

技術、教育を取り巻く環境の変化

一般財団法人信州大学工学部若里会 理事 榊 和彦

研究助成報告

バイオマス由来の食資源であるエノキタケ細胞壁構造の解明

電子情報システム工学科 研究員 田川 聡美

環境調和型触媒による革新的合成プロセスの開発

物質化学科 准教授 戸田 泰徳

新規p型二次元物質による電界効果素子の開発

電子情報システム工学科 准教授 浦上 法之

| 研 | 究 | 室 | 紹 | 介 |

信大クリスタル®が拓く未来社会

—フラックス法を核としたエネルギー・環境材料科学の挑戦—(手嶋・萩尾・林・山田研究室)

物質化学科 教授 手嶋 勝弥・教授 萩尾 健史・准教授 林 文隆・准教授 山田 哲也

新たな表面・界面物理の発見で、見たことのない電子デバイスを(大原研究室)

電子情報システム工学科 助教 大原 正裕

「水の動き」から水環境・水防災を考える(豊田研究室)の紹介

水環境・土木工学科 准教授 豊田 政史

制御工学研究室(種村研究室)の紹介

機械システム工学科 准教授 種村 昌也

建築分野の気候変動対策研究

建築学科 助教 中谷 岳史

目 次

技術、教育を取り巻く環境の変化

／一般財団法人信州大学工学部若里会 理事 榎 和彦	1
---------------------------------	---

研究助成報告

バイオマス由来の食資源であるエノキタケ細胞壁構造の解明※

／電子情報システム工学科 研究員 田川 聡美	2
------------------------------	---

環境調和型触媒による革新的合成プロセスの開発

／物質化学科 准教授 戸田 泰徳	8
------------------------	---

新規 p 型二次元物質による電界効果素子の開発

／電子情報システム工学科 准教授 浦上 法之	11
------------------------------	----

研究室紹介

信大クリスタル®が拓く未来社会

—フラックス法を核としたエネルギー・環境材料科学の挑戦—（手嶋・萩尾・林・山田研究室）

／物質化学科 教授 手嶋 勝弥・教授 萩尾 健史・准教授 林 文隆・准教授 山田 哲也	15
---	----

新たな表面・界面物理の発見で、見たことのない電子デバイスを（大原研究室）

／電子情報システム工学科 助教 大原 正裕	17
-----------------------------	----

「水の動き」から水環境・水防災を考える（豊田研究室）の紹介

／水環境・土木工学科 准教授 豊田 政史	19
----------------------------	----

制御工学研究室（種村研究室）の紹介

／機械システム工学科 准教授 種村 昌也	21
----------------------------	----

建築分野の気候変動対策研究

／建築学科 助教 中谷 岳史	23
----------------------	----

※ 研究助成報告の田川聡美先生の報告は、第 21 号で掲載予定でしたが、論文発表のため本号に掲載しました。

技術、教育を取り巻く環境の変化

一般財団法人信州大学工学部若里会
理事 榎 和彦

地政学的リスクが収まる気配のない中、技術分野ではAIの目まぐるしい発展とともに、DX × GXなどの取り組みが進展しています。

ところで皆さんは、経済安全保障の強化・推進を目的に、内閣府や経済産業省、その他の関係府省が連携し、先端的かつ重要な技術の研究開発から技術実証までを迅速かつ柔軟に推進する「経済安全保障重要技術育成プログラム」（通称“K Program”）をご存じでしょうか。筆者は、同プログラムが発足した2022年6月から半年ほど経った頃、知人からその存在を聞きました。このプログラムで、コーティング法である溶射技術の中でも比較的新しいコールドスプレーが話題に上っていると耳にし、密かに期待を寄せていました。コールドスプレーは、もともと旧ソ連で発明され、欧米を中心に広まりました。国内では筆者もその普及に取り組んできたパイオニアの一人です。

ところが、今年5月に公開されたK Programの一環である「高度な金属積層造形システム技術の開発・実証」（予算270億円）には、コールドスプレーは含まれていませんでした。いわゆる金属積層造形とは、“金属3Dプリンティング技術”のことで、日本はこの分野で欧米にやや遅れをとっています。この事業では、造形技術・金属粉末・設計技術などの要素技術を一体的に開発し、統合型の金属積層造形システムとして確立すること、さらに実機による技術実証、品質保証の規格化、認証基準の策定を行い、最適地（オンサイト）で高機能部品を製造し、納期短縮を実現する生産プロセスの構築を国内で目指しています。

コールドスプレーは、粒子を溶かすことなく高速で基材表面に衝突させて成膜する技術であり、その高速成膜性や厚膜形成能力から、金属造形技術として欧米では注目を集めています。国内ではまだ十分に普及していませんので、やむを得ないと思います。しかし、8月末に大手自動車メーカーが、第3世代e-POWER向けエンジンに世界初のコールドスプレー工法でバルブシートを実用化したことをプレスリリースして、これを機に国内でのコールドスプレーのブレイクスルーを期待している。

さて、教育の現場に目を向けると、平成30年（2018年）に改訂された高等学校学習指導要領で学んだ生徒たちが、今年4月に大学へ入学してきました。

この学習指導要領の改訂は、高大接続改革と連動し、大学入学者選抜の見直しと一体的に実施されたもので、未来社会に主体的に対応できる力を育成することを目的としています。その中では、次の三つの柱をバランスよく育てることが求められています。

- 1) 知識・技能（基礎的な内容の習得と活用力）
- 2) 思考力・判断力・表現力など（自ら考え、他者に伝える力）
- 3) 学びに向かう力・人間性など（主体性・協働性・倫理性）

その手段の一つとして導入されたのが「GIGAスクール構想」で、すべての児童・生徒に1人1台の端末と高速ネットワーク環境を提供するというものです。

大学では、この「新教育課程」で育った彼らにどのように対応するかについて、議論が始まったばかりです。先日、学内で「緊急FD！今年の1年生ってどう？」というテーマで開催されたFDセミナー（大学教員が授業の質を向上させるための研修）に参加しました。FDセミナーでは、GIGAスクールの負の側面についても議論されました。たとえば、次のような傾向が報告されています：

- ・「メモを取らない、文字を書かない習慣が定着している」
- ・「字が汚い、文章が書けない、文の構成ができない（句読点が使えない）」

一方で、良い点として以下のような変化も挙げられました：

- ・「物おじせず発言する姿勢がある」
- ・「学生同士でグループ活動を通じて課題解決に取り組む傾向が強い」

負の側面を持った学生は、以前から徐々に増えていたように感じていましたが、今後さらに増える可能性があると感じています。技術導入によって生まれたこうした課題は、再び技術によって解決できる可能性もあります。ただし、人間はアナログな存在でもあるため、地道で愚直な学びや手書きによる基本的なトレーニングの重要性も、引き続き見直されるべきだと感じています。

最後に、研究助成報告を掲載されている若手の先生方が、将来的に“K Program”に関わるような大規模なプロジェクトに参画されることを心より祈念いたします。

また、目まぐるしく変化するこの時代において、私たちが享受している豊かな生活をどのように維持し続けていくのか。そのための知恵と行動が、今まさに人類全体に問われているのかもしれません。

バイオマス由来の食資源である エノキタケ細胞壁構造の解明



(元) 信州大学工学部 物質化学科 助教 (特定雇用)

(現所属) 信州大学工学部 電子情報システム工学科 研究員

田川 聡美

1. 研究背景と目的

キノコは、低カロリーでありながら、食物繊維、ミネラル、ビタミン類、アミノ酸を豊富に含む優れた栄養源である。このような特性から、免疫力の向上に寄与し、さまざまな料理に取り入れられている。

近年では、持続可能な社会の実現に向け、生分解性素材の開発への関心が高まる中、キノコをバイオベース材料として活用する動きが広がっている¹⁾。一方で、人口増加に伴って建築資材やプラスチック製品の需要が拡大し、鉄鋼やコンクリートといった従来の建材は、生産時に大量のエネルギーを消費し、温室効果ガスを排出するという課題を抱えている。加えて、プラスチックは海洋汚染の原因となるだけでなく、廃棄時には温室効果ガスや有害物質の発生も招く。こうした背景の中で注目されているのが、キノコの菌糸体である。菌糸は成長過程におけるエネルギー消費が少なく、副産物の発生も抑えられるという利点を持つ。これにより、前述の環境問題の解決に貢献できる可能性があり、菌糸を用いた素材開発が活発化している。実際に、キノコ菌糸を原料とした皮革代替品、断熱材、緩衝材などの製品が登場しつつあり、その実用化に向けた研究と技術開発が進められている¹⁾。

キノコの主体は、管状の繊維である菌糸が絡み合って形成された塊であり、これを子実体と呼ぶ

(図 1a)。菌糸体は、菌糸が網目状に絡まったあるいは、束状にまとまった集合体である (図 1b)。菌糸は直径 1-30 μm 程度、長さ数 μm から数 mm の管状の細胞からなり、その細胞壁は複数の層で形成される。その外層にはマンノプロテインやハイドロフォビンといったタンパク質が存在し、細胞間の認識や酵素の構成成分、菌糸表面の撥水性に寄与するとされている。内層はグルカン、キチンからなり、菌糸に機械的な剛性と強度を与えていると推測されている (図 1c)²⁾。

キノコは階層構造を持つが、材料物性や細胞壁構造、成分などについては、特に菌糸体を対象とした研究が行われている。しかし、各階層の構造が材料特性に影響を与えるとの視点から、菌糸体だけでなく、他の階層にも焦点を当てた複合的な調査が求められる。本研究の大目標は、このような広範な視野からキノコを用いた材料設計に寄与することである。本研究では、大きな階層として、まずは子実体に注目した。

長野県は、全国でもキノコの産地としては特筆すべき地域で、令和 2 年度におけるエノキタケ、ブナシメジ、エリンギの生産量は全国一であった³⁾。エノキタケは、生活習慣病の予防や免疫機能の強化といった効果が高く評価されている。それに加え、エノキ氷やエノキヨーグルトなどの新たな商品の開発も行われている。そこで、本研究では、エノキタケ

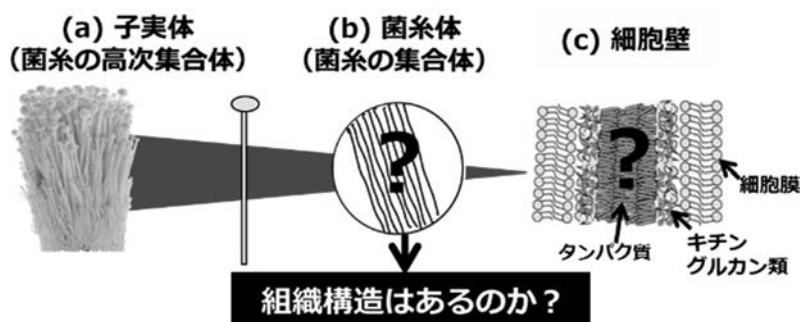


図 1 キノコの階層構造

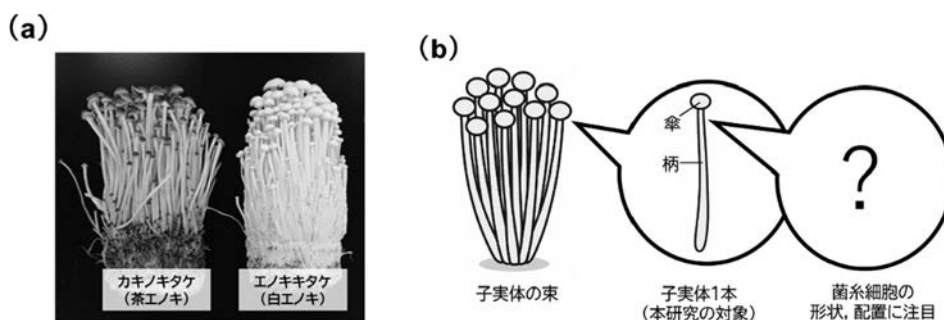


図2 本研究で使ったエノキタケ試料

(a) エノキタケの子実体の束. 左:カキノキタケ (茶エノキ), 右:エノキタケ (白エノキ), (b) 本研究で対象とした子実体試料に関する説明.エノキタケ子実体1本を指し,子実体の束ではないことを強調しておく.(本研究の成果論文:日本きのこ学会誌(2025) 33(2): 82-86 より転載)

(*Flammulina velutipes*) を材料として利用する基盤を構築することを目指し、子実体の組織構造と物性の関連性に焦点を当てた。なお、初めに立てた目的は子実体の細胞壁構造の解明であったが、研究を進行する中でより高次の組織構造を明らかにすることが必要だという認識に至った。そのため、まずは子実体の組織構造の調査を行うこととなった。

具体的には、子実体としての柿の木茸 (茶エノキ) とえのき茸 (白エノキ) の組織構造と物性を調査した。この二つのエノキタケ (図 2a) が選ばれた理由は、それぞれの食感が異なることから、組織構造と物性も異なると推察されたからである。これら、二種類のエノキタケの子実体一本に対し、その組織構造を顕微鏡で観察し、画像解析を行い、さらに物性を破断強度測定により評価することで、組織構造と物性の関連性を考察した (図 2b)。

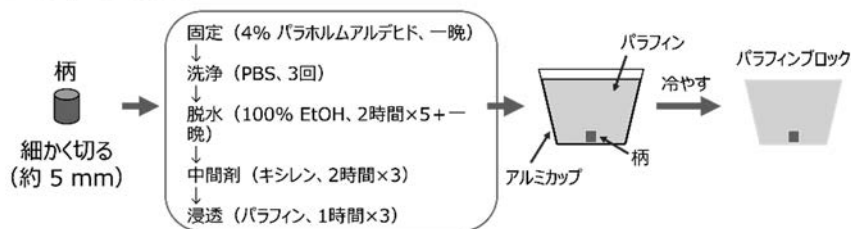
2. キノコ組織の観察方法の構築

エノキタケの組織構造を観察するにあたり、文献

調査を行ったが、キノコ子実体における組織構造に関する知見の乏しさが明らかとなった。例えば、「mushroom, tissue structure, fruit body」という検索ワードで Web of Science で検索したところ、ヒットした論文は 35 件であり、そのうち組織構造に着目した論文は数報であった。一方、木材分野に目を向けてみると、組織構造は材料利用の基本となっており、膨大な情報が存在する。木材標本に関しては、その組織切片画像のオープンデータベースが存在するほどである⁴⁾。キノコ研究の主軸は、成分分析や分類、生態学や生理学、育種や栽培にあり、組織構造はこれまで重要視されてこなかった可能性がある。このような背景から、キノコの組織の観察方法の構築から始めることとした。

組織観察試料の主流な作製方法は試料の組織切片を作製することである。キノコは柔らかい組織であるため、本研究では、パラフィン包埋法を参考にすることとした。具体的な試料調製方法を図 3 に示した。試料調製は、化学固定、脱水、パラフィン包埋、

<パラフィン包埋方法>



<パラフィン切片作製方法>



<プレパレート作製方法>

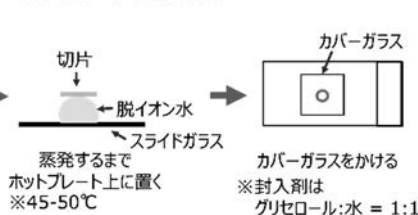


図3 キノコの組織切片作製法



図4 大型滑走式マイクローム

トリミング、切片作製という流れである。切片作製には滑走式のマクロトーム（リトラトーム REM-710, YAMATO）を用いた（図4）。本装置は、本助成金をいただいて購入したものであり、今後の研究の要となるものである。動物組織切片においては、脱パラフィンという過程を経て、パラフィンを除去し、染色するという流れになる。しかし、今回は、パラフィンの切削面に対し、菌糸の細胞壁成分を染める Calcofluor White を滴下することで染色が可能であったため、パラフィン切片を脱パラフィンせずにそのまま観察に用いた。

3. エノキタケ子実体の組織観察

はじめに、茶エノキ及び白エノキの柄のマクロ構造を明らかにするために、デジタルマイクロスコープ（VHX-900, KEYENCE）で各試料の断面を観察した（図5）。エノキと白エノキはどちらも柄の中央に空洞があり、柄の内側では菌糸が長軸方向に配向

していることが明らかとなった。また、茶エノキは菌糸が見えづらく透き通った部分も認められた（図5矢印）。このことから、茶エノキと白エノキでは、組織構造が異なることが示唆された。

次に、茶エノキ及び白エノキの柄の組織構造の違いを明らかにするために、柄の横断面を落射蛍光顕微鏡（BX51, OLYMPUS）を用いて観察をし、ImageJ Fiji を用いて画像解析を行った。茶エノキと白エノキの柄の横断面を蛍光顕微鏡で観察した像の一例を図6に示した。これは Calcofluor White の蛍光像で、菌類の細胞壁に含まれる chitin や β -glucan が染色されている。キノコの菌糸の直径は $10\text{ }\mu\text{m}$ 前後であることより⁵⁾、丸状のものは菌糸の断面であり、蛍光を示した部分は菌糸の細胞壁であると考えられる。

さらに、Image J Fiji を用いて画像解析を行い、菌糸1細胞横断面積（菌糸面積）と菌糸数密度を測定した。その結果、菌糸面積は、両エノキに共通し

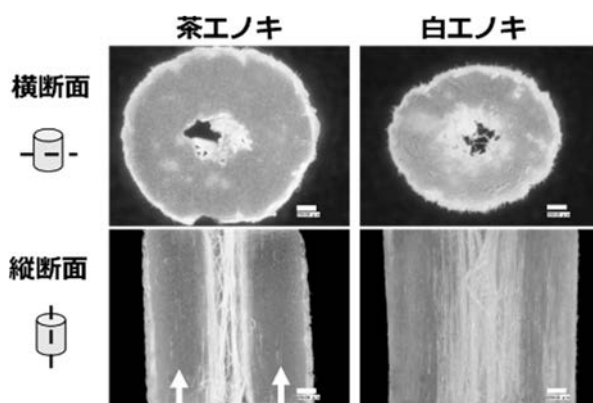


図5 エノキタケ断面のマクロ観察像

矢印：透き通った部分，スケール：250 μm ．

（本研究の成果論文：日本きのこ学会誌（2025）33(2)：82-86より転載）

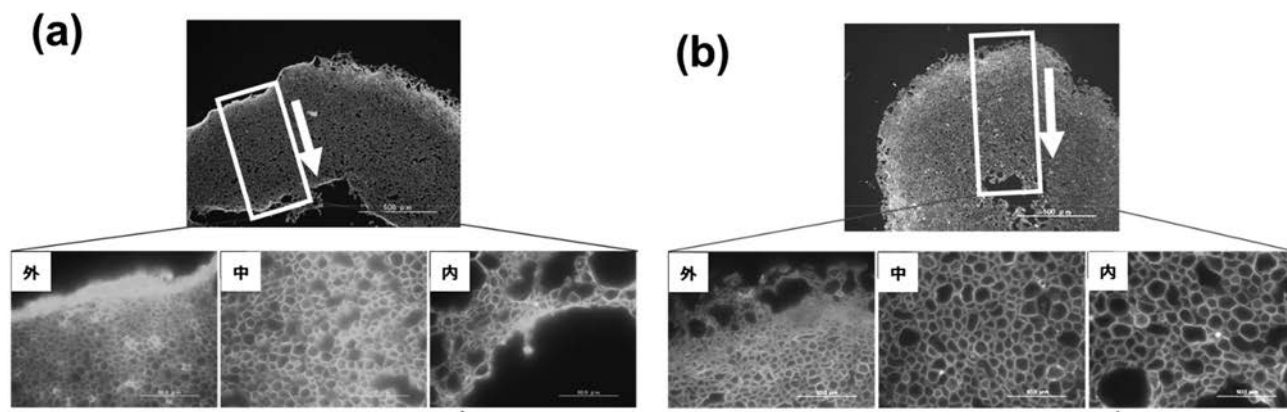


図6 エノキタケの横断面切片の蛍光観察像

カルコフローホワイトの蛍光像を示す。下図は上図の拡大像，(a) 茶エノキ，(b) 白エノキ，拡大像のスケール：50 μm ．上図白の矢印と下図黒矢印の方向は対応している。

（本研究の成果論文：日本きのこ学会誌（2025）33(2)：82-86より転載）

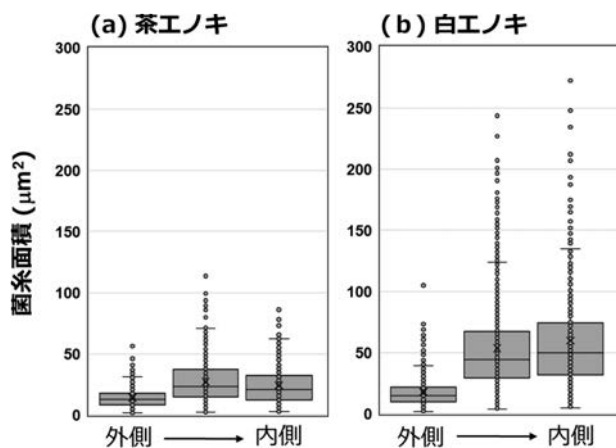


図7 菌糸面積の箱ひげ図

(a) 茶エノキ, (b) 白エノキ, 外側は柄の外側、内側は柄の中心部を意味する。(本研究の成果論文: 日本きのこ学会誌 (2025) 33(2): 82-86 より転載)

て、外側よりも内側の方が大きいことが判明した(図7)。また、茶エノキよりも白エノキの方が、菌糸面積が大きい傾向がみとめられた(図7b)。加えて、茶エノキと比べ、白エノキの面積はばらつきが大きく、不均一であることが分かった(図7b)。菌糸数密度は、内側よりも外側の方が高く、白エノキよりも茶エノキの方が高かった(表1)。よって、茶エノキは菌糸が小さく密に集合しており、白エノキは菌糸が大きく疎であることが明らかとなった。

4. エノキタケ子実体の破断強度測定

組織観察で認められた子実体の組織構造が、物性にどのように関連しているのかを調べるために、エノキ子実体の破断強度測定を行った。2種のエノキタケの柄を2 cm 程の長さに切ったものを各30本ずつ測定した。測定には、クリープメーター

表1 菌糸数密度 [$\times 10^4$ 個/mm²]

(本研究の成果論文: 日本きのこ学会誌 (2025) 33(2): 82-86 より転載)

エノキタケの種類	外側	中側	内側
茶エノキ	4.10 ± 0.45	2.18 ± 0.37	1.74 ± 0.20
白エノキ	2.69 ± 0.62	1.06 ± 0.17	0.84 ± 0.10

(RE2-33005B, YAMADEN) 及び同解析ソフトウェア(破断強度解析、Windows Ver. 2.5、BAS-3305)を用いた。プランジャーには治具49を用い(図8)、プランジャーの移動速度は1 mm/sec、測定歪率は100%、測定点数は300個とした。具体的な測定条件は図8に示した。測定は、エノキ子実体の柄の長軸方向に対して垂直方向と平行方向の2方向に力を加え比較した。

図9(a)に、エノキタケの柄の長軸方向に垂直な方向から力を加えて破断した場合の歪率と応力の関係を一例として示した。ここでの応力とは、荷重を接触面積で割ったものである。このグラフから読み取れることは、エノキタケの柄に垂直な方向から力を加えた場合、複数の破断点が現れるということである。それに対し、柄の長軸方向に平行に力を加えると、破断点は一つだけとなった(図9b)。これら

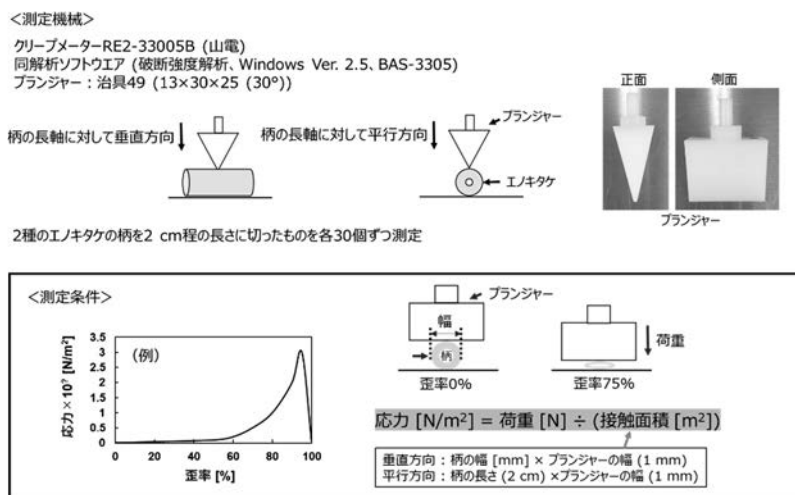


図8 エノキタケの破断強度測定方法

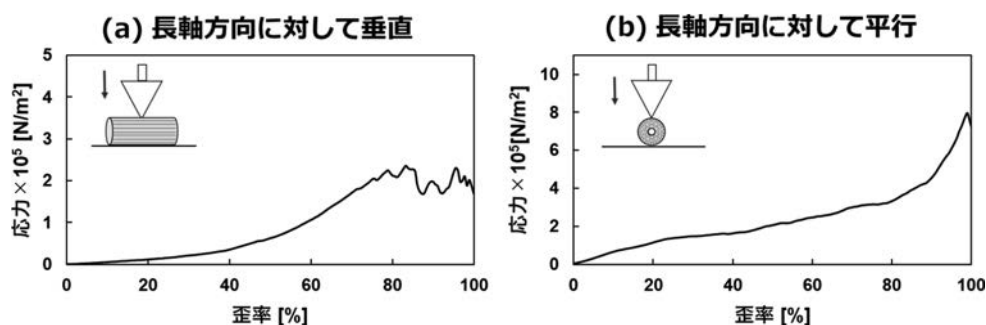


図9 歪み-応力グラフの一例

(a) 柄の長軸方向に対し垂直, (b) 柄の長軸方向に対し平行. (本研究の成果論文: 日本きのこ学会誌 (2025) 33(2): 82-86 より転載)

の破断の振る舞いの違いは、子実体の柄の組織構造が影響を及ぼしていると考えられる。図5と図6の組織構造の観察からは、エノキタケの子実体の柄には菌糸が密集してパッキングし、柄の長軸方向に明瞭に配向していることが示されている。この菌糸が配向している方向に対して垂直に力を加えると、複数の菌糸体が破壊され、結果的に複数の破断点が生じる。一方、同じ方向に平行に力を加えると、菌糸は引き裂かれるように破断すると考えられる。

次に、エノキタケの柄の長軸方向に垂直な方向から力を加えて破断した場合の歪率と応力の関係について、茶エノキと白エノキの破断挙動を分析した。複数生じた破断点の数と各破断点の破断強度を調査したところ、図10のような結果が得られた。破断点の数に関しては有意差は認められなかったが(図10a)、破断強度については有意差が確認でき、白エ

ノキの方が破断強度が高いということが示された(図10b)。さらに、白エノキの破断強度のばらつきは茶エノキよりも大きいという特性が見られた。これについては現時点では推測の域を出ていないが、菌糸面積のばらつきの大きさ(図7b)が関連していると考えられる。

さらに、エノキタケの柄の長軸方向に平行な方向から力を加えて破断した場合の歪率と応力の関係について、茶エノキと白エノキの破断挙動を比較した結果を図11に示す。その結果、茶エノキの最大応力平均は 6.77 ± 0.95 ($\times 10^6$ [N/m²], 図11a) 白エノキのそれは 5.23 ± 0.54 ($\times 10^6$ [N/m²], 図11b) となった。これより、茶エノキは白エノキよりも力に対する耐性、つまり破断強度が高いことが明らかになった。この結果の要因としては、菌糸同士の結着性が寄与していると考えられる。さらに、

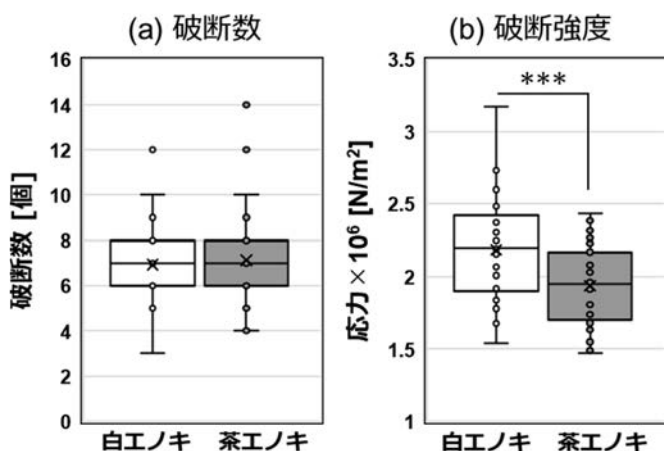


図10 長軸方向に対して垂直方向に押した際の破断強度解析
(a) 破断点の数の箱ひげ図, (b) 各破断点の破断強度の箱ひげ図.
*** はスチューデントの t 検定により有意差があることを示す ($p < 0.05$) (本研究の成果論文: 日本きのこ学会誌 (2025) 33(2): 82-86 より転載)

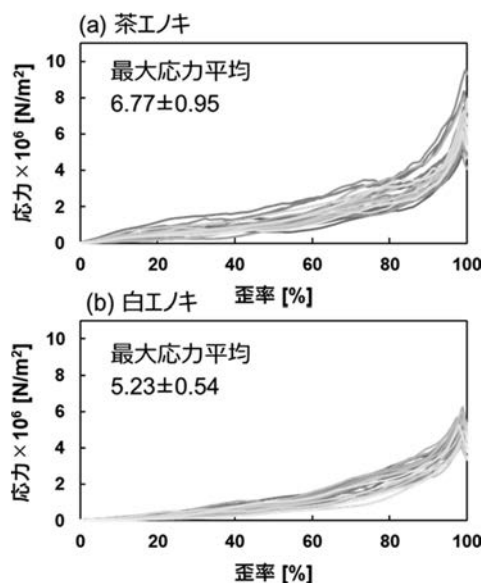


図11 長軸方向に対して平行方向に押した際の歪み-応力グラフ
(a) 茶エノキ, (b) 白エノキ. (本研究の成果論文: 日本きのこ学会誌 (2025) 33(2): 82-86 より転載)

茶エノキの菌糸密度が白エノキよりも高いという観察結果（表1）もこれに関連していると思われる。結着性に関連する成分については、今後の研究で詳しく調査する予定である。

5. おわりに

日本では年間約 760,000 トンのキノコが生産されており、また 2022 年の世界の菌糸体市場は 28.5 億ドルに達している。この市場は 2023 年から 2028 年にかけて年平均成長率 9.39% で成長し、2028 年には 47.6 億ドルに至ると予測されている⁶⁾。このような状況は、将来的にキノコ材料の需要が高まり、キノコに関する知見の必要性も高まることを示唆している。本研究により、キノコ子実体に関する知識を深め、その知見を集積する基盤が構築された。同一のエノキタケでも、株により組織構造が異なることが明らかとなったのは、大変重要な発見である。そして、食感に差があるとされる茶エノキと白エノキについて、組織構造と物性の観点からその違いを明らかにすることができた。これらの組織構造の違いが材料としての機能にどのように影響を与えるのか、今後の研究で明らかにする予定である。また、これまでは細胞壁の一つ上の階層である組織に焦点を当ててきたが、今後は主要な対象である細胞壁成分やその構造についても解明していきたいと考えている。

謝辞

2022 年度研究助成として、一般財団法人信州大学工学部若里会から大変なご支援をいただきました。この場をお借りし、心から感謝申し上げます。さらに、本研究を進める上で一緒に試行錯誤し、研究を共に進めてくださった大学院生の高橋茉那さん、中内宙弥さん（現、アクアリ・ジェネレーション機構特別助教）そして常に的確なアドバイスをくださった同研究室の天野良彦先生、水野正浩先生に対しても深く感謝申し上げます。

引用論文

- 1) D. Alemu, M. Tafesse, A. K. Mondal, Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial. Int. J. Biomater. 2022, 8401528 (2022).
- 2) L. Yang, D. Park, Z. Qin, Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review. Frontiers in Materials. 8 (2021), doi:10.3389/fmats.2021.737377.

- 3) 農政部園芸畜産課, 2022, 「長野県の菌床栽培きのこのページ」, 長野県公式ホームページ (2023 年 2 月 27 日取得, <https://ac-writing.com/writing-references-electronic-sources/>).
- 4) 森林総合研究所, 「木材標本庫データベース」, 森林総合研究所ホームページ (2023 年 7 月 31 日取得, <https://db.ffpri.go.jp/WoodDB/TWTwDB/home.php>).
- 5) W.-C. Ko, W.-C. Liu, Y.-T. Tsang, C.-W. Hsieh, Kinetics of winter mushrooms (*Flammulina velutipes*) microstructure and quality changes during thermal processing. J. Food Eng. 81, 587-598 (2007).
- 6) BIS Research, "Mycelium Market-A Global and Regional Analysis", BIS Research ホームページ (2023 年 7 月 31 日取得, <https://bisresearch.com/industry-report/mycelium-market.html>).

成果

論文掲載

田川聡美, 高橋茉那, 中内宙弥, 水野正浩, 天野良彦, 2 種のエノキタケ *Flammulina velutipes* の組織構造と力学特性の比較, 日本きのこ学会誌, (2025) 33(2): 82-86 査読有

学会発表

「2 種のエノキタケ子実体 (*Flammulina velutipes*) の組織構造と物性の比較」

○高橋茉那, 田川聡美, 中内宙弥, 水野正浩, 天野良彦

日本きのこ学会第 26 回大会, A-06, 2023 年 8 月, 奈良.

環境調和型触媒による 革新的合成プロセスの開発



信州大学工学部 物質化学科 准教授 戸田 泰徳

はじめに

優れた機能や特性をもつ有機化合物は「機能性化学品」と呼ばれ、高付加価値な機能性材料の原料として利用される。資源の少ない我が国では、安価な汎用化学品（数百円～数千円/kg）よりも高価な機能性化学品（数万円～数百万円/kg）の合成が国際的な産業競争力の基盤となっている。

ラジカル反応は、有機合成において重要な反応として位置づけられている。例えば、フェノールの工業的製造法であるクメン法では、クメン由来の炭素ラジカルを経由した反応が利用されている。また、ポリスチレン（熱可塑性樹脂）は、スチレンのラジカル重合反応により工業的に製造されている。これらの例のように潜在的に有用なラジカル反応が開発されてきたが、機能性化学品合成への工業的な応用は遅れている。本問題を解決するため、『可視光レドックス触媒』と呼ばれる光触媒を用いる効率的な炭素ラジカルの発生法が精力的に研究されている。この反応は、従来法では困難な分子変換を実現できると期待されている。

炭素ラジカルの1つである『アリールラジカル』は非常に高い反応性をもち、芳香族化合物の合成において有用な中間体であることが知られている。し

かし、従来のアリールラジカルの発生法は毒性の高い試薬を用いる方法や、厳しい反応条件を要する方法などに限られている。本研究では、容易に入手可能なハロゲン化アリールから『可視光レドックス触媒』を用いて温和な条件下、触媒的にアリールラジカルを発生させることにより、芳香環を直接導入するラジカル反応の開発を目指した（図1）。

負電荷を持つ炭素原子が正電荷を持つリン原子と直接結合している化合物をリンイリドという。リン原子が正電荷を持つことから『ホスホニウムイリド』と呼ばれることも多い。ホスホニウムイリドの化学は、歴史的に有機合成化学の発展に大きく貢献してきた。約70年前に Wittig らがホスホニウムイリドを用いるカルボニル化合物からのアルケン合成反応（1979年ノーベル化学賞）を報告して以来¹⁾、イリド炭素の求核性を利用した合成反応が数多く報告されてきた。一方、その触媒能に関する研究は、他のリン化合物（ホスホニウム塩やホスフィンオキシド、リン酸およびその誘導体など）と比較して限定的であった²⁾。

イリドの炭素原子に電子求引基が置換していると、その効果によってイリドの負電荷が安定化される（これを安定イリドと呼ぶ）。筆者らはカルボニ

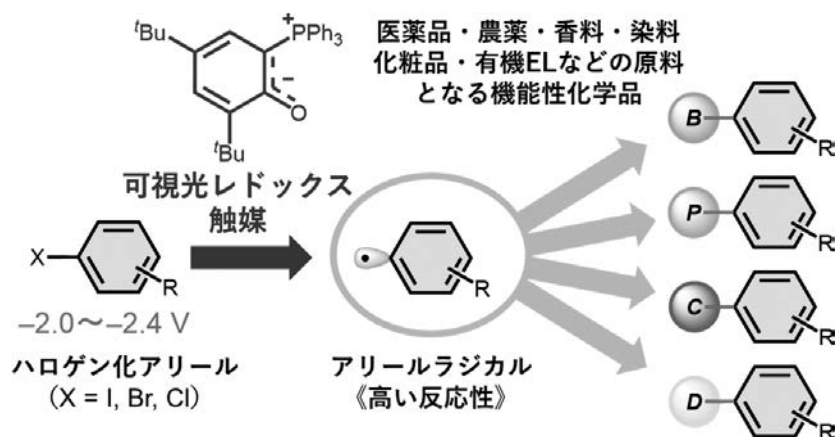


図1 可視光レドックス触媒を用いる芳香環を直接導入するラジカル反応

ル基によって安定化されたホスホニウムイリドに π 共役系を導入した独自の安定イリドを設計し³⁾、この分子の特性を最大限に活かすことによって、環境調和型触媒としての機能開拓を目指している。本稿では、これまで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るため、十分検討できていない結果が含まれることをご容赦いただきたい。

環境調和型触媒を用いるアリールラジカル反応開発

筆者はホスホニウムイリドが示す還元性に着目し⁴⁾、イリドが還元的過程を担う可視光レドックス触媒として機能することを世界で初めて実証した⁵⁾。すなわち、励起状態の酸化電位は -2.4 V vs. SCE であり、極めて強い還元力 (-2.0 V vs. SCE よりも負の電位) を有することを明らかにした。また、合成化学的应用として、図2に示したトリフルオロメチル化剤 (-0.4 V vs. SCE) やイミド化剤 (-1.3 V vs. SCE) を用いるアルケンや芳香族化合物のC-H官能基化反応を報告した⁶⁾。これらの知見に基づくとイリドの特長である還元力を最大限利

用できれば、トリフルオロメチル化剤やイミド化剤よりも反応性が低いラジカル前駆体であるハロゲン化アリール ($-2.0 \sim -2.4$ V vs. SCE) から触媒的にラジカルを発生できると期待される。そこで、ハロゲン化アリールから触媒的に発生させたアリールラジカルの反応を検討した。

芳香族ボロン酸エステルは合成中間体として大変有用な化合物である。その合成法として、パラジウムなどのレアメタル触媒によるハロゲン化アリールのホウ素化反応が知られているが、レアメタルを使用しない合成法の開発が望まれている。検討の結果、*p*-ヨードアニソール (-2.3 V vs. SCE) とピナコールジボロン (B_2pin_2) をアセトニトリル中、10 mol%のホスホニウムイリド触媒およびフッ化セシウム存在下、可視光照射下に反応させると、対応する芳香族ボロン酸エステルが得られることを見出した。また、大変興味深いことに、水 (5%) を添加すると収率が向上することを明らかにした (図3)。2-プロモナフタレン (-2.2 V vs. SCE) や2-クロロナフタレン (-2.3 V vs. SCE) を同条件で反応させた場合、それぞれ40%および31%の収率で目的

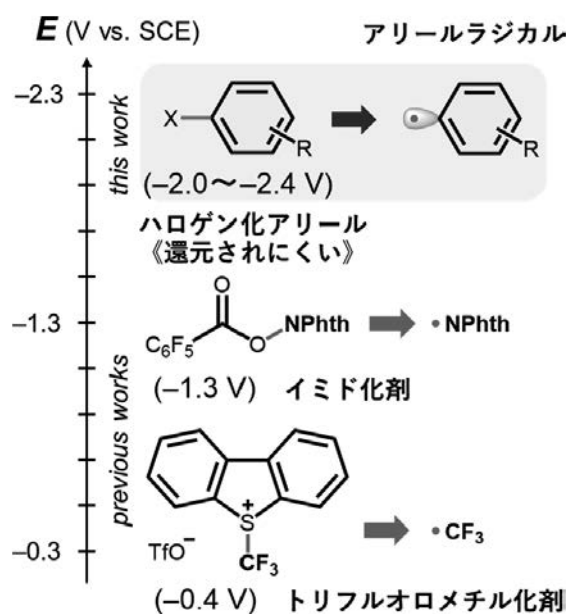


図2 ラジカル前駆体の還元電位

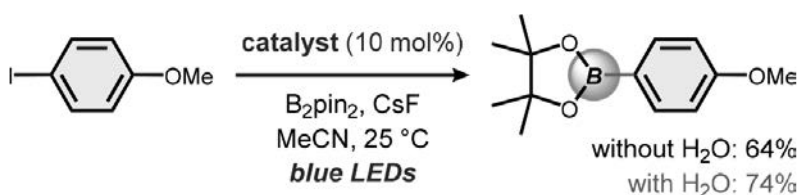


図3 芳香族ボロン酸エステル合成反応

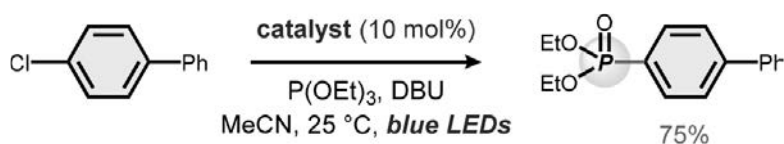


図4 芳香族ホスホン酸エステル合成反応

物が得られた。特に、2-クロロナフタレンのような塩化アリールは、従来法を適用しにくく、入手容易な原料（市販されているハロゲン化アリールの3分の2以上が塩化アリール）であることから魅力的な基質である。

続いて、芳香族ホスホン酸エステルの合成法として、ハロゲン化アリールと亜リン酸トリエチルとの反応を検討した。芳香族ホスホン酸エステルは表面処理剤や樹脂改質剤として材料化学の分野で使用されているだけでなく、生物活性を示すものが数多く存在するため、創薬化学の分野からも注目されている化合物である。類似する化合物はハロゲン化アリールとホスフィンオキシドからも合成できるが、レアメタル触媒を使用する点に改善の余地を残している。検討の結果、*p*-ヨードアニソールと亜リン酸トリエチル ($P(OEt)_3$) を反応させると、目的物が87%の高収率で得られることを明らかにした。また、4-クロロビフェニル (-2.4 V vs. SCE) のように極めて反応性が低い塩化アリールを用いた場合でも、75%と良好な収率で目的物を得ることができた(図4)。また、*p*-ヨードアニソールと1,3-ジメチルインドールとの反応においても中程度の収率で目的物が得られることを見出しており、現在、有機合成への応用を鋭意検討中である。

おわりに

可視光レドックス触媒の原理は40年以上前に発見されていたが、有機合成に応用されはじめたのは直近10年ほどのことである。筆者らが開発したイリド触媒のように還元的光触媒過程を担う触媒の開発は、酸化的過程の触媒に比べて大きく遅れていた。還元的に作用する触媒の開発において、還元力の向上が重要な課題であるが、研究開始当初、三価のイリジウム錯体を超える強い還元力をもつ触媒はナフタレン誘導体やフェノチアジン誘導体などに限られていた。本研究では、既存の可視光レドックス触媒と比較して、一線を画した分子構造である一方、修飾が容易な分子構造であるホスホニウムイリドを可視光レドックス触媒として用いることにより、極めて強い還元力を実現した。筆者は信州大学

工学部に着任して丸10年となるが、2025年の春、日本化学会第105春季年会において『若い世代の特別講演』を行うことができた。信大工学部から新しい触媒を開発できたことを大変嬉しく思うとともに、新しい触媒の開発に取り組みたいと思う。

謝辞

本研究は一般財団法人 信州大学工学部若里会2024年度研究助成を受けて行ったものであり、関係各位に御礼申し上げます。また、ご指導いただいた菅 博幸 教授、ともに実験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) G. Wittig, U. Schöllkopf, *Chem. Ber.* **1954**, *87*, 1318.
- 2) Y. Shi, B.-W. Pan, J.-S. Yu, Y. Zhou, J. Zhou, *ChemCatChem* **2021**, *13*, 129.
- 3) Y. Toda, T. Sakamoto, Y. Komiyama, A. Kikuchi, H. Suga, *ACS Catal.* **2017**, *7*, 6150.
- 4) M. M. Wienk, R. A. J. Janssen, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 5398.
- 5) Y. Toda, K. Tanaka, R. Matsuda, T. Sakamoto, S. Katsumi, M. Shimizu, F. Ito, H. Suga, *Chem. Commun.* **2021**, *57*, 3591.
- 6) Y. Toda, T. Kobayashi, F. Hirai, T. Yano, M. Oikawa, K. Sukegawa, M. Shimizu, F. Ito, H. Suga, *J. Org. Chem.* **2023**, *88*, 9574.

新規 p 型二次元物質による 電界効果素子の開発



信州大学工学部 電子情報システム工学科 准教授 浦上 法之

はじめに

デジタル化の推進やカーボンニュートラルを目指す世界情勢において、電子機器の根幹をなす電子素子の低消費電力化は重要な技術課題である。層状物質からなる二次元物質は、極限的に 0.6 nm 程度の膜厚で機能する材料群であり、半導体性質を有するそれらは電界効果トランジスタ (FET) のチャネル材料として注目を集めている。現状ではまだ単体素子の実証に留まっているが、既存技術 (歪 Si、Ge、化合物半導体、ナノワイヤ構造など) と比較して極めて薄いチャネルにより、FET の低消費電力かつ高出力化や三次元集積の高い実現性が予測されている。そのため二次元物質は、ポスト Si エレクトロニクス材料として次々世代における超大規模集積回路 (VLSI) の実現に向けて極めて魅力的である¹⁾。二次元物質に関する研究開発において、FET を志向した検討例の多い材料群は遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDCs, MX_2 : $\text{M} = \text{Mo}, \text{W}$, $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) である。基本的にこれらの電気的特性は、結晶中の第 16 族元素の空格子欠陥の自己補償が不純物添加効果を生じさせてドナーとして振る舞うため、電子が電気伝導を担う n 型半導体である。MoS₂や WS₂などの TMDCs は二次元物質における

n 型の最有力の候補材料であるため、同材料群による p 型化の実現は生産性の観点から有利である。ただし、p 型化への導電性制御に関する汎用的な手法が確立できていないことが障壁となり、二次元チャネル FET はその潜在性を期待した議論までに終始した状況にある。これを打開してその研究開発を再加速させるためには、結晶成長技術の深化や新たな p 型半導体の創成など、従来技術からの大きな飛躍が必要である²⁾。

p 型を志向した二次元物質の比較を表 1 に示している。TMDCs の Mo や W サイトへのアクセプタ原子 (Nb) を導入することにより、それらの p 型化が見込める。しかし 0.6 nm まで単層化した薄膜は、バンドギャップエネルギーの変化によるイオン化エネルギーの増加により導電性は n 型に遷移してしまう³⁾。また両極性伝導を示す WSe₂に対する電極金属の選択と界面制御による正孔輸送技術では、単純な電極構造だと接触界面における Fermi レベルピンニングにより理想の Ohm 性界面が実現しにくい⁴⁾。これらの知見から、筆者は純粋な p 型材料を利用すべきという主張を支持している。p 型の二次元物質として、黒リンや硫化マンガン (MnS) が先に発見されている⁵⁾。しかし大気安定

表 1. 二次元物質における p 型材料の候補

材料	E_g (eV)	正孔移動度 (cm^2/Vs)@RT	特徴
IV-V族化合物	2.2 ~ 2.6	~ 100 (GeAs)	面内異方性あり。 純粋な p 型。
TMDCs (Nb 添加 MoS ₂)	1.8	~ 10	薄膜にすると p 型から n 型に戻る。
TMDCs (WS ₂ , WSe ₂)	1.8 ~ 2.0	~ 120 (WSe ₂)	正孔輸送のための界面 制御が複雑 (電極構造)
黒リン	1.8	~ 1000	酸化しやすい。 純粋な p 型。
α -MnS	2.7	~ 0.1	熱的に安定相。 純粋な p 型。

性や低い正孔移動度など、それぞれの性質に課題が散見され、それらは p 型の二次元物質としての存在を確固としたものにできていない。

第 14 族元素 (Si, Ge) と第 15 族元素 (P, As) の構成比が 1:1 である層状 IV-V 族化合物 (SiP, SiAs, GeP, GeAs) は、半導体特性を有する安定な層状物質である。これらは前述の TMDCs とは対照的に、結晶中における第 14 族元素の空格子欠陥の自己補償が不純物添加効果を発生させアクセプタとして振る舞うため、正孔が電気伝導を担う純粋な p 型半導体である。そのため、IV-V 族化合物の電気的特性は、TMDCs のそれとは相補的な関係にある。IV-V 族化合物により二次元チャネル FET を実現することができれば、相補型集積回路 (CMOS FET) の実現とその展開に本質的な突破口を見出すことに繋がる。また層状 IV-V 族化合物の構成元素は III-V 族化合物半導体や添加不純物のそれらと同じであるため、薄膜の大面积化や量産化に従来の 300 mm Si ウエハ対応結晶成長装置をそのまま利用でき、普及に対する障壁も極めて低くできる。しかし層状 IV-V 族化合物を FET の二次元チャネル材料として扱い利用するための克明な取り組みはまだまだなく、その潜在性を十分に解明するに至っていない。本稿では、層状 IV-V 族化合物の GeAs に着目し、素子応用の観点から半導体材料としての検討例を紹介する。

三次元接触を有する二次元チャネル FET 構造

層状物質からなる二次元物質は薄膜化すると電極金属との接触が悪化し、接触抵抗の増加により電流が減少してしまうことが共通の課題であり、GeAs にもそれが見られている⁶⁾。さらに GeAs の場合、検討例の多い MoS₂ や WSe₂ と比較してその傾向が強く見られているようにも考察される。電極金属と GeAs の接触抵抗を改善する手法の 1 つとして、電極部のみを厚膜化し表面と端からの電荷輸送を実現する特殊な形状を有する薄膜の実現が有効である。工程数を極力減少させ素子の歩留まりを向上させるために、薄膜の加工を素子作製に組み込むことを考えた。GeAs は過酸化水素水 (H₂O₂) により酸化しその酸化物が水 (H₂O) により除去できることが明らかにできたため、その工程により、電極との厚い接触部と薄いチャネル部を実現した。Au による GeAs の二端子素子を作製後、濃度 1 %、温度 60 °C の H₂O₂ 水溶液にそれを浸した。Au で覆われた GeAs 表面は酸化反応が進行しないことを事前に確認している。その後、脱イオン水にそれを浸すこと

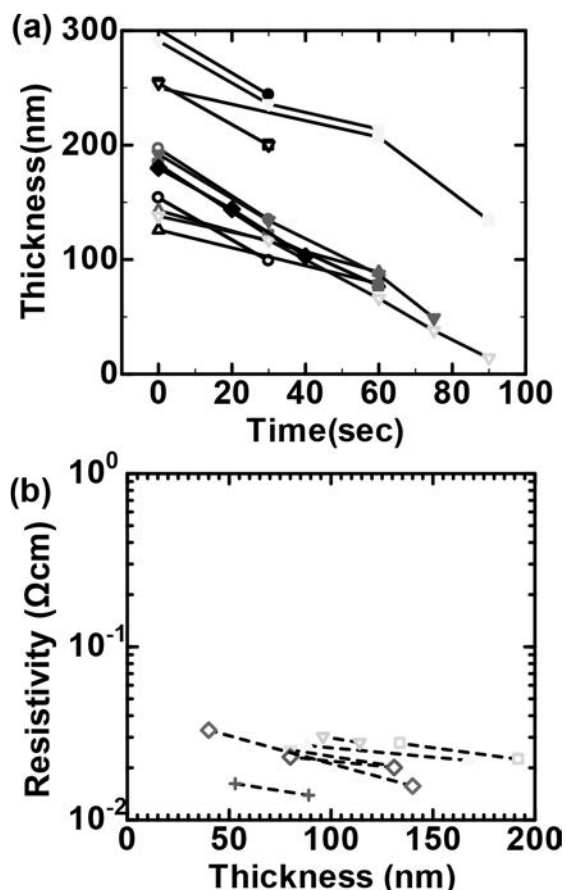


図 1 (a) H₂O₂水溶液による GeAs の酸化時間と酸化物の除去後における膜厚の変化。(b) H₂O₂水溶液を用いた酸化によりチャネル部のみを薄膜化した二端子素子の膜厚に対する抵抗率の変化。

で酸化物を除去し、二端子素子のチャネル部を薄膜化した。図 1 (a) に H₂O₂水溶液による酸化時間と GeAs の膜厚の変化を示す。実施した実験条件では、2 nm/sec での膜厚の減少に成功した。ここで、酸化後における H₂O により酸化物を除去しない場合、膜厚の変化は確認されていないことを確認している。図 1 (b) に、チャネル部のみを薄膜化した GeAs 二端子素子の抵抗率を示す。H₂O₂水溶液による酸化前における素子の抵抗率は大きくないものを選定しており、チャネル部の膜厚減少後に抵抗率の極端な増加は見られなかった。層状物質やそれを薄膜化した二次元物質の電極金属との接触は、表面と端の三次元的な接触が有効であることを示すことができた。しかし、40-50 nm 以下の膜厚への薄膜化の再現性が得られなかった。H₂O₂水溶液のこれ以上の濃度減少により酸化速度の低下を試みたが、制御性は向上しなかった。また酸化時間の増加では膜厚は減少したが、チャネルの面内方向の酸化・エッチングも進行し、二端子素子が破壊してしまうこともあった。以上から、H₂O₂水溶液によるチャネル

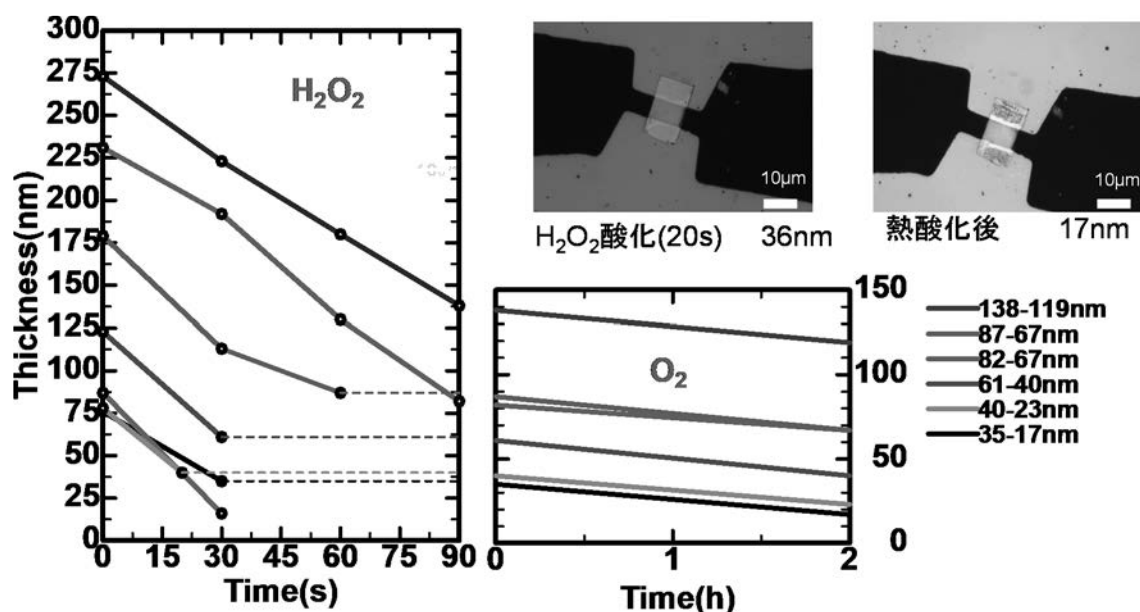


図2 酸素雰囲気下にて酸化した GeAs の膜厚の変化および酸化前後の光学顕微鏡像。

部の薄膜化のみでは、二次元チャネルを実現することは困難であることが明らかになった。そのため、その後さらに低速の酸化を実現する手法を検討し、2段階での酸化過程により GeAs 素子のチャネル部の薄膜化を検討した。

GeAs は他の層状物質と比較して Ge を含んでいることから大気安定性が低く表面から酸化しやすいことを利用し、Si 集積回路の作製工程でも採用されている酸素雰囲気下での熱処理による酸化を検討した。ただしそれにおいてよく利用されている水蒸気雰囲気下ではなく、酸素 (O_2) ガスの導入による雰囲気制御を実施している。電気炉内に H_2O_2 水溶液と H_2O により膜厚を減少した GeAs 二端子電極を配置し、 O_2 雰囲気下にて $350^\circ C$ で2時間加熱した。その後、 H_2O により表面の酸化物を除去した。図2に示すように、 H_2O_2 水溶液による酸化物の形成とその除去工程と比較して O_2 ガス雰囲気下での熱酸化によるそれは 10 nm/h ($2 \times 10^{-3}\text{ nm/sec}$) 程度と極めて遅い酸化速度であり、 50 nm 以下の膜厚への制御も可能であることが実証できた。熱酸化前後での表面形態も光学顕微鏡による観察では、大きな変化は見られなかった。図1(b)と同様に、 H_2O_2 水溶液による酸化後に酸素ガス雰囲気下で酸化して膜厚を減少させた GeAs 二端子素子の抵抗率は大きな変化が見られなかった。やはり電極と GeAs の接触は、面のみではなく端も含めた三次元的なそれを実現することで電荷輸送が効率よく起こすことができ、接触抵抗を低減することが可能であることが裏付けられた。以上から、酸化物の意図的な形成とそ

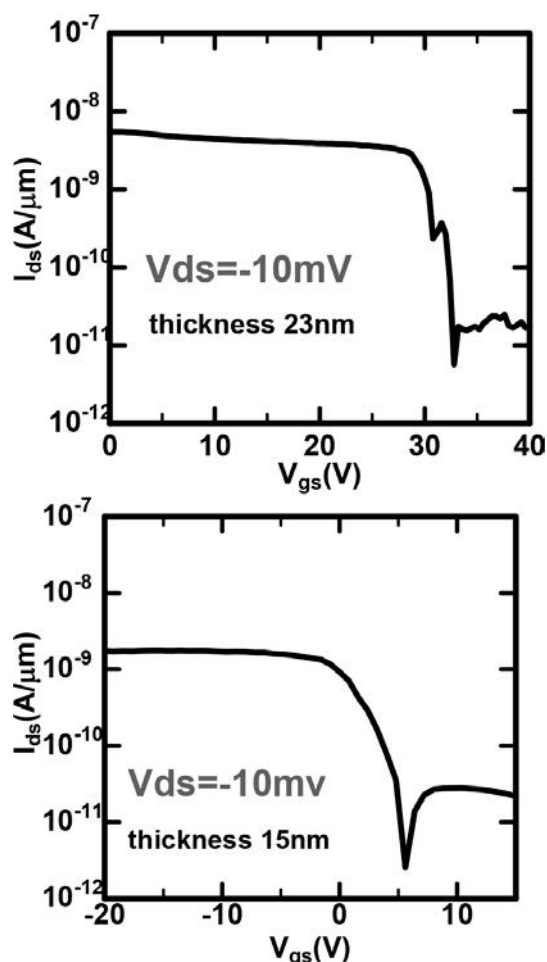


図3 膜厚 23 および 15 nm の GeAs MIS FET の伝達特性。

の除去による本手法は、GeAs の精密な膜厚減少に有効な手法であることが明らかになった。

二次元チャネルとして利用可能な GeAs の接触抵

抗の低減が二端子素子の作製工程に組み込むことが可能になったため、続けてゲート絶縁体の作製工程を実施し金属-絶縁体-半導体 (MIS) 構造による FET 素子を作製した。ここでゲート絶縁膜は原子層堆積 (ALD) 法を用いた酸化ハフニウム (HfO_2) を採用し、二次元チャネル GeAs MIS FET の動作も同時に実証することを考えた。二端子素子の作製後に膜厚を減少させた GeAs チャネル上に HfO_2 を 40 nm 程度堆積し、ゲート電極を形成した。図 3 に膜厚が 23 および 15 nm の 2 素子の伝達特性を示す。両素子ともに、ゲート電圧を負の方向に変化させたときに電流が増加し、膜厚が減少すると閾値電圧が負のゲート電圧に変化する p 型伝導の様相を示した。特筆すべき事項としてドレイン電圧 V_{ds} が -10 mV と二次元チャネル FET において極めて小さくても On/Off の動作を示している点であり、GeAs の低い抵抗率と HfO_2 の高い比誘電率の組み合わせにより実現できた高い動作性能であると考えられる。接触抵抗を FET の伝達特性から見積もったところ、6670–12000 $\text{k}\Omega \cdot \mu\text{m}$ となり、p 型の二次元チャネルとして利用される WSe_2 の先端技術により作製したものと同程度であった⁷⁾。以上から、接触抵抗の改善により、GeAs は p 型二次元チャネルとして有望であることを示すことができた。

おわりに

厚膜で二端子素子の作製後にチャネル部のみを酸化により薄膜化する三次元接触を有する二次元チャネル素子の作製工程を検討した。 H_2O_2 水溶液と O_2 雰囲気下における熱酸化による 2 段階工程により、接触抵抗が極めて小さい FET 素子の作製に成功した。今後は、先端素子構造の適用と本手法を FET の作製工程に組み込むことを検討し、高性能な二次元チャネル FET の実現を目指す。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人信州大学工学部若里会の令和 6 年度研究助成を受けて実施したものであり、多大なる支援に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) G. Yang, J. Niu, C. Lu, R. Cao, J. Wang, Y. Zhao, X. Chuai, M. Li, D. Geng, N. Lu, Q. Liu, L. Li, M. Liu, presented at 2020 Int. Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, December 2020. DOI : 10.1109/IEDM13553.2020.9372092
- 2) 長汐晃輔, 応用物理 第 89 巻, 3 号, 139 (2020).
- 3) N. Fang, S. Toyoda, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Adv. Funct. Mater. 29, 1904465 (2019).
- 4) C. Kim, I. Moon, D. Lee, M. S. Choi, F. Ahmed, S. Nam, Y. Cho, H.-J. Shin, S. Park, W. J. Yoo, ACS Nano 11, 1588 (2017).
- 5) Q. He, Y. Liu, C. Tan, W. Zhai, G.-h. Nam, H. Zhang, ACS Nano 13, 12294 (2019).
- 6) S. Kagami, N. Urakami, Y. Suzuki, Y. Hashimoto, CrystEngComm 24, 4085 (2022).
- 7) H.Y. Lan, R. Tripathi, X. Liu, J. Appenzeller, Z. Chen, presented at 2023 Int. Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, December 2023. DOI : 10.1109/IEDM45741.2023.10413736

研究室紹介

信大クリスタル®が拓く未来社会 —フラックス法を核としたエネルギー・ 環境材料科学の挑戦— (手嶋・萩尾・林・山田研究室)



物質化学科 教授 手嶋 勝弥 教授 萩尾 健史 准教授 林 文隆 准教授 山田 哲也

1. はじめに

当研究室は、これまで無機結晶材料の創製と応用に関する研究に邁進してまいりました。その歩みの中で、多くの企業や公的機関、そして学生・スタッフに支えられ、現在では教員陣（教授5名、准教授3名、助教3名）、博士研究員、研究員、事務員、そして40名以上（博士5名、修士22名、学部15名）の学生たちが集う、総勢約70名の大規模な研究拠点へと成長しました（図1）。

我々の研究の根幹には、高品質な単結晶を育成する「フラックス法」という技術があります。この技術で生み出される多種多様な機能性結晶材料を、我々は「信大クリスタル®」としてブランド化し、社会課題の解決に取り組んでいます。本稿では、基礎的な結晶研究から「信大クリスタル®」としての応用、そしてAIとロボットが織りなす未来の材料開発へと飛躍的に進化を続ける、我々の最新の挑戦をご紹介します。

2. コア技術「フラックス法」と「信大クリスタル®」の多彩な展開

「フラックス法」とは、高温で溶かした塩（フラックス）を溶媒として、そこに原料を溶かし、ゆっくりと冷やすことで高品質な結晶を育成する、シンプルかつ奥深い技術です。この手法の最大の魅力は、ルビーのような美しい宝石から、リチウムイオン電池の性能を左右する電極材料、太陽光で水素を生み出す光触媒まで、目的や用途に応じて結晶のサイズや形を精密にデザインできる点にあります。我々は、このフラックス法を駆使して、社会のニーズに応える様々な「信大クリスタル®」を創出してきました（図2）。

3. 研究を加速する新拠点「アクア・リジェネレーション機構」

我々の挑戦をさらに加速させるため、2024年に学内に「アクア・リジェネレーション機構（ARG機構）」が発足し、2025年7月にはその中核施設として「ARG共創研究センター」が松本キャンパスに開



手嶋・萩尾・林・山田研究室の皆さん

図1. 研究室メンバー集合写真（2024年度）

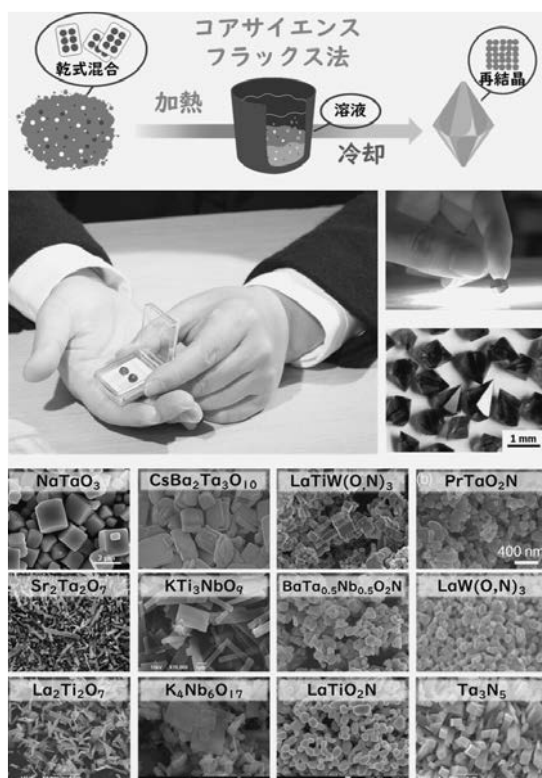


図2. フラックス法のプロセスと、本手法で育成した多様な信大クリスタル®

所しました。このセンターは、多数の企業との共同研究を推進するオープンイノベーションの拠点であると同時に、次節で述べる我々の未来の研究開発を象徴する場所でもあります。

4. 未来の材料開発へAIとロボットが拓く自律実験ラボ

材料開発の世界は、AIとロボティクスの導入により、今まさに革命の時を迎えようとしています。この潮流を牽引すべく、ARG 共創研究センター内に設置された「ロボラボ」には、60台以上のロボットが立ち並びます。ここでは、これまで研究者の経験と勘に頼ってきた試料の秤量・混合から、加熱、分析、後処理までの一連のプロセスを完全自動化します(図3上図)。これにより、実験速度は人手と比べて100倍以上に向上する見込みです。

この物理的なロボットシステムを頭脳として制御するのが、我々が独自に開発を進めているAIシステム(パッケージアプリ)です(図3下図)。このアプリは、「実験データ管理」「結晶材料探索」「結晶制御予測」をはじめとした10個の個別アプリケーションから構成されています。AIが1兆通りレベルにも及ぶ超巨大な探索空間の中から最適な材料や合成条件を予測・提案することで、結晶材料開発を



図3. ARG 共創研究センターで稼働する自律実験ロボットシステムと、実験を支援する独自開発アプリ

強力にアシストします。我々は、これら両システムが連携する統合システムによって新しい結晶成長の時代を拓くことを目指し、今も鋭意開発を続けています。

5. おわりに

当研究室の研究は、「機能性結晶の探求」という基礎科学から始まり、「信大クリスタル®」という社会実装を見据えたブランドへと発展し、そして今、「AIとロボットによる自律的な材料開発」という新たなステージへと飛躍しようとしています。アクア・リジェネレーション機構という新たな推進力を得て、我々はこれからも学術的探求と社会貢献の両輪を力強く回し続けてまいります。

同窓会の皆様におかれましても、我々の進化し続ける活動にぜひご注目いただき、ご支援、ご協力賜れますと幸いです。未来の材料科学を共に切り拓きたいという熱意ある学生の皆さん、そして新たな価値創造に挑戦したい企業の皆様からのご連絡を、心よりお待ちしております。

新たな表面・界面物理の発見で、 見たことのない電子デバイスを (大原研究室)



電子情報システム工学科 助教 大原 正裕

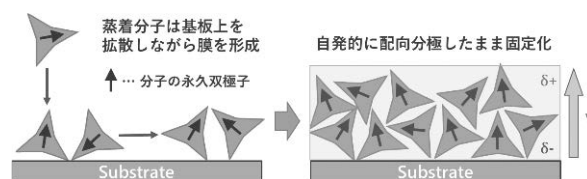
はじめに

大原研究室は 2025 年春に始まった新設の研究室です。助教の私（大原正裕）と学部 4 年生 4 人の未だ小さな研究室ですが、私自身、学生と年齢が近いこともあり「先生」というよりはチームのリーダーとして上手く組織を運営していけたらと考えています。研究室全体としてはエレクトロニクスに用いられる有機半導体材料の界面電子構造に関する研究を行っております。本稿では研究の内容の一部と、我々の目指す研究のスタイルについてご紹介したいと思います。

研究①：有機分子の自発配向現象の原理解明と制御法の開発

我々が普段扱う様々なデバイスの中で、有機分子を材料に作られているものの代表として有機 EL ディスプレイが挙げられます。今や iPhone に搭載されているディスプレイはすべて有機 EL に切り替わり、50 インチを超えるような大型の有機 EL テレビも年々価格が下がってきています。

そのような有機半導体デバイス作製で第一に重要なのは、有機薄膜の成膜方法と言えます。高品質な有機薄膜を製膜する際に、真空中に有機分子を昇華



自発配向現象の概略図

させることで基板に分子膜を生成する“真空蒸着法”という方法があります。通常真空蒸着法で薄膜を作製すると、分子はランダムに配置され非晶質（アモルファス）という状態になるのですが、近年、実は完全にランダムではなく、僅かながら分子が向く方向が揃っており（配向性がある）、有機 EL デバイス性能に大きく関与していることがわかってきました。

しかし、このような配向現象に関しては、未だその原理が完全に理解されているとは言い難く、制御法を確立してデバイス性能を向上させることが求められています。

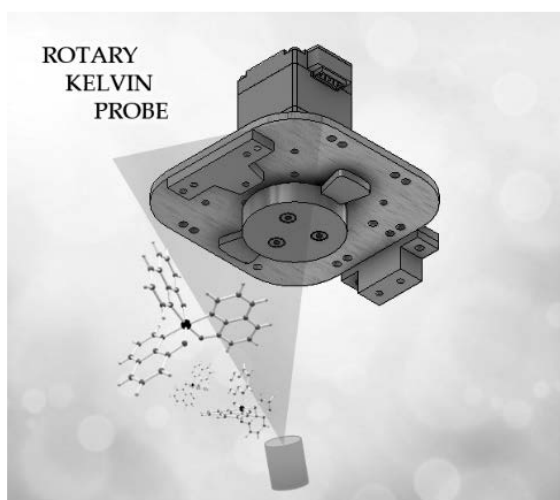
そこで当研究室では、分子の配向を発生させる鍵となっていると思われる、「成膜プロセス中の分子の挙動」に焦点を当てています。気体となって真空中に飛び出し基板に着弾した分子は、すぐに固定化されるのではなく、エネルギー的に安定な配置を探すように基板上を彷徨います。真空蒸着を連続的に行うのではなく、間に休憩を入れて分子が彷徨う時間を調整することで、分子の配向性をダイナミックに制御することが可能であることを発見しました。今後はこのようにして配向を制御した薄膜が、実際のデバイスにおいてどの程度性能を左右するかについて、検証していく予定です。

研究②：表面電位のリアルタイム測定を可能にする 回転型 Kelvin probe 装置の開発

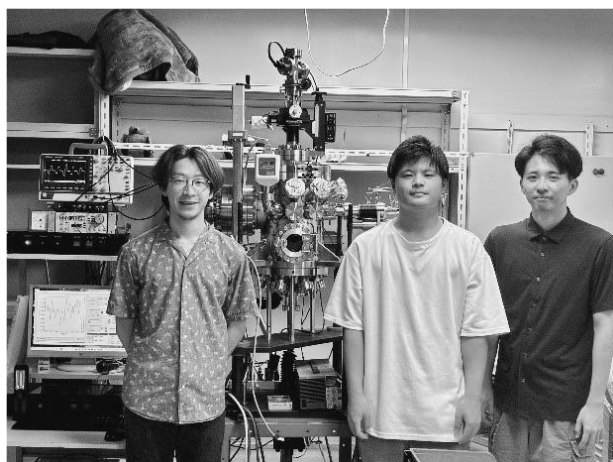
研究①における実験では、蒸着が継続している状態から停止した状態への遷移前後の表面電位（配向



研究室発足時の写真



回転型 Kelvin probe 装置の概略図



装置が初めて動いた時の記念写真

分極によって生じる膜表面の電位)を連続的に測定する必要があったため、典型的な表面電位測定装置である“振動型 Kelvin probe 装置”では不十分であり、表面電位の膜厚依存性の測定に特化した“回転型 Kelvin probe 装置”を開発しています。

この装置は、私の前所属で開発を続けてきたもので、国内の装置メーカーに技術を提供することで去年の夏に製品化されました。もちろん信州大学でも同じ装置を導入して研究を始めており、その際に数々の改良点を設計しなおすことでさらに高精度な測定が可能なものになりました。このあたりの改良や、部品の製作など一部分を学生と協力して行うことができたのがよかったと思います。装置の稼働までに四苦八苦しましたが、複雑な回路や真空装置が実際に思い通りに動いた瞬間は、私にとっては安堵、学生にとっては歓喜、という感じだったと思います。

私が育ってきた実験系の材料科学の世界では、

「無い装置は自分で作る」が合言葉でした。ぜひ学生の皆さんにも、そんなマインドを持ってもらって、オリジナルな装置でオリジナルな発見ができれば研究の醍醐味を感じられるのではないかと思います。

おわりに

研究活動を通じて学生の方にぜひ分かってほしいことがあります。研究にはもちろん新たな発見や発明に対する悦楽がありますが、研究を通じた人との出会いや、それによる自身の成長に、研究そのものと同等以上の価値があるということです。尊敬できる人（先生、先輩後輩問わず）が見ている世界を追体験することで、学問を超えて人生全体に通用する哲学や、精神的な豊かさを得ることができるのだと思います。

私自身も、これからもオリジナルな装置を用いて未知の物理現象を発見・解明し、世界に通用する研究を行うことを目指していきたいと思っています。

「水の動き」から水環境・水防災を考える (豊田研究室) の紹介



水環境・土木工学科 准教授 豊田 政史

1. はじめに

豊田研究室は 2008 年度に発足し、今年度で 18 年目を迎えます。研究内容に関しては、2008 年 3 月に退職された富所名誉教授から引き継いだ形をとっています。現在は、修士 2 年が 1 名、修士 1 年が 5 名、学部 4 年が 6 名の総勢 12 名で構成されています。

2. 研究内容の紹介

本研究室では、現地観測と数値解析を用いて、湖

を中心に河川・海洋といった水域の「水の動き」を研究しています。研究室発足以来、中心として研究してきた対象は諏訪湖です。本稿では、その一例を示します。

諏訪湖上に図 1 に示すように 26 点の観測点を設け、各点で 2 分間以上船を停止させて、風向・風速(写真 1 参照)、流向・流速(写真 2 参照)を観測しました。このとき、諏訪地方では西北西の強風が連続的に吹いていました。湖の上を吹く風(湖上風)

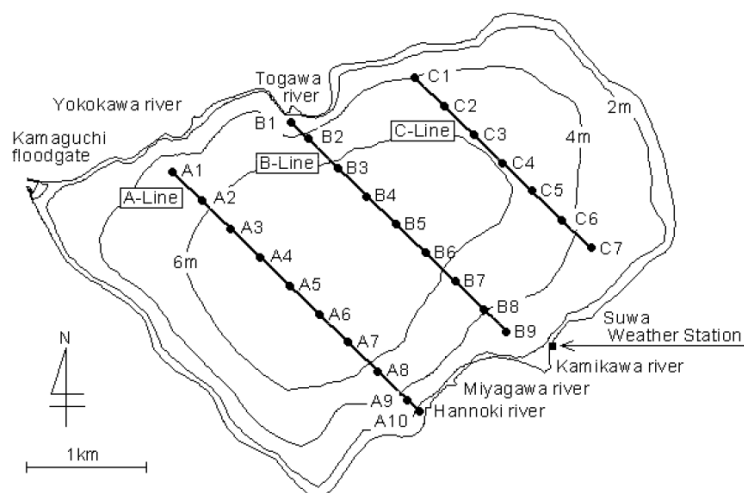


図 1 諏訪湖上の風および湖流の観測点



写真 1 風向風速計



写真 2 超音波ドップラー流向流速計

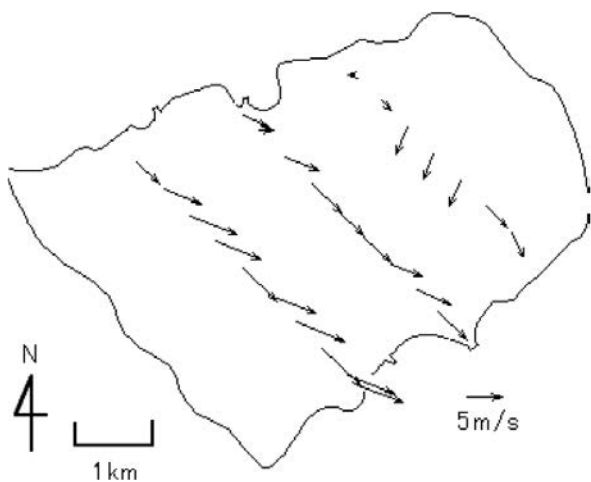


図2 西北西からの強風作用時の湖上風分布

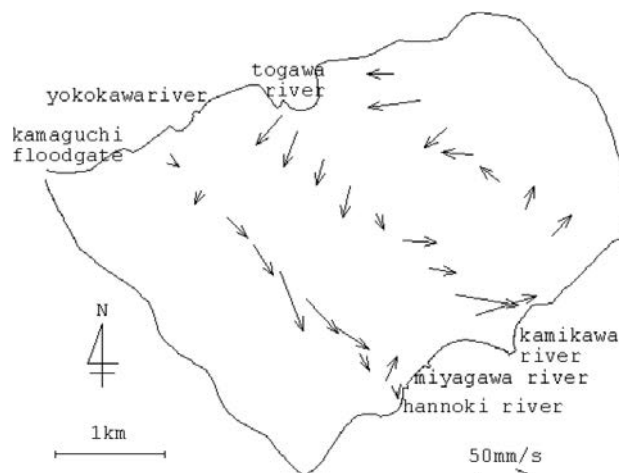


図3 西北西からの強風作用時の湖流分布

は一般的に周辺地形の影響を受けます。図2は、湖上風（湖面から約2m）の観測結果です。諏訪湖は周りを多くの山々で囲まれていますので、その影響を受けて湖上風はこの図に示すように、空間的に非一様（湖の北西部で風が弱く、湖の東部で風向が異なっている）になっていることがわかりました。図3は湖流（表層、水面から0.55m）の観測結果です。図2の湖上風の影響を受けて、湖の水は反時計回りに循環していることがみてとれます。このように湖流の特性がわかると、河川から湖へ流入した窒素やリンなどの栄養塩類や最近問題が顕在化してきているマイクロプラスチックなどが湖内をどのように動き、どのあたりにたまりやすいかを明らかにすることができます。また、われわれの研究結果を生物・化学的な観点をもつ方々（主に信州大学理学部）の研究結果とあわせることで、湖で生じているさまざまな現象解明に取り組んでいます。

現在、本研究室で取り組んでいる諏訪湖以外の研究対象水域は以下の通りです。

- ・野尻湖（水環境・土木工学科小松研究室との共同研究）
- ・与論島（総合地球環境学研究所の研究プロジェクト）
- ・千曲川、信濃川（長野大学、長野県水産試験場、長野高専などとの共同研究）

上記に加えて、昨年設立された流域治水研究センターの研究も、工学部内に設置されている小型気象レーダーの研究（日本無線との共同研究）を中心に、学内外の方々の指導を受けながら、少しずつ始めています。

3. おわりに

自然界の現象はきわめて複雑ですが、今後も学生たちと一緒に、自然界の偉大さを感じつつ、楽しみながら少しずつ解明していき、世の中が少しでもよくなることにつながるような研究をしていければと思っています。



写真3 現地観測風景（諏訪湖）



写真4 現地観測後の集合写真（与論島）

制御工学研究室（種村研究室）の紹介



機械システム工学科 准教授 種村 昌也

1. はじめに

当研究室は、千田教授と私の共同体制で千田種村研究室としての合同研究室になります。私は学生の時に信州大学工学部に入学し、修士課程および博士課程まで信州大学に在籍していました。実は大学の研究室の指導教員は千田教授であり、千田教授には学生の頃から現在まで長い間お世話になっております。現在、研究室の学生は博士課程2名、修士課程2年生が7名、1年生が9名、学部4年生が7名という構成になります。特に私が主担当の学生は修士課程2年生が2名、1年生が5名、学部4年生が4名となります。研究室では研究活動や学会参加はもちろんのこと、研究室内での交流も行っています。図1は5月にマレーシアから来た留学生と交流のために実施したサッカーのときの集合写真です。また、図2は7月に学生が企画してくれ研究室で地域のハーフマラソンに出場したときのものです。研究室の学生はしっかりしたコスプレをして出場していました。写真には私は映っていませんが、コスプレに渋っていた私に配慮してもらい、ちょっとしたコスプレを学生が用意してくれました。このように普段から運動などでリフレッシュしながら日々の活動に取り組んでいます。

上記のような体制ですが、本稿では、私（種村）の研究室に焦点を当てて紹介したいと思います。研究室の名前にもありますように当研究室では「制御工学」に関する研究をしています。

2. 制御工学

制御工学とは、制御したい対象を設計者が思いのままに動かす（制御する）方法を探求する学問になります。制御工学で扱う制御対象は多岐にわたりますが、自動車、ロボット、航空機などがイメージしやすいかもしれません。また、身近なものでいうとエアコンも制御されることにより部屋の温度を一定に保つことができます。制御工学では制御対象を適切に動かす方法を構築する学問ですので、制御対象



図1 サッカーの集合写真



図2 ハーフマラソンの写真

のことをよく理解する必要があります。そのために、制御工学では制御対象を数式モデルで表し、その数式モデルをもとに制御則を構築します。この数式モデルが現実の制御対象を良く表現できていれば、構築した制御則も実環境でうまく機能します。ただし、この制御対象を数式モデルで表すというプロセスは、手間がかかったり専門知識を必要としたりします。

当研究室ではこの制御対象を数式モデルで表すと

いうプロセスをスキップし、制御対象の実データから直接制御則を構築する方法を研究しています。このように、制御対象を未知の対象のまま扱い、実データから直接制御則を構築する方法をデータ駆動型制御といいます。

3. 研究紹介

私の研究対象の一つに Human-in-the-loop system というものがあります。これは人間が制御ループの中に組み込まれており、人間はある目的をもって制御対象を操作しているシステムのことを意味します。例えば、自動車を制御対象として、自動車を人間が運転している状況も Human-in-the-loop system とみなすこともできます。また、図3は私の研究室で対象としているシステムで、人間が遠隔で複数のロボットを操作し、人間が立ち入ることが難しい環境（例えば被災地など）に人間の代わりにロボットを向かわせる状況を想定しています。現在は、図4のように実験室レベルの実験環境を構築中です。

機械が発明される前は全ての作業は人間や家畜によって行われていたと思います。その後、産業革命により自動制御が発明されて、機械を電子制御する方法が発達してきました。機械を電子制御することで人間だけでは困難であった作業を実現できるようになりました。一方で、より複雑な作業は機械のみ

で実現するのが困難な場合が多くあります。例えば、自動車の運転がそのよい例です。こういった場合に、人間が制御ループの中に組み込まれ、人間は機械を操作する制御器として機能します。

我々はこの Human-in-the-loop system を対象として、人間にとって操作しやすい機械システムの設計を目指しています。人間にとって操作しやすい機械システムを設計するためには、人間のモデル化が必要になりますが、人間を数式モデルで正確に表すことは簡単ではありません。そこで、人間を未知の対象として扱い、データ駆動型制御手法を用いて人間が実際に機械を操作した時系列データからその人間にとって操作しやすい機械の設計方法の構築を行っています。

4. おわりに

制御理論の発展や制御装置技術の向上に伴い、制御工学で実現できることが急激に増えていると思われます。それに伴い制御する対象の規模が大きくなり対象の複雑化が進んでいます。そういった状況に対して近年では大量のデータに基づいて制御則を構築する機械学習も注目を集めています。本研究室でもこういった現実の状況に対して、有用な制御方法を構築することを目指して、日々取り組んでいます。

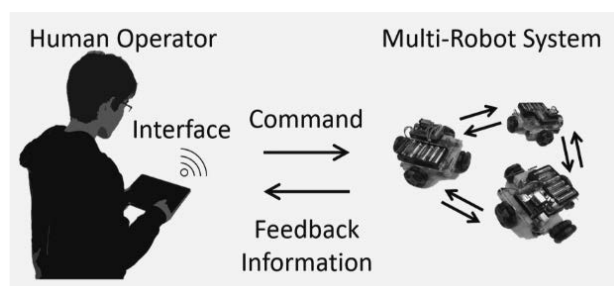


図3 人間が遠隔でロボット群を操作する
Human-in-the-loop system



図4 構築中の実験環境

建築分野の気候変動対策研究



建築学科 助教 中谷 岳史

本研究室では、気候変動に伴う建築分野の課題に対して、主に「高温化」と「水害対応」を二大テーマとして研究を進めています。

まず、高温化についてです。現在重点を置いているのは公共建築、特に学校建築における対策です。近年の夏季の暑さは学習環境や健康に深刻な影響を与えており、科学的根拠に基づいた対策立案が急務となっています。研究の進め方は大きく三段階に分かれます。まず将来の気候予測に基づいた建物熱解析を行い、その結果を用いて対策の方向性を明らかにします。次に、現場での検証や行政・利用者との環境コミュニケーションを通じて、解析結果を実際の運用に結び付けます。さらに、得られた知見をデータベース化し、大規模な条件を網羅したシミュレーションデータ（現在約 200 万条件）を活用しながら、より実践的な判断材料を提供します（図 1）。断熱改修に関しては、予算制約の中でどの部位を優先すべきか、また地域ごとに改修をどのようなペースで進めるのが最も効果的かといった複雑な意思決定が求められます。そこで機械学習や多目的最適化を導入し、シナリオの不確実性に対してもロバストな方策を検討しています。例えば、最悪の気候条件下でも最低限の性能を満たしつつ、環境性能と費用対効果を両立させる最適解を探索しています。また、ライフサイクルアセスメントやコスト分析を組み合わせて、日本の主要 8 地域での比較検討も進めています。現在は、東京都板橋区や京都府宇治市と連携し、行政支援研究を展開しています。板橋区では、防水工事の際に断熱を同時に行う方針が確定しており、約 70 校の小中高を対象に年間 3 棟のペースで改修が進められています。解析の結果、屋根の断熱改修が最優先であることが示され、実際の改修計画に反映されています。さらに板橋区では、解析に基づく実証研究も進行中です。機械学習の結果、校舎のエネルギー消費量を削減しつつ熱中症などの健康リスクを低減するには、屋根の断熱、次いで窓ガラスの日射遮蔽性能の向上が重要であることが明

らかになりました。これを受けて区内の中小学校では、屋根断熱工事や窓ガラスへの日射遮蔽コーティングを実施し、その効果を今年春から約 1 年間かけて検証しています。こうした解析結果、実証研究、そして行政との環境コミュニケーションを統合し、最終的には温暖地域の自治体が活用できる専門的レポートを作成します。エビデンスに基づく合理的な政策決定を可能にする取り組みであり、同様の課題を抱える全国の自治体にも波及効果が期待されます。

次に、水害対応についてです。本研究室のもう一つの柱は、水害後の建物の合理的な復旧に関する研究です。私は 2019 年の東日本台風で自宅が床上浸水し、荷物搬出、室内清掃、乾燥、壁の解体や洗浄、設備機器の処分と更新、建築工事に至るまで、一連の工程を実際に経験しました。水害復旧は行政や支援団体、建築業者など多様な主体が関わる複雑なプロセスであり、短時間で建物が有機物に汚染され、生物被害や構造体の長期的劣化を招くため、迅速かつ合理的な対応が不可欠です。これまで大規模災害の際には建築会社や団体から依頼を受け、技術支援や指導を行ってきました。近年は知見を体系化し、情報発信にも力を入れています。共同研究先の江原製作所とともに 2024 年には「水害復旧マニュアル（概要版）」を公開し、被災地で 2000 部以上が配布されました（図 2）。さらに、より具体的な行動手順を示す詳細版を 2025 年末までに刊行予定です。また現在は浜松市や磐田市など静岡県西部の行政や社会福祉協議会、地元 NPO、30 社の建築会社連合、ボランティア団体と連携し、技術指導や教育・講習を通じて水害対応の迅速化を進めています。加えて、2025 年 8 月の九州豪雨では、鹿児島県霧島市の行政支援を実施しております。災害直後から数週間後までに生じる多様な課題に対応するため、行政や議員を介して住民への情報提供、資機材の貸出、建築会社への応急処置支援を継続しています。エビデンスに基づいた水害復旧技術を確立する為、国内外の文

献調査を行い、私の専門である建築環境工学の視点からは床下の迅速乾燥手法、熱流体解析による乾燥過程のモデル化、カビ発生予測などのレジリエンスに資する研究に取り組んでいます。

このように、高温化と水害復旧という気候変動影響に対し、解析と実証、行政支援を一体的に展開し、気候変動対策に資する研究活動を推進しています。

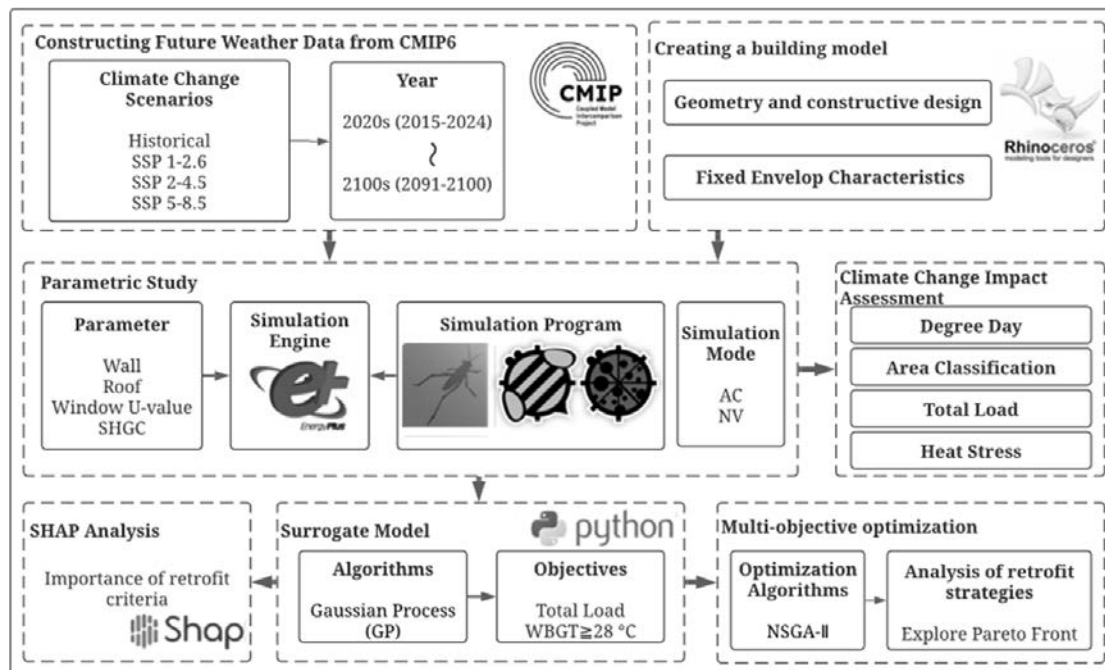


図1 気候変動に対応した建物改修戦略の探索 -建物熱解析とAIを用いたアプローチ

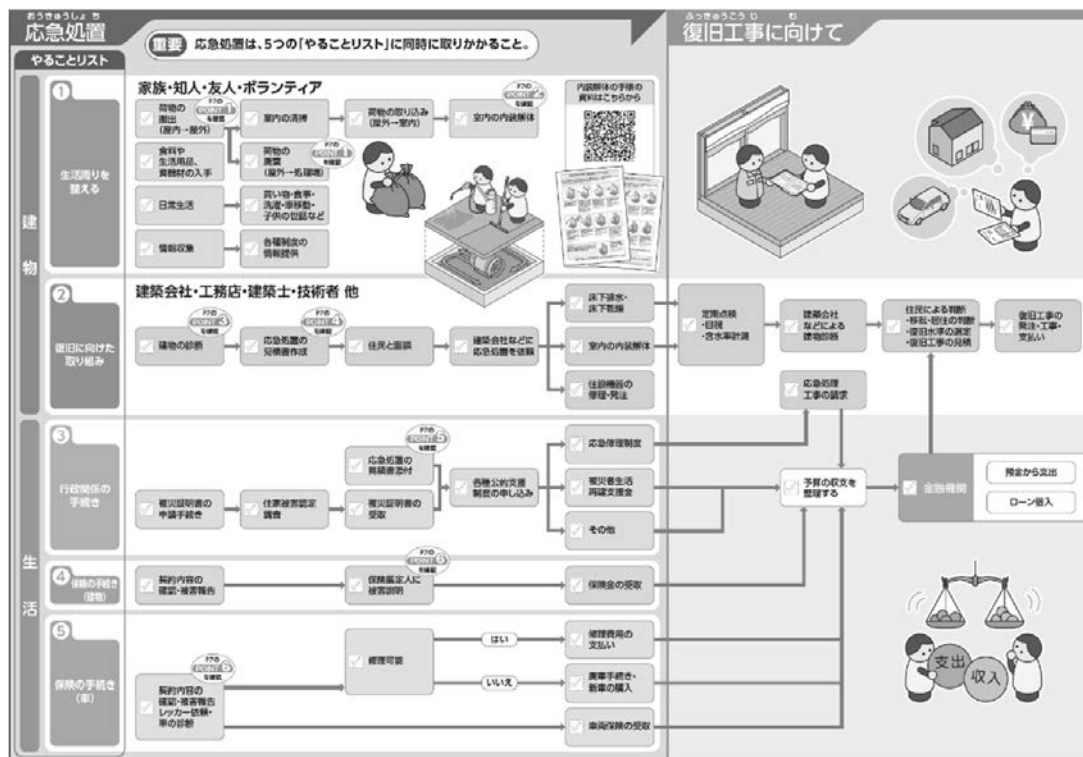


図2 レジリエンスの視点でみる水害後の応急処置と復旧プロセス

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写（コピー）することは、法律で認められた場合を除き、著作者および本会の権利の侵害になります。
複写とそれ以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、（一財）信州大学工学部若里会へお問い合わせください。

「技報 こまくさ」 第 23 号 令和 7 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 : kdoso@wakasatokai.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 こまくさ

K O M A K U S A

一般財団法人 信州大学工学部 若里会

