航成田, 千葉)

##### ⑤ 受賞

1. 小鷹 俊介, 阿相 英孝, 小野 幸子, “異方性エッチングを利用した高アスペクト比ポーラス GaAs 及びプリズムアレーの創製”, 社団法人日本金属学会第62回金属組織写真賞 走査電子顕微鏡部門「最優秀賞」(2012/3/28)
2. 岩田 悅, 阿相 英孝, 小野 幸子, “ナチュラルリソグラフィーにより作製した InP の自己組織化ナノポーラス構造”, 社団法人日本金属学会第62回金属組織写真賞 走査電子顕微鏡部門「奨励賞」(2012/3/28)
3. 岩田 悅, 横山 誉幸, 阿相 英孝, 小野 幸子, “微粒子フォトリソグラフィーマスクを介した InP のアノードエッチング”, 電気化学会第77回大会学生ポスター賞 (2010/3/30)
4. 小野 幸子, “アルミナ等酸化物のナノ構造制御に関する研究”, 社団法人表面技術協会平成22年度協会賞 (2010/2/26)

以上



## 集積化紫外発光素子のための透明導電膜の検討

工学院大学 情報通信工学科 本田 徹

工学院大学 基礎・教養教育部門 佐藤 光史

Fabrication of MgZnO films by molecular precursor method for integrated light-emitting diodes operating in a UV spectral region

Tohru Honda, Department of Information & Communication Engineering, Kogakuin University  
Mitsunobu Sato, Coordination Laboratory, Kogakuin University

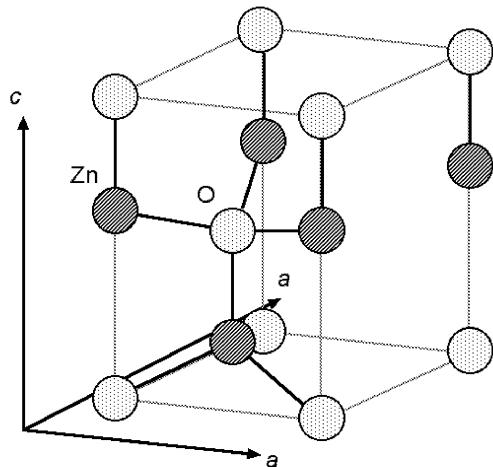
**ABSTRACT :** MgZnO films were fabricated by the molecular precursor method (MPM) for their application as UV transparent electrodes in integrated GaN-based light-emitting devices. First, ZnO films were investigated before the fabrication of MgZnO films. It was clarified that annealing under suitable conditions using an Ar gas flow is effective for the realization of c-axis-oriented MgZnO films in the time of a pyrolysis reaction. However, the orientation direction was  $<0001>$  along the growth direction ( $c^-$  growth). It leads to the surface roughness and columnar growth. Thus, the  $c^+$  growth was investigated. It was found that the use of MgO bufferlayer is effective to realize the  $c^+$  growth of MgZnO films by molecular precursor method. The resistivity of the Ga-doped  $Mg_{0.1}Zn_{0.9}O$  film was approximately  $2.5 \times 10^{-2} \Omega \cdot cm$ . The resistivity of the c-axis oriented MgZnO films was lower than that of the polycrystalline films. This is due to the reduction of the potential barrier at the boundaries of the crystallites. The spontaneous polarization affects the potential barrier. The c-axis orientation reduces the potential barrier along the deposition plane.

### 1. はじめに

酸化インジウム錫(ITO)や酸化亜鉛(ZnO)をはじめとする導電性透明酸化物は、平面ディスプレイパネルや太陽電池の透明電極への応用が期待されている。特にインジウム錫酸化物(ITO)は、これまでに液晶ディスプレイ用透明電極として商業的に使用されている。しかしながら、ITO電極は可視光域に対して透明ではあるが紫外線領域で透明性を保ちながら電極として使用することは非常に困難である。我々は、紫外線に対する透明電極として酸化マグネシウム亜鉛混晶(MgZnO)を使用することを提案している。MgZnOは、適当なMg組成を選ぶことにより、その禁制帯幅の大きさにより、紫外線(UV-A)に対して透明となる[1]。また上記混晶の基本となる2元化合物・酸化亜鉛(ZnO)[2, 3]は、非常に低抵抗な薄膜製作が可能である[4]。よって、Mgを混合したZnO薄膜がどこまで低抵抗化できる

かについて、応用上非常に興味が持たれるところである。

ZnO薄膜製作には通常、真空中における堆積が用いられる[3]。これらの薄膜を低成本で製作することを考えるとスピノコート等の技術が使用できる溶液法が非常に興味深い。商業的に使用される溶液法の代表としてゾル・ゲル法があるが、今回の製作材料を考えるとき、Mgの安定した材料が見当たらず、今回は、分子プレカーサー法によるMgZnO薄膜形成を採用することにした。文史プレカーサー法(MPM)は、溶液法の一種であり、有機金属錯体を用いる方法である[5]。この方法では、安定したZnおよびMg等の金属錯体が準備可能であり、MgZnO薄膜形成には優位であると考える。この方法の概略を説明すると、金属錯体溶液を製作し、これをスピノコート等の方法を用いて基板上に塗布し、熱を加えることにより、金属錯体が熱分解し、酸化物薄膜が形成される方法である。この際、残留有機物は蒸



**Fig. 1** Schematic diagram of ZnO crystal structure.

Here,  $c^+$  direction indicates the Zn polarity growth. The surfaces of  $c^+$  and  $c^-$  directions are called as “Zn face” and “O face”, respectively.

発し、薄膜中には、ほぼ残らない。

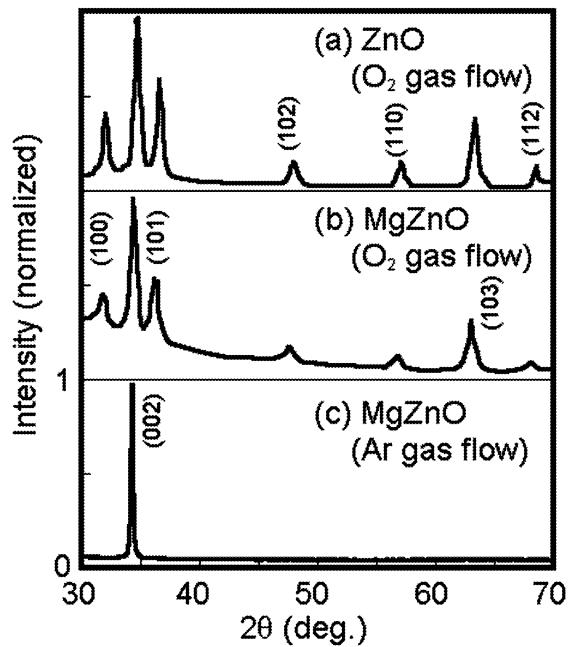
これまでに MPM 法により  $Mg_{0.1}Zn_{0.9}$  薄膜の形成に成功し、370nm 帯 GaN 系発光ダイオード(LED)の発光波長に対して製作した薄膜が透明であることを報告している[1]。また、Ga 金属錯体溶液を添加することにより、抵抗率が制御できることも示した[1]。しかしながら、その抵抗率は数  $\Omega \cdot cm$  程度と比較的高く、電極に使用するには、更なる低抵抗率化が課題となっている。これまでに、ZnO 薄膜について電極と使用できる抵抗率が報告されているが[3, 4]、これらの薄膜では、 $c$  軸配向薄膜で実現されている。つまり、電極として使用する ZnO 薄膜は、多結晶薄膜であるが、 $c$  軸配向性を持たせることが低抵抗化の鍵となる。参考に ZnO 結晶とその結晶軸名の関係を図 1 に模式的に示す。

そこで、本研究では、これまで 3 年間に途中報告した内容も含め、 $c$  軸配向 ZnO および  $Mg_{0.1}Zn_{0.9}$  薄膜を MPM 法により実現可能であるかを明らかにし、その結果について報告する[1]。また、Zn 極性  $c$  軸配向を目指した研究結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2. 1 $c$ 軸配向 MgZnO 薄膜の製作

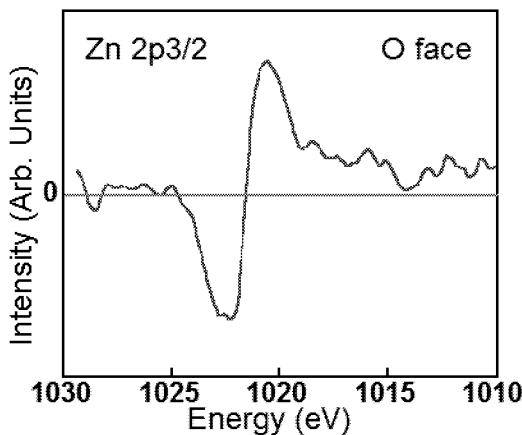
亜鉛原料には Zn-nta 錯体(nitrilotriacetic acid)を使用した。本錯体をアンモニア水用いて溶液化した[1]。添加するマグネシウムおよびガリウム材料に



**Fig. 2** XRD patterns of (a) ZnO and  $Mg_{0.1}Zn_{0.9}$  O films after pyrolysis in an  $O_2$  flow and (b)  $Mg_{0.1}Zn_{0.9}$  O film after pyrolysis in an Ar gas flow.

は、Mg-edta 錯体(ethylenediamine-N, N, N', N'-tetraacetic acid)および Ga-edta 錯体を使用し、アンモニア水用いて溶液化した。 $MgZnO$  薄膜中の Mg 組成および Ga 不純物量は、溶液混合時のモル%を調整することにより制御した。製作した溶液は、スピンドルコートにより基板上に塗布した。この際、回転数を途中で変更するダブルステップモードを用いた。1段目の条件は、3000 rpm, 3 秒、2段目の条件は、4000 rpm, 5 秒である。基板上に塗布により製作されたプリカーサー薄膜は、70°Cで 10 分間乾燥させ、その後、600°Cで 90 分焼成した。この際、不活性ガスであるアルゴン(Ar)を流量 100ccm 供給する中で焼成を行った。焼成は、開管炉で行い、その際の酸素流量は 100ccm であった。

この結果は、Ar 霧囲気中で招請することにより、 $c$  軸配向  $MgZnO$  薄膜の製作に成功している。製作した薄膜の XRD 測定結果を図 2 に示す。ここで、(a)には、酸素霧囲気中で焼成した ZnO 薄膜の結果、(b)には、酸素霧囲気中で焼成した MgZnO 薄膜の結果、および(c)には、アルゴンガス霧囲気中で焼成した MgZnO 薄膜の結果を示す。焼成霧囲気を Ar ガスにかえることにより  $c$  軸配向が実現できた。しかしながら、角度分解 X 線光電子分光法(AR-XPS)測定の結果、酸素極性配向していることがわかった。ここで、AR-XPS 法による Zn 極性もしくは酸素極性配向の判別について詳しく述べる。ZnO 結晶は、六方晶結晶構造を有しており、その結晶対称性より図 1 に示す  $c$  軸方向に大きな自発分極を持つ。このため結晶内

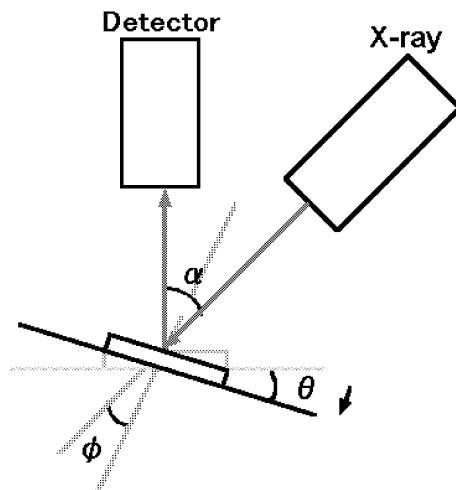


**Fig. 3** AR-XPS differential spectrum of ZnO films fabricated on (0001)sapphire by molecular precursor method.

部に  $c$  軸方向に沿った大きな電界強度を有する。また、結晶がヘテロエピタキシャル成長のように ZnO 薄膜に残留歪みを有する場合には、さらに圧電分極による電界が生じている。サファイア基板上に成長した ZnO の場合には、通常圧縮方向の残留歪みを内在しているが、その電界方向は、自発分極と同様の方向である。つまり、今回製作しているサファイア基板上の ZnO 系薄膜の場合には、Zn 極性  $c$  軸配向と酸素極性  $c$  軸配向の場合には、薄膜内部の電界強度の方向が、ちょうど  $c$  軸方向に沿って逆方向となる。つまり、内部分極の電界強度方向を知ることができれば、Zn 極性  $c$  軸配向と酸素極性  $c$  軸配向のどちらであるか知ることができる。電界方向を調べる方法に AR-XPS 法を用いる。電界強度は薄膜堆積方向である  $c$  軸方向に生じているので、薄膜中の異なる深さにおける電位差をみると電界強度方向を求めることができる。今、測定している束縛電子の結合エネルギーを  $E_{bin}$ 、X 線のエネルギーを  $h\nu$ 、真空における電子の運動エネルギーを  $E_{kin}$ 、内蔵電位、仕事関数を  $V_{built-in}$ 、 $\Phi$  とそれぞれを示すと、

$$E_{kin} = h\nu - E_{bin} + V_{built-in} + \Phi \quad (1)$$

と示される。これは、X 線光電子分光法では、エネルギー一定である入射特性 X 線の照射によって薄膜中の原子内殻準位から電子が放出される(光電子)。この電子の運動エネルギーは、X 線のエネルギーから内殻電子のエネルギーおよび測定点の原子のビルトイン・ポテンシャル(内蔵電位)となる。よって、図 4 に示すように、入射 X 線の角度を変化



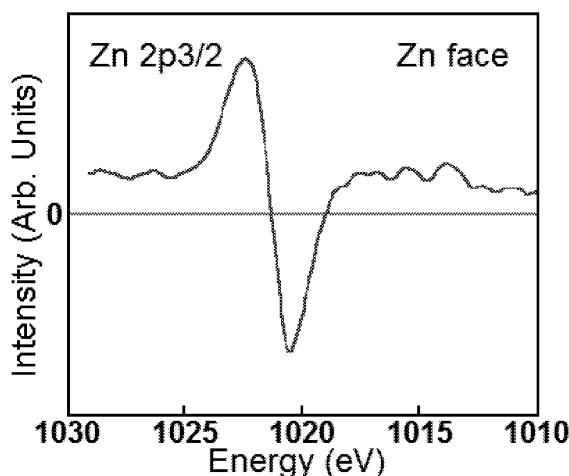
**Fig. 4** Relationship between x-ray irradiation,  $\theta$  and detection angles,  $\alpha$  in AR-XPS spectra.

させることより深さ方向の光電子放出点を変化させることにより、内蔵電位の違いを観測することができる。この場合の深さ方向の位置の違いは数 nm 程度と考えられるので、内蔵電位の差は非常に小さいものとなる。今回は、数値の大きさではなく定性的に電界強度方向を知ることができればよいので、X 線入射角度  $\theta$  が  $0^\circ$  のスペクトルと  $-40^\circ$  の場合の差分スペクトル(ディファレンシャル・スペクトル)で方向を検討する。

## 2. 2 Zn 極性 $c$ 軸配向の必要性について

まず、Zn 極性面と酸素極性面について説明したい。図 1 に示すように、ZnO 系結晶は、ウルツ鉱型結晶構造を有するため、 $c$  軸方向に自発分極が生じている。また、ヘテロエピタキシャル成長にみられるような残留ひずみを有する場合には、圧電分極を内在する。このような結晶では、電極として使用する場合、半導体との接触面について分極の影響による接触抵抗を考慮する必要がある。

また、結晶成長の点からも配向性制御が注目されている。真空を利用した MBE 法、スパッタ法および電子ビーム蒸着法では、抵抗率  $10^{-3}\Omega\text{cm}$  と非常に低い値が報告されている。この要因は、これらの薄膜が  $c$  軸配向性を有しているため、結晶粒界における抵抗が低減するためであると考える。単結晶薄膜成長では、 $c$ (酸素極性)軸に配向しやすいが、この場合、表面平坦性を維持することが難しい。これは、発光素子に対する電極応用の観点からみると、光取り出しが優位になることが想像できるが、集積化を行う際の配線の観点から問題が生じる。高い表面平坦性を実現するためにも Zn 極性  $c$  軸配向が必要となる。



**Fig.5** AR-XPS differrensal spectrum of ZnO films with a MgO primary layer fabricated on (0001)sapphire by molecular precursor method.

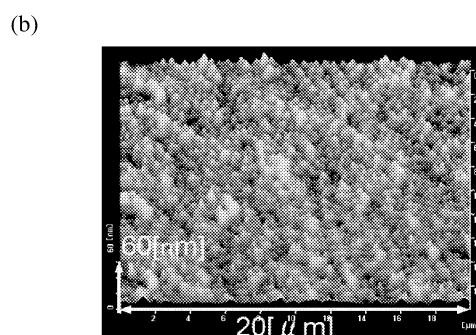
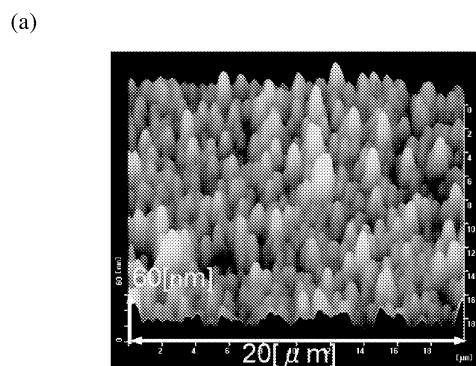
## 2. 3 Zn 極性 c 軸配向 MgZnO 薄膜の製作

Zn 極性 ZnO 薄膜の分子線エピタキシャル成長では、MgO バッファ層の導入により実現できる報告がある[6]。我々が電極として検討する MgZnO 薄膜は、配向性を有する多結晶薄膜であるが、MgO プライマリ層導入が Zn 極性配向性制御に使用できると考え、MgO プライマリ層を導入した ZnO 層の製作を行った。

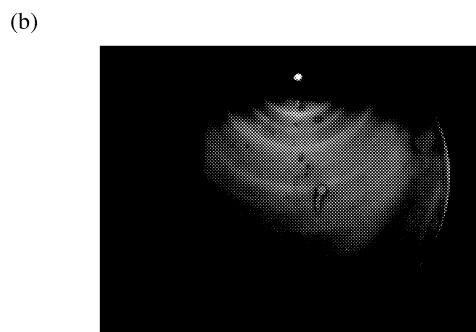
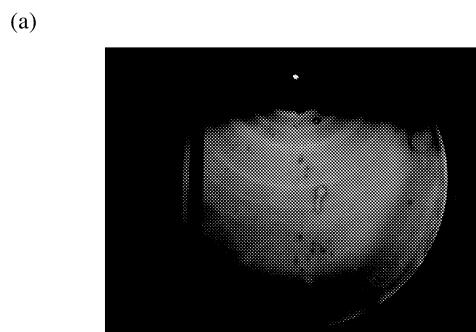
亜鉛原料には Zn-nta 錯体(nitrilotriacetic acid)を使用した。本錯体をアンモニア水用いて溶液化した[1]。マグネシウム材料には、Mg-edta 錯体(ethylenediamine-N, N, N', N'-tetraacetic acid)を使用し、アンモニア水用いて溶液化した。製作した溶液は、スピンドルコートにより基板上に塗布した。この際、回転数を途中で変更するダブルステップモードを用いた。1段目の条件は、3000 rpm, 3秒、2段目の条件は、4000 rpm, 5秒である。基板上に塗布により製作されたプリカーサー薄膜は、70°Cで10分間乾燥させ、その後、600°Cで90分焼成した。この際、酸素雰囲気中で焼成を行った。焼成は、開管炉で行い、その際のアルゴン流量は 100ccm であった。MgO プリカーサー薄膜製作後に ZnO 薄膜の製作をおこなった。

## 3. 極性制御結果

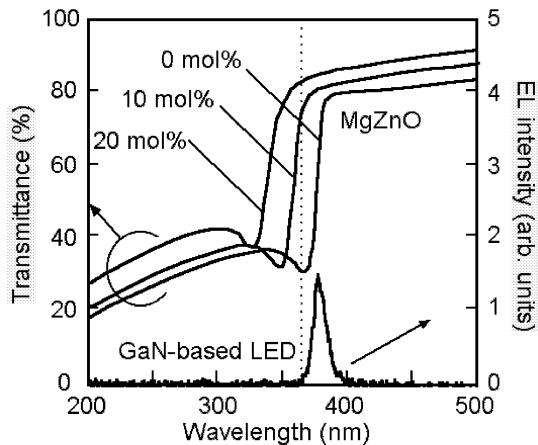
MgO プライマリ層を使用して製作した ZnO 薄膜の AR-XPS 測定結果を図 5 に示す。この結果は、図 3 に示した、酸素極性 ZnO 薄膜の結果と逆の内蔵電位変化を示しており、この薄膜が亜鉛極性を有することがわかった。真空装置を利用しない ZnO



**Fig.6** Surface AFM images of (a) ZnO film on (0001)sapphire and (b) ZnO film on (0001) with MgO primary layer.



**Fig.7** RHEED patterens of (a) ZnO film on (0001)sapphire and (b) ZnO film on (0001) with MgO primary layer.



**Fig. 8** Transparent spectra of MgZnO films as a function of Mg composition. The electroluminescent spectra of a GaN-based LED were also shown in the figure.

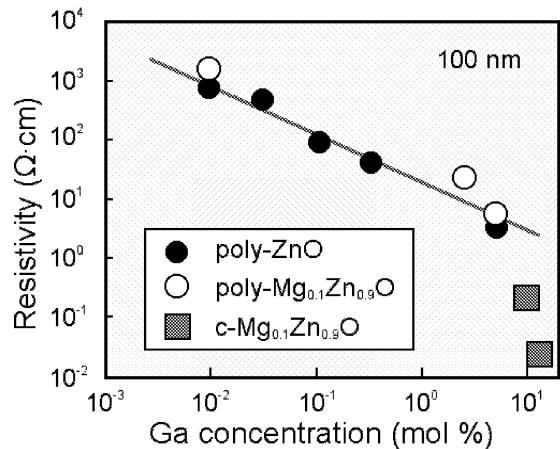
薄膜のc軸配向性制御を実現したのは世界初であると考えている。

Zn極性c軸配向ZnO薄膜の製作により、表面モロジーの改善がみられた。図6に原子間力顕微鏡による表面観測結果を示す。単結晶薄膜成長の際にみられる結果[6]と同様であり、c軸配向多結晶薄膜でも配向方向と表面平坦性に関連があることがわかった。単結晶成長と同様の結果が得られたことにより、分子プレカーサー法によって製作したc軸配向ZnO薄膜のa軸方向の周期性が気になるところである。そこで、反射高速電子線回折(RHEED)によるa軸方向の周期性の観測を行った。図7にその結果を示す。A軸方向に周期性がある場合には、ストリーパターン(線状)もしくは、スポットパターン(表面平坦性が悪い場合)が観測されるが、今回は、スポットパターンがリング上に配列する像を観測した。この像は、多結晶薄膜の場合に観測される典型的な形状をしており、酸素極性の場合もZn極性の場合もc軸方向には配向しているが、a軸方向には周期性がないことを示している。

#### 4. 透明電極としての評価

##### 4-1 透明性についての評価

図8に溶融石英ガラス基板上に製作したMgZnO薄膜の室温における透過スペクトルを示す。当時に製作したGaN系ショットキー型集積化発光素子の発光スペクトルも示す。XPS測定の結果よりMgプレカーサー溶液をZnOプレカーサー溶液に20mol%混入した場合、MgZnO薄膜の固相Mg組成が0.1となることがわかったが、透過率測定の結果と



**Fig. 9** Resistivity of polycrystalline ZnO and  $Mg_{0.1}Zn_{0.9}O$  films as a function of the amount of Ga precursor. The resistivity of c-axis-oriented  $Mg_{0.1}Zn_{0.9}O$  films is also shown in the figure. The thickness of layers was 100 nm.

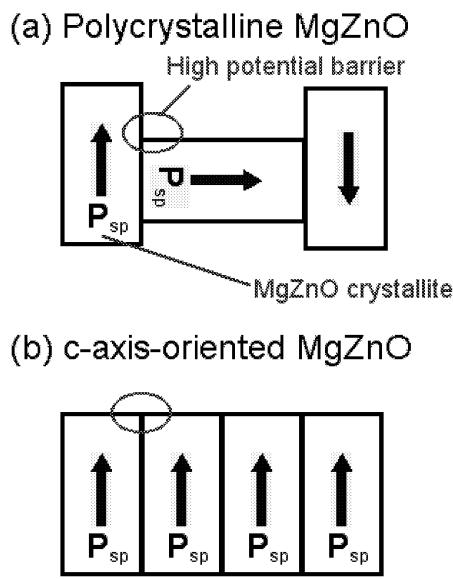
一致する。また、固相Mg組成が0.1の場合には370nm帯GaN系発光ダイオードの近紫外光に対して透明であり、透明性に関しては応用上の要求をクリアしている。

##### 4-2 抵抗率についての評価

Ga添加による抵抗率の変化を調べた。Ga添加の際には、Ga-edtaを原料に使用し、共通の溶媒であるアンモニア水を用いて溶液化した[1]。Ga添加量に伴う抵抗率変化を図9に示す。アンドープの場合には高い抵抗率を示すが、Ga添加量増加につれ、抵抗率低下がみられた。また、ZnO薄膜とMgをZnO薄膜製作時に添加したMgZnO薄膜の抵抗率には大きな違いが見られない。通常、結晶の場合、Mg添加により禁制帯幅が大きくなると、Gaドナー準位が深くなると同時に混晶効果により、抵抗率の増大が懸念されるが、そのような現象は観測されなかつた。これは、非常に興味深い現象である。電流パスが薄膜中全体に広がっていないことが予想される。

##### 4-3 配向性向上による抵抗率低減の考察

一般に、多結晶薄膜の場合、抵抗率の低下は、薄膜を構成する微結晶粒界におけるキャリア散乱が減少するためと説明されるが、本研究の場合にも当てはまるかどうかを確認するため、AFMによる表面状態の観測を行った。その結果を図10に示す。図10における(a)は、多結晶MgZnO薄膜の表面状態であり、(b)は、c軸配向MgZnO薄膜のものである。この結果、微結晶それぞれのc軸の向きは配向性制御により揃う傾向にあることがわかるが、結晶粒の大きさは、大きく変わらないことがわかった。この



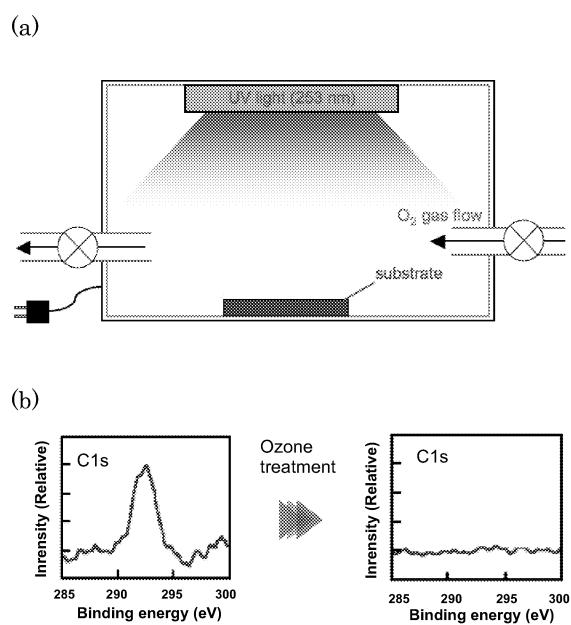
**Fig. 10** Schematic drawings of spontaneous polarization in polycrystalline and c-axis-oriented MgZnO films.

結果は、微結晶粒界におけるキャリア散乱の減少による抵抗率低減と考えることが難しいことを示している。この結果について考察したい。

六方晶 ZnO および MgZnO 結晶は、その結晶対称性から c 軸方向に自発分極およびピエゾ分極を有する。個の様子を図 5 に模式的に示す。微結晶が無ひずみの状態を仮定すると、自発分極の影響により微結晶内部には大きな電界を有している。微結晶表面は、表面準位が多数存在しており、粒界では、その準位にフェルミレベルがピニングされていると考えることができる。このような場合、粒界に生じるポテンシャル障壁の高さは、自発分極の向きおよび大きさに依存するため、多結晶薄膜の場合、障壁の低いところを選択して電流が流れることとなる。これは、抵抗率増大につながることとなる。一方、c 軸配向薄膜の場合、微結晶内部に生じる電界の方向と粒界の位置関係により、粒界に生じるポテンシャル障壁の高さが自発分極の影響を受けにくくなるので、障壁を通過するキャリアの抵抗が低下すると考える。以上の考察により、c 軸配向実現が薄膜の低抵抗化に効果があると結論に至った。

## 5. 多層化への試み

分子プレカーサー法(MPM)により 370nm 帯紫外光に対して透明な MgZnO 薄膜を製作したが、膜厚の制御については問題が残る。スピンドルコート時の回転数および溶液濃度によって若干の制御は可能であるが、スピンドルコート法による抜本的な膜厚制御を

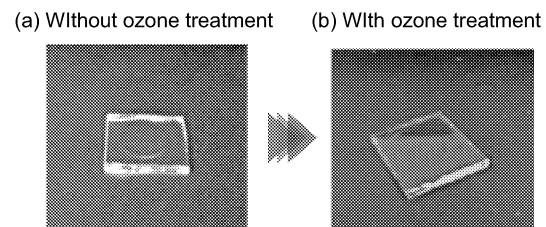


**Fig. 11** (a) Schematic diagram of ozone treatment. The XPS spectra around C1s binding energies w/o the treatment are shown in (b).

行うためには、多層化の実現が必要となる。しかしながら、アルコール系溶液などでは問題とならないが、形成した薄膜の表面は酸化物であり、溶液がアンモニア水を基本とするため、濡れ性が悪く、均一な多層化薄膜形成に問題がある。原因の一つに表面の炭素系化合物付着が考えられるため[7]、表面のオゾン処理を検討した。

オゾン処理は酸素雰囲気中で紫外線照射を行って生成したオゾン中に試料を露出することにより行った。暴露時間は 6 分間である。終了後、紫外線ランプを消し、窒素ガスに置換した。

オゾン処理前後の試料表面の XPS スペクトルを図 11(b)に示す。オゾン処理により酸化物表面の炭素系付着物が除去されていることがわかる。今回、プレカーサー溶液は水溶液であるので、表面の濡れ性は表面が疎水性を有すると悪化する。その原因として炭素系化合物の付着が考えられる。オゾン処理



**Fig. 12** Photographs of MgZnO films on sapphire substrates w/o the ozone treatment.

により表面の除去が実現され、結果として表面濡れ性の改善が可能となった。この様子を図 12 の写真に示す。

オゾン処理による表面濡れ性の改善が実現できたことから MgZnO 薄膜の多層化を行うことに成功した。本方法により 100nm の膜厚により GaN 系発光素子への応用を検討した[7]。素子構造を図 13(a) に示す。本 LED 構造はショットキ一型発光ダイオードの構造であり、酸化アルミニウムを用いた金属・酸化物・半導体構造(MOS 構造)を有する。本素子について従来の金電極を用いた場合と MgZnO 透明電極を用いた場合の電流・電圧特性を図 13(b) に示す。どちらの場合についても整流特性が得られ、ダイオードの製作に成功している。順方向特性の傾きの違いは、オン抵抗の大きさの違いを示しており、透明電極のさらなる低抵抗化が必要であると考えられる。また、逆方向特性に着目すると、従来の場合と比較して若干リーク電流が大きいことがわかる。これは、透明電極製作時に水溶液を用いていることが原因と考えているが詳細は不明である。下地の酸化層についてもオゾン処理が必要であるかもしれない。

## 6. まとめ

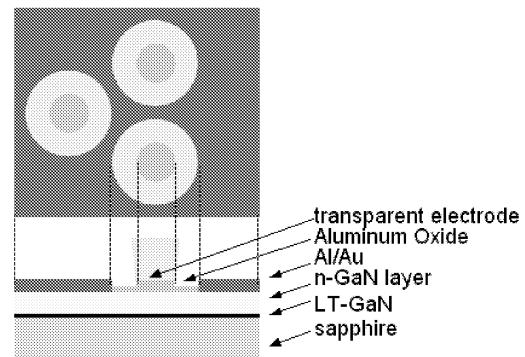
分子プレカーサー法(MPM)により 370nm 帯紫外光に対して透明な MgZnO 薄膜を製作した。この結果、焼成条件を変更することにより c 軸配向薄膜が実現できることを示した。また、Ga 添加により薄膜の抵抗率を変化できるが、c 軸配向した薄膜の方が低抵抗化できることがわかった。また、分子プレカーサー法(MPM)により c 軸配向 ZnO 薄膜の配向性制御を試みた。この結果、プライマリー層に MgO 層を導入することにより Zn 極性 c 軸配向薄膜が実現できることを示した。また、RHEED 測定の結果より、これらの薄膜は c 軸配向しているが、a 軸方向については、周期性がないことがわかった。

370nm 帯紫外光に対して透明な Mg 組成 10% である Ga 添加 MgZnO 薄膜はを GaN 系ショットキ一型発光素子の透明電極に応用した。従来の金電極を用いて製作した GaN 系ショットキ一型発光素子と電気特性について比較検討した。この結果、今回開発した MgZnO 近紫外透明電極を搭載した整流特性が得られ、ダイオードの製作に成功した。

## 謝辞

本研究は、電気・電子工学専攻修士学生 小田拓人氏、安野泰平氏、坂井直之氏、化学応用学専攻修士学生 鈴木達也氏の協力のもと行われた。永井裕己、望月千尋、原 広樹 各氏、東京高専 尾沼猛儀 講師および山口智宏准教授の協力にも感謝する。

(a) device structure



(b) I-V characteristics

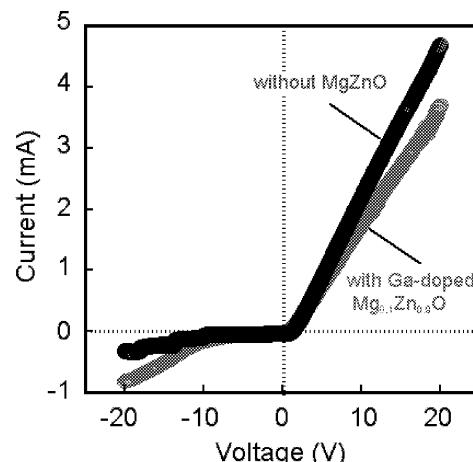


Fig. 13 (a) Device structure of GaN-based LED with Ga-doped MgZnO films. Its I-V characteristics were also shown in (b).

## 参考文献

- [1] Y. Mashiyma, K. Yoshioka, S. Komiyama, H. Nomura, S. Adachi, M. Sato and T. Honda, Phys. Stat. Sol. C **6**, 596 (2009).
- [2] D. C. Look, Sci. Eng. B **80**, 383 (2001).
- [3] T. Minami, MRS Bull. **25**, 38 (2000).
- [4] T. Minami, T. Miyata, Y. Ohtani and Y. Mochizuki, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, L409 (2006).
- [5] M. Sato, H. Hara, H. Kuritani, T. Nishide and Y. Sawada, J. Mater. Chem. **6**, 1767 (1996).
- [6] M. W. Cho, A. Setiawan, H. J. Ko, S. K. Hong, and T. Yao, Semicond. Sci. Technol. **20**, S13 (2005).
- [7] T. Honda, A. Inoue, M. Mori, T. Shirasawa, N. Mochida, K. Saotome, T. Sakaguchi, A. Ohtomo, M. Kawasaki, H. Koinuma, F. Koyama and K. Iga, J. Cryst. Growth **195**, 319 (1998).

- [8] T. Honda, N. Sakai, S. Komiya, M. Hayashi and T. Igaki, Phys, Status Solidi (C) 9, 778 (2012).

### 本研究に関する発表

#### [査読付き論文]

- [1] Y. Mashiyama, K. Yoshioka, S. Komiya, H. Nomura, S. Adachi, M. Sato and T. Honda, Phys. Stat. Sol. C 6, 596 (2009).
- [2] H. Nagai, S. Aoyama, H. Hara, C. Mochizuki, I. Takano, T. Honda and M. Sato, "Photoluminescence and photoreactivity affected by oxygen defects in crystal-oriented rutile thin film fabricated by molecular precursor method," J. Mater. Sci., vol. 45, pp. 5704-5710 (2010).
- [3] T. Honda, T. Oda, Y. Mashiyama, H. Hara and M. Sato, "Fabrication of c-axis oriented Ga-doped MgZnO-based UV transparent electrodes by molecular precursor method," Phys, Status Solidi (c), vol. 7, pp. 2471-2473 (2010).
- [4] T. Onuma', N. Sakai, T. Okuhata, A. A. Yamaguchi, and T. Honda, "Surface Recombination of hexagonal GaN crystals," Phys, Status Solidi (C), vol. 8, no.7-8, 2321-2323 (2011).
- [5] T. Honda, N. Sakai, S. Komiya, M. Hayashi and T. Igaki, "Reduction of reverse-bias leakage current in GaN-based Schottky-type light-emitting diodes by surface modification using the aluminum facepack technique," Phys, Status Solidi (C), vol. 9, no.3-4, 778-781 (2012).
- [国際会議発表]
- [6] T. Oda, H. Hara, C. Mochizuki, M. Sato and T. Honda, "Fabrication of c-axis oriented MgZnO transparent electrode by molecular precursor method," 8th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2010), Peking University, Beijing, China, P16.
- [7] T. Honda, "Fabrication of RGB pixels based on UV Schottky-type LEDs," The 9th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-9), Tokyo, Japan, IL-9.
- [8] T. Suzuki, H. Nagai, C. Mochizuki, H. Hara, I. Takano, T. Honda and M. Sato, "The Electrical and optical properties of p-type cuprous oxides transparent thin films by the molecular precursor method," The 9th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-9), Tokyo, Japan, P-18.
- [9] T. Oda, T. Kizu, Y. Sugiura, H. Hara, M. Sato and T. Honda, "Polarity control of MgZnO thin films by molecular precursor method," The 9th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-9), Tokyo, Japan, P-26.
- [10] T. Oda, T. Kidu, H. Hara, Y. Sugiura, M. Sato and T. Honda, "Fabrication of c-axis oriented MgZnO transparent electrodes by molecular precursor method," The 38th Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-38), San Diego, California, USA, We 1200.
- [11] N. Sakai, T. Onuma, A. A. Yamaguchi and T. Honda, "Surface recombination in polar and nonpolar GaN surfaces," 5th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS 2011), Toba, Mie, Japan, We-P35.
- [12] Y. Sugiura, T. Oda, S. Obata, Y. Yoshihara, T. Onuma and T. Honda, "ZnO growth for transparent electrodes by compound-source MBE," 5th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS 2011), Toba, Mie, Japan, We-P54.
- [13] T. Honda, N. Sakai, S. Komiya, M. Hayashi and T. Igaki, "Reduction of reverse-bias leakage current in GaN-based Schottky-type light-emitting diodes by a surface modification," 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS 2011), SECC, Glasgow, Scotland, UK, PF2.13.
- [14] T. Onuma, N. Sakai, T. Igaki, T. Yamaguchi, A. A. Yamaguchi and T. Honda, "Comparative Study of Surface recombination in hexagonal GaN and ZnO surfaces," The 28th North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2011) (NAMBE 2011), San Diego, California, USA, Mo1130.
- [15] T. Honda, "XPS spectra of c-face GaN and ZnO crystals," The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-10), BUCT, Beijing, China, O1.
- [16] R. Amiya, Y. Sugiura, T. Yamaguchi and T. Honda, "X-ray diffraction pattern of ZnO layer grown by compound source MBE," The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-10), BUCT, Beijing, China, A2.
- [17] T. Oda, H. Hara, Y. Sugiura, T. Yasuno, T. Yamaguchi, M. Sato, and T. Honda, "Ozone treatment of the substrates for the ZnO deposition by molecular precursor method," The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-10), BUCT, Beijing, China, A3.
- [18] Y. Sugiura, T. Oda, T. Onuma, T. Yamaguchi, and T. Honda, "In-plane epitaxial relationship of (0001) sapphire grown by compound-source MBE," Materials Research Society 2011 Fall Meeting (MRS 2011F), Boston, MA, USA, M13.16.
- [国内発表]
- [19] T. Oda, T. Kizu, H. Hara, Y. Sugiyama, M. Sato and T. Honda, "Fabrication of c-axis oriented MgZnO films by molecular precursor method," 29th Electronic Materials Symposium (EMS-29), Laforet Shuzenji, Izu, Shizuoka, Japan, We2-6.
- [20] 鈴木達也, 永井裕己, 望月千尋, 原 広樹,

- 鷹野一朗, 本田 徹, 佐藤光史, “分子プレカーサー法による p 型酸化銅(I)透明薄膜の形成,” 第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎大学文京キャンパス, 長崎, 14p-NE-1.
- [21] 小田拓人, 木津拓人, 原 広樹, 杉浦洋平, 佐藤光史, 本田 徹, “分子プレカーサー法による MgZnO 薄膜の極性制御,” 第 71 回応用物理学会学術講演会、長崎大学文京キャンパス, 長崎, 17a-NE-4.
- [22] N. Sakai, T. Igaki, T. Onuma, A. A. Yamaguchi, T. Yamaguchi, and T. Honda, “Recombination dynamics in polar and nonpolar GaN surfaces,” 30th Electronic Materials Symposium (EMS-30), Laforet Biwako, Shiga, Japan, We1-16.
- [23] T. Oda, T. Kizu, H. Hara, Y. Sugiura, M. Sato, and T. Honda, “Polarity control of MgZnO transparent electrodes by molecular precursor method,” 30th Electronic Materials Symposium (EMS-30), Laforet Biwako, Shiga, Japan, Fr2-7.
- [24] 坂井直之、井垣辰浩、尾沼猛儀、山口敦史、山口智広、本田徹, “極性および非極性 GaN 表面における表面再結合過程,” 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 山形大学, 1a-ZE-12.
- [25] 尾沼猛儀、坂井直之、井垣辰浩、山口智広、山口敦史、本田徹, “六方晶 GaN と ZnO における表面再結合の比較,” 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 山形大学, 1a-ZE-13.
- [26] 杉浦洋平、小田拓人、小畠聰、芳原義大、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, “化合物原料 MBE 法を用いた ZnO 薄膜の結晶成長とその評価,” 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 山形大学, 31a-N-12.
- [27] 東脇正高、井垣辰浩、山口智広、本田徹, “n-GaN 上への Al<sub>x</sub>O<sub>x</sub> 薄膜の in-situ RF-MBE 成長,” 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 16p-F12-17.
- [28] 坂井直之、尾沼猛儀、山口敦史、山口智広、本田徹, “Al および Al<sub>x</sub>O<sub>x</sub> 膜堆積が極性 GaN の PL 強度に与える影響,” 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 16a-DP1-10.
- [29] 尾沼猛儀、大林亨、山口智広、山口敦史、本田徹, “極性・非極性バルク ZnO 表面における CL スペクトルの比較,” 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 15p-GP2-8.
- [30] 安野泰平, 小田拓人, 佐藤光史, 原 広樹, 本田 徹, “分子プレカーサー法による ZnO 系透明電極製作におけるオゾン洗浄の効果,” 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 15p-GP2-25.



## 高密度情報ストレージシステムにおける 多端子情報理論に基づく多次元信号処理方式の研究

工学院大学 工学部情報通信工学科 斎藤秀俊

横浜国立大学大学院 工学研究院 河野隆二

### A Study of Multidimensional Signal Processing Schemes for High Areal Density Recording based on Multiterminal Information Theory

Hidetoshi Saito, Department of Information and Communications Engineering, Kogakuin University

Ryuji Kohno, Graduate School of Engineering, Yokohama National University

**ABSTRACT :** Recently, the areal density of magnetic data storage on a hard disk drives exceeds an astonishing  $620 \text{ Gb/in}^2$  with the growth rate of about 30% per year by using the perpendicular magnetic recording technology. Unless dramatic innovations are made in the current recording process, this growing pace will soon face a fundamental physical limit, namely, the thermal stability of the polarizations of the magnetized grains within the magnetic medium. In recent years, substantial effort has been spent on three alternative recording technologies: heat-assisted magnetic recording (HAMR), bit patterned media recording (BPMR) and microwave-assisted magnetic recording (MAMR). From these leading alternative technologies, HAMR will make a step toward practical use of future recording system because it attains the areal density up to  $1 \text{ Tb/in}^2$ . However, it is pointed out that these leading alternative technologies all require significant changes in the hardware comprising the drive, particularly in the magnetic medium. Recently, a signal processing technique called two-dimensional magnetic recording (TDMR) has been studied for the challenges of fabricating novel media for HAMR, BPMR or MAMR, etc. It is known that TDMR has the advantage of exploiting conventional media and transfers the technological challenges to more innovative writing, reading, signal processing and coding. In this research, we propose several effective TDMR systems for the multiple-track recording using bit patterned media.

## 1 Introduction

Recently, it considers that a recording system using bit-patterned media (BPM) is one of the future considerable technologies [1]-[3]. Bit-patterned magnetic recording (BPMR) is expected to attain areal density of up to about 4 terabits per square inch ( $\text{Tb/in}^2$ ). However, high recording density is achieved by reducing the intertrack distance, which causes side reading and the associated intertrack interference (ITI) becomes a major impairment for the system using BPM. It is known that one of the effective signal processing approaches for BPMR is the two-dimensional (2D) equalization considered in [4], where the readback signals from multiple tracks are filtered by a 2D equalizer and the channel is equalized to an adaptive 1D GPR target based on the criterion for the minimum mean-squared error. It is recognized that the 2D equalizer employed in [4] is equivalent to a 1D equalizer which processes the readback signal from a desired track. From the result of [4], the 2D equalization achieves significant gains over single-track equalization and is a very useful technique to mitigate the impact of ITI. Another approach is the 2D equalization employed with the reliable estimate value of data recorded on the adjacent sidetracks [5]-[9]. During detection on a desired track, it is necessary to estimate the data on the sidetracks to fully benefit from the equalization with the 2D generalized partial response (GPR) target in this multi-track detection. This multi-track detection technique gives the more reliable data estimation method compared to the first detection technique shown by [5],[8],[10]. As discussed previously, most of the conventional 2D equalization techniques provide the reliable sequence detection for the one desired track only. But, these 2D equalization techniques have the same efficiency as 1D equalization techniques in the aspect of the effective transmission rate. Then, to improve the transmission rate, it makes a study on the other new multi-track detection technique in this research.

In general, it is the appearance feature that the BPM recording channel alternates uniformly distributed non-magnetic and magnetic regions. Therefore, statistical characteristics of noise occurred in the BPM recording channel will differ from those of noise in the continuous magnetic thin film media recording channel except

fundamental problems in manufacturing tolerances and variations related to processes of BPM formation. As a consequence, the noise power of the BPM increases or decreases with time in frequency as compared to continuous media because the BPM have two separated areas of magnetic and nonmagnetic materials. It is naturally assumed that the parameter for variance of noise is variable for each recoded bit patterns. From the above observation, the new signal estimation technique based on the combined 2D GPR equalization and nonstationary time series analysis by using an autoregressive conditionally heteroskedastic (ARCH) or generalized autoregressive conditional heteroskedastic (GARCH) process for the BPM recording channel is proposed in this research.

On the other hand, a modulation code with constraints for two-dimensional magnetic recording (TDMR) is needed to reduce the effect of minimum distance error events, which is the major parameter in the determining the performance of the detector. Furthermore, as the recording density increases, the modulated sequence is then pre-coded before being recorded on the disk in order to overcome the effects of ITI and intersymbolic interference (ISI) during the read back process. In this research, we construct a new 2D extended recording code based on the maximum transition run code for 1D recording system. As a result, proposed 2D MTR coded generalized partial response (GPR) equalization is one of effective signal processing techniques for BPMR.

## 2 Bit-Patterned Media Recording Channel Model with Analytical 2D Island Pulse Response

For the 2D island response for a BPM recording channel, we use an analytical 2D pulse which fits to the 2D numerical pulse obtained in [7]. It is defined that the Gaussian pulse response in the along-track or cross-track direction to model the isolated island response as it provides a good match with the numerical results obtained in [10]. For an example, this Gaussian pulse response in the along-track is given by

$$G_x(x) = \exp \left\{ -c_x \left( \frac{x}{T_{50x}} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

Here,  $T_{50x}$  is the time interval for the transition response to rise from negative 50% amplitude to positive 50% amplitude, in the along-track direction. Furthermore,  $c_x$  is a parameter depending on various head/media parameters, such as the recording density, the sizes of the island and the giant magneto resistive (GMR) read-head, the flying height, the soft-underlayer (SUL) spacing, etc. For the head/media parameters, the optimum value of  $c_x$  can be obtained by minimizing the mean square error (MSE) between and the numerical pulse obtained from [6], [10]. For the case including media noise, the parameters of island position jitter and size fluctuations follow the truncated normal distributions with zero means. In this model, the island position jitter  $x + \Delta x$  adding randomness  $\Delta x$  to a position  $x$ . On the other hand, the island size fluctuation has influence on both the amplitude and width of the island pulse response and it can be expressed as the linear function  $m_1 \Lambda_x + b_x$  with the island size fluctuation  $\Lambda_x$ , the gradient  $m_1$  and y-intercept  $c_x$  of this linear function.

$$G_x(x + \Delta x, \Lambda x) = \exp \left\{ -c_x \left( \frac{x + \Delta x}{T_{50x}} \right)^2 \right\} (m_1 \Lambda x + b_x), \quad (2)$$

Similar modeling can be applied to the cross-track pulse. Furthermore, combining the analytical pulse responses in both along-track and cross-track directions, we obtain a 2D island pulse response given by

$$\begin{aligned} & G(x + \Delta x, z + \Delta z, \Lambda x, \Lambda z) \\ &= G_x(x + \Delta x, \Lambda x) G_z(z + \Delta z, \Lambda z) \\ &= A_{xz} \cdot \exp \left\{ -c_x \left( \frac{x + \Delta x}{T_{50x}} \right)^2 \right\} (\Lambda x + d_x) \\ & \times \exp \left\{ -c_z \left( \frac{z + \Delta z}{T_{50z}} \right)^2 \right\} (\Lambda z + d_z) \end{aligned} \quad (3)$$

with  $A_{xz} = m_1 m_2$ ,  $d_x = b_x/m_1$  and  $d_z = b_z/m_2$ . Here, the island size fluctuation for the cross-track direction  $z$  can be expressed as the linear function  $m_2 \Lambda_z + b_z$  with the gradient  $m_2$  and  $y$ -intercept  $b_z$ . Furthermore,  $\Delta z$  and  $\Lambda z$  are the island position jitter and island size fluctuation, respectively.  $T_{50z}$  is the time interval for the transition response to rise from negative 50% amplitude to positive 50% amplitude in the cross-track direction. Similar to  $c_x$  for the along-track pulse,  $c_z$  is a parameter for the cross-track pulse depending on the system parameters. This island pulse response is

obtained from [7] for a recording density of 2Tb/in<sup>2</sup>, flying height of 10 nm, and with island geometries as shown in Fig. 1. In this research, it is assumed that a GMR read-head with an element thickness of 3 nm, element width of 18 nm, both along-track and cross-track sensor to shield gap of 11 nm. The media to SUL spacing is assumed to be 3 nm.

### 3 Two-Dimensional Coding for Data Storage Systems

#### 3.1 Discrete Sources with Constraints

A discrete information source is a device or process that outputs symbols at discrete instances from some finite alphabet. We usually assume that a large number of such symbols will have to be processed, and that they may be produced at regular instances in time or read from various positions in the plane in some fashion. Typical data sources have complex structure, or we say that they exhibit memory. The source memory is described by distinguishing several states that summarize the influence of the past. We consider only the cases in which a finite number of states is sufficient. Finite-state sources are used to describe sequences that satisfy various constraints. Some typical properties include run-length constraints. The 1-D  $(d,k)$ -run-length-limited (RLL) constraint consists of all binary sequences in which the run-lengths of 0s are between  $d$  and  $k$ , inclusive, except the first and the last runs, which may be shorter than  $d$ . Binary RLL  $(d,k)$  codes are used in some storage systems. In this research, multi-track storage systems using a number of parallel tracks can provide increased capacity on HDD or DVD-like disks. Thus, it is expected that recording in 2D fields, which are defined as 2D arrays of finite fixed (vertical) height and arbitrary (horizontal) width, achieves greater density than that of 1D track.

#### 3.2 Two-Dimensional Coding with Maximum Transition Run Constraint

To improve the performance of the generalized partial response maximum likelihood (PRML) system, it needs to reveal that errors arise mostly due to the ML detector's inability to distinguish the minimum distance transition patterns. In the 1D recording system, the advantage of MTR coding is to eliminate all se-

quences of with three or more consecutive transitions, but allow the dabit pattern in the recorded sequence. The advantage of MTR constraint is to increase the minimum Euclidean distance in the ML sequence detector by eliminating the dominant error events. Therefore, MTR codes are considered as distance-enhancing codes. An MTR code is identified with two parameters: the minimum number consecutive transitions,  $t$ , and the maximum number of consecutive zeros,  $k$ . We show and MTR code with such properties by MTR( $t, k$ ) in NRZI format, where “one” corresponds to a reversal and “zero” to a non-reversal of the polarization in binary differential signaling scheme, respectively.

The conventional 1D MTR constraint is generalized to 2D constraints by requiring that it is satisfied for any row and column of the 2D array. In the concrete code construction, conditions are expressed as forbidden configurations having three or more neighboring 1s and admissible configurations having two consecutive 1s. Our proposed code construction method is as follows.

- (1) A codeword is represented as the 2D array  $\mathbf{b} = \{b_{i,k'}\}$ , where  $i = mt, \dots, mt + m - 1$ ,  $k' = m\ell, \dots, m\ell + m - 1$  for  $\ell, t \geq 0$  and  $m \geq 3$ .
- (2) At first, we chooses  $\mathbf{b}^{(1)}$  that satisfies  $b_{mt,m\ell+n_0} = b_{mt+1,m\ell+n_1} = \dots = b_{mt+m-1,m\ell+n_{m-1}} = 1$ , where  $n_0, \dots, n_{m-1}$  are differ from each other.
- (3) We choose the other  $\mathbf{b}^{(2)}$  that satisfies  $b_{mt,m\ell+n'_0} = b_{mt+1,m\ell+n'_1} = \dots = b_{mt+m-1,m\ell+n'_{m-1}} = 1$ , where  $n'_0, \dots, n'_{m-1}$  are differ from each other and  $n'_j \neq n_j$ ,  $j = 0, \dots, m - 1$ , respectively.
- (4) In both of 2D arrays  $\mathbf{b}^{(1)}$  and  $\mathbf{b}^{(2)}$ , the symbol 0 is placed in the same element in the array if the symbol 1 isn't placed in either  $\mathbf{b}^{(1)}$  or  $\mathbf{b}^{(2)}$ .
- (5) In each 2D array, there remain  $2^m$  empty elements. These empty elements are filled in either symbol 0 or 1.
- (6) From the above operations, we get  $2^{m+1}$  codewords for an MTR( $2, 2(m - 1)$ ) code.

The code rate of the proposed MTR code is  $(m + 1)/m^2$ . If it is able to use readback signals detected from  $m$  tracks in parallel, the efficiency of coding is  $(m + 1)/m$ .

## 4 Block Diagram for the 2D Partial Response Equalization System

Fig. 1 shows the block diagram of the coded GPR system with the 2D equalization and ML detector. In this read/write system, a raw data sequence  $\{a_{i,k}\}$  of the  $i$ -th track with bit rate  $f_b$  is inputted into the modulation encoder.

- (i) The 1D Modulation encoder gives run-length limited  $(0, k)$  constraints (RLL  $(0, k)$ ) for output sequences. The output sequence RLL  $(0, k)$  is represented by NRZ format. The run-length limited sequence of the  $i$ -th track from this modulation encoder is transformed into the codeword sequence  $\{b_{i,k'}\}$  by using the precoder which has polynomial  $(1 + D)^{-1} \bmod 2$  where  $D$  corresponds to an unit shift in the along-track. In this encoding process, the sequence  $\{b_{i,k'}\}$  satisfies the modulation constraints with RLL  $(1, k+1)$  for each track.
- (ii) The 2D Modulation encoder gives MTR constraints (MTR  $(t, k)$ ) for output sequences. The data sequence is transformed into the 2D MTR codeword sequence  $\{b_{i,k'}\}$  by using the precoder which has polynomial  $(1 + D)^{-1} \bmod 2$ . The 2D MTR codeword sequence is represented by NRZI format. In this encoding process, the sequence  $\{b_{i,k'}\}$  satisfies the modulation constraints with MTR  $(t, k)$  for each along-track or cross-track direction.

In Fig. 1, the modulation encoder is RLL  $(0, k)$  encoder as an example. The sequence  $\{b_{i,k'}\}$  with additional symbols which terminate a trellis diagram of the targeted GPR system is transformed into the sequence  $\{c_{i,k'}\}$  at the precoder output. The precoder output sequence  $\{c_{i,k'}\}$  is NRZ-recorded on the double layered BPM with a soft under layer. Here, the readback signal with media noise can be written as

$$\begin{aligned} r(x, z) = & \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{i,k} G(x - kT_x + \tilde{\Delta}x_{i,k} T_x, \\ & z - iT_z + \tilde{\Delta}z_{i,k} T_z, \tilde{\Delta}x_{i,k} L_x, \tilde{\Delta}z_{i,k} L_z) Q_L(kT_x, iT_z) \\ & + n(x, z), \end{aligned} \quad (4)$$

where the  $a_{i,k} \in \pm 1$  represents the  $k$ -th data bit of the  $i$ -th track and  $Q_L(kT_x, iT_z)$  is the impulse response of a 2D low-pass filter (LPF). The notations of  $T_x$ ,

$T_z$ ,  $L_x$  and  $L_z$  are island periods and island lengths in the along-track and cross-track directions, respectively. Here,  $\tilde{\Delta}x$ ,  $\tilde{\Delta}z$ ,  $\tilde{\Lambda}x$  and  $\tilde{\Lambda}z$ , and are the normalized along-track and cross-track island position jitters, respectively, and the normalized along-track and cross-track island size fluctuations, respectively. The normalization factors are  $T_x$ ,  $T_z$   $L_x$  and  $L_z$ , respectively. Furthermore,  $\tilde{\Delta}x$ ,  $\tilde{\Delta}z$ ,  $\tilde{\Lambda}x$  and  $\tilde{\Lambda}z$  are all truncated to the range of  $[\pm 1/2]$ , with variances of  $\tilde{\sigma}_{\Delta x}^2$ ,  $\tilde{\sigma}_{\Delta z}^2$   $\tilde{\sigma}_{\Lambda x}^2$  and  $\tilde{\sigma}_{\Lambda z}^2$ , respectively. In addition,  $n(x, z)$  represents additive white Gaussian noise (AWGN) with zero mean and variance  $\sigma_n^2$ . Sampling  $r(x, z)$  and  $n(x, z)$  at integer multiples of  $T_x$  and  $T_z$ , the 2D discrete-time read-back signal and AWGN are given by  $r_{i,k}$  and  $n_{i,k}$ . The reproducing waveform corresponding to the recording sequence read back by the reading head is inputted into the equalizer which consists of a 2D low-pass filter with the cut-off frequencies  $x_h$  and  $z_h$  normalized by bit rate  $f_b = 1/T_x = 1/T_z$  and the 2D transversal filter with  $(2N_x + 1)(2N_z + 1)$  taps. Using a 2D equalizer, a 2D target of length  $N_{gx} \times (2N_{gz} + 1)$ , the equalizer output  $y_{i,k'}$  and the PR target output  $d_{i,k'}$  are given by

$$\begin{aligned} y_{i,k'} &= \sum_{m=-N_z}^{N_z} \sum_{n=-N_x}^{N_x} f_{m,n} r_{i-m,k'-n} = \mathbf{f}^T \mathbf{r}_{i,k'} \\ d_{i,k'} &= \sum_{m=-N_{gz}}^{N_{gz}} \sum_{n=0}^{N_g-1} g_{mn} a_{i-m,k'-n} = \mathbf{g}^T \mathbf{a}_{i,k'} \end{aligned} \quad (5)$$

The MSE can be obtained as follows.

$$\begin{aligned} E \{(e(k))^2\} &= E \{(\mathbf{f}^T \mathbf{r}_{i,k} - \mathbf{g}^T \mathbf{a}_{i,k})(\mathbf{f}^T \mathbf{r}_{i,k} - \mathbf{g}^T \mathbf{a}_{i,k})^T\} \\ &= \mathbf{f}^T \mathbf{R} \mathbf{f} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{T} \mathbf{g} + \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{g}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E \left\{ \mathbf{r}_{i,k'} \mathbf{r}_{i,k'}^T \right\}, \\ \mathbf{T} &= E \left\{ \mathbf{r}_{i,k'} \mathbf{a}_{i,k'}^T \right\}, \\ \mathbf{A} &= E \left\{ \mathbf{a}_{i,k'} \mathbf{a}_{i,k'}^T \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

where the notation  $E$  denotes the expectation,  $\mathbf{R}$  is the auto-correlation matrix of the channel output data,  $\mathbf{T}$  is the cross-correlation of the input data and the channel output data and  $\mathbf{A}$  is the auto-correlation of the input data. When minimizing the MSE in (6), it can minimize the following Lagrange functional to achieve constrained minimization of the MSE.

$$J = \mathbf{f}^T \mathbf{R} \mathbf{f} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{T} \mathbf{g} + \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{E}^T \mathbf{g} - \mathbf{c}), \quad (8)$$

where  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{c}$  are any given matrices which are satisfied with the constraint for the GPR target in  $\mathbf{g}$ .  $\boldsymbol{\lambda}$  is a vector containing the Lagrange multipliers. By setting the gradients of  $J$  with respect to  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{g}$ ,  $\boldsymbol{\lambda}$  to zero vectors. The optimized target and equalizer coefficient vectors are defined as follows [5].

$$\boldsymbol{\lambda} = \left( \mathbf{E}^T \left( \mathbf{A} - \mathbf{T}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{E} \right)^{-1} \mathbf{E} \right)^{-1} \mathbf{c}. \quad (9)$$

$$\mathbf{g} = \left( \mathbf{A} - \mathbf{T}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T} \right)^{-1} \mathbf{E} \boldsymbol{\lambda}. \quad (10)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{g}. \quad (11)$$

In our proposed method, it shows a GPR target of size  $5 \times 3$  which represents the length of inter-symbol interference (ISI) and ITI are 3, respectively. The constraint for the GPR target in  $\mathbf{g}$  is given as

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}^{(-2)} \\ \mathbf{g}^{(-1)} \\ \mathbf{g}^{(0)} \\ \mathbf{g}^{(1)} \\ \mathbf{g}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ g_{-1,-1} & g_{-1,0} & g_{-1,1} \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{g} = [\mathbf{g}^{(-2)} \mathbf{g}^{(-1)} \mathbf{g}^{(0)} \mathbf{g}^{(1)} \mathbf{g}^{(2)}]^T. \quad (13)$$

The constraint of the GPR target shown in (12) is the form of a matrix and (13) is a vector. The above constraint can be expressed as follows.

$$\mathbf{E}^T \mathbf{g} = \mathbf{c}, \quad (14)$$

where

$$\mathbf{c} = \left[ \zeta_0 \zeta_1 \zeta_2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 \right]^T, \quad (15)$$

and

$$\mathbf{E}^T = \begin{bmatrix} 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 \\ 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 \\ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 \\ 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 \\ 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 \\ 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 \\ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 \\ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 \\ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 \\ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

In this read/write system, the noise at the reading point consists of AWGN with two-sided power spectral density equal to  $N_0/2$  and media noise which is

subject to island position jitter and size fluctuations. The equalization is performed so that the overall characteristic between the input of recording head and the output of the equalizer is equal to the aimed 2D GPR targets given by (12). The signal-to-noise ratio (SNR) at the reading point is defined as

$$a = \frac{A_p}{\sigma_n}. \quad (17)$$

In decoding process, the equalizer output sequence  $\{d_{i,k'}\}$  is decoded by the ML detector and the estimated sequence  $\{\hat{b}_{i,k'}\}$  is given as the detector outputs. The output data sequence  $\{\hat{a}_{i,k}\}$  is obtained after demodulation (RLL decoding). The BER of this read/write system is evaluated by computer simulation.

## 5 Maximum Likelihood Detector with Generalized Autoregressive Conditionally Heteroskedastic Models

The AR channel model is known to be generate the good approximate data of the channel with inter-symbol interference (ISI) and data-dependent Gauss-Markov noise in the original ideas. The idea of AR channel model can be applied to the ML detector with a linear predictor based on an AR process. The AR model is defined as follows. Let  $\{a_k\}$  be the channel input sequence of binary symbols, then for  $k-I \leq k$  the column vector collecting samples  $a_{k-I}, a_{k-I+1}, \dots, a_k$  is denoted by

$$\alpha = [a_{k-I} \ a_{k-I+1} \ \dots \ a_k]^T, \quad (18)$$

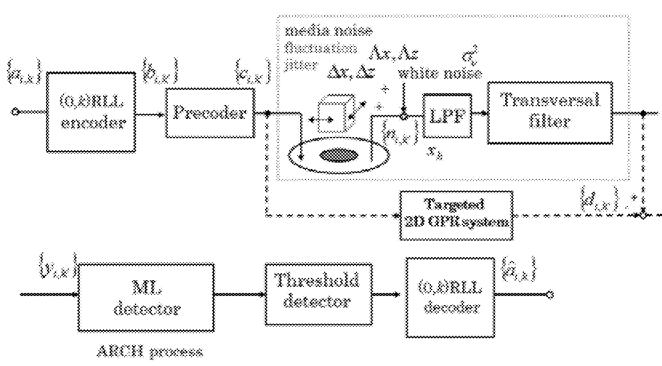


Fig. 1: The block diagram of the generalized partial response system for bit-patterned media recording channel.

where the notation  $\alpha$  is a vector which denotes a binary column vector of size  $I + 1$  for  $I \geq 0$  and  $k \geq 0$ , where  $I$  is the data memory length. The sampled channel output is

$$z_k = y_k(\alpha) + n_k, \quad (19)$$

where  $y_k(\alpha)$  is the noiseless channel output which depends on the  $I + 1$  input symbols  $\alpha$  and  $\{n_k\}$  is the additive noise sequence. To include channel non-linearities in this noise sequence,  $y_k(\alpha)$  is constructed as a look-up-table beforehand which is corresponding to one of  $2^{I+1}$  patterns of  $\alpha$ . The noise term  $n_k$  is the output of a signal-dependent autoregressive filter whose input is white Gaussian noise sequence  $\{n_k^e\} \sim \mathcal{WN}(0,1)$ .

$$\begin{aligned} n_k &= \sigma(\alpha)n_k^e + \sum_{i=1}^L \phi_i(\alpha)n_{k-i} \\ &= e_k + \hat{n}_k, \\ e_k &= \sigma(\alpha)n_k^e, \\ \hat{n}_k &= \sum_{i=1}^L \phi_i(\alpha)n_{k-i}, \\ \frac{1}{N} \sum_{k=L}^{N+L-1} (n_k^e)^2 &= 1, \end{aligned} \quad (20)$$

where  $\sigma(\alpha)$  is the standard deviation of residual between  $n_k$  and  $\hat{n}_k$ ,  $\phi_1(\alpha), \phi_2(\alpha), \dots, \phi_L(\alpha)$  are the tap-weights which are the coefficients of the filter at time  $k$ , and  $N$  is the number of all input symbols  $a_k$  ( $N \gg L$ ). (20) gives variance of  $\{e_k\}$  as

$$\begin{aligned} E\{e_k^2\} &= E\left\{ \left[ n_k - \sum_{i=1}^L \phi_i(\alpha)n_{k-i} \right] n_k \right\} \\ &+ \sum_{j=1}^L \phi_j(\alpha)E\left\{ \left[ n_k - \sum_{i=1}^L \phi_i(\alpha)n_{k-i} \right] n_{k-j} \right\} \\ &= \rho(0) - \sum_{i=1}^L \phi_i(\alpha)\rho(i) \end{aligned} \quad (21)$$

where  $\rho(\cdot)$  is autocorrelation function which is defined as

$$\begin{aligned} \rho(\tau) &= E\{n_{k+\tau}n_k\} \\ &\simeq \frac{1}{N} \sum_{k=L}^{N+L-1} n_{k-L+i}n_{k-L+j} \\ &= \rho(|i-j|) \quad \text{for } 0 \leq i \leq L, \\ &\quad 0 \leq j \leq L \text{ and } -\infty < \tau < \infty, \\ n_k &= 0 \quad \text{for } k < L \text{ or } k > N + L - 1. \end{aligned} \quad (22)$$

In (21),  $n_{k-j}$  depends on  $e_t$  for  $0 \leq t \leq k-j$  and there is no correlation between  $e_k$  and  $e_{k-\ell}$  ( $\ell \geq 1$ ) because  $\{e_k\}$  is white Gaussian noise sequence. Therefore, (21) is written as

$$\sigma(\boldsymbol{\alpha})^2 = \rho(0) - \sum_{i=1}^L \phi_i(\boldsymbol{\alpha}) \rho(i) \quad (23)$$

The transfer function can be obtained by taking Z-transform of both sides of (20) and written as

$$E(z) = N(z) - \sum_{i=1}^L \phi_i(\boldsymbol{\alpha}) z^i N(z), \quad (24)$$

where  $E(z)$ ,  $N(z)$  are Z-transforms of  $e_k, n_k$ , respectively. The transfer function  $H(z)$  is obtained as  $E(z)$  over  $N(z)$  and written in terms of all pole model as

$$H(z) = \frac{E(z)}{N(z)} = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^L \phi_i(\boldsymbol{\alpha}) z^i}. \quad (25)$$

From (25), it is able to determine stability criterion for AR( $L$ ) process whether the roots of the transfer function  $H(z)$  given by a denominator polynomial are on the inside of a unit circle. Therefore, the conventional AR channel model is assumed to be satisfy stability condition implicitly. From the observations of sampled channel output sequences  $\{z_k\}$ , it is possible to estimate the autocovariance function  $\gamma(\cdot)$  of the underlying process  $\{z_k\}$  in order to gain information concerning its dependence structure. To estimate  $\gamma(\cdot)$ , the sample autocovariance function is used. The sample autocovariance function of  $\{n_k\}$  is defined as

$$\begin{aligned} \gamma(\tau) &= E\{(z_k - \mu)(z_{k-\tau} - \mu)\} \\ &= E\{\hat{n}_k \hat{n}_{k-\tau}\}, \\ \gamma(\tau) &= \gamma(-\tau), \end{aligned} \quad (26)$$

where  $\mu$  is the sample mean and  $\hat{n}_k = z_k - \hat{y}_k(\boldsymbol{\alpha})$ . Then, the sample autocorrelation function is defined in terms of the sample autocovariance function as

$$\rho(\tau) = \frac{\gamma(\tau)}{\gamma(0)}, \quad (27)$$

where the autocovariance functions of the AR( $p$ ) pro-

cess are obtained as

$$\begin{aligned} \gamma(0) &= \sum_{i=1}^p \phi_i \gamma(i) + \sigma^2(\boldsymbol{\alpha}), \\ \gamma(\tau) &= \begin{cases} \sum_{i=0}^{|\tau|-1} \phi_{|\tau|-1-i} \gamma(\tau-1-i) \\ + \sum_{i=1}^{p-|\tau|} \phi_i \gamma(i), & 1 \leq |\tau| \leq p, \\ \sum_{i=0}^{|\tau|-1} \phi_{|\tau|-1-i} \gamma(\tau-1-i), & |\tau| > p \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

In general, the partial autocorrelation function  $\rho_{pa}(\tau)$  of  $\{n_k\}$  at lag  $\tau$  is defined as  $\rho_p(\tau) = \phi_{\tau,\tau}$ ,  $\tau \geq 1$ , where  $\phi_{\tau,\tau}$  is uniquely determined by the equation

$$\begin{aligned} &\left[ \begin{array}{cccc} \rho(0) & \rho(1) & \cdots & \rho(\tau-1) \\ \rho(1) & \rho(0) & \cdots & \rho(\tau-2) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \rho(\tau-1) & \rho(\tau-2) & \cdots & \rho(0) \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \phi_{\tau,1} \\ \phi_{\tau,2} \\ \vdots \\ \phi_{\tau,\tau} \end{array} \right] \\ &= \left[ \begin{array}{c} \rho(1) \\ \rho(2) \\ \vdots \\ \rho(\tau) \end{array} \right], \quad \tau \geq 1. \end{aligned} \quad (29)$$

If  $L = p$  in (22) and (23), the partial autocorrelation function  $\rho_{pa}(p+t)$  of the AR( $p$ ) process at lag  $p+t$ ,  $t = 1, 2, \dots$ , is given as

$$\begin{aligned} \rho_{pa}(p+t) &= \frac{E\left[(n_k - \sum_{i=1}^p \phi_i n_{k-i}) n_{k-p-1}\right]}{\sigma(\boldsymbol{\alpha})^2} \\ &= \frac{E[e_k n_{k-p-1}]}{\sigma(\boldsymbol{\alpha})^2} = 0, \\ \sigma(\boldsymbol{\alpha})^2 &= E\left[(n_k - \sum_{i=1}^p \phi_i n_{k-i})^2\right]. \end{aligned} \quad (30)$$

For  $k \geq p$  the value of the partial autocorrelation function of an AR( $k$ ) vanishes from (30). From (28) ~ (30),  $e_k$  is the uncorrelated, zero mean white noise with constant variance  $\sigma(\boldsymbol{\alpha})^2$ . If the variance of  $e_k$  changes in time, it is able to be assumed that the conditional variance of  $e_k$  takes a changing value. To consider such a condition, it takes one approach to model  $e_k^2$  as a new

AR( $M$ ) model as

$$\begin{aligned} e_k^2 &= \sigma_a(\boldsymbol{\alpha}) w_k^e + \sum_{i=1}^M \theta_i(\boldsymbol{\alpha}) e_{k-i}^2 \\ w_k &= \sigma_a(\boldsymbol{\alpha}) w_k^e, \\ \frac{1}{N} \sum_{k=M}^{N+M-1} (w_k^e)^2 &= 1, \end{aligned} \quad (31)$$

where  $w_k$  is a white noise sequence with zero mean and constant variances  $\sigma_a(\boldsymbol{\alpha})^2$ . In this notation  $e_k$  is said to follow an autoregressive conditional heteroskedastic process of order  $M$ , ARCH( $M$ ). To generalize the ARCH or GARCH model, it assumes that the error can be represented as

$$e_k = \sqrt{h_k} \cdot v_t \quad (32)$$

where  $v_t$  is independent and identically distributed with zero mean and variance one, and

$$h_k = E(e_k^2 | e_{k-1}^2, e_{k-2}^2, \dots, e_{k-M}^2) = \sum_{i=1}^M \theta_i(\boldsymbol{\alpha}) e_{k-i}^2, \quad (33)$$

$$h_k = \sum_{i=1}^p \theta_i^1(\boldsymbol{\alpha}) e_{k-i}^2 + \sum_{j=1}^q \theta_j^2(\boldsymbol{\beta}) h_{k-j}. \quad (34)$$

From (32), (33) and (34), it is given as

$$w_k = h_t \cdot (v_t^2 - 1). \quad (35)$$

In Fig. 1, the ML detector is the ML-ARCH( $M$ ) detector as an example.

## 6 Multi-track Recording Systems using Parallel Readback Signals

### 6.1 Two-Dimensional Coding for TDMR

In the BPM recording channel, each bit is recorded on a single-domain magnetic island which is surrounded by the nonmagnetic region. Therefore, statistical characteristics of noise occurred in the BPM recording channel will differ from those of noise in the continuous magnetic thin film media recording channel. In this BPM simulation model, we consider additive AWGN at the reading point. Fig. 2 shows the BER performances of the coded GPRML systems. The symbols  $\bullet$ ,  $\square$  show the BER performances of the conventional system using the 2D GPR equalization with the 1D ML detector for the desired one track [4], the proposed 2D GPRML with the three joint 1D ML detectors for the

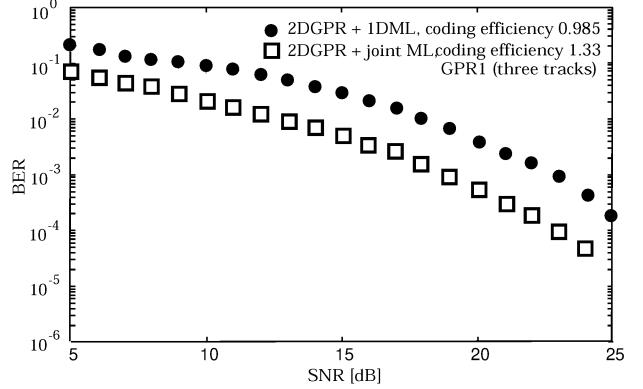


Fig. 2: BER performances of the MTR coded 2D GPRML system for three tracks in comparison with the conventional GPRML system.

three tracks, respectively. In the conventional system, the 64/65 (0,8) RLL code is used in each track with one symbol delayed precoder and efficiency of coding is 0.985. On the other hand, the 2D MTR(2,4) code is used for each three tracks and efficiency of coding is 1.33. The recording condition corresponds to the areal density of 2Tb/in<sup>2</sup> in [7] and the parameters of  $x_h = 0.4$ ,  $T_{50x} = 12.4$ ,  $T_{50z} = 13.0$ ,  $A_{xy} = 0.0069$ ,  $c_x = 0.82$ ,  $d_x = 12.07$ ,  $c_z = 0.81$  and  $d_z = 11.95$ . Furthermore, it sets equalizer length ( $2N_x + 1$ ) to 3, equalizer rows ( $2N_z + 1$ ) to 5 and GPR target length  $N_g$  to 2 for each track. In all simulations, the SNR is defined as  $\text{SNR} = 20 \log_{10}(A_p/\sigma_n)$ , where  $A_p = 1$  is the normalized amplitude of the readback signal. We take 10% island size fluctuations and 10% position jitter in both the along-track and cross-track directions as examples to study the BER performance of various equalizers. As can be seen Fig. 2, the performance of the proposed system with 2D MTR coding outperforms the conventional system using RLL coding by about 1.2 dB of SNR gain at a BER of  $10^{-4}$ . This performance improvement is substantially and compensates the performance degradation caused by the island size fluctuations and position jitter.

### 6.2 Statistical Signal Processing and Time Series Models for TDMR

In this BPM simulation model, we consider additive AWGN at the reading point. Fig. 2 shows the BER performances of the coded GPRML systems. For the modulation code, the 64/65 (0,8) RLL code is used with

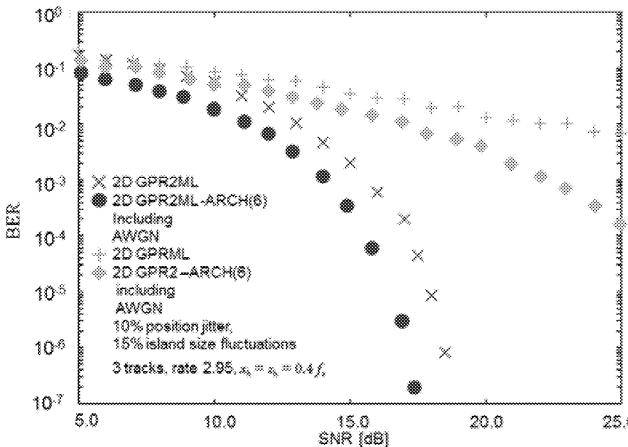


Fig. 3: BER performances of the 2D GPRML-ARCH system for three tracks in comparison with the conventional GPRML system.

one symbol delayed precoder in the 2D GPR equalization. The recording and equalizing conditions are same as the previous ones. We take 10% island size fluctuations and 15% position jitter in both the along-track and cross-track directions as examples to study the BER performance of various equalizers. The symbols  $\bullet$ ,  $\diamond$  show the BER performances of the system using the conventional 2D GPRML detection for the three tracks, the proposed 2D GPRML with combined ML and ARCH(6) detection (2D GPRML-ARCH(6)) for the three tracks, respectively. As can be seen Fig. 3, the performance of the proposed 2D GPRML-ARCH(6) outperforms the conventional GPRML using ITI substantially and compensates the performance degradation caused by the island size fluctuations and position jitter.

## 7 Conclusion

In this research, we propose a new two-dimensional magnetic recording (TDMR) system combined with the two-dimensional (2D) generalized partial response (GPR) equalization and the BER performance is evaluated by computer simulation. The following results are obtained. At first, the 2D MTR coded TDMR system using the multi-track detection technique is introduced. This proposed system provides a significant symbol error rate performance improvement for the TDMR system with the 2D GPR equalization using the conventional single-track detection technique. From this first

result, it is shown that the proposed system with the joint ML detectors for parallel three tracks outperforms the conventional system with 2D GPR equalization and 1D ML detection. Secondly, the TDMR system using the multi-track detection with time series forecasting techniques is proposed. From the second result, it is found that the proposed system with joint ML detection or combined 1D ML detectors and ARCH or GARCH model for parallel three tracks outperforms the conventional system with 2D GPR equalization. From these results, it needs to be studied for various TDMR systems with superior performance in order to attain higher recording density up to about 10Tb/in<sup>2</sup>.

## Acknowledgment

This work was supported by the Grants-in-Aid of Research Institute for Science and Technology in Kogakuin University.

## References

- [1] M. K. Grobis, O. Hellwing, T. Hauet, E. Dobisz, and T. R. Albrecht, "High-density bit patterned media: magnetic design and recording performance," *IEEE. Tran. Magn.*, vol. 47, no. 1, pp.6-10, Jan. 2011.
- [2] M. M. Aziz, C. D. Wright, B. K. Middleton, and H. Due, "Signal and noise characteristics of patterned media," *IEEE Tran. Magn.*, vol.38, no.5, pp.1964-1966, Sept. 2002.
- [3] A. R. Iyengar, P. H. Siegel, and J. K. Wolf, "Write channel model for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.47, no.1, pp.35-45, Jan. 2011.
- [4] S. Nabavi and B. V. K. Vijaya Kumar, "Two-dimensional generalized partial response equalizer for bit-patterned media," in *Proc.ICC 2007*, pp.6249-6254, 2007.
- [5] S. Nabavi, S. Jeon, B. V. K. V. Kumar, "An analytical approach for performance evaluation of bit-patterned media channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.28, no.2, pp.135-142, Feb. 2010.
- [6] S. Nabavi, "Signal processing for bit-patterned media channels with inter-track interference," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Comut. Sci., Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, PA, 2008.

- [7] Y. Ng, K. Cai, B. V. K. V. Kumar, S. Zhang and T. C. Chong, "Modeling and two-dimensional equalization for bit-patterned media channels with media noise," *IEEE Trans. Magn.*, vol.45, no.10, pp.3535-3538, Oct. 2009.
- [8] S. Karakulak, P. H. Siegel, J. K. Wolf, and H. N. Bertram, "Joint-track equalization and detection for bit patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.46, no.9, pp.3639-3647, Sept. 2010.
- [9] W. Chang and J. R. Cruz, "Inter-track interference mitigation for bit-patterned magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.46, no.11, pp.3899-3908, Nov. 2010.
- [10] W. Chang and J. R. Cruz, "Intertrack interference mitigation on Staggered bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol.47, no.10, pp.2551-2554, Oct. 2011.
- [11] E. Ordentlich and R. M. Roth, "Two-dimensional maximum-likelihood sequence detection is NP hard," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.57, no.12, pp.7661-7670, Dec. 2011.

#### 【国際会議における発表】

- (1) Hidetoshi Saito, Daichi Sibamoto and Ryuji Kohno, "Two-Dimensional Maximum Transition Run Codes for Multi-track Magnetic Recording Systems," 2012 International Symposium on Information Theory and its Application Conference (ISITA2012), Honolulu, Hawaii, USA, Oct. 2012 (*submitted*).
- (2) Hidetoshi Saito, "Two-Dimensional Signal Processing Schemes for Multi-Track High-Density Magnetic Recording Systems," The 10th International Symposium on Advanced Technology (ISAT10), O-21, Beijing, China, Nov.16-19, 2011.
- (3) Hidetoshi Saito, Ryuji Kohno, "Maximum a Posteriori Estimation Using ARCH Models and Burst Error Correcting Array Codes for Burst-Erasure Recording Channels," 2010 International Symposium on Information Theory and its Application Conference (ISITA2010), pp.850-855, Taichung, Taiwan, Oct. 2010.
- (4) Hidetoshi Saito, Ryuji Kohno, Isami Kobayashi, "Maximum a Posteriori Estimation Using Autoregressive Conditional Heteroskedastic Models for Digital Magnetic Recording Channels Using

Patterned Perpendicular Media," 20th The Magetic Recrdng Conference (TMRC2009), P11, pp.95-96, Tuscaloosa, Alabama, USA, Oct. 2009.

#### 【国内における学会発表】

- (1) Hidetoshi Saito, Masashi Kosuge, Daichi Sibamoto, " Two-Dimensional Partial Response Equalization Systems for Multi-track Magnetic Recording Systems," The 34th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2011), 2.3.2, pp.103-108, 2011年12月.
- (2) 斎藤秀俊, 小菅 雅, 柴本大地, " マルチトラック記録方式に対する二次元パーシャルレスポンス等化方式の一検討," 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-6-2, 2011年9月.
- (3) 斎藤秀俊, 小林勇海, 小菅 雅, " 多変量自己回帰条件付分散不均一モデルを用いた二次元パーシャルレスポンス等化方式に関する一検討," 2011年電子情報通信学会総合大会, A-6-10, 2011年3月.
- (4) Hidetoshi Saito, Isami Kobayashi, Masashi Kosuge, " A Study of Two-Dimensional Partial Response Systems for High-Density Magnetic Recording using Bit-Patterned Media," The 33th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2010), 5.1, pp.93-98, 2010年12月.
- (5) 斎藤秀俊, 小林勇海, 小菅 雅, " 最大事後確率推定法を用いた二次元パーシャルレスポンス等化方式に関する一検討," 2010年電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-6-5, 2010年9月.
- (6) Hidetoshi Saito, Takeshi Kondo, Isami Kobayashi, " Maximum a Posteriori Estimation Using Autoregressive Conditional Heteroskedastic Models for Discrete Magnetic Recording Systems," The 32th Symposium on Information Theory and its Applications (SITA2009), F24-2, pp.851-856, 2009年12月.
- (7) 斎藤秀俊, 近藤 建, 小林勇海, " 自己回帰条件付分散不均一モデルを用いた最大事後確率復号方式の性能改善に関する一検討," 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-6-4, 2009年9月.

# ストリートファッショントレンド検知手法の研究

工学院大学 情報学部 コンピュータ科学科 小西克巳

共立女子短期大学 生活科学科 渡辺明日香

A Trend Detection Algorithm for Street Fashion Database

Katsumi Konishi, Department of Computer Science, Kogakuin University

Asuka Watanabe, Kyoritsu Women's Junior College

**ABSTRACT :** This report summarizes the project of the street fashion database and a method for detecting the fashion trend. The project consists of three parts, developing the street fashion database, an automatic extraction method of metadata from fashion images, and an algorithm for detecting the fashion trend.

ング手法を提案している。次節以降に詳細を報告する。

## 2. ストリートファッショントレンド検知手法

### 2.1 ストリートファッショントレンド検知手法

ストリートファッショントレンド検知手法とは、ストリートスナップとも呼ばれ、繁華街でお洒落な服装を着た人を対象に撮影した全身画像のことである。本研究では、東京の主な繁華街である銀座、原宿、渋谷の路上で、毎月1回、週末に定点観測を行い撮影した画像を利用する。これらの画像は、服装色にファッショントレンドが反映されやすい若い女性を対象とし、ランタムに撮影したものである。ストリートファッショントレンド検知手法の例を Fig. 1 に示す。

## 2. ストリートファッショントレンド検知手法

### 2.1 ストリートファッショントレンド検知手法

ストリートファッショントレンド検知手法とは、ストリートスナップとも呼ばれ、繁華街でお洒落な服装を着た人を対象に撮影した全身画像のことである。本研究では、東京の主な繁華街である銀座、原宿、渋谷の路上で、毎月1回、週末に定点観測を行い撮影した画像を利用する。これらの画像は、服装色にファッショントレンドが反映されやすい若い女性を対象とし、ランタムに撮影したものである。ストリートファッショントレンド検知手法の例を Fig. 1 に示す。

## 1. はじめに

一般に「ファッショントレンド」の流行は数年毎に繰り返す」と言われるが、この命題に対し観測データに基づいて科学的に取り組んだ研究はなかった。これはファッショントレンドが掛け離れた分野であることも大きいが、ファッショントレンドに関するサンプリングデータが圧倒的に不足していたことが最大の理由である。これに対し、共立女子短期大学カラー&デザイン研究室では、1970年から現在までの38年間に撮影されたストリートファッショントレンド写真が数万点蓄積されており、現在も月間数百点の割合で増加している。そこで本研究では、これらのストリートファッショントレンド写真をアーカイブし、付加情報とともにデータベースを構築する。またデータベースに蓄積された情報を基づき、ファッショントレンドを科学的に分析し、ファッショントレンドを検知し予測する手法の研究を行う。

本研究は、ストリートファッショントレンド検知手法の構築、ストリートファッショントレンド検知手法の開発、および、ファッショントレンド検知手法の開発の3つの研究から構成される。本年度は平成21年度に開発されたストリートファッショントレンド検知手法を携帯型端末上でアプリケーションとして実装した。また、ファッショントレンド検知に利用可能なデータマイニング手法の一種であるコラボレーティブフィルタリ



Fig.1 Examples of street fashion images.

## 2. 2 データベースアプリケーション開発

撮影されたストリートファッショング画像の情報が、すぐにその場で入力可能とするため、Android OS を搭載する携帯型情報端末上でのデータベースアプリケーション開発を行った。データベースについては Android に標準で搭載されている SQLite を利用した。開発アプリケーションは、ストリートファッショング画像の表示、情報入力、検索機能を持つ。

開発アプリケーションの実行画面を Fig.2 に示す。この画面では、SD カードに保存されているすべての画像からサムネイルを取得し表示している。すべての画像を一画面にタイル状に配置し表示することで、保存されている画像を素早く確認することができ、また直感的な操作が可能となるため情報を入力したい画像をすぐに選ぶことができる。さらに、SD カードに保存されている画像をすべて読み込むことで、SD カード内のフォルダ構成を気にすることなく画像を選択できる。それにより搭載されたカメラで撮影した画像などに対し、その場で情報を入力することを可能とした。サムネイルを取得し表示すると、画像全体が見づらくなるというデメリットが発生するが、Fig. 3 に示す次の画面で、選んだ画像のみを全体に表示させ、この問題を解決している。



Fig.2 Listed images.



Fig. 3 Selected image.

本研究で開発したアプリケーションには、選んだ画像に対する情報を入力し、データベースを構築していく機能と、データベース化された情報を更新する機能がある。入力欄はどちらの機能も同じものを使用する。入力する項目や選択肢などのデータベースに登録する情報は共立女子大学の研究で使用するものと同じものを利用する。その情報は大きく分けて 5 つのカテゴリ(写真情報、トッ

プス、ボトム、トップス&ボトム、小物)となっている。Table 1、Table 2、Table 3 で示すように登録する情報はそれぞれのカテゴリごとに細かく設定されている。また、トップス、ボトム、トップス&ボトムの項目は表 4 に示すように共通となっている。

Table 1.

写真情報		
撮影日(年)	撮影日(月)	撮影日(季節)
性別	年齢区分	年齢区分詳細
クラスター	クラスター詳細	年代
ティスト&ルック	ティスト&ルック詳細	デザイナー/ブランド

Table 2.

アイテム情報(トップス、ボトム、トップス&ボトム)		
アイテム	アイテム詳細	シルエット/ライン
丈	ディテール	ディテール詳細
マテリアル	柄の構図	カラー
図柄	図柄詳細	トーン

Table 3.

アイテム情報(小物)		
帽子	ウィッグ	アクセサリー
アイウェア	ベルト	バッグ
シューズ	傘	その他

構築されたデータベースから、キーワードによる検索を可能とした。Fig. 4 はキーワード検索結果画面であり、Fig. 5 は画像をクリックして表示される詳細情報画面である。



Fig. 4 Keyword-based image retrieval



Fig. 5 Image retrieval result.

### 3. コラボレーティブフィルタリング手法

#### 3. 1 コラボレーティブフィルタリングとは

コラボレーティブフィルタリングとは、協調フィルタリングとも呼ばれ、データマイニング手法の一つである。例えば、商品を購入したユーザーが商品の満足度を10点満点で評価する場合を考える。全てのユーザーが全ての商品を購入するわけではないため、Table 4 のように満足度が空欄となる箇所が生じる。この空欄箇所の点数を推定することを協調フィルタリングと呼ぶ。空欄箇所の点数を推定することで、高い点数が予想される商品の購入をユーザーに推薦したり、商品のカテゴリ一分けを可能にする。

Table 4

商品	A	B	C	D	E
User1	10	8			1
User2		8		3	
User3		10		4	6
User3	3			2	3

本研究では、協調フィルタリングによって、ファッショングの機械的なカテゴリ一分けを目指す。現在では、ファッショングのカテゴリ一分けは専門家の感覚によってしか実現できない。協調フィルタリングにより、ファッショングカテゴリーの機械的な分類を実現し、最終的にはファッショントレンドの分析および検知を目指す。

協調フィルタリングを実現するアルゴリズムとして様々なアルゴリズムが提案されているが、本研究では、行列ランク最小化手法による手法を提案する。Table 4 を行列としたとき、各行が他の行の線形和で表されると仮定し、空欄を推定する手法である。このとき、行列はフルランクではなく、低ランク行列となる。つまり、低ランク行列を求めてことで、協調フィルタリングを実現する手法を提案する。

#### 3. 2 行列ランク最小化問題と解法

本研究で扱う行列ランク最小化問題は以下のようない

題である。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \text{rank} X \\ & \text{subject to } X_{ij} = M_{ij}, \quad \forall (i,j) \in I \end{aligned} \quad (1)$$

$M$ は与えられた行列であり、 $I$ は変数行列  $X$  のうち要素が既知である添え字の集合である。この問題は Matrix Completion 問題と呼ばれ、一般には NP 困難な問題である。本研究では、行列ランク最小化問題の解法として、null space based alternating optimization (NSAO) 法を提案する。

行列  $X$  のランクを最小化することは、その行列の零空間の次数を最大化することに等しいことから、問題(1)は以下の問題と等価である。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \text{rank} W \\ & \text{subject to } XW = 0, X_{ij} = M_{ij}, \quad \forall (i,j) \in I \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、0 は適切な大きさの零行列である。上記問題において  $X$  と  $W$  が設計変数である。この問題は問題(1)と本質的には同じ難しさの問題であるが、目的関数のみに注目すると、ランクの小さい行列を求めるることは組合せ的な困難があるのに対し、ランクの大きい行列を求めるることは容易である。そこで NSAO 法では、問題(2)に対する近似解法を与える。

問題(2)に対し、以下の緩和問題を考える。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \|W\|_F^2 \\ & \text{subject to } W_{ii} = 1, XW = 0, X_{ij} = M_{ij}, \quad \forall (i,j) \in I \end{aligned} \quad (3)$$

上記問題は問題(2)の良い近似解を与えることが期待される。問題(3)は制約  $XW=0$  を含むため難しい問題である。そこで、以下のようなラグランジュ緩和問題を考える。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f_\gamma(W, X) \\ & \text{subject to } W_{ii} = 1, X_{ij} = M_{ij}, \quad \forall (i,j) \in I \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、

$$f_\gamma(W, X) = \gamma \|W\|_F^2 + \|XW\|_F^2$$

と定義され、 $\gamma > 0$  である。上記問題は目的関数が凸関数でないため厳密に解くことは難しいが、 $X$  または  $W$  を定数とすると凸最適化問題として解けるため、 $X$  と  $W$  を交互に固定化することにより精度の高い近似解を得ることができる。射影勾配法 (gradient projection method, GPM) を適用することにより、Algorithm 1 に示す NSAO-GPM 法を得る。ただし、 $P_\Phi$  は行列の対角成分を全て 0 に置き換える、 $P_\Omega$  は行列の成分のうち集合  $I$  に属する成分のみを 0 に置き換える射影である。

Algorithm 1 は逆行列や特異値分解を一切利用しないという特徴がある。そのため、GPU 利用による計算の飛躍的な高速化が可能である。しかしながら、GPU は CPU に比べて利用可能なメモリが少ないため、大規模行列に適用することができない。そこで、本研究では複数の GPU

を利用する並列アルゴリズム Algorithm 2 を提案する。行列の行と列の順序を入れ替えても行列ランクは変化しないことに注目し、提案アルゴリズムでは行と列をランダムに入れ替え行列分割を行い、分割された各行列に対して Algorithm 1 を並列に適用している。計算精度を上げるために、複数回の試行を繰り返し、平均を計算している。

---

**Algorithm 1** NSAO-GPM

---

**Input:**  $X \in R^{m \times n}$ ,  $\gamma > 0$ ,  $\eta > 1$

repeat

$$\begin{aligned} D_\Phi &\leftarrow \gamma W + X^T X W; F_\Phi \leftarrow P_\Phi (W - 2D_\Phi) - W \\ \alpha_\Phi &\leftarrow -\text{Tr}(D_\Phi F_\Phi) / \|X^T F_\Phi\|_F^2 \\ W &\leftarrow W + \alpha_\Phi F_\Phi \\ D_\Omega &\leftarrow X W W^T; F_\Omega \leftarrow P_\Omega (X - 2D_\Omega) - X \\ \alpha_\Omega &\leftarrow -\text{Tr}(D_\Omega^T F_\Omega) / \|F_\Omega W\|_F^2 \\ X &\leftarrow X + \alpha_\Omega F_\Omega \\ \gamma &\leftarrow \gamma / \eta \end{aligned}$$

until termination criterion is satisfied

**Output:** low-rank solution  $X$

---



---

**Algorithm 2** paralel NSAO

---

**Input:**  $X \in R^{k_p p \times k_q q}$ ,  $i_{max}$

$X_{sum} \leftarrow 0$

for  $i = 1$  to  $i_{max}$  do

permute rows and columns of  $X$  randomly  
divide  $X$  into  $k_p k_q$  matrices  $X^i$  of size  $p \times q$

parallel apply Algorithm 1 to  $X^i$

reconstruct  $X$  from  $X^i$

$X_{sum} \leftarrow X_{sum} + X$

end for

$X \leftarrow X_{sum} / i_{max}$

**Output:** low-rank solution  $X$

---

### 3.3 数値実験

提案する並列アルゴリズムの有効性を確認するため、数値実験を行った。復元するランク  $r$  の行列  $X$  は  $n \times n$  の正方行列とし、正規分布に従い生成した行列  $Y_1$  と行列  $Y_2$  を用いて  $X = Y_1 Y_2$  を計算して生成した。ただし、最大特異値が 1 となるように正規化している。既知行列  $M$  は、 $X$  の成分のうち 20% が既知であるとし、一様乱数を用いて生成した。なお全ての計算は CPU:Core i7 3.4GHz、RAM:16GB、および、NVIDIA 製 Tesla を搭載した PC において MATLAB および MATLAB 用 GPU 計算ライブラリである Jacket を利用した。

まず最初に CPU、1 枚の GPU、2 枚の GPU での計算時間の比較実験を行った。GPU 1 枚の場合は行列分割せずに Algorithm 1 を適用した。GPU 2 枚の場合は、行列を  $4 \times 4 = 16$  分割して計算し、 $i_{max} = 1$  とした。実験結果を Table 5 に示す。GPU 1 枚の場合はメモリ制約により、 $n = 4000$  までしか計算できない。次に  $i_{max}$  の値と計算

精度の関係を調べるために、 $n = 2000$  の行列に対し、行列を  $2 \times 2 = 4$  分割して GPU 2 枚で並列計算を行った。結果を Fig. 6 に示す。誤差は、最適解  $X_{opt}$  と得られた解  $X^*$  に対してフロベニウスノルムの相対誤差として計算した。

繰り返し数を増やすことで、計算精度が向上することが確認できる。

Table 5. CPU time [sec]

$n$	$r$	CPU	GPU x1	GPU x2
1000	10	35.42	5.180	5.758
2000	10	268.1	26.98	13.42
4000	10	2013	162.23	44.80
8000	10	16042	-	509.25
10000	10	30959	-	2062.2

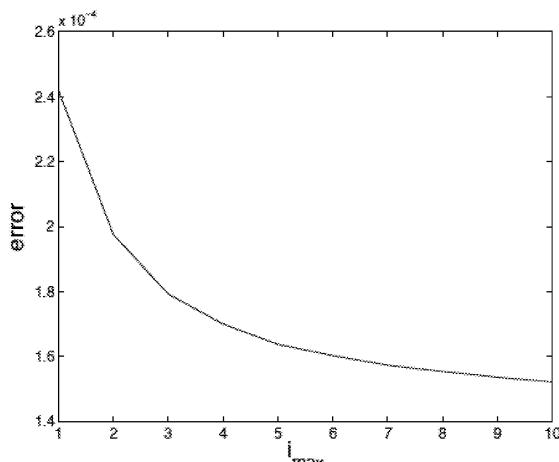


Fig. 6 error vs. imax.

#### 4. まとめ

本研究では、ストリートファッショントレンド検知手法の研究を行った。本年度は、携帯型情報端末上でのストリートファッショントレンド検知手法の構築、および、ファッショントレンド検知のためのコラボレーティブフィルタリング手法の研究の 2 つを行った。コラボレーティブフィルタリングについては、数値実験により有効性を確認したが、実データでの実証は行われていない。今後はストリートファッショントレンド検出アルゴリズムの導出も今後の課題である。

#### 参考文献

- (1) Katsumi Konishi: Iterative reweighted least squares approach to identification of switched affine systems , Proc. of IECON, pp. 604 – 609 , 2011.
- (2) 小西克巳：零空間アプローチによるアフィン制約付き行列ランク最小化問題の解法，計測自動制御学会制御理論シンポジウム，2011
- (3) 小西克巳，坂本亮：並列 GPGPU を利用した大規模行列に対する行列ランク最小化問題の解法，情報処理学会全国大会，2012
- (4) Katsumi Konishi: Parallel GPU implementation of Null Space Based ALternationg Optimization Algorithm for Large-scale Matrix Rank Minimization, Proc. of IEEE ICASSP, 2012

#### ① 発表論文

小西 克巳, 遠山敏章, 渡辺明日香 : ファッション画像共有サイトの情報を用いたインターネット上のファッショントレンド検出と検索, 人工知能学会論文誌, Vol. 25, No. 1, pp. 25–36, 2010

#### ② 学会発表

渡辺明日香, 城一夫, 小西克巳 : ストリートファッショントレンド検出アルゴリズムに関する研究—3 次元色空間上における分布可視化ソフトウェアの開発と検証—, 日本色彩学会全国大会, 2010.

Katsumi Konishi: Reweighted  $l_1$  norm minimization approach to Matrix Rank Minimization for System Identification, 計測自動制御学会制御部門大会, 2011

Katsumi Konishi: Iterative reweighted least squares approach to identification of switched affine systems , Proc. of IECON, pp. 604 – 609 , 2011.

小西克巳：零空間アプローチによるアフィン制約付き行列ランク最小化問題の解法，計測自動制御学会制御理論シンポジウム，2011

小西克巳，坂本亮：並列 GPGPU を利用した大規模行列に対する行列ランク最小化問題の解法，情報処理学会全国大会，2012

Katsumi Konishi: Parallel GPU implementation of Null Space Based ALternationg Optimization Algorithm for Large-scale Matrix Rank Minimization, Proc. of IEEE ICASSP, 2012



## 人口過疎地域における人口、生活圏域、域内生活基盤施設の相互関係

工学院大学 建築学部建築学科 山下てつろう

工学院大学 建築学部建築デザイン学科 篠 淳夫

名城大学 理工学部建築学科 生田京子

A study on the arrangement of medical and welfare facilities in the underpopulated area by using GIS

Tetsuro Yamashita, Prof., Department of Arch, Faculty of Arch., Kogakuin University, Dr.Eng

Atsuo Kakehi, Prof., Department of Arch, Faculty of Arch design., Kogakuin University, Dr.Eng

Kyoko Ikuta, Assoc. Prof., Department of Arch., Faculty of Science and Engineering, Meijo Univ., Dr.Eng

**ABSTRACT :** Under the circumstance of aging and distribution of population in the underpopulated area, construction of medical welfare state measures has a pressing need. Therefore, with a supposition of compounded medical welfare state facilities in the underpopulated area, arrangement and combination of institution has been done will be made clear. As a result of the supposition, main management were 37% in a 100m bloc which was centered with Geriatric health services facility. In the other word, in the underpopulated area, they combine medical care and welfare to manage with using beds in a right place. However, the income change with each bed because the law are also different..

### 1. はじめに

#### 1. 1 背景

「高齢者が住み慣れた環境の中で、その人らしい生活を営む」<sup>1)</sup>ために、高齢者福祉施策は、数値的目標を掲げた量的整備から、生活圏域で一連のサービスを完結させることにより、利用者とサービスが密接な関係を構築し、安心をいつも身近に感じられ、即時対応が可能になることが望ましいとし、圏域的な整備に力点が置かれることになった。一方、過疎地域では、少ない人口が広域に広がり、移動時間が増える等の理由により、営利企業やNPO法人も効率が悪く、採算がとれないためか、参入は都市部に限られ、人口一万人未満の町村への進出はほとんどない<sup>2)</sup>。また、財政状況についても、脆弱な財政構造となっている<sup>3)</sup>。このような状況から、近くに病院等の施設が存在しないという状況は度々聞かれる。つまり、理想とされる圏域的整備については、これら条件に加え、全国平均を上回る高齢化率といった理由から、その困難性は容易に推測できる。従って、こうした過疎地域の医療福祉の総合的な研究は急務と考えられる。

#### 1. 2 着想に至る経緯と研究の目的

本研究ではまず、過疎地域での施設運営状況を把握するため、2010年8月17日に宮城県石巻市沖合の離島にあるA診療所に訪問し、ヒアリングを行うこととした。施設概要はFig.1の通りである。

運営主体は、他県に本院がある医療法人となっており、施設の機能は、無床診療所、老人保健施設（短期入所17床（以下、老健とする））、生活支援ハウス（4室8名）、通所介護（定員20名）という構成である。この医療法人は、町からの要望により、有床診療所（有床診11床、療養病床8床）を引き継ぐという形で現在に至っている。

開院から10年間の傾向をみると、長期入院・入所が多く、長期入院の診療報酬点数の引き下げにより診療所収入が低減し、一方で、常勤医師の給与等は維持しなければならないことにより診療所の経営は圧迫されていたが、本院の収益で年間3,500万円の埋め合わせを行っていたという。

このような長期入所でも点数変動のない状況の改善策として、2010年4月より、有床診療所は老健へと変換され、石巻市による補助金等も受けることで赤字経営は避

けられることになった。つまり、診療所と老健を併設し、一ヵ所に複合的に運営されている点より本研究の着想に至った。

このような過疎地域の背景と施設状況から、施設等は、一ヵ所に集約、または複合的に配置され、単体の分散配置は、殆どないと推測できる。また、訪問介護など、利用者宅を訪問するサービスは、人口密度が低い地域で単体配置することは、困難と考えられる<sup>4)</sup>が、そのサービスを継続的に成立させるには、集約・複合する施設間で、デメリットを補う関係性が必要であると考える。

そこで本研究は、集約・複合する施設の組み合わせによる連携や、使い分けに着目し、総合的な医療福祉施設の今後のあり方に対して示唆を得ることを目的とし、本稿では、過疎地域における、集約・複合する施設の進展度、また、どの組み合わせによる施設が存在するのかを施設配置から明らかにする。

### 1.3 既往研究

保健医療福祉施設の複合について、1996年に二木<sup>5)</sup>によって、社会福祉学の分野から、医療・介護保険制度上による複合体の可能性、「複合体」化の進展度が調査研究され、全国的な状況を理解することができる。また、「複合体」化は、10万人以下の都市で多くみられるとされ、過疎地域で進展している可能性が考えられる。しかし、1996年以降、医療法、介護保険法等の制度が策定・改定・改正、ゴールドプラン21での数値目標による施設の増加、また、「人口減少元年」である2008年以降の人口減少等により、過疎地域の状況が大きく変化していると考えられるため、ここから抜き出して検討することができない。

また、建築計画の分野では、医療福祉のサービス利用実態<sup>6)</sup>、廃校の有効利用<sup>7)</sup>等、多くの側面から研究が行われている。その中には、生田ら<sup>8)</sup>により、訪問介護拠点の最適配置について、ヒアリングとアンケート調査を行い地域配置について実態や問題点等を導き、サービス提供方法について全国を分析対象とし、在宅サービスの充実、サービス提供の効率化を考察しているものもある。しかし、施設の組み合わせや、使い分けについての提案は殆どない。

一方、過疎地域に関しては、林ら<sup>9)</sup>によって、自治体の財政、高齢者の生活等の多角的侧面から検討された積極的な撤退が提案され、過疎地域の状況を把握することができる有用な調査研究であるが、不利な条件下でサービスを展開する手段については、言及されていないため、本研究と目的が異なる。

そこで本研究は、過疎地域での医療福祉施設全体像を対象として、組み合わせによる連携や使い分けの可能性を探るものであり、こうした視点を加えることで既往研究の成果をも考え併せた総合的な検討が可能になるとを考えている。

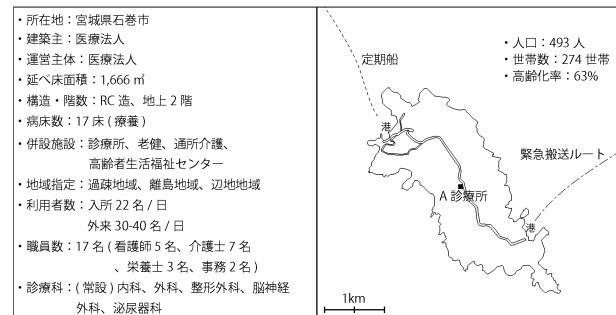


Fig.1 A 診療所概要.

## 2. 研究方法

### 2.1 研究概要

はじめに、GIS(MapInfo Professional 9.5)を用いて、施設がプロットされる人口メッシュ( $\approx 1\text{km} \times 1\text{km}$ )数を数えることで医療福祉施設の人口密度による配置限界の有無を明らかにする。次に、各施設を中心にして円を描き、その円の範囲(以下、円域)にいくつの分析対象施設を含むかを全国的に把握する。また、各施設に対する円域内に他種施設を含む割合(以下、円域内施設率)から、施設配置の実態を明らかにする。最後に円域内の施設数に対して、その施設の運営主体の数の比(以下、運営主体比)により過疎地域の併設施設実態を明らかにする。こうした方法により、過疎地域の医療福祉施設の法制度が異なることによる配置実態についての考察を行っていく。

### 2.2 分析対象

全国の過疎地域に含まれる医療福祉施設数はTable.1の通りである。過疎地域には、「過疎地城市町村」、「過疎地域とみなされる市町村」、「過疎地域とみなされる区域のある市町村」の三区分があり、市町村単位で指定されている(Table2)。例えば、京都府京都市も「過疎地域とみなされる区域のある市町村」で指定を受けている。つまり、指定された過疎地域でも人口密度に大きな差が生じることになる。

本研究では、人口密度の低い地域の医療福祉施設の実

Table1 データ概要

データ項目	作成年次	データ形式	データ属性	データ出典	データ数
医療施設	H22	点	医療機関名、分類コード等	国土数値情報	7,310
入居施設	H23	点	施設名、分類コード、住所	WAMNET	3,191
居宅サービス事業所	H23	点	施設名、分類コード、住所	WAMNET	13,154
3次メッシュ	H17	メッシュ	総人口、男女別等	国勢調査	215,343
過疎地域	H19	面	行政コード、都道府県名等	国土数値情報	752

\*メッシュ $\approx 1\text{km} \times 1\text{km}$

Table2 過疎地域の定義

■過疎地域 (過疎地城自立促進特別措置法)		総務省
1  財政収入 / 財政需要額   平均 $\leq 0.42$	2  財政力指数   平均 $\leq 0.56$	
ただし、以下に該当する場合においては、 (H.7.S.45) 人口 / 現人口 $> 0.1$	ただし、①、②又は③に該当する場合においては、 (H.17.S.55) 人口 / 現人口 $< 0.1$	
• 35年間人口減少率 $\geq 0.3$	① 45年間人口減少率 $\geq 0.33$	
• 35年間人口減少率 $\geq 0.25$	② 45年間人口減少率 $\geq 0.28$	
• H.7人口 / 65歳人口 $\geq 0.24$	H.17人口 / 65歳人口 $\geq 0.29$	
• H.7人口 / (15歳以上-30歳未満人口) $\geq 0.24$	H.17人口 / (15歳以上-30歳未満) 人口 $\geq 0.14$	
	③ (S.55.H.17) 人口 / S.55人口 $\geq 0.17$	

\*平成22年4月1日現在

態を検討しようと考えているので、便宜的に、分析対象を、総務省による過疎地域の町村集落あたり平均人口<sup>10)</sup>の最大値 346 人 /km<sup>2</sup> 以下地域を扱うこととし、それらの地域は Table3 のように得ることができる。

過疎地域内での分析対象と対象外では、1 メッシュあたりの平均人口は分析対象が 62 人であるのに対し、対象外では 916 人となっている。過疎地域のメッシュをみると、346 人 /km<sup>2</sup> を基準とした場合、人口密度が高いメッシュは、過疎地域全体のおよそ 10% である。

### 3. 過疎地域の施設組み合わせ

#### 3. 1 人口密度による施設配置限界

様々な施設は、どの程度の人口密度で配置されているのかを、Fig. 2 に示す。

各施設とも、人口密度が低下するに伴い施設数が減少し、病院は 6 人 /km<sup>2</sup> で施設数は、0 になり、特別養護老人ホーム（以下、特養とする）は 5 人 /km<sup>2</sup> で 0 となる。その他の施設は 1 人 /km<sup>2</sup> まで施設が存在している。また、各々の施設総数の 80% は、人口密度 85 人 /km<sup>2</sup> 以上の地域に配置され、総務省による過疎地域の集落の報告<sup>10)</sup>の中の、集落を構成する人口規模である 50 ～ 99 人と近い値をとることがわかり、集落のような人口を有する地域に、比較的配置されている。また、施設の種類や建築規模により、人口密度による配置限界は変化すると考えられるが、過疎地域での配置限界の変曲点が見えず、傾向を読み取ることができなかった。つまり、NPO や自治体による施設が、人口密度の低い地域で展開しているためと考えられる。

#### 3. 2 円域内施設数

各施設の周辺にどのような施設がいくつ存在するかを把握するため、各々の施設を中心半径 1km、500m、100m の円を描き、その円域内の各施設数集計した（Table4, Fig. 3）。

100m 円域内での集約の程度をより明確に理解するために、円域内を三段階で小さくしたが、1km ～ 500m の円域内施設率では、5 ～ 10% 未満の減少がみられ、訪問介護と診療所、特定施設と診療所、特定施設と訪問看護、特定施設と訪問介護、老人保健施設（以下、老健とする）と通所介護の 5 つの組み合わせで、減少し、500m ～ 100m にかけては、変化はみられない。つまり、1km、500m といった大きさの円域ではなく、100m あるいは、それ以下の範囲で複数の施設が集約して配置されることになる。また、円域内施設率が最大のものと二番目に大きい組み合わせについては 100m まで円域を小さくしても変化は見られないことから、各施設に近い位置で、固定された組み合わせが考えられる。また、円域内施設率が高い組み合わせとして、病院、特養、老健、グル

Table3 過疎地域内の分析対象の詳細

	メッシュ数	総人口	男	女	世帯数	施設名	施設数	施設名	施設数
対象	64,438	4,010,545	1,914,749	2,095,776	1,418,481	病院	133	短期入所	701
対象外	6,158	5,642,002	2,659,908	2,982,114	2,077,427	診療所	1,032	特養	488
無人	123,210	0	0	0	0	訪問看護	967	老健	130
全体会	193,806	9,652,547	4,574,657	5,077,890	3,495,908	訪問介護	708	グループホーム	553
						通所介護	1,203	特定施設	69

\*1 分析対象内の施設数

\*2 全体とは過疎地域のことを指す

\*3 3 次メッシュから過疎地域を抽出しているため、過疎地域人口がおよそ 1% 誤差がある

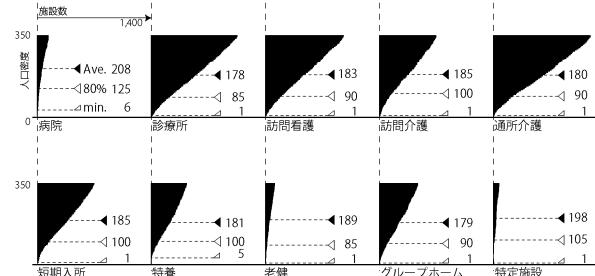


Fig.2 人口密度と累積施設数

プホーム、特定施設といったベッドを有する施設と居宅サービス事業所は比較的近くに配置されているが、ベッドを有する施設同士の組み合わせは、最大のもので病院と老健で 23% を示している。つまり、各施設とも特定の施設と近接した配置関係であることがわかる。

先述した通り、施設の配置構成として、集落のような人口規模がある地域に配置され、また円域の範囲を 1km から 100m まで縮小し、円域内施設数に変化がないことから、施設が配置される集落の間隔が遠いと考えられ、過疎地域の特徴を得た結果となっている。また、施設は、単独で配置されることが少ないとから、施設は、一ヵ所に集約し、配置されている傾向がわかった。

#### 3. 3 施設配置構造

前節で、集落間隔が遠く、施設が集約されている傾向がわかったが、その集落内で各々の施設はどの施設との組み合わせで配置される傾向があるのかを明らかにする。1 つの組み合わせで、両施設側から 2 つの円域内施設率がある。それぞれを X 軸、Y 軸とし、Fig. 3 に示す。

両施設の円域内施設率が高い場合、散布図の右上にプロットされ、両施設が近接に配置される傾向の強さを表す。傾向が強い組み合わせとして、短期入所・訪問看護を含んだ組み合わせがみられるが、短期入所の単独型事業は稀であり、一般的に、老健や特養の併設施設である。

一方、訪問看護は、みなし指定を考えると、必ずしも併設し、運営するとは限らないので除外すると、訪問介護と通所介護、特養と通所介護、特定施設と訪問介護が、近接に配置される傾向が強い組み合わせであり、また短期入所と円域内施設率が高い、病院、訪問介護、通所介護、グループホームは、老健と特養と近接する関係が強いと考えられる。100m 円域内で、施設毎に円域内施設率が 10% を超える組み合わせを数えると老健が 8 と最大となることから、老健について、組み合わせ実態を Table5 で表す。

組み合わせは、多種多様であり、特徴としては、ベッドを有する施設と居宅サービス事業所、ベッドを有する施設同士の組み合わせである。Table4 の老健との組み合わせにおいて、円域内施設率が短期入所は 87% と示され、実態の中でも、46 通りの組み合わせの内、32 通りある。一方、訪問看護とは、39% であるが、22 通りあり、凡そ半分の組み合わせに現れる。また、短期入所・訪問看護の組み合わせでは、20%、26% で、円域内施設率は低い。つまり、短期入所が特養、老健の併設施設とすれば、短期入所との円域内施設率が高い施設は、特養、老健とも近接関係にあると考えられ、訪問介護についても同様である。

Table4 円域内施設率

※ 各施設において該当施設数の割合が最も大きい施設  
■ 各施設において該当施設数の割合が 2番目に大きい施設  
＊( ) 内は該当施設数を表す

	1km	H	C	N	HP	DS	SS	SH	HF	GH	NH
病院(H)		5% (6)	8% (10)		22% (29)	27% (36)	17% (23)	15% (20)	13% (17)	4% (5)	
診療所(C)		1% (10)	7% (73)		16% (160)	14% (145)	8% (83)	4% (39)	8% (85)	1% (14)	
訪問看護(N)		99% (91)	23% (220)	22% (209)	23% (227)	13% (124)	6% (58)	13% (126)	2% (126)		
訪問介護(HP)		5% (34)	26% (183)	30% (211)	24% (171)	30% (268)	30% (214)	5% (38)	20% (144)	6% (41)	
通所介護(DS)		3% (40)	25% (305)	26% (313)	22% (268)	3% (42)	18% (217)	3% (33)			
短期入所(SS)		9% (66)	21% (146)	30% (209)	37% (256)	10% (70)	19% (133)	23% (164)	3% (24)		
特養(SH)		5% (22)	16% (79)	23% (110)	39% (191)	4% (21)	5% (26)	24% (118)	3% (17)		
老健(HF)		16% (21)	25% (33)	1% (1)	27% (35)	27% (35)	18% (24)	2% (2)	27% (35)	2% (2)	
グループホーム(GH)		3% (19)	16% (90)	19% (107)	26% (144)	22% (124)	8% (44)	14% (78)	4% (21)		
特定施設(NH)		7% (5)	19% (13)	28% (19)		36% (25)	26% (18)	3% (2)	26% (18)	6% (4)	
	100m・500m	H	C	N	HP	DS	SS	SH	HF	GH	NH
病院(H)		3% (4)	7% (9)		20% (26)	23% (31)	14% (18)	14% (19)	10% (13)	3% (4)	
診療所(C)		1% (9)	5% (48)		11% (116)	10% (106)	5% (54)	3% (31)	6% (57)	1% (6)	
訪問看護(N)		9% (87)	20% (189)	17% (166)	20% (156)	10% (98)	5% (53)	10% (97)	2% (19)		
訪問介護(HP)		4% (29)	19% (137)	25% (176)	22% (156)	28% (198)	5% (33)	17% (117)	5% (37)		
通所介護(DS)		3% (36)	20% (242)	22% (267)	20% (235)	31% (368)	2% (28)	15% (176)	2% (29)		
短期入所(SS)		9% (61)	16% (112)	26% (179)	34% (241)	8% (54)	18% (128)	20% (139)	3% (21)		
特養(SH)		4% (18)	11% (54)	18% (90)	37% (179)	4% (20)	4% (21)	21% (102)	3% (14)		
老健(HF)		15% (20)	23% (30)	3% (1)	24% (31)	19% (25)	15% (19)	2% (2)	25% (32)	2% (2)	
グループホーム(GH)		2% (13)	11% (59)	16% (87)	21% (117)	19% (106)	7% (38)	13% (70)	3% (19)		
特定施設(NH)		6% (4)	9% (6)	20% (14)		32% (22)	22% (15)	3% (2)	23% (16)	6% (4)	

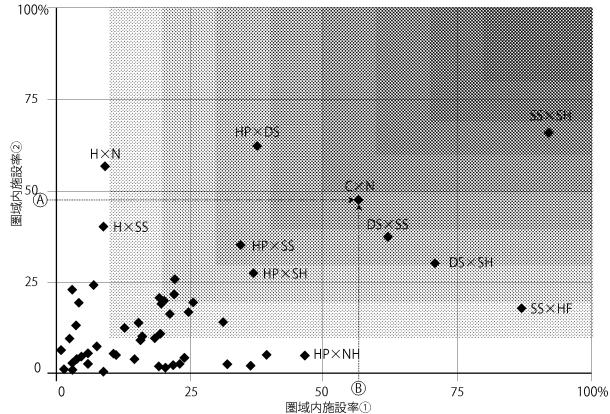


Fig.3 近接に配置される組み合わせ (100m 円域)

### 3.4 円域内施設法人

一般的には、このように 100m 円域内に設置された複数の施設は、同じ運営主体で運営されていると考えられる。そこで、100m 円域内で、施設毎に円域内施設率が 10% を超える組み合わせを数えると老健が 8 と最大となり、多くの施設が併設されている可能性があることから、全老健の 100m 円域内の施設を WAMNET を利用し法人名を確認したものを Table5 に示す。法人名が異なっているが同じ運営主体の可能性が考えられるため、該当法人のホームページにて、確認した上で、円域内はいくつの運営主体で構成されているのかを把握し、円域内の施設数に対する運営主体数の比（運営主体比）を Fig.4 で示す。老健を有する 1 つの運営主体が他に 2 つ以上の他種施設を運営しているのが全体 (130 施設) の凡そ 81% である。4 つ以上のものは、37% となる。また、全円域内の運営主体総数と施設総数で見る 1 運営主体は、平均 2.6 施設を持つことになる。運営主体一つあたりの最大併設施設数は 7 施設である。

その複合施設は、例をあげると、社会福祉法人により、診療所 + 訪問看護、特養 + 短期入所、老健 + 短期入所、グループホーム + 通所介護、訪問介護が併設され、分析対象外としては、居宅介護支援事業所、在宅複合型施設、また、市町村からの受託事業として、地域包括支援センターを併設していた。

つまり、1 つの運営主体で、複数の施設を併設していることがわかった。

Table5 老健の全組み合わせ実態

病院, 老健	訪問看護, 老健	
	短期入所	訪問介護, 短期入所, 特養
訪問看護		
訪問介護		
訪問看護, 老健		
訪問介護, 老健		
訪問看護, 老健		
訪問介護, 老健		
訪問看護, 老健		
訪問看護, 老健		
診療所, 老健	訪問介護, 老健	
短期入所	短期入所	短期入所
訪問介護	訪問介護	訪問介護
訪問看護	訪問看護	訪問看護
訪問看護, 老健		
短期入所, 老健	特養, 老健	
特定施設	特定施設	特定施設
グループホーム	グループホーム	グループホーム

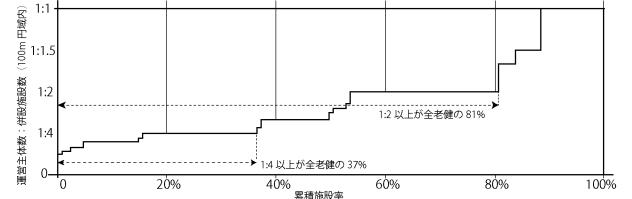


Fig.4 運営主体比率と老健の全組み合わせ



取ることができなかつた。

- ・施設が配置される人口密度が各施設とも平均 85 人 / km<sup>2</sup> 以上であることから、集落のような人口を有する地域に配置されている傾向がある。
- ・円域を 1km から 500m に縮小した場合、5 ~ 10% の減少が 5 つの組み合わせでみられた。また、500m から 100m の場合は、変化はみられなかつた。
- ・円域内施設率が 50% 以上の組み合わせは、ベッドを有する施設と居宅サービス事業所、居宅サービス事業所と居宅サービス事業所で、多くみられる。
- ・過疎地域では、1 運営主体あたり平均 2.6 施設を持つことから、多くの施設を一体的に運営されている。

以上の結果より、過疎地域での医療福祉施設の実態として、施設は、集約して配置され、1 つのサービスで展開するのではなく、複数の施設を併設させ、地域にサービスを展開させていることがわかつた。

併設する施設の組み合わせ実態を 3.3 で取り上げたが、ベッドを有する施設を中心に集約する組み合わせの実態を円域内施設率を利用し、図式化したもの Fig. 7 に示す。病院、診療所以外の施設は、集約率 50% 以上で 100m 円域以下に集約して配置され、二木の全国調査結果と比較して、施設が集約・複合されている傾向が強いことがわかつた。また、従来は施設サービスの中核が病院、特養、老健であったが、グループホームや診療所等の小規模施設が中核となっている傾向がみられた。つまり、中核施設の多様化、小規模化が、人口が少ない地域での特徴の 1 つと考えられる。今後は、施設が集約・複合される実態が明らかになったことから、利用実態を明らかにし、施設の規模、組み合わせが、どのように影響を与えていているかを検討することが重要と推測する。

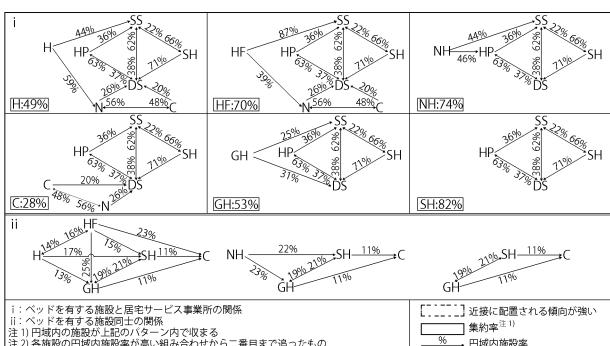


Fig.7 近接配置構造

## 付記

本研究は、平成 21-23 年度 工学院大学総合研究所プロジェクト研究費「人口過疎地域における人口、生活圏域、域内生活基盤施設の相互関係」（代表者：山下哲郎）を得て、実施したものである。

## 参考文献

- 1) 厚生労働省：2015 年の高齢者介護～高齢者の尊厳を支えるケアの確立に向けて～, 2003. 6
- 2) 伊藤周平：介護保険を問い合わせなおす，ちくま新書, 2001. 6
- 3) 総務省：平成 22 年度版「過疎対策の現況」について（概要版）, 2011. 10
- 4) 泉恵太, 石坂公一, 近江隆：地域における在宅介護サービス供給に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文集 N.0.585, pp95-101, 2004. 11
- 5) 二木立：介護保険制度の総合的研究, 効率書房, 2007. 2
- 6) 加藤岳, 坂本圭一, 長澤泰, 篠淳夫, 生田京子, 山下哲郎：過疎地域における住民の受療行動について－過疎地域における医療福祉の今後のあり方に関する研究－, 日本建築学会技術報告集 第 17 卷 第 37 号, pp993-996, 2011. 10
- 7) 鈴木健二：廃校の転用に際して建築関連法規が及ぼす影響－過疎地域の事例の考察－, 日本建築学会技術報告集 第 17 卷 第 36 号, pp633-638, 2011. 6
- 8) 生田京子, 山下哲郎：拠点過疎地域における訪問介護拠点の地域配置について, 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）, pp193 ~ 194, 2006
- 9) 林直樹, 斎藤晋：撤退の農村計画 過疎地域からはじまる戦略的再編, 学芸出版社, 2010. 8
- 10) 総務省 地域力創造グループ 過疎対策室：過疎地域等における集落の状況に関する現況把握調査報告書, 2011. 3

## ①発表論文

- 加藤岳, 坂本圭一, 長澤泰, 篠淳夫, 生田京子, 山下哲郎：過疎地域における住民の受療行動について－過疎地域における医療福祉の今後のあり方に関する研究－, 日本建築学会技術報告集 第 17 卷 第 37 号, pp993-996, 2011. 10

## ②学会発表

- 坂本圭一, 篠淳夫, 生田京子, 山下哲郎 :GIS を用いた過疎地域における医療福祉施設の配置実態に関する研究, 日本建築学会学術講演会（東海）, 名古屋大学 2012 年 9 月 12 日 -14 日

- ## ③特許出願 なし

# Innovative Identity Matrixing Model in the Trans-Cultural Era

Michael Kearney

Setsuko Adachi

Shuichi Kawasaki

School of Architecture, Kogakuin University

Faculty of Information Studies, Kogakuin University

The Japanese Red Cross College of Nursing

Transcultural な時代の創意的アイデンティティ - マトリクシング-モデル

工学院大学 建築学部建築学科

カーニー マイケル

工学院大学 情報学部デザイン学科

足立 節子

日本赤十字看護大学

川崎 修一

**ABSTRACT:** With the development of Advanced Information and Communications Systems (AICS), the dissemination of cultural constructions has become more rapid and has broadened in scope to include almost every region of the world. The cultural systems being transmitted globally through AICS are primarily Euro-American ideologies, which include concepts regarding economics, consumerism, civil rights, politics, gender roles, morality, lifestyle, notions of success, fashion, and diet. These concepts have permeated traditional regional cultural systems causing irreversible alterations. The idea of concise homogeneous cultures is antiquated. Current cultures are hybridizations. In the global paradigm of *informatization* (from Michael Hardt and Antonio Negri's book *Empire*) regional societal sets are transcultural. Holding that identity is constructed internally within an individual from external cultural factors, then it may be concluded that identities today are culturally hybrid. In order to better address the forging of identity under the forces of globalization, the authors have developed a theoretical model of the identity formation process, termed Identity Matrixing, which accounts for the conditions of transculturality. Understanding this model will foster the creation of transcultural frameworks to better engage and traverse globalizing cultural landscapes. Furthermore, the application of the model, and the concepts that the model proffers, to the development of educational programs will assist in the creation of courses that prepare individuals to navigate, with an underlying schema of benevolent coexistence, the ever globalizing world landscape. The report will introduce the further development in the Identity Matrixing Model (IMM). It will also include relevant developments and interests from various interdisciplinary backgrounds.. The second part of the report will focus on the success that the innovative application of the model and its ancillary concepts, through their utilization in educational programs at Kogakuin University, namely the English Communication Skills Program (ECSP) and the Postgraduate Intercultural Communications Course (PICC), has achieved; furthermore, 2011 also saw successful implementation of content-based courses for non-program oriented students that utilize the IMM theories.

## 1. はじめに

本年度は理論面では Identity Marixing の理論をさらに精査させることに焦点をあて、その成果は、2011年9月に Oxford 大学 Mansfield College で開催された 5th Global

Conference on Multiculturalism, Conflict and Belonging (MCB5)で発表することを得た。本学会発表は MCB の Research Director である Alejandro Cervantes-Carson 氏の依頼によるものである。

氏は Kearney - Adachi のこれまでの研究は multiculturalism 研究を interdisciplinary

一学際的な立場から研究し展開するにあたっての一つの key research としての役割を果たすと認め、2011 年度は Identity を鍵概念としてプログラムの中にパネルを設けた。ここに Kearney および Adachi と Alejandro Cervantes-Carson がパネリストとして登壇した次第である。本研究資金が筆者らの参加を可能にしてくれたことにここに記して感謝する。また、本パネルは新学会 Alternative Academia 立ち上げの方向性を定める役割を果たす一助となったことも記しておく。ちなみにこのパネルでの発表を発展させた論文が後に紹介する *Deconstructing the Frameworks of Identity: The Identity Matrixing Model* である。

また、教育面では、昨年度までの報告書に詳細を記してあるが、Identity Matrixing Model とそれに関連する諸概念の教育的応用として実施している ECSP、PICC プログラムの運営と教授につとめた。これらは本学のみならず日本全体で必要性が認識されている国際的、グローバル化世界で生き延びる、かつ成功する人間を育成する必要性に応えようとするものである。

そのほかに、学部生に関しては、時間的労力的負担の高い ECSP の履修希望まではしないが、それでも高いモチベーションのある学生のためにもオープンな科目が開講された。これらの科目は情報学部、建築学部の新設準備の過程で Kearney・足立に依頼され、両学部のリクエストにこたえる形でカリキュラムとして設けられたものである。それらは Non-Japanese Communication Strategies, Transculturality: Cultural Hybridization, History of Humanities, Cultural Identity という 4 科目である。

また、大学院で提供している PICC に関しては、国際的マネージメント、コミュニケーション力を謳った System Design 専攻において選択必修としての科目提供を開始した。他の専攻では、選択科目扱いとなっている。

本報告書は、前半を 2011 年度 Identity Matrixing 理論の学術的展開を、後半を 2011 年度 Identity Matrixing 理論の教育的応用と実践について報告する。

## 2. Identity Matixing Model 理論 2011 年度

それでは、まずはじめに Identity Matrixing モデルの理論的発展であるが、それらは、ひとまず *Deconstructing the Frameworks of Identity: The Identity Matrixing Model* としてまとめることができた。以下に要旨と、さらに要点となるポイントの概略の紹介でもつて報告とする。

### 論文要旨:

Accepting that the general concepts of identity presented by Martin Heidegger and Jacques Lacan are theoretically and practically sound, the research presented here endeavours to develop upon these notions in order to construct a model that will both account for the formation of identity and how identity functions. Heidegger and Lacan discount the conception of identity being a whole, or complete, aspect of the human that functions independently of external forces. Instead identity is seen as a fragmented amalgamation formed from the internalisation of the myriad external cultural constructions which govern the social systems within which an individual exists. Lacan termed this combination of social systems the Symbolic Order. However, his model does not address that with cultural, social, and technological coevolution, humans do not exist in merely one Symbolic Order; rather, individuals encounter various Symbolic Orders, with each having roles in the continuous construction and functioning of identity. In the paradigm of Advanced Information and Communications Systems, exposure to diverse Symbolic Orders has become more expansive and the depth to which individuals are immersed in these Symbolic Orders has increased.

The model presented in this paper regards identity as a system with multiple frameworks underlying it. Many of these frameworks are cultural elements that have been internalised from the various Symbolic

Orders that an individual encounters. Rather than present a simplistic flat model of identity, the authors' aim is to reveal the complexity of identity, and to argue that with an increase in cultural elements functioning within an individual, the complexity of identity increases exponentially. In order to represent both the construction processes and the functioning processes of identity, the authors' have devised an innovative model that is extra-dimensional and fluid; where identity can be represented through an analogy with the universe: it has no boundaries, no parameters; it is warped, bending; operating through non-linear connections that occur teleportation-like, as if travelling through wormholes, where cultural elements through infinite combinations form a multitude of identity traits without having to follow any of the laws that apply to spatial-temporal phenomena.

本論のために上げたキーワードはこれまでの研究の流れを表しているので最終年度の報告書のために参考のためにあげておく。

Key Words: Identity formation, culturally hybrid identity, transcultural identity, Identity Matrixing Model.

筆者らの今年度の研究は、本理論を展開するに際して「アイデンティティは複雑である、その複雑性を簡素化しないモデル化」という点に焦点が当たったといえる。上記の論文の一部分を抜粋すると以下のようである。

An essential question that needs to be addressed then is how identity functions within the human entity. Foremost, it is important to note that identity is not static, it does not reach an end-point: it is in continual formation. Let us then consider identity to be somewhat analogous to the universe in that it is ever expanding. However, unlike physics where it is theorised that the matter of a closed system,

the universe in this case, cannot be generated or destroyed, although it can be converted to other forms of matter: mass to energy for example, the matter of identity, the elements comprising identity, is constantly increasing. Identity is not a closed system: new elements, cultural constructions, from the various Symbolic Orders being encountered by the entity are constantly being added to the matrix of identity. Moreover, while these elements can act in a singular manner to form an identity trait, they can also combine or work in unison with other elements in the formation of an identity trait. The result of this interacting of elements is an infinite multiplicity of combinations, where any element can combine or work in unison with an infinite number of other elements simultaneously to form multi-elements, which in turn can combine or work in unison with any other elements or multi-elements in the manifestation of identity traits.

Identity can then be seen as not adhering to any of the laws of physical properties, even though the elements, the matrixed cultural constructions, comprising identity are stored in the tissues and activated within the confines of the physical. An identity element does not have to be physically adjacent to another element to interact with it, nor do they need to be on the same neural pathway. These associations, connections, forming of combinations, can be held as occurring as an instantaneous teleporter-like process, where elements interact in a manner beyond the laws pertaining to physical properties even though the data is stored and triggered within the somatic. It will be suggested here then that identity is manifested through the firing patterns of the stored data, this data being the cultural constructions that are matrixed into the entity. Moreover, these "firing patterns change as new data/information/elements are stored in the

brain,”<sup>1</sup> which results in the phenomenon of ever expanding identity. (注<sup>1</sup> From a conversation with Dr. Miyuki Kamachi, Associate Professor, Kogakuin University, whose research focuses on temporal firing patterns. July 20, 2011.) (“How Identity Functions in the Human Entity”セクションより)

そして、以下のように理論の有効性と実験での検証の提案でもって結ぶ。

It can thus be posited that there are a number of frameworks operating in relation to identity. The two major frameworks being the physical and the conceptual, with myriad sub-frameworks functioning within these. The next stage of this research will be to investigate temporal firing patterns in an attempt to discern how these patterns are related to identity traits. When and if this stage of the research can be conducted is dependent upon research funding because it will entail the utilisation of functional magnetic resonance imaging (fMRI) and magnetoencephalography (MEG) in order to measure spikes in brain activity that occur during the manifestation of particular identity traits. Another difficulty that arises in conducting the study properly is that the test subject group must be extensive in that it needs to include subjects from numerous cultural and societal sets. However, the Identity Matrixing Model, as it stands, can prove to be a valuable instrument in analysing and discussing issues involving any aspect of human identity. Moreover, the model proves useful as a deconstructive devise for scholars to better understand cultural issues as it exposes that interpretive processes, which are not “presuppositionless,” need to be sternly questioned. (“Multiple Frameworks”セクションより）

### 3. Identity Matrixing と諸概念の教育的応用: ECSP、PICC プログラム

本 Identity Matrixing 理論モデルをプログラム編成のバックボーンとして作られている教育プログラム English Communication Skills Program (ECSP)、Postgraduate Intercultural Communication Course (PICC)の成果、および進捗状況を簡潔に報告する。

本学では学部が 2006 年度より English Communication Skills Program (ECSP)を、また大学院では 2008 年度より Postgraduate Intercultural Communications Course (PICC)を実施している。ECSP は 2011 年度 3 名、PICC は 5 名の修了生を出した。本プログラムの完遂は学生本人の意思次第であり、このプログラムの修了には、卒業論文/プロジェクト、修士論文/プロジェクトを同時進行させながら、英語で論文を書き上げ、Conference スタイルで発表、質疑応答までを完遂する力を要求される。時間のマネジメント、教員とのコミュニケーション力が、英語論文・発表以外にも重要な技量として問われてくる部分である。

さて、両プログラムが目指すところの基本的思想は共通している。工学院大学の学部生、大学院生が、グローバル化が進む今日の世の中で有効に共通言語が英語である場で機能・貢献できるようになること、人間としての視線で、人類全体・社会全体に貢献できる思考を開拓する個として育成されることである。

本教育プログラムのカリキュラムの詳細およびデザインについては、本学 HP シラバス (<http://www.kogakuin.ac.jp/syllabus/index.html>)、Bibliography に掲げてある Adachi & Kearney 共同執筆論文、*Educating Engineers for the 3rd Paradigm: Identity Matrixing and Global Hodological Mapping* (2008) および *Forging Global Hodological Maps for the Meta-Symbolic Order* (2008) を参照されたい。

昨年度にも指摘しているが、ECSP 運営上で生じてきている問題は、まずニーズがあるにも関わらず、本学の時間割システムが弊害となって、多くの学生にとって ECSP 科目の取得が困難となっていることである。一方の PICC は、国際的マネジメント、コミュニケーション力を謳って新設された System Design 専攻において選択必修として提供を開

始した。特に1年次の科目が時間帯によっては、適正サイズでの実施が困難となっている。セミナー形式でinteractiveな実施が好ましいのだが、その規模をはるかに超える事態が2011年度、2012年度と起きており、工夫が必要とされるところである。SDの学生数は少なく、これは選択必修化とは無関係と思われる。むしろ全専攻の学生の意識にある現代世界のグローバル化、就職戦略として「大学院生レベルの英語力」のニーズと関連していると思われる。ECSP・PICC両方に共通する問題としては、運営責任・系統の不透明性で、早急の改善が望まれるところである。

それではここで新たに2011年度よりECSPプログラムには登録しないが、高いモチベーションのある学生のために提供を始めた科目について記す。これらの科目の特徴は、content-based、すなわち教授内容が「英語」ではなく「××について」英語で学ぶ授業である。これらは、「英語」の習得をも目標としつつ、それのみではない。これらの科目が目指すのは、英語を共有語とする多文化社会の中で、未知の価値観や複数の価値観が交錯する世界への理解を深める科目を提供することで、複数文化、言語、価値観の共存する中でのコミュニケーション、人間の平等性、人間の尊重というものを考えていく人間を育てていくことに寄与することである。このような授業内容、教授方法を通じて学生たち自らが主体的に舵を取れるようになるためのGlobal Hodological Mapsを形成すること、また

critical thinkingの力の育成がされる仕組みになっている。

この方式はimmersion方式と呼ばれるものであるが、すべてを英語で実施することによって学生たちは英語での機動力をつける訓練を受けていることになる。常に英語を聞き、英語で話し、読み、書き、考えることで、より実践的な英語力を身につけることが可能となる。

新たに2011年度から開講された4科目のねらいを簡潔に以下紹介する。ちなみに英語でシラバスも作成されているが、それも教育的効果を配慮してである。

#### • Non-Japanese Communication Strategies

The objective of this course is to develop the students' abilities to communicate in settings where Japanese language, Japanese customs, and Japanese discursive formations are not the controlling elements in the interaction process.

#### • Transculturality: Cultural Hybridization

This course applies current cultural and critical theoretical devices to the examination of various regions and time periods in order to reveal crossovers, merges, adaptations, and supplantations of culturally constructed systems; thus, revealing that the notion of concise homogeneous cultures is antiquated and that in fact cultures are hybridizations.

#### • History of Humanities

The aim of this course is to provide architecture and technology students with an overview of various paradigms from an humanities perspective in order to expose the intersections between technology and the humanities and reveal the interrelationship between the thought processes associated with both.

#### • Cultural Identity

In the global paradigm of informatization, where regional societal sets are becoming infused with cultural constructions from other areas of the world, it is paramount that modern humans have a keen understanding of the identity formation process. In this course, students will be introduced to the Identity Matrixing Model, the concepts of Vertical and Horizontal Matrixing, and the notion of Global Hodological Maps so as to be able to autonomously navigate their globalizing environment.

以上の科目は現在は情報学部2年生対象として開講されているが、2012年度には建築学部3年生をも対象となる。だが2011年度の状況を見ると、すでにこれらの対象学生とは別に、他学部(工学部GE学部)からの受講生、

また CAP 制科目登録数に制限がかかって登録はできないが受講したいという学生が、学年も 2 年生から 4 年生にわたって相当数いる。特に時間割的に融通がつく時間帯は全学部からの学生が入り混じった混成クラスができるという実態であった。2012 年度 4 月時点では情報学部の学生が ECSP 登録の割合が多いがそれは 2011 年度に 2 年次で上記の科目をとったという関係もあるかと思う。ちなみに ECSP は 3 年次より始まるプログラムである。余談であるが、嬉しいことに 2012 年度は ECSP を受けた影響もあり、1 年あるいは 2 年休学して国外で勉強したものが復学し、もう一度 ECSP に参加するという向上心を表明してくれている。ECSP、PICC には韓国、中国、台湾、アメリカ合衆国(Harvey Mudd の交換学生)、チュニジア、インド、サウジアラビア、スペイン、イラン、と多様な背景からの人々が学生として活発に参加して活気をつけてくれている。本学の学生が日本主体であるのからすると相当なものであると言える。

本プログラムは Kogakuin English Lecture Series(KELS)という仕掛けをプログラムに持つており、これが教育効果として実に有効である。この英語講演会シリーズについてはシラバスに詳細が書かれているが、広範囲な分野をその専門家たちに英語で講演あるいは workshop として開催していもらうという企画である。この企画の利点は学生が、今までプログラムで育成してきた知識とその時点で彼らが生成している Global Hodological Maps の総合的な実践の場であるということである。2011 年度は震災の影響もあり、講演会のキャンセル等もしたが、以下のように計 4 回開催することを得た。

Eileen Coates 氏 Artist

*Pottery and Identity: Stories from Gujarat*

2011 年 7 月 4 日

Brian Coates 氏 元 University of Limerick

*What Was Deconstruction?*

2011 年 7 月 6 日

Michael Coxall 氏 School of Oriental and African Studies, London University, UK  
*Shakuhachi Player*

*Tradition and Modernity: a conflict in beliefs*

&

*A Short Shakuhachi Performance with President Mizuno* (水野学長と尺八共演)

2011 年 10 月 20 日

David Chapman 氏 The University of South Australia

*Different Faces, Different Spaces: Tracing the History of the Ogasawara Islands*

2011 年 12 月 7 日

講演の内容は文学、音楽、批評理論、社会学と多岐にわたるが、ECSP/PICC の学生は、本講演会を通して、これまで場合によっては無関係として触れてこなかった、あるいは無関心でもって切り捨ててきた分野に触れ、視野を広げ、関心をつむいでいく。こうした知的作業は、つねに知的態度の変化を伴うとともに、多くの学生にとって講演者のもたらす非日本文化・言語圏との対峙の機会であり、自分が試される場もある。この機会は学生自身が自分で感じられる国際的通用度の尺度となるものであり、場数を踏んでの明らかな向上が経験されるという効用がある。

こうした観点から企画者としては必ず講演会のほかに、飲食を共にする社交の場を設けることをプログラムの一環としてやっている。こうして客観的言葉ベースの交流、また社交スキルの経験をつむぐ機会を提供するのである。向上していく学生たちは積極的にこの機会を活用するものが多い。自発的に来日講師たちに東京案内等の名目で関わっていく学生たちも多くみられるが、このように学生は英語の運用力、英語環境での機能力は自立して渡り歩くことができるスキルをこうした過程を経て習得していく。また、卒業した学生が知り合いを連れて講演会やその後の交流の場に顔を出して応援してくれる場ともなっている。こうした卒業生の存在は ECSP(PICC)

を経た後の自分たちのモデルともなるといった意味合いもありよい刺激となっている（大学院留学するもの、仕事で海外に出張するもの、外資系の就職を目指すもの、国内の現場で国際化の流れを経験しているもの等々）。ECSP・PICC がますます transcultural 化ハイブリッド化する世界の中で学生が力を発揮できる力の育成の一助となることを願う。

またいいうまでもなく、コミュニティにとっても、工学院大学の教職員にとっても、こうした第一人者たちとの交流は貴重な学術交流であり、将来的な研究の展開、学生・学者交流のネットワークを広げていくことになる。これが工学院大学にとっては、ますます国際社会での立場をより向上させていくことを意味するのはもちろんである。

## Bibliography

Adachi, S. *A Monolingualistic Identity in Transculturality: Japanese and Foreign Languages*, Proceedings of International Conference on Foreign Languages (MICFL), University Putrajaya Malaysia, Malaysia 2010.

Adachi, S. *Undermining Coexistence: Japanese Discursive Formations Related to Empathy*, 4<sup>th</sup> Global Conference on Multiculturalism, Conflict and Belonging, Mansfield, Oxford, September 2010.

Adachi, Setsuko & Michael Kearney, *Educating Engineers for the 3rd Paradigm: Identity Matrixing and Global Hodological Mapping*, International Cooperation in Engineering Education 2008 JSEE Annual Conference, pp. 20-27, August, 2008.

Adachi, Setsuko & Michael Kearney, *Forging Global Hodological Maps for the Meta-Symbolic Order, Re-visioning*

English Studies in Asia, 2008  
ELLAK International Conference  
Proceedings, pp. 209-214,  
November, 2008.

Adachi, Setsuko & Michael Kearney, *Globalization and Identity: A Case Study of Japanese Amae*, Proceedings International Conference On Social Sciences and & Humanities 2008 Crossing the Borders of Knowledge for the Future, CD-ROM, June, 2008.

Adachi, Setsuko & Michael Kearney, Japan and the United States: An Inter-Cultural Analysis of Depictions of, and Attitudes toward, War, 29th Annual Meeting of the Southwest/Texas Popular Culture and American Culture Association, February 14, 2008.  
(口頭発表)

Adachi, Setsuko & Michael Kearney, *Maintaining Japanese Harmony: A Subjugating Silence, Sound, Silence and the Arts* Symposium, Nanyang Technological University, February 28, 2009. (口頭発表)

Doi, Takeo. [trans. John Bester], 1978. The Anatomy of Dependence, Tokyo: Kodansha International.

Hardt, Michael & Antonio Negri, 2001. Empire. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.

Kearney, Michael & Setsuko Adachi, *An Identity Matrixing Model for Transculturality*. In Katherine Wilson (ed.) 2010. Looking At Ourselves: Multiculturalism, Conflict &

Belonging. Inter-Disciplinary Press:  
<http://www.inter-disciplinary.net/at-the-interface>.

Kearney, Michael & Setsuko Adachi, *Deconstructing the Frameworks of Identity: The Identity Matrixing Model.* (2012 年出版予定)

Kearney M. and S. Adachi, *Mapping Hybrid Identities: A Matrixing Model for Transculturality*, in From Conflict to Recognition: Moving Multiculturalism Forward. M. Kearney (ed), Inter-Disciplinary Press, Oxford, 2011.

Kearney, Michael & Setsuko Adachi  
*The Production of the Global Consumer: Economic Booms and the Destruction of Cultures*, International Conference On Social Sciences and & Humanities 2008 Crossing the Borders of Knowledge for the Future, CD-ROM, June, 2008.

Kearney, M., *Designing Singaporeans: A Project in Identity Construction*, 4<sup>th</sup> Global Conference on Multiculturalism, Conflict and Belonging, Mansfield, Oxford, September 2010.

Kearney, M., *Transcultural Identity Formation: The Matrixing of Language(s) and Regional and Global Cultural Constructions*, Proceedings of International Conference on Foreign Languages (MICFL), University Putrajaya Malaysia, Malaysia 2010.

Sartre, J., H. Barnes (trans), *Being and Nothingness*. Washington Square Press, New York, 1993.

## ① 発表論文(一部)

Adachi, S. *A Monolingualistic Identity in Transculturality: Japanese and Foreign Languages*, Proceedings of International Conference on Foreign Languages (MICFL), University Putrajaya Malaysia, Malaysia 2010.

Adachi, S. *Undermined Empathy, Undermined Coexistence: Japanese Discursive Formations Related to Empathy*, in The Need to Belong: Perpetual Conflicts and Temporary Stability, Albin Wagener & Tina Rahimy(eds), Inter-Disciplinary Press, Oxford. (2012 出版予定)

Kearney, Michael & Setsuko Adachi, *An Identity Matrixing Model for Transculturality*. In Katherine Wilson (ed.) 2010. Looking At Ourselves: Multiculturalism, Conflict & Belonging. Inter-Disciplinary Press:  
<http://www.inter-disciplinary.net/at-the-interface>.

Kearney, Michael & Setsuko Adachi, *Deconstructing the Frameworks of Identity: The Identity Matrixing Model*. (Inter-Disciplinary Press, Oxford, 2012 年出版予定)

Kearney M. and S. Adachi, *Mapping Hybrid Identities: A Matrixing Model for Transculturality*, in From Conflict to Recognition: Moving Multiculturalism Forward. M.

Kearney (ed), Inter-Disciplinary Press, Oxford, 2011.

Kearney, M., *Designing Identity: An Attempt to Manufacture Singaporeans*, in The Need to Belong: Perpetual Conflicts and Temporary Stability, Albin Wagener & Tina Rahimy(eds), Inter-Disciplinary Press, Oxford. (2012 出版予定)

Kearney, M., *Transcultural Identity Formation: The Matrixing of Language(s) and Regional and Global Cultural Constructions*, Proceedings of International Conference on Foreign Languages (MICFL), University Putrajaya Malaysia, Malaysia 2010.

## ② 学会発表

2009 年度

Kearney, Michael & Setsuko Adachi, *An Identity Matrixing Model for Transculturality*, 3rd Global Conference on Multiculturalism, Conflict and Belonging, Mansfield, Oxford, September 2009.

2010 年度

Adachi, S. *A Monolingualistic Identity in Transculturality: Japanese and Foreign Languages*, University Putrajaya Malaysia, Malaysia 2010.

Adachi, S. *Undermining Coexistence: Japanese Discursive Formations Related to Empathy*, 4<sup>th</sup> Global Conference on Multiculturalism, Conflict and Belonging, Mansfield, Oxford, September 2010.

Kearney, M., *Designing Singaporeans: A Project in Identity Construction*, 4<sup>th</sup> Global Conference on Multiculturalism,

Conflict and Belonging, Mansfield, Oxford, September 2010.

Kearney, M., *Transcultural Identity Formation: The Matrixing of Language(s) and Regional and Global Cultural Constructions*, University Putrajaya Malaysia, Malaysia 2010.

2011 年度

Kearney, Michael & Setsuko Adachi, *Deconstructing the Frameworks of Identity: The Identity Matrixing Model*, 5th Global Conference on Multiculturalism, Conflict and Belonging, Mansfield, Oxford, September 2011.

(Adachi, Setsuko and Michael Kearney)



## 政党政治再編成期ドイツにおける3政党間関係の変容に関する 理論的・実証的分析

工学院大学 基礎・教養教育部門 小野 一

北海学園大学 法学部 山本 佐門

北海学園大学 法学部 本田 宏

福岡大学 法学部 東原 正明

Die theoretische und empirische Analyse über die Umformierung des deutschen Parteiensystems

— Bezuglich der Beziehungen zwischen der SPD, den Grünen und der Linke in einer Transformationsphase —

Hajime Ono, Division of Liberal Arts, Kogakuin University

Samon Yamamoto, Department of Law, Hokkaigakuen University

Hiroshi Honda, Department of Law, Hokkaigakuen University

Masaaki Higashihara, Department of Law, Fukuoka University

**ABSTRACT:** The transformation processes of party-politics in the present German Federal Republic are proceeding more explicitly than in other European countries. The purpose of this research project is to grasp interparty relations between the Social Democrat (SPD), the Greens and the Left Party and to explain about those developments theoretically and empirically. It is also expected that trans-disciplinary dialogues and comparative studies would increase our knowledge about political parties, social movements and engagements in the recent civil societies.

代欧州政治をテーマとした共同研究である。

### 1. はじめに

#### 1. 1. 本プロジェクトの目的および研究体制

総合研究所プロジェクト研究「政党政治再編成期ドイツにおける3政党間関係の変容に関する理論的・実証的分析」は、2010年度より2ヶ年計画で実施される、現

五党制の定着をはじめ、戦後二度目の政党政治再編成の渦中にあるドイツを主たる対象に、社会民主党（SPD）、緑の党、左翼党の3党間の新たな関係、および、それと党内外の政治過程との相互規定性についての理論的・実証的分析を行い、かつ、他のヨーロッパ諸国の事例との比較や、社会運動論・市民社会論などの学問的対話を通じて知見を豊富化することを目的とする。グローバル経済の下での格差拡大などの問題に応え切れていく

ない政党政治を、政治思想史的視点と結びつけつつ問い合わせる試みだが、それを通じて、市民社会のあるべき姿を模索する現代の議論にも多大な理論的貢献をなす。

本プロジェクトのメンバーは、同時に、学術振興会基盤研究B「政党政治再編成期欧洲における市民社会論研究の再構築」を申請した。総合研究所プロジェクト研究は、それ自体、独立した研究課題だが、本格的な現地調査を伴う大規模研究プロジェクトの重要な構成部分として、より高いレベルでの学術的成果へと発展させる可能性を秘めたものである。ただし諸般の事情から、本プロジェクト研究は2011年度を最終年度とし、今後の研究計画は科研申請も含め再検討することとした。

研究代表者は小野一が務め、共同研究者として北海学園大学教授の山本佐門（敬称略、以下同じ）および本田宏が加わる。両氏はいずれも、ドイツを中心に現代政治学や、政党論、社会運動論、市民社会論などに造詣の深い研究者である。2011年度よりは、東原正明（福岡大学法学部専任講師）が共同研究者に加わる。同氏は、オーストリア自由党をはじめとする研究業績を有する他、2010年夏まで在奥日本大使館専門調査員としてウィーンに赴任していたため、その知見が本研究プロジェクトの深化と視野の拡大に寄与すると期待される。

このような研究体制の下で、2011年度には、小野がドイツ出張で現地調査（インタビューも含む）を行うとともに、4回の国内研究会を開催した。その成果は学術論文等のかたちで順次発表されている。以下では、2011年度における研究活動の経緯と成果を概説するとともに、これまでの総括と今後の展望を述べ、2年間にわたるプロジェクト研究の報告とする。

研究活動報告に先立ち、2009年連邦議会選挙以後の州レベルにおける政党政治の展開について概観しておくことが有益だろう。

## 1. 2 最近におけるドイツ政党政治の展開

2009年連邦議会選挙で、中道保守連立、すなわちキリスト教民主社会同盟（CDU／CSU）と自由民主党（FDP）の連立は、メルケル（Angela Merkel）首相の下でドイツ政治の中核に復した。しかしながらこの政権は、安泰ではなかった。世論調査では連邦野党がめざましい支持率回復を見せ、2010年夏には赤緑連立（SPD+緑の党）による過半数確保が可能な水準にまで達する<sup>1</sup>。そのような中、戦略的思惑も絡んでさまざまなことが語られた。それがほんとうに潮目の変化を意味するのかどうかを問うためには、2010年以降の州レベルでの展開が参考になる。

2010年5月9日の州議会選挙<sup>2</sup>の結果、ノルトライン＝ヴェストファーレンでも左翼党が議会入りを果たし、五党制の下で中道保守陣営も赤緑連立も多数派形成でき

ないという、2005年連邦議会選挙後の連邦レベルと類似した議席配置が出現した。FDPはいかなる三党連立にも否定的だったため、選択肢はいったん、赤赤緑連立（SPD+左翼党+緑の党）か大連立（CDU+SPD）に絞られたと思われた。交渉の過程で、SPDと緑の党は、左翼党には連立能力はないとの認識で一致する。だが、大連立は避けたい連邦SPDの意向もあり、当地のSPDも、赤緑連立少数派内閣への決意を固めていく。こうしてクラフト（Hannelore Kraft）は、7月14日の州議会で首相に指名された。これは、2013年連邦議会選挙を見越してのシグナルである。赤緑連立の再来。ただし政治的プロジェクトとしてではなく、戦術的手段として<sup>3</sup>。

その頃ハンブルクでは、2008年2月以来の黒緑連立（CDU+緑の党）の雲行きが怪しくなっていた。同政権が計画していた教育制度改革が2010年7月の住民投票により事実上頓挫すると、ボイスト（Ole von Beust）市長は辞意を表明する。後継市長に任命されたのはCDUのアールハオス（Christoph Ahlhaus）だが、彼は保守的で、疎遠となった同党支持者を呼び戻すことを期待された人物である。緑の党には容認し難い経済開発政策が喧伝され、野党サイドや報道機関からは繰上選挙を求める声が聞かれた。ついに、緑の党党大会はCDUとの連立解消を決定する。それを受け、アールハオス市長は同年11月29日、緑の党の大臣を解任し、黒緑連立はここに幕を閉じた。

こうして議会は解散され、繰上選挙が2011年2月20日に行われる。SPDは筆頭候補にショルツ（Olaf Scholz）を立て、ハンブルク市政の奪還をめざすが、結果は同党が過半数議席を獲得する大勝利だった。同市SPDは、選挙前から、経済政策重視の姿勢を打ち出し、なおもエコロジーを標榜する緑の党に搖さぶりをかけた。「エコノミーとエコロジー」という両党関係の古典的テーマが顕著なかたちで現れたわけである。

2011年3月27日には、南ドイツのふたつの州で州議会選挙が行われた。最も注目されたのは、上昇気流に乗る緑の党である。ラインラント＝プファルツでは、15.4%の得票で第三党。バーデン＝ヴュルテンベルクでは24.2%の得票率で、SPD（23.1%）を抜いて第二党になり、クレッチャマン（Winfried Kretschmann）が史上初の緑の党の州首相に選ばれる。「シュトゥットガルト21」への抗議行動以来の社会運動の盛り上がりに加え、福島原発事故との関連でドイツの原子力政策が急遽争点に浮上したこと、この選挙に大きく影響したとされる。なお、左翼党はいずれの州でも議会入りを逃した。

伝統的な保守の牙城の両州で赤緑連立が明らかな勝利をおさめたことは、重要な意味を持つ。特に、バーデン＝ヴュルテンベルクで成立した緑の党主導の赤緑連立は前例がないだけに、ドイツの政党連立政策全体に与える影響も小さくない。ただし、政権交代は政治の転換と同

義ではない。カラーは同じでも、政策内容や政治的方向性は、「赤と緑」の実験の頃とは違っている可能性は排除されない。

5月22日のブレーメン選挙では、SPDと緑の党がともに票を積み増し、2007年以来の赤緑連立政権が継続を果たした。ここでも緑の党は、得票率22.5%（前回比6.0%増）と目覚ましい躍進を遂げ、史上はじめてCDUを上回り第二党となった。しかし、2001年以来赤赤連立（SPD+左翼党）が政権の座にあったベルリンでは、2011年9月18日の選挙後、一時は有力視された赤緑連立ではなく、大連立政権が成立した。

2012年3月25日、ザールラントで州議会選挙が行われた。2009年以来の「ジャマイカ連立」（CDU+FD P+緑の党）が閣内対立により崩壊したことを受けた繰上選挙である。結果<sup>4</sup>は、SPDが得票を増やすものの、第一党のCDUには及ばず。緑の党や左翼党の後退、FDPの議席喪失、新党「海賊党」の（ベルリンに続く）議席獲得など、小政党にも変化があった。この結果を受けて、大連立政権が成立する公算が高い。計算上の可能性にもかかわらず「赤赤緑連立」が成立しなかったのは、前回（2009年）選挙と同じ。また、緑の党と保守主義政党との連立は注目の的だったが、ハングルクの黒緑連立に続きザールラントのジャマイカ連立も任期を全うできずに早期に崩壊した。

続く5月6日にはシュレスヴィヒ＝ホルシュタインで、5月13日にはノルトライン＝ヴェストファーレンで州議会選挙が行われる（いずれも繰上選挙）。特に後者は、ドイツ最大の人口を擁する州であるゆえ次期連邦議会選挙（2013年？）を見越して注目度も高い。4月時点の世論調査では、赤緑連立が過半数を確保しそうだとの予測も出ている<sup>5</sup>。ここでも「海賊党」が議会入りを果たし、赤緑連立少数派内閣を閣外協力により支えてきた左翼党は「5%条項」により議席を失いそうな情勢である。

## 2. 国内研究会

国内研究会は、本研究プロジェクトの重要な柱のひとつである。研究成果や情報を共有し、刻々と変わる日独の政治情勢について適切に評価するために、メンバー間の定期的な会合が必要なのである。本年度には、工学院大学で1回、北海学園大学（札幌市）で3回の研究会を開催している。この中には、他の研究会と共同開催のかたちをとったものもある。また、これらの研究会は公開研究会として企画されており、外部からの参加者を加えて研究交流活動の活発化に寄与することができた。

### 2. 1 第4回研究会

2011年6月18日には、北海学園大学にて第4回研究会が行われた。今年の日本比較政治学会が北海道大学で開

催されるのにあわせての企画であり、そのため当研究会も今回に限り午前中の開催としている。主報告は本田宏が、「福島原発事故の文脈と余波／日本とドイツの比較の視点から」というテーマで行った。東日本大震災以後の急激な状況変化の中、本研究会においても、原発問題を軸とする集中的な議論は欠かせない。すでに本田には日独の原子力政策に関する業績があり、最新の情報を知悉する上でも有利な位置にいる。この日の研究会には、本プロジェクトのメンバー以外にも、田口晃氏（北海学園大学）、魚住弘久氏（千葉大学）、佐藤温子氏（ドイツ・リューネブルク大学に留学中）も参加した。

本田報告は、まず、福島原発事故の波紋を、行政当局、市民社会、主要国政府ごとに要約した上で、日独における政治過程を検討する。ドイツのメルケル政権は、承認のように、事故発生後ただちに原発運転期間延長の凍結（モラトリアム）を宣言するとともに、各界代表も参加する「倫理委員会」での審議を経て、2011年6月には、2022年までにすべての原発を停止することを決定する。ドイツは、EUレベルでも原発の安全基準を厳しくすることを要求し、英仏などの原発推進国と対立する。日本ではこの時期、統一地方選挙では原発問題はほとんど争点にならなかったが、既存原発の停止などにより、原発推進を前提とした政府方針は見直しを迫られる。菅元首相は脱原発や再生可能エネルギーに比較的好意的な立場をとるが、原子力政策の見直しにつながるかどうかは政局次第と言える。それ以外の国々でも脱原発宣言をしたり、原発推進国でも原子力反対運動が盛り上がりを見せたりしている。市民社会での世論状況の変化は、各種調査データやデモの高揚などにも見られる。インターネットが既存メディアへの対抗勢力の役割を果たすことはしばしば指摘されるが、近年では、ツイッターやフェイスブックなどと言ったさらに新しい情報手段が運動の行方に大きな影響を与えている。

日独の政治過程の比較をふまえ、重大事故への対応がかくも違ったものになる要因を、法制度、政治構造、選挙、社会運動などのさまざまな側面から分析する。脱原発を助長したり抑制したりする政治構造への注目は、「チエルノブイリ効果」の現れ方の違いを分析する際に重視したことだが<sup>6</sup>、そのような手法は福島原発事故後の各國政治過程にも援用されるべきである。本田はここでは、「連邦制・中央集権制と原発認可・電力行政」、「裁判所の独立性・従属性」、「選挙制度」、「政党制と政党支持の構造」、「原子力政策関係省庁の多元性（推進行政と監督・監視行政の分離・一体化）」、「電力市場の特徴」を挙げる。

こうした知見は、「福島原発事故の文脈」を具体的に考察する中で深められる。脱原発の方向に舵を切ったドイツだが、四大電力会社のひとつEnBWは原発電力輸出入を支配するフランス資本の傘下にあること、大電力会社は再生可能エネルギーへの投資に消極的であるばかりか、系列下の送電会社が高い託送料を設定し、発送電分

離による再生可能エネルギーの普及を妨げていることなどから、予断を許さない。こうした状況に対し、緑の党的伸張、環境意識の高い市民による自然エネルギー電力の購入、固定価格買取保障制度の導入、 Chernobyl 事故の影響を封じようとする動きに抗して低線量内部被曝の影響を正当に評価する放射線影響評価基準を提倡する運動などが対峙しているのが、今日のドイツであると言える。これに対し日本では、さまざまな意味で脱原発派には不利な状況にある。本田は日本政治の問題点を、「開発国家モデルに英米型の『多数決型民主制』、『新自由主義』が接ぎ木された形で、政治行政・社会経済制度の再編成が行われ」、「二大政党化進むが、大政党の凝集性が低く、政策実現能力が低い」と要約する。

今回の研究会のテーマは、今日の日本社会において極めて関心度の高い問題である。質疑応答では、さまざまな質問や意見が出された。

日独の原子力政策の比較は、興味深い。しかし原子力の行方に大きな影響力をもつ諸国の中には、両国とは全く違った事情を抱えるところもある。原発推進国であるフランスやロシアは、途上国への原発輸出や、核廃棄物・放射能汚染除去の分野でも積極的なビジネスを展開する。米国も、日本企業との提携を進める一方、劣化ウラン弾の製造なども行っている。これらはいずれも核兵器保有国であり、核兵器大国ほど原子力産業に固執する傾向がある。原子力産業と核兵器開発とは切っても切れない関係にあるとの視点は重要であり、このことは、被爆国であるがゆえに原子力の平和理由を推進するという言説が受け入れられた戦後日本のパラドックスを再考する際の手がかりにもなり得る。

被災地支援や食の安全とも結びついた市民・社会運動の盛り上がりにも話が及んだ。だが結局のところ、最大の関心は、脱原発が首尾よく進展するのか否か、ということである。これについては、楽観的なものから悲観的なものまで、研究会参加者の間でも意見は分かれ。本田が重視することのひとつは、新規の原発建設や原子炉再稼働が困難になる中で「事実としての」脱原発が進んでいくという効果であり、それは、フランスのような原子力依存度の高い国でも例外でない。しかし、上述したような脱原発を妨げる諸要因とともに、状況次第では原発推進派の巻き返しや世論の選好の再変容も排除できないだけに、予断を許さない。

## 2. 2 第5回研究会

2011年9月17日には、北海学園大学で第5回研究会（第71回現代政治研究会との共催）が開かれる予定だった。だが報告者の東原正明の急病のため、予定されていた報告は次回に順延となった。ただし、都合のつくメンバーのみが自発的に集まっており、本報告書ではこれ

を第5回研究会とカウントしている。当初の予定より縮小された会合ではあるが、最近の日独の政治情勢についての情報交換、および研究会活動の事務的な打ち合わせがなされた。

## 2. 3 第6回研究会

2011年12月10日には、工学院大学で第6回研究会が開催された。主報告は東原正明が、「ウィーンにおける赤と緑の連立／2010年市議会選挙と赤緑連立政権の形成」というテーマで行った。同時に小野も、ドイツ左翼党の新基本綱領に関する問題提起を行うが、あくまでも東原報告をメインに、時間が許す範囲での簡単なものにとどめた。研究会には、本プロジェクトのメンバーの他に、魚住弘久氏（千葉大学）が参加。なお、本研究会の前日には「環境政策史研究会」が東京都内で開催されており、希望する者は両方の研究会に参加できるような日程とした。

ウィーンでは、2010年10月10日の市議会選挙<sup>7</sup>の結果、オーストリア社会民主党（SPÖ）と緑の党的連立政権が成立した。東原報告では、まず、ウィーンの選挙制度や同市がオーストリア連邦制の中で占める位置について解説される。そもそもウィーンは、SPÖの伝統的牙城であり、戦後史において同党が過半数を割り連立政権を余儀なくされたのは、1996年選挙と2010年選挙の2度しかない。なぜSPÖは緑の党と連立を組んだのかについての分析が主題だが、かつてハイダーを輩出した極右政党オーストリア自由党（FPÖ）の伸張が影を投げかけるという状況が、ここでも垣間見られる。

報告では、各党支持者層の分析とともに、選挙綱領に表れた各党の主張が紹介される。FPÖが環境問題に全く言及しないのとは対照的に、他の主要3党の政策距離は近接している。経営者の支持の強いオーストリア国民党（ÖVP）が経済政策と関連づけた環境政策を掲げるものの、3党はいずれも環境問題に好意的で、しかもそれを交通政策と結びつけて論じる。SPÖと緑の党的ブロックとÖVPとの間に隔たりが見られるのは、移民政策である。SPÖと緑の党的間の関係は複雑だが、人的・イデオロギー的な親近性に加え、市政において協力して環境問題に取り組んできた実績が、オーストリアでは初の赤緑連立政権の形成に結びついたと言える。

その一方で見過ごされてはならないのは、FPÖが議席を大幅に増加させたことである。そこには、SPÖからも少なくない票が流れ込んだとみられる。他の3党は同党との連立を拒否している。SPÖは、ウィーンでの圧倒的優位を失った後、ÖVPとの連立に入ることもできず、いわばFPÖのひとり勝ちによって緑の党との連立に「追い込まれた」との解釈も成り立つ<sup>8</sup>。

かくして社会民主主義の伝統的牙城で、さまざまな状況変化の中で赤緑連立政権が形成された。そこには、ウィーンやオーストリアに特有の事情もあるのだが、こう

した事例研究を重ねていくことで、本プロジェクト研究がテーマとする政党政治再編成の研究の視野を広げ、欧洲各地で起こりつつある変化に迫る手がかりとすることができる。

東原報告に続き、小野が報告を行った。ドイツ左翼党が正式な政党になったのは2007年のことだが、基本綱領の採択は2010年末にまでずれ込む。難産となった党内論議を、同黨のウェブサイトなどに依拠して概観する。基本綱領をめぐり対立があるとともに、理論的にも未成熟なものを残しているであろうことは、綱領がわざわざ「学習期政党」と自己規定していることからも推測できる。2010年3月20日付けの党執行部綱領草案と、2011年5月26日付け中間報告との間にかなり大きな文言変更があることは、こうした状況の反映に他ならない。小野は、特に環境問題への姿勢を述べた箇所でそれが見られることに注目した<sup>9</sup>。こうした問題提起は仮説の域を出るものではないが、これまで研究上の盲点となっていた左翼党の分析を進めて行くにあたって、ひとつの手がかりとはなるであろう。

## 2.4 第7回研究会

次項（3.5.）を参照のこと。

## 3. 海外調査および出張報告会（第7回研究会）

研究代表者である小野は、2012年3月6日から3月15日まで、ドイツへ出張した。さらには、この海外調査の成果を共同研究者と共有することを目的に、3月24日、北海学園大学（札幌市）を訪問し、報告を行った（これを第7回研究会としてカウントする）。以下ではその模様と成果を、各項目ごとに概説する。

### 3.1 資料収集活動およびその成果

3月7日午後、9日午前、12日午後および13日には、ベルリンにあるハインリッヒ・ベル財団の緑の思想文書館<sup>10</sup>を訪問した。この文書館は、これまでにもドイツ出張の際にはしばしば立ち寄っている。*Zeitschrift für Parlamentsfragen*をはじめ、ドイツ政治に不可欠な雑誌を参照し、必要な論文はコピーした。

近年、「黒と緑」というテーマがアカデミズムでも注目される<sup>11</sup>。ハンブルクの黒緑連立やザールラントのジャマイカ連立といった新しい連立パターンが州レベルで出現したことの反映だが、（左翼陣営の再編成とともに）緑の党が保守主義政党も含め連立オプションを多様化させつた事実は、ドイツ政党政治再編成を読み解く上でも非常に重大な意味を持つ。今回の文書館訪問では、これと関連する文献や一次資料の収集が重要な目的のひとつとなつた。

緑の思想文書館の開架式書架には、州別の緑の党的資料のファイルがある。「黒と緑」の問題を解くための手がかかる

りと思われるバーデン＝ヴュルテンベルク州緑の党的動向<sup>12</sup>を知るために、当該ファイルを参照した。あわせて、関連する研究文献の調査を行つた。入手可能な書籍は購入の手続きをとり、そうでないものについては可能な限りコピーした。コピーを入手した主要な文献は、Winne, Hermann and Wolfgang Schwegler-Rohmeis (eds.), 1989, *Grüner Weg durch schwarzes Land: 10 Jahre Grüne in Baden-Württemberg*. Stuttgart: K. Thienemanns Verlag、Reinhold Weber, 2010, Baden-Württemberg: «Stammland des Liberalismus» und Hochburg der CDU. In: Andreas Kost, Werner Rellecke and Reinhold Weber (eds.), *Parteien in den deutschen Ländern: Geschichte und Gegenwart*. München: C.H.Beck、JETZT ABER GRÜN!: Das Programm für Baden-Württembergなど。

同文書館職員のカンプ（Robert Camp）氏には、研究意図を説明した上で、資料状況に関する相談に乗つてもらう。閉架式書庫には、過去の新聞記事の抜粋が保管されている。それを元に上記テーマについての政治過程を再構成するという方法が考えられるが、保管されている文書は膨大なので、時期的な限定を行う必要がある。緑の党（バーデン＝ヴュルテンベルク州）のウェブサイトには、党大会等の日時と議題を掲載した一覧表があるので、それを参照に閲覧すべき資料を絞り込むとよい、との助言を受けた。

3月7日午前および12日午前には、同じくベルリンにあるローザ・ルクセンブルク財団の文書館を訪れた。ドイツの主要政党は、いずれも自らの系列の研究機関を擁しているが、同財団は左翼党系の研究機関である。今回がはじめての訪問であるため、施設や所蔵資料の概要をまず把握した。2011年末の基本綱領採択に至る党内論議（第6回研究会の項も参照）を跡づけておきたいと考えた。同文書館にも、左翼党関係の新聞記事等を集めたファイルがある。こうした資料を本格的に調査することは今後の課題だが、とりあえず今回は、エルフルト党大会（2011年10月）と前後する日時のニュースをコピーした。

### 3.2 インタビュー記録（抜粋）および解説

#### 3.2.1 トーマス・ローマイヤー氏

ローマイヤー（Thomas Lohmeier）氏は、左翼党のキッピング（Katja Kipping）連邦議会議員<sup>13</sup>の秘書で、ベルリンの連邦議会に勤務する。「連帶的近代のための機構」<sup>14</sup>の活動にも関与。メールでインタビューを申し込み、了承を得る。面談は3月8日午後、連邦議会（Wilhelmstr.）内のレストランにて実施。左翼党のことに限らず詳細な話を聞かせてもらうが、文書としては、党内グループ *forum demokratischer sozialismus* (fds) が2010年9月6日付けで出したエルフルト綱領への修正提案と、左翼党綱領に向けての党内論議の対立点を解

説した『ノイエス・ドイツラント』の2011年10月21日付けの記事を頂く。当方からは、拙著（小野 2012a）を贈呈する。この会合には佐藤温子氏が同席し、インタビューの補助業務などを行った。

以下の質問票（Fragebogen）を事前に送付し、それに沿うかたちでインタビューが行われた。

## FRAGEBOGEN

### 1 Strategische Übersicht der rot-rot-grünen Allianz

Altmodisch unter der Bedingung der "rot-grünen" Mehrheit?

- Z.B. Minderheitsregierung in NRW oder Grün-Rot in Baden-Württemberg
- Schon überflüssig? Welche Rolle spielt die LINKE? Ist neue bürgerliche Koalition (Schwarz-Grün oder "Jamaica") Alternative?
- Trotz "rot-grüner" Mehrheit kommt die Große Koalition in Berlin!

Gibt es noch Chance für überparteiliche Zusammenarbeit wie Institut Solidarische Moderne?

### 2 Programmatische Entwicklung

Gibt es Auseinandersetzung auf dem Weg zum Erfurter Programm der LINKE?

Meinungsverschiebung u.a. im umweltpolitischen Bereich?

- Diskrepanz zwischen 1. Entwurf (März 2010) und Diskussionsstand (Mai 2011)

Bedeutung der Grundeinkommen-Debatte in der heutigen LINKE?

### 3 Linke Politiken

Umweltpolitik und soziale Gerechtigkeit vereinbar?

- Z.B. Atomausstieg und Arbeitslosigkeit

Wirtschafts- bzw. Finanzpolitik

- Alternative zum Neo-Liberalismus möglich?

Friedens- bzw. Sicherheitspolitik

- Ist Pazifismus durchsetzbar auch bei der Regierungsübernahme?

### Exkurs: Aktuelle sozialpolitische Lage in Japan

Energiepolitische Schwankung nach der Atomkatastrophe Fukushimas

Steuererhöhung für Wohlfahrt und Wiederaufbau nach dem Erdbeben!?

Wiederherstellung der sozialen Gerechtigkeit im demographischen Wandel?

Populismusgefahr in der unübersichtlichen Zeit, besonders in Osaka

インタビューの要約は、以下のとおり。この要約は、佐藤氏が現場でとったメモに基づき、インタビュー相手

の修正を受けた上で作成したものである。佐藤氏の丁寧な作業と語学力は大いに助けとなった。

### Rot-rot-grüne Allianz? (SPD - Die Linke - die Grünen)

Lohmeier: Sehr sehr unwahrscheinlich. Es gibt keine gemeinsame Politik und sehr starke Differenz zwischen den Parteien. Auf Landesebene gibt es als Beispiel eine SPD-geführte rot-rote Koalition in Brandenburg seit 2009. Es ist nötig, immer auszuprobieren, was zusammen machbar ist. Im NRW hat eine Minderheitsregierung lange gut funktioniert. Im Hamburg hat die schwarz-grüne Koalition nicht gut funktioniert. Für die Bundestagswahl 2013 muss die Linke sich gar nicht darauf vor, eine rot-rot-grüne Koalition zu bilden. Es ist offensichtlich, dass die SPD, wenn es keine Mehrheit für Rot-Grün gibt, eine Große Koalition gebildet wird. Das Institut Solidarische Moderne zielt nicht unmittelbar auf eine rot-rot-grüne Koalition, sondern legt das Hauptgewicht eher auf die Schaffung neuer politischer Lösungsansätze.

### Programmatische Entwicklung

#### Was entsteht nach dem Neo-Liberarismus?

Lohmeier: Es ist schwer zu sagen. Z. B. fordert ATTAC die Einführung einer Finanzaktionssteuer. Das fordert jetzt auch Merkel. Vorher hat nur die Linke die Einführung eines Mindestlohns gefordert, aber seit neuestem ist die CDU auch dieser Meinung aufgesprungen. Wir brauchen ein neues Prinzip. Ich finde die Wahl im Frankreich interessant. Der Kandidat der Sozialisten in Frankreich fordert gerade die Erhöhung der Einkommensteuer.

#### Bedeutung der Grundeinkommen-Debatte ?

Lohmeier: Auf dem Parteitag der Linken wird das Thema "Grundeinkommen" nicht öffentlich diskutiert, obwohl es eigentlich verschiedene Meinungen gibt. Die Linke hat zwar auf ihrem Parteitag eine Kindergrundsicherung für alle Kinder und Jugendlichen beschlossen, aber diese Position war sehr umstritten. Die Kinder sollen gesichert sein, unabhängig vom Einkommen der Eltern. Ob die Flügel innerhalb der Linken einen Kompromiss zum Grundeinkommen finden, ist sehr fraglich.

#### Atomausstieg und Arbeitslosigkeit?

Lohmeier: Wir, die Linke, denken, wir müssen aus der Atomenergie aussteigen, so schnell wie möglich. Allerdings möchten die Unternehmen so lange wie möglich die Atomkraftwerke weiter betreiben. Die

Bedeutung der Atomkatastrophe in Fukushima kann nicht ignoriert werden. Wenn sie nicht passiert wäre, hätte Kretschmann nicht als Ministerpräsident in Baden-Württemberg gewählt werden können.

Aber auch in der LINKEN ist die Umweltpolitik strittig. In Brandenburg ist der Wirtschaftsminister aus der Partei "Die Linke". Er wollte hier lieber entgegen der Parteibeschlüsse die CCS<sup>15</sup>-Technologie durchsetzen. Diese Technik steht im internationalen Sprachgebrauch für die Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung, von der viele Akteure einen erheblichen Klimaschutzbeitrag erwarten, die aber auch sehr gefährlich ist, weil das gefährliche CO<sub>2</sub> über Jahrhunderte in der Erde gespeichert wird.

Aber die Linke ist nicht nur Arbeiterpartei. Sie thematisiert die soziale Politik. Aber ihre Wähler kommen aus vielen unterschiedlichen Milieus, wie eine Studie von Herrn Prof. Neubauer (Friedrich-Ebert-Stiftung) eindrücklich aufgezeigt hat. Es ist für die LINKE schwer, deren unterschiedlichen Interessen und Anforderungen gerecht zu werden.

#### **Einflusse der Griechenlandkrise?**

Lohmeier: Egal. Es gibt in den Flügeln der Linken verschiedene Meinungen zur EU. Im Frankreich ist die Linke etwas gespalten. Dort gibt es die KPF (Kommunistische Partei Frankreichs) und Trotzkisten usw. Im Herbst wird eine Konferenz zum Grundeinkommen in München abgehalten.

#### **Beziehung zu den Bürgerbewegungen?**

Lohmeier: Die Linke arbeitet mit ATTAC zusammen.



写真 1 3月8日のインタビューの模様

(左からローマイナー氏、ブラシュケ氏、佐藤氏)

Z.B., Online-Unterschriften-Sammlung, Treffen in Frankfurt, im Jahr 2007 Demo in Heiligendamm. Wir arbeiten auch beim Atomausstieg mit. Aber das Thema Ausstieg aus der Atomenergie gehört eigentlich zu den Grünen und Umweltverbänden. Allerdings gibt es in der Partei "Die Linke" eine Person, die die Linke und die Bewegungen koordiniert.

Die Demonstration, die ein Jahr nach der Atomkatastrophe in Fukushima stattgefunden hat, ist ein nachrangiges Thema für die Linke. Allerdings thematisieren es die Grünen und die Umweltverbände. Der Konflikt zwischen dem Ausstieg aus der Atomenergie und den Arbeitsplätzen ist kein Thema mehr.

#### **Aktuelle Themen im Institut Solidarische Moderne?**

Lohmeier: Arbeitslosigkeit, Europäische Krise, Sozialökologischer Umgestaltung

#### **Veränderung nach der Atomkatastrophe in Fukushima?**

Lohmeier: Wir müssen überlegen, welche alternativen Energieträger es gibt und wie wir eine sozial-ökologische Energiewende leisten können.

ローマイナー氏が「赤赤緑連立」に懐疑的な見通しを示したのは印象的だが、それはこの間の政局の反映なのかもしれない。左翼党基本綱領に向けて喧々諤々の党内論議があったことは、当事者の証言として伺い知ることができる。原子力政策では、左翼党は他党よりも早期の撤退を主張して脱原発法案に反対投票した。これが現実性を欠いた野党的パフォーマンスではないかとの問い合わせには、撤退時期をめぐる議論はテクノロジーや再生可能エネルギーの問題だと答える。また氏は、脱原発が雇用機会の喪失につながるのではないか、との議論を退ける。しばしば左翼党は労働者や失業者の物質主義的な要求を体現する政党との解釈がなされるが、インタビューにもあるように、近年のミリュー研究は、単なる労働者党を超えた左翼党の社会的構成の多様化を示唆している。従来型の賃金労働に含まれないもの（家事労働、リプロダクション、等）も視野に入れて労働概念の拡張が必要だとの指摘もあったが、このような問題関心は、ローマイナー氏じしんが「連帶的近代のための機構」を通じた理論活動に関わっていることとも通底すると思われる。なお、今日では左翼党は欧州議会で統一会派を組んでおり、国境を越えた交流もさかんだが、欧州左翼といってもその政治的立場は一様でないという。

#### **3. 2. 2. ロナルド・ブラシュケ氏**

ローマイナー氏との面談が1時間ほど続いた後、ブラシュケ (Ronald Blaschke) 氏が加わった。同氏もキッピング議員の下で働く秘書で、左翼党内ではベーシック・インカムについての議論で主導的な役割を果たす。当方から質問したいことは多々あるが、ブラシュケ氏は日本の社会政策の最新状況に強い関心を抱いているところで、インタビューに同席頂くことになった。前項に掲げた質問票の中で「Exkurs」の部分は、日本の社会政策についての当方よりの情報提供を意図して書かれたものである。当方より拙著（小野 2012a）を贈呈。

ブラシュケ氏よりは、ベーシック・インカム論をめぐる党内議論を集めた著書<sup>16</sup>の他、資料やパンフレット類を多数頂く。以下にインタビュー記録（要約）を掲げるが、これも前項のものと同様、佐藤氏のテキストにブラシュケ氏が加筆して作成されたものである。

### Grundeinkommen?

Blaschke: Seit 1993 hat die PDS eine soziale Grundsicherung gefordert, eine bedürftigkeitsgeprüfte, steuerfinanzierte Sozialleistung. Zugleich wurde ein weiter Arbeitsbegriff (Erwerbsarbeit, Haus-, Sorge-, Familienarbeit, bürgerschaftliches Engagement und Bildung/Muße) diskutiert. Inzwischen wurde auch beschlossen, dass die Grundsicherung ohne eine Arbeitszwang und ohne eine Gegenleistung individuell garantiert sein soll. Viele Menschen werden aber auch mit einer bedürftigkeitsgeprüften (Einkommens- und Vermögensprüfung durch eine Sozialadministration) Grundsicherung von der gesellschaftlichen Teilhabe ausgegrenzt (verdeckte Armut, Nichtinanspruchnahme zustehender Sozialleistungen wegen deren diskriminierenden und stigmatisierenden Charakters, der systemisch bedingt durch bedürftigkeitsgeprüfte Transferleistungen ist). Daher wird in weiten Teilen der LINKEN eine bedingungsloses Grundeinkommen (über 1.000 Euro) für alle diskutiert und bejaht – ein Transfer ohne eine sozialadministrative Bedürftigkeitsprüfung, ohne eine Zwang zur Arbeit oder eine Gegenleistung, in existenz- und teilhabesichernder Höhe und als individuell garantiert Rechtsanspruch. Viele Gründe werden für das Grundeinkommen für alle genannt: Wenn wir ein Grundeinkommen hätten, könnten wir Zeit finden, selbstbestimmt über die eigene Zeitverwendung bzgl. der Teilhabe an verschiedenen Arbeits-/Tätigkeitsbereichen zu entscheiden. Außerdem werden demokratische Prozesse in Wirtschaft und Gesellschaft befördert, ebenso die Individuen in privaten Beziehungen unabhängiger von ökonomischen Abhängigkeiten.

Letztlich stärkt das Grundeinkommen auch die Lohnabhängigen in ihrer Verhandlungsmacht gegenüber den Unternehmern. In Europa gibt es schon seit langem verschiedene Diskussionen darüber (Thomas Spence, 1796, Charles Fourier Mitte des 19. Jahrhunderts, Erich Fromm, André Gorz, Michael Hardt/Antonio Negri im 20. Jahrhundert). Aktuell gibt es in der Linken in Finnland, in Italien, Spanien, Frankreich und in Österreich Diskussionen zum Grundeinkommen und sich fürs Grundeinkommen engagierende Gruppierungen. Die Kommunistische Partei Österreich hat das Grundeinkommen im Parteiprogramm aufgenommen. Seit 1982 kämpft die unabhängige Erwerbslosenbewegung in Deutschland für ein Grundeinkommen. Es gibt auch seitens neoliberaler Wirtschaftswissenschaftler und Politiker, die ein niedriges Grundeinkommen (nicht die Existenz und gesellschaftliche Teilhabe sichernd) fordern und den radikalen Abbau anderer Sozialleistungen, Mindestlöhne, Kündigungsschutz usw. Zur Zeit ist es wichtig, wie der den Verbrauch natürlicher Ressourcen radikal gesenkt sowie die kapitalistische Wirtschaftsordnung zurückdrängt und die aktuelle europäische Krise überwinden können. Viele Menschenrechts- und entwicklungspolitische NGOs fordern ein Mindestnahrungseinkommen zur Bekämpfung des Hungers und der Untrernährung in armen Ländern. Es ist nicht unmöglich, Grundrechte zu sichern. Im Herbst 2012 (14.-16.09.2012) wird eine Konferenz in München der 14. Weltgrundeinkommenskongress des Basic Income Earth Networks (BIEN) abgehalten. Letztes Mal war er in Brasilien (2010), 2016 könnte er in Südkorea sein, wo bereits im Jahr 2010 ein internationaler Grundeinkommenskongress stattfand, organisiert vom Basic Income Korean Network (BIKN).

ベーシック・インカムの意義や最近の議論状況については、左翼党内のワーキンググループの報告書<sup>17</sup>などもあわせて参考されたい。ただしこの問題をめぐる党内コンセンサスが難しいであろうことは、ローマイナー氏も指摘するとおりである。ベーシック・インカムは、時短＝ワークシェアリングとワンセットで考えるべきである。大量失業の下で長時間労働に従事する者がいるという問題の解決のためには、労働時間短縮が不可欠だからだが、ブラシュケ氏によれば近年の個人主義化傾向の中でのいかにしてそれを実現するかは議論の余地があるという。ヨーロッパでは実質的なベーシック・インカム的な制度もある程度現実性はあるが、長時間労働・低福祉の非ヨーロッパ（アジア・アフリカなど）も視野に入れると話は変わってくる、との指摘もあった。

### 3. 2. 3. ヨッヘン・ヴァイヒホルド氏

3月9日午後、ローザ・ルクセンブルク財団文書館・図書館の所長ヴァイヒホルド（Jochen Weichold）氏を訪問した。数年前に緑の思想文書館を訪れた時にベッカーラ＝シャオム（Christoph Becker-Schaum）氏からこの人を訪問するよう助言を受けていたが、今回ようやくその宿題を果たしたわけである。拙著（小野 2012a）を贈呈。ヴァイヒホルド氏はこの分野での優れた研究者であり、私の研究意図を説明してそれに対してコメントを頂くことを主たる目的と考えていた。以下に掲げる質問票もそのような意図に沿って作成されたものである。

**Forschungsthema: Die LINKE in der post-“rot-grünen” Zeit: Strategische, programmatische sowie politische Aussicht im parteipolitischen Transformationsprozess**

**Fragestellung 1: Strukturelle Änderung des deutschen Parteiensystems und atompolitische Einstellung der LINKE**

Bei der Kurskorrektur der deutschen Atompolitik nach dem Fukushima behauptet die LINKE eine kürzere Ausstiegszeit im Vergleich zu anderen Regierungs- bzw. Oppositionsparteien, die in Juni 2011 den Gesetzentwurf unterstützten, bis 2022 alle AKW zu stoppen. Dazu gibe es allerdings folgende Fragen:

- Hat die LINKE eine sichere Aussicht als eine (potenzielle) Regierungspartei?
- Für Arbeiterparteien ist es nicht einfach, den Atomausstieg zu befürworten, der möglicherweise mehrere Arbeitsplätze vernichten würde. Gibt es innerparteiliche Auseinandersetzung in der LINKE?

Merkels Entscheidung hat zu einem partei-überquerenden Konsens für Atomausstieg geführt. Die CDU hat sich den Grünen angenähert so, dass die schwarz-grüne (oder Jamaica) Koalition nicht ausgeschlossen ist. Die Atompolitik kann eine neue Streitfrage sein, die die bisherige Konfrontationsstruktur des deutschen Parteiensystems reorganisieren würde. Kann die LINKE in dieser Situation eine leitende Rolle spielen? Oder, ist die Aussage für frühen Atomausstieg nur eine populistische Anforderung, die gegebenenfalls den innerparteilichen Zusammenhalt der LINKE bedrohen würde?

Um dies Thema zu untersuchen, möchte ich Dokumente bis zum Erfurter Programm prüfen. In der Tat gibt es Diskrepanz zwischen 1. Entwurf (März 2010) und Diskussionsstand (Mai 2011), u.a. im

Bereich der Energie- bzw. Umweltpolitik. Man kann vermuten, dass es verschiedene Meinungen innerhalb der Partei gibt. Ausgrund dieser Analyse kann man fragen, ob die LINKE die parteipolitische Systemänderung nach der “rot-grünen” Zeit sowie die Identitätskrise des linken Lagers überleben würde oder nicht.

**Fragestellung 2: Bedeutung der Grundeinkommen-Debatte in der heutigen LINKE**

Die LINKE ist die einzige Partei, die noch heute positive Einstellung zum Grundeinkommen behält. Trotz der Aktivität der Bundesarbeitsgemeinschaft Grundeinkommen (BAG) hat dieses Konzept noch keinen innerparteilichen Konsens gewonnen und es gibt im Erfurter Programm keinen direkten Hinweis. Die Diskussion über Grundeinkommen bietet möglicherweise einen Ansatz zur neuen linken Zusammenarbeit, eine Alternative zum Neoliberalismus zu formulieren und Gesellschaftsordnungen radikal zu erneuern. Es ist sinnvoll, den Einfluss des Vorschlags der BAG nachzuprüfen.

ただし実際の面談では、質問票とは直接関係のない、現代ドイツ社会や政党政治の問題状況にまで話が及んだ。以下はその要約であるが、この日も佐藤氏が同席しており、後にヴァイヒホルド氏と連絡を取りながらまとめてくれたテキストである。

**Hat die Atomkatastrophe in Fukushima Einfluss auf die Partei “Die Linke” ausgeübt?**

Weichold: Es gab zwei wichtige Wahlen. Besonders bei der Landtagswahl in Baden-Württemberg am 27. März 2011 haben “Die Grünen” stark hinzugewonnen. Winfried Kretschmann wurde am 12. Mai 2011 mit 73 Stimmen zum ersten grünen Ministerpräsidenten in der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland gewählt. Für die Partei “Die Linke” war diese Landtagswahl jedoch ein Misserfolg. Sie hatte darauf gesetzt, dass SPD und “Grüne” keine klare Mehrheit haben würden. In einem solchen Fall hätte sich “Die Linke” an einer Regierungskoalition in Baden-Württemberg beteiligen können. “Die Linke” scheiterte jedoch an der Fünf-Prozent-Hürde.

Im Juni 2012 findet der Parteitag der “Linken” statt, auf dem eine neue Führungsspitze gewählt werden soll. Unklar ist gegenwärtig, ob Oskar Lafontaine erneut für den Posten des Vorsitzenden kandidieren wird.

**Welches Thema ist wichtig in der Parteidebatte?**

Weichold: Regierungsbeteiligung. Welche Kompromisse darf man eingehen?

Für eine Regierungsbeteiligung der "Linken" auf Bundesebene ist ihre Haltung in der NATO-Frage und in der Frage der Beteiligung der Bundeswehr am Einsatz in Afghanistan gegenwärtig ein unüberwindbares Hindernis.

#### Sind Politiker in Berlin pragmatischer?

Weichold: Ja. Das hat die rot-rote Koalition in Berlin (2002 bis 2011) gezeigt. Diese Koalition hatte große Bedeutung für das Zusammenwachsen der geteilten Stadt. Die PDS (später "Die Linke") hat unter Beweis gestellt, dass sie regierungsfähig ist. Sie hat in der rot-roten Koalition dazu beigetragen, die negativen Auswirkungen der Hartz-IV-Gesetzgebung auf die Betroffenen zu mildern. Sie hat einen Öffentlich Geförderten Beschäftigungssektor etabliert usw.

Aber sie hat in ihrer Regierungszeit in Berlin auch Fehler gemacht, so zum Beispiel in der Wohnungspolitik. Sie hat zu spät auf die steigenden Mieten reagiert. Und sie hat es nicht genügend verstanden, die Erfolge ihrer Regierungsarbeit herauszustellen und damit bei den Wählerinnen und Wählern zu punkten.

#### Ist "Die Linke" der Partei "Die Grünen" in den 80er Jahren ähnlich?

Weichold: In der Tat gibt es Ähnlichkeiten. Damals gab es viele Konflikte innerhalb der Partei "Die Grünen" zwischen den verschiedenen Flügeln. In den 90er Jahren hat sich die Mitgliedschaft der "Grünen" verändert. Dadurch wurde die sogenannte realistische Tendenz (Realos) stark.

Wenn man heute die Positionen von "Grünen" und "Linken" vergleicht, gibt es auf vielen Politikfeldern ähnliche Positionen, z.B. in der Gesundheits- und Sozialpolitik, in der Steuerpolitik usw. Beide Parteien treten für eine Bürgerversicherung in der Gesundheits-, in der Pflege- und in der Rentenversicherung ein. Beide Parteien plädieren für die Anhebung des Spaltensteuersatzes. Im Detail gibt es ohne Zweifel Unterschiede, aber die Richtung ist gleich.

#### Wie ist die Beziehung zwischen Parteien und sozialen Bewegungen?

Weichold: "Die Grünen" haben bei der Bewegung gegen "Stuttgart 21" mitgearbeitet. "Die Linke" fühlt sich der Gewerkschaftsbewegung nahe.

Seit Neuestem wird von einigen Politikwissenschaftlern darauf hingewiesen, dass "Die Linke" einen Spagat zwischen ihren Mitgliedern und ihren Wählern ausführen müsse. Die Mitglieder der "Linken" scheinen im Allgemeinen radikaler zu sein als ihre Wähler.

**Die Linke fordert einen gesetzlichen Mindestlohn von 10 Euro. Glauben Sie, dass das machbar ist? ("Die Grünen" verlangen nur einen Mindestlohn von 8,50 Euro.)**

Weichold: Wichtig ist zunächst, dass überhaupt ein gesetzlicher Mindestlohn eingeführt wird. Dieser sollte dann schrittweise erhöht werden (wie zum Beispiel in Großbritannien). Während Großunternehmen in der Regel heute schon in der Lage wären, einen Mindestlohn von 10 Euro pro Stunde zu zahlen, benötigen kleine und mittlere Betriebe längere Übergangsfristen. Es ist in diesem Kontext auch problematisch, dass die Löhne in Ost- und Westdeutschland unterschiedlich sind. Auch nach mehr als 20 Jahren staatlicher deutscher Einheit sind die Löhne in Ostdeutschland deutlich niedriger als in Westdeutschland.

**Wie sieht die Beziehung zwischen neuer Technologie und Arbeitsplatz aus? Haben wir weniger Arbeitsplätze aufgrund der technologischen Entwicklung?**

Weichold: Das kann man so nicht sagen. In Bayern gibt es viel High Tech, und es gibt trotzdem viele neue Arbeitsplätze. Problematisch ist die zunehmende prekäre Beschäftigung (Scheinselbstständige, Werkverträge, befristete Beschäftigung, Mini-Jobs usw.). Es sind vor allem Frauen, die einen Mini-Job



写真2 ローザ・ルクセンブルク財団のあるビル  
(ベルリン)

haben und dabei wenig Geld verdienen (z.B. Verkäuferinnen wie die in dem kleinen Bäckerladen bei mir um die Ecke).

In der Partei "Die Linke" gibt es mehr männliche Mitglieder als Frauen. In der PDS gab es mehr Frauen und auch eine Frauenquote bei der Besetzung von Parteiämtern und bei der Aufstellung der Kandidatenlisten für Landtags- oder Bundestagswahlen.

Bei den "Grünen" gibt es eine Frauenquote bei der Besetzung von Parteiämtern und bei der Aufstellung der Kandidatenlisten für Landtags- oder Bundestagswahlen. Früher existierte das Rotationsprinzip. Allerdings hielt sich sogar Petra Kelly nicht an das Rotationsprinzip der "Grünen" im Bundestag.

In Brandenburg gibt es einen Konflikt hinsichtlich der CCS-Technologie. Die Linke setzt sich für den Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung ein. Ein Strukturwandel ist jedoch immer schwierig. Wenn Personen im Braunkohlebergbau und in Kohlekraftwerken ihre Arbeit verlieren, können sie nicht einfach in einem Bereich der Erneuerbaren Energien arbeiten. Dort werden andere Fachkenntnisse und andere handwerkliche Fertigkeiten verlangt. Das ist besonders für die älteren Menschen schwierig.

#### Identität der Partei "Die Grünen"?

Weichold: "Die Grünen" fordern einen "Green New Deal" und haben dazu ein in sich stimmiges Konzept entwickelt, das gerade gebildete Wählerschichten anspricht und zu ihren Wahlerfolgen in der letzten Zeit beigetragen hat.

党内における多様な政治的立場の併存、政党連立をめぐる苦悩、基本綱領論議をめぐる諸潮流間の妥協など、左翼党の最新状況に関しては多くの点で、ローマイナー氏の議論とも一致する。左翼党では、支持者よりも党員層のほうにラディカルな傾向が強く、両グループ間の紐帯を保つという容易ならざる課題を抱える、という指摘は興味深い。また、女性党員比率が他党に比べ低い。「クオーター制」や「ローテンション制」は初期の緑の党に見られたアイデアだが、それがなかなかうまく機能しないのは、経験からも明らかである。ヴァイヒホルト氏によれば、80年代緑の党と現在の左翼党が似たような発展方向にある、というのは基本的に正しい。雇用と環境（脱原発）の問題を対立的にとらえるのが正しくない、という点でもローマイナー氏と認識を共有する。テクノロジーが問題解決のカギを

握るのであり、グリーン・ニューディールを肯定するか否定するかではなく、どのような種類のグリーン・ニューディールなのかが問題である。ただし、例えば（旧東独地区の）炭鉱労働者が再生可能エネルギー分野で再雇用されることが難しいといった例からもわかるように、事態は必ずしも楽観的なわけではない。最低限賃金は左翼党の基本的立場だが、フルタイム労働が減少しパートタイムが増大するといった状況変化の中でどこまで解決策となるかについては、議論の余地がある。いわゆる「ミニジョブ」従事者に女性が多いということも、問題と言える。

#### 3. 3. 3.11 脱原発行動の取材

東日本大震災一周年の2012年3月11日、ドイツでは各地で脱原発を求める行動が繰り広げられた。偶然その日に居合わせた私は、3月10日にはブラウンシュヴァイクで「光の鎖」行動を組織した市民団体を訪問し、3月11日にはブロックドルフ原発前での脱原発デモを取材した。その時の手記を、以下に掲げておく。

ドイツが2022年までにすべての原発を停止すると決定したのは、中道保守政権下においてである。だがそれはメルケル首相の理性的判断のみに帰されるものではなく、永年培われた社会運動文化に裏打ちされた世論に後押しされての政策転換と考えるべきである。東日本大震災一周年に際して脱原発運動が世界的な盛り上がりを見せる中、ドイツでものべ4万人以上の人人がデモなどの行動に参加した<sup>18</sup>。

全原発の10%分の核燃料を生産するウラン濃縮工場の立地グローナウ（ノルトライン＝ヴェストファーレン州）では4000人がデモ行進した。当地で生産された核燃料の97%は輸出されているとの情報もあり、同施設の閉鎖なしにはドイツの脱原発は「不完全かつ信憑性のないもの」にとどまる。ブロックドルフ（シュレスヴィヒ



写真3 AG Schacht Konrad の事務所にて

(ブラウンシュヴァイク)

=ホルシュタイン州) では 3000 人が、原発敷地を囲む「人間の鎖」を作った。原発立地のグンドレミンゲン(バイエルン州)とネッカールヴェストハイム(バーデン=ヴュルテンベルク州)でも、それぞれ 5000 人が集まった<sup>19</sup>。使用済み核燃料最終(中間)処分場ゴアーベンを抱えるニーダーザクセンの州都ハノーファーでは、7000 人が抗議行動に参加した。同州はそれ以外にも、陥没が危惧されるアッセ核廃棄物貯蔵施設や低レベル核廃棄物処分施設予定地シャハト・コンラートがあるが、これらの施設(予定地)などを結び、3月 11 日の夕方に 80 キロの「光の鎖」を作る行動には、2 万人が参加した。

「光の鎖」行動を企画した市民団体<sup>20</sup>と連絡がとれたため、私は 3 月 10 日、ブラウンシュヴァイク市を訪れた。数人のメンバーが仕事している事務所に案内されると、いきなり質問攻めに遭う。福島原発事故後、日本でも脱原発世論が高まったと聞くが、その後どうなったのか。健康面や食の安全に不安を持つ人は多いのではないか。あれだけの被害を被りながら、原発再稼働の動きがあるのはなぜなのか、等々。

私は、メルケル首相の原子力政策への評価を尋ねる。経済界と結びつきの強い中道保守政権が、よくあれだけ大胆な政策転換を行い得たなど。だがドイツの環境運動活動家は、多くの日本人が考えるほど事態を楽観視していないようである。公式には脱原発を掲げながら、メルケル政権の立場は不徹底で、いつどんなかたちで振り戻しがあるかわからない。再生可能エネルギーなど脱原発の条件は整いつつある。そもそも原子力エネルギーは、核兵器の問題と切り離しては論じられない。やはり脱原発を掲げる政党や市民団体が圧力をかけ続けなければならない、ということだろうか。

彼らの疑問は、社会レベルでの脱原発世論の高まりが政策決定に反映されにくい日本政治の問題状況へと収斂していく。これはなかなかの難問である。私はいちおう政治学者だから、日独の政党システムの違いが重要な作用を及ぼしていると説明することはできる。だがこんな形式論で、ドイツの環境運動の現場で活動している人たちを納得させられるわけはない。これは日本の市民運動の根幹にも関わる問い合わせでもある。

短時間だが充実した会話を終え、私は次の訪問地へ向けて出發した。

ハンブルクからアオトバーン(高速道路) 23 号線を北上すると、ところどころ、広大な牧草地の中に風車が林立するのが見える。デンマークと国境を接するシュレスヴィヒ=ホルシュタイン州は、風力発電地帯でもある。3月 11 日の朝のこと。のどかな田園風景の中に、小さな村が現れる。入り口には村のシンボルマークと、おそらくはこの土地の方言で歓迎のメッセージ。ここは、エルベ川河口のちょっとしたリゾート地らしい。この平和そのものの村のどこに原発などあるのか、と思いながら周

囲を見渡すと、半球型のドームと建屋、そして高压送電線が目に入った。これがブロックドルフ原発。1986 年に営業運転を開始した加圧水型原子炉(MOX 燃料も燃やす)で、実効出力は 1480 メガワット、運転終了予定は 2021 年である。

上述のようにここでは、約 3000 人が集まった。正午をもって行動開始。デモ行進やバンド演奏、ビラやパンフレットの配布など。さまざまなスローガンや旗を掲げた人たちが、原発敷地を包囲する。ひときわ印象的なのが、「フクシマは至る所にある」の横断幕。もちろん平和的な抗議行動で、食べ物の屋台や記念グッズの販売などもある。エコ電力業者も来ていた。私の知る限り、日本の原発は警戒が厳重で、ここまで近寄れない。というより、ブロックドルフでは原発の至近距離まで民家があることに驚かされる。

この日の行動には、環境保護団体や市民運動、労働組合なども協賛する。参加者の顔ぶれも、小さな子どもから年配者まで幅広い。政党としては、SPD、緑の党、左翼党が参加するが、CDU/CSU と FDP、すなわち連邦与党の名前はない。これは、昨日ブラウンシュヴァイクで聞いたこととも符合する。メルケル政権の立場が不徹底であることを、多くの人たちが感じ取っている。ドイツでは脱原発は党派を超えたコンセンサスと言われるが、実際にはそれほど単純ではないようである。

私は日本出発前に、主催者代表のコルター(Marianne Kolter) 氏から会ってもよいとの返事をもらっていた。諸般の事情からそれはうまくいかなかったが、会場で少しだけ挨拶することができた。午後 1 時過ぎだったか、コルター氏が中央舞台から参加者に呼びかける。「なぜ私たちが今日ここにいるのか、確認しておきましょう。1 年前、日本で起きた大地震と津波、およびそれらの自然災害に続いて引き起こされた史上最悪のフクシマ原発事故。まず、犠牲となった人に黙祷を捧げましょう。(1

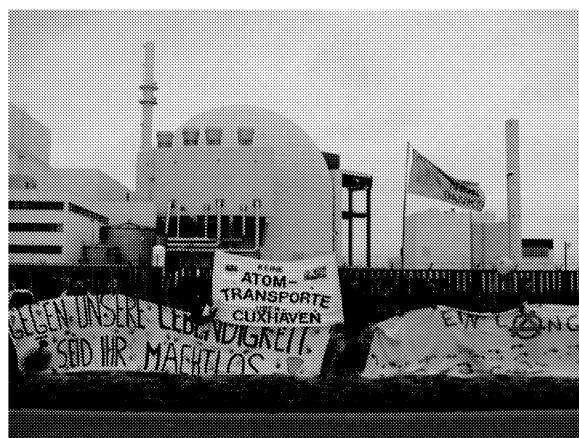


写真 4 さまざまな要求を掲げる 3・11 デモ参加者

(ブロックドルフ原発前にて)

※ 『反核から脱原発へ』のカバー写真に採用

分間ほどの黙祷)。ありがとうございました。日本とは違い、ここでは津波のおそれはありません。しかしどのようにことが重大事故のきっかけになるかはわからないのです。原発は止めなければなりません。(エルベ川の増水に備えて) 堤防を高くすることが問題なのではありません。私たちは原発なしでやつていけます。だから、ブルックドルフから始めましょう」。「アプシャルテン」(原発止めろ) のシュプレヒコールが響く。

それに続いて何人かの人、が中央舞台でスピーチする。残念ながら、アルト (Franz Alt) 氏<sup>21</sup>の参加は健康上の理由のため中止になった。脱原発デモは、午後 3 時頃まで続いた。

経済成長と巨大技術への信頼。東京一極集中型の国土開発。資源多消費型の生活スタイル。自分は何もせずに黙っていても、政府と大企業は情報を公開し、安全を守ってくれるとの思い込み。福島原発事故は、暗黙の前提を根本から覆した。がれきの中から日本再建の方途を模索する私たちに、ドイツの経験は何を教えてくれるのだろうか。

ドイツでは現在、実質的な比例代表制の下で五党制が機能している。環境問題が顕在化した 70 年代前後、既成政党が保革を問わず環境問題への取り組みにためらいがちな態度を示す中、新しい社会運動の担い手の一部は新しく政党を作った。それが緑の党の起源である。脱物質主義的価値を現実政治の中で実現するのが容易でないことは、「赤と緑」の実験の経緯が示すことだが、今や第三の国民政党にさえなった緑の党は、政策決定に無視し得ない存在となっている。かつては見向きもされなかつたテーマが争点化し、政治に変化をもたらすダイナミズムが、この国にはあった。

なぜ日本では世論の変化が政治に反映されにくいのか、という問い合わせへのひとつの答えがここにある。90 年代の選挙制度改革（小選挙区制導入）によりなかなか強引に作られた二大政党制は、原子力問題を争点化できない。当初の謳い文句どおり政権交代が実現しても、自民党も民主党も基本的には原発推進の立場だからである。あたかも二大政党制が世界の大勢であるかのような言説を批判しきれなかつたことには、私たち政治学者にも責任の一端はある。多様な価値観を反映し得る多党制の意義が、重視されてよい。原発事故後の日本で、わずかばかりの復興費用を捻出するために比例代表制の定数削減が論じられるとは、ドイツで環境問題に取り組む人たちには理解できることだろう。

### 3. 4. ドイツ出張に関わるその他の成果

帰国後、ローマイナー氏からメールが届く。「連帶的近代のための機構」の日本語訳に対しては、同機構の幹部やキッピング議員も大きな関心を寄せており、同機構

のウェブサイトに公開できないか、との問い合わせである。もちろん国際交流の一環として歓迎すべきことであり、雑誌編集者<sup>22</sup>の同意を得た上で拙訳の PDF ファイルを送付した。

再生可能エネルギーの立役者の生前の業績を記念することを目的に、ヘルマン・シェア財団がベルリンに設立された<sup>23</sup>。同財団にメールと電話で連絡を取り、訪問して挨拶をしておこうと試みるが、先方の都合により私の滞在中には日程が合わず、見送りとなった。拙著（小野 2012a）を郵送するにとどめる。同財団の活動は、今後の研究のためにも重要な示唆を与えてくれるだろう。

### 3. 5. 出張報告会（第 7 回研究会）

2012 年 3 月 24 日、小野が北海学園大学を訪れ、ドイツ出張の成果を報告した。この会合（第 7 回研究会）には、本プロジェクト研究のメンバー、田口晃氏、現代政治研究会などからの参加者もあり、盛会となった。帰国後すぐの開催だったが、幸い佐藤氏が適確なインタビュー記録を作成してくれたこともあり、ドイツ出張の成果をメンバー全員で共有し、議論を深めることができた。

今回のインタビューからわかったことのひとつは、（2013 年連邦議会選挙を見越して）左翼党関係者は、「赤赤緑連立」の可能性がほとんどないと考えていることである。左翼党と赤緑連立両党との間には、不一致点が多い。同じ左翼党関係者でありながら、2010 年夏にインタビューしたリービッヒ (Stefan Liebich) 氏が、外交・安全保障政策を除き 3 党間の政策的差異は大きくないと言っていたのとはニュアンスが異なる。それは、この間の状況変化（赤緑連立だけでの多数派形成可能性、等）によるところも少なくないと考えられる。

それとともに重要な論点は、左翼党における多様な党内潮流の存在や、思想的立場や利害関係の複雑性である。既存の研究文献も示すように、同党を構成するのは、今や、旧東独共産党の末裔だけではない。赤緑連立を経験する中で緑の党が平和主義を貫徹できなくなったことに失望した、主として若い世代の左翼党支持者、「アジェンダ 2010」路線への反発から SPD を離反した労働組合系の活動家、ベルリンなどで政権党（赤赤連立）としての経験を積む中でプラグマティックな態度を強めてきた現実政治家、そして既成政党には代弁者を見つけられないさまざまな要求を持った人たちなどが、左翼党の（潜在的）支持者である。これらのグループは時として相矛盾する政治的方向性を掲げるため、党内統合は容易でない。

質疑応答では、いくつかの意見が出された。まず、左翼党的党内潮流に関してはより精緻な概念化が必要だと指摘である。例えば、一口にプラグマティズムと言っ

ても、「アジェンダ2010」路線への反発からSPDを離反した活動家のそれと、赤赤連立で実践的な政策的経験を積んだ（主に旧東ドイツやベルリンの）政治エリートのそれとは同じではない。また、脱物質主義的方向での改革を志向するゆえに緑の党を離反した若い世代のラディカルズムは、旧来型社会主義のラディカルズムとは全く異なる。インタビューの場合、いつ、誰に話を聞くのかによって全く違った結果が得られるので、そこで得られた調査結果には慎重な扱いが必要である、との方法論上の指摘もなされた。

左翼党基本綱領をどう理解するか、ということをめぐっても議論がなされた。エルフルト綱領はさまざまな党内潮流の妥協の産物であり、同綱領の採択をもって左翼党がある一定の指向性を打ち出したとは言い難い、というのが報告者（小野）の見解である。これに対し、このようなとらえ方は政党分析のあり方としては不適切ではないか、との指摘がなされた。広範な支持者を引きつけるためにプログラム的プロフィールが不鮮明になっているのは、左翼党に限らず今日の（国民）政党の特徴だが、それだけに、政党にとっての綱領の意味が問われていると言える。左翼党に固有の事情としては、「支持者層」と「活動家層」の選好がかなり違っていることに注意が喚起された。

さらには、「運動政党」が既成政党化する過程での問題も話題に上った。今日の左翼党には、テーマは違えど80年代緑の党の党内論争を思い起こさせるものがある（ヴァイヒホルドのインタビューも参照せよ）。いっぽ左翼党は、政権党化してかつての緑の党のような隘路に陥るよりも、ラディカルな批判勢力に徹するほうが戦術的には有利なのではないか、との意見もあったが、これに対しては現実政党としては無理のある路線との反論も聞かれた。今日、政党を基本単位として分析することそのものの妥当性がゆらいでいるのかもしれないが、かといってそれに代わる分析概念が確立されていないのが現状だろう。

今回のドイツ出張の重点は左翼党の調査にあったが、言うまでもなく、左翼党だけで政党政治再編成を理解することはできない。緑の党でも、目覚ましい党勢拡大の影で重大な変化が進行している。いわゆる「黒と緑」をめぐっても議論がなされた。緑の党とFDPの支持者の近接性に注目する解釈<sup>24</sup>は、本プロジェクトでもたびたび言及されているが、そのような議論は今回も反芻された。さらには、（これまで等閑視してきた）新党「海賊党」の動向についても、注意が喚起された。

他にもさまざまな論点が出され、議論が行われた。ただしメンバー間での意見の違いも大きく、今後も情報交換や討論を継続していくところである。

#### 4. 研究成果

2011年度における研究代表者および共同研究者の研究業績のうち、本プロジェクト研究と関わりのあるものは、以下のとおりである。なお、研究代表者の単著の場合にも、共同研究者の協力の下に作成されている場合が多い。

##### 【著書・発表論文】

小野一 2011a 「ドイツの政党再編成と左派の可能性／超党派シンクタンク「連帶的近代のための機構」を中心に」『FORUM OPINION』13（2011年6月）、42～49頁。

小野一 2011b 「「3・11」フクシマ原発震災の衝撃とドイツ政治／メルケル政権の原発政策の再転換の政治的背景」『労働運動研究』413（2011年8月）、31～37頁。

小野一 2011c 「ポスト赤緑連立時代の左翼の存在意義／脱原発を選択したドイツの構造変化との関連で」『現代思想』39-14（2011年10月1日）、150～159頁。

小野一 2011d 「ドイツ・左翼党の綱領論議をめぐって／「学習期政党」のふたつの文書の紹介と検討」『工学院大学研究論叢』49-1（2011年10月31日）、1～20頁。

小野一 2012a 『現代ドイツ政党政治の変容／社会民主党、緑の党、左翼党の挑戦』（吉田書店、2012年1月10日）、1～211頁。

小野一 2012b 「ポスト赤緑連立時代の政党政治再編成」『ドイツ研究』第46号（2012年3月31日）、70～84頁。

小野一 2012c 「『政策過程』としての脱原発問題／シュレーダー赤緑連立政権からメルケル中道保守政権まで」若尾祐司・本田宏編『反核から脱原発へ／ドイツとヨーロッパ諸国の選択』（昭和堂、2012年4月20日）第6章、223～260頁。

東原正明 2011 「オーストリア／協調民主主義体制の発展と変容」津田由美子、吉武信彦編『世界政治叢書3 北欧・南欧・ベネルクス』（ミネルヴァ書房、2011年11月30日）、169～190頁。

東原正明 2012a 「ウィーンにおける赤と緑の連立／2010年市議会選挙と赤緑連立政権の形成」『福岡大学法学論叢』56-4（2012年3月15日）、499～538頁。

東原正明 2012b 「オーストリアの脱原発史」若尾祐司・本田宏編『反核から脱原発へ／ドイツとヨーロッパ諸国の選択』（昭和堂、2012年4月20日）第9章2、367～375頁。

本田宏 2011a 「ドイツの脱原発をめぐる政治過程」『生活経済政策』175（2011年8月）、34～38頁。

本田宏 2011b 「日本政治と反原発運動」『現代思想』39-14 (2011年10月1日)、128~141頁。

本田宏 2012 「ドイツの原子力政策の展開と隘路」若尾祐司・本田宏編『反核から脱原発へ／ドイツとヨーロッパ諸国の選択』(昭和堂、2012年4月20日) 第2章、56~104頁。

【学会報告・口頭報告(本プロジェクトの研究会を除く)】

東原正明 「ウィーンにおける赤と緑の連立／2010年市議会選挙と赤緑連立政権の形成」(福岡大学領域別研究チーム「連邦制」研究会、2011年12月27日、於福岡大学)

本田宏 「福島原発事故の政治的背景と市民運動の可能性／日本とドイツの比較の視点から」日本平和学会北海道地区研究会、2011年5月15日、北海道大学、(招待講演)

本田宏 「政治の構造・文化を根本的に問いかける」NPO法人自由学校「遊」連続講座「変わる！変える！暮らしとエネルギー」第1回、2011年10月4日、札幌(招待講演)

本田宏 「原発をめぐる日本政治の構造と社会運動」立教大学法学部主催シンポジウム「原発・エネルギー政治と市民社会／日本・ドイツ・中東の選択」2011年11月27日、立教大学池袋キャンパス(太刀川記念館多目的ホール)(招待講演)

本田宏 「原発をめぐる国際構造と新しい政党の可能性」ほっかいどうピースネット連続講座「脱原発と日本社会の未来」第1回、2012年1月11日、札幌エルプラザ2階環境プラザ環境研究室(招待講演)

## 5. 全体の総括および今後に向けての展望

2011年度の研究活動は、本研究プロジェクト1年目(2010年度)の成果を基盤に、その研究スタイルを踏襲して遂行された。そのため研究会活動は内容の濃いものになり、活発な議論を通して重要な成果が上げられた。メンバー以外の研究会参加は、ドイツ政治研究者間の交流活性化という目的にも、貢献すること大であった。

だがそれは、今年度の活動が前年度の単なる延長上にあることを意味するのではない。2011年3月11日の東日本大震災、およびそれに続く福島原発事故は、私たちの活動内容にも影響を及ぼした。ドイツの(左翼)政治再編成過程において原子力と再生可能エネルギーが重要テーマのひとつであるから、当然のことである。同時に、既存のシステムや価値観が根底から覆されるような状況に、日本社会に生きる研究者としてどう対峙するのかという問題に、否応なしに直面させられた。本プロジェク

トのメンバーに、日独の原子力問題に造詣の深い本田がいたことは幸運なことである。それをテーマに研究会を企画した他、論文、投稿、講演などのかたちで研究成果が発信された。特に、若尾祐司・本田宏編『反核から脱原発へ』に編者ないしは執筆者として協力したこと<sup>25</sup>は、特筆されるべき社会貢献活動である。

狭義の研究目的である政党政治論では、前年度の研究成果が深化される方向で新たな成果が得られた。小野のドイツ出張では、今年度は左翼党関係の調査・インタビューに重点が置かれたが、これはプロジェクトの進行の中で自然な流れだった。しかも、日本ではこれまでこの分野の研究が手薄だっただけに、大いに意義がある。ドイツの最新事情にも、私たち研究プロジェクトのメンバーは機敏に対応することができた。ドイツ以外の欧州諸国への事例研究拡張により知見を豊富化することも、本プロジェクトの目的である。その意味で東原の報告は重要である。また、外部からの参加者により、現代市民社会の問題状況に関する幅広い知見がもたらされた。

2011年度は、本プロジェクト研究の最終年度である。2年間の研究活動を総括して、ドイツ政党政治再編成の理論的・実証的分析という当初の目標にどの程度迫り得ただろうか。2010年度に行ったドイツ出張調査や国内研究会での知見をとりまとめた成果が、今年度、『現代ドイツ政党政治の変容』(小野 2012a)として出版された。連帶的近代のための機構を中心に、ポスト赤緑連立時代の左翼陣営の再編成を把握することにはある程度成功している。しかし同時に、このテーマを論究し尽くすために新たな課題が見えてきたのも事実である。そこには、保守主義陣営との協力も含めた緑の党の連立オプション多様化とその評価、左翼党の党内状況と政治的立場に関するさらなる解明、政党政治そのものを問い合わせし新しい時代の政治的関与のあり方を論ずる視点、などが含まれる。

このように考えると、政党政治再編成に関する研究は緒に就いたばかり、というのが順当な評価だろう。聞き取り調査を含む本格的な一次資料収集も、さらに継続されるべきである。残念ながら、次年度以降の科研申請は見送ることとなった。ドイツ政治は状況変化が著しく、いったんは区切りをつけて、仕切り直しが必要なのである。しかし、本プロジェクト研究の成果を持ち帰り、各人がそれぞれの領域において論究を深めていく。その上で、再度の共同研究が可能となるべく準備を整えていくことが望まれる。

<sup>1</sup> 赤緑連立による多数派形成も可能とのデータは、2010年7月終わり頃から出始めた([www.focus.de](http://www.focus.de), 21.7.2010, "Rot-Grün mit absoluter Mehrheit")。Forschungsgruppe Wahlenのデータでは、赤緑連立を望ましいと考える有権者の割合は、2010年はじめに中道保守連立を上回って第二位に浮上し、同年夏以降は大連立を上回る第一位となっている

- ([www.forschungsgruppe.de](http://www.forschungsgruppe.de), “Langzeitentwicklung: Politik I: Projektion seit 01/1991”).
- <sup>2</sup> 選挙結果は、小野 2012a の第 1 章など参照。他の州議会選挙についても同じ。
- <sup>3</sup> Oskar Niedermayer, 2011, *Die Parteien nach der Bundestagswahl 2009*. Wiesbaden: VS Verlag, p.25.
- <sup>4</sup> 調査機関 Forschungsgruppe Wahlen の選挙分析 ([www.forschungsgruppe.de/Aktuelles/Wahl\\_Saarland/](http://www.forschungsgruppe.de/Aktuelles/Wahl_Saarland/)) など参照。
- <sup>5</sup> [www.forschungsgruppe.de/Aktuelles/Politbarometer\\_Extra\\_NRW/](http://www.forschungsgruppe.de/Aktuelles/Politbarometer_Extra_NRW/)
- <sup>6</sup> 本田宏, 2005, 『脱原子力の運動と政治／日本のエネルギー政策の転換は可能か』北海道大学図書刊行会、201～213 頁。
- <sup>7</sup> 同選挙の結果および選挙分析(投票行動分析も含む)については、東原 2012a 参照。
- <sup>8</sup> 東原 2012a, 532 頁。
- <sup>9</sup> 拙稿(小野 2011d)を参照のこと。
- <sup>10</sup> [www.boell.de/stiftung/archiv/archiv.html](http://www.boell.de/stiftung/archiv/archiv.html).
- <sup>11</sup> 種々の論文の他、これをテーマとする書籍 (Volker Kronenberg and Christoph Weckenbrock (eds.), 2011, *Schwarz-Grün: Die Debatte*. Wiesbaden: VS Verlag) も刊行されている。
- <sup>12</sup> 史上初の緑の党の州首相を輩出したことで注目された同州緑の党だが、もともとプラグマティズム志向が強く、すでに 90 年代前半には C D U との連立にもオープンな態度をとっていた。
- <sup>13</sup> 左翼党では連邦副党首を務めるが、連帶的近代のための機構(注 14)の設立メンバーのひとりでもある。同氏のウェブサイトは、[www.katja-kipping.de/](http://www.katja-kipping.de/)。
- <sup>14</sup> 2010 年 1 月に設立された超党派シンクタンクで、S P D 、緑の党、左翼党の政治家も参加する(ウェブサイトは <https://www.solidarische-moderne.de/>)。同機構についての詳細は、小野 2012a の第 3 章を参照。注 22 も参照。
- <sup>15</sup> 二酸化炭素貯留 (CO<sub>2</sub> Capture and Storage)。
- <sup>16</sup> Ronald Blaschke, Adeline Otto, Norbert Schepers (eds.), 2010, *Grundeinkommen: Geschichte – Modelle – Debatten*. Berlin: Karl Dietz Verlag.
- <sup>17</sup> Bundesarbeitsgemeinschaft Grundeinkommen in und bei der Partei DIE LINKE, 2011, p.5.
- <sup>18</sup> “Atomkraft, gib auf, du bist umgestellt!”, in: *die tageszeitung*, 12.03.2012, p.2. なお、脱原発行動主催者のウェブサイト (<http://anti-atom-demo.de/>) には、参加者は 5 万人である。
- <sup>19</sup> 3 月 12 日付『ノイエス・ドイッチャーランド』紙には、ネッカールヴェストハイムとブロックドルフを取材したやや詳細なレポートがある。“Aus und Schluss und zwar sofort!”, in: *Neues Deutschland*, 12.03.2012, p.3.
- <sup>20</sup> ディッケル (Peter Dickel) 氏が代表を務める AG Schacht Konrad。同組織のウェブサイトは、[www.ag-schacht-konrad.de/](http://www.ag-schacht-konrad.de/)を参照。「光の鎖」行動の写真などもここから閲覧できる。
- <sup>21</sup> 再生可能エネルギーに関心を寄せるジャーナリストで連帶的近代のための機構(注 14)理事。自身のウェブサイトは、<http://sonnenseite.com/>。福島原発事故後の同氏へのインタビュー抄訳は、小野 2011b を参照。
- <sup>22</sup> 連帶的近代のための機構の設立宣言の拙訳が掲載されたのは、『労働運動研究』410 号(2010 年 8 月)。
- <sup>23</sup> シェア (Hermann Scheer) は、S P D 連邦議会議

員で、連邦党執行部を務めたこともある。ユーロソーラーや国際再生可能エネルギー機関 (I R E N A) などの国際組織・N G O を通じた活動でも知られる。晩年はむしろ S P D 外での活動に傾斜を強め、ユーピシランティ (Andrea Ypsilanti) らとともに連帶的近代のための機構(注 14)の設立メンバーとなった。2010 年 10 月 14 日死去。ヘルマン・シェア財団のウェブサイトは [www.hermann-scheer-stiftung.de](http://www.hermann-scheer-stiftung.de)。

<sup>24</sup> Franz Walter, 2010, *Gelb oder Grün?: Kleine Parteiengeschichte der besserverdienenden Mitte in Deutschland*. Bielefeld: transcript Verlag 等参照。

<sup>25</sup> 本田(兼編者)、小野、東原が執筆参加した他、本プロジェクトの協力者である西田慎氏、佐藤温子氏、田口晃氏も寄稿している。本の刊行は 2012 年 4 月 20 日だが、実質的な作業は 2011 年度中に終了しているため、本報告書に研究成果として記載した。

# 憲法と制度改革：国際化と地域化の市民生活への影響に関する研究

基礎・教養教育部門 長谷川 憲

パリ第2大学教授 デゥニ・バランジェ

## La Constitution et la Réforme du système juridique

— L'étude comparative relative aux actualités de l'activité citoyenne dans la mondialisation et le régionalisme —

HASEGAWA Ken      Département d' éducation générale  
Denis BARANGER      Université de Paris II

**ABSTRACT :** 本研究は、欧州における欧州連合の成立と地域的拡大、および東アジアにおける経済的一体化の進行の下で、急速に進む国際化および地域化現象が、市民生活と市民意識に与える影響と問題点に関して、国際機関および国家制度、並びに議会制度、司法制度および地方制度などに与える影響に関して、日仏の研究者による国際的共同研究により比較法・比較政治制度論的観点から検証することを目的として企画され、実施された。2011年度は、補論的にフランスにおける最近の立憲主義に関する問題について、パリ第二大学ミッシェル・ヴィレイ研究所のデゥニ・バランジェ教授が提唱する理論モデルを扱った。

Selon les réformes récentes dans le domaine du système judiciaire et politique, par exemple, la participation des citoyens à la justice et au processus politique, la nomination des juges parmi des avocats, la réforme d'apprentisage des juristes, et l'accroissement des populations judiciaires, etc., ont été le but d'effectuer cette réforme. Cependant, afin de renforcer le rôle social des juges et d'agrandir le rôle des praticiens du droit, il semble nécessaire de maintenir la garantie du statut réel et stable en ajoutant la garantie du statut formelle de ces derniers comme le principe d'immobilité étant la signification de la garantie stable de leur statut, en plus il y a une nécessité d'installer le lieu de l'échange avec des intéressés des autres domaines des juristes et des citoyens, et d'avoir l'espace de publication des articles, d'exprimer des paroles libres des juge, etc. L'année 2011, on discutait le terme "constitutionnalisme" et "constitution", comme les aspects sur un droit dominé par une certaine compréhension des rapport entre droit et politique en France.

## LES CONSTITUTIONNALISTES FRANCAIS ET LA POLITIQUE

Denis Baranger

Professeur de droit public à l'université Panthéon-Assas (Paris II)

Membre de l'Institut Universitaire de France

Je voudrais commencer cette conférence en remerciant M. Ken Hasegawa et mes autres collègues japonais. Je leur suis très reconnaissant pour leur invitation. C'est une joie et un honneur pour moi de parler devant vous de droit public français. Je suis réellement désolé de ne pas pouvoir le faire en japonais !

Je me propose dans cette intervention de mettre en évidence certains traits caractéristiques de la doctrine constitutionnaliste française. Je compte le faire à partir d'une interprétation historique du droit constitutionnel. Je dois dire dès le départ que je comprends celui-ci comme un "droit politique", c'est-à-dire un droit dominé par une certaine compréhension des rapports entre droit et politique. C'est le sens que j'attribue au terme "constitutionnalisme". Je vais donc tout d'abord dire quelques mots sur la dimension fondamentalement politique du constitutionnalisme (I). Ensuite, je me propose de faire apparaître certaines tendances récentes de la doctrine constitutionnelle en France. Je vais en particulier insister sur la tendance au "scepticisme" des juristes français de droit public. Je comprends ce "scepticisme" comme la tendance des éléments techniques à prévaloir sur les éléments politiques dans l'interprétation de la constitution. Cette tendance est liée à une dévalorisation de la politique et à l'idée que le droit, qui est distinct de la politique, doit l'emporter sur elle dans le contexte de la justice constitutionnelle (II).

### I - La dimension intrinsèquement politique du constitutionnalisme des origines

On pourrait dire que l'objet du droit politique consiste à (re)comprendre le

constitutionnalisme. Un pareil projet évoque certes des phrases du juriste français Maurice Hauriou telles que celles rencontrées au début de son *Précis de droit constitutionnel* de 1929. Il insistait en particulier sur l'idée d'une nécessaire « restauration de la doctrine classique »<sup>1</sup>. Mais on peut espérer éviter de tomber dans le reproche de partialité idéologique que l'on a pu, non sans certaines raisons, formuler à l'encontre de cet auteur.

Le propre du constitutionnalisme, de ce point de vue, c'est d'articuler positivement droit et politique. Les grandes pensées politiques de l'antiquité « n'accordent au droit qu'une position subordonnée (...) dans le cadre d'une constitution dont les principes fondamentaux sont politiques et non pas juridiques »<sup>2</sup>. Au contraire, l'Etat moderne est bâti à partir d'une double réflexion sur le droit : à travers la fondation positive du pouvoir dans la souveraineté ; à travers le fait que « la politique libérale vise à subordonner la politique au droit (*Law*) pour mieux protéger les droits (*rights*) »<sup>3</sup>. En d'autres termes : le constitutionnalisme, au sens où je propose d'employer ici ce terme, c'est le contenu politique du droit constitutionnel; pour le dire autrement : c'est sa dimension politique. On comprendra que je veux dire ici que cette dimension est irréductible. Le contenu politique du constitutionnalisme peut changer, ou diverger selon les expériences nationales. Mais qu'il existe une telle charge politique dans le dispositif constitutionnel n'est pas quelque chose qu'on pourrait supprimer. On ne comprend pas le droit constitutionnel sans le constitutionnalisme,

---

<sup>1</sup> *Précis de droit constitutionnel*, 1929, xxx.

<sup>2</sup> P. Raynaud, *le juge et le philosophe*, p. 26  
<sup>3</sup> idem p. 30.

c'est-à-dire sans prendre en compte sa composante politique. Il n'est pas de droit constitutionnel en dehors du projet consistant à réaliser des finalités politiques à travers le recours à certaines formes juridiques.

On pourrait dire que le constitutionnalisme, c'est le moment de l'appréhension d'un certain nombre de contenus qui imprègnent ensuite le droit constitutionnel. Le constitutionnalisme, comme projet intellectuel en partie réalisé dans des constitutions existantes, vise une finalité substantielle : la liberté politique et la garantie des droits individuels. Il réalise ce projet qui est tout sauf neutre politiquement, à travers 1/ une conception naturaliste du pouvoir politique, 2/ la mise en place d'un dispositif institutionnel visant à encadrer ce pouvoir, et 3/ une conception formaliste du droit et de sa production.

Le résultat de cette mutation ne se situe pas seulement au niveau de la pensée politique. Tous les éléments du projet constitutionnaliste ainsi identifiés sont fondés en valeur et en même temps construits juridiquement. Les valeurs sont exprimées juridiquement, notamment dans des déclarations de droit. Les institutions sont consacrées par des « constitutions de la liberté » qui obéissent elles aussi à un formalisme juridique d'un certain type. Ces institutions produisent du droit sous forme volontariste. Le constitutionnalisme repose fondamentalement sur une théorie juridique de la législation.

L'implication majeure est qu'il n'est plus possible de totalement séparer politique et droit. C'est de cette fusion que naît le droit constitutionnel : avec lui, la politique est incorporée dans le droit lui-même. Elle n'est pas supprimée comme tendaient à le faire les conceptions selon lesquelles le gouvernant était intrinsèquement le porteur d'une « justice » fondée dans une conception métaphysique du monde. Le droit constitutionnel est donc fondamentalement un droit politique. Le concernant, il n'est pas possible de penser un droit extérieur à la politique et capable de s'en saisir. Inversement, du moment qu'elle est prise en

charge dans le contexte étatique, l'action politique perd les moyens d'être dite hors le droit. Les mots du droit s'appliquent à elle. Les mécanismes du droit la médiatisent. Il n'y a pas d'un côté une action politique brute et de l'autre des comportements qui ne sont formulables que juridiquement.

Cette liaison du droit et de la politique ne se fait pas de manière apaisée. On peut en effet distinguer deux influences dans le droit constitutionnel. L'une est idéologique : un certain corps de conceptions sur le pouvoir et sur les principes qui doivent régir le gouvernement des hommes. L'autre est technique : un certain savoir de l'Etat et de la manière de l'organiser juridiquement. Ce sont les deux facettes du constitutionnalisme. L'une, idéologique, est plus ancienne que l'autre. Le volet technique a largement, bien que pas totalement, été bâti à partir des préoccupations idéologiques.

Une des prétentions fortes du normativisme à partir de Kelsen a été de purifier le droit constitutionnel (en tant que composante du phénomène juridique) de sa dimension politique, comprise comme dimension idéologique. Ce qui compte, c'est la production normative et elle seule. Or elle peut et doit être comprise en mettant de côté toute dimension substantielle consistant en des valeurs morales ou politiques. Kelsen redouble cette vision des choses d'une théorie politique sceptique valorisant la démocratie à proportion du fait qu'elle est un régime compatible avec un relativisme ultime en ce qui concerne les valeurs. Je ne veux ni ne peux engager ici une critique des limites de cette lecture. Mais il suffit de dire ici qu'elle me semble faire perdre une part significative de son intelligibilité au droit constitutionnel. Le droit constitutionnel n'est pas un droit comme les autres. Il possède son autonomie dans le paysage plus large du phénomène juridique (auquel il appartient) en raison de sa liaison constitutive avec une certaine acception de la politique et un certain bagage de principes et de valeurs substantiels. Il peut s'agir de prescriptions issues du libéralisme politique classique. Il peut encore s'agir d'exigences démocratiques. Il peut enfin

s'agir des vérités énoncées par une autre pensée politique, qui n'a pas pu être totalement mise à l'écart : la science classique de l'Etat et de la souveraineté.

## II - Le cas français : une esquisse de généalogie de la période récente

### 1) Conserver ou supprimer les valeurs substantielles en droit constitutionnel : l'influence de la doctrine allemande en France.

#### *La doctrine classique : le maintien de la dimension politique du droit constitutionnel*

Sans vouloir pousser trop loin l'esquisse de généalogie tentée dans ces pages, je pense qu'il est arrivé un moment où le projet positiviste a conduit à ne plus voir, ou peut-être à ne plus vouloir comprendre, certains aspects du projet constitutionnaliste classique. Assez longtemps, pourtant, présenter le droit constitutionnel dans le sillage direct des grandes constitutions du XVIII<sup>e</sup> s. était un projet jugé réalisable. C'était même pour beaucoup en cela que consistait une appréhension scientifique de cette discipline relativement neuve. Ne peut-on pas comprendre ainsi une part importante de ce que fit Jellinek dans *l'Etat moderne et son droit* (comme dans son écrit célèbre de 1900 sur la généalogie de la déclaration des droits de l'homme) ? N'est-ce pas assez exactement le projet mené à bien par Adhémar Esmein dans ses *Elements de droit constitutionnel* ? Dans une certaine mesure, malgré ses appels répétés à une interprétation formelle, non-matérielle des fonctions de l'Etat, ce projet a été aussi en partie celui de Carré de Malberg. Sa caractéristique a été de se concentrer sur la variante française du constitutionnalisme, et sur l'idée de souveraineté nationale. Mais le projet de contribuer à la théorie générale de l'Etat « d'après les données fournies par le droit constitutionnel français » peut tout à fait s'interpréter comme un effort pour renouer le lien entre droit public positif de la III<sup>e</sup> république et constitutionnalisme

révolutionnaire.

Il est pourtant arrivé un moment où un tel projet de déduction du droit constitutionnel positif à partir d'un legs de principes et de valeurs « constitutionnalistes » est devenu impossible, ou disons peut-être impensable. Je ne me prononce pas de manière prématurée sur la manière dont cela s'est déroulé. Un moment très important du découplage me semble résider dans la réflexion allemande sur la théorie générale de l'Etat, et en particulier dans la distinction entre une théorie sociologique et une théorie juridique de l'Etat.

Le dualisme de la théorie de l'Etat de Jellinek avait en effet pour mérite de mettre en évidence le lien entre l'Etat et certaines valeurs : ainsi en est-il de la théorie des « buts » de l'Etat ou de celle des droits de l'homme comme fondement des droits subjectifs des sujets de droit. Mais la théorie juridique de l'Etat devait alors, symétriquement, fonder ledit Etat en dehors de ces valeurs de fond. Ainsi, les buts substantiels de l'Etat n'ont rien à voir avec la définition juridique de l'Etat, et Jellinek renvoie pour cela à des critères exclusivement formels. « le but est certes le créateur du droit, dit Jellinek dans *Gesetz und Verordnung*. Mais c'est une erreur méthodologique et logique de confondre le créateur et la créature »<sup>4</sup>. Etait ainsi ouverte, dans la théorie du droit public, une fracture entre les formes juridiques et les valeurs. Ce n'était peut-être pas la première occasion où cela se produisait. Mais dans notre histoire contemporaine, c'est une occasion décisive.

#### *la rupture kelsénienne*

Il est clair en effet qu'avec le normativisme kelsénien, cette dichotomie prudemment élaborée par Jellinek allait devenir une béance qui ne pourrait plus être refermée. Jellinek avait laissé une place pour la politique dans

<sup>4</sup> Cité et traduit par Alexandre Dietrich, *Les théories des fonctions de l'Etat dans la doctrine constitutionnelle en France et en Allemagne*, Thèse droit public, Strasbourg, 2011, p. 75.

l'étude du droit public. Au contraire, Kelsen affirme avec netteté le caractère infranchissable de la distinction entre droit et politique : la théorie pure qui a pour objet le droit « entend être science du droit, elle n'entend pas être politique juridique (...) elle n'essaye en aucune façon de dire comment le droit devrait être ou doit être ou être fait »<sup>5</sup>. Avec lui cette distinction n'est pas seulement approfondie d'un point de vue analytique. Elle définit le droit précisément par opposition à ce qui est du ressort du politique. Ce qui est du domaine de l'un ne peut plus être du domaine de l'autre. Les deux domaines (droit et politique) sont définis de manière exclusive l'un de l'autre. C'est une manière très intéressante de situer la dimension politique du droit dans le seul fait de fixer un certain contenu au devoir être, tandis que le problème propre à la science du droit serait de spécifier le « comment » de la production normative. Il semble pourtant très réducteur de ramener la politique à cette seule dimension. On pourrait au contraire prêter attention au fait que le droit constitutionnel, en particulier, est lié à des concepts spécifiques, par exemple ceux de pouvoir et de souveraineté, de représentation et de responsabilité, qui impliquent une configuration particulière de la production normative, ainsi d'ailleurs que de l'action politique des autorités constitutionnelles. On peut ne pas vouloir s'engager dans cette direction. Mais quoi qu'il en soit, il faut relever qu'elle fait jouer à des concepts politiques un rôle tout à fait autre que celui indiqué par Kelsen et l'école normativiste. Il ne s'agit pas d'injecter des décisions politiques dans la machine de production des normes. Il s'agit de montrer comment des concepts déterminés par certaines idées politiques (au sens très large du terme) travaillent de l'intérieur le système constitutionnel. Raisonner en terme de souveraineté, par exemple, a un impact sur la production normative, mais n'implique nullement qu'on ait fait le choix de vivre dans un Etat libéral ou socialiste, une théocratie fondée sur telle ou telle version du droit

naturel ou un Etat totalement sécularisé, qu'on respectera les droits de l'homme ou que le mot n'aura même pas de sens dans le système concerné. Il en va de même de concepts fondamentaux tels que celui de représentation politique. Accuser l'analyse politique de ne pouvoir faire que « polluer » la théorie juridique, c'est confiner la politique dans le statut de pourvoyeur de conceptions de fond pour les actions de l'Etat et les normes qu'il produit. C'est donc ne voir dans la politique qu'une activité consistant à fixer des buts substantiels à l'Etat. Ce type de raisonnement traverse nombre de discussions très intenses dans le droit public de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et du XX<sup>e</sup> siècle. Qu'on pense par exemple à la discussion sur le critère de l'acte de gouvernement et sur l'existence d'une fonction gouvernementale. C'est aussi une des raisons de la polarisation de la doctrine, surtout française, en direction du droit administratif. Celui-ci a été compris comme un droit non-politique. La lecture non-politique de l'Etat trouvait un parallèle avec le traitement des autorités publiques par les juridictions administratives et le droit qu'elles ont élaboré. Or, pour qu'une telle lecture soit possible, encore faut-il ramener la politique à une fonction de désignation des finalités. Ce qu'apprend le retour au constitutionnalisme, c'est une leçon d'une autre nature au sujet des rapports entre politique et droit. La politique imprègne le mécanisme lui-même de l'Etat, ses concepts animateurs et les interactions qu'ils entretiennent. L'idéologie n'est pas seulement l'essence qui fait tourner le moteur. Elle a également imprégné la manière dont ont été dessinées les pièces de ce moteur. Elle conditionne leur fonctionnement d'ensemble.

Il n'en reste pas moins que cette conception restrictive de la politique a influencé nombre de lecteurs de Kelsen, et certainement joué un grand rôle dans son succès en France. J'en prends un exemple avec la thèse de Charles Eisenmann (1928). Etant conduit à discuter les positions selon lesquelles les droits de l'homme ont « une sorte de prééminence (...) parmi les règles du droit constitutionnel », le jeune auteur portait le jugement suivant : « ces appréciations n'expriment évidemment

<sup>5</sup> *Théorie Pure du droit*, Dalloz, 1962, p. 9.

qu'une vue politique. Elles se rattachent directement à l'inspiration libérale-individualiste » et « vont au rebours de l'ordre et de l'enchaînement véritable des différentes notions juridiques de la constitution ». Le tableau est dressé : le juridique et le politique s'excluent désormais mutuellement.

On peut mesurer l'écart avec l'effort méthodique par lequel Esmein entreprenait de relier (pratiquement de déduire) le droit constitutionnel positif avec un « fonds commun (...) de principes dégagés par la spéculation philosophique du XVIII<sup>e</sup> s. » ainsi que des « institutions-type » du modèle constitutionnel anglais<sup>6</sup>. C'est comme si le gain en termes d'intelligibilité globale du phénomène juridique, acquis difficilement discutable du travail entamé par Kelsen, devait se faire au détriment de l'intelligibilité spécifique du droit constitutionnel.

On est tout aussi loin de la manière dont Hauriou, par exemple, avait entrepris de manière très systématique de fonder sa doctrine du droit public sur les orientations politiques assignées à l'Etat par la tradition de pensée constitutionnaliste. On détecte par exemple cette orientation chez Hauriou dans sa définition de la souveraineté comme « le pouvoir de domination de l'Etat en tant que, pour exercer sur lui-même une autolimitation favorable à la liberté politique, il s'organise en une volonté décentralisée et pondérée par des séparations internes de ses propres formes et de ses propres pouvoirs »<sup>7</sup> ; ou bien encore dans sa définition de l'Etat comme « système de situations stables garantissant la liberté »<sup>8</sup> ; ou bien dans sa définition de la loi comme « règle écrite (...) contenant une détermination du régime d'Etat, c'est-à-dire une réforme dans le sens de la liberté »<sup>9</sup>.

<sup>6</sup> Elements de droit constitutionnel, 1896, p. 22-23.

<sup>7</sup> Précis de droit administratif et de droit public (12<sup>e</sup> édition, 1933, rééd. Dalloz, 2002, p. 606-607. Cf. thèse Dietrich p. 40.

<sup>8</sup> Précis, 4<sup>e</sup> édition, 1900, p. 8. Cité Dietrich p. 53.

<sup>9</sup> Idem p. 28.

Mais le problème d'une telle approche, évident surtout chez Hauriou, c'était celui de la définition de la liberté. Ce qu'on se doit de retenir de ces auteurs, c'est l'idée que le constitutionnalisme ne se comprend pas sans un ensemble de valeurs substantielles dont il était porteur. Mais il n'en est pas moins évident que ces valeurs substantielles posent problème. Elles posent problème par leur existence même, et c'est précisément cela contre cela que le normativisme moderne est entré en lutte. Elles posent aussi problème du point de vue de leur contenu. Pourquoi s'en tenir, par exemple, à la seule liberté ? pourquoi Hauriou ne dit-il pas par exemple, dans toutes ces définitions, : « la liberté et les droits » ? Et, en ne prenant que la seule liberté, il est clair qu'on peut en faire une grande variété d'interprétations. La liberté est un concept qui renvoie à d'autres concepts. Elle est par excellence un concept impur. Toute liberté est liberté de faire quelque chose, ou liberté contre quelque chose. Et la liste des choses visées, positivement ou négativement, est infiniment longue et dépendante du contexte historique. Comment ne pas comprendre le pouvoir de séduction d'une doctrine du droit constitutionnel prétendant faire abstraction de tous ces problèmes ?

## 2) Le scepticisme des juristes de droit public français : le contraste avec les Etats-Unis

### *Une comparaison avec les Etats-Unis*

Comme Olivier Beaud l'a montré dans plusieurs articles, la théorie normativiste a eu le mérite de conserver la préoccupation théorique en droit, au moment où se produisait ce qu'il a appelé le « tournant pragmatique » consistant dans le fait de la part des constitutionnalistes de se tourner vers l'étude des seules institutions politiques (Joseph-Barthélémy) et de la vie politique. On pourrait esquisser une comparaison, de ce point de vue, entre la France et les Etats-Unis. Pour le meilleur comme pour le pire, le droit constitutionnel américain est resté un droit politique, conscient d'être tel. Cela demeure

vrai alors même que la discipline « droit constitutionnel » est très fortement tournée vers l'étude de la jurisprudence de la Cour suprême. Mais ladite Cour suprême formule sa jurisprudence sur un mode discursif, où les problèmes politiques ne sont pas esquivés, même si la haute juridiction ne considère pas qu'elle doive les trancher en tant que tels. Le danger d'une telle manière de faire est bien sûr qu'elle s'en mêle néanmoins. Ce danger n'est pas illusoire : l'arrêt *Bush v. Gore*, ou certaines opinions du juge Scalia le montrent suffisamment. Mais le mal porte en lui-même son remède. Le principe des opinions séparées permet à la doctrine de se livrer à une analyse politique (voire dans le cas des *critical legal studies*, une analyse idéologique) de la jurisprudence, c'est-à-dire entre autres choses d'appliquer aux décisions une grille de lecture politique. Du point de vue de cette même doctrine, le professeur de droit américain ne considère pas comme une violation de son éthos professionnel le fait de tenir un discours dont la coloration politique est assez forte, un discours qui peut aller jusqu'à être nettement prescriptif (qu'on pense aux écrits de Cass Sunstein ou de Bruce Ackerman, Larry Tribe, etc.). Cette ouverture à la politique est à rapprocher d'une autre ouverture, celle aux sciences sociales. L'économie politique est bien plus centrale dans la discussion juridique qu'elle ne l'est en France. Et de grands juristes, y compris des juges, n'hésitent pas à se livrer à des études qu'ils rattachent à la sociologie ou aux sciences sociales<sup>10</sup>. Symétriquement, le discours politique non-savant, celui des partis et des courants d'opinion, insiste bien plus qu'en France sur la constitution, qu'il tient pour un enjeu central. On le voit avec l'importance de la controverse entre originalistes et tenants de la constitution vivante. On le voit aussi avec la relecture de la constitution proposée par les mouvements républicains ou par le « Tea Party ». Chaque grand mouvement politique américain porte en lui une certaine interprétation de la constitution, qui est, pour lui, tout sauf accessoire<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Que l'on pense par exemple à Richard Posner.

<sup>11</sup> Cela a été récemment démontré au

### *Le parti-pris de neutralité politique du droit public français*

En France, au contraire, prévaut une impressionnante neutralité politique qui coexiste harmonieusement avec un parti-pris « technique » très affirmé. La constitution est assez nettement « hors limites » pour la politique active. Cela présente de nombreux avantages, il ne s'agit pas de le nier. Mais le résultat est que les implications politiques du problème constitutionnel tendent à être obscures. La doctrine constitutionnelle se concentre sur des questions techniques, essentiellement contentieuses. Inversement, les questions institutionnelles (l'Etat par opposition aux autorités administratives et aux services publics qu'elles assument ; le régime politique et ses transformations) ou touchant aux valeurs que la société veut voir préserver, tendent à échapper aux juristes. Une vision sceptique des choses s'est imposée. C'est dans ce contexte, me semble-t-il, qu'il faut comprendre la thèse de Louis Favoreu selon laquelle le droit aurait saisi la politique. Elle vise à constituer un îlot de vérité substantielle au sein de cet océan de scepticisme. Il est très remarquable que le point de départ du raisonnement ne consiste pas une défense des droits fondamentaux eux-mêmes. Cette absence de fondation dans les droits fondamentaux est assez typique de la doctrine française. Ils ne sont bien sûr pas désavoués, loin de là. Un des grands mérites reconnu, de l'aveu commun, à la jurisprudence constitutionnelle est d'avoir donné au système juridique la charte élargie des droits fondamentaux qui lui faisait défaut. En un sens, on retrouve donc une manière de faire « constitutionnaliste ». Chaque étape du constitutionnalisme a commencé par l'établissement de valeurs fondatrices. L'étape du juge constitutionnel suppose la même opération : le juge pose les valeurs

---

sujet des Républicains par Jeffrey Rosen : « Three Strands of Conservatism on The U.S. Supreme Court : Lessons for Health Care, Gay Marriage, and Constitutional Review in Europe » (cf. podcast Jus politicum à paraître).

caractéristiques de l'époque, tandis que l'époque se définit par le règne du juge.

Toutefois, le rapport aux valeurs n'est pas ici celui qu'on pourrait imaginer. Dans le cas français, les valeurs substantielles posées par le juge constitutionnel ne constituent pas le fondement de la dogmatique juridique. Celle-ci part d'un point de vue sceptique. La constitution pourrait avoir n'importe quel contenu. Il y a là une négation très forte de la position exprimée par l'article 16 de la déclaration des droits de l'homme de 1789. Cela suppose une lecture très particulière de dispositions constitutionnelles dont on pourrait facilement croire qu'elles enchaissent des contenus politiquement substantiels. Ainsi, la lecture sceptique de l'alinéa 5 de l'article 89 de la constitution de 1958 consistera à dire qu'il ne contient en réalité aucune autre norme s'imposant aux autorités soumises à la constitution, sinon celui de devoir choisir la république contre la monarchie. Mais la « forme républicaine de gouvernement » ne limite pas plus que cela le pouvoir de révision de la constitution.

Le juge constitutionnel, d'autre part, est présenté comme un "aiguilleur" qui ne se prononcerait jamais sur le fond. La justice constitutionnelle n'est nullement garantie des valeurs supérieures (de la vision contemporaine de la « justice » au sens de formulation de ce qui est juste). Elle se bornerait à dire sous quelle forme la volonté démocratique doit se manifester de manière conforme aux « normes de production » constitutionnelles. Il y a là une manière très particulière de détacher fonction juridictionnelle et rapport à la justice. Dans tout cela, la seule chose qui n'est pas appréhendée sur le mode sceptique, c'est la capacité du juge constitutionnel à produire une certaine sorte de vérité. Cette capacité n'est pas validée, sur le fond, par une conformité à des valeurs supérieures. L'une des finalités poursuivies est bien au contraire de chasser toute valeur substantielle de la construction dogmatique, car elle serait alors considérée comme supra-constitutionnelle. La capacité du juge à dire la vérité est exclusive (elle est refusée aux autres acteurs du jeu

institutionnel<sup>12</sup>) auto-suffisante, auto-fondée, et même (on le verra) autolimitée. On dira alors, comme on le lit souvent, que le juge constitutionnel a adressé de « véritables leçons de droit constitutionnel » aux acteurs politiques. Au total, la fonction de « la politique saisie par le droit » est de donner un socle de vérification, d'inconditionnalité (donc de rationalité) au système juridique tout entier. On en remonte là à un des projets les plus anciens et les plus fondamentaux du droit moderne : faire échapper la société politique au chaos produit par la sortie d'une vision ordonnée (aristotélicienne) du monde, au moyen d'un droit compris de manière volontariste et centralisé. Ce qui est au-dessus (le « supra », si on me pardonne cette manière de dire) est rejeté parce qu'on rationalise et que donc on désenchant. Ce qui est au dedans mais générateur de chaos, la politique dans toute sa force « désordonnatrice », doit dans le même temps être encadré, sinon (comme le rappelle Bodin dès la préface des *Six Livres de la République*) la destruction nous guette.

#### *L'interprétation sceptique du droit constitutionnel*

Si l'on fait le tour de ce qu'au temps de la guerre froide on appelait les « grandes démocraties occidentales », la France est peut-être la seule où la culture juridique n'a pas pris, après la seconde guerre mondiale, un net tournant « jusnaturaliste ». Les constitutions françaises ont certes pris la même direction que les autres, celle visant à une meilleure garantie des droits de l'homme et de la démocratie. Mais les conceptions scientifiques du droit, dans des pays comme l'Allemagne (de Radbruch à Habermas), les

<sup>12</sup> Là encore, une telle lecture suppose une interprétation neutralisante de certaines dispositions constitutionnelles positives. Ici, c'est la formule de l'article 5 de la constitution de 1958 qui fait du président le garant de la constitution qui sera souvent visée. De Jean Massot à Louis Favoreu, l'interprétation dominante consistera à dire qu'elle ne fait nullement du chef de l'Etat un interprète authentique de la constitution.

Etats-Unis ou le Royaume Uni (Dworkin) ont souvent cherché à rendre compte d'une articulation positive, d'une implantation solide, de valeurs morales dans le droit. En France, si les constitutions ont pris cette orientation, et si la jurisprudence a fini par trouver un moyen de rejoindre cette même orientation, la doctrine a pris au contraire un parti de forte neutralité et de scepticisme. La primauté du contentieux constitutionnel n'est nullement assise sur l'idée d'une constitution inséparable de hautes valeurs humanistes, ou capable de refléter, sur un mode dworkinien, les conceptions morales d'une communauté de citoyens. Au contraire. D'une part, la lecture prédominante de la constitution est intégralement formelle : n'importe quel contenu peut être constitutionnel du moment que cela a été voulu dans les formes requises par le législateur constituant. D'autre part, le contentieux constitutionnel comprend le travail du parlement à l'image de celui d'une autorité de type administratif. Les outils très affûtés du contentieux administratif français peuvent donc sans difficulté être transposés en vue de saisir les « excès de pouvoir » du législateur<sup>13</sup>.

Cette vision des choses s'est efficacement approprié l'emploi du label « droit constitutionnel ». Non seulement elle était ce qu'il y avait de neuf dans la discipline, mais elle n'a pas hésité à réclamer pour elle la vérité ultime de celle-ci. L'essence du « vrai » droit constitutionnel a été présentée comme résidant dans sa forme contentieuse, dans l'existence d'une jurisprudence constitutionnelle. Cette position était déjà en germe, prête à servir en quelque sorte, dans les écrits de Kelsen, et, s'agissant de la doctrine française, dès la thèse de Charles Eisenmann. Celui-ci pouvait, dans le contexte de propos servant de théorie générale à une réflexion sur la justice constitutionnelle, écrire que : « seule (la justice constitutionnelle) fait des règles

constitutionnelles des normes juridiquement obligatoires, de véritables règles de droit en y attachant une sanction ; sans elle, la constitution n'est qu'un programme politique, à la rigueur obligatoire moralement, un recueil de bons conseils à l'usage du législateur, mais dont il est juridiquement libre de tenir ou de ne pas tenir compte, puisque ses actes (...) seront en tout état de cause valables. La justice constitutionnelle transforme donc en normes véritablement juridiques ce qui seulement se voulait tel. La constitution devient ainsi et ainsi seulement la règle de droit suprême, principe de toute validité juridique »<sup>14</sup>. Dans le même ouvrage, Eisenmann s'était employé à réfuter une série de positions doctrinales qui opéraient des rapprochements entre droit et politique. C'était en particulier le cas des idées de Maurice Hauriou, François Gény et Léon Duguit.

La critique normativiste dont Charles Eisenmann fut l'un des précurseurs en France pouvait tirer argument de l'impasse dans laquelle avaient été placées les réflexions sur les rapports entre droit et politique qui avaient dominé la doctrine entre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et les années 1920-1930 (la thèse de C. Eisenmann date de 1928). Les idées d'Hauriou et de Duguit, en particulier, malgré leurs opposition bien connues, avaient en commun de réclamer pour le droit positif un socle extra-positif. Il était assez facile à C. Eisenmann de démontrer que cela « ne tenait pas » et manquait de bases juridiques réelles. Mais, pour ne prendre que le cas de M. Hauriou, l'effort fait par celui-ci ne méritait pas pour autant une entière disqualification.

La réponse à ces positions fut articulée systématiquement par une doctrine de type positiviste. A toute position qui cherchait ainsi à faire du juge le garant d'un droit

---

<sup>13</sup> Je me permets de renvoyer sur ces points à mon étude : « the language of eternity » : <http://www.juspoliticum.com/The-language-of-eternity,319.html>

<sup>14</sup> Eisenmann, *La justice constitutionnelle et la Haute Cour constitutionnelle d'Autriche*, Paris, 1928, avec une préface de Hans Kelsen, réédition avec un avant-propos de Georges Vedel et une post-face de Louis Favoreu (Economica et P.U.A.M. ISBN 2-7178-1210-5) (1986).p. 22.

« supra-positif » il fut répondu avec logique que celui-ci était introuvable. Et même si on pouvait l'identifier, le faire reviendrait à concurrencer le droit émanant du souverain démocratique. En un mot : la question fut placée sur le terrain de l'opposition entre droit positif (seul vrai droit pour un positiviste) et « droit naturel », un terme englobant désignant efficacement tous les efforts pour démontrer que pouvaient être juridiques des règles ou des institutions qui ne procédaient pas de la volonté d'une autorité étatique légitime. Cette manière de réduire le problème à une question de « juridicité » rassemble une longue et éminente lignée de juristes français : de Carré de Malberg, Charles Eisenmann ou Pierre Laroque dans les années 1920-1930 jusqu'à Georges Vedel et Bruno Genevois à une période plus proche de nous. Dans tous les cas, cette école identifie étroitement le « droit naturel » avec le risque de politisation du droit. Inversement, la méthode positiviste aurait le grand mérite de mettre de côté la politique, toujours comprise comme signifiant des choix politiques partisans, marqués idéologiquement, et dont il n'appartient pas au juriste de connaître. Le territoire du juriste commence là où se termine celui de la politique.

Le droit identifié comme positif avait donc à la fois le mérite d'être reconnu comme étant « du droit » au regard de conditions purement formelles, et d'être politiquement acceptable puisqu'on se trouve dans un régime démocratique et que son auteur (ultime) se trouve être le peuple. Ce n'est pas exactement comme cela que cela a été dit, mais on aurait pu résumer ainsi la pensée dominante : les seuls choix politiques acceptables sont ceux qui ont été coulés dans le moule du droit reconnu comme positif. Le juriste qui commente et met en œuvre le droit existant est ainsi dispensé de toute analyse politique, et se trouve en même temps recouvert d'une indiscutable légitimité. Il était parfaitement légitime de dire que « la jurisprudence constitutionnelle est devenue un élément indispensable de la connaissance du fonctionnement des institutions politiques et

de la vie politique »<sup>15</sup>. Mais il ne fallait peut-être pas exclure le C.C. lui-même de l'analyse politique en le présentant comme un pouvoir neutre, « écrétant » et « modérant » la politique depuis un lieu miraculeusement préservé de ses excès. De manière assez logique, la place du C.C. dans les institutions est alors décrite en termes d'autolimitation. Le juge, étant extérieur à la politique et même aux équilibres institutionnels, se bornant à les réguler avec sagesse, étend cette sagesse à son propre cas et pratique le *self-restraint*. Il n'est pas partie prenante à la bataille des forces partisanes. Mais il en comprend les contraintes et ne se heurte pas à l'autorité démocratiquement désignée. Pour ce faire, il s'autolimite.

### Conclusion

La doctrine juridique française a donc pu faire l'économie d'une analyse de fond de la signification de la démocratie constitutionnelle et de ses exigences. Alors même que le juge constitutionnel a été crédité de la « découverte » d'un catalogue de droits fondamentaux et de mécanismes pour les protéger, les juristes français, dans leur majorité, ne se sont guère interrogés sur le sens de ce nouveau paradigme associant démocratie, primauté du juge, et prévalence des droits fondamentaux au sein de l'ordre juridique. Cela a fait une différence assez nette avec les Etats comparables du point de vue culturel et juridique : Allemagne, Royaume Uni<sup>16</sup> ou Etats-Unis.

(Le texte original de la conférence de l'Université Kogakuin, le 23 février 2012)

<sup>15</sup> Ibid. p. 118.

<sup>16</sup> Pour ne prendre que le cas britannique, la discussion sur les droits fondamentaux a été beaucoup plus approfondie avant et après l'adoption du *Human Rights Act* de 1998. La recherche d'un « *common law constitutionalism* » a conduit à identifier dans le droit national britannique, sur la longue durée, une préoccupation substantielle pour la liberté. Loin d'être de nature sceptique, cette analyse associait étroitement *common law*, constitution, et préoccupation pour la liberté et les droits des individus.

## 2. 総合研究所プロジェクト研究報告 (2012年度継続研究)



## 氷海船舶の船体氷荷重分布推定手法の高度化

工学院大学 工学部機械工学科 金野 祥久

海上技術安全研究所 流体設計系 松澤 孝俊

### Enhancement of Estimation Method for Distribution of Ice Loads on Ship in Ice

Akihisa Konno, Department of Mechanical Engineering  
Takatoshi Matsuzawa, National Maritime Research Institute

**ABSTRACT:** Finnish-Swedish ice class rules require performance estimation of ship maneuvering in brash ice condition. We have developed numerical estimation method of the above situation, and applied it to the simulation of ship navigation in a channel filled with small ice pieces. To estimate ship performance in a brash ice channel numerically, it is important to prepare an appropriate channel condition. However, local distribution of ice loads against a ship on the hull was not extensively investigated. In addition, effect of consolidated layer on the channel against the resistance was not incorporated into the simulation. In this paper, we incorporate two different physics simulation library, ODE (Open Dynamics Engine) and Bullet Physics Library, into our simulation program, and investigate the difference. In addition, consolidated layer of the channel is implemented in the simulation; ice pieces are connected with virtual joints, and the joints is set to be broken if the feedback force stronger than the threshold value is applied. As a result, it is observed that the Bullet library underestimates the ship resistance. This seems mainly because of mistreatments of friction effect. The simulator can simulate the effect of consolidated layer, and it seems possible to evaluate the effect of consolidated layer against the ship resistance with appropriate threshold.

### 1. はじめに

近年の原油価格の高騰を契機として、氷海域でのエネルギー資源開発が再評価されている。我が国近郊でも、1999年にオホーツク海北部のサハリン沖で石油・天然ガスの商業生産がはじまっている。これらのエネルギー資源を輸送する目的で、碎氷型あるいは耐氷型船舶への関心が高まっており、アイスク拉斯を保有する船舶も年々増加している。

碎氷船または耐氷型海洋構造物を設計するに際してその碎氷・耐氷性能を予測するためには、現時点では氷海試験水槽での模型試験がもっとも有効で現実的な方法だと考えられる。特に設計の最終段階では、船型模型を作成して実験し、その設計の有効性を確認する必要がある。しかし設計の初期の段階で、多くの設計パラメタに対して最適な値を見つけようとするときには、氷海試験

水槽での模型試験は安易に実施できる方法ではない。現在、日本で稼動している氷海試験水槽は独立行政法人海上技術安全研究所が所有する水槽など数機関に限定される。また氷海水槽の実験では氷を張る必要があり、1枚の氷に対して実施可能な実験内容は限定されるなどの理由から、多数の実験を行うには時間的・予算的な制約を受ける。

開水中を航行する船舶の抵抗等の評価では数値解析が利用されるようになっている。氷海を航行する船舶では上記のような実験上の制約があることから、数値解析による抵抗等の評価は開水中船舶以上に意義があると考えられる。しかし実際には氷海を航行する船舶の性能解析手法は、開水中での解析ほどに信頼できるとは言い難い。

このような数値解析による性能評価が求められている状況のひとつに、水路中に碎氷片が密集した小氷片密集水路（brash ice channel）を航行する船舶の性能解析が

挙げられる。北極海やバルト海では、碎氷船が先行して形成した水路を商船（必ずしも碎氷船型ではない）が航行することが頻繁にある。*brash ice channel* 中を航行するときの抵抗は平坦氷中碎氷抵抗の約 80%となる場合があることが知られている[1]。バルト海航行船舶の認証規則(Finnish-Swedish Ice Class Rules [2], 以下 FSICR)では *brash ice channel* を航行する際の抵抗と必要機関動力の評価を義務づけている。

このルールでは数値解析での評価により認証を受けることも可能であるが、*brash ice channel* 中の抵抗評価手法の研究はほとんど行われていないのが現状である。これは *brash ice channel* 中の航行では、多数の氷片が周囲の氷片、氷板や船体および流体と相互干渉しながら並進・回転する現象が本質なので、これまで研究されてきた開水中での船体抵抗評価手法、または平坦氷碎氷時の評価手法が応用できないことが大きな要因である。

著者らのグループでは 2003 年から、船体周りの氷片運動の解析手法を研究・開発してきた。物理ベースモデリングと呼ばれる解析手法を適用し、船体まわりでの複数氷片の衝突と摩擦を伴う運動の解析を可能とした。これまでの成果として、単純形状船型模型を用いた模型実験との比較によりその正当性を確認しているほか、この解析手法に基づく船体抵抗の評価にも取り組み一定の成果を挙げている。2009 年度からは科学研究費(若手研究(B), 2009~2010 年度, 21760671)および造船学術研究推進機構(2009 年度)の補助を受けて研究しており、計算規模の拡大への対処や解析条件の確立などの成果を得ている。またこれまで船体全体に作用する氷荷重を船体抵抗として捉えて解析してきたが、各氷片の衝突・接触を追跡することにより、船体に作用する局所氷荷重を評価することができるようになっている。これにより、FSICR が求める船舶の安全性評価に対応する解析を行う見通しが得られたと考えている。

局所氷荷重評価の研究の弱点として、実験結果を用いた解析結果の検証が不十分であることが挙げられる。これは適切な比較対象となる実験データや文献が少なく、特に船型と氷片の初期条件を明記している研究報告が非常に限られることが大きな要因である。

本プロジェクト研究では、この弱点を海上技術安全研究所の所有する氷海試験水槽を用いた実験および実船実験によって補い、氷荷重分布を数値解析によって予測する手法を確立することを具体的な目標とする。数値解析を工学院大学で行い、対応する模型実験を海上技術安全研究所で行う。

2010 年度までに、数値解析により水路中抵抗の解析条件への依存性を詳細に調査し、氷片配置の影響はわずかにあるものの顕著ではないこと、水路遠方での氷片運動の拘束(先詰まり)は水路中抵抗にほとんど影響しないこと、流れ場が各氷片に与える流体力の評価手法は水路中抵抗に影響するが、流れ場の解析手法はあまり影響しないこと、氷片の形状分布の影響は顕著であり、適切な

形状分布を選択することで予測精度を向上できる可能性があることなどを見いだした。また模型実験の実施には至っていなかったが、準備を進めていた。

2011 年度は、数値解析に供する水路モデルの作成方法を再検討し、任意の密接度での解析を実現した。また 2010 年度までの解析手法にくわえ、撃力ベース解析と呼ばれる解析手法も導入し、水路中抵抗の解析結果に対する手法影響を検討した。また、consolidated layer(水路中の結氷層)の影響を数値解析に取り入れた。以降でこれらの成果の詳細を報告する。

なお 2012 年 3 月に海上技術安全研究所氷海試験水槽において模型実験を実施している。この実験ではポリプロピレン製の模擬氷を導入し、数値解析に使用したのと同じ船型模型を用い、模型船舶に作用する水路中抵抗を解析するとともに、模擬氷の挙動を撮影し観察した。しかし実験結果の解析がまだ不十分であるため、本報告には含めない。最終報告では実験結果を報告する予定である。

## 2. 解析手法と解析条件

### 2.1 氷片挙動の解析手法—物理ベースモデリング

氷片運動の解析のためには、氷片と船体、および氷片同士の衝突、摩擦を取り扱う必要がある。特に *brash ice channel* の解析を行うことを考えると、氷片の大きさは船幅の 1/10~1/100 のオーダーでありこれが水路中に密集しているので、多数の小物体同士の衝突、摩擦を伴った運動を取り扱う手法が必要である。

本研究では、先行する研究[3-8]と同様に物理ベースモデリング(Physically Based Modeling)と呼ばれる手法[9, 10]を氷片運動の解析に適用している。物理ベースモデリングとは、物体の衝突、摩擦を含めた運動を解くための手法の一つである。本研究では、主として物理ベースモデリングのライブラリである Open Dynamics Engine (ODE) [11]を利用して氷片運動を解析するプログラムを作成し、解析に供する。解析手法の詳細は著者らの論文[4]で報告している。本研究では ODE バージョン 0.11.1 を改造し多数氷片を扱えるようにしたものを利用した。

なお 2011 年度から、同じ物理ベースモデリングのライブラリである Bullet Physics Library [12]も利用し、性能を評価している。Bullet は撃力ベース解析[13]に基づいた解析手法であるところが特徴で、ODE よりも開発が活発なので、研究の発展に寄与することを期待し、評価に供した。本研究では Bullet バージョン 2.79 を利用した。

### 2.2 Consolidated Layer の再現手法

水路に浮かべられた氷片群の表層が、外気に触れて冷やされることにより上方から凍結し互いに結合し合う。この結氷層を consolidated layer と呼ぶ。consolidated layer の影響で抵抗は 1 割程度増加するとされており、FSICR [2] の IA Super クラスの船舶ではこの層の影響を考慮した性能解析が義務付けられている。しかし本研究

でこれまで開発してきたシミュレータには、この影響を考慮した解析を行う機能がなく、IA Super の解析に対応していなかった。

そこで本研究では consolidated layer をシミュレーションに取り入れるべく研究を進め、2011 年度の段階で結氷とその破壊を再現するに至っている。

本研究では結氷とその破壊を数値的に再現するため、ODE の joint, feedback という 2 つの機能を使用している。2 つの物体を指定することでその物体の動きを拘束することができる joint を使用することで、氷片が凍りつき、互いに拘束された状態を再現している。また、結氷部分に外力が加わって破壊する現象を、joint が持つ feedback 機能を利用して表現する。すなわち、joint に作用する力を feedback 機能により取得し、その力が予め定めた値以上になった場合に joint が消去され、氷片同士の拘束が失われるようになっている。

結氷の初期状態を作るため、シミュレーションの計算ループ開始前に、接触している氷片を判定し、joint で結合する。なお本来は表層のみが結氷するが、本研究の範囲では接触点をすべて結合させている。

### 2.3 数値解析条件

本研究の解析では、船型として（独）海上技術安全研究所で開発された単純形状模型船型 B-063 (Fig. 1) を用い、模型実験スケールの現象を数値的に再現する。この船型は実験用の単純形状模型で、Fig. 1 に示すように六角錐台形状をしている。垂線間長は 3.04m である。船体両端のいずれも船首として実験に供することができるが、本研究では船首 (Fig. 1 の上面図、側面図で左側) を用いる。

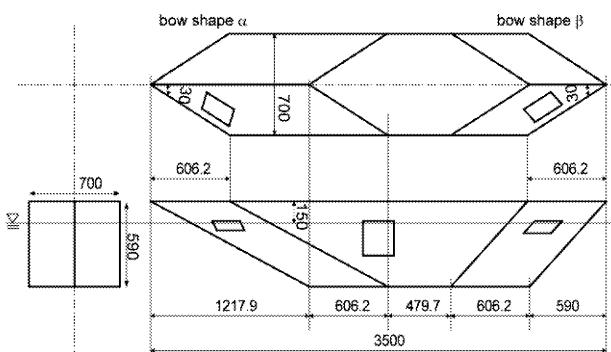


Fig. 1 Model ship B-063

氷片挙動の数値解析は以下の仮定に基づいて行う。

1. 氷片と船体は剛体として取り扱う。その変形や破壊は考慮しない。
2. 模型船は定速で航行する。船体の動搖は考慮しない。また、水路を形成する左右の氷板は固定とする。氷片も初期状態では静止とする。
3. 氷片には外力として重力と浮力を加え、以下の式で示される外力（流体力）を与える。

$$F_v = C_D A \cdot \frac{1}{2} \rho (v - v_l) (\vec{v} - \vec{v}_l) \quad (1)$$

ここに  $C_D$  は氷片にはたらく抗力の抗力係数、 $A$  は氷片の前方投影面積、 $\rho$  は水の密度、 $v$  は氷片の移動速度である。 $v_l$  は船体まわりの局所流速である。従ってこの式は、流れの中で相対運動している氷片を流れ場と同じ速度にしようとする力を与えていることになる。

4. 浮力は静水圧のみ考慮し、数値積分により求める。流れによる圧力の変動、および自由表面の変形による静水圧の変動は考慮しない。
5. 接触時には摩擦（クーロン摩擦）および反力を考慮する。consolidated layer を考慮する場合は、これに加えて joint による feedback 力を考慮する。氷片の抗力係数として、本研究では、 $C_D=0.4$  を採用する。本研究で採用している氷片サイズ（実船スケールに換算すると約 1 m）と船速（実船スケールで約 5 ノット）を代表長さとするレイノルズ数は  $10^6$  のオーダーである。氷片の運動は船体の運動よりも遅いと考えられるので、レイノルズ数  $10^3 \sim 10^5$  の領域での球の抗力係数 0.4 を採用している。流れ場の解析では模型スケールを想定しているが、この場合でも球の抗力係数はほぼ変わらない。また前方投影面積  $A$  は球の場合は適切な値を与えることができる。

立方体氷片については、 $C_D$  は球と同じ 0.4 とし、前方投影面積  $A$  は、氷片の進行方向にかかわらず立方体の 1 面の面積とする。本研究の解析では氷片形状を球と立方体形状としているものの、実際の海域でこのような幾何学的な形状の氷片が多数あることは考えられない。したがって立方体の抗力係数や前方投影面積を正確に求めて現実の状況をよりよく再現できるようになるわけではない。このため、流体力の代表値の意味で、球の抗力係数と立方体の面の面積とを採用している。

また本研究では流れ場の影響を調べるために、流れ場を考慮しない場合 ( $\vec{v}_l = 0$ )、および流れ場を考慮する場合の解析を行う。流れ場を考慮する場合には、 $\vec{v}_l$  に前述した数値流体解析の結果から求めた局所流速ベクトルから船速を引いたベクトルを設定する。

解析に用いるパラメタとして、解析時間 20 s、時間刻み 0.01 s を選択する。水の密度は  $1000 \text{ kg/m}^3$ 、氷の密度は過去の研究と合わせて  $950 \text{ kg/m}^3$ 、反発係数は氷と氷、氷と船のいずれの衝突でもゼロとする。氷片同士の摩擦の摩擦係数は、過去の研究[3]での検討に基づき 1.35 を与える。氷片と船体との摩擦係数は、Finnish Swedish Ice Class Rules の適用ガイドライン[13]に従い、0.1 を与える。船速を  $1 \text{ knot}=0.514 \text{ m/s}$  とする。

Fig. 3 に本解析で用いる氷片の初期配置を示す。

本研究では Fig. 4 に示すように氷片を規則的に配置した条件と、先行する研究[15]において開発した、氷片を不規則に配置した条件での解析を実施する。詳細な実験条件は Table 1 に示している。また水路幅は FSICR の

適用ガイドライン[13]での模型実験条件を適用して 1.394 m とする。

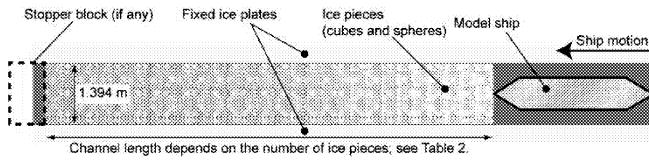


Fig. 2 Initial arrangement of ice pieces. Top view

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 物理計算ライブラリの違いに起因する解析結果の差異

Fig. 3 に物理計算ライブラリを変更した場合の、計算される水路中抵抗の違いを示す。この図では球形氷片と立方体形氷片の個数の割合を 0:10, 5:5, 10:0 の 3 種類変えて行った結果を示している。

この図から、ライブラリの違いによって、解析される水路中抵抗が大きく異なり、ODE を用いた解析のほうが高い抵抗を示すことが分かる。過去の研究の結果と比較すると、Bullet が抵抗を過小評価していると考えられる。

この原因を調査するため、それぞれの計算結果を可視化し、氷片運動の違いを観察した。同じ時刻での氷片を左舷側から表示した例を Fig. 4 に示す。

それぞれの解析結果に置いて、氷片運動はおおよそ同様であり、非物理的な氷片挙動、たとえば氷片の船体への侵入や激しい運動は観察されない。詳細に観察すると丸で囲んでいる部分に差異があり、Bullet を用いた解析では氷片が船底付近まで沈み込まないが、ODE では沈み込んでいることが分かる。

いずれの物理計算ライブラリを用いた解析でも、氷片に作用する浮力は同じコードを使って計算しており、差異はないはずである。従って物理計算ライブラリが内部で計算している接触力に差があるために、氷片運動に差が生じたと考えられる。

そこで、内部で計算している接触力のひとつである摩擦が原因である可能性を調査するため、同じ解析条件で摩擦係数をゼロとした解析を実施した。その結果を Fig. 5 に示す。

摩擦係数をゼロと設定した場合には、いずれの物理計算ライブラリを用いた場合でも同等の水路中抵抗を示していることが分かる。従って、Fig. 3 に示される差異は摩擦の取り扱いの違いによるものと思われる。

本稿執筆時点までの調査で、Bullet を用いたプログラムでは摩擦力が作用する方向を適切に取り出すことができていないことが分かっている。ただしこの違いだけで 3~5 倍の抵抗の差が出るとは考えにくく、これ以外の理由もあると思われる。この原因究明は今後の課題である。

なお Bullet を用いた解析の長所として、複雑形状の物

体同士の衝突であっても、接触点に作用する力を解析しやすい、という点が挙げられる。Fig. 6 に Bullet を用いた解析における、接触点を表示している例を示す。2011 年度の研究範囲では、ODE の解析結果のほうが信頼性が高いとの結論に至っているが、Bullet バージョン 3 からは摩擦の取り扱いが改善される予定であり、開発の活発さや利用者の数などを比較しても、Bullet の将来性には期待できるものがある。今後も評価を継続する予定である。

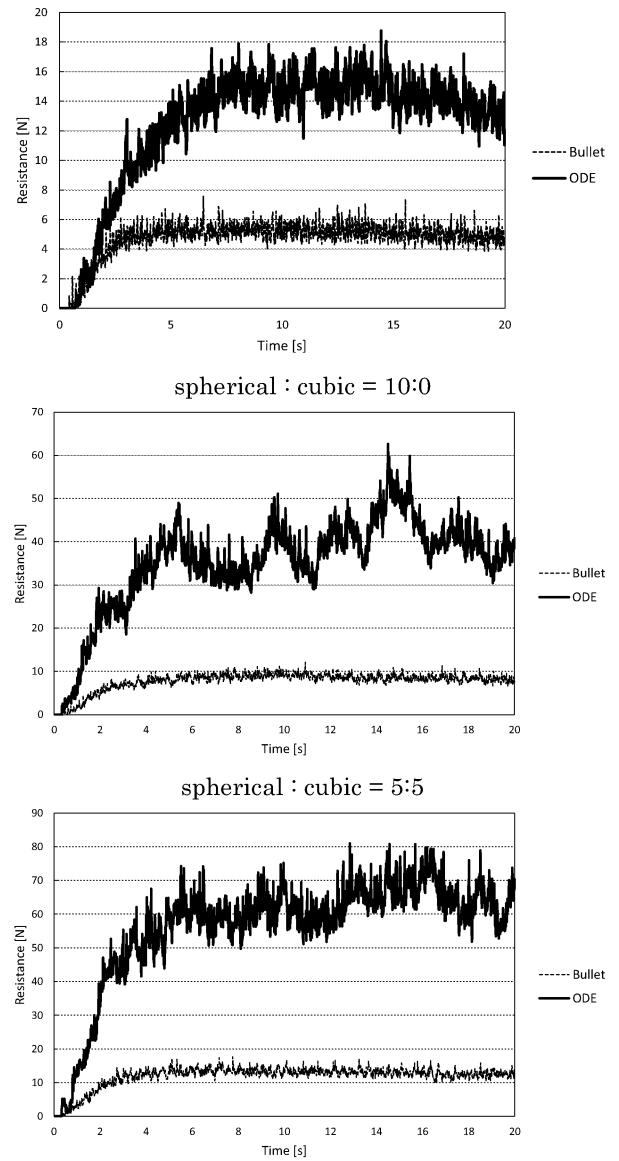
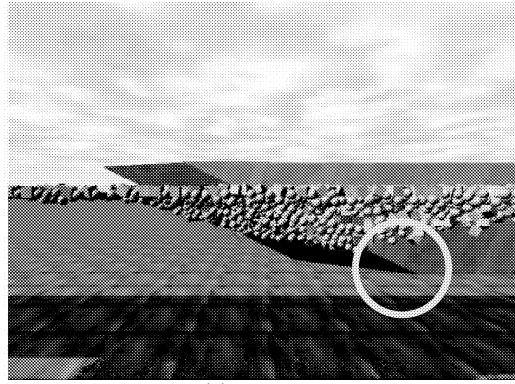
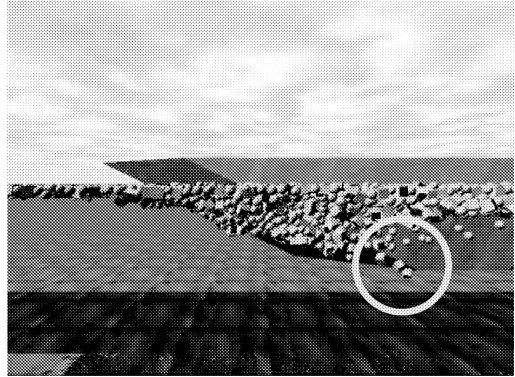


Fig. 3 Comparison of ice resistance between two physics libraries, ODE and Bullet, with different ratios of spherical and cubic ice pieces

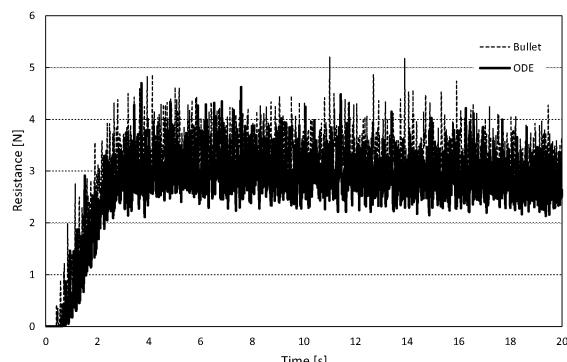


(a) Bullet

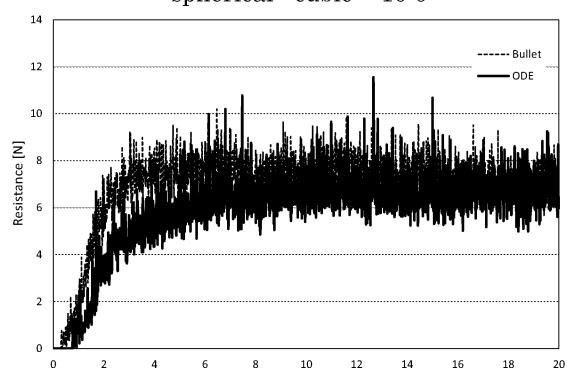


(b) ODE

Fig. 4 Comparison of ice motion in simulation with different physics libraries



spherical : cubic = 10:0



spherical : cubic = 0:10

Fig. 5 Comparison of ice resistance between two physics libraries, ODE and Bullet, with different ratios of spherical and cubic ice pieces; cases that friction coefficient is set to zero.

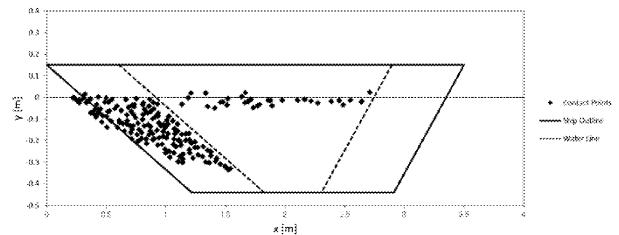


Fig. 6 An example of contact points of ice pieces against the ship hull, calculated with Bullet physics library

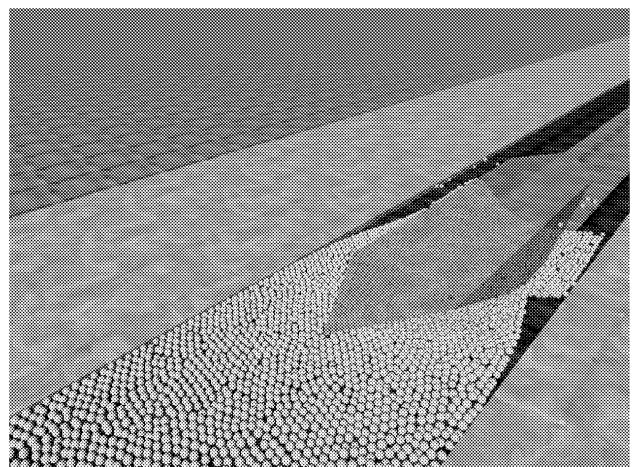


Fig. 7 Snapshot of simulation of consolidated layer with no disjoints



Fig. 8 Snapshot of simulation of consolidated layer with low threshold of disjoint force (0.005 N)

### 3.2 Consolidated layer を模擬した解析結果

Fig. 7, Fig. 8 に、consolidated layer を模擬した解析による氷片運動の様子を示す。いずれも氷片は 1 層で、氷片数 10,000 個である。Fig. 7 は全氷片の接触点を結合して離れないようにした解析例で、すべての氷片は球形氷片である。また Fig. 8 は joint の結合を消去する閾値を 0.005 N と設定した場合の解析例で、球形氷片数：立方体形氷片数=5:5 の場合である。なお船体を半透明に表示し、船体の下側に潜り込んだ氷片を見るようにし

である。

Fig. 7 より、結合が切れないように解析した場合には、すべての接触点が離れないため、布状の物体の上を船体が移動するような解析となっている。この解析自体は非現実的なものだが、氷片同士を joint で結合することにより、意図した解析が可能であることが分かる。一方、Fig. 8 では氷片同士の結合を、0.005 N の力が加わったときに消失させる（破壊させる）ような解析である。この場合には、氷片の運動の様式が joint で結合しない場合とあまり変わらず、わずかに氷片同士が結合したままの運動が観察されるだけであった。

Fig. 9 に、結合消去の閾値を変えて解析した結果の水路中抵抗を示す。氷片を 2 層に積層させ、その表層のみを結合している。氷片数は 80,000 個である。

この図には表示していないが、joint なし（結氷なし）で解析した場合の結果は、閾値 0.005 N の解析結果とほぼ一致した。consolidated layer の影響で抵抗は 1 割程度増加するとされていることから[2]、本解析の範囲においては、閾値 0.5 N の場合に実際の consolidated layer での抵抗に近い水路中抵抗となっていることが分かる。

実際の水路では、水路中の氷片の表層が大気によって冷やされることにより互いに凍り付き、consolidated layer を形成する。本研究で行った解析は氷片を 2 層に積層し、その 1 層目を結合させている。したがって結氷の傾向は再現している。しかし全氷片のおよそ半数が結合していることになり、これは実海域よりも多いと考えられる。このため、本解析条件が実海域の状況を再現しているかどうかは疑問である。

今回の解析では閾値 0.5 N の場合に水路中抵抗が consolidated layer の抵抗に近づいたが、上に述べた理由によりこの値が適切な閾値だとは考えておらず、更なる定量的評価が必要である。だが閾値により水路中抵抗が異なることから、水路状態を実海域に近づけるとともに適切な閾値を設定することにより、consolidated layer に相当する解析を再現する可能性があると判断している。

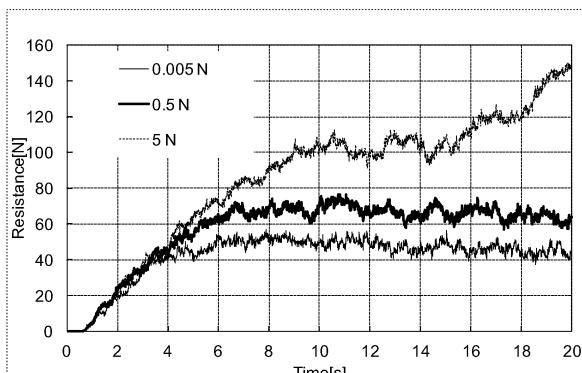


Fig. 9 Comparison of ice resistance with different threshold of disjoint forces

#### 4. 結論と今後の課題

本研究は氷荷重分布を数値解析によって予測する手法を確立することを具体的な目標としている。数値解析を工学院大学で行い、対応する模型実験を海上技術安全研究所で行うが、本稿執筆時点では数値解析の研究を先行して行っている。著者らの開発したシミュレータを用い、(独)海上技術安全研究所の所有する模型船型 B-063 を解析対象とし、物理計算ライブラリの変更が解析結果に及ぼす影響、及び結氷層 (consolidated layer) の再現手法を調査した。その結果、物理計算ライブラリを ODE から Bullet に変更することにより、氷片の運動の傾向はあまり変わらないが、詳細に見ると氷片の沈み込み方に差があること、また計算される水路中抵抗が大きく異なり、Bullet は水路中抵抗を過小評価していることが分かった。この原因として摩擦力の取り扱いが原因だと考えられるが、詳細な原因究明には至らず課題を残した。また consolidated layer を、氷片同士を joint で結合し、予め定めた閾値以上の力が加えられたときに結合を消去（破壊）することで、結氷層を模擬した。これにより結氷を定性的には再現できた。氷片の配置と結氷部分の選択に際して実海域での状況を再現し、かつ適切な閾値を設定することにより、consolidated layer が存在する水路での抵抗を適切に予測できる可能性がある。

本研究では 2012 年 3 月に海上技術安全研究所氷海試験水槽において模型実験を実施しており、この結果と比較することにより数値解析の妥当性を評価する予定であるが、本稿執筆時点では結果の解析が不十分である。また複数の船型を用いた解析による妥当性評価は、2011 年度中の実施を予定していたが終了しておらず、引き続き課題として残されている。

なお本研究の成果の一部を、国際学会で報告している[16]。

#### 謝辞

本研究は工学院大学総合研究所プロジェクト研究費（2010 年度～）のほか、科学研究費（若手研究(B)、2009～2010 年度、21760671 および基盤研究(C)、2011 年度～、23560974）および造船学術研究推進機構（2009～2010 年度）の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 野澤和男、氷海工学、成山堂書店、2006.
- [2] Finnish Maritime Administration. Guidelines for the application of the Finnish-Swedish ice class rules. Finnish Maritime Administration Bulletin No. 14/20.12.2005, 2005.
- [3] 金野祥久、水城崇、山本敬介、安木正樹、若生大輔、瀧本忠教、金田成雄、下田春人、泉山耕。碎氷船の性能評価を目的とした船体周りの氷片挙動シミュレータの開発.日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 8, pp. 99-106, 2008.

[4] 金野祥久, 吉本和弘. 物理ベースモデリングに基づく brash ice channel 航行船舶の抵抗評価手法の開発. 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 10, pp. 49-56, 2009.

[5] 金野祥久, 吉本和弘. 船舶のチャネル内氷片排除能力の数値シミュレーションによる推定. 寒地技術論文・報告集, Vol. 23, pp. 208-212, 2007.

[6] 金野祥久, 吉本和弘. 船舶のチャネル内氷片排除能力の数値シミュレーションによる推定(第2報: brash ice channel における氷片排除能力の評価). 寒地技術論文・報告集, Vol. 24, pp. 222-226, 2008.

[7] Akihisa Konno, RESISTANCE EVALUATION OF SHIP NAVIGATION IN BRASH ICE CHANNELS WITH PHYSICALLY BASED MODELING, 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions 2009, June 2009.

[8] 金野祥久, 齋藤耕. 船舶のチャネル内氷片排除能力の数値シミュレーションによる推定(第3報: 氷片排除能力に対する氷片配置と垂線間長の影響). 寒地技術論文・報告集, Vol. 25, pp. 202-206, December 2009. CD-ROM.

[9] David Baraff. Physically based modeling: Principles and practice; rigid body simulation I; unconstrained rigid body dynamics. Siggraph '97 Course notes, 1997.

[10] David Baraff. Physically based modeling: Principles and practice; rigid body simulation II; nonpenetration constraints. Siggraph '97 Course notes, 1997.

[11] Russel Smith. Open Dynamics Engine v0.5 User Guide, 2004. <http://www.ode.org/> (2010年10月25日確認).

[12] Bullet Physics Library,  
<http://bulletphysics.org/wordpress/> (2012年5月1日確認)

[13] Brian Mirtich, John Canny, Impulse-based simulation of rigid bodies, Proceedings of the 1995 symposium on Interactive 3D graphics, 1995.

[14] Finnish Maritime Administration. Guidelines for the application of the Finnish-Swedish ice class rules. Finnish Maritime Administration Bulletin No. 14/20.12.2005, 2005.

[15] Akihisa Konno and Osamu Saitoh. Preparation method of numerical ice channel and its evaluation for simulation of navigation in ice. In Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, pp. 154-159, 2010.

[16] Akihisa Konno, Osamu Saitoh and Yuuki Watanabe. NUMERICAL INVESTIGATION OF EFFECT OF CHANNEL CONDITION AGAINST SHIP RESISTANCE IN BRASH ICE CHANNELS. In Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on

Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2011. USB Memory (POAC11-037)



# シンセティックジェットの流動特性に関する研究 —壁面近傍でのシンセティックジェットの挙動—

工学院大学グローバルエンジニアリング学部機械創造工学科 佐藤光太郎

青山学院大学理工学部機械創造工学科 横田和彦

## Study on the Flow Characteristics of Synthetic Jets

### —Behavior of Synthetic Jets near a Rigid Boundary—

Kotaro SATO, Faculty of Global Engineering, Kogakuin University

Kazuhiko YOKOTA, Faculty of Engineering Science, Aoyama Gakuin University

**ABSTRACT :** The jet flows have been applied to various fields to control the flow separation. Over the last decade, several studies have investigated synthetic jets. However, there are still many clarifications needed, including details of the structure and Coanda effect of synthetic jets. The present study clarifies some fundamental flow characteristics of free synthetic jets and synthetic jets near a rigid boundary by conducting an experiment and numerical simulations. As the main results, it is found that the velocity distribution of free synthetic jets depends on  $K = Re/S^2$  (the ratio of the Reynolds number to the square of the Stokes number) and can be identified by the maximum velocity at the centerline and the jet half-width. Flow visualization is carried out applying the smoke wire method. In addition, it is confirmed that the flow characteristics of the synthetic jet near a rigid boundary and re-attachment length of the synthetic jet are determined not only by  $H_1/b_0$  (normalized step heights) but also  $K$ .

**Key Words:** Synthetic Jet, Continuous Jet, Free Jet, Velocity Distribution, Jet Formation, Smoke Wire Method, Unsteady Flow, Turbulence

### 1. 緒論

工業製品の生産過程のみならず今日では日常生活においても様々な場面で噴流技術の発展を目指すことができるが、その背景には長い噴流研究の歴史がある<sup>(1)</sup>。最近では噴流を利用した流れの制御に関する研究が盛んで<sup>(1)</sup>、噴流による境界層・失速制御、循環制御、抵抗低減などが試みられている。さらに、これまでの連続噴流の代わりにシンセティックジェットを利用して流れを制御する研究も始まっている<sup>(2)-(8)</sup>。既存のシンセティックジェット・アクチュエータにはプラズマ方式やダイアフラム式、ピエゾ駆動型、スピーカー型などがあり、いずれも機械的駆動部分が少ないと小型化・マイクロ化に適

している。また、駆動源に多様性があることもシンセティックジェットの大きな特徴であり、将来的には非接触でのエネルギー供給も可能と思われる。そのため、シンセティックジェットはマイクロ飛翔体における推力・揚力生成あるいは埋め込み型マイクロポンプや自走式カプセル内視鏡などの医用流体機械への応用などが期待される。これまでのシンセティックジェットに関する研究では翼負圧面にシンセティックジェット・アクチュエータを取り付け翼の失速制御<sup>(1),(2)</sup>が行なわれてきた他、平均噴流の発生条件や生成メカニズム、基本流動特性に関連した噴流構造や非定常特性などが議論され一定の成果が報告されている<sup>(9),(10)</sup>。しかし、詳細な平均流の発生メカニズムや流動特性には不明な点が多く残され、なかでもコ

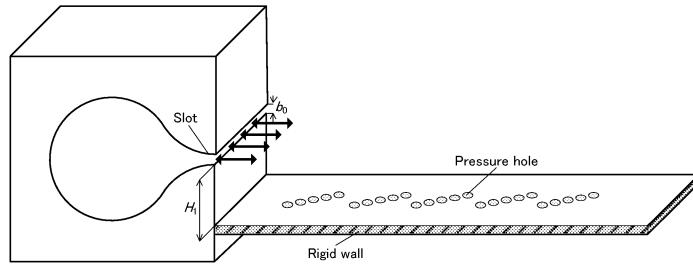


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

アンダ効果に代表されるようなシンセティックジェットと境界面との干渉問題について報告した例は極めて少ない。シンセティックジェットを用いて物体に働く流体力を制御する上で、境界面近傍でのシンセティックジェットの挙動やコアンダ効果に関する知見は極めて重要であるにも関わらず、今なお不十分なままである。

そこで、本研究ではコアンダ効果に注目しながら剛体壁近傍における二次元シンセティックジェットの流動特性について、実験的並びに数値的に解明を試みた。スモークワイヤ法による可視化実験結果と数値計算結果から剛体壁近傍での連続噴流とシンセティックジェットのフローパターンを比較するとともに、シンセティックジェットのフローパターンに及ぼす無次元パラメータ  $K^{(10)}$  の影響について調べる。また、速度ベクトルおよび剛体壁面上の圧力分布から求められる噴流付着距離と  $K$  の関係を明らかにする。さらに、流線の時間変化により連続噴流とシンセティックジェットの流動特性の同異並びに噴流の安定性に及ぼす  $K$  の影響について議論する。

## 2. 主な記号

$b_0$	: Slit width = $5.0 \times 10^{-3}$ [m]
$C$	: Distance from slit to upper boundary
$C_p$	: Pressure coefficient [ $P/0.5\rho U^2$ ]
$f$	: Frequency [1/s]
$H_1$	: Step height [m]
$H_2$	: Distance from slot to upper boundary [m]
$K$	: The constant = $Re/S^2$
$l$	: Slot length = $1.0 \times 10^{-2}$ [m]
$L_0$	: Dimensionless stroke
$P$	: Pressure on the wall [Pa]
$Re$	: Reynolds number = $Ub_0/\nu$
$RMS$	: Velocity turbulence [m/s]
$S$	: Stokes number = $[(2\pi f b_0)/\nu]^{1/2}$
$U$	: Representative velocity [m/s]
$U_{sa}$	: Velocity amplitude [m/s]
$u$	: Velocity of X-way [m/s]
$v$	: Velocity of Y-way [m/s]
$X_{MJ}$	: Formative point of mean jet from slit [m]
$y_{1/2}$	: Jet half width ( $u/u_m = 0.5$ )
$X_{st}$	: Reattachment length [m]
$\nu$	: Kinematic viscosity [m <sup>2</sup> /s]

## Subscripts

$c$	: Continuous jet
$s$	: Synthetic jet
$o$	: Outlet of slit (point)
$m$	: Maximum average velocity [m/s]

## 3. 実験装置・方法および数値計算方法

実験装置・方法及び数値解析方法の詳細は平成22年度総合研究所プロジェクト研究報告書を参照されたい。実験での作動流体は空気であり、プレナムタンク上部にスロット（幅  $b_0=5\text{mm}$ 、アスペクト比は  $l/b_0=20$ ）付き角柱を取り付け、両端がアクリル板により保持されていることから、スロット下流では概ね二次元流れが実現されている。シンセティックジェットは、シグナルジェネレータとアンプによりスピーカーを駆動することで、連続噴流はプロアを用いてプレナムに空気供給することで生成し、スロット出口流速はそれぞれシグナルジェネレータとインバータによって調整した。流速計測にはピト管並びに熱線流速計を使用した。

図1に噴流出口スロットから  $H_1$  の距離に剛体壁が配された場合の試験部拡大図を示す。剛体壁には直径1mmの圧力孔が設けられており、剛体壁表面圧力分布が計測可能である。なお、圧力計測には微差圧計（岡野製作所 DMP202N1）を用いた。剛体壁表面圧力分布から時間平均よどみ点が決定され噴流の再付着距離が求められる。一方、数値シミュレーションには、非構造格子系熱流体解析システム SCRYU/Tetra for Windows を用いた。本研究では乱流モデルに  $k-\epsilon$  モデルを用い、二次元非圧縮粘性流れを仮定して流れ場の解析を行った。

図2に剛体壁近傍でのシンセティックジェットの計算モデルと計算条件を示す。境界条件として噴流出口には流速規定条件を計算領域出口境界( $x=420b_0$ )では圧力一定条件を与えた。上側境界( $y=380b_0$ )では一定流速( $v_w=-0.01U$ )を与え、剛体壁表面上では no slip 条件を与えた。

図3は剛体壁近傍でのシンセティックジェットのための計算メッシュ例である。本計算に用いたグリッド数は約 200,000 である。なお、本研究では可視化実験を除き、スロット幅( $b_0=5\text{mm}$ )とストロークに基づくレイノルズ

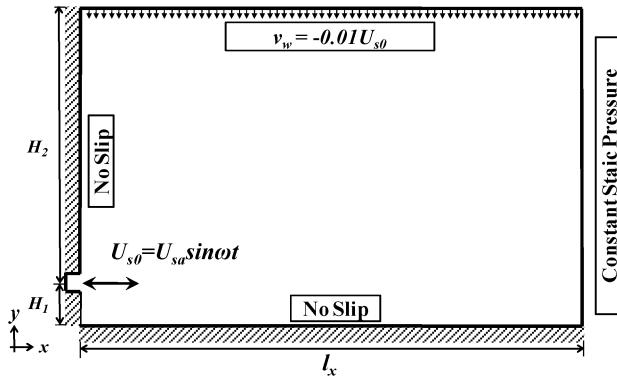


Fig.2 Numerical simulation domain and boundary conditions near rigid boundary

数を  $Re U_0 = 1980$ ,  $Re \bar{U} = 4860$  で一定で行った。

#### 4. 結果及び考察

シンセティックジェットの挙動と比較するため剛体壁近傍  $H_1/b_0 = 20$  における連続噴流の挙動観察例を図 4 に示す。 (a) はスモークワイヤ法により可視化された実験結果 ( $Re U_0 \approx 990$ ), (b) は数値計算で得られたベクトル図 ( $Re U_0 = 2430$ ) であり, (c) は数値計算で得られた渦度分布 ( $Re U_0 = 2430$ ) である。 (c) の渦度のスケールは -1000 ~ 1000 [1/s] であり, レンジオーバーについては白色および黒色で表す。 (a), (b), (c) の図において, (i), (ii), (iii), (iv), (v) はそれぞれ無次元時間  $t = tU_0/b_0 = 0, 7.5, 15.0, 22.5, 30.0$  (後述の図 5 のシンセティックジェット  $K=9.55$  での振動周期に基づく無次元時間  $t/T=0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$  に対応) の場合の様子である。なお, 本章では本図を含む全てのフローパターンの図において, 流れが十分発達した状態を  $t=0$  と定義した。 (a) 可視化実験 (スモークワイヤ法) でのトレーサ粒子流脈線と (b) 数値計算で得られたベクトル図のいずれにおいても噴流は剛体壁面側へ引き寄せられる様子が伺え, 実験結果と数値計算結果は定性的に一致していることがわかる。 (b) ベクトル図から  $H_1/b_0 = 20$  では剛体壁面上  $x/b_0 = 30$  付近によどみ点を形成することがわかり, 本図のよどみ点の位置すなわち噴流再付着距離は熊田ら<sup>(11)</sup>の結果とほぼ一致している。また, (i)～(v)において顕著な時間的変化は認められず, ほぼ定常流れとなっており,  $x/b_0 < 30$  の噴流と下壁に挟まれた再循環領域に見られる時計周りの渦構造にも時間変化は見られない。 (c) 渦度分布については連続噴流の場合, 渦度の絶対値が噴流中心の上下で帶状に大きな値を示している様子が確認できる。

図 5 は剛体壁近傍  $H_1/b_0 = 5$  における連続噴流の挙動観察例を示す。 (a), (b), (c) および (i), (ii), (iii), (iv), (v) について前図同様である。  $H_1/b_0 = 5$  も  $H_1/b_0 = 20$  の場合と同様に噴流は剛体壁面側へ引き寄せられ, ほぼ定常状

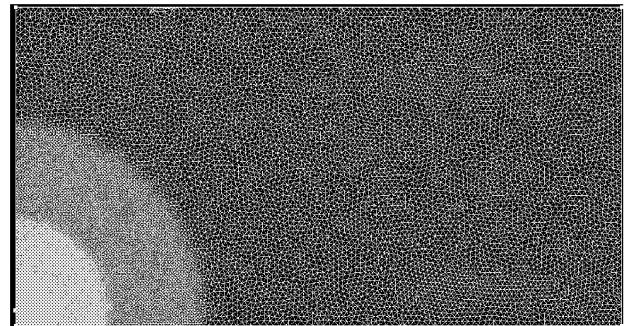


Fig.3 Grids for numerical simulation near rigid boundary ( $H_1/b_0 = 5$ )

態になっている様子が観察される。本図においてよどみ点は剛体壁面上の  $x/b_0 = 12$  附近に存在し, 再循環領域は図 4  $H_1/b_0 = 20$  の場合と比較して小さいものの, 渦強度, 大きさに時間変化は見られない。噴流再付着後, 噴流は噴流幅を増加しながら剛体壁に沿って流れていく様子が伺える。

剛体壁近傍でのシンセティックジェット,  $K=9.55$  の場合の挙動観察例を図 6 と図 7 に示す。連続噴流の場合と同様, (a) はスモークワイヤ法による可視化観察結果 ( $Re U_0 \approx 990$ ), (b) は数値計算によるベクトル図 ( $Re U_0 = 2430$ ), (c) は数値計算で得られた渦度分布 ( $Re U_0 = 2430$ ) である。 (c) の渦度のスケールは -1000 ~ 1000 [1/s] で, レンジオーバーについては白色および黒色で表す。 (a), (b), (c) の (i)～(v) は出口速度変化の一周期についてフローパターンの時間的変化を見たものである。(i), (ii), (iii), (iv), (v) はそれぞれシンセティックジェット振動周期に基づく無次元時間  $t/T = 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$  であり,  $t = 0, 7.5, 15.0, 22.5, 30.0$  に対応している。(i)～(iii) は噴出時, (iii)～(v) が吸引時の流れ場である。

図 6 は  $K=9.55$ ,  $H_1/b_0 = 20$  の場合の剛体壁近傍におけるシンセティックジェットの挙動観察例である。 (a), (b) の一連の図から剛体壁近傍でのシンセティックジェットの場合も無限遠の場合と同様, スロット出口付近で渦対が生成され平均流を形成していることが観察される。(i) から(ii) の間でスロット付近に渦対が形成され, (ii) から(iii) では発達しながら下流へ移動する。(iv) は出口流速が  $u_{s0} = -23.5 \text{ m/s}$ , すなわち吸引の場合であるが, 吸引時でも渦対は下流側に進行し続けている。発達した渦対では互いの誘起速度が吸引速度を上回るため, 渦対は常に下流側へ進行し続けることが可能となる。さらに, (b) (iv) のベクトル図で噴流中心の速度を調べると, 本条件では  $x/b_0 > 4$  で噴流中心速度  $u$  は常に正になっており,  $x/b_0 > 4$  では速度変動を伴うものの吸引により噴流中心速度が負

になることはない。 $K=9.55$  の場合の無限遠でのシンセティックジェットと剛体壁近傍でのシンセティックジェットとを比較すると、無限遠では対称の渦対が互いの誘起速度により直線的に並進運動するのに対して、剛体壁近傍では蛇行しながら剛体壁面側に引き寄せられている。(c)の渦度分布を見ると、渦対の存在は明確であり、反時計回りの正の渦中心（例えば図(ii)中、 $x/b_0=3$ 、19付近に見られる2組の渦対の上側で、それぞれ赤と白の部分）の渦度絶対値が時計回りの負の渦中心（図中の2組の渦対の下側で、それぞれ青と黒の部分）の渦度絶対値よりも大きくなっている。また、噴流中心速度  $u$  は常に正となる位置  $X_{PJ}$  は、無限遠の場合と  $H/b_0=20$  の場合と共に  $x/b_0 \approx 4$  となり、大きな差は見られない。図4 連続噴流ほど明確ではないが、本条件でも剛体壁側に再循環領域が存在するため、噴出時にスロット下端での速度勾配が上端に比べ小さくなることが、渦強さに差が生じる原因として考えられる。これにより互いの誘起速度のバランスも崩れ、時計回りの渦（青）は反時計回りの渦（赤）よりも大きな誘起速度が与えられ、反時計回りの渦（赤）より先行して下流側に進んでいく。したがって、剛体壁近傍のシンセティックジェットは渦対の対称性が崩れて蛇行するものの、速度分布は連続噴流に類似しているためコアンダ効果により壁面側に引き寄せられると考えられる。一方、剛体壁近傍の連続噴流と比較すると連続噴流の場合は剛体壁が存在することで、噴流は概ね一定曲率で壁面側へ曲がり、定常流れとなるのに対して、シンセティックジェットの場合は壁面の存在で噴流中心が蛇行し、フローパターンの時間変化が大きい非定常流れになることがわかる。

図7は  $K=9.55$ 、 $H/b_0=5$  の場合の剛体壁近傍におけるシンセティックジェットの挙動観察例である。前章で無限遠におけるシンセティックジェットの非定常特性について議論し、 $K=9.55$  の場合には  $x/b_0=25\sim30$  の間で無限遠のシンセティックジェットの速度変動  $RMS/u_m$  が連続噴流の  $RMS/u_m$  と同程度になり、この位置では速度変動スペクトル分布の卓越周波数成分ピーク値が  $x/b_0=5$  のピーク値の  $1/5$  以下に減少することを示した。ベクトル図からも  $x/b_0>30$  において流れ場の顕著な時間変化は認められない。ところが、本図、剛体壁近傍のシンセティックジェットでは  $x/b_0>30$  においても明らかにフローパターンが時間変化している。(c)の渦度分布図では渦が千鳥配列となって下流へ移動する様子が見てとれる。したがって、前図同様、シンセティックジェットの場合は剛体壁の存在により流れが不安定化されることがわかる。

$H/b_0=20$  の条件下で数値計算されたシンセティックジェットのベクトル図を図8に示す。(a)は  $K=1.0$ 、(b)は  $K=15.92$ 、(c)は  $K=47.76$  の場合であり、(i), (ii), (iii), (iv)、

(v)はそれぞれシンセティックジェット振動周期に基づく無次元時間  $t/T=0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$  の様子である。(a)  $K=1.0$  の場合はストロークが小さく、無限遠の場合と同様に  $K$  が大きい場合に比べて、早い段階で連続噴流と類似の振動特性になるため、他のシンセティックジェットと比較して、噴流中心の蛇行は明瞭ではなく、流れ場全体のフローパターンの時間変化も小さくなっている。また、この条件では噴流はスロットから出た直後に剛体壁と反対側に曲がり、その後、剛体壁に引き寄せられる。本研究で示す他の条件ではシンセティックジェットの再付着点距離は連続噴流と比べて長くなっているが、 $K=1.0$  では噴流中心の曲率が連続噴流の場合よりも大きくなることから、よどみ点は連続噴流の  $x/b_0 \approx 30$  よりも小さい  $x/b_0 \approx 25$  に存在し、再付着点距離が小さくなることが見てとれる。さらに本条件では明白な再循環領域も確認できる。ところで(b)  $K=15.92$  の場合は自由噴流の場合でも流れ場の対称性が崩れ、渦が逆カルマン渦状の千鳥配列となる。壁面近傍のシンセティックジェットである(b)  $K=15.92$  の場合は境界面存在による流れ場の非対称性のため、渦はより明確な千鳥配列となり噴流中心の蛇行が鮮明となっている。噴流中心位置は蛇行するものの  $x/b_0$  の増加とともに剛体壁側へ移動していることが確認でき、よどみ点を形成することもわかる。ただし、よどみ点位置の時間変化は大きく、スロットでの噴出・吸引のため再循環領域の様相も時間とともに変化している。(c)  $K=47.76$  におけるシンセティックジェットの特徴的挙動は噴出時に形成される渦対の循環量のバランスが大きく崩れていることがある。すなわち、スロット下端から形成される時計回りの渦に比べてスロット上端に連なる反時計回りの渦が本図で示す流れの領域全体に大きな影響を及ぼしていることが伺える。ここでは、(b)  $K=15.92$  で見られたような渦対の千鳥配列は確認できず、さらに吸引時間が長くなるため再循環領域が消滅する時間帯も存在する。これに関連して、無次元時間  $t/T=0\sim0.25$  では渦の巻き上がり位置より上流側で噴流中心の剛体壁側へ移動は認められず、 $t/T=0.50$  程度の噴流発達後にコアンダ効果により壁面側へ噴流中心移動が始まる。また、本図のようなコマ図では解りにくいが動画観察などから噴流先端部分が下流側で剛体壁に付着した後、吸引過程でよどみ点が上流側に移動することを確認している。本図では下流で噴流最大速度が減衰後に壁面に衝突するため速度分岐点の特定が困難となりよどみ点の確認も困難になる。(c)  $K=47.76$  では(i)～(v)でフローパターンが大きく変化しており、(a)  $K=1.0$  のフローパターンと比較すると再循環領域をはじめとして流動特性が全く異なることが明白である。

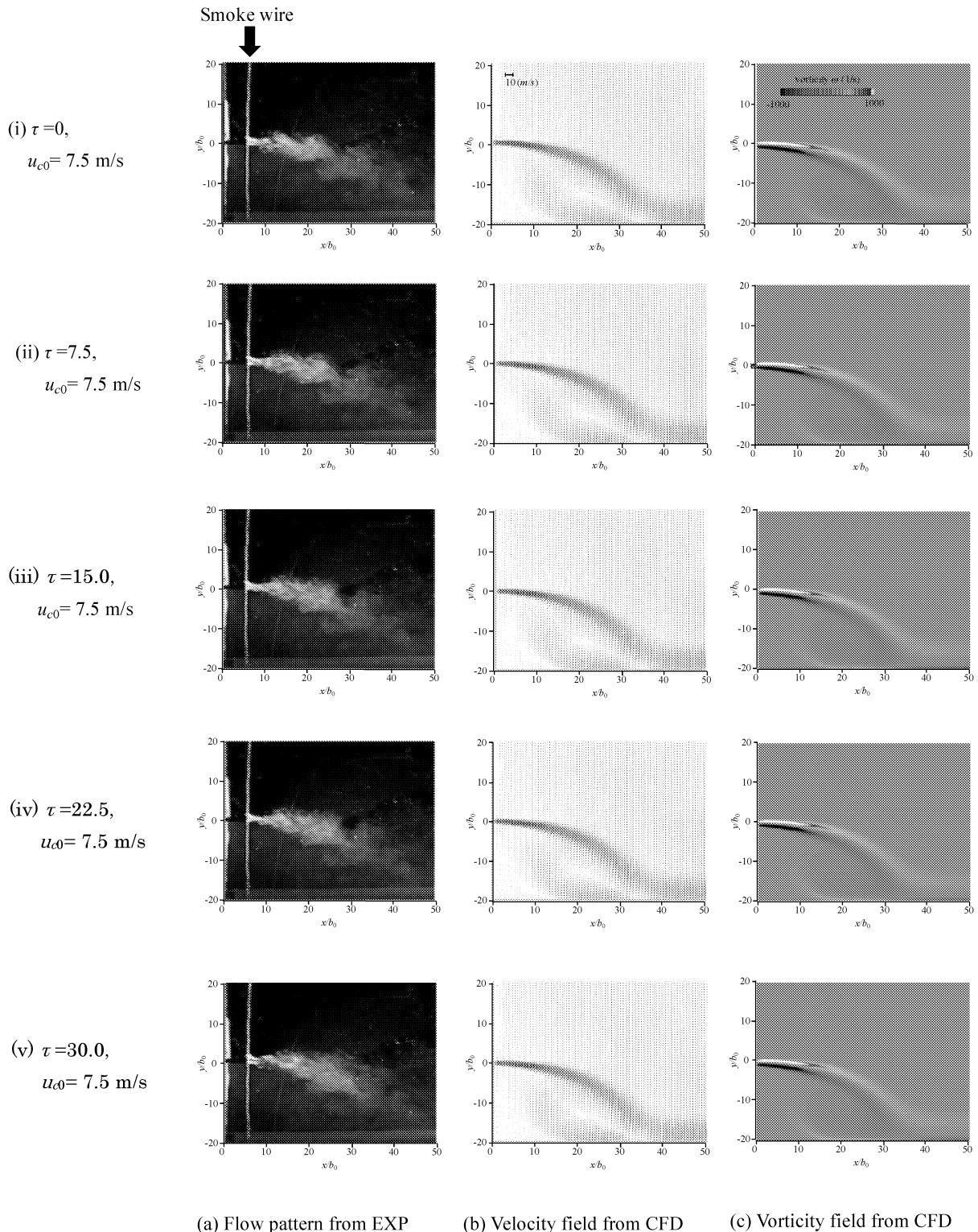


Fig.4 Flow pattern of continuous jet from EXP and CFD results ( $H_1/b_0=20$ )  
(EXP: Experiment, CFD: Numerical simulation)

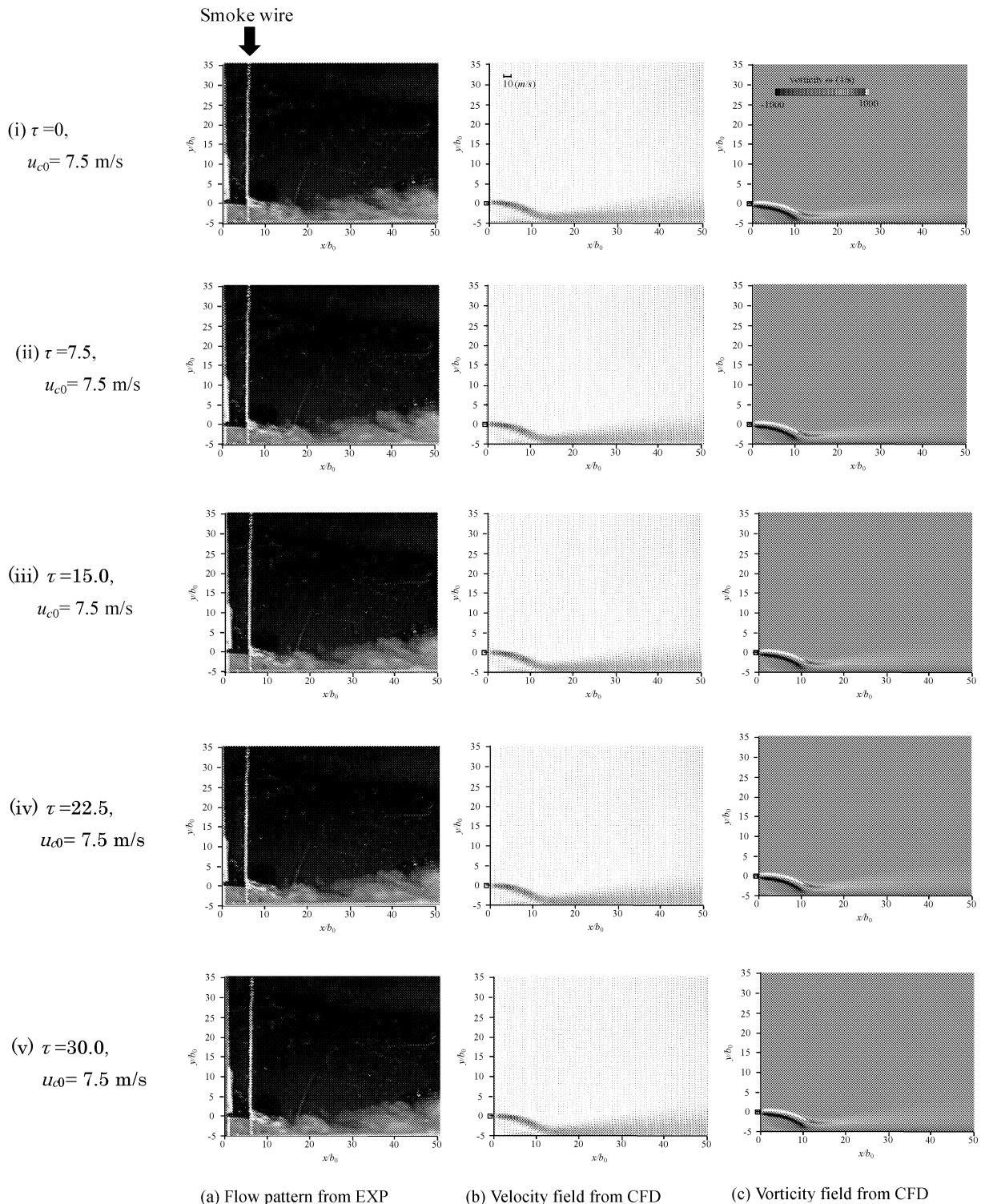


Fig.5 Flow pattern of continuous jet from EXP and CFD results ( $H_1/b_0=5$ )  
(EXP: Experiment, CFD: Numerical simulation)

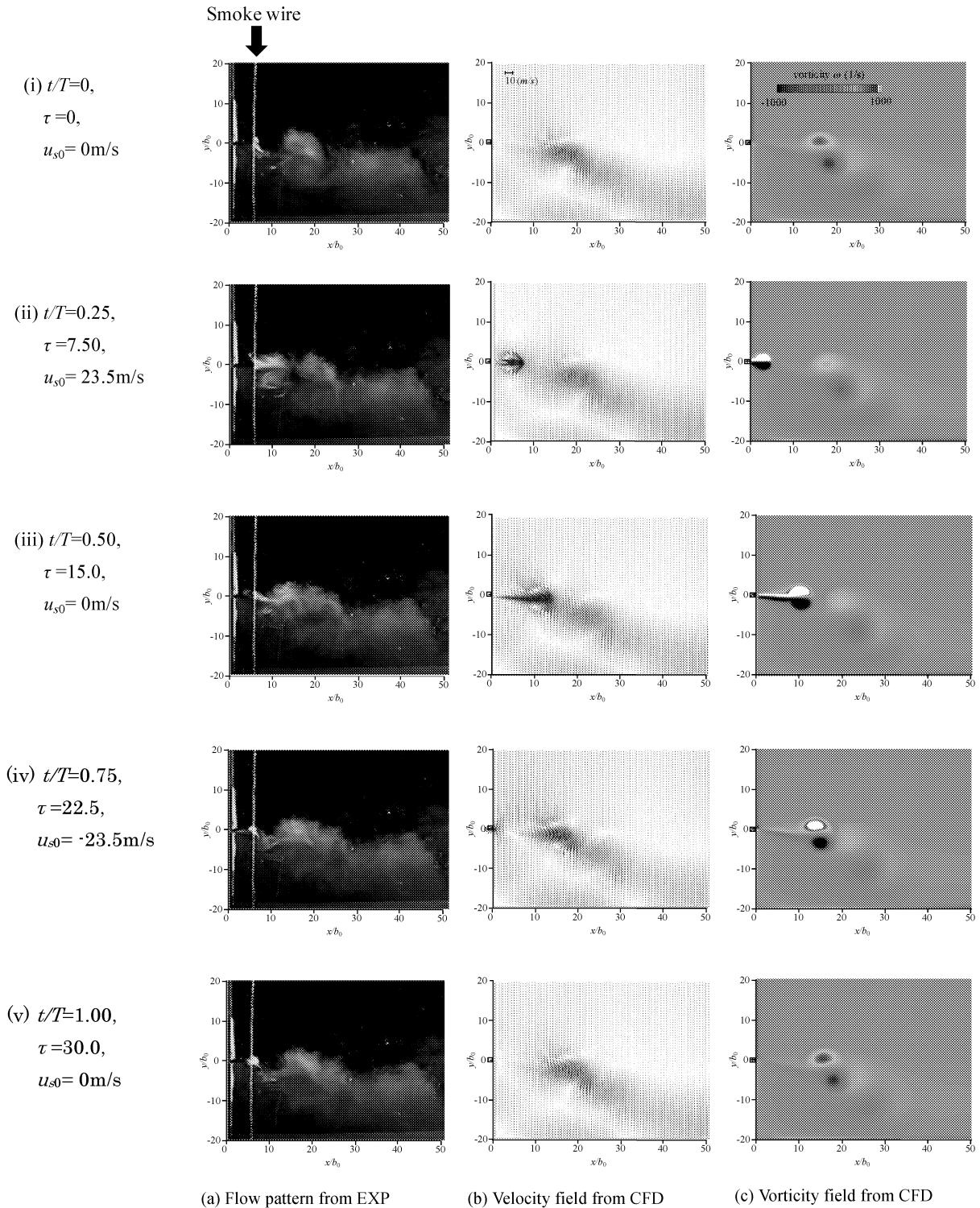


Fig.6 Flow pattern of continuous jet from EXP and CFD results ( $K=9.55$ ,  $H_1/b_0=20$ )  
(EXP: Experiment, CFD: Numerical simulation)

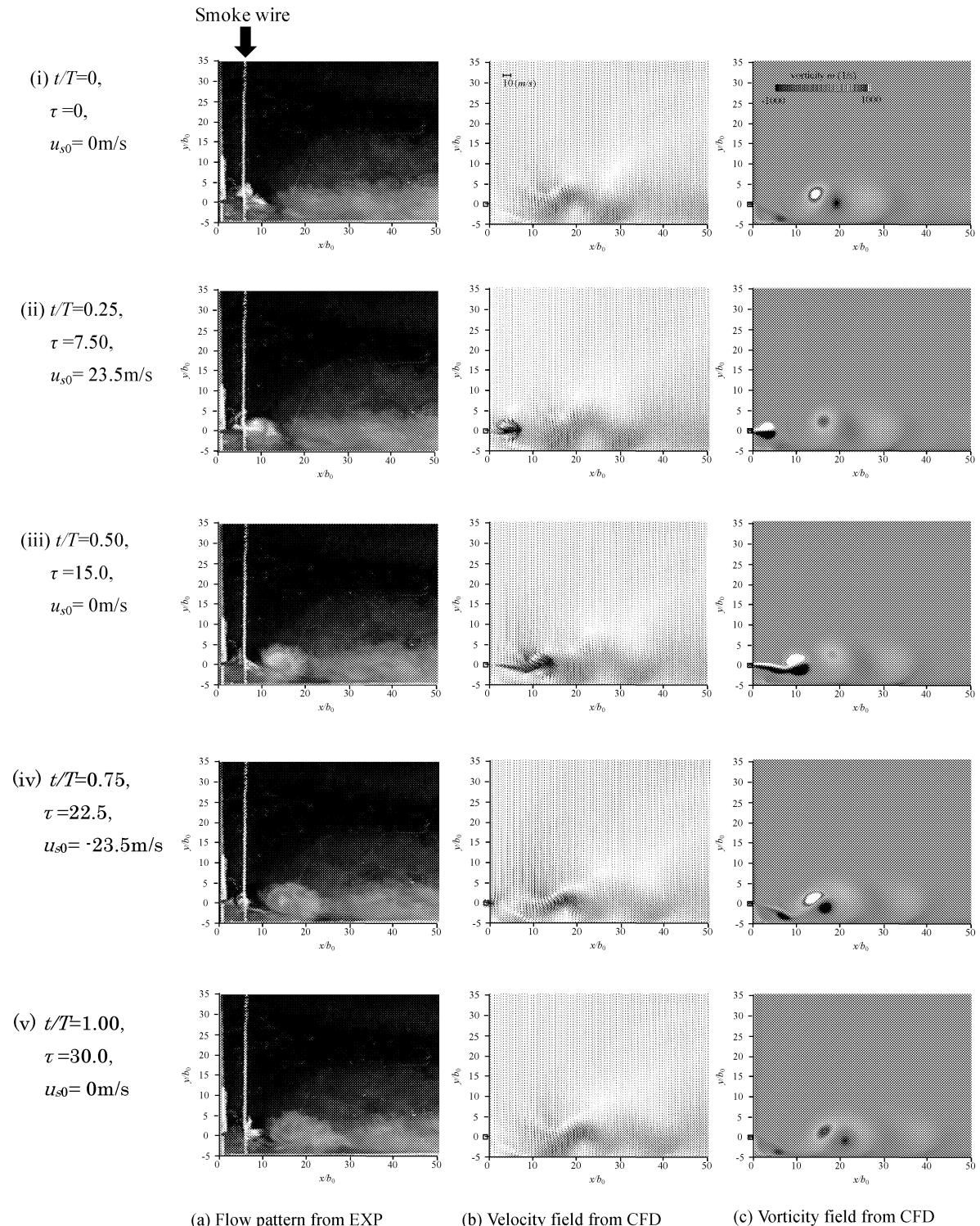
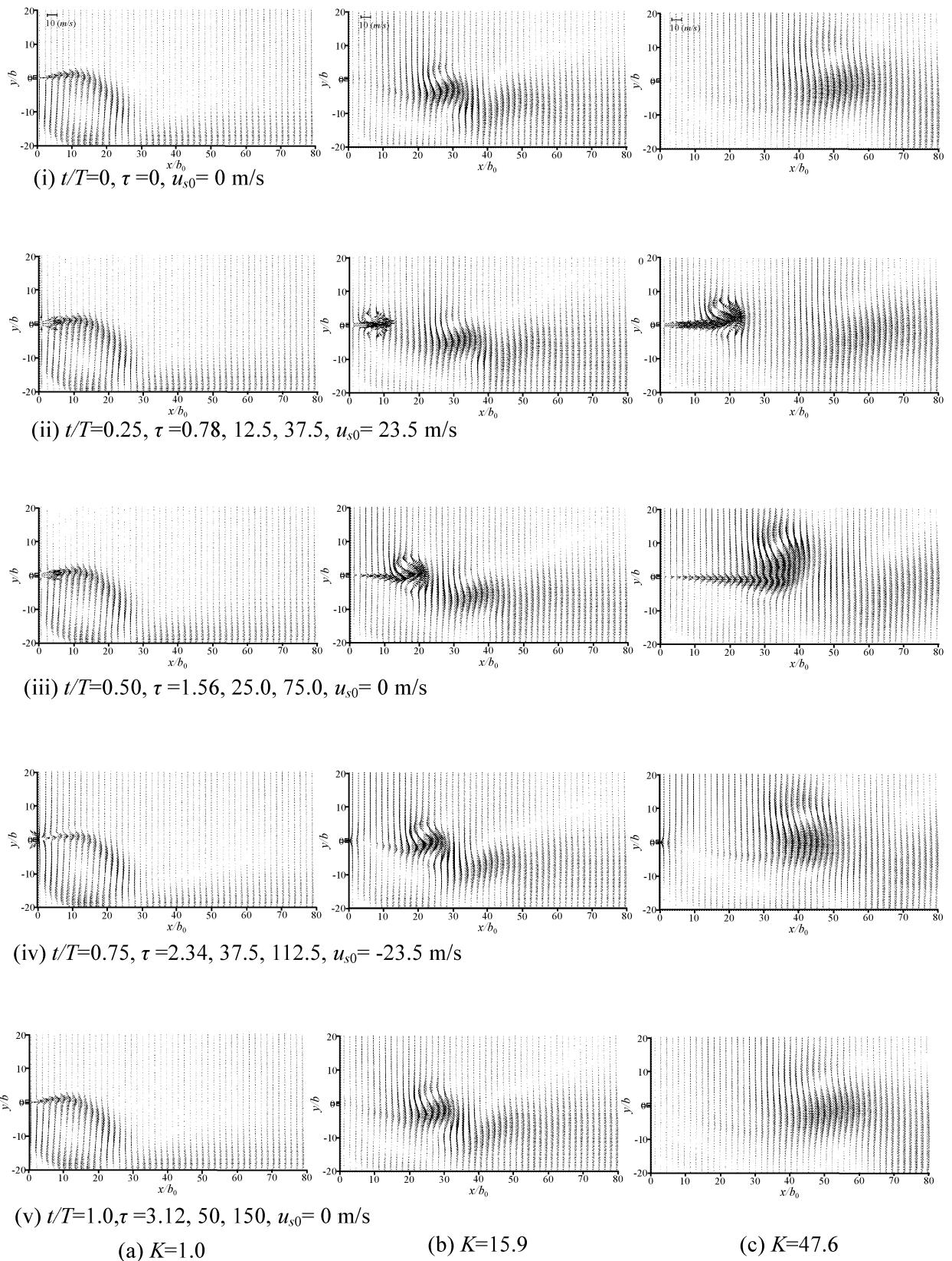


Fig.7 Flow pattern of continuous jet from EXP and CFD results ( $K=9.55$ ,  $H_1/b_0=5$ )  
(EXP: Experiment, CFD: Numerical simulation)

Fig.8 Flow pattern of various synthetic jet from numerical simulation ( $H_1/b_0=20$ )

## 5. 結 論

本研究では無限遠における二次元シンセティックジェットの基本流動特性を調べるために、実験並びに数値計算を行った。主な結論を以下に示す。

1. シンセティックジェットのスロット近傍に剛体壁が存在する場合にも平均流が形成されること、条件に依ってはコアンダ効果が確認された。
2. スモークワイヤ法による流れの可視化および数値計算による速度ベクトル図、渦度分布から剛体壁近傍での渦対の挙動など典型的なフローパターンを観察し、実験結果と数値計算結果とが定性的に一致していることを示した。
3. 無限遠でのシンセティックジェットは  $K$  の広い領域で渦対が直線的に並進運動する対称な流れになるのに対して、剛体壁近傍でのシンセティックジェットは流れ場が非対称となることから、渦対の対称性が崩れ噴流は蛇行することがわかった。
4. 剛体壁近傍でのシンセティックジェットの挙動は相対壁面距離  $H/b_0$  だけでなく、無次元パラメータ  $K$  にも依存することが明らかになった。
5. 壁面圧力分布と時間平均速度ベクトル図から同一相対壁面距離であっても  $K$  の増加とともに再付着点距離は大きくなることがわかった。
6. 時間平均噴流中心の移動からシンセティックジェットへ作用するコアンダ効果は相対壁面距離  $H/b_0$  と  $K$  によって決定されることを示した。 $H/b_0$  が小さく、 $K$  が大きい場合には明白なコアンダ効果は確認できない。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、千代田化工株式会社 西部光一博士に多大なる助力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- (1) Joslin,R.D.and Jones, G.S., "Applications of Circulation Control Technology", AIAA, Inc, Vol. 214 progress in astronautics and aeronautics (2006).
- (2) Duvigneau, R., Hay, A., and Visonneau, M., "Optimal Location of a Synthetic Jet on an Airfoil for Stall Control", Journal of Fluid Engineering, Vol.129 (2007), pp.825-833.
- (3) Tensi, J., Boué, I., Paillé, F., and Dury, G., "Modification of the Wake behind a Circular Cylinder by Using Synthetic Jets", Journal of Visualization, Vol.5, No.1 (2002), pp.37-44.

- (4) Whitehead, J. and Gursul, I., "Interaction of Synthetic Jet Propulsion with Airfoil Aerodynamics at Low Reynolds Numbers", AIAA Journal, Vol. 44, No.8 (2006), pp. 1753-1766.
- (5) You, D. and Moin, P., "Study of flow separation over an airfoil with synthetic jet control using large-eddy simulation", Annual Research Briefs, Center for Turbulence Research (2007), pp.311-321.
- (6) Amitay, M., Glezer, A., Kibens, V., Parekh, D.E., and Smith, D.R., "Aerodynamic Flow Control over an Unconventional Airfoil Using Synthetic Jet Actuators" AIAA Journal, Vol. 39, No.3 (2001), pp.361-370.
- (7) Shuster, J.M. and Smith, D.R., "An Experimental Study of the Formation and Scaling of a Round Synthetic Jet", Physics of Fluids, Vol. 19-045109 (2007), pp.1-21.
- (8) Zhang, P.F. and Wang, J.J., "Novel Signal Wave Pattern for Efficient Synthetic Jet Generation", AIAA Journal, Vol. 45, No.5 (2007), pp.1058-1065.
- (9) Holman, R., and Utturkar, Y., "Formation Criterion for Synthetic Jets", AIAA Journal, Vol. 43, No.10 (2005), pp. 2110 -2116
- (10) 高曾徹, 木下卓也, “環状シンセティック・ジェット・アクチュエータによる噴流の形成”, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.2 (2006), pp.211-212 .
- (11) 熊田 雅弥 , 馬渕 幾夫 , 親川 兼勇, “側壁を有する噴流による熱伝達に関する研究(第4報, 再付着噴流による平板岐点物質伝達率の一般整理式)”, 日本機械学会論文集 Vol.39(319), pp.920-929

## ① 発表論文

1. 西部光一, 藤田祐樹, 佐藤光太郎, 横田和彦, シンセティックジェットの基本流動特性に関する研究(第一報, 自由噴流の挙動について), 日本機械学会論文集(B編), 第 77 卷, 783 号 (2011), 2093-2104 頁
2. Koichi Nishibe, Yuki Fujita, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota and Toru Koso, Study on the Flow Structure of the Synthetic Jet, JSME Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6 (2011), No.4, pp.425-436
3. Koichi Nishibe, Kotaro Sato, Yoshinobu Tsujimoto and Haruo Yoshiaki, Experimental and Numerical Study on the Control of Flow Instabilities Downstream of Radial Inlet Guide Vanes JSME Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 6 (2011), No.4, pp.651-661

## ② 学会発表

1. Ryota Tsunoda, Koichi Nishibe, Yuki Fujita, Kotaro Sato, Kazuhiko Yokota and Toru Koso, Study on the Flow Characteristics of Synthetic Jets near a Rigid Plane Boundary, ASME-JSME-KSME Joint Fluids

Engineering Conference 2011, 9th Symposium on Fundamental Issues and Perspectives in Fluid Mechanics

2. 廣瀬夏穂, 紙谷祐樹, 佐藤光太郎, 横田和彦, 循環制御翼周りの流れに関する研究, 日本機械学会東海支部第61期総会講演会論文集（名古屋）(2011)
3. 田中雄貴, 根本篤, 西部光一, 佐藤光太郎, 武沢英樹, 気泡の運動により生成されるシンセティックジェットの構造について, 日本機械学会東海支部第61期総会講演会論文集（名古屋）(2011)
4. 福島大海, 佐藤光太郎, 横田和彦, 円板型粘性マイクロポンプに関する研究, 日本機械学会東海支部第61期総会講演会論文集（名古屋）(2011)
5. 津野裕太郎, 渡邊 匠, 姜東赫, 横田和彦, 佐藤光太郎, 孔開回転円筒の圧力損失特性, 日本機械学会関東支部第18期総会講演会論文集（習志野）(2011)
6. 根本篤, 田中雅人, 佐藤光太郎, 武沢英樹, 横田和彦, 放電気泡を利用したシンセティックジェット・アクチュエータの開発, 日本機械学会年次大会2011（東京）(2011)
7. 福島大海, 江口直哉, 佐藤光太郎, 横田和彦, 円板型粘性マイクロポンプの性能特性, 日本混相流学会年会講演会2011（京都）(2011)
8. 小泉怜, 中川盟士, 西部光一, 佐藤光太郎, 横田和彦, 円柱曲面シンセティックジェットの流動特性, 日本混相流学会年会講演会2011（京都）
9. 紙谷祐樹, 佐藤光太郎, 横田和彦, 吹き出しスロットを有する平板翼の流動特性, 日本混相流学会年会講演会2011（京都）(2011)
10. 根本篤, 田中雅人, 佐藤光太郎, 武沢英樹, 横田和彦, 気泡の運動により生成されるシンセティックジェットの流動特性, 日本混相流学会年会講演会2011（京都）(2011)

### ③ 特許出願

なし



## キチンの潜在能力を化学とバイオテクノロジーで拓く

工学院大学 工学部 応用化学科 小山文隆

工学院大学 工学部 応用化学科 菅原康里

工学院大学 工学部 応用化学科 坂口政吉

横浜市立大学 大学院医学研究科 神経内科学・脳卒中医学 土井 宏

### Investigation of the new roles of chitin by means of chemistry and biotechnology

Fumitaka Oyama, Yasusato Sugahara, and Masayoshi Sakaguchi: Department of Applied Chemistry, Faculty of Engineering, Kogakuin University

Hiroshi Doi: Department of Neurology, Graduate School of Medicine, Yokohama City University

**ABSTRACT :** Acidic mammalian chitinase (AMCase) have been shown to be closely associated with allergic inflammation and food processing in mouse. To understand its pathophysiological roles, we expressed the mouse AMCase in *Escherichia coli* as a fusion protein. We found that most of the expressed fusion protein was present in intracellular soluble fraction in the *E. coli* with chitinolytic activity. The recombinant protein shows a distinct pH optimum at pH 2.0. This recombinant protein was stable between pH 1~11 under the condition of 0 °C for 1 h pre-incubation. This protein also showed a heat-stable (with optimal temperature) to at 50 °C under acidic condition, pH 2.0. Based on both acid and heat stabilities of this enzyme, we successfully purified the recombinant protein. This recombinant protein can be used to elucidate detailed biological functions of the mouse chitinase.

ゼである<sup>2, 3, 4</sup>。

### 1. はじめに

キチンは *N*-アセチル-D-グルコサミンが  $\beta$ -1, 4 結合した多糖である。キチンは、エビ、カニ、酵母などに多量に含まれている。さらに、キチンはカビの細胞壁や寄生虫のミクロフィラリア鞘、そしてダニの構成成分もある<sup>1</sup>。キチンはバイオマスとしてセルロースに次いで膨大に存在している。

哺乳類はキチンを合成できないが、キチンを分解する酵素であるキチナーゼの遺伝子をゲノム中に保持し、活性を持った形で発現している。マウスとヒトにおいて、chitotriosidase と acidic mammalian chitinase (AMCase) が主要なキチナーゼである<sup>2, 3, 4</sup>。

Chitotriosidase と AMCase はともに family 18 の glycosyl hydrolase で<sup>5</sup>、互いに構造が良く似ている。すなわち、N 末端領域に触媒ドメイン、C 末端領域にキチン結合ドメイン (chitin binding domain, CBD) をもち、約 50 kDa の活性キチナーゼとして合成され、細胞外に分泌される<sup>4, 6</sup>。

Chitotriosidase は哺乳類で最初に発見されたキチナーゼで、Gaucher 病患者の血漿中で酵素量が著しく上昇する<sup>2</sup>。これに対し、AMCase は chitotriosidase を補償するキチナーゼとして発見され、酸性側で作用することから acidic mammalian chitinase (AMCase) と名付けられた<sup>4</sup>。この酵素はアレルギー性喘息のモデルマウスの肺

において多量に発現することから、それら病気の治療ターゲットとなっている<sup>7,8</sup>。

昨年度の本プロジェクト研究で、当研究室の大野は、マウスでは AMCase が chitotriosidase よりも圧倒的に多く発現し、特に胃では消化酵素の pepsin とほぼ同じレベルであることを示した。これらのこととは、AMCase がアレルギー、喘息、そしてキチン含有物の消化プロセス、さらにはキチン含有病原生物に対する防御などにおいて重要な役割を果たしている可能性を強く示唆する。

本研究は、AMCase の生体内での役割を明らかにするための基礎研究として、マウス AMCase を大腸菌で組換えタンパク質として発現し、その性質を明らかにすることを目的として行った。

## 2. 実験材料と方法

### 2.1 大腸菌発現プラスミドの構築

マウス AMCase cDNA をマウス胃より調製した cDNA ライブラリーより PCR で増幅し、クローニング後、塩基配列を確認した。マウス AMCase のシグナル配列を除いた cDNA 断片を、N 末端に Protein A、C 末端に V5 エピトープと 6 × His タグが付加された状態で発現するよう 大腸菌発現ベクター pEZ18 にライゲーションし、発現ベクターを構築した。このプラスミド DNA を大腸菌 (HB101) に導入し、24 時間培養しタンパク質を発現した。

### 2.2 大腸菌からの融合タンパク質の調製

大腸菌を 5,000 rpm, 20 分の遠心で菌体を回収し、上清を培地画分とした。他方、菌体に浸透圧ショックの処理をし、ペリプラズム空間からタンパク質を回収した。具体的な操作は以下である。

菌体を 0.5 M sucrose, 20 mM Tris-HCl (pH 7.6), 0.5 mM EDTA に懸濁し、氷上で 30 分放置後した。次に 4 倍容の純水を加え、30 分放置し、15,000 rpm, 20 分の遠心で上清と菌体を得た。上清にはペリプラズム空間からの溶出物が存在する。この画分を培地と合わせ、1. 培地 + ペリプラズム画分とした。

この菌体を TS Buffer [20 mM Tris-HCl (pH 7.6), 150 mM NaCl, プロテアーゼインヒビターとして

complete Mini (Roche 社) を含む] に懸濁し、超音波処理して菌体を破碎し、15,000 rpm, 20 分遠心し、菌体内可溶画分（上清）と菌体内不溶画分（沈殿）に分けた。菌体内不溶性画分に 7 M Urea, 20 mM Tris-HCl (pH 7.6) を加え、ホモジナイズし、15,000 rpm, 20 分遠心し上清を回収した。

これらの画分をそれぞれ、Ni Sepharose に供し、20 mM Tris-HCl (pH 7.6), 0.5 M imidazole, 0.5 M NaCl で溶出した。それぞれの画分を TS Buffer で平衡化した Miditrap G25 を用いて脱塩した。

ここでは、それぞれの画分を 1. 培地+ペリプラズム、2. 菌体可溶性、3. 菌体不溶性画分と呼ぶこととする。

### 2.3 キチナーゼ活性

キチナーゼ活性は、4-Nitrophenyl *N,N'*-diacetyl- $\beta$ -D-chitobioside を基質として用い、加水分解されて遊離した *p*-nitrophenol を 405 nm で測定した。精製酵素について、各種 pH 緩衝液を用いて、至適 pH、至適温度、pH 安定性、温度安定性について検討した。

### 2.4 Western blotting

上のようにして得られたタンパク質を SDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動で分離し、クーマシーブリリアントブルー染色と anti-V5-HRP を用いたウエスタンプロット法で分析した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 マウス AMCase の大腸菌での発現

ここで発現した融合タンパク質の N 末端領域にはシグナルペプチドを保持した Protein A が付加されている（図 1）<sup>9,10</sup>。発現されたタンパク質は菌体外に分泌されることが期待される。しかし、大腸菌で発現後、培地のキチナーゼ活性を測定したところ弱いキチナーゼ活性しか認められなかった。

## Protein A-AMCase-V5His

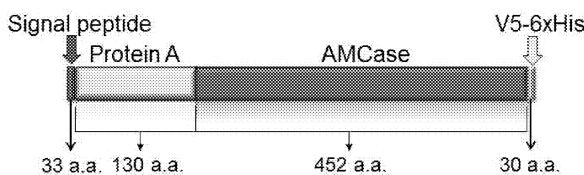


図 1. 融合タンパク質の構造

そこで、大腸菌を、“実験材料および方法”に記載した方法に従い、1. 菌体外（培地+ペリプラズム）、2. 菌体内可溶性画分、3. 不溶性画分に分画し、キチナーゼ活性の分布を検討した。図 2 に示すように、91% のキチナーゼ活性が菌体内可溶性画分に検出された。

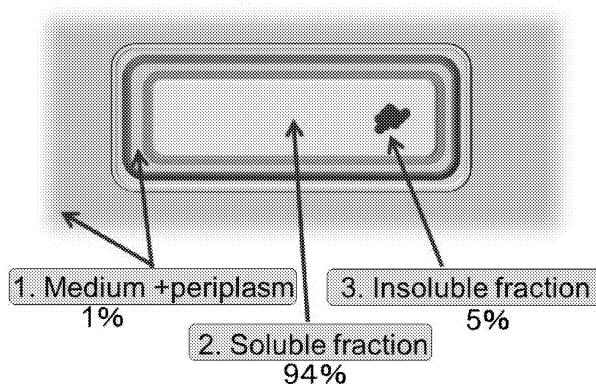


図 2. 大腸菌で発現した融合タンパク質のキチナーゼ活性の分布

これらの画分を V5 抗体を用いた Western blotting で解析したところ、菌体内可溶性画分に最も強いバンド（分子量約 70 kDa）が認められた（図 3）。さらに、菌体不溶性画分にもバンドが認められたが、そのサイズは、培地+ペリプラズム、菌体内可溶性画分の酵素よりもわずかに分子量が大きかった（図 3）。

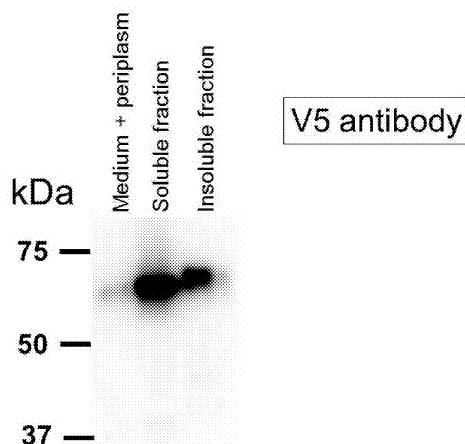


図 3. 融合タンパク質確認。V5 抗体を用いたウエスタンブロット法で融合タンパク質の検出を行なった

菌体可溶性画分にキチナーゼ活性の大部分が検出され、融合タンパク質の発現が認められた。そこで本研究では、菌体内可溶性画分を酵素画分として以後の研究を進めた。

この組換え体に天然高分子キチンへの結合活性があるかどうかをキチナーゼビーズへの結合活性で検討した。図 4 に示すように、Protein A はキチナーゼビーズに対し結合しなかつたが、Protein A-AMCase は結合した（図 4）。このことは、発現した Protein A-AMCase が天然キチンを認識して結合したことを見出す。

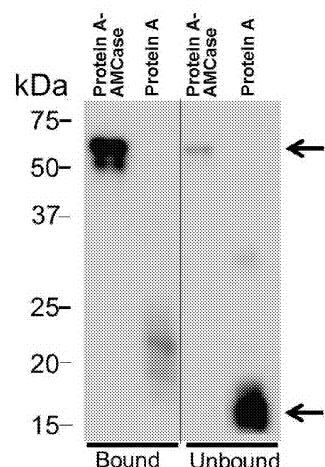


図 4. 融合タンパク質のキチナーゼへの結合活性

以上の結果から、大腸菌で、マウス AMCase をキチナーゼ活性、キチン結合活性を保持した状態で発

現できたと考えた。

### 3.2 組換えマウス AMCase の性質

組換えマウス AMCase について、酵素としての性質を検討した。まず、至適 pH について検討したところ、pH 2 で最大活性を示した（図 5）。さらに、pH 2 における至適温度は 54 °C だった（図 6）。

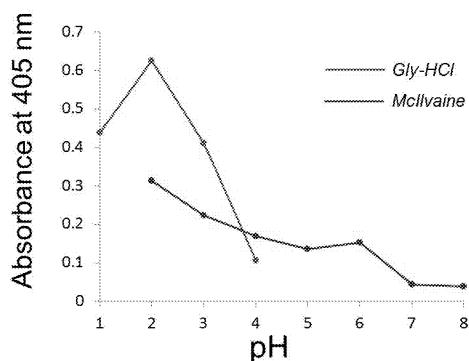


図 5. 組換え ANCase の pH 依存性。マウスの AMCase のキチナーゼ活性の pH 依存性を Gly-HCl と McIlvaine 緩衝液で測定した。

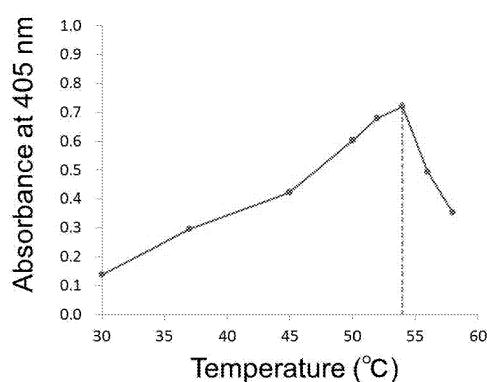


図 6. 組換え ANCase の温度依存性。Gly-HCl (pH 2) を使いマウスの AMCase のキチナーゼ活性の温度依存性を測定した。

次に酵素の安定性について検討した。pH 安定性について、pH 1-11 の条件で氷上 1 時間放置し、至

適の pH 2 で酵素活性を測定した。図 7 に示すように、pH 1-11において安定であった。さらに温度安定性について検討したところ、pH 2 では 50 °C、pH 7 では 56 °C まで安定だった（図 8）。

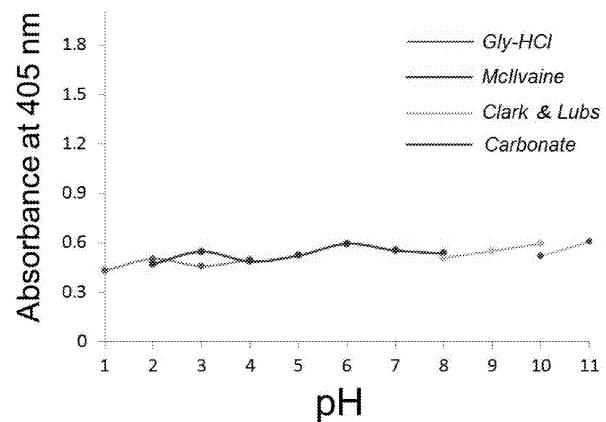


図 7. 組換え ANCase の pH 安定性。4 種類の緩衝液を用いて pH 1-11 を作成し、マウス AMCase の pH 安定性を測定した。

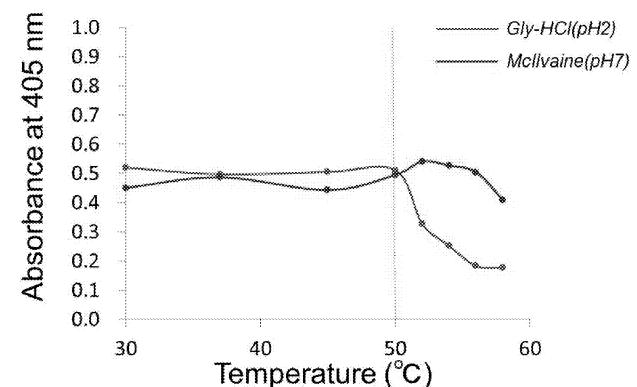


図 8. 組換え ANCase の温度安定性。マウスの AMCase の温度安定性を pH 2 と pH 7 で調べた。

以上の結果から、マウス AMCase は pH 2 が至適で、広い pH 安定性を有し、50 °C までの熱耐性の性質を備えた比較的頑丈な酵素であることが分かった。

### 3.3 AMCase の性質を活かした精製法の確立

組換えマウス AMCase は、酸、穀やかな高温条件下でも安定であることが分かった。この性質はタンパク質を精製時に問題になる菌体夾雜タンパク質

の除去に使用できるのではないかと考えた。

そこで、これらの性質を利用して大腸菌で発現したマウス AMCase を精製することを試みた。まず、大腸菌を pH 2.5 に懸濁後、菌体可溶性画分を調製した。次に pH 7 付近に中和後、50 °C、15 分の熱処理をした。さらに、融合タンパク質には affinity tail として Protein A が付加していることから、IgG Sepharose に結合させた。先に示したように AMCase は酸性で安定なことから、IgG Sepharose から Protein A-AMCase を pH 2.5 で溶出した。本研究で最初に記載した、Ni Sepharose を用いた分離法と比べ、酸処理、50 °C での加熱、IgG Sepharose への結合と pH 2.5 での溶出処理で精製することができた。

#### 4.まとめ

本研究では、マウス AMCase を大腸菌で発現し、精製することができた。さらにマウス AMCase の性質として、pH 2 が至適で、その条件での至適温度は 54 °C、0 °C では pH 1~11 で安定、pH 2 では 50 °C まで安定だった。さらに pH 安定性と温度安定性を利用して効率の良い精製法を確立した。

本研究で、AMCase の生体内での役割を解明する上で重要な酵素の構造と機能の研究の基盤ができた。今後、酵素の構造と機能の研究から、AMCase の生理的、病理的役割を解明してゆく。

#### 参考文献

- Lee, C.G., et al. Role of chitin and chitinase/chitinase-like proteins in inflammation, tissue remodeling, and injury. *Annu Rev Physiol* **73**, 479-501 (2011).
- Hollak, C.E., van Weely, S., van Oers, M.H. & Aerts, J.M. Marked elevation of plasma chitotriosidase activity. A novel hallmark of Gaucher disease. *J Clin Invest* **93**, 1288-1292 (1994).
- Renkema, G.H., et al. Synthesis, sorting, and processing into distinct isoforms of human macrophage chitotriosidase. *Eur J Biochem* **244**, 279-285 (1997).
- Boot, R.G., et al. Identification of a novel acidic mammalian chitinase distinct from chitotriosidase. *J Biol Chem* **276**, 6770-6778 (2001).
- Bussink, A.P., Speijer, D., Aerts, J.M. & Boot, R.G. Evolution of mammalian chitinase(-like) members of family 18 glycosyl hydrolases. *Genetics* **177**, 959-970 (2007).
- Boot, R.G., Renkema, G.H., Strijland, A., van Zonneveld, A.J. & Aerts, J.M. Cloning of a cDNA encoding chitotriosidase, a human chitinase produced by macrophages. *J Biol Chem* **270**, 26252-26256 (1995).
- Zhu, Z., et al. Acidic mammalian chitinase in asthmatic Th2 inflammation and IL-13 pathway activation. *Science* **304**, 1678-1682 (2004).
- Reese, T.A., et al. Chitin induces accumulation in tissue of innate immune cells associated with allergy. *Nature* **447**, 92-96 (2007).
- Lowenadler, B., et al. A gene fusion system for generating antibodies against short peptides. *Gene* **58**, 87-97 (1987).
- Tiwary, E. & Gupta, R. Extracellular expression of keratinase from *Bacillus licheniformis* ER-15 in *Escherichia coli*. *J Agric Food Chem.* **58**, 8380-8385 (2010).



## 複雑な多環性構造を有する新規抗腫瘍天然物の全合成研究

工学院大学工学部応用化学科 南雲紳史、安井英子

工学院大学附属高校 宮下正昭

北海道薬科大学 水上徳美

Synthetic Study of Highly Antitumor Active Natural Products Composing  
of Complex Polycyclic System

Shinji Nagumo, Eiko Yasui, Department of Applied Chemistry, Kogakuin University

Masaaki Miyashita, High School of Kogakuin University

Megumi Mizukami, Hokkaido Pharmaceutical University, School of Pharmacy

**ABSTRACT:** Cortistatin A which has abeo-9(10-19)-androstane and isoquinoline skeletons was isolated from Indonesian marine sponge *Corticium simplex*. The natural product showed the anti-proliferative activity ( $IC_{50} = 0.0018 \mu\text{M}$ ) against human umbilical vein endothelial cells (HUVECs) with high selectivity. Diene 1, which was synthesized from  $\beta$ -estradiol according to the established method in the last stage of this project, was transformed to trieneyne **25** by 4 steps. Tandem ring closure metathesis of **25** with Grubbs catalyst (2<sup>nd</sup>) produced the desired lactone **26** in good yield. Suzuki-Miyaura cross coupling of vinylborane **38** prepared from estrone and bromo isoquinoline **32** was also found to proceed smoothly.

### 1. はじめに

近年、標的分子に基づく論理的な薬物設計が脚光を浴びるようになってきているが、一方で新しいリード化合物の探索という観点から天然物化学の重要性は未だ搖るぎない。特に、近年の微量分析技術の飛躍的発展とスクエーバーダイビングの普及に伴い、新規海産天然物の探索が盛んに行われるようになると、新しいタイプの天然物が次々に発見されるようになった。海洋生物は独自の生息環境に適応するため、陸上の生物には見られない特異な構造や顕著な生物活性を示す二次代謝物を产生することが多い。そのため新薬開発におけるシーズの宝庫として期待されている。特に抗腫瘍活性を有する海産天然

物の探索が精力的に続けられているが、その中には新しいメカニズムに基づいた次世代型抗癌剤のリード化合物として期待されている化合物もある。

次世代型として興味を持たれている制癌メカニズムの代表例として、血管新生阻害が挙げられる。血管新生は、正常個体においては傷の回復時など限られた場合にしか起こらないが、癌患者において腫瘍細胞が異常増殖する際には重要な意味をもつ。暴走した細胞増殖を持続するためには、それを賄う膨大なエネルギーが必要となる。そのため腫瘍細胞はある程度の大きさまで成長すると、血管新生促進物質というある種のタンパク質を放出し、周辺にある宿主の血管から腫瘍細胞に繋がる毛細血管を作りだす。したがって、血管新生の選択的阻害活性物質は固形癌の成長を抑制する一方で、正常細胞に対しては毒性を発現しない抗癌剤として期待されている。大阪大

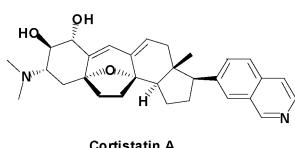


Fig. 1

学の小林教授らは血管新生阻害に基づく次世代型抗癌剤の開発を目的として、正常ヒト臍帯静脈血管内皮細胞（HUVECs）に対する選択的増殖抑制物質を探査する中で、インドネシアの周辺海域で採取された海綿 *Corticium simplex* から Cortistatin A という強力な活性 ( $IC_{50} = 0.0018 \mu\text{M}$ ) を示す化合物を見出した。<sup>(1)</sup> 新規リード化合物として注目を集めている Cortistatin A であるが、残念ながら海綿からの採取量は極微量であり、詳細な作用機序解明やファーマコフォアの特定を進めていく上でも化学合成による量的供給が強く望まれている。その構造はオキサビシクロ[3.2.1]オクテン骨格やイソキノリン骨格を含む類例のないステロイド系アルカロイドであり、その合成には独自の合成戦略が求められる。これまでにも世界中の名だたるグループが合成研究に取り組んでいるが、著者らも独自の方法論を確立することにより本化合物の全合成に挑戦している。平成22年度は、本プロジェクト研究の一年目として、本合成研究の中心戦略として位置付けるタンデム閉環メタセシス反応のモデル実験と Cortistatin A の C-D 環部に相当する重要中間体 1 の合成を行った。今回はこれらの知見をもとに 1 からトリエンイン 25 へ導き、そのタンデム閉環メタセシス反応を行った。また、D 環部にイソキノリン骨格を導入するためのモデル実験を検討したので併せて報告する。

## 2. 合成計画

Cortistatin A の合成を進める上で最も重要な課題は oxabicyclo[3.2.1]octene 骨格をいかに効率的に構築するかにある。このユニークな部分構造はその周辺との間で共役ジエンシステムを併せ持つおり、その構築には相当の困難が予想された。これに対して我々は、近年飛躍的に発展した閉環メタセシス反応を基盤として解決できるものと考え、以下のような合成計画を立案した。Cortistatin A は環状トリエノエート A からシクロヘキサン環を構築後、水酸基およびアミノ基の立体選択的な導入により合成できるものと考えている。化合物 A はトリ

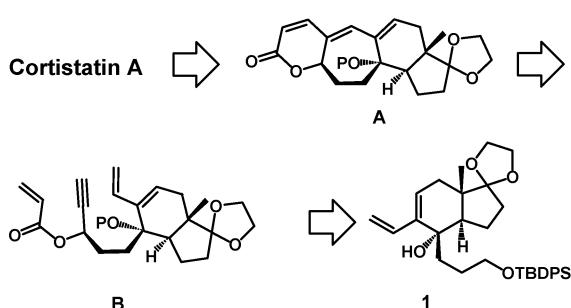


Fig. 2

エンイン B のタンデム閉環メタセシス反応<sup>(2)</sup>により得られるものと考えた。また 22 年度に行ったモデル実験によりその新規方法論の有効性を既に実証している。化合物 B は 22 年度に合成した 1 の側鎖末端をアルデヒドに変換後、アセチリドとのカップリング、生じた 2 級水酸基のエステル化により得られるものと考えた。

## 3. 以前の研究経過

### 3. 1 タンデム閉環メタセシス反応のモデル実験

当初の計画では、エンイン 2 の閉環メタセシス反応により 7 員環を含むトリエン 4 を合成し、さらなる交差クロスマタセシス反応により炭素鎖の伸長を試みようと考えていた。しかし実際に閉環メタセシス反応を行ったところ、7 員環形成と 8 員環形成が競争的に進行し、目的とする 4 の収率は僅か 25% であった (Fig. 3)。そこで 8 員環形成を抑えるために、アクリル酸エチル 6 のタンデム閉環メタセシス反応を検討したところ、7 員環成績体 7 を選択的に得ることができた。

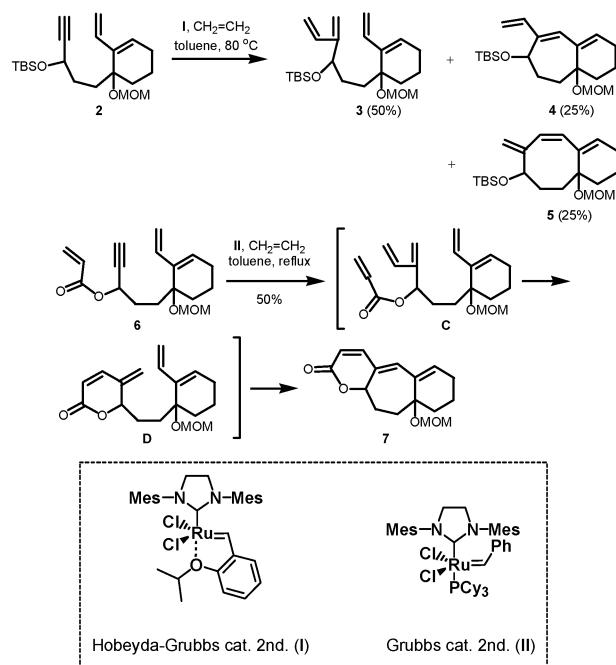


Fig. 3

### 3. 2 Cortistatin A の C-D 環部の合成

エストラジオールのベンゼン環を塩化ルテニウムにより酸化分解し、得られたジカルボン酸に対してエステル化、ケタール化を順次行いジエステル 9 とした。次に、Dieckmann 環化、脱炭酸によりケトン 11 へ導いた後、Baeyer-Villiger 反応、LiAlH<sub>4</sub> 還元、一級水酸基の選択的シリル化、TPAP 酸化を順次行いケトン 14 を合成した。8 位に水酸基を導入するために 4 置換シリルエノールエーテルへ誘導しようと考え、TESOTf /Et<sub>3</sub>N の条件でシリル化を検討したが、三置換シリルエノールエーテル 15 しか得られなかった。そこで、三枝反応によりエノン 16

に誘導後、Davis 酸化<sup>(3)</sup>を行った結果、立体選択的に 8 位水酸基を導入することができ高収率で **17**を得た。最後に 3 工程でエノールトリフレート **20**へ変換後、鈴木・宮浦クロスカップリング反応<sup>(4)</sup>を行い、89%の収率でジエン **1**を合成することに成功した。

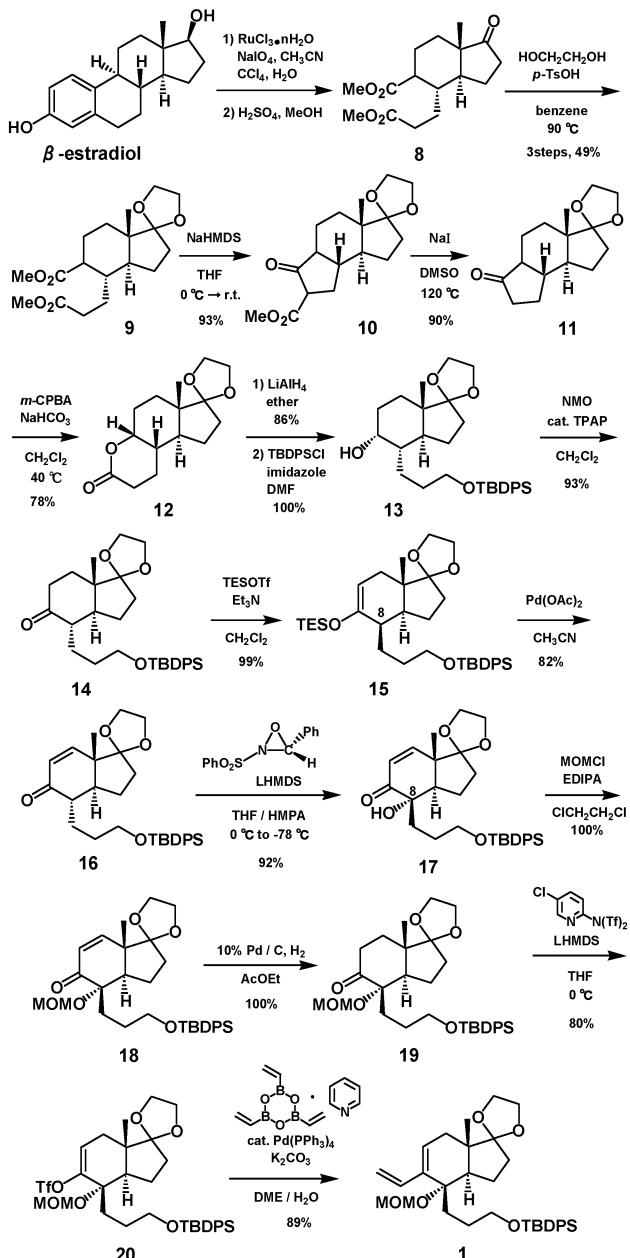


Fig. 4

#### 4. 23 年度の研究成果

##### 4. 1 Cortistatin A の B 環部構築

23 年度は、まずジエン **1**からトリエンイン **24**への変換およびそのタンデム閉環メタセシスを検討した。ジエン **1**に対して tetrabutylammonium fluoride (TBAF) を用いてシリル基の除去を行い、生じた 1 級水酸基の Dess-Martin 酸化によりアルデヒド **21**を得た。これに対し、trimethylsilylacetylene と BuLi から調製したリチウムアセチリドとのカップリングを行い、アルコール **22**を得た。最後に、**22**を TBAF で処理することによりシリル基を除去した後、アクリル酸クロライドを用いてエステル化し、目的とするトリエンイン **24**を合成した。

次に化合物 **6**を用いたモデル実験を参考に、**24**のタンデム閉環メタセシス反応を検討した。トルエン溶媒中、エチレン雰囲気下、第二世代グラブス触媒を用いて行つところ、59%の収率で環状ラクトン **25**が生成した。

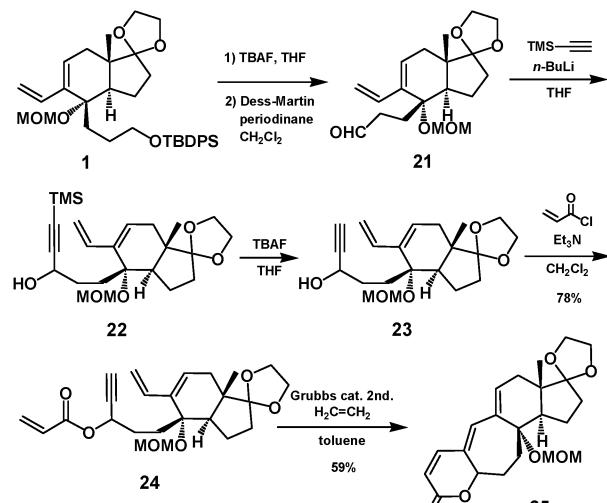


Fig. 5

##### 4. 2 イソキノリン環導入のモデル実験

Cortistatin A の構造的特徴の一つとして、D 環部に直結したイソキノリン環の存在が挙げられる。したがって、今後 **25**から Cortistatin A への合成経路を確立していく上で、他の部位に影響を与えない緩和な条件下でのイソキノリン導入法を見出さなければならない。これに関しては D 環部をビニルボランへ変換し、プロモイソキノリンとの鈴木・宮浦クロスカップリングを行うことが最適であると考えた。そこで、実際に **25**から対応するビニルボランへの誘導を行う前に、D 環部の立体的な環境が近いエストロンからビニルボラン **36**, **37**への変換、およびそれらの鈴木・宮浦クロスカップリングを検討した。

まずプロモイソキノリン **31**の合成に取り組んだ (Fig. 6)。市販の **26**を NaBH4 で還元した後、トシリ酸で処理することによりプロモインデン **28**を得た。次に四酸化オスミウムで処理し、得られたジオール **29**を過ヨウ素酸酸化に付すことによりジアルデヒド **30**へ導いた。最後にアンモニア水との反応を行い、プロモイソキノリン **31**を合成した。一方ビニルボラン **36**, **37**はエストロンから以下のように合成した。A 環部のフェノールを TBS 基およびメチル基で保護し、それぞれ **32**, **33**とした。次に Comin's 試薬を用いて D 環部をエノールトリフレートに変換後、宮浦らの方法に従つてホウ素化を行つた。その結果、いずれの基質からも高収率で **36**, **37**が生成した。

最初に **36**を基質として用い **31**とのクロスカップリングを行つた。DMF 溶媒中、K3PO4 の存在下、触媒

として  $PdCl_2(DPPF)$  を用いた。シリカゲルカラムクロマトグラフィーで精製後、21%の収率でカップリング体 **38** が得られた。低収率の原因是シリカゲル中で **38** の一部が結晶化し、それが展開溶媒に極めて難溶だったためと考えた。そこで、フェノールの保護基がよりはずれにくい **37** を基質とし、同様の条件でクロスカップリングを行ったところ、70%の収率でカップリング体 **39**を得ることに成功した。最後に  $Pd(OH)_2/C$  を触媒として接触水素化を行ったところ、立体選択的に  $\alpha$  面からの付加を受け 97%の収率で **40** が生成した。なお **40** の  $^1H$ -NMRにおいて、核環メチル基はイソキノリンの遮蔽効果を受け、そのケミカルシフトは 0.53 ppm に高磁場シフトしていた。

今年度は **25** からさらに合成を進め、A 環の構築を検討すると同時に、モデル実験で行った鈴木-宮浦クロスカップリングを用いて D 環部へのイソキノリン導入を行うことにより **Cortistatin A** の合成を完成する予定である。

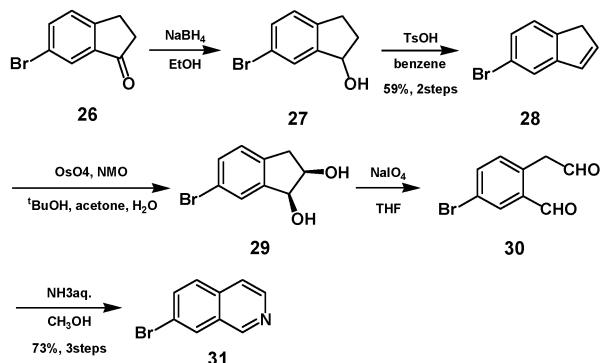


Fig. 6

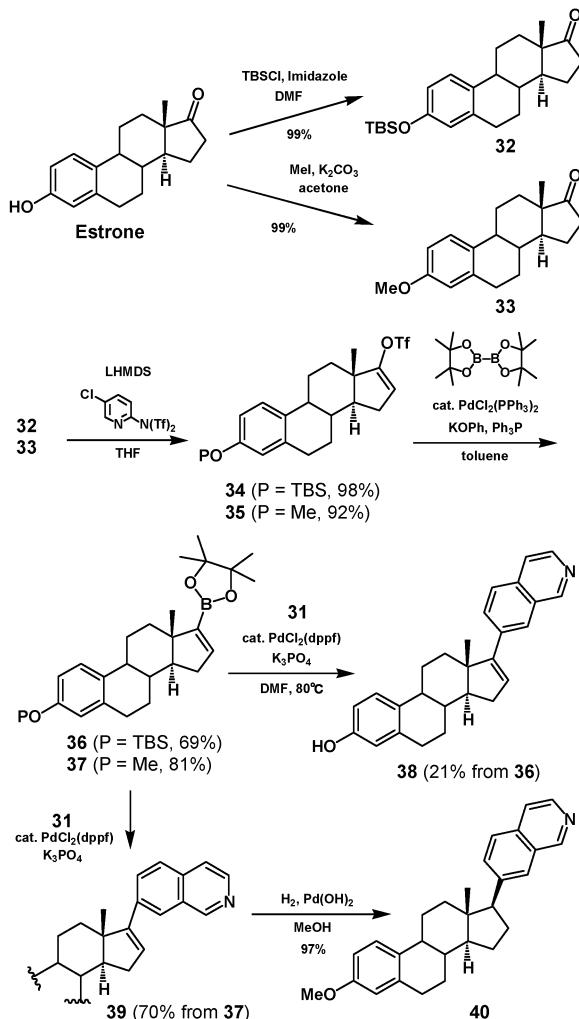


Fig. 7

## 参考文献

- (1) Aoki, S., Watanabe, Y., Sanagawa, M., Setiawan, A., Kotoku, N., Kobayashi, M.: *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 128, No. 10 (2006) pp. 3148-3149.
- (2) Kinoshita, A., Sakakibara, N., Mori, M.: *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 119, No. 50 (1997) pp. 12388-12389.
- (3) Vishwakarma, L. C., Stringer, O. D., Davis, F. A.: *Org. Synth.*, Vol. 66 (1988) pp. 203-210.
- (4) Miyaura, N., Yamada, K., Suzuki, A.: *Tetrahedron Lett.*, Vol. 20, No. 36 (1979) pp. 3437-3440.

## 研究課題：血液環境で使用される医療機器の生体適合性の改善

2011年度課題：チタン多孔体の孔径の違いによる血液適合性の差異

工学院大学 工学部 環境エネルギー化学科 木村 雄二

埼玉大学 工学部 森田 真史

工学院大 総合研究所 大家 渥

### Difference in Blood Compatibility Depending upon Pore Size of Porous Titanium

Yuji Kimura, Department of Environmental Energy Chemistry, Kogakuin Univ.  
Masafumi MORITA, Faculty of Engineering, Saitama Univ.  
and  
Kei OYA, Research Institute for Science and Technology, Kogakuin Univ.

**ABSTRACT :** For developing new stent material, various porous titanium specimens were sintered using particles with different size. Then, blood compatibility tests, that is, platelet adhesion test and so on were conducted. Both from platelet adhesion test result and morphologies of HUVEC after cultured on surface of porous specimens, specimen with smaller particle size showed better anti-thrombosis property and adhesion characteristics toward vascular endothelial cells. As a result, titanium porous specimen sintered with smaller particle size showed relatively higher potential for using as new stent material.

**Key words :** porous Ti, blood compatibility, adhesion characteristics toward vascular endothelial cells

#### 1. 緒言

動脈硬化による血管の閉塞は、心疾患や脳血管疾患の要因となる。冠動脈疾患に対する治療法として、主に薬剤治療や冠動脈バイパス手術、あるいは閉塞しかけている血管内部位を拡張するバルーン（風船）拡張術が施されてきた<sup>1), 2)</sup>。しかし、これらの治療法は施術から短期間のうちに再狭窄が認められる場合が多くなった。これらの解決を目指して開発されたのがステントである。ステントの登場により、これまでの血管内冠動脈治療が抱えていた問題は大幅に改善された。さらに、ステント挿入術は他の治療法と比較して低侵襲であり、なおかつ簡易であることから、超高齢社会を迎えた現代において、市場を急速に拡大している。

ステントはバルーン拡張術を応用したものであり、金属製の細かい網目構造を持つ筒状のデバイスである。ステントは通常、使用前は折りたたまれており、これを血管内の狭窄部まで輸送し拡張させることにより、狭窄部を物理的に拡張して血流を確保するものである。ステントはそれ自体が患部で自己拡張するもの（自己拡張型ステント）とバルーンにより拡張するもの（バルーン拡張型ステント）の二種類がある。自己拡張型ステントには主にニッケル・チタン合金が用いられており、バルーン拡張型ステントにはステンレス鋼やコバルト・クロム合金が用いられている<sup>3), 4)</sup>。

従来の血管狭窄治療法よりも効果的な治療デバイスとして最初に登場したステントは、金属が露出したままのステント（Bare Metal Stent: BMS）である。しかし、BMS

は依然として再狭窄率が高いという問題があった。そこで開発されたのが血管を構成する細胞の増殖や活性を抑制する（すなわち、再狭窄を抑制する）薬剤を、ポリマーなどを用いてステント表面に被覆したステント（薬剤溶出型ステント、Drug Eluting Stent: DES）である。DESの中には長いもので約1年間、薬剤を放出できるものもあるが、長期間使用すればステントの下地がいずれ露出しまう。そのため、時間の経過とともにDESはBMSと変わらないものとなってしまい、遅発性あるいは超遅発性のステント血栓症を引き起こすことが問題となっている。この問題を解決するために、現在、DESを改良したステントや、生分解性をもつステントの開発など、従来のステントに代わる新たなステントの開発が活発に進められている。

ステントには血管内で血栓を形成しないこと（抗血栓性）と、血管内皮細胞に対して優れた細胞接着性を有すること（細胞適合性）の二つの特性が求められる。BMSやDESに代わるステントの開発には、これらの特性を併せもつ材料が求められる。そのためには、材料の選定や表面形状の制御が重要な因子となる。これまでに、316Lステンレス鋼、コバルト・クロム・モリブデン合金、純チタン、およびチタン合金上で血栓形成の要因となる血小板の粘着やFibrin Networkの形成能を比較した結果、表面に酸化チタン皮膜を形成する純チタンやチタン合金はFibrin Networkの形成が早く、表面に酸化クロム皮膜を形成する316Lステンレス鋼、コバルト・クロム・モリブデン合金は血小板の粘着が少ないことが報告されており、材料によって抗血栓性に差があることがわかっている<sup>5)</sup>。一方、材料表面の粗さ（roughness）の違いが、細胞接着に大きく影響することが数多く報告されている<sup>6)~9)</sup>。一般に、平滑な表面と比較して粗い表面の方が細胞接着性に優れる。さらに、材料表面の形状（topography）も、細胞接着性に大きな影響を及ぼす一因である。

本研究では新たなステント材料の開発を目指し、材料の多孔質化に着目した。上述したように材料表面の粗さは細胞接着を促進する重要な因子であり、多孔質化により金属材料表面に粗さを付与することができる。粗さをもつ材料表面は血管内皮細胞の足場材としての役割を担い、細胞の優れた伸展・増殖が期待できる。さらに、血管壁に対するアンカー性の向上によるズレの低減や、低ヤング率化による血管壁面に対するストレスの低減なども期待できる。そこで本年度は、粒径の異なるチタン多孔体に対し、血小板粘着試験と血管内皮細胞の接着性試験を行い、抗血栓性と細胞接着性の両方の観点から多孔体のステント材料としての可能性を検証した。

## 2. 材料と方法

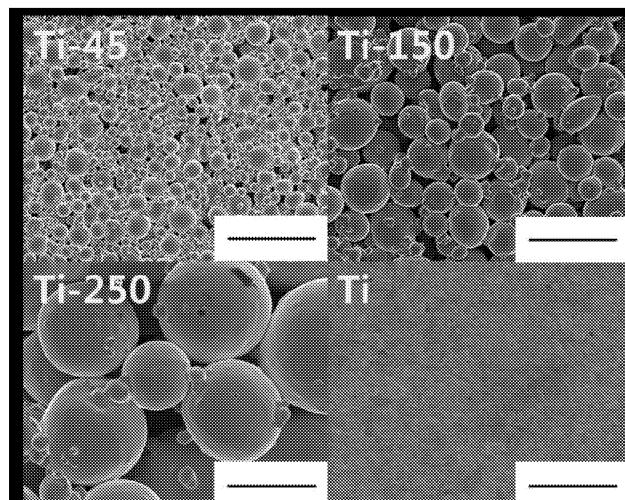
### 2.1 供試材料

本研究では多孔体材料としてチタンを用いた。JIS1種工業用純チタン（CP Ti）を用い、ガスマルク法によ

り作製された真球状チタン紺体を焼結することにより、多孔体を得た。本研究では紺体の平均粒径が45、150、250μmのものを選択した。各材料の規格をTable 1に示す。以下、それぞれのチタン多孔体を“Ti-45”、“Ti-150”，および“Ti-250”と表記する。比較材として、#1000の研磨紙で乾式研磨したJIS1種のCP Ti（以下“Ti”）を用いた。（Fig.1）

**Table 1 Average particle size, average pore size and porosity of porous specimen used in this study.**

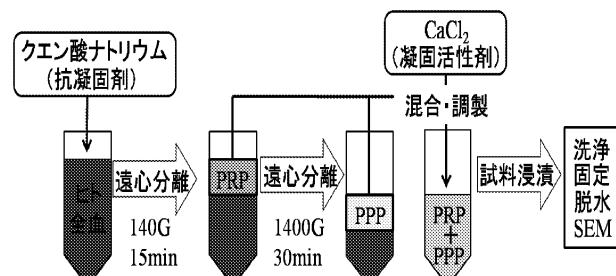
specimen	average particle size	average pore size	porosity
Ti-45	45 μm	10 μm	36%
Ti-150	150 μm	25 μm	46%
Ti-250	250 μm	60 μm	53%



**Fig.1 SEM micrograph of porous Ti specimen used in this study. (a: Ti-45, b: Ti-150, c: Ti-250, d: Ti plate)**

### 2.2 血小板粘着試験

血小板粘着試験の方法をFig.2に示す。健常者から得た全血を遠心分離し、上清より多血小板血漿（Platelet Rich Plasma: PRP）を得た。さらに、遠心分離後の下層を遠心分離することにより、貧血小板血漿（Platelet Poor Plasma: PPP）を得た。PRPとPPPを用いて血小板数が $1 \times 10^5 \mu\text{L}^{-1}$ となるように多血小板血漿液を調製し、37°Cに加温した。使用前に $0.25 \text{ mol L}^{-1}$ となるように多血小板血漿液に



**Fig.2 Flow chart of blood compatibility test.**

$\text{CaCl}_2$ を添加し、その溶液を各試料に添加した。添加後、各試料を37°Cで10 min静置した。その後、各試料をPBS(−)溶液で十分に洗浄し、グルタルアルデヒドで固定した。各試料を脱水し、臨界点乾燥した。そして、走査型電子顕微鏡(SEM)により、各試料における血小板の粘着の様子を観察・比較した。

### 2.3 血管内皮細胞の接着性試験

血管内皮細胞として、正常ヒト臍帯静脈血管内皮細胞(HUVEC)を用いた。培養方法・使用培地は付属の説明書に従った。各試料にHUVECを播種し、37°C、5% $\text{CO}_2$ 下で1 hおよび6 h培養した。培養後、各試料をPBS(−)溶液で洗浄した後、Karnovsky溶液で細胞を前固定し、1%四酸化オスミウム溶液で後固定を行った。上昇エタノール系列脱水により各試料を脱水し、液化炭酸ガスを用いて臨界点乾燥した。その後、SEMを用いて各試料における細胞の接着や伸展の様子を観察・比較した。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 血小板粘着試験結果

各試料における血小板の粘着の様子を観察した結果をFig.3およびFig.4に示す。緻密な板状Tiでは血小板が粘着し、Fibrin Networkが活発に形成されている様子が観察された。一方、Ti-45においては、粒子表面で血小板の粘着が見られたものの、粒子間を繋ぐFibrin Networkの形成は観察されなかった。Ti-150においては、粒子間を繋ぐようFibrin Networkが形成されている様子が観察された。一方、粒子表面に着目すると、血小板の粘着は見られたものの、Fibrin Networkの形成は確認されなかった。Ti-250では、粒子間ではFibrinの伸展はあまり見られなかつたが、粒子表面でFibrin Networkが立体的に形成され、その量も三種の中で最も多い様子が観察された。以上の結果より、

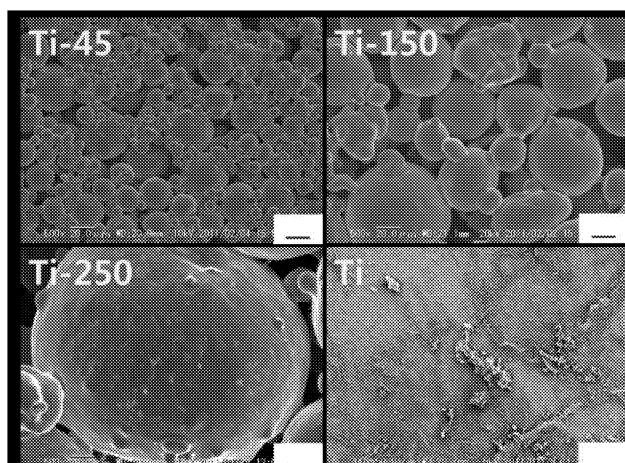


Fig.3 SEM micrograph of Ti specimen surface after platelet adhesion test.  
(low magnification images: scale bar=20  $\mu\text{m}$ )

多孔体においては緻密な板状のTiに比較し抗血栓性に優れる傾向が見られ、その傾向は粒径の小さい多孔体ほど著しいことが明らかとなった。このように、粒子間および粒子表面における血小板粘着の様子やFibrin Networkの形成の様子に差異が観察されたことから、血小板の粘着やFibrin Networkの形成には材料の粒子径や気孔率が大きく関与していることがわかった。

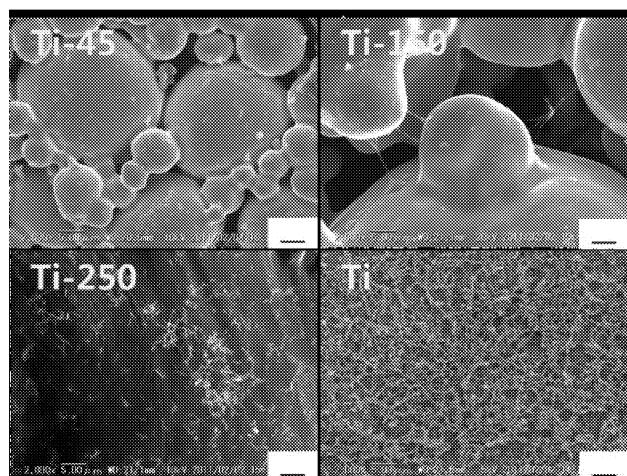


Fig.4 SEM micrograph of Ti specimen surface after platelet adhesion test.  
(high magnification images: scale bar=5  $\mu\text{m}$ )

### 3.2 HUVECの接着性試験

血管内皮細胞として、正常ヒト臍帯静脈血管内皮細胞(HUVEC)を用い、各試料にHUVECを播種し1 hおよび6 h培養を行った。その後、各試料におけるHUVECの様子を観察した結果をFig.5およびFig.6に示す。まず、全ての試料において細胞が接着・伸展している様子が観察された。特に、緻密な板状Tiでは、細胞が接着し、仮足が活発に伸展している様子が観察された。一方、チタン多孔体では全ての試料において緻密な板状Tiほどの細胞の伸展は見られなかった。Ti-45では細胞が粒子間に存在し、粒子と

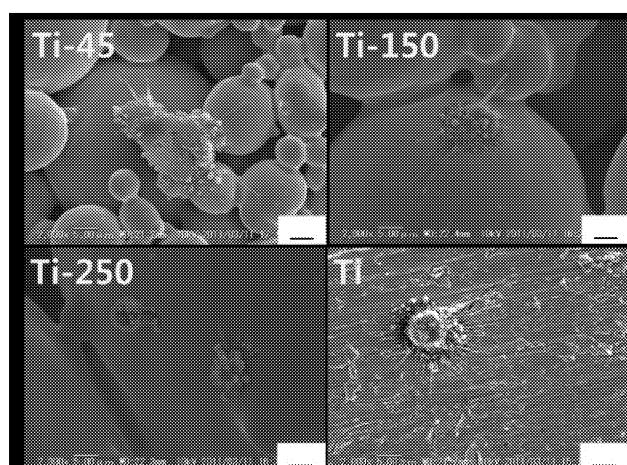
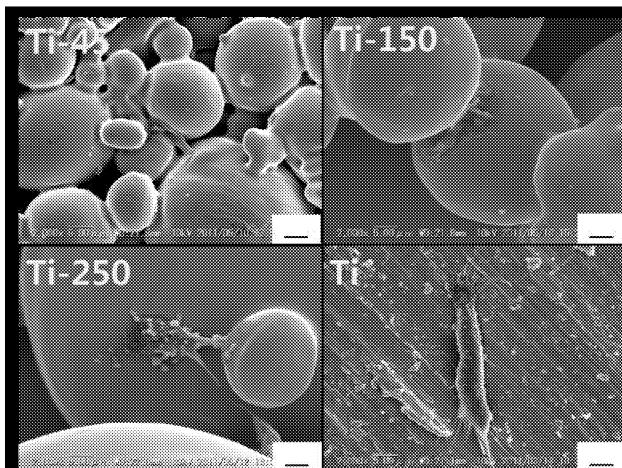


Fig.5 Adhesion of cells on Ti specimen surface after cultured 1 hour. (SEM images: scale bar=5  $\mu\text{m}$ )



**Fig.6 Adhesion of cells on Ti specimen surface after cultured 6 hours. (SEM images: scale bar=5 μm)**

粒子を繋ぐように細胞が接着・伸展している様子が観察された。Ti-150では、粒子表面上で細胞は良好に接着・伸展している様子が観察された。さらに、粒子間を繋ぐように細胞が伸展している様子が観察でき、その様子はTi-45よりも優れていた。一方、Ti-250では粒子表面上で細胞は良好に接着・伸展していたが、粒子間を繋ぐように接着している細胞は見られなかった。

以上の結果より、Ti-250は粒径が大きすぎるために細胞が材料表面を被覆することができなかつたと考えられる。一方で、Ti-45とTi-150では細胞が伸展できる程度の粗さが多孔体表面に形成されており、材料表面を被覆しやすい表面であると考えられる。すなわち、粒径の小さい多孔体の方が、血管内皮細胞が材料表面を被覆しやすいことがわかった。

#### 4. 結 言

JIS1種工業用純チタン(CP Ti)を用い、ガスアトマイズ法により作製された異なる粒子径の真球状チタン紛体を焼結することにより得た多孔体を用いて、血小板粘着試験ならびに血管内皮細胞の接着性試験を行った結果、以下の事柄が明らかとなった。

1. 血小板粘着試験の結果から、粒径が小さい粒子を用いた多孔体ほど抗血栓性に優れる傾向が示された。
2. 一方、血管内皮細胞の細胞接着性評価を行った結果、粒径の小さいTi-45およびTi-150において細胞接着性に優れる傾向が観察された。

以上の結果から、粒径の小さい金属粉末を用いて作製された多孔質材料は、血液適合性に優れるステント材料となり得る可能性が示唆された。

#### 参考文献

- (1) 岩田博、真鍋一郎：バイオマテリアル、日本バイオマテリアル学会、**29**(2011) pp.146-157.
- (2) 柿木佐知朗、山岡哲二：バイオマテリアル、日本バイオマテリアル学会、**29**(2011) pp.166-173.
- (3) 堀隆夫：医療用金属材料概論、日本金属学会、(2010) pp.22-26 and pp.246-248.
- (4) 堀隆夫、米山隆之：金属バイオマテリアル、コロナ社、(2007) pp.18-20.
- (5) Y. Tanaka, K. Kurashima, H. Saito, A. Nagai, Y. Tsutsumi, H. Doi, *et al*, J.Artif.Organs, **12** (2009) pp.182-186.
- (6) J. Y. Martin, Z. Schwartz, T. W. Hummert, D. M. Schraub, J. Simpson, J. Lankford Jr, *et al*, J.Biomed.Mater.Res., **29** (1995) pp.389-401.
- (7) K. Kieswetter, Z. Schwartz, T. W. Hummert, D. L. Cochran, J. Simpson, D. D. Dean, *et al*, J.Biomed.Mater.Res., **32** (1996) pp.55-63.
- (8) B. D. Boyan, R. Batzer, K. Kieswetter, Y. Liu, D. L. Cochran, S. Szmuckler-Moncler, *et al*, J.Biomed.Mater.Res., **39** (1998) pp.77-85.
- (9) T. J. Webster and J. U. Ejiofor, Biomaterials, **25** (2004) pp.4731-4739.

#### 研究発表等

1. 大家 溪、箕浦祐貴、木村雄二、チタン多孔体の孔径の違いによる血液適合性の差異、日本材料科学会平成23年度学術講演大会講演予稿集、(2011) pp.67-68.
2. 大家 溪、木村雄二、チタン多孔体の血液適合性、日本材料科学会第3回医用生体材料分科会講演会前刷集、2012年1月。

# 解体を迎える半世紀供用した鉄筋コンクリート造建築物の後期健全度評価 と解体排出物のゼロエミッション型再資源化モデルの構築

—長期供用の旧基準鉄筋コンクリート部材を想定した鉄筋腐食ひび割れに関する予防保全診断技術の検討および  
都市地域における鉄筋コンクリート造建築物の解体・処理・輸送段階のシステム分析と環境負荷—

工学院大学 建築学部建築学科 田村雅紀

工学院大学 建築学部建築学科 阿部道彦

首都大学東京 中村孝也

八洋コンサルタント 斎藤順一

電源開発 石川嘉崇

鹿島建設技術研究所 依田和久

Robustness evaluation of reinforced concrete buildings using in long terms and  
technical development the construction on recycling model for zero emission

Masaki Tamura, Department of Architecture, School of Architecture

**ABSTRACT :** The objectives for the long-term and environmental conscious use of buildings and constructed assets are more important in Japan and the many types of technical approaches in order to reduce the environmental loads during the whole lifecycle are developing day by day. In particular, during CO<sub>2</sub> emission from transportation have been causing a lots of concern, and environmental loads during long-distance transportation of materials such as demolished wood and concrete rubble should therefore be properly assessed. In this study, it is investigated the new system for evaluating the residual performance of structural concrete by using easily nondestructive testing method by surface color analysis and finally estimate the deconstructed loads associated with CO<sub>2</sub> emission in actual building in Hachioji area.

## 1. はじめに

現在、新築のみならず既存建物も含めた長期耐用性の確保が一層重視される状況となりつつある。建物の作り手は、建物としての本来の目的や役割を達成するための機能・性能が、継続的な維持保全が可能な段階を満足するように品質として管理する条件に、使い手の使用環境や使用状態を踏まえ、使い手のニーズを損なうことなく継続的に品質を保証し続ける条件を加えて、最終的にそれらを広義の健全性として評価する必要性が生じている<sup>1,2)</sup>。一方、都市建築ストックが増大した傾向は、近年の経済情勢に影響をうけた新築需用の低下と解体・廃棄の抑止に伴う建物の延命等の影響により、想定された既存建物の解体時期が遅れる可能性がある。上記を鑑み、個々の建物の後期段階における維持保全に向けて、専門技術者による維持管理ではなく、使用者や一般第三者による、美観保持機能の保全に影響を与えるような段階からの点検・調査による簡易診断の仕組みを構築する必要がある。そこで第1研究として、昭和38年に竣工し、50年近くの供用期間を経た八王子キャンパス内の鉄筋コンクリート造建築物<sup>3,4)</sup>を対象に、内部鉄筋の腐食に伴う初期ひび割れや錆汁の溶出などの状態観察を踏まえ、長期供用の旧基準鉄筋コンクリート部材を想定した鉄筋腐食ひび割れに関する予防保全診断技術の検討を行う（図1参照）。

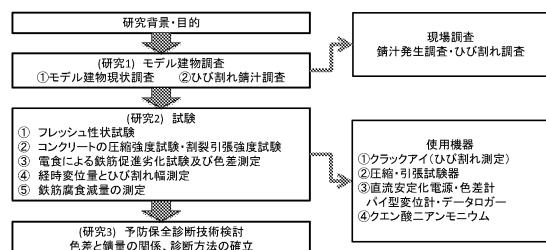


図1 研究概要図（研究1）

統いて、前年度までの成果を踏まえ、八王子という郊外都市の地域性を十分に踏まえたうえで、最終的に上記の建物が平常時に解体される場合や、地震等による災害時に解体される場合<sup>5)</sup>を想定し、建物の解体・処理・輸送段階のシステム分析と環境負荷を評価することが重要となる。そこで第2研究として、同キャンパスで2011年に解体された厚生棟・排水処理施設を対象に、実際の解体作業現場の調査をはじめ、現場関係者のヒアリングならびに解体処理全般のシステム分析を行い、最終的に廃棄物排出に伴う資材・CO<sub>2</sub>排出量等による環境負荷を評価する（図12参照）。

## 2. 長期供用の旧基準鉄筋コンクリート部材を想定した鉄筋腐食ひび割れに関する予防保全診断技術の検討

### 2.1. 旧基準鉄筋コンクリート造建築物の劣化性状調査

### 2.1.1 鉄筋腐食の状況

表1にモデル建物概要と調査結果を示す。モデル建物の4階から地下1階のひび割れ状況について外観検査をし、地上階南西ボイラー室を中心とした基礎立ち上がり部位の劣化調査をおこなった。当該箇所は、表面の塗装自身の劣化や鉄色による変色、仕上げ材のひび割れならびに低品位コンクリート表層への内部鉄汁の溶出など、様々な劣化事象が確認された。①～⑥が最も劣化が進行しており、ボイラーハウス室外側の基礎部分は冬期の日変動の大きい熱負荷に伴う、熱膨張・伸縮の繰り返しを長期間にわたり受けた劣化が進行した可能性がある。ひび割れ幅は人による測定誤差が小さい光学式携帯ひび割れ幅測定器<sup>6)</sup>を使用し、測定個所30cm幅に対し、測定間隔1cmで多点サンプリングを行った。①～④は目視によるひび割れは確認されないが鉄汁が浮出しており、⑤⑥は塗装箇所のひび割れとコンクリートひび割れの2種類が生じていた。塗装部分⑤のひび割れ幅平均は0.23mmで、基礎部分⑥は0.37mmで、ひび割れの有無・幅に応じて鉄汁発生が顕著になることが確認された。

### 2.1.2 鉄筋腐食部の色彩特性

図2外壁部①～⑥の色彩特性(汚れ度L\*, 鉄び度a\*)を、図3に色彩とひび割れ幅の色彩特性の関係を示す。色彩測定は、ひび割れ測定箇所30箇所に対し、色差計を用いてL\*a\*b\*値により光学的に測定した。L\*a\*b\*表色系は、L\*値が明度値で、L=0が最暗(黒色)L=100が最明(白色)であることから汚れ値として評価した。a\*, b\*値は色味と鮮やかさを表現し、tanθ(a\*/b\*)が色相(hue)で土の程度さがあり、a\*値(+は赤色、-は緑色)、b\*値(+は黄色、-は青色)となる。赤茶系の鉄び汁が検出される場合、a\*値が+値として評価されるため鉄び度として評価した。測定の結果、L\*値は④の健全箇所を含み、鉄び発生箇所は明度値が約40～60の間を示しており、鉄び発生程度の確認は容易ではないが、ひび割れ部からの水分溶出による影響も含め、相対的な汚れ度の評価は可能と考えられる。仕上部のL\*値は80前後であり、コンクリート部分との区分は容易となるが、測定円径部10mmに占める鉄汁を含めた平均明度が仕上げ材の明度に大きく影響を受けるため、鉄び度の評価はより困難

になる。一方、a\*値の鉄び度に関しては、②③④を中心に、赤茶色の鉄びが溶出した部分の色彩変化を正確に読みとつておらず、仕上げ部についても吹付白色塗装の場合は大きく影響を及ぼさないことから、鉄び度により外壁部の鉄筋腐食ひび割れによる一定の劣化度評価が可能と考えられた。なお、外壁部の汚れ度とひび割れ幅との関係において、棒グラフは、L\*値による汚れ度の平均値とばらつきを示すが、外壁の測定幅が長い場合、ひび割れが生じていない場合も含めて全体的に汚れ度に一定のばらつきがあることが確認され、ひび割れが生じている場合、ひび割れ幅の拡大とともに汚れ度が低下する傾向がみられた。

### 2.2 電食による鉄筋腐食ひび割れ試験による予防保全診断技術検討

#### 2.2.1 使用材料と実験方法

表2に鉄汁溶出・鉄筋腐食ひび割れ試験の使用材料を、表3に実験要因と水準を、表4にコンクリート計画調合を

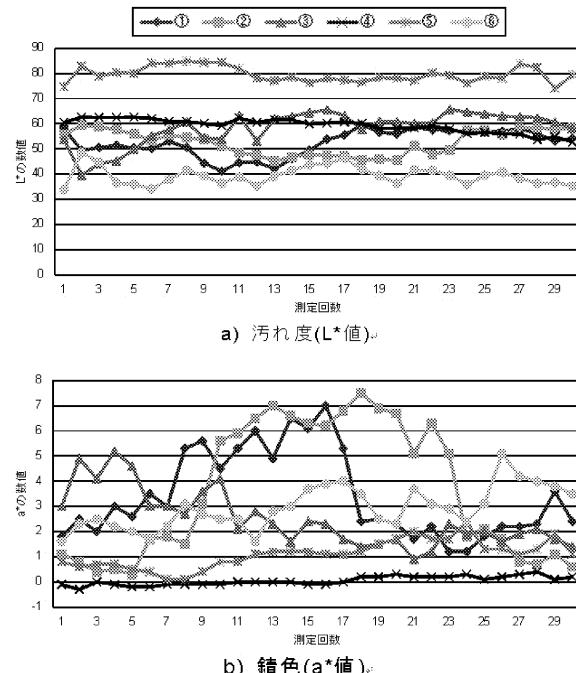


図2 外壁部①～⑥の色彩特性(汚れ度L\*, 鉄び度a\*)

表1 モデル建物調査概要と調査結果

項目	調査概要	写真(全体とボイラー室の①～⑥劣化箇所)	モデル建物概要					
			建物名称	工学院大学外王子校舎1号館	竣工	1963年(昭和38年)	構造形式	
	実施: 平成23年10月 場所: 東京都八王子市 中野町2665-1 箇所: 地下1階～地上4階		階数	地下1階、地上4階	面積等	建築面積1,008m <sup>2</sup> 、延床面積5,040m <sup>2</sup>	用途	年間利用する講義用教室
	結果: 南西角にあるボイラー室の外壁を中心に、多数の鉄汁が発生しており、基礎全般には目視で認識できるひび割れは少ないもののひび割れ状の組織水溶出に伴う暗色化や鉄色化が進展している。過去に劣化補修は行われて折らず、美観保全を目的に外壁トップコートの塗り替えが簡易に実施された状況である。		その他	吹付白色塗装仕上げ、吹付アスベスト使用なし	備考	丸鋼(JIS G 3110)は1965年に廃止	劣化箇所調査概要	
劣化箇所調査概要								
場所	測定範囲(cm)	ひび割れ測定箇所	測定間隔(cm)	ひび割れ幅平均(mm)				
①ひび割れなし	30	30	1	0				
②鉄汁溶出のみ	30	30	1	0				
③鉄汁溶出のみ	30	30	1	0				
④鉄汁溶出のみ	30	30	1	0				
⑤仕上材ひび割れ	30	30	1	0.23				
⑥ひび割れ漏水部	30	30	1	0.37				

示す。コンクリート構成材料は、関東地域で旧来より一般的に使用されたものとし、細骨材に関しては、鉛汁溶出が促進されるよう粒度調整を行い、f.m.4.36とした粗目砂も設けた。水セメント比は高強度から低強度までの 40, 55, 70%とし、低水セメント比の場合は、練り混み時に材料分離が生じないよう碎石粉を混和し製造した。電食試験体に用いる鉄筋は、丸鋼と異形棒鋼の  $\phi$  10, 13mm で、かぶり厚さを 10, 20mm として製造し、相対的な比較が行えるようにするとともに、旧基準の鉄筋コンクリートの部材要素を想定できるようにした。

## 2.2.2 コンクリートの基礎的物性

表 5 にフレッシュ性状を、図 4 にコンクリートの基礎的物性として、a)ブリージング量、b)割裂引張強度、c)圧縮強度・静弾性係数の実測値と RC 構造計算規準の分布を示す。本研究では、旧基準コンクリートの仕様を一部想定したため、水セメント比の調整のみではなく、実際には現在のセメントとは相違する低い活性度のセメントを使用する必要がある。従って、水セメント比 55%と 70%は、碎石粉を一定量混和するとともに、ブリージングの発生を抑えられ、貧調合でも材料分離がないコンクリートとなった。碎石粉量が少ない 70p10 がブリージング量は最大であり、細骨材の粗粒率の影響は、最終水量には大きく影響しなかった。また、70p20 にすることで 55p5 シリーズよりもブリージング量が抑えられ、良好な性状のコンクリートとなった。

コンクリートは打設後 24 時間で標準養生させ、材齢 28 日に JIS に準じて強度試験を行った。圧縮強度と割裂引張強度は水セメント比に依存しており、圧縮強度と静弾性係数の関係では、日本建築学会 RC 規準式における圧縮強度-静弾性係数関係式に従う一般的な力学特性を有していた。

## 2.2.3 ひび割れ面の汚れ度と耐力低下度の関係

### (1) 電食による鉄筋腐食試験と色彩・ひび割れ幅測定概要

図 5 に電食による鉄筋腐食試験と色彩・ひび割れ幅測定位を示す。試験体は、 $100 \times 100 \times 100$  mm 立方体の鉄筋コン

クリート部材要素であり、所定の鉄筋およびかぶり厚さを設定し製造されている。ひび割れ測定面が上面になるように水槽内に配置し、5%濃度の NaCl 水溶液に浸し、鉄筋を陽極、銅板を陰極として直流安定化電源 30V を用い、電圧 30V、電流 0.1A で一定の通電を行った<sup>7)</sup>。なお鉄筋の露出部分は、腐食を防ぐためエポキシ樹脂でシーリングした。試験体上面にパイ型変位計を取付け、データロガーでひび割れ発生までのひずみ量の経時変化を測定する。色彩値は色差計を用いて 2 時間ごとに測定し、試験中は両端の 2箇所、試験終了後は

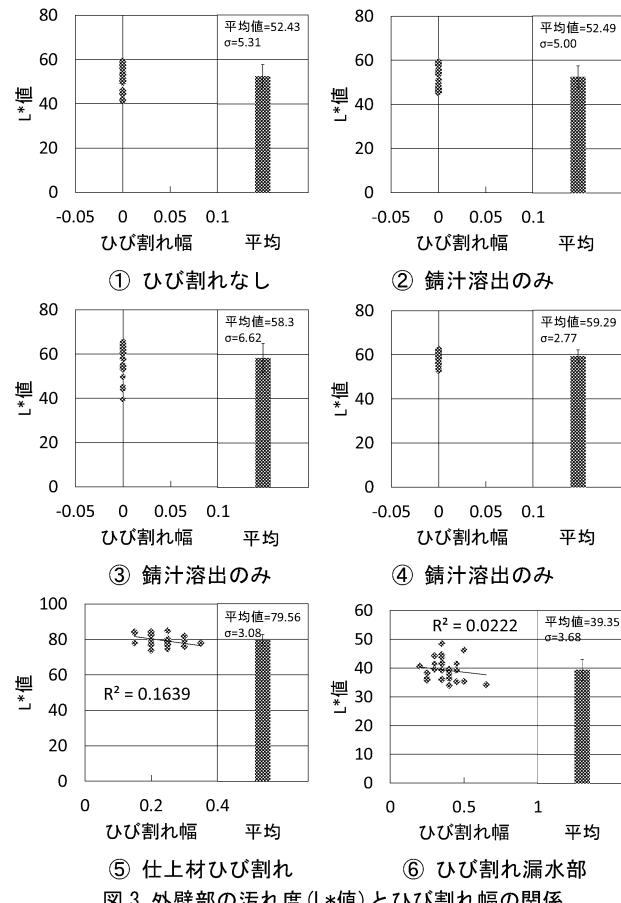


図 3 外壁部の汚れ度 ( $L^*$  値) とひび割れ幅の関係

表 2 鉛汁溶出・鉄筋腐食ひび割れ試験の使用材料

材料	種類	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm³)	表乾密度 (g/cm³)	実績率 (%)	単位容積質量 (Kg/L)	粗粒率 f · m.
細骨材	大井川産陸砂(標準)	1.78	2.54	2.59	66.7	1.69	2.54
	大井川産陸砂(荒目)	2.15	2.53	2.58	60.6	1.53	4.36
粗骨材	青梅産砂岩碎石	0.74	2.63	2.65	61.8	1.62	6.8
微粉末	硬質砂石碎石粉	-	-	2.59	-	-	-

備考) セメントは普通ポルトランドセメントを使用：密度 3.16(g/cm³)。

表 4 コンクリート計画調合

要因	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				
			W	c	s	g	
40p0	40	41.9	185	463	704	999	0
55p5	55	44.8	185	336	793	999	14
70p20	70	45.2	189	270	807	999	44
		45.9	189	270	829	999	22
70p10	70	45.9	189	270	829	999	22
70p10L			189	270	829	999	22

備考) 化学混和剤は AE 減水剤を使用し、旧基準コンクリートを想定し、空気量は積極的に導入しない方法とした。細骨材粒度の違いは 70p シリーズのみで検討した。

表 5 フレッシュ性状

要因	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積質量(g/L)
40p0	18.0	2.0	20	2364.7
55p5	21.0	0.1	20	2373.6
70p20	17.5	0.3	20	2401.7
70p10	19.0	0.3	20	2378.9
70p10L	16.5	0.2	20	2356.0

5箇所の測定を行った。鉄筋腐食減量  $C_g$ (式2)は、10%濃度クエン酸二アンモニウムにより錆除去を行った鉄筋腐食前後の鉄筋量および寸法情報をもとに、質量減少率  $C$ (式1)より算定する。

$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \quad (\%) \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

$$C_g = \frac{\Delta w}{(\pi R_0 L)} \quad (\text{g/mm}^2) \quad \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

$C$  : 質量減少率  $w$  : 腐食前質量  $w_2$  : 徐錆後質量

$\Delta w$  : 腐食に伴う質量減少分( $\Delta w = w - w_2$ )(g)

$R_0$  : 公称径(mm),  $L$  : 測定片長さ(mm)

## (2) 汚れ度(a)とひび割れ幅(b)の関係

図6 鉄筋腐食によるひび割れ部汚れ度(a)の評価(かぶり・鉄筋径混合)を示す。一般に鉄筋による部材の拘束度は、自由収縮ひずみと拘束ひずみとの関係から得られるが、今回の場合、D13, D10,  $\phi 10$  の順に拘束ひずみが大きいことが予想され、コンクリート強度強度が大きい場合にその影響が顕著になると予想される。ここでは、かぶり・鉄筋径混合として見た場合、40p0 シリーズから 70p シリーズに向けて、明度が大きく低下しており、高強度であるとひび割れの発生位置が不均質になり、上面からの錆汁が生じにくく結果として汚れ度が低下し難くなる傾向があった。また、70p10 は微粉およびセメントペースト量が少なく、かつ骨材量が多く、さらに 70p10L は粗粒率が大きい細骨材を用いているため、モルタル要素が粗な構造であることが予想される。ここでは、明確なひび割れが発生する前に、錆汁により汚れ度が低下する場合も観察され、実験経過中の含水率変化の影響、材料構成の違いによる初期汚れ度の差異を踏まえても、貧調合コンクリートの方が鉄筋腐食による色差変化の幅が捉えやすいことが考えられた。

図7 に汚れ度(a)とひび割れ幅(b)の関係(かぶり 10mm・鉄筋径混合)を示す。ここでは水セメント比 40%~70%までの鉄筋コンクリート部材要素によるかぶり 10mm 全試料の最終的な汚れ度(Y 軸)とひび割れ幅(X 軸)の関係を図示し、線形回帰式を算出した。その結果、極めて限られたデータであるが、既存建物でかぶりが 10mm 程度で 1965 年に JIS G 3110 製品除外となった丸鋼を含めた鉄筋コンクリート建造物を想定した場合、壁面の最終的な汚れ度から開口ひび割れ幅を 0.2mm~1.2mm 程度までの範囲で想定することができる。なお、厳密には統計的な処理を踏まえ、予測値の基準値に対する実験式の正確度とばらつきの評価結果を併せて示すことが不可欠となる。

## (3) ひび割れ幅(b)とかぶり部変位量(c)の関係

図8 にひび割れ幅(b)とかぶり部変位量(c)(かぶり・鉄筋径混合)の関係を示す。最終的に計測されるひび割れ幅は、鉄筋周辺全体のマトリックス要素が鉄筋腐食により引張ひずみが発生し、最終的に局所的にひずみが軟化してひび割れ進展する。その間、鉄筋腐食は加速し、腐食減量も増大するが、その過程の連続的な変形挙動は最終ひび割れ幅から読みとることは困難である。一方で、パイゲージにより計測された

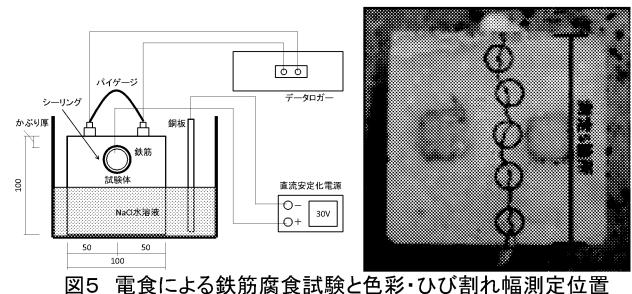


図5 電食による鉄筋腐食試験と色彩・ひび割れ幅測定位置

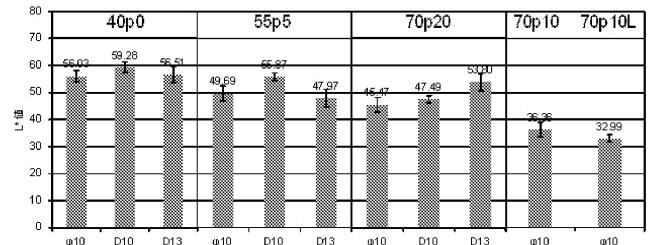


図6 鉄筋腐食ひび割れ部の汚れ度(a)の評価(かぶり・鉄筋径混合)

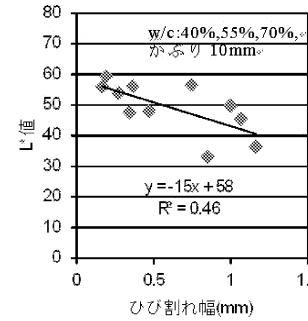


図7 汚れ度(a)とひび割れ幅(b)  
の関係(かぶり 10mm・鉄筋径混合)

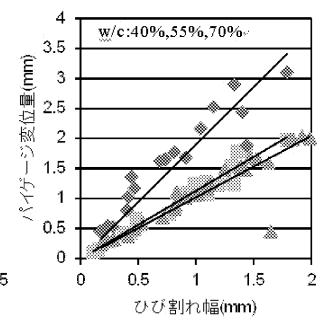


図8 ひび割れ幅(b)とかぶり部  
変位量(c)の関係(かぶり・鉄筋径混合)

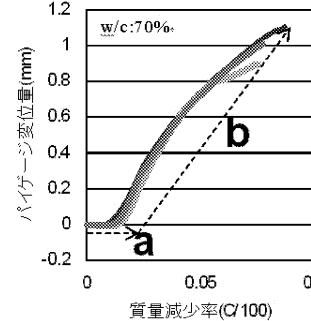


図9 かぶり部変位量(c)と腐食鉄筋質量減少率(d)との関係  
(左: 70p 実験値, 右: 全種推定式)

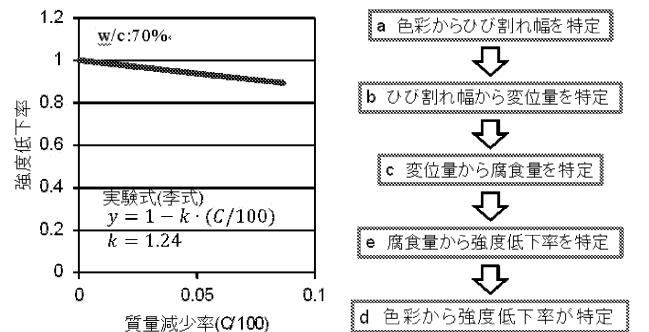
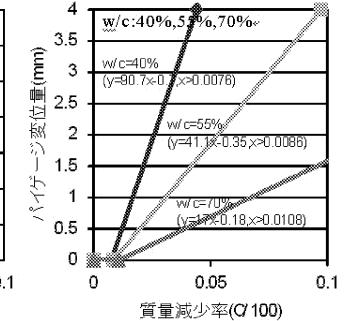


図10 腐食鉄筋質量減少率(d)と強度低下率(e)と評価プロセス

ひずみ量については、かぶり部の連続的な変形挙動が確認でき、かつ最終的な変位量と開口ひびわれ幅の関係についても評価可能となり、最終的にかぶり部の変位量を介して、最終ひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係を導くことができる。ここでは、パイ型変位計によるかぶり部5cm区間の変位量と最終ひび割れ幅を関係を示すが、55pシリーズと70pシリーズについては、最終ひび割れ幅と変位計による測定値との対応がよく、高強度の40pシリーズについては、変位計のひずみ量が倍程度大きく計測され、鉄筋腐食による膨張挙動が正確に変位として計測されていることが推測される。逆に開口ひび割れ幅は、一定量の変形によりひび割れが局所化した後は、剛性のあるマトリックス間でひずみが再分配され、ひび割れ幅が縮小している可能性も考えられる。これらの傾向を踏まえ、ひび割れ幅と鉄筋腐食量との関係を推定する。

#### (4) かぶり部変位量(c)と腐食鉄筋質量減少率(d)の関係

図9にかぶり部変位量(c)と質量減少率(d)との関係を示す。図の左は実際の測定値(p70シリーズ)であり、右はバイリニアの線形回帰による質量減少率の推定式(全シリーズ)となる。ひび割れ発生後の鉄筋の質量減少率を実測値を踏まえて求め、単位時間あたりの腐食量が一定とする条件下でかぶり部変位量との関係として示した。腐食開始時期はマトリックスの拘束が強いためかぶり部変位が生じない区間aが生じ、その後、変位が緩やかに増大する区間bが存在することが確認された。従って、全シリーズにおける区間a、bの線形回帰式を算出し、最終的にかぶり部の変位量から鉄筋の質量減少率を導くための推定式を導いた。この結果、水セメント比の低下に比例し、かぶり部の変位量に対する鉄筋の質量減少率が小さくなることが確認でき、かぶりコンクリートに対する鉄筋腐食抵抗性との一般的な考え方と整合する。

#### (5) 腐食鉄筋質量減少率(d)とかぶりコンクリート強度低下率(e)の関係

図10に鉄筋質量減少率(d)とかぶりコンクリート強度低下率(e)と評価プロセスを示す。最終的に鉄筋コンクリート部材として、腐食鉄筋による質量減少率と部材耐力低下度との関係を導くことは、長期に供用した鉄筋コンクリート造建築物の構造性能を評価する上で、極めて重要な目的となる。一般に、構造物全体の鉄筋における20%が腐食により減量した場合、構造耐力も80%程度となり構造的に問題が生じる可能性がある。もちろん、その後の供用可能性の是非は、建物の立地条件や重要度評価など多様な側面より評価される必要があるといえる。ここでは、かぶり部周辺の要素における鉄筋腐食による耐力低下度を算定するために、今回はコンクリートの破壊は、微細要素の引張抵抗力により決まり、引張抵抗力の低下度を評価することでコンクリートの力学特性の変化を安全側で評価する立場から、既往の実験式<sup>2)</sup>により、引張強度低下率(式3)を算定し、強度低下率とした。これらの一連のプロセスは図のように示される。

$$y = 1 - k \cdot (C/100) \quad \dots \dots \dots \text{式(3)}$$

C : 質量減少率(%) k : 1.24(係数)

#### 2.2.4 予防保全診断技術の検討

図11に鉄筋腐食ひび割れの予防保全診断技術の評価プロセスを示す。前述の(1)～(5)に示した関係より、使用者もしくは管理者により、鉄筋コンクリート造建築物の外壁面における浮き鏽や鉄筋腐食による微細ひび割れが確認された場合、周辺の健全部と評価対象部分の色彩値(L\*値)を色差計もしくは標色シートなどにより測色し、当該部位に使用されたコンクリートの水セメント比ごとに大きく区分される推定ひび割れ幅を決定する(プロセスa)。続いて、内部腐食鉄筋による変位量を決定し(プロセスb)，推定式より対応する腐食鉄筋の質量減少率を決定し(プロセスc)，それよりかぶりコンクリート部分の引張耐力残存比を想定する(プロセスd,e)。

以上のようなプロセスで実際の残存耐力を推定するためには、測定データの積み重ねと統計的処理方法の習練が必要となるが、鉄筋腐食ひび割れによる予防保全診断技術に必要な基礎的な流れが示されたといえる。

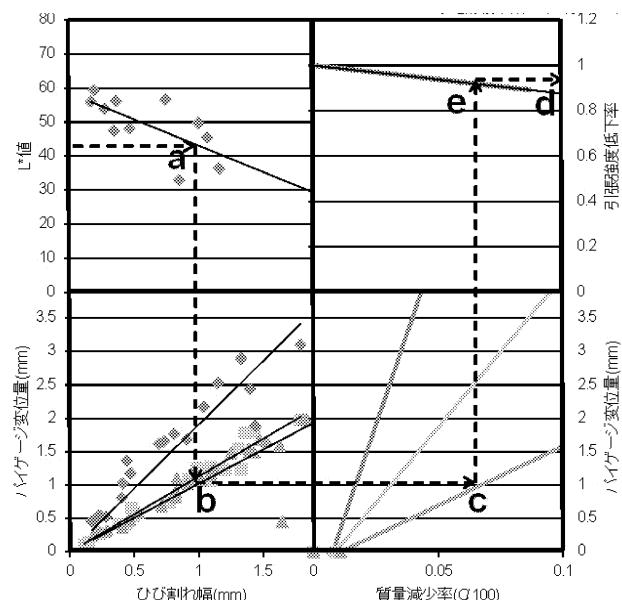


図11 鉄筋腐食ひび割れの予防保全診断技術の評価プロセス

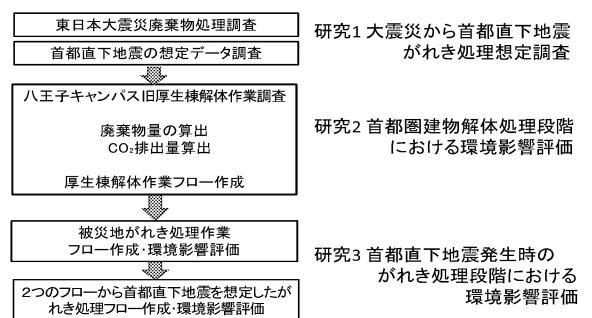


図12 研究概要図(研究2)

### 3. 都市地域における鉄筋コンクリート造建築物の解体・処理・輸送段階のシステム分析と環境負荷(研究2)

#### 3.1 工学院大学八王子キャンパス厚生棟・排水処理施設の解体処理調査の概要

図12に研究概要図を、表6に旧厚生棟・排水処理施設の概要を示す。研究2では、既設の鉄筋コンクリート造建築物を対象に、八王子という郊外都市の地域性を踏まえたうえで、最終的に平常時および災害時における解体処理を区別して、解体処理・輸送段階のシステム分析と環境負荷を評価する。工学院大学八王子キャンパスの旧厚生棟・排水処理施設を対象に、実際の解体作業現場の立入調査、施工管理担当者および関連専門工事業者へのヒアリング・工事資料分析などを行い、解体処理全般のシステム分析と廃棄物排出に伴う資材・CO<sub>2</sub>排出量等による環境負荷量を推計する。

#### 3.2 平常時における解体処理システム分析と環境負荷評価

##### 3.2.1 解体処理システム分析

図13に解体作業分析のシステム境界の設定を、写真1に平常時における解体処理の状況を、表7に解体処理状況のヒアリング結果(2011年7月7日)を、表8に廃棄物量算出方法と輸送時負荷の試算条件を示す。システム境界は、環境インパクトを算定する上で、その対象の環境影響範囲と主たる担い手の作業範囲ならびに地域的影響範囲が特定されるため重要なとなる。従って、現場管理担当者にヒアリングをするとともに、工事工程概要書、詳細作業書、廃棄処理マニフェストデータ等を借用し、鉄筋コンクリート造建築物の解体・廃棄処理時の廃棄物量・CO<sub>2</sub>排出量試算の準備を行った。

表6 工学院大学八王子キャンパス厚生棟および排水処理施設の概要

a) 厚生棟	b) 排水処理施設
1)所在：東京都八王子市中野町 2665-1	1)所在：東京都八王子市中野町 2665-1
2)用途：教育厚生	2)用途：排水処理機械室（地下施設）
3)面積：建築面積 11989m <sup>2</sup> 延床面積 26122m <sup>2</sup> 居室部床面積 2階 355.7 m <sup>2</sup> 1階 341.5 m <sup>2</sup> 合計 697 m <sup>2</sup>	3)面積：建築面積 78336 m <sup>2</sup> 延床面積 22167 m <sup>2</sup>
4)建物高さ：最高高 7.65m, 最高軒高 7.2m	4)建物高さ：最高高 4.430m, 最高の軒高 3.830m
5)構造種別：柱 鉄筋造／梁 鉄骨造／外壁 ALC 版／階段 鉄骨造 床 デッキプレート+RC／屋根 デッキプレート+RC	5)構造種別：柱 RC 造／梁 RC 造／外壁 RC 造／ 階段 RC 造／床 RC 造

表7 解体処理状況のヒアリング結果(ヒアリング日時 2011年7月7日)

Q1. A. 廃棄物・材料別解体方法について
Q1.材質別に解体する際、異種混入する廃棄物はどのように分別するのか。 A1.基本的に主たる材料を重機を使用して大きく分別し、最終的に現場ヤード内で手作業で分別し、材料分離を行うまで実施する
Q2.複合化部材など、機械的・化学的に現場での分別が困難な廃棄物はどのように処理するのか。 A2.基本的に設備機械等も導入し、現場解体・分別を原則とするが、一部できないものは混合廃棄物として処理する
Q2. B. リサイクル・資源回収について
Q1.現場で生じた解体廃棄物はどのように処理し、どこに運ぶのか。 A1.現場で生じた廃棄物はそれぞれ分別して、中間処理場や最終処分場へ運ぶ。場合により場内ストックし、そのまま再利用することもある。
Q2.現場で生じた廃棄物はどのような種類の運搬車両で運ぶか。 A2.コンクリートガラは10tダンプ、スクランプ屑・磨ブラ・木屑・ALC等は、分別の上アームロール車(20 m <sup>3</sup> 等状況に応じて)で輸送する
Q3.大量発生、多数回輸送が必要となるトラック輸送対象物は、輸送距離はどの程度を見込み排出するか。 A3.本現場では、スクランプ屑やコンクリートガラは15~20kmであるが、木くずは約150kmの中間処理を設定した。材料により区別して考える。
Q4.現場解体で使用する重機の燃料は何を用いるか、また一日にどれほどの消費量を見込んでいるか。 A4.本現場では大型ブレーカ等に軽油を使用しており、100~120L/日・台程度を使用。
Q5.中間処理施設での再資源化の方法は。 A5.コンクリートガラは現場のガラバゴスで細碎化し、再生砕石(RC40 ゼロ)等の規格に合わせて加工する。木材等はチップ化して、バイオマス燃料や公園敷設材料として幅広く利用する。アスベストやヒ素が含まれた再利用できないものは埋立処理とし、本現場では95%以上の再利用を目指している。
Q3. C. 終末処理・廃棄物方法について
Q1.本現場で、最終的な廃棄物量はどの程度になるか。 A1.本現場では約3000t程度のコンクリートガラが発生する見込みである。
Q2.本現場で破碎したコンクリートの現場内再利用方法はどのような内容か。 A2.移動式再生砕石製造機で再生砕石とし、場内ストックして捨てコンクリート前の砕石敷等で利用する。他、大学内の駐車場整備に使用する。

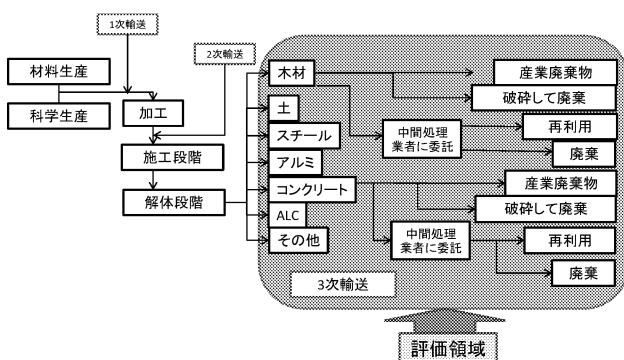


図13 解体作業分析のシステム境界の設定



写真1 平常時における解体処理の状況

図14に解体現場で発生した主たる廃棄物量の構成を示す。汚泥・コンクリートがら・木くずの廃棄物量が多いこと、コンクリートがらなど、かさ密度による質量換算より、重量制限で輸送量・台車が決定する廃棄物があること、現場解体時にできるだけ混合廃棄物の排出がないように配慮したこと等がわかる。

### 3.2.2 輸送距離の設定と環境負荷評価

表9 輸送トンキロ当たりの燃料使用量と廃棄物処理場の位置・GIS検索輸送距離結果を、表9に解体廃棄物別の輸送場所・輸送距離を、表10に解体廃棄物別の総トンキロ値と輸送時二酸化炭素排出量を、図15に解体廃棄物別の大気質汚染物質排出量を示す。解体現場で発生する廃棄物量が確認されたため、カーボンフットプリントとして算定する際に必要となる、現場からの排出物としてシステム境界の外部範囲である中間処分場や最終処分場へ輸送した場合の環境負荷量を算定する。工学院大学八王子キャンパス旧厚生棟・排水処理施設から、各種排出物の中間処理場・最終処分場を特定し、片道輸送距離を全国デジタル道路地図データベースを基にした地理情報システムGISの最短距離検索を用いて輸送距離を試算した。コンクリートがらなど、かさ密度が1.5(t/m<sup>3</sup>)に近くなり重量制限により積載量が決まるものは八王子市内周辺の複数箇所の中間処理場に対し片道13km程度の輸送を伴い排出しており、輸送回数も100回を越えるものとなっており、総トンキロ値および算定される二酸化炭素排出量への影響も大きいことから中間処理場の排出先の検討は重要となる。廃プラスチック、木くずなど、かさ密度が0.5(t/m<sup>3</sup>)程度で容積制限により積載量が決まるものは、片道130km程度を要して県境を越えた群馬県などで排出し

ているが、総排出量も適当であるためこのような輸送形態で処理することが可能となっている。

また、排出物輸送時のCO<sub>2</sub>排出量から、各種エネルギー係数を掛けて、大気質の汚染物質であるSox, Nox, PM(粒子状物質)の排出量を算定したところ、コンクリートがら・

表8 廃棄物量算出方法と輸送時負荷の試算条件

項目	内容	
廃棄物量算出方法	体積(m <sup>3</sup> )	解体作業マニフェスト情報をもとに、各種廃棄物のかさ体積を設定
輸送距離設定方法	質量(t)	設定したかさ体積に産業廃棄物種類別重量換算係数 <sup>7)</sup> を掛け単位容積あたりの質量を算定。当該データはFEMA(アメリカ環境保護局が公表した指針 <sup>8)</sup> や東日本大震災時の国のがれき対策指針等 <sup>9)</sup> を踏まえ、今回は図14中設定データを利用
環境負荷算定方法		10tトラックにより、工学院大学八王子キャンパス(東京都八王子市中野町)から各中間処理場までの片道輸送距離を全国デジタル道路地図データベースに準拠した地理情報システムGIS(インクルメントP社ルート検索)を用いて、非高速道路・最短距離の条件で試算 <sup>10)</sup> 。
		トラック輸送に適用される改良トンキロ法により、単輸送重量と輸送距離および輸送回数の積による総輸送トンキロ値を求め、改良トンキロ法燃料使用原単位より、輸送トンキロ当たり燃料使用量(積載率100%: 0.0342L/t·km), 二酸化炭素排出係数(軽油:2.62t-CO <sub>2</sub> /kL)により二酸化炭素排出量を算出

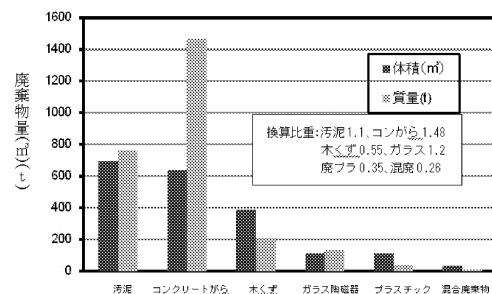


図14 解体現場で発生した主たる廃棄物量の構成

表9 輸送トンキロ当たりの燃料使用量と廃棄物処理場の位置・GIS検索輸送距離結果

最大積載荷重(kg)	輸送トンキロ当たり燃料使用量(L/t·km)			八王子キャンパス	八王子旧厚生棟
	20%	80%	100%		
6000~7999	0.17	0.0551	0.0459		
8000~9999	0.144	0.0467	0.039		
10000~11999	0.126	0.041	0.0342		
12000~16999	0.105	0.0342	0.0285		
備考)	改良トンキロ法燃料使用原単位より、二酸化炭素排出係数を決定(10tトラック軽油2.62t-CO <sub>2</sub> /kL)。その他の大気汚染物質は、既往研究を踏まえ、CO <sub>2</sub> 排出量に対する軽油含有成分による各種エネルギー係数(SOX=9.41×10 <sup>-5</sup> , NOX=9.14×10 <sup>-4</sup> , PM=7.68×10 <sup>-5</sup> )を掛け算出 <sup>11)</sup>				

- ③ S興業あきるの工場 改良土プラント 8.1km
- ②株式会社K建設 第1リサイクル工場 13.9km
- コンクリートがら →廃プラスチック 13.5km
- 木くず 131.9km
- ガラス及び陶磁器くず 122km
- 混合廃棄物 52.3km
- ガラス及び陶磁器くず 139.1km
- ③株式会社T組 沼田エコセンター 131.9km
- ④H重機株式会社 52.3km
- ⑤O運輸(株) 139.1km
- ⑥N資源株式会社 チップ工場 139.1km
- ⑦O運輸(株)リサイクルセンター 139.1km
- ⑧N資源株式会社 139.1km

表10 解体廃棄物別の総トンキロ値と輸送時二酸化炭素排出量

廃棄物名	中間処理場・廃棄場名	廃棄物量(t)	距離(km)	輸送回数(回)	総トン・キロ値(t·km)	輸送時総CO <sub>2</sub> 排出量(t-CO <sub>2</sub> )
汚泥	S興業あきるの工場 改良土プラント	765.6	8.1	116	719316	64.457
コンクリートがら	株式会社K建設 第1リサイクル工場	1451.9	13.9	64	1291584	115.731
	株式会社K建設 国立リサイクル工場	14.38	13.5	7	1358	0.122
廃プラスチック	株式会社T組 沼田エコセンター	38.85	131.9	13	66612	7.156
木くず	H重機株式会社	189.75	122	11	2541	84.063
	O運輸(株)リサイクルセンター	1.38	52.3	1	72	0.024
N資源株式会社 チップ工場	N資源株式会社 チップ工場	20.9	139.1	4	11628	3.839
混合廃棄物	O運輸(株)リサイクルセンター	8.58	52.3	4	1796	0.161
ガラスくず及び陶磁器くず	N資源株式会社	0.11	139.1	1	15	0.0014
	株式会社T組 沼田エコセンター	134.4	135	9	1063296	14.632

木くずによる環境負荷量が多いことがわかる。特に木くずに関しては、所定の中間処理を行う施設数の制約と再資源化用途の定め方で限定的に選択する可能性を有していることから、現場処理および分別解体の方法の改良により、環境負荷量を下げることが可能になるといえる。また、コンクリートがらに関しては、比較的短距離で排出処理を実施しているものの輸送回数が大きく影響していることから、現トラックよりも積載容量が大きいものを使用し、輸送回数を減らすことができれば二酸化炭素排出量等を抑えることが可能となる。

### 3.3 災害時における解体処理システム分析

図16に災害時を想定したがれき処理システムの分析結果を、表11に東日本大震災による被災地のがれき処理状況調査結果(茨城県H市)を示す。解体現場および中間処理場に対するヒアリングにより、平常時で想定した解体処理システムを震災時のがれき処理システムに置き換える、現場段階対応(A)、中間処理施設対応(B)、最終処分場対応(C)に区分した場合のシステム連携を踏まえた事業継続計画性(BCP)を評価した。また、東日本大震災における復興支援研究の一環として、地域を特定しがれき処理方法や撤去方法などをヒアリング(H市、平成23年6月2日調査)した。その結果、震災時のがれき処理の場合、A段階対応において、分別解体作業が困難になり、かさ密度が大きいコンクリートがら等に、木くず・プラスチック類の混合廃棄物が多く混入することになるため、A段階での作業が難航する。ガラバゴス等の現場処理設備が積極導入されるが、平常時レベルの解体がらの品質確保が困難であるため、B段階対応である中間処理施設数が少ない場合は、結果としてC現場対応である最終処分場に廃棄する方法が中心となる。国内では最終処分場の残余量に余裕がある地域は非常に少ないため、閉塞状況が生じる可能性が多分にある。その対策としては、簡易な方法により現場もしくは中間処理場により再資源化して製品化できる用途のメニューを予め増やして

くことが重要であるとともに、震災時においても建造物自身が易分解性が保持され、混合廃棄物とならないような設計・施工仕様で予め適用しておくなどの中長期的な対策も重要となる。

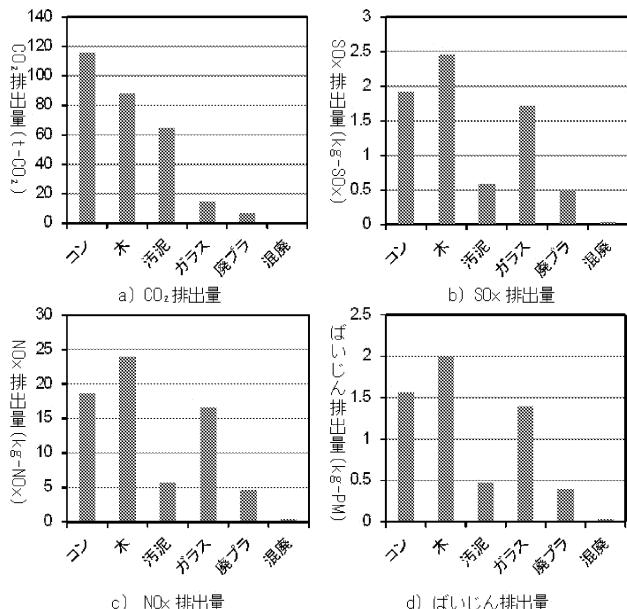


図15 解体廃棄物別の大気質汚染物質排出量

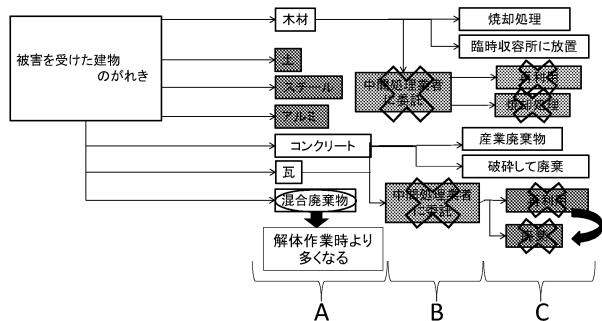


図16 災害時を想定したがれき処理システムの分析結果

表11 東日本大震災による被災地のがれき処理状況調査結果(茨城県H市)

対象	内容/詳細	
茨城県 K漁港	平成23年6月2日 午後12時30分 住民T様,U様	K漁港付近も含め海岸沿いには甚大な被害が出ており、テトラポットの配置の仕方により、津波が大きくなり、被害が増加した。河原子漁港の方たちの多くが、住む場所がなくなり他県に避難している状況である。津波の被災を受けた海岸近辺の住宅は、端材が散乱している状況であり、一次仮置き場に集積している木材は、市の一般廃棄物処理施設に運搬し焼却処理を実施したいところであるが、自治体の対応が滞っている状況である。コンクリート塊はすでに安定型の最終処分場に輸送された一次仮置き場にはからの状態であるが、木材は量の問題と焼却による処理を行う点が問題となりストップしている様子。
茨城県 H市役所	平成23年6月2日 午後14時15分  生活環境部 環境衛生課 ごみ対策推進 担当者様	H市内の廃棄物に関しては市内で処理をする方針がある。木材は一度市内4カ所の臨時収容所に集め、10t トラックを使用する。6×15cm以上の木材はH市清掃センターでは1サイクル1時間で処理できない。そのため木材をチップ化する必要があるが、清掃センターでは月に100t、震災廃棄物は40tしか処理できないので、全ての木材を処理するのに2~3年かかると予想されている。がれきも同様に臨時収容所に集め、ガラバゴス(100L/時)を使用し細かく破碎し、埋め立てをするため公共工事廃棄物処分場に運送する。ガラバゴスによる破碎は1日6時間行い10日間で可能である。がれきのリサイクルに関しては大谷石、ブロック、瓦などをガラバゴスで一緒に碎いてしまったため、再生材として使用したとき強度が均一にならないため、使用できない。輸送手段として使用されている10t トラックは、処理場まで運ぶ際、木材の場合は空隙ができ、結局は1t程度の重量しか運べず、平均にすると700~800kgしか運べない。またがれきの場合は7~8tは運べる。

#### 4.まとめ

- 1) 鉄筋コンクリート造建築物の後期健全度を評価するにあたり、外壁部分における浮き錆や微細ひび割れからの錆汁の色彩値を評価することで、最終的にかぶりコンクリート内部の鉄筋腐食質量減少率と引張耐力低下度が簡易に診断できるための基礎的仕組みが提案された。
- 2) 都市建築ストックの維持管理においては、部材劣化事象における劣化要因の潜伏期や潜在期からの対応が重視され、鉄筋コンクリート造建築物における美観保持機能を重視した検査技術を導入することで、長期供用の旧基準鉄筋コンクリート部材にも対応し得る予防保全診断技術の検討が可能となる。
- 3) 都市周辺地域における鉄筋コンクリート造建造物より排出される解体廃棄物は、平常時においては現場内、中間処理場、最終処分場の組み合わせにより、トンキロ値、二酸化炭素排出量などの環境負荷値を積極的に削減できる方法が具体的に提案することができる。
- 4) 都市周辺地域における解体廃棄物の処理方法に関して、災害時のBCP(事業継続計画)対策に対する他業種連携と地域的受容能力に関しては十分な体制であるとはいはず、課題の整理と実務的な対策の提示が今後必要となる。

#### 謝辞

本研究は、工学院大学PJ研究費、工学院大学UDM中課題3、H23年度科研費（若手A）都市減災・早期復興に資する震災廃棄物起源材料の高度利活用研究（代表：田村雅紀）により実施された。そして本研究は、平成23年度田村研究室卒論生である岡晴貴君、山縣翔太君、中村祐樹君の卒業論文の各テーマであり、彼らとともに本研究を積極的に検討することができた。八

王子キャンパス・新総合教育棟建設現場の種田所長、原副所長には本研究への多大なご助言・ご協力を頂いた。東日本大震災の復興研究の一環として、アンケート・ヒアリングにご協力いただいた各自治体関係者の各位、日立市廃棄物処理課大塚寧氏、工学院大学施設課担当各位に助力を得た。付記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート環境配慮施工指針（案）・同解説、2008
- 2) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能研究小委員会、コンクリート331委員会、2009
- 3) 工学院大学1号館耐震診断調査報告書、工学院大学施設課管理資料、2007
- 4) 工学院大学1号館耐震審査報告書、工学院大学施設課管理資料、1997
- 5) 内閣府：首都直下地震対策概要、2007
- 6) 田村、近藤、茨田、長谷川、：コンクリート構造物に用いる光学式ひび割れ幅測定器の開発と性能評価、日本建築学会技術報告集第19号2004
- 7) 橋高、LE、塚越、松沢：鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、2011
- 8) 環境省：沿岸市町村の災害廃棄物処理について、  
<http://www.env.go.jp/index.html> 参照 2011.1
- 9) アメリカ環境保護局：FEMAがれき管理指針、2007
- 10) 田村、阿部：首都圏に流入するコンクリート用骨材の需給動向調査と輸送時環境負荷評価、日本建築学会技術報告集、pp.631-636、第31号、2009.9
- 11) 土木学会：コンクリートの環境負荷その2、コンクリート技術シリーズ62、2004



## 古代東アジアにおける学術と支配制度に関する研究

工学院大学 基礎・教養教育部門 榎本淳一

工学院大学 機械創造工学科 塚本剛

明治大学 文学部 河内春人

Study on Governing System and Academic in Ancient East Asia

ENOMOTO Jun'ichi, Division of Liberal Arts

TSUKAMOTO Tsuyoshi, Department of Basic Engineer in Global Environment

KOCHI Haruhito, Meiji University

**ABSTRACT :** It is considered that in premodern times there existed in the East Asian region an international order centered on China and a historical world known as the “East Asian world” in which various countries and peoples were structurally interconnected. Because of shared cultural phenomena such as a Sinographic culture, Confucianism, the *Iu-ling* system, and Buddhism, the “East Asian world” can, it is maintained, also be understood as a sphere of Chinese culture mediated by the Chinese script.

### 1. はじめに

本研究は、古代東アジアにおける学術と支配制度の関係性について、多様な視点から実証的に解明することを目的とする共同研究である。研究期間は、2010～2012年の3年間であり、今回はその第2年度の研究成果について、途中経過報告という形で報告したいと思う。

### 2. 研究実施体制

#### 2. 1 研究組織

本研究においては、多様な視点から実証的な検討を加えることに重要性があるため、共同研究者に加え、研究協力者を募集し、研究体制の強化を図った。本研究に関わる研究者（専門・所属）は以下の通りである。

研究責任者 榎本淳一 日本古代史

共同研究者 塚本剛 東洋史

共同研究者 河内春人 日本古代史

研究協力者 小林春樹 東洋史 大東文化大学

研究協力者 小林岳 東洋史 早稲田高等学院

研究協力者 濱田寛 漢文学 聖学院大学

研究協力者 野田由紀子 日本古代史 お茶の水女子大学（現在は、エジプト国立インシャムス大学日本語学科）

研究協力者 吉永匡史 日本古代史 日本学術振興会以上、8名により昨年度は共同研究を遂行したが、次年度は、下記の2名を増員し、更に研究体制を強化する予定である。

研究協力者 会田大輔 東洋史 明治大学

研究協力者 柿沼陽平 東洋史 早稲田大学

#### 2. 2 研究体制

研究責任者及び共同研究者による個別研究と、研究責任者・共同研究者・研究協力者による研究会によって、研究を推進する体制をとっている。次年度末には、その両方の研究成果を、研究書としてまとめ、刊行することを計画し、出版社との交渉を進めている状況である。

### 3. 研究の成果と途中経過

#### 3. 1 公表・刊行された研究成果(2011年度分)

##### (1) 著書

- ①榎本淳一(共著)『日本の対外関係2 律令国家と東アジア』吉川弘文館、pp.172-195
- ②榎本淳一(共著)『日本書紀の謎と聖徳太子』平凡社、pp.119-137
- ③榎本淳一(共著)『律令制研究入門』名著刊行会、pp.2-23
- ④河内春人(翻訳)シャルロッテ・フォン・ヴェアシュア著・鈴木靖民解説『モノが語る日本対外交易史』藤原書店、pp.1-401
- ⑤河内春人(共著)『古代東アジアの道路と交通』勉誠出版、pp.287-298
- ⑥河内春人(共著)『遣隋使がみた風景・東アジアからの新視点-』八木書店、pp.223-247

##### (2) 論文など

- ①榎本淳一「鈴木靖民編『古代日本の異文化交流』『日本歴史』757、pp.104-106
- ②榎本淳一「比較的の視点」『日本歴史』759、pp.35-37
- ③榎本淳一「浜田久美子著『日本古代の外交儀礼と渤海』『法政史学』77、pp.73-78
- ④河内春人「古市晃著『日本古代王権の支配論理』『歴史評論』732、pp.105-110
- ⑤河内春人「中野高行著『日本古代の外交制度史』『史学雑誌』120-6、pp.87-95
- ⑥河内春人「義江明子著『古代王権論』『日本歴史』768、pp.103-105
- ⑦河内春人「鈴木靖民著『日本の古代国家形成と東アジア』『国史学』掲載予定
- ⑧塙本剛「漢代における真正皇帝在時の皇太后の動向」投稿中

##### (3) 口頭発表

- ①榎本淳一「隋唐朝の朝貢体制の構造と展開」唐代史研究会2011年度夏期シンポジウム、2011年8月23日
- ②榎本淳一「コメント」国際シンポジウム「新発見百済人「祢氏墓誌」と7世紀東アジアと「日本」」、2012年2月15日
- ③河内春人「古代東アジアにおけるモノの往来」古代史セミナー、2012年3月6日

##### (4) 市民講座

- ①榎本淳一「仏教の流伝と中国・朝鮮文化の移入」朝日カルチャーセンター新宿、2011年11月8日

##### ②榎本淳一「遣隋使の諸問題」

朝日カルチャーセンター新宿、2012年1月10日

##### ③塙本剛「隋朝における遣隋使」

朝日カルチャーセンター新宿、2012年3月13日

##### ④河内春人「遣隋使と仏教」

朝日カルチャーセンター新宿、2012年2月14日

### 3. 2 研究会実施状況

#### 第1回研究会

日時：2011年6月4日 15:00～18:30

場所：本学基礎・教養教育部門応接室

発表：①小林岳氏

「李賢の『後漢書注』について」

##### ②塙本剛氏

「『漢書』成立に関する一考察～班固の立場とその作用」

#### 第2回研究会

日時：2011年7月2日 14:00～18:00

場所：本学第3会議室

発表：①小林春樹氏

「『漢書』帝紀の皇帝觀、前漢王朝觀について」

#### 第3回研究会

日時：2011年10月8日 15:00～18:00

場所：本学基礎・教養教育部門応接室

発表：①濱田寛氏

「『世俗諺文』注文に見る源為憲の学問」

### 3. 3 研究の進捗状況

#### (1) 榎本淳一

2011年度の研究は、上記の公表した成果以外に、まず、遣唐使の持ち帰った書籍が、具体的にどのように取り入れられ、また日本文化にどのような影響を与えたかについて検討を行った。また、その歴史的な背景となつた、遣唐使を取り巻く國際環境＝隋唐朝の朝貢体制について考察を行い、従来の通説を大いに修正しうる成果を挙げることができた。その要点は、以下の通りである。

藤原仲麻呂政權において、なぜ天平宝字元年勅を発令したのかという問題を考える前提として、本勅が出される以前において、官人養成教育に用いられたテキストがどのような状況にあったかを見ておきたい。

先に見たように、令制でテキストが指定されていたのは、大学の明経生・算生、典薬寮の医生・針生のみであった。このうち、まず、明経生のテキストについては、学令の規定と『目録』掲載の経書を対応させることによって、ある程度推定できるものと思う。それをまとめたのが、「表2：令制における経書テキスト」である。これによれば、学令に規定されたテキストがほぼ一対一対応で『目録』に確認でき、それらは皆、隋唐以前に成書さ

れたテキストばかりである。古代日本における五経正義の本格的受容が奈良時代末以降であったとする水口幹記氏の指摘を併せ考えるならば、恐らく大宝律令制定の段階では、五経正義は大学のテキストとしては使用されていなかったものと思われる。これに関連して、日本では奈良朝末まで、呉音（中国南朝時代の発音）でテキストを読んでいたわけだが、それはそもそもテキスト自体が南北朝期のものであったことと深く関わっていたと考えられるのではないだろうか。すなわち、南北朝期のテキストを使い続けることにより、その発音もテキストと共に固定化していたと考えられる。唐では永徽四年（六五三）から五経正義を科挙の試験用テキストに指定していたが、当然、国家の教育機関では五経正義がテキストとして使用されていたと考えてよいだろう。しかし、日本の令制においては、まだ南北朝時代以来のテキストを使用していた可能性が高いと思われる。

次に算生のテキストだが、令制で使用されていた算経が如何なるものであったかについては、学令集解 13 算経条の令釈と古記に撰者・巻数表記があることからある程度明らかにできる。それに、唐代公定の算経テキストである「算経十書（十部算経）」の書名・巻数・撰者などをまとめたのが「表3：令制の算経テキストと唐の算経十書」である。なお、令釈は養老令における算経の巻数、古記は大宝令における算経の巻数を記したものと考えられ、両者の記す巻数に相違が無いことから、令制における算経テキストの変更は無かったものと考えられる。ただし、古記にはいくつかの算経について「今選」として別の巻数が記されていることから、古記が記された天平年間には一部算経の変更が行われていたことが知られる。この表を一覧すれば、すぐ分かるように、日本の令制で用いられた算経は、基本的に南北朝時代のものであり、唐代の「算経十書」は全く使用されていない。ただし、「今選」という天平頃（「今」）に使用された（「選」ばれた）算経テキストの巻数を見ると、「算経十書」の巻数と同じことが確認でき、天平頃には『孫子』・『五曹』・『周髀』の三書については唐の「算経十書」が使用されるようになっていたものと考えられる。

続いて、医生・針生の令制のテキストだが、テキストを規定する医疾令の『令集解』が喪われているため、必ずしも明確ではない。テキストを規定する医疾令2医針生受業条については、『政事要略』に『令義解』の逸文があり、そこから窺うしかない。その義解逸文の内容と隋唐の書目類などとの対応関係をまとめたのが「表4：医疾令義解」に見える医生・針生のテキストである。

まず、押さえておかなければならないのは、義解は大宝・養老令制定時のテキストを記しているわけではないということである。それが明瞭に示されているのが、『本草』を「新修本草廿卷」としている点である。令制では梁・陶弘景撰『本草集注』であったとされることから、義解は明らかに義解が制定された当時のテキストを挙げていることが分かる。『新修本草』以外にも、令制以後に

新たに採用されたテキストが含まれている可能性は十分あるだろう。先に述べたように『明堂』も、唐・楊玄操撰『黄帝明堂經』三巻が該当するのではないかと思われる。しかし、全てが新來のテキストに改められていたわけではなく、『黄帝甲乙經』をはじめとして、『小品方』・『集驗方』など隋唐以前からの医書が多数確認できる。また、義解が記す『素問』三巻、『黃帝針經』三巻、『偃側図』一巻なども、隋唐の書目類に該当するものが見当たらず、それ以前の医書である可能性が高いと思われる。そのように考えると、天平宝字勅で採用される以前の、即ち令制の医生・針生のテキストも、南北朝期の医書を中心に構成されていたと想定してよいだろう。

以上、令制のテキストを通覧したわけだが、唐代のテキストは確認できず、南北朝期の学術に基づいていた可能性が大きいことを明らかにできたものと思う。そのような奈良時代の学術状況を踏まえるならば、天平宝字元年勅で多くの隋唐期のテキストを諸生のテキストに指定したことの意味、仲麻呂らの意図が明らかになるだろう。すなわち、できるだけ多くの隋唐のすぐれた学術成果を取り入れ、立ち後れていた日本の学術レベルを高めようという意図があったと見ることができるだろう。

なお、天平宝字元年勅の漢籍は、全てが隋唐期のものは不明な部分もある。算経の『六章』などは、隋唐の史書に確認できず、中国では既に喪われていた逸書であったか、朝鮮で撰ばれた書か、その何れかと思われる。新來の先進的な学術書だけでなく、旧来の使い慣れたテキストも指定してあるのは、現実的な対応と言えるだろう。令制よりテキスト数を減らす精選の傾向が見られることも同様な配慮からと考えられ、修得の必要性の高いものを、現実的に学びうる範囲でテキストに指定したのであろう。

仲麻呂の政策意図を考える上で、最後に天平宝字三年（七五九）六月丙申勅（以下、「天平宝字三年勅」と略称する）との関連について触れておきたい。この勅において、史生以上への任用や位階の昇進の条件として、『維城典訓』と律令格式の読習を義務づけたわけだが、官人たる者は法の知識と人徳を併せ持つべきであるという官人養成の理念・要諦が示されている。仲麻呂は先に養老律令を施行し、法制度の整備を進めていたわけだが、国家なり制度なりを動かすのはあくまでも人間であることを痛切に感じていたのではないだろうか。法に則って形式的に人員を配置しても、その人員に然るべき能力・技能が無ければ、何ら制度は機能しない。先に見た国博士・医師の不正任用も、その点から問題化したのであろう。こうした視点から見れば、天平宝字元年勅と天平三年勅は共通した施策であることが理解されるだろう。天平宝字元年勅は比較的専門職的な技能官人養成を目的とするものであり、天平宝字三年勅はもっと一般的な官人養成を目的とするものであったと言えるだろう。どちらも、律令国家の運営に必要な人材である。その人材を教育・養成する具体的な方策として、最新もしくは最適なテキ

ストが選定されたと考えられる。

例えて言うならば、法制度はハードであり、官人養成はソフトであり、この両者を併せ整備することで、律令制が初めて十全に機能することができたと考えられる。天平宝字三年勅も、天平宝字元年勅同様に格式に継承されており、仲麻呂が作ったハードである養老律令とソフトである官人教育が、その後長らく律令国家の基盤となったことをきちんと評価する必要があるだろう。

遣唐使は唐代の先進的な文化や制度などを日本にもたらしたが、唐文化の移入において遣唐使将来の漢籍・仏典の果たした役割は極めて大きいと思われる。しかし、書籍がもたらされるだけでは、唐文化を摂取したことにはならず、その利用を積極的かつ効果的に行わなければ、宮廷書庫で死蔵されるだけで終わってしまう。死蔵まで行かなくとも、その書籍の価値を知っているごく限られた人間の個人的な利用に留まってしまうだろう。実際、日本に早くもたらされたものであっても、行用・活用されるまで長い年数を要した書籍が少なくない。

天平七年（七三五）に吉備真備が持ち帰った『大衍暦』も、その一つである。その『大衍暦』が施行されたのは、正に仲麻呂政権の天平宝字七年（七六三）であったことは実に象徴的である。『大衍暦』施行のためにはその原理・マニュアルを十分理解・研究する必要があったと思われるが、こうした理解・研究を推進するにあたって、天平宝字元年勅において『大衍暦議』が曆竿生のテキストに指定されたことは大きく関わっているものと考えられる。先進の学術を継続的に、かつ国家として組織的に取り入れるためには、制度化が必要であり、官吏養成機関の公的なテキストに指定することは学術の制度化の最も効果的な方法であったと言えるのではないだろうか。

仲麻呂が新来の漢籍の有効利用を図ったことで、日本古代の学術の内容・水準が南北朝期の段階から隋唐期の段階へと大きく発展する契機を作り出したと評価できるのではないか。また、律令国家を動かす各種の官僚を養成する教育基盤を整備したことは、養老律令の施行など法制整備と併せ、日本の律令制の進展を大いに押し進める役割を果たしたと捉えることが可能なのではないだろうか。（文中の表は、本報告書の最後に付した。）

## （2）塚本剛

従来より『漢書』という正史にはいくつかの問題点が投げかけられており、それを整理すれば、大体以下のようになるといえる。

1つは、『漢書』王莽伝の異常な分量であり、それは、本来最も重要な部分である帝紀のいずれの皇帝の記述よりも大部な記述であるということである。臣下の記述である「伝」の方が長いことは異常であり、ましてや王莽は漢王朝から見れば最初こそ輔政の功臣ではあったが、後には史上初の禪讓という美名の形式を踏んで、事実上漢王朝より帝位を篡奪した叛徒に当たり、その異常性は際だつと言える。

2つめには、儒学の国教化の問題に重大に関係する問題である。所謂、「五經博士」設置の問題についてであるが、一般的には（高校世界史のいかなる教科書でもそうであるが）『漢書』の武帝紀にある、武帝の建元5年に五經博士を置く、という記述をもって前漢の武帝時代に早くも儒教の国教化、もしくは儒学の官学化が成立したとする。そしてその立役者となつたのが董仲舒なる人物であり、『漢書』董仲舒伝には、董仲舒が、武帝に対して3度にわたり対策文を奉り、その建言がいれられて儒教が国教化されていったことが、詳述される。

しかし、いまでも多くの論者が指摘する通り、まず、帝紀の記述には体裁があり、その形式から武帝の建元5年の記載は著しくはずれていることが、問題点としてあげられる。通常は、年のあとに、月日が明記されるはずなのに、それがないなどである。

また、董仲舒については、武帝期という同時期を記録するもう一つの正史である『史記』には独立した伝が立てられておらず、儒林列傳に、言わば抱き合わせにされ、その記述も極めて簡素であり、分量も數十分の一であり、対策文を奉り儒教を国教化したという『漢書』でのハイライト一切確認されず、ただ当時は異端だった災異説を展開し、世に入れられず不遇だったことが記されるのみである。周知の通り、『漢書』は後漢初期に成立し、その記録する内容は同時代ではあり得ず、言わば後世の編纂物である。これに対して司馬遷の『史記』は、司馬遷の死期には諸説あるものの、武帝時代を過ごしたことは間違いなく、よって『史記』の記録するところは同時代であり、言わば同時代記録と言える。そこから武帝時代には、さしたる活躍も見られなかつた董仲舒が、後に災異説が儒教の潮流において主流を占めるにいたり、だんだんとその存在が大きく取り上げられるようになり、前漢末、王莽期、後漢時代に至って、儒教のウェイトが大きくなるに従って、儒教の国教化の立役者として、仮託されるようになったと解釈でき、本来遡っても王莽期、正式には後漢に成立する儒教の国教化が、災異説の創始者である董仲舒が既に武帝期に決定的な役割を果たしたという虚構が、『漢書』編纂時に作られたかもしくはそれまでに徐々に醸成された仮託譚が『漢書』編纂時に整備されたと考えられる。勿論、現状『史記』の武帝紀が散逸したため、『史記』の武帝紀にも五經博士を置いた、という記述はあったはずだという反対意見が東洋哲学を専攻する学者を中心に多いのも事実ではあるが、これらは、現状、存在しない史料を証拠とするものであり、確かに記載してあった可能性も否定できないが、だからといって同時に記載していなかった可能性も否定できないものであり、論理学の初步の観点から言っても、証拠、もしくは反証とするに足らないものである。またかりに『史記』の記載をの有無を暫く置くにしても、『漢書』武帝紀

の不自然な記載は動かしようがないのである。さらに言えば、董仲舒伝の対策文も当時の文書形式から逸脱したことであること、さらにその内容に後世の歴史事実が記載されていることなど（一例を挙げれば、建元5年以降に行われた武帝の西域遠征の成果が対策文に記載されている）からも『漢書』という正史の史料性は極めて慎重に吟味せねばならないものなのである。

ではどうしてこのように疑義が残る状態になっているのか、それこそが問われねばならず、またそれによって史料として使用する際の留意も理解できるはずである。そしてこれらの問題が解決できれば、併せて儒教国教化の問題や、漢堯後説＝漢火徳説についても一定の解決がなされるはずである。

班氏は、親王莽派劉欽、劉向らとともに王氏グループの一員ともいべき立場で、揚雄はじめメンバーは班氏の家を言わばサロンにしていたのでは。

劉欽、揚雄らは独自に『史記』続編も作るが、これらは広く流布した。田中麻紗巳氏、『両漢思想の研究』（研文出版、1986年）によればこれらは王莽政権に積極的に参加した人々の著作であったために王莽賛美の記述が多くあったとする。また、この時期の学者に多く見られるように図識の強い影響下にあった。福井重雅氏によれば劉向、劉欽は図識、災異説、左傳、漢堯後説の4点セット思想の創始者とも言うべき人物であった。

福井重雅氏は『漢代儒教の史的研究』（汲古書院 2005年）の中で、多くの論者が、「当時は正規の史官の職にない者が、勝手に歴史を執筆することは禁止されていた」ことを主な理由に挙げていることに対し、「前漢後期以降においてすら、その地位になくて『史記』を続成しようとした人物は劉向以下、跡を絶たない状態にあった。したがって班固が逮捕投獄されたのは、正式な作史の官職になくて私的に国史を改作したという理由からではない。」とし、図識的な内容を記したからだと推定し、班超のとりなしで明帝がこれを奇として、班固が自由に国史を改作できる自由を得たとしている。

正式な作史の官職になくて私的に国史を改作したという理由からではない、としていることに対しては全面的に賛意を表し、さらに、図識的な内容を記したから、とされる部分についてはもう少し突っ込んで検討してみたい。

確かに、図識的な内容を記されてはいるが、それが直ちに禁忌にふれたのではない。

というのは、小林春樹氏の「後漢時代の蘭台令史について『漢書』研究序説」（東方学 68、一九八四年）、「後漢時代の東觀について『後漢書』研究序説」では、前漢末から蘭台には多数の緯書が収蔵されたがその蘭台における修史事業の基本理念とされたのがであったことが指摘されていることから、漢王朝では王朝の歴史編纂事業で図識を採用しているのである。また、先に触れたように

劉向、劉欽もその思想の強烈支持者にして『史記』続編を作り民間にも広く流布したが、特に問題になっていない。それでは何が問題になったのか。それは、史官にない者が史書を記したからでもなく、単に図識を利用したからだけでもない。まさに「国史改作」が問題になっていると言える。

ここで注目すべきは安居香山氏の「今日現存する緯書の中には王莽に関連するものが見あたらない（劉漢関係緯書の五徳終始説）『緯書の基礎的研究』漢魏文化研究会 1966年」という指摘である。

また、稻葉一郎氏の「班固が国史を改作しているとして密告されるのも、班氏が王莽政権と深い関係にあったことから嫌疑を招いたとみることができる」（『中国史学史の研究』京都大学学術出版会、2006年）という指摘も重要である。

漢王朝では同じく図識の予言によって王朝を成立した新王朝は絶対に認められない立場にあった。つまり図識の王莽的解釈は許されないのである。図識を利用するにしても漢王朝の正式見解に沿っているならば、問題ないが、そうでない場合王朝存立の基盤、正統性を脅かすものとされ、それがまさに国史を改作するに該当すると判断されるのである。

加えて言うならば、図識だけでなく、儒教国家と存立している後漢としては、儒教のあらゆる解釈が国家公認のものでなければ許されなかつたはずである。

例えば左傳が学官にれたれなかったのもその延長線で解釈すべきである。思想の正当性によらず、国家にとって都合の悪い教義は国家として正式に採用することはないはずである。逆に言えばいかに思想的には正当性があろうとも、国家に都合が悪ければ、立てられることはないのであり、それはキリスト教を国教としている国家においていかにゾロアスター教が思想的に正当性があつても採用されることがないのと同じである。よって思想の正当性から論ずるのでは無しに国家理性の観点から論ずるべき問題であると考える。今文である公羊学が立てられている以上、漢王朝は今文である公羊学によってたつ、立脚する国家なのである。実際、識緯、図識の暦法は一貫して公羊学のものが使用されているということはつとに薮内清氏によって指摘されている。薮内清氏の見解によれば、今文である公羊学でなければ、識緯、図識の予言は生きてこないし、それをフル活用して成立した後漢王朝からみても、国家公認の学説は今文である公羊学であり、また識緯、図識の暦法は一貫して公羊学のものであり、その予言の正統性、永遠の孔子王朝の実現が漢王朝によってなされるという教義の構想からしても、むしろ今文である公羊学説でなければ漢堯後説＝漢火徳説は証明できないとするのが妥当なのである。

つまり図識的な内容についても漢王朝が基づく今文である公羊学説による国家公認の解釈があったのであり、この

解釈を改めていると判断されたと考えるべきであろう。

ここで問題となってくるのが、班固の『漢書』編纂の執筆態度なのであるが、左伝を使用しながらも根本となる姿勢、依拠すべき理論・構想は本文である公羊学説に依っていたすべきであろう。だから明帝が見聞するに至ってその誤解が解けたのだが、問題は何故そこまでの嫌疑を受けたかであるが、稻葉氏の言う通り、班氏の王莽政権との深い関わり合いがその最大の理由であろう。確かに班彪親子に限って言えば、早くから漢王朝の復興を望み、王莽政権に対する距離感があるが、班氏となると札付きの王莽新派というレッテルが貼られていたのであろう。

従来、東晋次氏をはじめ、王莽と班氏には姻戚関係は見あたらない、（『王莽』白帝社、2003年）とされてきたが、直接的な姻戚ではないが班禡（班彪の父）は金氏の娘をめとつており、その金氏は王莽の叔母と姻戚関係になるのである。上記の史料を見たとき王氏と金氏の関係は並々ならざるものがあり、王氏から親戚にあたる金氏の婚姻に王莽が懇意にしていた班氏をめあわせるに至って何らかの介入があつと見ても大過ないであろう。言わば班氏は王莽の遠い外戚になったのである。

今回、班氏の系図を作成して、班氏が金日磾の金氏を通じて王莽と親戚関係にあったことを突き止めた。また同じく成帝の私親の外戚に当たる王氏と班氏は親しく通行があつたことなどを考え合わせれば、班固個人はともかく、班氏となると、札付きの王莽シンパと見られていたのではないだろうか。故に班固とその父、班彪はそのくびきから逃れるため、かなり早くから断固として漢王朝復興指示の立場を表したのではないだろうか。それにも関わらず班氏に対するイメージで告発されたのである。であるならば、福井氏の言うとおり、自由に国史を改作したのではなく、むしろ漢王朝の国是と合致した立場だったからこそ採用されたのであり、その路線で正史は編纂され、歴史的事実よりも王朝側からしての理想=こうであるべきだという記載がなされていったものと考えられる。ザインよりもゾーレンで記録されたのが班固の『漢書』であり、漢堯後説=漢火徳説も儒教の国教化もその延長線であろう。最後に王莽伝の異常な分量は恐らく、解釈を避けて残存記録をそのままに編集するという処世術の果てとは考えられないだろうか。

### （3）河内春人

2011年度は、日本律令国家の形成過程における対外関係と学術の流通という点を軸にして主として6・8世紀を中心に研究を進め、2本の論文を公表した。また、研究を進めるための研究史整理についても継続的に取り組み、7・8世紀の日本古代史の専著に対する書評を執筆した。また、近年の歴史学研究のグローバル化に伴い、海外における日本史の研究も活発化している。日本古代史の分

野でも国際交流が必須という課題に鑑み、Charlotte von Verschuer 氏の著書 *Across the Perilous Sea, East Asia Program Cornell University, New York, 2006* を翻訳した。以下、その成果と展望を述べる。

日本古代の学術の交流は、主として中国を中心とした先進文化の受容というかたちをとる。その実相において、儒教の礼的文化や律令法のような法的制度といった中国文明と、世界宗教としての仏教が倭国（倭國）の文明化という点において大きな役割を果たした。

本年度は、仏教が倭国に与えた影響について着手した。それは単に教学的なレベルにとどまるものではなく、政治のあり方にも強く反映しているという見通しのもとに「遣隋使の『致書』国書と仏教」を執筆した。『隋書』倭国伝に記される通り、遣隋使が「日出處天子、書を日没處天子に致す云々」という国書を持参して煬帝から不興を買ったことはよく知られており、従来は「日出處」が「日没處」に優越する、あるいは中国皇帝と倭国王を同列の「天子」と称したことがその原因とされている。これまでの研究はこの国書を中華思想の枠組みで理解することが一般的であったといえる。しかし詳細に検討すると、「日出處」「日没處」は『大智度論』という經典の引用であることが明らかにされており、仏教的観点からの再検討が要請される。そこでさらに注視すると、『大智度論』は6世紀の中国南朝から端を発し北朝・隋にも盛行した仏典であり、さらに高句麗への伝来も確認できる。百濟への流通は史料上に明記するものはないが、百濟の中国仏教への関わりから考えるとやはりその伝来を認めてよいだろう。すなわち、倭国における仏典『大智度論』の受容は、中国から高句麗・百濟を通じて果たされたものと捉えることができる。この国書に用いられている「致書」というフレーズは、当該期の仏教において対等の僧侶間でよく用いられるものである。このように、遣隋使の国書は従来考えられていた以上に仏教的色彩に彩られたものということになる。その執筆者についても当時の倭国において仏典の知識を外交文書に転用できる文筆技術を有する人物として僧侶と推定できるのであり、具体的に該当する人物としては厩戸王子のブレーンとして活動した高句麗僧・慧慈を挙げることができる。以上のように当時の政治文化における仏教の影響力の強さを確認できるのであり、当時の支配制度にも深く食い込んでいたことを明らかにした。

なお、7世紀の仏教が政治体制に大きな影響を与えていたことは、古市晃氏が著書『日本古代王権の支配論理』（塙書房）において特に強調するところであり、本書の書評を通じて古代国家の支配体制における仏教の関わり方について確認した。

また、中国の学術・仏教の列島への流通という観点に立つとき、交通のあり方を具体的に理解する必要がある。そこで当時の倭国内の交通を鑑みると、それは地域の共同体に強く規制されており共同体ごとにそれぞれ外部からの通行者を、同行者を帶同させるかたちで管理してい

たという事実に着目して、対外交流において同様の観点から検討を加え「古代国際交通における送使」を公表した。古代東アジア諸国の外交では、外交使節に送使という使者が付随するケースが頻繁に確認できる。従来はこれを外交使節の船舶が破損した際に相手国に送り届けるためと理解されてきたが、それでは船舶の破損がないにもかかわらず送使が付されるなど解釈できないケースが散見する。そこで当時の交通の共同体規制を念頭に置くと、共同体と同様に国家においても通行使節に対して同行者を帶同させたのが送使であると理解することによってそれまで例外とせざるを得なかったケースについても説明が可能になる。このように明らかにしたことを学術の流通という観点に適用すると、当時の未成熟な交通技術では目的地（本研究の場合は中国王朝）への直接的な通交は不可能であり、それゆえ朝鮮半島を経由せざるを得ない。たとえば遣隋使においてもその実際の往来には百濟が関与しており、学術の受容はかかる当時の交通規制に強く規定されていたことが指摘できるのである。

また、特に学術と支配制度の関係について特にその成立に重点をおいて律令国家形成期を中心に研究を進めてきたが、それを日本史全体の中に適切に位置づけるためには長期的な見通しを立てる必要がある。日本における研究は個別細分化する傾向を強く持っており、そのため長期的な視点から全体を把握するということが困難になっている。こうした難点を克服し、なおかつ研究の国際化に対応するために『モノが語る日本対外交歴史』を訳出した。原著は7世紀から16世紀の日本と東アジアの交流を、物流という観点から長期的なスパンで見渡したものであり、日本における日本史研究とは異なる視点は研究の進展に大きく資するものである。本書ではモノというかたちをとるが、学術が国際的に流通するにあたっては書籍などの具体的なかたちをとるものであり、こうした流通の仕組みを解明することによって古代日本における外国の文物受容のありかたや時代的な特色を明確にすることができた。すなわち、7・8世紀は外交を通じた物流という傾向が汲み取れる。特に7世紀まではモノのやり取りは朝鮮半島からの流入が大きな位置を占めており、8世紀になると遣唐使による中国からの直接的な受容が注目できるようになる。9世紀になると海域商人の活動が活発化し、中国の高級品が「唐物」と称されて日本において貴ばれるようになった。平安時代は外交以外の方法による物流が徐々に比重を大きくするようになつたといえる。11・12世紀になると日本からのモノの流れも目立つようになるが、手工業や経済の発展に対応している。

翻訳の成果を承けて、律令国家形成期の学術と支配体制という立場においては7・8世紀の外交を通じた学術の受容という観点が重視されることになる。そのため当該期の外交の仕組みを理解する必要が認められるのであり、中野高行氏の著書『日本古代の外交制度史』を書評することでその課題整理を図った。

以上のように、本年度は律令国家形成期の学術と支配制度の関係について、儒教・礼学のみならず仏教も大きな役割を果たしていることを確認し、かつ学術の受容の前提となる外交のシステムについて具体的に明らかにすることことができた。

前年度及び今年度の成果をふまえて、次年度はそれを総合的に総括する研究を進める予定である。

#### 4. 2012年度の研究計画

本年度も引き続き、研究責任者・共同研究者の個別的な研究をベースに、研究協力者との研究会により研究の総合化を図り、本研究の目的を果たしたいと考える。

研究会は本年度は夏休み前までに2回開催し、その後これまでの研究発表の成果をそれぞれ論文化し、今年度末までに単行本として発行する計画である。

本年度第1回目の研究会は、6月9日（土）に本学で開催する予定で、会田大輔氏『帝王略論』の編纂について（仮）、柿沼陽平氏『漢書』の読書共同体と日本』という2本の研究発表と討議を行うことになっている。

また、本研究の成果を一般社会に還元するために、市民講座において、本研究の成果を分かりやすく講演する企画を立て、下記の要領で、朝日カルチャーセンター新宿において実施する予定である。

##### （1）公開講座

##### **対外貿易から見た日本古代史**

###### 〔講座の概要〕

日本（倭国）は、古くから海外との貿易を通じて発展してきました。本講座では、日本古代における貿易の果たした役割、古代の社会・文化や政治・経済などへの貿易の影響などについて、世界史的視点を取り入れながら具体的に論じることにしたいと思います。中国への朝貢が行われた奈良時代、民間貿易が展開した平安時代前・中期、平清盛が日宋貿易を行つた院政期と3つの時期に分けて、古代の貿易の歴史を辿ります。

###### 〔日程・個別テーマ・講師〕

① 4月24日 榎本淳一

「朝貢と貿易」—朝貢と貿易をキーワードに、古代の对外関係の実態に迫る

② 5月22日 河内春人

「東アジア交易圏の成立」—9世紀に成立する東アジア交易圏が、日本の对外関係をどのように変貌させたかを考える

③ 6月26日 塚本剛

「日宋貿易と宋錢」—平安時代末の日宋貿易の実態と、それによりもたらされた宋錢の影響について考える

(2) 公開講座  
書物の受容からみる日本古代史

## 〔講座の概要〕

現代のわたしたちは書籍を書店で購入しますが、古代の人びとはどのようにして書物を手に入れていたのでしょうか。そして、書物を読むことで獲得した知識を、政治・社会・宗教などの多様な場でどのように活用したのでしょうか。中国から日本への流入という観点を基本にしつつ、日本古代の社会で書物が果たした役割について、さまざまな角度から考えます。

## 〔日程・個別テーマ・講師〕

① 7月10日 榎本淳一

「書物から見た遣唐使」—遣唐使はいかなる書物をもたらし、いかなる書物をもたらしえなかつたのかを考える

② 7月24日 吉永匡史

「書物・経巻の書写と伝播」—書物や経巻がどのようにして書き写され、地方社会へ伝播していくのかを考える

③ 8月28日 中野高行

「古代の儒学教典・教科書」—奈良・平安時代の教育機関で使われた教科書や儒学の教典について考える

④ 9月11日 会田大輔

「日本における帝王学漢籍の受容」—中国（唐代）で編纂された帝王学漢籍が日本に与えた影響を考える

⑤ 9月25日 柿沼陽平

「『漢書』の読者共同体と日本」—歴代多くの学者に読まれてきた、『漢書』のもつ歴史的意義と日本史に与えた影響を考える

## 【付表】（榎本研究概要）

表2：令制における経書テキスト

学令指定の経書	学令指定の注	『日本国見在書目録』の対応書
1. 『周易』	鄭玄 王弼	『周易』十卷（鄭玄注） 『周易』十卷（王弼注）
2. 『尚書』	孔安国 鄭玄	『古文尚書』十三卷（孔安国注）
3. 『周礼』	鄭玄	『尚書大伝』（鄭玄注或本伏生注）
4. 『儀礼』	鄭玄	

5. 『礼記』	鄭玄	『周官礼』十二卷（鄭玄注）
6. 『毛詩』	鄭玄	『儀礼』十七卷（鄭玄注）
7. 『春秋左氏伝』	服虔 杜預	『礼記』二十卷（戴聖撰・鄭玄注）
8. 『孝經』	孔安国 鄭玄	『毛詩』二十卷（毛萐伝・鄭氏注）
9. 『論語』	鄭玄 何晏	『春秋左氏伝解説』三十卷（服虔注） 『春秋左氏伝集解』三十卷（杜預注） 『孝經』一卷（孔安国注） 『孝經』一卷（鄭玄注） 『論語』十卷（鄭玄注） 『論語』十卷（何晏集解）

表3：令制の算経テキストと唐の算経十書

大宝令（養老令）の算経			「今選」算経	唐の算経十書		
書名	卷数	撰・注者	卷数	書名	卷数	撰・注者
『孫子』	1卷	(北周) 甄鸞*1	3卷	『孫子算経』	3卷	(唐) 李淳風
『五曹』	1卷	(北周) 甄鸞*1	5卷	『五曹算経』	5卷*2	(唐) 李淳風
『九章』	9卷	(後漢) 徐岳 (南宋・著) 祖冲之		『九章算術』	9卷	(唐) 李淳風
『海島』	1卷	(後漢) 徐岳 (南宋・著) 祖冲之		『海島算経』	1卷	(唐) 李淳風
『六章』	6卷	高氏?				
『綱術』	5卷	相氏?				
『三閼重』	3卷	高氏?				
『差』	1卷	(後漢) 趙君卿	2卷	『周髀算経』	2卷	(唐) 李淳風
『周髀』		or (北周) 甄鸞				
『九司』		?		『張丘建算経』	3卷	(唐) 李淳風
					3卷*3	(李淳風*4)
				『夏侯陽算経』	2卷	(唐) 李淳風
					5卷	(唐) 李淳風
				『五經算術』	4卷	(唐) 王孝通
				『綱術』		(唐) 李淳風
				『緝古算経』		

表4：「医疾令義解」に見える医生・針生のテキスト

表4：「医疾令義解」に見える医生・針生のテキスト

	テキスト名	巻数	撰者	備考
医生	『甲乙』（『黄帝甲乙經』）	12巻	西晋・皇甫謐	『隋』=10巻、『新』・『目録』=12巻（梁=12巻）
	『脈經』	2巻	不詳	『隋』・『新』=10巻（西晋・王叔和撰） なお、『隋』には撰者不明の2巻本、『新』には張権『脈經』1巻も著録す
	『本草』（『新修本草』）	20巻	唐・蘇敬	『目録』は、王叔和本を12巻と著録す
	『小品方』	12巻	南朝宋・陳延之	『旧』・『新』=21巻、『目録』=20巻（但し、孔志約撰とする）
	『集驗方』	12巻	北周・姚僧垣？	『隋』・『旧』・『新』・『目録』=12巻 姚本については、『隋』・『旧』・『新』=10巻 なお、『隋』に撰者不明の12巻本有り 『目録』は、姚本を12巻と著録す
針生	『素問』（『黄帝素問』）	3巻	齊~梁・全元起	『隋』・『旧』=8巻、『新』=9巻 なお、『目録』は16巻とする →唐・楊上善『黄帝內經太素』30巻
	『黃帝針經』	3巻	不詳	『隋』=9巻、『旧』・『新』=10巻、 『目録』=9巻
	『明堂』（『黄帝明堂經』）	3巻	唐・楊玄操？	撰者不明本と楊玄操撰本共に『旧』・『新』=3巻。『目録』には唐・楊上善『黃帝內經明堂』（13巻か）と楊玄操『明堂音義』2巻を著録
	『脈決』（『脈經決』）	2巻	徐氏	『隋』=2巻、『旧』・『新』=3巻、『目録』に著録無し
	『流注』（『黄帝流注脈經』）	1巻	不詳	『隋』・『新』=1巻、『目録』に著録無し
	『偃側図』	1巻	不詳	『隋』・『旧』・『新』に、『黄帝十二經明堂偃側人図』12巻あり（『隋』は『隋』・『旧』・『新』に著録無し）
	『赤鳥神針經』	1巻	三国吳？・張子存	「側」無し、梁に『偃側図』8巻本と2巻本あり)、『目録』に著録無し 『隋』・『旧』・『新』=1巻、『目録』に著録無し

## 参考文献

- (1) 榎本淳一『唐王朝と古代日本』吉川弘文館, (2008) pp. 1-286.
- (2) ENOMOTO Jun'ichi: Japan's Ritsuryo System in the "East Asian World", ACTA ASIATICA, No. 99, (2010) pp. 1-17.
- (3) 大津透編『日唐律令比較研究の新段階』山川出版社, (2008) pp. 1-275.



## 科学衛星搭載用放射線検出器の開発

工学院大学 基礎・教養教育部門 幸村孝由

立教大学 理学部物理学科 村上弘志

Development of the radiation detector on board science satellite

Takayoshi Kohmura , Kogakuin University, Department of Architecture

Hiroshi Murakami, Rikkyo University, Department of Physics

**ABSTRACT :** We have developed the radiation detector on board science satellite to observe X-ray from universe. In this the first year for this study, we have developed both X-ray CCD for ASTRO-H mission and GEM for GEMS and XACT mission.

### 1. はじめに

電波、可視光、X線、ガンマ線といった電磁波や、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、ニュートリノといった粒子線を検出するための放射線・粒子線用検出器の検出原理は、様々な種類のものに区分けできる。例えば、電磁波の中でもエネルギーが高いX線、ガンマ線の検出原理は光電吸収である。光電吸収を検出原理として利用している検出器の場合、検出器中の物質の中で生じる光電子を取得することによって、放射線・粒子線を検出することになる。また、検出器の区分の1つに、電磁波や粒子線と相互作用を起こす物質が、固体のものを固体(型)検出器、気体のものをガス型検出器などと呼ぶ。さらに、ニュートリノの検出には、固体や気体ではなく液体の水を用いているように、放射線・粒子線を検出するには、あらゆる相の物質を用いている。

固体検出器で使用する物質の代表例が、シリコンやカドミウムといった半導体であり、これらを半導体検出器と呼ぶ。半導体中の空乏層にX線が入射し光電吸収が起こると、価電子帯の電子がエネルギーを獲得しバンドギャップを超えて伝導帯に達することで電子-正孔対が形成される。入射X線エネルギーに比例した個数だけ電子-正孔対が生成されるため、X線エネルギー測定が可能である。またガス型放射線検出器に比べて

成される電子の個数が多いので、相対的な揺らぎが小さく抑えられエネルギー分解能は格段に良くなる。この半導体検出器をarray状に分割し、位置分解能を持たせた検出器がCCD (Charge Coupled Device) である。CCDは、可視光からX線にわたる広いエネルギー帯域の電磁波に感度があり、ビデオカメラや胃カメラなどに利用されるほか、宇宙望遠鏡の焦点面カメラとしても利用されている。特にX線用のCCDは、X線入射により空乏層内で生じた電子・正孔対を内部に印加した電場で電極に集め、順次転送して電子(あるいは正孔)の情報を読み出すことで、X線の入射位置とエネルギーの両方の情報を、時間情報とを得ることができる。我々が本研究において開発するX線CCDは、2014年に種子島宇宙センターからHIIAで打ち上げ予定の日本の科学衛星「Astro-H」に搭載することを目指している。「Astro-H」は、宇宙X線 $\gamma$ 線を観測し、ブラックホールの周辺や超新星爆発など高エネルギーの現象に満ちた極限宇宙の探査を通して、宇宙の進化を探ることを目的としており、4種類の放射線検出器を搭載する。X線CCDはそのうちの1台であり、主に広い視野でX線の撮像ならびに分光観測を行う。

一方、ガス型検出器は、金属製の容器中に充填したArなどの不活性ガスに入射したX線と光電吸収を起こした際に生ずる電子、イオン対の量を計測する放射線検出器である。ガス型検出器は、吸収体にガスを使っているため軽量かつ大面積化が容易で、また安定した動作が保証されるため初期のX線天文衛星から現在軌道上の国

際宇宙ステーションISSのX線全天モニターMAXIに搭載しているGSC至るまでよく用いられている。ガス型検出器は、高い増幅率を持つ一方で、ガス増幅率の不安定性から固体検出器に比べエネルギー分解能は悪く、それ自身では位置分解能を持たなかった。しかし、近年の微細加工技術の進歩に伴い、ガス型検出器も固体検出器のように位置分解能を持つように改良が進み、その1つが本研究で研究開発を行うGEM(Gas Electron Multiplier)である。GEMは、両面を数 $\mu\text{m}$ 厚の金属で被覆した50 $\mu\text{m}$ 厚の絶縁体フォイルに直径100 $\mu\text{m}$ 程度、ピッチが100 $\mu\text{m}$ 程度の孔を2次元に配置した構造を持つ。両面の金属層が電極として働き、この電極間に電圧を印加するとGEMの穴の中に強い電場が生じ、ガス中で生じた光電子がこの孔を通過すると、強い電場により電子なだれを起こし、これを2次元に配置した読み出しパッドで読み出すことで、位置分解能を持つことができる。また、10000万倍を超える増幅率をもち、大型化が容易で、高い解像度の2次元イメージングが可能なことから、医療機器、宇宙観測、物質の構造解析など、様々な分野への応用が期待されている。しかし、放射線の検出は検出器内に満たされたガスで行われるため、エネルギーの高い放射線に対して感度が低い。そこで本研究では、高いエネルギーのX線にも感度を持つ新しいタイプのGEMの開発研究を進める。

また、GEMは、2012年に打ち上げる米国の「XACT」に搭載し、また2014年に打ち上げる米国の科学衛星「GEMS」への搭載も決まっている。本研究では、製造パラメータを変えたGEMSの、X線に対するエネルギー分解能、ゲイン、ゲインの長期安定性などの基本性能を調べ、より高性能のGEMの開発を行う。またXACTやGEMSの計画に参画し、GEMによるX線偏光観測を行う。

本研究では、主として宇宙観測利用を目的とした、半導体検出器の1つであるX線CCDと、MPGDの一種であるガス電子増幅器(GEM)の研究開発を行う。研究の2年目である2011年度は、表面処理を改良した新型のX線CCDの研究開発と、開発をスタートしたGEMの初期動作試験の結果について報告する。

## 2. X線CCDの研究開発

X線CCD開発の主目的は、宇宙X線観測用CCD(以下X線CCD)の宇宙紫外線の遮断方法を確立するために、EUV遮断フィルムを直接CCD素子にコートしたX線CCDの研究開発を行うことである。X線CCDは、X線以外の電磁波(可視光、紫外線など)にも感度がある。特に、表面照射型CCD(FI-CCD)に比べ、1keV以下の低いエネルギー帯域におけるX線の検出感度が格段に優れている裏面照射型CCD(BI-CCD)は、紫外線の検出効率も格段に高い。そのため、BI-CCDを使って宇宙空間で天体からのX線を測定する時は、主に地球大

気が放射するEUV(Heからの20eVや41eVの紫外線)を遮断する必要がある。X線天文衛星「すばる」と同等の、X線望遠鏡のデザイン(焦点距離、反射率など)、サーマルシールドの素材と膜厚、CCDのサイズを想定すると、何らかの方法でBI-CCDに入射する紫外線透過率を1%程度に抑える必要がある。従来の紫外線遮断方法は、X線CCDの前面に、厚みが2600Å程度の薄膜(OBF:Optical Blocking Filter;アルミニウムとポリイミドの2層構造)を装備し、紫外線を遮断していた。しかし、OBFは薄膜であるため、製造も難しく、また地上での取り扱いも破損の危険性がつきまととい難しかった。そこで、我々は、本研究において、OBFに替わる新技術として、アルミニウムとポリイミドからなるEUV遮断フィルム(OBL:Optical Blocking Layer)を、直接BI-CCDの表面に最適の厚さでコートする方法を確立する。

### 2.1 研究成果

2010年度は、OBLをコーティングしたX線CCDを開発し、OBLの可視光ならびに紫外線の遮光性能の評価を行った。また、コーティングするOBLの厚みの制御が可能かどうかを評価するために、OBLのX線透過率を測定し、OBLの厚みを求めることができた。X線の透過率から求めたOBLの厚みは、設計値と同じであり、コーティングするOBLの厚みを制御できることが分かった。ただし、可視光透過率に関しては、予想したよりも透過率が高いことがわかり、可視光遮光用のアルミニウムのコーティング方法について課題が残った。

そこで、今年度は、アルミニウム単体のコーティング方法を確立することに注力した。また、OBLをコーティングしたX線CCDのX線計測に関する性能評価を行った。

### 2.2 アルミニウムのコーティング方法の確立

透明なガラスサンプルに、様々なコーティング方法でアルミニウムをコーティングし、そのガラスサンプルの可視光透過率を評価した。1000Åのアルミニウムで予想値である10<sup>-5</sup>の可視光透過率を得られるコーティング方法を採用した。

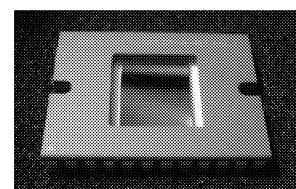


Fig. 1 OBLをコートしたBI-CCD。全画素数320×512画素、有効画素数336×256画素、1画素サイズ24 $\mu\text{m}$ ×24 $\mu\text{m}$ 。素子の全面を厚さ1000Åのアルミニウム(A1)でコーティングしている。

Fig1に示すように、 $1000\text{ \AA}$ のアルミニウムをコーティングした BI-CCD を試作し、可視光透過率の評価を行った。結果を Fig2 に示す。2010 年度に試作したものに比べ、同じ  $1000\text{ \AA}$ のアルミニウムで  $10^{-5}$ の可視光透過率を達成していることが分かる。

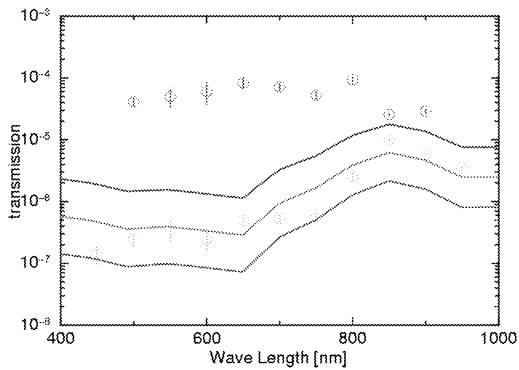


Fig.2 Al 単層の OBL をコートした BI-CCD の可視光透過率。横軸：波長、縦軸：可視光透過率。○と□は、Al のコーティング方法が異なり、○が 2010 年度のデータ、□が 2011 年度のデータになる。実線は、可視光透過率が高いものから順に、アルミニウムの厚みが  $900, 1000, 1100\text{ \AA}$  の可視光透過率の予想値を表す。2011 年度の測定値 (□) は、アルミニウムの厚み  $1000\text{ \AA}$  の予想値とよく一致していることが分かる。

## 2. 3 OBL をコーティングした BI-CCD の X 線に対するレスポンスの測定

OBL をコーティングした BI-CCD に X 線を照射し、X 線に対する性能評価を行った。評価実験内容は、次の①、②の通りである。①工学院大学において構築した X 線 CCD の性能評価システムを用いて、放射性同位体  $^{55}\text{Fe}$  から放射する  $5.9\text{ keV}$  の X 線を BI-CCD へ照射し、エネルギー分解能、電荷転送非効率 CTI (Charge Transfer inefficiency)，暗電流などの評価を行った。②茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光科学研究施設 (PF) のビームライン BL-11A において、 $0.2\text{--}2.0\text{ keV}$  の帯域の X 線を BI-CCD に照射して、エネルギー分解能、エネルギー線形性などの評価を行った。

### ① $5.9\text{ keV}$ の X 線に対するレスポンス

OBL をコーティングした BI-CCD と、していない BI-CCD との性能を比較した結果を Table1 に示す。

読み出しノイズは OBL の有無でそれぞれ  $5.62\pm0.06[\text{e}^-]$ ,  $6.08\pm0.07[\text{e}^-]$  であった。参考として OBL をコートした BI-CCD で取得した X 線のイメージと、X 線のスペクトルを Fig3, Fig4 に示す。

OBL の有無	エネルギー分解能[eV]	暗電流 [e-/s/pixel]	CTI/[pixel] $\times 10^{-6}$
有	$147.4\pm0.5$	$0.06\pm0.03$	$2.9\pm3.0$
無	$147.7\pm0.6$	$0.06\pm0.02$	$9.5\pm9.0$

Table. 1 OBL コーティングの有無による性能の比較。OBL をコーティングすることによる性能の劣化がないことがわかる。

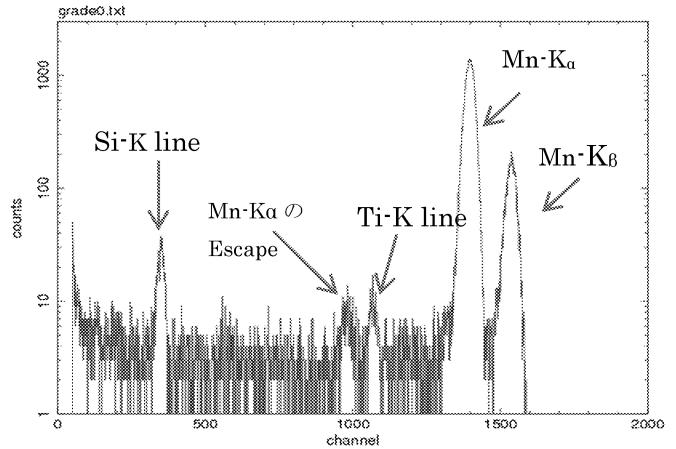


Fig.3 OBL コーティングした BI-CCD のエネルギースペクトル。 $^{55}\text{Fe}$  からの Mn-K $\alpha$ , K $\beta$  が分光できていることが分かる。エネルギー分解能など詳細は、表 1 に示す。横軸：入射 X 線のエネルギー (1ch が  $4.2\text{ eV}$  に相当する)、縦軸：BI-CCD で検出した X 線光子のカウント数 (露光時間は～5 時間程度である)。

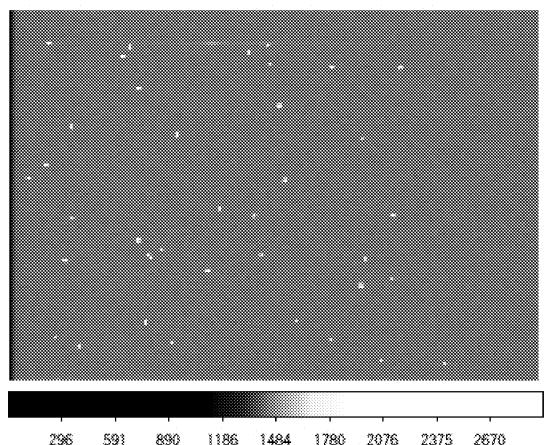


Fig.4 OBL コーティングした BI-CCD の X 線画像。点で表示した画素に X 線光子が入射したことになる。イメージのサイズは、縦×横が  $6\text{mm} \times 8\text{mm}$  に相当する。

### ② $0.2\text{--}2.0\text{ keV}$ の X 線に対するレスポンス

今年度は、CCD 素子のシリコンウエハの表面処理の異なる 2 種類の BI-CCD を製作した。KEK-PF のビームライン BL-11A において、製作した 2 素子に対し、 $0.2\text{--}2.0\text{ keV}$  の単色の軟 X 線を照射し、BI-CCD のレスポン

スを測定した。0.5keV の X 線を照射した際に取得したエネルギースペクトルを Fig.5 に示す。

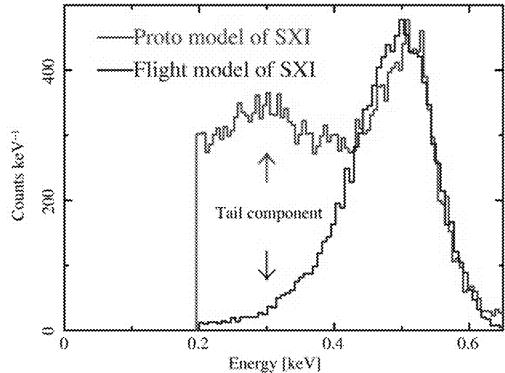


Fig.5 0.5keV の単色の X 線を照射した際に得られた BI-CCD のレスポンス。横軸 : BI-CCD に照射した X 線のエネルギー[keV]。縦軸 : BI-CCD で検出した X 線光子のカウント数。0.5keV の X 線に対するレスポンスは、0.5keV 付近の最もカウント数が高い Main Peak 部と、0.4keV 以下の Tail component 部からなることが分かる。2 つの BI-CCD で Tail component が低い素子を AstroH の SXI のライト候補素子とした。

0.5keV も含め、0.25-2.0keV の帯域の、11 種類の異なるエネルギーの X 線を照射した際に取得したエネルギースペクトルを Fig.6 に示す。

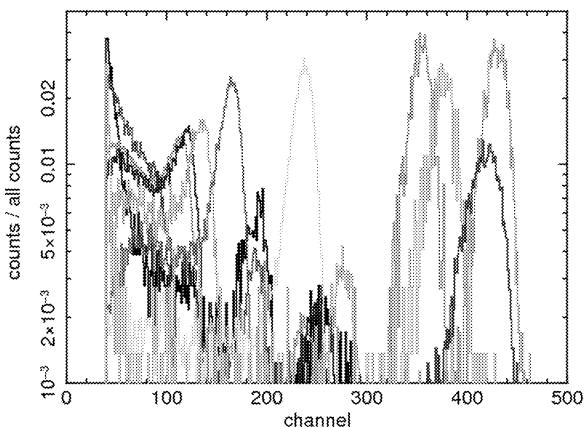


Fig.6 0.25-2.0keV の軟 X 線帯域の X 線を照射した際に得られた BI-CCD のレスポンス。横軸 : BI-CCD に照射した X 線のエネルギー[ch] (1ch が  $\sim 4.7\text{eV}$  に相当する)。縦軸 : BI-CCD で検出した X 線光子のカウント数。エネルギーが高くなるほど、相対的に Main peak に比べて Tail component の割合が少なくなる傾向である。

Fig.6 の結果から得た、照射 X 線のエネルギーに対する CCD の出力 (波高) 値の関係 (エネルギー線形性) を Fig.7 に示す。Fig.7 より、製作した BI-CCD は、入射 X 線のエネルギーが最大でも 19eV 程度のズレで決定できることが分かる。

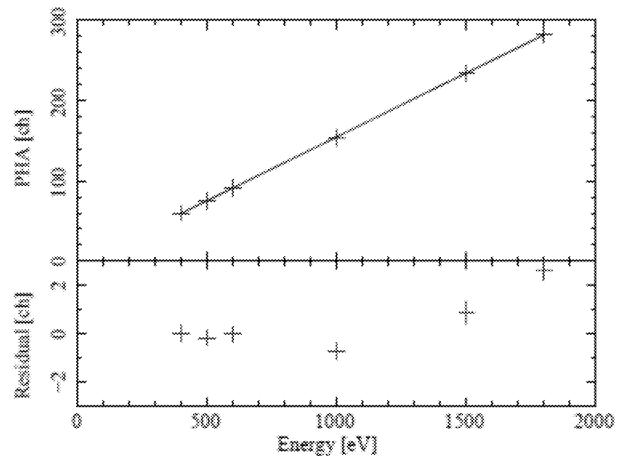


Fig.7 BI-CCD のエネルギー線形性。上・下面パネルともに横軸 : BI-CCD に照射した X 線のエネルギー[eV]。縦軸 : BI-CCD から得られた出力値[ch] (上面パネル)。照射 X 線のエネルギーと BI-CCD の出力値の関係を、直線近似したときの、近似直線と測定データのズレ[ch]。

### 3. GEM の初期動作試験

50keV 以上の高エネルギーの X 線・ $\gamma$  線にも感度をもつ GEM の開発を目的として、本年度は、表面に Au をコーティングした GEM (以降 Au-GEM) の動作試験を行った。動作試験では、Au-GEM に対し、放射性同位体である  $^{55}\text{Fe}$  からの X 線を照射した。本研究に使用した Au-GEM を Fig.8 に示す。

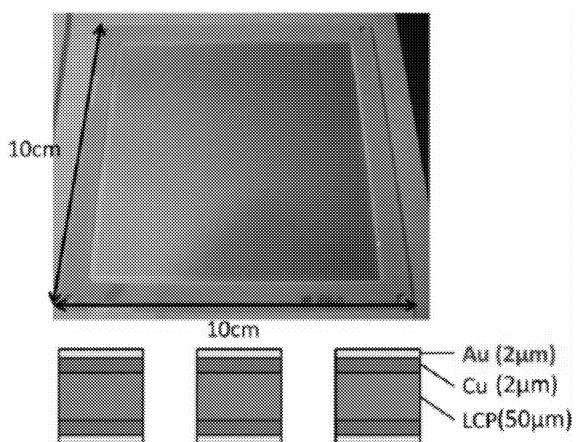


Fig.8 上 : Au をコーティングした GEM の写真。面積は 10cm 四角。厚みは  $58\mu\text{m}$ 。下 : 断面図。厚さ  $50\mu\text{m}$  の LCP を、厚みがともに  $2\mu\text{m}$  の Cu と Au で挟み込んだ構造である。

#### 3. 1 実験システム

本研究用に工学院大学で構築した実験システムを Fig.8 に示す。

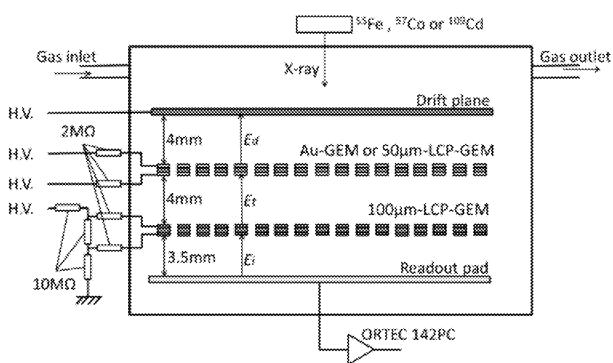


Fig.9 ステンレス製の容器の上蓋に、アルミフォイル製の放射線を導入する窓を設置し、容器内には上から順に、Al フォイルの Drift Plane, Au-GEM, GEM, 読み出しパッドの順で設置する。Drift Plane には最大で 600V 程度の電圧を印加する。Drift Plane, Au-GEM, GEM の間の電場は、それぞれ 0.4, 0.8, 1.5kV/cm である。また、本実験では P10 ガスを使用した。

### 3. 2 $^{55}\text{Fe}$ 照射試験

Au-GEM に、放射性同位体  $^{55}\text{Fe}$  からの X 線を照射した結果を Fig.10 に示す。また、比較のために、Au をコーティングしていない GEM に同様の実験を行った結果も示す。Fig.10 に示すように、Au-GEM でも、 $^{55}\text{Fe}$  からの 5.9keV の X 線を検出し、Au の有無による GEM のエネルギー分解能に有意な差がない。

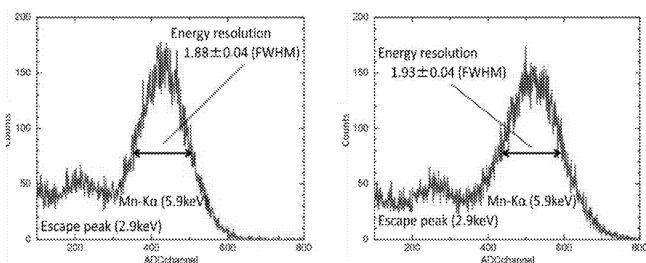


Fig.10 Au-GEM (右図) と Au をコーティングしていない GEM (左図) を用いて取得した 5.9keV の X 線に対するエネルギースペクトル。エネルギー分解能は、それぞれ  $1.93 \pm 0.04\text{keV}$ ,  $1.88 \pm 0.04\text{keV}$  である。

### 4. まとめ

本年度、1000Å の単層のアルミニウムをコーティングし、可視光透過率が期待通りの  $10^{-5}$  に達し、我々のコーティング方法によって、十分な可視光の遮光性能を得られることが分かった。また、 $^{55}\text{Fe}$  からの X 線を照射した実験では、OBL をコーティングしたことによる性能の劣化がないことを確認した。また、軟 X 線のレスポンスも Tail component を減らすことができ、AstroH 衛星に搭載する X 線 CCD に採用することに決定した。

GEM については、我々が構築した実験システムを用いて、Au をコーティングした GEM の動作試験を行い、 $^{55}\text{Fe}$  を検出することを確認した。

### 4. 謝辞

本研究の遂行にあたり、大阪大学の常深博教授、林田清准教授、立教大学の北本教授には多くの御助言、御支援を賜りました。KEK-PF のビームライン BL-11A, 20A の責任者である伊藤健二教授、北島義典助教には多くの御助言を頂きました。工学院大学の池田翔馬氏、金子健太氏（機械工学専攻博士前期課程 2 年）、立教大学の清水裕貴氏、吉田佑輔氏（物理学専攻博士前期課程 1 年）、京都大学の内田 裕之氏（日本学術振興会特別研究員）、上田周太朗氏（宇宙地球科学専攻博士後期課程 1 年）には研究の協力を頂いた。ここにお礼申し上げます。

## 研究成績

### ① 発表論文

- (1) Ishida, M., Tsujimoto, M., Kohmura, T., et al “Cross Spectral Calibration of Suzaku, XMM-Newton, and Chandra with PKS 2155-304 as an Activity of IACHEC”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 63, 657–668 (2011)
- (2) Hakayashida, K., et al., “Development of the soft x-ray imager (SXI) for ASTRO-H”, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XVII. Edited by Tsakalakos, Loucas. Proceedings of the SPIE, Vol 8145, 814505-814505-9 (2011)
- (3) Ueda, S., et al, “Development of the x-ray CCD for SXI on board ASTRO-H”, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XVII. Edited by Tsakalakos, Loucas. Proceedings of the SPIE, Vol 8145, pp. 814504-814504-9 (2011)
- (4) Kawai, K., Kohmura, T., et al, “Optical, UV and soft x-ray transmission of optical blocking layer for the x-ray CCD”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conference Proceedings, 1427, 255-256 (2012)
- (5) Ikeda, S., Kohmura, T., et al, “Soft X-ray response of the x-ray CCD camera directly coated with optical blocking layer”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conference Proceedings, 1427, 253-254 (2012)
- (6) Kohmura, T., Kawai, K., et al, “The calibration status of P-sum mode for XIS on

- borad Suzaku”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conference Proceedings, 1427, 247-248 (2012)
- (7) Kaneko, K and Kohmura, T., “Developments of gas electron multiplier for use hard X-ray detector”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. AIP Conference Proceedings, 1427, 257-258 (2012)

## ② 学会発表

- (1) Kohmura, T., Kawai, K., et al. “The calibration status of P-sum mode for XIS on borad Suzaku”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, California, USA, 7月20日
- (2) S. Ikeda, T. Kohmura, K. Kawai, K. Kaneko, T. Watanabe. et al “Soft X-ray response of the X-ray CCD camera directly coated with Optical Blocking Layer”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, California, USA, 7月 20 日
- (3) K. Kawai, T. Kohmura, S. Ikeda, K. Kaneko, T. Watanabe. et al. “Optical, UV and soft X-ray transmission of optical blocking layer for the X-ray CCD”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, California, USA, 7月 20 日
- (4) K. Kaneko., T. Kohmura., “Developments of Gas Electron Multiplier for use hard X-ray detector”, SUZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, California, USA, 7月 20 日
- (5) M. Ishida, M. Tsujimoto(ISAS/JAXA), T. Kohmura(Kogakuin University) et al . “Cross Spectral Calibration of Suzaku, Chandra and XMM-Newton with PKS2155-304”, SZAKU 2011: Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond. Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC National Accelerator Laboratory, California, USA, 7月 20 日
- (6) K. Hayashida, H. Tsunemi, T.G.Tsuru, T. Dotani, H. Nakajima, N. Anabuki, M. Ozaki, C. Natsukari, J.S.Hiraga, H. Tomida, T. Kohmura. et al, “Development of the soft x-ray imager (SXI) for ASTRO-H”, SPIE Optics+ Photonics 2011, SanDiego Convention Center, USA, 8月 21 日
- (7) S. Ueda, K. Hayashida, H. Nakajima, N. Anabuki, H. Uchida, H. Tsunemi, M. Fujikawa, H. Mori, T. Kohmura, et al. “Development of the x-ray CCD for SXI on board ASTRO-H”, SPIE Optics+ Photonics 2011, SanDiego Convention Center, USA, 8月 21 日
- (7) K. Kaneko., T.Kohmura., “Developments of X-ray detector with a Gas Electron Multiplier”, 2nd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, Seaside Hotel MAIKO VILLA Kobe, Kobe, Japan, 8月 29 日
- (8) 玉川徹, 山田真也, 岩橋孝典, 阿佐美ふみ, 吉川瑛文, 武内陽子 (理化学研究所), 早藤麻美, Jean Swank , Keith Jahoda , Keith Gendreau(NASA/GSFC), 岩切涉(埼玉大学), 幸村孝由, 金子健太(工学院大学), 田原謙(名古屋大学), 高橋忠幸 (ISAS/JAXA), 牧島一夫(東京大学), “X線偏光観測衛星 GEMS と偏光観測プロジェクト実験 XACT の現状 II”, 日本物理学会, 2011 年秋季大会, 弘前大学, 9月 17 日
- (9) 林田清, 常深博, 中嶋大, 穴吹直久(大阪大学), 鶴剛, 信川正順, 内田裕之 (京都大学), 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 夏苅権, 富田洋 (ISAS/JAXA), 幸村孝由 (工学院大学), 村上弘志 (立教大学), 平賀純子 (東京大学), 森浩二, 廿日出勇, 山内誠 (宮崎大学), 馬場彩 (青山学院大学), John Doty(Nosqi Aerospace) , “X線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 II”, 日本物理学会, 2011 年秋季大会, 弘前大学, 9月 18 日
- (10) 上田周太朗, 林田清, 中嶋大, 森秀樹, 藤川真里, 小松聖児, 穴吹直久, 常深博 (大阪大学), 幸村孝由 (工学院大学), 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 夏苅権, 藤永貴久, 松田桂子 (ISAS/JAXA), 鶴剛 (京都大学), “ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ (SXI) 用素子の性能評価 (III) : 低エネルギー応答の改善とフライトイモデル CCD の開発”, 日本物理学会, 2011 年秋季大会, 弘前大学, 9月 18 日
- (11) 幸村孝由, 河合耕平, 池田翔馬, 金子健太, 渡辺辰雄 (工学院大学), 北本俊二, 村上弘志, 八木橋伸佳, 水野瑛己, 轟章太郎, 坂田和也 (立教大学), 常深博, 林田清, 中嶋大, 穴吹直久, 上田周太朗 (大阪大学), 鶴剛 (京都大学), 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 富田洋, 藤永貴久 (ISAS/JAXA), 森浩二 (宮崎大学), 平賀純子 (東京大学), 馬場彩 (青山学院大学), “ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の可視光遮断用フィルムの開発”, 日本物理学会, 2011 年秋季大会, 弘前大学, 9月 18 日
- (12) 常深 博、林田 清、中嶋 大、穴吹直久 (大阪大学)、鶴 剛 (京都大学)、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苅 権、富田 洋 (ISAS/JAXA)、馬場 彩 (青山学院大学)、幸村孝由 (工学院大学)、村上 弘志 (立教大学)、平賀純子 (東京大学)、森 浩二、廿日出勇、山内 誠 (宮崎大学)、“X線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発の現状”, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 鹿児島大学, 9月 21 日
- (13) 林田 清、中嶋 大、穴吹直久、常深 博、小松聖児、上田周太朗 (大阪大学)、尾崎正伸、

- 夏苅 権、堂谷忠靖（ISAS/JAXA）、John Doty (Noqsi Aerospace)、幸村孝由（工学院大学）、森 浩二（宮崎大学），“ASTRO-H 搭載 SXI 用 FE(Front End Electronics)の開発”，日本天文学会 2011 年秋季年会，鹿児島大学，9 月 21 日
- (14) 上田周太朗、中嶋大、林田清、穴吹直久、森秀樹、小松聖児、藤川真里、常深博（大阪大学）幸村孝由（工学院大学）、鶴剛（京都大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苅権、藤永貴久、松田桂子（ISAS/JAXA）、森浩二（宮崎大学）、平賀純子（東京大学），“ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ(SXI)用素子エンジニアリングモデルの開発と性能評価”，日本天文学会 2011 年秋季年会，鹿児島大学，9 月 21 日
- (15) 池田翔馬、幸村孝由、河合耕平、渡辺辰雄、金子健太（工学院大学）、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太朗（大阪大学）、鶴剛（京都大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田桂子（ISAS/JAXA）、北本俊二、村上弘志（立教大学）、平賀純子（東京大学）、森浩二（宮崎大学），“X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 CCD (SXI) 用可視光遮断膜の性能評価”，日本天文学会 2011 年秋季年会，鹿児島大学，9 月 21 日
- (16) 河合耕平、幸村孝由、池田翔馬、金子健太（工学院大学）、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太朗（大阪大学）、鶴剛（京都大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田桂子（ISAS/JAXA）、北本俊二、村上弘志（立教大学）、平賀純子（東京大学）、森浩二（宮崎大学），“ASTRO-H 搭載 X 線 CCD(SXI)の可視光遮断膜の X 線透過率測定”，日本天文学会 2011 年秋季年会，鹿児島大学，9 月 21 日
- (17) 海田亮平、森浩二（宮崎大学）、林田清、常深博（大阪大学）、鶴剛、内田裕之、信川正順（京都大学）、松本浩典（名古屋大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、辻本匡弘（ISAS）、馬場彩（青山学院大学）、村上弘志（立教大学）、幸村孝由（工学院大学），“すぐ衛星搭載 XIS における「Si edge 問題」の解決にむけての取組”，日本天文学会 2011 年秋季年会，鹿児島大学，9 月 22 日
- (18) 金子 健太、幸村 孝由（工学院大）、玉川 徹、山田 真也、岩橋 孝典、阿佐美ふみ、吉川 瑛文、武内 陽子（理研）、岩切 渉（埼玉大）、早藤 麻美（NASA/GSFC），“X 線偏光観測衛星 GEMS 搭載のガス電子増幅器(GEM)の電子増幅度の時間変動調査”，日本天文学会 2011 年秋季年会，鹿児島大学，9 月 22 日
- (19) 上田周太朗、中嶋大、林田清、穴吹直久、森秀樹、小松聖児、藤川真里、常深博（大阪大）、幸村孝由（工学院大）、鶴剛（京大）、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苅権、藤永貴久、松田桂子（ISAS/JAXA）、森浩二（宮崎大）、平賀純子（東大）“次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ用素子の性能評価とエンジニアリングモデル CCD の開発”，第 11 回 X 線結像光学シンポジウム，東北大学，11 月 14 日
- (20) 上田周太朗、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大（阪大）、堂谷忠靖、尾崎正伸、富田洋、夏苅権、藤永貴久、松田桂子（ISAS/JAXA）、鶴剛、内田裕之、信川正順、大西隆雄（京大）、幸村孝由（工学院大）、馬場彩（青山学院大）、村上弘志（立教大）、森浩二、廿日出勇、山内誠（宮崎大）、平賀純子（東大），“ASTRO-H 搭載軟 X 線 CCD カメラ(SXI)のシステム開発の現状”，第 12 回宇宙科学シンポジウム，宇宙科学研究所，2012 年 1 月 5 日
- (21) 池田翔馬、幸村孝由、河合耕平、金子健太（工学院大学）、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太朗、菅裕哲（大阪大学）、鶴剛（京都大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田桂子、富田洋（ISAS/JAXA）、北本俊二、村上弘志、清水佑輔、吉田裕貴、梅津里香、小松飛斗（立教大学）、平賀純子（東京大学）、森浩二（宮崎大学），“X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD(SXI) 用可視光遮断膜(OBL) の性能評価”，第 12 回宇宙科学シンポジウム，宇宙科学研究所，2012 年 1 月 5 日
- (22) 金子健太、幸村孝由、河合耕平、池田翔馬（工学院大学）、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太朗、菅裕哲（大阪大学）、鶴剛（京都大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田桂子、富田洋（ISAS/JAXA）、北本俊二、村上弘志、清水佑輔、吉田裕貴、梅津里香、小松飛斗（立教大学）、平賀純子（東京大学）、森浩二（宮崎大学），“ASTRO-H 搭載の X 線 CCD(SXI) の可視光遮断膜の軟 X 線透過率測定”，第 12 回宇宙科学シンポジウム，宇宙科学研究所，2012 年 1 月 5 日
- (23) 菅裕哲、森秀樹、上田周太朗、中嶋大、林田清、穴吹直久、常深博（大阪大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苅権（ISAS/JAXA）、鶴剛（京都大学）、森浩二、廿日出勇、山内誠（宮崎大学）、平賀純子（東京大学）、幸村孝由（工学院大学）、村上弘志（立教大学），“ASTRO-H 搭載 SXI 用 CCD 素子エンジニアリングモデルの開発と性能評価”，第 12 回宇宙科学シンポジウム，宇宙科学研究所，2012 年 1 月 5 日
- (24) 玉川徹（理化学研究所/東京理科大）、早藤麻美（NASA/GSFC）、北口貴雄、山田真也（理化学研究所）、岩橋孝典、阿佐美ふみ、吉川瑛文、武内陽子（理化学研究所/東京理科大）、岩切渉（埼玉大学）、幸村孝由、金子健太（工学院大学）、田原譲（名古屋大学）、高橋忠幸（ISAS/JAXA）、牧島一夫（東京大学/理化学研究所）、Jean Swank、Keith Jahoda（NASA/GSFC），“X 線偏光観測衛星 GEMS”，第 12 回宇宙科学シンポジウム，宇宙科学研究所，2012 年 1 月 5 日
- (25) 河合耕平、幸村孝由、池田翔馬、金子健太（工学院大学）、常深博、林田清、穴吹直久、中嶋大、上田周太朗（大阪大学）、鶴剛（京都大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、藤永貴久、松田桂子（ISAS/JAXA）、北本俊二、村上弘志（立教大学）、平賀純子（東京大学）、森浩二（宮崎大学），“ASTRO-H 搭載 X 線 CCD(SXI)の可視光遮断膜の X 線透過率測定”，第 25 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム，鳥栖文化会館，2012 年 1 月 7 日
- (26) 林田清、常深博、中嶋大、穴吹直久（大阪大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苅権、富田洋（JAXA/ISAS）、鶴剛、信川正順、内田裕之（京都大学）、幸村孝由（工学院大学）、村上弘志（立教大学）、平賀純子（東京大学）、森浩二、廿日出勇、山内誠（宮崎大学）、馬場彩（青山学院大学）、John

Doty (Nozomi Aerospace)、他 SXI チーム，“X線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発の現状”，日本天文学会 2012 年春季年会，龍谷大学，2012 年 3 月 19 日

(27) 菅裕哲、森秀樹、上田周太朗、小松聖児、藤川真里、米森愛美、中嶋大、林田清、穴吹直久、常深博（大阪大学）堂谷忠靖、尾崎正伸、富田洋、夏苅権、藤永貴久 (ISAS/JAXA)、鶴剛、大西隆雄（京都大学）、森浩二（宮崎大学）、幸村孝由（工学院大学）、村上弘志（立教大学）、他 ASTRO-H/SXI チーム，“X 線衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI 用 CCD 素子の開発～スクリーニングシステムを用いた CCD 性能評価”，日本天文学会 2012 年春季年会，龍谷大学，2012 年 3 月 19 日

(28) 北口 貴雄（理研）、玉川 徹、岩橋 孝典（理研/東理大）、山田 真也（理研）、阿佐美 ふみ、吉川 瑛文、武内 陽子、飯高 陽介、宮川 健太（理研/東理大）、岩切 渉（埼玉大）、幸村 孝由、金子 健太（工学院）、早藤 麻美（NASA/GSFC）、ほか GEMS 衛星チーム，“X 線偏光観測衛星 GEMS に搭載するガス検出器の偏光応答モンテカルロシミュレータの開発”，日本天文学会 2012 年春季年会，龍谷大学，2012 年 3 月 19 日

(29) 海田亮平、森浩二（宮崎大学）、林田清、常深博（大阪大学）、鶴剛、内田裕之、信川正順（京都大学）、松本浩典（名古屋大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、辻本匡弘（ISAS）、馬場彩（青山学院大学）、村上弘志（立教大学）、幸村孝由（工学院大学）、他 XIS チーム，“さざく衛星搭載 XIS における「Si edge 問題」の解決にむけての取組(2)”，日本天文学会 2012 年春季年会，龍谷大学，2012 年 3 月 19 日

(30) 金子 健太、幸村 孝由、池田 翔馬（工学院大学）、森井 幹雄、浅野 勝晃（東京工業大学）、白旗 麻衣（国立天文台）、柴崎 徳明（立教大学），“赤外線天文衛星あかりによるマグネター 4U0142+61 の観測的研究”，日本天文学会 2012 年春季年会，龍谷大学，2012 年 3 月 21 日

(31) 鶴剛、信川正順、内田裕之（京都大学）、林田清、常深博、中嶋大、穴吹直久（大阪大学）、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏苅権、富田洋 (ISAS/JAXA)、幸村孝由（工学院大学）、村上弘志（立教大学）、平賀純子（東京大学）、森浩二、廿日出勇、山内誠（宮崎大学）、馬場彩（青山学院大学）、John Doty、他 SXI チーム，“X 線衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ SXI の開発の現状 III”，日本物理学会第 67 回年次大会，関西学院大学，2012 年 3 月 26 日

(32) 阿佐美ふみ、玉川徹、飯高陽介、宮川健太、北口貴雄、山田真也、岩橋孝典、吉川瑛文、武内陽子、小波さおり（理化学研究所）、岩切渉（埼玉大学）、幸村孝由、金子健太（工学院大学）、早藤麻美（GSFC/NASA），“ジメチルエーテル中の不純物ガスによる電子吸着の GEM 動作への影響調査”，日本物理学会第 67 回年次大会，関西学院大学，2012 年 3 月 26 日

# 廃棄物系バイオマス由来燃料を用いたデュアルフューエルディーゼル発電

工学院大学 機械工学科 小林 潤

(独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 倉持秀敏 室長

## Study on Dual Fuel for Diesel Generation Using Waste Biomass Fuel

Jun Kobayashi, Department of Mechanical Engineering  
Hidetoshi Kuramochi, National Institute for Environmental Studies

**ABSTRACT :** Development of technologies for energy recovery from waste biomass such as biomass diesel fuel (BDF) production and thermal gasification is important for reduction of both fossil fuel consumption and greenhouse gas emission. In this study, dual fuel diesel generation using simulant gasified gases was investigated. It is a first step toward the practical use of dual fuel diesel generation using both BDF and biogas. Hydrogen and methane were used as simulant gases and a small commercial diesel generator was applied. Diesel substitution effect was confirmed at several conditions but combustion efficiency decreased using those gases. It was thought to be due to mixing gas fuel and air i.e. fuel gas supply methods because the mechanism of flame propagation using gas fuel might be different from that of diesel fuel. Including these problems, improvement of not only these combustions but also influence of these biofuels on environmental load will be subject of next investigation.

### 1. はじめに

廃棄物系バイオマスを基盤とした化石燃料代替技術として、廃食用油からのバイオディーゼルフューエル(BDF)合成、比較的乾燥した有機廃棄物の熱分解ガス化、生分解性廃棄物によるメタン・水素発酵などが検討されており、それぞれにおいて優れた成果を上げている。一方でこれら化石代替燃料の用途としては、従来の熱機関を前提としているケースがほとんどであるが、その具体的な適用性について検討している例は多くない。化石燃料と比較して、廃棄物系バイオマス由来の燃料の組成は複雑となる場合もあり、特に熱分解ガス化ガスについては主な可燃成分としては水素、メタン、一酸化炭素、不燃成分として二酸化炭素や窒素などが含まれる[1], [2]。また、BDFについても原料にトラップグリースを適用することでタンパク質由来の窒素分を多く含む燃料となることが予想されている。

このような様々な燃料に対して優れた適用能力を有する熱機関として、デュアルフューエルディーゼル(DFD)がある。これは、十分なセタン価を有する液体燃料に気体燃料を併用して駆動する内燃機関であり、商用大型車などで実用化がなされている。現在 DFD で使用される液体燃料は軽油、気体燃料は水素とメタンが主流であり、BDF やガス化ガスを使用した DFD の研究は極端に少ない[3], [4]。よって既存のディーゼル機関と比較し燃焼特性、熱損失、軽油代替効果、有害物質生成などの傾向を明らかにする必要がある。本研究では BDF とガス化ガスを併用する DFD の実用化を最終目標とする。その第一段階としてガスの主な成分である水素、メタン、二酸化炭素を単体で使用し、市販の小型ディーゼル発電機をそのまま用いて DFD 発電の実証実験を行う。これらの実験を通じて、上記の課題点について検討することを今回の目的とする。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

本研究の実験装置の概略図を以下の Fig. 1 に示す。なお、本研究では市販の発電機をほぼそのまま使用している。発電機の仕様は以下の Table 1 の通りである。

Table 1 Details of diesel generator

Model number	YDG250VS
Engine general details	Four stroke, Single cylinder, Direct injection
Frequency	50 Hz
Number of revolutions	3000 rpm
Engine displacement	320 cc
Bore diameter	78 mm
Stroke	67 mm
Voltage value	100 V
Max current	20 A

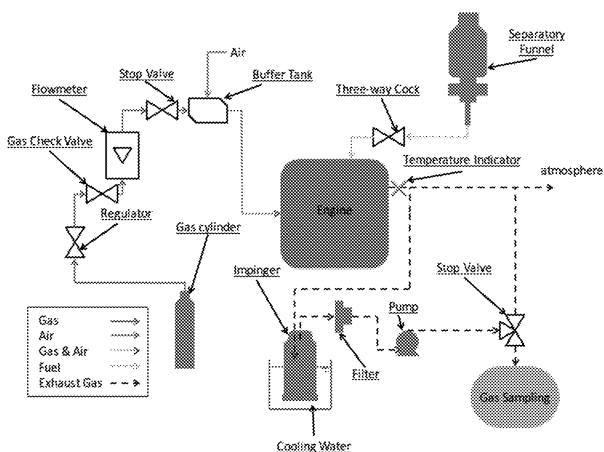


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Properties of gas

	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Molecular mass [-]	2.02	16.04	44.01
High heating value [MJ/kg]	141.8	55.51	
Low heating value [MJ/kg]	119.9	50.01	
Ignition point [°C]	571	632	
Combustion limit [%]	4.0~75.0	5.0~15.0	
Gas density [kg/m <sup>3</sup> ]	0.0899	0.7168	1.9770

本研究では市販の発電機を使用しているが、液体燃料消費量、排気ガスの成分や排気ガスの温度を計測するためにいくつか改良を施した。今回の実験装置は主に燃料供給部分と気体燃料供給部分とガスサンプリング部に分けられる。また室内で実験を行うために排気ガスの排出

部にダクトをつけ、室外に排出する様にした。発電時の電力負荷として、出力の切り替えが可能な市販のセラミックヒーターを用いた。

次に各部分の改良について説明する。燃料供給部分は軽油消費量の計測するためにバイパス部分を作成した。元の燃料供給ルートを切って三方コックを繋げ、分液ロートを接続できるように改良した。

気体燃料供給部分は各種ガスボンベから配管を組み、エンジンの吸気口から供給できるように改良した。その配管の間に逆流防止のための逆止弁、流量計、ストップバルブ、バッファタンクを設置した。

ガスサンプリング部はダクト部分からガスサンプリングできるように改良した。ポンプを使用しガスを吸い込み、インピングジャーを使用することで水分を除去した。また、煤を含む粒状浮遊物質（PM）などの除去のためガラスフィルターを使用した。

### 2.2 実験条件

本研究で使用する水素、二酸化炭素やメタンの性質は以下の Table 2 通りである。また本研究では軽油 2 号を使用し、その性質を以下の Table 3 に示す。なお、一酸化炭素については、平成 22 年度に実施した卒業研究論文[]にて報告済みである。

Table 3 Properties of diesel oil

Data item	Value
Molecular formula	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
Flash point [°C]	70~90
High heating value [MJ/kg]	45.64
Specific gravity [g/cm <sup>3</sup> ]	0.845
Dynamic viscosity [mm <sup>3</sup> /sec]	2.5 and over
Cetane number [-]	45 and over

また、今回の検討において燃焼用空気と予混合させる気体供給量の条件を以下の Table 4 に示す。

Table 4 Experimental conditions

Supplied gases	Flow rate [L/min]
CO <sub>2</sub>	10, 20
CH <sub>4</sub>	5, 10
H <sub>2</sub>	10

### 2.3 実験手順

実験手順は以下の通りである。

- ガスクロマトグラフィーを立ち上げ、定常状態にする。
- 空の分液ロートの重量と軽油戻りのビーカー重量を計測する。
- 分液ロートに軽油を入れ、重量を計測する。
- エンジンを始動し、エンジンを温めるために無負荷状態で排気ガス温度が所定の温度になるまで暖機

- 運転を行う。
- 5) 負荷運転の場合はこの時点で負荷を設定し、その後少し時間を空ける。負荷を使用しない場合はこの手順をスキップする。
  - 6) 各種気体ボンベのバルブを開き、流量計で気体の供給量を設定する。
  - 7) 燃料供給を分液ロートに切り替え、1分間の分液ロートの軽油消費量と軽油の戻り量を数度計測し、分液ロートの最適な位置を調節する。
  - 8) 排気ガスをサンプリングしそのときの排気ガス温度を計測する。
  - 9) 各条件において5)～8)の手順を繰り返し行う。
  - 10) それぞれの排ガスの組成をガスクロマトグラフィーで分析する。
  - 11) 排ガス中のNOxは検知管により計測する。

なお、メタンや水素などの可燃性ガスを適用する場合、供給開始後排気ガス温度が一定となるまで待ってから実験を行った。

### 3. 結果及び考察

#### 3. 1 燃焼特性

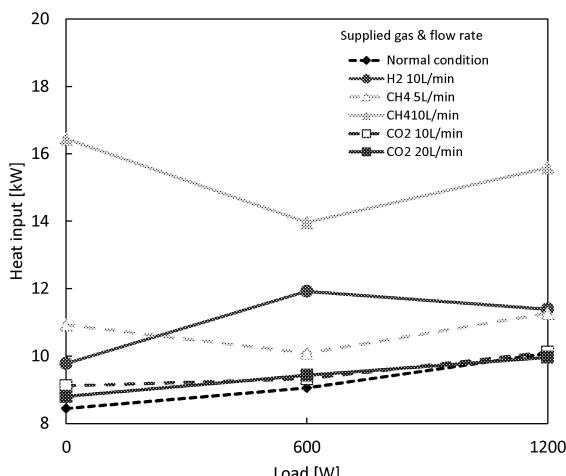


Fig. 2 Heat input at gas supplied and normal condition

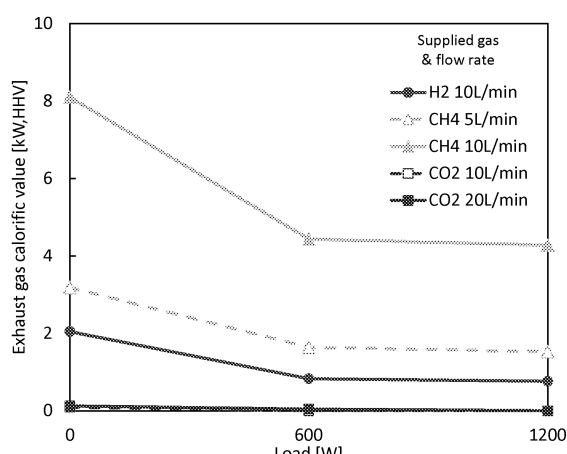


Fig. 3 Exhaust gas calorific value at several conditions

本研究での燃焼効率を求めるため、供給燃料の総発熱量（入熱）および燃焼排ガス中に含まれる未燃ガスの総発熱量（出熱）を実験結果より算出した。Fig. 2 には各実験条件における入熱を、Fig. 3 には出熱を示す。

Fig. 2 に着目すると負荷が上昇することで入熱も増大することがわかる。これは負荷をかけることで軽油の消費量が上昇し、それに伴い全体的な熱量が底上げされたことによるものであると考えられる。一方、気体燃料の供給に伴い全体としての入熱量が増加しており、結果的に空気比のより低い条件での燃焼となってしまっている。軽油の燃料供給のメカニズムは、シリンダー内で着火しピストンが下がり始めると機械的に供給が停止するようになっているため、着火・燃焼が不安定化すると軽油供給量が増えてしまうことがある。今回の実験においては、気体燃料が十分に燃焼せず不安定化してしまったことが、全体としての入熱量の増加につながった可能性がある。

Fig. 3 より、負荷が増えることで未燃分の発熱量が減少するということがわかる。負荷の増加は全体的な燃料供給量の増加を意味し、結果として燃焼場の温度の上昇を伴うと考えられ、これにより燃焼状態がよりよくなつたため未燃分の発熱量が減少したものと考えられる。可燃性ガスの出熱の熱量は燃え残りに大きく依存しているので燃えずに排出される水素やメタンの量が減少すれば相対的に熱量は減る傾向にある。

上記の熱量を元に燃焼効率を算出すると以下の Fig. 4 のようなグラフになる。

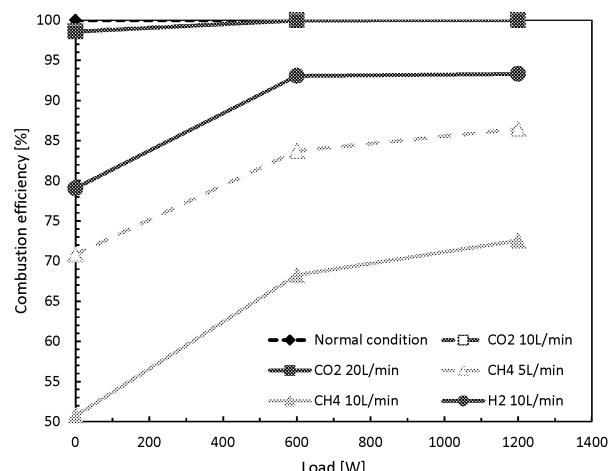


Fig. 4 Combustion efficiency at gas supplied and normal condition

本図より、気体燃料供給時では不完全燃焼となっていることが改めて確認されたが、負荷の増加に伴い改善される傾向にあることが示された。燃焼条件としては、空気比は2以上となっているはずであるが、実際のディーゼル燃焼時は3以上であるため、通常の状態と比較するとFuel richな条件となっている。実際、気体燃料は燃焼用空気に予混合させてシリンダー内に供給しているため、気体燃料分の空気量は減少するが、全体の供給空気量(480 L/min)と比較しても5%以下であり、空気比の減

少による燃焼の不安定化というよりも、予混合気の燃焼特性そのものが結果に影響を及ぼしている可能性がある。なお、負荷が増加しても供給空気量は基本的に変わらない（エンジンの回転数が常に一定のため）ので、高負荷時のほうが空気比としては低くなるが燃焼効率は上がっていることがわかる。このことからも、シリンダー内の燃焼挙動について詳細に検討し、燃焼効率の向上に努める必要がある。

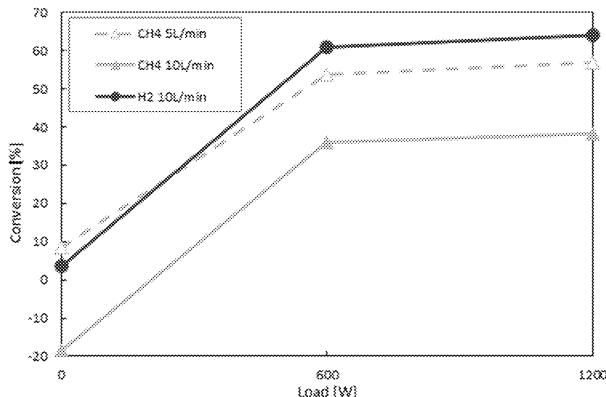


Fig. 5 Conversion at combustible gas supplied and normal condition

可燃性ガスの反応転化率を Fig. 5 に示す。本図より、負荷が上昇することで反応転化率は上昇するが、供給量の半分近くが未燃分として排出されており、値としては低いといえる。また無負荷でメタン 10 L/min 供給したときの反応転化率がマイナスの値をとっている。これは燃焼状態が不安定になったため軽油の熱分解成分としてメタンが生成している可能性が考えられるが、この点についてはさらに詳細に検討する必要がある。

### 3. 2 燃料代替効果

高位発熱量を基準に、使用した軽油の熱量、未燃分の熱量、燃焼した可燃ガスの熱量、燃焼で発生した一酸化炭素の熱量をそれぞれ以下の Figs. 6~8 に示す。

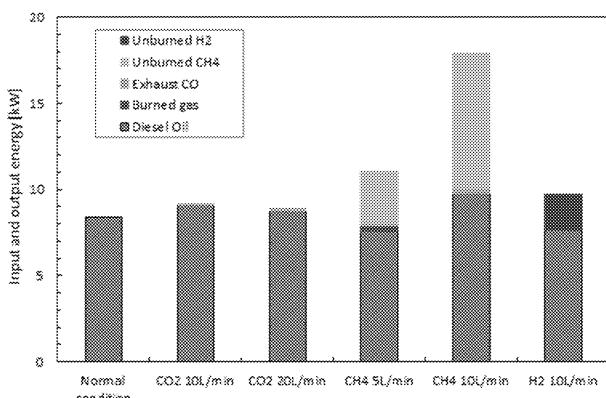


Fig. 6 Input and output energy at no-load

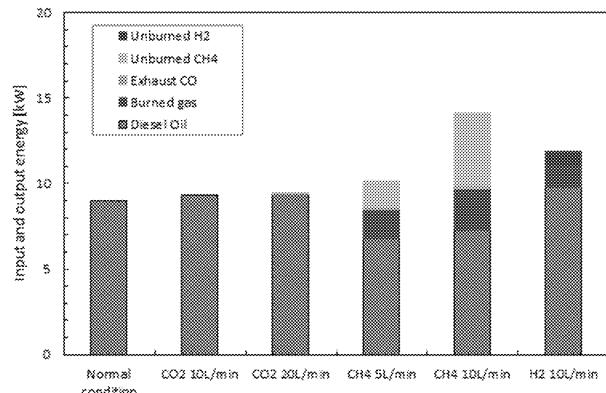


Fig. 7 Input and output energy at load of 600 W

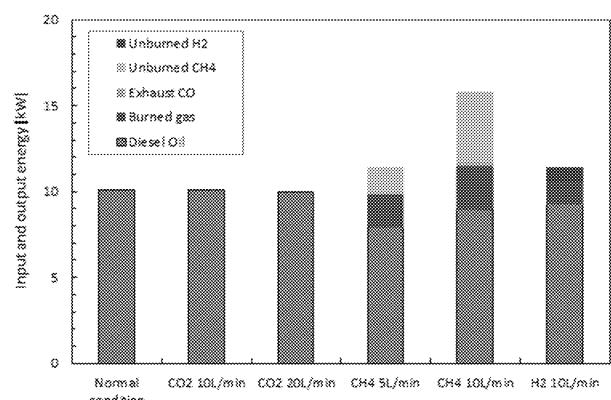


Fig. 8 Input and output energy at load of 1200 W

これらの図より明らかにおり、軽油のみを供給した通常のケースと比較してほとんどが燃料供給過剰となっている（空気比としては 1 以上）ことがわかる。特に未燃メタンが際立っているが、メタンよりも爆発限界が広い水素においても未反応で排出されていることから、気体燃料供給方法について抜本的な改良が必要であると考えられる。ただし、昨年度実施した CO 供給 DFD 発電においては一定の効果も確認できており、気体燃料組成が及ぼす影響についても詳細な検討が必要である。

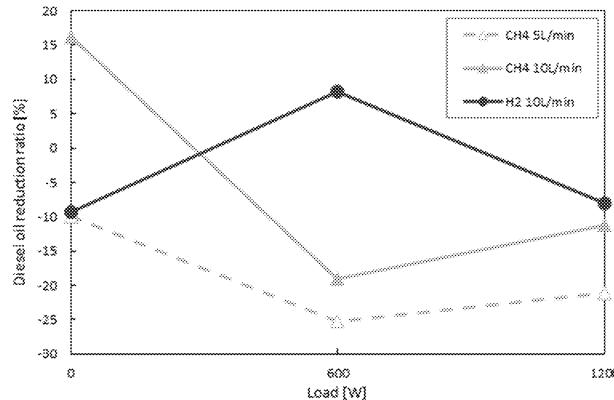


Fig. 9 Diesel oil reduction ratio

通常状態の軽油発熱量を基準に可燃性ガス供給時の軽油削減率を算出し、その結果を以下の Fig. 9 に示す。なお、図中の縦軸が負の値の場合が DFD 時に軽油消費量が

削減されていることを意味する。

本図より、気体燃料の併給により軽油消費量を削減することが可能であることが示された。特にメタンの供給による効果は 5 L/min 供給時がより優れていることがわかる。メタンの供給量を増やしすぎると燃焼挙動そのものが安定せず、さらに余分な軽油を噴霧している可能性が示唆された。

### 3.3 発電効率

上記結果に基づいて算出された発電効率をまとめた結果を Fig. 10 に示す。本図より、負荷が上昇することで発電効率も上昇していることがわかる。しかし可燃性ガスを供給した際には効率が下がっていることがわかる。燃焼効率の向上が発電効率の向上に必須であることが改めて示された。

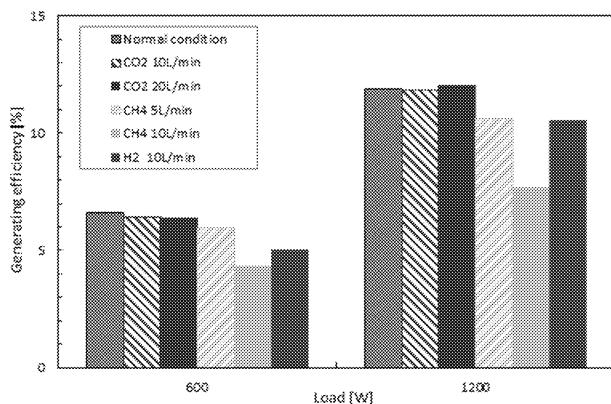


Fig. 10 Power generation efficiency at several conditions

### 3.4 燃焼排ガス中の有害成分

ディーゼル機関の排ガス中の有害成分として、燃料中に含まれる硫黄分に起因する SOx、空気中の窒素が酸化して生成される NOx および PM が挙げられ、その削減が求められている。ここでは、排ガス中に含まれる窒素酸化物(NO, NO<sub>2</sub>)について測定した。図中の NOx 濃度は実測値(未換算)である。

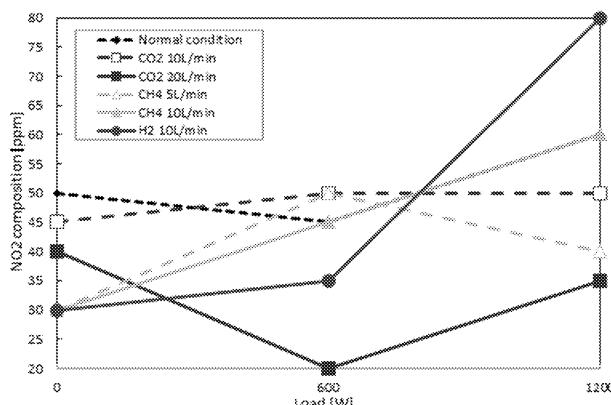


Fig. 11 NO<sub>2</sub> composition of dry exhaust gas

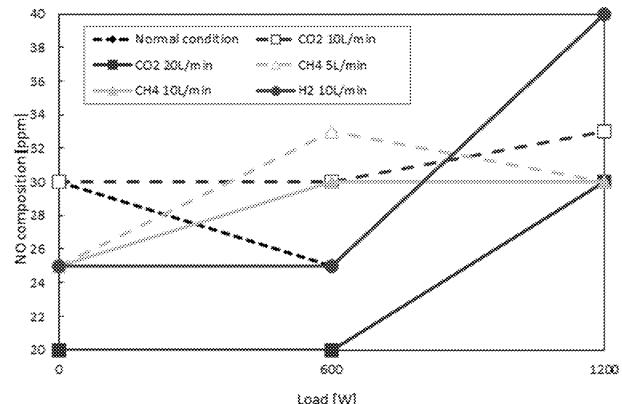


Fig. 12 NO composition of dry exhaust gas

各条件において測定された排ガス中の NO および NO<sub>2</sub> 濃度を Fig. 11 および 12 に示す。各条件において空気比が異なるため単純な比較は難しいが、負荷の増加に伴い NOx 濃度も増加する傾向にあることから、燃料供給量の増加に伴う燃焼温度の上昇が影響しているものと考えられる。また、CO<sub>2</sub> 供給量を増やすことで NOx を低減出来ることが本結果から明らかとなった。CO<sub>2</sub> は空気と比較して若干比熱が大きいので、燃焼場の温度を下げるのに効果があったものと考えられる。

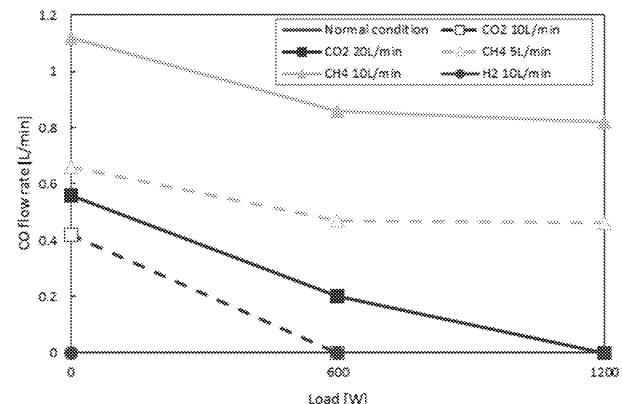


Fig. 13 CO flow rate in exhaust gas

排ガス中に含まれる CO を流量換算して求めた結果をまとめた図を Fig. 13 に示す。二酸化炭素供給時とガス無供給時は分析下限値(約 0.02%)を下回る濃度であるため省略した。一酸化炭素の生成の主な原因是不完全燃焼である。一酸化炭素が多く生成されることは不完全燃焼を起こしている可能性が高い。Fig. 13 に着目すると、負荷が上昇することで一酸化炭素の濃度が減少していることがわかる。これは負荷上昇によって燃焼状態が向上していると考えられる。またメタンを供給した際には一酸化炭素の濃度が他の条件より高いことがわかる。これはメタンが燃えにくいために起こると考えられる。

### 4. BDF の製造

先にも述べたとおり、BDF の原料として食品との競合を避けるため、廃棄物を原料に用いることが検討されて

いるが、今回の研究では極めて品質の低いトラップグリースを原料として用いた BDF の製造について検討している。具体的にはトラップグリースから油脂類のみを抽出し、メチルエステル化する方法や、水素添加によりさらに軽油に近い物質に変換する方法などについて検討を行っている。しかし、いずれの方法においても複雑な処理が必要となるため、要求される基準の厳しい軽油代替から重油代替に仕様変更し、トラップグリースから取り出される油脂分をそのままディーゼル発電に利用することを目標とした検討を行っている。今回の検討結果から油脂分の分離は温度を 50°C 程度まで上げることで比較的容易に行えることを確認しているが、重油との親和性については十分な確認が取れていない。次年度には実際にディーゼル発電機に適用し、その稼働特性について検討を行う予定であるが、単独使用ではなく重油との混合燃料としての利用を考えており、この点についても検討を行う予定である。

## 5. 結言

ディーゼル発電機を使用した DFD の燃焼特性における研究を行った結果以下の知見を得た。

1. 水素やメタンなどの可燃性ガスを供給することで軽油の削減効果があることが確認された。しかし可燃性ガスの 3 割以上が未燃分として排出された。
2. 可燃性ガスを供給することで燃焼効率が若干下がり、熱損失が上昇していることが確認され、発電効率が減少した。
3. 二酸化炭素を供給することで窒素酸化物排出量の削減効果があった。

## 6. 今後の検討

本研究の実験の結果、可燃性ガスの未燃分が多く排出されることが明らかとなり、燃焼効率の向上が重要な課題の一つとして挙げられる。一般的な DFD では気体燃料供給方法が異なり、空気と予混合せずシリンダー内に直接噴霧することで、意図的に燃料と空気を混合させない状態を作っている。本研究では逆に気体の混合を促進したため未燃分が多くでている可能性がある。その他にシリンダーの形状や供給のタイミングによる改善の可能性も考えられる。これらを考慮し気体供給の方法を改良することが重要である。

これまで、いわゆる熱分解ガス化ガスの主要成分である水素、一酸化炭素、メタンを個別に供給して実験を行ってきたが、それらがある組成を持って供給された場合、相互の燃焼速度や爆発限界など燃焼物性の違いにより、燃焼効率に影響を及ぼす可能性がある。この点についても厳密に検討を行う必要があると考える。

さらに将来的には軽油・重油代替燃料（BDF や DME）との併用も考慮する必要があり、特に廃棄物由来の BDF 中に含まれる硫黄分の影響など環境負荷に対する影響に

についても十分な検討が必要であると考える。

## 参考文献

- [1] Kobayashi, J., Kawamoto, K.: Catalyst durability in steam reforming of thermally decomposed waste wood, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 12 (2010) pp. 10–16.
- [2] Wu, W., Kawamoto, K., Kuramochi, H.: Hydrogen-rich synthesis gas production from waste wood via gasification and reforming technology for fuel cell application, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, Vol. 8 (2006) pp. 70–77.
- [3] 関 太墳, 安藤 裕一, 吉川 邦夫, 遠藤 浩之: 廃棄物ガス化発電用混焼ディーゼル機関に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), 第 70 卷, 697 号 (2011) pp. 2468–2473.
- [4] 塩路 昌宏, 石山 拓二, 池上 謂, 三谷 信一, 芝田 裕晃: 天然ガスデュアルフューエル機関の性能および排気特性, 日本機械学会論文集(B編), 第 66 卷, 647 号 (2008) pp. 1898–1904

## 新規ナノ構造高熱伝導高分子の創生と熱伝導メカニズムの解析

工学院大学 応用化学科 伊藤雄三

九州大学大学院 機械工学科 西村 伸

Development of Novel Nano-structure High Thermal Conductivity Polymers  
and Study on Their Thermal Conductivity Mechanism

Yuzo Itoh, Department of Applied Chemistry, Faculty of Engineering,  
Kogakuin University  
Shin Nishimura, Department of Mechanical Engineering,  
Graduate School of Kyushu University

**ABSTRACT :** The high thermal conductivity insulating materials have recently become to be very attractive materials because decreasing the temperature of the devices, which intrinsically produce a lot of heat, is critically important to make excellent devices, like small size motors and power semiconductors, etc. The high thermal conductivity insulating materials have usually be produced by putting the fillers, such as silica or aluminum oxide, of which thermal conductivities are relatively large, into the polymer matrices, of which thermal conductivity are very small. However, if, in order to increase the thermal conductivities of the materials, the contents of the fillers are become very large, the other properties, which are very important as the insulating materials should become very bad. But, if we can use the high thermal conductivity polymers as polymer matrices of high thermal conductivity insulating materials, those materials should be very excellent high thermal conductivity materials without lowering the other properties as the insulating materials. The high thermal conductivity thermo-setting polymers with liquid crystal structure have been proposed as high thermal conductivity polymers, but their high thermal conductivity mechanism has not be clarified. In this study, we tried to clarify the mechanism of the high thermal conductivity polymers from the chemical structural viewpoints.

### 1. はじめに

液晶構造を有する熱硬化性樹脂は、これまでの熱硬化性樹脂と同等の成型加工性、軽さ、絶縁性に加え、高い熱伝導性を有する樹脂であり、次世代の電気機器、特に発熱量の大きいモータやパワー半導体などの絶縁材料として現在盛んに研究が行われている。特に本研究で扱うツインメソゲン型エポキシ樹脂は、熱伝導を支配するフ

ォノンの散乱を抑制することにより、添加剤、異方性を伴わずに従来の熱硬化性絶縁樹脂の約5倍の熱伝導率を示す<sup>1), 2)</sup>。この樹脂は自己配列しやすい構造であるメソゲン骨格によって樹脂内部に高い秩序性を有する液晶構造のドメインを形成し、その高い秩序性により、構造の乱れによる熱伝導フォノンの静的な散乱やフォノン同士の動的な散乱を抑制し、その高い熱伝導性を実現している。しかし現在までに推定されているのは定性的な高熱伝導発現のメカニズムであり、エポキシ樹脂内部の液晶ドメインの詳細な構造や大きさと熱伝導性の関係など、

定量的な熱伝導メカニズムはまだ明らかになっていない。そこで本研究では、ツインメソゲン型高熱伝導エポキシ樹脂の熱伝導メカニズムを定量的に明らかにするため、ツインメソゲン型エポキシモノマーを合成し、硬化剤と共に高分子化し、広角および小角X線や振動分光学的解析等の構造化学的手法による詳細な解析を行い、高熱伝導樹脂の高次構造と熱伝導フォノンの散乱メカニズム及び熱伝導率との定量的相関検討を行うことを目的とする。

## 2. 実験

### 2.1 ツインメソゲン型エポキシモノマーの合成

ツインメソゲン型エポキシモノマー (Twin8e) の化学構造及びその合成経路を Fig. 1 に示した。Allyl bromide、4-hydroxybenzoic acid より Fig. 1 化合物 2 を 1,8-dibromo-octane、hydroquinone から Fig. 1 化合物 3 を合成した。化合物 2 及び 3 より Fig. 1 化合物 Twin8a を、さらに両末端をエポキシ化して目的物であるツインメソゲン型エポキシモノマー (Twin8e) を合成した。得られた Twin8e に対し <sup>1</sup>H-NMR 測定、偏光子を取り付けた状態での融点測定を行い合成確認した。

### 2.2 ツインメソゲン型エポキシモノマーの分子及び相構造の解析

次に構造解析として DSC 測定とホットステージ付き偏光顕微鏡(POM)観察、KBr 法による IR 測定、広角 X 線回折 (WXRD) 測定、小角 X 線回折 (SAXS) 測定を行った。これらの測定から得られた結果を総合的に考察し、相同定した。DSC 測定、POM 観察の結果から重合温度の決定も行った。なお樹脂に対して IR 測定による合成確認を行ったため硬化剤 4,4'-Diaminodiphenylmethane (DDM, Fig2) の IR 測定も行った。

### 2.3 ツインメソゲン型樹脂の重合と高次構造及び熱伝導特性の解析

次に Twin8e と DDM を重合させ、樹脂 TME<sub>8</sub>を得た。樹脂はレーザーフラッシュ法による熱伝導率の測定が行えるよう、測定条件を満たす形に切り抜いたシリコーンゴムの型に詰め込んで加熱重合した。得られた樹脂に対し KBr 法による IR 測定、ATR 一回反射法による IR 測定と偏光 IR 測定、広角 X 線回折 (WXRD) 測定、小角 X 線回折 (SAXS) 測定を行った。これらの結果から合成確認と、TME<sub>8</sub> の高次構造、配向、液晶相の構造及びその周期構造の測定及び解析を行った。

熱伝導率はレーザーフラッシュ法により測定した。熱拡散率と体積熱容量を別々に測定し、熱伝導率を算出した。どちらの測定でも、レーザー照射面と反対の面(測定面)に、長さ約 1~2cm にした直径 0.05mm の R タイプ熱電対(Pt-Pt/Rh13%)を極少量の瞬間接着剤で取り付けた。体積熱容量は標準サンプルとしてサファイヤを使用した。測定時は照射面にグリースを接着剤としてごく少量塗り、そこに受光板としてグラッシーカーボンを貼り付けた状

態で測定を行った。熱拡散率測定の際には樹脂の黒化処理のため照射面に対しカーボンスプレーを用いて粒子状炭素を塗布した。レーザーの強度は 2.0kV とした。

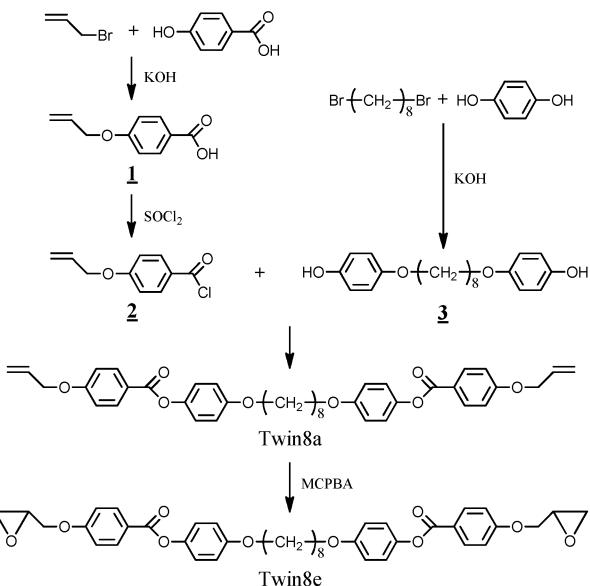


Fig. 1 Synthetic scheme of Twin8e

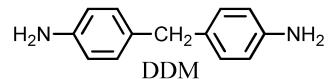


Fig. 2 Chemical structure of DDM

## 3. 結果および考察

### 3.1 ツインメソゲン型エポキシモノマーの分子及び相構造の解析

合成により得られた化合物に対する <sup>1</sup>H-NMR 測定の結果を Fig.3 に示した。文献値<sup>3), 4)</sup>との比較により目的物以外にも片末端がエポキシ化されていないものが若干含まれていることが確認された。しかし融点測定の結果はこの化合物は 152.2~182.5°C で液晶を示し、文献値<sup>3), 4)</sup> 152~182°C とほぼ一致したため、重合に用いるのに十分な純度の目的物であると判断した。

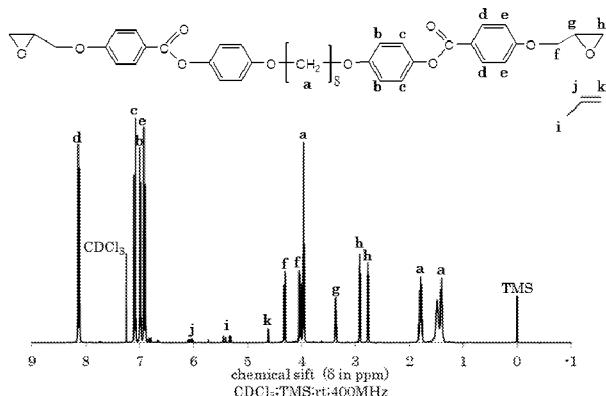


Fig. 3 The  $\text{H}^1\text{-NMR}$  spectrum of Twin8e and its peaks assignments.

### 3.2 ツインメソゲン型エポキシモノマーの分子及び相構造の解析

DSC 測定結果を Fig. 4 に、偏光顕微鏡 (POM) 観察結果を Fig. 5 に、それぞれ示した。DSC では、約 150°C と 181°C に吸熱ピークが現れた。それぞれの温度域における POM 観察で、150°C は結晶から液晶相への転移点、181°C は液晶相から等方性液体への転移点であることがわかった。これらの結果から Twin8e はこの温度域でネマチック液晶相を発現すると考えられる。

Twin8e の FT-IR 測定結果を Fig. 6 に、その帰属を Table 1 に示した。FT-IR スペクトルから Twin8e の分子構造を確認した。

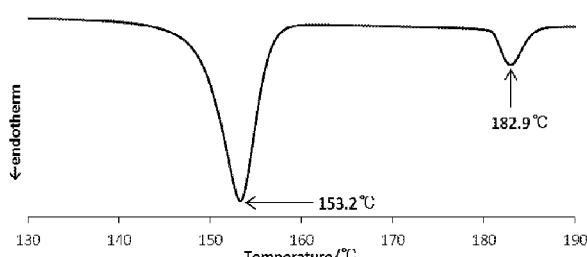


Fig. 4 The DSC spectrum of Twin8e.

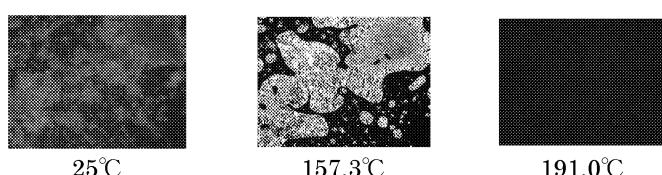


Fig. 5 POM images of Twin 8e at each temperature.

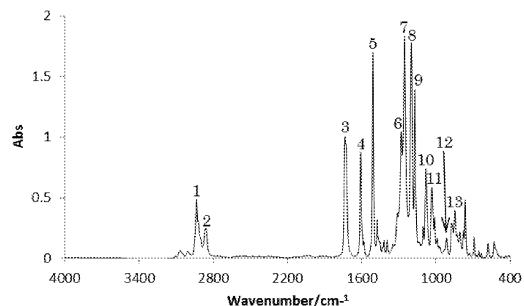


Fig. 6 The FT-IR spectrum of Twin8e.

Table 1 Assignments of the FT-IR spectrum of Twin8e.

No.	$\text{cm}^{-1}$	帰属	No.	$\text{cm}^{-1}$	帰属
1	2935	CH 逆対称伸縮	8	1201	CO 伸縮
2	2862	CH 対称伸縮	9	1172	CO 伸縮
3	1736	C=O 伸縮	10	1082	CH 面内変角
4	1609	芳香族面内骨格	11	1034	CH 面内変角
5	1511	芳香族面内骨格	12	913	COC 逆対称伸縮
6	1285	CO 伸縮	13	847	COC 非対称伸縮
7	1255	COC 対称伸縮			

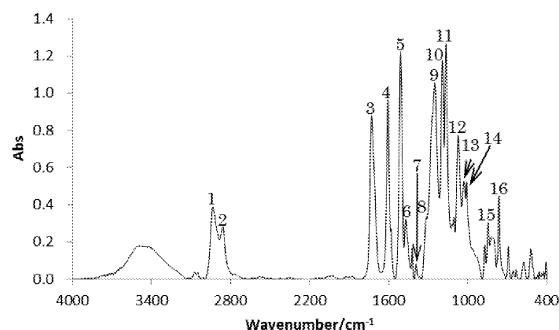
### 3.3 ツインメソゲン型樹脂の重合と高次構造解析

上記の結果を踏まえ、硬化は Twin8e が液晶相を示す温度帯で行った。具体的には、Twin8e:DDM=2:1 のモル比となるよう乳鉢で粉碎・混合し、直径 12mm、厚さ 2mm の穴を開けたシリコーンゴムの型に詰め込み、180°C で 4 時間加熱し樹脂 TME<sub>8</sub>を得た。得られた樹脂は台形様で、目視では上辺と下辺が平行・平滑であった。それぞれの直径が 8mm と 9mm、厚みが 1.7mm の黒色のペレットであった。これはレーザーフラッシュ法による熱伝導率測定が行える形状(上辺と下辺が平行・平滑で直径約 10mm、厚み 1mm 以下)に限りなく近い。文献<sup>1)</sup>では一度硬化した樹脂を成型加工することにより測定を行える形状にしているため、この得られた樹脂も同様にして成型加工することにより測定を行うことが可能であると言える。

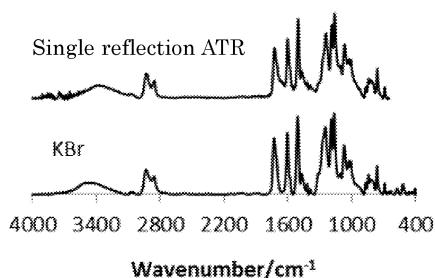
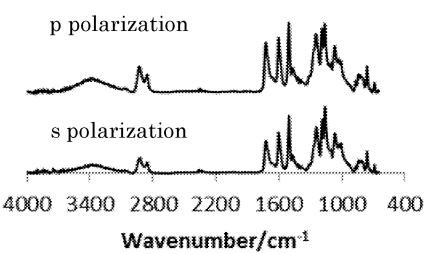
得られた樹脂の構造解析及び合成確認のため、KBr 法による IR 測定を行った。樹脂 TME<sub>8</sub> の FT-IR スペクトルを Fig. 7 に、その帰属を Table 2 に示した。樹脂の吸収スペクトルでは、Twin8e で確認された  $913\text{cm}^{-1}$  のエポキシ基由来と思われるピーク、DDM の  $3376\text{cm}^{-1}$ 、 $3280\text{cm}^{-1}$  の NH 由来のピークが全て消失し、逆に  $1363\text{cm}^{-1}$  に CN 結合由来のピークが確認されたことから、重合反応が進行したことが確認できた。

次に樹脂の表面とバルクとの差異を検討するため、得られた樹脂に対し ATR 一回反射法による IR 測定を行い、先ほどの KBr 法による測定の結果と比較した(Fig.8)。また、試料表面の配向を検討するために ATR 一回反射法

による偏光 IR 測定を行った。試料面に対し垂直な偏光(p 偏光)での測定と、試料面に対し平行な偏光(s 偏光)での測定における IR スペクトルの比較を Fig.9 に示した。Fig. 8 では 2 つのスペクトルに差が見られなかつたため、樹脂の表面とバルクの構造に差異がないことが確認された。また Fig. 9においても 2 つのスペクトルに差が見られなかつたため、樹脂表面に配向がないことが確認された。これらの結果から、この樹脂は表面で配向することなく、等方的に硬化されていることが確認された。

Fig. 7 The FT-IR spectrum of TME<sub>8</sub>Table 2 Assignments of the FT-IR spectrum of TMA<sub>8</sub>

No.	/cm <sup>-1</sup>	帰属	No.	/cm <sup>-1</sup>	帰属
1	2933	CH 逆対称伸縮	9	1250	COC 伸縮
2	2857	CH 対称伸縮	10	1193	CO 伸縮
3	1731	C=O 伸縮	11	1167	CH 横揺れ
4	1605	芳香族面内骨格	12	1073	CO 伸縮
5	1509	芳香族面内骨格	13	1031	COC 対称伸縮
6	1472	CH 変角	14	1009	CH 横揺れ
7	1363	CN 伸縮	15	846	CH 変角
8	1313	OH 変角	16	764	CC 骨格

Fig. 8 The comparison between the single reflection ATR and the bulk (KBr) FT-IR spectra of TME<sub>8</sub>Fig. 9 The comparison between the p polarization and the s polarization single reflection ATR FT-IR spectra of TME<sub>8</sub>

次に広角 X 線回折 (WXRD) により樹脂の凝集構造解析を行なった。WXRD の結果を Fig.10 に示した。回折角  $2\theta$  は  $19.8^\circ$ 、半幅値  $\Delta 2\theta$  は  $5.9^\circ$  であった。これらの値を用いて Bragg の式、Scherrer の式から、それぞれ、面間隔  $d$  と微結晶サイズ (可干渉距離)  $D$  を求めると、 $d=4.5\text{ \AA}$ 、 $D=27.2\text{ \AA}$  となった。この面間隔はメソゲン骨格であるフェニルベンゾエートの厚みと近い値のため、樹脂内部でベンゾエートが厚み方向に配列していると考えられる。この配列は厳密な周期性を有する結晶相としてのものではなく、 $D$  の値を考慮すると X 線の可干渉距離にしてベンゾエートが約 6 個分のよりラフな秩序性、すなわち液晶構造が樹脂中で凍結した配列と考えられる。また、この  $D$  の値はその方向の配列の秩序性のパラメータと考えられ、この値が大きいほど秩序性が高い。モノメソゲン高熱伝導樹脂の  $D$  値は、 $14.7\text{ \AA}$  であり、TME<sub>8</sub> のほうがモノメソゲン型より秩序性が高いと考えられる。TME<sub>8</sub> 樹脂のこの秩序性の高さが、その熱伝導率の大きさに関連していると考えられる。

TME<sub>8</sub> 樹脂の小角 X 線回折 (SXRD) 測定を行い、散乱ベクトル  $q$  が  $0.14$ 、すなわち、 $2\theta$  が  $2^\circ$  の値で回折ピークを測定した。この値より面間隔  $d$  を計算すると  $4.4\text{ nm}$  となり、TME<sub>8</sub> 樹脂中に面間隔  $4.4\text{ nm}$  の層構造が存在し、スマートチック液晶構造を形成していると考えられる。この層間隔は、量子化学計算によって求めた Twin8e の両末端 CC 原子の距離と DDM の両末端 NN 原子の距離を足した値  $4.9\text{ nm}$  と近い値となつたため、TME<sub>8</sub> 樹脂の高次構造として、この繰り返し単位がやや傾いた状態で分子鎖方向に層構造を形成しているスマートチック液晶構造が考えられる。これらの結果から TME<sub>8</sub> 樹脂中にはスマートチック液晶型の層構造が存在し、高い秩序性を有しており、ネマチック型構造を有するモノメソゲン樹脂より、より大きな熱伝導性を示すことが予想される。

以上の解析結果より TME<sub>8</sub> 樹脂の高次構造の模式図として Fig. 11 に示した構造が考えられる。図に示したそれぞれの長さは  $A=0.45\text{ nm}$ 、 $B=2.72\text{ nm}$ 、 $C=4.4\text{ nm}$  である。

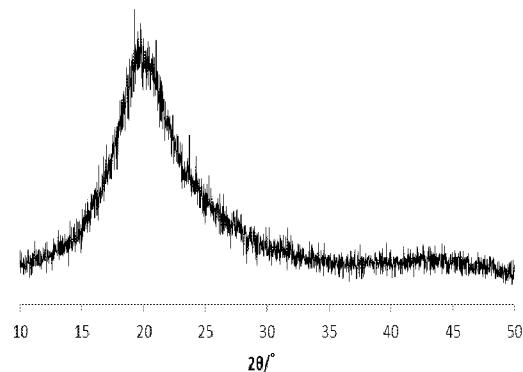


Fig. 10 The wide-angle X-ray diffraction pattern of TME<sub>8</sub>

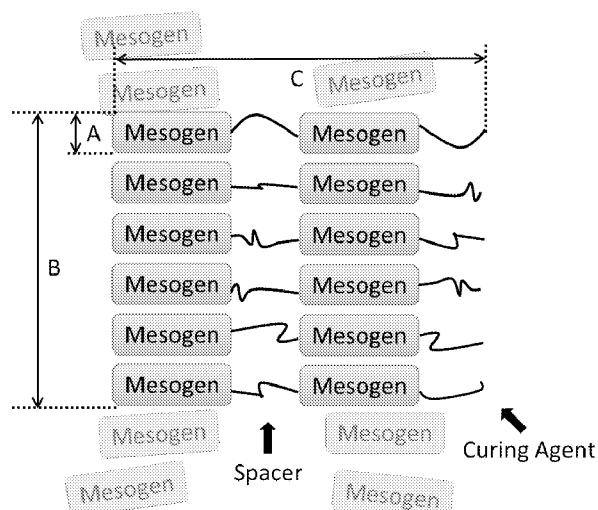


Fig. 11 The schematic figure of higher-order structure of TME<sub>8</sub>

### 3.4 ツインメソーゲン型樹脂の熱伝導率と高次構造の相関

レーザーフラッシュ法により測定したものメソーゲン型高熱伝導樹脂及び今回合成したツインメソーゲン型高熱伝導樹脂TME<sub>8</sub>の熱伝導率の値を可干渉距離 $D$ および液晶構造とともにTable 3に示した。熱伝導率の大きいツインメソーゲン型熱伝導樹脂TME<sub>8</sub>は、モノメソーゲン型高熱伝導樹脂より液晶構造中、同一層内（横方向）の秩序性を表す可干渉距離 $D$ が大きく、また、層構造を示さないネマチック液晶構造を示すモノメソーゲン型高熱伝導樹脂より、層構造を示すスメクチック液晶構造を示すため、層形成方向（縦方向）に関しても秩序性が高く、熱伝導率の大きさと高次構造の秩序性の相関が本実験時事実により明確に示されたと考えられる。

Table 3 Thermal conductivities, coherent lengths  $D$ , and liquid crystal structures of mono- and twin-mesogen polymers.

樹脂	TME <sub>8</sub>	モノメソーゲン型
熱伝導率(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.53	0.26
$D$ (/Å)	27.2	14.7
液晶相の型	Smectic	Nematic

### 4. 結論

合成により高熱伝導樹脂TME<sub>8</sub>のモノマーTwin8eを得て、種々の測定によりその液晶性に関する知見を得た。またそこからTME<sub>8</sub>の重合温度を決定した。

重合により得た樹脂はIR測定により合成確認をした。この樹脂TME<sub>8</sub>はレーザーフラッシュ法による熱伝導率測定を行うことがほぼ可能な形状に硬化することができた。KBr法、ATR法によるIR測定、偏光IR測定の結果から樹脂表面の配向がないこと、等方的に硬化されていることを確認した。XRD測定、SAXS測定から、TME<sub>8</sub>樹脂の高次構造、すなわち、樹脂内部に形成されている液晶構造の詳細な知見を得た。その構造は、モノマーがネマチック相であったのに対し、より秩序性の高いスメクチック液晶型の構造であった。

さらに樹脂に対し熱伝導率測定を行うことで高次構造と物性の相関を明らかにし、モノメソーゲン型高熱伝導樹脂と今回検討を行ったツインメソーゲン型高熱伝導樹脂TME<sub>8</sub>の熱伝導率の違いをその高次構造の違いから明らかにすることができた。

### 参考文献

- 1) Akatsuka, M., Takezawa, Y., J. Appl. Polym. Sci., 89, (2003) 2464.
- 2) 竹澤由高、“高次構造制御による高熱伝導絶縁エポキシ樹脂”、ネットワークポリマー、第26巻(第4号)、(2005) 38
- 3) Shiota, A., Ober, C.K., J. of Polym. Sci. Part A: Polym. Chem., Vol.34, (1996) 1291-1303
- 4) 塩田淳、クリストファー ケムパー オーバー、特開平9-118673、公開日 1997年5月6日



## 細胞の増殖、分化、機能維持を制御する蛇毒因子の単離と その機能に関する研究

工学院大学 応用化学科 辛 英哲

工学院大学 応用化学科 今村保忠

明治薬科大学 薬学教育センター 阿刀田 英子

山梨大学 医学部 井上 克枝

Isolation and Characterization of the Snake Venom Protein that Affects the Growth, Differentiation and Function of mammalian Cells.

Yongchol Shin and Yasutada Imamura, Department of Applied Chemistry, Kogakuin University: Hideko Atoda,

Department of biology, Meiji Pharmaceutical University:

Katsue Inoue, Department of Clinical and Laboratory Medicine, Yamanashi University

**ABSTRACT :** The snake venom proteins that inhibit binding of human fibrosarcoma cell(HT-1080) to collagens were purified from the crude venom of *Naja atra* (Taiwan cobra) by two steps of column chromatography. Determined N-terminal amino acid sequence of one of purified proteins is identical with Cardiotoxin-4. The molecular weight of the venom protein measured by mass spectrometry well coincides with that of Cardiotoxin-4. Therefore, the purified venom protein is identified as Cardiotoxin-4, that has hemolysis activity. The Cardiotoxin-4 inhibits binding of HT-1080 as well as other tumor cells to type IV collagen more effectively than type I collagen or fibronectin.

### 1. はじめに

コラーゲンなどの細胞外基質は細胞の足場としてだけでなく、細胞の増殖や分化、機能維持に積極的に関与していることが明らかになっている。細胞外基質と細胞の結合は、インテグリンとよばれる細胞膜タンパク質を筆頭に多くのタンパク質、糖鎖、脂質などが関与していると考えられている。インテグリンは細胞表面に発現している膜貫通型タンパク質であり、 $\alpha$ 鎖と $\beta$ 鎖の異なる2つのサブユニットが非共有結合により会合した構造をしており、細胞の接着、脱着において中心的な役割を果たす。哺乳類では18種類の $\alpha$ 鎖と8種類の $\beta$ 鎖が存在し、その組み合わせが異なる24種類のインテグリンが知ら

れている。インテグリンの接着能は細胞が受ける種々の刺激に応じて細胞の内側からもコントロールされている。また、インテグリンを介して細胞がリガンドに接着すると、その情報は細胞内に伝えられ最終的には細胞の次の活動（生存、増殖、遺伝子発現など）を引き起こすことが分かっている。これらの結合について詳細に解析することは、細胞外基質によって細胞の増殖、分化や機能維持がいかに制御されているかを調べる上で重要である。

ヘビ毒の中にはインテグリンと競合的に結合することで細胞と細胞外基質の接着を阻害し、細胞の機能の抑制や細胞にダメージを与えるタンパク質がある。このようなタンパク質は循環器疾患の診断薬の設計、骨粗しょう症の治療薬、および血管新生により引き起こされる腫瘍

うの増殖と転移における治療薬の設計に利用されている(1)。

Cardiotoxin (CTX) ファミリータンパク質はコブラ科のヘビ毒に多く含まれている塩基性タンパク質で、3つのループからなる構造をしており立体構造の特徴から three finger toxin ファミリータンパク質に属する(図3)。コブラ科のヘビ毒は、アセチルコリンやアセチルコリン受容体、あるいはイオンチャンネルに作用する神経毒が主に含まれていることが分かっており、神経に関する報告が圧倒的に多い。その含量は通常のコブラ粗毒中に30~50%と非常に高い。CTX 1 はマウスの骨格筋細胞の壊死を惹き起すことがわかつており、CTX 2、CTX 3、CTX4 は溶血作用を持つことが知られている(2)。また、CTX 3 は腫瘍細胞の壊死を引き起こす(3)、プロテインキナーゼ C の阻害することが知られている。CTX 5 は、インテグリン $\alpha_5\beta_3$ と結合することが知られている(4)。このように CTX ファミリーは幅広い活性を有する事が知られている。

本研究では、タイワンコブラ粗毒由来の CTX4 が細胞接着阻害活性を有することを明らかにした。これまで CTX4 に細胞接着阻害活性がある事は知られておらず、接着阻害作用機構について詳細に解析し、インテグリンなどの細胞膜レセプターを介した細胞外基質による細胞の増殖、分化や機能維持の制御機構の一端を明らかにする。また、腫瘍細胞などの特定の細胞の増殖や転移を制御する道具としての可能性を検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 液体クロマトグラフィーによる接着阻害因子の単離と同定

18種類の蛇毒から、細胞外基質と細胞の結合に影響を及ぼす因子を含む蛇毒を選定する。本研究では細胞外基質としてコラーゲンを用いる。コラーゲンは、従来ペプシン等の酵素を用いて組織から抽出するが、工学院大学の今村保忠教授により酵素を使わずコラーゲンを抽出する方法が確立されており、より生体内の状態に近いコラーゲンを用いる。つぎに、蛇毒から種々のカラムクロマトグラフィーを用いて、目的タンパク質を精製する。本実験では、陽イオン交換クロマトグラフィーおよび逆相クロマトグラフィーを単独、あるいはその組み合わせで、タイワンコブラ粗毒から接着阻害因子であるタンパク質、および他の CTX ファミリータンパク質を単離した。単離したタンパク質の N 末端側のアミノ酸配列をプロテインシーケンサーで解析し、分子量を飛行時間型質量分析計によって測定した。

### 2.2 単離した接着阻害因子 (CTX) を用いた接着阻害実験

ヒト線維肉腫細胞 (HT-1080) と各細胞外基質 (I型、

IV 型コラーゲンおよびフィブロネクチン) との接着を CTX4 あるいは CTX3 を用いて阻害することで基質による接着阻害の強さを比較した。さらに、数種類の細胞を用いて細胞接着阻害実験を行い細胞による接着阻害活性の特異性を確認した。

## 2.3 蛇毒タンパク質の標的因子の特定

各種培養細胞を細胞溶解液に加え、3時間インキュベートした。その後、細胞溶解液を回収し、試料とした。

CTX4 あるいは BSA をビオチン化した。された CTX4 あるいは BSA 回収した。

### 2.19 ビオチン化した CTX4 と BSA を用いた、細胞に含まれる CTX4 と結合するタンパク質の検出

この試料を電気泳動した後、PVDF 膜にゲル中のタンパク質を転写した。PVDF 膜上に Biotin Labeling Kit-NH<sub>2</sub> を用いてビオチン化した CTX4 あるいは BSA を添加した。PVDF 膜上に転写したタンパク質と結合したビオチン化 CTX4 あるいは BSA を、酵素標識したアビジンと反応させ、発光基質による検出を試みた。

## 3. 結 果

### 3.1 液体クロマトグラフィーによる接着阻害因子の単離と同定

既に 18 種類の蛇毒から、肉腫細胞とコラーゲンとの結合を阻害する成分を有する蛇毒として、ヒメハブ、タイワンコブラ、タンビマムシ由来の粗毒の 3 種を選定した。最も阻害活性の強かったタイワンコブラ由来の粗毒から、陽イオン交換クロマトグラフィーによって接着阻害因子であるタンパク質の単離に成功した。単離したタンパク質の分子量を質量分析計によって測定した結果、分子量は 6781.3115 であり CTX4 (分子量 6780.3846) とほぼ一致した。比較のために、陽イオン交換クロマトグラフィーと逆相クロマトグラフィーによって他の CTX ファミリータンパク質を単離した。単離したタンパク質の分子量を上記と同様にして測定した結果、6734.3865 であり、Cardiotoxin-3 (CTX3) (分子量 6734.4292) とほぼ一致した。この 2 つのタンパク質の N 末端側のアミノ酸配列 (20 残基) を解析したところ、それぞれのタンパク質の決定されたアミノ酸配列は CTX4 と CTX3 に完全に一致したため (システイン残基は、還元アルキル化等を行っておらず、予想された配列の位置では検出されなかった)、2 つのタンパク質を CTX4 と CTX3 であると同定した。

### 3.2 単離した接着阻害因子 (CTX) による各種細胞と細胞外マトリックスとの接着阻害

CTX4 を用いたときの結果 (図 1) を見ると IV 型コラーゲンと HT-1080 の接着をより強く阻害していた。さらに、細胞による特異性を確認するために数種類の細胞を用い

て接着阻害実験を行ったところ、ヒト胎児由来肝臓細胞（HEK293）、ラット副腎髓質褐色細胞（PC-12）とIV型コラーゲンの接着を強く阻害していたが、ヒト臍帯静脈内皮細胞（HUVEC）、ヒト胎児由来線維芽細胞（TIG-1）の接着をほとんど阻害しなかった（図1）。接着阻害活性がみられた細胞は全て腫瘍化した細胞であり、CTX4は腫瘍細胞によるIV型コラーゲンへの接着を強く阻害すると考えられる。一方で、CTX3を用いて接着阻害実験を行った結果、細胞接着阻害いずれの条件でも認められなかつた。

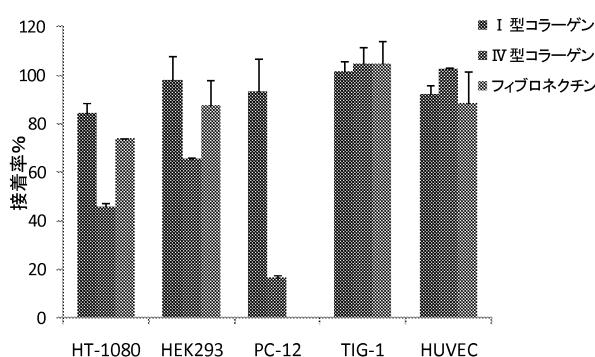


図1 各種細胞とCTX4を用いた細胞接着阻害実験

HT-1080、HEK293、PC-12、TIG-1、HUVECを用いて細胞接着阻害実験を行った。CTX4非添加時の各種細胞と細胞外マトリックスとの接着数を100%とした。添加したCTX4の終濃度は全て $2.2\mu M$ である。PC-12はCTX4を添加無しでもフィブロネクチンと接着しなかった。

多くのthree finger toxinファミリータンパク質の神経毒性発現残基が2ループ目の先端に存在することや、CTX3とCTX4のアミノ酸配列の違いから（図2、3）CTX4が有する接着阻害活性は28-31残基のアミノ酸に起因するものではないかと考えている。

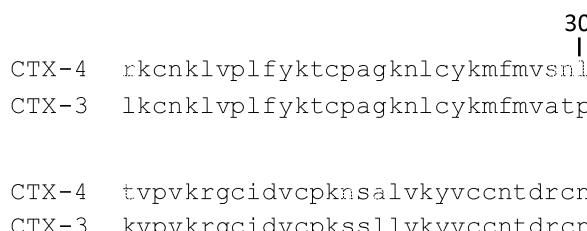


図2 CTX4とCTX3のアミノ酸配列の相同意

CTX4とCTX3のアミノ酸配列を比較し、CTX3と異なるCTX4のアミノ酸配列を赤色で示した。数字はアミノ末端からのアミノ酸残基数を示している。

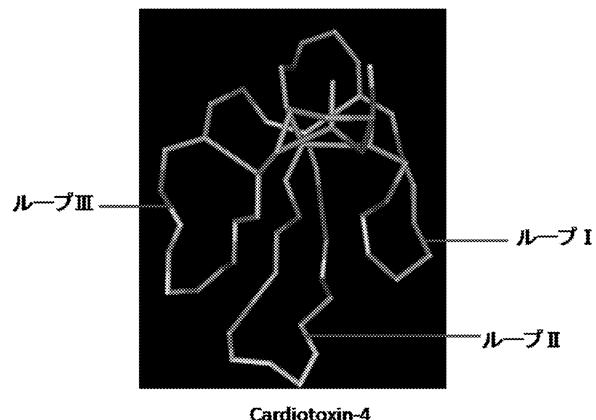


図3 CTX4の立体構造図

中性アミノ酸を灰色、塩基性アミノ酸を青色、酸性アミノ酸を赤色、CTX3と異なるアミノ酸を黄色、ジスルフィド結合をオレンジ色で表す。

### 3.3 蛇毒タンパク質の標的因子の特定

ビオチン化CTX4と結合する細胞膜上のタンパク質の検出を行った。その結果、CTX4を反応させたメンブレンにのみ、PC-12、TIG-1、HUVECの各種細胞溶解液では、25KDa-35KDa付近にCTX4と結合するタンパク質が確認できた。したがって、PC-12、TIG-1、HUVECの細胞膜上に、CTX4と結合する分子量が25-35KDaのタンパク質を含んでいる可能性が高い（図4）。

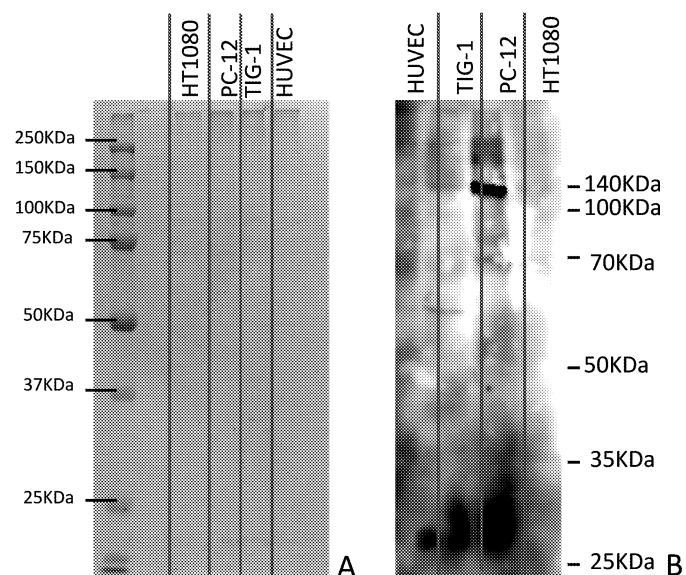


図4 各種培養細胞膜上のビオチン化CTX4と結合するタンパク質の検出

A: 各細胞の溶解液を電気泳動した後、CBB染色を行った。B: PVDF膜に各細胞の溶解液を転写し、ビオチン化CTX4 ( $1.3\mu M$ )を反応させてアビシンにて検出した。

また、検出されたバンドがスマアなことから、糖タンパク質であると考えた。細胞表面に分布しているタンパク質が糖鎖修飾を受けていることが多いことから、今回検出されたタンパク質は細胞表面に分布している可能性がある。しかし、HT-1080にはこのようなタンパク質が検出されなかつたため、今回検出されたタンパク質が接着阻害活性に関与していることは示せなかつた。もしくはHT-1080は別の機構により接着を阻害させている、SDS-PAGEによりタンパク質が変性してCTX4と結合できなかつた等の理由が考えられる。

#### 4. 考 察

タイワンコブラ粗毒から細胞該マトリックスとヒト線維肉腫細胞（HT-1080）との接着を阻害する因子を単離した。分子量及びN末端のアミノ酸配列からCTX4であることが明らかとなつた。CTX4は腫瘍化した細胞とIV型コラーゲンとの接着を特異的に阻害した。特にラット副腎髓質褐色細胞（PC-12）とIV型コラーゲンとの接着を強く阻害した。接着阻害活性を示さなかつたCTX3とアミノ酸配列を比較した結果、28～31残基のアミノ酸（Ser-Asn-Leu-Thr）が接着阻害活性に関係していると考えられた。CTX4には溶血作用があることが知られているが、細胞とIV型コラーゲンとの結合を阻害する活性があることは知られておらず、その作用機序は大変興味深い。ビオチン化したCTX4と結合する細胞膜タンパク質の分子量は、PC12由来細胞膜では25～35kDa、TIG-1由来細胞膜では25～30kDaであった。CTX4による接着阻害が確認できなかつたHUVEC由来細胞膜では25kDaの分子量のタンパク質と結合することが確認できた。一方、CTX4による接着阻害を示すHT1080由来細胞膜では、CTX4と結合を示すタンパク質を確認することが出来なかつた。これらタンパク質との結合がCTX4の示す、細胞接着阻害活性と関係しているか、現在検討中である。

タイワンコブラ粗毒由來のCTX5は、インテグリン $\alpha_v\beta_3$ との結合を阻害する事が報告されている。インテグリン $\alpha_v\beta_3$ はファイプロネクチンあるいはフィブリノーゲンの受容体であることが知られており、IV型コラーゲンの受容体ではないと考えられている。よってCTX4とCTX5の細胞接着阻害は異なる機構で起きていると考えられる。腫瘍細胞の壊死を引きおこすCTX3は細胞膜表面上のリン脂質と相互作用することが報告されている（5）。CTX3とスフィンゴリン脂質複合体とのX線結晶構造解析も行われており、結合機構の詳細についての解析が進んでいる（5）。CTX3はスフィンゴリン脂質複合体と相互作用しつつ、細胞に穿孔を形成する事で細胞死をもたらすと考えられている。CTX4には細胞死を誘導する活性があることは知られておらず、スフィンゴリン脂質複合体との相互作用の有無についても知られていない。

コブラ科の蛇毒に主に含まれているthree-finger toxin ファミリータンパク質は神経細胞の神経伝達物質

受容体に結合し、神経伝達を阻害することが知られている。タイドクハキコブラ由來の three-finger toxin ファミリータンパク質 $\alpha$ -cobratoxin (Cbtx) とアセチルコリンレセプター構造類似体 acetylcholine-binding protein との複合体のX線結晶構造解析から、Cbtxの2つの目のループに標的タンパク質の認識部位が存在する（6）。本研究からも、CTX4の第2ループのアミノ酸残基が接着阻害活性に関与していることが示唆されており、three-finger toxin ファミリータンパク質の第2ループの機能的特徴であると考えられる。

CTX4による細胞接着阻害機構を研究することで、細胞外基質による細胞の増殖、分化や機能維持の制御機構の一端を明らかにし、腫瘍細胞などの特定の細胞の増殖や転移を制御するツールの開発を目指す。

#### 参 考 文 献

- (1) Lewis, R. J., Garcia, M. L. : Therapeutic potential of venom peptides, *Nature Rev. Drug Discov.*, Vol. 2, (2003) pp. 1790-802.
- (2) Chen, Y. H. et al. : Membrane disintegration and hemolysis of human erythrocytes by snake venom cardiotoxin (a membrane-disruptive polypeptide), *Biochem. Int.*, Vol. 8 (1984). pp. 329-338
- (3) Iwaguchi, T. et al. : Cytolytic activity of cytotoxin isolated from Indian cobra venom against experimental tumor cells, *Biochem. Int.*, Vol. 10 (1985). pp. 343-349
- (4) Wu, P.L., et al. : Non-cytotoxic cobra cardiotoxin A5 binds to alpha(v)beta3 integrin and inhibits bone resorption. Identification of cardiotoxins as non-RGD integrin-binding proteins of the Ly-6 family, *J. Biol. Chem.*, Vol. 281 (2006). pp. 7937-7945
- (5) Wang, C.H. et al. : Glycosphingolipid-facilitated membrane insertion and internalization of cobra cardiotoxin. The sulfatide-cardiotoxin complex structure in a membrane-like environment suggests a lipid-dependent cell-penetrating mechanism for membrane binding polypeptides., *J. Biol. Chem.*, Vol. 281 (2006). pp. 656-667
- (6) Bourne, Y. et al. : Crystal structure of a Cbtx-AChBP complex reveals essential interactions between snake  $\alpha$ -neurotoxins and nicotinic receptors, *EMBO J.*, Vol. 24 (2005). pp. 1512-1522

# オーバーレイネットワークによるアプリケーションレイヤ リンクアグリゲーションの研究

工学院大学工学部情報通信工学科 浅谷 耕一

早稲田大学大学院国際情報通信学研究科 中里 秀典

A Study on Overlay Network Link Aggregation on Application Layer

Koichi ASATANI Department of Computer Science and Communications, Kogakuin University

Hidenori Nakazato, Graduate School of Global Information and Telecommunications Studies, Waseda University

**Abstract** : The link aggregation is a technology that bundles multiple links on a single virtual links, enabling large-capacity data communications and faster transmission speed. In addition to faster transmission speed and large-capacity data communications, link aggregation also enables redundant communications. Several link aggregation schemes have been proposed, but these schemes utilize transport layer link aggregation.

In this paper, application level link aggregation is proposed and implemented with Android OS, which is most popular OS for devices such as smartphones and tablets PCs. The proposed application level link aggregation is verified with use of the implemented terminal.

## 1. はじめに

大容量なデータ通信、通信速度の高速化が可能になる技術として、リンクアグリゲーションが研究されている[1],[2]。リンクアグリゲーションとは、複数のリンクを束ねて1つの論理的なリンクとして使用する技術のことである。これにより、帯域幅の拡大を図ることができる。また、大容量なデータ通信、通信速度の高速化以外に、冗長性のある通信も可能となる。具体的には、経路で損失したパケットをもう一方の経路で再送することにより損失したパケットの保証が可能となる。リンクアグリゲーションは、様々な通信システムにおいて研究が行われている。既存のリンクアグリゲーションの研究では、トランスポートレイヤ以下においてリンクアグリゲーションを実現している。そのため、リンクアグリゲーションを前提としたシステム構築が難しいという問題点がある。また、無線ネットワークと有線ネットワークのリンクアグリゲーションは未検討である。

本報告では、無線ネットワークと有線ネットワークのリンクアグリゲーションを実現するために、無線・

有線ネットワーク上のオーバーレイネットワークに着目する。また、リンクアグリゲーションは、トランスポートレイヤ以下の変更を不要とし、導入を容易とするため、アプリケーションレベルにおいて行う。リンクアグリゲーション方式のアーキテクチャ、アルゴリズム、動的データ転送制御について検討し、Android 端末及び Linux サーバにアプリケーションを実装し、通信実験を行った結果について述べる。

## 2. 関連研究

イーサネットにおけるリンクアグリゲーションに IEEE802.3ad がある[1]。また、無線システムによるリンクアグリゲーション MIMO(Multi-Input Multi-output)環境を想定したマルチリンク伝送がある[2]。さらにトランスポート層におけるリンクアグリゲーションである M/TCP(Multi Path/Transmission Control Protocol)[3] やコグニティブ層におけるリンクアグリゲーション[4]などがある。しかしこれらの方式はトランスポート層以下で実装を行っているためシステムの導入が困難であるという問題点がある。また、無線ネットワーク

と有線ネットワークのリンクアグリゲーションは検討

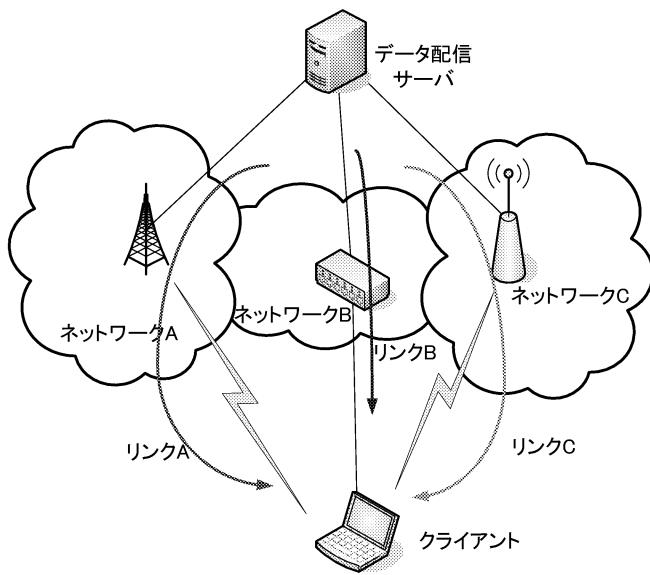


図 1. 提案方式におけるネットワーク構成例

されていない[5].

### 3. アプリケーションレベルにおけるリンクアグリゲーション方式の提案

#### 3.1. リンクアグリゲーション方式の課題

提案するオーバーレイネットワークによるリンクアグリゲーション手法はトランスポートレイヤ以下の変更が不要であるため導入が容易であることが特徴である。本方式ではユーザの利便性向上、スループットの向上を目指す。図 1 に提案方式の課題と機能の機能を示す。

##### ①ユーザの利便性向上

ユーザが複雑な設定や手続きを踏むことなくリンクアグリゲーション通信を行えるようにする。ユーザは Web を閲覧した際に特定のリンクを選択することでリンクアグリゲーションを開始する。Web ページ上のリンクを選択するだけで自動的にアプリケーションが起動する。

##### ② スループット向上

使用可能な複数のリンクを活用し、より短い時間でデータのダウンロードを完了できることでユーザの満足度を向上する。スループットの向上については新規接続処理でのデータ分配比率決定やデータ転送処理での動的データ分配にて検討を行う。

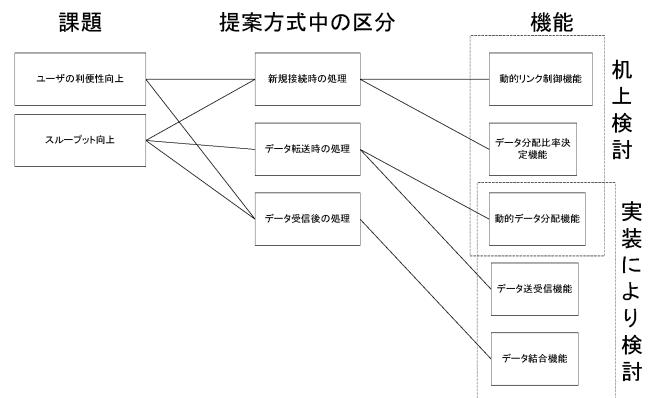


図 2. 提案方式の課題と機能の対応

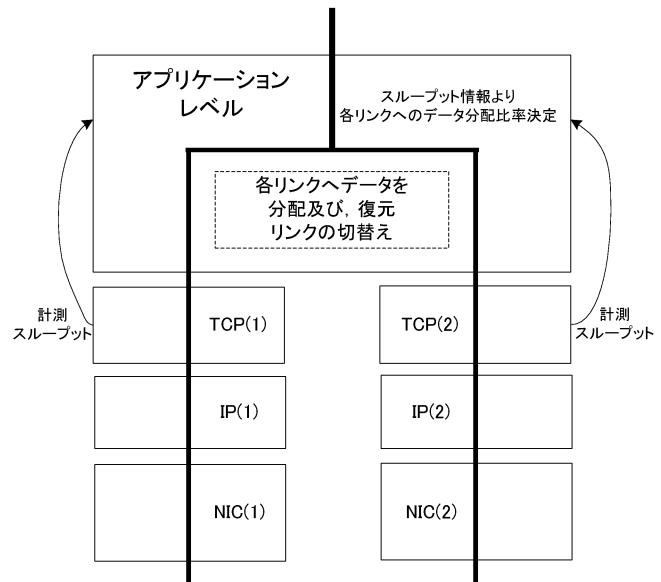


図 3. アプリケーションレベルにおける  
リンクアグリゲーション

#### 3.2. リンクアグリゲーション方式のアーキテクチャ

ネットワーク構成例を図 2 に示す。クライアントはネットワーク A,B,C へ接続することとする。各ネットワークの基地局、ルータの上位に、データ配信サーバを設置し、各リンクへデータの分配、及び送信を行う。また、クライアントは複数の無線システムを利用するため、各アクセスポイントの通信エリアが重なるエリアにいることが前提となる。

アプリケーションレベルにおけるアグリゲーションの概念図を図 3 に示す。この方式ではアプリケーションレベルにおいて、サーバはデータの分配を、クライアントでは復元を行う。また、アプリケーションレベル以下においてコネクションは独立である。

この方式は、リンクアグリゲーション通信と単一リンク通信の切替えを行う動的リンク制御機能と、リンクアグリゲーション通信時に各リンクへのデータ配分を決定するスループットを指標としたデータ分配機能、帯域変動時にデータ分配比率を動的に変更する動的データ分配比率変更機能の3つの機能により構成する。

### 3.3. 動的リンク制御機能

クライアントは、新規接続時にテストデータを各リンクへ送信することによりスループットを測定し、それを指標として単一リンク通信を行うか、リンクアグリゲーション通信を行うか判断する。リンクアグリゲーション通信を行う場合は、各リンクへのデータ分配比率を決定し、データ配信サーバへ通達する。リンクアグリゲーション通信時のスループットである総合スループットを最大にするデータ分配比率は、各リンクのスループット比率よりクライアントが算出する。また、データ通信時に、通信に使用しているリンクのスループット変動を検知した場合、分配比率を動的に変更する。これにより、スループットが変動しても総合スループットは最大となる。また、総合スループットが単一リンク通信時の特性と同等以下となる場合、リンクアグリゲーション通信から単一リンク通信の切替えを行う。

通信継続時は、各リンクより受信したデータより各リンクのスループットを計測し、リンクアグリゲーション通信を継続するか、単一リンク通信に切替えるか判断する。单一リンク通信に切替え後、複数のネットワークに接続可能である場合は、再度テストデータを送信しスループットを計測し、リンクアグリゲーション通信へ切替えるか単一リンク通信を継続するか判断する。リンクアグリゲーション通信継続時に各リンク

の帯域が変動したと判断した場合は、各リンクのスループットより再度データ分配比率を算出し、データ配信サーバへ通達する。

### 3.4. データ分配比率決定機能

提案方式ではデータ分配に用いる指標として、電波強度、スペクトル干渉、各リンクのスループット、RTTなどが挙げられる。各リンクへのデータ分配比率が決定したら、その分配比率データを双方のリンクでデータ配信サーバに送信する。これにより、冗長性のある分配比率決定の通知が可能となる。データ配信サーバが分配比率を把握すると、データ配信サーバにおいて受信したデータを分配比率に沿って各リンクへ分配する。クライアントにおいては各リンクから受信したパケットをデータ単位で復元及び、並び替えする。

### 3.5. 動的データ分配機能

通信継続時において帯域が変動した場合、動的にデータの分配比率変更する。クライアントにおいて各リンクからのデータ受信完了時間差が生じる。そこで、通信継続時において各リンクの実効帯域が変動し、それが閾値以上となる場合、データ分配比率を変更する。

### 3.6. Android を用いたクライアントの実装

スマートフォンやタブレット端末などに向けた汎用的なOSであるAndroidを搭載した端末に実装し、実現可能性を確認する。提案手法のアーキテクチャを図4に示す。Androidはアプリケーションソフトウェア、アプリケーションフレームワーク、Androidランタイム、ライブラリ群及びLinuxカーネルから構成されている。本研究ではアプリケーションソフトウェアに提案手法を実装する。また、Intel i386シリーズ互換のCPUを搭載したPCで動作するAndroid x86がある。

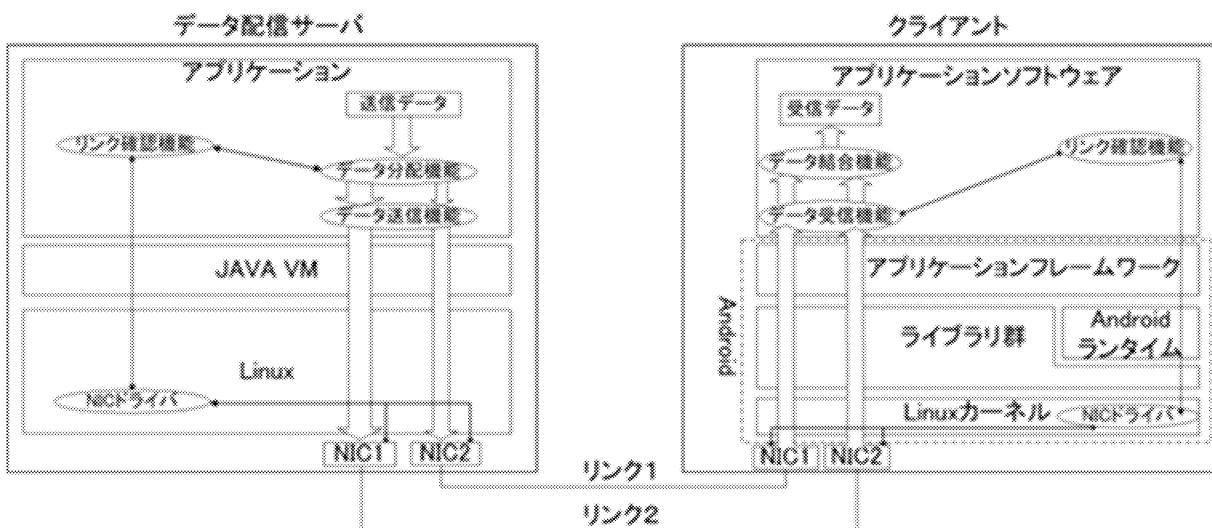


図4. 実装システムのアーキテクチャ

## 4. 実験

### 4.1. 実験構成

実装したシステムの動作を確認するため、2本の無線のリンクを用いたネットワークと有線・無線のリンクを用いたネットワークを構築し、300MBのデータをダウンロードするリンクアグリゲーション通信実験を行った。無線・無線のリンクアグリゲーションではIEEE802.11n及びIEEE802.11gのリンクを用いた。有線・無線のリンクアグリゲーション通信ではFastEthernetとIEEE802.11nのリンクを用いた。無線リンクは両リンクとも2.4GHz帯の電波を使用しているが、チャネルを離すことで両リンク間の干渉を避けて

いる。実験に使用した機器を表1に示す。また、無線・無線のリンクアグリゲーションの実験構成を図6に、有線・無線のリンクアグリゲーションの実験構成を図7に示す。

次にリンクアグリゲーション通信を行っている際に片方のリンクが切断されたり、通信途中で新たなるリンクが使用可能となるような状況を想定した実験を行った。この実験では有線・無線のトポロジを用いた。リンクアグリゲーション通信開始から5秒後に有線のリンクを切断する。また、15秒経過後に再び有線のリンクを接続する。

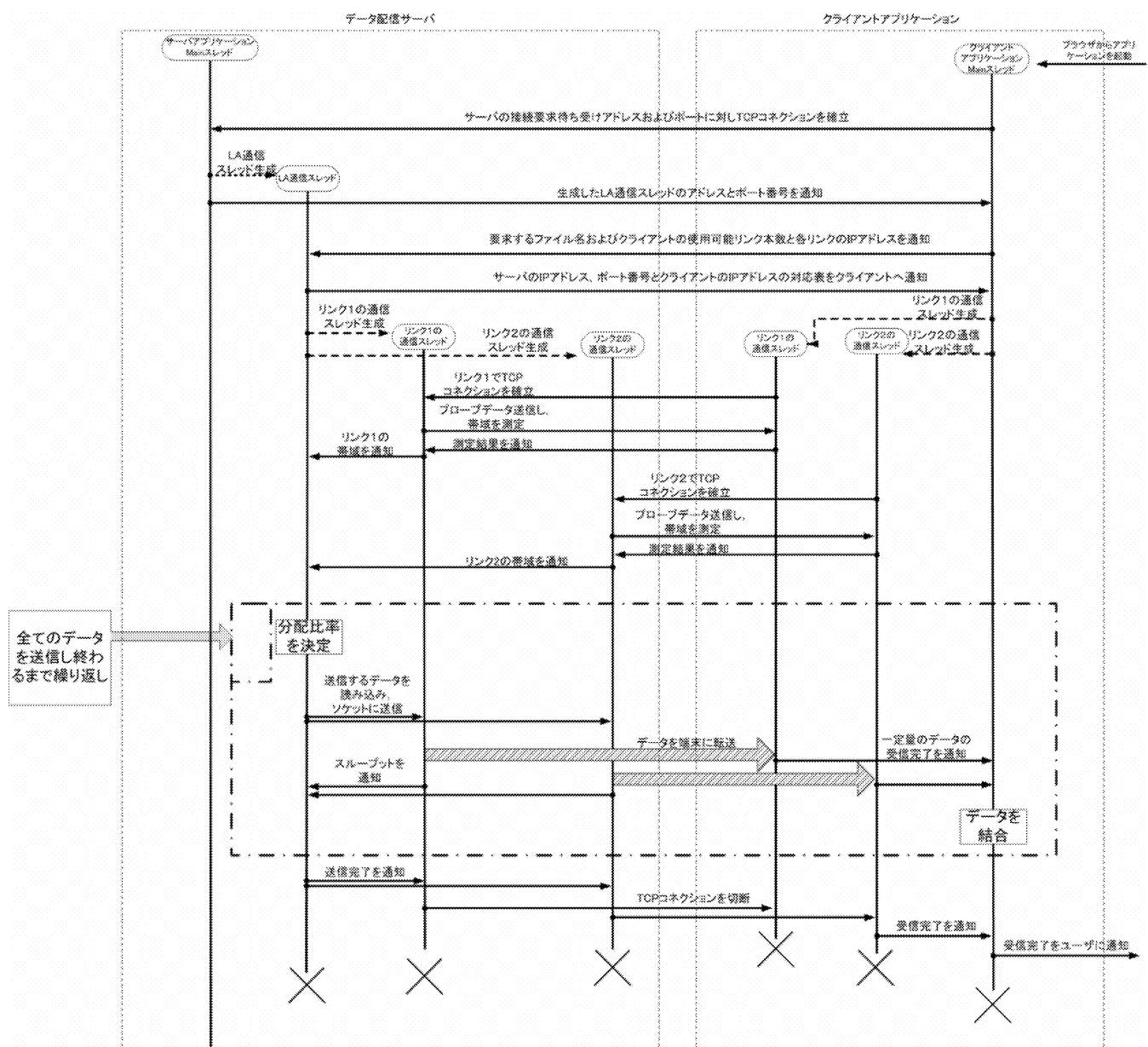


図5. 実装システムのシーケンス図

## 4.2. 実験結果

無線・無線のリンクアグリゲーション通信実験結果を図 8 に、有線・無線のリンクアグリゲーション通信実験結果を図 9 に示す。無線・無線のリンクアグリゲーション通信では有線に比べ帯域変動の多い無線リンクを用いたリンクアグリゲーション通信でも、両リンクの通信がほぼ同時に終了していることから、適切にデータ分配が行えていることがわかる。FastEthernet と IEEE802.11 g のリンクアグリゲーション通信実験結果では、通信開始から 11 秒程経過した際に両リンクでのスループットの低下がみられた。スループットが低下した際にデータ配信サーバでハードディスクの読み込みが頻発したことが確認できており、これはデータ配信サーバにおいて送信するデータを読み込む際のオーバヘッドであると考えられる。

次にリンクの切断や新規接続を想定した実験を行った結果を図 10 に示す。この結果よりリンクアグリゲーション通信途中でのリンクによる单一リンク通信への切り替えが正常に行われていることが確認できた。また、新たなリンクが使用可能になった際の单一リンク通信からリンクアグリゲーション通信への切り替えは、リンクの検出やコネクションの設定等に数秒時間がかかるが、正常に動作することが確認できた。

表 1. 使用機器

クライアント		データ配信サーバ		アクセスポイント	
製造	DELL Vostro 3300	製造	DELL PowerEdge T300	AP1	WZR-HP-G301NH
CPU	Intel i5 M480	CPU	Intel Xeon X3822S	AP2	CG-WLB-RAGM
仮想化ソフトウェア	Virtualbox 4.1.6	OS	Ubuntu 11.10 64bit 環境		
オペレーティングシステム	Windows 7 Home Premium	接続インターフェース1	BCM437232 [FastEthernetモードで後述]		
ゲストOS	Android 2.2 x86	接続インターフェース2	BCM437232 [FastEthernetモードで後述]		
接続インターフェース	Realtek GBE				
接続インターフェース 〔無線・無線実験時の IEEE802.11g 〕	GW-USMicro-G				
接続インターフェース 〔無線・無線実験時の IEEE802.11n 〕	GW-USValue-EZ				
接続インターフェース 〔無線・無線実験時の IEEE802.11n 〕	DW18G1				

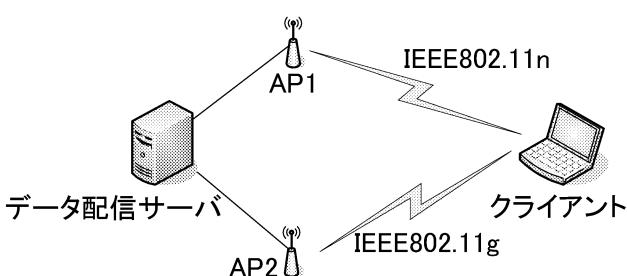


図 6. 無線・無線のリンクアグリゲーション通信実験構成

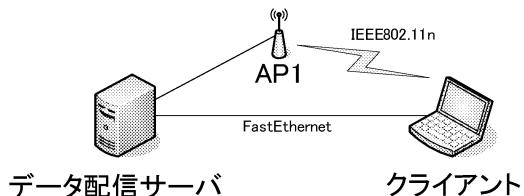


図 7. 有線・無線のリンクアグリゲーション通信実験構成

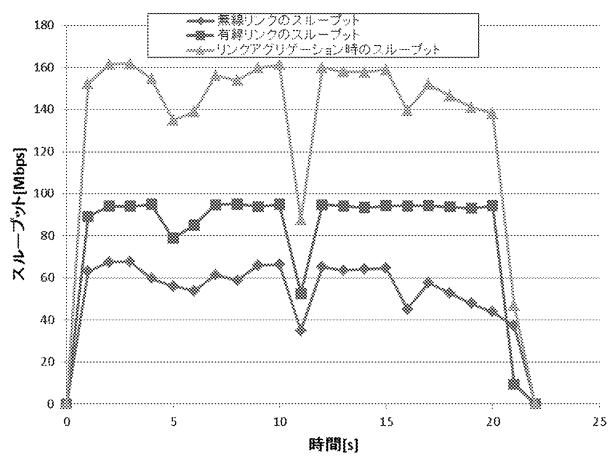


図 8. 無線・無線のリンクアグリゲーション通信実験結果

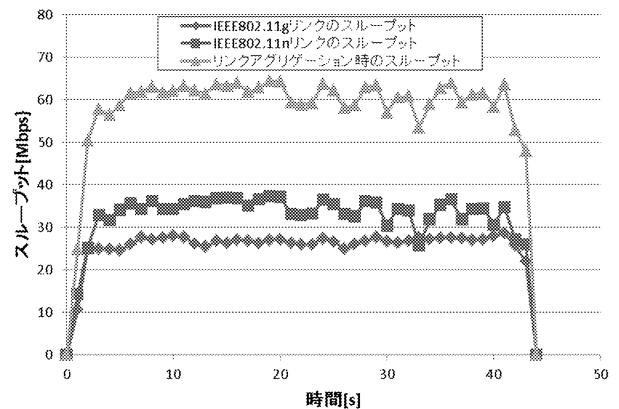


図 9. 有線・無線のリンクアグリゲーション通信実験結果

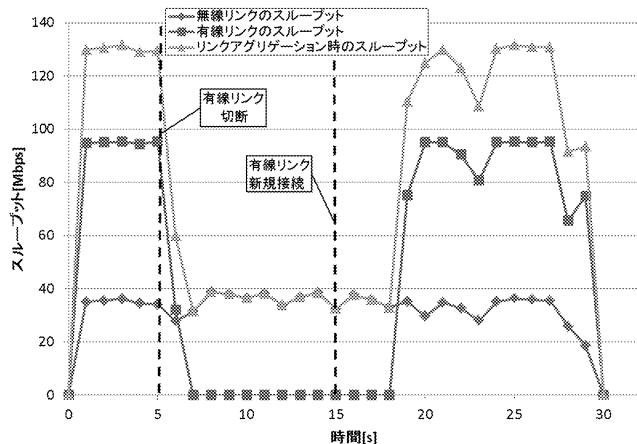


図 10. リンクの切断、新規接続時の追従性

## 5. おわりに

本報告では、無線・有線上のオーバーレイネットワークによるリンクアグリゲーションに着目し、実現可能性を確認するためデータ配信サーバ及びクライアントの実装を行った。クライアントの OS にはマートフォンやタブレット端末などに向けた汎用的な OS である Android を用いた。

実装したシステムの実現可能性は実験を行うことにより確認した。その結果複数のリンクを同時に使用することにより高速な通信ができることが確認した。

## 参考文献

- [1] Draft standard P802.3ad, Supplement to Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection(CSMA/CD)Access Method and Physical Layer Specification: Link Aggregation, draft 3.0, Nov. 1999.
- [2] 長谷川洋平, 村瀬勉, “TCP の特性を考慮した複数経路通信方式の提案と評価,” 信学会技報, NS2003-328, pp. 175-178, Mar. 2004.
- [3] 坂本大輔, 近藤勝裕, 村田裕昭, 六浦光一, 岡田博美, “マルチリンク無線 LAN における ML-ARQ 方式,” 信学技報, IN2004-273, pp. 149-152, Feb. 2005.
- [4] 石津健太郎, 黒田正博, 原田博史, “コグニティブ無線クラウド(4)ー異種無線アダプティブリンクアグリゲーション技術ー,” 信学技報, SR2006-73, pp43-50, May 2007.
- [5] 増井大, 杉崎義雄, 水野修, 浅谷耕一, “無線・有線ネットワーク上のオーバーレイネットワークによるリンクアグリゲーション方式”, 信学技報, CQ2010-81, pp81-86, Feb. 2011.

# 生体機能分子の固定化制御による軟組織適合性に優れた金属材料表面の創製

工学院大学 総合研究所 大家 渥

東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 塙 隆夫

Cytocompatibility of titanium on which immobilized a cellular adhesive peptide through electrodeposited zwitterionic polyethylene glycol

Kei Oya, Research institute for science and technology, Kogakuin University  
Takao Hanawa, Institute of biomaterials and bioengineering, Tokyo Medical and Dental University

**ABSTRACT :** A significant number of surface modification techniques to improve the cytocompatibility of titanium have been developed. Arg-Gly-Asp sequence, RGD peptide, is known to be concerned with cell adhesion and involved in many extracellular matrix proteins. On the other hand, the immobilized density and amount of the peptide are controlled by immobilizing it through electrodeposited NH<sub>2</sub>-PEG-COOH on a titanium surface. In this study, the RGD-containing peptide, GRGDS, was immobilized on titanium through electrodeposited NH<sub>2</sub>-PEG-COOH, and the immobilized manners of GRGDS and electrodeposited NH<sub>2</sub>-PEG-COOH on a titanium surface were investigated.

## 1. はじめに

老化、疾病、事故によって失われた人体機能を修復あるいは再建する方法として、再生医療、人工材料による治療がある。再生医療による治療は長期の入院加療を要する場合が多いが、人工材料による治療は、生体機能の早期再建が可能であり、高齢者や早期の社会復帰を望む患者に有効である。現在、医療用デバイスに使用される生体材料は、金属、セラミックス、高分子に大別される。金属材料は優れた機械的特性をもつため、現在使用されている体内埋入デバイスの約 80 %を占めている。

セラミック材料や高分子材料はその作製段階から生体組織適合性や生体機能性を付与することが可能であるが、金属材料は溶解、鋳造、鍛造、加工、熱処理などの製造プロセスにおいて、それらを付与することができない。そのため、金属材料表面の形状を制御したり、種々の生体機能分子を表面に固定化するなど、金属表面の改質や処理に関する研究が盛んに行われている。しかし、歯科インプラントや心臓ペースメーカーなど、金属材料は軟組織との優れた接着性が求められる部材が多いが、軟組

織との接着性に優れた固体材料はこれまでに開発されていないのが現状である。

アルギニン (R)・グリシン (G)・アスパラギン酸 (D) の順に配列したペプチドは、細胞接着に密接に関わっていることが知られている<sup>1</sup>。この RGD ペプチドを Ti 表面に固定化することにより、優れた細胞接着性を付与できると期待され、数多くの研究が報告されている。これまでに、電着した双性イオン型ポリエチレングリコール (NH<sub>2</sub>-PEG-COOH) を介して Ti 表面に RGD ペプチドを固定化することにより、RGD ペプチドを直接固定化した Ti と比較して骨芽細胞の石灰化能が向上したことが示されている<sup>2,3</sup>。このことから、NH<sub>2</sub>-PEG-COOH を介して RGD ペプチドを固定化したことが細胞機能に影響を及ぼしたといえる。

本研究では、Ti 表面に NH<sub>2</sub>-PEG-COOH を電着し、それを介して RGD 配列を含む GRGDS ペプチドを固定化することにより、Ti の細胞適合性を向上させることを目的とした。そのため、Ti 表面に電着した NH<sub>2</sub>-PEG-COOH の層や GRGDS ペプチドの層について、解析・評価を行った。

## 2. 実験方法

### 2. 1 供試材

供試材として JIS 2 種の工業用純 Ti (CP Ti) を用いた。8 mm φ の棒材をファインカッターで厚さ 1.5 mm に切り出した。切り出した試料の裏面を #150 および #320 の耐水研磨紙で湿式研磨した。その後、表面を #320 および #600 の耐水研磨紙で湿式研磨し、さらに、ダイヤモンド懸濁液 (9 μm) 及び二酸化シリコン混濁液 (0.04 μm) により鏡面に仕上げた。研磨後、アセトン中で 3 回、各 10 min 超音波洗浄を行い、高純度窒素ガス (99.999%) で乾燥させた。その後、オートドライデシケータに 24 h 以上静置した。以下、この試料を “Ti” と表記する。

### 2. 2 電着による $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$ の固定化

作用極に Ti、対極に Pt、参照極に飽和カロメル電極 (SCE) を用いた。電解液に  $1 \text{ mmol L}^{-1}$   $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  (MW=3055) /  $1 \text{ mol L}^{-1}$  NaCl (pH12) を用い、37°C 中で電解液に試料を 10 min 浸漬後、電圧  $-3 \text{ V}_{\text{SEC}}$  で 15 min 通電し、 $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  を電着した。試料を水洗し、高純度窒素ガスで乾燥させ、オートドライデシケータで 24 h 静置した。以下、この試料を “PEG/Ti” と表記する。

### 2. 3 細胞接着性ペプチドの固定化

$30 \text{ mmol L}^{-1}$  (pH 12) に調整した GRGDS 水溶液に PEG/Ti を浸漬し、37°C に設定したインキュベータ内で 24 h 静置した。浸漬後、試料を取り出して水洗し、高純度窒素ガスで乾燥させ、オートドライデシケータで 24 h 静置した。以下、この試料を “GRGDS/PEG/Ti” と表記する。

### 2. 4 固定化層の評価

Ti 表面上の  $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  と GRGDS ペプチドの固定化層の厚さを大気中でエリプソメータによって測定した。 $632.8 \text{ nm}$  の He-Ne レーザーを入射角  $70^\circ$  で試料に照射し、入射光と反射光の偏光変化量 (位相差  $\Delta$ 、振幅比  $\Psi$ ) を測定した。この位相差  $\Delta$  および振幅比  $\Psi$  は、波長、入射角度  $\theta_0$ 、膜厚  $d$  によって変化する。したがって、位相差および振幅比が求まれば光学定数 (屈折率  $n$ 、消衰係数  $k$ )、膜厚  $d$  を求めることができる。本研究では、固定化前の金属表面の光学定数を基本とした 2 層モデル (双性イオン固定化層 / 酸化物を含む金属) を仮定し、固定化層の厚さを評価した。

さらに、固定化層の表面形状を走査型プローブ顕微鏡 (SPM) により測定した。カンチレバーは

MPP-11100-10 (Bruker; 共振振動数  $f=300 \text{ kHz}$ , バネ定数  $C=40 \text{ Nm}^{-1}$ , 曲率半径  $R=10 \text{ nm}$ ) を使用し、試料表面を  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  の範囲で走査した。

## 3. 結果

エリプソメータにより固定化層の厚さを評価した結果を Fig.1 に示す。GRGDS 固定化前の PEG/Ti では約 1.8 nm の固定化層厚さが検出された。 $\text{TiO}_2$  層を含む Ti を 0 nm として計算しているため、Ti 上には何も固定化されておらず、Ti 表面に  $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  が固定化されていることが考えられる。一方、PEG/Ti と比較して、GRGDS 固定化後の GRGDS/PEG/Ti の固定化層厚さは、有意差はなかったものの、0.1 nm 程度の増加傾向を示した。

Fig.2 に SPM により得られた各試料の表面形状像を示す。未処理 Ti と PEG/Ti の形状を比較すると、PEG/Ti 表面には大きな凹凸形状が見られた。したがって、Ti 表面に  $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  が電着されたことが示唆された。一方、PEG/Ti に GRGDS ペプチドを固定化した後の GRGDS/PEG/Ti の表面形状も、PEG/Ti と同様に凹凸形状が見られたが、その凹凸は PEG/Ti よりも細かく、GRGDS ペプチドが固定化されている様子が示唆された。

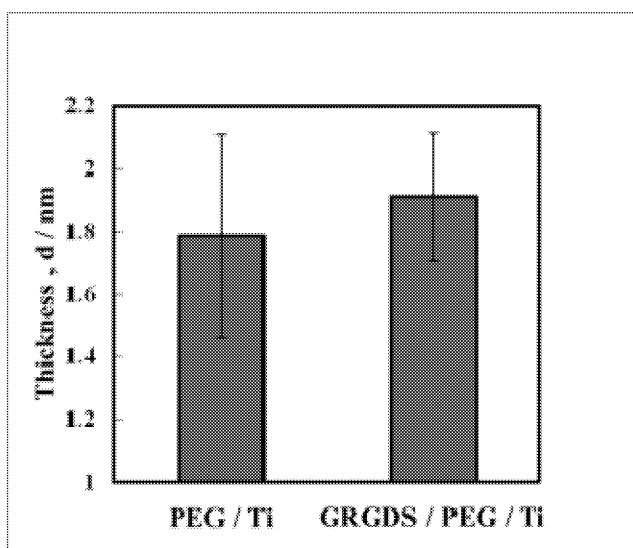


Fig.1 Thicknesses of immobilized layers on Ti (left) and PEG/Ti (right).

## 4. 考察

エリプソメータによる測定結果から、Ti 表面に  $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  を電着した PEG / Ti では約 1.8 nm の固定化層が検出された。エリプソメータでは、各試料上の 5 点をランダムに測定し、得られた 5 つの数値の平均値が各試料の固定化層厚さとなる。本研究では数値が得られたものをデータとして用いているが、エリプソメータの検出感度に達さずに解が発散してしまい、固定化層厚さの変化が見かけ上 0 nm と測定され結果もあった。本研究では、解が発散した点はデータとして採用してい

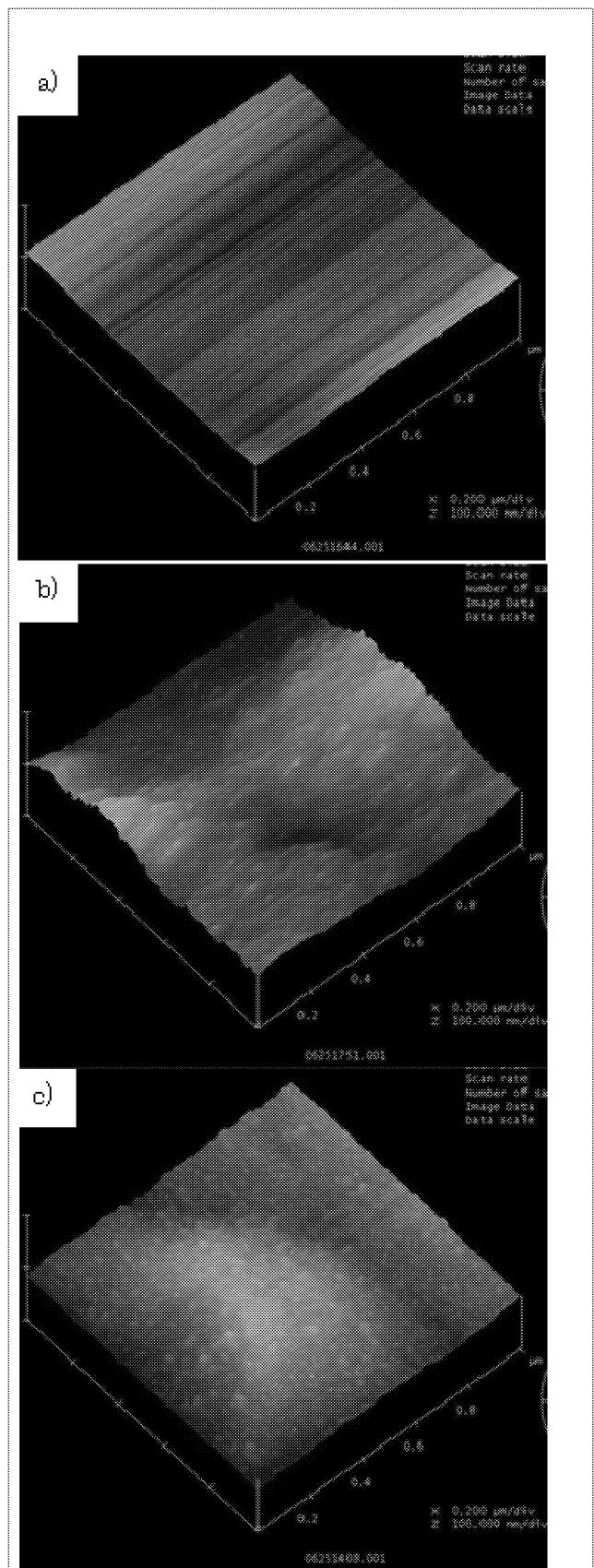


Fig.2 SPM images of (a) Ti, (b) PEG/Ti, and (c) GRGDS/PEG/Ti

ないため、得られた固定化層厚さとその標準偏差は実際の値と異なっている可能性がある。一方、SPMより、PEG/Ti 上には Fig.2b のように固定化層が厚い部分と薄い部分があることが観察された。SPMでは $1 \times 1 \mu\text{m}$ の範囲を走査して像を得ており、エリプソメータによって固定化層厚さが **0 nm** と測定された部分は、SPM像における固定化層が薄い部分に相当していると考えられる。また、PEG/Ti 表面が凹凸形状を示した理由として、本来  $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  は溶液中で揺らいでいるが、今回の評価では試料を乾燥させているため、 $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$ 鎖が寝てしまい、重なり合って厚くなつた部分と疎になつていている部分ができたためとも考えられる。

一方、PEG/Ti と比較して GRGDS/PEG/Ti の固定化層厚さは、有意差はないものの増加傾向を示したことから、PEG/Ti の上に GRGDS ペプチドが固定化されていることが示唆された。しかしながら、PEG/Ti と同様にエリプソメータでは解の発散も見られ、SPM像ではPEG/Ti と類似した凹凸形状が見られた。GRGDS ペプチドは  $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  と比較して分子量が非常に小さいため、GRGDS の固定化層はエリプソメータや SPM の測定感度の限界を超えてしまった可能性がある。

## 5. まとめ

本研究より、電着した  $\text{NH}_2\text{-PEG-COOH}$  を介して GRGDS ペプチドを Ti 表面に固定化することができたことが示唆された。今後は、本試料上で細胞培養を行い、細胞接着性について評価していく必要がある。

## 参考文献

- (1) Pierschbacher, M. D., Ruoslahti, E.: Cell attachment activity of fibronectin can be duplicated by small synthetic fragments of the molecule, *Nature*, Vol. 309, (1984) pp. 30–33.
- (2) Tanaka, Y., Saito, H., Tsutsumi, Y., Doi, H., Nomura, N., Imai, H., Hanawa, T.: Effect of pH on the interaction between zwitterions and titanium oxide, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 330, (2009) pp. 138–143.
- (3) Oya, K., Tanaka, Y., Saito, H., Kurashima, K., Nogi, K., Tsutsumi, H., Tsutsumi, Y., Doi, H., Nomura, N., Hanawa, T.: Calcification by MC3T3-E1 cells on RGD peptide immobilized on titanium through electrodeposited PEG, *Biomaterials*, Vol. 30, (2009) pp. 1291–1286.



### 3. 總合研究所一般研究報告 (個人研究)



# 超臨界ジメチルエーテル噴霧の活用によるディーゼルエンジンの高性能化研究

機械工学科 教授  
是松 孝治

本研究は石油枯渇後をにらんだ、高性能 DME (ジメチルエーテル) 燃料エンジンを実現するための基礎研究である。DME が単一成分燃料であることから、そのポテンシャルを最大限に生かす点に特色がある。そのなかで、DME を噴射装置内で超臨界状態にして、これをシリンダ内に噴射・燃焼させ飛躍的な性能向上を目指している。

当該年度は、DME が超臨界状態になっている噴射装置内の流動解明を行なった。超臨界状態の扱いは、実在気体の状態方程式に集約される Peng-Robinson 式を用いて計算モデルを構築した。コモンレール式燃料噴射装置を想定した流路系で、数値解析を行い超臨界 DME の噴射系内流動を解明した。この結果、臨界点付近で噴射時の全体的な圧力変化と異なる高周波の変動が起こっていることがわかった(図 1)。この現象が超臨界 DME 固有の特性であり、燃焼室内に噴射され形成される噴霧特性(分散性、貫徹性、微粒化性)に影響するかどうかを解明する必要性が出てきた。そこで、電子制御式燃料噴射システムを新たに設計試作した。この際には、燃料配管からの漏れやゴム製の O リングが腐食されるといった燃料性状に起因する困難を乗り切り、電子制御式インジェクタやインジェクタドライバーの問題を解決し燃料噴射システム全体を完成させた。この成果は現在取りまとめ中である。特に、臨界点付近の高周波の圧力波が検出される理由について検討中であり、さらに噴霧特性にどのように影響しているかについて精査している。

最終的にはこれらの知見をまとめて「超臨界 DME 専用噴射装置」の設計に役立つ情報の整備

を行うことを目指している。

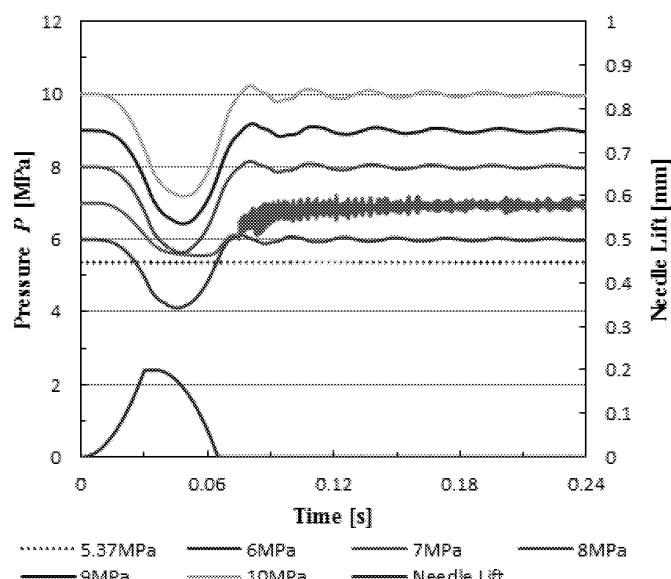


図 1 臨界点 (5.37 MPa) 付近に迫る 7 MPa の時に見られる高周波波形

## マイクロ部品の転造による増径加工技術の開発

機械工学科 准教授

久保木 功

転造加工はネジ山の成形に良く用いられているが、成形工具の形状を変えることにより、凹凸の段や溝を持つ軸対称部品の高速加工が可能である。それをウェッジ・クロスローリング加工と呼び、最近では微小部品において連続生産の検討が行われている。本研究では直径約1mmの微小径長軸材について、平板工具を用い、徐々に縮径させた部分の材料を移動させ増径させる転造加工（ウェッジ・クロスローリング加工）を試みた。これにより断面減少率と増径の関係や欠陥の発生傾向などについて検討を行った。

供試材には直径0.99mmのオーステナイト・ステンレス鋼 SUSXM7 (17%Cr-9%Ni-3%Cu系)、マルテンサイト・ステンレス鋼 SUS420F (13%Cr-0.2%Pb系)、低炭素鋼 SWCH12A (0.12%C系) および黄銅 C2600 (70%Cu-30%Zn系) の4種類の線材を用いた。これらの供試材を直線加工し、長さ約30mmに切断して試験片とした。

使用した転造加工機は一対2つの平板工具間に試験片を挿入し、片方の工具を移動させることによって試験片が加工できる。転造加工は工具移動速度25mm/sで、工具と試験片に潤滑油を塗布して行った。

まず成形幅 $w=2\text{mm}$ および成形長さ $L=100\text{mm}$ の工具を用いた場合のC2600における工具の突起高さに伴う断面減少率および試験片の増径部直径の変化を調べた。断面減少率が喰付部の突起高さ( $hs$ )に大きく依存せず、仕上部の突起高さ( $hf$ )が増大するほど大きくなる傾向がみられる。逆に増径部直径は $hf$ が増大すると小さくなる傾向が見られる。これは縮径加工によって断面減少率を大きくしても材料の移動による径方向の増径よりも長さが大きくなりやすいためと考えられる。また $hs$ と $hf$ の差が大きすぎるとマンネスマニ割れが発生し、小さすぎると最初に刃の入る付近にくびれ(むしれ溝)が発生しやすい傾向がある。工具の刃を丸めた状態では増径部直径が小さくなる。

次に、同様の工具を用いて転造加工した場合、加工欠陥が発生せず、断面減少率および増肉部直径が最大となった加工条件における各材料の外観を観察した。直径約1mmの材料の成形幅2mmの転造では、SWCH12A、C2600およびSUSXM7において断面減少率が60%を超える縮径加工が可能であった。しかしSUS420Fでは断面減少率 $R$ を大きくすると破断してしまう場合が多く、 $R$ が40%未満の条件でのみ正常に加工できた。増径加工は増径部直径 $d_p$ を工具の刃がシャープな場合、SUS420Fでは $d_p=\varphi1.456\text{mm}$ 、SWCH12Aでは $\varphi1.484\text{mm}$ まで大きくできる。工具の刃を丸めると $d_p$ が約 $\varphi1.45\text{mm}$ あったSWCH12AおよびC2600でも約 $\varphi1.35\text{mm}$ 程度まで増径部直径が低下する。

# 原子炉心流力振動に関する研究（解析の高速化検討）

機械工学科 準教授

菱田 博俊

著者は従来より、FORTRAN 言語で構築した差分法プログラムにより原子力圧力容器流力振動解析を実施してきた<sup>1)</sup>が、計算時間の短縮化も課題の一つだった。そこで、本予算により VINAS 社製高速化ライブラリ SMS-AMG-SMP を用いて、高速化が可能かどうかを検討した。

## [研究目的]

PC を用いて、軸流中に弾性支持された円柱の振動挙動に係る数値解析を実施し、軸流下で流力振動する円柱の振動数と起振力振動数並びに自然振動数との関係を評価する。

## [差分法プログラムの概要]

弾性支持された円柱周りの三次元流動解析を実施し、円柱に作用する流体力より円柱の変位を求め、計算メッシュ形状を修正し流路形状の変形と円柱の移動境界を流動解析にフィードバックする連成解析を行う。二次元流れに対しては正方格子形状多数本円柱群の各円柱に対する変位－振動解析が可能であり、三次元流れに対しては PC 能力を超えない単円柱で軸流振動解析を実施中である。尚、円柱周りの境界層に任意の本数のメッシュ設定が可能である。

## [結果]

円柱を弾性支持し  $Re=1000$  の流下に置くと、ピーク無次元周波数  $f_{peak}=8.95$  の振動が発生する。円柱は  $f_0=8.53$  であり、 $f_{peak}$  は  $f_0$  より大きくなつた<sup>2)</sup>。

PC (DELL Presision T1500、CPU=インテル® Core® i7)において、高速化ライブラリを用いた場合、用いない場合より約 5 倍の高速化が達成された。但し、コンパイラと調整が必要。

1) Hirotoshi HISHIDA, et.al. : “Numerical convergence of Strouhal frequency associated with lift on a cylinder in parallel flow with number of time-iteration steps”, *J. Comp. Fluid Dyn.*, **18-1** (2009) pp.104-114.

2) Hirotoshi HISHIDA, et.al. : “Numerical Evaluation on Strouhal Frequency Associated with Flow-Induced Lift Acting on Elasticity Supported Cylindrical Rod under Axial Flow”, *J. Comp. Fluid Dyn.*, **19-1** (2011) 印刷中.

## マイクロ・ナノ構造による表面機能の制御

機械システム工学科 教授  
鈴木 健司

自然界には、表面の微細構造によって様々な機能を実現している例が多く見られる。例えば、昆虫の脚の表面には多数の毛が存在し、毛の微細構造によって表面の付着性、濡れ性などを制御し、壁面への付着、水面移動などを実現している。本研究では、このような昆虫の表面を参考にして、金属などの表面にマイクロ・ナノ構造を加工することによって、表面の機能を制御することを目的としている。さらに微細構造を加工した表面をロボットに応用することによって、表面機能を利用した新しいロボットの開発を目指す。

今年度は、アメンボの脚を規範として、高い撥水性を持つ表面の製作を行った。平面ばかりでなく、ワイヤ表面などの曲面上においても撥水性の付与を可能にするため、フェムト秒レーザー加工機を用いて表面の微細加工を行った。真鍮平板、および直径 0.5mm の真鍮ワイヤ上に、フェムト秒レーザーにより一定間隔の直線状の溝を加工し、撥水剤を塗布することで高撥水面を製作した。図 1 に製作した撥水面の SEM 画像を示す。また、撥水面に水滴を滴下し、接触角を測定した結果を図 2 に示す。微細加工を行わなかった場合の接触角が 120° であるのに対し、間隔 25 μm の溝加工を行った場合に最大 160° の接触角が得られた。

次に、製作した撥水性ワイヤを支持脚に用いて、水面上を移動するロボットの製作を行った。ロボットは 6 本の脚を持ち、チェビシェフリンク機構を利用して中脚を D 字型の軌道で駆動することにより推進する。ロボットの寸法は 20×40×10 mm、質量は 4.39 g であり、DC モータとバッテリーを搭載し、自立移動が可能である。図 3 に製作した水面移動ロボットの写真を示す。動作実験を行った結果、表面張力により水面に浮き、59.2 mm/sec の速度で移動できることを確認した。

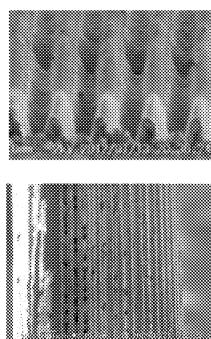


図 1 撥水性表面

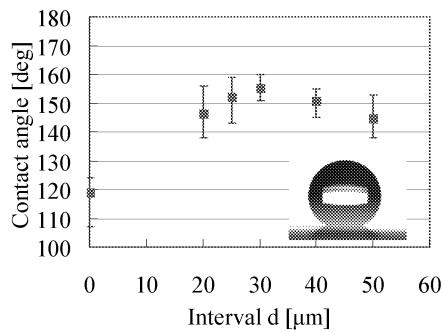


図 2 接触角の測定結果

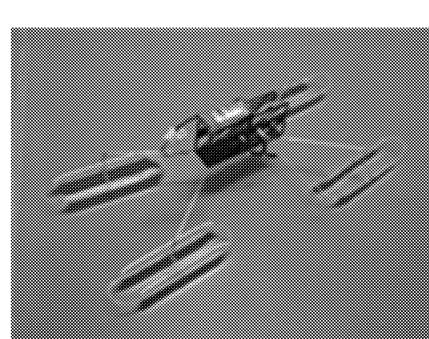


図 3 水面移動ロボット

# 小型レスキューロボットをもちいたセンサネット構築のための基礎実験

機械システム工学科 準教授  
見崎 大悟

近年の日本では、都市直下での大規模震災が予期されており、様々な研究機関でレスキューロボット、特に災害後の被災者を早期に発見する探査型ロボットの研究が盛んに行われている。しかし、それらの多くのロボットは、実用できる程の性能を達成しているにもかかわらず、未だ実用化に至っていない。広大な被災地における被災者を早期に発見するためには、ロボットを災害現場へ大量に投入し、同時多発的に探査活動をする必要があると推定できる。従って、それらのロボットが実用化に至らない理由として、高性能の代償として複雑構造・コストの高騰を招いており、大量生産し難く、災害現場への大量投入に向かないためではないかと考えられる。本研究ではロボットの実用化を目指し、「大量生産・大量投入」できる探査型小型レスキューロボットの設計・製作およびセンサネット構築の基礎実験を実施した。以下に本年度の研究成果を示す。

## 1) メッシュネットワークのための探索ロボットの製作

製作した探索ロボット(図1)は、障害物を検出し、回避するためのアルゴリズムはサブサンプションアーキテクチャ(以下 SA)に基づいて設計をおこなった。SAは図2の様に能力レベル毎にレイヤーが分かれしており、より高位のレイヤーが低位のレイヤーを包摂している。

## 2) メッシュネットワークをもちいたセンサネットワークに関する基礎実験

センサネットワーク実施のためには、それぞれのロボットがメッシュネットワーク内に位置する必要があるために、通信にもちいた XBEE の無線強度の判定をもちいることで、ロボット同士が一定の範囲内におさまるような機能について提案・実験をおこなった。

## 3) 上記をもちい被災者探索実験

本学 18F フロアに人をランダムに配置し、固有の IP を割り振りした 5 台のロボットによる探索実験を行い、複数台で被災者を探査するメリットがあるか検証し、その有効性を確認した。

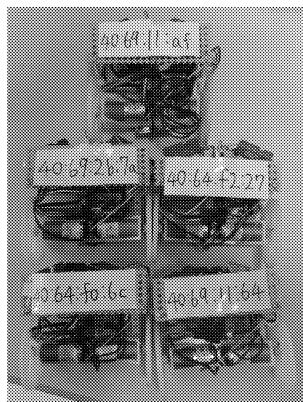


図1 小型レスキューロボット群

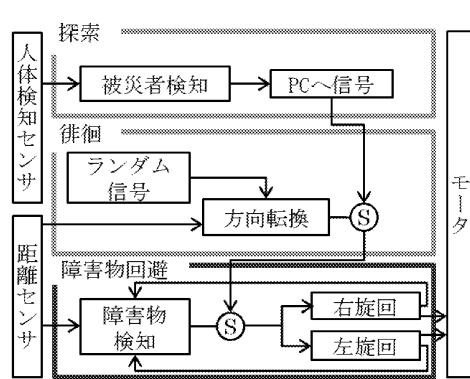


図2 SAをもちいた探索アルゴリズム

# 水素生成のための尿素エネルギー・システムに関する研究

機械創造工学科 教授  
雜賀 高

## 1. はじめに

水素を用いた燃料電池システムは、単位質量あたりのエネルギー密度が高く、使用時に温室効果ガスを排出しないことなどから、実用化に向けた取り組みが行われている。しかし、取扱いの難しさやインフラの問題などから、実用レベルまでには至っていないのが現状である。そこで、尿素を用いる水素エネルギー・システムを提案する。

## 2. $\text{NH}_3$ 選択発生バイオリアクター

ウレアーゼのような生体触媒を使用する反応器系はバイオリアクターと呼ばれ、様々な分野で開発が行われている。化学触媒を用いるのに対し、生体触媒は生成物の絶対質量は少ないものの、常温・常圧での反応が可能である点や、特定の物質を特定の物質に変換可能である点（基質特異性）が大きな特徴となっている。尿素を選択的にアンモニアに分解するウレアーゼを使用するにあたり、1回の反応に酵素を1回投入する回分式ではなく、現状では高コストである酵素を繰り返し使用することが求められる。酵素を固定化する方法は様々であるが、容易かつ安価に行える方法として、限外ろ過膜で仕切られた空間内に触媒を閉じ込める包括法の一種である膜型がある。今回は東レ社製酢酸セルロース RO 膜を使用し、逆浸透膜でパウダータイプのウレアーゼを包含する方法を用いた。

## 3. 実験結果および考察

1回目の測定における活性を1とした残存酵素活性率の比較結果を見ると、測定を開始して3日目まではアンモニアの発生量は顕著で、酵素が十分に活性を保っていることが確認できる。その後は測定を重ねるごとに減少傾向を示している。測定開始から10日目まではアンモニアの発生が確認されたが、16日目に行った測定ではアンモニアの発生量は0 ppmとなった。

また各測定時における、測定後の反応器内水溶液のpHを見ると、アンモニア蒸気圧により発生するアンモニアガスと、水溶液に残留するアンモニアが飽和するポイントがpH 9.3付近であることが分かる。残存酵素活性率が100%である3日目までの水溶液pHと、残存酵素活性率が20%に低下した10日目の水溶液pHが近似していることから、膜内にはウレアーゼが残存し、逆浸透膜を介してウレアーゼによる尿素の加水分解反応が行われていることが分かった。これにより、RO膜を用いた酵素の固定化が可能であることを実証した。

# 高エネルギー密度を用いた磁性体の形状および機能制御に関する研究

機械創造工学科 教授  
武沢 英樹

従来、着磁後の永久磁石は硬脆材料であることに加え、その磁力の影響から加工粉や加工工具の引きつけが発生し、機械加工が困難とされてきた。一方、放電加工やレーザ加工は非接触加工であり、放電加工で使用する工具も非磁性体であるため磁力の影響を受けずに形状加工が可能である。加えて両者とも熱加工であり、局所的な温度上昇が伴う。永久磁石はキュリ一点を超えると磁力を失う性質を有しているため、放電加工やレーザ照射により磁石形状の変化と磁気パターンの変化を「同時に」、あるいは「個別に」制御可能と考え研究を進めてきた。

永久磁石の中でも磁力の強いネオジウム磁石に対する突き当て除去加工の実験を繰り返したところ、パルス幅と休止幅を等しくした D.F. 50% の条件では、入力エネルギーが大きくなると加工後の表面磁束密度の低下が大きくなる傾向であった。一方、エネルギーの小さな条件では、磁石高さが低減したことによる影響のみで放電に起因する磁束密度低下は生じないこともわかった。

そこで、直径 10mm、高さ 10mm のネオジウム磁石を 1mm 突き当て放電加工により除去する実験を次の電気条件で行った。条件 1 は磁束密度の低下が発生しない電流値 5A、パルス幅 32μs、休止時間 32μs の条件であり、条件 2 は磁束密度の低下が大きかった電流値 20A、パルス幅 128μs、休止時間 128μs の条件である。初期 1mm の除去加工を両者の条件で行い、その後条件 1 を用いてさらに 1mm ずつ除去加工を行い、その都度表面磁束密度を放電加工機上で計測した。その結果を図 1 に示す。■印の電流値 5A の条件では各未加工品の磁石高さと同程度の磁束密度の値を示した。ところが、電流値 20A の条件では、初期 1mm 加工後は 270mT 程度と大きく減少したにもかかわらず、その後 1mm ずつ条件 1 で除去を繰り返すと高さ 6mm までは磁石高さが減少するにもかかわらず磁束密度の値が上昇した。これは、20A の条件で初期 1mm を除去加工すると、加工面より下 3mm 程度の領域に放電加工に起因した温度上昇による磁束密度低下領域が生成したためと考えられる。

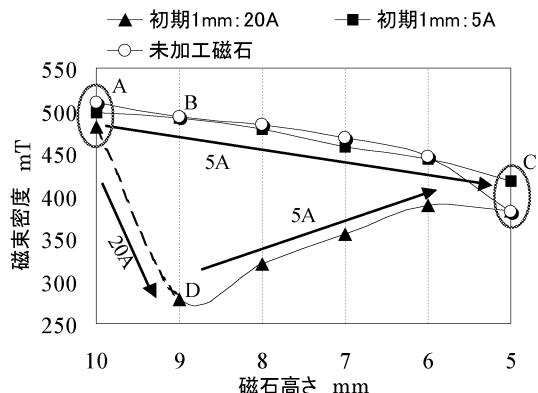


図 1 磁石高さによる磁束密度変化

これより、放電条件を制御することによりネオジウム磁石の表面磁束密度の制御が可能であり、磁石内部方向への熱的な影響度合いも予測がつくことがわかった。

1) 市村佳大ほか、永久磁石の熱加工における磁気特性の変化、2011 年精密工学会秋季大会論文集、(2011) 723

2) 市村佳大ほか、永久磁石に対する放電加工で形成される熱的影響層、2011 年度電気加工学会全国大会、(2011) 69

## コロイド結晶テンプレート法を応用した アルミニウム表面の構造制御

応用化学科 准教授  
阿相英孝

アルミニウムをアノード酸化することで得られるアノード酸化ポーラスアルミナは、ナノメートルオーダーの孔が蜂の巣のように最密充填配置したポーラス材料であり、最適な電解条件下においては孔の配列が高い規則性を示すことから、フィルター、テンプレート、マスクをはじめ、ナノ空間での反応を制御するホスト構造として研究が活発化している。本研究では、アノード酸化で形成したポーラスアルミナの孔の基本周期に加え、コロイド結晶のミクロンオーダーの規則的な周期を組み合わせることで、ナノ・マイクロ複合周期を持つポーラスアルミナを作製し、位置選択的な溶液の充填に基づき、水酸アパタイト[Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>、以下 HAp]の析出位置の制御に関して検討を行った。

図1にナノ・マイクロ複合周期を持つポーラスアルミナの作製概念図を示す。二段階アノード酸化でアルミニウム基板上に規則性の高い孔配列を持つポーラス型皮膜を形成後、皮膜上に粒径3 μmのポリスチレン(PS)微粒子を含む懸濁液を滴下した。乾燥後、熱処理によりPS微粒子を皮膜上に固定し、二次処理として酸溶液中に試料を浸漬した。その結果、PS微粒子で被覆された領域は、化学溶解を受けず円柱状に残存した(図2)。円柱は約100 nmの基本周期を持つポーラスアルミナのセルの集合体で構成されており、深さ方向にもポーラス構造を維持していた。この結果は、PS微粒子とポーラスアルミナの接触界面において、二次処理に用いる液の浸透を抑制できることを示しており、位置選択的な溶液の充填に基づく反応場の制御でナノ・マイクロ複合周期を持つポーラスアルミナを作製することができた。さらに、作製した柱状構造を持つアルミニウム基板をPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>とCa<sup>2+</sup>を含む溶液中に交互に浸漬した結果、ポーラスアルミナの円柱状構造部においてのみHApが選択的に析出することを確認した。

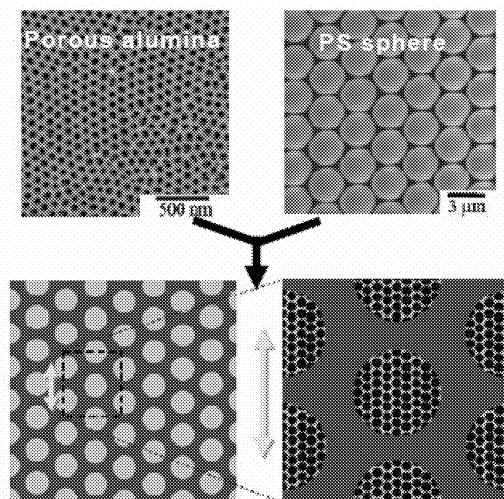


図1 ナノ・マイクロ複合周期を持つ  
ポーラスアルミナの作製概念

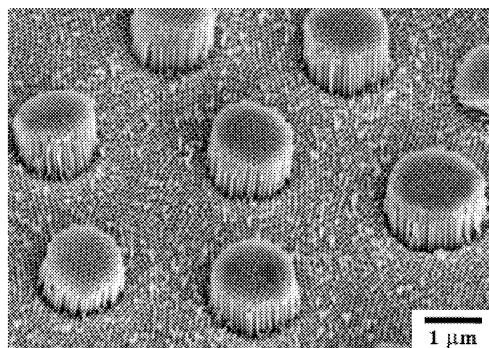


図2 PS微粒子をマスクとしアノード酸化ポーラスアルミナを局的に溶解除去した試料の傾斜観察像

# チエタノシン誘導体の合成とその血管新生作用の検討

応用化学科 準教授  
安井英子

1986年に *Bacillus Megatellum* の培養液より、核酸誘導体 oxetanocin A (**1**)が発見された。**1**は、含酸素四員環および 2 つのヒドロキシメチル基を持つという構造的特徴を有し、天然から得られた初の四員環ヌクレオシドであることから注目を集めた化合物である。この発見以来、様々な四員環ヌクレオシドが主に新規抗ウイルス薬のリード化合物となることを期待して合成されたが、含硫黄四員環（チエタン）ヌクレオシドに関しては十分な検討がなされていない。ところで、2010年に炭素四員環ヌクレオシド **2** に強力な血管新生作用があることが報告された。そこで、チエタンヌクレオシド **3** を合成し、その生理活性を調べることを目指した。

酒石酸ジエチルから 12 工程で合成したチエタン化合物 **4** を酸化し、スルホキシド **5** をジアステレオマー混合物として得た。**5** を Pummerer 転位の条件に付し 2 種のプリン塩基とカップリングさせ、**6** および **7** をどちらも  $\alpha$  体、 $\beta$  体の混合物として得た (Scheme 1)。目的とする **3** を得るためには、**6** の核酸塩基 2 位のクロル基を選択的にアミノ基へ変換させる必要がある。この変換を十分に検討するためにカップリング反応の収率を上げることが重要であった。本カップリング反応ではジアステレオマー混合物であるスルホキシドを用いたが、両ジアステレオマー間で反応性に差があり、反応性の高いものが優先的にカップリング体を与え、反応性の低いスルホキシドが反応し残るために収率が悪いのではないかと考えた。そこで、チエタン化合物 **4** を不斉酸化に供し、反応性が高いとみられるスルホキシドを選択的に合成し、カップリング反応に用いることとした。種々の不斉酸化を試した結果、2 つのクロル基を有するオキサジリジン **8** (Fig. 2) が望みの立体を有するスルホキシドを優先的に与えることが分かった。

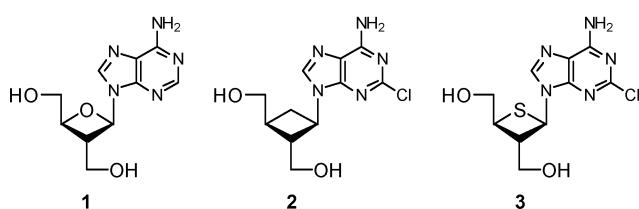
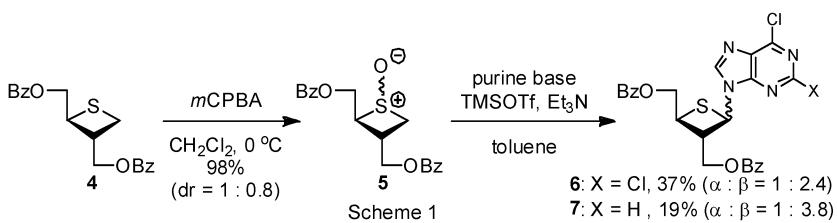


Fig. 1



核酸塩基とのカップリング収率の向上および **6** から **3** への変換を検討中である。

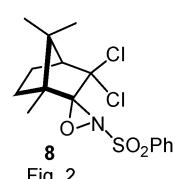


Fig. 2

## 植物性油脂の水素添加におけるトランス脂肪酸生成量の低減のための担持白金系触媒の高機能化

応用化学科 講師  
飯田 肇

マーガリンなどの食用加工油脂は植物性油脂の部分水素化により製造されるが、その過程で生成するトランス脂肪酸(TFA)は油脂の特性の制御に有用な脂肪酸である一方で、心疾患のリスクを増大させることが指摘されており、TFAを低減可能な触媒の開発の重要性が高まっている。そこで本研究は、TFAと飽和脂肪酸(SFA)生成量の低減が可能な触媒の開発を目的として、担持Pt触媒の触媒担体や第二金属であるIrが水素化活性やTFAおよびSFA生成量に与える影響について検討を加え、触媒性能とその物性・構造との関係について明らかにすることを目的とした。

担持Pt触媒の調製方法として含浸法を用いた。触媒性能試験には小型回分式反応装置を用いた。なお、触媒には反応前に400°Cで還元処理を施した。原料油には大豆油(ヨウ素価: IV = 約130)を用い、触媒濃度を50 ppm<sub>Pt</sub>または200 ppm<sub>Pt</sub>、反応温度: 140°C、水素圧: 0.5 MPa G、攪拌速度: 1700 rpmとして反応を行なった。生成物の分析にはFID型GCを用いた。また、反応速度がIVの1次に比例すると仮定して、反応速度定数kを算出した。

まず、触媒担体の及ぼす影響について検討を加えたところ、担持Pt触媒の水素化活性はPt/Cがもっとも高く、ついでPt/ZrO<sub>2</sub>、Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pt/TiO<sub>2</sub>、Pt/SiO<sub>2</sub>、Pt/MgOの順に高い水素化活性を示した。調製した担持Pt触媒のなかでは、Pt/BaSO<sub>4</sub>の水素化活性がもっとも低かった。触媒物性と水素化活性の関係について調べたところ、CO化学吸着量が多い触媒ほど水素化活性が高い傾向が認められた。したがって、担持Pt触媒の水素化活性の違いは、Pt分散度の違いでおむね説明することができる。また、部分水素化油脂(IV = 70)に含まれているTFAおよび原料油からの飽和脂肪酸の増加分(ASFA)を比較すると、担体が第2族元素の硫酸塩および酸化物であるPt/BaSO<sub>4</sub>やPt/MgOを用いたときにTFA含有率が低くなった。一方、Pt/TiO<sub>2</sub>やPt/ZrO<sub>2</sub>を用いたときにASFA含有率が低くなり、多価不飽和脂肪酸基に対する水素化選択性が高くなつた。これらの含有率と担体の金属イオンの電気陰性度との間には火山型の関係が認められることから、Ptに対する担体の電子的效果が影響していると推論した。

つぎに、Pt/BaSO<sub>4</sub>へのIr添加の影響について検討を加えた。触媒濃度50 ppm<sub>Pt</sub>のときのPt-Ir/BaSO<sub>4</sub>の反応速度定数kは、200 ppm<sub>Pt</sub>のときのPt/BaSO<sub>4</sub>のそれよりも大きく、同触媒へのIrの添加が著しい水素化活性の向上をもたらすことが明らかとなつた。Ir/BaSO<sub>4</sub>の水素化活性はきわめて低く、CO化学吸着量がIrの添加により増加していることから、水素化活性が向上した原因はPtの高分散化であると考えられる。以上のことから、Pt-Ir/BaSO<sub>4</sub>触媒が植物性油脂の水素添加のためのすぐれた水素化活性を有し、TFAおよびSFA生成量の低減に有効な触媒であることが明らかとなつた。

なお、本研究の成果はEuropaCat Xおよび第108回触媒討論会で発表された。

## 細菌由来糖質分解酵素の取得と産物解析

応用化学科 講師  
坂口 政吉

グルコアミラーゼはデンプンからグルコースを生産する酵素で、工業的にグルコース生産に用いられる重要な酵素であり、糖質分解酵素ファミリー(Glycoside hydrolase family : GH family)の15に属している。しかし、酵素の性質改良という点において、比較対象となる細菌由来の類似酵素の報告例が少ない。そこで、データベース検索により、60°C近くで生育する細菌のゲノム上に、グルコアミラーゼとよく似た一次構造(アミノ酸配列)が存在することを見出した。これら酵素と機知の酵素との性質比較は、上述したように酵素の改良、つまりタンパク質工学の点で興味が持たれる。

まず、細菌ゲノムよりグルコアミラーゼ様遺伝子二種をPCR法で取得した。次に発現ベクターを構築し、大腸菌を用いた酵素の発現を試みた。二種の遺伝子から目的タンパク質を得て、精製後、その性質を調べた。どちらの酵素も細菌の生育温度とほぼ同じ程度の55°Cで至適温度を持つことがわかった。しかし、類似の一次構造にもかかわらず、その基質特異性は異なっていた。一方の酵素は、グルコアミラーゼ同様、 $\alpha$ -1,4 グルコシド結合を持つ三糖(マルトトリオース)に特異的に作用した。二糖である麦芽糖(マルトース)、そして四糖のマルトテトラオースにはほとんど作用しなかった。これはグルコアミラーゼとは異なる性質であり、基質特異性の違いに興味が持たれる。他方の酵素は、 $\alpha$ -1,4 グルコシド結合を持つ三糖には加水分解活性を持たなかった。種々の二糖を用いて検討を行った結果、 $\alpha$ -1,1 グルコシド結合を持つ二糖(トレハロース)を特異的に加水分解する酵素であることがわかった。GHファミリー15でトレハロースを加水分解する酵素は二例目である。なぜ、トレハロースを分解する酵素が細菌中に存在するのかという未知の部分はあるが、やはりその基質特異性に関して興味が持たれる。

私たちは他の好熱性細菌にも同様の酵素の配列を見出している。この細菌の酵素は上述の酵素よりも熱に対する安定性が高いと予測している。これら酵素の一次構造は比較的似ており、そのアミノ酸配列の違いにより特異性や熱に対する安定性が異なる。アミノ酸配列と性質を比較研究することで、糖質分解酵素の構造と機能研究の基礎的知見を確立したいと考える。

# リン酸塩ガラス異常現象を利用した高レベル放射性廃棄物固化ガラスの開発

環境エネルギー化学科 教授  
大倉利典

## <背景と目的>

使用済み核燃料再処理工程で発生する高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体にしたのち深地層中に管理・保管される。固化ガラスには現在ホウケイ酸ガラスが使用されており、放射性廃棄物の含有量は最大で 25 mass% となっている。しかし、このガラスは  $P_2O_5$  の濃度が増加すると分相してしまうことが報告されている。そこで、高レベル放射性廃棄物固化のベースガラスに、融点が低く、より多く様々な種類の元素を取り込める特性を持つリン酸塩ガラスに着目した。本研究では、 $Li_2O-CeO_2-Fe_2O_3-P_2O_5$  系模擬高レベル放射性廃棄物固化ガラスについて、化学的耐久性などの検討を行った。

## <実験>

出発原料として  $Li_2CO_3$ 、 $CeO_2$ 、 $Fe_2O_3$  および  $(NH_4)_2HPO_3$  を用いて、ガラス組成が質量比で (A)  $Li_2O : CeO_2 : Fe_2O_3 : P_2O_5 = 4.5 : 9.7 : 25.74 : 60.06$  ( $Fe_2O_3 : P_2O_5 = 30 : 70$ )、(B)  $Li_2O : CeO_2 : Fe_2O_3 : P_2O_5 = 4.5 : 9.7 : 34.32 : 51.48$  ( $Fe_2O_3 : P_2O_5 = 40 : 60$ ) となるように秤量および混合し、1250°Cで 2 時間溶融した。その融液をステンレス板上に流し出して室温まで急冷し、ベースとなるガラスを作製した。このガラスを粉碎し、模擬廃棄物を固化ガラス中の含有率が 10、25、45 mass% になるようにそれぞれ混合し、1250°Cで 2 時間溶融後、急冷して固化ガラスとした。得られた固化ガラスについて、水に対する浸出実験 (MCC-2 法: 水 50 ml 中で試料約 1 g、90°Cで 20 日間保持) を行った。固化ガラスの総損失量から全体の浸出率を算出した。各元素の浸出率は ICP 発光分光分析により求めた。

## <結果と考察>

表 1 に浸出実験の結果を示す。(B) 組成のガラスでは、廃棄物含有量が 10、25、45 mass% のいずれの場合も全体の浸出率は  $10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{day}$  のオーダーとなり、現在用いられているホウケイ酸ガラス固化体の浸出率 ( $2.5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{day}$ ) とほぼ同等の結果を示した。(A) 組成のガラスでは、全体の浸出率は  $10^{-4} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{day}$  のオーダーとなり、ホウケイ酸ガラスや(B)組成のガラスに比べて大きくなつたが、ベースガラス以外のとくに廃棄物元素の浸出率が低くなつた。廃棄物含有量が多くなると浸出率は低下する傾向を示し、廃棄物含有量が 45 mass% の場合でも極めて良好な結果となつた。

Table 1 Leach rate of each constituent element of glass waste forms.

(A)  $Li_2O : CeO_2 : Fe_2O_3 : P_2O_5 = 4.5 : 9.7 : 25.74 : 60.06$  ( $Fe_2O_3 : P_2O_5 = 30 : 70$ ) (B)  $Li_2O : CeO_2 : Fe_2O_3 : P_2O_5 = 4.5 : 9.7 : 34.32 : 51.48$  ( $Fe_2O_3 : P_2O_5 = 40 : 60$ )

Waste (mass%)	10	25	45	Waste (mass%)	10	25	45
Gross	$2.27 \times 10^{-4}$	$1.14 \times 10^{-4}$	$1.36 \times 10^{-4}$	Gross	$5.59 \times 10^{-5}$	$3.81 \times 10^{-5}$	$3.28 \times 10^{-5}$
P	$3.88 \times 10^{-6}$	$2.25 \times 10^{-7}$	$4.53 \times 10^{-7}$	P	$1.22 \times 10^{-5}$	$9.36 \times 10^{-5}$	$4.45 \times 10^{-6}$
Fe	$7.08 \times 10^{-7}$	$6.62 \times 10^{-7}$	$6.29 \times 10^{-7}$	Fe	$1.09 \times 10^{-6}$	$3.19 \times 10^{-6}$	$2.18 \times 10^{-7}$
Ce	$1.57 \times 10^{-6}$	$2.14 \times 10^{-7}$	n.d.	Ce	$3.47 \times 10^{-7}$	$1.45 \times 10^{-7}$	$1.72 \times 10^{-10}$
Li	n.d.	n.d.	n.d.	Li	$2.10 \times 10^{-6}$	$1.89 \times 10^{-6}$	$1.19 \times 10^{-5}$
Na	n.d.	n.d.	n.d.	Na	$3.14 \times 10^{-6}$	$4.15 \times 10^{-6}$	$5.17 \times 10^{-7}$
Sr	n.d.	n.d.	n.d.	Sr	$5.24 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-7}$	$6.89 \times 10^{-8}$
La	n.d.	n.d.	n.d.	La	$1.75 \times 10^{-8}$	$9.07 \times 10^{-8}$	$3.45 \times 10^{-9}$
Mo	n.d.	n.d.	n.d.	Mo	$1.75 \times 10^{-7}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$6.89 \times 10^{-7}$
Te	n.d.	n.d.	$1.34 \times 10^{-5}$	Te	n.d.	$3.63 \times 10^{-8}$	n.d.

Leach rate:  $\text{g/cm}^2 \cdot \text{day}$

# 二塔式木質バイオマスガス化装置の高度低タール化

環境エネルギー化学科 教授  
長本 英俊

## 1. 緒言

木質バイオマスをガス化してディーゼル用発電機に供給し、電気エネルギーとして利用する技術が期待されている。しかしながら、2つの問題点ある：1)配管閉塞を起こす原因となるタールを低減化（ $100 \text{ mg/Nm}^3$ 以下）する、2)生成ガス温度が $100^\circ\text{C}$ 以下で発熱量 $4200 \text{ kJ/Nm}^3$ 以上。著者らは、小型二塔式ガス化炉を用いて空燃比を0.3にしてガス化実験を行った結果、ガス化反応に必要な温度を維持しつつ、内燃機関に利用可能な発熱量を得ることに成功した。

本研究では使用していた小型二塔式ガス化炉（1.5kW）をベンチスケール（10kW）にスケールアップした実用化レベルのガス化炉を用い、原料投入量、空気供給流量、切り替え時間等を変化させ、ガス化炉内温度挙動や生成ガス組成の分析を行うと共に、タールの一層の低減化を試みた。

## 2. 実験

### 2.1 二塔式ガス化炉の原理及び実験装置

二塔式ガス化炉は、A塔、B塔と二つに分割されている（Fig. 1）。A塔上部よりバイオマス原料（木質ペレット）、下部より空気を供給することで、A塔下部から、酸化層、還元層、乾留層になる。A塔で生成したガス中に含まれるタール成分は、B塔のタール吸着層で、吸着・熱分解される事でガス化される。一定時間後、原料及び空気の供給をB塔へ切り替え、以下この操作を繰り返す。実験装置は二塔式固定床ガス化炉（ $460 \text{ mm}\phi \times 420 \text{ mm(H)}$ 、常圧、SUS304）、空気ブロワー、熱交換器、及びタールトラップ、ポートなどから構成されている。炉内に計6本の熱電対（各塔底部より、 $13.5 \text{ cm}$ 間隔で設置、TC1～6）を取り付け（Fig. 2）、データロガーを用いて、炉内温度を計測した。生成ガスを、吸引ポンプによりテトラーバッグにて回収し、ガス組成（ $\text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{CH}_4$ ）をGC/TCD（GC-14B、SHIMADZU）により分析をした。

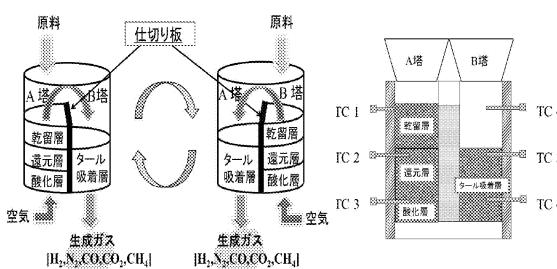


Fig. 2 Thermocouple setup

## 2.2 実験方法

両塔の炉内に着火炭とチャーをそれぞれ、 $2.4 \text{ kg}$ 、 $6.0 \text{ kg}$ ずつ投入して空気を供給し、還元層の最高到達温度が $800^\circ\text{C}$ になるまで昇温した。切り替え時間を12分と固定し、原料投入量（以下、負荷量）を $800 \text{ g}$ とした時の空気供給流量を空燃比が0.3になるように $110 \text{ L/min}$ とした。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 炉内温度

ガス化炉内の温度の経時変化をFig. 3に示す。酸化層炉内温度は、最高到達温度 $1000^\circ\text{C}$ 以上の温度を保ち周期的に変化した。しかし、還元層、乾留層においては原料を投入してから徐々に温度が下がるという傾向が見られた。これは、熱分解によって生じるチャーの生成速度と酸化層でガス化されるチャーの消費速度が等しくなかったために生じたものと考えた。

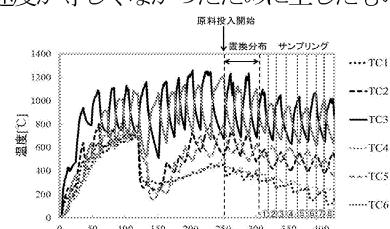


Fig. 3 Temperature of each layer

### 3.2 生成ガス組成

各サンプルにおける生成ガスの組成分析値から算出した発熱量をFig. 4に示す。得られた発熱量では、最高発熱量のガス（サンプル⑥:  $4145 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$ ）と最低発熱量のガス（サンプル⑤:  $3131 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$ ）の発熱量差約 $1000 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$ と変動し、安定しなかった。

今回着目したタールの生成量は、 $1.5 \text{ kW}$ のガス化炉と比べ、8割程度に減少した。乾留層の温度が低いにもかかわらず減少したことの理由は、ガス化炉下流の熱交換器の効率が高く、ここで凝縮したものと考えている。

## 4.まとめ

スケールアップした二塔式ガス化炉の運転により、目標よりやや低いが、平均 $3654 \text{ [kJ/Nm}^3\text{]}$ の燃料ガスを得ることができた。タールの生成を抑えることができたが、乾留によるタール生成を低減化するために、乾留層の温度を高める工夫が必要であろう。

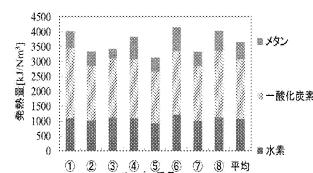


Fig. 4 Calorific values

# 超音波霧化微細ミストを用いた環境中超微粒子の捕集技術の確立

環境エネルギー化学科 准教授  
並木 則和

MHz オーダーの超音波で霧化された液滴には、ミクロンオーダーの主液滴以外に 100 nm 以下の超微粒子 (UFP) 域の液滴が含まれることが知られている。また、液体の破碎・分裂によって生成した超音波霧化液滴の多くが帶電していると考えられるため、これらの液滴を無帶電の UFP に接触させることで、フィルタを用いずに帶電粒子として静電捕集できることが期待される。本研究では、これまでに検討した超音波霧化 UFP 捕集装置 (UAUEC: Ultrasonic atomization electrostatic UFP collector) を、大流量でも一定の捕集効率を得られるように改良することを試みた。具体的には、図1に示すように従来の装置では超音波霧化器とミストセパレータの2つに分かれていた前処理部を改良装置では一体化し、装置の高さを高くして発生したミストと試験 UFP との滞留時間を長くとれるようにした。次に、試験粒子を含む試験空気の導入口を PD 底部で周方向に向けることで試料空気を装置内で回転させるようにした。さらに、ガイドベーンを内壁に取り付けた円錐を槽内に挿入し、気流の回転速度をさらに上げることで、粗大超音波ミストに遠心力を加えることで、ミストと試験 UFP の接触する確率を上げるように工夫した。

性能評価実験では、試験粒子として酸化チタン懸濁液を噴霧乾燥させた試験 UFP を PD に導入し、その一部を 1 個荷電の  $1.4 \mu\text{m}$  以下の粒子が 100 % 捕集可能な電圧 ( $V=-2 \text{ kV}$ ) が印加された二重円筒電極に導入した。そして、流量  $Q_t$  を 8~25 LPM に変化させて各装置の下流の粒径別個数濃度を、SMPS(走査型粒径測定装置)を用いて測定し部分捕集効率を求めた。その結果、図2に示すように  $Q_t=25 \text{ LPM}$  と高流量で捕集効率が低下している従来装置に比べて、改良装置は 400nm 以下の粒径範囲で高い捕集効率となっている。このことから、遠心力を利用することは帶電粗大ミストと UFP の接触確率を向上させ、UAUEC の捕集性能を向上させるのに有効であることがわかった。

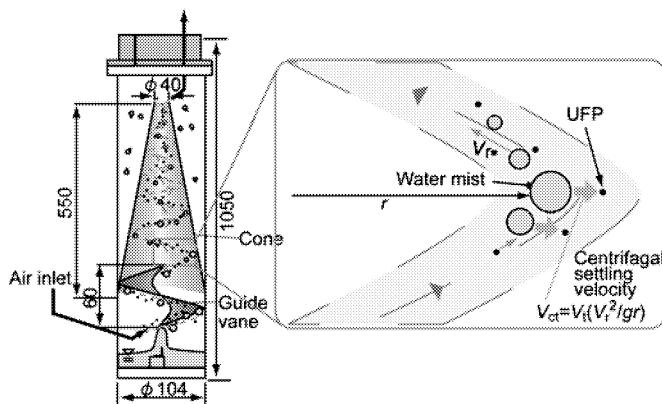


図1 改良装置の概要

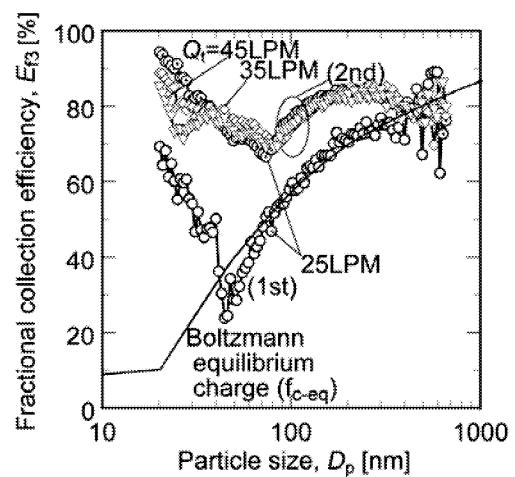


図2 改良型(第2世代)装置と従来型(第1世代)装置の捕集効率の比較

# ガラス被覆溶融紡糸法による熱電材料のナノワイヤー化

環境エネルギー化学科 准教授  
桑折 仁

環境・エネルギー問題対策として低温熱源で発電可能な熱電材料が注目されている。1993年に Hicks, Dresselhaus によって、材料のナノサイズ化により量子効果が発現し、熱電性能が大幅に向上的する、とくに巨大な熱電能（単位温度差あたりの熱起電力）が出現する理論予測がなされた。これは既存材料でも一次元化(ナノワイヤー化)により大幅に性能向上できることを意味する。現状では物性評価に十分な長さのナノワイヤーは得られていない。そこで、本研究ではガラス被覆溶融紡糸法により熱電材料のナノワイヤー化を試み、熱電特性に対するナノサイズ化の効果を検証した。

供試材料は Bi(純度 99.999%)を使用した。被覆材とするガラスは外径が 6 mm、肉厚 1 mm のソーダガラス(軟化点 585—620 °C)を使用した。ソーダガラスをあらかじめ片方の先端を細線状に加工したものを用いた。3 g の Bi をソーダガラスアンプルに 1/3 気圧程度になるように Ar 封入した。このアンプルは BN 製ダイスに設置後、縦型炉で 640 °C に保持し、低速モーターで引き抜いた。引き抜き速度は  $15 \text{ cm h}^{-1}$  とした。引き抜きながらダイス出口付近でガラスアンプルに窒素ガスを吹きつけ冷却した。2 回目以降の引き抜き加工では引き抜いた試料を一本とガラスアンプルとの隙間が埋まるようにソーダガラスを充填し、1 回目と同条件で引き抜き加工を行った。引き抜いた試料の断面は光学顕微鏡(OM)および走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。熱電能  $\alpha$  は小温度差法にて測定した。

ガラスアンプルは数十 cm の長さで引き抜くことができ、引き抜き回数の増加にともない線径は指数関数的に細くなった。引き抜き回数 5 回目において  $1.82 \mu\text{m}$  まで細線化できた。6 回引き抜き加工した試料断面は SEM により観察したが、Bi を確認できなかった。Bi の熱電能は室温で n 型である負の値を示し、細線化にともない熱電能が低下、すなわち絶対値は増加した。引き抜き回数 4 回目にて  $-60.1 \mu\text{VK}^{-1}$  であった。5 回目以降の測定については測定端子を接続することができなかった。細線化にともない熱電能の絶対値が増加したのはガラスの成分である Na が Bi にドープされたこと、または Bi が熱電能の大きい c 軸に配向されたことが考えられる。

今後、さらに引き抜き細線化した Bi を詳細に観察し、特性評価のため微細領域への端子接続技術の確立を目指す。

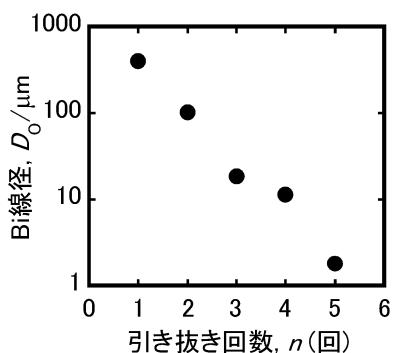


Fig. 1 引き抜き回数と Bi 線径の関係。

## イオンビーム照射による高分子材料表面の高機能化

電気システム工学科 教授  
鷹野 一朗

近年、産業技術の発展とともに高機能な高分子材料が開発されており、その応用が期待されている。本研究ではこれらの高分子材料にイオンビーム照射を行い、その表面の機能性向上を目的とした。本報告では何種類か実験した高分子材料の一つとして生分解性樹脂について述べる。生分解性樹脂は微生物などの働きにより最終的に水と二酸化炭素に分解されるため、イオンビームなどを用いて自体改質を行うことは、分解時に余分な残渣が残らず有効な方法であると考えられる。実験で使用した生分解性樹脂は、㈱クレハから提供を受けた結晶性の高いポリ乳酸（PLA）、ガスバリア性と加水分解性に優れたポリグリコール酸（PGA）をそれぞれ主成分とするものである。これらの表面をイオンビームによって照射し、硬さ、摩擦、水接触角等の特性を調べ生分解性樹脂の新たな可能性を探った。

イオンビーム照射は大電流イオン注入装置を用いて行った。照射イオンには Ar を用い、照射条件は、到達圧力  $6.0 \times 10^{-4}$ Pa 以下、ガス導入圧力  $6.0 \times 10^{-3}$ Pa、加速電圧 1 及び 5kV、電流密度  $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$  とした。なお、Ar<sup>+</sup>イオン照射時間と加速電圧からエネルギーを算出し、各試験における照射エネルギー依存性を調べた。表面改質を行った生分解性樹脂の硬さの評価は、ヌープ圧子による押し込み試験を行った。測定条件は試験力 5mN、負荷速度 0.5mN/s、保持時間 10s とした。摩擦係数の評価は、往復摺動による固定荷重試験にて行い、測定条件は垂直荷重 20mN、摺動幅 5mm、摺動回数 200 回、摺動時間 600s とした。水接触角の評価は、温度 24.5-26.5°C、湿度 45-65% の環境の下で蒸留水 1μl をθ/2 法によって測定した。

PGA、PLA の硬さを測定したところ、照射エネルギー  $0.5\text{J}/\text{cm}^2$  付近で PGA の硬さは一度低下したが、PLA は上昇し  $1.5\text{J}/\text{cm}^2$  では PGA, PLA 両者とも硬さが最大になる傾向見られた。イオン照射によって表面が炭化し硬くなることが予想されたが、イオン照射による熱収縮などの影響により表面の平滑性が失われ十分な測定精度は得られなかった。摩擦については、照射を行うと摩擦係数が両者とも上昇し、 $1.0\text{J}/\text{cm}^2$  で最大 0.45 になり、照射エネルギーの高い方が摩擦係数も大きく上昇することが分かった。エネルギーが高いとイオンの侵入長さも深くなるため、改質層が厚くなり摩擦も上昇したと考えられる。水接触角は、PGA、PLA とも照射し始めるとすぐに上昇し  $0.5\text{J}/\text{cm}^2$  付近で最大の  $85^\circ$  になった。その後  $0.5-1.5\text{J}/\text{cm}^2$  の範囲では変化が見られなかった。PLA, PGA 両者とも照射エネルギー  $1.0\text{J}/\text{cm}^2$  までに表面の凹凸が増し、 $1.5\text{J}/\text{cm}^2$  の試料は凹凸の激しい表面形態となっていた。一般にイオン照射すると官能基が増し水接触角は低下するが、この場合親水化よりも凹凸構造による影響が勝り水接触角は上昇したものと考えられる。これらの研究成果は、著者らの今後の研究において大きな一助となった。

# モータのトルクリップル除去技術の開発

電気システム工学科 教授  
森下 明平

電気自動車や産業用として近年普及が進んでいる永久磁石埋め込み型同期モータ（以下、IPMSMと称す）では、その原理的性質から、発生トルクにリップル成分が含まれる。このトルクリップルはモータの駆動対象である機械系に加振源として作用するため、これを除去する技術の確立が望まれている。

本年度の研究では、IPMSMをベクトル制御で駆動した場合のトルクリップルの特性を明らかにするため、モータテストベンチを製作した。このテストベンチを用いて、モータ制御に必要な各種パラメータの測定とベクトル制御のうちサーボ制御に使用されるd軸電流ゼロ制御によりモータを駆動し、実際にどのようなトルクリップルが発生しているかを調査した。

製作したモータテストベンチの外観を図1に、IPMSMの諸元を表1に示す。また、モータを10 Hz(回転数5 Hz)で駆動した時のq軸電流とトルクリップルの様子を図2に示す。

図2から明らかなように、0.5 Nmの定常トルク成分に回転数と同期する周波数のトルクリップルと駆動周波数の6倍の周波数のトルクリップルが重畠していることがわかる。

今後、これらのトルクリップルを除去するアルゴリズムをベクトル制御駆動装置に組み込んでゆく。

表1 IPMSM諸元

極対数	$P_n$	2
d軸インダクタンス	$L_d$	0.0768 H
q軸インダクタンス	$L_q$	0.2537 H
電機子巻線抵抗	$R_a$	1.1 Ω
電機子鎖交磁束	$\Psi_a$	0.16 Wb
慣性モーメント	I	$4.97 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$

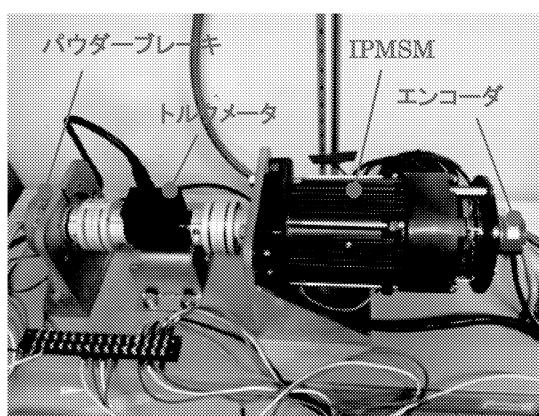


図1 モータテストベンチ

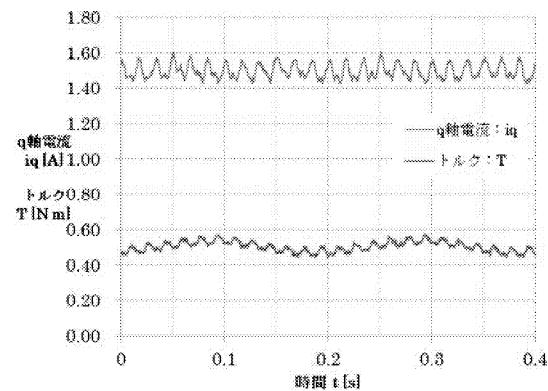


図2 トルク波形

# 光ファイバアクセスによる機能分散型次世代移動通信方式の研究

情報通信工学科 教授  
大塚 裕幸

移動通信の分野において、Long Term Evolution(LTE)及びLTE-Advancedの研究開発が加速している。しかし、それらは無線基地局eNBに全ての機能が集中しているため高機能化、システムの経済化が期待できない。本研究では、LTE-Advanced及びBeyond LTE-Advanced(5G)に向けて、制御局・交換局と無線基地局間は光ファイバを介して機能分散を図り、OFDMA、基地局間協調等の無線技術の高機能化を実現することにより、無線基地局の汎用性、経済性を高めることを目的とする。

本研究では、ブロードバンドネットワークを容易にするために、光無線技術の適用によってネットワークとアンテナを分離し、その両者間で通信機能を分散する機能分散型移動通信システムの提案を行い、以下の点を明らかにした。

①異なる複数の micro-eNB を用いたネットワーク MIMOにおいて、変調信号として OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を用いた場合、そのサイクリックプレフィックス (CP; Cyclic Prefix) の設計法を示した。具体的には、光ファイバの伝送遅延時間（群遅延時間）を  $5\mu\text{s}/\text{km}$ 、規定された CP 長が約  $5\sim30\mu\text{s}$ 、光区間と無線区間の遅延時間配分を 50% として場合、基地局 eNB と異なる二つの micro-eNB 間の光ファイバ長差は  $3\text{km}\sim500\text{m}$  以下で設計すれば良い。また、光デバイスおよび光ファイバ損失をパラメータとして、上りリンクの伝送特性である受信感度特性を明らかにした。

②LTE-Advancedにおいては、セルエッジでの品質を改善するためにリレー通信の研究が盛んである。本研究では、無線基地局からの電波を受信しその信号を光ファイバで伝送した後、再び電波不感地帯の端末に電波を送信する光無線リレーノードを提案した。これは、建物や障害物に起因するデッドゾーンのようなエリアへのカバレッジ拡張を目的としている。リレー通信では 3 種類のプロトコルスタックアーキテクチャ内の“レイヤ”の視点から定義が分類されている。本研究では、レイヤ 1 (L1) リレーの属する Amplify-and-forward (AF) 型リレーについて検討を行った。光区間の雑音特性を考慮した上下回線のレベルダイヤを明らかにするとともに、電気信号への要求品質である上り回線の受信感度特性を明らかにした。

研究成果として、国内学会で 6 件、国際会議で 3 件の発表を行った。今後は、リレー通信の干渉特性の評価、セルサイズをダイナミックに変動させる cell range expansion 技術の確立に向けた研究を行う予定である。

# 出力バッファ型ネットワークインターフェースの研究

情報通信工学科 準教授  
高瀬 柔郎

今後恒常化する我国の少子高齢社会において、年金制度の変質に伴う経済的な配慮や、人手不足を補う介助装置の遠隔管理、多種多様なデリバリーサービスや近隣のボランティア活動などを積極的に支援するために、我々は、分散網の考え方を活かし、広域網とは別建てに、近隣地域で課金を不要化するオープンな近隣網(IHN: Interlinked Homes Network)を提案している。更に近隣網には、今後地域へ配備され得る、ソーシャルサービスのための様々な装置と協調するセンサネットワークや、スマートグリッドのデータ交換における可用性も潜在する。

近隣網では、家庭や事業所および公的機関などからなる各ノードが、自ノードを囲む隣接ノードへ直結する物理リンクを張り、通信端末との間のインターフェースの機能により、ルータなどの設備投資を無用化する。各家庭は基本的に初期費用の負担だけで済む。その点において、近隣網はアドホックネットワークの考え方と類似する。アドホックネットワークでは、ノード毎にバッファメモリを設置し、ノード間のパケット伝送にブロードキャストを行う。バッファ溢れを生じたノードでは、周囲のすべての隣接ノードへパケットを伝送できず、パケット損失を生ずる。

一方、出力バッファメモリの優位性はよく知られており、前提となる高速処理が課題である。基盤技術の進化に伴うCPUの高速化やDRAMの低廉化は、出力バッファを可能にし、従来ノード毎に考慮していたバッファ溢れによるパケット廃棄率を、リンク毎のバッファ溢れによるパケット廃棄率へ転換し得ると考えられる。また、WPAN(Wireless Personal Area Network)で開発が進められているUWB(Ultra Wide Bandwidth)のTH-SS(Time Hopping Spread Spectrum)技術などは、各ノードと周囲の隣接ノードとの間に、それぞれ個別に無線リンクを実現できる可能性をもつ。ただし、UWBによるリンクは、本質的に、近接する隣家までが限界となる。

隣家同士が連結し自律的に通信を行う近隣網において、パケット損失率を低減し通信の高い信頼性を保持するために、今後のUWB技術と出力バッファ技術の進展を念頭に、ブロードキャストではなく、出力バッファ型の無線リンクを用いるフラッディング方式へ転換する方針が妥当であると考えられる。損失率を与える枝の廃棄率の多項式を解析し、いかに複雑で大規模な網でも、クロスバ集合が形成する部分網に等価となり、SD間の基幹路の最小枝数が増加しても最小次積の組が不変となるための条件、路による損失率の減少分を追加しても最小次積の組が不変となるための条件を提示した。これらの結果を鑑み、隣家同士が連結する近隣網において損失率を低減するために、各ノードがもつ複数枝を活用し出枝毎にバッファメモリを設ける方針は妥当であると考えられる。今後は、この方針に基づき、近隣網のアーキテクチャについて検討する。

## モバイル環境を考慮した I/O 性能の高いクラウド基盤

工学部 情報通信工学科 准教授  
山口実靖

スマートフォンをはじめとする近年のモバイル端末は、PC と同程度に高機能な基盤ソフトウェアを持つようになっている。しかし、モバイル端末の処理性能は PC より大きく劣り、モバイル端末からクラウドシステムに接続しそれを利用する手法が多くとられている。

本研究ではこの様なサービス形態を想定し、その性能の解析手法に関する考察と、性能解析システムの構築を行った。具体的には、モバイル環境におけるクラウドデバイスとして Android OS を搭載した携帯電話、携帯端末を想定し、そのアプリケーションの起動時間の解析システムの構築と、当該システムを用いてアプリケーションの起動時間の解析を行った。アプリケーションの起動時間はユーザにとって極めて重要な指標の一つであり、また Android OS ではアプリケーションが特有の手法で起動されるため起動時間に関する考察が十分になされておらず、この解析システムの構築は極めて重要な課題であった。

Android OS ではアプリケーションは、スクリーンのタッチ、ホームアプリケーションから ActivityManager への intent 送信、Zygote による新プロセスの fork、新プロセスのライフサイクル処理という処理を経て起動される。本研究ではまず、これらイベントの発生時刻を調査できる様 Android OS に改良を加えた。具体的には、ホームアプリケーションのスクリーンタッチの検出処理部、ホームアプリケーションから ActivityManager への intent 送信処理、ActivityManager から Zygote へのプロセス作成要求の送信処理、Android カーネルに於ける新規プロセス fork 処理、アプリケーションフレームワークの Activity クラス(アプリケーションクラスの super class)に於けるライフサイクルメソッド(onCreate()、onStart()、onResume())の呼び出しの時刻を保存し、調査できるよう改良を加えた。ユーザ空間部は Android システムログを用い、カーネル空間部はカーネル内のメモリに記録し後にユーザ空間部に転送できる機能を実装した。そして、各イベント時刻間の時間を計測し、各処理に要した時間の調査を可能とした。

提案システムを実アプリケーションに適用した結果、各アプリケーションの起動時間にて多くの時間を占めている箇所を定量的に計測することがわかり、提案システムがアプリケーション起動性能の解析に有益であることがわかった。

今後は、提案システムを用いてアプリケーション起動時間の短縮について考察をしていく予定である。

# ピクトグラム走査型ブレインマシンインターフェースの研究

情報デザイン学科 准教授

田中 久弥

筋萎縮性側索硬化症(Amyotrophic Lateral Sclerosis: ALS)は進行性で運動神経系のみが障害される神経難病の一つであり、病勢が進行すると家族と医療従事者とのコミュニケーションが非常に困難となる。ALS者の意思伝達方法としては文字盤や筆記、コミュニケーション機器などがあるが、完全な閉じ込め状態(Total Locked-in State: TLS)となった場合に残された意思伝達方法には脳波を利用したブレインコンピュータインターフェース(Brain Computer Interface: BCI)がある。しかし、BCIには生体反応を読み取るため、入力確度が低い、入力時間がかかるなどの問題点が挙げられる。そこで本研究では特定のコミュニケーションをピクトグラム化することで従来の文字走査型 BCI よりも速く正確に意思伝達を行うことを目的とした。BCI の設計は作業療法士を対象としたニード調査をもとに行った。現場のニードに基づいて必要なピクトグラムおよび BCI の要求仕様をもとに BCI の開発を行い、試作した BCI を健常成人によって評価実験を行った。評価実験は試作したピクトグラム走査方式 BCI と比較として従来のアルファベット走査方式の 2 種類の表示方法および 4 種類の刺激間隔の計 8 種類を行った。評価は正答率(入力確度)、入力時間、通信速度(bit rate)で行った。

実験の結果、正答率においてピクトグラムは正答率 75%，アルファベット走査方式は 80%であったが多重比較の結果有意差は認められず、どちらの方式も同等のパフォーマンスであることがわかった(図 1)。また、入力時間においては全刺激間隔においてピクトグラム走査方式の入力時間が短く、ピクトグラム走査方式がアルファベット走査方式よりも速く意思伝達が可能であることがわかった。さらに、bit rate はピクトグラム走査方式が 10.35[bits/min] に対しアルファベット走査方式が 8.9[bits/min] であったが正答率と同様に入力方式による有意差は認められなかった(図 2)。加えて、3 文字からなる 1 単語を入力した場合はピクトグラム走査方式では 10 秒に対してアルファベット走査方式では 23 秒と 2 倍の入力時間であり、正答率もピクトグラム走査方式が 78%

に対してアルファベット走査方式が 51% にまで減少することから、ピクトグラム走査方式 BCI は従来の文字走査型 BCI よりも速く正確に意思伝達が可能であることがわかった(図 3)。以上のことから、本研究ではニードに基づいてより速く正確に意思伝達が可能なピクトグラム走査方式 BCI の開発ができたといえる。

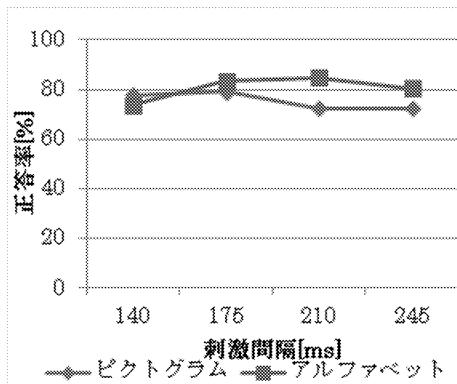


図 1 刺激間隔と正答率

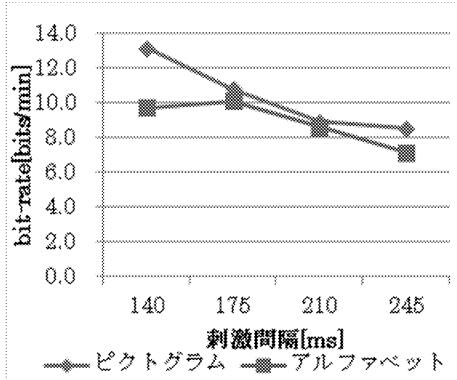


図 2 BCI のビットレート

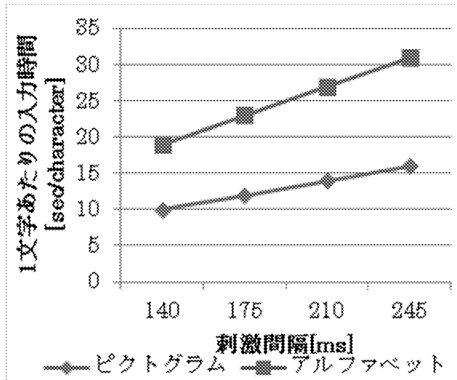


図 3 1 文字入力に要した時間

## クリフォード代数を用いるパターン認識

情報デザイン学科 準教授  
橋 完太

計算機の登場以来、その処理能力は指数関数的に向上し続けている。整然とした記号情報だけでなく曖昧模糊なパターン情報の計算が可能となりパターン認識が実応用され始めてから既に四半世紀が経過した。これまで、実数値の入力を受けけるパターン認識が主に研究されてきた。現在、複素数や超複素数の入力を受けけるパターン認識が注目されている。複素数や超複素数はクリフォード代数に一般化でき、クリフォード代数を用いるパターン認識はより幅広い応用先への適用が期待できる。本年度はクリフォード代数を用いるパターン認識に関連して、次の研究を進めた。

パターン認識のコア技術であるベイズの定理について、クリフォード代数を用いる応用先の一つとして有望な感性工学の専門誌「感性工学」に解説記事[1]を寄稿した。クリフォード代数のうち conformal geometric algebra は球と平面を同等に扱うことができ、特徴空間内の多種の図形を統一的に近似できる。この性質を利用したデータのクラスタリング手法を提案し、IEEE ファジィシステム国際会議[2]で発表した。特徴空間を折り畳んで新たな特徴空間を作り出す手法を提案し、クラスタリングやパターン識別に応用した結果を示した論文を Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics[3]で発表した。

[1] キーワード解説 ベイズの定理. 橋完太. 感性工学 10 卷 3 号, 170, 2011

[2] A clustering method for geometric data based on approximation using conformal geometric algebra. M.T. Pham, K. Tachibana, T. Yoshikawa and T. Furuhashi. Proc. IEEE Int'l Conf. Fuzzy Systems, 2540-2545, 2011

[3] Feature extraction with space folding model and its application to machine learning. M.T. Pham, T. Yoshikawa, T. Furuhashi and K. Tachibana. J. Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, vol.15, no.6, 662-670, 2011

# 教育施設における廃棄物資源回収と環境性能評価に関する調査研究

まちづくり学科 準教授

西川 豊宏

持続可能な資源循環型社会システムの形成が急務とされるなか、廃棄物排出に対する適切な抑制策や適正な循環利用の促進が重要である。建築環境の分野においては、過去に事務所建築を対象に建設に伴う消費エネルギー、CO<sub>2</sub>排出量、産業廃棄物の排出量等を産業連関分析により求めた研究や一般廃棄物処理にかかる環境負荷原単位を廃棄物の収集・運搬、焼却施設運用と処分場建設のLCI分析から導出している研究があったが、一般廃棄物の資源回収とその環境影響を評価している事例は少ない。

本研究では、教育施設側に求められる適切な分別回収、とりわけ一般廃棄物の資源回収の要領を明確にするため、都心立地型キャンパスと郊外立地型キャンパスを有する本学における廃棄物の適切な分別回収と再資源化について調査分析した。

延べ面積としてはほぼ同規模ながら立地の異なる両キャンパスを対象に、廃棄物の分別回収の実態と品目別排出割合の特性を比較したところ、新宿キャンパスは事務所建築、八王子キャンパスは学校建築の一般廃棄物排出割合に類似していた。この結果を基に一般廃棄物の資源回収率と廃棄物処理に係る CO<sub>2</sub> 排出量との関係を分析したところ、資源回収率は運搬、処理、処分過程で排出される CO<sub>2</sub> 排出量とは反比例の関係にあり、一般廃棄物の再利用に伴う天然資源投入抑制による CO<sub>2</sub> 排出削減量を加味すると新宿キャンパスにおいては資源回収率約 60%で、八王子キャンパスにおいては 50%でカーボンオフセットが実現可能との知見を得た。

さらに環境影響の評価領域を拡大し、昨夏の節電対策下でのエネルギー消費実態を本学新宿キャンパスで導入されている BEMS から設備機器運転状態や運転実績管理記録を利用して、人為的な節電対策下では把握できない室使用状況や在館者数を一般廃棄物排出量によって推定した。これにより節電対策下での電力使用量を震災前と同等の施設使用状況に補正して比較評価したところ、ピーク時及び節電期間にて共に約 20%の一次エネルギー消費が削減されていたと算定された。今後は八王子キャンパスを含めた環境負荷削減に寄与する対策をエネルギー消費と一般廃棄物排出の両面から検討する予定である。

# 家具（プロダクト）、インテリア、建築を横断する領域を対象とする

## 新しい教科書のあり方に関する基礎的研究

建築学科 教授 鈴木敏彦

### 1. テーマ・目的

日本における建築教育は工学系の内容で占められているが、インテリアデザインやプロダクトデザインの教育は美大系で教えられている。しかしそもそも建築とは総合的な学問であるべきだ。人々が生き生きと生活するためには、身の回りのスケールまで含めたトータル・デザインの教育が重要である。今こそ日本初の建築学部創設にあたって、家具（プロダクト）、インテリア、建築を横断する領域として「建築教育」を再構成することが求められる。今回はその基礎的調査を目的とし、デンマークではアルネ・ヤコブセン、フィンランドではアルヴァー・アルトに関する建築の調査、写真撮影、資料収集を行った。

### 2. 活動内容

4月28日 ラディソン SAS ロイヤルホテル（1960年設計）、ヤコブセンルーム 606号室にて計測、撮影。  
国立国会図書館において図面撮影。／4月29日 ステリングビル（1937年）撮影、デンマーク工芸博物館にてヤコブセン等、北欧の家具と椅子の撮影。／4月30日 クランベンボーゲーにて、ベラヴィスタ集合住宅（1934年）、マットソン乗馬クラブ（1934年）、ベルビュー海水浴場（1932年）の撮影。オードルップゴー美術館にてフィン・ユールの自邸を見学。／5月1日 クランベンボーゲーに移動。テキサコのガソリンスタンド（1937年）、レストラン・ヤコブセンの撮影。ムレベックに移動。レイジアナ美術館ヤコブセン資料収集。／5月2日 ヤコブセンの家具を生産するフリツ・ハンセン社のショールーム、工場、本社、ミュージアムを視察。椅子の職人、皮の職人、デザイナーに家具生産についてインタビュー。デンマーク国立銀行（1971年）撮影。／5月3日 オーフスに移動。オーフス市庁舎（1942年）見学と撮影。／5月4日 オーフス市庁舎にてガイドツアー。コリングに移動。トラポルト美術館にてヤコブセンの実験住宅の撮影。ヴァーナー・バントンの家具の撮影。コペンハーゲンに移動。ダンスク・デザイン・センターにて撮影。／5月5日 フィンランド・ヘルシンキに移動。アカデミア書店を中心とする、アルヴァー・アルト設計の建築14箇所を撮影。エリエル・サーリネン設計の中央駅の撮影。／5月6日 アルヴァー・アルトのスタジオ（設計事務所）見学。アルトの自邸撮影。アルト設計のレストラン・サヴォイ撮影。アルトの家具製品を販売するイッタラにて資料収集。／5月7日 アルト設計のアルト大学とフィンランディアホールの撮影。

### 3. 成果・感想

建築学部のための新しい教科書を2冊発行することができた。  
研究費助成に感謝すると共に、この成果を大学に還元していきたい。

#### 成果1：建築計画1の教科書として

「世界で一番美しい建築デザインの教科書／7人の巨匠に学ぶインテリア・家具・建築の基本」  
ムック：160ページ／出版社：エクスナレッジ（2011/12/15）／言語：日本語  
ISBN-10: 4767812399／ISBN-13: 978-4767812397／発行日：2011/12/15

#### 成果2：基礎設計・図法の教科書として

「北欧の巨匠に学ぶ図法／家具・インテリア・建築のデザイン基礎」  
単行本：113ページ／出版社：彰国社（2012/04）  
ISBN-10: 4395013015／ISBN-13: 978-4395013012／発行日：2012/05/10

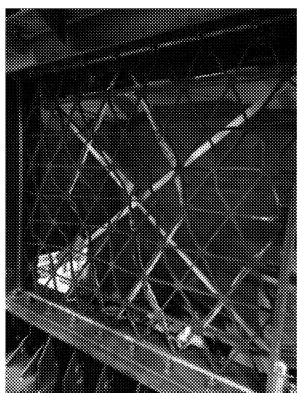
# 格子耐震壁の耐震性能に関する研究

建築学科 准教授  
山下 哲郎

本研究は、透光性や通気性を有し、意匠性にも優れた鉄骨格子耐震壁を研究対象とする。このような鉄骨格子耐震壁を使用すれば建物の外周部にも耐震要素を配置でき、自由度の高い空間構成が可能となる。また当耐震壁は新築のみならず、既存ストックの耐震補強やリノベーションにも有効であり、建築構造に軽快で意匠性の高い新しいボキャブラリーをもたらし、構造体の高付加価値化を狙うものである。

しかしながら、ラチスシェルに見られるように格子状構造物は複雑な座屈性状を呈する。せん断力を受ける耐震壁では、圧縮側の個材が座屈する個材座屈と、壁全体が面外にはらみ出して座屈する全体座屈の2種類を設計上考慮する必要がある。また塑性変形によるエネルギー消費に期待する場合、初期の座屈耐力だけでなく座屈後安定耐力や塑性変形性能が問題になる。従って、格子状鉄骨耐震壁を建物の耐震要素として用いるために、せん断座屈特性の分析、耐震性能評価と設計方法の開発が必要である。

研究全体としては座屈解析と実験の両面を行うが、今回の一般研究費を使用して縮小試験体の繰返し加力実験を実施し、座屈モード、座屈耐力と塑性変形性能を中心とした耐震性能を調べた。試験体は鋼板をレーザーまたはプラズマでくり抜いて製作したが、熱ひずみのため多少の初期不整を生じた。また結果の検証のため有限要素解析を平行して実施した。図1に座屈した状態、図2に荷重変形関係を示す。特に全体座屈が生じる場合、顕著な座屈変形にもかかわらず最大耐力後の耐力劣化は小さく、耐震要素としての性能が良好であることが示された。



(全体座屈) (個材座屈)

図1 座屈性状

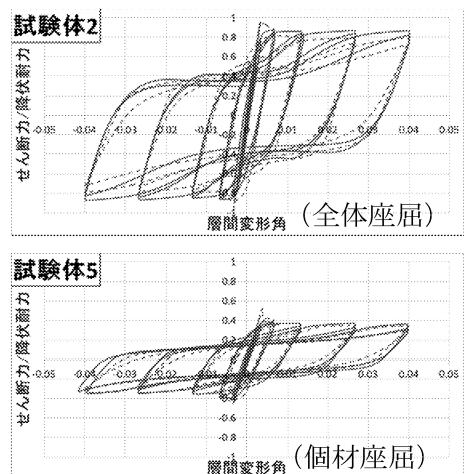


図2 荷重変形関係

# 中世・近世ヨーロッパにおける都市防禦施設の更新と それがもたらした建築・都市の変容

建築デザイン学科 准教授

中島 智章

## 研究背景・目的・方法

古代以来、ヨーロッパのほとんどの都市は都市防禦のための施設を備えて外敵の攻撃に備えてきた。だが、軍事をめぐる制度の変化や技術の進化などによって都市攻囲の方法が変わってくると、都市防禦施設の更新の問題が生じ、それに伴って従来の都市防禦施設の別用途への変更(コンヴァージョン)や、取り壊された場合にはその跡地の活用が図られ、都市構造に大きな変化を及ぼすことが多かった。本研究では、現在のフランス、ベルギー、オランダ、ドイツなどのアルプスの北側地域の諸都市における中世・近世の都市防禦施設の事例研究を通じて、その変遷と都市構造の変化の関係を明らかにする。

## 実施した調査

上記の研究目的・方法に基づき、以下の建造物の調査を実施した。

- 1) かつての古代ローマ都市アウグスタ・トレウェロールムで、現在はドイツ西部の国境付近の司教座都市トリアの北の城門だったポルタ・ニグラ(ラテン語で「黒い門」の意)
- 2) かつての古代ローマ都市コロニア・アグリッピネンシスで、電材はドイツ西部の大司教座都市ケルンの古代ローマ時代の城壁、城塔の遺構と大司教座聖堂
- 3) チェコ・オモロウツの築城を施された司教座聖堂
- 4) ポーランド・クラクフのヴァヴェル城塞と城内の司教座聖堂

## 研究成果

- 1) 拙著:『図説キリスト教会建築の歴史』、河出書房新社、2012年(ただし、出版は2012年度)  
\* その他、研究テーマに関係するところでは、J. E. カウフマン、H. W. カウフマン:『中世ヨーロッパの城塞』、中島智章訳、マール社、2012年も公刊された。

# 科学言説と探偵小説のトランスナショナルな移動と交差をめぐる

## 文化研究

基礎・教養教育部門 教授

吉田 司雄

本研究は、科学言説と文学言説を中心とする他の言説群との相互関連性を問題とし、文学研究・文化研究の新たな地平をひらこうとするものである。とりわけ、西洋近代科学と密接な関わりのある探偵小説ジャンルの誕生と変容に注目し、近代日本を対象とするのみならず、西洋で誕生した探偵小説が日本経由でアジア圏に浸透していく様態を、戦前の日本植民地科学の進展や一般大衆への情報の還流状況と関連付けながら、これまでの一国主義・一言語主義的な文学研究の枠におさまらない研究領域を開拓することを目的としている。

探偵小説ジャンルの成立要因として、どのようなことが考えられてきただろうか。ハワード・ヘイクラフト『娯楽としての殺人—探偵小説・成長とその時代』(1941年)は、「探偵小説」というジャンルの成立が「探偵」の登場と不可分なものであったと述べている。「明らかに探偵というものが生まれるまでは、探偵小説というものもあり得なかつたろう(し、また事実なかつた)。そして、探偵というものは、十九世紀に至るまでは、存在しなかつた」。「近代文明とよばれる複雑な生活が発達し」「理性的になったひとびとは、犯罪防止と消滅のためには、秩序だった方法での真犯人の逮捕と、真犯人の正しい処罰だけが、役立つことをさとりはじめ」る。「拷問は証明に、神託は証拠に、拷問台や指ねじりは訓練された尋問者にと、かわって」ゆき、「そして尋問者が完全に出現したときに、探偵小説が、当然の帰結として、登場してきた」(林峻一郎訳)。ヘイクラフトの考える「探偵」＝「尋問者」は、合理的科学的な捜査と証明によって真犯人を見出し、民主的な社会秩序の土台である「法」に基づいてその罪を裁く公権力の代理人である。

しかしながら、「法」の番人としての「探偵」の活躍を保証する西洋的な民主主義の発展のみを考えたのでは、近代日本やその植民地であった地域でも探偵小説が読まれ、また書かれていた事実を十分に評価することはできない。「探偵行為と探偵小説は、民主的な伝統の強さと国家の本質的な寛大さに比例して栄える」と考えたヘイクラフトに従えば、近代日本における民主化の不徹底が不可避的に探偵小説の発達の遅れを招いたということになるのだが、そこで見失われていくのはアジア的な法概念やその大衆レベルでの浸透状況である。本研究では、中国の公案小説やその影響を受けた『大岡政談』など江戸期の実録体小説まで視野を広げながら、この問題を再検討している。

# MPGD を用いたガス検出器における電子増幅機構に関する研究

基礎・教養教育部門 教授  
渡部 隆史

高エネルギー物理学の将来計画の一つである国際リニアコライダー(ILC)計画[1]における荷電粒子飛跡検出器 Time Projection Chamber (TPC)の電子増幅機構として Gas Electron Multiplier [2]は、反応速度、位置分解能などの点から有効な機構の一つと考えられている。しかし、読み出し部の面積が数  $m^2$  に亘ることから、極板の細分化(図 1)、読み出し回路の高集積化などを国際協力の下、進めている段階にある。極板の細分化については、飛跡の連続性、それに伴った位置分解能の見積もりを定量的、系統的に行うため荷電粒子ビームによるテスト実験に加え、紫外線レーザー ( $\lambda = 266\text{nm}$ ) による疑似飛跡を利用した分解能測定も有効であると考えられる。本研究は、試験用分割電極によるテスト実験を行う前



図1. Large Prototype-1 への試験用分割電極の組込みの様子



図2. 紫外線入射用石英窓のついた test chamber

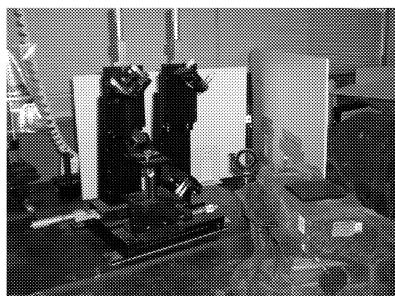


図3. 紫外線レーザーと光学システム

に、現段階で ILC-TPC に適していると考えられる混合ガス Ar-CF<sub>4</sub>-isoC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (95:3:2) を使用し、

- レーザーのスポットサイズを十分に絞り込みつつ、疑似飛跡として十分な長さを確保できるか、
- 飛跡再構成のための信号として十分な電荷量を得ることができるか、

を検証することを目的としている。実験は、共同実験グループの 1 機関である東京農工大学の協力の下、石英窓のついた test chamber (図 2) と紫外線レーザー (図 3)

を用いて行われて

おり、動作試験の結果、十分な信号が得られることが確認された(図 4)。現在は、疑似飛跡の検証を行っている。

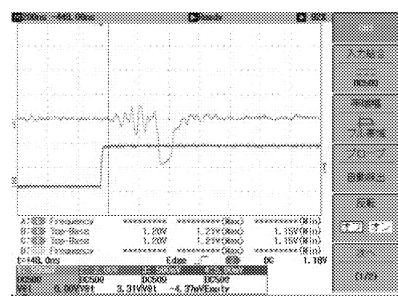


図4. 紫外線レーザーによる信号

[1] <http://www.linearcollider.org/>

[2] F.Sauli, Nucl. Instr. And Meth. A386 (1997) 531.

## 擬微分作用素による経路積分の研究

基礎・教養教育部門 教授  
熊ノ郷 直人

私はこれまで擬微分作用素の理論で開発された方法でシュレディンガ方程式に対する経路積分の理論を定式化してきたが、擬微分作用素は元々様々な方程式に適用できる一般理論であり、最近、対称性を重視した新しい形の擬微分作用素も展開されている。そのため、従来の擬微分作用素による経路積分と対称性を重視した新しい形の擬微分作用素を研究した。

論文として、相空間経路積分が存在する一般的な汎関数の2つのクラスを与えた。各々のクラスに属する汎関数を振幅とする相空間経路積分の時間分割近似法は位置の終点と運動量の始点に関して広義一様収束する。また各々のクラスは和、積、経路の平行移動や線形変換、汎関数微分に関して閉じているため、多くの相空間経路積分可能な汎関数を創ることができる。不確定性原理を避けるため使用する際に注意が必要であるが、相空間経路積分において、時間に関する積分や $\lim$ との順序交換定理、摂動展開、経路の平行移動や直交変換に関する自然な性質、汎関数微分に関する部分積分、Hamilton型準古典近似が成立することを証明した。

論文：Naoto Kumano-go, Phase space Feynman path integrals with smooth functional derivatives by time slicing approximation, Bulletin des Sciences Mathématiques, 135 (2011) 936–987.

また、時間分割近似法による経路積分の理論について一般向けの解説を書いた。

解説：熊ノ郷直人，経路積分—時間分割近似法による経路空間上の解析として，数理科学 2012 年 4 月号, No. 586 (2012) 28–34.

さらに、研究集会「Introdetroy Workshop on Feynman path integral and Microlocal Analysis」(6月21日～24日, 京都大学数理解析研究所)を研究代表者として企画し、研究集会「超局所解析とその展望」(3月8日～10日, 日本大学)を副研究代表者として企画した。

口頭発表として、6月23日と24日に京都大学数理解析研究所での研究集会「Introdetroy Workshop on Feynman path integral and Microlocal Analysis」、7月7日に東京都市大学の数理科学セミナー、7月20日に立命館大学の解析セミナー、11月13日に佐賀大学での研究集会「確率解析とその周辺」、1月31日にスイスのEPFLでの研究集会「Recent Developments in Stochastic Analysis」、2月25日に東京都市大学の数理科学研究会、3月8日に日本大学での研究集会「超局所解析とその展望」、3月16日にドイツのポツダム大学での研究集会「Geometric and Singular Analysis」、3月22日に韓国のソウル科学技術大学のセミナー、3月23日に韓国の京畿大学のセミナー、3月26日に韓国の延世大学のセミナーで発表した。

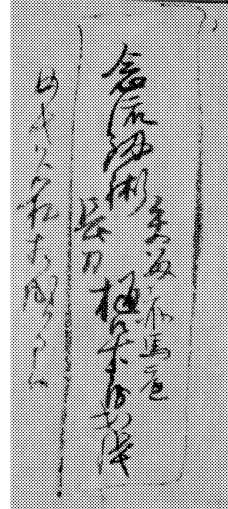
## 近世関東の村における剣術流派の普及に関する基礎的研究

基礎・教養教育部門 教授  
数馬 広二

江戸時代に關東（上野国、常陸国、安房国、上総国、武藏国、下野国、相模国、下総国）の村落部で行われた剣術流派が、明治期に至るまでいかに稽古を続け、継承されたか明らかにすることは、日本における身体教育の歴史を明らかにするために必要な研究と考えている。今研究では以下の成果を得た。

### ① 馬庭念流の江戸道場とその活動について

上野国（群馬県高崎市吉井町馬庭）で創始された馬庭念流が18世紀はじめに江戸へ進出し、13世樋口将定の頃に赤坂（東京都港区）、14世定嵩は京橋（東京都中央区）、定張が神田お玉が池（東京都千代田区）および小石川（東京都文京区）、18世定伊が神田明神下（東京都千代田区）にそれぞれ開いた。道場の木札には「念流剣術」「矢留」「長刀」の三術を「上州馬庭 樋口十郎兵衛出張」と記された（右写真）。馬



庭念流の江戸での活動に「上覧」がある。念流の祖、相馬四郎左衛門義元の由緒から元文5年（1740年：樋口将定）に、外桜田（東京都千代田区霞が関）の相馬弾正邸で馬庭念流の「かた」を木刀により披露したことをはじめ、寛政5年（1793年：樋口定嵩）には、松平定信に認められ江戸城御白書院での演武をした。また、参詣の人々で賑わう社寺へ「門人姓名額」の奉納については、嘉永4年（1851）に神田明神、嘉永5年（1852）に浅草寺へそれぞれ行っている。また弘化年間に「矢留術」（10間離れた距離から射放たれた弓矢を素肌で構え、木刀で真っ向から切り落とす技）を再興し、江戸の旗本の入門が相次いだ（樋口家文書）。

### ② 米国議会図書館 ASIAN DIVISION 所蔵武芸文書の閲覧

The Library of Congress（米国・ワシントンD. C）で「兵法」「剣術」「弓術」「砲術」に関する資料64点を閲覧・撮影した。「武備淵源録一船戦」、「船軍定書」、『葉隠』などの写本、武藏国多摩郡の八王子千人同心「七三良・三十八歳」の名のある「多摩郡宮下村五人組帳」（文政13年4月）などの地方文書も含まれる。文書検索は『Catalog Of Japanese Rare Books In The Library of Congress 米国議会図書館蔵 日本古典籍目録』（八木書店）に拠った。日本人移民により米国内に持ち込まれた武芸伝書の存在についても可能性を見いだすことができた。

### ③ 江戸時代八王子千人同心組頭の八王子市犬目町・斎藤家の資料分析

多摩で起こった剣術流派の一つ、天然理心流を学んだ斎藤家（八王子市犬目町・元八王子千人同心組頭）の膨大な所蔵文書整理のため、本研究費の一部を目録作成経費の一部に充当した。今回整理分の書籍点数は（明治以降）3,775点になった。

# 素粒子標準模型を超える TeV スケールの物理

基礎・教養教育部門 準教授  
進藤 哲央

ヒッグス粒子は、素粒子標準模型の重要な要素でありながら、未発見であり、LHC での発見が期待されている。実際、最近の LHC 実験では、それらしい兆候をとらえたという報告もある。

標準模型を超える物理を考えると、ヒッグスセクターは自然と拡張される。例えば最小超対称性模型などでは、ヒッグスは1つではなく2つ必要であり、いわゆるヒッグス2重項模型となる。ヒッグスセクターの物理と標準模型を超える物理とは、このように密接に結びついており、ヒッグスセクターの詳細を調べることで、標準模型を超える物理の方向性を探ることが可能である。

この研究では、超対称性模型に注目し、最小模型である MSSM に対し、ヒッグスセクターが拡張されたような場合に、それが現象論におよぼす影響について議論を行った。文献[1]では、2重項が4つあるような超対称性模型を議論し、そのような模型の非デカップリング効果の現れ方を理論的に検証した。その結果、標準模型の極限では、このような拡張の効果はデカップリングしてしまうが、MSSM の極限を考えると、たとえつけ加えた場が重かったとしても、荷電ヒッグスの質量等に非デカップリング効果が現れることを示すことができた。

文献[2]では、上記のような非デカップリング効果を利用した結果として、2重項が4つと荷電1重項が2つ入ったような超対称性模型において、電弱バリオン数生成を引き起こすのに必要な、強い1次相転移を実現できることを示した。このことは、標準模型の内包する深刻な問題であるバリオン数生成の問題に対し、低エネルギーでの解を与える大きな一歩である。

## 参考文献

1. M. Aoki, S. Kanemura, T. Shindou, and K. Yagyu, “Decoupling property of the supersymmetric Higgs sector with four doublets”, JHEP 1111:038(2011).
2. S. Kanemura, E. Senaha, and T. Shindou, “First-order electroweak phase transition powered by additional F-term loop effects in an extended supersymmetric Higgs sector”, Physics Letters B706,40 (2011).

# 有機分子を用いた分子型量子ドットセル中の 電子移動シミュレーション

基礎・教養教育部門 助教

徳永 健

日常に欠かせない存在となったコンピュータ。近年、その核となる中央演算処理装置(CPU)の性能向上は目覚ましい。これは、CPUを構築する電界効果トランジスター(FET)の微細化や複雑化による。しかしながら、微細化の限界や動作原理の破綻のため、その性能は近く上限に到達すると言われている。このため、FETとは異なる仕組みを持つデバイスが数多く提案されてきた。その1つが「量子ドットセルオートマトン(QCA)」である。基板上に量子ドットを様々な配置し、さらに入力・出力を付け足すことにより論理演算などの様々な機能を持たせたものがQCAである。1997年に論理回路としての動作が実証され、2000年以降はQCAを分子で構築する分子型QCAが注目を集めている。しかしながら、分子型QCAの動作はまだ実現していない。このため、実験に先駆けた分子型QCAの理論的動作解析および設計に関する理論的研究が現在盛んに行われている。

分子型QCAの性能を支配するのは、図の点電荷の変化に伴い分子内を移動する電荷の量(信号強度)とそれにかかる時間(信号伝達時間)である。これまでの研究で、分子型QCAの理論的動作解析のためのシンプルな評価方法を提唱し、無機QCA(混合原子価錯体、図(a))中の信号伝達挙動の金属原子・錯体電荷依存性を明らかにした。本研究課題では、この方法を有機QCA(複数の部分共役系を有する系、図(b))に適用し、その分子内電子移動挙動を無機QCAと比較した。

今回取りあげた有機QCAは無機QCAとほぼ同じ強度の信号を伝達するが、信号伝達に長い時間を要する。このため、信号伝達時間の点では、図の有機QCAは無機QCAに劣ることが分かった。今後は、有機QCAのアルキル鎖に二重・三重結合を導入し、信号伝達時間の短縮をねらいとした分子設計を行う。

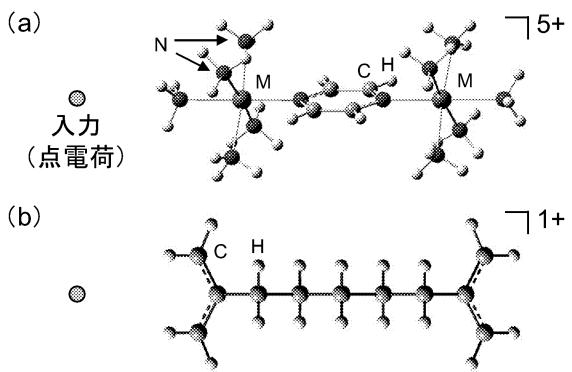


図 (a) 無機QCA (b) 有機QCA