

神奈川大学

工学研究所 所報

SCIENCE REPORTS OF
RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING
KANAGAWA UNIVERSITY

NO. **38**

NOV.2015

工学研究所所報第 38 号目次

巻 頭 言

工学研究所について考える…………… 横澤 勉… 1

総 説

天からの無限の恩恵を受け取る— 新型太陽電池および関連材料の研究開発 —
…………… 松木 伸行… 3
マンガンをベースにした酸素貯蔵材料：応用に向けた材料開発と材料テーラリング
…………… 本橋 輝樹… 17

共 同 研 究

小型電気自動車のための CFRP ボディと車両制御の融合技術開発
…………… 林 憲玉、竹村 兼一、山崎 徹、中村 弘毅、加藤木秀章、高山 英一… 22
外部磁界の 2 次元走査による超伝導ジョセフソン接合と
超伝導量子干渉計の電流電圧特性の変調…………… 中山 明芳、阿部 晋、穴田 哲夫… 30
人間はどこまで速く走れるか？-四足走行の挑戦-…………… 宇佐見義之、衣笠 竜太… 39
多光子イオン化過程を利用する新反応開発…………… 岩倉いずみ、赤井 昭二… 45

プロジェクト共同研究

高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発
…………… 許 瑞邦、武田 重喜、穴田 哲夫、平岡 隆晴、陳 春平… 53
高安心超安全交通研究所 (KU-WIRF) の活動…………… 松浦 春樹、森 みどり
堀野 定雄、大和 裕幸、久保 登、石川 博敏、龍 重法、石倉 理有、北島 創… 55
防災まちづくり支援研究センター
…………… 荻本 孝久、大熊 武司、島崎 和司、佐藤 孝治
丸川比佐夫、天国 邦博、栗山 利男、露木 延夫、植山 利昭… 58
地元住民と協力して実施する町づくり研究所の活動を振り返って
…………… 内田 青蔵、重村 力、山家 京子、曾我部昌史
中井 邦夫、小幡 知之、香山 篤美… 60
コンクリート中性化深さ測定における呈色範囲の時間変化に関する研究
…………… 齊藤 隆典、趙 衍剛… 62
“新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発”
…………… 松本 太、池原 飛之、田邊 豊和、片岡 利介… 64
時間-周波数分析を用いたヴァイオリン駒構造振動伝搬モデルの検討
…………… 山崎 徹、中村 弘毅、伊東 圭昌、田中 俊光… 67
多分岐ポリマー系ナノハイブリッド材料の開発と応用
…………… 横澤 勉、池原 飛之、小出 芳弘、山田 保治、花畑 誠、工藤 宏人… 69

直接駆動型ペルチェ素子を用いた DNA 増幅装置の開発	山口 栄雄、鈴木 温、井上 和仁、安積 良隆...	73
刺激応答性材料の開発.....	亀山 敦、石田 良仁、川口 春馬、上田 充...	74
グリーンイノベーションの基盤となるナノ構造制御触媒の開発研究	引地 史郎、内藤 周弉、上田 渉、吉田 暁弘、中澤 順 Shigeo T. Oyama、宮尾 敏広、赤間 弘、星野 真樹...	76
ナノ構造材料合成における水媒体の影響に関する研究.....	金 仁華、齋藤 美和...	78
車両等に装備するためのポリカーボネート窓の表面改質に関する研究	新中 新二、井上 成美、大越 昌幸、野尻 秀智 植田 博臣、岩井 和史、中村 先男...	79
超精密加工による高品位表面の創成に関する研究	中尾 陽一、林 晃生、Sangkee Min...	81
テクノサークル活動報告		
環境科学テクノサークル活動報告.....	井川 学、南齋 勉...	83
映像記録型ドライブレコーダーによる安心安全快適自動車運転サークルの活動	松浦 春樹、堀野 定雄...	85
テクノサークル「けんちくをつくる会」活動報告.....	三笠 友洋...	88
テクノサークル KURAFT 活動報告.....	中村 弘毅...	90
「神奈川大学宇宙ロケット部」活動報告.....	高野 敦...	93
随 想		
神奈川大学に勤務させていただいて.....	伊藤 勝悦...	95
神奈川大学 4 1 年間における光波・電磁波回路の研究.....	穴田 哲夫...	99
ねじ雑感.....	細川 修二...	103
研究雑感 ― 学生時代と最近 3 点.....	松井 正之...	105
なぜか「災害と離島」に深く関わることになった.....	重村 力...	108
春風馬堤の曲を枕に、思いつくまま.....	吉田 稔...	115
年次報告.....		117
神奈川大学工学研究所所報執筆規程.....		122
編集後記.....		127

CONTENTS

Preface

Proposal to Research Institute for Engineering ····· Tsutomu YOKOZAWA ··· 1

Review

Receiving Infinite Benefit from Empyrean: Research and Development of Novel
Photovoltaics and Related Materials ····· Nobuyuki MATSUKI ··· 3
Manganese-Based Oxygen Storage Materials: Materials Development and Tailoring for
Practical Applications ····· Teruki MOTOHASHI ··· 17

Joint Research

Development of Vehicle Control and CFRP Chassis for Micro Electric Vehicles
······ Hun-Ok LIM Kenichi TAKEMURA Toru YAMAZAKI
Hiroki NAKAMURA Hideaki KATOI Eiichi TAKAYAMA ··· 22
Modulation of Current-voltage Characteristics of Superconducting Josephson Junctions and
Superconducting Quantum Interference Devices by Two-dimensional Scanning of External
Magnetic Field ····· Akiyoshi NAKAYAMA Susumu ABE Tetsuo ANADA ··· 30
How fast human can run? a possibility of quadrupedal running
······ Yoshiyuki USAMI Ryuta KINUGASA ··· 39
Development of Novel Reaction using Multiphoton Ionization
······ Izumi IWAKURA Shoji AKAI A ··· 45

Project Research

Construction of high frequency circuit analysis/synthesis theory and development of the
corresponding software ····· Jui-Pang HSU higeki TAKEDA etsuo ANADA
Takaharu HIRAOKA Chun-Ping CHEN ··· 53
Kanagawa University, The Research Institute for Well-Informed and Risk-Free
Transportation ····· Haruki MATSUURA Midori MORI Sadao HORINO
Hiroyuki YAMATO Noboru KUBO Hirotoshi ISHIKAWA
Sigenori RYU Masatomo ISHIKURA Sou KITAJIMA ··· 55
Institutional Center of Regional Constitution Support for Disaster Preparedness
······ Takahisa ENOMOTO Takeshi OHKUMA Kazushi SHIMAZAKI
Koji Sato Hisao MARUKAWA Knihiro AMAKUNI
Toshio KURIYAMA Nobuo TUYUKI Toshiaki UEYAMA ··· 58
On Activity of the Institute for Town Planning to Carry Out in Cooperation with Local
People ····· Seizo UCHIDA Tutomu SHIGEMURA Kyoko YAMAGA
Masashi SOGABE Kyouko YAMAGA Kunio NAKAI
Kazuo NISHI Tomoyuki OBATA Atumi KAYAMA ··· 60
Study on the Coloration Time History of the Concrete Neutralization Measurement
······ Takasuke SAITO Yan-Gang ZHAO ··· 62
“Development of Novel Battery towards New Low Carbon Energy Society”
······ Futoshi MATSUMOTO Takayuki IKAHARA
Toyokazu TANABE Toshiyuki KATAOKA ··· 64
Modelling for Vibration Transmission through Violin Bridge from String to Body by using
Time-Frequency Analysis ····· Toru YAMAZAKI Hiroki NAKAMURA
Yoshiaki ITOH Toshimitsu TANAKA ··· 67

Development and Application of Nano Hybrid Materials from Hyperbranched PolymersTsutomu YOKOZAWA Takayuki IKEHARA Yoshihiro KOIDE Yasuharu YAMADA Makoto HANABATA Hiroto KUDO···	69
Development of direct-current driven DNA amplification system ···Shigeo Yamaguchi Tadzunu Suzuki Kazuhito Inoue Yoshitaka Azumi···	73
Development of stimuli-responsive MaterialsAtsushi KAMEYAMA Yoshihito ISHIDA Haruma KAWAGUCHI Mitsuru UEDA···	74
Development of Nano-structure Controlled Catalysts for Green InnovationShiro HIKICHI Shuichi NAITO Wataru UEDA Akihiro YOSHIDA Jun NAKAZAWA Shigeo T. Oyama Toshihiro MIYAO Hiroshi AKAMA Masaki HOSHINO···	76
Study on Influence of Water in Nanostructure Material SynthesisRen-Hua JIN Miwa SAITO···	78
Study on Surface Reforming of Polycarbonate Windows for VehiclesShinji SHINNAKA Narumi INOUE Masayuki OKOSHI Hidetoshi NOJIRI Hiroomi UEDA Kazufumi IWAI Sakio NAKAMURA···	79
Study on Generation of Advanced Surfaces by means of Ultra-Precision Machining ProcessesYohichi NAKAO Akio HAYASHI Sangkee MIN···	81
Techne Circle Report	
Reports on the Activities of Environmental Science Techno-circleManabu IGAWA Ben NANZAI···	83
Activity of Techno-Circle Study Group on Well-Informed, Risk-Free and Comfortable Car-Driving by Means of An Image-Recording-Type Video Driving RecorderHaruki MATSUURA Sadao HORINO···	85
Reports of Annual works of the Techno Circle “Tsuku-Ken”Tomohiro MIKASA···	88
Activity Reports of the Techno Circle KURAFT Hiroki NAKAMURA···	90
Activity Reports of “Kanagawa University Space Rocket Club”Atsushi TAKANO···	93
Essay	
Memories in Kanagawa University Shouetsu Itou···	95
Study on microwave and light-wave planar circuits for forty-one years at Kanagawa universityTetsuo ANADA···	99
Thoughts of Screw ThreadShuji HOSOKAWA···	103
Researcher’s Essays: Student age vs. Recent-3Masayuki Matsui···	105
I found myself involved deeply in “Disaster and Island”Minoru W. YOSHIDA···	108
Tears in HeavenTsutomu SHIGEMURA···	115
Annual Reports of the Institute	117
Manuscript Submission Instruction	122
Letters from the Editors	127

巻頭言

工学研究所について考える

横澤 勉*

Proposal to Research Institute for Engineering

Tsutomu YOKOZAWA*

私が神奈川大学に着任したのが1991年4月、バブル経済の最後のころである。翌年には工学研究所運営委員を任せ、その半年後に上記タイトルで工学研究所所報を苦しみながら書いた。冊子が手元になくて確認できないが、工学研究所運営委員全員が書かされた様子である。本学着任前は大学の附置研究所に勤務をしていたので、神奈川大学のこともよくわからずに次の3つの疑問点・問題点を挙げた。

- 1) 工学研究所に研究室がない。
- 2) 工学研究所からの発表論文がない。
- 3) 境界領域は学内共同研究で行えるか？

これに対して私は以下の提言をした。

- 1) 工学研究所の建物を作る。
 - 2) 境界領域を専門とする教員を採用して、工学研究所に研究室を設置する。
 - 3) 工学研究所において研究を中心とする大学院教育を行う。
 - 4) 工学部の関与しない独立した研究所とする。
- 今となっては無理な提案をした感がある。

1993年には各運営委員の提案をもとに同内容で座談会が開かれ(出席者:三宅工学部長,濱野工学研究所長,遠藤,寺尾,横澤運営委員,大成(司会)(敬称略)),その記録が工学研究所所報に掲載された。それを見ると私の提案もそれほどずれていたわけではなく、共通認識としては、工学研究所の建物を作り、専任の教員と職員を配置し、研究を中心とした大学院教育を行う、といったまだバブル時代を反映したようなものであった。さらに具体的な提案としては、工学研究所の建物がなくても工学部教員は工学部の研究室において、ある期間、工学研究所の仕事の主として研究に専念する、といったものもあった。

また、工学研究所を産学連携の場として、企業人のリカレント教育や中小企業の技術問題の解決を行うことも提案された。工学研究所の話からはやや離れるが、どの先生も今後大学にとって大学院教育がいかに重要になるかについて熱く語っていた。

さて1992年に提案した23年後の現在、以前の提案を基にもう少し可能性のありそうな提案を考えてみた。

1) 学際領域の産学共同研究の基盤としての工学研究所 現在行われているプロジェクト研究がこれに当てはまるのかもしれないが、研究予算がないことからあまりインセンティブではない。そこで工学研究所からの研究予算および企業からの共同研究費または委託研究費をもとに複数学科の教員と企業研究者からなるプロジェクトを立ち上げる。例えば企業がある研究目的のために大学との包括共同研究契約の申し出があった場合に工学研究所が中心になって工学部教員の専門に基づいて研究者をコーディネートして工学研究所からも予算を付けてプロジェクト化すると研究のアクティビティーおよび神大の工学研究所の知名度が上がると思われる。

2) 大学院生の研究スペースとしての工学研究所 留学生や社会人を含めて大学院生を今よりもっと増やせた場合(これは工学研究科の宿題であるが)、現在の学部生の人数に基づいた研究室では手狭であり、研究を安全に行うのに支障をきたすようになる。その場合に大学院生の多い研究室が使える研究スペースを工学研究所に設置し、利用できるようにする。工学研究所の建物やスペースがないと実現できないことかもしれないが、現在の学部生の人数の1/3でも大学院生が在籍するようになれば、研究の安全上、大学にスペースの要求はできるはずである。

3) 博士後期課程修了者を採用する工学研究所 博士後期課程修了者を工学研究所がポストドクとして採用し、独立した研究を行わせて研究者としてのトレーニングを行わせる。そして次の研究職を目指してもらう。これに

*委員長, 工学研究科
Dean, Graduate School of Engineering

よって工学研究所の研究アクティビティーが高くなるとともに博士後期課程修了者が研究職に従事できる機会が増えるであろう。このような博士後期課程修了者をポストドクとして大学が雇用する制度は、全学の大学院政策委員会でも検討されている。

4) 工学研究所における共同研究の論文発表において、著者の所属を工学部だけではなく、工学研究所との兼任を明記する。これはすぐにでもできることであり、工学研究所のPRのためにぜひ行ってもらいたい。

神奈川大学工学部は、人的資源および研究経費に恵まれた、研究アクティビティーの高い大学として専門家には認められてきた(残念ながら社会一般とは言えないが)。しかしながら大学院生の漸減とともにその特徴である研究アクティビティーも座談会が行われた時と比べると残念ながら低下してきたように思われる。工学研究所を上手に活用したインセンティブなシステムを作り、研究の活性化および大学院の充実化を望む。



天からの無限の恩恵を受け取る

— 新型太陽電池および関連材料の研究開発 —

松木 伸行

Receiving Infinite Benefit from Emyprean:

Research and Development of Novel Photovoltaics and Related Materials

Nobuyuki MATSUKI*

1. 緒言

人類の文明はエネルギーの獲得手段開発とともに発展し、そして、エネルギー資源の獲得を巡って紛争・戦争すら起こってきた。エネルギーの獲得争いが起こる原因は、森林や地下埋蔵化石燃料など従来の主要なエネルギー資源の供給量、埋蔵量が限定されていることに帰着される。特に化石燃料の大量消費は大気中 CO_2 濃度を上昇させ、地球高温化と気候変動を引き起こすとともに硫黄分から発生する SO_x を原因とする酸性雨をもたらし、いまや人類の永続を脅かすほどの地球環境悪化を招いている⁽¹⁾。

地球環境を健全に保ちつつ人類が恒久的に発展・存続していくためには、(1) 地球環境を悪化させることなく (2) 消滅できない廃棄物を排出することなく、かつ (3) 枯渇のおそれのないエネルギーでなければならない。化石燃料エネルギーは(1)~(3)を満たさず、また核分裂原子力エネルギーの場合は(2), (3)を満たすことができない。海水に含まれる三重水素を原料とする核融合エネルギーは(1), (2)を満たし、(3)もほぼ満たすといつてよいが、現在のところ技術的に実現できる目途が立っていない。現在の技術で(1)~(3)を実現可能なエネルギーとしては再生可能エネルギー (Renewable energy) が最も有望である。再生可能エネルギーの主なものとして、太陽光・風力・水力・波力・潮汐力・海流流・バイオマス・地熱が挙げられる。これらは、地熱エネルギーを除き全て太陽から放射されるエネルギーを源として直接的・間接的に発生している。すなわち、太陽は地球上の大気・海洋循環および生命活動を発生・維持させている全てのエネルギー源

となっている。

地球から約 1.5×10^8 km の距離に位置する太陽は、水素・重水素とヘリウム 3 による陽子—陽子連鎖核融合反応によって 5800 K の黒体輻射温度に相当する約 6.2×10^{10} kW/km² もの莫大な表面輻射エネルギーを放出している。太陽光のエネルギー密度は地球の大気圏外直近到達時には面積平均約 1.4 kW/m² であり、大気によりその 30% が宇宙空間へ反射されて最終的に地表・海洋面に到達するエネルギー密度は面積平均約 1.0 kW/m² となる。なお、地表面が受け取るトータル太陽光エネルギー (1.25×10^{14} kW) のうち 47% が地表で熱となり、約 23% が海洋で蓄積される。一方、風・波・海水対流など自然の循環に寄与する割合は約 0.2%、そして生命活動で消費される割合にいたってはわずか 0.02% にすぎない。すなわち、我々人類の文明活動を維持するに余りある膨大な太陽光エネルギーが利用されずに打ち捨てられている、といつてもいいだろう。しかしながら、地表面における 1.0 kW/m² という太陽光エネルギー密度は決して高いとはいえず、また時刻と天候によってその値は常に変動する。したがって、この希薄で不安定な太陽光エネルギーを如何にして効率良く受け取り、最大限に利用するかという点に人類の英知が集約される必要がある。

太陽光エネルギーの利用法としては、太陽光発電・太陽熱発電・太陽熱利用に大別される。太陽光発電は太陽電池により太陽光を直接電気に変換する方式であり、設備が簡便でメンテナンス負荷も低く各家庭にも設備可能である。太陽熱発電は、太陽光を反射鏡によりボイラー塔に集光し、オイルなどの 1 次媒質を加熱してその熱により水から蒸気を生じさせて蒸気タービンを通じて発電する方式であり、特に直達日射量が多い地域に適している。太陽熱利用としては、いわゆる「温水パネル」とし

*准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical, Electric and Information Engineering

て家庭、プール施設、浴場施設などで温水を供給する目的で普及している。

筆者は、これまで太陽光発電に資する太陽電池の効率を向上させるための基礎研究を行ってきた。本稿では、太陽電池の歴史、現状および課題について概説したのちに筆者が進めてきた太陽電池関連研究についてその一部を紹介する。

2. 太陽電池の歴史と現状および課題

2.1 太陽電池の歴史

太陽電池とは、光:photon を電気:(の素である) electron に変換するデバイスである。「光電変換素子」としての開発の歴史は19世紀に遡る。1839年、A. E. Becquerel (ベクレル、仏) は電気分解槽への照射時に起電力が発生するという光化学電池の原理を初めて発見した。1876年にはW. G. Adams と R. E. Day (アダムスとデイ、英) とによってSe (セレン) と金属との接触によって起電力が発生する現象が見出され、これを応用して1883年にはC. E. Fritts (フリッツ、米) がSeに金を蒸着し世界初の無機光電池を開発している(この光電池の光電変換効率は1%程度であるが、1960年代までカメラの露出計など広く利用されてきた)。1900~1940年代には量子力学が著しい発展を遂げ、金属・半導体内の電子状態を解明する固体物性物理の確立へ繋がる礎が築かれた。その流れの中で、1941年には米国Bell研究所のR. S. Ohl (オール、米) によってSi p-n 接合太陽電池が提案され基本特許が取得された。1947年には同研究所のW. Shockley, J. Bardeen, W. Brattain (ショックレイ、バーディーン、ブラッテン、米) によって初めて点接触型トランジスタが発明され、金属-半導体接合のみならず半導体 p-n 接合に対する理論的な考察も行われた。そして1954年、ベル研究所のG. Pearson, D. Chapin, C. Fuller (ピアソン、シャピン、フラウ、米) によりSi p-n 接合太陽電池が実証された(変換効率約4%)²⁾。翌年には早くも日本電気中央研究所の林一雄博士らにより変換効率6~8%のSi p-n 接合太陽電池が再現実証されている。

2.2 太陽電池に必要な4大機能

さて、太陽電池の変換効率は以下に示す4つの機能により規定される。それぞれの機能に対して、それらを増強させるための対応技術も併記する。

1. 光の導入と閉じ込め(表面反射の低減と実効光路長の増大): 反射防止膜・テクスチャ構造
2. 半導体での電荷(電子・正孔)生成: 低欠陥材料開発・複数のバンドギャップ材料による複層(タ

ンデム)化

3. 生成した電荷の分離: p-n 接合やショットキー接合による内部電界の形成・バンドオフセット構造による逆方向飽和電流の低減
4. 分離した電荷の外部への取り出し: 良好なオーミック接触

上記の機能が全て引き出されることにより、太陽電池が最高効率を達成することができる。しかし、1つの機能でも不十分な場合、理想的な特性を得ることができない。太陽電池の高効率化は、機能が不全な部分の解明と、機能を強化する要素技術の開発を併進することによって達成される。

2.3 各種太陽電池の発展と課題

表1に、現在実用化されている、または実用化が期待され研究発展段階にある太陽電池を材料の分類に従って系統的に示した。変換効率は文献(3)に拠る。

結晶シリコン(Si)太陽電池:

Si p-n 接合太陽電池は、上記の各機能に関する改良を進めることで徐々に変換効率を向上させてきた。1954年の発明時に4%であった変換効率は45年かけて25%まで向上した。1960年代以降、単結晶Siの精錬技術が向上し、重金属含有量や転位密度の低下によりバルクのキャリア寿命が増大するのに伴い、表面キャリア再結合が太陽電池効率向上のための律速となってきた。そこで、表面キャリア再結合を低減させるための「パッシベーション(不活性化)」⁴⁾技術開発へ研究の基軸がシフトしていった。パッシベーションには、Si表面の未結合手(ダングリングボンド)を終端しミッドギャップに形成される欠陥準位密度を低減させ、また、表面近傍にバンドベンディングによる内部電界を形成しキャリアを欠陥リッチな表面に寄せ付けないようにする、という2つの効果が含まれる。このパッシベーションは、Si表面に熱酸化膜、 $a\text{-Si}_x\text{N}_x\text{H}$ (アモルファス窒化シリコン)膜、 $a\text{-Si:H}$ (水素化アモルファスシリコン)膜などを製膜することにより実施されてきた。このなかでも、特に10nm厚の極薄膜 $a\text{-Si:H}$ をパッシベーション膜とした太陽電池は $a\text{-Si:H/c-Si}$ ヘテロ接合太陽電池とよばれており、三洋電機(株)(現:パナソニック)によって1990年代から開発が始められ、2014年に世界最高効率の25.6%を達成した⁵⁾。Si p-n 接合太陽電池の理論効率限界は30%と予想されており、前述の太陽電池に必要な各機能が限界近くまで引き出されているといえよう。

単結晶Siよりも安価に大量生産できる多結晶Siを用

いた Si p-n 太陽電池は結晶内に存在する粒界欠陥によって宿命的にキャリア寿命が低下し最高変換効率も 20.4% と単結晶 Si 系に比べて低い値ではあるが、現在実質的に市場で最もシェアの高い太陽電池となっている。

GaAs 太陽電池：

Si が間接遷移型半導体であり直接遷移型の GaAs などと比較すると光吸収係数が低いものの太陽電池としてのシェアがもっとも高い理由は Si の豊富さにあり、低コスト化のポテンシャルが高いという点にある。しかしながら、Si p-n 太陽電池は高エネルギー粒子照射、すなわち宇宙放射線被曝により空孔欠陥が発生し著しく特性劣化するため、人工衛星・宇宙船の電源として適していないことが、宇宙開発の進展に伴って明らかになった。そこで、宇宙用電源としての GaAs による太陽電池開発が、民生用とは別の路線で（すなわち低コスト化は考慮されずに）、ひたすら高効率を目指して極めて欠陥の少ない結晶薄膜が作製可能な分子線エピタキシー法による開発が行われてきた。その結果、GaAs 系太陽電池の 5 接合セル（有効面積：1 cm²）で現在太陽電池の中で最高効率である 38.8% が達成されている。

薄膜太陽電池：

Si や GaAs のバルク太陽電池では、材料の使用量が太陽電池に本来必要な量以上に多く、生産量の増大に伴って材料資源が不足・枯渇する懸念も考えられた。そこで、単結晶半導体に代わる省材料・低コスト化を指向した薄膜半導体材料による「薄膜太陽電池」の開発も CdS 薄膜太陽電池の登場⁶⁾ (1954 年) を端緒として行われてきた。

II-VI 族半導体である CdTe は、バンドギャップが 1.5 eV で太陽光スペクトルとの整合性が非常に良く、また、可視光領域において $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 以上の高い光吸収係数を有するため早くから太陽電池材料として着目されていた。

1960 年、単結晶 CdTe 上に半透明金属膜を堆積した CdTe 太陽電池が発表され、1969 年にはじめて薄膜による CdS/CdTe 太陽電池が開発された。Cd, Te は人体に有毒な物質であり、特に日本では Cd 汚染による公害病の記憶により忌避感情が存在する。松下電池工業は 2000 年まで CdTe 太陽電池の開発を進めてきたが、前述の理由により事業化は難しいと判断され中止した。一方、米国 First Solar 社は使用済み太陽電池の自社回収制度などの整備によって CdTe 太陽電池の事業化を拡大しつつ開発を継続し、2014 年には 17.5% のモジュール変換効率を達成している。1974 年、Wagner らは CuInSe (CIS) を CdS と組み合わせることにより変換効率 12% の薄膜太陽電池を開発し、これは現在 CuInGaSe (CIGS 太陽電池) として実用化するに至っている。

1975 年、Spear と LeComber らにより a-Si:H (水素化アモルファスシリコン) への置換ドーピングが成功すると⁷⁾、翌年には Carlson らにより a-Si:H 太陽電池が開発された。「薄膜シリコン太陽電池」の誕生である。1973 年の石油ショック後に通産省工業技術院 (当時) により策定されたサンシャイン計画の一環では薄膜シリコン太陽電池が次世代太陽電池になると見込んで開発ターゲットとされた。しかし、40 年余りにもわたる国内外の基礎研究にもかかわらず、ランダムネットワークでの物性において未だ解明や制御ができない点が多い。このことが障壁となり、a-Si:H における光劣化現象 (Staebler-Wronski effect) ともいわれる：光照射によって特性が劣化し、150 °C 程度の加熱アニールによって回復する可逆的現象) は未解決であり、また太陽電池緒変換効率が 10% 程度で結晶 Si 系太陽電池と比較して低止まりとなっている。このような弱点があるものの、a-Si:H は極めて均質に大面積の半導体薄膜を安価に形成できるという大きな利点があり、電力供給用太陽電池としてよりも液晶ディスプレイ

表 1 各種太陽電池の分類

太陽電池の材料・形式		開発段階	小面積最高効率 ⁽⁴⁾ (%)	モジュール最高効率 ⁽³⁾ (%)
バルク太陽電池	単結晶 Si	実用化済	25.6	22.9
	多結晶 Si		20.8	18.5
	III-V 族化合物 (GaAs, InP)		38.8	24.1
無機系	多結晶薄膜 Si	試験段階	21.2	-
	水素化アモルファス Si (a-Si:H)	実用化済	10.2	-
	微結晶 Si ($\mu\text{c-Si}$)	試験段階	11.8	-
	a-Si:H/ $\mu\text{c-Si}$ タンデム	実用化済	13.6	12.3
薄膜太陽電池	II-VI 族化合物系 (CdTe)	実用化済	21.0	17.5
	カルコパイライト系 (Cu-In, Ga)-(S, Se)	実用化済	21.0	17.5
有機系	色素増感		11.9	8.8
	有機半導体	試験段階	11.0	8.7
有機無機ハイブリッド (ペロブスカイト)			15.0	-

を駆動する薄膜トランジスタ用の材料として工業的に発展を遂げた。また、 $a\text{-Si:H}$ は薄膜太陽電池の発電層材料としては現在のところ他の薄膜太陽電池用無機材料を凌駕する優れた物性を得られていないが、前述のように $a\text{-Si:H/c-Si}$ ヘテロ接合太陽電池への適用、すなわち、結晶 Si 表面のバッシペーション層として非常に優れた物性を発揮することがわかった。この経緯から、 $a\text{-Si:H}$ は「過去の材料」ではなく今後もより詳細に研究していくべき材料として再認識されつつある。

1980年代から、有機半導体とその応用電子デバイスに関する研究は盛んになった。当然のことながら太陽電池への応用も検討され、1986年には Tang らによって初めて有機薄膜太陽電池が実証された。有機半導体はキャリアの拡散距離が極めて小さく nm オーダーであるため、通常の p-n 接合構造ではキャリア分離と収集の効率が極めて低い。この問題を改善するアイデアとして、1995年に A. J. Heeger らによって p 層と n 層が互いに複雑に混合し侵入しあった「バルクヘテロ接合構造」が提案され⁶⁾、変換効率飛躍的に向上した。その後も有機半導体自体の開発が精力的に続けられ、2015年現在では東芝(株)により変換効率 11.0%が達成されている⁹⁾。

近年、薄膜太陽電池材料の中で新星のごとく現われ注目されているのは、ハロゲン化メチルアンモニウム鉛 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, X=I, Br, Cl) で有機無機複合ペロブスカイト(以下、ペロブスカイト)とも呼ばれるイオン結晶から成る薄膜材料である。同ペロブスカイトの最大の特徴は簡便で低コストの溶液塗布プロセスにより作製可能であるという点と、1 V を超える高い開放電圧が得られるというところにある。同ペロブスカイトは 1990 年代より非線形光学特性や量子閉じ込め効果を示す発光材料として研究されていたが、2006 年、桐蔭横浜大学 宮坂力教授の研究グループが色素増感型太陽電池の増感材料として用い、初めて太陽電池材料としての適用を提案・実証した^{10, 11)}。その後、同研究グループはオックスフォード大学の H. J. Snaith 博士の研究グループと共同研究を行った結果、ペロブスカイトを溶解させ特性劣化を引き起こす原因にもなっていた電解液を廃して固体の有機正孔輸送材料 Spiro-OMeTAD に置き換えることにより、有機無機ハイブリッド型太陽電池では 2012 年当時最高効率の 10.9%を達成した¹²⁾。この時点から国内外でのペロブスカイト型太陽電池研究開発フィーバーが始まり、現在までに変換効率 20.1%が達成されている¹³⁾。ペロブスカイトの光学的バンドギャップは 1.55-1.60 eV で光吸収端波長は約 800 nm であるので、光吸収端がより長波長にある Si (同約 1100 nm) や CIGS (同約 1200 nm) とのタン

デム化によってより高効率化が可能であると考えられており、Si とペロブスカイトとのタンデム化による太陽電池の理論限界効率は 29.8-35.0%と推算されている¹⁴⁾。このように、ペロブスカイト太陽電池は簡便なプロセスで高効率のものが得られるという特長がある一方、大気中の酸素や水分への曝露により著しく特性劣化を起こすという決定的な弱点があり、これはまだ解決されていない。 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ の有機基を疎水性の高いものへ置き換えることによって耐久性を向上させたという報告もあり、今後の発展と改善が最も期待されている太陽電池のひとつである。

3. 太陽電池および太陽電池材料開発への取り組み

筆者は、太陽電池に関連する研究として、以下のテーマについて取り組んできた。

I. 新型太陽電池の開発

- I-1. 電界効果型アモルファスシリコン太陽電池⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁹⁾
- I-2. 水分解太陽電池^(20,21)
- I-3. 透明導電性高分子と III-V 族窒化物とのヘテロ接合による新型ショットキー太陽電池⁽²²⁾⁻⁽²⁸⁾

II. 太陽電池関連材料の開発

- II-1. アモルファスシリコンの新規製膜法^(29,30)
- II-2. フレキシブル結晶基板における III-V 族窒化物薄膜のヘテロエピタキシャル成長⁽³¹⁾

III. 太陽電池関連材料の評価技術開発

- III-1. レーザー結晶化薄膜多結晶シリコンにおける粒界電気特性の計測⁽³²⁾⁻⁽³³⁾
- III-2. アモルファスシリコン/単結晶シリコンヘテロ接合太陽電池の構造・物性評価⁽³⁴⁾⁻⁽³⁷⁾

本稿では、I-1.の電界効果型アモルファスシリコン太陽電池の開発⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁹⁾と III-2.アモルファスシリコン/単結晶シリコンヘテロ接合太陽電池の構造・物性評価⁽³⁵⁾⁻⁽³⁷⁾について

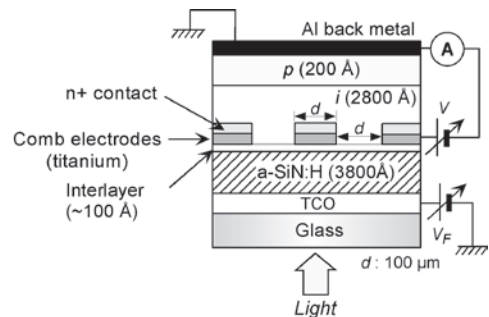


図1 電界効果型 $a\text{-Si:H}$ 太陽電池 (FESC) の構造

て取り上げ、その研究内容の一端を紹介する。

4. 電界効果型アモルファスシリコン太陽電池の開発

4.1 電界効果型アモルファスシリコン太陽電池の概念

電界効果型太陽電池 (Field-Effect Solar Cell: FESC) は、絶縁または強誘電体によるゲート構造を有する太陽電池であり、電界効果によって強制的に光生成キャリアの分離を促進することで、水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) 内のキャリア再結合確率と劣化率を抑制することで変換効率向上を図るために提案された⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁹⁾。図1に、検討された FESC の構造を示す。

4.2 FESC の作製プロセスとデバイス特性

この構造を真空中でマスクを使って一貫して形成するため、図2に示すプロセスフローを検討した。このプロセスでは、a-Si:H の堆積手法としては化学気相堆積 (CVD)、そして楕形電極や金属電極の堆積手法としてはパルスレーザー堆積 (PLD) を用いることとした。これを実現するため、図3に示すような2台の CVD と1

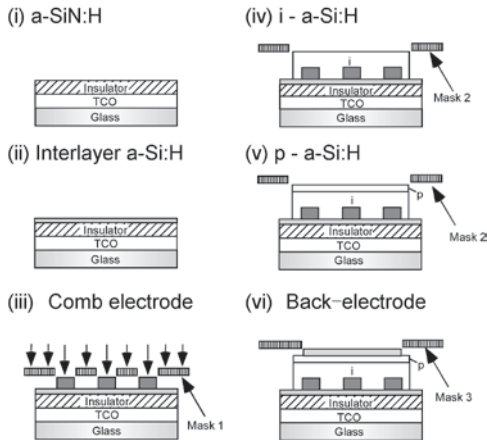


図2 FESC の作製プロセス。製膜する材料ごとに (i)~(vi)のステップを示している。

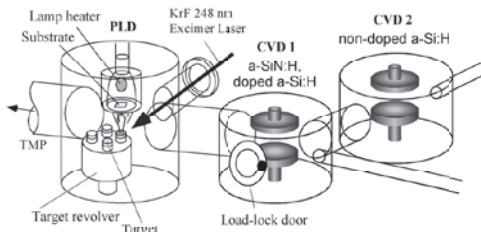


図3 FESC を作製するための複合薄膜堆積システム (コンビナトリアルデバイスプロセスシステム)

台の PLD がゲートバルブを介して接続された複合薄膜

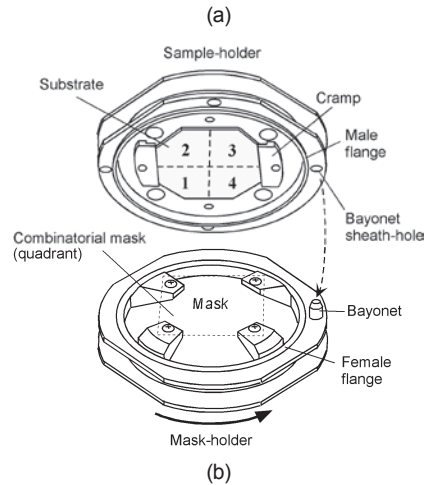
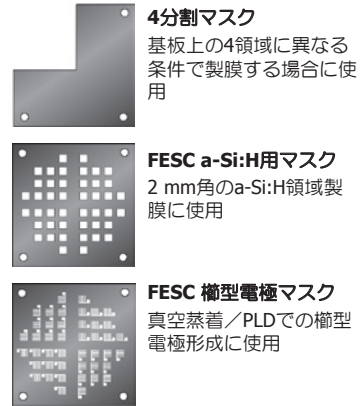


図4 (a)コンビナトリアルマスク および (b)コンビナトリアルマスクホルダー

堆積システムを構築した^(17, 18)。この複合薄膜堆積システムは、真空中で図4(a)に示すような4分割マスク、a-Si:H用マスク、楕形電極マスクを交換することによって、外部に基板を取り出すことなく連続して図2で示した作製プロセスを行えるようになっている。このプロセスを可能にするのが図4(b)で示したコンビナトリアルマスクホルダーである。このホルダーは、試料を輸送する試料ホルダー部分と、マスクを交換・輸送するマスクホルダーが嵌合する構造となっており、さらに回転方向がバヨネット (ガイドピン) で規定されるようになっている。その結果、試料に対して数 10 μm 以内の精度でマスク合わせを行なうことが可能である。上記のシステムによって、1回の実験で4つの異なる条件、44個のFESCセルを作製できる。前述の複合薄膜堆積装置とコンビナトリアルマスクホルダーを総合してコンビナトリアルデバイスプ

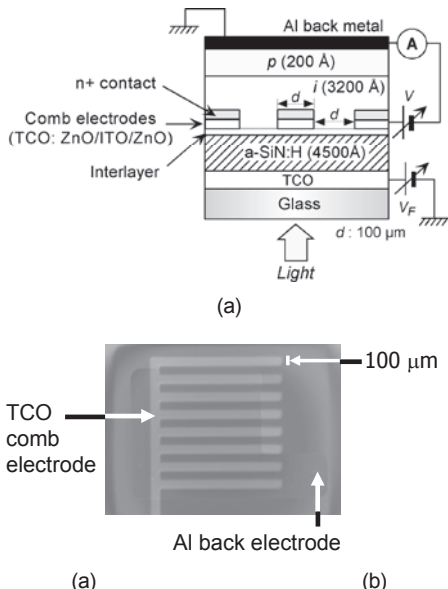


図5 (a)最適化されたFESCの構造 および (b)透明導電性酸化物櫛型電極

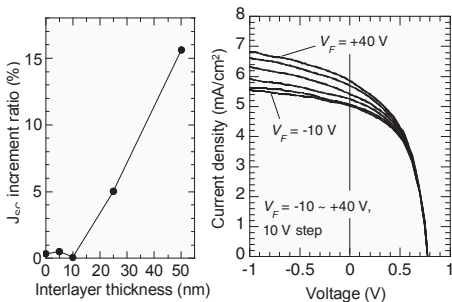


図6 (a)短絡電流密度に関する電界効果増大率のinterlayer (中間層)膜厚依存性および(b)FESCの電界効果電流—電圧特性

ロセスシステムとみなされる。同コンビナトリアルデバイスプロセスシステムによって、a-Si:Hの膜厚、ドーピング量、a-SiN:H絶縁層の製膜条件など様々な最適化を行うとともに、櫛型電極の材料を金属ではなく透明導電性酸化物に置き換えるなど太陽電池構造の改良を行った。その結果、最終的に図5に示す構造に最適化された。このコンビナトリアル最適化の過程で、中間層(interlayer)の導入により電界効果が増大されるという知見が得られた。図6(a)は電界効果による短絡電流密度の中間層厚さ依存性を示しており、中間層の膜厚増加とともに短絡電流密度の増大率が大きくなっていることがわかる。このようにして構造最適化されたFESCは、図6(b)に示すように絶縁層へのゲート電圧印加によって電流—電圧特性が変化し、短絡電流値の明確な増大を示した。

以上のように、多種類のデバイスを同バッチで一貫して行えるコンビナトリアルシステムの開発を通じ、FESCの実証に成功した。今後も、本FESCの機構をa-Si:Hのみならず他の太陽電池材料にも拡大適用し、太陽電池高効率化のさらなる可能性を検討する。

5. a-Si:H/c-Si ヘテロ接合界面ボイド構造の解析

5.1 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の長所と課題

日本発の水素化アモルファスシリコン/結晶シリコン(a-Si:H/c-Si:H)ヘテロ接合太陽電池(Si-HJSC)⁽³⁸⁾は、200°C以下での低温プロセスが可能である、高温動作時の変換効率低下度が低いなどの優れた特性を有し、上述のように2014年にはSi系太陽電池の中では最高となる25.6%の変換効率を達成したことでさらに普及への期待が高まっている。Si-HJSCでは、c-Si表面上にプラズマ化学気相成長(プラズマCVD)法によって堆積した膜厚10nm程度のa-Si:H層がSi表面欠陥を終端・不活性するとともにバンドオフセットを形成することで逆飽和電流値の低減が750mVという高い開放電圧を実現し、その結果高効率を達成している⁽⁹⁾。

変換効率をさらに理論限界近く(29.4%)⁽³⁹⁾まで高めるためには、a-Si:H/c-Si界面の状態を解析し、欠陥形成の要因を解明する必要がある。a-Si:Hの電気特性は、水素終端がされていない欠陥であるダングリングボンド(Dangling-bond: DB, 未結合手)密度、SiH₂結合密度およびマイクロボイドの密度と密接な相関がある。これらの物性は電子スピン密度、赤外吸収および陽電子消滅法やX線構造解析によって評価できるものの、十分な精度のデータを得るためには1μm以上の“厚膜”が必要である。そのため、10nm程度の膜厚しかないSi-HJSCのa-Si:H層の定量的な評価は極めて困難であった。

本研究では、サブnm膜厚の測定感度を有し、かつ非破壊の方法として広く薄膜材料の物性評価に用いられてきた分光エリプソメトリー⁽⁴⁰⁾を用いてa-Si:H/c-Siヘテロ接合界面のマイクロボイド構造を解析できないか検討を行ってきた。分光エリプソメトリーから得られる情報は光学定数のみであり、マイクロボイド構造を直接決定することはできない。そこで、材料中の欠陥構造を探る手段として有効な陽電子消滅法⁽⁴¹⁾をa-Si:Hの厚膜(150nm)に対して適用することで、あらかじめマイクロボイド構造と光学定数との相関を調べ、その相関関係を基に分光エリプソメトリー測定をサブnm~10nmの膜厚領域におけるマイクロボイドを決定する手法としての確立を目指している。本稿では、a-Si:H/c-Siヘテロ接合界面近傍におけるa-Si:H内ボイド構造について陽電子消滅と分光

エリプソメトリーの結果を交えつつ考察する。

5.2 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の構造と特性

図7に(a)Si-HJSCの基本構造 (a) および (b)エネルギーバンドダイアグラムを示す(世界最高 25.6%の変換効率を有する Si-HJSC の構造は「バックコンタクト型」であり, 図7とは異なっている⁽⁶⁾). a-Si:H 層は高抵抗(光照射時 $\sim 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$)であるため, Si p-n 接合太陽電池とは異なり, 電流収集のための透明導電膜(材料: $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO)や $\text{ZnO}:\text{Al}$, 膜厚: $\sim 70 \text{ nm}$)が必要となる. 光入射側の a-Si:H p-i/c-Si と裏面側の c-Si/a-Si:H i-n の2つのヘテロ構造により構成される, 図7(a)で示した構造はダブルヘテロ接合同も呼ばれる. a-Si:H i 層は p 層, n 層と比較してダングリングボンド(未結合手)欠陥密度が1桁~2桁低く 10^{15} cm^{-3} 台であり, i 層を c-Si 表面に堆積することでパッシベーション(表面欠陥不活性化)効果をもたらすとともに, バンドオフセットの形成による逆飽和電流密度の低減効果が発現する. a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太

陽電池における最大の発明は i 層の挿入にあり, そのため開発した三洋電機(現: Panasonic)では Heterojunction with Intrinsic Thin layer の意味を込めて「HIT」という登録商標がなされた. なお, c-Si 基板上に a-Si:H p 層, n 層を直接堆積する限り, a-Si:H 層欠陥を介して逆飽和電流が増加するために開放電圧や曲線因子 (FF) を増大させることは難しいことが知られている. 表1に HIT 太陽電池およびオーストラリア・ニューサウスウェールズ大 (UNSW) が開発した “Passivated emitter, rear locally diffused (PERL)” 型 Si p-n 接合太陽電池特性との特性比較表を掲載する. Si-HJSC は, UNSW-PERL と比較して特に開放電圧と FF が高い値となっており, a-Si:H による Si 表面パッシベーションと逆飽和電流阻止の効果が非常に大きいことがわかる.

5.3 分光エリプソメトリー (SE) の原理と a-Si:H/c-Si 太陽電池構造評価への適用

図8にエリプソメトリーの原理図を示す. 平坦基板上の薄膜に対して, 基板に対しある角度をもって光線を入射させることを考える. 入射光線と反射光線を含む平面である入射-反射平面に平行な偏光成分は p 偏光 (parallel), 垂直な偏光成分は s 偏光 (senkrecht: 垂直(独語))とそれぞれ呼ばれる. s 偏光と p 偏光が同位相で同振幅の場合, すなわち入射-反射平面に対して 45° 傾いた同位相直線偏光を薄膜に入射させる (45° 傾いた同位相直線偏光は 45° 回転させた偏光子(偏光板)に入射光を通すことにより得られる). 薄膜に入射した直線偏光は, 薄膜原子による電子振動再輻射の異方性により, s 偏光・p 偏光の位相と振幅が入射時とは変化して反射される. すると, 入射時には直線偏光であったものが, 反射時には回転する楕円偏光となる. 反射した光がどのような楕円偏光であるかは, 偏光子を通して反射光を測定することにより, 反射光強度の偏光子回転角度依存性から決定できる. 反射楕円偏光 (elliptical polarization) の波長依存性から薄膜の膜厚や光学定数など求める方法なので Spectroscopic Ellipsometry (分光エリプソメトリー: SE) と呼ばれる.

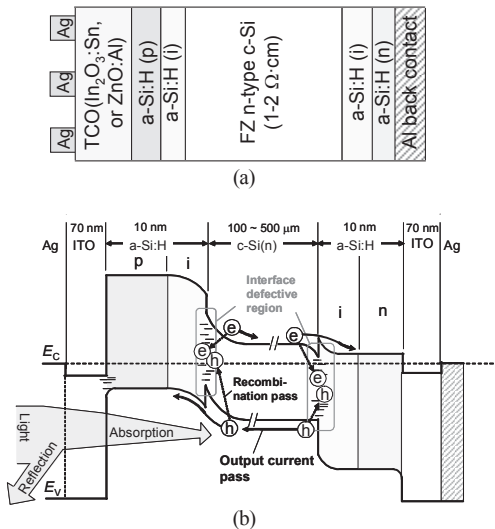


図7 Si-HJSC の (a) 基本構造および (b)エネルギーバンドダイアグラム

表2 Si-HJSC (図2) および UNSW-PERL 太陽電池との特性比較

	UNSW-PERL	Si-HJSC (HIT)
セル面積 (cm ²)	4	101.8
開放電圧 V _{oc} (mV)	706	750
短絡電流密度 J _{sc} (mA/cm ²)	42.7	37.4
曲線因子 FF	0.828	0.832
変換効率 η (%)	25.0	24.7

SE は, 直接評価法ではなく間接評価法である. 測定された SE スペクトルから直接構造・光学定数が求まるのではない. 図9に, エリプソメトリーによる光学定数・構造決定の概念図を示す. 仮定した構造・光学定数モデルを基に計算される SE スペクトルが, 測定 SE スペクトルに近づくように徐々にモデルの方を修正していき, 最終的に計算スペクトルが測定スペクトルと一致するようになったときのモデルに使用された構造・光学定数モデ

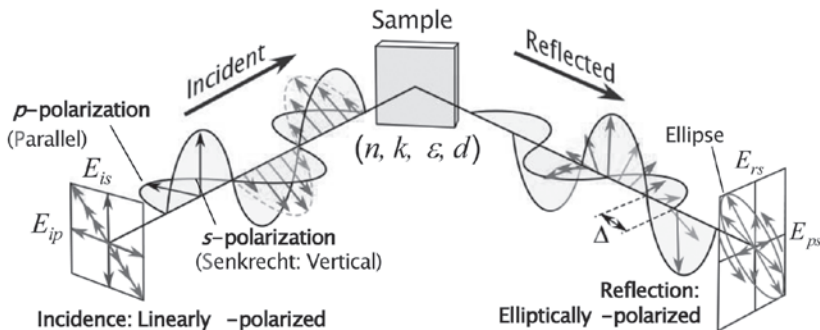


図 8 エリプソメトリーの原理図

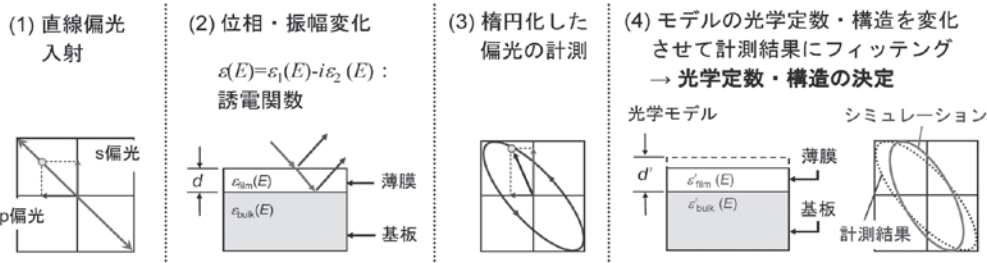


図 9 エリプソメトリーによる光学定数・構造決定の概念図

ルが、求めるべき構造・光学定数となる。より詳しくは参考文献(40)を参照されたい。

5.4 陽電子消滅法の原理

陽電子消滅法は、物質中の単一原子空孔から数 10 nm³ に至る大きさの空隙 (ポイド) を、高感度 ($\geq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) かつ非破壊で定量評価できる手法である⁽⁴¹⁾。放射性同位

元素 (²²Na など) の β 崩壊や高エネルギー光子による陽電子・電子対生成によって発生した陽電子のエネルギーを電磁的に調整して 0~20 keV の単一エネルギーを有する陽電子ビームを形成する。この陽電子ビームのパルスを材料に照射すると、イオン化やフォノンの励起により運動エネルギーを失った後に電子と対消滅し約 511 keV の γ 線を放出する。この放出 γ 線のエネルギー分布や減衰

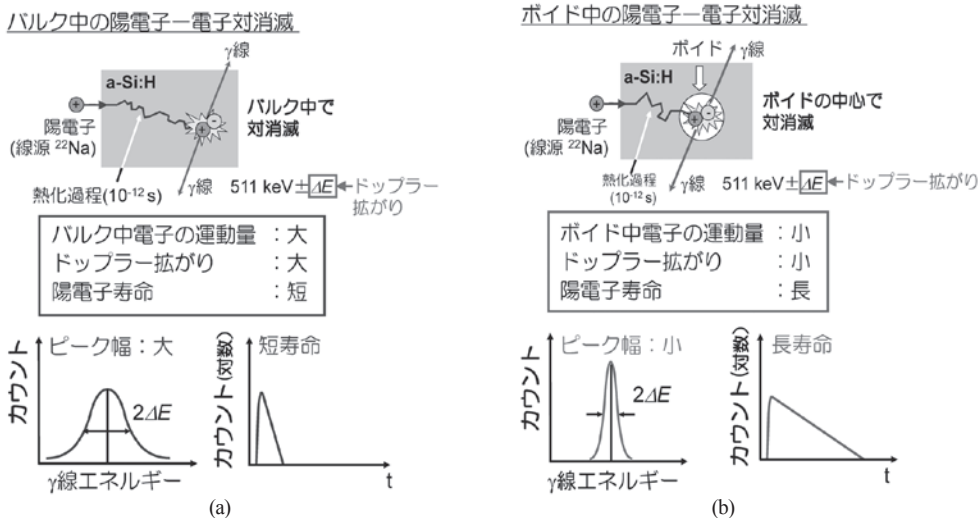


図 10 陽電子消滅法の原理 (a)バルク中 および (b) ポイド中の陽電子-電子対消滅

時定数が、原子空孔・ボイド構造に依存して変化することを利用して原子空孔・ボイド構造を解析する。

図 10 に陽電子消滅の原理を模式化して示す。図 10(a) : ボイドのないバルク中では価電子の運動量は大きく、そのため対消滅時の γ 線エネルギーに対するドップラー効果が大きい。その結果、 γ 線のスペクトル幅が広がる。また、電子密度も高いため、単位時間当たりの対消滅確率が高くなり陽電子寿命が短くなる。図 10(b) : ボイドのある物質中では、陽電子は原子核の陽子から斥力を受けるため、原子密度の低いボイドへと集まってくる。そして、ボイド内に陽電子がトラップされると、バルク中に比べると希薄で運動量の小さい価電子雲と対消滅する。このとき、 γ 線エネルギーに対するドップラー効果は小さく、スペクトル幅は狭くなる。また、電子密度は平均的に低いため、単位時間当たりの対消滅確率は減少し陽電子寿命が長くなる。原子空孔の種類・サイズ・密度と γ 線スペクトル幅や陽電子寿命との関係は、加速陽子の照射によって空孔欠陥構造を定量的に制御した参照試料による検量線の決定や⁽⁴²⁾、第一原理計算により求められている⁽⁴³⁾。

a-Si:H は、より低温で製膜するほどボイドの体積分率が增大することが以前からよく知られていた。小角 X 線散乱により解析されたボイド直径 D_{void} は、製膜基板温度 $T_s = 250^\circ\text{C}$ の場合に 0.68 nm であったが $T_s = 40^\circ\text{C}$ まで低下すると 0.96 nm まで増大するという結果が得られている⁽⁴⁴⁾。a-Si:H 中ボイド構造の陽電子消滅による研究は 1980 年代から行われているものの⁽⁴⁵⁻⁴⁷⁾、ボイドの定量的な大きさ・密度を作製条件に対して系統的に示した例はない。この理由としては、a-Si:H 中ボイドに対するドップラー広がりスペクトルおよび陽電子寿命の第一原理計算結果が得られていなかった点が挙げられる。

本研究では、結晶 Si への陽子照射による定量的欠陥生成実験と第一原理計算による理論を合わせて推定され

た Si 原子空孔数-陽電子寿命の相関曲線^(43, 48)を a-Si:H に適用することによってボイドサイズを求めた。この詳細については次の章で述べる。

5.5 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合近傍のボイド構造解析

図 11 に、a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池における表面近傍構造模式図および a-Si:H ネットワークにおけるボイド-SiH₂ 複合構造模式図を示す。Si(111)表面での a-Si:H i 層の CVD 堆積では成長初期に不均一な島状成長となるため、ボイドリッチな構造になっていると考えられ、界面近傍のみ SiH₂ 量が異常に多いことがその間接的な証左となっている⁽⁴⁹⁾。a-Si:H p 層は、成長時において BH₃ ラジカルによる表面水素引き抜き反応の異常亢進によって成膜速度が増大し、結果的にボイドを多く含む膜構造となっている。このような a-Si:H の成長過程は成長中 in-situ 分光エリブソメトリー法 (SE) と in-situ 減衰全反射フーリエ変換赤外分光法 (ATR-FTIR) との併用により詳しく調べられ⁽⁴⁹⁾、ボイドを含む a-Si:H 膜に対する誘電関数モデルも確立された⁽⁵⁰⁾。

SE ではボイドを含む a-Si:H を Bruggeman の有効媒質近似により誘電関数を決定しているため、体積分率は算定できるがボイドの直径など微細構造を直接知ることはできない。しかし、もしボイドの直径と光学定数とが単純な相関関係を持っており、かつそれが普遍的に成り立つならば、その「検量線」を用いることにより、SE で決定した光学定数からボイド直径を決定することが可能となる。本研究では、その「検量線」である相関関係を導き出し、それを用いて a-Si:H の厚さ方向におけるボイド構造の推移を求めることを行った。

5.6 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合試料作製方法および評価方法

W19 mm×L50 mm×t0.28mm の鏡面 FZ-Si(111)基板を RCA クリーニングプロセスにより化学洗浄・表面水

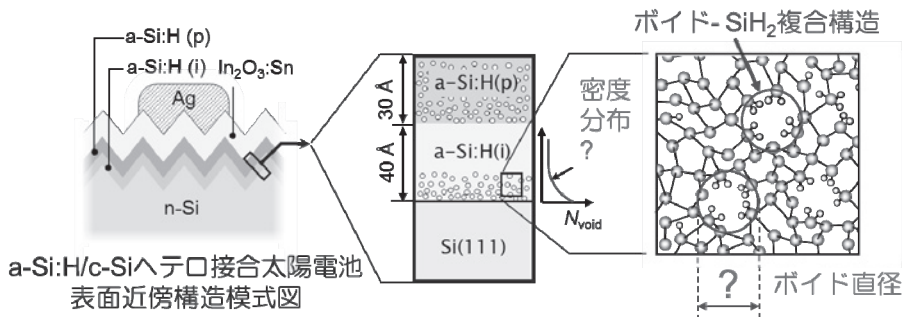


図 11 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池における表面近傍構造およびボイド-SiH₂複合構造の模式図

素終端した上へプラズマ CVD 法により a-Si:H 層を 150 nm 厚膜し、a-Si:H/c-Si ヘテロ接合構造を作製した。製膜時圧力は 6.5 Pa, RF 出力は 13 mW/cm² とした。膜中ポイド構造を系統的に変化させた試料を複数作製するため、基板温度 (T_s) は 80, 130, 180, 130, 280 °C とした。プラズマ CVD 装置には J. A. Woollam M-2000 回転補償型エリプソメータが設置されており、基板面垂直線から 70° の入射角・反射角で Si 基板表面を in-situ 観察可能な構造となっている。製膜中、実時間で SE データを取得した。陽電子寿命は、(国) 産業技術総合研究所の陽電子欠陥測定装置により陽電子エネルギーを 2 keV (侵入深さピーク 53 nm) として測定した。

5.7 実験結果および考察

図 12 に、製膜基板温度 T_s の異なる 5 つの a-Si:H に対して SE 測定の結果決定された誘電関数の虚数部、すなわち光吸収に関与する要素である ϵ_2 スペクトルを示す。 T_s が低下するにしたがって、スペクトルピーク高さが低下すなわち光吸収が低下していることがわかる。 ϵ_2 スペクトルのピーク高さを ϵ_2^{peak} として $1000/T_s$ に対してプロットした結果 (図 13) から、温度の低下に伴い ϵ_2^{peak} が急激に低下し、膜構造が疎となりポイドの体積分率が增大していることが明瞭にわかる。

図 14 に、陽電子寿命測定の結果を示す。 γ 線計測カウンタ数は直線的に減衰しており、途中での屈曲や湾曲は見られない。このことは、a-Si:H 膜中のポイドサイズが均一であり、複数のサイズが混在しているのではないことを示している。 T_s が低いほど陽電子寿命が長寿命化し、ポイドサイズが増大していることがわかる。このようにして得られた陽電子寿命を τ に対してプロットしたものが図 15 である。興味深いことに、両者には線形の関係が成り立っていることがわかる。そこで、最小二乗フィッティングによりその線形関係を求めると次の式が得られる。

$$\tau = -19.1 \cdot \epsilon_2^{peak} + 825.2 \quad (1)$$

次に、陽電子寿命からポイドサイズを算定する方法として、本研究では Tuomisto⁽⁴³⁾ と Amarendra⁽⁴⁸⁾ らの第一原理計算と実験とに基づく相関性により、平均ポイドサイズ (原子空孔数) N_{VSi} と陽電子寿命 τ との間に次の(2)式が成り立つとした：

$$N_{VSi} = \frac{5.1}{\left(\frac{289.2}{\tau - 210.5}\right) - 1} \quad (2)$$

この式による平均ポイドサイズ (原子空孔数) と陽電子寿命との関係を図 16 に示す。(2)式に(1)式を代入する

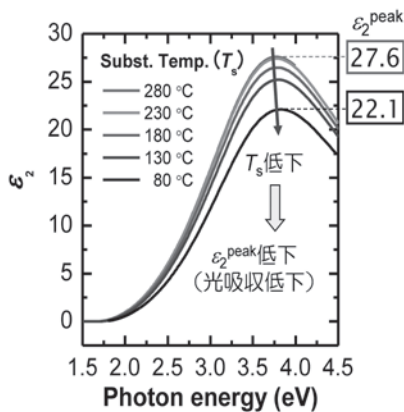


図 12 ϵ_2 スペクトルの T_s 依存性

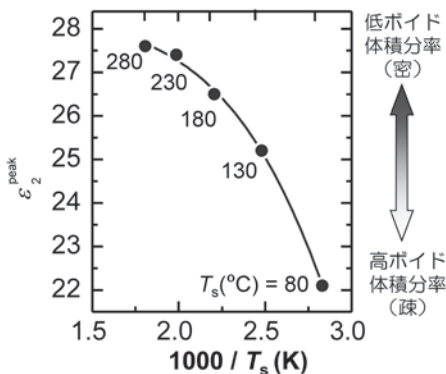
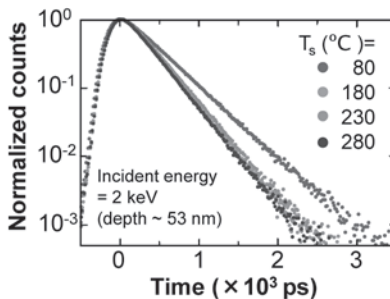


図 13 ϵ_2^{peak} の $1000/T_s$ 依存性



T_s (°C)	Positron lifetime (ps)
80	404.0 ± 0.6
130	347.7 ± 0.6
180	317.9 ± 0.5
230	304.9 ± 0.5
280	298.1 ± 0.5

図 14 陽電子寿命測定結果

ことよって、 ϵ_2^{peak} から直接 $N_{V_{Si}}$ を求める次の(3)式が

得られる：

$$N_{V_{Si}} = 5.1 / \left[\left(\frac{15.1}{32.2 - \epsilon_2^{peak}} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

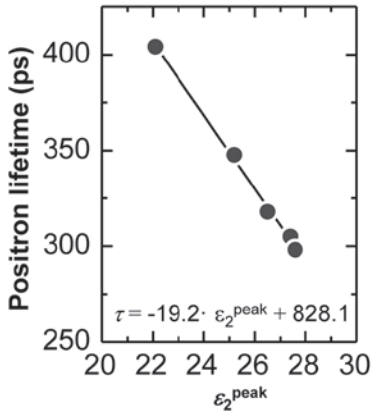


図15 陽電子寿命と ϵ_2^{peak} との関係

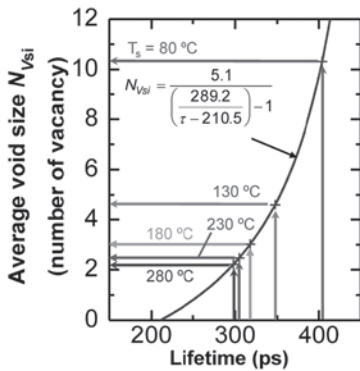


図16 平均ポイドサイズと陽電子寿命との関係

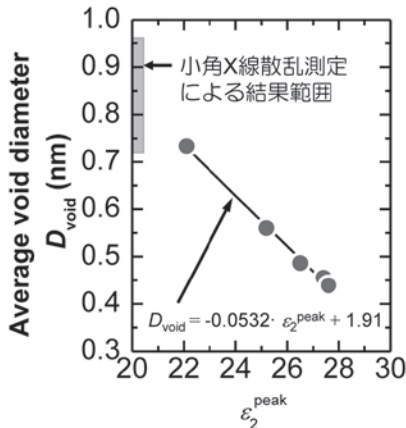


図17 平均ポイドサイズと ϵ_2^{peak} との関係

$N_{V_{Si}}$ は Si 原子空孔数であるから、この原子空孔クラスタによって形成されるポイドが球形と仮定してその直径 D_{void} を算出する式を求める。原子空孔クラスタの体積は原子空孔数 $N_{V_{Si}}$ × Si 原子1個の体積 V_{Si} であるので、球の直径と体積の関係から次の式(4)が導かれる：

$$D_{void} = (6N_{V_{Si}} \cdot V_{Si} / \pi)^{1/3} \quad (4)$$

上式を用いて、 D_{void} とのグラフに再構成すると図17が得られる。図17中には過去の研究において小角 X 線散乱で得られたポイドサイズが比較のために示してあり、本研究で得られたポイドサイズが過去の小角 X 線散乱で得られた値のオーダーにあるということがわかる。この結果で重要なことは、 ϵ_2^{peak} が D_{void} と線形関係にあるということである。図17のプロットへ最小二乗フィッティングを行い求めた式は、次のように簡潔になる：

$$D_{void} = -0.0532 \cdot \epsilon_2^{peak} + 1.91 \quad (5)$$

したがって、上式を用いれば SE 解析によって得られたポイド直径を推算することが可能である。

図18に、a-Si:Hの堆積初期から150 nmの種々の膜厚における SE 解析結果から得られた式(5)によってポイド直径に変換し再プロットした、ポイド直径の膜厚依存性を示す。製膜基板温度の異なる3つのデータにおいて、いずれも10~150 nmの範囲ではポイド直径は一定値の傾向を示し、10 nm以下で急激な増大を示している。10 nmという膜厚は、ちょうど a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の a-Si:H 膜厚と同等であり、a-Si:H i 層膜厚が4 nmより薄くした場合には効率が急速に低下するという以前の研究成果⁽⁴⁹⁾とも合致する。このポイド直径が急速に増大する「臨界膜厚」は T_g によって異なるが、 T_g が低いほど臨界膜厚が増大している、などの系統性がみられるわけではない。こ

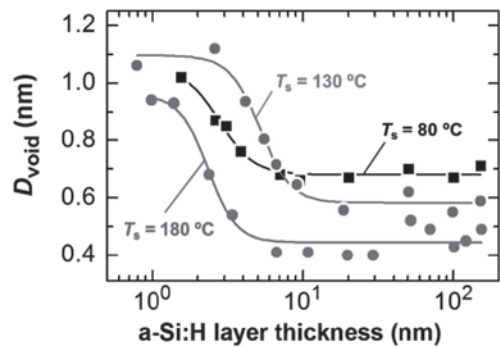


図18 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合における a-Si:H ポイド直径の a-Si:H 膜厚依存性

のことは、10 nm 以上の膜厚領域における平均ボイドサイズが T_g と良い相関を示していることは対照的であり、a-Si:H/c-Siヘテロ接合界面近傍のボイド構造は T_g だけではなく基板表面の初期状態にも依存している可能性を示唆している。

a-Si:H/c-Siヘテロ接合に対して陽電子消滅と分光エリブノメトリーによる解析を行い、陽電子寿命およびボイドサイズが光学定数 ϵ_2^{peak} と線形相関をもっていることを明らかにした。また、ボイドサイズと ϵ_2^{peak} との線形相関性を利用して、c-Si上に堆積されたa-Si:Hにおけるボイドサイズの膜厚依存性を1 nm~150 nmの広い膜厚範囲にわたって算出することができた。本研究により、a-Si:H膜厚10 nm以下の領域において、ボイドサイズが急激に増加していることが初めて定量的に明らかになった。

6. まとめ

本稿では、太陽光の恩恵とそれを活用する手段としての太陽電池の歴史、現状や課題について述べ、また、筆者がこれまで取り組んできた太陽電池と評価法の開発に関連するテーマのなかから2つを取り上げて紹介した。

今後も、太陽電池および関連材料に関する研究を基軸とした再生可能エネルギー利用を促進する新規デバイスや要素技術開発、基礎的な物性の解明を深化させることを目指す。また、工学研究所における多様な設備と研究者・技術者の方々との交流の機会を活用させていただくことにより、自身の研究の幅も広げていきたい。

参考文献

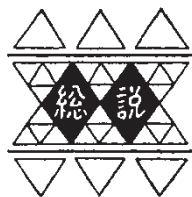
- (1) "Fifth Assessment Report (AR5)", *Inter Governmental Panel on Climate Change (IPCC)*, (2014).
- (2) D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson, "A New Silicon *p-n* Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", *J. Appl. Phys.*, **25**, (1954), pp. 676-677.
- (3) M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop, "Solar Cell Efficiency Tables (version 46)", *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **23**(2015), pp.805-812.
- (4) 宮島晋介, "結晶シリコン太陽電池における界面不活性化膜", *Plasma Fusion Res.*, **85** (2009), pp. 820-824.
- (5) K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamaniishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama and S. Okamoto, "Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell", *IEEE J. of*

Photovolt., **4**, (2014), pp.1433-1435.

- (6) D. C. Reynolds, "Photovoltaic Effect in Cadmium Sulfide", *Phys. Rev.*, **96**, (1954), pp.533-534.
- (7) W. E. Spear and P.G. Le Comber, "Substitutional Doping of Amorphous Silicon", *Solid State Comm.*, **17**, (1975), pp.1015-1018.
- (8) L. Smilowitz, N. S. Sariciftci, R. Wu, C. Gettinger, A. J. Heeger, F. Wudl, S. E. Shaheen, "Photoexcitation Spectroscopy of Conducting-polymer-C60 Composites: Photoinduced Electron Transfer", *Phys. Rev. B*, **47** (1993) p. 13835.
- (9) M. Hosoya, H. Oooka, H. Nakao, T. Gotanda, S. Mori, N. Shida, R. Hayase, Y. Nakano, M. Saito, "Organic thin film photovoltaic modules", *Proc. of the 93rd Annual Meeting of the Chemical Society of Japan*, (2013), pp. 21-37.
- (10) A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, "Novel Photoelectrochemical Cell with Mesoscopic Electrodes Sensitized by Lead-halide Compounds (2)", *210th ECS Meeting*, Cancun, Mexico, (2006), Abstr.-No.397.
- (11) A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, "Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells", *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, (2009), pp. 6050-6051.
- (12) M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, H. J. Snaith, "Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites", *Science*, **338**, (2012), pp. 643-947.
- (13) J. H. Noh, S. H. Im, J. H. Heo, T. H. Mandal, S. I. Seok, "Chemical Management for Colorful, Efficient, and Stable Inorganic-Organic Hybrid Nanostructured Solar Cells", *Nano Letters*, **13**, (2013), pp. 1764-1769.
- (14) I. Almansouri, A. Ho-Baillie, M. Green, "Ultimate efficiency limit of single-junction perovskite and dual-junction perovskite/silicon two-terminal devices", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, (2015), p. 08KD04.
- (15) H. Fujioka, M. Oshima, C. Hu, M. Sumiya, N. Matsuki, K. Miyazaki, H. Koinuma, "Characteristics of Field Effect a-Si:H Solar Cells", *Journal of Non-Crystalline Solids*, **227-230**, (1998), pp.1287-1290.
- (16) K. Miyazaki, N. Matsuki, H. Shinno, H. Fujioka, M. Oshima, H. Koinuma, "Device Simulation and Fabrication of Field Effect Solar Cells", *Bulletin of Materials Science*, **22**, (1999), pp. 729-733.
- (17) N. Matsuki, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima, M. Yoshimoto, H. Koinuma, "Fabrication of Oxide-gate Thin-Film Transistors using PECVD/PLD Multichamber System", *Science and Technology of Advanced Materials*, **1**, (2000), pp.187-190.
- (18) N. Matsuki, Y. Abiko, M. Kobayashi, K. Miyazaki, H. Fujioka, H. Koinuma, "A Pulsed Laser Ablation / Plasma

- Chemical Vapor Deposition Tandem System for Combinatorial Device Fabrication”, *Applied Physics A*, **79**, (2004), pp. 1413-1416.
- (19) N. Matsuki, Y. Abiko, K. Miyazaki, M. Kobayashi, H. Fujioka, H. Koinuma, “Field-effect a-Si:H Solar Cells with Transparent Conductive Oxide Comb-shaped Electrodes”, *Thin Solid Films*, **486**, (2005), pp. 210-213.
- (20) T. Ohmori, H. Go, Y. Yamada, N. Matsuki, N. Yamaguchi, A. Nakayama, H. Mametsuka, E. Suzuki, “Hydrogen Production from Solar Light Energy by Photovoltaic Water Electrolysis”, *Chemical Industry*, **55**, (2001) pp. 535-540.
- (21) Y. Yamada, N. Matsuki, T. Ohmori, H. Mametsuka, M. Kondo, A. Matsuda, E. Suzuki, “One Chip Photovoltaic Water Electrolysis Device”, *International Journal of Hydrogen Energy*, **28**, (2003), pp. 1167-1169.
- (22) N. Matsuki, Y. Irokawa, T. Matsui, M. Kondo, and M. Sumiya, “Photovoltaic Action in Polyaniline/n-GaN Schottky Diodes”, *Applied Physics Express*, **2**, (2009), p. 092201.
- (23) Y. Irokawa, N. Matsuki, M. Sumiya, Y. Sakuma, T. Sekiguchi, T. Chikyo, Y. Sumida, Y. Nakano, “Low-frequency Capacitance-Voltage Study of Hydrogen Interaction with Pt-AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes”, *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*, **3**, (2009), pp. 266-268.
- (24) Y. Nakano, N. Matsuki, Y. Irokawa and M. Sumiya, “Electrical Characterization of n-GaN Epilayers using Transparent Polyaniline Schottky Contacts”, *Physica Status Solidi (c)*, **7**, (2010), pp. 2007-2009.
- (25) Y. Irokawa, N. Matsuki, M. Sumiya, Y. Sakuma, T. Sekiguchi, T. Chikyo, Y. Sumida and Y. Nakano, “Anomalous Capacitance-Voltage Characteristics of Pt-AlGaIn/GaN Schottky diodes exposed to hydrogen”, *Physica Status Solidi (c)*, **7**, (2010), pp. 1928-1930.
- (26) N. Matsuki, Y. Nakano, Y. Irokawa, M. Sumiya, “Heterointerface Properties of Novel Hybrid Solar Cells consisting of Transparent Conductive Polymers and III-Nitride Semiconductor”, *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.*, **19**, (2010), pp. 703-711.
- (27) Y. Nakano, M. Lozach, N. Matsuki, K. Sakoda, and M. Sumiya, “Photocapacitance Spectroscopy Study of Deep-level Defects in Freestanding n-GaN Substrates using Transparent Conductive Polymer Schottky Contacts”, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **29**, (2011), p. 023001.
- (28) Y. Nakano, N. Matsuki, Y. Irokawa, and M. Sumiya, “Deep-level Characterization of n-GaN Epitaxial Layers using Transparent Conductive Polyaniline Schottky Contacts”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50**, (2011), p. 01AD02.
- (29) N. Matsuki, M. Kondo, A. Matsuda, “Novel Network Control in Hydrogenated Amorphous Silicon by Molecular Beam Deposition Method”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **338-340**, (2004), pp. 382-385.
- (30) N. Matsuki, S. Shimizu, M. Kondo, A. Matsuda, “Unusual Hydrogen Distribution and Its Change in Hydrogenated Amorphous Silicon prepared using Bias Electric-field Molecular Beam Deposition”, *Applied Physics Letters*, **89**, (2006), p. 011909.
- (31) N. Matsuki, T.-W. Kim, J. Ohta, H. Fujioka, “Heteroepitaxial Growth of Gallium Nitride on Muscovite Mica Plates by Pulsed Laser Deposition”, *Solid State Communications*, **136**, (2005), pp. 338-341.
- (32) N. Matsuki, R. Ishihara, A. Baiano, K. Beenakker, Investigation of Local Electrical Properties of Coincidence-Site-Lattice boundaries in Location-controlled Silicon Islands using Scanning Capacitance Microscopy, *Applied Physics Letters*, **93**, (2008), pp. 062102.
- (33) N. Matsuki, R. Ishihara, K. Beenakker, “Direct Observation of the Electrical Activity of Coincidence-site Lattice Boundaries in Location Controlled Silicon Islands using Scanning Spread Resistance Microscopy”, *Journal of the Society for Information Display*, **17**, (2009), pp. 293-297.
- (34) K. Watanabe, N. Matsuki, and H. Fujiwara, “Ellipsometry Characterization of Hydrogenated Amorphous Silicon Layers Formed on Textured Crystalline Silicon Substrates”, *Appl. Phys. Express*, **3**, (2010), p. 116604.
- (35) N. Matsuki and H. Fujiwara, “Nondestructive Characterization of Textured a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cell Structures with Nanometer-scale a-Si:H and In₂O₃:Sn Layers by Spectroscopic Ellipsometry”, *J. Appl. Phys.* **114**, (2013), p. 043101.
- (36) Y. Tanaka, N. Matsuki and H. Fujiwara, “Characterization of a-Si:H Thin Layers Incorporated into Textured a-Si:H/c-Si Solar Cell Structures by Spectroscopic Ellipsometry using a Tilt-angle Optical Configuration”, *Thin Solid Films* **569**, (2014), pp. 64-69.
- (37) M. Tamakoshi and N. Matsuki, “Impact of Sputter-induced Ion Bombardment at the Heterointerfaces of a-Si:H/c-Si solar cells with Double-layered In₂O₃:Sn Structures”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, (2015), p. 08KD09.
- (38) M. Tanaka, M. Taguchi, T. Matsuyama, T. Sawada, S. Tsuda, S. Nakano, H. Hanafusa, and Y. Kuwano, “Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer)”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, (1992), pp. 3518-3522.
- (39) A. Richter, M. Hermle, and S. W. Glunz, “Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar

- Cells”, *IEEE J. Photovoltaics*, **3**, (2013), pp. 1184-1191.
- (40) 藤原裕之, “分光エリブソメトリー”, 丸善出版, (2011).
- (41) A. Uedono, “Vacancy-Boron Complexes in Plasma Immersion Ion-Implanted Si Probed by a Monoenergetic Positron Beam”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49**, (2010), p. 051301
- (42) M. A. Lourenço, A. P. Knights, K. P. Homewood, R. M. Gwilliam, P. J. Simpson, P. Mascher, “A Comparative Study of Vacancies Produced by Proton Implantation of Silicon using Positron Annihilation and Deep Level Transient Spectroscopy”, *Nuc. Inst. Method. Phys. Res. B*, **175**, (2001) pp. 300-304.
- (43) F. Tuomisto, I. Makkonen, “Defect Identification in Semiconductors with Positron Annihilation: Experiment and Theory”, *Rev. Mod. Phys.*, **85**, (2013), pp. 1583-1631.
- (44) A. H. Mahan, D. L. Williamson, B. P. Nelson, and R. S. Crandall, “Small-angle X-ray Scattering Studies of Microvoids in a-Si:C:H and a-Si:H”, *Solar Cells*, **27**, (1989), pp. 465-476.
- (45) Y. J. He, M. Hasegawa, R. Lee, S. Berko, D. Adler, and A. L. Jung, “Positron-annihilation Study of Voids in a-Si and a-Si:H”, *Phys. Rev. B*, **33**, (1986), pp. 5924-5927.
- (46) V. G. Bhide, R. O. Dusane, S. V. Rajarshi, A. D. Shaligram, and S. K. David, “Positron-Lifetime Studies of Hydrogenated Amorphous Silicon”, *J. Appl. Phys.*, **62** (1987), pp. 108-116.
- (47) J. Melkens, A. H. M. Semts, S. W. H. Eijt, H. Schut, E. Brück, and M. Zeman, “The Nanostructural Analysis of Hydrogenated Silicon Films based on Positron Annihilation Studies”, *J. Non-Cryst. Solids*, **358**, (2012) 2015.
- (48) G. Amarendra, R. Rajaraman, G. V. Rao, K. G. M. Nair, B. Viswanathan, R. Suzuki, T. Ohdaira, T. Mikado, “Identification of Open-volume Defects in Disordered and Amorphized Si”, A Depth-Resolved Positron Annihilation Study”, *Phys. Rev. B*, **63**, (2001), p. 224112.
- (49) H. Fujiwara and M. Kondo, “Effects of a - Si:H Layer Thicknesses on the Performance of a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells”, *J. Appl. Physics*, **101**, (2007), p. 054516.
- (50) S. Kageyama, M. Akagawa, and H. Fujiwara, “Dielectric Function of a-Si:H based on Local Network Structures”, *Phys Rev. B*, **83**, (2011), p. 195205.



マンガンをベースにした酸素貯蔵材料： 応用に向けた材料開発と材料テーラリング

本橋 輝樹*

Manganese-Based Oxygen Storage Materials: Materials Development and Tailoring for Practical Applications

Teruki MOTOHASHI*

1. 緒言

化石燃料の枯渇や地球温暖化などの重大問題を背景に、省エネルギー化および次世代エネルギー生産が人類の最重要課題となっている。酸素は最も身近な元素でありエネルギー・工業・バイオなどあらゆる分野の化学反応に関与していることから、酸化還元反応の精密制御を実現する酸素貯蔵材料 (oxygen storage materials) と呼ばれる物質が注目され始めている。酸素貯蔵材料とは、構成元素の価数変化に伴う顕著な酸素吸収放出を特徴とする機能性材料である。その代表物質であるセリア・ジルコニア固溶体 (CZ) は、酸素過剰/欠乏状態において酸素を吸収/放出することにより酸素分圧の変動を抑制し、自動車排ガス中の CO, NO_x, 炭化水素を効率良く燃焼浄化する⁽¹⁾。これまでに CZ とその関連物質が広く研究されてきたが、新しい応用分野の開拓には CZ とは化学組成や結晶構造が根本的に異なる新規材料の開発が強く望まれる。

セリウム (Ce) の価数変化を利用する CZ の他にも、多彩な価数状態を示す遷移金属を含む物質が高性能酸素貯蔵材料の候補となり得る。我々のグループでは、マンガンを主成分とする酸素貯蔵材料の探索研究を行い、2種類の新規材料：BaYMn₂O_{5+δ}^(2,3) および Ca₂AlMnO_{5+δ}⁽⁴⁾ を開発した。本稿では、これら材料の結晶学的特徴および酸素吸収放出特性を報告する。注目すべきは、両材料とも酸化還元種としてマンガンを含むものの、互いに全く異なる温度・雰囲気応答性を示すことから別分野への応用が期待される点である。また、これらの材料について実用化を達成するには、用途に合わせた酸素吸収放出特性の制御が不可欠である。本稿では、金属イオンサイ

トへの元素置換に基づく応用を目指した材料テーラリング研究を紹介する。

2. マンガンをベースにした新規酸素貯蔵材料

2. 1. ダブルペロブスカイト型 BaYMn₂O_{5+δ}

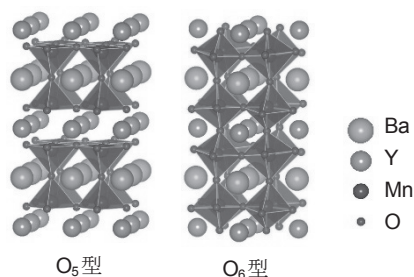


図 1. BaYMn₂O_{5+δ} の結晶構造。酸素量 δ = 0 (左, O₅型) および δ = 1 (右, O₆型)。

BaYMn₂O_{5+δ} は、ペロブスカイト構造の A サイトをイオン半径の大きな Ba と小さな Y が交互に積層したダブルペロブスカイト構造をもつ (図 1)。Y 層内の酸素は還元雰囲気中で容易に脱離し、δ 値が 0 (O₅型) から 1 (O₆型) の範囲で変化する。つまり、BaYMn₂O_{5+δ} はマンガン価数変化 (+2.5 ~ +3.5) を伴いながら大きな酸素不定比性を示す。本物質は、超巨大磁気抵抗 (CMR) 効果を示すペロブスカイト型マンガン酸化物 Ln_{1-x}AE_xMnO₃ (Ln = 希土類元素, AE = Ca, Sr) と組成・構造が類似するため、その磁性および電気特性についての研究が盛んに行われてきた⁽⁵⁻⁷⁾。一方で、温度やガス雰囲気に対する酸素吸収放出は詳しく調べられていなかった。

*教授 物質生命化学科
Professor, Dept. of Materials and Life Chemistry

熱重量 (TG) 分析により, $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5+\delta}$ が 500°C 以下の温度で酸素/5%水素のガス切換に応じて多量の酸素を吸収放出することが明らかになった. この実験では, 合成直後の試料を酸素気流中で室温から 600°C の温度範囲で加熱冷却し, 続いて同じ条件で 5% H_2 /95% Ar 混合ガス気流中での分析を行った. 酸素気流中において, 試料重量が 200°C 付近から増加し始め, 390°C 以上で飽和した. この重量増加は酸素量変化によると考えられる. 増加率は 3.75 wt % であり, O_3 型から O_6 型への酸素量変化に期待される増加率 3.85 wt % とほぼ一致する. 続いて還元雰囲気下での分析では, $200, 490^\circ\text{C}$ で重量減少 (酸素放出に対応) がそれぞれ開始および完了した. 分析後の試料重量は分析前の値と完全に一致しており, 酸素が可逆に吸収放出したことを強く示唆している.

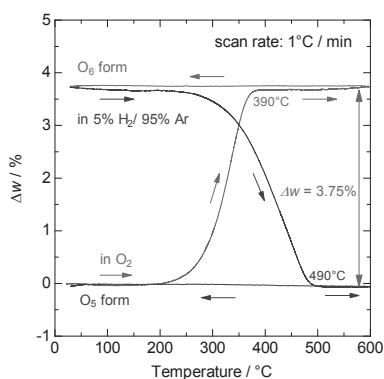


図 2. $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5+\delta}$ の TG 分析結果. 合成直後の試料を酸素気流中 600°C 以下の温度範囲で加熱冷却し, 続いて同じ温度条件で 5% H_2 /95% Ar 気流中での分析を行った.

続いて, 温度を 500°C に固定し, ガス雰囲気を O_2 と 5% H_2 /95% Ar 混合ガスで交互に切り替えながら $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5+\delta}$ 試料の TG 分析を行った. 試料重量が酸素中で即座に増加し, 5% H_2 /95% Ar 混合ガスでは重量が減少した. 注目すべきは, 酸素吸収放出現象が 10 分間隔のガス雰囲気変化に応答できるほど高速なことに加え, 完璧なサイクル特性を示す点である.

本材料のユニークな酸素貯蔵能により, 様々な酸素関連分野での応用が期待される. 既に本材料が炭化水素を初めとする揮発性有機化合物 (VOC) の燃焼反応において高い触媒活性を示すことが判明している⁽²⁾. また, その極めて優れた酸素吸収能力=酸素還元反応 (ORR) 活性を考慮すると, 本材料が SOFC の電極材料として応用できる可能性がある.

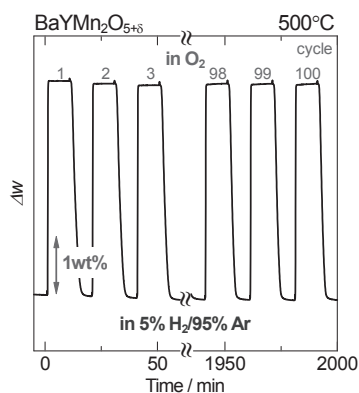


図 3. $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5+\delta}$ の 500°C における TG データ. 10 分間隔で雰囲気ガスを酸素 \leftrightarrow 5%水素に切り替えて 100 サイクル繰り返した. 100 サイクル後も特性の劣化が全く見られない.

2. ブラウンミラーライト型 $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$

$\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$ は, 酸素欠損ペロブスカイト構造の一種であるブラウンミラーライト (BM) 型をとる. $\delta = 0$ の組成では B サイトの Al, Mn がそれぞれ四面体および八面体配位を形成して交互に積層し, BM 型構造の一般式 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_5$ となる (図 4). 低温・酸化雰囲気中では Al 四面体層に過剰酸素を取り込み, マンガン価数が +3 から +4 へ変化するとともに最大で $\delta = 0 \sim 0.5$ の酸素不定比性を示す. 本物質については, 酸素定比相 ($\delta = 0$) および酸素過剰相 ($\delta = 0.5$) の合成とそれらの磁気特性が過去に報告されていたが⁽⁸⁻¹⁰⁾, 温度やガス雰囲気に対する酸素吸収放出の応答性は研究されていない.

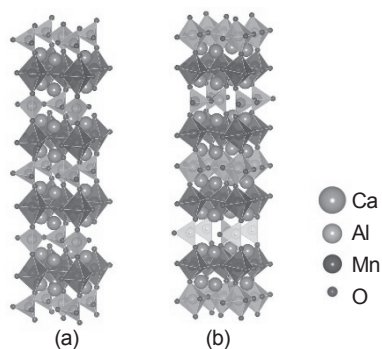


図 4. $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$ の結晶構造. (a) 酸素定比相 ($\delta = 0$) および (b) 酸素過剰相 ($\delta = 0.5$).

酸素定比相 ($\delta = 0$) 試料について, 室温から 900°C の温度範囲において TG 分析を行った (図 5). 窒素気流中 (図中点線) では試料の重量 (つまり酸素量) は実質

上変化しないのに対し、酸素気流中（実線）では劇的な変化が観測された。酸素気流中で温度を上げると 200 °C 付近から重量が増加し始め、300 °C で極大値の 3.0 wt % ($\delta = 0.45$) に達した。さらに温度を上げると約 650 °C で重量が急激に減少し、それ以上の温度でほぼ初期重量に戻る挙動が観測された。続いて酸素気流中で試料を冷却すると、酸素吸収による大きな重量増加が 550 °C で見られた。500 °C 以下で酸素放出は見られず、重量値は 2.7 wt % ($\delta = 0.41$) で飽和した。

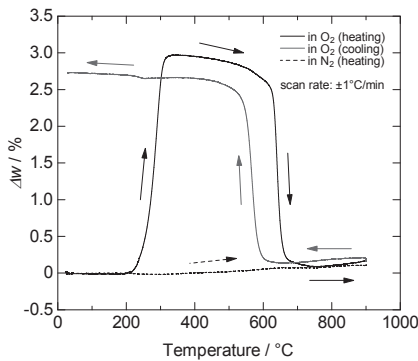


図5. $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5.6}$ における900 °C以下でのTG曲線。実験は酸素気流中（実線）および窒素気流中（点線）で行った。

図5のTGデータより、本材料では550 ~ 650 °Cの狭い温度範囲で酸素量が劇的に変化することが判明した。この酸素量変化は不連続であり、低温の酸素過剰相 ($\delta \approx 0.4$) と高温の酸素定比相 ($\delta \approx 0$) の間で起こる一次相転移に起因すると考えられる。したがって、本材料ではガス雰囲気を変化させることなく小さな温度変化のみで顕著な酸素吸収放出を引き起こせると期待され、実際、図6のように酸素気流中または空气中500 ~ 700 °Cの間で温度サイクルすることにより2.7 wt %の酸素が可逆に吸収放出した。

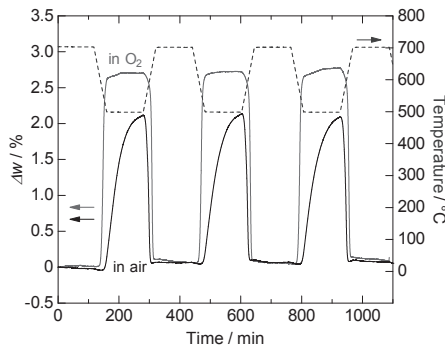


図6. $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5.6}$ の酸素気流中および空气中（いずれも実線）での温度サイクル時のTG曲線。試料温度は点線で示した。

このように、本材料では高酸素濃度においても温度変化のみで顕著な酸素吸収放出が起きるのが特徴である。このユニークな特性に着目し、低温での酸素吸収プロセスと高温での酸素放出プロセスを組み合わせた酸素ガス濃縮への応用が期待される⁽⁴⁾。酸素ガス濃縮技術は、燃焼温度の高温化による生産性向上を通じて省エネルギー化に貢献する。

3. 応用を目指した材料テラリング⁽¹¹⁾

我々が開発したマンガン系酸素貯蔵材料は、従来材料のCZとは根本的に異なる化学組成・結晶構造を有しており、CZでは実現が困難だった新たな応用分野を開拓する可能性を秘めている。これら新規材料の応用を目指すには、用途に合わせた「オンデマンド」酸素吸収放出特性へのチューニングが不可欠である。 $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5.6}$ および $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5.6}$ はいずれもペロブスカイト型を基本とした結晶構造を有しており、その柔軟な骨格構造により各金属サイトへ様々な元素置換が可能だと予想される。特に、酸素吸収放出サイトに隣接する金属、すなわち $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5.6}$ ではYサイト、 $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5.6}$ ではAlサイトへの元素置換による酸素吸収放出特性への影響を調べることは意義深い。

3. 1. $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5.6}$ のYサイトへのランタノイド置換

$\text{BaYMn}_2\text{O}_{5.6}$ のYサイトをよりイオン半径の大きなランタノイド $\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Nd}, \text{La}$ で置換した $\text{BaLnMn}_2\text{O}_{5.6}$ ($\delta \approx 0$)を合成し、その酸素吸収放出挙動を調べた。 Ln^{3+} イオン半径はY, Gd, Nd, Laの順で大きくなることから知られており（それぞれ8配位において0.1019, 0.1053, 0.1109, 0.1160 nm⁽¹²⁾）、X線回折実験により各相の格子定数が同じ順列で増大することを確認した。酸素気流中で昇温しながら試料重量を計測したところ、試料間の酸素吸収挙動に大きな差が見られた（図7）。 $\text{Ln} = \text{Y}$ 試料が約200 °C以上で酸素吸収するのに対し、Gd, Nd, La試料では重量増加の開始温度がイオン半径とともに系統的に低下し、La試料では80 °C付近から酸素吸収することが判明した。

続いて、一定温度において酸素分圧を変化させた際の酸素量をTG分析により調べた。この実験では、各試料を700 °Cに保ちながら酸素分圧を段階的に低下させ、それぞれの酸素分圧下における飽和重量から δ 値を見積もった。図8に示すように、Y試料では酸素分圧の低下に伴い飽和酸素量が小さくなり、 $P(\text{O}_2) = 10^2 \text{ Pa}$ で δ 値が0.90から0.55へ急激に減少した。これは低酸素分圧下において、酸素吸収相 ($\delta \approx 1$) と酸素放出相 ($\delta \approx 0$) の中間相に相当する部分酸素放出相 ($\delta \approx 0.5$) が出現するこ

とを示している。一方, Gd, Nd, La 試料の酸素放出挙動は明らかに異なり, 酸素分圧低下に伴う酸素量の減少が大幅に抑えられ, また Y 試料のような部分酸素放出相が見られなかった。特に, La 試料の酸素量は今回の酸素分圧範囲ではほぼ一定であった。この結果は, 大きな (小さな) Ln^{3+} イオンを含む $BaLnMn_2O_{5.8}$ ほど酸化 (還元) が容易であることを表しており, 先に述べた昇温時における酸素吸収実験の結果 (図7) と一致している。

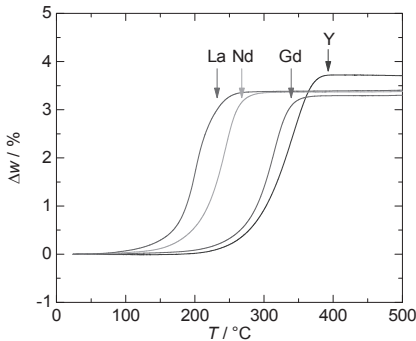


図7. 酸素気流中, 昇温時における $BaLnMn_2O_{5.8}$ ($Ln = Y, Gd, Nd, La$) の TG 曲線 (昇温速度 $1^\circ C \text{ min}^{-1}$) .

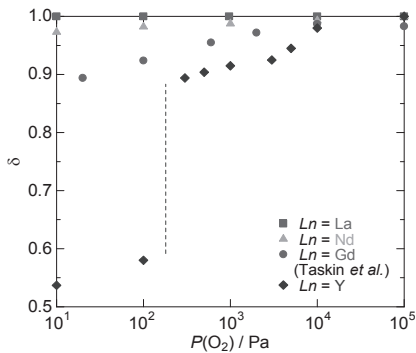


図8. 等温 TG データに基づく $700^\circ C$ での $BaLnMn_2O_{5.8}$ ($Ln = Y, Gd, Nd, La$) の酸素量 δ と酸素分圧 $P(O_2)$ の関係. $Ln = Gd$ のデータは Taskin らの報告⁽¹³⁾を基にプロットした.

3. 2. $Ca_2AlMnO_{5.8}$ の Al サイトへの Ga 置換

$Ca_2Al_{1-x}Ga_xMnO_{5.8}$ ($0 \leq x \leq 1$) の単一相試料を全固溶範囲で合成することに成功した。X 線回折実験より, 全ての試料は斜方晶系の BM 型構造をもつことを確認した。Ga 置換に伴う格子定数変化は異方的であり, Ga 量 x とともに積層方向である b 軸長のみが顕著に変化した。この振る舞いより, Ga 置換に伴う結晶構造変化は主に四面体 (Al,Ga) O_4 層の厚さ増大に由来すると考えられる。ヨ

ウ素滴定で酸素量を求めたところ, 全ての試料でその値はほぼ 5.0 であった。

得られた $Ca_2Al_{1-x}Ga_xMnO_{5.8}$ について, 等温での酸素吸収挙動を TG 分析により調べた。この実験では, 試料温度を $400^\circ C$ に保ちながら雰囲気を変化させて酸素に切り替えて重量変化を計測した (図9) . $x = 0 \sim 0.5$ 試料では酸素中において過剰酸素量 (重量増加値より計算) が速やかに増加し $\delta = 0.40 \sim 0.45$ で飽和するのに対し, Ga 全置換した $x = 1$ 試料 ($Ca_2GaMnO_{5.8}$) では酸素吸収速度が大幅に低下することが判明した。酸素吸収速度に影響を与える結晶粒径には試料間で大きな違いが見られないことから, Ga 置換に伴う酸素吸収速度の低下は本質的であり, Al-O/Ga-O 化学結合の違いに起因する可能性が示唆される。

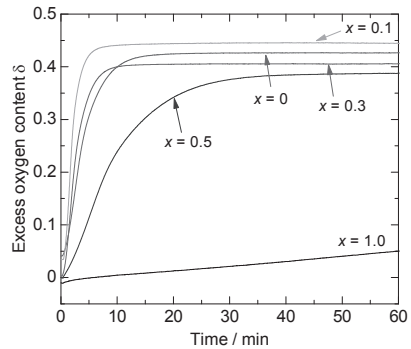


図9. $Ca_2Al_{1-x}Ga_xMnO_{5.8}$ ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0$) の $400^\circ C$ での等温 TG 曲線. データは雰囲気を変化させて酸素に切り替えて測定した.

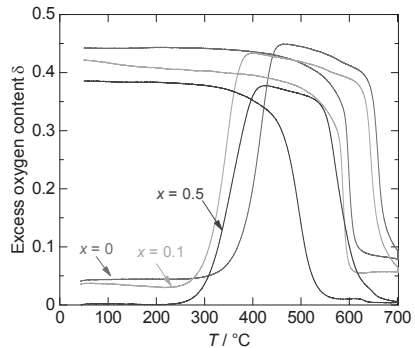


図10. $Ca_2Al_{1-x}Ga_xMnO_{5.8}$ 試料の酸素気流中での TG データ ($x = 0, 0.1, 0.5$).

次に, 各試料について酸素気流中における温度変化時の酸素吸収放出を計測した (図10) . $Ca_2AlMnO_{5.8}$ ($x = 0$) では昇温時に過剰酸素量が $200^\circ C$ 付近から増加し, $450 \sim$

640 °C でプラトーとなり、それ以上の温度で急激に減少した。その後の降温時には 610 °C で過剰酸素量が再び増加し、酸素放出することなく低温で δ 値が飽和した。Ga 置換した $x = 0.1$ でも似たような挙動が見られたが、昇温時の酸素放出および降温時の酸素再吸収の開始温度がやや低下した。さらに、酸素吸収放出温度の低下は高濃度 Ga 置換試料でより顕著になり、 $x = 0.5$ 試料では 80 °C 以上の低温化を達成した。一方、全置換した $x = 1$ 試料では酸素吸収速度が極端に遅く、温度変化時の開始温度を正確に決定することができなかった。

5. まとめ

多量の酸素を高速可逆に吸収放出する機能性材料：酸素貯蔵材料の開発研究において、マンガンを主成分とする 2 種類の新規材料：ダブルペロブスカイト型 $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5+\delta}$ およびブラウンミラーライト型 $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$ を見出した。これらは従来材料である CZ とは異なる酸素吸収放出特性を示すことから、CZ の適用が困難な新たな応用分野を開拓する可能性を秘めている。

興味深いことに、両材料とも酸化還元種としてマンガンを含むものの、互いに全く異なる温度・雰囲気応答性を示す。これは両者間でマンガンの（平均）価数が異なり、 $\text{BaYMn}_2\text{O}_{5+\delta}$ では 2.5~3.5 価、 $\text{Ca}_2\text{AlMnO}_{5+\delta}$ では 3~4 価の範囲で変動することに起因する。前者はマンガンが低価数に片寄っているため、強力な酸素吸収能をもつ反面、酸素放出には還元ガスを必要とする。一方、後者はその逆の特性を示し、酸素吸収能がやや弱いものの小さな温度スイングのみで顕著な酸素吸収放出が発現させることができる。

これら新規材料の応用を目指すには、用途に合わせた「オンデマンド」酸素吸収放出特性へのチューニングが不可欠である。両材料とも金属イオンの層状構造をもっており、明確な「酸素吸収放出サイト＝活性サイト」を有するのが特徴である。本研究では、このような活性サイトに隣接する金属を同価数元素置換することにより、酸化還元種であるマンガンを変えずに酸素吸収放出特性が可能なることを示した。

$\text{BaLnMn}_2\text{O}_{5+\delta}$ では、La などイオン半径の大きな Ln 種を選ぶことにより酸素吸収能が向上することが明らかにな

った。この強い酸素吸収能は、本材料を還元剤や酸素除去などへ応用する上で非常に有効である。一方、Ga 置換した $\text{Ca}_2\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{MnO}_{5+\delta}$ における動作温度の低温化は、本材料を酸素ガス製造／濃縮技術へ応用する際に好ましい。

謝辞

本稿の研究成果の一部は、以下の助成を受けて実施しました。ここに感謝の意を表します。科学研究費補助金（課題番号 22750181, 26288104, 15K13793）、平成 23 年度稲盛財団研究助成、平成 25 年度池谷科学技術振興財団単年度研究助成。

参考文献

- (1) J. Kašpar and P. Fornasiero, *J. Solid State Chem.*, **171** (2003) 19-29; J. Kašpar, P. Fornasiero and N. Hickey, *Catal. Today*, **77** (2003) 419-449.
- (2) T. Motohashi, T. Ueda, Y. Masubuchi, M. Takiguchi, T. Setoyama, K. Oshima and S. Kikkawa, *Chem. Mater.*, **22** (2010) 3192-3196.
- (3) 本橋輝樹, 上田拓, 鱒淵友治, 吉川信一, 滝口真, 瀬戸山亨, 大島一典, 燃料電池 **10-1** (2010) 145-148.
- (4) T. Motohashi, Y. Hirano, Y. Masubuchi, K. Oshima, T. Setoyama and S. Kikkawa, *Chem. Mater.*, **25** (2013) 372-377.
- (5) J. P. Chapman, J. P. Attfield, M. Molg, C. M. Friend and T. P. Beales, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **35** (1996) 2482-2484.
- (6) F. Millange, E. Suard, V. Caignaert and B. Raveau, *Mater. Res. Bull.*, **34** (1999) 1-9.
- (7) M. Karppinen, H. Okamoto, H. Fjellåg, T. Motohashi and H. Yamauchi, *J. Solid State Chem.*, **177** (2004) 2122-2128.
- (8) A. J. Wright, H. M. Palmer, P. A. Anderson and G. Greaves, *J. Mater. Chem.*, **12** (2002) 978-982.
- (9) H. M. Parmer, A. Snedden, A. J. Wright and C. Greaves, *Chem. Mater.*, **18** (2006) 1130-1133.
- (10) E. V. Antipov, A. M. Abakumov and S. Y. Istomin, *Inorg. Chem.*, **47** (2008) 8543-8552.
- (11) T. Motohashi, M. Kimura, T. Inayoshi, T. Ueda, Y. Masubuchi, and S. Kikkawa, *Dalton Trans.* **44** (2015) 10746-10752.
- (12) R. D. Shannon and C. T. Prewitt, *Acta Cryst.*, **B25** (1969) 925-946.
- (13) A. A. Taskin, A. N. Lavrov and Y. Ando, *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 091910/1-091910/3.



小型電気自動車のための CFRP ボディと 車両制御の融合技術開発

林 憲玉* 竹村 兼一* 山崎 徹*
中村 弘毅** 加藤木 秀章** 高山 英一***

Development of Vehicle Control and CFRP Chassis for Micro Electric Vehicles

Hun-Ok LIM* Kenichi TAKEMURA* Toru YAMAZAKI*
Hiroyuki NAKAMURA** Hideaki KATO** Eiichi TAKAYAMA***

1. はじめに

近年、様々な電気自動車(Electric Vehicle: EV)が市場に普及しつつある。EV は内燃機関自動車と比較し、車両を構成する部品点数が少なく、排気ガスを車両から排出しないため環境負荷が小さい。また、電気モータはトルク応答が内燃機関に比べて速いため、発生したトルクを高速かつ正確に制御でき、自動運転などの車両制御技術が応用しやすい。しかし、航続距離は内燃機関自動車に劣り、充電にかかる時間が長いなどの課題があるため、一度の走行が短い都市交通への応用がより適していると考えられる。

このような背景から EV の中でも、近距離、短時間での使用に限定した 1 人から 2 人乗りの新しい移動手段として小型 EV(Micro Electric Vehicle: MEV)が注目されている。一般生活における車での一日当たりの移動距離は、約 6 割が半径 10km 圏内となっており、車両に搭乗する人数も 2 人以下が大半を占めている。また、国土交通省は軽自動車より小型で 1 人もしくは 2 人乗りの自動車の新たな車両規格の導入を決定⁽¹⁾している。

しかしながら、小型電気自動車普及を妨げる障害が数多く存在する。まず、軽自動車よりも小型な車体であるため、衝突に弱い。車体の小型軽量化と高剛性を両立するためには複合材料などの新素材の利用が必要不可欠である。キャビンに比強度及び比剛性に優れた炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いることで、軽量かつ高い安全性を有する小型電気自動車を製作することが可能になると期待されているが、キャビンに用いる CFRP と車体を構成するチュー

ブラーフレーム構造の金属部材を接合することができる部材を開発する必要がある。

また、自動車は一般的にホイールベースやトレッドを長くすることで安定化し、短くすることで小回りが利く。そのため、小型自動車は都市部において小回りが利くといった利点がある一方で、姿勢が不安定になりやすく、ピッチングやローリング振動が発生しやすい。しかし、電気モータの即応性を利用した姿勢安定化制御によってこれらの振動を抑えることが期待できる。

さらに、車両を小型化することによって冗長性が少なくなり、利用範囲が限定されてしまうことも生産性の点からは問題となる。MEV の用途としては、手軽さを活かして主婦や高齢者の買い物や送迎や、省スペースで小回りが利くことを活かした配達など業務での使用、観光地での観光客の移動手段、カーシェアリングなどが想定される。これらの需要に対応するためにはベースのプラットフォームは共有しながら目的ごとにバリエーションが必要である。つまり、低コストで設計変更が容易な構造で小ロット多品種生産を実現することが望まれる。

現在市販されている電気自動車開発は、制御システム設計における明確なプラットフォームが存在しないため、開発の手法や手順は各企業の裁量に任されている。そのため、大学など外部の機関や一般人が制御システムに変更・改良を施すことは困難である。そこで、制御プログラムを一定の範囲に分けてモジュール化することにより、複数の制御プログラムの統合・開発を容易にする「汎用制御プラットフォーム」を考案する。

このように、小型電気自動車が普及するにはクリアすべき課題がいくつかある。そこで、本研究では車両の定員 2 人まで、半径 10km 以内の短距離走行を想定した小型電気自動車の開発を目的とする。しかし、前述のようにクリア

*教授 機械工学科
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**助手 機械工学科

Research associate, Dept. of Mechanical Engineering

*** 高山自動車 Takayama car

すべき課題がいくつかあるため、各研究室の特長を活かしてそれぞれの課題に取り組む。

本報では、2013-2014 年度の工学研究所共同研究として行った小型電気自動車開発のための要素技術研究について報告する。制御工学、材料力学、振動工学の観点から、以下6つのテーマに取り組んだ。

- 1)制御モジュール構築 (林研究室)
- 2)車両ピッチング制御に関する検討 (林研究室)
- 3)CFRP と金属部材を接合可能な部材の設計・製作・評価 (竹村研究室)
- 4) 温湿度・振動複合環境シミュレーターによる新素材の減衰特性の評価 (山崎研究室)
- 5)小型自動車の試作プラットフォーム製作 (林研究室・高山自動車)
- 6)学生フォーミュラ車両製作を通じた学生の実践的のづくり能力の向上 (山崎研究室)

2. 制御用モジュール構築

車両制御の統合・開発を容易にするための汎用制御プラットフォームを考案する。その汎用制御プラットフォームの概要を図1に示す。ハードウェア入出力に関連する部分とそうでない部分を切り分けることで、センサ等ハードウェアの交換・追加を容易にする。ハードウェア入出力に関連しない部分を役割に応じた3段階に分割する。

入出力に関連しない3つの制御モジュールの詳細を以下に述べる。一つ目は走行環境モジュールである。このモジュールでは、車両周辺の状況を考慮した上で車両の行動を決定するための役割を担う。ドライバーが運転する車両だけでなく、周囲を走行している別の車両や障害物に基づいた制御を行う。二つ目は車両全体の状態を制御するためのモジュールである。走行環境モジュールから出力された車両周辺の状態から、必要と判断した車両の推進力を実現しつつ車両を制御するのに必要なトルクを出力する。トラクション制御などはこゝに該当する。三つ目はモータ・電動パワーステアリング・ブレーキなど機構のモデルに基づいた制御モジュールである。車両全体を制御するため、指示されたタイヤ軸トルクを発生させるのに必要なモータトルクを機構のモデルベース制御により算出し、動力のモータに送る。

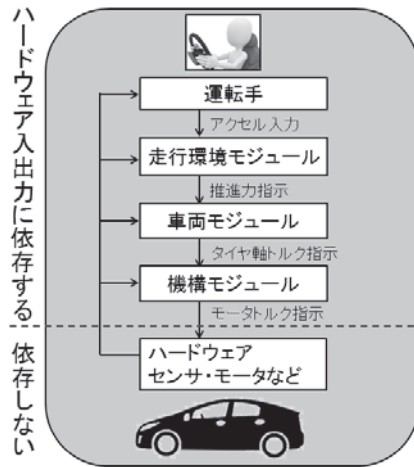


図1 汎用制御プラットフォーム概要図

以上の三種類のモジュールで汎用制御プラットフォームが構成される。三種類のモジュールの中で、車両モジュールに姿勢安定化制御を組み込み、次節で詳しく説明する。

3. 車両のピッチング制御に関する検討

ここでは、ホイールベースの短い車両の問題点の一つであるピッチング振動について、駆動モータによる制御を行い、その有効性を検討する。

3.1 車両姿勢安定化制御モデル

最適レギュレータを用いて走行中に発生するピッチング振動を抑制する。自動車を安定化させるために、図2のような自動車モデルを考え、状態空間方程式を組み立てる。モデルの状態方程式を式(1)と(2)に示す。式(1)の左辺は重心点の垂直方向の変位と速度、ピッチ軸周りの角度と角速度から構成される4次元の状態変数である。また入力にはタイヤ軸でのトルク T を意味する。

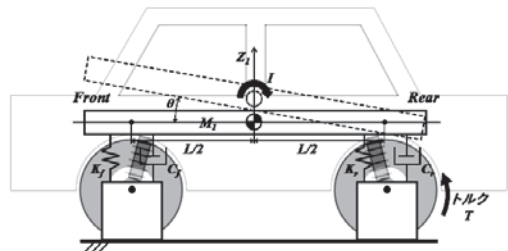


図2 自動車モデル

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_f + K_r}{M} & -\frac{C_f + C_r}{M} & -L\frac{K_f - K_r}{2M} & -L\frac{C_f - C_r}{2M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -L\frac{K_f - K_r}{I} & -L\frac{C_f - C_r}{I} & -L^2\frac{K_f + K_r}{2I} & -L^2\frac{C_f + C_r}{2I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} T \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} T \quad (2)$$

これらを基に最適レギュレータを用いてコントローラを設計する。状態変数と入力の両者のバランスをとるために評価関数 J を用い、状態変数と入力にかかる行列 Q と R をそれぞれ調整する。行列 Q は 4 次元の対角行列である。行列 R は入力の次元と同様に 1 次元である。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (3)$$

制御システムはフィードバック制御を用い、最適レギュレータのみを使用した開ループ型のフィードフォワード制御である。制御システムを図 3 に示す。そして走行中に発生した状態変数の変化は加速度センサとジャイロセンサで検出し、評価に用いる。

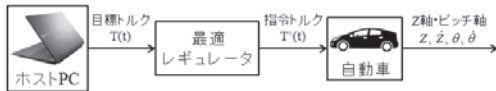


図 3 姿勢安定化制御システム

3.2 移動ロボットを用いた実験

ピッチング制御の有効性を示すためモータを動力とする移動ロボットを製作し実験を行った。移動ロボットの外観を図 4 に示す。



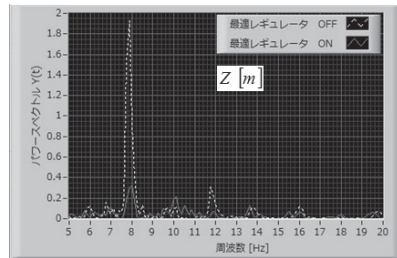
図 4 自律走行ロボットの外観

機体はアルミフレームで構成されている。駆動には、左右の後輪一つずつ搭載しているブラシレス DC モータを使用している。ステアリングには、サーボモータを使用し、ラックとピニオンを介して前輪を操舵する。またサスペンションは適しているものが入手できなかったため、ばねとダンパーの両方の性質を持つ、サミニ社製の「防振ダンパーばね」を使用した。センサやコントローラ、バッテリーなどのハードウェアを搭載したアルミ板の四方に防振ダンパーばねを装着する事で、自動車のサスペンションの機能を再現している。この防振ダンパーばねを用いたサスペンションは、実際の自動車と構造が異なるが、モデル上は第 3.1 節で導出した自動車モデルと同様である。制御用ハードウェアには、実際の小型電気自動車にも搭載可能な、日本ナショナルインスツルメンツ社の CompactRIO と LabVIEW を使用する。パソコンにルータを接続し、CompactRIO に接続された無線 LAN 子機と無線通信を行って制御する。アクチュエータやセンサ等の入出力には CompactRIO に付随する A/D コンバータや D/A コンバータ、DIO 等を使用する。

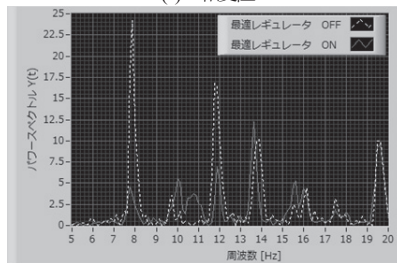
姿勢安定化制御の有用性を検証するために、直線走行における姿勢安定化制御実験を行う。ステップ状の指令トルクを入力として与えた際、姿勢安定化制御を用いた時と用いない時で生じる振動の比較を行う。

3.3 姿勢安定化制御実験

実験では、状態変数を構成する Z 軸方向の変位と速度、ピッチ軸周りの角度と角速度を検出した。その値に高速フーリエ変換を施してパワースペクトルにまとめた。それぞれの状態変数のパワースペクトルを図 5(a)~(b)に示す。



(1) Z 軸変位



(3) ピッチ軸角度変位

図 5 状態変数のパワースペクトル

状態変数の変化が、最適レギュレータの効果によって抑えられているのがグラフから読み取れる。状態変数の変化が8[Hz]付近に集中しているため、ほぼ意図通りの周波数帯の変位を最適レギュレータで抑制できている事が確認できる。

4. CFRP と金属材料を接合可能な部材の設計・評価

自動車などの機械製品に軽量高剛性な CFRP を利用する場合、金属材料と CFRP の接合方法、その強度が問題になる。提案する小型電気自動車用車体フレーム(図 7 参照)にも軽量化のため CFRP を活用し、また部品によっては金属材料が用いられる。そこで、接合部材の設計・製作・評価を行った。車体総重量は 750kg, 前面部の接合箇所は 6 箇所を想定する。なお、設計には SolidWorks 2010 を用いた。設計した接合部材を図 8 に示す。丸パイプ(S45C)と接合部材(S50C)は溶接し、接合部材と角パイプ(CFRP)はボルト接合する。

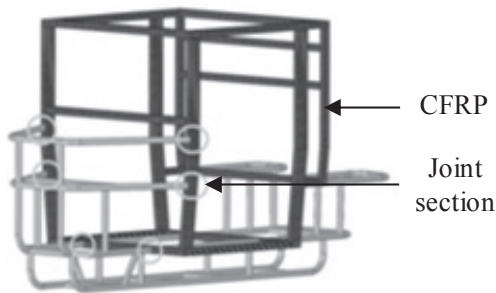


図 7 EV 用車体フレーム

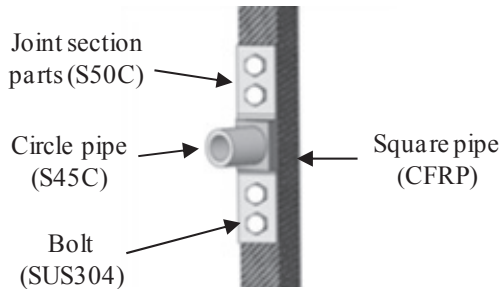


図 8 接合箇所

4.1 接合部材の解析方法

4.1.1 使用要素及び物性値

本研究では、汎用有限要素法解析ソフト ANSYS 14.0 を用いて解析を行った。要素は 3 次元要素 Solid186(6 面体形状, 20 節点)とした。節点数は 185584, 要素数は 114420 である。接合部材に用いる材料の物性値を表 1^{(2),(3)}に示す。繊維体積含有率は 45%とした。

表 1 CFRP 及び金属材料の物性値

	Young's modulus (GPa)		Poisson's ratio		Shear modulus (GPa)		Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Failure strain (%)
CFRP	E_x	65.3	ν_{xy}	0.3	G_{xy}	12.1	σ_x	502	1.78
	E_y	16	ν_{yz}	0.3	G_{yz}	12.1	σ_y	82.4	
	E_z	65.3	ν_{xz}	0.1	G_{xz}	49.5	σ_z	502	
S45C	202	0.3	202	570	345	20			
S50C	206	0.3	206	608	363	18			
SUS304	197	0.3	197	480	255	40			

4.1.2 境界条件

境界条件を図 9 に示す。拘束条件は角パイプ両端の断面を選択し、Z 軸を中心とした回転自由度以外すべて拘束した。荷重を算出する際、式(4)を用いた。荷重条件は丸パイプ断面に垂直な荷重を 8680N 負荷させた。

$$F = \frac{M \times V}{S \times N} \tag{4}$$

F: 荷重, M: 質量 750kg, V: 衝突速度 50km/h,
S: 衝突時間 0.2s, N: 接合箇所

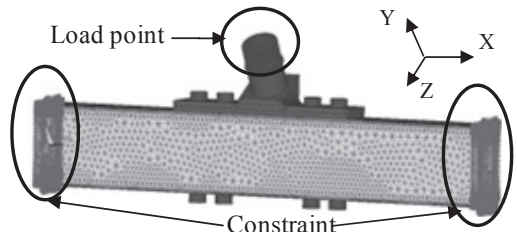


図 9 境界条件

4.2 解析結果

CFRP 製角パイプと金属材料をボルト接合させた部材の相当応力分布を図 10 に示す。接合部材の最大相当応力は 78.9MPa であり、構成材料である S50C の降伏応力の 22% 程度であった。

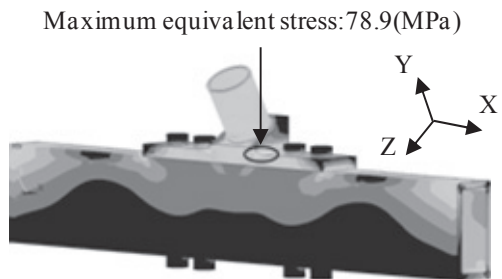


図 10 相当応力分布

4.3 接合部材の製作と荷重試験

CFRP 製角パイプを成形する際、型を用いてハンドレイアップ法により成形した。成形条件として、成形温度は90℃、成形時間は3hrsとした。CFRP 製角パイプの寸法は外径は縦80mm、横40mm、内径は縦66mm、横26mm、長さは460mmとした。成形したCFRPの重量は820g、繊維体積含有率は41%であった。

CFRP 製角パイプと金属部材をボルト接合させた部材(図11参照)を用いて、荷重試験を行った。

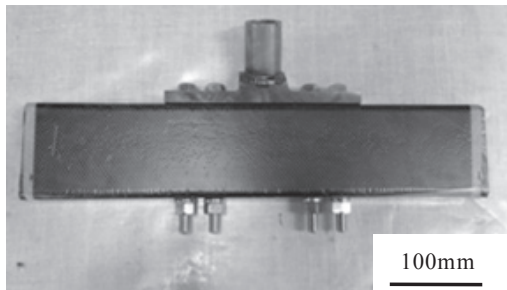


図11 接合部材

試験本数は2本とし、クロスヘッドスピードは0.1mm/min、試験荷重は8680Nとした。また、試験荷重に到達後、1分間荷重を保持した。作製した接合部材の荷重-変位線図を図12に示す。8680Nを1分間負荷させた場合、接合部材は破壊せず、ボルト接合が可能な部材を作製することができた。

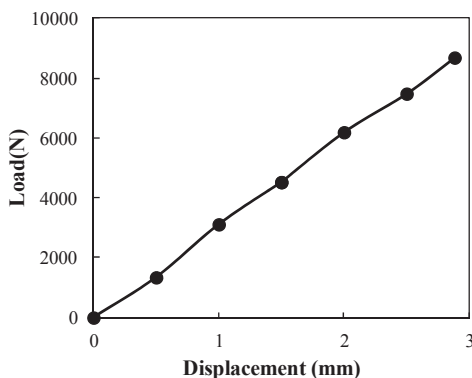


図12 荷重-変位線図

5. 新素材の減衰特性の評価

5.1 金属材料の特性(剛性, 減衰)は、実社会環境下においては温度や湿度による影響は小さく、無視しうるものと思われる。一方、樹脂材料や自然素材の複合材料は、温度や湿度の影響を大きく受け、剛性や減衰が変化しうるものと

思われる。そこで、減衰を増大させた金属材料、自然にやさしい新複合素材について、試験片を用意し、これら試験片の温度による減衰の変化について、時間-周波数分析を用いて試みた。

5.2 温湿度・振動複合環境シミュレータ

振動シミュレーションシステムと共に恒温恒湿槽を設計・製作している(株)IMVから、図6にその概観を示す温湿度・振動複合環境シミュレータを導入した。

導入したシミュレータの特徴は、以下の通り。

- (a) 集中管理：振動のほか温度・湿度を含めたシステム全体の制御と管理が可能。
- (b) 槽底直結方式：振動発生器を直接、恒温恒湿槽内の床に接続する方式であるため、振動発生器と供試品の連結を行う軸の付け替えの煩わしさや加振のロスが無い。
- (c) 移動機構を標準装備：振動発生器に供試品を設置する際、移動機構により、恒温恒湿槽内での供試品の取り付けが不要であるため作業効率が良い。また、振動シミュレーションシステムと恒温恒湿槽をそれぞれ単独で使用することもできる。
- (d) 省エネ機能：冷凍機能力の積極制御により、無駄なエネルギーを低減し、省エネ効果が期待できる。



図13 温湿度・振動複合環境シミュレータ外観

5.3 実験条件

図14に温湿度・振動複合環境シミュレータの振動部に、金属試験片および複合材試験片をそれぞれ片持ち状態で設置した状態を示す。この状態において、庫内の雰囲気温度を-30度、10度、30度、50度、70度として、振動台自体をインパルス信号で励振し、その際の試験片の振動応答を加速度計により測定した。測定した加速度波形は、時間一周波数分析を行い、第1次固有振動数およびその振動数における対数減衰率を求め、減衰比を算出した。

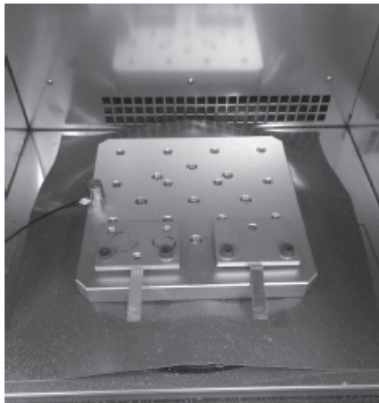
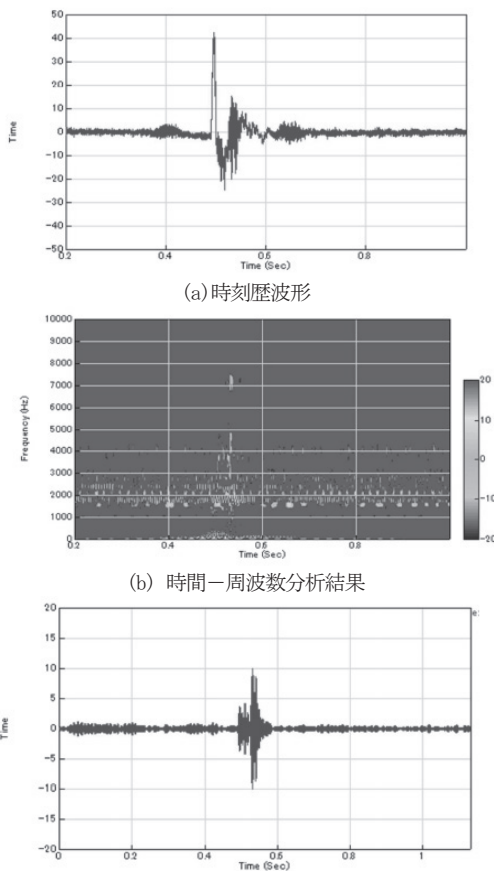


図 14 試験片加振状況

5.4 減衰評価結果と考察

金属試験片および複合材試験片の測定および分析結果の例として、インパルス励振時の時刻歴データを図 15(a)、時間一周波数分析結果を図 15(b)、それより抽出した第 1 次共振振動数での時刻歴データを各図 15(c)にそれぞれ示す。



(c) 抽出した第 1 次共振振動数での時刻歴データ
図 15 減衰分析例

測定した加速度波形は、時間一周波数分析を行い、第 1 次固有振動数およびその振動数における対数減衰率を求め、減衰比を算出した。算出した温度ごとの減衰比を図 16 に示す。

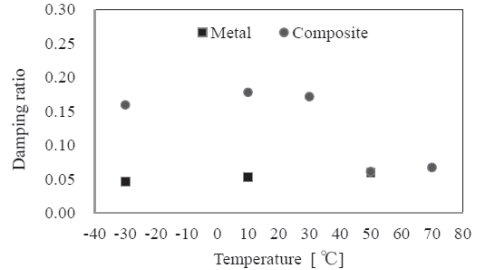


図 16 温度変化による減衰比の推移

金属材料の減衰比は温度によってほとんど変化しないのに対して、複合材料の減衰比は 40 度付近で急激に下がっていることが分かる。

6. 小型電気自動車試作車 105 型の開発

6.1 試作車両概要

本研究において製作した小型電気自動車「105 型」の仕様を表 2 に、外観を図 17 に示す。

表 2 105 型の主な仕様

全長	2490[mm]	
幅	1290[mm]	
高さ	1680[mm]	
ホイールベース	1730[mm]	
車両重量	450[Kg]	
最高速度	60[km/h]	
駆動方式	MR 方式 (Mid-motor Rear-drive)	
サスペンション	ストラット式	
ブレーキ	前輪	ディスクブレーキ
	後輪	ドラムブレーキ
モータ	DC ブラシレスモータ	
バッテリー	鉛蓄電池 12V/42Ah×6	
	鉛蓄電池 12V/28Ah×1	

シャシの設計方法には、製作が容易で安価かつ汎用性に優れたフレーム構造を採用した。動力には三相ブラシレス DC モータを使用する。駆動方式は、モータから出力された動力をディファレンシャルギアとドライブシャフトを介して後輪に伝達する方式を採用している。制御には、National Instruments 社の CompactRIO を

ハードウェアに、付随する同社のグラフィカル言語 LabVIEW をソフトウェアに使用する。



図17 小型電気自動車 (105 型)

62 車体 (ボディ)

車体の構造は衝突に耐えることができ、小規模な工場での製作を考慮した結果、鋼管を組み合わせて車体を構成するチューブラーフレーム構造を採用した。溶接ロボットやプレス加工などが使えないため大量生産には向かないが、溶接機やパイプ加工機といった簡易な製造設備で製作でき、車体は軽量で高い剛性・強度を持たせることができる。

また、少量多品種生産を容易にするためにモジュール毎に分割して設計を行える構成にした。この車両は図18のようにシャシフレーム・フロント・キャビン・リアの四つのモジュールに分けて設計を行っている。そのため、設計変更やモデルチェンジを行う際に変更が必要なモジュールのみを設計することで用途に応じた車両フレームの開発が可能となっている。

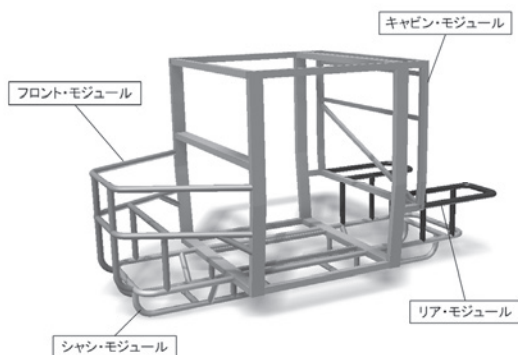


図18 車体を構成するモジュール

63 シャシ

シャシの構造を図19に示す。シャシはモータやバッテリーなどの駆動部品を収め、車両特性を決める重要な部分である。そのため、特に汎用性が求められる部分であり、シャシを共通化することでモデル展開を行う際、開発期間と製作時間の大幅な短縮や生産数の増加によるコストの低減が可能になる。

今回設計した小型電気自動車では、シャシ上部をフラットに保つことで、車種展開の際にキャビン・フロント・リアモジュール設計を制約しないように考慮した。また、重心を下げるために、モータやデフレンシャルギア、バッテリーなどの重量のある機器をシャシフレーム内に配置した。また、車両重量の半分近くを占めるモータとバッテリーを車体中央に配置することで、車体の安定性の向上を図った。

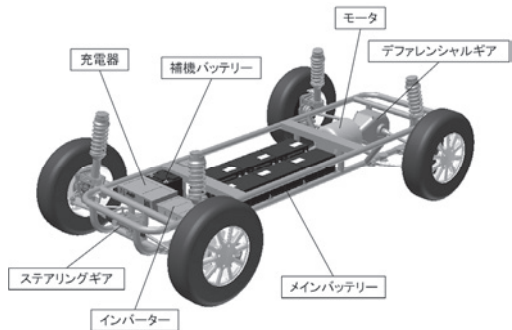


図19 シャシの構造

7. 学生の実践的ものづくり能力の向上

本研究のような車両開発はアイデアだけでなくそれを実現する製作技術、あるいはその両者をつなぐ実践的な能力が必要不可欠である。しかし、最近の工学系大学では、実習や設計・製図などのカリキュラムが減少しており、欧米に比べ、ものづくりの機会が不足している。今回の研究においても試作車両は外注して製作しているが、車両の完成は業者に依存してしまい、また設計変更などを反映するには時間とコストがかかる。そこで、学生のものづくりの経験値を高めることで今後の研究を円滑に進めるべく、学生フォーミュラのEV車両を題材とし、設計・製作を行った。

7.1 学生フォーミュラ大会概要

学生自らがチームを組み約1年間で1人乗り小型レーシングカーを開発・製作することによって、学生がものづくりの本質やそのプロセスを学び、ものづくりの厳しさ・おもしろさ・喜びを実感することを目的としている。年に1度開催される全日本大会では、走行性能だけでなく、車両のマーケティング、企画・設計・製作、コスト等のものづくりにおける総合力を競う。米国ではものづくり実践教育の場として1981年から大会が開催され、日本でも米国「Formula SAE®」のルールに準拠し、2003年から全日本学生フォーミュラ大会を開催している⁶⁾。

7.2 車両製作の概要

設計については鋼製パイプの溶接によるフレーム構造など、前章で提案した車両と共通点が多くあるため、ここでは主に加工について述べる。フレーム構造の溶接は専門の企業の方の指導を受けて行った(図20参照)。溶接しずみの発生しにくいトラスの組み方など、設計時点を考慮すべき点についても指導を受けた。



図20 フレーム製作の様子 (溶接作業)

駆動系を含む電気系統の配線については、電気電子情報工学専攻の大学院生が主体となって設計製作を行った(図21参照)。電気自動車は高電圧・高電流を取り扱うため設計や作業中に留意すべき点が多く、Formula SAE®のルールに書かれた安全基準や、電気車検担当の審査員の指導に従って製作を進めた。

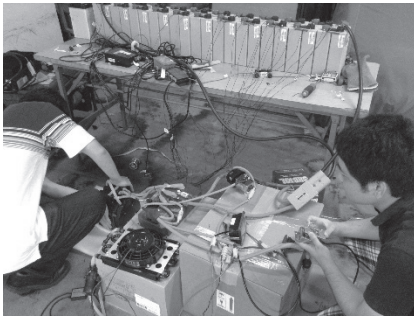


図21 駆動系配線確認

予定から大幅に遅れたものの完成した車両を図22に示す。設計・製作において多くのことを学んだ一方で、工程管理の拙さなど、改善すべき点も多く、それについては今後の活動で検討すべき課題である。学生フォーミュラの活動についてはテクノサークルとしても継続予定であり、本年度の課題については来年以降の活動で改善していく。



図22 完成車両外観

8. まとめ

車両制御の統合・開発を容易にするための汎用制御プラットフォームも開発し、そのプラットフォームには、姿勢安定化制御則を組み込んだ。モータを動力とする自律走行ロボットを利用した走行実験により、姿勢安定化則の有効性が確認できた。

また、小型電気自動車のキャビンに用いる CFRP 製角パイプと金属部材のボルト接合可能な部材を設計・評価し、接合部材の開発を行った。その結果、設計した部材の相当応力は構成材料である S50C の降伏応力の 22% 程度であった。また、作製した接合部材に 8680N を 1 分間負荷させた場合では破壊せず、ボルト接合が可能な部材を作製することができた。

温度や湿度の影響を大きく受けやすい樹脂材料や自然素材の複合材料の特性を、温湿度・振動複合環境シミュレータを用いて解析した。その結果、金属材料の減衰比が温度によってほとんど変化しないのに対して、自然素材を用いた複合材料が温度上昇と共に急激に減衰比が減少する特性を見出した。

1~2 人乗りの MEV 試作車両「105 型」の設計開発を行った。外注部品製作の遅れにより現時点で車両は完成していないが、車両が納入され次第、走行実験を行う。

学生フォーミュラ大会仕様車両の設計・製作を通じて学生のものづくりに対する理解を深めることができた。工程管理など今後改善すべき課題があるものの、1 台の電気自動車を走行可能な状態にまで自作したことで、設計から製作に至る過程で注意すべき点などに気づくことができ、今後の研究に役立てられることが期待できる。

なお、本報は 2013 年度および 2014 年度工学研究所共同研究の成果を再編集したものである

参考文献

- (1) 加藤敦宣, 社会イノベーション研究 Vol.7, (2012-2), p.29.
- (2) 足立廣正, 長谷川照夫, 日本複合材料学会誌 Vol.30, (2004-3), p.120.
- (3) 山部昌, 小森昌宏, 日本設計工学会北陸支部研究発表会論文集, (2007), p.21.
- (4) 全日本学生フォーミュラ大会ホームページ <http://www.jsae.or.jp/formula/jp/> (2015 年 10 月 16 日アクセス)



外部磁界の2次元走査による超伝導ジョセフソン接合と 超伝導量子干渉計の電流電圧特性の変調

中山 明芳* 阿部 晋** 穴田 哲夫***

Modulation of Current-voltage Characteristics of Superconducting Josephson Junctions and Superconducting Quantum Interference Devices by Two-dimensional Scanning of External Magnetic Field

Akiyoshi NAKAYAMA* Susumu ABE** Tetsuo ANADA***

1. 緒言

超伝導は1911年カマリン オネスにより、約4.2K以下で水銀の抵抗値が測定できないほど小さくなるというかたちではじめて発見されている。この超伝導の 特徴的な性質としては

- (i) 超伝導体内の磁束密度が零(反磁場の効果で磁束線が超伝導体の外へ押し出される)
- (ii) 直流抵抗の消滅
- (iii) 超伝導体でつながれた接合間の干渉効果(超伝導量子干渉計(Superconducting Quantum Interference Devices)というかたちで利用)
- (iv) オーダパラメータにより表される超伝導状態
- (v) 超伝導サンドイッチ構造での超伝導電子(クーパ対)のトンネル効果等がある。

このうち性質(v)については、イギリスのケンブリッジ大学のジョセフソン氏は2枚の超伝導体で薄い酸化膜を

挟んだサンドイッチ構造で電流が流れても電位差が生じないことを1962年理論的に予想し、この現象は翌年実験的に観測されている。以来この共同研究で扱うような超伝導体を2つ弱く結合した構造は「ジョセフソン接合」と呼ばれる。ジョセフソン接合は基本的に二端子の素子である。超伝導デバイス及び超伝導集積回路は、3端子のトランジスタ素子ではなく、超伝導体/バリア/超伝導体の構造を基本とする2端子のジョセフソン接合を中心的な構成素子として使っている。論理回路動作は、この2端子素子を元に回路的に工夫することで得られ、超伝導集積回路への応用が研究されている[1, 2]。

我々のグループでは、ニオブウム金属を使った超伝導薄膜堆積、バリア層用のアルミニウムの堆積とその自然酸化プロセスの最適化、及びフォトグラフィーと陽極酸化方法を使った接合部決定プロセスの改善により、実際に超伝導二端子および超伝導干渉計構造を製作し、その基本特性を測定している。さらに外部から加える磁界に対する超伝導接合の電流電圧特性と超伝導電流の特性を測定する新しい測定手法を開発してきている。

* ,***教授 電気電子情報工学科
Professor, Department of Electrical and Electronics and Information Engineering
**准教授 電気電子情報工学科
Associate Professor, Department of Electrical and Electronics and Information Engineering

2. 実験

2.1 素子製作用スパッタリング装置

磁界センサーを応用とめざす超伝導接合の製作のためには、マグネトロンスパッタリング装置を使う。試料交換はロードロック室のみの真空を破ることにより短時間でおこなうことができる。主排気はターボ分子ポンプとドライポンプである[3]。

2.2 磁界特性測定装置

図1に示すように円形コイル[ヘルムホルツコイル]を3対使い、 x 、 y 、 z 方向の外部磁界を生成する。パーソナルコンピュータにより GPIB 制御された直流電源によりコイルに電流を流すと、その電流に比例して磁界が生じる。プログラムファイルであらかじめ設定したアルゴリズムにより、外部磁界を正確に生成し、デジタルオシロスコープで電流・電圧特性を計測することが可能となる[4,5]。

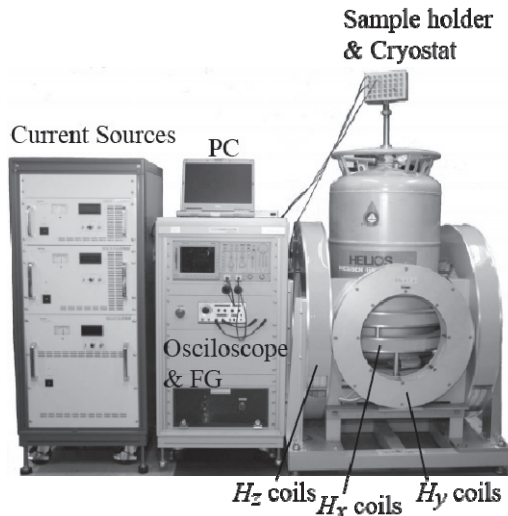


図1. 超伝導接合の磁界測定装置

液体ヘリウム中の超伝導接合のそれぞれの辺に平行に H_x , H_y 成分を有する磁界 H を外部よりヘルムホルツコイルを使い加えることができる。

3. 外部磁界による超伝導電流の変調

「非常に薄い絶縁膜を挟んで2つの超伝導体があるとき、2つの超伝導体の間に電流が流れていても、2つの超伝導体の間の電位差が0でありうるという現象」が、ジョセフソンにより理論的に予言され、翌年実験により確かめられ、ジョセフソン効果と呼ばれることになった。この現象は、言い換えると、一方の超伝導体から他方の超伝導体へ、電子のみならず、いわば、超伝導電子対(クーパー対)もトンネルするというわけである。

図2に示すサンドイッチ形の超伝導接合を電流が流れても、二つの超伝導電極間に電位差は生じない。このとき、2つの超伝導体間に電位差なしで、いくらでも大きな電流を流せるわけではなくて、流しうるある上限の値がある。2つの超伝導体を下部の超伝導体電極及び上部の超伝導体電極と呼ぶことにすると、この下部超伝導体電極から上部電極に向かって、接合を電位差なしで流れる電流 i は、二つの超伝導体電極間の「(ゲージ不変な)位相差 γ 」の \sin に比例し、

$$i = \sin \gamma \tag{1}$$

の関係が成り立つ[6]。

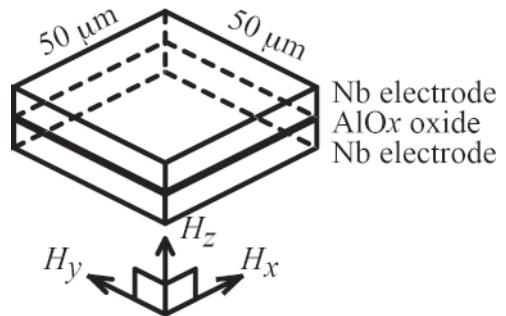


図2. 正方形接合

超伝導体の Nb でサンドイッチされた構造の中間の薄いアルミニウム酸化膜の正方形接合面のそれぞれの辺に平行に H_x , H_y 成分を有する磁界 H を外部よりヘルムホルツコイルで加えると、光の回折と同じように、 H_x , H_y 成分に対する依存性はフラウンホーファーパターンになる。

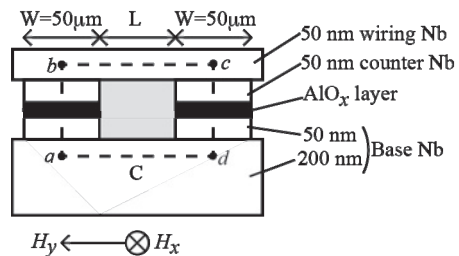


図3. 超伝導量子干渉計の構造

図2に示した超伝導接合が左右にあり、上側電極同士、下側電極同士を超伝導体でつなぐと、干渉計の構造となる。外部磁界の H_x , H_y 成分の向きは単一接合の場合と同じで、接合の辺に平行である。特に H_x 成分は干渉計のループ C と鎖交する磁束を決める。

図2に示した単一の超伝導接合を二つ使い、接合の上側電極同士、下側電極同士を超伝導体でつないでループ構造にしたのが、超伝導量子干渉計である(図3)。この量子干渉計の構造で外部磁界の影響を以下説明する。図3で基準となる左接合の下部の電極内の任意の点 a のオーダパラメータの位相を $\theta(a)$ 、この点 a から垂直に酸化膜バリアを横切って、上部の電極内に入り点 b を考える。その点の位相を $\theta(b)$ としている。左接合面を垂直に横切る経路に沿ったゲージによらない「ゲージ不変な位相差 γ 」は、

$$\gamma = \theta(b) - \theta(a) + \frac{2\pi}{\Phi_0} \int \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} \quad (2)$$

である。ここでゲージ不変な位相差 γ の前半は、上部電極の点 b の位相 $\theta(b)$ と、基準となる下部電極の点 a のオーダパラメータの位相 $\theta(a)$ の差である。後半は点 a から垂直に酸化膜バリアを横切って、もう一方の電極の点 b までの経路に沿う電磁場のベクトルポテンシャル \mathbf{A} の線積分の項が入っている。さらに、右側接合の上部電極の点 c と下部電極の点 d を4点 $abcd$ が長方形 $abcd$ になるように考えてみる。このとき、経路 dc に沿うゲージ不変な位相差 γ の、経路 ab に沿うゲージ不変な位相差 γ に対する差分 $\Delta\gamma$ は、長方形 $abcd$ に鎖交する磁束 $\Delta\Phi$ の $2\pi/\Phi_0$ 倍であることになる。数式で書くと

$$\Delta\gamma = \frac{2\pi}{\Phi_0} \Delta\Phi \quad (3)$$

である。特に、長方形 $abcd$ に鎖交する磁束が磁束量子 Φ_0 1個分であれば、位相の増分は 2π である。

$i = \sin\gamma$ により、単一の接合の接合内の各点での電流値の和を接合全体でとれば、与えられた磁界における単一接合を流れる電流が得られる。以上をまとめると、(i)接合間の電流は(ゲージ不変な)位相差 γ の \sin に比例する。(ii)この位相差 γ のは電磁場のベクトルポテンシャル \mathbf{A} の項を含むので、外部磁界により、磁界と垂直に接合電流は空間変調する。(iii)特別な場合として、外部磁界がなければ、この位相差は、接合内で一定で、特に $\pi/2$ のとき、最大の電流 I_c が接合を流れる。この I_c は接合の臨界電流値とも呼ばれる。この変調周期は加える磁界の大きさに反比例する。超伝導ジョセフソントンネル電流の変調特性から、トンネルバリアそのもの一様性等を診断することができる[4,5]。これまで外部磁界を単に一次元方向に走査して quartic polynomial 形[7,8]や x 線解

析のための normal-distribution-function 形[9]の接合について調べられてきた。これに対して我々は2方向、3方向に外部磁界を走査し、 $I_c \mathbf{H}(H_x, H_y)$ 特性を調べることを提案して、実際に数値解析と、さまざまな接合形状の素子製作、実験により測定に成功している[10-20]。

超伝導量子干渉計では、左右の接合の超伝導電流の位相差が加える外部磁界により感度高く変調されることになる。超伝導ループ C に鎖交する磁束 Φ が Φ_0 の整数 n 倍のとき、干渉計の電流は $2I_c$ となり、逆にループ C に鎖交する磁束 Φ が Φ_0 の整数 $(n+1/2)$ 倍のとき、干渉計の電流は小さくなる。

4. 超伝導量子干渉計を流れる超伝導電流

2方向に外部磁界を走査したとき、接合に流れる超伝導電流が変調される様子を、正方形の接合を例に考えてみる。製作した正方形の接合の構造を図1に示す。素子はマグネトロンスパッタリング法により成膜したそれぞれ $200, 5, 50\text{nm}$ のニオブウム/アルミニウム-アルミニウム酸化膜/ニオブウムのサンドイッチ構造である。アルミニウム酸化膜は、アルミニウム薄膜堆積後、酸化室で純酸素を導入して表面を酸化し形成した。図2に示す $L \times L = 50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の接合寸法および図3の超伝導量子干渉計の構造は、ポジレジストとコンタクト式マスクアライナーを使ったフォトリソグラフィ後での溶液中の陽極酸化法で決めた[21]。また、超伝導量子干渉計構造の第1層目のベース電極と最上部のワイヤリング電極は、フッ酸、硝酸、水からなる緩衝液での化学エッチング法により形成している。このワイヤリング層に $25\mu\text{m}$ の太さのアルミニウム線を超音波ボンディングして、素子特性が4端子法で測定できるようにする。測定においては、外部磁界 $\mathbf{H}(H_x, H_y)$ をパラメータとして特定のステップで変化させ、各々の外部磁界において超伝導接合もしくは干渉計の図4に示す電流電圧特性 (I - V 特性) をデジタルオシロスコープで取り込む。測定時のオフセットを考慮する必要があるが、この図4の I - V 特性の 0V での電流ステップが超伝導電流 I_c である。

測定は GPIB (General Purpose Interface Bus) システムで制御され、最大 3000A/m の磁界を発生させることができる H_x 及び H_y 用ヘルムホルツコイル対と、最大 8000A/m の磁界を発生させることができる H_z 用ヘルムホルツコイル対に、直流電源により電流を流した。素子に加える外部磁界を段階的に変化させることで2次元的磁界特性測定をおこなった。測定は液体ヘリウム中 4.2K である。

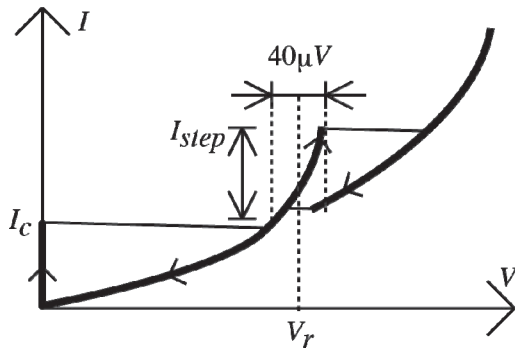


図4. 超伝導量子干渉計の電流-電圧特性

図3に示す干渉計の接合間の距離 L を 50、150、250 μm と変えることで、磁束捕獲断面積[ループCの面積]が異なる超伝導量子干渉計を作成した。図5に $I_c\text{-}\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 特性を示す。図5の(a1-c1)は $H_y=0$ 固定での $I_c\text{-}H_x$ curves 変調特性であり、(a2-c2)は $I_c\text{-}\mathbf{H}(H_x, H_y)$ 変調特性である。(a1,a2) $L=50\mu\text{m}$ 、(b1,b2) $L=150\mu\text{m}$ 、(c1,c2) $L=250\mu\text{m}$ である。外部磁界の H_x 成分と H_y 成分はそれぞれ $-800 < H_x < 800(\text{A/m})$ と $-40 < H_y < 40(\text{A/m})$ の範囲で走査した。

超伝導量子干渉計を流れる全電流 I は左接合の電流と右接合の電流の和である。

$$I = I_L + I_R. \tag{4}$$

I_L と I_R はそれぞれ

$$I_{L,R} = \iint_{\text{Junction Area}} I_0 \sin\left(\frac{2\pi\mu_0 d}{\Phi_0} H_{y,x} - \frac{2\pi\mu_0 d}{\Phi_0} H_{x,y} + \gamma(\text{junction center})\right) dx dy. \tag{5}$$

となり、接合電流は、各接合中で外部磁界と垂直に空間変調している。

図5(a1), (b1), (c1)より、捕獲断面積の異なる3種類の干渉計の超伝導電流の変調の数 N を調べた結果を図6に示す。 $-800 < H_x < 800\text{A/m}$ の範囲で変調の数 N は、接合間距離に直線的に依存することがわかる。接合を貫く磁束と干渉計ループを貫く磁束の比はそれぞれ $L=50\mu\text{m}$

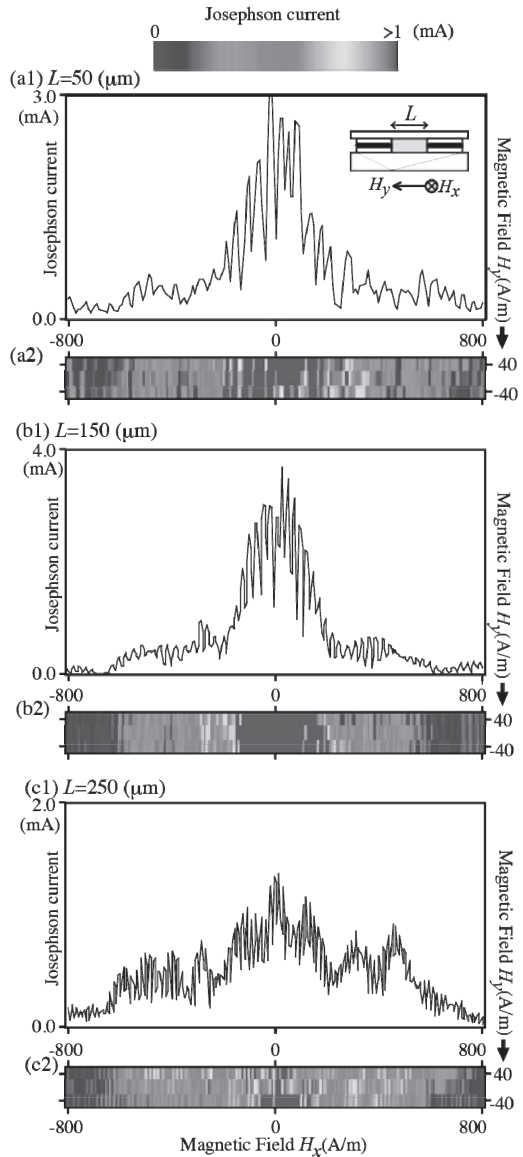


図5. 接合間隔の異なる超伝導量子干渉計を流れる超伝導電流の外部磁界変調特性

の場合 7:5、 $L=150\mu\text{m}$ の場合 7:15、 $L=250\mu\text{m}$ の場合 7:25 であり、図6での直線グラフの縦軸とのオフセット

25A/m は接合自体を磁束が貫いていることに対応する。磁界を加えない場合に接合端から内部に超伝導電流が流れる範囲はジョセフソンの侵入長と呼ばれる。ここで使用している接合のジョセフソンの侵入長は $40\mu\text{m}$ であり、接合の一边は $50\mu\text{m}$ なので、外部磁界を加えない状態では接合内で一様に接合電流が流れているとみなせる。

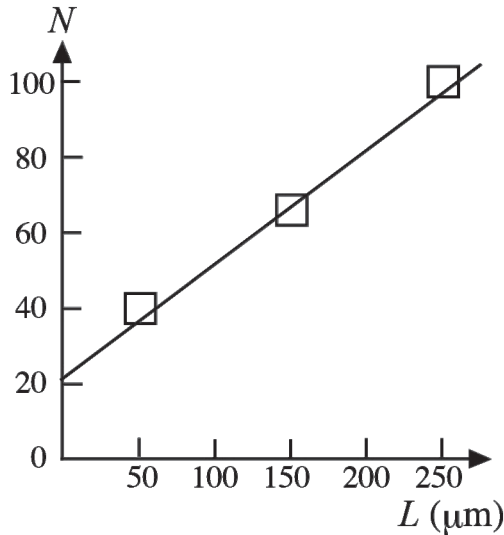


図6. SQUID 変調の数 N の接合間距離 L 依存性

λ_1, λ_2 を下部電極、上部電極への磁界のロンドン侵入長 [17,18]、 t_b を接合酸化膜の厚さとする、和 $[\lambda_1 + \lambda_2 + t_b]$ は単一接合の変調特性から 176 nm と調べられている [8]。干渉計の変調特性は等間隔とみなせるが、測定時の雑音により特に (a1) でいくつかの変調が隠れてしまっていることがわかる。測定結果より干渉計の磁束捕獲ループ C の垂直長さが 251 nm と求まる [22,23]。このループ C の垂直長さ 251 nm と和 $[\lambda_1 + \lambda_2 + t_b]$ の 176 nm の差 (75 nm) は、干渉計を構成する中央の厚い酸化膜(陽極酸化による NbO_x) の実際の厚さ 60 nm と良い一致を示す。図 5(b) の大きな変調周期は接合自体の変調であり、この値 200 A/m もロンドン侵入長から計算される値とよく一致する。

5. 超伝導量子干渉計の有限電圧での共振ステップ

図 4 に示す超伝導量子干渉計の I - V 特性上の有限電圧での共振ステップの特性を調べた。 I - V 特性では、ゼロ電圧に超伝導電流 I_c のステップがあるので、共振ステ

ップの電流値がこの I_c の値を超えたときのみ、観察できることになる。 I - V 特性上で有限電圧 V_r をパラメータとして決めて、その前後 $\pm 20\mu\text{V}$ の領域を測定の窓としてこの領域の最大と最小の電流値の差 I_{step} をステップ長と定めることとした。測定結果を図 7 に示す。

図 7 の (a) は I_c - H (H_x, H_y) 特性、(b)-(c) は共振ステップ I_{step} の外部磁界 (H_x, H_y) 依存性である。それぞれ左列は円形接合、中央と右列はそれぞれ、 L が $150\mu\text{m}$ と $250\mu\text{m}$ の干渉計の特性であり、外部磁界の変調範囲はそれぞれ $-800 < H_x < 800$ と $-800 < H_y < 800$ (A/m) である。図 (b)-(c) は測定電圧 V_r がパラメータである。(a) の円形接合の I_c - H (H_x, H_y) 特性は (H_x, H_y) 面上でサブピークも中央のピークも円対称性をもつことがわかる。干渉計では超伝導電流が流れる領域の形は 2 つの離れた正方形の形であり、2 つの点と正方形接合の量み込みみである。2 つの点のフーリエ変換は等間隔の縞である。よってこの量み込みみのフーリエ変換は、正方形のフーリエ変換と等間隔縞の単純な積となる。図 7 から広範囲の $-800 < H_x < 800$ 、 $-800 < H_y < 800$ (A/m) の領域での I_c - H (H_x, H_y) 特性は単一の円形接合の I_c - H (H_x, H_y) 特性と似ている。これは、干渉計の 2 つの接合のフォトリソグラフィ過程で数 μm 接合の角が丸まってしまったことが一因である。

平面回路モデルで有限電圧の共振ステップを考察する。大越、三好の提案した平面回路モデルは、インダクタンス素子 L と容量素子 C から構成される [24,25]。超伝導量子干渉計の共振ステップを解析するため、図 8 に示すように超伝導版に改良したモデルを使う。各点 $a(x, y)$ での $V(x, y)$ は左右の接合領域では上下の電極間の電圧であり、接合と接合の間の厚い絶縁膜 NbO_x の場所では、上のワイヤリング層と下のベース電極の間の電圧を表す。この電圧 $V(x, y)$ は位相の時間変化に等しく [第 2 ジョセフソンの式];

$$V = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{\partial \gamma}{\partial t}, \quad (6)$$

となる。式中の位相差 γ は上の電極 [カウンター電極もしくはワイヤリング電極] と下のベース電極の間の位相差である。

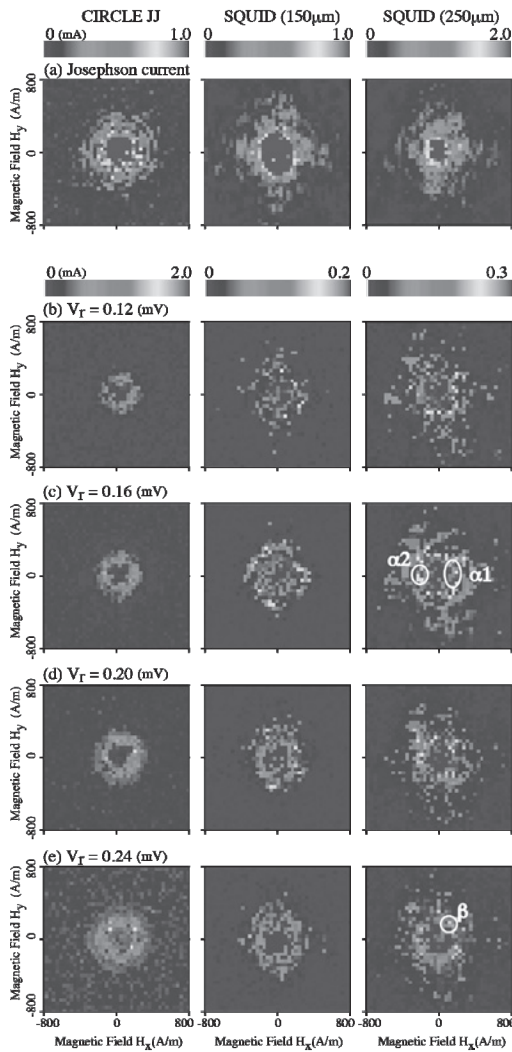


図7. 二次元磁界変調特性 (a) 超伝導電流の特性、(b) $V_r=0.12\text{mV}$ より (e) 0.24mV での共振電流ステップの磁界特性。共振ステップの現れる電圧 V_r をパラメータとしている。

図8中の $\mathbf{J}=[J_x, J_y]$ は接合部(超伝導接続部)のカウンター(ワイヤリング)電極の下表面を流れる2次元電流であり、以下単に電極電流 \mathbf{J} と略すことにする。接合部では、ジョセフソン電流と浮遊容量を充電する電流および電極電流 \mathbf{J} の発散の和は零であり、式で書くと

$$I_0 \sin \gamma + C \frac{\partial V}{\partial t} = -\text{div} \mathbf{J} \quad (7)$$

と電荷保存の式となる。

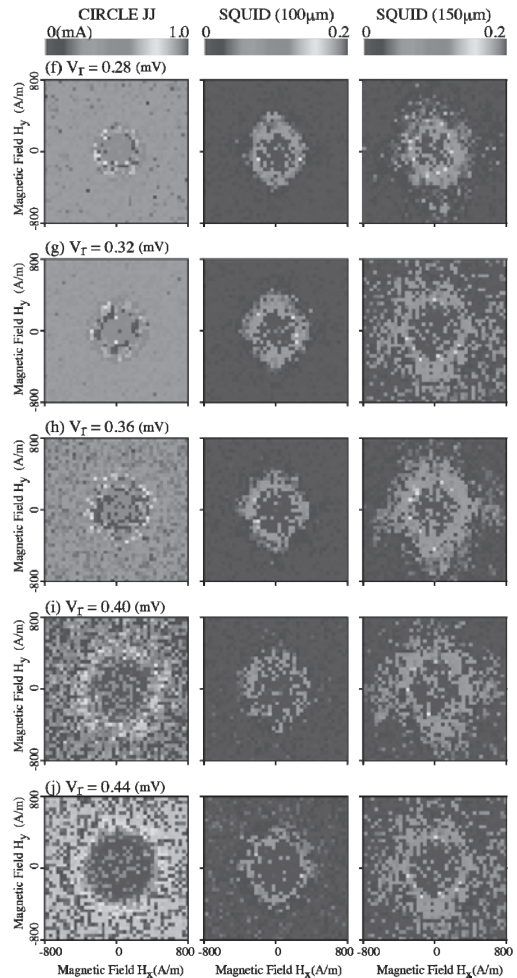


図7(f)-(j) 前図の続き: 共振電流ステップの磁界特性 (b) $V_r=0.28\text{mV}$ より(j) $V_r=0.44\text{mV}$

超伝導接続部では厚い酸化膜の両端であるためジョセフソン電流は流れず、浮遊容量を充電する電流も極めて小さく

$$\text{div} \mathbf{J} = 0 \quad (8)$$

が成り立つ。モデルの垂直面内のループについてのファラデーの電磁誘導の法則の式は

$$L \frac{d\mathbf{J}}{dt} = -\text{grad}V, \quad (9)$$

これらの式に使われる、 div と grad は通常の3次元でなく、図8中の記号を使い2次元 x - y 面内で定義され、

$$\begin{aligned} \text{div}\mathbf{J} = & \left\{ J_x \left(x + \frac{\Delta x}{2}, y \right) - J_x \left(x - \frac{\Delta x}{2}, y \right) \right\} / \Delta x \\ & + \left\{ J_y \left(x, y + \frac{\Delta y}{2} \right) - J_y \left(x, y - \frac{\Delta y}{2} \right) \right\} / \Delta y \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{grad}V = & \left[\{ V(x+\Delta x, y) - V(x, y) \} / \Delta x, \{ V(x, y+\Delta y) - V(x, y) \} / \Delta y \right] \end{aligned} \quad (11)$$

と定める。

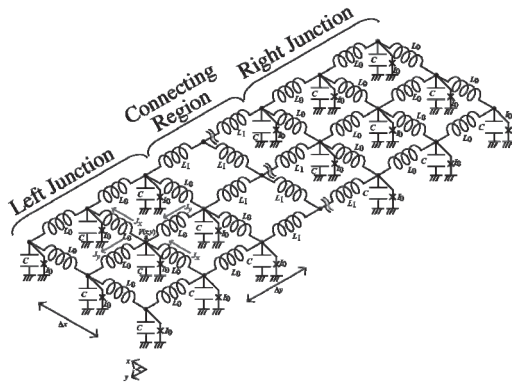


図8. 超伝導量子干渉計の解析用平面回路モデル

この図8のモデルを使い電圧モードを考える。 $I_{\text{step}} \cdot \mathbf{H}(H_x, H_y)$ 特性の測定において H_x と H_y は +800 から -800 A/m まで変えている。図9は $\Phi = (N+1)\Phi_0$ から $\Phi = N\Phi_0$ へ干渉計の鎖交磁束を減らしたときの、左接合と右接合の平均的な位相差 $\bar{\gamma}_L$ 、 $\bar{\gamma}_R$ の時間変化を示している。干渉計の遷移モードは(a)左接合の磁束転移、(b)右接合の磁束転移、(c)両接合の電圧モードである。磁束転移において転移(a)では $\bar{\gamma}_L$ が 2π だけ増え、転移(b)では $\bar{\gamma}_R$ が 2π だけ増える。モード(c)では両方の接合の位相差が同時に増える。鎖交磁束 Φ が $\Phi = (N+1)\Phi_0$ のとき、図9の{A}で示し

たように両接合の位相差は同時に増えている。次に図9の{B}で示したように磁束転移(a)と磁束転移(b)の数が同じであると、鎖交磁束は $\Phi = (N+1)\Phi_0$ のままである。転移{C}では磁束転移(a)の数が磁束転移(b)の数より1だけ多く、量子計の鎖交磁束は $\Phi = (N+1)\Phi_0$ から $\Phi = N\Phi_0$ に減る。鎖交磁束が $\Phi = N\Phi_0$ になった後、転移{D}では磁束転移(a)の数が磁束転移(b)の数と同じで、 $\Phi = N\Phi_0$ のままである。転移より{B}{C}{D}は恒久的でない転移である。定常的な外部磁束の下では、図で線{D}もしくは{E}で示されるように、同位相で両接合の位相差が増える。

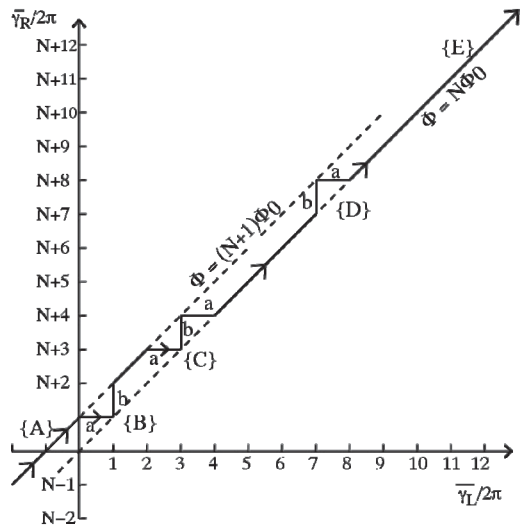


図9. 超伝導量子干渉計の左接合の位相差と右接合の位相差の変化

図7(c)の (α_1) (α_2) でしめされたところで $(n_x, n_y) = (1, 0)$ と $(-1, 0)$ のモードが観察される。ここで対 (n_x, n_y) の n_x と n_y はそれぞれ x と y 方向に接合を鎖交する磁束量子の数を示す。図7(c)で (α_1) で示されるモード $(1, 0)$ のときの接合の磁束分布と接合電流分布を図10に示す。図10の上側は $t=0$ のときで、下側は $t=T/2$ [T : 共振の周期]のときの分布である。上側電極の下表面の電極電流と下側電極の上表面の電極電流は大きさ同じで向きが反対であるので上側電極の電極電流を説明する。図10では接合バリア領域を x 方向に磁界が貫いていて、共振がなければ電極電流 J_1 は一様で、上部電極の下表面を右方向 ($-y$ 方向) に流れ、反磁性電流として上部電極への磁界侵入を防いでいる。モード $(1, 0)$ 共振状態では定在波は y 方向に片方の接合内に一波長分立つことになる。両接合の分布は同

じなので、左接合側で説明すると、共振状態自体に対応する電極電流 J_2 は $t=0$ のとき各接合領域外向き、 $t=T_1/2$ のときは内向きに流れる向きであるとする。 $t=0$ のときは、電流の和 $J = J_1 + J_2$ は接合の左半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では右向きに流れ、接合の右半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では J はほぼ零である。磁界分布は不均一であり磁束は接合の左半分に偏り磁束量子1個分貫いている。 $t = T_1/2$ のときは、電流の和 $J = J_1 + J_2$ は接合の右半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では右向きに流れ、接合の左半分領域 [$L_y/2 > y > 0$] では J はほぼ零である。 $t = T_1/2$ のときは、磁束は接合の右半分に磁束量子1個分貫いている。

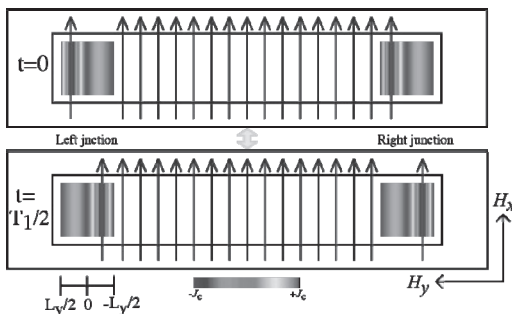


図 10. モード(1,0)共振状態の磁束線分布と接合電流分布 上側 $t=0$ のとき、下側 $t=T_1/2$ のとき (T_1 :共振周期)

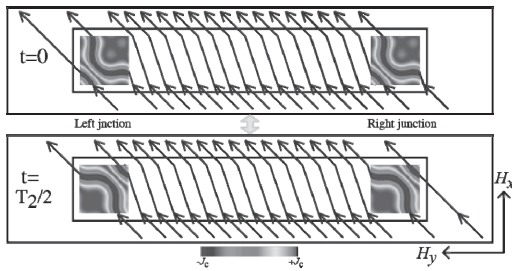


図 11. モード(1,0)共振状態の磁束線分布と接合電流分布 上側 $t=0$ のとき、下側 $t=T_2/2$ のとき (T_2 :共振周期)

図7(e)で(β)で示されるモード(1,1)のときの接合の磁束分布と接合電流分布を図11に示す。図11の上側は $t=0$ のときで、下側は $t=T_2/2$ [T_2 : 共振の周期]のときの分布である。外部磁界は図で斜め左上向きである。共振(1,1)モード自体では、 $t=0$ のとき1量子磁束が各接合バリア

内部に時計回りにあり、電極電流は各接合の中心へと流れる。 $t=T_2/2$ のときは1磁束量子が反時計回りにあり、電極電流は各接合で中心から外向きである。実際の磁束分布は、外部磁界と共振状態の磁界の和であり、図11のように $t=0$ では磁束線は各接合で左下側に曲がり、 $t = T_2/2$ では磁束線は各接合で右上側に曲がる。接合電流も磁束分布と位相差 γ 分布から図11のように求まる。この(1,1)共振モードでも、ベース電極からカウンター電極に流れる電流の領域がそれと逆向きの領域よりも各接合において広いので、全電流は上向きになる。このように、平面回路モデルを使うことで、共振モードが解析できる。

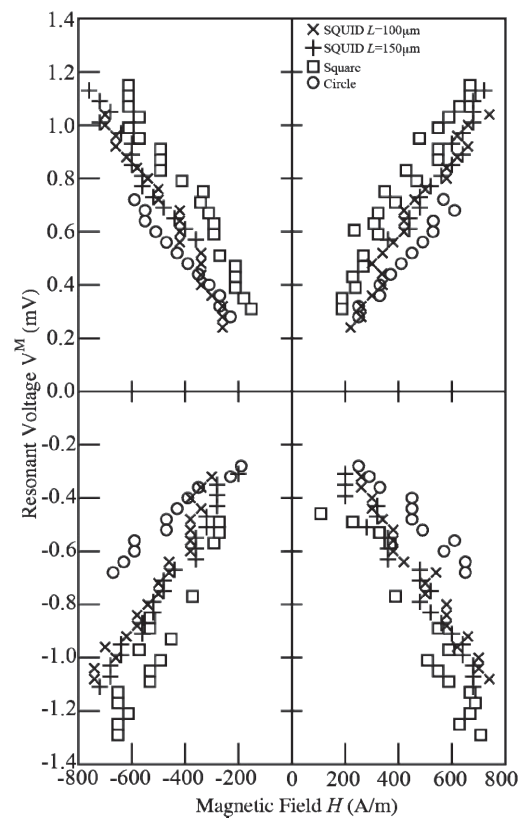


図 12. 最大共振ステップ電圧 V^M の外部磁界依存性

共振の電圧 V_r が 0.3mV 以上では、図(g)-(j)より(H_x, H_y)平面で等方的に共振ステップは生じている。電磁波の速度 \bar{c} が接合電流分布の位相速度と一致したとき、 $I-V$ 特性上に共振ステップが現われる。図7で最も大きな共振ステップが現われる電圧 V^M は加え外部磁界 H に線形に

依存している。

$$V^M = \bar{c}d\mu_0H \quad (12)$$

図 12 はこの共振ステップが現われる電圧 V^M の外部磁界依存性を、円形接合、正方形接合、干渉計の場合について示している。この比例関係からバリア厚さ t_b とバリア材料比誘電率 ϵ_r の比 t_b/ϵ_r は 0.092nm と求まる。この比 t_b/ϵ_r は干渉計の接合のスウィッチング速度を決める重要な量である。このように図 12 の共振ステップの現われる電圧 V^M の外部磁界 H 依存性の線形関係からこの比 t_b/ϵ_r を決めるやり方は信頼性の高いものであるといえる。

6. まとめ

スパッターリングにより Nb/AlOx/Nb 接合 2 個から構成される SQUID を製作した。この SQUID の電流電圧特性から零電圧における超伝導ジョセフソン電流の二次元磁界変調特性を測定した。また、有限電圧での電流共振ステップを測定し、平面回路モデルを使って解析した。なお、図 1、3-12 は文献[26] 図 2 は文献[14]より引用した。

本共同研究の機会を与えてくださった神奈川大学工学研究所および工学研究所所長、共同研究審査委員会に感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Hidaka, S. Nakagawa, K. Hinode, T. Satoh, IEEE Trans. Appl. Super. 23 (2013), 1100906.
- [2] S.K. Tolpygo, D.J.C. Amparo, R.T. Hunt, J.A. Vivalda, D.T. Yohannes, IEEE Trans. Appl. Super. 23 (2013), 1100305.
- [3] Barone and G. Paterno, Physics and Applications of the Josephson Effect, Wiley-Interscience, New York, 1982.
- [4] Akiyoshi Nakayama, Yoichi Okabe, Takuo Sugano, Jpn. J. Appl. Phys. 23 (1985) 1007.
- [5] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Tatsuyuki Morita, Makoto Iwata, and Yusuke Yamamoto, IEEE Trans. Mag., 36 (2000) 3511.
- [6] R.L. Peterson, Cryogenics, 31 (1991) 132.
- [7] J. G. Gijssbertsen, E.P. Houwman, B.B.G. Klopman, J. Flokstra, H. Rogalla, D. Quenter, S. Lemke, Physica Vol. C249, (1995) 12.
- [8] K. Kikuchi, H. Myoren, T. Iizuka, S. Takada, Appl. Phys. Lett., 77 (2000) 3660.
- [9] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Tomoko Shoji, Ryota Aoki, and Norimichi Watanabe, Physica B329-333 (2003) 1493.
- [10] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Tetsuya Shimoyama, Norimichi Watanabe, Hsu Jui-Pang and Yoichi Okabe, J. Phys. Conf. Ser. 43 (2006) 1092.
- [11] Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Kunimori Aizawa, J. Appl. Phys. 97 (2005) 10B116.
- [12] Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, J. Appl. Phys. 101 (2007) 09G105.
- [13] Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Sho Kawai, Yohei Nishi, Koji Masuda, J. Appl. Phys. 103 (2008) 07C707.
- [14] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, J. Appl. Phys. 111 (2012) 113907.
- [15] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, Microelectron. Eng. 108 (2013) 163.
- [16] Akiyoshi NAKAYAMA, Susumu ABE, Norimichi WATANABE, Yoichi OKABE, J. Nanoscience and Nanotechnology 12 (2012) 5016.
- [17] Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Mitsunori Suda, Yohei Nishi, Koji Masuda, Chisato Sugaya, J. Appl. Phys. 105 (2009) 07E312.
- [18] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, Yoichi Okabe, J. Nanoscience and Nanotechnology 12 (2012) 5021.
- [19] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, Microelectron. Eng. 108 (2013) 93.
- [20] Akiyoshi Nakayama, Naoki Inaba, Shigenori Sawachi, Kazunari Ishizu, Yoichi Okabe, IEICE Trans. Electron. E77-C (1994) 1164.
- [21] H. Kroger, L. N. Smith, D.W. Jillie, Appl. Phys. Lett. 39 (1981) 280.
- [22] P. de Gennes, *Superconductivity of Metals and Alloys*, (Benjamin, New York, 1967).
- [23] U. Kawabe, Y. Tarutani, M. Tsukada, and Y. Harada, *Superconducting Electronics*, (in Japanese) (Maruzen, Tokyo, 1995).
- [24] T. Okoshi and T. Miyoshi, IEEE MTT, 20, 245 (1972).
- [25] Hsu Jui-Pang and T. Anada, IEEE MTT-S Int'l microwave symp. digest, V2, 574 (1983).
- [26] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Yohei Nishi, Norimichi Watanabe, Yoichi Okabe, Microelectron. Eng. 146 (2015) 19.



人間はどこまで速く走れるか？-四足走行の挑戦-

宇佐見 義之*

衣笠 竜太**

How fast human can run? a possibility of quadrupedal running

Yoshiyuki USAMI*

Ryuta KINUGASA**

1. はじめに

- 人間や動物は最高どのくらいまで速く走ることができるだろうか？ 現在最速のスプリンターはウサイン・ボルトであり、その速さは 8.91m/s である (20.15.8.30 現在)。一方、最速の動物はチーターであって、30m/s もの速さで陸上を疾走する。尚、本研究では陸上動物の最高走行速度を議論する。水中における最速の動物は 30m/s もの速さで海中を泳ぐことのできるカマスである。陸上と水中の最高速度が一致するのは、おそらくは偶然の一致であろう。
- 動物が出す最高速度と体重の関係を図1に掲げる。最高速度を出すチーターは、この図で見ると体重としては真ん中ほどに位置している。筆者の一人 (宇佐見) が行っている大型恐竜の走行の研究では、大きくて体重が重い動物の運動性能を調べている。その領域では、体重が重くなると走行速度が遅くなる。これは体重が身長³で増えるのに対し、筋肉の力はその断面積に比例し、身長²に比例するからと説明される。しかし、この関係が平易に説明されている場合はほとんど見られないので、この稿ではこの点についての説明からはじめることにする。

2. 現生動物の最大走行速度は？

動物が出す最高速度と体重の関係を図1に掲げる(1)。最高速度を出すチーターは、この図で見ると体重としては真ん中ほどに位置している。

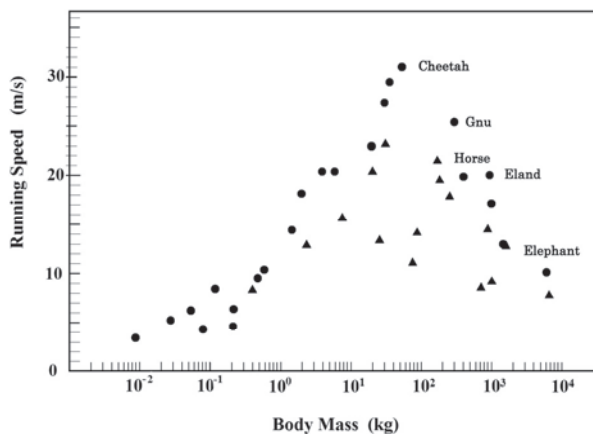


図1 哺乳類の最高走行速度と体重の関係。最速の動物はチーターで秒速30mもの速度で走ることができる。体重が重くなるに従い、最高速度は小さくなる。

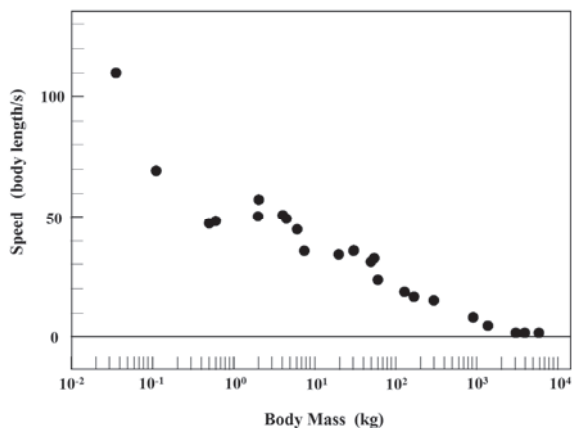


図2 動物の最高走行速度 (body length/s) v.s. 対数 (体重)

*准教授 物理学教室

Assistant Professor, Inst. of Physics

**准教授 人間科学部

Assistant Professor, Faculty of Human Science

ここで、最高速度と体重には、何かの数式関係が存在するだろうか？試みに最高速度 (body length/s) v.s.対数 (体重) というグラフを描いてみる (図2)。このグラフを見ると、なだらかな曲線を描き、明白な直線関係は無いと言える。再び試みに、対数 (最高速度) .v.s.対数 (体重) というグラフを描いてみたのが図3である。

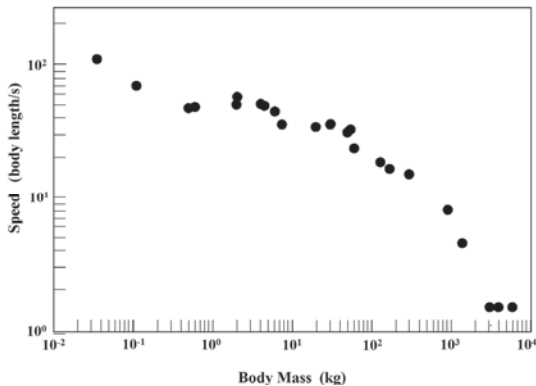


図3 動物の最高走行速度 v.s.対数 (体重)

この図を見ると、体重が200kgくらいまでの領域では直線関係が成り立っているように見えるが、それを超えると、その直線関係は破れる。Garlandによれば (式1) のような関係があるとされている (2)。

$$\log_{10} v_{\max} = a + b \log_{10} M - c (\log_{10} M)^2 \quad (\text{式1})$$

ここで M は体重、 v_{\max} は最高速度であり、係数はそれぞれ $a=1.47832$, $b=0.25892$, $c=0.06237$ だそうである。

総じてみて、体重の全領域に渡って、簡単な数式で表せる関係は残念ながら無いと言える。一方で、体重が300kgまでくらいまでの領域ではべきの関係があると言えよう。このことは何を物語っているのだろうか？図1のグラフをみると、かなり非一様な関係があると言える。この関係において、300kgのところまでべきの関係があるということは、ある種、驚くべきことのように思える。他方で300kgを超えると、このべきの関係は崩れる。この辺の係数性を理論的に考察した研究は存在しないように筆者には思える。また、(式1)の関係が生理的・数理的にどのような意味を持つのかも、判然としていないと思える。

筆者の一人 (宇佐見) は重い恐竜の走行能力について研究を行ってきた。それを、このような動物の走行能力

の全体像の中にあてはめて考えたのが図4である。

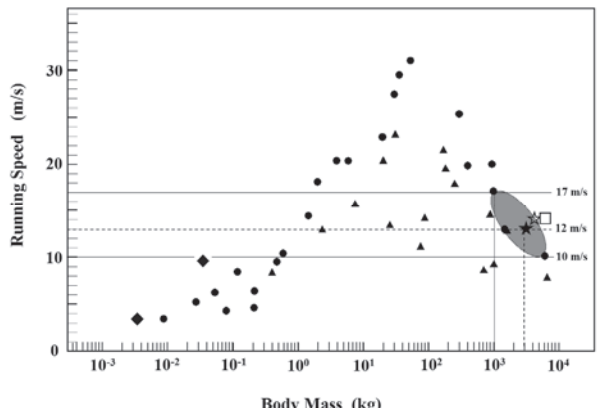


図4 宇佐見が研究している *T.Rex* の体重と速度の領域

この図をみると、体重1000kgの恐竜であれば、秒速17mという人間に比べて速い速度で走ることも可能であることがわかる。他方で体重が成体の *T.Rex* の体重である6000kgほどになると秒速10mくらいが限界のようにも思えてくる。とは言え、秒速10mという走行速度は人間に比べて言えばかなり速い。人間の最高走行速度は秒速10mほどであり、一般の人間の最高走行速度はこれよりかなり遅い。よって、このデータからは、一概には重い *T.Rex* は速くは走れないと簡単には言えない、ということがわかる。図4中で黒星印は3000kgの体重で12m/sの速度を想定している。ティラノサウルス科のダズプレトサウルスはこの程度の質量であり、人間より速く走れたと考えるのも不可能ではない。白星印は4000kgで13m/sを想定している。現生動物のデータからの推測では、この程度までは許容されるのではないかというところである。白い四角は6000kgの *T.Rex* を想定し、走行速度が14m/sとした場合である。現生動物のデータからの類推として言えることは、この速度領域は苦しいと言えるかも知れない。

3. 筋肉は最大どのくらいの力を出すことができるか？

個体としての動物の運動能力は図1-3に示すように、ある程度の規則性があることが知られている (いまの場合のデータは哺乳類であるが)。それでは、その運動を生じさせる筋肉の最大に出せる力はどの程度なのだろうか？

この疑問の近代的な問いかけは 1846 年に Weber が唱えたことに遡る(1,3)。

共通なので、筋力の最大値は共通で一定であろう、という考えである。そこで、その値 σ (最大筋力ストレス)

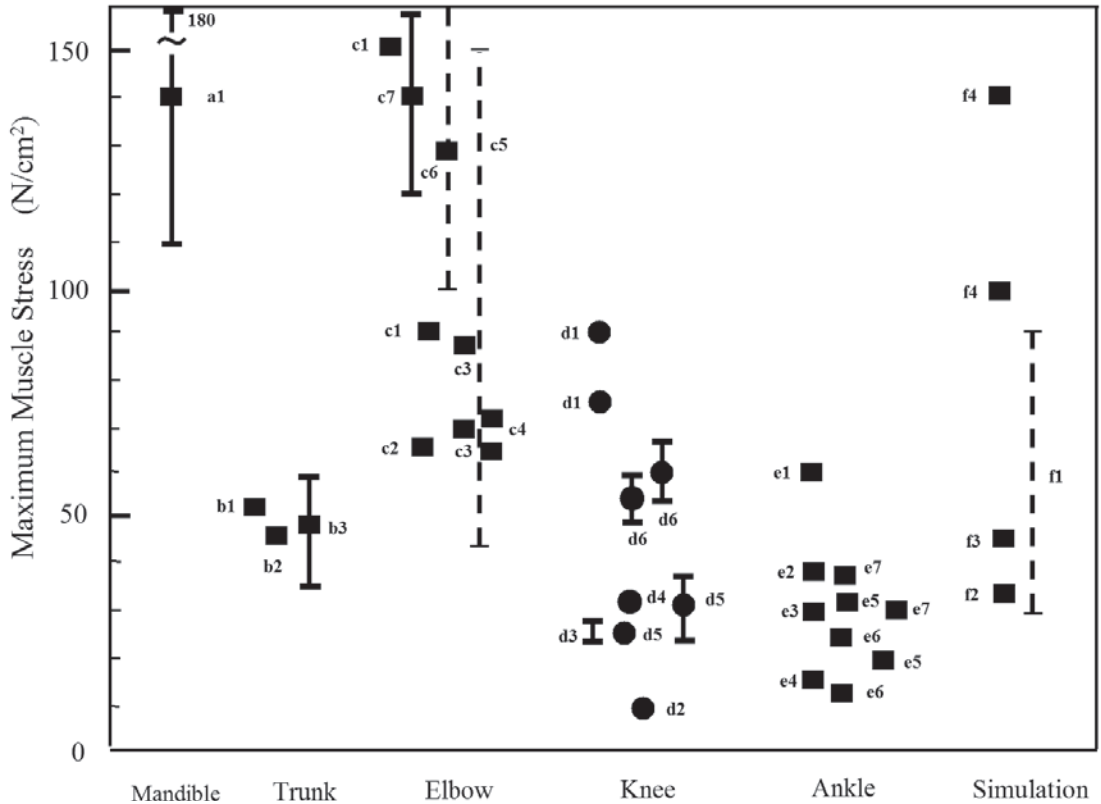


図5 人間の各部位で測定された最大筋力ストレス σ [N/cm²]。各データは文献(1)にある。

筋肉を構成するものはサルコメアと呼ばれる小さな単位からなる。ここに含まれるアクチンとミオシンというタンパク質分子のスライディング収縮運動により筋力が発生する。ここで、サルコメアが並列につながると筋力は強くなっていく。しかし、直列につながっても力は増さない。このことにより、筋力は、その断面積が大きくなるにつれて増大することになる。このことは、現代の分子生物学の知見によりわかっていることだが、少し驚くことには Weber の頃より筋力が断面積に比例して増大することが提唱されていた。もう一つの考え方は、筋力が体積に依存するとする考え方であるが、この考え方は約 150 年前より支持されていない。そこで、筋肉が出す最大の力を最大筋力ストレス(Maximum Muscle Stress)と呼び、その値を測定しようとする試みがなされてきた。

更に、もう一つの信仰に近い考えがこの分野には散見される。それは、筋力発生分子機構が全ての生物種で

を測定する試みが 19 世紀後半より百数十年に渡ってなされてきた。その結果は測定によって σ が 15[N/cm²]程度から 100[N/cm²]程度まで非常に大きなばらつきを持った値として報告されてしまうということになった。そのような中で、ごく僅かな研究者が σ は果たして一定なのだろうか? という疑問を呈してきた(4)。最近の一つの考えによれば、力断面積を指標とするのではなく、トルク/体積を指標としようとする提案がある。確かに、現代では筋肉の形は MRI で三次元の立体のオブジェクトとして直接測定できてしまうので、筋肉を円筒形と仮定し、断面積と力を考えようという平均化の考えに無理があるという論にはかなりの合理性がある。そのように、新しい一つの考えでは体積とトルクを考えるものがあるが、ここでは百数十年に渡って行ってきた σ の測定がどのようにまとめられるかを示したい。その結果が図5である。

一般に最大筋力ストレス σ は 20~70[N/cm²]の範囲にあるとされる文献が多い。しかるに図5をみると、Elbow

ろうか？それらを説明する宇佐見による仮説が図7である。まず、サルコメアを単位として構成される筋肉の力

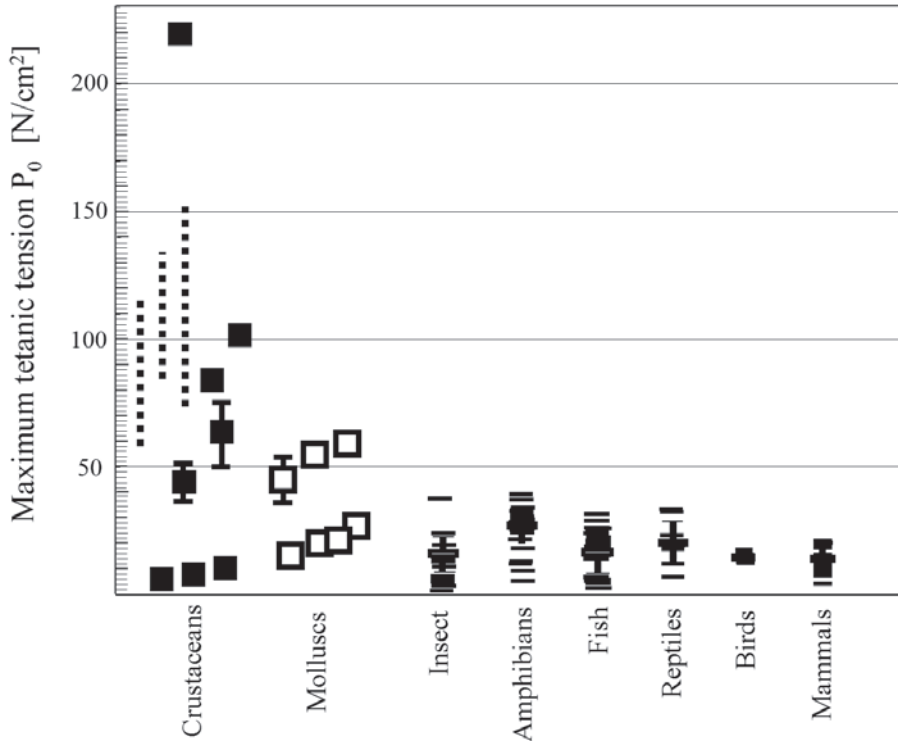


図6 各生物グループの Tetanic Tention P_0 [N/cm²].

での測定結果はもっと大きく 50 [N/cm²]から 150 [N/cm²]まで分布している。なかでも最大なのは Mandible で 180 [N/cm²]までに達している。

ところで、筋繊維を生体から摘出し、そこにテタス刺激と呼ばれる電気パルス信号を与えて筋収縮の力を測定する、という手法の筋力測定法がある。そのデータは Tetanic Tension と呼ばれる。単位はさきの最大筋力ストレスと同じ N/cm² になる。この方法によれば人間以外の動物の筋力も測定することができる。120 に及ぶ論文のデータを要約した結果が図6である (1)。この図をみると、哺乳類の Tetanic Tension は全動物種の中で一番小さな部類に入ることがわかる。一方、大きい方は甲殻類 (Crustacean) である。一般に動物の筋肉の Tetanic Tention は 10~25 N/cm² である場合が多いが、甲殻類の Tetanic Tension は非常に大きいことが知られている。その値は 100 N/cm² を超え、200 N/cm² に達する場合もある。これら、図5、図6の動物種による Tetanic Tention の違いや部位による最大筋力ストレスの違いは何によるものなのだ

は通常我々が考える力より遥かに大きい (図7左上)。そして、各生物グループが進化を遂げるにあたって、適応が起こり、それぞれの生息環境に合わせて出せる力の適応が起こる。このプロセスは、素材としてのサルコメアが出せる最高の力より下位に位置する (図7中段)。そして、人間の場合はどうかというと、甲殻類 (Crustaceans) よりも遥かに小さい Tetanic Tension のところでの適応が起こった。更に、人間の各部位を構成する筋肉グループのなかでも適応が起こり、最大筋力ストレス σ が大きいグループ Mandible (顎) から Ankle (足首) までの幅広い適応が起こった。このように考えて、最大筋力ストレス σ が一定との考えを捨てることを筆者は提案する。

4. 人間の最高走行速度は最大でどのくらいか？ (四足走行の可能性の探究)

これまでの節で説明したように筋肉の力の最大値は、かなり大きい。これは実は次のような事実にも潜んでいる。

すなわち、我々人間の筋力の最大値は結構大きいのである。自意識がここまでが最大と思って出した力は、実は筋力の最大値よりもかなり小さい。例えば、エイツ、ヤツ

いの、自分はこんなもんだと思ひ込む。これは自分のせいというより、社会がそのように抑圧をかけて、そのようなことを信じてしまうようになった結果だと筆者に

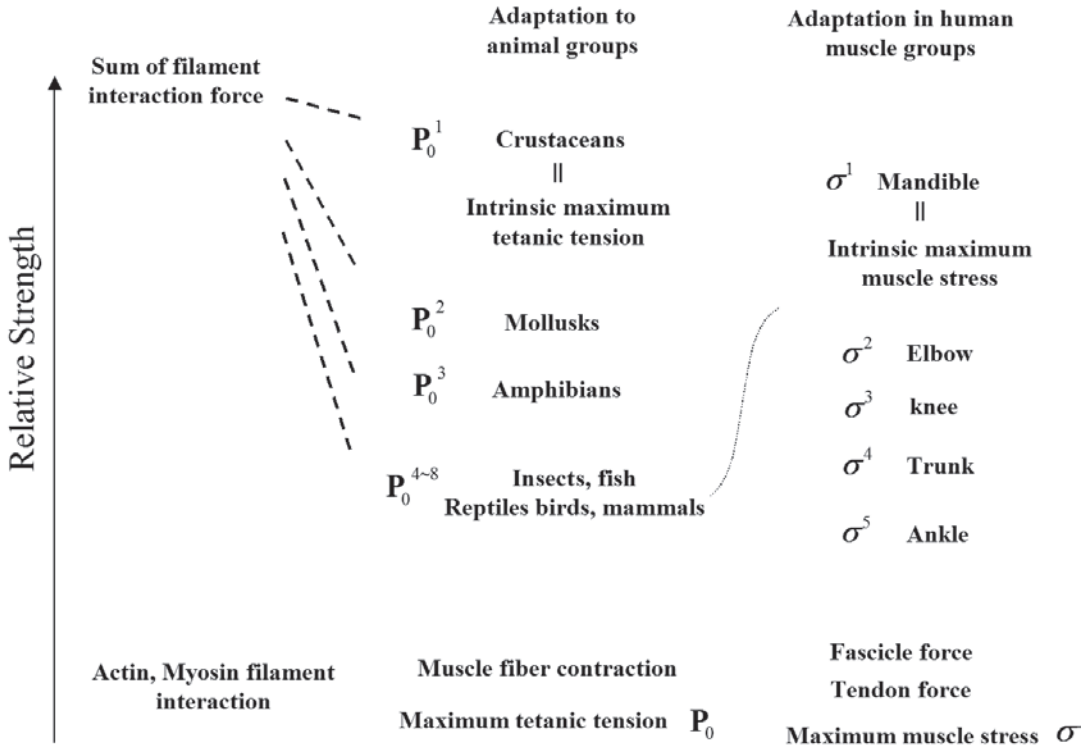


図7 動物の筋力の進化モデル (宇佐見) (1).

ツ等かけ声を掛けると、ここまでが最大と自分が思った力よりも大きな力が出る。これは、火事場の馬鹿力という諺として日本人の間では暗に浸透している考え方であり、また事実でもある。この現象は実は脳が制御をかけて、筋力の最大値が低いように抑制をかけているのである。このことは関連する分野でよく知られている。例えば腕相撲をやった場合、火事場の馬鹿力的なものを出してしまうと、腕の骨が折れてしまうのである。そこで脳がそうならないように抑制をかけて、最大の筋力は実際のそれより小さいとの暗示をかけるのである。

余談的なことを少し書くが、脳が実際の身体の能力よりも抑制をかけてしまう、ということは非常によくあることである。日本人の人間形成や発達という現象の中にも、そのようなことが多々ある。本当の能力は実際は高

は思えてならない。あらん限りの力を込めて、何かに集中すれば人間はすごいことができるのではないか? このことは広く知られ、また伝えて良いことである。更に余談的なことを書くが、終戦を知らずに30年ジャングルで過ごした後に帰還した小野田寛郎少尉は、人間は生きるか死ぬかとなった時には異常な能力を発揮すると述べている(5)。敵が銃を撃った時にその弾痕が見えるようになり、それを実際に避けることができる、と述べている。これが真実かどうかはわからないが、人間が自分が思っているよりも高い能力を持っていることは確かである。

筆者らは、人間が四足で走る能力について研究をはじめた。四足走行の競技は最近では毎年行われるようになり、そのスコアの改善は目覚ましい。筆者らは四足走行の運動のモーションキャプチャを行った。そのデータを使っ

て、四足走行の最高速度がどのくらいになるかの動力学計算をはじめている。現状は、プログラミングの途上にあり、来年にはその結果がでるものと思われる。

文献

- (1) Y. Usami, "Biomechanics for Bipedal Dinosaurs: How fast T-Rex run?", CreateSpace 2014.
- (2) T. JR. Garland, "The relation between maximal running speed and body mass in terrestrial mammals", *J. Zool. Lond.* (1983) 199: 157-170.
- (3) E. Weber, "Wagner's Handwörterbuch der physiologie". Braunschweig, Vieweg, 1846.
- (4) T. S. Buchanan, "Evidence that maximum muscle stress is not a constant: differences in specific tension in elbow flexors and extensors", *Medical Engineering & Physics* (1995)17: 529-536.
- (5) 小野田寛郎, "わがバルパン島の30年戦争", 日本図書センター(1999).



多光子イオン化過程を利用する新反応開発

岩倉 いずみ*

赤井 昭二**

Development of Novel Reaction using Multiphoton Ionization

Izumi IWAKURA*

Shoji AKAI**

1. 緒言

1960年にレーザー光発振が報告されて以来¹,『単色性が高く, 高強度であり, かつ位相制御が可能』というレーザー光の特色を活かした反応の開発が志向されてきた。これまでに, 電子励起に対する制御は多々報告されている²。また, 多光子イオン化過程に関する種々の研究も報告されている³。本研究では, 液体試料に可視-極限的超短パルスレーザー光を照射し, 試料を活性化させることで反応させる, 新反応開発を目的として研究を行った。本年度は, 主に可視-極限的超短パルスレーザー光発生装置を構築した。

2. 可視-極限的超短パルスレーザー光の発生装置の概略

パルスレーザー光が光として存在するためには, パルス時間幅内で光電場が一回以上波打つ必要がある。中心波長が 630 nm の可視光の場合, 光電場振動の一周期は, 2.1 fs ($630 \text{ nm} / 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 2.1 \text{ fs}$) である。パルス時間幅の圧縮においては, 実験的には光電場振動の二周期程度までにはしか圧縮できない。そのため, パルス時間幅 約 5 fs の可視-パルスレーザー光は可視-極限的超短パルスレーザー光である。パルスレーザー光のパルス時間幅を極限的に圧縮するためには, フーリエ限界の式 (1) が示すように, パルスレーザー光スペクトルの波長幅を広帯域に広げる必要がある。

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \geq k \quad (1)$$

Δt : パルスレーザー光のパルス半値全幅 (s)

$\Delta \nu$: パルスレーザー光スペクトルの半値全幅 (Hz)

k : ビームの強度分布ごとに決まる定数

測定に用いるパルスレーザー光の強度分布はガウス型であるため, $k = 0.441$ である。また, パルスレーザー光の周波数 ν は, 光速 c と波長 λ を用いて, $\nu = c/\lambda$ と表せるため, 例えば中心波長が 630 nm の可視-パルスレーザー光のパルス時間幅を約 5 fs に圧縮するためには, パルスレーザー光のスペクトル波長幅を半値全幅で 100 nm 以上に広げる必要がある。

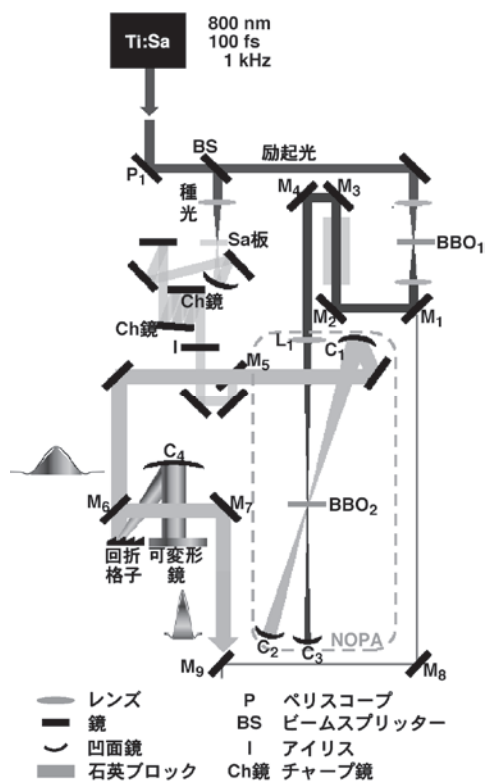


図1. 可視5-fs パルスレーザー光発生装置

*准教授 化学教室

Associate Professor, Dept. of Chemistry

**准教授 物質生命化学科

Associate Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

Ti:サファイアレーザー光 (中心波長: 800 nm, パルス時間幅: 100 fs, 繰り返し周波数: 1 kHz, パルスエネルギー: 3 mW, 偏光方向: 縦) を光源として用いて, 図1の装置を構築した⁴. 可視-極限的超短パルスレーザー光は以下4つの過程を経て発生させる. ①高強度紫外 (400 nm) パルスレーザー光 (NOPA-励起光) の発生. ②広帯域-可視パルスレーザー光 (NOPA-種光) の発生. ③非共直線光パラメトリック増幅器 (NOPA) を用いる種光の2段階増幅 (増幅光の発生). ④増幅光のパルス幅圧縮. 以下それぞれの過程について詳細を記す.

3. 高強度紫外パルスレーザー光 (NOPA-励起光) の発生

非共直線光パラメトリック増幅⁴(NOPA: noncollinear optical parametric amplifier) の励起パルスレーザー光には 400-nm パルスレーザー光を用いた. 光源から発振される 800-nm パルスレーザー光をビームスプリッター (図1BS) により2分し, β -BBO結晶 (図1BBO₁:Type1, カット角 29°, 厚さ 0.4 mm) に集光することで, 第二次高調波である 400-nm パルスレーザー光を発生させた. 次に, 光路長 100 mm の石英片を透過させることで, パルス時間幅を広げた. パルス時間幅を広げることにより, NOPAシステムを用いて, 長い時間領域において種光を増幅することが可能になる. また, パルス時間幅を広げ尖頭値を下げることにより, BBO結晶 (図1BBO₂) にダメージを与えることなく集光可能になる. 更に, 400-nm 光のみを反射する誘電体多層膜ミラー (図1M₁~M₄) を用いてパルスレーザー光を反射することで, 400-nm 光に変換されずに残った 800-nm パルスレーザー光を排除した.

4. 広帯域-可視パルスレーザー光 (NOPA-種光) の発生

前述したように, パルス時間幅が約 5 fs の可視-パルスレーザー光を発生させるためには, スペクトルの半値全幅が 100 nm 以上の広帯域可視-パルスレーザー光を種光として利用する必要がある. すなわち, スペクトルの裾が 200 nm 以上広がったパルスレーザー光を種光として用いる必要がある. 光源 (中心波長 800 nm の単色光) のパルスレーザー光を厚さ 1 mm のサファイア板 (図1Sa) に集光することで自己位相変調により発生させた白色光 (波長領域: 450 ~ 750 nm, パルス幅: 約 100 fs) を種光として用いた.

自己位相変調は非線形な物理現象の一つである. 自然光などの通常光とパルス光との違いの一つとして, 単位時間当たりの光子密度がある. ガラス板や石英板などの媒質に通常光が入射すると, ガラスと空気の屈折率が異なるため光は屈折する. 媒質が吸収できない波長域の通

常光を照射した場合には, 透過した光のスペクトルは媒質を透過する前と同じである. 一方, 媒質が吸収できない波長域の高強度なパルス光を照射した場合には, パルス光の単位時間当たりの光子密度がある閾値を超えると, 媒質入射前後でパルス光のスペクトルが大きく変化する. これは, 入射した光子の光電場によって媒質を構成する分子中の電子が振動し, パルス光が透過するまでの間に媒質の屈折率が大きく乱されることによる. 屈折率が大きく乱された媒質を透過すると入射光のスペクトル幅が広がる. この非線形な物理現象を用いて非常に線幅の狭いパルスレーザー光 (中心波長: 800 nm, スペクトルの半値全幅: 10 nm) を, 可視領域に広がったパルスレーザー光 (波長領域: 450 ~ 750 nm) に変換した (図2).

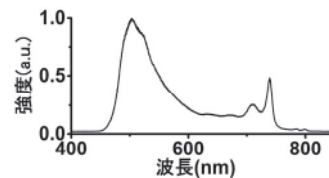


図2. 広帯域-可視パルスレーザー光のスペクトル

本実験において使用したパルスレーザー光 (中心波長: 800 nm, パルス時間幅: 100 fs) の場合, パルスレーザー光が 800 nm 進むと光電場が 1 回振動する. 光速は, 3×10^8 m/s であるため, 2.7 fs で 800 nm 進行する. すなわち, 2.7 fs 間に 800-nm 光の光電場は 1 回振動するため, 100 fs 間では, 37 回振動する. 一方, 厚さ 1 mm のサファイア板を透過する間に 800-nm 光の光電場は 1250 回振動する. このように光がサファイア板を透過すると, 非常に激しく媒質分子中の電子が揺さぶられるため, 媒質の屈折率が大きく乱される.

自己位相変調により発生する白色光のスペクトル形や安定性はサファイア板に集光するパルスレーザー光の強度・パルス時間幅・スペクトル幅・周波数・断面積および集光面積・媒質の屈折率 (一次の屈折率, 三次の屈折率)・媒質の厚さなどによって変化する. 光源の強度を強くすると, 白色光の強度は向上し, スペクトル幅も広がる. しかし, 光源の強度が閾値を超えるとアイドラー光が発生し, 白色光のスペクトル形が振動する. 種光のスペクトル形および強度が不安定であると, NOPAシステムにより増幅したパルスレーザー光も同様に不安定になる. そのため, 強度およびスペクトル形が安定する範囲内で, 高強度な可視-パルスレーザー光が発生するように, 光源の強度および集光面積を調整して白色光 (種光) を発生させた.

発生させた白色光のような、広帯域パルスレーザー光が媒質を通過すると、短波長光は長波長光よりも屈折率が高いため、短波長光は媒質内を進む速度が長波長光よりも相対的に遅くなる。その結果、短波長光は遅れ、長波長光は先に進む正のチャープ(時間的なずれ)が生じる(図3)。

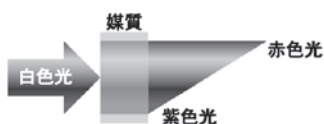


図3 広帯域可視パルスレーザー光の媒質通過に伴う正のチャープ

本システムにおいても、サファイア板やBBO結晶を通過する際に、パルス内で波長ごとに時間的な遅れが生じ、パルス時間幅が伸びる。図1に示すNOPAシステムでは、種光と励起光が時間および空間的に重なったときのみ、種光が増幅されるため、正のチャープにより種光のパルス幅が広がると、ポンプ光と時間的に重なる波長領域が狭くなり、増幅可能なスペクトルの半値全幅が狭くなる。また、本システムにおいてはNOPAシステムにより増幅した種光(一段階増幅パルスレーザー光)を、もう一度NOPAシステムにより増幅する(二段階増幅パルスレーザー光)。一段階増幅パルスレーザー光は一段階目の増幅の際にBBO結晶を透過し、種光よりもさらに正のチャープが生じたパルスレーザー光である。そのため、二段階目の増幅においては、より増幅できる波長領域が狭くなる。このような問題を回避するために、チャープ鏡対(図1C_h鏡)を3往復させることで負のチャープ(短波長光が先に進み、長波長光が遅れて進む)をつけた。

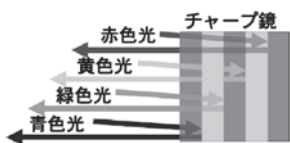


図4 チャープ鏡による負のチャープ

このチャープ鏡対は浅い部分の層には短波長光を高効率に反射するコーティングが施されており、逆に深い層には長波長光を高効率に反射するコーティングが施されている誘電体多層膜鏡である。そのため、波長ごとに光路差が生じ、負のチャープをつけることが可能である(図4)。このように負のチャープがついた種光をNOPAによ

て二段階増幅し、広帯域に広がる高強度白色光を発生させた。

5. 非共直線光パラメトリック増幅器(NOPA)を用いる種光の2段階増幅(増幅光の発生)

前述したNOPA-励起光とNOPA-種光がBBO結晶中で焦点を結ぶように焦点距離を調整した。このとき、NOPA-励起光は焦点距離が長いレンズ(図1L₁)を用いることで、焦点における集光面積を広げた。一方、NOPA-種光は焦点距離が短い凹面鏡(図1C₁)を用いることで、焦点における集光面積を小さくした。これはNOPA-種光の焦点が、NOPA-励起光の焦点で覆われるように調整するためである。また、NOPAシステムを用いて種光を増幅するためには、NOPA-励起光とNOPA-種光のなす角を正確に 6.5° にしてBBO結晶(図1BBO₂: Type1, カット角 31° , 厚さ1mm)に入射させる必要がある。そのため、図5に示すように角度を調整した。

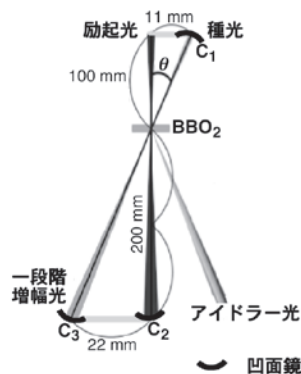


図5 NOPAシステムの模式図

このように、NOPA-励起光とNOPA-種光のなす角 6.5° でBBO結晶に入射した2つの光は結晶に入射するとき各々異なった屈折率で屈折する。その結果、結晶中ではNOPA-励起光とNOPA-種光のなす角 3.7° で空間的に重なる。この条件でのみ、スペクトル波長領域が広がった可視光であるNOPA-種光が広い波長領域において増幅され、一段階増幅パルスレーザー光が発生する。このとき、NOPA-励起光である400 nmパルスレーザー光のエネルギーは保存されるため、増幅した波長と400 nmのエネルギー差に相当する光(アイドラー光)も放出される。例えば、400 nm (25000 cm^{-1})のパルスレーザー光をNOPA-励起光に用いて500 nm (20000 cm^{-1})の光を増幅したとする。この場合、NOPA-励起光の残りのエネルギーである2000 nm (5000 cm^{-1})の光が放出される。各波長に対応

してこのアイドラー光が発生するため、500 ~ 700 nm の光が 400-nm 光で増幅された場合には、約 930 ~ 2000 nm の波長領域に広がった近赤外パルス光が放出される。このように発生したアイドラー光が凹面鏡 (図 1 C₂) に入らないように注意して、一段階増幅パルスレーザー光を凹面鏡で一段階目の増幅光路と重ならないように下方向にずらしてもう一度 BBO 結晶 (図 1 BBO₂) に集光した。一段階目の増幅後に BBO 結晶を透過した NOPA-励起光は凹面鏡 (図 1 C₃) で反射し、一段階増幅パルスレーザー光の焦点に重なるように BBO 結晶 (図 1 BBO₂) に集光した。このように NOPA システムにより二段階増幅することで 525 ~ 725 nm にブロードした可視広帯域パルスレーザー光 (二段階増幅パルスレーザー光) を得た (図 6)。

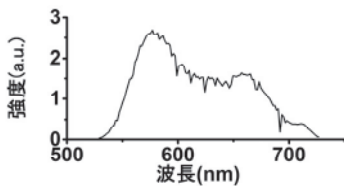


図6 二段階増幅パルスレーザー光のスペクトル

6. 広帯域-可視パルスレーザー光のパルス時間幅圧縮

図1に示すNOPAシステムにより発生させた二段階増幅パルスレーザー光のパルス時間幅を、回折格子および、可変形鏡を調整することにより、圧縮する。NOPAシステムにより増幅された二段階増幅パルスレーザー光は鏡 (図 1 M₅) の上を通り、回折格子へと進む。広帯域光を回折格子で反射すると、波長ごとに異なった角度に反射される。この進行方向に対して横方向に広がったパルスレーザー光を凹面鏡 (図 1 C₄) で反射し、幅広い平行光にして、可変形鏡に照射する。可変形鏡は複数の鏡が横に並んだ長方形の鏡であり、パソコン制御によって各鏡の奥行きを調整できる鏡である (図 7)。そのため、鏡ごとに異なった波長の光を反射することで、パルス時間幅を圧縮できる。可変形鏡で反射されたパルスレーザー光は同じ光路軸上の下方向を進行する。さらに鏡 (図 1 M₆, M₇) で反射し、ポンプ・プローブ測定システムへと入射する。このとき、回折格子の反射角度を変えることで、凹面鏡で反射されて可変形鏡へ入射される位置を調整し、可変形鏡の各チャンネルで反射するタイミングを調整した (図 7)。このように、回折格子の反射角と、可変形鏡の組み合わせによって波長ごとの光路長差、および、反射するタイミングを調整し、二段階増幅パルスレーザー光のパルス時間幅を圧縮した。

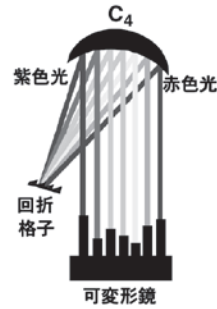


図7 回折格子および、可変形鏡による各波長の光路長差調整

7. ポンプ・プローブ測定系の構築

二段階増幅パルスレーザー光のパルス時間幅を測定するために、ポンプ・プローブ測定系 (図 8) を構築した。広帯域-可視パルスレーザー光をビームスプリッター (図 8 BS) によりポンプパルスレーザー光とプローブパルスレーザー光に 2 分した。ビームスプリッターから BBO 結晶 (図 8 BBO₃) までのポンプパルスレーザー光とプローブパルスレーザー光の光路長が等しくなるように、メジャーを用いて光路長を大まかにあわせた。ポンプパルスレーザー光の光路長に遅延ステージを挿入し、微調整可能にした。

図 8 に示す本測定システムにおける原点信号は、可視-ポンプパルスレーザー光と可視-プローブパルスレーザー光の焦点が BBO 結晶 (図 8 BBO₃: Type1, 厚さ 0.01 mm) 上で空間的・時間的に重なるように 2 つのパルスレーザー光を集光し、和周波として得られる紫外領域の光であるパルスレーザー光を確認する必要がある。しかし、260 nm 付近の光は目視できないため、発生の有無の確認が困難である。そのため、二段階増幅パルスレーザー光と同じ光路に 800-nm パルスレーザー光を飛ばすことで、800-nm 光の和周波である 400-nm 光を目視で確認した後、二段階増幅パルスレーザー光を用いて再度調整することにした。

図 1 を用いて詳細を説明する。BBO 結晶で発生させた NOPA-励起光は、400-nm 光のみを反射する誘電体多層膜鏡 (図 1 M₁ ~ M₄) によって反射される。この誘電体多層膜鏡は 400-nm 光の反射率のみが高く、その他の波長の光は透過するため、変換漏れした 800-nm 光は鏡を透過する。この 800-nm パルス光を鏡 (図 1 M₅) で反射して、二段階増幅パルスレーザー光と同じ光路を進むようにフリップパーミラー (図 1 M₆) の角度を調整した。フリップパーミラーとは取り外しが可能な鏡である。この時、800-nm パルスレーザー光は非常に高強度であり、BBO 結晶にダメー

ジを与えるので、アイリス（図8 I₂）の径を最小に絞り減光した。減光した800-nmパルスレーザー光がアイリスの中心を通るように鏡の角度を調整した。次に、ビームスプリッター（図8 BS）でポンプパルスレーザー光とプローブパルスレーザー光に分け、それぞれの光路を進行した800-nmパルスレーザー光がBBO結晶中（図8 BBO₃）において焦点を結び、空間的に重なるように調整した。焦点を重ねた状態で遅延ステージを前後させ、800-nmパルスレーザー光同士が時間的に重なる条件を探した。遅延ステージを動かしながらBBO結晶の角度を回転させ、800-nm光に適切な角度を探した。その結果、プローブパルスレーザー光の光路に対して結晶の角度を約45°にしたときに、和周波である400-nm光を確認することができた。この和周波を検出器に入射し、ポンプパルスレーザー光とプローブパルスレーザー光の透過光はアイリス（図8 I₃）で遮断した。

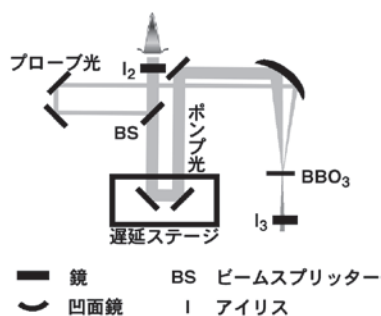


図8 ポンプ・プローブ測定系

この状態で図8のフリップパー鏡を取り外し、二段階増幅パルスレーザー光をBBO結晶（図8 BBO₃）に集光した。800-nmパルスレーザー光により和周波を発生させる場合と、二段階増幅パルスレーザー光により和周波を発生させる場合とではBBO結晶への入射角度が異なる。そのため、BBO結晶を回転させて分光器のスペクトルを確認しつつ、和周波が発生する角度を探った。その結果、二段階増幅パルスレーザー光により和周波が発生するBBO結晶の角度は800-nmパルス光を用いた場合よりも3°垂直に近い8°であった。

二段階増幅パルスレーザー光の和周波が確認できたので、ポンプパルスレーザー光およびプローブパルスレーザー光は時間的・空間的に重なっていることが確認できた。和周波の強度は両パルスレーザー光の時間的・空間的重なりに依存している。また、集光するパルスレーザー光の尖頭値の高さが高い程、和周波の強度は強くなる。

つまり、パルス幅が短くなると和周波は高強度になる。そこで、和周波の強度を確認しつつ、可変形鏡、回折格子を調整し、パルス時間幅を圧縮した。実際に構築した装置を図9に示す。

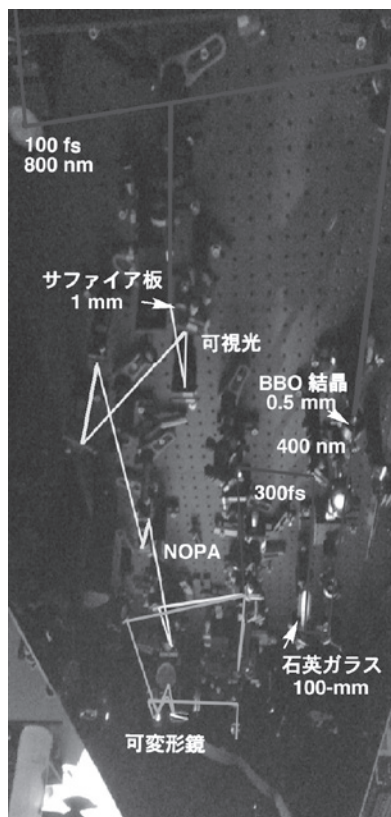


図9 構築したレーザー装置

和周波の強度が最大になるように調整し、遅延ステージをパソコン制御で動かし、原点の±50 fsの時間領域について和周波の強度を計測し、パルス時間幅を測定した。その結果、約10 fsであることが確認できた（図10）。

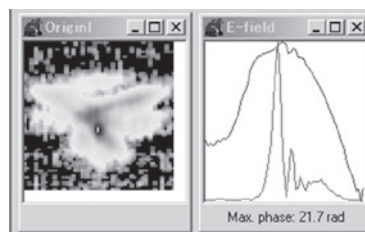


図10 パルス時間幅の測定

毎日の温度・湿度の変化により、チャープのしかたが変わるため、これらの調整は毎日必要である。今後、チャープの評価を行い、さらにパルス時間幅を圧縮するためのチャープ鏡を作成する予定である。

8. 様々な保護基を有する糖基質の合成

様々な保護基を有する糖基質として図 11 の化合物を選定し、合成することとした。この基質は、酸や光に耐性の高いエーテル型保護基(ベンジル基)と、異なる2つの反応性基、カルバメート基(*N*-フェニルカルバモイル基)とチオエーテル基(フェニルチオ基)が共存し、結合種が異なることで、選択的な結合のみを脱保護できるものと考えた。

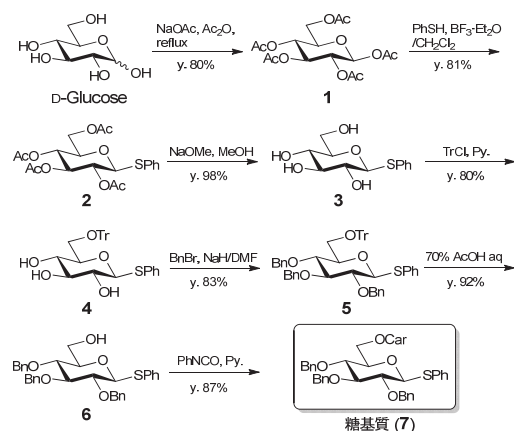


図 11 様々な保護基を有する糖基質の合成

まず、よく乾燥させた D-グルコースを無水酢酸と酢酸ナトリウムで完全アセチル(Ac)化して **1** を得た後、三フッ化ホウ素-ジエチルエーテル錯体を触媒にフェニルチオ(SPh)グリコシド **3** を選択的に得た。次いで、**3** の Ac 基を Zemplén の条件で除去、6 位を選択的にトリフェニルメチル(Tr)基で保護し **4** を得た。得られた **4** の水酸基をベンジル(Bn)基で保護した後、Tr 基を 60% 酢酸水溶液で除去して **5** を得、最後にフェニルイソシアネートとピリジンで *N*-フェニルカルバモイル(Car)基を導入し、目的とする糖基質 **7** を合成した。

Penta-*O*-acetyl-β-D-glucopyranose (**1**).⁵

To a gently refluxed Ac₂O (280 mL, 3.0 mol) containing anhydrous sodium acetate (12 g, 0.14 mol) was slowly added powdered D-glucose (50.0 g, 0.28 mmol) over a period of 15 min. After the mixture was heated to reflux for more 10 min,

the mixture was cooled to room temperature. The reaction was then quenched by addition of ice, and stirred at 0 °C for 1 h. During this treatment, **1** was precipitated as brownish white solid (crude pentaacetate). The precipitation was filtered and washed with water until the odor of the acetic acid disappeared. The crude product was purified by recrystallization with EtOH to afford **1** (86.6 g, 80% yield); mp 132-135 °C (colorless prisms); IR (KBr disk) 1755, 1740 cm⁻¹; ¹H NMR (500 MHz, CDCl₃) δ *J* = 5.71 (d, *J* = 8.2 Hz, 1H), 5.24 (dd, *J* = 9.8, 9.4 Hz, 1H), 5.16-5.10 (m, 2H), 4.29 (dd, *J* = 12.6, 4.6 Hz, 1H), 4.11 (dd, *J* = 12.6, 2.3 Hz, 1H), 3.84 (ddd, *J* = 9.8, 4.6, 2.3 Hz, 1H), 2.11 (s, 3H), 2.09 (s, 3H), 2.03 (s, 6H), 2.01 (s, 3H); ¹³C NMR (125 MHz, CDCl₃) *J* = 170.7, 170.2, 169.5, 169.4, 169.1, 91.8, 72.9, 72.8, 70.3, 67.9, 61.6, 20.9, 20.8, 20.7.

Phenyl 2,3,4,6-tetra-*O*-acetyl-thio-β-D-glucopyranoside (**2**).⁶

Under an argon atmosphere the pentaacetate **1** (50 g, 128 mmol) was dissolved in anhydrous CH₂Cl₂ (500 mL) and BF₃·Et₂O (21.0 mL, 192 mmol) was added at 0 °C. At -5 °C thiophenol (21.0 mL, 192 mmol) was added dropwise, and the reaction mixture was allowed to warm to room temperature. After consumption of starting pentaacetate **1** saturated sodium bicarbonate solution was added until all BF₃ was hydrolyzed. The organic layer was washed with water and saturated sodium bicarbonate solution three times. The combined organic layer was dried over MgSO₄, filtered, concentrated in vacuo. The resulting residue was purified on a column of silica gel with hexane-EtOAc (3:1-2:1 v/v) to give β-thio glycoside **2** (45.6 g, 81% yield); colorless needles (hexane-EtOAc), mp 115-117 °C; IR (KBr disk) 1748 cm⁻¹; ¹H NMR (CDCl₃, 500 MHz) δ 7.51-7.29 (m, 5 H, Ph/H), 5.17 (dd, *J* = 9.2, 9.2 Hz, 1H, H-3), 5.05 (dd, *J* = 9.7, 9.6 Hz, 1 H, H-2), 4.95 (dd, *J* = 9.2, 9.6 Hz, 1H, H-4), 4.70 (d, *J* = 9.9 Hz, 1H, H-1), 4.21-4.18 (m, 2H, H-6a,b), 3.80-3.65 (ddd, 1H, H-5), 2.08, 2.07, 2.01, 1.98 (each s, 12H, COCH₃); ¹³C NMR (CDCl₃, 125 MHz) δ 170.3, 170.1, 169.2, 169.0, 133.7, 128.7, 85.9, 76.2, 74.4, 70.3, 68.5, 62.3, 20.9, 20.8.

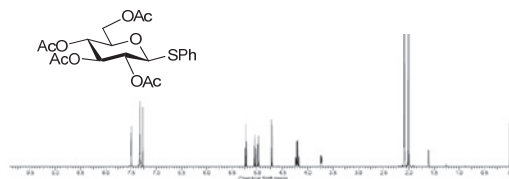


図 12 化合物 **2** の ¹H NMR スペクトルチャート

Phenyl 1-thio-β-D-glucopyranoside (3).⁷

To a solution of tetra acetate **2** (10.0 g, 22.7 mmol) in methanol (200 mL) sodium methoxide-methanol solution (5 mL of 1 M solution) was added and stirred at room temperature for 1 h. After consumption of starting tetra acetate **2** on TLC with hexane-EtOAc (2:1 v/v), the mixture was neutralized by ion exchange resin (Dowex 50W-X8, H⁺ form), filtered off, and concentrated in vacuo to give **3** (6.05g, 98% yield), which was used without further purification; mp 103-105 °C; IR (KBr disk) 3405, 1583, 1480 cm⁻¹; ¹H NMR (500 MHz, CD₃OD) δ 7.56 (m, 2H), 7.26 (m, 3H), 4.59 (d, *J* = 9.8, 1H), 3.86 (dd, *J* = 12.0, 1.8 Hz, 1H), 3.38 (dd, *J* = 8.6 Hz, 1H), 3.30 (m, 2H), 3.26 (dd, *J* = 12.0, 5.4 Hz, 1H), 3.21 (dd, *J* = 9.7, 8.7 Hz, 1H); ¹³C NMR (125 MHz, CDCl₃) δ 135.3, 132.8, 129.7, 128.3, 89.4, 82.1, 79.7, 73.8, 71.4, 62.7.

Phenyl 2,3,4-tri-O-benzyl-1-thio-6-O-triphenylmethyl-β-D-glucopyranoside (5).⁸

A solution of **3** (1.0 g, 3.67 mmol) and triphenylmethyl chloride (1.33 g, 4.77 mmol) in pyridine-CH₂Cl₂ (50 mL, 1:1 v/v) was stirred at room temperature for 24 h. After completion of starting compound on TLC with CHCl₃-MeOH (8:1 v/v), the reaction mixture was poured into brine and extracted with CHCl₃. The combined organic layer was washed with water, dried over MgSO₄, and concentrated in vacuo. The resulting residue was purified on a column of silica gel with EtOAc to give phenyl 1-thio-6-O-triphenylmethyl-β-D-glucopyranoside (**4**)⁸ (1.51 g, 80% yield). To a mixture of **4** (1.0 g, 1.94 mmol) and NaH (312 mg, 7.8 mmol dispersed in 60 % mineral oil) in dry DMF (30 mL) was added dropwise benzyl bromide (BnBr) (0.83 mL, 7.0 mmol) at 0 °C. The resulting mixture was stirred at room temperature for 5 h. Excess BnBr and NaH was quenched with Et₃N (0.5 mL) and methanol (1 mL), poured into brine, extracted with EtOAc. The combined organic layer was washed with brine, dried over MgSO₄, and concentrated in vacuo. The resulting residue was purified on a column of silica gel with hexane-EtOAc (3:1 v/v) to give **5** as a yellow syrup (1.27 g, 83% yield); ¹H NMR (500 MHz, CDCl₃) δ 7.16-7.52 (m, 35H, PhH), 4.56-4.93 (m, 6H, OCH₂Ph), 4.31 (d, 1H, *J* = 10.2 Hz, H-1), 3.74 (dd, 1H, *J* = 9.5 Hz, H-3), 3.58-3.69 (m, 3H, H-6, H-6', H-4), 3.45 (dd, 1H, *J* = 9.5 Hz, H-2), 3.26 (m, 1H, H-5); ¹³C NMR (125 MHz, CDCl₃) δ 138.3, 138.1, 137.6, 133.8, 131.9, 128.9, 128.8, 128.5, 128.4, 128.2, 128.1, 127.8, 127.6, 127.4, 126.9, 87.3, 86.8, 86.5, 80.8, 78.8, 76.7, 76.0, 75.4, 75.0, 72.1, 62.4.

Phenyl 2,3,4-tri-O-benzyl-6-O-(N-phenylcarbamoyl)-1-thio-β-D-glucopyranoside (7).

A mixture of **5** (1.01 g, 1.29 mmol) in 70% acetic acid solution (50 mL) was stirred at room temperature for 12 h. After consumption of **5** on TLC with hexane-EtOAc (2:1 v/v), the mixture was concentrated in vacuo. The resulting residue was purified on a column of silica gel with hexane-EtOAc (2:1-1:1 v/v) to give **6**⁸ (642 mg, 92 % yield). Next to a solution of **6** (501 mg, 0.923 mmol) in dry pyridine (20 mL) was added phenyl isocyanate (0.12 mL, 1.1 mmol) at 0 °C and stirred for 1 h. After completion of the starting compound on TLC with hexane-EtOAc (2:1 v/v), the mixture was evaporated in vacuo. The resulting crude crystal was purified by recrystallization with hexane-EtOH to give **7**⁹ (532 mg, 87% yield); [α]_D²⁵ +8.9° (*c* 1.51, CHCl₃); mp 131-132 °C (hexane-EtOH, colorless needles); IR (KBr disk) ν 3369 cm⁻¹ (NH), 1703 cm⁻¹ (C=O); ¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 7.55-7.06 (m, 25H, PhH), 6.55 (br s, 1H, CONH), 4.94, 4.87 (each d, 2H, *J* = 10.8 Hz, OCH₂Ph), 4.93, 4.75 (each d, 2H, *J* = 10.2 Hz, OCH₂Ph), 4.85, 4.62 (each d, 2H, *J* = 10.2 Hz, OCH₂Ph), 4.67 (d, 1H, *J* = 10.2 Hz, H-1), 4.44 (br d, 1H, *J* = 12.0 Hz, H-6), 4.34 (m, 1H, H-6'), 3.74 (br dd, 1H, *J* = 9.0, 9.0 Hz, H-5), 3.57-3.53 (m, 2H, H-3, H-4), 3.50 (dd, 1H, *J* = 10.2, 9.0 Hz, H-2); ¹³C NMR (150 MHz, CDCl₃) δ 138.2, 137.8, 137.5, 133.3, 132.4, 129.1, 128.8, 128.5, 128.5, 128.4, 128.3, 128.2, 127.8, 123.5, 118.5, 87.6, 86.7, 81.0, 77.2, 77.1, 75.8, 75.5, 75.0; Anal. Calcd for C₄₀H₃₉NO₆S (661.81) C, 72.59; H, 5.94; N, 2.12, found C, 72.21; H, 5.60; N, 1.99; HRMS (ESI-TOF) calcd for C₄₀H₃₉NO₆S *m/z* [M+Na]⁺ 684.2396, found 684.2376.

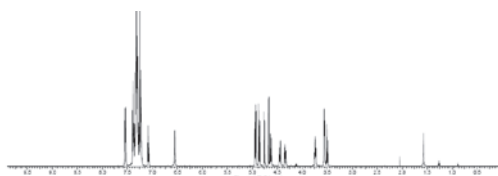
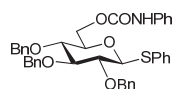


図 13 糖基質 **7** の ¹H NMR スペクトルチャート

9. 可視-極限的超短パルスレーザー照射による 新反応開発

糖基質 **7** の弱酸性メタノール溶液を試料として、光励起による電子励起状態の反応、加熱による電子基底状態

の熱反応、および、可視-極限的超短パルスレーザー光照射による反応を比較検討した。まず、合成した糖基質 **7** の紫外-可視吸収スペクトルを測定した。図 14 に示すように、糖基質 **7** は 290 nm よりも短波長側に吸収を有している。そこで、糖基質 **7** を 1 光子励起可能な 266 nm の 10-ns パルスレーザー光 (Nd:YAG レーザー光の 4 倍波) を照射し、光反応を検討した。反応後の溶液の $^1\text{H-NMR}$ スペクトルを測定した結果、3 種類全ての保護基の脱保護反応と糖基質 **7** の 6 員環自体の開環-分解反応の進行が確認された。次に、糖基質 **7** の弱酸性メタノール溶液を 4 時間加熱還流することで、熱反応を検討した。予想に反し、いずれの基の脱保護反応も糖自身の開環反応も進行しなかった。

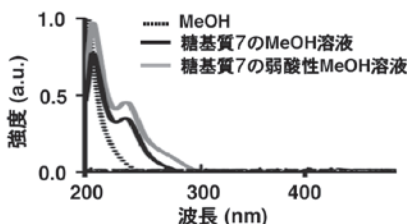


図 14 糖基質 **7** の紫外-可視吸収スペクトル

さらに、可視-極限的超短パルスレーザー光照射による反応を検討した。糖基質 **7** の弱酸性メタノール溶液を光路長 10 mm の石英セルに入れ、図 8 BBO_3 の位置に固定し、レーザー光強度 $4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 程度で照射した。反応前後の溶液をドライアップし、重クロロホルム中での $^1\text{H-NMR}$ スペクトルを比較した結果、カルバメート基の脱保護反応が進行していることが示唆された。この結果は、可視-極限的超短パルスレーザー光を照射すると、光反応とも熱反応とも異なる反応が進行することを示している。

確認のため、糖基質 **7** の弱酸性メタノール溶液に 532 nm の 10-ns パルスレーザー光を照射したところ、266 nm の 10-ns パルスレーザー光を照射した場合と同様、3 種類全ての保護基の脱保護反応と糖基質 **7** の 6 員環自体の開環-分解反応が進行した。この結果は、532 nm の 10-ns パルスレーザー光を照射すると、2 光子励起反応が進行することを示している。これらの結果は、可視-極限的超短パルスレーザー光をレーザー光強度 $4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 程度で照射することにより、多光子励起を含む光反応とも熱反応とも異なる反応が進行していることを示しており、その結果、カルバメート基のみが脱保護されたと考察される。

次に、可視-極限的超短パルスレーザー光をレーザー光強度 $3 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 程度で照射した。その結果予想に反し、光路上に結晶が析出した (図 15a)。得られた結晶は細かいカビ状の針状結晶であった (図 15b)。この結晶の $^1\text{H-NMR}$ および $^{13}\text{C-NMR}$ スペクトルと MASS スペクトルを測定し、解析したところ、この結晶は環状トリアセタール体であると推定された。また、推定される環状トリアセタール体は、新規化合物である。

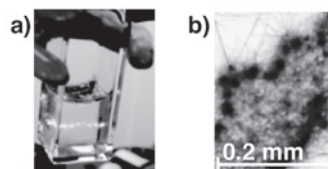


図 15. 光路上に析出した結晶

10. 今後の課題

上述したように、可視-極限的超短パルスレーザー光の強度により、生成物が異なることが見いだされた。また、いずれの場合にも、光反応とも熱反応とも異なる生成物が得られることが示された。今後は、各々の反応の誘起過程を解析していくと同時に、環状トリアセタール体の高効率な合成手法を開発していく予定である。

参考文献

- (1) T. H. Mayman, *Nature*, **187** 493 (1960).
- (2) I. Iwakura, S. Kato, R. Hino, A. Fukumoto, K. K.-Orisaku, Y. Koide, *RSC Advances* **3**, 5354 (2013).
- (3) T. Yatsushashi, N. Nakashima, J. Azuma, *J. Phys. Chem. A* **117** 1393 (2013).
- (4) A. Baltuska, T. Fuji, T. Kobayashi, *Opt. Lett.*, **27**, 306 (2002).
- (5) N. Michihata, Y. Kaneko, Y. Kasai, K. Tanigawa, T. Hirokane, S. Higasa, H. Yamada, *J. Org. Chem.* **2013**, 78(9), 4319-4328. (Compound 1)
- (6) A. P. Dieskau, B. Plietker, *Org. Lett.*, **2011**, 13(20), 5544-5547. (Compound 2)
- (7) F. P. Boulineau, A. Wei, *J. Org. Chem.*, **2004**, 69(10), 3391-3399. (Compound 3)
- (8) A. Agarwal, Y. D. Vankar, *Carbohydr. Res.* **2005**, 340(9), 1661-1667. (Compound 4-6)
- (9) S. Akai, R. Tanaka, H. Hoshi, K.-I. Sato, *J. Org. Chem.* **2013**, 78(17), 8802-8808. (Compound 7)



高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発

許 瑞邦² 武田 重喜² 穴田 哲夫¹ 平岡 隆晴³ 陳 春平³

Construction of high frequency circuit analysis/synthesis theory and development of the corresponding software

Jui-Pang HSU² Shigeki TAKEDA² Tetsuo ANADA¹ Takaharu HIRAOKA³ Chun-Ping CHEN³

1. プロジェクト研究の概要

電子機器の高周波化，高速化に伴い，使用する周波数
またはマイクロプロセッサの動作クロックが数 GHz に近
づいている現在，モノリシック集積回路化に適したマイ
クロストリップ線による 2 次元的平面回路，共平面回路
等といった電磁波回路が頻りに利用されているが，超
広帯域マイクロ波回路の設計理論はほとんど確立されて
いないため，統一的な設計理論を開発することが望まれ
ている．また高周波用プリント基板から外部への放射・
漏れによる電磁界分布の視覚的観測や温度分布（回路の
発熱状態）も同時にシミュレーションすることができれ
ば，回路の特性解析・評価・改善，漏れを防ぐ手段の発
見，更には新しい概念の回路の開発にも大変有意義であ
ると考えられる．このような観点から，Maxwell の方程
式の境界値問題に対する汎用的な設計法を開発し，実際
のデバイスへの応用を考えて研究プロジェクトを組織し
た．以下に各担当者の役割分担を簡潔に述べると，

- (1) 平面的導波路，回路の固有モード展開による理論の
展開と整備：担当は許 瑞邦 客員教授．
- (2) 平面回路理論による回路合成と実際：担当は武田重
喜客員教授（企業で多くの実装経験をもつ）．
- (3) Maxwell 方程式の FDTD 法による数値解法の開発と
応用：担当は穴田哲夫教授．
- (4) 平面回路の固有モード展開法に遺伝的アルゴリズムの
導入：担当は平岡隆晴助教．
- (5) 平面回路的 UWB 通信用帯域通過フィルタの開発と実

際：担当は陳春平特別助教．

上記研究課題にそって 5 年間の研究成果を統括すること
で，文科省科研費の取得など大きな成果を上げることが
できた．その研究成果の一部を報告する．

2. 次世代モバイル通信超広帯域デバイスの開発と実用 化における電磁環境評価

(1) UWB バンドパスフィルタの合成理論と実際

今日，携帯電話はコンピュータなみの性能へと進化し，
通信速度への要求は「Kbps」から「Mbps」へと進化を遂
げ，今後，更に「ワイヤレス&モバイルの通信速度/処
理能力の向上，無線による RFID，通信技術と ICT 技術を
高度に融合させることで，一段の飛躍を遂げるとともに
周波数資源の枯渇がおおきな問題となりつつある．さら
に無線による社会システムの電磁環境にも注意を払わな
ければならない．米国連邦通信委員会が周波数帯域
3.1GHz~10.6GHz 帯の民生利用を認可して以来，USA，日
本を始め，欧州やアジア各国に於いても超広帯域通信技
術の実用化に向けて研究開発が活発化しており，近距離
且つ超高速の情報伝送を無線で行う手段として，UWB（超
広帯域）無線通信技術（UWB 無線システム）が注目され
ている．特に，マイクロ波帯（3.1~10.6 GHz）を用い
る超高速 WPAN（wireless personal area network），超
低消費電力のセンサネットワークと，準ミリ波帯（22 ~
29 GHz）及びミリ波（77 ~ 81 GHz）を用いた車載近接
レーダ（自動車事故防止用）としての応用について多くの
企業が研究開発を行っている．しかし，UWB 通信を実用・
量産・商用化するにはさらなる研究開発すべき課題が多
いのが現状であり，そのひとつに，超広帯域(UWB)帯域通
過フィルタと既存通信システムへの電磁環境問題があげ
られる．屋内・屋外のスペクトルマスクを完全にクリア
した超小型 UWB バンドパスフィルタは，現時点では実現

¹教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information
Engineering

²客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

³助教 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical and Electronic
Information Engineering

されていない。筆者等は従来設計理論とは異なり、短絡スタブ、平行結合線路、ステップインピーダンス共振器構造(SIR)の設計に便利な等価回路を導出、この等価回路に基いて、中心周波数6.8GHz、通過帯域3.1~10.6GHz(比帯域幅110%)、リップル幅0.20dBのチェビシェフ特性を持つ超広帯域帯域通過フィルタを合成理論に基いて設計可能であることを見出した。また実際に設計したフィルタを試作し、測定・評価した結果、比帯域110%、周波数帯域共に米国連邦通信委員会のスペクトラルマスクの仕様を屋内・屋外共に満足する見通しが得られた。さらに群遅延特性は帯域内で 0.4 ± 0.1 nsの良好な特性を実現している。当プロジェクトで採用した平行結合線路、先端短絡スタブとステップインピーダンス型共振器を用いたマイクロストリップ構造は、他の研究者も個々に用いているが、非常に強い結合、線間のギャップは0.1mm以下(実際の実現不可能)であるのに対して、筆者等は、先端短絡スタブ、結合線路と非対称ステップインピーダンス型共振器の便利な等価回路を用いることで、結合線路間のギャップの拡大に成功し、実際に実現可能な設計値を得ており、簡易的に試作し、ネットワークアナライザで測定した結果、良好な特性を実現できた。

(2) 電子機器からの電磁雑音のモデル化と電磁干渉メカニズムの解明(シミュレーションソフトの整備)

UWBフィルタを組み込んだPCBボードや電子機器から漏洩する不要電磁放射の測定法として、高周波電界と高周波磁界を測定する必要がある。これまでに電界に関しては、ほぼ数100MHzからミリ波帯まで測定可能な超小型電界プローブを開発してきた。測定結果は電子情報通信学会のマイクロ波研究会や産業界との共催マイクロ波のTutorial講座でも発表してきたが、測定精度および得られた結果の分解能などは世界の最高水準にあると言っても過言でない。さらに、高周波用磁界プローブの開発にも成功し、まだプリミティブな試作段階であるが、測定結果の一部を国際会議にて発表している。

またユビキタスネットワーク社会の到来とともに、通信システムのみならず、衝突防止レーダー、複数台のハイビジョンTVカメラ用としてもUltra Wide Band(UWB)無線システムが期待されているが、回路素子の高周波駆動による小型化のみならず、PCB基板上のLSIの高密度化などますます高速動作化しており、これらの電子機器からの不要電磁波による様々な電磁環境・相互干渉問題を引き起こすことが予想される。機器の扱う周波数が上がると、従来からの遮蔽対策だけでは対応することが困難となっており、基板自体の誘電率(誘電体材料は周波数分散を持っている)、高周波回路パターンなど根

本的な対策が求められている。このような現状でPCBを診断する方法として、PCB周辺に分布する電磁界を非接触プローブセンサーで測定し、その波源(電流あるいは電荷)を可視化する事が極めて有効であると考えられる。また同時に放射電磁界の抑圧と特定など、EMC/EMIの観点から意味あることである。更に、コンピュータの高性能化に伴って、FDTD法などを応用した電磁波シミュレータが盛んに研究され、理論解析が困難な複雑な回路構造に対しても、電磁界シミュレーションが可能となってきた。その一方で、数値計算で得られたシミュレーション結果の信頼性が問われるようになってきている。

その中でも、**当プロジェクトにおいて開発した高周波電界及び磁界プローブは特筆すべき一つとして注目されている。**

3. 光波平面回路の研究

短ミリ波・光波領域における研究に関して多層超薄膜導波路のアイデアは、マイクロ波と同じように単一伝搬モード且つ単一偏波動作の実現を目指して、2種類の異なる誘電体を10層に多層化することによって実現した。

4. これまでの研究成果

新しい通信システムのUWB通信(超広帯域通信)におけるフィルタの研究成果をIEEE-IMS, EuMW, APMCの国際会議にて発表している。また本プロジェクトにおいて2度の科研費(20560339及び24560423)を得ることができた。研究範囲は、マイクロ波、ミリ波、短ミリ波、テラヘルツ波、光波と広範囲にわたっており、新しいデバイスや回路を見出しているが、5年間を一区切りとして、研究成果の一部をまとめて報告書としたい。その他の研究成果については、別の機会に報告する。

参考文献

- [1] 基盤研究C(研究課題番号:20560339), 次世代モバイル通信超広帯域デバイスの開発と実用化における電磁環境評価, 研究期間:2008年度~2010年度
- [2] 基盤研究C(研究課題番号:24560423):ミリ波・サブミリ波帯におけるフォトリソニック結晶構造を応用した電磁波回路の解析と応用. 研究期間:2012年4月1日~2015年3月31日
- [3] Noda, Y., Takamori, H., Kamiji, Y., Chen, C.P., Anada, T., "Contactless electromagnetic field mapping system on planar circuits in EMC/EMI investigations", pp. 784 - 789, 2011, EMC Europe 2011 York.
- [4] Takamori, H., Chen, C., Kamiji, Y., Anada, T. "Study on error suppression in broadband characterization of complex EM-parameters", pp.801 - 804, 2011 York.



高安心超安全交通研究所 (KU-WIRF) の活動

松浦 春樹* 森みどり** 堀野 定雄*** 大和裕幸**** 久保 登*****
石川博敏***** 龍 重法***** 石倉理有***** 北島 創*****

Kanagawa University, The Research Institute for Well-Informed and Risk-Free
Transportation

Haruki MATSUURA* Midori MORI** Sadao HORINO*** Hiroyuki YAMATO**** Noboru KUBO*****
Hirotoishi ISHIKAWA***** Sigenori RYU***** Masatomo ISHIKURA***** Sou KITAJIMA*****

1. プロジェクト研究 C : KU-WIRF の設立理念

開業以来 50 年間乗客人身事故ゼロ記録更新中の新幹線に比べて、自動車交通は同時期(1964-2014)死者約 45 万人強と安全成果が極めて不十分で課題山積である。日本ではこの 10 年間、G(行政)・I(産業)・A(学術)・P(国民)コラボレーションで事故件数、負傷者数、死者数は減少傾向にある(図1)が、事態はまだ深刻だ。

ヒューマンエラーの複合要因である「4M」(Man 人間、Machine 機械、Media 環境、Management 管理)のうち Media (環境)と Management (管理)には情報不足状態が含まれる。情報不足状態を「不安状態」、その逆を「安心状態」と定義すれば、交通機関における情報伝達性を「安心性」尺度として用い「高安心」な交通機関を目指す。

他方、新幹線の様な絶対的安全性を担保する交通機関を「超安全」交通機関と定義し、高安心・超安全交通実現に効果的な、完全な無リスク状態実現を自動車交通で最も先進的情報収集技術として注目される映像記録型ドライブレコーダー活用(当時の運輸省内設置、運輸技術審議会で堀野提唱、1999)の大規模データ分析で行う計画でスタートしたのが、当プロジェクト研究 C 高安心超安全交通研究所 (KU-WIRF) である。

2. KU-WIRF 命名に込めた熱意

昨今、用語「安心・安全」はインフラ気味で、その本

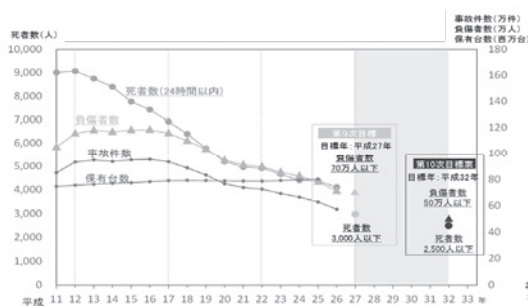


図1交通事故の現状 死者:4,113人、負傷者:711,134人、人身事故:573,842件(国土交通省、2014)

来価値が希薄化している。そこで、我々は上述理念で「神奈川大学高安心超安全交通研究所」と命名した。「高安心」の英訳「Well Informed」は、情報不足状態「不安状態」の逆「安心状態」を示す。情報が的確、タイムリー、過不足なく与えられると人は安心する。「超安全」英訳「Risk Free」は新幹線の様な絶対的安全性を担保する、リスクから完全解放された状態を指す。

初対面の名刺交換に興味ある経験をしている。日本語名刺を渡す日本人と英語名刺を渡す外国人の反応が異なる。外国人は何をする人か直ぐに解ってくれる。わざわざ親指を突き出して「そうそう、その通り」と相槌を打つオランダ人もいる。日本人の多くは「高」と「超」に抵抗があるらしく「これはどう意味ですか?」と訊く方が多い。そう言う時は英語名刺も渡すと納得して貰える。この様に、英語名 KU-WIRF を広める努力が徐々に奏功したか、認知されつつある様だ。

3. KU-WIRF の沿革と研究組織

当プロジェクト研究 C は、2008 年設立(所長:堀野定雄)、3 年毎更新で 2 期目 2011 年、所長交代(松浦春樹)、現在 3 期目半ばである。研究課題は一貫して「映像記録型ドライブレコーダーによる大規模データ収集システム構築と事故原因

*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering

**准教授 経営工学科

Associate Professor, Dept. of Industrial Engineering

***客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

****客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

*****特別研究員 工学研究所

Special Researcher, Research Institute for Engineering

因の究明」で科学的交通事故激減を目指し活動中である。

人間工学、システム設計学、組織経営、事故データ分析、ドライブレコーダーデータ収集・システム設計開発などに豊富な経験を持つ専門家を客員研究員などとして招聘、効率よく研究を進めて来た。その所属内訳は本学3名(松浦春樹、森みどり氏、堀野定雄)の他に他大学2名(大和裕幸氏、久保 登氏)、研究機関2名(石川博敏氏、北島 創氏*)、民間企業2名(龍 重法氏、石倉理有氏)を客員研究員5名、特別研究員1名*で招聘、構成している。

3. ドライブレコーダー：交通事故激減への貢献度

映像記録型ドライブレコーダー(DR)はメモリー技術の長足進歩で初期のトリガー型から常時記録型へ業務用個人用共に普及した。事故分析視点からの関心は、急加減速、急ハンドル、衝突事故場面の記録性能で、①環境：前方映像、GPS 地理データ、②車の状況：速度・加速度変動、③運転者の操作状況：ウィンカー、ブレーキなど多岐に渡る。

DR が出来ることのハイライトは、①事故過程の詳細分析とそれによる事故原因解明、②効率的な事故処理推進、③運転者安全教育活用で、各論的には、(1) 事実発見に顕著な効果挙げる「虫瞰図」的タスク分析や時系列分析が出来ること(図2、図3)、(2) 事故/ニアミス分析の迅速化や映像活用で実況見分図作成の迅速化、(3) 事故/ニアミス発生メカニズムとリスク要因の解明、例えば、リスク要因上位(8割)は①合流・車線変更、②追突、③出会い頭が占める事が既に判明しているなど、(4) 事故の相手当事者の1/3は自転車・歩行者などの交通弱者で、彼等がマナーを守れる環境再設計が急務であるとか公道利用者として公平な権利・義務分担を図る諸政策実施が急がれるなど、(5) 安全教育に活用、換言すると事故未然防止に有効である。

早朝の出会い頭事故(図2、図3)では、この種不測事態を想定して、タクシーは交差点に接近中減速30キロで衝突した。不幸にして衝突した自転車は転倒するが、タクシー低速のおかげで衝撃は小さく直ぐに自力で立ち上がり、なんと運転者が下車して接近すると一目散に逃げた。不幸な事故でも被害軽減に有効な係わり方が検証できた。

最近ではデジタルタコグラフと一体化し通信技術と連動してクラウドコンピュータ処理するビッグデータ化も進んでいる。データ収集とデータ活用は独立した技術課題であるが今やICT(情報通信技術)と人間工学の協働は必須である。それを裏付ける最新の大型トラック急ブレーキ多発地点ビッグデータ横断的分析研究では、道路インフラ環境のハード面、ソフト面の良否が運転者ヒューマンエラーを誘発する事が鮮明になって来た。従来の教育訓練偏重から脱却して、道路インフラ整備に資源投入する方が効果的と判って来た。



図2 早朝 5:29、生活道路無信号交叉点出会い頭、若い女性自転車一時不停止でタクシーと衝突！！

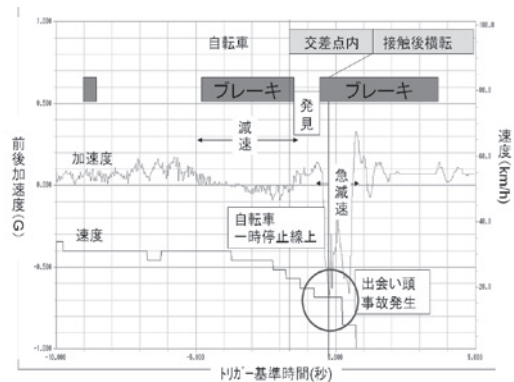


図3 早朝(5:29)一時不停止で交差点突入若い女性自転車と衝突(時速30km/h)。タクシー事前減速、軽傷で済む。

4. KU-WIRF の主な活動実績

KU-WIRF が自負できる活動実績は積極的学外発信活動である。2009年以來、毎年1回開催を続け、今回で第7回目となる「ドラブリ、ドライブレコーダー応用実践シンポジウム」である。喜ばしいことに、今や日本で唯一のドライブレコーダー専門シンポジウムとして広く認知されるに至った。

今回、「ドラブリ 2015」は話題沸騰中の自動運転に着目、「ドライブレコーダーと自動運転(高度運転支援)」をテーマに2015年12月1日、日本大学理工学部駿河台校舎1号館6F、CSTホール(JR中央・総武線 御茶ノ水駅 徒歩3分)を会場に開催する。本学ホームページも広報協力頂いておりが、恒例の国交省基調講演に始まり、自動運転に関する国内外動向やドライブレコーダーの役割と進化のあり方を考える。参加費無料(資料代3000円)、展示会、交流会を企画、関心ある方々の積極的参加をお待ちしている。

そもそものきっかけは、KU-WIRF 設立記念シンポジウム「交通事故と予防安全へドライブレコーダーとその応用技術〜」(2009-7)である。中島学長(当時)と許工学研究所長(当時)の強力なご支援を頂き、セレスホールに学内外から約160名の熱心な参加者が集まり熱い討論を行なった。内容

がユニークで印象的だったのか、1号館8階交流会場は超満員で立錫の余地なく、手を伸ばす乾杯グラスがお互いにくっつく程だった。この席で初面識を得た多くの産業人から「来年はいつやるのか」と聞かれ「その予定はありません」と答えると、ぜひ継続をと強く促され2回目以降を企画する運びとなった。今振り返ると、これは多くの賛同者に囲まれて、幸運に恵まれたとしか言いようがない。

初回から6回目まで「運輸現場におけるドライブレコーダーの予防安全技術の効果的な手法」(2009)、「大量データの自動検出技術を用いた安全教育への活用方法」(2010)、「交通事故の劇的削減〜ドライブレコーダー活用実践〜」(2011)、「多様化するドライブレコーダー応用」(2012)、「ドライブレコーダーのビッグデータ」(2013)、「高齢者とドライブレコーダー」(2014)をテーマに開催、好評を得た。

その後、KU-WIRFが母体となり純民間組織ドライブレコーダー協議会を学外に設立 (<http://www.jdrc.gr.jp/>)、初代会長:堀野定雄、2010-12)、2年前から共同主催の形で運営している。協議会試算ではマイカー装着も含めて500万台普及したと見る(2014-4)。

ドライブレコーダー協議会小林敏雄3代目会長が掲げる

活動目標は、ドライブレコーダー技術を交通安全の向上に資するための3方策:①利用者に分かり易い機能や性能の表示によってドライブレコーダーの更なる普及を促進すること、②ドライブレコーダーのデータを交通安全に利活用する方策を検討すること、③安全運転支援技術の効果強化する方策を検討することであり、これらはKU-WIRF活動とも符合しており強いコラボレーションが継続中である。

KU-WIRFのもう一つの研究活動実績は、全事故件数の1/4を占める出会い頭事故を防止する等のカーブミラーが機能不全を起こしていた問題への解決策提案である。我々のフィールド研究で全国225万基カーブミラーの2/3が機能不全に陥っている事が判った。抜本的設置改善研究を行い、最終知見を判り易く整理して国交省道路局へ提言(2010-3)、全国展開された(図4)。これに関してはカーブミラー角度調整簡便法に関する特許も取得した。

5. まとめ

今後も、積極的に安全を諸外国に輸出する精神で、社会発信できる研究活動を推進していく方針である。各方面からのご指導ご鞭撻を期待する次第である。

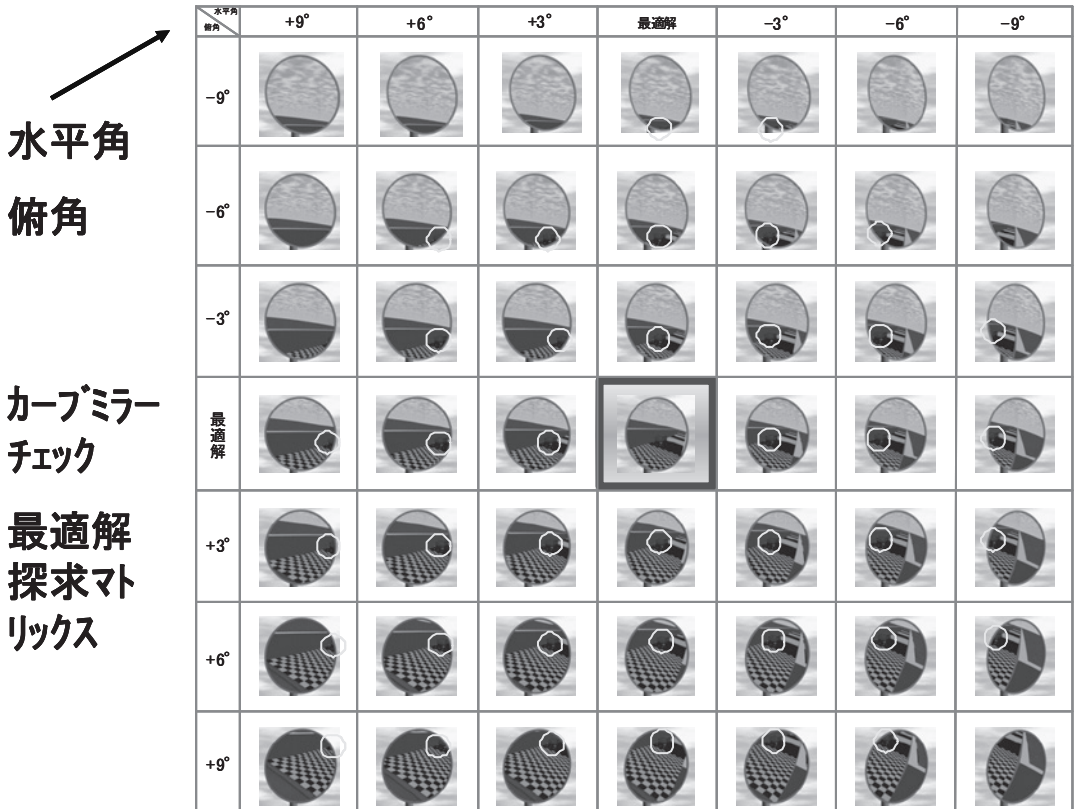


図4 カーブミラー角度調整簡便マトリックス法。問題のカーブミラー鏡像を見て、マトリックス真中の最適解を目指して水平角、俯角を適宜調整する。全国225万基カーブミラーを所管する国土交通省道路局地方道環境課に提言、採用された(2010-3)。



防災まちづくり支援研究センター

荏本 孝久* 大熊 武司** 島崎 和司* 佐藤 孝治***
丸川 比佐夫**** 天国 邦博**** 栗山 利男****
露木 延夫**** 植山 利昭****

Institutional Center of Regional Constitution Support for Disaster Preparedness

Takahisa ENOMOTO* Takeshi OHKUMA** Kazushi SHIMAZAKI* Koji Sato***
Hisao MARUKAWA**** Knihiro AMAKUNI**** Toshio KURIYAMA****
Nobuo TUYUKI**** Toshiaki UEYAMA****

1. プロジェクト研究の概要

自然災害に対する減災や防災活動として、防災まちづくりを地域および住民などが連携して組織的に活動できる環境が必要である。特に、防災情報の情報共有化と人的・組織的ネットワークの構築が重要で、その中心的な母体は地域の大学が地域社会への貢献、研究情報の還元として取り組み支援すべき研究活動である。このための研究センターとして本研究センターを創設した。研究センターの目標として、地域特性を考慮した災害危険度マップの作成と防災カルテを作成し、合わせて災害リスクマネジメントのための実践的な地域防災教育プログラムの開発、セミナー・講演会開催を中心的な目標とした。

2011年3月に発生した東日本大震災以降、地域の防災まちづくりの重要性は益々高くなり、その期待も大きくなってきている。また、地域からの要望も大きい。このような状況の中で防災研究成果の地域還元は社会貢献・地域貢献として極めて重要となっている。

当初より研究センターの目標として、地域特性を考慮

した災害危険度マップの作成と防災カルテを作成し、合わせて防災リスクマネジメントのための実践的な地域防災教育プログラムの開発、セミナー・講演会開催を中心的な目標としてきており、これまでの3年間に亘って実施してきた。これらの成果は開設しているURL上に公開してきている。

ここに申請するプロジェクト研究Cは、これまでの成果を基盤として研究成果をより工夫を重ねて地域住民が活用し易い災害リスクマップの開発、地域防災活動の支援プログラムおよびテキストの開発、セミナーの開催、連続講座の開催により、より充実した地域連携型の防災まちづくり支援のための研究センターを目指すものである。

2. 研究成果の概要

2-1 災害危険度マップ作成と防災カルテ

神奈川県を対象として、事前に防災情報を集約した地震防災情報プラットフォームを整備して、防災情報の共有化とネットワークの構築を進め、防災まちづくりを支援する種々のツールを開発することを目的とする。

- (1)地震災害リスクの抽出と評価の高精度化
- (2)地震災害リスクの視覚化のための詳細ハザードマップの作成
- (3)地震防災情報プラットフォームの構築
- (4)防災まちづくり支援ツールの開発

*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architectural Engineering

**客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

***教授 経済学部経済学科

Professor, Dept. of Economics, Fac. of Economics

****学外研究者

Researcher of Outside the Univ.

研究期間内に実施した研究と成果を以下にまとめる。

- ① 細密メッシュマップによる神奈川県市区町村 GIS 防災マップの整備に関する研究：
 - ・研究目的を達成するためには「新しい防災マップ」として詳細な地震災害ハザードマップを作成することが必要であり、その GIS 環境を構築した。
- ② 市町村別地震ハザードマップの作成：
 - ・既に作成した「微地形区分図」と「地盤増幅率図」を活用して、市町村の「建物分布」や「人口分布」など社会統計資料を組合わせて、10 タイプの想定地震に対する詳細な「震度分布図（地震動マップ）」と「建物倒壊危険度図（建物危険度マップ）」を作成した。これらのマップを地震防災情報プラットフォームとしてインターネット上で公開した。
- ③ 地震防災カルテに関する研究：
 - ・防災カルテを神奈川県内の各市区町村へ適用するため、GIS 環境を構築した。実際に主要都市である横浜市・川崎市に適用して防災カルテを作成した。
- ④ GIS による空間解析を用いた外水氾濫時の避難所の選定に関する研究—相模川水系中小河川を対象に—
 - ・近年の気候温暖化に伴う気象災害が頻発する状況で、住民の関心が高い洪水災害に関する分析を実施した。地震災害同様 GIS 環境を構築することで分析が可能であることを確認した。
- ⑤ GIS 空間分析機能を活用した広域地震被害情報の分析評価に関する研究
 - ・2011 年東日本大震災において津波災害は顕著であった。この津波災害に関して建物被害の発生要因を分析することが将来の津波災害の予測に重要であることから、GIS の空間分析機能を活用して検討した。

2-2 地域防災教育プログラムの開発と展開

地域防災教育プログラムは、2005 年～2009 年に実施した文部科学省・学術フロンティア研究事業において構築された地域の一般市民の方々との防災研究および実践活動組織である「防災塾・だるま」との共同事業として展開した。主な活動内容は、以下のようになっている。

①防災塾・だるま「定例会」等の運営：

毎月 1 回（毎月末金曜日午後）開催し、前半は会の運営に関する意見交換を行い、後半は公開講演会として意識向上を計る。

②「実践的防災まちづくりコーディネーター養成講座」の開催：

毎年秋期に 6 回程度の講座を開催している。この事業の運営には運営委員会を組織してテーマとプログラムを

作成し防災意識の向上を計る。

③地域防災活動支援のためのセミナー、講演会の開催：

地域防災活動を支援するために、自治体や自主防災組織・自治会が開催するセミナー、講演会の企画・運営や講師派遣などで協力し、「防災塾・だるま」の事業活動で培った知識・技術を普及している。

④「防災塾・だるま」HP の維持管理：

「防災塾・だるま」の活動事業や防災情報を公開して、活動の進展に伴う発信情報の質的・量的な充実を計る。

3. まとめ

工学研究所プロジェクト研究 C（2012 年度～2014 年度）により実施したプロジェクト研究「防災まちづくり支援研究センター」について成果をまとめた。この研究では、先行した 2005 年度～2009 年度（5 年間）に実施した文部科学省・学術フロンティア研究事業の成果と 2009 年度～2011 年度（3 年間）に実施した工学研究所プロジェクト研究 C での研究成果に基づいて継続的に実施してきたもので、1995 年阪神・淡路大震災、2004 年新潟県中越地震や 2007 年新潟県中越沖地震など大規模な地震災害を受けた被災地の災害発生直後の混乱を軽減し、災害を出来るだけ最小化する重要性を考慮して、大学が地域社会に貢献することを目的として実施した。本研究に基づいて支援研究センターの骨格は構築できた。しかし、2011 年 3 月には東日本大震災が発生し、巨大津波による災害で膨大な被害が広域的に発生するという想定外の災害が発生し、新たな視点の導入が必要になっている。この点に関しても、今後も十分な取り組みが重要であると考えている。

参考文献

- 1) 栗山 利男, 荻本 孝久, 山本 俊雄, 露木 延夫, 「地域防災活動支援を目的とした防災カルテに関する基礎的研究」, 地域安全学会梗概集 No.26, 2010. 6
- 2) 文部科学省・学術フロンティア研究事業報告書「災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントの構築に関する研究（研究代表：荻本孝久）2005 年～2009 年」, 2010 年 3 月
- 3) 神奈川大学共同研究報告書「地震防災情報プラットフォームを活用した防災まちづくり支援ツールの構築に関する研究（研究代表：荻本孝久）2010 年度～2012 年度」, 2013 年 3 月



地元住民と協力して実施する 町づくり研究所の活動を振り返って

内田 青蔵* 重村 力* 山家 京子* 曾我部 昌史*
中井 邦夫* 小幡 知之** 香山 篤美**

On Activity of the Institute for Town Planning Practice of Town Planning in Cooperation with Local People

Seizo UCHIDA* Tsutomu SHIGEMURA* Kyoko YAMAGA* Masashi SOGABE*
Kunio NAKAI* Tomoyuki OBATA** Atsumi KAYAMA**

1. プロジェクト研究の概要

町づくり研究所が、工学研究所プロジェクト研究として承認されたのは2006年からであり、今年度においてはや10年が過ぎようとしている。

ところで、この町づくり研究所を立ち上げ、精力的に活動を展開してきた中心人物が、神奈川大学名誉教授の西和夫先生である。西先生は、建築学科で建築史研究室を構え、多くの卒業生を世に送り出した。その卒業生たちが、各地で活動し始める中で、再び西研究室を訪ねる機会が増えたという。その理由の多くは、古くから伝わる建造物が取り壊される状況を変えるために、歴史的建造物を用いながら町おこしができないかという相談のためだったという。西先生は、こうしたことからOB・OGたちとともに古い建物を調査を行い、それらの価値を明らかにし、地元住民に価値を伝え、住民と一緒にそれらを活用しながら疲弊した町を活性化させる新しい町づくりの道を模索する活動を展開し始めた。そして、その活動をより本格化するために、工学研究所内に町づくり研究所を設置したのである。西先生の定年後は、代表は山家、内田が担当したが、その中であって西先生は客員教授としてより積極的に町づくりに係ってきた。しかしながら、この中心的活動を担っていた西先生が、今年2015

年1月、突然亡くなられてしまった。

そこで、本稿では町づくり研究所の研究報告に代わって、これまで西先生を中心に精力的に行われてきた町づくりの活動を簡単に振り返り、西先生の業績の一端を紹介することで、研究報告の代わりとしたい。

2. 町づくり研究の実績

西先生は、在職時代に研究室主体ですでにいくつかの町づくりに関する活動を進めていた。以下、西先生が係られた活動を見てみたい。

研究室主体で行った町づくりの代表的活動として、2000年から始められた平戸の町並み調査がある。2005年までに町並み調査が行われ、町並みを形成する建物の重要性が住民に周知され、また、建物の維持・修理のための補助制度もこの間に整えられた。また、建物の保存だけではなく、住民の生活そのものも継承すべきであるとし、年中行事やその際の料理などの調査も行い、とりわけ「おくんち」の際には町屋すべてが参加して町を演出するといった、行事の復活などにも積極的に係られた。そして、平戸の町づくりとしてかつてのオランダ商館復原にも係り、平戸の歴史的建造物所有者と町づくりを模索する人々のネットワークづくりなどにも寄与した。

この平戸の調査と並行して、2002年から島根県江津本庁の町並み調査を行っている。調査の結果、町中には貴重な歴史的建造物が点在していることが明らかになり、地元では町の保全のための活動が調査を起点に開始された。

2005年からは、長崎県と壱岐市の依頼を受け、壱岐勝

*教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

**客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

本浦の町並み調査を行っている。その調査には、失われつつある建物や町並み、さらには、周辺の自然環境などの状況を把握し、新しい町づくりの資料として生かそうとする目的があった。建物の調査とともに、生活に係る重要な要素として井戸と生活の関係を分析し、また、住民の人々の生活に係るものとして祭礼や朝市なども調査し、その重要性を指摘している。

また、同じ2005年から2008年度まで岐阜県各務原市からの依頼により、各務原市の歴史的建造物の調査を行っている。その調査をもとに貴重な歴史的建造物8件17棟は、国の登録有形文化財に登録された。また、調査結果をもとに、町並みの修景事業や街道を走る水路の復原などの検討も行われており、まさしく町づくりのための成果をあげている。

一方、こうした調査に相前後し、2004年から2009年までの6年間、長野県長野市教育委員会の協力のもとで、松代町の町並み調査を行っている。調査を行ったのは95件164棟の建物で、2009年に報告書が刊行されている。この調査をもとに、松代では町づくりに関するNPOが誕生し、地域の建物や庭などの歴史的資産の見直しの活動が展開された。この活動の中で、2007年松代の「松真館」内に「神奈川大学・松代町町づくり研究所」が開設され、調査とともに、学生と住民の交流や住民への調査報告会などが行われた。

さらに、2006年から山形市長井商工会議所と長井町づくりNPOセンターの協力を得て、長井市中央地区の歴史的建造物の調査を実施し、併せて、神奈川大学と長井NPOが共同で「町づくり研究所」を設置し、活動を行っている。また、長井も平戸と同様に様々な年中行事や祭礼がある。そこで、長井でもこうした住民活動としての祭礼や行事を重視し、町づくりに欠かせない貴重な資料として調査を行っている。

なお、西先生は、神奈川大学日本常民文化研究所の委託研究として、岐阜県高山市の町並み調査並びに景観要素の調査も行っている。この調査は2008年から2011年まで行われた。調査目的は、2005年に近隣9町村と合併した高山市が、合併して高山市に編入された高山市市街地とその周辺の関係を見直すためのもので、具体的には、農山村民家の調査と重要な歴史的景観要素として高山市の中心地域に点在する「秋葉様」と呼ばれる防火の神様を祭った小さな社の調査であった。調査から、この「秋葉様」が普段から住民によって大切に扱われていること、高山市中心地の歴史的景観要素として重要なものであることを明らかにしている。また、その後は、町づくりに直接かかわるものではないが、町づくりの核となる歴史

的建造物である高松城と小田原城の調査も行っている。

3. 結びにかえて

西先生は、ご自分が手掛けられた町づくりに関する活動内容を、2009年11月14日に神奈川大学日本常民文化研究所主催の第13回常民文化研究講座の中で詳しく紹介された。この講座は、シンポジウムと展示からなるもので、シンポジウムのタイトルは「町をつくる、人をつくる―祭礼・年中行事そして町並み」というものであった。まさしく、紹介した西先生の町づくり調査が終始一貫して行われていたことがそのまま表現されていることがわかる。すなわち、これまでの町並み調査では、町並みを構成する建物調査が主眼で、建物の調査に終始するくらいがあった。そのため、報告書も建築専門家しかわからない用語を並べたものが多かったのである。しかしながら、西先生の調査では、建物調査とともに、年中行事や祭礼の調査、さらには、その地域の特産物や地元の料理や地酒なども調べ、その地域ならではの生活を把握し、それを大切に継承していくことをめざしたのである。町や町並みの主役は、表に見える建物ではなく、あくまでもその建物で生活する人々であり、その人々の生活そのものが大切であるという熱い思いが込められているのである。

また、展示内容は、各地区で行った調査内容やその成果をまとめた写真パネルをもとにしたもので、2009年10月27日から11月26日まで1か月間学内で展示された。そして展示会終了後には、そのパネルをもとに調査地で巡回展が行われた。

いずれにせよ、学生と住民を巻き込んだ手法を用いた町づくり研究所の活動は、西先生の突然の逝去により、終止符を打たざるを得なくなった。ただ、それでも今後は、これまでの西先生のご遺志を継ぎながら、新たな町づくりの活動を進めたいと考えている。具体的には、もう少し新しい町や今回の災害後の町づくりといったものを対象とした活動を展開したいと考えている。これまでの町づくりにかかわる調査・研究を積極的に手掛けてきた西先生に改めて敬意を表し、ご冥福をお祈りしたい。

<参考文献>

西和夫「町をつくる、人をつくる―祭礼・年中行事そして町並み」『歴史と民族』神奈川大学日本常民文化研究所論集27 pp.127-153 平凡社 2011年。

※本稿は、上記の西先生ご自身が書かれた参考文献をもとに、簡単に西先生の町づくりに関する活動をまとめたものである。



コンクリート中性化深さ測定における呈色範囲の 時間変化に関する研究

齊藤 隆典* 趙 衍剛**

Study on the Coloration Time History of the Concrete Neutralization Measurement

Takasuke SAITO* Yan-Gang ZHAO**

1. 序論

コンクリートの中性化反応は二酸化炭素がコンクリート内部に侵入し炭酸化反応を引き起こすことにより生じ、本来アルカリ性であるコンクリートの pH を下げる現象であり、劣化減少の一つである。この中性化の進展具合を測定する方法としては、フェノールフタレイン溶液による呈色法を用いて目視により測定を行うことが一般的である。しかしながら、この方法では呈色範囲が時間経過に伴って変化することが知られており、計測条件によっては正確な測定結果が得られない可能性があることが既往の研究¹⁾においても指摘されている。

そこで本研究ではこのような背景を鑑み、デジタルカメラによる撮影画像データを解析する手法を用いて、コンクリート中性化深さ測定における呈色範囲の時間変化について検討することを目的とする。

2. コンクリート中性化深さ測定方法

2. 1 目視による測定方法

目視による中性化深さ測定の概要を図1に示す。本研究では、JIS A 1152_2011²⁾に基づき、試験体を割裂後、フェノールフタレイン 1%溶液を割裂面に噴霧し、図1のように未呈色部分 7 箇所の中性化深さについてノギスを用いて測定し、その平均値を求めた。また、測定位置に骨材がある場合等では、JISに基づき、その両端の中性化位置を結んだ直線で補間し測定を行った。



図1 目視測定の概要

図2 撮影の様子

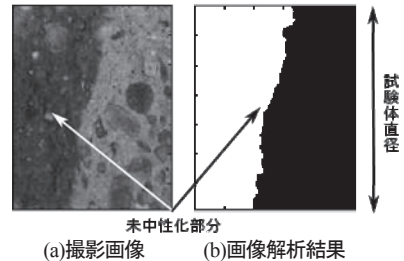


図3 画像解析による中性化深さ測定の一例

2. 2 画像解析による測定方法

本研究ではデジタルカメラにより試験体を撮影し、その画像データを解析することで中性化深さを計測する方法を用いる。撮影は図2に示すようにデジタルカメラと試験体が平行となるように配置して実施した。試験体にフェノールフタレイン溶液を噴霧後 20 秒間ドライヤによる乾燥を行った後、割裂面を撮影した。また、呈色範囲の時間変化を捉えるため、10 秒毎のインターバル撮影を 5 分間実施し、連続画像データを取得した。

撮影した画像データを用いて画像解析からコンクリートの中性化部分を判定するため、本研究では Lab 表色系を採用する。Lab 表色系による色情報に基づき中性化の

*助教 建築学科

Assistant Professor, Department of Architecture

**教授 建築学科

Professor, Department of Architecture

判定を行い、フェノールフタレインの赤紫色の発色を識別し、未呈色部分を中性化部分と判断する。本研究では撮影画像の呈色部分について任意の10点からLab値を測定し、中性化領域の閾値として、 $0 < L < 120, 145 < a < 174, 100 < b < 135$ を設定した。尚、画像解析では図3に示す未中性化部分の面積をコンクリート試験体の直径で除した値を平均中性化深さとして算出した。これらの判定条件を用いてコンクリート割裂面の撮影画像から中性化深さの平均値を求めた。

3. 測定結果および考察

3. 1 画像解析結果の妥当性の検証

本研究では8物件126本の試験体について中性化試験および画像解析を行った。その一例として昭和55年竣工の物件についてペンキ仕上げ、室内壁から抜き出した48本について検討を行った。画像解析の計測結果の妥当性を確認するため、目視測定結果および画像解析結果の中性化深さの平均値を測定し比較した。尚、撮影開始直後と60秒後の中性化深さ測定を行っている。計測結果の一例を表1に示す。この表より目視および画像解析の中性化深さ計測値は概ね対応していることが分かる。他の試験体においても両者の誤差は15%程度の範囲に収まっており、画像解析の計測値は概ね妥当であると言える。

3. 2 画像解析結果

図4に画像解析による中性化深さ測定における解析結果を示す。点線は10本の試験体における試薬噴霧後の経過時間と中性化深さの割合、また実線は10本の試験体から求めた中性化深さ減少割合の平均値を示す。なお、グラフの横軸は経過時間、縦軸は次式で表す、中性化深さの減少割合を示す。この図に示すように、数値の大小は見られるが、いずれの試験体も試薬噴霧後に中性化深さは減少することが確認できる。また、試験体により中性化深さの減少の程度は異なり、試薬噴霧300秒間までに2割未満の減少が見られる減少割合の小さい試験体と2割以上の減少が見られる減少割合の大きい試験体に分かれる。減少割合が大きい試験体では試薬噴霧300秒後までにおよそ3割から5割の減少が見られ、多いものでは7割の減少が見られた。中性化深さ減少割合が小さい試験体では試薬噴霧300秒後までに1割程の減少が見られた。試薬噴霧後の時間経過と中性化深さ変化の傾向としては、減少割合の大きさに関わらず、いずれの試験体でも試薬噴霧後30秒間の減少が最大であり、およそ180秒後まで緩やかな中性化深さの減少が見られることが分かった。

フェノールフタレイン溶液噴霧後に中性化深さ減少の

表1 中性化深さ測定値の比較

試験体 No.	経過時間 (sec)	目視測定 (mm)	画像解析 (mm)
001	0	34.644	39.167
	60	23.928	23.266

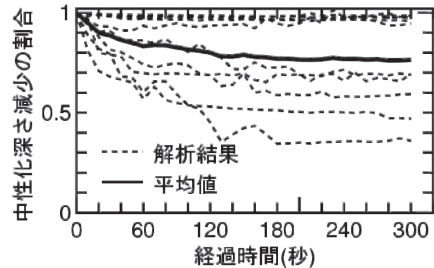


図4 中性化深さの時間変化と減少割合

程度に差が生じる要因としてコンクリートに含まれる骨材やセメントの量との関連を推測し、各種コンクリート材料特性との関連性を検討した。その結果、現状では減少割合が大小と材料特性のいずれのパラメータとも関連は認められなかった。今後、更に計測する試験体数を増やし、継続して検討する必要があると思われる。

4. 結論

本研究ではコンクリート中性化測定におけるフェノールフタレイン呈色範囲の変化から中性化深さの時間変化を画像解析により捉えた。得られた結果を以下に示す。

- ・画像解析による手法は目視測定結果との比較から、概ね妥当な中性化深さを測定できることが確認された。
- ・画像解析を用いた中性化深さ測定の結果、フェノールフタレイン溶液噴霧後、呈色範囲の変化により中性化深さが時間経過に伴い減少することを明らかにした。
- ・中性化深さは試薬噴霧直後の変化が大きく、その後も中性化深さの減少は続くが、およそ180秒から安定した数値となることが確認された。
- ・試薬噴霧後に中性化深さの時間変化割合の大小が見られ、この差が生じる要因について検討したものの、本計測では材料特性との関連は見られなかった。

参考文献

(1) 佐藤周之, 内田健一郎, 横井克則, 野中資博, フェノールフタレイン法によるコンクリート中性化の詳細評価技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, (2009), p.2023-2028

(2) JISA 1152_2011, コンクリートの促進中性化試験



“新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発”

松本 太¹・池原 飛之²・田邊豊和³・片岡利介⁴

“Development of Novel Battery towards New Low Carbon Energy Society”

Futoshi MATSUMOTO・Takayuki IKAHARA・Toyokazu TANABE・
Toshiyuki KATAOKA

1. 緒言

近年の温暖化問題から二酸化炭素を可能な限り排出しない低炭素社会への移行が我々の社会の重要な課題となっている。エネルギーを効率的に使う方法の一つとしてリチウムイオン電池、燃料電池などが注目されてきており、数年ぐらい前から幾つかの自動車会社が電池だけで動く電気自動車を作り出しているが、市場への普及は進んでおらず、ハイブリッド車がまだまだ主流である。その理由は、私たちの生活を支える様々な用途に対して電池性能がまだまだ追いついていないこと、電池の値段が高いことが挙げられる。そこで本プロジェクトでは、学内外の様々な電池の専門家を”新しい電池を開発”するという目的に、研究グループを組織し、これまでになかった新しい考えを導入した新型電池を創成することを最終目標に研究活動を行ってきた。

2. 研究活動 “神奈川大学オープンラボ事業”

この研究プロジェクトの大きな特徴は、2年半前から行っている“神奈川大学オープンラボ”事業とのリンクによる産学連携の試みである。“神奈川大学オープンラボ”事業は2012年度神奈川大学発政策提案事業から始まる神

奈川県と地元企業を巻き込んだ神奈川大学オリジナルの新型電池開発プロジェクトであり、現在は神奈川大学と神奈川県産業技術センターとの共催という形で運営を行っている。この“神奈川大学オープンラボ”事業は本プロジェクトのメンバーが実行委員を務め、プロジェクトの客員教授の先生方が講演者・企業との相談を担当するなど様々な場面で協力をいただいている。オープンラボを使って実習、共同実験を行った企業は2年半で20社になる。



Fig. 1 オープンラボ講演会の風景

その中には本学の卒業生が関与した企業が2社あり、共同研究をきっかけに本学の学生が就職したケースが2件ある。また、2カ月に1回のペースで勉強会を兼ねた講演会を開催し、現在まで15回を数えるが、聴講生はのべ1000人を超える盛況である(Fig.1)。現在のところオープンラボの参加企業と神奈川大学で2件の研究外部資金(サポイン、ちば中小企業元気づくり助成事業)を共同で取得することができている。このプロジェクトは今年度から神奈川県に限定せず、広く全国からの希望者を募る形に変更を行い、今後も活動が続けて行く予定である。研究論文や著

1: 准教授 神奈川大学工学部物質生命化学科
Associate Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University
2: 教授 神奈川大学工学部物質生命化学科
Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University
3: 特別助教 神奈川大学工学部物質生命化学科
Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University
4: 特別助教 神奈川大学工学部物質生命化学科
Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry, Kanagawa University

書も企業との共同研究による成果とし発表できる段階のものもいくつか出てきている。¹⁻³⁾ また我々のプロジェクト内の研究からも論文が発表されている。⁴⁾

3. 固体高分子形燃料電池用電極触媒開発 –金属間化合物触媒の応用–

固体高分子形燃料電池の電極触媒は数nm径の白金ナノ粒子(Pt NPs)を高表面積のカーボン材料に高分散担持させたカーボン担持Pt NPs触媒が用いられる。しかし、長時間の使用により、

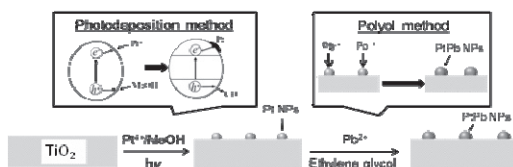


Fig. 2 TiO₂/CSCNT 上での PtPb NPs の合成スキーム

カーボン担持体が酸化され Pt NPs が担持体から脱落し、電池性能の劣化を導くことが重大な問題となっている。その解決法として、近年、カーボンナノチューブ(CNT)に Pt NPs を担持させる方法が報告されるようになってきている。この理由は、CNT が酸化されやすいグラフェンエッジ部分の割合が低いことによるが、その反面、Pt NPs を高分散で担持させることができないという、欠点を有する。そこで本研究では、グラフェンによって作られるカップ構造が積み重なった構造を有するカップスタ

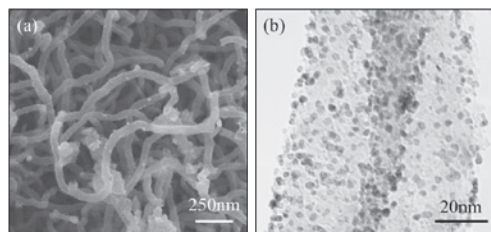


Fig. 3 合成した Pt/TiO₂/CSCNT の (a) SEM および (b) TEM 像

ックカーボンナノチューブ(CSCNT)のグラフェンエッジ面を利用して触媒を担持し、その後、熱処理によって、CSCNT のエッジ面を無くし、耐酸化性を有する構造にする方法を用いた。これまで我々はカーボン担持体上に金属酸化物を担持させ、その上に PtPb NPs を固定することにより、従来の Pt より優れた触媒活性が得られることを報告している。本年度の研究では PtPb NPs/TiO₂/CSCNT 合成と電極触媒活性評価を試み、優れた触媒活性を得ることができた。2-プロパノール中に CSCNT

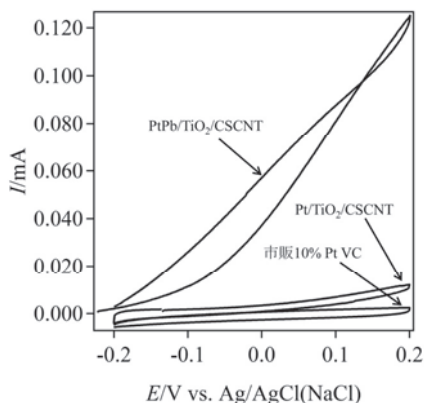


Fig. 4 ギ酸の酸化反応に関するサイクリックボルタムグラム。0.5 M ギ酸+0.1 M H₂SO₄, N₂ 雰囲気下, 電極回転速度: 200 rpm, 掃引速度: 10 mV/s.

と TiO₂ の前駆体である Titanium(IV) isopropoxide, H₂O を添加後に乾燥させ 450°C 焼成の工程を複数回繰り返すことでカーボンナノチューブ表面に TiO₂ を担持させた (Fig. 2)。Pt NPs は H₂PtCl₆ 前駆体の光電着法により担持した。その後、ポリオール法を用いて PtPb NPs を TiO₂ 上に形成した。Fig. 3 に合成した Pt/TiO₂/CSCNT の SEM, TEM 像を示す。TiO₂/カーボンナノチューブ表面に Pt NPs (粒子径 5-10 nm) が高分散で担持されていることが確認できる。Fig. 4 に合成した PtPb/TiO₂/CSCNT, Pt/TiO₂/CSCNT および市販の Pt/バシカルカーボン(VC)のギ酸の酸化反応に関するサイクリックボルタムグラムを示す。PtPb/TiO₂/CSCNT は他のサンプルに比べて、同じ電位でより大きな酸化電流を示していることから、合成した PtPb/TiO₂/CSCNT はギ酸の酸化反応に関して高い活性を有していることが確認できた。本プロジェクトでは様々な金属間化合物の触媒活性に関する研究を行っている。⁵¹⁰⁾

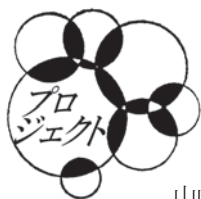
4. 次世代空気電池開発のための電極触媒および電解質膜の合成と電池性能

本研究テーマは2012-2014年度の工学研究所共同研究奨励金の助成により本格的研究に着手した研究テーマであり、その後、2年間、申請時の共同研究メンバーで研究を行っている。ここでは我々が担当している電極触媒について説明する。空気電池は正極(空気極)活物質として空気中の酸素分子を用いて還元反応を行うことによって発電することから、従来のリチウム電池の10倍以上のエネルギー密度を示す新型電池として最近注目されている。しかしながら、充放電に高い過電圧を要することから発電効率が低いことがこの電池開発の大きな問題となって

いる。この問題を解決するためには、正極における酸素の還元反応及びその逆反応の両方を触媒する材料 (Bifunctional catalyst) の開発が求められている。我々は安価な材料として MnO_2 に着目し、結晶構造の違いによる Bifunctional 触媒活性について、あるいは MnO_2 の一部を異種遷移金属イオンで置換することで、Bifunctional catalyst としての性能の向上を図ることを目的として検討を行ってきた。¹⁵⁾ その中からいくつか有能な触媒も見つかってきている。その他、Bifunctional catalyst として、それぞれの触媒反応に特異的な性能を示す触媒を複合化して、Bifunctional 機能を発揮させる方法についても検討を行ってきた。¹⁶⁾ 電極触媒以外の研究成果については昨年、一昨年の工学研究所報中の我々の研究プロジェクトの報告を参照していただきたい。¹⁷⁻¹⁸⁾

参考文献

- (1) Toshiyuki Wakao, Takao Gunji, Arockiam John Jeevagan, Yasumasa Mochizuki, Shingo Kaneko, Kunihito Baba, Mitsuhiro Watanabe, Yusuke Kanda, Koh Murakami, Masaya Omura, Genki Kobayashi, Futoshi Matsumoto, Stable Charge/Discharge Cycle Performance of a LiFePO_4 Cathode Prepared with a Carboxymethyl Cellulose Binder, ECS Transactions, Electrochemical Society, Inc., **58 (25)**, 19-25 (2014).
- (2) 金子信悟, 横溝美衣子, 望月康正, 嵐田敏彦, 笹元貴弘, 田邊豊和, 松本 太, マグネトロンスパッタ法により作製したリン酸リチウムオキシナイトライド 固体電解質薄膜のイオン伝導性に及ぼす導入ガス中窒素濃度の影響, 表面技術, in press (2015).
- (3) 松本 太, 郡司貴雄, 金子信悟, 渡辺充広, 村上 更, 粗面化アルミニウム集電体を用いたリチウム二次電池用 正極/水系バインダー薄膜の作製と性能評価, 「LiB の高容量・高耐久化のための電極-電解液(質)の界面制御技術と解析・評価法」, 技術情報協会編, p.100-105.
- (4) Shingo KANEKO, Bingbo XIA, Qian ZHANG, Guoqing FANG, Weiwei LIU, Hongdan SUN, Futoshi MATSUMOTO, Yuichi SATO, Junwei ZHENG, and Decheng LI, High-Rate Capability of Lithium-Rich Layered $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.18}\text{Mn}_{0.59}\text{Co}_{0.03}\text{O}_2$ Cathode Material Prepared from Size-Regulated Precursor Fine Particles, *Electrochemistry*, **82(6)**, 438-443(2014).
- (5) Francis M. Auxilia, Toyokazu Tanabe, Shinsuke Ishihara, Govindachetty Saravanan, Gubbala V. Ramesh, Futoshi Matsumoto, Xu Ya, Katsuhiko Ariga, Arivuoli Dakshanaamoorthy, Hideki Abe, Interleaved Mesoporous Copper for the Anode Catalysis in Direct Ammonium Borane Fuel Cells, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **14**, 4443-4448 (2014).
- (6) Ramesh, Gubbala, kodiya, Rajesh, Tanabe, Toyokazu, Fujita, Takeshi, Matsumoto, Futoshi, Ishihara, Shinsuke, Ueda, Shigenori, Yamashita, Yoshiyuki, Ariga, Katsuhiko, Abe, Hideki, Pt_3Nb Intermetallic Nanoparticles: Highly Stable and CO Tolerant Anode Electrocatalyst for the Oxidation of Ethanol and Formic Acid, *ChemElectroChem*, **1(4)**, 728-732(2014).
- (7) Takao Gunji, Govindachetty Saravanan, Toyokazu Tanabe, Takashi Tsuda, Masahiro, Miyauchi, Genki Kobayashi, Hideki Abe and Futoshi Matsumoto, Long-term Stable Oxygen-Reduction Performance of Titania-supported PtPb Nanoparticles, *Catalysis Science and Technology*, **4**, 1436-1445, (2014).
- (8) Nor A. Fadi, Govindachetty Saravanan, Gubbala V. Ramesh, Futoshi Matsumoto, Hideki Yoshikawa, Shigenori Ueda, Toyokazu Tanabe, Toru Hara, Shinsuke Ishihara, Hideyuki Murakami, Katsuhiko Ariga, and Hideki Abe, Synthesis and Electrocatalytic Performance of Atomically Ordered Nickel Carbide (Ni_3C) Nanoparticles, *Chem. Comm.*, **50**, 6451-6453 (2014).
- (9) Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Arockiam John Jeevagan, Sho Usui, Takashi Tsuda, Shingo Kaneko, Govindachetty Saravanan, Hideki Abe, Futoshi Matsumoto, Facile Route for the Preparation of Ordered Intermetallic Pt_3Pb -PtPb Core-Shell Nanoparticles and Its Enhanced Activity for Alkaline Methanol and Ethanol Oxidation, *J. Power Sources*, **273**, 990-998(2014).
- (10) Hideki Abe, Hideki Yoshikawa, Naoto Umezawa, Ya Xu, Govindachetty Saravanan, Gubbala V. Ramesh, Toyokazu Tanabe, Rajesh Kodiyath, Shigenori Ueda, Nobuaki Sekido, Yoko Yamabe-Mitarai, Masahiko Shimoda, Takahisa Ohno, Futoshi Matsumoto and Takayuki Komatsu, Correlation between the surface electronic structure and CO-oxidation activity of Pt alloys, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 4879-4887 (2015).
- (11) Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Govindachetty Saravanan, Shingo Kaneko, Hideki Yoshikawa, Yoshitaka Matsushita, Nobuaki Sekido, Ya Xu, Shigenori Ueda, Hideki Abe and Futoshi Matsumoto, Enhanced activity for oxygen reduction reactions by carbon-supported high-index-facet Pt-Ti nanoparticles, *Electrochemistry*, **83(1)**, 7-11 (2015).
- (12) Arockiam John Jeevagan, Takao Gunji, Naoyuki Sawano, Govindachetty Saravanan, Taiki Kojima, Shingo Kaneko, Genki Kobayashi, Futoshi Matsumoto, "Two-Step Microwave Synthesis of Highly Dispersed Ordered Intermetallic PtPb Nanoparticles On Carbon Black", ECS Transactions, Electrochemical Society, Inc., **58(21)**, 25-31(2014).
- (13) Arockiam John Jeevagan, Takao Gunji, Toyokazu Tanabe, Shingo Kaneko, Futoshi Matsumoto, "Photocatalytic Activity of Pd-Au Alloy Nanoparticle Co-Catalyst/ TiO_2 for Acetic Acid Decomposition", ECS Transactions, Electrochemical Society, Inc., **64(25)**, 9-16 (2015).
- (14) T. Gunji, K. Sasaki, A. J. Jeevagan, T. Tanabe, S. Kaneko, F. Matsumoto, Enhanced Oxygen Reduction Reactions and Stable Long-term Activity on TiO_2 -supported Dealloyed PtCu Nanoparticles in Acidic Aqueous Solutions, ECS Transactions, Electrochemical Society, Inc., **66(39)**, 1-8 (2015).
- (15) Arockiam John Jeevagan, Yukiko Suzuki, Takao Gunji, Govindachetty Saravanan, Yuta Irii, Takashi Tsuda, Toshiaki Onobuchi, Shingo Kaneko, Genki Kobayashi, Futoshi Matsumoto, "Electrocatalytic Oxygen Reduction and Water-Oxidation on Transition Metal Ion-Doped MnO_2 , RuO_2 and IrO_2 in Alkaline Aqueous Solutions", ECS Transactions, Electrochemical Society, Inc., **58(20)**, 9-18 (2014).
- (16) Takao Gunji, Keisuke Sakai, Yukiko Suzuki, Shingo Kaneko, Toyokazu Tanabe and Futoshi Matsumoto, Enhanced Oxygen Reduction Reaction on PtPb Ordered Intermetallic Nanoparticle/ TiO_2 /Carbon Black in Acidic Aqueous Solutions, *Catalysis Communications*, **61**, 1-5 (2015).
- (17) 神奈川大学工学研究所報第36号, p.87 (2013).
- (18) 神奈川大学工学研究所報第37号, p.68 (2014).



時間一周波数分析を用いた ヴァイオリン駒構造振動伝搬モデルの検討

山崎 徹* 中村 弘毅** 伊東 圭昌*** 田中 俊光***

Modelling for Vibration Transmission through Violin Bridge from String to Body by using Time-Frequency Analysis

Toru YAMAZAKI* Hiroki NAKAMURA** Yoshiaki ITOH*** Toshimitsu TANAKA***

1. プロジェクト研究の概要

現実の物理現象には必ず何かしらの非線形性が含まれていると言えるが、機械製品の設計など非線形性を考慮せずに便宜上線形として扱うことが多い。そのような場合においても、どのような、どの程度の非線形性が含まれているかを把握しておくことは重要である。各種現象把握のためには、測定を行い、測定データを周波数分析することが多い。周波数分析技術として、FFT（高速フーリエ変換）が主に用いられる。しかしFFTは時間平均結果となるため、特に衝撃的な現象などの分析には注意が必要である。瞬時的な現象の分析には、ウェーブレット解析やフィルタ処理技術が有効であり、著者らはデジタルフィルタを用いた三次元周波数分析（時間一周波数分析）手法を開発し、それに基づく振動モデル化法の開発、疾病診断のための心電波形分析、などへの応用について検討を行っている⁽¹⁻³⁾。

これまで、デジタルフィルタを用いた時間一周波数分析技術の開発として、線形振動⁽¹⁾、非線形振動⁽²⁾の時間一周波数分析結果の捉え方、FFTやウェーブレットなどその他の信号処理手法との比較を行い、開発手法の優位性

を確認、検証してきた。また、機械にまつわる各種の振動・音響分析を実施し、対象機械の現象把握、特性の評価、モデル化などへの活用、心電波形の基礎的な検討⁽³⁾を行ってきた。そこで本報告では、別途の研究⁽⁴⁾で明らかにしたヴァイオリンの駒構造の振動伝搬特性が一方方向となっていることのみをメカニズム解明に時間一周波数分析技術を活用した事例を紹介する。

2. ヴァイオリン駒構造の振動伝搬メカニズムの解明

2.1 ヴァイオリン構造

図1にヴァイオリンの全体と断面模式図を示す。表板、裏板と側板で構成され、駒と表板は弦によって押しつけるように設置されている。また表板には一本の力木が長手方向に設置され、裏板との間に魂柱が挿入されている。

2.2 振動伝搬性状

弦から駒を介して本体へ伝わる振動伝搬を調べると、振動入力と応答の相反定理が成立しない周波数域を確認した（図2）。このことと振動エネルギー伝搬解析手法の実験SEAを用いた検討結果（駒を介して表板へ入力される振動入力パワーは無限系への入力パワーと周波数分布が類似する）から、何らかの非線形性によって一方方向の振動伝搬となっていることと推測した。

2.3 時間一周波数分析によるメカニズムの仮説の導出

非線形現象の詳細検討として、駒の弦と接する箇所をインパルスハンマで打撃し、そのときの表板の応答を加

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**助手 機械工学科

Research Associate, Dept. of Mechanical Engineering

***客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

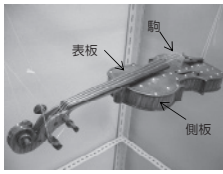


図1 ヴァイオリン構造

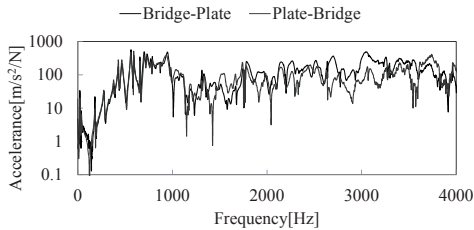


図2 ヴァイオリンの駒と表板の振動応答例

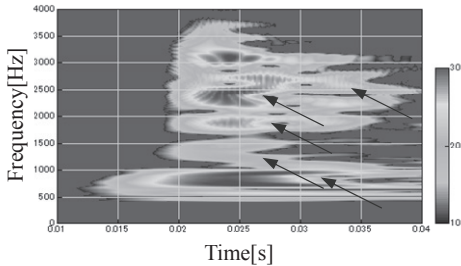


図3 ヴァイオリンの振動応答の時間一周波数分析結果

速度により測定した。その時刻歴波形を開発した時間一周波数分析を行った結果を図3に示す。応答が線形の場合には、時間によって図のz軸の値が大きなピークの周波数が一定となるのに対し、図3の結果では図中に矢印で示すところなどで、時間による周波数の変化、すなわち、非線形性が確認できる。別途の検討と共に、ヴァイオリンの駒構造を介した振動伝搬は、振幅依存の非線形性を有することと言える。

3. 簡易試験体による検討

振幅依存の非線形性であること、そもそも駒と表板は接着されていないことから、衝撃による現象であることと思われた。そこで、二つのブロックを押しつけ固定した試験体(図4)を用いた検討を実施した。図2と同様に相反定理が不成立となること、図3と同様に時間一周波数分析による時間による周波数の変化を確認した。また、ブロック間の瞬時振動インテンシティの測定結果(図5)から、衝突時は負の値を示し、その後は常に正の値、すなわち、一方向へのエネルギー伝達であることを見出

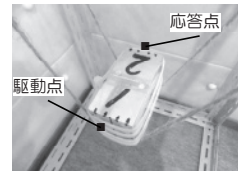


図4 簡易試験体(二つのブロックをひも留め)

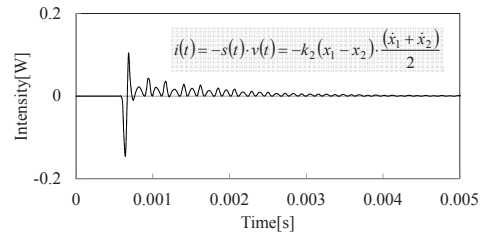


図5 簡易試験体の一方向振動伝搬測定結果例

した。このことから、駒構造を介する振動伝搬特性は、接触状態の衝突現象による振幅依存の非線形現象であると言える。この振動伝搬は一方向のみへのエネルギー伝搬特性を有する。各種機械の振動伝搬制御への駒構造の活用が期待できる。

4. おわりに

本報告では、時間一周波数分析技術を用いて、ヴァイオリンの駒構造の振動伝搬メカニズムを考察し、今後のモデル化および機械製品の低振動・低騒音化へ有益な知見を得ることができた。また、振動特性をFFTで評価すると時間平均結果となることから、衝撃応答の正しい評価、非線形現象の抽出ができない。このことを理解した上で、一度は測定データを時間一周波数分析し、そのうえでFFTを用いることが望ましいと言える。

今後は、時間一周波数分析技術を種々の現象解明に役立てると共に、各種の従来手法でFFTの代替とすることで新たな発展を目指す。

参考文献

- (1) 伊東圭昌, 山口尚人, 山崎徹, “デジタルフィルタによる時間一周波数分析を用いた振動解析に関する基礎的検討”, 日本機械学会論文集C編, 79巻801号, pp.1633-1646, 2013-5
- (2) Y.Itoh, T.Imazu, H.Nakamura, T.Yamazaki, “TIME-FREQUENCY ANALYSIS WITH DIGITAL FILTER FOR NONLINEAR SYSTEM CHARACTERIZATION IN MECHANICAL VIBRATIONS”, Proc. of The 22th International Congress on Sound and Vibration, 1009, 2015-7
- (3) 伊東圭昌, 山崎徹, 永井基, 藤井智恵子, “デジタルフィルタを用いた時間一周波数分析による心電波形の可視化”, 可視化情報全国講演会講演論文, D210, 2015-10 (発表予定)
- (4) 伊東圭昌, 今津卓, 中村弘毅, 山崎徹, “ヴァイオリンの駒構造から学ぶ機械の静穏化技術の開発”, 日本機械学会[No.15-7] Dynamics and Design Conference 2015 USB 論文集, 529.pdf, 2015-8



多分岐ポリマー系ナノハイブリッド

材料の開発と応用

横澤 勉* 池原 飛之* 小出 芳弘*
山田 保治** 花畑 誠** 工藤 宏人***

Development and Application of Nano Hybrid Materials from Hyperbranched Polymers

Tsutomu YOKOZAWA* Takayuki IKEHARA* Yoshihiro KOIDE*
Yasuharu YAMADA** Makoto HANABATA** Hiroto KUDO***

1. プロジェクト研究の概要

デンドリマーや多分岐ポリマーは、樹木状構造をもつ高機能高分子として近年その開発が注目されている^{1,2)}。一般に、特異な分子形状(数 nm~数十 nm の分子径を持つ球状分子)に起因して分子内に多数の空孔を持ち、多くの溶媒に対して溶解性が良く、またその溶液は低粘度である。また、一分子内に多くの末端基を持ち、表面、内部骨格やコアに機能性基を導入することで多機能高分子となる。一方、Noria (NRA) は一分子内に 24 個の水酸基を有するラダー型環状化合物で、分子内に空孔を有する構造的特徴がある。いずれの物質も分子内に空孔を有する特異な分子構造から、分子の吸着や透過の制御が可能で高性能分離材料として応用が期待される。

我々は、多分岐ポリアイミド-シリカハイブリッド (HBPI-SiO₂ HBD) 膜が高い CO₂ 透過性と CO₂/CH₄ 分離選択性を示すことを見出した³⁾。また、Noria は環構造径が約 3 Å で、CO₂ に対して高い選択的吸着能を有することが報告されている⁴⁾。以上の結果から、HBPI に Noria をハイブリッドさせた HBPI-NRA HBD 膜は、優れた CO₂ 分離膜になることが期待される。

本研究は、高効率な CO₂ 分離膜の開発を目的に

HBPI-NRA HBD 膜の合成と CO₂ 透過特性について検討した。

2. 結果と考察

HBPI は、芳香族カルボン酸二無水物 (4,4'-(hexafluoroisopropylidene) diphthalic anhydride : 6DFA) と芳香族トリアミン (1,3,5-tris(4-amino phenoxy)benzene : TAPOB) とを *N,N*-dimethylacetamide (DMAc) 中で縮重合することにより合成した。PI の前駆体である多分岐ポリアミド (HBPA) 膜は、高分子鎖末端にシランカップリング剤 (3-aminopropyltrimethoxysilane : APTriMOS) を導入して PET 上にキャストし成膜した。得られた HBPA 膜を窒素雰囲気下で熱イミド化 (100 °C/1 h → 200 °C/1 h → 300 °C/1 h) し、HBPI 膜を調製した。

Noria は、レゾルシノール (resorcinol) と 1,5-ペンタジアル (1,5-pentanedial) との縮合反応により合成した (図 1)⁵⁾。

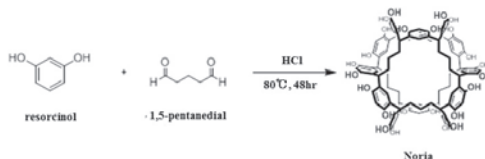


図 1 Noria の合成法

HBPI-NRA HBD 膜はシランカップリング処理下、前駆体 (HBPA-APTriMOS) に Noria を添加してハイブリッド化した

*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

**客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

***准教授 関西大学工学部

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kansai University

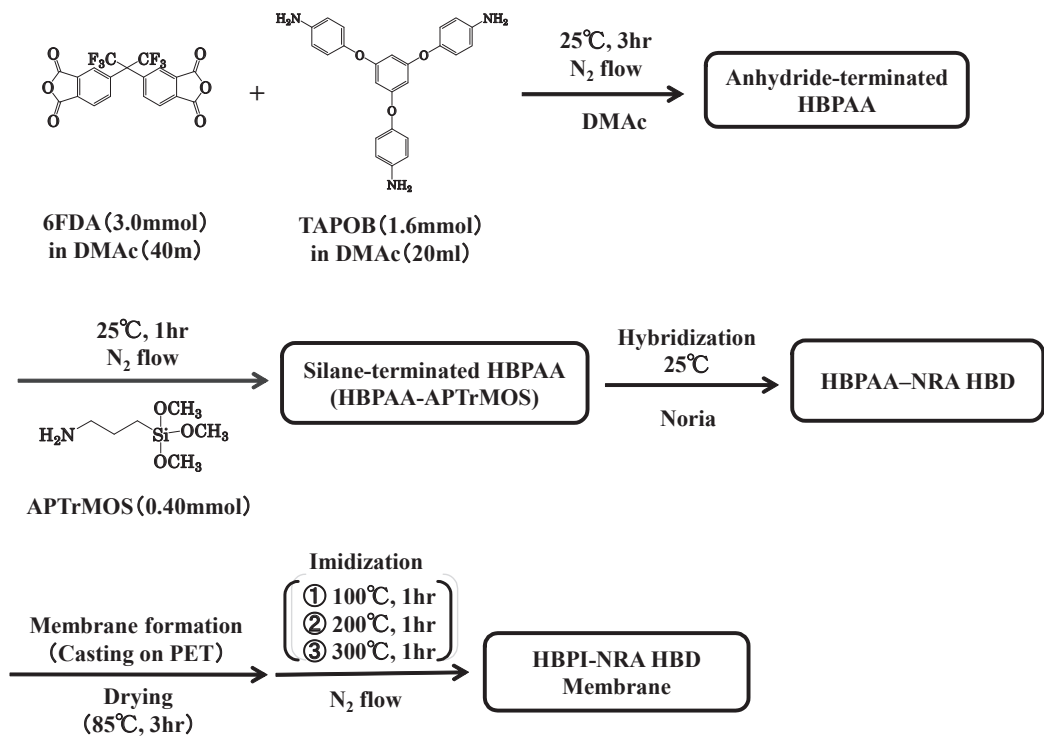


図2 HBPI-NRA HBD 膜の合成法

後、HBPI 膜と同様の方法で製膜した。HBD 膜は Noria 含有量が 20 wt% まで自立膜として製膜できたが、Noria 含有量が 30 wt% の膜は収縮が激しく自立膜にならない。合成スキームを図 2 に示す。

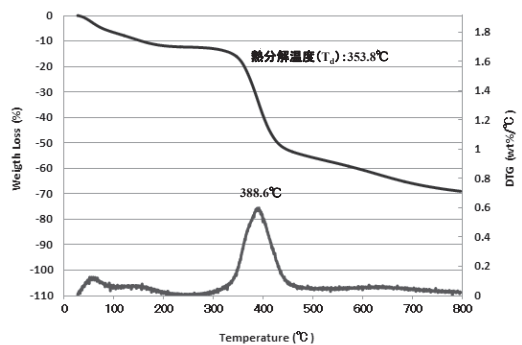
気体透過測定は、測定圧力: 76 cmHg (1 atm), 25 °C で定容法 (vacuum-pressure method) により CO₂, CH₄, O₂ および N₂ を用いて行った。

多岐岐ポリイミド-シリカハイブリッド (HBPI-SiO₂ HBD) 膜は高い CO₂ 透過性と CO₂/CH₄ 分離選択性を示し、シリカ含有量の増加とともに CO₂ 透過速度と CO₂/CH₄ 分離選択性の両方が向上する特性を示すが、これは HBPI の大きな自由体積率 (FFV) とゾルゲル法で合成されたシリカのナノ細孔に起因した分子篩効果によるものと考えられる⁹。Noria も CO₂ に対して高い選択的吸着能を有することから、高透過膜である HBPI にハイブリッド化することで CO₂ の選択分離膜になることが期待される。

図 3 に Noria の TG-DTA 測定結果を示す。Noria の熱分解温度は約 354 °C (窒素雰囲気下) で、熱安定性はそれほど高くない。

HBPI 膜および HBPI-NRA HBD 膜の気体透過係数、拡散係数および溶解度係数を表 1 に、各種気体に対する理想分離係数を表 2 にまとめた。

また、HBPI 膜および HBPI-NRA HBD 膜の $\alpha(\text{CO}_2/\text{CH}_4)$ と $P(\text{CO}_2)$, $\alpha(\text{O}_2/\text{N}_2)$ と $P(\text{O}_2)$ の関係をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。

図3 Noria のTG-DTA 曲線 (N₂ 雰囲気)

Noria の導入によって CO₂ の他 CH₄, N₂ および O₂, すべての気体透過係数 (P) は低下している。Noria の導入によって各気体の溶解度係数 (S) は増加しているが拡散係数 (D) の低下が大きく、透過係数 (P) が低下する結果となっている。O₂/N₂ の理想分離係数 ($\alpha(\text{O}_2/\text{N}_2)$) は Robeson の upperbound に沿って上昇しているが、 $\alpha(\text{CO}_2/\text{CH}_4)$, $\alpha(\text{CO}_2/\text{N}_2)$ および $\alpha(\text{CO}_2/\text{O}_2)$ はやや増加しているがほとんど変化していない。CO₂ が関係する

表1 HBPI 膜および HBPI-NRA HBD 膜の気体透過係数, 拡散係数および溶解度係数

Membrane	$P \times 10^{10} [\text{cm}^3 \text{STPcm}/\text{cm}^2 \text{sec.cmHg}]$				$D \times 10^8 [\text{cm}^2/\text{sec}]$				$S \times 10^2 [\text{cm}^3 \text{STP}/\text{cm}^3 \text{polym.cmHg}]$			
	CO ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	CH ₄
HBPI	7.4	1.5	0.22	0.098	0.30	1.4	0.25	0.028	25	1.1	0.92	3.5
HBPI-NRA HBD (20wt%)	4.3	0.93	0.12	0.055	0.15	0.66	0.11	0.014	30	1.4	1.1	3.9

表2 HBPI 膜および HBPI-NRA HBD 膜の各種気体に対する理想分離係数

Membrane	α			
	[CO ₂ /CH ₄]	[O ₂ /N ₂]	[CO ₂ /N ₂]	[CO ₂ /O ₂]
HBPI	75	6.8	33.6	4.9
HBPI-NRA HBD (20wt%)	79	8.0	35.8	4.6

理想分離係数 (α) が大きく変化していないことから, Noria による CO₂ 透過の制御が考えられるが, その効果は小さく限定的である. Noria の CO₂ 吸着能は圧力依存性があり CO₂ 圧力の増加とともに吸着量が増大する. 本検討における気体透過測定は1気圧 (76cmHg) の差圧で測定しており, Noria の吸着効果を十分発揮できない条件で行った可能性も否定できない. CO₂ 圧力の高い条件 (5~10 atm) で透過測定し, Noria の吸着効果を確認することが必要と思われる.

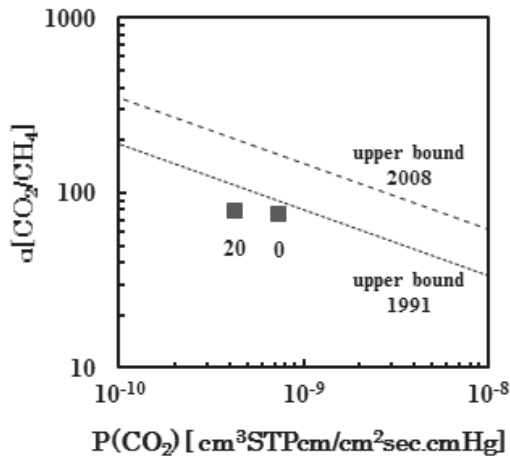


図4 HBPI 膜および HBPI-NRA HBD 膜の α (CO₂/CH₄) と P(CO₂) の関係 (0: HBPI 膜, 20: HBPI-NRA HBD 膜).

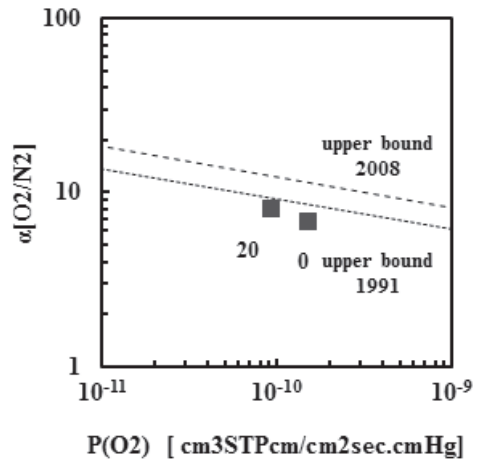


図5 HBPI 膜および HBPI-NRA HBD 膜の α (O₂/N₂) と P(O₂) の関係 (0: HBPI 膜, 20: HBPI-NRA HBD 膜).

3. 結論

Noria が CO₂ に対して高い選択的吸着能を有することと, 多分岐ポリイミド-シリカハイブリッド膜が高い CO₂ 透過性と CO₂/CH₄ 分離選択性を示すことから Noria-多分岐ポリイミド-シリカハイブリッド膜を製作し, その気体透過特性を検討した. その結果, いずれの気体に対しても透過係数は低下したが, 各種気体の理想分離係数は多分岐ポリイミド-シリカハイブリッド膜より若干向上することを見出した. 今後は多分岐ポリイミド以外の多分岐ポリマーを用いてハイブリッド材料の

開発を検討する予定である。

参考文献

- 1) 青井啓悟, 柿本雅明 監修, 『デンドリティック高分子—多分岐が構造が拓げる高機能化の世界』, エス・ティー・エス (2005).
- 2) C. Gao, D. Yan, *Prog. Polym. Sci.*, **29**, 183 (2004).
- 3) T. Suzuki, Y. Yamada, J. Sakai, K. Itahashi, *Membrane Gas Separation*, Ch.2[8], 143, Wiley & Sons Ltd (2010).
- 4) J. Tian, P. K. Thallapally, S. J. Dalgarno, P. B. McGrail, J. L. Atwood, *Angew. Chem. Int. Ed.* **48**, 5492 (2009).
- 5) H. Kudo, R. Hayashi, K. Mitani, T. Yokozawa, N. C. Kasug, T. Nishikubo, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **45**, 7948 (2006).
- 6) M. Miki, H. Horiuchi, Y. Yamada, *Polymers*, **5**, 1362 (2013).



直接駆動型ペルチェ素子を用いた DNA 増幅装置の開発

山口 栄雄* 鈴木 温** 井上 和仁*** 安積 良隆****

Development of direct-current driven DNA amplification system

Shigeo Yamaguchi*, Tadzunu Suzuki**, Kazuhito Inoue***,
and Yoshitaka Azumi****

1. プロジェクト研究の概要

一般的な、ポリマーゼ連鎖反応 (PCR) 法では、熱サイクルを実施する。しかしながら、現実の熱サイクルは、形状が崩れており、1) 温度上昇下降速度が小さく、2) 温度変化部分で丸みを帯び、3) オーバー・アンダーシュート、及び4) 保持温度精度が低いという問題を含んでいる。この根本原因は、PCR 装置に内蔵されているペルチェ素子が、セラミックス製絶縁板を挟んで間接的に DNA 試薬を導入したウェルブロックを冷却加熱していることにあることを我々は見出した。そこで、上記の問題を克服するため、熱サイクルを正確かつ高速を実現できる、i) 熱応答性の極めて高いペルチェ素子の開発、ii) 高速高精度動作に対応した駆動電源の開発、及び iii) ウェルブロックを直接熱駆動できる新構造を提案し、研究を行ってきた。

2. 実験結果

我々は、金属性ウェルブロックを PN 半導体間に直接挟む電流→熱直接駆動構造を提案してきた (図1)。この構造では、ウェルブロックに直接電流 ($\pm 3.0 \text{ A}$, $\pm 0.3 \text{ V}$) を流し、PN と金属との界面で直接ペルチェ効果による冷却加熱を行う構造を採用するため、ウェルブロック部で電流が直接熱に変換され高速の熱応答を得るこ

とができる。これにより、高速高精度な DNA 増幅の実現が期待できる。開発した専用電源の回路図 (図2) と PCR システムの構成図を以下に示す (図3)。

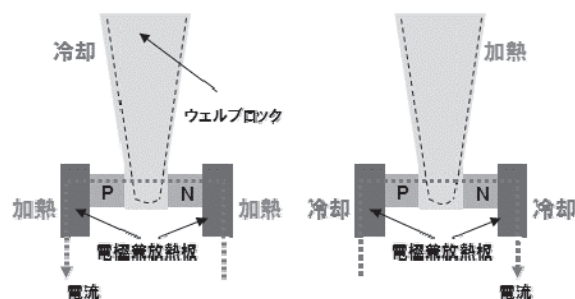


図1

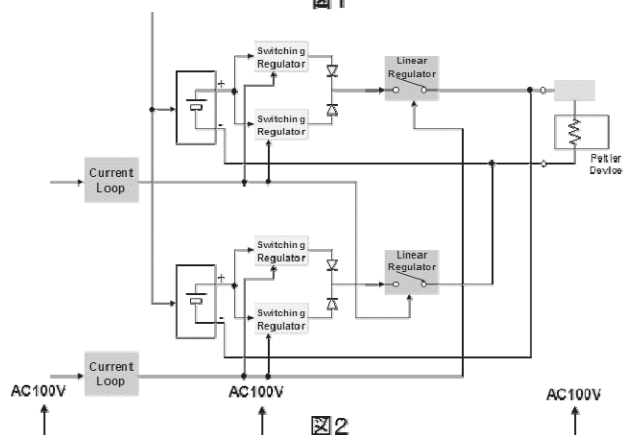


図2

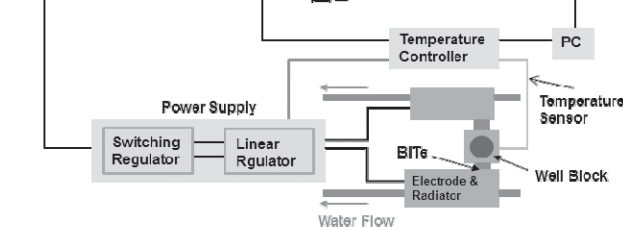


図3

*教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

**客員研究員 工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

***教授 理学部生物科学科

Professor, Dept. of Biological Sciences

****准教授 理学部生物科学科

Associate Professor, Dept. of Biological Sciences



刺激応答性材料の開発

亀山 敦* 石田 良仁** 川口 春馬*** 上田 充***

Development of Stimuli-responsive Materials

Atsushi KAMEYAMA*

Yoshihito ISHIDA**

Haruma KAWAGUCHI***

Mitsuru UEDA***

1. プロジェクト研究の概要

熱、電場、光などの外部刺激に応答する刺激応答性材料は、一体成型後に微細な構造を構築する素材として、また動的な材料(ケモメカニカル材料)として注目されている。刺激応答性材料の本質は、分子レベルの変化が累積されて、マクロスコピックな変化が得られることである。

本プロジェクト研究では、熱転位反応を基盤とする屈折率増加材料、および光で体積が変化するハイドロゲル微粒子の基礎研究を推進している。

2. 熱応答性屈折率変化材料の開発

熱や光刺激によって屈折率が変化する透明ポリマー材料は光回路への応用が検討されている。しかし、その多くは光化学反応により屈折率が低下する材料であり、屈折率が増加する材料についての報告例は非常に少ない。すでに我々は、側鎖に芳香族複素環を有する線状および多岐ポリマーのフィルム中で、芳香族複素環の熱転位反応(S-アシル体から N-アシル体への変化)が起こり、フィルムの屈折率が 0.01 程度大きくなることを報告した⁽¹⁾。一般に、屈折率変化が 0.01 程度あれば屈折率変化材料として利用することができる。しかし、芳香族複素環の構造と反応性、および屈折率変化の相関関係は明らかになっていない。そこで本研究では、上記ポリマーの参照化合物として、安息香酸誘導体を合成し、前述の課題について詳細に検討した。

安息香酸エステル誘導体 **1-6a** の熱転位反応の進行は

表 1. 安息香酸エステル誘導体の構造と熱転位反応

Ester	X	Y	Z	T_m (°C)
1a	H	S	O	115
2a	OCH ₃	S	O	^{b)}
3a	CN	S	O	136
4a	H	O	S	123
5a	OCH ₃	O	S	161
6a	CN	O	S	^{b)}

a) Measured by DSC under N₂ flow with heating rate of 10 °C.
b) Clear exothermic peak was not observed.

FT-IR スペクトルより確認され、示差走査熱量計(DSC)により測定された熱転位温度(T_m)は115~161 °Cの範囲であった。次に、光学材料として用いられるポリメチルメタクリレート(PMMA)に対して **1-3a** を 30 wt%含むフィルムを調製し、フィルム内に均一分散した **1-3a** の熱転位反応について検討を行った。それぞれのフィルムを 80 °Cで加熱した結果、熱転位反応の転化率は加熱時間に対して直線的に増加した。PMMA 中に分子分散している **1-3a** はその結晶状態よりも低い温度で S-アシル体から N-アシル体へ転位することが明らかになった。また、熱転位反応の速度は **3a**>**1a**>**2a** の順であり、これは安息香酸エステルの *p*-位の置換基の電子吸引性の序列(CN>H>OCH₃)と一致した。この転位反応は、カルボニル炭素(C=O)に対する窒素原子の対電子の求核反応によ

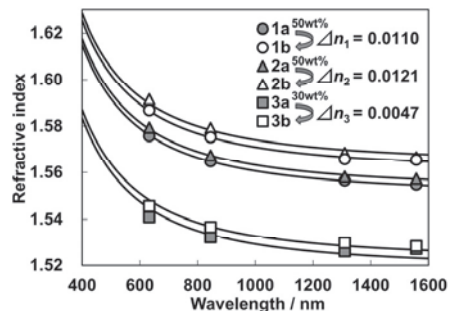


図 1. **1-3a** 含有 PMMA フィルムの加熱前後での屈折率変化。

*教授 化学教室

Professor, Dept. of Chemistry

**特別助教 化学教室

Assistant Professor, Dept. of Chemistry

***客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

り進行することから、CN基の場合、よりC=Oの反応性が高められていると考えられる。

次に、屈折率変化材料としての特性を調べるため、1-3aを50 wt% (1-2a)、または30 wt% (3a)含むPMMAフィルムを調製し、80 °Cで1 h加熱し、加熱前後でのフィルムの屈折率をプリズムカップラーにより測定した(図1)。いずれのフィルムについても波長範囲633~1558 nmで屈折率が増加し、1-2a (50 wt%)のフィルムでは、加熱後に0.011-0.012増加した。今回利用している刺激は熱であるが、赤外線レーザーを用いることで位置選択的に屈折率変化を誘起することも可能である。

3. 光応答性ハイドロゲル微粒子の開発

架橋されたポリマー網目中に多量の水を保持したハイドロゲルは生体適合性があり、様々な応用展開が期待されている。また、刺激応答性を有するハイドロゲルはケモメカニカル材料として注目されている。

スピロピランは疎水性の開環体と親水性の開環体の2種類の状態を取ることが知られており⁽²⁾、一般に水中では開環体が優位に存在する。また、開環体に対するUV光照射により開環体が生成し、これは可視光照射により開環体に戻る(図2)。

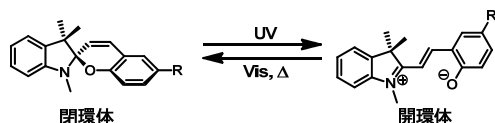


図2. スピロピランの光化学反応。

そこで本研究では、新しい光ケモメカニカル材料の開発を目的とし、スピロピランアクリレートモノマー(SPA)と親水性のポリ(*N*-イソプロピルアクリルアミド)(PNIPAM)からなるハイドロゲル微粒子を合成し、光照射に伴う膨潤・収縮挙動を検討した。

ハイドロゲル微粒子はH₂O/DMSO 溶媒中で所定量のSPAとNIPAM、架橋剤である*N,N'*-メチレンビスアクリルアミド(MBAM)、重合開始剤(V-50)を用いた沈殿重合により合成した(図3)。得られたハイドロゲル微粒子の直径はSPA導入量の増加に伴い1098 nm (0 mol%)から315 nm (10 mol%)へと低下した。これは、一部の疎水性の開環体

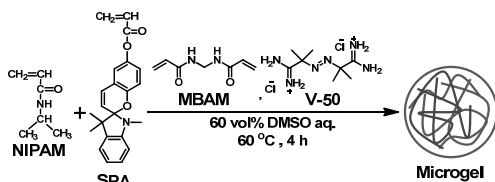


図3. 光応答性ハイドロゲル微粒子の合成。

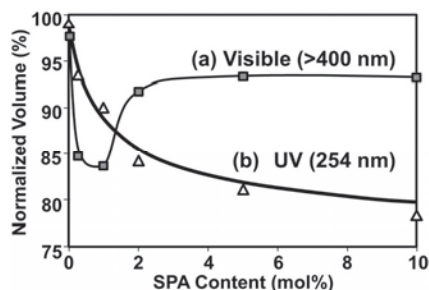


図4. SPA含有ハイドロゲル微粒子の光応答性。

が会合し、水に不溶性物理架橋点を形成したためだと考えられる。

ゲル微粒子に対して水中で可視光(>400 nm)を照射したところ、ゲル微粒子の体積は収縮し、特にSPA導入量が1 mol%の微粒子において最も大きな体積収縮が見られた(図4)。この体積収縮は疎水性の開環体の生成によるが、SPAの導入量が高い微粒子の場合、物理架橋点によりゲルの柔軟性が損なわれ、体積変化が小さくなったと考えられる。

一方、UV光(254 nm)を照射したところ、予想に反してゲル微粒子は膨潤せずに収縮した。これはUV光照射により生成した開環体の平面性が高く、芳香族部分の分子間 π - π 相互作用により会合し、物理架橋点が形成されたためであると考えられる。

今後は、可逆性に優れた光応答性ハイドロゲル微粒子の合成し、その光反応性を明らかにする予定である。

参考文献

- (1) M. Miyasaka, A. Higurashi, A. Kameyama, *Chem. Lett.* **2011**, 40, 1363-1365.
- (2) J. H. Lee, S. H. Park and H. Lee, *Bull. Korean Chem. Soc.* **2007**, 28, 1211-1214.
- (3) R. Klajn, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, 43, 148-184.

発表論文

- (1) Y. Ishida, Y. Kawabe, A. Kameyama, *J. Photopolym. Sci. Technol.* **2015**, 28, 201-205.

学会発表

- (1) Y. Ishida, Y. Kawabe, A. Kameyama, The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology, B1-14, (Chiba, 2015-6).
- (2) A. Kameyama, K. Iwasa, Y. Ishida, H. Kawaguchi, Polymer Networks Group Meeting & Gel Symposium 2014, P5d (Tokyo, 2014-11).
- (3) 安田明日美, 石田良仁, 上田充, 安藤慎治, 亀山敦, 第63回高分子学会年次大会, 1Pd100, (愛知, 2014-5).
- (4) 岩佐克己, 石田良仁, 川口春馬, 亀山敦, 第63回高分子学会年次大会, 1Pb104 (愛知, 2014-5).
- (5) 安田明日美, 奥嶋由紀, 石田良仁, 上田充, 亀山敦, 安藤慎治, 第22回ポリマー材料フォーラム, 23PB23 (東京, 2013-11).
- (6) 石田良仁, 川辺優也, 亀山敦, 第22回ポリマー材料フォーラム, 23PB11 (東京, 2013-11).

受賞

- (1) 安田明日美, 第22回ポリマー材料フォーラム(2013年11月, 東京), 優秀ポスター賞。



グリーンイノベーションの基盤となる ナノ構造制御触媒の開発研究

引地 史郎* 内藤 周弉** 上田 渉* 吉田 暁弘*** 中澤 順***
Shigeo T. Oyama**** 宮尾 敏広***** 赤間 弘***** 星野 真樹*****

Development of Nano-structure Controlled Catalysts for Green Innovation

Shiro HIKICHI* Shuichi NAITO** Wataru UEDA* Akihiro YOSHIDA*** Jun NAKAZAWA***
Shigeo T. Oyama**** Toshihiro MIYAO***** Hiroshi AKAMA***** Masaki HOSHINO*****

1. プロジェクト研究の概要

将来にわたる持続的成長社会の発展を図る上で必須な、安定的なエネルギー供給体制の構築と低炭素社会の実現を目指したグリーンイノベーションは、第四期科学技術基本計画の柱のひとつである。エネルギー問題の解決には太陽光に代表される再生可能エネルギーや水素・バイオマス等の代替エネルギーを軸とする新たなエネルギー変換システムの開発が急務である。一方で既存のシステムにおける主要なエネルギー源である化石燃料資源のより一層の効率的活用を図る必要があるが、化石燃料資源は我々の生活を支える様々な有用化学物質の原材料でもある。従って化石燃料資源を有効活用する上で、炭化水素類の化学変換効率の向上を図りつつ、エネルギーの過剰消費や環境負荷物質排出を抑制した環境調和型物質変換プロセスを構築することは喫緊の課題である。

“革新的触媒技術に関する研究開発の推進”が科学技術基本計画の中でも謳われていることから伺えるよう

に、化学反応による物質変換(物質生産や環境汚染物質の無害化等)やエネルギー変換の効率向上に資する触媒の高性能化は、グリーンイノベーションを推し進める上で重要な研究課題である。そこで本研究では、グリーンイノベーションの基盤となる高性能触媒の開発を行う。具体的には、触媒活性点およびその周辺の構造をサブナノ～ナノスケールで精緻に設計・制御することで、金属元素が持つ触媒性能を極限まで引き出すことや、天然の高性能触媒である酵素と同様に、様々な機能を併せ持つ触媒デバイスの構築を可能とし、これによりエネルギー変換・再生可能エネルギー創出効率の向上やグリーン化学合成の達成に資する革新的触媒技術の確立を目指す。

2014年4月より三か年の計画で開始した本プロジェクト研究では、バイオマス資源の有用化学物質への変換に有効な触媒⁽⁴⁾や、酵素の活性点構造に想を得た環境調和型酸化プロセスに適用するための触媒^(5,7)の開発を進めている。以下本稿ではこれまでの成果の概要を紹介する。

*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

**名誉教授 工学研究所客員教授

Professor Emeritus

***特別助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

****教授 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻

Professor, Dept. of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo

*****教授 山梨大学燃料電池研究センター

Professor, Fuel Cell Nanomaterials Center, University of Yamanashi

*****主任研究員 日産自動車総合研究所

Senior Researcher, Nissan Research Center, Nissan Motor Corporation

2. バイオマス資源の有効活用のための新規触媒の開発

バイオマス資源の中でも入手しやすいものの一つが、糖類の発酵により得られるエタノール(バイオエタノール)である。植物体由来するバイオエタノールは、大気中のCO₂が固定されて生じた、いわゆる“カーボンニュートラル”な代替エネルギー資源に位置付けられ、現状では石油製品と混合して内燃機関の燃料に用いられている。しかしエタノールを直接燃焼するのではなく、化学変換により水素や各種有機化合物の原料とすることができれば、より広い意味での“石油代替資源”となる。そ

ここで本研究ではエタノールと水の反応による水素製造プロセス構築に向けた基礎研究として、種々の担体に 8-10 族金属を担持した担持金属触媒の反応特性を解析し、水素生成反応の活性・選択性支配因子の解明を試みた。

200 °C 加圧下において、TiO₂(チタニア)及び Al₂O₃(アルミナ)を担体とし、これに 8-10 族の貴金属(Ru, Rh, Ir, Pt)を担持した一連の触媒をエタノール水溶液に作用させたところ、エタノールは水と反応して酢酸へと転換されるとともに水素、二酸化炭素およびメタンを与えた。目的物である水素および副生成物であるメタンの生成効率は触媒の担持金属元素および担体の種類に応じて異なっていた。またチタニアを担体とする担持金属触媒に対して 7 族元素である Re を第二金属成分として添加した触媒を開発し、それらの反応特性の解析および活性点構造の解明を試みたところ、主金属と Re からなるナノサイズの複合金属種がエタノールの脱水素を促進し、さらに ReO_x 層と主金属の複合種が、反応中間体であるアセトアルデヒドから酢酸への転換を促進することを見出した⁽¹⁾。また上記のチタニア担持触媒により、バイオオイルの主成分である酢酸と水の反応による水素と二酸化炭素への変換、すなわち酢酸の液相完全改質反応が進行することを発見した^(2,3)。以上の成果は、来るべき水素エネルギー社会の構築に向け、その基盤となる非化石燃料資源からの水素製造プロセスの基盤となる触媒を設計・開発していく上での基礎となる重要な知見である。

さらにエタノールを有用化学物質に転換するための触媒開発にも取り組んでいる。アルミナに Ru を担持した触媒は、2 分子のエタノールの脱水縮合により 1-ブタノールを与えるのに対し、この触媒に第二金属成分として Lewis 酸性を示す第二金属(Re, Mo, Sn)を添加したものでは、酢酸エチルが高選択的に生成することを見出した。中でもアルミナに Sn を含浸担持し、いったん焼成した後と同じ物質量の Ru を担持した触媒が、最も高収率かつ高選択的に酢酸エチルを与えた。この触媒では、Ru と Sn の双方の還元が進み、また Ru と Sn が単一のナノ粒子を形成していることが明らかになった⁽⁴⁾。

3. 環境調和型酸化反応触媒の開発

石油や天然ガス(メタン)などの炭化水素資源を有用化学物質に変換する触媒として、現在のところ最も高効率なものは天然の触媒である酵素である。とりわけ、大気中に存在する酸素を、極めて安定なメタンに導入することでアルコール(メタノール)に変換するメタン水酸化酵素は、“究極の触媒”といえる。この酵素の触媒活性点はタンパク質を構成しているアミノ酸残基に保持された鉄

や銅から構成されていることから、同様の構造を触媒設計に反映させていくことで、酵素と同様な活性を有しながらそれよりも安定性に勝る人工的な触媒素子、すなわち“人工酵素”が構築できるものと期待される⁽⁵⁾。

本研究ではカルボン酸で細孔壁の表面を化学修飾したメソ多孔性シリカを担体とし、これに酵素の活性点構造に類似した鉄錯体触媒活性点を構築することに成功した。この触媒を用いることで過酸化水素に由来する酸素原子を飽和および不飽和炭化水素に導入することができる⁽⁶⁾。さらに酸素分子に由来する酸素原子を炭化水素に導入することを目指し、開発した固定化錯体触媒における金属の配位環境に類似した Fe 錯体種の酸素分子活性化能を検討した。その結果、Fe(II)種が可逆的に酸素分子を結合して酸素分子を 1 電子還元した状態を検出し、さらにこの 1 電子還元種がある種の有機化合物から水素原子(水素イオン+電子)を引き抜いて、酸化活性種の前駆体である Fe(III)-OOH 種を与えることを見出した⁽⁷⁾。

4. 結言

本研究課題は、触媒性能向上のための普遍的な課題の解決を目指したものであり、ここで確立される方法論はあらゆる触媒に適用できると考えられる。すなわち、本研究で開発する“ナノ構造制御触媒”は、バルクからファインケミカルズにいたる化学物質合成プロセス、新エネルギープロセス、環境浄化システムなど、あらゆる触媒プロセスに適用できる可能性がある。また本研究で開発する触媒材料や触媒構築技術は、電極やセンサー等、種々のボトムアップ型ナノ構造機能材料の構築にも応用可能であり、関連する研究分野への波及効果は大きいと予想される。

参考文献

- (1) T. Nozawa, A. Yoshida, S. Hikichi, S. Naito, *Int. J. Hyd. Energy*, **40** (2015) 4129.
- (2) T. Nozawa, Y. Mizukoshi, A. Yoshida, S. Naito, *Appl. Catal. B: Environ.*, **146** (2014) 221.
- (3) 野澤 寿章, 吉田 曉弘, 中澤 順, 引地 史郎, 内藤 周次, 第 115 回触媒討論会, IB03 (2015 年 3 月)。
- (4) 石川 修平, 吉田 曉弘, 中澤 順, 引地 史郎, 内藤 周次, 第 116 回触媒討論会, 2D03 (2015 年 9 月)。
- (5) 引地 史郎, 内藤 周次, 吉田 曉弘, 中澤 順, *神奈川大学工学研究所報*, **37** (2014) 66.
- (6) T. Tsuruta, T. Yamazaki, K. Watanabe, Y. Chiba, A. Yoshida, S. Naito, J. Nakazawa, S. Hikichi, *Chem. Lett.*, **44** (2015) 144.
- (7) F. Odden, Y. Chiba, J. Nakazawa, T. Ohta, T. Ogura, S. Hikichi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **54** (2015) 7336.



ナノ構造材料合成における水媒体の影響に関する研究

金 仁華* 齋藤 美和**

Study on Influence of Water in Nanostructure Material Synthesis

Ren-Hua JIN* Miwa SAITO**

1. 研究の背景

生物の多くの機能は基本的に水媒体中発現される。タンパク質, DNA のような生体高分子からアミノ酸, ビタミンなどの低分子まで, 水を介して分子が組織化されたり, 情報が伝達されたりする。従って, 水の影響は多くの分子機能の発現においては無視できない要素である。当研究代表者は, ポリエチレンイミン骨格を有する水溶性高分子を設計し, その高分子が水中で自己組織化し, 一定の形状を伴う結晶性構造体に成長する際, かならずエチレンイミン単位に2分子水が結合することを見出した。即ち, その構造体成長には水そのものが深く関わり, 水媒体条件を変えることで, 構造体の形状を変化させたりすることができる。

このようにして得られた構造体を水性媒体中に分散したまま, それを鋳型に用いることにより, その構造体をコピーした金属酸化物のナノ構造体を効率的に合成することができる。

2. 研究の目的と課題

本プロジェクトの目的は, 水を変化させた条件下, 有機系高分子の自己組織化挙動の検討及びその水媒体中で

の金属酸化物の設計と合成である。特に, 水の水素結合の変化とその媒体中での分子が示す挙動についての相関性有無を調べながら, 水素結合がチューニングされた水中での分子間相互作用と高分子会合体について検討する。

さらに, 金属酸化物が水中で形成する際の水の構造要因と金属酸化物構造・結晶との相関性を調べる。

ここでいう, 水素結合のチューニングは, 磁場, 電場, 高圧による水の活性化を指す。

3. 検討内容

本プロジェクト研究により, 杉原 淳氏を工学研究所客員教授として迎え, 同氏が調製した活性化水を用い, 以下の件について検討した。

- 1)種々の構造が設計されたポリアミン系親水性ポリマーを用い, 活性化水中での自己組織化について
- 2)キラル構造を有するポリアミン系親水性ポリマーの活性化水中での円二色性挙動について
- 3)活性化水中での鋳型構造体により誘導される金属酸化物の特徴について

4. 検討結果

上記の件について検討した結果, 残念ながら, 活性化水を用いることによる有意な結果が得られなかった。以上の結果を踏まえ, 本プロジェクト研究については2015年3月をもって終了とした。

*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Material and Life Chemistry

**助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Material and Life Chemistry



車両等に装備するためのポリカーボネート窓の 表面改質に関する研究

新中 新二* 井上 成美** 大越 昌幸** 野尻 秀智**
植田 博臣*** 岩井 和史*** 中村 先男***

Study on Surface Reforming of Polycarbonate Windows for Vehicles

Shinji SHINNAKA* Narumi INOUE** Masayuki OKOSHI** Hidetoshi NOJIRI**
Hiroomi UEDA*** Kazufumi IWAI*** Sakio NAKAMURA***

1. プロジェクト研究の概要

近年、発達の目覚ましい電気自動車の分野では、エネルギー効率改善のための重量軽減の検討が必須である。車両を構成する部品の中で、窓ガラスの占める重量割合は大きい。これを、プラスチック（主としてポリカーボネート等）で置き換える事は、車体重量の軽量化、すなわち電気消費量の低減につながり、航続距離の増加をはかることができる。

ポリカーボネートは耐衝撃性において優れた特徴を有するが、引っ掻き傷等につきやすく、耐薬品性、耐候性においても問題があり、透明性が損なわれやすい。

我々はこれ迄、高分子材料であるシリコンゴムに真空紫外レーザーである 157 nm の F₂ レーザー光を照射するとシリコンゴムがガラスに改質される事を見い出し報告している^{1,2)}。

本プロジェクトではこの技術を応用して、ポリカーボネート表面に、プライマーを介し、液体シリコンを塗布して真空紫外光を照射することでその表面をガラス化することにより、ガラス並みの表面硬度を有する車両用軽量窓を開発する事を目的とする。

2. 実験方法

厚さ 3 mm のポリカーボネート板上に、厚さ 4 μm のアクリルプライマーをコーティングした後、シリコンハードコートを膜厚 5~8 μm の範囲にてコーティングした。その後、波長 172 nm の Xe エキシマランプを照射して、シリコンハードコート層の表面改質を行った。表面改質層の化学組成をフーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) の ATR 法を用いて測定した。耐摩耗性は、テーバー摩耗試験 (ASTM D1044) により調べた。図 1 にテーバー摩耗試験機 (東洋精機製 TS) を示す。またテーバー摩耗試験の回転数は 1000 回転、荷重は 500g、摩耗輪は CS-10F typeIV を用いた。

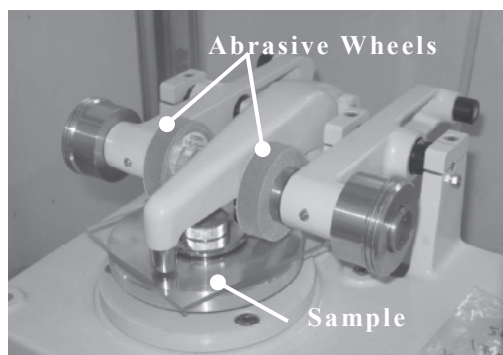


図 1 テーバー摩耗試験機

*教授 電気電子情報工学科
Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information
Engineering
**客員教授 工学研究所
Guest Professor, Research Institute for Engineering
***客員研究員 工学研究所
Guest Researcher, Research Institute for Engineering

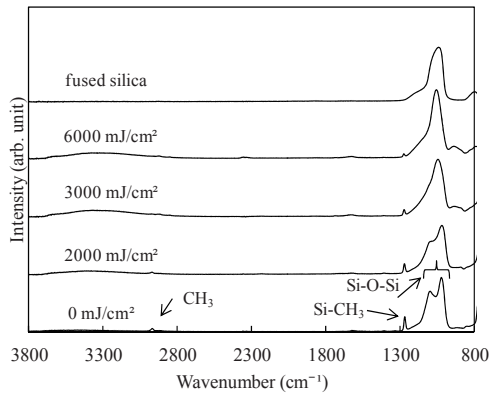
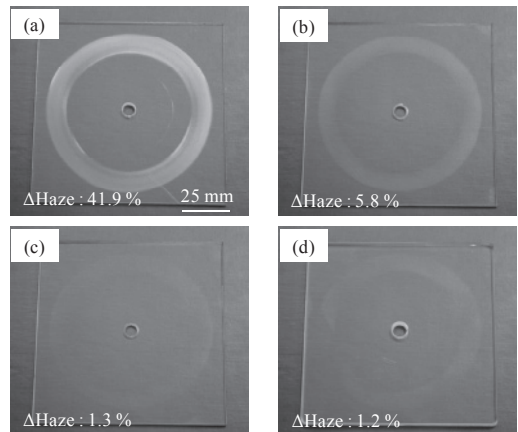


図2 赤外分光分析 (FT-IR) スペクトル

3. 表面改質層の化学組成

図2はXeエキシマランプをシリコンハードコートに照射したときの試料表面の赤外分光分析 (FT-IR) スペクトルを示している。Xeエキシマランプの照射量は2000, 3000, 6000 mJ/cm²とした。Xeエキシマランプ未照射の試料には、1270 cm⁻¹にSi-CH₃結合のピークが、2970 cm⁻¹にCH₃結合のピークが認められた。また、1025および1100 cm⁻¹にシロキサン結合を示す2つのSi-O-Si結合が見られた。一方、Xeエキシマランプを照射すると、Si-CH₃およびCH₃結合のピークは減少し、Si-O-Si結合のピーク形状が変化してくることがわかった。この時、照射量が多くなるに従って、Si-CH₃およびCH₃結合のピークが減少しているのはXeエキシマランプの照射により最表面から、その下層にSiO₂改質層が徐々に形成されることにより、SiO₂改質層の厚みが増しているためである。参照試料として測定した合成石英ガラス (SiO₂) 板と比べると照射量6000 mJ/cm²のシリコンハードコートとほぼ同じスペクトルが得られた。したがって、Xeエキシマランプ照射によって、ポリカーボネート上のシリコンハードコートをSiO₂に改質できることが明らかとなった。

次に、Xeエキシマランプで改質された試料の耐摩耗性を調べるために、テーバー摩耗試験を行った (図3)。テーバー摩耗試験の値は試料の摩耗試験前後のHaze (曇価) 値を測定し、その差をΔHazeとして示している。すなわち、ΔHaze値が大きいかほどが摩耗による擦傷が多いことを示しており、耐摩耗性が良い試料のΔHaze値は低い値となる。



(a)ポリカーボネート, (b)シリコンハードコート

(c)Xeエキシマランプ照射シリコンハードコート, (d)ガラス

図3 テーバー摩耗試験後の試料

(a)ポリカーボネートのみの場合、摩耗輪の跡がはっきりと示されΔHazeの値は41.9%であった。一方、シリコンハードコートが施されたポリカーボネートでは、(b)のように、摩耗輪の跡が薄くなっていることがわかる。さらにXeエキシマランプを照射すると、摩耗輪の跡はさらに薄くなって、ΔHazeの値は1.3%まで低くなり、(d)のガラスと同等な値となった。このように、Xeエキシマランプを照射してシリコンハードコートの表面にSiO₂改質層を形成することにより、高い耐摩耗性を発現できることが分かった。

4. まとめ

シリコンハードコートがコーティングされたポリカーボネートに、Xeエキシマランプを照射することにより、表面にSiO₂改質層を形成することができ、その改質膜がテーバー摩耗試験において、ガラスに匹敵する耐摩耗性を示すことを明らかにした。

5. 参考文献

- (1) H. Takao, H. Miyagami, M. Okoshi, and N. inoue: "Microlenses fabrication on silicone rubber using F₂ laser", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.44, No.4A (2005) pp.1808-1811.
- (2) M. Okoshi, T. Kimura, H. Takao, N. inoue and T. Yamashita: "Photochemical modification of silicone films using F₂ laser for selective chemical etching", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.43, No.6A (2004) pp.3438-3442.



超精密加工による高品位表面の創成に関する研究

中尾 陽一* 林 晃生** Sangkee Min***

Study on Generation of Advanced Surfaces by means of Ultra-Precision Machining Processes

Yohichi NAKAO* Akio HAYASHI** Sangkee MIN***

1. プロジェクト研究の概要

超精密切削ならびに研削加工は、従来から各種光学部品に代表される先端システム用の部品加工に用いられている。この種の加工には、高性能切削あるいは研削工具に加え、超精密工作機械が必須であり、当該分野の研究開発が進められている。従前より、平面、球面、非球面といった比較的単純な形状で構成される加工面が創成されてきている。他方、最近では、微細かつ精密な三次元形状の創成が期待されつつあり、医療分野、さらには航空宇宙分野等への応用が期待されている。

一方、微細かつ精密な三次元形状のさらなる加工技術の向上には、以下に示す研究が必要不可欠になっている。

- (1) 超精密工作機械の高精度化のための高度機械要素技術の研究開発
- (2) 超精密加工技術の開発

本プロジェクト研究では、これらの研究を推進し、高品位な微細かつ精密な三次元形状創成を目的とするものである。

2. 本プロジェクト研究の実施状況

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**特別助教 機械工学科

Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering

***客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

2.1 超精密工作機械の高精度化のための高度機械要素技術の研究開発

超精密工作機械のナノオーダーレベルの高精度な運動創成には、静圧案内のさらなる高精度・高機能化が必要になっている。本プロジェクト研究では、機械要素技術と制御技術に関する研究を行い、高精度案内装置の開発を行う。本研究プロジェクトが対象とする超精密加工分野では、形状精度が数十 nm、加工面粗さは数 nm 程度と極めて高度な加工精度が要求されている。

超精密工作機械の主要な構成要素は、回転要素であるスピンドルと直動運動要素である直動テーブルである。いずれに対しても、高い運動精度と支持剛性が必要不可欠である。さらに、超精密工作機械の温度変化に対しても工作機械構造の高い安定性、すなわち高い熱剛性が必要になっている。

研究代表者は、高い加工精度実現に向けて、従前より、高精度スピンドルと直動テーブルの開発を行っている。本プロジェクトの開始後、図1に示す水静圧軸受が組み込まれた高剛性スピンドルを開発^①した。このスピンドルの特徴の一つは、水静圧軸受に変位制御機能を組み込むことが可能であり、これまでに行った予備実験によって、サブミクロンオーダーの分解能で変位制御が可能になることに加え、目標変位を零に設定することによって、軸受剛性の無限大化が図れることも確認している^②。

さらに、これまでの研究で開発したウォータードライブステージに対しては、テーブル姿勢の制御手法について

研究を行い、基礎実験によってその有効性を示している。図2は実験結果⁽³⁾の一例であり、外部荷重によってテーブル姿勢が変化しても、提案する制御手法によって、姿勢変化の抑制が実現されている。今後、制御系の改良を図りながら、実加工時に適用する予定である。

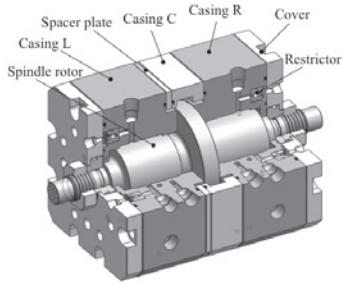


図1 開発した水静圧高剛性スピンドル

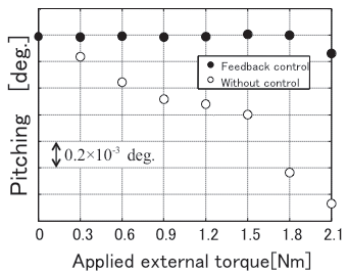


図2 ウォータドライブステージの姿勢制御性能

2.2 超精密加工技術の開発

マイクロオプティクス、マイクロエレクトロニクス、医療分野、航空宇宙分野に代表される、先進科学技術分野においては、従来では使用される機会がなかった、新材料に対する超精密加工が要求される状況にある。多くの場合、これらの材料は、従来からの加工技術の適用が困難な難削材料であり、新たな加工技術や加工戦略が必要になっている。そこで、本プロジェクト研究では、代表的なサファイヤなどに代表される材料の加工技術開発を行っている。

超精密加工や微細切削加工分野においては、単結晶ダイヤモンドバイトに代表される高性能切削工具によって加工が行われる。この場合、加工時における加工現象の理解は、加工条件の選定、ひいては加工戦略を立案するために必要不可欠である。一方、サファイヤに代表される材料は、難削材料であるため、従来、実用的な加工方法が確立されていない。しかも、本研究プロジェクトが研究対象とする超精密加工あるいは微細加工においては、

切り込み量が微小であるため、十分な切削現象の理解がなされていない。

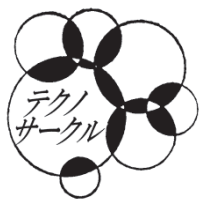
本プロジェクト研究においては、新たに加工現象の観察装置を開発し、これまでに単結晶ダイヤモンドバイトで被材料を切削する際の切り屑の排出現象の可視化が行えるようになってきている⁽⁴⁾。開発した本装置を利用して、単結晶ダイヤモンドバイトによる延性材料に対する微細加工の検討を行っている。具体的には、微細切削における切削比の測定手法を考案し、実際に測定実験を行うとともに、提案手法による測定結果が従来手法による測定結果とよく一致し、本手法によれば、従来手法のように切り屑厚さを測定することなく、切削比を測定可能になることを明らかにしている。

3. 今後の展望

本研究プロジェクトは、開始1年目であり、現在はまだ本格的な研究に着手する準備段階にある。今後、次世代超精密工作機械への応用に適した高性能スピンドルと直動テーブルシステムを開発した上、従来では困難であったサファイア、シリコンウエーハ、ガラスに代表される難削材に対する超精密加工技術の確立を目指して研究を進める予定である。これによって、マイクロオプティクス、マイクロエレクトロニクス、医療分野、さらには航空宇宙分野における技術進展に貢献したいと考えている。

参考文献

- (1) Kohei Nagasaka, Akio Hayashi and Yohichi Nakao, 'Design of spindle supported by water hydrostatic bearings', Proceedings of 30th ASPE Annual Meeting (to be presented).
- (2) 山田康雅, 栗原健太, 山田晃平, 林晃生, 鈴木健児, 中尾陽一, "対向式水静圧スラスト軸受の変位制御系の検討", 日本機械学会 2015 年度年次大会講演論文集, S1310103.
- (3) Satoshi Shibata, Yusuke Torii, Akio Hayashi, Kenji Suzuki and Yohichi Nakao, "Trial study on attitude control of water driven stage, Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (to be presented).
- (4) 坂田脩, 熊田汰一, 林晃生, 中尾陽一, "ハイスピードカメラによるダイヤモンド旋削加工の可視化", 日本機械学会 第54回学生員卒業研究発表講演会前刷集.



環境科学テクノサークル活動報告

井川 学*

南齋 勉**

Reports on the Activities of Environmental Science Techno-circle

Manabu IGAWA*

Ben NANZAI**

1. サークル結成まで

物質生命化学科の前身である応用化学科では工業分析研究部や有機合成研究部等、研究室ごとのクラブ活動が学科創立初期に結成され学生による自主的活動が行われていた。2011年時の工学研究所長であった故山村 博先生は学生のこの自主活動の歴史に注目され、同様な学生主体の「テクノサークル」を発足させることにより、学生が活性化することを願われた。そして、この趣旨のサークルの一つとして、環境科学関係のテクノサークルを結成することを我々に依頼された。著者の一人である井川は1978年に工業分析研究室を主宰する田中正雄教授の下に助手として本学に赴任したが、当時も工業分析研究部は存続していた。しかし、サロンのな意味はあったものの、実際の活動は1~2名が夏休みに研究室の機器を使って、河川水を分析する程度であり、その後、自然消滅に近い形で無くなり、他の部も同様な形で消滅した。このような経緯もあり運営にはかなりの労力を要することが予想されたため消極的にならざるを得なかったが、山村先生の熱意に動かされて引き受けた。

工学研究所の新しい取り組みとして2011年度に予算が付いてその年の5月にテクノサークル募集が開始された。応募して正式に認可された後にサークル員の勧誘が始まるが、既に新しい年度は始まっている。やむなく井川が本人の1年生向けの授業で自ら説明し、環境科学の松本安生先生にご協力いただき先生の授業でピラを配布し、新1年生を勧誘した。

2. サークルの活動

最初の集合をある日の昼休みに設定し、授業講堂の一室を確保して井川と南齋が待っていたところ、何人か集まってきてホッとしたものだった。その後も学内に宣伝ピラを貼ったりサークル員となった学生が周りに声をかけたりして、初年度は物質生命化学科で9名、電気電子情報工学科から1名の学生が集まった。

2011年の当時は全国に飛散した放射性物質による汚染が大問題になっていた。そこで、サークルの活動内容として生活圏の放射線量を測定することを課題とし、手分けして六角橋、平塚、中山の3キャンパスと横浜駅や鎌倉駅の周辺の放射線量を測定した。開始時は測定器の注文が全国で殺到した頃で、注文しても簡単に入手できず、やむなくレンタルの測定器を入手して測定した。ちょうどその頃、学内の放射線量についての関心が高まり、分野が近いと思われたのか工学部長や学長から我々に測定依頼があったが、既に測定していた後だったのでデータを渡し、皆さんから喜ばれた。

サークルとして最初に迎えた神大フェスタにおいては原発の事故について調べたことと、測定結果に基づく放射線量分布図を展示した。誰もが初めて迎えるフェスタであり、最初の対外的な発表でとまどうことは多かったが、見学者からの質問も多く、準備したサークル員も充実感を感じていたようであり、1年目としては幸先良い滑り出しであった。

2012年度は、新入生勧誘から始まり、工学部以外の学部からも新たな学生が入って一層にぎやかになった。学部が違うとやはり観点も違うのでより活発な活動となった。2年目は神大フェスタだけではなくテクノフェスタにも参加した。放射線量の測定はなお続けたが、横浜と川崎の間を流れる鶴見川の川沿いの分布や底泥の深さ方向の分布について調べた。また、神奈川県の上水源の一つである酒匂川について、その上流から下流までの水質

*教授 物質生命化学科

Professor, Dept. of Materials and Life Chemistry

**特別助教 物質生命化学科

Assistant Professor, Dept. of Materials and Life Chemistry

調査についても取り組みを開始した。私達の研究室では丹沢山塊への大気汚染物質の沈着量測定を1988年から継続している。初期にはモミの立ち枯れが顕著な大山について観測してきたが、最近ではブナの立ち枯れが激しい丹沢山塊南端の鍋割山でも観測している。鍋割山は酒匂川の源流域にあたるので、丹沢山塊で多量の汚染物質が沈着し、森林が衰退し水質の悪化につながるこの全体像が今後の調査により把握できることが期待される。この他、きのこの放射性物質の取り込みについて文献調査した内容等についても興味深くまとめられた。

これらの調査は主には夏休みの長期休暇期間中に行っているが、授業期間中は週に一度昼休みに集まって、勉強会を行っている。サークル員が順番に興味ある科学的なテーマについて調べてきて、みんなの前で発表するというスタイルである。中には、非常に鋭いテーマ設定もあり、私たちも面白く聞かせていただいた。最近の発表では、蝶はなぜ長時間飛行を続けられるか、雨傘の種類と雨よけの課題、といった直接環境問題ではないが日常生活あるいはありふれた自然現象に科学の視点で切り込む話がなされ、いずれも斬新で印象深いものだった。これらの発表は毎年冊子としてまとめられ、2012年から神大フェスタにおいて配布を行なっている。

2013年度の調査は基本的には2012年度のもの踏襲したが、放射線については土壌粒子径による放射線量の違い等、より詳細なものを行った。2014年度になると、神奈川水再生センター、資源循環局、廃液処理プラントなどの様々な処理施設や物質・材料研究機構（NIMS）や海洋研究開発機構（JAMSTEC）などの研究所訪問もサークル活動の一つとなり、行った後には報告会を行なうとともに、結果は神大フェスタでも報告した。2015年度の調査では、タバコの副流煙による環境汚染という新たなテーマにもチャレンジした。

3. サークル活動の今後

サークル活動はまずは部員の確保と、活動内容の明確化が重要であろう。現在、発足時に比してメンバー数は多くはないが、週に一度の集まりに文系学部も含めた様々な学部学科のサークル員が集まってくる。研究室で行う研究ではないので、研究テーマの設定が難しいが、学生が知的に刺激し合い、その中で友情が生まれる場として有効であろう。より適切な研究・調査テーマが設定され、学生諸君がイキイキと活動するようなサークルになることを願っている。



写真1 2012年の神大フェスタ会場のポスター発表掲示



写真2 河川水試料採取風景



写真3 テクノサークルの集合写真（2013年度）



映像記録型ドライブレコーダーによる 安心安全快適自動車運転サークルの活動

松浦 春樹* 堀野 定雄**

Activity of Techno-Circle Study Group on Well-Informed, Risk-Free and Comfortable Car-Driving by Means of An Image-Recording-Type Video Driving Recorder

Haruki MATSUURA* Sadao HORINO**

1. ドラレコ・テクノサークルの誕生

若者の車離れが続いている。交通事故の大半は一般ドライバーが惹起しており、テクノサークル開始(2011)から4年間、事故件数は90万から57万件(2014)まで減少したが、激減には一般車事故削減が必須である。それにはドライブレコーダーの一般車普及が鍵であると官民一致して認識している。

明日の社会を担う若者ドライバーが在学中、学部のを越えてサークル活動で仲間と一緒に楽しく新技術を習得、社会で活用してくれたら本望との想いで応募、承認された当テクノサークルは生活の中で安心・安全・快適な自動車運用技術に関心ある学生対象に、学内組織 KU-WIRF(高安心超安全交通研究所、所長:松浦春樹)有志とドライブレコーダー協議会(顧問:堀野定雄)有志の支援で組織した。開始時、学生9名(工、人間、経)、4年後2015年同じく9名(工、経、法、外、他大学)、教員3名、社会人6名、顧問3名に成長した。

社会人、顧問はドラレコ開発・実践活用、自転車活用促進の日本の代表的人材で、社会で交通安全指導的役割を果たす人材育成を視野に学生支援と学生中心運営に徹している。

2. ドラレコ・テクノサークルの組織、活動手順

サークルは、KU-WIRFのプロ運転者対象に蓄積した事故原因・対策などの知的資源を活用し、学生対象に運転を可視化するドラレコ新技術を実地伝授し、ドライブレコーダー装着がシートベルト装着と同様、安全運転必須条件と認識してもらう狙いを込めて活動している。

会員の愛車にドラレコ搭載、生活場面でデータ採取、各自データ持寄り、報告、経験交流する。交流からマイカー固有の安全指針を導く活動を地道に続けている。

自転車事故多発を背景に、浮穴浩二会員(社会人、UKコンサルタント代表、"ドラドラ"(JAF-Mate社製、図1)回路設計)が米国ラスベガス国際家電ショーで発掘した最

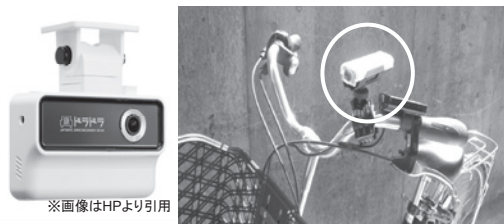


図1 ドラドラ(JAF-Mate社)とリンレコ装着自転車(O)



図2 リンレコで出来る道路性能評価。片側1車線通学路車道左端走行時、見えない路面窪み(3cm)で衝撃!(2012)。

*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering

**客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

新自転車専用ドライブレコーダー（BVR-01、廉価電池式小型で映像/音声、速度、GPS 情報を記録）をネットで調達「自転車 Working Group」で自転車通学生、車運転会員も一緒に、自転車・自動車が共生する道路交通に着眼したフィールド研究を進めて成果を挙げている（図1、表1）。日本語「チャリンコ」と英語 recorder を合体、「リンレコ」と命名した。主に「ドラドラ」と「リンレコ」を会員に貸与し車、自転車生活の中で自由に記録して貰った。

3. ドラレコ・テクノサークルの活動実績

活動成果は毎年秋の学部、大学院、工学研究所共催の「テクノフェスタ」でポスター発表が義務付けられている。知的成果を判り易く誘目性高く A1 サイズポスター1 枚にまとめるのは卒論準備として恰好の学習場である。

初年度「テクノフェスタ 2012」動画付ポスター発表は反響を呼び、新中二所長名で発表 2 学生、栄 一真（工 3）と大島 薫（経 4）が優秀ポスター賞を受賞、全く想定外の出来事で全員驚き、感激した。

学生会員 9 名中たまたま運転免許を保有しない 2 人が自転車通学者で、毎日、通学路でリンレコ継続記録を実施、分析・整理して動画付きポスター発表した。

主な成果の一つは、反対車線がタクシー乗り場で道路が狭く歩道側に寄せて走行中、リンレコがずれる程の衝撃を受け、ハンドルを取られそうになり、バランスを崩し車道に出てしまうところを耐えた。下車して調べたら自転車から見えない深さ 3cm の窪みを発見した（図2）。

2 人は「今まで何の気なしに歩道を走っていた自転車通学がリンレコ映像を見て自分を客観視でき、反省点が鮮明になった」「軽車両自転車が車道左端を走る決まりは知っているが、自転車に道路環境が良くないのは歩道を走る要因の一つであり、車道は安全でないという経験則が形成され、欧米のように専用レーンが少なく、設置してもなかなか浸透しない道路環境が、今日までの「迷惑自転車」生み出している、自転車は自動車と歩行者に挟まれたいわばグレーゾーン状態でどっちつかずの現状がサイクリストの判断ミスを誘発しているのでは」と結論付けた。事実に基づく学生の力強い主張が共感を呼び、認められた様だ。

「テクノフェスタ 2013」でも自転車/自動車ドラレコ比較ポスター発表で好評を博した。発表者（栄 一真（工 4）、大島 薫（経卒）、浮穴 浩二（社会人）は「自転車の居場所がない。自転車専用道が整備されても無神経な違法駐車が効果をなくしている。自動車側も前に自転車を発見すると追い越し辛い。接触を避け

るため車線超えの配慮が要る。」と改善策を提言した（図3）。

自転車専用ドラレコ、リンレコに注目した神奈川県警は本部に学生を招待、交通総務課長以下署員十数名対象に発表、貴重な県警・神大学术交流が実現した。更に、県警と厚木市が主催した「交通安全こどもサミット」（厚木市立清水小学校、2013-9）で、県警初の試みとしてリンレコ映像を活用した参加型交通安全教育に自転車ドラレコ映像を提供、全面協力し子供たちに生き生きした反応を呼び起こし、大きな成果を挙げた。

「テクノフェスタ 2014」で初めて、酒井聖紘、萩 綾太（工 3）が自動車活用のポスター発表「映像記録型ドライブレコーダー “ドラドラ” 観察から判った交通安全実態—無視できない危険運転—」を行なった。

“ドラドラ” 使用経験を整理し、「長所：①高品位画質、②その場で撮影画像確認できる、③取り外してデジカメ仕様で静止画や動画を撮れる。短所：①信号など LED 照明撮影で点滅する、②夜間撮影時輝度不足で人間の目より暗く写る、③SD カード PC 編集時映像混合が起こる。」を指摘した。学生の使用経験に基づく貴重な報告である。

成果のハイライトは夜間運転時前照灯のハイビーム操作とロービーム操作で視認距離が 2.5 倍異なることを路面の白線の数で見事に示したことである（図4）。この知見は意外と広く普及していないのが現状で、対向車がない場

表1 リンレコ(映像記録型ドライブレコーダー-BVR-01)の仕様

GPS		CMOS センサー	
GPS モジュール	SIRF Star III	解像度	640x480 (VGA)
周波数	L1, 1575.42MHz	センサーサイズ	1/4"
チャンネル	12 CH for tracking	画像レート	VGA, CIF, QCIF, QQCIF - 30 fps.
アンテナ	GPS Patch Antenna	QVGA, QQVGA - 60 fps	
データ	WGS-84	スキャン	プログレッシブ
コールドスタート	50 秒, 平均値*	露出	最大 510:1 (for selected fps)
ウォームスタート	33 秒, 平均値*	画素サイズ	6 μm x 6 μm
ホットスタート	1 秒, 平均値*	画素範囲	3.984 mm x 2.952 mm
受信簡素	-158 dBm		
動作環境		電源	
動作温度	0°C ~ 40°C	電源	1. 単四電池2本
動作湿度	5% ~ 85%		2. カーシガレット (3V/1A)
		消費電力	350mA 2.4V

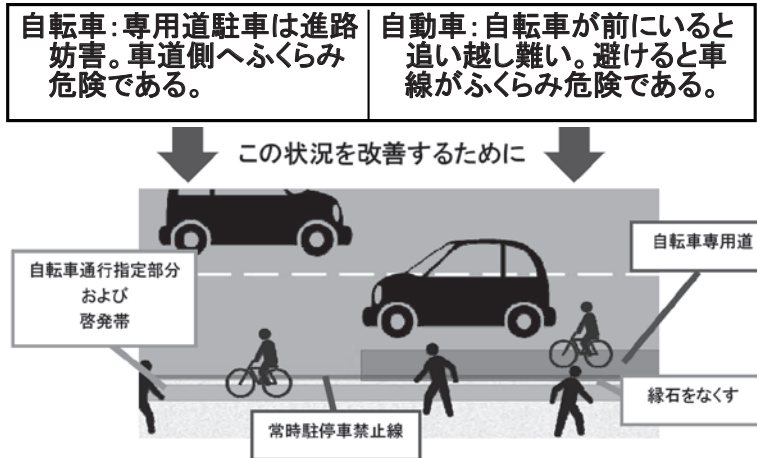


図3 自動車と自転車の共生: 複数の提案(2013)

合の夜間運転の安全性確保に不可欠の知識がこの様な形で学生に共有される意義は大きい。

2人は「ドラレコで見える危険運転: エゴドライブ」として「最初ドラドラをつけて運転したとき、あまり危険場面は撮れていないと思っていた。が、映像を後々見返してみると危険場面が日常運転にかなり潜んでいると感じた。特に、無理な割り込みや自分本位の運転が事故原因になりやすい場面がたくさん観察できた。」「環境整備と思いやり運転で事故減少可能だ。交通事故はゼロにするのは厳しいが減少させることは確実にできる。道路環境整備、違法駐車をしな、ドライバーひとりひとりの相手を思いやる運転が事故を減少させる事につながる。」と力強く結んだ。

「テクノフェスタ 2015」では、高橋綱喜(法 3)、松田 洋(工 3)、後藤航太(経 1)が「リンレコが記録した日常交通における自転車行動と道路環境」と題し、動画付きポスター発表、共生をテーマに、自転車視点で交通安全上無視できない危険実態を発表した。

研究で判った重要点は「自転車断絶」とも言うべきママチャリとロードバイクで安全実態が異なる事、今後を展望した意欲的発表だ。リスク相違のハイライトは、東神奈川駅近辺にあるY字分岐に潜む危険である。自転車は本来車道を右折できないが、道路環境によっては、車線を右に直進する必要がある。その場合、車道を横切る必要が起こる。もし、右方向に直進出来なかったら全く違う方向に行ってしまったり、高速道路に進入してしまったりする可能性がある。

ママチャリは速度が遅く子供や荷物を載せているので後方確認に危険が伴う、つまり右方向へ安全に直進するのはほぼ不可能である。ロードバイクは果敢にも後方確認の上車道を横断して行きたい右方向へ直進する。

次に車道左端走行に邪魔な植栽リスクの顕在化である。植栽を避け切れず衝突可能性、衝突時の速度・部位によっては重篤化の危険性、ママチャリの前に乗せた子供の顔面に激突の危険性、植栽を避けた時、そこに後続車両がいる危険性が顕在化していると報告した(図5)。

まとめで、「1. 自転車の公道を走る権利: 自転車は車道の左端を走る決まりだが(道交法第 17 条第 1 項)、現実に公道においては排除されている。問題は自転車の走行ゾーンが曖昧であり、これを改善するためには、自転車車道の整備、根本的な道路設計の見直しが必要。2. 道路環境整備の徹底: 道路環境整備がまだまだ行き届いていない道路が多数ある。サイクリストを含む道路利用者の声に広く耳を傾け、早急により良い道路環境を構築することが行政にとっての急務である。」と明快に結論づけた。

今回、報告すべき内容が豊富でテクノフェスタだけではカバー仕切れないので、人類動態学会、定例の東日本地方会(2015-12)で発表する予定

で準備中である。学生の意欲は満ちている。

4. 今後の課題と発展

今後も、データ採取・分析を通して安全な交通共生関係を模索し、会員家族の協力を得て高齢者運転、後方視界記録など新しい視点も追加する予定である。更に、若者視点で使用機器の使い勝手改善やドラレコ普及条件も探り、次の社会人開発課題として反映する活動も続ける。この様に、テクノサークルは世代間コラボレーションでも成果を挙げつつある。

研究会で出会う学生の目の輝きが新鮮で印象的である事を強調したい。参加の動機付が単位制枠外で、純粋にドラレコやリンレコが好きで関心や興味を共有し、熱意あふれる学生達が学部・学年・大学を超えて仲間意識を醸成しつつある。

5. 故山村所長に感謝

若者の理工系離れが社会現象化し、理工系学部の危機、日本のものづくり産業危機が叫ばれる中、山村 博前工学研究所長は、特別予算申請、新規事業、工学研究所主催「テクノサークル」予算獲得に奮闘された(2011-4)。その趣旨は「技術の共有と物作りの喜びを体験する場とする。」具体策として「1) 研究成果・ポテンシャルを社会にアピールするとともに、企業との新たな連携を図る。2) 専攻間・学科間での学生同士、及び教員と学生の交流の場とする。3) 参加者が体験できるプログラムを用意する。」を掲げられた。

所長の熱意と行動にも拘わらず道半ば、その発展と成果を見届ける事なく急逝された。ご本人が最も無念で悔しい思いであろう。故山村所長が蒔かれた種は着実に開花していますよと感謝、ご報告し、この場を借りて謹んでご冥福を祈る。



図4 前照灯ハイビーム視認距離はローの2.5倍: 照射白線数(ドラドラ画像、2014)



図5 横浜周辺の邪魔な植栽の例(2015)



テクノサークル「けんちくをつくる会」活動報告

三笠 友洋*

Reports of Annual works of the Techno Circle “Tsuku-Ken”

Tomohiro MIKASA*

1. 活動の背景

学部における建築デザイン教育は、演習科目の中で仮想の建築を設計することが中心となる。実際にものにつれ、それをどのように使って建築をつくるかを考える機会は限られている。現実の設計活動においては、多くの時間とエネルギーをもと向き合うプロセスにかけるし、それが設計の醍醐味でもあるが、大学の授業の中でその面白さを伝える事はなかなか難しい。こうした意識から立ち上げたのが、建築サークル「けんちくをつくる会」である。2011年に設立したけんちくをつくる会(以降つくけん)は、毎年建築学科3年生を主体とし、さらに1,2年生が加わり総勢30名程度が参加する。例年春先に引き継ぎが行なわれ、2015年度で5期目を迎えた。

2. これまでの活動テーマ

つくけんの活動目的は、その名の通り建築をつくることである。どこに何をつくるかは学生自身が検討し、その実現のための交渉も基本的に学生が行なう。限られた予算で「建築」と呼べるものを実際にこつくるのだから、自ずと小規模で仮設的なものになる。当初は神大フェスタの際に、キャンパスの一角にフォリーをつくることから始めた。2013年には六角橋商店街の商店会と連携し、夏のイベントの仮設会場をつつた。どのようにつくるかも学生の自由であるが、例年ひとつだけ決めていることがある。それは最初材料をきめることである。限られた予算と時間と技術でできることは多くない。手に入りやすい材料を使い、その特徴をよく考え、自分たちにつくれる方法を考えることを主題とする事で、建築をつくることそのものの楽しさを感じてもらいたいと考えたからだ。これまで竹、布などがテーマ材料となり、それぞれ材料特性を活かした空間づくりの試みがなされた。(写真1,2,3,表1)



写真1 2011年度活動「竹の東屋」



写真2 2012年度活動「外のリビング」



写真3 2013年度活動「ダンボールを開いたら」

* 助教 建築学科
Assistant Professor

表1 各年度の建築物の敷地、用途、材料

年度	敷地	用途	材料
1期 2011	旧3号館前 公開空地	神大フェスタ 休憩所	竹
2期 2012	東屋前空地	神大フェスタ 休憩所	布
3期 2013	六角橋商店街	どっきり闇市 ライブ会場	ダンボール
4期 2014	六角橋商店街	どっきり闇市 ライブ会場	紙管+ 3Dプリンター

3. 2014年度の活動「紙管のジカン」

2014年度の学生メンバーは、前年度の活動を引き継ぎ、六角橋商店街の一角にイベント会場を設営する事を課題とした。神奈川大の学生にとってなじみぶかい六角橋商店街は、戦後の闇市をルーツ^{※1}とした商店街で、木造アーケードの小道にお店が並ぶ仲見世通りは独特の雰囲気をもつ。商店会の活動は活発で、毎月第3土曜日にはドッキリヤミ市場というフリーマーケットイベントが行なわれている。そのヤミ市場の一角で行なわれるライブのためのステージと観客席、掲示板などを設計施工する。

そこで彼らがテーマとした材料は「紙管」であった。紙管は、サランラップやプリンターロール紙の芯などに使われるありふれた素材である。建築分野では一部著名建築家はその活用をテーマとしているが、通常建材として利用される事はない。彼らは、紙管を細かく輪切りにして使う方法やたばねて使う方法などさまざまな構法を考えた。なかでも特徴的だったのは、3Dプリンターによるジョイント構造である。3Dプリンターは、コンピュータで3Dモデリングした形状を、樹脂を溶かし固めて成形するもので、任意の角度のジョイントをたくさんつくることができる。このジョイントを軽い紙管と組み合わせれば、組み立ても容易だし状況に応じて形をかえる事も可能だ。彼らはこの仕組みで会場の中心となるライブステージをつくり、イベントを成功させた。

実際の制作過程では、3Dモデリング技術の習得、3Dプリンターの調整など様々な技術的困難が合ったようだが、その苦勞も含めて、材料と技術とデザインの関係に向き合うよい経験となったのではないかと思う。

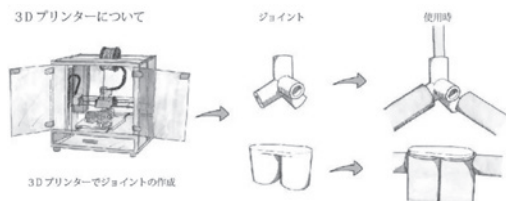


図1 3Dプリンターによるジョイント部材



写真4 3Dプリンターによるジョイント部材



写真5 ライブ会場

4. つくけんの活動の成果

サークル設立にあたって期待していた事は、なにより建築の楽しさを感じてもらう事だった。毎年テクノサークルの応募時期が来ると、こちらから働きかけるまでもなく学生間でリーダーの引き継ぎが行なわれ、応募申請の相談がくる。1年生のときによくわからないまま参加していた学生が、やがてリーダーになり先導している姿を見ると、試みとしては成功しているのではないかと思う。活動そのものの水準については、あまり気にしていなかったが、第2期、第3期の活動ではテクノフェスタポスター賞を受賞した。また主要参加メンバーは毎年卒業設計において優秀賞(1期3名、2期3名、3期2名)を受賞している。本活動の経験がその後活躍に少なからず活かしているのであれば幸いです。

なお2014年度活動に使用した3Dプリンターはレモンホーム株式会社の協力により提供を受けたものである。

参考文献

※1 RAKU review of architectural design course, vol.9, 六角橋商店街の歴史, 津田良樹, 2013



テクノサークル KURAFT 活動報告

中村 弘毅*

Activity Reports of the Techno Circle KURAFT

Hiroki NAKAMURA

1. はじめに

最近の工学系大学では、実習や設計・製図などのカリキュラムが減少しており、そういった状況を鑑みて、学生フォーミュラ大会は、学生自らがチームを組み約1年間で1人乗り小型レーシングカーを開発・製作することによって、学生がものづくりの本質やそのプロセスを学び、ものづくりの厳しさ・おもしろさ・喜びを実感することを目的に掲げている。年に1度開催される全日本大会では、走行性能だけでなく、車両のマーケティング、企画・設計・製作、コスト等のものづくりにおける総合力を競う。米国ではものづくり実践教育の場として1981年から大会が開催され、日本でも米国「Formula SAE®」のルールに準拠し、2003年から全日本学生フォーミュラ大会を開催している¹⁾。また、2013年からEVクラスが設立され、駆動ユニット以外は民間ルールで内燃機関エンジンの車両と電気モーターで駆動する車両の性能を競っている。

本学学生フォーミュラプロジェクト KURAFT は2013年10月に設立され、毎年9月に開催される全日本学生フォーミュラ大会への出場を主な目標として活動している。

また、地域貢献活動の一環として神奈川県下の中小企業と連携して展示会にて車両展示を行っている。これは神奈川県 KURAFT の広報活動であるとともに、支援企業の技術を社会に広めることを目的としている。

2. 全日本学生フォーミュラ大会

2.1 大会概要

前述の通り、学生が自ら構想・設計・製作した車両により、ものづくりの総合力を競い、産学官民で支援して、自動車技術ならびに産業の発展・進捗に資する人材を育成することを目的として毎年9月に開催されている。主な設計要件・安全要件は以下のように定められている。

・タイヤがカウルで覆われてなく、フォーミュラスタイルの車両。

・ホイールベースは1525mm以上。トレッドは前後の大きい方に対して75%以上。

・横転・衝突時などにドライバーを保護するために、コックピット回りなどの構造・材料などが詳細規定されている。

・ドライバーの保護用具・シートベルトなどについて規定されている。

・ブレーキは4輪全てに作動し、独立した2系統の油圧回路を有する。

その他 Formula SAE のルール²⁾及び日本大会ローカル規則に準拠して製作されていることが必須要件である。

2.2 競技概要

大会は車検と以下の静的審査3種目、動的審査4種目の総合得点で競われる。

表1 競技種目概要

種目	概要	配点	
車検	車両の安全・設計要件の適合性の確認	-	
静的審査	コスト	車両製作コストの妥当性を事前提出書類と当日の口頭諮問により審査	100
	プレゼンテーション	製造・販売を含むビジネスプランを提示するという仮想のシチュエーションで発表	75
	デザイン(設計)	設計の適切さ・革新性。加工性・整備性など事前書類と口頭諮問により審査	150
動的審査	アクセラレーション	0-75mの直線での加速性能を競う	75
	スキッドパッド	左右の定常円旋回でコーナリング性能を競う	50
	オートクロス	直線・ターン・スラローム・シケインなどを含む約800mのコースを1周走行し、タイムを競う	150
	エンデュランス	オートクロスと同様の周回コースを22周走行。タイムと耐久性能を競う	300
	燃費/電費	エンデュランス走行時の燃料/電力消費量を競う	100

3. KURAFT の2015年度活動

3.1 車両設計・製作

*助手 機械工学科

Research associate, Dept. of Mechanical Engineering

車両設計は、加速、旋回競技での目標タイムを設定し、ホイールベースなどの仕様から順に設計を行った。以下主要な仕様を表2にまとめる。

表2 車両仕様

全長×全幅×全高	2400mm×1450mm×1350mm
ホイールベース	1650mm
トレッド	1200mm
乾燥車重	320kg
フレーム構造	鋼管パイプスペースフレーム
材料・結合方法	STKM13A・TIG溶接
モータ・最高出力	Motonagy 製ブラシレスモーター 38kW
バッテリーシステム	72V 220Ah CALB 製リチウムイオン電池 1モジュール2×11セル
ステアリング	ラックアンドピニオン
サスペンション	前後ダブルウィッシュボーン
ブレーキ	4輪・油圧式アウトボードディスク

製作はフレーム構造の溶接から、サスペンション周りの部品まで、一部の購入品を除いて自作している。溶接は昨年に引き続き専門の企業の方の指導を受けて行った(図1参照)。溶接ひずみの発生しにくいトラスの組み方など、設計時点で考慮すべき点についても指導を受けた。



図1 フレーム製作の様子(溶接作業)

駆動系を含む電気系統の配線については、電気電子情報工学専攻の大学院生が主体となって設計製作を行った(図2参照)。電気自動車は高電圧・高電流を取り扱うため設計や作業中に留意すべき点が多く、Formula SAE®のルールに書かれた安全基準や、電気車検担当の審査員の指導に従って製作を進めた。

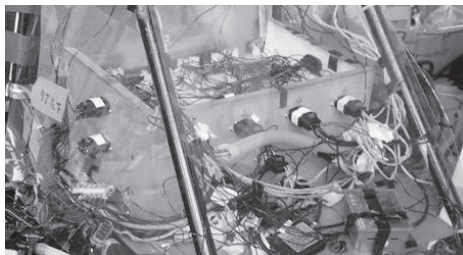


図2 駆動系回路・配線の様子

3.2 ドキュメントの作成

大会出場要件を満たすため、デザインレポート、コストレポートを初め、電気システム診断(ESF)、故障モード診断(FMEA)など様々なレポート作成に着手した。特に、ESF、FMEAは危険箇所が見つかるごとに設計変更と当該書類の再提出を繰り返し、システムの安全性および信頼性の向上に努めた。

4. 第13回全日本学生フォーミュラ大会

今年度の大会は2015年9月1日～5日の5日間で開催された。参加校はエンジン車(ICV)81校(うち13校海外チーム)、電気自動車(EV)9校(うち2校海外チーム)であった。

残念ながらKURAFTの車両はブレーキ周りのオイル漏れなど、安全性の不備を指摘され、期間内に車検を通過することができず、静的審査のみの参加となった。



図4 2015年度製作車両

5. まとめおよび今後の展望

KURAFT 設立以来初の全日本学生フォーミュラ大会挑戦は車検不通過という悔しい結果に終わった。しかし、車両製作や書類作成を通して実際の会社で行われる設計製作のプロセスを経験し、また近隣企業と連携して展示会への参加をすることでものづくりへの理解を深めた。

工程管理など今後改善すべき課題があるものの、1台の電気自動車を走行可能な状態にまで自作したことで、設計から製作に至る過程で注意すべき点などに気づくことができ、今後の研究に役立てられることが期待できる。

謝辞

本活動を支援して下さった以下の企業の方々へ感謝の意を表す。

公益財団法人川崎市産業振興財団様、松井工業様、日本モレックス合同会社様、(株)先端技術開発研究所様、(株)オズコーポレーション様、松山工業様、フジテック様、堤工業様、(株)日の出製作所様、(株)西川精機製作所様、(株)オートショップ福井様、(株)理研オブテック様、(株)JMC様、ディージャック様、(株)サイマコーポレーション様、(株)SEVCON JAPAN様、NKN様、日信工業様、(株)キタコ

様, (株)SHIFT UP 様, アンフェノール・ジャパン(株)様, NTN
(株)様, (株)ミスミグループ本社様, (有)渡邊左官店様, Deep stage
様, (株)レイズ様, 匠ソリューションズ(株)様, ウエストレー
シングカーズ様, (株)ザム・ジャパン様, (株)浜正機工様, Race
Car Parts 様, (有)松井工具様 (順不同)

参考文献

- (1) 全日本学生フォーミュラ大会ホームページ
<http://www.jsae.or.jp/formula/jp/> (2015年10月16日アクセス)
- (2) 2015 Formula SAE® Rules
students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf



「神奈川大学宇宙ロケット部」活動報告

高野 敦*

Activity Reports of “Kanagawa University Space Rocket Club”

Atsushi TAKANO*

1. 緒言

「神奈川大学宇宙ロケット部」はまだ昨年9月に設立されたばかりの新しいテクノサークルである。このサークルは、「ハイブリッドロケット」と呼ばれるロケットエンジンを用い、超小型衛星を打ち上げるための超小型ロケットの設計・開発を目的としている。現在、超小型衛星の打上げが各地の大学で行われているが、これらは大型の衛星に相乗りという形で打上げるためその打上げ機会は限られている。そこで超小型ロケットを開発することで、これら超小型衛星の安価な打上げを実現させることを最終目標としている。従来衛星打ち上げのために実用化されているロケットは、火薬を使用する固体ロケットか、液体燃料・液体酸化剤を使用する液体ロケットの2種類に大別されてきた。これらは、可燃性の高い火薬や燃料を使用するため、万一破損した場合爆発の危険性が高い。一方、ハイブリッドロケットは燃料にプラスチック樹脂、酸化剤に液体を使用するため、ロケットが破損しても自然に消火する性質を持っている。つまり爆発の危険が無い⁽¹⁾。そのため、火薬や燃料の運用・管理コストを抑えることができ、従来のロケットに比べ大幅に打上げコストを抑えることができる。これを受けて、当サークルでは機械工学科 航空宇宙構造研究室と共同でハイブリッドロケットの開発、打上げに取り組んできた。本報告ではこの1年間での活動実績を報告する。

2. 伊豆大島共同打上げ実験 (2014年11月)

2014年11月に伊豆大島で実施された共同打上げ実験に参加した。エンジンは米国からの購入品を用いたが、機体はCFRP(炭素繊維強化プラスチック)製の円筒殻を自作し採用した。



図1 1機目打上げの様子

フィン及びロケット先端のノーズコーンは3Dプリンタで造形した樹脂部品を採用した。機体は全長2.2m、直径150mmであり、同一設計のものを2機準備した。これは不測の事態による破損などで実験不能とならないよう、互換性・冗長性を確保するための配慮である。打上げは伊豆大島噴火口周りの砂漠で実施された。実験は2日に及んだが、1日目は機体の不具合(酸化剤満充填の目印となる余剰酸化剤排出による白煙が視認できない)により打上げが出来ず、急遽酸化剤排出出口の位置を変更するという対策を徹夜で実施し、翌日に打上げた。翌日は10:00分及び10:30分の2ウィンドウ(打上げ可能時間帯)しかない中で打上げとなった。1機目を無事打上げに成功したものの、機体の捜索に出る余裕もないまま2機目を打上げた。図1が1機目打上げの様子である。機体は数秒で雲に隠れ目視できなくなったが、軟着陸のためのパラシュートが展開することは目視で確認できた。2機とも打ち上げに成功したので引き続き

*准教授 機械工学科

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering

き機体の搜索を実施した。1機目は砂漠からかなり離れた森のなかで樹木に引っかかっているところを発見できたが、2機目はそれより手前の背の高い草むらに落ちて埋没したため発見できなかった。1機目に搭載したデータロガーのデータを解析した結果、高度は2000mに達し、初参加かつ初昇りながら当打上げ場所での記録を更新する快挙となった。

3. 能代宇宙イベント (2015年8月)

さらに高高度の4000mを目標として、2015年8月には秋田県能代市で実施された能代宇宙イベントに参加した。ここではより高高度に飛行が可能な海に向かっての打上げ場所が確保されていた。海に打ち上げるため、機体は地元漁協の協力を得て漁船で搜索した。機体の水没を避けるためのフロート、海面を着色するためのシーマーカー、広い範囲を搜索するため無線信号を発信するためのビーコン、防水処置を施したビデオカメラやデータロガーを搭載するなど、先年の伊豆大島での打上げから機体製作の難易度は上がっていた。搭載機器の増加により、機体の全長は伊豆大島での2.2mから2.5mに増大した。これら搭載機器の増加・大型化の中でも目標高度を達成するため、軽量化をさらに推し進めた。CFRP製胴体は最も薄いところで0.28mmと薄肉化を進めた。フィンも3Dプリンタ製からCFRPの積層板とすることで強度を確保しつつ厚さを30mmから4mmに大幅に削減することで同時に空気抵抗の大幅減を達成し、解析上、最大速度は音速に迫る結果となった。機体は研究室中心で作成した直径120mmのものを2機と、ロケット部単独で作成した直径150mmの1機の計3機を準備した。直径を小さくすることで空気抵抗を減らし、より高高度を目指す一方で強度設計・製作・ハンドリング上の難易度も格段に高くなるため、ロケット部オリジナル機体としてはより確実に記録を残せるように伊豆大島で実績のある150mmを踏襲した。研究室機体1機とロケット部機体1機の合わせて2機の打ち上げに成功したが、いずれもパラシュートが展開せず海面に激突し、その衝撃で機体は激しく破損した(図2)。エンジン部分は回収できたが、データロガーが回収できず、正確な記録は不明となった。動画データから飛行時間を計測し、コリレーション解析を行ったところ、ロケット部機体のおよび研究室機体の到達高度はそれぞれ2402mおよび3287mと推定された。詳細な結果はfacebook上^①で報告の予定である。3機目は最終日に打ち上げる予定であったが機体の部品(Oリング)取り付け忘れまたは脱落による酸化剤漏れにより打ち上げることが出来ず、翌日の予備日に打上げを試みたが雨天のため高電圧による火花点火不良が発生

し、時間切れとなり断念した(図3)。

打ち上げに成功した2機のパラシュートが展開しなかった原因は現在究明中だが、展開機構駆動回路の電池が打上げ衝撃により脱落した可能性が高いと推測している。伊豆大島機体では電池ボックスでの固定に加え脱落防止のためテープ固定していたものが今回は実施していないことが3機目打上げ前に判明した。また、打上げ準備においてもトラブルが多く、反省点が多い打上げとなった。

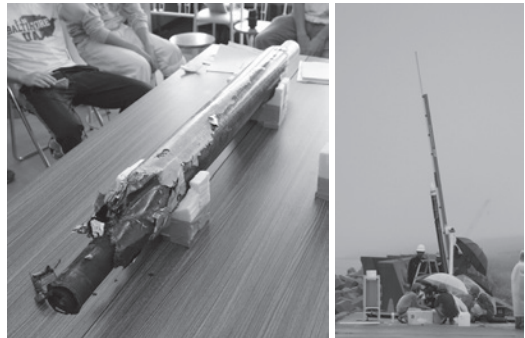


図2 回収された1機目下半分



図3 打上げの様子

4. 結言

能代宇宙イベントでの様々な不具合は、文書に残っていない暗黙知をいかに形式知化するか、という課題を明白にした。また、複雑な打上げ手順を確実に遂行するため文書化を進めても、現地ではそれらでカバーできない不測の事態が多々発生するため、それらを自律的・自発的に対応できる能力を有する学生の育成の必要性も痛感した。さらに、現在は総合工学コースの学生をリーダーとして機械工学科の学生で構成されているが、データロガーやビーコンの高度化など、電気系の知識・技術を持つ学生の育成・確保も課題である。

今後、高度4000mを越えようとするご購入品のエンジンでは限界があることもわかり、今後の高高度化に向けてエンジンの開発に着手している。また、打上げ場所も限られてくるため、その開拓も急務である。一方で、打上げ場所への移動、宿泊費用などは各種補助金の支援を受けているがまだ大部分が学生の負担によるため、各種支援者・支援企業の確保や成果を社会に還元するアウトリーチ活動などにおいて、マネジメントの能力を持つ学生の育成・確保も課題となっている。

参考文献

- (1) 嶋田徹 他, “平成27年度ハイブリッドロケット研究WG成果報告書”, JAXA (2015-2), p.1.
- (2) 神奈川大学宇宙ロケット部:

<https://www.facebook.com/kanagawa.rocket>



神奈川大学に勤務させていただいて

伊藤 勝悦*

Memories in Kanagawa University

Shouetsu Itou*

1. はじめに

1968年3月に秋田大学鉱山学部機械工学科を卒業して、4月から、東北大学工学部機械工学第2学科の弾性及び固体の力学講座(渥美 光 教授研究室)の助手に勤めさせて戴きました。勤めて3年が過ぎた春の頃でしたが、「伊藤君、青森県八戸市に工業大学の設立が準備されているので書類を出して下さい」と渥美先生にご指示戴き、そのようにしました。9月頃でしたが、「文部省教員組織審査で弾性学の助教授として判定されました」との書面を八戸工業大学の設立準備室を通して戴きました。

3年間の教育・研究実績が審査されて、厳しいと言われている文部省教員組織審査で助教授に判定された事は驚きでした。これは、渥美先生の研究に対する厳しい指導のお陰である事は明らかであり、素晴らしい先生に指導して戴けて有難かったです。秋田大学では、「君は万年助手をやるつもりか」と言った教授もいましたが、「君、この仕事をやりたいの。やるんだったら、一流の人に付かなければならない」と言って渥美先生に紹介して戴いた教授の先生には感謝の気持ちでいっぱいです。

八戸工業大学には創設の2年目から14年間お世話になりました。その後、縁があって、神奈川大学工学部機械工学科に勤務させて戴く幸運に恵まれました。

2. 渥美研究室での5年間

渥美研究室の5年間は研究については厳しく指導されました。恐らく、その厳しさの内容については所属した院生・助手だけが知っているのではないかと思います。研究に対しては日本で最も厳しい研究室ではなかったかと思っています。しかし、研究から離れると、恐らく、日本で最も過ごしやすい研究室であったかと思っています。勤務して数ヶ月後の日曜日、塩釜港に

ハゼ釣りに連れて行ってもらいました。誰か段取りをされたかは分かりませんが、釣ったハゼを岸壁で漁師さんに天婦羅にしてもらいました。漁師さんにはお魚もさばいで戴きました。天婦羅を食べて、御刺身を食べて、エンドレスにアルコールを飲んだ時の事が今でも思い出されます。

渥美研究室は応用数学の研究室でした。定期的に教室で呼ばれて論文を渡されて研究テーマを指示されます。その時、「伊藤君、これが出来たら連名で、ASME(アメリカ機械学会)に出そう」と言われます。これは助手だけではなく、院生の1年生も言われます。これを言われると院生や助手は燃えるのです。ASMEにうまく掲載されない場合でも、添えられたコメントを検討して、ASMEに準ずる国際学術雑誌に再投稿すれば掲載されて行きます。ただし、連名で発表するのは、院生であれ、助手であれ、大学の学部卒業後の2年間までです。D1の院生、3年目(あるいは1年目)の助手からは、論文は単著として発表させます。このような研究室は渥美研以外には国内には無いのではないかと思います。有名な国際雑誌に単著で論文を出せると分かると、若手の研究者はさらに燃える事を知っていたのです。あくまでも、院生や助手の将来を考えての事なのです。

「渥美研の人たちは仲が良くって羨ましいです」と他の大学の先生から言われた事があります。渥美研では、先輩には多少の敬語は使いますが、特に配慮する事はありません。その頃の研究仲間の全員が、それぞれ全く異なる研究テーマを持って研究していて競合する事はありません。しかも全員が国際的に良く知られている欧米の一流学術雑誌に、普通に論文を掲載させていく研究室であった事にもよります。当時の研究仲間の全員が大学に就職して、全員が教授になりました。

3. ZAMM への論文掲載

東北大学工学部の機械工学科の図書室には、世界的に有名なドイツの学術雑誌 *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* が創刊号からそろっていました。何気なく、1942年、1943年、1944年の雑誌を見た

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

ら、雑誌の厚さは薄くなっていましたが、少なくないアメリカの大学教員の論文も掲載されていました。この雑誌に論文を投稿したいと思い、渥美先生にお伺いしたところ了解されました。院生の1年生が私のところに来て、「伊藤さん、ZAMMに投稿したそうですね。通ったらどうするの」と言われました。「通る事は無いだろう」と言いましたが、このような有名な雑誌に私の論文が通る事は無いと思っていました。しかし、幸いにも、この論文はストレートに掲載可になりました⁽¹⁾。図1に示すような高速で移動する板(用紙)のパンチによる押しつけ応力を解析した論文でした。

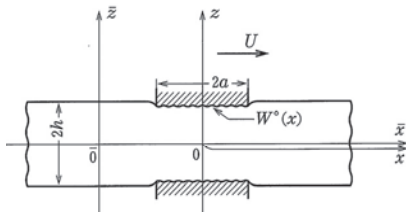


図1 高速移動する板のパンチによる押しつけ応力

この頃から、もしかしたら、筆者もこの世界で生きて行けるかも分からないと思いました。

4. き裂と応力拡大係数

渥美先生が研究室の全員に見せたいと思った時の論文は全員にコピーをとらせて渡していました。そのような論文の中に、Sih and Loeber のき裂の動弾性問題がありました⁽²⁾。図2に示すような割れ傷(きずの隙間は数ミクロン)に調和振動応力波が入射する場合の応力を解析した研究でした。

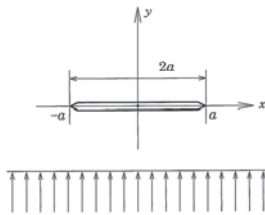


図2 調和振動応力波入射による応力拡大係数

その論文を見たとき、筆者もこのような数式展開の華麗な、そして独創的な論文を書いて見たいと思いました。その後、リーハイ大学の Professor G. C. Sih の研究グループは、多くのき裂の動弾性問題を解いてき裂の動的応力拡大係数を解明しました。

助手になって1年目、2年目は、多くの研究テーマを渥美先生から提示されましたので、その都度、懸命に勉強しました。複素関数論の応用問題、半無限き裂に有用となるウィンナー・ホッフの手法、ラプラス逆変換の手法であるカグニードデフープ法など、どれも魅力的で優美な手法でした。Howland が解析した円孔を有する帯板の応力集中の有名な論文⁽³⁾の数式展開を理解出来る研究者は渥美研究室在籍者だけだと思っています。

板の剛体押しつけ問題の解析論文が ZAMM に載ったので、この手法も守備範囲内にありました。図1に示すように、板を押しつけた部分の応力 τ_{zz}^0 を次式のように級数展開して積分方程式を解くのです。

$$\tau_{zz}^0 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n T_n(x/a) / \sqrt{a^2 - x^2} \quad (1)$$

ここで、 $2a$ は接触長さで、 a_n は未定係数、 $T_n(x)$ はチェビシェフ級数です。未定係数 a_n は最終的にシュミット法で決定されます。

あるとき、図2に示すき裂面の変位をヤコブ級数 $P_n^{(1/2, 1/2)}(x)$ で次式のように

$$v^0 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n P_{2n-2}^{(1/2, 1/2)}(x/a) \quad (2)$$

級数展開すれば、き裂の問題が解けるのではないかと着想しました。ここで、 $2a$ はき裂長さです。この手法を文献⁽²⁾の Sih and Loeber が解いた問題と同じ問題に適用して解いたら、両者の数値計算結果が完全に一致したのです。Sih and Loeber の解法は数式展開が長いのですが、変位の級数展開とシュミット法を結合して解く方法は比較的取り扱いが容易になります。このため、より複雑なき裂の問題も比較的解きやすくなります。

長いき裂に不均質な動的荷重が働く場合の解析を行って ASME に投稿したところ掲載可となってしまいました⁽⁴⁾。ASME には、日本の大学の機械工学科の教員の論文は1年間にゼロ編、あるいは数年間に1編程度しか掲載されません。この雑誌に筆者の単著論文が掲載されてしまったのです。日本の大学の機械工学科のほとんどの教授は ASME に1編の論文さえも出せずに定年を迎えるのです。

5. リーハイ大学とき裂の解析

き裂(隙間が数ミクロンの割れ傷)の先端では応力が無限大になるので、材料力学的に考えれば、微小なき裂

であっても材料は直ぐに壊れてしまいます。しかし、実際には壊れません。論文執筆とは順序が逆になってしまいましたが、この辺りの考え方を理解する必要があります。結局のところ、き裂を進展させるためにはエネルギー g_c を必要とします。また、き裂が進展すれば、エネルギー g_e が材料から放出されます。(i) 出て来るエネルギーが消費されるエネルギーよりも小さい $g_e < g_c$ の時は、材料は破壊しないで、(ii) 出て来るエネルギーが消費されるエネルギーよりも大きい $g_e > g_c$ の場合はき裂が一気に進んで材料は破壊してしまいます。

同じ事ですが、応力拡大係数 K_I が材料に固有な値である破壊靱性値 K_{Ic} を超えた時に、すなわち、次式

$$K_I < K_{Ic} \quad (3)$$

を満たしたとき、材料は前触れも無く瞬時に壊れるのです。図3に溶接を多用して建造されたリバパーティ船の破断の写真を示します(出典：<http://school.mech.uwa.edu.au>)。静かな港の埠頭に係留されていた船が瞬時に破断したのです。溶接部分に発生した隙間が数ミクロンのき裂の長さが徐々に長くなっても、誰も気が付きません。ある長さになった時に、式(3)を満足してしまっ一気に破断したのです。

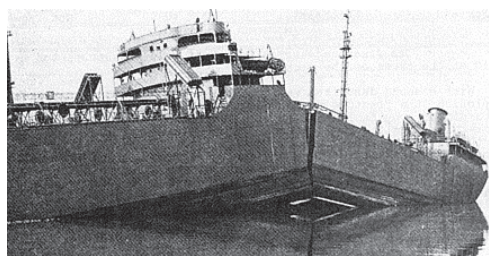


図3 リバパーティ船の埠頭での破断

ベスレヘム (Bethlehem) はニューヨークから西へ約125kmに位置するペンシルベニア州東部の都市です。ここにリーハイ大学 (Lehigh University) があります。この大学の機械工学科でき裂を有する材料の破断に関する多くの研究が行われたのです。多くの権威者がいますが、現在の名誉工学部長の Professor Fazil Erdogan についてだけ紹介します。Erdogan 先生は、終戦後まもなくトルコのイスタンブール工科大学修士課程を修了して、リーハイ大学の博士課程に進学しています。Professor G. C. Sih と一緒に、実用上極めて役に立つ実験も行っていますが、多くはき裂の応力を応用数学的に解析する研究を

行って来ました。リーハイ大学に定年があるのか無いか分かりませんが、最後まで応力拡大係数の研究を続けて一流国際学術雑誌に論文を掲載していました。この点に関しては、恩師の渥美先生と同じでした。切れ目なく、ご定年までご自身で研究されていたお二人の先生の姿は筆者にとっては無言の教えになりました。

6. 神奈川大学と TAT

TAT (Turn Around Time) とは、カードで作成したプログラムを窓口に出してから、計算結果を受け取るまでの時間です。八戸工業大学には電子計算機は無く、カードを郵送で東京大学の大型計算機センターに送って計算結果とカードを郵送で返送してもらっていました。平均の TAT は 10 日程度でした。この不便さを乗り越えるためには、解析を丁寧にやって、プログラムを丁寧に組んで何度も見直す事でした。どんなに努力しても、プログラムのエラーだけを除くためには 5 回程度の計算は必要になります。プログラムにエラーが無くなっても、計算結果が思わしく無い時は、解析のチェックを繰り返します。

何度も解析とプログラムをチェックしても計算結果が出ないのが筆者の行っている理論解析の特徴であって、この点が辛いのです。ここで諦めても良いのですが、諦めたからと言って、次の研究テーマでも同じことが起こる可能性が大となりますので、この判断が難しいのです。結局、納得出来る計算結果が出るまでは、

解析チェック → プログラムチェック → 数値計算

を何度も何度も繰り返す事になります。応力 (stress, ストレス) を解析している筆者に過大で過酷なストレスがかかるのです。大型計算機センターに歩いて行ける研究環境を持っている研究者には負けてしまいます。

神奈川大学には大型計算機センターがありました。ただ、直ぐにオーバーフローするのです。学科に隔年で配分される特別予算を振り向けて欲しいとお願いしましたが、うまく行きませんでした。当時の教授の田島 守先生に相談したところ、研究費の援助を快諾して戴き、ワークステーションを導入する事が出来ました。このワークステーションに入っている Fortran のソフトは4倍長の複素計算が出来て、しかも 10 の (-5000) 乗から 10 の (+5000) 乗まで計算出来る能力を持っていました。この能力を生かせる研究者はそんなに多くはいないのですが、筆者には頼もしいソフトでした。

勤務させて戴いて分かりましたが、神奈川大学には他大学には無い素晴らしい点が数多くあります。1点だけ

追加で述べれば、事務職員が優しいのです。

7. 神奈川大学での研究と教育

慶応大学工学部機械工学科専任講師であった牟岐鹿楼先生は California Institute of Technology の Eli Sternberg 教授の研究室に移られて、その後、UCLA の教授に就任されました。何故、Cal Tech に移られたのかは分かりませんが、恐らく Sternberg 教授が牟岐先生の非凡なる解析能力を知っていたからではないかと思っています。牟岐先生は岩手県水沢市（現在の奥州市）の出身ですが、時々、ロサンゼルスから水沢に帰った時は、帰りに渥美先生を訪ねてきました。筆者とは身分違いでしたので紹介してはもらえませんでした。女性の技術員はお茶をお持ちしますので何度かお会いしています。渥美先生も Professor Erdogan も牟岐先生も応力解析が研究の中心でした。ある日、この点が牟岐先生との話題になった事があったようです。牟岐先生も「実験と理論解析の両方の研究を行う事は無理だと思います」と話しておられたと渥美先生からお聞きした事があります。凡人の伊藤には、元から両方は出来なく、理論解析だけになりました。

日本の国立大学の全ての工学部は Thomson Reuters の Web of Science へのアクセス権を持っています。西久保忠臣先生が工学部長のとき、神奈川大学でもアクセス権を購入しています。このサイトに入れるようになってから、キーワードを入力する事によって最新の研究動向を知る事が出来るようになりました。き裂関係の論文を探し出して、自分の能力に重なる研究テーマを見出して研究を継続する事が出来るようになりました。材料力学の分野では ASME に準ずる雑誌である International Journal of Solids and Structures には、論文を何回も投稿して、そして厳しいコメントを添えられて何回も掲載否で返されましたが、最近では掲載がかなり楽になりました。ASME Journal of Applied Mechanics は impact factor は約 1.0 程度ですが材料力学の分野では最高権威の雑誌ですが、雑誌の主題の流れが少し変わって来ているように思われます。それでも、時々、応力拡大係数の解析研究の論文も出ますので、この雑誌に論文を掲載出来なくなってきたのは筆者の頑張りが足りないのが原因と反省しています。

機械工学科では、主として材料力学の授業を担当して来ました。毎回の授業で必ず新しい数式が出てきますので、学生も大変だと思っていますが、学生は負けないで真面目に勉強してくれました。卒業研究でも、どちらかと言えば理論解析の研究テーマで研究を行ってまいりましたが、毎日、全員が研究室に出て来て熱心に研究を行ってくれました。研究テーマが理論解析のため難しく、

修士課程に進学してくれる学生は多くはいませんでした。それでも進学してくれる学生がいました。難しい研究テーマであるにもかかわらず、真面目に取り組んでくれて数値計算まで仕上げてくださいました。名前は伏せますが、連名の論文を International Journal of Solids and Structures に投稿したら通ってしまった事もありました。本学の学部生と院生の勉学と研究に対する真摯な頑張りには心から敬意を表したいと思っています。素晴らしい学部生と院生の皆様と一緒に過ごせた事も幸せでした。

8. ウルムチとカシュガルへの旅行

ウルムチの新疆工学院（中国では単科大学を学院と言うのだと思っています）の講師の先生が伊藤研究室に研究生として来られました。この少し後に、学長室から電話があって、「ウルムチに出張しませんか」と聞かれました。筆者の性格としては、普通は断るのですが、何故かその時は、「費用はいくらかかるのでしょうか」と聞いてしまいました。「費用は大学の負担です」と言われたので、成り行きで行くことになってしまいました。公務出張だったとは思いますが、ウルムチ、トルファン、カシュガルの3都市を訪問する事が出来ました。

9. 終わりに

約30年前の4月1日が辞令交付の日でした。4月なのに、どことなく暖かい風が頬を撫でていた日でした。「多分、神奈川大学に勤めさせて戴いても、力量不足な筆者は勤めきれないだろうな」と思っていました。この不安は見事に的中してしまいました。最初から最後まで、教職員の皆様には一方ならぬお世話になりました。心から御礼申し上げます。最後に、皆様方のご健勝と工学部の発展、ひいては大学の発展を心より祈念致しています。

文献

- (1) S. Itou, "Indentations of an elastic Cosserat layer by moving punches", *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, **52** (1972-4), 93-99.
- (2) G. C. Sih and J. F. Loeber, "Wave propagation in an elastic solid with a line of discontinuity or finite crack", *Quarterly of Applied Mathematics*, **27** (1969), 193-213.
- (3) R. C. J. Howland, "On the stress in the neighborhood of a circular hole in a strip under tension", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **229** (1930), 48-86.
- (4) S. Itou, "Three-dimensional wave propagation in a cracked elastic solid", *ASME Journal of Applied Mechanics*, **45** (1978-12), 807-811.



神奈川大学 41 年間における光波・電磁波回路の研究

穴田 哲夫*

Study on microwave and light-wave planar circuits for forty-one years at Kanagawa university

Tetsuo ANADA*

1. はじめに

私は、あと数か月余りで退職を迎えます。41 年間の大学教員生活で考えていたことの一部を書かせていただきます。1974 年4 月に工学部電気工学科助手、専任講師、助教授、教授として41 年勤務したことになります。1995 年にはイギリスのシェフィールド大学とノッティンガム大学に1 年間の在外研究をさせていただきました。そのおかげで研究の幅を広げることができ、多くのことを経験してきました。41 年間に楽しいこともたくさんありましたが、学科名称の変更や昨年の工学部内において学科解体危機の何とも言えない悲しいこともいろいろと経験しました。しかし、総合的に言えば、研究生活は大変面白かったと言えます。平成27年3月31日で神奈川大学の教授を退任するにあたり、なぜ私が光波・電磁波工学の道を選んだのか、光波・電磁波回路の研究者としてどのような研究をしてきたかについてまとめさせていただきました。何かの参考になれば幸いです。

2. 研究者としての原点・出発点

今から 40 年以上前のことであるが鮮明に覚えている。大学 4 年次の卒業研究は、これまで聞いたこともない、当然習ったこともないマイクロ波、プラズマというキーワードに惹かれて許 瑞邦研究室を希望し、運よく友達と配属になった許研究室から私の研究者としての原点が始まったように思う。就職先も先端的の仕事ができそうな T 社に決まり、喜びと不安の中で入社式を迎えたことを思い出す。入社式には 700 名の新入社員のうち、修士が 400 名、残りの 300 名が学部卒と高専卒である。半導体

工場の高周波技術部に配属になり、仕事中であったが 1969 年 7 月 20 日、アポロ月面着陸の映像をカラー TV の固体化の耐久試験用 TV を第 1, 2 応用技術部の皆で見ていた。月面から映像が送られて来るのを見て、益々、マイクロ波通信の重要性を認識し、この分野の仕事を続けたいと強く思うようになっていった。それから半年後、マイクロ波関連の新組織が誕生するというわさが流れ、自分も先端的仕事を希望していた。T 社は博士、修士をもった技術者が多く、自分ももう一度大学に戻ろうと決心するまで時間がかからなかった。許瑞邦先生の研究室でマイクロ波平面回路の研究をスタートした。この時代は、TV の固体化、衛星通信も真空管（進行波管）から固体化に移行する時で、これまでの集中定数回路や導波管といった回路から固体に適した低インピーダンスの平面回路がうぶ声を上げたところであり、後のスーパーバイザーとなる東京大学大越先生が平面回路の概念を提案し、許先生が 1 次元の電信方程式を 2 次元の平面回路方程式に発展させ、また東京大学の大型電子計算機の共同利用が開始し、マイクロ波平面回路の研究が本格化した時代である。許先生は、研究者のみならず、熱心な教育者でもあり、土曜日には、午前中は、その当時、パイブルといわれた R.E. Colin の Guided Wave を講読し、午後には IEEE-MTT の雑誌（マイクロ波の論文）を院生で順番に読み、院生のつたない英訳と勉強会に付き合って下さった。これは私が助手から教員になるまで続けていただいたおかげで英語には多少の自信をもつことができた。また東大・大越先生も数か月に 1 回、色々な大学の先生と平面回路の勉強会を開催し、この分野の発展に大きな貢献と足跡を残された。これがきっかけで、研究成果をまとめ、博士論文を書いて提出したところ、博士論文を英語で書きなさいと言われて、時間的に困難という、そ

*教授 電気電子情報工学科
Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information
Engineering

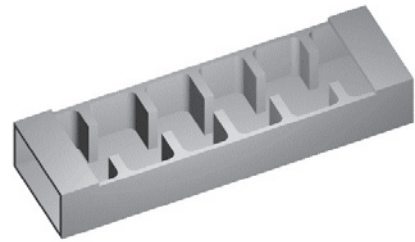
れでは研究成果をIEEEの論文誌に投稿し、さらにIEEEのコンファレンスでOralに採録されたら読みましょうということになった。研究成果には自分なりの自信を持っていたので、これなら数か月で達成すると安易に考えていた。先ず、IEEE-IMS国際会議に投稿し、採択率40%の枠を乗り越えて採録され、Oral発表し、初めての本格的なバンケットにも参加し、自分は将来留学したいと思っていたので、有名な先生の隣に座り、留学したいことを伝えたが軽い返事だった。そこで、自分のスーパーバイザーの名前を出すと彼は友達である。いつでも受けいれると言われ、改めてスーパーバイザーの偉大さを再認識した。自分もこうなりたいと心に誓ったものである。とにかく、これで気を良くし、論文誌も簡単に採録されるであろうと考えていた。早速、日本に戻り、論文を書いて速達で論文を送付した。ところが結果は条件付き採録で、すべての査読者の質問に答えることが条件であると編集者から手紙を受け取った。自信をもったの投稿だったのでさすがにショックを受けた。最初は、査読者は私の論文の内容をよく理解していないと不満を持ったのも事実である。しかし、今から思うとこれがあつたからこそ、論文を書く時のコツを覚えたような気がする。すこし脱線するが、採録される論文とはどんなことか考えてみよう。

- (1) 査読者が共感するように書くこと。参考文献も大事である。参考文献の著者に査読依頼が行われる可能性がある。実際、参考文献の不足を指摘された。
- (2) こんなに苦労したという姿は見せても意味がなく、主張すべき内容に焦点を当てる書き方が大事である。
- (3) 論文のタイトルは興味をそそるように、次にアブストラクト、結びの書き方を工夫すること。
- (4) 図面などはきれいに書くこと。
- (5) 英語が母国語でない我々は短い文で明瞭に表現すること(日本人の英語論文はわかりやすいと評価されている)。

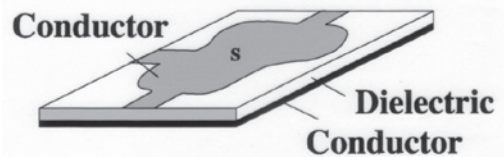
さて、41年間の研究生活をふりかえってみる。

3. マイクロ波平面回路解析と電磁界測定に関する研究

学部で習った電気回路・電子回路は集中定数回路だけである。宇田新太郎教授の無線工学の講義の中で、八木・宇田アンテナ、導波管回路、マクスウェルの方程式について少し習った程度である。この分野の研究の出発点となったマイクロ波平面回路の解析は何といても「マクスウェルの方程式」という連立ベクトル偏微分方程式に



(a) Example of Waveguide-type Iris Coupled Filter



(b) Example of microstrip-type planar circuit

図1 導波管回路とマイクロ波平面回路の例

支配される境界条件付の電磁気学の世界です。世界中の大学の先生達が「電磁気学を学生に理解させるには大変である」とため息をつくほどです。また私自身も完全に理解しているとは言いがたいほど奥の深い方程式を解かなければならない。この時期は、まだ図1(a)に示すような金属による導波管回路で種々の特性を実現していた時代である。それが進行波管からガンやインパットダイオードによる固体化と共に図1(b)のようなマイクロ波平面回路による軽量化・集積化が始まったばかりである。まず、イメージを膨らませるために、回路内の電磁界分布を知る必要がある。一般論はグリーン関数の固有関数展開で表現できるので、無限個の固有関数がわかれば、解が得られるはずである。しかし、任意の形状の固有関数を得る手法がない。ちょうどこのころから、東大に大型計算機が設置され、共同利用が開始していたので、講義の無い時間は、計算機センターでパンチカードで作成したプログラムを走らせ、計算結果を*記号でグラフ化して表示していた。その後、神奈川大学でもミニコンNOVAを購入し、プログラム作成と固有値問題を解く問題に没頭し、平面回路の周波数特性を求められるようになった。さらに神奈川大学に大型計算機センターが開設され、計算結果をグラフで表示できるようになり、雲形定規でグラフを書かなくてよくなった。一方、平面回路内の電磁界分布を知る(測定する)方法としてコレステック液晶を用いて、電界分布を熱に変換し、色分布として観測する実験を並行して行っていたが、分解能に問題があり、これを改善するために、図2に示す同軸型電界プローブ、微小ループ磁界プローブを開発し、パソコンで

ステップモータを制御し、平面回路上を掃引することでどんな複雑な形状でも電磁界を測定できるようになった。図 2 (c)に直角コーナーからなる共振回路を作製し、FDTD 法によるシミュレーション、および測定例を示すように、直角コーナーから電磁界が放射することが知られていたが、実際の観測結果は初めての報告であった。電磁環境 (EMC) の国際会議でも高い評価を得るとともにこれは画期的な成果であった。2 人の女子卒業生が何回も繰り返し測定してくれた結果であり、心から感謝したい。以後、シミュレーション結果を実証するために、電磁界測定は欠かせない装置となった。その後、EMC の関心が高まり、高周波プリント回路からの電磁界の不要放射が話題となり、本装置は実際の回路からの放射などを測定する装置として発展し、大手の電機メーカーでも模倣した装置が市販されるようになるが、本装置は 10 年間ほど活躍したが、昨今のコンピュータシミュレーション時代になり、電磁界分布がコンピュータ上で観測可能となり、その役割を終えたが、研究に行き詰ったときなど、測定データを論文として投稿、また国際会議や学会で発表することができた。助手から専任講師に昇格したとき、光の研究が盛んになり、SEM を改良した微細加工装置を 4000 千万円で購入し、光回路の作製の研究を始め、多層薄膜による光導波路の提案など順調に移行することができた。しかし、微細加工装置には位置合わせ機能がないため、数十回に 1 回しか光回路を作ることができず、私の最初の大学院生には苦勞をかけたが、よく耐えて実験を行ってもらった。教務技術職員の大出氏と SEM の分解掃除と苦勞もあったが、最初の修士の学生 T 君には感謝している。2005 年には、電子情報フロンティア学科の 11 名の教員とともに文科省のハイテクリサーチに応募し、5 年間で 5 億円の支援を受けて、念願のネットワーク・アナライザを 2500 万円で購入し、回路解析、周波数特性の測定が容易になった。またポスドクの研究者が来日し、その後、特別助教として共同研究者を得て、一段と研究を加速することができた。また昭和 50 年代には数十 M バイトのメモリしか使えない時代であったが、最近のコンピュータの目覚ましい進展によりマクスウェルの方程式を研究室内で数値的に解く事ができるようになりました。マクスウェルの方程式が立てられてから 150 年以上過ぎててもいまだに新しい結果が得られるのは、如何にこの方程式が本質的真理を深く表現しているという意味で驚くばかりです。

4. 光回路の FD-BPM 法による研究

ヨーロッパ・マイクロ波国際会議 (EuMC) に参加し

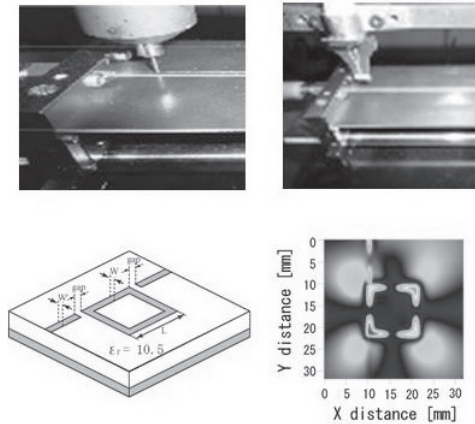


図 2 電磁界測定と直角コーナーをもつリング共振器の測定例 (上図左：同軸型電界プローブ、上図右：ループ型磁界プローブ)

た時、これからは計算機によるシミュレーション時代が来ることを実感し、その当時ノッティンガム大学の P.B. Johons 教授が TLM 法を開発し、市販ソフトウェアとして発売していた。この手法なら大規模光回路の解析が可能であると思っ、在外研究を希望し、イギリスへの在外研究が決まったときに病気で亡くなられたと連絡を受け、急遽、光回路の本や論文を多数発表していたシェフィールド大学の P.C. kendall 教授を頼ってイギリスに出発した。NAIO の共通の研究課題である光の斜め伝搬の解析の競争テーマを与えられた。お前もチャレンジするように言われ、早速取り掛かった。光回路解析には FFT-BPM 法が主流であったが、FDTD 法に興味を持っていたので、FD-BPM 法に斜め座標を導入することで、斜め光導波路型回路の解析に没頭し、数週間でプログラムを作成、計算に成功した。先方の教授から Great と称賛されたが、領域の端に到達した光波が反射するのを防ぐ境界条件を開発する必要があった。吸収境界条件では十分な機能を果たすことができなかった。それでも移動座標と斜交座標を組み合わせ、曲がり導波路、60 度までの斜め光導波路を解析することができ、当時、世界のトップデータとなったことは本当にうれしかった。その FD-BPM による計算例を図 3 に示す。実際に光導波型 MMI デバイスに応用し、高次 Pade 近似を用いて計算精度を改良し、国際会議で報告した。当初、2 次元モデルだけであったが、ADI 法を導入し、3 次元モデルを計算できるように発展したが、コンピュータの目覚ましい進展を受けて、FDTD 法が光デバイスの解析に適用できるようになり、10 年間続いた FD-BPM 法の役目を終えた。

5. 光フォトニック結晶による電磁波デバイスの開発

光導波型デバイスは、多くの研究者によって集中的に解析され、微細加工装置をそなえているところは限られた大学と企業の研究所のみである。神奈川大学ではPCV薄膜作製装置で多層薄膜導波路を作製し、ある特定の偏波のみを伝搬する導波路を作製し、学会で注目を浴びたが、その当時、レーザーの出力はあまり大きくなかったので、特定の偏波のみを導波することは電力の半分を捨てることになる理由で、企業との共同研究に発展しなかったが、イギリスの雑誌、国際会議でのOral発表で研究を終えたが、この動作原理は、その当時は気が付かなかったが、1次元のフォトニック結晶そのものであった。

1987年、Yablonovitch等により、周期構造の構造パラメタ、誘電率を適切に選ぶことによって、ある周波数帯域ではどの方向にも電磁波（光）が伝搬しない性質を持つフォトニックバンドギャップの概念が提案された。光の研究は、フォトニック結晶に世界中が注目していた。我々も、MMIデバイス（多重モードの干渉を利用した電力分配回路）をFD-BPM法で解析を進めた。その後、大学院生がフォトニックバンドギャップの計算を行ってくれた。簡単なモデルはMITの研究者グループがすでに解析を行っていたが、通信システムに必要なフィルタ回路などの設計に新たな研究の機会を得た。図4に示すようにマイクロ波フィルタの2重縮退モードによる共振器をフォトニック結晶点欠陥共振器に応用することにより、コンパクトなフィルタを実現することができた。さらにフィルタの高減衰傾度を実現するために、入力と出力導波路との結合カップリングを利用して帯域外に減衰極を作り、スカート特性を改善し、これまで実現できなかった特性を可能にした研究論文は大きな反響を得ている。

6. 最後に

これまでの41年間の研究生活をふりかえってみると、光波・電磁波回路の研究を進展させながらも、およそ10年ごとに研究の内容が少しずつ変化しており、時代の流れとともに研究課題もシフトしている。最初はマイクロ波帯、次に光周波数帯、ここ5年間は、電波と光の境界に位置するテラヘルツ周波数にたどりつき、2次元平面回路から3次元立体回路へ一歩踏み出したところではあるが、博士論文のときに将来の研究目標として掲げたテラヘルツ帯のところに到達できたことは本当に感慨深いものがあり、結局、無我夢中で努力していると時代が助けてくれたような気がする。しかし、許教授から与えられた「平面回路の固有モードによる回路合成」という大命題はまだ完全には実現できていない。また学部生や院

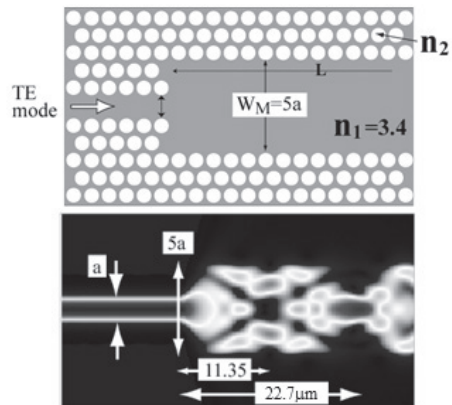


図3 多重干渉導波路型電力分配回路のFD-BPMによるシミュレーションの例

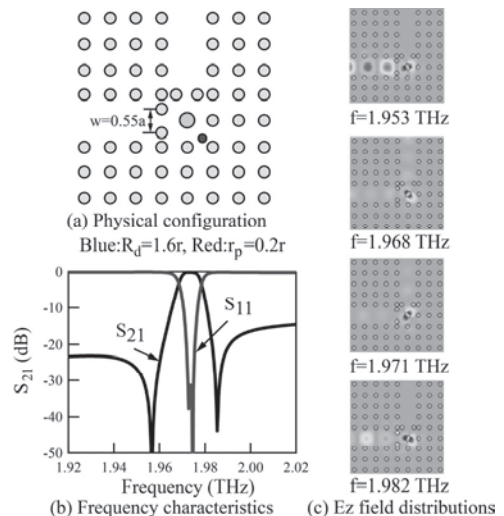


図4 フォトニック結晶による減衰極を有する高性能フィルタリング特性

生とともに過ごした41年間は長いようであつという間の時間であつた。神奈川大学の電気工学科、電気電子情報学科、電子情報フロンティア学科、そして、また電気電子情報工学科と数回の名称変更を経験しながら、卒論や修士論文を完成させて巣立っていった学生の顔を昨日のように思い出されるのは、年をとったからであろうか。是非、神奈川大学の工学部の発展、電気電子情報工学科はもっと発展することを願って筆を置きたい。

最後に、41年間に渡って、大きな病気もせず、恩師、学科の仲間、そして多くの卒論生、大学院生に支えられて研究生活を送ることができたことに感謝いたします。神奈川大学の潤沢な研究費にも感謝いたします。



ねじ雑感

細川 修二*

Thoughts of Screw Thread

Shuji HOSOKAWA*

1. はじめに

「宮面ヶ丘に花咲きて、色は匂えど散りにけり…」私の学生時代に神奈川県宮面寮の寮生がよく歌っていた逍遙歌の1節です。当時、8号館5階から眺めた宮面ヶ丘に建つ宮面寮と遠くに見える富士山が、夕日で茜色に染まり、とても美しく印象的でした。

半世紀を経た今でも、23号館7階の居室からはときに夕日を見ることができます。もっとも、宮面寮は大学紛争後しばらくして20号館に建て替えられ、富士山も周りに高い建物ができて僅かに見えるだけです。

ねじは古くから身近にあり、現在でも新しい製造技術によってつくられ、さまざまな分野で多く用いられています。私がおねじに関わって30年以上が過ぎ、これまでの経験や折にふれて感じた事を少し記述させていただき、その話の一部でも皆様のお役に立てれば幸いです。

2. 花のつる

私が最初に関わったねじの実験は恩師宮田忠治先生のボルトの高速衝撃引張、そして次がゆるみの問題です。当時からねじのゆるみに起因する事故が多く発生し、重要な問題となっていました。ねじのゆるみ機構の一つとして、ねじは引っ張ると振じれる。このため引張荷重が繰返し作用すると、ナットは振じれに伴って次第に回転しゆるむというものです。これを実証するために、ねじ棒の引張りに伴う振じれ角の測定を試みます。しかし、ねじ棒は両端の回転を拘束して引っ張ると振じれず、回転を自由にするとうまく引っ張れない。そこで恩師の津村利光先生のアイデアで、1本の棒の上部に右ねじ、下

部に左ねじを加工したねじ棒試験片を用い、両端の回転を拘束して引っ張ると中央部分がうまく振じれる。いつもお世話になっている熊倉進先生にその振じれ角の測定を手伝っていただき、1本のボルトに右ねじと左ねじを持つゆるみ止め部品が出来上がりました。

花のつるを観察しますと右に巻いたり左に巻いているものを見かけます。調べてみると胡瓜のつるが垣根に巻きつくとき巻き方を替えている。これは風にふかれてつるが伸びる時、振じれを相殺するためだろうと書いた書物（浅川勇吉著、実験機械工学、現代工学社発行、1966年）を見つけました。著者の鋭い観察力や、振じれ角の測定法と同じ考え方に驚き、また神秘的とさえ思える植物の素晴らしさに感動し、自然界の現象に学ぶことの大切さを教わりました。

ほぼ同じ時期に、ねじ締結に関する著名な G. H ユンカー氏の「ねじの弾性限界締付け」についての特別講演を拝聴する機会を得ました。これまでの常識では、ねじは必ず弾性域内で使用し、弾性限界では危険とされていました。しかし、ねじを弾性限界まで締付けることで締付け力は安定し、ドイツではこの研究が進められていました。今では日本の自動車メーカーでもこの締付け方法が多く用いられていて、従来の常識にとらわれない物の考え方の大事さも学びました。

3. 日本最古のねじ探し

織田信長が当時の戦いの方法を一変させてしまった火縄銃は、1543年（天文12年）種子島南端に漂着した難破船上のボルトガル人によって初めてわが国に紹介されたことは良く知られています。「日本におけるねじの始まり」（日本ねじ工業協会発行、1982年）等の書物によると、その銃身最終端部の腔孔を閉塞する方法としてねじの機構が発見され、これがわが国におけるねじの始ま

*准教授 経営工学科
Associate Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

りであるということになっております。

この話を知った時は、日本でどうしてねじが生まれなかったのだろうと不思議に思い、古いねじを探すために積極的に博物館へと出かけ、動く機構の時計やからくり人形に興味を持ち始めました。数年が経過した後「日本ねじ文化史」(村松貞次郎著、日本機械学会誌 83 巻 735 号 1980 年)に、ねじの歴史が詳細に記されていることがわかりました。その論説の中で、ねじは江戸時代製作の櫓時計にペルを留める箇所のみられ、またからくり師細川半蔵頼直著の「機巧図彙」(寛政 8 年、1796 刊)の中にも上記の櫓時計とそっくりな図と解説がある程度で、日本の技術史は古代から明治初年のころまで無ねじ文化史であったように思われる、と述べられています。

2002 年の冬、山口県岩国市の錦川に架かる錦帯橋(1673 年に創建、2 度の流失、当時の物は 1953 年完成)の半世紀ぶりの架け替え作業を見学する機会を得ました。橋を下から眺めると見事なまでの木組みで、その匠の技に驚かされ、ねじどころか釘も使っていない美しい橋です。この橋を見ていると、日本にねじの発想が生まれなかった理由の一つに、日本的な木の文化と手先の器用さが、結合には木を組み合わせ締付けにくさびを用いることで、回転を要するねじを必要としなかったのかも知れない、と思うようになりました。それでも夢を求め、今も時々古い絵巻物や版画のある美術館や博物館に足を運んでいます。日本のどこかで、古いねじを使っていると思われる物の所在をご存知の方は、ぜひ教えていただきたいと思っています。

4. 情報について

信長の話の続きとして、1560 年、織田信長が桶狭間で今川義元をうちとったことはよく知られています。この戦いには、梁田(やなだ)政綱から義元が桶狭間で休憩中の情報を元に、信長の奇襲が成功し、毛利新助が今川義元的首級をあげています。信長はこの情報を提供した梁田政綱には沓掛村 3000 貫の地を賜ったが、義元的首級をあげた毛利新助の褒美はそれより少なかったとのことです。この時、すでに信長が情報のいかに尊いかを認識していたことに当時感心しました。

現在はインターネットが普及し、多くの情報を簡単に得ることができます。「ねじ」をインターネットで調べてみますと、多くの事柄があらわれましたが、これらの内容をすべてみることはほとんど不可能です。

しかし、最近では情報の過剰化が進み、情報の消費率は低く、インターネット、携帯電話、テレビ、パソコンなどによる情報供給の伸びに消費が追いつかず、実際に

利用される情報はほんの一部で、大部分はただ消え去っていると思われます。今後も益々技術的進歩と共に情報は多くなっていくと考えられる。しかしながら、各自には時間、あるいは吸収能力といった制約があるため、必要な情報までも失ってしまうことが危惧されます。

日本工業規格(JIS)は、2011 年現在で約 10200 件の規格の適正な内容を維持するため、原則として 5 年以内に見直しが行われ、改正し、新たなニーズに即した JIS が制定されています。昨年はこのねじに関する部分の JIS 改正原案作成委員会に出席しましたが、情報が多すぎて改正に時間を費やしました。そこで、今後は多くの情報の中から信頼できるねじに関する技術情報を、うまく利用する方法や設計などの要求に応じることのできるシステムを、情報の専門家の方からお教えいただければ良いと願っている次第です。

5. 近い将来

現在はねじ締結部のメンテナンス技術の重要性が指摘され、締付け力の診断方法の確立が必要とされています。ねじに関する人々なら誰もが、ゆるみや締付け力が簡単にわかるねじ部品があればと思いつけている。すでに測量では IC チップをねじの頭に埋め込んだ測量用ハイテクねじが開発されているように、1 本 1 本にチップの埋め込まれたねじで締付け力を管理する日も近いと思われます。

最近では企業の方々との交流もあり、軽量化に貢献する新しい材料のマグネシウム合金ねじや金属ガラスねじの開発にもかかわっています。これらの研究成果による機能、性能、品質の向上はもちろん、量販店などでは美しい色のねじを見かけるようになり、近い将来、ねじは画一や規格と相反する、個性、魅力、感性などの領域とも無縁でなくなってくるように思われます。

6. おわりに

長い間機械工学科に在籍し、その間に多くの学科の皆様方にお世話になり、さらに経営工学科に移った後も、多くの教職員の方々にお世話になり、本当に有難うございました。古くて新しい、そして 1 回転してもわずかに 1 山だけ進むねじは、古風でスローライフな私の生き方に似たところがあります。今後は、このねじと関わることも少なくなりそうです。

「山坂越えて返り見る夕日かな」

技術随想のつもりがお願いばかりで、取り止めのないお話と駄文をお読みいただく神奈川大学工学部の皆様には感謝申し上げます。



研究雑感 — 学生時代と最近3点

松井 正之*

A Researcher's Essays: Student age vs. Recent-3

Masayuki Matsui*

1. 緒言*

神奈川県でいただいた貴重な教育と研究の機会に感謝いたします。この5年間は、次世代の経営工学は、3M&I系の術(art)であると考えてきましたが、以下は学生時代の話と最近の拙著3点です。ここで、3M&I系とは、資源のヒト(労働)、モノ(生産過程)、カネ(資本)と、方法の情報(知恵)であり、この個体の2重性、ムダ対効率基準、個体のロボット化とバランスなどが問題である。

A. 私の大学での学び「経営工学における人間」

大学における学問は、人間をどう観るかによって変わってくる。学びの学問は、その時代の環境を前提(考慮)して受け入れる必要があり、固定されているものではない。環境が変化し続ける中で、人間(自分)を模索していくことが求められている。

以下の駄文は、私の大学学部時代の学びでの模索例である。

(1) 人間 — この未知なるもの

大学に入学して間もなく、ある当時の教養部の先生から、A. Carrel 著「人間—この未知なるもの」という文庫本を読んでも薦められた。早速買ってきて読んだのだが、読んでつれて人間というものがわからなくなってきたのを憶えている。けれども、何か非常に引きつけられるものがあり、続いて“サイバネティクス(Cybernetics)”という新奇な名前を教えられたのがもとで、その後、3年生になってこの学問こりつかれてしまった。

ところが、この勉強まよひまよるほど解らなくなる感じで、同級生や大学祭の経工展(第1回)で他人に説明するのも冷汗の連続であり、特に、最初の真実ほとんど自分でやる外には教えてもらえないし、第一、だれに聞いたらよいかさえ解らなかつた。そうこうしている間に、共立出版から「情報科学」シリーズなるものが出版されるようになって、ほぼ全貌がつかめるよ

うになった。サイバネティクスは、従来の分析的アプローチにかわるシステムズ・アプローチともいべき新しい科学的方法論を提供したのみではなく、技術論にも影響を与え、頭脳ロボットを人類もたらそうとしており、今日の情報科学の母体となった。戦時中にアメリカで芽生え、N. Wienerによって“サイバネティクス”と提唱されたこの学問は、実は、その背景において、機械論的人間観から有機体的人間観への転換を意味しており、そういう人間に対する視点という一つの前提条件における変化の上に構築されてきたものである。このことは、人間に対する観点の転換が学問に大きな変化を与えたものとして、大事なことだと思う。

(2) 経営工学における人間 — ある視点

経営工学における人間は、何よりも、経営を構成する重要な“資源”としてみなされる。この視点を前提として、経営工学における技術は開発されているのだが、この“資源”は単なる資源とは大分違って、特に現場においてはしばしばこの状態に直面する。すなわち、物体のように一意にコントロールができないばかりか、時には“資源”としての存在さえ否定し、経営を破壊することさえあるのである。

人間は、抽象的な物体・物質、点では存在しえないし、人間を部分に分けて考えることは無意味なのである。人間は、単なる“資源”であるよりもまゝに、生きている、生命ある、考える主体なのである。

ある面では、経営工学のあゆみ(特に思想上における)は、機械論的人間観からの脱皮という大きな変化のなかで、技術の前提となる人間に対する前提のおき方、すなわち、人間をどのような“資源”として考えてきたかの苦難のあゆみがあるように思える。

テイラー時代からホーソン実験へと、そして特に最近では、組立ラインのロボット化によるオートメーション時代に入りつつあり、生産ラインにおける人間的要因の比重は低下していく

*教授 経営工学科
Professor, Dept. of Industrial Engineering

ことが予想され、人間は肉体力労働者から情報的労働者に転換していこうとしている。それに伴って、“工業経営学(IE)”から“経営工学(ME)”への脱皮が求められている。

(3) 専門領域との関係

専門領域というよりも、現在研究している領域といった方が正確なのだが、経営システムの領域で、特に“経営におけるシステム的设计原理”とは何なのか、ということに研究のねらいを定めている。当面は、システムの確率論的研究ということで、具体的に、[ある種のコンベヤー・システム設計のための待ち行列研究]についての研究をしている。

この確率論的システムにおいて人間が含まれる場合には、人間またはその集団の行動のランダム性に対してモデルが立てられ、このモデルを解くことによって、ランダム性を吸収するような方策や、システム的设计が考えられる。これは、従来の作業研究的方法とは違った设计的アプローチである。

OR アプローチにおいて、数学モデルを使う場合には、人間は単純な行動をもった抽象化されたものとして考えざるをえないが、これは別の観点では、単純な前提条件から複雑な現象における法則を見出す方法として非常に有効なものである。学問の発展は、より単純な前提条件から複雑な条件をもったものに進むのであり、また、より単純なシステムの法則を見出すことは、それ以上に大切なことである。経営システムにおいても、もっとこの面での研究がなされるべきであると思う。

なお、経営システムにおける人間的要素については、以前の職務設計の研究の関係から、経営組織のシステムの把握の問題、特にその集合論的研究について、今後とも研究していきたいと思っている。(1969年12月16日 卒業後記)

B. 最近の3点「新サイバネティクスに向けて」

学生時代から約45年後の現在、今の関心は、N. Wienerのサイバネティクス(動物対機械)から新サイバネティクス(自然対人工体等)に向けられている。以下は、最近の3点である。

(1) 経営工学対サイバネティクスから3M&I系個体科学への道へ

これまでの約50年間に及ぶ大学生活の中で、N. Wienerのサイバネティクス(Cybernetics)との出会いから今日までの間、経営工学とが関わりながら、3M&I系とサイバネティクスとのアナロジーが何かと念頭にあった。

そのためか、これまでの研究生活は、背面のみならずポスト・サイバネティクスに向けられて導かれてきたような一面がある。Wienerのサイバネティクスは、動物対機械における通信と制御系に着目している。筆者は他の世界にも、特に離散系ならではの別の科学があるのではないかと思っていた。

最初は、自動制御系の理論に対比させて、待ち/在庫のコントロール理論の発展に関わってきた。企業もこの種の入出力系と同様なアナロジーをもっており、しかしながらフィードバック系に特徴をもつマネジメント領域があるのではないかとこの展望がある。

学位研究は、コンベヤー系の先見制御研究(モダン作業研究)であった。この研究は、確率的な待ち行列理論アプローチであり、その過程で、待ち行列系における2つの「ムダの公式」と「松井の式」が生まれた(1977年)。

最近、この「松井の式」の2重性が、リトルの公式(1961年)の拡張形に留まらずに、自然対人工体(ウィーナーの動物対機械ではなく)におけるサンドイッチ理論のベースなどとして期待されており、3M&I系個体理論の基底(命題)となりつつある。これは、人工体視点での企業ロボット化から宇宙論議への切り口につながってくるかもしれない。

他方の「ムダの公式」は、サイクル世界における遅れと溢れの線形関係であり、入出力公式と同値である。特に、この公式は、3M&I系におけるプロセス(サイクル)のベースとして期待されているウィーナー/シャノン情報論のムダ(冗長)対価値(エントロピー)とは別視点を切り開く糸口となっている。

最近の研究で、効率(ヤセ)対ムダ(デブ)の尺度として、カメレオン基準(メジアン)を提案している。この基準は、ムダが個体系を循環しているbalancingの均衡点とも考えられて、3M&I系において以下のアナロジーが成り立つと思われる。

ムダ ↔ 限界価値(利益、冗長) ↔ 血液

これは、これは、自然対人工体におけるプロセス系の基底(命題)を成すとなりつつあるもう一方である。(2015.7.24 記)

(2) 経営工学100年から観た社会ムダ学の進歩と次世代

100年前頃、時の米大統領ルーズベルトは、物的資源の保全は、国民の効率への大きな一歩に過ぎない、と演説した。経営工学(IE)は、その国家的要請に答えるものであると、科学的管理法の父であるF.W.テラーは、著書でその価値を位置づけている。

それ以来、米国で発達した経営工学は、EUや日本でもIEを用いることによって、製造業における生産性を50倍に上げている。これに失敗したソビエトは、その後崩壊してしまった。

マネジメントの父であるドラッカーは、この生産性の向上は経済学者が言う設備投資によるものでなく、テラーによる仕事の革命、ムダへのシステムの取組みの成果と指摘している。生産量増強の能力を超えることはできないのであるが、人間や社会の力(モチベーション・イノベーションなど)は、この限界を超えさせるものがある。

一方で、サービス業の生産性の向上は、米国でおお進歩したが、日本ではIEの導入が中途半端であったために非常に遅れて

いる(非製造業では米国の1/2ほど)。この対応は、今後の日本の社会の発展(生産性)にとって重要で、最近注目されて努力が向けられている。

また、東日本大地震の教訓は、ムダ(在庫)はゼロに向かうだけではだめで、バッファヤストック(貯蔵)としての価値も大切であることを教えている。これからも、ムダは、絶対的な大小ではなく、社会や環境に応じて決められる相対的な存在(カメラオン基軸)と考えられる。

すなわち、今のムダは、次への進歩の泉である。社会のシステム(環境も含めて)が変われば、それなりのムダが生じる。それは、ムダの循環サイクル(潤滑油として)と考えてはどうか。これを衰退・退廃ではなく、成長サイクルに向けてることが重要である。今ムダのないシステムは、次の環境への適応力に欠ける。

企業の利益も、一種の潤滑油であり、ムダと同様な性質もっている。絶対的な大小ではなく、それ相応の額(活用分だけ)があるだろう。過ってのソビエトでは、利益の向上にあまり考慮が足りなかったために、進歩へのサイクルを回すことができなかったとも考えられる。

このような二面性をもつ存在としては、在庫(ストック)がよく知られている。在庫は、取り巻く環境(状況)によっては資産にもムダにもなる。たとえば、有限なものは資産価値が高くなるが、無尽蔵と考えられるものはムダに消費品として扱われる。

企業のムダや利益だけでなく、社会的ムダも、成長への循環サイクルに向けて、回していくことが、社会、経済の進歩に貢献するだろう。今後も経営学が、その役割を果たしていくことが、社会から(特に、サービス業において)問われている。

最近の話題であるが、日本の潜在力として、女性力が注目されている。これまで、女性のマンパワーという人財を温存(ムダ?)してきたからこそ、次の環境、成長へのこの活用が可能であり、期待できるわけである。この女性力を組み込んだ成長への循環サイクルの確立が急がれる。

自然には、ムダの無いように、ムダが取り除かれた(淘汰された)、ムリのない環境にあった世界があると考えられる。人間の生み出す人工物(社会も含む)には、まだ多くのムダがある場合があり、自然に帰するプロセスへの、ムダ、矛盾のあるサイクルを経過していく宿命をもっていると思われる。(2013.2.7 記)

(3) 未来へ:企業電動機体、CEO ロボットからクラウド社会へ
近い将来において、企業のロボット化やクラウド SCM などの実現も現実化してくるかもしれない。すでに1948年にはドミニコ派の神父は、「管理機械」の製作の理論的可能性について述べている。

企業ロボット化には、サンドイッチ理論による企業電動機体タイプと、経営組織理論による CEO ロボット化が考えられている。前者は、マトリックス/3D アプローチによって可能であり、後者は人工知能/IoT (internet of things)アプローチによって可能とされている。

両者の違いは、前者がボトムアップとトップダウンの止揚化による企業全体のバランス構築を考えているのに対して、後者はトップレベルの意思決定の自動化と組織歯ごたえを当てているところである。今後の発展が期待される。

また、クラウド社会としては企業等の個体系のネットワーク管理課題が当面の課題である。もともと、企業連鎖(SCM)は市場の経済/企業ルールに従うものであり、互いを調整するよう管理者は存在していない。今後のクラウド社会(例えばスマートシティ)では、個体中心のアプローチによるクラウド・バランスにより、これは需給系を中心にして可能になると考えられる。下記にあるコラム記事を参照。(2015.8.14 記)

民主主義に通じる

▽…このほど私が提案した理論式は、実は民主主義につながるものなのです」というのは、神



互平均と相乗平均の不等式を元にしたものだ。項目に消費者と生産者のメリットを当てはめ、均衡点考えた。▽…そこで得られた結果は消費者と生産者の話に限らない。それぞれ個別に動いてい



松井さん

奈川大学工学部教授で電気通信大学名誉教授の松井正彦さん。

▽…この式は「在庫理論でも使われている相

でも、平等であれば全体の幸せは最大になる」のだとか。社会の幸せを議論する選挙運動でも、式

日刊工業新聞コラム記事〈2014.11.22(木)〉



なぜか「災害と離島」に深く関わることになった

重村 力*

I found myself involved deeply in “Disaster and Island”

Tsutomu SHIGEMURA *

災害と離島

「災害と離島」と言う言葉を表題にしたのだが、誤解されないように書いておく。離島の災害問題について、論じようとするのではない。私は、都市の居住や集落空間や教育施設の専門家だと自覚して、建築計画や地域計画の分野で研究活動を進めてきたつもりだが、気がついてみると災害からの復興の専門家としても評価されることになった。またずいぶん多くの島にも関わったことになっている。神奈川大学退任にあたって、その背景を振り返ってみたい。



図1 伊豆大島

伊豆大島で学んだこと

1965年1月に伊豆大島の中心集落、元町で大火が起きた。大島は秋冬など澄んだ空気の日に鎌倉の海岸に立つと、水平線の向こうにいつもくっきりと見えている島である。小学校1年(1951)の時には三原山が噴火し、鎌倉の海岸から夜、赤々と見え、小学校2年の時にJALの木犀号の三原山への墜落事故が起き、想像をめぐらした。そのように大島をこころのどこかでいつも意識していた。元町の大火の時に、私はお茶の水の駿台予備校に通う浪人生で、もうすぐ試験が終わって大学生になれると思っていたときだから、予備校で受験参考書がいらなくなったら、きっと困っている大島の高校生に送ろうと小さな運動をした。世界史の村山正雄という尊敬する先

生が大いに評価してくれた。大学に入ると、私は早稲田の理工学部の形式的で表面的な共通教養科目の教え方にはうんざりしていた。湘南高校や駿台予備校の方が、よほどわくわくするような深い学問の世界を垣間見せてくれていた。そして65年の授業料値上げ反対運動に熱中し、66年の秋にはもう学生運動のセクト主義が見えて、それにもうんざりしていた。

そんなとき、クラス委員をしていた私に大学院生のTA(地井昭夫=後に広島大学教授)が来た。「重村君 ぼくたちは伊豆大島で大火後の復興の都市計画のための調査をしている。だれかその手伝いをしてくれる学生を紹介してくれないか。」という。二つ返事で「僕が行きます」と答えた。災害と離島のはじまりである。

発見的方法

その頃は江ノ島から大島に東海汽船の航路があり、元町の棧橋に下りると、都はるみの「あんこ椿は恋の花」が大ヒットした時期で、「三日遅れの便りを乗せてフネエがユ〜クウユウク波浮ミ〜ナアト」と彼女の気張り声が、島中に溢れていた。1週間ほど滞在した。当時はコピー機がないので大学二年生の私の仕事は、人間コピー機になることであつた。統計書でも図面でも先輩が必要と思つたものは私が書き写す。役場のとなりにある木造の倉庫の2階でひたすら書き写しをやっていた。ひっきりなしに役場の女子職員がお茶や果物やお菓子を持ってくる。後で気づいたのだがモテていたようだ。学生服の私は、うぶでそんなことには一切気づかなかつた。当時の吉阪隆正研究室が調査していたのは、島の環境の中で人々が自覚せず創りだし、受け継いできた、生活空間の素晴らしいディテールを探し出し、描出し記述し、都市計画に反映することであつた。そこに知性を感じ、想像力がかきたてられた。大学の授業よりはるかに面白

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

いので、授業には出ず、教科書だけ読んで先輩に教わることにし、研究室に通ってこの作業を手伝った。のちに「発見的方法」と呼ばれるようになったこのポストモダニズムの方法が、知らぬまに私の身についた。

沖縄との出会い

大島で勉強したことは、のちに沖縄で役に立つことになった。当時ベトナム戦争に協力していた政府の方針に私たちは反対していたが、沖縄の米軍統治への抵抗運動も極値に達していた。68年に佐藤栄作が訪米し、沖縄が「両三年以内＝within a few years に日本に返還される」という日米合意が成立し、実際には72年に復帰した。69年に学部を卒業した私はそのまま大学院に進み長く在学することになる（～77年）。院生になったころ、大島の作業と一緒にやった先輩たちと設計事務所を創る話が持ち上がった。私は院生と事務所員を兼任して大学と事務所をつなぐということになり、70年に象設計集団という設計事務所ができた。仕事は少なく貧乏であったが、みなで丁寧に仕事をした。そんな頃、南方同胞援護会から話があった。南方同胞援護会（後の沖縄協会）は、米軍統治下の沖縄地域に政府資金を投下するための、実質的な政府機関であった。復帰を迎える沖縄の仕事することになり、最初はコザ市に建つ「沖縄子供の国・子供博物館」（70～72）の企画と建築設計を行った。

現代に生きている伝統

沖縄は周知のごとく大きな島である。沖縄との出会いは実に刺激的であった。民謡・三線などの音楽、陶芸・染織などの美術、これらの伝統芸術・芸能が私たちに驚かせたのは、それが過去の伝承ではなく、現代に生きているということである。民謡を例に挙げると、那覇にはいくつもレコード会社があり、どんどん新曲が出ている。酒席では楽器があれば楽器、なければマッチ箱のようなものまで楽器になり、それが奏でられて、即興の詩が謡われる。それが踊りとなり、まちの関係ない通行人までもが巻き込まれて踊られる。戦火で焦土と化し、25%の人口（当時の若い男性が多い）を失った後、戦後の収容所の中でも、黒檀と蛇皮と象牙で造られる三線が入手できないときは、米軍が消費するコーヒー缶＝MJBの空き缶に角材をつけ、針金を張ってカンカラサンシンと言うものを創ったらしい。これは独特の音色がするので、いまでも愛用する人がいる。民謡は楽しくも悲しくも歌われ、ゆっくりとしたのびのある間合いもあれば、カチャーシのような速い囃子もある。芸術芸能が自分たちの心の中で生きているからこそ、生活の場面で即興的創造

が行われる。柳宗悦ら民芸運動の創始者たちが沖縄を絶賛したように、人々の生活の中に芸術がある。沖縄のガラス工芸＝琉球ガラスもその一つで、戦争直後、生活雑器が圧倒的に不足する中で、米兵たちが大量消費するビールやコーラの瓶のガラス材を集めて、再生して、ガラス器を吹いて造り、食器や雑器づくりを始めたことに端を発し、いまでは重要な民芸品になっている。沖縄が私たちにあたえたショックは、このように深い伝統の基盤の上に、最先端の現代文化が生きているという事実であった。そのころ全盛であったプログレッシブ・ロックの気分とこれは見事に一致した。那覇にロックが聴けるデザイン用具店とカフェを兼ねた「ドグラ・マグラ」（75年）を沖縄の友人が開店し、私たちが内装をし、壁画「緋牡丹ガジュマル」を描いた。

沖縄の民家

しかし大いに問題だったのは、私の専門である建築や都市の分野では、伝統と現代の関係が、むしろ不連続になっていることであった。沖縄には赤瓦の伝統的な民家の形式がある。戦争で多く失われたのだが、70年頃残っているものもあり、再建されコンクリート瓦を乗せているものもあった。この民家の形式は日光の熱い直射が強く、時に激しい雨が降り、台風時に強風が吹くという、沖縄の自然の災厄に対処しているとともに、涼しいそよ風をどう家の中に取り込むか、軒先の気持ちのよい日蔭をどうつくるか、と言うことに応えている。北中城村にある重要文化財の民家＝中村家に行くと、外はかんかん照りなのに気持ちよく昼寝ができる快適さがある。もちろん冷房などなく、十分風土的に合理的な空間構成なのである。

沖縄の現代建築はこれをキチンと継承していなかった。那覇のまちの普通の建築は、日本の他の地方都市の建築と変わらず、コンクリートの町並みが続き、日射しの熱を帯びて、歩くと暑くて卒倒しそうな炎天下の風景を現出していた。70年代はまだ車にも個人の家にもクーラーなどないので、建物の中での会合は、夏には実にうっとうしいものであった。島の人が会館で集まって、外に出て、樹木の下で会合をしているという風景によく出会った。

沖縄エコ建築をめざして

建築の内部空間は普通環境よりも災厄が少なく、より快適なものでなくてはならない。植物の下が気持ちよいのならその仕組みを建築が取り込まなければならない。そう思っただけで沖縄を歩いていると、集落の中はフクギの屋

敷林やガジュマル（榕樹）などの照葉樹や相思樹・銀合歓・クワディーサ（＝こぼていし）などの落葉樹が大きな気持ちのいい緑陰をつくり、実に快適であった。名護市の名護中学校は、不思議なことに屋根に樹が生えていて涼しいという噂を聞いたので、見に行くと確かに屋根の上がモクマオの林になっていて涼しい。私たちの師匠の師匠にあたるル・コルビュジェがインドで設計したサラバイ邸のようでもある。聞けばある時代の教頭の工夫だという。暑いので屋根に土嚢を積み、断熱していたら、そこに実生が生え、やがて生長して林になったという。2階建てで屋根荷重に余力があったからよかった。沖縄中の風土に配慮した建築を見て歩き、時に戦前の内務官僚の設計者の話を聞くために熊本にまで足を伸ばした。そうして沖縄子供の国の次に、ようやくもらった公共建築＝今帰仁村中央公民館（75年）では、なんとか沖縄の気候の中で冷房せずに気持ちのよい、公共建築を創ろうとした。子供博物館では、屋根スラブからの受熱を防ぐために、沖縄の焼き物で創ったヴェンチレーションブロックを屋上に敷き詰め、空気層のある二重の屋根を形成して涼しい建築をめざしたのだが、地元のやんちゃな高校生たちが、足でこのブロックを割れることに気づき、みな割られてしまった。今帰仁村中央公民館は、コンクリートの大屋根を無数の柱で支える大空間を創った。風通しのよい、十分雨からも守られた大きな日蔭の下に、諸々の室は木造で創り、熱的に分離した。さらにこの大屋根の受熱をも防ぐために、上にパーゴラのネットワークをかぶせ、そこをつる性の植物で覆うことにした。ウッドローズとブーゲンビリアを植え、早く生える草本のウッドローズがまずネットワークを創り、そこを木本のブーゲンビリアが追いかけるという構成だ。今帰仁村中央公民館＝芸術選奨・文部大臣新人賞（77年）。この公民館も好評を得たがその4年後隣接市の名護市庁舎のコンペに通り、名護市庁舎も沖縄らしいエコ建築として実現することになった。名護市庁舎＝日本建築学会作品賞（81年）。



写真1 名護市庁舎

沖縄らしい地域開発の形

上記のように書くと、沖縄での仕事が順調に展開したかのように聞こえるかも知れないが実際はその逆だ。72年沖縄復帰と前後した時期は、オイルショック直前、本土でも高度成長の最後のあだ花が列島改造論として開花していた時期と一致する。沖縄には「亜熱帯のリゾート楽園開発を」夢見る不動産業者と開発資本が押し寄せ、さまざまな集落の入会地・共有地が見境なく買い占められるという現象が始まっていた。私たちは沖縄の自然や集落や沖縄の文化こそが価値で、これをなくしては、沖縄の開発はないと考えた。戦後27年間沖縄の意思が反映されない統治をようやく回復したのだから、いまこそ沖縄の主体性で沖縄の開発をじっくり着実に進めるべきであるというのが私たちの主張であった。当然これとは反対の意見も存在する。沖縄の人の中にも沖縄をハワイのようにしよう、シンガポールのように古い集落は取り払って開発しようとする意見があった。私はこの頃大いに論争をし、新聞にも論陣をはった。まだ25～6歳の若さであったのだが、平気で財閥の領袖や政治家や教授たちと議論をした。沖縄がよかったのは私のような意見を権力者が青臭い議論と切り捨てるのではなく、堂々と相手になって尊重してくれたことである。73年の新春、沖縄開発庁から予算を百万つけるからハワイに年度内に行ってくるかと頼まれた。その頃の私の英語力は低く、2週間の調査では後半どうにか意思疎通ができる程度だったが、なんとか州の局長や市長や教授や銀行幹部と話をし、トランク2個分の資料をハワイから入手してきた。ハワイは、アメリカでも最も計画行政が進んでおり、実に緻密な土地利用計画や景観計画を持っていて、また民間と公共の共同事業や役割分担も進んでいる。私たちが学ぶべきはこの計画行政であり、決して見かけの開発ではないことを主張し、乱開発を防ぎ、長期的視野を持つ計画の必要性を訴えた。

水系を基本とする土地利用計画

その後、さまざまな公的計画を受注することになった。名護市土地利用計画では、小水系を環境単位とする土地利用の新しい分析法と計画法を創り上げた。沖縄本島には微細な水系がおびただしくあり、離島のため飲料水や農業用水が常に不足すること、雨量が大きく表土が微細であるためエロージョン＝土砂流出がすぐ下流に及び、珊瑚礁を死滅させる危険がある。そのため水系を尊重し、急傾斜面を緑地で守りながら保全することは実に大切なのである。これらの水系は実はほぼ沖縄の集落の単位とも一致し、コミュニティが環境を管理する社会単位とも

なっている。共有地の開発は集落懇談会の同意が必要という仕組みもつくった。のちに都市計画学会長となった日笠端東大教授が名護市を回り、ほかの地域と景観が違うのに気づき、計画書を読み、77年に日本都市計画学会賞をいただくことにつながった。表題の災害と離島と言うことでは、沖縄では大きな自然災害とは出会わなかったが、自然の過酷な条件をどのように克服し、利点とするかに腐心した。さらには乱開発・買い占めといういわば社会災害に対応する、法的・技術的・社会的仕組みを創り、どうやって整った環境と景観を創り出すかと言うことを大いに学んだのである。



図2 名護市土地利用計画 水系によるアナリシス

阪神・淡路大震災との関わり

さてここから私の自然災害の直接体験について、駆け足で書こうと思う。78年以降神戸市に居住することになったが、95年阪神淡路大震災と遭遇することになった。94年12月に私は、フィリピンのマニラに呼ばれ、その3年前兵庫県出石町で造った木造の弘道小学校が評価され、アジア建築家協議会=ARCASIAで金メダルを受賞し、タキシードを仕立てて出かけたはずなのだが、その一ヶ月後に起こった震災で体験したことがあまりに鮮烈であったために、マニラを含め震災直前の一ヶ月の記憶が脳裏から完全に消えてしまっている。震災で私の住んでいた東灘住吉の中古マンションは全壊し、1階が押しつぶされ、避難階段が壊れ、7階に住んでいた私はマンション内の被災者を捜す過程で転落し足を骨折し、車いす生活をし、2年間山手のマンションを借りて避難生活を行った。数千人が死に、東灘区は最も多い犠牲者を出した。私の勤めていた神戸大学では40人もの学生の犠牲者を出し、建築学科だけでも2名の学生が犠牲になった。私たちはマンションの自力再建を模索し、住民中心で自主再建したマンションとして、97年3月に再建されて、後のマンション再建法制化のモデルとなった。東灘区住吉

地区の復興をサポートする組織を作った。阪神・淡路の災害からの復興の最大の論点は、被災時に実質的な救援がほぼ48時間ないままに、住民たちが緊急に創り上げた助け合い体制や、それ以降ボランティアも加わって行われた被災地の応急支援を、被災地の自助・互助・共助と公助の組み合わせに発展させてどう評価し、それをどう復興の原動力にするのかと言う点である。



写真2 阪神大震災 灘区の学生街 震災直後 この後火事発生

コミュニティに依拠する復興

阪神・淡路では国や県がいわば一方的に被災地域に都市計画や都市再開発を上から押しつけた地区と、地域コミュニティの選択に任せた地区とで復興の成否が著しく異なっている。神戸市長田区や淡路島の富島地区は過大な再開発や区画整理の計画に苦しみ、一方東灘区の復興や淡路島東浦の復興はメニューリストを地域が捨選択して進められた。前者では被災者のコミュニティは、計画決定以降、長い年月がかかる計画の実現の前に空中分解し、地域の主体的意思によって復興を進めることはできなかった。後者では先に述べた被災後の互助共助体制がそのまま、復興の原動力となり地域の話し合いは順調に進んだ。

このように自然災害からの被災では、被災地域のコミュニティの継続が、地域社会のみならず、地域経済の持続にとっても重要である。

9年後2004年中越地震が起きた。中越では阪神の失敗を再現しないよう政策的修正がなされ、例えば仮設住宅を造るときもコミュニティをシャッフルしないよう、集落別に仮設を造り、復興は順調に進んだと言える。私は建築学会の中越復興支援委員会の主査として提言をまとめた。

2005年の福岡県西方沖地震では博多湾沖の玄界島という離島が被災し、ここではいろいろ問題はあったが、このコミュニティ復興の原則は守られた。

続けて2006年にはインドネシア・ジャワ島でジャワ島

中部地震が起きた。インドネシアでは、その1年半前2004年に世界有史最大級のスマトラ沖地震および大津波が起き、世界中の政府やNGOによる国際支援が行われた。大変な投資がなされたのだが、各国の住宅建設などがばらばらに行われ、一貫したインフラ再建などが不十分であって、地域社会が大混乱していた。ジャワ島中部地震の被災地はジャワ島の古都であり大学が集中するジョグジャカルタ市の南方である。ここで政策的影響力を持つ学者たちは日本留学経験者が多く、阪神の反省やスマトラの反省から是非コミュニティに依拠した復興を行おうと政策提言をした。収容所のような仮設を造らず、すべて現地に仮設を造り、地域隣組 POKMAS に復興メニューの選択意思決定を任せ、専門家はそれを助言すると言う仕組みを創った。私たち(神戸大学COE)もこれを支援した。ジャワ島中部被災地は、ほぼ3年で環境的にも社会的にも経済的にも復興し、コミュニティ復興のモデルとなっている。こうしていやおうなく災害復興の専門家にもなってしまった。

神奈川大学に着任して3年後の2012年日本建築学会から「コミュニティ研究に立脚した災害復興に関する研究」で学会論文賞をいただくことになった。

東日本大震災とコミュニティの備え

2011年3月11日、あの東日本大震災が起き、そして大津波が起きた。建築学会で私の属する農村計画委員会が、ただちに動こうとしたのは、これが未曾有の集落災害だからである。数百の漁村集落が被災した。このような集落の災害に対応する法的な復興制度はない。多くの災害復興の制度は、都市災害を前提にしている。中越はそうではなかったのだが、大きな河川の河道閉塞が自然のダムを形成したためこれを、解決せざるをえず、その土砂災害対策に付随して数個の集落の再建がなされた。玄界島は福岡市の市域内にあり、復興制度はよくも悪くも都市計画制度や公営住宅の制度でなされた。そのため復興景観から離島らしい特徴や集落らしい空間は消えてしまった。

3月中に東北に行こうとしたのだが、被災者の救出収容作業が続いていてなかなか許可が出ない。3月末になっていざゆけるとなったら、今度は具体的に、移動・宿泊・食事・ガソリン補給などが大問題だとわかり、大いに悩んだ。福島は関東の、宮城は東北の学者がやるだろうと考え、岩手に行くことにし、八戸工大の友人に4WDを出勤させてもらって南下し、岩手県南部では遠野市を拠点に沿岸各地に往復するというルートに決めた。遠野市には神奈川大学出身の本田敏秋市長がおり面識があ

り、前年にも学生たちと訪問していた。沿岸集落では、1高所移転の成否(明治昭和津波による移転の評価)2防潮堤の成否3避難路の成否4津波防災伝承を調べながら、各集落を見て回った。被災の状況は筆舌に尽くしがたいひどいものであった。防潮堤の功罪については大いに議論のあるところだ。もっとも大切なことは津波の被害をよく知り、避難路を整備することである。昭和の津波以降高所への移転居住が徹底しているところは、被害は劇的に少ない。また津波防災知識が高く、素早く避難したところでも被害は少ない。悲惨な結果を生んでしまった、宮城県石巻市北上川河口の大川小学校の小学生や教師たちの被災では、避難方法や緊急体制の準備が足りなかった。減災と言う課題においても、集落での伝承や備え、コミュニティの共同性が大いに大切である。



写真3 東日本大震災 広田湾の防潮堤決壊 2011.4.2

二つの地域での復興支援と広域合併の問題

以降、二つの地域で復興に関わることになった。一つは岩手県大船渡市三陸町越喜来地区の四つの集落であり、もう一つは宮城県の気仙沼市の離島=気仙沼大島である。どちらも災害抜きで、出会いたかった美しい地域である。大船渡市の越喜来湾に面する地区は2011年に何回か集落を回っているときにヒアリングした。越喜来漁協長が復興委員会の会長になり、復興計画の策定助言を要請してきたのが発端となり、研究室をあげて集落別の復興計画の立案のための調査や計画作業を行った。気仙沼湾に浮かぶ緑の島・気仙沼大島の方は、私の所属する神奈川大学日本常民文化研究所が、旧大島漁協=現宮城県漁協大島出張所が所蔵する明治以来の漁協の資料が浸水流出したことを知り、これを修復しようと、大学院歴史民俗資料学研究科とともに作業を始めたことに端を発する。どちらのケースでも、いわゆる広域合併によっていろいろな問題が起きていることが明らかになった。大船渡のケースでは越喜来(オキライ)という旧村が明治にあり、

昭和の合併で三陸町の中心になる。そして平成 13 年（2001 年）に大船渡市に合併されている。一つ一つの被災集落から見ると、最終意思決定がなされる大船渡市議会や役所は大変遠いものになるし、行政の方から見てもなかなか実感がわかない。宮城県では 2007 年に県内の 31 の漁協が合併して一つの漁協になった。そのため、明治以来の漁協の文書を保存している日本でも珍しい（おそらく世界でも珍しい）大島漁協文庫の貴重さはなかなか県漁協には理解されなかった。地域が復興などのまちづくりに際して、自らの意思決定をできると言うことがきわめて大切であり、地域社会を束ねる自治体や広域団体にも適正サイズというものがある。

地域が復興などのまちづくりに際して、自らの意思決定をできると言うことがきわめて大切であり、地域社会を束ねる自治体や広域団体にも適正サイズというものがある。災害からみると、広域合併は行き過ぎである。



図3 崎浜復興計画原案 (重村・三笠研究室)

越喜来の復興計画立案と問題点

越喜来の復興計画立案では、居住地や学校などの公共施設をどう高い場所に移転できるかを考えた。越喜来では低地にあった学校や老人施設が無残に被災した。先に述べた昭和の高所移転が功を奏して、今回低被害であったほかの地域を見ると、水平移動距離があまり多くない直上の高地に居住地を造った集落は成功している。越喜来では今回の津波以前から、高い土地に個別に移転している例がばらばらとあり、これらの並びに新しい住居や公共施設がはまるような in-fill 型の高地居住の実現を提案し、はめ込み型の移転という名称とした。すなわちこ

れまでの集落構造の文脈から大きく外れず、いわば一段と高い棚に水平に住居施設が並ぶことを理想とした。防災集団移転促進事業の定義を少し柔軟に解釈して運用することでこれが可能となった。一方で港湾に関連した生産・流通施設は、いやおうなく水際に立地せざるを得ない。先に述べた安全なレベルへの避難路をたくさん確保する計画を行った。津波に対する地域全体の防御を防潮堤だけに期待すると、壮大なものが必要となるが、景観的にも交通的にも海と集落とが極端に断絶されることは漁村集落としては無理がある。ここでは防潮堤の高さを極端には高くせず、陸地側に造られる道路や鉄道敷などの盛り土を併せて、多重に防御する仕組みを考えた。これらの大きな土地利用計画や道路計画は大筋合意を得るのは簡単だったが、現実の高所移転地を公共的に入手するにはさまざまな困難があり、行政プロセス・民間合意プロセスともに難航した上に、ようやく確保した高地斜面から埋蔵文化財が出て、文化財調査を優先せざるをえず、実に時間のかかる事業展開となった。2015 年現在まだ居住が始まっていない高所住宅地が多い。一方低地は土地利用を抑制するべきだが、緑地や生産施設や流通施設など、一部の公共施設などで利用し、津波の予報が出たときは直ちに避難できるようにしつつ活用するべきである。しかし、被災施設が撤去された後、低地はぼっかりと穴が空いた状況が続き、ここをどうするかが大問題であった。2013 年かからかつて奥尻島や淡路島でも役に立った漁業集落環境整備事業を、東日本向きに改良した漁業集落防災機能強化事業が用いられるようになり、ようやく低地の土地利用について、制度をとまなつて考え始めることができるようになった。この頃、崎浜集落の低地に仮設の集会所を創ろうと言う話が盛り上がり、おりしもフランス政府のフランス財団の震災への寄付金を受け、私たちの研究室と地域の人々、NPO が協力して、共同作業を行い、この集会所を創った。「浜ライン」であ



写真4 大船渡市越喜来崎浜 集会イベント施設
浜ラインの建設ワークショップ

る。「浜ライン」は被災集落のさまざまな会合に自由に活発に利用されている。2015年に神奈川大学建築学科にこの集落から一人の学生が入学した。「浜ライン」で被災地のクラス会ができ、感動して本学に来たという。

気仙沼大島での文庫建設

先に述べた気仙沼大島の文書再生の活動も、簡単な道のりではなかった。大島漁協（現・宮城県漁協気仙沼支所大島出張所）は、明治以来の大島の漁業や村の発展に関わる資料を整理して収蔵していることで有名であり、神奈川大学日本常民文化研究所をはじめ、民俗学者や歴史家、漁業・漁村の研究者から注目されていた。大津波によって浦の浜にあった旧漁協事務所は被災し、資料は浸水し建物の中に漂っていた。常民研は被災に際し、せめて資料の救出／再生で役に立とうと考え、4月から大学院歴史民俗資料学研究所の院生たちに呼びかけ、資料の救出乾燥清掃整理作業をはじめた。資料は浸水し塩分を含み土砂ほこりなどを吸着して、その状態は相当悪く、高度な処理が必要だった。幸い文化庁の文化財レスキュー事業の対象となり、国立奈良文化財研究所の協力を得られることになり、同研究所に神奈川大学側が向向き、真空凍結乾燥機を使用して再生整理の作業を行うことができた。



写真5 気仙沼大島 夏のワークショップ
神奈川大学大学院生の建設参加

この間、私はこれらを安全に収蔵し、また研究的に閲覧できる施設（大島漁協文庫）が必要と考え、これを創る運動を始めた。幸い三井物産環境基金の震災復興支援に応募しこの補助をいただくことになった。資金と労働力（研究室の学生たち）はどうにかなるが、これをどこにつくるかと言う点が難航した。漁協はいまやかつての島の漁協ではなく県全体の漁協の出張所という存在に変わり、漁協そのものの中にはつくりづらい。被災地であ

る島で、住宅もまだ復旧していないときに、このいわば倉庫に過ぎない建物を優先してつくるわけにも行かない。文庫建設候補地は、漁協の仮事務所の敷地内、隣接の借地、市の開発センターの駐車場内など転々とした。一方で資料は徐々に大島に戻ってきたが、これを置く場所もない、資料は学校の空き教室や開発センターの倉庫を転々と移動しながら文庫の建設を待った。文庫の建設地は、2014年になってようやく確定することができた。復興予算でつくられる漁協の新しい集荷場に隣接する土地を小野寺義久地主が、提供してくれることになったのである。それから土地登記、農地転用、確認申請などの過程を経て、2015年ようやく建設が始まった。三井物産環境基金の予算の不足分は神奈川大学の予算をあてた。私たちの設計を地元の櫻田務棟梁が主要部分を施行し、棟梁の指導の下、学生が建設に参加し、9月26日仮の竣工を終え、資料は文庫にとまれ収蔵され、今後はこのミニ図書館で地域と神奈川大学を中心とする研究者が資料を整理・研究する作業が始まる。



写真6 気仙沼大島 大島漁協文庫

9月26日大島公民館で文庫の再生出発を記念するシンポジウム「漁村文化と大島の未来」が開かれ、4名の講師が講演し、私が司会した。地元の郷土史家千葉勝衛、気仙沼市文化財保護審議会の会長山内繁、民俗史家で東北大教授の川島秀一、常民研の安室知の4名である。この文庫資料を背景に、気仙沼大島が今後の漁業集落・漁村史・漁業史・海村民俗の研究の拠点となる期待がうずまいた。

千葉は明治から昭和まで、漁協長・村長として大島を率い、長い闘争を経て、今日の全国にある漁業権の原型を確立した菅原熊治郎の事績を熱く紹介した。

島のコミュニティの文化核が創れたと自負している。



春風馬堤の曲を枕に、思いつくまま

吉田 稔*

Tears in Heaven

Minoru W. YOSHIDA*

「やぶいりや浪速を出でて長柄川 春風や堤長うして家遠し」と始まり、「藪入りの寝るやひとりの親の側」で閉じる春風馬堤の曲は、蕪村が晩年に書きとどめた長詩である。

タイトルに、この詩を持つ小文を理工学について語る場である神奈川大学工学研究所報に寄せるとは、いかにも場違いで、趣旨をわきまえざるの行いである。しかしながら、今回の寄稿は、神奈川大学に今年四月に奉職した新任の私が、所員である先生方に、私の言葉で自身を説明する目的に則したものであるとご理解いただきたい。本所報のあるべきスタイルにのっとり、自身の仕事の場であり、心の場である解析学について記述することなく、かかる情緒的な小文を自己紹介とすることについての更なる言い訳として、特殊な数学の言葉をこねくりまわし、短文とすることによっては、私は、自分の心を表現できないと言うことがある。ご理解を賜りたい。

さて、与謝蕪村は、江戸時代中期の俳人にして画家である。淀川を大阪湾に向かって流れる眺めかたにより、その左岸に位置する毛馬（けま）と呼ばれる地域を生地とするとされる。現在も、この淀川河畔の地域は毛馬と呼ばれ、大阪市都島区に属する。多くの人好む彼の代表作として「菜の花や月は東に日は西に」がある。そもそも、詩歌句において、それぞれの作者の代表作とは、各々の読者による身勝手な解釈と嗅覚によって選び取られる。その了解の上で、私は、「春雨や小磯の小貝濡るほど」、「ありがたや箕いっばいのむかごかな」、「葱買うて枯木の中を帰りけり」など、ちから任せでない語りによる句を蕪村の代表作ととらえている。

私の母方の祖父は尾張士族であるが、祖母は毛馬で生まれた人であり、私は、幼いころ祖母から、その地域は毛馬村と呼ばれていたと聞かされた記憶がある。私は毛馬ではなく、毛馬の堤から数キロメートルより大阪の中心に近く、私が幼い頃は、大阪市電が通っていた地域で生まれた。毛馬の堤は、父の休日に、姉と家族の一員であったドイツシェパードと共に散歩に出かけた場所である。今から50年以上も前の事である。生きている時代は隔たっているが、私は、蕪村が感じたのと同じにおいを毛馬の堤で受け取っていると考えている。蕪村は、幼い頃を毛馬で過ごし、長じて後、七十近くで亡くなるまで、以後、終生、毛馬を訪れることはなかったとされる。現実には、訪れることなく、60歳近くになって書き上げたのが春風馬堤の曲である。私は、馬堤とは毛馬の堤を指していると解釈している。萩原朔太郎が、晩年60歳近くになって著した「郷愁の詩人と謝蕪村」では、タイトル通り蕪村と彼の作品を、郷愁を手掛かりに読み取っている。自身、極めてシャープな詩を著す萩原朔太郎が、彼の嗅覚に従い、蕪村を郷愁の詩人ととらえることは、彼と同じ感受性を蕪村の郷愁に嗅ぎとったと言うことであろう。詩歌句は、読み手の嗅覚により理解され、そこには何の嘘もない。長々と書き連ねられた小説が、その欺瞞と無責任を楽しむものであるのは大きく異なる。私は、最近は何れも作り話である小説を読むことができない。

郷愁と言うべきものであるかどうかとも分からないが、私の生家であった大阪市内の家は、祖母が世を去るより随分と前の遠のむかしに無くなってしまっており、その事で、むしろ自由ではあるが抛り所のない気持ちだが、私にはあるかも知れない。私は、父母、姉、シェパードと共に、小学校に上がる前の時期に千葉県に移り住み、中学校に上がる前の年頃まで千葉県内に住んだ。初めに千

* 教授 情報システム創生学科
Professor Dept of Information Systems Creation

葉に住んだ頃は、1964年の東京オリンピック前の時代で、海から遠くはない西千葉の借家には、リヤカーにアサリや海苔をのせて売るモンペ姿のおばさんが訪ねて来ていた。日によって異なるおばさんが来ていたのか、同じ人であったのかは分からないが、ある日、母に、より高価な海苔を勧めるおばさんの口から、こちらの方が「比べてみれば、香りがよい」との言葉が発せられた。子供心に、モンペ姿のおばさんから、うつくしい言葉が語られることに強い印象をもった。当時の千葉は、まだ海から近かったのであるが、陸は、サツマイモ、落花生、小麦の畑ばかりであった様に思う。千葉に移り住んで程ないころ、幼稚園に通っていた時期であるが、おいしい落花生をよるこんで食べ、食べ過ぎ、夜になって吐しゃを繰り返した日があった、母が、論しながら、必死になって看病してくれた。また、多分、秋の日であるが、幼稚園から帰り着き、家には上がらずのままの私に、玄関先で母が梨をむいてくれたことがあった、何か、偉そうに、大人びたことを言って食べた様な気がする。小さな借家は、総武線沿いに位置し、先にある踏切から少し坂道を下った所に線路に向かって建っていた。幼稚園へは、その踏切を越えて通った。雨の日や、雨上がりの日の情景や空気や、この頃の自分の心のあり所がよく思い出される。今も園児達の通っている西千葉にある幼稚園や、当時住んでいた借家の近くを数年前に人と共に訪ねたことがある。その時の印象を短文として書き留めていた。「記憶が映像に近い形で、かなり明瞭になりました。情景は、ほとんど全て変わっていましたが、余韻や残澤がはっきり感じられました。黄色い雨傘を肩に担いで、兵隊さんに成った設定で、幼稚園からあの緩やかな坂道を下りて帰ってくる坊やの自分が見えました。」もちろん、兵隊さんは、日本の兵隊さんです。

この様な記述は、やはり、ノスタルジーである。郷愁を目にうかがふ風景として言葉とした春風馬堤の曲は、萩原朔太郎によるものより後に与えられた近年の解釈では、これを、恋の歌の一つとするものもあるが、私は私として、より素直に読みたい。蕪村は、四十を過ぎて結婚し、45歳前後で一人娘を授かったとされ、この詩を著したのは、彼が60歳を前にする時期である。15歳前後の命輝く一人娘を故郷の春の風景の中に置いての父親の歌として、私は読んでいる。次の句も、私は、蕪村が幼かった頃の一人娘に重ねてのものとして読んでいる。「鶯の鳴くやちいさき口開けて」。

わが子についての詩といえば、この上なく悲しいものがある。中原中也の「また来ん春……」である。

幼い坊やを亡くした実生活の中での詩である、一節は「象を見せても猫（にゃあ）といひ 鳥を見ても猫（にゃあ）だった 最後にもせた鹿だけは角によっぽど惹かれてか何とも云わず 眺めてた……」。私は、独り身にて、子あらざる者なれども、この詩の心をおしはかることができる様に思っている。失うものを何も持たず、神を畏れる必要のなくなった者として、人をもてあそぶ神を恨むの心の中で書かれたものであろうか。中原中也は、この詩を書いた後、長く生きることはなかった。Eric Clapton も幼い坊やを失った人であり、それを映す歌として「Tears in Heaven」を作っている。一節は、
 “Would you know my name. If I saw you in heaven. Would you be the same. If I saw you in heaven. …… Time can break your heart. Have you (been) begging please. Begging please. …… Beyond the door, there is a peace I’m sure, and I know there will be no more tears in heaven.”。初めの行の you は、亡くなった天国の息子への呼びかけであるが、後半の“Have you (been) begging please”の you は、Clapton 自身であると私は読んでいる。神に乞い願っているのである。坊やを帰せと。しかし、最後には、中原中也と異なり、前向きに手もとにある人生に向かって行く気持ちの言葉が置かれている。

蕪村は、一人娘を失うことなく、25歳前後の娘を残して病死したとされる。辞世の句とされているものは、「白梅に明るる夜ばかりとなりけり」である。残した者全てが幸せな日々のみを持つと願い夢想する(信ずる)句であると私は読んでいる。これが辞世の句とされているが、私には、「鬼老いて河原の院の月に泣く」なる句が、心を定めた歌として特に印象深い。これとても、恋の歌とする解釈もある様であるが。他の蕪村の句に「月に吠える」の表現を含むものもある。

最後に、西行法師と蕪村の歌をあわせて、「願わくは、月に泣く河原の院の鬼として逝かん」を私の決心とした。

参考文献

- (1) 尾形 侑 校注, “蕪村句集” 岩波書店, (1991)
- (2) 萩原朔太郎, “郷愁の詩人と謝蕪村” 岩波書店, (1988)
- (3) 大岡昇平, “中原中也詩集” 岩波書店, (1981)
- (4) 大岡信, “折々のうた” 1990代の朝日新聞の紙面より
- (5) Eric Clapton, “Un Plugged”, Warner Music (1992)

2014年度（平成26年度）工学研究所年次報告

1. 人事

1) 運営委員

所長	新中 新二 教授
機械工学科	伊東 弘行 准教授
電気電子情報工学科	穴田 哲夫 教授
物質生命化学科	佐藤 憲一 教授
情報システム創成学科	奥野 祥二 助教
経営工学科	中島 健一 教授
建築学科	趙 衍剛 教授
化学教室	岩倉 いずみ 准教授
情報システム情報学科	杉本 剛 教授（所長指名）
物質生命化学科	井川 学 教授（所長指名）

2) 研究所客員教授

小嶋 英一 (2014.4~2015.3)	阿部 英樹 (2014.10~2015.9)
佐藤 祐一 (2014.4~2015.3)	田中 俊光 (2014.4~2015.3)
李 杰 (2014.10~2015.9)	山田 保治 (2014.4~2015.3)
許 瑞邦 (2014.10~2015.9)	上田 充 (2014.4~2015.3)
武田 重喜 (2014.10~2015.9)	川口 春馬 (2014.4~2015.3)
花畑 誠 (2014.4~2015.3)	内藤 周弑 (2014.4~2015.3)
堀野 定雄 (2014.4~2015.3)	杉原 淳 (2014.4~2015.3)
伊東 圭昌 (2014.4~2015.3)	野尻 秀智 (2014.10~2015.9)
大越 昌幸 (2014.10~2015.9)	Min,Sangkee (2014.10~2015.9)
井上 成美 (2014.10~2015.9)	

3) 研究所客員研究員

大和 裕幸 (2013.4~2015.3)	徐 剛 (2013.10~2015.9)
久保 登 (2013.4~2015.3)	金 徳印 (2014.10~2016.9)
龍 重法 (2013.4~2015.3)	曾 志平 (2014.10~2015.9)
石倉 理有 (2013.4~2015.3)	西 和夫 (2014.4~2015.3)
石川 博敏 (2013.4~2015.3)	持田 由幸 (2014.4~2016.3)
蘆 朝輝 (2013.10~2015.9)	Govindachetty Saravanan (2013.10~2014.9)
周 建東 (2013.10~2015.9)	鈴木 温 (2013.4~2015.3)
大熊 武司 (2014.4~2015.3)	植田 博臣 (2014.9~2015.10)
岩井 和史 (2014.9~2015.10)	

4) 研究所特別研究員

北島 創 (2014.4~2015.3)	入井 友海太 (2014.10~2016.9)
秋山 友昭 (2014.10~2016.9)	

5) 研究所職員

教務技術職員 萩原 健司	教務技術職員 金子 信悟
--------------	--------------

2. 予 算

平成 26 年度の予算・決算額を表-1 に示す。

表-1 (単位：千円)

業 務 項 目	予 算 額	決 算 額
研究所運営費	2,543	2,011
大型共同設備管理運営	4,000	4,478
工学研究所共同研究*	14,000	13,980
(特) テクノフェスタ	2,790	1,918
(特) テクノサークル	1,500	1,093
合 計	24,833	23,480

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者	予算額 (千円)
林 教授	3,500
中山 准教授	3,500
宇佐見 准教授	2,500
岩倉 准教授	4,500
計	14,000

3. 共同研究／プロジェクト研究

平成 26 年度の工学研究所共同研究／プロジェクト研究を表-2 に示す

表-2

共同研究

小型電気自動車のための CFPR ボディと車両制御の融合技術開発	林 憲玉／機械工学
マイクロ波回路モデルによる超伝導素子の高周波応答の解析と動作検証	中山 明芳／電気電子情報工学
恐竜と人間の歩行・走行の力学シミュレーションと測定	宇佐見 義之／物理学
多光子イオン化過程を利用する新反応開発	岩倉 いずみ／化学

プロジェクト研究

A	高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発	穴田 哲夫／電気電子情報工学
C	高安心・超安全交通研究所（KU-WIPF）	松浦 春樹／経営工学
C	防災まちづくり支援研究センター	荻本 孝久／建築学
C	地元住民と協力して実施する町づくり研究所の創設と運営	内田 青蔵／建築学
A	構造物の耐震安全性及び耐久性の評価方法に関する研究	趙 衍剛／建築学
A	新たな低炭素エネルギー社会に対応した新型電池の開発	松本 太／物質生命化学
A	三次元周波数分析を用いた振動モデル化技術の構築	山崎 徹／機械工学
A	多分岐ポリマー系ナノハイブリッド材料の開発と応用	横澤 勉／物質生命化学
A	高速高精度 DNA 増幅装置の開発	山口 栄雄／電気電子情報工学
A	刺激応答性材料の開発	亀山 敦／化学
A	グリーンイノベーションの基盤となるナノ構造制御触媒の開発研究	引地 史郎／物質生命化学
A	ナノ構造材料における水媒体の影響に関する研究	金 仁華／物質生命化学
A	車両等に装備するためのポリカーボネート窓の表面改質に関する研究	新中 新二／電気電子情報工学
A	超精密加工による高品位表面の創成に関する研究	中尾 陽一／機械工学

4. 講演会

「暮らしの中のサイエンス」連続講演会

テーマ：『住まいにおけるリスクマネジメント』

場 所：神奈川大学みなとみらいエクステンションセンター

オーガナイザー：趙 衍剛（神奈川大学工学部教授）

●第1回 2014年10月25日（土）13:30～15:00

○リスクで考える住まいの安全性

神奈川大学工学部 教授 趙 衍剛

●第2回 2014年10月25日（土）15:20～16:50

○住宅所有のリスクマネジメント

名古屋工業大学 工学部 都市社会工学科 准教授 小島 貢利

●第3回 2014年11月8日（土）13:30～15:00

○神奈川県地震危険度一過去の地震から学び将来に備えるー

清水建設（株）技術研究所 安全安心技術センター リスク・BCPグループ 奥村 俊彦

●第4回 2014年11月8日（土）15:20～16:50

○すまいの耐震化のススメー震災からあなたの命を守るためにー

名古屋大学 大学院環境学研究科 教授 森 保宏

5. 神大テクノフェスタ2014ーくらしと環境の未来ー

日時：2014年10月24日（金）12:00～17:00

場所：神奈川大学横浜キャンパス1号館804室・2号館演習室

実施内容

1) 講演会（1号館308室）

工学系講演2件

ゲル微粒子のコロイド科学・光学・バイオテクノロジー（川口 春馬客員教授）

水素エネルギー社会の実現を目指すナノ空間触媒（内藤 周弐客員教授）

2) 研究ポスター発表（2号館演習室）

大学院生によるポスター発表・作品展示 49件

学部生によるポスター発表 12件

テクノサークルによるポスター発表・作品展示 4件 総計 65件

3) 実演展示 2件（宇宙エレベーター・ロボット）

4) 企業展示 25社、1同窓会（2号館演習室）

5) 研究相談窓口（2号館演習室）

6) 技術・情報交換会（10号館3階学生ラウンジ 17:00～18:00）

6. 大型装置使用実績

平成 26 年度の大型装置装置使用実績を表-3 に示す。

表-3

(時間)

研究室名	TEM	SEM	XRD	TF-XRD	XPS	ICP	CCD	NCSM
機械工学科	0	68	57.2	0	0	0	0	27.5
竹村研究室		65.5	30.5					
寺島研究室			26.7					
中尾研究室		2.5						27.5
電気電子情報工学科	0	367	4	24.5	13	0	0	0
新中研究室					13			
中山研究室		3						
平手研究室		316.5						
山口研究室		47.5	4	24.5				
物質生命化学科	291	821	592.2	602.5	496	765	528	19
井川研究室		82				157		
池原研究室	23	37	16					
上田研究室	13	8.5	81					
小野研究室						118		
金研究室	64.5	294	89.7		7	189.5		
小出研究室		39.5	33			22		
佐藤研究室			2.5					
引地研究室	43.5			98	220	41	528	
松本研究室	147	349	370	504.5	269	237.5		19
横澤研究室		11						
化学教室	15	24.5	1	0	0	0	0	0
岩倉研究室			1					
亀山研究室	15	24.5						
三相乳化プロジェクト	0	12.5	12	0	0	0	0	0
合計時間	306	1293	666.4	627	509	765	528	46.5
機械工学科 (%)	0.0	5.3	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	59.1
電気電子情報工学科 (%)	0.0	28.4	0.6	3.9	2.6	0.0	0.0	0.0
物質生命化学科 (%)	95.1	63.5	88.9	96.1	97.4	100.0	100.0	40.9
共通教室 (%)	4.9	1.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
三相乳化 (%)	0.0	1.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

神奈川大学工学研究所所報執筆規程

1978年（昭和53年）2月5日

改訂2015年（平成27年）5月20日

1. 投稿資格

投稿筆頭者は原則として神奈川大学工学部属教職員とする。ただし原稿を編集委員会が依頼する場合はこの限りではない。また連名者については制限しない。

2. 記事の種類

巻頭言

論説 学問・技術・本研究所の事業・動向などに関する論説，意見。

総合論文 専門の学協会などに発表された研究論文を骨子として，著者の一連の研究をまとめ，これにその分野における地位を明らかにするような解説を若干つけたもの。

共同研究報告 発足時点では〔共同研究の紹介〕，中間時点では〔共同研究の現況〕，研究終了または一段落の時点では〔共同研究の成果要約〕として，その現状が報告される。

プロジェクト研究報告 発足時点では研究の紹介，中間時点では研究の現況，研究終了または一段落の時点では研究の成果要約として，その現状が報告される。

テクノサークル報告 テクノサークルの紹介およびその現状が報告される。

総説 総合論文と略同一性格の記事であるが，解説的色彩の強いもの。

トピックス その時々のトピックスについての展望あるいは解説。

随想 研究・開発などの思い出，意見，感想，経験談など。

国際交流研究 学外（国内，国外）における研究・講義・出張に関する経験談など。

特集 その号の特集として特別記事を設けることがある。

3. 用語

用語は和文とする。ただし総合論文に限り欧文でもよい。

また〔英文目次〕作成のため，原稿には〔英文題目〕のほか〔著者氏名〕および〔職名，所属〕の英語名をつける。

4. 提出期日

その年度により定める。

5. 頁数

以下の頁数はすべて〔刷り上り〕のものを示す。

総合論文 原則として20頁以内。和文の場合は〔欧文内容概要（1頁以内）〕，欧文のときは〔和文内容概要（1頁以内）〕をつけることができる。

共同研究報告 原則として10頁以内。

論説・随想 原則として4頁以内。

プロジェクト研究報告・テクノサークル報告 原則として2頁以内。

総説・トピックス・その他の記事 原則として8頁以内。

6. 原稿の書き方

原稿の書き方は，この〔規程〕ならびに〔神奈川大学 工学研究所 所報 執筆要領〕による。

7. 原稿の責任と権利

掲載された論文などの内容についての責任は著者が負うものとする。またその著作権・編集出版権は〔神奈川大学 工学研究所〕に属する。

8. 採否

原稿の採否および分類は〔神奈川大学 工学研究所 編集委員会〕において行う。

9. 原稿の提出先

原稿の提出先は〔神奈川大学 工学研究所 事務室〕とする。そこで受領した日を原稿受付日とする。

10. その他

(1) 原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが，状況により超過分の実費を徴することができる。

(2) 図が印刷に不適当な場合は，専門家に依頼して書き直すことがある。この場合の経費は著者負担とする。

工学研究所所報執筆要領

工学 太郎* 研究所 花子**

Making Reports of Research Institute for Engineering

Taro KOUGAKU* Hanako KENKYUJO**

1. 緒言

この工学研究所執筆要領は、このファイル自体が所報原稿のテンプレートになっているので、著者が別にタイプしてある原稿をこの様式内にペーストすれば、以下に記載する体裁の原稿が作成される。

テンプレートファイルは工学研究所事務室から著者あてにメールにより送付する。

原稿は、テンプレート (A4 版) に従って執筆し、提出の際は、印刷した原稿 (ハードコピー) とそのデジタルデータ (ファイル) を提出する。ファイルは MS Word (Windows または Mac) または TeX とする。

原稿記載の順序は、標題、本文、文献、付録、である。

2. 本文及び原稿の体裁全般

A4 版用紙を用い、本文レイアウト (1 ページあたりの文字数は、25 字×45 行×2 段=2250 字とする。ただしタイトルのみは 1 段組である。

MS Word の“ページの設定”の“文字数と行数”のタブ中の設定はフォントサイズ 8、段数 2 で文字数 26、行数 45 とし、“余白”のタブ中の設定は上 45 下 40 左 34 右 34 としてある。

和文文字は MS 明朝、英文文字は Times New Roman とする。ただし、記号などに Symbol を用いることが出来る。

本文、図、表及び式は原則として左右の段にまたがらないように書く。

小数点は [.] を用い、カンマ [,] を用いない。

句読点は [,] [.] とし、[,] [。] を用いない。

脚注はなるべく避ける。

3. 記号及び単位の書き方

諸記号の字体は次のとおりとする。

(種別)	(字体)	(例)
数学的演算記号	立体	sin, sinh
単位記号	立体	cm, kg, MΩ
ベクトル量	斜体ゴシック	速度 V , 力 F
量記号	斜体	周波数 f , 長さ l
化学記号	立体	H ₂ O, BaTiO ₂

文字の大きさは表 1 に示すとおりとする。

4. 図、写真及び表の作成

図、写真及び表が単段 (片側) に収まらない場合は 2 段 (両側) にまたがって書くことができる。

図、写真及び表の横に空白ができて、その空白部には本文を記入しない。

図、写真、表と本文及び図表相互の間は 1 行余白をとる。

図、写真、表の見出しは本文と同一言語とする。図及び写真の見出しはその下に、表の見出しは上に書く。

図、表中の記号類は、小さすぎて判別不能にならないようにする。また、複雑な記号類は、大きめに描くようにする。

写真は本文に貼るだけでなく、写真のファイルを添付する。

5. 数式

数式エディタを用いて記載する。

式は単列に書くように整形する。

字体は Times New Roman を使う。ただし、Symbol は使用できる。

数式は原則として文章の行の中に入れない。やむを得ず挿入する場合には、1 行高さを守る。

*教授 機械工学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

**助手 建築学科

Research associate, Dept. of Architecture

例1 [分数式の例]

…これは $(a+b)/(c+d)$ の形を取る.

例2 [指数式の例]

…電流は $i = I \exp(-t/x)$ の形となる.

文中でなく、式を別行にする場合には、次のように書いても良い. その結果、[上例の式]は次の形を取る.

例1 [分数式の例]

…その結果、これは次式の形を取る.

$$\frac{a+b}{c+d} \quad (1)$$

例2 [指数式の例]

…その結果、電流は次式の形となる.

$$i = Ie^{-t/x} \quad (2)$$

6. 文献記載方法

文中の文献引用は、引用箇所文献ナンバーを上付きカッコでつける.

参考文献 (References) はナンバーに () を付して本文末に列記する.

引用文献は原則として以下の A, B のように記載する.

(A) 雑誌の場合

(No.) 著者名, “標題”, 雑誌名, 巻一号 (発行年-月), p.ページ.
例

(x) 赤坂憲夫, 青山幸夫, 宮下俊夫, “広帯域増幅器の特性”, 電子通信学会誌, 52-192 (1977-8), p.1125.

(x) E. W. Euler and R. F. Stoessel, “……”, Mech. Engng., 90-3 (1968-3), p.42.

(B) 単行本の場合

(No.) 著者名, “書名”, 発行所名, (発行年), p.ページ.

例

(x) 田部浩三, 竹下 誠, “塩酸触媒”, 産業図書, (1976), p.1225.

7. 原稿作成上のヒント

このテンプレートは Windows MS Word 97 で作成してある. 著者が別に書いた原稿をコピーペーストすれば、自動的に割付けが決定する.

Word からコピーペーストする際、書式情報無しテキストのみをペーストするには、コピーした後にメニューの“編集”から“形式を選択して貼り付け…”を選択し、“テキスト”を選ぶ.

第1ページ標題部分は1段組である. この部分では、項目ごとにコピーペーストが必要である.

本文は著者原稿から図、表、脚注を除いてコピーし、テンプレートにペーストする. その後で、図等のスペー

スを作ってテキストボックスを挿入し、その中に図などをペースト、あるいはファイルからの挿入をする.

第1ページの脚注(著者所属など)には、直接入力しても、コピーした内容をペーストしても良い. ただし、MS Word の制限により、脚注の機能を先頭の“1. 結言”の後ろに見えないように白文字で“*”をつけてある. ここを削除すると脚注も消えてしまうので注意が必要である.(標題下の著者名に脚注の機能をつけるべきだが、その場合は脚注が両段にまたがってしまうため、この形式を採用した)

このテンプレートについて不明な点がある場合は、工学研究所 事務局に問い合わせる.

8. 結言

校正は著者に依頼するので、校正刷りが到着後、速やかに校正を済ませて、工学研究所 事務室まで返送する. 校正は、内容が著者提出のハードコピーと一致することを確かめるものであって、変更を加えることはできない.

著者の責任による修正が生じた場合には、その修正に必要な実費を徴収する.

表1 文字及びサイズ

題目	MS 明朝	14 点
著者名	MS 明朝	10 点
欧文題目	Times New Roman	12 点
欧文著者名	Times New Roman	9 点
本文	MS 明朝	8 点
本文の各節・小項目	MS ゴシック	8 点
図・表の見出し	MS ゴシック	7 点
参考文献・脚注	MS 明朝	7 点

参考文献

(1) 工学太郎, 研究所花子, “執筆要領”, 工学研究所所報, 27号 (2004-11), p.126.

(雑誌の場合)

(2) 工学太郎, 研究所花子, “工学研究所所報 27号” 工学研究所,

(2004), p.126.

(単行本の場合)

付録

[参 考] 研究所所報の配布

刷上がった所報は以下の各者に1部宛贈呈する.

- (1) 本学理事および工学部所属教職員.
- (2) 理, 工学部を有する国内の大学またはそれに準ずる学校.
- (3) 官公庁の研究機関.
- (4) 主要の学協会.
- (5) 民間の主要研究機関.
- (6) その他委員会が認めたもの.

[資 料] 英文用語一覧

Research Institute for Engineering	工学研究所
Science Reports of Research Institute for Engineering	工学研究所所報
Faculty of Engineering	工学部
Department (Dept.) of	学 科
Mechanical Engineering	機械工学
Electrical and Electronic Information Engineering	電気電子情報工学

Material and Life Chemistry	物質生命化学
Information Systems Creation	情報システム創成
Industrial Engineering and Management	経営工学
Architecture	建築学
Mathematics	数 学
Physics	物理学
Chemistry	化 学
Biology	生物学
Professor	教 授
Professor Emeritus	名誉教授
Associate Professor	准教授
Assistant Professor	助 教
Research Associate	助 手
Technical Assistant	技術員
Graduate (M.C.)	大学院 (博士前期課程)
Graduate (D.C.)	大学院 (博士後期課程)
Research Student	研究生
Dean	学部長
Chairman of Dept. of ...	学科主任
Abstract	概 要

注: 工学部, 准教授, 助手, 技術員, 研究生などについては種々の呼称があるが, 上記のように統一する.

編集後記

編集委員ならびに工学研究所事務職員のご協力のもと、工学研究所所報第 38 号が刊行となりました。お忙しいところ、進んで原稿をお寄せ下さいました多くの方々に厚くお礼申し上げます。

所報の編集にあたりましては、工学研究所の年間活動および所員の研究分野の紹介を通して研究のポテンシャルの高さを知って頂けるよう配慮しました。新任の教員には、これまでの研究内容を存分にアピール出来るよう主に総説を執筆して頂きました。また、本年度をもって退職される教員には随想を執筆して頂きました。さらに、工学研究所共同研究、プロジェクト研究、テクノサークルの成果報告に加えて工学研究所の年間活動が一目で分かる年次報告等も記載しております。産官学と連携して研究活動を行っている教職員の活動や研究成果も可能な限り工学研究所所報に公表することで、産官と工学研究所とのより緊密な関係が確立され、産官学協同研究がさらに発展することを期待しております。

なお、所報はホームページにも掲載されていますので、より多くの方々にお読み頂けるものと思っております。発刊にあたりご協力頂きました方々に改めて敬意を表するとともにご協力に感謝申し上げます。

化学教室 岩倉いずみ

工学研究所 所報 (No. 38)

工学研究所 所長 新中 新二

工学研究所 所報 編集委員会

委員長 岩倉いずみ (化学教室)
委員 高野 敦 (機械工学科)
穴田 哲夫 (電気電子情報工学科)
井川 学 (物質生命化学科)
吉田 稔 (情報システム創成学科)
中島 健一 (経営工学科)
趙 衍剛 (建築学科)

SCIENCE REPORTS (No. 38)
of
Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute Shinji SHINNAKA

Chief Editor Izumi IWAKURA (Dept. of Chemistry)
Editor Atushi TAKANO (Dept. of Mechanical Engineering)
Tetsuo ANADA (Dept. of Electrical, Electronics and Information
Engineering)
Manabu IGAWA (Dept. of Material and Life Chemistry)
Minoru YOSHIDA (Dept. of Information Systems Creation)
Kenichi NAKASHIMA (Dept. of Industrial Engineering and Management)
Yan-Gang ZHAO (Dept. of Architectonics)

神奈川大学工学研究所所報第38号

2015年11月25日 印刷

2015年11月30日 発行

編集兼発行者 神奈川大学工学研究所
〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1

印刷所 共立速記印刷株式会社
東京都千代田区飯田橋 3-11-24

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING
KANAGAWA UNIVERSITY
3-27 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686, Japan