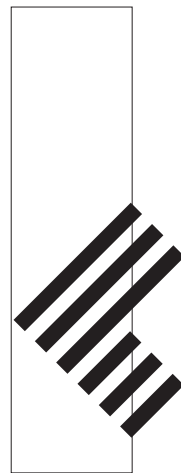


工学院大学  
総合研究所年報

第16号 2008年度



平成21年7月発行

工学院大学総合研究所

RESEARCH INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
KOGAKUIN UNIVERSITY

工 学 院 大 学  
総 合 研 究 所 年 報







## さらなる飛躍を目指して

学長 水野 明哲

ここに、プロジェクト研究課題の報告などがまとめられた総合研究所年報が発刊されることを皆様と共に喜びたいと思います。

総合研究所が設置されたのは 1994 年のことで、2004 年、ちょうど私が総合研究所の所長をしているときに 10 周年の記念行事を開催しました。思い起こせば、総合研究所所長を務めておられた三浦宏文先生が学長になられたため、2003 年 4 月から私が所長を引き継ぐことになりました。ちょうど「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(通称 SMBC)」の申請を出したところで、センター長を務められるはずであった三浦先生が、東大で培ってこられたマイクロの技術を本学で花開かせようと意気込んでおられました。SMBC 長は小泉安郎先生が引き継がれて、定期的な勉強会を開催されるなど、きっちりとした運営をされました。総合研究所所長はその後、木村雄二先生から藤江裕道先生へと引き継がれました。SMBC を立ち上げていただいた小泉先生は他大学に移られています。三浦先生は 6 年間 2 期の学長を全うされ、私が学長を引き継いでいます。ほんの数年の間にずいぶんさまざまな展開があったことに感慨を覚えるものです。

さて、大学においては「教育」と「研究」が車の両輪である、というように言われることが少なくありません。それは、「研究」の無い「教育」はありえない、という意味でしょう。ではなぜ研究の無い教育はダメなのでしょう。本来、研究者と教育者は求められる資質が異なるはずで、研究者はオリジナリティーのある研究を進めるための着想力や粘り強い研究を展開する上での忍耐力などが求められるのに対して、教育者は学生の立場に立って、時には冗談も交えながら楽しく学生に学ばせることが求められるでしょう。そのように考えると研究者と教育者は違う職業ともいえます。しかし、よき教育者たるためには、活発な学会活動を行うことにより、最新の学術情報を得ると共に、研究を展開する上での論理的発想法を身に付けていることが求められます。それは、そのことが生き生きとした教育者として学生から魅力ある存在に見えることにつながるからです。学外での研究活動を行わず、十年一日の講義をしていたのでは、学生の興味を喚起することは難しいでしょう。そんな意味で、総合研究所が研究の場や資金を用意して研究を奨励することは、本学の教育のレベルアップのためにも不可欠のことと考えています。

そうは言いましても、昨今大学が置かれている状況から学内の予算は削減され、必要な研究費は学外に頼らざるを得なくなりつつあります。研究者には、自ら外部資金を獲得するという課題が課せられるようになりました。しかし、そんな中だからこそ、改めて教育と研究の密接な関係を認識し、その新たな課題を乗り越え、研究活動の更なる活性化と展開を図ることが肝要です。本学の総合研究所がこれからもまた大きな飛躍を遂げることを願っています。

## 総合研究所の役割

総合研究所 所長  
藤江 裕道



「工学院大学総合研究所」は、科学技術の基礎及び応用並びにこれらが直面する人間文化的側面に関する特色ある研究を行うとともに、その研究成果に基づいて本学の教育の向上に資することを目的として1994年2月に設置されました。理工学研究部門と総合文化研究部門から構成されており、前者は主に工学部、情報学部ならびにグローバルエンジニアリング学部の専門課程を担当する教員の多様な専門分野の研究活動を、後者は共通課程を専門とする教員の研究活動を支援する仕組みとなっています。

活動の具体的な内容は、①文部科学省私学助成を得た3つの研究センターの運営、②センター以外の公的研究費、受託研究費などの受け入れと報告取りまとめ、③学内の中小規模研究活動やフォーラムの運営・支援、④プロジェクト研究費、一般研究費などの学内研究費の採択と成果報告取りまとめ、⑤産学共同研究センターの運営、⑥特許申請と知的財産権に関する業務、⑦学外からの研究・試験等の受託などの産学連携など、多岐にわたります。

①の3つの研究センターは本報告書と直接の関わりがありませんが、総合研究所が管轄する、本学の研究面における最大のアピールポイントですので、名称と研究期間等について簡単に説明します。

- 1) ナノ表面・界面研究センター（略称 NASIC：ハイテクリサーチセンター整備事業：2005年度－2009年度）
- 2) ポスト・地震防災・環境研究センター（略称 PostEEC：学術フロンティア推進事業：2006年度－2008年度）。2010年度に新規の申請を行うべく準備中。
- 3) 生体医工学研究センター（略称 BERC：戦略的研究基盤形成支援事業：2008年度－2012年度）

総勢100名以上の本学教員と、関連研究室所属の大学院生、および学外研究者が研究を推進しており、多くの成果を挙げています。その成果については研究成果報告会の開催ならびに報告書作成等により公表しています。また、⑤に関しては産業界との幅広い共同研究を実施する場として、

- 4) 産学共同研究センター(CORC：Collaborative Open Research Center)

を設置し、学外の企業を中心とする研究者と共同研究を行っています。

さらに総合研究所は研究を実施することのほかに、学外との共同研究の実施、工業所有権に関する取扱い、研究成果報告会、各種講演会などの開催、各種研究成果報告書の刊行等々、多岐にわたる活動を行っています。

④の学内研究費の配分は本学の大きな特徴です。プロジェクト研究に関しては、木村前所長の方針が引き継がれ、厳正な審査を経て採択と研究費配分の決定を行っています。研究計画が精査されることはもちろん、研究実績評価も十分に加味されています。また、一般研究はプロジェクト研究に準ずる研究費枠であり、各学科系列で選定され、推薦された研究申請を総合研究所が審査し、採択決定をしています。本報告書はこれらの研究成果について報告されたものです。したがって、その内容は本学の研究の粋を集めたものと言えます。どうぞ、じっくりと中身をご覧くださいと思います。

我々大学教員は、研究や教育の優れた点を社会一般に正しく伝え、大学の評価を向上させるとともに、我々自身の研究、教育のレベルをその評価に負けないくらい高く保つよう努力する必要があります。本報告書の発行など、①～⑦に示された工学院大学総合研究所の活動が本学の益々のレベルアップに大きく貢献しています。

# 目 次

学 長 水野 明哲  
総合研究所所長 藤江 裕道

## 1. 総合研究所プロジェクト研究報告（2008年度研究終了）

- ・ Generation of Selves  
責任者 足立 節子…………… 15
  - ・ 前十字靭帯三重束再建術のロボットシステムによる解析・評価  
責任者 藤江 裕道…………… 25
  - ・ 軸流型スパイラル粘性マイクロポンプの基礎的研究  
責任者 佐藤光太郎…………… 37
  - ・ 外科手術用マスタ・スレイブ型ロボット鉗子システムの構築に関する研究  
責任者 石井 千春（現芝浦工業大学）… 49
  - ・ 表面張力を利用した微小液滴のマニピュレーションに関する研究  
責任者 鈴木 健司…………… 57
  - ・ フレキシブル基板上の微細配線に生ずるマイグレーション損傷評価手法の確立  
責任者 木村 雄二…………… 67
  - ・ セルロース類の化学原料化と機能性物質への展開  
責任者 小野 擴邦…………… 81
  - ・ 疑似血管デバイスを用いた流れによる刺激による内皮細胞の応答の計測  
責任者 杉井 康彦…………… 91
- （2006年度研究終了・追加報告）
- ・ 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  
責任者 長谷川 憲…………… 99

## 2. 総合研究所プロジェクト研究報告（2009年度継続研究）

- ・ 近代日本における科学言説の浸透と変容をめぐる文化研究  
責任者 吉田 司雄…………… 117
- ・ 原子炉の地震時安全性に関する研究（炉心伝熱に及ぼす地震加速度とその方向の影響）  
責任者 大竹 浩靖…………… 127
- ・ センサ・ネットワーク用新構造弾性表面波センサ装置の開発  
責任者 疋田 光孝…………… 131
- ・ 顕著な生物活性を有する高次構造天然物の全合成研究  
責任者 宮下 正昭…………… 139

・ 次世代 End-to-End QoS 制御のためのネットワーク資源管理方式の研究	責任者 浅谷 耕一	145
・ 教員資質論の動向を踏まえた教員資格制度のあり方に関する歴史的研究	責任者 蔵原 清人	151
・ MPGD による位置分解能の最適化	責任者 渡部 隆史	157
・ タールレスガス化炉を搭載したバイオマス燃料自動車の研究開発	責任者 雑賀 高	165
3. 総合研究所一般研究報告（共同研究）		
・ 金属光造形複合加工法による焼結チタン人工骨内部構造仕様と最適加工条件に関する研究	責任者 何 建梅	173
・ 環境負荷低減を目的とした生分解性樹脂への印刷膜付与による機能材料の創製と分解挙動の把握	責任者 矢ヶ崎隆義	177
・ 高密度酸化物熱電材料を用いた発電モジュールの開発	責任者 桑折 仁	183
・ 酸化チタンの光機能特性に対する磁場印加効果	責任者 鷹野 一郎	187
・ sIGNDEX V3 による汎用的な手話記述法に関する研究	責任者 長嶋 祐二	191
4. 総合研究所一般研究報告（個人研究）		
・ 憲法制定過程の研究	長谷川 憲	197
・ 日本における地方金融界の変遷に関する研究	吉田 賢一	198
・ トップクォーク生成過程に関する高次補正	加藤 潔	199
・ 大学院教育における数式処理の利用	牧野 潔夫	200
・ 非線形拡散の退化特異性に起因する数理現象の研究	竹内 慎吾	201
・ ナショナリズムと身体政治学—ハワイ日系人のベースボールを事例として	森 仁志	202
・ 江戸時代関東農村における剣術流派の存在形態に関する基礎的研究	数馬 広二	203

・ 砕氷船の航行時安全性評価技術の開発及び実験的検証	金野 祥久	204
・ レオロジー制御を利用した摺動部材用ナノカーボン充填多元型ポリマーブレンドの創製	西谷 要介	205
・ 光照射分解及び気液分離を用いたシアン化物イオンの定量テープ式測定法の開発	長島 珍男	206
・ 気生微細藻類による抗酸化物質の生産および天然由来機能性添加物への応用	阿部 克也	207
・ ミジンコの蛍光ビーズ摂取量測定による迅速毒性評価	釜谷 美則	208
・ 欠陥構造物質化学と欠陥物質材料の機能性に関する研究	門間 英毅	209
・ ナノ空孔構造材料をベースとする燃料電池用個体電解質の開発	大倉 利典	210
・ 顔画像による個人の認証ならびに表情認識システムの構築	中村 納	211
・ 集積化 GaN 系面発光素子の製作検討	本田 徹	212
・ 数値最適化に基づく制御系設計の可視化手法の研究	小西 克巳	213
・ 脳情報通信技術による対話認知解析	田中 久弥	214
・ アンシアン・レジーム期におけるソフト・パワーとしての王権建築とその様式伝播	中島 智章	215
・ 学校体育館の耐震性評価に関する研究	山下 哲郎	216
・ 鋼板の面外耐力に関する基礎的研究	小野里憲一	217
・ 省エネ型ライフスタイル普及に向けた住宅エネルギー情報収集・表示システムの開発	中島 裕輔	218

## 2009年度総合研究所運営委員

総合研究所所長 大学院運営委員会委員長	藤江 裕道 (機械工学科教授)
BERCセンター長	藤江 裕道 (機械工学科教授)
NASICセンター長	長本 英俊 (環境エネルギー化学科教授)
UDMセンター長	久田 嘉章 (建築学科教授)
共通課程互選	蔵原 清人 (共通課程教授)
機械系学科互選	立野 昌義 (機械工学科教授)
化学系学科互選	宮下 正昭 (応用化学科教授)
電気系学科互選	横山 修一 (電気システム工学科教授)
建築系学科互選	阿部 道彦 (建築学科教授)
情報学部互選	小野 論 (コンピュータ科学科教授)
グローバル エンジニアリング学部互選	疋田 光孝 (機械創造工学科教授)

2008 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: 2009 年度
<b>・ 2008 年度研究終了</b>		
Generation of Selves	足立 節子	共通課程准教授
前十字靭帯三重束再建術のロボットシステムによる解析・評価	藤江 裕道	機械工学科教授
軸流型スパイラル粘性マイクロポンプの基礎的研究	佐藤光太郎	機械創造工学科教授
外科手術用マスタ・スレイブ型ロボット鉗子システムの構築に関する研究	石井 千春	(機械創造工学科准教授) (現 芝浦工業大学)
表面張力を利用した微小液滴のマニピュレーションに関する研究	鈴木 健司	機械システム工学科教授
フレキシブル基板上の微細配線に生ずるマイグレーション損傷評価手法の確立	木村 雄二	環境エネルギー化学科教授
セルロース類の化学原料化と機能性物質への展開	小野 擴邦	応用化学科教授
疑似血管デバイスを用いた流れによる刺激による内皮細胞の応答の計測	杉井 康彦	総合研究所准教授
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	共通課程教授
<b>・ 2009 年度継続研究</b>		
近代日本における科学言説の浸透と変容をめぐる文化研究	吉田 司雄	共通課程教授
原子炉の地震時安全性に関する研究 (炉心伝熱に及ぼす地震加速度とその方向の影響)	大竹 浩靖	機械工学科教授
センサ・ネットワーク用新構造弾性表面波センサ装置の開発	疋田 光孝	機械創造工学科教授
顕著な生物活性を有する高次構造天然物の全合成研究	宮下 正昭	応用化学科教授
次世代 End-to-End QoS 制御のためのネットワーク資源管理方式の研究	浅谷 耕一	情報通信工学科教授
教員資質論の動向を踏まえた教員資格制度のあり方に関する歴史的研究	蔵原 清人	共通課程教授
MPGD による位置分解能の最適化	渡部 隆史	共通課程教授
ターブルスガス化炉を搭載したバイオマス燃料自動車の研究開発	雑賀 高	機械創造工学科教授



( 一 般 研 究 )

	研 究 課 題	研究責任者	所属学科・職名: 2009 年度
共 同 研 究	金属光造形複合加工法による焼結チタン人工骨内部構造仕様と最適加工条件に関する研究	何 建梅	機械創造工学科准教授
	環境負荷低減を目的とした生分解性樹脂への印刷膜付与による機能材料の創製と分解挙動の把握	矢ヶ崎隆義	環境エネルギー化学科教授
	高密度酸化物熱電材料を用いた発電モジュールの開発	桑折 仁	環境エネルギー化学科准教授
	酸化チタンの光機能特性に対する磁場印加効果	鷹野 一郎	電気システム工学科教授
	sIGNDEX V3 による汎用的な手話記述法に関する研究	長嶋 祐二	情報デザイン学科教授
個 人 研 究	憲法制定過程の研究	長谷川 憲	共通課程教授
	日本における地方金融界の変遷に関する研究	吉田 賢一	共通課程教授
	トップクォーク生成過程に関する高次補正	加藤 潔	共通課程教授
	大学院教育における数式処理の利用	牧野 潔夫	共通課程教授
	非線形拡散の退化特異性に起因する数理現象の研究	竹内 慎吾	共通課程准教授
	ナショナリズムと身体の正治学－ハワイ日系人のベースボールを事例として	森 仁志	共通課程講師
	江戸時代関東農村における剣術流派の存在形態に関する基礎的研究	数馬 広二	共通課程教授
	砕氷船の航行時安全性評価技術の開発及び実験的検証	金野 祥久	機械工学科准教授
	レオロジー制御を利用した摺動部材用ナノカーボン充填多元型ポリマーブレンドの創製	西谷 要介	機械工学科講師
	光照射分解及び気液分離を用いたシアン化物イオンの定量テープ式測定法の開発	長島 珍男	環境エネルギー化学科教授
	気生微細藻類による抗酸化物質の生産および天然由来機能性添加物への応用	阿部 克也	応用化学科准教授
	ミジンコの蛍光ビーズ摂取量測定による迅速毒性評価	釜谷 義則	環境エネルギー化学科准教授
	欠陥構造物質化学と欠陥物質材料の機能性に関する研究	門間 英毅	環境エネルギー化学科教授
ナノ空孔構造材料をベースとする燃料電池用個体電解質の開発	大倉 利典	環境エネルギー化学科准教授	

研 究 課 題		研究責任者	所属学科・職名: 2009 年度
個人 研 究	顔画像による個人の認証ならびに表情認識システムの構築	中村 納	情報通信工学科教授
	集積化 GaN 系面発光素子の製作検討	本田 徹	情報通信工学科教授
	数値最適化に基づく制御系設計の可視化手法の研究	小西 克巳	コンピュータ科学科准教授
	脳情報通信技術による対話認知解析	田中 久弥	情報デザイン学科准教授
	アンシアン・レジーム期におけるソフト・パワーとしての王権建築とその様式伝播	中島 智章	建築学科准教授
	学校体育館の耐震性評価に関する研究	山下 哲郎	建築学科准教授
	鋼板の面外耐力に関する基礎的研究	小野里憲一	建築都市デザイン学科准教授
	省エネ型ライフスタイル普及に向けた住宅エネルギー情報収集・表示システムの開発	中島 裕輔	建築都市デザイン学科准教授



1. 総合研究所プロジェクト研究報告  
(2008年度研究終了)



## Generation of Selves: Identity Matrixing and Transculturality in the 3<sup>rd</sup> Paradigm of *Informatization*

Setsuko Adachi                      General Education, Kogakuin University  
Michael Kearney                     General Education, Kogakuin University  
Shuichi Kawasaki                   The Japanese Red Cross College of Nursing

### 情報化パラダイムにおける混文化性とアイデンティティ - マトリクシング

工学院大学 共通課程外国語科      足立 節子  
工学院大学 共通課程外国語科      カーニー マイケル  
日本赤十字看護大学                  川崎 修一

**ABSTRACT:** The influence of transculturality during the process of Identity Matrixing is increasing at a high rate as a result of developments in Advanced Information and Communications Systems. This report, for the academic year 2008, presents the investigations conducted by the research group into the process of Identity Formation in relation to issues of regional identity, globalization in the 3<sup>rd</sup> Paradigm of *Informatization*, and transculturality: an understanding of the mechanisms of Identity Matrixing and its relationship to transculturality reveals the systems operating in, and the problems of, the 3<sup>rd</sup> Paradigm of *Informatization*. First, a brief overview of the related concepts that will be utilized to discuss transculturality and Identity Matrixing will be given; then the developments and applications of the relevant theories, concepts, and models will be discussed in three parts. The first part will focus on the development of global consumerism. The second part will detail the development of educational programs that foster regional identities, which are able to operate in the global forum without losing their specific cultural integrity. The third part will be comprised of two case studies on the interface zone of regionality/globalization: one will be an analysis of the relationship between globalization and the Japanese psychological infrastructure of *amae*; the other will consider the audibly explicit interference force of Japanese logocentric thinking that inhibits the grasping of transcultural/global systems, structures, and texts, which thus results in disabling the abilities of Japanese structured identities to operate on a global landscape. This report will conclude with two projections of future human identities: the first is a comparison of an examination of the future as it is presented in The Possibility of an Island by Michel Houellebecq in juxtaposition with the present socio-cultural situation; the second deals with William Gibson's view of Japan as the global imagination's default setting for the future.

#### 1. はじめに

Wolfgang Welsch は *Transculturality: The Puzzling Form of Cultures Today* の中で、文化という概念に対する新たな認識を促すために “transculturality” という用語を提案している。

Welsch は従来の「文化は単一の存在である」という考えは今日の「さまざまな文化がお互いに深く関わり絡み合っているという状況」の中では、もはや役に立たないと主張する。Welsch は “interculturality” および “multiculturality” という用語をも否定する。そ

れらは共に「文化というものは自立している存在」であるという考えの上に成立している用語だからである。(Welsch: 1999; 194-197) 日本語で用いられる「多文化」、「異文化」、「間文化」、「文化間」といった用語も今日の「文化」という概念を考えるとときには否定されることになる。Welschは“transculturality”を「今日の文化は一般的にハイブリッド化が特徴となっている」とし、それは「コミュニケーションシステムによる物質的、非物質的な移動と、経済的な相互依存」によって起きていると言う。(Welsch: 1999; 198) グローバル化時代、すべての地域文化は他の地域に源を有する文化が浸透している。ハートとネグリの経済的／文化的帝国主義論から、地域が経済急成長をとげ第三パラダイム、情報化(Infomatization)パラダイムに移行していくとき、地域文化システムと個のアイデンティティには次のような変化が生じると考えられる。すなわちグローバル経済力はコンシューマリズム、消費のイデオロギーを高度情報コミュニケーションシステム(Advanced Information and Communications Systems, AICS)によって伝達し、個をそれでもってプログラムするため、従来の地域の個に備わっていた判断能力を奪うのである。

“Transculturality”を日本語では「混文化性」と呼ぶこととする。AICSが発達した今日では、Kearney、足立が展開してきているアイデンティティ・マトリクス Identity Matrixing と呼ぶアイデンティティ形成過程において、混文化は今までにない速さで進行している。2008年度の研究は、混文化が避けられない情報化パラダイムの情勢の中、地域アイデンティティとグローバル化の関係に焦点をあてている。Identity Matrixingの仕組みを混文化性との関連で把握することによって、情報化パラダイムのシステムや問題点を明らかにする。

まず、簡単に混文化性と Identity Matrixing を論じる際に用いられる諸概念について記述し、つぎに3部に分けて、混文化性と Identity Matrixing モデル理論を応用、展開する。1つ目はグローバル・コンシューマリズムについて、2つ目は個の一貫性を失うことをせずにグローバルな舞台で機能できる地域アイデン

ティティを養成するための教育プログラムについて述べる。3つ目はグローバル化と地域アイデンティティの問題を扱ったケーススタディである。日本の甘え心理構造とグローバル化の関係分析、及び聴覚的に、音声的に明らかな日本人のロゴス中心主義を扱う。ここで論じるのは日本のロゴス中心主義がいかにグローバル化と混文化性への認識を阻み、個をグローバルなコンテクストで機能するのを妨げているかである。最後に人間のアイデンティティが未来にどうなるのかの考察を紹介して結びとする。作家 Michel Houellebecq がその作品、The Possibility of an Islandの中で「私たち」の未来として描き出す未来と現在の社会文化的状況との比較検討を通してアイデンティティとは、人間とは何かを問うものが1点。もう1点は作家 William Gibson の未来観を扱う。彼に言わせるとAICSが発達した世界にとって、日本は「世界の未来を占うグローバルな想像のための初期設定」であるが、それが示す人間の未来像アイデンティティは好ましくないものである。

## 2. Transculturalityと Identity Matrixing

混文化性と Identity Matrixing を理論的な側面から扱った論文が、Identity Matrixing: A Theoretical Model for Trans-Cultural Studiesである。これは韓国の梨花女子大学で2008年11月に開催された Transcultural Studies in the Pacific Era で発表したものである。なお、本論は次のセクション3で述べる Forging Global Hodological Maps for the Meta-Symbolic Orderのabstractを韓国で行われる別の学会に提出していたところ、審査員から連絡があり、梨花女子大学で行う学会で発表してくれと招待され、実現したものである。

第三パラダイムにおけるグローバル化は、AICSが地域社会グループ間の文化的構築の伝播を加速、広範囲にいきわたらせることになる。それはとりもなおさず、transculturality—文化と文化の混合、ハイブリッド性—を高めることになるが、Identity Matrixingは、こうしたパラダイムシフトによ

る認識論的変遷にも応用できる理論的モデルであり、本理論的モデルはtransculturalityそのものを直接扱うことが可能である。また、Identity Matrixingの諸概念の理解が個の内にtransculturalな構造をつくり、グローバルなコンテキストで活躍する人材の養成に寄与すると思われる。

まず、ラカンのSymbolic Order(象徴界)の概要を説き起こし、どのように著者たちがラカンの概念を応用、発展させたかを述べる。象徴界は複数存在するという点に着目し、象徴界と個の出会いの関係性がアイデンティティとして組み込まれていく仕組みをVertical Matrixing、Horizontal Matrixingと呼んでいる。各アイデンティティは、Vertical Matrixing、Horizontal Matrixingの過程を経て、恒常的にさまざまな変化を経つづけるが、近年はMeta-Symbolic Orderというこれまでになかった高度情報コミュニケーションシステム(AICS)が発達したゆえに生じた象徴界があると著者らは考える。この象徴界は地域性を超えてAICSへのアクセスがあるところならば、どこでも浸透していくという混文化性の特徴を持つ。ハート・ネグリらは、情報化パラダイムを帝国主義的な動きと捉えるが、Meta-Symbolic OrderとAICSの関係はその仕組みを解き明かすために有効である。その手始めに手がけたのが、つぎに論じるMeta-Symbolic OrderとAICSの密接な関係が生み出したグローバル消費者論である(セクション3)。また、著者らは象徴界のhodological mapという考えをさらに進め、混文化化していく世界の中で成功していくためにはglobal hodological mapの養成が必要であることを説く。詳細は工学院大学総合研究所年報14(2006)、15(2007)の報告書、また本報告に付する学術論文にリストされたものを参照されたい。

著者らはグローバル化した世界の中での共存、人間の存在を考える寄与していく思考力の重要性を主張するが、それに逆行する動き、たとえばAICSの情報散布による個の思考停止の可能性、また地域文化のロゴス中心主義による思考停止の可能性(セクション5)を危惧する。それは、それぞれの思考停止は人間破壊の危険性をはらんでいると考えるからで、それを回避するための方法を模索している(セクション4)。

### 3. The Production of the Global Consumer: Economic Booms and the Destruction of Cultures

本論は2008年6月にマレーシアのペナンにあるUniversiti Sainsにて開催されたICoSSH'08国際学会*Crossing the Border of Knowledge for the Future*にて発表したものである。地域経済の急成長と同時に、そこにもたらされるグローバル・コンシューマリズムと地域アイデンティティの関係を考察する。過去15年くらいの間に東南アジアの多くの地域は経済的急成長を経験してきた。それと連動してAICSの浸透率が上昇し、経済パラダイムは第三パラダイムにシフトしていく。そして経済的急成長は生活水準と生活様式に変化をもたらすと同時に、その地域の人々の自己、アイデンティティにも大きな影響を及ぼしているのである。

経済的に国や地域が急成長しているときの資本の流入には、新しい生活様式やイデオロギーがそれとともに組み込まれているのを発見する。地域が隆盛するということは、そこがグローバル経済の狙いどころ、市場となるということである。彼らはそれまでに経験したことのない富を手にしたその地域の住人を消費者の候補生としてみなすのである。そして、その地域の住人を消費者として確保するために、経済的存在は住人たちに彼らの商品を買うように誘惑しなくてはならない。つまり彼らは人々にそれらの商品は必要不可欠なものだと確信させるか、消費者候補生にそれらの物を所有する必要性、それらの物への欲求を作り出さなくてはならないのである。AICSはこの目標を達成するのに優れている。テレビ番組や映画は真似すべき美や成功、格好よさのイメージを提供する。インターネットは世界中の隅々までをもつなぐサービスであり、コンピューターとモデムを持つだけの富を有する人であれば、誰にでも異質の生活様式、流行、考えといったものへの窓口を開いてくれる。こうした発達には多くの利益、生活水準の向上、知識の拡大、人間間の共感を育むというような利益があるのは明らかである。しかしながら、AICSを通じてなされる多くの伝達は個に組み込まれる不透明な文化的にコ



ントロールする仕組みなのである。これらの仕組みが内面的に目に見えない形で個に作用するとすれば、その力は情報を発信している経済的存在にあるのであって、個にあるのではないといえる。別の言い方をすれば、AICSが促進する混文化性は、しばしば消費イデオロギーであり、それは個をグローバル消費者としてプログラムするため、その地域の個から自立した判断能力を奪うことになる。

グローバル資本主義はその成長のためには、物質主義を推進しなければならず、その成功のためには消費者を作り出すことが必要不可欠である。さらにはそれを成し遂げるために、その地域の価値システムを否定することがしばしば起きるのである。従来その地域が有してきた価値観の変わりに、きらびやかに飾られた展示物や、贅沢な品々が表す理想的な都会的豊かさが示されるのである。家族とコミュニティの間に作られていた家族的な外向的關係は、富に結びついた内なる自己の満足と物品の調達にとって代わられる。成長する経済は、消費と物質主義の資本主義イデオロギーにプログラムされた個と、崩壊する地域文化を食物にしながら肥えていく。グローバルな経済的存在は農業の利他的な価値システムを破壊しなくてはならない。でないと彼らはその地域には根付けないのである。もちろん彼らが、表に出すイメージはそのようなものではない。日本のショッピングセンター、JUSCO(The Japan United Stores Company)は東南アジア圏の中核店舗である。マレーシアでJUSCOが展開するショッピングセンターSunway Pyramid Shopping Centreのウェブサイトに、JUSCOは自分たちのことを次のように表現している。

成功するためには、お客様にとってショッピングセンターは好ましい環境と好ましいテナントが絶妙な具合に混ざってはいなくてはなりません。そうあってはじめて、お客様は限りなくここにいることを楽しまれ、時間をくつろぐために費やそうと思われるのです。JUSCOはレディース、メンズ、キッズのウェアやその他の商品が取り揃えてありますし、そ

れにあなたのお気に入りになるようなものが必ずみつかる豊富な品揃えのスーパーをもご用意してあります！  
(Sunway Pyramid Shopping Centre ウェブサイト)

「限りなくここにいることを楽し」み、くつろぐためにショッピングセンターで時間を使うことは、まちがいなく相当な金額を使うのと同じであろう。「儲ける」、これがマレーシアのセランゴールにあるSunway Pyramid Lagoon Resort and Shopping Centre complexの目的なのである。結局のところ、これはビジネスなのである。しかしながら、ショッピングをするには最高の場所、客が必要とし、欲しいと思うものはほとんどすべて手に入るし、多数の飲食店がさまざまな価格帯で提供され、のみならずスケートリンクとウォーターパークといった娯楽施設までであるという実に最高の場所なのである。新しい生活様式を取り入れた家族にとっては休暇を楽しむための行楽地となるのである。

しかしながら、経済的発達をもたらす生活様式の向上を享受しつつ、個を守るためには、自分たちのアイデンティティを設定しようとしている力に気がつく必要がある。もし、私たちが自尊心を充たすために消費しているのであれば、その状況は問題である。知らないうちにコンシューマリズムのイデオロギーによってプログラムされることは、すなわち私たちが自分たちの売り物を購買させることだけを目的とする経済的存在にコントロールされている社会において無力化した存在になることを意味するからである。このような状態に陥ることを避けるためには、政府、教育者、そして親が、Identity Matrixing、Meta-Symbolic Order、Global Hodological Mapping、Advanced Information and Communications Systemsといった考えをこどもたちが理解するようにしなくてはならない。これらの概念を把握していることは、個がコンシューマリズムのイデオロギーのコントロール力に屈することなく、グローバル化の建設的な面から益ずることを可能にする。

#### 4 今日のグローバリゼーションの中で無力化しないアイデンティティ育成のための教育

先に AICS が広めるグローバル消費社会が形成するアイデンティティと地域アイデンティティを東南アジアを例にとって論じたが、本セクションは同様の問題点を教育的観点からとりあげる。1つ目の Forging Global Hodological Maps for the Meta-Symbolic Order は韓国の ELLAK International Conference が Re-visioning English Studies in Asia というテーマで開催した国際学会で 2008 年 11 月に発表したものである。もう 1 つの Educating Engineers for the 3rd Paradigm: Identity Matrixing and Global Hodological Mapping は日本工学教育協会開催の 2008 年年次大会 *Engineering Education for Innovation* における International Session *International Cooperation in Engineering Education* にて 2008 年 8 月に発表したものである。

##### 4.1 Forging Global Hodological Maps for the Meta-Symbolic Order

グローバリゼーションの潮流の中で、地域文化システムの希薄化と破壊が懸念される。このような状況の中であって、その地域と子ども達の未来を保障する教育環境を作ろうとするならば、この状況を各分野の教育機関と研究者が客観的に綿密に検討する必要がある。英語が今日のグローバリゼーションの lingua franca である以上、英語という言葉、文学、そして文化に関わる教員が、この状況に対応するカリキュラムとシラバスを考案し、実施することは根源的な重要性を帯びる。はじめに、アイデンティティ形成上に作用する関連概念の説明、つぎに global hodological maps の形成のための教育プログラムを紹介する。Jean-Paul Sartre は Being and Nothingness の中で hodological map を個が他者と遭遇したときに用いる行動様式とコミュニケーションパターンの個に内在化したシステムであると説明しているが、本論が提案する教育プログラムが目指すのは、個のうちに global hodological maps を育成し、アイデンティティがグローバルなカー AICS による個の無力化の力を認識し、個が無力化せずにグローバル化した世界の中で建設的に共

存のために批評的思考力を有し寄与できるようにすることである。また、グローバル化した状況の中で建設的な貢献をする地域間の協力ネットワークを、地域文化とアイデンティティを育みながら、発達させることである。筆者らは決して統一化したグローバルアイデンティティを論じているのではないことを付記しておく。

##### 4.2 Educating Engineers for the 3<sup>rd</sup> Paradigm: Identity Matrixing and Global Hodological Mapping

本学では 2006 年度より学部では English Communication Skills Program (ECSP) を実施している。これは本学の学生が、グローバル化が進む今日の世の中で英語が共通語の場で有効に機能できるようになること、適切な貢献ができるようになること、また、未知の文化圏言語圏、多くの場合、非日本文化圏、非日本語圏で適切な判断がとれるようになること、また国境、文化にとらわれず、グローバルな視点で判断ができる個人の育成を目標に掲げて著者らが開発、本学 JABEE WG の支援のもとに立ち上げたプログラムである。また大学院では、2007 年度に Postgraduate Intercultural Communications Course (PICC) を開発、2008 年度より実施している。本論は、日本工学教育協会 (JSEE) 2008 年年次大会にて、発表したものである。

日本の大学、ことに工学系の学生、大学院生の intercultural interaction 教育、複数の混文化性をまたがって互いを対等な関係で尊重しあった交流、共存共栄を根底にすえた行動、そのための思考様式教育が必要とされている。また現在のグローバル世界で普及している社会経済システムの分析、そしてそれらのシステムはどのように将来的に展開するかをプログラムでは扱う。日本を経済的にも社会的にも安定した国の一つとして維持、発展させていくために、日本の大学が学生をどのように準備することが一番望ましいのかを教育的に還元する試みである。第三パラダイム—情報化パラダイムの中で日本が経済的安定を得るには日本の高等教育機関は、複数文化教育、および外国語教育、特に今日の

lingua franca である英語の教育的なアプローチを活性化する必要がある。こうした目標を達成するためには、個人が地域的アイデンティティの integrity やその混文化性を理解し、信頼性を保ちつつグローバルな舞台をナビゲートできるための global hodological maps を養成する。

まず、アイデンティティ形成理論を特に第三パラダイムに重点をおいて概観し、グローバリゼーションと AICS を通じて拡散される強力な思考形態の一つが欧米中心主義を起源としている点を指摘した上で、本学プログラムの概要を説明する。ロゴス中心主義的思考の枠組みを外れた、批評的思考力に基づいたコミュニケーションスキルの養成に必要な科目配置。それは学生のグローバル認識、無意識のバイアス認識の覚醒を促すために必要な言語的・文化的な要素に対応するよう多面性を有した仕組みとなっている。学生に工学と技術的な知識の教授と同時に複数混文化間の中で critical thinking という思考技術を身につけていくことによって、日本の大学と、学生はより明るい安定した未来を自分たちのみならず日本にもたらすことができ、さらに本学の学生は人間社会を技術的に進歩させる貢献でもって世界全般に益することができる。

## 5. Case Studies

### 5.1 Globalization and Identity: A Case Study of Japanese *Amae*

従来、グローバリゼーションの流れに地域文化がうまく対応できると富と繁栄を手にし、その失敗は往々にして滅亡を意味した。今日のグローバリゼーションに対する地域文化とアイデンティティの反応は現在進行中であり、それぞれの文化的心理構造が彼らの現在と未来の状態を大きく左右する。本論は今日のグローバリゼーションと Meta-Symbolic Order 層、それは高度な情報通信システム(AICS)の発達がつくりだしたアイデンティティ形成上の新しい象徴界層だが、それらと地域文化の関係を扱うケーススタディの一つである。ここでは日本の甘え心理構造とグローバリゼーションの関係を見ていく。

現代の日本のアイデンティティにおける甘

えの作用と機能は、今日のグローバリゼーションを生き延びるためには逆効果となっている。まず、アイデンティティ形成における甘えの構造的な機能を分析する。その次に3つの甘え構造が運用されている場合を見ていく。そのうちの二つは日本の開国と第二次世界大戦敗戦に対する日本人の反応であるが、これらの場合は甘え構造がグローバル化の流れに適應するのに役に立っている。最後は現在の状況で、グローバルな舞台で甘え構造が日本人のアイデンティティをロゴス中心主義に囲い込むため、うまく機能できなくなっている、甘え構造が障害となっている場合である。

### 5.2 Maintaining Japanese Harmony: A Subjugating Silence

本論の契機となったのは韓国梨花女子大学に招待されて行った発表、Identity Matrixing: A Theoretical Model for Trans-Cultural Studies で、それを聞いたシンガポールの Nanyang Technological University の教員に誘われ、同じパネルのメンバーとして口頭発表を行った。文化間のハイブリッド、transculturality が加速する AICS の時代、地域文化システムとグローバルシステムを理解することは、人々の間で相互尊重と相互認知のコミュニケーションを促進させるために重要である。しかしながら、往々にして地域の文化的コミュニケーションシステムが、グローバルレベルでの共存のために必要なコミュニケーション能力を獲得することを妨害する。ここでは音声的に表れるコミュニケーションを対象に考察し、聴覚認知の研究によってそうしたシステムの思考構造を明らかにした。すなわち日本では英語が lingua franca であるという認識はあるものの、日本の文化的コミュニケーションシステムがグローバルな場で機能することを妨げている。それらの妨害的なコミュニケーションの仕組みは今日の日本語から聴覚的に聞き取れる。日本社会では沈黙は美德として発達し、和を保つものとして重要である。和を保つために日本のコミュニケーションシステムは決まった音が言葉の論理的な意味を越える仕組みを作り、和を保つために場に服従する仕組みとなっている。このような場合、音は、服

従的な沈黙と同じである。本発表では、日本のヒエラルキー構造、特に先輩／後輩システム、このシステムは日本における多くの思考システムの枠組みとなっているシステムだが、そうしたシステムの中で沈黙と音がどのように文化的認知をされているか分析した。まず、コントロール・メカニズムを明らかにするために、和の沈黙性をそれに関連する理論的概念でもって分析する。つぎに文学、アニメ、ゲームソフトから例示する。最後にそのシステムの残忍性、個の成熟にとっての潜在的な危険性を論じた。

## 6. 結びにかえて——未来の人間のアイデンティティ

人間のアイデンティティは未来にはどうなっているのだろうか。本報告書に簡潔にこれまで行ってきた研究の概略を記述したが、人間のアイデンティティは AICS が進める情報伝播とグローバル化でそのあり方の様相を変えてきている。それはアイデンティティ形成プロセスに Meta-Symbolic Order という地域性を超えた Symbolic Order 層を付加させるほどの大変化である。技術革新は文化を変え、アイデンティティに影響を及ぼし、人間とは何か、人間はどうあるべきか、という根源的な問いをつきつけてくる。著者らの研究には、このままでは他者との共存を視野に入れた思考が停止し、自己の欲望にのみ生きる人間が、あるいは他者の欲望に操られるのみ人間が、多く輩出される、という危機感がある。こうした種の危機意識は世界各地で作家や、特にヨーロッパを中心とした知識人の間でも分かち合われてもたれているものである。アメリカ発のアニメ諷刺作品、シンプソンズやサウスパークなどもその流れの中で解釈される一思考停止への危機に警鐘を鳴らしているように見える。

さて、サイバーパンクと呼ばれるサイエンスフィクションのジャンルでは作家は技術革新が人間にもたらす未来をフィクションという形で哲学し、創造し、描き出して見せる。共同執筆の形はとらなかったが、そのような危機意識を反映したのものとして以下、本研究の共同研究者である Kearney、足立がそれぞ

れ Creative Forum: A Journal of Literary & Critical Writing Vol. 22 No.1, January-June の Cyberpunk 特集号への執筆依頼を受けて書き下ろした論文の内容を簡潔に紹介して結びとする。Current State/Future Projection: Houeheelbecq's *The Possibility of an Island* (未刊) という題で Kearney は Michel Houeheelbecq の *The Possibility of an Island* を取り上げ、本書に描写される未来をわれわれの未来とみなし、それに現在の社会文化的状況と並べて比較していくというユニークな手法でもって、人間とは何なのかという根源的問いを探っていく。肉体が技術の進化によって不死身なものとなったとき、あるいは肉体は乗り換えればよだけの存在になったとき、人間が生殖とは無関係に作られるようになり、「成長」と離別し記憶のみが肉体に注入されるようになったとき、そうしたさまざまな未来を人間のアイデンティティとは何かを Identity Matrixing 論を運用しながら記述している。

一方足立は日本関連で書いてくれという依頼に応じて Japan: the Default Setting for the Future(未刊)という論文を書き下ろした。本論は Cyberpunk 作家として世界の未来像を模索する William Gibson が見る日本を分析した。Gibson のサイバー未来を描く SF 小説には日本がよく出てくる。しかも彼は日本について以下のように言う。“Japan is the global imagination's default setting for the future”「日本は世界の未来を占うグローバルな想像のための初期設定である」。と同時に Gibson は、それは自分(カナダ・イギリス)の未来ではないと語り、日本の心理構造が技術に適應して行く際に表れる人間像を否定している。本論ではなぜ日本が否定されるべき「初期設定」—アイデンティティ・プログラミング—されているのかを Kearney・足立の Identity Matrix 論、および土居健郎の甘えの構造をつかって解明する。そこで足立は日本の甘えという心理構造が現代の情勢の中で反混文化思想を培養している上、ロゴス中心主義の弊害に陥っており、それらがグローバルな舞台での対等な立場に立って、相互尊重を基盤にしたコミュニケーションを行うことを阻んでいると分析する。また、この日本とい

う象徴界を有するものはその心理構造の中に新たな hodological map を matrix し変化させることが必要であると主張している。

技術の進歩とイデオロギーの持つ人間の無力化の力に対する危機、それらとどのように未来を担う人間は対峙していけばよいのであろうか。また研究者として教育者としてどのような提言をしていけばよいのだろうか。こうした間に、アイデンティティ・マトリックス論は、以上で見てきたように、1つの方向性を示す。

### Bibliography

Adachi, Setsuko & Michael

Kearney, Generation of Selves:  
The Meta-Symbolic Order &  
Identity Matrixing Part I, 工学院  
大学総合研究所年報 No.14 2006  
年度, pp. 137-152, 2007年7月

Adachi, Setsuko & Michael

Kearney, 第三パラダイムにおける  
超象徴界とアイデンティティ・マト  
リクシング II, 工学院大学総合研  
究所年報 No.14 2006年度, pp.  
153-162, 2007年7月

Adachi, Setsuko & Michael

Kearney, Generation of Selves:  
Globalization and Identity  
Matrixing, 工学院大学総合研究所  
年報 No.15 2007年度, pp.  
117-126, 2008年7月

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

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

Sunway Pyramid Shopping Centre website:  
[http://www.sunwaypyramid.com/tenants/tenants\\_listing.asp](http://www.sunwaypyramid.com/tenants/tenants_listing.asp)

Welsch, Wolfgang, 1999. *Transculturality: The Puzzling Form of Cultures Today*. In: Featherstone, Mike & Scott Lash (eds) 1999. Spaces of Culture: City, Nation, World. London: Sage Publications. (pp. 194-213).

### 学術論文 2006-2008

*The Meta-Symbolic Order: 3rd Paradigm Identity*, SoLLs. INTEC. 07 Language and Nationhood: Discourses Across Cultures and Disciplines, CD-ROM, May, 2007.

*Identity Matrixing: A Theoretical Model for Trans-Cultural Studies*, Transcultural Studies in the Pacific Era Sessions I, II, III, Ewha English, 2008 BK International Conference, 4th IEAS International Conference, Department BK Project Team and Ewha Institute of English and American Studies, Nov. 2008, pp.1-10.

*The Undermining of A West Briton: The Deconstruction of Joyce's Gabriel Conroy*, A Multicultural and Multifaceted Study of Ideologies and Conflicts Related to the Complex Realities and Fictions of Nation and Identity Represented in Contemporary Literature Written in English, February, 2008 pp.3-18.

*A Japanese Concept of Self*, Some Essays on Postmodernism: Globalization and Media, Ahmedabad (MICA), pp. 107-114, 2008.

*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.

*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.

*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.

*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.

#### 報告書 2006-2008

Generation of Selves: The  
Meta-Symbolic Order & Identity  
Matrixing Part I, 工学院大学総合  
研究所年報 No.14 2006年度, pp.  
137-152, 2007年7月

第三パラダイムにおける超象徴界と  
アイデンティティ・マトリクシング  
II, 工学院大学総合研究所年報  
No.14 2006年度, pp. 153-162, 2007  
年7月

Generation of Selves:

Globalization and Identity  
Matrixing, 工学院大学総合研究所  
年報 No.15 2007年度, pp.  
117-126, 2008年7月

#### 国際学会発表 2006-2008

The Meta-Symbolic Order:  
Globalization and Identity  
Formation, 1st International  
Conference on the Asia  
Association for Global Studies  
Asia in Global Perspective , June  
24, 2006. Featured Lecture

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.

Globalization and Identity: A Case  
Study of Japanese, International  
Conference On Social Sciences and  
& Humanities 2008: Crossing the  
Borders of Knowledge for the  
Future, June 18, 2008.

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, June 18,  
2008.

Educating Engineers for the 3rd  
Paradigm: Identity Matrixing and  
Global Hodological Mapping, 2008  
JSEE Annual Conference , August  
2, 2008.

The Meta-Symbolic Order: 3rd

Paradigm Identity, SoLLs. INTEC.  
07 Language and Nationhood:  
Discourses Across Cultures and  
Disciplines, May 15, 2007.

Identity Matrixing: A Theoretical  
Model for Trans-Cultural Studies,  
Transcultural Studies in the  
Pacific Era Sessions I, II, III,  
Ewha English, 2008 BK  
International Conference, 4th  
IEAS International Conference,  
Department BK Project Team and  
Ewha Institute of English and  
American Studies, Nov. 19, 2008.

Forging Global Hodological Maps  
for the Meta-Symbolic Order,  
Re-visioning English Studies in  
Asia, 2008 ELLAK International  
Conference , Nov. 21, 2008.

Maintaining Japanese Harmony: A  
Subjugating Silence, Sound,  
Silence and the Arts Symposium,  
Nanyang Technological University,  
February 28, 2009.

(Adachi, Setsuko and Michael  
Kearney)

## 前十字靭帯三重束再建術のロボットシステムによる解析・評価

工学院大学機械工学科 藤江 裕道, 小久保 邦雄  
 大阪大学医学部整形外科 中田 研  
 大阪府立大学リハビリテーション学部 史野 根生

### ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE 3-BUNDLE ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT RECONSTRUCTION

Hiromichi Fujie, Kunio Kokubo Kogakuin University  
 Ken Nakata Osaka University Medical School  
 Konsei Shino Osaka Prefecture University

**ABSTRACT:** The anterior cruciate ligament (ACL) is one of the most important structures in the knee joint although it is frequently injured. The reconstruction of the ACL using autogenous graft materials is a common procedure for the restoration of the knee stability after the ACL injury. The traditional procedure of the ACL reconstruction is performed by the use of a single bundle autograft. The double bundle ACL reconstruction was developed by one of the coauthors in which the ACL is replaced with two looped Hamstring grafts. Previous studies indicated that the function of reconstructed knee with the double-bundle grafts was recovered more closely to normal knee as compared with that with the single bundle reconstruction. The recent anatomical studies have found that the ACL is consisted of three different bundle structures; anteromedial (AM) bundle, posterolateral (PL) bundle, and intermediate (IM) bundle. Following the anatomical finding, a novel ACL reconstruction technique has been developed in which the ACL is replaced with 3 grafts corresponding to the 3 bundles. However, the biomechanical significance of the triple bundle-ACL reconstruction has not been clarified yet. Therefore, the objective of the present study was to determine the biomechanical characteristics of the triple bundle-ACL reconstruction technique using a custom-made robotic system.

A 6-degree of freedom robotic system has been developed in which a custom made 6-DOF manipulator was combined with a 6-DOF load transducer. All the actuators attached to the axes of the manipulator were position control-based actuators. A LabView-based control program runs on a Windows PC. Hybrid control of position of, and force/moment applied to, the knee joint was developed. Using the system, the mechanical function of the human ACL for anterior stability of the knee joint, was determined. Results reveal that the function of the PL bundle is more important than other bundles in response to hyperextension, and anterior and internal loads at low flexion angles. As the flexion angle increases up to 60 degree the function of the AM bundle becomes more significant. When the flexion angle is more 60 degree the function of the IM bundle becomes more significant. The force in the AM bundle decreases with the increase of flexion angle while the contrary relationship is found in the IM bundle. The laxity matched tension (LMT) in anterior translation was approximately 12 N in the triple-bundle and double-bundle ACL reconstructions with Hamstring tendon grafts. Note that the obtained LMT is significantly lower than the LMT (44 N) in anterior translation for the single-bundle ACL reconstruction determined in a previous study. The graft force in response to internal moment to the knee is lower in the triple-b. ACL reconstruction than in the double-b. ACL reconstruction. The LMT in anterior translation is approximately 10 N in the rectangle-bone-tunnel (Rec.) bone-patellar tendon-bone (BTB) ACL reconstruction which is significantly lower than the LMT (30 N) in the conventional BTB reconstruction. Besides the anterior stability, the anterior translation is limited within 1 mm in response to internal moment of 5 Nm, which suggests that the rotational stability is also high in the Rec.BTB reconstructed knee.

**Keywords:** Anterior cruciate ligament (ACL), Knee joint, Triple-bundle ACL reconstruction, Knee laxity, Graft force, Six-degree of freedom robotic system, Hybrid position/force-moment control



## 1. はじめに

膝関節は高荷重が加わる荷重関節のなかで損傷頻度が最も高い関節である。同程度の高荷重がかかる股関節に比べて関節面の適合性が悪いため、軟骨に生じる応力は過大であり、また、周囲に筋肉がほとんどないため、軸受けとしての安定性を小さな靭帯に依存していることなどが原因である。この膝関節を研究対象として、その機能がどのように発揮され、どのように維持されているかをバイオメカニクスの観点から調べることにより、臨床整形外科学に対する有用なデータを得ることができる。また、複雑な膝関節の構造を軸受のモデルとして捉え、その機能発現のメカニズムを解き明かすことにより、機械工学に対する有用なデータを得ることも可能であろう。

近年のスポーツの興隆や高齢化の影響を受け、膝関節に変性、損傷をきたすケースが増えており、それらに対する治療の改善が望まれている。特に前十字靭帯 (ACL) の損傷は、自然治癒が望めないこともあって、外科的手術による再建術に関する多くの基礎的・臨床的検討が行われている。その一般的な手法は、同個体内の健全な腱組織をグラフトとして取り出し、このグラフトを適当に整形したのちにACLの代わりに埋め込むというものである。もっとも使用頻度の高いグラフトは膝関節の内側後方の腱組織のひとつであるハムストリング腱であり、通常は、この腱を一重のループに加工してACLの代わりとして体内に埋め込む。Rosenbergはループ状グラフトを2組作成して、ACLの前内側 (AM (anteromedial)) 線維束と後外側 (PL (posterolateral)) 線維束を別々に再建する二重束再建法を開発した<sup>1)</sup>。研究代表者と史野ら、阪大整形外科スポーツ整形・バイオメカニクスのグループは独自に開発した6軸関節力学試験ロボットシステム<sup>2-4)</sup>を用いて、二重束再建法でACL再建された膝関節は、従来法でACL再建された膝関節に比べて、より低いグラフト張力で高い膝安定性を得ることができることを明らかにした<sup>5)</sup>。現在では日本国内はもちろん、欧米でもこの再建手術法が取り入れられ、世界中のACL損傷患者の術後機能回復に貢献している。しかし、この方法ではグラフトの骨孔位置が解剖学的な靭帯附着部と異なる位置であるため、グラフトが大腿骨と接触する問題 (Impingement) や、再建膝の安定性が低いという問題があった。研究分担者の史野は、このグラフト作成法に改良を施し、再建位置を靭帯附着部位置に一致させた解剖学的二重束再建法 (anatomical double bundle reconstruction) を考案した<sup>6)</sup>。

近年の解剖学では、ACLのAM線維束はさらに内側と

外側に分離されることが示されており<sup>7)</sup>、内側はAM束、外側は中間 (IM (intermediate)) 束と呼ばれている (Figure 1)。史野はACL再建術において、AM束、IM束、およびPL束を靭帯附着部に再建する解剖学的三重束再建法 (anatomical triple-bundle reconstruction) を開発し、臨床的には大きな成果を挙げている<sup>6)</sup>。しかしながら、臨床成績は良好なものの、三重束再建術の力学的な評価は不完全であり、その良否について最終的な結論を得るに至っていない。そこで本研究では、ACLの解剖学的二重束および三重束再建法について力学的な評価を行い、その有用性について考察することを目的とした。また、史野らによって開発された、長方形骨孔に膝蓋腱グラフトを固定する長方形骨孔膝蓋腱グラフト再建法 (RecBTB reconstruction (Rectangular Bone-patellar tendon-bone graft reconstruction))<sup>8,9)</sup>についても力学的な評価を行い、その有用性について考察した。

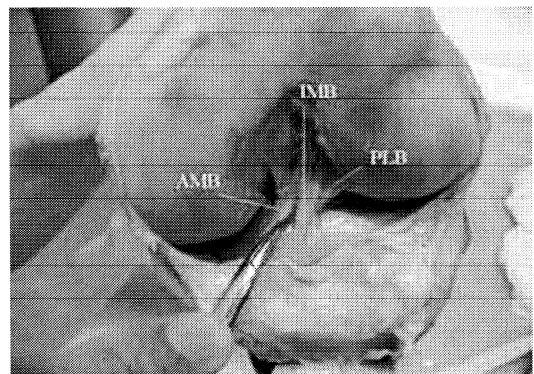


Figure 1: Anterior view of the human knee joint with ACL consisting of the AM, IM, and PL bundles

## 2. 生体関節力学機能試験ロボットシステムの開発

### 2.1 ロボットシステムの必要性

生体膝関節の力学機能をバイオメカニクスの観点から理解し、得られた知識を臨床に還元するためには、膝関節全体や各構成要素を多自由度で力学試験し、詳細なデータを得る必要がある。これは、自由度の少ない一般的な材料試験機で実現できない。本研究代表者らは産業用多関節ロボットに改良を加えて6自由度の関節力学試験機を開発し、これを実現した実績を有している<sup>2)</sup>。ロボットハンド先端に6軸力センサを固定し、その先端に取り付けられた骨固定治具に膝関節を固定する構造とした。6軸力センサは3力と3モーメントの同時計測が可能なセンサであり、膝に生じる力およびモーメントの計測および制御に用いられた。

これらの方法論を用いて新たなロボットシステムをWooら<sup>10)</sup>が開発したが、いずれも産業用多関節型ロ

ロボットを改良したシステムであり、膝関節を力学試験するための制御性や精度および担荷能力が不十分であるという問題があった。また、市販ロボットを基本にしていたことから力やモーメントの制御を行うことが困難であり、かつ制御される位置や力/モーメントの誤差が大きいという問題があった。

## 2.2 新ロボットシステムの開発

ロボットで力学試験をするためには、大腿骨と脛骨に座標系を固定する必要がある。そこで、Figure 2で示されるレーザーデジタイザーを開発した<sup>11)</sup>。円筒状のデジタイザーから発せられるレーザービームを内側側副靭帯と外側側副靭帯の大腿骨付着部に2方向から照射し、両付着部位置をロボットシステムの基準座標系で求めた。両付着部位置の中心を大腿骨座標系の原点とし、両付着部を貫く方向を大腿骨座標系のZ軸とした。また、大腿骨の骨軸方向に平行で、大腿骨座標系の原点をとる軸を大腿骨座標系のY軸とした。大腿骨座標系のX軸はY軸とZ軸に垂直な軸として定義した。脛骨座標系は、膝関節が伸展位にあるときに大腿骨座標系に一致するとして脛骨に固定した。そして、大腿骨座標系と脛骨座標系の間、Figure 3で示す膝関節座標系を連結した。

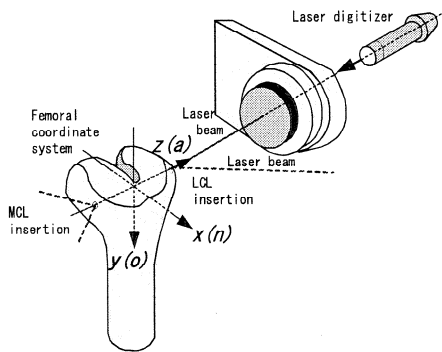


Figure 2: Laser digitizer to determine the position of the femoral insertion sites of the MCL and LCL for the establishment of the femoral coordinate system<sup>11)</sup>

膝関節の6自由度は臨床で用いられている定義を生かしつつ、機構学的に定義されたGrood & Suntayの膝モデル<sup>12)</sup>を用いた。このモデルはFigure 2に示すごとく、大腿骨に水平方向に固定された大腿骨軸、脛骨の骨軸方向に固定された脛骨軸、および両軸に垂直な浮遊軸の3軸からなり、大腿骨軸に関する回転と直動を屈曲伸展と内外反、脛骨軸に関する回転と直動を内外旋と遠近位、浮遊軸に関する回転と直動を内外反と前後方とし、これら臨床的な膝自由度を用いること

により膝の運動や荷重状態を表現することの可能な機構モデルである。研究代表者らは、この膝モデルの各自由度に生じる力/モーメントをヤコビ行列により記述し、6軸力センサの出力から求めた<sup>4)</sup>。そして、ロボットシステムを用いることにより、膝関節の6自由度に任意の変位または力/モーメントをあたえる方法論を開拓した<sup>13)</sup>。

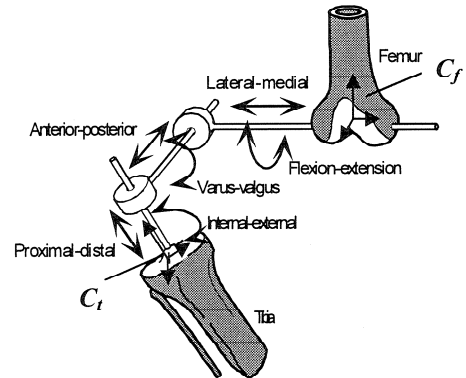


Figure 3: Six degrees of freedom (Grood&Suntay) model of the human knee joint<sup>12)</sup>, connecting the femoral coordinate system,  $C_f$ , to the tibial coordinate system,  $C_i$

本研究では関藤、藤江らによって開発された直動3軸・回転3軸型マニピュレータ<sup>2)</sup>を用いることで制御性、精度および担荷能力の向上を図り、また制御方式の変更を行うことにより、高精度かつ高速な位置および力/モーメント制御が可能なシステムの開発を試みた (Figure 4)。制御コンピュータのOSは、2005年度まではReal-Time Linux系列のKNOPPIXを用いていた<sup>11)</sup>。しかし、制御コンピュータとアクチュエータのドライバー間に設置した高電流遮断ボードに雑音が入り、位置精度が悪化する問題が生じた。そこで2006年度より、Windowsが充分高速化された現状を踏まえ、汎用性を考慮してOSをWindowsに変更し、プログラム開発環境を考慮してLabVIEWを用いることにした。LabVIEWはフローチャートを描く感覚でプログラミングすることが可能であり、サブルーチンであるVIの扱いも簡単であるため、従来のテキストベースのプログラムに比べて、ソフトウェア作成が格段に容易になる特徴を有する。ロボットの各軸を構成するアクチュエータの駆動方式を外乱に対し堅固なパルス(位置)制御方式としたが、計測・計算・駆動の高速化が図られたため、位置制御はもちろん、力/モーメント制御が高精度で実現できるようになった<sup>14)</sup>。制御系のフローチャートをFigure 5に示す。

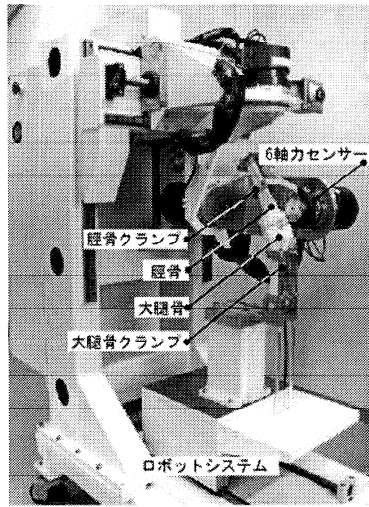


Figure 4: Six-DOF robotic system for biomechanical tests of the human knee joint<sup>6)</sup>

これらの改良等の結果、ロボットシステム全体の大  
 腿骨クランプと脛骨クランプ間のコンプライアンス  
 は、Figure 3 の座標系に沿って、X方向に 0.003 mm/N、  
 YおよびZ方向に 0.001 mm/Nとなり、高剛性化が実現  
 できていることが確認された<sup>13)</sup>。X軸方向がやや低剛  
 性ではあるが、膝関節の力学試験においてX軸方向は  
 膝の内外側方向に一致し、この方向には大きな荷重は  
 かからない。大きな荷重のかかるYおよびZ方向に剛性  
 が高いことから、膝を対象とした試験において問題が  
 生じないと考えられた。さらに、膝関節座標系におけ  
 る変位と力/モーメントの目標値との偏差  $\tau$  を速度  
 ベクトル  $V$  に変換し、 $V$  をマニピュレータ座標系での  
 速度  $V_m$  に変換する手法を開発した<sup>14)</sup>。そしてマニピュ  
 レータの各軸の速度が  $V_m$  になるようにパルス制御す  
 ることで、結果的に膝の変位と力/モーメントをハイ

ブリッド制御した。マニピュレータのパルス制御では  
 パルスが速度にほぼ比例することを利用し、この制御  
 を実現した。計測、計算、動作のサイクルを 10 ms の  
 イタレーション速度で繰り返した。

次節で示す方法によりヒト健常膝関節をシステム  
 に固定し、開発したプログラムを用いて前後方自由度  
 を 100 N が生じるまで 500  $\mu\text{m/s}$  の速度でパルス制御  
 し、屈曲伸展自由度を固定し、他の 4 自由度に生じる  
 力/モーメントが 0 になるようにハイブリッド制御し  
 た。その結果を Figure 6 に示す。目標とする前方力が  
 100 N まで増大し、0 N へ低下する間、力/モーメント  
 制御下におれた自由度に生じる力/モーメントが正確  
 に 0 に制御されていることが確認された。

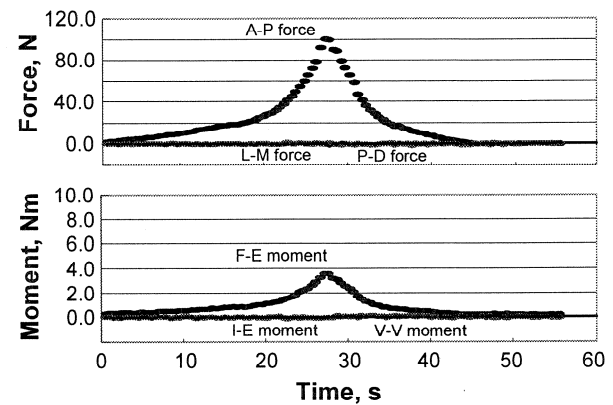


Figure 6: Six-DOF force/moment applied to the human knee joint controlled at prescribed levels to simulate a physiological anterior translation test

### 3. 正常 ACL の機能解析

#### 3.1. 実験方法

大阪大学医学部整形外科および札幌医科大学整形外  
 科・解剖学教室の協力を得て、ヒト健常切断膝 (n=6) を用い、  
 整形外科医が徒手により膝の壊  
 れ具合を調べる動揺性試験等を  
 ロボットシステムで再現した。  
 まず、膝関節の関節包外の軟組  
 織を取り除き、ロボットシス  
 テムに固定した。下記に示す4つ  
 の試験 (運動・負荷条件) を行  
 った。

- 1) 過伸展 (屈曲伸展自由度 : 5 Nm の伸展モーメントが生じるまで速度制御, 他の 5 自由度 : 目標値 0 の力/モーメント)

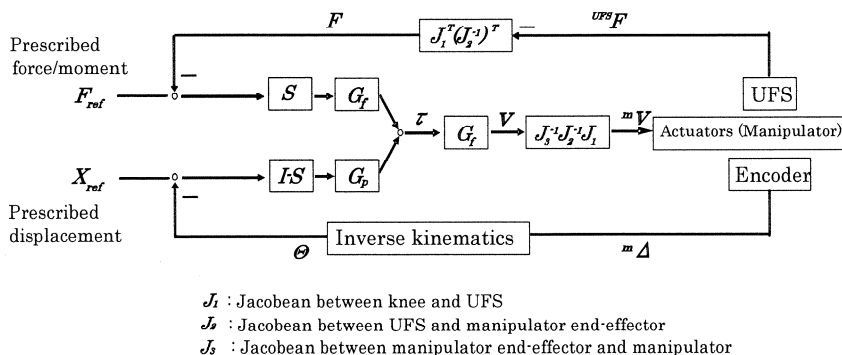


Figure 5: Flow of the force/position control of the robotic system. Errors in displacement and force/moment are described with respect to the knee joint coordinate system,  $\tau$ , and was transformed to velocity vector  $V_m$  described with respect to the manipulator coordinate system

ト制御)

- 2) 他動的屈曲 (屈曲伸展自由度: 0° 伸展位から 90° 屈曲位まで速度制御, 他の 5 自由度: 目標値 0 の力/モーメント制御)
- 3) 前後方引出試験 (屈曲伸展自由度: 0, 15, 30, 60, 90° それぞれに固定 (速度制御), 前方後方自由度: 100 N の前後方力が作用するまで速度制御, 屈曲伸展自由度と前後方自由度以外の自由度: 目標値 0 の力/モーメント制御)
- 4) 内外旋試験 (屈曲伸展自由度: 0, 15, 30 それぞれに固定 (速度制御), 内外旋自由度: 5 Nm の内外旋モーメントが作用するまで速度制御, 屈曲伸展自由度と内外旋自由度以外の自由度: 目標値 0 の力/モーメント制御)

これらの試験における膝関節 6 自由度の変位, 6 自由度の力/モーメント, およびマニピュレータの 6 自由度変位を 50 msec ごとに記録した。

その後, 大坪, 史野らの ACL の線維束の大腿骨および脛骨付着部に関する解剖学的研究の結果<sup>7)</sup> (Figure 7) に従い, AM 束を脛骨付着部近くで切断した。AM 切断膝に対し, 健常状態の試験で記録済みの 1) ~ 4) の膝 6 自由度の運動軌跡を再現してあたえ, その際の膝 6 自由度の力/モーメントを記録した。そして, 研究代表者が開発した手法<sup>15)</sup> を用い, 6 軸力センサの出力を座標変換し, 4 つの試験において AM 束に生じた張力を求めた。ついで, IM 束, PL 束を順次切断し, AM 束切断後と同様の手法により, 4 つの試験において IM 束および PL 束に生じた張力を求めた。プランジャー式断面積計測器 (Maywa) で計測したところ, AM 束, IM 束, PL 束の断面積は, 脛骨付着部付近でそれぞれ, 11, 11, 16 mm<sup>2</sup> であった。その後, ACL を全切断した膝に対し, 1) ~ 4) の試験を行い, ACL 切断膝の 3 次元運動を記録した。

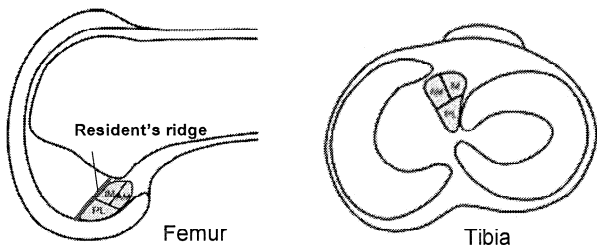


Figure 7: Division of the ACL into the AM, IM, and PL bundles. The femoral insertion site locates just behind the Resident's ridge

### 3.2 健常膝・ACL 再建膝の運動と ACL 線維束の張力

Figure 8 に他動的屈曲時の ACL と 3 線維束の張力を示す。5 Nm の過伸展モーメントをあたえた場合, 基準位置より 3° 伸展した。ACL 全体には 30 N 以上の張力が生じ, 線維束の張力は AM 束 13 N, IM 束 8 N, PL 束 20 N であった。過伸展以外では線維束張力は 5 N 以下と小さかった。屈曲するにつれて脛骨が内旋した。

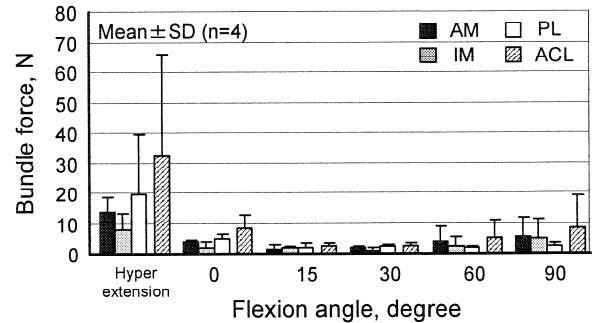


Figure 8: ACL force and ACL-bundle forces during hyperextension and passive flexion of the knee

Figure 9 に健常膝の前後方移動量 (前方力 100 N 作用時と後方力 100 N 作用時の前後方変位の差) と, ACL 切断膝の前後方移動量を示す。前後方移動量は屈曲角度に依存して変化し, 伸展位および 90° 屈曲位では 6 mm 程度と小さく, 15° および 30° 屈曲位では 8 mm 程度で最大になった。健常膝の前後方動揺が軽度屈曲位で最大となることは, 過去の報告<sup>16)</sup> に一致する。ACL が切断された ACL 切断膝では, どの屈曲角度でも前後方移動量が健常膝に比べて有意に増大し, 特に, 30° 屈曲位において 20 mm 以上と, 最も大きくなった。また, 膝に前方力が負荷されると脛骨が大腿骨に対して内旋することが観察された。

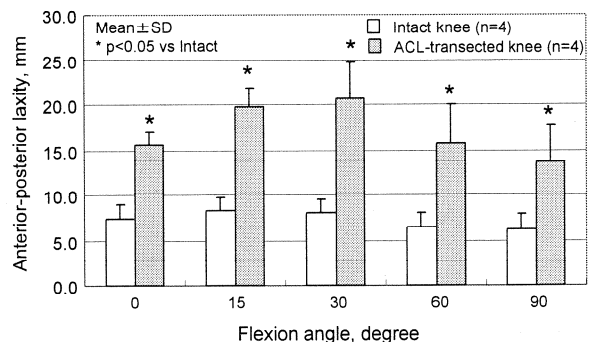


Figure 9: A-P laxity of the intact knee and ACL-transected knee in response to A-P force application from 100 N of posterior force to 100 N of anterior force

前方力が 100 N のとき、ACL の AM 束、IM 束、および PL 束の線維束に生じる張力は異なる傾向を示し、伸展位では PL 束が約 40 N で最大で、AM 束はわずかに劣り、IM 束は約 20 N で最も小さかった (Figure 10)。膝が屈曲すると AM 束の張力は増大し、PL 束の張力は減少した。AM 束の張力は屈曲 30° 以上で変化しないのに対して、IM 束の張力は屈曲 30° 以上で増大した。

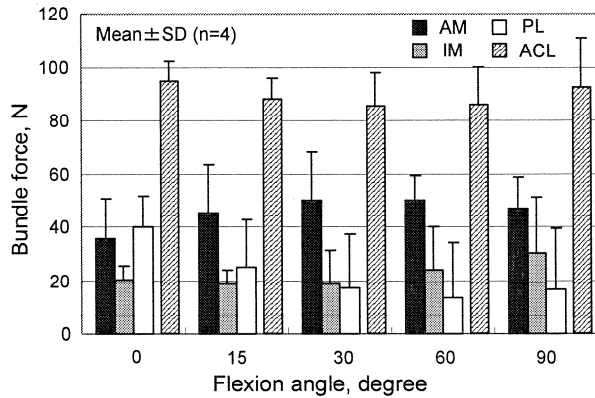


Figure 10: ACL force and ACL-bundle forces in response to anterior force of 100 N

膝に 5 Nm の内外旋変位 (5 Nm の内外旋モーメントが作用したときの回旋角度の差) を Figure 11 に示す。健常膝と ACL 切断膝で大きな差はなく、伸展位では 30 度程度、30° 屈曲位では 45° 程度であった。

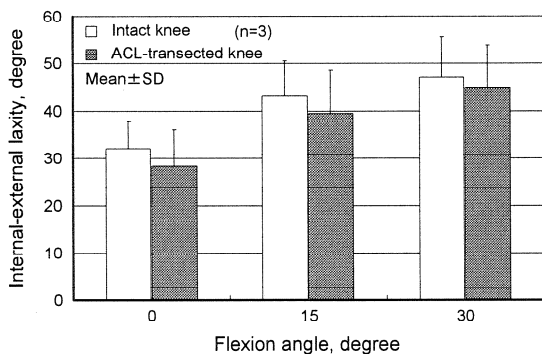


Figure 11: I-E laxity of the intact knee and ACL-deficient knee in response to I-E moment application from 5 Nm of external moment to 5 Nm of internal moment,

内外旋変位は ACL 切断の影響を受けなかったが、内外旋試験時の前後方変位は ACL 切断の影響を受けた。Figure 12 に示すように、健常膝では外旋モーメント 5 Nm から内旋モーメント 5 Nm に変化させても、前方に 1 mm 程度しか動かない。それに対し、ACL を切断すると伸展位では 3 mm 以上、前方移動する。ACL 切断時

の回旋不安定性増大の一現象がみてとれる。

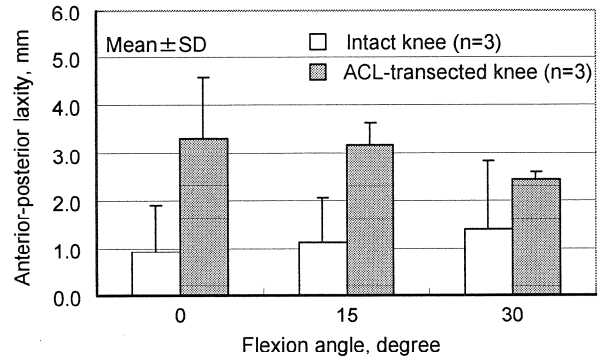


Figure 12: A-P laxity in response to I-E moment application from 5 Nm of external moment to 5 Nm of internal moment

内旋モーメント 5 Nm 作用時の ACL 張力および 3 線維束の張力を Figure 13 に示す。ACL 張力は伸展位で 60 N 以上であり、屈曲とともに低下して、30° 屈曲位では 35 N 程度であった。線維束レベルでは伸展位で AM 束と PL 束が 20 N 以上で IM 束よりも大きく、屈曲とともに全線維束の張力が低下した。AM 束の張力が屈曲とともに増大する前後方試験時と様相を異にする。

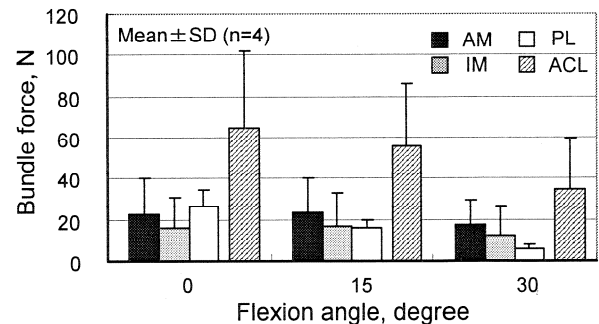


Figure 13: ACL force and ACL-bundle forces in response to internal moment of 5 Nm

#### 4. ハムストリング腱多重束グラフトによる ACL 再建の評価

##### 4.1 実験方法

正常膝の実験において摘出、保存されたハムストリング腱のうち、半膜様筋腱 (ST, Semitendinosus tendon) と薄筋腱 (GT, Gracilis tendon) を採取し、グラフトを作成した (Figure 14)。まず、三重束再建術を評価するために、膝の大腿骨と脛骨に、ハムストリング腱多重束再建のための骨孔を削孔した。骨孔位置は Figure 7 に示すように、正常膝の ACL 付着部に一致させ、大腿骨側は 2 つ、脛骨側は 3 つとした。これ

らグラフトと骨孔の作孔は、大阪大学整形外科で適用されている手法<sup>6)</sup>を忠実に再現して行った。手術用のダクロンテープとポリエステルテープを縫い付けたグラフトをFigure 15のように骨穴に通し、大腿骨側は2つのエンドボタンを骨孔出口で展開させて骨壁に引っ掛け、脛骨側は脛骨クランプに固定された3つの荷重センサに取り付けた。なお、大腿骨側のグラフト出口孔から荷重センサまでの距離は、臨床例に近づけて約5cmとし、骨孔方向とテープが一直線になって骨孔での摩擦がなるべく生じないようにした。

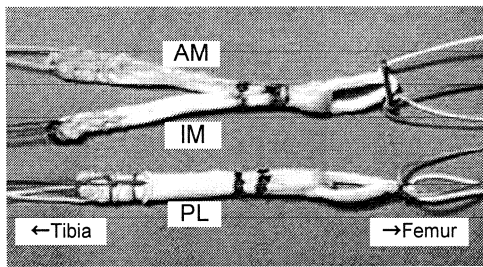


Figure 14: Hamstring tendon (ST and GT) grafts for the triple-bundle ACL reconstruction

ロボットシステムに Figure 15 の状態で取り付けた膝を 15° に屈曲させ、荷重センサのテープの長さを調節して、3線維束に Table 1 に示す初期張力を3分間与え、クリーブを起こさせた。このとき、屈曲伸展自由度を除く膝の5自由度を力/モーメントの目標値0で力/モーメント制御しながら、張力を所定の値に維持した。その後、正常膝に対して行った試験と同様に、1) 過伸展、2) 他動的屈曲、3) 前後方試験、4) 回旋試験、を行った。それぞれのグラフト初期張力で再建した膝の、各試験における運動と3つのグラフト張力を求めた。

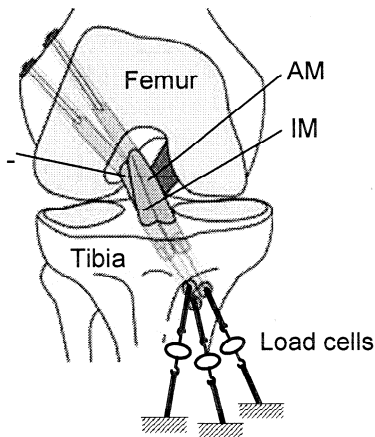


Figure 15: Schematic of the anatomical triple-bundle ACL reconstruction using Hamstring tendon grafts<sup>6)</sup>

Table 1: Load set for the grafts in the triple-bundle and double-bundle ACL reconstruction

Load set #	Triple-b. reconst.			Double-b. reconst.	
	AM	IM	PL	AM <sub>(AM+IM)</sub>	PL
1	1	1	2	2	2
2	3	3	6	6	6
3	5	5	10	10	10 (N)

ついで、二重束再建を再現するために、三重束再建で用いたAM束とIM束をひとつのグラフトにまとめてAM束とし、脛骨側のAM束とIM束用の2つの骨孔をひとつにまとめた。グラフトへの初期張力は、三重束再建においてAM束とIM束に付与した張力の和を二重束再建膝のAM束に与えた (Table 1)。再建膝のロボットシステムへの固定、固定時の制御、試験の実施は三重束再建と同様とした。それぞれのグラフト初期張力で再建した膝の、各試験における運動と2つのグラフト張力を求めた。

#### 4.2 ハムストリング腱多重束ACL再建膝の運動と再建グラフトの張力

Figure 16 に三重束再建膝の前後方試験における前後方移動量を示す。比較のため、3節で求めた健全膝の前後方移動量を斜線で示した。再建膝の前後方移動量は健全膝と同様に軽度屈曲位で最大となった。グラフト初期張力の総和で見ると、4Nではどの屈曲角度でも前後方移動量が健全膝に比べて2mm程度大きく、緩い再建膝になっている。ところが初期張力を12Nとすると健全膝と同程度の前後方移動量となり、初期張力を20Nとすると健全膝に比べて同程度か、やや堅めの膝関節になっている。この結果から、ACL三重束再建における前後方動揺性に関する Laxity matched tension (LMT, 健全膝と同じ緩みになる再建膝の初期張力)は約12Nであり、AM束、IM束、PL束の張力はそれぞれ3、3、6Nであることが分かった。

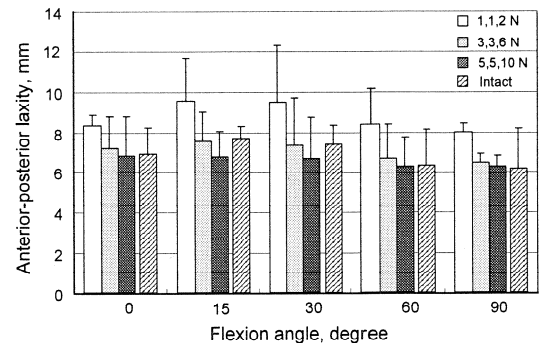
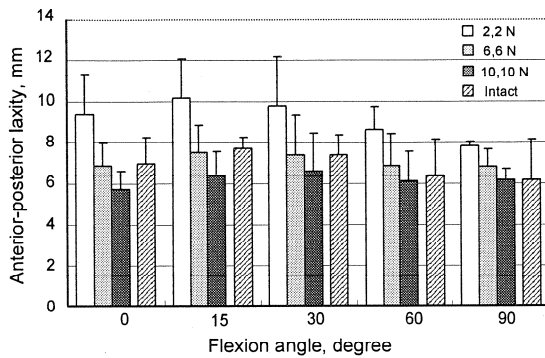
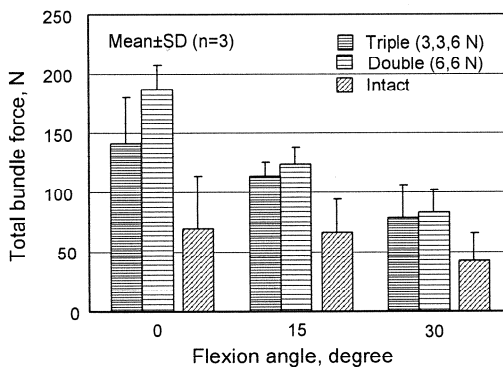


Figure 16: Schematic of the anatomical triple-bundle ACL reconstruction using Hamstring tendon grafts



**Figure 17: Schematic of the anatomical triple-bundle ACL reconstruction using Hamstring tendon grafts**

Figure 17 に二重束再建膝の前後方試験における前後方移動量を示す。再建膝の前後方移動量は健常膝、三重束再建膝と同様に軽度屈曲位で最大となった。グラフト初期張力の総和で見ると、4 Nではどの屈曲角度でも前後方移動量が健常膝に比べて 2 mm 程度大きく、緩い再建膝になっている。ところが初期張力を 12 N とすると健常膝と同程度の前後方移動量となり、初期張力を 20 N とすると健常膝に比べて同程度か、やや堅めの膝関節になっている。この結果から、ACL 二重束再建における前後方動揺性に関する LMT は約 12 N であり、AM 束、PL 束の張力はそれぞれ 6 N ずつであることが分かった<sup>14)</sup>。



**Figure 18: Total bundle forces in the grafts in the triple-bundle and double-bundle ACL reconstructions with a large difference observed at 0 degree of flexion**

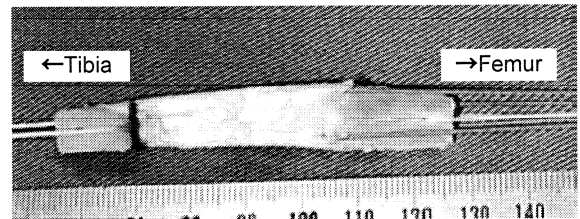
前後方移動量では大きな差のなかった ACL の三重束再建膝と二重束再建膝であるが、荷重負荷時のグラフト張力には差があった。Figure 18 に示すとおり、LMT であるグラフト初期張力の総和を 12 N にして固定した場合、膝に前方力 100 N が作用すると三重束再建膝のグラフト張力は二重束再建膝のグラフと張力に比べて常に低い張力であった。特に伸展位において三重束再建膝では 140 N 程度であるのに対し、二重束再建

膝では 180 N 以上であり、大きな差があった<sup>14)</sup>。

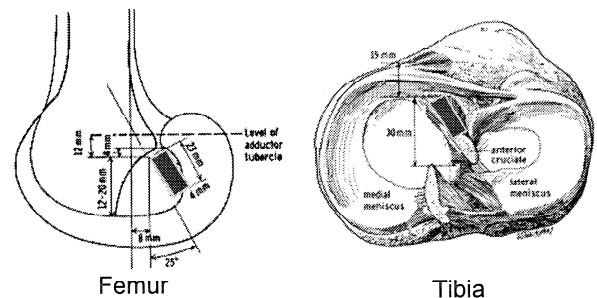
## 5. 膝蓋腱グラフトによる ACL 再建の評価

### 5.1 実験方法

健常膝 (n=3) から膝蓋腱 (BTB, Bone-patellar tendon-bone graft) を採取し、グラフトを作成した (Figure 19)。そして、史野によって開発された長方形骨孔 BTB 再建法 (Rec. BTB, rectangular bone tunnel BTB reconstruction) を評価するために、膝の大腿骨と脛骨の ACL 付着部に長方形骨孔を削孔した (Figure 20)。骨孔位置は Figure 7 に示す正常膝の ACL 付着部に一致させた。これらグラフトと骨孔の作孔は、大阪大学整形外科で適用されている手法<sup>8,9)</sup> を忠実に再現して行った。手術用の高分子テープを縫い付けたグラフトを Figure 21 のように骨穴に通し、大腿骨側は 1 つのエンドボタンを骨孔出口で展開させて骨壁に引っ掛け、脛骨側は脛骨クランプに固定された荷重センサに取り付けた。なお、大腿骨側のグラフト出口孔から荷重センサまでの距離は、臨床例に近づけて約 5 cm とし、骨孔方向とテープが一直線になって骨孔での摩擦がなるべく生じないようにした。

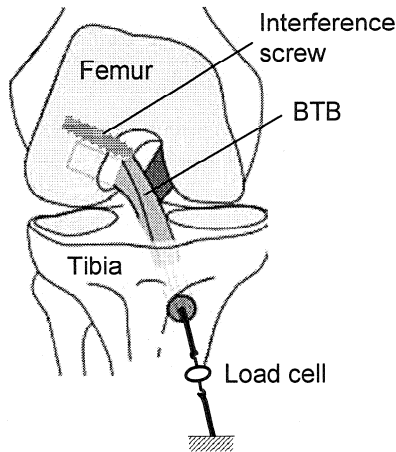


**Figure 19: Tendon grafts for the Rec. BTB reconstruction**



**Figure 20: Rectangle bone tunnels in the femoral and tibial insertion sites for the anatomical Rec. BTB reconstruction. The tunnels locate at the insertion sites of the ACL in the femur and tibia indicated in Figure 7.**





**Figure 21: Schematic of the anatomical Rec.BTB reconstruction using a BTB graft**

ロボットシステムに **Figure 21** の状態で取り付けた膝を 15° に屈曲させ、高分子紐の長さを調節して、BTB グラフトに多重束再建の評価の際と同様のグラフト張力である 4, 12, 20 N を 3 分間与え、クリープを起こさせた。このとき、屈曲伸展自由度を除く膝の 5 自由度を力/モーメントの目標値 0 で力/モーメント制御しながら、張力を所定の値に維持した。その後、正常膝、多重束再建膝に対して行った試験と同様に、1) 過伸展、2) 他動的屈曲、3) 前後方試験、4) 回旋試験、を行った。それぞれのグラフト初期張力で再建した膝の、各試験における運動とグラフト張力を求めた。

また、比較のため BTB 従来法による再建を行い、同様の試験を行った。その際の骨孔位置は Rec. BTB 法と一致させ、骨孔を円形とした。

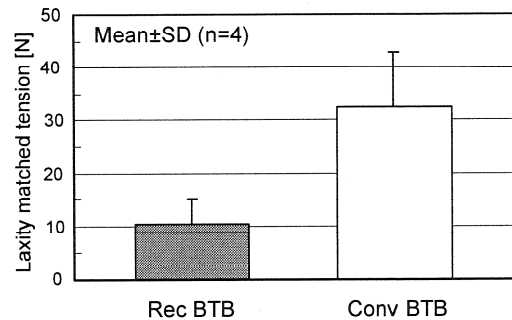
## 5.2 長方形骨孔/膝蓋腱 ACL 再建膝の運動と再建グラフトの張力

Rec. BTB法による再建膝の 30° 屈曲位での前後方試験におけるLMTを示す (**Figure 22**)。比較のため、BTB 従来法による再建膝のLMTも示した。BTB従来法のLMTは 30 N以上であるのに対し、Rec. BTB法のLMTは 10 Nと有意に小さかった<sup>14)</sup>。

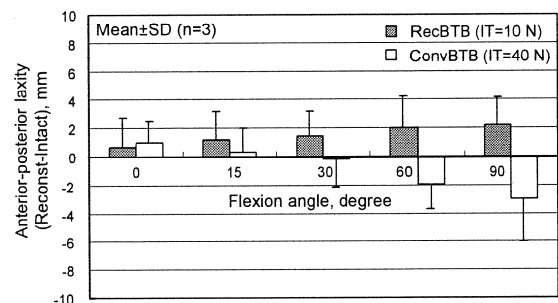
求めたLMTを参考にして、Rec. BTB法の初期張力を 10 N、BTB従来法の初期張力を 40 Nとしたときの前後方移動量を求め、健常膝との差を示した (**Figure 23**)。その結果、前後方移動量が健常膝よりもわずかに大きいものの、すべての屈曲角度において健常膝程度の安定性が得られていることが分かった<sup>14)</sup>。BTB従来法の場合は、初期張力が 40 Nということもあり、健常膝と同程度以上の安定性が得られていることが分かる。

以上から、Rec. BTB法による再建膝は、BTB従来法に比べてわずか 10 Nという低い初期張力で健常膝程度の堅さを得ることができていることが分かった。内外旋時の回旋軸の運動に関しても興味深い結果が得られた。

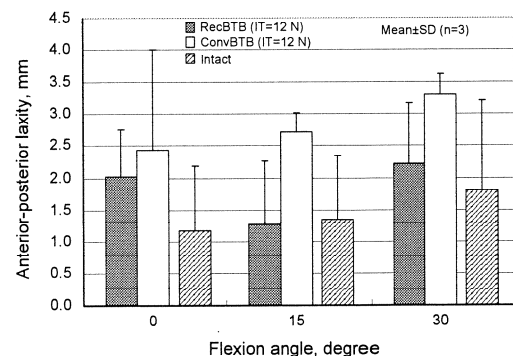
**Figure 24** に示すとおり、5 Nmの内外旋モーメント負荷時の前後方移動量は、健常膝ではわずかに 1.0~2.0 mmである。これに対し、BTB従来法では 2.5~3.5 mmと大きな前後方移動が起こるが、Rec. BTB法では 1.0~2.5 mmと前後方変位が小さく、軽度屈曲位では健常膝と同程度であることが分かった<sup>14)</sup>。



**Figure 22: LMT of the Rec.BTB reconstructed knee and conventional BTB reconstructed knee**



**Figure 23: A-P laxity of the Rec.BTB reconstructed knee with the initial graft fixation of 10 N and conventional BTB reconstructed knee with the initial graft tension of 40 N**



**Figure 24: A-P laxity in response to I-E moment application from 5 Nm of external moment to 5 Nm of internal moment in the Rec.BTB reconstructed knee, conventional BTB reconstructed knee, and intact knee**



## 6. まとめ

ロボットシステムを用いて膝関節やその構成組織の力学機能・特性を調べることにより、臨床整形外科にとってきわめて重要なデータを得ることができる。本研究室<sup>17-20)</sup>や国外の研究室<sup>21)</sup>で同手法を用いて多くの結果が得られている。本研究の結果を詳細に把握することで、生体関節という最も優れた軸受けの詳細な機能が把握でき、また関節外科におけるより優れた治療方針や手術方針を立てることが可能となる。また、ロボット技術を用いた関節力学試験の手法について、さまざまな研究機関が研究に着手し、その成果発表のための国際学会 (International Symposium on Robotic Application in Biomechanics) が開催されるようになり、研究代表者は本手法の開発者として講演<sup>22)</sup>を行った。今後、ますます盛んに研究が進められる分野であると思われる。

健全膝に対する検討より、力学的機能の観点からは、ACLをひとつの靭帯組織として捉えるよりも、複数の靭帯で構成される複合靭帯組織として捉える方が妥当であると考えられる。Sakane<sup>16)</sup>ら、またはMae, Shino, Fujieら<sup>5)</sup>はAM束とPL束の機能について、同様のロボットシステムにより求め、伸展位ではPL束、屈曲位ではAM束の張力が高まるという結果を示している。本研究ではさらに詳細な解析を試み、伸展位ではPL束、屈曲 60° 前後ではAM束、そして屈曲 60° 以上ではIM束が大きな張力を発生させることが分かった。この結果は、ACLの機能解剖の点からも、またACL再建術の改善の点からも重要な結果である。

ACLは膝の主要な靭帯の中でもスポーツなどにおいて損傷頻度がきわめて高い靭帯である。しかも治癒・再生能力に乏しいため、損傷すると体の別の部分から腱等を摘出して、移植手術を行うことになる。ハムストリング腱グラフトを用いた多重束再建では、三重束再建と二重束再建では、膝の安定性においては大きな差がないことが分かった。しかし、回旋時のグラフト張力は三重束再建膝の方が二重束再建膝に比べて有意に小さく、グラフトへの負担が小さいことが分かった。Mae, Shino, Fujieらは、ACL骨孔位置がACLの解剖学的付着部位置と異なる旧式のハムストリング腱二重束再建術の評価を行っており、LMTが 44 Nであることを報告している<sup>5)</sup>。この旧式の再建に比べて、ACLの解剖学的付着部位置に骨孔を削孔する新式の多重束再建では、LMTはわずかに 12 Nであり、低荷重で安定性の高い再建膝を得ることができることが分かった。

膝蓋腱を長方形骨孔に固定する長方形骨孔 BTB 再

建術では、丸孔を用いる従来法に比べて、小さなグラフト初期張力で、高い膝安定性を得ることができる再建術であることが分かった。また、回旋時の回旋軸のブレが少ないことが分かった。再建術を受けた患者の主観的な評価において、長方形骨孔 BTB 再建膝は回旋時の不安定感が少ないことが報告されており、本結果と密接な関係があるものと思われる。

## 参考文献

- 1) Rosenberg, T.D., Brown, G.C., and Deffner, K.T., 1997, "Anterior cruciate ligament reconstruction with quadrupled semitendinosus autograft," *Sports Med. Arthrosc. Rev.*, Vol. 5: pp. 51-58.
- 2) Fujie, H., Mabuchi, K., Woo, S. L-Y., Livesay, G. A., Arai, S., and Tsukamoto, Y., 1993, "The use of robotics technology to study human joint kinematics: A new methodology," *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 115: pp. 211-217.
- 3) Fujie, H., Mae, T., Sekito, T., and Shino, K., 2000, "Mechanical functions of human ACL bundles: Development and application of a robotic knee simulator :In human biomechanics and injury prevention (edited by Kajzer, J., Tanaka, E., and Yamada, H.)," Springer-Verlag Tokyo, pp. 255-260.
- 4) Fujie, H., Livesay, G. A., Fujita, M., and Woo, S. L-Y., 1996, "Forces and moments in six-DOF at the human knee joint: Mathematical description for control," *Journal of Biomechanics*, Vol. 29, pp. 1577-1585.
- 5) Mae, T., Shino, K., Miyama, T., Shinjo, H., Ochi, T., Yoshikawa, H., and Fujie, H., 2001, "Single- versus two-femoral socket anterior cruciate ligament reconstruction technique: Biomechanical analysis using a robotic simulator," *Arthroscopy*, Vol. 17, pp. 708-716.
- 6) Shino, K., Nakata, K., Nakamura, N., Mae, T., Otsubo, H., Iwahashi, T., and Nakagawa, S., 2005, "Anatomic anterior cruciate ligament reconstruction using two double-looped hamstring tendon grafts via twin femoral and triple tibial tunnels," *Operative Techniques in Orthopaedics*, Vol. 15: pp. 130-134.
- 7) 大坪英則, 史野根生, 他, 2008, "ACL の機能解剖," 第 35 回日本臨床バイオメカニクス学会抄録: pp. 69.
- 8) Shino, K., Nakata, K., Nakamura, N., Toritsuka Y., Nakagawa, S., and Horibe, S., 2005, "Anatomically oriented anterior cruciate ligament reconstruction with a bone-patellar tendon-bone graft via rectangular socket and tunnel: A snug-fit and impingement-free grafting technique," *Arthroscopy*, Vol. 21(11): pp. 1402e1-e5.
- 9) Shino, K., Nakata, K., Nakamura, N., Toritsuka, Y., Horibe, S., Nakagawa, S., and Suzuki, T., "Rectangular tunnel double-bundle anterior cruciate ligament

reconstruction with bone-patellar tendon-bone graft to mimic natural fiber arrangement” *Arthroscopy*, Vol. 24(19): pp. 1178-1183.

10) Woo, S. L-Y., Chan, S. S., and Yamaji, T., 1997, “Biomechanics of knee ligament healing, repair and reconstruction,” *Journal of Biomechanics*, Vol. 30, pp. 431-439.

11) 野村良平, 2005, 工学院大学大学院博士前期課程修士論文.

12) Grood, E. S., and Suntay, W. J., 1983, "A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: Application to the knee," *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 105, pp. 136-144.

13) Fujie, H., Sekito, T., and Orita, A., 2004, “A novel robotic system for joint biomechanical tests: Application to the human knee joint,” *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 126, pp. 54-61.

14) 深野祥司, 2008, 工学院大学大学院博士前期課程修士論文.

15) Fujie, H., Livesay, G. A., Woo, S. L-Y., Kashiwaguchi, S., and Blomstrom, G., 1995, “The use of a universal force-moment sensor to determine in-situ forces in ligaments: A new methodology,” *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 117, pp. 1-7.

16) Sakane, M., Fox, R.J., Woo, S.L-Y., Livesay, G.A., Li, G., and Fu, F.H., 1997 “In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads,” *Journal of Orthopaedic Research*, Vol. 15: pp. 285-293.

17) Fujie, H., Otsubo, H., Katakai, D., Nomura, R., Hirano, T., Makino, K., and Shino, K., 2008, “The importance of the intermediate bundle of the anterior cruciate ligament: Biomechanical analysis using a novel robotic system,” *Proceedings of the International Symposium on Ligaments and Tendons VII, Chicago*, pp.44.

18) Fukano, S., Fujie, H., Otsubo, H., Katakai, D., Nomura, R., Hirano, T., Makino, K., and Shino, K., 2009, “Mechanical function of the three bundles of the anterior cruciate ligament in response to externally applied loads,” *Proceedings of the International Symposium on Ligaments and Tendons IX, Las Vegas*, pp. 60.

19) Mae, T., Shino, K., Fujie, H., et al., 2008, “Optimization of graft fixation at the time of anterior cruciate ligament reconstruction Part I : Effect of initial tension,” *The American Journal of Sports Medicine*, Vol. 36(6): pp. 1087-1093.

20) Mae, T., et al., Shino, K., and Fujie, H., et al., 2008, “Optimization of graft fixation at the time of anterior cruciate ligament reconstruction Part II : Effect of knee flexion angle. *The American Journal of Sports Medicine*,

Vol. 36(6): pp. 1094-1100.

21) Gabriel, M.T., et al., 2004, “Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotatory loads,” *Journal of Orthopaedic Research*, Vol. 22: pp. 85-89.

22) Fujie, H., Fukano, S., Hirano, T., Otsubo, H., Suzuki, T., Nakata, K., and Shino, K., 2008 “Application of a robotic system to the determination of the force sharing in the three ACL bundles,” *Abstract of the International Symposium on Robotic Applications in Biomechanics, Banff*: 21

## 本研究の業績

### ① 発表論文

1) Mae, T., Shino, K., Fujie, H., et al., 2008, “Optimization of graft fixation at the time of anterior cruciate ligament reconstruction Part I : Effect of initial tension,” *The American Journal of Sports Medicine*, Vol. 36(6): pp. 1087-1093.

2) Mae, T., et al., Shino, K., and Fujie, H., et al., 2008, “Optimization of graft fixation at the time of anterior cruciate ligament reconstruction Part II : Effect of knee flexion angle,” *The American Journal of Sports Medicine*, Vol. 36(6): pp. 1094-1100.

### ② 学会発表

1) Fujie, H., Fukano, S., Hirano, T., Otsubo, H., Suzuki, T., Nakata, K., and Shino, K., 2008 “Application of a robotic system to the determination of the force sharing in the three ACL bundles,” *Abstract of the International Symposium on Robotic Applications in Biomechanics, Banff*: 21

2) Fukano, S., Fujie, H., Otsubo, H., Katakai, D., Nomura, R., Hirano, T., Makino, K., and Shino, K., 2009, “Mechanical function of the three bundles of the anterior cruciate ligament in response to externally applied loads,” *Proceedings of the International Symposium on Ligaments and Tendons IX, Las Vegas*, pp. 60.

### ③ 特許出願

なし



# 軸流型スパイラル粘性マイクロポンプの基礎的研究

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  
名古屋工業大学大学院工学研究科 横田和彦

## Basic Study of the Axial-Flow Viscous Micropump Using a Spiral Rotor

Kotaro SATO, Faculty of Global Engineering, Kogakuin University  
Kazuhiko YOKOTA, Nagoya Institute of Technology

In the present paper, a new viscous micropump using double-circular flows is proposed. Its pressure characteristics are investigated by using a theoretical analysis, a model experiment and a numerical simulation. In the theoretical analysis, the two-dimensional lubrication theory for a journal bearing with infinite length is adopted. In the model experiment, the low Reynolds number flow in practical micropumps is realized by using glycerin as working fluid, and a centimeter-scale (not micrometer-scale) model pump is examined. In the numerical simulation, the SIMPLE method is used to obtain steady-state solutions. With respect to the pressure characteristics, the theoretical results show good agreements with the experimental and the numerical ones quantitatively. The pressure at zero flow rate obtained is quite larger than that of an existing viscous micropump.

**Key Words:** Micromachine, Viscous Flow, Lubrication, Numerical Simulation, Model Experiments, Pressure Characteristics

### 1. 結 論

MEMS(Micro-Electro-Mechanical System), NEMS(Nano-Electro-Mechanical Systems)の分野において、マイクロ( $\mu$ )ポンプは、流体のハンドリングを必要とする際のキーテクノロジーと認識されている。例えば $\mu$ TAS(Micro Total Analysis System)あるいはLOC(Laboratory on a Chip)と呼ばれる超小型分析システム、ウェアブレイシユリン注入器を始めとする超小型医療機器、遺伝子分析器を始めとする超小型バイオテクノロジー機器、UMGT(Ultra Micro Gas Turbine)や宇宙推進機をはじめとする超小型航空宇宙機器等、枚挙に暇が無い。このように多種多様な用途に対応する為に、それぞれの使用環境・使用条件等に応じた多種多様な $\mu$ ポンプが必要とされており、現在でも様々な $\mu$ ポンプが考案・提案され、活発な研究開発が行われている<sup>(17)</sup>。

その中で、粘性式は、脈動が発生しない、連続的液体輸送が可能、比較

的簡単な構造、流量制御が容易等の利点を持っており、様々な形状が行われている<sup>(17)</sup>。しかし吐き出し圧力が低いという欠点を持っている。そこで本研究では、より高圧を発生可能な新規粘性 $\mu$ ポンプを提案する。そしてジャーナル軸受けの潤滑理論を用いた理論解析、センチメートル(cm)スケールのポンプモデルを用いたモデル実験、及びNavier-Stokes(NS)方程式と滑り無し条件を用いた数値シミュレーションを用いて、その圧力特性の解明を目的とする。

ところで流体潤滑の分野では、以前からナノメートル(nm)スケールの液体潤滑膜(即ちnm隙間の液体流れ)を扱っており、100nm程度であれば、液体の密度変化・粘度変化、軸受け変形を生じる高圧・高速変形時のEHL(Elastohydrodynamic Lubrication)に、Reynolds方程式を適用可能な事は良く知られている<sup>(8)</sup>。更にCooperら<sup>(9)</sup>は、Reynolds方程式から得られる液膜厚さと速変形との関係が、液膜厚さ10nm、速変形 $10^7$ /sまで実験結果とよく合う事を、様々なNewton流体に関して示した。ここで

Reynolds 方程式は、連続体近似である NS 方程式と壁面での滑り無し条件から導出される事から、この程度のスケールや速度剪断まで NS 方程式と滑り無し条件が有効である事を意味している。

ところが MEMS 分野では、マイクロメータ( $\mu\text{m}$ )スケールにおいて、連続体近似や滑り等の問題を指摘している論文が見られる。Gad-el-Hak<sup>(9)</sup>は、Knudsen 数 ( $Kn$ ) に相当するものが液体では不明である事を指摘し、粘数に関して互いに矛盾する結果を報告している論文をいくつか紹介している。しかし前記 Cooper<sup>(10)</sup> は液膜厚さ  $h=10\sim 100\text{nm}$ 、温度  $T=25\sim 120^\circ\text{C}$ 、圧力  $p=0.1\sim 500\text{MPa}$ 、10 種類の Newton 流体の広い範囲で、潤滑特性が Reynolds 方程式に基づく従来理論と一致する事を指摘しているのを始め、Matsuoka<sup>(11)</sup> は液体の  $Kn$  に相当する無次元数として  $Kn_{liq} = D_m / L$  ( $D_m$  分子直径、 $L$  代表長さ)を定義出来、 $Kn_{liq} < 0.1$  で従来理論が適用出来る事を指摘している等、液体潤滑分野では nm スケール領域において従来理論に一致する多くの結果が得られている。Thompson<sup>(12)</sup> は分子間干渉のエネルギにカットオフを設けると滑りが生じ得る事を指摘している。しかし液体潤滑の結果から、滑りが生じるのは特殊なケースと考えられる。この様に MEMS 分野では液体潤滑の知見が反映されていない。そこで本研究では MEMS 分野ではなく液体潤滑分野の知見に基づく事とした。

提案する粘性  $\mu$  ポンプに関する条件は、想定作動流体は Newton 流体の液体、想定壁面粗さは微細加工における数十 nm 程度で  $\mu\text{m}$  スケールに対しては無視可能、想定圧力は数百 kPa で液体の密度変化・粘度変化・固体壁の変形は無視可能と言うものである。従って (液体潤滑分野の知見から) 非圧縮性 NS 方程式と滑り無し条件が使用可能で、流れを支配するパラメータは Reynolds 数 ( $Re$ ) のみである。そこで本研究では、cm スケールのポンプモデルを用いた低  $Re$  実験、及び NS 方程式と滑り無し条件を用いた理論解析・数値シミュレーションを研究手法として採用した。

さらにここでは回転円板型スパイラル粘性マイクロポンプの特性についても併せて解明を試みる。センチスケールモデルポンプを製作し、実験を行うとともに理論解析・数値シミュレーションを実行した。ここでは流れ方向やポンプ内外径比  $a=r_{in}/r_{out}$  に対するポンプ性能と流路内の昇圧過程を調べた。実験結果と理論解析結果・数値シミュレーション結果とを比較検討することから、形状最適化に関して議論した。

## 2. 主な記号

- $c$  : シリンダとロータの半径差
- $D$  : ロータ直径
- $e$  : ロータの偏心量
- $h$  : 二重円筒間の隙間幅
- $p, p_{in}, p_{out}$  : 周方向静圧分布, 入口静圧, 出口静圧
- $P$  : 周方向静圧分布圧力係数 ( $= (p - p_{in}) / (\rho U^2 / 2)$ )
- $Q$  : 体積流量
- $r$  : ロータ中心を原点とする半径方向座標
- $R$  : ロータ半径
- $Re$  : Reynolds 数 ( $= \rho D U / \mu$ )
- $U$  : ロータ(外)周速度
- $v_\theta$  : 周方向流速
- $W$  : ロータ軸方向長さ

- $\alpha$  : Sommerfeld 変換変数
- $\varepsilon$  : 偏心率 ( $= e/c$ ), ( $0 \leq \varepsilon < 1$ )
- $\delta$  : 隙間係数 ( $= c/D$ )
- $\phi$  : 流量係数 ( $= Q / (\pi D W U)$ )
- $\mu$  : 作動流体の粘度 ( $v$  動粘度)
- $\theta$  : ロータ中心を原点とする周方向座標
- $\theta_0, \Delta\theta$  : 隔壁の周方向位置, 周方向幅
- $\rho$  : 作動流体の密度
- $\psi$  : ポンプ性能圧力係数 ( $= (p_{out} - p_{in}) / (\rho U^2 / 2)$ )
- $\omega$  : ロータ回転角速度

## 3. 二重円筒型粘性 $\mu$ ポンプとスパイラル $\mu$ ポンプ

図1に、考案した新型粘性  $\mu$  ポンプの模式図を示す。本  $\mu$  ポンプは、内円筒 (ロータ) と外円筒 (シリンダ) の二重円筒流路に、入口・出口を分ける隔壁を配置した構造である。そしてロータ回転により入口から出口へ流体を輸送する。次節で示す様に、本  $\mu$  ポンプでは速度剪断により静圧が上昇するので、隙間を小さくすれば理論上無限に吐出圧力を高められる。一方、隙間を小さくすると流量は減少するが、本  $\mu$  ポンプの2次元的特性から、ポンプの厚さ (紙面で垂直な方向のサイズ) の増加により、(厚さに制限はあるものの) 流量低下をある程度緩和出来る。換言すれば、必要圧力を隙間幅により、必要流量をポンプ厚さにより独立に調節出来ると言う事である。これは、本  $\mu$  ポンプの特長の1つと言える。

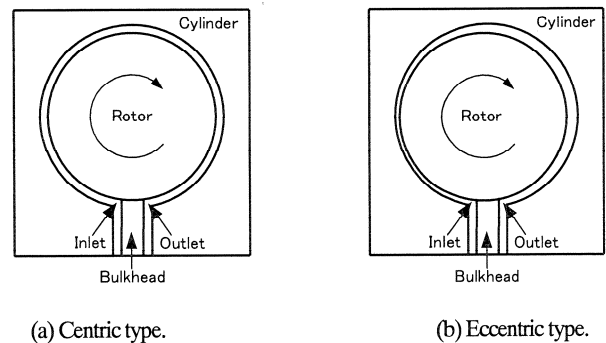


Fig.1 New viscous micropump.

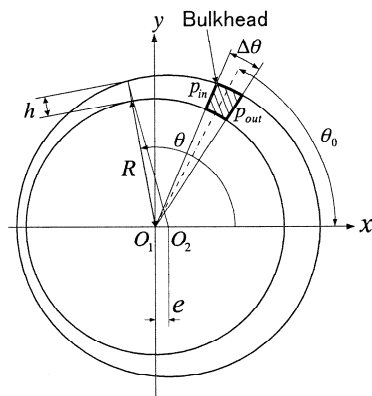


Fig.2 Flow field for theoretical analysis.

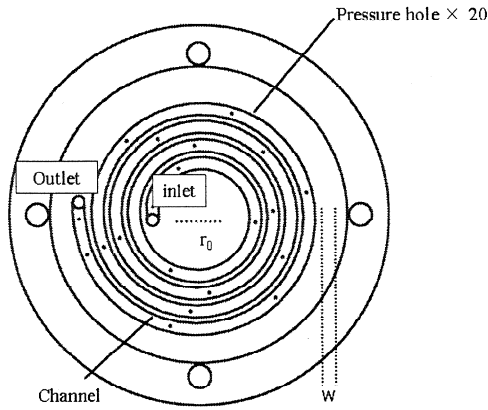


Fig. 3 Test section of spiral micropump

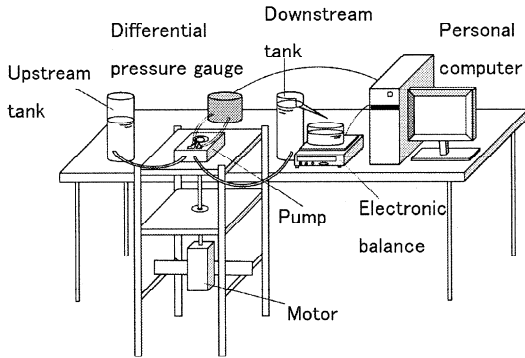


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus.

ここで、図1(b)に示す様な、ロータ中心をシリンダ中心から偏心させたものは1つのバリエーションと考えられる。そこで、この様な偏心の影響も併せて調査した。実際の製品生産を考えれば完全な同心円の(二重円筒)製品を生産する事は非常に困難であるから、偏心の影響を調べる事は、製品の品質(バラツキ)を考慮する上でも重要と考えられる。

図3に Kilani<sup>(17)(18)</sup>らにより考案された回転円板型スパイラル粘性ポンプの試験部を示す。円板型であるためエッチング加工に適している。

#### 4. 理論解析

図1の構造はジャーナル軸受に類似しており、流体間隙理論における無限長ジャーナル軸受に関する Sommerfeld の理論が適用出来る。ここでは理論の概要を述べる(より詳細は流体間隙理論に掲載された書籍(参考文献(18)など)を参照されたい)。またジャーナル軸受との違いは潤滑膜の存在であり、その数値的取扱については理論上の特性式の導出過程で述べる。

図2に示す様に、周速 $U$ で回転するロータと静止したシリンダ間の狭い隙間内の流れについて考える。流れは2次的で、隙間幅 $h$ は $h \ll R$ ( $R$ :ロータ半径)とすると、ロータ中心を原点とする周方向運動方程式として、

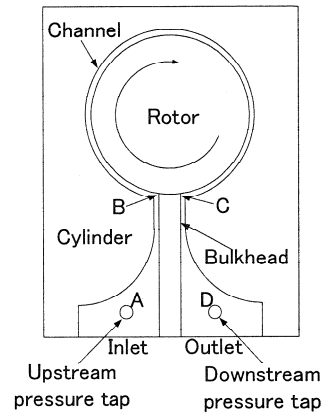


Fig. 5 Experimental model of micropump.

$$\frac{dp}{d\theta} = \mu R \frac{d^2 v_\theta}{dr^2} \quad (1)$$

を得る。 $\mu$ は作動流体の粘度である。なお半径方向運動方程式(従って半径方向静圧平衡)は周方向運動方程式(従って周方向静圧平衡)に対して無視出来る。即ち $dp/dr \approx 0$ (半径方向に静圧一定)である。

境界条件は、滑り無し条件(ロータ壁面 $r = R$ で周速 $U$ 、シリンダ壁面 $r = R + h$ で速度ゼロ)を与えて、半径方向に静圧一定として、式(1)を $r$ で積分すれば、隙間内周方向流速の半径方向分布の式として、

$$v_\theta = \left\{ \frac{h}{2\mu R} (r - R) \frac{dp}{d\theta} - U \right\} \frac{r - R - h}{h} \quad (2)$$

を得る。ロータ厚み $W$ の時、隙間内の流量 $Q$ は、

$$Q = W \int_R^{R+h} v_\theta dr \quad (3)$$

で与えられるから、式(3)に式(2)を代入して積分を実行すると、流量の式として

$$Q = W \left( \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu R} \frac{dp}{d\theta} \right) \quad (4)$$

が得られる。なお、これを周方向で微分すると、

$$\frac{dQ}{d\theta} = W \left\{ \frac{d}{d\theta} \left( \frac{Uh}{2} \right) - \frac{d}{d\theta} \left( \frac{h^3}{12\mu R} \frac{dp}{d\theta} \right) \right\}$$

となるが、質量保存より $dQ/d\theta = 0$ であるから、結局

$$\frac{d}{d\theta} \left( \frac{h^3}{12\mu R} \frac{dp}{d\theta} \right) = \frac{U}{2} \frac{dh}{d\theta} + \frac{h}{2} \frac{dU}{d\theta} \quad (5)$$

を得る。式(5)は流体間隙における Reynolds 方程式と呼ばれる連続の式である。この式で、左辺は Poiseuille 項、右辺は Couette 項、右辺第一項は撓み効果項、右辺第二項はストレッチ効果項と呼ばれている。従って、式(4)は Reynolds 方程式の周方向積分でもある。

次に、周方向静圧分布を求める為に、式(4)を

$$\frac{dp}{d\theta} = 12\mu R \left( \frac{U}{2h^2} - \frac{Q}{Wh^3} \right) \quad (6)$$

と変形する。式(6)から、右辺第一項 即ち、Couette 項 (ロータ周速  $U$ ) が静圧上昇 (正の静圧勾配) を生じ、その効果は隙間幅  $h$  の 2 乗に反比例する事が分かる。

図2に示す様に ロータがシリンダに対して、 $\theta=0^\circ$  で最大隙間幅となる様に偏心している場合を考える。  $h/R \ll 1$  を用いれば  $h(\theta)$  は近似的に

$$h(\theta) = c + e \cos \theta = c(1 + \varepsilon \cos \theta) \quad (7)$$

で与えられる。ここで  $c$  はシリンダとロータの半径差、 $e$  は偏心率、 $\varepsilon = e/c$  ( $0 \leq \varepsilon < 1$ ) は偏心率である。

式(7)を式(6)に代入して、Sommerfeld 変換

$$1 + \varepsilon \cos \theta = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 - \varepsilon \cos \alpha} \quad (8)$$

を用いると、容易に積分が出来て、

$$p = \frac{12\mu R}{c^2} \left\{ \frac{U}{2} \frac{\alpha - \varepsilon \sin \alpha}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} - \frac{Q}{Wc} \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \times \left( \alpha - 2\varepsilon \sin \alpha + \frac{\varepsilon^2}{2} \alpha + \frac{\varepsilon^2}{4} \sin 2\alpha \right) \right\} + C \quad (9)$$

を得る ( $C$  は積分定数)。これが周方向静圧分布式である。なおジャーナル軸受けの流体潤滑理論では、 $\theta = 0$  での周期境界条件により  $Q$  を定める ( $C$  は  $\theta = 0$  での圧力により定まる)。しかし本研究では、隔壁の存在の為、周期境界条件を用いる事が出来ない。

次に図2の様に、 $\theta = \theta_0$  を中心として、隔壁幅  $\Delta\theta$  を考えれば、隔壁の位置と幅を取り扱える。なお入口は  $\theta = \theta_0 + \Delta\theta/2$ 、出口は  $\theta = \theta_0 - \Delta\theta/2$  である。

まず入口については、式(8)において、

$$1 + \varepsilon \cos(\theta_0 + \Delta\theta/2) = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 - \varepsilon \cos \alpha_0}$$

を満たす  $\alpha_0$  を考えると、 $\alpha$  座標系では  $\alpha_0$  が入口に対応する。よって、式(9)において  $\alpha = \alpha_0$  とすれば、入口静圧 ( $p_{in}$ ) の式として

$$p_{in} = \frac{12\mu R}{c^2} \left\{ \frac{U}{2} \frac{\alpha_0 - \varepsilon \sin \alpha_0}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} - \frac{Q}{Wc} \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \times \left( \alpha_0 - 2\varepsilon \sin \alpha_0 + \frac{\varepsilon^2}{2} \alpha_0 + \frac{\varepsilon^2}{4} \sin 2\alpha_0 \right) \right\} + C$$

を得る。この入口静圧を式(9)に代入して、 $C$  を消去すれば、周方向静圧分布式として

$$p - p_{in} = \frac{12\mu R}{c^2} \left[ \frac{U}{2} \frac{\alpha - \alpha_0 - \varepsilon(\sin \alpha - \sin \alpha_0)}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} - \frac{Q}{Wc} \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \left\{ \left( 1 + \frac{\varepsilon^2}{2} \right) (\alpha - \alpha_0) - 2\varepsilon(\sin \alpha - \sin \alpha_0) + \frac{\varepsilon^2}{4} (\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_0) \right\} \right] \quad (10)$$

を得る。

ここで、Yokota ら<sup>(14)</sup>の次元解析に基づき、

$$\text{流量係数: } \phi = Q / (\pi DWU),$$

$$\text{周方向静圧分布圧力係数: } P = (p - p_{in}) / (\rho U^2 / 2),$$

$$\text{Reynolds 数: } Re = \rho DU / \mu,$$

( $D$  はロータ直径) を導入して、式(10)を無次元化すると、無次元静圧分布式として、

$$P \cdot Re = \frac{6}{\delta^2} \left[ \frac{\alpha - \alpha_0 - \varepsilon(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0)}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} - \frac{2\pi\phi}{\delta} \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \left\{ \left( 1 + \frac{\varepsilon^2}{2} \right) (\alpha - \alpha_0) - 2\varepsilon(\sin \alpha - \sin \alpha_0) + \frac{\varepsilon^2}{4} (\sin 2\alpha - \sin 2\alpha_0) \right\} \right] \quad (11)$$

を得る ( $\delta = c/D$  は隙間係数)。

次に、出口については、式(8)において、

$$1 + \varepsilon \cos(\theta_0 - \Delta\theta/2) = \frac{1 - \varepsilon^2}{1 - \varepsilon \cos \alpha_1}$$

を満たす  $\alpha_1$  を考えると、 $\alpha$  座標系では  $\alpha_1$  が出口に対応する。従って式(11)において  $\alpha = \alpha_1$  とし、

$$\text{ポンプ圧力特性の圧力係数: } \psi = \frac{P_{out} - P_{in}}{\frac{1}{2} \rho U^2},$$

を用いれば、入口出口の静圧差の式として、

$$\psi Re = \frac{6}{\delta^2} \left[ \frac{\alpha_1 - \alpha_0 - \varepsilon(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0)}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} - \frac{2\pi\phi}{\delta} \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \left\{ \left( 1 + \frac{\varepsilon^2}{2} \right) (\alpha_1 - \alpha_0) - 2\varepsilon(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0) + \frac{\varepsilon^2}{4} (\sin 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_0) \right\} \right] \quad (12)$$

を得る。これが本  $\mu$  ポンプの理論圧力特性式である。

先に、周期境界条件を用いる事が出来ないと言った。しかし、それ以降の過程から分かる様に、むしろ周期境界を用いない事によって流量  $Q$  を独立変数として扱う事が可能とし、その結果として式(9)から理論圧力特性式を導出した事が、本研究における理論解析の要点である。

ところで圧力に関しては、 $\rho v^2 / D^2$  で無次元化する研究者<sup>(10-12)</sup>、

$\mu U / D$  で無次元化する研究者<sup>(13)</sup>、有次元扱いの研究者<sup>(16,17)</sup>などが現れ、統一的に扱われていない。しかし Yokota ら<sup>(14)</sup>は、粘性ポンプの圧力特性に関しては、一般的なポンプの圧力係数  $\psi$  でなく、 $\psi$  と  $Re$  の積である新しい圧力係数  $\psi Re$  で整理すれば、任意の粘性  $\mu$  ポンプの圧力特性を  $\phi - \psi Re$  で統一的に扱える事を次元解析により示した。式(12)は、この結果を裏付ける1つの例と言える。

ここで、最も簡単な隔壁幅ゼロの場合を考えると、 $\alpha_1 = \alpha_0 + 2\pi$  なので、無次元の理論圧力特性式は、

$$\psi Re = \frac{12\pi}{\delta^2} \left( \frac{1}{(1 - \varepsilon^2)^{3/2}} - \frac{\pi(2 + \varepsilon^2)}{\delta(1 - \varepsilon^2)^{5/2}} \phi \right) \quad (13)$$

と簡単な式となる。

さらに以下にスパイラル粘性ポンプの解析方法を示す。Kilani らはスパイラル流路を直線流路とみなし、低 Re 近似により圧力特性と圧力分布を解析している。一方、Yokota(2)らはスクリュウ型粘性マイクロポンプの性能予測解析に圧力損失に関する擬似三次元解析手法を取り入れることで、簡便に良好な結果が得られることを示している。本研究ではKilaniらの理論解析にYokotaらの手法を取り入れ、さらに圧力係数を $\psi$ Re及び $\psi P^*$ により表す。式(1)に性能予測式、式(2)に無次元圧力分布式を示す。

$$\varphi \text{Re} = \frac{12r_m^3}{kwh} (1 - \alpha^2) \left\{ \frac{w}{4h} (1 + \alpha) - r_m^2 \pi \phi \left( \frac{1}{h^2} + \frac{1}{w^2} \right) \right\} \quad (14)$$

$$P^* \text{Re} = \frac{3r_m^3}{kh^2} (1 + \alpha) (1 - \alpha^2) \left\{ x^* + \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} - \frac{2r_m^2 \pi \phi (w^2 + h^2)}{hw^3 (1 - \alpha)} \right\}^2 - \frac{3r_m^3}{kh^2} (1 + \alpha) (1 - \alpha^2) \left\{ \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} - \frac{2r_m^2 \pi \phi (w^2 + h^2)}{hw^3 (1 - \alpha)} \right\}^2 + P_0^* \quad (15)$$

## 5. 実験方法

図4に本研究で用いた実験システムの全体図を示す。装置は上下流のタンク、ポンプ部分で構成されている。作動流体はグリセリン水溶液を用いた。ロータはモータ（オリエンタルモータ、MSD590-502CU、出力90W、ギア無し回転数90~1700rpm、最小回転数約10rpm、減速比1/180のギア付きで回転数0.50~944rpm、最小回転数約0.0556rpm）により駆動される。上流タンクにおいて単一筒形回転粘度計（リオン株式会社VT04E、測定可能範囲0~13 Pa・s、最小読み取り値0.01 Pa・s）を用いて実験開始前に粘度測定を行った。ポンプ上下流の圧力差は微差圧計（etta社L PX9381、測定可能範囲5000~5000 Pa、最小読み取り値5 Pa）により測定した。また下流タンクから流出したグリセリンの重量を電子天秤（株式会社島津製作所UW-6200H、測定可能範囲0~6200 g、最小目盛り0.01 g）により測定し、重量法より流量を算出した。微差圧計と電子天秤からの出力をパソコンに取り込み自動計測を行った。図5に、本 $\mu$ ポンプのcmスケールポンプモデルを示す。ロータ直径 $D=30.0\text{mm}$ 、シリンダ直径 $D+2c=32.0\text{mm}$ （隙間係数 $\delta=1/30=0.033$ ）、隔壁幅 $4.0\text{mm}$ 、ロータ軸方向長さ $W=30.2\text{mm}$ である。なお、ロータ両端の漏れ流れを最小とする為、ロータ両端には直径 $30.0\text{mm}$ 、厚さ $0.1\text{mm}$ の円形テフロンシートを貼り付け、側壁を研磨させて回転させた。本来、図5に示すB,Cがポンプ入口、出口（理論ではその様扱っている）であり、この2点間の圧力差を計測すべきであるが、B,Cでは流路幅が狭く測定孔を設けるのが困難である事、B,Cはロータに近くロータ回転による動圧の影響が大きき、正確な静圧を計測する事が困難である事等から、入口上流、出口下流の拡大部（整流部としても機能する）を設け、そこ（図5のA,D）で圧力差を計測した。実験で際しては、グリセリンの粘度を測定し、想定するReynolds数となる様にモータの回転数を設定して圧力特性を計測した。

一方、スパイラル粘性マイクロポンプの相似モデルポンプはスパイラル状に溝が形成されている静止円板と回転円板より構成されている。作動流体はグリセリン水溶液を用い、Re数は円板回転数とグリセリン濃度により調整した。ポンプ入口と出口の圧力差並びに流路内圧力分布

は微差圧計及びマノメータで計測した。また流量は下流側タンクから流出したグリセリンの重量を電子天秤により測定することにより、重量法で算出した。スパイラルポンプの流路を図3に示す。

本実験の流路は4巻、 $\Delta\theta=8\pi$ 、内外径比は $a=0.4$ である。

## 6. 数値シミュレーション

数値シミュレーションでは、支配方程式として、連続の式と3次元非圧縮NS方程式を採用した。圧力場と速度場の連成解法には、SIMPLE(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation)を用いた。なお、低Re流れなので乱流モデルは使用していない。

流れ場は、厚み方向（ロータ軸方向）の中央断面に関する対称性を考慮して、厚み方向サイズをポンプモデルの半分とし、対称面上で対称条件を、壁面上に滑り無し条件を課した。格子数は、格子依存性が無くなるまで細かくし、最終的には主流方向920点、流路幅方向20点、厚み方向25点の計約46万点を採用した。

また、スパイラルマイクロポンプの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 [(株)ソフトウェアアクレイドル]を用いた。本研究では層流・三次元非圧縮粘性流れを仮定して流れ場の解析を行った。境界条件として入口境界では流速を与え、出口境界では圧力一定条件を課した。静止円板の流路壁面ではNo-Slip条件を適用し、回転円板上では流速を与えた。なお、計算グリッド数は250万程度である。

## 7. 二重円筒型粘性 $\mu$ ポンプに関する結果と考察

7.1 モデル実験と数値シミュレーションの比較 図6に、隙間係数 $\delta=0.033$ 、偏心率 $\epsilon=0$ 、Reynolds数 $Re=1.0$ の場合のモデル実験と数値シミュレーションの結果（図5のAD間圧力差）を示す。モデル実験と数値シミュレーションは定量的に一致しており、数値シミュレーションに定量的な信頼性があると言える。

ところで理論圧力特性式は、図5のBC間圧力差を与える。一方モデル実験では（前述の様にBC間圧力差を計測する事が困難なため）図5のAD間圧力差を計測している。モデル実験と理論圧力性能を比較する為、図6により信頼性が確認された数値シミュレーションによって、AB間・CD間の圧力損失を算出し、実験結果はこの圧力損失を加えて、実験におけるBC間圧力差、即ちポンプ圧力性能（厳密には推定値）とした。

7.2 理論解析、モデル実験、数値シミュレーションの比較 図7に、隙間係数 $\delta=0.033$ 、偏心率 $\epsilon=0$ 、Reynolds数 $Re=1.0$ の場合の理論圧力特性式（ $\Delta\theta=15^\circ$ ）、モデル実験、数値シミュレーションの圧力性能（図5のBC間圧力差）を示す。なお、隔壁幅 $4.0\text{mm}$ は $\Delta\theta=15.3^\circ$ に相当するので、理論圧力特性式では $\Delta\theta=15^\circ$ とした。理論圧力性能線はモデル実験、数値シミュレーションに定量的に一致しており、理論圧力特性式で定量的な信頼性が確認されたと言える。

更に、図7には $\Delta\theta=0^\circ$ の理論圧力性能線を併せて図示している。ゼロ流量圧力 $\psi Re_0$ （ $\psi$ 切片）に関して、 $\Delta\theta=15^\circ$ は $\Delta\theta=0^\circ$ に比べて約42%低下していた。 $\Delta\theta=15^\circ$ は1周に対して約42%なので、式(6)から分かる様に、隙間幅 $h$ が一定の場合、隔壁幅による周方向長さの減少に比例して圧力性能



能が低くなる。また本ポンプモデルの様に、隔壁位置がロータ直径に比べ大きい場合でも、圧力性能の低下は比較的小さいと言える。図8に、偏心率  $\varepsilon = 0.35$  の場合の理論圧力特性式、モデル実験、数値シミュレーションの圧力性能を示す ( $\delta = 0.033, Re = 1.0, \Delta\theta = 15^\circ, \theta_0 = 0^\circ$ )。3者とも定量的に一致しており、偏心させた場合でも3者共に定量的な調和性があると言える。図9に、 Reynolds 数  $Re = 0.5, 3.3$  の場合の理論圧力特性式、モデル実験の圧力性能を示す ( $\delta = 0.033, \varepsilon = 0, \Delta\theta = 15^\circ$ )。当然、理論圧力性能線は  $Re = 1.0$  の場合と同一の直線である。実験結果は  $Re$  依存性なく、実験と理論圧力性能線は定量的にほぼ一致している。従って、理論圧力特性式は定量的な調和性があると言える。

**7・3 3次元性の影響** 図7～図9のモデル実験および数値シミュレーションは3次元流れである。特に、ロータ端壁(静止壁)の影響を含んでいる。

しかしこれら2つの結果が、2次元理論解析の結果である理論圧力特性式で定量的に一致していることから3次元性の影響(ロータ軸方向分布)は小さいと言える。図7～図9により理論圧力特性式で定量的な調和性が確認されたので、以下では、理論圧力特性式に基づいて、本μポンプの圧力特性を論じる事とする。

**7・4 隔壁位置の影響** 図8において、 $\Delta\theta = 0^\circ$  と  $\Delta\theta = 15^\circ$  のゼロ流量圧力  $\psi Re_0$  は、 $\Delta\theta = 15^\circ$  は  $\Delta\theta = 0^\circ$  に比べて約19%低下していた。この図8 ( $\theta_0 = 0^\circ$ ) における隔壁による圧力性能低下率19%は、図7 ( $\theta_0 = 0^\circ$ ) における圧力性能低下率4.2%より小さい。ところで、式(6)から分かる様に、隙間幅  $h$  が大きい位置での圧力分布は小さく、図8の場合、その圧力分布が小さい区間で隔壁を設けている為に、圧力性能低下が抑えられたと考えられる。これを確かめる為に  $\theta_0$  を変化させた。

図10に  $\theta_0 = 90, 180^\circ$  の場合の理論圧力性能を示す ( $\varepsilon = 0.5$ )。なお  $180^\circ < \theta_0 < 360^\circ$  の結果は、 $x$  軸に関して対称な場合の結果と一致する。図10からゼロ流量圧力  $\psi Re_0$  は、 $\theta_0 = 0^\circ$  で最大、 $\theta_0 = 180^\circ$  で最小である事が確認出来る。この結果に基づき、隙間幅  $h$  が隔壁の反対側で最も狭くなる様に設計あるいは組み立てを行なう事が圧力性能にとって重要であると言える。ただし、最適な状態は極大点であるから、多少ずれても圧力の低下は小さい。組み立ての容易さの観点から、この特性は本μポンプの特長と言える。この様に  $\theta_0 = 0^\circ$  が最適状態であり、且つ、図7、図8で示した様に、 $\theta_0 = 0^\circ$  での隔壁位置  $\Delta\theta$  の影響が小さい事から、以下では、 $\Delta\theta = 0^\circ$  の場合の理論圧力特性式である式(13)を用いて、本μポンプの圧力特性を調査する。なお式(13)は  $\alpha_0$  を含んでいないので、図10の結果と異なり、圧力特性は隔壁位置  $\alpha_0$  に依存しない。

**7・5 隙間係数・偏心率の影響** ここでは、本粘性ポンプの高圧力化に対する隙間係数と偏心率の影響を調べる。ところで、Yokota ら<sup>(44)</sup>は幾何学的に相似な粘性ポンプが発生する実圧力(有次元圧力)は  $\psi Re \times \mu \omega / 4$  で与えられ、ポンプサイズ(スケール)に寄らない事を示した。即ち、新しい圧力係数  $\psi Re$  を大きくする事は、無次元圧力の高圧力化を意味するだけでなく、実圧力の高圧力化をも意味する。

図11に隙間係数  $\delta = 0.02, 0.033, 0.05, 0.1$  の場合の理論圧力性能線を示す ( $\varepsilon = 0$ )。  $\delta$  が0に近づく、ゼロ流量圧力  $\psi Re_0$  は増加し、ゼロ圧力流量  $\phi_0$  (x切片) は減少している。従って  $\delta$  を0に近づければ本粘性ポンプの高圧力化が可能である(ただし流量の低下も招く)。

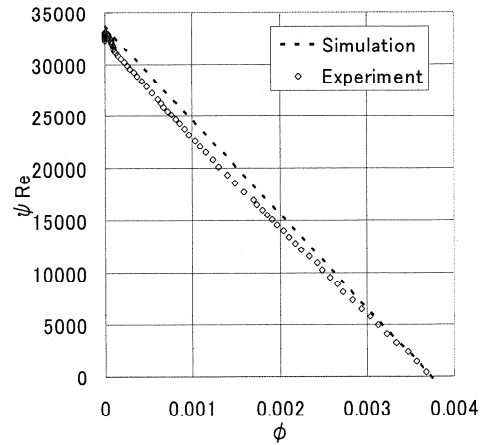


Fig. 6 Pressure differences between A and D in Fig. 4. ( $\delta = 0.033, \varepsilon = 0$  and  $Re = 1.0$ .)

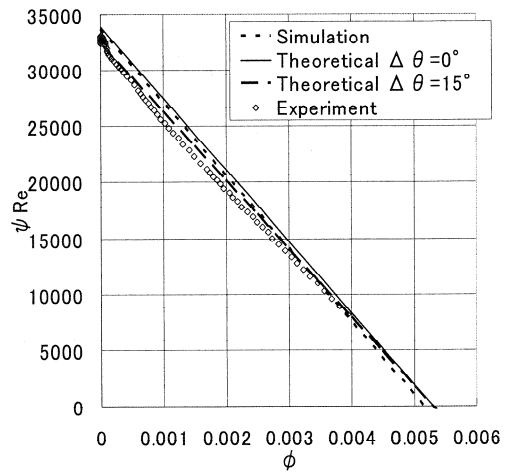


Fig. 7 Pressure performance. ( $\delta = 0.033, \varepsilon = 0, Re = 1.0$  and  $\Delta\theta = 15^\circ$ .)

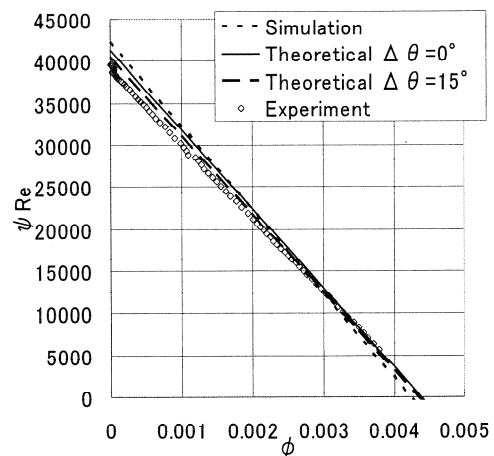


Fig. 8 Pressure performance. ( $\delta = 0.033, \varepsilon = 0.35, Re = 1.0, \Delta\theta = 15^\circ$  and  $\theta_0 = 0^\circ$ .)

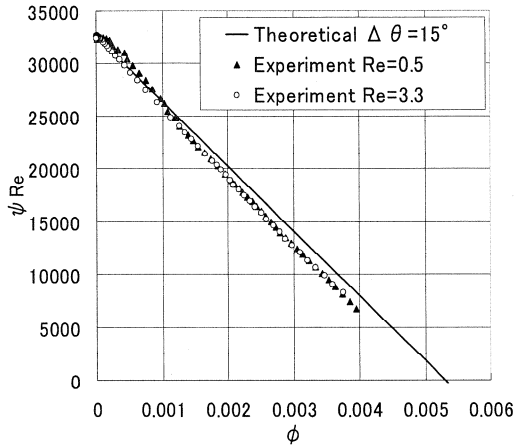


Fig.9 Dependence of pressure characteristics on  $Re$ .  
( $\delta=0.033$  and  $\varepsilon=0$ .)

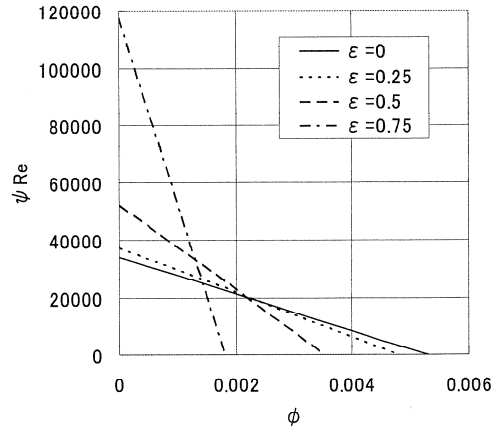


Fig.12 Dependence of pressure characteristics on  $\varepsilon$ .  
( $\delta=0.033$ .)

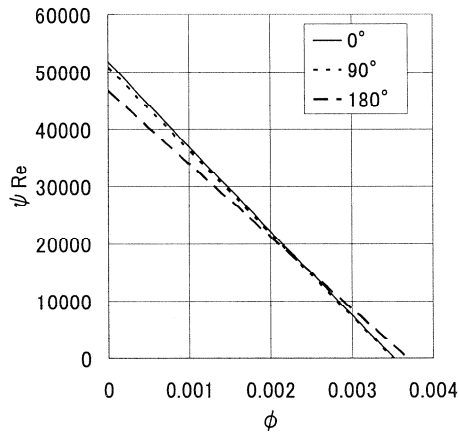


Fig.10 Dependence of pressure characteristics on  $\phi$ .  
( $\delta=0.033$  and  $\varepsilon=0.5$ .)

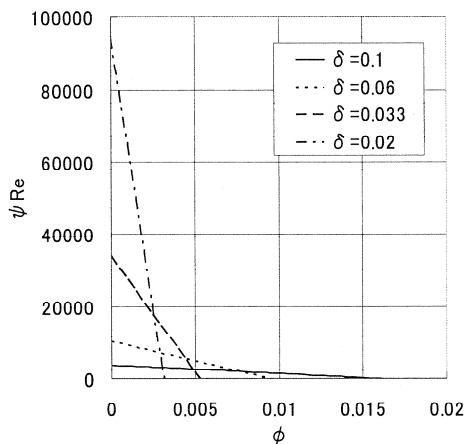


Fig.11 Dependence of pressure characteristics on  $\delta$ .  
( $\varepsilon=0$ .)

図12に偏心率 $\varepsilon=0, 0.25, 0.5, 0.75$ の場合の理論圧力性能線を示す( $\delta=0.033$ ).  $\varepsilon$ が1に近づくと、(図11と同様)  $\psi Re_0$ は増加し、 $\phi_0$ は減少している。従って $\varepsilon$ を1に近づければ本粘性ポンプの高圧化が可能である(ただし流量の低下も招く)。次に、ゼロ流量圧力 $\psi Re_0$ の挙動と、それに付随したゼロ圧力流量 $\phi_0$ の挙動を数理的に検討する。まず、式(13)で $\psi Re = 0, \phi = 0$ と置けば、ゼロ圧力流量 $\phi_0$ 、ゼロ流量圧力 $\psi Re_0$ として、それぞれ

$$\phi_0 = \frac{\delta(1-\varepsilon^2)}{\pi(2+\varepsilon^2)}, \quad \psi Re_0 = \frac{12\pi}{\delta^2(1-\varepsilon^2)^{3/2}} \quad (14)$$

を得る。ここで、 $\delta \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow 1$ の時、 $\psi Re_0$ が大きくなるから、 $\varepsilon = 1 - \varepsilon^*$ と置いて、 $\delta \rightarrow 0, \varepsilon^* \rightarrow 0$ の挙動を調べる。式(14)に $\varepsilon = 1 - \varepsilon^*$ を代入し、 $\varepsilon^*$ の最低次数の項のみ考えると

$$\phi_0 = \frac{2}{3\pi} \delta \varepsilon^*, \quad \psi Re_0 = \frac{6\pi}{\sqrt{2} \delta^2 \varepsilon^{*3/2}} \quad (15)$$

を得る。

式(15)を見ると、 $\delta \rightarrow 0, \varepsilon^* \rightarrow 0$ の時、 $\phi_0$ は $\delta, \varepsilon^*$ に関して共に1次関数的に減少するのに対し、 $\psi Re_0$ は-2次、-1.5次で発散する(即ち急速に高圧化出来る)事が分かる。換言すれば、 $\delta \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow 1$ の時、低流量化効果よりも、高圧化効果の方が極めて大きいと言える。また低流量化効果に対して $\delta, \varepsilon$ の寄与は同程度であり、高圧化効果に対しては $\delta$ の方が $\varepsilon$ よりも寄与が大きい事も分かる。この様に、低流量化効果が、高圧化効果に比べて抑えられると言う特性から、ロータ厚みを増加させる事によって、ゼロ圧力流量の低下をある程度補える事が期待出来る。

**7・6 他の粘性ポンプとの比較** ここでは、他の粘性ポンプとの比較を試みる。ただし、例えば本ポンプの偏心率というパラメータは他の粘性ポンプには無い、また形式が異なると理論的な流量係数の定義式が異なる等、粘性ポンプであっても形式の異なるものを比較する事は極めて困難である。

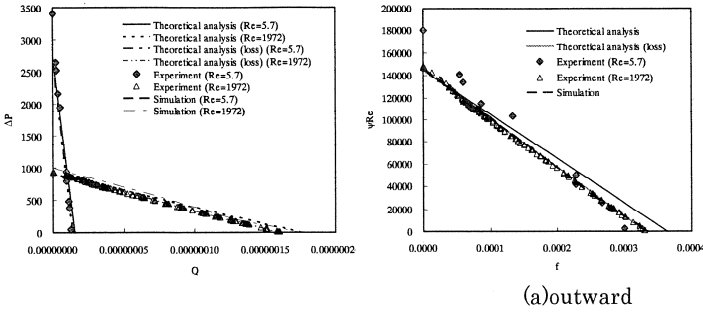


Fig.13 Pressure performance (outward)

Fig.14 Pressure performance based on  $\phi$  and (a)outward

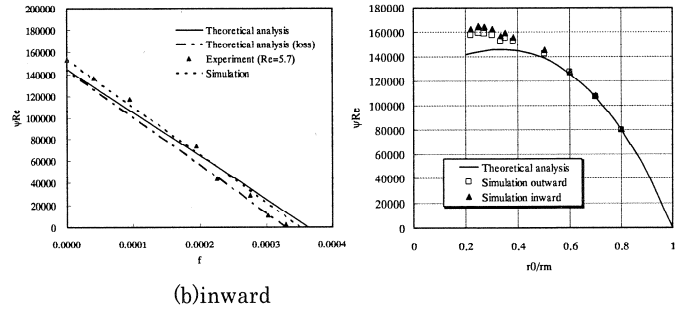


Fig.15 Dependence of pressure performance on  $\alpha$  for  $\phi=0$  based on  $\psi Re$  (b)inward

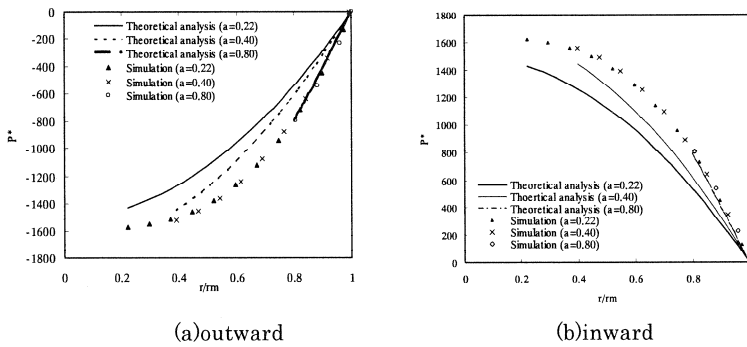


Fig.16 Pressure distribution (Re=100)

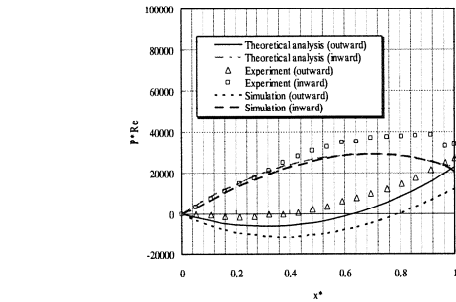


Fig.17 Pressure distribution based on  $x^*$  and  $P^*Re$  ( $\phi=0.000306$ )

そこで、各粘性ポンプの理論式において共通なパラメータのみとなる様に (共通で無いパラメータが理論式から消える様) に、且つ流量係数が同形式となる様に、適当な値を代入して (例えば  $\epsilon = 0, W = D$  等) 式変形する。すると、理論圧力特性係数  $\delta$  のみの式となる。これに基づき、ゼロ圧力流量  $\phi_0$  (これを流量性能と見なす)、ゼロ流量圧力  $\psi Re_0$  (これを圧力性能と見なす) を比較する事とする。

結果は、参考文献(16)(17)、及び本粘性ポンプでは

$$\phi_0^* = \delta / 2\pi, \psi Re_0^* = 12\pi / \delta^2 \quad (16)$$

参考文献(9)~(15)の粘性ポンプでは

$$\phi_0^{**} = 2\delta / 3\pi, \psi Re_0^{**} = 6\pi / \delta^{3/2} \quad (17)$$

となる。また式(17)に対する式(16)の比は

$$\phi_0^* / \phi_0^{**} = 3/4, \psi Re_0^* / \psi Re_0^{**} = 2 / \delta^{1/2} \quad (18)$$

である。

式(16)~(18)から、本粘性ポンプの流量・圧力性能は参考文献(16)(17)の粘性ポンプと同程度であり、参考文献(9)~(15)の粘性ポンプの0.75倍の流量性能  $2 / \delta^{1/2}$  倍 (例えば本実験値  $\delta = 1/30$  を代入すれば11倍) の圧力性能である事が分かる。ここで、参考文献(16)(17)の粘性ポンプは、流量性能が最も低い種類に属し、圧力性能が最も高い種類に属するので、本粘性ポンプも同様であると言える。

ただし、参考文献(16)(17)の粘性ポンプには実流量を増加させるパラメータは存在しないが、本粘性ポンプではロータ軸方向長さ  $W$  により実流量を増加させることが可能である。また、参考文献(16)(17)の粘性ポンプでは偏心率  $\epsilon$  とは異なる他の高圧化パラメータが存在するが、 $\epsilon$  による高圧化の効果はそれらのパラメータより効果が高い、これらの事から、本粘性ポンプは、他の粘性ポンプに対して、流量性能、圧力性能ともに優位にあると言える。

## 8. スパイラル粘性μポンプに関する結果と考察

本研究では  $k=0.00075$  の結果について報告する。図13に  $Re=5.7, 1972$  で外向き流れ (内側に入口、外側に出口を配置) の場合の性能曲線 ( $\phi - \psi$  線図) を示す。実験結果、解析結果、数値シミュレーション結果はいずれも他の粘性ポンプと同様、右下がりの直線ひょうており、僅かな差異はあるものの定量的にも一致している。  $Re$  が大きくなると変配 (絶対値) が小さくなる事が分かる。図14にポンプ性能を  $\phi$  と  $\psi Re$  で整理した結果を示す。作動流体が(a)は図13に対応し外向き流れで、(b)は内向き流れ (外側に入口、内側に出口を配置) の場合である。(a)では2種類の  $Re$  数 ( $Re=5.7$  ( $\omega=0.42$ [rad/s],  $\mu=0.09$ [Pa·s]),  $Re=1972$  ( $\omega=5.03$ [rad/s],  $\mu=0.0025$ [Pa·s])) を記しているが、 $\psi Re$  で整理するとほぼ1本の直線となり、Yokotaらの粘性ポンプ評価方法はスパイラル粘性マイクロポンプにも適用できることが確認された。  $Re=5.7$  の実験値は  $Re=1972$  の場合に比べて理論線からの差異が大きくなっているが、この原因として、低レ

イノルズ数を実現するためにはグリセリン濃度を高くせざるを得ず、そのためグリセリンの温度依存性で起因する粘性係数変化や粘度計測などの誤差が考えられる。実験値、数値シミュレーション、損失を考慮した理論解析は良好に一致しており、本ポンプにおいても擬似三次元解析による損失評価方法が妥当であることがわかる。(b)  $Re=5.7$  の内向き方向流れの結果を(a)と比較すると、両者のポンプ性能の違いは認められない。このことは粘性ポンプ性能での遠心力の寄与は極めて小さいことを意味している。

図15は $\phi=0$ で $\psi Re$ に及ぼす内外径比 $\alpha$ の影響である。ラインは理論解析、プロット点はシミュレーション結果である。なお、遠心力を考慮していない本理論解析では、外向き流れと内向き流れの解が一致する。 $\phi=0$ の解析解は $\psi Re=3r_m^3(1+\alpha)^2(1-\alpha)(kh^2)$ で表され、本研究では $\alpha=0.33$ で極大値をとるのに対して、数値シミュレーションでは $\alpha$ が小さくなるほど圧力差が大きくなる。 $\alpha \leq 0.5$ では理論解析と数値シミュレーションとに差異が生じ、 $\alpha$ が小さくなるほど差が大きくなっている。これは理論解析において流路角直線の二次元流れを仮定しているにも関わらず、半径が小さい領域では曲率が大きくなり流路内で三次元流れが支配的になることが考えられる。したがって、 $\phi=0$ での吐出圧という点では内外径比 $\alpha$ が小さくするほど、高性能なポンプが実現可能であると言える。

図16に $\phi=0$ の場合に流路内の圧力分布を示す。横軸は無次元半径位置、縦軸は出口圧力を基準( $P^*=0$ )にした流路内の無次元圧力である。(a)は外向き流れ、(b)は内向き流れの場合である。(a)では下に凸、(b)では上に凸の曲線になっていることがわかる。(a)、(b)ともに3つの $\alpha$ に対して理論解析結果は3つの曲線になっているが、数値シミュレーション結果は1本の曲線上に分布していることがわかる。

図17は $\phi=0.000306$ の場合の無次元圧力分布である。前図同様、外向き流れでは下に凸、内向き流れでは上に凸の曲線形状になっている。また、この流量係数では圧力分布に極大値、極小値が存在する。実用上の問題を考えると、例えば気泡が混入するケースは容易に起こり得ることで、このような状況ではポンプ流路内に低圧部が存在することは好ましくない。

したがって、この点についてはスパイラル粘性ポンプでは内向きに流れるよう設計することが望まれる。

## 9. 結 論

本研究では、二重円筒流れを用いた粘性マイクロポンプを考案し、その性能と特性の解明を行った。さらにスパイラル粘性マイクロポンプの特性解明を目的として、センチスケールモデルポンプを製作し、実験を行った。また、理論解析、数値シミュレーションを実行し、実験結果と比較検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 新しい粘性マイクロポンプを提案した。
- (2) 提案した粘性マイクロポンプの理論圧力特性式を導出し、その定量的な信頼性をモデル実験・3次元数値シミュレーションにより確認した。
- (3) 隙間係数を0に、あるいは偏心率を1に近づける事によって、ゼロ圧力流量は減少し、ゼロ流量圧力は増加する。また、ゼロ圧力流量の減少よりも、ゼロ

流量圧力の増加の方が著しい。更に、隙間係数を0に近づける方が、偏心率を1に近づけるよりも、ゼロ流量圧力の増加が著しい。

- (4) 提案した粘性マイクロポンプを設計する際には、導出した理論圧力特性式が有効である。
- (5) 提案した粘性マイクロポンプは、ゼロ圧力流量は最も小さい部類に属し、ゼロ流量圧力は最も大きい部類に属する。しかし、ロータ軸方向長さや偏心率の存在により、実流量と実圧力を更に調整できる点で優位性がある。
- (6) スパイラル粘性マイクロポンプの性能特性は $\phi$ と $\psi Re$ で整理可能で実験、圧力損失を考慮した理論解析、数値シミュレーション結果は良好に一致した。
- (7) 流路内の圧力分布を検証することにより、本理論解析方法は内外径比 $\alpha$ が大きいほど有効であることを示した。
- (8) スパイラル粘性マイクロポンプの昇圧過程で圧力は外向き流れでは下に凸、内向き流れでは上に凸の曲線形状になることを実験、理論解析、数値シミュレーションで示した。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、工学院大学大学院生 西浦由華君、江口直哉君、元名古屋工業大学大学院生 石黒文彦君の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) Park, J.H. et al., A Piezoelectric Micropump Using Resonance Drive with High Power Density, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series C, Vol. 65, No. 631 (1999), pp. 1071-1077.
- (2) Kondoh, Y. et al., A Peristaltic Motion Channel-Type Micro Pump with Bimorph-Type PZT Elements Alloy: Fabrication of Single Side-Type, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series C, Vol. 68, No. 666 (2002), pp. 643-649.
- (3) Yokota, S. et al., An SMA-Driven Micropump Using ECF Jet Cooling, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series C, Vol. 66, No. 650 (2000), pp. 3516-3522.
- (4) Hattori, S. et al., Structure and Mechanism of Micropump Using Thermoresponsive Polymer Actuator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series C, Vol. 58, No. 550 (1992), pp. 1868-1873.
- (5) Miyazaki, K. et al., Development of a Bubble Actuated Micro Pump,
- (6) *Turbomachinery*, (in Japanese), Vol. 29, No. 3 (2001), pp. 176-181.
- (7) Hosokawa, K. et al., Study of MHD (Magnetohydrodynamic) Micropump, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series C, Vol. 59, No. 557 (1993), pp. 205-210.

- (8) Hattori, S. et al., Structure and Mechanism of Microcapsule Pump Using Osmotic Pressure Actuator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series C, Vol. 58, No. 552 (1992), pp. 2483-2488.
- (9) Fujiwara, T., Kitoh, O., Basic Study for a Micro-Pump using Electroosmotic Flow, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series B, Vol. 68, No. 671 (2002), pp. 2071-2078.
- (10) Sen, M. et al., A Novel Pump for MEMS Applications, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118 (1996), pp. 624-627.
- (11) Sharatchandra, M.C. et al., Navier-Stokes Simulation of a Novel Viscous Pump, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119 (1997), pp. 372-383.
- (12) DeCourtye, D. et al., Analysis of Viscous Micropumps and Microturbines, *International Journal Computational Fluid Dynamics*, Vol. 10 (1998), pp. 13-25.
- (13) Abdelgawad, M., et al. (Numerical Investigation of Multistage Viscous Micropump Configurations, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127(2005), pp. 734-742.)
- (14) Day, R.F., and Stone, H. A., Lubrication analysis and boundary integral simulations of a viscous micropump, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 416 (2000), pp. 197-216.
- (15) Yokota, K. et al., Model Experiments, Numerical Simulation and Theoretical Analysis on the Characteristics of a Viscous Micropump Using a Cylindrical Rotor in a Rectangular Duct, *the Japan Society of Mechanical Engineers International Journal*, Series B, Vol. 49, No. 2 (2006), pp. 393-400.
- (16) Sakai, Y. et al., Influence of Duct Height on Flow Fields and Pressure Performances of a Viscous Micropump Model Using a Cylindrical Rotor in a Rectangular Duct, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, (in Japanese), Series B, Vol. 72, No. 718 (2006), pp. 1513-1521.
- (17) Kilani, M.I. et al., Design and Analysis of a Surface Micromachined Spiral-Channel Viscous Pump, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125 (2003), pp. 339-344.
- (18) Blanchard, D. et al. (Miniature Single-Disk Viscous Pump (Single-DVP), Performance Characterization, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128(2006), pp. 602-610.
- (19) Benard J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill, 1994.
- (20) Cooper, D., and Moore, A.J., Application of the ultra-thin elastohydrodynamic oil film thickness technique to the study of automotive engine oils, *Wear*, Vol. 175 (1994), pp. 93-105.
- (21) Gad-el-Hak, M. The fluid mechanics of microdevices - the Freeman scholar lecture, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 121(1999), pp. 5-33.
- (22) Matsuoka, H. and Kato, T., Discrete Nature of Ultrathin Lubrication Film Between Mica Surface, *Journal of Tribology*, Vol. 118(1996), pp. 832-838.
- (23) Thompson, P.A. and Troian, S.M., "A General Boundary Condition for Liquid Flow at Solid Surfaces," *Physical Review Letters*, Vol. 63(1997), pp. 766-769.
- (24) Sakai, Y. et al., Influences of Duct Height on Flow Field and Pressure Performances of a Viscous Micropump Model Using a Cylindrical Rotor in a Rectangular Duct, (in Japanese)
- (25) Yokota, K. et al., Experimental, Numerical and Theoretical Investigations on Characteristics of Screw-type Viscous Micropump
- (26) M.I. Kilani, et al., Design and Analysis of a Surface Micromachined Spiral-Channel Viscous Pump, *J. Fluids Eng.* 125 (2003) 339-344
- (27) M.I. Kilani, et al., Effect of Channel Aspect Ratio on the Flow Performance of a Spiral-Channel Viscous Micropump, *J. Fluids Eng.* 128 (2006) 618-627

## ① 発表論文

- (1) Model Experiment, Numerical Simulation and Theoretical Analysis on the Characteristics of a Viscous Micropump Using a Cylindrical Rotor in a Rectangular Duct, Kazuhiko YOKOTA, Kotaro SATO and Motoyuki ITOH, JSME International Journal, Series B, Vol. 49, No. 2, pp. 393-400, 2006
- (2) 液滴形成過程の高速度撮影, 佐藤光太郎, 廣瀬智水, 古屋興二, 可視化情報論文集, Vol.26, No.7, pp.62-68, 2006
- (3) 円柱を用いた粘性マイクロポンプモデルのポンプ性能と流路内流れに与える流路高さの影響, 酒井康隆, 牧正幸, 尾形慎太郎, 佐藤光太郎, 横田和彦, 伊藤基之, 日本機械学会論文集, B編, 第72巻, 第718号, pp. 1513-1521, 2006
- (4) 壁に設置されたゲートを用いた回転円柱粘性マイクロポンプの特性制御, 佐藤光太郎, 横田和彦, 尾形慎太郎, 酒井康隆, 伊藤基之, 日本機械学会論文集, B編, 第72巻, 第720号, pp. 1977-1983, 2006
- (5) 二重円筒流れを用いた新型粘性マイクロポンプの圧力特性に関する理論的, 実験的, 数値的研究, 横田和彦, 佐藤光太郎, 石黒文彦, 玉野真司, 伊藤基之, 日本機械学会論文集, B編, 第74巻, 第739号, pp.558-566, 2008

## ② 学会発表

- (1) 複数円柱を用いた粘性マイクロポンプに関する実験並びに数値シミュレーション, 片山雅大, 田口稔邦, 佐藤光太郎, 横田和彦, 伊藤基之, 日本機械学会鳥取講演会講演論文集, No.065-2, 83-84頁, 2006
- (2) スパイラル型粘性マイクロポンプの性能・特性解明, 田口稔邦, 片山雅大, 横田和彦, 佐藤光太郎, 玉野真司, 伊藤基之, 第85期 日本機械学会流体工学部門講演論文集 CD-ROM, 広島, 2007

## ③ 特許出願

なし



# 外科手術用マスタ・スレイブ型ロボット鉗子システムの構築に関する研究

工学院大学 グローバルエンジニアリング学部 石井千春  
 (現 芝浦工業大学 工学部)  
 産業技術大学院大学 創造技術専攻 橋本洋志

Study on Construction of Surgical Master-Slave Robotic forceps systems

Chiharu Ishii School of Global Engineering  
 (Shibaura Institute of Technology)  
 Hiroshi Hashimoto Advanced Institute of Industrial Technology

**ABSTRACT :** Recently, robotic surgical support systems are in clinical use for minimally invasive surgery. For improvement in operability of the minimally invasive surgery, development of haptic forceps teleoperation systems is required to help surgeon's immersion and dexterity. Besides, motion scaling function which can adequately reduce and enlarge a movement of the forceps against a surgeon's operation and a tactile sense to the surgeon under time delay, is necessary for safety. We have developed a multi-DOF robotic forceps manipulator using a novel omni-directional bending mechanism, so far. In this paper, such a passivity based bilateral control that enables motion scaling in both position tracking and force tracking is proposed for the developed robotic forceps teleoperation system with constant time delay. Experimental works were carried out and results showed the effectiveness of the proposed control scheme.

## 1. Introduction

Minimally invasive surgery has a characteristic that can reduce a burden of patients. However, it causes difficult operation for surgeons due to the inflexibility of surgical instruments. Therefore, development of surgical support devices with the application of robot technology is in demand [1]-[5]. Recently, robotic surgical support systems such as 'da VINCI' are in clinical use. We have developed a multi-DOF robotic forceps manipulator for minimally invasive surgery using a novel omni-directional bending mechanism with screw drive mechanism that we call double-screw-drive (DSD) mechanism, so far [6]. For improvement of operability in minimally invasive surgery, development of haptic forceps teleoperation systems is required to help surgeon's

immersion and dexterity. Most recently, haptic forceps manipulator for minimally invasive surgery has been proposed in [7]-[9], in which operation force is measured by force sensor and force feedback is provided.

On the other hand, a remote surgery experiment between Japan and Thailand using an internet is presented in [10]. In a remote teleoperation of robotic surgical support systems, time delay is inevitable. From the above viewpoints, motion scaling function which can adequately reduce and enlarge a movement of the forceps against a surgeon's operation and a tactile sense to the surgeon under time delay, is necessary for safety. [11] proposes a passivity based control scheme for bilateral teleoperation systems with constant time delay, in which delay dependent exponential stability of the



position and velocity tracking error is guaranteed. However, in [11] coupling torques are given as a function of position and velocity, and is not a function of force. Hence, motion scaling in force tracking cannot be achieved.

In this paper, improving a control scheme proposed in [11], such a passivity based bilateral control scheme for a teleoperation systems with time delay that enables motion scaling in both position tracking and force tracking is proposed. This can be achieved by adding force tracking error terms to the coupling torques. Besides, the joy-stick type master manipulator for teleoperation built in [6] is modified so that the operator can feel reaction force. Then, the proposed bilateral control scheme is applied to a haptic control of bending motion of the modified DSD forceps teleoperation system with constant time delay.

## 2. DSD robotic forceps

Overview of the developed DSD robotic forceps manipulator is shown in Fig. 1, and configuration of its bending part is shown in Fig. 2.



Fig. 1 Overview of DSD forceps manipulator

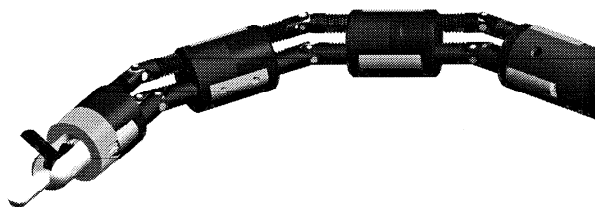


Fig. 2 DSD forceps manipulator

### 2. 1 Specifications

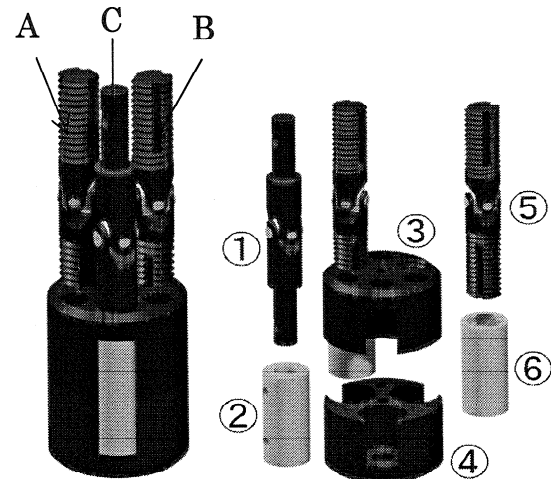
DSD mechanism has three linkages. Two are used to achieve omni-directional bending motion, and one is used to rotate a gripper. The opening and closing motions of the gripper is achieved by wire-driven. The main specifications of the DSD robotic forceps are described as follows.

1. Diameter of the forceps is 10 mm, which enables to insert the forceps into a trocar.
2. Bending power must be larger than 4 N, which enables the forceps to lift up 1/3 of liver.
3. Bending range is  $\pm 90$  degrees in horizontal and vertical direction, respectively.

4. The gripper can rotate arbitrarily.
5. In the grasping motion, only one side of the jaw can move. The other side of the jaw is fixed.

### 2. 2 Bending mechanism

One block of bending mechanism is shown in Fig. 3.



A and B: Bending linkage, C: Grasping linkage

- ① Universal joint shaft
- ② Coupling
- ③ Plate with left-handed screw hole
- ④ Plate with right-handed screw hole
- ⑤ Screwed universal joint
- ⑥ Spline shaft with bumped hole

Fig. 3 One block of DSD mechanism

Three linkages of the DSD mechanism are assigned on the circumference of a circle with diameter 6 mm by center angle of every 120 degrees. Let us call a group of ① and ② as “bending linkage” and a group of ⑤ and ⑥ as “grasping linkage”. Then, one side of the screwed universal joint is left-handed screw and the other side is right-handed screw, which also have such grooves that can accord with the shape of bumped penetration hole of the spline shaft. Thus, the screwed universal joint can transmit the rotation power to the spline shaft with translating inside of it. When another block of DSD mechanism is connected after one block, a joint is formed. Principle of the bending motion for one joint is illustrated in Fig. 4.

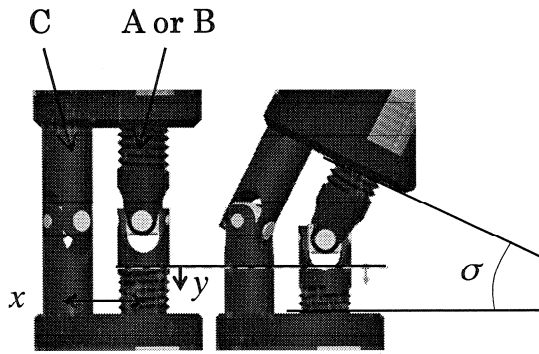


Fig. 4 Principle of bending motion

The left-handed screw of the screwed universal joint connects with the plate with left-handed screw hole, and the right-handed screw of the screwed universal joint connects with the plate with right-handed screw hole. The rotation of the linkage changes connecting length of screw and plate at both ends of universal joint. As a result, an inclination is occurred between the plates at both ends. For example, when the linkage rotates clockwise, the plates at both ends approach each other and when the linkage rotates counter clockwise, the plates at both ends part from each other. Thus, bending motion is achieved. The maximum bending angle of one joint is 30 degrees, since it is the allowable bending angle of the universal joint. One bending linkage enables bending motion in one direction, and using two bending linkages and controlling the amount of revolutions of them, arbitrary omni-directional bending motion is attained. The total length of the bending part is 59 mm excluding a gripper.

### 2. 3 Attachment and rotary gripper

The gripper is exchangeable to the other end effector such as scalpel or surgical knife. Fig. 5 shows the attachment of the end effector and mechanism of the rotary gripper. The gear 1 on the tip of the grasping linkage and the gear 2 in the root of the jaw bite each other, and the gripper is turned by rotation of the grasping linkage.

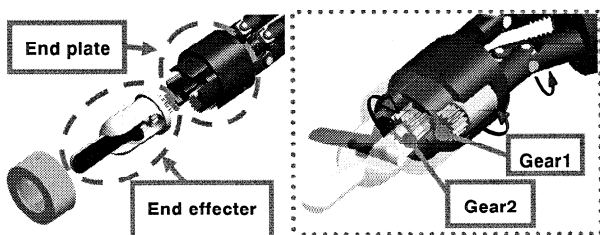


Fig. 5 Attachment and rotation of gripper

### 2. 4 Open and close of jaws

The opening and closing motions of the jaws are wire-driven. Only one side of the jaw can move. The other side of the jaw is fixed. The wire for the drive goes through inside of the forceps and is pulled by electric motor through friction pulley. The closing and opening states of the gripper are shown in Fig. 6.

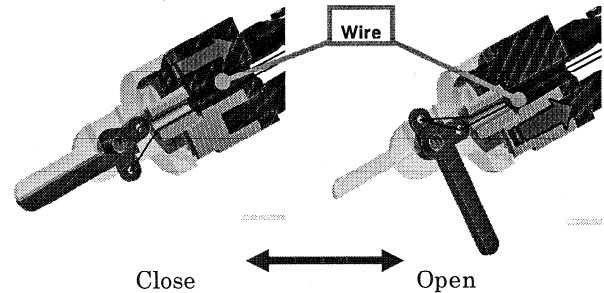


Fig. 6 Gripper

Although rotary gripper can rotate arbitrary degrees, it should be rotated within  $\pm 360$  degrees to avoid winding of the wire which drives the jaw. In fact, this is enough amounts in actual suture work.

### 2. 5 Drive unit

The feature of drive unit for the DSD forceps manipulator is shown in Fig. 7. Tail end of bending part and drive unit are connected by three rods, whose length is 300 mm and diameter is 3 mm. A gear mounted on the tail of the rod and a gear mounted on the tip of the driveshaft of the motor bite each other. Thus, driving power from the motor is transmitted to each rod. Those gears are assigned in spiral position respectively so as not to interfere each other. Three motors which transmit the driving power to the three rods through the gears are mounted in central position of drive unit. Two of them are for the bending motion and the rest is for the rotary motion of the gripper. The fourth motor is mounted in the tail for the opening and closing motions of the gripper driven by wire. DC micro motors 1727U012C (3.65W) made in FAULHABER Corp. are used for four motors in drive unit. Rotary encoder and deceleration gear are installed in each motor.

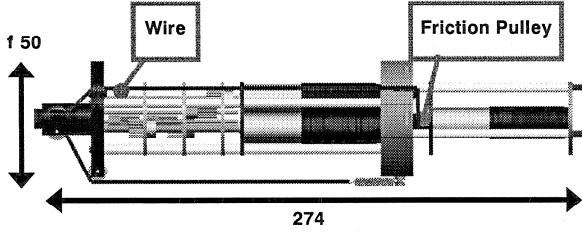


Fig. 7 Drive unit

## 2. 6 Prototype DSD robotic forceps

The built DSD forceps manipulator is shown in Fig. 8, which is made of stainless steel SUS303 to satisfy bio-compatibility. Its maximum diameter is 10 mm, and total length is 85 mm including the gripper. Transition chart of rotary gripper is shown in Fig. 9.

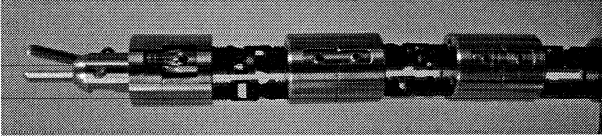


Fig. 8 Built DSD forceps manipulator

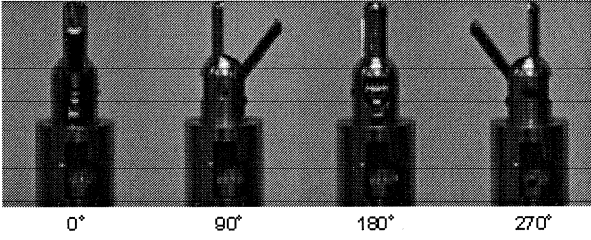


Fig. 9 Transition chart of rotary gripper

## 2. 7 Master manipulator for teleoperation

In a laparoscopic surgery, multi-DOF robotic forceps manipulators are operated by remote control. In order to control the DSD robotic forceps as a teleoperation system, in [6] joy-stick type master manipulator for teleoperation was designed and built by reconstruction of a ready-made joy-stick combined with conventional forceps, which enables to control bending, grasping and rotary motions of the DSD robotic forceps manipulator. Besides, the built joy-stick type master manipulator was modified so that the operator can feel reaction force generated by electric motors. The teleoperation system and force feedback mechanisms for bending force are illustrated in Fig. 10. Operation force is detected by strain gauges, and variation of position is measured by encoders mounted in electric motors.

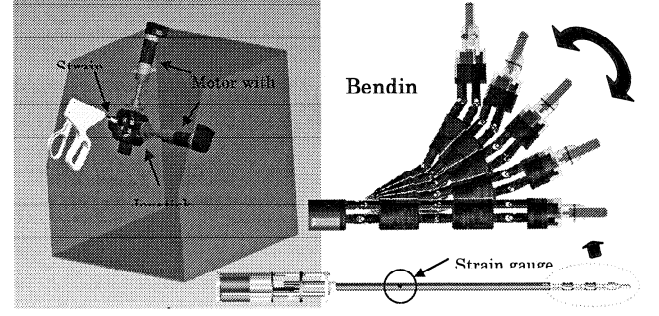


Fig. 10 Robotic forceps teleoperation system

## 3. Bilateral Control

Let the dynamics of the master-slave teleoperation system be given by

$$m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m + c_m x_m = \tau_m + f_m, \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + c_s x_s = \tau_s - f_s, \quad (2)$$

where subscripts  $m$  and  $s$  denote master and slave respectively.  $x_m$  and  $x_s$  represent the displacements,  $m_m$  and  $m_s$  the masses,  $b_m$  and  $b_s$  the viscous coefficients, and  $c_m$  and  $c_s$  the spring coefficients of the master and slave arms.  $f_m$  stands for the force applied to the master arm by human operator,  $f_s$  the force of the slave arm due to the mechanical interaction between slave arm and handling object, and  $\tau_m$  and  $\tau_s$  are input motor torques. There exists constant time delay  $T$  in the network between master and slave systems. Define motor torques as

$$\tau_m = \bar{\tau}_m - m_m \lambda \dot{x}_m - b_m \lambda x_m + c_m x_m, \quad (3)$$

$$\tau_s = \bar{\tau}_s - m_s \lambda \dot{x}_s - b_s \lambda x_s + c_s x_s, \quad (4)$$

where  $\lambda$  is a positive constant, and  $\bar{\tau}_m$  and  $\bar{\tau}_s$  are coupling torques. Then, the dynamics are rewritten as follows.

$$m_m \dot{r}_m + b_m r_m = \bar{\tau}_m + f_m, \quad (5)$$

$$m_s \dot{r}_s + b_s r_s = \bar{\tau}_s - f_s, \quad (6)$$

where  $r_m = \dot{x}_m + \lambda x_m$ ,  $r_s = \dot{x}_s + \lambda x_s$ . Let the

coupling torques be given by

$$\bar{\tau}_m = K_1 (G_p r_s(t-T) - r_m) - K_m (G_f f_s(t-T) - f_m), \quad (7)$$

$$\bar{\tau}_s = K_1 (r_m(t-T) - G_p r_s) + K_s (f_m(t-T) - G_f f_s), \quad (8)$$

where  $K_1$ ,  $K_m$  and  $K_s$  are feedback gains, and

$G_p \geq 1$  and  $G_f \geq 1$  are scaling gain for position

tracking and force tracking, respectively.

Assume that the human operator and the remote environment are delay independent passive. Then, the following inequalities hold.

$$-\int_0^t r_m f_m d\tau \geq 0, \quad \int_0^t r_s f_s d\tau \geq 0 \quad (9)$$

$$-\int_0^t r_s f_s (\tau - T) d\tau \geq 0, \quad \int_0^t r_m f_m (\tau - T) d\tau \geq 0 \quad (10)$$

Define a positive definite function as

$$\begin{aligned}
 V &= m_m r_m^2 + G_p m_s r_s^2 + K_1 \int_{t-T}^t (r_m^2 + G_p^2 r_s^2) d\tau \\
 &\quad - 2(K_m + 1) \int_0^t r_m f_m d\tau + 2G_p (G_f K_s + 1) \int_0^t r_s f_s d\tau \\
 &\quad - 2G_p K_s \int_0^t r_s f_m (\tau - T) d\tau + 2G_f K_m \int_0^t r_m f_s (\tau - T) d\tau.
 \end{aligned} \tag{11}$$

The derivative of  $V$  along trajectories of the system (5) and (6) is given by

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= 2m_m r_m \dot{r}_m + 2G_p m_s r_s \dot{r}_s + K_1 (r_m^2 + G_p^2 r_s^2) \\
 &\quad - K_1 (r_m^2 (t-T) + G_p^2 r_s^2 (t-T)) \\
 &\quad - 2(K_m + 1) r_m f_m + 2G_p (G_f K_s + 1) r_s f_s \\
 &\quad - 2G_p K_s r_s f_m (t-T) + 2G_f K_m r_m f_s (t-T) \\
 &= 2r_m (-b_m r_m + \bar{c}_m + f_m) + 2G_p r_s (-b_s r_s + \bar{c}_s - f_s) \\
 &\quad - K_1 (G_p r_s (t-T) - r_m) (G_p r_s (t-T) + r_m) \\
 &\quad - K_1 (r_m (t-T) - G_p r_s) (r_m (t-T) + G_p r_s) \\
 &\quad - 2(K_m + 1) r_m f_m + 2G_p (G_f K_s + 1) r_s f_s \\
 &\quad - 2G_p K_s r_s f_m (t-T) + 2G_f K_m r_m f_s (t-T).
 \end{aligned} \tag{12}$$

Using (7) and (8), (12) is rewritten as follows.

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -2b_m r_m^2 + 2r_m \bar{c}_m + 2r_m f_m \\
 &\quad - 2G_p b_s r_s^2 + 2G_p r_s \bar{c}_s - 2G_p r_s f_s \\
 &\quad + \left\{ \bar{c}_m + K_m (G_f f_s (t-T) - f_m) \right\} \\
 &\quad \times \left[ 2r_m + K_1^{-1} \left\{ \bar{c}_m + K_m (G_f f_s (t-T) - f_m) \right\} \right] \\
 &\quad - \left\{ \bar{c}_s - K_s (f_m (t-T) - G_f f_s) \right\} \\
 &\quad \times \left[ 2G_p r_s + K_1^{-1} \left\{ \bar{c}_s - K_s (f_m (t-T) - G_f f_s) \right\} \right] \\
 &\quad - 2(K_m + 1) r_m f_m + 2G_p (G_f K_s + 1) r_s f_s \\
 &\quad - 2G_p K_s r_s f_m (t-T) + 2G_f K_m r_m f_s (t-T) \\
 &= -2b_m r_m^2 - 2G_p b_s r_s^2 \\
 &\quad - K_1^{-1} \left\{ \bar{c}_m + K_m (G_f f_s (t-T) - f_m) \right\}^2 \\
 &\quad - K_1^{-1} \left\{ \bar{c}_s - K_s (f_m (t-T) - G_f f_s) \right\}^2 \\
 &\leq -K_1 (G_p r_s (t-T) - r_m)^2 - K_1 (r_m (t-T) - G_p r_s)^2.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Thus, delay independent exponential convergence of the tracking errors of position to the origin is guaranteed.

Finally, motor torques (3) and (4) are given as follows.

$$\begin{aligned}
 \tau_m &= K_1 G_p \dot{x}_s (t-T) + \lambda K_1 G_p x_s (t-T) - K_m G_f f_s (t-T) \\
 &\quad - (K_1 + \lambda m_m) \dot{x}_m + (c_m - \lambda (K_1 + b_m)) x_m + K_m f_m,
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_s &= K_1 \dot{x}_m (t-T) + \lambda K_1 x_m (t-T) + K_s f_m (t-T) \\
 &\quad - (K_1 G_p + \lambda m_s) \dot{x}_s + (c_s - \lambda (K_1 G_p + b_s)) x_s - K_s f_s.
 \end{aligned} \tag{15}$$

#### 4. Simulations

Simulation work was executed using the proposed bilateral controller under the conditions that

$T = 0.125$  and  $G_p = G_f = 2$ . In the simulation, it is assumed that spring force is imposed to a slave manipulator. Simulation results are shown in Fig. 11.

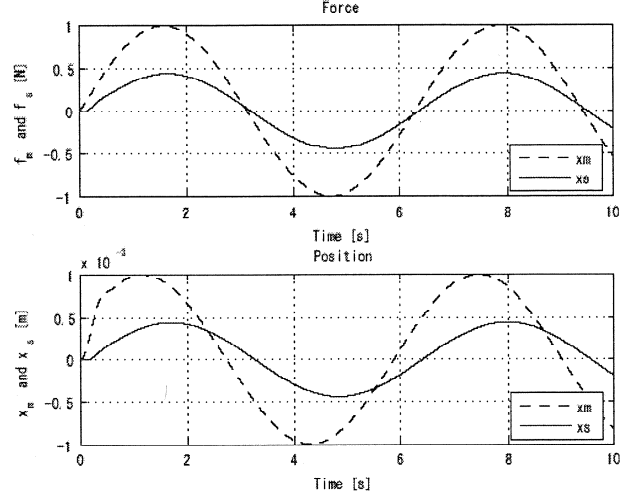


Fig. 11 Simulation results

From Fig. 11, it is verified that the motion of slave tracks the motion of master with half scale in both position tracking and force tracking.

#### 5. Experiments

Next, experimental works were carried out for the developed DSD robotic forceps teleoperation system. Here, only vertical direction of the bending motion is considered, namely bending motion of the DSD forceps is restricted to one degree of freedom. Then, dynamics of the master-slave teleoperation system are given by equations (1) and (2), since only one bending linkage is used. Parameter values of the system are given as  $m_m = 0.07$ ,  $m_s = 0.025$ ,

$$b_m = 0.25, b_s = 2.5, c_m = 9 \text{ and } c_s = 9.$$

DC micro motors 1727U012C (3.65W) produced by FAULHABER Corp. are used for four motors in drive unit. Rotary encoder and deceleration gear are mounted in each motor. Resolution of the encoder is 2048 pulses per revolutions. The gear ratio of the deceleration gear installed in the motor is 159:1, and the gear ratio between linkage and motor is 10:18. From these facts, the DSD forceps manipulator can be operated by an accuracy of 0.05 degrees in bending angle. Control system is constructed under the MATLAB/Simulink software environment.

In the experiments, a 200g weights pet bottle filled

with water was hung up on a tip of the forceps, and lift up and down were repeated. Appearance of the experiment is shown in Fig. 12.

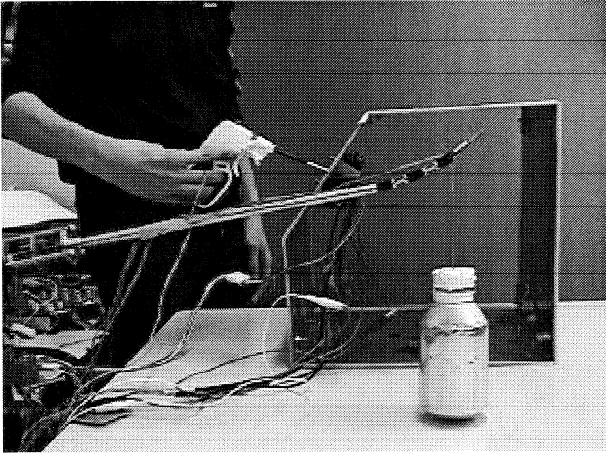


Fig. 12 Appearance of experiment

Firstly, in order to see the effect of motion scaling, experimental works with the following conditions were carried out.

A) Verification of the effect of motion scaling.

i)  $G_p = G_f = 1$  and  $T = 0$ .

ii)  $G_p = 3$ ,  $G_f = 2$  and  $T = 0$ .

Secondly, in order to see the effect against time delay, comparison of the proposed bilateral control scheme and conventional bilateral control method was performed.

B) Verification of the effect against time delay.

i)  $G_p = G_f = 1$  and  $T = 0.125$ .

ii) Force reflecting servo type bilateral control law with constant time delay  $T = 0.125$ .

In B-ii), force reflecting servo type bilateral control law is given as follows.

$$\tau_m = K_f (f_m - f_s(t-T)), \quad (16)$$

$$\tau_s = K_p (x_m(t-T) - x_s), \quad (17)$$

where  $K_f$  and  $K_p$  are feedback gains of force and position. The time delay  $T = 0.125$  is intentionally generated in the control system, whose value was referred from time delay of control signal between Japan and Thailand: 124.7ms in [10]. Note that the proposed bilateral control scheme guarantees stability in the presence of constant time delay, however stability is not guaranteed in force reflecting servo type bilateral control law under the presence of

constant time delay.

Feedback gains were adjusted by trial and error through repetition of experiments, which are determined as  $\lambda = 3.8$ ,  $K_1 = 30$ ,  $K_m = 400$ ,  $K_s = 400$ ,  $K_p = 60$  and  $K_f = 650$ .

Experimental results for condition A) are shown in Fig. 13 and Fig. 14.

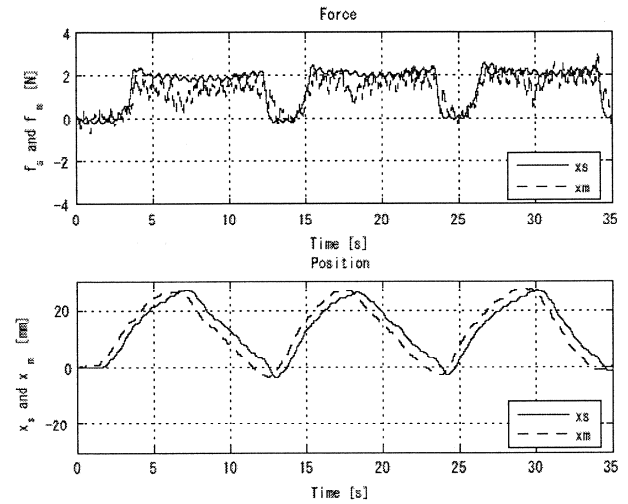


Fig. 13 Experimental result for A-i)

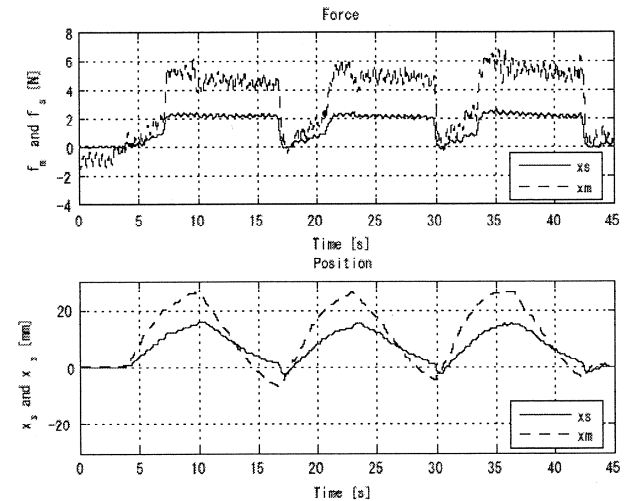


Fig. 14 Experimental result for A-ii)

As shown in Fig. 13 and Fig. 14, it is verified that the motion of slave tracks the motion of master with specified scale in both position tracking and force tracking.

Experimental results for condition B) are shown in Fig. 15 and Fig. 16.

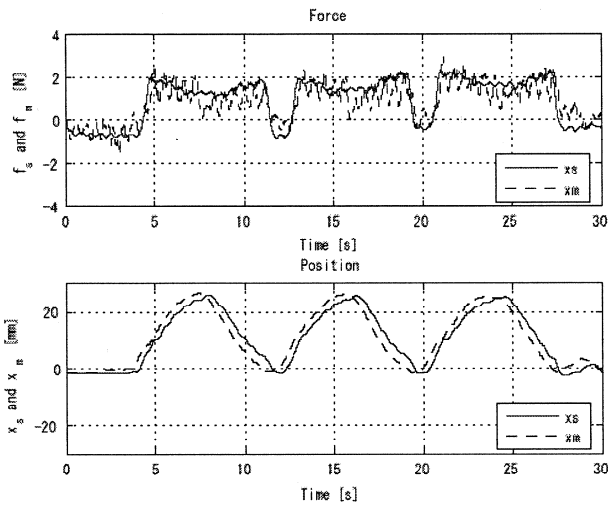


Fig. 15 Experimental result for B-i)

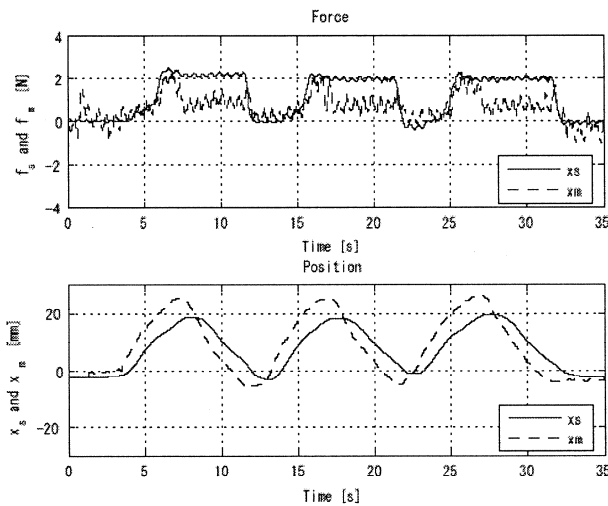


Fig. 16 Experimental result for B-ii)

As shown in Fig. 15 and Fig. 16, tracking errors of both position and force in Fig. 15 are smaller than those of Fig. 16.

From the above observations, the effectiveness of the proposed control scheme was verified.

## 6. Conclusions

In this paper, such a passivity based bilateral control for a teleoperation systems with time delay that enables motion scaling in both position tracking and force tracking was proposed. The proposed control scheme was applied to a haptic control of bending motion of the modified DSD robotic forceps teleoperation system with constant time delay, and experimental works were executed. Experimental results showed the effectiveness of the proposed control scheme.

Improvement of a sensing method of the force, extension of the proposed control technique to the

omni-directional bending motion, and application of the proposed control technique to the grasping motion are left as future works.

## References

- (1) R. Taylor and D. Stoianovici: Medical Robotics in Computer-Integrated Surgery, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.19, No.5, pp.765-781, 2003.
- (2) M. Mitsuishi, J. Arata, K. Tanaka, M. Miyamoto, T. Yoshidome, S. Iwata, S. Warisawa, and M. Hashizume: Development of a Remote Minimally-Invasive Surgical System with Operational Environment Transmission Capability, Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.2663-2670, 2003.
- (3) K. Ikuta, T. Hasegawa, and S. Daifu: Hyper Redundant Miniature Manipulator 'Hyper Finger' for Remote Minimally Invasive Surgery in Deep Area, Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.1098-1102, 2003.
- (4) Y. Kobayashi, S. Chiyoda, K. Watabe, M. Okada, and Y. Nakamura: Small Occupancy Robotic Mechanisms for Endoscopic Surgery, Proc. Int. Conf. on Medical Computing and Computer Assisted Intervention, pp.75-82, 2002.
- (5) H. Yamashita, A. Iimura, E. Aoki, T. Suzuki, T. Nakazawa, E. Kobayashi, M. Hashizume, I. Sakuma, and T. Dohi: Development of Endoscopic Forceps Manipulator Using Multi-Slider Linkage Mechanisms, Proc. 1st Asian Symposium on Computer Aided Surgery - Robotic and Image guided Surgery -, 2005.
- (6) C. Ishii and K. Kobayashi: Development of a New Robotic Forceps Manipulator for Minimally Invasive Surgery and Its Control, Proc. of SICE-ICASE Int. Joint Conf., pp. 250-253, 2006.
- (7) J. Arata, M. Mitsuishi, S. Warisawa, and M. Hashizume: Development of a Dexterous Minimally-Invasive Surgical System with Augmented Force Feedback Capability, Proc. 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3207-3212, 2005.
- (8) U. Seibold, B. Kubler, and G. Hirzinger: Prototype of Instrument for Minimally Invasive Surgery with 6-Axis Force Sensing Capability, Proc. 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.496-501, 2005.
- (9) N. Zemiti, G. Morel, T. Ortaiaier, and N. Bonnet: Mechatronic Design of a New Robot for Force Control in Minimally Invasive Surgery, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol.12, No.2, pp.143-153, 2007.
- (10) J. Arata, et al.: A Remote Surgery Experiment Between Japan and Thailand Over Internet Using a Low Latency CODEC System, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation,

pp. 953-959, 2007.

- (11) N. Chopra and M.W. Spong: On Synchronization of Networked Passive Systems with Time Delays and Application to Bilateral Teleoperation, Proc. of SICE Annual Conf., 2005.

4. Y. Kamei and C. Ishii: Force Feedback Control for Double-Screw-Drive Forceps Manipulator, 3rd Japan-China-Korea Joint Workshop on Robotics (September 2008).

## 【研究成果】

### ① 発表論文

1. C. Ishii and K. Kobayashi: Robotic Forceps Manipulator for Laparoscopic Surgery Using Double-Screw-Drive Mechanism, 12th IASTED International Conference on Robotics and Applications, p.163-168 (August 2006).
2. C. Ishii and K. Kobayashi: Development of a New Robotic Forceps Manipulator for Minimally Invasive Surgery and Its Control, SICE-ICASE International Joint Conference, p.250-253 (October 2006).
3. C. Ishii and K. Kobayashi: Development of a New Bending Mechanism and Its Application to Robotic Forceps Manipulator, IEEE International Conference on Robotics and Automation, p.238-243 (April 2007).
4. C. Ishii and Y. Kamei: On Servo Experiment of a New Multi-DOF Robotic Forceps Manipulator for Minimally Invasive Surgery, IEEE 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications, p.1-6 (May 2008).
5. C. Ishii and Y. Kamei: Force Feedback Control of Robotic Forceps for Minimally Invasive Surgery, 1st Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation, p.154-155 (June 2008).
6. Y. Kamei and C. Ishii: Passivity Based Bilateral Control with Motion Scaling for Robotic Forceps Teleoperation System with Time Delay, International Conference on Control, Automation and Systems, p.1657-1662 (October 2008).
7. C. Ishii, K. Kobayashi, Y. Kamei, and Y. Nishitani: Robotic Forceps Manipulator with a Novel Bending Mechanism, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (submitted).

### ② 学会発表

1. 小林宏輔, 石井千春: Double-Screw-Drive 機構を用いた低侵襲手術用多自由度鉗子の開発 (第1報), 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 06 (2006年5月)
2. 小林宏輔, 石井千春: Double-Screw-Drive 機構を用いた低侵襲手術用多自由度鉗子の開発 (第2報), 日本ロボット学会 第24回学術講演会 (2006年9月)
3. 亀井佑介, 石井千春: Double-Screw-Drive 機構を用いた低侵襲手術用多自由度鉗子の追従実験について, 第16回日本コンピュータ外科学会大会 (2007年11月)

### ③ 特許出願

1. 石井千春, 小林宏輔: 屈曲機構及び低侵襲外科手術用マニピュレータ, 2006-085324 (2006年3月27日出願)
2. 石井千春, 小林宏輔: 屈曲機構及び低侵襲外科手術用マニピュレータ (追加), 2006-212396 (2006年8月3日出願)

# 表面張力を利用した微小液滴のマニピュレーションに関する研究

工学院大学 機械システム工学科 鈴木 健司

工学院大学 総合研究所 杉井 康彦

東京工業高等専門学校 機械工学科 福田 勝己

Study on Manipulation of micro droplets using surface tension forces

Kenji Suzuki, Department of Mechanical Systems Engineering

Yasuhiko Sugii, Research Institute of Science and Technology

Katsumi Fukuda, Tokyo National College of Technology

**ABSTRACT :** This paper describes the electrowetting-on-dielectric (EWOD) actuation of liquid droplets for transportation of micromechanical components. As the dimension of mechanical parts decreases, surface tension and electro static forces become dominant compared to gravity force. Recent studies show that these forces can be utilized for actuation of liquid droplets and lubrication of hydrophobic surfaces of small objects. In this study, actuation of liquid droplet by EWOD, and its application to micro transportation systems driven by the droplets are proposed. A device for the transportation system was fabricated by MEMS techniques and the behavior of the liquid droplet actuated by EWOD was investigated experimentally using a high speed camera.

## 1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) のデバイスにおいては、スケールの効果によりマクロの機械では無視できる表面間力が、重力などに比べて大きな影響を及ぼすようになる。このため、静電力や液体のメニスカスなどの表面間力を積極的に利用する研究が盛んに行われている。本研究では、表面張力と静電力を利用した液滴のマニピュレーション技術と、その応用として液滴の上に表面張力により微小な物体を支持して搬送するマイクロアクチュエータの研究を行った。本研究で製作したマイクロアクチュエータの概念図を Fig. 1 示す。マイクロアクチュエータは、液滴を駆動するための電極アレイを有する“ステータ”，その上部に載る“液滴”，さらにその上部へ液滴によって支持される“搬送台”から構成されている。液滴の輸送には、化学チップなどに多用される EWOD (Electrowetting on Dielectric) 技術を用い

ている<sup>(1)(2)</sup>。マイクロ化学チップ、マイクロ TAS (Total Analysis System) などの分野では、EWOD を利用して、基板上での液滴の移動、生成、分離、混合などの研究が盛んに行われている<sup>(3)</sup>。この方法の特徴は、ポンプなどの機械的な可動部品が不要なこと、流路内の液体輸送とは異なり液体の無駄が生じないことなどが挙げられる。

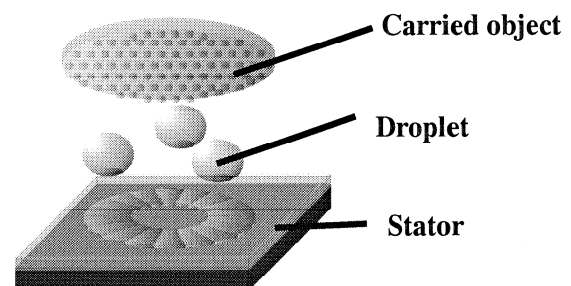


Fig.1 Schematic of Microactuator



また、鈴木<sup>(4)</sup>は撥水面上の液滴を用いた潤滑の可能性を示し、梶原ら<sup>(5)</sup>、Moonら<sup>(6)</sup>はEWODを駆動力としたモータやコンベアシステムを提案している。

本研究では、まずEWODにより輸送される液滴の挙動を解析した。高速度カメラを用いて液滴が移動する際の変形挙動を調べ、液滴量、印加電圧、電圧の切り替え周波数との関係を明らかにした。また、液滴を斜面や垂直面、天井面などに沿って3次元的に輸送させるための基礎実験を行った。次に液滴を利用した微小物体の搬送の研究を行った。搬送台の表面性状と搬送性能の関係を明らかにし、搬送台の回転実験を行った。

## 2. EWODによる液滴輸送の原理

EWODを利用した液滴輸送の原理をFig.2に示す。液滴の下部の基板には、導体の電極層、絶縁層、撥水層が順に成膜されている。電極と液滴との間に電圧を印加すると、静電力により液滴が基板に引きつけられ、接触面が広がり液滴が平たい形状になる。液体が導体とみなせるとき、気、液、固の三相の接触線における単位長さあたりの界面張力と静電力のつりあいは次式で表わされる。

$$\gamma_{LV} \cos \theta_e = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2d} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_{LV}$ 、 $\gamma_{SV}$ 、 $\gamma_{SL}$  は、それぞれ気液界面、固気界面、固液界面の界面張力であり、 $\theta_e$ は電圧印加時の液体の接触角、 $V$ は印加電圧、 $d$ は絶縁層の膜厚、 $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_r$ は真空の誘電率と絶縁層の比誘電率である。電圧を引加していないときの接触角を $\theta$ とすれば、

$$\cos \theta_e = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} + \frac{\epsilon \epsilon_0 V^2}{2d \gamma_{LV}} = \cos \theta + \frac{\epsilon \epsilon_0 V^2}{2d \gamma_{LV}} \quad (2)$$

となり、電圧の印加により接触角は減少する。したがって見かけ上、電圧の印加により表面の濡れ性が増加したと解釈することができる。

EWODを利用して液滴を移動させる際には、一般に液滴の蒸発などを防ぐため、Fig.3のように液滴を2つの基板間に挟みこむ場合が多い。さらに液滴の周囲を溶媒でみたく場合もある。このような配置では、下部基板には液滴の直径よりも長さの短い電極列を形成する。また、上部基板は全面をグラウンド電極とし、絶縁層をはさまずに薄い撥水膜をコーティングすることによって、液滴の電位はほぼグラウンドレベルとなる。液滴の下の電極を接地し、隣の電極に電圧を引加すると、液滴と電極の関係はFig.5(a)のように電極がずれたコンデンサと等価となり、2つの電極が重なる方向に静電力が生じ、電圧を加えた電極の方に液滴が移動する。液滴が電圧を加えた電極と完全に重なると、平衡状態となり静止する。電圧を与える電極を順次切り替えることによって、液滴を連続的に移動させることができる。

一方、本研究では、液滴の上に微小物体を支持して搬送することを目標としているため、上部電極を用いずに、Fig.4のように一枚の基板上での液滴輸送実験を行った。

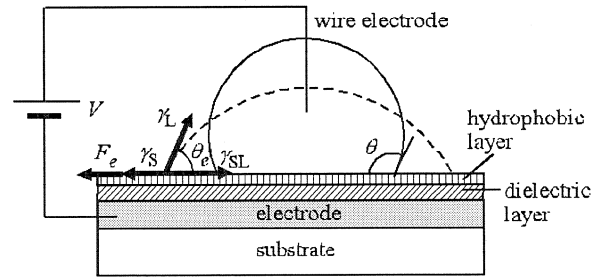


Fig.2 Principle of EWOD

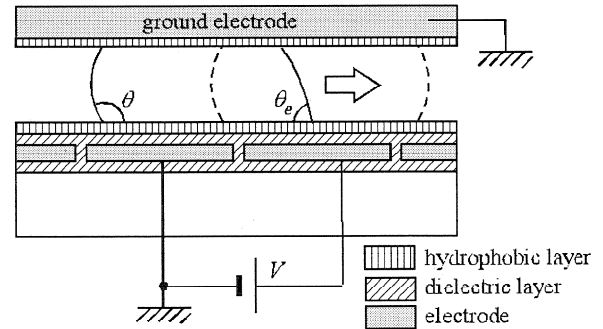


Fig.3 EWOD actuation between two substrates

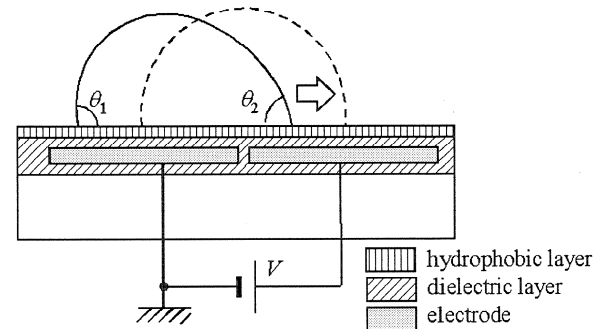
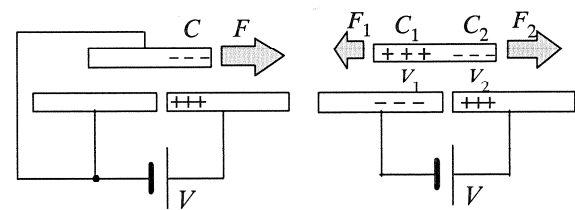


Fig.4 EWOD actuation on a single substrate



(a) Grounded droplet (b) Ungrounded droplet

Fig.5 Equivalent Circuits

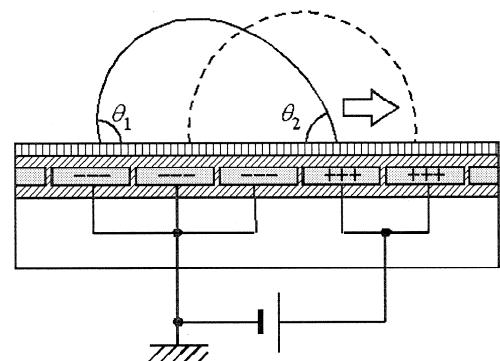


Fig.6 Continuous transportation

この配置では, Fig.5 (b) のように2つのコンデンサ  $C_1, C_2$  を直列接続した場合と等価になり、液滴の移動により電位は変動する。液滴内の静負の電荷量は常に等しいので、その電荷量を  $Q$  とすると、

$$Q = C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V, \quad V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V \quad (4)$$

コンデンサの内部エネルギーを  $U$ , 液滴に働く力を  $F$ , 液滴の変位を  $x$  とすれば、

$$U = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2 = \frac{1}{2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} V^2 \quad (5)$$

$$F = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{(C_1' C_2^2 + C_1^2 C_2')}{(C_1 + C_2)^2} V^2$$

$$= \frac{1}{2} C_1' V_1^2 + \frac{1}{2} C_2' V_2^2 = F_1 - F_2 \quad (6)$$

ここで  $C_1', C_2'$  は  $C_1, C_2$  の  $x$  による偏微分,  $F_1, F_2$  は液滴に働く左向き, 右向きの力である。液滴が2つの電極の中央に移動したとき,  $F_1 = F_2$  となり, 平衡に達する。上部にグラウンド電極を設ける場合より, 静電力は小さく1ステップの移動距離も小さくなる。

液滴を連続的に移動させるためには, Fig. 6 のように電極アレイのピッチを液滴の幅の半分以下とし, 進行方向の複数の電極の電位が高くなるように, 印加する電極を切り替えていけばよい。

### 3. 液滴の挙動解析

#### 3. 1 液滴デバイスの製作

液滴輸送デバイスの構造を Fig. 7 に示す。石英ガラスウェーハの上に厚さ  $0.3\mu\text{m}$  のクロム膜をスパッタリングにより成膜し, フォトリソグラフィとエッチングにより電極アレイを形成した。電極のサイズは  $3\text{mm} \times 0.35\text{mm}$ , ピッチは  $0.40\text{mm}$ , 電極数は24極とした。その上に絶縁膜として厚さ  $1\mu\text{m}$  のパリレンCを蒸着し, さらに撥水膜として厚さ  $1\mu\text{m}$  のテフロンAF 2400 (三井デュポンフロケミカル(株))をスピコーティングにより成膜した。Fig.8 に電極のマスクパターンを示す。電圧を印加するための配線部は, ピッチ  $2.54\text{mm}$  の25ピンコネクタを接続できるようにした。

#### 3. 2 液滴輸送実験

液滴輸送の実験装置の概要を Fig.9 に示す。24の電極を8極ずつ3組に分け, 各組に同じ電圧パターンを印加した。ファンクションジェネレータから出力された矩形波を用いて, PICにより隣り合う3つの電極が同時にオンになるような電圧パターンを生成し, 電圧の印加場所を1ステップごとに隣に移動し循環させる。Fig.10に8個の電極に与える電圧パターンを示す。一定周期( $T$ )ご

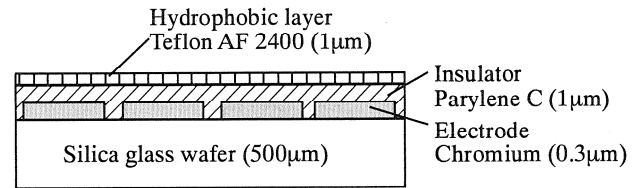


Fig. 7 Structure of the device for droplet transportation.

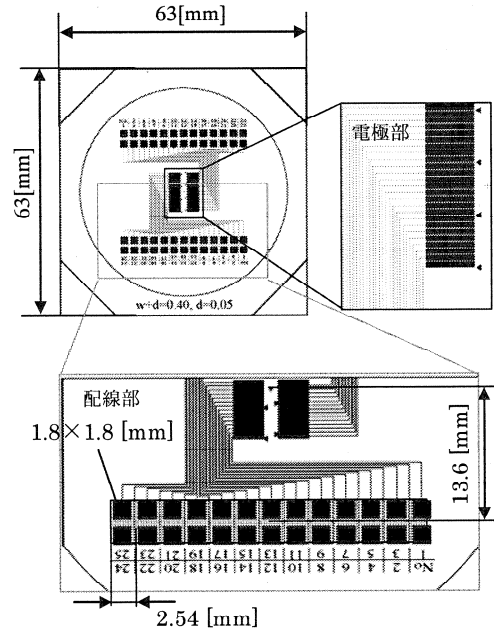


Fig. 8 Mask pattern of the device

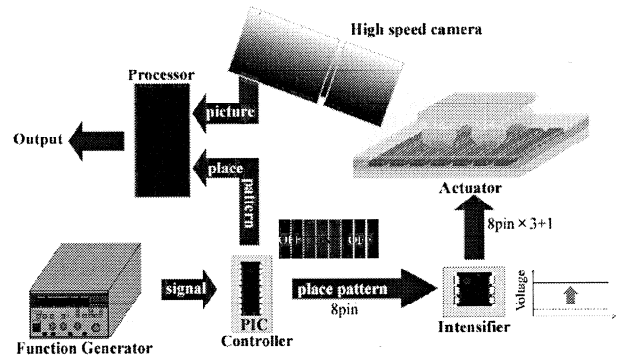


Fig. 9 Experimental setup

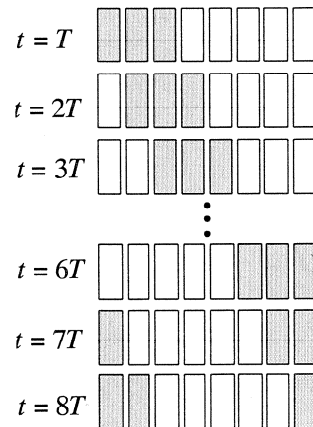


Fig.10 Pattern of Applied voltage.

とに電圧を切り替え、8通りのパターンを繰り返した。

液滴には純水を用い、輸送中の水滴を上面と側面から(株)フォトロンの高速度カメラで撮影し、同時に電極への印加電圧を波形入力ボードで計測した。その後、撮影した画像を画像処理し、液滴の中心位置と形状を計測した。

### 3. 3 実験結果

#### (1) 電圧を印加する電極と液滴の位置の関係

液滴が移動する際の電圧を印加する電極と液滴の位置の関係を調べたところ、Fig.11 に示すように、水滴が電圧を印加した電極の後ろ側を移動する場合と、前側を移動する場合の2通りがあることがわかった。このことから、水滴は電圧の高い側に移動するのではなく、水滴の中心が、電位差のある2つの電極の間に位置するように移動することが確認された。

#### (2) 移動中の液滴の変形挙動

液滴は、印加パターンが切り替わった直後に変形しながら移動する。Fig. 12 は、移動中の液滴の時間に対する中心位置の変化、長さの変化、幅の変化をプロットしたものである。多くの場合、Fig.12 (a) に示すように、液滴はまず前縁の接触角が低下しながら引きのばされる。限界まで伸びると両側の接触角が釣り合うまで液滴が変形する。その後、縮みながら移動し、1ステップ移動したときに元の形に戻る。一方、液滴の前縁が電極間の段差に引っかかる「ピン止め現象」も観察された。この場合には、Fig. 12 (b) のように、液滴の後ろ側が先に縮み、最も縮んだときにピン止めがはずれて前縁が伸びながら移動し、1ステップ移動したときに元の形状に戻ることが確認された。液滴の幅は移動中ほとんど変化しないことが確認された。また、液滴の高さは、液滴の長さが伸びると減少することが確認された。

#### (3) 液滴量の影響

Fig. 13 は、液滴量が1ステップの移動距離、移動時間、液滴の長さの変化量に及ぼす影響を示している。液滴量が1.5 mL 以下のときには、1ステップの移動距離は、ばらつきはあるものの平均的には電極のピッチにほぼ等しいが、2mL 以上になると移動距離が一定にはならず、電圧の印加位置に追従しなくなることがわかる。また、Fig.13 (b) に示すように、液滴量が1.5mL のときに移動量のばらつきが非常に小さくなっていることがわかる。これは、Fig. 13 (d) の液滴の長さの変化が電極ピッチとほぼ等しいことと関係していると考えられる。Fig. 13(c) は液滴量と移動時間の関係を示しており、液滴量の増加により、1ステップの移動時間が増加していることがわかる。Fig. 13(d) の縦軸は液滴の長さの最大値から最小値を引いたものである。液滴量が1.5mL のときのみ、長さの変化量が電極ピッチにほぼ等しく、それ以外の場合には電極ピッチよりも小さい。以上より、液滴量には最適値があり、液滴の伸縮量と電極ピッチが一致したときに、ばらつきの少ない安定した移動ができると考えられる。

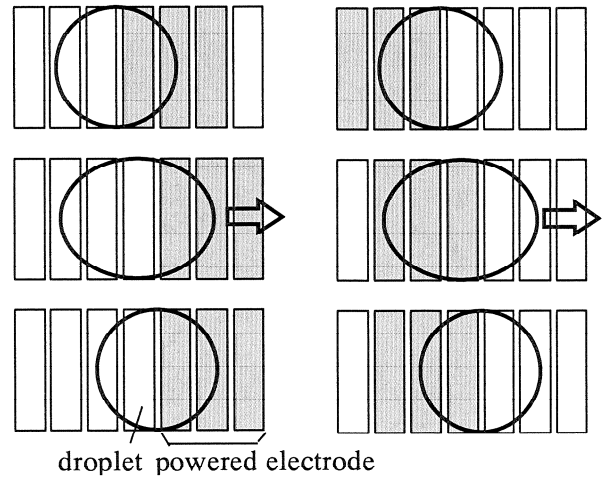
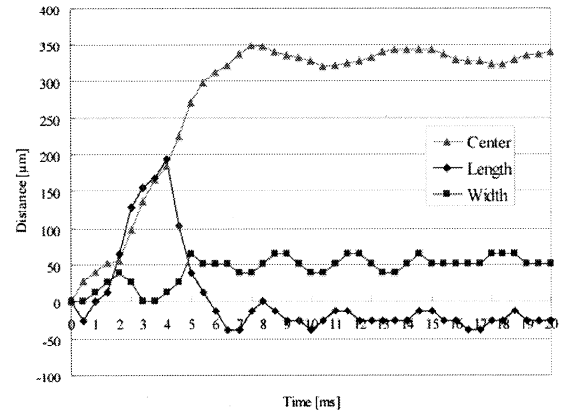
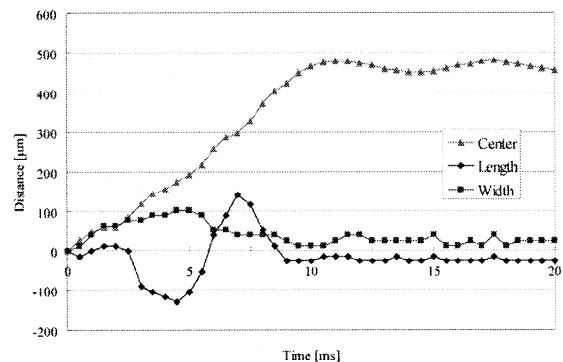


Fig.11 Two possible configurations of droplet transportation

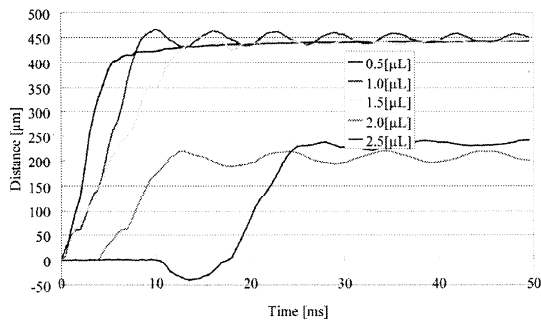


(a) Elongation of a droplet

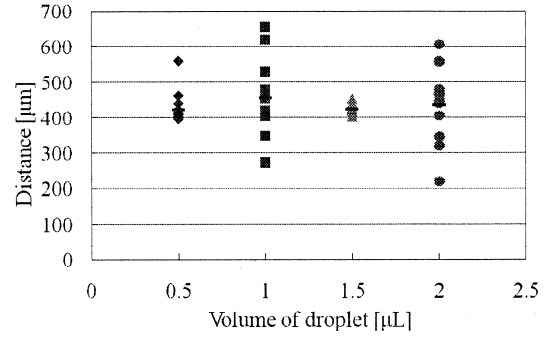


(b) Shrinkage of a droplet

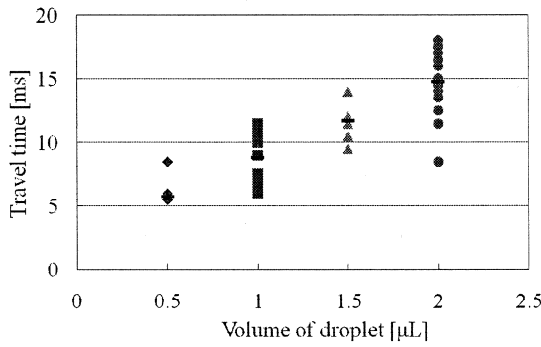
Fig. 12 Variations of center of gravity, length, width of the droplet with time.



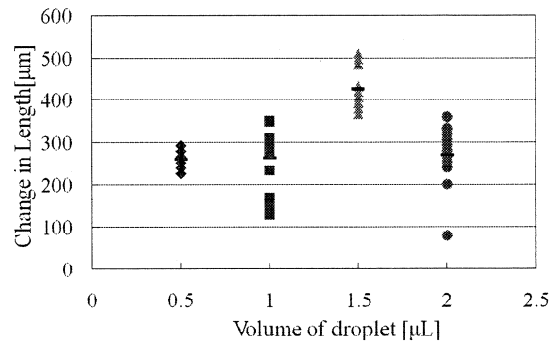
(a) Displacement vs. time



(b) Distribution of moving distance

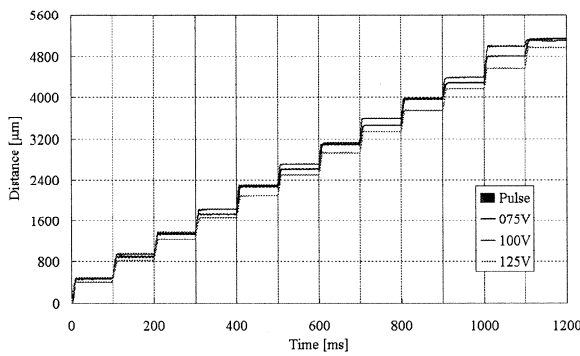


(c) Distribution of travel time

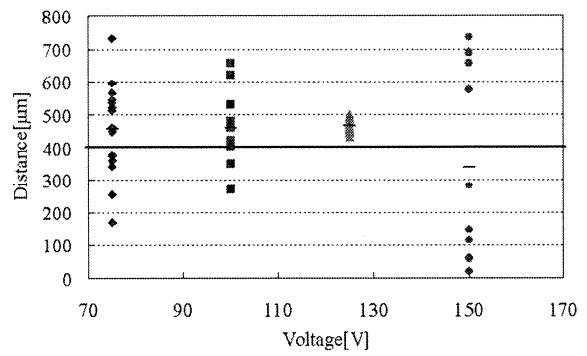


(d) Distribution of change in length

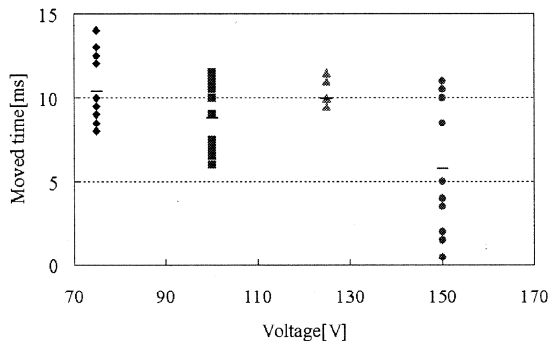
Fig. 13 Effect of volume of droplet



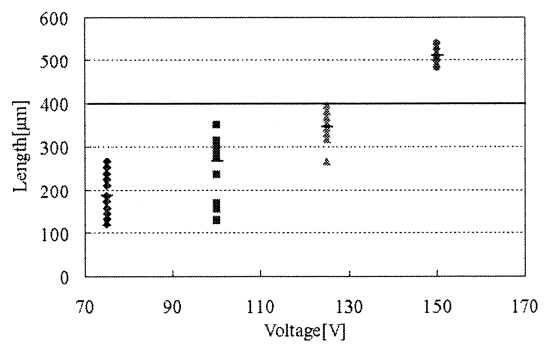
(a) Displacement vs. time



(b) Distribution of moving distance



(c) Distribution of travel time



(d) Distribution of change in length

Fig. 14 Effect of applied voltage

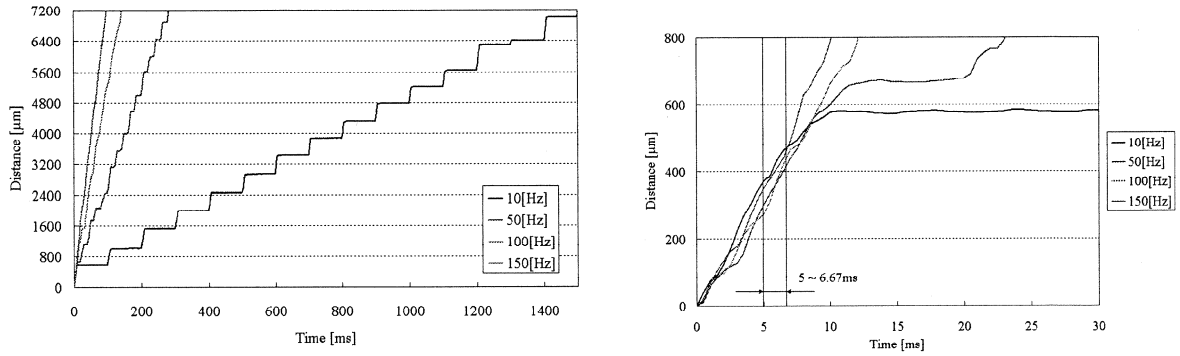


Fig. 15 Effects of switching frequency of applied voltage on droplet behavior

(4) 印加電圧の影響

Fig. 14 は、印加電圧が、移動距離、移動時間、液滴の長さの変化に与える影響を示している。電圧が 125V 以下の場合には 1 ステップの移動距離の平均は電極ピッチに等しくなるが、150V 以上では、移動しない場合や 1 度に 2 ステップ分移動する場合などが観察され、安定した移動が行えなかった。移動時間は電圧によりほとんど変化がなく、液滴の長さの変化は電圧が大きくなるほど大きいことがわかった。また、電圧が 125V のとき、移動距離、移動時間、液滴の長さのばらつきが他の場合に比べて非常に小さくなっている。これは、液滴の長さの変化が電極ピッチとほぼ等しいことと関係していると考えられる。

(5) 電圧の切り替え周波数の影響

Fig. 15 は電圧の切り替え周波数が液滴の挙動に与える影響を示している。右の図は、左の図の 0~30msec の部分の拡大図である。1 ステップの移動時間、移動速度は、一定の電圧であれば切り替え周波数によらず一定であり、切り替え周波数が低い場合には、移動後の静止時間が長くなることわかる。周波数を高くしていくと、静止時間がなくなるときに液滴の移動速度が最大になり、200Hz 以上の周波数では脱調して液滴が電圧変化に追従できなかった。

4. 液滴の斜面輸送

4. 1 デバイスの構造と実験方法

液滴を水平な平面上だけではなく、斜面や垂直面、天井面などを移動させることができれば、液滴の曲面輸送や 3 次元輸送が可能になり、応用の幅が広がると考えられる。そこで、デバイスを水平面から 10 度刻みで 360 度まで傾けて、斜面上での液滴輸送実験を行った。

液滴の斜面輸送では、重力の影響を受けるため、駆動力をより大きくする必要がある。そこでデバイスの構造を Fig. 16 のように一部変更した。絶縁層としてフォトレジストの SU-8 を用いてピンホールなどの欠陥を少なくし、厚さを 0.5μm とした。また、電極間の溝において液滴をスムーズに移動させピン止めを発生しにくくするため、Fig.17 のようなのこぎり歯状の電極に変更し

た。

デバイスの製作方法は前節と同様である。ガラスウェハ上に Cr の電極層を作り、フォトリソグラフィにより電極の形を形成する。形成した電極層の上には従来の SiO<sub>2</sub> よりも短時間で製作でき、高電圧を印加可能な SU-8 を用いて絶縁層を製作し、絶縁層の上に撥水面を Teflon AF2400 をコーティングした。電極の数、印加電圧のパターンは前節と同様である。実験条件を Table 1 にまとめて示す。

Table 1 Experimental conditions

Powered electrodes	3/8 × 3
Material of insulator	SU-8
Thickness of insulator	0.5 [μm]
Applied voltage	150 [V]
Frequency	2 [Hz]
Amount of droplet	0.6 [μl]
Inclination angle	0° ~ 350° (every 10°)

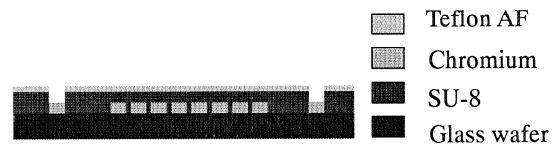


Fig. 16 Structure of the device

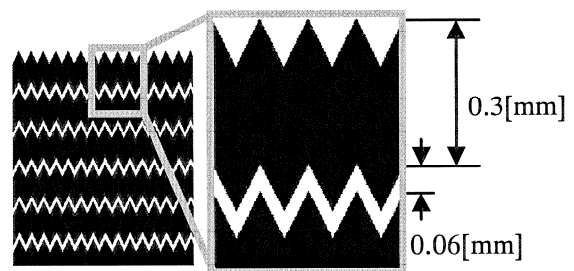


Fig. 17 Mask pattern for the electrodes

#### 4. 2 実験結果

実験の結果, 10 度から 360 度のすべての傾斜面上での液滴輸送が可能であることがわかった. 輸送の様子を Fig.18 に示す. 最も重力の影響が大きくなるのは垂直な壁面であり, 電圧の印加をやめると液滴は滑落してしまいが, 電圧を印加すれば, 上方に移動できることが確認された. また, 天井面でも液滴は落下せずに基板に付着しながら移動可能であることが確認された.

また, デバイスを垂直に立て, 垂直な壁面上で液滴を水平方向に輸送させる実験を行った. 結果, 液滴は電極上を移動しながら, 電極の最下端までは滑落するが, その境界よりも下に滑落する事は無く, 境界に沿って水平に輸送された. これは電極と水滴の間に, 電極との重なりが大きくなる方向に静電力が働くためと考えられる.

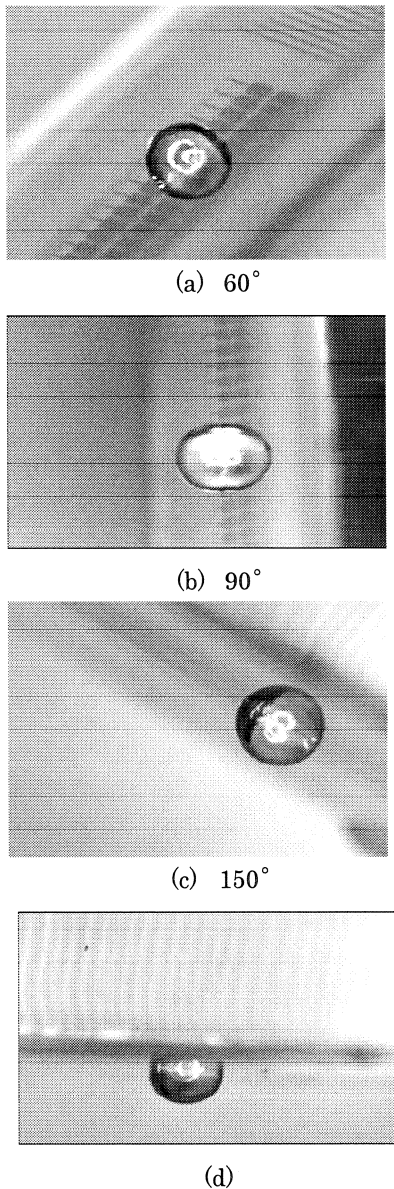


Fig. 18 Transportation on an inclined substrate

#### 5. 液滴による微小物体の輸送

本研究は, 液滴の上に微小物体を支持して搬送を行う装置の開発を目標としている. そこで, Fig.19 に示す外径 4.5mm, 内径 2mm, 18 極の円形電極と, 直径 5mm の円板状の搬送台を用いて搬送台を回転させる実験を行った (Fig.20). ステータ側の電極はクロム, 絶縁膜はパリレン C, 撥水膜は Teflon AF 2400 を用いた. また, 搬送台は, PDMS 製であり, 表面に凹凸加工を施したものと平坦なもの, 撥水剤の Teflon AF 2400, HIREC1450 (NTT アドバンステクノロジー(株)) を塗布したものと何も塗布していないものの計 6 種類を用意した. 凹凸のパターンは直径 100mm の円柱状の突起を間隔 50mm で並べたもので, フォトレジストの SU-8 で型を作り, PDMS に形状を転写した. ステータの電極は, 6 極ずつを組にして, それぞれの組で隣り合う 2 つの電極に同時に 125V の電圧を印加し, 印加位置をずらしていくことにより 3 個の液滴を同時に回転させた. 液体は純水を用い, 切り替え周波数は 2Hz で実験を行った.

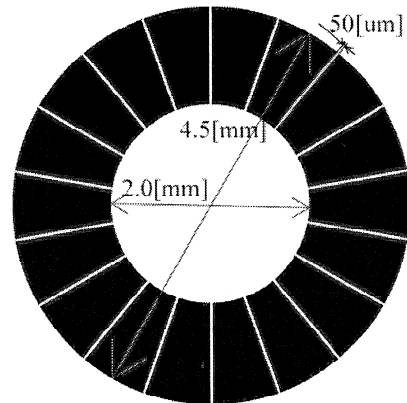


Fig.19 Mask pattern for circular electrodes

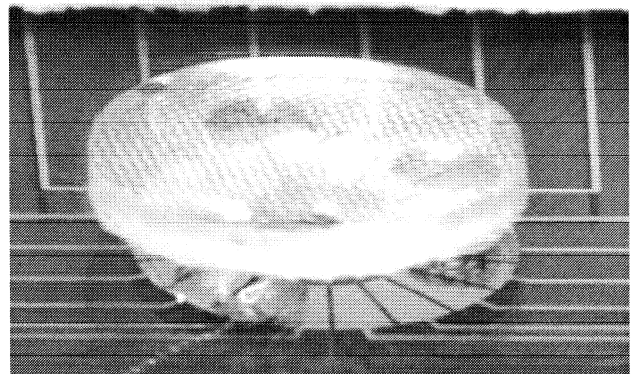


Fig. 20 Transportation of carrier disk.

Table 2 Experimental results

Hydrophobic surface	Textured surface	Contact angle [deg.]	Mass [mg]	Transport
PDMS	flat	100	12.8	×
	textured	120	15.4	○
TeflonAF2400	flat	120	22.6	△
	textured	130	13.4	○
HIREC1450	flat	130	10.4	×
	textured	140	18.1	△

実験結果を Table 2 に示す。結果から、凹凸形状が無い場合は、液滴は搬送台に固着し、液滴の変形が阻害されるため搬送台は回転しなかった。凹凸のある場合には、液滴は球形に近付き、移動し易くなり、搬送台を回転させることができた。また最も接触角が大きい HIREC1450 で凹凸のある場合には液滴と搬送台が滑る傾向が見られ、搬送台が回転しにくくなった。

## 5. 結言

本研究では、EWOD を用いた液滴輸送における液滴の挙動解析を行った。液滴量、印加電圧、切り替え周波数などを変化させ、その影響を調べた。また、斜面上の液滴輸送実験を行った。さらに、液滴を用いた物体搬送の基礎実験として、円形の搬送台を用いた回転実験を行い、搬送台の凹凸の影響などを調べた。その結果以下の知見が得られた。

### (1) 電圧の印加位置

液滴が移動する際に印加される電圧の位置は、液滴の前縁側の場合と、後縁側の場合との 2 種類があった。

### (2) 移動時の形状変化

液滴が移動する際には、移動方向に対して前側が伸びてから移動する場合と、後ろ側が縮んでから前部が延びて移動する場合があった。後者では、電極間の溝でピン止めが発生していた。

### (3) 液適量の影響

液適量が増加すると、1 極を移動する時間が増加することがわかった。また、電極幅に対して最適な液適量があることがわかった。

### (4) 印加電圧の影響

液滴が 1 極を移動する時間や距離は変化がなかったが、液滴の長さの伸長量が電圧に対して増加した。移動距離では、125V でばらつきが少なくなり、150V では切り替え信号に対して 1 極ずつ進まなくなった。これより、最適な電圧値があることがわかった。

### (5) 切り替え周波数の影響

液滴の 1 極の移動時間は、切り替え周波数に依存せず一定である。1 極の移動時間よりも速い周期で電圧を切り替えた場合には、液滴は追従できなくなる。

### (6) 斜面上の液滴輸送

基板を 10 度刻みで 0~360° まで傾斜させて輸送実験を行った結果、すべての傾斜角度での輸送に成功した。電極の形状をのこぎり歯状にすることは、液滴の輸送抵

抗を低減するために有効である。

### (7) 液滴による物体搬送

液滴による搬送では、搬送台に凹凸加工を施すと、液滴が動きやすくなり搬送が行えるようになる。搬送台の撥水性が高い場合には、液滴と搬送台が滑りやすくなる傾向がみられた。

## 参考文献

- (1) M. Washizu, Electrostatic Actuation of Liquid Droplets for Microreactor Applications, IEEE Trans. Industry Applications, Vol.34, No.4 (1998) pp.732-737.
- (2) R. B. Fair: Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible? , Microfluid Nanofluid, Vol.3 (2007) pp11-17.
- (3) S. K. Cho, H. Moon, and C-J. Kim: Creating, Transporting, Cutting, and Merging Liquid Droplets by Electrowetting-Based Actuation for Digital Microfluidic Circuits, J. Microelectromechanical Systems, Vol.12, No.1 (2003) pp.70-80.
- (4) Kenji Suzuki: Flow Resistance of a Liquid Droplet Confined between Two Hydrophobic Surfaces, Microsystem Technologies, Vol. 11, No. 8-10 (2005) pp.1107-1114.
- (5) A. Kajiwara, K. Suzuki, H. Miura and H. Takanobu: Study on Micromotor Using Surface Tension of Liquid Droplets, Proc. The 23<sup>rd</sup> Sensor Symposium on Sensors, Micromachines and Applied Systems, Takamatsu, (2006) pp.201-204.
- (6) I. Moon, J. Kim: Using EWOD actuation in a micro conveyor system, Sensors and Actuators A, Vol.130-131 (2006) pp.537-544.

① 発表論文

- (1) 鈴木健司, 小池裕之, 高信英明, 三浦宏文, 表面張力を利用した水面移動ロボットの研究, 日本機械学会論文集(C編), Vol.75, No.751, 2009/3, pp.656-665.

② 学会発表

- (1) 小池裕之, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, □表面張力を利用した水面移動ロボットの研究 (折り紙構造による機構の一体化), □第 14 回ロボティクスシンポジウム, 登別, 2009/3/16, pp.47-52.
- (2) 鈴木健司, 小池裕之, 高信英明, 三浦宏文, MEMS 技術を応用した水面移動ロボット, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 (8), 横浜, 2008/8/6, pp.285-286.
- (3) 本間裕章, 鈴木健司, 村山達哉, 高信英明, 三浦宏文, エレクトロウエッチングを用いた微小物体の搬送, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 (8), 横浜, 2008/8/4, pp.121-122.
- (4) 村山達哉, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 表面張力を利用した液滴分離の研究, 日本 IFToMM 会議シンポジウム前刷集(第 14 回), 東京, 2008/7/12, pp.87-90.
- (5) 梶原周, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 液滴の表面張力を利用した微小物体の多自由度アクチュエーションに関する研究, 日本機械学会 [No.08-3] IIP2008 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2008/3/17-18, pp.349-352.
- (6) 根元秀輔, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, メニスカスカを利用した壁面歩行ロボットの研究, 日本機械学会 [No.08-3] IIP2008 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2008/3/17-18, pp.345-348.
- (7) 小池裕之, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 振動を利用した水面移動ロボットに関する研究, 日本機械学会 [No.08-3] IIP2008 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2008/3/17-18, pp.353-357.
- (8) Kenji Suzuki, Hideaki Takanobu, Kota Noya, Hiroyuki Koike, and Hirofumi Miura, Water Strider Robots with Microfabricated Hydrophobic Legs, □ Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS07), San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007, pp.590-595.
- (9) 鈴木健司, 小池裕之, 野谷耕太, 高信英明, 三浦宏文, マイクロ加工表面を有する水面移動ロボットの研究, 日本機械学会2007年度年次大会講演論文集, No.07-1, Vol.7, 吹田市, 2007/9/11, pp.311-312.
- (10) 根元秀輔, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 表面張力を利用した壁面歩行ロボットの研究, [No. 07-2] Proceedings of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Akita, Japan, May 10-12, 2007, 1P1-O05 (1)-(4).

- (11) 小池裕之, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 表面張力を利用した水面移動ロボットの研究, [No. 07-2] Proceedings of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Akita, Japan, May 10-12, 2007, 1P1-O06 (1)-(4).

③ 特許出願

なし





研究課題：フレキシブル基板上の微細配線に生ずるマイグレーション損傷評価手法の確立 (H18～H20 年度)

## フレキシブル基板上の微細配線に生ずるマイグレーション損傷評価手法の確立と 種々の特性改善による材料システムの最適化

工学院大学 工学部 マテリアル科学科 木村 雄二  
電気システム工学科 鷹野 一朗  
明星大学 アジア環境研究センター 大畑 宙生

### Establishment of the method for evaluating migration behavior in minute wiring on flexible substrate and optimization of material system through conducting various improvements

Yuji Kimura, Dept. of Materials Science and Technology, Kogakuin University  
Ichiro TAKANO, Dept. of Electrical Engineering, Kogakuin University  
Michi Ohata, Asian Center for Environmental Research, Meisei University

#### ABSTRACT

Recently, miniaturization and high density mounting have been demanded in the various electronic devices. Above all, flexible print circuit has been paid attention especially in the field of notebook computer and the cellular phone for realizing high density mounting and also obtaining higher degree of freedom in design. The insulation failure due to an electrochemical migration damage advanced in a fine pitch wire mounting becomes serious problem. Electro chemical migration is an electrochemical phenomenon related to chemical solutions under electric potential. Migration in electronic materials is caused by electrochemical phenomena related to chemical solutions and electric potential. Involved in migration are deposition reactions and metal ion transfer reactions induced by such factors as metal dissolution reactions, diffusion, and migration. Migration is especially likely to occur when electronic devices using high-density mounting are affected by both materials and environmental conditions. When migration occurs, it causes changes in electrical characteristics and results in equipment failure. Therefore, the analysis of migration behaviour in FPC (Flexible Printed Circuit) becomes important for evaluating the reliability of an electronic devices based on FPC. In this research, Steady-State Temperature Humidity Bias Life Test (THB Test ) under the conditions of 85°C and 85 %RH with applying electric potentials of 5, 25 and 45 V was conducted using COF as a sample to understand the electro chemical migration behaviour in FPC. Then, various investigations concerning generated electrochemical migration behaviour were conducted employing SEM and EDX. Then, some trials were conducted for establishing the evaluation method of ionic migration behaviour. In addition, improvement of ionic migration character was conducted employing alternative under fill resin and manufacturing process in FPC materials system using tooth profile wiring specimen with 30  $\mu$  m pitch.

Then, in this paper, the surface treatment of the polyimide substrate is conducted for improving adhesion strength with under fill resin. For the surface treatment method, the atmospheric pressure plasma processing and the excimer VUV processing were employed. These processings can improve adhesion strength through removing an organic contaminant and changing chemical bonding state. In

addition, because this processing can be conducted under the atmospheric pressure condition, this method can be built into in-line manufacturing process. The effect of the surface treatments were evaluated by the contact-angle of the surface of polyimide substrate. Then, it was evaluated by adhesion strength between under fill resin and polyimide substrate. These characteristics were evaluated with passage of time. Moreover, THB for examining ECM character was conducted by using polyimide substrate with surface treatments. As a result, ECM is assumed to be controlled through improving adhesion strength on adhesion interface.

In addition, various surface treatments were conducted for improving adhesion strength between polyimide substrate and under fill resin. For this purpose, the atmospheric pressure plasma processing and the excimer VUV processing were employed. These methods can improve adhesion strength by removing an organic contaminant and/or changing chemical bonding state. Improvement of adhesion strength between polyimide substrate and under fill resin may result in the improvement of ECM resistance.

Results obtained are summarized as follows:

1. Migration behaviour such as color change that corresponded with dendrite formation was recognized in the specimen after 24 hrs THB testing, however, insulation failure of specimen was detected after 168 hrs THB testing.
  2. Generated dendrite from wiring on COF was composed of Cu, and this dendrite was initiated from the interface between plated Sn coating and polyimide substrate.
  3. Cl included in epoxy resin used for under fill material is dominant factor affecting migration behaviour. Absorbed moisture in under fill resin and the bias potential between anode and cathode electrodes accelerated migration behaviour.
  4. Generation of migration initiated from some distant area from Sn plating. Initiation site of dendrite was understood to be Cr/Ni seed layer which is essential element for making specimen by sputtering and plating process.
  5. Results of THB testing till 1,000 hrs obtained employing 30  $\mu\text{m}$  pitched tooth profile wiring specimen showed that manufacturing method and types of under fill resin clearly affect migration behavior of FPC.
  6. Surface treatment such as the atmospheric pressure plasma processing and the excimer VUV processing can change surface characteristics of substrate PI resin and under fill resin to hydrophile. Therefore, it is understood that compatibility of PI substrate with the under fill material was improved by abovementioned various surface treatments.
  7. Adhesion strength has improved by the atmospheric pressure plasma processing. Therefore, the functional group with polarity may be introduced on PI substrate material. As a result, it is understood that the hydrogen bonding as the secondary bonding may be more exercised by this surface treatment. However, the functional group with polarity which made target materials hydrophilic may also cause easier adsorption of water molecule.
- Therefore, effects of abovementioned surface treatment upon ECM resistance are going to be evaluated in mean future.

Keywords: Electro chemical migration, FPC, Fine pitched wiring, Reliability, THB testing, Cr/Ni seed layer, Surface treatment, Adhesion strength

## 1. はじめに

近年、電子部材の分野において軽薄短小化・高容量化の需要が高まっていることは周知のとおりである。電子機器の分野では、特にこの傾向が強い。現在、小型化が可能、搭載する実装部品の設計自由度が高いことからフ

レキシブル基板(Flexible Printed Circuits)が汎用されている。FPCの1つであるCOF(Chip On Flex)は微細配線形成性が優れることから注目されている。しかし、電子機器における更なる配線間のファインピッチ化を考慮すると、エレクトロケミカルマイグレーション(Electro Chemical Migration: ECM)による電子部品の絶縁不良は無視する

ことができない<sup>1)~4)</sup>。これに対応すべく、FPCにおけるECM挙動の把握、支配因子の整理を行うことにより、電子部材の信頼性を評価することが必要である。

本研究では、THB加速試験によりECMを生じさせた前後でのCu配線部の微細構造変化の確認を行うことを通じて、ECMの支配因子の明確化とこれを改善するための材料システムの最適化について検討した結果を報告する。

## 2. エレクトロケミカルマイグレーション現象

### 2.1 マイグレーションの発生メカニズム

エレクトロケミカルマイグレーションは直流バイアス電圧<sup>5)6)</sup>が印加されている状態で、電極導体間が吸湿など水の影響により絶縁性が低下し、電気化学的反応によるアノードからの電極金属の溶解、それが還元析出してできる生成物によって短絡に至る絶縁劣化現象である<sup>7)8)</sup>。ECMは電気化学反応によってアノードから金属イオンが溶出することから始まる。ECMの発生メカニズムは電極導体間(絶縁層)の抵抗値100Ω位を境に2種に分かれる。Fig.1に示すように、絶縁層の抵抗値が高い場合、アノードより溶出した金属イオンは絶縁層中で相互作用により還元析出、または化合物として析出してカソード側に向かって進行する。

一方、絶縁層の抵抗値が低い場合、アノード側より溶出した金属イオンが絶縁層中を拡散、移動しカソード側に至った時点で還元析出する。この場合マイグレーションはカソード側からアノード側に向かって進行する。また、本研究においてはアンダーフィル樹脂の抵抗値が100Ω程度より高いことから、前者の反応が生じると考えられる。

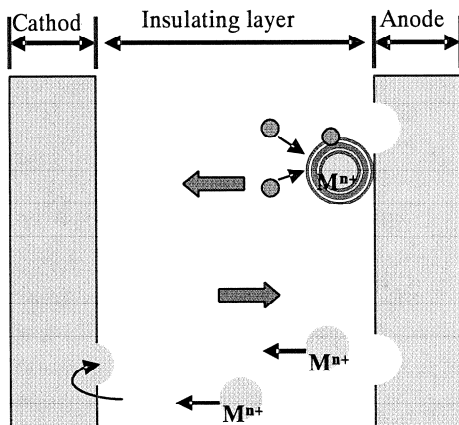


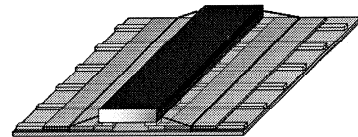
Fig.1 Electrochemical migration mechanism

### 2.2 THB (Temperature humidity bias) 試験: 高温高湿バイアス試験

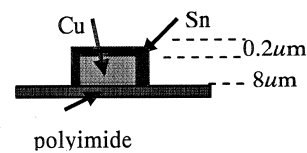
THB試験は、ECM発生要因である、温度、湿度を一定条件に設定し、定電位印加による加速試験を行うものである。樹脂封止パッケージに対して、チップ上の金属膜配線の腐食現象に関する耐久性の評価やパッシベーション膜からの水分侵入によるリーク現象の加速や、各種シリーズ試験などに用いられている。すなわち、高温高湿雰囲気中での使用および保管した場合、主として配線の腐食現象に対する耐久性を評価することを目的とし実施する。(JEITA規格番号: EIAJ, ED-4701/100、試験方法 102)

### 3. THB加速試験によるマイグレーション挙動の把握

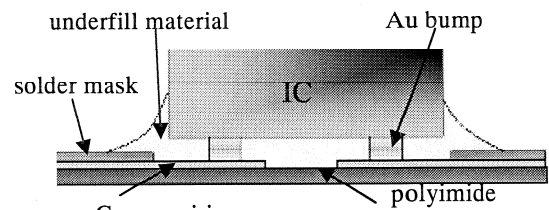
まず、供試材料としてFig.2に示す携帯電話に用いられるCOFを使用しマイグレーション挙動の把握を行った。COFはポリイミドフィルム上に配線パターンが形成されたフレキシブル基板にLSIや抵抗、コンデンサなどを実装したものであり、従来のTCPタイプのフレキシブル基板と比較して、より配線のファインピッチ化に適している。各部材の組成として配線はスズめっきされた銅を用い、バンプは金、アンダーフィル材にエポキシ樹脂、ソルダレジストにハロゲン含有のポリイミド系樹脂を用いている。また、本実験で用いるCOFはスパッタ・メッキ法を用いて用いた作製した基板を用いている。スパッタ・メッキ法の概略図をFig.3に示す。



(a) Outlook of COF



(b) Cu wiring geometry



(c) Detailed structure of COF

Fig.2 COF structure for test specimens

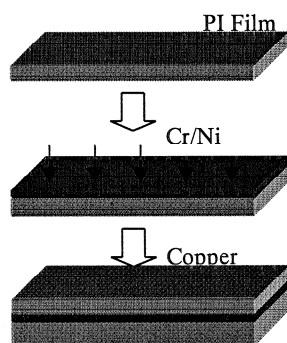


Fig.3 Sputtering and electroplating

COF サンプルに対して THB 試験を用いてマイグレーションの加速試験を行い、絶縁不良発生確認と光学顕微鏡による概観測定を行った。この実験により COF においてマイグレーションの発生している部位の特定とマイグレーションの形態の把握を試みた。THB 試験条件は温度 85℃、湿度 85%RH、DC5V、25V、45V である。

THB の結果 168 時間で絶縁不良を確認した。劣化を起こした配線は溶出による配線の変色と配線側面からのデンドライトが確認できた。デンドライトはアノード側より発生しており、発生した領域は Fig.4 の A~C であった。したがってアンダーフィル材によりマイグレーション挙動が影響を受けていることが推測された。

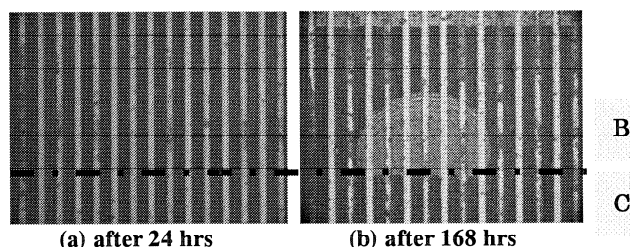


Fig. 4 Bottom view of migration damage observed by an optical microscope mainly generated in B and C regions

絶縁不良発生後はマイグレーション発生部位の観察が困難であるため、THB を 24、70、96、168 時間において、それぞれ光学顕微鏡を用いて観察し、マイグレーション成長の様子を観察するとともに THB における抵抗値との比較を行った。

COF のマイグレーションの特長として溶出により変色した配線とデンドライトであるとし、絶縁不良が発生した 168 時間以前の状態で配線の変色とデンドライト発生の有無、さらに THB の試験状況を Table1 に示した。この表によるとデンドライトおよび配線の変色は早い段階から発生していることがわかり、THB 試験の結果絶縁不良が認められない場合もマイグレーションが発生している場合があることが確認された。

THB により発生したマイグレーション生成物に対して各断面より SEM による観察と EDX による生成物の

Table 1 Generation of migration with time

時間	外観		絶縁抵抗値
	変色	デンドライト	
24	あり	あり	良好
70	あり	あり	良好
96	あり	あり	良好
168	あり	あり	未実施

元素分析を行った。発生したマイグレーションの SEM 画像を Fig.5 に示す。Fig.6 は配線をそれぞれ表面、底面、断面から観察したものである。配線表面の SEM 画像を見ると COF におけるマイグレーションの形状がデンドライト状になっていることが確認できる。また、配線の底面 SEM 画像には溶出により Cu 配線部分が外側に削れている状態が見られ、Sn メッキ部分がきれいに残っているように見られた。さらに配線断面の SEM 画像を見ると、マイグレーションが Sn メッキと基板の界面より発生しており、Sn メッキに損傷がなく内部の Cu 配線部が溶出により配線が削れていることが確認することができる。

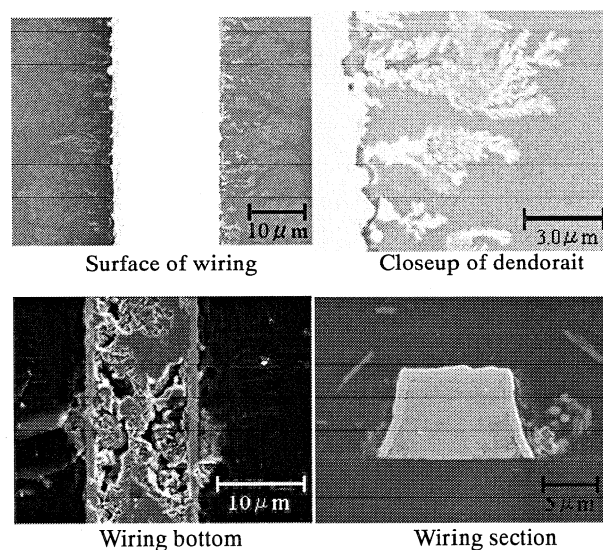


Fig.5 Observations of migration by SEM

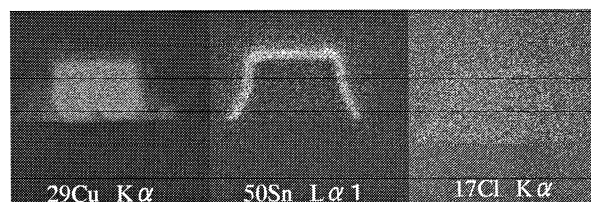


Fig.6 Analysis of migration by EDX

次に、配線の断面の EDX 測定結果を Fig.6 に示す。まず Cu の反応に着目すると、基板に接している面より Cu が溶出し、さらに Sn メッキ面よりこの Cu が滲み出している状態を確認することができる。一方の Sn の測定結

果より Sn メッキは損傷のない状態であることが確認できた。この EDX 測定結果よりマイグレーションにより dendrite として析出している成分が Cu なのではないかという結論に至った。また、EDX 測定にあたって Cl のピークが測定され、配線全体を囲むようにピークが出ていることがわかった。これによりマイグレーション発生に Cl が関与していると示唆した。

デンドライトの更なる観察を行った結果、デンドライト発生ポイントは Sn メッキと基板の界面からではなく Sn メッキよりやや離れていることが確認された。Sn メッキより溶出している部分とデンドライトは明らかに形状が異なり、また、THB 未投入のサンプルとの比較からデンドライトでない溶出部位のスパッタ・メッキ法により基板を作成した際に見られる Cr/Ni シード層であると推察した。

EDX の測定結果よりマイグレーション発生及び Sn メッキの破壊にはアンダーフィル材に含有される Cl の影響が大きいことが推察されたため、これまでの実験に用いたエポキシ樹脂より Cl 含有量の低いアンダーフィル材により作成した COF を用いて THB による比較実験を行った結果、THB において試験時間 1,000 時間経過後、絶縁不良及び配線の外観評価ともに良好な結果得ることができた。本実験に用いた改良アンダーフィル材の成分を Table 2 に示す。したがって、マイグレーション発生が Cl により促進することが明らかになった。

Table 2 Comparison of elements of underfill material

項目	既存アンダーフィル	改良アンダーフィル
主成分	エポキシ系	エポキシ系
Cl イオン (ppm)	0.41	0.12
Na イオン (ppm)	0.32	0.15
pH	5	4.1
電気伝導度 (μm/cm)	21.2	27.7
吸水率 (%)	1~2	1.4
粘度 (Pa・s)	0.45	19

SEM・EDX の結果マイグレーションは基板とメッキの界面より発生していることが示唆された。これにより、THB により基板とメッキとの密着性が低下しているのではないかと考えられるため THB の前後で、密着強度の比較を行った。実験は IC と基板を引き剥がし、その際の密着強度の測定を行った。実験の結果を Fig.7 に示す。Fig. 7 において樹脂 1 が既存アンダーフィル材、樹脂 2 が改良アンダーフィル材である。Fig. 7 によると改良アンダーフィル材は既存のアンダーフィル材よりも高い密着強度を持つが、共に THB 投入後の基板の密着性は急激

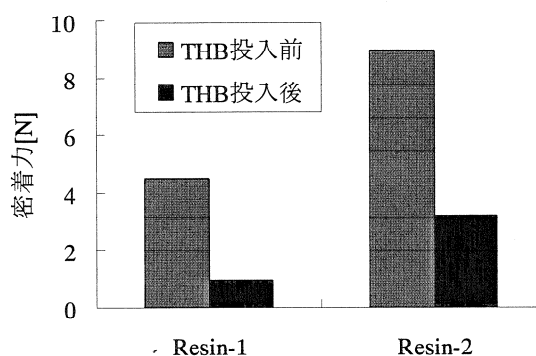


Fig. 7 Adhesion strength comparison before and after THB test

に下がることが確認された。したがって、基板の密着強度の評価において高温高湿環境下での密着強度低下も検討する必要がある。

#### 4. 損傷発生挙動の基板作成方法ならびにアンダーフィル材依存性

上記の結果をふまえ、微細配線間の絶縁抵抗をモニタリングできる様に作成した「くし歯パターン基板」を使用したマイグレーション試験を行い、基板作成方法とアンダーフィル材による発生率の違いについてさらに検討を加えたので以下に報告する。

##### マイグレーション評価試験

今回使用した FPC 基板の配線パターンを Fig. 8 に示す。30μm ピッチのくし歯パターンのものを使用した。今回、製作方法の異なる 2 種類の基材（基材 a：キャスト法、基材 b：メタライズ法）を使用した。40μm または 38μm 厚のポリイミド基材上に 8μm 厚の Cu 配線、0.2μm 厚のすずめっきがされている。ソルダレジストにはポリイミド系樹脂を用いている。アンダーフィル材としてはエポキシ樹脂が主材料で異なる 5 種類（A, B, C, D, E）を使用した。また、アンダーフィル材を塗布せず基材だけのサンプルも投入した。基板のくし歯パターン上に適量アンダーフィル材を塗布し、それぞれの

アンダーフィル材の硬化条件に従って硬化させたサンプルを使用した。アンダーフィル材の塗布箇所を Fig. 9 に示す。

実験に用いた FPC 基板と樹脂の組み合わせによるサンプル番号の一覧を Table 3 に示す。

この COF サンプルをマイグレーション評価装置（エスベック社製：AMI-025-P）を用いて絶縁抵抗測定を行った。試験条件は温度 85℃、湿度 85%RH、バイアス電圧は DC 45V である。

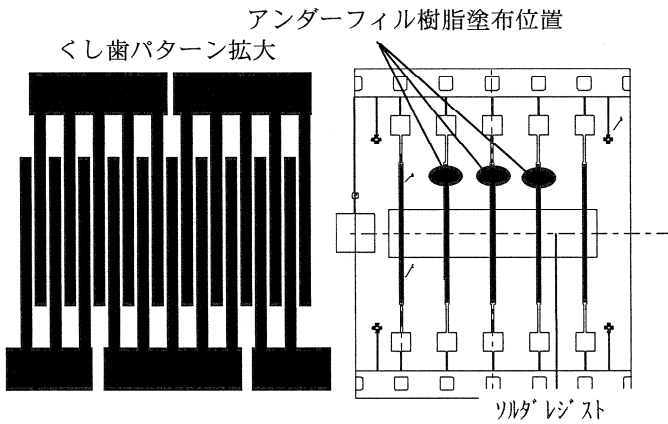


Fig.8 FPC tooth profile wiring specimen with 30 μm pitch

Table 3 Combination of under fill resin and substrate

	基材 a	基材 b
樹脂A (Epoxy)	Sample A-a	Sample A-b
樹脂B (Epoxy)	Sample B-a	Sample B-b
樹脂C (Epoxy)	Sample C-a	Sample C-b
樹脂D (Epoxy)	Sample D-a	Sample D-b
樹脂E (Epoxy)	Sample E-a	Sample E-b
樹脂なし	Sample 0-a	Sample 0-b

外観観察結果

まず 200 時間経過後のサンプルを試験槽から取り出して観察した。結果、基材 a のサンプルは一部変色を確認できるサンプルもあったが、デンドライトの発生は確認出来なかった。基材 b のものは配線の変色とデンドライトの発生が確認できた。劣化を起こした配線はポリイミド面との界面部分の変色と配線側面からのデンドライトが確認でき、デンドライトはアノード側より発生していた。この基材 b の結果は著者らのこれまでの研究で得られた結果と一致しており、変色はポリイミド層と配線パターン層の界面において配線パターン層の成分である Cu が溶出したものであるということが分かっている。またデンドライトは、変色部位を基点に配線基材である Cu が溶出し、デンドライト状に成長したものである。それぞれの代表的な外観写真を Fig.9 に示す。

アンダーフィル材の種類の違いでは変色やデンドライトの発生の仕方に違いがあることが確認できた。このことについては後述する。

マイグレーション試験の結果

前述の結果から基材 a と基材 b で試験後の外観 (変色とデンドライト発生) に違いがあることが確認できた。次にマイグレーション試験における配線間の絶縁抵抗値の評価結果を報告する。

マイグレーション試験の結果を Table 4 に示す。

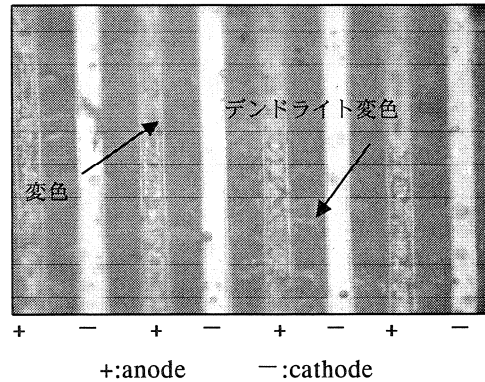


Fig. 9 Dendrite formation after 200hrs THB testing : Sample E-b

Table 4 Insulation degradation detected by impedance change

	基材a	基材b
樹脂A	A-a ◎	B-b ×
NG発生時間	—	4.4 時間
樹脂B	B-a ◎	B-b ×
NG発生時間	—	8.6 時間
樹脂C	C-a ○	C-b ×
NG発生時間	—	5.8 時間
樹脂D	D-a ○	D-b ○
NG発生時間	—	—
樹脂E	E-a ◎	E-b ×
NG発生時間	—	5.8 時間
樹脂なし	0-a ×	0-b ○
NG発生時間	161.8 時間	—

- ◎ : Fairly good ( $I \geq 100MO$ )
- : Good ( $I \geq 1MO$ )
- × : Degraded ( $I \leq 1kO$ )

同表において、1 行目がサンプルNoと各サンプルの抵抗値判定結果 (◎ : 100MO 以上キープ ○1MO 以上キープ ×:100KO 以下NG⇒今回 100kO 以下になった時点でNG判定とした)、2 行目がNG発生までの時間である。

結果として、絶縁抵抗値を基材で比較すると基材 a の方が良好であった。基材 a でみると抵抗値が 100MO 以上をキープしたものが 3 水準、10MO 以上をキープしたものが 2 水準あり、100KO 以下になったサンプルに関しても 161 時間耐えることが出来た。一方基材 b でみると抵抗値が 100MO 以上をキープしたものは一つもなく、10MO 以上をキープしたものが 2 水準、10 時間以内で 100KO 以下となったサンプルが 4 水準もあり、中には約 4 時間で 100KO 以下になってしまうサンプルもあった。以上のように基材に関しては基材 a と基材 b では明らかに差があり、基材 a の方が良好であった。

次にアンダーフィル材に着目してみると、基材 a に対しては樹脂 A, B, E の 3 種類が 100MO 以上をキープし、残りの樹脂 C, D は 1MO 以上をキープした。リファレンスとして作成した「樹脂無し」で NG となった Sample 0-a は、試験に失敗している可能性があるため原因の解析を行う。一方基材 b に対して 1MO 以上をキープしたのは樹脂 D だけであった。つまり今回の試験において、基材 a, b 共に比較的良好な結果を得られた樹脂は樹脂 D であった。

詳細は省くが、変色及びデンドライトの観察でもこの結果と一致する結果が得られている。

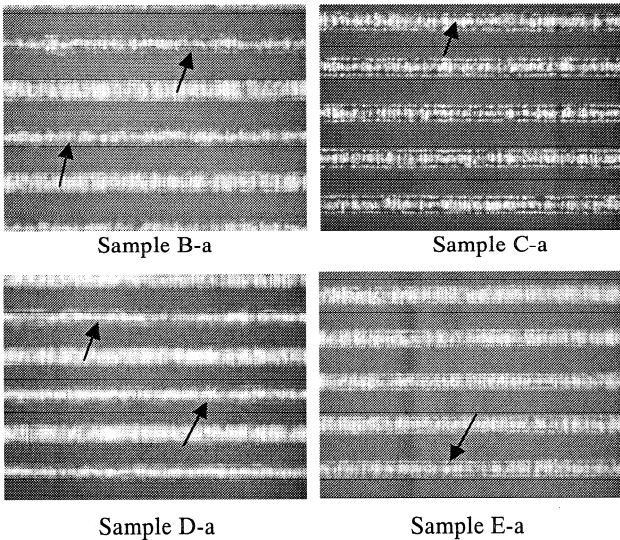
**絶縁抵抗値継続評**

基材 a のサンプルは基材 b と比較して絶縁抵抗の NG 品も少なく、全体的に配線の変色などもほとんど見られなかった。しかし、さらに試験を継続すると発生するのではないかと確認するため、200 時間の試験において絶縁抵抗が 1MO 以上で変色が無いサンプル 4 水準 (Sample B-a, C-a, D-a, E-a) を選び、継続投入した。試験条件は前回と同じである。

結果を Table 5 に示す。500 時間を経過しても絶縁抵抗

**Table 5 500 時間追加試験の絶縁抵抗値**

サンプルNo	絶縁抵抗値
B-a	問題なし (◎100MO 以上)
C-a	問題なし (○1MO 以上)
D-a	問題なし (◎100MO 以上)
E-a	問題なし (○10MO 以上)



**Fig.10 500 時間経過サンプル外観写真**

値の異常は認められなかった。但し、外観には変化があり、200 時間では確認されなかった配線の変色が発生し始めているサンプルがあった。Fig. 10 にその代表的な

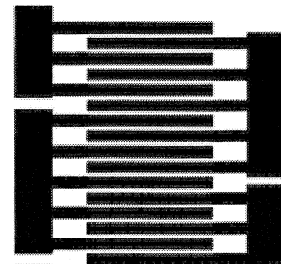
写真を示す。サンプル B-a と D-a はアノード側の配線の Sn めっき部分からの変色が確認できた。サンプル C-a と E-a は Cu 配線部分に変色していることが確認できた。サンプル 21 については投入前の状態と殆ど変わりはない。これまでの研究においては、基材 b では変色はデンドライト形成が始まる前に必ず起きる現象であったが(1)、基材 a では、これらの変色がデンドライト形成の予兆なのか変色だけに留まるのかは今後更に試験時間を継続して確認する必要がある。

**5. FIB を用いた ECM 過程の観察**

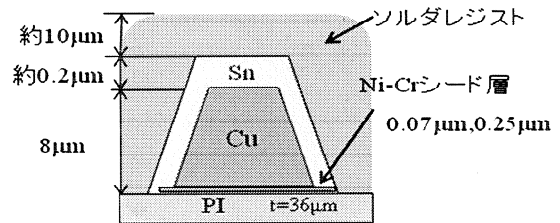
**5.1 供試材料および実験・評価方法**

**供試材料**

本研究で用いた COF を Fig. 11 に、断面構造を Fig. 12 に示した。この COF は、ECM 現象の再現化・明確化がしやすい、くし歯パターンをしている。配線間ピッチについては 30μm ならびに 25μm のものを用い、シード層厚みについても、0.07μm ならびに 0.25μm のものを用意し検討を加えた。



**Fig. 11 Tooth profile wiring specimen**



**Fig. 12 COF Structure**

**実験方法・評価方法**

THB 試験を Table 6 に示す条件で行った。

**Table 6 THB Test condition**

	温度/°C	湿度/%RH	印加電圧/V
試験条件	85	85	45

THB 試験後、光学顕微鏡・レーザー顕微鏡による配線部の観察を行い、変色・不良等が生じた試験片に対し、以下の詳細な観察評価を実施した。

- 1)配線部観察: 光学顕微鏡, レーザー顕微鏡 FE-SEM, SIM
- 2)配線部微細構造の観察: SIM
- 3)溶出元素の確認・観察: EDX, XRD

また、Cu 配線の微細構造を観察するため FIB による微細加工と SIM による詳細な観察を実施した。



### 5.2 THB 試験投入前の試験片の微細構造

配線断面図を Fig. 13 に示した。これより、Cu 配線とめっき部分の Sn との界面で約  $0.2 \mu\text{m}$  厚さの金属間化合物が形成されていることが確認できた。Fig. 14 に示した EDX 分析結果より、Sn めっき部分にも Cu が存在していることが確認でき、XRD による定性結果からも  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  の金属間化合物と断定できた。この金属間化合物は、Sn めっき後の熱処理の影響を受け形成されたと考えられる。また、金属間化合物が形成されたことにより、Cu と Sn との密着性は向上したが、その結果ポイドが形成されたものと思われる。

### 5.3 THB 試験後の試験片の微細構造変化

THB 試験 200 時間後の試験片において基板裏面 (PI を透過) からレーザー顕微鏡による観察を行った結果を Fig. 15 に示した。基板と配線との界面に生じた変色は Fig. 15 に示

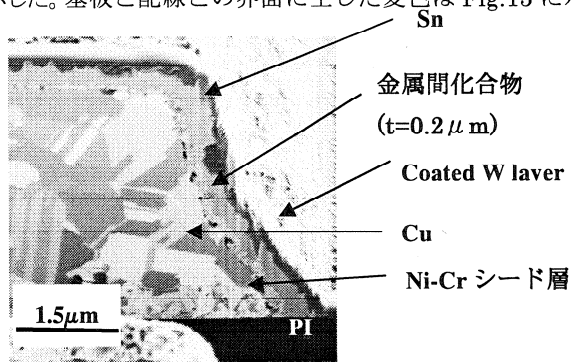


Fig.13 Cross sectional view of Cu wiring after FIB processing

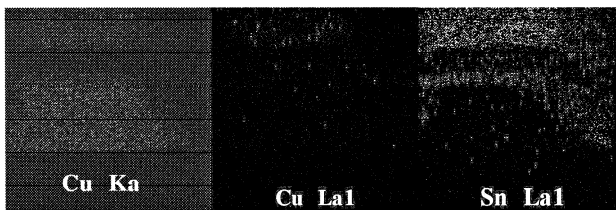


Fig. 14 Analysis of ECM by EDX

す部分から生じたことを確認した。この変色は初期の ECM 現象と推測でき、シード層の関与が示唆され、変色元素はシード層成分といえる。

また、IC 実装済みの試験片における THB 試験 168 時間後の観察結果より、デンドライト発生部位は Fig. 16 より Cu より少し離れた点であり、Ni-Cr シード層の関与が示唆されており、配線パターン形成の際に生じるシード層残渣が関与していると推測される。この部位は、アンダーフィル樹脂の下であり、アンダーフィル樹脂含有の CI が加速因子として関与していると考えられ、EDX 分析を行った結果、ECM の発生部位には CI が多く存在していることが確認された。そのため、配線間に存在する元素について EDX による分析を行った結果、Ni と Cr の存在が確認され、配線間の詳細確認を行うことができた。

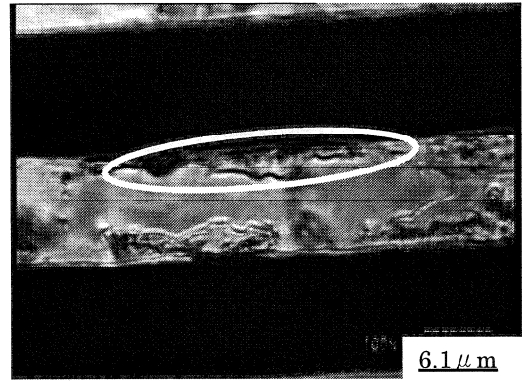


Fig. 15 Color change observed by laser microscope

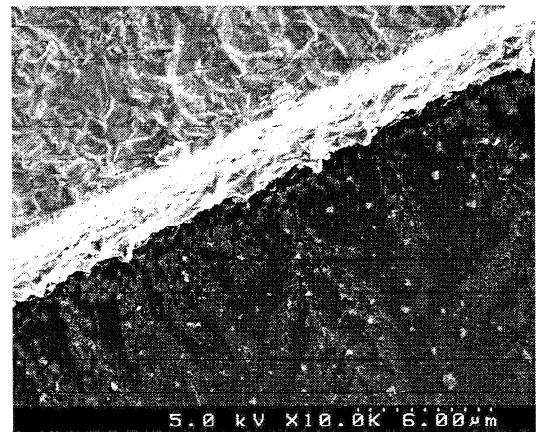
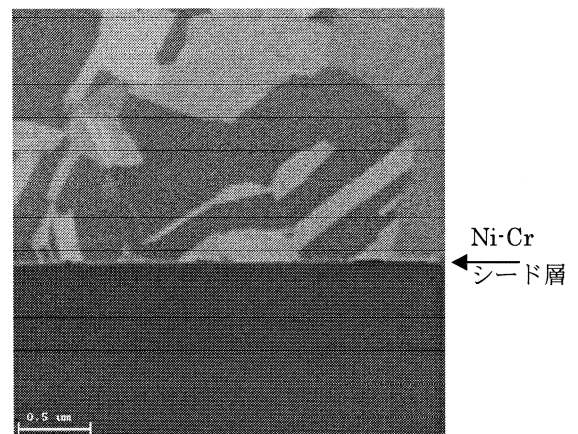


Fig.16 Dendrite generation observed by SEM image

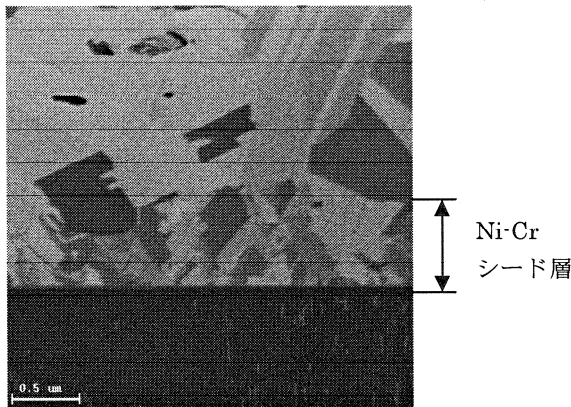
### 5.4 ECM の進行に対するシード層厚さの影響の検討

まず、THB 試験前における COF の微細構造の把握を行い、特にシード層厚さの差異が ECM の進行に対してどのような影響を有するかについて検討を行った。

その結果を Fig. 17 に示すが、同図(b)に示された試験片においては、(a)の試験片に比べてかなりの厚みを有するシード層が形成されていることが確認された。



(a) シード層薄い試験片

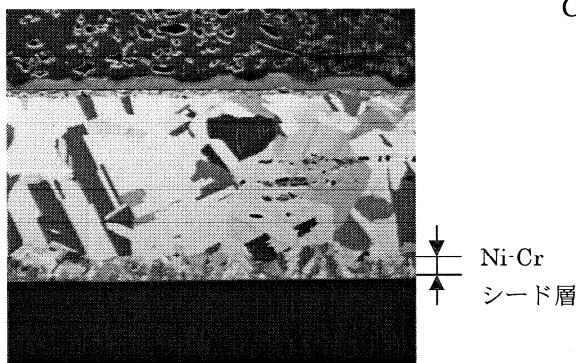


(b) シード層厚い試験片

**Fig.17 Observation of microstructural by SIM after FIB process**

したがって、THB 試験 200 時間後の試験片において基板裏面 (PI を透過) からレーザー顕微鏡による観察を行った結果に示された基板と配線との界面に生じた変色が、初期の ECM 現象と推測され、これに対するシード層の関与の重要性が示唆されていることから、シード層の厚みが大きくなっている試験片における耐 ECM の改善が期待される。

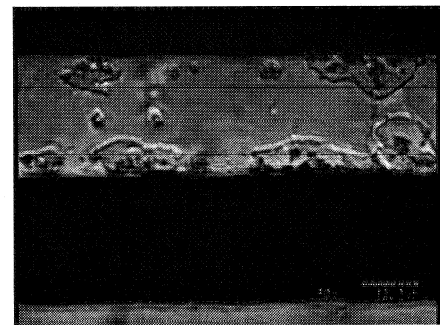
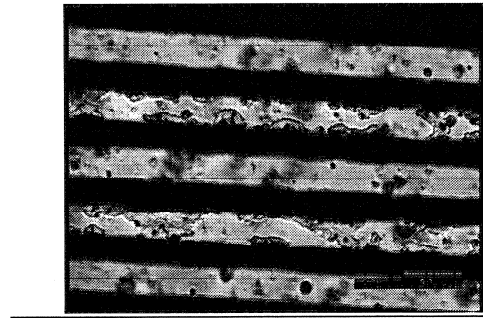
Fig. 18 には、同様に FIB 微細加工を施した試験片の配線部分の長手方向の断面形状を示す。同図には厚いシード層の形成が長手方向に厚みのばらつきがなく行われていることを示している。また、金属間化合物の形成によるポイドが、Cu と Sn との界面に長手方向の各位置で同じように欠陥として存在していることを示している。



**Fig.18 Observation of microstructure of longitudinal cross section by SIM after FIB process : COF(b)**

次に、THB 加速試験 200hr 投入後における COF の観察結果を示す。

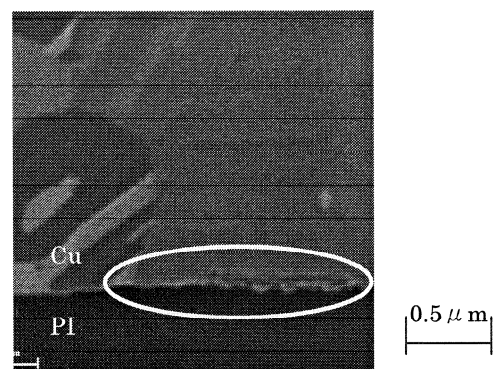
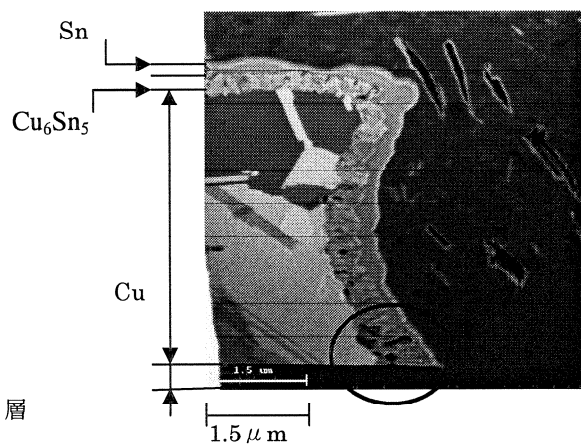
200hr THB 加速試験実施後の COF についてレーザー顕微鏡で詳細に観察した結果を Fig. 20 に示すが、配線に変色を観察されたのは、シード層の薄い(a)のみであった。現実には、PI 基板と Cu 配線との境界に変色が確認され、これらの変色は配線中心部へ向かって順次進行する



**Fig.19 Observation by Laser Microscope :**

(a) シード層薄い試験片

ことがうかがえた。これに対して、シード層の薄い試験片(b)においては、この様な変色すなわち ECM の初期過程の観察されなかった。したがって、Ni-Cr シード層の厚みを増大することによる耐 ECM 性の改善が示された。



**Fig.20 Observation of microstructural change by SIM after FIB process:COF(a)**

そこで、200hr の THB 試験投入後の微細構造変化を把握するために、前述同様に FIB による微細加工を施した後に SIM により観察した結果を Fig. 20 に示す。

THB 試験を 200hr 実施後の微細構造変化の把握を行うために FIB により微細加工を行いその後に SIM により詳細な観察を行った結果、以下の事柄が明らかとなった。すなわち、Ni-Cr シード層の変色は、溶出と思われる微細構造の変化が生じ、Cu 配線と PI 基板の間に存在する Ni-Cr シード層部分にすきまが生じた結果、もたらされたものであった。

すなわち、Fig. 20(b)には、これらの過程を示す PI 基板と Sn めっきとの間にすきまの存在が確認されている。これと同時に、THB 加速試験の実施より金属間化合物の容積が増大した。すなわち、形成された金属間化合物  $Cu_6Sn_5$  の内部ならびに Sn と  $Cu_6Sn_5$  の間にボイドの形成が認められ、反応の進行に伴う金属間化合物の体積の増大よりボイドの体積増大が生じているものと判断される。

一方では、デンドライトの発生と Sn めっき膜の損傷との関係を明らかにするために、168hr THB 試験ごの微細構造変化を、同様に FIB により加工後 SIM により観察した結果を Fig. 21 に示す。

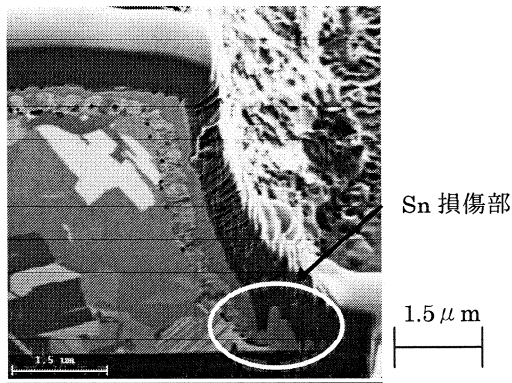


Fig.21 Observation of microstructure by SIM after FIB process

その結果、すべての部位において、Cu 配線と Sn めっきとの間に金属間化合物の形成され、これが Cu 配線と Sn めっきの間にボイドの生成をもたらしている。しかも、デンドライトの生じている Anode のみ Sn めっきの溶出による損傷部が存在することが明らかとなった。

## 6. 接着強度向上による ECM の抑制

### 6.1 はじめに

この COF は更なるファインピッチ化により、接着面積

が微小化し、これに伴って接合界面の密着性や接着強度の低下による問題が顕在化されている。また、ECM による配線間の絶縁不良が問題となっている。

これらの問題から、PI 基板と UF 材界面間の接着強度の要因が影響してきます。そのため、様々な表面改質法が PI 基板と UF 材界面間の接着強度向上に使用され、本研究では大気圧プラズマ処理及びエキシマ VUV 処理を用いました。これらの手法は有機汚染物質の除去、極性官能基の導入によって、接着強度の向上が行えます。これによって、接着強度を向上させ隙間のない界面をより ECM の金属成分の移動を抑制する効果の可能性がある。

## 6.2 実験方法

### 試験片

本研究では Fig.22 に示した ECM の再現化・明確化がしやすい、くし歯パターンをした配線間ピッチ  $25\mu m$  の FPC を用いた。また配線の一部には配線保護のためのソルダーレジストが塗布されている。本研究では用いた試験片の詳細を Table 7 に示した。

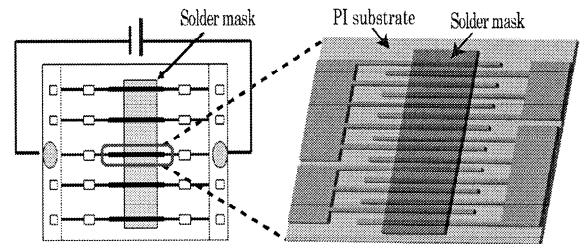


Fig.22 Test piece

Table 7 Details of specimen used in this study

Substrate	Polyimide
Solder mask	Polyurethane
UF material	Acid anhydride
Wiring pitch	$25\mu m$

### 実験方法

大気圧プラズマ処理では、供給ガス  $N_2$  を用い、搬送速度  $10mm/s$  (以下 NA10)、供給ガス Ar、 $O_2$  を用い、搬送速度  $200mm/s$  (以下 AL200) を選定し用いた。エキシマ UV 処理では、照射距離  $2mm$ 、照射強度  $40mW/cm^2$ 、照射時間  $20$  秒 (以下 UV20) を選定し用いた。

表面改質前後の評価法として AFM による表面観察、純水による接触角測定、XPS による表面結合状態の変化の測定を行った。また Fig.23 のようにシエアテストにより接着強度測定を行った。

## 6.3 実験結果

### 水濡れ性評価

純水による接触角測定を大気圧プラズマ処理、エキシマ VUV 処理前後で行い、PI 基板部及びレジスト部に

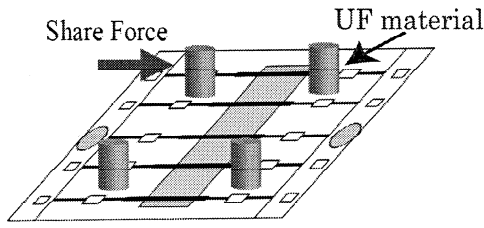


Fig.23 Interfacial shear strength test

において測定した。Fig.5 に測定結果を示した。結果より大気圧プラズマ処理及びエキシマ VUV 処理共に PI 基板部は親水性となったが、レジスト部においては大気圧プラズマ処理において親水性に改質されなかった。この事により、表面改質により親水性に改質された部位では UF 材との親和性が向上したものである。

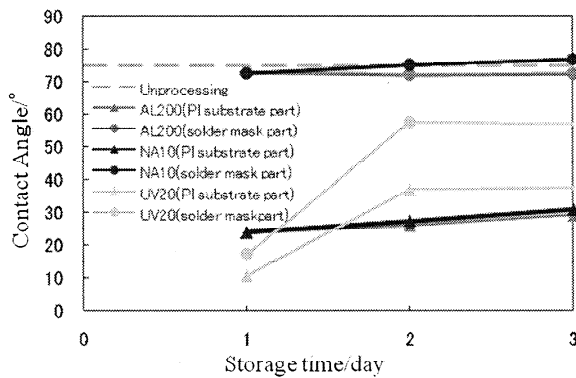


Fig.24 Change in contact angle with time

**XPS による表面結合状態測定**

XPS による大気圧プラズマ処理、エキシマ VUV 処理前後の C1s の化学結合状態の結果を Fig.25、Table 8 に示した。

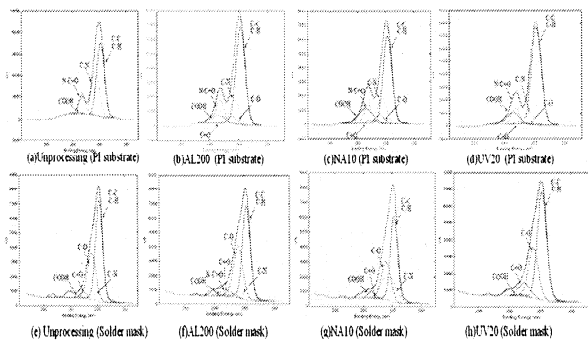


Fig.25 XPS analysis result of C1 spectra

Table 1 より PI 基板部では未処理基板に比べ、COOH、C=O といった親水性の極性官能基が生成している事が確認出来た。また、レジスト部においても UV20 において同様の生成が確認出来た。これによって Fig.24 のように親水性に改善できたものと考えられる。

Table 8 Ratio of XPS analysis results of C1 spectra

	band	C-C, C-H	C-N	C=O	C=O	N-C=O	COOH
PI substrate	Unprocessing	52.25	34.64	0.00	0.00	12.27	0.84
	AL200	58.51	15.53	4.80	1.12	12.24	7.80
	NA10	52.42	16.55	6.03	2.07	9.14	13.78
	UV20	62.27	13.00	0.75	1.86	9.66	12.46
Solder mask	Unprocessing	53.83	6.49	31.56	2.67	0.00	1.05
	AL200	48.98	6.18	33.77	3.14	4.70	0.36
	NA10	43.15	22.34	27.14	1.16	0.00	3.49
	UV20	57.10	0.00	29.60	9.04	0.00	1.49

**AFM による粗さ測定**

Fig.26 に大気圧プラズマ処理及びエキシマ VUV 処理前後の PI 基板部及びレジスト部の表面粗さ測定結果を示した。

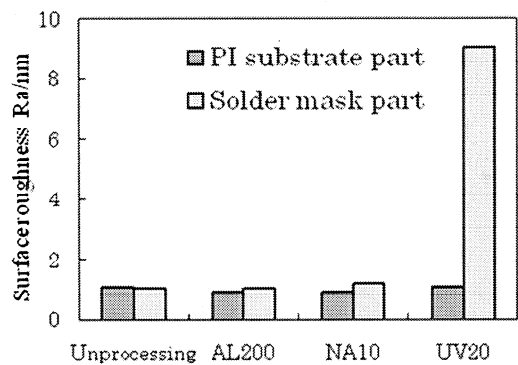
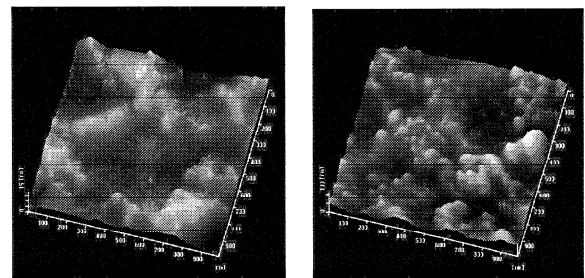


Fig.26 Roughness before and after surface treatment

結果より、AL200 及び NA10 の処理基板において、未処理基板との粗さの変化はほとんど示さなかった。また UV20 の処理基板においては未処理基板に比べ約 1.1nm から約 9.0nm まで粗さが変化した。これは Table 8 からも C-N の結合の減少によるものと考えられる。



(a) Unprocessing solder mask part (b) UV20 solder mask part

Fig.27 Surface figure before and after surface treatment

**PI 基板-UF 材の接着強度測定**

大気圧プラズマ処理後の接着強度の経時変化を Fig.28 に示した。

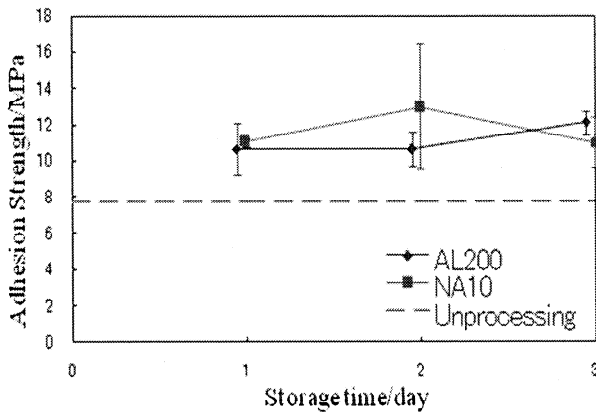


Fig.28 Changes in adhesive strength with time after the atmospheric pressure plasma treatment

この結果より、大気圧プラズマ処理では未処理に比べ、接着強度が向上した事が確認出来た。これは PI 基板部において極性官能基が導入したことにより、二次結合である水素結合がより働いたためと考えられる。また、経時変化を示したが、分散が大きい結果になった。これは塗布した UF 材を硬化させるために熱を加えるが、この際に結合に分布ができたものと考えられる。

## 7. 結果のまとめ

FPC のマイグレーション挙動を把握するため、携帯電話の液晶ドライバーなどに用いられる COF(Chip On Flex)を供試材料とし、マイグレーションの信頼性試験として行われている THB (高温高湿バイアス試験) を行い、加速的にマイグレーション発生させた。また、発生したマイグレーションに対して SEM・EDX による評価を行い、マイグレーション評価法の確立を目的とした種々の実験検討を実施した。

その結果、COF 中の配線のマイグレーションにより発生した dendrite の成分は Cu であり、Cu のマイグレーションは Sn メッキと基板との界面より発生していることが確認された。また、エポキシ樹脂中において、含有される Cl 及び樹脂に吸湿された水により配線のマイグレーションは促進される方向にあることが確認された。また、dendrite または CAF 発生には基点となる隙間が必要であることが示唆された。隙間発生には、スパッタ・メッキ法で作成した基板における Cr/Ni シード層の水分及び Cl による溶出や、樹脂中含有イオンの吸湿による溶解等が考えられる。THB により基板との密着力が落ちることから高温高湿環境下において COF におけるマイグレーション発生の基点となる基板界面における隙間の発生が促進されていることが推測され、COF におけるマイグレーション防止を考えるにあたって、いかにマイグレーションの基点となる隙間を作らないかが論点になると考えられる。

またさらに、くし歯パターン基板を使用したマイグレーション試験を行い損傷発生挙動の基板作成方法ならびにアンダーフィル材依存性を検討した結果、以下の事柄が示された。

- a-1) 基材の違いにより、絶縁不良になるまでの時間に差があることが分かった。
- a-2) 絶縁抵抗の試験結果がよいサンプルも、試験時間を長くすると配線に変色が見られることが判明した。シード層を持たないキャスト工法の基材であっても長時間のマイグレーション試験では Cu の溶出による変色が起きる可能性があることが示唆された。
- a-3) アンダーフィル材の違いでマイグレーション発生に違いがあることが分かった。

これらの結果に基づき、さらに、FIB による微細加工を施し、SIM による詳細な微細構造観察を行った結果、以下の事柄が明らかとなった。

- b-1) THB 試験投入前の試験片における観察結果より、金属間化合物形成によるボイドの発生が観察された。すなわち、Cu が Sn に向かい拡散し、金属間化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  の形成がなされた。 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  が形成されたことにより、Cu と  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  の間にボイドが生じた。
- b-2) PI/Sn/Cu との界面にはボイドが存在する。
- b-3) THB 試験投入後における試験片観察結果より基板と配線との界面より変色が生じており、ECM 現象の初期過程には Ni-Cr シード層が関与しているといえる。また、dendrite 状の生成物はアンダーフィル樹脂に覆われている部分から生じ、Cu 配線から離れた箇所より発生していることから EMC 現象の発生には Ni-Cr シード層が関与していることが強く示唆された。また、Ni-Cr シード層の厚みを増大させた試験片における耐 ECM 性の改善が確認された。
- b-4) スパッタにより形成された Ni-Cr シード層の状態の把握を行った結果、初期過程における Cu と PI 基板の界面の変色は、Ni-Cr シード層の溶出に起因していると示唆された。これらの劣化が進行する過程としては、
  - ① Ni-Cr シード層/Sn/PI の界面から、優先的に溶出が進む
  - ② Ni-Cr シード層の溶出により生じたすきまを起点に Cu の溶出が進むことによりもたらされていることが示唆された。
- b-5) dendrite の生じた Anode では、PI 基板に近い部位で、Sn の溶出による Sn めっきの損傷部が存在する。

また、様々な表面改質法が PI 基板と UF 材界面間の接着強度向上の目的で適用されているので、本研究では大気圧プラズマ処理及びエキシマ VUV 処理を用い、表面改質を試みた。これらの手法は有機汚染物質の除去、極性官能基の導入によって、接着強度の向上が行えると言

われている。これによって、接着強度を向上させ隙間のない界面をより ECM の金属成分の移動を抑制する効果の可能性がある。

得られた結果を以下に示す。

c-1) 大気圧プラズマ処理及びエキシマ VUV 処理共に PI 基板部は親水性に改質することが確認できた。この事により、表面改質により親水性に改質された部位では UF 材との親和性が向上したものである。

c-2) 大気圧プラズマ処理では未処理に比べ、接着強度が向上した事が確認出来た。これは PI 基板部において極性官能基が導入したことにより、二次結合である水素結合がより働いたためと考えられる。

親水化処理を行うことにより極性官能基は水を吸着しやすくなると推察できる。このため、高温環境下での THB 試験を行い、今後影響の調査を行う。

### 参考文献

- (1) G.T.Kohman, H.W.Hermance and G.H. Downes, "Silver Migration in Electrical Insulation" Bell System Tech. Journal, Vol.34, No.6, pp.1115-1147, 1955.
- (2) S. Krumbein, "Metallic Electromigration Phenomena," IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol.11, No.1, pp.5-15, 1988.
- (3) Tsutomu Tsukui, "Insulation Deterioration and the Prevention Method by Electrochemical Migration of Electronic Equipment (Part 1)", The Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.8, No.4, pp.339-345, 2005.
- (4) Hirokazu Tanaka, "Factors leading to ionic migration in lead-free solder", ESPEC Technology Report No. 14, pp. 1-9, 2002.
- (5) M. Pourbaix, "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", NACE, 1966.
- (6) J.A. Augis, D.G. DeNure, M.J. LuValle, J.P.Mitchell, Pinnel, M.R. and Welsher, T.L. "A Humidity Threshold for Conductive Anodic Filaments in Epoxy Glass Printed Wiring Boards", 3rd International SAMPE Electronics Conference, pp. 1023-1030, 1989.
- (7) T.L. Welsher, J.P. Mitchell and D.J. Lando, "CAF in Composite Printed-Circuit Substrates: Characterization, Modeling, and a Resistant Material," Reliability Physics, 18th Annual Proceeding, pp 235-237, 1980.
- (8) J.P. Mitchell and T.L. Welsher, "Conductive Anodic Filament Growth in Printed Circuit Materials," Proceedings of the Printed Circuit World Convention II, pp. 80-93, 1981.
- (9) B. S. Rudra, and M. G. Pecht, "Assessing Time-to-Failure Due to Conductive Filament Formation in Multi-Layer Organic Laminates," Packaging and Manufacturing Techniques, Part B, Vol. 17, No. 3, pp. 269-276, 1994.

### 研究成果の公表

1. 木村雄二 他：フレキシブル基板上の微細配線におけるマイグレーション挙動の把握と評価法の確立，第 20 回エレクトロニクス実装学会講演大会論文集，(2006)，pp.118-119.
2. Yuji KIMURA et al., Migration Behavior in Minute Wiring on Flexible Substrate and Establishment of Evaluation Method, Proceedings of 8th International Conference on Electronic Materials and Packaging, Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), Hong Kong, December 11-14, 2006, pp. 540-543.
3. Ichiro Takano, Yoshiharu Arai, Michiko Sasaki, Yoshio Sawada, Kaori Yamada, Takayoshi Yagasaki and Yuji Kimura, Surface modification of bio degradable plastics by ion beams, Vacuum,80,pp788-792, 2006 年 7 月.
4. Yuji KIMURA et al., Ionic Migration Behavior in Minute Wiring on Flexible Substrate, Eighth International Conference on Computer Methods and Experimental Measurements for Surface and Contact Mechanics, 16-18 May 2007, Wessex Institute of Technology, The New Forest, UK, pp.75-87.
5. 木村雄二 他：マイグレーション現象の発生による配線部の微細構造変化の把握と特性改善に向けた材料システムの最適化，第 22 回エレクトロニクス実装学会講演大会論文集，Paper No.18B-11, pp.1-2, 2008.
6. Hiroki Nagai, Chihiro Mochizuki, Hiroki Hara, Ichiro Takano, Mitsunobu Sato, Enhanced UV-sensitivity of vis-responsive anatase thin films fabricated by using precursor solutions involving Ti complexes, Solar Energy Materials & Solar Cells Vol. 92 pp.1136- 1144, 2008.
7. Osamu Kato, Yuji KIMURA, Mitsuru Chino and Sanee Isawa, Improvement of Adhesion Strength between Under Fill Resin and Polyimide Substrate through Conducting Surface Treatment on Substrate Resin, Proceedings of International Conference on Electronics Packaging, Kyoto International Conference Center, 2009, pp.
8. 加藤修、木村雄二、千野満、伊澤早苗：接着強度向上による Chip on Film の Electro Chemical Migration の抑制、JPCA Show 2009/2009 マイクロエレクトロニクスショー/JISSO PROTEC 2009 アカデミックプラザ、2009、6 月 3 日～5 日。





# セルロース類の化学原料化と機能性物質への展開

## —セルロース由来レブリン酸のポリマーへの導入—

応用化学科 小野 拓邦、阿部 克也

マテリアル科学科 橋本 和彦

### Functional Materials from Cellulose Based Chemical Platform

#### — Introduction of Levulinic Acid Derived from Cellulose into Polymers —

Hirokuni ONO , Department of Applied Chemistry

**ABSTRACT :** Poly(vinyl alcohol-co-levulinate) was synthesized by N,N- dicyclohexyl- carbodiimide assisted esterification of poly(vinyl alcohol) with free levulinic acid using 4-pyrrolidino pyridine as a catalyst in N,N-dimethyl acetamide/lithium chloride solvent system in order to optimize the reaction condition. The vinyl levulinate content in the copolymer was attained up to 0.95. The <sup>13</sup>CNMR dyad compositional analysis indicated the block character of the copolymer was 0.92, suggesting almost random poly(polyvinyl alcohol-co-vinyl levulinate) was formed. Glass transition temperature (T<sub>g</sub>) dependence on vinyl levulinate content of the copolymer fitted better into Gordon-Taylor equation as compared with Fox equation and the T<sub>g</sub> of poly(vinyl levulinate) was given as 2.3 °C by the least regression method.

## 1. はじめに

レブリン酸（以後LAと省略）は木材中のセルロースを解重合することにより得られる六単糖を希酸などで分解して得られる[1]。近年、このレブリン酸をバイオマスから比較的安価に高収率で取得する方法が開発された[2]。我々もまた、木質系バイオマスをグリコール類や環状炭酸類で加溶媒分解するとLAが取得できることを報告している[3, 4]。従って、LAは再生可能な植物中に含まれるセルロースからの持続的原料として可能性の高いものと考えられる。そして、多分それ故に、LAやその誘導体がゴム、ポリアミド、エポキシ樹脂などに導入されている[5-8]。

近年、LAを生分解性ポリマーに利用する動きが注目を集めている。これは、LAのアルキルエステルが食用香料に、LAのカルシウム塩がカルシウム補給剤として経口および静脈注射薬に使用されている例からいって低毒性であるということに理由があるかも知れない[9]。LAはセルロース、キトサン、などの天然多糖類に導入されレブリン酸セルロースやN-カルボキシブチルキトサ

ン等にもなっている。また、グルコースやキシロースからの微生物産生ポリエステルについてはポリ(3-ヒドロキシブチラート-3ヒドロキシバリラート)中のバリラート成分増加のためにLAを基質として添加することが試みられている。

ところで、ポリビニルアルコール（以下PVAと省略）は合成高分子での生分解性ポリマーであるにもかかわらず[10]、LAとの複合化高分子についての検討はほとんどされていない。PVAは数少ない水溶性の高分子であり、種々の酸により特性の異なるエステルを形成する。エステル化物は生分解性樹脂や水溶性の生物活性物質などとして、あるいはエステル物質の残存水酸基と多官能性の分子との架橋反応物質として広範囲の応用が考えられている[11]。

PVAの均一系での典型的エステル化反応では、ジメチルスルホキシドや1-メチル-2-ピロリドン溶媒の使用がなされてきたが[12, 13]、最近、Toshらはポリ酢酸ビニルの合成にN,N-ジメチルアセトアミド/塩化リチウム



(以下DMAc/LiClと省略)混合系が適切であり、この系では結晶系は崩すもののセルロースの解重合は起きず、溶解度 6.7%までゲルを形成しない利点があると報告している[14]。しかし、この条件では酸無水物あるいは酸クロリドが使用されるので、これらの形態を取らない遊離の酸であるLAにとっては不都合なことになる。遊離の酸を使用するエステル化として、Carlottiらはエステル化に不利と考えられる水中でPVAの乳酸エステルなどを得たという報告をしている[15]。そこで、我々はLAを用いてこの反応を追試したが目的のエステルは得られなかった。

室温下での遊離カルボン酸とアルコールの縮合反応の触媒としてはピリジン誘導体とN,N-ジシクロヘキシルカルボジイミド(DCC)の混合体が知られている[35-38]。DCCを応用して、テレキーイックなオリゴエステルやポリエステルが室温で合成されており、Hassnerらは4置換ピリジン中でも4-ピリジノピリジン(以下PPと省略)と1,1,3,3,テトラメチル-4-(4-ピリジル)グアニジンがアシル化触媒として有効であると報告している[16]。

DCC/PP混合系ではDCCがN,N-ジシクロリリア(以下DCUと省略)に変換する時に遊離カルボン酸から酸無水物を生成させ、PPが酸無水物に作用して活性アシルピリジウム種となってアルコール性水酸基と反応を行い目的のエステルを生成させる[16-18]。ここで、DCUは反応系から分離可能であり、熱処理によりDCUに再生可能である。

そこで、我々はPVAと遊離カルボン酸であるLAによるエステル化反応をDMAc/LiCl溶媒中でDCC/PP触媒系を用いて検討し、生分解性樹脂となる可能性の高いポリビニルアルコール-ポリビニルレプリン酸共重合体(以下VA-VL共重合体と省略)の合成を試みた。我々の文献調査では、この種の反応系の応用はセルロースのエステル化について報告されているが[17-20]、PVAについては皆無である。

本論文では、(1)種々のレプリン酸置換度(以下VLCと省略)を持つVA-VL共重合体の最適合成条件、(2)VA-VL共重合体の組成シーケンスの検討について焦点を当てる。

## 2. 実験

### 2.1 供資料

ポリビニルアルコールはAldrich社製の公称数平均分子量 89000-98000、公称水酸基置換率 99%のものをそのまま使用した。実験で使用した試薬はすべて試薬特級のものである。DMAcは使用前1週間前より水酸化カリウムで脱水した。LiClは100-105℃で乾燥し、使用までデシケータ中で保存した。

### 2.2 VA-VL共重合体の合成

マグネティックスターラーを入れた温度計と窒素ガス

導入口および乾燥管を装備した200ml容積の丸底3つ口フラスコ内に70-80℃の温度で1.1g(0.026mol)のLiClを110mlのDMAc中に溶解して透明な溶液を得た。LiCl濃度はすべての合成でToshらの方法に準じて1%(wt./vol.)とした[32]。溶液は室温まで冷却し、1.1g(25mmol OH mol当量)のPVAを添加してから、攪拌しつつ70-80℃まで再加熱して透明なPVA溶液とした[14]。PVA溶液を再度室温まで冷却し、5.1g(25mmol)のDCCと0.37g(2.5mmol)のPP、そして3.63g(31.3mmol;PVAのOHモル当量に対し0.25mol過剰)のLAを順次添加し24時間まで窒素雰囲気下に室温でエステル化した結果、白濁した液体を得た。

### 2.3 VA-VL共重合体の精製

白濁した液体中の析出したDCU(DCUが生成したことは<sup>1</sup>H-NMRにより確認)を口過により取り除き透明な反応液を得た。ジイソブチルケトン中にこの透明液を注ぎ入れ、粗VA-VL共重合体を析出させ、口過して分離した。分離した粗VA-VL共重合体を再度メタノールに溶解させ、次いでイソブチルケトン中で再沈殿させてVA-VL共重合体を精製した。場合によっては、精製度を上げるためこの操作を数回繰り返した。なお、メタノールはPVAは溶解しないがVA-VL共重合体は溶解することは予め確認している。

### 2.4 共重合体のNMR測定

共重合体の<sup>1</sup>H-NMRと<sup>13</sup>C-NMRスペクトルは日本電子製JEOLJNM-A500FT NMRにより20℃の条件下で、測定周波数それぞれ500MHzおよび125.6MHzで測定した。溶媒は場合に応じてDMSO-d<sub>6</sub>およびMeOH-d<sub>4</sub>を用いTetramethylsilaneを内部標準とした。

共重合体のVA-VL組成ダイアッドシーケンス分布を検討するために<sup>13</sup>C-NMRにおいてゲート付きデカップリング法で共重合体のメチレン炭素の強度を測定した。測定にあたってはOvernallらの報告を参考として[19]、パルス幅0.54秒、待ち時間を2秒とし、10,000以上のFIDを積算した。強度は3サンプルの強度測定値の平均をもちいた。なお、ポリ(ビニルアルコール-ビニルアセテート)共重合体の文献では、Head-to-HeadあるいはTail-toTail結合を特に考慮に入れていないので、ここでもこれらの結合様式を無視することとした。

### 2.5 元素分析

共重合体の元素分析はPerkin-Elmer社製のModel CHN元素分析装置より行い、VLC(VL置換度)を計算した。

### 2.6 示唆熱分析

得られた共重合体のガラス転移温度(T<sub>g</sub>)をPerkin-Elmer DSC-7(日本パーキンエルマー社製)により測定した。なお、測定に先立ち、インジウムで温度更正を行った。測定は、ヘリウム雰囲気下に20℃から150℃まで昇温速度20℃/分でおこなった。熱履歴を避けるため、T<sub>g</sub>はセカンドラン測定のものを採用した。

### 3. 結果と考察

#### 3. 1 VL 置換度 (VLC) の検討

Fig. 1 に VA-VL 共重合体の <sup>1</sup>H-NMR スペクトルの 1 例を LA および PVA のそれと比較して示す。共重合体のそれぞれのプロトンの帰属は図中に示してある。共重合体は、原料 PVA の骨格の特徴的なシグナルばかりかレブリン酸エステルの特徴をも示している [47-49]。2.10ppm のシグナルと 2.43ppm および 2.69ppm の一対のシグナルは、それぞれレブリン酸エステルのメチル基と 2 つのメチレン基に帰属される。1.2-1.9ppm の幅広い多分裂シグナルは、共重合体の主鎖部分のメチレン結合に由来する。3.76ppm と 5.02ppm に中心をおく多分裂シグナルは、それぞれヒドロキシル基を有するメチンとレブリン酸エステル基を持つ主鎖のメチン基に帰属される。これらの知見から均一系エステル化反応で VA-VL 共重合体が精製していることが判明した。

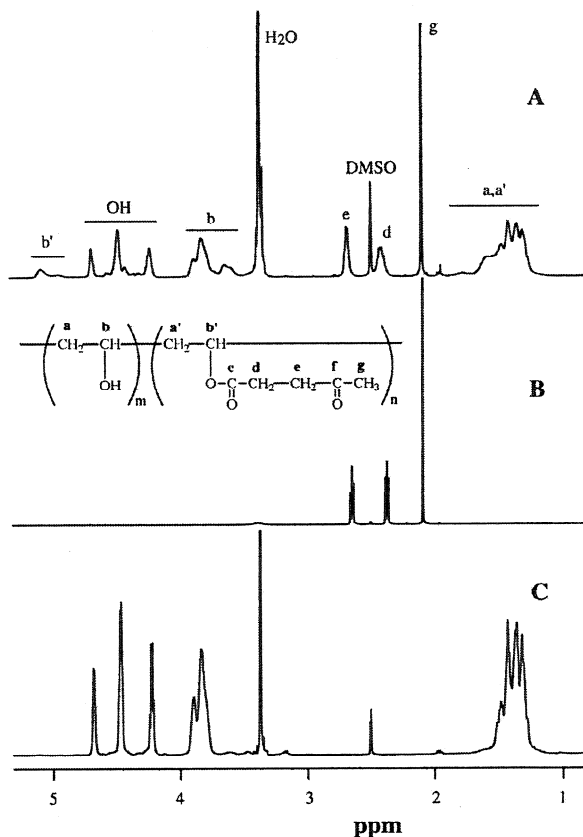


Fig. 1. <sup>1</sup>H NMR spectra of VA-VL copolymer (A); LA (B); PVA (C) in DMSO-*d*<sub>6</sub>.

レブリン酸のエステル化度(ポリビニルアルコールの置換度: VLC) は、レブリン酸エステル基とポリマー主鎖のそれぞれのシグナルの強度比から求められる筈である。ここで、例えば、 $I[\text{CH}_2(\text{d})]$  は Fig. 1 中のメチレン基 d のシグナル強度を、 $I[\text{CH}_2(\text{a}+\text{a}')]$  はメチレン基 a とメチレン基 a' の

強度の総和というふうに、それぞれのシグナルの前に I という符号を付けたものを対応するシグナルの強度として表すことにする。すると、VLC は以下のように表される。

$$\text{VLC} = I[\text{CH}_2(\text{d})]/I[\text{CH}_2(\text{a}+\text{a}')] \quad (1\text{a})$$

$$\text{VLC} = I[\text{CH}_2(\text{e})]/I[\text{CH}_2(\text{a}+\text{a}')] \quad (1\text{b})$$

$$\text{VLC} = 2I[\text{CH}_3(\text{g})]/3I[\text{CH}_2(\text{a}+\text{a}')] \quad (1\text{c})$$

これらの式の中では、溶媒の DMSO-*d*<sub>6</sub> のシグナルに近接するため、影響を受けやすいシグナル d を含む (1a) 式を除いて、(1b) 式および (1c) 式からはほぼ一致する値を得ている。

Table 1 に LA の添加量を変化させて得た VLC の異なる VA-VL 共重合体を試料として <sup>1</sup>H-NMR、<sup>13</sup>C-NMR および元素分析から得た分析結果を示す。なお、<sup>13</sup>C-NMR での解析法は後述する。

ここで、<sup>1</sup>H-NMR と <sup>13</sup>C-NMR の結果は元素分析値の結果とよく対応しており、NMR での精度が確認できた。以上の結果から、以後の実験における VLC 値を <sup>1</sup>H-NMR で求めることとした。

Table 1  
Comparison of VLC values obtained from NMR and elemental analysis

<sup>1</sup> H NMR	<sup>13</sup> C NMR	Elemental analysis
0.14	0.15	0.12
0.24	0.24	0.28
0.58	0.57	0.55
0.69	0.70	0.65
0.91	0.90	0.95

#### 3. 2 高い VLC 値を持つ VA-VL 共重合体の合成

##### 3.2.1 反応温度

エステル化の条件を、反応時間 24 時間、LiCl/DMAc 濃度を 1% (wt./vol.)、LiCl/DMAc 溶媒に対する PVA の濃度を 1% (wt./vol.)、LA に対する DCC のモル比を 0.8、PVA の水酸基当量に対する LA と PP のモル比をそれぞれ 1.25 および 0.1 とした時の反応温度と VLC の関係を Fig. 2 に示した。

VLC 値は反応温度を 60℃にまで上昇させるに従って直線的に減少する傾向が見られた。この時、温度を上昇させるにつれて、不溶物量が減少することが認められた。反応温度 40℃以上で得られた DCU の <sup>1</sup>H-NMR スペクトルには、カルボン酸の副反応で生成する N-アシルユリアに帰属される余分なシグナルが認められた。N-アシルユリアの生成は、DCC の活性を失わせ、エステル化反応を妨害することが Moore と Stupp によって報告されている [20]。この実験事実と我々の実験設備の制限から、以後のエステル化では反応温度を 25℃に固定した。

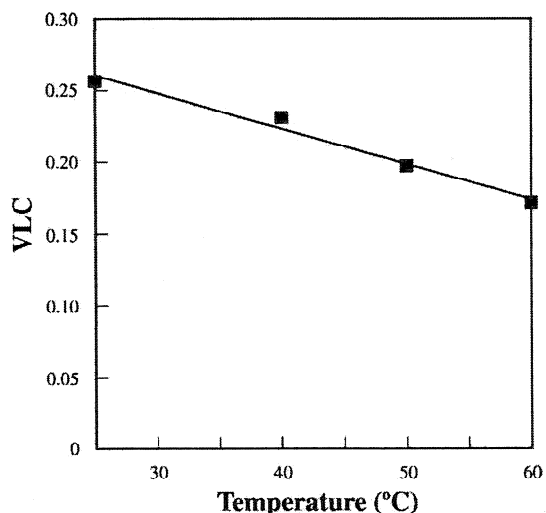


Fig. 2. VLC as a function of reaction temperature.

### 3.2.2 反応時間

反応温度を 25°C に固定し、PP 触媒の添加量を変化させて VLC と反応時間の関係を検討した。Fig. 3 にその結果を示す。VLC は 24 時間反応までは増加するが、それ以後は平衡に達する。したがって、エステル化時間は 24 時間程度で十分であるとの結論を得た。

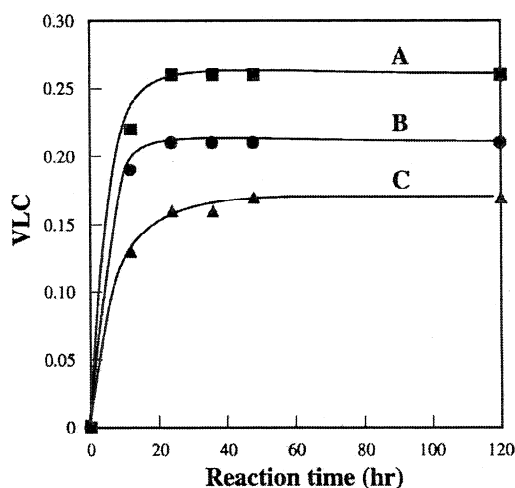


Fig. 3. VLC as a function of reaction time at different PP molar ratio based on PVA: 0.1 (A), 0.05 (B), 0.03 (C). Reaction temperature; 25 °C, LiCl/DMAc concentration; 1% (wt/vol.), PVA concentration based on the LiCl/DMAc solvent; 1% (w/v), the molar ratio of DCC to LA; 0.8, the molar ratio of LA to PVA hydroxyl equivalent; 1.25.

### 3.2.3 DCC 添加量

PP 触媒量を前述の 0.1 に固定し、LA に対する DCC 添加量を変化させて、VLC への影響を検討した。結果を Fig. 4 に示す。DCC 添加量が 0.8 程度で VLC は平衡となっている。このことから、以後の反応では DCC 添加量を 0.8 に固定することとした。

### 3.2.4 PP 触媒添加量

異なる PVA 濃度における PP 触媒量と VLC の関係を Fig. 5 に示す。VLC は PVA 濃度の増加とともに増

加している。そして、PP 添加量が 0.2 に至るまで増加し、それ以降は平衡となる。PP の添加量を 0.2 以上とすると高い VLC 値を得るのに有効である。

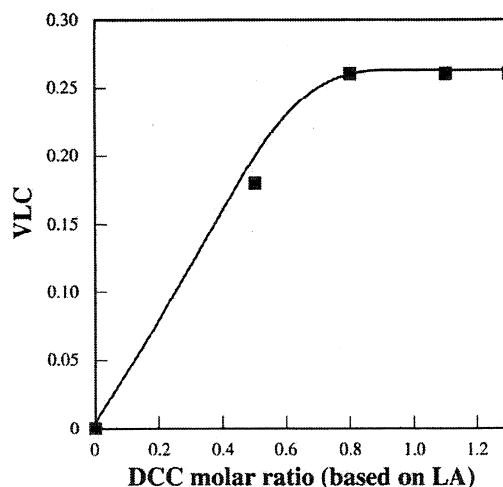


Fig. 4. VLC as a function of the charge amount of DCC based on LA. Reaction condition: reaction temperature; 25 °C, reaction time; 24 h, LiCl/DMAc con.; 1% (w/v), PVA con.; 1% (w/v), the molar ratio of LA and PP to PVA; 1.25 and 0.1, respectively.

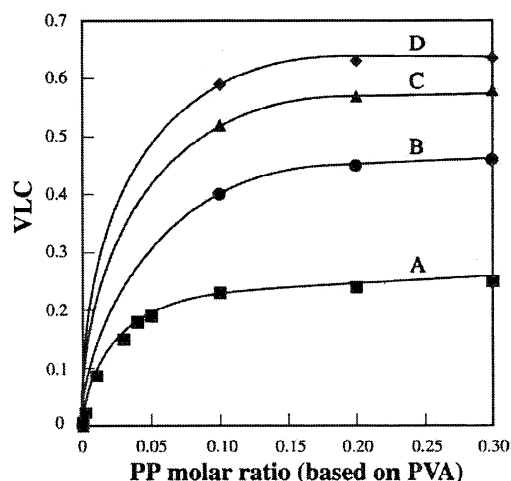


Fig. 5. VLC as a function of the charge molar ratio of PP at different PVA concentration (w/v): 1% (A), 2% (B), 3% (C), 5% (D). Reaction condition: Reaction temperature; 25 °C, reaction time; 24 h, LiCl/DMAc con.; 1% (w/v), the molar ratio of DCC to LA; 0.8, LA molar ratio based on PVA; 1.25.

### 3.2.5 LA 添加量

PVA 添加量を 4 水準とし、PVA に対する LA の配合量を変化させて VLC への影響を検討した。結果を Fig. 6 に示す。VLC は LA 添加量が 2.0 程度までは増加するが、PVA 濃度が 3% を超えると低下し、5% PVA 濃度では予想外に低い値を示している。LA の濃度が高く PVA 濃度 3% 以上では、反応初期に PVA の析出が起き、反応が進行するに従い再溶解することが認められた。再溶解までの時間は PVA と LA の濃度が高いほど長くし、PVA 濃度が 5% になると反応液の粘度が 3% 時に比べて極端に高くなることを認められた。これらのことが 5% 濃度で低い VLC を

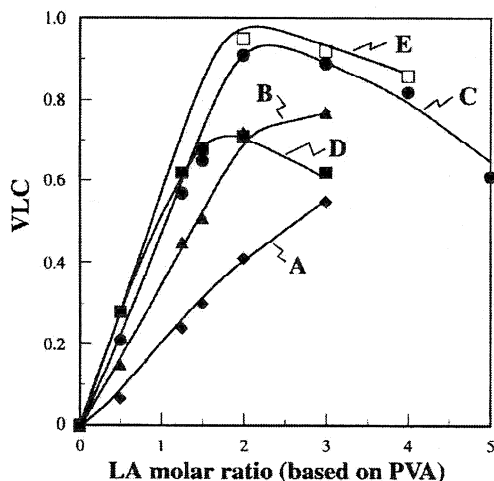


Fig. 6. VLC as a function of the charge molar ratio of LA at different PVA concentration (w/v): 1% (A), 2% (B), 3% (C), 5% (D), 3% for 48 h (E). Reaction condition: LiCl/DMAc con.:1% (w/v), PP molar ratio to PVA; 0.2, DCC/LA molar ratio; 0.8, reaction temp.;25 °C, reaction time; 24 h (A)-(D), 48 h (E).

与える理由であると考えている。しかし、高い VLC を得るためには、高濃度の PVA および LA の条件を

選び、前述した再溶解時間を考慮して、24 時間以上の反応を行うことが必要となる。

実際、反応時間を 48 時間と延長した場合に、Fig. 6(E)に見られるように高い VLC を持つ共重合体が得られている。しかし、PVA 濃度が高ければ反応系の粘度の上昇を招き、取り扱いにくくなるという問題が残された。VLC が 0.95 という高い値を与える共重合体が LA モル濃度 2.0、PVA 濃度 3%、反応時間 48 時間の条件で得られていることは注目に値する。

### 3.3 <sup>13</sup>C-NMR による VA-VL 共重合体の VLC および組成的ダイアッドシーケンス分析

Fig. 7 に VA-VL 共重合体の DMSO-d<sub>6</sub> 中での <sup>13</sup>C-NMR スペクトルを示した。共重合体のスペクトルでは、VAL 中のレプリネート基に由来のカルボキシル炭素 (173ppm)、カリボニル炭素 (208.3ppm)、2 個のメチレン炭素 (27.8ppm、37.3ppm)、およびメチル炭素 (28.3ppm) のシグナルが観察される。また、種々のシーケンスを取る PVA 主鎖に由来するメチン炭素 (66.5ppm)、メチレン炭素 (43.0ppm) が観察される。原料 LA がエステル化反応すると、

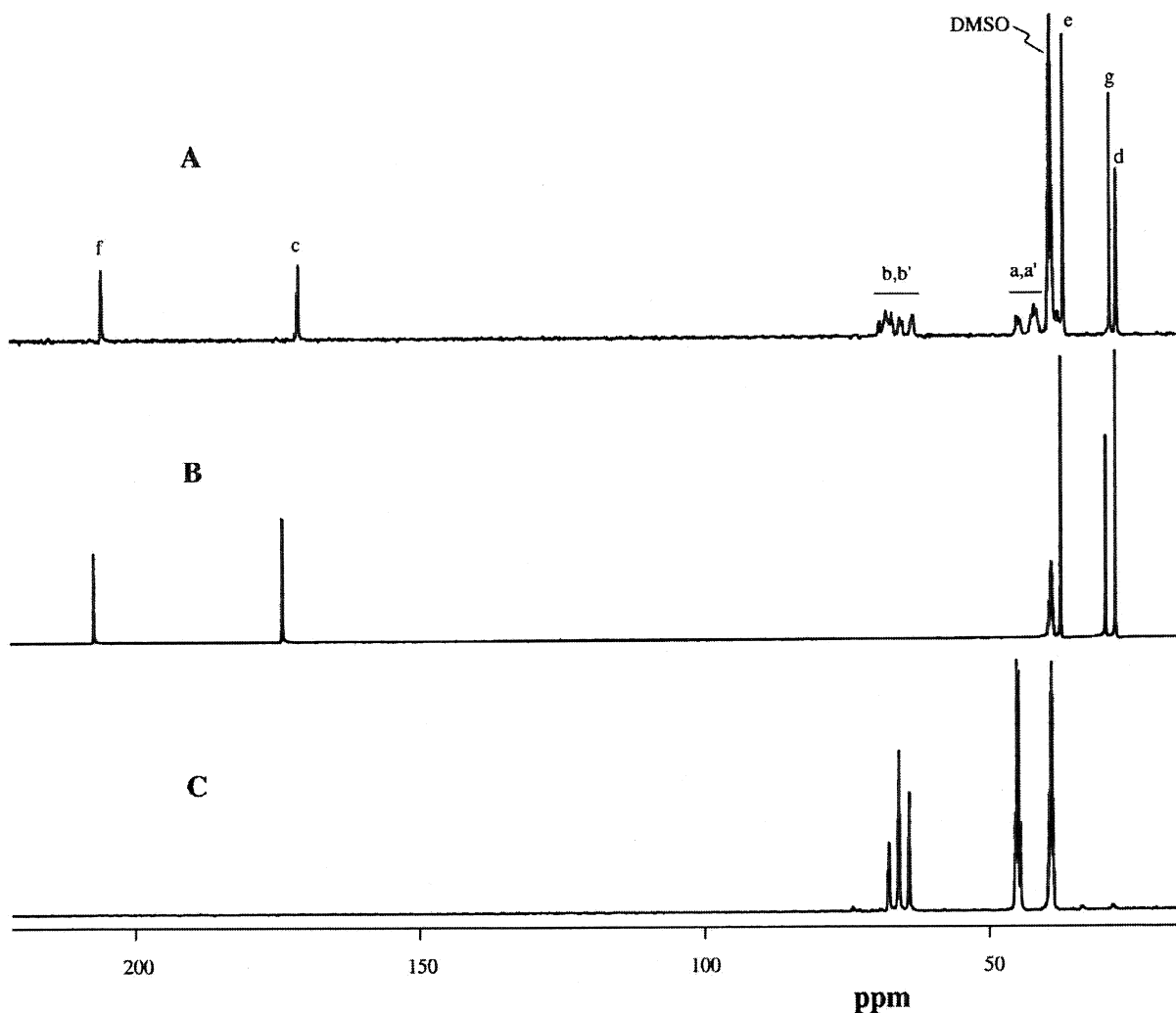


Fig. 7. <sup>13</sup>C NMR spectra of VA-VL copolymers with VLC of 0.56 (A), LA (B) and PVA (C) in DMSO-d<sub>6</sub>.

LA 由来の 174.6ppm および 208.9ppm のシグナルは、それぞれ 173.0ppm と 208.3ppm へと高磁場シフトしている。NMR 溶媒の DMSO-d6 は 39.5ppm に残余のシグナルを示すので溶媒を MeOH-d4 に替えて、置換度の異なる 3 個の共重合体のメチルおよびメチレン領域を測定したスペクトルを Fig. 8 に示す。

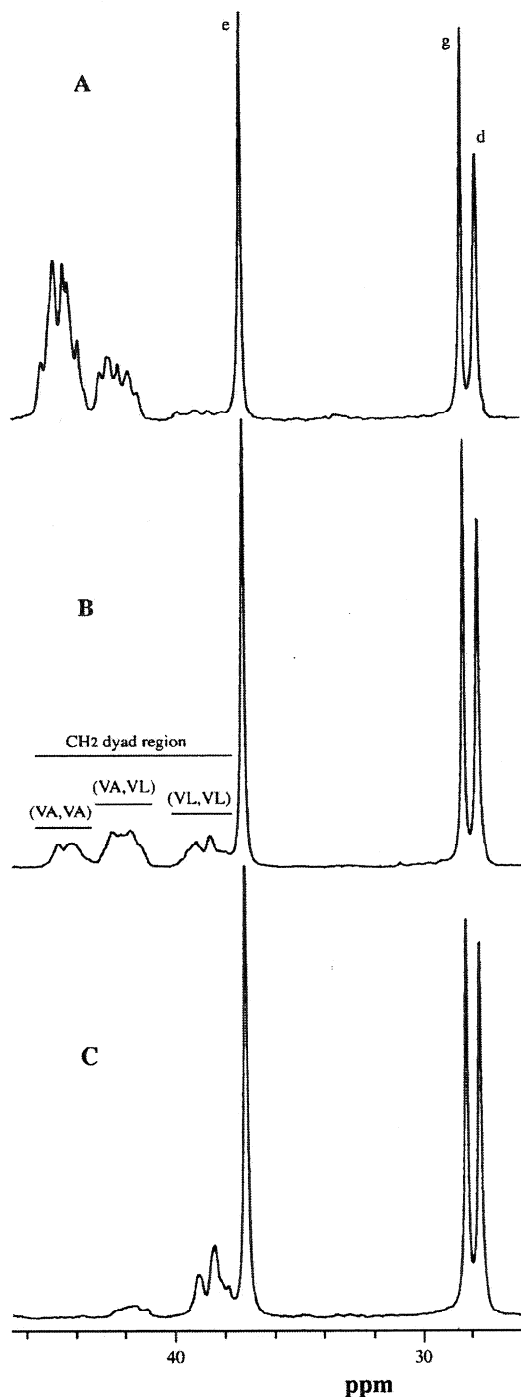


Fig. 8. Enlarged partial <sup>13</sup>C-NMR spectra of VA-VL copolymers at methyl and methylene region in MeOH-d<sub>4</sub>: VLC=0.2 (A), VLC=0.56 (B), VLC=0.91 (C).

ここで、27.8ppm (図中 d のシグナル) と 28.3ppm (図中 g のシグナル) はそれぞれカルボキシル基とカルボニル基に隣接したものである。37.6-46.5ppm

の範囲には、2 個の多分裂シグナルとレプリネート基中のカルボニルに結合したメチレン炭素 (図中 e シグナル) がお互いに分離した形で観察される。置換度とこれらシグナルの強度比について着目すると、VLC が増加するにつれて、44.5ppm に中心をおく多分裂シグナルの強度が減少するが、39.1ppm のシグナル強度は増大する。また、42.1ppm に中心をおくシグナルは VLC が 0.56 では増大し、0.91 では減少している。

以上のことを考え合わせると、これら 44.5ppm、42.1ppm、39.1ppm にそれぞれ中心をおく多重分散シグナルは、低磁場からビニルアルコール/ビニルアルコール (VA,VA)、ビニルアルコール/ビニルレプリネート (VA,VL)、ビニルレプリネート/ビニルレプリネート (VL,VL) の組成的ダイアッドシーケンスを表していると解釈できる。このケミカルシフトの傾向はポリビニルセテートやビニルアルコール/ビニルプロピオネート共重合体のそれと類似している [21, 22]。

以上の結果を踏まえて、本実験で得られた VA-VL 共重合体の組成的ダイアッドシーケンスの分析を検討した。Overall らはポリビニルアセテート (置換度 10%) の <sup>13</sup>C-NMR による置換度定量測定においてメチレン炭素に注目し、ゲート付きデカップリング法により、パルス幅; 0.2 マイクロ秒、パルス待ち時間; 2 秒 (T<sub>1</sub> の約 10 倍) の条件を用いて、信頼できる精度を得ている [19]。そこで、我々もこの条件に準拠して置換度定量測定を行った。ここで、注目する 3 個のメチレン炭素シグナルと 37.3ppm (図中 e のシグナル) および 27.3ppm (図中 d のシグナル) のメチレンシグナルにおけるオーバーハウザー効果はほぼ等しいと仮定した。

前述の VLC 測定に用いた <sup>1</sup>H-NMR での積分強度の命名法をここでも適用すると、3 個の組成的ダイアッドシーケンスは以下のように表される。

$$[VA, VA]/[VA, VL]/[VL, VL] = I (VA, VA)/I (VA, AL)/I (VL, VL) \quad (2)$$

ここで、[VA, VA]、[VA, VL]、[VL, VL] は 3 種のダイアッドシーケンスのモル分率である。

ここで、(VL, VL) のシグナルは置換度が増すにつれてメチレンシグナル e と重複してくるため、その積分強度を正確に測定できないと言う問題点がでてくる。これを回避するために、27.3ppm のシグナル強度はシグナル e の強度に等しいこと、すなわち、I (e) = I (d) を利用する。そうすると、I (VL, VL) は、以下のように表される。

$$I (VL, VL) = \{I (VL, VL) + I (e)\} - I (d) \quad (3)$$

式 (2)、(3) を使用して、共重合体の定量的ダイアッドシーケンス分布と乱れの程度 (ランダムネス; randomness) が計算できる。VA 単位と VL 単位のモ

ル比は以下のように表される。

$$[VA] = [VA, VA] + [VA, VL]/2 \quad (4)$$

$$[VL] = [VA, VL]/2 + [VL, VL] \quad (5)$$

(4)、(5)式から VLC は以下ようになる。

$$[VLC] = [VL]/\{[VA] + [VL]\} \quad (6)$$

ビニルアルコールとビニルレプリネートの平均連鎖長を LOH、LLA と標記することにすれば、それらの平均連鎖長は以下のように表される。

$$LOH = 2[VA]/[VA, VL] \quad (7)$$

$$LLA = 2[VL]/[VA, VL] \quad (8)$$

ランダムネスの指標であるブロックキャラクター ( $\eta$ ) は以下で表される。

$$\eta = [VA, VL]/2[VA][VL] \quad (9)$$

<sup>13</sup>C-NMR の積分値を定量し、以上の数式中の (5)、(6) から求めた VLC 値は、Table.1 での <sup>1</sup>H-NMR の値と良く一致していることから <sup>13</sup>C-NMR による測定の妥当性が示されている。

VA と VL の数平均連鎖長と VLC の関係を Fig. 9 に示した。LOH と LLA の間に反比例的な関係が認められ、VLC が 0.5 付近で両者は交差した。そして、平均連鎖長はほぼ 2.2 となった。このことは、100 個のダイアッド中の [VA, VA]、[VA, VL]、[VL, VL] の比率は 27、46、27 に近いことを示している。

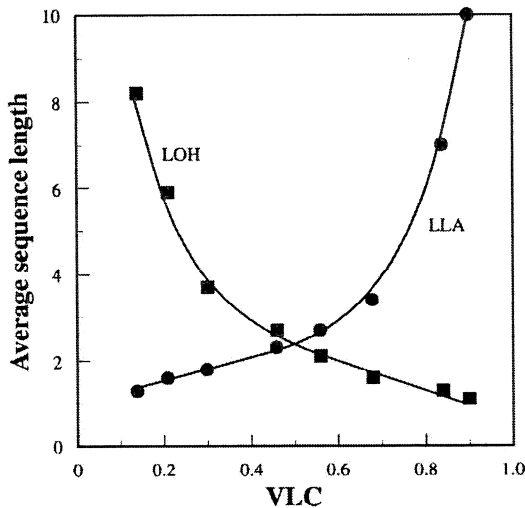


Fig. 9. Dependences of average sequence length on VLC.

VA のモル比に対する [VA, VL] ダイアッドのモル分率を Fig. 10 に示した。ここで、ブロックキャラクター  $\eta$  が 1 の時は完全なランダムポリマーであることをあらわし、 $\eta = 2$  の時は完全交互共重合体であることを示す。この共重合体のブロックキャラクターを求めるために、(9)式を以下のように変形する。

$$[VA, VL]/2 = \eta [VA][VL] \quad (10)$$

この変形により  $\eta$  は [VA][VL] vs. [VA, VL]/2 プロットの傾きとして求められる。最小二乗法で求めた  $\eta$  の値は、相関係数 0.99 の精度において 0.92 であった。このことから本実験で合成した VA-VL 共重合体は組成的にほぼランダムな形態を取ることが判明した。

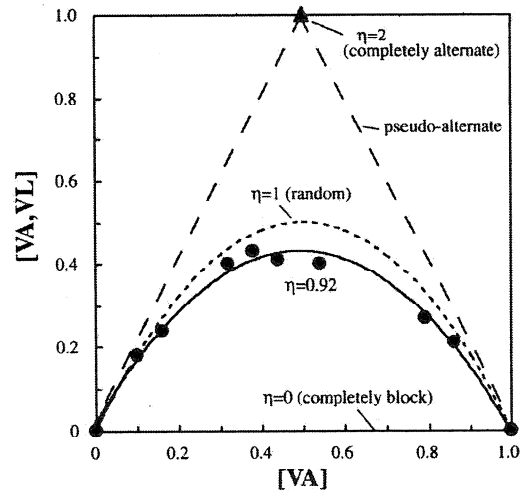


Fig. 10. Diagram of [VA,VL] dyads proportion as a function of VA molar fraction.

### 3.4 共重合体の熱分析

Table 2 に VA-VL 共重合体の各 VLC におけるガラス転移温 ( $T_g$ ) を掲げた。VA と VL の重量分率をそれぞれ  $W_A$  および  $W_B$  とすると、それらは VLC 値から以下のように導かれる。

$$W_A = 44(1 - VLC)/(44 + 98VLC) \quad (11)$$

$$W_B = 1 - W_A = 142VLC/(44 + 98VLC) \quad (12)$$

ここで、44 および 142 はそれぞれ VA と VL の分子量を表し、98 はその差を表している。Table 2 には各 VLC での  $W_B$  の値も掲げてある。

Table 2  
 $T_g$  dependence on the molar fraction and weight fraction of vinyl levulinate unit

VLC	$W_B$ (%)	$T_g$ (°C)
0	0	70.0*
0.13	32.5	52.1
0.20	44.7	44.4
0.28	55.7	35.9
0.40	68.3	28.8
0.57	81.1	16.9
0.71	88.8	12.4
0.87	95.6	6.1
0.91	97.0	5.2

\*  $T_g$  of PVA.

共重合体の  $T_g$  はポリビニルアルコールに導入したレプリン酸量に大きく影響されている。共重合体での成分の重量分率と  $T_g$  の関係はゴードン・テイラー式 [23] あるいはフォックス式 [24] で論じられる。そこで、一連の共重合体の  $T_g$  がゴードン、テ

イラー式に当てはまるか否かを検証した。ビニルアルコール成分とビニルレプリネート成分の Tg をそれぞれ TgA (測定値 70℃) および TgB とすると、ゴードン・テイラー式は以下で表現される。

$$T_g = (T_{gA} \cdot W_A + K T_{gB} \cdot W_B) / (W_A + K W_B) \quad (13)$$

ここで、K は共重合体の Tg における各成分に特有な比容積に関連する定数である。

(13)式を変形すると、都合良く (1/K) と TgB (100% VL 置換のポリビニルレプリネート) が求まる以下の式になる。

$$T_g = (1/K) (T_{gA} - T_g) W_A / W_B + T_{gB} \quad (14)$$

ここで 1/K と TgB は、Fig. 11 に示した Tg vs. (TgA - Tg) W\_A / W\_B プロットでの切片と勾配から求められる。

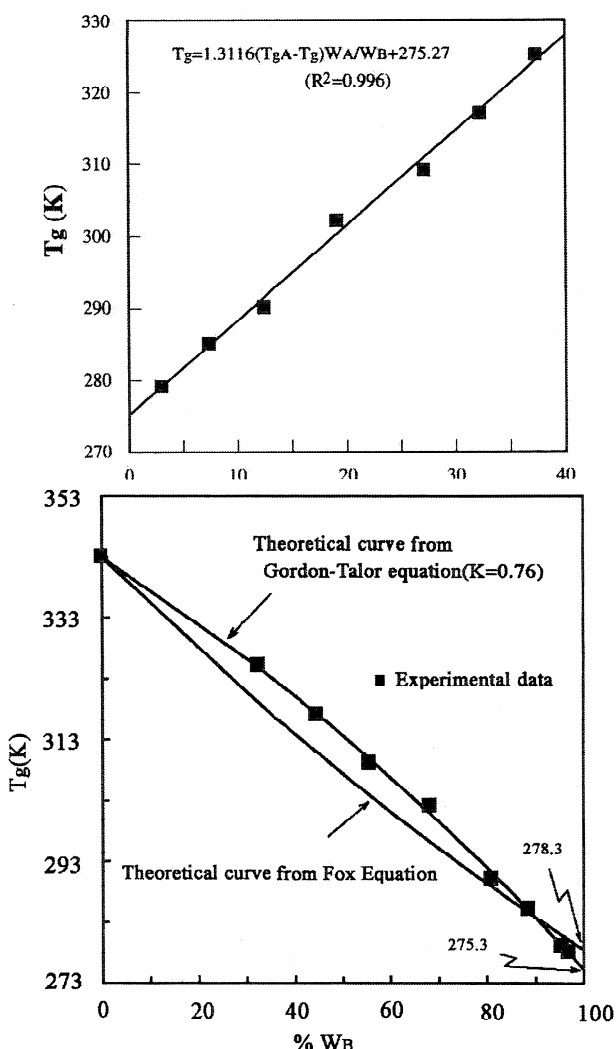


Fig.12 Tg of VOH-VLA copolymers.

このようにして行った線形近似は 0.99 以上の相関係数を示し、K として 0.76 が得られ、TgB (100% VL 置換のポリビニルレプリネート) のガラス転移温度は 2.3℃と決定できた。

一方、フォックス式での近似では、ゴードン・テイラー近似より広い標準偏差 (6.3) を示し、TgB は 5.3℃を示した。Fig. 12 にゴードン・テイラー近似とフォックス近似の度合いを示した。この重合体では、ゴードン・テイラー近似によく一致している。

#### 4 結論

1. DCC を縮合剤とし、DMAC/LiCl 溶媒中で PP 触媒の下 PVA とラのエステル化を 25℃の条件で行った結果、VLC が 0.95 に達する VA-VL 共重合体が得られた。
2. 共重合体の組成的ダイアドシーケンスを <sup>13</sup>C-NMR の積分強度から計算した結果として得られたブロックキャラクターは 0.92 と求められ、上記条件で合成した重合体はほぼランダムな構造を取ることが判明した。
3. 得られた共重合体における VLC と Tg の関連は、フォックス式よりもゴードン・テイラー式に当てはまることが判明した。また、ゴードン・テイラー式から算定した VL ポリマー (完全レプリン酸置換) の Tg は 2.3℃であった。

#### 参考文献

- (1) Shilling, W.L.; Levurinic Acid from Wood Residues. Tappi, Vol.47(10)(1965) pp.105A-108A
- (2) Bozell, J.J.; Moens, L.; Elliot, D. C.; Wang, Y.; Neuenswander, G. G.; Fitzpatrick, S. W.; Bilski, R. J.; Janefield, J. L.; Production of Iluverinic acid and use as a platform chemical for derived products. Resource, Conversion and Recycling, Vol.28(2000) pp.227-239
- (3) Yamada, T.; Ono, H.; Rapid liquefaction of lignocellulose waste by using ethylene carbonate. Bioresource Technology, Vol.70(1999) pp. 61-67.
- (4) 山田龍彦、豊田誠資、志水一允、小野拓邦; 環状炭酸類を用いる木質物質からの樹脂原料組成物、日本特許第 3343564 号 (2002) .
- (5) Noyer, G.; Caoatchou et al. Gutta-percha, Vol.13(1916) pp.8804-8805[CA;10.11525]
- (6) Leonard, R. H.; Bordanca, C.: US Patent 2962478 (1960) [CA;55.30748].
- (7) Holmen, R. E.; US Patent 3433766 (1969) [CA;70.97592].
- (8) Joshi, U. R.; Limaye, P. A.; US Patent 2933472(1960) [CA;54.77713].
- (9) Calcium Levulinate, In Stedman's Medical Dictionary. 27<sup>th</sup> Ed. Pugh, M. B. Ed., Lippincot Williams and Wikins, Baltimore, Maryland, 2000, p.208.
- (10) Chiellini, E.; Corti, A.; D'Antone, S.; Solano, R.; Biodegradation of poly(vinyl alcohol) based materials, PROGRESS IN POLYMER SCIENCE, Vol.28(6)(2003) pp.963-1014.
- (11) Sanchez-Chaves, M.; Arranz, F; Cortazar, M.; Poly(vinyl alcohol) functionalized by monosuccinate groups. Coupling of bioactive amino compounds. POLYMER, Vol.39 (13) (1998) pp.2751-2757.

- (12) Gimenez, V.; Mantecom, A.; Ronda, J. C.; Cadiz, V.; Poly(vinyl alcohol) modified with carboxylic acid anhydride: Crosslinking through carboxylic groups. *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol.65(8) (1997) pp. 1643-1651.
- (13) ) Gimenez, V.; Mantecom, A.; Cadiz, V.; *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol.59(8) (1996) p. 425.
- (14) Tosh, B.; Saika, C. N.; Dass, N. N.; *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol.74 (1999) p. 663.
- (15) Carlotti, S. J.; Giani- Beaune, O.; Schue, F.; *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol.80 (2001) pp. 142--147.
- (16) Hassmer, A.; Alexanian, V. *Tetrahedron Lett.*, Vol.46 (1978) p.4475.
- (17) Holmberg, K.; Hansen, B.; *Acta Chem. Scand.*, B33, (1979) p.410.
- (18) Hassner, A.; Krepski, L.; Alexanian, X.; *Tetrahedron*, Vol.34 (1978) p.2069.
- (19) Overall, D. V.; *Macromolecules*, Vol.17 (1984) pp.1458-1464.
- (20) Moore, J. S.; Stupp, S. I.; *Macromolecules*, Vol.23 (1990) pp.65-70.
- (21) Sanchez-Chaves, M.; Arranz, F; Montes, M.; *POLYMER*, Vol.29 (1988) pp.2243-2248.
- (22) Moritani, T.; Fujiwara, Y.; *Macromolecules* Vol.10(3) (1977) pp.532-535.
- (23) Gordon, M.; Taylor, J. S.; *J. Appl. Chem.* Vol.2 (1952) p.493.
- (24) Fox, T. G.; *Bull. Am. Phys. Soc.*, Vol.1 (1956) p.123.

得られた成果：本研究での成果を英文ジャーナル  
POLYMER に投稿中。





## 疑似血管デバイスを用いた流れによる刺激による内皮細胞の応答の計測

工学院大学 総合研究所 杉井 康彦

広島国際大学 保健医療学部 南山 求

Experimental Investigation of Response of Endothelial Cells Cultured in  
Microchannel with Fluid Shear Stress Exposure

Yasuhiko Sugii, Research Institute for Science and Technology  
Motomu Minamiyama, Hiroshima International University

**ABSTRACT:** In order to investigate vascular diseases such as cause of atherosclerosis and myocardial infarction, relationships of endothelial cells (ECs) covered with surface blood vessels and blood flow stimulation have been experimentally studied. In the study, a blood vessel model for in vitro experiment made from polydimethylsiloxane (PDMS) microchip with a straight microchannel with 400  $\mu\text{m}$  width and 75  $\mu\text{m}$  depth was developed. By optimizing cells cultured condition such as the liquid introduction method and the surface coating for enhancement of cell attachment on the microchannel wall, a cell culture method in the microchannel with fluid shear stress to be confluent were developed. The morphological response, such as shape index, area and orientation, of cultured ECs with shear stress 0.1 Pa was investigated. In the period of low cell density until 60 hours culture, cells were elongated and aligned with flow direction. In the period of over about 50% cell density of confluent, cells became gradually randomly distributed. The area of cell at confluent with shear stress became 1.7 times larger than that of cell without shear stress. The results indicated that interaction of surrounding cells influenced the morphological response of ECs.

### 1. はじめに

現代社会において、大幅な生活様式の変化と急速な高齢化に伴い、心臓病・高血圧症・脳血管障害などに代表される循環器疾患の有病率が高まっている。血液循環に重篤な障害を与える循環器疾患は、動脈硬化や血栓、閉塞などと密接に関連しているが、これらの発症と進展には、血液の流体力学因子が大きな影響を及ぼしている。心臓と血管から構成される循環器の基本的な役割は、血液を循環させることによって体の各臓器・組織を形作る細胞の生命維持・活動に必要な酸素や脂肪、糖分、ミネラル、ビタミンなどの栄養素を供給し、そこで生産された代謝産物や老廃物を排出することである。また、化学

伝達物質であるホルモンを体内の各所に運び、相互の連絡をはかる役割も担っている。生命維持のためには、この循環器の役割が正常に機能することが非常に重要である。そこで、動脈硬化、心筋梗塞、脳梗塞など血管の疾患の原因解明や予防のため、血管の内側を覆っている血管内皮細胞と血流による刺激との関係が *in vivo* や *in vitro* の実験により調べられている<sup>(1-3)</sup>。血管内皮細胞は、血流と接触する部分をただ1層からなり、核の存在する最も厚いところで2-3  $\mu\text{m}$ 程度とであり、敷石のように覆われている。これまでに、*in vivo*の実験により、流体によるせん断応力とNO産生量などに相関があること<sup>(4,5)</sup>やせん断応力による細胞の配向性<sup>(6-8)</sup>などが調べられているが、そのメカニズムは不明な点が多い。メカニズ

ムの解明のために、マイクロ加工技術を用いて作成したマイクロデバイス内で血管内皮細胞を培養し、疑似血管マイクロデバイスが開発され、内皮細胞への白血球の付着性について調べられている<sup>(9-11)</sup>。また、層流の理論解より求めた壁面せん断速度より、動物実験によって求めた速度場から求めたせん断速度が、小さくなっていることが報告されている<sup>(12-14)</sup>。一方、数値計算を用いて計測した内皮細胞の周り流れを求め、推定されたせん断応力の分布が、円管のせん断応力の理論値より小さくなることが示されている<sup>(15)</sup>。

本研究では、マイクロ加工技術を用いて作成したマイクロデバイス内で血管内皮細胞を培養して疑似血管マイクロデバイスを開発し、マイクロ PIV 法を用いたデバイス内の内皮細胞近傍の速度場を計測する。

## 2. 疑似血管マイクロデバイスの開発

### 2.1 マイクロデバイス作成方法

Fig.1 に作成した幅 400 $\mu$ m、深さ 75 $\mu$ m、長さ 2cm の直線流路から成る PDMS(polydimethylsiloxane) 製マイクロデバイスを示す。スピコートを用いてガラス基板にフォトリソ剤(SU-8)を塗布し、ホットプレートで焼き固め、マスクアライナを用いてフォトマスクに描画したマイクロ流路の図面をレジスト剤に露光した。露光した後、再びホットプレートで焼き、現像液で現像して型を作成し、その上に PDMS を流し込みオーブンで焼き固めた後、引き剥がした。酸素プラズマをチップ表面に照射して表面処理を行って流路を親水性にした後、厚さ 0.17mm のガラスに貼り付けて溶液導入用の内径 0.3mm、外径 0.5mm のチューブを取り付けた。なお、PDMS は酸素透過性で、無色透明である。また、流路の位置を把握するために、流路横に流入口から 1.0 mm 毎にメモリを作成した。

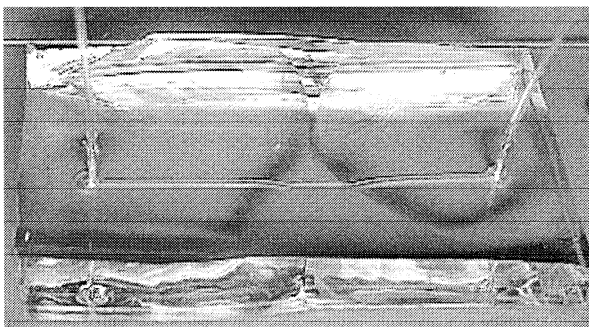


Fig. 1 PDMS microchannel

### 2.2 血管内皮細胞の培養方法

これまでに確立された培養ディッシュなどにおける細胞培養技術では、培養ディッシュなどに細胞と栄養である培養液を入れ、インキュベータ内で静置することによって細胞の培養が可能であった。一方、マイクロ流路内での培養は、微小空間であるために培養液を充填した

だけでは、細胞に対して培養液の量が少なく栄養や酸素が不足し、さらに老廃物が滞留するために、細胞を育てることが出来ない。しかし、新鮮な培養液を細胞に連続的に供給する必要があるが、還流の際の気泡の混入やコンタミ、還流による細胞の剥がれなどの問題などがあり、非常に困難であった。そのため、必要最小限の流量で培養液を還流させて培養が行われている<sup>(15)</sup>。その際の細胞に負荷されるせん断応力は、0.007Pa であった。なお、壁面せん断応力  $\tau$  は、

$$\tau = \frac{6\mu Q}{a^2 b} \quad (1)$$

により求めた。ここで、 $\mu$  は粘度、 $Q$  は流量、 $a, b$  はそれぞれ流路の深さと幅である。

本研究では、大きなせん断応力を負荷しながら細胞を培養する方法を検討し、Fig.2 に示す疑似血管マイクロデバイスを開発した。正常ヒト臍帯静脈内皮細胞 (Human Umbilical Vein Endothelial Cells: HUVECs) を用い、直径 35mm の細胞培養ディッシュに播種し継代した 4 代目の細胞を用いた。継代では、溶液 (HEPES-BSS, Trypsin/EDTA, TNS) にサブカルチャー用試薬セット (ReagentPack™) を加えたものを用いた。内皮細胞培地キット (EGM-2, Cambrex) を用いて、培養を行った。Fig.3 に示すシリンジポンプを用いて吸引する方法により、溶液をマイクロ流路内に導入し、細胞懸濁液などの種々の溶液の交換の際の気泡の混入やコンタミを避けた。70%エタノールおよび紫外線で滅菌したマイクロ流路の壁面を、細胞外マトリックスの一つであるマトリゲルを用いてコーティングした。マトリゲルの濃度は、0.1 mg/ml であり、コーティング溶液を 5.0  $\mu$ l/min の流量で吸引し、5%の CO<sub>2</sub> インキュベータ内で 1 時間静置させた。静地後、無血清の D-MEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) (Gibco) 溶液を流して洗浄した。細胞濃度が 10<sup>6</sup> cells/ml の HUVECs の懸濁液を流量 5.0  $\mu$ l/min でシリンジポンプを用いた吸引により、作成したマイクロ流路内に導入した。マイクロチューブの両端をクリップで挟んで流れを止め、細胞の接着のため 3 時間、37.0 $^{\circ}$ C、5.0%の CO<sub>2</sub> インキュベータ内に静置した。細胞のチャンネル壁面への接着を確認した後、37.0 $^{\circ}$ C、5.0%の CO<sub>2</sub> インキュベータ内で、入口と出口の圧力差を利用する落差法を用いて培養液を還流させ、培養中連続してせん断応力を細胞に負荷した。インキュベータ内が密閉空間であるために電源を必要とするシリンジポンプなどを使用することができず、長時間培地を還流するため、落差法を用いた。なお、流入口と流出口の水位差を与えてマイクロ流路内に純水を流し、電子天秤を用いて計測した質量から流量を求めることにより、検定を行った。

20 倍(N.A.=0.40)の位相差対物レンズと 1004  $\times$  1002 画素、14bit の高感度カメラ (iXon 885, Andor) を取り付け、倒立型位相差顕微鏡 (IX71, Olympus) を用いて、マイ

クロ流路内の内皮細胞を撮影した。撮影領域は、 $402\ \mu\text{m} \times 401\ \mu\text{m}$  であり、流路下部のガラス面に焦点を合わせて、細胞画像をコンピュータに取り込み、画像解析ソフト Image J を用いて、Fig.4 に示す Shape Index<sup>(20)</sup> および配向角を求めた。Shape Index(SI)は、

$$\text{Shape Index} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

で定義される。ここで、A は細胞の面積、P は細胞の周囲長である。配向角は、最適楕円の長軸と流れ方向のなす角とし、時計周りを正とした。

本研究では、細胞にフィッティングした最適楕円の面積および周囲長から SI を求めた。マイクロ流路内の各培養時間および静置培養の細胞画像から、流路壁面近傍の細胞と分裂中の細胞を除いた 86 から 121 個の細胞を抽出し解析を行った。得られた SI について、シュューデント t 検定を行った。

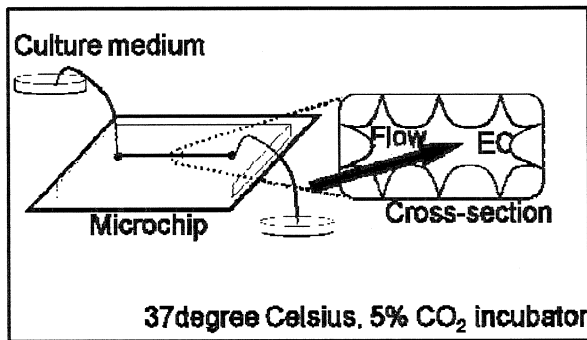


Fig. 2 Blood vessel model

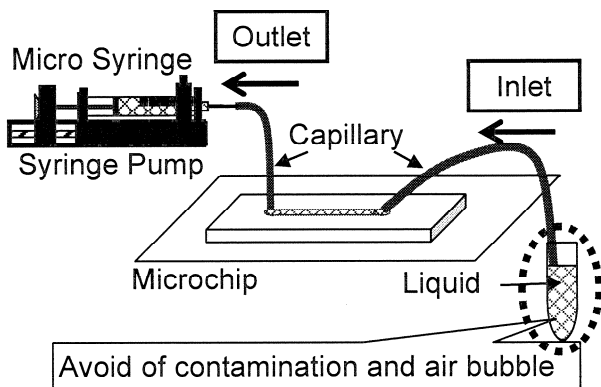
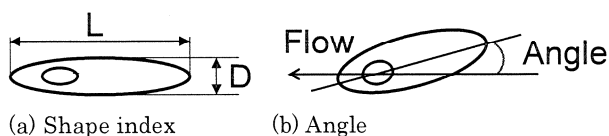


Fig. 3 Liquid introduction method by withdraw

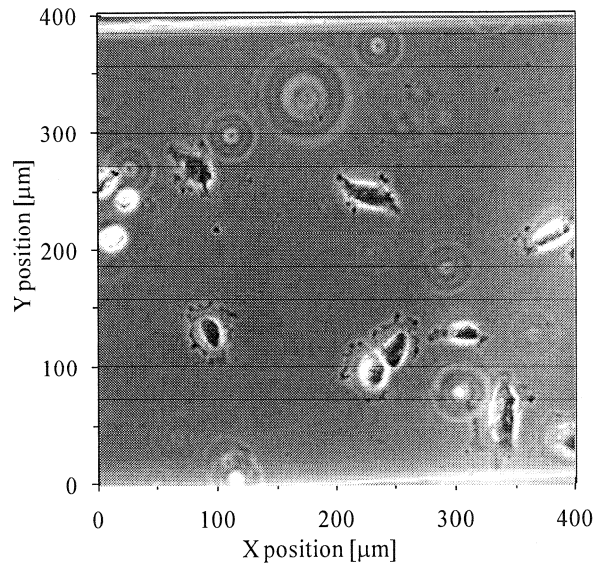


(a) Shape index (b) Angle  
Fig. 4 Shape index and angle

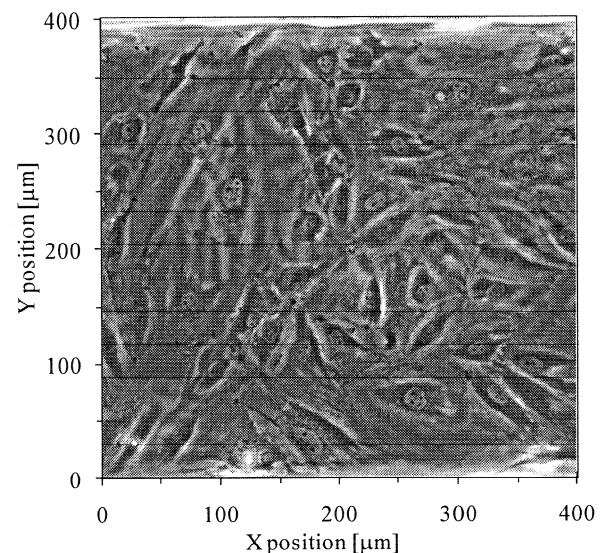
### 3. 実験結果

Fig.5(a)に細胞を導入後 3 時間の流路内の様子を示す。

$y = 0$  と  $400\ \mu\text{m}$  が流路壁面であり、培地は落差法を用いて、細胞に  $0.1\text{Pa}$  のせん断応力が負荷されるように、右から左へ流した。細胞が底面に接着しており、丸みを帯びて広がっている。大きさは  $40\ \mu\text{m}$  程度であり、導入直後と比較して 2.5 倍程度の大きさになっている。細胞密度は、 $0.46 \times 10^2\ \text{cells}/\text{mm}^2$  であった。細胞の接着率が低い原因として、流れにより細胞が剥がれたためと考えられる。Fig.5(b)に培養開始から 154 時間後の細胞画像を示す。細胞の大きさは、 $100\text{-}150\ \mu\text{m}$  程度の細長い形状や丸みを帯びた形状である。130 時間後の細胞密度とほとんど変化が見られず、コンフルエントとなった。



(a) 3 hours



(b) 154 hours

Fig.5 Endothelial cells cultured in microchannel

Fig.6 にマイクロ流路内でせん断応力を負荷しながら培養した内皮細胞の増殖曲線を示す。コントロールとして同様にマトリゲルでコーティングした直径  $35\ \text{mm}$  の

ディッシュにより静置培養した結果を用いた。0時間の値は、細胞を捲いた密度であり、3時間後から接着し増殖した細胞の密度である。0.1, 1.0Pa のせん断応力の負荷をかけながらマイクロ流路内で培養した場合には、細胞の接着率はそれぞれ 46.8, 91.6%となった。0.1Pa のせん断応力を負荷しながら培養した細胞では、154 時間後に  $2.07 \times 10^2 \text{ cells/mm}^2$  と、コンフルエントになった。1.0Pa のせん断応力を負荷しながら培養した細胞では、64 時間後に気泡の混入により細胞が死滅した。しかしながら、細胞の接着と増殖が確認できており、コンフルエントまで培養が可能と思われる。一方、静置培養した内皮細胞は、播種後 116 時間後にコンフルエントになり、細胞密度は  $2.49 \times 10^2 \text{ cells/mm}^2$  と 0.1Pa のせん断応力を負荷したもののより大きな細胞密度となった。

Fig.7 に、式(2)の細胞の SI と面積を示す。細胞の接着直後は、せん断応力を負荷しておらず、SI は  $0.98 \pm 0.02$  と円形に近い値を示し、面積も  $0.84 \pm 0.45 \times 10^3 \mu\text{m}^2$  と最小値を示した。培養が進むに連れて、SI が減少し、面積が増加した。これは、細胞が細長く伸長し、薄く広がったためと考えられる。60 時間付近で SI が最小で面積が最大となり、その後 SI は増加し、面積は減少した。コンフルエント時では、SI が  $0.81 \pm 0.15$ 、面積が  $2.37 \pm 1.37 \times 10^3 \mu\text{m}^2$  となった。

Fig.8 に細胞の配向角を示す。接着直後は、 $-0.41 \pm 50.3$  度と平均値がほぼ 0 度であり、標準偏差が大きい。培養が進むに連れて、標準偏差が減少し Fig.6 と同様に 60 時間程度で  $3.75 \pm 21.9$  度と最小となり、その後再び増加した。Fig.8(a)に細胞の配向角と(b)-(e)にヒストグラムを示す。Fig.8(b)に示す接着直後は、各角度の頻度がほぼ同じであり、ランダムに配向していることが確認できた。せん断応力の負荷しながら培養するに連れて、Fig.8(c)に示す 60 時間付近で、 $\pm 20$  度以下の頻度が増加し、 $\pm 30$  度以上の頻度が減少し、標準偏差が最小となった。Fig.8(d)のコンフルエント時では、各角度の頻度がほぼ同じ値になり、標準偏差が増加した。このことから、培養開始後 60 時間までは、細胞が流れ方向に配向し、細胞が増加するに連れて、流れ方向への配向が解消されたことがわかった。

Fig.9 に 0.1Pa のせん断応力を負荷して培養したコンフルエントになった場合と静置培養した場合との比較を示す。静置培養およびせん断応力を負荷して培養した細胞の SI は、それぞれ  $0.85 \pm 0.11$ ,  $0.81 \pm 0.15$  であり、せん断応力を負荷して培養した細胞が有意に ( $p < 0.05$ ) 伸長している。また、静置培養およびせん断応力を負荷して培養した細胞の面積は、それぞれ  $1.43 \pm 0.53 \times 10^3$ ,  $2.36 \pm 1.37 \times 10^3 \mu\text{m}^2$  と、せん断応力を負荷して培養した細胞が有意に ( $p < 0.05$ ) 広がっている。

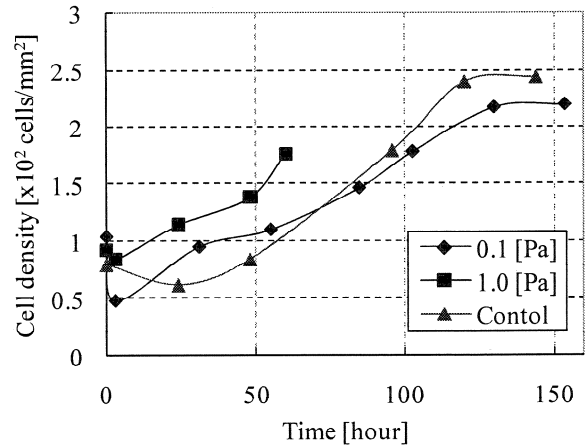


Fig. 6 Growth curves of ECs cultured in microchannel

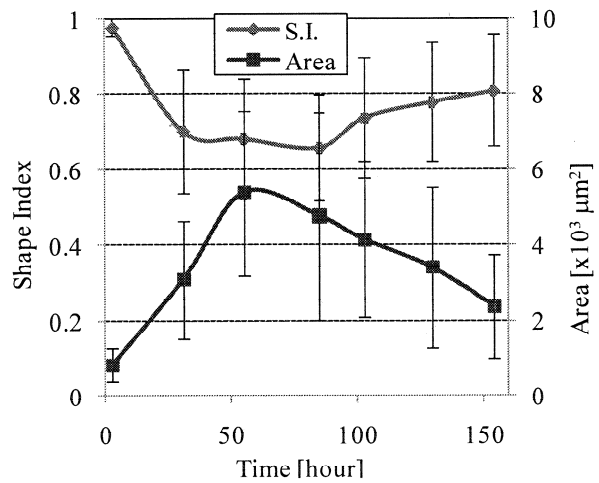
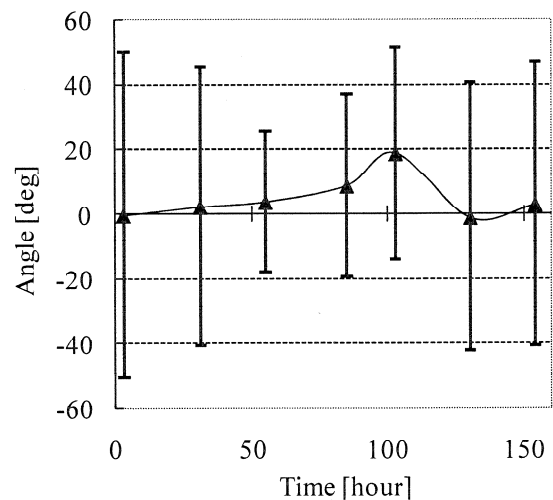
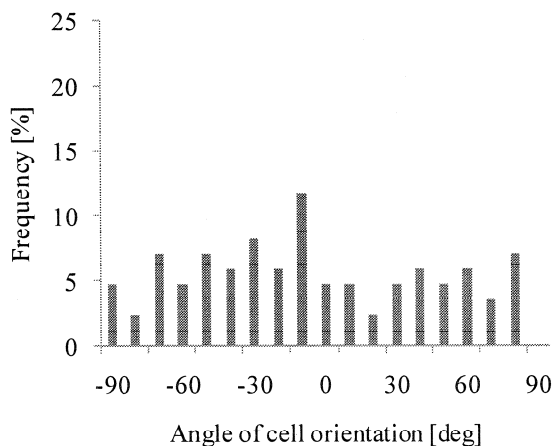


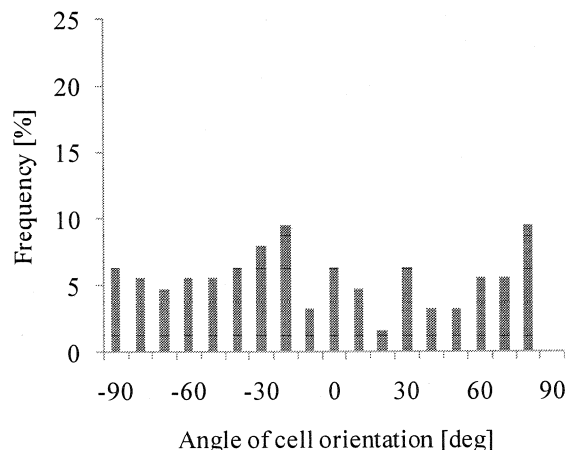
Fig. 7 Shape index and area of ECs cultured in microchannel with shear stress 0.1 Pa



(a) Angle of ECs orientation

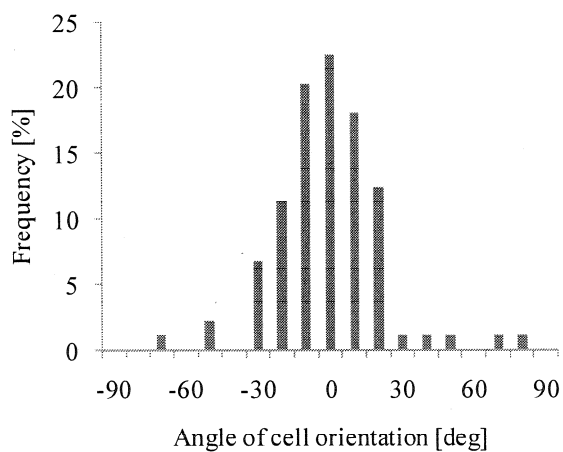


(b) 3 hours with shear stress 0.1 Pa

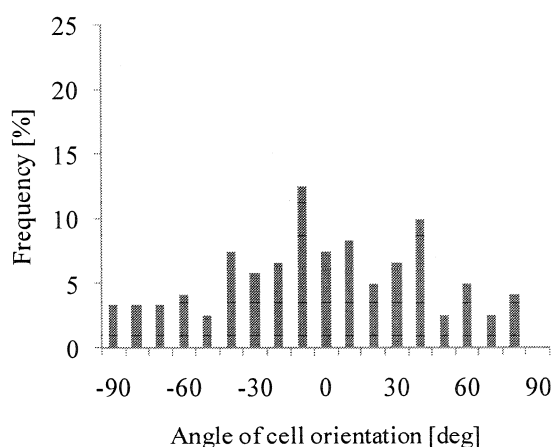


(e) Control

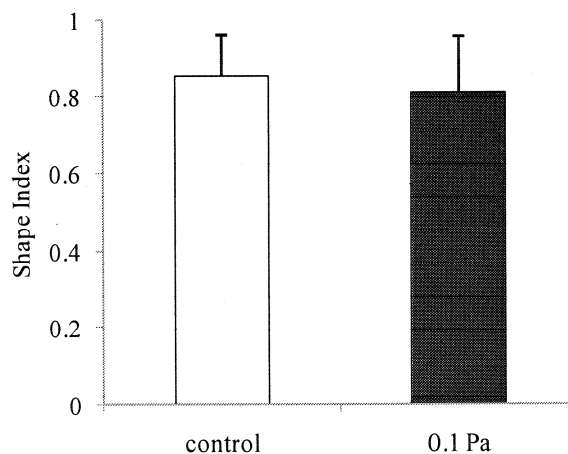
Fig. 8 Histograms of Angle of ECs orientation cultured with shear stress 0.1 Pa and without shear stress



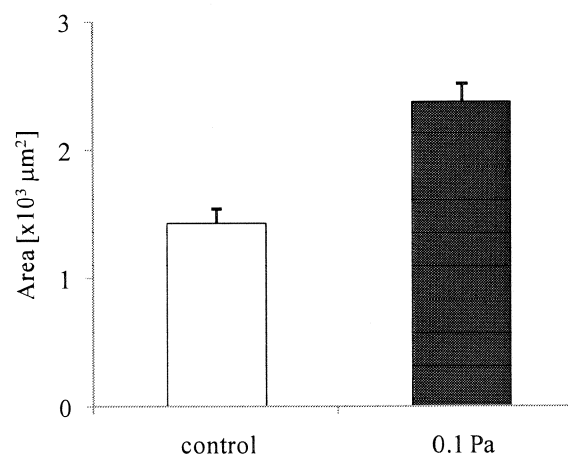
(c) 55 hours with shear stress 0.1 Pa



(d) 154 hours with shear stress 0.1 Pa



(a) Shape index



(b) Area

Fig. 9 Shape index and area of ECs cultured with shear stress 0.1 Pa and without shear stress

4. 考察

本研究では、マイクロ流路内でせん断応力を負荷しながら培養する方法を確立し、0.1Paのせん断応力を負荷しながら培養した細胞の形態変化を観察した。増殖初期の培養開始後60時間程度までは、SIの減少と細胞面積の増加、および細胞の流れ方向への配向が観察された。60時間以降の細胞密度の増加と共に、SIの増加と細胞面積の減少、および配向の解消が観察された。

増殖初期の段階における細胞の伸長と配向は、他の細胞との接触が無いことや近接する細胞が無いことによる比較的大きなせん断応力が作用したためと考えられる。一方、コンフルエントの約50%程度の細胞密度に達すると、細胞間の相互作用や隣接する細胞の存在によってせん断応力が小さくなり、伸長と配向が抑制されたことが考えられる。また、0.1Paのせん断応力を負荷しながら培養しコンフルエントになった細胞は、静置培養に比べ、有意に伸長して面積が1.7倍程度に広がり、0.1Paと比較的小さなせん断応力でも形態変化が生じた。

コンフルエントになったウシ大動脈内皮細胞(BAEC)に0.1~0.5Paのせん断応力を負荷した場合、8日間形態変化が起らず、0.8Paのせん断応力の場合に2日目では形態変化が観察されており<sup>(5)</sup>、本研究での0.1Paのせん断応力による伸長と相違が見られる。一方、内皮細胞が増殖するスペースがある場合には、せん断応力が増殖を刺激し、細胞同士が密に密着している場合にはせん断応力は増殖に影響しないか抑制すると考えられており<sup>(22)</sup>、本研究の増殖時の伸長・配向の変化との関連が考えられる。

また、せん断応力により細胞の高さが小さくなり、せん断応力の勾配が小さくなるように変形していると考えられており<sup>(6)</sup>、隣接する細胞形状が細胞近傍の微視的な流れが大きく変化することが報告されており<sup>(21)</sup>、隣接する細胞も形状が細胞の形態変化に影響することが考えられる。

今後、細胞近傍の微視的な流れを直接可視化・計測し、細胞にかかるせん断応力の勾配と形態変化の関係や周囲の細胞との相互作用を調べる必要がある。

## 5. おわりに

PDMS製マイクロ流路内で血管内皮細胞の培養方法を検討し、流れによるせん断応力を負荷しながらコンフルエントにまで培養が可能となった。細胞密度が小さい増殖期では、細胞の伸長と配向が見られた。細胞密度が増加するにつれて、伸長が減少し配向が解消された。

本研究は一部、平成19~20年度科学研究費補助金 基盤研究(B)「疑似血管デバイスをを用いた内皮細胞と流れによる刺激との相互作用の解明」(課題番号19360089)の援助を受けた。

## 参考文献

- (1) Gouverneur, M., Berg, B. V. D., Nieuwdorp, M., Stroed, E., Vink, H., Vasculoprotective properties of the endothelial glycocalyx: effects of fluid shear stress, *J. Inter. Medicine*, Vol.259, No.4 (2006), pp.393-400.
- (2) Pries, A. R., Secomb, T. W., Microvascular blood viscosity in vivo and the endothelial surface layer, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, Vol. 289 (2005), pp. H2657-H2664.
- (3) Fry, D. L., Acute vascular endothelial changes associated with increased blood velocity gradients, *Circulation Research*, Vol. 22 (1968), pp.165-197.
- (4) Levesque, M. J., Nerem, R. M., The dynamic response of vascular endothelial cells to fluid shear stress, *J. Biomech. Eng.*, Vol.103, No.3 (1981), pp.177-85.
- (5) Dewey, C. F. Jr., Bussolari, S. R., Gimbrone, M. A. Jr., Davies, P. F., The dynamic response of vascular endothelial cells to fluid shear stress, *J Biomech Eng.*, Vol.103, No.3 (1981) pp.177-185.
- (6) Barbee, K. A., Davies, P. F., Lal, R., Shear stress-induced reorganization of the surface topography of living endothelial cells imaged by atomic force microscopy, *Circulation Research*, Vol 74 (1994) pp.163-171.
- (7) Ando, J., Komatsuda, T., Kamiya, A., Cytoplasmic calcium response to fluid shear stress in cultured vascular endothelial cells, *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, Vol.24, No. 9 (1988), pp.871-877.
- (8) Nozawa, T., Cheng, C. P., Noda, T., Little, W. C., Effect of exercise on left ventricular mechanical efficiency in conscious dogs, *Circulation*, Vol.90 (1994), pp.3047-3054.
- (9) Berger, H. J., Prasad, S. K., Davidoff, A. J., Pimental, D., Ellingsen, O., Marsh, J. D., Smith, T. W., Kelly, R. A., Continual electric field stimulation preserves contractile function of adult ventricular myocytes in primary culture, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, Vol.266 (1994), pp.H341-H349.
- (10) Mochizuki, S., Vink, H., Hiramatsu, O., Kajita, T., Shigeto, F., Spaan, J. A. E., Kajiya, F., Role of hyaluronic acid glycosaminoglycans in shear-induced endothelium-derived nitric oxide release, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, Vol.285 (2003), pp.H722-H726.
- (11) Oblak, T. D. A., Root, P., Spence, D. M., Fluorescence Monitoring of ATP-Stimulated, Endothelium-Derived Nitric Oxide Production in Channels of a Poly(dimethylsiloxane)-Based Microfluidic Device, *Anal. Chem.*, Vol.78, No.9 (2006), pp.3193-3197.
- (12) Sakamoto, N., Oi, M., Ohashi, T., Sato, M., Nitric Oxide Production and Smooth Muscle Cell Phenotype of Endothelial Cell-Smooth Muscle Cell Cocultured Model, *J. Biomech. Sci. Eng.*, Vol.1, No.1 (2006), pp.224-233.
- (13) Masuda, M., Fujiwara, K., Morphological responses of single endothelial cells exposed to physiological levels of fluid shear stress, *Front Med. Biol. Eng.*, Vol.5, No.2 (1993), pp.79-87.
- (14) Katakoka, N., Ujita, S., Kimura, K., Sato, M., The Morphological Responses of Cultured Bovine Aortic Endothelial Cells to Fluid-Imposed Shear Stress under Sparse and Colony Conditions, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.63, No.607 (1997), pp. 838-845.
- (15) Tanaka, Y., Kikukawa, Y., Sato, K., Sugii, Y., Kitamori, T., Culture and leukocyte adhesion assay of human arterial endothelial cells in a glass microchip, *Anal. Sci.*, Vol.23, No.3 (2007), pp.261-266.
- (16) Korin, N., Bransky, A., Dinnar, U., Levenberg, S., A parametric study of human fibroblasts culture in a microchannel bioreactor, *Lab on a Chip*, Vol.7 (2007) pp.611-617.
- (17) Sugii, Y., Nakano, A., Nishio, S., Minamiyama, M., Blood Flow Velocity Measurement in Microcirculation

- Field by Means of Highly Accurate Iterative PIV, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.67, No.662 (2001), pp. 2431-2436.
- (18) Sugii, Y., Nishio, S., Okamoto, K., In vivo PIV measurement of red blood cell velocity field in microvessels considering mesentery motion, *Physiol. Meas.*, Vol.23 (2002), pp.403-416.
- (19) Smith, M. L., Long, D. S., Damiano, E. R., Ley, K., Near-Wall  $\mu$ -PIV Reveals a Hydrodynamically Relevant Endothelial Surface Layer in Venules In Vivo, *Biophysical J.*, Vol.85 (2003), pp.637-645.
- (20) Sugii, Y., Nishio, S., Okamoto, K., Nakano, A., Minamiyama, M., Blood Flow Velocity Measurement in the Microcirculation Using Highly Accurate Iterative PIV : 2nd Report, Analysis of Ensemble Averaged Velocity in Rat Mesenteric Arterioles, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.691 (2004), pp. 701-706.
- (21) Fukushima, S., Fujioka, H., Tanishita, K., Shear Stress Distribution on the Surface of Endothelial Cells during Flow-Induced Morphological Remodeling, *JSME International Journal Series C*, Vol. 46, No.4 (2003), pp.1275-1283.
- (22) Cornhill, J. F., Levesque, M. J., Herderick, E. E., Nerem, R. M., Kilman, J. W., Vasko, J. S., Quantitative study of the rabbit aortic endothelium using vascular casts, *Atherosclerosis*, No.35, Vol.3 (1980) pp.321-337.
- (23) Akimoto, S., Mitsumata, M., Sasaguri, T., Yoshida, Y., Laminar Shear Stress Inhibits Vascular Endothelial Cell Proliferation by Inducing Cyclin-Dependent Kinase Inhibitor p21, *Circulation Research*, Vol.86 (2000) pp.185-190.

## ① 発表論文

- (1) 杉井 康彦, マイクロ流路内でせん断応力を負荷しながら培養した内皮細胞の形態変化, 日本機械学会論文集, (投稿中)
- (2) Tanaka Y, Kikukawa Y, Sato K, Sugii Y, Kitamori T, GLASS MICROCHIP-BASED BIOASSAY SYSTEM USING HUMAN ARTERIAL ENDOTHELIAL CELLS, The 11th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, (micro-TAS2007), Paris, France, 2007.
- (3) Segawa N, Sugii Y, In Vitro Experiments of Blood Flow in Microchip Cultured Endothelial Cells, Third Asian Pacific Conference on Biomechanics, Tokyo, Japan, 2007.
- (4) Segawa N, Sugii Y, Velocity Measurement of in Vitro Blood Flow in Microchip Cultured Endothelial Cells, The first ASME Micro/Nanoscale Heat Transfer International Conference (MNHT08), Tainan, Taiwan, MNHT2008-52250, 2008.
- (5) Sugii Y, Segawa N, Measurement of Shear Stress on Surface of Endothelial Cells Cultured in Microchip, Proc. 14th Int. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2008.
- (6) Sugii Y, Segawa N, Measurement of Morphological Responses of Endothelial Cells Cultured in Microchannel by Fluid Shear Stress, 4th Asian Pacific Conference on Biomechanics, Christchurch, New Zealand, 238-239, 2009.

## ② 学会発表

- (1) 瀬川 直樹, 杉井 康彦, 内皮細胞を用いた疑似血

- 管デバイス内の速度場計測, 可視化情報学会 全国講演会 (岐阜 2007), 2007.
- (2) 瀬川 直樹, 杉井 康彦, マイクロ流路内で培養した内皮細胞の表面近傍の速度場計測, 日本機械学会 第 20 回 バイオエンジニアリング講演会, 103, 2008.





# 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

工学院大学 共通課程 長谷川 憲  
パリ第10大学 教授 ピエール・ブリュネ

## La Constitution et la Réforme du système politique

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

HASEGAWA Ken            Département d'éducation générale  
Pierre Brunet            Université de Paris 10

**ABSTRACT :** 本研究は、欧州連合の地域的拡大により、欧州および東アジアにおいて急速に進む国際化と地域化現象が、市民生活に与える影響に関して、国際機関、国家制度並びに地方制度改革とそこに含まれる問題点を、日仏の研究者による国際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するものである。とりわけ東西冷戦構造の終了後、東西両陣営の対決の下、放置されてきた様々な問題が変化を見せている。90年代以降の日本において制度改革が進行した背景に、東欧・中欧諸国の社会主義体制からの離脱とソ連邦の崩壊の結果、両陣営に依る冷戦が終結し、左右のイデオロギー対立が弱まったことが背景に有ることは否定できないのである。

Après la fin de la structure de la guerre froide de l'Ouest et l'Est, sous l'affrontement des deux camps de l'Ouest et de l'Est, les différents problèmes abandonnés commencent à se transformer. En matière de contexte de l'avancement de la réforme des systèmes au Japon les années 1990, on ne peut pas ignorer qu'il y ait eu la détente de l'opposition idéologique entre la gauche et la droite en raison de l'effondrement de l'U.R.S.S., le détachement du régime socialiste des pays de l'Europe orientale et centrale et la fin de la guerre froide entre le camp de l'Ouest et celui de l'Est.

# 立憲主義と民主主義

パリ第10大学 教授 ピエール・ブリュネ

## *Constitutionnalisme et démocratie : comment concilier la démocratie avec le contrôle de la constitutionnalité de la loi?*

Professeur à l'Université Paris10 Pierre Brunet

La question la plus difficile que la théorie constitutionnelle ait à affronter est bien évidemment celle de la justification de l'existence même du contrôle de constitutionnalité. Là comme ailleurs, plusieurs réponses existent, dont aucune n'est réellement satisfaisante, tout le problème se ramenant à celui de savoir comment on peut concilier le contrôle de constitutionnalité avec ce qu'il est censé justement assurer ou garantir : la démocratie.

Je me propose d'examiner ici plusieurs réponses apportées à cette question de la conciliation, sans prétendre à l'exhaustivité.

### 1. *Suprématie de la constitution*

De nombreux juristes ont tenté de justifier le contrôle de constitutionnalité par la suprématie de la constitution. L'argument est assez simple. On le trouve fort bien exprimé chez Marshall dans la décision *Marbury vs Madison* qui écrivait :

« ou la constitution est un droit supérieur, suprême, inaltérable par des moyens ordinaires ; ou elle est sur le même plan que la loi ordinaire et, à l'instar des autres lois, elle est modifiable selon la volonté de la législature. Si c'est la première partie de la proposition qui est vraie, alors une loi contraire à la constitution n'est pas du droit ; si c'est la deuxième qui est vraie,

alors les constitutions écrites ne sont que d'absurdes tentatives de la part des peuples de limiter un pouvoir par nature illimité »<sup>1</sup>.

La structure de l'argumentation consiste donc en ceci :

- a) La constitution est supérieure à la loi
- b) Une loi contraire à la constitution n'est pas du droit, elle est nulle (*void*)
- c) Si elle est nulle, elle ne doit pas être appliquée. Il faut donc des juges pour l'annuler.

---

<sup>1</sup> Décision *Marbury v. Madison*, in E. ZOLLER (dir.), *Les grands arrêts de la Cour suprême des États-Unis*, Paris, PUF, 2000, p. 102.

On trouve le même raisonnement chez Kelsen qui, comme Marshall, fait découler le contrôle de constitutionnalité de la suprématie de la constitution. Il soutient que si la constitution est « silencieuse sur le point de savoir qui a à examiner ou contrôler la constitutionnalité des lois, il s'ensuit en principe que les organes de l'application des lois, donc en particulier les tribunaux ont le pouvoir de procéder à cet examen ou contrôle. Puisqu'ils ont le pouvoir d'appliquer les lois, ils doivent nécessairement établir si ce qui prétend être une loi a bien objectivement ce caractère et signification de loi ; et il n'en va ainsi que des actes qui sont conformes à la constitution<sup>2</sup> ».

Autrement dit :

- a) la constitution est supérieure à la loi,
- b) cette supériorité entraîne soit la nullité soit l'annulabilité de la loi contraire et, dans le silence de la constitution, le pouvoir des juges d'exercer le contrôle de constitutionnalité

Mais comme cela a été si bien démontré, toute l'argumentation n'est qu'une pétition de principe<sup>3</sup>.

En effet, de deux choses l'une :

- ou bien la constitution est suprême, et il n'est nul besoin de la faire respecter ;
- ou bien il faut la faire respecter... c'est donc qu'elle n'est pas suprême.

---

<sup>2</sup> H. KELSEN, *Théorie pure du droit*, trad. Ch. Eisenmann, Paris, Dalloz, 1962, p. 361.

<sup>3</sup> M. TROPER, « Marshall, Kelsen, Barak et le sophisme constitutionnaliste », in E. ZOLLER (dir.), *Marbury v. Madison : 1803-2003. Un dialogue franco-américain*, Paris, Dalloz, 2003, p. 215-228.

Or, tant Marshall que Kelsen montrent, malgré eux, que ce n'est pas la suprématie de la constitution qui justifie le contrôle de constitutionnalité mais bien le contrôle de constitutionnalité qui justifie la suprématie de la constitution. Bref, la constitution n'« est » pas suprême, elle « doit » l'être.

On peut ajouter une pierre à cette critique. Marshall – comme beaucoup d'autres –, prétend démontrer la nécessité du contrôle de constitutionnalité en enfermant son auditoire dans une alternative qu'il croit définitive. Reprenons la citation déjà utilisée :

« ou la constitution est un droit supérieur, suprême, inaltérable par des moyens ordinaires ; ou elle est sur le même plan que la loi ordinaire et, à l'instar des autres lois, elle est modifiable selon la volonté de la législature. Si c'est la première partie de la proposition qui est vraie, alors une loi contraire à la constitution n'est pas du droit ; si c'est la deuxième qui est vraie, alors les constitutions écrites ne sont que d'absurdes tentatives de la part des peuples de limiter un pouvoir par nature illimité ».

Or, le raisonnement souffre ici du même vice que celui que l'on trouve dans les conceptions dualistes du droit propres aux jusnaturalistes.

En effet, en disant que la constitution est un droit supérieur et qu'une loi contraire à la constitution n'est pas « du droit », Marshall emploie le terme « droit » dans deux sens très différents : le droit qui vaut pour la constitution, le droit qui vaut pour la loi. En admettant que la constitution soit un droit supérieur, elle n'est toutefois pas « du droit » parce qu'elle est conforme à elle-même : or, si l'on se demande pourquoi la constitution « est

du droit », il faudra recourir à une autre définition que celle employée pour dire que la loi contraire à la constitution n'est pas du droit – ou que la loi conforme en est.

C'est là un raisonnement classique et propre à toutes les formes de jusnaturalisme : pour justifier la supériorité du droit naturel, les auteurs ont toujours recours à un argument négatif déniait la qualité de droit à toute norme contraire au droit naturel. Mais en aucun cas ils n'iraient jusqu'à reconnaître que le droit naturel est du droit parce qu'il est conforme à lui-même. Ils préféreront expliquer que le droit naturel contient des vérités que le droit positif doit mettre en œuvre, ou encore, que le droit naturel découle de la raison de sorte qu'il est du devoir de chacun de s'y conformer. Autant de propositions qui ne permettent en aucun cas de savoir à quoi tient la supériorité du droit naturel mais qui servent – c'est leur fonction – à justifier la norme selon laquelle le droit positif doit se conformer au droit naturel.

C'est précisément la norme que pose Marshall à l'égard du législateur : il doit se conformer à la constitution, un point c'est tout.

## ***2. Le juge constitutionnel comme protecteur des droits de la minorité***

Un autre argument est souvent avancé pour justifier l'existence du contrôle de constitutionnalité : celui de la protection des droits de la minorité contre la tyrannie de la majorité. Cet argument se présente sous deux formes, l'une ancienne imputable à Tocqueville, l'autre moderne que l'on trouve par exemple chez Dworkin.

Quel rapport Tocqueville entretient-il avec le contrôle de constitutionnalité demandera-t-on ? Il

suffit de le citer : « Resserré dans ses limites, le pouvoir accordé aux tribunaux américains de prononcer sur l'inconstitutionnalité des lois forme [encore] une des plus puissantes barrières qu'on ait jamais élevées contre la *tyrannie des Assemblées politiques*<sup>4</sup>. »

Ainsi, le contrôle de constitutionnalité serait le meilleur instrument pour préserver les droits de la minorité de la menace que fait peser à leur encontre la tyrannie de la majorité. Cet argument est à première vue très convaincant d'autant qu'il est fondé sur cette idée que le pouvoir absolu corrompt absolument ce que nul n'oserait contester. Il repose toutefois sur un préjugé pour le moins anti-démocratique dont, en réalité, Tocqueville ne parvient jamais à se défaire complètement. En témoigne un passage de la seconde partie du premier volume de la *Démocratie en Amérique* dans lequel il pose la question suivante :

« Je regarde comme impie et détestable cette maxime, qu'en matière de gouvernement la majorité d'un peuple a le droit de tout faire, et pourtant je place dans les volontés de la majorité l'origine de tous les pouvoirs. Suis-je en contradiction avec moi-même ? »

Et telle est la question serait-on tenté de dire... Tocqueville, lui, répond par une autre question :

« Qu'est-ce donc qu'une majorité prise collectivement, sinon un individu qui a des opinions et le plus souvent des intérêts contraires à un autre individu qu'on nomme la minorité ? Or, si vous admettez qu'un homme revêtu de la toute-puissance peut en abuser contre ses adversaires, pourquoi

---

<sup>4</sup> *De la démocratie en Amérique*, I, 1, ch. VI.

n'admettez-vous pas la même chose pour une majorité ? »<sup>5</sup>.

Voilà ce que l'on pourrait appeler le sophisme de Tocqueville. En effet, contrairement à ce qu'il feint de croire, il demeure quelque peu délicat sinon franchement déplacé – en démocratie du moins – de définir la majorité et la minorité comme deux individus équivalents et réductibles l'un à l'autre. Tocqueville se trouve alors pris dans un dilemme : s'il ne veut pas admettre une différence de nature entre majorité et minorité en démocratie, comment justifier que la volonté de la majorité puisse ne pas toujours s'imposer ? Là encore, le seul moyen d'en sortir est d'envisager un droit supérieur et distinct du droit positif. C'est d'ailleurs en ayant recours à ce dualisme que Tocqueville croit pouvoir répondre négativement à la question qu'il posait. Il n'est pas en contradiction avec lui-même, dit-il, parce qu'il existe au-dessus des lois positives des hommes une loi suprême, une loi universelle qui s'appelle la justice :

« Il existe une loi générale qui a été faite ou du moins adoptée, non pas seulement par la majorité de tel ou tel peuple, mais par la majorité de tous les hommes. Cette loi, c'est la justice. La justice forme donc la borne du droit de chaque peuple. Une nation est comme un jury chargé de représenter la société universelle et d'appliquer la justice qui est sa loi. Le jury, qui représente la

---

<sup>5</sup> *Ibid.*, I, 2, chap. VII. Il continue : « Les hommes, en se réunissant, ont-ils changé de caractère ? Sont-ils devenus plus patients dans les obstacles en devenant plus forts ? Pour moi, je ne saurais le croire ; et le pouvoir de tout faire, que je refuse à un seul de mes semblables, je ne l'accorderai jamais à plusieurs. »

société, doit-il avoir plus de puissance que la société elle-même dont il applique les lois ? »

Mais affirmer cela ne revient plus, comme le croyait Tocqueville, à « *placer dans les volontés de la majorité l'origine de tous les pouvoirs* ». C'est au contraire affirmer qu'il existe deux systèmes de normes : l'un, naturel ou universel, peu importe ; l'autre, fait par la majorité à l'origine de tous les pouvoirs. Ces deux systèmes de normes ne se voient pas reconnaître le même statut : le premier précède le second et le prime, c'est un droit auquel la majorité doit se conformer.

C'est d'ailleurs ce que Tocqueville reconnaît volontiers : « Une Constitution américaine n'est point censée immuable comme en France ; elle ne saurait être modifiée par les pouvoirs ordinaires de la société, comme en Angleterre. Elle forme *une œuvre à part*, qui, *représentant* la volonté de tout le peuple, oblige les législateurs comme les simples citoyens, mais qui peut être changée par la volonté du peuple, suivant des formes qu'on a établies, et dans des cas qu'on a prévus. En Amérique, la Constitution peut donc varier ; mais, *tant qu'elle existe, elle est l'origine de tous les pouvoirs*. La force prédominante est en elle seule<sup>6</sup> ».

La théorie que Bruce Ackerman développe depuis quelques années semble prolonger l'analyse toquevillienne. Comme on le sait, Bruce Ackerman oppose la démocratie moniste – dans laquelle la volonté du peuple est réputée représentée par ceux qui détiennent le pouvoir législatif (le Congrès et le Président) – à la démocratie dualiste dans laquelle cette volonté « est présumée représentée par les *principes de*

---

<sup>6</sup> *Ibid.*, I, 1, ch. VI.

*droit suprême* qui ont obtenu dans le passé le consentement du peuple »<sup>7</sup>. Cela le conduit à une seconde opposition entre la législation ou la politique ordinaire et la législation ou la politique constitutionnelle. Dans la première, le peuple « n'existe tout simplement pas ; il ne peut-être que représenté par ses tenant-lieu »<sup>8</sup>. Dans la seconde, en revanche, « quelque chose de spécial se produit : les représentants et les citoyens, dans leur entreprise de redéfinition et de rénovation des fondations du gouvernement américain, parlent un langage commun. Ce langage a été testé à de multiples reprises au sein d'assemblées délibératives et à l'occasion d'élections populaires »<sup>9</sup> donc, il s'agit bien de la volonté du peuple lui-même.

Ainsi, chez Tocqueville hier comme chez Ackerman aujourd'hui, la constitution « représente » la volonté de tout le peuple. On pourrait s'interroger longuement sur ce que cette « représentation » signifie. Bien évidemment, on peut tout d'abord être tenté de n'y lire qu'une métaphore : la constitution représenterait la volonté de tout le peuple comme la colombe représente la paix. Mais il ne viendrait jamais à l'esprit de quiconque de dire que la colombe oblige les hommes à la paix tandis que Tocqueville dit que la constitution américaine oblige les législateurs comme les simples citoyens. En affirmant que la constitution représente la volonté de tout le peuple, Tocqueville parvient à

---

<sup>7</sup> B. ACKERMAN, *Au nom du Peuple. Les fondements de la démocratie américaine* (1991), trad. J.-F. Spitz, Paris, Calman-Lévy, 1998, v. not. p. 37 et 327 s. ainsi que « La démocratie dualiste », in M. Troper et L. Jaume (dir.), *op. cit.*, p. 191-204.

<sup>8</sup> *Au nom du Peuple*, p. 329.

<sup>9</sup> *Ibid.*, p. 358.

substituer, par métonymie, l'effet à la cause. C'est en effet la volonté du peuple qui fait la constitution mais une fois faite cette constitution représente cette même volonté non pas au sens iconographique mais au sens juridique : elle vaut pour elle, elle en tient lieu, elle s'y substitue<sup>10</sup>.

L'argumentation est étonnamment identique chez Bruce Ackerman. On se doit pourtant de remarquer que s'il y a un point commun entre la théorie selon laquelle le peuple est représenté par des individus et celle selon laquelle il est représenté par un texte, une analyse plus approfondie permet de mesurer l'écart qui les sépare. En effet, le peuple représenté demeure, dans les deux cas, une entité que l'on ne peut saisir qu'au travers d'un biais, un truchement, ses « tenant-lieu » dans un cas, la constitution dans l'autre. Une fiction dira-t-on. Mais au-delà tout les oppose puisque cette fiction s'incarnera, pour l'une dans une parole humaine, pour l'autre dans un texte, de sorte que la volonté du peuple sera, dans le premier cas, produite par des individus et, dans le second, déduite d'un texte. Ce sont donc bien deux théories radicalement antagonistes de la représentation politique auxquelles on a affaire puisque, dans l'une, représenter c'est vouloir et que, dans l'autre, représenter c'est connaître. Il reste enfin à se demander en quoi cela confère à la constitution une prédominance. Or, cette prédominance s'explique chez Tocqueville comme chez Ackerman parce qu'ils raisonnent selon l'*a priori* qu'il n'y a de « vraie » constitution que s'il existe un contrôle de constitutionnalité. Si on la prolongeait, cette thèse conduirait à admettre un

---

<sup>10</sup> Ou'il me soit permis de renvoyer à P. BRUNET, *Vouloir pour la nation. Le concept de représentation dans la théorie de l'État*, Paris, P.U. Rouen-LGDJ-Bruylant, 2004.

contrôle des lois au regard non pas tant de la constitution entendue comme norme juridique positive mais au regard d'une Constitution pensée comme norme de justice universelle ou du moins intégrant cette dimension de justice.

On trouve aujourd'hui l'argument sous une autre forme, qui insiste davantage sur les droits qu'une Constitution est censée protéger et reconnaître. Cet argument se présente de la façon suivante : une Constitution a pour fonction essentielle d'établir des droits et ces droits sont des barrières aux décisions de la majorité permettant de protéger les intérêts des individus. En sorte que, s'il n'y avait pas de contrôle de constitutionnalité, il n'y aurait pas de reconnaissance de ces droits parce qu'il n'y aurait aucune limite aux décisions de la majorité exprimées par les organes politiques et notamment le Parlement. Les juges constitutionnels ont donc pour mission de protéger les droits et dès lors que l'on reconnaît des droits, on doit accepter le contrôle de constitutionnalité.

Cette thèse est très largement répandue au point qu'elle apparaît comme une évidence.

Ainsi, par exemple, Pasquale Pasquino écrit : « L'État constitutionnel s'est construit pour défendre les citoyens du pouvoir des majorités politiques et pour protéger les minorités, non pour consacrer le pouvoir sans obstacle des élites politiques. Une structure polyarchique semble le meilleur instrument pour faire obstacle à l'intempérance, comme l'appelait Tocqueville, d'un organe monocratique qui pouvait revendiquer pour lui l'autorisation populaire »<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> P. PASQUINO, « La politica limitata. I principi liberal-democratici dello Stato di diritto il controllo ddi

Cette même évidence se retrouve également chez Dworkin lorsqu'il propose de distinguer entre les politiques et les principes pour ensuite expliquer que les politiques définissent des objectifs collectifs, tandis que les principes établissent des droits. Ces derniers constituent une limite aux objectifs collectifs et préservent la sphère individuelle de cette sphère collective. Les objectifs doivent être définis par des organes politiques mais les droits doivent être établis sur le fondement des principes par les juges. Sous couvert de tracer une frontière entre la sphère publique et celle privée, on en vient à déplacer le lieu de l'exercice du pouvoir des assemblées vers les juges. La critique majeure de l'argument est qu'il repose sur une confusion entre les *intérêts* de la majorité – qui sont toujours susceptibles d'entrer en conflit avec les intérêts des individus – et les *décisions* de la majorité.

Comme le fait justement remarquer Carlos Nino, il n'y a aucune contradiction logique à soutenir qu'en démocratie l'unique autorité légitimement investie du pouvoir de reconnaître les droits est précisément la volonté de la majorité<sup>12</sup>. Sauf à admettre, comme Tocqueville le fait, qu'il y a une identité de nature entre la majorité et la minorité. Mais il faut alors parvenir à expliquer en quoi le système que l'on décrit est encore démocratique.

### ***3. Le juge constitutionnel représentant de la souveraineté du peuple***

Une autre justification, sans doute peu éloignée de celle que proposait Tocqueville, est aujourd'hui défendue par Dominique Rousseau en France, qui

costituzionalità », *Analisi e Diritto*, 1996 (187-205), not. p. 204.

<sup>12</sup> C.S. NINO, *Fundamentos de derecho constitucional. op. cit.*, p. 680.



cherche à présenter le Conseil constitutionnel comme le « représentant de la souveraineté du peuple »<sup>13</sup>. Pourquoi voir le juge constitutionnel, en France ou ailleurs, comme le représentant de la souveraineté du peuple ? Parce que le juge constitutionnel oblige le législateur à respecter la volonté du peuple souverain déclarée dans la constitution : « Lorsque le Conseil constitutionnel censure une loi (...) il ne le fait pas au motif que les représentants ont méconnu la volonté des citoyens qui les ont élus (...), il ne le fait pas davantage au motif qu'il connaît et donc représente mieux que les élus la volonté du peuple qui s'est exprimée lors de ces élections ; il censure en montrant aux représentants (...) le texte où le peuple figure en souverain et qui leur interdit de prendre ces dispositions. En d'autres termes, le Conseil ne représente pas le peuple souverain, il représente ce en quoi et par quoi le peuple se pense et se reconnaît souverain »<sup>14</sup>

À l'examen, cette thèse se fonde sur deux présupposés qui, bien que parfois explicites, ne sont pas pour autant démontrés : selon le premier le contrôle de constitutionnalité vise à préserver la suprématie de la constitution ; selon le second, la représentation juridique s'analyse en la reproduction d'une réalité préexistante, autrement dit, la représentation juridique est toujours symbolique.

---

<sup>13</sup> D. ROUSSEAU, « La jurisprudence constitutionnelle : quelle "nécessité démocratique" ? », in Molfessis et alii (dir.), *La légitimité de la jurisprudence du Conseil constitutionnel*, Paris, Economica, 1999 (363-376), p. 370 : « les citoyens figurent comme représentés dans les institutions législative et exécutive et, là est la nouveauté, comme souverain par la juridiction constitutionnelle ».

<sup>14</sup> *Ibid.*, ici. p. 374

Le premier présupposé est ancien. On le trouve formulé pour la première fois chez Hamilton au n°78 du *Fédéraliste* : « lorsque la volonté de la législature, déclarée dans les lois, est en opposition avec celle du peuple, déclarée dans la Constitution, les juges doivent être gouvernés par la seconde plutôt que par la première. Ils doivent fonder leurs décisions sur les lois fondamentales plutôt que sur celles qui ne le sont pas »<sup>15</sup>. L'affirmation semble procéder du raisonnement suivant : la constitution étant la volonté du peuple, elle est une loi « fondamentale » et parce qu'elle est fondamentale, elle doit s'imposer et au législateur et aux juges, il faut donc préférer la constitution à la loi qui lui serait contraire. Ce raisonnement procède lui-même d'une théorie bien connue selon laquelle le droit est et doit être un ensemble de règles de justice qui dérivent toutes les unes des autres, autrement dit, c'est la vérité de la constitution et non l'autorité du législateur qui fait la loi.

Une telle conception contient cependant une contradiction : en effet, pour parvenir à dire que la constitution « est » la volonté du « peuple », on doit logiquement admettre que le peuple existe avant la constitution et que cette dernière ne contient des normes de justice que dans la mesure où elle est l'expression de sa volonté. C'est donc en dernier ressort l'autorité du peuple qui fait la loi et non la vérité de la constitution. Dans ces conditions, comment savoir qu'une loi est contraire à la volonté du peuple ? Et si la contrariété de la loi à la constitution ne procède pas de la logique, comment justifier que les juges doivent respecter la constitution plutôt que la loi ? Enfin, comment justifier que les membres de

---

<sup>15</sup> Hamilton, lettre n°LXXVIII, *Federalists Papers*, ed., p. 468.

l'assemblée législative, qui agissent au nom du peuple, ne puissent eux aussi exprimer sa volonté ?

En réalité, ces questions insurmontables ne se posent qu'en raison de la très grande ambiguïté de la prémisse initiale présumée qui fonde le raisonnement examiné et selon laquelle la volonté du peuple existe indépendamment de celle de ses représentants. Dire que le peuple existe avant la constitution conduit à un dilemme dont il est malaisé de sortir : ou bien le peuple existe, et il n'a pas besoin de représentant ; ou bien il en a besoin, donc il n'existe pas réellement. Ajoutons, pour être complet, que cette prémisse n'a rien de descriptif et dissimule à peine une norme de comportement à l'égard de tout corps législatif élu<sup>16</sup>.

Cela étant, quand bien même on justifierait la suprématie de la constitution par sa conformité à la volonté du peuple « réel », on ne pourrait pas en inférer la nécessité d'un organe chargé de contrôler la loi. C'est à cela que sert le second présumé selon lequel la représentation, en droit, est symbolique. Ce dernier présumé est d'ailleurs explicite chez Dominique Rousseau qui

---

<sup>16</sup> Ibid., « Il n'est pas de proposition plus évidemment vraie que tout acte d'une autorité déléguée, contraire aux termes de la commission en vertu de laquelle elle est exercée, est nul. Donc, nul acte législatif, contraire à la Constitution, ne peut être valable. Nier cela, ce serait affirmer que le délégué est supérieur à son commettant, que le serviteur est au-dessus de son maître ; que les représentants du peuple sont supérieurs au peuple lui-même ; que des hommes qui agissent en vertu de pouvoirs peuvent faire non seulement ce que ces pouvoirs ne les autorisent pas à faire, mais encore ce qu'ils leur défendent. » (trad. Jèze).

écrit : « Le mécanisme de la représentation (...) est un mécanisme de constitution de la réalité en ce que celui qui représente donne une forme, une consistance à ce qui est absent. Ici, ce qui est absent, c'est la personne du peuple souverain et le Conseil donne corps à cette personne, produit sa réalité de souverain *en mettant au jour, en rendant visible* ce qui est construit par sa représentation, c'est-à-dire, précisément, la souveraineté du peuple. Cette dernière n'est réelle et n'acquiert une possible effectivité que si elle est représentée *en tant que telle*. Or, c'est justement cette présence du peuple souverain dans la sphère du pouvoir que représente la juridiction constitutionnelle face aux institutions parlementaire et exécutive qui renvoient seulement aux citoyens l'image de représentés et non de souverains. »<sup>17</sup>

La difficulté à laquelle aboutit ce présumé est qu'il contredit le précédent : tandis que le premier assoit la suprématie de la constitution sur l'existence d'un peuple dont la volonté est tout entière contenue dans la constitution, voilà que l'on nous dit maintenant que cette volonté a besoin du juge constitutionnel pour se déployer. Contradictoire, la thèse est en définitive moins une thèse qu'un jugement de valeur déguisé au

---

<sup>17</sup> D. ROUSSEAU, *art. cit.*, p. 372. Nous soulignons. Ou encore : « Le Conseil est, ainsi, l'institution qui réfléchit la structure dialogique de la représentation politique : il est, pour parler en termes kantien, la condition de possibilité de la perception – et de la réception de cette perception – de la représentation du peuple comme souverain et des représentants comme délégués subordonnés. L'apport de la juridiction constitutionnelle, loin de heurter le principe démocratique de la souveraineté du peuple, en permet donc la représentation symbolique et pratique. »

terme duquel il n'est pas bon qu'une assemblée législative agisse sans limites, sans rencontrer d'obstacles. En d'autres termes, le droit ne doit pas être le produit de la volonté mais de la raison.

#### ***4. Le contrôle de constitutionnalité justifié par la structure du raisonnement juridique***

Afin d'éviter les écueils des justifications précédentes, Carlos Nino en a fourni une autre qui a le mérite de la simplicité : le contrôle de constitutionnalité est logiquement inévitable<sup>18</sup>.

Cette thèse s'appuie sur ce que Nino appelle le « théorème fondamental de la philosophie du droit » à savoir que le droit n'est pas autonome par rapport à la morale parce que « les normes juridiques ne constituent pas en elles-mêmes des raisons opératoires pour justifier des actions et des décisions comme celles des juges, à moins qu'on les conçoivent comme dérivant de jugements moraux, c'est-à-dire, de jugements normatifs qui possèdent les caractéristiques suivantes : autonomie, justification, universalisabilité, généralité, supervenience, et publicité »<sup>19</sup>. Nino appuie toute sa démonstration sur une critique serrée et habile de la validité chez Kelsen que le conduit à distinguer deux concepts de validité : l'un normatif, selon lequel « valide » signifie « obligatoire » ; l'autre descriptif

---

<sup>18</sup> C.S. NINO, *Fundamentos de derecho constitucional, op.cit.*, p. 681 et pour une version anglaise de l'argumentation, v. « A Philosophical Reconstruction of Judicial Review », in M. Rosenfeld (dir.), *Constitutionalism, Identity, Difference and Legitimacy. Theoretical Perspectives*, Duke UP., 1994, p. 285-332, spéc. p. 300 s.

<sup>19</sup> C.S. NINO, « Breve nota sulla struttura del ragionamento giuridico », *Ragion Pratica*, 1993, 1, p. 32-37.

selon lequel « valide » désigne le fait d'appartenir à un système juridique. Fort de cette distinction, Nino décèle chez Kelsen une confusion entre ces deux concepts et conclut que la conception kelsenienne de la validité est minée par un sophisme naturaliste car Kelsen déduirait la force contraignante d'une norme de sa seule appartenance factuelle au système comme le prouverait sa théorie de la norme fondamentale présupposée<sup>20</sup>. Si l'on veut éviter une telle confusion, Nino recommande de n'admettre qu'un seul concept de validité ; et si l'on veut parvenir à rendre compte du raisonnement juridique, ce ne peut être qu'un concept normatif au risque de violer la loi de Hume. En effet, si comme le font les théoriciens positivistes, on définit les normes juridiques comme des entités factuelles, elles ne pourront jamais servir de fondement à des normes puisqu'une norme ne saurait dériver d'un fait. On ne pourrait pas non plus contourner la difficulté en décidant de privilégier l'origine de la norme et en justifiant cette dernière par l'autorité qui l'a posée.

C'est donc la structure même du raisonnement juridique qui justifie le contrôle de constitutionnalité : les juges ne peuvent justifier leurs décisions sur le seul fondement de l'existence factuelle d'une loi ou sur le fait qu'elle a été posée par une autorité mais ils doivent nécessairement fonder leurs décisions sur des normes qui sont valides en raison de « leurs

---

<sup>20</sup> C. S. NINO, « Some Confusions around Kelsen's Concept of Validity », *Archiv für Rechts-und Sozialphilosophie*, 64, 1978 repris in *La validez del derecho*, Buenos Aires, Astrea, 1985, réimp. 2000, chap. I.

mérites intrinsèques»<sup>21</sup>. Or, aucun système de normes ne peut par lui-même fournir les critères de sa propre validité. Il faut donc nécessairement avoir recours à des principes moraux que la constitution contient et qui garantissent la légitimité des lois votées par le Parlement. Dès lors, les juges ordinaires ne peuvent faire autrement que de contrôler la constitutionnalité des lois par rapport à la constitution.

Il n'en demeure pas moins que si la critique de Kelsen par Nino est pertinente, la thèse est très ambiguë.

D'une part, justifier l'obéissance à une norme en se fondant sur le « fait » que le législateur l'a posée ne revient pas, contrairement aux apparences, à décrire un fait duquel on inférerait – de manière erronée – une norme. Il faut ici distinguer entre l'acte de poser la norme et la signification de cet acte. Si l'acte en lui-même ne permet d'inférer aucune norme, la signification qu'on donnera à cet acte peut, dans certains cas, être normative : un juge peut parfaitement considérer que telle norme est valide – qu'elle est obligatoire – parce qu'elle répond aux conditions de validité posée par une norme supérieure elle-même « obligatoire ».

D'autre part, rien ne nous contraint à interpréter le terme même d'obligatoire au sens moral : le même juge peut parfaitement considérer telle norme comme juridiquement obligatoire sans pour autant adhérer moralement à celle-ci ni d'ailleurs exiger une adhésion morale à cette norme de la part des sujets de droit auxquels il en impose le respect. Et ce qui vaut pour le juge vaut

pour tout organe d'application du droit : tous ceux qui paient leurs impôts ne le font pas nécessairement en vertu d'une adhésion morale au système de redistribution de la richesse nationale dont l'impôt est censé procéder. Ils ne le font pas non plus en vertu d'un sophisme naturaliste. Ils estiment au contraire qu'il existe bien une norme valide selon laquelle ils doivent payer leurs impôts et qui justifie l'ordre émanant du percepteur. Bref, contrairement à ce que semble croire Nino, la reconnaissance de l'autorité d'un organe par un autre n'est pas un fait mais une norme juridique : la proposition par laquelle le juge dit que telle norme est valide parce qu'elle a été posée par tel organe ne s'analyse pas en un jugement de valeur inféré d'un fait mais en un jugement de validité inféré d'un autre jugement de validité. Le respect que Nino voue à la loi de Hume est tout à son honneur mais l'usage qu'il en fait ne lui permet pas de conclure que le raisonnement juridique n'est qu'une modalité du raisonnement moral ou pratique.

Enfin, la critique par Nino de la norme fondamentale est habile mais excessive. Si la thèse de la norme fondamentale s'avère indéfendable en ce qu'elle procède d'une confusion entre deux concepts de validité, cette même confusion n'est pas inéluctable. Ainsi, la description d'un système de normes valides reste-t-elle possible à l'aide d'un concept descriptif de validité au terme duquel dire d'une norme qu'elle est valide, revient à dire qu'elle appartient au système juridique. Et, si l'on cherche à décrire les normes valides, c'est-à-dire les normes qui appartiennent au système, il devient dès lors inutile de chercher à décrire la validité de la constitution elle-même, sa force obligatoire : d'un

---

<sup>21</sup> C.S. NINO, *Fundamentos de derecho constitucional*, *op.cit.*, p. 683 et C. S. NINO, « A Philosophical Reconstruction of Judicial Review », *cit.*, p. 299.

point de vue descriptif, la constitution n'appartient à aucun système et la question de sa validité ne se pose tout simplement pas<sup>22</sup>.

On l'aura compris, le contrôle de constitutionnalité n'est logiquement inévitable que pour ceux qui, comme Nino, en viennent à poser une exigence de validité absolue des normes juridiques, exigence que ne contient pourtant aucun système juridique.

##### ***5. La présence d'un juge constitutionnel améliore la démocratie***

Enfin, il y a un argument sur lequel se fonde Victor Ferreres et que l'on peut résumer d'une phrase : la présence d'un juge constitutionnel « se justifie par la contribution que peut apporter le juge au maintien d'une culture de délibération publique », en d'autres termes, « on discute de la constitutionnalité d'une loi parce qu'une juridiction existe qui peut faire respecter cette constitution »<sup>23</sup>.

Autrement dit, dans une culture publique constitutionnelle où l'on estime que le législateur ne doit pas prendre ses décisions de manière

arbitraire – ou parce qu'il trouve des voix pour approuver sa décision –, la majorité parlementaire doit se fonder sur des raisons solides et répliquer aux contre-raisons de l'opposition. Parmi ces raisons et contre-raisons, beaucoup dérivent de la constitution, mais ne sont prises au sérieux que s'il existe une juridiction constitutionnelle susceptible d'en imposer le respect au législateur. Ainsi, la présence d'une cour constitutionnelle agit-elle comme une contrainte susceptible de peser sur l'argumentation politique et de renforcer, par là même, la démocratie.

On peut cependant avancer au moins une objection, elle-même politique : si on parle de constitutionnalité parce que la cour existe, cela veut dire que la conformité de la loi à des normes constitutionnelles est une affaire politique et non strictement juridique. Le juge constitutionnel qui entre dans ce jeu y entre comme acteur politique mais dont la légitimité ne procède pourtant pas d'un mandat électif<sup>24</sup>. Ce qui revient à dire qu'il n'est ni véritablement un juge – il est amené à trancher un débat politique – ni véritablement un législateur – il ne vote pas la loi. Il échappe ainsi à toute responsabilité : nul ne peut espérer le sanctionner par les urnes, nul ne peut tenter de mettre en cause sa participation à la fonction législative. On ne saurait dissimuler plus longtemps ce que cette conception du contrôle politique a d'incompatible avec l'acceptation de la

---

<sup>22</sup> Cf. E. BULYGIN, « An Antinomy in Kelsen's Pure Theory of Law », *Ratio Juris*, 3, 1990, p. 29-45 repris ds *Norme, validità, sistemi normativi*, trad. ital. P. Comanducci e R. Guastini, Torino, Giappichelli, 1995, Chap. XI, p. 189-211 et GUASTINI R., « Sur la validité de la constitution du point de vue du positivisme juridique », in M. Troper et L. Jaume (dir.), *op. cit.*, p. 216-225.

<sup>23</sup> V. FERRERES COMELLA, *Justicia constitucional y democracia*, Madrid, CEC, 1997, p. 139 et p. 180. Clairement prescriptive, la démonstration constitue sans doute une des plus approfondies sur la question du contrôle de constitutionnalité en démocratie.

---

<sup>24</sup> Sur la spécificité de la participation du juge constitutionnel français dans le jeu politique, v. J. MEUNIER, « Les décisions du Conseil constitutionnel et le jeu politique », *Pouvoirs*, n°105, 2003, p. 29-40 et, plus généralement, du même auteur *Le pouvoir du Conseil constitutionnel. Essai d'analyse stratégique*, Paris, P.U. Rouen-LGDJ-Bruylant, 1994.

démocratie que défendent ceux-là mêmes qui tentent de justifier ce contrôle : le juge constitutionnel devient un acteur d'un processus que l'on s'évertue à qualifier de démocratique alors que l'une des parties prenantes échappe à tout contrôle<sup>25</sup>.

Enfin, cette légitimité rationalisante ou « processuelle » que l'on reconnaît à la cour constitutionnelle à travers la « participation à l'enrichissement du débat démocratique », pourquoi ne pas la reconnaître à toute autorité dont l'action est susceptible de peser sur ce même débat ? Outre les juges de première instance, on pense aussi aux autorités dites, aujourd'hui, de régulation ou celles, consultatives, qui sont amenées à rendre un avis (le Comité consultatif national d'éthique, par exemple). Ne pourrait-on considérer que dès lors qu'il fait appel à des arguments d'ordre éthique, le débat démocratique devrait être susceptible de contrôle par un comité spécialisé ? Si un tel argument semble absurde, c'est – en partie du moins – que le problème est ailleurs, dans cette idée à la fois fort évidente et fort complexe que la constitution est la norme suprême et qu'un ordre juridique qui ne s'y conformerait pas ne serait pas réellement juridique. On en mesure la portée à l'aune du refus si fréquent et pourtant si surprenant qu'essuient les propositions résolument démocratiques, sinon républicaines, en faveur

---

<sup>25</sup> D'où le phénomène de « suprématie judiciaire » que connaissent particulièrement bien les États-Unis, v. sur ce point L. KRAMER, « We the People. Who has the last word on the Constitution? », *Boston Review*, February/March 2004 disponible à l'adresse Internet suivante : [bostonreview.net/BR29.1/kramer/html](http://bostonreview.net/BR29.1/kramer/html) et *The People Themselves: Popular Constitutionalism and Judicial Review*, Oxford UP, 2004.

d'une liberté d'appréciation laissée aux représentants eux-mêmes en matière de constitutionnalité des lois. L'objection immédiatement soulevée consiste en ce que ces derniers seraient alors libres de « tout faire ». C'est là penser qu'un désir irréprouvable de puissance voire de despotisme animerait ces mêmes représentants et craindre ainsi davantage une assemblée d'élus qu'une assemblée composée de personnes nommées ; croire, donc, en une vérité juridique seule apte à dompter la volonté politique. Nul ne peut plus alors douter que, contrairement à ce qu'elle prétend affirmer, cette justification « démocratique » du contrôle de constitutionnalité dissimule – aussi paradoxal que cela puisse paraître – une conception aristocratique de la démocratie.

La spécificité du juge constitutionnel ne réside donc pas dans l'interprétation de la constitution à laquelle il est contraint mais dans la justification dont ce contrôle fait l'objet et qui elle-même repose sur la question préalable de savoir si la constitution *est* suprême ou si elle *doit* l'être. Il n'y a en effet rien d'illogique ou d'absurde à considérer que la suprématie de la constitution ne requiert pas pour autant le contrôle de constitutionnalité des lois. Quiconque répond en revanche que la constitution doit être suprême n'en a toutefois pas encore terminé car la question se double inévitablement d'une autre : pourquoi faut-il nécessairement confier à des juges le soin de contrôler la loi ? Ceux qui souhaitent répondre à cette question sans donner aucun gage à une conception aristocratique du pouvoir dans laquelle le contrôle de constitutionnalité reste l'ultime moyen de tenir le peuple – même représenté – en dehors du jeu politique ne sont pas au bout de leurs peines.

## 6. Une conception essentialiste de la démocratie ?

Une telle conclusion – sceptique – suscite parfois une critique : elle serait le produit d'une conception essentialiste de la démocratie, c'est-à-dire, une conception de la démocratie qui ne voudrait pas mesurer les évolutions que le concept de démocratie subit dès l'instant où le contrôle de constitutionnalité est introduit dans le système juridique. La critique consiste donc en une thèse selon laquelle « le contrôle de constitutionnalité produit un nouveau concept de démocratie »<sup>26</sup>.

On peut objecter que, puisque le système politique désigné habituellement du nom de démocratie a profondément changé depuis qu'a été introduite la justice constitutionnelle, il semble raisonnable de s'interroger sur l'opportunité de continuer à parler de démocratie pour désigner la forme que le système politique a désormais prise. Mieux encore, le changement est tellement profond que la démocratie dans laquelle existe une cour constitutionnelle semble n'avoir que le nom de commun avec la démocratie représentative classique, tout comme cette dernière n'avait que le nom de commun avec celle de la Grèce antique.

Dans ces conditions, il serait peut-être plus éclairant de ne pas employer le même mot pour désigner deux réalités aussi différentes ou, du moins, on ne peut employer le même mot sans

---

<sup>26</sup> L'un des défenseurs les plus brillants de cette thèse est, en France, Dominique Rousseau. Voir son article « Constitutionnalisme et démocratie », *La vie des idées* (<http://www.laviedesidees.fr/Constitutionnalisme-et-democratie.html>)

s'interroger sur les conséquences (pragmatiques) de cet emploi.

Dire cela ne signifie pas du tout que l'on soit attaché à une conception essentialiste de la démocratie et que l'on tende à en naturaliser une forme historique. Au contraire ! c'est reconnaître que l'on est tellement détaché d'une quelconque essence que l'on serait même prêt à reconnaître qu'il y a autant de sens du mot « démocratie » qu'il y a de gens pour l'employer. Mais parce que c'est un nom et non une essence, chacun de ces emplois doit être analysé et évalué à l'aune des fins poursuivies par celui-là même qui l'utilise. Or, il en est de ce nom comme de beaucoup d'autres : les usages peuvent en être descriptifs mais aussi prescriptifs.

Dans ces conditions, l'affirmation selon laquelle le contrôle de constitutionnalité produit un nouveau concept de démocratie ne consiste pas seulement en une thèse descriptive : elle est également très largement suggestive (ou *persuasive* comme le disait Stevenson<sup>27</sup>) sinon prescriptive.

Elle est suggestive parce qu'elle laisse entendre qu'il est tout à fait légitime d'employer le mot de « démocratie » pour désigner un système politique dans lequel est exercé le contrôle de constitutionnalité. Or, puisque c'est précisément la légitimité de cet emploi ce qui fait problème ici, on ne saurait prétendre avoir démontré quoi que ce soit en tenant ce problème pour résolu avant même de l'avoir posé.

La thèse est également prescriptive puisqu'il ne fait aucun doute que, dans l'esprit de ceux qui la défendent, cette « démocratie par la constitution » ou cette « démocratie continue » est bien

---

<sup>27</sup> C. L. Stevenson, « Persuasive Definitions », *Mind*, Vol. 47, No. 187. (July 1938), pp. 331-350.

évidemment préférable à la « démocratie électorale » à laquelle elle succède, parce qu'elle est, selon lui, tout simplement *plus démocratique*.

La démonstration revient donc à affirmer que, si le contrôle de constitutionnalité améliore la démocratie, et si la démocratie est bonne, alors, on doit reconnaître que ce contrôle est bon. Il n'empêche que si la prémisse majeure ne décrit rien et n'est elle-même ni vraie ni fausse, la conclusion à laquelle on aboutit ne saurait constituer une quelconque vérité.

Ainsi, parce qu'ils sont attentifs aux usages de certains noms et notamment de celui de démocratie, les sceptiques ne sont pas tous des essentialistes égarés dans le monde moderne. Mieux, ils peuvent eux aussi se revendiquer de cet empirisme qui manque si souvent aux juristes.

(Texte original de la conférence du vendredi  
23 janvier 2009 à l'Université Kogakuin)





## 2. 総合研究所プロジェクト研究報告 (2009年度継続研究)



## 近代日本における科学言説の浸透と変容をめぐる文化研究

工学院大学 工学部共通課程 吉田司雄

工学院大学 工学部共通課程 林 真理

横浜国立大学 教育人間科学部 一柳廣孝

### Cultural Studies on the acceptance of western sciences in Modern Japan

YOSHIDA Morio                      Department of General Studies  
HAYASHI Makoto                    Department of General Studies  
ICHIYANAGI Hirotaka              Yokohama National University

**ABSTRACT:** There have been many studies on Japanese acceptance of western sciences. But they mainly focused on professional discourses. But the process of popularization of sciences is not limited in professional research and education. Public acceptance of scientific knowledge is the important part of modernization of Japanese society. We studied some aspects of Japanese acceptance of scientific knowledge in the public, and the relationship between scientific ideas and their representations in Japanese modern culture.

#### 1. はじめに

本プロジェクト研究は、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、脱領域的なレベルでの積極的な議論を行える場所をつくることを通じて、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、科学との関わりに目を向ける文学研究と非専門家の科学理解を視野に入れ始めた科学史研究とを接合し、新たな研究領域を切り開きたいという構想を実現すべく企図され、2005年から2007年までの4年間、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)、研究課題番号16520111)を、さらに2006年からは工学院大学総合研究所プロジェクト研究費をベースとすることで、研究活動を続けてきた。これまでの日本を対象とした科学史研究においては、著名な幾人かの科学者の研究の足跡を明らかにし意義付けるといった内在史的な研究が主で、科学的概念や疑似科学的思考の非専門家的な

受容についての歴史的研究はほとんど行われてこなかったが、科学的概念の理解が前提となる歴史的状況や社会的環境にどのように左右されるものであるかを探り、科学的なるものと非科学的なるものとの線引きがどのようになされるかを検証することが、これからの文化研究のためにも必要だと考えたからである。科学的知識に対する非専門家の理解は、啓蒙主義的な科学観が想定するように「正しい」科学理解(=専門家による科学理解)の未熟な形体を取るのではなく、むしろ様々な価値観によって「正しい」科学理解を読み替え、それぞれ独自の知識理解を達成するものではないかと考えられる。こうした視座に立つとき、文学言説と科学言説とがいかに関係したかを探ることが改めて課題として浮上してきた。必ずしも専門家的な「正しい」知識を有しない文学者たちの科学言説受容や、それゆえに可能となったとも言うる想像力の在り方、そして様々なメディア空間における科学言説と文学言説とのせめぎあいを検証することには

大きな意義があると確信している。

もちろん限られた研究期間内で、近代日本における西洋近代科学言説の受容という広範なテーマのすべてに目を向けることは不可能である。そこで、19世紀の近代生物学を特徴づけた重要な概念である「進化」「遺伝」「細胞」に注目し、また同時期以降台頭してきた人類学・心理学・ロボット工学において「身体」と「内面」（心、精神世界）とがどのように語られてきたかに着目している。これらのキーワードはいずれも「人間」という観念の再考を促し、文学言説においても多様な意味作用を担ってきたものだからである。

と同時に広範な研究領域をわずか三人でカバーすることはとても出来ないため、出身大学や専門領域の敷居を越えた研究者ネットワークを構築することに力を注いできた。具体的には、文学研究者と科学史研究者とが情報交換をしつつ真摯に議論をたたかわすための場を用意すべく公開研究会を開催し、科学技術史、医学史、人類学史、社会学、表象文化論など多方面の専門家を招いて脱領域的交流をはかり、この研究課題に強い関心を示すであろう、若い研究者へも積極的な参与を働きかけてきた。これまでに開催された公開研究会は以下の通りである（肩書きは研究会当時のもの）

第1回 2005年2月11日（金曜・祝日）

午後3時～6時30分

感染文学論－科学は文学の糧たり得るか

奈良崎英穂

（プール学院大学非常勤講師 日本近代文学）

進化論の成立と日本における受容

松永俊男（桃山学院大学教授・日本科学史学会

生物学史分科会会長 生物学史・進化論史）

〔コメンテーター〕

谷口薫（工学院大学非常勤講師・哲学・フランス

近現代思想）

慎蒼健（東京理科大学専任講師・東アジア科学史）

第2回 2006年2月19日（日曜）

午後2時～5時30分

林麟（木々高太郎）：パブロフ学説の導入と頭のよくなる法

溝口元（立正大学社会福祉学部教授・発生生物学・生物学史・心理学史）

昭和初年のフロイト・ブームについて

曾根博義（日本大学文理学部教授・

日本近代文学会代表理事 日本近現代文学）

〔コメンテーター〕

住家正芳（工学院大学非常勤講師・宗教社会学）

小松史生子（金城学院大学助教授・日本近現代文学）

第3回 2006年12月16日（土曜）

午後1時～5時30分

犯罪者と科学的まなざし－寺田精一と心理学

安齊順子（明海大学外国語学部専任講師・

臨床心理学・心理学史）

『変態心理』『変態性欲』読者による「変態」概念の受容

竹内瑞穂（名古屋大学大学院生 日本近代文学）

1920年代アメリカ大衆社会におけるフロイト及び精神分析の受容について

小倉めぐみ（一橋大学大学院生 アメリカ

大衆文化史）

科学者の虚像と実像～文学のなかの科学者像

井山弘幸（新潟大学人文学部教授 科学思想史）

第4回 2007年12月9日（日曜）

午後2時～5時30分

未発見動物の歴史

－大海蛇殺しとしてのリチャード・オーウェン

下坂英（東洋英和女学院大学教授・科学史（特に地質学史）・科学論）

未確認動物の民俗学－忘れられたツチノコたち－

伊藤龍平（南台科技大学日本近世文芸・口承文芸）

〔コメンテーター〕

齊藤純（天理大学文学部教授・日本民俗学・民間説話研究）

菊地原洋平（九州工業大学非常勤・科学史）

第5回 2009年2月14日（土曜）

午後2時～5時30分

「健康の元」を分配する機械

－昭和初期の紫外線発生装置を中心に－

金凡性（東京大学特任助教 科学史）

バイオリズム・ブームとは何だったのか

－生命リズムの科学・文化誌－

岩崎秀雄（早稲田大学理工学術院准教授・科学術

振興機構さきがけ研究者兼任 時間生物学・微生物学・バイオアート）

〔コメンテーター〕

姜竣（城西国際大学准教授・工学院大学非常勤講師 民俗学・文化人類学・表象文化論）

さらに2009年度には以下を予定している（本報告書刊行時点では開催済）。

第6回 2009年6月21日（日曜）

午後3時～6時

サイボーグ表象と自己の変容

浅見克彦（和光大学表現学部教授）

サイボーグ化は何をもたらすのか

高橋透（早稲田大学文化構想学部教授）

さて、本研究プロジェクトの2008年度におけるトピックはといえば、2007年度の第4回公開研究会の

内容が日本科学史学会生物学史分科会の機関誌「生物学史研究」80号(2008年9月)に掲載されたことであった。「UMA(未確認動物)のいる科学史」というテーマで開催されたこの回の報告内容の概要を記すと、下坂英氏は、昔から目撃談のある、巨大で細長い、未知の海洋動物「大海蛇」(sea serpent)を取りあげ、19世紀にその実在性をめぐってイギリスなどで起こった論争について、動物学者リチャード・オーウェンの主張などに注目しながら論じられ、その後の、マスコミにおける大海蛇の取り上げられ方についても語られた。伊藤龍平氏は、一九七〇年代の未確認動物ブーム以来「幻の蛇」というイメージがすっかり浸透してしまったツチノコについて、しかしブーム以前のツチノコは、今日の定義でいう妖怪にあたる存在であったことを明らかにし、ブーム以前と以後のツチノコ像を、文献資料や民俗資料を用いつつ紹介・考察し、妖怪から未確認動物へという道筋を辿ってみせた。さらに齊藤純氏からは民俗学や翻訳論の視座から、菊地原洋平からは博物誌の視点から問題提起がなされ、活発な議論が交わされた。この会は日本科学史学会生物学史分科会2007年度シンポジウムを兼ねる形での開催であったが、科学史の研究者だけでなく、様々な領域から50名以上もの参加者が集まり、大変盛況であった。さらに、内容を深めていただきたく、ここでは「生物学史研究」80号に林真理が執筆した論考「未確認動物の存在論:UMAのいる科学史」を論じるにあたって、さらに吉田司雄が編著『オカルトの惑星 1980年代、もう一つの世界地図』(青弓社、2009年2月)の「あとがきにかえて」執筆した文章を再録させていただくこととする。

## 2. 未確認動物の存在論:「UMAのいる科学史」を論じるにあたって

林 真理

### はじめに

以下に掲載する特集は、UMA(Unidentified Mysterious Animals, 未確認動物)を主題としたシンポジウム(1)の講演者およびコメントが、当日の報告やコメントに基づいて、あるいはそれを発展させて書いた文章を集めたものである。その特集の冒頭にあたり、シンポジウム企画者の一人として、未確認動物をめぐるとの簡単な考察を行って、導入に代えたい(2)。

人が動物について抱く空想は、未確認動物という形をとるものにとどまらない。むしろより幅広い様々な想像を含んだ動物が「存在」している。もちろん、動物に関する人間の想像力が発揮された結果の重要な一部は、未確認動物においても見ることができ、それだけではないのである。

また、こういった想像力を強力に効かせた動物の見方は、現実の動物(ここでは「実在動物」と呼ぼう)に対する見方と相互に影響し合っていることも間違いないで

あろう。そういった観点に注意を払いつつ、ここではとりあえず「未確認動物の存在論」に焦点をあて、未確認動物に関する議論が生物学史研究にとって持つ意味について考えるヒントを提供したい(3)。

### 実在動物・理念動物・仮想動物・未確認動物

ところで、未確認動物とは何だろうか。未確認動物以外の私たちの動物概念との比較から考えてみたい。

まず、一番わかりやすいところから始める。実在動物の定義をあえてするとしたらどうなるだろうか。さしあたり文字の意味から掘り起こしてみると、実在動物(real animals)とは、おおよそ以下の2つを満たすようなものであると言える。

- (i) 分類学上、動物界に属していると考えられる生物種。
- (ii) 標本等の明確な証拠物によって自然誌がそれなりに明らかになり、実在が科学的に証明されている生物種。

次に、動物という全体集合における、上記実在動物の補集合を考えてみることにする。すると、それは理屈上次のようになる。

- (i) 分類学上、動物界に属していると考えられる生物種。
- (ii) 標本等の明確な証拠物によって自然誌がそれなりに明らかになっているわけではなく、実在が科学的に証明されているというわけではない生物種。

これは、明らかに未確認動物以外のものも含む概念である。したがって、これをとりあえず理念動物(ideal animals)と名付けることにしよう。さて、未確認動物以外に、どのようなものがこの理念動物に含まれているだろうか。

たとえば、有名な『鼻行類』(4)に登場する仲間たちを挙げることができる。『鼻行類』は、計189種に及ぶ一つの目全体の動物の自然誌が描かれており、その目に関する包括的な記述になっている。「歩行のために鼻を用いる」という奇抜な行動を主特徴としてもつこの鼻行類についての記述であるが、その科学的な筆致、詳細を極めた説明、もっともらしい雰囲気は、読む人をして「本気」にさせる可能性をもっていないわけではない。あるいは「本気になったふり」をして読むことが、とても楽しい種類の読み物である。実在動物の中には、一般書の領域で決して注目されることがなく、専門家以外の誰にもほとんど知られずにいる多数のものがあることを考えると、鼻行類はそれらよりもはるかに高い実在性を獲得していると見ることができ、その意味で、鼻行類は仮想世界において立派に「実在」していると言って良いのではないだろうか。

このように仮想世界に実在する動物を「仮想動物 imaginary animals」と名付けよう。仮想動物と未確認動物は明らかに異なったものである。仮想動物は、いかにそれがリアルに描かれることがあったとしても、あくまでも仮想世界における存在者であるに過ぎないが、他方未確認動物は、もし本当にそれが存在しているとしたら私たちの住んでいるこのリアルな世界においてであるということが前提となっているからである(5)。

このような仮想動物は、他にも多数「存在」している。たとえば、テレビ特撮ヒーロー番組に出てくる敵役の怪獣(6)の類はすべて仮想動物であるように見える。また、

現代のファンタジー（それは映画、小説、アニメーション、マンガなどさまざまな芸術分野にわたる）に登場する動物の多くも、仮想的な存在である。たとえば、トトロ（映画「となりのトトロ」）、ムーミン・トロール（小説ムーミンシリーズおよびテレビアニメーション）、ガサルス（小説『星界の紋章』シリーズ）、ピカチュウ（ゲーム「ポケットモンスター」）といったものである。これらは、現代の創作物であるが、それほど近い時代ではなくてもこのような事例は多数見つけ出すことができる。それに対して、イカロス、ケンタウロス、ヤタガラス、ヤマタノオロチといった神話・伝説上の動物も、同様に仮想動物であると言える。それらは、近現代の様々な創作物の起源でもあり、また大きなヒントを与えている存在といっても良いだろう。このように考えると、仮想動物は、新仮想動物（創作者がはっきりしている比較的由来の新しい仮想動物）と、旧仮想動物（伝説や神話等に由来し、創作者がはっきりしない、比較的由来の古い仮想動物）に分けて考えることもできそうである。ただし、旧仮想動物は、新しい創作物によっても取り上げられており、常に読み替えられていく存在でもある(7)。

これらの仮想動物は、ギリシア神話の世界であれ、トーマス・ヤンソンによって考え出された世界であれ、何らかの「もう一つの世界」すなわち私たちの住んでいる世界とは異なった世界の存在を前提としている。そして、その世界に関するそれなりの設定も存在するのが普通である。仮想とはいえ、それなりに筋の通った動物に関する説明をもたらすためには、そういった世界設定が必要とされるであろう。

しかし、そういった世界設定とは比較的独立した仮想動物も存在している。たとえば、ウナギイヌは赤塚不二夫のマンガ『天才バカボン』に登場するが、本体のストーリーとは関係なく思いつきで導入されたキャラクターであった(8)。さらに、『鏡の国のアリス』に出てくるジャバウォック(Jabberwocky)は、ルイス・キャロルの創作物(童話)中の創作物(叙事詩)の中に出てくる謎の動物であり、これは二重に仮想的な存在であるとも言える。「かちかち山のぼうぼう鳥」についても同じことが言える。これらは、当然のことながら、それが存在している世界もまた謎であり、その動物自体も謎である。このように仮想動物といっても、一貫したキャラクター設定を持たない、暫定的なアイデアでしかないような存在もある。このようなものは、一時的仮想動物と呼ぶことにしたい。それらは、仮想世界の中に実在しているとまで強弁できない不安定な存在である。

ここまで、現実動物と仮想動物の定義を考えてきた。次に、そもそもの目的であった未確認動物に移ろう。

### 未確認動物とは何か

以上のような仮想動物を除いた理念動物が未確認動物であろうか。そうすると、未確認動物は、次のように定義できることになる。

- (i) 分類学上、動物界に属していると考えられる生物種。
- (ii) 標本等の明確な証拠物によって自然誌がそれなりに明らかになり、実在が科学的に証明されているというわけではない生物種。
- (iii) にもかかわらず、その実在を信じている人々がいるような生物種。

同様に、これまでの議論に基づいて仮想動物を定義し直してみると次のようになる。

- (i) 分類学上、動物界に属していると考えられる生物種。
- (ii) 標本等の明確な証拠物によって自然誌がそれなりに明らかになり、実在が科学的に証明されているというわけではない生物種。
- (iii) 純粋に人間の空想の産物である生物種。

(iii)を加えることで、仮想動物から未確認動物が区別されている。また、仮想動物の(ii)は(iii)に含まれているとすることもでき、そうすると(ii)は不要になる。これらは、きわめてまっとうな定義であろう。ただし、このように定義された未確認動物を英語で言うならば unidentified animals となるだろう。ここでは、UMA という語に含まれている mysterious といういささか客観的定義が難しい部分を省いて考えたものと言うことができる。

ところが、この一見きわめてもっともで疑問の余地がないように見える定義においても、既に問題点が含まれていないわけではない。このことを次に見る。これは、未確認動物のもつ地位の不安定さがもたらしていると言える。

(i)を挙げた理由は、「未確認動物」が字句上「動物」とされているからであってここには一見何も問題がないように見える。ところが必ずしもそうではないのである。というのも、未確認であるがゆえに、当然それが動物であるかどうか問題となる場合が出てくる。

たとえば、動物と植物の両方の要素を兼ね備えた未確認生物がある。ケサランバサランは、動物であるとされることも植物であるとされることもある(9)。仮想動物は、仮想である限り、その特性が決定されていないという面をもち、したがって動物か植物かあるいはそれ以外かというレベルでの所属も曖昧になる場合があるのである。

このようなことはもちろん仮想動物の場合にも起こりえないわけではない。

生物分類学上で動物という評価が可能なのは、地球における進化の過程で生じた生物(つまり地球型生命体)に限られるはずだからである。地球上の他の動物たちと由来を一にしない地球外の生物として想定されたものは、いかに外見が地球型生命体の動物に類似していようとも、分類学上動物と呼ぶことははばかれる。フクロオオカミが食肉目でないのと似たところがある。そのため、動物界に属していると断言することはできず、この定義は「動物界に属している(あるいは動物界に属する種と類似性をもつ)」とカッコ内を補うのが正確ということになる。しかし、類似性の度合いの判定は難しく、したがって定義が曖昧なものにならざるを得ないという問題点が生じる。たとえば怪獣が売り物の子供向け番組「ウルトラマン」に登場する怪獣シーボーズは、地球から脱出を望むというその行動から地球外生物であると目される。他方で、いかにも脊椎動物様の骨格をもっているように見える。しかし、系統発生学に基づいた分類基準を用いるならば、それを「動物」と呼ぶことはできないかも知れない。

そしてそもそも、仮想世界の存在者について、動物という枠組みを用いることがカテゴリーミステイクであるかも知れないのである。すべての仮想生物が何らかの特定の実在生物をもとに想像されたものであるとすれば、その実在生物の分類学上の地位によって動物であるかど

うかを判定することは可能である。しかしながら、仮想的存在というのは実在物に「原型」をもつものであって、常にそこからの派生体に他ならないという見方は、人間の想像力に関する極めて了見の狭い見方であると考えられるので、このような決め方も採用しがたい。

しかし、こういった問題はあるものの、仮想生物の場合は、人の想像上の産物であることから、設定次第で何とでもできるものである。あるいは、あえて分類学上の地位を設定をしないことで、その生き物に対する人々の想像力を高めるといことも可能である。というのも、分類学上の位置についての情報は、その生き物の構造や生態に関する制限条件となって、想像の可能性を狭めるからである。正体は謎というのも、一つの設定でありうる。しかし、未確認動物は、それが現実世界に存在しているとされるものである限り、その正体は突き止めることも原理的に可能であるということが前提となる。だからこそ、それらが本当は「未確認「動物」(本当に動物であるかどうかはまだわかっていないもの)とでも呼ぶべき存在であるということ、念頭においておかなければならないのである。

ところで、ここでの一連の定義における「実在」という言葉には、現在存在しているという意味だけ無く、過去において確かに存在していたという意味も含まれているに違いない。つまり、既に滅んでしまっただけで今では存在していない動物もまた、どのような動物であったかということが十分にわかっていれば、それを実在動物と呼ぶことができるわけである。ところが、系統発生の過程については、化石等の証拠を用いて推測するしかない。したがって、既に絶滅してしまったがその自然誌が現在よくわかっている動物の数は必ずしも多くない。そうすると、様々な生き物が「未確認動物」と呼ばざるを得ない存在となるであろう。

たとえば、バージェス頁岩動物群(10)は、どの門に属するかということすら議論のある動物群を含んでいる。それらは自然誌がはっきりしないという観点について言えば、まさに unidentified であり、未確認動物の範疇に含まれていると言える。他にも、いわゆる進化上のミッシングリンクにあたる動物など、科学的な議論の中でも多数の未確認動物が考えられていることがわかる。これらを「専門的未確認動物」と呼ぼう。もちろん、現在存在している、観察機会が不十分である等の理由から、種分類が未確定であり分類学上の宿題を与えてくれるような動物もまた、「専門的未確認動物」と呼ぶことができよう。それらとは区別すべきものとして、「大衆的未確認動物」(あるいはそれこそUMA?)というものがあると言えるだろう。このようにすると、科学的研究の成果として実在性が構成された(専門家集団において認知された研究活動を通して実在性が証明された)動物を実在動物と私たちは呼んでいるのであり、他方で一部の人々による社会的合意として実在性が構成された動物についてUMAと呼んでいるとも言える。

最後に、未確認動物にすらなっていない動物というのも想定できることにも注意しておきたい。それらを「未知動物」と呼ぶことにしよう。未発見動物という言い方もあるかも知れないが、たとえ誰かが発見していても、そのことがある人々には伝わっていない場合がありうる。未発見動物というより未知動物と呼ぶ方が無難であるように思われる。

本節の最後に、ここまで述べた動物分類を表にして示そう。

実在動物	仮想動物	旧仮想動物
理念動物		新仮想動物
		一時的仮想動物
	未確認動物	専門的未確認動物
		大衆的未確認動物
	未知動物	

### 越境する動物 現実と仮想のはざまの未確認動物

既に述べたように、仮想動物と未確認動物はその実在性について大きな点で違いがあった。このことを再び確認しておこう。仮想世界に「存在」している動物であるのか、それとも現実世界に存在していることが仮想されている動物であるのかというのがその違いである。現実世界のものであるならば、私たちはそれに出会う可能性やその存在の痕跡を見いだす可能性をもっている。前者の場合には、せいぜい創作の対象となるだけであるが、後者の場合には自然科学的研究や探検の対象にもなりうる。

ところが、仮想世界と実在世界が完全に区別できるというのもまた不十分な想定である。ヴェーヌ(11)が教えてくれるように、私たちは世界に関する矛盾した想定を、そのように自覚することなくもっている場合がある。したがって、仮想世界の存在物が実在世界にはみ出してくることは十分にあることであり、私たちは人間によって架空の存在とされたはずのものを現実世界に探すとという混乱した事態に陥ることがあるかも知れない。未確認動物探索のうちのいくらかは、そういった事態なのではないだろうか。

このことは、伝説と創作の違いとも関係しているに違いない。伝説とされるものも、もちろんもとをたどれば、当然創作による部分がないわけではないだろう。場合によっては完全な創作であるかも知れない。しかし、作者不詳となり、いつからあるかも知らなくなったときに、伝説はその歴史の重みによって、誰かによって創られたものに過ぎず恣意的なものに過ぎないという仮想性を持ちながらも、何らかの過去の事実に根拠を持つに違いないという説得力をも持ち合わせるようになる。そのようにして、現実世界に接近していくのである。

そもそも、伝説と創作はどこが違うのだろうか。伝説には決まった作者がおらず、それに対して創作は、誰かをその創作者として名指しできるような(あるいはできたような)ものである。伝説はそもそも「共同幻想」から始まっており、したがってある動物に関する伝説が語られていることについて、何らかの歴史的な理由があると考えられる。現実世界に実在している動物に関する体験が元になって伝説ができたということは十分に考えられることであるため、伝説における仮想動物は現実とのつながりがあるということになる。それに対して、創作における仮想動物は、著者が勝手に自由な存在を想定することが可能であるため、現実とのつながりはそういった意味ではないことになる。しかし、創作者自身が現実世界に存在しているというつながりはあるので、そのために想像可能性の限界は確かにあり、したがってまったく現実世界とつながりのない仮想動物など存在し得ないという考え方もできる(12)。このように両者はまったく無縁というわけではない。だからこそ仮想動物と未確認動物のあいだの壁は容易に越境されることになる。



たとえば、そもそも現実世界において仮想された動物であったはずのものが、仮想世界における「実在」としての地位を獲得することがある。たとえば、イッシー(鹿児島県池田湖に生息するとされた大衆的未確認動物)は、金子修介監督によってモスラになぞらえられることで、映画の中に新たな表象を得ることになった(13)。

未確認動物に関する情報は、滅多なことでは増えることはない。もちろん新たな目撃談が出てくることはあるが、基本的に謎の解明は進まない状態にある。それに対して、映画や小説といった創作物は、情報欠如＝情報渴望状態にある未確認動物に対して、豊かな表象を与える。それは、特殊な、そして時には勝手な解釈であるかも知れない。しかし、そういった表象は一人歩きし、未確認動物それ自身のイメージを変えていくことになる。

ツチノコのイメージ形成に対して、マンガが大きな役割を果たしていると言われる(14)。藤子不二雄の『ドラえもん』では、未来社会においてツチノコは実在動物として扱われており(発見者は剛田武すなわちジャイアンとされている)、ペットとして飼われている。ここでは本来伝説的存在であったツチノコに、愛らしいペットという新しい位置づけが与えられており、まったく別の存在のようになっている。これが、ドラえもんの世界における仮想動物としてのツチノコである。ここにもまた、未確認動物が仮想動物の世界へと越境していく様を見ることができる。

この「ドラえもんに出てくるツチノコ」というキャラクターはその後も一人歩きを続け、マスコットとしてぬいぐるみや関連商品が販売されるに至っている。そして、その結果として、今世紀の若者達は、ツチノコをドラえもんに登場する仮想動物として知ることになっているのである(15)。実在動物である可能性が乏しくなったとき、未確認動物は消えてなくなる代わりに、仮想動物となって現れてくるのではないだろうか。実際、大衆的未確認動物であることを維持し続けるには、それなりの手立てが必要ははずである。

他方で、こういった越境に関して、実在動物も無縁ではありえない。

バクやキリンといった命名は、未知動物が科学的未確認動物を経て実在動物へと変わっていく過程において、仮想動物になぞらえたものであると言えるだろう。人は新しい対象について、既に知っている何かに喩えて理解しようとするものである。仮想動物は、新しく知った動物を理解するための参照項として用いられたものであった。

パンダは、しばしばフランス人神父が中国で発見されたとされており、したがって未知動物から突然実在動物になったかのように語られることもあるが、パンダについてのものではないかとされる記録はヨーロッパ人による発見以前にも存在しており、したがってむしろ長いあいだ未確認動物であったと言った方が良くであろう。そうであるとすれば、パンダは未確認動物から実在動物へとその地位を変えたのである(16)。

以上、簡単によく知られている例を挙げた。こういった事例を網羅しようとするならば、さらに紙面が必要であろう。しかし、そこまでしなくても、私たちのもっている動物種の概念においては、様々な種類の「越境」が実際にあるということがわかるだろう。実在動物についてのイメージを理解しようとするときにも、その背後に未確認動物や仮想動物があることを忘れてはならないということである。

他方で、こういった境界線自体が歴史的なものであることにも着目したい。

中世における博物学書の記述は、それがいったいどのレベルで実在性を捉えているのかよくわからない。というのも、そこでは今日の日から見て明らかに実在し、当時においてもその実在性が信じられていたことが十分に予想される動物と、今日の日から見れば想像上の動物としか思えないものが同じようにリストアップされているからである。これをどのように解釈すべきだろうか。何らかの見間違いや誤情報に基づいて記述されたものであり、当人は実在性を信じていたものだと考えることもできる。しかし、中世における調査方法の限界を考えると、実際に目で見たり確実な情報によって確かめられるものばかりで書籍を構成するのであれば、図鑑の規模のものにはなりえなかったということが言えるだろう。そうであるならば、それなりの網羅性を求めようとするほど、真偽のほどの疑わしい情報に基づいて様々な記述を取り込んだに違いない。結果として、今日の日から見ると実在しない生き物までが含まれるということになる。これは、実在しないことがわかって載せていたわけでもなく、また実在するというを十分に確信して載せていたのではなく、そのどちらでもない境界領域がそもそも広がったのでありそういう境界線上の「仮事実」抜きで網羅的な事典などありえなかったのである(17)。つまり、仮想動物を分類して、仮想世界に「実在」している動物であるのか、それとも現実世界に存在していることが仮想されている動物であるのかによって分けようというここでの問い方自体があまりにも現代的なものであるということが逆に判明してしまうわけである。

## 終わりに

前節の最後に述べた中世の博物学書のような事態は、現代とは無縁なのだろうか。そのようなことはあるまい。ここまでこの記述では、科学と創作を区別することで、私たちの知識の中にある動物を分けることに字数を費やしてきた。最後に、別の視点を挙げておきたい。

たとえばネッシーを初めとして、とても実在しているなどとは思えないようなものが、実在しているかのように期待され、そのように扱われることがある。ほんの一部の錯覚に囚われた人以外にはその存在を誰も信じていないような種類でありながら、大変著名な大衆的未確認動物は他にもある。それはあたかも、その仮想動物が実在するかも知れないという前提のもとに皆が同じゲームを楽しんでいるようなものだ。そういう意味では、未確認動物は「物語」上の存在であると言えるのではないだろうか。そして、科学もまた現実世界に対する一つの物語であるとするなら(もちろんその物語は、それ自体の性質においても、またその物語の社会的な意味においても、きわめて特殊な物語であることは間違いないのであるが)(18)、実在動物とされているもの自体が一つの仮想性を帯びてくることになろう(19)。

また、私たちの日常的動物観は、中世のそれとさほど変わっていないかも知れない。日常レベルの思考においては、見ることもないであろう珍獣も、単なる仮想動物も、それほど意味のある違いはないのである。その違いが重要になるのは、事実を明確にする必要がある場面すなわち科学の場面だけであろう。そのように考えると、越境は極めて自然な人の思考の流れによって生じているものだとと言えるのではないだろうか。未確認動物は、実

在動物と仮想動物のあいだにあって、越境を仲介する重要な役割を果たしているのである。

#### 注

- (1) シンポジウムは、下坂英「未発見動物の歴史—大海蛇殺しとしてのリチャード・オーウェン—」、伊藤龍平「未確認動物の民俗学—忘れられたツチノコたち—」の2題の報告を受け、齊藤純、菊地原洋平両氏からコメントをいただき、さらに会場に開いていく形で行われた。
- (2) 本特集の下坂論文もまたUMAの概念(下坂氏によれば「未発見動物」概念)を扱っている。
- (3) 生物学史の観点から踏まえて未確認動物を論じるこういった分野の先駆者として、本誌購読者にはおなじみで、『河童とその世界』『狐の日本史』などの著書がある中村禎里氏がいることを忘れてはならない。また「動物観研究会」など関連するテーマの研究会も他に存在している。本特集が取り上げているのは、決して新しいわけでもないテーマであることがわかるだろう。
- (4) ハラルト・シュテンプケ著、日高敏隆、羽田節子訳『鼻行類—新しく発見された哺乳類の構造と生活』思索社、1987
- (5) このように考えると、私たちにあってその存在が生き生きとしたものであるという意味でのリアリティというもの、単なる客観的に実在するということと異なっていることがわかる。これは事実と真実の違いにも対応する大きな問題であると考えられるが、ここでは問わない。
- (6) ただし、「怪獣」という言葉がこのように仮想動物にばかり用いられたわけではなかったということ、本特集の齋藤論文が示している。
- (7) 新仮想動物もまた読み替えられる。日本のマンガ、アニメに関して言えば、二次創作という分野がそれを促している。他方で、新仮想動物においては、知的財産権保護の観点から、創作者がその読み替えに対して厳しく対処する場合もある。ディズニーのキャラクターがその典型的な例である。
- (8) 長谷邦夫『ギャグにとり憑かれた男 赤塚不二夫とのマンガ格闘記』冒険社、1997
- (9) 山形新聞の記事 [http://yamagata-np.jp/news/200805/22/kj\\_2008052200327.php](http://yamagata-np.jp/news/200805/22/kj_2008052200327.php) に、写真付きでケサランパサランの発見が掲載されている。小学生が発見して持ち込んだ県立博物館の学芸員の話として、「この7年で3件」との情報も掲載されている。なお、ケサランパサランに関しては、飯倉義之「『名付け』と『知識』の妖怪現象—ケサランパサランあるいはテンサラバサラの1970年代」『口承文藝研究』2006, no. 29, pp. 124-137がある。
- (10) スティーヴン・ジェイ・グールド『ワンダフル・ライフ—バージェス頁岩と生物進化の物語』早川書房、2000
- (11) Paul Veyne, *Les Grecs ont-ils cru a leurs mythes ?*, Le Seuil, 1983 (ポール・ヴェーヌ著、大津真作訳『ギリシア人は神話を信じたか 世界を構成する想像力にかんする試論』法政大学出版局、1985)
- (12) スタニスワフ・レム『ソラリスの陽のもとに』早川書房(ハヤカワ文庫), 1977
- (13) 「ゴジラ モスラ キングギドラ 大怪獣総攻撃」東宝、2001
- (14) このようなツチノコイメージの変容について、シンポジウム当日に伊藤氏から報告があった。本特集の伊藤論文はまったく別の限定的なテーマを扱っている。

(15) 『ドラえもん』を読んだ子どもたちの中には、ツチノコを作者藤子不二雄氏(2名で1つのペンネームのこの作者の存在自体がまた仮想的なものであるのだが)の創作物だと考えた者がいたということは十分に考えられる。このようにして、想像上の生き物というイメージが形成される。

(16) 荒木達雄「中国古文献中のパンダ」『東京大学中国語中国文学研究室紀要』2006, no. 9, pp. 1-22

(17) 本特集の菊地原氏の文章を参照。

(18) 野家啓一『科学の解釈学』(増補版)筑摩書房(ちくま学芸文庫), 2006

(19) なお、本稿では全体として、(個体ではなく)種としての動物について述べている。個体が存在することと種が存在することは別のことである。種の定義(種概念)について各論が存在し、あるいは唯名論(種などそもそも実在しない)という見方もあることはわかっているが、動物の確認や発見という自体は個体レベルでなく種レベルの話であると考えてこのようにしたものである。

#### 追記

以上は、シンポジウム「UMA(未確認動物)のいる科学史」の報告に対する前書きである。内容豊かで様々な示唆に富んだシンポジウムの雰囲気をも十分に伝えることができたとは思えないが、当日参加されなかった諸氏の参考にされたい。

なお、本シンポジウムは、日本学術振興会の科学研究費補助金交付課題「近代日本における科学言説の浸透と変容をめぐる文化研究」(平成16-19年度、研究課題番号16520111)の研究発表会を兼ねた企画であった。生物学史分科会の関係者からは「こんな生物学史ちゃうがな」との評もいただいた。たしかにスタンダードな生物学史研究の枠はずれていると思う。他方で、若手の科学史家からは伊藤氏、齋藤氏に積極的な質問が飛んでいき、最初は「理系の研究会」という違和感を感じていた文学関係者も、科学史がそれほど硬派一辺倒でないことに安心された様子であった。今後交流が発展することを願いたいところである。もちろん正統派の科学史研究があつてこそ、このような寄り道や枠の取っ払いも可能になるということは確認しておいた上で、それほど科学史研究業界にとって意味のない企画ではなかったと、企画者の一人として自己評価しておきたい。

### 3. ネス湖への旅は終わらない

吉田司雄

二〇〇七年夏、ネス湖を初めて訪れることができた。ネス湖にはスコットランド北部のインヴァネスからバスかクルーズで向かうのが一般的だ。スコットランドの二大都市であるエディンバラとグラスゴーのいずれからでも鉄道で約三時間半。朝出発すれば昼前にはインヴァネスに到着する。インヴァ(inver)はゲール語で「河口」という意味で、インヴァネスはその名の通り「ネス川の河口」に位置している。その日はインヴァネスに宿をとることとし、ネス河畔を散歩。インヴァネス城や聖アンドリュース修道院を見てまわった。ネス川の流れるは思いのほか早い。

翌朝インヴァネスのバスステーションからネス湖行きのバスに乗る。しばらく進むと湖畔沿いの道に出る。といっても、ネス湖は全長四十五キロほどの細長い湖であり、車窓から眺める湖面からはネス川の幅がにわかには

がったという印象を受ける。三十分ほどでドロムナドロヒト、さらに十分ほどでアーカート城に到着。湖畔にたたずむアーカート城は、ネス湖のシンボルとしてガイドブックや絵葉書に必ず出てくるが、国王自らの手によって破壊された城郭が今も廃墟のまま取り残されている。

古城見学の後再びドロムナドロヒトへ戻る。観光客用のホテルが集まり、湖畔には潇洒なB&Bが並んでいる。幸い天気恵まれた。天上には透き通るような青空が広がり、視線を落とせば湖面に反射する夏の光がまぶしい。土産物屋のテラス席で冷たい飲物を口にしながら、すっかりリゾート気分になってしまう。

今日ネス湖はすっかり観光地となり、土産物店にはネッシーグッズがあふれていた。しかし、ネッシーがブームとなることでネス湖の観光地化が進んだのは事実だとしても、もともとネッシーの目撃情報が現われた時点で、すでにネス湖は人も踏み入らないような秘境ではなかった。

ネス湖の怪物に関する最古の記録として知られるのは、紀元五六五年頃の聖アダムナンによる『聖コロンバ伝』第六巻第二部第二十七章「聖者の祈りの力によって水棲の怪物を追いはらったこと」である。一六世紀にダンカン・キャンベルの目撃譚があり、一八七〇年の『フォンテンガル年代記』にも記述があるというが、しかし、怪物の目撃情報が頻発するのは二〇世紀に入ってからだ。その事情を、ティム・ディンスデール『ネス湖の怪物』（南山宏訳、一九七三年四月、大陸書房）はこう説明している。「そして一九三三年、近代的な自動車道路がインヴァネスからフォート・オーガスタスに至る北岸沿いに、湖すれすれに建設されるに及んで、突然、目撃報告が奔流のように続出し始めた」と。「目撃報告、目撃談が突然増加したという事実は、道路建設が進むにつれ、大規模の樹木伐採がおこなわれて、幾世紀もの間、地元の漁夫たちの目にしかうつらず、静寂のうちに孤立していた湖面の大部分が、人々の眼前にさらけ出されたことに、明らかに大きく起因している」のだと。怪物の出現がネス湖を観光地へと変えたのではなく、そもそもは観光リゾート開発のための道路建設や樹木伐採が怪物を眠りから目覚めさせたのだと言うのである。

一九三三年五月二十二日に湖畔でホテルを営むマッケイ夫妻が目撃したのを皮切りに、七月二十二日にスパイナー夫妻が目撃した際には超常現象の研究者として知られていた大英海軍のR・T・グールド提督も質問に訪れ（一九三四年にグールドは『ネス湖の怪物その他』という本を刊行する）、十一月にはフォイヤーズにある英国アルミニウム会社工場の従業員ヒュー・グレイが初の写真撮影に成功する。翌年四月にはネス湖の怪物を捉えた写真として最も有名な「外科医の写真」がデイリー・メール紙に掲載される（周知のように、ロンドンの産婦人科医であるローバト・クリス・ウィルソンが撮影したというこの写真は、一九九四年にニセモノだったという告白記事がサンデー・テレグラフ紙に載った）。

一九六〇年代に入ると、怪物を捉えるのは写真から映像へと変わる。一九六〇年四月に航空技師のティム・ディンスデールが撮影した、湖面を横切ってゆく奇妙な生物の映像は同年六月十三日の夜にBBCテレビで四十秒放送された。さらに七〇年代に入ると、怪獣探索の方法は水中カメラによる撮影やエコーによる調査へと変わる。湖面から水中へと探査の矛先は変わり、一九七三年に康芳夫が企てた、石原慎太郎を総隊長とするネス湖怪獣探索探検もこうした時代動向を大いに反映し、最新機材に

よる水中調査を中心とするものであった。興味深いことに、ネス湖探索の方法の変貌は、そのままネス湖観光の形を変えてゆく。人々は湖畔から眺めるだけでは満足せず、「ネッシー・ハンティング」を掲げるレーダー装備の小型機船で湖面へと出てゆくようになったのだ。

ネス湖観光の中心であるドロムナドロヒトには現在、二つのネッシー関連施設がある。一つはオフィシャル・ネス湖モンスター・イグジビション・センター（The Official Loch Ness Monster Exhibition Centre、以下オフィシャルセンター）で、市庁舎風の建物の正面入口から入り、案内に従ってほの暗い展示室を巡ってゆくと、次々壁にスライドが投射されネスシー探索の歴史が語られていく。現在は使われていない初期の探索船の実物大模型が置かれていたりする。センターのガイドブックの表紙にも大きな「？」が描かれていることから窺えるように、ここでの展示はネッシーの実在を無前提に認めるのではなく、科学的にその可能性を探ってゆくというスタンスで貫かれている。最新技術を駆使したアトラクションとして楽しめるよう工夫されているが、しかし自分にはもう一つのオリジナル・ネス湖・ビジター・センター（The Original Loch Ness Visitor Centre、以下オリジナルセンター）の方が何かしっくり来るものがあった。こちらは小さなホテルが併設している土産物屋の中に入口がある。中心は三十分ほどのビデオ上映で、上映室のまわりを取り囲む狭い廊下の両側には古いネッシー写真や新聞記事などがずらりと飾られている。どう見ても場末の映画館といった趣きだし、展示もありったけのものをただバタバタ壁に貼付けたといった風で学術的とはとても言えない。いかにも観光客向けといったいかがわしさが漂ってくるのだが、しかしオフィシャルセンターの方だって、湖畔を眺望しながら食事できるレストランやネッシーグッズをふんだんに並べた土産物コーナーがすぐ横にあり、観光客目当てという点では大差ない。ただオリジナルセンターの古さ・ぼろさは、確実に時代に取り残されつつある。そこにノスタルジアを感じるのみならず、モダンで科学的なオフィシャルセンターと過去の噂話をそのまま封じ込めたような古ぼけたオリジナルセンターとの並存自体に、ネッシーの生きる「今」の状況が象徴的に表れているようにも思われてしまったのである。

オリジナルセンターのある土産物屋の前には大きなネッシーの模型があって、子どもたちが滑り台のようにして遊んでいた。オフィシャルセンターの中庭にも、記念写真用であろうか、湖面から姿を現わしたネッシーのもう少しリアルな模型があった。目撃情報は多岐に渡っているのに、湖の巨大水棲生物を模型となるとやはりプレシオサウルスのような恐竜型になってしまうのは古今東西どこも同じなんだなあ、日本のクッシーやイッシーに思いを馳せながら、つい時代錯誤的なことまで考えてしまった。

北海道屈斜路湖のクッシーが広く知られるようになったのは、一九七三年。八月に中学生約四十人が藻岩山への遠足の途中で目撃してからである。鹿児島県指宿市の池田湖のイッシーが有名になったのは、一九七八年九月。法事に来てきた二十数名が同時に目撃したことによる。注目すべきはどちらも集団の目撃体験がきっかけとなっていることだ。これは湖面の謎の物体をネッシーによく似た水棲生物と同定するイメージ連想が瞬時に働いたことを指しているだろう。ネッシーのイメージが先に共有されていたからこそ、目撃者たちはそれをネッシーによ

く似た動物として語り得たのだ。日本各地の湖沼には大蛇や巨大魚が住むという伝説があるところが少なからずあり、屈斜路湖にも巨大なヘビが鹿を呑みこんだというアイヌの伝説があるが、ツチノコが妖怪から未確認動物へと変貌しイメージが画一化していったように、伝説の湖の主たちは、一九七〇年代にネッシー型の未確認動物として再発見されていったのである。

もっともクッシーが知られるようになったきっかけについては諸説あり、北海道弟子屈町のHP「てしかが」では同月の屈斜路ポイント地区で排水工事をしていた作業員数名による発見情報をきっかけとして挙げ、一九七五年一二月「クッシーを守る会」が結成され、一九八三年には池田湖でイッシーとクッシーの出逢いが漫画家の手塚治虫の演出で行われたことを記している。紹介記事には湖畔にあるクッシーの模型の写真が添えられているが、「元祖砂湯クッシー」と書かれた立て札がなければ、ネッシーと外見的に異なる点を見出すことはできないだろう。また、今年(二〇〇九年)の正月には池田湖に行く機会に恵まれたが、ここにも湖畔の土産物屋が並んだ一画にイッシーの模型が置かれていた。だが、ショックだったのは、イッシー像のすぐ横の土産物屋でいくら探してもイッシーグッズや包装紙にイッシーを描いた土産物が全然みつからなかったことだ。全国どこでもある御当地キティちゃんグッズやNHK大河ドラマ「篤姫」絡みの菓子はふんだんにあるというのに…。池田湖は大ウナギの生息地として知られ、土産物屋の奥にも大ウナギを飼育している水槽が置かれていたり、食堂では地元特産のウナギ料理を名物にしていたりと、池田湖のイッシーは大ウナギに押され、観光資源として絶滅の危機にある。

本家であるネス湖のネッシーとて安穩としてはいられないのだろう。帰国後の二〇〇七年十月、朝日新聞の海外短信欄でこんな記事を見つけた。「英国のネス湖の怪物、ネッシーの「目撃」者がここ数年激減している。今年はまだ2人。報じた英タイムズ紙は「みんな妙にまっとうになってしまったみたいだ」と評している」。ネス湖から帰ってきたばかりの自分にとって、この記事はとてもありアルだった。自然豊かなリゾート地にはたくさんの人が集まっていたが、確かに誰もネッシーの出現を信じ、真剣に湖面をみつめてはいなかった…。しかし、目撃者減は観光地ネス湖にとって大きな打撃であろうけれども、ネッシーがこのまま人々の記憶からフェードアウトしてしまうとはやはり思えない。

二〇〇七年十二月九日(日)、「UMA(未確認動物)のいる科学史」というタイトルの公開シンポジウムが東京新宿の工学院大学で開催された。「未確認動物学」という論考を発表している下坂英氏が「大海蛇」について、本書にも執筆している伊藤龍平氏が「ツチノコ」について発表をし、民俗学の齊藤純氏と科学史の菊地原洋平氏がコメンテーターとして参加された。これは実は勤務先の同僚で科学史・科学論の専門家である林真理氏や『オカルトの帝国』の編者でもある一柳廣孝氏と続けている研究プロジェクトの活動として企画したものであった。今回は日本科学史学会生物学史分科会二〇〇七年度シンポジウムを兼ねる形となり、日本の公的な学会で「UMA」をテーマとして正面から取り上げた最初の試みとなったのではないかと自負しているのだが、詳細は日本科学史学会生物学史分科会の機関誌「生物学史研究」80号(二〇〇八年九月)に掲載されているので、そちらをご覧ください。ただ一点、研究プロジェクト

の公開研究会はいつもそうなのだが、どこで聞きつけたのか主催者側も全然知らない人が何人も聴講に来て、最前列に座っていた学生が下坂氏への質問に立ち、某大学の探検部に所属していると自己紹介するなど、会場は常の学会とは違う不思議な熱気に包まれていたことだけは記しておきたい。

おそらく会場に来た人たちは、このシンポジウムで大海蛇やツチノコの実在が明かされると期待していた訳ではないだろう。ネッシーが生きていると素朴に信じたりはしない「まっとう」な人たちはばかりだったのではないかと思う。だが、その実在の真偽を超えたところで、「UMA(未確認動物)」にどこか引きせぬ魅力を感じていたに違いない。だからこそ、多くの人々を熱中させ、時に専門家をも巻き込む形でその存在が問われたという歴史的事実を、現在という高みから嘲笑うことなく、再考してみることを意味を共有していただけたのだと思っている。

いや、ネッシーら「UMA」に限った話ではない。「UMA」という語は「UFO」から派生したもののだが、UFO(未確認飛行物体)の典型である空飛ぶ円盤を始め、この世界には不思議なことが溢れている。科学的に実証されない物事を人はオカルトと呼ぶが、現代文化の一翼として、現代社会のありようと深く関わる問題として考えてゆくべき課題はまだ多い。ネス湖への旅もそう簡単には終わらない。



# 原子炉の地震時安全性に関する研究 (炉心伝熱に及ぼす地震加速度とその方向の影響)

機械工学科 大竹浩靖、宮下徹

信州大学 小泉安郎

東京電力 森治嗣

筑波大学 阿部豊

Research on safety at earthquake of nuclear reactor

**ABSTRACT :** Onset of nucleate boiling –ONB– and critical heat flux –CHF– on subcooled flow boiling under oscillatory flow and vibration conditions, focusing on liquid velocity, amplitude and frequency of oscillations were investigated experimentally. Experiments were conducted using a copper thin-film and subcooled water in a range of the liquid velocity from 0.27 to 4.07 m/s at 0.10MPa. The liquid subcooling was 20K. Frequency of oscillatory flow was 2, 4 and 6 Hz, respectively; amplitude of oscillatory flow was 25 and 50 % in a ratio of main flow rate, respectively. For the vibration condition, acceleration of vibrator was 1.3 and 4.2 m/s<sup>2</sup>, respectively. Temperature at ONB and critical heat flux for oscillatory flow were lower than those for steady flow. The decreasing of liquid velocity by oscillatory caused the ONB and the CHF to decrease. Critical heat flux for the vibration condition was higher than that for steady flow. The effect of liquid oscillatory flow and vibration of heater on CHF examined through the liquid velocity profiles under oscillatory flow and vibration conditions. Now correlation was proposed by using the present experimental data.

## 1. 工業的背景

平成 18 年 9 月 19 日、25 年ぶりに「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が原子力安全委員会により改訂された。これにより地震に対する様々な見直しが行われ、構造的安全性に関しては免震構造等の設計技術の進歩が著しく適用実績もあることから「建物・構造物は原則として剛建造とする」という規定は廃止されるなど耐震安全性評価がより一層深まった。しかし、地震は自然現象で人間が制御できないだけでなく、最近の地震学、地震工学等の進展をもってしても敷地に生じる地震動を精度良く予測することは難しい。この一例が、平成 18

年 3 月金沢地裁での地震時安全性の点からの志賀原子力発電所 2 号機の運転差し止め判決である。この判決は、知識の進歩、技術の進歩にあわせて、常に合理的判断ができるよう最新の科学的・技術的最新の知見を踏まえて高度化していくことの必要性を指摘したことに重要性がある。

原子力発電所は我が国において重要なエネルギー供給源であるが、原子力発電所ほど耐震性に配慮した建築物はない。地震によって壊れた原子力発電所は、世界中を探してみても今までひとつもない。しかし、事故の進展にはさまざまな要因がありうるので、多様な分岐を漏れなく考える必要がある。また、地震時の原子炉炉心や配

管等の熱水力学的安全性に関してはこれまでほとんど注目されていない。振動流下の熱水力学特性の研究としては、ボイラーの安全性に関して小澤ら<sup>(1)</sup>が周波数 0.1~0.5(Hz)での強制流動脈動流下の限界熱流束に関する研究を行うことにとどまっている。なお、彼らは熱流束変動を考慮し、加熱面の熱容量に注目した CHF モデルを提案している。昨年度までの研究では定置状態における定常流および脈動流実験がなされてきたが、実際の地震を見立てて試験部を振動させる実験は行われていない。そこで、本研究では地震発生時のサブクール流動沸騰系における伝熱特性および気泡挙動に関する知見を得るために振動装置を用いて試験部に対して水平方向および垂直方向に振動を付加することで、液体の振動下における熱水力学問題を沸騰開始条件 (ONB) および限界熱流束 (CHF) に着目し実験および解析を行う。また、それらの点を高速度カメラで視覚化しデータを検討し、定置状態における定常流および脈動流の実験結果との比較を行い、加熱面の振動が沸騰開始条件および限界熱流束へ及ぼす影響に関しそれらの機構解明を行う。

## 2. 従来の研究

1959年、Zuberは加熱面から発生した上昇する蒸気が、連続かつ定常的な蒸気柱となり、加熱面上に Taylor 不安定に予って決まる間隔で、円柱状の蒸気柱が並ぶ状況を想定した。上昇する蒸気と下降する液との相対速度が、Helmholtz 不安定を起こす速度以上になると、加熱面への液体の流れが阻害され、CHF が発生するとして、飽和沸騰の場合の限界熱流束値を以下に示した。

$$q_{CHF} = 0.131\rho_v H_{fg} \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

高熱流束下の核沸騰では、加熱面上に形成した合体気泡の底部に液膜が存在し、この液膜内部には多数の蒸気茎（一次気泡）が定常的に存在する事を報告した。

甲藤・原村<sup>(2)</sup>は、気泡塊が成長し離脱するまでの滞留時間と、液膜が蒸発消耗するまでに要する時間とが等しくなったとき、限界熱流束を迎えるとした。発泡点から生じる蒸気は、小さな蒸気流（蒸気茎）を形成し上方で球状の気泡を形成する。この蒸気方がある長さになると気液界面で Helmholtz 不安定を生じ、その結果、隣接した気泡と合体し気泡塊を形成する。この気泡塊下には液膜、蒸気茎が混在するとしている。

小澤らは任意の振幅、周波数での脈動流動を人為的に作成できる実験装置を用いることで、逆流域をも含む広範囲にわたる脈動条件で限界熱流束実験を行い、脈動流下における限界熱流束は低減し、それは流量変動に伴って発生する周期的なドライアウトとリウェッティングの関係で説明でき、また脈動振幅ならびに脈動周波数が増加するに従って低減率は増加すると発表している。

沸騰伝熱とは、伝熱面とこれに接する液体の温度が蒸気相を形成するのに十分な条件のもとで、蒸気泡あるいは蒸気塊の発生を伴って、伝熱面から液体へ熱が伝えられることである。

伝熱面の過熱度  $\Delta T_{sat} = (T_w - T_s)$  と伝熱面熱流束  $q$  の関係を与える曲線を沸騰特性曲線と呼び、普通それは両対数グラフ上に図示され、Fig.1 となる。図中の AB 間は、非沸騰の液単相の自然対流域であり、B 点が沸騰開始点である。この点を越えると急激に沸騰の現象が現れ、熱伝達は違った機構に支配されるようになる。BD 間は、核沸騰域と呼ばれ、伝熱面上に分布した発泡点から気泡が発生する。低熱流束の BC 間は孤立気泡と呼ばれ、発泡点密度が小さいため、各気泡は干渉することなく独立に、発生、成長、離脱を行う。一方、高熱流束の CD 間は、合体泡域あるいは気泡干渉域と呼ばれ、発泡点密度が大きい為、気泡間の干渉により蒸気塊が形成される。D 点は核沸騰の上限を与える点で、バーンアウト点、極大熱流束点あるいは限界熱流束などと呼ばれる。核沸騰域は、わずかな伝熱面過熱度  $\Delta T_{sat}$  で非常に高い熱流束  $q$  を与えるので、工業上重要であり、またバーンアウト点は設計上の安全限度を与えるので、特別な関心が払われる。DE 間は遷移沸騰域と呼ばれ、伝熱面温度の増加によりかえって熱流束が低下するという特異な特性を示す領域で、電気加熱のような熱流束制御形の加熱源の場合には、この領域は不安定で定常的には実現不可能である。EF 間は膜沸騰域と呼ばれ、伝熱面は液体と直接に接することなく連続的な蒸気膜で覆われており、気泡は気液界面から発生、離脱する。E 点は膜沸騰が安定に維持される下限を与える点で、極小熱流束点と呼ばれる。

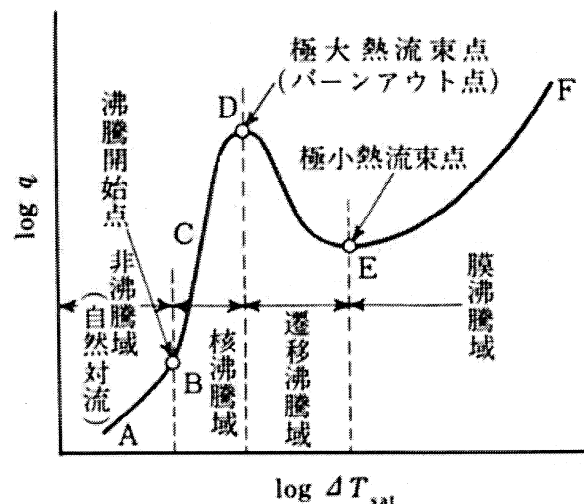


Fig.1 Boiling Curve.

## 3. 研究目的

本研究では、最新の技術を駆使して、原子炉の地震時

炉心伝熱の安全性検討のための情報を提供することを目的とする。特に、2008年度は、振動台を用いた振動条件下の実験を行い、地震発生時に伴う加熱面の揺れが沸騰熱伝達に及ぼす影響を検討した。特に、加熱面と水平方向の振動条件とともに、加熱面と垂直方向の振動が除熱限界（限界熱流束）に及ぼす影響を検討した。また、除熱限界（限界熱流束）時の蒸気泡の挙動、観測を通して、地震加速度とその方向が除熱限界（限界熱流束）に及ぼす機構を検討した。

#### 4. 実験装置および実験方法

振動下沸騰伝熱の実験装置を Fig.2 に示す。

実験装置は Fig.2 に示すような開放循環ループ系である。試験流体には十分に脱気したイオン交換水を用いた。液体の流動はマグネットポンプに行わせる。流動の実験パラメータは、液サブクール度 20K、液流速 0.27, 1.38, 3.20 および 4.07m/s である。振動は、加熱部を振動台（工学院大学 EEC プロジェクト仕様。水平方向最大振動加速度  $5\text{m/s}^2$ ）に載せることで実現した。この振動台にて正弦波状に試験部を振動させた。振動の方向は、加熱面に対して水平方向および垂直方向である。後者の実験は、加熱面を垂直に配置し、水平方向の振動を付加させた。前者は地震時の縦波に、後者は地震時の横波に対応する。振動実験のパラメータである加速度  $a$  および振動周波数  $f$  は、 $a = 1.3$  および  $4.15 \text{ m/s}^2$ 、 $f = 2, 4$  および  $20 \text{ Hz}$  である。

試験部には上部に可視部が設けてあり、沸騰様相及び流動様相が観測可能となっている。試験流路は  $10 \times 10 \times 500\text{mm}$ （水力等価直径  $0.01 \text{ m}$ ）の矩形流路である。伝熱面は電気回路用プリント基板を幅  $3\text{mm}$ 、長さ  $26\text{mm}$  の長さエッチングした銅薄膜（銅箔厚さ  $35\mu\text{m}$ ）を使用し定電流電源により直接通電加熱する。計測部は、電圧タップ線にはさまれた  $3 \times 10\text{mm}$  の領域である。伝熱面加熱量（平均熱流束）はジュール発熱量（=電圧×電流）から求め、伝熱面温度は電流と電圧の計測値とあらかじめ得た銅薄膜の温度と電気抵抗値の較正直線から求めた。併せて、高速度ビデオカメラ（最大  $500 \text{ frames/s}$ ）にて、加熱面から発生する蒸気泡の挙動を観察、その後定量化した。

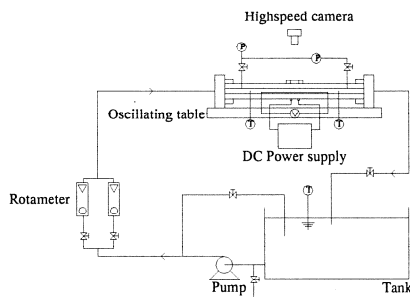


Fig. 2 Vibration condition type

#### 5. 実験結果および考察

Fig. 3、4 に、加熱面に対して水平方向振動の付加時の沸騰熱伝達特性を、Fig. 5 に、加熱面に対して垂直方向振動の付加時の沸騰熱伝達特性を示す。Fig. 3～5 中の矢印記号は、限界熱流束である。Fig. 3～5 に示すように、加熱面の振動の付加により、限界熱流束、冷却限界が上昇することがわかる。

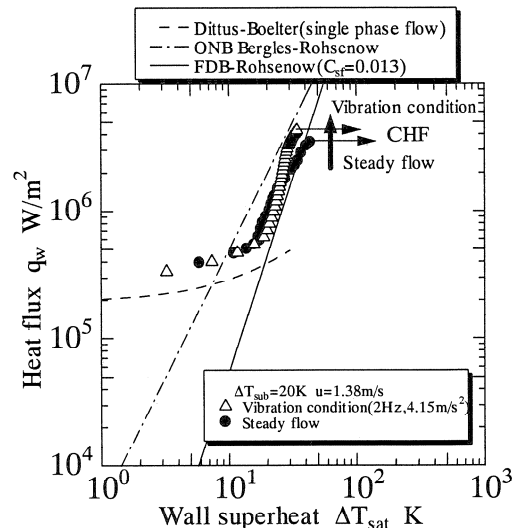


Fig. 3 Boiling curves under vibration condition for 1.38 m/s

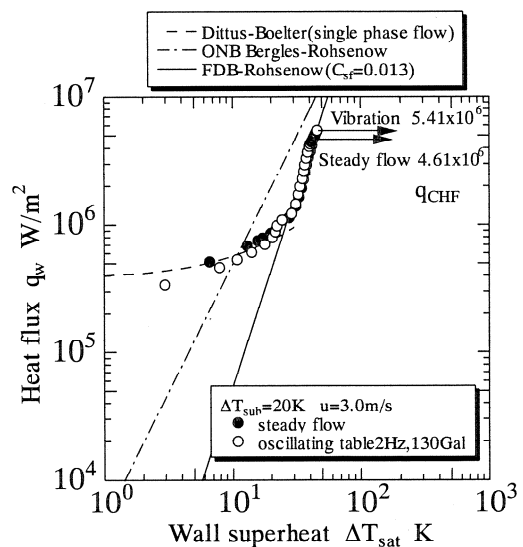


Fig. 4 Boiling curves under vibration condition for 3.0 m/s



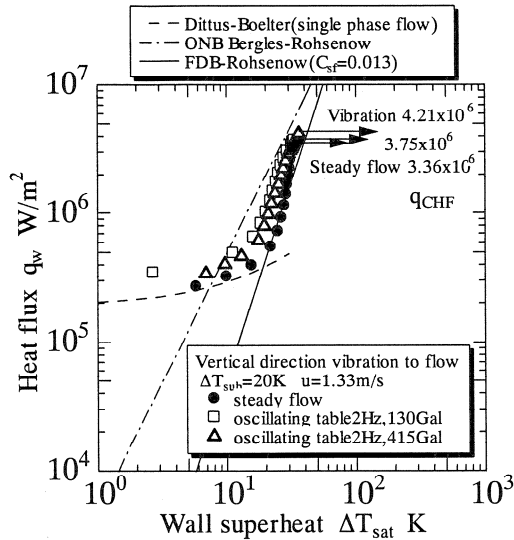


Fig. 5 Boiling curves under vibration condition for 1.3 m/s (Vertical flow)

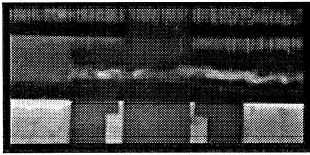


Fig. 6 CHF of steady flow Fig.7 CHF of vibration condition

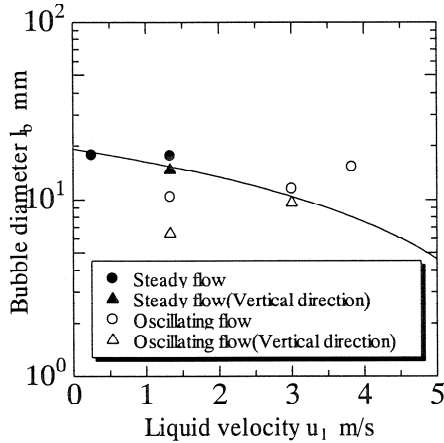


Fig. 8 Length of coalesced bubble on heater

この機構について考察する。Fig. 6 の一様流下、Fig. 7 の振動条件下における限界熱流束直前の加熱面上の合体気泡の本観察によると、Fig. 8 に示すように、加熱面振動下条件で発生する CHF 付近の合体気泡長さ (Fig. 7) は定常流条件のそれに (Fig. 6) 比べ短くなるのがわかる。DNB 型の限界熱流束を想定すると、その冷却限界 (限界熱流束:  $q_{CHF}$ ) は下式で与えられる<sup>(2)</sup>。

$$\tau_d q_{CHF} A_w = \rho_l \delta_{macro} (A_w - A_v) h_{fg} \quad (1)$$

ここで、 $\tau_d$  は気泡挙動の特性時間であり、流動沸騰系では、

$$\tau_d = L/U \quad (2)$$

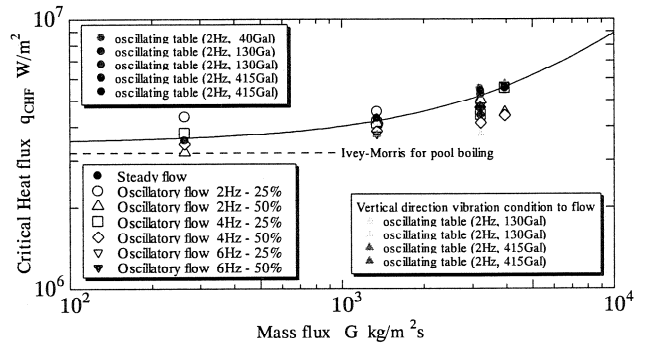


Fig. 9 Critical Heat Flux under vibration conditions

で与えられると考えられる。ここで、 $L$  は気泡代表寸法、 $U$  は気泡移動速度である。すなわち、特性時間  $\tau_d$  の減少、つまり合体気泡長さ  $L$  の減少が限界熱流束  $q_{CHF}$  の増加を導くと考えられる。前出した振動加速度の増加とともに、この合体気泡長さ  $L$  の減少がどのようなメカニズムで生じるかは、流路内の速度分布の変動およびそれに起因する温度分布の変動も考慮に入れ、現在検討中である。なお、まとめとして、Fig. 9 に、振動条件下の CHF の測定値を質量流束に対して示す。Fig. 9 に示すように、加熱面に対する垂直振動の付加により除熱限界が低減する条件が認められた。最終年度である 2009 年度は、この現象について、詳細な検討を続けていく予定である。

## 7. 参考文献

振動下のサブクール流動沸騰熱伝達に関し、実験的に検討し以下の結論を得た。

- (1) 加熱部の加振により冷却限界 (限界熱流束: CHF) は上昇した。
- (2) この機構については、合体気泡長さ  $L$  の減少が特性時間  $\tau_d$  ( $=L/U$ ) の減少し、限界熱流束  $q_{CHF}$  の増加を導くと考えられる。

## 8. 参考文献

- (1) 小澤ら, JSME, Int. J, SerB,39-2(1995), 412.
- (2) 原村・甲藤, 機論, 49-445, B(1983), 1919.

## センサ・ネットワーク用新構造弾性表面波センサ装置の開発

工学院大学 グローバルエンジニアリング学部 疋田 光孝  
玉川大学 工学部 竹内 正男

### Development of New Surface-Acoustic-Wave Sensor Installed in Sensor Network

Mitsutaka HIKITA Faculty of Global Engineering, Kogakuin University  
Masao TAKEUCHI Faculty of Engineering, Tamagawa University

**Abstract** — A new concept called “Sensor Network” has been proposed with the development of mobile communications system such as cellular phone, radio LAN and Bluetooth. Sensed signals from many sensor nodes installed in a wide area are gathered to a center node by technology similar to that used in mobile communications. Home/office circumstance control, environment monitoring and protection can be conducted based on the collected data. We propose a new SAW subtle-gas sensor, which can be used in these sensor nodes. The new sensor structure removes a limited selection for piezoelectric crystal substrates, while only Quartz crystal substrates have been used in conventional SAW gas sensors. The sensing dynamic range was widely extended by utilizing both fundamental and 3rd-harmonic frequency SAWs. Moreover, our sensors are also designed to be combined with 2.4-GHz ZigBee, which has been regulated by IEEE802.15.4, and ZigBee Alliance as a wireless-communications medium for the “Sensor Network”. It is predicted that our network system will possibly provide hydrogen-gas leakage sensing for future fuel-cell cars and environmental-pollution gas sensing.

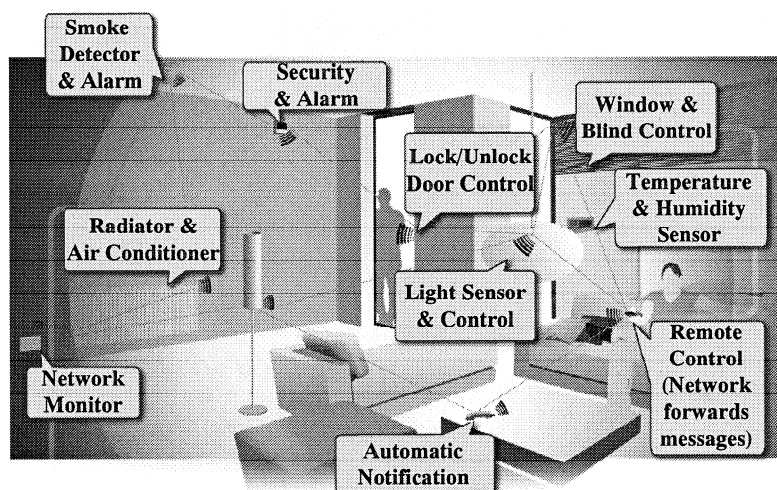


Fig. 1. Concept of ZigBee-based sensor network.

## 1. INTRODUCTION

Cellular-phone systems have spread all over the world and their technologies continue to be developed during the first half of the twenty-first century. On the other hand outstanding technical innovations have been observed in a sensor area. A new concept called "Sensor Network" has been proposed recently by combining sensor technologies with such mobile communications system as cellular-phone, radio LAN and Bluetooth. In this network system, a lot of sensors distributed in a certain area such as home, office and public places are connected via rather simple private radio communications network. It is thought to have a big impact on our lives and to grow to be a giant industry like the cellular-phone systems. It will also contribute to future ecology, i.e. energy saving and environmental preservation. In our laboratory, we have been studying the sensor network to achieve comfortable living circumstances by home/office sensing and control [1]. As shown in Fig. 1, many sensor nodes with various sensors will be arranged within homes and offices, where nodes can communicate one another via simple radio network. Sensed signals from all nodes are gathered to a center node. The center node not only supervises sensor nodes and processes collected data but also sends control signals to other installations.

In this paper, we propose a new sensor-node structure and a novel SAW (Surface Acoustic Wave) gas sensor which can operate within the sensor node. One of the most successful SAW gas-sensors is a SAW GC (gas chromatography) invented by E. J. Staple, et al [2][3]. However, it has a rather complicated structure using not only a SAW sensor but also a trap tube and a column tube to separate gases according to their molecule weight. Due to the rather large size and the high power consumption, it can not be adopted in sensor network. Moreover, only Quartz crystal substrates have been used in these kinds of conventional SAW gas sensors, because conventional SAW sensors require very good temperature characteristics for the piezoelectric substrates. We have invented a novel SAW gas sensor, which can remove such a limited selection for piezoelectric crystal substrates.

ZigBee has been regulated by IEEE 802.15.4 [4] and ZigBee Alliance as a wireless-communications medium for the sensor network. One important feature required for ZigBee is the extreme low-power consumption, which provides several-year operation with a single battery. In ZigBee, 2.4 GHz is used to connect sensor nodes

mutually in the sensor network. They can provide not only conventional star-link but also new mesh-link types of network topology. Our sensor is also designed to be combined with 2.4-GHz ZigBee. Sensing signals with several hundred MHz are generated by division and multiplication of 2.4-GHz signal, which can remove the necessity of a SAW feedback oscillator used in the conventional SAW sensors [5][6]. Moreover, the dynamic range of our sensor is expanded by using not only fundamental but also 3-rd harmonic frequency SAWs to detect gasses. For example, 150 MHz obtained from 2.4 GHz divided by 16 is used in coarse sensing, while 450 MHz i.e. 150 MHz multiplied by 3 is used in fine sensing. The proposed sensor not only can be assembled within the sensor node but also provides self-temperature-compensated characteristics. We will give an illustration of the 2.4-GHz ZigBee-based sensor node in the 2nd Section and present a detail explanation about the SAW gas sensor in the 3rd Section. These sensor nodes will be used for sensing hydrogen gas leaked from fuel-cell cars as well as other pollution gases in the future.

## 2. PROPOSED ZIGBEE-BASED SENSOR NODE

ZigBee which uses 2.4 GHz has been regulated by IEEE802.15.4 as one of radio standards for low data-rate communications media such as a sensor network [4]. We have proposed a new sensor-node structure which is constructed with not only conventional RF circuits but also a SAW gas sensor as shown in Fig. 2. In our configuration, sensing RF signals e.g. 150-MHz and 450-MHz signals which are supplied to the SAW sensor are generated from 2.4-GHz signal in the ZigBee circuit. These frequencies are obtained from 2.4 GHz divided by 16 and from 150 MHz multiplied by 3, respectively. As will be explained in the next Section, 150 MHz corresponds to a fundamental SAW, while 450 MHz to a 3rd-harmonic SAW. Both of them can be excited by a single IDT (Interdigital Transducer). When the concentration of hydrogen-gas molecule is very subtle, the 450-MHz 3rd-harmonic SAW is used for sensing with high sensitivity. On the other hand, the 150-MHz fundamental SAW is used for coarse sensing of dense concentration. Therefore a wide sensitivity dynamic range can be achieved by changing two frequencies.

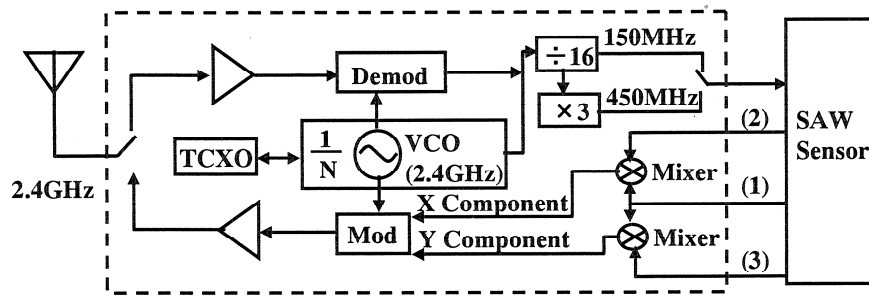


Fig. 2 Proposed sensor node based on ZigBee consisting of not only conventional RF circuits but also SAW sensor.

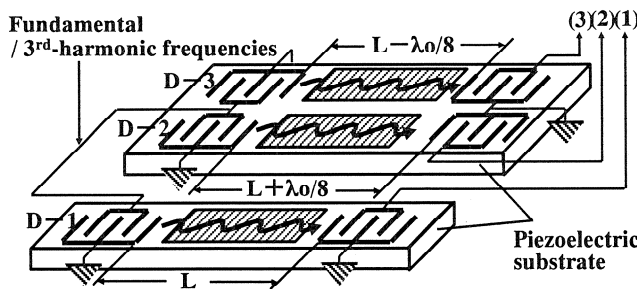


Fig. 3 Fundamental configuration for novel SAW gas sensor.

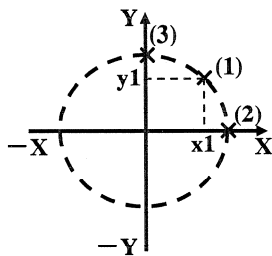


Fig. 4 Phase relations for three output signals.

### 3. NOVEL SAW GAS-SENSOR STRUCTURE

#### 3.1. Fundamental configuration of sensor

We use three SAW delay lines in our sensor as shown in Fig. 3. Each delay line has input and output IDTs, between which thin film reactive to specific gas molecule is formed. In the case of palladium (Pd) thin film, hydrogen molecule reacts with Pd to produce small mass loading along the SAW propagation path, which results in phase shift

of the received SAW. As shown in Fig. 4, the propagation length between input and output IDTs for the delay line of D-1 is defined as  $L$ . Other lengths for D-2 and D-3 are  $L + \lambda_0/8$  and  $L - \lambda_0/8$ , respectively, where  $\lambda_0$  is a SAW wavelength. The D-1 is used as a sensing delay line. The D-2 and D-3 are isolated from air and provide standard phases determined by SAW propagation lengths between IDTs.

First we assume that the 150-MHz signal which corresponds to a fundamental SAW is providing from the sensor-node circuit shown in Fig. 2. The signal is supplied to all input IDTs of three delay lines, and the received signals from output IDTs are numbered from (1) to (3) in order according to the delay lines from D-1 to D-3 as shown in Fig. 3. Phase relations of three output signals from (1) to (3) are shown in Fig. 4. If the output signal (2) is assumed to be a standard signal with 0-rad phase and to exist on X axis, the output signal (3) is located on Y axis with  $\pi/2$ -rad phase due to  $\lambda_0/4$ -propagation path difference. With no concentration of sensing gas, location of the sensor output signal (1) is in the middle point between two output signals (2) and (3) as shown in Fig. 4, because the delay-line length of D-1 is in-between for both D-2 and D-3. With increase of gas concentration signal (1) moves along Fig. 4's circle. This phase shift for propagating SAW is produced due to mass loading effect of sensing gas. It also can be measured based on  $x_1$  (in-phase) and  $y_1$  (quadrature-phase) components given by projected values to X and Y axes respectively as shown in Fig. 4. Moreover the delay lines D-2 and D-3 are isolated from the sensing gas, therefore they can provide standard in-phase (I) and quadrature-phase (Q) signals unrelated to gas concentration. The  $x_1$  and  $y_1$  can be obtained by mixing the sensor signal (1) with the standard signals (2) and (3) respectively as shown in Fig. 2.

### 3.2. Self-temperature-compensation characteristics of sensor

SAWs propagating along the general piezoelectric substrates, e.g. LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, LBO have velocities with negative temperature coefficients for rising temperature. Their values are from 20 to 100 ppm/°C, which can not be neglected when considering wide temperature range from -40° to 100°C required for the sensor network especially for use within a garage. The phase relations between sensor signal (1) and the standard signals (2)/(3) at room temperature are shown in Fig. 5(a)'s constellation, which are same as in Fig. 4. When the temperature rises the velocity of SAW is decreased, which results in increase of each delay line's phase delay. This corresponds to clockwise rotation in the constellation for each output signal as shown in Fig. 5(b). The more rises the temperature, the further increases the rotation-angle as shown in Fig. 5(c). However, the temperature change has same influence to all three SAW delay lines, which keeps unchanged relative phase relations among three output signals. Therefore, if we introduce new axes of X' and Y', the values projected onto X' and Y' can provide same I and Q components as x1 and y1 at room temperature. This means that the novel sensor structure has self-temperature-compensation characteristics. The actual phase shift due only to the gas concentration can be obtained independent of the environmental temperature condition.

### 3.3. Sensing characteristics at 3rd-harmonic frequency

An IDT can excite both fundamental and 3rd-harmonic SAWs in principle as shown in Fig. 6. However, a problem is low excitation efficiency for the 3rd-harmonic SAW. We have been investigating finger shape of IDT electrodes versus excitation efficiency focusing on the 3rd-harmonic SAW. Various kinds of combination between Fig.6's electrode finger width W(M) and space width W(S) are possible. We have found that some combinations can provide good excitation efficiency for the 3rd-harmonic SAW as well as reasonable efficiency for the fundamental SAW, which will be shown in experimental results later.

Almost same excitation efficiency for both fundamental and 3rd-harmonic SAWs are assumed, which provides phase relations between the output signal (1) and the output signals (2)/(3) for the 3rd-harmonic SAW as shown in Fig. 7's constellation. In this case, if we take the output signal (2) as a standard signal on X axis with 0-rad phase, the output signal (3) is on -Y axis with

$3\pi/2$ -rad phase because the quarter-wavelength path difference for fundamental SAW corresponds to three-quarter-wavelength path difference for the 3rd-harmonic SAW. The sensor output signal (1) for the 3rd-harmonic SAW is located in the middle point between (2) and (3). Therefore, changing the sign of the output (3), which is equivalent to changing sign of the mixer output signal obtained from mixing between (1) and (3) shown in Fig. 2, ensures that same procedures as used in the fundamental SAW can be applied to the 3rd-harmonic SAW. The phase shift of the output signal (1) which can be monitored by x1 and -y1 provides amount of gas concentration, whose sensitivity is three times higher than that of the fundamental SAW.

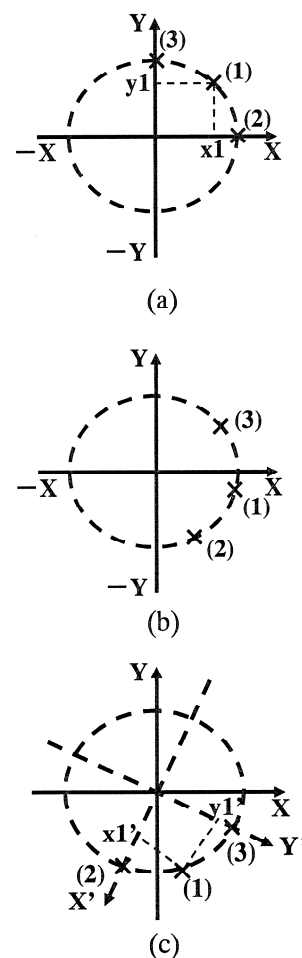


Fig. 5 Phase rotations due to temperature change.  
 (a) Room temperature; (b) Clockwise rotation due to temperature rising;  
 (c) New axes, X' and Y'.

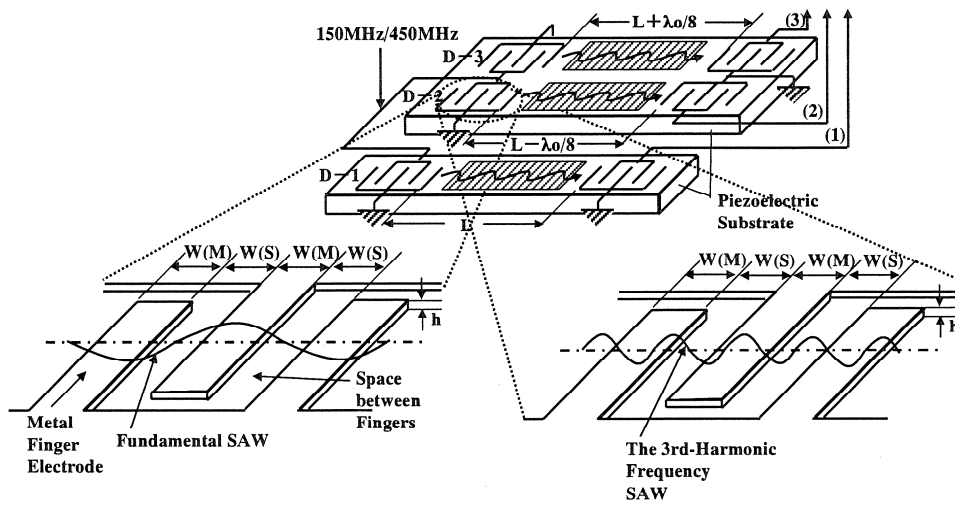


Fig. 6 Excitation of fundamental and 3rd-harmonic frequency SAWs.

#### 4. EXPERIMENTAL VERIFICATION for PROPOSED SENSOR STRUCTURE

To verify our proposal, we carried out basic experiments using Fig. 8's structure equivalent to that shown in Fig. 3. Three same SAW delay lines are introduced as shown in the figure. Functions of Fig 3's D-1, D-2, and D-3 were equivalently achieved by combination of the three delay lines and three different external electric-transmission lines as illustrated in Fig. 8. The phases of the transmission lines,  $\theta_i$  ( $i=1, 2, \text{ and } 3$ ), are determined as follows:  $\theta_1=\text{arbitrary}$ ,  $\theta_2=\text{arbitrary}$ , and  $\theta_3=\theta_2+\pi/2$ . If the phase of the Fig. 8's SAW delay line is denoted as  $\varphi_{\text{SAW}}$ , total phases are  $\varphi_{\text{SAW}}+\theta_1$ ,  $\varphi_{\text{SAW}}+\theta_2$ , and  $\varphi_{\text{SAW}}+\theta_3$  respectively. If the phases of Fig. 4's (1), (2), and (3) are denoted as  $\varphi_i$  ( $i=1, 2, \text{ and } 3$ ), they are given by  $\varphi_1=\varphi_2+\pi/4$ ,  $\varphi_2=0$ , and  $\varphi_3=\varphi_2+\pi/2$ , which correspond to one specific condition of the above  $\varphi_{\text{SAW}}+\theta_i$  ( $i=1, 2, \text{ and } 3$ ). These values can guarantee  $|\varphi_2-\varphi_3|=|\theta_2-\theta_3|=\pi/2$ . Those shown in Fig. 7 at the 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency are three times of the above values at the fundamental frequency. Therefore,  $|\varphi_2-\varphi_3|=|\theta_2-\theta_3|=\pi/2$  at the fundamental frequency and  $|\varphi_2-\varphi_3|=|\theta_2-\theta_3|=3\pi/2=\pi/2$  at the 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency can be achieved. This means that the axes for directions of (2) and (3) are perpendicular to each other at both frequencies. Thus the exact phase shifts of D-1 due only to gas concentration can be measured by projecting (1) onto the above perpendicular coordinate.

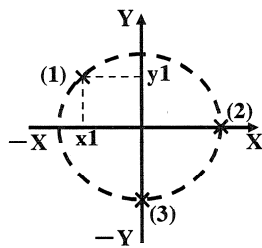


Fig. 7 Phase relations for three output signals at 3rd-harmonic frequency.

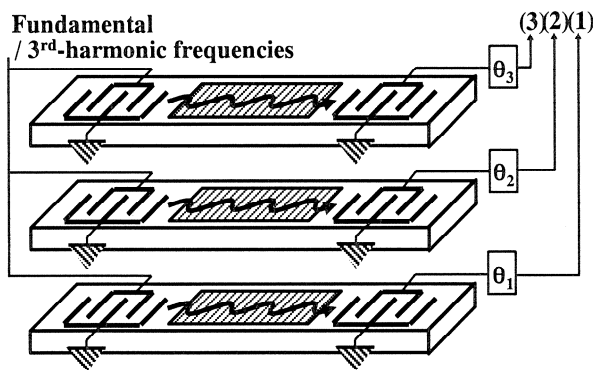


Fig. 8 Experimental sensor structure equivalent to that shown in Fig. 3.

In the experiments, as  $\theta_i$ 's depend on the transmission-line lengths, we used appropriate transmission lines which had the phase

characteristics of  $\theta_1=230^\circ$ ,  $\theta_2=60^\circ$ , and  $\theta_3=150^\circ$  at the fundamental frequency at room temperature which will be shown later. We fabricated SAW delay lines using process equipments in Kogakuin University's MBSC research center. The SAW delay line mounted on a TO-8 package is shown in Fig. 9. In order to obtain good excitation efficiencies for both the fundamental and 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency SAWs, we designed a modified-electrode-width IDT based on computer simulation procedures as shown in Fig. 10a. Examples of excitation characteristics for the SAW delay line are illustrated in Fig. 10b, which shows that SAWs with almost same levels can be excited at both frequencies.

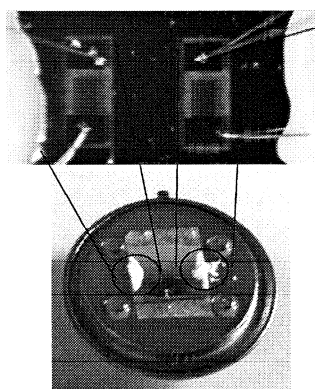


Fig. 9 Experimental SAW delay line fabricated in MBSC. SAW chip is mounted on TO-8.

A  $128^\circ$  Y-X  $\text{LiNbO}_3$  was used as a substrate. Experimental results for temperature characteristics of phases of Fig. 8's (1), (2), and (3) at the fundamental frequency, 75MHz in this case, are shown in Fig. 11a. Phases of (1), (2), and (3) are about  $230^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $150^\circ$  respectively at room temperature, and the phase shifts due to temperature changes are exactly same for all phases. Phase difference between (2) and (3) is exactly  $90^\circ$ . Thus, projecting (1) onto the axes for directions of (2) and (3) can provide correct phase shift due only to the sensing-gas effect over wide-temperature. As explained previously, projection procedure can be operated by mixing (1) with (2) and (3).

Experimental results at the 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency, 225MHz in this case, are shown in Fig. 11b. Almost same characteristics as those at the fundamental frequency were achieved. Phase difference between (2) and (3) is also exactly  $90^\circ$ . The phase shifts due to temperature changes are also same for all phases, which can provide correct phase shift due only to the sensing-gas effect even at the 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency. These results implicate a

possibility to achieve wide-dynamic range from coarse sensing to fine sensing by switching the fundamental and 3<sup>rd</sup>-harmonic frequencies. We can include functions of Fig. 8's transmission lines with phases of  $\theta_i$  ( $i=1, 2, \text{ and } 3$ ) within SAW chips by introducing SAW transmission paths with  $n\pi/4$  ( $n$ : integer) as shown in Fig. 3.

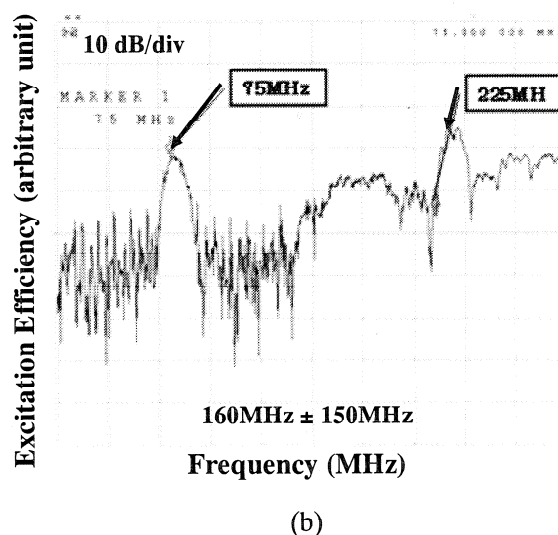
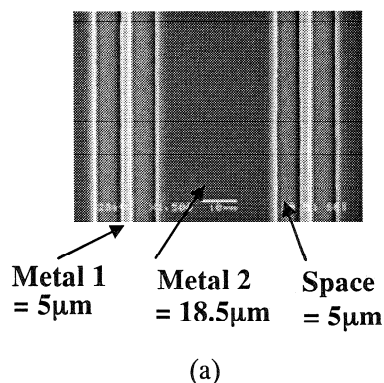
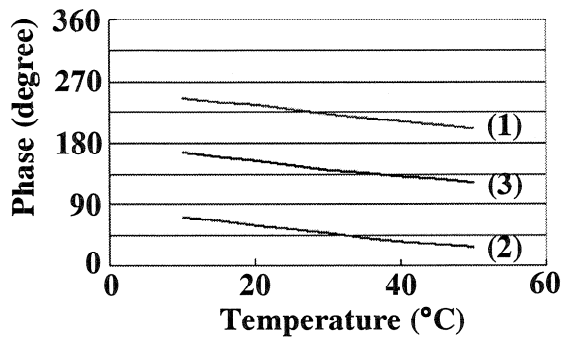
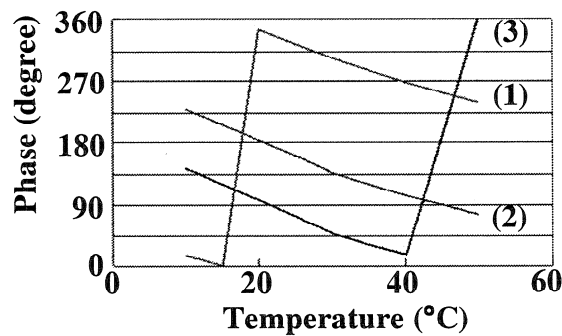


Fig. 10 Excitation of both fundamental and 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency SAWs.  
 (a) Designed IDT pattern;  
 (b) Experimental results.



(a)



(b)

Fig. 11 Experimental temperature characteristics for Fig. 8's three output phases.

- (a) Fundamental frequency (75 MHz);
- (b) 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency (225MHz).

## 5. CONCLUSION

“Sensor Network” has been investigated as a small-sized radio-communications infrastructure. We have been studying such sensor network as a method to improve home/office circumstances. In this paper, we have proposed a new sensor-node configuration based on 2.4-GHz ZigBee and a novel SAW sensor. Features of our SAW sensor are as follows: (1) Sensing RF signals are generated from the ZigBee circuit, (2) Temperature coefficients of piezoelectric substrates do not need to be considered due to self-temperature-compensation characteristics of the sensor, (3) Wide sensing dynamic range can be achieved by using both fundamental and 3rd-harmonic SAWs.

By carrying out fundamental experiments, we confirmed the validity of the proposed sensor structure. The possibility of wide-dynamic sensing range using both the fundamental and 3<sup>rd</sup>-harmonic

frequencies was also shown. This sensor has been developed to be installed in the 2.4-GHz ZigBee-based sensor network. The fundamental and 3<sup>rd</sup>-harmonic frequency signals can be generated from a 2.4-GHz VCO in RF circuit of ZigBee's sensor node by division and multiplication of 2.4-GHz signal.

## REFERENCES

- [1] Home Page of Kogakuin University (<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1022/>)
- [2] E. J. Staples, “Dioxin/Furan detection and analysis using a SAW based electronic nose,” in IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1998, pp. 521-525.
- [3] Electronic Sensor Technology HP, “Chemical sensor for the 21 century,” (<http://www.estcal.com/>)
- [4] IEEE Standard 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2003.
- [5] K. Yamanaka, S. Ishikawa, N. Nakaso, N. Takeda, T. Mihara, and Y. Tsukahara, “Ball SAW devices for hydrogen gas sensor,” in IEEE Ultrason. Symp. Proc., pp.229-302, 2003.
- [6] T. Kogai, and H. Yatsuda, “Liquid sensor using SAW and SH-SAW on Quartz,” in IEEE Ultrason. Symp. Proc., pp.552-555, 2006.





## 顕著な生物活性を有する高次構造天然物の全合成研究

—特異な二量体マクロライド構造を有するレプランシンおよび  
強力な抗癌作用を有する海産天然物コルチスタチン A の全合成研究—

工学院大学 工学部 応用化学科 宮下正昭

北海道大学 理学研究院 化学部門 谷野圭持

工学院大学 工学部 応用化学科 南雲紳史

Synthetic Studies on Natural Products Having a Unique Chemical Structure and  
Distinctive Biological Properties

—Synthetic Studies on Lepranthin, a Novel Dimeric Macrolide, and Cortistatin A,  
a Marine Natural Product Displaying Potent Anticancer Activity—

Masaaki Miyashita, Department of Applied Chemistry, Kogakuin University  
Keiji Tanino, Graduate School of Science, Hokkaido University  
Shinji Nagumo, Department of Applied Chemistry, Kogakuin University

ABSTRACT: Lepranthin is a novel 16-membered-ring dimeric macrolide, isolated from the lichen *Arthonia impolita* in 1904, and its structure was unambiguously determined by X-ray crystallographic analyses in 1995. We set about synthetic studies of lepranthin having a novel molecular structure with stereochemical complexity, because its biological properties as well as synthetic studies have never been reported so far. Synthetic challenges posed by lepranthin are as follows: (1) Stereoselective construction of six asymmetric carbon atoms including four contiguous stereogenic centers; (2) Different functionalization of four hydroxyl groups; (3) Macrolactonization toward construction of a 16-membered ring. As a result, we were successful in construction of the six asymmetric carbon atoms including four contiguous stereogenic centers in a highly stereoselective manner by using our original stereospecific epoxide-opening

reactions. Eventually, we successfully synthesized lactone **10** bearing all the requisite stereogenic centers and functionalities for the total synthesis of lepranthin.

Cortistatin A, isolated from the marine sponge *Corticium simplex*, is a novel steroidal alkaloid which has been demonstrated to exhibit highly selective anti-proliferative activity against human umbilical vein endothelial cells (HUVECs). We were very interested in the potent anti-angiogenic activity of cortistatin A as well as its unique chemical structure and embarked on a total synthesis. To this end, we chose  $\beta$ -estradiol, a commercially available steroid, as the starting material and explored an efficient synthetic route from  $\beta$ -estradiol to tricyclic spiro lactone **19**, the key synthetic intermediate in the present synthesis. The synthesis of the tricyclic spiro lactone **19** was efficiently performed which involves an oxidative cleavage of the aromatic A-ring, subsequent Dieckmann condensation leading to diester **11**, formation of tricyclic lactone **14**, and stereoselective construction of the C8 stereogenic center by the use of Davis oxidation of ketone **16**, as the key steps. We also developed a promising methodology for introduction of an isoquinoline moiety.

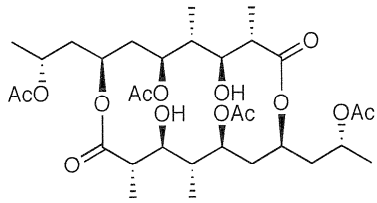
## 1. はじめに

大環状ラクトン構造をもつ天然物はマクロライドと総称されるが、それらの中には抗生物質として著名なエリスロマイシンや免疫抑制剤 FK-506 などをはじめ、顕著な抗菌作用や抗腫瘍活性を示すものが数多く含まれており、マクロライド系天然物の探索ならびに合成研究は創薬の立場から非常に重要である。このような背景から、顕著な薬理活性を有するマクロライドの合成研究が内外で活発に行なわれている。

## 2. 顕著な生物活性を有する高次構造天然物の全合成研究

### 2. 1 レプランシンの全合成研究

1904年、Zopfらにより地衣類 *Arthonia impolita*

から初めて単離されたレプランシン<sup>1)</sup>は90年後の1995年、PolbornらによりX-線結晶解析を用いてその構造が明らかにされた。<sup>2)</sup> レプランシンは4個のアセチル基、2個の水酸基を含む二量体構造を有するユニークな16員環マクロライドであるが、その生理活性は不明であり、合成研究も報告されていない。レプランシンは同一構造を有する2つのセコ酸がマクロラクトン化して生合成されたもので、 1に示すように二量体構造をとっている。

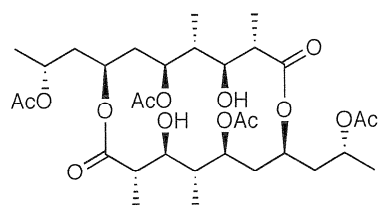
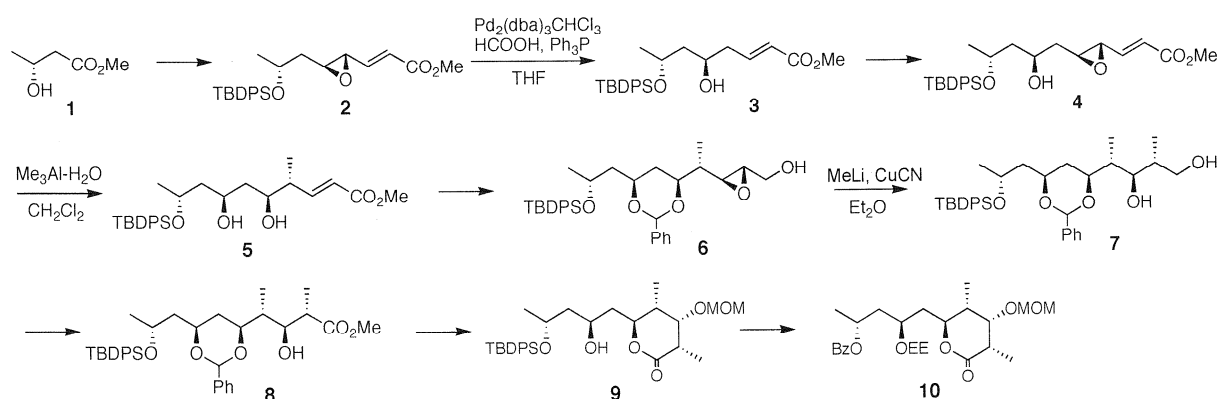


図 1. Lepranthinの構造

なお単量体のセコ酸は2個のメチル基と4個の水酸基を含む合計6個の不斉炭素有している。従って、4連続不斉中心を含む6個の不斉炭素の立体選択的構築が合成上の最重要課題となる。我々はレプランシンのユニークな立体構造と生理活性に興味を持ち、立体特異的エポキシド開環反応を基盤とする全合成研究に着手した。

**Scheme 1** に示すように、市販の Methyl (*R*)-(-)-hydroxybutyrate (**1**) を出発物質とし、数行程の官能基変換を経て、 $\gamma,\delta$ -エポキシ- $\alpha,\beta$ -不飽和エステル **2** へ導いた。**2** に対し  $\text{Pd}_2(\text{dba})_3 \cdot \text{CHCl}_3 \cdot \text{HCOOH}$ 、 $\text{Ph}_3\text{P}$  を用いてエポキシドの還元を行い、(5*R*)-ヒドロキシ- $\alpha,\beta$ -不飽和エステル **3** を立体選択的に合成した。**3** から同様の官能基変換により、 $\gamma,\delta$ -エポキシ-



Scheme 1. セコ酸 (単量体) の合成に必要な全ての不斉炭素と官能基を備えたラクトン10の立体選択的合成

$\alpha,\beta$ -不飽和エステル **4** へ導いた後、独自に開発した  $\text{Me}_3\text{Al} \cdot \text{H}_2\text{O}$  系による立体特異的メチル化反応<sup>3)</sup>に付き、ジオール **5** を高立体選択的に合成した。

さらに **5** から3工程を経てエポキシアルコール **6** へ導いた後、Lipshutz 試薬によりエポキシドの開環を行ない、**7** を立体選択的に得た。得られた **7** から官能基変換を行い、セコ酸誘導体 **8** へ導いた。このようにしてレプランシンに必要なすべての官能基と不斉炭素有するセコ酸誘導体 **8** を合成した。次に、**8** の水酸基を識別するため、MOM 基による水酸基の保護、ラクトン化を行ない **9** とした後、さらに保護基の変換を行ってラクトン **10** へ導いた。今後、アセチル基の導入とマクロラクトン化を行ない、レプランシンの全合成を達成する予定である。

## 2. 2 コルチスタチン A の全合成研究

コルチスタチン A はインドネシア・フローレンス島で採取された海綿 *Corticium simplex* の代謝産物から単離された化合物で、正常ヒト臍帯静脈血管内皮細胞に対し強力な増殖抑制を示すことから血管新生阻害に基づく新しい抗癌剤として内外から非常に注目されている。<sup>4)</sup> コルチスタチン A は顕著な生物活性に加え、構造的にも特異な oxabicyclo-

[3.2.1]octene 骨格やイソキノリン構造を含む新規なステロイド系アルカロイドであることから、多くの合成化学者の注目を集め内外で活発な合成研究が行われている。我々はコルチスタチン A の特異な薬理活性と複雑な化学構造に興味を持ち全合成研究に着手した。

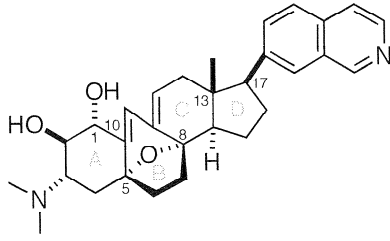


図 2. Cortistatin A の構造

Scheme 2 に示すように、市販の $\beta$ -estradiol をルテニウム酸化により芳香環部を酸化的に開裂した後、エステル化、ケタール化を経てジエステル 11 へ導いた。11 を Dieckmann 環化により 12 とし、さらに脱炭酸を行ってケトン 13 を得た。13 を Baeyer-Villiger 酸化に付すと、望むラクトン 14 が収率良く得られた。なお、14 は  $^1\text{H-NMR}$  によりシス-ラクトンであることが判明した。さらに 14 から LAH 還元、1 級水酸基の選択的保護、酸化、エノールシリルエーテル化を経て 15 へ導いた後、三枝反応を用いて目的とするエノン 16 を合成した。

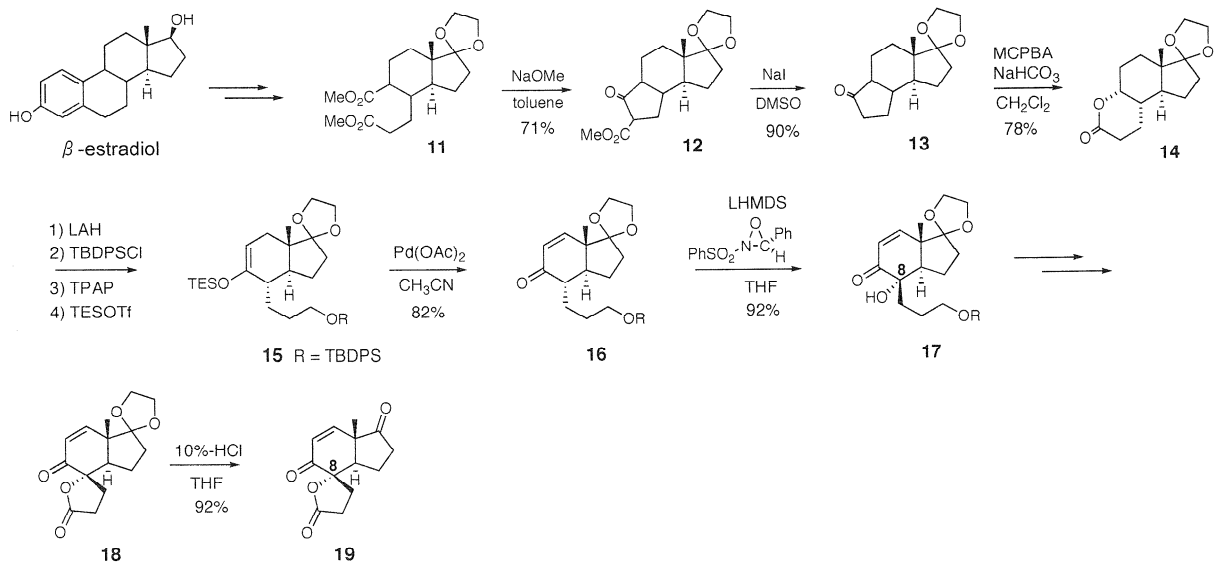
コルチスタチン A の合成上の重要課題は 8 位の三級水酸基の立体選択的導入であるが、エノン 16 に

対し LHMDS を用いて Davis 酸化を行なうことにより、ケトアルコール 17 の合成を高収率で達成した。さらに、17 から 3 工程を経て 18 へ変換後、アセタールの除去を行ない鍵中間体であるケトラクトン 19 を合成した。

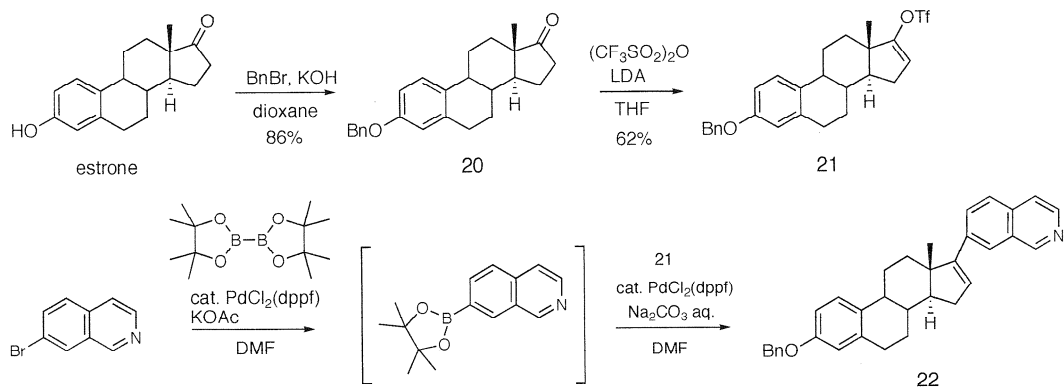
### 3. イソキノリン導入のモデル実験

Scheme 3 に示すように、イソキノリン導入のモデル実験としてエストロン誘導体 20 と 7-bromo-isoquinoline の鈴木・宮浦カップリングの検討を行なった。なお、20 は市販のエストロンから 2 工程で合成できる。得られた 20 と 7-bromoisoquinoline をパラジウム触媒存在下、カテコールボラン用いて鈴木・宮浦カップリング反応を行なったところ、望むイソキノリン導入体 22 が好収率で得られた。

今後、鍵中間体 19 からイソキノリンの導入ならびに最重要課題である B 環部の構築を行い、コルチスタチン A の全合成を達成する予定である。



Scheme 2. CD環構築の鍵中間体スピロラクトン19の立体選択的合成



Scheme 3. イソキノリン部の導入法の開発

### 参考文献

- 1) W. Zopf, *Liebigs Ann. Chem.* **336**, 46 (1904).
- 2) K. Polnborn, W. Steglich, J. D. Connolly, and S. Huneck, *B: Chem. Sci.* **50**, 1111 (1995).
- 3) M. Miyashita, M. Hoshino, A. Yoshikoshi, *J. Org. Chem.*, **56**, 6483 (1991).
- 4) S. Aoki, Y. Watanabe, M. Sanagawa, A. Setiawan, N. Kotoku, M. Kobayashi.



## 次世代 End-to-End QoS 制御のためのネットワーク資源管理方式の研究 (2) - QoS アウェア経路制御方式 -

工学部 情報通信工学科 浅谷 耕一、山口 実靖  
早稲田大学大学院国際情報通信研究科 松本 充司

### A Network Resource Management Scheme for Next Generation End-to-End QoS Control - QoS Aware Routing Protocol -

Koichi Asatani, Saneyasu Yamaguchi, Department of Information and Communications Engineering  
Mitsuji Matsumoto, Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University

ABSTRACT: It is difficult to fully monitor network resource usage in the Internet. Various new applications including IP telephony and IPTV requires each QoS. In particular, real-time applications are sensitive to delay and delay variation.

This report proposes a delay-aware routing scheme with use of multiple routing tables to reduce end-to-end delay of real-time communication. It first establishes minimum spanning trees for real-time and non real-time communications. Then the maximum node degree is specified to avoid excessive traffic loads in specific nodes. The unused links are assigned to real-time and non real-time links alternately according to the cost order. Simulation results show that the number of unused links is reduced and each node degree is balanced.

#### 1. はじめに

近年、ADSL や FTTH などのブロードバンドアクセスが普及し、インターネットも WEB やメールをはじめとして、テレビ会議やライブ映像配信などの動画や IP 電話などの音声などストリーミング通信やリアルタイム通信などの提供が可能となった。これらの多様なトラフィックに対してそれぞれに適した QoS (Quality of Service) を保証する必要がある。

メールや Web のような非リアルタイムデータ通信と、音声やテレビ会議などのリアルタイム通信では所要品質が異なる。特に、リアルタイム通信では遅延やジッタが大きな問題となる。

例えばメールや Web では数秒の遅延やジッタは問題で

はないが、音声や動画では、一定以上の遅延・ジッタが発生すると音声品質や画像品質の劣化が生じる。

インターネットの QoS 保証技術として Diffserv (Differentiated Service) が研究されている。Diffserv はパケットを転送する際に優先度情報を各 IP パケットヘッダに書き込み、各ホップでこの優先度情報に応じた優先制御 (PHB; Per Hop Behavior) を行う。

DiffServ は優先度として EF (Expedited Forwarding), AF (Assured Forwarding), BE (Best Effort) が規定されている。動画や音声などの通信は、帯域を保証する EF あるいは最低帯域を保証する AF が適する。

AF を提供する輻輳制御方式に AQM (Active Queue Management) がある。輻輳制御は送受信端末であるエンドホスト間で行われる。

ネットワークの輻輳制御だけでは、輻輳の早期検出お



よび公平なネットワークの資源（帯域）割り当てを行うことは困難である。そこでルータにおいて輻輳制御を行うことで、より効率的にネットワーク資源を利用することが可能になる。このような輻輳制御方式が AQM である。

AQM として RED (Random Early Detection) などが提案されている。

昨年度は、エンドーエンド QoS 制御の可能性を検討するため、リアルタイム通信のジッタを AQM により制御する方式についての検討結果を報告した。[1]

具体的には、まず異なるキュー制御方式をもつ複数接続された Diffserv ドメインからなるネットワークにおいて経由するドメイン数とともにキュー長ゆらぎが累積することを示した。キュー長ゆらぎはキューイングによる遅延変動をもたらす。ジッタが増大する。ジッタの主要因のひとつであるキュー長ゆらぎを低減する手法を検討した。

本報告では、End-to-End QoS として遅延に着目し、遅延制御を目的とする経路制御方式について検討した結果について報告する。

インターネットの経路制御プロトコルとしては、AS (Autonomous System) 内では RIP (Routing Information Protocol) [2], OSPF (Open Shortest Path First) [3], [4], AS 間では BGP (Border Gateway Protocol) などが代表的なものである。

これらの経路制御プロトコルではネットワークの輻輳により遅延が急激に増大する。Diffserve による優先度制御によっても、優先度の低いパケットのスループットを犠牲にしても優先度の高いパケットは影響を受け、遅延が増大する。

固定電話と同等の音声通信のエンドエンド間の遅延の上限は 150ms とされている [5]。そのため、音声通信など遅延の要求が厳しいリアルタイム通信に対して QoS (Quality of Service) を保証する経路制御手法の実現は課題の 1 つである。

本報告では、リアルタイム通信におけるエンドエンド間の遅延を低減するため、エンドエンド間の遅延を考慮した複数経路表を用いるルーティング方式に関する検討結果の概要を報告する。

本方式では、リアルタイムトラフィックと非リアルタイムトラフィックの混在を避けることにより、リアルタイム通信の遅延を抑制する。しかし、最小全域木のみを用いて各通信用経路を設定するため、ネットワーク内にリンクが十分あると、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路のどちらにも使用されないリンクが存在し、リンクの利用効率が悪いという問題がある。また、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路の直径が大きくなる（ホップ数が増大する）ことや、特定のノードにトラフィックが集中する問題がある。

これらの課題を解決するため、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路を設定する際にノードの次数に仮想的上限を設ける。また、最小全域木を用いて

リアルタイム通信用の路と非リアルタイム通信用の経路を構築し、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路にコストの低い順に交互に、どちらにも使用されていないリンクを割り当てる。

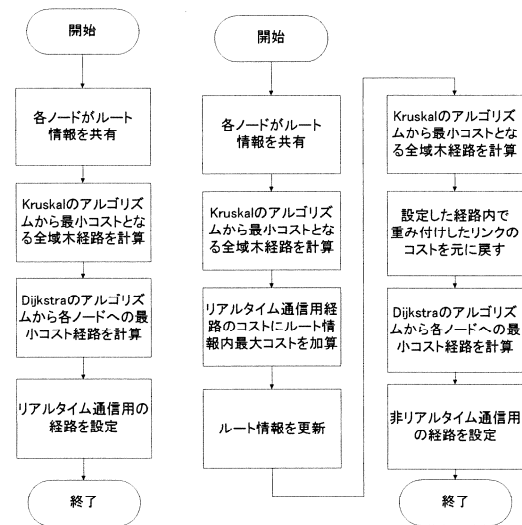
シミュレーションにより、提案アルゴリズムの有効性を確認する。

## 2 MST-MRT 方式

筆者らは、リアルタイム通信の遅延を抑制するためにエンドエンド間の遅延を考慮した複数の経路表を用いるルーティング手法を提案した [6]。本報告では、この手法を最小全域木による複数経路表方式 (MST-MRT 方式, Minimum Spanning Tree-Multi Routing Table 方式) と呼ぶことにする。

MST-MRT 方式では、リアルタイムトラフィックと非リアルタイムトラフィックとで通信経路が可能な限り重複しないよう 2 つの経路表を作成する。通信経路が重複する箇所ではトラフィックの優先制御を行うことにより非リアルタイムトラフィックを制限し、リアルタイムトラフィックのパフォーマンスを保つ。

MST-MRT 方式の経路表作成アルゴリズムを図 1 に示す。



(a)リアルタイム通信用 (b)非リアルタイム通信用  
図 1 MST-MRT 方式の経路表作成アルゴリズム

経路表を作成する過程で Kruskal のアルゴリズム [7] を用いる。Kruskal のアルゴリズムはコストが最小になるよう全域木を作成するアルゴリズムである。

MST-MRT 方式では、リアルタイムトラフィックと非リアルタイムトラフィックの混在を避け、リアルタイム通信の遅延を抑制することが可能である。しかし、最小全域木のみを用いて経路表を作成するため、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路のどちらにも設定されないリンクが存在する。未使用のリンクが存在



リアルタイム通信と非リアルタイム通信とは別経路でルーティングする。リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路とで重複するリンクが発生する場合には、トラフィックの優先制御を行うことにより非リアルタイムトラフィックを抑制し、リアルタイムトラフィックのパフォーマンスを保つ。

これらのアルゴリズムにより、リアルタイムトラフィックと非リアルタイムトラフィックとの混在を避けつつ、未使用リンクを低減し、特定のノードへのトラフィックの集中を抑制することが可能となる。

5 シミュレーションによる評価

提案方式の有効性を検証するために、シミュレーション評価を行った。

提案方式の経路表作成アルゴリズムを用いて、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路の設定を行った。シミュレーションモデルを図4に示す。

図4はノード数10、リンク数30のランダムネットワークである。提案方式の経路表作成アルゴリズムを用いて作成した、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路を図5に示す。

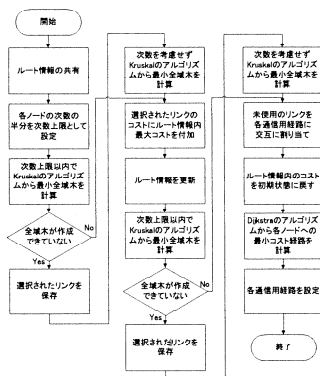


図3 提案方式の経路表作成アルゴリズム

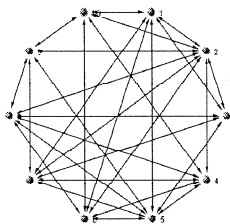
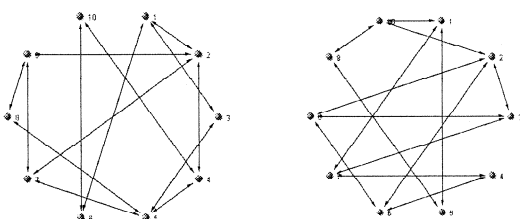


図4 シミュレーションモデル (ノード数10 リンク数30)



(a)リアルタイム通信用 (b)非リアルタイム通信用  
図5 各通信用経路(ノード数10 リンク数30)

シミュレーションモデルはランダムモデル[10]と BAモデル[11]とし、ノード数は100とした。ランダムモデルにおける総リンク数  $M$  は200,300,400とし、BAモデルにおいて追加ノードがもつリンク数  $m$  は2,3,4とした。各リンクのコストは1か2のランダムとした。

なお、本シミュレーションではランダムモデルにおける各ノードの次数は最低でも3とした。また、BAモデルにおける初期ノード数  $m_0$  は追加ノードがもつリンク数  $m$  と同じ値とした。

6 評価結果

6.1 ノードの次数に関する評価

提案方式とMST-MRT方式(従来手法)において、各通信用経路を設定した後の次数と各通信用経路を設定する前の次数の比の統計をとるため、各ノードの次数の割合と存在確率の関係をシミュレーションにより評価した。シミュレーション結果を図6から図9に示す。

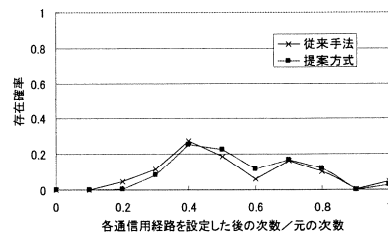


図6 次数の割合と存在確率 (ランダムモデル  $M=200$ )

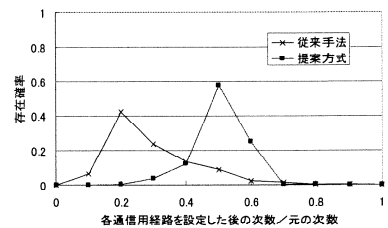


図7 次数の割合と存在確率 (ランダムモデル  $M=400$ )

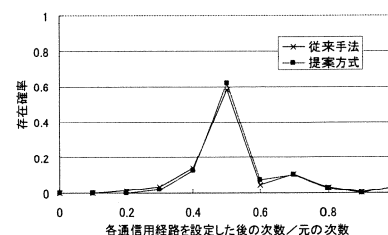


図8 次数の割合と存在確率  
(BAモデル  $m=2$ )

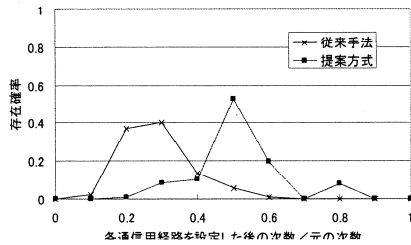


図9 次数の割合と存在確率  
(BAモデル  $m=4$ )

図6から図9において、横軸の値が0.5のときに縦軸の値が高いほど、次数に関して均等に各通信用経路を設定できていることを示す。また、グラフの頂点が横軸の0に近づくほど未使用リンクが多いことを示す。

図6、図8より、ランダムモデルの  $M=200$  のときとBAモデルの  $m=2$  のときは、提案方式とMST-MRT方式(従来手法)に大きな差はないことがわかる。しかし、図7、図9より、リンク数が増えるにしたがって、提案方式では各通信用経路を設定した後の次数と各通信用経路を設定する前の次数の比が0.5のノード数が多いままだが、従来手法では減少していることがわかる。MST-MRT方式(従来手法)では、グラフの頂点が横軸の0に近付いており、リンク数が増えるにしたがって未使用リンクが増加していることがわかる。

### 6.2 未使用リンク、直径に関する評価

提案方式とMST-MRT方式(従来手法)における未使用リンク、各通信用経路の直径、絶対平均誤差を評価した。

シミュレーション結果を表1、表2に示す。

表1 ランダムモデルにおける性能評価

	M=200		M=300		M=400	
	従来手法	提案方式	従来手法	提案方式	従来手法	提案方式
未使用リンクの割合	0.056	0.003	0.344	0.031	0.505	0.028
重複リンクの割合	0.046	0.043	0.004	0.001	0.000	0.000
直径	27.5	24.8	23.7	10.1	20.2	7.0
絶対平均誤差	0.169	0.145	0.204	0.075	0.263	0.051

表2 BAモデルにおける性能評価

	m=2		m=3		m=4	
	従来手法	提案方式	従来手法	提案方式	従来手法	提案方式
未使用リンクの割合	0.034	0.012	0.327	0.007	0.492	0.015
重複リンクの割合	0.039	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000
直径	12.9	12.6	13.6	8.1	13.4	6.4
絶対平均誤差	0.082	0.076	0.185	0.113	0.253	0.074

なお、直径は各通信用経路におけるノード間のホップ

数の最大値であり、絶対平均誤差は各通信用経路を設定した後の次数と各通信用経路を設定する前の次数の比が0.5からどの程度離れているかを示す尺度である。各通信用経路を設定した後の次数と各通信用経路を設定する前の次数の比が0.5に近いほど、次数に関して均等に2つの経路表を作成できることを示す。

表1、表2より、リンク数がノード数の約2倍程度のときは、提案方式は従来手法と大きな差がないことがわかる。しかし、MST-MRT方式ではネットワークの密度(ネットワーク内に存在する各ノードのリンク具合)が濃くなるにしたがって未使用リンクが増加する。

また、重複リンクはネットワークの密度が濃くなるにしたがって減少する。どちらの方式においてもリンク数がノード数の約3倍程度以上であれば、重複リンクの0に抑えられることがわかる。

MST-MRT方式では、各通信用経路を設定した際の直径はネットワークの密度に依存せずほぼ一定であり、絶対平均誤差は未使用リンクの増加に伴って増加している。表1、表2より、提案方式はMST-MRT方式と比較して未使用リンクを低減しつつ、絶対平均誤差も小さく抑えている。このことから、提案方式は次数に関してほぼ均等に2つの経路表を作成できていることがわかる。

これらのことから、提案方式は各ノードの次数上限の設定と各通信用経路への未使用リンクの割り当てにより、特定のノードへのトラフィックの集中を抑制し、未使用リンクを低減することが可能である。提案方式はMST-MRT方式と比較して、ネットワークの密度に依存せずほぼ均等に負荷を分散することが可能である。

### 7 おわりに

既存のネットワークを管理するルーティング・プロトコルはVoIPなどのリアルタイム通信を行う際にリアルタイムトラフィックと非リアルタイムトラフィックとが混在し、リアルタイム通信の遅延を抑制することが困難である。リアルタイム通信の遅延を抑制するため、筆者らはエンドエンド間の遅延を考慮した複数の経路表を用いるルーティング手法を提案した。

しかし、従来手法では、特定のノードにトラフィックが集中すること、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路のどちらにも使用されないリンクが存在し、各通信用経路の直径が大きいなどの問題があった。これらの問題点を解決するため、従来手法の経路表作成アルゴリズムを改良し、各通信用経路におけるノードの次数に上限を設定し、リアルタイム通信用経路と非リアルタイム通信用経路にどちらの経路にも未使用のリンクをコストの低い順に交互に設定する方式を提案した。

評価の結果、提案方式は従来手法と比較して特定のノードへのトラフィックの集中を抑制し、未使用リンクを低減できることがわかった。

今後の課題として、提案方式とMST-MRT方式(従来

手法) のスループットと遅延を評価することがある。さらに、提案方式の実装によりその有用性を確認することがあげられる。

### 参考文献

- [1] 次世代 End-to-End QoS 制御のためのネットワーク資源管理方式の研究、浅谷、山口、工学院大学総合研究所プロジェクト報告 2008 年 5 月
- [2] C. L. Hedrick, "Routing information protocol," RFC1058, Jun. 1988.
- [3] J. Moy, "OSPF," RFC1131, Oct. 1989.
- [4] J. Moy, "OSPF Version 2," RFC2328, Nov. 1998.
- [5] ITU-T Recommendation G.114, "One-way transmission time," 2005.
- [6] 小笠航, 川人直樹, 杉崎義雄, 山口実靖, 浅谷耕一, "複数経路表によるエンドエンド間の遅延を考慮したルーティング手法の提案," 電子情報通信学会, 東京支部学生会, B-7, Mar. 2008.
- [7] J. B. Kruskal, "On the shortest spanning tree of a graph and the traveling salesman problem," Proceedings of the American Mathematical Society, 7 (1956), pp.48-50.
- [8] Freeman, L. C., "Centrality in social networks: Conceptual clarification," Social Networks, Vol.1, pp.215-239, 1979.
- [9] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," Numerische Mathematik, 1(1959), pp.268-271.
- [10] R. Albert, A.-L. Barabasi, "Statistical mechanics of complex networks," Rev. Mod. Phys. 74 (1), pp.47-97, 2002.
- [11] A.-L. Barabasi, R. Albert, "Emergence of Scaling in Random Networks," Science, 286(5439), pp.509-512, 1999.

# 教員資質論の動向を踏まえた教員資格制度のあり方に関する歴史的研究

## （第1年度の間接報告）

工学院大学 工学部共通課程 蔵原清人  
東京学芸大学 教員養成カリキュラム開発研究センター 山崎準二  
愛知大学 文学部 田了健  
滋賀県立大学 人間文化学部 八木英二  
京都府立大学 公共政策科学部 吉岡真佐樹  
日本女子体育大学 体育学部 蔵原三雪  
青山学院女子短期大学 清水康幸

## What should be the teacher's License System — Historical Study —

Kiyohito Kurahara, Kogakuin University  
Junji Yamazaki, Tokyo Gakugei University  
Takeshi Tago, Aichi University  
Hideji Yagi, University of Shiga Prefecture  
Masaki Yoshioka, Kyoto Prefectural University  
Miyuki Kurahara, Japan Women's College of Physical Education  
Yasuyuki Shimizu, Aoyama Gakuin Women's Junior College

ABSTRACT : This is a historical study on the teacher's license system based on what should be school teachers. In 2008, as the first year of this study, we have two meetings and presented reports about this study on a meeting of JSSTE (Japanese Society for the Study on Teacher Education).

The fruits of this study are published as the Report 1. Five papers as follows are printed in this book.

- 1) On the International Formation of Agreements on Teacher License and Evaluation on Teacher
- 2) The Gap between the Japanese view and Western view on the Role of Teacher in early Meiji Era
- 3) The Management of Teacher Training Course of AICHI University after WW II (1955-1988)
- 4) Teacher's Competency and Gender — in the Case of Physical Education —
- 5) What a Teacher Training School established Local School Board is — through my experience in that school —

## 1. はじめに

### 1.1 研究の目的と計画

今日、教育問題の深刻さが増す中で教員の資質論に関心が集まっている。それとともに更新制など教員免許資格制度の改善について議論が盛んである。制度の変更はその時々成り行きや何らかの思惑からではなく、教育の実態と免許資格制度に関する原理的な検討を踏まえて行うべきであろう。

教員資質論の内容は、教科内容と授業に関する知識・技術、教育と児童・生徒に関する知識・理解とともに、特に日本の場合、教師の人格的要素が重視されている。免許資格制度は教員配置や教育の普及、教育学の動向などからも影響を受ける。本研究ではこうした点を中心に日本の教員論・資質論の変遷をたどり、それを踏まえて免許資格制度の変化の事実を整理しながら、免許資格制度のよって立つべき原理を明らかにすることを目的とする。特に、近代的法制度の中での一貫性、整合性を明らかにしたい。このために比較対象として他の資格や外国の事例を取り上げ検討する。具体的な研究の計画は次の通りである。

#### 1) 教員論資質論の系譜研究

①日本および東アジア 主に清水、蔵原（三）が担当し、近世まで、明治以降終戦まで、戦後の3期に分けて、文献収集および主要な論点の整理を行う。近世以前においては中国、韓国からの儒教や仏教などの影響も検討する。戦後については、山崎、田子も参加する。

②ヨーロッパ 主に八木、吉岡が担当する。近代教育が生み出されてきたヨーロッパにおいて教員の資格、免許制度がどのように構想されてきたか、教師論、教員資質論、市民権論との関わりで論点を整理する。

#### 2) 免許制度の変遷研究

これは主に、山崎、田子が行う。明治からの日本の制度の変遷を整理するとともに、議会や審議会等においてどのような議論がされたか、教師論、教員資質論との関わりを分析する。比較制度論の観点からは八木、吉岡も参加する。

#### 3) 教員資格・免許制度の原理論の研究

1) および2)の研究をふまえて教員資格・免許制度のよって立つべき原理を検討する。蔵原（清）を中心に全員で当たる。特に教員免許の特殊性とともに他の免許・資格制度との整合性をどう考えるか、法的原理をどう考えるかは大きな課題となろう。

年4回程度の研究会を行うほか、研究成果は学会等での発表の他、報告書をまとめる。

### 1.2 研究の特色

教員の免許についての議論が盛んになっているが、これまでの研究は、教員論、資質論に偏っており、免許制度、特に免許法などの法制度の研究はほとんど行われていない。本研究は教員免許制度の総合的研究に本格的に取り組むものとなる。

本研究のメンバーの勤務校は地理的に離れているが、各大学において教職課程に属して教員養成の実際に携わっている上に、これまでも学会や教職課程の全国連絡会である全国私立大学教職課程研究連絡協議会でともに活動して制度上の課題などについての共通理解を形成してきた。こうしたメンバーが行う共同研究という特徴がある。

本研究のメンバーは上記の通り、すでに日本教育学会、日本教師教育学会、日本教育政策学会や全国私立大学教職課程研究連絡協議会などで共同の研究や活動を進めてきているなかで、免許法や免許制度についての理解を共有してきた。科研の申請書に記載しているとおり、それぞれが関連する研究業績を発表している。

清水、蔵原（三）は日本教育史の研究者であり、教員養成についても多くの論文がある。また八木、吉岡は比較教育の研究者として、現地調査をたびたび行って教員論、教員養成に関する論文を発表している。山崎、田子は教師養成、教育行政の研究者であり、日本の免許法制の研究に実績を持つほか、行政関係の仕事も行ってその方面にも詳しい。蔵原（清）は、教員養成問題について研究を行い、学会のシンポジウムでの報告者もつとめるほか、日本教師教育学会常任理事、全国私立大学教職課程研究連絡協議会元事務局次長として、全国的な教員養成や教員養成教育研究についての事情に通じている。そうした基礎の上に、本研究が企画された。今回の研究のためにすでに本年7月、9月および12月に研究会を行って、準備を行った。

なお本研究と関連して科研費（基盤研究（C））にも平成20年度より3カ年の予定で採択された。研究課題は、「教員の実践的指導力を担保する教員免許制度の法的枠組みに関する研究」である。本プロジェクト研究と連携しつつ研究の仕分けをして進める方針である。

## 2. 研究の経過

研究を進めるにあたって研究補助者として、佃隆一郎、瀧本知加、加島大輔の3氏をお願いすることとした。2008年度の研究活動の要点は以下の通りである。

2008年7月20-21日に、ハートピア京都（京都市）において研究会を行った。研究会では、日本教師教育学会シンポジウムの準備、海外出張の計画について協議した

ほか、明治初期のお雇い教師を通してみた教員像のギャップ（蔵原三雪）、コメニウスの教師論（井ノ口淳三〔ゲスト報告者〕）の報告を受けて討議した。

2008年9月14日 日本教師教育学会シンポジウム（工学院大学）でメンバーが報告を行った。シンポジウムのテーマは、「21世紀における教員の資質向上論をさぐる—世界の教員政策と日本—」である。本研究のメンバーは、国際機関（ILO・ユネスコ・EU）の教員政策・資質向上論（八木英二）、ドイツにおける教員政策・資質向上論（吉岡真佐樹）、日本における教員政策・資質向上論（山崎準二）の3本の報告を行った。なお、蔵原清人が司会をした。これらの報告については、日本教師教育学会第18回研究大会実行委員会編『日本教師教育学会第18回研究大会報告集』2008年12月25日に収録されている。

また同学会において15日に行われた課題研究Ⅲ免許更新制実施上の課題を考える において、更新講習を行う大学として—予備講習を実施して—（田子 健）の報告をした。司会は、蔵原清人がおこなった。

以上の報告は本研究の成果の一部である。

2008年12月6-7日に、工学院大学において研究会を行った。報告は以下の通り。教育職員免許法の沿革—主な改正における立法者意志を中心に—（加島大輔）、ドイツ調査報告（吉岡真佐樹、瀧本知加）、愛知大学における教職課程の歴史（佃隆一郎、田子健）、免許基準の問題（蔵原清人）

2009年3月10日に、2008年度の研究成果のまとめとして、『工学院大学総合研究所プロジェクト研究報告書1』（以下、「報告書1」と略記）を発行した。本報告書の内容は以下の通りである。

はじめに

教員資格と評価に関する国際的合意形成（八木英二） 明治初期のお雇い教師を通してみた教員像のギャップ —W. E. Griffisを事例として—（蔵原三雪）

昭和戦後期の愛知大学における教職課程運営—愛知大学教職課程運営委員会（1955-1983年）・教職課程委員会（1983-1988年）議題一覧—（田子健・佃隆一郎）

教員の資質とジェンダー—体育科教員養成とジェンダー視点導入の課題—（蔵原三雪）

「教員育成塾」の全国的動向と京都教師塾の検討—塾生としての経験から—（瀧本知加）

研究会メンバー

活動の記録

資料1 免許法研究の課題(最初の提案) 07/07/29

資料2 現行免許法制の構造について 07/09/09

以下ではこれらの報告の内容を紹介するが、多分に私見を含むことをお断りする。

### 3. 教員資格と評価に関する国際的合意形成（八木英二）

八木論文は、第2次大戦後以降のユネスコ・ILOを中心とした教員資格と評価の「国際的合意形成」の経緯と論点の検討を行い、今日新たに提起されている課題を抽出した。

まず戦後早くからユネスコでは教員の専門職性について関心を持ち調査を行っている。また、ILOでも教員の経済的地位の向上とともに専門職性の確立をめざして活動を始めていた。60年代に入るとユネスコとILOが協同して活動が始められ、1966年に「教員の地位に関する勧告」がユネスコ主催の特別政府間会議で採択される。

この勧告は世界人権宣言をはじめとする諸人権宣言とユネスコやILOの各種の国際条約の規定を踏まえ、

「教育における国際的合意形成」の体系（子ども・教師・父母）が一応整ったことを意味している」（報告書1 3頁）という。またこの取り決めが勧告という、

「他に例を見ない、そのユニークな合意形式と採択の方式が地位勧告の性格を特徴付けた」。また、教職の専門性については、今後深められるべき「未完の仮説として前提にされた面がある」という。（同前 3頁）

勧告の採択後、ユネスコとILOは共同の委員会（教員の地位に関する勧告の適用に関わる共同ILO/ユネスコ専門家委員会CERAT）を設け提起監視作業を行うことになる。勧告自体は各国に対して拘束的ではないのであるが、国際労働基準（ILO条約）に準じて実施状況の報告義務を課したのである。

CERATはこの報告書の検討を継続して行い、ILOとユネスコへ報告書を提出するが、特に日本政府の報告書の検討のために来日調査もおこない、日本の実態に対して勧告をまとめている。それは、①指導力不足・指導不適切教員への対応、②給与に連動する業績評価、③教員政策と実施における協議であり、勧告を受け入れるよう要請した。八木論文ではこの来日調査の報告書の内容を紹介し、教員評価の客観性に関する論点を検討している。

さらに八木論文では今日の教員評価問題が取り上げられる背景として、「新たな「教師の人権と教職の役割変化」が生まれている」（同前 8頁）ことを挙げている。すなわち、実践の力量の強調をどう考えるか、生涯にわたる教師の職能発達における大学の役割と関わり方につ



いて、専門職としての基準設定の動きをどう評価するか、さらには「開かれた専門職性」に対する民主的な公証システムをどうつくるか、が課題となっているとしている。

八木論文は、こうした検討により今日、国際的動向と日本の中での論点は密接に関わっていることを浮き彫りにした。さらに今後の教師論研究の課題を提示するものとなっている。

#### 4. 明治初期のお雇い教師を通してみた教員像のギャップ—W. E. Griffisを事例として— (蔵原三雪)

幕末から明治維新期にかけて多くのお雇い外国人を雇い入れたが、本論文では、彼らの行動から彼らのもつ教師観を明らかにし、当時の日本の教師観との「ギャップ」（報告書1 11頁）を明らかにしようとするものである。従来の教師論研究は主に日本の教師観は日本に即して、西欧の教師観は西欧に即して明らかにすることが中心であったが、本論文は伝統的な日本の教師観の特徴を西欧的教師観から照らし出す試みといえる。そのためには、日本と西欧の教師観をそれぞれ抽出した上で比較するのではなく、日本の教育の中で直接両者がぶつかった場面ないし問題を取り上げて検討するという意味で、方法的にも興味深いものである。そこで具体的にはお雇い外国人教師の一人であるW. E. Griffis の事例を取り上げた。

まず、W. E. Griffis の日本における活動を紹介する。W. E. Griffis は1871年に福井藩校明新館の教師として来日し、11ヶ月理化学教師として教えている。その後、廃藩置県があり藩雇いの外国人は政府雇いに変更されたが、それによって東京に移り南校および南校から改組された一番中学、さらに開成学校の教師をつとめることになる。蔵原論文では、教師としての活動を、先輩教師の授業参観と代講、理化学の講義と実験準備、授業の仕上げとしての試験、公開授業としての「天覧授業」、教師の会合"Meeting"への参加("meeting of teachers" から"faculty meeting"へ)、会食と放課後の交流の6つの角度から紹介している。

W. E. Griffisはこのように精力的に活動したが、仕事の仕方などについて日本側の認識とギャップがあった。

それは、「理化学教師は授業の準備に時間がかかるので担当授業時間を他の強化と比較して少なくすべきである」こと、「契約に決められた科目以外は特別の仕事であり」「担当するとすれば、当然給料が増額されるべきだ」、また自分はcollege のprofessorであり、自分の専門以外の科目は教えられないということであった。

論文ではこうしたW. E. Griffisの主張と日本側とのや

りとりを資料に基づいて紹介し、こうした経緯からいえることとして、「日本では『〇〇学校の教師』として雇うのであるから、英語を話せるアメリカ人教師が英語や合衆国憲法や歴史、生理学、化学など様々な科目を教えることは教師の専門性からはよくないことだと認識していない。これらの帰結として担当科目あるいは学校階梯ごとに教師の処遇を変えなければならないという認識にも達していなかった」（同前 15頁）と指摘している。

さらにW. E. Griffisの主張の背景の1つとして彼が学んだ、アメリカ、フィラデルフィアにあるセントラルハイスクールの教員採用事例を紹介している。アメリカにおける教育も当時大きく変わりつつある時期であったが、W. E. Griffisはその経験に基づいて自らの教師像、すなわち「教員の専門性に対する認識」を形成してきたのである。

本論文はこうした当時の先進的教育を受けてきたお雇い外国人が日本でもそのような教師として活動しようとした姿を描き出している。しかし日本側はこれから近代教育を形成しようとする時期であり、現実の教育を築くための第一歩を踏み出したばかりであり、W. E. Griffisの期待するような現実の条件がまだ備わってはいなかった。したがって日本側の関係者はそれまでの日本の教育観・教師観からすぐには脱却できなかったのである。こうした日本側の教育観・教師観はその後どのような変遷をたどっていくのであろうか、本論文はこうした大きな課題を投げかけたといえる。

#### 5. 昭和戦後期の愛知大学における教職課程運営—愛知大学教職課程運営委員会（1955—1983年）・教職課程委員会（1983—1988年）議題一覧—（田子健・佃 隆一郎）

本資料は、愛知大学における教職課程運営委員会の1955年から1988年まで30年以上にわたる委員会の議題の一覧である。

愛知大学の教職課程の設置は1951年であるが、それから54年までの記録は見つかっていないという。しかしその後30年以上にわたる期間の詳細な記録が存在するということが驚くべきことであり、今後、教育職員免許法の改正経緯の研究を踏まえて、議題だけでなく議事内容等の研究が進められるならば、大学レベルでの教免法の実施の実態と教職課程運営の事例として貴重な研究となることは間違いない。

#### 6. 教員の資質とジェンダー—体育科教員養成とジェンダー視点導入の課題—（蔵原三雪）

教員の資質論は様々な角度から検討されているが、本論文はジェンダー視点からの検討も必要であるとの立場から、体育科教員養成との関わりで問題提起をする論文である。特に体育科教員の事例を対象とするのは、教育現場や教育実習中のセクシュアル・ハラスメントやジェンダー・ハラスメントの調査を見ると、「とりわけ体育科教員にセクシュアル・ハラスメント加害者が多い」（報告書1 37頁）という事実注目したことによる。またスポーツ選手の養成過程や部活動の「慣習の下で長年培われてきた価値観」などが影響しているからである。

論文は、2004年度に行われた教育実習生に対する「セクシュアル・ハラスメント調査」から、特に「保健体育科」の実習生が被害を多く受けていたこと、また実習生自身がセクシュアル・ハラスメントおよびジェンダー・ハラスメントについての知識が不足していること、該当する事例によってはハラスメントの「全被害者の30%しか認識されていない」という結果であったという。また大学の教職担当教員の意識にも問題があることを指摘する。

次に、体育科教員と部活動の関係についてスクール・セクハラや暴力の事例をもとに分析している。それらは「名顧問」「熱血先生」といわれていた教員の行動であり、強くなるには「体罰も必要である」とか自分の立場は全体的であるかのように考える指導観に問題があると指摘する。また部員がわいせつ行為で逮捕された野球部の甲子園出場は被害者の感情をどのように考えたのか、出場にどのような教育的効果を見いだそうとしたのかと批判した新聞の投書を紹介している。

体育科教員の場合、部活動とも深く関わっているが、日本学生野球連盟の警告や処分の理由を見ると「部内暴力」「監督の行き過ぎた指導」「迷惑行為」が多い。これに関して学生たちの評価は、批判的なものもあるものの、「それは先生の愛情だ」「それによって練習するようになった」など全面的に肯定する意見もなくなる現実がある。

校内でも体育科教員に生徒指導を任せられるなどの期待があって、まず男性の体育科教員を確保する傾向が採用にも大きな影響を与えていると指摘している。

これらの問題に対して、実習生からも「（問題の解決には）もっと根本的な人間教育が必要である」という指摘もある。単に体育科や部活動の問題に閉じ込めるのではなく、「人間教育の根幹に関わる問題としてとらえ直していくことの必要性」を示唆しているとのべている。

次いで今後の課題をあげている。まず、教育実習におけるセクシュアル・ハラスメント調査からは、大学において事前の学習が行われている場合は、問題が認識されて解決に向かうことが可能になってきた。またこの数年

で認識が大きく変化しているという。しかしジェンダー・ハラスメントやジェンダー平等についての認識をはっきり持っているものは学生全体で3割にも満たない。今後授業その他で積極的に取り組んでいく必要がある。さらに小中高校の、あるいは教科の教員採用におけるジェンダー格差を解消する問題も指摘している。

最後に、体育科だけでなく「様々な教科教育の内容や教師教育の現状あるいは教員の資質論をジェンダー視点から見直すことが今後の課題と思われる」（同前 43頁）と結んでいる。

## 7. 「教員育成塾」の全国的動向と京都教師塾の検討－塾生としての経験から－（瀧本知加）

近年、優秀な教員すなわち実践的指導力のある教員の確保という観点から教育委員会主導で教職希望者に対して大学在学中などから実践的教育を行うことが広がっている。中には採用試験にあたって優遇措置をとるものもある。本論文でいう「教員育成塾」はこれである。瀧本論文では、そうした動向の全国的状況を整理し、特に筆者が体験した京都教師塾の事例について検討するものである。

「教員育成塾」は2004年に東京教育委員会が「東京教師養成塾」を開設して以来、今日までに京都市、杉並区、三鷹市、横浜市、川崎市、神奈川県、埼玉県、滋賀県、大阪府、相模原市、堺市などで行われているが、設置形態や実施の状況などは様々である。

そうした状況を概観した上で、「①学生側から見た問題、②教員養成制度上の問題、③採用における公平性の問題、④教育行政上の問題」の4つの論点を提出する。

①については大学の教育活動との関係での学生の負担、競争率が下がっている現在、養成塾の採用試験での特例がメリットとなるかどうか、大学での学内選考が行われる場合の公平性などを挙げている。要するに「本当に優秀な学生の確保」つながっているのだろうか、との根本的疑問が生じる」（報告書1 50頁）と指摘する。

②については主として大学との関係であるが、「教育委員会自体には、「教員養成」の権限はもたされていない」（同前 50頁）のであり、大学との関係が変質することにつながる。また教育委員会が行うことは教員養成だけでなく教員の研修との関係も見えておく必要がある。さらには教員採用は教育委員会の責任であるが、それを養成問題にすり替えるものである。教員育成塾は実践的指導力の向上を目指すものが多いが、そもそもそれは養成段階ではなく現場に入ってから勤務や研修によって育成されるものではないか。こうした「教員育成塾」のあり方は、教師教育全体を大きくゆがめることにな

る」（同前 52頁）といっている。

③について、教員育成塾の運営は採用者である教育委員会側が行っている以上、これを受講していたものと受講していないものが同じ試験を受ける以上、「どのような形態を取っていたとしても、その公平性は担保され得ないといえる」（同前 52頁）とする。

④について、少なくない教員育成塾は自治体首長の強いリーダーシップによって発案されているものがある点、また本来大学が行う教員養成を教育委員会が直接関わるものである点、「教育行政の一般行政からの独立や教師の専門職性の確立という観点から、果たして問題がないのか、という疑問が生じている」（同前 53頁）ことを指摘している。

以上の全国的動向の検討を踏まえて、筆者の参加した京都教師塾の活動内容を紹介したうえで体験的評価のべているが、その内容についてはここでは割愛する。

本論文のまとめとして、教育実習の問題と採用の問題を取り上げている。実習の問題としては教育委員会は教員育成塾を行うまえに学校ごとに実習生の扱いに格差のある教育実習の実態を把握し、「より充実した実習体制を保証することも可能なはずである」とする。また採用の問題としては、「教育委員会の大きな権限であった、「採用」の方法の見直しをせずに「教員育成塾」という形態で養成を行うことは、非常に大きな問題をはらんでいる」（同前 61頁）と指摘する。

まとめとして、教員育成塾の広がり、「教員養成制度全体に及ぼす影響は決して小さくはない」のであり、「より一層の実態把握および、情報公開を求めていくことが必要」としている。

本論文で明らかにされた教員育成塾の教育の中で主張されている実践的指導力、即戦力という問題は、本プロジェクト研究のテーマである教員資質論にとっても検討すべき大きな問題であることは明らかである。これは現職研修などでも同様に強調されているところであるが、教職に就く時点で実践的指導力を備えることが可能であるのかという問題とともに、教職に就いた時点でそれを備えているとすれば、その後の発展は必要なくなってしまうのではないかと、またそうした能力観・人間観というものは教育の本質を踏まえたものであるといえるのかという根本的疑問が生じてこよう。現場の実態として実践的指導力を備えた教員がほしいという気持ちはわからなくもないが、制度設計としてそのような希望を前面に出したものが適切で合理的な解決策となり得るかどうか、十分な検討が必要であろう。

## 8. 今後の課題について

2008年度は以上のように研究の第1年度として各自の

これまでの研究を中心に教員資質論に迫る研究を進めてきた。報告書1に掲載したものの他に継続的に研究を進めている課題もあり、2009年度以降に成果がまとめられることが期待される。

2009年度は、日本の教師像・教員資質論の発展を概観しヨーロッパにおける教員資質論の発展およびその特徴と比較してその特徴を明らかにしたい。特に日本の近世における師あるいは師範のあり方は明治以降の日本の教師像・教員資質論にも大きな影響を与え続けたと思われるのであり、その具体的な姿をさぐり、その概念を抽出することは重要な課題である。また戦後の教育改革の中で教員制度や教員養成制度は大きく改革されたが、その意味をこうした研究の成果に立って再評価することも重要な課題である。このためにもこれまでの教師像・教員資質論の先行研究の整理を行う。

さらにそうした教師像・教員資質論を踏まえ、あるいはその影響の下にわが国の教員資格制度、特に教員免許制度がどのように組み立てられたのか、検討を進めたいと考えている。この制度的研究においてもヨーロッパの制度との比較研究が重要になるが、制度の組み立てだけの比較にとどまるのではなく、ヨーロッパにおける教員資格制度、特に教員免許制度をその教師像・教員資質論と関係させて理解することが重要になろう。

最終的にはこれらの研究成果を踏まえてわが国の近年における教員資質論、教員資格論を検討する。それは実践的指導力、免許更新制、教員の適格性の判定などを強調するところに大きな特徴があるが、これらはわが国の教員資質論、教師論のどのような流れと関わるのか、戦後の教員制度や教員養成制度の改革のよってたつ立場とどのような関係があるのかを検討することである。その上で今後目指すべき方向を探っていきたい。

なお、詳しくは上記の2つの報告書を参照されたい。若干の余部があるので希望する向きはご連絡いただければ幸いである。

（文責 蔵原清人）

付記 なお研究者の所属は2008年度のものである。

# MPGD による位置分解能の最適化

工学院大学工学部共通課程 渡部隆史

工学院大学工学部共通課程 幸村孝由

東京農工大学大学院共生科学技術研究院 仁藤 修

## Optimization of Position Resolution with MPGD

Takashi Watanabe, Department of General Education, Kogakuin University  
Takayoshi Kohmura, Department of General Education, Kogakuin University  
Osamu Nitoh, Tokyo University of Agriculture and Technology

**ABSTRACT:** A Time Projection Chamber (TPC) is a strong candidate for the central tracker of the international linear collider experiment. We have been studying about a TPC using multi-wire proportional chamber (MWPC) and micro pattern gas detector (MPGD). In this study, we are focusing a design of the read-out pad and optimizing it using small chamber and UV laser system.

### 1. 序章

近年、高エネルギー実験や X 線天文学、 $\gamma$  線天文学

など、多分野にわたって  $\mu$ PIC、GEM、MicroMEGAS などの微細加工技術を用いて製作される Micro Pattern Gas Detector (MPGD) を荷電粒子飛跡検出器、 $\gamma$  線のイメージング検出などに利用することが検討され、開発研究が進められている。MPGD は高精度な位置分

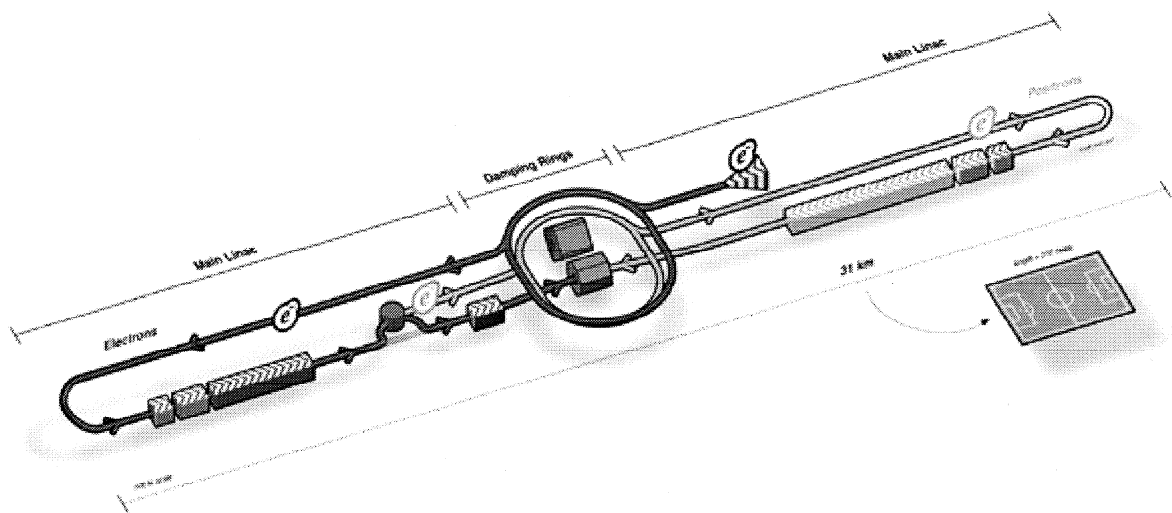


図 1. ILC 計画の概念図

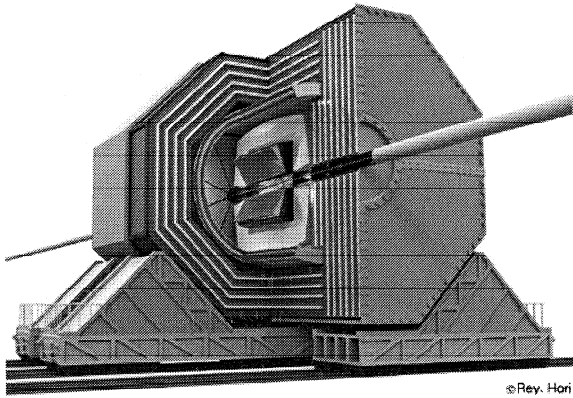


図2. 高分解能測定器の概念図

解能、細密性、高速な応答性など、これまでそれぞれの分野で用いられてきた検出器に対して有利な点を持っている。その一方で、高頻度放射線または重粒子線の照射環境において検出器を破損するような致命的な放電の問題もかかえている。大きな損傷をとまなう放電のメカニズムを研究し対策を講じ長期の実験でも安定に動作させながら、さらに高精度な位置分解能を持つMPGDを開発することが重要となる。

## 2. 高エネルギー物理学におけるMPGDの利用

### 2.1 ILC

現在、高エネルギー実験分野においては、将来計画としてInternational Linear Collider (ILC)計画が検討されている(図1)。ILC計画は電子・陽電子線衝突型加速器でTeVエネルギー領域の素粒子実験を目的とした計画であり、宇宙のビッグバン直後に匹敵する超高エネルギー状態を実験室に実現し、素粒子の基本法則の解明を通じて、宇宙創成の研究を行うものである。我が国においては、従来JLC計画(後にGLCと名称を変更)という名称で計画の検討を行ってきたが、2004年8月にInternational Technology Recommendation Panelが世界に複数あった加速器の基本技術を一本化する決定を行ったことを受け、ILC計画実現のために活動を進めている。

### 2.2 ILDとLCTPC

ILCのような高エネルギー粒子衝突実験においては、一般的に複数の飛跡検出器やエネルギー検出器を組み合わせた大規模複合型検出器が用いられる(図2参照)。現在、ILC計画においては、Letter of Intention (LOI)の提出が求められている。当初、ILC計画に対しては、4つのDetector Conceptが挙げられていたが、そのうち、アジア主体に提案されていたGlobal Detector Conceptとヨーロッパが主体となって提案していたLarge Detector Conceptが一つにまとめ上げられ、International Large Detector (ILD)として提案が行われている。本研究代表者は、このILD提案グループに参加しており、主に主要飛跡検出器の研究を行っている。

ILDにおいては、主要飛跡検出器としてTime Projection Chamber (TPC)を提案している。このとき、ILCの主な研究対象とされているHiggs粒子探索、超対称性粒子探索、Top quarkに関する精密測定を十分な形で行うためにTPCに求められる性能は、

- 運動量分解能で  $\Delta p_T/p_T \sim 5 \times 10^{-5}$
- 位置分解能では  $100 \mu\text{m}$

といわれている[1][2]。このような性能をTPCにおいて実現するためには、飛跡情報の読み出し部分における電子増幅機構としてこれまで使われてきたMulti-Wire Proportional Chamber (MWPC)を使用したものでは限界があり実現が難しいため[3]、Micro Pattern Gas Detector (MPGD)を用いることを主張している。このとき、この分解能性能を決める要素として考えられるのが、以下のMPGD固有の問題である、

- MPGDによる電子増幅時の拡散、
- 電子検出用電極の形状、拡散された電子群に対しての大きさ、配列、

であり、それらに加え、TPC固有の問題である、

- 荷電粒子による一次電子の生成の不確定性
- 二次電子の生成機構
- 電子遷移領域の電場、磁場の一様性
- 電場中を電子が遷移する際の拡散

などがあげられる。これらの内容については、個々の現象についての理解は進められてきたものの、それらの相関、その他の不確定要素については研究が行われていない。また、電極によって得た電気パルスを変換して、飛跡を再構成する際にも、 $\chi^2$ 検定法やlikelihood法による違いなどが指摘されてきた。この点については、現在ではベイズ統計法に基づいた解析方法も検討されている。本研究代表者は、2004年よりドイツ、フランス、フィリピン、日本からなる研究グループに参画し、小型のTPC (MP-TPC、図3参照)と超伝導電磁石を用いることにより、複数のMPGDに関する増幅率、稼動安定性などの動作研究を行ってきた[4][5]。さらに、2007年よりILDに限らず、Linear Colliderに向けてのTPCの開発共同研究グループとし

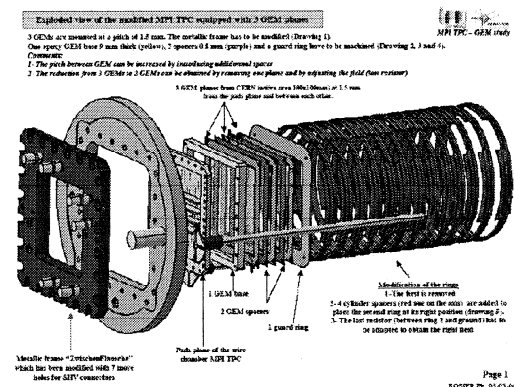


図3. MP-TPC

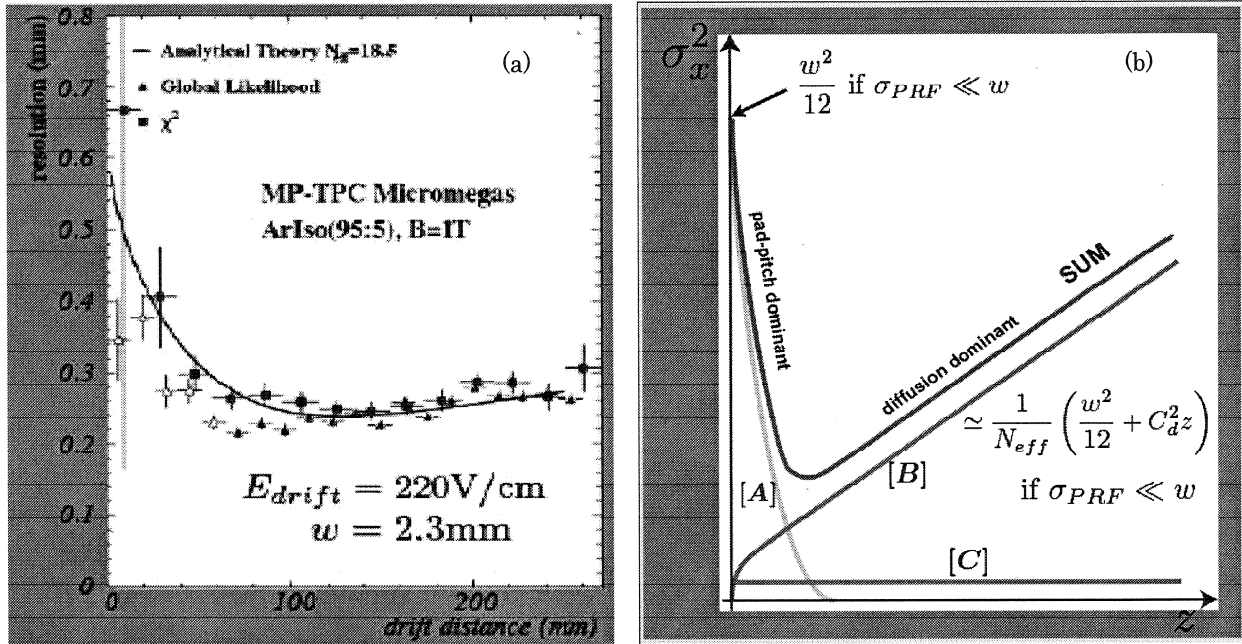


図4. 電子信号の拡散と繊維距離の関係。(a) MP-TPC を使った測定データ、(b) 理論計算による遷移距離依存性

て LCTPC Collaboration が組織され MOA が取り交わされている。また、この枠組みのもと、ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY)において Large Prototype phse1 (LP1)の test chamber による電子ビームを使った試験研究が続けられている。

一方、これまでの研究によって、MPGD による電子増幅によって得られた信号での位置分解能は、電子信号の遷移距離の領域によって、

- ① 読み出し電極が大きく影響する場合
  - ② 増幅領域のガスの性質が大きく影響する場合
- がある (図4参照) ことがわかっている。高エネルギー物理学実験においては①、②いずれの場合についてもその理解が重要となってくるが、そのほかの場合、例えば X 線天文学、 $\gamma$  線天文学といった他の科学分野、医療目

的においては、遷移距離が短くなることが予想されるため、①の理解が非常に重要になってくる。

現在、LP-TPC collaboration 内では、MPGD として GEM[6]をアジア、ドイツを中心として、MicroMEGAS[7]をフランスが中心として研究を進めている。

### 3. LCTPCの開発

#### 3.1 GEM

Gas Electron Multiplier (GEM)は、1996年に Fabio Sauli によって開発された電子増幅装置である (図5)。薄膜の絶縁体の両面に薄膜電極があり、エッチングによって約  $100\mu m$  間隔で数  $10\mu m$  の貫通孔が空けられている。誘電体を挟んだ電極には、数  $100V$  の電圧がかけられる。この結果、GEM の空孔内には高電場が発生し (図6)、こ

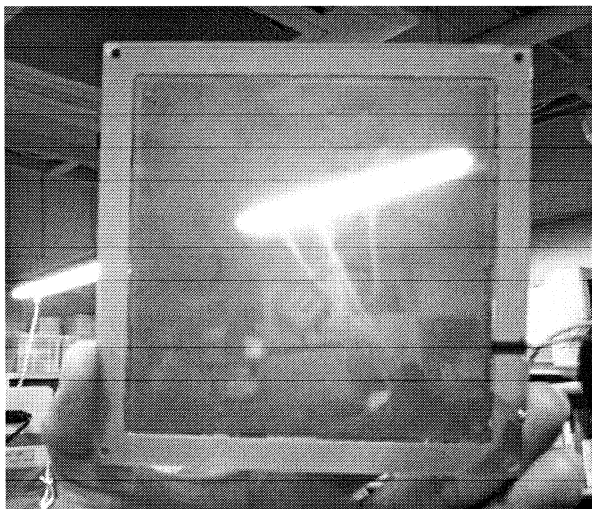


図5. GEM

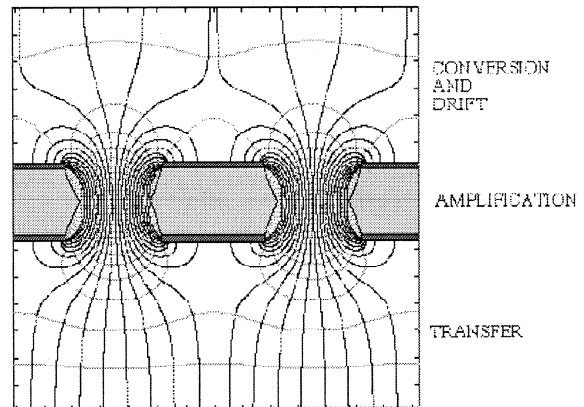


図6. GEM による発生電場 (理論計算)



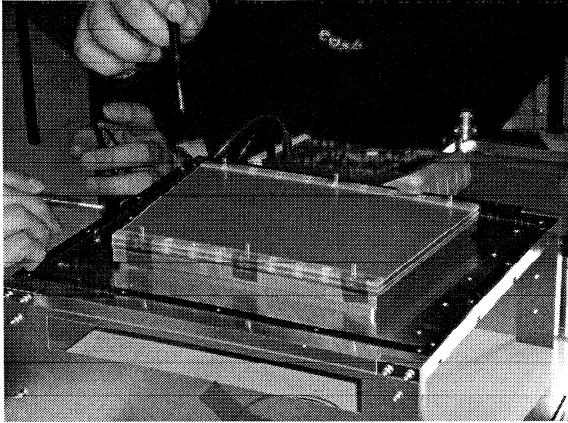


図7. GEM panel (prototype)

の結果、空孔内で電子雪崩が起こり、 $10^2$ 程度の増幅が見込まれることになる。

現在利用できる GEM は Sauli により開発され、CERN において製造されているバイコンカル・タイプ (図6) と SciEnergy 社 (日本) によって開発されたストレートホール・タイプタイプがあり、日本グループはストレートホールタイプの GEM を用いている。これは、製造元が国内メーカーであることによる開発の利便性を考えた結果である。

これまで、MP-TPC による実験研究においては、

- 誘電体・・・厚さ  $50\mu\text{m}$  のポリミド
- 電極・・・厚さ  $5\mu\text{m}$  の銅箔
- 空孔間・・・ $140\mu\text{m}$
- 孔直径・・・ $70\mu\text{m}$
- 面積・・・ $100\times 100\text{mm}^2$

のものを3段用いていた。GEM 間の電圧は使用するガスの種類によって変わるが、 $200\sim 400\text{V}$  程度である。この場合、電子の収率などの関係により、増幅率はおおよそ  $10^4$  程度となる。MP-TPC による GEM の動作検証実験の結果については、現在投稿論文としてまとめる作業を行っている。

一方、ILD で提案されている TPC の大きさは、半径が約  $1,800\text{mm}$  の円を底面 (端板) とする円柱状であり、GEM をこの円に敷詰めることになる。その分割セグメントの大きさは  $230\times 180\text{mm}^2$  程度となるため (図6)、GEM の張力の維持、サポート・フレームの物質量を減らす目的で誘電体を厚さ  $100\mu\text{m}$  のものとして、2段による増幅を考えている。

### 3. 2 読み出し電極

読み出し用電極の極板サイズをいくつにするかは、飛跡測定的位置/運動量分解能を向上させるための非常に重要な要素となる。たとえば言えば、コンピュータ・グラフィックの分解能に相当する。極板の大きさを小さくすればするほど位置分解能は良くなることが見込まれるが、極板の数が莫大なものとなってしまう、その結果、読み出し用のエレクトロニクスにかかるコストがそれに伴って増大してしまう。また、集積回路による発熱量な

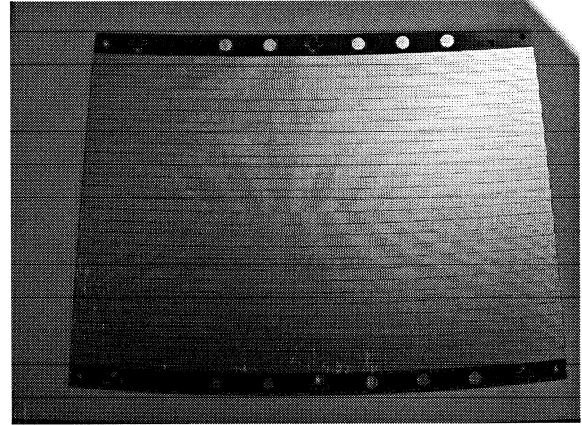


図8. Prototype 用信号読み出し電極

どを考えると ( $1\times 6\text{mm}^2$  の電極で数  $\text{mW}/\text{m}^2$  程度が予想される)、現状のテクノロジーにおいてマイクロ単位の電極を仮定することは非現実的と言える。また、飛跡は円形の端板に対して動径方向に伸びていくため、電極の縦横を同一にする必要はなく、その割合を最適化することは、大変意味のあることと言える。

### 3. 3 TPC 開発の方向性

LCTPC の開発の進め方としてオーソライズされているのは、

- TPC 全体のメカニカルな研究、十分に長い電子群遷移距離に関する研究：LP1 の枠組みの中で行う。
- 読み出し部 (電子増幅機構、読み出し機構) に関する研究：個々の研究グループによる個別の研究である。アジアグループとしては、電子増幅機構については GEM を用いたものをこれまで通りに進めていき、さらに読み出し機構との組み合わせを幾通りか試みることにより、より最適な解を求めていくことになっている。

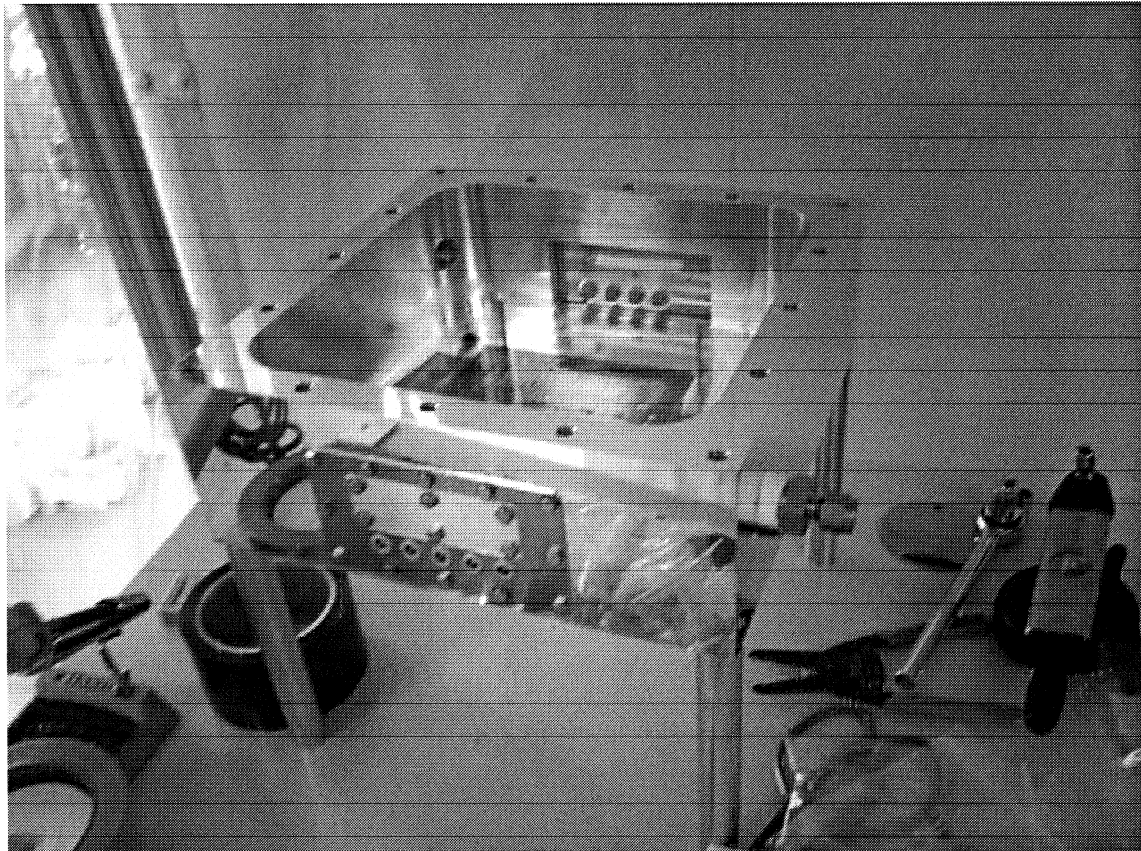
本研究の目的は、この読み出し部に関する研究のうち、特に読み出し基板の配列 (特に、電極配列に対して斜めに入射してくる飛跡に対するレスポンスに注目をする)、サイズに関して、分解能向上の意味でより効率的でコストを抑える方法を研究、検討することを目的としている。

## 4. テストボックス

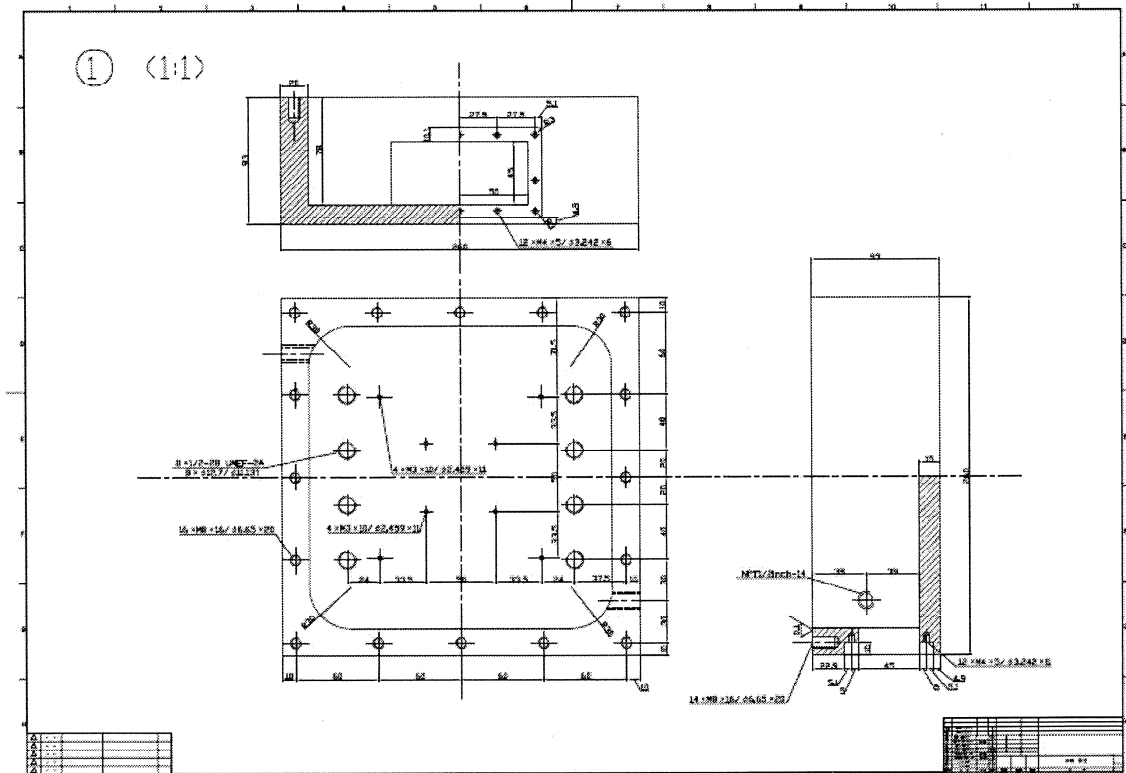
### 4. 1 テストボックスの製作

読み出し電極と  $100\mu\text{m}$  厚の GEM の組み合わせのテストを行うためにテストボックスの製作を行った。設計にあたって留意した点は、

- ガスの置換が容易の行うことができるように有感領域をできる限り小さくする、
- GEM および電極の大きさを MP-TPC など標準的に使われているものと同じサイズに統一する、
- ガス励起のための宣言として、 $^{55}\text{Fe}$  もしくは紫外線レーザーを用いるため、それぞれの入射が容易となるような窓を設ける、
- 酸素などノイズ源となる期待の混入を防ぐため、ま



(a) GEM および読み出し部試験用テストボックス



(b) 設計図

図9. テストボックス



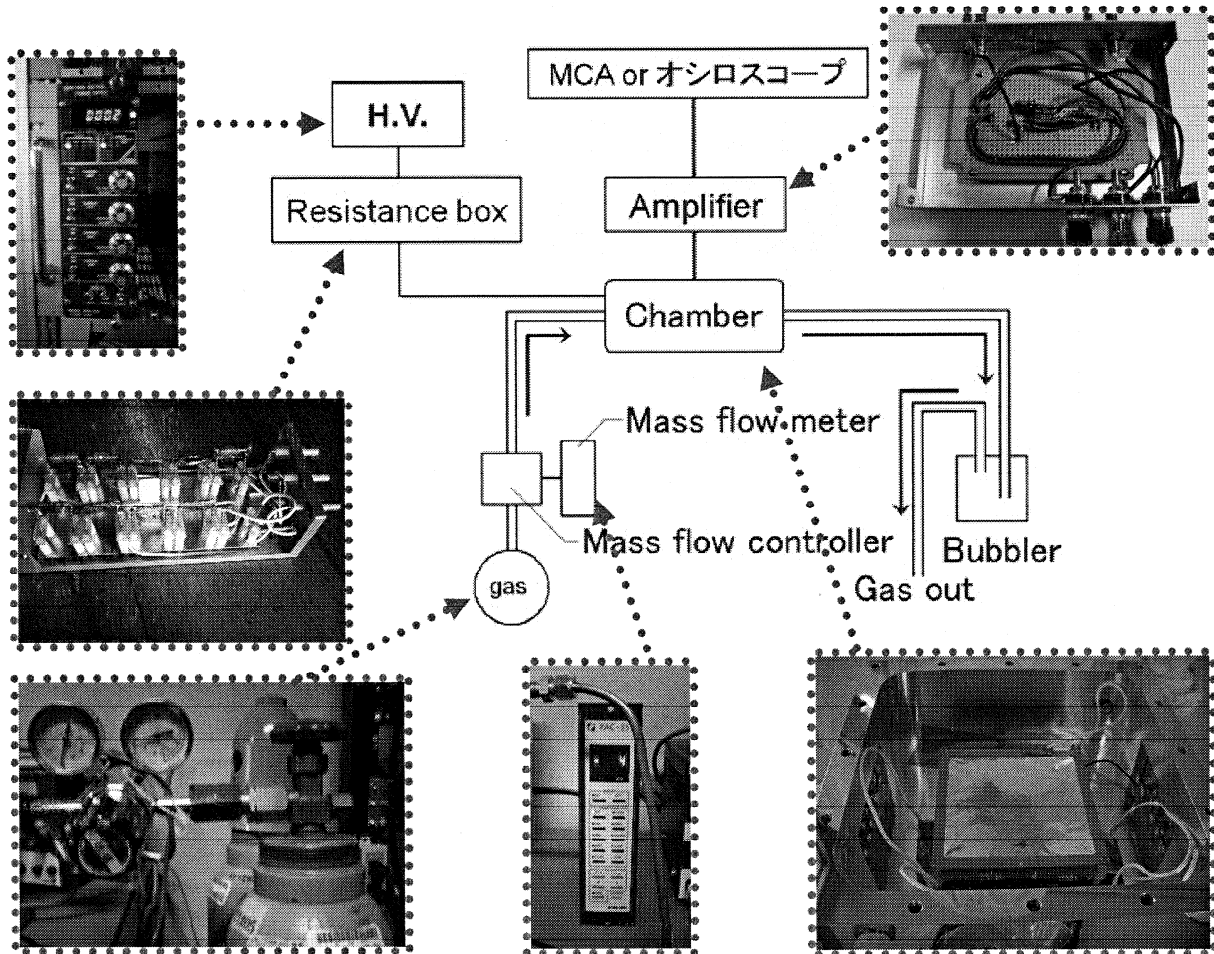


図10. セットアップ

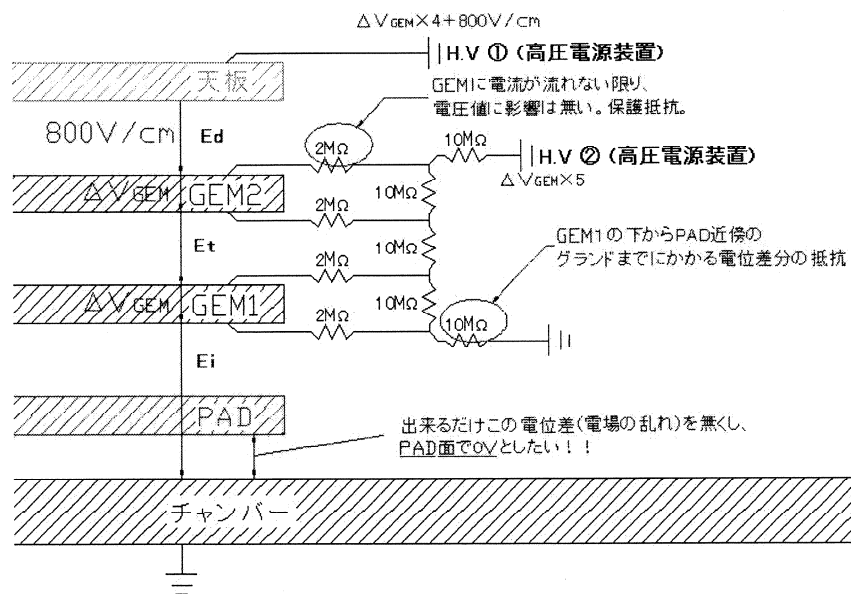


図11.  $V_{GEM}$  システム

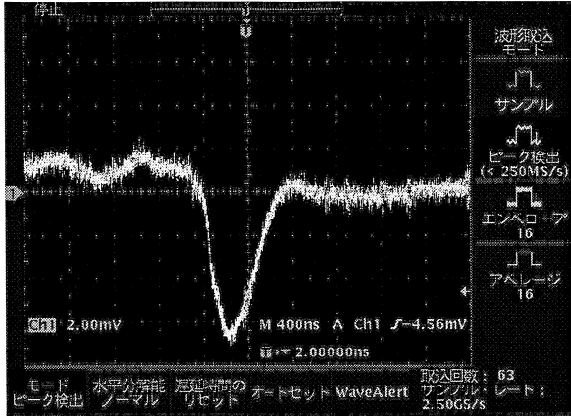


図 1 2.  $^{55}\text{Fe}$  による出力信号。パルス波高は約 7mV、信号の立ち上がりは 240ns。

た、ガスの置換を効率的に行うためにテストボックスの密封性を高める、といった点である。図 8 にテストボックスとその設計図を示す。密封性を高めるため、蓋の部分を除いてアルミの削り出しによる製法を選択した。手前側に見えるのは信号線の引き出し用にコネクタであるが、レーザー引き込みようの石英板の取り付けが容易になるようにアタッチメント方式となっている。

#### 4. 2 GEM増幅率の測定

製作したテストボックスにより、 $100\mu\text{m}$  厚の GEM による増幅率の測定を行った。セットアップを図 1 0 に示す。使用したガスは  $\text{Ar}:90\%+\text{CH}_4:10\%$  の混合ガス(P10)である。線源には  $^{55}\text{Fe}$  を使用し、 $V_{\text{GEM}}$  の変化に対して GEM による増幅率がどのように変化していくかを測定した。ここで、 $V_{\text{GEM}}$  とは図 1 1 にあるように、誘電体の両側にある薄膜電極間の電位差を指し、抵抗チェーンにより 2 枚の GEM にかかる  $V_{\text{GEM}}$  と天板までの遷移電圧を一元的に取り扱うようになっている。図 1 2 は典型的な出力パ

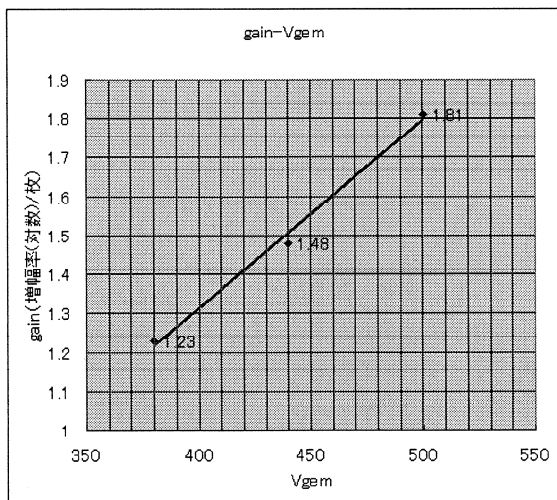


図 1 3. 2 段の  $100\mu\text{m}$  GEM による電子信号の増幅率。

ルスを示している。電子の増幅方向と遷移方向が平行なため、信号の立ち上がりが早いのが特徴となる。この出力信号をもとに GEM による電子信号の増幅率を計算した。図 1 3 はこの増幅率の  $V_{\text{GEM}}$  依存性を示したものであり、期待通りの結果が得られている。現在使用している P10 については、これまでのガスを使用した検出器での使用実績があるため安定した動作が期待できるが、加圧電圧が比較的高いという欠点がある。GEM は構造的に増幅機構が 1 枚の GEM シートで完結しているため、比較的安定した動作と取り扱いに容易さが特徴といえる。しかし、高電場を極小状態で発生させるため、可能であれば低電圧での使用が望まれる。今後は、同様の組成ではあるが混合比の違う  $\text{Ar}:95\%+\text{CH}_4:5\%$  の混合ガス(P5. P5 ガスを使用することにより、P10 ガスを使用した場合の数割の加圧電圧で同程度の電子信号増幅率を得ることが期待される)を使用することにより、より広い加圧電圧レンジでの動作確認を行う必要がある。また、現在は増幅率を確認するため、信号収集のための電極を大きいものにしてはいるが、安定動作が確認された段階で、分解能測定に向けた極小電極の設計を進めることとなる。

#### 5. 今後の展開

これまでの研究内容を踏まえて、今後の方針として、以下のような内容が考えられる。

- ① 紫外線レーザーを用いた擬似飛跡によるデータ収集および解析
- ② 宇宙線によるデータ収集および解析

研究当初の予定では、紫外線レーザーによるデータ収集および解析のみを予定していた。一方、現在、LP-TPC Asia グループは、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の低温グループの協力により、1T 出力の超伝導電磁石を用いた宇宙線データによるテスト実験を続けている (図 1 4)。昨年度末より、この MP-TPC の改良計画が進められており、その内容は、

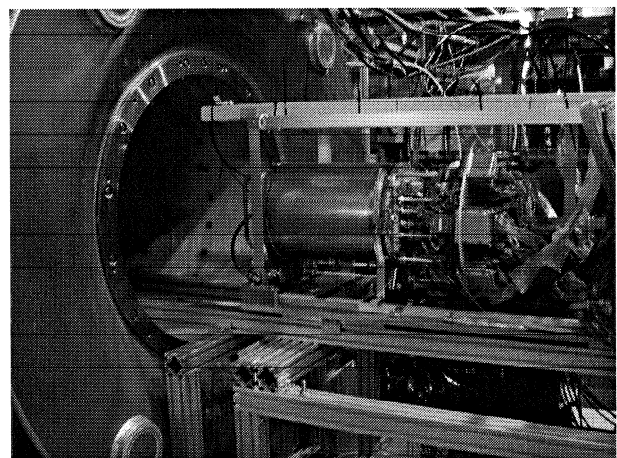


図 1 4. MP-TPC と超伝導電磁石

- 50 $\mu\text{m}$  GEM を 3 段で使った増幅システムを 100 $\mu\text{m}$  GEM を 2 段としたもの (LP1 仕様) に変更する
  - 高速かつ省電力タイプのデータ収集システムへの upgrade
  - Gating GEM の設置
- が主となる。これにともない、
- 低速の多チャンネル信号読み出しシステムを今回作成したテストボックスに移設する
  - MP-TPC と同規格の読み出し基板の設計を行い、クロスチェックを可能とする
  - テストボックスでレーザーによるガス励起のデータ、MP-TPC で宇宙線による磁場を伴ったデータを収集するが、必要であれば、MP-TPC にもレーザーシステムを適用する

といった方向で研究を進めていくことにする。MP-TPC の改良は今秋には終了する予定であり、それまでに読み出し基板の設計を終了する必要がある。

## 6. 謝辞

研究過程の途中ではあるが、以下の方々に感謝の意を表させていただきます。これまでの研究活動に当たっては、KEK の ILC 物理グループ、LC-TPC Asia グループメンバーには多大なるご協力をいただいています。また、SciEnergy 社の大津氏には貴重なお時間を使っただき、テストボックスの作成に関する卒業研究学生の指導をお手伝いいただきました。大変ありがとうございました。

## 参考文献

- [1]. TESLA Technical Design Report, DESY 2001-011.
- [2]. GLC Project Report, KEK Report 2003-7.
- [3]. K.Ackermann et. al., preprint submitted to TIPP09 Proceedings in NIM A.
- [4]. M.Kobayashi et. al., Nucl. Instrum. and Meth. A 851 (2007) 265.
- [5]. D.C.Arogancla et.al, Nucl. Instrum. and Meth. A 602 (2009) 403.
- [6]. F.Sauli, Nucl. Instrum. and Meth. A 386 (1997) 531.
- [7]. Y.Glomataris et. al., Nucl. Instrum. and Meth. A 376 (1996) 29.

# タールレスガス化炉を搭載したバイオマス燃料自動車の研究開発 —二塔式ガス化炉の開発とガスエンジン発電機の選定—

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 雑賀 高  
工学院大学工学部環境エネルギー化学科 長本 英俊  
工学院大学工学部環境エネルギー化学科 酒井 裕司  
エコ・エンジニアリング株式会社 小屋 敏行

## Research and Development of a Biomass Fuel Vehicle with a Tarless Gasification Furnace

### — Development of Dual Tower Gasification Furnace and Selection of Gas Engine Generator —

Takashi Saika, Dept. of Mechanical Innovative Engineering  
Hidetoshi Nagamoto, Dept. of Environmental Energy Chemistry  
Yuji Sakai, Dept. of Environmental Energy Chemistry  
Toshiyuki Koya, Eco Engineering LTD

**ABSTRACT:** Converting the fossil-fueled vehicles to woody-biomass fueled vehicles, where the biogas is produced by a tarless gasification furnace, is estimated to reduce global fossil emissions of CO<sub>2</sub>. In this study, a production device of solid fuel, a gasification furnace and a compact gas engine system with high efficiency and security are designed and developed experimentally to completely remove tar occurring by thermolysis with the solid fuel. Miniaturization of the gasification furnace, increase of quantity of generation gas and reduction of tar are necessary to install the gasification furnace in a vehicle. Result of this study must lead to diversification of an energy source for vehicles and contribute to reduction of greenhouse gas discharge.

## 1. はじめに

再生可能エネルギーであるバイオマスの用途は肥料、発電、化学原料および自動車用燃料等のように多岐にわたる。木質系バイオマス（木質廃材、農業廃棄物等）20%に高品位石炭 80%を混入した燃料をバイオブリケットという。バイオブリケットは、発熱量・嵩密度が比較的大きく、含水率が 5%程度と低く、原炭よりも燃焼性に優れている固形燃料である。本研究の目的は、新しいガス化方法を用いて生成ガス中に含まれるタール分の削減を行い、車載可能なシステムを開発し、実際に自動車を試作走行することである。

二塔式移動層ガス化装置において、空気およびバイオマス固形燃料を交互に供給することによって、タール削減と中カロリーガスの生成を行うことができる。また、熱分解ガス中に含まれる微量のタールとカーボンドアスターを触媒で CO<sub>2</sub>に変換する。この新しいガス化方法を用いて、実機レベルの車両搭載型装置の設計試作を行う。

本研究では、木質バイオマス廃棄物からエネルギーを得て、自動車を走行させることを主目的として、固形燃料とその製造装置、ガス化装置およびガスエンジンシステムをそれぞれ設計・試作する。車載のために、

小型・安全・高効率に、自己完結型にトータルシステム化する。バイオマスは熱分解で必ず発生するタールをほぼ完全になくすことを目標に、また、どこにもあるバイオマスを、部分燃焼ガス化用に最適な固形燃料化とし、タールレスガス化エンジンシステムの開発を行う。

研究は次の 5 項目からなり、これらを分担し、実行していくことで、バイオマス燃料自動車を開発する。

ガス化炉を自動車に搭載させるためには、ガス化炉の小型化、生成ガス量の増加、タールの低減が必要である。従来原料として使用されていた木材チップより高い嵩密度をもつ木質ペレットをバイオマス原料として使用し、既存のガス化炉で空燃比や試料投入量など様々な条件を変化させガス化実験を行なう。

- (1) バイオマスをガス化用に固形燃料化する技術
- (2) 部分燃焼ガス化とその炉の開発
- (3) 生成ガスからタールをほぼ完全に除去する技術
- (4) 生成ガスで、既製品のガスエンジン等を稼働させる技術
- (5) 自動車走行実証試験

本研究の成果は、自動車用エネルギー源の多様化につながり、温室効果ガス排出削減に寄与する。

## 2. 二塔式ガス化炉の開発

### 2.1 実験装置

全体の構造としては、材質は鉄を用い、上部・中部・下部に分かれている。それぞれがフランジ状になっており、ボルト・ナットで止めてある。中部と下部には炉内を半分仕切る仕切り板が入るため、溝がついており仕切り板をその溝に上から差し込む形になっている。

仕切り板には高温でも歪まないために耐熱鋼の SUS310S を用いた。大きさは、縦 360mm × 横 153mm × 厚さ 2mm で、表・裏の下から 105mm 横から 71.5mm の部分に、縦 10mm × 横 10mm × 厚さ 5mm の火格子(ロストル)を乗せる箇所を取り付けた。上部は燃料投入部になっており(内径 100mm, 高さ 160mm)円塔部に軸を通しその上に厚さ 2mm の円盤を置き、それを回転させることで、仕切り板でしきった両側に燃料を供給できる仕組みになっている。蓋は入江工研 Black flange VP4100 を用い、上部と蓋の間には O リングを入れ蓋の上に重しを乗せることによりリークを無くした。中部と下部の内径は 153.2mm, 全体の高さは 420mm である。

下部には空気ブロワー(富士電機テクニカ製 VFC208P)から空気を送り込むパイプが 2 本、炉内で発生した可燃ガスが排出されるパイプが 2 本取り付けられており、仕切り板でしきられた際、両塔に各パイプが 1 本ずつ配置されるようになっている。

そしてガス化炉のヒートロス(熱損失)を抑えるために外側には断熱材を巻き炉内温度の上昇をやすくするため、自然放熱を抑制するために 1kW の日本ヒーター製マイクロヒーターを巻いた。

ガス化炉内にはファイバーキャスト(TOMB 5420)を塗布し断熱と仕切り板の隙間をなくした。これにより空気のショートパスがなくなり十分な還元反応が見込まれ、高発熱量の可燃性ガスの生成が見込まれる。ガスのリークを防ぐため繋ぎ目の部分である上部と中部にはジョイントシート(バルカー社製石綿 1500, 厚さ 1.5mm), 中部と下部の部分にはファイバーキャスト(高温用捕集剤)とポンド(レスポンド)を用いてシールし、ボルト・ナットをしっかりと締めた。実験中ボルトとナットが熱膨張により伸びて漏れが発生しやすくなるので、増し締め(ホットボルティング)を随時行った。

ガス化炉内の温度分布を測定するために多極熱電対(CA 熱電対)を 5cm 間隔で片側 5 本ずつ計 10 本を取り付けた。チャンネル番号は片側ずつ上から順番に番号をふっていき、出力された多極熱電対の温度データは HIOKI 2421 Memory Hilogger により集計した。

ガス洗浄のためのターレット装置の中にはシリコンオイルを絡ませたスチールウールが充填してある。このターレット装置を二つ設置することにより内燃機関で使用すると悪影響を及ぼすターレットの含有量を低減させる。ガスクロマトグラフィーでガス分析を行うので、サンプリング口手前にも円筒ろ紙でのターレット装置を設け、さらなるターレットの低減を行った。

ガス発生炉から生成するガスの温度が高ければ、ガスの容積も膨張して大きくなる。ガスの容積が大きければガスの濃度が薄くなり、エネルギー密度が小さくなる。したがって、ガスを十分に冷却することは重要である。

さらにガスを冷却することにより、ターレットが凝縮されターレットトラップでの回収率を高める。ガス化炉を出たガスの温度は、高いものでは 700℃ にもなる。外気温より 20℃ 以上高い場合にはエンジンの出力が衰退する。したがって、効率良くガスを使用するためにはガス冷却器やターレットトラップを通して外気温と同じくらいに冷却することが望ましい。

装置の概略図を Fig. 1 に示す。

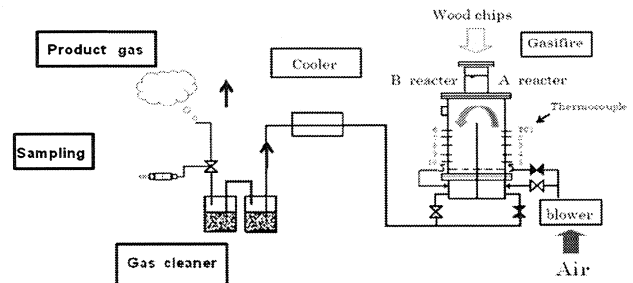


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

### 2.2 実験試料

木質ペレットの材料は、主に針葉樹である。樹皮を原料として作られたバークペレット、幹部を原料としたホワイトペレットと、樹皮・幹部が混ざった全木ペレットの 3 種類がある。主なペレットは、間伐材、オガくず、流木などを利用するので一切、生態系を破壊することはない。木質ペレットは、木材の成分であるリグニンを熱で融解し、固着させるので接合剤の添加は一切ありません。また他の燃料に比べ、形状、含水率が一定であるため自動運転装置に適している。

ペレット燃料の長所は以下の通りである。

- 形状や含水率等の品質が安定している
- 乾燥しており貯蔵が容易である
- 環境基準に適合した燃焼が可能である
- 自動燃焼に適している
- 地域の再生可能な資源から造られる
- エネルギー密度が高く、輸送や貯蔵に適している
- 閉鎖系の再生可能エネルギーシステムに理想的である
- 経済的な代替エネルギーの選択肢である

使用した木質ペレットの外形を Fig. 2 に、成分分析値を Table 1 に示す。

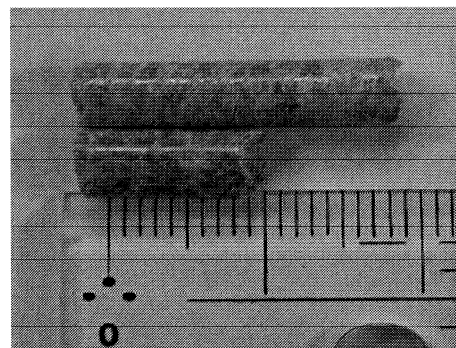


Fig. 2 Woody pellet.

Table 1 Ingredient of woody pellet.

Ingredient	Mol %
C	32.5

H	46.4
O	21.1

### 2.3 実験条件及び実験方法

#### 実験条件

試料：ペレット

試料投入量：260 g/batch

チャー投入量：各塔 350 g

送風空気量：34 L/min

切り替え時間：12 min

空燃比：0.3

#### 実験方法

- (1) ヒーターを用いて炉内温度を 300℃まで予熱する。
- (2) ガス化炉の両塔に着火した木炭 100 g を入れる。
- (3) 両塔に空気を 30[L/min]で交互に送風し、炉内温度を上昇させる。
- (4) チャー350 g を投入。
- (5) 両塔に空気を交互に送入し炉内温度(両塔最下部 CH5,10) を 900℃まで上昇させる。
- (6) 送風量を 34 L/min に 変更。
- (7) 試料を投入し実験開始
- (8) 試料投入を繰り返し行い、炉内を定常状態にもっていく

### 2.4 実験結果

ガス化炉内全体の温度分布を Fig. 3 に示し、酸化層、還元層、乾留層の温度分布 (TC3, 4, 5, 8, 9, 10) を Fig. 4 に示す。

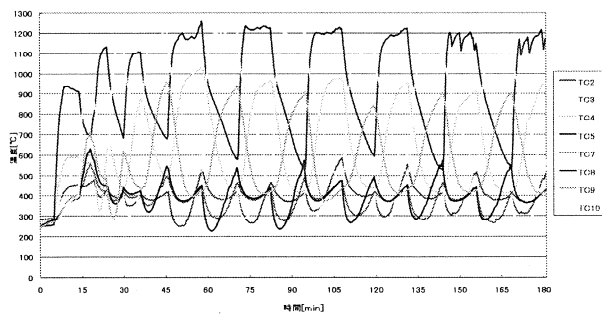


Fig. 3 Temperature distribution in the furnace.

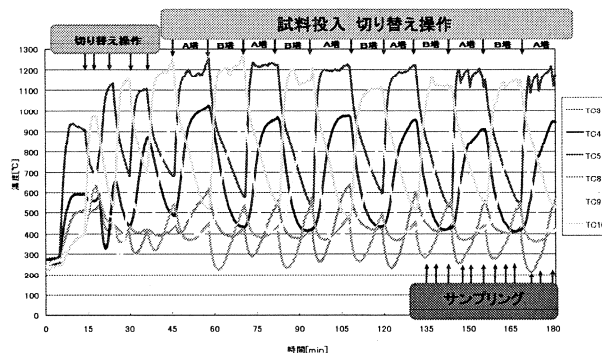


Fig. 4 Temperature distributions in oxidation, restoration and dry distillation layers.

A塔の最下部(TC5)では 1200℃付近の高温を維持し続けた。しかし、B塔では実験の途中までは TC5 と同様に 1200℃付近を維持していたが、後半では約 100℃程下がった位置で同じ挙動を示した。

TC5, 10 共通して切り替え操作の直前に温度が上昇

している。これはその上の部分(TC4, 9)で温度が上昇し一部が還元層から酸化層に移行することで発熱反応の幅が広がり、温度が上昇したと考える。

TC4, 9 は切り替え操作後から徐々に温度上昇し、還元反応が行なわれる温度まで十分達している。

TC3, 8 では試料投入直後から温度が低下していることから熱分解がこの位置で行なわれていることがわかる。今回は時間経過と共にチャーの量が減少し、熱分解の位置がどんどん下がってしまったが、今回の実験では TC3, 8 で吸熱反応である熱分解反応が確認されたため、今回の実験を通して著しいチャーの減少を防ぐことができ、各層の温度をプロットすることができた。

次に、生成ガスの時間別組成割合 (mol %) を Fig. 5 に示し、Fig. 6 に生成ガス発熱量を示す。

A塔で平均 4130 kJ/Nm<sup>3</sup>, B塔で平均 3830 kJ/Nm<sup>3</sup>, 全体平均で 3980 kJ/Nm<sup>3</sup> ととても高い発熱量を得ることができ、最高で 5315 kJ/Nm<sup>3</sup> のガスが得られた。温度の結果から今回の実験ではチャー層の高さがある程度一定に保つことができ、充填率を高くした結果が十分得られたと考える。B塔の発熱量の傾向として、徐々に発熱量が上がっている。

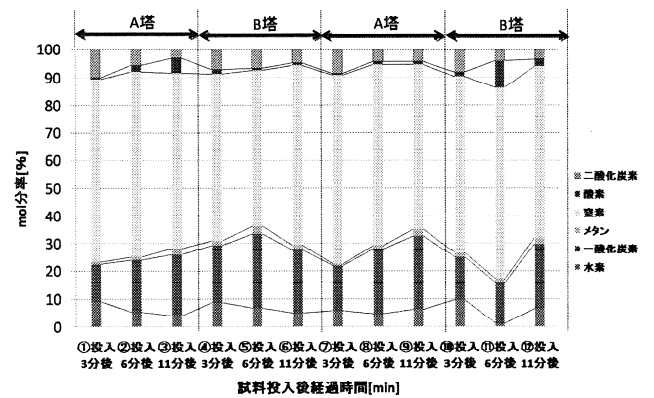


Fig. 5 Fraction of ingredient in the generated gas (mol %).

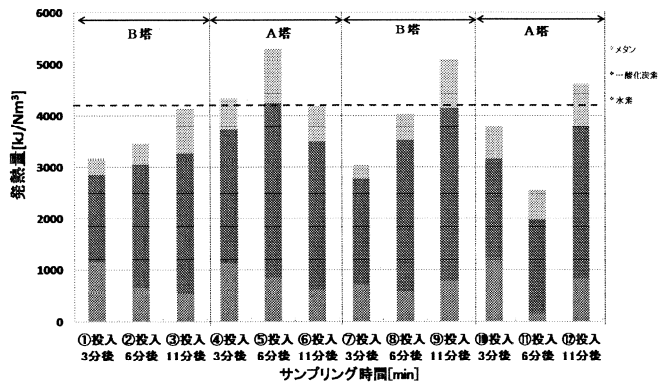


Fig. 6 Heating value of the generated gas.

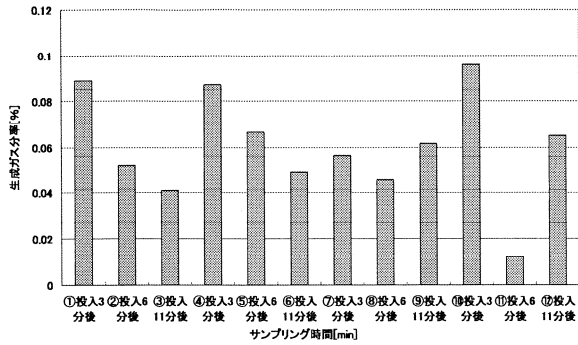


Fig. 7 Generated hydrogen fraction (mol %)

A塔では2回目の試料投入6分後のサンプリング結果は多量の酸素が検出されたことと、着火確認で常に火が絶えなかったこと、そして温度の3点から考えサンプリングミスと考えており、推測にはなるが傾向としては6分にピークを迎えその後低下していく。

試料投入後は火の勢いは弱く、青白いような透明感のある炎が確認された。Fig. 7に示すように、試料投入後の初期段階では多くの水素が発生しておりこの炎の色は水素によるものである。熱分解反応が終了し、乾留層部分の温度が上昇するにつれて炎の勢いが強くなり、色もオレンジがかった濃い色の炎へと変化していった。これより熱分解反応から還元層へと移行していき、それに伴い、メタン、一酸化炭素の発生量が増加していった。

二酸化炭素の組成割合は前回の実験までと比べても低く、10%以内に抑えられている。一酸化炭素の占める割合が増加していることから還元反応など各反応が活発に行われていることがわかった。

### 3. 自動車燃料への適用

#### 3.1 バイオマス燃料自動車の概念

Fig. 8にガス化炉から自動車へのエネルギー供給プロセスを示す。これまでのバイオマスガス化の研究より生成ガスの発熱量及び生成ガス量を一定に保つのは困難とみられた。自動車エンジンへ直接ガス化炉からの生成ガスを供給し、自動車運転中の要求に対応できないと考えられる。そこで、駆動システムを電気自動車とし、自動車にはガス化炉と共に発電機を搭載し、ガス化炉からの生成ガスにより発電し、バッテリーに充電もしくは駆動モーターを動かし走行試験を行う事がバイオマスカー実用化研究会で決定された。

木質燃料から得られる気体燃料を利用するためテスト用エンジンを用いた実験を行い、予混合燃焼のテストを行った。負荷の観測を容易にするため、実験には発電機を使用し、電気で出力を得た。現在検討されている車載発電機の仕様をTable 2に示す。

#### 3.2 実験装置及び実験方法

実験にあたり、Fig. 9に示す装置を製作した。吸気中にメタンを定量ずつ予混合し、通常燃料の軽油の消費量の低減を図った。実験の手順は以下の通りである。

- (1) 発電機の電源を入れ通常運転させ、燃焼を安定させる。
- (2) 圧力を0.05MPaに合わせる。
- (3) 流量計を開き、測定したい供給量に合わせる。
- (4) 負荷(今回は1200W)の電源を入れる。

- (5) 回転系を用いてエンジンの回転数を約3200rpmに合わせる。
- (6) コックを切り替え、測定を開始する。

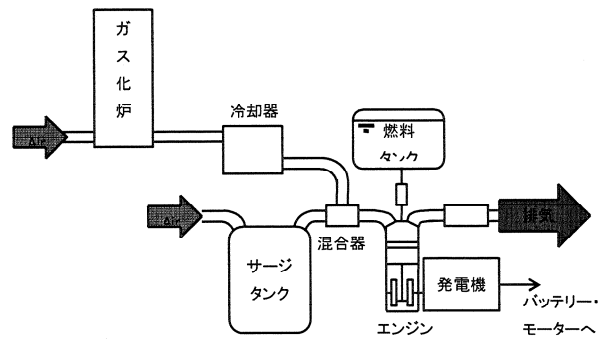


Fig. 8 Schematic diagram of the biomass engine system.

Table 2 Specifications of generator.

Test engine	Fuji Heavy Industries LTD. SGD2200 DY-23
Engine type	Diesel engine
Displacement	230 mL
Output at rated speed	2.2 kVA at 3200 rpm
Maximum power	2.5 kVA at 3200 rpm
Fuel consumption	1.2 L/h
Supplied fuel	CH <sub>4</sub>

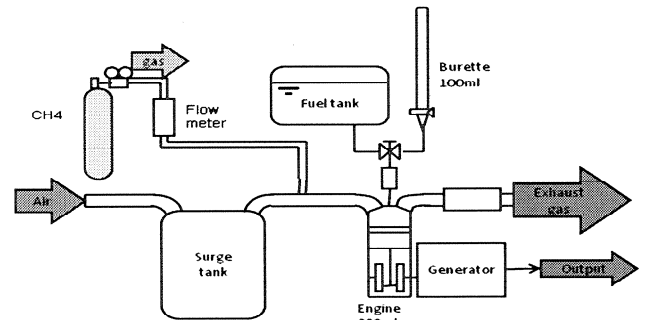


Fig. 9 Schematic diagram of engine experiment.

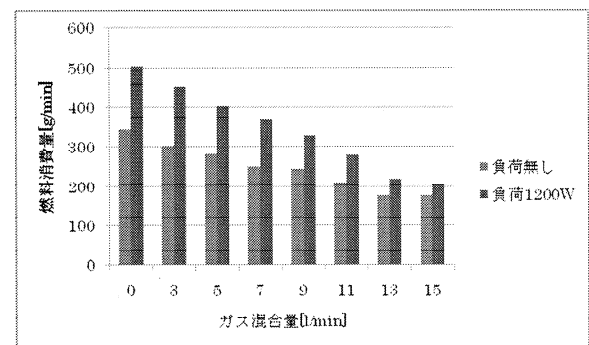


Fig. 10 Fuel consumption.

#### 3.3 実験結果

実験結果をFig. 10~Fig. 12に示す。気体燃料の予混合により、燃料である軽油の消費量は最大で1/2程度まで削減された。しかし、投入したガスの熱量に対し、削減された軽油の熱量で比較すると、大きなロスが認められる。機関に圧縮着火機関を用いたため、気



体燃料だけではなく点火源として軽油も併用する方式をとったが、このためにガスの燃焼に十分な空気量が確保できず、未燃焼のままガスが排出されているものと考えられる。

- (6) Reed, T.B., et al., Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, 2nd Ed. (The Biomass Energy Foundation Press) (2000)
- (7) 有限会社 ブッカーズ編「バイオマスからの気体燃料製造とそのエネルギー利用」(株)エヌ・ティー・エス

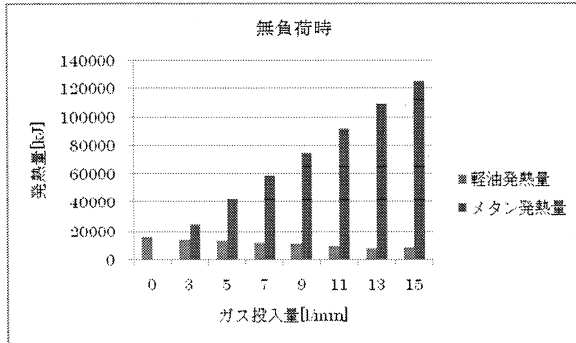


Fig. 11 Heating value at no load.

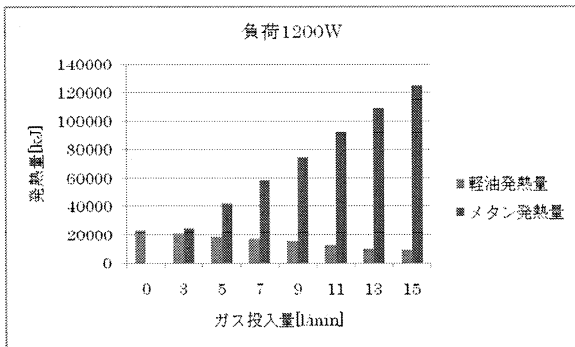


Fig. 12 Heating value at a load of 1200 W.

#### 4. おわりに

二塔式ガス化炉の実験を行い、以下の知見を得た。最大発熱量 5315 kJ/Nm<sup>3</sup> と高い発熱量を得ることができた。また、平均 3980 kJ/Nm<sup>3</sup> と安定して高発熱量のガスが得られた。さらに、各層の高さを継続的に維持できた。

また、ガス化炉からのバイオマス燃料を用いて、ガスエンジン発電機の実験を行った。その結果を受け、有効活用できなかつたと考えられるガスの損失の原因を探る。そのため、排気成分の分析と排気温度の測定を行い、損失の原因を探る。

ガス化炉から得られるガスの熱量、車の駆動に必要な電気出力から、搭載可能なサイズでの発電機の選定を行う。また、荷台へのガス化炉・発電機、その他補機などの搭載のための設計を行う。アンモニア燃料電池システムと車体を共有するため、搭載用フレームを共通で使用できるような設計を行う。

#### 参考文献

- (1) 環境省 HP：第4次統合報告書  
<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf#search=IPCC>
- (2) 統合報告書 社団法人 日本学会エネルギー編「バイオマスハンドブック」オーム出版(2002)
- (3) 塩ノ谷幸造 著「木炭自動車」(株)パワー社 (1996)
- (4) 資源エネルギー庁 HP  
<http://www.enecho.meti.go.jp/energy/newenergy/newene05.htm>
- (5) 岩渕圭吾 工学院大学卒業論文 (2006)





### 3. 総合研究所一般研究報告 (共同研究)



# 金属光造形複合加工法による焼結チタン人工骨内部構造仕様と最適加工条件に関する研究

## —金属光造形複合加工法による焼結チタン合金の力学的特性評価—

工学院大学 機械工学科 何 建梅、小久保 邦雄

Investigation on Internal Structures and Optimal Processing Conditions for Artificial Bones of Senile Titanium by Metallic Optical Prototyping

— Evaluation on Mechanical Properties of Senile Titanium by Metallic Optical Prototyping —

Jianmei He, Kunio Kokubo, Department of Mechanical Engineering

**ABSTRACT :** Mechanical properties of senile titanium based on metallic optical prototyping processing were experimentally evaluated. Two kinds of titanium material (Ti-6Al-7Nb titanium alloy and pure titanium) were utilized based on three different metallic optical prototyping conditions (energy density during the processing). Young's modulus, Poisson's ratio and tensile/bending strength of these senile titanium materials were examined through tensile tests and 3-point bending tests for future study on structural design of artificial bones.

### 1. はじめに

再生医療の対象となる難治性骨欠損として、脳外科領域での開頭術後の骨欠損、整形外科領域での腫瘍切除後や骨折後の骨欠損があげられる。また広範囲な骨欠損ではないが、治療困難な骨欠損として歯科領域での歯周病による骨欠損などがある。こうした骨欠損に対しては、自家骨や同種骨の移植のほか、金属・セラミックス・高分子化合物などのバイオマテリアルを用いた組織工学的治療が行われている。

バイオマテリアルを用いた人工骨は吸収型人工骨と非吸収型人工骨の2種類に分類される。生体吸収材料として代表的なものに合成高分子であるPGAやPLA、天然高分子であるコラーゲンやキトサン、無機材料であるリン酸三カルシウムや炭酸カルシウムなどがあげられる。しかし吸収型人工骨は強度および靱性が不十分であるため、荷重部位には使用することができない。非吸収型人工骨は、チタン等の金属系材料で製品化されているものの、(A) ヒト本来の骨と比較し、靱性や強度が高すぎる、(B) 骨との結合が弱いいため固定部でゆるみが発生する、(C) 顎骨等の欠損部位には人工骨製品が存在しなく、Fig.1-1-2 に示すようなプレート等で固定するため機能的に修復するのみで形状再建されないのが術後の患者 QOL (Quality Of Life) が低いなどといった欠点がある。

人工骨移植における問題点・欠点をクリアするために日々新しい人工骨の開発および製造技術の開発が進められている。その技術の一つに金属光造形複合加工法（\*後述）という加工・製造方法があげられる。金属光造形複合加工法は、近年注目されつつある三次元プリンタの金属バージョンとしてイメージをすると理解しやすい。得られる人工骨は生体用金属を材料としていることで、前項における非吸収型人工骨に分類される。本方法による人工骨作成におけるメリットは、欠損部と同一形状を有する人工骨を製造可能、細胞や血管が内部まで入り込む内部構造の作成が可能となり人骨との高い結合が見込めるなどといった点である。また Fig.1-1-3 に示すように、従来の人工骨の製造プロセスと比較して工程数が削減でき、短納期・低コスト化が可能となる。

しかしながら、金属光造形複合加工による人工骨の製造技術は現在でも開発段階にあり、多くの解決すべき問題が残されている。例としては、生体用金属材料（チタン合金、コバルトクロム合金等）のレーザによる焼結データがない、金属光複合加工法で製作した材料・構造の特性評価例（密度・剛性の物性データ、強度特性等）がないという技術的課題があげられる。本研究では、金属光造形複合加工法による焼結チタン人工骨の研究開発において、レーザ焼結条件、積層方向、内部構造の有無、等の造形方法の違いによる焼結チタン材料・構造の力学

特性変化を把握し、人骨の比強度に近い焼結チタン人工骨を作成する製造・加工条件を検討することを目的としている。具体的には、金属光造形複合加工法における焼結条件（レーザ焼結のエネルギー密度あるいは焼結温度）、積層方向などの設計パラメータをとり、引張と3点曲げの評価実験を行い、焼結チタン合金と焼結純チタンの材料特性（密度、ヤング率、強度など）の設計パラメータによる変化を評価・把握した。

## 2. 金属光造形複合加工法による焼結チタン合金の力学的特性評価

### 2.1 引張評価試験

金属光造形複合加工法は、焼結時のレーザ照射エネルギー密度を変化させることで焼結体の密度をコントロールできるといった利点を持っている。そこで3種類のレーザ照射エネルギー条件で加工した焼結チタン（材料は粉末チタン合金と粉末純チタンの2通りを用意した）を対象に引張り試験を行い、金属光造形複合加工法による焼結チタンの引張強度、ヤング率、ポアソン比を評価する。試験片形状・寸法は図1に示す。また試験片の材料および焼結条件を表1に示す。クロスヘッド変位速度は0.3mm/minを一定とし試験片が破壊するまで負荷荷重、および縦ひずみ・横ひずみを測定した。

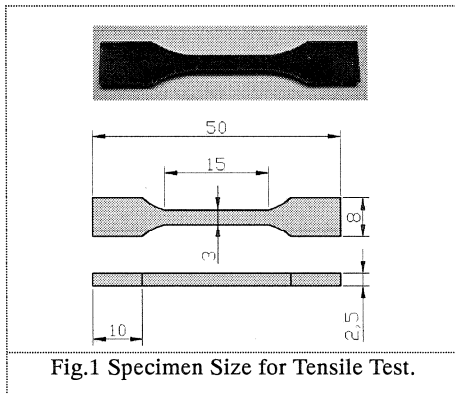


Fig.1 Specimen Size for Tensile Test.

Table 1 Material and Senile Conditions.

条件	材料	ビームスポット径 (mm)	レーザ走査速度 (mm/sec)	ハッチングピッチ (mm)	積層厚さ (mm)	積層方向
1 ①	チタン合金 (Ti-6Al-7Nb)	Φ0.1	900	0.10	0.05	Z軸方向
2 ②		Φ0.1	900	0.15	0.05	
3 ③		Φ0.1	900	0.20	0.05	
4 ①	純チタン	Φ0.2	900	0.10	0.1	
5 ②		Φ0.2	900	0.15	0.1	
6 ③		Φ0.2	900	0.20	0.1	

### 2.2 3点曲げ評価試験

3点曲げ試験に供した焼結チタン試験片の寸法、積層方向と試験時の概略を図2に示す。試験片の材料は引張試験と同様に粉末チタン合金と粉末純チタンの2通りを用意し、金属光造形複合加工機によるレーザ焼結で造形し、放電加工により表面処理を行った。表2に3点曲げ試験片の積層・照射エネルギーの成形条件を示す。クロスヘッド変位速度0.1mm/min一定にて試験を行い、試験片が破壊するまでの負荷荷重を測定し、クロスヘッドの変位量を試験片のたわみ量とする。

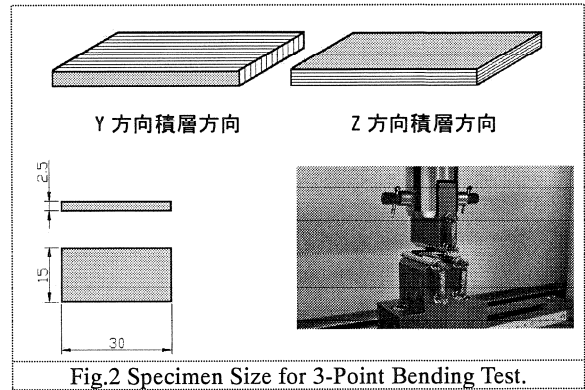


Fig.2 Specimen Size for 3-Point Bending Test.

Table 2 Processing Conditions of Specimens.

試験片の種類	材料	積層方向	照射エネルギー密度
1	チタン合金 (Ti-6Al-7Nb)	Y軸方向	条件①
2			条件②
3			条件③
4		Z軸方向	条件①
5			条件②
6			条件③
7	純チタン	Y軸方向	条件①
8			条件②
9			条件③
10		Z軸方向	条件①
11			条件②
12			条件③

## 3. 焼結チタンの力学的特性評価結果

粉末チタン合金と粉末純チタンを3種類のレーザ焼結条件により焼結・積層した試験片を各レーザ焼結条件につき5回（N=5）試験を行った結果（引張強度、ヤング率とポアソン比）を図3～5に示す。同図に示す人骨の引張強度と弾性係数との比較から、本試験に用いた焼結チタンの引張強度・弾性係数はどれも人骨を上回っており、人工骨として必要な引張特性を満たすことが言える。

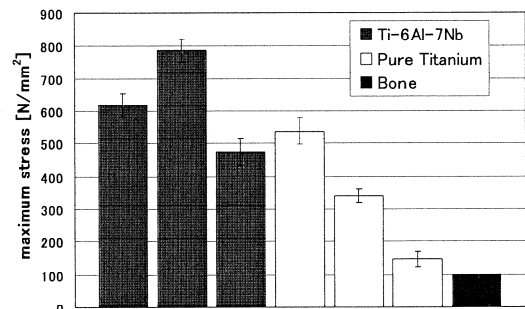


Fig.3 Tensile Strength of Senile Titanium.

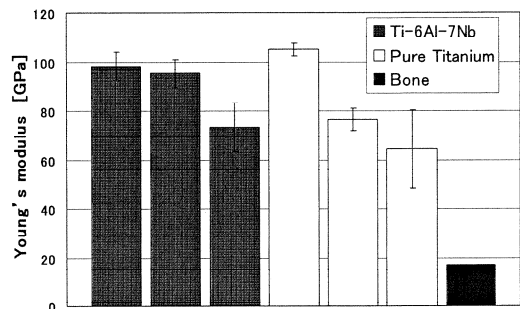


Fig.4 Young's Modules of Senile Titanium.

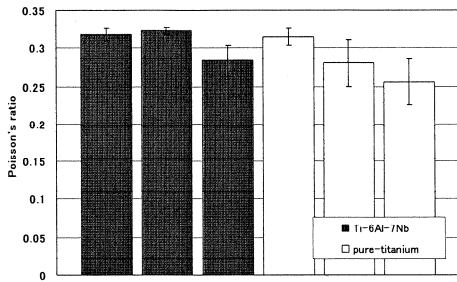


Fig.5 Poisson's Ratio of Senile Titanium

図 6 に金属光造形複合加工法による焼結チタン合金（条件①～③）と焼結純チタン（条件①～③）の 3 点曲げ強度の結果を示す。この結果から、チタン合金の方が高強度ということがわかる。これは引張試験と同様にアルミや耐蝕性を向上させるために添加されているニオブが結晶の転位の移動を起こしにくくしている為と考えられる。

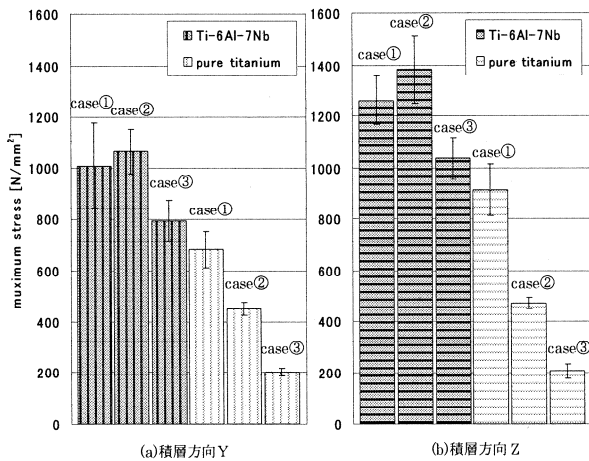


Fig.6 Bending Stiffness of Senile Titanium

図 7 と図 8 に引張試験と曲げ試験で得られたヤング率と曲げ弾性係数の比較を示す。焼結チタン合金は引張試験の結果と曲げ試験の結果がほぼ一致しているが、焼結純チタンの場合は誤差が生じているため、N 数を増やしてデータの精度を上げる必要がある

#### 4. 結論

本研究では、金属光造形複合加工法による焼結チタン人工骨の研究開発において、レーザー焼結条件、積層方向、内部構造の有無、等の造形方法の違いによる焼結チタン材料の力学特性の変化を把握した。

##### ① 焼結チタンの材料特性について

引張試験・曲げ試験を行うことにより Table. 3-3-1 に示す材料特性を得た。金属光造形複合加工法による焼結チタン合金、焼結純チタンは、脆性材料である。

##### ② レーザ焼結条件について

レーザー焼結時における照射エネルギー密度を低下させることで焼結体そのものの密度を低下させることが可能であり、焼結体の密度を変化させることで、強度に違いが生じた。焼結純チタンにおいては照射エネルギー密度

を低下させることで強度が低下したが、焼結チタン合金に関しては、配合している金属の融点や粒子との関係で強度が変化することが分かった。

一方、ヤング率に関してはレーザー焼結時の照射エネルギー密度の低下と共に減少するという傾向が見られた。

##### ③ 積層方向について

焼結時の積層方向による曲げ強度を比較した結果、焼結チタン合金において、積層方向 Z は積層方向 Y の約 1.3 倍の強度を示した。焼結純チタンにおいては 1.02 倍から 1.35 倍とばらつきがあったものの、積層方向 Z の方が高強度であった。

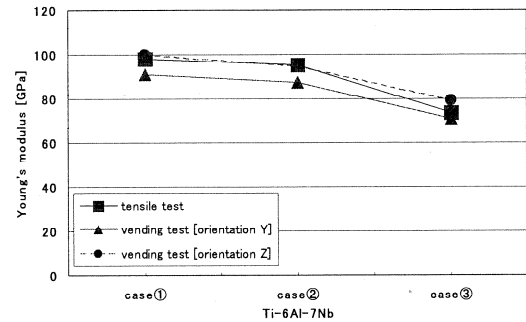


Fig.7 Elastic Modulus of Senile Titanium Alloy

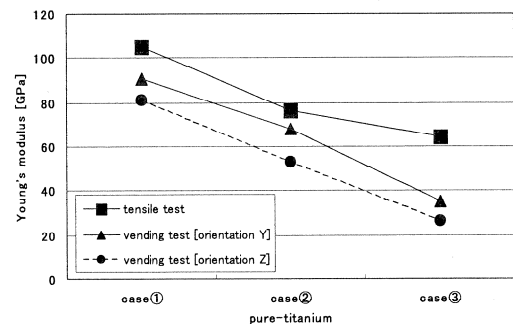


Fig.8 Elastic Modulus of Senile Pure Titanium

謝辞：(株)ネクスト 21 と (株)松浦機械製作所に焼結チタン金属試験片の提供に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- (1) 立石哲也, 田中順三, 再生医療工学, 123-129, (2004)
- (2) 阿部諭, 不破勲, ほか, 金属光造形複合加工システムによる高機能射出成形金型製作, 松下電工技法, Vol. 53, (2005)
- (3) 日本機械学会, 生体機械工学, 100-108, (1997)
- (4) 日本チタン協会, 金属材料シリーズ・チタン, (2007)
- (5) 林均 ほか, 生体内における金属材料の引張疲労試験, 生体材料, 3, 143-149, (1985)



# **Coating of a Biodegradable Ink Film on a Biodegradable Resin Substrate Using a Screen Printing Technique and Characterization of the Coating Films and Coated Materials**

by

**Takayoshi Yagasaki, Department of Environmental and Energy Chemistry, Kogakuin University  
Riko Katahira, Faculty of Home Economics, Tokyo Kasei-Gakuin University  
Takashi Shimoda, Nagano Giken Co. Ltd.**

**ABSTRACT :** In order to prepare biodegradable plastics with an electro-conductive surface in an economical and environmentally friendly way, a plate of biodegradable resin was coated with an electro-conductive and biodegradable film. The coating was performed by a screen print process, employing ink which consists of a biodegradable vehicle and carbon powder. The obtained films and the plastics coated with the films were characterized in terms of the microstructure, the electro-conductivity, the strength of adhesion and the behavior of biodegradation. The film shows a good adhesive strength to the substrate. The carbon particles were well dispersed in the film and the film was electro-conductive. The electro-conductivity could be varied by control of the content of the carbon particles in the film. It was found that the substrate coated with the biodegradable film biodegraded faster than the one without it.

## **1. Introduction**

At present, a number of studies to investigate functionalization of biodegradable resins are being carried out. In previous works<sup>1)~3)</sup>, the authors carried out experiments based on materials prepared by formation of thin films of metals and metallic compound on the surface of biodegradable resins. However, the formation of non-biodegradable films on the surface of biodegradable resins is problematic, as the film will remain as a residue in the environment after the biodegradation process.

In order to overcome this problem and develop a low cost, environmentally friendly method of film formation, we examined the use of screen printing techniques to prepare materials consisting of a biodegradable resin coated with a biodegradable film (consisting of a biodegradable vehicle and a functionality auxiliary material (abbreviated as FAM) with low toxicity levels to both the environment and living bodies), and we investigated the electro-conductivity and biodegradability

of the resulting materials. The experiment began with the application of a commercial conductive ink on to a plastic substrate used in the field of engineering, and with examination of the drying conditions to obtain adhesive strength in a cold-setting type ink film comparable to the strength obtained from a hot-setting type film. Based on these results, a cold-setting type conductive ink film was formed on a biodegradable resin substrate of low heat resistance; the adhesive strength of the film was measured, and this value was used to benchmark the adhesive strength of the other biodegradable ink films tested. Then, experiments were conducted to test the homogeneity of dispersion of the FAM in the ink film. Based on these results, adjustments were made to the biodegradable ink, to be used to form films on biodegradable resin substrates. In appropriate conditions determined by these preliminary experiments, the substrates were printed with cold- and hot-setting type ink. Adhesive strength and electro-conductivity were



evaluated for the coating film and the biodegradability was assessed for the whole material with or without coating film. The results of these tests are presented in this paper.

## 2. Testing materials and experimental methods

### 2.1 Substrate material

For the substrate, one engineering plastic and one biodegradable plastic were used. A poly ether imide (PEI) resin with ether and imide bonding, known as ULTEM (Japanese GE plastic Co. Ltd.), was selected as the engineering plastic. This material was used as a substrate for commercially available hot-setting type and cold-setting type conductive ink, in order to understand the conditions necessary for formation of a stable ink film. For the biodegradable resin substrate was chosen LACEA (Mitsui Chemistry Co., Ltd.). It is a resin produced through chemosynthesis (the method through which the largest quantities can be obtained), and a poly lactic acid (PLA) resin with a glass transition point higher than room temperature.

### 2.2 Film materials (Functional inks)

In this experiment, we used two types of commercial ink (hot-setting (100~150°C) and cold-setting (50~60°C), Asahi Chemical Research Laboratory Co. Ltd.), and two types of experimental ink (cold-setting).

The commercial inks were formed by adding a solvent to vinyl resin to form the vehicle, and then prepared silver powder as the FAM. The commercial inks were used to form print films on the surface of LACEA at room temperature in order to elucidate the conditions required to form a stable film using cold-setting type ink on a biodegradable resin surface, while the experimental inks were used to form biodegradable ink films on biodegradable resin substrates.

In the experimental inks, vyloecol (Toyobo Co. Ltd., BE-400)<sup>4)</sup>, a copolymerization-type polylactic acid resin mainly composed of biodegradable amorphous polylactic acid with a high concentration of D-lactic acid, was used as the vehicle, and carbitol acetate was used as the solvent for vyloecol. Carbitol acetate is an ester-based solvent, and therefore shows high polarity and solubility, while

being biodegradable. Vyloecol and carbitol acetate were mixed to form a 2:3 solution by weight. Both vyloecol, the primary constituent of the film, and LACEA, the substrate, were tested for biodegradability under the same compost environment. It was confirmed in advance of the printing experiments that the time taken for the former to begin biodegradation was about 65% of the time taken by the latter, and the time taken for complete biodegradation was about 7% that of the latter. Silver particles and carbon particles<sup>5)</sup> were used as the FAM.

The silver particles (mean diameter : 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 $\mu$ m) were prepared via a water atomization process, one of the methods used for producing metallic powders, and the dispersal of the particles in the vehicle was examined. Generally, powders prepared by this process are spherical, with a sharp particle diameter distribution, and we could therefore predict that the vehicle would possess high dispersal properties and corrosion resistance.

### 2.3 Film formation method and equipment

Screen printing<sup>6)</sup> was used as a cost-effective means of forming a stable, conductive ink film on the surface of a resin substrate. An schematic diagram of the equipment used to print the film is shown in Fig. 1. The ink was placed on the screen and a urethane rubber blade, known as a squeegee (hardness: 60-70IRDH)<sup>7)</sup>, was drawn across the frame horizontally. Ink that passed through the screen was printed on to the substrate, which was placed

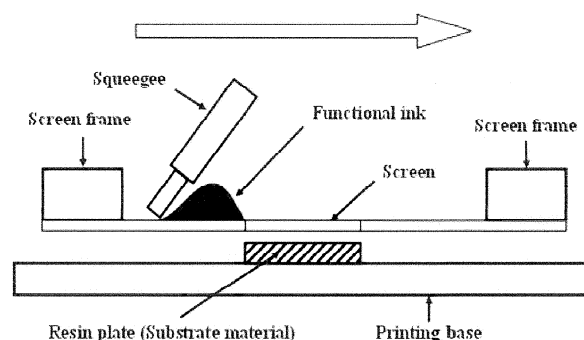


Fig.1 Schematic diagram of the equipment used to produce the film.

beneath the screen. The screen was prepared by stretching a piece of cloth made from polyester fibers, fixing it to the screen frame, and forming a resistant film

on top. The ink film formed on the surface of the resin substrate by printing was dried in a constant temperature dryer under set conditions, and then a number of evaluation tests were carried out.

### 3. Results and discussion

#### 3.1 Film on a biodegradable resin substrate formation using cold-setting type ink

ULTEM, which a high heat resistant, was used for the substrate, while commercial hot- and cold-setting type inks with a vinyl-resin-based vehicle were used as the film forming material. First, in order to identify the optimum drying temperatures of both types of ink, ULTEM substrates with printed ink films were placed in a dryer and dried for a set time at a set temperature, after which observation of the condition of the film was carried out using a microscope, and a scratch test was conducted to measure the  $L_c$  value of the film. Critical break away load and drying temperatures are shown in Fig. 2. It was determined that when drying was carried out for 30 minutes, the temperatures that resulted in the strongest adhesive bonding were 150°C for the hot-setting type ink film, and 50°C for the cold-setting type ink film. Furthermore, visual and microscope observation revealed that in the former case, the ink film did not deform even at a drying temperature of 170°C, while in the latter case there was some deformation at temperatures over 70°C.

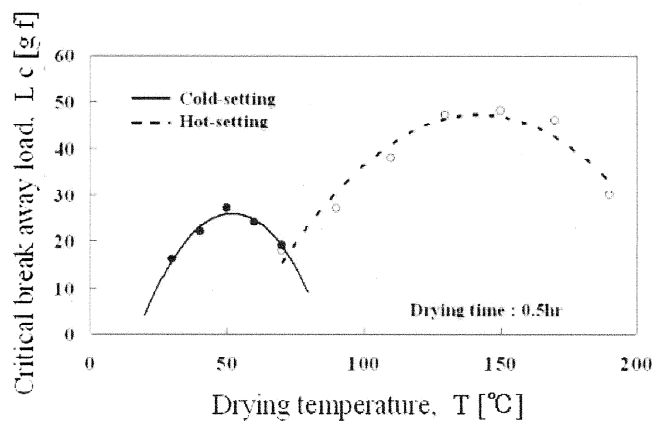


Fig.2 Variation of critical break away load with drying temperature.

In order to verify the optimum drying time for cold-setting type ink film, the drying temperature was set

to 150°C for hot-setting type ink film and 50°C for cold-setting type ink film, and the adhesive strengths were measured at different drying times. Neither film showed any morphologies of excessive roughness, peeling or cracking. Based on these results, it is apparent that even when commercially available cold-setting type ink film was used, a high  $L_c$  value, equivalent to 87.5% of that achieved with commercial hot-setting type ink film, could be obtained by drying for one hour at 50°C. In other words, given sufficient drying time, cold-setting type ink can be conferred with an adhesive strength almost equal to those of hot-setting type inks. The drying time required to obtain an adhesive bond of sufficient strength was roughly equal to the time taken for weight loss due to drying to cease.

Based on these results, it was determined that the optimum drying conditions for the cold-setting type ink film were a temperature of 50°C, at which non heat-deformation, and a drying time of one hour.

Next, an experiment was conducted to test whether commercially available cold-setting type ink could be used to form a similar type of film on a substrate made of LACEA, a low-heat-resistance biodegradable plastic, under the same drying conditions as used for the high-heat-resistance substrate. When an electron microscope was used to observe the condition of the ink film formed on LACEA, no defects were detected, although film was highly uneven due to the particle

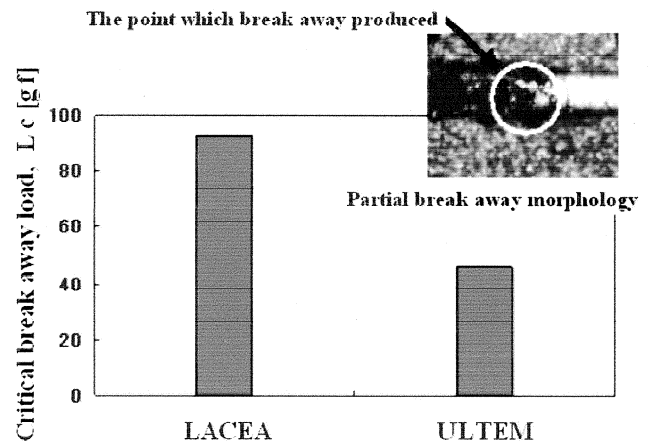


Fig.3 Results of scratch tests of the surface of the commercial cold-setting type ink film formed on the LACEA and ULTEM.

shapes of the silver powder. The  $L_c$  value was then obtained via a scratch test in order to evaluate the film's adhesive strength. The results are shown in Fig. 3. It was found that for all types of ink film, an relatively high adhesive strength was obtained when the film was formed on a biodegradable substrate, compared to film formation on ULTEM; the adhesive strength of the ink film formed on LACEA was about twice that of the ink film formed on ULTEM. It seem likely that the higher adhesive strength achieved using LACEA is due to the use of ethyl carbitol acetate as a solvent in the cold-setting type ink.

### 3.3 Formation of functional ink film with a biodegradable resin vehicle containing carbon particles, and evaluation of film functionality

The content of carbon particles in the biodegradable resin vehicle was varied, and the average thicknesses of the films produced by inks containing various amounts of carbon are summarized in Fig.5, surface and cross-section of a film containing 40wt.% carbon particles are shown in Fig. 6. Cross-sectional observation of the film showed that regardless of the amount of carbon particles added, the film maintained a relatively even distribution of the particles. However, as the amount of carbon increased, the average thickness of the film decreased, while the widths and heights of bumps in the surface of the film—which are thought to have been formed when the screen mesh was lifted away—grew larger.

A scratch test was performed in order to evaluate the adhesive strength between the biodegradable film and

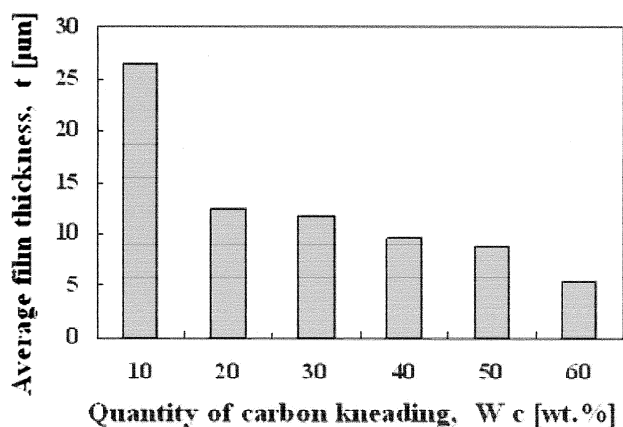


Fig.5 Variation of the film thickness with a content of carbon in the ink.

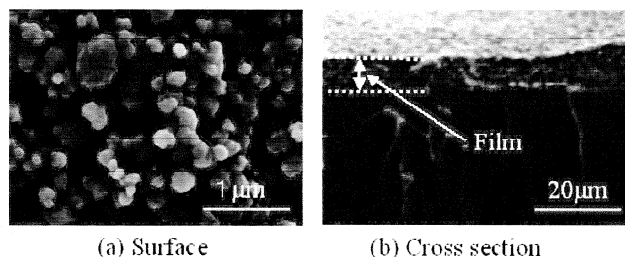


Fig.6 Morphologies of the surface and the cross section of the film from an ink containing carbon particles by 40wt.%.

biodegradable resin substrate. The results are shown in Fig. 7. In comparison to the values obtained for films containing silver particles only a few micron meter in diameter, films containing carbon particles showed a relatively high  $L_c$  value, indicating greater adhesive strength. While the carbon content of 20~30wt.% resulted in lower  $L_c$  values, larger amounts of carbon

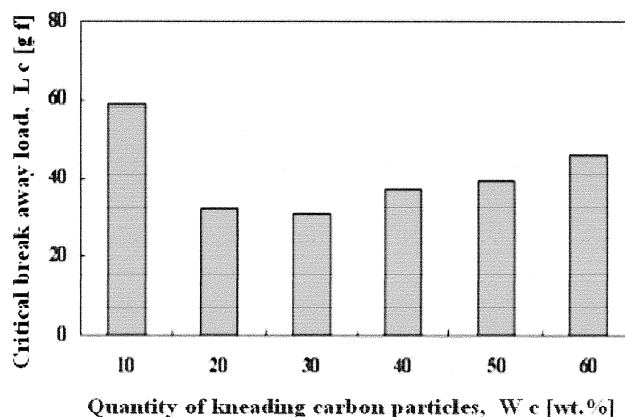


Fig.7 Results of the scratch test for the biodegradable films on the biodegradable resin substrate.

particles did not result in any clear reduction in  $L_c$  value, indicating that adhesive strength was maintained. Normally, when particles of a few micron meter in size are used as the FAM, increase in the content of the particles results in a corresponding reduction in the content of the vehicle, causing a significant drop in adhesive strength between the film and the substrate. Accordingly, further investigation is required to examine whether this decrease in adhesive strength can be avoided by reducing the size of the particles and whether there is a proportional relationship between particle diameter and

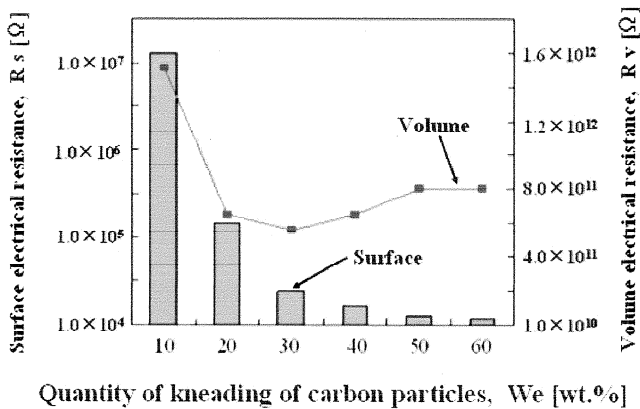


Fig.8 Variations of surface and volume resistivity with the content of carbon.

film thickness.

The film's surface and volume resistivity are presented in Fig. 8. The values obtained were slightly lower than those obtained when silver particles were used as the FAM; as the content of the carbon particles was increased, both surface and volume resistivity decreased by a significant extent. In other words, by proactively varying the amount of carbon particles used, it is possible to control both the surface and depth-direction conductivity of the resulting ink film.

These results show that the use of carbon particles in a biodegradable resin vehicle allows the preparation of biodegradable ink with a high level of functionality.

#### 4. Conclusions

In an attempt to create a relatively low-cost, environmentally friendly material, screen printing techniques were used to coat a biodegradable resin substrate with a film composed of a biodegradable vehicle and a functionality auxiliary material with low toxicity. The functionality and biodegradability of the resulting material were then examined. Based on these results, the following points may be noted:

(1) When silver powder formed in a water atomization process is used as a functionality auxiliary material in an ink with a biodegradable resin vehicle, its spherical particles and even saize distribution result in a high level of dispersion and sufficient

conductivity to make the product useful for a conductive material.

- (2) When carbon particles, which have a low toxicity, are used as the functionality auxiliary material with a biodegradable resin vehicle to produce an ink film, together there is high adhesive strength between the biodegradable resin substrate and the film.
- (3) When a biodegradable substrate is coated with an ink film containing a biodegradable resin vehicle mixed with carbon particles, the resulting material possesses sufficient conductivity to function as a conductive material. Furthermore, by adjusting the amount of carbon particles used in the film, it is possible to control the degree of conductivity.
- (4) A substrate with a biodegradable film undergoes faster decomposition than one without a film. In all cases, the application of such a film results in quicker decomposition of the biodegradable resin base material.

#### References

- 1) T. Yagasaki, and Y. Kimura, Journal of the society of materials science Japan, 47, 84 (1998).
- 2) K. Yamada, T. Yagasaki, Y. Kimura, and I. Takano, Journal of the society of materials science Japan, 54, 79 (2005).
- 3) T. Yagasaki, Material stage, 6, 18 (2006).
- 4) T. Miyamoto, K. Shimeno, Journal of Japan society of mechanical engineers, 14, 147 (2005).
- 5) T. Shimazaki, "Applied technology with carbon" CMC (2001).
- 6) Edited by the Japanese society of printing science and technology, "Printing engineering handbook ;1st edition", Gihoudo(1983).
- 7) Japanese industrial standard, JIS K 6253, "Hardness test method of rubber" (1999).



# 高密度酸化物熱電材料を用いた発電モジュールの開発

マテリアル科学科 桑折 仁

サレジオ工業高等専門学校 加藤雅彦

サレジオ工業高等専門学校 大杉 功

## Preparation of High Density Sintered Oxides for Thermo-module

Hitoshi Kohri, Department of Materials Science and Technology  
Masahiko Kato, Salesian Polytechnic  
Isao J. Ohsugi, Salesian Polytechnic

**ABSTRACT** : P-type  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  and n-type  $\text{CaMnO}_3$  are promising materials for thermoelectric generation. Not only high Seebeck coefficient but also low electrical resistivity is required for practical use of the thermoelectric oxide materials. The electrical resistivity of both oxide were, however, too high for practical use. P-type  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{M}_{0.2}\text{O}_6$  (M= Co, Mn or V) and n-type  $\text{CaMn}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{O}_3$  (M=Cu, In) were prepared by solid-state reaction and hot pressing. Relative density of p-type  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  (HP) was over 94 %, which is larger than the one of  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  (SSR).  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  (HP) showed larger strength and lower resistivity than  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  (SSR). The maximum value of power factor ( $\alpha^2\rho^{-1}$ ) for V-substituted  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  ( $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{V}_{0.1}\text{O}_6$ ) was  $66.9 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ , which is the largest of all specimens at 1175 K. Relative density of n-type  $\text{CaMnO}_3$  (HP) was over 99%, which is larger than the one of  $\text{CaMnO}_3$  (SSR). The maximum value of power factor ( $\alpha^2\rho^{-1}$ ) for In-substituted  $\text{CaMnO}_3$  ( $\text{CaMn}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{O}_3$ ) was  $204 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ , which is the largest of all specimens at 673 K.

### 1. はじめに

鉄鋼やセラミック等の工業炉およびごみ焼却炉からは500～1300 Kの廃熱が大量に放出されている。現在、これら廃熱からの電力回収手段として期待される酸化物を用いた熱電発電の研究が盛んである。熱電発電モジュールはp型熱電材料とn型熱電材料を電極で接続したものが最小構成単位となる。近年、高温酸化性雰囲気能耐える酸化物系熱電材料が注目されている。本研究では熱電発電モジュール開発の基礎的研究としてp型およびn型酸化物熱電材料の合成を試みた。

p型酸化物としては耐熱性に優れ、高温大気中で高い熱電特性をもつ $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ が注目されている。報告されている $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ はサイズの小さな単結晶や、焼結密度

の低い常圧焼結体に関するものが大半である。実用に向けては大きなサイズのものが必要であり、また熱電特性の向上に関する研究を行うにあたってベースとなる高密度焼結体は必須である。

そこで本研究では、第一の目的としてホットプレス法による高密度 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ 焼結体の作製条件を確立し、ついで、高密度 $\text{Ca}_3\text{Co}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_6$  (M=Mn, Cr, Mo, V)  $x=0.05, 0.1, 0.2$ を作製し、Coサイトへの元素置換効果の解明を試みた。

次に、n型酸化物熱電材料としては高いゼーベック係数を示す $\text{CaMnO}_3$ が期待されている。しかし、この化合物は比抵抗が高いため実用に至らない。

抵抗を下げる手段としては、高密度化あるいは、Mnサイトへの元素置換が考えられ、元素置換による性能の

向上例はいくつか報告されている。Mn サイトへの In または Cu の置換例が報告されているが、詳細は明らかでない。

そこで、第二の目的として、本研究では、ホットプレス法による高密度  $\text{CaMnO}_3$  焼結体の作製条件を確立し、ついで、高密度  $\text{CaMn}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{O}_3$  ( $\text{M}=\text{In}, \text{Cu}$ ) を作製し、Mn サイトへの元素置換効果の解明を試みた。

## 2. 実験

### 2.1 p 型 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$

原料には  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (純度 : 91 or 99.9%),  $\text{CaCO}_3$  (99.9 or 99%),  $\text{MnO}_2$  (純度 : 90%),  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  (純度 : 99.9%),  $\text{CrO}_2$  (純度 : 99%),  $\text{Mo}$  (純度 : 90%),  $\text{V}_2\text{O}_5$  (純度 : 99%) を用いた。各原料粉末を  $\text{Ca}_3\text{Co}_2-x\text{M}_x\text{O}_6$  ( $\text{M}=\text{Mn}, \text{Cr}, \text{Mo}$  or  $\text{V}$ )  $x=0, 0.05, 0.1, 0.2$  となるように秤量し、めのう乳鉢で 1 h 混合した。原料混合物は加圧圧力 30 MPa または 420 MPa で冷間プレスし、成形体を作製した。型は加圧圧力 30 MPa では  $\backslash 23$  または  $\backslash 32$  のカーボンダイスを使用し、420MPa ではステンレスダイスを使用した。加圧圧力 30 MPa で成形した焼結体は [SSR30], 420 MPa は [SSR420] と表記する。これら成形体は大気中にて 1223 K, 40 h 加熱し、固相反応 (Solid state reaction 以下, SSR) を行った。SSR30 を再度粉砕し、 $38 \mu\text{m}$  以下に分級後、ホットプレス (以下, HP) を行った。HP はカーボンダイスに直接、あるいは BN または  $\text{Al}_2\text{O}_3$  スラリーをコーティングしたカーボンダイスに試料を充填し、60MPa で加圧しながら 1223 K で 2~4 h 保持した。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  スラリーは  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末と水または 5mass% PVA 水溶液を混ぜて作製した (PVA 水溶液使用の試料は以下, PVA)。HP 試料は大気中で 20 h~50 h 熱処理 (以下, HT) を行った。

得られた試料は XRD による結晶相の同定, SEM による組織観察を行い、四端子法による比抵抗  $\rho$ , ゼーベック係数  $\alpha$  の測定およびパワーファクター  $\alpha^2 \rho^{-1}$  の算出を行った。測定試料の形状は  $1 \times 1 \times 10 \text{ mm}^3$  とし、測定は 373~1173 K 大気中で行った。

### 2.2 n 型 $\text{CaMnO}_3$

原料には  $\text{CaCO}_3$  (純度 : 99.9%) と  $\text{MnO}_2$  (99.99%),  $\text{Cu}, \text{In}$  を用いた。原料はモル比  $\text{Ca}:\text{Mn} = 1:1$ ,  $\text{Cu}, \text{In}$  を 10 mol% 秤量し、めのう乳鉢で 1 h 混合後、コールドプレスを行い、成形した。この成形体は大気中, 1000  $^\circ\text{C}$ , 24 h の条件で SSR を行った。得られた仮焼体を粉砕し、播潰機で 1 h 混合後、カーボンダイス、あるいは、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  または BN スラリーでコーティングしたカーボンダイスに試料を充填した。充填した試料を Ar 中, 30 MPa, 1000  $^\circ\text{C}$  あるいは 1400  $^\circ\text{C}$  で 1 h, HP を行った。コーティング剤を用いたのは、先行研究において試料のカーボンダイスによる還元反応が問題となっていたためである。HP 後の試料は大気中, 1000  $^\circ\text{C}$ , 24 h の条件で HT を行った。

仮焼体, HP 試料, HT 試料は XRD による結晶相の同定を行い、HP 試料, HT 試料は XPS でその化学結合状

態を分析した。

HT 試料の密度はアルキメデス法により測定し、四端子法による比抵抗  $\rho$ , ゼーベック係数  $\alpha$  の測定およびパワーファクター  $\alpha^2 \rho^{-1}$  の算出を行った。測定試料の形状は  $1 \times 1 \times 10 \text{ mm}^3$  とし、測定は 373~1173 K 大気中で行った。

## 3. 結果 および 考察

### 3.1 p 型 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$

XRD より、試料は HP 中にカーボンダイスとの接触部で還元され、Co を生成することがわかった。この結果を受けて、カーボンダイスと充填試料との接触を防ぐために BN または  $\text{Al}_2\text{O}_3$  スラリーをカーボンダイスにコーティングした。これによって充填試料の還元を抑制することに成功し、ほぼ  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  単相の焼結体を得ることができた。本研究で用いた HP 法により、 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  焼結体の相対密度は 41% (SSR30) から最大で 97% まで上昇し、先行研究の相対密度 78% よりも高い  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  焼結体の作製に成功した。

比抵抗  $\rho$  の測定結果より、すべての試料の  $\rho$  は温度の上昇とともに単調に減少する半導体的挙動を示すことがわかった。この傾向は先行研究と一致する。SSR420, HT 後の  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  焼結体の  $\rho$  は密度が高い順に低く、相対密度 97% の  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6(\text{HT})$  では 1200 K で  $4.6 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$  を示した。この値は同じ温度における SSR420 および SSR の文献値<sup>(1)</sup> のそれぞれ 1/5, 1/2 である。

Fig. 1 に  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6(\text{HT})$ ,  $\text{Ca}_3\text{Co}_2-x\text{V}_x\text{O}_6$  ( $x=0.05, 0.1, 0.2$ ),  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{Cr}_{0.1}\text{O}_6$ ,  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_6$ ,  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{V}_{0.2}\text{O}_6(\text{PVA})$ ,  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_6(\text{PVA})$  および  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{Mo}_{0.2}\text{O}_6(\text{PVA})$  のゼーベック係数  $\alpha$  の温度依存性を示す。

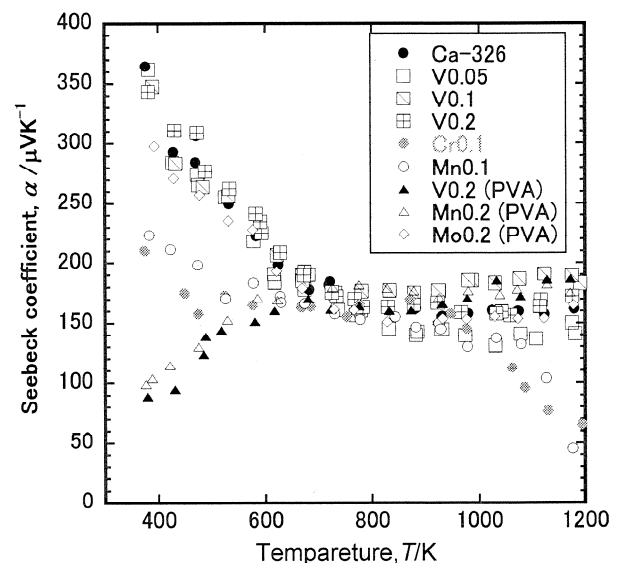


Fig. 1 p 型  $\text{Ca}_3\text{Co}_2-x\text{M}_x\text{O}_6$  の  $\alpha$  の温度依存性。

[Ca-326(HT)] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{12}\text{O}_6(\text{HT})$ , [V0.05] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_6$ , [V0.1] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{V}_{0.1}\text{O}_6$ , [V0.2] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{V}_{0.2}\text{O}_6$ , [Cr0.1] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{Cr}_{0.1}\text{O}_6$ , [Mn0.1] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_6$ , [Mo0.2(PVA)] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{Mo}_{0.2}\text{O}_6(\text{PVA})$

Fig. 1 より、 $\alpha$  の温度依存性は3つのグループに分類することができる。すなわち、600Kまで温度上昇にともない増加した後、緩やかに、かつ、単調に増加するグループ(Mn0.2(PVA), V0.2(PVA))と、温度の増加にともない低下し、500K近傍から温度依存性がなくほぼ一定値を示した後1000Kで減少に転じたグループ(Cr0.1, Mn0.1)と、無置換  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  と同様の傾向を示すグループ(Ca-326, V0.05, V0.1, V0.2, Mo0.2(PVA))である。 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  および  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  の混相の  $\alpha$  は600 K以下で  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  の  $\alpha$  より低く、600Kまで温度上昇にともない増加した後、緩やかに増加することが報告されている<sup>2)</sup>。熱電特性測定後のXRD結果より、Mn0.2(PVA)、とくにV0.2(PVA)には  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  ピーク以外にも  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  の回折ピークを確認した。よって、V0.2(PVA), Mn0.2(PVA) の  $\alpha$  の600 K以下での減少は  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  が存在するために生じたと考えられる。また、Cr0.1 および Mn0.1 の2化合物の1000 Kにおける  $\alpha$  の急激な減少については、 $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  は高温においてCaOとCoOに分解するが、この分解相の  $\alpha$  は  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  の  $\alpha$  よりも低いと思われる。したがって、分解温度がCrまたはMnの元素置換により低下したため  $\alpha$  が急激に減少したと思われる。V0.05, V0.1, V0.2, Mo0.2(PVA)の  $\alpha$  が  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  の  $\alpha$  と同様な温度依存性を示したが、その絶対値はわずかながら増減している。これはキャリア濃度の増減、キャリアの有効質量の変化によるものと思われるが、単純で統一的な傾向が認められない。還元の度合い、添加元素による第2相の有無を考慮しつつ、価数、イオン半径、格子定数の変化、置換サイトの選択性の観点で現在検討している。

Fig. 2 に得られた p 型  $\text{Ca}_3\text{Co}_{2-x}\text{M}_x\text{O}_6$  HT 試料, SSR420 のパワーファクター  $\alpha^2\rho^{-1}$  の温度依存性をそれぞれ示す。

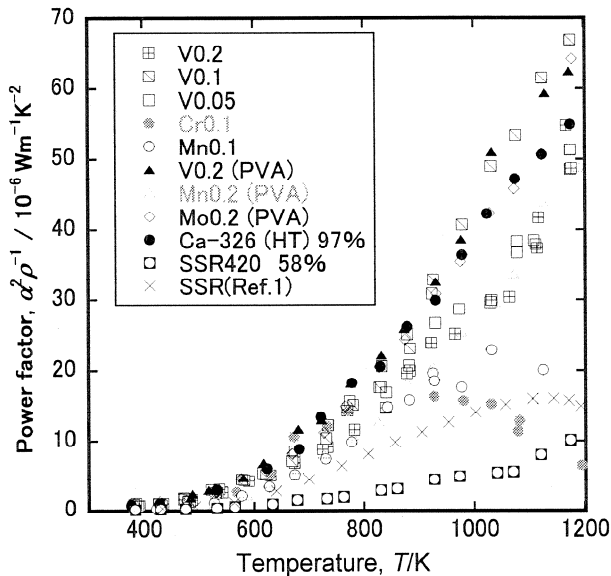


Fig. 2 p 型  $\text{Ca}_3\text{Co}_{2-x}\text{M}_x\text{O}_6$  の  $\alpha^2\rho^{-1}$  の温度依存性。  
 [V0.05] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.95}\text{V}_{0.05}\text{O}_6$ , [V0.1] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{V}_{0.1}\text{O}_6$ , [V0.2] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{V}_{0.2}\text{O}_6$ , [Cr0.1] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{Cr}_{0.1}\text{O}_6$ , [Mn0.1] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_6$ , [V0.2 (PVA)] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{V}_{0.2}\text{O}_6$  (PVA), [Mo0.2 (PVA)] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{Mo}_{0.2}\text{O}_6$  (PVA), [Mn0.2 (PVA)] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_6$  (PVA), [Ca-326 (HT)] :  $\text{Ca}_3\text{Co}_{12}\text{O}_6$  (HT)

Fig. 2 より、1000 K での  $\alpha$  の急激な変化によって Mn0.1 および Cr0.1 の  $\alpha^2\rho^{-1}$  は 980 K, 1032 K でピークを示すことがわかった。Mo0.2(PVA)の  $\alpha^2\rho^{-1}$  の最大値  $64.2 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$  は無置換  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  のものより 1.2 倍高い値を示した。V0.1 の  $\alpha$  は測定温度域において無置換  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  よりも高い  $170 \text{ mVK}^{-1}$  以上を示し、 $\alpha^2\rho^{-1}$  の最大値はすべての試料の中で最も高い  $66.9 \text{ }\mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  (1175 K) を示した。この値は報告されている元素置換  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  焼結体の中でも最も高い値である。

### 3. 2 n 型 $\text{CaMnO}_3$

XRD の同定結果より、仮焼体では  $\text{CaMnO}_3$  の回折ピークが確認できたが、HP 試料ではコーティング剤の有無に関わらず、 $\text{CaMnO}_3$  のピークが見られなかった。HT 試料ではほぼ  $\text{CaMnO}_3$  の回折ピークとなった。よって、 $\text{CaMnO}_3$  は HP 時に還元され、HT により再び生成したと考えられる。

XPS で分析した結果、1400 ℓ で HP をしたコーティング剤を用いた試料では、コーティング剤から試料の構成元素が見られた。よって、1400 ℓ の HP 時に試料がコーティング剤に拡散することがわかった。このため、HT 試料の XRD において、 $\text{CaMnO}_3$  以外の回折ピークが現れたと考えられる。

HT により  $\text{CaMnO}_3$  の還元した部位を元の組成に酸化させることができることをふまえると、HP 時における試料のコーティング剤への拡散の影響も無視できるため、コーティング剤は使用しない方が良いといえる。

アルキメデス法で算出した HT 後の試料の相対密度を Table 1 に示す。

Table 1 各試料の相対密度。

HP 温度, T/ ℃	1000	1400	1400	1400
コーティング剤	$\text{Al}_2\text{O}_3$	なし	$\text{Al}_2\text{O}_3$	BN
相対密度, d (%)	79	99	99	89

HP 温度を 1000 ℓ から 1400 ℓ にすることで、相対密度の向上に成功した。

Fig. 3 に各試料の比抵抗の温度依存性を示す。無置換の  $\text{CaMnO}_3$  と Cu 置換は温度上昇にともない、比抵抗が減少する傾向が見られた。In 置換では温度が上昇しても、1200 K 以下では比抵抗が大きく変化せず、1200 K を越えると比抵抗が大きく上昇する傾向が見られた。無置換の  $\text{CaMnO}_3$  に比べ、置換試料は測定温度領域において一桁あるいはそれ以上小さな値を示した。 $\text{CaMnO}_3$  はキャリアの伝導機構がホッピング伝導であることが知られており、Mn サイトに In などのイオン半径の大きな元素を置換するとホッピングサイト間距離が増大して移動度が向上すると言われている。したがって、Cu 置換より In 置換の方が比抵抗の減少が大きいのは、In の方が Cu に比べてイオン半径が大きいため、より移動度が向上し、比抵抗は減少したと考えられる。



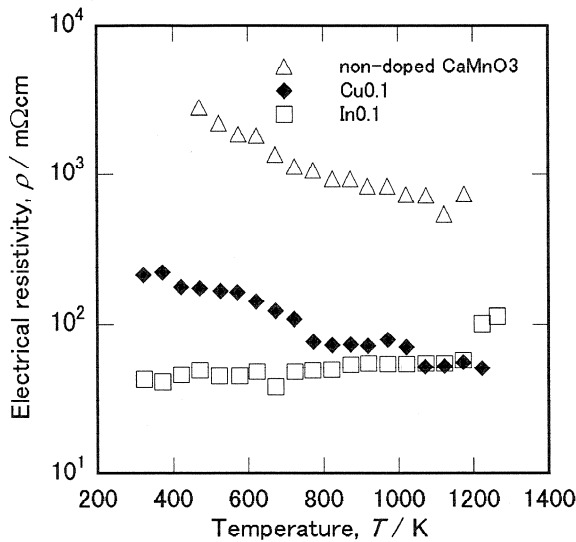


Fig. 3 n 型  $\text{CaMn}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{O}_3$  [M=Cu, In] の  $\rho$  の温度依存性.

Fig. 4 に n 型各試料のパワーファクター  $\alpha^2\rho^{-1}$  の温度依存性を示す. 1100 K 以下の温度域では In 置換, Cu 置換, 無置換の順で大きな  $\alpha^2\rho^{-1}$  を示した. 最も高い  $\alpha^2\rho^{-1}$  は In 置換, 673 K において  $2.04 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  であった. また, 無置換  $\text{CaMnO}_3$  の  $\alpha^2\rho^{-1}$  の最大値は 919 K において  $0.15 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ , Cu 置換の  $\alpha^2\rho^{-1}$  の最大値は 872 K において  $1.19 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  であり, In 置換の  $\alpha^2\rho^{-1}$  の最大値における温度 673 K と比較すると, In 置換は  $\alpha^2\rho^{-1}$  の最大値が低温側へシフトした. この傾向の差はゼーベック係数の温度傾向が反映されたことによる. XPS 分析結果より, In 置換試料は 2 相混在の可能性が示唆された. したがって, これらの結果をあわせて考えると, 本試料は混相であり, 高温で有利な相と低温で有利な相の両者のピークが重なったフラットな温度変化を示したと考えられる.

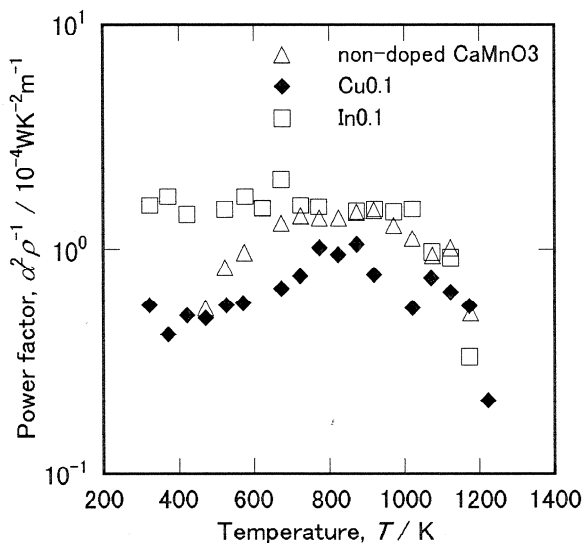


Fig. 4 n 型  $\text{CaMn}_{0.9}\text{M}_{0.1}\text{O}_3$  [M=Cu, In] の  $\alpha^2\rho^{-1}$  の温度依存性.

#### 4. 結論

本研究では熱電発電モジュール開発の基礎的研究として p 型および n 型酸化物熱電材料の合成を試みた.

p 型材料については, ホットプレス (HP) および固相反応焼結 (SSR) により  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_6$  ( $x=0.05, 0.1, 0.2$ ),  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_6$  ( $x=0.1, 0.2$ ),  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{Cr}_{0.1}\text{O}_6$ ,  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{Mo}_{0.2}\text{O}_6$  を作製した.

HP 法により  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  焼結体の相対密度は 41% から 97% まで高密度させることに成功した. この高密度化によって比抵抗は SSR 試料と比較して 1/5 に減少し, それにともなってパワーファクター  $\alpha^2\rho^{-1}$  は約 5 倍増加した.

Co サイトへの Mn, Cr, V, Mo 置換による熱電特性への影響を精査した結果, Mo または V 置換により  $\alpha^2\rho^{-1}$  の向上がみられた.  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.8}\text{Mo}_{0.2}\text{O}_6$  (PVA) の  $\alpha^2\rho^{-1}$  は最大値で無置換  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  の 1.2 倍にあたる  $64.2 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  を示した.  $\text{Ca}_3\text{Co}_{1.9}\text{V}_{0.1}\text{O}_6$  はゼーベック係数が測定温度域で  $170 \mu\text{VK}^{-1}$  以上を示し, パワーファクターの最大値がすべての試料の中で最も高い  $66.9 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  (1175 K) を示した. この値は無置換試料の最大値  $52.9 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  (1175 K) の 1.3 倍である.

よって, Co サイトへの V または Mo 置換により熱電特性の向上が得られ, これら元素の置換量の最適化によりさらなる性能向上が期待できることが示された.

n 型材料については, HP 法による  $\text{CaMnO}_3$  の作製条件について検討した結果, 大気中, 1000 °C, 12 h 仮焼後, コーティング剤を用いず, Ar 中, 1400 °C, 1 h, ホットプレスを行い, その後, 大気中, 1000 °C, 24 h の熱処理することにより作製することができた.

Mn サイトを Cu, In で置換することによって, 450 K から 1150 K にかけて, 一桁あるいはそれ以上の比抵抗の減少が見られた.

最も大きなパワーファクターは In 置換 673 K において  $2.04 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$  であった.

元素置換により, 大幅に比抵抗を減少することができたが, それにともない, ゼーベック係数の減少も見られたため, 元素置換量をさらに検討する必要がある.

#### 参考文献

- (1) K. Iwasaki, H. Yamane et al. Power factor of  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  and  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ -based solid solutions, J. Alloy. Comp. 358 (2003) pp. 210-215.
- (2) H. Fujishiro, Y. Fujine et al. Search for p-type oxide thermoelectrics - cobaltites. 22nd ICT (2003) pp. 192-195.

# 酸化チタンの光機能特性に対する磁場印加効果

工学院大学 電気システム工学科 鷹野 一郎

若狭湾エネルギー研究センター 研究開発部 笹瀬 雅人

Effect of Magnetic Field for Photo-functional Property of Titanium Oxide

Ichiro Takano, Department of Electrical Engineering

Masato Sasase, The Wakasa Wan Energy Research Center

**ABSTRACT** : Titanium oxide including iron was prepared by reactive magnetron sputtering. The glass or ferrite magnet was used as the substrate. Effect of applying magnetic field for photocatalytic property of Titanium Oxide was investigated by using a methylene blue solution under light irradiation. In this experiment the effect of applying magnetic field was obtained from both of the glass substrate in magnetic field and the ferrite magnet substrate. The effect of using the ferrite magnet substrate was superior to that of the glass substrate in magnetic field.

## 1. はじめに

光触媒特性を持つ物質として、ZnO(酸化亜鉛)やCdSe(セレン化カドミウム)などのいくつかの材料があるが、その多くは空気中や水中で光を照射すると物質自体が溶解してしまうなど不安定であることや、酸化力が小さくなって分解力に欠けるなどの欠点がある。またCd(カドミウム)、Se(セレン)、As(ヒ素)などには毒性のあることが知られているため、環境的立場から利用が制限される。以上のような理由から、高い光触媒特性、物理的・科学的安定性、無害・無毒性、安価など多くの利点を有する酸化チタンが実用材料として多用されてきている。

酸化チタンの光触媒効果は、太陽光のエネルギーによって活性酸素(O<sub>2</sub>・OH)を生成し、有機物や窒素酸化物などの大気汚染の原因となる物質を分解する能力があり、多くの分野で研究されている。また、太陽光等の自然エネルギーを利用でき、酸化チタン自身も人体に無害であるため環境にやさしいという利点がある<sup>1)3)</sup>。

著者らは光触媒反応の効率化を目的として、磁界中で酸化チタンに鉄を添加した薄膜を作製した。鉄を添加することによる効果は次のようなものが予想される。添加された鉄は酸化物を生成し、価電子帯のエネルギーを上昇させる。その結果、可視光領域(長波長)の光エネルギーで電子の励起が生じるようになり、光触媒反応が促進される。一方、強い保磁力を持つ鉄を用い、磁界の中で成膜することで成膜後の試料にも磁性を持たせることができる。その磁気作用によって光触媒反応中に生ずる電

子と正孔の再結合が妨げられ、光触媒反応が促進される。さらに、光触媒特性の測定時にも試料に磁界を印加することで、特性の向上が期待される。

## 2. 実験方法

### 2.1 成膜方法

本研究ではマルチプロセスコーティング装置を用いて成膜を行った。一般にスパッタプロセス圧力はおよそ1.3Pa程度で使用されるが、マルチプロセスコーティング装置では $7 \times 10^{-2}$ Paの低圧力まで放電を維持できる誘導結合RFプラズマ支援マグネトロンスパッタ源を用いる。本スパッタ源ではカソード単体での放電維持が可能であり、基板とターゲット間距離を離し(ロングスロースパッタ)基板を中心として各スパッタ源をMBEのように配置することが可能である。本装置は準備室、中間室、成膜室と分かれており、それぞれ独立した排気系を持っている。

試料基板としてノンアルカリガラス(コーニング社製#1737)、最大磁界約0.03Tのフェライト製磁石(株マグナ)及び最大磁界約0.30Tのネオジウム磁石(株マグナ)を使用した。これらの基板に対しマルチプロセスコーティング装置(アルバック(株))を用いた反応性スパッタリング法により酸化チタンを成膜した。その際、ガラス基板への成膜はフォルダ裏面にネオジウム磁石(68×4×8mm、株マグナ)を取り付け基板表面に最大値約0.11Tの磁界を加えた。磁性基板に直接成膜する際には裏面に磁石は設置しない。以上の条件下でTiとFeを

O<sub>2</sub>雰囲気中でスパッタし、鉄添加酸化チタンを成膜した。膜厚は100nm一定としFeとTiのスパッタ速度比を1:2、1:4、1:8として成膜したところ、組成はXPS測定からそれぞれFe/Ti比が0.5、1.0、0.1となった。装置の到達圧力は1.0×10<sup>-5</sup>Paで、他の成膜条件は表1に示す通りである。ここでは、(Fe/Ti)の組成を試料名とし、磁石基板にはFe/Ti比を1.0として成膜した。

Table1 Conditions of film formation

Fe/Ti	1.0	0.2	0.1	1.0 (磁石基板)
成膜時間 (sec)	2857	3225	3571	2857
スパッタ速度 Ti (nm/s)	0.025	0.025	0.025	0.025
スパッタ速度 Fe (nm/s)	0.012	0.006	0.003	0.012
成膜時圧力 (MPa)	0.1	0.12	0.12	0.012
入力電力 Ti (W)	100	100	100	100
入力電力 Fe (W)	20	10	5	20

2.2 評価方法

薄膜の光触媒特性は、殺菌灯照射によるメチレンブルー溶液の色度変化を分光光度計(オーシャンプティクス社 USB2000)で測定した。分光光源にはタングステン・ハロゲンランプを用い、光ファイバーで試料ホルダー(CUV-VIS/UV)をUSB2000に接続した。メチレンブルー溶液濃度10ppmを石英セルに3.0ml採取して、試料を浸漬させ殺菌灯を24時間照射し、所定の時間に吸光度の測定を行った。本実験では8Wの殺菌灯を用い、試料セルと殺菌灯の距離を100mmとした。図1のように試料基板がガラスの場合、成膜面を光照射側にして浸漬した。その際、(a)のようにセルの外側から磁石のS極側を基板側に設置した場合と(b)のようにN極側を基板側に設置した場合の双方について実験を行った。磁石基板の場合には図2に示すようにメチレンブルー溶液に直接磁石を浸漬させた。この場合も(c)のように磁石のS極面、(d)のように磁石のN極面にそれぞれ成膜を行っている。薄膜の結晶構造の同定にはX線回折法(XRD)、膜の深さ方向の組成、化学結合状態についてはX線光電子分光法(XPS)をそれぞれ用いて分析した。

3. 実験結果及び考察

3.1 薄膜の構造

薄膜の構造は図3のXRD回折パターンより、Fe/Ti比1.0及び0.2どちらも酸化チタンはRutile構造を示し

ていた。また、鉄については基板であるステンレス鋼と添加されたFeとの分離はできていない。

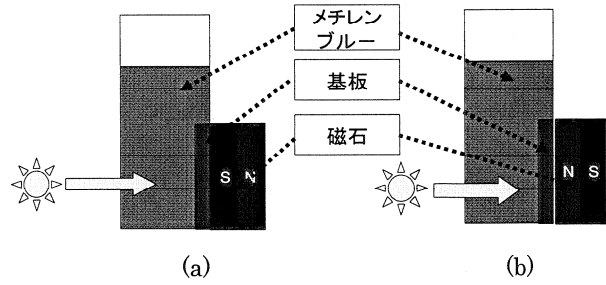


Fig.1 Photocatalytic measurements of the glass substrate

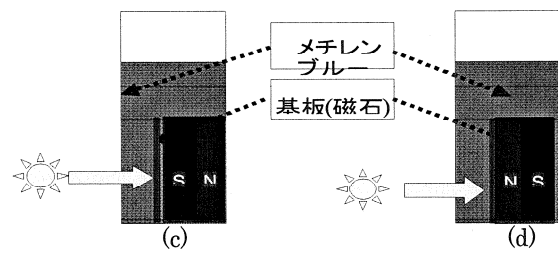


Fig.2 Photocatalytic measurements of the ferrite magnet substrate

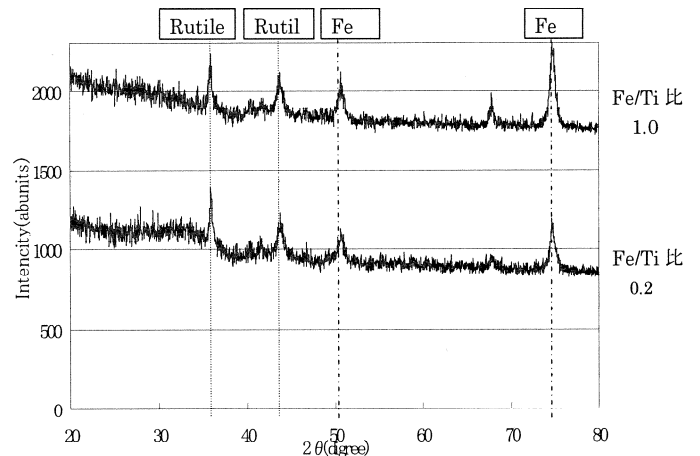


Fig.3 XRD patterns of the titanium oxide film including iron

3.2 印加磁界の有無と印加極性

ガラス基板上にFe/Ti比が0.2となる鉄添加酸化チタンを成膜した試料について、24時間殺菌灯を照射し光触媒特性を測定した。測定方法は、図1(a)と(b)のような場合と外部磁石を置かない場合である。

図4に示すように殺菌灯の照射時間とともに、メチレンブルーの透過度は徐々に上昇する。最も透過度の上昇速度が遅いものは、外部磁石を設置しない試料であった。一方、外部磁石を設置することで透過度は向上することが分かり、さらに基板面に磁石のS極を設置した方が透過度の上昇は速かった。24時間後の値で無磁界の試料は36.4%、N極の磁界をかけた試料は51.1%、S極の磁界

をかけた試料は 65.6%であった。詳細については、更なる検討を要するが極性によって異なる結果が得られたことは、n 型半導体の多数キャリアである電子へ磁気的な影響が及んでいるものと考えられる。

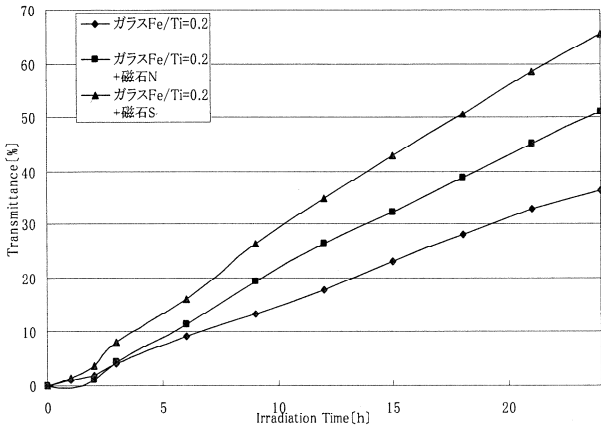


Fig.4 Photocatalytic properties of the titanium oxide film including iron under a sterilization lamp

### 3.3 酸化チタンへの鉄添加量

鉄添加の効果を調べるため、図5のように酸化チタン中の鉄含有量に対する光触媒特性を測定した。何れもS極を基板側に印加した試料の方が、メチレンブルーの透過度は上昇した。さらに、鉄の含有量が高いほどメチレンブルーの透過度は上昇し光触媒特性が高くなるのが分かる。一方、N極を基板側に印加した場合、鉄の含有量に対する透過度はS極の場合とは逆になり、鉄の含有量が高いものが最も透過度は低くなった。24時間紫外線照射後、N極磁界中のFe/Ti比1.0の試料の透過度は38.7%であり、0.2の試料は51.1%、0.1の試料は55.4%であった。S極の磁界では1.0の試料は68.8%であり、0.2の試料は65.6%、0.1の試料は60.2%であった。このことから、酸化チタンへの鉄の添加によってS極磁界に対する効果は向上するが、N極対しては逆効果となることが分かる。光照射による電子と正孔対の発生と、薄膜

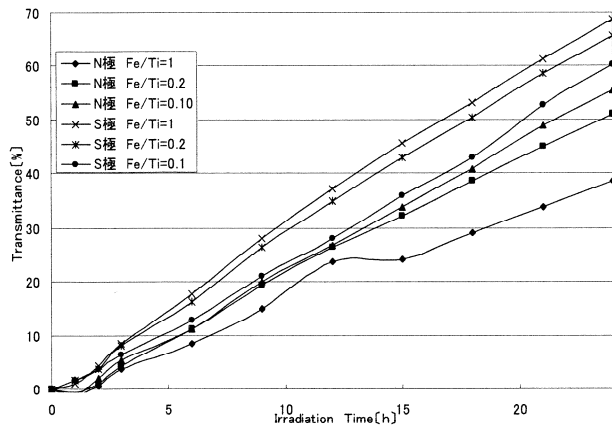


Fig.5 Effect of iron dope for photocatalytic property of the titanium oxide under a sterilization lamp

面からの磁束の侵入が、電子の移動に伴い電磁力を発生し電子と正孔の再結合を抑制することで触媒効果が向上する。その際、鉄添加による透磁率の増加によって、さらに触媒効果は向上することになると考えられる。

### 3.4 磁性基板の効果

磁界強度による効果を調べるため、磁石上に直接成膜をして、その光触媒効果を調査した。磁石は市販のフェライト製である。鉄の含有量はFe/Ti比1.0と0.2として、それぞれN極側に成膜した場合とS極側に成膜した場合について紫外線下で測定した。参考までに、ガラス基板の試料についても示したが、いずれも最も低い値を示した。一方、磁石上に成膜した場合は、N極とS極による違いはなく、さらに鉄の含有量による違いも現れなかった。しかしながら、Fe/Ti比1.0の場合、N極に成膜した試料の透過度は85.3%、S極に成膜した試料では88.0%であり、Fe/Ti比0.2の場合、N極に成膜した試料では85.3%、S極に成膜した試料では87.5%であった。この透過度は、図5に示したガラス基板の外部磁界による透過度68.8%に比べ、かなり大きな値であり磁界の強さが直接的に関与しているものと考えられる。

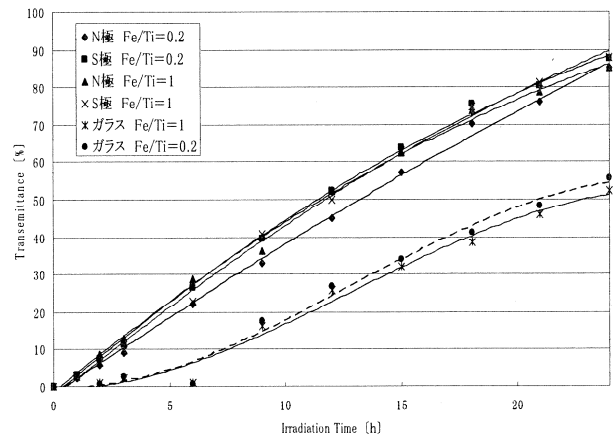


Fig.6 Effect of the ferrite magnet substrate for photocatalytic property of the titanium oxide under a sterilization lamp

次に図6と同様の条件で、蛍光灯下での光触媒特性を調査した。殺菌灯の場合と同様に、ガラス基板では透過度の上昇は少なく数%であった。一方、N極に成膜したFe/Ti比1.0の試料の透過度が最も高く、S極への成膜の場合は鉄含有量が高い試料の方が透過度は低下しており、殺菌灯と異なる結果が得られた。24時間後のFe/Ti比1.0の場合、N極に成膜した試料では22.8%、S極に成膜した試料では13.6%であった。Fe/Ti比0.2の場合、N極に成膜した試料では16.3%、S極に成膜した試料では15.8%であった。さらにガラスでFe/Ti比が1.0の試料では2.7%、Fe/Ti比が0.2の試料では3.3%であった。

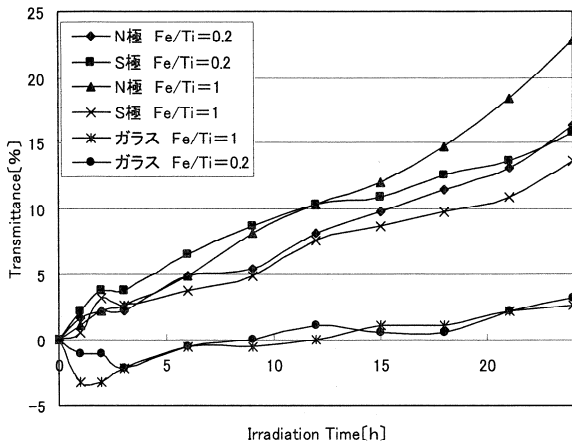


Fig.7 Effect of the ferrite magnet substrate for photocatalytic property of the titanium oxide under a fluorescent lamp

#### 4. まとめ

本研究では、反応性スパッタリング法を用いて鉄添加酸化チタン薄膜を作製し、XPS測定により鉄添加量を決定したところ 1.0、0.2、0.1 の Fe/Ti 比を持つ膜が得られた。また、XRD 分析によっていずれの膜もルチル構造をもつことが分かった。

ガラス基板上的鉄添加酸化チタン薄膜を磁界中に置いた際、印加極性によってメチレンブルーの透過度に違いが生ずることが明らかになった。試料裏面からの磁界印加では、紫外線下において S 極の印加が効果的であった。一方、蛍光灯下ではこの逆となったが、その原因は今後の調査とする。

本実験では、酸化チタン中に磁性材である鉄を添加し、さらに磁界中で触媒効果を向上させることができた。その特性は極性にも影響されるため、電子と正孔対に影響を与えているものと考えられる。今後は、ルチル構造だけではなくアナターゼ構造についても調査を行いたい。

#### 謝辞

XRD 測定においてご協力いただきました本学共通課程佐藤光史教授に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 清野 学：“酸化チタン - 物性と応用技術-” (技法堂出版)
- 2) 窪川裕, 本多健一, 斉藤泰和：“光触媒” (朝倉書店)
- 3) 藤島 昭, 橋本和仁, 渡部俊也：“光触媒のしくみ” (日本実業出版社)

## sIGNDEX V3 による汎用的な手話記述法に関する研究

工学院大学 情報学部 長嶋祐二

中京大学 教養部 神田和幸

### The Development of sIGNDEX V3 : Notation of Japanese Sign Language

Yuji NAGASHIMA , Faculty of Informatics

Kazuyuki KANDA , Chukyo University

**ABSTRACT** : Sign language is one of the communication means for the hearing impaired. It is a visual language and the articulatory components of a sign are presented in three-dimensional space. Moreover the so-called non-manual signals including facial expressions and body postures are attached to it. They are linguistically characteristic and are different from those in vocal languages. Social interest for sign language has been increasing in Japan and Sign Linguistic Informatics is attracting their attention. On the other hand, the discretionary system for the articulation of signs is not established yet. The history of sign language analysis by linguists and engineers is too short and researches have not been fully advanced.

In this report, we analyze linguistic characteristics of sign language focusing on the linguistic feature to verify our notational system. Then we discuss a blueprint on what we call sIGNDEX V3 should be like. We argue that the animation generating system should utilize the linguistic concept "distinctive feature" and that by so doing , we can develop an efficient and error-free, and consequently user-friendly sign animation generating system.

#### 1. はじめに

ICT の急速な進展はコミュニケーション支援技術を提供できる 1 つの重要な基盤と成っている。ICT は高度に情報化された社会を生み、新たなマルチモーダルなコミュニケーション手段の提供や、情報授受の機会を飛躍的に向上させつつある。これは、聴覚や視覚に障害のある人にとっても例外ではない。例えば、携帯電話による文字情報の送信や受信は、聴覚に障害のある人にとって有効なコミュニケーションや情報授受手段と成っている。この携帯電話による文字通信により外出先などでの予定変更など緊急事態に柔軟な対応ができるようになり、飛躍的にその生活の質を向上させているとって過言ではないであろう。

聴覚障害は、聞こえない、聞き取りにくいことなどに起因するコミュニケーション障害あるいは情報障害といえる。この障害は、外から一見してわからず「見えない障害」といわれている。聴覚に障害のある人のコミュニ

ケーション手段の一つとして手話がある。音声言語の研究に比べて手話研究の歴史は浅く、言語学や工学的な側面での翻訳技術獲得のために必要な知識の蓄積は少ない。この理由は、手話の言語学的研究が少ないこと、体系だった記述方式がないこと、十分な言語資料の整備がされていないことなどである。

本稿では、手話の言語学的な特徴の解析について述べる。次に、アニメーションの生成や認識などの工学的応用を目指した弁別的特徴や形態素レベルでの記述 sIGNDEX V.3 の検討について述べる。最後に、手話の弁別的特徴や形態素解析のための必要となる語彙資料となる必要な語彙データベース KOSIGN Version 4&5 の収集法について述べる。

#### 2. 手話

手話は、3次元空間上で複数の調動器官による運動と提示の継時変化として語が形成される空間的言語である。受信者にとって手話は、視覚系で受容される視覚言語で

ある。このため手話は、線条性をもつ音声言語とは異なった言語的特性(独立した文法体系)をもつ。図1に示すように、手話の調動は、手指信号および非手指信号により構成される。手指信号は、手の型・掌方向・提示位置・大局的な運動により構成され、これらの動きを時間軸上に同時あるいは連続的に提示することにより、主に語の形成に寄与する。非手指信号は、表情・口型・うなずき・視線などの動作で構成され、主に統語論的、意味論的な作用があるといわれている。手話は話し言葉と同様に対話型自然言語であるため、効率的な認識や生成装置を構成するためには、その言語的特性を理解して、新たな記述法 SIGINDEX V.3 を検討しなければならない。

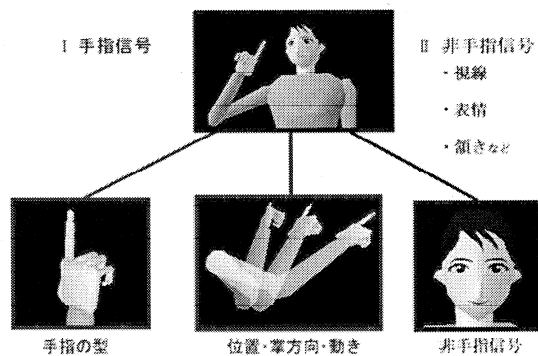


Fig. 1: Articulatory elements of Sign

## 2.1 手話の言語学的な特徴

手話では、音素レベルのこれら調動の構成素が空間的かつ線条あるいは非線条的に結合することにより形態素を構成してゆく。語彙解析からわかっている主な言語的な特徴を、以下に示す<sup>(1),(2)</sup>。

- 1)同時性・非線条性：調動器官が複数存在するため、空間と時間の概念の同時進行が可能となり、構成素(音素)や形態素を同時に表現することが可能となる。
- 2)写像性：類辞の存在に示されるように、写像性が強く、意味が形式に提示されているため事象・物・属性概念が混在している。手話では、手型が類辞となることが多いが、身体が類辞となることもある。ここで、類辞(classifiers)とは、形状、サイズ、材質などの属性を示す品詞である。
- 3)調動空間における人称表現：調動位置や視線の方向により話者(1人称)を中心とする人称空間を構成する。また、調動の方向性や始点・終点を確定することにより"主体-客体"あるいは"能動-受動"という二項関係が表出される。
- 4)表現空間の代理機能：調動位置や空間または手型が、その後の手話の中でも同じ意味を保存し、事物などの代理的な役割をすることがある(型残り)。
- 5)統語構造：動詞類を中心に、主語や目的語を内在している表現では、調動が変化するものがある。
- 6)非手指信号：単語、節、文レベルで作用する抑揚な

どの韻律的特徴などの存在とその重要性が示唆されている。

手話は3次元空間内において、話者の上半身を中心とした調動により伝達情報を出するため、通常話者を主体(1人称)とする人称空間が設定される。手話空間内の人称位置関係は、調動の運動方向などに反映される。小田らは、手話における主体の表れ方により、手話を大きく3つに分類した<sup>(3)</sup>。

分類A：行為・作用の主体が話者自身となる手話

分類B：行為・作用の主体が手指として代理表現されるもの

分類C：行為・作用の主体が存在しない、あるいは極度に潜在化されたもの

分類AおよびBの手話は、抽象化レベルが最も低く話者を中心とする主体、客体の関係が明確になるため、会話における統語構造を表示するため屈折する機会が多い。これに対し、分類Cは調動される単語の機能的肢位を中心として、前後方向を時間軸、水平方向を関係軸、鉛直方向を上下関係といったように空間内を次元化して調動表出することが多く、語形が変形を受ける可能性が低い。市販の手話の本などでは、「辞書型」といわれる基本的な型のみ記載となり、統語構造の変化による屈折については十分に説明がされていない。そのため、手話の語の構造を理解できる記述方式が望まれる。

## 2.2 視線の役割<sup>(4)</sup>

非手指動作に含まれる視線情報は、手話の伝達や認知に重要な役割を担っていると思われる。観測者の視線情報を計測し、分析することで、手話使用者の認知メカニズム解明の基礎とすることができると考えられる。また、アニメーション生成を考慮した記述のためには、視線の解析が重要となる。ここでは、手話読み取りにおける注視点の分布、ならびに手話者側の視線について視線追尾装置を用いて計測実験を行った結果について述べる。

### 2.2.1 観測者の停留点分布

実験では観測者には座位で顎台に顎を固定した状態で、ほぼ等身大の手話映像を見てもらい、観測者の左眼の視線情報を計測した。視線情報の計測にはNAC社製視線追尾装置EMR-NL8を、観測者とスクリーンの距離は約2.8m、スクリーンサイズは縦120cm×横160cmとした。視野カメラからの視線情報はデジタルビデオテープに30frames/secで記録した。解析は、デジタルビデオテープに記録された視線情報をパーソナルコンピュータに取り込み、EMR-NL8付属の解析プログラムにより停留点を算出した。このとき、停留とみなす最小の時間は200msecとした。なお、被験者は6名の手話を母語とする者である。ネイティブサイナの映像の場合、鼻を中心に注視しており、顔から視線が外れることはほとんどなかった。以下にその特徴をまとめる。

特徴1:ろう者は平均80-90%以上の高い割合で口や眼など顔中心を注視している

特徴2:手話の初・中級者は大きな動きの場合、手を追

う傾向がある

特徴3:手話の習熟度が高くなれば、顔領域への視線の集中度が高くなる

特徴4:顔から離れて動いている手の形や動きなどの情報は、周辺視で捕えている

### 2.2.2. 手話者の視線

ここでは、手話対話における手話者側の視線について述べる。視線情報の計測には NAC 社製視線追尾装置 EMR-7 を用いた。手話者側に確認された特徴的な視線を以下に示す。

- 1)想起の視線
- 2)手への視線
- 3)ポインティングの視線
- 4)その他の視線

## 3. 手話の記述法

日本語や英語などの音声言語は、仮名や漢字、アルファベットなどの文字により記述することができる。しかし、手話には、共通に使用できる体系化された記述する方法が確立されていない。手話の音声的な記述法では、ハンブルグ大学の HamNoSys<sup>(5)</sup> や Sutton の SignWriting<sup>(6)</sup> などいくつかの方法提案されている。しかし、これらの表記法は、アイコン的な記述となり、共通して使用できる記述法に至っていない。

### 3.1 sIGNDEX V3 の考え方<sup>(7)</sup>

筆者らの研究グループでは、これまでに、キーボードから入力可能な記号のみを用いて日本手話単語をラベル化して表示するシステムである sIGNDEX V1 を開発、ついで、それに非手指信号（NMS: non-manual signals）を記号化し、手指動作と同期して非手指信号を記述するシステムである sIGNDEX V2 を提案してきた<sup>(8)-(10)</sup>。sIGNDEX V1 および V2 で記述された手話単語列内の個々の単語を手話アニメーションに置換することにより、手話文をアニメーション化することは現在でも可能である。しかし、この場合、それぞれの単語の表出時間、単語から単語への渡りの時間とその運動軌跡、単語間の同化現象、動詞の適切な屈折形の使用等は考慮されない。そのため、生成されたアニメーションは、理解は可能であっても、日本手話使用者にとっては不自然なものであることは否定できない。手話アニメーションシステムが利用される場面を想定すると、このような不自然さは致命的である。

手話アニメーションは、聴覚に障害のある人への自立移動支援を目的とし、事故等で突然停止した電車やエレベーターの中や、緊急時の飛行機の機内での緊急案内に利用されると想定している。このような緊急時に直面した際、人間にはかなりの精神的負荷がかかっており、「理解可能だが不自然な」アニメーションを瞬時に理解することは難しい。したがって、手話アニメーションには、より多くの言語的情報や言語的余剰性を保持していること

が要求される。さらに、手話アニメーション生成に要する時間も考慮する必要がある。緊急時には刻々と状況が変化するので、その変化に瞬時に対応して、適切な手話アニメーションを生成し伝達していくことが求められる。柔軟性の高い手話アニメーション生成システムを実現させるためには、これら2つの条件を満たす必要があると考える。

### 3.2 弁別の特徴

このことを受け、筆者らの目指す sIGNDEX V3 の一つの重要な機能は、基本構成要素により手話動作を記述し、これら2つの条件を満足させることである。現在の手話アニメーション生成システムは、日本手話使用者にとって、理解できるが違和感を覚える状態となっている。これには、大きく分けて二つの原因が考えられる。一つは、上述したように、手話単語同士の関係（渡りの時間や同化現象など）がアニメーションに正しく反映されていないことである。他方は、以下で詳述するが、個々の手話単語のアニメーションを生成する際に、何を手話単語の基本構成要素（モーション・プリミティブ）とするか、どの基本構成要素同士を組み合わせるべきかという手話単語内における基本構成要素間の関係（組み合わせ論）が適切に捉えられていないことである。筆者らは、最終的に、この両方の問題点を解決することが、上記の sIGNDEX V3 を実現するカギであると考えている。この報告では紙面の都合上、2つの問題点のうち「手話単語内の基本構成要素」に焦点を絞り、より自然なアニメーション生成を実現するシステムはどうあるべきかについて議論していく。

## 4. 語彙データベースの構築

さて、弁別の特徴や形態素レベルでの記述法の構築には、言語解析のもととなる手話母語者による語彙収集が必要である。

### 4.1 可搬型対話データ収録・編集システムの構築

ここでは、手話対話をはじめ様々な対話データの収集と分析を行う必要がある。収集は、スタジオという閉じた環境だけではなく外部での収録も想定される。そこで、外部収録可能な可搬型の収録システムを構築した。

本大学のスタジオで使用する場合の構成概要を図2に示す。外部の撮影では、プロンプタを使用できないため対面での撮影となる。そこで、手話者への指示は、小型モニターへ出力することで行う。カムコーダ A,B の配置は、解析を考慮して、対話相手の反利き手側に配置することで被撮影者の効き手側を鮮明に撮影する。

手話の語彙撮影では、日本で使われているなるべく多くの語彙を収集して、その語彙構成のメカニズムの解明などの言語資源とするため、映像のみの収録による KOSIGN Version 4 とモーションキャプチャデータと映像の同時収録による KOSIGN Version 5 の2種類の分類方法・収録方法の検討を行った。撮影語彙の選定は、手話母語者、手話辞書編纂者の協力により行った。



#### 4.2 KOSIGN Version 4

純粹に言語資料としては、正面と側面の映像があれば十分である。この方式で撮影する語彙は、現在市販されている私たちの手話シリーズを基に、同動作異義語を除き 3,632 語彙を抽出した。図 2 を用いて、撮影を行った。手話者は、日本語対応手話使用者で、インテグレーション教育を受けた先天性聴覚障害者とした。

なお、図 3 に撮影風景を示す。

#### 4.3 KOSIGN Version 5

手話の認知機構の解明には、映像データのみではなく 3 次元の動作データの収集も必要になる。撮影候補語彙は、日本語手話の語彙を中心として一部の同動作異義語を含め 4,379 語彙とする。撮影環境としては、図 2 も用いた様式に、光学式モーションキャプチャシステム VICON MX-40 の 12 台構成が推奨される。手話者は、手話母語者の CODA である。

なお、図 4 にモーションキャプチャによるデータ収集を行うための実際の環境を示す。

### 5. おわりに

本稿では、手話の言語学的な特徴の解析、ニメーションの生成や認識などの工学的応用を目指した弁別の特徴や形態素レベルでの記述 sIGNDEX V.3、および KOSIGN Version 4&5 の収集法について述べた。

今後は、収録データを解析することにより sIGNDEX V3 の記述能力を評価する。

謝辞 本研究のデータ収集にご協力をいただいた諸氏に感謝する。また、本研究の一部は、SCOPE の平成 20 年度採択課題によるものである。

#### 参考文献

- (1) 神田 編：基礎からの手話学，福村出版(2009/6 出版予定)。
- (2) 長嶋，神田：手話のコンピュータ処理，電子情報通信学会誌，Vol. 84, No. 5, pp. 320-324 (2001)。
- (3) 小田 他：手話単語の造語形態に関する一考察，国立特殊教育総合研究所研究紀要 第 11 巻，pp. 45-51(1984)。
- (4) 長嶋：手話研究への情報工学的アプローチ，月間言語，大修館書房(2009 年 8 月号掲載予定)
- (5) HamNoSys Version 4 :  
<http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/projects/hamnosys.html>
- (6) SignWriting: <http://www.signwriting.org/>。
- (7) Daisuke HARA, Kazuyuki KANDA, Yuji NAGASHIMA, et al. : Collaboration between Linguistics and Engineering in Generating Animation of Japanese Sign Language the Development of sIGNDEX Vol.3, 9th European Conference for the Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe, pp.261-264, 2007.
- (8) K.Kanda, A.Ichikawa, Y.Nagashima, et al. : Signdex V.1 & V.2 The Computerized Dictionary of Japanese Sign Language, Proceedings of TISLR 7, 195(2000).
- (9) K.Kanda, A.Ichikawa, Y.Nagashima, et al. : Constraints on co-occurrence of manual and non-manual operations in JSL, Proceedings of ICITA2002, pp.1-5(2002).
- (10) sIGNDEX HP:  
<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwc1015/sigsile/http>

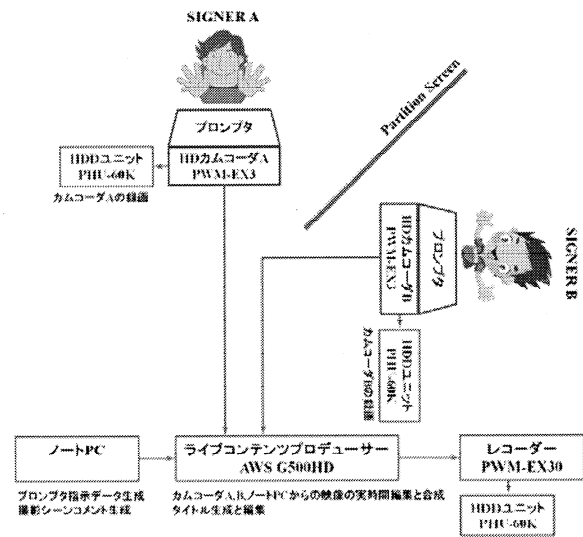


Fig.2 : Recording and the editing system of JSL

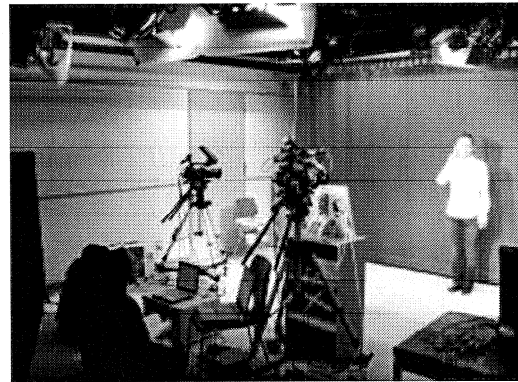


Fig.3 : Appearance of recording of KOSIGN Version 4

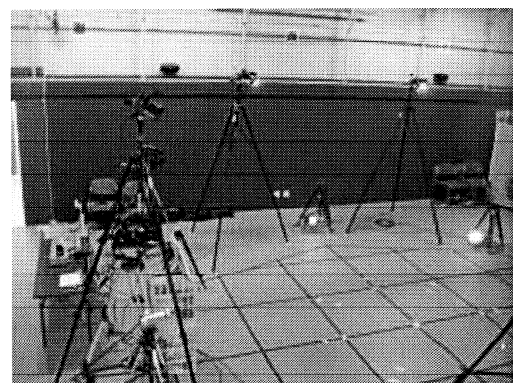


Fig.4 : Appearance of recording of KOSIGN Version 5

4. 総合研究所一般研究報告  
(個人研究)



## 憲法制定過程の研究

工学部・共通課程・教授  
長谷川 憲

本年度は、表記の課題に関連する以下の領域に関して研究を進めた。

第1に、憲法制定過程に関する研究として次の研究を行った。

フランス第二共和制初期に成立した憲法制定議会の議員に関する研究を、1848年11月に Victor Lecou 出版から発行された『Biographie Impartiale des Repeentants du Peuple a l' Assemblée Nationale』に基づき、当時の議員の伝記的傾向に関する研究を進めた。

第2に、比較憲法学の領域で次の研究を行った。

人権論に関する領域で、ジェンダーバイアスと女性の人権に関して、パリテ(Parite)制度の歴史的社会的役割に関する研究を進めた。また、家族制度に関して、伝統的な国家および社会の基礎として家族を位置づける社会感から変化に関して、相続制度・連帯市民契約(PACS)などの意味についての研究を進めた。

第3に、社会制度と国家制度に関連して次の研究を行った。

民主主義論に関する研究を進めるとともに、フランスにおける Social 概念について引き続き検討を進め、社会保障・社会給付・生活保護制度との関係性について、歴史的・比較制度論的研究を進めた。

第4に、地方自治、地方制度および地方制度改革に関連して次の研究を行った。

1995年に制定された合併特例法、とりわけ合併特例債の効果として1999年3月末に3232存在した地方自治体は、2009年度末には1770程度まで半減する模様である。その結果、市町村事務の効率化が進められ、公役務の外注化やPFI制度の採用が進められ、市町村長および市町村議会議員数は激減するとともに、市町村区画は拡大化し、住民と役場との距離感の拡大が指摘されている。そのような現状を含め進められた平成の大合併の現状とその市町村への影響に関して現状分析を行った。また、まちづくりにおける住民参加の現状と特徴についての研究を進めた。

研究成果：上記研究の詳細については、共通課程研究論叢第46-1号「最近の日本における民主主義の諸問題」、共通課程研究論叢第46-2号「1848年におけるフランスの国民議会議員(1)」、立命館法学第320号「フランスにおける女性の人権の進展について」、「Les Problemes des Dernieres Reformes des Collectivites Locales au Japon」(『VIIeme seminaire franco-japonais de droit public : Les mutations contemporaines de la democratie』, Monediteur.com)を参照されたい。

## 日本における地方金融界の変遷に関する研究

共通課程 教授  
吉田 賢一

明治 10 年（1877）ごろから銀行システムの本格的な導入をみたわが国では、その後の 20 年間に国立銀行 153 行をはじめ、普通銀行・貯蓄銀行をあわせ 2,000 を超える銀行が設立された。まさに「濫設」であるが、大方は弱小かつ縁故性濃厚の銀行群で、基盤はきわめて脆弱であった。それが、大正 9 年（1920）の反動恐慌、昭和 2 年（1927）の金融恐慌、同 5 年（1930）の昭和恐慌という一連の危機、資本金の最低額を盛り込んだ『銀行法』の施行、さらに金融当局（大蔵省と日本銀行）による強力な合同政策（合併・買収の誘導・慫慂）によって「多数小規模銀行体制」から「少数大規模銀行体制」（「多数小資本体制」から「少数大資本体制」）へと移行、金融システムの基盤は昭和 10 年（1935）ごろにおいてようやく堅固なものとなった。

1868 年に維新を実現した近代日本（新興資本主義国家としての大日本帝国）は明治 28 年（1895）に日清戦争に勝利して賠償金 2 億テールを獲得、同 38 年（1905）には日露戦争にも勝利、さらには大正 3～7 年（1914～18）の第 1 次世界大戦による軍需景気をへて急膨張をとげたのであった。しかしながら、前述した大正 9 年の反動恐慌、同 11 年（1922）の銀行恐慌、同 12 年（1923）の関東大震災、金融恐慌および昭和恐慌などによって、あたかも坂を転がり落ちるように、破滅への道を歩んでいった。要するに日本資本主義は、日清戦争以来の四半世紀に得たもの（膨大な富）を、反動恐慌以降の四半世紀において早急に食い潰し、大戦の敗北によってその一切を失ったのである。

では、このようなマクロ的全国状況の中で、各地方金融界の中枢に位置するミクロ的主体としての諸銀行はどのような役割をになったのか。前述した一連の危機・法制・政策によって安定的な「少数大規模銀行体制」となった金融界にさらなる変化を強いたのは、二・二六事件後まもない昭和 11 年（1936）5 月に馬場鑣一蔵相（広田弘毅内閣）によって公表されたいわゆる「一県一行主義」であった。これは各地方金融界の安定と発展の都合上、東京と大阪はともかく爾余の 45 道府県のそれぞれにおける地元銀行は 1 行ないし 2 行が望ましいとしたもので、事実上かつ暗黙的な合同の強要であった。

これ以来、各地方の有力地元銀行は、大蔵省や日本銀行の局長クラスを頭取や重役に迎えつつ弱小銀行群を片っ端から吸収・併呑し、規模を急速に拡大していった。それだけではない。勝ち残った地元銀行は、中央政界による傀儡的な国債消化機関への転化を強いられることになった。つまり、政府債券（主として国債）を買い入れ、預金として集積した地元資金を中央に放出し軍需産業へと注入、総動員国家への奉仕機関となったのである。

本年度は以上のプロセスを、戦前における道内金融界の動態を中心に研究した。

## トップクォーク生成過程に関する高次補正

共通課程 教授

加藤 潔

トップクォークの生成の詳細を調べることはLHCあるいは将来のILC実験において重要であるが、その際、高い精度の実験と理論を比較するためには、高次補正を入れた理論的取り扱いや、関連するバックグラウンドの研究が不可欠である。この研究ではトップクォーク生成チャンネルと関連するチャンネルのQCD補正について検討するが、必要な場合には、電弱補正についても検討し、それから得られる物理について研究するとともにイベント・ジェネレータを作成し実験データの解析に資するものとした。

最終的なアウトプットとしては、QCDの理論としてみた場合に精度が良く、かつ実験データの解析に適した形のイベント・ジェネレータが、主要なプロセスについて作成されることになる。LHCの場合、具体的には、実験的な優先順位も考慮して（Tは反tクォーク），

$$pp \rightarrow tT, tTj, tTjj, tTH$$

などのQCD補正を含めたイベント・ジェネレータの作成をターゲットとして考えている。

上記で「tT」とは、単純過程ではなく、tTのツリー、tTのループ、tTjのツリーを加えて質量特異性を処理し、高次補正も含めてパートンシャワーに接続するという意味である。さらにツリーレベル（+必要な補正）でtの崩壊過程について扱う内容も含むという意味である。

ILCでの対応するプロセスについても同様である。さらに、これらの成果を踏まえ、可能なQCDのバックグラウンドについて検討を行っていきたい。

この目的を実現するためにはいくつかの段階を踏む必要があるが、本年度は、トップクォーク生成過程のNLO行列要素の計算のために必要な、質量を含むQCDダイアグラムのループ積分の次元正則化法によるライブラリについて基礎的な計算やコード開発を行った。

また、このようなライブラリはSUSY-QCDの計算にも利用できるのでgluinoの崩壊過程の電弱補正を行っているグループと協力し、そのSUSY-QCDの1ループ補正についても準備研究を行った。

今後は、質量特異性の処理がきちんと機能していることを確認しつつ、効率の良い具体的な断面積の計算などが課題となっている。

[関連する研究報告] Methodology of Computations in Theoretical Physics -Summary-, ACAT2008 (XII International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research) 2008/11/07

# 大学院教育における数式処理の利用

共通課程(数学) 教授

牧野潔夫

この報告書は工学院大学工学専攻科の『応用関数解析特論』の講義で数式処理ソフト maxima を利用した内容の報告である

講義について

内容は直交多項式の一般論と直交多項式による関数近似（いわゆる Lagrange 補間）および近似多項式を積分してもとの関数の積分の近似積分を求める。いわゆる Gauss 型近似積分を扱っている。この分野は線形代数学と微分積分学が融合し、数学の内容も計算もそれほど難しくないので、数学に興味を持つ学生（院生）に適度な題材であると思われる。講義対象は電気系、機械系の大学院生（1年生が多い）で期間は半期である。この講義における数式処理の利用は以前から行っていたが、気が向いたとき計算例を示すにとどまっていた。2年ほど前から系統的に教材を作り始めた。講義で例示するものは demo ファイルで作ってあるが html ファイルで作ったほうが使いやすいので現在書き換えている。

講義内容詳細

1. 計量ベクトル空間の概要 ¶newline
2. (一変数) $n$  次多項式のなす  $n+1$  次元ベクトル空間とその計量
3. 正規直交基底の存在とその計算法。
4. 具体的な計量に関する正規直交基底。
5. 直交多項式の様々な性質。  
Rodrigues の公式、直交性、漸化式、微分方程式
6. Christoffer-Darboux の公式¶newline
7. 直交多項式の根の性質と近似解法
8. Lagrange 近似¶newline
9. Gauss 型近似積分¶newline
10. 直交多項式が満たす微分方程式¶newline
11. 母関数¶newline
12. 詳しい計算例

以上の内容で数式の計算や漸化式などを数式処理ソフト Maxima で例示した。また講義の課題（必ず手で計算するようにと指示）の答え確認にも使うようにこのソフトを配布した。その結果昨年より課題提出数が増えたように思われる。

これからの課題として計算例の増加と改良をさらに続けたい

## 非線形拡散の退化特異性に起因する数理現象の研究

共通課程 准教授

竹内 慎吾

常微分方程式論で有名なロジスティック方程式に対して、対象となる個体の空間に関する拡散効果も考慮した偏微分方程式がフィッシャーにより考案された(1927年)。これを拡散ロジスティック方程式、またはフィッシャー方程式という。平成20年度は、 $p$ ラプラス作用素を拡散項とする拡散ロジスティック方程式(の定常問題)について、解がある領域上で環境収容力と一致するためには環境収容力が $p$ 調和であることが必要十分であることを空間1次元の場合に証明し、論文が受理された: *Differential and Integral Equations* 22 (2009), 587-600. 非定数関数との一致集合が存在すればその上で $p$ ラプラス作用素に退化特異性が現れないのでは $p$ ラプラス作用素とみなせるので、前年度に得られたラプラス作用素の場合に関する結果から考えると、それがゼロであり同時に反応項が特異性(非リプシッツ連続性)をもちつつゼロになれば、一致集合が存在すると予想される。この論文ではそれを肯定し、数箇所での研究発表を行った。 $p$ ラプラス作用素に関して非定数関数との一致集合が研究された例は、例えば障害物問題では広島大学の坂口茂氏の研究があるが、単なる境界値問題では本研究が最初であると思われる。 $p$ ラプラス作用素のような非線形作用素では解と環境収容力の差を評価することが困難になるが、(一致集合が存在するための必要条件である)環境収容力が $p$ 調和であることを活かして、一致集合の存在を結論付けることに成功した。

空間多次元の場合のこの問題は1次元の場合と異なり、解の勾配に関する有界性評価を得るのが困難で、小さい進展はあるものの解決するには至らなかった。有界性評価が得られたとしても、1次元のときにもちいた Diaz-Veron の局所エネルギー法に基づく証明はある範囲のパラメータにのみ適用可能であることがわかってきた。これは局所エネルギーに現れる境界積分を評価する際、1次元では境界積分が境界値の和となりイェンセンの不等式が適用できるが、多次元ではそれに相当する不等式はなくヘルダーの不等式に依らざるを得ないことに起因している。

本研究費で購入した数式処理ソフト Maple は特に、上記の多次元の場合に現れる、パラメータの範囲を考察する際に役に立った。



## ナショナリズムと身体政治学—ハワイ日系人のベースボールを事例として

工学部共通課程 講師  
森 仁志

本研究では、第二次世界大戦後初の外国人プロ野球選手として日本球界で活躍したハワイ出身日系二世ウォーリー・与那嶺を事例として、日米の国境を越える身体的な実践を通じたアイデンティティの構築プロセスについて考察に取り組んだ。とりわけ、アメリカで身につけた未成熟なベースボールの技術を資本として日本にやってきた与那嶺が、日本の選手の技を盗み模倣する中で、チームメートやメディアやファンによって彼の身体／技法がどのような意味を与えられ、自らはいかなるアイデンティティを構築していったかに焦点を当てた。

具体的な調査内容としては、新聞や雑誌や書籍等の複数の資料を用いて多様な文脈での与那嶺の語りや発言を収集することはもちろん、ハワイあるいは日本で与那嶺と同時期に活躍した経験のある人物の自伝やライフヒストリー資料等も使用し、間主観的かつ重層的に与那嶺の経験を描き出す作業に取り組んだ。

与那嶺の経験を具体的に読み解いていくと、チームメートの日本選手を模倣することによって日本人としての技法を身体化する、すなわち「他者」に完全に同一化することによって「自己」と「他者」の壁を突き崩し自他の一元化に成功したというようなかつての同化主義を連想させる実践はむしろみえてこない。しかし一方で、「他者」を模倣する過程では、必然的にかつての「自己」も不安定化し変容を余儀なくされるために、境界をまたいで身につけた複数の区分け可能な「自己」を文脈に応じて自在に使い分けるといったような文化多元主義の理念に典型的な物語もみえてこない。ホーム＝ハワイを旅立ち日本で模倣すなわちミメシスを実践した与那嶺の身体は、日本人からの絶え間ない差異化の視線と同時に、ホームからのまなざしによってもかつてと同じものとして存在することを許されず、それらの介在的な他者の視線は自己の視線と分かちがたく絡み合いながら、間主観的に与那嶺自身のアイデンティティを構築していく。一元化と多元化の双方の力学にさらされながらもそのどちらにも回収されえない、あえて口語的な表現を用いれば、与那嶺の「ためらい」がちなアイデンティフィケーションは、(ナショナルなまなざしから完全に解放されるわけではないにせよ)「私」と「国家」の必然的な結びつきを揺さぶったという意味で、ナショナルなものを「脱白」する実践であったことが示唆される。

以下、本研究の成果を提示する。

1. 「ベースボール／野球を実践する身体とアイデンティティ—ウォーリー・与那嶺を事例として」ハワイ研究会第23回研究会、2008年11月。
2. 「越境する身体／技法—ウォーリー・与那嶺のミメシスする身体へのまなざし」日本スポーツ人類学会第10回大会、2009年3月。
3. 「ミメシスする身体へのまなざし—ウォーリー・与那嶺のダイヤモンドの旅とアイデンティティ」『スポーツ人類学研究』（査読中）

# 江戸時代関東農村における剣術流派の存在形態に関する基礎的研究

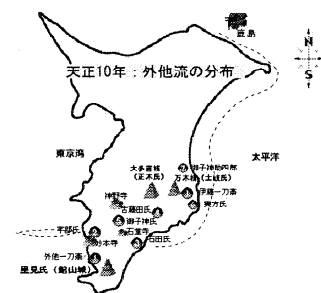
## ～外他流を中心として～

共通課程（保健体育科）教授  
数馬広二

外他流は富田流の鐘捲自斎の流れをくんだ中世の総合武術で、近世の一大剣術流派「小野派一刀流」の祖型、と位置づけられる。本研究では、今の千葉県（安房国、上総国）における外他流の伝播の様子につき、以下の5点を明らかにした。



実方家文書 天正10年（1582）「印可極意高上之巻」



天正10年 外他流の伝播

- ①石田家・実方家外他流文書の内容について：「五点」「殺人刀、活人剣」「卍」など、一刀流の源流として位置づけるに十分の共通術語が文書中に確認される。また、神前儀式や神饌など、きわめて中世的な兵法を表していた。
- ②外他流の相伝制度について：外他流は、天正年間当時、免許者に伝授の権利を付与する「完全相伝制」に移行していた。
- ③御子神氏について：御子神氏は里見家臣「百人衆」の一人であり、一家に作刀技術をもった鍛冶もいた。御子神家の一人、御子神助四郎（典膳）は上総国・万木城の土岐少弼の家臣となり、万木城を訪れた伊藤一刀斎から外他流を学び、実方与五右衛門に伝授した。
- ④里見家の水軍と外他流について：石田家文書および実方家文書には、里見家の水軍が水上戦で用いた武器（熊手、長刀、突く棒、さす又など）が記される。外他流は、これらの武器教習を含む兵法（総合武術）であった。
- ⑤中世兵法としての外他流流：外他流の技法は、戦国期の総合武術であり、剣一本の教習で成り立った近世剣術流派へ分化する前段階の中世的兵法であった。中世兵法の身体技法から近世剣術へ移行は、剣一本における技法や心法がより深化する始点でもあったともいえよう。

## 砕氷船の航行時安全性評価技術の開発及び実験的検証

機械工学科 講師

金野祥久

本研究は、砕氷型船舶の性能および安全性を数値解析によって評価する手法を開発することを目的とし、特に小氷片密集水路 (brash ice channel) 航行時の状況を数値解析により模擬することと、そのときの船舶の抵抗を評価することに焦点を当てて研究した。

本研究では、これまでに我々のグループが開発してきた物理ベースモデリングに基づく解析手法を、模型船型の brash ice channel 中抵抗評価に適用している。これに伴い、氷片に作用する流体力を評価する方法の検討、氷片同士の摩擦係数の検討を行ったほか、解析の大規模化を実現するためのプログラムの開発、改造を行っている。

本研究の成果として、本研究で開発した解析手法が多数の衝突を伴う現象の解析に適用可能であること、チャンネル中抵抗を評価できることが分かった。また数値解析により得られたチャンネル中抵抗の傾向が氷海船舶の代表的な船級ルールである Finnish-Swedish Ice Class Rules (FSICR) の抵抗評価式と一致するという結果を得ている。ただし、模型スケールの結果から 3 乗則を用いて推定した実船スケールのチャンネル中抵抗が FSICR の抵抗評価式による評価よりも 2 倍程度大きいことから、抵抗の絶対値を過大評価していると思われる。これを改善する方法として、氷片サイズや分布、摩擦係数の適切な設定、流体力の評価の改善、実船スケールの数値解析などについて検討している。これらを改善することにより、FSICR が求める、抵抗評価式よりも「より正確な計算」(more exact calculations) を提供できるようになると考えている。

本研究では氷片と流れ場 (海水) との相関解析にも取り組んだが、現時点では報告すべき成果を得ていない。また解析規模はこれまでよりも大きくなっているとはいえ、まだ実海域の状況を模擬するには至っておらず、このため現在の解析条件が適切か否かの判断も行えない。これらは今後の課題として残されている。

本研究の成果は下記の論文にて発表している。

1. 金野祥久ほか 9 名, 砕氷船の性能評価を目的とした船体周り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 第 8 号 (2008), pp. 99-106.
2. 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 (投稿中) .
3. 金野祥久, 吉本和弘, 小氷片密集水路を航行する船舶にはたらく氷荷重の物理ベースモデリングによる評価, 日本船舶海洋工学会講演会講演論文集 第 6 号, (2008), pp. 147-150.
4. Akihisa Konno, Numerical simulation of ship navigation in brash ice channels (Second report: effect of size and layer number of ice pieces), Proceedings of the 24th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (2009), pp. 35-38.

# レオロジー制御を利用した摺動部材用ナノカーボン充填

## 多元型ポリマーブレンドの創製

機械工学科 講師  
西谷要介

高分子材料は自己潤滑性などの優れた特性を有するため、歯車や軸受など多くの摺動部品に使用されている。最近では、機械の小型化や高性能化がより一層進んでおり、ナノサイズの充填材を用いた高分子系ナノコンポジットをベースとした高性能な摺動部材の開発が望まれているが、摩擦摩耗特性や機械的性質などの相反した要求性能に对应されていないのが現状である。それらの問題点を解決するためには、ナノサイズの充填材の分散技術の確立および系のレオロジー的性質を明らかにし、それらを積極的に活用した成形加工技術の確立が必要である。

本研究ではレオロジー制御を積極的に活用し、フィラー分散技術およびポリマーアロイ技術を併せることにより、摺動部材として適するトライボロジー特性や機械的性質を付与したナノカーボン充填ポリマーブレンドの創製を目的として、摺動部材用ナノカーボン充填多元型ポリマーブレンドを開発検討した結果を報告する。具体的には、結晶性熱可塑性樹脂をベースとし、熱可塑性エラストマーを分散させた多元型ポリマーブレンドをマトリックス材とし、ナノカーボンファイバー (CNF) を充填材とした複合材料について、系のレオロジー特性を積極的に制御することにより、CNF の分散位置や配向だけでなく、ブレンド材のナノ分散構造を発現させ、摺動部材に適した性能を有する新規な複合材料を開発するために必要なレオロジー的性質および成形した複合材料の構造を観察したものである。

ナノカーボン充填多元型ポリマーブレンドのレオロジー的性質について平行円板型粘度計を用いて評価した熔融状態の動的粘弾性、また SEM などを用いたモルホロジー観察を中心に検討した結果、次のことを明らかにした。

- ・ TPE 添加および官能基の種類、CNF 充填量により粘弾性的性質が変化すること
- ・ 粘弾性的性質に及ぼす官能基の影響は、エポキシ基 (SBS-EP) > アミン基 (SBBS-NH<sub>2</sub>) > 水酸基 (SEEPS-OH) の順であること
- ・ レオロジー的性質に及ぼす影響は、TPE 分散相形状による影響よりも、CNF 充填量や官能基の種類による影響が支配的であること
- ・ 配合順序 (CNF や TPE などの投入時期) の違いがモルホロジー変化に及ぼす影響が大きいこと

### 研究業績

- 1) 西谷要介, 他, 成形加工シンポジア vol.2008, 239-240, 福井大学, 福井
- 2) Yosuke Nishitani, et.al., "Effects of Addition of Functionalized SEBS on Rheological, Mechanical and Tribological Properties of Polyamide 6 Nanocomposites", Polymer Engineering and Science, in print
- 3) 内藤貴仁, 西谷要介, 他, "気相成長炭素繊維充填 PBT 複合材料の機械的およびトライボロジー的性質に及ぼす熱可塑性エラストマー添加の影響" 成形加工 (投稿中)

# 光照射分解及び気液分離を用いたシアン化物イオンの

## 定量テープ式測定法の開発

応用化学科 教授

長島 珍男

水道水中の残留塩素分析用試薬として DPD(Diethyl-p-Phenylene-Diamine)が長く使われているが、DPD が普及する前は、o-トリジンが使われていた。o-トリジンは発癌性が高いという理由でその代替品として 1978 年頃から米・英両国に続き、日本(厚生省環境衛生局)でも発がん性の低い DPD が残留塩素分析試薬として公定分析法で使われるようになった。この DPD は塩素によって酸化され、赤色( $\lambda=510\text{nm}$ )を呈することから、この赤色濃度を吸光光度定量することにより水中の残留塩素濃度を知ることができる。呈色反応は迅速でかつ良好な再現性であることから広く用いられていた。長島はこの DPD の酸化呈色反応を利用して、大気中の塩素ガス定量用のろ紙について検討した。つまり DPD 等の発色試薬を含んだろ紙に、一定量の試料ガスを通気・反応後、ろ紙上の呈色程度を反射吸光度の測定により塩素ガスの濃度を測定するものである。定量用ろ紙を作製するには、ろ紙の材質(シリカゲル混和の多孔性酢酸セルローステープが最適であった。)及び発色液中の溶液組成(テープ上で定量的な化学反応を進めるためには保湿剤が必要で 16%グリセリン-メタノール溶液が最適であった。また、グリセリンはろ紙表面での光乱反射を防ぐ効果もあった。)の詳細な検討が必要であって、試料ガスの流量、通気時間、測定濃度範囲等の最適条件を検討した。

一方シアン化物イオンは、Cu(Ⅰ)と安定度定数の高い錯体を形成することから Cu(Ⅱ)と Cu(Ⅰ)が共存する反応場にシアン化物イオンが添加されるとその量に応じて Cu(Ⅱ)の酸化力が増し、添加したシアン化物イオンの量に応じて DPD が酸化されることを見出しシアン化水素ガス定量ろ紙を開発した。シアン化物イオンを定量する場合は、試料に硫酸を加え酸性にすることによりシアン化水素とし多孔性テフロン管を用いて気液分離後定量ろ紙に通気・捕集した。DPD 酸化体の呈色度は同様に反射吸光度測定により数値化した。

DPD と比べて発癌性が 1/300 と低く、空気酸化に対する安定性も約 10 倍高く、さらに、発色強度を示すモル吸光係数が約 2 倍という優れた化合物、SBT が 2003 年に他の研究者により合成された。

SBT とは N,N'-bis(2,4-di-sulfobenzyl)tolidine tetrasodium salt の略で、DPD の残留塩素測定用代替化合物として合成され、その後市中に販売されてきた。開発費等が加算されていることもあって、10g 当たり 67,000 円と高価であるが、DPD の代替化合物として今まで行ってきたシアン化物イオン定量ろ紙の改良に大きな期待が持てると判断し、新たな研究テーマとして取り上げた。SBT は DPD と同様に塩素によって酸化され呈色( $\lambda=675\text{nm}$ )する化合物なので、DPD と同様の手法、取り扱いで検討ができると考えた。その結果、開発した定量ろ紙の保存性は大幅に改良され、水中のシアン化物イオンに対する検出下限は  $10 \mu\text{gCN/L}$  となり、DPD を用いた定量ろ紙と比較してほぼ 1 桁改善された。感度は工場排出基準値 ( $1\text{mgCN/L}$ )の測定に十分対応できるものであった。

## 気生微細藻類による抗酸化物質の生産および 天然由来機能性添加物への応用

応用化学科 准教授

阿部 克也

気生微細藻類は、陸上の岩や樹皮表面などに着生し、直射日光、温度変化や乾燥などの比較的厳しい環境下にさらされているため、生命維持のために特殊な生体防御機構を持っている可能性が高いと考えられている。また、その様な環境下では栄養細胞から休眠細胞（シスト細胞）に変化し、細胞内のカロテノイドを著しく蓄積する現象が見られる。カロテノイドは、光合成系における光化学反応の増感剤として機能するだけでなく、活性酸素から細胞を保護する機能（抗酸化作用）を有することから食品・医薬品または化粧品などへの応用が期待されている。気生微細藻類は、細胞内のカロテノイド濃度が増加するに伴い緑色から橙色に変化し、その色彩には細胞の種や条件によって違いを示すことが分かっている。本研究では気生微細藻類による抗酸化物質の生産および天然由来機能性添加物への応用に関する研究の一環として、山岳地帯や海岸地帯から単離した3種の気生微細藻類に含まれるカロテノイドの組成差について比較・検討し、さらに細胞成分の抗酸化作用について評価した。

気生微細藻類は栃木県湯西川、山梨県小菅、および静岡県下田の岩場表面から採集・単離し、それぞれ湯西川株、小菅株、および下田株とした。藻株は液体培地において光を照射することによって通気培養した。細胞内カロテノイドの分析はHPLCを用いて行った。

今回用いた気生微細藻類（湯西川株、小菅株、および下田株）は、シスト細胞においてアスタキサンチン、アドニキサンチン、ゼアキサンチン、カンタキサンチン、 $\beta$ -カロテンを含んでいることが分かり、それぞれの藻株においてカロテノイドの組成差が見られた。特に、湯西川株は非常に高い抗酸化作用を示すアスタキサンチンとアドニキサンチンを比較的多く含有していることが分かった（総カロテノイド含有量：約90 mg/g dry weight cells）。次に、湯西川株のシスト細胞成分の抗酸化作用について評価した。この結果、シスト細胞は人為的な酸化ストレス条件下においても活性酸素濃度が低く維持されることが認められ、この抗酸化活性は以前に報告された氷上藻類 *Haematococcus* とほぼ同様であった。また、アドニキサンチンについては高級脂肪酸がエステル結合したものが多く存在していることが分かり、それは自然界における細胞の耐久性を高めるために重要な役割を担っていると考えられる。今後、気生微細藻類由来カロテノイドは、色素特性や安定性などを評価することで食品・医薬品または化粧品などへの応用が期待される。

## ミジンコの蛍光ビーズ摂取量測定による迅速毒性評価

環境エネルギー化学科 准教授

釜谷美則

これまで筆者は、ミジンコを用いて様々な物質の毒性評価について検討してきた。公定法で用いる 24 時間遊泳阻害試験法は、その測定に 1 日以上要するため、迅速に毒性評価するのに適していない。そこでミジンコの腸内に取り込まれる量を測定することで迅速毒性評価を試みた。試験に供する子ミジンコは、腸内を通過する時間がほぼ 30 分程度であるため、この時間以内で試験できる利点がある。これまでクロレラ、蛍光標識クロレラ、さらに蛍光標識酵母を用いて検討してきた。しかし、これらの物質はそれらの再現性のある保存状態を作ることや腸内での分解や吸着等に問題があった。そこで、生体への付着が小さく、取り込み量を感度の高い蛍光法で測定でき、さらにビーズサイズが均一である蛍光ビーズを用いることにした。これまでの検討結果の中で蛍光ビーズのサイズが大きい  $2\mu\text{m}$  を用いると、腸内に取り込まれてからある間隔で強制的に押し出されているような傾向が見られた。そこで蛍光ビーズのサイズをより小さい  $0.2\mu\text{m}$  とすることでこれらの挙動は見られなくなった。ミジンコへの毒性対象物質はナノ粒子を使用することにした。ナノ粒子は、その優れた機能性から多くの産業分野で実用化されつつある。一方、影の部分としてその毒性が危ぶまれている。本研究では、比較的入手しやすいナノ粒子を選んでみたが、二酸化チタンやフラーレンなどでは、溶液にした状態で凝集が生じることや、水への不溶化などの問題があった。そこで、本学の一般共通科の渡部教授が手がけている金、白金および銀のナノ粒子を手始めに用い、これらの毒性評価を試みた。毒性の試験方法は、次の通りである。まず、ミジンコを 30 分間希釈水中で腸内にある餌を排出させた。次に希釈水中で貴金属のナノ粒子溶液に 30 分間ミジンコ暴露した。その後、ミジンコを蛍光ビーズ含有溶液に移し 30 分放置した。最後に、このミジンコを特性の網でろ過し、水で洗浄してからマイクロテストチューブに移し、ホモジナイズしてから蛍光測定した。毒性評価は、蛍光ビーズの取り込み量がコントロールに対して半分になる濃度として求めた。その結果、半摂取量濃度が金で  $1200\text{mg/L}$ 、白金で  $4.7\text{mg/L}$ 、銀で  $5.9 \times 10^{-9}\text{mg/L}$  となった。このように、金が最も毒性の低い結果となり、銀が最も毒性の高い結果となった。さらに、それらの毒性値は、3 桁から 9 桁ほどの差が見られた。しかし、これらの毒性値は、イオン状態のものがナノ粒子に付着していることやナノ粒子の凝集を抑えるための分散剤を無視した結果であることから参考の数値に過ぎない。しかし、銀イオンのみでの半摂取量濃度を求めたところ  $2.3 \times 10^{-5}\text{mg/L}$  と銀ナノ粒子より低い結果が得られた。このように、銀ナノ粒子の毒性がなぜ異常に大きくなったのか今後追究する。これに加えて、中国などの国ではヨウ化銀を雨水の核として利用していることから、ナノ粒子のみならずハロゲン化銀のミジンコへの影響も懸念されるので、雨水の環境への影響を探る意味で検討していきたい。

# 欠陥構造物質化学と欠陥物質材料の機能性 に関する研究

マテリアル科学科 教授  
門間英毅

1. 緒言:リン酸三カルシウム[Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, TCP]には、約1150℃以下で安定なβ相とそれ以上で安定なα相があり、それぞれ人工骨として応用されている。このような背景あるいは結晶化学的関心から、TCPのβ→α相転移に関する研究が活発である。β相はCa<sup>2+</sup>(*r*<sub>Ca</sub>=0.100nm)よりイオン半径の小さい金属イオンを固溶させると、相転移温度が上昇してβ相安定化に寄与する。その典型例はMg<sup>2+</sup>(0.072nm)であるが、Mg<sup>2+</sup>とほぼ同じ半径のZn<sup>2+</sup>(0.075nm)では、固溶量とTCP結晶相および格子定数変化に対する影響が一様でない<sup>1)</sup>。本研究では、このような欠陥構造を有するZn固溶TCPの特徴を検証することを目的とした。

2. 実験:Zn 固溶 TCP は、CaHPO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O-CaCO<sub>3</sub>-ZnO 系混合粉末( (Ca+Zn)=M として、M/P モル比=1.50 (一部実験では>1.50), Zn/M=0-30mol% )を 1000-1300℃、5 時間焼成・急冷して得た。結晶相同定と格子定数はXRDにより検討した。想定される欠陥構造組成は(Ca<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>)(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>である。(M/P>1.50 では、(Ca<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>)<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)のような欠陥構造 Zn 固溶アパタイトの一部生成も考えられる。

3. 結果と考察:各種 ZnO 配合比で得た Zn 固溶 TCP の結晶相は、1000℃と1100℃:すべてβ相、α相安定温度である1200℃以上:3mol%Zn配合比の場合はβ相+α相、6mol%Zn以上ではβ単一相、となった。すなわちZn固溶によってβ相の高温安定性が増すことを確認した。Fig. 1は種々のZnO配合比と焼成温度におけるβ相の格子定数変化(Δ*a*, Δ*c*, Δ*V*)である。*a*軸、単位格子体積*V*は、Zn配合比とともに直線的に減少し、15mol%以上ではほぼ一定値になった。一方、*c*軸は10mol%まで減少し、それ以後は増加する傾向を示し、Bigiら<sup>1)</sup>の結果(---)<sup>1)</sup>と一致した。1200℃以上、3mol%Znで観察されたα相の*a*, *c*軸および*V*に明瞭な変化は読み取れなかった。

M/P>1.50、1300℃でのTCPは、3-20mol%Znにおいて、すべてα相であり、TCPへのZn固溶によるβ相安定化はみられなかった<sup>2)</sup>。20mol%Zn添加焼成生成物においては、α-TCP+ZnO+アパタイトの生成を確認した。α相およびアパタイトへのZn固溶の有無は今後の課題である。

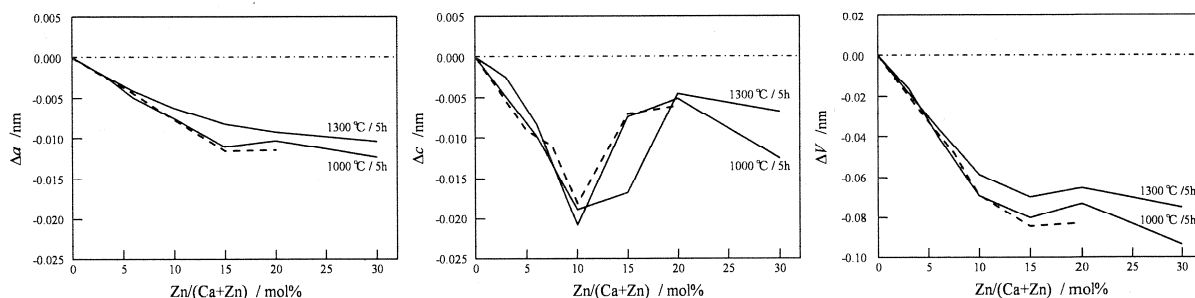


Fig.1 Relationship between lattice parameters of β-phase and Zn/(Ca+Zn) ratio. (---: 1000℃<sup>1)</sup>)

文献: 1)A.Bigiet al., *J. Inorg. Biochem.*, **66**(4), 259-265 (1997). 2)門間ほか, 第18回無機化学討論会, (2008).



# ナノ空孔構造材料をベースとする燃料電池用固体電解質の開発

環境エネルギー化学科 准教授  
大倉利典

## <背景と目的>

Silicoaluminophosphate (以下 SAPO) は、Si、Al、P の混合酸化物ネットワーク構造を持ち、これらの組成比により、骨格上に局在した過剰電荷を制御できる特徴を持っている。この電荷の制御により、燃料電池用の固体電解質に応用できると考えられる。本研究では Chabazite 型 SAPO (以下 SAPO-CHA) の組成比を変化させることで電荷の制御を行い、プロトンを包接させて導電率を向上させることを目的とした。

## <実験>

純水と、シリカ源にシリカヒューム、アルミナ源に水酸化アルミニウム、リン源にリン酸、構造規定剤にシクロヘキシルアミンを種々の割合で混合した。これに 47% フッ化水素酸水溶液を加えて攪拌したのち、180℃でオートクレーブ中に 8 日間静置して生成物を得た。得られた生成物を純水でろ過、洗浄して乾燥させた後、電気炉中 540℃で 24 時間仮焼した。仮焼後の試料を XRD、SEM、EDX、FT-IR で分析を行い、インピーダンスアナライザーで電気伝導率の測定を行った。

## <結果と考察>

他の仕込み組成比を変えずに、シリカの組成比のみを 0.2~1.1 (以下 0.2~1.1Si)、水酸化アルミニウムの組成比のみを 2.2~2.6 (以下 2.2~2.6Al) および、リン酸の組成比のみを 1.2~1.4 (以下 1.2~1.4P) まで振った SAPO-CHA を合成した。これらの XRD ピークより、組成を変化させても Chabazite 型の結晶構造が壊れないことが分かった。また SEM 像から菱面体晶系の SAPO-CHA を確認することができた。

図 1 はそれぞれの仕込み組成により合成した試料の組成比 (モル比) から Al/P 比を算出して示したものである。Al/P 比の値が大きいほど、その試料の負電荷が強いと考えられ、リン酸の仕込み組成を減らすほど、負電荷が強くなる傾向にあった。

導電率は測定温度を約 350℃まで上昇させたが、抵抗が大きいため導電率は測定できなかった。しかし、水蒸気雰囲気中で温度を変化させ測定した結果、1.1Si の試料にて約 75℃の時  $1.21 \times 10^{-5}$  [S/cm] の導電率を得ることができた。また他の試料も水蒸気雰囲気中で約 50℃の時に最も高い導電率となり、いずれも  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  [S/cm] オーダーの導電率が得られた。これらの試料は 50℃以上の温度になると急激に導電率が低下した。このことから、導電率の向上は SAPO-CHA の表面に吸着した水によるものと考えられる。

比較として骨格にリンを含まず、細孔内にアンモニウムイオンを含む仮焼前の Chabazite の導電率を測定した結果、温度変化のみ、および水蒸気雰囲気中で温度変化させたものは、共に  $10^{-5}$  [S/cm] オーダーの導電率となった。Chabazite は吸着水以外に、アンモニウムイオンがキャリアーとして関与しているものと考えられる。

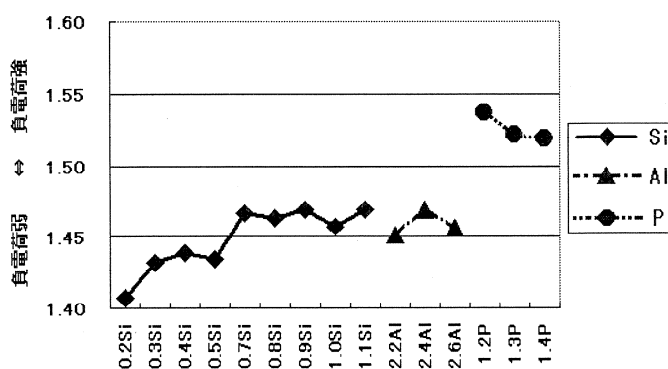


図1 合成したSAPO-CHAの組成比(モル比)から算出したAl/P比

# 顔画像による個人の認証並びに表情認識システムの構築

情報通信工学科 教授  
中村 納

## 1 まえがき

顔表情の認識等を目的とし、特に傾き顔までも認識の対象とした場合、顔領域の検出はかなり高い精度が要求される。しかしながら、実際は筆者らの経験からも光源の影響や背景の環境あるいは動きの状態等を考慮すると、この作業は必ずしも容易なものではない。以上のことから本論文では、単なる顔の検出ではなく、後に行われる表情認識を意識しながら如何に顔領域の抽出を正確でしかも安定に実施するかという観点から検討し、この手法について述べる。

## 2 顔領域の抽出

提案方式での顔領域の抽出は大きく以下の5段階で実施される。即ち、

- (1) 画像入力
- (2) 動領域の抽出
- (3) 肌色領域の抽出
- (4) 顔候補領域の抽出 (抽出領域の統合)
- (5) 顔候補領域の評価および判定

である。

### 2.1 画像入力

入力画像は、RGB 各色 256 階調のカラー画像で 30fps の動画像として入力される。図1に入力画像例を示す。

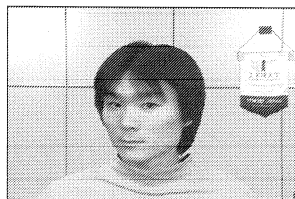


図 1: 入力画像

なお、本方式は画像サイズに依存する形でのしきい値の設定は行わない。即ち、画像サイズに関してはサイズフリーとする。

### 2.2 動領域の抽出

動領域の抽出はフレーム間差分を用いることで、比較的容易に人物領域の特定は可能と考えられる。しかしながら、ここで問題となるのは人物の動きが小さい場合、予め設定されたフレーム間隔でフレーム間差分をとってもその差分量は当然小さく、したがって動領域の特定が困難な場合があるということである。このため、動領域の抽出は、フレーム間の差分量に基づいてフレーム間隔を自動的に調節しながら行う必要がある。

### 2.3 肌色領域の抽出

従来から HSV 表色系は人間の知覚に比較的近いモデルで、顔領域の抽出に有効であることが知られている。特に、HSV 表色系の各成分のうち H(色相) 成分は照明などによる反射や陰影の影響を比較的受けにくいという特長を持つ。一般に顔は肌色領域が多く (特別に髭などを多く生やしている人は除く)、領域中の色相値はほぼ一定であると考えられることから、顔領域の抽出には非常に有効であるといえる。

### 2.4 顔候補領域の抽出

上記 2.2 および 2.3 の動き情報および色情報を用いた領域抽出の結果に局所的な処理を施し顔候補領域を抽出する。動領域および肌色領域の論理積をとり、それに基づいた処理を行い顔候補領域を抽出する。抽出結果を図 2 に示す。

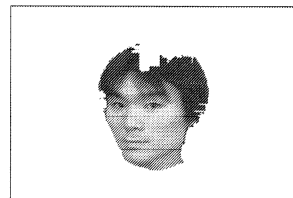


図 2: 顔候補領域

### 2.5 顔候補領域の評価および判定

上記 2.4 で抽出された領域は顔領域ではなく、まだ候補領域の段階である。ここでは、これら候補領域に対して以下の3つの観点から、顔領域としての適否の度合を評価する。即ち、

- 領域の円形度
- 領域の対称性
- 領域輪郭の平滑度

である。以上の評価結果を基に顔候補領域抽出の成否を判断し、3つの評価基準を満足した領域を顔領域として最終的に抽出する。

## 3 まとめ

本稿では、可変フレーム間差分および肌色の色情報に基づく顔領域抽出について述べた。差分をとるフレーム間隔を可変とすることで、人物に動きのあるときのみ顔領域を抽出し、動きの小さい場合は抽出処理は行わずに自動的に適切なフレーム間隔数とすることを実現した。

今後は、更なる各入力環境の変動に対する本方式の有効性を確認し、よりロバストな顔領域抽出方式を確立する予定である。

# 集積化 GaN 系面発光素子の製作検討

情報通信工学科 教授

本田 徹

**Abstract:** The reduction of reverse-bias leakage current in GaN-based Schottky diodes was investigated using an aluminum facepack technique, which resulted in a decrease in the reverse-bias current. The large reverse-bias current was reduced by the facepack technique. This is due to the mask effect of the facepack reducing the number of dislocation-related leakage current paths. The reduction leads to the enhancement of quantum efficiency in Schottky-type light-emitting diodes (ST-LEDs).

GaN 系集積型発光素子は、マイクロディスプレイなどへの応用が期待されている。これまでに高効率発光ダイオードが GaInN 系材料および量子井戸、pn 接合により実現されているが、製作コストの点からデバイス構造の抜本的改革が必要とされている。本研究ではショットキー型発光ダイオードに着目し、低コスト集積化応用およびその発光効率向上を検討してきた。本素子は、逆方向リーク電流が少ないことが、素子の動作原理上要求される。窒化物上に蒸着したアルミニウム薄膜の大気中酸化およびその大気中エッチング(AI facepack 法)により低リーク電流を実現した。これは、X線光電子分光法(XPS)および走査型電子顕微鏡(SEM)の観察結果から、窒化物薄膜の貫通転位(TD)直上周辺の表面改質が facepack 法により実現され、リークパスが低減したためと思われる。

ショットキー接合および素子製作に使用した  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  および GaN 薄膜は、分子線エピタキシャル成長法(MBE)によってサファイア基板上に製作したものである。Ga および Al 金属および RF ラジカル窒素源を使用した。成長には AlN バッファ層を使用し、膜厚は、約  $1\ \mu\text{m}$  である。Si ドープ n 型の薄膜であり、キャリア濃度は  $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$  である。この薄膜を使用してショットキー接合および ST-LED の製作を行った。まず、GaN 表面の大面积にオーミック電極として Al/Au を蒸着した。このとき、スクリーン印刷法およびリフトオフ法によって直径  $1\text{mm}$  の窓を形成した。次に窓の内側にショットキー電極として Au を直径  $300\ \mu\text{m}$  のドット状に形成した。図 1(a)に ST-LED の構造図を示す。また、ST-LED の金属・半導体界面に酸化 Al ( $\text{AlO}_x$ ) を導入することにより MOS-LED の製作を行った。蒸着した Al を大気中、 $450^\circ\text{C}$  において 30 分間アニールすることにより酸化 Al の製作を行った。今回、提案する「Al フェイスパック法」は、上記酸化物を一度、BHF を利用して酸化層を剥離してショットキー電極を形成する方法である。MOS 構造製作時には、さらにその後、Al を再蒸着、再酸化させ、酸化層の形成を行った。

$\text{AlGaIn}$ (Al 組成 10%)MOS-LED の室温における電流電圧特性の測定を行った。Al フェイスパックを施すことにより、逆方向リーク電流が 1/10 程度に減少していることがわかる。Au/ $\text{AlGaIn}$  ショットキー接合の場合も同様な傾向が観測された。MBE および MOVPE 成長した GaN 薄膜を利用したショットキー接合でも同様に逆方向リーク電流の低減が観測された。Al フェイスパック処理による逆方向リーク電流の低減の結果、 $\text{AlGaIn}$  薄膜を用いた MOS-LED のエレクトロルミネッセンス(EL)発光強度が飛躍的に改善した。

## 数値最適化に基づく制御系設計の可視化手法の研究

コンピュータ科学科 准教授

小西 克巳

本研究では、数値最適化に基づいた制御系設計を行うための可視化手法の研究を行った。現在では、 $H_2/H_\infty$ 混合制御問題や制御系と構造系の同時設計問題など、多くの実用的な制御系設計問題が、線形行列不等式問題(LMI)や双線形行列不等式問題(BMI)、パラメータ依存LMI問題といった数理計画問題に定式化されている。これらの問題を数値計算によって解くことで、解析的手法で設計が困難な様々な制御系設計が可能となる。しかし、一部の問題を除いて多くの問題は非凸最適化問題となり、簡単に解くことはできない。そこで現在では、分枝限定法などの厳密解法を用いるか、有限個の線形行列不等式(LMI)や線形制約によって凸包を生成し、凸最適化問題を解くことによって解を求める方法が提案されている。厳密解法の場合には、 $\varepsilon$ 大域解という誤差の精度が保証された解が得られるが、問題の規模に対して計算時間が指数的に増加してしまい、PID制御などの一部の設計問題を除いては、現実的な時間で解くことができない。後者の場合では、制御系設計条件の十分条件で凸包を生成した場合は解が保守的になりすぎ、必要条件で凸包を生成した場合は解の精度が保証されない近似解を得るという問題がある。そこで本研究では、数理計画法の制約式として与えられた制御系設計条件の解空間(実行可能領域)の可視化と、解探索過程の可視化を実現する手法の研究を行った。

本研究では可視化手法として多次元空間を2次元平面で表現する階層型マトリックスデータの可視化手法を利用した。これにより多次元空間であっても、2次元平面として表現でき、最適化問題における上界と下解をうまく表示することにより、どの領域にどの程度の解が存在するのかが把握できる。このような可視化を行うことで、制御系設計条件の必要条件や十分条件から得られる凸包の精度が視覚的な把握が可能になった。これにより、解の精度や解法の精度が理論的に示すことができない場合や、他の手法との比較が理論的には行えない場合でも、視覚的にその効果を確かめることができる。また、分枝限定法のような全探索手法の場合には、最適化計算途中で解空間(実行可能領域)のどの領域にどの程度の精度の解があるのかを直感的に把握することができ、アルゴリズムの終了条件を満たす前に、利用者(ユーザ)の判断で計算を停止させ、ユーザが満足し妥協できる解を得ることができる設計ツールを構築した。

# 脳情報通信技術による対話認知解析

情報デザイン学科 准教授

田中 久弥

## 1. はじめに

近年、インターネットの普及により、オンラインゲームや在宅勤務等により顔を合わせず、また、会話も行わずに文字だけのコミュニケーション手段で協調作業をすることが多くなってきた。このような協調作業には作業の共有、意識の共有、情報の共有の3つの共有が必要だといわれている。最近の研究ではこのようなインターネットを使用したコミュニケーション形態を調査する方法としてオンラインゲームを用いたプレイヤーの協調と競争の心理変化をプレイヤーの行動を統計的に解析している研究がある[1]。本研究ではオンラインゲームという顔を合わせない会話を遮断した状況での協調作業をさせた。3つの共有の内、意識の共有は協調度合いと考え、その生理指標としてRRI(瞬時心拍)を計測し、それを周波数解析することにより交感神経の活動にLF/HFを用いた。また、協調指標としてはプレイヤー切り替え数(キー回数)、心理指標には新性格検査を用いた。以上より協調と生理、心理の関係を調べていくことを本研究の目的とする。

## 2. 実験内容

本実験で用いる協調作業の“Platform”[2]はジャンプ、横移動、プレイヤーの切り替えの3つの操作で2人のプレイヤーが交互に操作しながらお互いに協力して仕掛けを解いてゲームを進めていく。本ゲームでの協調作業の目的としてステージを早くクリアすることを伝えた。このとき、意識の共有が必要となってくるものはステージに存在する仕掛けを解き最短経路という戦略を共有し、その経路を無駄なく移動するために行動を共有して移動できたとき本実験における協調が成立したと仮定する。このときの最短経路とはプレイヤーの切り替え数が最も少ない経路と同意であると言える。このことから本研究での協調の指標にプレイヤーの切り替え数(キー回数)を用いた。本実験では2人の被験者で、“Platform”を使用した協調作業を行い、プレイ中のプレイヤーのRRIとキーロガーによる操作ログを生理指標と協調指標を調査するために計測した。また、実験後にはロジカルシンキングテストを4問行ってもらった。尚、Platformの操作についてはプレイヤーの切り替えは受け渡し、奪い取りのどちらでも可能だが、最初に割り当てられたキャラクター以外を動かすことはできないこととした。実験を行うに当たって、お互いに会話ができない状況で行った。また、作業前の情報としてなるべく多くステージ数を行うよう指示し、作業中のプレイヤーに与える情報としては画面に相手のRRIを表示し、それ以外の会話などの戦略の情報のやり取りは遮断した。以上の環境で実験は20分間の間に、1~4ステージまたは1~3ステージを繰り返し行った。実験後に新性格検査を行った。

## 3. 実験結果及び考察

被験者は4組計8名の成人男性、年齢は19~24歳とした。実験結果は図1、図2に示す。図1より協調指数としているキーの回数はステージ数を重ねる毎に少なくなり、戦略と行動の共有ができ互いに協調していると考えられる。また、ス

テージ毎のプレイヤーのLF/HFを見ていったところ、ペア同士で同調する傾向が見られた。これはペア同士が同じ負荷に対して、同じような負担を感じながら作業を行っているからであると考えられ、このことからお互いに状況、考えを共有し、協調しようとしていると考えられる。ペア同士の性格の組み合わせと協調度合の関係は非協調性と社会的外向性の組み合わせでこの数値が上がるに連れて協調作業におけるが上がっているといえる。また、それ以外の組み合わせにおいても同じ傾向が見られるものが多数確認された。

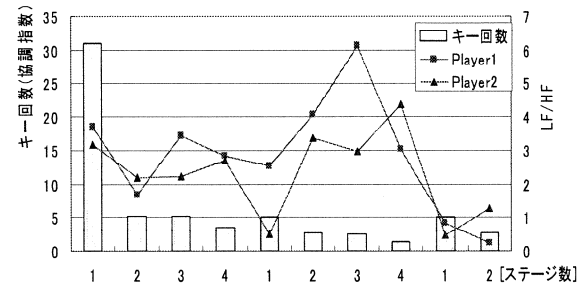


図1. ステージ毎の心拍 LF/HF 推移とキー回数の推移

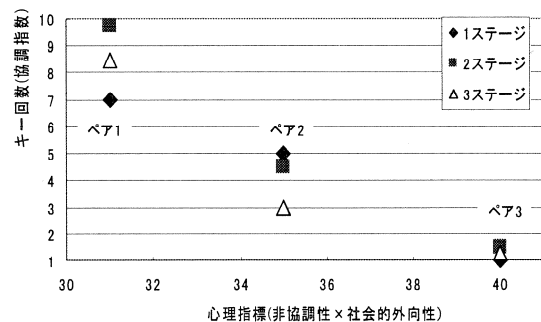


図2. ステージ毎の協調指数(キー回数)とペアによる心理指標(非協調性と社会的外向性)の関係

## 4. おわりに

今回の実験から意識の共有を LF/HF の同調で確認することができた。また、より効率よく協調作業を行うにはペアの非協調性と社会的外向性の組み合わせが起因していると考えられ、その傾向を見ることができた。今回の結果から確認できた傾向を今後は性格によるペアの組み合わせを指定した状態で実験を行い、さらに詳しく分析していきたい。

## 参考文献

- [1]YUAN Ruixi, ZHAO Li, WANG Wenyu “Cooperation and Competition Dynamics in an Online Game Community”: Lecture Notes in Computer Science
- [2]Platform - A weekly game:  
<http://www.platformthegame.com/level1.html>

# アンシアン・レジーム期における ソフト・パワーとしての王権建築とその様式伝播

工学部建築学科 准教授  
中島 智章

## 研究背景

建築は、文化、日常風俗、あるいは大きな事件の記憶と密接に結び付いているという意味で、そして、人々の様々な活動が常に関わる場ゆえにその共通の記憶を最もよく体現するものとして、人類の生活に不可欠かつ後世に伝えるべき貴重な資源であるといえる。

筆者はこれまで、17世紀フランスという近代へと流れこむ歴史の中で重要な役を果たした国と時代の、特にそのメインプレイヤーたる王権の建築のあり方を問い、現在の建築を取巻く状況をふまえて、建築というジャンル＝建築文化資源の持つ意義を明らかにすることをめざした。

しかし、一方では、ある社会の反映として現れた建築のあり方がひとつの「様式」として結実し、それ自体が絶大な「ソフト・パワー」となって、その「様式」を生んだ社会とは異なる性質を持つ社会に根付いていくという側面も見逃すべきではないと考える。

たとえば、17世紀のフランス建築がルネサンス様式からバロック様式へと変貌を遂げていった背景には、絶対王政下における王権の強化が非常に重要な要素として挙げられるが、それだけではなく、当時の文化的先進地域であったイタリアのバロック様式がフランスにとって無視しえない強大なソフト・パワーとして作用した側面もある。

## 研究目的・方法

研究成果1)では、ヴェルサイユ宮殿新城館の国王のアパルトマンの設計過程を明らかにする上で重要な位置を占めながら、その建設過程のどの時点で書かれたのか定説が確立されていない国王付建設局長官コルベールの書簡「ヴェルサイユ宮殿：概論」の内容を分析し、その成立時を推定するための材料を抽出した。

様式伝播の問題については、次の三つのテーマで研究成果2)を発表した。

- 1) サントゥスターシュ聖堂(パリ)を例に、初期フランス・ルネサンスにおいて、イタリア・ルネサンスとゴシックがどのように融合しているのかを明らかにする。
- 2) ルーヴル宮殿レスコ棟を例に、どのようにしてフランス・ルネサンスが完成に至ったのかを明らかにする。
- 3) コレージュ・デ・キャトル・ナシオン(パリ)とルーヴル宮殿を例に、イタリア・バロック(の影響を受けたフランス建築)とフランス・バロックを比較し、その本質的な違いを明らかにする。

## 研究成果

- 1) 「ジャン・バティスト・コルベールの書簡－ヴェルサイユ宮殿：概論」の位置付けと解釈をめぐる諸問題」『日本建築学会学術講演梗概集』F-2建築歴史・意匠、pp. 535-536、2008年9月
- 2) 『図説パリ 名建築でめぐる旅』、河出書房新社、東京、2008年

# 学校体育館の耐震性評価に関する研究

建築学科准教授  
山下哲郎

## 1. 研究目的

学校体育館の主耐震要素として X 型ブレースが広く用いられているが、その実験は少なく地震時の挙動の詳細は不明であり、地震の度に被害が生じる。ここでは実際の状態、寸法をできる限り再現して実験を行い耐震性能を調べる。

## 2. 方法

EEC 大型加力実験室にほぼ実寸の 4m x 4m の H 型鋼フレームを組み、対角線に試験体として山形鋼を用いた X 型ブレースを設置した上で (図 1) 油圧ジャッキで 1 方向および地震動を模した振幅漸増繰返し加力を行い、試験体が破壊にいたる挙動を観察する。次に荷重～変形関係よりブレースのエネルギー吸収性能と等価粘性減衰を調べる。山形鋼断面には実際に用いられる寸法のシングル材とダブル材 (図 2、表 1) を用いる。

## 3. 結果

図 3 に 1 方向加力に対する荷重～変形関係、図 4 に繰り返し荷重に対する荷重～変形関係の例を示す。1 方向加力ではシングル材、ダブル材とも非常に良好な変形性能を示し、ブレースは破断せず層間変形角約 1/25 に達した。またブレースは層間変形角 1/400 程度で降伏するが、軸部に貼り付けたひずみゲージより、全長にわたって降伏するのは層間変形角 1/100 付近であることが判明した。圧縮側では層間変形角 1/200 付近より顕著な座屈を呈する。

繰り返し荷重に対しては、シングル材は良好な変形性能を示したが、ダブル材ではブレース中央の屈曲部で顕著な局部座屈が発生し、層間変形角 1/100 に達する以前に低サイクル疲労により破断した。エネルギー吸収性能を示す累積塑性変形倍率は現在の耐震設計法における想定値である 25 に達しなかった。

## 4. 研究費の使途

当研究費の全額を試験体とフレームの製作費に使用した。

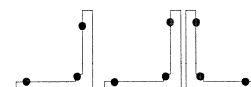


図 2 断面形状

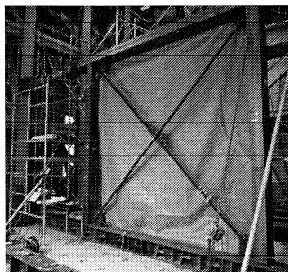


図 1 試験体と加力装置

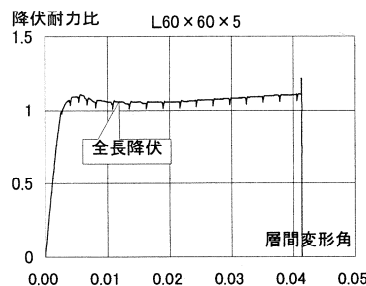


図 3 荷重変形関係

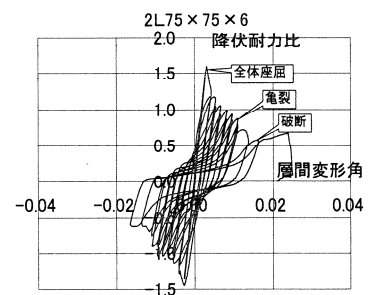


図 4 荷重変形関係

## 鋼板の面外耐力に関する基礎的研究

建築都市デザイン学科 准教授

小野里憲一

鉄骨筋かいが鋼構造の体育館、倉庫、駐車場および住宅など様々な建築物に利用されている。鉄骨筋かいはガセットプレートを介して柱や梁に取付けられ、建築物の剛性と強度を高める役割を果たす。また、他の耐震要素に比較して、軽量で強度が高く、また設置が容易な鉄骨筋かいは、近年では「耐震改修促進法」に基づく耐震補強設計において、耐力の足らない既存建築物の補強として用いられることも多くなった。しかし、鉄骨筋かいは取付けが容易である反面、取付け部の耐力を十分に検討せず安易に用いられる場合がある。その原因は建築計画上望ましい鉄骨筋かいの取り付け方法が構造的に適切でない場合が多い。さらにその様な取り付け方は、接合強度を検討するための設計法が確立されていないことがあげられる。

例えば、鋼管柱に丸鋼筋かいを取り付ける場合、一般的には鋼管柱の側面にガセットプレートが溶接されているのに対し、鋼管柱の正面にガセットプレートが溶接されるケースがある。鋼管の側面にガセットプレートを溶接する方法では柱に仕上げを貼るとき柱側面から出る突起が障害になることや、突起をよけて仕上げを貼るため部屋の有効面積が小さくなるなどの理由で、鋼管の正面にガセットプレートが溶接されることがある。一般的な方法であれば建築物の構造設計で従うべき設計規準や指針[1~5]に示されているのに対し、鋼管の正面にガセットプレートが溶接する方法はそれらに示されていない。

そこで本研究ではそのような設計法が確立されていないが、多くの利点を有する鉄骨筋かい接合部の接合方法について検討を行い、設計に応用することのできる計算式を提案することを目的とした基礎実験を行った。実験は鋼板に棒鋼を溶接し、鋼板の外周を拘束して棒鋼に引張荷重を加える試験を行った。試験体は、鋼板の大きさ、棒鋼の太さ、拘束条件をパラメータとして計12種類、各2体で計24体作製した。実験によって得られた結果から、接合強度と実験におけるパラメータの関係を捉えた。



## 省エネ型ライフスタイル普及に向けた 住宅エネルギー情報収集・表示システムの開発

建築都市デザイン学科 准教授  
中島裕輔

近年では二酸化炭素の排出量削減のために、住宅においても建物自体の断熱性能向上などのハード面の対策だけでなくソフト面の対策が重要視されており、その中でライフスタイルを省エネ型に見直すことも求められている。本研究では、家庭からの CO2 排出量削減に向けて、HEMS の試験導入団地の調査等もふまえて長屋型アパートに試験設置した住宅用環境・エネルギー情報提供システムについて、初年度の運用実績の評価を行った。

まず、システム運用開始から1年が経過した状態である2008年4月～2009年3月の計測データを基に調査アパートにおける電気・ガスの使用状況を分析するとともに、一般世帯とのエネルギー消費量の比較を行った。その結果、本アパートは一般世帯に比べ、3分の1ほどの電力消費量で推移していることが分かった。この理由として、延床面積が比較的小さいことやアパートの熱的性能の高さから空調機器の使用頻度が非常に少ないことなどが影響していると考えられる。1住戸について電力消費の内訳を見てみると、居間照明の電力使用量の著しい減少が見られた。この理由としては、ヒアリングを通して9月下旬に住民が電球を白熱灯から蛍光灯に変更したことによる効果だということが分かった。これは、本アパートに設置されている情報提供システムによる行動誘発効果の1つだと考えることが出来る。一方で、ガス消費量では一般世帯と比較して本アパートが平均約5%多く、単身世帯同士比較すると1つの住戸は一般単身世帯のおよそ倍の量消費していることとなった。一般に給湯などガス消費量削減対策は難しく、本アパートにおいてもガス消費の対策に重点を置き省エネ対策を行っていくべきだと考えることが出来る。

また、システム使用から約半年経過後の2008年7月に調査住戸の居住者に対してヒアリングとアンケートを実施した。調査内容はシステム導入後の使い勝手や追加機能の要望等であり、この調査結果をもとに省エネ実行度とモニタ参考度の比較、及び追加機能の検討を行った。各住戸の省エネ行動実行度とシステムのモニタ画面参考度を比較してみると、全般的に実行している省エネ行動項目は多く、比較的環境意識の高い居住者が多い傾向が見られた。中でも実行度が全般的に高い住戸ではモニタ参考度も高いが、冷蔵庫や給湯など毎日気候の影響が少なくほぼ決まった行動を行う項目については参考度は低くなっていた。実行度が高い項目については、リアルタイムの温度や電力量が参考になることが理由であるとのことであった。

システムを導入して1年間で実測データも不十分であり、モニタの活用が顕著な省エネルギーに結びついている様子は明確とは言えないが、一部明らかな効果は見られており、長期的な利用による効果についての検証を行いながら、システムの改良を重ねていく計画である。



工学院大学総合研究所年報 No.16 2008年度

発 行 2009年7月

発行者 工学院大学総合研究所

〒163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-2

TEL (03) 3340-3440 (ダイヤルイン)

編 集 工学院大学総合研究所

印 刷 三陽工業株式会社