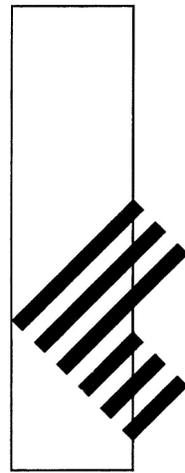


工 学 院 大 学
総 合 研 究 所 年 報
第 25 号 2017 年度



平成 30 年 7 月 発行

工学院大学総合研究所

RESEARCH INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
KOGAKUIN UNIVERSITY

“Think globally, act locally”

学長 佐藤 光史

2017 年度版研究活動報告書の発刊に当たり、熱意をもって研究に取り組み、また一緒に支えて頂いたすべての教職員と協力者に感謝いたします。このように活発な研究活動の結果として、Times Higher Education (THE) が 6 月末に発表した 2018 Asia University Ranking において、本学は前年を上回る評価を得て、アジアの上位 3%以内に位置する大学としての地位を保つことができました。THE ランキングは、大学の設置形態や規模を問わず、研究活動の成果を中心に複数の指標で評価します。本学は、特に Industry income において強みを発揮していることが分かるなど、建学の精神である「社会・産業と最先端の学問を幅広くつなぐ『工』の精神」が具現化されつつあることが分かります。多くの教職員が貢献しているイノベーションジャパンへの取組みが、主催する JST から高い評価を得ていることも軌を一にするもので、今後とも活発な活動を期待するものです。

さて、国際連合は、2030 年を実現目標とする「持続的開発目標 (Sustainable Development Goals (SDGs))」を掲げています。政治・経済で解決すべき多くの問題も含みながら、環境問題などが関わる 17 の具体的な目標達成において、科学技術・工学が果たす役割は大きいと考えられます。その理念は、“No one will be left behind”に集約されており、そのために “Think globally, act locally” を思考・行動原理として提唱しています。このような背景の基に、本学で学ぶ留学生たちは上述した大学ランキングに大変敏感で、高い評価を得ている大学で学んでいることに誇りをもつと率直に語ります。

一方で、日本人学生には必ずしもその感覚は浸透しておらず、入学試験時の単一指標のみに拘りがちな古いタイプの日本社会をそのまま投影しているように見えます。残り 10 年余りで、国連が掲げる目標を実現するには高いハードルがあることは想像に難くありません。しかし、著しい少子高齢化社会に突入した日本においてこそ、私たちが育てる学生たちの未来が少しでも明るくなるように、基礎と応用を総動員した未来につながる研究活動が重要と認識しています。もちろん、工学教育に関わる研究活動の底上げも、重要なことは議論を待ちません。

本年 4 月の VISION150 改訂に当たっては、「国立の東京工業大学・私立の工学院大学」と並び称されることを目指そう、との理事長見解が示されました。先立つ 2 月には、THE ランキング運営会社 (TES Global) の Phil Baty 氏 (Editorial Director) と Nick Pirog 氏 (Commercial Director) に本学を直接紹介する機会を得て意見交換した際には、その規模などに言及しつつ Caltech (California Institute of Technology) のベンチマークを薦められました。いずれも眩いばかりの輝きを放っている世界有数の優れた大学です。目標は高い方が挑戦し甲斐があります。一歩でも近づくためにも、大胆な発想と戦略性を持ちつつ、着実な研究活動に励もうではありませんか。

科学技術白書から見えるもの

総合研究所 所長 鷹野 一朗

毎年文部科学省から発刊される科学技術白書は、平成22年版からホームページ上に概要版が添付され、翌年からポスター形式になったことで視覚的な効果とともに要点が把握しやすくなっています。また、同じ年の表紙には、公募した小中学生の絵が採用されるようになりました。最初を飾ったのは小学一年生の女の子の作品で、未来を担う子供たちに科学技術の重要性を少しでも知ってもらいたい試みの一つと言えます。当時、表紙絵に応募した小中学生は今16歳から23歳になっており、私たちの世界はその子達が描いた絵に近づいているのでしょうか。

今年の科学技術白書の概要版が語るものは、私たちが今感じているものに他なりません。日本の論文数と被引用数Top10%補正論文数の大幅な低下や若手研究者数の伸び悩み、特に修士課程から博士課程への進学者数は十数年で半分近くに減少しています。大学等の教員の研究時間割合は過去10年間減少傾向にあり、私立大学での状況はこれ以上に厳しいと言えましょう。研究資金面では、一部の独創的・挑戦的な研究に対し安定的な確保を掲げるものの、私立大学等経常費補助金については、前年度維持を掲げながら中長期的には減少傾向にあります。研究資金の調達には、オープンイノベーションに向けた意識を高め、大企業を対象とするような「組織」対「組織」の大型の共同研究を基にすることが求められており、本学のような中規模大学は益々厳しい状況下に置かれています。

日本を支える科学技術の方向性としては、SDGs(持続可能な開発目標)を基にしながら、「Society5.0」の実現に向けた取組を通じて、各方面との連携・協力を深めることが求められています。このような社会的背景のもと、本学総合研究所はプロジェクト研究費(新規応募課題20件、採択課題5件、継続課題10件)と科研費採択奨励研究費の継続と適切な研究費配分を行いました。科研費採択奨励研究費に関わる科研費申請件数は165件、申請率74.6%となりました。本学からの情報発信では、「JST 技術説明会」「りそな技術懇親会」「たましん技術説明会」「諏訪圏工業メッセ」「テクノトランスファーinかわさき」「第7回おおた研究・開発フェア」への継続出展に加え、初めての試みとして「Innovation Big West」(共催:東京医科大学、東京薬科大学、八王子市)を八王子キャンパスで開催しました。さらに「イノベーション・ジャパン2018」では、12件の研究テーマと大学組織展示として「エリア防災+新宿 巨大都市・複合災害に対するエリア防災活動支援技術」が採択されました。本学における研究展開は、各研究者の努力の賜物であり、様々な要求にご協力いただいている成果であります。心より感謝申し上げます。

最後に、本年報をまとめるにあたり、ご協力いただいた教職員の方々に御礼申し上げますとともに、研究者の皆様のさらなる発展を祈念いたします。

目 次

学 長 佐藤 光史
総合研究所所長 鷹野 一郎

1. 総合研究所プロジェクト研究報告（2017年度研究終了）	
・抗腫瘍活性を有するアレニコライドAの化学合成および医薬化学研究	
責任者 南雲 紳史	1 1
・網羅的生体分子情報の高速解析システムの開発と次世代型がん個別最適化治療法への応用	
責任者 福岡 豊	1 8
・非常時における音声通話確保を目的とした新しい通信受付制御方式	
責任者 馬場 健一	2 8
・高速高精度な多関節ロボットの位置、姿勢、力とモーメントのハイブリッド制御 —インピーダンス特性をもつハイブリッド制御—	
責任者 黄 慶九	3 6
・GaN系集積化面発光素子用近紫外透明導電膜製作技術の開発研究	
責任者 本田 徹	4 3
2. 総合研究所プロジェクト研究報告（2018年度継続研究）	
・大地震時の強震動予測手法の開発と超高層建築の耐震対策への適用	
責任者 久田 嘉章	5 5
・神経難病者のニーズ調査に基づく自立住環境支援スイッチの研究 —生体スイッチのための眼電位解析アルゴリズム—	
責任者 田中 久弥	6 4
・ヒトの下肢関節動態を再現した脚運動機構による人工関節評価システムの開発 —歩行動作の再現—	
責任者 桐山 善守	6 9
・希土類フリー新規超イオン伝導性固体電解質の開発	
責任者 大倉 利典	7 9
・光充電型リチウムイオン電池の高容量化と全固相化（II）	
責任者 永井 裕己	8 4
・革新的金属基圧電複合材料の創製と特性設計手法構築	
責任者 柳迫 徹郎	9 3
・均質化とトポロジー最適化を援用した多孔質吸音材微視構造設計法の構築	
責任者 山本 崇史	9 8
・体性感覚と視聴覚刺激を組み合わせた行動誘発メカニズムに関する基礎検討	
責任者 近藤 公久	1 0 8
・耳小骨検査の正診率を向上させる検査方法及びデータ解析方法の確立	
責任者 向井 正和	1 1 8
・III族酸化物半導体を用いた深紫外線センサーの開発	
責任者 尾沼 猛儀	1 2 4

3. 総合研究所科学研究費採択奨励研究報告（2017年度）

- ・近代東アジア大衆文学における翻訳ディスコースの様態と受容をめぐる文化研究
吉田 司雄…………… 131
- ・災害時のレジリエンスに対応した建築物の維持保全手法の開発
田村 雅紀…………… 132
- ・個別端末の特性を考慮したセル拡張によるパーソナルピコセル形成手法
大塚 裕幸…………… 133
- ・光化学反応を利用した Cu/CNT 微細配線の形成
永井 裕己…………… 134
- ・3本らせんをとらないコラーゲンポリプチド鎖の生成と腫瘍
今村 保忠…………… 135
- ・多彩な光学異方性をもつ酸化ガリウム系混晶半導体の励起子光物性の解明と機能性の開拓
尾沼 猛儀…………… 136
- ・高速高精度な多関節ロボットの位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御
黄 慶九…………… 137
- ・大規模並列計算機上での高精度演算環境と高精度演算アルゴリズムの開発
田中 輝雄…………… 138
- ・可視光水中双方向伝送のための位置ずれ検出
前田 幹夫…………… 139
- ・室温プロセスで創製する高移動度フレキシブル酸化物薄膜トランジスタ
相川 慎也…………… 140
- ・蛍光イメージングからの高解像神経活動推定技術の確立
竹川 高志…………… 141
- ・イオンビームアシスト低温形成法による炭素薄膜の構造制御
鷹野 一朗…………… 142
- ・マルチタブレットによる協働支援環境に関する研究
小林 亜樹…………… 143
- ・適応的操作による映像情報量低減の研究
合志 清一…………… 144
- ・分子の柔軟性を利用した実験と計算の融合による高機能触媒設計
奥村 和…………… 145

2018年度 総合研究所運営委員

学長	佐藤 光史 (応用物理学科 教授)
総合研究所所長	鷹野 一郎 (電気電子工学科 教授)
所長代理	長嶋 祐二 (情報デザイン学科 教授)
大学院運営委員会委員長	今村 保忠 (生命化学科 教授)
先進工学部 (生命・応化・環境) 互選	伊藤 雄三 (応用化学科 教授)
先進工学部 (応物) 互選	坂本 哲夫 (応用物理学科 教授)
先進工学部 (機理) 互選	中島 幸雄 (機械理工学科 教授)
工学部 (機械・機シス) 互選	伊藤慎一郎 (機械工学科 教授)
工学部 (電気電子) 互選	於保 英作 (電気電子工学科 教授)
建築学部 互選	河合 直人 (建築学科 教授)
情報学部 互選	長嶋 祐二 (情報デザイン学科 教授)
教育推進機構 互選	高見 知秀 (基礎・教養科(自然) 教授)
BMSC センター長	今村 保忠 (生命化学科 教授)
ブランディングUDMセンター長	久田 嘉章 (まちづくり学科 教授)
ブランディングSVセンター長	中島 幸雄 (機械理工学科 教授)

2017 年度総合研究所研究一覧（学内研究費）

（プロジェクト研究）

研 究 課 題	研究責任者	所属学科・職名は 2017 年度
・ 2017 年度研究終了		
抗腫瘍活性を有するアレニコライドAの化学合成および医薬化学研究	南雲 紳史	生命化学科 教授
網羅的生体分子情報の高速解析システムの開発と次世代型がん個別最適化治療法への応用	福岡 豊	電気電子工学科 教授
非常時における音声通話確保を目的とした新しい通信受付制御方式	馬場 健一	情報通信工学科 教授
高速高精度な多関節ロボットの位置、姿勢、力とモーメントのハイブリッド制御 —インピーダンス特性をもつハイブリッド制御—	黄 慶九	電気電子工学科 准教授
GaN 系集積化面発光素子用近紫外透明導電膜製作技術の開発研究	本田 徹	応用物理学科 教授
・ 2018 年度継続研究		
大地震時の強震動予測手法の開発と超高層建築の耐震対策への適用	久田 嘉章	まちづくり学科 教授
神経難病者のニーズ調査に基づく自立住環境支援スイッチの研究 —生体スイッチのための眼電位解析アルゴリズム—	田中 久弥	コンピュータ科学科 教授
ヒトの下肢関節動態を再現した脚運動機構による人工関節評価システムの開発 —歩行動作の再現—	桐山 善守	機械システム工学科 准教授
希土類フリー新規超イオン伝導性固体電解質の開発	大倉 利典	応用化学科 教授
光充電型リチウムイオン電池の高容量化と全固相化 (II)	永井 裕己	応用物理学科 助教
革新的金属基圧電複合材料の創製と特性設計手法構築	柳迫 徹郎	機械工学科 助教
均質化とトポロジー最適化を援用した多孔質吸音材微視構造設計法の構築	山本 崇史	機械工学科 准教授
体性感覚と視聴覚刺激を組み合わせた行動誘発メカニズムに関する基礎検討	近藤 公久	情報デザイン学科 教授
耳小骨検査の正診率を向上させる検査方法及びデータ解析方法の確立	向井 正和	電気電子工学科 准教授
Ⅲ族酸化物半導体を用いた深紫外線センサーの開発	尾沼 猛儀	応用物理学科 准教授

(科学研究費採択奨励研究)

研 究 課 題	研究者	所属学科・職名は 2017 年度
近代東アジア大衆文学における翻訳ディスコースの様態と受容をめぐる文化研究	吉田 司雄	国際キャリア科 教授
災害時のレジリエンスに対応した建築物の維持保全手法の開発	田村 雅紀	建築学科 教授
個別端末の特性を考慮したセル拡張によるパーソナルピコセル形成手法	大塚 裕幸	情報通信工学科 教授
光化学反応を利用した Cu/CNT 微細配線の形成	永井 裕己	応用物理学科 助教
3本らせんをとらないコラーゲンポリプチド鎖の生成と腫瘍	今村 保忠	生命化学科 教授
多彩な光学異方性をもつ酸化ガリウム系混晶半導体の励起子光物性の解明と機能性の開拓	尾沼 猛儀	応用物理学科 准教授
高速高精度な多関節ロボットの位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御	黄 慶九	電気電子工学科 准教授
大規模並列計算機上での高精度演算環境と高精度演算アルゴリズムの開発	田中 輝雄	コンピュータ科学科 教授
可視光水中双方向伝送のための位置ずれ検出	前田 幹夫	電気電子工学科 教授
室温プロセスで創製する高移動度フレキシブル酸化物薄膜トランジスタ	相川 慎也	総合研究所 准教授
蛍光イメージングからの高解像神経活動推定技術の確立	竹川 高志	システム数理学科 准教授
イオンビームアシスト低温形成法による炭素薄膜の構造制御	鷹野 一朗	電気電子工学科 教授
マルチタブレットによる協働支援環境に関する研究	小林 亜樹	情報通信工学科 准教授
適応的操作による映像情報量低減の研究	合志 清一	情報デザイン学科 教授
分子の柔軟性を利用した実験と計算の融合による高機能触媒設計	奥村 和	応用化学科 教授

1. 総合研究所プロジェクト研究報告

(2017年度研究終了)

抗腫瘍活性を有するアレニコライドAの化学合成および医薬化学研究

工学院大学先進工学部生命化学科 南雲紳史、安井英子

芝浦工業大学工学部応用化学科 北川理

理化学研究所 園園孝介

Synthetic and Medicinal Chemical Studies of Arenicolide A with
Antitumor Activity

Shinji Nagumo, Eiko Yasui, Department of Chemistry and Life Science, Kogakuin University

Osamu Kitagawa, Department of Applied Chemistry, Shibaura Institute of Technology

Kosuke Dodo, Riken

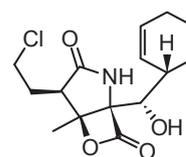
ABSTRACT : Arenicolide A and C are secondary metabolites of *Salinospora arenicola* possessing a 26-membered lactone ring involving 14 asymmetric centers and three characteristic conjugated (*E,E*)-diene units. Among them, arenicolide A shows moderate cytotoxicity against the human colon adenocarcinoma cell line HCT-116. Our study has achieved the construction of 26 membered lactone by using ring closing metathesis twice.

1. はじめに

近年、スキューバダイビングの普及によって、化学の世界でも海綿、サンゴ、ホヤ、ヒトデといった海洋無脊椎生物の存在が身近となり、それらが産生する天然物の探索にも関心が集まるようになった。海洋生物は陸上にはない環境的制限を乗り越えるため、あるいは天敵よる捕食を免れるために、陸上生物とは構造的に異なるタイプの二次代謝物を産生する。これらの中には、がんや感染症治療など様々な疾病に対するリード化合物として注目されているものも多い。ところで古くよりフグ毒として知られているテトロドキシンの真の生産者が海洋微生物であったということもあり、海洋微生物が産生する二次代謝物にも関心が高まっている。

この分野の第一人者であるカリフォルニア大学スク립ス海洋研究所の Fenical 教授は、種々の海洋放線菌より様々な二次代謝物を見出している。例えば、*Salinospora tropicana* からユニークなβラクトン構造

をとるサリノスポラミドA (Fig. 1) が単離されている。このものは細胞内において不要となったタンパク質の分解を担う20Sプロテアソームの強力な阻害活性を示すことが報告されている。また、ユビキチン-プロテアソーム系に関連するバイオツールとして広く利用されており、また多発性骨髄腫の治療薬として臨床試験が進められている。

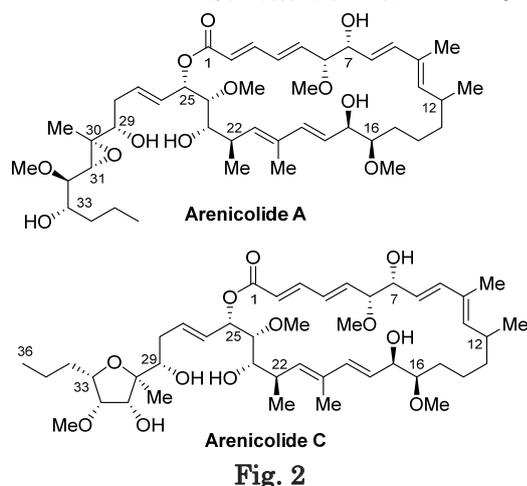


Salinosporamide A

Fig. 1

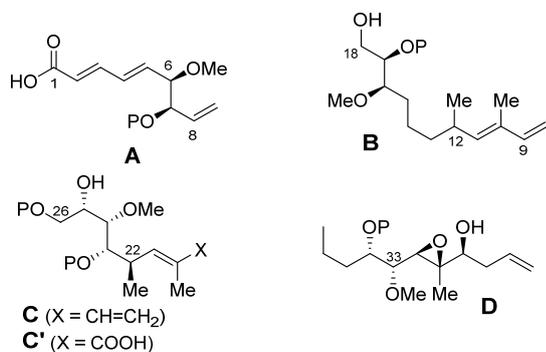
Fenical 教授は、同種族の放線菌 *Salinispora Arenicola* の発酵培地から26員環ラクトンと高度に酸素官能基化された側鎖を有するアレニコライドA、および

アレニコライドCを見出している (Fig 2)。このうち、アレニコライドAには結腸ガン細胞に対する中程度の抗腫瘍活性があり新規リード化合物としての期待がかかっている。アレニコライドAが示す抗腫瘍活性発現に関しては、理論計算化学により上皮成長因子 (EGF) との親和性があることは報告されているが、真の標的分子を含め作用機序の詳細については未だ明らかになっていない。その一つの原因として、アレニコライドAの海洋放線菌の発酵培地からの供給量が十分でないことが挙げられる。したがって、その作用機序の解明や構造修飾による活性増強を試みる上で、化学合成による供給が強く望まれ、我々はアレニコライド類の合成研究を行っている。



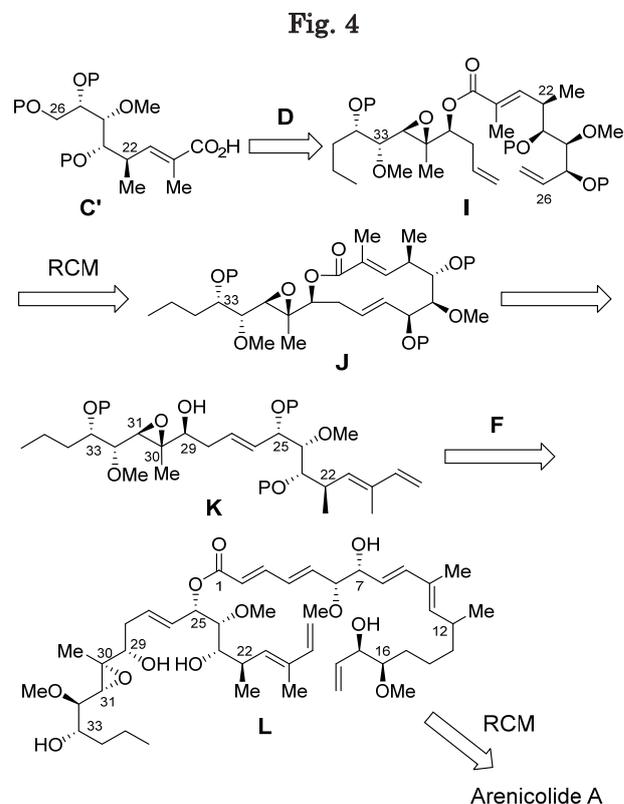
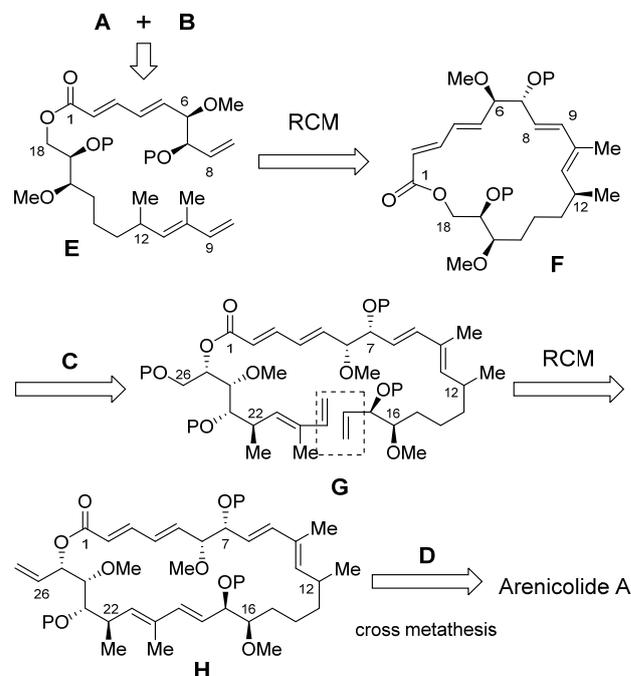
2. 合成計画

我々は閉環メタセシスを繰り返し行うことで、各セグメントを連結する戦略を考案し、個々のセグメントとして、C1-C8セグメント **A**、C9-C18セグメント **B**、C19-C26セグメント **C**、C27-C36セグメント **D** の4つを設定した (Fig. 3)。また、これらの連結の順序には二通り考えた。その一つは、**A** と **B** を連結後、順次 **C**、**D** を連結していく方法である (A法)。もう一つは、**A** と **B** を連結すると同時に、**C** と **D** を連結する。その後、**AB** と **CD** を連結するという方法である (B法)。



具体的にA法は、Fig. 4のように計画した。まず、**A** と **B** のエステル化により **E** を得、その閉環メタセシス反

応 (RCM) を行うことにより 19員環ラクトン **F** とする。これにより、C8位とC9位が連結される。次に、ラクトン **F** とアルコール **C** のエステル交換反応を行った後、数工程の官能基変換により **G** とし、再度 RCM を行うことで、26員環ラクトン **G** を得る。最後に、側鎖部に相当する **D** とクロスメタセシスを行うことでアレニコライドAを合成する。



B法は **Fig. 5** のように計画した。**C'**と**D**のエステル化により**I**を得、そのRCMを行うことにより12員環ラクトン**J**とする。ラクトン**J**の加水分解後、カルボン酸部を末端アルケンに変換することで**K**に導く。ラクトン**F**とアルコール**K**のエステル交換反応を行い、得られた**L**のRCMを行うことでアレニコライドAを合成する。以下、この二つの合成経路で検討を行った。

3. C1-C8 セグメントの合成

C1-C8 セグメントの合成に関して、**Fig 6** に示した経路が確立したことは、以前の報告書に示した。この経路において、末端アルケンを導入するために、化合物**5**を酸化して得られるアルデヒドのTebbe反応を行った。しかし、その収率が低く、また42%という収率も再現が難しかった。 α 位に酸素置換基があるアルデヒドは、しばしば取扱が難しいことを知っていたので、そのようなアルデヒドを回避できるような経路が必要であると考えた。

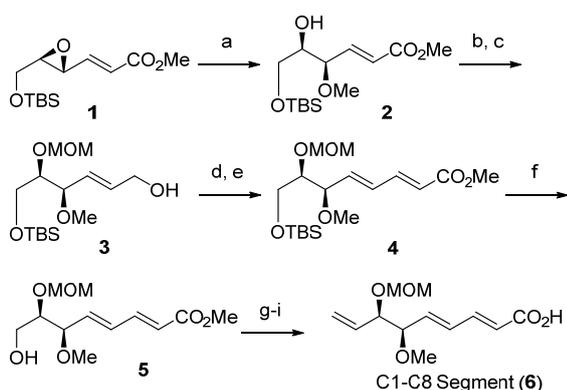


Fig 6: (a) Pd(OAc)₂, P(2-furyl)₃, B(OMe)₃, THF, 81% (b) MOMCl, DIPEA, DMAP, CH₂Cl₂ (c) DIBAH, THF, -20 °C 80% (2 steps) (d) Dess-Martin oxid. (e) Ph₃P=CHCO₂Me, 75% (2 steps) (f) AcOH, H₂O, 84% (g) Swern oxid. (h) Tebbe reagent, THF, -40 °C, 42% (2 steps) (i) NaOH, H₂O, MeOH

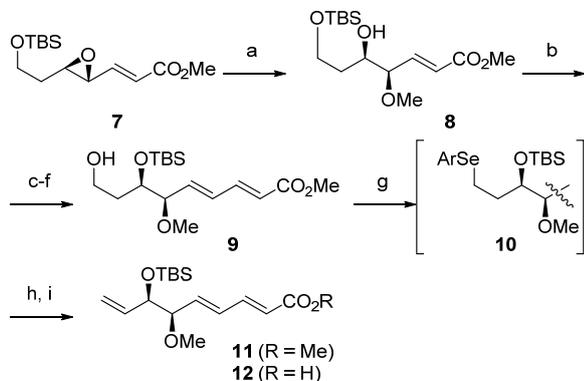


Fig 7: (a) Pd(OAc)₂, P(2-furyl)₃, B(OMe)₃, THF (b) TBSOT, 2,6-lutidine, DMF, 8% (2 steps) (c) DIBAH (d) Dess-Martin oxid. (e) Ph₃P=CHCO₂Me, 81% (3 steps) (f) AcOH, H₂O, THF, 75% (g) 2-NO₂C₆H₄SeCN, Bu₃P (h) NsHCO₃, H₂O₂, 60% (2 steps) (i) NaOH, H₂O, MeOH, quant.

また、当初7位水酸基（他のセグメント中の水酸基に関しても）の保護に methoxymethyl (MOM) 基が用いられていたが、全合成の最終段階でその除去を行うのは困難が予想されたので、保護基の再検討も必要であった。これらのことから、**Fig 7** に示した合成経路の改良を行った。化合物**1**より1炭素長い**7**に対して、パラジウム触媒による立体特異的アルコキシ置換反応を行った。得られた**8**は、TBS保護、還元、Wittig反応などにより2炭素増炭された**9**に導いた。さらに、一級水酸基をセレン化後、H₂O₂処理することで、末端アルケンを構築した（西澤法）。最後に、**11**に対してアルカリ加水分解を行うことで**12**を合成した。

4. C9-C18 セグメントの合成

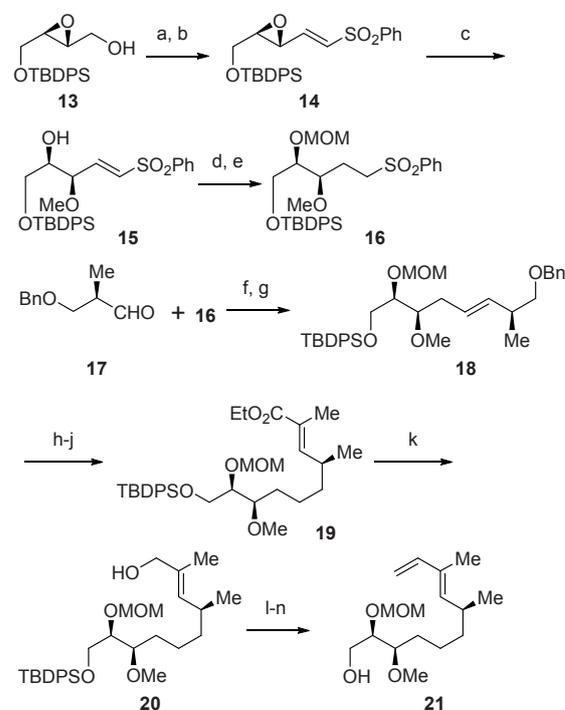


Fig 6: (a) IBX, DMSO (b) (EtO)₂P(O)CH₂SO₂Ph, NaH, toluene, 79% (2 steps) (c) Pd(OAc)₂, P(2-furyl)₃, B(OMe)₃, THF, 80% (d) MOMCl, DIPEA, DMAP, CH₂Cl₂ (e) Pd/C, H₂, AcOEt, 64% (2 steps) (f) BuLi, AcCl, DMAP, THF, -78 °C to rt (g) 5% Na(Hg), MeOH, 57% (2 steps) (h) PtO₂, H₂, MeOH (i) (COCl)₂, DMSO, Et₃N, CH₂Cl₂, -78 °C (j) Ph₃P=C(Me)CO₂Et, THF, 50% (3 steps) (k) DIBAH, toluene, -78 °C, 93% (l) MnO₂, CH₂Cl₂ (m) Ph₃P⁺CH₃ Br⁻, KHMDS, THF, 0 °C, 83% (2 steps) (n) TBAF, THF, 82%

2016年度に報告したC9-C18セグメントの合成を**Fig 6** に示す。既知の方法に従って合成したアルコール**13**を酸化した後、Horner-Emmons反応を行うことでエポキシビニルスルホン**14**を得た。パラジウム触媒存在下、B(OMe)₃と反応させたところ、エポキシ不飽和エステルと

同様、立体特異的にメトキシ基の置換反応が進行し、高収率で所望の **15** を得ることができた。ビニルスルホン **15** の水酸基をMOM基で保護した後、接触水素化に付すことでスルホン **16** へ導いた。化合物 **16** とアルデヒド **17** との Juliaカップリングで **18** を得、脱ベンジル化後、酸化、Wittig 反応を行うことでエステル **19** へ導いた。さらに DIBAH 還元を行い、得られたアリルアルコール **20** に対して酸化、Wittig 反応を行うことで **21** を合成した。しかし、この経路の中では、**16** と **17** との Julia カップリングに再現性が見られないこと、また MOM 基が保護基として望ましくないこと等の問題があったので、**Fig 7** に示したように **28** を合成した。8 から三工程で得られる **22** とホスホナート **23** の Horner-Emouth 反応、続いて接触水素化を行うことによって Evans アミド **25** を得た。このアルキル化は高ジアステレオ選択的に進行し、85%の収率でメチル化体 **25** が生成した。化合物 **25** は DIBAH 還元、Wittig 反応により共役エステル **26** へ導いた。さらに二工程でアルデヒド **27** に、最後に Wittig 反応を行うことで、ジエン **28** を合成した。

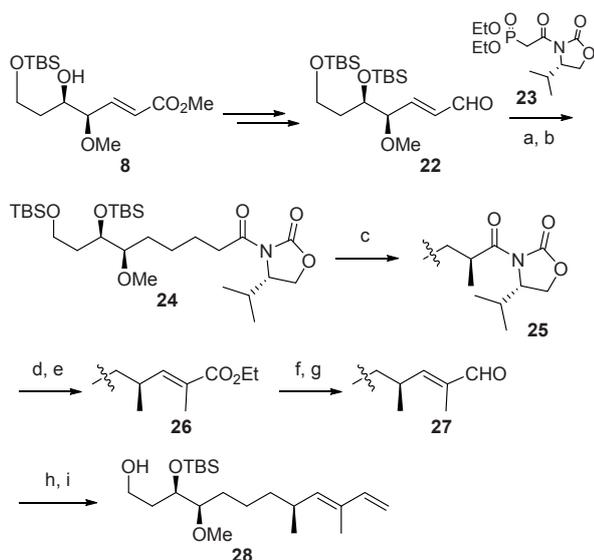


Fig 7 (a) **23**, NaH, THF, 55% (b) H₂, Pd-C, quant. (c) LHMDS, MeI, THF, -20 °C, 85% (d) DIBAH (e) Ph₃P=CMeCO₂Et, 55% (2 steps) (f) DIBAH (g) MnO₂ (h) Ph₃P⁺CH₃ Br, KHMDS, THF (i) AcOH, H₂O

5. C1-C18 セグメントの合成

C1-C8 セグメントと C9-C18 セグメントをそれぞれ 2 種類ずつ合成したので、次にこれらの連結を試みた。まず、**6** と **21** を椎名法に付し、定量的にエステル **29** を得た (**Fig. 8**)。次に、**16** に対して第二世代 Grubbs 触媒による RCM を行ったところ、62%の収率で目的とする 19 員環ラクトン **30** を得ることができた。化合物 **29** は、末端だけでなく内部にも複数のアルケンを有している。それ

にも関わらず、メタセシスは末端のアルケン同士の間で進行した。また、新たに形成されたアルケンは、望むトランス体だけであることを ¹H NMR スペクトルで確認した。次に、C19-C26 セグメントと連結させる準備として、末端アルケンの構築を行った。化合物 **30** をメタノールとのエステル交換反応に付し、生じた 1 級アルコールを酸化して **31** を得た。これを **Tebbe** 反応に付し、最後にエステルの加水分解を行うことで、カルボン酸 **32** を合成した。

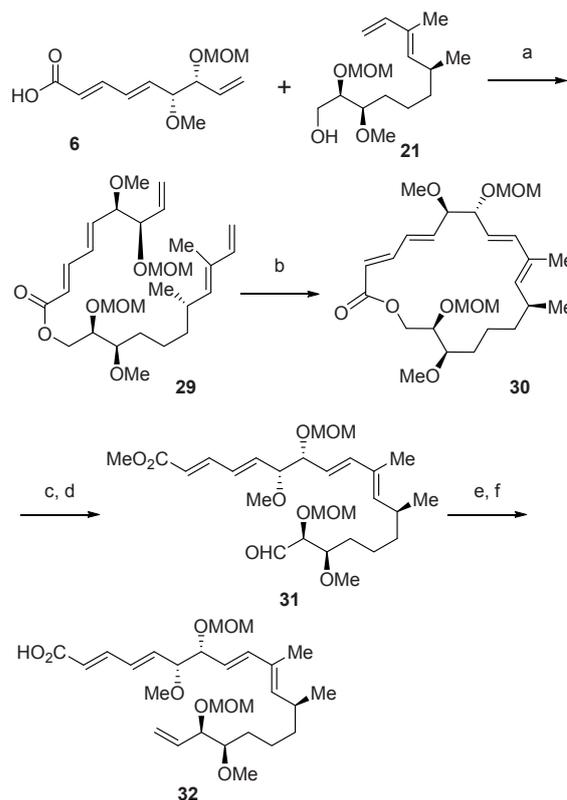


Fig 8: (a) MNBA, Et₃N, DMAP, CH₂Cl₂, quant. (b) Grubbs 2nd, CH₂Cl₂, reflux, 62% (c) K₂CO₃, MeOH, 73% (d) Swern oxidation (e) **Tebbe** reagent, 41% (f) 1N NaOH aq. MeOH, THF

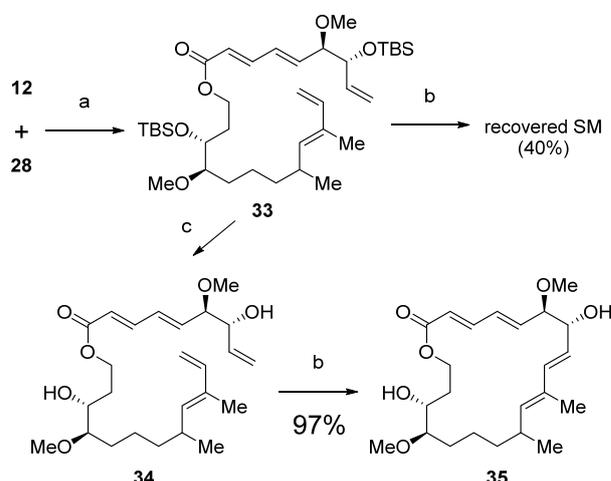


Fig 9: (a) MNBA, Et₃N, DMAP, CH₂Cl₂, 86% (b) Grubbs 2nd, CH₂Cl₂, reflux (c) BF₃·OEt₂, 73%

次に、**12** と **28** を椎名法に付し、エステル **33** を合成した。続いて、化合物 **33** の RCM を、第二世代 Grubbs 触媒を用いて試みたが、反応の進行が遅く、そのうちに様々な分解物が生成してきた。結果として、目的の環化体は得られず、原料が 40% 回収されただけであった。片側の末端アルケンに隣接したシリルオキシ基が高高いことが、もう一つのアルケンとの接近を妨げているものと考え、TBS 基を除去してから RCM を行うことにした。BF₃·OEt₂ で **33** を処理し、73% の収率でジオール **34** を得た。これを第二世代 Grubbs 触媒で処理したところ、非常に効率よく RCM が進行して、97% の収率で 20 員環ラクトン **35** が生成した。

6. C19-C26 セグメントの合成

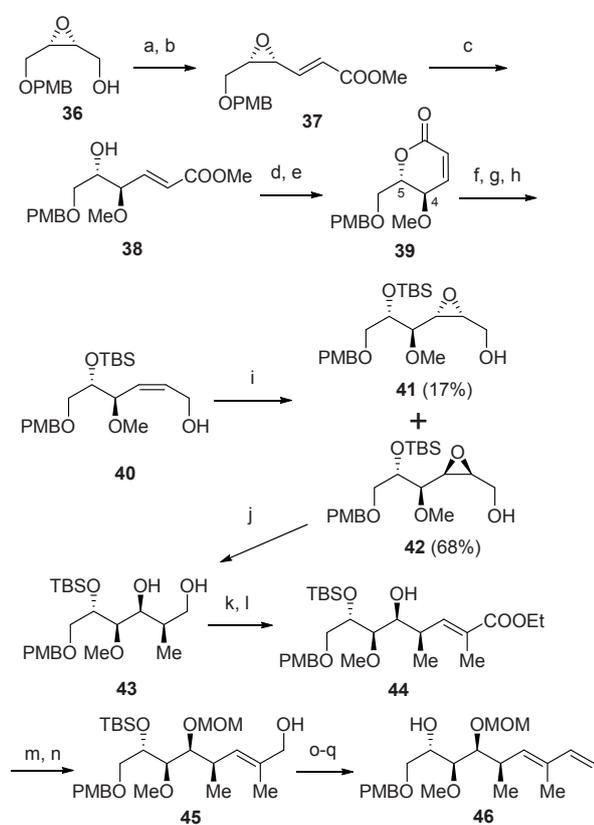


Fig 10: (a) IBX, DMSO (b) (EtO)₂P(O)CH₂CO₂Et, NaH, THF, 75% (2 steps) (c) Pd(OAc)₂, P(2-furyl)₃, B(OMe)₃, THF, 97% (d) NaOH aq., MeOH, THF (e) 2,4,6-Cl₃C₆H₂COCl, Pyridine, Pyridine-HCl, DCM, 80% (2 steps) (f) NaBH₄, CeCl₃, MeOH, 0 °C, 94% (g) TBSOTf, 2,6-lutidine, DCM, 0 °C, 96% (h) HF-Py, THF, 0 °C, 88% (i) mCPBA, DCM, -15 °C (j) MeLi, CuCN, Et₂O, -50 °C, 79% (k) TEMPO, PhI(OAc)₂, K₂CO₃, TBAB, DCM, H₂O (l) Ph₃P=CHCO₂Et, DCE, 87% (2 steps) (m) MOMCl, TBAI, DIPEA, DMAP, DME, 50 °C, 85% (n) DIBAH, THF, -35 °C, 95% (o) oxidation (p) Ph₃P=CH₂. (q) TBAF

C9-C18 セグメントに関して、以下のように以前報告した (Fig 10)。既知のアルコール **36** を酸化した後、

Horner-Emmons 反応を行うことでエポキシ不飽和エステル **37** を得た。パラジウム触媒存在下、B(OMe)₃ と反応させると、立体特異的にメトキシ基の置換反応が進行し、高収率で所望の **38** が生成した。エステル **38** を加水分解後、ピリジン存在下、山口試薬で処理すると、アルケンの異性化とともにラクトン化が進行してラクトン **39** が得られた。NaBH₄/CeCl₃ の条件で還元した後、保護、脱保護を順次行いアルコール **40** を合成した。MCPBA によるエポキシ化を行ったところ、所望の立体配置を有するエポキシド **42** を主生成物として得ることができた。次に、有機銅試薬を用いて **42** のメチル化を行い、得られたジオールを TEMPO 酸化、Wittig 反応に順次付すことで、共役エステル **44** に導いた。2 級水酸基を MOM 基で保護した後、DIBAH 還元によりアリルアルコール **45** を得、最後に酸化、Wittig 反応、TBS 基の除去を行うことで、**46** を合成することができた。

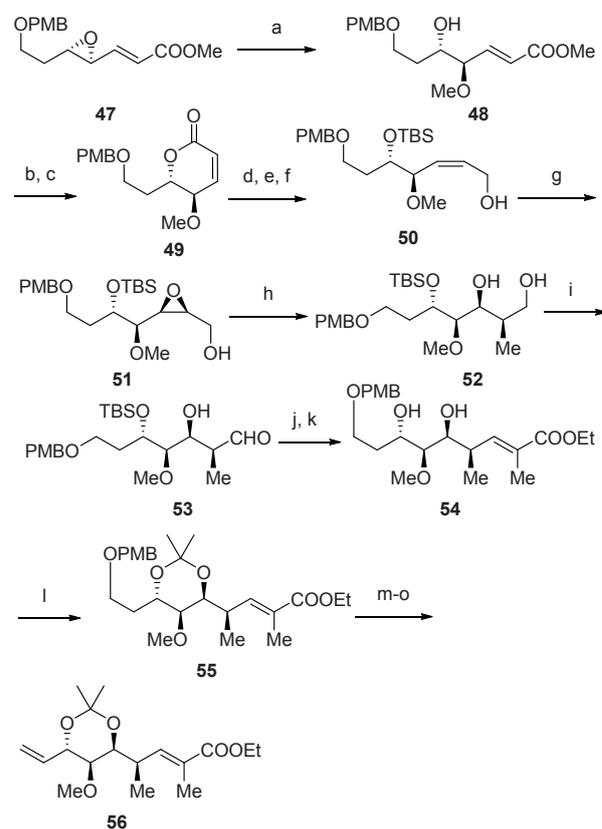


Fig 11: (a) BF₃·OEt₂, MeOH, 60% (b) NaOH aq., MeOH, THF (c) 2,4,6-Cl₃C₆H₂COCl, Pyridine, Pyridine-HCl, DCM, 90% (2 steps) (d) NaBH₄, CeCl₃, MeOH, 0 °C, 88% (e) TBSOTf, 2,6-lutidine, DMF, 0 °C, 94% (f) HF-Py, THF, 0 °C, 89% (g) mCPBA, DCM, -15 °C (h) Me₂CuLi, Et₂O, -50 °C, 70% (2 steps) (i) TEMPO, PhI(OAc)₂, 94% (j) Ph₃P=CHCO₂Et, THF, 85% (kl) TBAF, THF, 93% (l) (MeO)₂CMe₂, TsOH, 50 °C, 70% (m) DDQ, DCM, H₂O, 71% (n) 2-NO₂C₆H₄SeCN, Bu₃P (o) NsHCO₃, H₂O₂

また B 法で行うことを念頭に、**56** を合成した。化合物 **47** のアルコキシ置換反応により **48** を得、二工程でラク

トン **49** に導いた。次に、 $\text{NaBH}_4/\text{CeCl}_3$ の条件で還元した後、保護、脱保護を順次行いアルコール **50** を合成した。さらに MCPBA 酸化、有機銅試薬とのカップリング、TEMPO 酸化により **53** とした後、Wittig 反応、TBS 基の除去を行い、ジオール **54** を合成した。最後にアセトナイド保護した後、PMB 基の除去、西澤法を行うことで末端アルケンをもつ **56** を合成した。

7. C1-C26 セグメント (26 員環ラクトン) の合成

各セグメントを合成できたので、全合成に向け、セグメントどうしの連結が残された課題となった。まず合成計画で示した二つの方法のうち、A 法による以下の合成を検討した。アルコール **46** と **32** から 26 員環ラク톤の構築を検討した。椎名法によって両者のエステル結合を行い、第二世代 Grubbs 触媒により RCM を行った。RCM はスムーズに進行し、かつ内部アルケンがメタセシスに関与することもなかった。また、新たにできたアルケンはトランス配置のみで、結果として 67% の収率で所望の **58** を得ることができた。

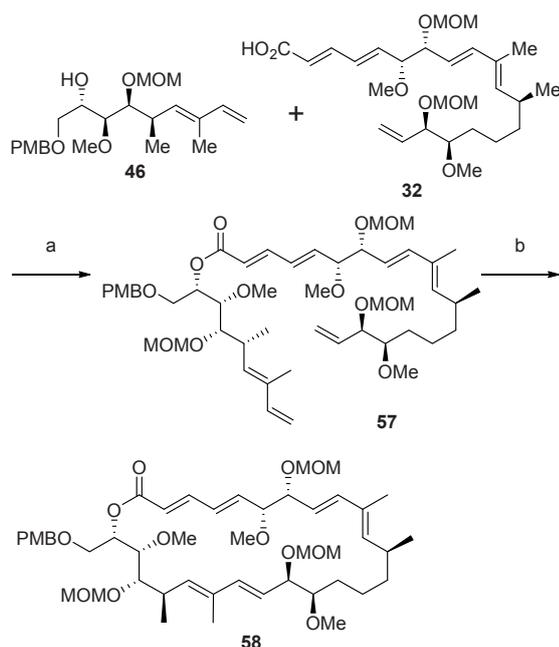


Fig 12: (a) MNBA, Et_3N , DMAP, CH_2Cl_2 , 81% (b) Grubbs 2nd, CH_2Cl_2 , reflux, 67%

8. C19-C36 セグメントの合成

次に、B 法による全合成を念頭に入れ、C19-C36 セグメントの合成を検討した。具体的には、C19-C26 セグメントと C27-C36 セグメント **59** のクロスメタシス反応を行った。化合物 **59** は、本プロジェクトの開始以前に既に合成していたので、その具体的な方法については省略する。C19-C26 セグメントにおける 23 位、25 位の保護基の選択は非常に大切であることがわかった。例え

ば、23 位が TBS 保護され、25 位は水酸基の **60** を **59** のカップリングパートナーに選ぶと、異種分子間でのメタセシスは全く進行しなかった。その理由は、**60** の末端アルケンが同一分子内の内部アルケンとメタセシスを起こし、6 員環ラクトンが生成するためであった。種々検討する中から、6 員環ラクトンの生成を抑えるためには、23 位と 25 位の水酸基をアセトナイドでしばるという着想に至った。実際に、**56** と **60** のクロスメタセシス反応を行ったところ、56% の収率で **61** を得ることに成功した。

9. まとめ

本プロジェクトにおいて、海洋放線菌が産生するアレニコライド A の合成研究を行い、主要骨格である 26 員環ラク톤を構築することに成功した。また、C19-C36 セグメントの合成にも成功した。まだ誰も成し遂げたことのない全合成で、多くの試行錯誤を必要とする課題であるが、全合成完成の直前までたどり着いた。残る課題は、26 員環ラクトンに側鎖部を連結するだけである。もちろん、前人未到の登山と同じで、8 合目まで登って山頂が見えても、そこにたどり着ける 100% の保証はない。しかし、このプロジェクトを通して、膨大かつ詳細なノウハウを獲得できたので、全合成達成に自信を深めている。最後の仕上げを行い、世界初の全合成を達成したい。また、それができたときには、抗腫瘍活性における標的分子の解明をおこなう予定である。

[1] 発表論文

- (1) Unique ring expansion of a 6-3 bicyclic ring system forming a functionalized 7-membered ring accelerated by nitrogen functional groups
Yasui, E.; Ootsuki, R.; Takayama, K.; Nagumo, S. *Tetrahedron Lett.* **2017**, *58*, 3092-3095.
- (2) Selective Mono-reduction of Pyrrole-2,5 and 2,4-Dicarboxylates
Yasui, E.; Tsuda, J.; Ohnuki, S.; Nagumo, S. *Chem. Pharm. Bull.* **2016**, *64*, 1262-1267.
- (3) Synthetic study of arenicolide C: Stereoselective Synthesis of the C19-C36 Segment
Sunagawa, S.; Yamada, H.; Naito, M.; Yasui, E.; Mizukami, M.; Miyashita, M.; Nagumo, S. *Tetrahedron Lett.* **2015**, *56*, 6693-6695.

[2] 学会発表

- (1) 環状アセチレンコバルト錯体の脱コバルトを伴う Friedel-Crafts 反応
日本化学会第 98 春季年会 (2018 年 3 月 22 日)
山中奎哉、坂田優希、安井英子、南雲紳史
- (2) ベンゾジアゼピン誘導体の合成研究
日本化学会第 98 春季年会 (2018 年 3 月 22 日)
安井 英子、津田隼平、南雲紳史

- (3) アレニコライド A の C19-C36 セグメントの合成
日本化学会第 98 春季年会 (2018 年 3 月 22 日)
上條陽平、岩田大昌、安井英子、<U>南雲紳史</U>
- (4) venturicin C の C15-C27 segment の合成
日本化学会第 98 春季年会 (2018 年 3 月 22 日)
小澤暢熙、安井英子、南雲紳史
- (5) 1,2-ベンゾジアゼピン誘導体の合成
74 回有機合成化学協会関東支部シンポジウム(2017 年 11 月 19 日)
津田 隼平、安井 英子、南雲 紳史
- (6) エポキシ不飽和エステルの変元的 SN2' 反応と独自の鎖状立体制御法を利用した Venturicin X の全合成
第 59 回天然有機化合物討論会 (2017 年 9 月 20 日)
鈴木 裕治、木村 直城、室川 俊介、古川 晃規、宮下 正昭、南雲紳史
- (7) アセチレンコバルト錯体を利用した新規タンデム環化反応における立体制御機構
第 61 回 香料・テルペンおよび精油化学に関する討論会 (2017 年 9 月 9 日)
坂田優希、安井英子、南雲紳史
- (8) Arenicolide A の中に存在する 26 員環ラクトン構造の合成
第 73 回有機合成化学協会関東支部シンポジウム (2017 年 5 月 20 日)
岩田大昌、内藤美菜子、砂川晶、安井英子、宮下正昭、南雲紳史
- (9) アルキンコバルト錯体を利用した新規含窒素中員環合成
日本薬学会第 136 年会 (2016 年 3 月 28 日)
高岸 帆奈美、水上 徳美、南雲 紳史
- (10) Synthetic studies of Venturicidins based on the newly developed method of a construction Z-alkene by SN2' type reduction with borane THF complex
日本薬学会第 136 年会 (2016 年 3 月 28 日)
鈴木裕司、佐藤大地、水上徳美、安井英子、宮下正昭、南雲紳史
- (11) 14 員環マクロライド Sekothrixide の改良合成
日本化学会第 96 春季年会 (2016 年 3 月 25 日)
勝見大介、小澤暢熙、中曾根和樹、安井英子、宮下正昭、南雲紳史
- (12) Pipestelide B の全合成研究
日本化学会第 96 春季年会 (2016 年 3 月 25 日)
木村直城、安井英子、南雲紳史
- (13) 新規 7 員環合成法の開発
日本化学会第 96 春季年会 (2016 年 3 月 24 日)
大月理央、樋口すみ香、高山敢、安井英子、南雲紳史
- (14) ピロール-2,5-ジカルボン酸エステルからのカリックスピロール合成研究
第 45 回複素環化学討論会 (2015 年 11 月 16 日)
安井英子、大貫智史、嶋田佑太、津田隼平、近藤匠、南雲紳史
- (15) 多剤耐性克服活性を有する Sekothrixide の改良合成
第 70 回有機合成化学協会関東支部シンポジウム (2015 年 11 月 21 日)
勝見大介、中曾根和樹、安井英子、宮下正昭、南雲紳史
- (16) Arenicolide 類の合成研究
第 58 回香料・テルペンおよび精油化学に関する討論会 (2015 年 9 月 6 日)
砂川晶、内藤美菜子、勝見大介、安井英子、宮下正昭、南雲紳史
- (17) 新規 7 員環合成法の開発
第 58 回香料・テルペンおよび精油化学に関する討論会 (2015 年 9 月 5 日)
安井英子、大月理央、高山敢、樋口すみ香、南雲紳史
- (18) Prins/Friedel-Crafts タンデム環化反応を用いた種々の検討
第 69 回有機合成化学協会関東支部シンポジウム (2015 年 5 月 16 日)
坂田優希、安井英子、高取和彦、南雲紳史

網羅的生体分子情報の高速解析システムの開発と 次世代型がん個別最適化治療法への応用

工学院大学 工学部 電気電子工学科 福岡 豊
東京医科大学 医学総合研究所 分子腫瘍研究部門 梅津知宏 大屋敷純子

Development of Efficient and Integrative Methods for Multi-omics Data and
their Application to Individually Optimized Cancer Therapy

Yutaka Fukuoka, Department of Electrical and Electronic Engineering,
Kogakuin University
Tomohiro Umezu and Junko H. Ohyashiki, Department of Molecular Oncology,
Tokyo Medical University

ABSTRACT: In this project, we are developing a fast processing system as well as an integrative analysis method for high throughput measurements, such as next generation sequencer (NGS). We are aiming at applying the developed system and method to individually optimized cancer therapy. To achieve the goal, the following three issues are addressed: 1) Effective processing of data from NGS, 2) an integrative method for various high throughput data to extract more useful information, and 3) new biomarkers for accurate diagnosis. In this report, we described our progresses in each of the issues.

1. はじめに

人口の高齢化にともない、がん患者数も増加している (Fig. 1)。2012 年の死亡者数は約 36 万人、2010 年の新規患者数は 80 万人以上と推計されている。手術、薬物、放射線などの治療法も急速に進歩しているが、死亡者数を十分に抑制できていないのが現状である。

また、多くの患者が抗がん剤の副作用に苦しんでいる。抗がん剤の治療効果に影響を与える最大の要因は、患者の遺伝的背景およびがん細胞における塩基配列の変異である。したがって、患者個々に適した抗がん剤を選択し、至適な量を投与するためには、患者個々についてゲノム情報を解読する必要がある。このように患者個人のゲノム情報を利用した治療を次世代型がん個別最適化治療とよび、その実現が切望されている。

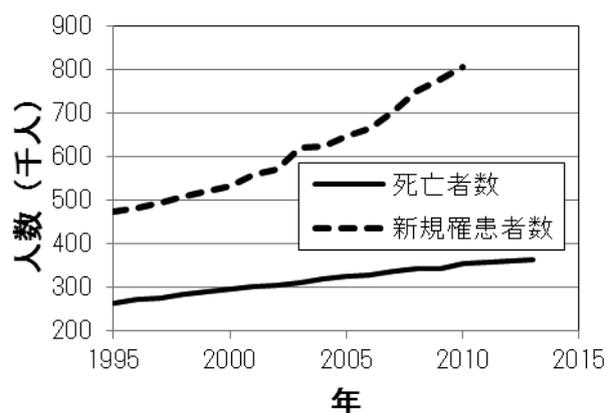


Fig. 1 Trend in the number of cancer patients (created from the statistics by the National Cancer Center).

本研究は次世代型がん個別最適化治療の実現を目指し、以下の3項目を達成することを目的としている。

- (1) 次世代シーケンサ (NGS) ・データを効率的に処理する方法を開発する。
- (2) 医学、生物学の先験的知識を活用し、異種データを統合的に解析する方法を開発する。
- (3) 開発した解析法をがん細胞由来のデータに適用し、抗がん剤 (イマチニブ等) の治療効果判定等、次世代型がん個別最適化治療に役立つ新規バイオマーカーを開発する。

本研究では以下の実施計画に基づいて研究目的の達成を目指している。まず、NGS データの効率的処理法と統合解析法の提案を中心に検討を進める。次に患者データ等の蓄積と解析を行い、治療効果判定等のための新規バイオマーカー候補の抽出を行う。最終的には、既存の知見等を参考にして候補を絞り込み、新規バイオマーカーとして実用化を図ることを目指す。

以下では、これまでの研究成果を中心に、(1) NGS データの効率的処理法、(2) 異種データの統合解析法、(3) イマチニブ治療効果に関するバイオマーカーの探索についての研究成果を述べる。

2. NGS データの効率的処理法の開発

2.1. はじめに

NGS は DNA の塩基 (アデニン、チミン、シトシン、グアニン) の並びを分割して並列に読み取る装置である¹⁾。NGS の登場によって個人の塩基配列を数日以内に決定することが可能になった。塩基配列の決定によって、患者個人の遺伝的背景やがんによる変異を知ることができる。しかし、30 億塩基対を持つヒトの塩基配列データは、しばしばテラバイト・オーダーのビッグデータとなり、データ解析がボトルネックとなっている。

分割して読み取った配列情報 (リード) を元の DNA (参照配列) にマッピングすることで、リードがどこに由来した配列であるか調べることができる。すなわち、マッピングとは参照配列に文字列を当てはめていく操作である。NGS では、DNA を 300 塩基程度に分割して読み取るので、マッピングを CPU 1 基のみで行うと、30 億の塩基から 300 塩基を見つける作業を何十万回も繰り返すため、かなりの時間が必要となる。

この作業はリードごとに行われるので、並列化することが可能であると考えられる。

GPU は Graphic Processing Unit の略称であり、その名の通り、画像処理用に開発されたプロセッサである。近年、GPU を画像処理以外の目的に用いる GPGPU という技術が注目されており、ゲノム情報処理をはじめとする様々な分野に応用されている。GPGPU を用いて並列にマッピングを行うことで処理時間を短縮することができると考えられる。本研究では、GPGPU による高速化の第一段階として、マッピングを行うソフトウェアの一部を GPGPU 化した。

一方、塩基配列の変異のうち、特徴的なものを効率的に探索する方法も確立されていない。多くの研究では一塩基多型 (SNP) を検出しているが、膨大な数の変異が存在するので、その中から意味のある情報を抽出するのが困難である。本研究では、2 条件間で異なる変異のみを検出する方法によって、効率的に有用な情報を抽出できないか検討している。

以下で、2 つの方法について説明する。

2.2. マッピングの GPGPU 化

GPGPU プログラミングには、NVIDIA 社が提供している C/C++ の統合開発環境である CUDA を用いた。GPGPU でプログラムを実行する時の処理の流れを Fig. 2 に示す²⁾。GPU の IO に関する命令は CPU が行う。GPU と CPU はメモリを共有していないため、それぞれ必要なメモリを確保する必要がある。また、

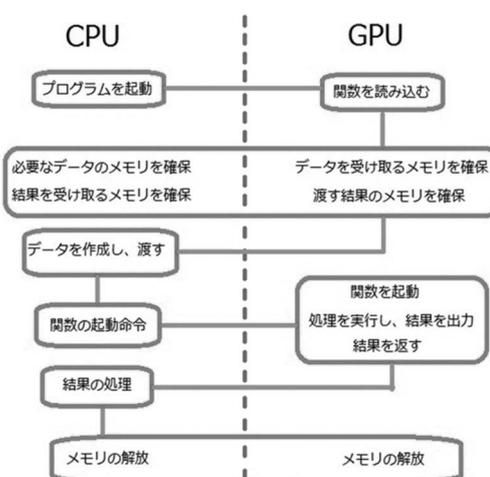


Fig. 2 Flowchart of GPGPU processing.

処理時間には、メモリの確保、データの受け渡しの時間も含めるものとする。

マッピングのためのソフトウェアである Burrows-Wheeler Aligner (BWA)³⁾のソースファイルを手入れして、一部を GPU 用書き換えた。BWA は C 言語で書かれており、プログラミング言語を変えずに CUDA での開発が可能である。今回は、BWA の処理のうち、インデックスを付ける関数の一部を GPU で処理するように書き換えた⁴⁾。

BWA は Li らによって開発された NGS のリード・データをマッピングするソフトウェアである³⁾。Suffix Array (SA) と Burrows-Wheeler Transform (BWT)⁵⁾を利用してマッピングを行う。

SA の作成は以下の手順で行う。まず、与えられた文字列の末尾に\$を挿入する。Fig. 3 の例では一番上にあるように coror の末尾に\$を挿入し、coror\$とする。次に、\$が先頭に来るまで文字列を一文字ずつシフトし、それぞれにインデックスを付ける (Fig. 3 左)。これら 6 つの文字列を辞書順にソートする (Fig. 3 右)。その際、\$はどのアルファベットよりも前に来るものとする。ソート後のインデックスの配列が SA である (Fig. 3 の S(i)が SA である)。BWT は、ソート後の配列の末尾の文字列を得る操作のことである。

Fig. 3 に示すように、文字列 coror から SA を作成すると、S(i) = (5, 0, 3, 1, 4, 2)となり、BWT 後の文字列は、B[i] = r\$rcoo となる。ただし、i = 0, 1, ..., 5 である。

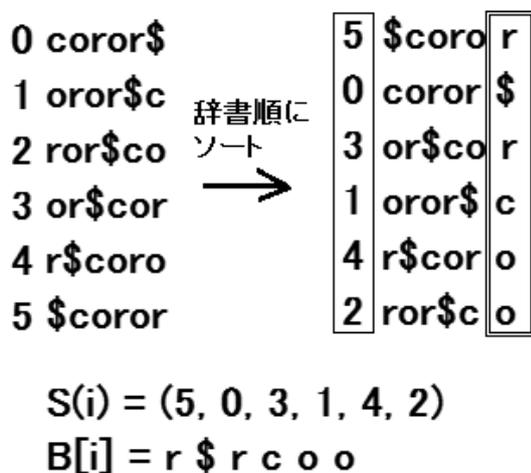


Fig. 3 Example of BWT and SA.

これらに基づき、BWA は式 (1) を用いて、後ろの文字から数学的にマッピングを行う。式 (1) は、W という文字列の位置がわかっている (マッピングが完了している) 場合に、aW という文字列をマッピングする計算を示している。

$$\left. \begin{aligned} \underline{R}(aW) &= C(a) + O(a, \underline{R}(W) - 1) + 1 \\ \overline{R}(aW) &= C(a) + O(a, \overline{R}(W)) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 $\underline{R}(W)$ と $\overline{R}(W)$ は W で始まるインデックスの最小値と最大値を表している。ただし、W が空文字の場合、 $\underline{R}(W) = 1$ および $\overline{R}(W) = n - 1$ とする (n は \$を含めた文字列全体の長さである)。C(a) は文字列全体中での a より小さい文字の個数であり、定数となる。O(a, i) は BWT 後の配列で i 番目までに文字 a が出現する回数である。

例として、coror の or をマッピングすることを考える。Fig. 3 右での r の位置から、 $\underline{R}(r) = 4$ 、 $\overline{R}(r) = 5$ であることがわかる。一方、o より小さい文字は c が 1 つだけなので、C(o) = 1 である。これを式 (1) に代入すると $\underline{R}(or) = 2$ 、 $\overline{R}(or) = 3$ となる。S(i)で i = 2 のとき 3、i = 3 のとき 1 であるので、もとの文字列の 1、3 番目に or があることがわかる。このように式 (1) を用いて数学的にマッピングを行うことができる。

BWA のソースプログラムで、SA から BWT の文字列を繰り返し求める部分を GPGPU で並列化した。酵母のデータを使用して、CPU のみで計算を行う場合と GPGPU 化した場合の速度を比較した。

結果を Table 1 に示す。Fig. 2 に示すように、全体の実行時間には、メモリ確保やデータ受渡しの時間も含まれている。したがって、全実行時間を比較すると大きな差はない。計算部分のみを比較すると、CPU の 70%程度の時間でマッピング処理が完了していることがわかる。

Table 1 Comparison of BWA executing time by CPU and GPGPU.

	全実行時間 (秒)	計算部分の み(秒)
CPU	4.82	0.17
GPGPU	4.77	0.12

酵母のゲノム 1200 万塩基であり、30 億塩基を持つヒトと比べるとサイズが小さいので、CPU と GPGPU の差が出にくいものと考えられる。ヒトゲノムの処理を行う場合は、処理時間の差が大きくなり、GPGPU による高速化の効果が顕著になると期待される。

2.3. NGS データからの特徴的変異検出法

NGS データはマイクロアレイ・データよりも膨大なため、有用な情報を抽出することはより難しくなる。そこで、本研究では、膨大な量の変化を対象とせず、欠失と挿入のみを解析対象とすることとした。2 条件で得られたリード・データを遺伝子ごとに比較し、条件間で各変異に対応したリードの数が大きく異なる遺伝子を抽出する方法を提案した⁶⁻⁸⁾。これによって、対象とする遺伝子の数が絞られるので、効率的に有用な遺伝子を抽出できるものと期待される。この方法を以下のデータに適用した。

測定の対象は多発性骨髄腫由来細胞株を低酸素下で長期間培養したものと通常の条件で培養したものの 2 種類である。Illumina 社 MiSeq および TruSight Cancer Panel を用いて計測したリード・データを上記の方法で処理した。なお、マッピングには BWA³⁾、アライメントには pindel⁹⁾を用いた。抽出された遺伝子の機能を DAVID¹⁰⁾で解析したところ、Table 2 のような結果を得た⁸⁾。これは提案した方法によって、特定の機能を持つ遺伝子が有意に多く検出されることを示しており、この方法によって意味のある結果が抽出できることを示唆している。今後、その有効性についてさらに検討する。

Table 2 DAVID による機能解析結果 (一部抜粋)

カテゴリ	機能	Count	p 値
GO_BP	nucleotide-excision repair	7	1.3×10^{-10}
GO_BP	DNA repair	10	3.8×10^{-10}
GO_BP	strand displacement	6	1.2×10^{-9}
GO_BP	DNA synthesis involved in DNA repair	6	5.7×10^{-9}

3. 統合解析法の開発

3.1. はじめに

マイクロアレイや NGS などのハイスループットな

技術を用いて網羅的に生命情報が収集されている。測定条件 (患者数等) に比べて、パラメータ (遺伝子等) の数が非常に大きくなり、これまでの生体信号のように数理的な方法だけでは有用な情報を効率的に抽出できない。医学・生物学的知見を含めて総合的にデータを解釈し、正常な細胞活動の乱れとして疾患を捉える視点が求められている¹¹⁾。

細胞内において遺伝子やタンパク質等の分子は相互作用しながら機能を果たしている。そこで、細胞内における遺伝子やタンパク質の量を網羅的に計測する技術が発展してきた。しかし、ハイスループットな計測では、自由度の大きいデータが得られるうえに、計測時のノイズも無視できないという問題がある¹²⁾。そこで、既知の生物学的知見や異種データと組み合わせることによって、有益な情報を抽出する方法が研究されている。

我々も生命分子システムの異常としてがんを理解することを目標に、ハイスループットなデータを統合的に解析する方法を研究している。研究成果を次世代型がん個別最適化治療法の開発に応用することを目指している。

3.2. がんと microRNA

microRNA (miRNA) はタンパク質をコードしない 22 塩基程度の短い RNA であり、多くの遺伝子の発現を調整していることがわかっている¹³⁻¹⁴⁾。近年、がんにおける miRNA の役割が注目を集め、世界中で研究がさかんに行われている¹⁵⁾。そのような中で、HeLa 細胞で 90 の miRNA をノックダウンすると細胞増殖とアポトーシスに影響が生じる¹⁶⁾、がんで異常な発現を示す miRNA が多い^{14,17)}、50%以上の miRNA ががんに関連する部位近傍にある¹⁸⁻¹⁹⁾、乳がん・甲状腺がん・メラノーマにおいて 41 の miRNA がコピー数異常を示す²⁰⁾ことなど、がんと miRNA の関係についての多数の報告がある。

miRNA と遺伝子の両方の発現を比較することにより、がんにおける miRNA の役割を考察した研究はほとんど存在しない。そこで、我々の研究グループでは、肝細胞臓癌について、癌部と非癌部の双方で miRNA と遺伝子 (mRNA) の発現をマイクロアレイによって

測定し²¹⁻²²⁾、両者を統合解析することで miRNA が遺伝子に与える影響を解析した²²⁻²⁶⁾。

3.3. がんにおける miRNA-遺伝子の相互作用のシステム論的解析

我々は miRNA の役割を解明するために、miRNA と mRNA の相互作用を大規模に解析してきた²²⁾。その中で、遺伝子の intron に存在する miRNA (intronic miRNA とよぶ) とその遺伝子 (ホスト遺伝子) の関係が、癌部と非癌部で異なることを見いだした。

具体的には、肝臓癌では intronic miRNA とホスト遺伝子の発現の相関が有意に高くなることがあった。intronic miRNA によって制御される遺伝子 (ターゲット遺伝子) とホスト遺伝子の間に相互作用がある場合、intronic miRNA-ホスト遺伝子-ターゲット遺伝子の間にループ構造ができる。周囲の非癌部では、intronic miRNA とホスト遺伝子の発現の相関が低いので、ループ構造ができない。この構造の相違が、がんのメカニズムに関係していると考えた。また、がん細胞の高い増殖力は、細胞内の制御がうまく働かないことを意味しており、不安定な状態にあるとみなすことができる。

我々は上記のループ構造がポジティブフィードバックであるとの仮説をたてた²³⁻²⁶⁾。肝臓癌患者 40 人の miRNA と遺伝子の発現データ²¹⁾を用いて、仮説の検証を試みた。しかし、測定数が少ないので、データから直接ポジティブフィードバックであるかを検討できない。そこで、シミュレーションによって発現データを模擬して、ポジティブフィードバックの有無が発現データにどのような影響を与えるかを検討した²³⁻²⁶⁾。

シミュレーションでは、2 種類の遺伝子ネットワークを用いた。解析の結果、ロジスティックモデル²⁷⁾を参考にして、飽和特性を導入したモデルを用いると、実際のデータと類似した特性が得られることがわかった。その際、大きなノイズの存在が重要であることを見出した²⁶⁾。

飽和特性は、細胞内の物質の有限性を考慮すると現実的な仮定である。一方、比較的大きなノイズが何に相当するかが問題である。実際のホスト遺伝子-intronic microRNA-ターゲット遺伝子は、これら 3

つ以外の要素ともネットワークを形成している。従って、3 つ以外の要素からの入力をノイズとして表現していると考えれば、大きなノイズの存在は不自然な仮定ではない。

3.4. マイクロアレイ・データの統合解析

がんの病態をシステムとして捉えることを目指して、文献 20 の方法を発展させて、miRNA と mRNA の発現を同時に解析する統合解析法を提案した²⁸⁻³²⁾。

まず、多くの先行研究と同様に、2 つの条件で発現が変化した miRNA と mRNA を検出し、両者間の制御関係を考慮することによって、変化が顕著に生じた機能を抽出する方法を提案した²⁸⁻³⁰⁾。以下では、この大きく変化する miRNA/mRNA を抽出して組み合わせる方法を個別検出による統合解析法とよぶ。しかし、この方法は、データサイズが小さいときには、抽出された miRNA のターゲットである mRNA が抽出される可能性が低く、有効な結果が得られないことがわかった。

そこで、大きく変化する miRNA を抽出した後に、その miRNA が制御する全ての遺伝子 (mRNA) を対象として遺伝子機能を調べ、発現変化があった遺伝子機能をグループとして抽出する方法を提案した³¹⁻³²⁾。以下では、この方法を統計的統合解析法とよぶ。

3.4.1. 個別検出による統合解析法

miRNA は Applied Biosystems 社 TaqMan Low-density Human microRNA array A card (ver. 3) を用いて測定した。測定ごとのばらつきが小さかったので、測定は 1 回のみとした。そこで、一定の割合 R_{th} 以上で発現が変化する miRNA を抽出することとした。割合の閾値 R_{th} としては 1.5、2.0、3.0 の 3 種類を用いた。

mRNA の発現は Affymetrix 社 GeneChip Human Gene 1.0 ST Array を用いて測定した。測定ごとのばらつきが無視できないので、各条件について 2 回の測定を行った。2 条件×2 回の測定データについて平均値に関する t 検定を行い、発現に有意な差がある mRNA を抽出した。有意水準 p_{th} としては 0.001、0.005、0.01 の 3 通りを用いた。したがって、 R_{th} と p_{th} の組合せは合計で 9 通りである。その中で最適なものを探し

た²⁸⁾。

次に、miRNA のターゲット遺伝子予測 web ツールである MAGIA³³⁾と本研究室で開発したターゲット遺伝子データベース³⁴⁻³⁶⁾を用いて、検出された miRNA それぞれについてターゲット遺伝子を決定する。最後に、各 miRNA について、有意な発現変動を示すターゲット遺伝子の機能を遺伝子機能解析 web サービスである DAVID¹⁰⁾を用いて調べる。これによって、miRNA ごとに分けずに解析するよりもターゲット遺伝子について有用な情報を抽出することができる。

Table 3 は 9 通りの閾値の組合せについて、検出された miRNA の数 (上段) とターゲット遺伝子機能の数の平均値と標準偏差 (下段) を示している。何れの組合せでも平均値が 1 以下であり、1 つの miRNA について抽出されるターゲット遺伝子の機能は非常に少ないことがわかる。したがって、閾値の設定を厳しくしすぎると、意味のある結果を抽出できない可能性がある。一方で、条件を緩和すると変化の有意性に疑問が生じるので、これ以上の緩和は望ましくない。これらの結果から、 $R_{th}=1.5$ 、 $p_{th}=0.01$ の組合せが最適であると判断した²⁸⁾。

この条件で検出された遺伝子機能を Table 4 に示す。アポトーシスなど、がんに関連がある機能が検出されているが、有意に変化する mRNA の数は少ない。これは、本研究で用いたマイクロアレイによる測定数が少ないためである。

その後、同種の細胞株について測定を行い、この方法を適用したところ、検出された miRNA のターゲットである mRNA が抽出される可能性が低いことがわかった。すなわち、マイクロアレイ数が少ない小規模なデータに対しては、有効な結果が得られない可能性が高いことが示唆された³¹⁾。

3.4.2. 統計的統合解析法

上記の結果を踏まえて、本研究では miRNA と遺伝子の少数の発現データからも解析可能な方法を提案した³¹⁻³²⁾。この方法は、miRNA によって制御される特定の機能を持った遺伝子群をグループとして比較するものである。

まず、大きく発現変化する miRNA を検出する。ま

た、mRNA については t 統計量を計算する。次に、検出された miRNA が制御する遺伝子群を MAGIA³³⁾と本研究室で開発したターゲット遺伝子データベース³⁴⁻³⁶⁾を用いて決定する。それらのターゲット遺伝子群が特異的に持つ機能を DAVID¹⁰⁾を用いて調べる。有意に多くのターゲット遺伝子を含む機能に着目し、以下の解析対象とする。遺伝子発現データに対象の機能を持つ遺伝子 (mRNA) が含まれる場合、その mRNA の t 統計量を抜き出す。抜き出された mRNA と同じ数だけ、発現データからランダムに mRNA を選び、 t 統計量を抜き出し、対照群とする。Wilcoxon 順位和検定を用いて、両群に違いがあるかを検定する。有意な違い

Table 3 The total numbers of the significantly enriched functions of the differentially expressed target genes for all differentially expressed miRNAs.

閾値		R_{th}		
		3.0	2.0	1.5
p_{th}	0.01	74 0.49±0.86	103 0.47±0.99	134 0.51±0.95
	0.005	62 0.20±0.48	90 0.20±0.55	119 0.19±0.49
	0.001	24 0.29±0.62	39 0.13±0.34	52 0.21±0.54

各セルの上段は発現変化した miRNA の数を表し、下段は有意に多く含まれる遺伝子機能の数の平均値と標準偏差を表している。

Table 4 Examples of the significantly enriched functions of the differentially expressed target genes of miR-130b.

ターゲット遺伝子機能		p 値
1	regulation of apoptosis	9.5×10^{-4}
	regulation of programmed cell death	0.001
	regulation of cell death	0.001
2	intracellular protein transport	0.001
	cellular protein localization	0.002
	cellular macromolecule localization	0.002

がある場合、その機能に 2 条件の間で発現変化があったとみなす。

提案した統計的統合解析法の有効性を検証するために、シミュレーションと実際のデータを用いた検討を行った。

シミュレーションには以下の手順を用いた。なお、発現データは対数正規分布に従うと仮定した。

- 1) 各 mRNA について t 統計量を計算する。
- 2) 遺伝子発現データの全体の平均を計算する。
- 3) 2) で計算した平均値の $x\%$ の値を計算する。
- 4) 遺伝子発現データを対数変換し、平均と分散を計算する。
- 5) 3) の値を対数変換した値を平均として、分散が 4) と等しい正規分布から乱数を発生させる。
- 6) miRNA のターゲット遺伝子群を決定し、対数変換後の発現量を 5) の値と置き換える。
- 7) 6) と同数の遺伝子をランダムに選び対照群とする。

このように作成したシミュレーションデータに統計的統合解析法を適用した。すなわち、ターゲット遺伝子群と対照群に対し、Wilcoxon 順位和検定を行い、 t 統計量の分布に有意差があるかを調べた。 $x=100, 50, 30$ の 3 通りについて、100 回のシミュレーションを行い、 $x=50, 30$ の場合に、両群間に有意差があるかを調べた。

その結果、 $x=100$ の場合は、有意差がある試行はほとんどなく、 $x=50$ 場合には有意確率は $10^{-12} \sim 10^{-4}$ の範囲、 $x=30$ 場合には有意確率は $10^{-65} \sim 10^{-46}$ の範囲となった。統計的統合解析法の有効性を示唆する結果が得られた。

次に、3.3.1. と同じデータに適用し、実データに対する有効性を検討した。 t 検定で有意差が検出された miR-93 のターゲット遺伝子群に、統計的統合解析法を適用したところ、transcription (DNA-templated)、DNA binding、ATP binding などの遺伝子機能が有意に多く含まれるものとして検出された。これらの機能について、ターゲット遺伝子群と対照群の差を検定したところ、ATP binding, protein kinase activity, intracellular receptor signaling pathway, cadherin

binding involved in cell-cell adhesion などの機能が検出された。何れもがんと関係ある機能であり、3.3.1. の結果よりも多くの機能を含んでいた³¹⁻³²⁾。この結果は、小規模データについては、統計的統合解析法のほうが有効である可能性を示している。

4. イマチニブの治療効果マーカの探索

4.1. はじめに

臨床の現場では、慢性骨髄性白血病に使われる抗癌剤であるイマチニブの投与を中止しても寛解が維持される患者が存在することが知られている。投与中止によって再発する患者も存在するため、中止を判断するためのバイオマーカの開発が切望されている。そこで、我々は患者のデータを解析し、新規マーカの候補を探索した。

4.2. 血漿 miRNA の網羅的発現解析による探索

投与中止後も完全寛解を維持している慢性骨髄性白血病患者 10 人と健常者 10 人（対照群）から血漿 miRNA を抽出し、TaqMan PCR array を用いて miRNA の発現量を測定した。

得られたデータについて Wilcoxon 順位和検定を行い、2 群で発現が有意に異なる miRNA を検出したところ、miR-215 を含む 3 つが検出された。3 つの miRNA について、ターゲット遺伝子を MirTarBase³⁷⁾ から抽出した。その結果、miR-215 のみでターゲット遺伝子がみつかった。その機能を調べたところ、cell cycle, mitosis, DNA metabolic process に関係する遺伝子が多く含まれていた。また、この中には慢性骨髄性白血病に関する Pathway³⁸⁾に含まれるものが見つかった。

そこで、この miRNA に注目して、さらに多くの患者および健常者について血漿とエクソソーム中の miRNA を RT-PCR によって測定した³⁹⁾。被験者の正確な人数は、以下の通りである。投与中止後も完全寛解維持をしている患者 20 人、投与により病状を抑えることができている患者 32 人、健常者 28 人である。解析の結果、中止後に完全寛解を維持している患者の血漿中において miR-215 のレベルが顕著に低下していることが見いだされた。これは miR-215 がイマチニ

ブ中止後の完全寛解維持において何らかの役割を果たしており、新たなバイオマーカーとなり得ることを示唆している。

5. まとめ

本研究では、次世代型がん個別最適化治療の実現を目指し、NGS データ解析の高速化法の開発、統合解析法の提案、新規バイオマーカーの探索を行っている。本報告では、上記の 3 項目について研究成果を述べた。

参考文献

- [1] 鈴木穰、菅野純夫: 次世代シーケンサー目的別アドバンスメソッド、秀潤社、2012.
- [2] 青木尊之: はじめての CUDA プログラミング、工学社、2009.
- [3] H. Li and R. Durbin: Fast and accurate short read alignment with Burrows - Wheeler transform, *Bioinformatics*, vol. 25, 1754-1760, 2009.
- [4] 太田祥貴、福岡 豊: 次世代シーケンサ用のマッピングソフトウェアの GPGPU プログラミング、電気学会 光・量子研究会 OQD-15-036、2015.
- [5] M. Burrows and D. J. Wheeler: A block-sorting lossless data compression algorithm, *Technical Report 124*, Digital Equipment Corporation, Palo Alto, CA, 1994.
- [6] 松井一馬、福岡 豊、大屋敷純子、梅津知宏: 次世代シーケンサデータの 2 条件比較による要因遺伝子の抽出、第 55 回日本生体医工学会大会抄録集 P3-N12、2016.
- [7] K. Matsui, T. Umezu, J. H. Ohyashiki, Y. Fukuoka: A method to extract differential mutations by comparing next generation sequencing data from two conditions, 16th ISAT, P082, 2017.
- [8] 松井一馬、梅津知宏、大屋敷純子、福岡 豊: NGS データを用いた遺伝子領域内の配列変異の比較による要因遺伝子の抽出法、電子情報通信学会技術報告 MBE2017-95、2018.
- [9] K. Ye, *et al.*: Pindel: a pattern growth approach to detect break points of large deletions and medium sized insertions from paired-end short reads, *Bioinformatics*, 25, 2865-2871, 2009.
- [10] D. W. Huang, B. T. Sherman, R. A. Lempicki: Systematic and integrative analysis of large gene lists using DAVID Bioinformatics Resources, *Nature Protocols*, 4, 44-57, 2008.
- [11] H. Kitano: *Systems biology: a brief overview*, *Science*, 295, 1662-1664, 2002.
- [12] I. S. Kohane, A. T. Kho, A. J. Butte: *Microarrays for an integrative genomics*, MIT press, 2003.
- [13] V. Ambros: The functions of animal microRNAs, *Nature*, 431, 350-355, 2004.
- [14] D. P. Bartel: *MicroRNAs: genomics, biogenesis, mechanisms, and function*, *Cell*, 116, 281-297, 2004.
- [15] E. A. C. Wiemer: The role of microRNAs in cancer: no small matter, *European Journal of Cancer*, 43, 1529-1544, 2007.
- [16] A. M. Cheng *et al.*: Antisense inhibition of human miRNAs and indications for an involvement of miRNA in cell growth and apoptosis, *Nucleic Acids Research*, 33, 1290-1297, 2005.
- [17] Y. Murakami *et al.*: Comprehensive analysis of microRNA expression patterns in hepatocellular carcinoma and non-tumorous tissues, *Oncogenes*, 25, 2537-2545, 2006.
- [18] G. A. Calin, *et al.*: Human microRNA genes are frequently located at fragile sites and genomic regions involved in cancers, *Proceedings of National Academy of Sciences USA*, 101, 2999-3004, 2004.
- [19] P. Lamy, *et al.*: Are microRNAs located in genomic regions associated with cancer?, *British Journal of Cancer*, 95, 1415-1418, 2006.
- [20] L. Zhang *et al.*: microRNAs exhibit high frequency genomic alterations in human cancer, *Proceedings of National Academy of Sciences USA*, 103, 9136-9141, 2006.
- [21] Y. Katayama, *et al.*: Identification of pathogenesis-related microRNAs in hepatocellular carcinoma by expression profiling, *Oncology Letters*, 4, 817-823, 2012.
- [22] Y. Fukuoka, M. Tashiro, T. Uchiyama: Systems analysis of interactions between microRNAs and genes in hepatocellular carcinoma, *Proceedings of IEEE EMBC 2013*, 600-603, 2013.
- [23] 都倉悠亮、福岡 豊: がんにおける遺伝子と microRNA のループ構造の影響の検討、第 55 回日本生体医工学会大会抄録集 P3-N18、2016.
- [24] 都倉悠亮、福岡 豊: がんにおける遺伝子と microRNA のフィードバックループに関する考察、電子情報通信学会技術報告 MBE2016-17、2016.
- [25] Y. Tokura and Y. Fukuoka: A study on feedback between microRNA and gene in cancer, *Proceedings of IEEE EMBC 2016 IEEE, FrCT9.4 2016*.
- [26] 都倉悠亮、福岡 豊: がんにおける遺伝子ネット

- ワークのフィードバックのシミュレーション解析、電気学会光・量子デバイス研究会 OQD-18-46、2018.
- [27] L. J. S. Allen、竹内康博、佐藤一憲、守田智、宮崎倫子共訳：生物数学入門、共立出版、2011.
- [28] 大木拓也、梅津知宏、大屋敷純子、福岡 豊：miRNA と mRNA の統合解析によるがん細胞の低酸素適応のメカニズム解析、第 54 回日本生体医工学会大会抄録集 P2-5-26-A、2015.
- [29] T. Ohki, T. Umezu, J. Ohyashiki, Y. Fukuoka: Integrative analysis of expression levels of miRNA and mRNA: Investigation of hypoxic tolerance in leukemia, Proceedings of 37th IEEE EMBC, SaBPoT8.10, 2015.
- [30] 大木拓也、福岡 豊、大屋敷純子、梅津知宏：miRNA と mRNA の統合解析における発現変化の閾値の最適化、第 55 回日本生体医工学会大会抄録集 P2-N13、2016.
- [31] 大木拓也、福岡 豊、大屋敷純子、梅津知宏：microRNA と遺伝子の統計的統合解析、電子情報通信学会技術報告 MBE2016-101、2017.
- [32] T. Ohki, T. Umezu, J. H. Ohyashiki, Y. Fukuoka: A statistical integrative analysis method for small size expression data of microRNAs and genes, IEEE EMBC 2017, FrDT11-06.2, 2017.
- [33] G. Sales, *et al.*: MAGIA, a web-based tool for miRNA and Genes Integrated Analysis, Nucleic Acids Research, 38, W352-W359, 2010.
- [34] Y. Fukuoka and M. Fujita: A method for predicting targets of microRNA based on multiple databases and its application to cancer related microRNAs, Proceedings of 37th IEEE EMBC, SaBPoT8.8, 2015.
- [35] 松原 恵、梅津知宏、大屋敷純子、福岡 豊：microRNA と mRNA の統計的統合解析のためのターゲット遺伝子予測の改善、第 57 回日本生体医工学会大会抄録集、2018.
- [36] M. Matsubara, T. Umezu, J. H. Ohyashiki, Y. Fukuoka: An improvement of meta-database on microRNA target genes for statistical integrative analysis of microRNA and mRNA, IEEE EMBC 2018, WePoS.39, 2018.
- [37] S. D. Hsu, *et al.*: miRTarBase update 2014: an information resource for experimentally validated miRNA-target interactions, Nucleic Acids Research, 42, D78-D85, 2014.
- [38] M. Kanehisa and S. Goto: KEGG: Kyoto encyclopedia of genes and genomes, Nucleic Acids Research, 28, 27-30, 2000.
- [39] K. Ohyashiki, *et al.*: Downregulation of plasma miR-215 in chronic myeloid leukemia patients with successful discontinuation of imatinib, International Journal of Molecular Sciences, 17, Article #570, 2016.
- 【研究業績】
- 原著論文
- [1] K. Ohyashiki, T. Umezu, S. Katagiri, C. Kobayashi, K. Azuma, T. Tauchi, S. Okabe, Y. Fukuoka, J. H. Ohyashiki: Downregulation of plasma miR-215 in chronic myeloid leukemia patients with successful discontinuation of imatinib, International Journal of Molecular Sciences, 17, Article #570, 2016.
- [2] J. H. Ohyashiki, T. Umezu, K. Ohyashiki: Exosomes promote bone marrow angiogenesis in hematologic neoplasia: the role of hypoxia, Current Opinion Hematology, 23, pp. 268-273, 2016.
- [3] T. Umezu, S. Imanishi, K. Azuma, C. Kobayashi, S. Yoshizawa, K. Ohyashiki, J. H. Ohyashiki: Replenishing exosomes from older bone marrow stromal cells with miR-340 inhibits myeloma-related angiogenesis, Blood Advances, 1, pp. 812-823, 2017.
- 他 2 編、投稿準備中
- 国際会議発表
- [1] T. Ohki, T. Umezu, J. Ohyashiki, Y. Fukuoka: Integrative analysis of expression levels of miRNA and mRNA: Investigation of hypoxic tolerance in leukemia, Proceedings of 37th IEEE EMBC, SaBPoT8.10, 2015.
- [2] Y. Fukuoka, M. Fujita: A method for predicting targets of microRNA based on multiple databases and its application to cancer related microRNAs, Proceedings of 37th IEEE EMBC, SaBPoT8.8, 2015.
- [3] K. Ohyashiki, T. Umezu, S. Katagiri, C. Kobayashi, K. Azuma, T. Tauchi, Y. Fukuoka, J. H. Ohyashiki: Down-regulation of plasma miR-215 in chronic myeloid leukemia patients with successful imatinib discontinuation, 10th AACR-JCA Joint Conference on Breakthroughs in Cancer Research, B039, 2016.
- [4] Y. Tokura, Y. Fukuoka: A study on feedback between microRNA and gene in cancer, Proceedings of IEEE EMBC 2016 IEEE, FrCT9.4 2016.
- [5] K. Matsui, T. Umezu, J. Ohyashiki, Y. Fukuoka: Determination of differential mutations by comparing next generation sequencing data from

- two conditions, IEEE EMBC 2016, FrCT9.7, 2016.
- [6] T. Ohki, T. Umezu, J. H. Ohyashiki, Y. Fukuoka: A statistical integrative analysis method for small size rpression data of microRNAs and genes, IEEE EMBC 2017, FrDT11-06.2, 2017.
- [7] K. Matsui, T. Umezu, J. H. Ohyashiki, Y. Fukuoka: A method to extract differential mutations by comparing next generation sequencing data from two conditions, 16th ISAT, P082, 2017.
- [8] M. Matsubara, T. Umezu, J. H. Ohyashiki, Y. Fukuoka: An improvement of meta-database on microRNA target genes for statistical integrative analysis of microRNA and mRNA, IEEE EMBC 2018, WePoS.39, 2018.
- 国内学会発表
- [1] 太田祥貴、福岡 豊: 次世代シーケンサ用のマッピングソフトウェアの GPGPU プログラミング、電気学会 光・量子研究会 OQD-15-036、2015.
- [2] 大木拓也、梅津知宏、大屋敷純子、福岡 豊: miRNA と mRNA の統合解析によるがん細胞の低酸素適応のメカニズム解析、第 54 回日本生体医工学会大会抄録集 P2-5-26-A、2015.
- [3] 松井一馬、福岡 豊、大屋敷純子、梅津知宏: 次世代シーケンサデータの 2 条件比較による要因遺伝子の抽出、第 55 回日本生体医工学会大会抄録集 P3-N12、2016.
- [4] 都倉悠亮、福岡 豊: がんにおける遺伝子と microRNA のループ構造の影響の検討、第 55 回日本生体医工学会大会抄録集 P3-N18、2016.
- [5] 都倉悠亮、福岡 豊: がんにおける遺伝子と microRNA のフィードバックループに関する考察、電子情報通信学会技術報告 MBE2016-17、2016.
- [6] 大木拓也、福岡 豊、大屋敷純子、梅津知宏: miRNA と mRNA の統合解析における発現変化の閾値の最適化、第 55 回日本生体医工学会大会抄録集 P2-N13、2016.
- [7] 大木拓也、福岡 豊、大屋敷純子、梅津知宏: microRNA と遺伝子の統計的統合解析、電子情報通信学会技術報告 MBE2016-101、2017.
- [8] 松井一馬、梅津知宏、大屋敷純子、福岡 豊: NGS データを用いた遺伝子領域内の配列変異の比較による要因遺伝子の抽出法、電子情報通信学会技術報告 MBE2017-95、2018.
- [9] 都倉悠亮、福岡 豊: がんにおける遺伝子ネットワークのフィードバックのシミュレーション解析、電気学会光・量子デバイス研究会 OQD-18-46、2018.
- [10] 松原 恵、梅津知宏、大屋敷純子、福岡 豊: microRNA と mRNA の統計的統合解析のためのターゲット遺伝子予測の改善、第 57 回日本生体医工学会大会抄録集、2018.

非常時における音声通話確保を目的とした新しい通信受付制御方式

工学院大学 情報学部 情報通信工学科 馬場 健一

芝浦工業大学 工学部 情報通信工学科 宮田 純子

東京工業大学 工学院 情報通信系 山岡 克式

A Call Admission Control Method for Accepting More Voice Calls in Emergency Situation

Ken-ichi Baba, Department of Information and Communications Engineering, Kogakuin University

Sumiko Miyata, Department of Information and Communications Engineering, Shibaura Institute of Technology

Katsunori Yamaoka, Department of Information and Communications Engineering, Tokyo Institute of Technology

ABSTRACT : In emergency situations, telecommunication networks become congested due to large numbers of call requests. Several lines in telephone exchanges are generally reserved for emergency calls whose users communicate crucial information. Moreover, we consider that the holding time for general calls should be positively limited. In previous work, we proposed a novel call admission control method which can accept both required emergency calls and more general calls by utilizing trunk reservation control and holding time limitation control. In this paper, we propose a trunk reservation control method with allowing call waiting to reduce the call blocking probability. In comparison with the conventional method without waiting queue, our proposed method with waiting queue decreased the call loss probability for general calls while keeping the call loss probability for emergency calls low.

1. はじめに

地震や台風、事件などの非常時において、被災地・現場周辺への安否確認の通話や、被災地からの安否報告の通話等の大量の呼が発生することにより、ネットワーク内で輻輳が発生し、発信規制などによって通話したくても通話できないことが頻発する。まず、通話を優先電話と一般電話の2種類に分類する。優先電話とは、警察や消防が利用する電話など、通信制限を受けず、発信が優先される電話である(3)。一方、一般電話とは、非常時において主な通話要求は安否確認など、優先電話以外の電話である。優先電話は、優先的にネットワーク資源を割り当てるが、一般電話は優先電話に比べて優先度は低くなる。しかし、非常時の安否確認は個々のユーザにとっ

て重要であり、優先度は低いが可能限り通話を確保すべきと考えられる。このような緊急時の輻輳への対策として用いられる制御の一つとして回線留保制御がある。これは、優先電話と一般電話の発呼を区別し、回線交換機の最大収容数(これを回線数とする)のうち、一定数を優先電話専用として確保する制御である。すなわち、回線留保制御では、新規呼到着時に、使用中の回線数が予め設定された閾値以下である場合は、優先、一般両電話の通話要求を収容するが、使用中の回線数が閾値以上となる場合、優先電話の通話要求のみを収容し、一般電話からの通話要求を呼損とする。

また、非常時の輻輳制御における問題の一つに、一部の一般電話ユーザが長時間の通話によって回線を占有し、一般電話の収容数が減少する問題がある。非常時には多

くのユーザから通話要求が発生するため、このような状況での一般電話は、安否確認など必要最小限に通話時間を留めるべきである。この問題への対策として、更なる一般電話収容数増大のために、一般電話に対して通話時間制限を設けることが考えられる。

非常時の輻輳問題を解決する手法として、文献(1)(2)では回線留保制御と通話時間制限の二つの制御を用いた呼受付制御手法が提案されている。この呼受付制御手法では、優先・一般両電話を独立に取り扱い、待ち行列理論における M1M2/MD/s/s; th 待ち行列システムとして被災地の回線交換機をモデル化し、回線留保のための閾値緩和、及び一般電話の通話制限時間設定により、より多くの一般電話収容を実現する方式を提案している。そして、様々なトラヒック条件における優先・一般両電話の呼損率を計算機シミュレーションにより導出し、非常時において優先電話も収容しつつ、より多くの一般電話の収容も実現できることを明らかにしている。

しかし近年では、通話手段としてスマートフォンを用いた電話アプリケーションや IP 電話が普及し、回線交換網だけではなく IP 電話網も使われるようになった。IP 電話網とは、回線交換網のように交換機を用いて電話機、交換機同士を回線でつなぐネットワークではなく、インターネットを利用したネットワークである。IP 電話網では、音声データを IP パケットに変換して、相手先の IP アドレスを宛先にして IP 網に流し、相手先に IP パケットが届いたとき音声データに変換する。ただし、IP 電話網では、通話ごとに回線を占有させる回線交換網とは違い、音声データの IP パケットが流れる経路を占有できない(3)。文献(4)で、固定電話において、回線交換網から IP 電話網へ移行することを示しており、音声通話に IP 電話網を用いることが今後主流となることが予想される。そのため、回線交換網と同じように、IP 電話網にも非常時の輻輳対策を検討しなければならない。

文献(2)で行われた検証は回線交換機が対象であるため、IP 電話網においても適応可能かの検証は行われていない。そのため、非常時において IP 電話網でも有効であるか、IP 電話網での実装が可能であるか検証が必要である。そこで 2015 年度、2016 年度の研究では、文献(2)の提案方式が IP 電話網でも有効か実装して検証し、非常時において優先電話の確保および一般電話の収容増大を図ることが可能かを明らかにした。具体的には、SIP サーバにオープンソースの IP 電話サーバソフトである Asterisk、2 台の SIP 端末に多量の呼の生成、受付ツールである SIPp を用いた実験環境を構築し、Asterisk に回線留保制御のための閾値を設定する。100Mbps の回線上で 2 台の SIP 端末から多数の呼を発生させ、制御手法の効果を検証した。

一方、文献(2)においては、回線留保制御と通話時間制限の二つの制御を用いた呼受付制御手法を用いることによる効果を示しているが、例えば一般通話時間を 30 秒に制御した場合においても一般通話の呼損率が 90%

程度であり、依然と高い呼損率となっている。そこで本年度における研究では、既存の回線留保制御に対し、新たに一般通話の待時を許容することにより、呼損率の低減を図る。本研究における非常時の一般通話は、被災地への安否確認などを想定し、直ちに呼損とせず待時させることにより、呼損率を低減させる。これにより、短時間の待時によって通話が可能となる安心感を与えることができ、再呼数の削減にも効果があると考えられる。提案手法を待ち行列理論に基づくシミュレーションにより評価し、優先通話における呼損率を要求値以下に保ちつつ、一般通話における呼損率低減効果を明らかにする。

2. 緊急時回線留保制御における到着呼量に基づく閾値設定法

発信規制など以外の、別の輻輳対策として、回線留保制御と通話時間制限がある。回線留保制御とは、優先・一般電話からの発呼を区別し、Fig. 1(a)のように、回線交換機の最大収容数から優先電話専用として回線を留保する制御である。このとき、留保した回線を留保回線、留保していない回線を非留保回線とする。回線留保制御は、新規の呼が到着したときに、使用中の回線数があらかじめ設定していた閾値以下の場合、つまり非留保回線に空きがある場合は、優先・一般電話のどちらも通話要求も収容する。しかし、使用中の回線数があらかじめ設定していた閾値以上の場合、つまり非留保回線に空きがなく、留保回線に空きがある場合は、優先電話からの通話要求のみ収容し、一般電話からの通話要求は呼損とする。この制御の問題点として、留保回線数が適切でない場合、優先電話、一般電話のどちらも大きな呼損につながることである。Fig. 1(b)では、閾値を一般電話に対して厳しく設定し、優先電話専用の回線数を過剰に留保すると、優先電話はほぼ確実に収容されるが、優先電話に比べ一般電話からの通話要求が大量に到着する場合には、優先電話専用の回線に空きがあったとしても、多くの一般電話が収容されず呼損する。Fig. 1(c)では逆に、優先電話専用の回線数を少なめに留保すると、優先、一般電話ともに通話要求が多ければ、回線に空きが無くなり非常時に必要な通話要求が収容できず呼損する。このような問題を回避するためには、優先電話の呼量を予測して、留保する回線数を決める閾値は適切に設定しなければならない。

一方、通話時間制限とは、一般電話ユーザの通話に時間制限を設ける制御である。非常時において、多くのユーザから通話要求が発生し、その中で一部の一般電話ユーザが長時間通話をして回線を占有した場合、一般電話の収容数が減少する問題がある。一般電話ユーザの通話時間を、安否確認などに必要な最低限の時間に留めるように通話時間制限を設定することで、更なる一般電話の収容数増大につながる。Fig. 2 の上図では、通話時間制限を設けていないため、一般電話 A のユーザが長時間回線

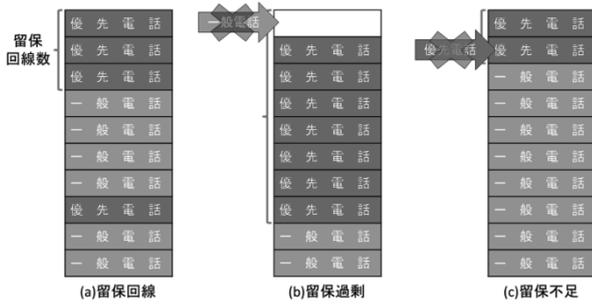


Fig. 1 Trunk reservation control.

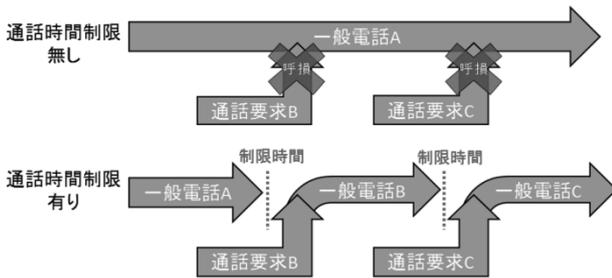


Fig. 2 Holding time control.

を占有し、通話要求してきた一般電話ユーザ B、C は収容されずに呼損してしまっている。しかし Fig. 2 の下図では、通話時間制限を設けたことで、一般電話 A のユーザが長時間回線を占有することもなく、制限時間になったとき退出している。その後、一般電話ユーザ B の通話要求も収容されてから制限時間になるまで通話でき、さらに通話要求してきた一般電話ユーザ C も収容されている。

この回線留保制御と通話時間制限を用いた輻輳対策の提案方式として文献(2)がある。文献(2)では、非常時の優先、一般両電話混在環境での回線交換機を想定し、Fig. 3 のような M1M2/MD/s/s; th 即時式完全線群としてモデル化を行っている。

回線交換機の最大電話収容数(回線数)は s 本とし、回線留保のための閾値を th 本としている。また、優先・一般両電話の到着率はそれぞれ平均 λ_e 、 λ_g のポアソン分布に従い、優先電話通話時間は平均値が $1/\mu_e$ の指数分布に、一般電話通話時間は一定値 h_g の一定分布に、それぞれ従っている。

文献(2)の閾値設定方式としては、到着する優先・一般両電話の呼量を予測し、閾値の設定に用いている。このとき、優先電話が留保回線のみならず非留保回線も利用可能であることを考慮して、予測される優先電話の呼量をすべて収容できるように回線を留保せずに、優先電話の予測呼量に対して留保回線数を減少させている。また、到着が予想される優先電話呼量 a_e を、優先電話の到着率 λ_e と平均通話時間 $1/\mu_e$ から式(1)により予測、一般電話呼量 a_g は、一般電話の目標呼損率 Br_g^* を設定し、全到着呼のうち Br_g^* の確率で収容される仮定のもと、一般電話の到着率 λ_g と通話制限時間 h_g から式(2)により予測

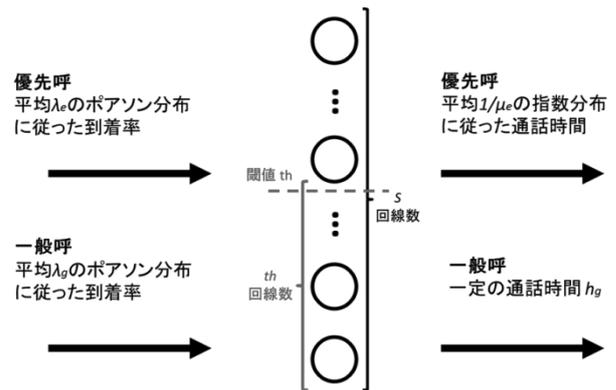


Fig. 3 Queuing model.

している。

$$a_e = \lambda_e \times 1/\mu_e = \frac{\lambda_e}{\mu_e} \quad (1)$$

$$a_g = (1 - Br_g^*) \lambda_g h_g \quad (2)$$

そして、閾値 th は次式により設定している。

$$th = \min \left(\left\lceil \frac{(s - a_e)(a_e + a_g)}{a_g} \right\rceil, s \right) \quad (3)$$

閾値の設定に式(3)を用いる理由としては、使用中の回線数が閾値 th 以上である間、新規に収容されるのは優先呼のみであり、使用中の回線数が再び閾値未満となるまで一般呼は新規に収容されない。一方、使用中の回線数が閾値未満である場合、新規に収容される優先電話と一般電話の呼数の比は、それぞれの到着率比 $\lambda_e : \lambda_g$ に等しい。さらに、一般電話の通話時間は制限されているため、一般呼は優先呼と比較して短時間に退去する。これらの点を考慮し、文献(2)では、輻輳発生から長時間経過後における非留保回線を占める優先呼および一般呼の比率は、それぞれの呼量の比 $a_e : a_g$ に従うと仮定し、閾値 th を次式より導出している。

$$s - \left(a_e - th \times \frac{a_e}{a_e + a_g} \right) = th \quad (4)$$

3. 待時を許容した回線留保制御の導入

本研究で想定する非常時の一般通話は、被災地や、事件現場にいるユーザから、もしくはユーザへの安否確認など、通常よりも強い通話要求があると考えられ、通話開始までに若干の待ち時間をユーザが許容する可能性が高い、そこで本章では、非常時の優先通話、一般通話の両通話が混在する環境における回線交換網を想定し、一般通話の待時を許容する回線留保制御および一般通話時間制御を行う回線交換機を待ち行列理論によってモデル化する。Fig. 4 に回線留保制御と待時キューを設定した回線留保制御の概念図を示す。

一般通話の通話時間が比較的短時間に制限されている場合、多くの一般通話ユーザが制限時間いっぱいまで通話を行うことが予想される。そこで本稿では、全一般ユーザの通話時間が一定値をとると仮定し、以下のように

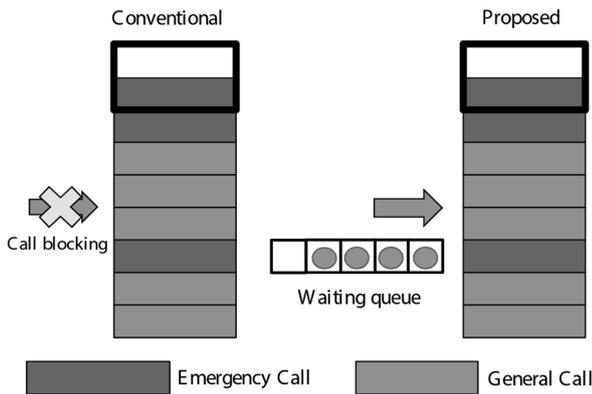


Fig. 4 Trunk reservation control with waiting queue.

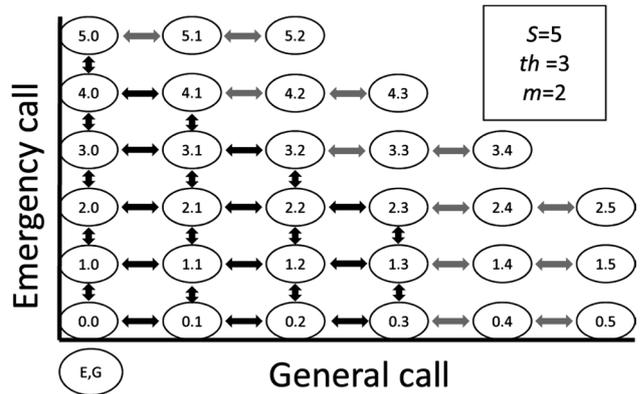


Fig. 6 Transition diagram.

Table 1 Parameter setting

s	1000 ~ 5000 [lines]
$\lambda_e + \lambda_g$	10000 [calls/min]
$\lambda_e : \lambda_g$	1:99, 3:97, 5:95, 10:90, 15:85, 20:80, 25:75
$1/\mu_e$	60 [sec]
h_g	10 ~ 180 [sec]
m	1, 10, 100, 1000

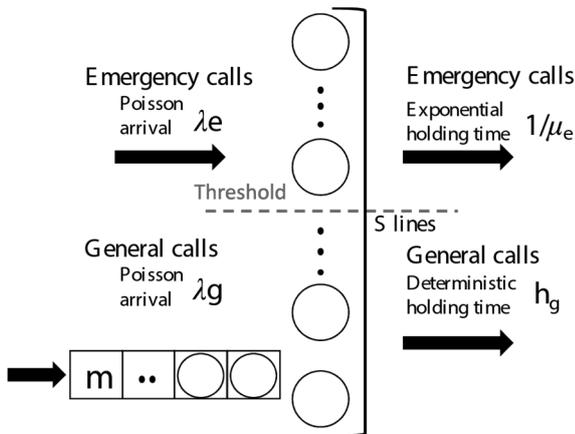


Fig. 5 Queuing model with waiting queue

M1M2/M1D2/S/S; $th + m$ 待ち行列システムとしてモデル化を行う。Fig. 5 に M1M2/M1D2/S/S; $th + m$ 待ち行列システムのモデル図を示す。そして、以下にモデル設定における条件を示す。

1. 回線交換機における最大収容呼数(回線数)は S 本とする。
2. 待ちキューの最大収容呼数は m 本とする。
3. 優先通話、一般通話の到着は、それぞれ平均 λ_e, λ_g のポアソン分布に従う。
4. 優先通話の通話時間は、平均値が $1/\mu_e$ の指数分布に、一般通話の通話時間は一定値 h_g の一定分布に従う。
5. 回線留保のための閾値を th 本とし、新規呼到着時に、使用中の回線数が th 未満であれば優先通話、一般通話いずれの通話要求も収容するが、使用中の回線数が閾値 th 以上の場合には、優先通話のみ収容し、一般通話は待ちキューに収容する。
6. 待ちキューに収容された一般通話は、キューの先頭まで待機することにより、必ず収容されるものとする。
7. 待ちキューに空きが無い場合、一般通話は呼損となる。

Fig. 6 に本モデルの状態遷移図の例を示す。ここでは簡単化のため、回線数 S を 5 [lines] とし、閾値 th は 3、待ちキュー長 m は 2 としている。丸の中の数字が左が

優先通話、右が一般通話のある状態における回線内の呼の数である。ここでの閾値 th は 3 なので、一般通話は閾値未満である 3 呼までしか、回線内に収容することができない。しかし、優先通話は回線全てを使用可能であるので、回線数 S である 5 呼まで収容可能である。ここまでの動作を黒の矢印で示す。そして、回線内に収容できなかった一般通話は、待ちキュー長 m は 2 であるので、待ちキューに 2 呼まで収容される。ここまでの動作を赤矢印で示す。

非常時の情報伝達に十分となる、一般通話制御時間 h_g の値は、事前に与えられているものとする。そして、一般通話が一時的に待ちキューに収容されてから回線に収容されるまでの待ち時間は、待ちキュー収容時に与えられているものとする。本モデルの通話時間分布である、指数分布(M) と一定分布(D) が混在する分布においてはマルコフ性が成立せず、定常状態確率の理論的な解析が困難である。そこで本研究では、計算機シミュレーションにより、優先通話の呼損率および一般通話の呼損率を、それぞれ導出する。

4. 提案手法の性能評価

4.1. シミュレーション条件

提案方式を用いた場合の M1M2/M1D2/S/S; $th + m$ モデルにおける優先通話、一般通話の呼損率を示す。また様々なトラヒック条件に関して計算機シミュレーションにより導出する。シミュレーションにおける各負荷における総発呼数は 100 万呼とする。Table 1 に用いるパラメータ設定を示す(文献(2))。

優先通話、一般通話の到着率 λ_e, λ_g は、両通話の到着率の和を 7 通りに設定した上で、到着率の比率をそれぞれ

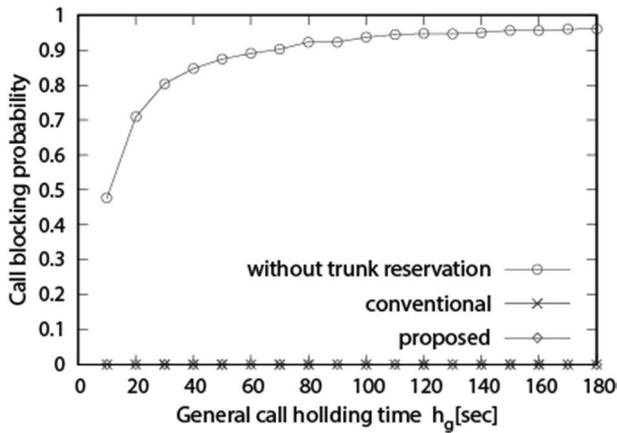


Fig. 7 Call loss probability of priority calls(S=1000, m=1000)

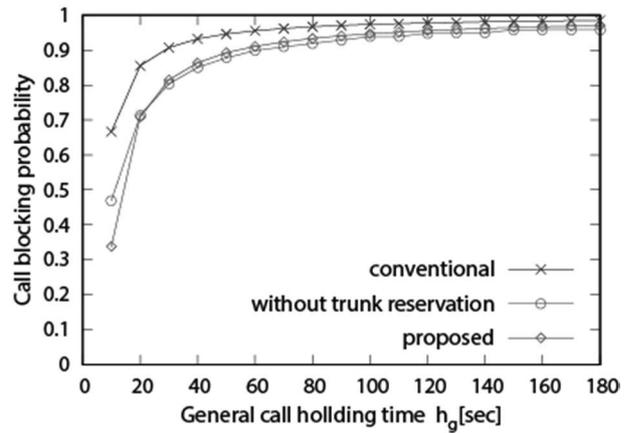


Fig. 9 Call loss probability of general calls (S=1000, m=1000)

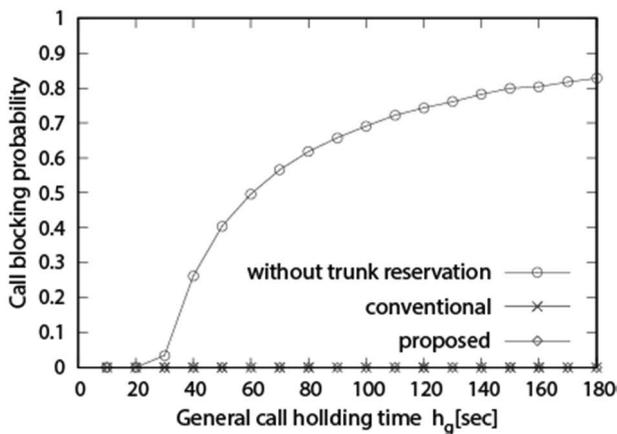


Fig. 8 Call loss probability of priority calls(S=5000, m=1000)

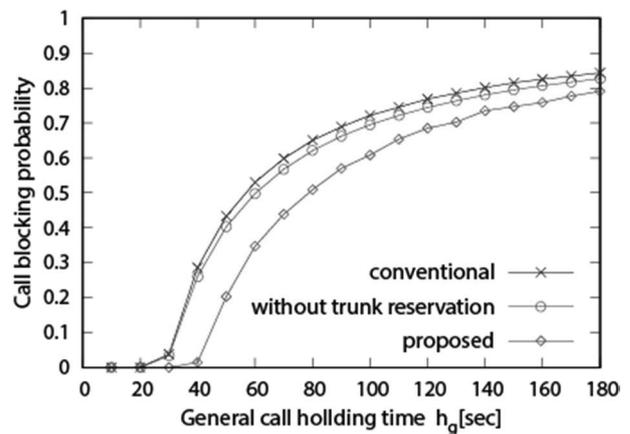


Fig. 10 Call loss probability of general calls(S=5000, m=1000)

れ異なる7通りに配分して、シミュレーションを行っている。例えば、 $\lambda_e + \lambda_g = 10000$ [calls/min], $\lambda_e : \lambda_g = 3:97$ の場合、 $\lambda_e = 300$ [calls/min], $\lambda_g = 9700$ [calls/min]である。

4.2. 従来研究との比較

一般通話の待時を許容する回線留保制御の導入による一般通話呼損率の減少効果を確認するために、既存手法である一般通話の待時を行わない場合、すなわち、一般通話の待時キュー長 $m=0$ の場合の一般通話呼損率を計算機シミュレーションにより導出し、提案手法である一般通話を待時する場合との比較を行った。Fig. 7 に $\lambda_e = 300$, $\lambda_g = 9700$ [calls/min], $1/\mu_e = 60$ [sec], $m=1000$, $S=1000$ [lines] での一般通話制御時間 h_g と優先通話の呼損率を示す。Fig. 8 に $S=5000$ [lines] での一般通話制御時間 h_g と優先通話の呼損率を示す。Fig. 9, Fig. 10 に、同様のトラフィック条件において、一般通話制御時間 h_g と一般通話の呼損率の関係を示す。

Fig. 7, Fig. 8 より、提案手法と既存手法において、 h_g の値に関わらず、優先通話の呼損率をほぼ0に抑えられていることが分かる。さらに、Fig. 9 より一般通話制御時間 $h_g = 30$ [sec] の時、一般通話の呼損率が既存手法では、90.7%、待時キュー長 $m=1000$ の提案手法では81.5%で

あり、呼損率を9.2ポイント低減できることがわかった。Fig. 10 より一般通話制御時間 $h_g = 40$ [sec] の時、一般通話の呼損率が既存手法では、28.6%、待時キュー長 $m=1000$ の提案手法では1.5%であり、呼損率を27.1ポイント低減した。既存研究(2)では、優先通話、一般通話ともに即時呼として取り扱う即時モデルであり、呼の到着時点で収容可否が判断されるため、網内が混雑し、使用中の回線数が閾値以上となる場合には、一般通話はすべて呼損となる。しかし、提案手法では、到着した一般通話が網内に収容不可の場合にすぐに呼損とせず、用意した待時キューに一時的に収容することによって呼損率の低減が可能となる。したがって、待時キューを導入した提案手法は、既存手法よりも、一般通話呼損率を低減できており、有効であるといえる。

4.3. 回線数による評価

Fig. 11 に、 $\lambda_e = 300$, $\lambda_g = 9700$ [calls/min], $1/\mu_e = 60$ [sec], $m=1000$ とした場合の、 h_g と一般通話呼損率の関係を、異なる5通りの回線数 S ごとに示している。図には示していないが、優先通話呼損率をほぼ0に抑えられており、回線留保制御により必要数の優先通話を十分収容できている。Fig. 11において、 $S=1000$ [lines] では、一般通話制

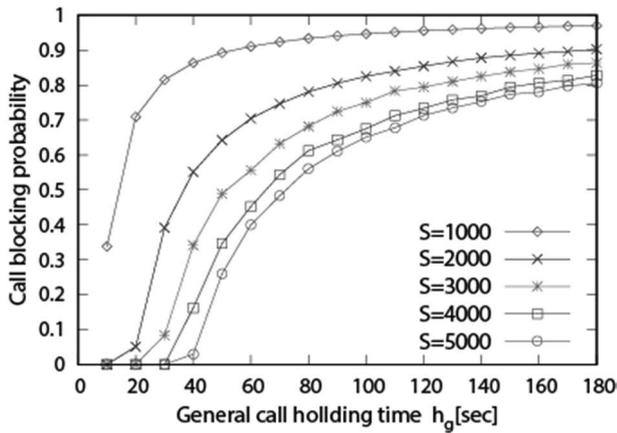


Fig. 11 Call loss probability of general calls by lines(m=1000)

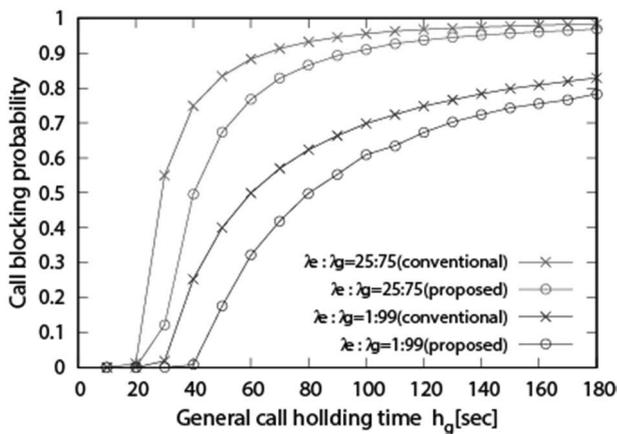


Fig. 12 Call loss probability of general calls by arrival ratio (S=5000, m=1000)

御時間 $h_g=50$ [sec]において一般通話呼損率は 89.3%、 $h_g=40$ [sec]において、一般通話呼損率 86.4% と 2.9 ポイントと、大きな呼損率低減効果はみられなかった。しかし、 $S=5000$ [lines]では、一般通話制御時間 $h_g=50$ [sec]において一般通話呼損率は 26.0%、 $h_g=40$ [sec]において、一般通話呼損率 3.1% と 22.9 ポイントの大きな呼損率低減効果を確認した。

4. 4. 到着比率による評価

優先通話、一般通話の到着率の比の変化における既存手法と比較した提案手法の効果について評価を行う。Fig. 12 は $S=5000$ [lines]、 $\lambda_e + \lambda_g = 10000$ [calls/min]、 $1/\mu_e=60$ [sec]、 $m=1000$ とした場合の h_g と一般通話の呼損率の関係を、到着率の比 $\lambda_e : \lambda_g$ の2通りの値に関して示している。

図には示していないが、到着率の比 $\lambda_e : \lambda_g$ に関わらず、優先通話呼損率はほぼ 0 に抑えられている。また、Fig. 12 より、当然ながら優先通話の割合が多いと留保回線数が多くなるため、一般通話の呼損率は大きい。さらに、既存手法における到着比率 $\lambda_e : \lambda_g = 25 : 75$ の場合の一般通話呼損率は $h_g=60$ [sec]で、88.3%、提案手法に

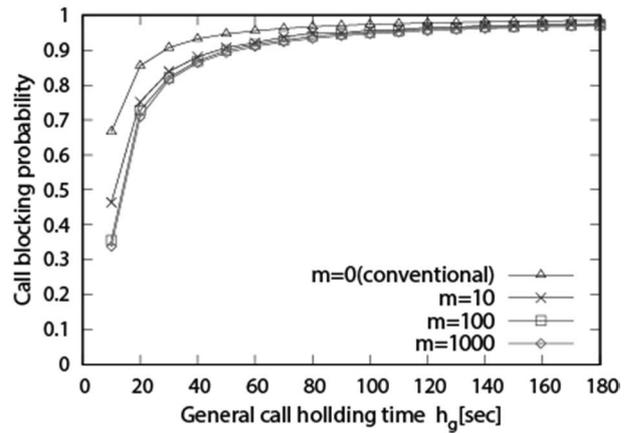


Fig. 13 Call loss probability of general calls by queue length (S=1000)

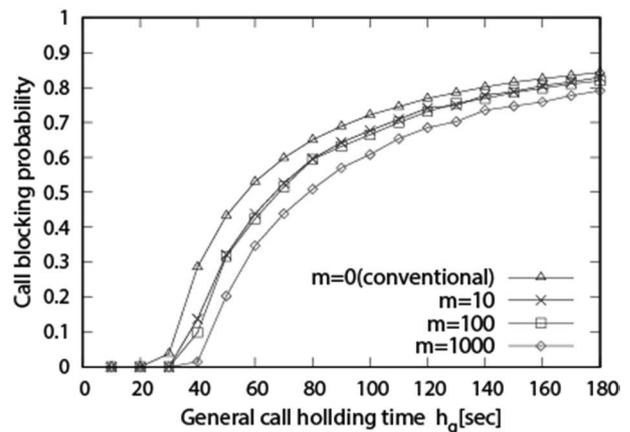


Fig. 14 Call loss probability of general calls by queue length (S=5000)

おける呼損率は 76.7%と 11.6 ポイントの呼損率低減を確認した。また、既存手法における到着比率 $\lambda_e : \lambda_g = 1 : 99$ の場合の一般通話呼損率は $h_g=60$ [sec]で 50.1%。提案手法における呼損率は 32.2%と 17.9 ポイントの呼損率低減を確認した。また、到着率の比 $\lambda_e : \lambda_g = 25 : 75$ の場合には、一般通話の通話時間制御時間 h_g が比較的短い時間領域において h_g を短くしたときの効果が大きいことがわかる。

4. 5. 待時キュー長の大きさと一般通話の待ち時間の関係

本節では、待時キュー長の変化における呼損率と、一般通話が待時キューに収容されてから回線に収容されるまでの待ち時間に関して評価を行う。Fig. 13 に $S=1000$ [lines]、Fig. 14 に $S=5000$ [lines]の場合の、 $\lambda_e=300$ 、 $\lambda_g=9700$ [calls/min]、 $1/\mu_e=60$ [sec]としたときの h_g と一般通話の呼損率の関係を、待時キュー長 m の 4 通りに関して示す。

Fig. 13、Fig. 14 より、待時キューを増大させることにより、一般通話の呼損率を低減可能であることがわかる。

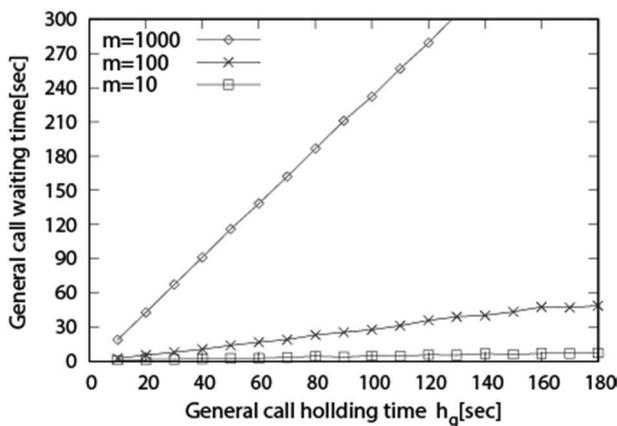


Fig. 15 Waiting time of general calls by queue length
($S=1000$)

しかし、Fig. 13における $m=100$ と $m=1000$ を比較した場合、待時キュー長の大きさには100から1000と10倍の差があるのに対し、呼損率に対する大きな効果は得られていない。一般通話制御時間 $h_g=30$ [sec]の時、一般通話の呼損率が既存手法では、90.7%、待時キュー長 $m=10$ の提案手法では83.6%であり、呼損率を7.1ポイント低減した。このように、わずかな待時キューを設けることにより、一般通話の呼損率を大きく低減することができている。Fig. 14では、 h_g が30[sec]以下の時は、それぞれの待時キュー長において、呼損率は0に抑えられていることがわかる。

Fig. 15に、回線数 $S=1000$ [lines]、 $\lambda_e=300$ 、 $\lambda_g=9700$ [calls/min]、 $1/\mu_e=60$ [sec]における h_g と一般通話が一時的に待時キューに收容されてから回線に收容されるまでの待ち時間の関係を、待時キュー長 m の3通りに関して示す。Fig. 15より、 $m=100$ 、一般通話時間 $h_g=60$ [sec]の場合、待ち時間は4.4[sec]だが、 $m=1000$ における待ち時間は17.9[sec]と待時キュー長の増加に伴って、一般通話の待ち時間も増加することがわかる。

以上より、待時キューを大きくすることによる呼損率への効果はそれほど大きくないが、通話時間制御によりキューからの処理率も高いため待ち時間もそれほど大きくないことがわかる。したがって、ユーザの待ち時間に対する許容度合いや待てばつながるという心理状況を勘案しながら待時キューの大きさを設定することが必要である。

5. まとめ

地震や火災などの非常時において、安否確認や警察、消防などへの連絡手段として発信することで大量の呼が発生する。そのため、現地の電話網内で輻輳が発生し、接続が困難になる問題がある。輻輳対策として、回線交換網において非常時の呼容数増大を図るため、一部回線を公的機関が使用する優先通話専用留保する回線留保制御手法と一般通話の通話時間制御手法が提案され、

その有効性が示されている。しかし、これらの制御によっても一般通話の呼損率は高く、さらなる呼損率の低減を図る必要がある。

本稿では、非常時の回線交換網における、優先通話の確保およびさらなる一般通話呼容数増大を目的とした、一般通話の待時を許容する回線留保制御を提案した。待時キューを設定しない場合の呼損率と比較し、一般通話の待時を許容する回線留保制御による呼損率減少効果を明らかにした。そして、回線交換網をM1M2/M1D2/S/S; $th+m$ 待ち行列システムとしてモデル化することで、優先通話、一般通話の呼損率を、計算機シミュレーションにより導出し評価を行った。結果として、網内に收容不可の場合にすぐに呼損とせず一時的に待時キューに收容することで、一般通話の待時を行わない場合の従来研究(2)と比較し、 h_g の値に関わらず、優先通話の呼損率はほぼ0に抑えられていることがわかった。そして、一般通話時間 $h_g=30$ [sec]の時、一般通話の呼損率が既存手法では90.7%、待時キュー長 $m=1000$ の提案手法では81.5%と一般通話呼損率を9.2ポイント低減可能であることを明らかにした。さらに、 $m=100$ と $m=1000$ を比較した場合、待時キュー長 m の大きさには100から1000と10倍の差があるのに対し、呼損率に対する大きな変化は得られなかった。しかし、一般通話時間 $h_g=30$ [sec]の時、一般通話の呼損率が既存手法では90.7%、待時キュー長 $m=10$ の提案手法では83.6%と一般通話の呼損率を7.1ポイント低減した。このように、わずかな待時キューを設けることにより、一般通話の呼損率を大きく低減できることがわかった。

今後は、待ち行列システムを用いた、待時を許容する回線留保環境下での最適な閾値の設定法に関して検討を行う。本研究では、優先通話時間 $1/\mu_e=60$ [sec]だったが、今後は文献(12)より優先通話時間を120, 180[sec]に設定した制御に関して検討を行う。

参考文献

- (1) K. Tanabe, S. Miyata, K. Baba and K. Yamaoka, "Threshold configuration of emergency trunk reservation considering traffic intensity for accepting more general telephone calls", in *Proceedings of 6th International Workshop on Reliable Network Design and Modeling (RNDM 2014)*, pp. 165–170, November 2014.
- (2) K. Tanabe, S. Miyata, K. Baba and K. Yamaoka, "Threshold relaxation and holding time limitation method for accepting more general calls under emergency trunk reservation", *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E99-A, no. 8, pp. 1518–1528, August 2016.
- (3) "回線交換から電話アプリまで", http://coin.nikkeibp.co.jp/coin/itpro/hansoku/pdf/nnw201210_1.pdf.
- (4) "「固定電話」の今後について",

http://www.ntt.co.jp/news2015/1511jwbw/pdf/xddh151106d_all.pdf.

- (5) “Asterisk”, <http://www.asterisk.org/>.
- (6) “Asterisk (PBX) | 用語集 | KDDI 株式会社”, [http://www.kddi.com/yogo/通信サービス/Asterisk\(PBX\).html](http://www.kddi.com/yogo/通信サービス/Asterisk(PBX).html).
- (7) アイウィーヴ, マッキーソフト, “Asterisk 運用・開発ガイド”, オーム社, June 2007.
- (8) 町田良平, “IP 電話網における非常時の収容呼数増大を目指した呼受付制御方式”, 2015 年度工学院大学卒業論文, February 2016.
- (9) “Welcome to SIPp”, <http://sipp.sourceforge.net/>.
- (10) 村杉直紀, “パケット通信網混雑時における音声コーデック選択のための特性評価”, 2015 年度工学院大学卒業論文, February 2016
- (11) “総務省、災害用伝言サービス”, http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/net_anzen/hijyo/dengon.html.
- (12) 総務省, “通信量からみた我が国の音声通信利用状況【平成28年度】”, January 2018. http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban0302000460.html.

2015~2017 年度研究成果

論文誌

1. Kazuki Tanabe, Sumiko Miyata, Ken-ichi Baba and Katsunori Yamaoka, “Threshold relaxation and holding time limitation method for accepting more general calls under emergency trunk reservation”, *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E99-A, no. 8, pp. 1518–1528, August 2016.

国際会議

2. Takuya Okamoto and Katsunori Yamaoka, “An efficient communications protocol for reticent sender cooperated with aggressively speaking receiver”, in *Proceedings of 17th International Network Strategy and Planning Symposium (Networks 2016)*, September 2016.
3. Sumiko Miyata, Ken-ichi Baba, Katsunori Yamaoka, and Hirotsugu Kinoshita, “Exact mean packet delay analysis for Long-Reach Passive Optical Networks”, in *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2015)*, December 2015.
4. Sumiko Miyata, Ken-ichi Baba, Katsunori Yamaoka, and Hirotsugu Kinoshita, “DR-MPCP: Delayed REPORT message for multipoint control protocol in EPON”, in *Proceedings of 7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM 2015)*, pp. 237-242, October 2015.
5. Yukihiro Kunishige, Ken-ichi Baba, and Shinji Shimojo, “Optical network configuration methods considering end-to-end latency in data centers”, in *Proceedings of IEEE Pacific Rim Conference on Communications,*

Computers and Signal Processing (PACRIM 2015), pp. 210-215, August 2015.

研究会

6. 村上亮太, 田辺和輝, 馬場健一, 山岡克式, “状態確率を考慮した QoS を満足する VoIP 受付制御方式”, 電子情報通信学会 技術研究報告(IN-144), vol. 117, no. 460, pp. 327-332, March 2018.
7. 川合健太, 田辺和輝, 山岡克式, 馬場健一, “一般通話の待時を許容する非常時回線留保制御”, 電子情報通信学会 技術研究報告(IN-116), vol. 117, no. 460, pp. 159-164, March 2018.
8. 村上亮太, 田辺和輝, 馬場健一, 山岡克式, “VoIP 受付制御における状態確率を考慮した QoS を満足する最大収容数決定法”, 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, B-7-26, March 2018.
9. 川合健太, 田辺和輝, 山岡克式, 馬場健一, “一般通話の待時を考慮した非常時回線留保制御による呼損率低減効果”, 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集, B-7-25, March 2018.
10. 加田匠, 岡本卓也, 田辺和輝, 山岡克式, “許容発信試行回数の導入による非常時通信網の通信収容効率向上効果”, 電子情報通信学会 技術研究報告 (IN2016-147), vol. 116, no. 485, pp. 299-304, March 2017.
11. 田辺和輝, 遠藤雅也, 南弘征, 山岡克式, “一定の QoS を満足する VoIP セッション収容数の検討”, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-7-19, September 2016.
12. 田辺和輝, 宮田純子, 馬場健一, 山岡克式, “非常時回線留保制御における再呼区別による新規呼収容数向上効果”, 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集, B-7-65, March 2016.
13. 村杉直紀, 馬場健一, “パケット通信網混雑時における音声コーデック選択のための特性評価”, 電子情報通信学会 総合大会 講演論文集, B-11-26, March 2016.

高速高精度な多関節ロボットの 位置、姿勢、力とモーメントのハイブリッド制御

— インピーダンス特性をもつハイブリッド制御 —

工学院大学 電気電子工学科 黄慶九

华中科技大学 機械科学与工程学院 陳学東

High-speed and High-precision Hybrid Position/Posture/Force/Moment Control
for Multi-joint Robot

— Basic Study: hybrid position with impedance characteristics —

Qingjiu Huang, Department of Electrical Engineering, Kogakuin University
Xuedong Chen, Huazhong University of Science and Technology

ABSTRACT : There are more and more needs for surface contact works, such as polish, grinding, paint, inspection, etc. with robot manipulators in recent years. In this paper, to achieve high-speed and high-precision surface contact work by robot manipulator, we propose a separation method of posture components to solve the problem of the rotation order, and a method of introducing the impedance characteristics to hybrid position, posture, force and moment control to eliminate the interference between free space and constrained space.

1. はじめに

現在ロボットは多くの分野で活躍している。特に社会福祉作業やエンターテインメントの分野でのロボットは掃除ロボットや会話ロボットなどが急速に社会進出している。一方、ロボットアームが行う作業は、外部環境と接触を伴う作業と伴わない作業の2種類に分類できる。産業用ロボットにおいて外部環境との接触を伴う作業とは、組み立て作業やバリ取りなどの作業であり、そうでない作業は塗装や溶接などがある。組み立て作業では組み立て部品と組み立て対象が接触による破損を防ぐ必要がある。バリ取り作業では加工対象に所望の力を伝える必要がある。そのために、手先の位置と姿勢の制御だけでなく、接触対象との相互作用も考慮した制御が必要となる。このような問題に対して、位置と力のハイブリッド制御が提案されている。位置と力のハイブリッド制御は、対象物に対して点と面で接触する場合に有効であるが、対象物に対して面と面で接触する面と面の接触作業に対しては有効とは言えない。

本研究の先行研究ではこのような面と面の接触作業に関する制御として、6軸のロボットアームに対して力制御の分野でよく知られている位置と力のハイブリッド制

御を拡張した、位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御を提案してきた。これは、スイッチング行列を用いて、位置・姿勢・力・モーメントを全て同時に制御する制御手法で、接触対象物と面接触を保ちながら望ましい作業を行うことができると考えられ、例えば製品の表面を研磨する作業などに対して有効性が期待される。

本研究ではいままでの位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御がロボットの高速な接触作業に適用される際に不安定の原因を明らかにしまして、インピーダンス特性を有する位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御を提案し、RPY型6自由度ロボットアームを用いるホワイトボードの文字消す動作のシミュレーションによってその有効性を確認する。

2. 制御対象と動作設定

本研究では図1に示すようにRPY型6自由度アームの手先にイーレーザーを装着して、ホワイトボードの文字消す動作を行い、制御手法の有効性を確認する。

解析環境はMatlab/Simulink上で制御系を設計して、手先にイーレーザーが装着されたRPY型6自由度ロボットアームと傾いたホワイトボードの動力学モデルを作成する。

RPY型6自由度ロボットアームは、関節型アームとRPY型手首機構を合わせた機構である。関節型アームは三つの回転関節をz-x-x軸回転する3軸ロボットアーム機構で、作業空間が広く、障害物の裏に回り込めるなど優れた操作性を持つが、軸剛性が小さいため振動を生じ

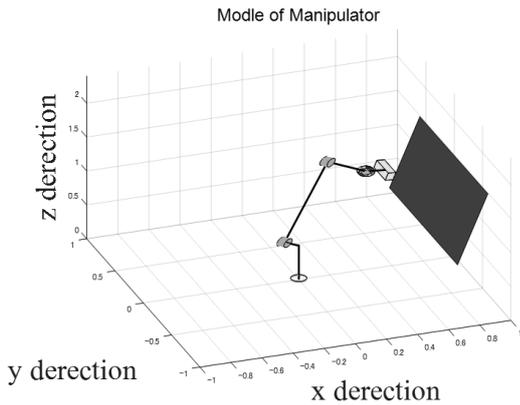


図1 単純適応制御系の基本構成

やすい。また、この機構は逆運動学の解析的な解が見つからないため、本研究の先行研究で提案した逐次探索法によって逆運動学問題を解く。

動力学について、ニュートンオイラー法に定数を与え計算を行い、本研究で用いる RPY 型ロボットアームの運動方程式を閉じた形で導いた。与えた定数を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{1z} \end{bmatrix} & I_2 &= \begin{bmatrix} I_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 I_3 &= \begin{bmatrix} I_{3x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & I_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{4z} \end{bmatrix} \\
 I_5 &= \begin{bmatrix} I_{5x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & I_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{6y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 A_1 &= \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ C_2 & -S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & A_4 &= \begin{bmatrix} S_4 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ C_4 & -S_4 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ C_5 & -S_5 & 0 \\ S_5 & C_5 & 1 \end{bmatrix} & A_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ C_6 & -S_6 & 0 \\ S_6 & C_6 & 1 \end{bmatrix} \\
 q_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & q_2 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & q_3 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 q_4 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & q_5 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & q_6 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ただし、このロボットアームは 6 自由度あり、運動方程式は自由度が多くなるほど複雑化する。2 自由度の平面ロボットアームですら複雑な式となるため、ここでは求めた運動方程式の実際の式は記述しない。求めた運動方程式を記号的に記述すると、

$$\tau = J(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) - P(\theta) + E(\theta, \dot{\theta}) + D\dot{\theta}$$

と書くことができる。本研究で用いる RPY 型ロボットアームは 6 自由度なので、慣性行列 M は 6×6 、コリオリ力と遠心力の項 V は 6×1 、重力項 G は 6×1 、粘性摩擦 D は 6×1 、クーロン摩擦 E は 6×1 のベクトルになる。ただし E は

$$\begin{aligned}
 E &= f_{c1} \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \text{if } \dot{\theta}_1 \neq 0 \\
 E &= F_1 \text{if } \dot{\theta}_1 = 0
 \end{aligned}$$

D は

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_6 \end{bmatrix}$$

3. 位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御

本章ではインピーダンス特性をもつハイブリッド制御と比較するため、先行研究で提案した位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御について記述する。

3.1 差分逆運動学法による逆ヤコビ行列計算の回避

ハイブリッド制御について述べる前に、まずベースとなる位置・姿勢制御の方法を述べる。本研究では、目標位置・姿勢から逆運動学を解くことによって、関節角度目標値 θ_{ref} を計算し、各関節について PID 制御を行う制御方式（差分逆運動学法）によって位置・姿勢制御を実現する。位置・姿勢制御の方法として、逆ヤコビ行列を用いた方法が知られているが、特異点に対処しなければならず、本研究では逆ヤコビ行列計算を回避するため、逆運動学から角度目標値を計算する方法を提案する。

具体的に式で表すと、入力トルク τ_{pd} を以下の式で与える。

$$\begin{aligned}
 \theta_{ref} &= A^{-1}({}^0P_{ref}, {}^0R_{ref}) \\
 \theta_{err} &= \theta_{ref} - \theta \\
 \tau_{pd} &= K_p \theta_{err} + K_i \int \theta_{err} dt + K_d \dot{\theta}_{err}
 \end{aligned}$$

そこで、位置・力のハイブリッド制御方式を式に組み込むために、目標位置から力制御方向誤差を引いた、仮想的な目標位置を新たな目標位置とする方法をとる。すなわち、

$$\begin{aligned}
 {}^0p_{terr} &= J_p({}^0p_{ref} - {}^0p_T) \\
 {}^0p_{ref} &= {}^0p_T + {}^0p_{terr} \\
 \theta_{err} &= A^{-1}({}^0p_{ref}, {}^0R_{ref}) - \theta \\
 \tau_{pd} &= K_p \theta_{err} + K_i \int \theta_{err} dt + K_d \dot{\theta}_{err}
 \end{aligned}$$

とする。力制御については従来法と同様に、

$${}^0\dot{\theta}_{err} = S_f({}^0\dot{\theta}_{ref} - {}^0\dot{\theta})$$

$$\tau_f = J^T(K_{fp} {}^0\dot{\theta}_{err} + K_{fd} \int {}^0\dot{\theta}_{err} dt + K_{fv} {}^0\dot{\theta}_{err})$$

とする。ここで、 S_f は力制御方向のスイッチ行列、 $S_p = I - S_f$ は位置制御方向のスイッチ行列である。 J_f はヤコビ行列の上半分であり、 3×6 の行列である。位置姿勢制御のトルク τ_{po} と力制御トルク τ_{pf} と力制御トルク τ_f を足し合わせて、制御入力 τ を

$$\tau = \tau_{po} + \tau_f$$

としたものが位置・力のハイブリッド制御である。

3. 2 姿勢成分分解法による姿勢のフリー化

位置・力のハイブリッド制御では、位置制御をする方向を自由空間、力制御をする方向を拘束空間という。位置・力のハイブリッド制御を実現するためには自由空間へ位置制御入力、拘束空間へ力制御入力をする必要がある。そこで目標位置・姿勢から自由空間への位置・姿勢誤差をキャンセルした新たな加速目標位置・姿勢を考え、その仮想目標に対して PID 制御を行う方法を取る。このようにして拘束空間への位置姿勢制御を無効化することを、ある方向の位置・姿勢をフリーにするという。拘束空間の位置をフリーにするには

$$\theta_{ref} = S_p \theta_{ref} - S_f \theta$$

とすればいい。ここで、 I は 3×3 の単位行列、 S_p, S_f は 3×3 の位置・力のスイッチング行列（誤差選択行列）であり、それぞれ位置の自由空間、高速空間に対応する対角成分が1で残りが0となる行列である。位置のフリー化はこのように各成分を独立に計算することができるが、姿勢の場合はそうではない。姿勢の RPY 表現は非線形なために、つまり姿勢行列の計算は順序を入れ替えることで答えが変わる為、位置の場合と違い単純に姿勢とモーメントのスイッチング行列 S_θ, S_m を用いて

$$\theta_{ref} = S_\theta \theta_{ref} - S_m \theta$$

とただけは問題がある。一般に、姿勢の RPY 角による表現は非線形であるので、各成分を別々に減算して姿勢誤差とすることはできない。

そのために姿勢成分分解法を用いる。ある u 軸回りについてモーメントを制御して、その軸回りについてのみ姿勢をフリーにしたいとき、 u 周りにフリーになる為の条件は

$$R_{ref} = R(u, \theta_u) R_{ref}$$

となるここで R_{ref} 仮想目標姿勢、 $R(u, \theta_u)$ は u 周りに θ_u 回転する回転行列である。単純に、

$$\theta_{ref} = S_\theta \theta_{ref} - S_m \theta$$

とした場合には u 周りにフリーになる為の条件はフリーにしたい軸に関する回転行列を最後にかけるように RPY の分解順序を選択する必要がある。よって $S_m = \text{diag}(s_x, s_y, s_z)$ の値によって分解順序を変える。また 2 軸同次に姿勢をフリー化するときには以下の式を用いる。

$$R_{ref} = R(u, \theta_u) R$$

フリーにしたい軸の回転行列を最後にかけるように RPY の分解順序を選択する。表に姿勢成分分解法での分解順序を示す。

表 1 姿勢成分分解法

s_x	s_y	s_z	分解方法	${}^0R_{ref}$
1	0	0	$R_x R_y R_z$	$R_x(\theta_x) R_z(\theta_{zref}) R_y(\theta_{yref})$
0	1	1	$R_x R_z R_y$	$R_x(\theta_{xref}) R_z(\theta_z) R_y(\theta_y)$
0	1	0	$R_y R_x R_z$	$R_y(\theta_y) R_x(\theta_{xref}) R_z(\theta_{zref})$
1	0	1	$R_y R_x R_z$	$R_y(\theta_{yref}) R_x(\theta_x) R_z(\theta_z)$
0	0	1	$R_z R_y R_x$	$R_z(\theta_z) R_y(\theta_{yref}) R_x(\theta_{xref})$
1	1	0	$R_z R_y R_x$	$R_z(\theta_{zref}) R_y(\theta_y) R_x(\theta_x)$
0	0	0		0R_f
1	1	1		${}^0R_{ref}$

3. 3 位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御

本研究では、前節の位置・力のハイブリッド制御に、さらに姿勢・モーメントのハイブリッド制御をつけ加えることにより、位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御を実現する。姿勢・モーメントのハイブリッド制御は位置・力の場合と同様に、目標姿勢からモーメント制御方向成分を引いた、仮想的な目標姿勢 ${}^0R_{ref}$ を新たな目標姿勢とすることで実現する。すなわち、

$${}^0\psi_{ref} = S_\theta {}^0\psi_{ref} + S_m {}^0\psi$$

$${}^0R_{ref} = A_\theta({}^0\psi_{ref})$$

とする。あとは前節と同様に計算し、位置姿勢制御トルク τ_{pa} を決定する。

$${}^0\dot{\theta}_{err} = S_p({}^0\dot{\theta}_{ref} - {}^0\dot{\theta})$$

$${}^0\dot{\psi}_{ref} = {}^0\dot{\psi}_f + {}^0\dot{\theta}_{err}$$

$$\theta_{err} = A^{-1}({}^0\psi_{ref}, {}^0R_{ref}) \otimes$$

$$\tau_{po} = K_p \theta_{err} + K_d \int \theta_{err} dt + K_v \dot{\theta}_{err}$$

モーメント制御トルク

$${}^0\dot{m}_{err} = S_m({}^0\dot{m}_{ref} - {}^0\dot{m})$$

$$\tau_m = J_m^T(K_{mp} {}^0\dot{m}_{err} + K_{md} \int {}^0\dot{m}_{err} dt + K_{mv} {}^0\dot{m}_{err})$$

力の制御トルク τ_f については、

$$\tau_f = J^T(K_{fp} {}^0\dot{\theta}_{err} + K_{fd} \int {}^0\dot{\theta}_{err} dt + K_{fv} {}^0\dot{\theta}_{err})$$

以上 3 つの制御トルクを足し合わせて制御入力 τ を

$$\tau = \tau_{po} + \tau_f + \tau_m$$

としたものが位置・姿勢・力・モーメントの制御となる。

4. インピーダンス特性を用いた位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御

本章では、位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御の制御則に拘束空間と自由空間の間にロボットの運動速度と比例した運動量の干渉と制御量の干渉を無く

すため、インピーダンス特性を用いた位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御の提案を述べる。

4. 1 拘束空間と自由空間のお互いの制御入力と運動の非干渉化

前章で述べて位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御はアームの動きが高速になると、位置姿勢制御に関節角度空間での位置決め制御を用いる差分逆運動学法では位置と姿勢制御の入力が拘束空間へ干渉し、制御系の不安定化を引き起こしている。そのためハイブリッド制御に直行空間でのインピーダンス制御則を導入した。

関節角度空間での位置決めによって位置姿勢制御を実現する方法で、トルク入力を直行空間での力・モーメント入力として現すと、

$$F = S F_{f/m} + (J^T)^{-1} \tau_{pa}$$

ここで、

$$S = \begin{bmatrix} S_f & 0 \\ 0 & S_m \end{bmatrix} F_{f/m} \begin{bmatrix} f_{f/m} \\ m_{f/m} \end{bmatrix}$$

$$f_{f/m} = K_{fp}(f_{ref} - f) + K_{f1} \int (f_{ref} - f) dt$$

$$m_{f/m} = K_{mp}(m_{ref} - m) + K_{m1} \int (m_{ref} - m) dt$$

また、直行空間での位置決め制御によって位置姿勢制御を行う方法では、

$$F = S F_{f/m} + (I - S) F_{pa}$$

$$F_{f/m} = \begin{bmatrix} f_{pa} \\ m_{pa} \end{bmatrix} = K_p \begin{bmatrix} P_{err} \\ \varphi_{err} \end{bmatrix} + K_d \int \begin{bmatrix} P_{err} \\ \varphi_{err} \end{bmatrix} + K_d \begin{bmatrix} P_{err} \\ \varphi_{err} \end{bmatrix}$$

関節空間での運動方程式は

$$J^{-T} M(\theta) J^{-1} \ddot{x} - J^{-T} M(\theta) J^{-1} \dot{J}^{-1} \dot{x} + J^{-T} (C(\theta, \dot{\theta}) + U(\theta)) + \pi(\theta) = F$$

$$A \ddot{x} + H = F$$

$$\ddot{x} = A^{-1} (F - H)$$

とする。

A^{-1} は一般的に対角行列でないから、自由空間への力とモーメント入力が拘束空間の加速度を生じさせる、また拘束空間への力とモーメント入力が自由空間の加速度を生じさせる。よって、自由空間と拘束空間の力とモーメントの入力を非干渉化しても、互いの運動への干渉は避けられない。

自由空間と拘束空間の制御入力が互いの空間の加速度を生じさせないような制御入力を考えると、互いの入力へ干渉しない場合、互いの運動への干渉が起こる。従って、加速度を生じさせないようにするためには適当な干渉入力が必要である。次のような動特性を含んだスイッチング行列を定義する。

$$F = A T_s^T (T_s A T_s^T)^{-1} T_s$$

ここで、 T_s はSから0のみからなる行を

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

のとき、

$$T_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

このとき T_s は、

$$T_s^T T_s = S$$

$$T_s S = S T_s = T_s$$

を満たす。モーメントの制御入力を

$$H = S F_{f/m}$$

とする。このとき、

$$S F = S S F_{f/m}$$

$$= S A T_s^T (T_s A T_s^T)^{-1} T_s f_{f/m}$$

$$= T_s^T T_s F_{f/m}$$

$$= S F_{f/m}$$

となるから、力とモーメントの制御入力はこのスイッチングによって変化しない。また、

$$(I - S) A^{-1} F = (I - S) A^{-1} S F_{f/m}$$

$$- (I - S) T_s^T (T_s A T_s^T)^{-1} T_s F_{f/m}$$

$$= (T_s^T - T_s^T) (T_s A T_s^T)^{-1} T_s F_{f/m}$$

$$= 0$$

となるので、自由空間への運動の干渉がなくなっていることがわかる。

4. 2 インピーダンス特性の導入

位置と姿勢制御の場合、すべり摩擦が外乱として存在する。これはロボットアームの手先の不安定振動の主な原因ではないが、悪影響を与えているのは事実である。よって、こうした外乱を考慮にいたしたインピーダンス特性を位置と姿勢制御に導入し、安定化を図る。以下のように、位置と姿勢の加速度目標を設定する。

$$\ddot{x}_{pa} = \ddot{x}_{ref} + M_1^{-1} (C_1 (\dot{x}_{ref} - \dot{x}_{pa}) + K_1 (x_{ref} - x_{pa}) + F_d)$$

$C_1 K_1 M_1$ は設計インピーダンスで、 F_d は力センサから得られた接触力である。この式で計算された加速度を自由空間で行わせることができれば、マニピュレータの手先が外乱に対してインピーダンス特性を持ち、摩擦の影響を緩和できると考えられる。そのために、

$$F_t = A \ddot{x}_{pa}$$

この入力によって拘束空間の加速度は生じない、

$$F = (I - S) F_t$$

とした場合

$$S F = S (I - S) A \ddot{x}_{pa}$$

$$= (S - S S) A \ddot{x}_{pa}$$

$$= (S - S) A \ddot{x}_{pa}$$

$$= 0$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Q} - \mathbf{S} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{y} &= \mathbf{Q} - \mathbf{S} \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{Q} - \mathbf{S}) \mathbf{A} \mathbf{x}_{p0} \\
 &= \mathbf{Q} - \mathbf{S} (\mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}) \mathbf{A} \mathbf{x}_{p0} \\
 &= \mathbf{Q} - \mathbf{S} (\mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{S}) \mathbf{A} \mathbf{x}_{p0} \\
 &= \mathbf{Q} - \mathbf{S} \mathbf{x}_{p0} - (\mathbf{I} - \mathbf{S}) \mathbf{T}_2^T (\mathbf{T}_2 \mathbf{A} \mathbf{T}_2^T)^{-1} \mathbf{A} \mathbf{x}_{p0} \\
 &= \mathbf{Q} - \mathbf{S} \mathbf{x}_{p0} - (\mathbf{T}_2^T - \mathbf{T}_2^T \mathbf{S}) (\mathbf{T}_2 \mathbf{A} \mathbf{T}_2^T)^{-1} \mathbf{T}_2 \mathbf{A} \mathbf{x}_{p0} \\
 &= \mathbf{Q} - \mathbf{S} \mathbf{x}_{p0}
 \end{aligned}$$

となるから、このスイッチングによって位置と姿勢制御の加速度としての入力を変化させることなく、拘束空間への力とモーメントの干渉入力をなくすることができる。

4. 3 4 ケースの干渉性に対する4つの制御則

拘束空間と自由空間の間の干渉性にはそれぞれ力とモーメントの干渉がある。そこで、これらの4ケースの干渉性に対して4つの制御則が提案された。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F} &= \mathbf{F}_{f0n} + \mathbf{F}_1 \\
 \mathbf{F} &= \mathbf{S} \mathbf{F}_{f0n} + (\mathbf{I} - \mathbf{S}) \mathbf{F}_1 \\
 \mathbf{F} &= \mathbf{S} \mathbf{F}_{f0n} + \mathbf{F}_1 \\
 \mathbf{F} &= \mathbf{F}_{f0n} - (\mathbf{I} - \mathbf{S}) \mathbf{F}_1
 \end{aligned}$$

5. シミュレーションとその解析結果

本章では手先にイーレーザーが装着された RPY 型 6 自由度ロボットアームを用いて、ホワイトボードの文字消す動作を行うようなシミュレーションを行い、前章で提案したインピーダンス特性を導入した位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御の有効性を確認する。

5. 1 シミュレーションの条件

図 1 のようなシミュレーションに対して、Matlab/Simulink を使用して面接触作業のシミュレーションで位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御とインピーダンス特性をもつハイブリッド制御の制御則 1 と制御則 3 の比較を行う。このとき作業面に対する y 方向の力は 10[N]とし、手先速度は位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御では 0.15[m/s]とし、インピーダンス特性をもつハイブリッド制御の制御則 1 と制御則 3 では 0.3[m/s]とした。

5. 2 シミュレーションの結果

5. 2. 1 位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御を用いた結果

先行研究である位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御のシミュレーション結果を図 2 から図 5 に示す。

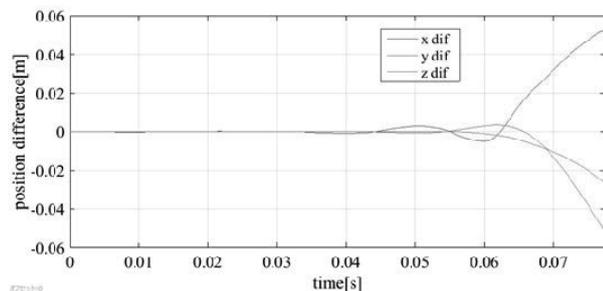


図 2 ロボット手先の位置誤差

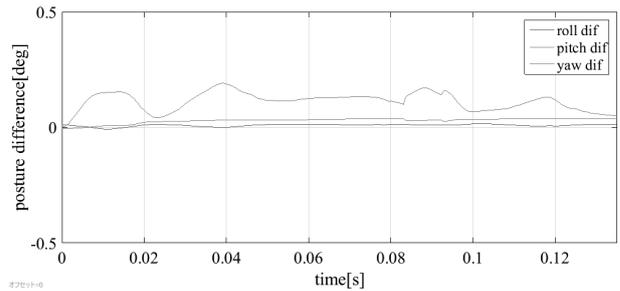


図 3 ロボット手先の姿勢誤差

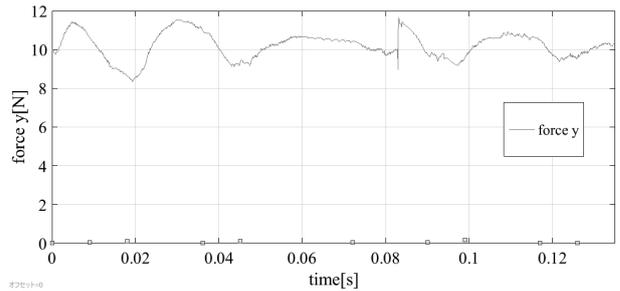


図 4 ロボット手先の y 方向の力

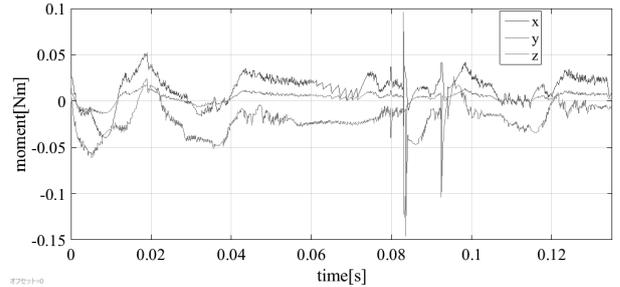


図 5 ロボット手先のモーメント

5. 2. 2 インピーダンス特性をもつ位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御 (制御則 1) の結果

インピーダンス特性をもつ位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御 (制御則 1) のシミュレーション結果を図 6 から図 9 に示す。

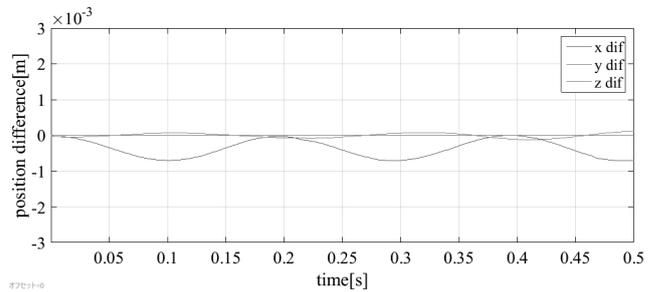


図 6 ロボット手先の位置誤差

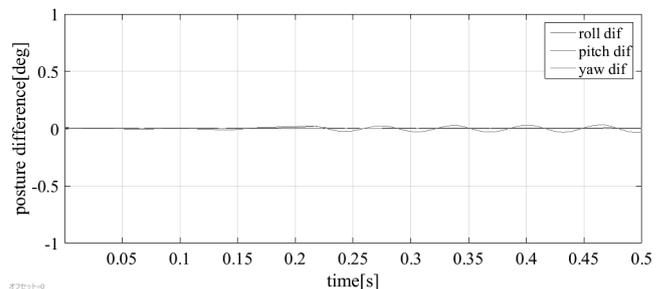


図 7 ロボット手先の姿勢誤差

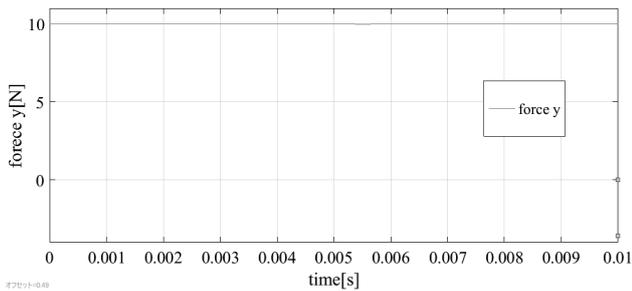


図 8 ロボット手先の y 方向の力

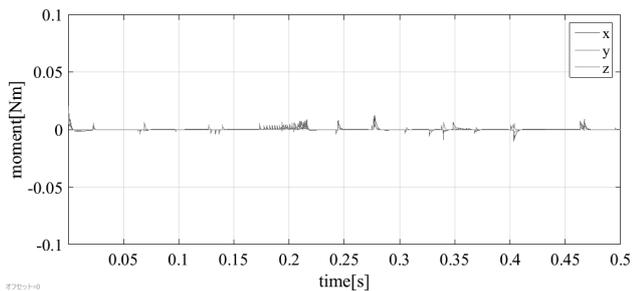


図 9 ロボット手先のモーメント

5. 2. 3 インピーダンス特性をもつ位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御（制御則 3）の結果
 インピーダンス特性をもつ位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御（制御則 3）のシミュレーション結果を図 10 から図 13 に示す。

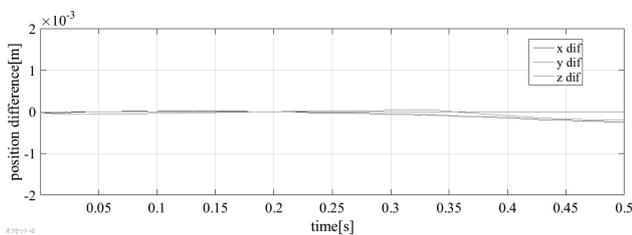


図 10 ロボット手先の位置誤差

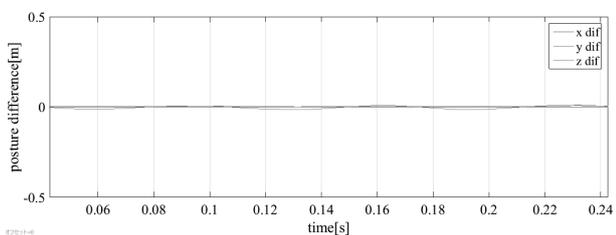


図 11 ロボット手先の姿勢誤差

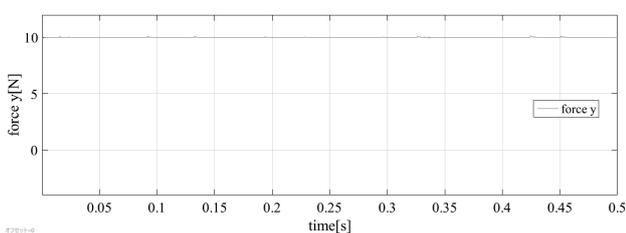


図 12 ロボット手先の y 方向の力

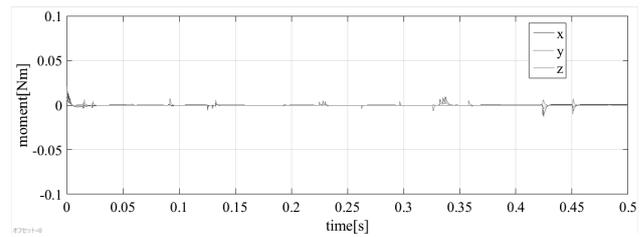


図 13 ロボット手先のモーメント

5. 2. 4 考察

結果から位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御では 0.06 秒から位置誤差が大きくなっている。それに対し制御則 1 では y 方向の位置誤差が生じているものさほど大きくなく、制御則 3 ではほぼ誤差はない。y 方向の力とモーメントも制御則 1 と制御則 3 は目標値に追従しており振動が少ないことが確認できる。また、位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御で手先速度を 0.3[m/s]とした場合もシミュレーションによる検証を行ったが制御ができていなかった。その為に条件を変え、手先速度を 0.15[m/s]としているが、手先速度が速いほど制御は難しくなる。これらのことからインピーダンス特性をもつハイブリッド制御の有効性が確認できる。

6. おわりに

本研究ではこのような面と面の接触作業に関する制御として、6 軸のロボットアームに対して力制御の分野でよく知られている位置と力のハイブリッド制御を拡張した、位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御を提案してきた。これは、スイッチング行列を用いて、位置・姿勢・力・モーメントを全て同時に制御する制御手法で、接触対象物と面接触を保ちながら望ましい作業を行うことができると考えられ、例えば製品の表面を研磨する作業などに対して有効性が期待される。

また、提案した位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御がロボットの高速な接触作業に適用される際に不安定の原因を明らかにしまして、インピーダンス特性を有する位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御を提案し、RPY 型 6 自由度ロボットアームを用いるホワイトボードの文字消す動作のシミュレーションによってその有効性を確認する。

参考文献

- (1) M.H.Raibert and J.J.Craig, “Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators”,

- Trans.of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102, pp.126-133, 1983.
- (2) 美多勉, 大須賀公一, ロボット制御工学入門, コロナ社, 1989.
 - (3) 広瀬茂男, ロボット工学—機械システムのベクトル解析—, 裳華房, 1996.
 - (4) 黄慶九, 榎本良太, 6自由度マニピュレータの位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御: 任意方向の実現および RPY 型実機での検証(マニピュレータ), 「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp.322-327, 2007.
 - (5) J.J.Craig, 三浦 宏文 (翻訳), 下山 勲 (翻訳), ロボティクス機構力学制御, 共立出版, 1990.
 - (6) 前田浩一, ロボットアームの動的モデルと同定, 日本ロボット学会, pp.203-208, 1989.
 - (7) 吉田浩治, 池田展也, 前田浩一, 6自由度産業用マニピュレータに対するパラメータ同定法の実証的研究, 日本ロボット学会誌, pp.564-573, 1993.
 - (8) H.Mayeda, K.Osuka, and A.Kangawa, A New Identification Method for Serial Manipulator Arms, Proc. of IFAC 9th World Cong., 2, pp.74-79, 1984.
 - (9) 川崎, 西村, マニピュレータのパラメータ同定, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.1, pp.76-83, 1986.
 - (10) 大須賀公一, 前田浩一, マニピュレータの動特性同定法, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.6, pp.637-643, 1986.
 - (11) 川崎晴久, ロボティクス-モデリングと制御, 共立出版, 2012.
 - (12) 黄慶九, 齊藤邦彦, 野波健蔵, 6自由度マニピュレータの手先の位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御, 第9回運動と振動の制御 シンポジウム講演論文集, pp.481-486, 2005.

GaN 系集積化面発光素子用近紫外透明導電膜製作技術の開発研究

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 本田徹

School of Electronic Engineering, LED-IT Fusion Technology Research Center,

Yeungnam University Ja-Soon Jang

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 佐藤光史

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 永井裕己

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 尾沼猛儀

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 山口智広

Fabrication of Near UV Transparent Conductive Film for GaN-based Integrated Surface Emitting Devices

Tohru Honda, Department of Applied Physics, Kogakuin University

Ja-Soon Jang, School of Electronic Engineering, LED-IT Fusion Technology Research Center,
Yeungnam University

Mitsunobu Sato, Department of Applied Physics, Kogakuin University

Hiroki Nagai, Department of Applied Physics, Kogakuin University

Takeyoshi Onuma, Department of Applied Physics, Kogakuin University

Tomohiro Yamaguchi, Department of Applied Physics, Kogakuin University

ABSTRACT : The target of this project is for fabricating near UV transparent conductive films (TCF) for GaN-based integrated surface emitting devices. The detailed research topics are the followings; (1) the fabrication of high-quality II-O and III-O compound semiconductor thin films and the control of their electrical properties, (2) the improvement of light extraction efficiency using transparent conductive films with dispersed metal nanocrystals and (3) the realization of GaN-based integrated surface emitting devices with transparent conductive films. Last year, we successfully fabricated CNT-added Ga₂O₃ films by molecular precursor method (MPM) as a TCF. In this year, we focused on how the CNT was incorporated into Ga₂O₃ and how the mechanisms of its electrical conductivity was for these CNT-added Ga₂O₃ films by MPM. We also focused on the feasibility study of the fabrication of integrated surface emitting device structure by selective etching using inductively-coupled plasma reactive ion etching (ICP-RIE) and the feasibility study of the fabrication of imbedded-type integrated surface emitting device structure.

1. はじめに

窒化ガリウム(GaN)を代表とする III-V 窒化物半導体は、青色・緑色・白色発光ダイオード(LED)、400nm 帯半導体レーザ(LD)に応用されるとともに、電子デバイスへの応用研究も活発に行われている。これら III-V 族窒

化物半導体は、近未来の主力半導体となる可能性を秘めている。

面発光レーザは、集積化が容易な半導体レーザの一形式であり、その製作プロセスは発光ダイオード等の集積化技術と重なるところが大きい。一方、フラットパネル・ディスプレイ(FPD)の研究・実用化は、近年著しい進展

があり、液晶ディスプレイのみならず、プラズマディスプレイ、有機 EL など非常に多様にわたる方式が市場に出ている。屋外大型ディスプレイの分野では、窒化物半導体を利用した発光ダイオードによる方法が、大きな市場を獲得している。これは、III-V 族窒化物半導体がディスプレイ应用到に適用していることを意味する。

このような背景の下、我々は、III-V 族窒化物材料の応用の裾野を広げるため、また、日々、モバイル機器を活用する学生等にとって興味をそそる研究テーマとして、他の方法では難しいと考える屋外利用を想定した 2 インチ程度の家庭・ビジネス用 III-V 族窒化物半導体発光素子を集積利用した FPD 応用に展開可能な高密度 GaN 系 LED の集積化を実現できる「面発光素子」の製作[1]を一貫して行っている。

平成 18-20 年度に科学研究費補助金 基盤研究(C)「集積化 GaN 系面発光素子の基礎検討」にて、GaN 系発光素子集積化の構造について検討を行い、無機紫外 EL 素子の製作に成功した。平成 21-23 年度には、同基盤研究種目「プレーナー型集積化 GaN 系面発光素子の製作検討」にて、ショットキー型集積化発光素子の製作に取り組み、紫外発光ダイオードの製作および蛍光体を利用した RGB 画素の製作に成功した。平成 25-27 年には、同基盤研究種目「化学リフトオフ技術を用いた GaN 系集積化面発光素子製作検討」にて、化学リフトオフ技術を用いた面発光素子の製作を行ってきた。

また並行して、平成 21-23 年度には、本学総合研究所プロジェクト研究「集積化紫外発光素子のための透明導電膜の検討」にて、溶液法の 1 種である分子プレカーサー法 (MPM) による MgZnO 透明導電膜の製作を行い、抵抗率が $10^{-2} \Omega\text{cm}$ 程度の透明導電膜の形成に成功した。さらに、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 工学院大学総合研究所エネルギー変換エコマテリアルセンター「エネルギー形態相互変換エコマテリアルの創製と応用」にて、Ga-In-O 薄膜を MPM により製作することに成功し、350 nm 帯での高透過率を実現している。

III-V 族窒化物半導体発光素子を集積利用した FPD 応用に展開可能な高密度 GaN 系 LED の集積化を行うことの問題点として、現在の市販されている LED 構造は、裏面 2 電極構造を有していることがあげられる。科学研究費補助金 基盤研究「化学リフトオフ技術を用いた GaN 系集積化面発光素子製作検討」にて検討を行ってきた、我々が開発した「金属中間層上 GaN 系半導体結晶成長」を用いることにより、製作した GaN 結晶下にある金属中間層を溶かし基板から LED 構造を化学的にリフトオフすることができるため、縦型電流注入素子の製作を可能とする。集積化を加味して効率的に光を取り出すためには、縦型注入素子の光取り出し側への、光吸収・反射やキャリア損失の少ない高品質な透明導電膜の使用が求められる。

本研究では特に、集積化面発光素子を実現するための 1 つの重要課題であるこの透明導電膜について、様々な

手法による製作およびその特性評価を行うことを通して、GaN 系集積化面発光素子用の透明導電膜製作技術を確立することを研究目的としている。

具体的には、

- (1) 高品質 II-O 族化合物半導体および III-O 族化合物半導体の製作および電気伝導制御
- (2) 金属ナノ粒子を分散させた透明導電膜による光取り出し効率の向上
- (3) 透明導電膜使用 GaN 系集積化発光素子の実現に関する検討を行っている。

昨年度、MPM を用いたカーボンナノチューブ (CNT) 添加 Ga₂O₃ 膜の製作に成功した。図 1 と図 2 に製作した CNT 添加 Ga₂O₃ 膜の光学写真と同試料の透過率測定結果を示す。CNT 添加無し Ga₂O₃ 膜に比べ CNT 添加 Ga₂O₃ 膜の透過率は低いのが、驚くことに、CNT 添加量が増えるにつれ透明性が改善していることが確認でき、50 mol% の CNT 添加 Ga₂O₃ 膜では GaN の発光波長 365 nm で 80 % 以上の高い透過率を示した。また、走査電子顕微鏡 (SEM) による微小領域における表面モフォロジーについても CNT 添加量が増えるにつれ平坦性が改善されていることが確認された (図 3 参照)。また、表 1 に CNT 添加 Ga₂O₃ 膜の抵抗率を示す。参考値として CNT の導電性も併せて示している。この結果より、CNT 添加 Ga₂O₃ 膜では安定して $10^{-2} \Omega\text{cm}$ の抵抗率が得られていることが分かる。また、CNT 添加量が増加するにつれ、抵抗率の低下していることが分かる。今回使用した CNT の抵抗率は $10^{-2} \Omega\text{cm}$ であるが、 $10^{-4} \Omega\text{cm}$ オーダーのもので実現されつつある。これらの結果より、抵抗率の低減化には依然改善の必要性があるものの、CNT 添加 Ga₂O₃ 膜の透明導電膜応用への可能性が示された。

本年度は、この結果に着目し、CNT が Ga₂O₃ 膜中にどのように混入され、どのような電気伝導機構があるかについて調査を行ったので報告する。また、反応性イオンエッチング (ICP-RIE) を用いた選択エッチングによる集積 LED デバイス製作の可能性探索、および、埋め込み型集積 LED デバイス製作の可能性探索についても検討をすすめたので、併せて報告する。

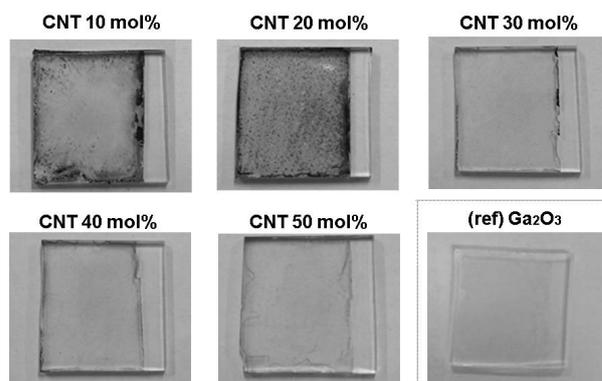


Fig. 1 Photographs of CNT-added Ga₂O₃ films fabricated by MPM.

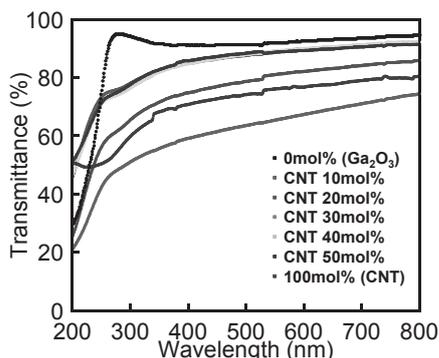


Fig. 2 Transmittance spectra of CNT-added Ga₂O₃ films.

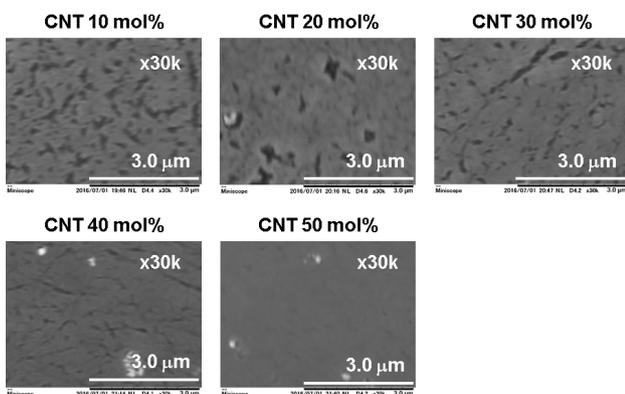


Fig. 3 Surface morphologies of CNT-added Ga₂O₃ films measured by SEM.

Table I. Resistivities of CNT-added Ga₂O₃ films.

	抵抗率[Ω·cm]
Ga ₂ O ₃	-
CNT 10 mol%	6.0×10^{-2}
CNT 50 mol%	2.0×10^{-2}
CNT	1.0×10^{-2}

2. CNT 添加 Ga₂O₃ 膜の導電機構の解明

図 4 に上記示した CNT 添加 Ga₂O₃ 膜の微小角 X 線回折 (GIXRD) 測定結果を示す。全体的にアモルファス構造をとっていると考えられるが、CNT 30mol%以上添加した Ga₂O₃ 膜では Ga₂O₃ からの回折ピークが確認でき、部分的に結晶化しているものと考えられる。

表 2 に上記示した CNT 添加 Ga₂O₃ 膜のエネルギー分散型 X 線分光法 (EDX) による求められた Ga と C の存在比を示す。この結果より、どの試料においても一定の Ga₂O₃ に対する C の存在比が確認された。

図 5 に導電性が一番高い CNT 濃度 50mol% の CNT 添加 Ga₂O₃ 膜と導電性のない CNT を添加していない Ga₂O₃ 膜の X 線光電子分光法 (XPS) 価電子帯スペクトルを示す。この結果より、フェルミレベルと価電子帯上端までのエネルギー差 ($E_F - E_V$) は、約 2.5 eV で同じであった。同試料の透過率測定結果 (図 2) より得られる Tauc プロットを図 6 に示す。この結果より、バンドギャップは両試料とも約 5.0 eV であった。このことから、両試料のフェルミレベル位置は変化がないと言えることができる。

上記の結果より、CNT 添加 Ga₂O₃ 膜の形成について以下のことが説明できる。

- CNT 濃度が低いと膜表面に CNT が凝集し、CNT 濃度が増加すると膜表面には CNT の凝集がなくなり、透過性が向上する。また、CNT 濃度は高いほど CNT が膜全体に均一に分散しやすい (図 3 の結果より)。
- CNT 濃度が高い試料は膜表面の荒れが少ないことから透過率が近紫外領域で高い透過性を示す (図 2、図 3 の結果より)。
- 表面に凝集する CNT も含め、膜中に取り込まれる CNT の量は一定である (表 2 の結果より)。
- フェルミ準位がシフトしていないことから、Ga₂O₃ に対して CNT が不純物として働いているわけではない (図 5、図 6 の結果より)

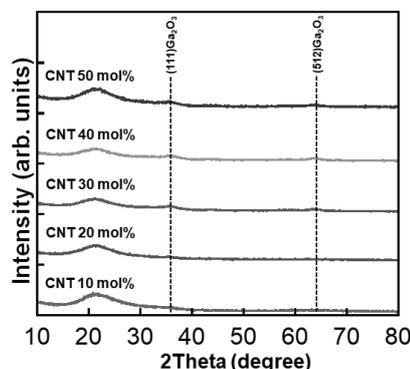


Fig. 4 GIXRD results of CNT-added Ga₂O₃ films.

Table II. Ga and C ratios measured by EDX in CNT-added Ga₂O₃ films.

CNT 濃度 [mol %]	Ga [at.%]	C [at.%]
10	23	77
20	31	69
30	30	70
40	24	75
50	23	77

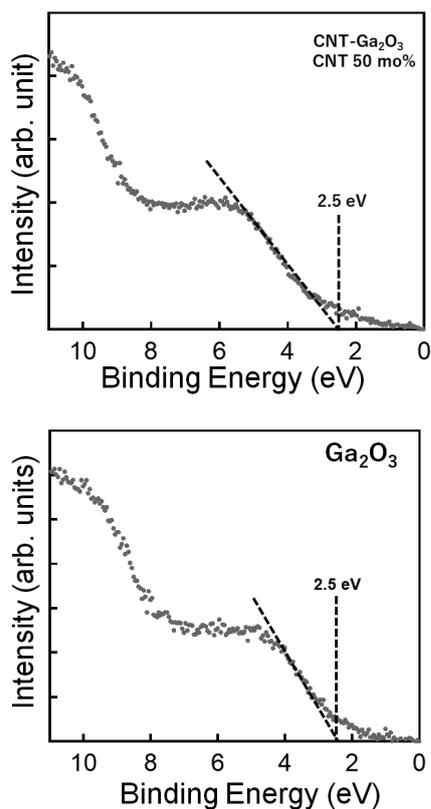


Fig. 5 XPS valence band spectra of Ga_2O_3 films with and without adding CNT (50 mol%).

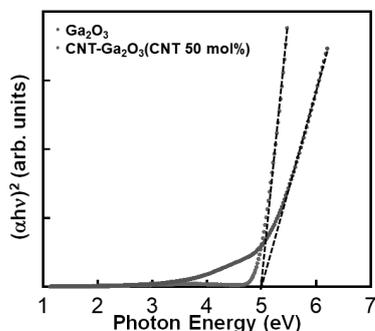


Fig. 6 Tauc plots of Ga_2O_3 films with and without adding CNT (50 mol%).

これらの結果より、一般的な半導体膜では不純物を添加することにより電気伝導に寄与するキャリアを生成することにより抵抗率を制御するが、CNT 添加 Ga_2O_3 膜では CNT が不純物として働いているわけではなく、CNT 同士のネットワークが形成されるものと思われる。この CNT ネットワークは、高濃度添加により CNT が膜中に均一に分散されることにより、透過性が高いにも関わらずある程度の電気伝導性が確保されたものと考えられる。CNT の直径は数 nm 程度であり、光の波長より非常に小さい。そのため CNT ネットワークが均一に膜中に広がることにより透明性が確保できたものと思われる。

CNT ネットワークが導電性を生み出すとすると、その CNT ネットワークを支える半導体材料は幅広い選択肢を与える。また半導体に限る話ではなくなる。さらに、CNT ネットワークの接合を圧力で調整することにより本透明導電膜のタッチパネルセンサなどへの応用も考えられるかもしれない。このように、本結果は透明導電膜としての新規概念の構築に導く結果である。

3. ICP-RIE を用いた選択エッチングによる集積 LED デバイス製作の可能性探索

ICP-RIE を用いた選択エッチングによる集積 LED デバイス製作の可能性探索では、LED ウェハの微細化プロセスによる微小 LED 素子形成を狙っている。微小 LED 素子実現のためには一素子領域を狭くできるエッチング断面の垂直性が重要となる。本研究では、エッチングの際に用いるマスク材料に着目し、マスク材料を変更した GaN テンプレートに対し ICP エッチングを行い、エッチングの垂直性評価を行った。

サファイア基板上に成長された厚さ $2\ \mu\text{m}$ の GaN テンプレートに対し、フォトレジスト(AZ5214E)、 SiO_2 薄膜、Ni 薄膜をエッチング用マスクとして使い、選択的にパターンを形成した試料を用意し、ICP-RIE 装置を用いてドライエッチングを施しマスクによるエッチング断面の垂直性を検討した(図7参照)。フォトレジストはスピコート法によって製膜し、 SiO_2 と Ni は電子ビーム蒸着によって製膜した。フォトレジストの厚さは $1.5\ \mu\text{m}$ 、 SiO_2 と Ni の厚さは、 $0.1\ \mu\text{m}$ とした。エッチング時間は 120 秒であり、エッチング条件は RF パワー 200 W もしくは 400 W とし、バイアスパワー 80 W、 Cl_2 ガス流量 20 sccm、Ar ガス流量 10 sccm は一定で行った。図8に各条件で得られたエッチング断面 SEM 像を示す。また、表3に各条件におけるエッチング深さおよびテーパ角(側面の垂直軸からのなす角)を示す。エッチング深さは ICP パワーを増加することにより増加する。ただし今回の結果では、 SiO_2 マスクを用いた時にはエッチング深さは減少している。これは、 SiO_2 がすべてエッチングされたことによりマスクパターンが無くなり、途中から GaN が全体的にエッチングされたことにより、結果的にマスクでカバーしていた領域とカバーしていないエッチング領域の段差が小さくなったためである。注目すべきは Ni マスクを用いたときである。Ni のマスク厚さは SiO_2 と同じであるが十分な耐性があり、ICP エッチング時にマスク自体がエッチングされることはなかった。加えて、ICP エッチング条件によらず垂直性の高いエッチング断面を実現することに成功した。エッチング断面が垂直に近づくことにより、1つ1つの発光素子の微細化が実現できる。さらに、Ni は一般的に p-GaN の電極として広く使用されている。そのため、この Ni マスクを p-GaN 電極としてそのまま利用できる可能性もある。

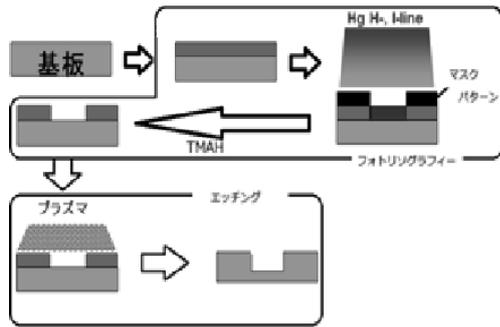


Fig. 7 Procedure of selective etching using ICP-RIE..

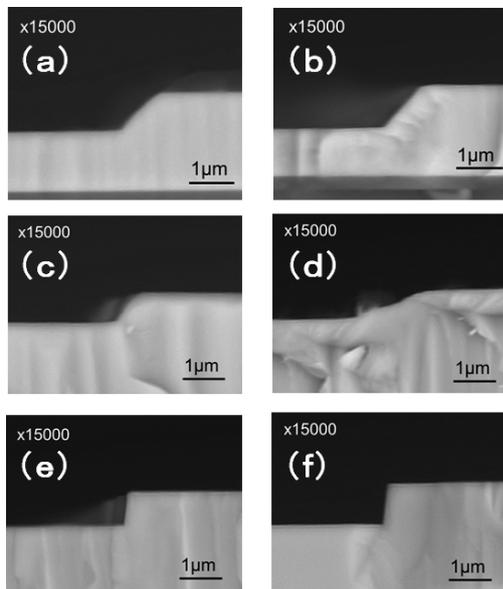


Fig. 8 Cross-sectional SEM images of GaN etched by ICP-RIE with ICP powers of (a,c,e) 200 W and (b,d,f) 400 W, and with masks of (a,b) photoresist, (c,d) SiO₂ and (e,f) Ni.

Table IV. Etching depth and taper angles of GaN shown in Fig. 8.

マスク	ICP パワー [W]	エッチング深さ [μm]	テーパ角 [°]
AZ5214E	200	0.98	44
AZ5214E	400	1.10	52
SiO ₂	200	0.80	60
SiO ₂	400	0.78	20
Ni	200	0.88	84
Ni	400	1.06	84

4. LED 埋め込み型集積 LED デバイス製作の可能性探索

LED 埋め込み型集積 LED デバイス製作の可能性探索では、前節で示した選択エッチングによる集積 LED デバイスの別のアプローチとして、小型の LED 素子を製作し、その素子をマトリクス内に埋め込んでいくことにより集積 LED デバイスを製作することを検討している。

図 9 に 620μm□のカップサイズを持つ 10 個×10 個で配列させたアレイ構造の Si 基板 (Si マイクロカップ基板) を示す。ピッチサイズは 1 mm である。カップは、ドライフィルムレジストで選択的にパターンを形成し、空気圧で砂をたたきつけるサンドブラストエッチングで行った。

この Si マイクロカップに Ni/Au ライン電極を形成し、マイクロカップ内にも光取り出し効率の向上および LED の密着性を高めることを目的として金属を蒸着した。その後、LED を各カップ内に実装することにより図 10 に示すような面発光素子を製作した。また、基板の拡大写真を図 11 に示す。今回 100 個の LED の実装を試み 97 個実装を行うことができ、ほぼすべての LED の実装を行うことに成功した。

実装したすべての LED の回転角の分散を算出するために以下の方法を行った。

① 図 12 の LED 配置を基準 0° として、基準からみて左回転を正、右回転を負となるように回転角の算出 (図 13 は負の回転角を持ち配置された LED)

② ①で算出したデータを基に算術平均 ((2)式) と標準偏差 ((3)式) を算出

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \cdot \cdot (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \cdot \cdot (3)}$$

ただし、s:標準偏差 n:総数 x_i:個々の数値 x̄:平均値 とする。

結果、算術平均値は-3.68°、標準偏差は±11.35°であった。実装した LED した状態で固定されているものが多くあることがわかった。

図 14 に LED の回転角の分散を示す。LED 回転角の分散は正規分布に近似しており分散値が比較的小さいことがわかる。標準偏差の値ゼロに近づけることで LED の回転角のばらつきが少なくなり、配線が容易になるため LED の回転をなくす手法の開発が今後の課題である。

図 15 に実装していない単体の LED の発光写真を、図 16 に Si マイクロカップに実装した LED の発光写真を示す。Si マイクロカップ実装前では発光した光が全方向に拡散していることがわかるが、Si マイクロカップ実装後は発光した光は横方向への光の伝搬が抑制され、カップ

内の反射鏡により光に指向性を持たせ、効率的に上方へ取り出せていることが確認できる。以上の結果より、Si マイクロカップ内に LED を実装することにより、クロス トークの低減がなされていることが確認できた。

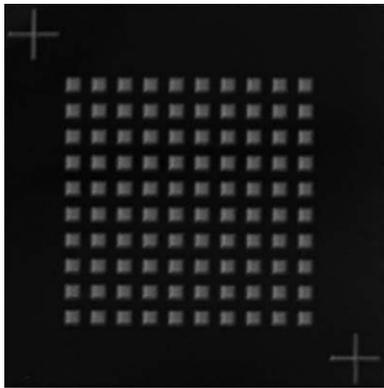


Fig. 9 Photographs of Si micro-cup substrate.

Emission images (a)before and (b) after installation of LED tip into micro-cup structure.

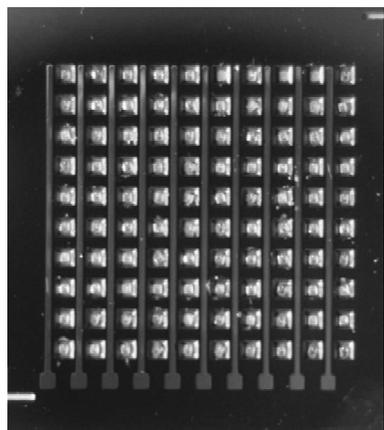


Fig. 10 Photographs of Si micro-cup substrate, installed GaN-based LED.

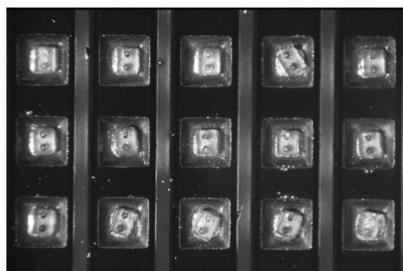


Fig. 11 Enlarged photographs of Si micro-cup substrate, installed GaN-based LED.

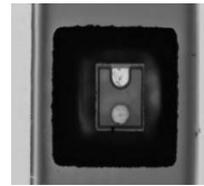


Fig. 12 GaN-based LED installed in Si micro-cup with collect angle (as standard).



Fig. 13 GaN-based LED installed in Si micro-cup with certain twist angle.

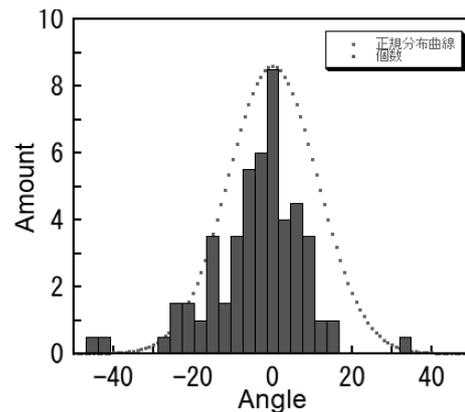


Fig. 14 Photographs of CNT-added Ga_2O_3 films fabricated by MPM.



Fig. 15 Photographs of CNT-added Ga_2O_3 films fabricated by MPM.

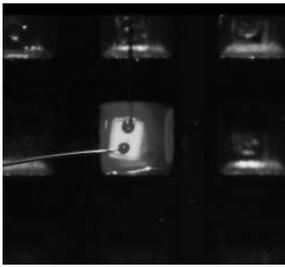


Fig. 16 Photographs of CNT-added Ga_2O_3 films fabricated by MPM.

5. まとめ

本研究では、集積化面発光素子を実現するための1つの重要課題である透明導電膜について、様々な手法による製作およびその特性評価を行うことを通して、GaN系集積化面発光素子用の透明導電膜製作技術を確立することをめざしている。

本年度は、CNT添加 Ga_2O_3 膜に着目し、CNTが Ga_2O_3 膜中にどのように混入され、どのような電気伝導機構があるかについて調査を行った。その結果、CNT添加量を一定量以上入れると Ga_2O_3 膜中に均一に分散されるようになり、伝導性のない Ga_2O_3 膜が透明導電膜として機能することを見出した。透過率測定から求められる Tauc プロットと XPS 測定結果より、この伝導性の実現は、一般的に半導体膜で伝導性を得るために行う不純物ドーピングとは異なり、膜中での CNT ネットワークの形成によるものであると現時点では考えている。CNT ネットワークが導電性を生み出すとすると、その CNT ネットワークを支える半導体材料は幅広い選択肢を与える。また半導体に限る話ではなくなる。さらに、CNT ネットワークの接合を圧力で調整することにより本透明導電膜のタッチパネルセンサなどへの応用も考えられるかもしれない。このように本結果は、透明導電膜としての新規概念の構築に導く結果である。

ICP-RIE を用いた選択エッチングによる集積 LED デバイス製作の可能性探索では、Ni マスクを用いることにより垂直性の優れた ICP エッチングを実現した。Ni は一般的に p-GaN の電極として広く使用されている。そのため、この Ni マスクを p-GaN 電極としてそのまま利用できる可能性もある。本結果は、縦型注入デバイス製作の上でデバイス設計に幅を持たせる結果である。

埋め込み型集積 LED デバイス製作の可能性探索では、選択エッチングによる集積 LED デバイスの別のアプローチとして、Si マイクロカップ基板内への LED の実装に成功した。クロストークの無い発光特性が得られ、集積化面発光素子の基本構造の製作に成功した。

集積化面発光素子実現には、LED の小型化が必須となる。LED の小型化には、現在の LED 製作技術の微細プロセス技術、もしくは、本研究で実施したような LED ウェハの微細化プロセスによる微小 LED 素子形成技術の

確立が求められる。これらの技術が実現されると、本研究で培った透明導電膜形成技術や光取り出し向上技術、さらには実装技術が活用できる準備が整った。

謝辞

本研究の CNT 添加 Ga_2O_3 膜の製作と特性評価は、フォトニクス研究室の高橋勇貴君が修士論文としておこなったもの、埋め込み型集積 LED デバイス製作の可能性探索は、デバイスマテリアル研究室の相沢空君が卒業論文として行ったものである。また、選択エッチングによる集積 LED デバイス製作の可能性探索は、デバイスマテリアル研究室の松浦悠君、名和遼祐ほか多くの研究室学生の協力の下行われたものである。各氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) T. Honda, A. Katsube, T. Sakaguchi, F. Koyama and K. Iga, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 3527 (1995).

論文発表

- 1) D. Taka, T. Onuma, T. Shibukawa, H. Nagai, T. Yamaguchi, J.-S. Jang, M. Sato, and T. Honda, Fabrication of Ag dispersed ZnO films by molecular precursor method and application in GaInN blue LED, *Physica Status Solidi (a)* **214**, 1600598 (2016).

国際学会発表

- 1) K.Rikitake, T. Kobayashi, T. Yamaguchi, T. Onuma and T. Honda, Growth of $\text{Ga}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ films by mist chemical vapor deposition, Materials Research Society, 2017 Fall Meeting & Exhibit, 2017年11月30日.
- 2) T. Honda, Y. Takahashi, T. Onuma, T. Yamaguchi, H. Nagai and M. Sato, XPS spectra of Ga_2O_3 , In_2O_3 and their alloys fabricated by molecular precursor method, 24th International Society of Pure & Applied Coordination Chemistry Symposium (SPACC 24), 2017年11月24日.
- 3) T. Yamaguchi, K. Tanuma, T. Kobayashi, H. Nagai, M. Sato, T. Onuma and T. Honda, Relationship between temperature and growth rate of Ga_2O_3 , In_2O_3 and their alloys in the growth of mist CVD, 4th International Conference on Advanced Electromaterials (ICAE2017), 2017年11月24日.
- 4) Y. Takahashi, T. Onuma, H. Nagai, T. Yamaguchi and T. Honda, Near-the surface Fermi level measured In_2O_3 and Ga_2O_3 thin films by molecular precursor method, The 16th

- International Symposium on Advanced Technology (ISAT-16), 2017年11月2日.
- 5) H. Matsuura, T. Onuma, T. Honda and T. Yamaguchi, Impact of mask materials on dry etching of GaN using ICP-RIE, The 16th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-16), 2017年11月2日.
 - 6) Y. Chunobayashi, R. Nawa, Y. Takahashi, H. Matsuura, T. Yamaguchi, T. Onuma and T. Honda, Formation of black matrix for realization of micro-LED display, The 16th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-16), 2017年11月2日.
 - 7) K. Rikitake, T. Yamaguchi, T. Onuma and T. Honda, Bandgap engineering of α -Ga₂O₃ films grown by mist chemical vapor deposition, The 16th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-16), 2017年11月2日.
 - 8) R. Nawa, T. Onuma, T. Yamaguchi and T. Honda, Fabrication of Si micro-cup substrate and its application for integration of μ -LEDs, The 16th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-16), 2017年11月2日.
 - 9) T. Honda, Y. Hoshikawa, K. Uehara, T. Onuma and T. Yamaguchi, GaN growth on Al template by MBE for the fabrication of micro displays, 11th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2017), 2017年10月12日.
 - 10) R. Nawa, T. Onuma, T. Yamaguchi, J. -S. Jang, T. Honda, Fabrication of μ -LED array structures using ICP dry-etching, International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications'17 (LEDIA'17), 2017年4月20日.
 - 11) K. Rikitake, T. Kobayashi, T. Yamaguchi, T. Onuma, T. Honda, Mist CVD growth of Sn-doped Ga₂O₃ thin films and its device application, International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications'17 (LEDIA'17), 2017年4月20日.
 - 12) K. Uehara, Y. Hoshikawa, T. Yamaguchi, T. Onuma, T. Honda, Characterization of GaN layers grown on Al templates by RF-MBE, The 15th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-15), 2016年11月10日.
 - 13) Y. Takahashi, T. Onuma, H. Nagai, T. Yamaguchi, M. Sato, T. Honda, Fabrication of CNT-doped Ga₂O₃ Thin Films by Molecular Precursor Method, The 15th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-15), 2016年11月10日.
 - 14) T. Honda, S. Fujioka, T. Onuma, T. Yamaguchi, H. Nagai, M. Sato, Fabrication of vertical-injection type GaN-based MIS diodes with near UV transparent oxide electrodes, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2016), 2016年10月2日.
 - 15) Y. Hoshikawa, Y. Suzuki, K. Uehara, T. Onuma, T. Yamaguchi, T. Honda, Impact of GaN low-temperature buffer layer on GaN growth on Al templates, 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE 2016), 2016年9月4日.
 - 16) D. Taka, T. Onuma, T. Shibukawa, H. Nagai, T. Yamaguchi, J.-S. Jang, M. Sato, T. Honda, Surface plasmon resonant emission from Ag dispersed ZnO films fabricated by molecular precursor method, The 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2016), 2016年6月26日.
 - 17) Y. Hoshikawa, T. Onuma, T. Yamaguchi and T. Honda, Study of nitridation conditions of Al layer for GaN growth by RF-MBE, Materials Research Society, 2015 Materials Research Society Fall Meeting & Exhibit(2015 MRS Fall Meeting), 2015年12月3日.
 - 18) Y. Hoshikawa, S. Osawa, Y. Matsumoto, T. Onuma, T. Yamaguchi and T. Honda, Impact of nitridation on GaN growth on (0001)sapphire with an Al layer as a release layer by RF-MBE, 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6), 2015年11月10日.
 - 19) D. Taka, T. Onuma, T. Shibukawa, H. Nagai, T. Yamaguchi, M. Sato and T. Honda, Fundamental study on local surface plasmons in Ag-nanocrystallites ZnO films toward future applications in nitride-based LEDs, The 14th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-14), 2015年11月2日.
 - 20) K. Narutani, T. Yamaguchi, T. Araki, Y. Nanishi, T. Onuma and T. Honda, Comprehensive study on GaN and InN etching by inductively coupled plasma reactive ion etching, The 14th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-14), 2015年11月2日.
 - 21) R. Goto, K. Tanuma, T. Hatakeyama, H. Nagai, T. Yamaguchi, M. Sato and T. Honda, Discussion of ZnO based film by mist CVD method using molecular precursor solution, The 14th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-14), 2015年11月2日.
 - 22) K. Narutani, T. Yamaguchi, T. Araki, Y. Nanishi, T. Onuma and T. Honda, Comprehensive study on inductively coupled plasma reactive ion etching of GaN and InN, The 31st North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2015), 2015年10月7日.
 - 23) R. Goto, H. Nagai, T. Yamaguchi, T. Onuma, M. Sato and T. Honda, MgZnO growth on (0001)sapphire by mist chemical vapor deposition, 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials, 2015年9月14日.
 - 24) T. Yamaguchi, K. Tanuma, H. Nagai, T. Onuma, T. Honda and M. Sato, Growth of group-III oxides by mist chemical vapor deposition and discussion on their growth mechanisms, The 22nd International SPACC (The Society of Pure and Applied Coordination Chemistry) Symposium (SPACC22), 2015年8月14日.

- 25) T. Onuma, T. Shibukawa, D. Taka, K. Serizawa, E. Adachi, H. Nagai, T. Yamaguchi, J.-S. Jang, M. Sato and T. Honda, Study on spontaneous emission in nitride-based LEDs with Ag-nanocrystallites ZnO films fabricated by molecular precursor method, The 22nd International SPACC (The Society of Pure and Applied Coordination Chemistry) Symposium (SPACC22), 2015年8月14日.
- 26) T. Honda, H. Nagai, S. Fujioka, R. Goto, T. Onuma, T. Yamaguchi and M. Sato, Fabrication of (Ga,In)₂O₃ films on GaN-based LED structures by molecular precursor method for near-UV transparent electrodes, The 22nd International SPACC (The Society of Pure and Applied Coordination Chemistry) Symposium (SPACC22), 2015年8月14日.
- 27) Y. Hoshikawa, S. Osawa, Y. Matsumoto, T. Yamaguchi, T. Onuma and T. Honda, Aluminum growth on sapphire substrate with surface nitridation by RF-MBE, The 3rd International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA'15), 2015年4月23日.
- カーサー法を用いた MgO 添加 GIO 薄膜製作検討, 第 38 回光通信研究会, 2016 年 8 月 9 日.
- 11) Y. Hoshikawa, Y. Suzuki, K. Uehara, T. Onuma, T. Yamaguchi, T. Honda, Effects of GaN low-temperature buffer layer on GaN surface flatness grown on Al templates, 35th Electronic Materials Symposium (EMS-35), 2016年7月7日.
- 12) 高大地、尾沼猛儀、澁川貴史、永井裕己、山口智広、Ja-Soon Jang、佐藤光史、本田徹, 分子プレカーサー法で製作した銀分散 ZnO 薄膜の光学的特性, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19 日.
- 13) 高橋勇貴、後藤良介、安野泰平、尾沼猛儀、永井裕己、山口智広、佐藤光史、本田徹, 分子プレカーサー法を用いた In-Ga-Mg-O 薄膜製作検討, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19 日.
- 14) 鳴谷建人、山口智広、荒木努、名西徳之、尾沼猛儀、本田徹, ICP-RIE による GaN, GaInN, InN エッチングと GaInN 系 LED 製作への応用, 第 4 回結晶工学未来塾, 2015 年 10 月 29 日.
- 15) 星川侑也、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, RF-MBE 法による Sapphire 基板上 Al 犠牲層の窒化処理による GaN 成長の影響, 第 38 回光通信研究会, 2015 年 8 月 9 日.
- 16) 鳴谷建人、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, ICP-RIE による InN および GaN 温度依存性エッチング, 第 38 回光通信研究会, 2015 年 8 月 9 日.
- 17) 後藤良介、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, 分子プレカーサー水溶液を用いたミスト化学気相成長による酸化亜鉛薄膜製作, 第 38 回光通信研究会, 2015 年 8 月 9 日.

国内学会発表

- 1) 名和 遼祐、相沢 空、尾沼 猛儀、山口 智広、本田 徹, 10×10 Si マイクロカップ基板での μ-LED 集積化, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 20 日.
- 2) 名和 遼祐、光成 将矢、尾沼 猛儀、山口 智広、本田 徹, シリコンマイクロカップ基板の製作と μ-LED の集積化の検討, 第 78 回応用物理学会学術講演会, 2017 年 9 月 8 日.
- 3) 力武 健一郎、小林 拓也、山口 智広、尾沼 猛儀、本田 徹, Ga_{2-x}Sn_xO 膜のミスト CVD 成長, 第 78 回応用物理学会学術講演会, 2017 年 9 月 8 日.
- 4) 名和遼祐、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, ICP-RIE による GaN テンプレートのアレイエッチングの製作検討, 第 40 回光通信研究会, 2017 年 8 月 9 日.
- 5) 松浦悠、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, 素子分離のための ICP-RIE によるエッチング垂直性の検討, 第 40 回光通信研究会, 2017 年 8 月 9 日.
- 6) 高橋勇貴、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, 分子プレカーサー法により形成した金属酸化物薄膜の表面近傍フェルミ準位の測定, 第 40 回光通信研究会, 2017 年 8 月 9 日.
- 7) 力武健一郎、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, ミスト CVD 法による Sn 添加 Ga₂O₃ 成長とそのデバイス応用, 第 40 回光通信研究会, 2017 年 8 月 9 日.
- 8) 高大地、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, 銀分散亜鉛薄膜によるプラズモン共鳴放出, 第 38 回光通信研究会, 2016 年 8 月 9 日.
- 9) 星川侑也、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, RF-MBE 法を用いた Al 薄膜上 GaN 成長における低温 GaN バッファ層挿入の影響, 第 38 回光通信研究会, 2016 年 8 月 9 日.
- 10) 高橋勇貴、尾沼猛儀、山口智広、本田徹, 分子プレ

2. 総合研究所プロジェクト研究報告 (2018年度継続研究)

大地震時の強震動予測手法の開発と超高層建築の耐震対策への適用

工学院大学・建築学部まちづくり学科 久田嘉章

工学院大学・建築学部建築学科 山下哲郎

工学院大学・大学院建築学専攻 中西真子、青木花子

Study on Strong Ground Motion Prediction Method
and Its Application to High-Rise Building

Yoshiaki Hisada, Department of Urban Design and Planning, School of Architecture

Tetsuo Yamashita, Department of Architecture, School of Architecture

Mako Nakanisi, Hanako Aoki, Architecture Program, Graduate School

ABSTRACT : First, we investigated the characteristic strong ground motion near faults, such as the directivity pulse and the fling step, using the theoretical simulation method (wave number integration method). Second, we have been developing an effective seismic retrofitting methodology for high-rise buildings for considering the near-fault strong ground motions and the long-period ground motion, and applied it to the Shinjuku Campus building with 28 floors.

1. はじめに

本研究では、活断層に代表される数千～数万年に一度程度という極めて発生確率大地震時の強震動の特性を調査し、その予測手法の開発と、過酷な入力地震動に対する超高層建築の高い耐震性能を有する新しい既存建物の効果的な補強法の開発を行うことを目的とする。昨年度¹⁾は、2016年熊本地震で出現した地表地震断層直上の建物被害調査を実施し、次に地表地震断層が出現する活断層帯地震など従来の耐震設計レベルを凌駕する可能性ある大地震に対する実用的な強震動予測手法を開発した。さらに工学院大学新宿校舎を事例とする鉄骨増の超高層建物への制振ダンパーによる効果的な補強法を提案した。2018年度は、まず昨年に引き続き活断層に代表される震源近傍の特徴的な強震動特性とその成因を理論的な強震動計算手法を用いて整理する。次に、工学院大学新宿校舎を事例とする超高層建築に対して、震源近傍強震動や長周期地震動など様々な特徴・レベルを持つ地震動に対する建物の地震応答解析を実施し、様々なダンパーの個数と配置による制振効果を検討する。最後に梁端部の繰り返し加力により損傷度も評価する。

2. 長周期地震動と断層近傍の強震動特性

2.1 長周期地震動の分類と主な特徴

まず長周期地震動を分類し、次に単純な断層震源モデルを用いた計算例から、断層近傍の長周期強震動の特徴を確認し、強震動計算を行う際の注意点などを説明する。

Table 1に長周期地震動の分類を示す。長周期地震動は大別して、堆積盆地（関東平野など）内で卓越する表面波である長時間型と、断層近傍で発生するパルス型がある。さらにパルス型には Fig.1 に示すように、震源断層の破壊伝播効果によって発生する指向性パルスと、地表地震断層など浅い断層すべりに起因するフリングパルス／フリングステップがあり、さらには2種のパルスが同位相で重なり複合型パルスとなる場合がある（例えば、文献²⁾⁴⁾）。

指向性パルスは、1995年兵庫県南部地震における神戸市で観測され（JMA 神戸波など）、市内建物の大被害の一因となったため「キラーパルス」として知られている（例えば文献²⁾）。横ずれ・縦ずれ断層ともに主に断層面に直交する方向で卓越するが、横ずれ断層で破壊伝播が上昇する場合は、断層面に平行するすべりの向きに表れる場合がある³⁾。Fig.1(1)に示すように速度波形では正負

に大きな振幅を示すパルス波となり、一般に永久変位は生じない。

一方、フリングパルス／フリングステップは1999年台湾・集集地震で発生した大規模の地表地震断層のごく近傍で観測され(石岡波など)、長周期地震動の卓越と同時に、断層ズレによって建物に大きな被害が生じる場合がある²⁾。Fig.1(2)に示すように、速度波形は片振幅に卓越し、変位波形には断層すべりに起因するステップ関数状の永久変位を示す。

2. 2 断層震源モデルによる断層近傍強震動計算

単純な断層震源モデルで断層近傍の特徴的な長周期地震動の物理的な成因と特徴を確認する。使用ソフトは著者らが開発した解析的手法(波数積分法)で、地表地震断層など浅い断層震源モデルで発生するフリングステップを精度よく計算できる特徴がある⁴⁾。なお手法の詳細や計算ソフト、例題等は全てWeb Page(工学院大学・久田研究室)で公開しているので参照されたい。

(1) 地中断層モデルによる指向性パルス

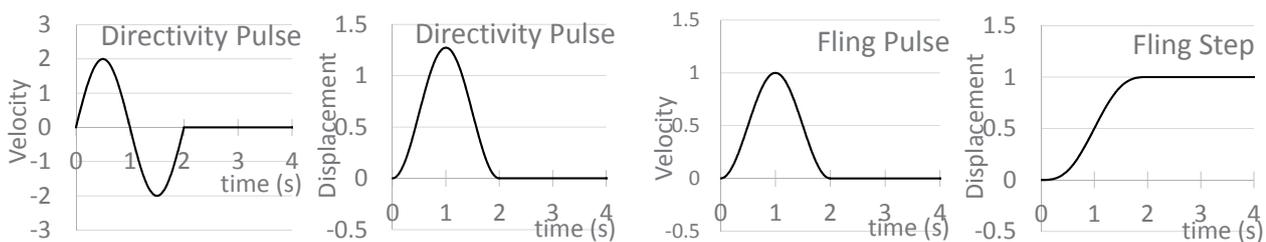
まずFig.2の単純な右横ずれの地中断層モデルで指向性パルスを確認する。地盤モデルは半無限一様地盤(密度=2.5g/cm³、Vs=3 km/s、Vp=5 km/s)とし、食い違い変位を1m、継続時間0.6秒の三角形関数をすべり速度関数を用いて、3 Hzまでの波を計算する。断層面は10x4 km²

であり、これを5x2個の小断層で分割する。破壊伝播速度は2.5 km/sで、各小断層で6x6=36点のガウス積分点を配置し、最小波長でも十分な破壊フロントの連続性を確保した。震源(破壊開始点)の位置は、断層の左上端部(震源1)と、左下端部(震源2)の2ケースとする。一方、観測点は断層面の両端部近くで、断層面の地表の延長線から0.1 kmと2 kmの距離の計4点とした。

Fig.3に計算した速度波形を示す。図中、FN成分は断層直交(X)方向、FP成分は断層平行(Y)方向で、上段が断層面の延長線上から0.1 km(観測点1Aと2A)、下段が2 km(観測点1Bと2B)の波形である。観測点2AのFN成分(特に震源2の場合)に大振幅の指向性パルスが現れている。観測点2Aは断層のごく近傍であり、断層各点から発生する要素パルス波は断層に直交する方向で最大振幅となる。断層破壊が進行する観測点Aでは、これらの要素パルス波が、ほぼ同時刻に重なるため大振幅のパルス波に成長する。一方、震源2の場合、観測点1Aに向かって破壊伝播が上昇してくるが、FP成分に指向性パルスが現れていない。これは断層面の延長線上では振幅0となるためである。一方、観測点1Bでは、FP成分に指向性パルスが現れている。但し、観測点2BのFN成分の指向性パルスに比べて振幅が小さいが、これは破壊伝播の距離が短い(断層巾が長さより短い)ことと、観測点の位置が放射特性の最大振幅ではないためである。

Table 1 Classification of the long-period strong ground motions and their characteristics

名称		特徴	主な成分	代表的な観測記録	代表的な計算法
長周期地震動	長周期・長時間地震動(やや長周期地震動)	浅い大規模震源から発生した長周期地震動が堆積盆地・平野で増幅し、継続時間が非常に長い表面波となる。基盤と堆積層の剛性比が大きいと、明瞭な卓越周期を生じる。	堆積層表面波	・1923年関東大震災の東京本郷の変位波形 ・2003年十勝沖地震の苫小牧波、など	3次元差分法・有限要素法、経験的グリーン関数法など
	指向性パルス(キラパルス)	震源断層の強震動生成域(SMGA)などで生成され、破壊伝播の進行方向で断層面に近い観測点に現れる。一般に断層面に直交する成分が卓越するが、横ずれ断層で破壊伝播が上昇する場合は断層平行成分にも表れる場合がある。速度波形では正負両振幅、変位波形では片振幅となる波形性状を示す。	実体波	・1994年ノースリッジ地震のNew Hall波など ・1995年兵庫県南部地震のJMA神戸波など	波数積分法、差分法、経験的グリーン関数法など
	長周期パルス(フリングステップ)	地表地震断層など浅い大規模な断層すべりに起因し、断層面の近傍の観測点で、断層すべりの方向に現れる。速度波形で片振幅、変位波形では永久変位を伴うステップ関数状の波形性状を示す。	断層すべりに起因	・1999年台湾集集地震の石岡波、 ・1997年ランダース地震のLucene Valley波、など	波数積分法(静的項・面震源考慮)、有限要素法など
	複合型パルス(指向性パルスとフリングステップの複合)	縦ずれ断層の断層直交・上下成分や、横ずれ断層の断層平行成分(破壊伝播が観測点に向かって上昇する場合は、指向性パルスとフリングステップは同じ方向に卓越する。従って2種のパルスが同位相で重なり大振幅のパルス波となる場合がある。	実体波、断層すべりに起因	・2016年熊本地震のKik-net益城町波、西原村役場波、など	波数積分法(静的項・面震源考慮)、有限要素法など



(1) Directivity Pulse (left: velocity, right: displacement) (2) Fling Pulse (left: velocity) and Fling Step (right: displacement)
Fig.1 Characteristics of the directivity pulses (left) and the fling step (right)

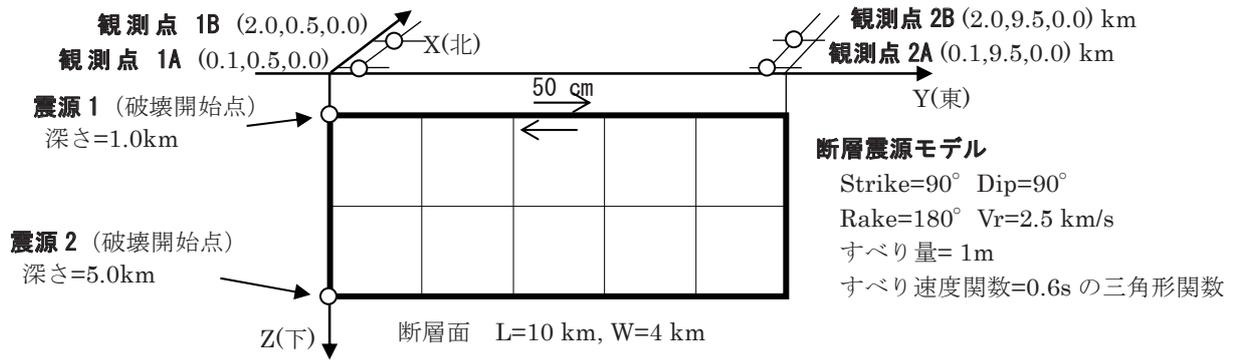


Fig.2 Buried seismic fault model (right-lateral)

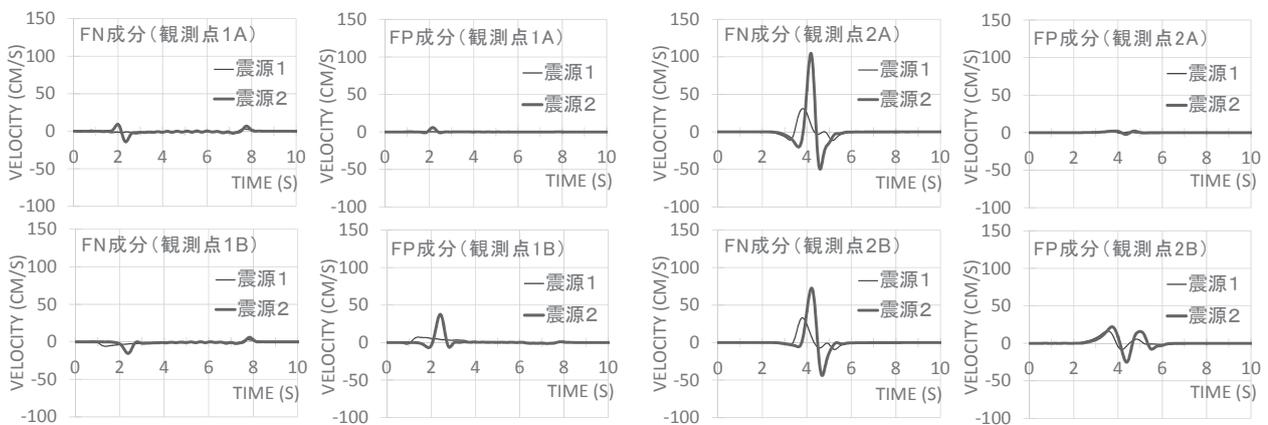


Fig.3 Directivity pulses simulated by the buried fault model (Fig.2)

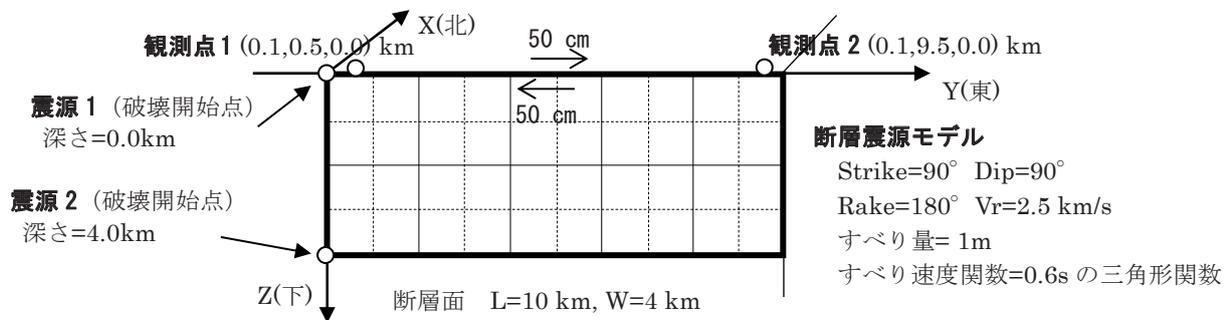


Fig.4 Surface seismic fault model (right-lateral)

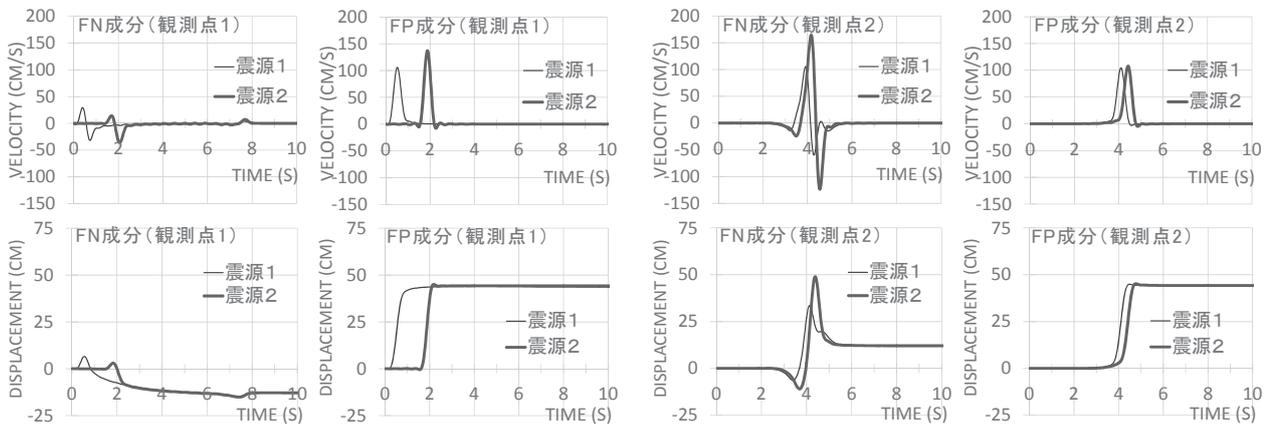


Fig.5 Directivity pulses and fling steps simulated by the surface fault model (Fig.3)

(2) 地表地震断層モデルによる指向性パルス、FRINGパルス／FRINGステップ、および複合型パルス

次に Fig. 4 に示す地表地震断層モデルを用い、指向性パルスとFRINGパルス／FRINGステップを確認する。このモデルは、断層面の上端が地表に達すること以外は、Fig. 2 と同じである。観測点は地表断層から 0.1 km 離れた断層の両端部に近い 2 点とする。

Fig. 5 に速度波形（上段）と変位波形（下段）を示す。FN 成分では、観測点 2 で大振幅の指向性パルスが現れている。一方、FP 成分では、破壊伝播の向き（指向性）に関係なく、観測点 1 と 2 とともに速度波形に大振幅のFRINGパルスが、変位波形にはFRINGステップが現れている。永久変位の値はどの点でも断層面のすべり量 50 cm に近い値である。観測点 1 では、パルス波の振幅が震源 2 の方が震源 1 より大きい、これは震源 2 では破壊伝播が近づく指向性効果により、FRINGパルスの幅が短くなるためである。加えて放射特性により振幅は小さいが、指向性パルスもほぼ同時刻に重なっている (Table 1 の複合型パルス、Fig. 5 の観測点 1 の FP 成分を参照)。

ちなみにグリーン関数は静的項と動的項に分離することができるが、FRINGステップは主として静的項の寄与、指向性パルスは動的項の寄与であることが確認されている⁴⁾。また観測点が地表断層面のごく近くである場合（小断層サイズ以下）、グリーン関数の静的項が急激に大きな値になるため、観測点近傍の小断層内では多数の積分点を置かないとFRINGステップが正確に求まらないことに注意を要する。

3. 既存超高層の骨組の地震時損傷評価

3. 1 地震応答とダンパー補強効果

近年、都市部の高層オフィスビルでは地震後の事業継

続性や帰宅困難者等の対策が急務である。これに関連し、特に超高層建築では、東京都が 2016 年に新しい構造設計指針⁵⁾を示し (Table 2)、耐用年数内に発生する可能性のある稀な地震動 (L1) での使用継続性と、極稀な地震動 (L2) でも修復を可能とする高い耐震性を求めた。また、L2 の 1.5 倍の L3 レベルも新たに加え、倒壊余裕度を検証することも求め、従来の建築基準法より高い耐震性能と要求している。本研究は、昨年度の研究に引き続き、工学院大学新宿校舎を例に、様々な特徴・レベルを持つ地震動に対する建物の応答解析を行い、大地震後の損傷を評価し、制振ダンパーによる補強の必要性と効果を検討する。

(1) 想定する入力地震動

指針による L1～L3 地震動と設計クライテリアを Table 1 に、各種地震動の加速度波と速度応答スペクトル（減衰 5%）を Fig.6 に示す。都心部で想定される様々な地震動を念頭に、まず M7 級の首都直下地震などを想定した標準型地震動として El Centro 波 (L2) と告示スペクトルとランダム位相を使用した告示波 L1～L3 地震動を用いる。次に「長周期・長時間型地震動」として、新宿校舎で観測した継続時間が 500 秒を超える 311 地震と 2004 年紀伊半島沖地震 (M7.4) の位相スペクトルと継続時間、告示スペクトルを使用した L1～L3 地震動（以下、311 告示 L1～L3 と紀伊告示 L1～L3）を用いる⁶⁾。最後に活断層による震源近傍地震動を含む観測記録を L3 地震動として用いる。具体的には 1995 年兵庫県南部地震時に JR 鷹取駅で観測された地震動（以下、鷹取）および、2016 年熊本地震時に西原村で観測された地表地震断層による地震動（以下、西原）である。ちなみに首都圏都心部では、熊本地震のような地表地震断層に近い将来活動することは考えにくい、活断層を考慮した L3 地震動、特に西原はあくまで参考波の扱いとする。

Table 1 Seismic design level and criteria of high-rise building (the city of Tokyo⁵⁾)

耐震レベル	入力地震動	建造物の特性	想定する地震発生頻度	上部構造			基礎
				部材の状態	最大層間変形角	層の最大塑性率	部材の状態
中地震 (L1)	既往波 (25cm/s)	無被害 【機能維持】	数十年に1度発生	短期許容応力度内	1/200以内	—	短期許容応力度内
	告示波 (稀)						
大地震 (L2)	既往波 (50cm/s)	軽微な補修により事業継続可能 【指定機能維持】	数百年に1度発生	部材の塑性率が4.0以下	1/100以内	2.0以下	脆性的破断を生じない
	告示波 (極稀)						
	サイト波 (個別・包絡) (長周期地震動を考慮)						
極大地震 (L3)	告示波 (極稀) の 1.5倍程度 (長周期地震動を考慮)	倒壊・崩壊させない 【余裕度の検証】	数千年に1度発生	建物の用途・特性に応じて個々に設定 (極大地震動が建物に入力した場合の形状を把握した上で判断)			

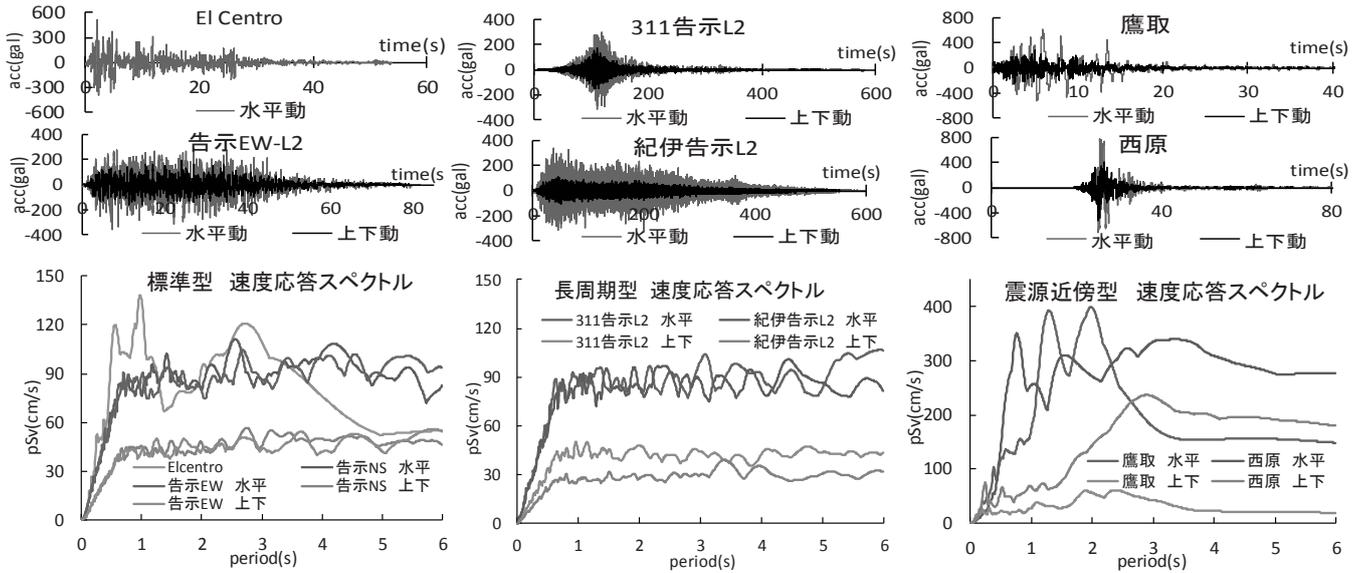


Fig.6 The accelerations (top) and their velocity response spectra (bottom) for the L1 – L3 input ground motions

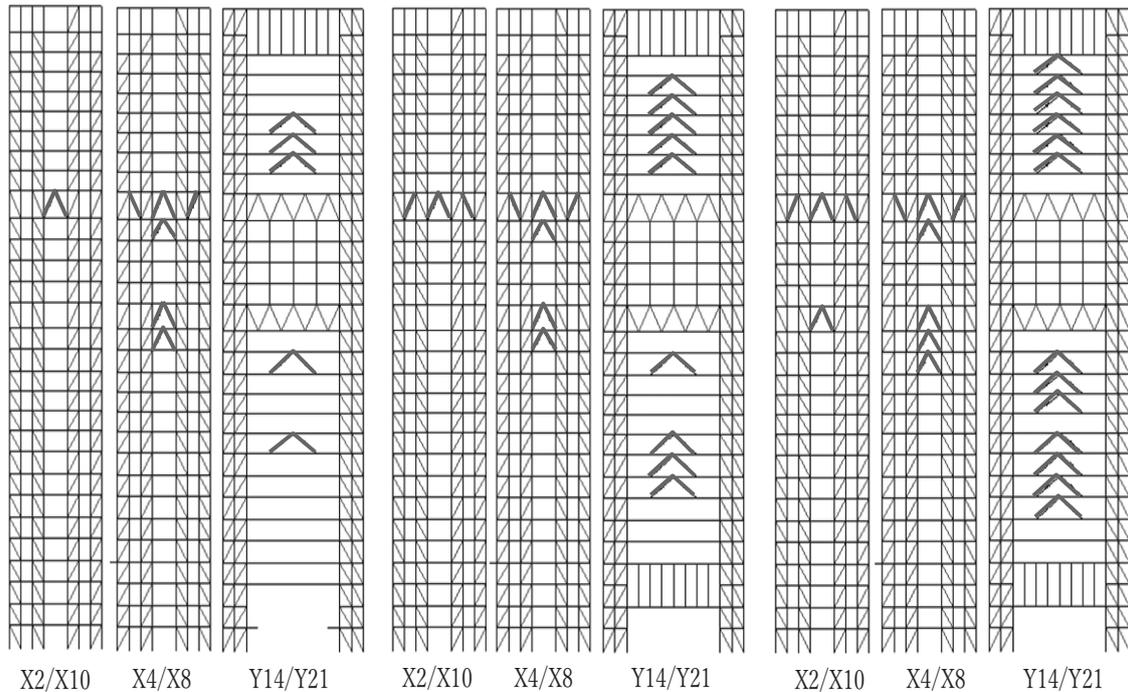


Fig.7 Retrofitting models using the oil dampers (left: D44 model, middle: D66 model, right: D88 model)

(2) 制震補強案と地震応答解析

ブレース型オイルダンパーによる新宿校舎の補強案を Fig.7 に示す。ダンパー配置は文献^{7) - 9)}の方法を参考に以下のプロセスで定めた。

- 1) 立体モデルを用い、剛性ゼロの疑似ブレースをダンパー設置可能位置全てに設置したモデルを作成し、 A_i 分布を外力分布とする弾性解析を実施する。
- 2) 層間変形と疑似ブレースの水平変形の値が大きな層は制振効率が良いため⁸⁾、ダンパー設置階の候補とし、出来る限り少ないダンパー本数で、L2 規模地震動で最大層間変形角が 1/100 以内となるダンパー配置を定める。この補強案を基本モデルである D44 (ダンパー総数 44 本) とする。

- 3) さらに D44 からダンパー総数を増大させ、余裕度を見込んだモデルとして本数が D44 の 1.5 倍である D64 モデル、2 倍の D88 モデルを作成する。

Fig.8 に L1 地震動による最大加速度を示す。D00 では上層階で 200cm/s^2 を超えている階が見受けられるが、D44 では全層で 150cm/s^2 程度以下となった。また、最大層間変形角は 1/200 以内となり、D44 で設計クライテリアを満足する。

Fig.9 に EW 方向の L2、L3 地震動の最大層間変形角を示す。L2 地震動では、D44 で 1/100 以内となり、設計クライテリアを満足する。また、西原波を含む L3 地震動を含む全ての地震動において、ダンパー数を増やすことにより最大応答値の低減が見られる。

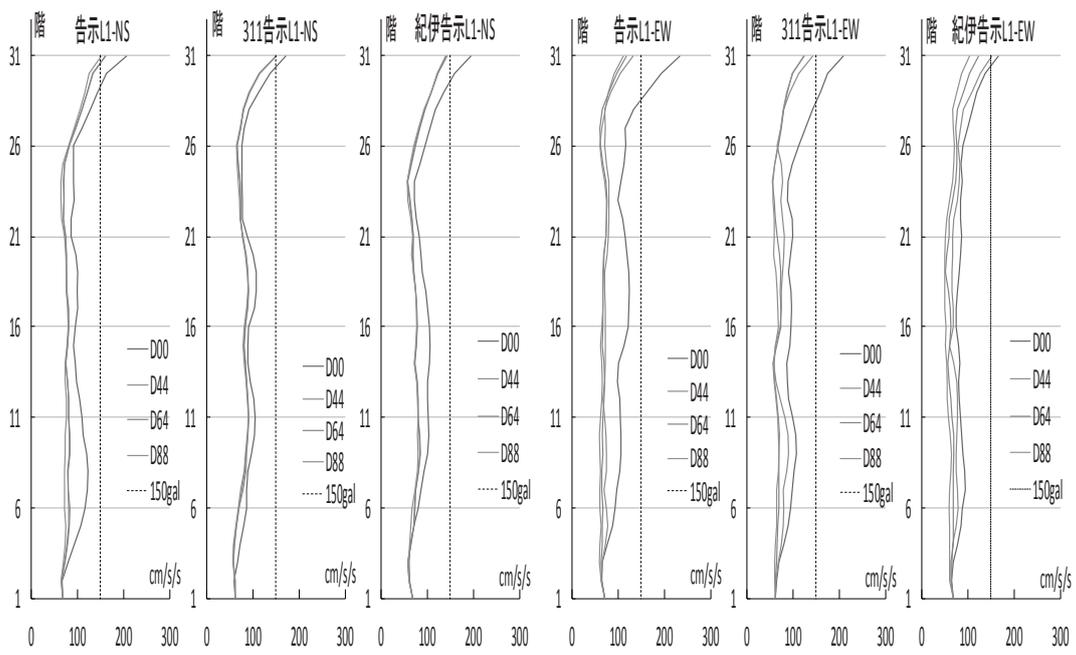


Fig.8 The maximum accelerations of the building with and without dampers for the L1 input motions

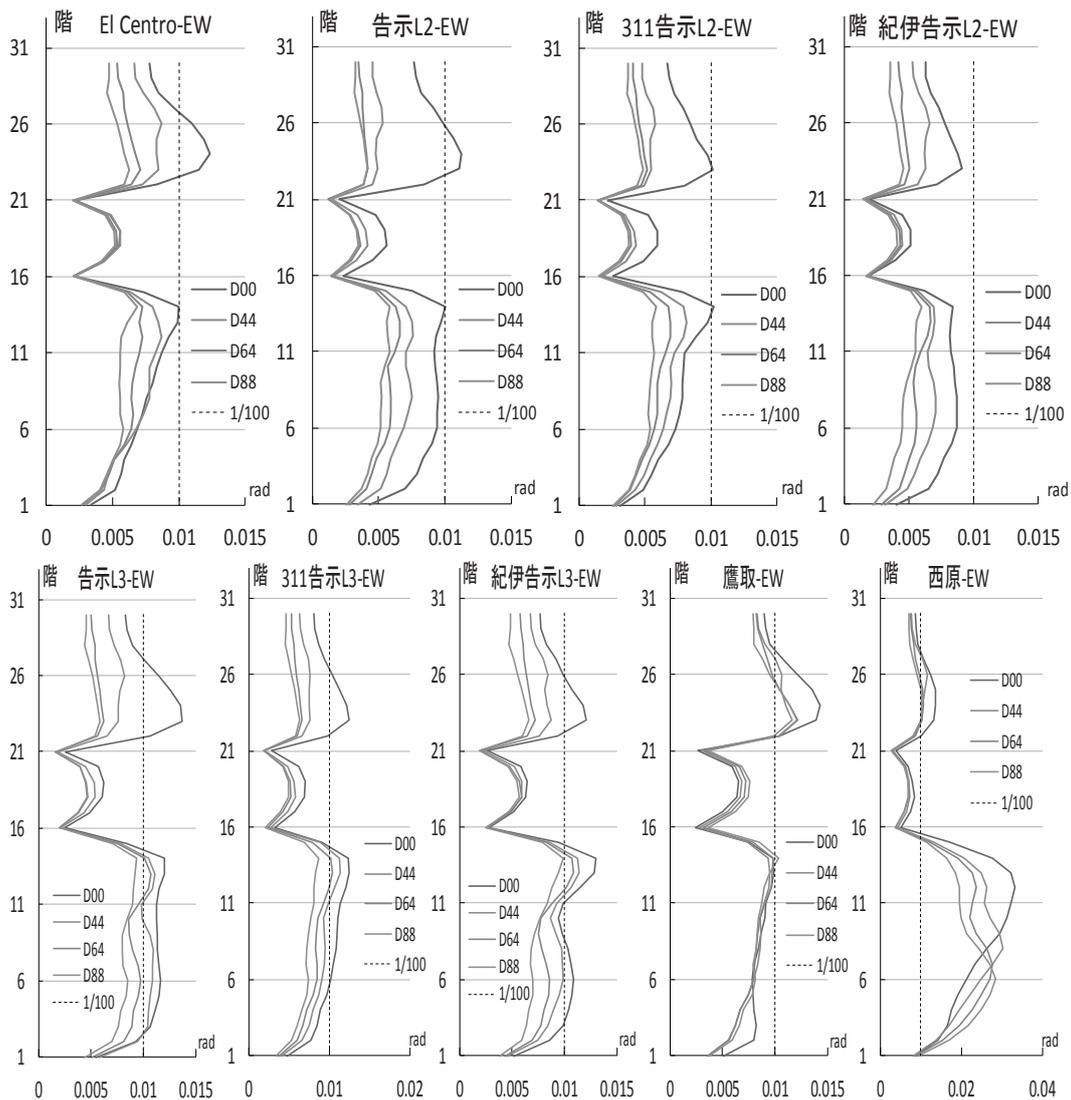


Fig.9 The maximum inner drift angles with and without dampers for the L2 (top) and L3 (bottom) input motions

一方、西原波ではダンパーを入れても層間変形は 1/30 を超えており、甚大な被害が出ることが予想される。西原波 (EW 成分) は Table 1 で説明したように、2016 年熊本地震の日奈久断層沿いの地表地震断層のごく近傍であり、震源近傍の指向性パルスに加えて、長周期パルス (フリグステップ/パルス) を含む非常に特殊な強震動である。新宿直下には活断層が知られておらず、また仮にあったとしても関東堆積盆地による厚さ 2 km 以上の堆積層により、地表に明瞭な地表地震断層が出現するとは考えられない。従って、この解析はあくまで参考値であることに注意を要する。

3. 2 梁端部の破断リスク評価

(1) 塑性率による破断リスク評価

長周期・長時間地震動を受ける超高層建築は、繰り返し加力により梁端部が破断するリスクがある。ここではマイナー則をもとに、地震時の梁端部の低サイクル疲労による破断リスクを試算した。なお、評価にあたり、前述の 3 次元立体フレーム構造モデルによる地震応答解析で得られた部材の応答履歴を用いた。

最初に、文献¹⁰⁾で示されている手法を用いて、塑性率 μ による評価を行った。評価には以下の式 (1)^{10),11)}を用いて、ある塑性率振幅 μ_i に対する繰返し数 n_i と式 (2) により定める疲労寿命 N_i との比である疲労損傷比 D_i ($=n_i/N_i$) を塑性率振幅毎に求め、その和である疲労損傷度 D を算出する。疲労損傷度 D が 1 に達したときに破断に至ると考える^{10),11)}。

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1) \quad N_i = \left(\frac{C}{\mu_i} \right)^\beta \quad (2)$$

ここで、 β は式 (2) の勾配、 C は梁端部の接合形式に応じて定める値で、いずれも実験に基づき定められる¹⁰⁾。

評価対象梁位置を Fig. 10 に、評価結果を Fig. 11 に示す。想定地震動は El Centro 波、鷹取、311 告示 L2・L3 とし、前述の D00、D44、D88 について評価を行った。

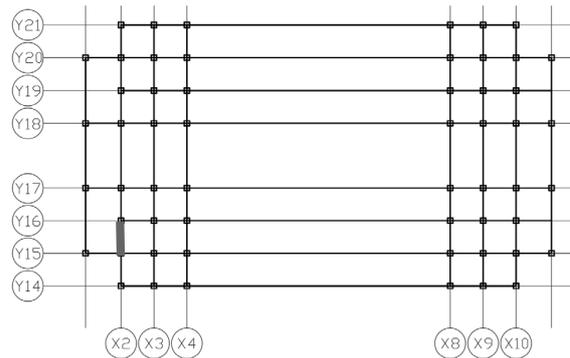


Fig.10 The location of the analyzed beam

D00 の 311 告示 L3 にて 7 階梁の D が最大値 0.75 となったが、1 を超えるものは見当たらない。

(2) 下フランジの歪による破断リスク評価

新宿校舎の梁は鉄骨梁に床スラブが取り付けいた合成梁であるため、床スラブが取り付けることにより中立軸が上昇する。従って、下フランジの歪が増幅される影響が塑性率による評価法で考慮できているか不明瞭である。そこで、次に下フランジの歪に着目した評価を試みる。

下フランジの歪に着目した評価法の考案のため、有限要素解析ソフト Marc Mentat2013 (以下、Marc)¹²⁾を用いて文献^{13),14)}による実大実験の試験体をモデル化して追解析を行い、塑性率 μ と、下フランジのスカラップ底 (柱梁接合部から 35mm) のフランジ軸方向全歪 (以下、全歪) ε との関係性を定めた (式 (3))。

$$\begin{aligned} \mu &= 50\varepsilon - 0.7 & (\varepsilon < -0.8\varepsilon_p) \\ \mu &= 500\varepsilon & (|\varepsilon| \leq 0.8\varepsilon_p) \\ \mu &= 50\varepsilon + 0.7 & (\varepsilon > 0.8\varepsilon_p) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ε_p は降伏歪の計算値である。また、Manson-Coffin 型の塑性率を評価パラメータとした鋼材の低サイクル疲労破断式である式(4)を示す¹⁰⁾。

$$\mu = CN_i^{-\beta} \quad (4)$$

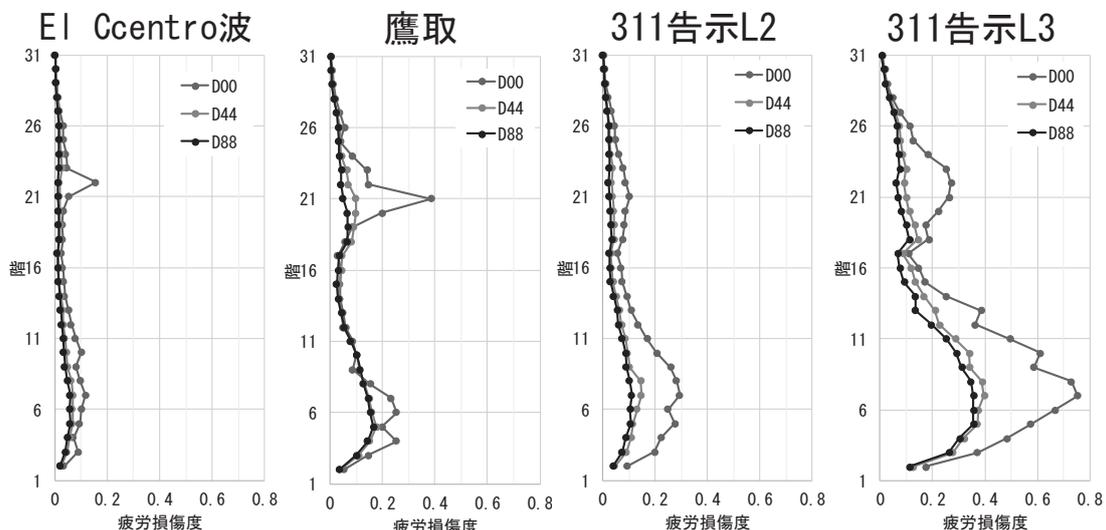


Fig.11 Estimations of the damage level at the edge of the beam for the various input ground motions

式 (3) に示す塑性率と全歪の関係を表式 (4) に代入し、全歪の値から破断寿命の N_i を計算する。

次に、前述の塑性率による疲労損傷度評価を行った梁について、式(3), (4)を用いて下フランジの歪による疲労損傷度の評価を試みる。試算対象は、塑性率による疲労損傷度評価を行った梁の中で、総合的に高い疲労損傷度がみられた7階の梁である。この部位は、溶接組立箱形断面柱（□-522×522×36）に溶接組立 H 形断面梁（BH-600×300×19×28）が接合され、厚さ 130mm の床スラブが取り付けられている¹⁵⁾。

Fig.12 に解析モデル概要を示す。鋼材およびコンクリート強度は構造計算書¹⁵⁾に準じて設定し、応力-歪関係は降伏後の二次勾配が E/100 のバイリニア型とした。地震時の入力として梁モデル先端の加力点に強制変位の時刻歴を与えた。強制変位には、自身応答解析から得られる梁端の相対回転角に梁長さの 1/2 を乗じて作成した加力点位置での梁相対変位を用いた。

以上の条件で、想定地震動を El Centro 波、鷹取、311 告示 L2・L3 とし、D00 について、歪による疲労損傷度評価を試みた。解析結果の荷重-変形関係を Fig.13 に示す。

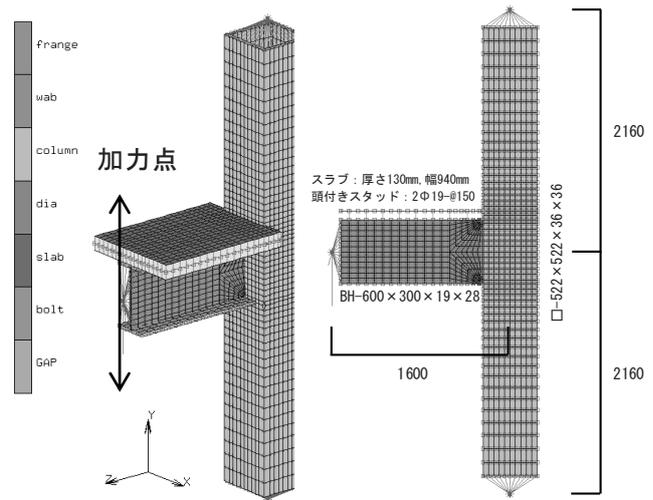


Fig.12 FEM model for the beam-column joint

各想定地震動による疲労損傷度の値は、El Centro 波：0.106、鷹取：0.178、311 告示 L2：0.164、311 告示 L3：0.489 であった。いずれの場合も疲労損傷度は 1 を超えることはなく、破断の危険は少ないと考えられる。

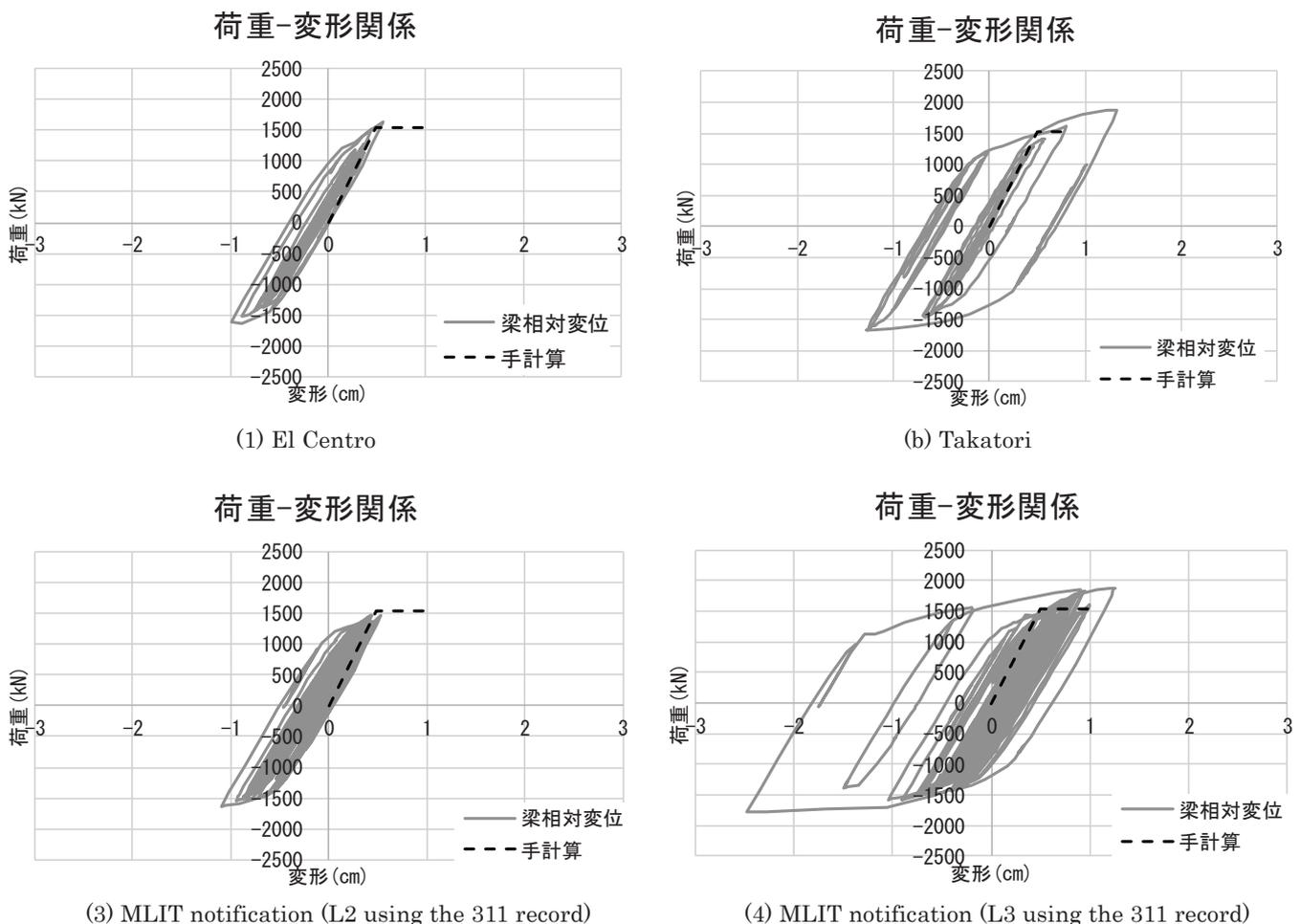


Fig.13 Estimations of the damage level at the edge of the beam for the various input ground motions

4. おわりに

本研究では、まず断層近傍に現れる長周期パルスである指向性パルスとフリングパルス／ステップの成因と基本的な特性を整理した。次に工学院大学新宿校舎を例とする超高層建築に対して、震源近傍強震動や長周期地震動など様々な特徴・レベルを持つ地震動に対する建物の応答を求め、大地震後の損傷を評価し、オイルダンパーの様々な配置による補強効果、および、柱・梁接合部の破断の可能性を検討した。今後は震源近傍強震動の強震動予測手法を改良し、超高層建築の応答解析に適用する計画である。一方、超高層建築が大変形を生じる場合、柱・梁接合部の破断に加えて、ブレース・柱の座屈などを加味した耐震性能を評価する必要がある。現在、数値解析手法を用いてより詳細な接合部破断や座屈の評価も実施中であり、次年度にはさらに費用対効果を考慮したダンパーの補強評価を予定している。

謝辞

2017年度研究部は総合研究所プロジェクト研究に加えて、JSPS 科研費 JP16K06586、および、文部科学省私立大学研究ブランディング事業の助成で行われました。また高層建築の制振補強とブレースの破断の検討方法について、笠井和彦特任教授（東京工業大学）より貴重なご助言を頂きました。鷹取波との西原波強震記録は、それぞれ JR 総合技術研究所と熊本県/気象庁より提供していただきました。

参考文献

- (1) 久田嘉章、山下哲郎、中西真子：大地震時の強震動予測手法の開発と超高層建築の耐震対策への適用、2016年度総合研究所プロジェクト研究報告書、2016.
- (2) 久田嘉章：久田嘉章：活断層と建築の減災対策、活断層研究、28号、pp.77-87、2008/02.
- (3) 宮武 隆、1948年福井地震の強震動—建築物・墓石等の倒壊方向と強震動と震源過程—、地震 II、第52巻、pp.151-161、1999.
- (4) Hisada, Y, and J. Bielak, A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, Bull. of the Seism. Soc. of America,, Vol. 93, No. 3, pp. 1154-1168, 2003.
- (5) 東京都財政局：東京都臨海部に建設される超高層建築物等の設計目標の目安、構造設計指針、2016.
- (6) 工学院大学・久田研究室：公開プログラムデータ、<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp>
- (7) 笠井和彦、岩崎啓介：様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法、日本建築学会構造系論文集 No.605、pp.37-46、2006.
- (8) 笠井和彦、久田嘉章、山下哲郎、杜 东升、白崎和幸、青木花子、中西真子、：長周期地震動等を考慮した既存超高層建築の耐震性能とダンパー補強効

果の評価 その1～その5、2016年度日本建築学会大会（九州）（学術講演梗概集 B-2 pp.85-94）、2016.

- (9) 石井正人、笠井和彦：多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案、日本建築学会構造系論文集 第75巻 第647号 pp.103-112、2010.
- (10) 長谷川隆ほか：多数回繰返し载荷を受ける梁端部の塑性変形能力と超高層鉄骨造建物の耐震安全性の検証、2015年度日本建築学会大会、鋼構造パネルディスカッション資料、pp19-32、2015.
- (11) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説(改訂案)、2014.
- (12) MSC Software: MARC2013, Vol. A, Theory and user information, Vol. B, Element library, 2013.
- (13) 成原弘之ほか：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討(その4,5)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1019-1022、2011.
- (14) 成原弘之ほか：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討(その11,12)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1053-1056、2012.
- (15) 株式会社日本設計：(仮称)KDN 街区再開発計画、構造計算書

神経難病者のニーズ調査に基づく自立住環境支援スイッチの研究 —生体スイッチのための眼電位解析アルゴリズム—

工学院大学 情報学部 コンピュータ科学科 田中久弥

内閣府 経済社会総合研究所 藤森裕美

Study on self-sustaining living environment support switch based on needs survey of neurological disorder

— EOG Analysis Algorithm for Biological Switches —

Hisaya Tanaka, Department of computer science
Hiromi Fujimori, Economic and Social Research Institute (ESRI), Cabinet Office,
Government of Japan

ABSTRACT: We are developing switch using Electro-oculogram (EOG) to support life of people with neurological diseases. The switch determined by threshold method. In this study, we investigated two threshold method. The first method use ratio of amplitude to RMS. Second method a value obtained by multiplying RMS by a constant is threshold value. In result, Hit rate was 86%, and FA rate was 16% in first method. In second method, the hit rate was 84 %, and FA rate was 16%.

1. はじめに

生体スイッチは筋電位(Electromyography : EMG), 眼電位 (Electrooculography : EOG) , 脳波 (Electroencephalogram : EEG) など生体信号を用いた意図伝達装置のことである。生体スイッチは四肢麻痺となった神経難病患者でも残存機能を用いて家電の操作が可能となることが報告されている[1]。筋萎縮性側索硬化症 (ALS) は運動ニューロンの障害により身体を動かすことが困難になる神経難病である。しかし ALS の末期症状でも眼球運動には障害が発生しにくいといわれている[2]。眼球には角膜側に正の電位, 網膜側に負の電位が帯電している。眼球運動を行ったときに眼球周辺の電位が変化する。この電位変化を記録したものが眼電位である[3]。眼電位は ALS 患者でも使用可能な生体信号である。生体スイッチは患者自身によるテレビ等家電の操作を可能にし, 介護者の負担を減らすとともに患者の生活の質を向上させることが出来る。しかし ALS 患者を想定した眼電位による生体スイッチの研究は少ない。検出に用いられる閾値法の閾値決定に関して振幅の揺らぎの個人差が大

きいため対象者によって調整しなければならないなど課題も多い[4]。そこで本研究では生体スイッチに眼電位を用いるため, 個人差を考慮した検出アルゴリズムを考案した。アルゴリズムには閾値法を用い, 閾値算出法を2種類考案し検出精度を比較した。

2. 解析アルゴリズム

2.1 解析アルゴリズム

操作意図の検出には閾値法を用いた。閾値法は特徴量が定めた閾値を超えた場合に検出する手法である。アルゴリズムは眼電位の振幅の絶対値と実効値である二乗平均平方根 (Root mean square :RMS) を用いて動的に閾値または特徴量を計算し解析を行う。振幅の絶対値を用いる理由は眼電位は動作によって電位が正負に大きく振れるためである。次に RMS を用いる理由は, RMS は実効値であり時間当たりの平均な信号の強さを求めることが出来るからである。動的に計算する理由としては生体信号の揺らぎの誤認識を防ぐためである。

2. 2 Doubled Constant to RMS (DCR)法

DCR 法は閾値に実効値である RMS を定数倍したものをを用いる手法である (1 式). $EOG(t)$ は時刻 t における眼電位の値である. $RMS(t)$ は時刻 t における RMS の値を示している. RMS は(2)式を用い直近 2 秒間の眼電位を使用して動的に算出した. RMS に乗算する定数 a は変更可能なパラメーターである. $EOG(t)$ の絶対値が a 倍した $RMS(t)$ を超えた場合にスイッチが入力されたと判定する.

$$\begin{cases} |EOG(t)| \geq RMS(t) \times a \cdots \text{switch on} \\ |EOG(t)| \leq RMS(t) \times a \cdots \text{switch off} \end{cases} \quad (1)$$

$$RMS(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=t-w}^t EOG(k)^2} \quad (2)$$

2. 3 Ratio of EOG and RMS (RER)法

RER 法は眼電位と RMS の比率を用いて検出を行う方法である (3 式). 時刻 t の眼電位の絶対値と RMS の比率を設定したパラメーター $ratio$ と比較する. もし振幅と RMS の比率が $ratio$ を超えた場合にはスイッチが入力されたと判定する.

$$\begin{cases} \frac{|EOG(t)|}{RMS(t)} \geq ratio \cdots \text{switch on} \\ \frac{|EOG(t)|}{RMS(t)} \leq ratio \cdots \text{switch off} \end{cases} \quad (3)$$

3. 実験文字および改行

3. 1 実験概要

考案したアルゴリズムについて検出精度を評価するためオンライン解析プログラムを作成し実験を行った. DCR 法の被験者は 20 代の健常な男性 5 名. RER 法では 5 人の健常な 20 代男性を対象とし内 1 名は検出による差を比較するため同一被験者とした. 検出精度の指標として表 1 の通りに検出回数を記録し, Hit 率と FA 率を算出した (4,5 式). この実験は工学院大学ヒトを対象とする研究倫理審査委員会の認可を受けている(承認番号 H28-22).

3. 2 実験機器

眼電位を取得するためのセンサーには OpenBCI を用いた. OpenBCI は Joel Murphy と Conor Russomanno によって 開発されたオープンソースのマルチセンサーである. OpenBCI はオープンソースであるため, 本研究のアルゴリズムを実装し実験を行った. サンプリング周波数は 250Hz, バンドパスフィルタを 5-50Hz に設定し実験を行った.

3. 3 実験内容

被験者に対して生体スイッチの入力動作を行ってもらい, どの程度検出できるかを検証した. 実験内容は共通で行った. 入力動作には先行研究より閉眼して眼球を上げる運動を設定した [5]. 信号計測用の電極は基準電極 (Reference)を右耳垂に, 眼電位計測用の電極を右眼球の約 1 cm 下に, フィルタ用の GND を左耳垂に装着した (図 2). 実験の流れを図 3 に示す. 実験開始から初めの 20 秒間安静にしてもらい動作指示を出す. 動作区間は 5 秒間としその後安静区間 5 秒をとる計 10 秒間を 1 セットとして 10 セット行った. また実験時のパラメーターは DCR 法の乗算定数 $a=2.5$, RER 法の比率定数 $ratio=4$ に設定した.

$$\text{Hit率(\%)} = \frac{\text{hit}}{\text{hit} + \text{miss}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{FA率(\%)} = \begin{cases} \frac{FA}{FA + CR} \times 100 \cdots (FA > 0) \\ \frac{0.5}{FA + CR} \times 100 \cdots (FA = 0) \end{cases} \quad (5)$$

表 1 信号計測

Table1 Recorded matter.

	検出あり	検出なし
動作意図あり	Hit	Miss
動作意図なし	FA	CR

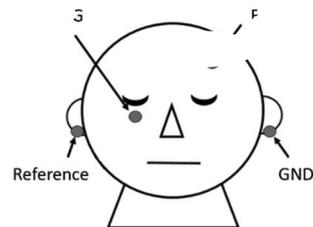


図 1 電極配置

Fig.1 Electrodes position.

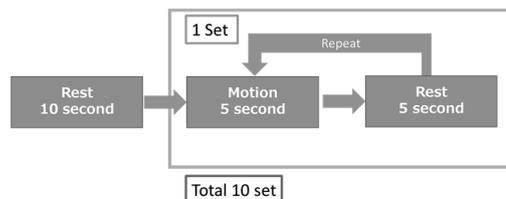


図 2 実験の流れ

Fig.2 Measurement flow.

4. 実験結果

DCR 法による検出回数を表 2 に示す。DCR 法では被験者 5 名中 3 名に対して動作指示時に行った動作をすべて検出することができた。しかし、FA の回数について Sub.1 は 2 回程度であったが Sub.3 や Sub.4 は動作意図なし時の半分程度の区間で誤検出されていた。DCR 法では閾値を RMS の定数倍にしている。通常時の電位は 10 μ V 程度と低いため、閾値と眼電位の差が開かず誤検出が増えたと考える。次に RER 法での検出回数を表 3 に示す。検出回数については DCR 法に比べて劣っているが誤検出に関しては優れていることがわかる。この時の平均 Hit 率と平均 FA 率を図 4 に示す。こちらでも検出に関しては DCR 法が、誤検出に関しては RER 法が優れていることがわかる。RER 法では眼電位と RMS の比率を見ている。比率が一定以上に達しない場合は検出の判定をしないため誤検出が少なくなったと考える。そのため誤検出が少ないが検出回数が少なくなったと考える。閾値と検出精度はトレードオフの関係で変化する。そこで本実験で取得した計 10 人分のデータを用いて閾値を変化させるシミュレーションを行って Hit 率と FA 率を求めた。

表 2 DCR 法の検出回数 (10 試行)

Table2 Detection count of Method 1.

	Hit(回)	Miss(回)	FA(回)	CR(回)
Sub. 1	10	0	2	8
Sub. 2	10	0	4	6
Sub. 3	10	0	5	5
Sub. 4	8	2	6	4
Sub. 5	8	2	3	7

表 3 : RER 法の検出回数 (10 試行)

Table3 Detection count of Method 2.

	Hit(回)	Miss(回)	FA(回)	CR(回)
Sub. 1	7	3	1	9
Sub. 2	7	3	0	10
Sub. 3	7	3	2	8
Sub. 4	9	1	2	8
Sub. 5	9	1	0	10

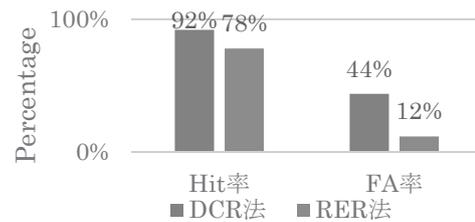


図 3 各手法の平均 Hit 率と FA 率

Fig.3 Average Hit rate and FA rate of each method.

5. 等価エラー率による閾値シミュレーション

5. 1 シミュレーション方法

シミュレーションでは 10 名分の計測データを用いてそれぞれの検出法の検出精度を図った。またシミュレーションを行う際にパラメーターを変化させ等価エラー率 (Equal Error Rate: EER) を求め、両検出法における適切なパラメーターを求めた。EER は認証技術の精度性能の目安として用いられており、EER が小さいほど精度が高いとされている。EER は Miss 率と FA 率の交点から求められる。Miss 率は 1 から Hit 率を減算することで求めた。

5. 2 シミュレーション結果

実験にて取得した計 10 名分のデータを用いてシミュレーションを行った。パラメーターは検出法では 1.5 から 4 まで 0.5 刻みずつ、RER 法では 2~5 まで 0.5 刻みで変化させた。シミュレーション結果から得られた Miss 率と FA 率からグラフを作成した (図 5,6)。

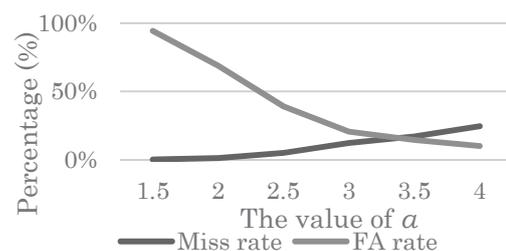


図 4 DCR 法における EER

Fig.4 EER of DCR.

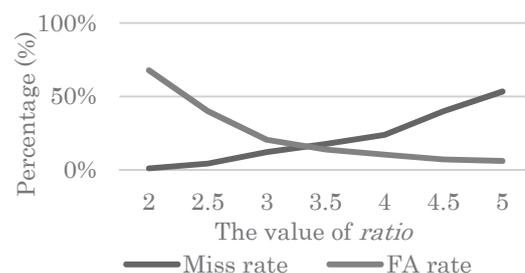


図 5 RER 法における EER

Fig.5 EER of RER.

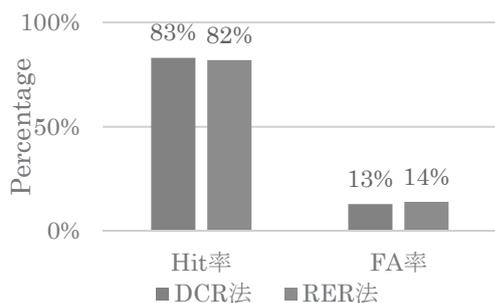


図 6 EER による閾値の平均 Hit 率と FA 率

Fig.6 Average Hit rate and FA rate at threshold by EER.

表 4 被験者ごとの EER による閾値時の Hit 率と FA 率

Table4 Best Hit rate and FA rate for each subject.

	DCR 法		RER 法	
	Hit 率	FA 率	Hit 率	FA 率
Sub.1	80%	5%	80%	10%
Sub.2	80%	10%	90%	10%
Sub.3	80%	10%	80%	10%
Sub.4	100%	5%	100%	5%
Sub.5	70%	10%	70%	20%
Sub.6	80%	20%	80%	20%
Sub.7	70%	30%	80%	20%
Sub.8	90%	20%	90%	10%
Sub.9	80%	20%	80%	20%
Sub.10	90%	5%	90%	5%

各検出法において EER となったパラメーターの Hit 率と FA 率を図 6 に示す. DCR 法での EER は乗算定数 a が 3.5 付近の値が最も検出精度が高いことが分かった. この時平均 Hit 率は 83%, 平均 FA 率は 14%であった. 実験時の a は 2.5 であったが, 閾値が上がっているため Hit 率が落ちているが FA 率に関しては大きく減少している. RER 法での EER は比率定数 $ratio$ が 3.5 の時であった. この時 Hit 率が 82%, FA 率が 16%となった. 実験時のパラメーターが 4 であり, 実験時よりも閾値が下がったため Hit 率が下がり FA 率が上がるというトレードオフの関係が見られた. シミュレーション実験においては Hit 率, FA 率ともに DCR 法のほうが優れていることが分かった. しかし Hit 率, FA 率の差がともに 1%と低い値であるため両手法の検出精度に差はないと考える. そこで被験者ごとに各手法の EER を求め, 最も EER に近い閾値の Hit 率と FA 率を求めた. 結果を表 4 に示す. 10 人の平均では DCR 法の検出精度が高かった. しかし, Sub.2 や Sub.7, Sub.8 の 3 名は RER 法の方が Hit 率と FA 率が高く, 被験者によって最適な検出法があることが分かった.

6. 考察

オンライン実験における検出回数を見ると DCR 法は検出に優れ, 検出法には誤検出に優れていることが分かった. ここでシミュレーションにおける Sub.1 の 1 回目を例に各手法のパラメーター変化による検出の違いについて考察した. 図 7 は DCR 法における眼電位の絶対値と乗算定数 a によって変化した閾値を対数軸で表したものである. 30.2 秒付近で入力動作が行われているが, 28 秒付近で $a=1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ までの閾値で誤検出が起きていることがわかる. 図 8 は図 7 と同区間の RER 法における眼電位の絶対値と RMS の比である. RER 法では比率定数 $ratio$ を 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 に定めたが, 動作を行った 30.2 秒以外では $ratio=3.0$ を超えることがなく, 波形の変化に追従し誤検出が減っていたと考えられる. これらのことから 3.5 節で述べたように DCR 法は EOG 検の意図検出に強く, RER 法は誤検出に強いと考えられる.

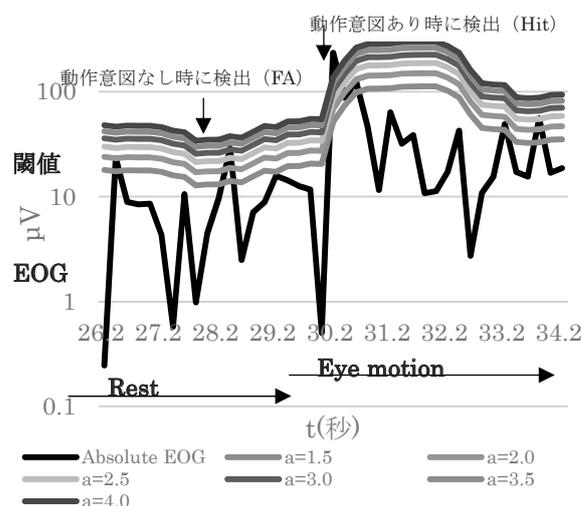


図 7 DCR 法における閾値(Sub.1 : 1 回目)

Fig.7 Change threshold in DCR.

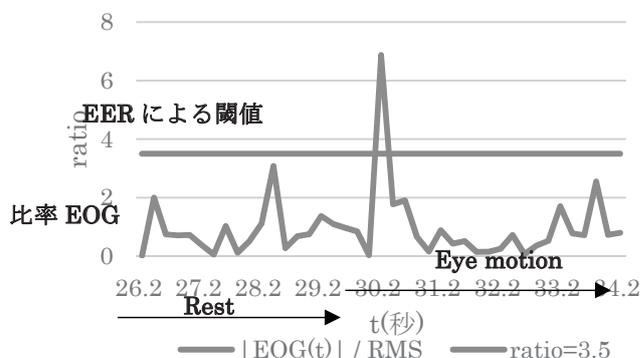


図 8 RER 法における比率変化(Sub.1 : 1 回目)

Fig.8 Change ration in RER.

7. まとめと今後の課題

本研究では眼電位を生体スイッチとして用いるための EOG 解析アルゴリズムについて検討を行った。検出には閾値法を用い、2 種類の検出方法を考案しオンライン実験を行い比較した。一つ目は閾値に動的に算出した RMS の定数倍を用いる DCR 法。二つ目は閾値に振幅と RMS の比率を用いた RER 法である。計 10 人分のデータによるシミュレーションを行った結果、DCR 法では Hit 率が 83%、FA 率が 13%、RER 法では Hit 率が 82%、FA 率が 14%であった。岡村らのまばたきによる機器操作方法に関する報告[6]では初めて操作を行った被験者の成功率は 80%前後であった。本実験においても被験者 10 名のうち 9 名は初めての使用であったがそれぞれ 70~100%の精度で検出できたため、本研究の 2 つの検出法は有効であることが示唆される。

今後は実際に神経難病患者に対して適用可能か検証を行う。また実験の際に被験者より入力動作が疲れるという意見が報告された。本研究で開発しているスイッチは神経難病患者の自立生活支援を目的としている。そのため日常生活で行いやすい動作を入力動作にする必要がある。今後は入力動作についても検討を行う。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご協力くださった被験者の皆様に深く感謝いたします。なお本研究の一部は工学院大学総合研究所プロジェクト研究費にて実施しました。

参考文献

- [1] 千島, 奈良, 橋本, 伊東 : 筋萎縮性側索硬化症 (ALS) 者における意思伝達支援の現況と脳波応用の可能性; 生体医工学 47(2),190-198,2009.
- [2] 阿部康二, “神経難病のすべて～症状・診断から最先端医療, 福祉の実態まで～”, 新興医学出版社, p28, 2007.
- [3] 独立行政法人 産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門, “人間計測ハンドブック”, 朝倉書店, p108, 2004.
- [4] 山岸, 堀, 宮川 : 眼電図を用いた文字入力インターフェースの開発, 電子情報通信学会信越支部大会, pp158, 2006.
- [5] 大矢, 川澄 : 眼電図による ALS コミュニケーションツールの入力動作の研究, 生体医工学, 日本エム・イー学会誌 43(1), pp.172-178, 2005.
- [6] 岡村, 加藤, 五百蔵, 田中 : まばたきによる筋電位変化を用いた機器操作方法の提案と実証; 第 10 回情報科学技術フォーラム, 第 4 分冊, pp303-306, 2011.

ヒトの下肢関節動態を再現した脚運動機構による 人工関節評価システムの開発 —歩行動作の再現—

工学院大学 機械システム工学科 桐山善守

東京医科大学 整形外科学分野 山本謙吾

Development of Evaluation System for Artificial Arthroplasty with the Mechanism of the Human Lower Extremity

— Simulation of the human gait —

Yoshimori Kiriya , Department of Mechanical Systems, Kogakuin University
Kengo Yamamoto, Department of Orthopedic surgery, Tokyo Medical University

ABSTRACT : Musculoskeletal simulator to evaluate artificial arthroplasty similar to the human lower extremity has been developed. This simulator has eight muscle tension generators and the muscle lines transmit muscle tension during motions of the simulator. In this study, we simulated normal human gait by the simulator. The muscle tensions during gait were calculated from the joint moments and activity patterns of the muscles. As a result, the simulator showed the joint movements similar to the human. On the other hand, ground reaction forces were not necessarily similar to the human gait. The tensions were controlled delayed to objective tensions. Also, the simulator system has damping factor along the tension wires. Although the simulator has some limitations, the simulator could simulate human gait kinematically. Therefore, the simulator should be useful to evaluate artificial arthroplasty.

1. はじめに

高齢者における関節疾患は、日常生活の大きな制約となり、要介護の原因として2割を占めている¹⁾。ROAD(Research on Osteoarthritis Against Disability)の調査によると、日本における変形性膝関節症(Knee Osteoarthritis:膝OA)の患者数は、推定で2530万人とされている²⁾。変形性関節症(Osteoarthritis:OA)は、下肢の関節に頻発し、加齢の他にも肥満や力学的負荷などの様々な要因から発症する。OAは、加齢や過度のスポーツによって軟骨が摩耗し、これに伴い、周辺の骨が変形することによって可動域の制限や関節炎症が生じる。症状が進行すると独歩が難しくなり、健康寿命、生活の質(quality of life:QOL)の低下の要因の一つとなる。また、支援や介護の必要性から、経済的な負担が大きくなり、大きな社会問題と言える。本邦における高齢社会に伴い、

OAの患者数の増加は明らかであるため、OAの予防と治療方法の開発は急務の課題となっている。

OAの治療法として、運動療法、薬物療法など様々な治療が行なわれているが、関節機能の効果的な復元方法として人工関節置換術が行なわれている。人工関節学会による統計レジストリーによると、日本における人工股関節置換術(Total Hip Arthroplasty:THA)と人工膝関節置換術(Total Knee Arthroplasty:TKA)の症例数は、2012年から2015年にかけて倍増している。2015年度では、THAとTKAはそれぞれ54,504件、68,640件も行なわれている^{3,4)}。

人工関節の耐用年数は一般的に20年以上と言われてる⁵⁾。しかし、耐久年数に達することなく人工関節に構造的な問題が生じてしまい、再置換を要する場合がある。THAとTKAにおける初回手術時の再置換率はそれぞれ8.2%、3.1%となっており、約9000症例が再置換となっ

ている^{3, 4)}。

構造的な問題の原因として、日常動作の負荷によってシステムの沈み込みやソケットのズレによるインプラントや摺動部のゆるみ、摩耗粉による骨溶解、患者に合わない機種選択、骨頭と寛骨臼におけるインピンジメントが挙げられる。

人工関節の耐用年数は、主に摺動面の磨耗及びびくリーブ評価で決定される。歩行時の関節角度とその負荷を再現し、それを50万回繰り返し行うことで評価される。しかし、現行のISO規格における荷重推移は、歩行時の荷重と運動を中心とした評価となっており、様々な日常動作における評価までには至っていない。このため、歩行以外の動作を目指した人工関節に対して、十分には評価できていない。

実際の人工関節を評価するために、生体内における荷重を計測することを目的としたセンサ内蔵型の人工関節も開発されている^{6, 7)}。しかし、患者に負担を強いる侵襲的な実験となり、倫理的な問題が生じる。

このため、*in vivo*(生体内)環境ではなく、*in vitro*(非生体内)における評価が必要とされている。

有限要素解析(Finite Element Analysis)に基づく人工関節の評価も行われている^{7, 8)}。しかし、入力する荷重が歩行動作などの典型的な得られる関節負荷の評価となっており、周囲の軟部組織の再現が不十分であることなど、課題が多い。

これらより、人工関節の耐用年数を評価するためには、実際の人工関節を用い、歩行動作だけでなく様々な日常運動下において評価することが必要だと考えられる。

図1に、当研究室で開発した人工関節シミュレータを示す。下肢全体の筋骨格構造を再現することを目的としており、能動的な筋活動と二関節筋の機能を再現した。この結果、生理的な関節の可動域や歩行動作の姿勢を再現できた。先行研究の課題としては、筋骨格構造を再現したものの質量や慣性モーメントなどの物理パラメータがヒトと一致しておらず、また骨盤部を固定していたため、前方への移動の再現が困難であった。また、膝関節に影響を及ぼす広筋と腓腹筋が骨盤に影響を及ぼしてしまうなどの課題があった。このため、本研究ではこれまでの問題点を解決し、日常運動の1つである歩行動作を

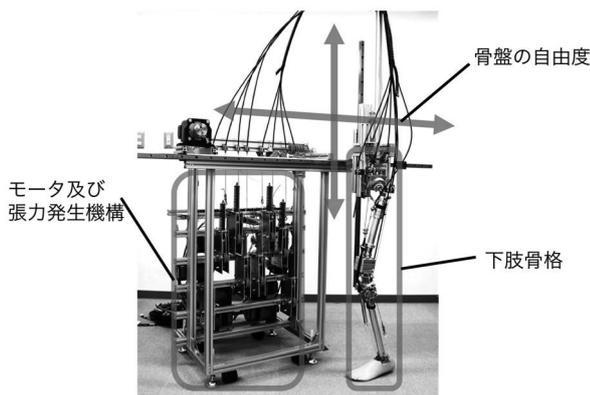


Fig.1 Lower extremity simulator

筋張力制御によって行うことを目的とする。

2. 下肢人工関節シミュレータの基本仕様

2.1 人工関節シミュレータの概要

本研究で使用したシミュレータを図1に示す。本シミュレータは、モータ部と下肢骨格部に分かれており、下肢骨格が動作した際にモータの重さなどが影響しない構造とした。

本シミュレータは、下肢骨格をモータとワイヤによって動作させた。骨盤は、矢状面方向と、上下方向の2自由度を有しており、矢状面方向はモータとワイヤによって下肢骨格の牽引を行った。また、上下方向は受動的に動作をさせた。本シミュレータで再現した下肢構造は、下肢の解剖学的な自由度と可動域を有しており、筋骨格構造を再現できている。

能動的な筋の制御には、モータとワイヤを用いた。モータとワイヤの経路にばねを搭載し、筋張力を発生させた。モータ部には、8つのモータとそれぞれに後述する張力発生機構を搭載した。

基本フレームと下肢構造は、アルミ材によって構成した。骨盤の自由度の再現には、リニアガイドを用いた。骨格には、中空の丸棒を用いた。

股関節と膝関節は、それぞれ人工股関節と人工膝関節を設置した。人工関節は、ねじによる締め付けによって固定した。

骨盤の上下方向の自由度は受動的であるため、反対脚が床に接地した場合を再現する際に、空中で維持させる必要がある。このため、下方向への可動域を物理的に制限し、床に接地せずに空中で姿勢が維持できる機構を搭載した。可動域の制限は、立位時に接地できる範囲で調整可能である。また床接地時には、下肢骨格を持ち上げる際にモータに大きな負荷が作用する可能性がある。この一方、歩行時の蹴り出し後にはつま先が床に接触し、下肢が持ち上がらない場合が考えられる。このため、特



Fig. 2 Femur segment



Fig.3 Tibia segment

定の位置に骨盤が達したときに、可動域の制限を小さくしより高い位置で制限できる機構を搭載した。この機構

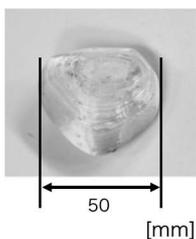


Fig.4 Patella model



Fig.5 Hip joint



Fig.6 Knee joint

には、物理リミッタとしてばねを用いた。特定の位置を超えた場合に、ばねが伸長することによってストッパーが飛び出す。これにより、高い位置で可動域を制限した。

2. 2 骨格の再現

今回用いたシミュレータの大腿と、下腿及び足部を図2および図3に示す。大腿及び下腿はアルミ材を中心に構成し、足部の再現には義足用の部品を用いた。また、リストウエイト(FIELDOR社 ソフトアンクルリストウエイト(0.5 [kg],1.0 [kg],2.0 [kg]))を用いて各部位の質量を決定した。このリストウエイトを用いて、大腿を 6.0 [kg]、下腿を 4.0 [kg]、足部を 1.0 [kg]とした。

前捻角は、年齢などにより個人差があるため、微調整が可能であることが好ましい。このため、本シミュレー

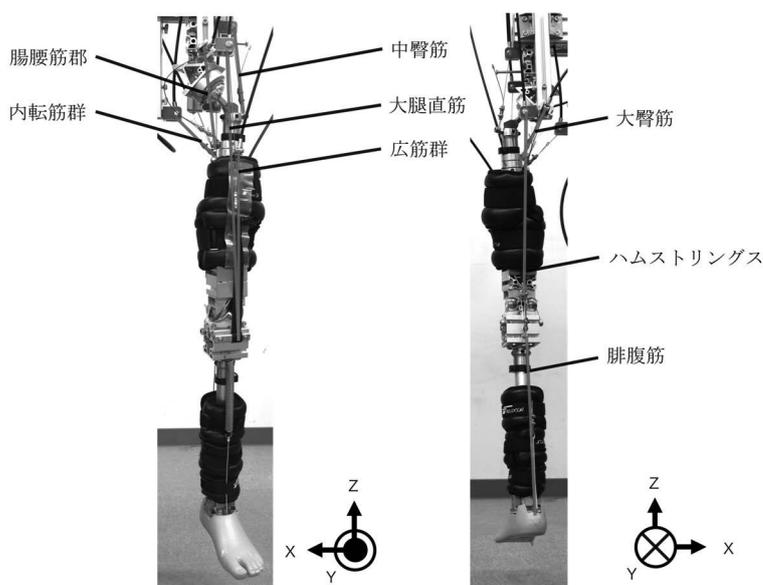


Fig.7 Muscle lines (front)

Fig.8 Muscle lines (rear)

タでは義足用のアタッチメントを用いることで様々な前捻角を実現可能とした。前捻角は、一般的に 8~15 [deg]とされている。本研究では、前捻角を 12 [deg]とした。

膝蓋骨は 3D プリンターを用いて作成し、材料は PLA 樹脂とした。これを図4に示す。また、使用した人工股関節は、ZIMMER-BIOMET社のMallory-Headを用いた。これを図5に示す。カップサイズは 52 [mm]、ヘッドサイズは 28 [mm]、ステムは RPP10 となっている。また人工膝関節は、STRYKER社のScorpioを使用した。これを図6に示す。大腿骨側のサイズ7、ライナーの厚みは 10 [mm]となっている。

2. 3 筋走向の再現

本シミュレータで再現した筋群とその機能を図7と図8及び表1に示す。全ての筋の再現は、機構的に困難であることに加え、筋張力による制御が非常に複雑になってしまう。このため、各関節動態で支配的であり、かつ機能が似ている筋群を一つにまとめ、特定の筋のみを再現した。また、能動的な筋とは別に、前脛骨筋をばねにより再現し、受動的に動作を行わせるようにした。

筋の付着位置は、体節ごとの座標系により表した。これらの筋付着位置は先行研究^{9, 10)}をもとに決定した。なお本研究では、全ての筋を再現していないため、筋付着位置は機能が似ている筋群の機能を実現可能な付着位置とした。

大腿や下腿に起始がある場合には、骨盤の運動に影響を与えることなく、筋張力を伝達する必要がある。このため、本シミュレータでは、リンクケーブルを用いて、図9のように配置した。リンクケーブルは、アウターケーブル内にインナーワイヤが走行しており、このインナーワイヤのみを変位させることによってモータと起始の位置関係に影響されず、張力を制御することができる。

Table 1 Reproduced Muscles

筋群	筋	機能
	大臀筋	股関節：伸展
	中臀筋	股関節：外転
腸腰筋群	腸骨筋 大腰筋 小腰筋	股関節：屈曲
内転筋群	大内転筋 短内転筋 長内転筋	股関節：内転
	大腿直筋	股関節：屈曲 膝関節：伸展
広筋群	内側広筋 外側広筋 中間抗衛	股関節：屈曲
ハムストリングス	大腿二頭筋 半膜様筋 半腱様筋	股関節：伸展 膝関節：屈曲
腓腹筋	腓腹筋内側頭 腓腹筋外側頭	足関節：底屈

2. 4 筋張力の再現

本シミュレータは、筋を1次元ワイヤモデルとみなし、モータとワイヤによって筋の収縮と筋張力を再現した。ばねは張力を発生させるために用いた。また、このばねによって主動筋によって関節が動作した時の張力を発生させることができる。このとき、モータは停止トルクが必要のため、ステッピングモータ(オリエンタルモータ社 ARM98AC-M10)を用いた。

ロードセルは、ワイヤの張力を計測するために用いた。このとき、ロードセルからの電圧は非常に小さいため、動ひずみアンプを用いて増幅を行った。

張力の再現はモータを使って行った。モータへの入力には、モータの回転速度とし、ロードセルで計測された張力によるフィードバック制御によってモータへの入力速度を決定した。このとき、ステッピングモータへの入力には、目標値である入力荷重 F_R [N]、プーリ直径 D_P [mm]、ギア比 R_S 、1パルスあたりの回転量 P_V [rev/pulse]、1ステップあたりの時間 S_S [sec/Hz]、ばね常数 K_S [N/mm]、モータの速度 P_E [pulse/sec]を用い、式(1)で決定した。

$$P_E = \frac{F_R \times R \times P_V}{\pi \times D_P \times K_S \times S_S} \quad (1)$$

2. 5 制御システム

本研究では、8つの筋群それぞれの張力発生機構に取り付けたロードセルでワイヤの張力を計測した。このときの電圧値を動ひずみアンプによって増幅し、アナログ入力ボードによってAD変換を行い、制御用PCに送信した。制御用PCでは、この張力をもとにフィードバック制御を行い、モータドライバに速度指令として出力をする。このとき、モータへの速度指令の入力周期は20[Hz]とした。

筋張力による制御を行う際、本シミュレータの場合には、ワイヤの伸張や摩擦によって張力の減衰や外乱が発生する。このため、ローパスフィルタ(LPF)と不感帯を設けることで対応した。

LPFは直前のセンサ情報 $Sensor(t-1)$ と現在のセンサ情

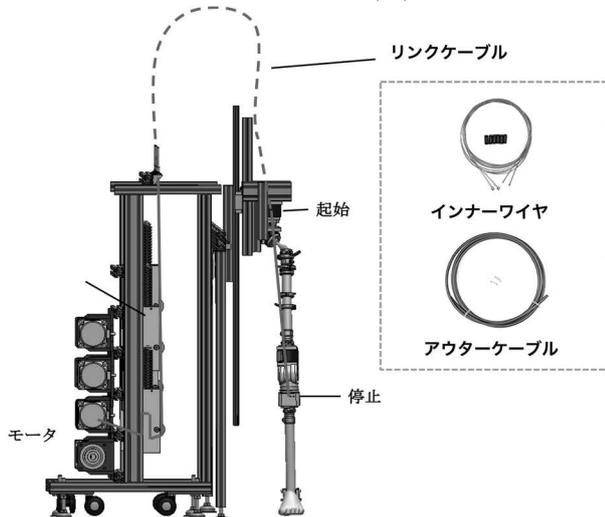


Fig.9 Link cable

報 $Sensor(t)$ により、式(2)を用いて平滑化しノイズを除去した。

$$Sig(t) = Sensor(t) \cdot A + Sensor(t-1) \cdot (A-1) \quad (2)$$

ここで、 $Sig(t)$ は平滑化後の信号を表す。係数 A は、平滑化の重みを示しており、大きくすると応答が悪くなるが、信号がより平滑化される。本研究では応答性を維持するためにカットオフ周波数約4[kHz]とし、係数 $A=0.8$ に設定した。

不感帯は、センサ値の変動に対して閾値 D_Z を設け、現在の信号値 $Sig(t)$ が閾値内であれば誤差とみなし、センサ信号の直前の信号値 $Sig(t-1)$ とみなすこととした。これを式(3)に示す。

$$Sig(t) = \begin{cases} Sig(t-1) & (|Sig(t) - Sig(t-1)| \leq D_Z) \\ Sig(t) & (otherwise) \end{cases} \quad (3)$$

不感帯によって、閾値以下になった際にその変動を無視することができる。このため、小さな外乱による影響を受けなくすることができる。さらに目標値に収束する際に、振幅が閾値内であれば振幅がなくなり目標値に収束したと見なすことができる。しかし不感帯は、大きく設定してしまうと、センサ値と入力値の差が大きくなり、不必要なオーバーシュートが発生してしまう可能性がある。このため、本研究では $D_Z=1$ [N]とした。これは、想定する最大荷重値の0.1[%]に相当する。

応答の改善には、PID制御を用いた。これを式(4)に示し、偏差 $e(t)$ に対して、比例ゲイン K_p 、積分ゲイン T_i 、微分ゲイン T_d によって目標に収束させた。

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (4)$$

2. 6 システムの応答性

本シミュレータは、張力の伝達にリンクケーブルを介しているため、摩擦による張力の減衰や時間遅れが発生する。このため、リンクケーブルの有無で、本制御システムの応答性を計測し比較を行った。リンクケーブルが無い場合では、ワイヤのみを介した先にロードセルを設置した。また、リンクケーブルがある場合では、ワイヤとリンクケーブルを介した先にロードセルを設置し、それぞれの張力を計測した。入力荷重は、200[N]のステップ入力とし、リンクケーブルの有無における張力を計測し、システムの応答性を評価した。この結果、リンクケーブルを介することで、時間遅れや荷重の減衰が大きく発生することが確認された。そこで本研究では、これらの減衰を考慮して制御を行った。

2. 7 筋張力の推定手法

本研究では、ヒトの動作から逆動力学解析を行うことで関節モーメントを求め、この関節モーメントを満たす筋張力を生理的構造の特徴に基づき推定した。

関節モーメントを求めるにあたり、まず外力と並進の運動方程式からリンク内力を導き(式(5)), 回転の運動方程式に代入した(式(6)). これにより、回転の運動方程式における未知数が、関節モーメントのみとなるため、それについて解いた.

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = -{}^{i-1}\mathbf{P}_i + {}^i\mathbf{P}_{i+1} + m_i \mathbf{g} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_i \dot{}^i\boldsymbol{\omega}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i \dot{}^i\boldsymbol{\omega}_i \\ = -{}^{i-1}\mathbf{n}_i + {}^i\mathbf{n}_{i+1} - \mathbf{r}_{i-1} \times {}^{i-1}\mathbf{P}_i + \mathbf{r}_g \times m_i \mathbf{g} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 m は質量[kg], \mathbf{x} は重心位置[m], \mathbf{P} は隣接するリンクからの並進力 [Nm], \mathbf{g} は重力加速度 [m/s²], \mathbf{I} は慣性テンソル[kg m²], $\boldsymbol{\omega}$ は角速度[rad/s], \mathbf{n} は隣接するリンクからの力のモーメント(関節モーメント) [Nm], \mathbf{r} は回転中心から隣接するリンクからの並進力作用位置までの距離[m], \mathbf{r}_g は回転中心から重心までの距離 [m], i はリンク番号である.

この計算を、足部から行った. 足部は歩行遊脚期には自由端となるが、立脚期には床との接触が生じる. この際の際の力やモーメントは、床反力計から取得することができる. このため、足関節モーメントを求めることができる. 式(5)および(6)により得られた足関節の関節間力とモーメントを用いることで、膝関節、股関節のモーメントを漸加的に求めることができる.

次に、得られた関節モーメント ${}^i\mathbf{n}_{i+1}$ を用いて、各筋張力を求めた. 筋張力を \mathbf{F} [N], リンク i に付着する筋の付着位置を \mathbf{r}_j [m], j を筋の番号とすると、筋張力によるモーメントの総和は関節モーメントを満たす必要がある. すなわち、式(7)のように表せる.

$${}^i\mathbf{n}_{i+1} = \sum_j {}^i\mathbf{r}_j \times \mathbf{f}_j \quad (7)$$

しかし、関節あたりに複数の筋が付着しているため、満たすべき式に対して未知数となる筋張力は冗長となる. また、拮抗関係となる筋があるため、その筋張力は一意には決められない. そこで、筋張力 \mathbf{F} [N]を、筋の生理断面積に基づく最大張力 s [N], 筋の活動度 x [%], 筋張力方向の単位ベクトル \mathbf{d} を用いて式(8)として表せるものとした.

$$\mathbf{F}_j = s_j \cdot x_j \cdot \mathbf{d}_j \quad (8)$$

生理断面積に基づく最大張力は、筋の生理学的横断面積と単位面積あたりの最大筋張力の積として求めた. また筋の活動については、Coleらによるヒトの通常歩行における筋活動度に基づくものとした¹¹⁾. 大臀筋, 中臀筋, 腸腰筋群, 内転筋群の筋活動度を図10に、大腿直筋, 広筋群, ハムストリングスの筋活動度を図11に示す. 縦軸は筋活動度であり最大等尺性収縮力に対する比として表される. 横軸は歩行サイクルとし、踵部接地から、再び踵部が接地するまでが歩行サイクル 100 [%]として表されている. Coleらによる筋活動度を a_i とすると、筋張力の計算の算出は以下を満たすことと等価となる. なお、ここで $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x^T]$ とする.

$$\begin{cases} f(\mathbf{x}) = \sum_j (x_j - a_j)^2 \rightarrow (\min) \\ \mathbf{g} = \sum_i \left({}^i\mathbf{n}_{i+1} - \sum_j \mathbf{r}_j \times \mathbf{f}_j \right) \rightarrow \mathbf{0} \end{cases} \quad (9)$$

そこで、式(9)を同時に満たすように式(10)を定めた.

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (10)$$

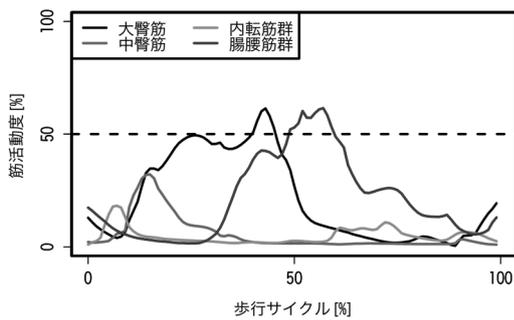


Fig.10 Muscle active patterns(1)

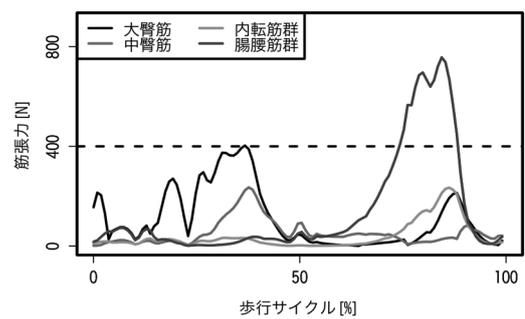


Fig.12 Muscle tensions(1)

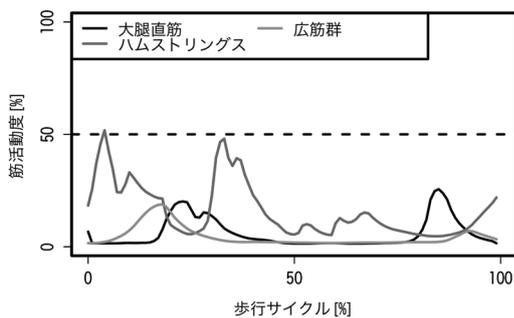


Fig.11 Muscle active patterns(2)

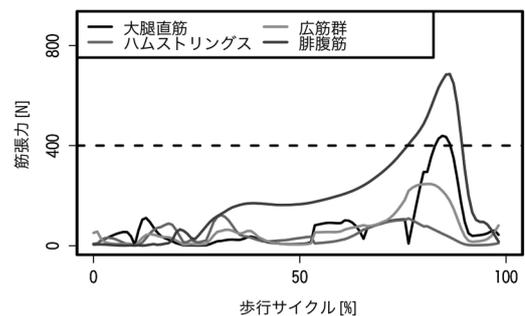


Fig.13 Muscle tensions(2)



Fig.14 Marker placements

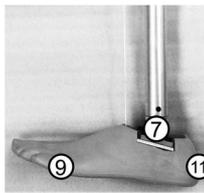
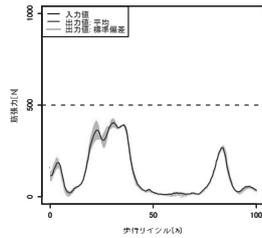
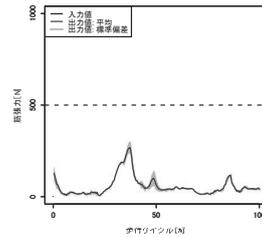


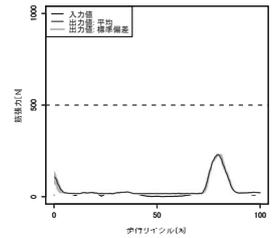
Fig.15 Foot markers



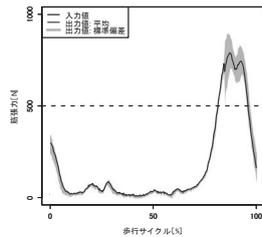
(a) Gluteus maximus m.



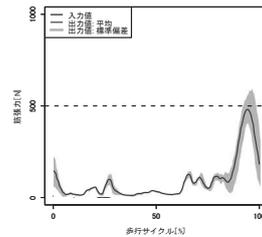
(b) Gluteus medius m.



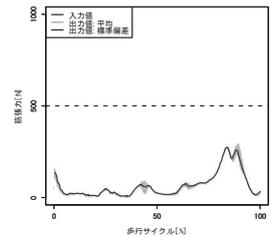
(a) Adductor m.



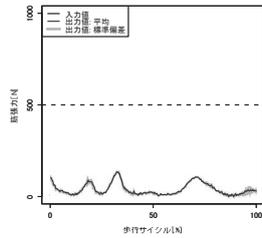
(d) Iliopsoas m.



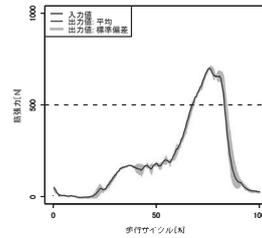
(e) Rectus femoris m.



(f) Vastus m.



(g) Hamstrings



(h) Gastrocnemius m.

Fig.16 Marker placements

ここで λ はラグランジュの未定乗数である. 本研究では, 式(10)を最小化するような筋活動度 x_j と λ を, ニュートン法を用いて求めた.

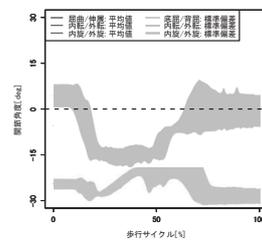
これらの最適化計算から得られた大臀筋, 中臀筋, 腸腰筋群, 内転筋群の筋張力を図 12 に, 大腿直筋, 広筋群, ハムストリングス, 腓腹筋の筋張力を図 13 に示す. 縦軸は筋張力[N]であり, 横軸は歩行サイクル[%]である.

2. 8 運動計測

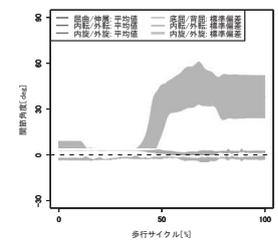
人工関節シミュレータの運動計測を行うために, 反射マーカ型モーションキャプチャシステム(Motion Analysis 社 Kestrel 2200)を用いた. 本研究では, 7台のカメラを用いた. なお, 膝の内側マーカを安定して計測できるように前後からも計測した.

本シミュレータの解剖学的特徴点に反射マーカを貼付し, これに基づいて股関節, 膝関節, 足関節角度動態を求めた. マーカ貼付位置を, 図 14 と 15 に示す. 計測対象の3次元姿勢を計測するためには, その一つの体節に対して3つ以上のマーカを貼付する必要がある. しかし, 骨盤は前後と上下方向にしか動かないため, 骨盤の姿勢の取得にはマーカ①とマーカ②のみ用いた.

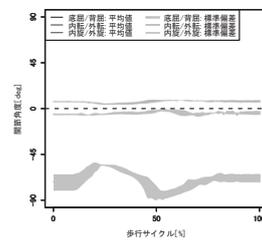
3. 結果



(a) Hip angle



(b) Knee angle



(c) Ankle angle

Fig.17 Joint angles

3. 1 筋張力の追従性

歩行動作時における, 各筋の筋張力をそれぞれ, 図 16 に示す. このとき, 縦軸は筋張力 [N], 横軸は歩行サイクル [%]とした. 入力値は補正前の入力値を示しており, 出力値は, 筋張力の平均値と標準偏差を示した.

ほとんどの筋張力において標準偏差が小さく, 再現性が高いことがわかる. また, 腸腰筋と腓腹筋のピーク値を入力値の補正によって減衰がある状態でも, 入力値の

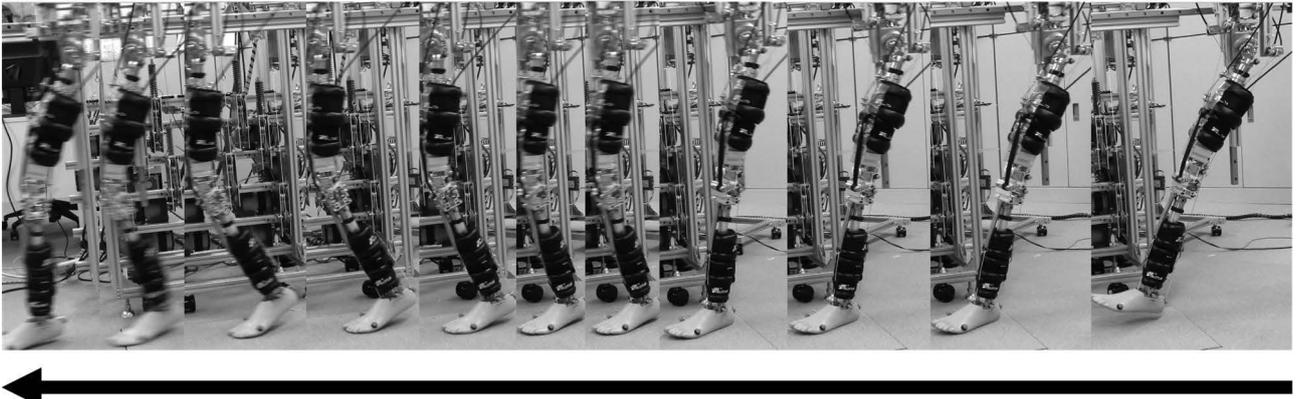


Fig.18 Stance phase of the simulator

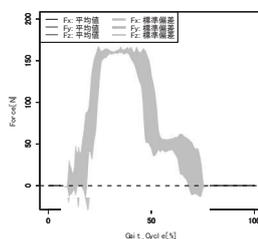


Fig.19 Ground reaction force of the simulator

ピーク値を達成することができた。

3. 2 歩行時運動角度

歩行動作時における本シミュレータの関節角度を図17に示す。縦軸は関節角度 [deg]とし、横軸は歩行サイクル [%]とした。また、それぞれの関節角度の平均値と標準偏差を示している。このときの歩行サイクル10 [%]間隔におけるシミュレータの歩行姿勢を図18に示す。

3. 2 シミュレータの床反力

得られた床反力を図19に示す。縦軸は荷重値 [N]とし、横軸は歩行サイクル [%]とした。床反力における前左右方向の成分を F_x 、前後方向の成分を F_y 、上下方向の成分を F_z とし、平均値と標準偏差を示した。

4. 考 察

4. 1 筋張力の再現性と主動筋・拮抗筋の関係

4. 1. 1 大臀筋

大臀筋は、股関節の単関節筋で伸展時に主動筋となる。このため、床接地時に張力が発生する必要がある。図10と図16(a)から、大臀筋の発火タイミングは適切であると考えられる。また、歩行サイクル終期の入力値と比較して、大臀筋が早いタイミングで張力が発生している。これは、主動筋となる腸腰筋によるものだと考えられる。このとき、股関節において主動筋の活動に対して拮抗筋としての大臀筋が活動し、拮抗したためと考えられる。

4. 1. 2 中臀筋

中臀筋は、歩行動作において、股関節の内旋/外旋及び、内転/外転角度が大きくなることを防止するとともに、股関節のステフィネスを維持する役割を担っている。これは、筋付着位置の関係で、大臀筋と腸腰筋が屈曲/伸展動作をすると、内旋/外旋及び内転/外転にも影響を及ぼすため、不必要な角度変位を防止する必要があるためである。図16(b)より、大臀筋同様に、歩行サイクル終期において、腸腰筋のピークに合わせて張力が発生しており、ステフィネスの維持と不必要な関節の変位を防止できていると考えられる。また、標準偏差を見ると張力の再現度が高いことがわかる。

4. 1. 3 内転筋群

内転筋群も、中臀筋と同様に、股関節の内転/外転及び内旋/外旋角度が大きくなることを防ぐとともに、股関節のステフィネスを維持する役割を担っていた。図17(a)より、歩行サイクル30 [%]から50 [%]の区間で、大きく外旋していることがわかる。同区間では、中臀筋(図16(b))が筋張力を発生した。このとき、内転筋群との拮抗状態にあれば、同区間において筋張力が生じるはずであった。しかし、内転筋群の筋張力(図16(c))は、同区間において、筋張力を生じていない。このことから、筋の拮抗関係が成立していなかったと考えられる。この要因としては、筋の再現度と筋付着位置にある。内転筋群は、表1で示したように、複数の筋からなる。特にこれらの筋の付着位置は大腿骨の広範囲に渡り付着している。本シミュレータの構造的な制約から、1次元ワイヤーモデルの再現となり、筋付着位置もこれらを平均した停止位置とした。これにより、ヒト本来との筋付着位置が異なることから拮抗関係が生じなかったと考えられる。このため、これらを考慮した解剖学的構造を再現するために、内転筋群の停止位置の再考が必要だと考えられる。

4. 1. 4 腸腰筋群

腸腰筋群は、股関節の単関節筋であり屈曲時に主動筋となる。このため、立脚中期から立脚終期にかけて張力を発揮し、下肢を持ち上げる必要がある。図10と図16(d)より、腸腰筋の発火タイミングは適切だと考えられる。

図16(d)より、腸腰筋群は筋張力のピーク時に標準偏差

が大きくなっていることがわかる。これは、オーバシュートのばらつきが影響しており、その振動によって再現性が低くなったと考えられる。しかし、張力の立ち上がりなど、それ以外の箇所については高い再現度を有していることがわかる。

腸腰筋の入力値と出力値を比較すると時間遅れが生じた。このため、入力に対する追従性の向上が今後の課題と考えられる。

4. 1. 5 大腿直筋

大腿直筋は、股関節と膝関節にまたがる二関節筋で、股関節の屈曲及び膝関節の伸展時に主動筋となる。本シミュレータでの歩行動作には、立脚終期において、股関節と膝関節が屈曲及び伸展動作が必要になった場合に張力を発揮しており、図 11 と図 16(e)から、大腿直筋の発火タイミングは適切だと考えられる。

図 16(e)より、立脚初期に見られる張力の小さな立ち上がりは、床接地後に膝関節が屈曲を開始しているタイミングであり、膝関節のステフィネスに貢献をしていると言える。歩行サイクルの立脚終期において、大きな時間遅れが生じた。腸腰筋群と同様に、追従特性を向上させることで時間遅れを解消させることが可能と考えられる。

4. 1. 6 広筋群

広筋群は、膝関節の単関節筋で、膝関節の屈曲時に主動筋となる。歩行サイクル終期における膝関節の伸展時に張力を発揮しており、大腿直筋と同様の役割を担っていることがわかる。

図 16(f)より、広筋群の張力は全体を通して、高い再現度を有していることがわかる。しかし、歩行サイクルの中期に標準偏差が大きくなった。これは、腓腹筋の影響のためと考えられ、膝のステフィネスを維持するために張力が発生としていたと考えられる。

4. 1. 7 ハムストリングス

ハムストリングスは、股関節と膝関節にまたがる二関節筋で、股関節の伸展及び膝関節の屈曲時に、主動筋となる。歩行サイクルにおいて股関節と膝関節が同時に伸展及び屈曲を動作をしない。しかし、立脚中期から立脚終期にかけて、膝関節の屈曲が必要となる。このとき、股関節は屈曲動作が必要となり、ハムストリングスの出力を大きくしてしまうと、股関節の屈曲に対して、伸展するようなモーメントを股関節に及ぼす可能性がある。図 16(g)より、膝関節の屈曲動作は、ハムストリングスが主動筋となるが、大きな出力はせずに、股関節のステフィネスに貢献をしつつ、骨盤の運動にともなる慣性によって屈曲動作を実現したと考えられる。また、ハムストリングスも広筋群と同様に、高い再現度を有していた。

4. 1. 8 腓腹筋

腓腹筋は、膝関節と足関節にまたがる二関節筋で膝関

節の伸展及び足関節の底屈時に、主動筋となる。立脚中期から立脚終期において、膝関節が屈曲、足関節が底屈の動作時に腓腹筋の張力が大きくなっており、図 16(h)から、筋の発火タイミングは適切だと考えられる。

図 16(h)より、入力値と出力値を比較すると、入力値に比べ早期に張力がピークに達した。これは、腸腰筋群と大腿直筋に比べ、 T_c が大きいことを示しており、腓腹筋のみで見るとこのパラメータを小さくする必要があると考えられる。

4. 2 関節運動

図 17 より、本シミュレータの股関節角度は再現性が高いものの、ヒトの股関節角度と比較すると、特に屈曲/伸展において、本シミュレータの屈曲動作は非常に小さくなった。また、ヒト歩行と比較して不必要な箇所で股関節が外旋位の姿勢となった。

高い再現性は、筋が拮抗関係にありステフィネスが維持されたことによるものだと考えられる。しかし、股関節の屈曲/伸展動作は、このステフィネスの維持によってヒトの関節角度を満たすことができなかったと考えられる。主動筋と拮抗筋によって拮抗関係が生じた際に、拮抗筋側の張力は、入力値と計測されたフィードバックに用いる張力は、必ずフィードバック側の張力が大きくならなければならない。これにより、拮抗筋側は主動筋による動作に合わせて張力を調整し、筋のステフィネスを維持しつつも、動作の妨げにならないように張力をフィードバックし調整する必要がある。

また、股関節角度がヒトの関節角度を満たさなかった要因として、張力の減衰が問題であると考えられる。特に大きな荷重を出力する腸腰筋や大臀筋は、減衰によって荷重が小さくなった。このため、股関節が大きく屈曲しなければならぬタイミングでも腸腰筋群が小さく、ヒトの関節角度を再現することができなかったと考えられる。これより、応答の改善が必須であると考えられる。

股関節角度の内旋/外旋に着目すると、歩行サイクル 20~50 [%]の箇所大きく外旋しており、ヒトの内旋/外旋角度と異なった。この要因としては、中臀筋がこのタイミングで張力を出力したことが要因としてあげられる。股関節の筋張力(図 12)を見ると、拮抗筋である内転筋の出力が小さく、中臀筋の出力が大きい箇所があり、これが要因であると考えられる。また、腸腰筋もその筋走行から外旋にも影響を及ぼす。このため、内転筋の出力は逆動力学計算で得られた筋張力より、大きい必要があると考えられる。内転筋の筋張力が小さい要因としては、股関節の筋活動度(図 10)と筋付着位置及び筋の再現度が原因であると考えられる。内転筋群は、恥骨筋、短内転筋、長内転筋、薄筋、小内転筋、大内転筋からなる筋群であり、その停止位置は、大腿骨の近位から遠位に至る。本研究では、大内転筋を中心に、複数の筋の機能を満たすように停止位置を決定した。しかし逆動力学計算において、内転筋群のモーメントアームが大きいことから、

筋張力を推定した際に小さい張力となったと考えられる。このため、筋の再現を改めて考慮する必要があると考えられる。また、筋活動度は文献によって報告が異なり、必ずしも一致しない。今回用いた筋活動度は、Cole らによるコンピュータシミュレーションから算出された筋活動度である。別の手法や実計測によっては筋活動が異なる可能性もある。このため、筋活動度の報告間の違いについても考慮に入れる必要があると考えられる。さらに、筋付着位置が再現する筋とは異なることから、筋活動度も合わせて調整する必要も考えられる。

図 17(b)に示す膝関節角度に注目すると、膝の屈曲/伸展角度は、概ねヒトに一致した。また、健常歩行であれば、立脚期に膝の屈曲が二回生じる *double knee action* が観察されるが、本シミュレータでは確認できなかった。一方、内転/外転と内旋/外旋には、一定のオフセットが生じたが、角度推移は概ね一致したと考えられる。図 17(b)から、屈曲/伸展角度は、歩行サイクル 50~100 [%] までの区間において、標準偏差が大きくなった。この要因として、蹴り出し時の屈曲に、大きな角度変位が生じることによるものだと考えられる。慣性や床接地時の外乱などによって、関節角度にオーバーシュートが生じてしまい、その振動によって標準偏差が大きくなり出力されているのではないかと考えられる。また、張力によって一意に姿勢が決定されるはずだが、リンクケーブルなどによる摩擦や減衰によって一意に定まらない場合があったと考えられ、これも問題として挙げられる。

歩行サイクル 50~60 [%] の区間における膝関節に関わる筋の筋張力を見ると、ほとんどの筋が小さな筋張力であった。またハムストリングスは、膝関節の屈曲に作用するが、股関節の伸展にも作用してしまうことから、大きな出力時には拮抗関係の筋が適切に筋張力を発揮しないと正しい動作が行われないと考えられる。この結果、本実験におけるシミュレータの関節角度は慣性によって姿勢が決定されており、小さな出力によって関節のステフィネスが低くなってしまったため、動作の再現性が低かったと考えられる。これに対し、内旋/外旋及び内反/外反については、概ねヒトの関節角度を再現できていると考えられる。

本シミュレータの足関節(図 17(c))は、ピンジョイントとなっているため、内旋/外旋と内反/外反はほとんど生じなかった。ヒト足関節の内旋/外旋と内転/外転角度を比較してもあまり大きな差は生じなかった。このため、本シミュレータにおけるヒト歩行時の内旋/外旋と内転/外転の再現は、現状ではピンジョイント機構で問題なかったと考えられる。

足関節角度の底屈/背屈を見ると、歩行サイクル 50 ~ 80 [%] の区間における角度変位が大きく異なることがわかる。これは、立脚終期における蹴り出し動作時の足関節角度が再現できていないことを意味する。このときに腓腹筋が大きく出力し、下肢を持ち上げる必要がある。しかし、蹴り出し時において腓腹筋は出力しているもの

の、足部の蹴り出しが十分できずに、腓腹筋のピークが過ぎてしまっている。これは、腓腹筋の張力がリンクケーブルを通して減衰が生じてしまい、持ち上げるために必要な筋張力を出力することができなかったと考えられる。このため、リンクケーブルの減衰の改善が必要だと考えられる。

4. 3 床反力

本シミュレータでの床反力(図 19)は、ヒト歩行の床反力に見られる二峰性を再現することができなかった。この要因としては、前述した通り、足部による蹴り出しが十分にできなかったと考えられる。このため、前述のように、リンクケーブルの減衰を改善することや、足関節に関わる筋であるヒラメ筋を追加することで解決できると考えられる。

4. 4 本研究の限界

本研究で再現した筋群の種類や本数の選択は、機構的な制約が大きい。また、モータの出力やワイヤの強度を考慮し、本シミュレータの出力値の上限は、1000 [N]とした。加えて、減衰によって影響で骨格に与える荷重が小さくなった。このため、骨格に与えなければならない荷重を出力すると、上限値を大きく超えた荷重となってしまう可能性がある。

減衰の改善にも限界があるため、特に大きな出力をする筋に対しては、役割を分担できる筋の追加や、リンクケーブルを用いない筋の再現が必要となる。特に、本シミュレータで大きな出力となるのは、腓腹筋と腸腰筋群である。

腓腹筋は、足関節の底屈時に主動筋となる。腓腹筋の筋張力は、本研究の手法により筋張力の決定を行った場合、足部には腓腹筋のみが能動的な筋となっているため、床反力などによるモーメントを一つの筋で補う必要があり、非常に大きな出力となってしまう。このため、足関節に関わる能動的な筋を追加することで、この問題が解決できると考えられる。腓腹筋の筋張力を他筋に分散することで、PID パラメータのゲインを上げることが可能となり、制御性の向上が見込めると考えられる。

腸腰筋群は骨盤に起始がある。本シミュレータでは、モータ部と下肢骨格部に独立しており、ワイヤ変位が骨盤の影響をうけないようにする必要があるので、リンクケーブルを用いて骨格に筋張力を与えた。リンクケーブルを用いずに、筋張力を骨格に与える方法として、腸腰筋群のモータと張力発生機構を骨盤に搭載することが考えられる。これにより、骨盤が移動した際のワイヤ変位を考慮する必要がなくなる。リンクケーブルを用いなければ減衰が減少するため、筋張力を下肢骨格に正しく与えられると考えられる。

再現した筋群のみだと、様々な日常動作の関節角度を再現するのが困難な場合がある。特に、膝関節においては、本来、内外旋や内外反を制御しているハムストリン

グスを一つにまとめ、停止位置を内側ハムストリングスと外側ハムストリングスの中間点とした。このため、膝の内外旋に影響を及ぼす筋が、本シミュレータには無い。これにより、歩行時における膝関節の回旋を制御することが困難となり、内側と外側のハムストリングスを別々に再現する必要があると考えられる。

本研究では、骨盤の自由度を矢状面方向と上下方向のみとした。歩行動作において骨盤は、歩行サイクル中、5度程度の前傾と後傾が、繰り返し行われている³⁰⁾。また、年齢や体格によって骨盤が前傾であったり、上体を前傾させることによって大腿四頭筋を補うとされている。このため、今後は骨盤の自由度を拡張することにより、ヒト歩行の再現度の向上や様々な動作への応用が可能であると考えられる。

本シミュレータの目的は、歩行動作や、様々な日常動作における人工関節への荷重を計測することである。このため、本研究では昨年度の課題であった筋骨格の解剖学的構造の再現と、歩行動作の再現を行った。

人工関節の評価において重要となるのが、ヒト歩行動作の再現度と再現性である。ヒト歩行動作の再現度は、ヒトの関節角度と比較して本シミュレータの関節角度は小さい値となってしまった。しかし、運動そのものの再現性においては、膝関節の屈曲/伸展を除けば定性的に良好であったと考えられる。

人工関節への荷重を計測するためには、動作再現時に各関節に生じる内力を計測する必要がある。このため、将来的に各関節に対して力覚センサを搭載する必要がある。また本実験では、歩行サイクルを3秒とした。人工関節を評価する上で歩行速度が異なると、関節面に生じる慣性力や衝撃が異なる可能性がある。このため、歩行サイクルをヒト歩行に近づける必要がある。荷重の入力周期20 [Hz]は、制御プログラムの限界から決定した。これは、プログラム内のFIFO処理が、20 [Hz]を超えてしまうと、オーバーフローが生じてしまうためである。これより、今後の課題として制御プログラムの改良が必要であると考えられる。

5. 結 論

本研究では、筋骨格構造を有する下肢運動シミュレータにヒトと同様の歩行運動を再現させた。ヒトの筋活動パターンと同様の筋張力を推定し、これをシミュレータに入力した。この結果、ヒトと同等の運動を示した。今後は動力学的な再現が重要となり、これを実践するための制御手法の確立が課題として考えられた。

謝 辞

本研究は、2017年度総合研究所プロジェクト研究の支援で行われた。また、本研究を遂行するにあたり、藤原史大君(本学大学院修士2年)と萩原拓己君(本学大学院修士1年)の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 厚生労働省: 国民生活基礎調査の概要(2016).
- (2) Yoshimura, N., et al.: Epidemiology of osteoarthritis in Japan; the ROAD study, Clin. Calcium. Vol.21 (2011) pp.821-825.
- (3) 日本人工関節学会: THA レジストリー統計, (2016).
- (4) 日本人工関節学会: TKA レジストリー統計, (2016).
- (5) Ritter, A., et al.: The Anatomical Graduated Component total knee replacement, Bone Joint J. Vol.91 (2009) pp.745-749.
- (6) 廣川俊二, 他: 生理的・能動的が可能な新型シミュレータの開発, 機論 vol.81, No.824 (2015) pp.14-00488.
- (7) Mark, A.N., et al.: Dynamic finite element knee simulation for evaluation of knee replacement mechanics, J. Biomech. Vol.45 (2012) pp.474-483.
- (8) 森田真史, 他: 高度な流体膜維持機能を有する人工股関節摺動部コンポーネントの開発, 医療機器学会誌 vol.84 (2014) pp.566-574.
- (9) 裴艶玲, 他: 生体力学的安全性を考慮した3次元リハビリテーション軌道と足先作用力の同時設計手法, 機論 vol.78 (2012) pp.253-267.
- (10) Richard, A.B., et al.: A model of Lower Extremity muscular anatomy, J. Biomech. Eng., vol.104 (1982) pp.304-310.
- (11) Cole, S.S., et al.: Feasible muscle activation ranges based on inverse dynamics analyses of human walking, J. Biomech. vol.48 (2015) pp.2290-2997.

希土類フリー新規超イオン伝導性固体電解質の開発

工学院大学 先進工学部 応用化学科 大倉利典

工学院大学 先進工学部 応用化学科 吉田直哉

東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 山下仁大

Ryu Bong-Ki, School of Materials Science and Engineering,
Pusan National University (Korea)

Development of Rare Earth-free Novel Superionic Solid Electrolyte

Toshinori Okura, Department of Applied Chemistry,
School of Advanced Engineering, Kogakuin University

Naoya Yoshida, Department of Applied Chemistry,
School of Advanced Engineering, Kogakuin University

Kimihiro Yamashita, Institute of Biomaterials and Bioengineering,
Tokyo Medical and Dental University

Ryu Bong-Ki, School of Materials Science and Engineering,
Pusan National University (Korea)

ABSTRACT : We have prepared glass-ceramics of the phosphorus-containing $\text{Na}_5\text{RSi}_4\text{O}_{12}$ (N5)-type (R = rare earth) Na^+ -superionic conductors (Narpsio), and confirmed wide composition range and various frame substitutions. The R elements may have significant effects on the conduction properties, as well as the crystallization of glasses. However, the rare earth element has a problem in the amount of resources and cost. Therefore, by replacing the R of the N5-type structure with Fe, the synthesis of inexpensive N5-type glass-ceramics of the rare earth-free is expected. In this study, the glass-ceramics of the phosphorus-containing N5-type conductors were prepared from the glasses with the composition $\text{Na}_{5-x}\text{FeP}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_{12}$ ($x = 0\sim 0.2$) with investigating their thermal crystallization conditions, and their ionic conductivity were evaluated. The conductivity in the grain of the glass-ceramics crystallized for 2 h was increased slightly by the addition of P, and the conductivity was decreased by the longer thermal crystallization probably due to the formation of the impurity phases. However, it was found that the obtained N5-type glass-ceramics of the rare earth-free exhibited excellent conductivity of the order of $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$.

1. はじめに

$\text{Na}_2\text{O-R}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (R=希土類元素)系結晶化ガラスは、組成および結晶化の際の熱処理条件によって

$\text{Na}_3\text{RSi}_3\text{O}_9$ (N3型)、 $\text{Na}_5\text{RSi}_4\text{O}_{12}$ (N5型)、 $\text{Na}_9\text{RSi}_6\text{O}_{18}$ (N9型)の3つの結晶相を持つ。中でもN5型は、結晶構造中に SiO_4 四面体の12員環構造があり、その環状構造同士は希土類元素Rで結合されている。これらの構造

間の隙間は3次元のトンネル構造となっていて、この中を Na^+ が電荷キャリアーとして通るため、安定で高いイオン伝導性を持つことが知られている。さらに、Siの一部をPで置換した $\text{Na}_2\text{O}-\text{R}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ 系 Na^+ 伝導性固体電解質(Narpsio)は、N5型を合成可能な組成範囲が広い。このようなNarpsioや β , β' -アルミナなどのナトリウム超イオン伝導体は、一次電池、二次電池、化学センサ、エレクトロクロミック表示素子、電気分解装置など幅広い応用が可能である。しかしこのNarpsioの組成中の希土類元素は希少で高価であるため、これを地殻存在度が豊富でかつ希土類元素と同様に八面体構造をとるFeで全置換することで、希土類フリーの安価なNarpsioの合成が期待できる。本研究では、①SiのP一部置換および②結晶化熱処理条件の2つの観点から、RをFeで代替した希土類フリーN5型結晶化ガラスの合成を検討し、伝導度の向上を図った。

2. 実験

結晶化ガラス試料の作製は、一般組成式 $\text{Na}_{5+3x-y}\text{Fe}_{1-x}\text{P}_y\text{Si}_{4-y}\text{O}_{12}$ ($x=0, y=0, 0.1, 0.2$)にしたがい、熔融急冷・ガラス結晶化法を用いて行った。はじめに、 Na_2CO_3 および SiO_2 を秤量・粉砕・混合し、電気炉内で脱 CO_2 のため 900°C で0.5 h 仮焼した後、 1400°C で1 h 熔融した。融液を大気中室温にてステンレス板を用いてプレス急冷し、母ガラスを得た。次に、作製した母ガラス、 Fe_2O_3 および Na_2HPO_4 を秤量・粉砕・混合した。これらを電気炉内にて 1400°C で1 h 熔融後、得られた融液を大気中室温にてステンレス板を用いてプレス急冷し、ガラス試料を作製した。得られたガラス試料

について、熱重量-示差熱分析(TG-DTA)を行い、結晶化条件を検討した。ガラス試料を粉砕した後、一軸加圧成型および冷間等方加圧(CIP)による成型(150 MPa)後、核生成を 500°C で1 h、核成長を 750°C で1~50 hと変化させて結晶化を行い、結晶化ガラス試料を作製した。得られた結晶化ガラスについて、結晶相の同定のため粉末X線回折(XRD)測定、微細構造の検討のため走査型電子顕微鏡(SEM)観察を行い、複素アドミッタンス測定による伝導度の解析、直流分極法による電子伝導性の寄与について評価した

3. 結果および考察

3.1 $\text{Na}_5\text{FeSi}_4\text{O}_{12}$ 型結晶化ガラスの合成の検討

これまで希土類元素としてYを使用して合成してきたN5型結晶化ガラスについて、YをFeに置き換えることによって希土類フリーN5型結晶化ガラスの合成を試みた。しかし、希土類元素を使用した系と同様の操作では試料を合成することが困難であり、大きく2つの問題があげられた。まず、ガラス試料は熔融の際に発泡しやすく、るつぼから吹きこぼれる影響で安定的に合成することが困難であった。この問題に対して、 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 系の母ガラスを作製し、そこに Fe_2O_3 および Na_2HPO_4 を添加する形で段階的に行うことにより、安定的にガラス試料が得られるようになった。次に、バルク状でのガラス試料の結晶化が困難であったことがあげられる。バルク状のガラス試料では、結晶化の際に空隙・亀裂の発生や不均一核生成により表面のみが結晶化し、均一に結晶化が進行しなかった。そこで、ガラス試料を粉末状にした後にそれをペレット状に成型することで、より均質かつ

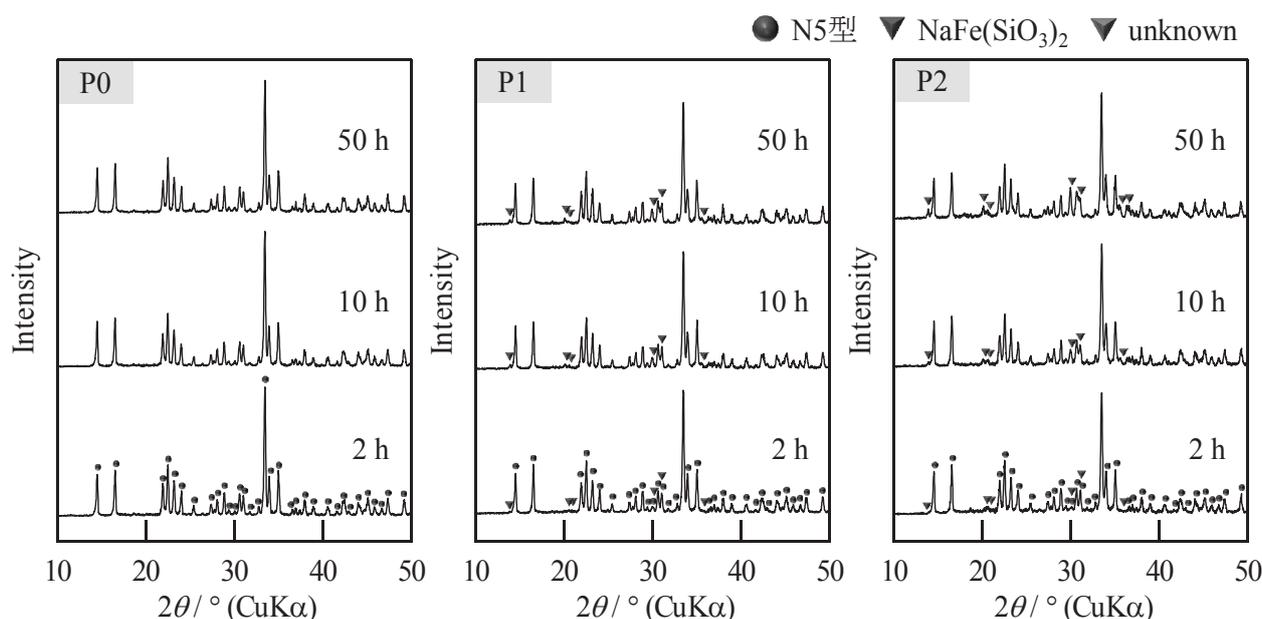


Fig. 1 核成長時間を変化させて作製した結晶化ガラスのXRDパターン

緻密なガラス試料が得られると考えた。本研究では、ペレット状に成型したガラス試料を結晶化することにより結晶化ガラスの合成を検討した。

3. 2 XRD 測定による結晶相の検討

組成式 $\text{Na}_{5+3x-y}\text{Fe}_{1-x}\text{P}_y\text{Si}_{4-y}\text{O}_{12}$ ($x = 0, y = 0, 0.1, 0.2$: それぞれ P0, P1, P2 と略記する) にしたがって、ガラス試料を作製し、核成長時間を 1~50 h と変化させて結晶化ガラスを合成した。Fig. 1 に核成長時間を変化させて作製した結晶化ガラスの XRD パターンを示す。すべての組成で N5 型を主とした結晶相が得られた。P0 では N5 型の結晶相が得られたが、P1 および P2 では $\text{NaFe}(\text{SiO}_3)_2$ が析出し、核成長時間が長くなるにつれてピークが強くなる傾向となった。

3. 3 P による一部置換および核成長時間が伝導度に及ぼす影響

核成長 2 h で作製した P2 結晶化ガラス (P2-2 h) のコール・コールプロットを Fig. 2 に示す。結晶化ガラス

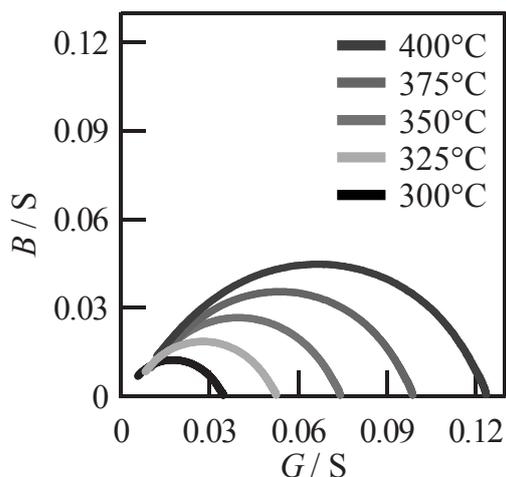


Fig. 2 P2-2 h 結晶化ガラスのコール・コールプロット

の伝導度を測定する際に考えられる抵抗成分として、粒内、粒界、電極の 3 つが考えられる。今回の測定では円弧は温度上昇とともに大きくなったが、1 つの円弧のみが観察された。そのため、本研究では成分ごとの解析が困難であることから、粒内の伝導度について評価した。Fig. 3 に核成長 2 h で作製した各組成の結晶化ガラス (P0~2-2 h) のアレニウスプロットを示す。P の添加量の増加にともない伝導度は増加し、活性化エネルギーはわずかながら低下した。最高の伝導度は P2 で観察され、 350°C で $8.78 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ となり、活性化エネルギーは 45.8 kJ mol^{-1} となった。Fig. 4 に各組成の 350°C での伝導度と核成長時間の関係を示した。P0 では、核成長時間の延長にともない伝導度は増加した。しかし、P1 および P2 では、核成長時間の延長による伝導度の増加はみられず、逆に低下する傾向となった。これは結晶相の変化と相関がみられ、核成長時間の延長により不純物相の析出量が増加し、それが抵抗成分となり伝導度が低下したと考えられる。

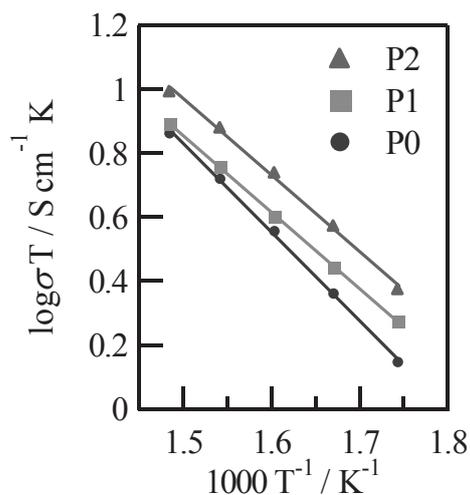


Fig. 3 P0~2-2 h 結晶化ガラスのアレニウスプロット

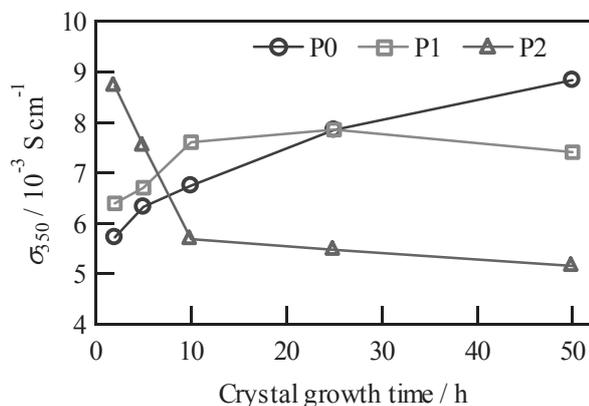


Fig. 4 350°C での伝導度と核成長時間の関係

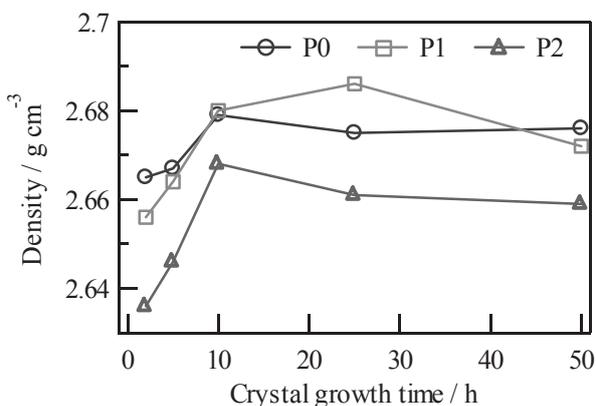


Fig. 5 各組成の核成長時間による密度変化

3. 4 密度測定

伝導度測定を行った試料に対して、それぞれ密度測定を行った。Fig. 5に各組成の核成長時間による密度変化を示す。核成長時間が長くなるにつれて密度は増加傾向となった。P2では10 h以降は低下傾向にあった。核成長時間の増加により結晶粒が成長し、密度が増加したと考えられる。また、P2では不純物相の析出により密度が低下したと考えられる。P2を除いて、密度が高い試料ほど伝導度が高い傾向となった。

3. 5 SEM観察

核成長2 hおよび50 hで作製したP0結晶化ガラス(それぞれP2 h, P0-50 h)、伝導度の高かった核成長2 hで作製したP2結晶化ガラス(P2-2 h)について、SEM観察を行った。Fig. 6に各試料のSEM像を示す。すべての試料においてN5型に特徴的な六角板状の結晶粒が観察された。P2 hとP0-50 hを比較すると、結晶粒が成長していることが確認できた。また、P2-2 hでは比較的小さい2 μm 程度の結晶粒も観察され、結晶粒サイズに

ばらつきがあったが、P2-50 hでも結晶粒の成長が確認できた。伝導度測定の結果を踏まえると、P2の伝導度の減少は粒界成分からの不純物相の析出に起因していると思われ、それが増加したために伝導度が低下したと考えられる。

3. 6 電子伝導性の寄与の検討

核成長2 hで作製した各組成の結晶化ガラス試料について、直流分極法により電子伝導性の寄与について検討した。Fig. 7にP2結晶化ガラスの350°CでのI-Vプロットを示す。I-Vプロットより得られた直線の傾きと試料の面積、厚さを考慮し、電子伝導度を算出した。各組成の電子伝導度および伝導度測定により得られた粒内の伝導度をTable 1に示す。電子伝導度は、粒内の伝導度と比較すると、いずれの組成でも1/1000程度の値を示した。このことから、作製した試料はいずれも電子伝導性の寄与は極めて小さく、ほぼイオン伝導性であると考えられる。

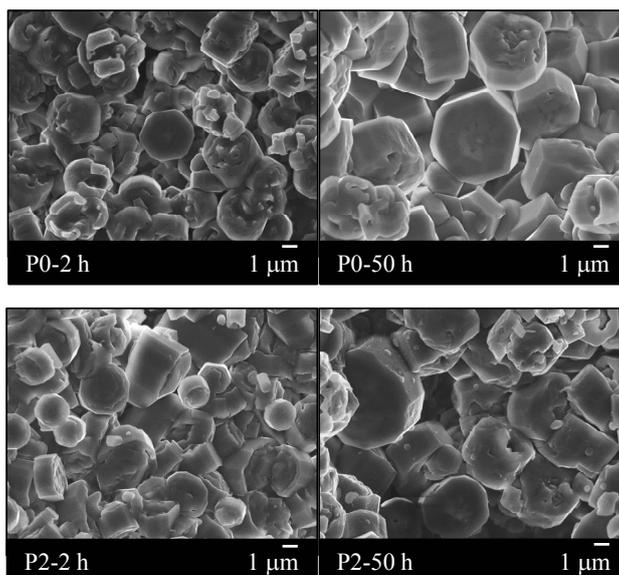


Fig. 6 作製した結晶化ガラスのSEM像

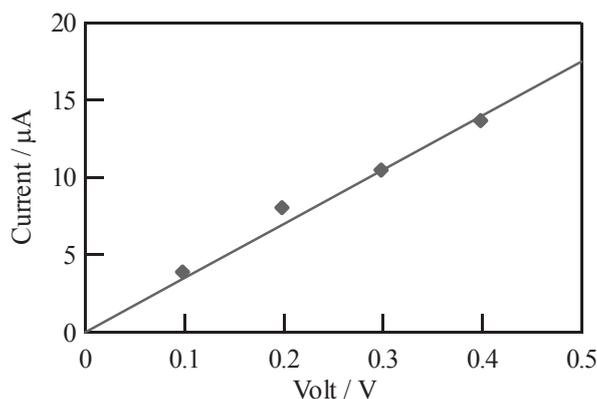


Fig. 7 P2-2 h 結晶化ガラスのI-Vプロット

Table 1 各組成の電子伝導度と粒内の伝導度

sample	Electron conductivity / $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$	Grain conductivity / $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$
P0	0.00292	5.72
P1	0.00300	6.53
P2	0.00409	8.72

4. おわりに

本研究では、①SiのP一部置換および②結晶化熱処理条件の2つの観点から希土類フリーの安価なN5型結晶化ガラスの合成を検討し、伝導度の向上を図った。

- ◆ すべての組成においてN5型を主とした結晶相が得られた。しかし、Pを添加した試料では不純物相が析出し、核成長時間の延長によりそれが増加する傾向となった。
- ◆ 伝導度測定の結果、短時間の結晶化ではPの添加により伝導度は増加した。P0では核成長時間が長くなるにつれて伝導度は増加した。しかし、Pを添加した試料では、核成長時間の延長による伝導度の増加はみられず、逆に低下した。

- ◆ N5型の特徴的な六角板状の結晶粒が観察され、核成長時間の延長により結晶粒の成長がみられた。
- ◆ 直流分極法により電子伝導性の寄与について検討した結果、いずれの組成でも粒内の伝導度と比較して電子伝導度は1/1000程度の値となり、電子伝導性は極めて小さいことがわかった。
- ◆ $\text{Na}_5\text{RSi}_4\text{O}_{12}$ 結晶化ガラスに匹敵する $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ の Na^+ 伝導性を有する希土類フリー結晶化ガラスを合成することができた。

本研究から得られた知見は、これからのガラスセラミックスや希土類フリー化などの研究・開発の足掛かりとなると考えられる。

光充電型リチウムイオン電池の高容量化と全固相化(II)

工学院大学 応用物理学科 永井裕己

工学院大学 応用物理学科 山口智広

工学院大学 情報通信工学科 工藤幸寛

工学院大学 基礎・教養科 望月千尋

シンガポール国立大学 機械工学科 Lu Li

工学院大学 応用物理学科 佐藤光史

Fabrication of photovoltaic lithium-ion-battery of all solidified materials and enhanced capacity

Hiroki Nagai, Tomohiro Yamaguchi, Mitsunobu Sato, Department of Applied Physics

Yukihiro Kudoh, Department of Information and Communications Engineering

Chihiro Mochizuki, Division of Liberal Arts

Li Lu, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore

ABSTRACT : We examined the LCO and titania thin-films were fabricated on an FTO glass substrate by the electrospray deposition (ESD) method. The average film thickness of LCO and titania increased linearly with the used amounts of each precursor solution. In the case of LCO, the XRD pattern and Raman spectrum was consistent to spinel crystal, without forming any Co_3O_4 . The electrodes with the active materials, titania and LiCoO_2 , were assembled into a sealed sandwich-type battery. A charge/discharge test using a current of 0.2 mA was performed with a DC voltage source/monitor. Averaged potentials of 2.5 and 2.1 V were observed by charging for 1 min and discharging for an identical duration, respectively. The 1-sun irradiation was achieved using a solar simulator and the voltage change was measured with a DC voltage monitor. The charging voltage of the assembled battery was 1.15 V by irradiating of 1 sun (100 mW cm^{-2}); the self-discharge voltage was 1.14 V. The averaged voltages were 1.1 V during 1-sun irradiation for 1 min. These results indicate that ESD method is useful for fabricating the all-solid thin film PV-LIB with high capacity.

1. はじめに

21世紀は、資源の枯渇や環境問題など世界規模の問題を鑑みながら社会が更に進出し続け、次世代につながるための持続可能な社会創造が大きなテーマである。特に、エネルギー問題は深刻であり、クリーンエネルギーの利用は、環境問題を解決するために急務である。

現在構築を目指しているユビキタスネットワーク社会は、安心・安全かつ便利で豊かな社会をどの地域でも実現させることによって、我が国の産業が活性化するとともに国際競争力が向上すると期待されている。しかし、これらユビキタスネットワーク社会の実現に向けた機器やセンサーの増加に伴い、電力消費も増大する。これに関して、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)とNMEMS技術研究機構は、電源や通信を有線で配線すると設置工事で大きな負担が必要なことや電池を内蔵して無線にする場合に現状のセンサーや送信技術では電力消費が多くなること、また電池交換などのメンテナンスが必要であることなどの課題を指摘している。

これらの課題に対して、高電圧で高エネルギー密度のリチウムイオン電池(LIB)は、多様な機器の電源として実用的である。しかし、一般的なリチウムイオン電池等の二次電池は、外部電源からの充電が必要である。したがって、リチウムイオン電池を設置したまま室内等の光で充電し、センサーに電力を供給できれば、省エネルギーな方法でユビキタスネットワーク社会の実現に向けて少なからず貢献できる。以上のことから、外部電源が不要で、光充電できるリチウムイオン電池は、実用性、社会的必要性が非常に高く、その開発は急務である。

我々は、導電性ガラス(FTO)を電極基板として、正極として $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ 、負極として $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ の各活物質薄膜を分子プレカーサー法で形成し、これらの電極間に LiPF_6 電解液を注入した世界初の無色透明なLIBを報告した⁽¹⁾。この透明LIBを研究背景として、光で充電可能なリチウムイオン電池(PV-LIB)を報告した⁽²⁾。この電池は、負極活物質に TiO_2 、正極活物質に LiCoO_2 (LCO)を用い、疑似太陽光の照射で約1.4Vの充放電電圧を示し、サイクル特性に優れている。このPV-LIBの薄膜活物質を形成した分子プレカーサー法は、低コストで薄膜作成が可能な化学的湿式法である⁽³⁾⁻⁽¹⁵⁾。この方法は、酸化物やリン酸化合物などを形成したい金属イオンを含む比較的安定な錯体が、アルコール溶液中に均一に溶解しているプレカーサー溶液を基板に塗布し、熱処理して薄膜を形成する。本プロジェクトでは、この分子プレカーサー法を応用して水または有機溶媒に溶解したプレカーサー溶液を調製し、その溶液を用いて活物質の厚膜化に適しているミストCVD法、Electro-Spray Deposition(静電スプレー析出, ESD)法、水溶液スプレー法で活物質膜を形成する。かつ、実用化に向けて電解液の代わりに

市販の電解質ゲルを用いることによって、安全性が高い光充電型全固体化リチウムイオン電池の形成を最終的な到達目標とする。

本年度は、スピコート法以外での活物質膜形成の基礎研究と位置付け、分子プレカーサー溶液を用いてESD法による薄膜形成結果を中心に報告する。ESD法は、クーロン力によって、ノズル先端の溶液から帯電した微細でスプレー状に広がる液滴を目的基板上に堆積させて成膜する。大気中で液滴を堆積する際に、溶媒が多量に含まれるウェットな状態と、ドライな状態を制御することが可能である。ドライな状態で堆積させることによって、厚膜化を実現できると考えられる。本研究ではESD法を成膜に用いることによって、①PV-LIB用の負極材料である酸化チタンの成膜と膜厚の増加、また②正極材料であるLCOの成膜と膜厚の増加を目的として、基礎的な成膜条件を検討した。さらに、得られた膜電極を組合せて、光充電型リチウムイオン電池の形成を試みた。なお、分子プレカーサー溶液をESD法に適用したのは本研究が初めてである。

2. 実験

2.1 使用試薬

チタニア分子プレカーサー液(TFLEAD-Ti)、酢酸コバルト四水和物、ブチルアミンは和光純薬工業株式会社、酢酸コバルト四水和物は関東化学工業株式会社、エタノールは、上野化学工業株式会社を使用した。イソプロパノール(IPA)は、大成化学株式会社を使用した。ヘキサフルオロリン酸リチウム(LiPF_6)溶液はキシダ化学株式会社を用いた。基板は旭硝子株式会社のフッ素ドープ酸化スズプレコートガラス基板(FTO基板)を用い、日東電工のアクリル両面テープ、スリーボンド株式会社の紫外線硬化性樹脂TB3035Bを用いてデバイスを作製した。FTOガラス基板は、 $20 \times 33 \text{ mm}^2$ に切断し、イソプロパノール(大成化学株式会社)中、超音波照射しながら30分間ずつ2回洗浄した。70°Cの乾燥器中で10分間乾燥後、室温まで放冷し、成膜用基板として使用した。ESD法により分子プレカーサー溶液の塗布を行う前に次のように基板表面の不純物を除去した。アルカリ洗浄液を用いて10分間超音波洗浄後、アルカリ洗浄液を次のように純水ですすいだ。基板を純水中に浸漬し、10分間超音波洗浄後、窒素ガスを吹き付けて基板表面の水滴を飛ばし、電気炉を用いて110°Cで10分間焼成した後、徐冷した。

2.2 ESD用チタニアプレカーサー溶液の調製

市販のチタニアプレカーサー溶液をIPAで体積比6:4(チタニアプレカーサー溶液300 μL : IPA200 μL)に希釈した。

2.3 ESD用 LiCoO_2 プレカーサー溶液の調製

50 mL スクリュー管ビンに、酢酸リチウム二水和物を 0.64 g (6.27 mmol) 量り取り、エタノールを 10.0 g 加えた。ここにブチルアミンを 1.82 g (24.9 mmol) 量り入れ、室温で 1 時間、1000 rpm で攪拌後、モレキュラーシーブスを 3 g 加えて、 Li^+ 濃度が 0.5 mmol g^{-1} の Li_2O プレカーサー溶液を調製した。また、50 mL スクリュー管ビンに、酢酸コバルト四水和物を 1.90 g (7.62 mmol) 量り取り、エタノールを 10 g 加えた。ここにブチルアミンを 3.34 g (45.7 mmol) 量り入れ、室温で 1 時間、1000 rpm で攪拌後、モレキュラーシーブスを 7 g 加えて、 Co^{2+} 濃度が 0.5 mmol g^{-1} の CoO プレカーサー溶液を得た。各プレカーサー溶液を、物質質量比が $\text{Co}^{2+}/\text{Li}^+=1$ となるように混合し、30 分間、1000 rpm で攪拌後、モレキュラーシーブスを 5 g 加えて調製した。調製した LCO プレカーサー溶液を IPA により体積比 3 : 7 (LiCoO_2 プレカーサー溶液 150 μL : IPA350 μL) でさらに希釈し、ESD 用 LCO プレカーサー溶液とした。

2. 4 ESD 塗布によるチタニア膜（負極活物質）の形成

ESD 用チタニアプレカーサー溶液を $3.3 \times 2.0 \text{ cm}^2$ サイズの FTO の $2 \times 2 \text{ cm}^2$ の領域に ESD 法で塗布した。導電性テープでマス킹し、アースに基板表面を接続した。シリンジのキャピラリー（内径: 0.15 mm, 外径: 0.72 mm）と基板に 4.1 kV の電圧を印加し、流速 $3 \mu\text{L min}^{-1}$ で 120, 240, 480, 720 μL を図 1 のように塗布した。

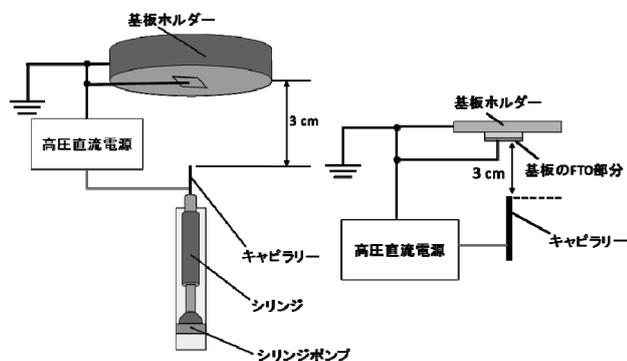


図 1 ESD 法によるプレカーサー溶液塗布

塗布後、 100°C に保温したホットプレート上で 10 分間プレヒートした。その後、 100°C に予熱したマッフル炉に入れ 500°C まで $36^\circ\text{C min}^{-1}$ で昇温して 500°C で 30 分間保持した。その後、炉内温度を 300°C まで下げて、サンプルを取り出した。480, 720 μL の塗布の場合は、240 μL の溶液を塗布後に、同条件でプレヒート、熱処理を繰り返した。

2. 5 ESD 塗布による LCO 薄膜（正極活物質）の形成

調製した LCO プレカーサー溶液を $3.3 \times 2.0 \text{ cm}^2$ サイズの FTO の $2 \times 2 \text{ cm}^2$ の領域に ESD 法で塗布した。導電性

テープでマス킹し、アースに基板表面を接続した。シリンジのキャピラリー（内径: 0.15 mm, 外径: 0.72 mm）と基板に 4.05 kV の電圧を印加し、流速 $3 \mu\text{L min}^{-1}$ で 80 μL のプレカーサー溶液を図 1 のように塗布した。

塗布後、 100°C に保温したホットプレート上で 10 分間プレヒートした。その後、 100°C に予熱したマッフル炉に入れ 500°C まで $36^\circ\text{C min}^{-1}$ で昇温して 500°C で 30 分間保持した。その後、炉内温度を 300°C まで下げて、サンプルを取り出した。

2. 6 スピンコート法による LCO 薄膜（正極活物質）の形成

ESD による成膜と同様に、 S_{LCO} をマイクロピペッターで 50 μL を FTO 基板に滴下し、1st ステップ 500 rpm-5 sec, 2nd ステップ 2000 rpm-30 sec の 2 段階スピンコート法で、プレカーサー膜を形成した。

塗布後、 100°C に保温したホットプレート上で 10 分間プレヒートした。その後、 100°C に予熱したマッフル炉に入れ 550°C まで $36^\circ\text{C min}^{-1}$ で昇温して 550°C で 30 分間保持した。その後、炉内温度を 300°C まで下げて、サンプルを取り出した。

2. 7 デバイスの作製

PESD 法により作製した正極活物質と負極活物質付きの両基板を貼り合わせて電解液を両基板の間に注入してデバイスを作製した。リチウムイオン電池としての特性は光充放電実験後に定電流充放電実験を行い、その後放電特性の測定を行った。測定用に 3 つの試料を用意した。PV-LIB の正極を同条件（塗布量 80 μL ）で作製し、負極材料である TiO_2 の膜の厚さを変えて（塗布量 120, 240, 720 μL ）作製した試料の光充放電と定電流充放電試験した。

2. 8 測定

薄膜の結晶構造は、X 線回折装置 SmartLab (Rigaku, Japan) を用い、出力 $45 \text{ kV} \times 200 \text{ mA}$ の $\text{Cu K}\alpha$ 線で測定した回折パターンによって同定した。X 線入射角 0.3° の平行ビーム光学系で、2 θ 範囲 $10\text{--}80^\circ$ 、ステップ幅 0.05° 、スキャン速度 5° min^{-1} の条件で測定した。

また、ラマンスペクトルは、レーザーラマン分光装置 LabRAM HR-800 (HORIBA) を使用し、レーザーは J100GS-16 (Showa optronics Co. Ltd) で測定した。

膜の表面形態は、FE-SEM JSM-6701F (JEOL, Japan) を使用して、5 kV の加速電圧で観察した。測定試料を SEM 観察用台座にカーボンテープで固定し、カーボンペーストで薄膜と SEM 観察用台座を接続した。カーボンペーストで接続後、デシケーター内で一晚乾燥させて観察した。

各デバイスの電流印加による電圧変化は、6241A DC Voltage Current Source/Monitor (ADCMT) で測定した。定電流 200 μA の定電流印加と自然放電を 1 分間隔で繰り返す充放電試験を 30 サイクル行った。

各デバイスの光照射による電圧変化は、VOAC7523H デジタルマルチメーター (IWATSU) で測定した。光照射には、LAX-Cute を使用した。1 SUN 疑似太陽光全域照射 (100 mW cm^{-2}) の光照射と暗所放置を1分間隔で繰り返し、30 サイクル行った。疑似太陽光照射度は、CS-20 (Asahi spectra) で設定した。

3. 結果と考察

3. 1 ESD によるチタニアプレカーサー膜の形成

ESD 用チタニアプレカーサー溶液のエレクトロスプレーに赤色光を照射して撮影した写真を図2に示す。スプレーは印加電圧 4.10 kV で安定状態を示した。観察されたスプレー状態は、スプレーの広がりが 100° 以上で良好な広がりが確認された。したがって、この ESD 条件によって、IPA で希釈したチタニアプレカーサー溶液を塗布すると成膜領域全体に溶液成分を堆積させることが可能ながかった。

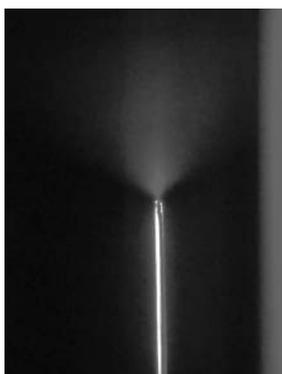


図2 ESD によるスプレー写真

3. 2 チタニアプレカーサー塗布量の検討

チタニアプレカーサー液の塗布量を 120, 240, 480, 720 μL として4種類作製した。図3に得られた膜の表面形態と、図4に断面 SEM 像を示す。

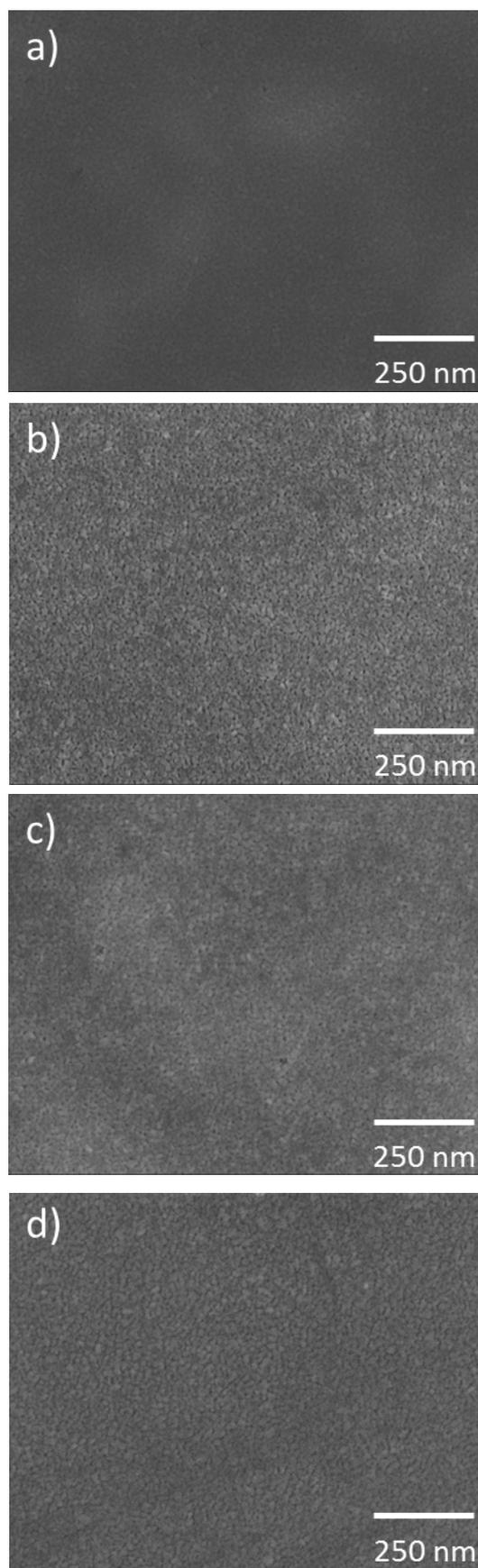


図3 塗布量の違いによる膜の表面形態

a) 120 μL , b) 240 μL , c) 480 μL , d) 720 μL

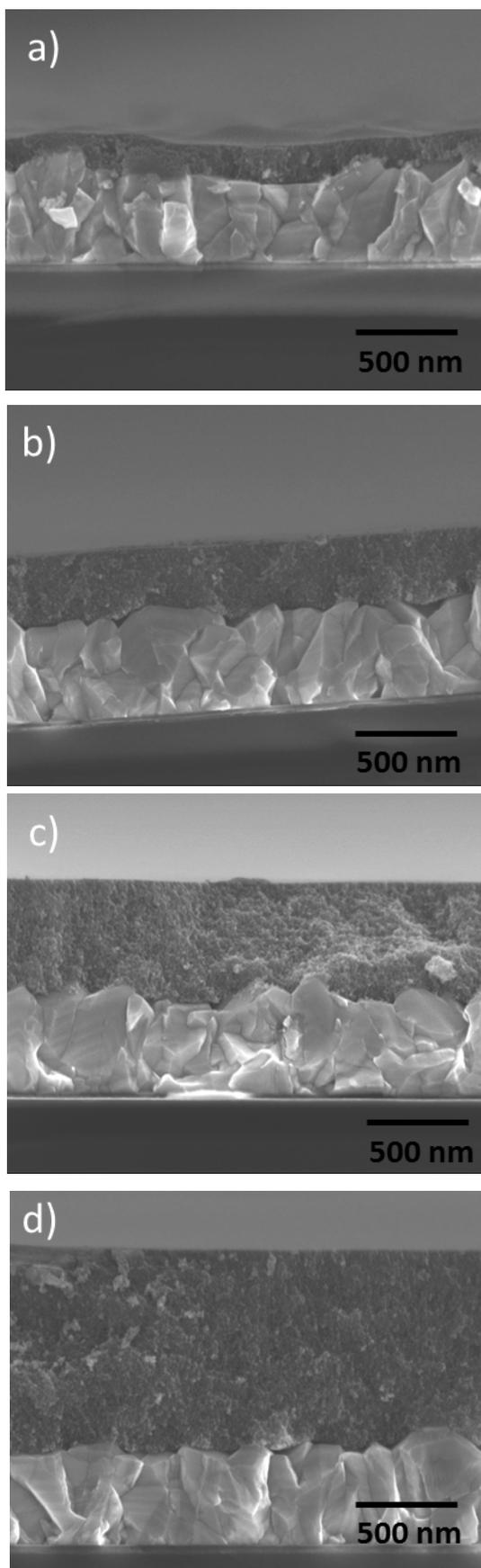


図 4 塗布量の違いによる膜の断面形態
a) 120 μL , b) 240 μL , c) 480 μL , d) 720 μL

この断面写真から膜厚を算出した。図 5 に塗布量と膜厚の関係を示す。近似線は、ほぼ直線となり、膜の成長速度は 4 nm min^{-1} と求めた。

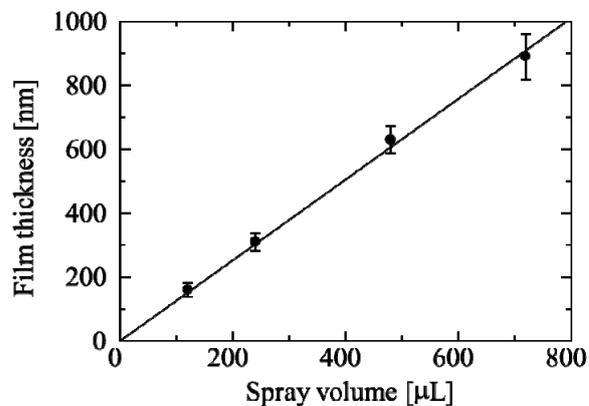


図 5 塗布量と膜厚の関係

図 6 に塗布量 120, 240, 480, 720 μL で作製した試料の XRD パターンを示す。薄膜の XRD パターンは $2\theta = 25.3, 48.1^\circ$ のピークは ICDD Card No. 00-021-1272 によりアナターゼ型 TiO_2 の (101), (200) 面に帰属できた。

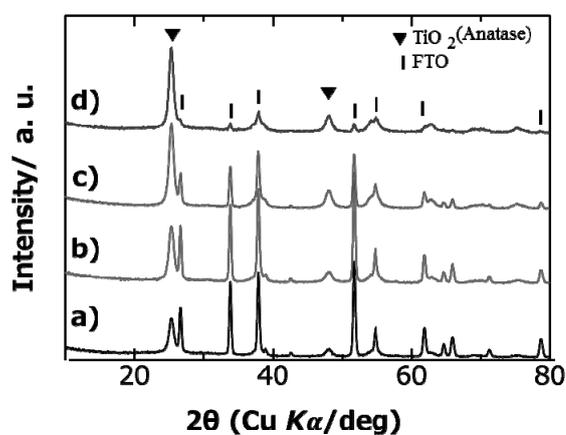


図 6 塗布量が異なる膜の XRD パターン
a) 120 μL , b) 240 μL , c) 480 μL , d) 720 μL

したがって、ESD 法で形成した各膜を熱処理して結晶化したアナターゼ薄膜が得られることが分かった。

3.3 ESD による LCO 膜の形成

図7にESD法で作製したLiCoO₂の表面SEM像を示す。表面は、網目状の形態を示し、クラックと針状の結晶が確認された。

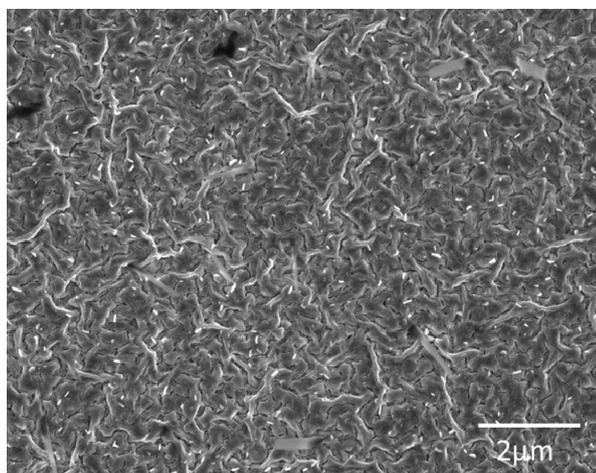


図7 ESD法で形成した膜の表面形態

また、この膜の断面SEM像を図8に示す。

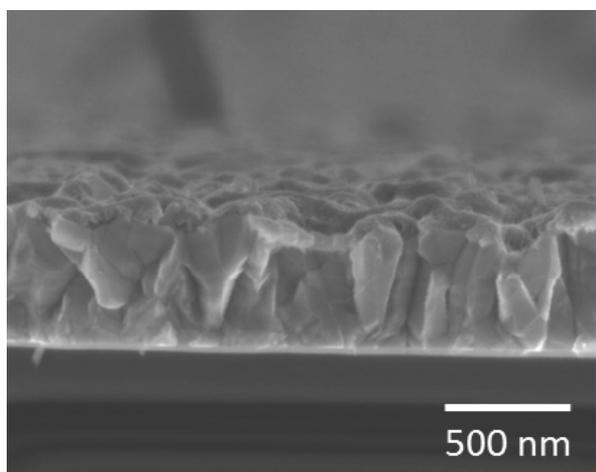


図8 ESD法で形成した膜の断面形態

断面SEM像から、形成した膜の厚さは、約50 nmであった。この膜上に同条件で塗布、熱処理し、2層膜(≒塗布量160 μL)を形成した。図9に形成した2層膜の断面SEM像を示す。

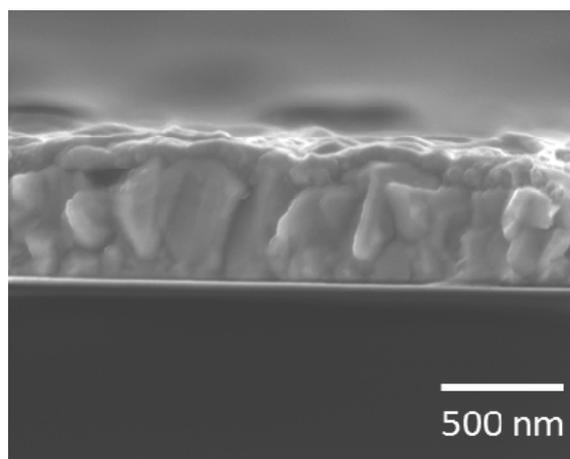


図9 ESD法で形成した積層膜の断面形態

断面像から、形成した2層膜の厚さは、約110 nmと考えられる。これらの膜のXRDパターンとラマンスペクトルを図10に示す。

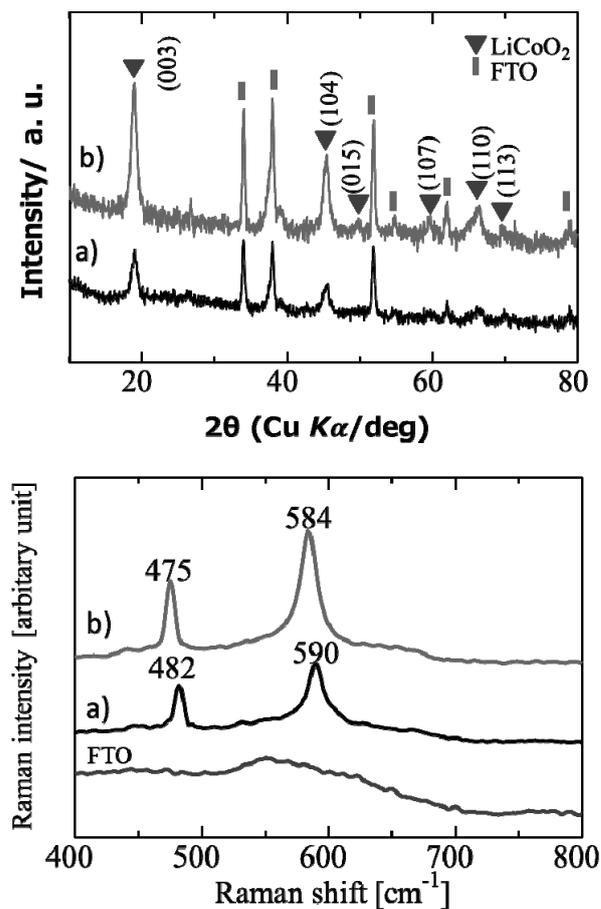


図10 塗布量の違いによるXRDパターンとラマンスペクトル
a) 80 μL, b) 160 μL

いずれの膜の XRD パターンには、18.9, 45.3, 49.5, 59.7, 66.5, 69.8° のピークが観察され ICDD Card No. 00-050-0653 により菱面体構造をもつ LiCoO_2 の(003), (104), (015), (107), (110), (113)面に帰属できた。文献から、いずれのラマンスペクトルも Layer 型構造の LCO と考えられる。2 層膜は、単層膜と比べて 7 cm^{-1} 程度高波数側にシフトすることが分かった。

3.4 ESD 法とスピコート法による LCO 膜の相違点

図 11 にスピコート法と ESD 法で作製した LiCoO_2 の XRD パターンを示す。

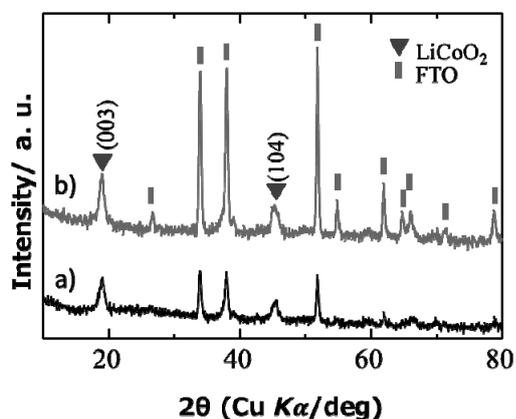


図 11 a) ESD 法, b) スピコート法で形成した LCO 薄膜の XRD パターン

XRD パターンから、いずれの試料も LiCoO_2 に帰属できた。スピコート法で形成した膜の膜厚は、SEM の断面像より、ESD で形成した場合と同様の 50 nm 程度だった。しかし、FTO とのピーク強度比は、ESD 法で塗布した膜の方が、 LiCoO_2 結晶がより多いことを示しており、FTO を良く覆っていることが推定される。これらの膜のラマンスペクトルを図 12 に示す。

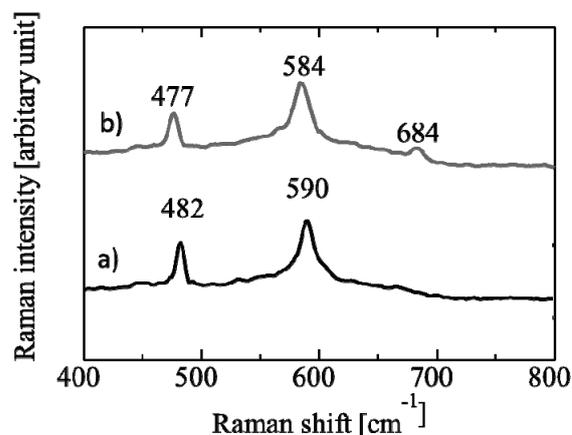


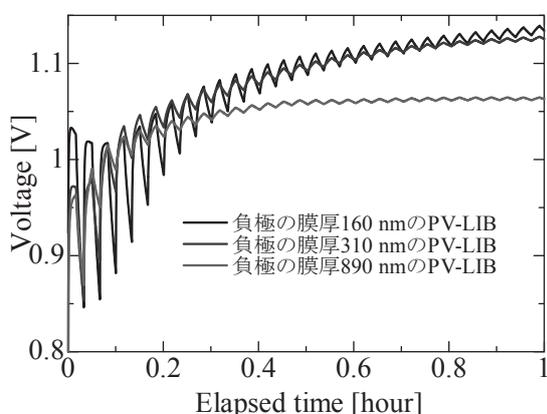
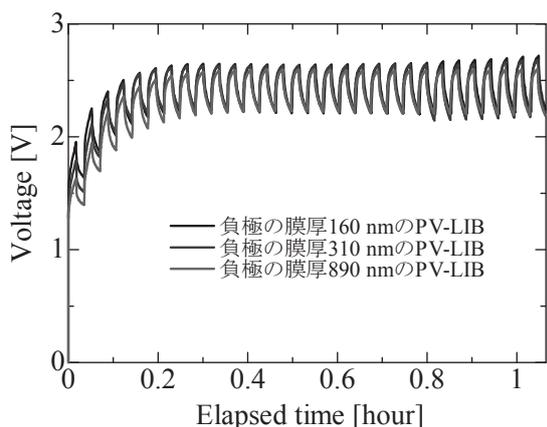
図 12 a) ESD 法, b) スピコート法で形成した LCO 薄膜のラマンスペクトル

ESD 法とスピコート法ともに LiCoO_2 の特有のピークを確認できた⁽¹⁶⁾。スピコート法で作製した試料は 684 cm^{-1} 付近にピークを示した。このピークは、アモルファスの Co_3O_4 (酸化コバルト) に寄ると考えられる⁽¹⁷⁾。このように、今回スピコート法で作製した膜には Co_3O_4 が含まれており、ESD 法で作製した膜には、 Co_3O_4 は全く含まれていないことが確認された。スピコート法で作製した試料と ESD 法で作製した試料は同条件でプレヒートと熱処理しており、消費熱量は同一である。

本条件で形成した ESD 法では、基板に到達した微細な液滴によって均一な超薄膜状態から堆積し始めて、分子プレカーサー溶液中の均一性が厳密に継承されて膜化したためと考えられる。また、微細な液滴は LCO 結晶により近いドライな条件で堆積し、スピコート法でのプレカーサー膜で起こり得る熱拡散が抑制できたためと考えられる。その結果、分子プレカーサー溶液の均一性が厳密に反映され、より純度の高い LCO 膜が ESD 法で形成されたと考えられる。このように、 Co_3O_4 含有の有無を塗布方法によって制御して膜形成が可能なのは、非常に興味深い。

3.5 ESD 法で形成した膜を用いた光充電型リチウムイオン電池の形成

ESD 法により LIB 両極の活物質を成膜し、負極の TiO_2 の厚さを変えて作製した試料の電流印加による充放電曲線を示す。形成したデバイスは、充電時に 2.5 V の電圧を示し、放電時は 2.1 V を示した。作製した全ての試料で、充電と放電のサイクルにおいて電圧の変化が確認できた。また、負極の TiO_2 膜の厚さを変更しても充放電曲線に大きな変化は確認されなかった。



また、光照射による充電試験は、光照射時に 1.15 V の電圧を示し、暗所時も 1.14 V 程度を示した。膜厚が 890 nm のチタニア膜は、充電も放電も 1.05 V とやや小さかったが、光によって充電できていることが確認できた。また、負極の TiO₂ の膜が厚くなることで、充電時と放電時の電圧の差がより小さくなり、安定した電圧を示した。

以上のことから、分子プレカーサー溶液を用いた ESD 法によって、チタニア薄膜と LCO 薄膜を簡便に形成し、膜厚の向上を達成した。今後は、これらの薄膜を組合せた光充電型全固相リチウムイオン電池の形成を試みる。

謝辞

本研究は、工学院大学情報学部情報通信工学科の高橋泰樹 教授 (情報ディスプレイ研究室) の小澤竜平君が修士論文としておこなったものです。高橋泰樹先生、小澤君に感謝を申し上げます。

参考文献

- (1) Nagai, H., Hara, H., Enomoto, M., Mochizuki, C., Honda, T., Takano, I., Sato, M.: "Synchronous Electrochromism of Lithium Ion Battery with Chemically Fabricated Transparent Thin Films, *Funct. Mater. Lett.*, Vol. 6, (2013) 1341001.
- (2) Nagai, H., Suzuki, T., Takahashi, Y., Sato, M.: Photovoltaic lithium ion battery fabricated by molecular

- precursor method, *Funct. Mater. Lett.*, Vol. 09, (2016) 1650046.
- (3) Nagai, H., Sato, M.: Highly Functionalized Lithium-Ion Battery, *Intech*, (2016) ch.6.
- (4) Nagai, H., Mita, S., Takano, I., Honda, T., Sato, M.: Conductive and semi-transparent Cu thin film fabricated using molecular precursor solutions, *Mater. Lett.*, Vol. 141, (2015) pp. 235-237.
- (5) Nagai, H., Suzuki T., Mochizuki, C., Takano, I., Honda, T., and Sato, M.: Formation mechanism of p-type Cu₂O thin films via intermediate Cu⁰ species derived from Cu(II) complex of ethylenediamine-N,N,N',N'-tetraacetic acid, *Science of Advanced Materials*, Vol. 6, (2014) pp. 603-611.
- (6) Onuma, T., Nagai, H., Yamaguchi, T., Sato, M., Honda, T.: Cathodoluminescence spectra of Ga-In-O polycrystalline films fabricated by molecular precursor method, *Japanese Journal of Applied Physics*, 53, (2014) 05FF02.
- (7) Daniel, L. S., Nagai, H., Sato, M.: Absorption spectra and photocurrent densities of Ag nanoparticle/TiO₂ composite thin films with various amounts of Ag, *J. Mater. Sci.*, 48, (2013) pp. 7162-7170.
- (8) Sato, M., Hara, H., Nishide, T., Sawada, Y.: A Water-resistant Precursor in a Wet Process for TiO₂ Thin Film Formation, *J. Mater. Chem.*, 6 (1996) 1767-1770.
- (9) Nishide, T., Sato, M., Hara, H.: Crystal Structure and Optical Property of TiO₂ Gels and Films Prepared from Ti-edta Complexes as Titania Precursors, *J. Mater. Sci.*, 35 (2000) 465-469.
- (10) Sato, M., Hara, H., Kuritani, M., Nishide, T.: Novel Route to Co₃O₄ Thin Films on Glass Substrates via N-alkyl Substituted Amine Salt of Co(III)-EDTA Complex. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 45 (1997) 43-49.
- (11) Sato, M., Tanji, T., Hara, H., Nishide, T., Sakashita, Y.: SrTiO₃ Film Fabrication and Powder Synthesis from a Non-polymerized Precursor System of a Stable Ti(IV) Complex and Sr(II) Salt of edta, *J. Mater. Chem.*, 9 (1999) 1539-1542.
- (12) Nagai, H., Mochizuki, C., Hara, H., Takano, I., Sato, M.: Enhanced UV-sensitivity of Vis-responsive Anatase Thin Films Fabricated by Using Precursor Solutions Involving Ti Complexes, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 92 (2008) 1136-1144.
- (13) Nagai, H., Hasegawa, M., Hara, H., Mochizuki, C., Takano, I., Sato, M.: An Important Factor Controlling the Photoreactivity of Titania: O-deficiency of Anatase Thin Film, *J. Mater. Sci.*, 43 (2008) 6902-6911.
- (14) Nagai, H., Aoyama, S., Hara, H., Mochizuki, C., Takano, I., Baba, N., Sato, M.: Rutile Thin Film Responsive to Visible Light and with High UV Light Sensitivity, *J. Mater. Sci.*, 44 (2009) 861-868.
- (15) Nagai, H., Aoyama, S., Hara, H., Mochizuki, C., Takano, I., Honda, T., Sato, M.: Photoluminescence and Photoreactivity Affected by Oxygen Defects in Crystal-oriented Rutile Thin Film Fabricated by Molecular Precursor Method, *J. Mater. Sci.*, 45 (2010) 5704-5710.
- (16) Porthault, H., Baddour-Hadjean, R., Le Crasa, F., Bourbon, C., and Franger, S.; *Vibrational*

- Spectroscopy, 62, (2012) 152.
- (17) Hadjiev, V. G ., Iliev, M. N., and Vergilov, I. V.;
Journal of Physics C Solid State Physics., 21, (1988)
L199.

革新的金属基圧電複合材料の創製と特性設計手法構築

工学院大学 機械工学科 柳迫徹郎
 工学院大学 機械工学科 久保木功
 千葉大学 機械工学科 浅沼博
 産業技術総合研究所 製造技術研究部門 佐藤宏司

Fabrication of Innovative Metal-Based Piezoelectric Composite and Establishment of Its Characteristic Design Method

Tetsuro Yanaseko, Dept. of Mechanical Engineering
 Isao Kuboki, Dept. of Mechanical Engineering
 Hiroshi Asanuma, Dept. of Mechanical Engineering, Chiba Univ.
 Hiroshi Sato, Advanced Manufacturing Process Institute, AIST

ABSTRACT : Piezoelectric ceramics are used widely as sensor and actuator materials due to its excellent mechanical-electrical energy conversion function. However, piezoelectric ceramic has poor mechanical properties such as fragility (fracture elongation of piezoelectric ceramics is almost less than 0.1%). In order to improve the mechanical properties of piezoelectric ceramics, authors developed surface oxidized nickel fiber/piezoelectric ceramics/aluminum composite. Surface oxide film of nickel fiber is worked as insulator between nickel fiber and aluminum matrix, also worked as barrier from reaction between nickel and piezoelectric ceramics during sintering the ceramics. To embed surface oxidized metal fiber and piezoelectric ceramics in aluminum matrix without losing functions, Interphase forming/bonding (IF/B) method was used. As a result, the surface oxidized nickel fiber and the piezoelectric ceramics can be embedded without fracture in aluminum matrix by using IF/B method. In addition, it is confirmed that output voltage was generated by applying impact to the fabricated composite, and it was confirmed that the piezoelectric ceramics and surface oxidized metal fiber were embedded without losing their function.

1. 諸言

圧電セラミックスはエネルギー変換材料として広く応用されている。しかし、脆性材料であるという問題を抱えており用途に制限がある。著者らはこの問題に対して、金属コア圧電ファイバ⁽¹⁾を界面層形成・接合法⁽²⁾にてアルミニウム中に複合化し、機械的強度の大幅な向上に成功した⁽³⁾。しかし、出力電圧特性が圧電材料として用いる金属コア圧電ファイバの物性値および形状・寸法に依存し、用途に合わせた材料設計が不可能であることが

判明している⁽⁴⁾。

本研究では、上記の課題を解決するために、複合化する圧電セラミックスの形状に自由度のある、表面酸化金属繊維/圧電セラミックス/金属マトリックス複合材料 (Fig. 1) の創製を試みる。本圧電複合材料は、金属マトリックス、圧電セラミックスおよび内部電極となる表面酸化金属繊維から構成されており、要求特性に応じて各部の材料および寸法・形状を変更できる材料システムであり、上述のようにセンサ特性が任意に決定可能である。また、上述の圧電セラミックスのぜい弱性を、機械的強

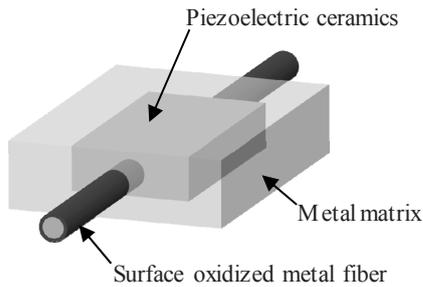


Fig. 1 Schematic of proposed innovative metal matrix piezoelectric composite.

度、信頼性に優れた金属材料中に圧電セラミックスを複合化することで、克服が可能である。

この圧電複合材料において、表面が酸化膜で覆われた金属繊維を内部電極として用いることが、提案する材料システムの最大の特徴となっている。従来の圧電複合材料の多くは、内部電極と外部電極となる金属マトリックスと絶縁が確保できず、高分子系マトリックスを採用することが多かったが、本研究では表面酸化膜を絶縁層として用いることにより問題を解決し、従来成し得なかった金属マトリックス、圧電セラミックス、表面酸化金属繊維の各々の材質、形状・寸法の選択性を実現する。また、内部電極は圧電セラミックス焼結時に高温にさらされ、電極材料と圧電セラミックスが反応し、圧電特性を低下させる化合物が生成される可能性がある。反応性の低い酸化膜を電極—圧電セラミックス間に設けることにより、この反応を防止する効果も期待できる (Fig. 2)。

本年度においては、提案した新規圧電複合材料の創製手法の確立を目的とし、表面に酸化膜を生成したニッケル繊維を内部電極として有する圧電セラミックスを作製し、作製した圧電セラミックスを界面層形成・接合法にてアルミニウム母材へ複合化を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

金属繊維として純ニッケル線 (直径: 0.5mm, 純度: 99.5%), 圧電セラミックスとしてチタン酸ジルコン酸鉛 ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$, PZT, 林化学工業製, MPT, 平均粒径: 0.4 μm), 金属マトリックスとして純アルミニウム板 (A1050P-O, 厚さ 0.8, 2.5 mm) および純銅箔 (純度: 99.90% 以上, 厚さ 0.01 mm) をインサート材として用い

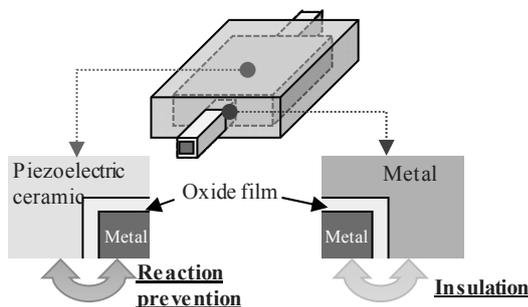


Fig. 2 Reaction prevention and insulation by oxide film.

た。また、PZT 粉はバインダー (ポリビニルアルコール水溶液, 1wt%) と重量比 1:1 で混合し、室温で 48 h 乾燥させ、粉碎した後ふるいにかけることで造粒を行った。

2.2 熱処理による金属繊維表面への酸化膜生成

内部電極として用いるニッケル繊維の表面に、熱処理により酸化膜を付与した。

ニッケル繊維を 40 mm に切断し、マッフル炉により大気中で熱処理し、酸化させた。保持時間は $t_0 = 0.9, 1.8, 3.6, 7.2$ および 10.8 ks, 酸化温度は $T_0 = 1073, 1173, 1273$ および 1373 K とした。酸化した金属繊維を長手方向中央で切断し、断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察することで、酸化条件が酸化膜の膜厚と構造に及ぼす影響を検討した。

2.3 内部電極を有する圧電セラミックスの作製

表面酸化金属繊維の周囲に PZT 粉を成形し、焼結することにより、内部電極を有する圧電セラミックスを作製した。この際に PZT の作製条件として成形圧力、焼結温度および保持時間が挙げられるが、焼結温度、保持時間に関しては材料メーカー推奨値で焼結を行うこととし、成形圧力の検討を行った。

造粒した PZT 粉を金型に投入し、成形圧力 P を 20 から 90 MPa まで 10 MPa 毎に変化させ、保持時間 60 s にて一軸成型を行った。その後、金型内に表面酸化膜金属繊維を設置し、PZT 粉を投入し、再度同条件にて一軸成型を行うことで圧粉体を作製し、得られた圧粉体をマッフル炉にて大気中で焼結した。焼結の条件は焼結温度 $T_s = 1323$ K, 保持時間 $t_s = 7.2$ ks とした。焼結後、焼結体の密度およびビッカース硬度を計測することにより評価を行った。

2.3 焼結体のアルミニウム中への複合化

Fig. 3 に示すように、焼結体および金属繊維を配置するためのくぼみと U 溝を、アルミニウム板 (厚さ 2.5 mm) を切削することで形成した。このくぼみの底部に銅箔を設置し、その上に焼結体および金属繊維を設置した。これらの上に、インサート材の銅箔および厚さ 0.8 mm のアルミニウム板を被せ、ホットプレス機により複合化した。ホットプレスの条件は、温度 873 K, 圧力 2.2 MPa, 保持時間 2.4 ks および真空度 100 Pa とした。

複合化後、母材外部に突出している金属繊維の表面酸化部を耐水研磨紙 (#220) で除去し、導通を確保した。この金属繊維と母材に電圧 300 V, 保持時間 1.8 ks の直流電圧を印加することで圧電セラミックスの分極処理を行った。

分極処理後、落錘試験により本複合材料の圧電セラミックスがセンサとして機能するかを確認した。作製した複合材料をバイスで固定し、鋼球 (直径 9.8 mm, 質量 3.5 g) を高さ 150 mm から落下させることで衝撃を印加し、その際の信号をオシロスコープにより計測した (Fig. 4)。

加えて、作製した試料を金属繊維と直角に切断し、断面を SEM にて観察することで材料組織の評価を行った。

3. 結果および考察

3.1 熱処理による金属繊維表面への酸化膜生成

Fig. 5 に $T_0 = 1373$ K, $t_0 = 10.8$ ks の条件で酸化膜を生成

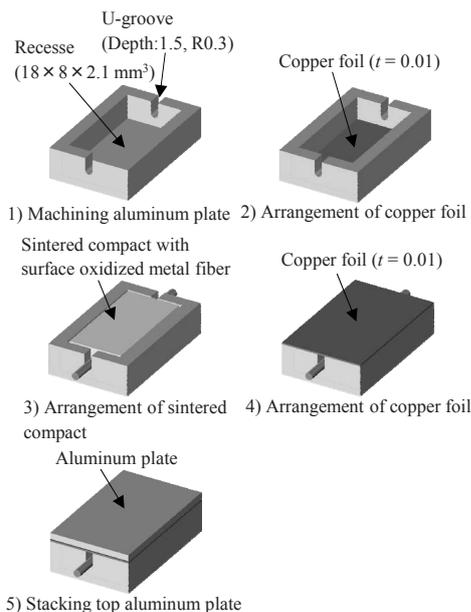


Fig. 3 Arrangement of aluminum plate, sintered compact and copper foil.

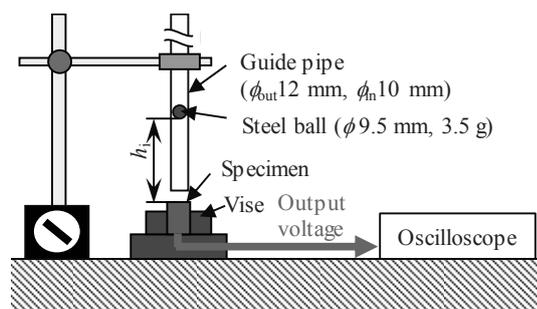


Fig. 4 Schematic of the impact test system.

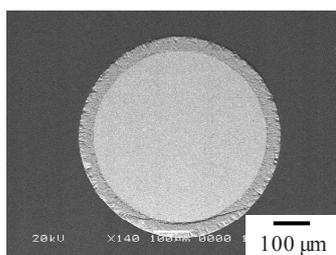


Fig. 5 Cross section of surface oxidized nickel fiber ($T=1373\text{ K}$, $t=10.8\text{ ks}$)

したニッケル繊維のSEM像を示し、Fig. 6に生じた酸化膜の厚さと各熱処理条件との関係を示す、Fig. 6より各熱処理温度において膜厚が熱処理時間の平方根と線形であることが分かり、酸化膜厚さは放物線則に従って増加することが分かる。また、同図の各温度における傾きを拡散係数とし、アレニウスプロットにより、必要な膜厚を得る酸化条件の予測ができることが確認された。この結果から、内部電極に用いるための熱処理条件は膜厚が10 μm以上得られる $t_0=3.6\text{ ks}$ 、 $T_0=1273\text{ K}$ を選定し、以降の試料作製にはこの酸化条件により酸化膜を付与した金属繊維を使用した。

3.2 内部電極を有する圧電セラミックスの作製

Fig. 7に成形圧力が焼結体のビッカース硬さおよび密度に及ぼす影響を示す。同図から50 MPa以上において、

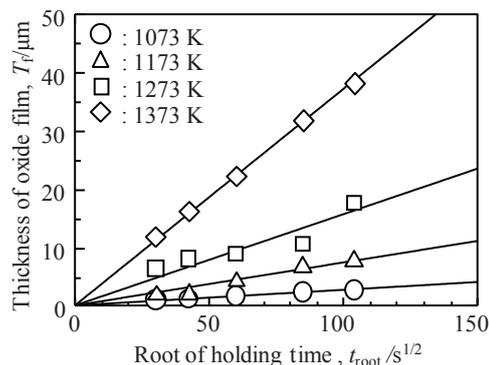


Fig. 6 Effect of root of holding time on thickness of oxide film of nickel fiber.

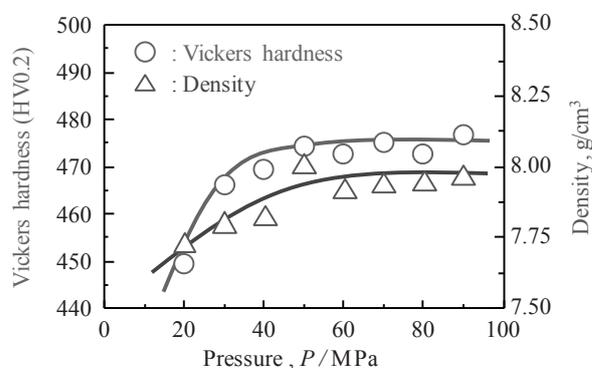


Fig. 7 Effect of pressure on Vickers hardness and density of sintered compact.

ビッカース硬さおよび密度共にほぼ変化しないことが分かる。これは50 MPaで粉体の充填密度が最大になり、50 MPa以上に圧力を向上させても充填密度が向上しなかったためと考えられる。このことから成形圧力は50 MPaが最適と判断した。この条件で作製された内部電極を有する圧電セラミックスの外観をFig. 8に示す。同図より圧電セラミックスの外径が鼓状になっていることが分かる。この鼓状変形は焼結および冷却時の圧電セラミックスとニッケル繊維の熱膨張係数の差に起因するものと考えられるため、冷却速度の低減により変形の縮小が期待できる。

3.3 焼結体のアルミニウム中への複合化

Fig. 9に作製した表面酸化ニッケル繊維/PZT/アルミニウム複合材料の外観を示す。概観を確認した結果、ニッケル繊維および酸化被膜が破断することなく複合化されていることが確認できた。Fig. 10に落錘試験による複合材料から得られた出力電圧の波形を示す。同図から、圧電セラミックスの機能を損なうことなくアルミニウム中へ複合化することに成功していることが確認された。しかしながら出力電圧はPeak to Peakで約5 mVと圧電材料を用いたセンサとしては極めて低い値であった。これは、金属酸化膜の誘電率が圧電セラミックスと比較して極めて低いことにより、分極時に印加された電界が

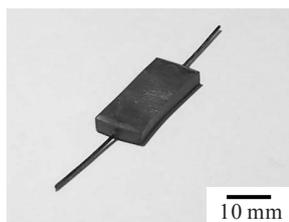


Fig. 8 Sintered compact with surface oxidized nickel fiber.

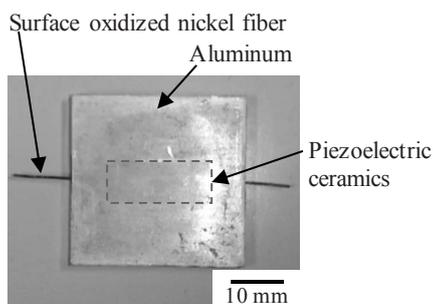


Fig. 9 General appearance of surface oxidized nickel fiber/piezoelectric ceramics/aluminum composite.

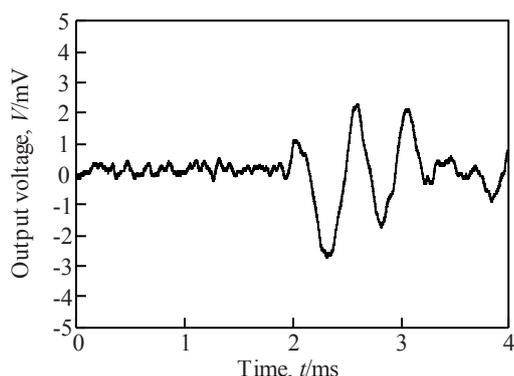
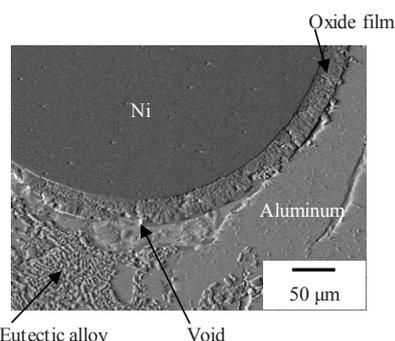
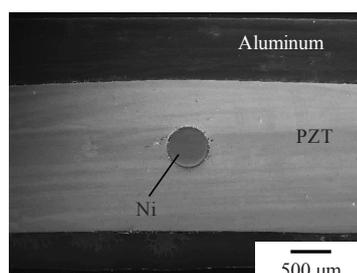


Fig. 10 Waveform of output voltage from the fabricated composite.

圧電セラミックスに有効に負荷されなかったためと考えられる。このため、分極条件に加え、酸化膜および圧電セラミックスの厚さの最適化が必要である。また、SEMによる断面観察結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a)はニッケル繊維とアルミニウムが直接接触している箇所の断面であり、(b)は PZT とアルミニウムが接触している部位である。この図から、酸化膜が破壊されずに複合化されていること、PZT と酸化膜で反応物が生成されていないことおよび PZT とアルミニウムが反応することなく、また PZT に破壊が生じずにアルミニウム中に複合化できていることが確認できた。しかしながら、Fig. 11(a)において、銅-アルミニウム共晶合金の残留や酸化膜とアルミニウム間にボイドが存在していることが確認できる。これらの存在は、機械的特性を低下させる要因となるのみならず、マトリックス-圧電セラミックス間の応力伝達を阻害することによる出力電圧低下の要因ともなるため、できるだけ低減することが望ましい。この共晶合金の残留およびボイドはホットプレス条件の最適化、インサート材の材質および量の調整、溝形状の改良により改善が



(a) Cross section of the composite where oxide film touch to aluminum



(b) Cross section of the center of the composite

Fig. 11 Cross sections of fabricated composite.

期待できる。

4. 結言

新たな金属基圧電複合材料として、複合化する圧電セラミックスの形状に自由度のある、表面酸化金属繊維／圧電セラミックス／金属マトリックス複合材料を提案しその創製を試みた。

結果として、下記の知見が得られた。

- 1) 絶縁層および反応防止の役割を持つ金属酸化膜は、金属繊維を大気中で熱処理することで容易に得ることができる。また、生成される酸化膜の厚さは熱処理時間の平方根に比例するという放物線則に従うことが判明し、このことを利用することで任意の厚さの酸化膜を得ることができることが判明した。
- 2) 圧電セラミックスの焼結において、一軸成型時の圧力が 50 MPa が最適であることが分かった。また金属繊維と圧電セラミックスの熱膨張係数の差から焼結体が鼓状に変形することが判明した。
- 3) 界面層形成接合法を用いることで金属酸化膜および圧電セラミックスの機能を損なうことなくアルミニウム中へ複合化することに成功した。しかしながら、本実験条件においては、共晶合金の残留やボイドの存在など。その材料組織が良好ではなかったため、より作製時の条件を検討する必要がある。

参考文献

- (1) 佐藤宏司, 下条善朗, 関谷忠, “チタン酸ジルコン酸鉛ファイバ, チタン酸ジルコン酸鉛ファイバを用いたスマートボードならびにスマートボードを利用したアクチュエータおよびセンサ”, 特許第 3968430 号.

- (2) Asanuma, H., "Development of metal-based smart composites," JOM, Vol. 52, No. 10(2000), pp. 21-25.
- (3) 浅沼博, 武田直浩, 千葉高充, 佐藤宏司, "金属コア圧電ファイバ/アルミニウム複合材料の創製", 日本機械学会第14回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (2006), pp. 21-22.
- (4) Yanaseko, T., Asanuma, H., Sato, H., "Output Voltage Characteristics of Piezoelectric Fiber/Aluminum Composites Fabricated by Interphase Forming/Bonding Method," Trans. Mat. Res. Soc. Japan, Vol. 39, No. 3(2014), pp. 325-329.

均質化とトポロジー最適化を援用した 多孔質吸音材微視構造設計法の構築

工学院大学 工学部 機械工学科 山本 崇史¹⁾

京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 西脇 眞二²⁾

Optimization of microstructure of sound-absorbing poroelastic material
by homogenization method and topology optimization method

Takashi Yamamoto, Department of Mechanical Engineering, Kogakuin University
Shinji Nishiwaki, Graduate School of Engineering, Kyoto University

ABSTRACT: An optimization method to design micro structures of sound-absorbing poroelastic media is proposed in this study. First, Biot's parameters are identified for various micro structure of sound-absorbing material by using homogenization method and the linkage between Biot's parameters and the parameters of micro structures such as pore radius, fiber diameter and pore radius of cell membranes is derived. Then, the parameters of poroelastic materials are optimized by using transfer matrix method and genetic algorithm to maximized sound absorption coefficient at prescribed target frequency range. The optimal micro structures are verified by the homogenization method.

1. はじめに

自動車などの輸送機器や建物など室内における静粛性の向上は、快適性を高める重要な要素であり、その代表的な方策の一つとして、多孔質吸音材が多用されている。多孔質吸音材の性能を示す代表的な特性は吸音率であり、その予測は多孔質吸音材の設計に欠かすことができない。

いずれの材料も基材となる固体相と、数 μm から数百 μm の径の流路からなる流体相が混在した構造をしており、吸音率はこの微視的な構造に依存する。吸音率を予測するために、これまで使われてきたモデルの一つは、Delany と Bazley⁽¹⁾ による経験則に基づいたモデルである。必要となるパラメータは流れ抵抗のみであるが、流体相しか考慮しておらず、さらに流体相の体積分率が 100% に近い繊維系の吸音材に適用は限定される。また、

Biot^(2, 3), Allard⁽⁴⁾, Atalla ら⁽⁵⁾ によるモデル (Biot's model) も近年広く適用されている。このモデルは、固体相と流体相の両方の特性を考慮しており、弾性定数や流れ抵抗など 8 つのパラメータで表現されている。しかし、パラメータはマクロなスケールで定義されており、多孔質吸音材の微視構造と直接関係付けることはできない。

一方、多孔質体の微視構造からマクロスケールにおける特性や支配方程式を導出することを目的とした研究がこれまでにいくつか報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、多孔質吸音材における物理現象の一部を扱ったものになっており、そのまま適用することはできない。著者はこれまで均質化法を多孔質吸音材に適用できるようにし、微視構造から吸音率を算出する方法を提案している。また、それを用いて、発泡系材料の流路径やセル間薄膜の吸音率に対する影響を検討してきた。

本研究では、繊維系材料の微視構造に着目し、均質化法を適用して繊維径、繊維間距離の吸音率に対する影響について調べる。また、均質化法による計算結果から Biot パラメータを同定し、繊維径や繊維間距離など微視的パ

1) 工学院大学 工学部 機械工学科

(〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1)

2) 京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3 棟)

ラメータと関連付ける．さらに，それに遺伝的アルゴリズムを用いて微視構造の最適化を図る．

2. 多孔質吸音材の均質化

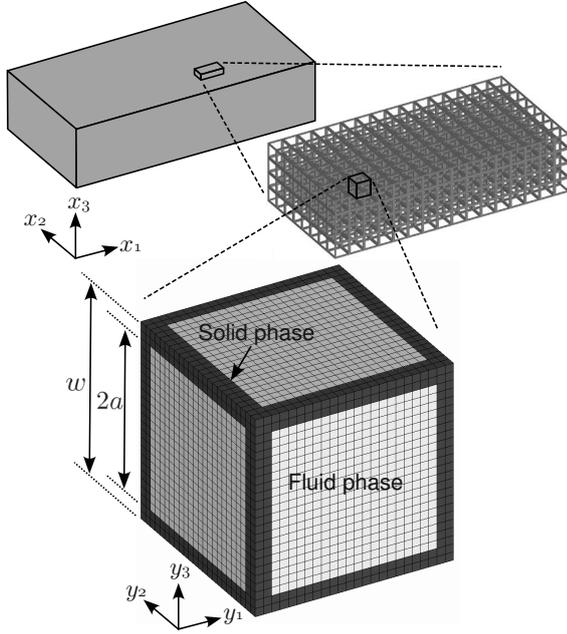


Fig.1 Schematic view of homogenization of sound-absorbing poroelastic material.

本研究で適用する多孔質吸音材に適用可能な均質化法について概略を説明する．詳細は文献⁽¹⁰⁾を参照いただきたい．

図1に示すように周期的な微視構造を有する多孔質吸音材を考える．ミクروسケールにおける支配方程式について，まず，固体相は線形弾性体の平衡式・構成式・変位-ひずみ関係式とし，流体相の流れ場は微小変位を仮定し線形化した Navier-Stokes の方程式とする．また，流体相の温度場は，熱力学の第一法則とし，固体相の比熱が流体相の比熱に比して十分大きく，平衡状態での温度を保持すると仮定すると，流体相のみに適用すればよい．質量保存則および状態方程式も支配方程式として考慮し，また，固体相と流体相の境界において速度，垂直応力および温度が連続であるという境界条件を課している．

漸近展開をした解を仮定し，ミクロスケールにおける一連の支配方程式に代入すると，ミクロスケールにおける境界値問題を得ることができる．これを解いて得られた解を体積平均することでマクロスケールにおける特性を得ることができる．また，ミクロスケールにおける支配方程式を平均化することで，マクロスケールにおける固

体相および流体相の支配方程式をそれぞれ導出することができる．これを解くことで吸音率などのマクロスケールにおける応答を求めることができる．

3. ミクروسケールにおける基礎支配方程式

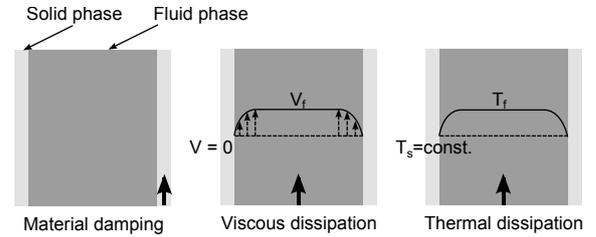


Fig.2 Dissipation mechanism in poroelastic material.

多孔質吸音材のミクロスケールにおける支配方程式について説明する．固体相は等方性の線形弾性体，流体相は圧縮性の粘性係数 μ^f の粘性流体で構成され，流体相は全て連結しているものとする．固体相の支配方程式は弾性テンソルを c_{ijkl}^s とすると，以下に示す式で表される．

$$-\rho^s \omega^2 u_i^s = \frac{\partial \sigma_{ij}^s}{\partial x_j}, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^s = c_{ijkl}^s \varepsilon_{kl}^s, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{kl}^s = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k^s}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l^s}{\partial x_k} \right). \quad (3)$$

流体相の速度を v_i^f ，質量密度を δ^f ，温度を τ^f とすると，流体相に関する質量保存則および状態方程式はそれぞれ

$$\rho^f \frac{\partial v_i^f}{\partial x_i} + j\omega \delta^f = 0, \quad (4)$$

$$\frac{p^f}{P^f} = \frac{\delta^f}{\rho^f} + \frac{\tau^f}{T^f}. \quad (5)$$

流体相の流れ場に関する支配方程式は微小振幅であることを考慮すると，線形化された Navier-Stokes の方程式で表される

$$\rho^f j\omega v_i^f = \frac{\partial \sigma_{ij}^f}{\partial x_j}, \quad (6)$$

$$\sigma_{ij}^f = -p^f \delta_{ij} + 2\mu^f \dot{\varepsilon}_{ij}^f - \frac{2}{3}\mu^f \delta_{ij} \dot{\varepsilon}_{kk}^f, \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^f = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i^f}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j^f}{\partial x_i} \right). \quad (8)$$

固体相の比熱は流体相の比熱に比して十分大きく，平衡状態での温度 T_0 を維持すると仮定すると，温度場は流体

相のみを考慮すればよく、支配方程式は熱力学の第一法則より次式のように表すことができる。

$$-\frac{\partial q_i^f}{\partial x_i} = j\omega\rho^f C_v^f \tau^f + (j\omega\rho^f R\tau^f - j\omega p^f), \quad (9)$$

$$q_i^f = -\kappa_{ij}^f \frac{\partial \tau^f}{\partial x_j}. \quad (10)$$

ここで、 C_v^f は定積比熱、 R は気体定数、 q_i^f は熱流速、 κ_{ij}^f は熱伝導率である。固体相と流体相の境界 Γ^{sf} における境界条件は、速度、境界垂直方向の応力、および温度の連続性から、以下の式で与えられる。

$$j\omega u_i^s = v_i^f, \quad (11)$$

$$\sigma_{ij}^s n_j^s + \sigma_{ij}^f n_j^f = 0, \quad (12)$$

$$\tau^f = 0. \quad (13)$$

ここで、 n_i^s 、 n_i^f はそれぞれ、 Γ^{sf} に立てた固体相、流体相の領域外向きの単位法線ベクトルである。

4. 漸近展開法に基づく吸音材の均質化

4.1 漸近展開

微視構造は周期的であると仮定し、その単位領域（ユニットセル）を Y 、ユニットセルの大きさを l とする。マクロスケールの代表長さ L は多孔質体における波長の長さとし、ミクロスケールとマクロスケールの代表長さの比を $\epsilon = l/L$ とする。また、マクロスケールにおける空間変数を \mathbf{x} 、ミクロスケールにおける空間変数を $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\epsilon$ ($\epsilon \ll 1$) とする。

Gilbert ら⁽¹¹⁾ や Clopeau ら⁽¹²⁾ が two-scale 収束論を適用し数学的に明らかにしているように、多孔質体の問題においても漸近展開形の解が成り立つ。ここでは、状態量 u_i^s 、 v_i^f 、 p^f 、 τ^f 、 δ^f に対して、次式のような漸近展開形の解⁽¹³⁾ を仮定する。

$$u_i^s = u_i^{s(0)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon u_i^{s(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon^2 u_i^{s(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad (14)$$

$$v_i^f = v_i^{f(0)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon v_i^{f(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon^2 v_i^{f(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad (15)$$

$$p^f = p^{f(0)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon p^{f(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon^2 p^{f(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad (16)$$

$$\tau^f = \tau^{f(0)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon \tau^{f(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon^2 \tau^{f(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad (17)$$

$$\delta^f = \delta^{f(0)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon \delta^{f(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon^2 \delta^{f(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad (18)$$

ここで、右辺における全ての項は \mathbf{y} について周期的（ Y -periodic）である。

4.2 境界値問題

固体相の ϵ^{-1} のオーダーの関係式に Galerkin 法を適用すると以下に示す式を導出することができる。

$$\int_Y \left(c_{ijkl}^s - c_{ijpq}^s \frac{\partial \chi_p^{kl}(\mathbf{y})}{\partial y_q} \right) \frac{\partial \delta u_i^s}{\partial y_j} dY = 0, \quad (19)$$

Y -periodic な特性関数 $\chi_i^{kl}(\mathbf{y})$ は、剛体変位を除くため $\int_Y \chi_i^{kl}(\mathbf{y}) dY = 0$ の条件を付加して上式を解くことで求めることができる。

ϵ^0 のオーダーにおける流体相の固体相に対する相対速度 $w_i^{f(0)} = v_i^{f(0)} - j\omega u_i^{s(0)}$ を考え、 $v_i^{f(0)}$ を $w_i^{f(0)} + j\omega u_i^{s(0)}$ で置き換える。 ϵ^{-1} のオーダーの関係式より流体相の流れ場に関して、次のミクロスケールにおける境界値問題を得ることができる。

$$\begin{aligned} & \int_Y \rho^f j\omega \xi_i^k(\mathbf{y}) \delta w_i^f dY + \int_Y \mu^f \frac{\partial \xi_i^k(\mathbf{y})}{\partial y_j} \frac{\partial \delta w_i^f}{\partial y_j} dY \\ & + \int_Y \frac{1}{3} \mu^f \frac{\partial \xi_i^k(\mathbf{y})}{\partial y_i} \frac{\partial \delta w_i^f}{\partial y_i} dY - \int_Y \frac{\partial \xi_i^k(\mathbf{y})}{\partial y_i} \delta p^f dY \\ & - \int_Y \frac{\partial \delta w_i^f}{\partial y_i} \pi^k(\mathbf{y}) dY = \int_Y \delta \xi_k^k(\mathbf{y}) dY \end{aligned} \quad (20)$$

ここで $\xi_i^k(\mathbf{y})$ および $\pi^k(\mathbf{y})$ はそれぞれ相対速度、圧力に関する Y -periodic な特性関数である。なお、 Γ^{sf} において $\xi_i^k(\mathbf{y}) = 0$ である。一定圧力の成分を除くため $\int_Y \pi^k(\mathbf{y}) dY = 0$ の条件を付加して解くことで $\xi_i^k(\mathbf{y})$ および $\pi^k(\mathbf{y})$ を求めることができる。

ϵ^0 のオーダーにおける流体相の温度 $\tau^{f(0)}$ についての関係式より、次の境界値問題を得ることができる。

$$\begin{aligned} & \int_Y \frac{1}{j\omega\rho^f C_p^f} \kappa_{ij}^f \frac{\partial \zeta(\mathbf{y})}{\partial y_j} \frac{\partial \delta \tau^f}{\partial y_i} dY \\ & + \int_Y \zeta(\mathbf{y}) \delta \tau^f dY = \int_Y \delta \tau^f dY, \end{aligned} \quad (21)$$

ここで $\zeta(\mathbf{y})$ は温度に関する Y -periodic な特性関数であり、 Γ^{sf} において等温条件 $\zeta(\mathbf{y}) = 0$ をみたす。

4.3 均質化特性

境界値問題を解き得られた特性関数 $\chi_i^{kl}(\mathbf{y})$ をユニットセル Y において体積平均をとることで、固体相の均質化された弾性テンソル $\langle c_{ijkl}^s \rangle$ は Terada ら⁽¹⁴⁾ と同様、次式により求めることができる。

$$\langle c_{ijkl}^s \rangle = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left[c_{ijkl}^s - c_{ijpq}^s \frac{\partial \chi_p^{kl}(\mathbf{y})}{\partial y_q} \right] dY, \quad (22)$$

ここで、 $|Y|$ は多孔質体のユニットセル Y の体積、 $\langle \rangle$ は Y における体積平均を表している。

また、ユニットセル中の流体相 Y^f において $\xi_i^k(\mathbf{y})$ の体積平均をとると、流体相の等価密度 ρ_{ki}^{fc} を求めることができる。

$$\rho_{ki}^{fc} = \frac{1}{j\omega} \langle \xi_i^k(\mathbf{y}) \rangle_{Y^f}^{-1}, \quad (23)$$

ただし、 $|Y^f|$ をユニットセル中の流体相 Y^f の体積、 $\langle \cdot \rangle_{Y^f}$ は Y^f における体積平均である。

流体相の等価体積弾性率 K^f はユニットセル中の流体相 Y^f において $\zeta(\mathbf{y})$ の体積平均をとることで

$$K^f = \frac{\gamma^f P^f}{\gamma^f - (\gamma^f - 1) \langle \zeta(\mathbf{y}) \rangle_{Y^f}}. \quad (24)$$

と求めることができる。

4.4 マクロスケーラの支配方程式

均質化特性を用いて、マクロスケラにおける固体相および流体相の支配方程式をそれぞれ導出することができる。導出の詳細は文献^(15, 16, 10)を参照されたい。ここでは結果のみを示す。固体相の支配方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\sigma}_{ij}^{s(0)}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \omega^2 u_i^{s(0)} - \rho_0^f \omega^2 d_i^k u_k^{s(0)} - j\omega d_i^k \frac{\partial \psi^f(0)}{\partial x_k} \\ + j\omega \phi \frac{\partial \psi^f(0)}{\partial x_i} + j\omega k_{ij}^H \frac{\partial \psi^f(0)}{\partial x_j} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

また、流体相の支配方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{d_i^k}{\rho_0^f} \frac{\partial^2 \psi^f(0)}{\partial x_k \partial x_i} + \omega^2 \left(\theta^f + \frac{\phi}{K^f} \right) \psi^f(0) - j\omega d_i^k \frac{\partial u_k^{s(0)}}{\partial x_i} \\ + j\omega \phi \frac{\partial u_i^{s(0)}}{\partial x_i} + j\omega \theta^{s,pq} \varepsilon_{pq}^{s(0)} = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、 $\psi^f(0)$ は $p^f(0) = -j\omega \psi^f(0)$ と定義されるポテンシャル関数、 $\hat{\sigma}_{ij}^{s(0)}$ は流体相との連成を考慮しない場合の固体相の応力、 ϕ はポロシティ、 $\bar{\rho}$ は多孔質体の平均質量密度で $(1 - \phi)\rho^s + \phi\rho_0^f$ である。また、 c_{ijkl}^H 、 k_{ij}^H 、 $\theta^{s,pq}$ は固体相の均質化特性、 θ^f 、 K^f 、 d_i^k は流体相の均質化特性である。

計算手順としては、まずユニットセルを対象にミクロスケラにおける計算を行い固体相の変位、流体相の速度および温度を求める。次に、それらをユニットセル内で平均化して上述した6つの均質化特性を算出する。最後に、マクロスケラにおける支配方程式を用いて、音響管を模擬したモデルで計算を行い、垂直入射吸音率を求める。

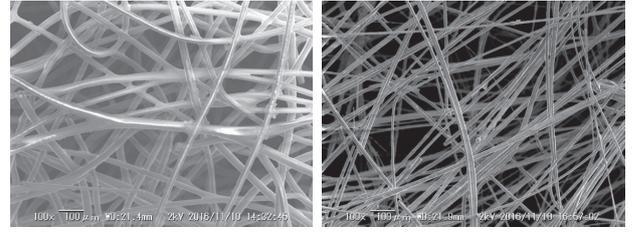


Fig.3 SEM images of typical fibrous poroelastic materials.

5. 繊維材料の最適化

繊維系吸音材は図3に示すように、繊維が平面的に積層して構成されている。なお、繊維の配向は平面内において特定の方向に偏ることはなく、一般的には等方性とみなすことができる。また、繊維材のヤング率は空孔内空気の体積弾性率に比して小さいため、固体相の吸音率への影響は無視できることが多い。Limp フレームモデルと呼ばれる、繊維の質量による慣性項のみを考慮したモデルがよく用いられている。

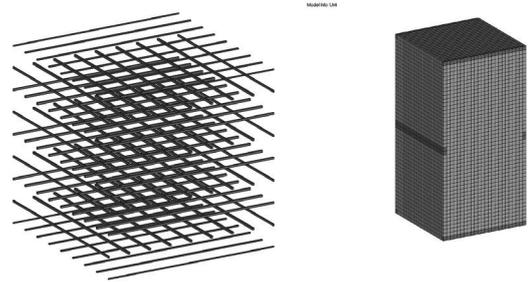


Fig.4 Orthogonal parallel fiber model.

以上の点を考慮し、ここでは、図4に示すように、繊維が接触することなく積層し、各層間の繊維は直交している非接触パラレルファイバーモデルを適用する。図は本モデルのユニットセル構造を示しており、これが周期的に繰り返されていると仮定し、上述した均質化法を適用する。

5.1 Biot パラメータの同定

均質化法の計算結果より、ヤング率などの固体相の弾性的なパラメータは直接得ることができる。また、流体相のパラメータの内、空気流れ抵抗 σ についても均質化法の計算結果より直接得ることができる。しかし、トーチューシティ α_∞ と粘性特性長 Λ ・熱的特性長 Λ' という Biot モデルに特有のパラメータについては、それら

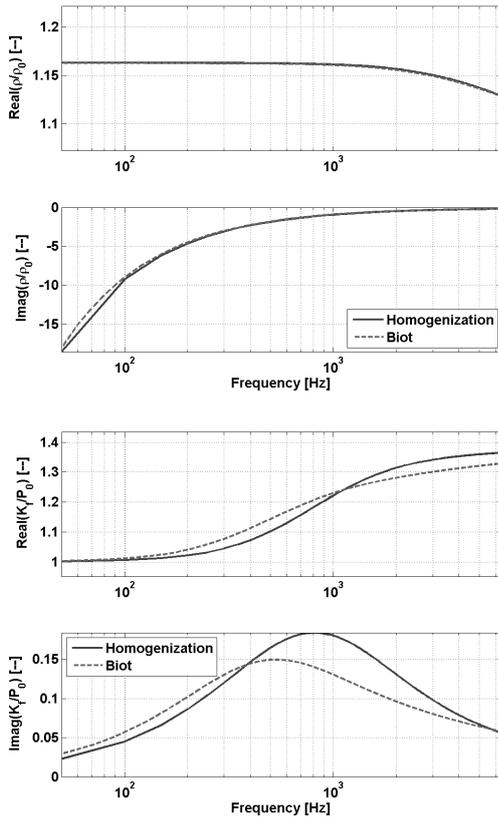


Fig.5 Comparisons of equivalent density and bulk modulus obtained by homogenization method and Biot's model with identified parameters.

の物理的な定義があいまいなこともあり、均質化法の計算結果より直接得ることはできない。そこで、流体相の等価密度・体積弾性率は均質化法の計算結果より直接得ることができることを応用し、 α_∞ 、 Λ は等価密度、 Λ' は等価体積弾性率より複素数対応の非線形最小二乗法 (Levenberg–Marquardt 法) を適用し、同定する。図 5 は均質化法の計算結果より直接求めた等価密度・体積弾性率と、同定したトーチューシティ α_∞ と粘性特性長 Λ ・熱的特性長 Λ' および均質化法により得られた空気流れ抵抗 σ を用いて Biot のモデルより求めた等価密度・体積弾性率の比較である。若干の乖離は見られるが、両者は良く一致している。

5.2 Biot パラメータと微視的パラメータの関係式

種々の繊維径および空孔率を有する繊維材料について非接触平行ファイバーモデルでモデル化し、均質化法による計算結果より、各材料の Biot パラメータを同定する。これは一種の数値実験であり、多種多様な繊維材料について Biot パラメータを同定していることに相

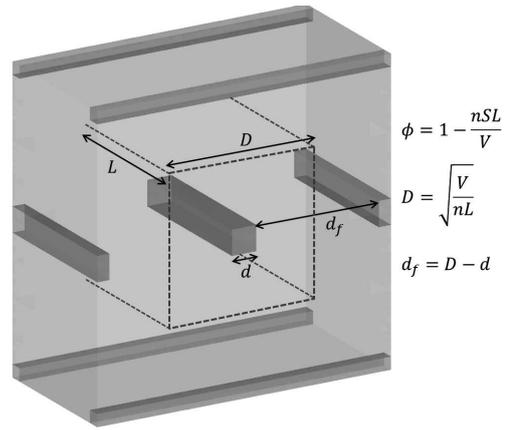


Fig.6 Microscopic parameters of fibrous materials.

当する。実材料では繊維系や空孔率を制御することは容易ではなく、また繊維系の分布やばらつきもあることから、精度よく Biot パラメータを同定するのは難しい。周期的なセル構造を仮定するという制約があるものの、パラメータを正確に反映した数値実験を行えるというメリットは大きく、また、数値解析のみで閉じていることも利点と考えられる。ここでは、発泡材のセル径に代わるものとして、図 6 に示すように、新たに平均繊維間距離 $d_f = d/\sqrt{1-\phi} - d$ を定義し、これを繊維材微視構造の代表パラメータの一つとする。繊維径 d および平均繊維間距離 d_f (あるいは空孔率 ϕ) を用いた関数を仮定し、各パラメータについて最小二乗法により係数同定をすると、以下の関係式を得ることができる。

$$\alpha_\infty = 1.00 + 1.03 (1 - \phi) \quad (27)$$

$$\sigma = 3.33 \times 10^{-4} d_f^{-2} (1 - \phi)^{0.16} \quad (28)$$

$$\Lambda = 0.70 d_f (1 - \phi)^{-0.15} \quad (29)$$

$$\Lambda' = 0.76 d_f (1 - \phi)^{-0.13} \quad (30)$$

上式より、 σ は d_f^2 に反比例、 Λ と Λ' は d_f に比例することが分かる。

5.3 パラメトリック最適化

繊維系吸音材を Limp フレームモデルで表し、その微視構造のパラメータを遺伝的アルゴリズムを用いて最適化する。目的関数は指定周波数における垂直入射吸音率を最小化とし、周波数は 250 Hz, 500 Hz, 1.0 kHz, 2.0 kHz および 4.0 kHz の 5 ケースを考える。

設計変数は、繊維径 d および平均繊維間距離 d_f および繊維材料自体の質量密度 ρ_s とし、それらの取りうる範囲は、現実的な材料構成を考慮して、 $0.1 \mu\text{m} \leq d \leq 500 \mu\text{m}$, $0.800 \leq \phi \leq 0.999$, $900 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_s \leq 2000 \text{ kg/m}^3$

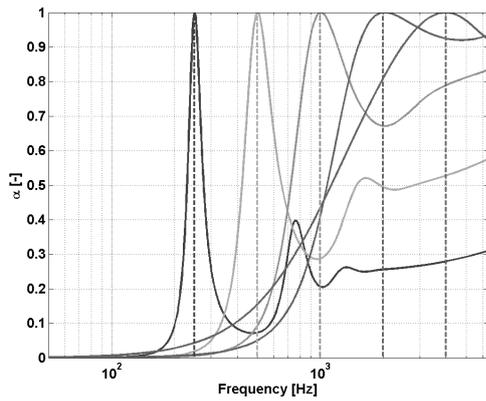


Fig.7 Optimal sound absorption coefficients for normal incident.

と設定する．なお、遺伝的アルゴリズムは Matlab の Toolbox に組み込まれている関数を用いている．図 7 は、各周波数において垂直入射吸音率が最大になるように最適化したときの垂直入射吸音率の周波数特性を示している．図から分かるように、最適化対象周波数において、吸音率はおおむね 1 となっている．しかし、その他の周波数帯域においてはそれほど大きくない．

Tab.1 Optimal microscopic parameters.

Freq	d [μm]	d_f [μm]	ϕ [-]	ρ_s [kg/m^3]
250 Hz	4.572	6.452	.828	1650.
500 Hz	4.956	14.049	.932	956.6
1.0 kHz	3.278	25.472	.987	1301.
2.0 kHz	3.535	42.102	.994	944.5
4.0 kHz	34.911	77.764	.904	2000.

表 1 は、各対象周波数において吸音率を最大とする設計変数の値を示している．繊維径は 4 kHz における最適化を除いて $3\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ が最適値となっている．また、低周波数ほど空孔率が小さく、圧縮度の大きい繊維材となっており、これまで得られている経験則にも合致していると思われる．

図 8 は各対象周波数において得られた最適値を与える設計変数を用いて、繊維材料の微視構造を模式的に示したものである．このような微視構造あるいはこれに近い微視構造を有する材料を実際に製造できるかどうかという課題はあると考えられるが、目標とすべき最適な微視

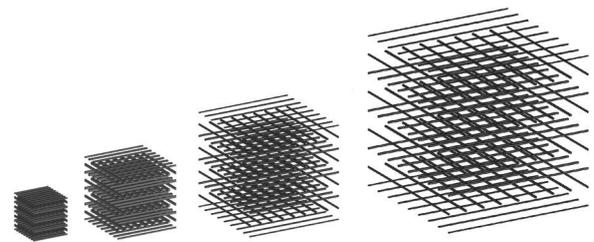


Fig.8 Schematic images of fibrous poroelastic materials optimized for 250 Hz, 500 Hz, 1.0 kHz, and 2.0 kHz.

構造を提示し、新たな材料設計の指針になるのではないかと考えている．

6. 発泡材料の最適化

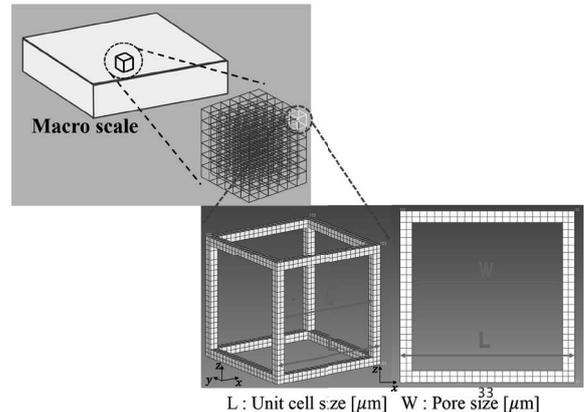


Fig.9 Unit cell model

ここでは、簡単のため図 9 のような矩形セルモデルを用いた．解析仕様としては、 L を 0.1 から $1000\mu\text{m}$ まで 10 通り、空孔率を 0.99 から 0.70 まで 9 通りの計 90 通りの解析を行った．その結果を表に示す．セルサイズと空孔率を変更した時に変化するパラメータが流れ抵抗 σ 、迷路度 α_∞ 、粘性特性長 Λ 、熱的特性長 Λ' である．それぞれのパラメータについて、セルサイズ L と空孔率 ϕ との関係式を導出を行った．

6.1 Biot パラメータと微視的パラメータの関係式

均質化法による解析結果を用いて、流れ抵抗 σ 、迷路度 α_∞ 、粘性特性長 Λ 、熱的特性長 Λ' について最小二乗法により関係式を導出を行った．迷路度についての導出結果は式 31、図 10 である．迷路度は空孔率に依存して

いる。また、迷路度が1である時、空孔率も1となる。流れ抵抗 σ 、粘性特性長 Λ 、熱的特性長 Λ' については、セルサイズ、空孔率の2変数による最小二乗法によって導出を行った。その結果は、式32から式34、図11から図13示す。流れ抵抗はユニットセルサイズに反比例していることがわかる。空孔率の値に反比例の関係にあることがわかる。粘性、熱的特性長についてはユニットセルサイズに比例の関係にある。この結果により、ユニットセルサイズが小さいとき、流れ抵抗が大きくなり固体相の特性が大きくなると考えられる。粘性特性長の $\phi = 0.99$ の値に若干、乖離が見られるがおおむね一致している。これにより、ユニットセルサイズ、空孔率を用いて各パラメータを表すことができ、多孔質吸音材の微視構造と関連づけることができる。

$$\alpha_{\infty} = 1.6423 - 0.6423 \times \phi \tag{31}$$

$$\sigma = 2.021 \times 10^{-3} \times (\alpha_{\infty} - 1)^{0.3133} \times L^{-2.00} \tag{32}$$

$$\Lambda = 0.1581 \times L^{1.0126} \times (\alpha_{\infty} - 1)^{-0.2595} \tag{33}$$

$$\Lambda' = 0.3685 \times L^{1.0098} \times (\alpha_{\infty} - 1)^{-0.1710} \tag{34}$$

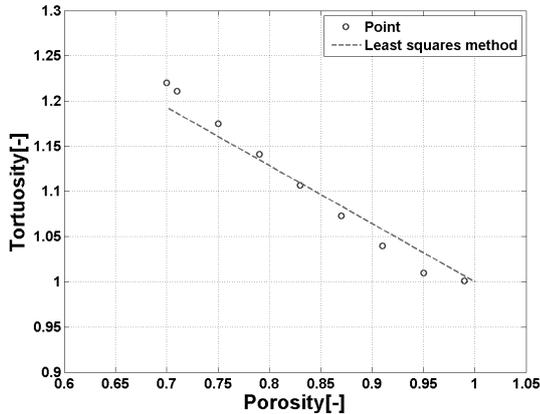


Fig.10 Tortuosity α_{∞}

6.2 パラメトリック最適化

最適化する吸音材の厚さは20mm、設計変数として、ユニットセルサイズ L 、空孔率 ϕ 、固体相の弾性率 E 、密度、損失係数 η に設定する。対象の周波数範囲における垂直入射吸音率が最大となるような値を遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を用いて探索する。目的関数は $1 - \alpha$ とし、各設計変数の範囲は表2に示す値に設定する。周波数範囲を中心周波数を4.0kHzの1/1オクターブバンドに設定した場合の最適な値を探索する。

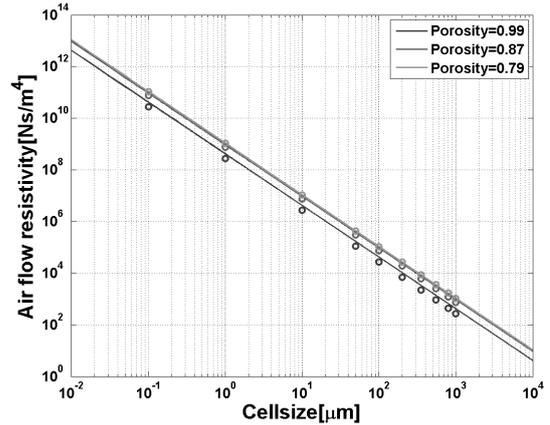


Fig.11 Air flow ratio σ

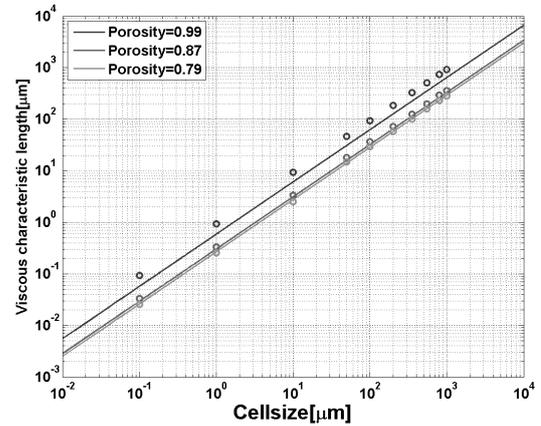


Fig.12 Viscous characteristic length Λ

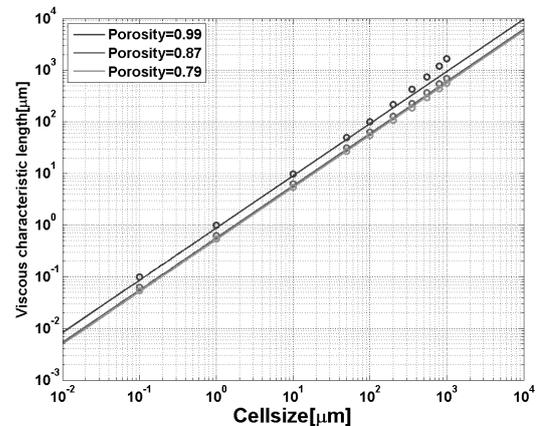


Fig.13 Thermal characteristic length Λ'

Tab.2 Design variables

Design variable	Min	Max
Unit cell size L	1.00 μm	500 μm
Porosity ϕ	0.70	0.99
Young's modulus E	1.00kPa	500kPa
Density	800kg/m ³	1500kg/m ³
Loss factor η	0.010	0.500

単層の材料について最適化を行った。前章で設定した解析仕様に設定し、最適化を行ったセルサイズ、空孔率については表 3, 材料特性値を表 4 に示す。また、セルサイズのモデルを図 14, 周波数特性を図 15 に示す。破線で示す周波数が最適化周波数である。

最適化した周波数で高い吸音率を示していることがわかる。空孔率は高い値を示している。粘性熱的特性長の値が大きくなっていると考えられる。そのため流体相の特性が作用して吸音率が高くなっていると考えられる。

Tab.3 Optimization result of L,W, ϕ

Freq	$L[\mu\text{m}]$	$W[\mu\text{m}]$	$\phi[-]$
4kHz	120.9	111.3	0.982

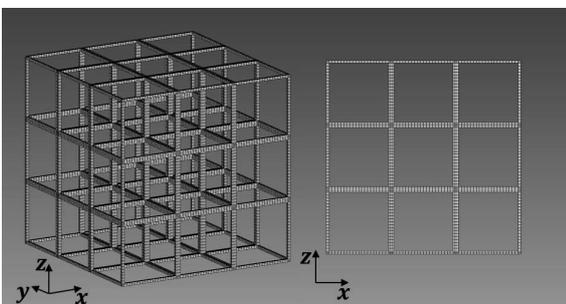


Fig.14 Optimization result of cell model

Tab.4 Optimization result of properties

Freq	$E[\text{kPa}]$	$\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	$\eta[-]$	α
4kHz	300.0	978.32	0.144	1.00

最適化を行ったセルサイズ、空孔率、固体相の特性をもつ均質化法モデルを作成し、解析を行いその結果を図 16 に示す。実線が GA の最適化結果、破線が均質化法による結果を示している。若干の乖離が見られるがおおむね一致している。これにより、多孔質吸音材の微視構造

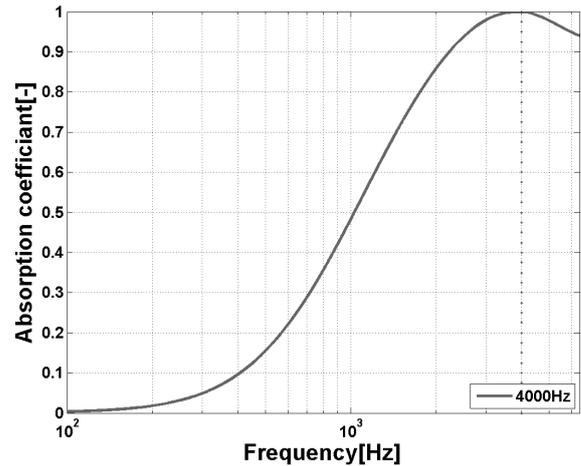


Fig.15 Optimization result(GA)

を最適化することができたと考えられる。

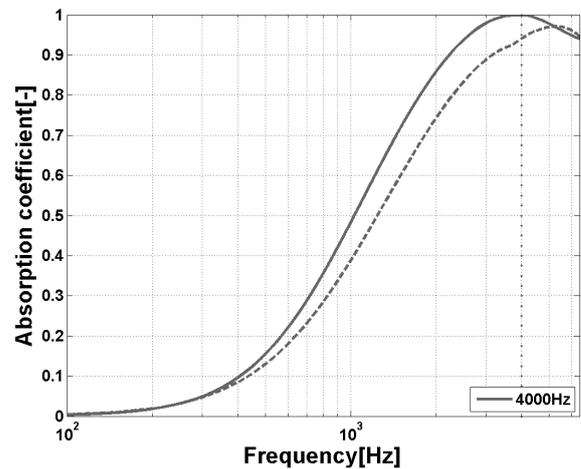


Fig.16 Comparison with homogenization method

多孔質吸音材の微視構造を最適化する例として 1/1 オクターブバンドの 4kHz 周波数帯について最適化を行った。セルサイズ、空孔率については表 5, 材料特性値を表 6 に示す。また、セルサイズのモデルを図 17, 周波数特性を図 18 に示す。網掛されている部分は最適化周波数を示している。本最適化法を使用して、任意の周波数帯や、質量などを設計変数などに設定することで、最適化することができると考えられる。

Tab.5 Optimization result of L,W, ϕ

Freq	$L[\mu\text{m}]$	$W[\mu\text{m}]$	$\phi[-]$
4kband	109.0	102.0	0.988

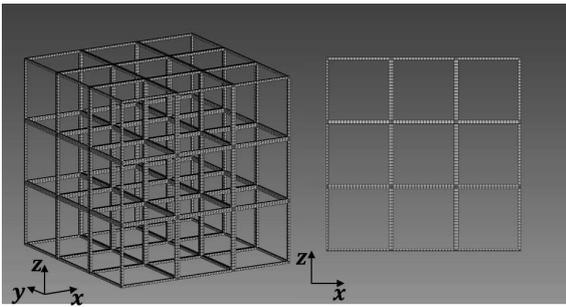
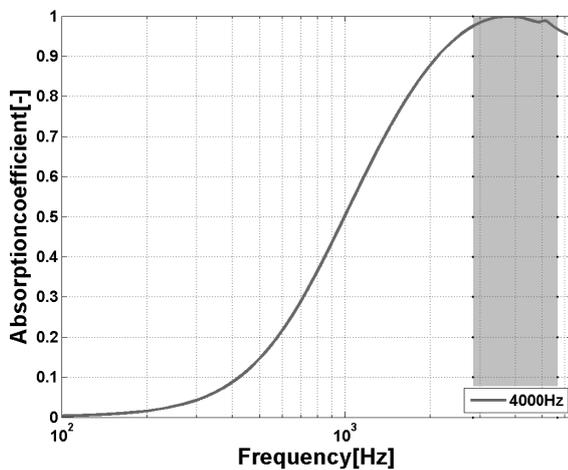


Fig.17 Optimization result of cell model

Tab.6 Optimization result of properties

Freq	E [kPa]	ρ [kg/m^3]	η [-]	α
4kband	338.8	1078.6	0.032	0.987

Fig.18 Optimization result of 1/10th band α

7. まとめ

本研究では、繊維系材料を Limp フレームにならない、非接触パラレルファイバーモデルでモデル化し、均質化法を適用して得られた計算結果から Biot パラメータを同定した。また、繊維径や繊維間距離の微視的パラメータと Biot パラメータを関連付ける式を最小二乗法により同定した。さらに、その式に遺伝的アルゴリズムを用いて、対象周波数における垂直入射吸音率を最大にする最適な繊維径と繊維間距離を得ることができた。今後は、繊維間の接触を考慮したモデル化および最適化について検討する。

参考文献

- 1) M. E. Delany and E. N. Bazley. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3:105–116, 1970.
- 2) M. A. Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *Journal of Acoustical Society of America*, 28:168–178, 1956.
- 3) M. A. Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *Journal of Acoustical Society of America*, 28:179–191, 1956.
- 4) J. F. Allard and N Atalla. *Propagation of Sound in Porous Media*. Wiley, 2009.
- 5) N. Atalla, R. Panneton, and P. Debergue. A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials. *Journal of Acoustical Society of America*, 104:1444–1452, 1998.
- 6) J. L. Auriault, L. Borne, and R. Chambon. Dynamics of porous saturated media, checking of the generalized law of Darcy. *Journal of Acoustical Society of America*, 77:1641–1650, 1985.
- 7) T. Levy. Propagation of waves in a fluid-saturated porous elastic solid. *International Journal of Engineering Science*, 17:1005–1014, 1979.
- 8) R. Burridge and J. B. Keller. Poroelasticity equations derived from microstructure. *Journal of Acoustical Society of America*, 70:1140–1146, 1981.
- 9) C. Boutin, P. Royer, and J. L. Auriault. Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity. *International Journal of Solids and Structures*, 35:4709–4737, 1998.
- 10) T. Yamamoto, S. Maruyama, K. Terada, K. Izui, and S. Nishiwaki. A generalized macroscopic model for sound-absorbing poroelastic media using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200:251–264, 2011.
- 11) R. P. Gilbert and A. Mikelić. Homogenizing the acoustic properties of the seabed: Part I. *Nonlinear Analysis*, 40:185–212, 2000.

- 12) TH. Clopeau, J. L. Ferrín, R. P. Gilbert, and A. Mikelić. Homogenizing the acoustic properties of the seabed: Part II. *Mathematical and Computer Modelling*, 33:821–841, 2001.
- 13) E. Sanchez-Palencia. *Non-Homogeneous Media and Vibration Theory, Lecture Notes in Physics 127*. Springer-Verlag, 1980.
- 14) K. Terada, T. Ito, and N. Kikuchi. Characterization of the mechanical behaviours of solid-fluid mixture by the homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 153:223–257, 1998.
- 15) T. Yamamoto, S. Maruyama, K. Izui, K. Terada, and S. Nishiwaki. Equivalent properties of sound absorbing porous material by homogenization method. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, 77(773):75–88, 2010.
- 16) T. Yamamoto, S. Maruyama, K. Izui, K. Terada, and S. Nishiwaki. A model for sound-absorbing poroelastic material using multiscale analysis. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, 76(768):2039–2048, 2010.

体性感覚と視聴覚刺激を組み合わせた行動誘発メカニズムに関する基礎検討

工学院大学 情報学部 近藤 公久, 中島 弘史

ATR 知能ロボティクス研究所 内海 章, 須佐見 憲史

Study on Action Inducing Mechanisms with Somatosenses and Audio-Visual Stimuli

Tadahisa Kondo, Hirofumi Nakajima, Department of Informatics

Akira Utsumi, Norifumi Susami, Intelligent Robotics Laboratory, ATR

ABSTRACT : This project aims to construct the model of action inducing mechanisms by somatosenses and audio-visual stimuli. This paper describes the results of the project as the first step. First, virtual reality system was constructed for demonstrating the sound localization reproduction. Second, attention drawing effects using 3D sound was investigated. Finally, effects of somatosenses on the position recognition by comparing between haptic information and visual information. The results showed that the 3D drawing sound was prior to 2D sound, and the different driving positions might affect the drivers' recognition. These results also suggested that further investigations could achieve the aims of the project.

1. はじめに

視聴覚刺激と体性感覚による注意誘導と、行動誘発モデルを構築することが本研究の最終到達目標である。

運転者の“漫然状態”はこれまで運転者の認知が運転タスクから離れ必要な情報取得ができなくなる状態(「認知的乖離」)を指していたが、自動運転ではさらにハンドルやペダルから手足を離して通常の運転姿勢とは異なる体勢をとっているため、緊急時に必要な操作が行えないという問題が生じる(「身体的乖離」)。さらに、このような不適切な姿勢状態は運転に必要な情報取得を妨げるため認知的乖離をさらに助長するなど両者には負の相互作用があ

る。安全な運転移譲を実現するには「認知的乖離」、「身体的乖離」の両方を短時間で解消しなければならない(図1-1)。本研究では、著者らがこれまで行ってきた視聴覚刺激による注意誘導手法と体性感覚との組み合わせにより必要な行動を素早く誘発して、安全なタスク移譲を実現する注意誘導・行動誘発システムの開発につなげる。

本報告では、工学院大学総合研究所プロジェクトとして、上述の最終到達目標達成のために、VR環境の構築、立体音響を用いた注意誘導効果の確認、体性感覚を伴う場面での運動の違いの基礎的検討を行った結果を示す。

1. 1 視聴覚による注意誘導効果

これまで著者らが行った注意誘導に関する研究^(1,2,3)では、注意の効果的な誘導の実現には誘導方法自体の検討に加えてヒトの注意が誘導されたか否かを検知し誘導刺激の呈示状態を動的に切り替える手法の確立が重要であることを指摘している。たとえば、視覚探索時の視線挙動を計測する実験を実施し、注意誘導によるターゲット視認の有無を識別するためにターゲットを視認した際に観察される視線挙動の特徴を解析している。解析の結果、ターゲット視認時と非視認時の視線挙動の差異、さらにタ

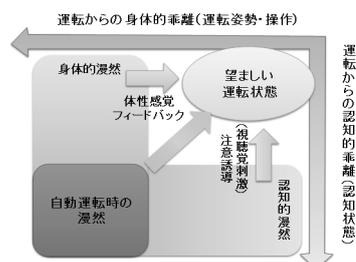


図 1-1 運転状態からの乖離と誘導の研究全体の概

ターゲット視認時の視線挙動がターゲットの大きさや明るさ・周囲物体による妨害等によって生じる視認難易度の違いによって変化することが明らかになっている。

そこで、音の方向や移動、周辺視による注意誘導の効果を高め、さりげなく、安全に危険を知らせ、無意識に注意を危険方向にシフトする手法を発展させるために、VR空間を用いた検討を行う。

本報告では、3D音響による(引き込まれ感)注意誘導効果を示す。また、眼球運動を用いた注意誘導効果の検討について行った結果と合わせ、通常運転時における注意誘導の実験研究から、認知的漫然状態からの復帰時の注意誘導を対象に発展させる方向性の検討結果も示す。

1. 2 3D音響空間

工学院大学3D音響実験室(以後VRシアタと呼ぶ)に、最先端音響処理技術によって実環境に近いVR環境を構築する。3D音響空間は、注意音(サイン音)および環境音をリアルに再現し、実環境(自動車運転時)における効果を検討するのに不可欠な環境である。車内の音環境、サイン音の検討により、これまで単純な音刺激と実験室研究であったものを、リアルな実環境を想定した研究推進が可能となる。

本報告では、最先端音響処理技術による実環境に近いVR環境の構築には、ホイヘンスの原理に基づく3D音響環境提示システムをVRシアター(八王子キャンパス2号館1階)の32個のスピーカを利用して構築した環境について述べる。このシステムは、提示したい仮想音源の信号波形と座標を設定することで、あたかもその位置にその音源が存在するような音響空間を提示できる。スピーカの出力信号を計算する部分は、プログラムの改変や拡張が容易なMATLABを用いて作成した。また入出力インタフェース用のGUIを実装し、一般の人でも、直感的に操作できるようになっている。さらに、臨場感の高い音響VRを提示できるエリア(スイートスポット)の拡大と、高さ方向の音像の制御によって、より臨場感の高い音響VRシステムの構築の方針についても示す。

1. 3 体性感覚の影響

運転移譲時の安全の確保のための体性感覚によるフィードバックと注意誘導および環境との相互作用を検討する。体性感覚フィードバックによる注意喚起は運転状態転換時の危険回避のために重要な情報伝達手段の一つである。しかし、この方法も、驚きや恐怖を与えてしまったりは返って危険であり、注意誘導と合わせて、さりげなく、自然な運転状態転換を実現させなければならない。

本研究プロジェクトでは、体性感覚フィードバックを用いた注意誘導および行動誘発方法を本格的に開発するために、振動機能付きのステアリングやシート、さらには車体ごと傾斜可能な装置による実験環境やフィードバック方法の検討を進めている。また、ドライバーの反応特性を実験的にデータとして蓄積し、データから、危険回避効

検討、検証、および、注意誘導との相互作用効果の検討を進めている。

本報告では、車体の傾斜や運動をバーチャルに体性感覚として与える装置を用いた本格的実験研究を開始するに先立って実施した、体勢および重力感覚、の影響についての基礎検討について述べる。

2. 立体音響収録再生システムの構築

2. 1. 立体音響収録再生システムの構築

音場の収録・再生を高精度に行うシステムの構築を進めるにあたり解決しなければならない課題は、室内・野外問わず、また音源の数や音源の指向性によらず、リアルタイムで音場の収録と再生を実現することである。本研究プロジェクトでは、既存手法をベースに、VRシアターに適した音場の収録再生システムを構築する。

立体音場の収録再生システムの開発の第1歩として、(1)VRシアター内での音源の位置の推定システム、(2)推定した音源の位置から仮想的な音源を再現するシステムを構築することを目標とした。また主にVRシアターにおいてリアルタイム音響処理システムのデモンストレーションを行うために、(3)リアルタイム残響付加システムの開発を目指した。

本章では、2節でVRシアターの音響システムについて概説したのち、3節で本年度開発した(1)~(3)のシステムのそれぞれの成果について記述する。

2. 2 VRシアターの音響システム

(1) ハードウェア

図2-1にVRシアター(八王子校舎2号館1階02-156室)の設計図面、図2-2にVRシアターの外観(上図はステージ側、下図は客席側)を示す。VRシアターは、立体音響の収録・再生や音刺激を用いた心理実験などの研究を行うために、多数のマイクロホンやスピーカ、LANなどの設備が備わっている。また多数のスピーカを用いてドルビーアトモス⁽⁴⁾などの最新のサラウンドに対応したデジタルコンテンツの再生が可能である。

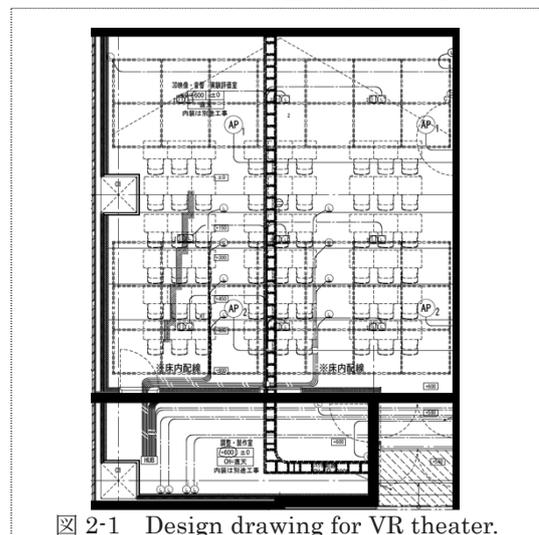


図 2-1 Design drawing for VR theater.



図 2-2 VR theater (Main room).

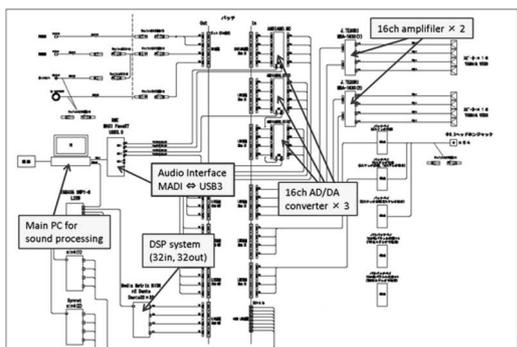


図 2-3 Design drawing for audio hardware.

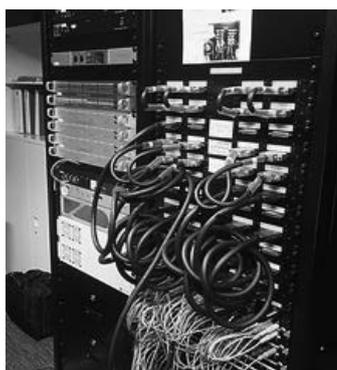


図 2-4 VR theater (Control room).

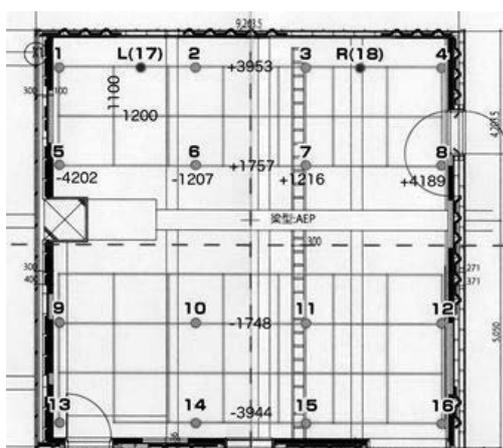


図 2-5 Arrangement for microphone array

の根管をなすものであり、それらが、アンプやオーディオインタフェースを介して、音響信号処理 PC に接続されている。また、多チャンネル信号をリアルタイムに処理するための音響信号処理用ハードウェアシステム (DSP システム) が備わっている。図 2-4 に調整室の外観を示す。多くのパッチ盤があり、接続を変えることで様々な構成の音響処理を実現できる。

マイクアレイの配置図を図 2-5 に示す。天井にメッシュ状に $4 \times 4 = 16$ 個の無指向性マイクロホンが配置されている。調整室までは、アナログケーブルで接続されている。シールド線を用いているため、S/N比は 60dB 以上確保されている。調整室では、マイクアンプ付きの 32ch AD/DA 変換器 (Andiamo MC) に接続されている。マイクアレイ 16ch とは別に、最大 16 個のマイクロホンを接続して、最大 32ch の収録が可能である。各マイクロホンで収録した信号は、並列の 16ch の信号として同期して、サンプリング周波数 48kHz で収録が可能である。データ転送には、MADI (Multichannel Audio Digital Interface) を採用している⁽⁶⁾。

スピーカアレイの配置図を図 2-6 に示す。32 個のスピーカが設置されている。配置は、NHK⁽⁶⁾ の 22.2ch サラウンドシステム (上段 9ch, 中段 11ch, 下段 3ch にスピーカを配置) に加え天井面に 8 個のスピーカを加えた形となっている。ただし、中段と下段のスピーカについては映像投影用のスクリーンに干渉するため、天井面にずらしている。

DSP システムは、MediaMatrix 社の NION nE を導入している。音響用の DSP が 3 基搭載されているハードウェアで、安定性・保守性に定評があり、多くのスタジアムやアミューズメント施設に導入されているものである。

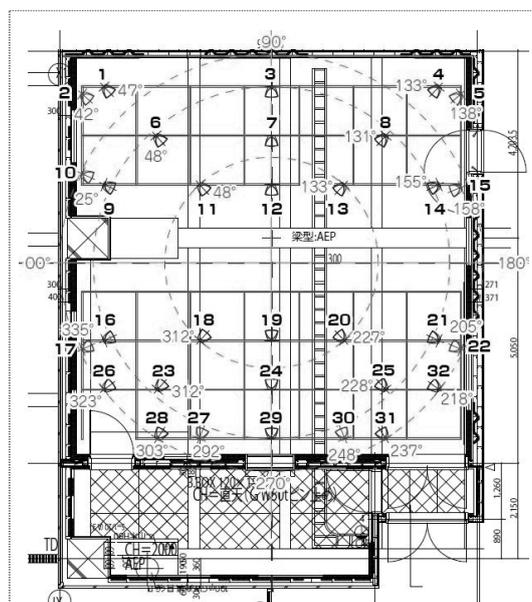


図 2-6 Arrangement for loudspeaker array.

VRシアターには、教室用の音響設備やテレビ会議よりの設備など複数の設備が備わっている。本節では、研究用の多チャンネル音響収録再生用の設備について説明する。図 2-3 は、研究用音響設備のシステムの接続図である。天井に配置した 16 個のマイクロホン (マイクアレイ) と 32 個のスピーカ (スピーカアレイ) が入出力のハードウェア

(2) ソフトウェア

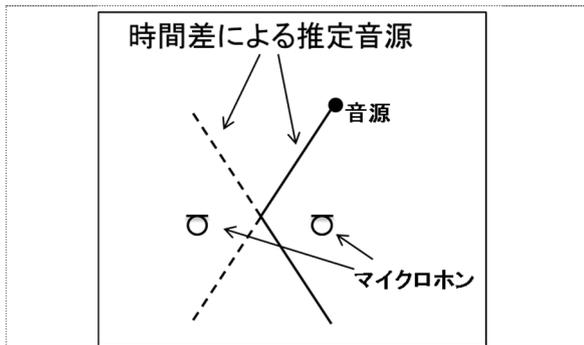


図 2-7 Sound position estimation based on CSP.

制御用のPCには、各種ハードウェアの機能を調整するための制御ソフトウェアと多チャンネルの音響信号を収録・再生するためのソフトウェアが導入されており、多チャンネルの音響信号の入出力が可能である。しかし、導入されているソフトウェアだけでは、VRシアターにおける音場を収録し、再生することはできない。これはたとえば、マイクアレイで収録した16chの信号をそのままスピーカアレイの1~16chで再生しても、配置の違いや、音響特性の違いにより、収録した音場とは全く異なった音場となって再生されるためである。

DSPシステムには、DSP制御用のソフトウェアが導入されており、GUI上で機能モジュールを結線する(ネットワークプログラムを作成する)ことで、リアルタイムの音響処理が可能である。しかし、制御用のPCと同様、VRシアター用に調整されたネットワークプログラムは無いため、独自に開発する必要がある。

2. 3 構築したシステムの概要

(1) 音源の位置推定システム

本年度は、音源の位置の推定方法として、CSP法⁽⁷⁾を用いて開発を行った。CSP法は、図2-7のように、2つのマイクロホンペアで収録される音響信号のズレから音源方向を推定する手法である。1つのペアから推定される音源の位置は、平面上では、2つの直線上に絞られる。これを16個のマイクロホンから2つを選んだ際のすべてのペア(16C2=120通り)ペアで行い、音源の位置である可能性が最も高いと判定された点を音源位置として推定した。図2-8は、音源の推定結果である。上図は音源が正面にある場合、下図は右斜め後方にある場合である。図中のカラーマップは、音源の位置の可能性であり、最も高い所が推定位置(赤点)である。また青点が、音源の実際の場所である。図より概ね音源の位置を正しく推定でき、音源の位置推定システムが正しく動作することが確認された。

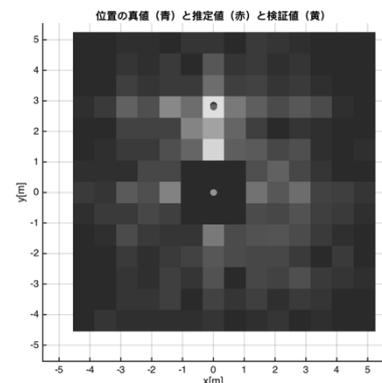
(2) 仮想音源の再現システム

本年度は、仮想音源の再生方法として、近接した2つのスピーカによる音量差と時間差の制御(ステレオ再生でのパン制御)で開発を行った。図2-9にその概要を示す。

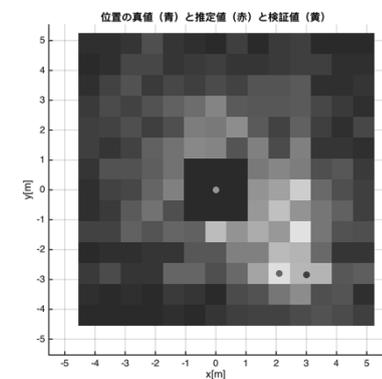
初めに仮想音源方向に最も近いスピーカを選択する、次に、選択したスピーカとは仮想音源を挟んで逆側にあるスピーカを選択する。最後に、この2つのスピーカを結ぶ線分上の位置の割合から、各スピーカの音量差と時間差をつけて、音を再生する。本システム実音源と仮想音源での再生音場の差を、両耳間時間差(ITD)で評価した⁽⁸⁾。図2-10は、評価で用いた音源の位置である。VRシアターの中心から2~3m離れた位置を取り囲むように22点の評価点を設けた。ITDは、VRシアターの中心に設置したダミーヘッドマイクロホンで収録した信号から分析した。実音源は、実際の話者であり、評価点からダミーヘッドに向かって発話した。図2-11は、ITDの評価結果である。上段は実音源、中段は仮想音源、下段は誤差である。横方向に音源がある場合に若干誤差が大きいものの、おおむね実音源と仮想音源のITDが一致しており、仮想音源の再現が確認できた。

(3) リアルタイム残響付加システム

DSPシステムおよび、VRシアター内のマイクアレイとスピーカアレイを用いて、実時間でVRシステム内の残響を調整できる残響付加システムを構築した。図2-12は、残響付加のDSPプログラムである。本システムを実行した結果、洞窟の中にいるような響きをVRシアター内で実現することができた。



(a) 正面に音源がある場合



(b) 右後ろに音源がある場合

図 2-8 Estimated and practical sound positions

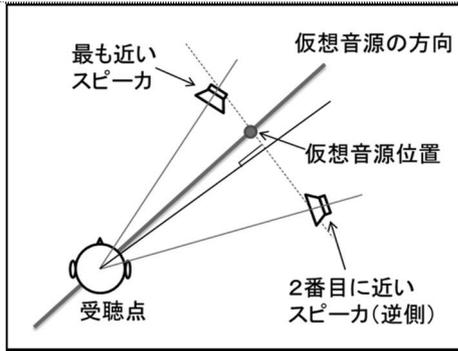


図 2-9 Virtual sound source reproduction.

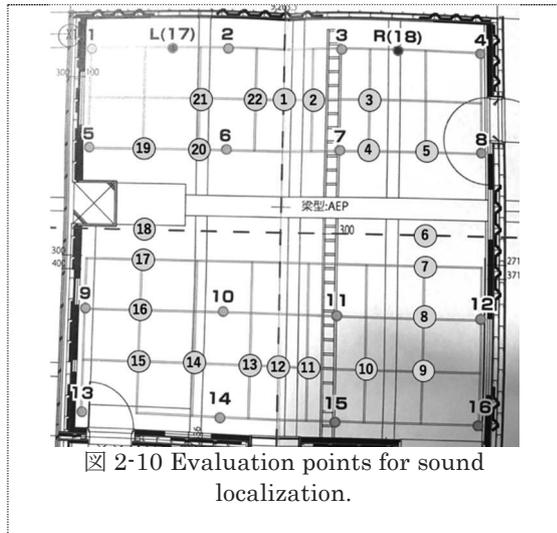


図 2-10 Evaluation points for sound localization.

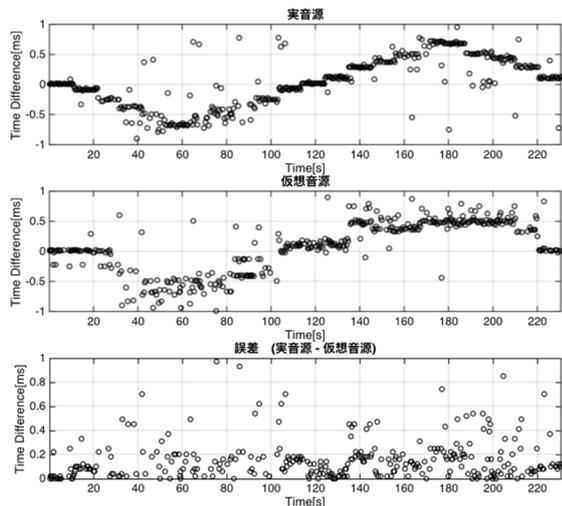


図 2-11 ITD between real and virtual sound source.

(4) 今後の課題

音源の位置推定システムは、定量的な推定精度の評価が未達である。また音源の高さや指向性が想定と異なる場合や、複数の音源がある場合には、正しい推定結果が得られなかった。これらの解決が課題である。

仮想音源の再生システムは、現在、1音源にしか対応しておらず、また手動での調整が必要である。複数の音源に対応し、手動調整なく再現できるシステムの開発が課題である。また、リアルタイム残響付加システムは、

長い残響を付加するとハウリングが発生するという課題がある。音質調整やハウリングキャンセラを導入し、様々な残響を付加することが課題である。

3. 立体音響を用いた注意誘導効果

本論において注意誘導とは何かしらの対象に意識が向いている状態から他の対象へ意識を向けさせる、または注意の配分を変えさせることを指す。例えば自動車運転中は、前方車両をはじめ、信号、歩行者、曲がり角、各種メーターなど様々な対象を見る必要があり、通常はその時々で必要なことに集中している。その通常状態から危険を知らせることによって注意の配分を変えさせる様な場面を想定する。単純に運転中に危険の方向へ注意を向けたいのであれば、「右」や「左」など音声で指示することでも可能である⁽⁹⁾。しかしそれでは完全に注意の配分が片方へ向いてしまい正面への注意の配分が低下してしまう可能性がある。そこで必要な誘導刺激は正面への注意の配分の減少を最小限に留めるとともに、ドライバーにストレスを与えない「さりげない」刺激である。

視覚刺激による注意誘導効果

井上ら⁽¹⁰⁾は大型ディスプレイの両端の周辺視野に相当する位置に一定方向に動くランダムドットを呈示することによる注意誘導効果の検討を行った。ランダムドットが注意を誘導させたい方向と同じ方向に動いた場合に反応時間が最も速くなるという実験結果から、一定方向に動くランダムドットが注意誘導刺激として利用可能であることを示した。さらに谷澤ら⁽¹¹⁾は、実際の車に小型LEDアレイを取り付けて運転手の周辺視野に視覚刺激を呈示した場合に、同様の効果が得られるか検証する実験を行った。その結果、被験者はLEDアレイによる視覚刺激が動く方向にターゲット刺激が出て来ると言う関係性に気づくとターゲットに対する反応が速くなることから、実際の車内環境でも視覚刺激による注意誘導効果が確認できたと主張している。

Tonnisら⁽¹²⁾は、HUDにAR(拡張現実)技術を駆使した3Dの矢印を表示し、危険の方向を3次元で示すものと、車を上から俯瞰した鳥瞰図に危険の方向を示した2Dの矢印を表示し危険の方向を2次元で示すものの、どちらが注意誘導に優れるか検証した。HUDによる情報に加えて前方を意識する周波数の音と後方を意識する周波数の音を呈示することで、更に注意誘導の効果が向上するかを検討した。その結果、3Dと2Dの矢印では3Dの矢印の方が注意誘導が高く、それに音に加わることでさらに注意誘導効果が高まることが示された。

聴覚刺激による情報呈示

視覚に比べ音は全方位から情報を得ることができるという利点が存在するため、聴覚刺激は注意誘導の手段としてよく用いられる。中山ら⁽¹³⁾はドライビングシミュレータを用いて、看板によって文字で「信号があるため追突注意」という情報を呈示した際と音声によって「信号があるため追突注意」という情報を呈示した際の運転手の挙

動の比較を行なった。その結果、看板による情報呈示時よりも音声による情報呈示時の方がブレーキをかけるタイミングが速く、早期にブレーキを踏み始めるため速度変化が緩やかであった。また直前に車両が存在することで前方の視界が不明瞭な状態（前方車両が乗用車よりもトラックの場合）の方が情報呈示の効果が大きく、早期にブレーキを踏み、速度変化が緩やかであった。このことから、視界が悪いほうが注意情報をより信頼すると結論している。

近藤と中村⁽⁹⁾は音声に含まれる感情的情報が注意誘導に与える影響を検討した。その中で誘導刺激（音声）が呈示されるタイミングと誘導効果の関係から、誘導刺激からターゲット刺激が出るまでの時間が 100ms 以上ある時に注意誘導効果があることが示されている。また、前田⁽¹⁴⁾はサイン音の移動方向によって注意誘導が可能かどうかを検討した。その結果、サイン音を急に左右どちらかに変化させること（音の仮現運動）によって注意誘導が可能であることが示された。さらに前田はサイン音が左右に移動終了と同時に終了してしまう（ターゲット刺激呈示時にはサイン音は消えている）と誘導効果が低下することを示唆した。

近藤と鈴木⁽¹⁵⁾は、前田⁽¹⁴⁾の結果を踏まえて、音が移動した後も音を流し続けることで統計的に有意な注意誘導効果が得られるかを検討した。その結果、音が移動してから 500ms 後にターゲット刺激が出る場合に有意な誘導効果が示された。さらに、移動する聴覚刺激に加えて周辺視野で左右に移動する視覚刺激を組み合わせると移動するサイン音のみの場合より注意誘導効果が向上することから、視聴覚刺激の相乗効果を示した。

立体音響刺激による情報呈示

聴覚的情報呈示方法において、立体音響を用いることで、従来実現しえなかった臨場感やコミュニケーションサービスが可能になると期待されている。立体音響を用いた情報呈示方法の一つとして、高尾⁽¹⁶⁾は、聴覚、音声情報に空間的な意味づけを行い、これを車載情報機器から呈示する手法を提案した。そして音源数が増えた場合に情報獲得の向上が見られるという報告を行った。これらのことから、立体的な音を用いれば臨場感や奥行き感と言ったリアルさを運転手に感じさせ、従来の刺激より誘導効果を得られる可能性がある。よって本研究では従来の 2ch の誘導音ではなく、多チャンネルの音源による情報呈示を行い、注意誘導効果を検討する。

3. 1 実験 1

実験 1 では 4ch で斜め前方に移動する音、ステレオで左右に移動する音、画面の下隅左右いずれかで点滅する視覚刺激を用いて注意誘導実験を行い、誘導効果を比較することにより有効な刺激を検証する。

3. 1. 1 実験方法

被験者：被験者は 20 代の正常な視力、聴力を有し、当

日の健康状態が良好な工学院大学学生 10 名（男性 6 名女性 4 名）であった。

実験環境と装置：実験は工学院大学 B-0627 教室内の簡易防音室の中で行った。D/A 変換機(TASCAM USB オーディオ/MIDI インターフェース US-20×20)を用いて誘導音を 4 台のスピーカーから呈示した。スピーカーは図 1 のように 1 番 2 番のスピーカーが置いてある辺を前方とし、1 辺 220 cm の正方形の四隅に 1 番と 3 番、2 番と 4 番がそれぞれ向かい合うように設置し、被験者はその対角線の交点に座った。視覚刺激を呈示するディスプレイ(PHILIPS BDM4350/11[42.51 インチ])は、被験者の正面に 70 cm の距離に設置した。

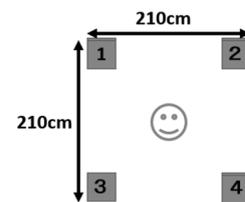


図 3-1 スピーカー配置図

刺激：

(聴覚刺激) 誘導刺激（サイン音）には、岩宮らが安定し、ゆったりすると感じる音とした 261.626Hz の純音を用いた。サイン音の長さは全て 3000ms とした。サイン音の移動条件として、(1)音が移動しない。(2)音が左右(前方)に移動するものの 2 種類を作成した。2ch, 4ch 両刺激ともに、1500ms まではサイン音中央で鳴り続け、1500ms から音の変化が現れる。

2ch 刺激は、500ms かけて音圧レベルが変化することで左から右、または、右から左へ音が移動する様に感じる音である。4ch 刺激は、図 3-1 の 3 番のスピーカーから 500ms かけて被験者の方向に移動する様に聞こえる音と、1 番と 4 番のスピーカーが 1000ms かけて 3 番のスピーカーへ移動し、2 番のスピーカーの音が 1500ms かけて移動する様に。これにより、1500ms までは音は被験者の位置（頭の中心）に定位させ、1500ms から誘導方向と反対のスピーカーの音が消え、その次に誘導方向以外のスピーカーの音が消えることにより誘導方向へ定位が移動する。その後も音が小さくなり続け、さらに遠くに行くような音であった。

(視覚刺激) 点滅する視覚刺激には画面下部全域に黒枠を取り、その両端に灰色の正方形を置き（視角：垂直 18.4 度、水平 26.5 度）、誘導する際は誘導方向の正方形が 0.1 秒点灯し、0.1 秒消える。これを繰り返して 3 回点滅するようにした。視覚刺激も聴覚刺激同様、誘導なし、右に誘導、左に誘導の 3 種類を作成した。

(ターゲット刺激)

ターゲット刺激は上向きと下向きの五角形を使用した（図 3-2）。ターゲット刺激の判定が簡単すぎると周辺視のみでターゲットを判定してしまう恐れがあるため、多少の認知的負荷をかけるために図 3-2 のいずれか（上む

きか下向きか)を使用した。呈示された五角形は画面上で20(mm)、視野角にして約1.6度の幅であった。



図 3-2 ターゲット刺激の上下の五角形

手続き： 実験手順を図 3-3 に示す。まず運転中の前景が背景として呈示される。被験者には画面の中央(前方車両)を見てもらうように指示した。その後、各種誘導刺激が呈示され、誘導刺激の呈示中もしくは呈示終了後に、画面の左、右、中央のいずれかにターゲット刺激が呈示された(左右視野角で22.5度)。被験者はターゲット刺激が上向きの五角形だった時のみ図 3-3 のハンドルの○ボタンをなるべく速く押し、下向きの五角形だった場合は何もせず中央を見てもらうように指示された。五角形の表示位置、五角形の種類、誘導方向、実験画面背景はランダムとし、2ch 刺激、視覚刺激、4ch 刺激の3種類行い全部で288 試行を行った。

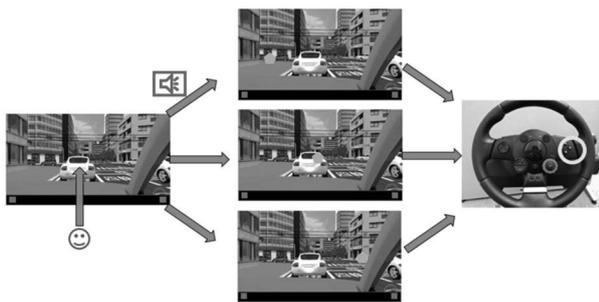


図 3-3 実験手順

3. 1. 2 実験結果

左右へ誘導刺激があり、誘導方向と同じ方向にターゲット刺激が出た場合の平均反応時間と、誘導刺激がなく(聴覚の場合はずっと真ん中で音が移動しない)、左右へターゲット刺激が出た場合の平均反応時間を図 3-4 に示す。また、左右へ誘導刺激があり、中央へターゲット刺激が出た場合の平均反応時間と左右へ誘導がなく中央へターゲット刺激が出た場合の平均反応時間を図 3-5 に示す。なお、反応時間は、ターゲット刺激が呈示されてから被験者がボタンを押すまでの時間である。なお、反応時間が1000ms 以上の結果は画面を集中して見ていなかったとみなし平均値を計算するデータから除外した。さらに被験者ごとの標準偏差が約100msであったので標準偏差の2.5倍にあたる250ms 以上各被験者の平均値より反応が遅かったデータも除外した。2ch、視覚、4ch の各刺激の被験者ごとの誘導ありとなしで対応のある t 検定を行った結果、2ch の刺激と 4ch の刺激で反応時間に有意な差があることが示された[2ch:t(9) = -1.9474, p<.05; 4ch:t(9) = -1.9262, p<.05]。

図 3-5 を見ると反応時間が誘導なしのほうが若干速くなっているように見えるが、被験者ごとの誘導ありと

誘導なしの平均値で対応のある t 検定を行ったところ、反応時間に有意な差はなく、左右へ誘導しても中央への注意は削がれていないことがわかる。

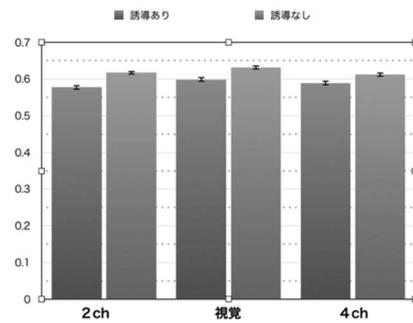


図 3-4 各種誘導刺激における反応時間の平均(ターゲット左右条件)

3. 1. 3 考察

2ch と 4ch の聴覚誘導刺激のどちらにおいても、誘導なしより誘導ありの方が反応時間が速くなることから、どちらの刺激を用いても有意な誘導効果が認められた。また点滅する視覚刺激では誘導効果を得ることができなかった。近藤と鈴木(7)による誘導効果が認められたものは、画面下部で正方形が左右に移動する誘導刺激、井上ら(2)では、周辺視野で移動するランダムドットであり、実験1で使用した視覚刺激と違う点は「移動する」という点である。よって視覚刺激を用いて効果的に注意を誘導するには「移動する」ことが重要と考える。

3. 2 実験2

実験2では4chの刺激を用いて誘導刺激を呈示するタイミングを変化させることにより、注意誘導効果の時間的推移を検討し、立体音響の優位性をさらに検討する。

3. 2. 1 実験方法

被験者：被験者は20代の正常な視力、聴力を有し、当日の健康状態が良好な工学院大学学生8名(男性6名女性2名)であった。

実験環境と装置：実験環境や装置は実験1と全く同じものを使用し、被験者は眼球運動装置(Tobii Pro Glasses 2[100Hz]⁽¹⁷⁾)を着用した。

刺激：聴覚誘導刺激として実験1と同じ4chによるものを使用した。ただし実験時間を短縮するために刺激の前半1秒を切り取ったものを使用した。誘導条件として、(1)音が移動しない、(2)音がターゲット刺激の呈示される方向に移動するものの2種類用意した(左右は対称であると仮定)。

ターゲット刺激：刺激は実験1と同じ五角形を用意した。五角形を呈示するタイミングは音による誘導刺激が呈示されてから1100ms、1500ms、1900msの3つの条件を用意した。1100msの条件では音が自分の位置から少しだけ誘導方向に動いている状態であり、右前方に誘導する際は図1における3番のスピーカーから出る音が消えた直後である。1500msの条件では、音が自分の位置から音

が右前方に動き、離れていくのを若干感じることできる状態であり、右前方に誘導する際は図 3-1 における 1 番と 4 番のスピーカーから出る音が消える瞬間である。1900ms の条件は音が鳴っているスピーカーは誘導方向にあるスピーカーのみで、さらに音が少しずつ小さくなっているため、誘導方向のさらに奥へ引き込まれていくように感じているときで、図 3-1 における 2 番のスピーカーからのみ音が出ている状況である。

手続き：眼球運動装置を着用しているため、実験を始める前と各休憩時間に眼球運動装置のキャリブレーション作業を行った。それ以外の実験手順は実験 1 と同様とし、試行回数は五角形の表示位置、五角形の種類、誘導条件、ターゲット提示タイミング、実験画面背景をランダムとし一人当たり 192 試行を行った。また、被験者への負担を軽減するために、途中で 1~2 分の休憩を 3 回入れ、実験、休憩、説明を合わせ 25 分要した。

3. 2. 2 実験結果

反応時間計測

左右へ誘導があり、その誘導方向にターゲット刺激が提示された場合の平均時間と、誘導が行われず左右にターゲット刺激が提示された場合の平均反応時間を図 3-6 に示す。また、左右へ誘導があり、中央にターゲット刺激が提示された場合の平均反応時間と、誘導が行われず中央にターゲット刺激が提示された場合の平均反応時間を図 3-7 に示す。棒グラフが誘導時にそれぞれのタイミングでターゲット刺激が提示された際の反応時間の平均であり、青の線が全ての誘導なしの際の反応時間の平均である。各タイミングの誘導ありと誘導なしで対応のある t 検定を行ったところ、中央にターゲット刺激が提示される条件の時はどのタイミングでも有意な差は見られず、左右へ誘導しても中央への注意がそがれないことが確認された。左右にターゲット刺激が提示される条件の時は 1900ms の条件のみ有意な差が見られ $t(7) = -2.7399$, $p < .05$ 、音が提示されてから 1900ms、つまり音が移動を始めてから 1400ms 経った音の変化の終盤の時のみ誘導効果が現れた。

3. 2. 3 考察

2ch 刺激では誘導音が鳴っていないタイミングでターゲット刺激が出た時は誘導効果が確認されなかった(3-6, 7)が、4ch 刺激では実験 1 の結果で示された様に移動が終了後の音が鳴っていないときでも、実験 2 の結果で示された様に音が鳴っている途中でも誘導効果を確認することができた。このように 4ch の誘導音には 2ch の誘導音にはない、奥行き感や引き込まれる感覚が含まれていることの有効性が示唆される。

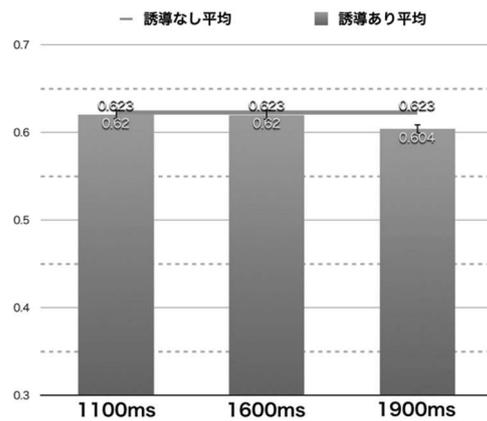


図 3-5 左右にターゲットが提示された際の平均反応時間

眼球運動計測

眼球運動の解析結果は 8 名の被験者のうちの 1 名のみを例として示す。各 Fixation の座標を五角形が提示される前と後に分けて散布図にした。この散布図を見ることによって誘導されているときの目の動きと五角形が提示されてからの目の動きを推定することができる。図の横軸と縦軸は実験画面にマッピング後の位置であり 1019×581 pixel である。

図 3-8 から、誘導有無に関わらず、視点は前方をみ続けていることがわかる。図 3-9 から、視点はターゲット出現後に左右に移動しており、ターゲット提示前は中央を注視し続けていることがわかる。

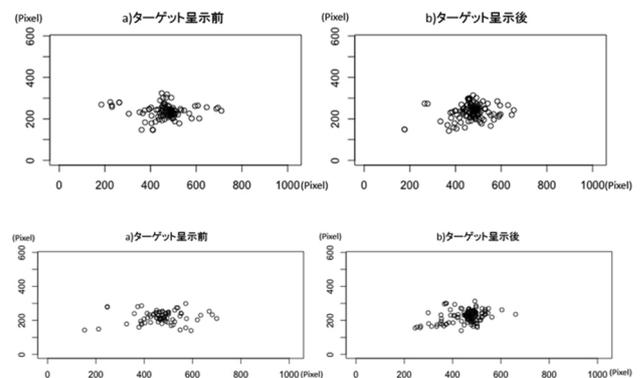


図 3-8 ターゲット中央条件(上：誘導有，下：誘導無)

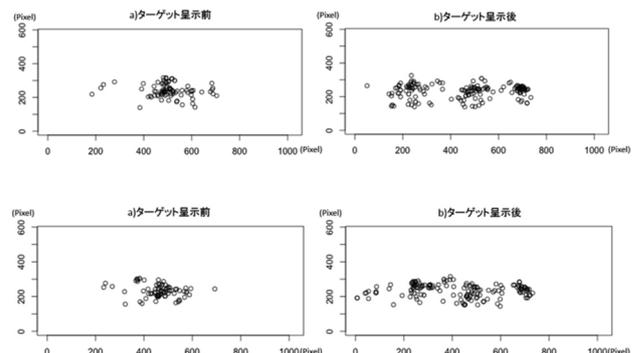


図 3-6 ターゲット左右条件(上：誘導有，下：誘導無)

また、左右に注意誘導した後に、中央にターゲット刺激が出る場合でも、1100ms, 1500ms, 1900ms のすべての条件で中央への反応時間が遅れることはなかった。これは、注意誘導音によって注意誘導されても、正面に対する注意を妨害していないといえる。よって、本誘導刺激によって、中央への注意を妨害せずに、左右への注意の誘導ができたと考える。

今後、離れていくのではなく近づく音を用いて、危険までの距離を運転手に教えるなど誘導の方向だけでなく、奥行きを工夫することによって、誘導刺激の幅が広がると考える。

眼球運動装置の解析の結果から、ターゲット提示前は前方を見続けていることから、視線移動後の反応を早くする準備に誘導効果があるものと考えられる。今後さらに解析、追加実験により、誘導効果が現れる過程も明らかにしていく。

4. 体性感覚フィードバックに関する基礎検討

本プロジェクトでは自動運転時に生じる“望ましい運転状態からの身体的乖離”を迅速に解消するための要素技術として体性感覚フィードバックについて検討している。

本章では、体性感覚による操作ターゲット位置の把握が（重力）加速度方向の変化によってどのような影響を受けるかについて実験によって予備的検討を進めた結果について述べる。

空間内のオブジェクト（ハンドル、レバーなど）に手を伸ばすリーチング時の位置知覚では視覚を利用する場合と体性感覚を利用する場合でズレが生じることが先行研究で知られている^(18,19)。

北川ら⁽¹⁸⁾は、視覚を遮断した実験においてヒトが実際よりも手先位置を身体により近い位置に知覚する傾向があり、多くの被験者でその誤差は数センチメートルに達するという結果を示した。さらに、手先に運動を与えた際の位置知覚についても計測し、運動が能動的であるか受動的であるかに関わらず静止時に比べて運動時に知覚誤差が増大するという結果を得ている⁽¹⁹⁾。

一方で走行する自動車内のように身体全体に加減速が生じている場合に体性感覚による位置知覚がどのような影響を受けるかについてはほとんど検討されていない。北川ら⁽¹⁹⁾では運動時に考えられる誤差要因のひとつとして筋収縮に伴う感覚受容器の信号変化を挙げているが、自動車の走行によって生じる身体に対する加減速条件の変化は同様に位置知覚の誤差を生じさせる可能性がある。

そこで、身体に対する加減速が生じている条件における位置知覚について検討を進める。本年度は、基礎検討として異なる身体姿勢により重力加速度方向を変化させて各条件における位置知覚を計測した。

4. 1 実験

本実験では、被験者の姿勢を立位と仰臥位の2通りとすることで身体に対する重力加速度の方向を変化させ、体

性感覚による位置知覚の変化を調べた。

4. 1. 1 実験方法

実験では被験者4名に対して、立位と仰臥位の2通りの姿勢において身体の上下方向に垂直な面内の16か所に設置した突起のうち隣接する2か所の突起の中央位置をマークする課題を実施した。図4-1（左）に立位、（右）に仰臥位の実験風景を示す。



図4-1（左）立位でのリーチング
（右）仰臥位でのリーチング

4. 1. 2 結果

図4-2に結果を示す。図4-2の赤色は立位、緑色は仰臥位における実験結果を示している。ここにみられるように、立位に比べて仰臥位ではマーク位置がより身体から離れる方向（仰臥位における鉛直上方）になる傾向がみられたものの、その変化は大きくなかった。

4. 1. 3 考察と今後の課題

実験結果から身体に対する重力方向の違いによって体性感覚による位置知覚に変化が生じる可能性が示された。一方で、今回の実験では北川ら^(18,19)が行った視覚遮断のない条件との比較ではなく、視覚は常に遮断し隣接する2か所の突起の中央位置を回答させた。そのため参照する突起との距離は小さく身体からの距離の違いによる変化が生じにくかったと考えられる。この点について実験方法を修正して今後さらに検討を進めていきたい。

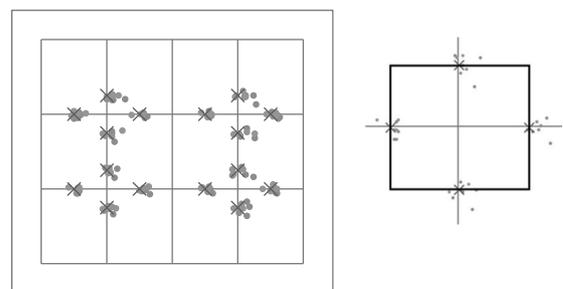


図4-2 実験刺激と実験結果

*図中の1ますは50mm、右の図の正方形の四隅の各頂点の中央を回答させた。

参考文献

- (1) 阪口, 内海, 須佐見, 近藤, 神原, 萩田: 視認推定モデル構築のための視認難易度と視線挙動の関係性分析, HIP 研究会 (2017).
- (2) Sakaguchi, H., Utsumi, A., Susami, K., Kondo, T., Kanbara, M, and Hagita, N. : Analysis of Relationship between Target Visual Cognition Difficulties and Gaze Movements in Visual Search Task, IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (SMC2017) (Oct. 2017) pp. 1423-1428.
- (3) Yuta Inoue, Takuya Tanizawa, Akira Utsumi, Kenji Susami, Tadahisa Kondo, and Kazuhiko Takahashi: Visual Attention Control Using Peripheral Vision Stimulation, IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (SMC2017) (Oct. 2017) pp. 1363-1368,.
- (4) Dolby Laboratories, Inc.: Dolby atmos, <https://www.dolby.com/jp/ja/technologies/dolby-atmos.html>.
- (5) AES Standard: AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering - Serial Multichannel Audio Digital Interface (MADI), AES10-2008 (r2014), Audio Engineering Society (2014).
- (6) 松井 健太郎: 家庭用 22.2 マルチチャンネル音響再生システム, NHK 技研 R&D, No.148 (2014-11) pp. 45-54.
- (7) 西浦 敬信, 山田 武志, 中村 哲, 鹿野 清宏: マイクホーンアレイを用いた CSP 法に基づく複数音源位置推定, 電子情報通信学会論文誌. D-2, J83-D-II (2000) pp. 1713-1721.
- (8) B.C.J ムーア, 大串 健吾: 聴覚心理学概論, 誠信書房 (1994)
- (9) 近藤 公久, 中村 風沙: 音声に含まれる感情情報の注意誘導に対する影響, 信学会ソサイエティ大会 (2015).
- (10) 井上 裕太, 谷澤 拓也, 内海 章, 須佐美 憲史, 近藤 公久, 高橋 和彦: 周辺視刺激による視覚的注意の誘導およびその学習効果の検討, 電子情報通信学会技術研究報告(IEICE technical report) 115(296) (2016) 5-8.
- (11) 谷澤 拓也, 井上 裕太, 内海 章, 須佐美 憲史, 近藤 公久, 和田 健(2016), 運転時における周辺視野への視覚刺激による注意誘導に関する検討, 映像情報メディア学会技術報告 = ITE technical report 40(9),25-28,
- (12) Marcus Tonniss, Gudrun Klinker(2006), Effective Control of a Car Driver's Attention for Visual and Acoustic Guidance towards the Direction of Imminent Dangers, Fifth IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2006, October 22-25.
- (13) 中山 達貴, 中村 俊之, 宇野 伸宏, 山崎 浩気, 山村 啓一(2015), ドライビングシミュレータを利用した赤信号切り替わり情報提供時の車両挙動分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.71,No.5(土木計画学研究・論文集第 32 巻), I_865-I_874.
- (14) 前田 祐希: サイン音の種類による注意誘導効果の違いの検討, 工学院大学卒業論文 (2015).
- (15) 近藤 公久, 鈴木 佑基: 移動する視聴覚刺激による注意誘導効果, 信学会総合大会 (2016).
- (16) 高尾秀伸: 立体音響を用いた車載情報機器の音声ユーザインターフェースの研究, 早稲田大学大学院, 人間科学研究科, 博士学位論文 (2003).
- (17) Tobii Pro Lab User's Manual <https://www.tobii.com/siteassets/tobii-pro/user-manuals/Tobii-Pro-Lab-User-Manual/?v=1.79>
- (18) 北川 哲生, 香川 高弘, 福田 浩士, 宇野 洋二: ヒトの手先位置に関する知覚誤差の解析, 第 18 回生体・生理光学シンポジウム論文集 (2003) pp. 101-102.
- (19) 北川 哲生, 福田 浩士, 福村 直博, 宇野 洋二: ヒトの運動における手先の位置知覚の誤差, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J89-D, No. 6 (2006) pp. 1429-1439.

耳小骨検査の正診率を向上させる検査方法及びデータ解析方法の確立

工学院大学 電気電子工学科 向井 正和

工学院大学 電気電子工学科 鷹野 一朗

工学院大学 電気電子工学科 福岡 豊

工学院大学 電気電子工学科 山崎 貞郎

東京医科大学 耳鼻咽喉科 稲垣 太郎

Study on diagnostic method using neural networks for the lesion of the auditory ossicles

Masakazu Mukai, Department of Electric and Electrical Engineering, Kogakuin University
 Ichiro Takano, Department of Electric and Electrical Engineering, Kogakuin University
 Yutaka Fukuoka, Department of Electric and Electrical Engineering, Kogakuin University
 Sadao Yamazaki, Department of Electric and Electrical Engineering, Kogakuin University
 Taro Inagaki, Otorhinolaryngology, Tokyo Medical University

ABSTRACT : This study considers 2 diagnostic methods. One method is using neural networks for the lesion of the auditory ossicles. The actual precision of the diagnosis of the lesion of the auditory ossicles is about 50%. We propose the diagnostic method to improve the precision. The neural network is constructed by using the MATLAB neural network toolbox. The neural network is tested using the actual data. The other method is to use a state observer for the state estimation. In this year numerical model of the auditory ossicles is derived and simulator is constructed. Further experimental set up is carried out to identify the parameters of the numerical model. For a preparation plastic models of a malleus, an incus, and a stapes are made using a 3D printer.

1. はじめに

社会の高齢化が進む中、加齢による難聴が増加すると考えられ、難聴に関する新しい検査方法が期待されている。Fig. 1のように耳は外耳、中耳、内耳という三つの部位に分類される。また中耳には鼓膜と耳小骨が存在する。耳小骨とは、鼓膜の近くから順にツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨の3つからなる。耳小骨は、鼓膜の振動を増幅させて内耳へと伝える役割を担っている。

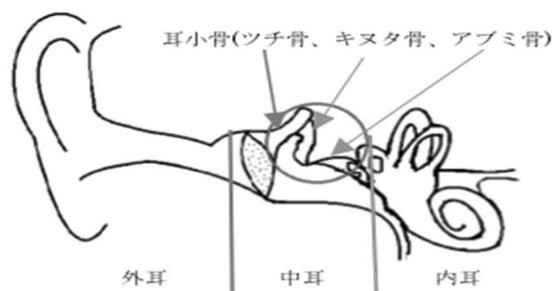


Fig.1 Structure of audio ossicles

鼓膜が正常な場合の、空気振動が十分に内耳に伝わらない伝音難聴では、耳小骨の機能的な状態を知る必要がある。しかし、鼓膜があるため直接診て診断することができない。正しく診断するためには、手術などで切開して直接診断する必要がある。しかし、それは患者に大きな負担がかかるため、患者に負担をかけない耳小骨の診断のために開発されたのが連続周波数ティンパノメトリを用いた検査である (Fig. 2 参照)。

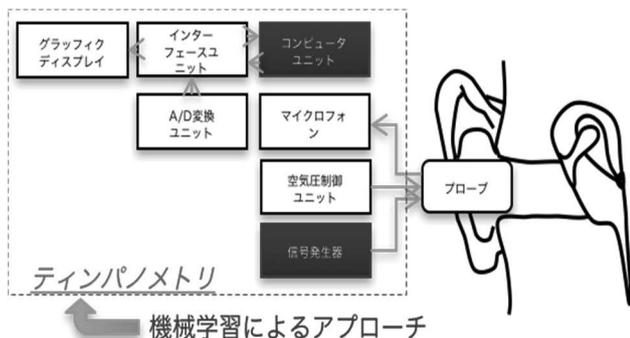


Fig. 2 Tympanometry

この検査では、外耳道を密閉し、圧力をかけ周波数を変化させた際の音圧と位相を測定し、耳小骨の状態を判別する。耳硬化症、ツチ骨前壁癒着、アブミ骨固着などを含む症状を固着と診断する。固着の主な症状としては内耳に振動を伝えている耳小骨が動きにくくなる病気で伝音難聴を起こす。キヌタ骨-アブミ骨離断、キヌタ骨-アブミ骨緩みなどを含む症状を離断と診断する。離断では耳小骨はツチ骨・キヌタ骨・アブミ骨と3つの骨が連鎖しているが、外傷により耳小骨の連鎖が緩みまたは離断し、伝音難聴を起こす。

実際の検査で使用されている連続周波数ティンパノメトリは耳小骨病変(固着・離断)の診断のために開発されたが、その正診率は十分ではなく(約50%)、確定診断には手術(試験的鼓室開放術)を要する。文献としては、連続周波数ティンパノメトリを用いて-200daPa, 0daPa と外耳道圧の圧を一定にし、周波数の連続的变化に対応する音圧、位相差を測定し、診断を行った結果、40例中、離断83%、固着61%という正診率が報告されている^{(1), (2), (3)}。

本研究では、2つの手法を研究する。一つは、ニューラルネットワークを用いた機械学習によって、検査の精度改善を目指す。実際の診断データを用いて、診断精度の比較を行い、効果を確認する。一方は、状態推定器(オブザーバ)を用いて耳小骨の動きを推定することで、異常を検出する手法を検討する。今年度は、数学的モデルの作成を行い、オブザーバの構成を行った。加えて、数学的モデルのパラメータを同定するための実験装置について検討し、実験環境の構築を行った。

2. ニューラルネットワークによるアプローチ

2.1 ニューラルネットワーク

本研究では、Fig.3の層状に並べたユニットが隣接層間でのみ結合した構造をもつニューラルネットワークを用いる。入力層(input layer)、隠れ層または中間層(hidden layer)、出力層(output layer)で構成されている。

本研究では、あらかじめニューラルネットワークに患者データを入力し学習させ、患者の状態判別を行う教師あり学習を行う。

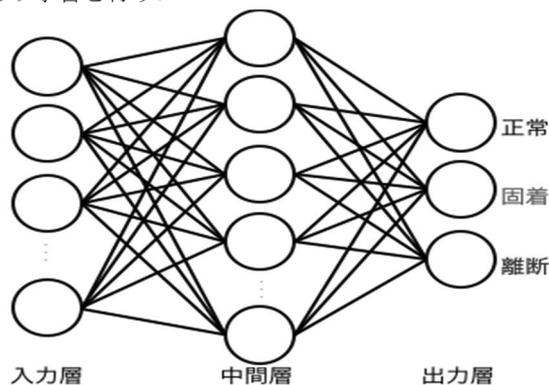


Fig. 3 Neural network.

2.2 方法

本研究では、匿名の患者の検査データを用いて以下の手順で診断を行う。

- ① 患者データは連続周波数ティンパノメトリで得られた音圧、位相曲線である (Fig.4 参照)。この音圧、位相曲線をグラフ数値化ソフト Graphcel を用いて数値化を行う (Fig. 5 参照)。

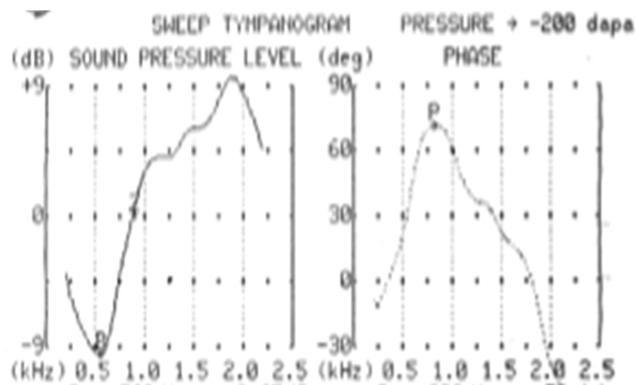


Fig. 4 Data obtained from tympanometry.

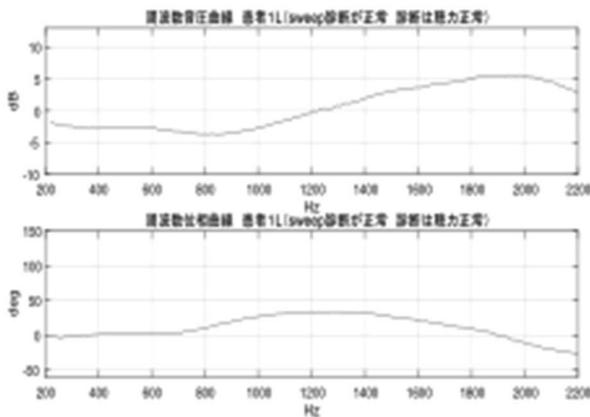


Fig. 5 Captured data.

- ② MATLAB の Neural Network Toolbox⁴⁾を用いて、入力されたデータから、出力として正常、固着、離断の3つを分類するニューラルネットワークを作成する。
- ③ 作成したニューラルネットワークに、数値化した患者データを入力し、正常、固着、離断に分類する。

検証には 45 個の耳のデータを用いる。学習の際、正常、固着、離断のデータを1つずつ除きテストデータセットとする。この組み合わせを 20 通り作成した。学習に用いるデータセット数が少ないため、データ量を 10 倍する。このデータをニューラルネットワークに入力し、学習させる。あらかじめ除いた患者データを学習済みのニューラルネットワークに入力し、出力で正常、固着、離断を判別する。学習ごとに結果バラつきがあるため、5 回検証を行い平均の値を求める。

2.2 使用するデータ

耳の患者データの症状数の内訳は、正常 16 例、固着 20 例、離断 9 例であった。また、ニューラルネットワークに入力するデータセットの次元はつぎのようにする。

- ・音圧曲線をサンプリングし 160 次元にしたデータ
 - ・位相曲線をサンプリングし 200 次元にしたデータ
- 加えて、実際の診断でも使用される次の数値を 5 次元データとして扱う。
- ・最低音圧時の周波数
 - ・最低音圧
 - ・ゲインクロスオーバー周波数
 - ・最大位相時の周波数
 - ・最大位相

2.3 計算機シミュレーション

上記のデータセットを組み合わせて学習とテストに用いた。また、学習時に与えられた学習データセットだけに対してだけでなく、テストデータセットに対する汎化能力をあげるため、ホワイトノイズを付加した。それぞれのデータセットを用いた学習結果を Table1 に示す。

Table1 Results using neural network.

状態 入力次元	正常 [%]	固着 [%]	離断 [%]	全体 [%]
5	56.3	65.5	40.0	56.8
160	56.3	55.5	33.3	51.1
165	65.0	66.0	31.0	54.0
360	72.0	56.0	46.0	58.0
365	79.0	64.0	41.0	61.3
365(noise)	78.0	61.0	45.0	61.3

Table 1 より全ての入力次元での離断の判別率が低いことが分かる。これは学習に用いた離断のデータが正常、固着に比べて少なく学習が十分に行われなかったためと考えられる。全体の判別率としては 365 次元を入力した際の 61.3[%]が高かったが、従来法と同等の診断率並みの結果となっている。しかし正常、固着に注目すると比較的高い精度で判別しており、現場での診断率 50%よりは精度を上げることができている。

3. オブザーバを用いたデータ解析アプローチ

3.1 耳小骨の数学的モデル作成

バネダンパ系を組み合わせた鼓膜・耳小骨の数学的モデルを構築する。耳小骨の、ツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨における変位をそれぞれ x_1, x_2, x_3 とし、それぞれバネ定数、粘性摩擦係数を有する振動系としてモデル化する。状態ベクトル x と入力 u を

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \dot{x}_1(t) \\ x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} \quad u(t) = f(t)$$

とする。ただし、 $f(t)$ は鼓膜から伝わる力である。ここで、状態方程式としてまとめると、

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1/m_1 & -d_1/m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_1/m_2 & -d_1/m_2 & -k_2/m_2 & -d_2/m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k_2/m_3 & -d_2/m_3 & -k_3/m_3 & -d_3/m_3 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

となる。上記の数学的モデルを用いて、計算機シミュレーションを行うと、Fig. 6, 7 のような振動の様子が得られた。

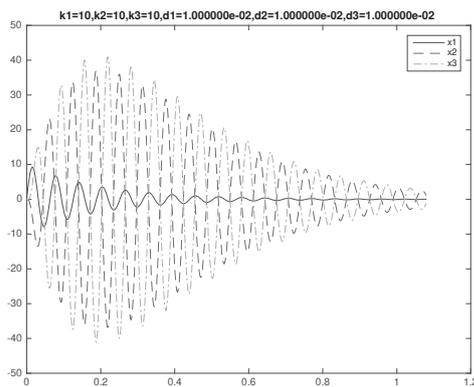


Fig.6 Simulation results.

ここで、バネ定数、粘性摩擦係数のパラメータをそれぞれ変化させることで、様々な振動のパターンを再現できることが確認できた。しかし、適切なパラメータははっきりしていないため、実験結果と照らし合わせながら求める必要がある。

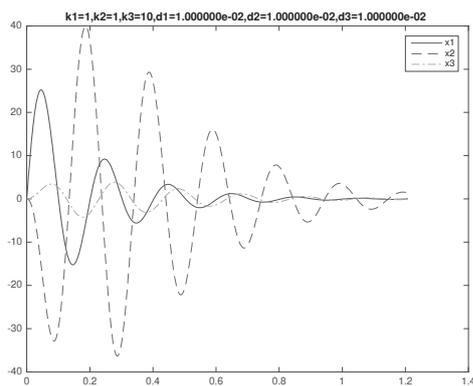


Fig.7 Simulation results.

今後は、山崎准教授作成の亚克力とゴムシートで外耳道と鼓膜を模擬した実験装置の実験結果を用いて、数学的モデルのパラメータ推定を行う。

また、入出力信号の選定として、数学的モデルの入出力について上記実験環境と合わせて検討を行う。まず、大きさと周波数のわかった正弦波を耳に入れることを想定し、大きさ（ゲイン）と鼓膜による時間遅れを表現できるモデルとする必要がある。今年度は、Fig. 8, 9 の構成の Simulink モデルを作成しシミュレーションを行った。

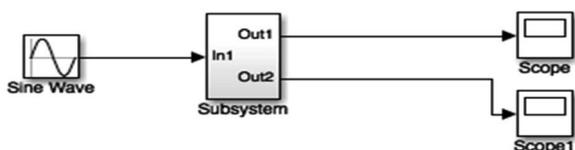


Fig.8 Simulink model.

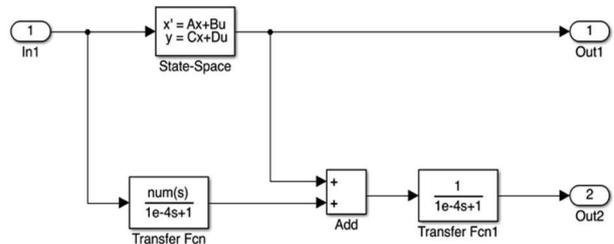


Fig.9 Simulink subsystem model.

3.2 オブザーバの構成

状態推定器（オブザーバ）の構成を考え、数学的モデルを用いて計算機シミュレーションでオブザーバの設計を行った。数学的モデルは線形システムとして、同一次元オブザーバを構成し、推定誤差が収束するように設計することが可能となった。このオブザーバにより、線形システムとして表現した耳小骨の動きを推定できるようになった。ただし、数学的モデルのパラメータが不明であるため、3.1 のモデルのパラメータを同定する必要がある。

実験で人の耳に音波を入れるのは危険が伴うため、模擬的に人の外耳道から耳小骨を再現した実験モデルを作成する必要がある。次の節では、実験環境の構築のために行った内容を示す。

3.3 実験環境の構築

鼓膜と耳小骨を模した実験モデル（模型）を作成するため、耳小骨の3つの骨の3Dデータを作成し、3Dプリンタ (Fig. 10 参照) で模型を作成する。

3Dプリンタは、ある程度高さのある物体を作成できるため Raise3D 社製の N2 Plus⁽⁵⁾ という製品を使用した。頭蓋骨に対して、耳小骨は非常に小さいため、3Dデータは大きさを10倍して作成した。



Fig. 10 Raise3D N2 Plus⁽⁵⁾

作成したアブミ骨，ツチ骨，キヌタ骨をそれぞれ Fig. 11, 12, 13 に示す．アブミ骨は，小さいため色を分けて作成した．



Fig. 11 Model of a stapes



Fig. 12 Model of a malleus



Fig. 13 Model of an incus

以上のように，3D モデリングソフトを導入し耳小骨までの 3D モデルの作成を行なうことができた．今年度は 3D プリンタを選定し，必要なフィラメントなどの材料を揃え，模型の作成が可能な状態となった．



Fig. 14 Model of a cochlea

加えて外耳道から，蝸牛の間までをどのように再現するかを検討し Fig. 14 のような蝸牛を作成した．

今後は，山崎准教授が作成した，鼓膜の実験装置と連動させて，耳小骨の動きが再現できる装置の作成を行う予定である．

4. おわりに

本報告書では2つのアプローチの研究結果を報告した．一つは，ニューラルネットワークを用いて学習を行って，耳小骨の状態を診断するアプローチである．今回使用するニューラルネットワークの作成では，MATLAB/Simulink の Neural Network Toolbox を用いた．結果として，前年度の結果よりも診断率を向上させることに成功した．また，東京医科大で診断した結果と同等の結果となった．

今後は，入力データを増やし診断率の向上を目指す．また，正常な状態のデータを多く集め，異常診断の手法を適用することで，診断率を向上する手法にも取り組んでいきたいと考えている．

一方，状態推定器（オブザーバ）を使用したアプローチに関しては，今年度は数学的モデルの導出を行い，MATLAB/Simulink を用いて計算機シミュレーションを行った．数学的モデルは，バネとダンパからなる 6 次元の振動システムとした．また，パラメータ同定のための実験環境の構築として，実験用モデルの作成を行った．

今後は，同定実験を行うための実験装置を完成させ，パラメータ同定の実験を行う．同定できたパラメータを用いて，状態推定器の設計を行い，推定した状態から固着・離断の診断が行える手法を完成させる予定である．

参考文献

- (1) 船坂宗太郎, 耳小骨病変と連続周波数チンパノメトリー, 第 81 回耳鼻咽喉科臨床学会, No. 3, pp. 313-320, (1988)
- (2) 船井洋光, 熊川孝三, 船坂宗太郎, プローブ音の連続周波数変化および位相計測を導入したインピーダンス検査法, *Audiology Japan*, No. 25, pp.84-89, (1982)
- (3) 船井洋光, 熊川孝三, 船坂宗太郎, プローブ音の連続周波数変化によるチンパノグラム の 3 次元 的再構成, *Audiology Japan*, No. 24, (1981)
- (4) MATLAB Neural Network Toolbox,
<https://jp.mathworks.com/products/neural-network.html>
- (5) Raise3D,
<https://www.raise3d.com/products/raise3d-n2-plus-fff-3d-printer>

Ⅲ族酸化物半導体を用いた深紫外線センサーの開発

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 尾沼猛儀

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 山口智広

工学院大学 先進工学部 応用物理学科 本田徹

Institut Jaume Almera, Spanish National Research Council (CSIC), Spain, Luis Artús
School of Semiconductor and Chemical Engineering, Semiconductor Physics Research Center,
Chonbuk National University, Korea, Jaehee Cho

Development of Deep UV Photosensor using III-VI Oxide Semiconductor

Takeyoshi Onuma, Department of Applied Physics, Kogakuin University

Tomohiro Yamaguchi, Department of Applied Physics, Kogakuin University

Tohru Honda, Department of Applied Physics, Kogakuin University

Luis Artús, Institut Jaume Almera, Spanish National Research Council (CSIC), Spain
Jaehee Cho, School of Semiconductor and Chemical Engineering, Semiconductor Physics Research
Center, Chonbuk National University, Korea

ABSTRACT : Epitaxial growth, fundamental material property, and their correlation with the device performance were consistently studied to realize functional deep UV photosensor using III-VI oxide semiconductor. Conductivity in α -Ga₂O₃ layer was successfully controlled by Sn-doping in the mist chemical vapor phase deposition. By employing undoped layer for the active layer, maximum responsivity of 1 A/W was achieved in metal-semiconductor-metal type solar-blind deep UV photosensor.

1. 背景と目的

波長 300 nm 以下の深紫外線光源は、殺菌・医療、公害物質の高速分解処理などへ応用されている（図1参照）。現状では、水銀灯が主流であるが、エネルギー効率が悪い上に大型の電源も必要になることから使い勝手は決して良いものではない。また、2013年10月10日に熊本県で開催された国連環境計画（UNEP）の外交会議で、水銀汚染防止に向けた国際的な水銀規制「水銀に関する水俣条約」が採択された。2017年8月16日に発効された当条約によって、水銀を使った製品の製造・輸出・輸入が原則禁止となり、水銀使用製品の撤廃に向けた社会的

努力が研究者に求められている。

本研究では、発光デバイスの双璧をなす受光デバイスに焦点を当てる。特に波長 280 nm 以下のセンサーは、地表に届く太陽光には含まれていないためソーラーブラインド検出器と呼ばれる。当該波長の発光は、炎に含まれるため、火災センサーとしての利用が考えられる。また、人体に有害な紫外線検出、オゾンホール観測、発光デバイスの制御回路や、深紫外線通信用の検出器などへの応用も考えられる。

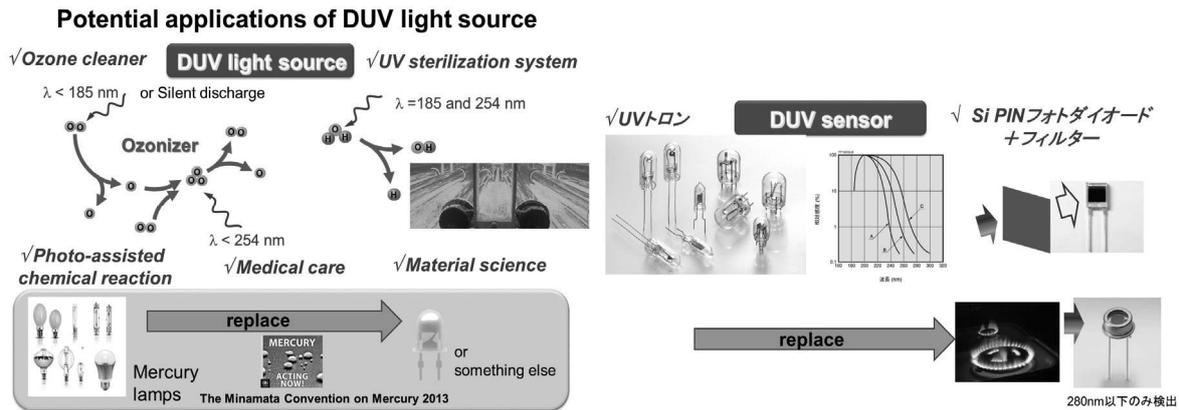


図1 期待される深紫外線デバイスの応用展開

現状の深紫外線センサーは光電子増倍管、UV トロンが主流であるが高電圧電源が必要となり小型化はできない。安価なものとして、Si PIN フォトダイオードとフィルターを組み合わせたものもあるが、感度、応答性が悪い。

代替の第一候補として、III族窒化物半導体系のAlGaNの利用が考えられる。実際、デバイス製作が国内外の機関で盛んに行われている。しかし、AlGaNのAl組成が高くなると、高品質結晶を得るための結晶成長が格段に難しくなり、デバイス特性が劣化する。

そこで、本研究ではIII族酸化物半導体に着目している。Al₂O₃、Ga₂O₃、In₂O₃を中心とするIII族酸化物半導体は、図2に示すように、バンドギャップエネルギー(E_g)が8.5 eV (Al₂O₃)から3.8 eV (In₂O₃)と、紫外線領域に広く分布している。波長300nm以下では、III族窒化物半導体で結晶成長が非常に難しい高Al組成AlGaN混晶が必要となるが、III族酸化物半導体では、バンドギャップ波長が240 nm付近の酸化ガリウム(Ga₂O₃)をベースとしてデバイスを製作できるメリットがある。

Ga₂O₃は5種類の結晶多型をもち、β-Ga₂O₃は融液成長法による大型単結晶基板作製が可能であり、イオン注入による電子濃度制御もできることから、高耐圧、低損失のパワーデバイスを低コスト・低エネルギーで製造できる材料として世界中の研究者から注目を集めている。本

研究で注目するα-Ga₂O₃は、単結晶基板は得られないが、ミスト気相成長(CVD)法を用いることでAl₂O₃からIn₂O₃の全ての混晶組成領域でエピタキシャル成長を行うことができる。ミストCVD法は、安全かつ省エネルギーであり、装置構成が簡素なため、デバイス製造の低コスト化に貢献する成長技術として注目を集めている。

以上のような背景から、本研究では、図3に示す共同研究体制のもとで、以下の項目に関する研究を行うことを目的とする。

- ① Ga₂O₃材料を中心としたIII族酸化物半導体の結晶高品質化
- ② 材料物性情報の乏しいIII族酸化物半導体の基礎物性評価
- ③ 比較として、高Al組成AlGaN材料を中心としたIII族窒化物半導体の結晶高品質化
- ④ III族酸化物半導体を用いた深紫外光センサーの製作とデバイス特性評価。またAlGaN系センサーとの比較

深紫外半導体発光・受光デバイスは図1に示すように非常に大きな市場規模を有している。本研究では、新しい材料であるIII族酸化物半導体材料に着目し、その結晶成長、物性評価、そしてデバイス応用展開までを一貫して行う。

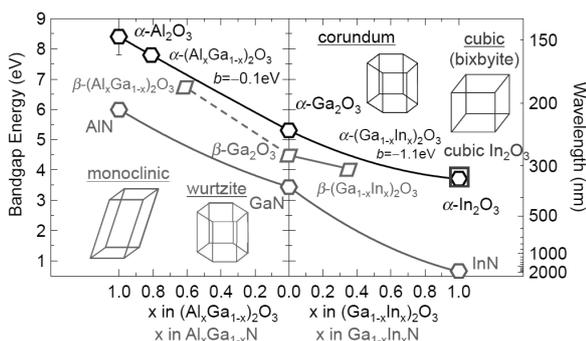


図2 III族酸化物・III族窒化物半導体のバンドギャップエネルギー

III族酸化物半導体を用いた深紫外線センサーの開発

<p>試料の準備・作製</p> <p>○酸化物薄膜成長 (尾沼猛儀, 山口智広(工学院大))</p> <p>○(Al,In,Ga)N窒化物薄膜成長(比較サンプルとして) (本田徹, 山口智広(工学院大), Cho(Chonbuk National University))</p>	<p>結晶評価</p> <p>○結晶構造・光学的特性解析 (尾沼猛儀(工学院大), Artus(CSIC))</p> <p>デバイス製作</p> <p>○デバイスプロセス, デバイス評価 (尾沼猛儀(工学院大))</p>
--	--

図3 本研究課題の共同研究者とその役割

2. 研究成果

目的に掲げた各項目に対し、2017年度に行った研究成果として以下の4項目が挙げられる。

- ① Ga₂O₃ 材料を中心としたⅢ族酸化物半導体の結晶高品質化
- ② 材料物性情報の乏しいⅢ族酸化物半導体の基礎物性評価
- ③ 高Al組成AlGaN材料を中心としたⅢ族窒化物半導体の結晶成長
- ④ Ⅲ族酸化物半導体を用いた深紫外線センサーの製作とデバイス特性評価

以下に、詳細を記述する。

2.1 Ga₂O₃ 材料を中心としたⅢ族酸化物半導体の結晶高品質化

α -Ga₂O₃ 材料を中心としたⅢ族酸化物半導体のミストCVD成長は、山口准教授、大学院生の力武君を主担当として実施した。深紫外線センサーの光吸収層や電極形成を行う上で、キャリア密度は重要なキーパラメータである。そこで、今年度はキャリア密度を制御するため、SnドープGa₂O₃の結晶成長を行った。

Ga(C₂H₃O₂)₃ 粉末を希塩酸溶液に溶解し、0.05 mol L⁻¹のGa溶液を合成した。また、塩化スズ(II)二水和物(SnCl₂·2H₂O)粉末を希塩酸溶液に溶解し、0.05 mol L⁻¹のSn溶液を合成した。Ga溶液にSn溶液を0、0.002、0.01、0.4%と変化させて混合した。原料溶液をミスト発生装置(2.4MHzの超音波振動子)にて霧状にし、N₂キャリアガスにより反応部へ輸送し450°Cで1時間成長した。

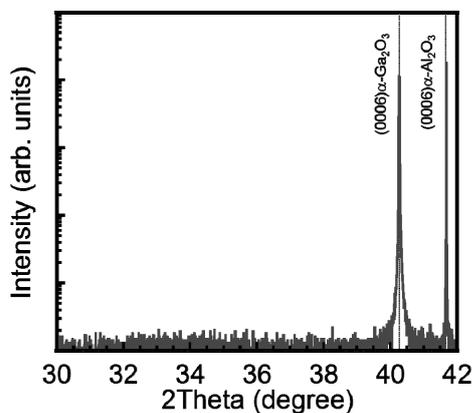


図4 (0001) α -Al₂O₃ 基板上に成長した Ga₂O₃ 薄膜の 2 θ - ω パターン

図4にX線回折の2 θ - ω パターンの代表例を示す。(0006) α -Al₂O₃ 基板からの回折ピークのほかに、(0006) α -Ga₂O₃ からの回折ピークしか観測されず、単相の α -Ga₂O₃ 薄膜が成長できていることが分かる。

室温でホール効果測定を行ったところ、原料Sn濃度が0%と0.002%の薄膜は高抵抗であったが、原料Sn濃度を0.01%に増加させると、抵抗率 $\rho=4.7 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 、ホール移動度 $\mu_H=3.1 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 、キャリア密度 $n=4.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ となり、0.4%では $\rho=1.1 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $\mu_H=2.8 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 、 $n=2.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ となった。原料Sn濃度を変化させることで、キャリア密度の制御に成功した。

2.2 材料物性情報の乏しいⅢ族酸化物半導体の基礎物性評価

深紫外線センサーの構造を設計する上で、屈折率や消衰係数、吸収係数などの光学定数に関する情報は必要不可欠である。そこで、分光エリプソメーターを用い、光学定数の測定を行った。

(0001) α -Al₂O₃ 基板上にミストCVD法により成長した240 nm厚の無添加(0001) α -Ga₂O₃ 薄膜の測定を行った。測定にはJ. A. Woolam社のM2000システムを用いた。測定波長範囲は、245–1700 nm (0.7–5.1 eV)であった。サファイア基板、酸化ガリウム薄膜ともに等方的として解析した。まずバンドギャップ以下の透明領域をCauchyモデルで解析する。次に、Cauchyモデルで求めた透明領域の光学定数を不透明領域に拡張するため、クラマース・クロネツヒの関係式に基づきB-Splineで求めた光学定数に変換する。そして、得られた光学定数をTauc-Lorentzモデルを用いて解析した[1]。

解析より得られた α -Ga₂O₃ 薄膜の屈折率 n 、消衰係数 k 、吸収係数 α の光子エネルギー依存性を、それぞれ図5(a)、図5(b)、図5(c)に示す。Prof. Artus 他分光エリプソメトリ測定の報告[2]では、エリオット-豊沢モデルに基づく解析から5.61 eVと6.44 eVに Γ 点における直接遷移構造を観測している。今回の測定ではエネルギー範囲外なので同様な構造を直接観測することはできなかったが、Tauc-Lorentzモデルにおいて中心エネルギー E_0 を5.6 eVとすることで上手くフィットすることができたことから、5.6 eV付近に同様な直接遷移構造が存在することが示唆された。ただし、得られた遷移エネルギーはこれまでのバンドギャップの報告値である5.3 eVに比べ大きいことから、エネルギー差の発生起因に関しては、今後も継続して調査する必要がある。

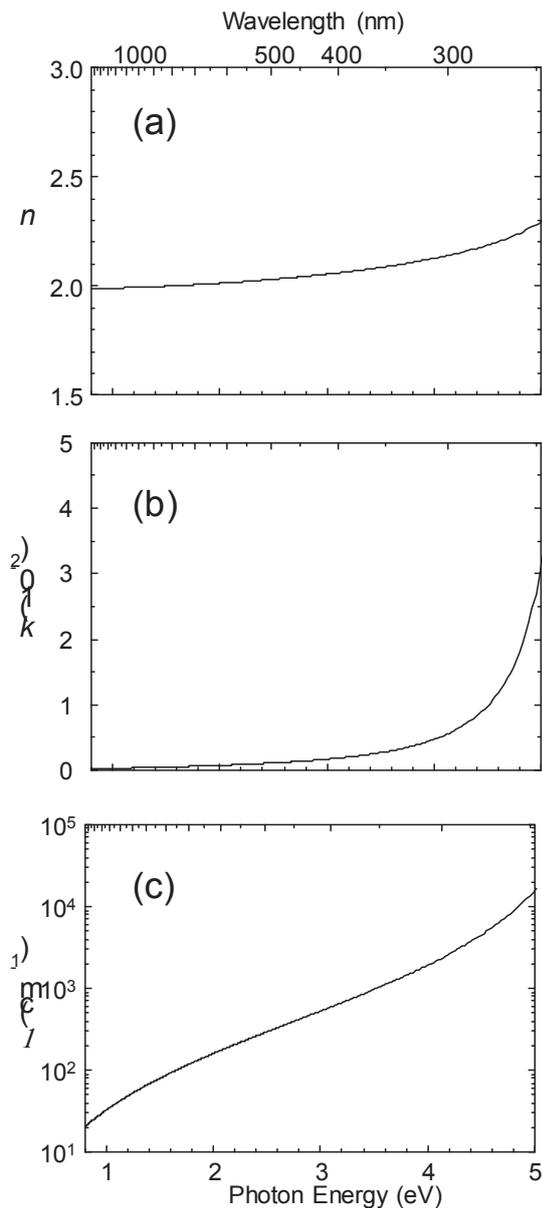


図5 (0001) α -Al₂O₃ 基板上にミスト CVD 法により成長した 240 nm 厚の無添加(0001) α -Ga₂O₃ 薄膜の (a) 屈折率 n 、(b) 消衰係数 k 、(c) 吸収係数 α の光子エネルギー依存性

2.3 高 Al 組成 AlGa_N 材料を中心とした III 族窒化物半導体の結晶成長

分子線エビタキシー (MBE) 法による結晶成長は主に尾沼が担当し、有機金属気相成長法による成長は Dr. Cho が担当している。2017年度は、MBE 装置の成長チャンバー用ターボ分子ポンプの整備、窒素ガスフィルターならびにガス供給のための配管整備を急ピッチで行った。図6に示すように RF プラズマの生成にも成功している。

2018年度は MBE 成長をスタートさせる。また、Dr. Cho との共同研究も継続して推進する予定である。

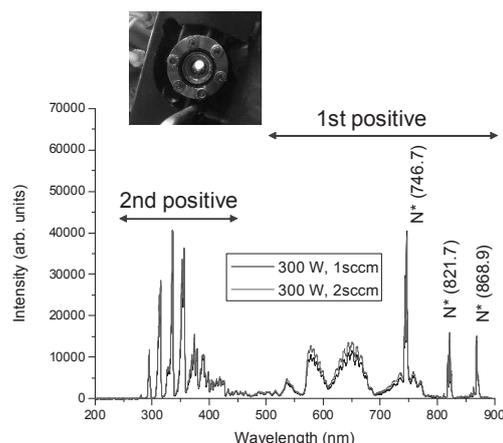


図6 RF プラズマの発光スペクトル

2.4 III 族窒化物半導体を用いた深紫外線センサーの製作とデバイス特性評価

まずはじめに、ミスト CVD 法により (0001) α -Al₂O₃ 基板上へ Sn 添加 α -Ga₂O₃ 薄膜成長を行い、ショットキー型の紫外線センサーを製作した。デバイスの外観写真と受光感度特性を図7に示す。図に示すようにバンドギャップに対応する 5.3 eV 付近から光応答の増加を確認した。しかし、4.2 eV 付近にギャップ内準位に起因する光応答が観測された。受光感度は最大で 5.6×10^{-2} A/W であった。

年度後半には、Metal-Semiconductor-Metal (MSM) 電極蒸着用のメタルマスクを準備し、光吸収層を無添加の α -Ga₂O₃ として MSM 型の紫外線センサーを製作した。デバイスの外観写真と受光感度特性を図8に示す。図に示すように、光応答特性は飛躍的に改善され、ソーラーブラインド検出器の製作に成功した。受光感度は最大で約 1 A/W であった。Pratiyush 他により報告された深紫外線センサーの受光感度と暗電流の関係を図9に示す[3]。今回製作した MSM 型センサーの暗電流は不明であるが、1 A/W は AlGa_N 系の深紫外線センサーの報告値と比べても一桁程度高く、酸化ガリウムが深紫外線センサー用の材料として高いポテンシャルをもつことが分かった。酸化ガリウムで高い受光感度が得られる原因として、ショットキー電極付近での正孔の自己トラップとそれによる実効的な正バイアスがモデル[3]として提案されているが、今後も継続して調査する必要がある。

3. まとめ

III 族窒化物半導体材料に着目し、その結晶成長、物性評価、そしてデバイス応用展開までを一貫して行った。 α -Ga₂O₃ に不純物として Sn を添加することにより、キャリア密度のコントロールが可能となった。分光エリプソ

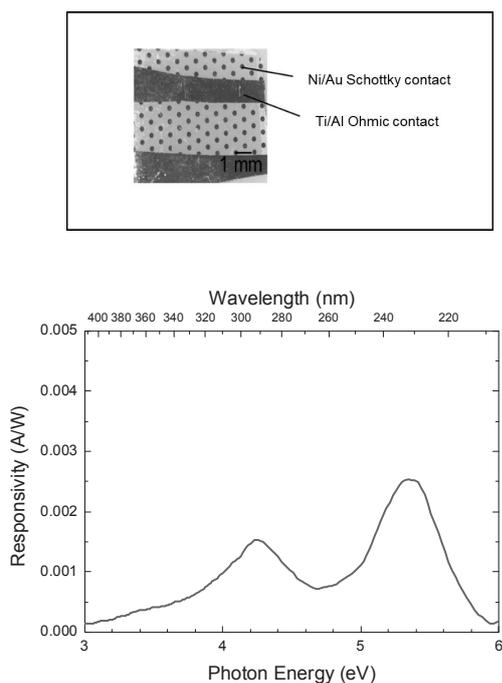


図7 Sn添加 α -Ga₂O₃によるショットキー型深紫外線センサーの外観写真と受光感度特性

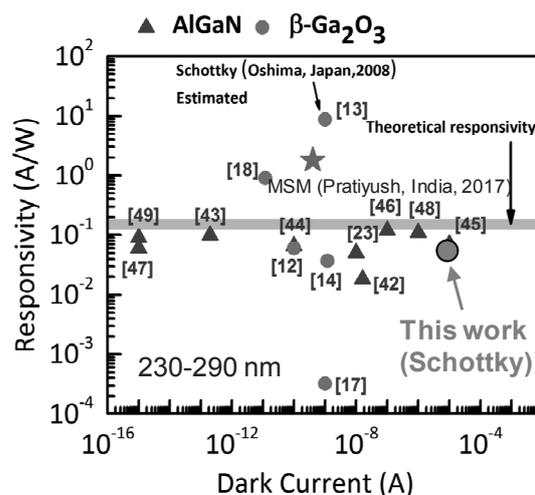


図9 深紫外線センサーの最近の報告[3]

ショットキー型ならびにMSM型の深紫外線センサーを製作した。光吸収層を無添加の α -Ga₂O₃とすることで、光応答特性が飛躍的に向上し、受光感度が最大で約1 A/Wのソーラーブラインド検出器の製作に成功した。

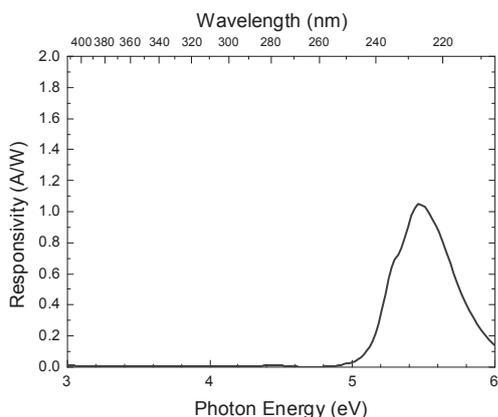
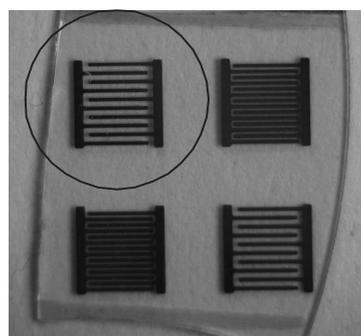


図8 無添加 α -Ga₂O₃薄膜によるMSM型深紫外線センサーの外観写真と受光感度特性

謝辞

ミストCVD成長に関してご助言いただいた京都大学藤田静雄教授、金子健太郎助教および工学院大学佐藤光史教授、永井裕己准教授に深く感謝申し上げます。本研究の一部は、JSPS 科研費JP16H06417、「物質・デバイス領域共同研究拠点」の共同研究プログラム(#20171119)の援助を受けて行われた。

参考文献

- [1] J. A. Woollam Co., Inc., CompleteEASE™ Data Analysis Manual.
- [2] A. Segura, L. Artús, R. Cuscó, R. Goldhahn, and M. Feneberg, Phys. Rev. Mater. 1, 024604 (2017).
- [3] A. S. Pratiyush, S. Krishnamoorthy, S. V. Solanke, Z. Xia, R. Muralidharan, S. Rajan, and D. N. Nath, Appl. Phys. Lett. 110, 221107 (2017).

メーターを用い光学定数を測定した。RF-MBE法によるAlGa_N系窒化物半導体の結晶成長に関しては、成長チャンパー用ターボ分子ポンプの整備、窒素ガスフィルターならびにガス供給のための配管整備を急ピッチで行った。

3. 総合研究所科学研究費採択奨励研究報告 (2017年度)

近代東アジア大衆文学における翻訳ディスクールの様態と 受容をめぐる文化研究

国際キャリア科 教授
吉田 司雄

本研究の目的は、探偵小説や冒険小説など大衆文学の「翻訳」「翻案」に注目することで、従来一国文学史の枠内で考えられてきた東アジア圏の近代文学形成過程を解きほぐし、あわせて西洋文学の影響や模倣といったタームを多用してきた比較文学の方法論を再審に付すことで、文学研究の新たな地平を開拓することである。何より「翻訳」とは原典の意味を正しく伝える透明な入れ物というよりは、人種や言語間の非対称性や不平等と切り離すことができない歴史的な営みなのであり、そこから抵抗や恭順の痕跡を読み解くことで、日本植民地時代の韓国や台湾を始めとする東アジア大衆文化の歴史的文化的位相に新たな照明をあてることができるはずである。以上の問題意識に立ち、これまでも台湾や韓国の研究者と共同研究体制をとってきた。

2017年6月27日から30日にオーストラリア・ニューサウスウェルズ州のウロンゴン大学で開催されたオーストラリア日本研究学会では、韓国・高麗大学校日語日文学科副教授の兪在真、大邱未来大学校産学協力教授の鄭惠英と「アジアにおける翻訳探偵小説のディスクール」という題のパネル発表を行った。学会のテーマは「Debating Democracy in Japan」というものであったが、探偵小説はまさにこのテーマと密接に関わる文学ジャンルであったからである。日本の探偵小説史は明治20年代の黒岩涙香らによる西洋探偵小説や探偵実話の翻案によって始まるが、それは大日本帝国憲法発布（明治22年）、国会開設（明治23年）にあわせ司法権を行使する裁判所が制度化される（明治23年）の同時並行的な出来事であり、それゆえ当時の翻案小説では事件の真相解明のために関係者が法廷（court）という議論（debating）の場へと召喚される形式が多くみられた（例えば、黒岩涙香の最初の翻案探偵小説は、Hugh ConwayのDark Daysを原本とした『法廷の美人』明治21年である）。しかし、裁判場面は探偵小説から徐々に姿を消し始める。真実は異なる立場の人間の議論を経て生まれるものではなく、超越的存在である探偵によってもたらされるものとなる。植民地空間を含む近代日本において、そして日本的な司法システムが整備運用されていく中で、西洋の探偵小説を翻訳翻案することにはどんな意味があったのか。それを問い直すためにも、大変有意義な共同発表と討議の場となった。

そしてその延長線上で、日本学術振興会の二国間交流事業共同研究（平成30～31年度）に採択され、「日韓における翻訳大衆文学のディスクール研究」という研究題目で、兪在真を研究代表者とする韓国の研究チームとの共同研究をスタートすることができた。

災害時のレジリエンスに対応した建築物の維持保全手法の開発

建築学科 教授

田村 雅紀

現在国内では、建物の不燃化を実現した鉄筋コンクリート造建造物が広く普及した状況にある。これらは永きに渡り、都市形成をはじめ幹線交通網を含めたインフラ整備に多大な貢献を果たした。一方で、都心部では当該建物の老朽問題が顕在化しており、国土全般のインフラ構築の時間管理手法を再考する必要性が生じている。このような環境下で、今後、建築物の維持保全手法を高度に習練させていくために、最終的には、平常・災害時を通じ、部材・構造体・仕上材などの品質保証技術を確立することが挙げられ、それは、所有者や使用者に対して、建築物のライフサイクル全体での物理的耐用年数の確保を前提に、予め設定された構造的性能・機能をはじめ、一定期間の住環境品質を保証することを求めている。

以上を踏まえ、本研究では、災害時対応を含め、保有可能なリスクを考慮した新たな維持保全手法の構築に向けた検討を行った。建築物としての本来の役割や目的を確保するために必要な各種の性能・機能に対して、冗長性(Redundancy)、頑強性(Robustness)、回復性(Resilience)などの性質が大きく影響する可能性がある。従って、防・減災活動の段階から、発災後の復旧・復興活動の段階において、平常時と災害時の問題が連続的に生じる段階でも、出来るだけ早急に災害前の平常状態に戻すための技術や、その回復速度を上げるため技術開発について検討を行ない、次なる課題を具体的にすることができた。以下に得られた成果の一部を示す。

1)M. Tamura and S.Sayama, Improvement Effect on Mechanical Prpperties of Cementitious Woodchip Compound Board introducing Stimulating Agent of Sseawater in Disaster Situation for Resilience Measures in Disaster Situation Toward Sustainability, 14th International Conference on Durability of Building Materials and Component, DBMC, Gent, 2017

2)岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治, 津村泰範, 文化財建造物の木摺り漆喰天井における浸透性樹脂を用いた補修工法の実施工検討, 日本建築学会技術報告集, pp. 789-796, Vol. 23, NO. 55, 2017

4)岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治, 歴史的建造物における既存左官天井の非破壊による健全度評価の基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 736 号, pp791-800, 2017

個別端末の特性を考慮したセル拡張による パーソナルピコセル形成手法

情報通信工学科 教授
大塚 裕幸

爆発的に増大したモバイル通信トラフィックを効率的に処理するネットワーク技術として、マクロセルにピコセルをオーバーレイするヘテロジニアスネットワークがある。しかし従来のヘテロジニアスネットワークでは、個々のユーザ端末の通信特性を考慮してピコセルサイズを調整できないため、ユーザ端末の性能劣化を招く、あるいはピコセルを十分に活用できない課題がある。本研究では、個々のユーザ端末の通信特性をもとに個別のパーソナルピコセルを形成する手法を確立し、その手法に基づいたヘテロジニアスネットワークの実現を目的とする。この提案手法により、マクロセル全体のユーザ端末のスループットの向上と、ユーザ端末の省電力化を実現する。

従来の CRE (Cell Range Expansion) では、全ての端末に対してピコ基地局からの受信電力に一定のオフセット値 CSO (Cell Selection Offset) を与える。しかし、一部の端末の通信品質が劣化する、あるいは逆にピコ基地局の無線リソースを十分に活用できない問題がある。本研究では、その問題を解決するために、マクロセル内の全端末の受信 SINR を基準としてそれぞれの端末に対して個別の CSO を設定する手法を提案した。全端末の受信 SINR から個々の端末の CSO を決定する手法を明らかにし、受信 SINR の閾値およびその数、複数の異なる CSO の設定値をパラメータとしてシステム全体のユーザスループットを評価した。

また、マクロセル単位でのピコ基地局への端末の接続比率に応じて、マクロセル毎に CSO を決定する手法を提案した。本研究では、ピコ基地局への端末の接続比率の閾値、その閾値から決まる複数の異なる CSO をパラメータとしてシステム全体のユーザスループットを評価した。

研究成果として、論文「Performance evaluation of adaptive control CRE in HetNet with eICIC scheme」が採録された。また IEEE の国際会議、国内の IEICE 総合大会、研究会等で研究成果の発表を行った。

光化学反応を利用した Cu/CNT 微細配線の形成

応用物理学科 助教

永井 裕己

本研究の目的は、第 5 期科学技術基本計画がめざす超スマート社会に向けた次世代 LSI の駆動に必要な大電流にも対応できるカーボンナノチューブが分散した銅微細配線の光形成を、簡便な化学的湿式法の分子プレカーサー法で試みる。シリコン基板上に回路を多数集積した LSI に代表される半導体デバイスは、現代社会を支えるスマートフォンなどの高度な情報処理機能をもつ電子機器の発展に寄与してきた。現在の配線材料として、主に銅 (Cu) が用いられている。近年は、LSI の高集積化によって、最小線幅 20 nm 以下の微細配線が実現している。しかし、このまま微細化を進めても、配線技術の限界のために、数年後には LSI の性能向上は限界に達すると予測されている。

2013 年に産総研は、電気メッキ法で銅を析出させて、単層カーボンナノチューブと Cu の複合材料を作製した。この複合材料は、Cu と同程度の電気伝導度をもちながら、Cu の 100 倍まで電流を流すことができる。産総研の報告によれば、この複合材料の作製は、Cu を CNT 構造体の内部にまで満遍なく形成する必要がある。

これまでに当研究室は、分子プレカーサー法による銅薄膜形成を報告した。この薄膜形成用の溶液に含まれる銅錯体は特有の d-d 吸収帯と電荷移動吸収帯をもち、特に後者が関わる紫外光領域の低温光照射で化学反応を引き起こすことが期待される。本年度は、先に銅プレカーサー水溶液と CNT 含有銅プレカーサー水溶液の調製を検討した。銅プレカーサー水溶液は、 $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{edta})] \cdot \text{H}_2\text{O}$ とギ酸銅 (II) $\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ とアンモニアとガラスへの塗布性向上を目的にシランカップリング剤を水に混合し、調製した。得られた水溶液に多層カーボンナノチューブ (MWCNT) を混合した Cu/MWCNT プレカーサー水溶液も調製した。これらの溶液をそれぞれガラス基板にスピコート法で塗布・乾燥後、Ar 中で熱処理した。また、熱処理した膜上にガラス基板を静置し、さらに Ar 雰囲気中で熱処理した。得られた薄膜は、MWCNT の添加有無によらず 43.5, 50.5, 74.3° に観測された 3 本の回折線が既知の銅の回折線と一致したことから、それらの回折線は銅の (111), (200), (220) 面と考えられる。形成した薄膜の膜厚は、いずれも 60 nm だった。MWCNT 含有銅薄膜と銅薄膜の電気抵抗率は、それぞれ $9(2) \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$, $8(2) \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ を示した。このように、MWCNT を添加して銅薄膜と同等の電気抵抗率をもつ薄膜を形成した。これらの膜の電気抵抗の温度依存性を Ar 雰囲気中で 200° C まで加熱して調べた。MWCNT 含有銅薄膜の温度変化による電気抵抗は、銅薄膜に比べて一定を示した。以上のことから、MWCNT が分散した銅薄膜の形成を達成した。今後は、MWCNT 含有銅プレカーサー膜に紫外線を照射し、銅薄膜形成とパターンニングを試みる。

3本らせんをとらないコラーゲンポリペプチド鎖の生成と腫瘍

生命化学科 教授
今村 保忠

3本らせんをとらないコラーゲンポリペプチド鎖をNTHとよぶ。NTHは生理的条件下で合成され、血管新生と腫瘍との相関が指摘されている。腫瘍化した細胞がNTHを多量に産生し、血管新生を誘導することで、腫瘍化が促進されるという作業仮説を着想した。本研究では、この仮説の妥当性をin vitroにおいて検証するために、NTHの生合成機構を明らかにし、腫瘍細胞では生合成過程のどの段階に異常があるかを明らかにすることとした。一方で、共培養系などin vitroの血管新生系において、NTHの血管新生誘導作用を立証することを試みた。

以下の成果が得られた:

- (1) NTH α 1(IV)は擬似低酸素条件下で、産生が増強された。また、低酸素誘導因子HIF-1 α の蓄積と相関した。HIF-1 α は腫瘍化に伴う血管新生を誘導すると考えられている転写調節因子である。したがって、NTH α 1(IV)が血管新生に関与する可能性が示唆される。
- (2) 共培養スフェロイドを用いた血管新生の培養系を確立した。血管内皮細胞の作る細胞のネットワークは、管腔を形成し、タイトジャンクションが認められたことから、生体内の微小血管に類似していることを明らかにできた。ネットワークの周囲にはNTH α 1(IV)の沈着が強く認められたことから、(1)の研究の示唆が証明されたと考えられる。これらの成果は論文として投稿する予定である。
- (3) NTHには、IV型コラーゲン由来のもの他に、VI型コラーゲン由来のNTHが存在することを明らかにした。NTH α 1(IV)に特異的な抗体#141は、NTH α 1(VI)をも認識した。両者には、#141抗体が認識する共通配列があった。この研究は論文として発表し、また投稿準備をしている。VI型コラーゲンのNTHも、IV型と同様に、アスコルビン酸により制御された。この知見は、両型のコラーゲンの生合成機構に共通性があることを示しており、新規な知見といえる。
- (4) 擬似低酸素条件下では、生体でもっと多量に存在するI型コラーゲンの性質も変化した。分泌された分子は3本らせん形成は認められたが、変性温度が低い、すなわち安定性の低い可能性が示唆され、組織の安定性に影響することが考えられる。

多彩な光学異方性をもつ酸化ガリウム系混晶半導体の 励起子光物性の解明と機能性の開拓

応用物理学科 准教授
尾沼 猛儀

酸化ガリウムはバンドギャップが GaN や SiC よりも大きく、融液成長法により大型単結晶基板を作製できることから、高耐圧、低損失のパワーデバイスを低コスト・低エネルギーで製造できる材料として注目を集めている。我々はこれまで β -Ga₂O₃ 基板の光学的特性を中心に、その材料物性を調査してきたが、中でも、発光特性は不純物や真性欠陥準位に関する情報やキャリア再結合に関する情報などを得る手法として非常に有用である。これまでに、青色発光強度と抵抗率の相関を見出し、酸素空孔(V_O)が青色発光に関与することを明らかにしてきた[1]。今年度は、Si ドープ基板と窒素ドープされたエピタキシャル薄膜のカソードルミネセンス(CL)スペクトルを観測し、スペクトル形状変化から不純物や真性欠陥準位の振舞いを解析した。

代表例として図に窒素ドープ量の変化に伴う CL スペクトルの変化を示す。窒素が低濃度でドープされた試料[図(a)]では、これまでの報告[1]と同様に、バンド端発光は観測されず、極低温では 3.2~3.6 eV の紫外線発光帯(UVL)、室温付近では 2.5~3.0 eV の青色発光帯(BL)が観測された。一方、高濃度に窒素がドープされた試料[図(b)]では、室温付近での青色発光が抑制され、UVL が支配的に観測された。得られた結果は、窒素ドープによる V_O 濃度の減少を示唆している。 V_O はイオン化エネルギーが 1 eV 程度[2]と大きく活性化率は低いが、ガリウム空孔(V_{Ga})や関連する複合欠陥などのアクセプター型の真性欠陥を補償し、Si などのドナー不純物の活性化に寄与することが報告されている[3]。これに従うと V_O 濃度の減少により、 V_{Ga} などのアクセプター型欠陥が Si などのドナー不純物を補償し高抵抗化することが類推されるが、窒素ドープによる薄膜の高抵抗化[4,5]と矛盾していなかった。

[謝辞] 本研究に際し、酸化ガリウム試料を提供頂いた、情報通信研究機構 東脇正高博士、(株)タムラ製作所 佐々木公平博士に感謝申し上げます。

[参考文献]

[1] T. Onuma *et al.*, APL **103**, 041910 (2013). [2] J. B. Varley *et al.*, APL **97**, 142106 (2010). [3] E. Korhonen *et al.*, APL**106**, 242103 (2015). [4] T. Kamimura *et al.*, IWGO2, Parma, Italy, Sep. 13 (2017), No. O2. [5] M. H. Wong *et al.*, 59th Electronic Materials Conference, Indiana, Jun. 28 (2017), No. A3.

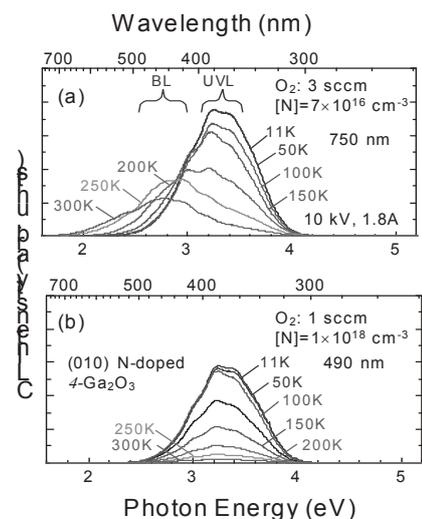


図 窒素ドープ酸化ガリウム薄膜の CL スペクトルの温度依存性.

高速高精度な多関節ロボットの 位置・姿勢・力・モーメントのハイブリッド制御

電気電子工学科 准教授

黄 慶九

多関節ロボットが行う作業には、研磨研削のような対象物との接触を伴う作業が多い。それに対して位置と力のハイブリッド制御の則があるが、作業速度の増大に伴ってロボットの運動が激しく暴走する現象が起こる。本研究の先行研究によって、この現象はいままでのロボットの制御則には自由空間と拘束空間の間に運動速度と関わる運動量と制御入力の相互干渉が存在することが原因であることが判明した。そのため、本研究では多関節ロボットの手先の接触制御において、姿勢成分分離法を提案した上、自由空間と拘束空間の運動量と制御入力の非干渉化を行い、ロボットの力制御の分野として新たな制御則を創出して、多関節ロボットの高速高精度の位置、姿勢、力とモーメントの制御を提案した。また、RPY型6関節ロボットアームのホワイトボードの文字消す動作によって、提案手法の有効性を明らかにした。

上記の研究成果は、多関節ロボットの自由空間と拘束空間のお互いの運動量と制御入力の非干渉化を公式化して、高速高精度な多関節ロボットの接触作業を実現し、ロボットの力制御の分野において独創性かつ学術的な貢献がある。

大規模並列計算機上での高精度演算環境と 高精度演算アルゴリズムの開発

コンピュータ科学科 教授
田中 輝雄

私たち研究グループは高精度演算を用いた(疎)行列を対象とする大規模反復計算ライブラリの実現を目指している。これまで、最新 CPU アクセレータ機構 AVX を有効に利用した倍々精度演算 ツール DD-AVX ライブラリを開発を進めた。本研究では、さらに高い任意精度演算に対する研究を行うことを目的とし、以下の3つの項目を研究課題とした。第1に、高精度計算環境の実現を目指す。第2に、大規模並列計算機上での高速化を目指し、RDMA を用いたノード間通信機構を開発する。第3に、1, 2の機能を含めた数値計算プログラムの自動チューニングを効率よく実現する技術を開発する。第1については、メニーコアの環境での倍々精度演算機能の実現とその性能チューニングを実施した[3][4]。第2については、スーパーコンピュータ FX10 上の RDMA 機能を用いた計算ノード間高性能機能を実現した。第3については、複数の性能パラメタの同時推定を実現した。本研究支援を成果の一部とした発表を以下にリストアップする。

- [1] T. Tanaka, M. Mochizuki, A. Fujii, T. Katagiri, Low Cost Multiple One-dimensional d-Spline Parameter Search for Multiple Performance Parameter Estimation, ATAT in HPSC(2018.3)
- [2] A. Fujii, T. Tanaka, T. Katagiri, Acceleration of sparse linear solvers using RDMA communication on PRIMEHPC FX supercomputer, ATAT in HPSC(2018.3)
- [3] 伊藤, 田中, 藤井, 菱沼, Knights Landing における倍々精度基本演算のハイブリッド並列の特性評価, 情処全大, 2H-05(2018.3).
- [4] 土肥, 田中, 藤井, 菱沼, Intel/KNL における倍々精度疎行列ベクトル積の特性評価, 情処全大, 2H-03(2018.3).
- [5] 関, 望月, 范, 藤井, 田中, 片桐, ソフトウェア自動チューニングにおける反復次元探索による複数性能パラメータ推定法の実装と評価, 情処全大 1H-3(2018.3).
- [6] 三輪, 望月, 藤井, 田中, Latin Hypercube Design の3次元空間への拡張, 情処全大, 1H-01.
- [7] G. Fan, M. Mochizuki, A. Fujii, T. Tanaka, T. Katagiri, D-Spline Performance Tuning Method Flexibly Responsive to Execution Time Perturbation, PPAM2017.
- [8] M. Mochizuki, A. Fujii, T. Tanaka, Fast Multidimensional Performance Parameter Estimation with Multiple One-dimensional d-Spline Parameter Search, iWAPT2017.

可視光水中双方向伝送のための位置ずれ検出

電気電子工学科 教授
前田 幹夫

我々は深海の潜水艇からTV生放送をすることを目指して可視光による映像信号の伝送システムの研究を行っている。これまでの研究で単方向には伝送できる見通しを得ている。生放送では放送局と現場との会話のための双方向の伝送路が必要であるが、双方向化には単方向と比べて高精度な位置ずれ制御が必要なため、装置が大型になるとともに伝送可能な距離が制限されるという課題があった。そこで、本研究では、単方向伝送用に既開発の映像、音声の信号受信用の光受信機に加え、撮影指示のための音声を反対方向に伝送するための光送信機を組み込んだ光モジュールを開発した。

この光モジュールは4つの受光器から構成されていて、到来する光ビームの入射角度が傾くと、発生する受光電力差によってサーボモータを動かし、光を自動追尾する機能を持っている。この光モジュールの中央部に音声信号伝送用のLEDを配置することにより、中継装置から潜水艇に位置ずれ制御をすることなく音声信号を伝送できることを確認することができた。

中継装置や潜水艇が動いても安定に映像信号が伝送できるようにするためには光ビームを中継装置に当て続ける必要があり、位置ずれ検出機能の性能改善が必要であった。これまでの研究で、提案する方法による動作原理は確認されていたが、検出できる距離が数mと短かった。そこで、今回、フレネルレンズとLED変調基板および受光器を組み合わせた光モジュールを潜水艇側の光送信機用に開発した。この光モジュールの特徴は、光中継装置の再帰性反射材から反射してきた光を従来よりも効率的に受光できることが特徴である。この光モジュールを光送信基板の上下左右の4か所に設置し、実験を行ったところ、15m程度まで検出可能な距離を延ばすことができた。位置ずれ検出性能に関する理論解析を行い、実験値と良く一致することを確認した。

提案する位置ずれ検出方法は20MHz程度の正弦波で変調した光信号を用いるため、外来光の影響を受けにくいという利点があるが、一方で、光モジュール内の光送信機と光受信機の位置が近いために、電波として直接混入してしまうというクロストーク妨害が発生するということが試作を通じて明らかになった。そこで、この妨害を軽減する対策を施した受光器を開発し、大きな低減効果を確認した。

これらの成果を映像情報メディア学会で発表し、学生優秀発表賞など、高い評価を受けることができた。

室温プロセスで創製する 高移動度フレキシブル酸化物薄膜トランジスタ

総合研究所 准教授
相川 慎也

酸化物半導体は、室温での成膜にもかかわらず高移動度を示す特異な材料である。しかしながら、さらなる特性向上のために、現行プロセスでは高温熱処理などの過剰プロセスが不可欠となっており、酸化物半導体の室温プロセス可能な特長を活かしきれていない。そのような状況下で、報告者は、自己組織化単分子膜 (SAM) で表面修飾された基板を用いることで、加熱しなくとも薄膜トランジスタ (TFT) の特性向上が可能な結果を独自に見出している。SAM は室温形成が可能であり、酸化物 TFT の特徴を最大限に活用できる。本年度は、SAM による TFT 特性向上のメカニズムを理解することを目的として、キャパシタンス測定による評価を行った。

Fig. 1 に典型的なキャパシタンス測定の結果を示す。(a)が $f = 100$ Hz であり、この場合には SAM なしの方が単位面積あたりの容量が大きい。一方で、(b)に示す $f = 1$ MHz では逆転し、SAM 有りのほうが容量が大きくなった。Fig. 2 に SAM ありおよびなしのキャパシタンスの周波数変化を示す。同図に示すように、SAM 有りでは周波数の増加に伴う容量の現象が SAM なしのとときと比較して遅れて生ずる結果となった。SAM は数 nm と薄いため、容量を大幅に低減させるほどその厚さ効果の影響は大きくない。したがって、この周波数依存性は、SAM の誘電性に由来すると考えられる。すなわち、誘電性による分極の遅延が高周波でのキャパシタンスの違いとして観測されたことに由来する。実際、分極の効果をより明確に確認するため、 150°C 、30 分間の熱処理を行った TFT においては、誘電体材料に特徴的な反時計回りの電流ループ挙動が観測された。アニール前にこのような挙動が観測されなかったのは、基板表面に吸着した水分子か SAM 形成過程での溶媒残渣が残っていたためだと考えられ、それらが揮発可能な 150°C のアニールにて明確な効果が見られている。このような誘電体をゲート絶縁膜として用いた場合、誘電体の分極が半導体との界面での電荷蓄積をエンハンスするために、結果として TFT の ON 電流の増加として観測されたと考えられる。

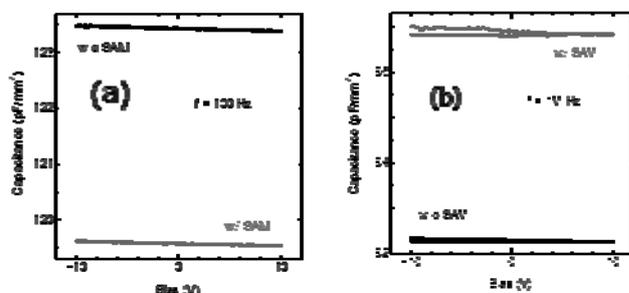


Fig. 1 Capacitance-voltage (CV) characteristics of SAM capacitor with the control sample (without SAM). (a) $f = 100$ Hz. (b) $f = 1$ MHz.

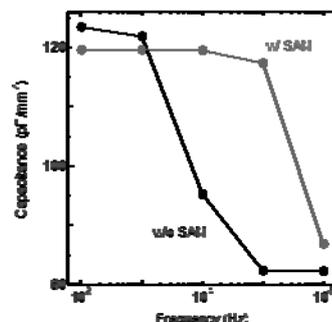


Fig. 2 Capacitance variation as a function of bias frequency both with and without SAM.

蛍光イメージングからの高解像神経活動推定技術の確立

システム数理学科 准教授

竹川 高志

近年、蛍光イメージング装置の性能の向上により、神経回路の理解が大きく向上することが期待されている。イメージングを用いた研究を発展させるためには、大規模な記録データから自動的に細胞の位置とスパイク活動を抽出するセルソーティングの精度を向上させ、高速化する必要がある。実際、ここ数年セルソーティングの手法に関する論文が多数発表されている。その中で、申請者はシンプルなモデルに基づいた汎用性が高い安定的に動作するシステムを構築しており、段階的な改良により高い精度を実現していた。2017年度は、並列計算機や GPU への対応による高速化とパラメータ調整作業を効率化するシステムの開発を行った。

現在、従来の手法では解を得ること自体困難であったデータサイズが 100GB 近い大規模データに対しても、数時間で解析が完了させることができるようになっている。

研究発表

1. Takashi Takekawa, Hirotaka Asai, Noriaki Ohkawa, Masanori Nomoto, Reiko Okubo-Suzuki, Khaled Ghandour, Masaaki Sato, Yasunori Hayashi, Kaoru Inokuchi, Tomoki Fukai, “Automatic sorting system for large calcium imaging data”, bioRxiv, doi: <https://doi.org/10.1101/215145>, 2017.
2. Takashi Takekawa, Noriaki Ohkawa, Kaoru Inokuchi, Tomoki Fukai, “Automatic sorting system for large calcium imaging data”, 9th Optogenetics Research Society Japan International Symposium, Tohoku University, Oct 2017.
3. 塩澤暁広, 竹川高志, スパース最適化を利用した細胞動態解析システム Hotaru の開発, 第31回人工知能学会全国大会, ウィンク愛知, 2017年5月.

イオンビームアシスト低温形成法による炭素薄膜の構造制御

電気電子工学科 教授

鷹野 一朗

炭素の最も基本的な構造は、ダイヤモンド、グラファイトでありその中間的な構造としてアモルファスがある。炭素の3つの構造を同一手法において形成し、その構造を自由に制御することができれば、次世代の材料革命として大きな役割を果たすものと考えている。すなわち、絶縁体、半導体、導電体という電子デバイスの基本を成す性質を全て炭素で賄うことができ、同一の元素で様々な製品が開発可能となれば、終末処理は非常容易となり格段に環境にやさしく、持続可能な社会に大きく貢献する。

科研費申請では、雰囲気ガスに炭化水素を用いたイオンビームアシスト法により、炭素薄膜の構造をグラファイト、ダイヤモンドライクカーボン、ダイヤモンドと制御することを目的とするが、残念ながら小型のイオン源が購入できなかつたため、基礎データ収集として、室温下でイオンビームアシスト法による炭素の形成を行った。また、炭素を主体とした積層膜の作製も目的にしているため、構成膜候補である酸化チタンやポリテトラフルオロエチレンなどについても検討を行った。

研究室ではこれまでイオンビームアシストによる成膜を行っており、いずれも直進型イオンビーム装置を用いた窒素イオンによる作製であり、窒素イオン種の選別 (N^+ , N_2^+) は行ってこなかった。そこで、本研究ではフリーマン型イオン源と 45° の質量分析器を備えたマルチプロセスコーティングを用いた。試料基板には SUS304, Ti, Cu, Al, Si を用い、試料ホルダーに装着した。照射チャンバーには C_2H_2 を導入し圧力を $0.086Pa$ とした中で、差動排気されたビームラインから N^+ イオンビーム照射を基板に対し垂直で行い炭素薄膜を作製し、ミキシング層と炭素薄膜の形成を試みた。イオンビームの電流密度は $2\sim 9\mu A/cm^2$ 、加速電圧は $10kV$ とした。試料の深さ組成分布には、フィールドエミッションオージェマイクロプローブ (JAMP-9500F: 日本電子株) を用い、膜構造はラマン分光計 (NRS-2001: 株堀場製作所) で行った。作製した試料では高エネルギー照射の影響から、膜が極めて薄くなり、ガウス分布となる窒素の注入は確認されたものの炭素膜厚に影響はなかった。今後は成長速度を増すために低エネルギーの照射に切り替え影響を調査する。

研究発表

- 1) 岩崎賢司, 鷹野一朗; イオンビームアシスト法による炭素膜の作製, 平成 29 年度日本材料科学会学術講演大会, 2017/6/26
- 2) 岩崎賢司, 鷹野一朗; 質量分析型イオンビームを用いたイオンアシスト炭素膜の形成, 2017 年真空・表面科学合同講演会, 2017/8/17
- 3) 堀田雄一朗, 鷹野一朗; アセチレン中での N^+ イオンビームアシスト法によるミキシング層の調査, 電気学会東京支部第 8 回学生研究発表会, 2017/9/4
- 4) 岩崎賢司, 鷹野一朗; C_2H_2 を用いた窒素イオンビームアシスト炭素薄膜の形成, 表面技術協会 第 136 回講演大会, 2017/9/14
- 5) Kenji Iwasaki, I. Takano; Carbon Thin Films Prepared by Ion Assistance Carbon Thin Films Prepared by Ion Assistance using the Mass Spectrometer, AVS 64th International Symposium & Exhibition, 2017/11/2

マルチタブレットによる協働支援環境に関する研究

情報通信工学科 准教授

小林 亜樹

家庭やオフィスにおける情報環境において、多数のタブレット端末を協調動作させ、一つの大画面や付箋のように機能させて、多様なコンテンツの表示や操作、会議などの協働作業を支援するシステムの構築に向けて研究を進めている。このような環境がインターネットを介して複数ある場合の遠隔地における協働作業をも視野に入れた構想である。

技術要素としては、同一室内などの単一協働空間内での各端末の識別と位置の認識、協調表示システム、遠隔地間でのコンテンツ検索と流通、に大別される。各分類についてそれぞれ取り組んでいるが、本稿では端末識別認識技術について報告する。

単一協働空間内での多数端末の協調動作のためには、端末の識別と位置の認識、状態の監視が必要である。一般の物体認識技術を流用したり、専用の計測デバイスを用いることもできるが、本システム自体から表示内容を制御できる特性を活かすことで、容易かつ正確な認識ができるものと考えている。センシングには、普及したスマートフォン内蔵カメラによる撮影画像を用いる。本年度は、端末上に表示した画像内容の読み取りがどの程度可能であるかの計測と、奥行き情報の取得合成手法の基礎的検討を行った。

画像内容の読み取り精度では、システム利用状態で利用者に知覚されないように情報を埋め込むため電子透かし技術を用いることとなるが、電子透かしは画像の微小な情報を読み取ることが必要となるため、オフィス環境での読み取りがどの程度可能であるのかを測定した。画素値を直接変更する方式の電子透かし手法により情報を埋め込み、異なる撮影条件による読み取り状況を計測した結果、2m程度の距離と一定の角度内であれば読み取れることがわかったが、一方でより厳しい条件での利用も想定されるため、これら条件変化に耐性のある電子透かし方式の採用などの今後検討していく。

奥行き情報の推定、合成手法では、撮影画像のフォーカス位置が異なる画像列から奥行きを推定するDFF法を用いる。しかし、スマートフォンカメラでは一般にフォーカス位置の移動で画角などの歪み変動するため、これを補償することが必要となる。本年度は最も影響の大きい画角変化を単一パラメータの画角変化率で推定することとし、これを撮影画像列から自動的に推定する手法の基礎的検討を行った。手法では、撮影画像列のエッジの位置変化を別画像に展開し、この上で、画角変化率が直線検出で近似できることを利用した。適当なハイパーパラメータの下で、人による推定値に十分近似できる値を得られることを確認した。今後は、ハイパーパラメータの推定も自動化できるよう進めていく。

適応的操作による映像情報量低減の研究

情報デザイン学科 教授
合志 清一

画像/映像は非定常的情報源であり、物理学のように特定の理論や数学モデルは存在しない。これまで行われてきた画像/映像に関する処理は全て経験やノウハウに基づいた手法であり、全ての画像/映像に万能な手法は存在しない。

本研究では、画像の冗長度を低減するために画像ごとの性質に合致した走査法を研究し、画素の並び替えにより情報量（エントロピー）を低減する手法を求める。画素を並び替えて情報量の少ない画像に変換可能な、可逆型変換対を求める。並び替えにより情報量を低減後、JPEG 等の符号化を行えば、符号化後のファイル容量は減少し、伝送容量は低減する。復号時は JPEG 復号後、逆変換により復元する。変換・逆変換間に非可逆符号化が存在しても、情報量の少ない画像であれば非可逆符号化による情報損失は少ない。本提案は画像の根本的な性質を探求する基礎研究である。研究成果は全ての画像・映像の符号化効率の向上につながる。帯域が圧迫されているモバイル動画配信での帯域有効利用に利用可能なだけでなく、画像・映像の根本的な性質も明示することを目的とした。

本提案の核となる発想は走査、重み付き加重平均である。様々な走査パターンや加重平均式を用いて画像のエントロピー低減を検討する。画像や映像の1フレームは縦・横2軸を持つ2次元情報である。走査とは、2次元情報を1次元情報に並び替えることであり、画素値は一列のベクトルとして定義できる。ベクトル化された画素値の一部分に急峻な変化、すなわち高周波成分を有していても、重み付き加重平均により高周波成分の低減が可能である。高周波成分の低減はローパスフィルタにより可能である。研究のポイントは、このローパスフィルタの逆フィルタが存在するか否かである。画像で使用する一般的なローパスフィルタの逆フィルタはリカーシブフィルタと呼ばれる巡回型のフィルタである。しかし、リカーシブフィルタは処理された画像に尾引きや特定方向の劣化を生じさせる。このため、本研究では有限タップのトランスバーサルフィルタを多数設計し、逆変換を検討した。

複数の画像でシミュレーションを行った結果、条件付きではあるが一定の精度で逆変換が存在することを確認した。本成果は、本年度の画像電子学会で発表予定である。

分子の柔軟性を利用した実験と計算の融合による高機能触媒設計

応用化学科 教授

奥村 和

申請者は Y 型ゼオライトの入口 (0.74 nm) よりも大きな分子 (約 1.0 nm) であるトリフェニルホスフィン (TPP) を Y 型ゼオライトのスーパーケージ中に混合・加熱するだけで直接導入できることを見出した。さらに、これらの試料に Pd を導入した触媒が辻・トロスト反応や菌頭反応に高活性を示すこと、および塩基性の官能基を有する TPP を導入した触媒が塩基触媒として機能することを見出している。一方、量子化学計算などにより、これらの分子が持つ 3 つのベンゼン環がスーパーケージの 12 員環に挿入されることで包接化合物を形成し、特殊な安定構造を形成することが分かった。本研究ではこの発見を新たに展開するために、下記の検討をおこなった。

1. さまざまな構造を有するホスフィン分子の β がゼオライトへの導入様式の解析 :

メチルジフェニルホスフィン (MDP) や TPP のようなサイズの異なるさまざまなホスフィン (P) を β 型ゼオライトに導入し、 β 型ゼオライトの Al 濃度と導入量の関係を調べた。また Y 型ゼオライトとの比較もおこなった。その結果、 β 型ゼオライトではスリムな構造を有する MDP が多く導入されるのに対し、嵩高い TPP の導入量は少なく外表面付近に留まっていることが推察された。対照的に Y 型ゼオライトでは TPP の方が MDP よりも多く導入され、ゼオライトの構造によってホスフィンの取り込まれやすさが異なることが分かった。

2. 触媒反応の実施 :

TPP を β 型ゼオライトに導入し、さらにパラジウム (Pd) を配位させた触媒によって辻・トロスト反応、および菌頭カップリング反応を実施した。Pd を配位させたのちに TPP を再度還流条件下で導入した触媒が高い活性を示すことを見出した。

3. 論文執筆 :

以上の研究をまとめ、論文 (Microporous and Mesoporous Materials 誌) に投稿し、2018 年 4 月 18 日にアクセプトされた。

