



技報



K O M A K U S A ・ 2020.10 ・

## コロナウィルス禍の中、徒然なるがままに

一般財団法人信州大学工学部若里会 理事長 神田 鷹久

研究助成  
報告

### 接合伝達遺伝子群を利用した放線菌染色体工学の樹立

物質化学科 片岡 正和

### 透磁率ゼロの新たな導体を用いた表皮効果を抑制する 低損失な導線とインダクタ

電子情報システム工学科 曾根原 誠

## | 研 | 究 | 室 | 紹 | 介 |

界面を理解して、界面を制御する！  
界面化学研究室(酒井俊郎研究室)の紹介  
物質化学科 教授 酒井 俊郎

ソフトウェア工学研究室(岡野・小形研)の研究室紹介  
電子情報システム工学科 教授 岡野 浩三  
電子情報システム工学科 准教授 小形 真平

地盤工学(河村)研究室紹介  
水環境・土木工学科 准教授 河村 隆

自律知能システム研究室(山崎研究室)の紹介  
機械システム工学科 准教授 山崎 公俊

人口減少時代における都市計画  
建築学科 助教 佐倉 弘祐

No. 18

# 目 次

コロナウィルス禍の中、徒然なるがままに ／一般財団法人信州大学工学部若里会 理事長 神田 鷹久 .....	1
<b>研究助成報告</b>	
接合伝達遺伝子群を利用した放線菌染色体工学の樹立 ／物質化学科 片岡 正和 .....	2
透磁率ゼロの新たな導体を用いた表皮効果を抑制する低損失な導線とインダクタ ／電子情報システム工学科 曾根原 誠 .....	7
<b>研究室紹介</b>	
界面を理解して、界面を制御する！ 界面化学研究室（酒井俊郎研究室）の紹介 ／物質化学科 教授 酒井 俊郎 .....	12
ソフトウェア工学研究室（岡野・小形研）の研究室紹介 ／電子情報システム工学科 教授 岡野 浩三 電子情報システム工学科 准教授 小形 真平 .....	14
地盤工学（河村）研究室紹介 ／水環境・土木工学科 准教授 河村 隆 .....	16
自律知能システム研究室（山崎研究室）の紹介 ／機械システム工学科 准教授 山崎 公俊 .....	17
人口減少時代における都市計画 ／建築学科 助教 佐倉 弘祐 .....	19

## コロナウイルス禍の中、徒然なるがままに

一般財団法人 信州大学工学部若里会  
理事長 神田 鷹久

コロナウイルス禍による昨今、私たちの生活にも大きな変化が生じています。このウイルス禍後の社会活動・生活そして経済はどのようになっていくのか大きな課題となっております。自宅に巣ごもりで書斎に入り書類を整理していたところ大変古い一冊の実験ノートが見つかりました。

このノートは担子菌（きのこ類）の一種 *Irpex lacteus* の産出する糖水解酵素、特にセルロース分解酵素、セルラーゼ (cellulase) と  $\beta$ -グルコシダーゼ ( $\beta$ -glucosidase) の発現機構に関する研究で、当時、東京教育大学の西澤一俊教授（酵素研究特にセルラーゼ研究の大家であり、天野良彦工学部長と同じ屋代高校（当時中学）の出身）の指導のもと、同研究室の鈴木恕助教授（後に教授）と共に、*I. lacteus*、*Trichoderma viride* の菌を用いてカーボンカタボライト抑制 (carbon catabolite repression, CCR と略) を制御する因子の探索と酵素の誘導物質（ソホロズ等）を含めた研究であった。大変むずかしい研究テーマであり、良き結果、結論を得ることができず途中で断念せざるを得なかったことを覚えています。

最近、でんぶん分解酵素アミラーゼ (amylase) をはじめとした糖水解酵素を強く生産する黄麹菌 (*Aspergillus oryzae*) が真核生物として初めて日本単独で全ゲノム配列が解読された (Nature, 438 1157 (2005))。この麹菌はご存知のように清酒、味噌、醤油などの日本を代表する発酵食品の醸造に用いられている糸状菌（カビ）であり、この菌の生産する酵素はまた医療用酵素製剤や食品加工酵素など様々な産業分野で利用されている。この麹菌における糖水解酵素遺伝子の発現も先に述べた CCR によることが明らかになっている。この制御は酵素反応の生成物であるグルコースが存在することで、他の炭素源の資化に関わる遺伝子の発現が抑制される現象である。前述したセルロース分解酵素セルラーゼにおいても、このような遺伝子発現制御機構が解明され、酵素（成分）生産機能を引き出すことは、今後の応用展開に大きく寄与することは明白である。工学部物質化学科の野崎功一准教授がこの研究に取り組んでいることを聞いており、今後ますますの発展を期待しています。このような研究が分子レベルで追究されていることに隔世の感を覚えます。

現在、大学のとりまく環境は法人化と共に大きく変化しております。従来の教育と研究に加え教員の方々は大学の運営と研究費の捻出に奔走され、本来の大学の使命である教育・研究に大きな支障をきたしています。日本のノーベル賞受賞者は皆「基礎研究」を大学に希求し国に警告を発しています。ノーベル化学賞の白川英樹先生（筑波大学名誉教授）は「セレンディピティ」、すなわち「思いがけない失敗や偶然により、目的以上の大きな成果を挙げること」そして「やってくる偶然と迎えに行く偶然」があり、後者には常識や決まった手順を疑ってみ、予想外の結果を失敗とせず、よく観察し記録し調べることが大切と提唱している。「基礎研究」はまさにこのような考え方に立脚しているように感じます。将来の日本の科学技術の発展は基礎研究を重要視しそれから生まれる新しい展開を追求することが大学の課せられた大きな使命と思われまます。

工学部同窓会、若里会は若手教員の研究、特に基礎研究が大きく進展することを願い、ささやかながら助成を今後とも続けていきたいと考えております。最後に本会誌にご寄稿くださいました方々並びに編集にご尽力をいただきました編集委員皆様に感謝いたします。

## 接合伝達遺伝子群を利用した放線菌染色体工学の樹立

信州大学工学部 物質化学科  
片岡 正和



### 目的：

性を持たない細菌のゲノム進化には遺伝子水平移動機構が関与したと考えられている。しかし大腸菌 F 因子の染色体挿入型である Hfr の大腸菌の系以外に高頻度に染色体を可動化する現象は知られていない。筆者は大学時代より放線菌の小型環状プラスミド pSN22 の接合伝達について長らく研究しており、多重遺伝子の協調進化に関する研究など、放線菌の遺伝子水平移動機構で分子生物学的・遺伝学的解析における世界的なトップランナーの一人である。放線菌の中で最大のファミリーであり、市場の様々な抗生物質、あるいはそのリード化合物の 7 割以上を生産している *Streptomyces* 属細菌は、一般的な真正細菌と異なり真核生物に類似した線状染色体を持つ。筆者や英国の研究者達は独立に、放線菌の線状染色体が接合因子の存在で可動化されることを明らかにしてきた。この染色体を水平移動させる現象を人工的に高頻度に引き起こすことができれば、現代生命科学の一つの大きな潮流である合成生物学（大きなゲノムを人工合成し、生命の再設計を行う）を強力に推進する手法となるであろう。

DNA のハンドリングにおいて長大な DNA の取り扱いは難しい。*de novo* 手法のサンガー法による塩基配列決定技術でのゲノムプロジェクトが終了し、ショットガンクローンと次世代シーケンサーによる大規模解析の時代に入り、整列 BAC (Bacterial Artificial Chromosome) クローンを扱う必要がなくなった現在、100 kbp を超える大型のプラスミドを無傷で扱える人材は日本国内に 100 人もいないと思われる。すなわち、通常分子生物学的技術では 5 遺伝子コード領域を超えるであろう代謝クラスターや生合成遺伝子クラスターを一気に操作するのは至難の業である。DNA を細胞に導入する手法、あるいは遺伝子水平移動には大きく分けて 3 種の機構がある。①接合伝達、②自然形質転換、③形質導入である (Fig. 1)。上記の BAC など人工染色体を用いた分子生物学操作は、②の形質転換を応用した手

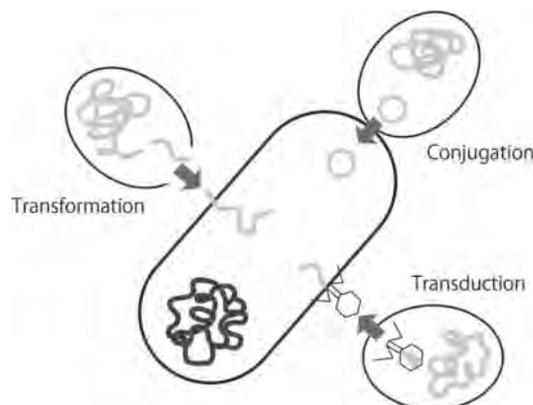


Fig. 1 遺伝子水平移動の主要な機構

法だが、DNA を水溶液中で扱う故の困難性がある。細胞間で DNA の輸送を行う接合系を用いた場合、細胞外に DNA が出ないため溶液中の水の剪断応力に起因する DNA 損傷 (断片化) を考慮せずに大型 DNA を扱える。さらに細胞に DNA を導入する形質転換系は、選ばれしモデル生物だけに適用可能な技術であり、各々の種によって手法開発が必要で、多くの場合研究者が開発しようとしても困難を極める。接合伝達は形質転換系の開発を必要とせず、ただ菌を混ぜるだけで DNA を移行できる素晴らしい能力を持つ。また本研究のターゲットとした *Streptomyces* 属の放線菌は、大村博士のイベルメクチンや結核を治る病にした Waksman のストレプトマイシンなどの抗生物質や有用二次代謝産物、有用酵素生産など、工業微生物としてスターの座にある。本研究の最終目的である高効率染色体可動化技術を開発・応用すれば新規ゲノム編集技術の開発にも繋がり、応用的合成生物学の樹立に繋がる。基礎生物学的にも本研究は、進化上起こったと考えられる染色体の菌間移動を大腸菌以外の細菌で初めて実験的に証明することに繋がる。

本研究では放線菌染色体の人為的な細胞間移動を確実なものとし、定量的に解析することで、大腸菌の Hfr 以外で初めての人工的な染色体の種間水平移動を明らかにできると考えた。

**結果**（ここでは得られた結果の一部を紹介する）

1991年 筆者らは世界に先駆けて *Streptomyces nigrifaciens* 由来の小型環状RCR (Rolling Circle Replication) プラスミド pSN22の細胞間プラスミド接合伝達に伴った低頻度の宿主染色体の移行を確認している。1994年 Stanford大学のS. N. CohenとPettisは *S. lividans* 由来接合伝達プラスミド pIJ101の接合伝達因子 *tra* および *tra*の制御因子である *korA*を *S. lividans*の染色体へ導入することで染色体移行効率のわずかな向上が見られることを確認した。このStanfordグループの結果より、染色体上の接合伝達関連遺伝子による染色体移行能上昇に着目し、pSN22上にコードされている *traR*、*traA*、*traB*、*clt*を *S. lividans*の染色体内に導入することで染色体移行能が効率的に引き起こされるか

否かを検定した。

供与菌 *S. lividans* TK21菌株内へのDNA導入は、インテグラーゼ遺伝子 *int*と特定部位での相同組換えを起こす *attP*をコードしたアクチノファージベクター pKU460を用いた。ベクターの *attP*と放線菌の染色体内の特定部位 *attB*との相互的な部位特異的組換えにより、ベクターを染色体内へまるごと組み込む方法を採用した (Fig. 2)。

染色体内に接合伝達関連因子を導入した供与菌を利用し、染色体移行での組換え効率の評価を行った。以下の図は、種菌間及び異種菌間での染色体移行の模式図である。薬剤耐性マーカーが2種類入ったものを組換え体とし、抗生物質入りの選択培地にまくことで組換え体を得た (Fig. 3)。

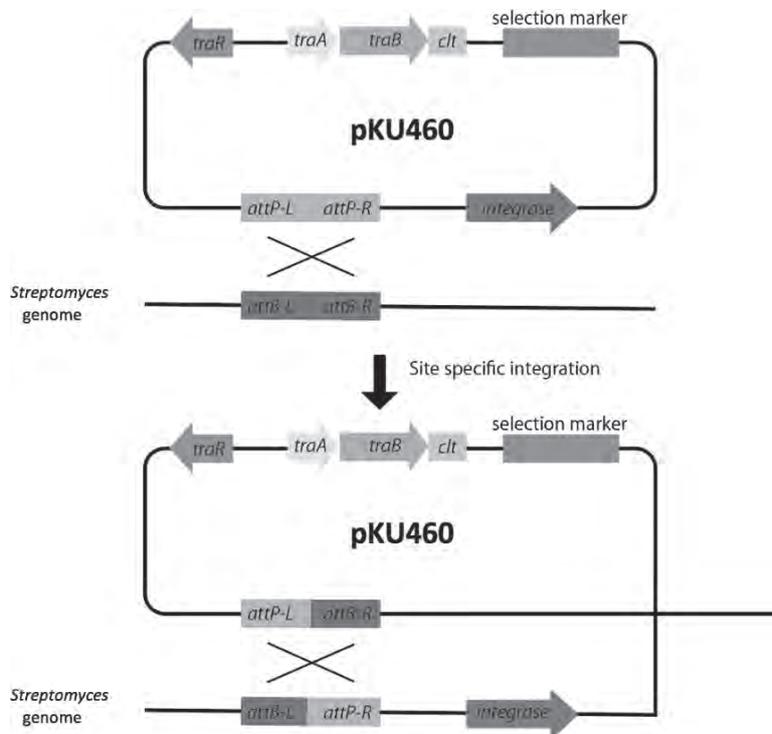


Fig. 2 *S. lividans* 染色体への target gene 組み込み

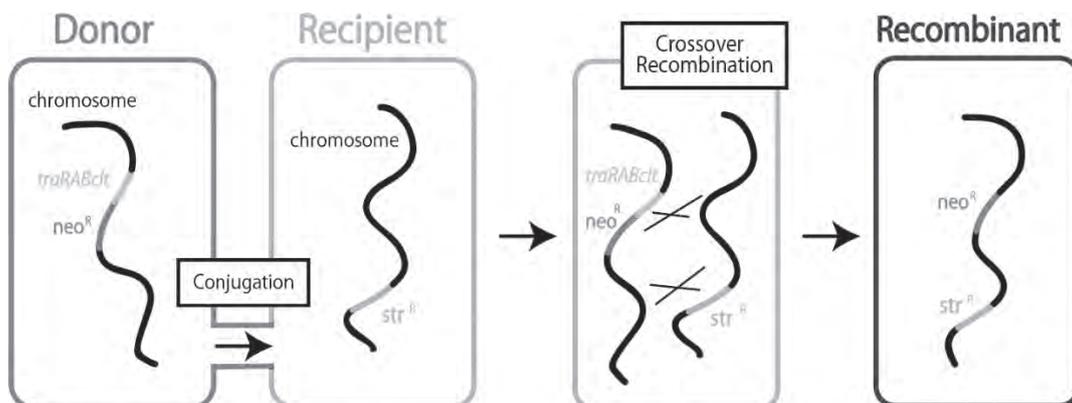


Fig. 3 *S. lividans* 染色体組換えの模式図

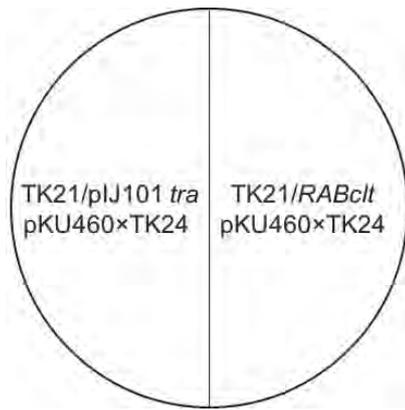


Fig. 4 *S. lividans* 染色体組換え (定性解析)

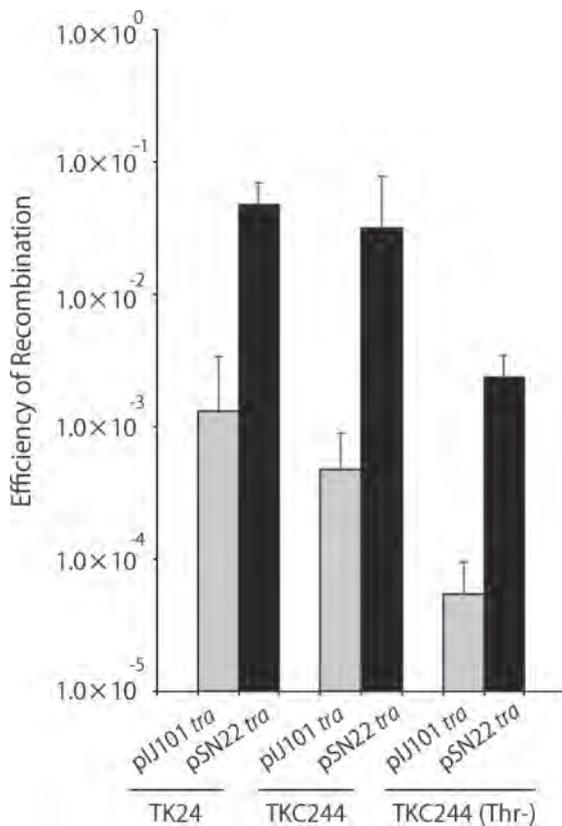


Fig. 5 *S. lividans* 染色体組換え (定量解析)

受容菌を TKC244 とした場合、トレオニン要求性を必要としなくなったものを組換え体とし、最小培地に Yeast Extract を含まない培地にまくことで組換え体を得た (data not shown)。まず、同種菌間において定性評価を行った。TK21/*traRABclt* : pKU460 及び TK21/pIJ101*tra* pKU460 をそれぞれ供与菌、*S. lividans* TK24 を受容菌として伝達能を評価した。解析の結果、両者ともに薬剤耐性マーカーでの組換え体が確認された。結果をより視覚的にするため、レプリカアッセイと呼ばれる方法を採用した。その結果を Fig. 4 に示す。染色体移行の結果としての染色体組換え株は右側の写真でコロニーを形成する (Fig. 4 Right)。結果より明らかに

TK21/pIJ101*tra*:pKU460 を供与菌とした場合より、TK21/*traRABclt* : pKU460 を供与菌とした場合の方が高い伝達能を示した。加えて我々の定量的実験系を用いて pIJ101 における染色体移行能の再現性を取った。遺伝的バックグラウンドの異なる複数の受容菌を用いて定性的、定量的実験を行うことで pIJ101 と pSN22 の染色体移行効率を比較した。コロニーカウントを利用した定量的解析の結果を Fig. 5 に示す ( $n > 10$ )。定量解析においても pSN22 由来 *tra* 遺伝子群を組み込んだ染色体の方が、pIJ101 の *tra* 遺伝子群を組み込んだ場合より 100 倍程度高頻度に組換え株を出現させる、すなわち pSN22 由来の *tra* 遺伝子群の方が本手法では効率的に染色体を移動させることがわかった。なお、(Thr) の結果は pSN22、pIJ101 ともに効率の低下を示しているが、これは Neo が挿入された遺伝子座と Thr1 の遺伝子座の *str-6* 遺伝子座 (Sm 耐性を与える) からの遺伝子間距離の差に起因するものであり、pIJ101 : pSN22 比が大きく変化しないことは結果の信頼性を示している。

これら一連の結果は、明らかに染色体移行において同種菌間での染色体移行及び組換えが高頻度で起きていること示している。さらに我々は受容菌として特徴が見られやすい KW 変異株 (TKC244 由来) を組換え対象として検定した。KW 変異株は、染色体内にランダムに点変異が入っており、野性型 (WT) である TKC244 と比較して孢子形成が速く、コロニーが小さい、孢子形成のタイミングが前ずれしている (すなわち時空間制御がおかしくなっている) という特徴がある。KW 変異株を利用することにより、様々な表現型をもつ組換え体を得られることが推測できる。まず、遺伝的交雑法による染色体移行能評価を行ったところ TK24 との交雑と同様の頻度で組換え株が得られた (Fig. 6 Left)。その後、Neo、Str 培地に生えてきた組換え体コロニーをピッ

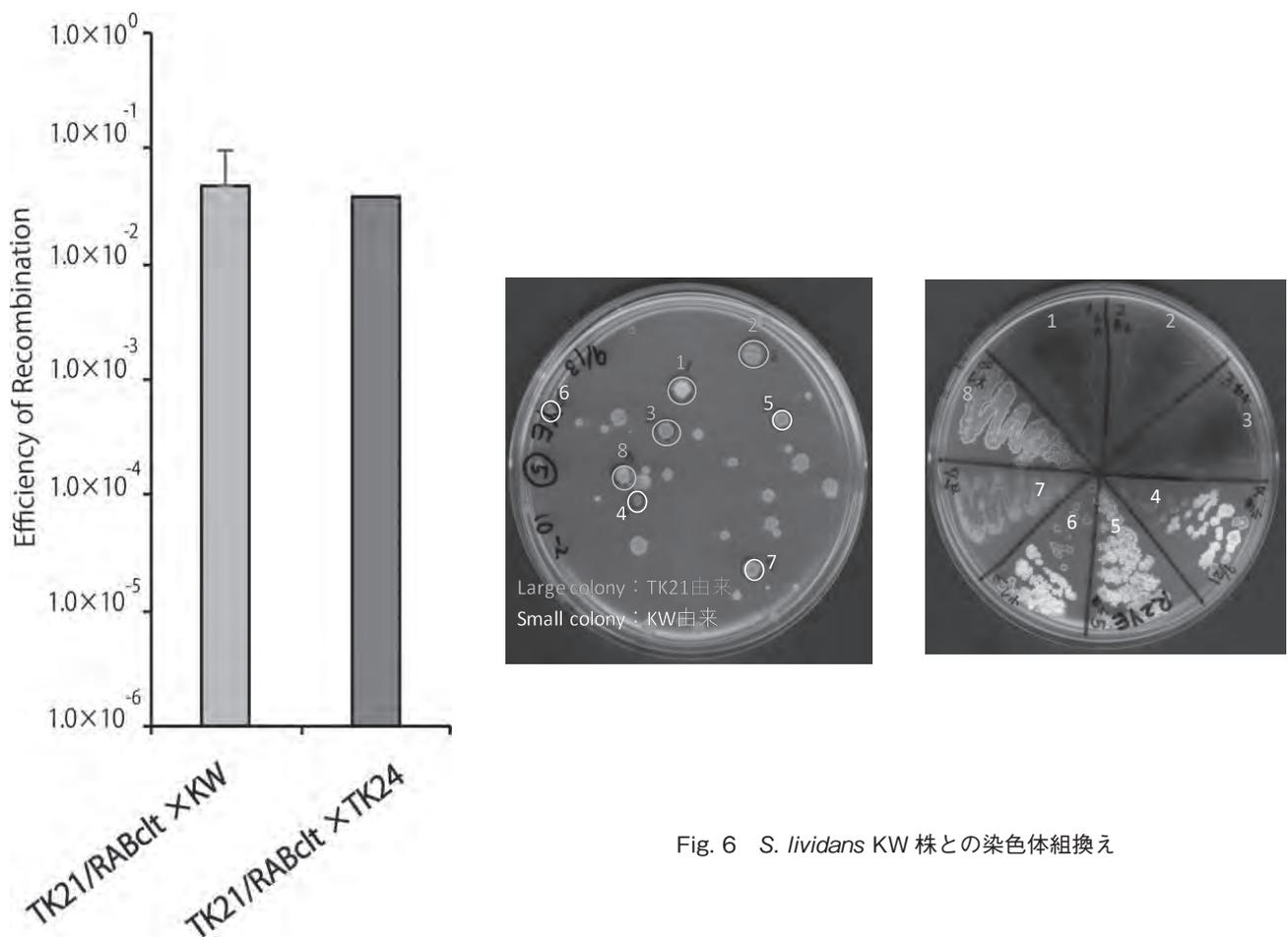


Fig. 6 *S. lividans* KW 株との染色体組換え

クアップし、胞子形成用培地 R5 にストリークし、表現型を観察した。おそらく大きいコロニーは TK21 由来の組換え体、小さいコロニーは KW 株由来の組換え体であると推測する (Fig. 6 Middle)。両者のコロニーを別の R5 培地にストリークした時、TK21 由来の組換え体から *S. lividans* がストレス下に置かれたときによく観察される抗生物質であるアクチノロージンの発生を認めた (Fig. 6 Right)。これより、様々な表現型の組換え体を得られたことから、染色体が移行し、高頻度な確立で組換えが起きていることが判明した。

ここに紹介した結果では、アクチノファージ由来部位特異的組換えを行うベクター pKU460 を利用して、pSN22 の接合伝達関連因子である *traR*、*traB*、*traA*、*clt* の導入を行った。遺伝子導入を行った放線菌 TK21 を供与菌とし、受容菌に TK24 または TK244 を選択し同種菌間における染色体移行能を評価した。更に Stanford の Cohen ラボで明らかにされていた pIJ101 の *tra* 領域を我々の系を用いて TK21 の染色体内に導入し、染色体移行能を評価し、比較対象とした。定性的評価及び定量的評価を行った結果、pSN22 の *tra* 領域を導入した TK21 は、pIJ101 の *tra* 領域を導入した TK21 よりも高頻

度な染色体移行及び組換え能を有することが確認できた。またプラスミドに伴う染色体移行においても同様の結果となった。以上より pSN22 の *tra* 領域を利用した染色体移行は、同種菌間において高頻度な輸送が可能であることを示唆した。KW 株を受容菌とした場合も高頻度な染色体移行能を示し、表現型も様々な組換え体を得ることができた。表現型の違いから組換え体の宿主が供与菌と受容菌、両者とも存在することが明らかとなった。

これらの結果の他、異種間の染色体移行、シス配列の影響、線状プラスミドの *tra* 領域による染色体移動などの結果も得たが、紙面の都合上割愛する。

#### お礼に代えて

本若里会研究助成を受けた接合研究は、筆者らを中心とするグループが日本国内では牽引役になっている。本助成によってグループ内の国際的スター研究者達、奈良先端大の森浩禎教授、慶應大学先端生命研の板谷光泰教授、北里大学生命研の池田治生教授などと有意義な研究打ち合わせや交流を行え、研究室の能力はかなり先鋭化した。助成金の多くは大学院生の能力を上げるため、奈良先端大学への研究派遣や学会への派遣に用いた。当該学生は現在博士

課程進学を検討中で学振 DC1 に応募中である。なお、共同研究者の森教授と板谷教授は現在客員教授として登録しており、引き続き情報交換を盛んに行っている。特に板谷教授は慶應大学退官後、信州大学客員教授として片岡研（生命科学研）の一部のスペースで引き続き世界トップクラスの合成生物学研究を続けており、秘密結社的ではあるが、片岡と共同で（自称）信州大学ゲノム合成センターを構築中である。例えば2種の生命体のゲノムを持つ、ツインゲノム生物の作製は板谷氏の PNAS2005 が世界初で次がベンター研のマイコプラズマ染色体を持つ酵母（Science 2008）である。特に代謝系全体の包括導入や、哺乳動物のエピジェネティックに重要な十文字遺伝子（jmg）の改変など長鎖 DNA の取り扱いは長けているので、合成生物学的アプローチを考えている研究者は是非御連絡を。また、現代生命科学ではゲノム情報やトランスオミックス情報といったビッグデータを先端生命科学技術と情報技術を融合して解決していく手法が必須である。しかし、残念ながら国内では超大国と準大国に追いつけないほど両分野とも人材も知能蓄積も不足しており、それが国内製薬会社の相次ぐ国内研究所縮小に繋がっている。なんとかがんばって良い人材を出したいと願っている。

## 結びに

本助成によって研究面の進展のみでなく、大学院のもう一つの大きな使命である有能な大学院生の育成もできました、心からサポートに感謝します。現在、特に基礎研究に対する助成が減少傾向のなか、大学でこそ基礎研究をと背中を押される気がします。私の研究室では世界トップレベルの研究者との共同研究や作業によって合成生物学的研究やシステム生物学研究に関して、日本国内としてはかなり上質の情報が集まっています。特に情報技術を利用し、機械学習を駆使した合成生物学的アプローチや生きてる状態、あるいは集団の振る舞い等の解析を考えられてる方は是非ご連絡下さい。

## 関連発表論文

Yokoi, T., Itaya, M., Mori, H., Kataoka, M. Optimization of RK2-based gene introduction system for *Bacillus subtilis*. *J Gen Appl Microbiol*, 65 (5), 265-272, 2019.

## シンポジストとしての発表

第71回生物工学会年会シンポジウム

「大規模な遺伝子・ゲノムを扱うツールとしての接合伝達システムの開発と展望」片岡

[https://www.sbj.or.jp/2019/program/program\\_3s-s2a01\\_05.html](https://www.sbj.or.jp/2019/program/program_3s-s2a01_05.html)

第42回分子生物学会年会フォーラム

「接合伝達：大昔から知られているのに忘れられている大規模ゲノム操作系：過去と経緯と将来展望」片岡

<https://www2.aeplan.co.jp/mbsj2019/japanese/forums/index.html>

# 透磁率ゼロの新たな導体を用いた 表皮効果を抑制する低損失な導線とインダクタ

信州大学工学部電子情報システム工学科 先端磁気デバイス (佐藤・曾根原) 研究室  
准教授・博士 (工学) 曾根原 誠

## Low-Loss Conductor Line and Inductor with Skin Effect Suppression Using Novel Conductor with Zero Permeability

Makoto SONEHARA, Associate Professor / Dr. Eng.,

Advanced Magnetic Devices (Sato and Sonehara) Lab., Dep. of Electrical and Computer Eng., Fac. of Eng., Shinshu Univ.



### 1. はじめに

28 GHz 帯などを用いる高速・大容量通信方式である第5世代移動通信システム (5G) の運用が開始され、さらに 100 GHz を超える周波数帯を利用して超高速・大容量通信方式の 6G が検討され始めている<sup>1)</sup>。それに伴い携帯端末などの無線回路や信号処理回路もさらなる高周波化への対応が要求されている。当然、電子デバイスだけでなく、配線やフリップチップ実装も同様である<sup>2), 3)</sup>。

一般的に配線には直流抵抗  $R_{DC}$  が低く、安価である Cu や Al が専ら利用されている。一方で、高周波の電流を配線など導体に流すと、導体内部に生じる誘導現象によって導体内部ほど電流が流れなくなり、電流が導体表面に偏る表皮効果が生じる。これは、後述の説明の通り Cu などの比透磁率  $\mu_r$  が真空とほぼ同等の 1 であることに起因する。表皮効果によって、高周波になると導体の見かけ上の抵抗  $R$  が高くなる。また、配線を巻くことでインダクタ (コイル) になるが、インダクタの性能指数である  $Q$  値 ( $=\omega L/R$ ) を低下することになる。

表皮効果を抑制する技術として、山口らの正の透磁率を有する Cu などの導体と負の透磁率を有する磁性体を交互に多層化した導体が挙げられる<sup>4), 5)</sup>。これは正の透磁率を有する導体と負の透磁率を有する磁性体を積層することで、誘導現象によって生じる磁束の向きを導体と磁性体では互い違いにすることができ、見掛け上の磁束がキャンセルされ、近接効果の低減を図ったものである。筆者も中山らと共同で導体と磁性体の各厚さを調整することで、より近接効果を低減させることを電磁界解析より明らかにした<sup>6)</sup>。

筆者らは、単一の材料でも前記のような近接効果が低減できる材料を検討し、特定の周波数において比透磁率がゼロになる一軸磁気異方性を有する磁性材料を利用し、表皮効果を抑制する新たな低損失導体 (以下、磁性導体と記述) を提案した。本稿では、磁性導体を用いることで表皮効果が低減できる理由

を概説し、電磁界解析による結果ならびに試作状況について述べる。

### 2. 表皮効果とその抑制技術

前述の通り、一般的に導体材料として利用されている Cu や Al では、周波数  $f$  が高くなるに伴い導体表面に比べて導体内部で高周波電流が流れ難くなる表皮効果が生じる。これは直流抵抗  $R_{DC}$  に比べて交流を流した場合では抵抗値が高くなり、ジュール熱 (損失) が大きくなることを意味する。例えば、厚さに対して幅が十分広い導体では、導体表面に流れる電流の  $1/e$  ( $\approx 0.368$ ) 倍になる導体表面からの距離 (表皮深さ  $\delta$ ) は、(1) 式で表される。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu f}} \text{ [m]} \quad \dots (1)$$

ここで、 $\sigma$  は導体の導電率 (Cu は室温で約 50 MS/m) で、 $\mu$  は導体の透磁率 (Cu は真空中の透磁率  $\mu_0$  とほぼ同等の  $4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]) である。一般的な導体材料は、周波数  $f$  に対して導電率  $\sigma$  も透磁率  $\mu$  もほぼ一定の値をとるため、(1) 式より表皮深さ  $\delta$  は周波数  $f$  の平方根に反比例する。

一方で、一軸磁気異方性を有する磁性材料では図 1 に示すような複素比透磁率  $\mu_r^*$  ( $=\mu_r' - j\mu_r''$ ) の周波数特性を示す。図 1 は磁化の運動方程式としてよく用いられる Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式による計算結果 (飽和磁化  $M_s = 34.7$  [mT]、異方性磁界  $H_k = 796$  [A/m] の計算値) である。複素比透磁率の実部  $\mu_r'$  および虚部  $\mu_r''$  はそれぞれ式 (2)、(3) で表され、実測値とよく一致することが知られている<sup>7)</sup>。

$$\mu_r' = \frac{M_s}{\mu_0 H_k} \cdot \frac{\omega_r^2 (\omega_r^2 - \omega^2)}{\{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + (4\pi\lambda\omega)^2\}} + 1 \quad \dots (2)$$

$$\mu_r'' = \frac{M_s}{\mu_0 H_k} \cdot \frac{\omega_r^2 (4\pi\lambda\omega)}{\{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + (4\pi\lambda\omega)^2\}} \quad \dots (3)$$

ここで、 $\omega_r$  は強磁性共鳴角周波数 ( $\omega_r = 2\pi f_r$ )、 $\omega$  は角周波数、 $\lambda$  は制動定数  $\alpha$  (一般的な強磁性体

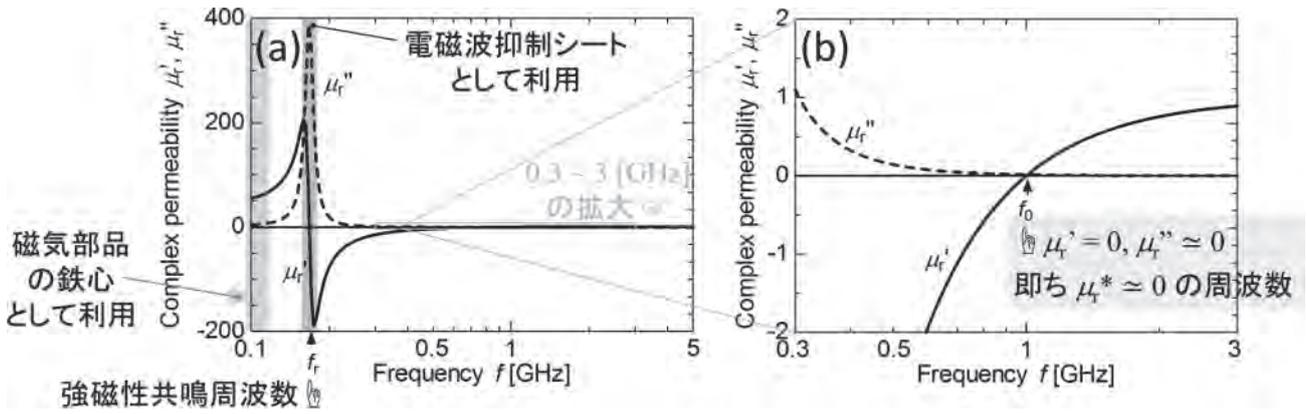


図1 LLG方程式を用いた磁性材料 ( $M_s = 34.7$  [mT]、 $H_k = 796$  [A/m]) の複素比透磁率の周波数特性の計算値

では、 $0.01\delta\alpha\delta 0.02$ で、ここでは、 $\alpha = 0.015$ とするとジャイロ磁気定数  $\gamma (2.21 \cdot 10^5$  [m/A · s]) を用いた定数であり次式で表される。

$$\lambda = \frac{\alpha\gamma M_s}{4\pi\mu_0} \text{ [rad/s]} \quad \dots (4)$$

また  $f_r$  は強磁性共鳴周波数であり次式で表される。

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_k \left( H_k + \frac{M_s}{\mu_0} \right)} \text{ [Hz]} \quad \dots (5)$$

図1 (a) より、約 0.16 GHz に複素比透磁率の実部  $\mu_r'$  がゼロ、虚部  $\mu_r''$  が最大になる強磁性共鳴周波数  $f_r$  が現れる。 $\mu_r''$  は損失項であり、回路としては抵抗に相当するため、フィルタや電磁波吸収シートとして利用される<sup>8), 9)</sup>。なお、 $f_r$  より十分低い周波数では、損失項である  $\mu_r''$  はほぼゼロで、 $\mu_r' \gg 0$  であり回路としてはインダクタンスに相当するため、インダクタやトランスといった磁気部品の鉄心として利用される。

$f_r$  より高い周波数では、 $\mu_r'$  は負となり、約 1 GHz で再び  $\mu_r' = 0$  となる周波数  $f_{\mu=0}$  が現れる (図1 (b) の拡大図を参照のこと)。 $f_{\mu=0}$  では  $\mu_r''$  もほぼ0であり、 $\mu_r^* = 0$  となるため、(1) 式より  $\delta$  は極めて深くなる。これは  $f_{\mu=0}$  では抵抗値が直流抵抗  $R_{DC}$  まで低減できることを意味し、低抵抗の高周波導線が期待される。

### 3. 電磁界解析による計算結果

電磁界解析には、電磁界解析ソフトウェア (ANSYS ; HFSS) を用いて計算した。また、解析に用いた磁性導体および比較として用いた Cu の各物性値を表1に示す。解析モデルとしては、配線を模した角柱導体、方形および円形平面スパイラルイ

ンダクタ<sup>10), 11)</sup>の3種類を検討し、それぞれの導体および巻線に対して Cu と本提案の磁性導体にした場合について電磁界解析を行なった。

#### 3.1 配線を模した角柱導体

配線を模した角柱導体について磁性導体を用いた場合の電磁界解析を行なった。断面が  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  の正方形で、長さが 5 mm の角柱導体を解析モデルとした。

図2に 1 GHz における電磁界解析による各導体の導体断面における電流密度  $J$  のコンター図を示すが、図2 (a) の Cu の場合は表皮効果の影響で表面付近 (特に四隅) に電流密度  $J$  が集中するのに対して、同図 (b) の本提案の透磁率ゼロの導体の場合は分布無く電流が流れることが分かる。これは磁性導体では、導体内部で透磁率がほぼゼロであるため、磁束が導体内部に入らず、その結果誘導現象が生じずに表皮効果が抑制できたからと考えられる。

表1 電磁界解析に用いた諸元

	Cu	磁性導体
導電率 $\sigma$ [MS/m]	58	
複素比透磁率の実部 $\mu_r'$	0.999991	$1 \times 10^{-10}$ ※
損失係数 $\tan\delta_\mu$	0	
複素比誘電率の実部 $\epsilon_r'$	1	
誘電正接 $\tan\delta_\epsilon$	0	

※はゼロの代わりに HFSS で設定できる最小値とした。それ以外は HFSS のライブラリにある Cu の物性値を使用した。

電磁界解析の結果、Cu の場合、1 GHz における抵抗値は約  $0.70\Omega$  になり、直流抵抗  $R_{DC} \approx 0.22$  [ $\Omega$ ] の約 3.2 倍であった。一方、本提案の磁性導体を適用したと仮定した場合の解析結果によると、 $R_{DC}$  と

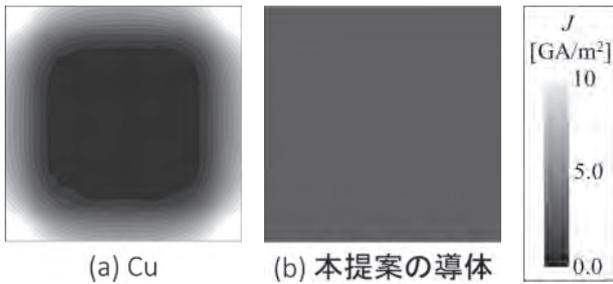


図2 角柱導体断面の電流密度  $J$  の分布の様子

同等であり、磁性導体による近接効果の抑制効果の可能性が示された。

### 3.2 方形平面スパイラルインダクタ

図3に示すような一辺が約  $500\mu\text{m}$ 、厚さ  $8\mu\text{m}$ 、巻線の幅  $55\mu\text{m}$ 、巻線間隔  $15\mu\text{m}$  の2 turn 方形平面スパイラルインダクタを解析モデルとした。

図4 (a)、(b) より、Cu 導体インダクタでは表皮効果により特に導体断面の短辺が電流密度が高く、中心は低くなる。また、同図 (b) の黄色い円に示したように近接効果の影響もあり、著しく電流が分布するため抵抗値が  $0.46\Omega$  となり、直流抵抗  $R_{DC} = 0.11 [\Omega]$  の約4.2倍であった。

一方、図4 (c)、(d) より、磁性導体インダクタの直線部分では表皮効果ならびに近接効果も生じず電流が分布しないことが分かる。同図 (c) より、直角に曲がる部分では電流は最短経路を通ろうとするため、内側が電流密度が高くなる。ただしその影

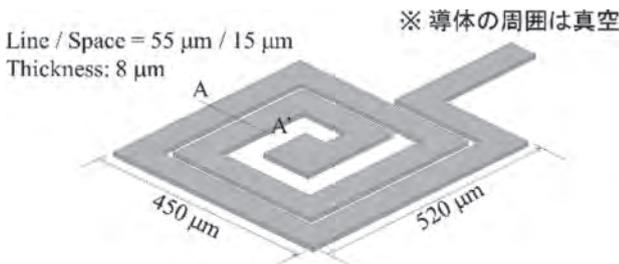


図3 2 turn 方形平面スパイラルインダクタの解析モデル

響は小さいものであったと考えられ、解析の結果、1 GHzにおける抵抗値は  $R_{DC}$  と同等の結果となった。

### 3.3 円形平面スパイラルインダクタ

図5に示すような直径が約  $700\mu\text{m}$ 、厚さ  $50\mu\text{m}$ 、巻線の幅  $80\mu\text{m}$ 、巻線間隔  $15\mu\text{m}$  の2 turn 円形平面スパイラルインダクタを解析モデルとした。

図6 (a)、(b) より、前項3.2の方形平面スパイラルインダクタと同様に、Cu 導体インダクタでは表皮効果および近接効果の影響で、著しく電流が分布するため抵抗値が  $0.20\Omega$  となり、直流抵抗  $R_{DC} = 9 [\text{m}\Omega]$  の約22倍であった。

一方、図6 (c)、(d) より、磁性導体インダクタの直線部分では表皮効果ならびに近接効果も生じず電流が分布しないことが分かる。同図 (c) より、直角に曲がる部分では電流は最短経路を通ろうとするため、巻線の内側の方が外側よりも電流密度が高くなる傾向が示された。解析の結果、1 GHzにおける抵抗値は  $R_{DC}$  と同等の結果となった。

## 4. 磁性導体の試作

数 GHz の周波数で透磁率がゼロになるような磁性導体を実現するためには、図1に示した材料のように異方性磁界が約  $1 \text{ kA/m}$  であ材料と仮定するならば、飽和磁化が数十 mT 程度でなければなら



図5 2 turn 円形平面スパイラルインダクタの解析モデル

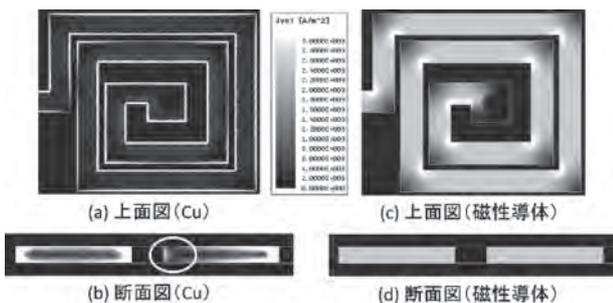


図4 2 turn 方形平面スパイラルインダクタの電磁界解析による各導体の電流密度分布の解析結果

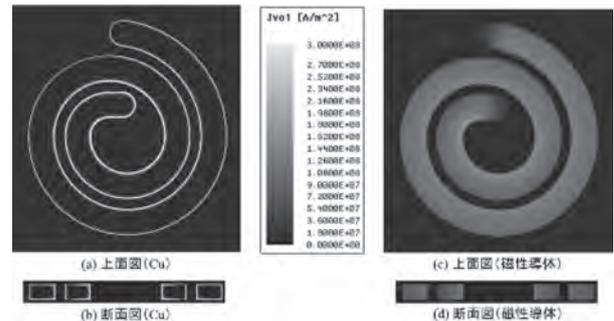


図6 2 turn 円形平面スパイラルインダクタの電磁界解析による各導体の電流密度分布の解析結果

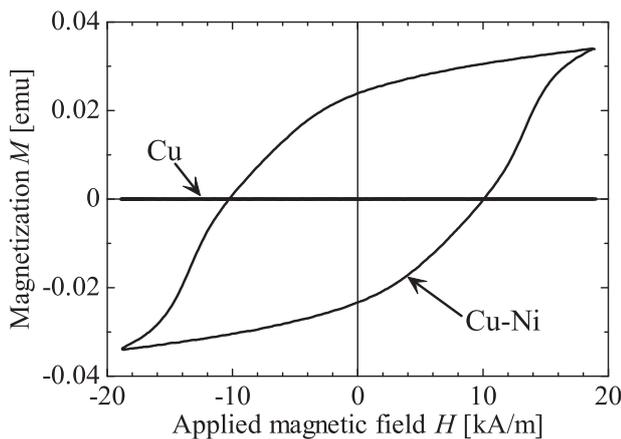


図7 Cu/Ni/Cu 積層膜および Cu 膜の磁化曲線の測定結果

ない。一般的な金属磁性材料である Fe は約 2.1 T、Co は約 1.7 T、Ni は約 0.7 T である。一方で、直流抵抗未満になることはないので、導電率の高い材料にする必要がある。そこで、母材は Cu とし、一般的な金属磁性材料の中で飽和磁化が低い Ni を数%程度添加する合金を検討することにした。

LCP 基板 (JX 液晶; CM-529BP) に、初めに無電解銅めっき (奥野製薬工業; LECS-Cu、pH: 12.8、浴温: 32°C、浴量: 1 L、時間: 900 s) で Cu を 0.5 $\mu$ m 厚狙いで成膜し、次に電解 Ni めっき (スルファミン酸 Ni めっき、pH: 4.3、浴温: 50°C、浴量: 1 L、時間: 94 s) で Ni を 0.05 0.5 $\mu$ m 厚狙いで成膜し、最後に電解銅めっき (硫酸銅めっき、pH: 0、浴温: 30°C、浴量: 1 L、時間: 94 s) で Cu を 0.5 $\mu$ m 厚狙いで成膜した。

図 7 に Cu/Ni/Cu 積層めっき膜と比較のため Cu めっき膜の磁化曲線の測定結果を示す。同図より、Cu は非磁性のため磁化は現れなかったが、Cu/Ni/Cu 積層膜は、約 20 kA/m で 0.033 emu の磁化を示した。これは T (テスラ) 換算すると、約 65 mT に相当し、当初予定通りの飽和磁化を有する磁性導体の可能性が示された。ただし、保磁力が約 10 kA/m と非常に高く、軟磁性材料としての性質が望まれるため、1/100 以下に低減する必要があり、今後の主たる検討事項である。

## 5. まとめ

著者らは、特定の周波数における表皮効果低減技術として、透磁率ゼロの新たな磁性導体について研究した。電磁界解析により、磁性導体を導線のみならずインダクタへ適用すると特定の周波数において直流抵抗と同程度まで低減できることを明らかにした。またインダクタのような巻線にすると近接効果

まで低減できる可能性を示した。さらに磁性導体の実現に向けて Cu/Ni/Cu 積層めっき膜を試作し、その可能性についても示すことができた。今後はさらに発展させ、単一材料の磁性導体として、例えば Cu-Ni 合金系材料を検討する予定である。

## 謝辞

信州大学工学部同窓会および (一財) 信州大学工学部若里会には令和元年度研究助成として多大なるご支援を頂いた。ここに深謝申し上げる。著者は、平成 26 年度にも研究助成を高周波インダクタ素子<sup>11)</sup>の研究テーマでも支援を受けていて、高周波デバイス・回路の研究開発を鋭意進めている。

最後に磁性導体の試作にご協力頂いた株式会社ヤマテックの小野 和秀 氏、めっき工程などにご助言頂いた大和電機工業株式会社の倉科 匡 氏、御田工学技術研究所の御田 護 氏、茨城大学理工学研究科の山崎 和彦 先生に深謝致します。また、電磁界解析や磁気測定で研究補助をして頂いた研究室 OB の山口 宗太 氏 (平成 30 年度修了) および修士 2 年生の菱田 晃右 君、野間田 竜 君に感謝する。

## 参考文献・WEB サイト

- 1) 下石坂 望、他:「サブミリ波帯域における導電ペースト接合構造の電磁界解析」、令和 2 年電気学会基礎・材料・共通部門大会、2-D-p2-1 (2020)。
- 2) M. Sonehara, et al.: "Characterization of UHF Band LC Filter With RF Spiral Inductor Using Carbonyl-Iron Powder/Epoxy Composite Magnetic and Chip Capacitor", *IEEE Transactions on Magnetics*, **53**, 11, #4002905 (5 pages) (2017).
- 3) 菱田 晃右、他:「数十 GHz 帯用導電ペースト接合材料の電磁界解析」、令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会、4-C-a2-3 (2019)。
- 4) 山口 正洋、他:「負透磁率強磁性体と導体との多層膜による RF デバイスの表皮効果抑制法」、*MWE 2008 Microwave Workshop Digest*, pp.207-210 (2008)。
- 5) B. Rejaei, and M. Vroubel: "Suppression of skin effect in metal/ferromagnet superlattice conductors", *Journal of Applied Physics*, **96**, 11, pp.6863-6868 (2004)。
- 6) 中山 英俊、他:「負の透磁率材料を用いた伝送

線路の表皮効果抑制・低損失化」、アカデミック  
プラザ講演論文集 2013、AP-20 (2013)。

- 7) 太田 恵造：「磁気工学の基礎Ⅱ」、共立全書  
(1990)。
- 8) M. Sonehara, et al. : “FeSi/IrMn Exchange  
Coupled Multilayer Film with Plural FMR  
Absorption”, *Transactions of the Materials  
Research Society of Japan*, **29**, 4, pp.1735-1738  
(2004).
- 9) M. Sonehara, et al. : “Preparation and  
characterization of nano-fiber nonwoven textile  
for electromagnetic wave shielding”, *IEEE  
Transactions on Magnetics*, **44**, 11, pp.3107-3110  
(2008).
- 10) M. Sonehara, et al. : “Fundamental study of  
high Q-factor RF spiral inductor using  
carbonyl-iron/epoxy composite magnetic  
core”, *IEEJ Transactions on Electrical and  
Electronic Engineering*, **11**, S1, pp.S3-S8  
(2016).
- 11) M. Sonehara, et al. : “Fundamental study of  
power inductor with carbonyl-iron powder/  
epoxy composite magnetic core for several  
hundred MHz witching convertor in POL  
supply”, *Intermag2020*, GQ-13 (2020).

## 界面を理解して、界面を制御する！ 界面化学研究室(酒井俊郎研究室)の紹介

物質化学科 教授 酒井 俊郎



### 1. はじめに

界面化学研究室(酒井俊郎研究室)は、2007年12月に信州大学工学部物質工学科にてスタートして、今年で13年目を迎えました。博士課程学生3名(ブラジルからの留学生1名)、修士課程2年生6名(中国からの留学生1名)、修士課程1年生5名、学部4年生5名、フランスからの特別聴講生1名、研究支援推進員2名、客員教授1名の合計22名で研究室活動を行っています(図1)。界面化学研究室(酒井俊郎研究室)の研究内容やコロイド&界面科学研究センター(CoLLIS)について紹介させていただきます。



図1. 令和2年度界面化学研究室(酒井俊郎研究室)のメンバー

### 2. 研究内容

当研究室は、「コロイド・界面化学」を基軸として基礎的な研究、コロイド材料の創製技術や界面制御技術の開発を行っています。「コロイド」とは、性質や状態の異なる物質がそれぞれ相として共存している系となります。例えば、気泡が水中に分散している系や水滴が空气中に分散している霧や雲は気相と液相が共存しているコロイドとなります。また、顔料(固体)が液中に分散した塗料やインクなどは固相と液相が共存しているコロイドとなります。さらに、油と水が混合したエマルションは液相と液相が

共存しているコロイドとなります。また、性質や状態の異なる物質がそれぞれ相として共存すると界面が生まれます。このようなコロイド状態を維持、コロイド材料を創製、また、界面を制御するために重要な役割を担っているのが「界面活性剤」です。食器用・衣料用洗剤、シャンプー・リンス、化粧品、医薬品、塗料・インクなどはコロイドであり、コロイド状態の制御、コロイド粒子、界面制御のために「界面活性剤」が使用されています。「界面活性剤」の歴史は紀元前3000年のメソポタミア文明にまでさかのぼります。人類は「界面活性剤」とともに文明を築いてきたといっても過言ではありません。

当研究室では、次世代の「コロイド・界面化学」を模索しています。その一つの取り組みが「界面活性剤を使用しないコロイド・界面化学」です。「界面活性剤を使用するコロイド・界面化学」では見えなかった「コロイド・界面化学」の領域が存在するものと期待しています。実際に、界面活性剤を使用しないことにより発現する特性が存在することも明らかとなってきました。その一例を紹介します。また、液相/液相分散系コロイドであるエマルションを用いて環境問題・エネルギー問題を解決する取り組みについても紹介します。

#### 2.1 乳化剤(界面活性剤など)を使用しない乳化技術 ～乳化剤フリーエマルション～

エマルションは、互いに溶解しない(難溶な)“油”と“水”の一方が滴となり、もう一方の液体に分散したコロイド分散系です。このようなエマルションを調製するためには、界面活性剤などの乳化剤と機械的な外力が必要となります。また、調製されたエマルションは、熱力学的に不安定(非平衡系)であるため、時間とともに再び油と水へ分離します。この現象を解乳化と言います。

当研究室では、エマルションの解乳化現象を理解するため、界面活性剤などの乳化剤を使用しないエ

マルションの分散安定性について検討してきました。その結果、界面活性剤などの乳化剤を使用しなくても、異種油を混合することによりエマルションが長期分散安定化することを明らかとしました。すなわち、乳化剤を一切使用しない乳化技術、エマルション（乳化剤フリーエマルションと命名）の開発に成功しました。

近年、医薬品、化粧品、食品分野など様々な分野において乳化剤（界面活性剤など）を使用しない乳化技術、乳化剤フリーエマルションが求められるようになり、乳化剤フリーエマルションの実用化に向けた企業との共同研究が開始しました。その取り組みの一つである「乳化剤フリーエマルションスプレー」について紹介します。超音波照射機を用いて油を水中に分散した「乳化剤フリー水中油滴型（O/W）エマルション」をスプレー缶に充填して噴霧すると、超純水を充填したスプレー缶から噴霧されるミストに比べてスプレーパターンが大きく柔らかいミストが噴霧されることが明らかとなりました（図2）。

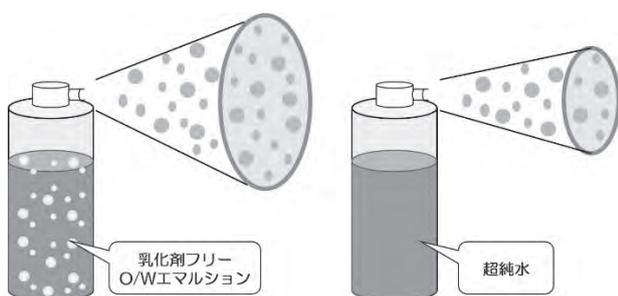


図2. 乳化剤フリー O/W エマルションスプレーと超純水スプレーの噴霧特性のイメージ図

また、信州大学の他学部や他大学の薬学部と共同研究を実施しており、乳化剤フリーエマルションを活用した薬剤・化粧品開発を進めています。さらに、令和2年3月にタイ国マヒドン大学薬学部と信州大学工学部間で協定を締結して、乳化剤フリーエマルションを利用した薬剤・化粧品開発の共同研究が開始しました。今後さらにエマルションの研究を中心として学内、国内外の大学、企業との連携を進めていく予定です。

## 2.2 エマルション型熱貯蔵・熱輸送媒体の開発

前述したように、エマルションは、互いに溶解しない（難溶な）“油”と“水”の一方が滴となり、もう一方の液体に分散したコロイド分散系です。エマルションは、医薬品、化粧品、食品など様々な分

野で活用されています。当研究室では、現代社会が抱える環境問題・エネルギー問題の解決を目指して、エマルションの熱貯蔵・熱輸送媒体としての可能性について検討しています。近年では、夏の猛暑などにより空調利用率が高まり、空調による電力需要が高まっています。電力需要が高まると、火力発電による化石燃料の使用量が増加して、温室効果ガスの排出量も増加するなどの問題が生じます。この問題を解決する方法として、地下水、河川水、地熱等などの未利用熱（再生可能エネルギー）を利用した未利用熱利用空調システムが注目されています。未利用熱利用空調システムを構築するためには、熱源において熱を貯蔵して、貯蔵した熱を使用先へ輸送する媒体が必要となります。当研究室は、油の固-液相転移に由来する潜熱と水の流動性・熱伝達性を兼ね備えた O/W エマルション型熱貯蔵・熱輸送媒体の開発に取り組んできました。その結果、O/W エマルション型熱貯蔵・熱輸送媒体は水に比べて約2倍の熱貯蔵・熱交換性能を有することが明らかとなりました。今後、企業と連携して O/W エマルション型熱貯蔵・熱輸送媒体の未利用熱利用空調システムへの実装を検討していく予定です。

## 3. コロイド&界面科学研究センター（CoLLIS）

コロイド&界面科学研究センター（Research Center of Colloid and Interface Science; CoLLIS）は、平成27年7月に発足した信州コロイド&界面科学研究会を前身として平成30年4月に工学部の共同研究センターの一つとしてリニューアルスタートしました。CoLLISでは、コロイド・界面科学分野のみならず、分野を越えて学生・研究者が集い、情報収集・交換、交流できる場を提供していきたいと考えています。そのため、公開講座（信州スプリングスクール、化粧品科学講座、食品科学講座、洗浄科学講座、超音波科学講座、熱マネジメント講座、粉体分散講座、機器分析講座など）、化粧品づくり体験実習や研究討論会を開催しています。「コロイド」とは性質や状態の異なる物質がそれぞれ相として共存している系であり、物質の異分野融合と言えます。また、性質や状態の異なる物質がそれぞれ相として共存すると界面が生まれ、物質の異なる性質が接している面、つまり、物質の異分野融合の出会いの場となります。CoLLISでは、「界面での新たな出会いから、境界を越えた新たな世界へ」を合言葉に、人が出会い、交流・融合（異分野融合）して新分野・新領域を創出・発信できる研究拠点の構築を目指しています。

#### 4. おわりに

ノーベル物理学賞を受賞したヴォルフガング・パウリは「固体は神がつくりたもうたが、表面は悪魔がつくった」という言葉を残しています。これは、表面・界面の神秘性や特異性、制御の難しさを表現したものと理解しています。相が存在すれば、界面

が存在します。界面は境界ではなく、相が出会う場です。「界面を理解して、界面を制御する」ことにより、界面（境界）を越えて相を「つなぐ」、領域を「つなぐ」ことができ、新しい世界を創り出すことができるものと信じています。多くの人と出会い、新しい世界をつくっていきたいと思います。

## ソフトウェア工学研究室 (岡野・小形研)の研究室紹介

電子情報システム工学科 教授 岡野 浩三  
准教授 小形 真平



#### 1. はじめに

岡野・小形研究室ではソフトウェア工学の研究をしています。当研究室の特色として、幅広いソフトウェア工学の中で「モデル」をキーワードに主に開発工程の上流過程の、高信頼化、安全性担保、生産性向上を目指す研究を行い、国内外に高い評価を得ていることを挙げるができます。修士学生を中心に国際会議に毎年のように積極的に発表参加してもらっています。そして、表彰を受ける学生もいます。この数年、研究室の有志の学生で組込みシステム技術者協会主催のET-Robo-conに参加しており、地方大会でモデリング賞などを受賞しています。最近では複数の国より留学生も受け入れています(2020年の在学学生 修士8名(うち留学生2名 フランス、中国) 4年生9名)。当研究室では国内の様々な研究機関・企業と共同のプロジェクトを積極的に実施しています。

#### 2. 研究紹介

最近の研究を4つ紹介します。

##### ■「自然語要求仕様書解析」

ソフトウェア開発を行う際、初期のステップでシステムの要求仕様を作成します。多くの場合、要求仕様は「自然語」で記述されます。仕様をより厳密な言語やモデルで記述しておけば、モデル検査ツールなどを用いて早期に欠陥を調べることができますが、ごく限られた技術者しかできないという課題があります。この研究では日本語で記述された組込みシステムの要求仕様を対象にシステムの振る舞いを

厳密に表現できる状態遷移モデルに自動変換する方法論を研究しています。最近の自然言語解析の技術を活用し、また従来から知られている構文解析技術などと組み合わせ、ルールベースで状態遷移モデルに変換する研究を精力的に行っています。最近ではルールの改善に機械学習を取り入れるなどの研究もはじめています。

##### ■「モデル駆動開発」

モデル駆動開発とは、ソフトウェアの設計仕様となるモデルからソフトウェアのプログラムを自動生成するアプローチを採用する開発方法です。ソフトウェア開発は、高度な知的活動であり、ソフトウェアを必要とする人の要求は何か、そのソフトウェアはどうすれば実現できるかなどをまず検討する必要があります。そして、その検討を行う要求分析やソフトウェア設計の中で仕様を作り、多様な開発関係者が仕様のチェックと洗練を繰り返して、最終的に開発者が高品質な仕様を作り上げていきます。もしも正確で精緻な仕様ができたら、そこからプログラムを自動生成することでプログラミングにおける人為的なミスを防ぎ、かつ効率的なソフトウェア開発ができるであろうと考えることは自然です。モデル駆動開発とはそのような理想に向かった開発方法であると捉えることができます。本テーマでは、UMLのモデルからソフトウェアのプログラムを自動生成する方法を研究します。読者は最終的なモデルから製品レベルのソフトウェアを自動生成することを思い浮かべるかもしれませんが、この目的に限らずに自動生成は様々な場面で活用できます。たと

えば、開発の初期段階においてユーザはモデルに対してソフトウェアの使いやすさを確認することは難しいですが、作成途中でもモデルから試作版ソフトウェアを自動生成できれば確認が容易になります。当研究室では、このような支援を実現するため、ソフトウェアのUI (User Interface) を表すモデルから操作ロガー付きの試作版ソフトウェアを自動生成する方法などを研究しています。

#### ■「エデュテイメント」

教育手法の一つとして、コンピュータを活用した「楽しみながら行う」教育手法があります。本研究ではこのような教育手法のプログラミング学習への応用を念頭に、システム構築をしています。今日のように社会的な要請により遠隔授業など多様な授業スタイルを要求される中、本研究で目指している遠隔による自主学习主体で、楽しみながらソフトウェア演習を進めるシステムは今後重要になってくると思われます。この研究は文部科学省が実施する平成30年度「Society 5.0 実現化研究拠点支援事業」に採択された大阪大学申請の「ライフデザイン・イノベーション研究拠点」の委託研究として行われています。

#### ■「反例解析を用いたシステム故障解析」

ソフトウェアの設計の検証を自動かつ網羅的に行うための基礎技術としてモデル検査という技法があります。世界的にはミッションクリティカルなシステムの検証に大きく貢献した事例が複数あります。モデル検査の特色として、与えられた設計が要求に合わないときに、具体的にどのように動いたときに要求をみたさないかという「反例」を与えてくれることが挙げられます。反例を解析することにより、設計や要求のバグの同定ができます。しかしながら、この反例解析は現在人力で行っているため、多くの

コストがかかり、また、技術者個人の能力に大きく依存する欠点があります。本研究ではこの反例を、一般の技術者にも理解できるような形に変換する方法や、複数の反例から、適切な反例の選択を自動化するなどの方法論をさまざまな観点から展開しています。

### 3. おわりに

当研究室では、週1回は教員と研究の打ち合わせを行い、毎月1回は全員で集まって、進捗報告を行います。当研究室の特色として、定例報告で、学生間で研究アドバイスや質疑応答、ときには厳しい突っ込みが積極的に行われていることが挙げられます。なかなか的確な質問やアドバイスがなされており、教員は、さらに、それ以上のフィードバックをメタな観点から与えられるように、頑張っています。2020年はCovid-19の禍のもと、遠隔の研究室運営を余儀なくされていますが、当研究室の学生はコミュニケーションツール Slack や会議システム Google Meets 等を使いこなし、研究活動に励んでいます。



図1 2019年度のメンバーとともに当別研究報告会発表後の記念撮影

# 地盤工学(河村)研究室紹介

水環境・土木工学科 准教授 河村 隆



## 1. はじめに

土木工学では、基礎となる力学分野を三力（構造力学、土質力学、水理学）と呼んでいます。その中の土質力学（地盤工学）が私の主たる教育・研究分野です。私が信州大学に助手として赴任した2000年4月、地盤工学分野のスタッフは、小西純一助教授（現信州大学名誉教授）、梅崎健夫助教授（現信州大学教授）、豊田富晴技官がおられました。当時、助手は研究室を持たなかったため、梅崎先生の研究室の助手として勤めました。

2008年4月に研究室を持つこととなり、初めて2人の4年生が配属されました。以降、毎年2～4名が配属されています。研究室を持つとはいっても、ゼミや検討会などほとんどすべての研究室活動は、それまでと同じく梅崎先生と合同で行っています。河村研究室の卒業生は、2020年3月までに、卒業生41名、修士課程の修了生6名です。現在は、学部4年生4名、修士課程の大学院生1名が所属しています。

## 2. 主な研究内容

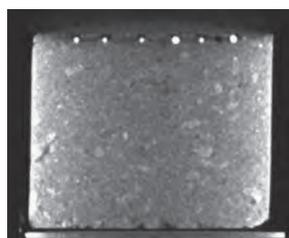
### (1)ひと・環境にやさしい土舗装の積雪寒冷地への適用に関する検討

土舗装は、保水性が高く、水たまりやぬかるみが生じないことから、歩行者用舗装として公園や歩道に多く適用されています（図1参照）。しかし、高い保水性のために、長野県のような積雪寒冷地では、冬期にひび割れなどの凍害劣化が懸念されています。そこで、凍害劣化に強い土舗装に必要な材料や施工法の開発を目指しています。

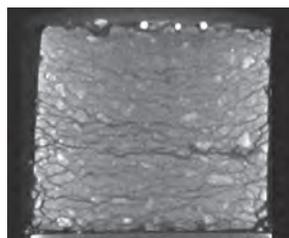
土舗装供試体を水に沈めた状態で、凍結融解を繰り返す試験を実施しています。凍結、融解後や凍結の途中でX線CT撮影を行います。得られたX線CT画像（図2参照）を用いて、氷で覆われて直接測定できない凍結中の供試体の変形や内部のクラックの発生状況に基づいて、土舗装の凍結融解特性について検討しています。今後、得られた特性に基づいて、凍害劣化に強い配合や添加剤、施工方法について検討していく予定です。



図1 土舗装の施工例



左：初期状態



左下：凍結融解10サイクル目の凍結後

下：凍結融解10サイクル目の融解後

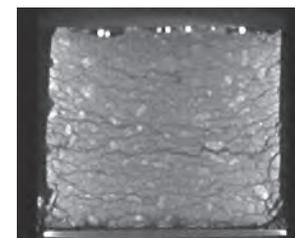


図2 凍結融解履歴を受ける土舗装のX線CT画像の一例

### (2)盛土の排水材として使用される土木用不織布の透水性に関する検討

不織布は、繊維を熱・機械的または化学的に絡み合わせたシートで、身近なところでは、フリースやフェルトのような布の一種です。不織布は内部に多くの空隙があるため、水を通しやすい特性を持っています。そのため、鉄道や道路などの盛土の中に浸透した雨水や融雪水を速やかに盛土外に排水するための排水材として盛土内に敷設されます。盛土内では、上に載っている盛土材料（土）の自重（上載圧）によって圧縮されます。不織布は空隙が大き

いために圧縮性が大きく、盛土内では不織布の空隙が小さくなります。これまでの研究で、不織布への上載圧の負荷が長期間継続すると圧縮量が徐々に増加するクリープ変形が比較的大きいこと、水浸状態で圧縮すると空気中よりも圧縮量が大きくなること、が新たに分かってきました。不織布の透水性(透水係数)や圧縮性を評価する試験方法は、学会などから規定されていますが、このような現象については、十分に考慮されていません。クリープ変形が生じると、時間の経過とともに透水係数が低下し、雨水を盛土外に速やかに排水することが阻害され、土砂災害の危険性が増加します。

盛土内での水の流れは、不織布の上から下に流れる場合(垂直方向透水係数)と不織布の空隙を通して、外に排水される場合(面内方向透水係数)に関する検討が必要です。そこで、上載圧を負荷して圧縮した状態の透水係数を評価するための研究(垂直方向と面内方向、2つの条件)、クリープや水浸を考慮して圧縮特性を評価するための研究の3つのテーマに分けて、4年生3人が各々の卒業研究として担当しています。

### 3. コロナウイルス感染症対策下の教育・研究活動

本原稿を執筆している8月上旬、コロナウイルス感染症対策のために、今までと全く異なった日常を過ごしています。国内のほとんどの大学と同じように、信州大学でも、授業は基本的にオンライン、授業・実習科目のみ部分的に対面授業となっています。

研究室活動においても多大な制約を受けています。研究室のゼミや研究打ち合わせは、Zoomを使ってオンラインで行っています。最初はどうかと思っていましたが、お互いの画面を共有したり、途中で参考文献や資料をウェブ検索したりと、やってみると結構便利だということに気が付きました。卒業研究の実験指導は、供試体の作製方法や実験装置の操作方法を指導しますので、さすがにオンラインでは困難です。教員も学生もフェイスシールドを装着して対面で指導を行っています。私もフェイスシールドの装着にもう慣れてしまいました。

最後になりますが、本原稿が発行される2020年秋においても、この混乱はまだ続いていると考えられます。早期に収束しますことを祈念します。

## 自律知能システム研究室(山崎研究室)の紹介

機械システム工学科 准教授 山崎 公俊



### 1. はじめに

自律知能システム研究室は、知能ロボティクスや知的情報処理を主たる研究分野としています。2012年9月に発足し、2020年現在の構成員は25名となり、ずいぶん大所帯になりました。内訳は、山崎公俊准教授、長濱虎太郎講師(特定雇用)、アーノルド・ソービ講師(特定雇用)からなる主導スタッフと、博士課程学生2名、修士課程学生14名、学部4年生6名です。うち4名は留学生であり、比較的国際色豊かな研究室と言えます。

研究室名に「自律」とある通り、一機体として独立に動くロボットを主な対象としています。そして、そこに搭載すべき状況把握および行動選択の機能を実現することや、種々の機能を統合したシステムによって有益な作業をおこなわせることを目指してい

ます。最近の主な研究対象は、(1)不定形物を対象とした知識表現・認識・操作の手法提案、(2)製品組み立てにおける認識・動作生成の手法提案およびエンドエフェクタ開発、(3)人の行動観察からの作業スキル抽出および行動学習、などです。以降では、これらの研究状況を簡単に説明します。

### 2. 不定形物の操作

人々が普段の生活を送るうえで、布製品はきわめて身近な存在です。例えば、衣類や寝具は日ごろから利用されている布製品ですが、それゆえに、布製品には様々な製造・販売の過程があり、購入後も洗濯や収納などのメンテナンスが頻繁に必要です。それらの多くはいまだに人手によっていますが、自動化への要望があることも事実です。



図1 ロボットによる布製品の操作

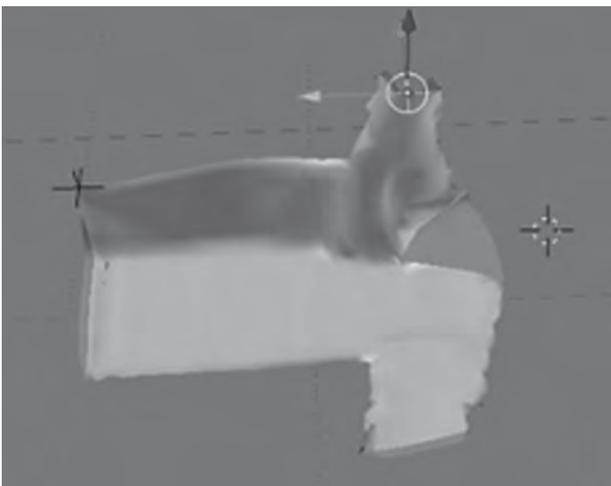


図2 物理シミュレーションを用いた布製品折り畳みの学習

しかしながら、布のような柔軟物を自動機械に操作させることは困難な課題です。当研究室では、その根本的な要因を「布の変形を適切に予測できる技術が確立されていないため」と考えています。それを解決することができれば、布のみならず、変形・分裂・変色などの様々な状態変化を伴う作業を自動化できる可能性があります。そのような考えのもと、不定形物の変化予測技術を確立し、ひいては自動機械による不定形物操作技術を体系化することを目指しています。これまでの成果としては、操作に伴う布の形状変化予測（図1）、物理シミュレーションによる操作学習（図2）、布製品の個体識別、着衣の補助などがあります。また、布にとどまらず、ひも状物体の操作や食材加工などの研究も進めています。

### 3. 製造作業の自動化

Industry4.0 や変種変量生産などのキーワードのもとに、製造作業自動化に臨機応変さを求める機運が高まっています。また、これまでは自動化が難しく人手に頼っていた作業を、新技術によって自動化

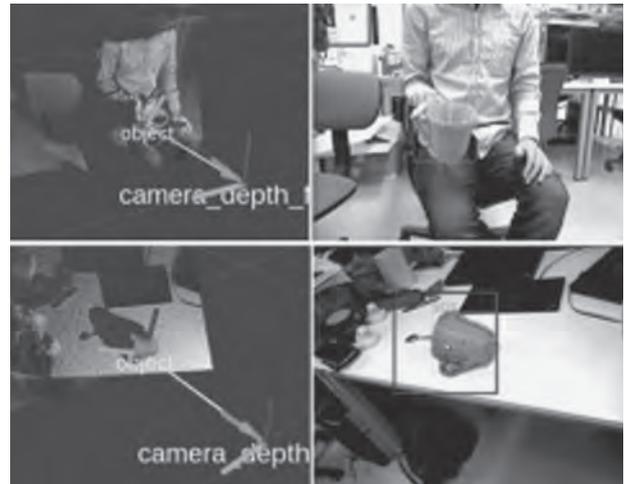


図3 WRS2018 等で採用した物体姿勢推定手法の一つ

しようとする動きもあります。当研究室でも、家電製品にケーブルを配線する作業の自動化や、布製品製造における布生地ピックアップ作業の自動化などを、企業との共同研究として進行中です。

また、要素研究だけでなく、変種変量生産を目指したロボットシステム構築についての活動もこなっています。その1例が World Robot Summit (WRS) 2018 ものづくり部門への参加です。そこでは、キッキングタスクや組み立てタスクなどいくつかの作業について、一つのロボットシステムで対応することが求められました。当研究室は金沢大学の3研究室と合同チームを組み、主に画像処理担当として参画しました（図3）。学生たちの頑張もあり、第2位（NEDO 理事長賞）を獲得しました。現在も 2021 年度に開催予定の国際大会に向けた準備を進めています。

### 4. 人の行動観察や人への作業指示

最近では、人の動きを計測・分析した結果をロボットの行動に活かす研究や、AR/MR の技術を生かして人に作業指示をする研究を始めています。前者の研究では、ある作業をしている人をカメラ等で計測し、そこからロボットの作業能力を修正したり（図



図4 人の観察に基づくロボットの行動修正

4)、人が達成している作業をロボットで再現することなどを実現しています。後者の研究では、熟練者の作業の様子をあらかじめ多種のセンサで計測しておき、その特徴を映像に重畳表示することで、初心者の人でも作業を修得しやすいシステムを構築しています。人にどのようなセンサを装着するかもひとつの研究対象となるので、幅広い技術が必要となるテーマです。

## 5. まとめ

私が学生であった時分は、ロボティクスはまだ応用分野というイメージが強く、研究開発ステージにあるものがほとんどという印象でした。同期の仲間たちは、自動車メーカーや家電メーカーなどで、ロボット以外の仕事を専門とする部署に就くケースが

多かったように思います。しかしながら、現在のロボティクスは実用ステージにおいても存在感を増しており、研究室の卒業生も一定程度がロボットに直結する仕事に就いています。昨今の人工知能ブームの影響は少なくないと思いますし、今後も機械系・電気系と融合することで、実用的なロボット技術はますます発展していくものと期待しています。

当研究室で最も興味を持って進めていることは、2章で述べた「不定形物操作技術の体系化」です。実は、3章および4章で示した成果は、2章と深くかわりのあるテーマであり、結局のところは、不定形物操作の自動化技術を体系化することに向けた一つの研究経験であると捉えることもできます。今後も自動化技術の発展に貢献できるよう、継続的に研究活動を進めていきたいと考えています。

# 人口減少時代における都市計画

建築学科 助教 佐倉 弘祐



## 1. 佐倉研究室の特徴

皆さんは、私達日本人が現在、これまでの人類史において誰も経験したことのない時代=「人口減少時代」に先進諸国の中でもいち早く突入していることをご存知でしょうか。

そうした背景の下、現在の日本では、従来の経済成長、都市成長を前提とした都市計画ではなく、持続可能性を重視した、もしくは縮退を前提とした「新しい都市計画」の重要性が高まっています。

佐倉研究室では、ミクロな研究として、私たちの研究室が位置する日本の一地方都市である長野市を対象とした研究、マクロな研究として、貧困国であるジンバブエやアルゼンチンのスラム地区を対象とした研究を行っています。研究室内でミクロとマクロ双方の研究が同時並行で進められることで学生間の学びの化学反応が起こることを期待しています。対象都市の選定基準は、経済成長とは異なる目的で都市が形成されていること、もしくは今まさに経済成長から他の目的へとシフトしようとしている都市であることです。それらの都市を対象にして、これ

からの都市計画に繋がるヒントを見出そうと研究と実践に邁進しています。

また、佐倉研究室では、研究として成果を発表するだけでなく、実際に研究対象都市が抱える課題を建築行為を通じて改良させること=実践に繋がるような研究であることを常に研究室メンバーには意識させています。

## 2. 直近の研究

今回は、紙面の都合上、ミクロな研究として長野市での研究を紹介し、佐倉研究室の特徴が実際にどのように研究、実践に反映されているか見ていきましょう。

現在修士1年生の須藤悠さんと一緒に研究しているのは、長野市狐池地区を対象に、高齢者世帯住宅の空き部屋を学生に利用してもらう異世代ホームシェア（以下、IH）の実践に向けた研究です。居住者である高齢者は、学生からの家賃収入による維持管理費負担の軽減や学生との会話による痴呆症予防や孤独死のリスク軽減などの利点があります。一

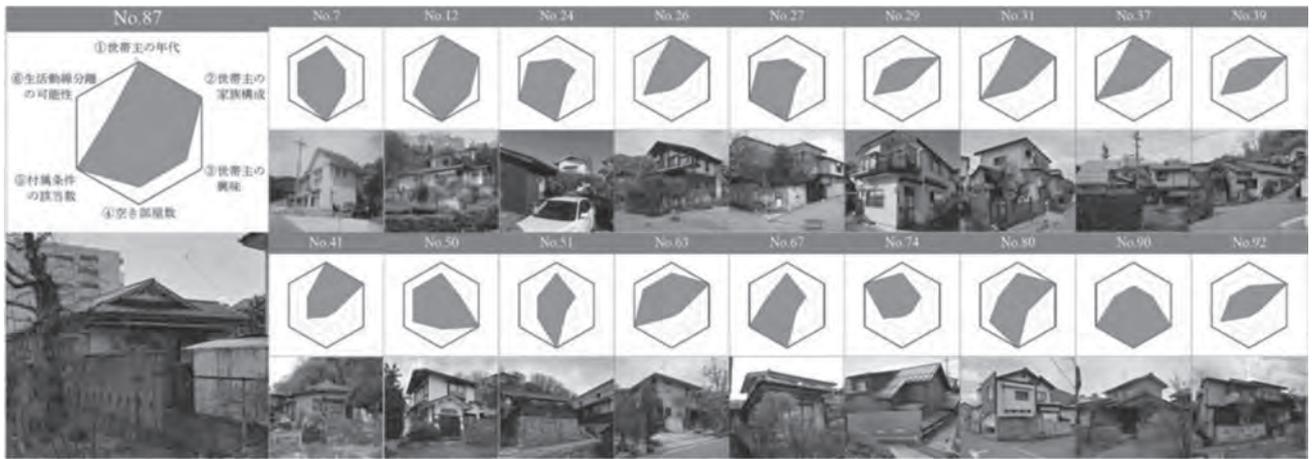


図 1：異世代間ホームシェアに対する評価指標

方で学生としては、家賃を安く抑えられる、高齢者の知恵や体験を学べるなどの利点があります。このような世帯主と学生の win-win な関係が IH の魅力なのですが、実際に日本において実現している事例は限られています。

それは何故でしょうか？ 私達の仮説は、居住者の要望と利用する学生の要望の両者に対応し得る住宅かどうかを判断する評価指標がないことが一要因なのではないか、というものでした。

仮説を立証させるため、まずは評価指標の作成に着手しました。評価指標としてレーダーチャートを採用し、その項目は、居住者項目、学生項目、住宅項

目により構成します。居住者項目としては年齢、種類、興味の程度、学生項目としては学生の要望に対する該当数、住宅項目としては IH を実現させるのに重要な空き部屋数、居住者との生活動線の分離の可否を対象としました。詳細な評点方法は割愛しますが、実際に作成したレーダーチャートが図 1 になります。

そして実際にレーダーチャートの評価の高かった住宅の居住者と IH を希望する学生に対して、再度この評価指標を見せながら実現に向けて協議し、2020 年 8 月現在、実際に 1 件の IH が誕生しています。更にこの研究過程で学生が狐池地区内で評価され、佐倉研究室で地域の掲示板を建てて欲しい、との依頼も受け、現在実施中です（写真 1 参照）。

### 3. 学生へのメッセージ

研究によって地域の課題やポテンシャルが可視化され、実践へ繋がる一例を示しました。

これまでの都市計画は、主に都市計画の専門家が担うものでした。しかし現在における都市計画は、役人、住民、地元企業、大学などの協働により構築するものという考えが定着してきています。そうした中で学生が担う役割はとても重要だと考えています。

人口減少時代における都市計画を担う学生には、限定された専門的知識以上に、様々な視点から都市の課題や魅力を見出すことができるスキル、様々なステークホルダーの間を取り持つリーダーシップ力、またはコミュニケーション能力などが求められます。これらのスキルは都市計画分野に限らず、工学系の様々な分野に共通するものだと思います。



写真 1：掲示板再建に向けた打ち合わせ風景

「技報 こまくさ」 第 18 号 令和 2 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