



技報



K O M A K U S A ・ 2018.10 ・

技報「こまくさ16号」発刊に当って

一般財団法人信州大学工学部若里会 理事 清水 信孟

研究助成
報告

ソーラー水素製造用光触媒結晶材料の新規作製手法の開発

物質化学科 鈴木 清香

有機触媒フロー法による環境調和型物質合成プロセスの開発

物質化学科 戸田 泰徳

非線形分散型方程式の臨界現象の解明

工学基礎部門 岡本 葵

研究室紹介

複雑熱流体システム研究室(杉岡研究室)の紹介

機械システム工学科 教授 杉岡 秀行

無線通信ネットワーク研究室(笹森研究室)の紹介

—理論を追求し、手軽で効率の良いデジタル無線通信の実現を目指す!—

電子情報システム工学科(電気電子工学科) 教授 笹森 文仁

水資源の政策支援研究 吉谷研究室紹介

水環境・土木工学科(土木工学科) 教授 吉谷 純一

空間デザインの理論と実践

建築学科 准教授 羽藤 広輔

真のもののづくりをめざして(菅・戸田研究室)

物質化学科(物質工学科) 教授 菅 博幸

物質化学科(物質工学科) 助教 戸田 泰徳

集積回路システム設計研究室(上口研究室)の紹介

電子情報システム工学科(情報工学科) 准教授 上口 光

生命を知る、創る

物質化学科(環境機能工学科) 准教授 片岡 正和

目 次

技報「こまくさ 16 号」発刊に当って ／一般財団法人信州大学工学部若里会 理事 清水 信孟	1
研究助成報告	
ソーラー水素製造用光触媒結晶材料の新規作製手法の開発 ／物質化学科 鈴木 清香	2
有機触媒フロー法による環境調和型物質合成プロセスの開発 ／物質化学科 戸田 泰徳	5
非線形分散型方程式の臨界現象の解明 ／工学基礎部門 岡本 葵	8
研究室紹介	
複雑熱流体システム研究室（杉岡研究室）の紹介 ／機械システム工学科 教授 杉岡 秀行	12
無線通信ネットワーク研究室（笹森研究室）の紹介 —理論を追求し、手軽で効率の良いデジタル無線通信の実現を目指す！— ／電子情報システム工学科（電気電子工学科） 教授 笹森 文仁	13
水資源の政策支援研究 吉谷研究室紹介 ／水環境・土木工学科（土木工学科） 教授 吉谷 純一	15
空間デザインの理論と実践 ／建築学科 准教授 羽藤 広輔	17
真のものづくりをめざして（菅・戸田研究室） ／物質化学科（物質工学科） 教授 菅 博幸 物質化学科（物質工学科） 助教 戸田 泰徳	18
集積回路システム設計研究室（上口研究室）の紹介 ／電子情報システム工学科（情報工学科） 准教授 上口 光	19
生命を知る、創る ／物質化学科（環境機能工学科） 准教授 片岡 正和	21

技報「こまくさ16号」発刊に当って

一般財団法人信州大学工学部若里会
理事 清水 信孟

ここに、一般財団法人若里会の技術情報誌、技報「こまくさ16号」を発刊する運びとなり、ご多忙にもかかわらず原稿をお寄せ頂いた著者並びに編集をご担当された委員各位に感謝申し上げます。

“信州大学工学部は2016年4月から従来の7学科から5学科体制という新しい学科展開へと大きな進化を遂げました。この取組みの背景にあるのは、これからの時代には、これからの夢を描くには、もっと工学を俯瞰する視点が欠かせないという問題意識に他なりません。細分化され続けてきた学問体系をプロダクト視点ではなくビジョン視点で捉え直すこと。「人」や「社会」において、何を実現していかなければならないかを考え、その発想から技術を構築していくこと。私たちはそのような姿勢を大切に、学科を超えた横断型プログラムの充実にも注力して進められています。文部科学省の革新的イノベーション創出プログラム（COISTREAM）にも選出されたアクアイノベーション拠点や信州で新たに展開されようとしている航空宇宙研究拠点、豊かな緑に囲まれた信州の地域特性をバックボーンに発達した環境・エネルギー材料科学研究など、信州大学工学部の強みを生かしながら、明日に向けて、様々な実験が繰り返される「日本、世界の未来LAB.」へと信州大学工学部は歩みを始めているのです。”（信州大学工学部ホームページより引用）

さらに、食・農産業の先端学際研究会と食農産業イノベーション研究センターも加えられています。

若里会は本年度も今までと同様に各種事業を行っております。その中で、1) 技術情報誌「こまくさ」は年1回発行し、会員ならびに各市町村、関係企業に配布し、産学官の共同研究、技術振興に役立てるとともに、長野県内の高校（80校強）にも配布をして進路指導の一助となること、工学系に興味を持つ学生さんの増加を期待しております。2) 研究助成事業は、本会が平成23年度から始めたもので、厳しい研究環境の中で健闘されている工学部の若手研究者の皆さんの独創的研究を支援し、研究の一助となることを目的としております。本年度も4月に公募し、多数応募いただき、選考委員会で審議の上、2件の採択が決定し、研究がスタートしています。独創的発明・発見を通して、研究の喜びを味わって頂くとともに技術革新に繋げられる事を期待しています。本号には、平成29年度に実施された研究助成事業の報告および研究室紹介を掲載しましたので、ご高覧いただきたく存じます。

また、「新公益法人制度」により、平成24年に一般財団法人に移行いたしましたが、ホームページの開設は中断となっており不便をお掛けしていました。本年度後半には、リニューアルして開設し、タイムリーに行事のお知らせ等をいたしますので適時閲覧、活用をお願いいたします。

末尾ながら、若里会への皆様の一層のご理解とご協力をお願い申し上げます。

ソーラー水素製造用光触媒結晶材料の新規作製手法の開発

信州大学工学部 物質化学科
鈴木 清香



はじめに

日本では電力や自動車などのエネルギー資源の大部分を化石燃料に頼っている。化石燃料は限りある資源であり、使用すれば温室効果ガスである二酸化炭素が排出される。化石燃料の使用や二酸化炭素の排出を低減するため、自然エネルギーである太陽光の利用が進んでいる。太陽電池のように、太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する技術が実用化され、一般家庭にも太陽電池（太陽光パネル）が普及している。一方、太陽光エネルギーを化学エネルギーに変換する研究・開発も活発に実施されている。その化学エネルギーの一つが水素である。例えば、「光触媒」に光を照射することで、地球に豊富に存在する水を分解して水素を作ることができる。近年、「水素エネルギー」や「水素社会」という言葉をよく耳にする。水素と酸素が反応する際にエネルギーが得られ、水のみが排出される。そのため、水素はクリーンエネルギーとして注目されている。

太陽光には、紫外光、可視光および（近）赤外光が、それぞれ約 5、54 および 41% の割合で含まれる。光触媒としてよく知られる酸化チタン (TiO_2) には、ルチル構造とアナターゼ構造があり、バンドギャップはそれぞれ 3.0 eV と 3.2 eV である。そのため、波長 400 nm 以下の紫外光照射しか吸収できず、太陽光のもとでは光触媒としてほとんど働かない^[1]。太陽光を効率良く利用するには、可視光に応答する光触媒でなければならない。図 1 に、Ta 系化合物

のバンドギャップのエネルギー準位を示す。多くの金属酸化物の価電子帯の上端は酸素の 2p 軌道で構成される。一方、金属酸窒化物 (TaON) や窒化物 (Ta_3N_5) では、窒素 2p 軌道が価電子帯の形成に寄与するため、酸化物よりもバンドギャップが狭くなり、可視光に応答できる。 Ta_3N_5 の場合、2.1 eV のバンドギャップをもち、約 600 nm 以下の可視光を吸収できる^[2]。また、水の分解に適したバンド構造をもつため、水分解用光触媒として盛んに研究されている。

Ta_3N_5 は市販試薬の Ta_2O_5 をアンモニア気流下で加熱（窒化）することで得られる。しかし、窒化前後で結晶構造が大きく変化するため、酸化物に比べて、結晶子サイズは小さくなるのが一般的である。結晶子サイズが小さくなれば、粒界が増加するだけでなく、窒化（すなわち結晶構造変化）に伴う欠陥生成の可能性も高まる。そこで筆者らは、酸窒化物や窒化物結晶の育成にフラックス法を活用している^[3]。フラックス法は溶液からの結晶育成法の一つである。高温で融解するフラックス（≒溶媒）に溶質を溶解させ、溶液の徐冷やフラックスの蒸発による過飽和度の増加を利用して結晶を育成する^[4]。アンモニアガスを窒素源として供給し、その雰囲気下でフラックス育成することで、高結晶性・高性能な（酸）窒化物光触媒粒子が得られると期待する。本稿では、 Ta_3N_5 結晶のフラックス育成を紹介する。

金属 Ta からの Ta_3N_5 結晶の育成

Ta_3N_5 粒子のフラックス育成は、他の研究グループも報告している^[5,6]。しかし、結晶面が発達した粒子ではない。この場合、 Ta_3N_5 の Ta 源として、 Ta_2O_5 や TaCl_5 が使用されている。筆者らは、Ta 基板表面に $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3$ フラックスを塗布し、アンモニア気流中で加熱することで、 Ta_3N_5 結晶層 / Ta 光電極の作製に成功している^[3]。この Ta_3N_5 結晶層は、Ta 基板表面で直接成長し、 Ta_3N_5 の結晶構造を反映した平坦な結晶面に囲まれた粒子で構成

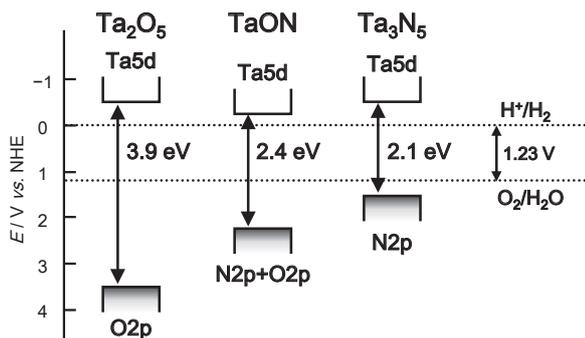


図 1 Ta 系化合物のバンドギャップのエネルギー準位

された。これらのことから、結晶面の発達した Ta_3N_5 結晶の育成には、Ta 源として金属 Ta を用いることが重要であると考えた。

Ta_3N_5 粒子のフラックス育成には、Ta 源として金属 Ta 粉末 (<45 μm) を、フラックスとして Na_2CO_3 を使用した。これらの粉末を乾式混合し、容器に充填した後、950°C のアンモニア気流中で加熱した。比較として、 $TaCl_5$ あるいは Ta_2O_5 粉末を Ta 源として用いた結晶育成も実施した。生成した結晶の電子顕微鏡 (SEM) 像を図 2 に示す。Ta

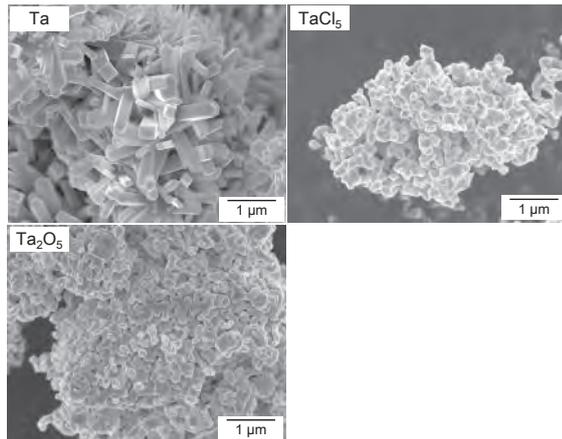


図 2 種々の Ta 源から育成した Ta_3N_5 結晶の SEM 像

源に Ta 粉末を用いた場合、平坦な結晶面で囲まれた柱状結晶が観察された。一方、 $TaCl_5$ および Ta_2O_5 粉末を用いた場合、生成結晶はいずれも不定形粒子であった。フラックスとして用いた Na_2CO_3 への各 Ta 源の溶解度が異なり、金属 Ta が Na_2CO_3 に最も溶解したと推察する。溶液成長した結果、柱状結晶が得られたと考える。また、Ta 原料種は生成結晶相にも影響した。生成結晶の粉末 X 線回折 (XRD) パターンを図 3 に示す。Ta 源に金属 Ta を用いると、目的の Ta_3N_5 を単一相で得た。ただし、 $TaCl_5$ や

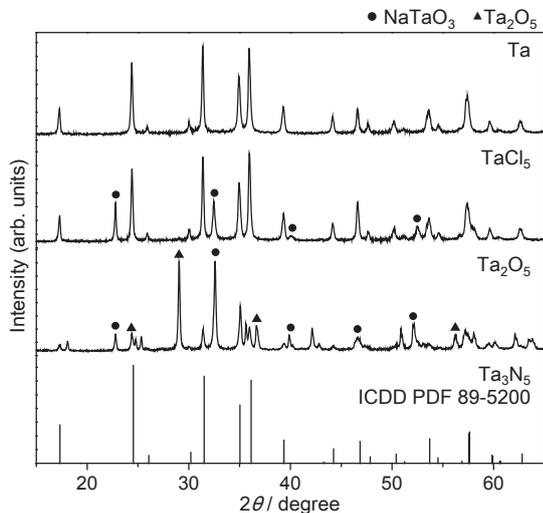


図 3 種々の Ta 源から育成した Ta_3N_5 結晶の XRD パターン

Ta_2O_5 を用いた場合、 Ta_3N_5 とともに、 $NaTaO_3$ や Ta_2O_5 の回折パターンも観測された。 $NaTaO_3$ の生成は、フラックスとして使用した Na_2CO_3 が Ta 源と反応し、 Ta_3N_5 よりも $NaTaO_3$ が安定的に生成した結果であると考えられる。

Ta 源に金属 Ta を用いた場合、柱状 Ta_3N_5 結晶が得られたものの、それらは凝集体であった。図 4 に、Ta 粉末から育成した Ta_3N_5 結晶および原料の Ta 粉末の低倍率 SEM 像を示す。両者を比較すると、

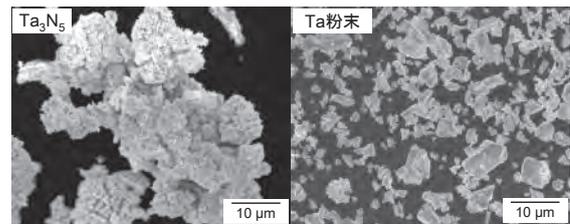


図 4 Ta_3N_5 結晶およびその原料 Ta 粉末の SEM 像

Ta_3N_5 結晶の凝集体は原料 Ta 粉末のサイズや形状を維持していることがわかる。すなわち、Ta 粉末がテンプレートのよう働き、 Ta_3N_5 結晶が成長したと考察する。

単分散した柱状 Ta_3N_5 結晶を得ることを目的として、フラックス種の変更や凝集体の超音波処理を試みたが、単分散の柱状結晶は得られなかった。Ta 粉末がフラックスに完全に溶解すれば、テンプレートの効果は無く、分散した Ta_3N_5 結晶が得られると期待する。そのため、原料の Ta 粉末を小粒径品 (<2 μm) に変更して Ta_3N_5 結晶のフラックス育成を試みた。図 5 に、原料の小粒径 Ta 粉末および生成した Ta_3N_5 結晶の SEM 像を示す。Ta 粉末は真球状であり、1 ~ 2 μm の粒子の周りに数十 nm の粒子が付着していた。この小粒径 Ta 粉末から育成した場合も、生成した Ta_3N_5 結晶は凝集体であり、Ta 粉末の形状やサイズを維持した。ただし、

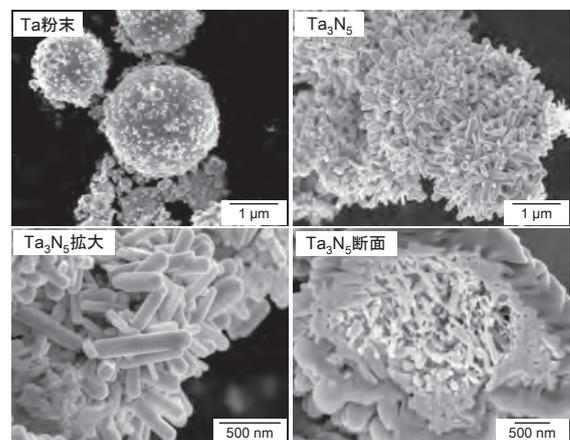


図 5 小粒径 Ta 粉末とその Ta 粉末から育成した Ta_3N_5 結晶の SEM 像

原料 Ta 粉末の小型化によって、個々の柱状 Ta_3N_5 結晶のサイズも小型化した。また、凝集体 1 粒子を集束イオンビーム装置で加工し、その断面を観察したところ、粒子の内部まで柱状結晶が成長する様子を観察した。先の $<45 \mu m$ Ta 粉末を用いた場合には、1 粒子の内部は比較的緻密で、柱状結晶は観察されなかった。このことから、原料 Ta 粉末の小粒径化によって、柱状 (= 高品質) Ta_3N_5 結晶の生成量が増加したと考える。

ACl- Na_2CO_3 (A = Na, K, Cs) フラックスからの Ta_3N_5 結晶の育成と光触媒活性評価

Ta_3N_5 結晶の単分散を目指し、フラックスとして塩化物を添加して Ta_3N_5 結晶を育成した。 Cl^- によって、金属 Ta の溶解・拡散が促進されることを期待した。育成手順は Na_2CO_3 単独フラックスの場合と同じであり、小粒径 Ta、 Na_2CO_3 および ACl (A = Na, K または Cs) の混合粉末を $950^\circ C$ のアンモニア気流中で加熱した。生成結晶の XRD 分析にて、いずれのフラックスからも Ta_3N_5 がほぼ単一相として得られたことを確認した。 $NaCl-Na_2CO_3$ および $CsCl-Na_2CO_3$ フラックスの場合、わずかに $NaTaO_3$ の生成が見られた。また、いずれのフラックスから育成した場合も、 Na_2CO_3 単独フラックスの場合と同様の柱状結晶の凝集体であった。ただし、 Na_2CO_3 に塩化物を混合したフラックスを用いることで、個々の柱状結晶のサイズが小型化した。図 6 (左) に、各フラックスから育成した結晶のガス吸着法にて測定した比表面積を示す。先に示した Na_2CO_3 単独フラックスと比べ、ACl- Na_2CO_3 フラックスから育成した結晶の比表面積が大きい。これは、個々の柱状結晶が小型化したためと考える。次に、これらの結晶の可視光照射下での光触媒特性を評価した。各フラックスから育成した結晶を $AgNO_3$ 水溶液中に懸濁させ、波長 420 nm 以上の可視光を照

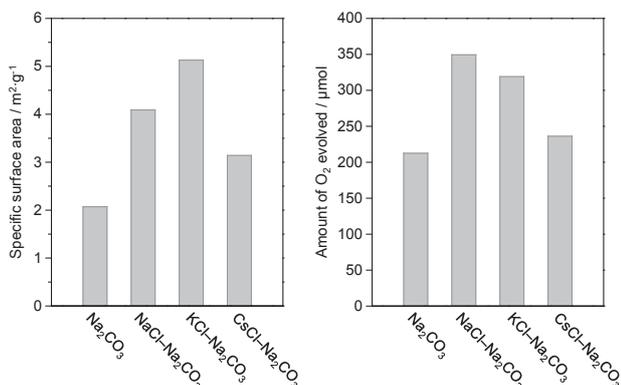


図 6 種々のフラックスから育成した Ta_3N_5 結晶の比表面積 (左) および酸素生成活性 (右)

射し、生成する酸素量を比較した。可視光照射 5 h 後の酸素生成量を図 6 (右) に示す。 $ACl-Na_2CO_3$ フラックスから育成した比表面積の大きな結晶では、 Na_2CO_3 単独フラックスから育成した結晶に比べ、酸素生成量が増大した。一部序列が異なる部分はあるものの、全体的に比表面積と酸素生成活性に相関性が見られた。光触媒活性に寄与すると考えられる他のファクター (露出結晶面や塩化物フラックスからのアルカリ金属の混入有無など) についても今後調査を継続する。

おわりに

本稿では、平坦な結晶面で構成される柱状 Ta_3N_5 結晶のフラックス育成を紹介した。 Ta_3N_5 の柱状形状はその結晶構造を反映していると考えられる。なお、現在の研究では、 Ta_3N_5 結晶の凝集体が得られ、単分散化には至っていない。ただし、現在の形態 (凝集体) でも単分散粒子に無い特長がある。例えば、水中からの回収が容易なことである。一般に、光触媒粒子を水中 (あるいは水溶液中) に懸濁させ、光を照射することで酸素や水素が生成する。最終的には水中から回収しなければならないため、小型の粒子がその表面積を維持したまま二次粒子化あるいは基材に固定化されていることが望ましい。今後も、(酸) 窒化物結晶の形態制御、光触媒特性の向上および水の全分解などを目指して研究を強力に推進したい。

最後に、貴財団より多大なるご支援をいただき、心より感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Hashimoto, Hiroshi Irie, A. Fujishima; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, 8269–8285 (2005).
- [2] W. Chun, A. Ishikawa, H. Fujisawa, T. Takata, J. N. Kondo, M. Hara, M. Kawai, Y. Matsumoto, K. Domen; *J. Phys. Chem. B*, 107, 1798–1803 (2003).
- [3] S. Suzuki, H. Wagata, M. Komatsu, T. Minegishi, K. Domen, S. Oishi, K. Teshima; *J. Mater. Chem. A*, 3, 13946–13952 (2015).
- [4] 大石修治, 宍戸統悦, 手嶋勝弥; フラックス結晶成長のはなし, 日本工業新聞社, (2010).
- [5] T. Takata, D. Lu, K. Domen; *Cryst. Growth Des.*, 11, 33–38 (2011).
- [6] S. S. K. Ma, T. Hisatomi, K. Maeda, Y. Moriya, K. Domen; *J. Am. Chem. Soc.*, 134, 19993–19996 (2012).

有機触媒フロー法による 環境調和型物質合成プロセスの開発

信州大学工学部 物質化学科
戸田 泰徳



はじめに

近年、“分子技術”という新しい概念が認識されつつある。分子技術とは、目的を持って分子を設計し、分子レベルで物質の物理的・化学的・生物学的機能を創出することにより、従前の科学技術を一変させる技術であり、究極の物質合成である。分子レベルでの機能創出には、精密合成と理論計算との協働により、無限に存在する分子の中から最適な分子を自在に合成する必要がある。特に有機合成化学は「分子レベルでのものづくり」を可能にする、分子技術そのものである。分子を組み立てるための化学反応自体は、もの（基質）ともの（反応剤）を混ぜるという極めて単純な操作を基本とするが、それは分子の構造と性質を深く理解した有機化学者による驚くほど緻密な設計に基づいている。

みが考えられる。このような背景の下、炭素・水素・窒素・酸素・リン・硫黄などの有機元素のみから構成された「有機触媒」が2000年頃から注目を集めている。重複する内容であるが、有機触媒には①希少な金属や有毒な金属を使用しない、②取扱いが容易、③再利用が可能、④反応条件が穏和などの長所がある。筆者は有機触媒に分子技術の概念を導入することにより、化学反応を精密かつ合理的に制御し、超効率的な物質合成プロセスを実現したいと考えている。本稿では、これまでの筆者らの研究の歩みと今後の展望について述べる。なお、途中経過の報告であり、十分な検討が行われていないものも含まれることをご容赦いただきたい。

二官能性 TAPS の開発

有機合成化学は医薬品や有機エレクトロニクス材料などを供給する、ものづくりのツールにまで成熟し、物質文明の進歩とライフサイエンスに大きく貢献してきた。同分野のさらなる発展には「新しい分子をつくり、その性質を理解する」ことが不可欠であり、筆者らは未知である分子の性質を理解する方法として触媒反応に着目し、新規触媒反応の開発に取り組んでいる。したがって、新しい分子技術による環境にやさしい物質合成は、本研究の延長線上にあると捉えることができる。

有機触媒は立体選択性・位置選択性・官能基選択性などの選択性の制御を目的として緻密に設計された分子である。有機化合物を構成する元素は限られているため、その開発においては対象とする分子の構造および性質が極めて重要である。筆者らは、リン原子上の置換基がすべてアリール基であるテトラアリールホスホニウム骨格に着目し、新規有機触媒として二官能性テトラアリールホスホニウム塩(以下、TAPSと略す)の開発を行った^{1,2}。二官能性TAPSは母骨格に活性化の起点となるプレンステッド酸性のヒドロキシ基と求核性のハロゲン化物イオンを有するため、二官能性触媒として機能すると期待される。しかし、これまでTAPSが二官能性触媒として利用された報告例は一切無く、TAPSに新しい触

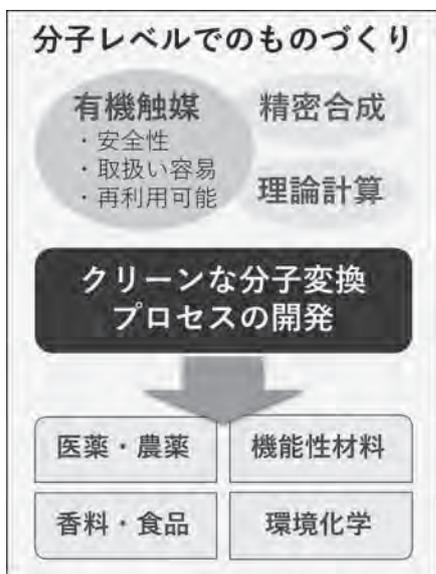


図1 有機合成化学と分子技術

持続可能な社会を構築するため、現代の物質合成には環境への負荷を軽減するクリーンな分子変換プロセスの開発が強く求められている。有機合成化学の分野においては、“環境にやさしい触媒”の開発が極めて重要である。具体的には、有機反応の触媒として環境負荷が大きい貴金属や重金属などを使用せず、取扱いやすく再利用可能な物質で代替する試

媒能を見出すことができれば、分子技術の開発という観点から学術的に極めて意義深い³。

第4級アンモニウム塩やホスホニウム塩などのオニウム塩は、エポキシドと二酸化炭素の反応による環状カーボネート合成にしばしば用いられる。環状カーボネートは塗料の有機溶剤、リチウムイオン電池の電解液、ポリカーボネートの原料などに利用される有用物質である。そこで筆者らは、二官能性TAPSの触媒能を同環状カーボネート合成反応により評価した⁴。TAPSの構造を種々検討した結果、アリール基のオルト位にヒドロキシ基が置換したTAPSが高い触媒能を示し、高収率で環状カーボネートが得られることを明らかにした。なお、本反応に光学活性エポキシドを用いると、完全に立体化学が保持された環状カーボネートを得ることができる。さらに、TAPS触媒系はエポキシドとイソシアネートの反応によるオキサゾリジノン合成にも適用できる⁵。オキサゾリジノンは抗菌剤のリネゾリド(販売元:ファイザー)や抗凝固剤のイグザレルト(販売元:バイエル)など合成医薬品に数多く存在する有用物質である。同オキサゾリジノン合成については、既存の触媒系では厳しい反応条件や煩雑な実験操作を要するケースが多く、近年報告された改良法でもイソシアネートの基質一般性が課題として残されていた。筆者らは、エポキシドとイソシアネートの反応に0.5–5 mol%の二官能性TAPSを添加すると、種々のイソシアネートがエポキシドと比較的穏和な条件で反応し、良好な収率で対応するオキサゾリジノンを与えることを見出した。また、単離した反応中間体を用いた対照実験により、反応機構に関

する重要な知見を得ることができた⁶。

おわりに

物質合成における省エネルギー化(例えば医薬品の製造に伴う溶媒や反応剤の低減など)は重要な研究課題である。一般に市販の医薬品などは、大きな反応容器(釜)を用いて化学反応を行う「バッチ法」により製造されている。しかし、小さなフラスコの中で行っていた化学反応を数百リットルの釜の中で行うには、どのように反応を実施・制御・処理するかという問題が生じる。一方、「フロー法」はカラムと呼ばれる充填剤を詰めた筒状の容器に原料と反応剤を流し込み反応させる方法であり、反応効率や安全性の面からバッチ法より優れている。逐次的に反応容器から生成物を取り出すバッチ法に対し、カラムの末端から連続的に生成物が排出されるフロー法では反応のスケールアップが容易であり、理論的には原料を流す時間を延長するだけで生産量がアップする。したがって、新規分子技術として有機触媒反応にフロー法を適用できれば、原料と反応剤を流すだけで有用物質を得るといった理想的な物質合成プロセスが実現されるであろう。フロー法自体は古くから知られており、例えばハーバー・ボッシュ法によるアンモニア合成のように、基礎化学品の大量合成に用いられてきたが、複雑な構造を有する有機化合物の精密合成に用いることは困難であった。有機触媒フロー法の開発においては、カラムの充填剤に担持された触媒の開発が重要であると考えられる。現在、筆者らのオリジナルの触媒であるTAPSの担持触媒化を模索している。

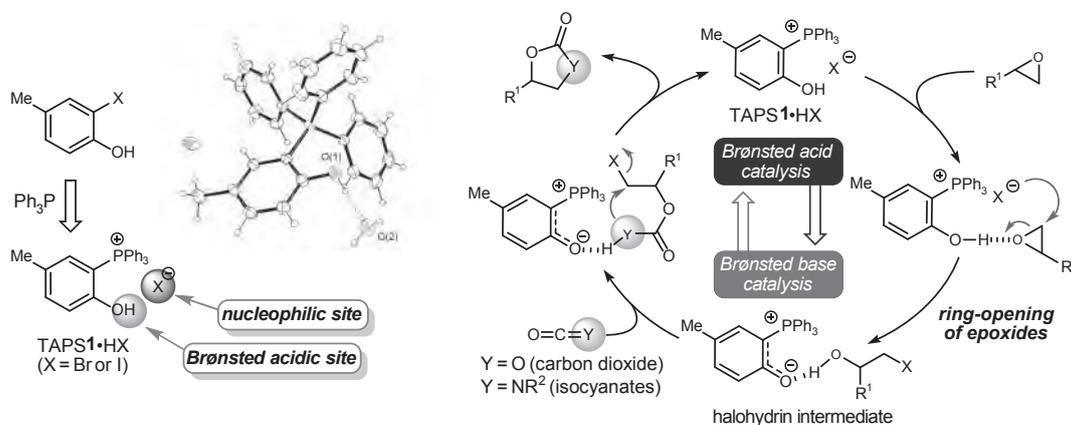


図2 二官能性TAPSを用いる有用物質の合成

謝辞

本研究は、一般財団法人 信州大学工学部若里会平成 29 年度研究助成を受けて行ったものであり、関係各位に感謝申し上げます。また、ご指導いただいた菅博幸 教授、共に研究を行っていただいた学生諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) D. Marcoux, A. B. Charette, *J. Org. Chem.*, **73**, 590–593 (2008).
- 2) D. Marcoux, A. B. Charette, *Adv. Synth. Catal.*, **350**, 2967–2974 (2008).
- 3) T. Werner, *Adv. Synth. Catal.*, **351**, 1469–1481 (2009).
- 4) Y. Toda, Y. Komiyama, A. Kikuchi, H. Suga, *ACS Catal.*, **6**, 6906–6910 (2016).
- 5) Y. Toda, S. Gomyou, S. Tanaka, Y. Komiyama, A. Kikuchi, H. Suga, *Org. Lett.*, **19**, 5786–5789 (2017).
- 6) Y. Toda, T. Sakamoto, Y. Komiyama, A. Kikuchi, H. Suga, *ACS Catal.*, **7**, 6150–6154 (2017).



非線形分散型方程式の臨界現象の解明

信州大学工学部 工学基礎部門
岡本 葵



1 導入

次の5階 Korteweg-de Vries (KdV) 型方程式の初期値問題を考える。

$$\partial_t u - \frac{1}{5} \partial_x^5 u = \partial_x (c_1 u^2 \partial_x^2 u + c_2 u (\partial_x u)^2 + c_3 u^5),$$
$$u(0, x) = u_0(x). \quad (1.1)$$

ここで、 $u = u(t, x) : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ は未知関数、 u_0 は与えられた初期値であり、 c_1, c_2, c_3 は実定数である。特に、 $c_1 = c_2 = -2, c_3 = \frac{6}{5}$ のとき、(1.1) は5階修正 KdV 方程式

$$\partial_t u - \frac{1}{5} \partial_x^5 u = 6u^4 \partial_x u - \partial_x (u \partial_x^2 (u^2)) \quad (1.2)$$

である。この方程式は、修正 KdV 階層の2番目に表れる方程式であり、無数の保存量を持つ完全可積分系であることが知られている。

初期値問題 (1.1) の適切性については多くの研究がある。ここで、適切性とは、初期値問題の解が存在し、一意的であり、さらに解が初期値に関して連続的に依存することをいう。適切性は数値解析の基盤となる概念であり、初期値問題における基本的な問題である。

Kenig et al. [7] は、より一般の高階 KdV 型方程式に対する適切性を得た。具体的には、 P を定数項及び線形項を持たない多項式とするとき、

$$\partial_t u + \partial_x^{2j+1} u + P(u, \partial_x u, \dots, \partial_x^{2j} u) = 0$$

の初期値問題が重み付き Sobolev 空間 $H^s(\mathbb{R}) \cap L^2(|x|^{2m} dx)$ ($s, m \geq 0$ は十分大きな実数) において適切であることを示した。Kwon [9] は、 $s \geq \frac{3}{4}$ のとき、初期値問題 (1.1) が Sobolev 空間 $H^s(\mathbb{R})$ において適切であることを証明した。さらに、 $s < \frac{3}{4}$ では、解写像が局所一様連続にならないことを示した。逐次近似法を用いて初期値問題の適切性を示した場合には、解写像は滑らかになることが知られているため、 $s = \frac{3}{4}$ は、逐次近似法による限界である。また、Grünrock [2] は、Fourier-Lebesgue 空間 $FL^p(\mathbb{R})$ を基にした空間における適切性を示した。

修正 KdV 階層の初めに表れる修正 KdV 方程式

$$\partial_t u - \frac{1}{3} \partial_x^3 u = 6u^2 \partial_x u, \quad u(0, x) = u_0(x)$$

については、初期値問題の適切性や解の漸近挙動が詳しく調べられている。ここでは、適切性に関する結果は割愛し、時間大域的挙動に関する結果を述べることにする。修正 KdV 方程式は完全可積分系であるため、Deift and Zhou [1] による逆散乱法を用いることで、時間大域的可解性や解の漸近挙動を求めることができる。しかし、小さな摂動を加えるだけで完全可積分性は破綻するため、逆散乱法は適用範囲が限定される。

Hayashi and Naumkin [4, 5] は、完全可積分性を用いず、摂動が加わった場合でも適用可能な解析的手法を用いて、修正 KdV 方程式の解の漸近挙動を解明した。また、Harrop-Griffiths [3] は、Ifrim and Tataru [6] による「波束テスト法」を用いて修正 KdV 方程式の漸近挙動を得ている。なお、以上の結果はいずれも小さな初期値に対する漸近挙動の結果であるが、大きな初期値を持つ解は爆発することが知られており ([8, 10])、このような初期値の小ささは本質的である。本研究では、(1.1) について、「波束テスト法」を用いて小さな初期値に対する時間大域的な存在及び解の漸近挙動について考察した。

2 5階修正 KdV 型方程式の臨界性

ここでは、(1.1) の臨界性を見るため、線形解の挙動について簡単に述べる。(1.1) の線形解は

$$e^{\frac{1}{5} t \partial_x^5} u_0(x) = (\mathcal{F}^{-1} [e^{\frac{1}{5} i t \xi^5}] * u_0)(x),$$
$$\mathcal{F}^{-1} [e^{\frac{1}{5} i t \xi^5}](x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{i(x\xi + \frac{1}{5} t \xi^5)} d\xi$$

と書くことができる。また、 $\partial_\xi(x\xi + \frac{1}{5} t \xi^5) = x + t\xi^4$ が0になるのは、 $\xi = \pm(\frac{|x|}{t})^{\frac{1}{4}}$ かつ $x < 0$ のときだけなので、停留位相法により、線形解 $e^{\frac{1}{5} t \partial_x^5} u_0(x)$ は $t^{-\frac{1}{5}} x \rightarrow \infty$ のとき早く減衰し、 $t^{-\frac{1}{5}} x \rightarrow -\infty$ のとき振動する。さらに、自己相似領域 $t^{-\frac{1}{5}} |x| \leq 1$ では、 $Q'''' + yQ_0 = 0$ の解 Q が存在し、

$$e^{\frac{1}{5}t\partial_x^5}u_0(x) = t^{-\frac{1}{5}}Q_0(t^{-\frac{1}{5}}x) \int_{\mathbb{R}} u_0(y)dy + \text{error}$$

と書ける。振動領域 $t^{-\frac{1}{5}}x \rightarrow -\infty$ では、

$$u(t) = ct^{-\frac{1}{5}}(t^{-\frac{1}{5}}|x|)^{-\frac{3}{8}}\mathfrak{R}\left(\widehat{u_0}(t^{-\frac{1}{4}}|x|^{\frac{1}{4}})e^{i\phi(t,x)}\right) + \text{error}$$

と書ける。ここで、 c は定数で、位相関数 ϕ は

$$\phi(t,x) = -\frac{4}{5}t^{-\frac{1}{4}}|x|^{\frac{5}{4}} + \frac{\pi}{4} \quad (2.1)$$

で定められる。

このような考察から、 $\|u_0\|_{L^2} + \|xu_0\|_{L^2} \leq \varepsilon$ ($k = 0, 1, 2, 3$)となる滑らかな初期値を持つ線形解 u は、

$$|\partial_x^k u(t,x)| \leq C\varepsilon t^{-\frac{k+1}{5}}(1+t^{-\frac{1}{5}}|x|)^{\frac{k}{4}-\frac{3}{8}}$$

を満たす。特に、 $|u\partial_x^3 u| + |\partial_x u\partial_x^2 u| + |u^3\partial_x u| \leq C\varepsilon^2 t^{-1}$ が成り立つ。もし、(1.1)の解 u が線形解と同じ減衰を持つとすると、

$$\|u(t)\|_{L^2} \leq \|e^{\frac{1}{5}t\partial_x^5}u(1)\|_{L^2} + C\varepsilon^2 \int_1^t \frac{\|u(t')\|_{L^2}}{t'} dt'$$

となるので、時刻 $t \sim \exp(-C\varepsilon^{-2})$ までしか非線形項を摂動的に扱うことができない。この意味で、 $t \rightarrow \infty$ での漸近挙動が線形解のそれとは異なる予想される。

3 主定理

本研究では、係数に条件

$$c_2 = \left(\frac{3}{2} - \kappa\right)c_1 \quad (\kappa = 0 \text{ 又は } \kappa = 1) \quad (A)$$

を課して、(1.1)の漸近挙動を考えた。この条件は、エネルギー法で取り扱いが難しい項を消し去るためのものである。なお、この条件では、いわゆる5階修正KdV方程式(1.2)が除外されてしまうが、本研究は5階KdV型方程式に関する漸近挙動に関する初めての結果である。

主結果を述べるため、記号を準備する。実数 s, m に対して、重み付きSobolev空間を $H^{s,m}(\mathbb{R})$ で書く。また、そのノルムを $\|f\|_{H^{s,m}} := \|\langle x \rangle^m \langle \partial_x \rangle^s f\|_{L^2}$ とする。ここで、 $\langle \xi \rangle := (1+|\xi|^2)^{\frac{1}{2}}$ である。さらに、 $H^s(\mathbb{R}) := H^{s,0}(\mathbb{R})$ と書く(通常Sobolev空間)。

定理1. 定数 c_1, c_2 は(A)を満たすとする。初期値 u_0 は

$$\|u_0\|_{H^2} + \|u_0\|_{H^{\kappa,1}} \leq \varepsilon \ll 1$$

を満たすとする。このとき、 $e^{-\frac{1}{5}t\partial_x^5}u \in$

$C(\mathbb{R}; H^2(\mathbb{R}) \cap H^{\kappa,1}(\mathbb{R}))$ 及び $t \geq 1, k = 0, 1, 2, 3$ に対して、

$$\| \langle t^{-\frac{1}{5}}x \rangle^{-\frac{k}{4} + \frac{3}{8}} \partial_x^k u(t) \|_{L^\infty} \leq C\varepsilon t^{-\frac{k+1}{5}} \quad (3.1)$$

を満たす(1.1)の時間大域解 u が一意的に存在する。さらに、(1.1)の自己相似解 $\mathfrak{s}(t,x) = t^{-\frac{1}{5}}Q(t^{-\frac{1}{5}}x)$ が存在し、

$$\|u(t) - \mathfrak{s}(t)\|_{L^\infty} \leq C\varepsilon t^{-\frac{7}{10}(\frac{27}{70}-\varepsilon)} \quad (3.2)$$

が成り立つ。

(3.2)の右辺の減衰は、線形解の減衰 $t^{-\frac{1}{5}}$ よりも真に早い。時空反転 $u(t,x) \mapsto u(-t,-x)$ を考えると、 $t \rightarrow -\infty$ での漸近挙動も得られる。

4 時間局所的適切性

作用素 \mathcal{J} を

$$\mathcal{J} := e^{\frac{1}{5}t\partial_x^5}x e^{-\frac{1}{5}t\partial_x^5} = x + t\partial_x^4$$

とする。また、(1.1)は尺度変換

$$u(t,x) \mapsto \lambda u(\lambda^5 t, \lambda x) \quad (\lambda > 0)$$

で不変であり、この変換の生成作用素は

$$\mathcal{S} := 5t\partial_t + x\partial_x + 1$$

である。ここで、 \mathcal{L} と \mathcal{J} に関して、

$$\mathcal{S} = 5t\mathcal{L} + \mathcal{J}\partial_x + 1$$

が成り立つ。[3, 5]のように、作用素 Λ を次で定める。

$$\Lambda := \partial_x^{-1}\mathcal{S} = 5t\partial_x^{-1}\mathcal{L} + \mathcal{J}$$

実数 $s, b \in \mathbb{R}$ に対して、

$$Y^{s,b} := \{u \in \mathcal{S}'(\mathbb{R}^2) : \|u\|_{Y^{s,b}} < \infty\},$$

$$\|u\|_{Y^{s,b}} := \left\| \langle \xi \rangle^s \left\langle \tau - \frac{\xi^5}{5} \right\rangle^b \mathcal{F}_{t,x}[u] \right\|_{L_{\tau,\xi}^2}$$

とする。 $b > \frac{1}{2}$ のとき、 $Y^{s,b} \hookrightarrow C(\mathbb{R}; H^s(\mathbb{R}))$ が成り立つ。また、時間を制限した空間を次のように定める。

$$Y_T^{s,b} := \left\{ u \in L^\infty([0,T]; H^s(\mathbb{R})) : \exists v \in Y^{s,b} \right. \\ \left. \text{s.t. } v|_{[0,T]} = u \right\},$$

$$\|u\|_{Y_T^{s,b}} := \inf \{ \|v\|_{Y^{s,b}} : v|_{[0,T]} = u \}.$$

さらに、

$$\|u\|_{Z_T^{s,\kappa,b}} := \|u\|_{Y_T^{s,b}} + \|\Lambda u\|_{Y_T^{\kappa,b}}$$

とおく。

ここで、時間局所的適切性の結果を述べる。なお、時間局所的適切性では、条件(A)は不要である。さらに、正則性 $u_0 \in H^2(\mathbb{R})$ も課さなくて良い。実際、 $u_0 \in H^{\kappa+\frac{3}{4}}(\mathbb{R})$ であれば、適切性が得られる。

命題 2. $\kappa \geq 0$, $s \geq \kappa + \frac{3}{4}$ とし、 $\varrho > 0$ は十分小さいとする。このとき、 $u_0 \in H^s(\mathbb{R}) \cap H^{\kappa,1}(\mathbb{R})$ に対して、 $T = T(\|u_0\|_{H^s \cap H^{\kappa,1}}) > 0$ 及び (1.1) の解 $u \in Z_T^{s,\kappa,\frac{1}{2}+\varrho}$ で、

$$\|u\|_{Z_T^{s,\kappa,\frac{1}{2}+\varrho}} \leq C(\|u_0\|_{H^s} + \|u_0\|_{H^{\kappa,1}})$$

を満たすものが存在する。さらに、解写像 $u_0 \in H^s(\mathbb{R}) \cap H^{\kappa,1}(\mathbb{R}) \mapsto u \in Z_T^{s,\kappa,\frac{1}{2}+\varrho}$ は局所 Lipschitz 連続である。

適切性は、 $Y^{s,b}$ 空間における次の 3 重線形評価式から従う。

命題 3. s_0, s_1, s_2, s_3 を実数とし、これらを降順に並べ替えたものを $s_0^*, s_1^*, s_2^*, s_3^*$ と書く。即ち、 $s_0^* \geq s_1^* \geq s_2^* \geq s_3^*$ とする。

$$s_2^* + s_3^* > -4,$$

$$s_1^* + s_2^* + s_3^* > -\frac{11}{4},$$

$$s_0 + s_1 + s_2 + s_3 \geq -\frac{3}{2}$$

が成り立つならば、十分小さな定数 $\varrho_0 = \varrho_0(s_0, s_1, s_2, s_3) > 0$ が存在して、任意の $0 < \varrho < \varrho_0$ に対して、

$$\begin{aligned} & \|f_1 f_2 f_3\|_{Y^{-s_0, -\frac{1}{2}+\varrho}} \\ & \leq C \sum_{j=1}^3 \|f_j\|_{Y^{s_j, \frac{1}{2}-\varrho}} \prod_{k \in \{1,2,3\} \setminus \{j\}} \|f_k\|_{Y^{s_k, \frac{1}{2}+\varrho}} \end{aligned}$$

が成り立つ。

この評価式は、Kwon [9] が示した 3 重線形評価式の一般化である。

5 漸近挙動の証明の概要

時間大域解及び漸近挙動の証明で重要な役割を果たす減衰評価式 (3.1) の証明の概要を述べる。証明では、bootstrap argument 及び Ifrim and Tataru [6] による「波束テスト法」を用いる。

ある時刻 $T > 1$ まで (3.1) が成立すると仮定する。

$$\|u(t)\|_{\tilde{X}} := \|\mathcal{J}u(t)\|_{L^2} + t^{\frac{1}{5}} \|(t^{\frac{1}{5}} \partial_x)^{-1} u(t)\|_{L^2}$$

と置けば、(A) と (3.1) 及びエネルギー法により、

$$\|u(t)\|_{\tilde{X}} \leq C \varepsilon t^{\frac{1}{2\kappa}}$$

が得られる。

$t \geq 1, v \leq -t^{-\frac{4}{5}}$ に対して、 $\lambda := t^{-\frac{1}{2}}|v|^{-\frac{3}{8}}$ とお

き、“波束”を

$$\Psi_v(t, x) := \chi(\lambda(x - vt)) e^{i\phi(t, x)}$$

とする。ここで、 χ はコンパクト台を持つ滑らかな関数であり、 ϕ は (2.1) で定義される関数である。また、

$$\gamma(t, v) := \int_{\mathbb{R}} u(t, x) \overline{\Psi_v(t, x)} dx,$$

$$u^+(t, x) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{ix\xi} \mathcal{F}[u](t, \xi) d\xi$$

とおき、 γ は次の意味で u の良い近似であることを示す。

$$\begin{aligned} & t^{\frac{1}{5}} (t^{\frac{4}{5}} |v|)^{\frac{9}{16}} \left| u^+(t, vt) - \lambda e^{i\phi(t, vt)} \gamma(t, v) \right| \\ & \leq C t^{-\frac{1}{10}} \|u(t)\|_{\tilde{X}}. \end{aligned}$$

次に、 u が (1.1) を満たすとき、 $\gamma(t, v)$ の評価式

$$\left| t(t^{\frac{4}{5}} |v|)^{\frac{3}{16}} \partial_t \gamma(t, v) \right| \leq C \varepsilon$$

を用いて、(3.1) が時刻 T を超えても成り立つことを示す。従って、任意の時刻において (3.1) が成立する。

また、自己相似変換 $U(t, y) := t^{\frac{1}{5}} u(t, t^{\frac{1}{5}} y)$ を用いて、 $|\partial_t U(t, y)| \leq C t^{-1-\varepsilon} (|y| \leq t^\varepsilon)$ となることを示し、極限 $Q(y) := \lim_{t \rightarrow \infty} U(t, y)$ が得られる。さらに、 $s(t, x) = t^{-\frac{1}{5}} Q(t^{-\frac{1}{5}} x)$ は、(1.1) の自己相似解である。

謝辞

本研究は、一般財団法人信州大学工学部若里会の平成 29 年度研究助成を受けて行ったものであり、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] P. Deift and X. Zhou, *A steepest descent method for oscillatory Riemann-Hilbert problems. Asymptotics for the MKdV equation*, Ann. of Math. (2) **137** (1993), no. 2, 295 – 368.
- [2] A. Grünrock, *On the hierarchies of higher order mKdV and KdV equations*, Cent. Eur. J. Math. **8** (2010), no. 3, 500 – 536.
- [3] B. Harrop-Griffiths, *Long time behavior of solutions to the mKdV*, Comm. Partial Differential Equations **41** (2016), no. 2, 282 – 317.
- [4] N. Hayashi and P. I. Naumkin, *Large time behavior of solutions for the modified Korteweg-de Vries equation*, Internat. Math. Res. Notices 1999, no. **8**, 395 – 418.
- [5] N. Hayashi and P. I. Naumkin, *Factorization technique for the modified Korteweg-de Vries equation*, SUT J. Math. **52** (2016), no. 1, 49 – 95.
- [6] M. Ifrim and D. Tataru, *Global bounds for the cubic nonlinear Schrödinger equation (NLS) in one space dimension*, Nonlinearity **28** (2015), no. 8, 2661 – 2675.
- [7] C. E. Kenig, G. Ponce, and L. Vega, *On the hierarchy of the generalized KdV equations*, Singular limits of dispersive waves (Lyon, 1991), 347 – 356, NATO Adv. Sci. Inst. Ser. B Phys., **320**, Plenum, New York, 1994.
- [8] C. E. Kenig, G. Ponce, and L. Vega, *On the concentration of blow up solutions for the generalized KdV equation critical in L^2* , Nonlinear wave equations (Providence, RI, 1998), 131 – 156, Contemp. Math., **263**, Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2000.
- [9] S. Kwon, *Well-posedness and ill-posedness of the fifth-order modified KdV equation*, Electron. J. Diff. Eqns. **2008**, 1, 1 – 15.
- [10] F. Merle, *Existence of blow-up solutions in the energy space for the critical generalized KdV equation*, J. Amer. Math. Soc. **14** (2001), no. 3, 555 – 578.

複雑熱流体システム研究室 (杉岡研究室) の紹介

機械システム工学科 教授 杉岡 秀行



1. はじめに

学生時代に世界水準の研究課題に挑戦し突破する経験を持つことは、いかなるスキルを磨くことより重要だと考えています。この考えに基づき、杉岡研究室では、学生さんと教員との共同研究を推進しています。勿論、研究力の根幹を成す真のスキルは重要です。だから、スキルアップは研究と並行して進めてもらうことになります。この意味で、杉岡研究室の学生さんは、大変かもしれません。しかし、今の世の中、自分はこの程度だから、この程度の研究（あるいは技術開発）しかできませんという甘えは許されるでしょうか？学生さんには、自分の可能性を限定しているものは自分自身であり、固定観念を捨てて自分自身の頭で問題に挑戦することができれば、広大な可能性が広がっていることを理解して欲しいと願っております。とは言っても、“悩んでしまう程”の研究活動を学生さんに要求しているわけではありません。まずは、できることを一歩ずつ相談しながら進めていけば良いと考えています。

杉岡研究室は、2016年度から学部生の受け入れを開始し、現在、学部生5人と大学院生8人に私を加えた14人体制の研究室です。まだ運営方法も模索中の新米研究室ですが、昨年度は3人の学生さんとの共同研究の成果が、物理分野及び数学分野のトップ誌であるPhysical Review E誌 [Physical Review 97, 013105 (2018)] に掲載された他、日本物理学会の国際誌 [Journal of the Physica Society of Japan 86, 104402 (2017)] にも掲載されました。また、現在、延べ6人の学生さんとの共同研究の成果3件をトップ誌に投稿中であり、学生さんによる学会発表も順次進めるなど、積極的な研究活動に取り組んでいます。

2. 界面現象を利用したシンプルで革新的な微小熱流体システムの研究

水または電解液中に置いた導電体に電界を印加す

ると、電界の二乗に比例した強い流れが発生する非線形界面動電現象が発生することが知られています。非線形界面動電現象では、1V程度の低電圧印加で1mm/s程度の高流速を発生できるうえ、流路と金属ポスト及び電極等の単純な構成で様々な機能を実現できる可能性があるため、もし実現できれば、小型血液診断システムや小型遺伝子診断システム等への応用が期待されます。言い換えれば、“ μ TAS (micro-Total Analysis Systems)”や“Lab-on-a-chip”の用語で語られるマイクロ流体技術を利用した近未来システムの性能と小型化を飛躍的に向上させ、真のイノベーションをもたらすことが期待できるわけです。しかしながら、非線形界面動電現象の理論的基礎を固めていく過程で、この現象は当初考えられた標準的な理論だけでは説明できない点を多く含み、基礎的に解明すべき多くの基本問題があることが認識されてきました。そこで、当研究室では、これまで理解することが難しかった基礎的な問題を統一的に解明するとともに、具体的な微小流体素子を提案し検証することにより、界面現象を利用したシンプルで革新的な微小熱流体システムの実現と設計論の確立に取り組んでいます。

3. 研究テーマの紹介

少しわかりにくいかと思いますが、以下に現行テーマを簡単に紹介します。

(1) バイオミミック素子の研究

生物を模したバイオミミック素子は、通常の機械では実現できない機能を実現できる可能性があり、注目されています。当研究室では、非線形界面動電現象を利用した人工繊毛を提案し、バルブ、ポンプ、キャッチャー等に利用できることを理論的に示すとともにその実験的検証を進めています [H. Sugioka, Physical Review Applied 3, 064001 (2015)]。

(2) スマート材料の研究

非線形界面動電現象により金属粒子のまわりに流れが発生すると、粒子間の流体力学的相互作用により粒子が配列する現象が予測されています [H. Sugioka, Physical Review E 80, 016315 (2009)]。また、さらに粒子の表面を修飾することにより、様々な構造が実現されることが指摘されています。当研究室では、こうした問題を理論的に予測するとともに、実験的に検証し、デバイスとして応用する研究を進めています。

(3) 熱現象が関与する非線形界面動電現象の解明と熱流体素子の研究

電解液に浸した金属柱に大きな温度勾配を印加すると流体ゼーベック効果という現象を通じて、非線形界面動電現象と同様な四極渦が発生する可能性があることが分かっています [H. Sugioka, Langmuir, 30, (28), 8621 (2014)]。また、良く知られた膜沸騰現象による低摩擦化と熱勾配によって流体が輸送される熱浸透現象の複合効果により、強い流れを発生できる可能性があることも指摘されています。当研究室では、こうした視点に立ち、熱現象が関与する非線形界面動電現象の解明とそうした複雑な現象を利用した熱流体素子の研究を、膜沸騰のような基礎問題に立ち返りながら、取り組んでいます。

4. おわりに

「少しくつまらぬ研究室」のイメージばかりを伝えてしまったかもしれません。

しかし、学部4年から上がってきた修士2年の学生の就職内定先がトヨタ系やJRなどの優良企業であったりすると、少しホットします。そして、業績として残るような研究を学生時代に経験できたことが、学生さんのこれからの人生を明るい方向に導いてくれることを願ってやみません。私自身は、学生時代に指導教員の先生とともに、Applied Physics Letter 誌という応用物理系の一流誌に論文を掲載できたことが、その後の研究者人生の支えとなりました。しかし、自分の学生時代を振り返れば、もっともっと、自主的で挑戦の雰囲気にあふれる、楽しく明るい研究室にしていかなければならないのではないかと、日々反省しています。大学院の頃の私は、挑戦的な研究に取り組んだ経験とともに、研究室の仲間とともに、北アルプスの山小屋に泊まったり、スキーやテニスをしたり、コンサートに行ったり、コンパを企画したりと様々な楽しい思い出を抱えています。また、単独でヨーロッパを自転車で縦断したり、インド・ネパールへ長期旅行したりと異文化への貴重な体験をしたのも大学院の頃であり、それら全ての体験が自分の底力になっていると感じています。だから、矛盾するようですが、学生さんたちには、研究室において、挑戦的な努力を継続するとともに、まわりの仲間と十分交流し、楽しい研究室ライフを過ごして欲しいと願っています。また、そのような育った自由闊達な学生さんが社会の荒波に揉まれながらも世界を舞台に活躍してくれることが今の私の切なる願いです。

無線通信ネットワーク研究室 (笹森研究室) の紹介

—理論を追求し、手軽で効率の良いデジタル無線通信の実現を目指す!—

電子情報システム工学科 (電気電子工学科) 教授 笹森 文仁



Wi-Fi や LTE (Long Term Evolution: 携帯電話用の通信回線規格)、地デジ (地上デジタルテレビ放送)、IoT (Internet of Things: モノのインターネット) など、専門用語が愛称として定着するほど無線通信はとて身近な存在になっています。笹森研究室では、普段から何気なく使っている無線通信

システムを支えている諸技術 (OFDM、スペクトル拡散技術、ダイバーシチなど) の性能を理論的に追求し、手軽で効率の良い無線通信の実現を目指しています。

スマートフォンを使ってより高速に大容量のデータ通信をしたいというニーズがある一方で、センサ

と無線通信機能が組み込まれたモノがインターネットにつながって相互に情報交換するIoTの普及が急速に進んでいます。後者は温度や湿度といった単なる数値データですので、高速な通信回線を必要としないケースが多々あります。Wi-FiやBluetooth、携帯電話回線によるIoT技術の研究開発が進む中、身の回りにあるあらゆるモノがつながることによるIoT回線の逼迫も予想されることから、当研究室では、電波だけでなく光や音波、超音波など無線回線として手軽に使えるものは何でも使えるような方法を探求しています(図1、図2)。そして、限られた無線回線でもより効率良くたくさんのデータを伝送できる無線通信技術について、理論的側面から追求しています。

提案した無線通信技術の有効性を検証する方法として、理論解析、コンピュータシミュレーションによる検証、実験による検証があります。物事を理論的に見つめる能力を大学で身につけるのは当然のこととして、研究室の学生たちには色々な経験を積んでもらい、その経験を活かして企業で活躍してもらいたいので、上記のすべての方法を用いて研究できるスキルを身につけるべく、学生相互で教えあう勉強会を週1回開催しています。実験に関しては、提案した無線信号処理をシングルボードコンピュータ(Raspberry Pi)やArduino互換のマイコンボード(ESP8266、ESP32)などのハードウェアに実装し、SPIやI2Cなどのシリアル通信を用いてAD/DAコ

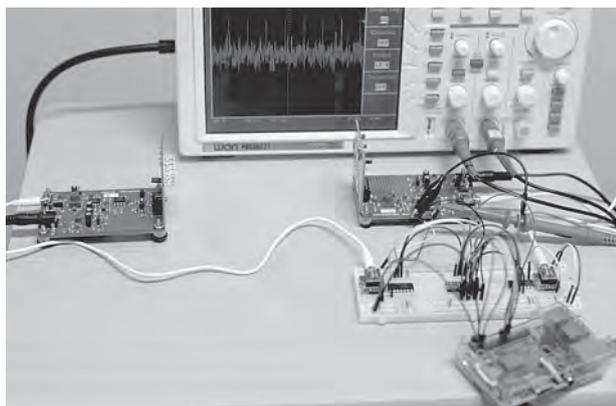


図1 LEDとフォトトランジスタを使った可視光通信



図2 FMトランスミッターとFMラジオを使った無線通信

ンバータなどのデバイスを制御する技術を身に付けます(図3)。コンピュータシミュレーションに関しては、オープンソースのジョブスケジューラ(TORQUE)をインストールしたPCクラスタを研究室に設置し(図4)、同じくオープンソースのOpenMPIを使った並列処理による無線信号処理方法を身につけます。これらの手法は卒業後の実際の開発現場でも必要なので、学生時代に積極的に習得するようエンカレッジしています。

研究に関する議論を学生と一対一でやることを数年前にやめ、ビジネス現場の研究開発・技術開発プロジェクトで良く用いられている手法を取り入れています。研究に関して学生相互で振り返りを実施する手法としてYWT(Y;やったこと、W;わかったこと、T;つぎやること)を週1回実施しています。また、ビジネス向けチャットツールSlackを使い、研究に関して疑問に思っていることや取り組んでいることをTwitterのような感覚でつぶやく「分報」という取り組みを今年度からはじめました。学生一人ひとりにつぶやき返すのは大変ですが、学生相互でつぶやき感覚で議論しあうようになることを期待しているところです。

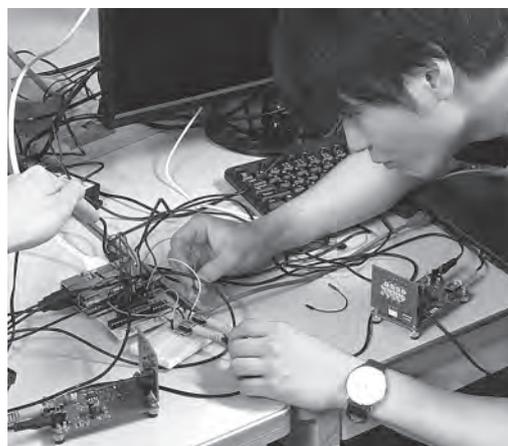


図3 可視光送受信機の組立てに奮闘する学生



図4 並列処理によるコンピュータシミュレーションを実行するためのPCクラスタ

研究以外では、説明能力を高めることを目的として、学会だけでなく色々なイベントに参加するよう心がけています。高校生向けのキャンパス見学会での説明はもちろんのこと、子ども向けの科学教室は物事をわかりやすく説明する能力を高める絶好の機会だと考えています。例えば、科研費による研究成果を子どもたちに伝える「ひらめき☆ときめきサイエンス」では、可視光通信のしくみを小学5、6年生と中学生に教えるサポートを研究室学生にお願いしています。音楽を伝送するための可視光送受信機を子どもたちに組み立ててもらうのですが、その前に音の勉強をしてもらうべく、オシロスコープで音の波形を観測してもらったり（図5）、スペクトルアナライザソフトで周波数の概念を教えたりしています。可視光送受信回路はブレッドボードに電子

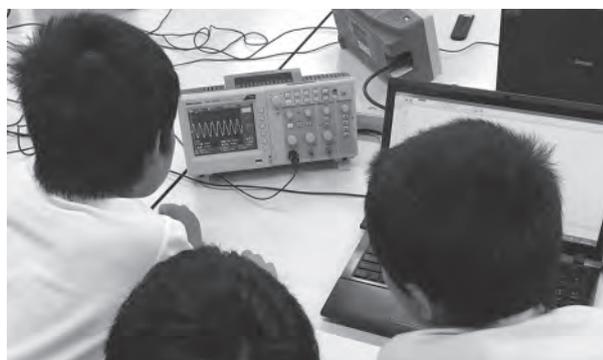


図5 オシロスコープで音の波形を観測する小学生たち

パーツを挿しながら組み立てていくのですが（図6）、音の勉強も回路の組み立ても初めての子どもたちがもちろん多いです。わからないことをわかってもらうように工夫する能力の向上は回数を重ねることが一番の近道ですので、「ひらめき☆ときめきサイエンス」はその絶好の機会です。

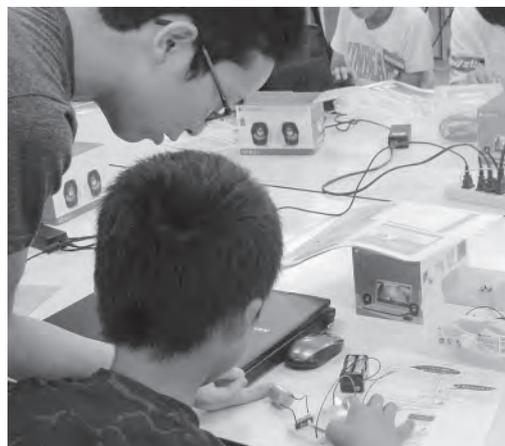


図6 マイコンでのLEDの制御をサポートする学生

簡単ですが、以上で研究室の紹介は終わりです。果たして大学の研究室でやるべきことなのか判断に迷うことも多々ありますが、私自身の研究開発者魂で、学生教育に関しても色々と新しいことを取り入れて、学生たちが楽しみながら自身の成長を継続できる環境づくりを常に心がけています。

水資源の政策支援研究 吉谷研究室紹介

水環境・土木工学科（土木工学科） 教授 吉谷 純一



研究事例

吉谷研究室は私が信州大学に赴任した2016年4月に発足しました。まずは、当研究室で実施した2つの研究事例を紹介します。

事例1：造山帯水文学確立の支援研究

図1は世界の造山帯の分布です。造山帯は火山活動が活発で崩れや浸食に弱いですが肥沃な土壌を形

成するため、(1)土砂災害が多い、(2)耕作地が多い、(3)山地に多くの方が住み着く、(4)人口が密集する、(5)水災害危険地帯が多い、という性質があると日本の水文学（すいもんがく、水の挙動を扱う科学）者は認識しています。安定帯の欧米で発達した水文学は造山帯には必ずしも適さないため、造山帯に適した水文学を確立すべきとの機運が2000年頃から高まり、日本の水文研究者はこぞってアジア諸国を対象とした研究にシフトしました。しかし、造山帯

の特徴はデータの裏付けがありませんでした。平成28年度卒業の山崎康貴君に、上記5項目が本当かを必要な全球データを集集し、造山帯と安定帯の差を統計分析してもらいました。その結果、(2) - (5)は有意な差が検出され、専門家の認識の4/5はデータで裏付けされました。



図-1 世界の造山帯 (山崎康貴君作成)

事例2：カリフォルニアの渇水対応

写真-1はカリフォルニア州メンドータ市の地盤沈下の様子です。2016年11月に信州大学工学部で開催したカリフォルニア州水資源部のカミヤ・グビッチ氏の講演資料からの引用です。これは地下水の過剰揚水が原因です。渇水時は普段より多くの地下水を汲み上げるので地盤沈下が急激に進行します。州政府資料では、2000年以降、渇水は2001-2001年、2006-2010年、2012年以降発生しています。

この渇水の日本での報道は、奇抜な取組が断片的になされるだけです。そのため、専門家ですら渇水被害の深刻度や公式の取組みは全くと言って良いほど知られていません。その実態は、加州の渇水は日本で度々行う水道の給水制限を行う事態よりはるかに深刻度が低くにもかかわらず、さらに信頼性の高い給

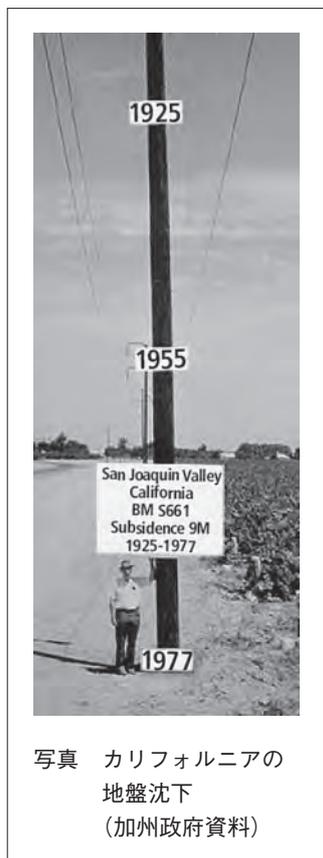


写真 カリフォルニアの地盤沈下 (加州政府資料)

水の実現を目指し、河道外貯留施設の建設を含む統合水資源管理と呼ばれるマネジメントで長期的に対処しようとしています。

今回の渇水で特筆すべきことは、今回初めて州民が本気で節水を始めたことです。レディガガなど著名人による節水キャンペーンや、州法と州予算の裏付けをもって水を多く消費する芝や樹木を土地ごと買い上げる取組みも行っています。その背景には、過去渇水に悩まされて続けたにもかかわらず、加州での日一人当たりの都市用水(水道+工業)使用量は現状で760リットルもあることがあります。これを将来628リットルに削減する計画です。参考までに、東京都水道局の日一人当たり配水量は320リットル程度です。統合水資源管理や貯留施設増強に加え、節水の推進で、加州としてあるべき生活・経済・環境の質を落とさずに対処できるという判断です。

このような調査を現地専門家へのインタビューなどで実施し、日本の専門家に情報提供する活動を行っています。研究は、この大きな課題のごく一部を取り出して実施します。例えば、平成28年度卒業の田村恭斗君には、加州の現渇水と利根川水系の最大級渇水の深刻度を同じ指標で評価する研究を実施してもらいました。

ちなみに、先述のカミヤ・グビッチ氏の講演会開催をきっかけにアクア・イノベーション拠点は、加州の渇水の取材番組を企画しました。取材番組は、信州大学動画チャンネル「三四六と学ぶ!世界を変える信州のアクア・イノベーション第2弾」で見ることができます。

研究室の運営方針

紹介した研究事例のとおり、当研究室は広い意味での水資源に関する現実の問題や新規政策に密接に関わる研究を行っています。それは、私は国立研究所で河川の計画管理を支援する実務的な調査研究を行ってきた経歴のためです。国立研究所では、自らの興味に基づく研究ではなく、組織が実施する諸政策・施策の推進に役立つ調査研究が強く求められます。ただし言われたことを実施するだけでは全く評価されません。組織や業界の動向を先読みした研究、さらには業界の標準技術を良い方へ変える、あるいはそのきっかけをつくる研究をしないとなかなか認められません。ここで技術とはすぐ何かに役立つという狭い意味だけでなく、混沌とした状況を整理する、課題解決の道筋は見えないまでも今までに

ない新しいアイデアを持ち込むことも含まれます。これに関連する研究をおおざっぱに政策支援研究とかってに呼んでいます。新アイデアは思いつきレベルでは実現性に乏しいので、実施済みで効果や社会的副作用がないと実証された事例が貴重です。その宝庫は米国と経験的に思います。私は国立研究所在職時やカリフォルニア大学デービス校修士

留学時代からの人脈を利用し、カリフォルニアの水政策の分析、現地専門家を招へいた国内でシンポジウム開催などを何回か行ってきました。大学には革新的新技術を生み出す開発研究が期待されているのは十分承知していますが、他の先生方がこの研究活動を行っていますので、私は政策支援研究を当面の運営方針として活動しています。

空間デザインの理論と実践

建築学科 准教授 羽藤 広輔



羽藤研究室では、建築や家具など人間の生活空間に関わるもののデザインについて、理論と実践の両面から取り組んでいます。前者では、特に昭和期建築家が展開した伝統論などの言説と建築設計を中心とした制作活動の関連について研究し、後者では、建築設計や家具デザインの実践、設計競技やワークショップへの参加を通じて、空間デザインの新たな可能性を模索しています。

(研究キーワード：近代建築史、建築意匠、空間デザイン)

現在、研究室では、学生それぞれが主体的にテーマを設定し、研究・制作に取り組んでいます。ここでは大学院の演習で行っている「建築家の伝統論」に関する研究について紹介します。

伝統論とは、日本の伝統がいかにあるべきかを論じたものであり、桂離宮や伊勢神宮を日本の伝統の

真髄と捉える事例など、近代以降、様々な場面で、建築意匠のあり方に大きな影響を及ぼしてきました。近年の例で言えば、新国立競技場コンペで当選案となったザハ案が白紙に戻される際に、「日本らしさ」とは何かという問いが重視され、仕切り直したプロポーザルにおいて、A案では、軒庇が作り出す水平ラインを、B案では、垂直線を強調する柱の象徴性を日本らしさと捉え、それぞれに対照的な伝統論に基づく計画が提示されました。

こうした現代の伝統理解に大きな役割を果たした事象として、1950年代の伝統論争が挙げられます。丹下健三や白井晟一といった建築家達が、建築設計における伝統と創造の問題について、それぞれの主張を展開したものであり、縄文・弥生の対比による伝統理解などが特徴として指摘されてきましたが、一方で、その総括のされ方が不十分であることも分



写真1：ワークショップ参加の様子



写真2：伝統論研究における建築作品の実見

かってきました。

そこで、同演習では、今後の建築意匠における伝統理解が、より厚みと多様性をもって展開されていくための基礎的な研究として、1950年代当時の建築家達の言説を丁寧に見直すことにより、これまで取り上げられて来なかった、同論争の新たな側面を明らかにすることを試みています。

空間創造の現場において、作者の思想が制作物に

与える影響は少なくなく、羽藤研究室では、その多様なあり方を探求しています。前述のテーマを基に、今後は「地域らしさ」というテーマへの展開も見据えながら、空間デザインに関わる研究・制作に取り組んで行きたいと考えています。

(現在、開設2年目。学部4名・修士4名が在籍しています。／研究室HPアドレス：<https://khatolab.com>)

真のものづくりをめざして (菅・戸田研究室)

物質化学科(物質工学科) 教授 菅 博幸

物質化学科(物質工学科) 助教 戸田 泰徳



1. はじめに

一般に、化学の中の分野を大きく分類すると、物理化学・無機化学・分析化学・有機化学の4つに分けることができ、これに加え生物化学も重要な分野として挙げることができると思います。化学に関連する研究者の多くは日本化学会に所属していますが、その中で有機化学の研究者が占める割合は大きく、全国的に見ても、工学部をはじめ理・農・薬などの理系学部には必ずというほど有機化学の研究室が複数設置されています。本学工学部では、当研究室が唯一の有機化学の研究室となっており、化学を主として取り扱う学科として教育・研究ならびに人材育成をする上で、非常に残念な状況にあると思います。今回、私たちの研究室を紹介する機会をいただきましたので、少しでも有機化学の魅力をお伝えしたく筆をとりました。

2. 有機化学と研究内容について

H27年4月に私(戸田)が助教として着任して以降、菅博幸教授のご指導の下、当研究室は現在の体制(H30年6月現在、修士学生9名、学部生5名)で研究を行っています。炭素を含む化合物のほとんどは有機化合物に分類され、生命体で最も重要な位置を占めており、地球上の生命の存在の根源であり、我々の存在は炭素化合物に基づいているといえます。このように、生命体を構成するタンパク質やエネルギーとなる糖類、食品、化粧品、医薬品、機能

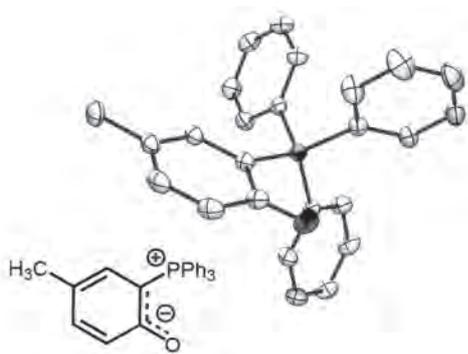
性材料、衣類、プラスチックなど、私たちの生活は数多くの有機化合物に支えられています。その有機化合物を自在につくるための学問、そして科学技術が有機化学です。大学の有機化学の教科書には、有用な有機化合物(=分子)の例として医薬品の構造式が登場しますし、実際に産業界では製薬業界、特に医薬品製造の分野と密接に関わっています。しかし、一般には、そのような認識は薄いように感じます。これは、化学者が分子という目に見えないものを扱っているために、一般の方にはものとして認識されないからでしょうか?大工さんが家を建てるように、化学者は有機化学の理論に基づく設計図により、分子をつくることができるといえば理解してもらえるのではないかと思います。

私たちの“有機化学”という学問が最終的に結び



研究室メンバーの集合写真(H30年6月13日撮影)

つく先は、医薬品などの有用物質＝有機化合物の合成を効率的に行うための方法論を開発することです。たとえば、ある物質を合成するのに従来は数工程を踏んでいたものを1工程にする！とか、まったく違う方法で簡単に合成する！といったことです。あるいは欲しいもの（有機化合物）だけを選択的かつ効率的につくる方法論の開発も重要です。化学の分野では“選択的かつ効率的”という表現がしばしば用いられますが、この言葉には“環境にやさしい・廃棄物を出さない・低コスト”などの意味が含まれています。たとえば、AとBを反応させてCという有機化合物を合成する際、目的物Cだけではなく、DとEといった不要物が得られる場合があります。これらC～Eの混合物からCだけを分離するには多大な労力を必要とします。このような課題の解決のために、私たちが研究に取り組んできた方法が「分子触媒」の利用です。化学反応を促進する物質を触媒とよびますが、特に化学反応の選択性や効率性を高めるため人工的に合成された触媒を分子触媒とい



独自に設計・開発した分子触媒

います。私たちは、独自の分子触媒を設計・開発し、そのチカラを利用して欲しいものだけが得られるように（先ほどの例ならば不要物DとEが得られないように）化学反応を制御しています。分子触媒を用いる新しいものづくりは、物質合成の効率化を実現する真のものづくりであると強く信じています。

3. おわりに

有機化学は日々の生活を支え、豊かにしています。ある日、ある瞬間、フラスコの中で偶然起きた現象（＝化学反応）が、数十年後の世界を変えてしまうこともあると考えると、非常に夢にあふれた学問だと思います。しかし、その反応は驚くほどシンプルな概念に基づいており、基本的な原理を理解すればとても論理的に説明することができます。有機化学の教科書には、『有機化学を学ぶ場合に最も重要なことの一つは、膨大で複雑な集積された知識が、反応機構（化学反応のメカニズムを記述するもの）により順序立てて整理され、理解できるようになることである。』と記述されています。これはすなわち、何千万もの化学反応が知られていますが、これらすべてを機械的に丸暗記する必要がなく、化学反応のメカニズムを理解すれば、体系的に捉えることができるということです。新薬の開発や新材料の提供など、明るい未来を築くために有機化学の研究は重要な役割を果たしています。日本の有機化学は世界のトップレベルに位置し、多くのノーベル化学賞受賞者を輩出しています。私たちも信州の地から真のものづくりをめざし、研究に邁進していきたいと思えます。

集積回路システム設計研究室 （上口研究室）の紹介

電子情報システム工学科（情報工学科） 准教授 上口 光



1. はじめに

電子情報システム工学科は、「電気電子」「通信システム」「情報システム」の3プログラムで構成されており、個々の学生の専門的興味と将来の進路に合わせた履修選択の自由度が向上した教育プログラ

ムを提供しています。集積回路システム設計研究室は、「情報システム」プログラムに所属しています。研究室は、2014年5月に上口准教授が着任して以来約4年というまだ比較的若い研究室で、卒業生も昨年3月によりやく三代目の卒研究生と、初めての

修士学生を送り出したところです。2018年7月現在は、学部4年次の卒研生4名と、修士2名（その内1名はパレスチナからの留学生）の計6名の学生が所属しています。

2. 上口研究室が目指す未来

エレクトロニクス、情報技術の進歩は、インターネット、携帯電話など、新しい産業・サービスを創出しています。特に、集積回路の微細化は様々な機能を低コストで実現し、コモディティ化により、医療、農業といった様々な分野に応用されるようになってきました。しかしながら、今、日本のエレクトロニクス業界はコスト競争の点で大変苦しい状況にあります。このような状況を打開し、商品を差別化するためには、集積回路を自らカスタマイズ（設計）し、使いこなす必要があります。

近年、IoT（モノのインターネット）という言葉に代表されるように、世の中の様々な情報を取得し、処理する、Trillio sensors（何兆個のセンサ）の時代がもうすぐそこに迫ってきています。これにより、半導体集積回路技術は、医療、薬品、農業、畜産、食品、物流、建築、土木といった多種多様な分野に応用されていくはずで、技術がコモディティ化する中で、製品の差別化を図り、「尖った」競争力あるモノを実現するためには、集積回路設計技術が不可欠です。

そこで研究室では、集積回路設計技術としてデジタル、アナログ回路設計のみならず、センサ、デバイスといった要素技術から、アーキテクチャ、ソフトウェアまでを研究領域としています。また、集積回路設計技術を用いて、新しい計算機アーキテクチャを開発し、ソフトウェア、アプリケーションと協調した新たなシステム・サービスの構築も目指しています。技術の出口まで意識して研究を行うことで、ICT（情報通信技術）の発展に貢献することを目指しています。

3. 研究テーマ紹介

集積回路システム設計研究室で実施している研究テーマの内から代表的なものを3つ紹介します。

3.1 発汗センサの開発

医療分野では、日常生活下での発汗量の測定をりたいというニーズが高まっていますが、従来の発汗計では、図1(a)に示すような大きな筐体が必要であり、測定環境に制限がかかります。そこで本研究では更に、センシング部分と空気流路をモジュール化し、CMOS集積回路を用いたコンパクトセン

サの開発を行うことにより、より手軽で利用範囲の広い発汗量観測システムを提供することを目標としています。図1(b)にこれまでに開発した作成した測定用プロトタイプと測定環境を示します。プロトタイプでは、A/D変換器、基準電圧、電流発生回路をカスタム集積回路化しています。プロトタイプによる測定評価から、従来の大きな筐体のシステムと同等レベルの測定精度を実現しつつ、ウェアラブル可能な小型化、省電力化が実現できていることを実証しています。

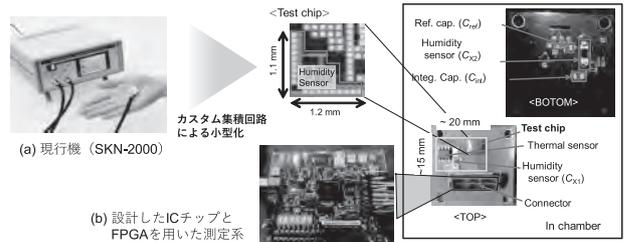


図1: ウェアラブル発汗計の開発。

3.2 不揮発メモリを用いた新しい計算機アーキテクチャ、ストレージシステム技術

近年、ハードディスク・ドライブに代わり、フラッシュメモリを始めとする半導体不揮発メモリが登場したことにより、ポータブルメディアプレーヤー、スマートフォン、タブレットといった様々な形態の携帯端末が発明され利用され、また、ソーシャルネットワークと呼ばれる新たなサービス・産業も生まれています。これら携帯機器に搭載される様々なセンサデバイスから、様々な環境情報を取得できるようになり、爆発的に増えるこれらの情報をどうやって安価かつ安全に記憶し、また高速にアクセスするか、ということが、キーテクノロジーとなっています。現在、これらの情報を集約し、処理を行っているのは、データセンタと呼ばれる設備ですが、この世界中のデータセンタで消費する電力量は、2012年時点ですでに、原子力発電所30基分に相当する300億ワットに達していて、この増加傾向は更に加速しています。そこでこの研究テーマでは、データを保持するデバイスとして消費電力、発熱の大きいハードディスク・ドライブから、より高速なNANDフラッシュメモリ置き換え、更にそれに加えて、より高速、省電力な不揮発ストレージクラスメモリ(SCM)を用いたストレージアーキテクチャを提案しています。図2(a)に示す通り、SCMを用いることで、ストレージとその上位のメインメモリとの速度ギャップを埋めることができるため、大幅な性能向上が見込めます。しかしながら、SCMは高価な

デバイスであり、また、使用する際に特徴のある回路構成であるため、それに見合った最適なアーキテクチャを再構築しなければなりません。図2(b)に示す通り、SCMそれぞれの特徴に見合った使いこなし方をすることで、フラッシュメモリのみで構成されるストレージ（1層）と比較して、SCMを用いた場合（2層と3層）は、コストを同じに揃えた場合においても、最大で10,000倍程度の性能向上が見込めることを、計算機シミュレーションにより証明しています。

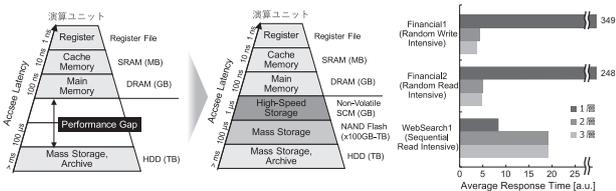


図2: SCMを用いたストレージシステム。

3.3 ウェアラブルロボットスーツ向けサーボアンプ小型化に関する研究

世界的に高齢化の進行が社会問題となっており、介護・福祉分野での支援技術確立に向けてさまざまな研究開発が行われています。中でも、ウェアラブルロボットは今後急速に需要の拡大する分野として位置付けられ、産学で活発な研究開発が行われています。本学でも繊維学部を中心として、「近未来体内埋め込み型歩行アシストサイボーグプロジェクト」を組織し、それらの課題を同調制御法と衣服の

ようなウェアラブルロボットを実現することで解決し、高齢者、患者の生活支援のために利用することを目指し、研究を行っています。上口研究室では、そのプロジェクトの中で、アクチュエータ制御ユニットの小型化という課題について取り組んでおり、集積回路技術を積極的に利用することにより、この課題に挑戦しています。本研究は、2016年度に若里会の研究助成をいただいております。第一段階として、サーボアンプ基板設計の最適化を行い、図3(b)に示すようにアクチュエータ制御ユニットの約35%の大幅な小型化に成功し、さらにパンツタイプのウェアラブルスーツ実現にも貢献しました。現在では、ドライバ回路を集積回路技術を用いて最適化し、ワンモジュール化（図3(c)）することで、省電力化、同調制御の高精度化、などを実現し、更なる小型化のみならず、装着感や扱い易さの向上といった課題にも挑んでいます。



図3: ウェアラブルロボットスーツ向けサーボアンプ小型化に関する研究。

生命を知る、創る

物質化学科（環境機能工学科） 准教授 片岡 正和



生命科学—生命工学—社会倫理

20世紀後半のワトソン、クリックによる核酸構造の解明と遺伝における重要性の発見に端を発し、ネイサンズ、バーグによる遺伝子操作法の開発など多くのノーベル賞、あるいはそれに準ずる発展を経て生命を分子の言葉で説明する時代となり、今世紀初頭には我々ヒトを含む多くの生物の設計図であるゲノムの一次構

造が決定され、さらに多くの生物情報が解読されつつある。この科学史上空前絶後の発展は、ほんの20年前まで手塚治虫氏の漫画の中だけであった世界を実現可能に思わせる。また、現実社会において遺伝子組み換え植物（GMO）、ゲノム創薬、個体差の遺伝情報（SNPs）に基づく個別治療、犯罪捜査など社会に恩恵をもたらす、今後さらに発展するのは確実である。さらに生命

工学の発展により、多くの新たな倫理基準作成の必要性が出てくる。

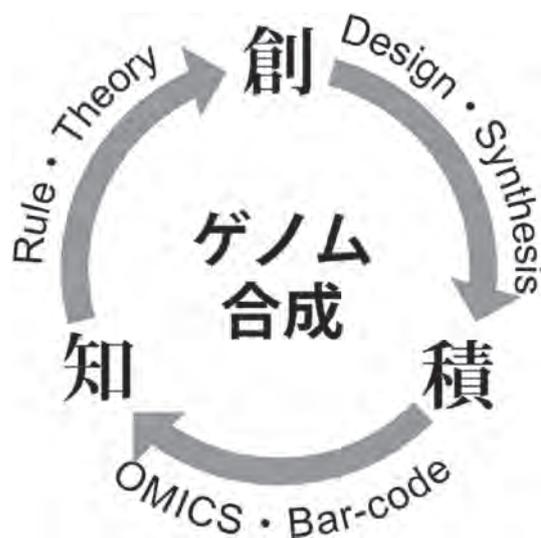
上は10年前本誌に依頼された原稿の書き出しである。生命科学のルネッサンスは1950年前後に勃興し、1960年から80年代までに分子生物学という物理学・化学をコアとする方法論を生み出し、さらに数学分野まで巻き込むこととなった。その後の生命科学分野の進みは凄まじく、現在では生命科学を専攻する大学院ですら、一部の超優秀な自立的学習ができる院生以外ではついていけないほど先端部分と教育現場では齟齬がでている。上記の原稿前後から十数年だけでも次世代シーケンサーの開発と広がりによる塩基配列の爆発的増加とそれともなうマイクロバイームやメタゲノム手法あるいはエポデポといった新しい考え方、山中らによるiPS細胞の誘導とその後の再生医療分野での過激な開発競争、CRISPR-Cas9によるゲノム編集の応用と非実験生物での応用、合成生物学時代の幕開けを告げたCraig Venter研究所による人工ゲノムを持つ細菌の創成など、今後の世界を変える技術や知見が目白押しである。ただしこれらの先端研究では優秀な頭脳はもちろん、莫大な研究費、多くの研究者（もちろん学位持ち）、技術者を必要とし、一地方大ではとてもまかなえない、もちろん日本ではトップかもしれない東大でも国際レベルでは一地方大であり、現時点でiPSを除けばほとんど日本の出る幕はない。

当研究室では後述の研究を行っているが、これらは急速に進展している膨大な体系の一部分にすぎない。むしろ若い貴重な時間の大半を研究室で過ごす学生には、研究を通じて調査能力、思考能力、対人説得力、そして確実な知識に基づく生命倫理観といった科学技術に携わる人間としての素養を身につけてもらい日本の近未来を託したい。

研究紹介

片岡研では分子生物学を主たる手法として、“放線菌接合因子の分子遺伝学”と“脳機能の分子構築”について研究していたが、多くの人員とコスト、設備を必要とする神経科学からは撤退し、新しい生命をデザインする“合成生物学”へシフトしている。合成生物学分野では如何に巨大なDNAを構成し、移植するかが技術的問題となっており、そこに我々の系を導入しようとしている。合成生物学での生命デザイン戦略を以下の図で示す。

これらの戦略の中で片岡研ではゲノムをデザインし、巨大化させて移動させる部分を受け持っている。



その元になったのが院内感染などでの研究の歴史を持つ接合現象である。

性を持たない細菌はどのようにして遺伝的多様性

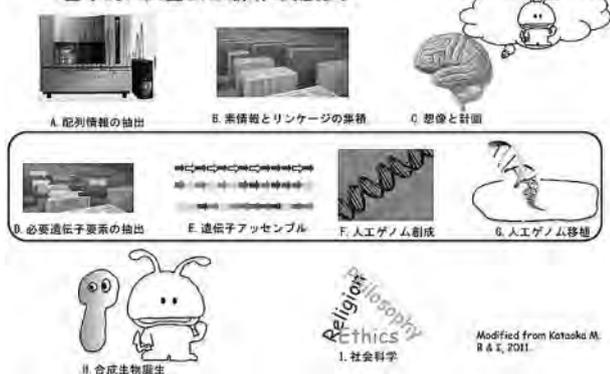


を獲得し、環境適応を果たしてきたのか？この問いへの答えは遺伝子の水平移動現象にある。片岡研では院内感染や自然界における抗生物質耐性菌の広がりの原因であるR因子と呼ばれる接合因子を合成生物学分野で応用するべく研究を行っている。例えばこの系を利用すればヒトへの安全性が歴史的に担保されている麹菌や納豆菌を化学工場として使う、所謂生合成マシナリーとして利用する技術の開発につながる。また、変わったところでは抗生物質生産菌として発酵工業の主役である放線菌の遺伝的多様性獲得機構としての接合因子に着目し、接合因子が仲介する遺伝子水平移動メカニズムの分子機構の解明、および技術的応用を目指した研究も実施している。これらは最終的に産業微生物である放線菌の自在な遺伝子発現系の開発やモザイクゲノムを持つ新規放線菌の開発につながる。

これらの研究は合成生物学で応用面だけでなく、基礎研究からの知見で生物がどのように進化してき

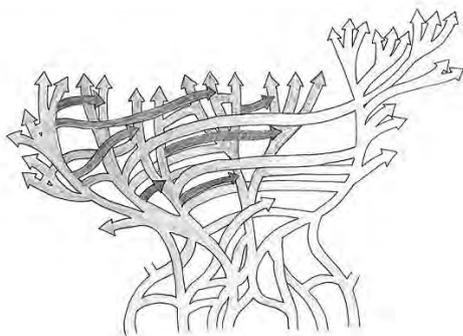
合成生物学の方法論

基本的に大型DNA操作は難あり



たかを知る指標にもなる。実際片岡研でも最近これまでに知られているよりもずっと高頻度で遺伝子水平移動が起こっていることを示すデータを得てい

叢林型進化論による系統樹と遺伝子水平移動の役目



る。ちなみにこのデータをたたき出したのも、ここで用いている一部の手書きの絵を描いたのも昨年卒業の信州大の4年生であり、学生の中にはたまに凄いのもいるもんだと感心した次第。

これらはメインのテーマだが、他にも生きてる状態を描写するテーマも動かしている。その一つが微小領域の pH をリアルタイムで計測するというもの。これは下村博士の GFP の変異型を利用して蛍光変化を二成分で検出し、算定する原理に基づいている。

また、現代生命科学では大量のデータを取得し、計算機に自動転送、自動解析する手法も必要である。我々は手法を構築し、利用する研究も行っており、

pH homeostasis



- Real-time monitoring of bacterial cellular pH
- Monitoring individual bacteria

Estimation of pH homeostasis

New insight of membrane potential

システムの一部を下記に示す。これらの手法は systems biology と呼ばれる計算機生命科学分野の研究に用いている。

測定方法 寒天培地

プレートを30分毎に計20時間スキャナで読み取り、画像からコロニーの中央座標を指定して菌体量を測定



96穴用のピン



インキュベーター内のスキャナ

研究室での生活

現在の研究室の構成員は、課程博士学生2名、修士学生3名、学部生6名である。研究室では月曜日の英文文献紹介から始まり木曜日のデータカンファレンスで一区切り。基本的には自由主義で伸びる人は伸び、就活以外何もしないままの学生もいるのは時代の流れか……。でも若いうちの経験が人生に生きると思うのだけだ。

片岡研連絡先

E-mail: mars@shinshu-u.ac.jp

Tel 026-269-5538

「技報 こまくさ」 第 16 号 平成 30 年 10 月発行
(非売品)

発行者 一般財団法人信州大学工学部若里会
〒 380-8553

住 所 長野県長野市若里 4 丁目 17-1
TEL (026) 266-8209 (FAX 共有)
E-mail : wakasat@shinshu-u.ac.jp

印刷・製本 株式会社アイデスク
〒 381-0025 長野市北長池 1263-1
TEL (026) 244-4551

技報



一般財団法人 信州大学工学部 若里会