

# 翠巒



第40号

2026年1月

## も く じ

### 〈巻頭言〉

伝えることの難しさ、あるいは「縁」を結ぶこと .....	東北大学大学院工学研究科長・工学部長 伊藤 彰 則	1
---------------------------------	---------------------------	---

### 〈令和7年度「青葉工学振興会賞」「青葉工学研究奨励賞」授賞報告〉 ..... 2

スピンを用いた新概念電子デバイスに関する研究 .....	東北大学電気通信研究所 准教授 金井 駿	3
広い温度範囲で動作する新しいTi-Al基形状記憶合金の開発 .....	東北大学学際科学フロンティア研究所 助教 許 勝	4
次世代共焦点プローブで切り拓く先駆的3次元形状計測システムの開発 .....	東北大学大学院工学研究科 助教 佐藤 遼	5
気候変動を踏まえた次世代の想定最大降雨推定手法の開発 .....	東北大学大学院工学研究科 助教 平賀 優介	6

### 〈研究プロフィール〉

計算科学と計測融合による次世代材料システムの機能・信頼性設計 .....	東北大学グリーンクロステック研究センター 教授 鈴木 研	7
現地調達機能美と推進工学への応用 .....	東北大学大学院工学研究科 准教授 高橋 聖幸	12
トンネル磁気抵抗センサと小型磁気共鳴画像装置「Spin-MRI」の開発 ～大阪・関西万博「エンタングル・モーメント展」に向けた挑戦～ .....	東北大学大学院工学研究科 教授 大兼 幹彦	17
植物に学ぶ持続可能なものづくり .....	東北大学大学院工学研究科 教授 高橋 征司	22
エネルギー・環境・医療を支える光技術 ～安全・安心な社会を照らす発光体の研究～ .....	東北大学大学院工学研究科 教授 徐 超男	27
東日本大震災からの復興に関する一連の都市研究 .....	東北大学災害科学国際研究所 教授 村尾 修	31
Intelligent Reflecting Surface (IRS)による高周波数帯無線通信の柔軟な利活用に向けて .....	東北大学大学院情報科学研究科 教授 川本 雄一	36
資源と二酸化炭素の循環をより効率的に。同時に環境浄化も .....	東北大学大学院環境科学研究科 教授 飯塚 淳	39
赤外光を用いたヘルスケアシステム開発 .....	東北大学大学院医工学研究科 教授 松浦 祐司	43
世界的なリン資源危機を打破するRinPhos法の開発 .....	東北大学未来科学技術共同研究センター 教授 長坂 徹也	47

### 〈令和6年度 一般財団法人青葉工学振興会 事業報告〉 ..... 51

### 〈編集後記〉

題字の翠巒（すいらん）とは「みどりの山」又は「みどりの連山」のことであるが、代わって青葉山の意に用いたものである。なお、揮毫は武山斌郎元青葉工学振興会理事長によります。



## 巻頭言

## 伝えることの難しさ、あるいは「縁」を結ぶこと

東北大学 大学院工学研究科長 工学部長 伊藤 彰 則

前回の「翠巒」39号の巻頭言では、翠巒1号を話題にしました。そこでは青葉工学振興会の存在意義と期待が綴られていて、主に東北大学と地元企業の間をつなぐことがその役割として期待されていました。翠巒は、大学と企業や自治体を結ぶメディアとして作られたのでした。翻って、現状の大学と企業、特に地元の企業との関係を見たとき、40年近く昔に先輩方が願っていたことがどれほど実現したのだろう、という思いがあります。

40年前といえば、もちろんインターネットはなく、東北大学では初めての学内LANであるTAINSができるかできないか、という時代です（できた当初は学外とは接続されていませんでした）。大型コンピュータが学内に数台、パソコンも研究室の学生でシェアして使っていました。テレビ・ラジオ・新聞で情報を自由に流せるはずもないので、多くの人に情報を届けるには、紙に印刷して配る以外の方法はありませんでした。一方現代では、インターネットがあり、電子メールがあり、Webがあり、SNSがあります。情報を「伝える」ことに関して、飛躍的に進歩したといってよいでしょう。伝えることができる情報の量は何千倍にもなったわけですが、それだけの情報を本当に伝えているのかと言われると、ちょっと口ごもってしまいます。

地元企業との連携では、企業側から「東北大学は敷居が高い」「中で何をしているのかわからない」といった声が聞かれるといいます。そのため、大学としては、研究者紹介やシーズ集を作って公開しています。翠巒にさまざまな研究紹介を載せて公開することも、それと同じ活動だと言ってよいでしょう。ですが、公開した情報がどれだけ企業の皆様に読まれているのでしょうか。それを思うとき、従来の情報公開活動に関して私は「そういうことじゃないのではないか」という思いを強くすることがあります。

膨大な情報が常時流れている現代では、私達はほとんどの情報を見ずにスルーしています。情報を受け取るためには、対象に対する特別な興味、あるいは「縁」が必要なのではないのでしょうか。

情報通信の理論では、通信を「送信者」「受信者」「通信路」の3つの要素に分けて考えます。大学の研究活動を広く企業や一般に伝える事を考えたとき、現代では「通信路」はすでに充実していて、受信者の目の前まで情報を伝えることは容易です。「送信者」は大学側であり、さまざまな努力によって研究紹介などのコンテンツは揃ってきています。一方、情報を受け取る「受信者」について、大学ではこれまであまり深く考えていなかったように思います。そして、情報がどれだけ伝達されたかは、これら3つの要素全てに影響を受けるのです。

情報は誰にでも開かれているようでいて、実際には「縁」がなければ届かないことが多々あります。たとえWeb上に研究成果を公開していても、それを見つけ、関心を持ち、行動に移すには、何らかの縁が必要です。自分と相手に縁が結ばれて初めて、相手が公開する情報が自分の中に入ってくるのだと思います。

縁は一朝一夕に結ばれるものではありません。何度か顔を合わせ、言葉を交わし、共通の関心を見つける中で、少しずつ育まれていくものです。こうした「縁結び活動」（普通の言い方で言えば「ネットワーキング」でしょうか）は効率がよくありませんし、目標や効果もわかりにくいものですが、今後さまざまな企業に東北大学と連携をしてもらうためには不可欠なものだと思います。青葉工学振興会が、良縁を結ぶための場になっていくためには、企業と大学と官公庁の人たちが実際に出会い、個人のレベルで知り合って語り合えるような場を作ることが必要なのではないかと感じています。

# 令和7年度 「青葉工学振興会賞」 「青葉工学研究奨励賞」 授賞報告

本財団では、『工学の振興に必要な研究教育助成を通じて、地域社会及び産業の向上発展に寄与する』という目的のため、宮城県内の工学系を有する大学等に所属する研究者等で、工学又は工業技術の分野において優れた業績をあげた者の顕彰を実施しています。

令和7年度は、宮城県内各大学等から「第19回青葉工学振興会賞」に13件、「第31回青葉工学研究奨励賞」には16件の応募があり、審査委員会による第1次及び第2次の書類・ヒアリングの慎重なる審査により、青葉工学振興会賞の受賞候補者1名、青葉工学研究奨励賞の受賞候補者3名を選出致しました。そして、11月18日(火)開催の本財団評議員会において、審査委員会の原案の通り受賞者を決定致しました。

授賞式は、令和7年12月12日(金)に、青葉山キャンパスの工学研究科大会議室において、受賞者のほか財団役員、審査委員、推薦教授の臨席のもとに執り行いました。

受賞者の研究業績は下に掲載しましたが、いずれも独創性・先駆性の高い優れた成果であります。そこで、世界的に発展・飛躍する受賞者の研究成果を工学研究科等の教員や学生の皆様に広く聴講して頂けるよう、両賞受賞記念講演会を工学研究科との共催で、授賞式終了後に同会場で実施致しました。



受賞講演会のスナップ

## 令和7年度「青葉工学振興会賞」等受賞者

### 第19回 青葉工学振興会賞 (応募件数：13件)

受賞者名	所 属	研究業績名
金井 駿	東北大学 電気通信研究所 計算システム基盤研究部門 准教授	スピンをを用いた新概念電子デバイスに関する研究

### 第31回 青葉工学研究奨励賞 (応募件数：16件)

受賞者名	所 属	研究業績名
許 勝	東北大学 学際科学フロンティア研究所 新領域創成研究部 助教	広い温度範囲で動作する新しいTi-Al 基形状記憶合金の開発
佐藤 遼	東北大学大学院 工学研究科 ファインメカニクス専攻 助教	次世代型共焦点プローブで切り拓く先駆的3次元形状計測システムの開発
平賀 優介	東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 助教	気候変動を踏まえた次世代の想定最大降雨推定手法の開発



受賞式での集合写真

## 第19回青葉工学振興会賞



## スピンを用いた新概念電子デバイスに関する研究

東北大学電気通信研究所  
計算システム基盤研究部門  
准教授 金井 駿

スマートフォンやパーソナルコンピュータ等に用いられる電子デバイスは、近年のAIやIoT技術の急速な発展に伴い、従来にない計算能力と電力消費効率の大幅な向上を強く求められている。筆者は、磁性の源である「スピン」を活用した新たな電子デバイス応用の研究を通じて、①古典ビット、②確率ビット、③量子ビットという三様態にわたる高機能情報デバイスの設計と実証を行ってきた(図1)。本稿では、スピンの非平衡挙動に立脚した高機能情報デバイス実証と、その基盤となるプラットフォーム構築に関する成果を紹介する。



代表例：HDD/不揮発性MTJ 代表例：超常磁性MTJ 代表例：スピン色中心

図1 スピンを用いた各ビット様態(古典・確率・量子)。

## ① 超低消費電力不揮発性磁気メモリデバイスの研究

半導体メモリの微細化により、情報保持に必要な待機電力の削減が課題となっている。この課題の解として、情報保持に電力を要さない磁性体メモリ、特に磁気抵抗ランダムアクセスメモリ(MRAM)が注目されている。筆者は、磁性半導体で見出された磁性の電界効果に着目し、高性能MRAM向け磁気トンネル接合(MTJ)に用いられる金属磁性体CoFeBの磁性の電界効果を世界で初めて観測した[1]。さらに、電界パルスで磁化を非平衡に駆動した過渡応答を利用することで、垂直磁化容易MTJにおける電界誘起磁化反転を世界で初めて実証した[2]。その結果、磁化反転に必要なエネルギーを6.3フェムトジュールとすることに成功した[3]。この値はHDD等を含む全磁性体メモリ中で最小である。また、CoFeBを古典電磁気学に反して垂直磁化容易となる条件を世界で初めて明らかにし、現在主流の電流書き込み型MRAMの低消費電力化・微細化に向けて重要な指針を示した[1]。本研究で提示したデバイス構造は2018年に量産MRAMの標準構造として採用され、実際にスマートウォッチやIoT機器に搭載されている。

## ② 確率的計算機向けスピンドバイスの研究

スピン状態が大きなエネルギー障壁で隔てられる構造はメモリとして有用である。一方、障壁を熱エネルギーと同程度に小さくすると、励起エネルギーをほとんど消費せずに確率的計算が可能となる。MTJを用いた確率的計算機は、大規模化のための動作の高速化やデバイス間ばらつきの抑制、環境電磁場揺動に対する耐性の課題を解決する必要がある。筆者は、従来はMRAM向けの垂直磁化容易MTJ構造がそのまま

確率ビットに転用されていた点に着目し、デバイス構造を確率ビット向けには面内磁化容易構造へと改良することで、確率的計算の動作速度を10万倍向上可能であることを理論的に予言した[4]。実際に直径数十ナノメートルのデバイスを試作し、8ナノ秒での高速動作を実証したほか、磁場揺動耐性・電圧揺動耐性を兼ね備えたMTJデバイスを実証した。これらのデバイスを用い、半導体デバイスを凌駕する問題解決性能を実証することに成功するなど、確率的スピンドバイスの実用化に向けたプラットフォームを築きつつある[5]。

## ③ スピン色中心を用いた新たな量子ビット材料の研究

量子重ね合わせを実現する量子ビットでは、スピンの非平衡開放系としてのダイナミクスが重要となる。筆者は、1970年代以来未解決であった「スピン色中心の量子情報保持時間( $T_2$ )」の代数表現を世界で初めて導出した(図2左)。この式は、材料パラメータ(核スピンのg因子・スピン量子数・濃度)などに基づき $T_2$ を定量的に予測するものであり、従来の2種類の材料に限られていた色中心量子ビット材料候補を数百種類以上へと拡大する契機となった[6]。その結果、特に酸化物に多数の有望候補が存在することが明らかとなり(図2右)、実際に多数の国際グループが実証研究を展開し、筆者自身も新材料の新たな量子ビット材料・デバイスの実証を推進している。例えば、MTJの高性能障壁材料である酸化物(スピネル)において色中心スピンの制御を実験実証し、新たな量子ビットを実証する[7]など、量子ビット研究とスピントロニクスをはじめとした異分野融合プラットフォーム構築を推進している[8]。

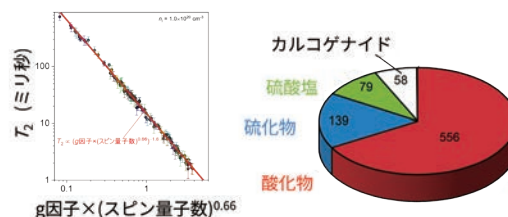


図2 スピン中心の量子情報保持時間( $T_2$ )の材料パラメータによる表現を発見し(左)、有望な新量子材料を提案した(右)。

- [1] M. Endo et al., Appl. Phys. Lett. 96, 212503 (2010).  
[2] S. Kanai et al., Appl. Phys. Lett. 101, 122403 (2012).  
[3] S. Kanai et al., Appl. Phys. Lett. 108, 192406 (2016).  
[4] S. Kanai et al., Phys. Rev. B 103, 094423 (2021).  
[5] 金井駿ら、日本物理学会誌 78, 256-261 (2023).  
[6] S. Kanai et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 119, e2121808119 (2022).  
[7] M. Kawahara et al., Appl. Phys. Express 17, 082004 (2024).  
[8] 金井駿、日本物理学会誌 79, 18-23 (2024).

## 第31回青葉工学研究奨励賞



### 広い温度範囲で動作する新しいTi-Al基形状記憶合金の開発

東北大学  
学際科学フロンティア研究所  
助教 許 勝

金属は強く変形させると、元の形には戻らない—これは私たちが日常的に感じている物質の“当たり前”である。しかし材料科学の世界には、この常識を覆す特別な金属が存在する。形状記憶合金である。応力によって内部の結晶構造が変化し（マルテンサイト変態）、その構造が元に戻ることで、10%にも及ぶ大きな変形から復元できる。この性質は超弾性と呼ばれる。高強度を保ちながらゴムのように滑らかに伸び縮みするという特性をもつNi-Ti合金は、医療デバイスや精密アクチュエーターなど、多くの分野で活発に利用されている。

しかし、この“魔法の金属”にも弱点がある。それは温度への脆弱性である。多くの形状記憶合金は室温付近でこそ優れた性能を示すものの、 $-150^{\circ}\text{C}$ 以下ではマルテンサイト変態による機能が失われ、逆に $100^{\circ}\text{C}$ 以上では塑性変形が先に発生してしまう。温度環境が大きく変動する宇宙空間では特性を保つことが難しく、NASAが提案した超弾性エアレスタイヤのような先端技術においても、温度依存性が課題になると指摘されてきた。「極低温から高温まで使える、軽くて強い形状記憶合金をつくる」—これは長年、実現が難しいとされてきたテーマである。私たちの研究は、この課題に真正面から取り組むところから始まった。

#### ■ 軽量・高強度・広温度域の超弾性材料を目指して

数ある金属の中で私たちが着目したのは、軽量で比強度に優れるチタン (Ti) とアルミニウム (Al) であった。Ti-Al系状態図の詳細解析を通じ、合金設計に関して丁寧に検討した。鍵となったのは、bcc構造の $\beta$ 相である。この相はマルテンサイト変態を起こしやすく、形状記憶特性の母相として適しているが、Ti-Al二元合金単独では相安定性が十分でない。そこで私たちは、 $\beta$ 相を規則化・安定化させるために少量のクロム (Cr) を添加する戦略を採用した。この設計により得られたTi-Al-Cr形状記憶合金は、比重4.36という軽さを保ちつつ、800 MPaを超える強度と7%以上の可逆ひずみという大きな室温超弾性を示した。これは従来のTi系超弾性合金のおよそ2倍に相当し、Ni-Ti合金にも匹敵する性能である。しかし、驚きの瞬間はここからだった。

#### ■ $-269^{\circ}\text{C}$ から $+127^{\circ}\text{C}$ — 宇宙の温度幅を丸ごとカバー

本合金を極低温試験機により4 K ( $-269^{\circ}\text{C}$ ) まで冷却し引張試験を行ったところ、多くの予想に反して、除荷後に試料は元の形状へと戻った。同様に400 K ( $+127^{\circ}\text{C}$ ) でも超弾性が確認され、 $-269^{\circ}\text{C}$ から $+127^{\circ}\text{C}$ までという前例の少

ない広い温度範囲で超弾性が発現することが明らかとなった<sup>[1]</sup>。図1に示すように、各温度で得られた負荷—除荷曲線はいずれもフラグ状の超弾性ループを描き、幅広い温度域で優れた特性が得られる。この温度範囲は地球上の環境を大きく超え、月面や火星の温度条件にも対応可能であることを示唆している。

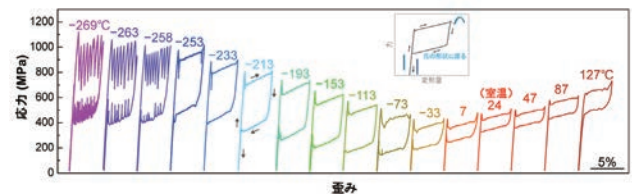


図1 Ti-Al-Cr合金の各温度での超弾性変形応力—歪み曲線<sup>[1]</sup>。

#### ■ 広温度域超弾性をもたらす“異常格子安定性”

なぜこれほど広い温度域で超弾性が維持されるのか。その理由を探るため、まずJ-PARCにおいてその場中性子回折実験を行い、変形中の相変態を原子スケールで追跡した。その結果、Ti-Al-Cr合金では $B2 \leftrightarrow B19$ の可逆マルテンサイト変態が生じていることが確認された。これはTi合金では比較的にまれな挙動である。さらに解析を進めると、低温領域で Clausius-Clapeyron 関係（温度と変態応力の比例関係）が成立しないことが明らかになった。低温ほど母相格子が“硬くなる”弾性硬化が起こり、変態核生成には逆に高い応力が必要となるためである。その結果、従来形状記憶材料には見られない負の変態応力温度依存性が現れ、極低温を含む広い動作温度範囲においても超弾性特性が維持された。この特異な挙動は熱力学だけでは説明が難しく、私たちは核生成の動力学に基づく新しい解釈を導入することで、広温度域超弾性の原理を明らかにした。

#### ■ 宇宙・水素・極低温技術へ—未来をひらく材料へ

Ti-Al-Cr合金は、“温度に縛られない超弾性”という新しい材料特性を有しており、超弾性エアレスタイヤ、極低温アクチュエーター、液体水素用部材など、幅広い応用可能性が示唆される。また、本研究で示された異常格子安定性に基づく挙動は、形状記憶合金の理解に新しい視点を与えるものである。Ti-Al-Cr系超弾性合金は、極限環境下で使用される機械要素や機能部材に対し、新たな選択肢を提供し得る材料として、今後の展開が期待される。

[1] Y. Song, S. Xu et al.; Nature, 638 (2025), 965-971.

## 第31回青葉工学研究奨励賞



## 次世代共焦点プローブで切り拓く先駆的3次元形状計測システムの開発

東北大学大学院工学研究科  
 ファインメカニクス専攻  
 助教 佐藤 遼

精密部品の品質保証のためには3次元形状計測は必要不可欠な技術となっている。3次元形状計測は一般的に2軸平面走査機構と高さ測定手法の組み合わせにより実施される[1]。この高さ測定手法の一つとして、共焦点光学系原理に基づき点光源から射出された光を測定対象物表面へ集光し、この集束光を測定対象物表面高さ測定用光プローブとして用いる共焦点プローブがある。これまで共焦点プローブの高分解能化・高速化のために光学系構成やその信号処理法が多数研究[2]されてきている。一方で、これら提案手法は「平坦表面」測定つまり段差測定が前提となっていた。そのため近年需要が拡大している歯車波面やX線光学用ミラー表面など複雑な「自由曲面」における3次元形状測定へ共焦点プローブを適用することは制限されていた。本報では、これまでにない「非線形光学」に基づく共焦点プローブ[3]を新たに提案し、その適用範囲を拡大可能とした研究成果を紹介する。

「自由曲面」測定へ共焦点プローブを適用する場合、対象物表面における傾斜角によって高さ測定精度が低下する問題があった[4]。この問題を解決するためには、「高さ」測定に加えて「傾斜角度」を計測し補正することが喫緊の課題であった。そこで筆者は、非線形光学現象である第二高調波発生に着目した。第二高調波発生とは、第二高調波発生媒質に入射した光(基本波)の周波数 $\nu$ に対して、その2倍の周波数 $2\nu$ をもつ光(第二高調波)が発生する現象である。第二高調波発生を利用した角度センサと変位センサはそれぞれ提案されているが、双方とも「測定対象物」が第二高調波発生媒質であったことから、3次元形状計測への適用には課題があった[1]。これらのセンサに着想を得て、第二高調波発生媒質を「測定対象物」に限定するのではなく、共焦点プローブにおける「非線形光学フィルタ」として採用する独創的な手法を提案した。

従来型共焦点プローブは、対象物面反射光を検出器前面に配置されたピンホールや光ファイバ等の「空間フィルタ」に通して検出していた。この場合、プローブ焦点面と対象物表面が合致する時のみ反射光が空間フィルタ面へ焦点を結ぶことが可能となり検出強度が最大となる。この効果により焦点面信号のみ高感度に検出可能であることから、共焦点プローブは光軸方向(高さ方向)に高コントラスト/高分解能な計測が可能であった[5,6]。一方で、従来型共焦点プローブでは「空間フィルタ」における角度変化感度が原理的に制限されるため、高分解能「角度」計測には課題が

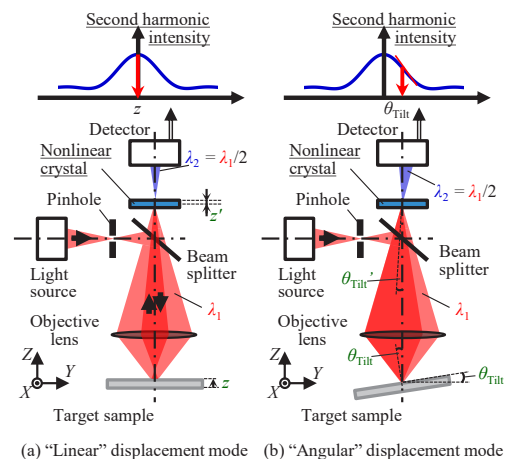


図1. 新たに第二高調波発生媒質を「非線形光学フィルタ」として採用する非線形光学共焦点プローブ

あった。この「空間フィルタ」の原理的制約を打破するために、本研究ではこれまで「空間フィルタ」として使用されていたピンホールや光ファイバ等に替えて、新たに第二高調波発生媒質を「非線形光学フィルタ」として採用する非線形光学共焦点プローブを提案した[3]。プロトタイプ光学系を構築して基礎特性評価実験を実施し、光軸変位(高さ)計測の分解能が約20 nm、角度変位計測の分解能が約5角度秒と評価されたことから、提案型非線形光学共焦点プローブの実現可能性が検証された。この発見により、非線形光学共焦点プローブ単体で測定対象物の「高さ」と「角度」計測の両立を世界で初めて実現可能とした。提案した非線形光学共焦点プローブは、平面走査位置測定用サーフェスエンコーダ[7,8]と組み合わせることにより、「自由曲面」3次元形状測定への応用性が高く、本研究成果が有する発展性・創造性は高いと言える。

- [1] R. Sato et al., Int. J. Automation Technol., 18(4) (2024), 545-580.
- [2] R. Sato et al., Int. J. Prec. Eng. Manuf., 25 (2024), pp. 199-223.
- [3] R. Sato et al., Opt. Express, 31(7) (2023), pp. 11982-11993.
- [4] R. Sato et al., Appl. Sci., 12(9) (2022), 4736.
- [5] R. Sato et al., Meas. Sci. Technol., 31 (2020), 094004.
- [6] R. Sato et al., Appl. Sci., 9(19) (2019), 4084.
- [7] R. Sato et al., Int. J. Automation Technol., 18(2) (2024), 249-256.
- [8] R. Sato et al., CIRP Annals, 74(1) (2025), 691-695.

## 第31回青葉工学研究奨励賞



### 気候変動を踏まえた次世代の想定最大降雨推定手法の開発

東北大学大学院工学研究科  
土木工学専攻  
助教 平賀優介

#### 研究の背景と目的

近年、激甚化する豪雨に対応するため、ある地域において想定し得る最大の雨量、すなわち「想定最大クラスの降雨」を設定して、「少なくとも命を守り、社会経済に壊滅的な被害が発生しない」対策を講じることが定められている。では、気候変動の影響はどうか。将来、我々はこの「最大クラス」をアップデートする必要があるのか？

気候変動が超低頻度の大雨に与える影響は、未だよくわかっていない。その理由の1つとして、想定最大のような極めてまれな大雨は観測記録が殆どなく、事例が大きく不足している。また、大雨にとっては、気温・海水面温度の上昇による水蒸気量の増加（熱力学的影響）だけでなく、上昇気流の強化などの力学的要因も非常に重要となる。そのため、気温上昇に伴う熱力学的な要因だけでは、気候変動による大雨の変化を十分に説明することはできない。

このような課題を解決するため、近年 Hiraga et al. (2025)<sup>1)</sup> は、気候変動の影響を考慮して想定最大クラスの降雨を推定できる新たな手法を提案した。当該手法は、数値気象シミュレーション技術を用いて、雨の最悪シナリオを推定する手法<sup>2)</sup>に基づいている。Hiraga et al. (2025) は、この数値気象シミュレーションによる手法に、気候変動の影響を考慮できる手法を掛け合わせ、さらには大アンサンブル気候データに基づき、その発生確率を評価する手法を提案した。これにより、決定論的な推定と確率的な評価をつなぐ枠組みを提案した。

本稿では、Hiraga et al. (2025)<sup>1)</sup> の手法を基に、線状降水帯による最大クラスの降雨を推定し、気候変動の影響を定量化した内容<sup>3)</sup>を紹介する。

#### 結果と今後の展開

図-1 に現在気候、2050年代気候、2090年代気候において、赤川流域の24時間流域平均降雨量が最大となる降雨シナリオを示す。図-1 から、気候変動に伴う気温・海水面温度の変化による、非線形な降雨の応答が確認できる。本手法は、気候変動の影響として熱力学的な影響だけでなく力学的な影響、またその相互作用を陽的に考慮できる。そのため、過去の分布をスケールするような線形的な仮定に依存せず、降雨シナリオが推定できる。

図-1 に示した現在気候と2090年代の想定最大規模降雨シナリオを基にして、降雨の変化量を継続時間ごとに求め、地表面露点温度でスケールした結果を図-2 に示す。ここでは図-2 のMaximum (赤) に着目する。図-2 から、想定最大規模降雨の気候変動に伴う増加率は、C-C scaling rate (7%/K) を大きく超え得ることが分かる。特に継続時間1hrの降雨については、C-C scaling rateの3倍 (21%/K) を超える増加率を示している。この結果は、気候変動に伴う力学的な影響の効果が非常に大きいことを示している。

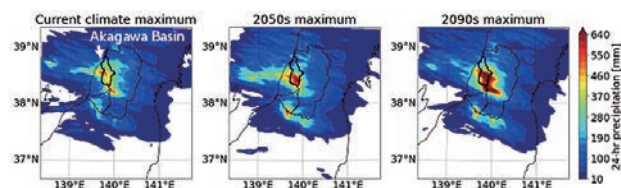


図-1 各気候における最大降雨のシナリオ（山形県赤川流域の24時間積算降水量）

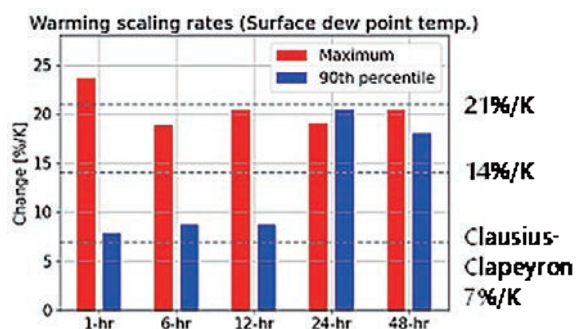


図-2 地上露点温度に対する想定最大規模降雨の増加率（山形県赤川流域平均雨量）

得られた推定値については、大アンサンブル気候データd4PDFに基づき、その発生確率を評価した。その結果、現在気候で最大クラスとされる雨量は、2090年代の気候では約10倍発生しやすくなることが分かった。

今後は、データ駆動型手法などを組み合わせ、広域で想定最大クラスの降雨を推定する。

[1] Hiraga et al. (2025a) Journal of Hydrology 132659.  
[2] Ohara et al. (2011) Journal of Hydrologic Eng.  
[3] Hiraga et al. (2025b) Journal of Hydrology 133724.

# 研究プロフィール



## 計算科学と計測融合による次世代材料システムの機能・信頼性設計

グリーン未来創造機構 グリーンクロステック研究センター  
(兼)工学研究科ファインメカニクス専攻  
教授 鈴木 研

### 1. はじめに

計算化学は、コンピュータの計算・情報処理・視覚化機能を活用し、多様な物質や材料を原子レベルでモデル化する学問分野です。特に、量子力学や古典力学の理論に基づくシミュレーションにより、化学現象の解析や予測を可能にします。材料の特性や構造は原子結合の状態(共有結合、イオン結合など)によって決定され、この結合状態は電子の相互作用に起因します。したがって、量子力学に基づいた原子レベルのシミュレーションは、材料の特性や化学現象の予測において極めて有効な手法であるといえます。この計算化学から得られた知見を材料設計指針の構築へと繋げ、新規材料開発や信頼性設計の効率化・高度化に貢献することを目標に研究を進めてきました。

現在、所属するグリーンクロステック研究センターは、グリーン課題解決の基盤となる原理・学理の探索を軸として、NanoTerasuなど最新計測装置から得られたビッグデータの分析・利用に基づく研究を推進するとともに、成果の社会実装をゴールとした産学共創イノベーションを推進しています。その中で、著者は計測・計算融合研究による研究DXを推進し、自身の専門である計算化学を、より広範な「計算科学」へと展開・融合させることで、材料機能の発現機構、および信頼性向上の支配因子を原子レベルで解明する役割を担っています。次世代材料システムの多くは、異種材料の複合構造形成により高機能化が図られていますが、多元素化や構造の複雑化に伴い、不安定性が増大する傾向にあります。特に異種材料の界面では、構造や組成の不均一性に加え、格子不整合や熱応力に起因したひずみ場が必ず存在し、これに応じて化学ポテンシャル勾配が発生します。この勾配は拡散や化学反応の駆動力となり、時間経過とともに組織変質(物性の変動や機能消失)を引き起こします。このひずみ場に起因する化学ポテンシャル勾配を駆動力とした原子拡散や化学反応(メカノケミカル反応)と、その結果生じる脆弱組織の生成こそが、次世代高機能材料における機能劣化・損傷メカニズムの本質であると考えられます。具体的には、現代社会の課題である脱炭素化社会

の実現と、持続可能で安全・安心な社会の構築を目指し、「計算科学をベースとした、ひずみと結晶組織の相互作用に起因する化学ポテンシャル勾配を考慮した材料設計・信頼性設計」を研究課題として実践しています。そして最近では、劣化・損傷評価に留まらず、ひずみによる物性制御の実現と新機能発現の可能性も見えてきています。以下に、これまでの主な研究成果を紹介します。

### 2. クリープ負荷環境下における粒界強度劣化機構の解明研究 [1-3]

多結晶材料の高温クリープ及びクリープ疲労損傷過程では、結晶粒界近傍に転位、格子欠陥、局所ひずみなどの損傷が蓄積し、結晶品質(原子配列の秩序性)が劣化します。これにより粒界強度が急激に低下し、粒界破壊が発生すると考えられます。例えば、Ni基合金Alloy617の高温クリープ疲労中断試験において、粒界近傍の結晶品質を、EBSD(電子後方散乱回折)法から得られるIQ値を用いて評価した結果、負荷時間とともに粒界品質が低下し、亀裂発生が加速することが確認されています。また、FIB(集束イオンビーム)で作製した二結晶試験片の微小引張試験では、図1に示すように、結晶品質が劣化した粒界では強度が著しく低下し、延性粒内割れから脆性粒界割れへと破壊モードが移行することも明らかになっています。このように、高温環境下での粒界近傍の結晶品質劣化が、材料の脆性的な破壊を引き起こす根本的な要因です。

この粒界品質劣化の主要因子は、材料や環境によって異なりますが、特に航空機エンジンに使用されているNi基耐熱超合金IN718においては、 $\delta$ 相(斜方晶 $\text{Ni}_3\text{Nb}$ )の粒界析出が深刻な問題となります。IN718はNb含有率が高く、エンジン稼働温度の高温化(650℃超)に伴い、分散析出強化組織である $\gamma''$ (正方晶 $\text{Ni}_3\text{Nb}$ )相が粗大化して図2に示すように $\delta$ 相として主に粒界近傍に針状に析出します。この $\delta$ 相の存在が、粒界品質劣化の主要因子であると疑われていますが、その原子レベルのメカニズムは

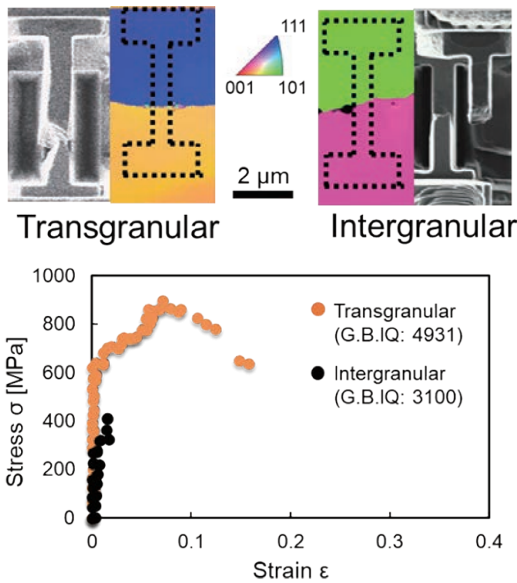


図1: FIBを用いた微小引張り試験による結晶粒界強度評価例。結晶粒界近傍のIQ値 (G.B.IQ) が低く結晶品質が低下した試験片では脆性粒界割れを生じる。

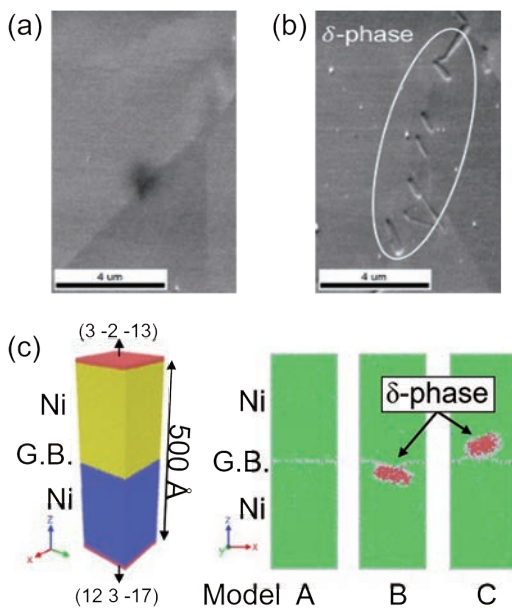


図2: (a)熱処理前、(b)800°C熱処理後の結晶粒界のSEM像、(c)二結晶構造を用いた $\delta$ 相析出粒界の解析モデル。

未解明でした。そこで著者らは、この「 $\delta$ 相析出が粒界強度を劣化させる機構」を原子レベルで解明するため、分子動力学 (MD) 解析を用いました。粒界近傍に $\delta$ 相を持つモデル (Model B, C) と、持たないモデル (Model A) を作成し、高温ひずみ保持環境下での応力集中場の影響を比較検討しました。

まず、ひずみ保持中において、全モデルで応力緩和が見られましたが、 $\delta$ 相を含むModel B, Cは、含まないModel Aより緩和が速く、粒界移動も顕著でした。これは、 $\delta$ 相/ $\gamma$ 相界面の格子ひずみと、原子配列が不規則な結晶粒界という2つの要因が重畳し、粒界近傍の原子拡散を活性化させ、

粒界の再構成を促進したためと考えられます。特にModel Cでは、降伏応力以下のひずみにも関わらず、すべり変形による応力低下が発生しました。応力分布解析から、 $\delta$ 相近傍の高応力領域と、本来高応力場である粒界とが重なる領域 (図3) において、局所的な応力集中がさらに助長され、すべりを誘起したと考えられます。

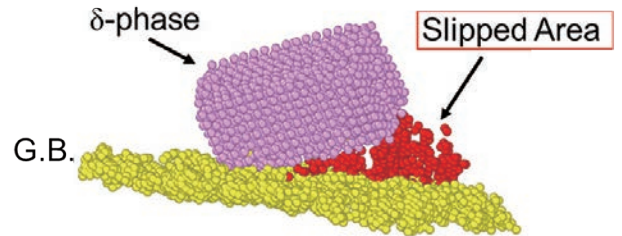


図3:  $\delta$ 相と粒界の複合効果によるすべり発生領域。 $\delta$ 相と $\gamma$ 相の格子不整合に起因する界面近傍の高応力場と、粒界が重畳する領域に応力が集中し、すべりの起点となる。

次に、負荷後の残留強度を一軸引張りシミュレーションにより評価したところ、 $\delta$ 相を含まないModel Aの強度低下が12%だったのに対し、 $\delta$ 相を含むModel B, Cでは約20%と、低下が顕著でした。この強度低下の要因を調べるため、粒界近傍の原子密度変化を分析したところ、全モデルで粒界近傍の原子密度低下が見られましたが、 $\delta$ 相を持つB, Cで特に顕著でした。これは、 $\delta$ 相界面ひずみと粒界の相乗効果で形成された局所的な応力集中場が、原子の外方拡散を加速させたためと考えられます。

以上の結果から、 $\delta$ 相を含んだモデルにおける強度低下は、[外部負荷+界面ひずみ+粒界]の重畳による局所応力集中が原子の増速拡散を駆動し、粒界近傍の原子密度を低下させる (=結晶品質を劣化させる) ことで生じた結論できます。したがって、クリープ環境下の $\delta$ 相の存在は、粒界に応力集中場を形成し、粒界強度の劣化を加速させる主要因子であると考えられます。

### 3. 形状制御によるグラフェン電子構造設計手法の確立とその応用 [4-6]

持続可能で安全・安心な社会を実現する上で、構造材料やデバイスの強度信頼性を保障することは極めて重要です。その鍵となるのが、予期せぬ破壊や機能劣化の予兆を捉えるための「ひずみのモニタリング」です。したがって、微小なひずみを正確に検知できる、高感度ひずみセンサの開発が社会的に強く求められています。この要求に対し、グラフェンナノリボン (GNR) は次世代のセンサ材料として大きな可能性を秘めています。グラフェンの電気伝導特性は形状や寸法に強く依存し、一般的なシート状 (金属的) とは異なり、幅100 nm以下のGNRは量子サイズ効果によりバンドギャップが発現し、数nm幅で半導体的性質を示します。さらに重要なことに、「ひずみ」によってそのバンドギャップが敏感に変化することが理論的に示されています。この特性は、GNRが高感度なフレキシブルひずみセンサとして

原理的に機能しうることを意味します。

しかし、GNRをひずみセンサなどのデバイス素子として実用化するには、根本的な課題がありました。GNRに電気を流すための金属電極との間にショットキー障壁が発生し、安定したオーミック接触を形成することが困難でした。そこで本研究では、このオーミックコンタクトの実現と高感度ひずみセンシング機能の両立を目指し、「形状制御」によるGNRの電子構造設計手法の開発を行いました。具体的には、幅狭部（半導体GNR）の両端にそれよりも幅の広いGNR（金属伝導GNR）を連続的に接合させた「ダンベル型構造」を提案しました。この構造について、密度汎関数理論（DFT）に基づく第一原理計算でその電子構造とひずみ応答を解析し、さらに試作評価を行いました。

DFT解析の結果、このダンベル型構造は、接合界面における特有の電子状態の形成によって、半導体GNR単体と比較して電流が流れ始めるしきい値電圧が著しく減少することを確認しました。また、図4に示すように、引張りひずみの増加に伴い、電流値が低下し電気抵抗が増加することが予測されました。ひずみゲージの感度評価パラメータであるゲージ率を線形近似して算出したところ、約40という高感度が得られる可能性が示されました。

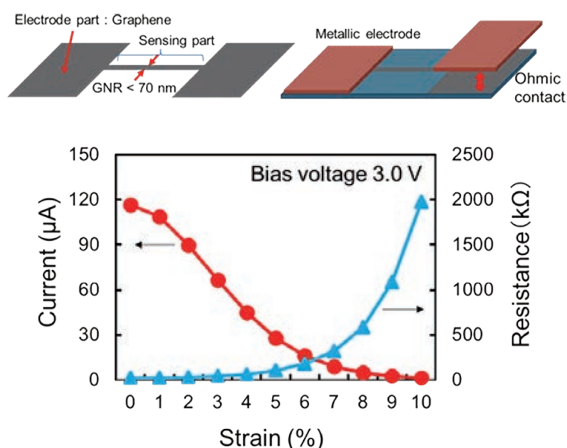


図4: ダンベル型GNR(DS-GNR)を利用したセンサ構造とその電気伝導特性歪み依存性解析例

この理論的知見を実証するため、CVD法で作製したグラフェンシートをSi基板上に転写後、電子ビームリソグラフィ技術を用いてダンベル型GNRを作製しました。具体的には、金属電極直下に幅40 μmのグラフェン（幅広部）を配置し、そこから幅50 nm、長さ18 μmのGNR（幅狭部）を電極間に継ぎ目無く接続することで、提案したダンベル形状を実現しました（図5）。作製したDS-GNR（ダンベル型GNR）のI-V特性を測定した結果、電圧に対し電流が線形的に増加するサンプルが得られました。この線形なI-V特性（シート抵抗約1300 Ω/□）は、DFTの予測通り、DS-GNRの幅広部と金属電極間に良好なオーミック接合が形成されていることを示しています。次に、このオーミック接触が確認されたサンプルに対し、4点曲げ試験法を用いて電気伝導特性のひずみ依存性を評価しました（図6）。引張りひず

みの増加に伴い抵抗値が上昇し、ゲージ率 (GF) = 50という非常に高い値を得ることに成功しました。これは、理論的予測を裏付けるものであり、高感度ひずみセンサへの応用可能性を実証するものです。

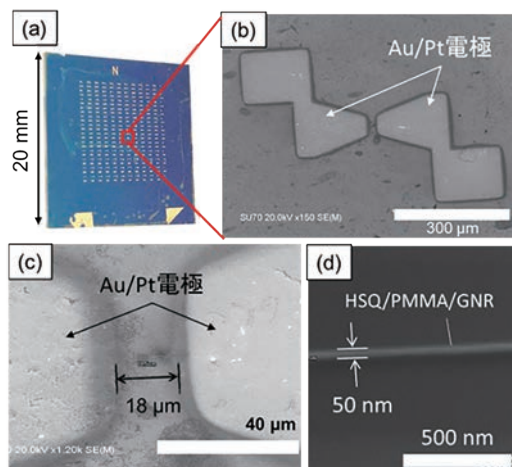


図5: (a)センササンプル外観、(b)金属電極SEM像、(c)ダンベル部SEM像、(d)幅狭部SEM像

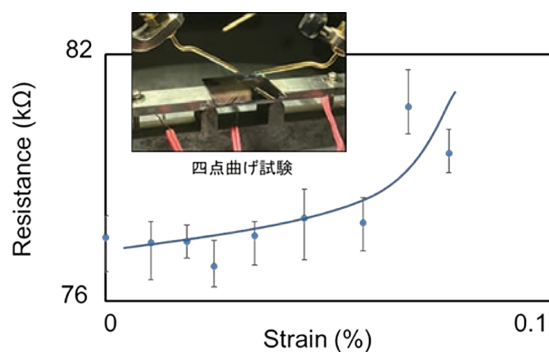


図6: DS-GNR電気抵抗のひずみ依存性測定例

#### 4. ひずみ負荷によるグラフェン表面吸着特性制御技術の開発とその応用 [7-9]

これまでの研究より、ひずみ負荷によりグラフェンの電子状態が変化することがわかっています。この特性を利用し、ひずみを負荷することで、高感度でガス選択性に優れたグラフェンガスセンサが開発できるのではないかと考え、サンプルの作製・評価を行いました。

背景として、近年、疾病予防の一環としてヘルスマニタリング技術の重要性が増しており、特に呼気に含まれるアセトンやNH<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>といった体内代謝産物（バイオマーカーガス）を検出する呼気分析への期待が高まっています。これを実現するには、日常生活で使用可能な、小型で高感度なセンサが不可欠ですが、既存センサには動作温度やコスト、携帯性の面で課題がありました。高い表面積/体積比と優れた電子特性を持つグラフェンは、その候補として注目されています。グラフェンは、ガス分子の吸着による電気抵抗変化を利用し、ppmレベルの希薄ガス検出が可能です。しかし、多くのガス種に対して感度を持つため、特定

のガスだけを検出する「ガス選択性」の向上が最大の課題でした。そこで本研究は、グラフェンのフェルミエネルギー（電子状態）が「ひずみ」によって変化することに着目しました。著者らは、この「ひずみ」を利用してグラフェン表面におけるガス分子の吸着状態を能動的に制御し、ガスセンサの感度と選択性を向上させるという新しい動作原理を提案し、その実証に取り組みました。

まず、DFT計算を用い、 $H_2O$ 、 $CO$ 、 $NH_3$ 、 $NO_2$ 分子の吸着に及ぼすひずみの影響を系統的に調べました。その結果、吸着エネルギーが、分子種ごとに明確に異なることを見出しました(図7)。このメカニズムは、ガス分子のフロンティア軌道のエネルギー準位と、ひずみを加えたグラフェンのフェルミエネルギーとの相対関係から説明できます。これは、「ひずみを負荷する」という操作によって、特定のガスの吸着だけを選択的に強めたり弱めたりできること、すなわち「ひずみによるガス選択性向上の可能性」を理論的に示すものです。

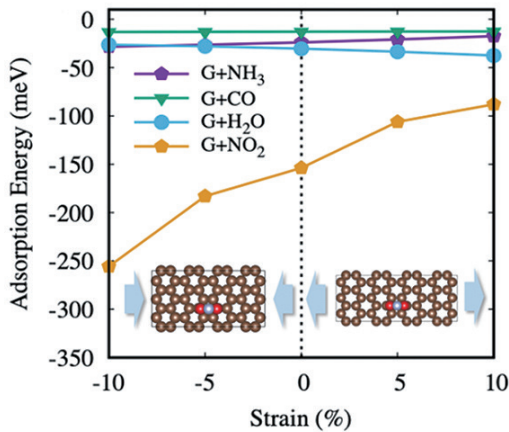


図7: ガス吸着エネルギーのひずみ依存性解析例

この理論的知見を実証するため、PI（ポリイミド）基板を用いたフレキシブルなグラフェンガスセンサを試作しました(図8)。試作センサは、予測通り $NH_3$ と $NO_2$ に対して高感度を示しました。特筆すべきは、ひずみの効果です。濃度100 ppmのガスに対し、ひずみ無しの感度は $NH_3$ が約

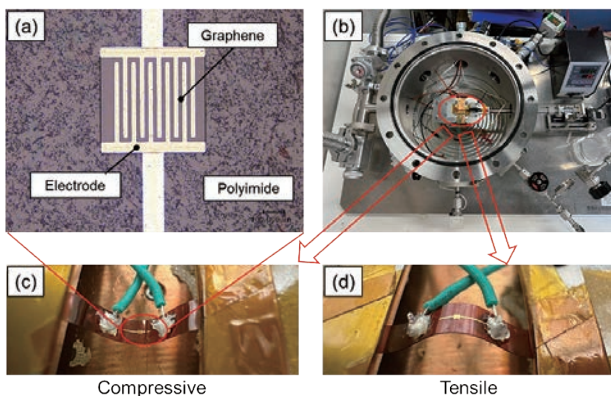


図8: (a)センサ部の拡大写真、(b)測定セットアップ、(c)曲げ変形による圧縮ひずみ負荷状態、(d)引張ひずみ負荷状態

0.4%、 $NO_2$ が約8%でした。これに対し、1.1%の引張りひずみを作用させると、感度は $NH_3$ が1%に、 $NO_2$ が14%へとそれぞれ向上しました。重要なのは、感度の「向上率」がガス種によって異なるため、両者の感度差が拡大し、ひずみ負荷によって $NO_2$ の選択性が向上した点です。これは、ひずみを利用したマルチガスセンサの実現可能性を示すものです。また、呼気分析応用への必須条件として耐湿度性を評価したところ、相対湿度0%から80%の範囲でも $NO_2$ に対するセンサ感度が湿度に依存せず、安定した応答を示すことを実証しました。これは、高湿度環境である呼気分析用ガスセンサとして極めて有望な結果です。

この研究例で示したように、「ひずみによる機能制御」というアプローチをさらに発展させ、省エネルギーな革新的デバイスの開発を目指していきます。

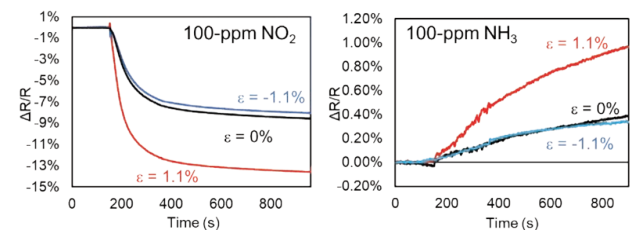


図9: グラフェンガスセンサのひずみ制御による感度変化の評価例

## 5. まとめ

これまでの研究より、複合材料システム内に存在するひずみ誘起化学ポテンシャル勾配に起因した組織変化により材料の機能や性能が劣化することが明らかとなりました。化学ポテンシャルは、組成や構造だけでなく、機械的作用や環境によって変化するため、材料、機械、環境因子が重畳した劣化・損傷現象は極めて複雑です。この複雑な現象に対し、原子レベルシミュレーションと実験・計測を相補的に連携させながら研究を実践することで、組織変化、劣化現象の支配因子を原子レベルで特定します。そして、この知見に基づき、潜在的な劣化・破壊現象の予測技術およびひずみ誘起による新機能発現技術の構築に取り組みます。これら一連の研究を通じて、持続発展可能な社会の実現に不可欠な、低環境負荷型のモノ創りに貢献し得る技術基盤の確立を目指します。

## 参考文献

- [1] W. Suzuki, Y. Luo, K. Ishihara, K. Suzuki, H. Miura, Applied and Experimental Mechanics, 16 (2021), 325-331.
- [2] S. Tezuka, K. Suzuki, Proc. of ASME IMECE2022, No. IMECE2022-94286, (2022).
- [3] Y. Luo, Y. Takahashi, K. Nakayama, A. Nakayama, K. Suzuki, H. Miura, J. of Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 46 (2023), 2043-3059.
- [4] M. Yang, S. Sasaki, K. Suzuki, H. Miura, Applied

- Surface Science. 366 (2016), 219-226.
- [5] Q. Zhang, T. Kudo, K. Suzuki, Proc. of ASME IMECE2018, No. IMECE2018-88431, (2018).
- [6] K. Suzuki, R. Nakagawa, Q. Zhang, H. Miura, Nanomaterials. 11(7) (2021), 1701.
- [7] X. Qiao, M. Yin, K. Suzuki, H. Miura, Proc. of ASME IMECE2023, No. IMECE2023-112231, (2023).
- [8] M. Yin, X. Qiao, H. Miura, Y. Chen, L. Wang, K. Suzuki, Diamond and Related Materials, 142 (2024), 110822.
- [9] M. Yin, X. Qiao, Y. Chen, L. Wang, H. Miura, K. Suzuki, Surfaces and Interfaces, 73 (2025), 107542.

## 【著者略歴】

すずき けん  
鈴木 研

- 2002年 東北大学大学院工学研究科（材料化学専攻）博士課程後期3年の課程 修了
- 2002年 東北大学大学院工学研究科附属破壊制御システム研究施設 COE研究員
- 2005年 東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター 助手
- 2013年 東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター 准教授
- 2023年 東北大学グリーン未来創造機構グリーンクロステック研究センター 教授



## 現地調達の機能美と推進工学への応用

東北大学大学院工学研究科  
航空宇宙工学専攻  
准教授 高橋 聖 幸

### 1. はじめに

唐突だが、筆者は“現地調達”という響きとそれに伴うシステム全体のスリム化が好きである。この言葉を聞くと、かつてボーイスカウト活動を行っていた日々を思い出す。現地にある石ころを調達し、飯盒炊爨用の竈を構築した記憶がよみがえる。あるいは成年に達してからは、小型のバックパックに4着の衣服とその他少量の備品だけを入れ、現地で物資を調達しながら衣服の手洗いを繰り返し、一ヶ月間かけてヨーロッパ12カ国を巡った旅が想起される。現地調達の魅力は何と言っても、携帯する荷物の軽量化、コンパクト化にある。例えばヨーロッパ旅では時に雨の中、時に石畳やレンガの凸凹とした道を1日10–20km程度歩くこととなる。このような中、重量の嵩む荷物を背負い歩くのは相当に足腰を鍛えられた人物でないとは困難だと推察されるため、現地調達を駆使して極限にまで荷物を軽量化するメリットは計り知れない。この現地調達という発想は、その機能的合理性や美しさを個人的な経験から見出していると同時に、筆者の研究ポートフォリオにも強い影響を及ぼしており、本稿では“現地調達”をキーワードに研究内容を紹介する。

筆者は航空宇宙工学の中でも特に推進工学を専門としているが、実は、これまで確立されてきた推進技術は現地調達との相性が極めて悪い。というのも、“推進力”とは運動量の排気とそれに伴う反作用の力であり、運動量を排気するためにはそれを生成するための荷物、即ち燃料が必要だからである。従来の打ち上げ用ロケットも、大量の燃料を持って行く。また宇宙を飛行する衛星も燃料を持っており、それを少しずつ排気して推進力を獲得している。本稿では、ロケットと衛星用エンジンの現状の課題と、対抗策としての燃料の現地調達技術についてそれぞれ議論する。

### 2. 従来のロケット技術の課題

まずはロケットの打ち上がる様を想像して欲しい。これまでに日本の宇宙輸送を担ってきたH-IIロケットは全長が56mと、大阪城よりも大きい。全体重量は約530トンであるが、その実に8–9割が燃料及び酸化剤である。この大量の液体酸素／液体水素燃料を燃やす事で高圧の排気ガスを作り出し、超音速ラバルノズルによって高速排気して反作用、即ち推進力を得るという仕組みである。最終的に地球低軌道に運搬出来る荷物は20トン程度である

が、これは全体重量のおおよそ4%とシステム全体と比較すると小規模であり、目的とする積荷を運搬していると言うよりは寧ろ、大量の燃料を使って燃料を輸送するという極めて非効率なシステムになってしまっている。この輸送の非効率さは、大量の燃料を持参してそれを排気している為に他ならず、実際にツィオルコフスキーの式によって表現される様に、燃料持参タイプのロケットの場合、目的とする加速量の増加に伴って必要燃料重量は指数関数的に増えて行く。この指数関数的増加が輸送能力の限界を決定してしまい、某SF映画やアニメーションのように、宇宙基地やスペースコロニーを構築するなどは極めて遠い世界の話になってしまっている。また、宇宙飛行士でない著名な民間人が安く簡単に、あたかも海外旅行にでも行くかの様に宇宙にアクセス出来るという世界も夢のまた夢である。ちなみに筆者が推進工学を専門とするのは、まさしく筆者自身が宇宙に行きたいからに他ならない。そこで、燃料を持参するという従来型ロケットシステムの発想を切り替え、燃料の現地調達と外部からの推進エネルギー共有により、輸送効率を破壊的水準で改善するという技術に筆者は着目している。この革新的な宇宙輸送技術が、“ビーム推進システム”である。

### 3. ビーム推進システム

ビーム推進システムの最初の提案は、レーザー光源が発明されて間もなく1970年代のKantrowitzに遡る[1]。その動作原理としては、まずロケットノズル内部に空気を蓄える。続いて地上或いは宇宙から高強度パルスビームをノズルに向けて照射し、オンボードの放物面ミラーなど何らかの手段でそれを集光する。空気中に存在する僅かな自由電子が集光点で加熱され、雪崩的に電子衝突電離を繰り返す事で高密度のプラズマが生成される。このプラズマが引き続き電磁エネルギーを吸収して加熱され、緩和過程を介して周りの空気を急速に暖める。すると衝撃波が駆動され、この圧力をロケットノズル壁面が受けて推力を獲得するという仕組みである。

燃料はまさに現地で調達するためロケットの小型化が可能である上、従来の様に複雑なターボポンプ・燃焼エンジンなどが不要となり、ロケット一機当たりの製造コストを大幅に下げることが出来る。一方で空気が無い高度では飛べないという指摘があるが、近年の筆者の研究によると、希

薄な空気を取り込んで圧縮する超高性能インテーク技術を確立出来れば、高度 100 km までの広範囲に渡ってビーム推進で推力を生成し、打ち上げコストの大幅低減に貢献出来る可能性が示されている[2]。また近年では3D金属プリンティングの技術の発展から、ビーム推進ロケット全てを3Dプリンティングで製造出来る可能性があり、製造のためのリードタイムも大幅に削減可能である。これによって究極的には、JR山手線のように5分に一回の頻度でロケット打ち上げを繰り返し、宇宙構造物のパーツを細かく分割して輸送して宇宙空間でそれらをドッキングする事で、従来の国際宇宙ステーション 400 トン規模を超える様な超大型宇宙構造物を、より短い期間で安く構築出来る可能性がある。

このように宇宙輸送ロケットにおける燃料の現地調達は大変魅力的である一方、いくつかの技術的課題が存在する。ビーム源として、レーザー光源を用いる場合とミリ波ビーム光源を用いる場合とでそれぞれ異なった課題を有しており、ここからは筆者の研究成果を交えつつ最新の研究結果を紹介する。

#### 4. レーザー推進の課題と近年の成果

レーザー推進の目覚ましい成果と言えば、1990年代後半に行われた Myrabo の Lightcraft 研究であろう[3]。スパイクノズル型のミラーとリング型のカウルを組み合わせ、高度 71 m のフリーフライト打ち上げの世界記録を打ち立てている。また、ドイツ DLR のグループのベル型機体も重要な成果であり、数メートルに渡る打ち上げを成功させている[4]。このように高度 100 m未満での打ち上げには2つのグループが成功しているものの、高度 100 kmを超える宇宙空間に到達した例は未だない。その原因の一つが、ロケットがレーザー軸上から外れやすく、安定した飛行が維持出来ないという問題である。この課題を克服するために、機体の姿勢を制御し、長時間の安定飛行“ビームライディング飛行”を維持する技術が求められている。

姿勢制御技術には、機体がレーザー軸から外れた際に自然と中心に戻る“受動的制御”と、ロケットの動きとレーザー軸からのずれを検知して、ロケットに追従してレーザー照射位置を動かす“能動的制御”がある。筆者らの研究グループは、これまでに数値シミュレーションを主として両者の研究を行ってきた[5-7]。それによると、過去に Lightcraft がビーム軸から逸脱して墜落してしまったのは、機体軸とビーム軸の角度ズレが大きくなり、機体をビーム軸中央へと引き寄せる“センタリング力”が低下したためであり、角度ズレを補正する受動的制御能力の重要性が示された。またそれに加えて、角度ズレを復元するようにレーザー着弾位置をリアルタイムに能動的制御することで、安定飛行が可能であると理論的に示された。これらのシミュレーション結果に関して、近年、実験システム構築と検証に成功し、Nature 出版の Scientific Reports 誌にて出版されたため[8]、本稿にて紹介する。

まず受動的制御に関しては、センタリング性能だけでなく角度ズレの補正力を付与出来るように機体デザインに工夫を凝らした。即ち Lightcraft 同様に、機体のメインボディにスパイクノズル形状のミラーを取り付け、機体に照射されたレーザーを、メインボディ周りに円環状に集光出来る設計とした。また、円環状の集光領域を覆うようにリング状のカウルを取り付けた。この構造により、機体が飛行中にレーザーの照射軸から横にずれた場合、レーザーがカウルの内側に不均一に集光されるようになる。すると、レーザー加熱により生成される衝撃波に不均一が生じ、衝撃波がカウルを押す力にも偏りが発生する。この非対称な力の働きによって、機体は自然に元の中心軸（レーザー軸）へと引き戻される方向に動き、積極的な制御をしなくても機体並進位置が自動的に補正されるようになる。加えて、機体軸上には放物面ミラーを取り付け、機体軸がレーザーの照射軸から傾いた際には、放物面ミラー内でのレーザー集光位置が変化し、それに伴って発生する衝撃波の形が変わることで、角度のずれを打ち消せる設計とした。この機体はスパイクノズル形状のミラーと放物面ミラーとを組み合わせた形状をしているため、本研究グループでは“複数放物面レーザー推進機”と呼んでいる(図1)。

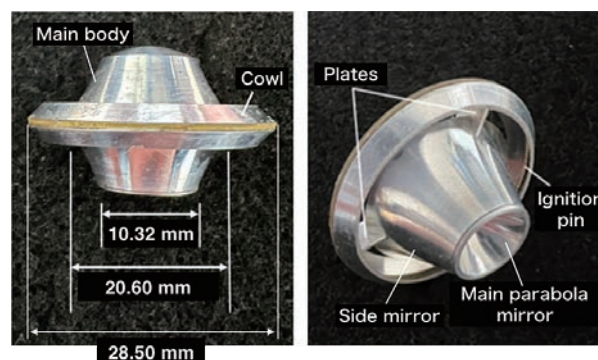


図1 開発した複数放物面レーザー推進機。

この機体の受動的制御能力を検証すべく、ロケットに向けて鉛直上向きに繰り返しパルスレーザーを照射し、実験室において自由飛行の打ち上げ実験を実施した。1ショットあたり約 5 J のレーザーを 50 Hz で繰り返し照射した結果、重量約 2 g の機体が機体全長約 15 mm の7倍程度の高度 110 mm まで浮き上がり、自由飛行する事に成功した(図2)。これは世界で三例目の自由飛行である。この際、レーザーの照射軸に自然と引き寄せられるように機体が運動したことが確認され、センタリング制御の実験的実証にも成功した。

然し乍ら打ち上げ実験を通し、受動的制御だけでは数分から数十分間にわたる安定飛行の確実性に欠くことが示唆された。従って、過去に数値シミュレーションによって予期されたように、能動的制御を担う仕組みとして、ロケットの動きをリアルタイムで追尾しながらレーザーを照射する“レーザートラッキングシステム”の開発にも取り組んだ。システムの定量的な追尾性能を評価するため、自由飛

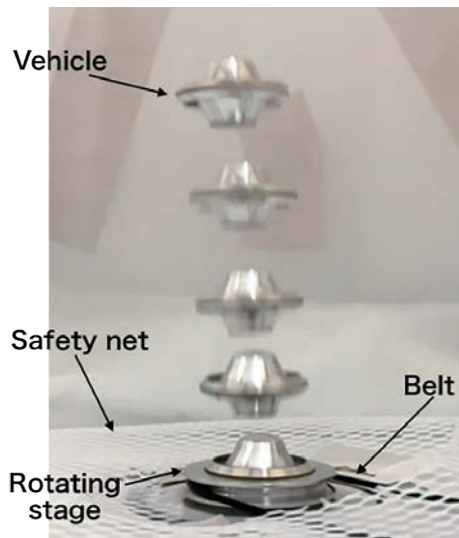


図2 レーザー推進機打ち上げ実験の様子。

行させる代わりに、推進機を自作のロボットアームに取り付け、自由飛行時と同程度の並進速度で機体を動かし、追尾させる実験を実施した（図3）。開発したトラッキングシステムにおいては、ステレオカメラを用い、空間内の機体の位置と速度をリアルタイムで取得した。これらの情報は、モーター、ベルト式アクチュエータ、ミラーから構成されるレーザー走査システムに送られ、機体の動きに合わせてレーザー照射位置を制御する設計とした。その結果、自由飛行時に想定される機体移動速度程度であれば、レーザーを十分に正確に追尾させることが出来、衝撃波と推力を継続的に発生させられる事が世界で初めて実証された。

このようにレーザー推進においては、“複数放物面レーザー推進機”の打ち上げ実証と、リアルタイム追尾を可能とする“レーザートラッキングシステム”の開発・実証に成功した。一方で今回の取り組みでは最長約 0.26 秒の自由飛行であり、打ち上げに十分とは言えない。今後は、レーザートラッキングシステムを用いた打ち上げ試験を行い、

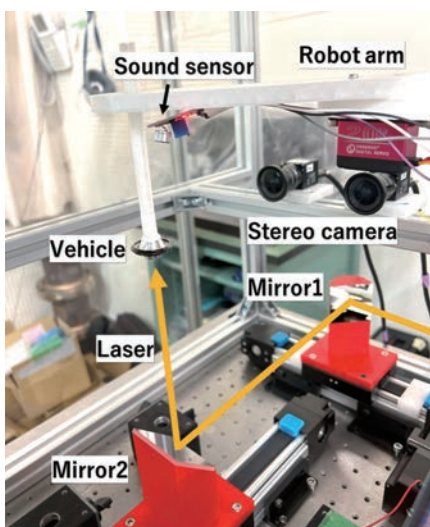


図3 開発したレーザートラッキングシステム。

打ち上げの全シーケンスを通じて、安定的なビームライディング飛行が達成出来るかを検証する予定である。そして最終的には、より高出力の繰り返しパルスレーザーを用い、高度 100 km以上の宇宙空間到達を目指す。“燃料現地調達型ロケット”の今後の研究進捗にご期待頂ければと思っている。

## 5. ミリ波ビーム推進の課題と近年の成果

レーザー推進とは別のアプローチとして、ミリ波ビームロケットが提案されている。これは高出力ミリ波ビーム源“ジャイロトロン”を用いたビーム推進システムである。ジャイロトロンは主に核融合のプラズマ加熱装置として使用されるが、核融合技術の発展と共にその発振効率や発振可能出力が改善され、日本とロシアが極めて強い国際競争力を持っている。また、将来的に核融合技術が確立されて世界的に普及すれば、ジャイロトロン大量生産のコストメリットを享受出来る事となり、ミリ波ビーム照射により、レーザー推進よりもより安く宇宙へとロケットを飛ばす事が可能となると試算されている[9]。過去には東京大学においてミリ波ビームロケットの打ち上げデモンストレーションが実施されており、高度1m 強のフリーフライトに成功している一方で、その問題点が徐々に明らかになっている。

ミリ波ロケットの動作原理はレーザー推進と基本的には同様で、ミリ波ビームによってプラズマ及び衝撃波を駆動する事で推力を獲得するが、ミリ波ビームはレーザーと比較するとパルス幅が長く、且つ照射ビームの単位時間あたりの出力が小さいという特性を持つ。それ故に、ミリ波ビームロケット専用の機体設計が行われる。過去の開発機体では、円筒状の筒の先頭に放物面ミラーが設置されており、このミラーによってミリ波ビームが集光されてプラズマが生成される。このプラズマがビームエネルギーの吸収帯となって衝撃波が駆動され、ミリ秒程度のパルス幅に渡って高圧が維持されて推力を得る。続いて次のミリ波ビーム着弾に備え、プラズマはロケットノズル下流の出口から排気され、ロケットノズル内の空気が換気され、新鮮な空気に入れ替わる。この繰り返しにより、打ち上げに至ると想定されている。

然し乍ら実用化への課題のひとつに、ミリ波ビームを繰り返し照射した際の推力低下が挙げられる。ミリ波ビーム照射後に新鮮な空気へと入れ替わることが理想だが、実際にはプラズマが残留してしまう。次のビームが照射された際にはこの残留プラズマがきっかけとなって電離過程が繰り返し誘発され、高密度なプラズマへと成長する。これがロケットノズル先頭付近で発生すれば高推力となり得るが、実際にはノズル出口付近にもプラズマが残留し、かつビームはノズル出口から先頭に向かって投入されるため、新たな高密度プラズマの生成位置がノズル出口にシフトしていく。この過程が繰り返されると、いずれはプラズマ生成位置がノズル出口からはみ出し、推力生成が困難となる。

従って、プラズマを上手に排気し、プラズマがビーム射線上に溜まらないような機体設計が必要となる。

従来の機体設計では、ミリ波ビーム投入口とプラズマ排気口は同一（ロケットノズル下流の出口）であり、地上から照射されたビームのライン上に必ずプラズマが残留してしまう。そこで筆者は過去に、ロケット前方からミリ波ビームを照射し、後方からプラズマ排気を行う新しい機体設計を考案した[10]。前方から照射されたビームに向かってロケットが飛行し、まるで某 SF 映画に登場するトラクター（牽引）ビームのように、ビーム源にロケットが引き寄せられるため、提案した推進システムを“トラクターミリ波ビーム推進（Tractor Millimeter-wave Beam Propulsion: TMiP）”と呼んでいる。ビーム源に向かってロケットが加速されるに従って、プラズマがロケット後方へと高速で排気されるため、残留プラズマがビームの射線を遮らず、繰り返しビームを照射した際の推力低下が緩和されると期待されている。

TMiPの全体構想としては、宇宙の軌道上にビーム源を搭載した衛星を予め飛行させておき、そのビーム衛星に向かってロケットを引き寄せさせるようにして動作させる。また、地球からのロケット打ち上げだけでなく、火星など地球外惑星の軌道上にビーム衛星を予め投入しておけば、惑星大気を燃料として現地調達し、ロケットを衛星軌道に引き寄せさせるようにして浮かせ、惑星から離脱させることが可能となる(図4)。現在の宇宙技術では地球外惑星からのロケット打ち上げは困難で、行ったきりの片道切符と考えられているが、もし TMiP が実用化されれば、火星表面などから人類や物資をトラクタービームで回収し、地球へと送り返すような宇宙ミッションが現実のものとなり得る。

さて、このような TMiP に関して、筆者の研究グループでは数値シミュレーションを主として研究を進めてきたが[10-13]、トラクタービーム源方向へ推力が生成できるのかは実証されていない状況であった。そこで近年、TMiP に実際にミリ波ビームを照射し、推力生成の実証実験を行い、それらの結果が Nature 出版の Scientific

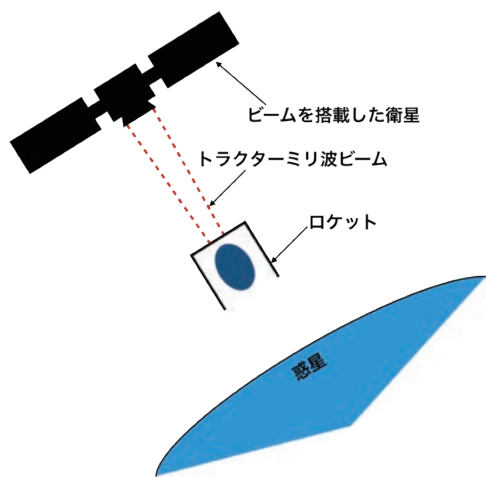


図4 トラクタービームによるロケット打ち上げの概念図。

Reports 誌に掲載されたため、本稿にて紹介する[14, 15]。

実験で用いたTMiPの機体デザインにおいては、プラズマおよび推力生成のために工夫を凝らした。円筒状のロケット本体の前方に、フッ素樹脂 PTFE を材料としたビーム集光レンズを取り付けた(図5)。PTFEはミリ波ビームに対して高い透過性を持っており、ビームエネルギーの損失を抑えることが可能となる。これによってロケット前方から照射されたトラクタービームを、ロケット本体の円筒ボディの内部で集光し、集光点付近の高電場強度によってプラズマを生成する。プラズマの熱が円筒ボディ内に充填された空気に輸送されて高温ガスとなり、この高温ガスがビーム集光レンズをビーム源方向に向かって押すことで、推力が生成されるといった設計とした。またロケットが加速されると、ビーム集光レンズ脇に配置された吸気口から新鮮な空気を取り込まれるとともに、プラズマがロケット下流に排気され、次のビーム照射に向けて準備が整うといった流れとなっている。

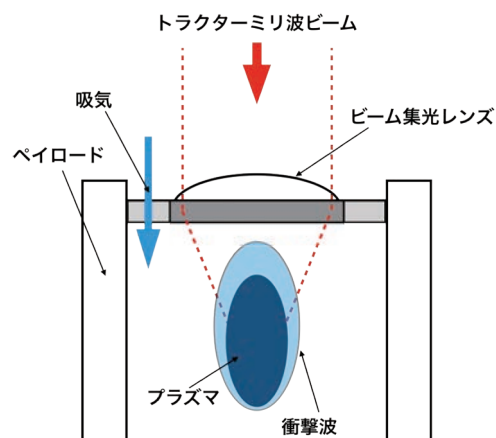


図5 提案したトラクターミリ波ビーム推進機。

この TMiP を筆者の研究グループで開発した振り子式推力測定装置に取り付け、筑波大学プラズマ研究センター所有の核融合用ジャイロトロンから 28 GHz、210 kW のミリ波ビームを発振し、TMiP 前方から照射して推力を測定した。この際、推力の基本的特性を捉えるために、単発のシングルパルス照射を行った。このビーム照射によってレンズ集光点付近からのプラズマ生成に成功し、プラズマフロント伝搬の様子をデジタルカメラにて捉える事が出来た(図6)。また加熱された高圧ガスがビーム集光レンズを押し、ビーム源に向かってロケットを加速する推力が生成される事が実験的に確かめられ、TMiPの実証に成功した。

このようにビーム照射実験によって、無燃料ロケット“トラクターミリ波ビーム推進機”の推力生成の実証に成功した。今回の実験では、シングルパルス照射による推力生成のみであったが、今後は繰り返しパルスビームを用い、トラクターミリ波ビームによる打ち上げを実証する予定である。果たして燃料を現地で調達しつつロケットを天空へと引っ張り上げられるのか、乞うご期待である。

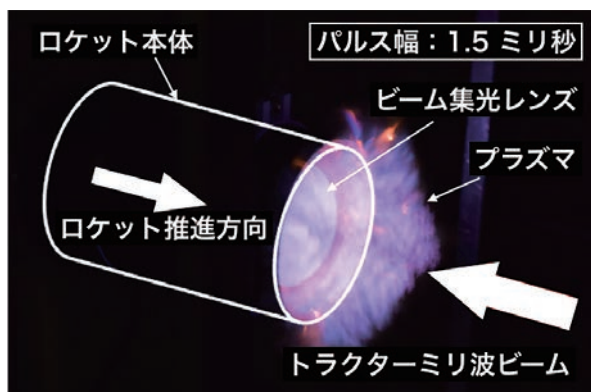


図6 トラクターミリ波ビーム推進機におけるビーム照射実験とプラズマの様子。

## 6. 衛星用エンジンにおける現地調達という発想

さて、ここまでは燃料を現地で調達するロケットの研究成果紹介であった。それに加えて筆者のグループでは、衛星用プラズマエンジンに対しても燃料の現地調達を試みている。これは、従来の低軌道よりももっと低い高度“地球超低軌道（高度としては100–300 km程度）”を飛ぶためのシステムであり、地球観測の高解像度化、通信の高速化などの恩恵にあずかれる。加えて最も優れた点は、当該高度には希薄ながらも大気が存在しており、衛星のオペレーション終了後はこの抗力を受けて自然と高度が下がり、空力加熱を受ける事でデブリにならずに燃え尽きるという点である。一方、この従来の低軌道よりも100倍から1,000倍の抗力を補償するだけの推力を生成しなければならず、オンボード燃料をプラズマ化して排気する従来型の電気推進システムでは、膨大な燃料が必要となってしまう。そこで、希薄大気をインテークによって取り込み、現地で燃料を調達してそれをプラズマ化し、排気する“大気吸い込み式電気推進”が提案されている。これに関する筆者の研究内容紹介は別の機会に譲るが、今後の進捗と研究発表を期待されたい。

## 7. まとめ

燃料を現地調達するという新しいタイプのロケット、衛星エンジンの概念を示し、筆者の最新の研究成果を紹介した。レーザー推進打ち上げにおいては日本記録を樹立し、世界的に見るとこれは三例目の打ち上げ成功である。今後は開発したトラッキングシステムを打ち上げ実験へと組み込み、日高高度の世界記録樹立を狙っている。また、トラクターミリ波ビーム推進という新しいロケットシステムを提案し、その実証に成功した。今後は繰り返しパルス照射により打ち上げ実験を行い、天空へとロケットを引っ張り上げるデモンストレーションを検討している。最後に、衛星用エンジンにおける燃料の現地調達技術を簡単に紹介した。これら新しい現地調達型の推進技術がどのような未来を切り開くのか、思いを馳せつつ筆を置く。

## 参考文献

- [1] A. Kantrowitz, *Astronautics and Aeronautics*, Vol. 10, pp. 74–76 (1971).
- [2] M. Takahashi, K. Ito, and Y. Nakamura, *Proceedings of the 39th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2025-156* (2025).
- [3] L. N. Myrabo, *AIAA Paper 2001-3798* (2001).
- [4] W. L. Bohn and W. O. Schall, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 664, pp. 79–91 (2002).
- [5] M. Takahashi and N. Ohnishi, *AIAA Journal*, Vol. 50, pp. 2600–2608 (2011).
- [6] M. Takahashi and N. Ohnishi, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 32, pp. 237–250 (2016).
- [7] M. Takahashi and N. Ohnishi, *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2015, 801371 (2015).
- [8] M. Takahashi, Y. Hayadate, K. Mori, and A. Hayakawa, *Scientific Reports*, Vol. 15, 15513 (2025).
- [9] M. Fukunari, A. Arnault, T. Yamaguchi, and K. Komurasaki, *Applied Optics*, Vol. 53, pp. 16–22 (2014).
- [10] M. Takahashi, “Microwave-driven in-tube accelerator,” *Journal of Propulsion and Power* (accepted).
- [11] M. Takahashi and N. Ohnishi, *Applied Physical Letters*, Vol. 105, 223504 (2015).
- [12] M. Takahashi and N. Ohnishi, *Journal of Applied Physics*, Vol. 120, 063303 (2016).
- [13] M. Takahashi, Y. Kageyama, and N. Ohnishi, *AIP Advances*, Vol. 7, 055206 (2017).
- [14] M. Takahashi, T. Yamada, R. Minami, T. Kariya, and K. Shimamura, *Scientific Reports*, Vol. 15, 17544 (2025).
- [15] M. Takahashi, T. Yamada, R. Minami, T. Kariya, and K. Shimamura, *Scientific Reports*, Vol. 15, 24274 (2025).

## 著者略歴

たかはし まさゆき  
高橋 聖幸

- 2011年3月 東北大学工学部 機械知能・航空工学科 卒業  
2012年9月 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 修士課程修了  
2013年4月 日本学術振興会特別研究員 DC1 (東北大学)  
2015年9月 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 博士課程修了  
2015年10月 日本学術振興会特別研究員 PD (東北大学)  
2016年4月 日本学術振興会特別研究員 PD (東京大学)  
2017年10月 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 助教に着任  
2019年4月 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 准教授に昇進  
2019年6月 フランストゥールーズ第三大学 客員研究員



## トンネル磁気抵抗センサと小型磁気共鳴画像装置「Spin-MRI」の開発

～大阪・関西万博「エンタングル・モーメント展」に向けた挑戦～

東北大学大学院工学研究科  
応用物理学専攻  
教授 大 兼 幹 彦

### 1. はじめに

最近、トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果を利用した、高感度な磁気センサ (TMRセンサ) の開発の進展が目覚ましい状況です。TMR効果は、強磁性層/絶縁層/強磁性層の薄膜三層構造を基本構造とする、強磁性トンネル接合 (Magnetic Tunnel Junction: MTJ) において発現する現象です。絶縁層が非常に薄い場合に、量子効果によって二つの強磁性層間にトンネル電流が流れるのですが、その電流の流れ方が、二つの強磁性層の磁化の相対角度によって変化します。室温におけるTMR効果は、私の恩師でもある、東北大学名誉教授の宮崎 照宣 博士らが発見した現象であり、その発見から30年が経過しました<sup>1,2)</sup>。この発見が契機となり、スピントロニクス、または、スピントロニクスと呼ばれる、電子の電荷とスピンの性質を活用した新たな電子デバイスを創出する研究分野が活発化しました。その後、2004年にトンネル絶縁層に酸化マグネシウム (MgO) を用いた、MgO-MTJ素子における巨大TMR効果が観測され<sup>3,4)</sup>、MTJ素子は、ハードディスクドライブ (HDD) の情報読み取り用の磁気ヘッド、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) へと応用展開が進みました。

宮崎 教授の退職後、研究室を引き継いだ安藤 康夫 教授は、HDDヘッド、MRAMの次のスピントロニクスデバイスとして、非常に微弱な磁場を検出することができる高感度な磁気センサ (TMRセンサ) の開発に着手しました。この研究は、HDDヘッドが磁気記録媒体からの漏洩磁場を検出する磁気センサの一種であることから、その感度を飛躍的に高めることができれば、生体磁場のような微弱磁場もいずれは検出できるという発想で開始されました。研究開始当時は、TMRセンサの性能は、比較的大きな生体磁場である心臓磁場を検出するにも、2桁も足りませんでした。そのような状況の中で、安藤 教授らは、前述の巨大TMR効果を示すMgO-MTJ素子を、高感度な磁気センサとして動作可能にするための、新しい素子構造を発明しました<sup>5)</sup>。さらに、心臓や脳などの低周波領域の生体磁場を計測するために重要な課題となる1/fノイズが、素子の集積化によって低減可能であることも見出しました<sup>6)</sup>。これらの研究成果がベースとなり、TMRセンサを用いた室温動作の心臓計、脳計、および、本稿で詳細に紹介する小型磁気共鳴画像 (MRI) 装置の開発がスタートしました。

### 2. TMRセンサとは

図1に、MTJ素子を磁気センサとして応用する場合の磁気抵抗曲線 (外部磁場に対する抵抗変化) を模式的に示します。TMRセンサとして用いるためには、外部磁場に対して線形に出力が変化することが望まれます。

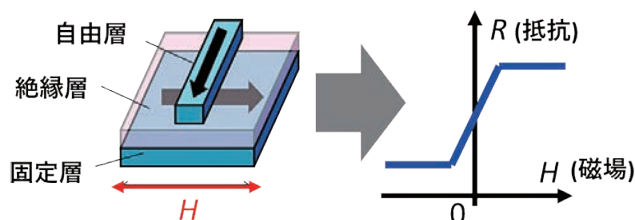


図1 TMRセンサの模式図とその磁気抵抗曲線

また、TMRセンサの感度は、図1中のリニア出力範囲における直線の傾きそのものです。TMRセンサ感度の単位は%/Tで、単位磁場あたりにどのぐらいTMR効果が変わるかを意味します。また、出力が飽和する磁場は、自由層と呼ばれる外部磁場に対して敏感に応答する磁性体の飽和磁場に相当します。従って、TMRセンサを高感度化するためには、TMR比を大きく、磁性体の飽和磁場を小さくする必要があります。MgO-MTJ素子の中でも、強磁性体にCoFeB合金を用いた、CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ素子は、高いTMR効果を容易な製造プロセスで得ることが可能です。しかしながら、CoFeBは飽和磁場が比較的大きいため、大きなセンサ感度を得ることが難しい材料系です。そこで、安藤教授らは、大きなTMR効果と小さな飽和磁場を両立するため、自由層をNiFe/Ru/CoFeBと3層で構成する構造を発案しました (図2)。この新型自由層構造では、CoFeBとMgO絶縁層を接合することで高いTMR比を実現できます。また、自由層のNiFeとCoFeB層は薄い非磁性金属であるRuを介した層間相互作用によって、磁氣的に反平行に結合させることが可能です。NiFeは、80:20の組成比において優れた軟磁気特性を示すパーマロイと呼ばれる合金です。この優れた軟磁気特性を有するNiFeとCoFeBが磁氣的に結合することで、自由層全体の飽和磁場を小さくできるという画期的な発明によって、高TMR比と小さな飽和磁場が両立可能になりました<sup>5)</sup>。

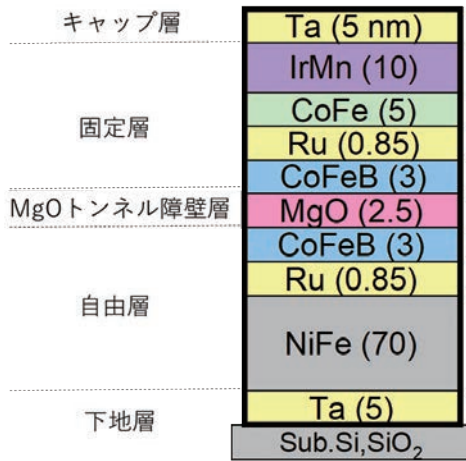


図2 高TMR効果と低飽和磁場を両立するMTJ構造

### 3. TMRセンサの高性能化

#### (a) TMRセンサの高感度化

NiFe/Ru/CoFeB自由層構造の発明後、高感度化を目指した磁性材料の研究開発が進められました。現在は、NiFeに代わり、良好な軟磁性を示すCo系アモルファス材料である、CoFeSiBを用いた素子が最も高い感度を示しています。図3に、CoFeSiB/Ru/CoFeB構造を自由層としたTMRセンサの磁気抵抗曲線と、センサ感度の年次推移を示します。CoFeSiB/Ru/CoFeB自由層によって、飛躍的にセンサ感度が増大し、現在では1,000%/mTの非常に高い

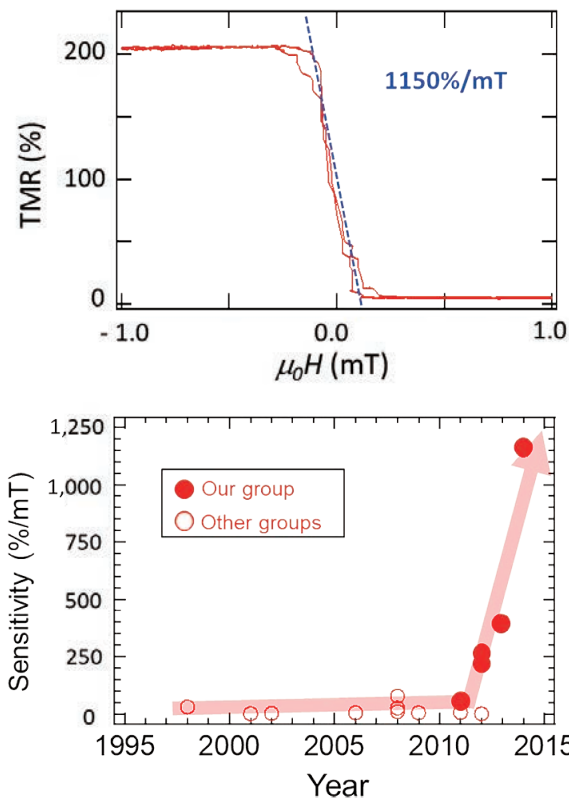


図3 CoFeSiBを用いたTMRセンサ素子の磁気抵抗曲線とセンサ感度の推移

センサ感度が達成されています<sup>7, 8)</sup>。最近では、さらなる高感度のための材料の開発も進んでいます。軟磁気特性と高TMRを両立する材料の一つとして、前述したCoFeSiBに微量なTaをドーピングしたアモルファス材料が候補として挙げられます。TaドーピングによってCoFeSiBの結晶化温度が増加することで、小さな飽和磁場を維持したまま高TMR化を達成できることが実証されています<sup>9)</sup>。それ以外にも、FeAlSi (センダスト) 合金、Co<sub>2</sub>FeAlSiホイスラー合金、磁気渦構造など、さらなる高TMR比と低飽和磁場化を実現可能な挑戦的な材料・素子開発が進められています<sup>10, 11, 12)</sup>。

また、磁束集束構造はセンサ感度を大幅に増大させるための有効な手段として知られています。図4に磁束集束構造の概念図を示します。MTJ素子の両脇に透磁率の高い磁性材料を配置することによって、外部磁場(測定対象の磁場)が集束され、MTJ素子に磁束を集中して印加することが可能になります。磁束収束構造の材料や形状にもよりますが、この構造を採用することによって約100倍のセンサ感度を得ることが可能になっています<sup>8)</sup>。

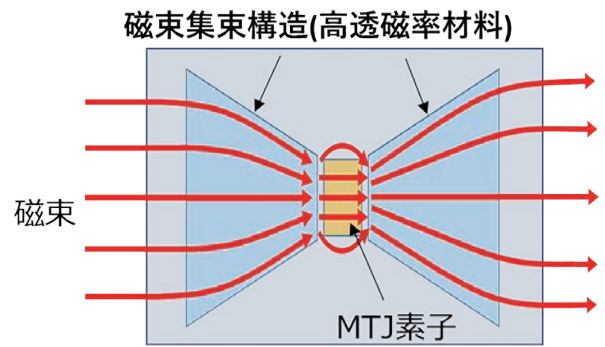


図4 磁束集束構造の模式図

#### (b) TMRセンサの低ノイズ化

TMRセンサ感度の向上と並行して、素子ノイズの低減に関する研究も並行して進めています。TMRセンサのノイズは、周波数に依存しないホワイトノイズと、周波数に逆比例する1/fノイズに大別されます。この1/fノイズを低減する手法の一つは、チョッピングやMEMSの技術を用いて、周波数帯域を高周波領域に変調することで1/fノイズを回避する方法です。先行研究において、変調技術によって1桁以上のノイズ低減が可能であることが示されています<sup>13)</sup>。しかし、チョッピングやMEMSを用いる方法は、強力なノイズ低減手法である一方、磁場変調するためのコイルや、MEMSの駆動部などが必要であり、小型化や低消費電力化には不向きです。

比較的簡便な1/fノイズ低減の手法として、MTJ素子を電気回路的に直並列に接続する集積化の方法があります。例えば、N個のMTJ素子を直列に接続し、その直列接続をM連並列に集積化することで、ノイズパワーを1/NMに低減可能であることが実証されています<sup>6)</sup>。図5に単体の

MTJ素子と、100×100個のMTJ素子を集積化した試料の典型的なノイズスペクトルを示します。単体素子と比較して、低周波領域の1/fノイズが劇的に低減されていることが分かります。ただし、期待されるほどのノイズ低減効果は得られておらず、この原因として素子加工の歩留まりや、個々のTMR素子の特性バラつきが考えられ、これらのさらなる改善が進められています。

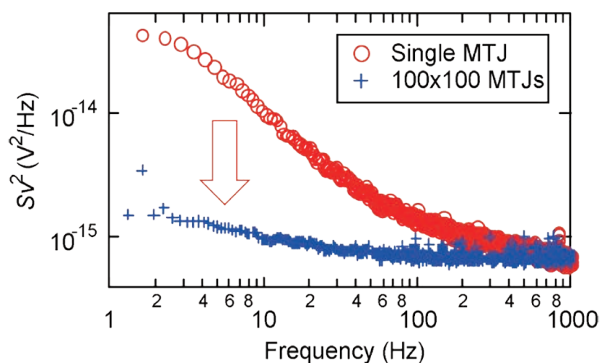


図5 MTJ単素子と100×100個集積したMTJ素子のノイズスペクトルの比較

#### (c) TMRセンサの最新性能

以上で述べた高感度化と、低ノイズ化技術との組み合わせにより、非常に高感度な磁気センサである超伝導量子干渉素子 (SQUID) に迫る性能が室温下で実現されつつあります。図6にTMR素子を74個直列配置し、その両脇に磁束集束構造を配置したTMRセンサの検出可能磁場の周波数依存性を示します。1/fノイズによって、低周波では検出できる磁場の大きさが大きく、高周波領域では検出可能な磁場が小さくなる傾向が見られます。例えば、脳磁場や心臓磁場などの生体磁場測定に重要な低周波領域に着目すると、約400 fT/Hz<sup>0.5</sup>の検出可能磁場が1 Hzにおいて実現されています。また、1 kHzになると、約20 fT/Hz<sup>0.5</sup>という極めて小さな検出可能磁場を示しています。この性能は、SQUIDに肉薄し、磁気抵抗効果を利用した磁気センサにおいて、現時点で圧倒的に世界最高です<sup>14)</sup>。この高感度TMRセンサを利用した、室温動作の脳磁計および心臓計の開発が、大型国家プロジェクトで進められています<sup>15, 16)</sup>。

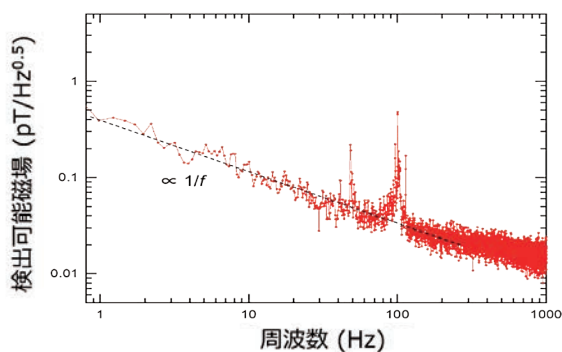


図6 TMRセンサの検出可能磁場の周波数依存性

#### 4. TMRセンサを利用した小型MRIの開発

磁気共鳴画像 (MRI) 装置は、医療現場で広く用いられる代表的な画像診断技術であり、体内に含まれる水分子のプロトンが示す核磁気共鳴 (NMR) 現象を利用しています。NMR信号の分布や緩和時間の差を解析することで、非侵襲的かつ三次元的な画像を取得できる点が大きな特徴です。従来のMRIでは、ピックアップコイルを用いてNMR信号を検出しますが、外部直流磁場を強くするほど信号強度が増し、高画質な画像が得られるため、高磁場化が技術的トレンドとなってきました<sup>17)</sup>。しかし、高磁場を発生させるには超伝導磁石や液体ヘリウム冷却などの大規模・高コストな設備が必要であり、MRI技術の普及には限界があります。このような背景から、近年では0.1T以下の低磁場で動作するMRIへの関心が高まっています<sup>18)</sup>。信号処理技術やAIによる画像再構成技術の進展により、低磁場でも一定の画質を確保できるようになってきました。

しかしながら、低磁場MRIには依然として課題があります。磁場強度が低下するとNMR周波数も低くなり、信号強度が減少してSN比が悪化します。従来のピックアップコイルではこの低周波領域の信号を十分に検出できず、画質の低下が避けられません。そこで、低周波領域でも高感度に動作するTMRセンサに着目し、小型MRI装置の開発を進めました。

図7に示す小型MRI装置「Spin-MRI」は、フリーランスの赤間 洋祐 氏によるシステム設計に基づいて構築されました。主コイルと直流励磁電源により10 mTの直流磁場を印加し、±50 ppmの磁場安定度を実現しています。試料空間 (約130 mm) における磁場均一性も500 ppm以内に抑え、画像取得に必要な条件を満たしています。位置情報取得のための勾配磁場は、±65 mmの範囲で線形に印加可能な勾配コイルを用いて設計しました。

NMR信号の検出回路は、ピックアップコイル、チューナ、二次トロイダルコイル、TMRセンサ、そして低雑音アンプで構成されており、株式会社エム・オー・シーとの共同開発によって実現されました。この回路により、1 nT程度のNMR信号をピックアップコイルで受信し、二次コイルで増幅することで、TMRセンサには8.5 nT相当の磁場が入力されます。結果として、SN比は約10,000に達し、MRI撮像に十分な性能を確保することができました。

図8 (左) に示すように、アルファベット「N」の形状の水容器を、構築したSpin-MRIシステムを用いて撮像する試験を行いました。容器は、一辺が10 cm、厚さが4 cmで、内容積は340 mL程度です。本MRIシステムの空間分解能は、勾配磁場強度、サンプリング周期、および、サンプリング時間から1.2 mm<sup>2</sup>と見積もられ、容器の形状を識別するには十分な空間分解能を有しています。図8 (右) に撮像したMRIを示します。ノイズに起因する輝線が横方向に観察されていますが、アルファベット「N」の形状が明瞭に再構成されていることが分かります。これが、TMRセンサを用いた世界で初めてのMRI撮像結果です。

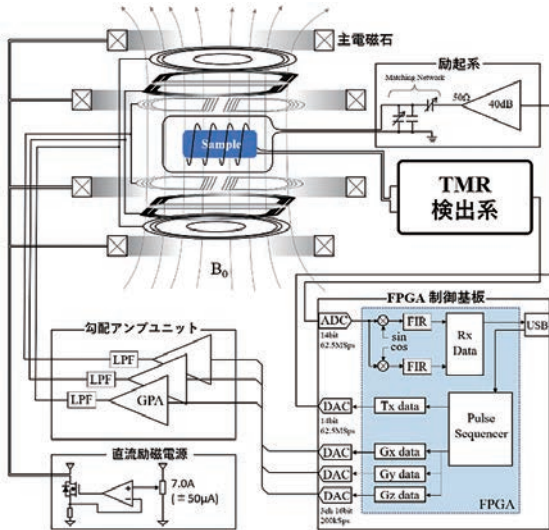


図7 開発した小型MRI「Spin-MRI」の構成

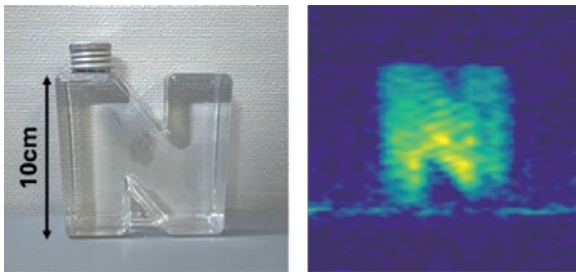


図8 Spin-MRIによる世界初のMRI撮像結果

5. Spin-MRIの大阪・関西万博展示

開発したSpin-MRIは、量子技術の一端を担う、未来の医療装置として、2025年8月14日から20日にかけて開催された大阪・関西万博「エンタングル・モーメント展」にて展示されました。期間中、6万人を超える来場者に対し、本装置の技術的現状と将来的な展望を紹介する貴重な機会を得ました。展示にあたっては、株式会社 白にアートディレクションおよびユーザーインターフェース開発をご担当いただきました。また、Spin-MRIの外装デザインは、慶

應義塾大学の大学院生である矢田 美涼 氏にご協力いただきました。図9に、展示された装置の外観・内部構造、および、ユーザーインターフェース画面を示します。本展示は、研究者のみでは成し得ない、アートと科学の融合による魅力的な空間演出を実現し、多くの来場者の関心を集めることができました。とりわけ、展示を見た子どもたちが科学技術の面白さや可能性に触れ、将来この分野を担う人材として育っていくきっかけとなれば、これ以上の喜びはありません。

6. おわりに

本稿では、TMRセンサの高感度化・低ノイズ化に向けた材料・構造・回路技術の進展と、それを応用した小型MRI装置「Spin-MRI」の開発、そして大阪・関西万博における展示の様子について紹介しました。Spin-MRIは、量子技術の社会実装に向けた第一歩であり、低磁場・室温動作という新たなMRIの可能性を示すものです。

本研究は、材料科学、スピントロニクス、回路設計など、分野横断的な協働によって実現された成果であり、科学技術と社会との接点を創出する試みでもあります。万博展示を通じて、来場者—とりわけ次世代を担う子どもたち—が科学技術の魅力に触れ、未来への好奇心を育むきっかけとなれば、研究者として何よりの喜びです。今後も、TMRセンサ技術のさらなる高度化と応用展開を通じて、医療分野のみならず、ヘルスケア・エネルギー・インフラなどの様々な分野において、量子技術の社会実装を加速させていきたいと考えています。

謝辞

本研究は、SIP第3期「量子スピンセンサの開発とユースケースの開発・実証」の支援を受けて実施されました。Spin-MRIの開発と展示において中心的な役割を果たしてくれた、当研究室の博士課程学生の高野星哉 氏に敬意と謝意を表します。

センサ素子開発・装置開発、および、展示にご協力いただいた、赤間洋祐 氏、矢田美涼 氏、スピンセンシングファクトリー 株式会社、株式会社 エム・オー・シー、株式会社 白 の皆様の個性豊かな専門性と創造性が結集することで、Spin-MRIは単なる研究成果を超え、社会との接点を持つ展示として昇華されました。私自身にとっても人生の宝となる、貴重な経験をさせていただいたプロジェクトでした。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) T. Miyazaki *et al.*, J. Magn. Magn. Mat. 139, L231 (1995)
- 2) J. S. Moodera *et al.*, Phys. Rev. Lett. 74, 3273 (1995)
- 3) S. Yuasa *et al.*, Nat. Mater., 3, 868 (2004)
- 4) S. S. P. Parkin *et al.*, Nat. Mater., 3, 862 (2004)
- 5) K. Fujiwara *et al.*, J. Appl. Phys. 111, 07C710 (2012)
- 6) K. Fujiwara *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 013001 (2011)

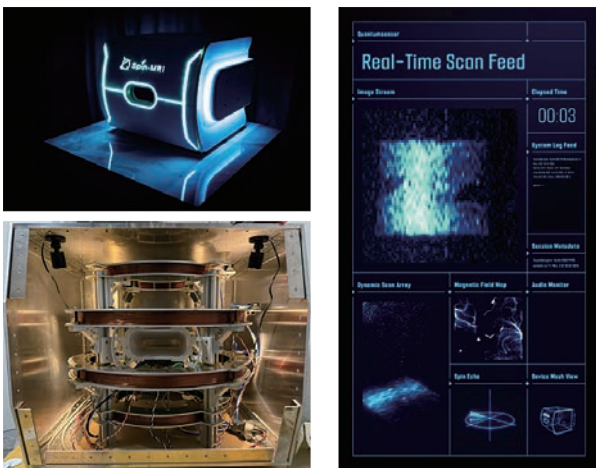


図9 大阪・関西万博にて展示したSpin-MRI

- 7) D. Kato *et al.*, Appl. Phys. Express 6, 103004 (2013)
- 8) M. Oogane *et al.*, Appl. Phys. Express 14, 123002 (2021)
- 9) T. Nakano *et al.*, Appl. Phys. Lett. 123, 072404 (2023)
- 10) S. Akamatsu *et al.*, APL Mater. 12, 021101 (2024)
- 11) T. Hojo *et al.*, J. Magn. Magn. Mat. 601, 172144 (2024)
- 12) M. Endo *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. 55 195001 (2022)
- 13) W. F. Egelhoff Jr. *et al.*, Sensors and Actuators A, 155, 217 (2009)
- 14) T. Nakano *et al.*, Appl. Phys. Lett. 126, 160503 (2025)
- 15) A. Kanno *et al.*, Scientific Reports 12, 6106 (2022)
- 16) K. Kurashima *et al.*, Sensors, 23, 646 (2023)
- 17) D. A. Feinberg *et al.*, Nat Methods 20, 2048–2057 (2023)
- 18) M. L. de Leeuw den Bouter *et al.*, Sci Rep. 12, 6362 (2022)

## 著者略歴

おおがね みきひこ  
大兼 幹彦

- 2003年 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻  
博士課程後期修了 博士（工学）
- 2004年 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 助教
- 2010年 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 准教授
- 2017年 カリフォルニア大学サンタバーバラ校  
客員研究員（兼務）
- 2022年 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 教授
- 2023年 Korea大学 客員教授（兼務）
- 現在に至る



## 植物に学ぶ持続可能なものづくり

東北大学大学院工学研究科  
バイオ工学専攻  
教授 高橋 征司

### 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の「1.5°C特別報告書（2018）」では、21世紀末における気候変動に起因した地球規模の壊滅的被害を回避するためには、産業革命以降の平均気温の上昇を1.5°Cまでに抑える必要があるという予測が示されました。そのためには、主要な温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の排出量低減を推進し、遅くとも2050年までにカーボンニュートラルを達成し、ネガティブエミッション（CO<sub>2</sub>排出量<CO<sub>2</sub>固定量）へと転じる必要があるとされています。この実現に向けた様々なアプローチがあるなかで、モノづくり、特に化成品製造においては、現在の化石燃料をベースとした生産系を、植物等の光合成生物により固定された炭素を利用するバイオベースの生産系へと移行させていくことが課題のひとつとなっており、産業における植物機能活用の重要性が増してきています。

植物を活用した物質生産は、植物バイオマスを変換・加工し得られる化合物を原料として微生物発酵や化学合成などで目的化合物を合成する方法と、植物内において目的化合物を直接合成させる方法に大別できます。前者に関しては、近年、プラスチック、繊維、ゴムなどの産業的に重要な化学ポリマーの原料となるモノマー化合物の多くが、植物バイオマスを原料とするバイオリファイナリーでも生産可能となってきました<sup>1)</sup>。それらのバイオ原料由来の化学合成ポリマーの生産量は年々増大しており、2024年時点で420万トン/年となっていますが、その量は石油化学ポリマーの1%程度であり、さらなる開発の余地があります。また、バイオリファイナリーにおいては、植物材料の輸送や加工等に必要エネルギーコストやそれに関わるCO<sub>2</sub>排出も考慮する必要があります。後者の植物内における物質生産系では、内在の代謝経路とそれに関わる酵素により、化学合成が困難な複雑な構造の化合物であっても低コストで合成可能であることが大きな利点となります。一方、多くの場合で、目的化合物の植物個体（栽培面積）あたりの年間生産量は低く、重量単価の低い化合物を産業ターゲットにしにくいことが課題となっています。しかし、数少ない例外として、機能性ポリマーの供給源として既に産業的に成立している植物生産系が存在します。それが、パラゴムノキ（*Hevea brasiliensis*）における天然ゴム生産系です（図1）。私はこのパラゴムノキの巧妙な天然ゴム合成機構に魅せられ、その生合成機構解明に取り組んで来ました。本

稿では、天然ゴム合成酵素の発見と、その機構を応用した新規ポリマー合成酵素開発について概説します。

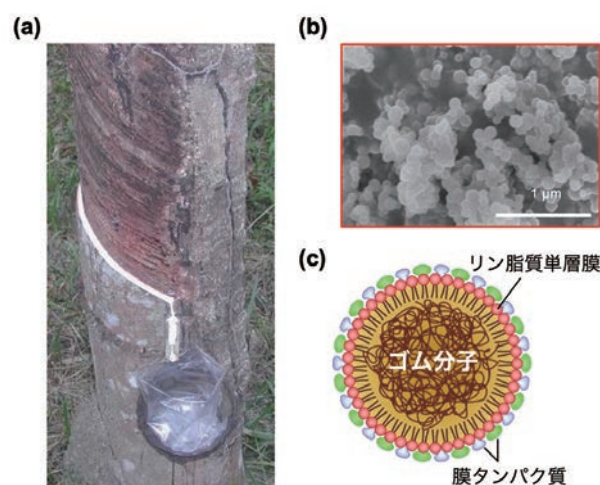


図1 パラゴムノキとゴム粒子。(a) パラゴムノキからのラテックス回収、(b) ゴム粒子の電子顕微鏡写真、(c) ゴム粒子模式図

### 2. 天然ゴムの構造と産業的有用性

【基本構造】天然ゴムの主成分は、*cis*型二重結合を有するイソプレン単位（炭素数5、C<sub>5</sub>）が1,4-重合した*cis*-1,4-ポリイソプレンです（図2）。また、この*cis*-1,4-ポリイソプレン構造の $\omega$ 末端（図2）には、*trans*二重結合を有するイソプレン単位（*trans*イソプレン単位）が数個結合しており、 $\alpha$ 末端は一級アルコールまたは脂肪酸エステルとなっています。天然ゴムは2,500種以上の植物で合成されますが、その分子量は植物種によって異なり（10<sup>4</sup>程度から10<sup>6</sup>を超えるものも）、その違いが何に起因するかは未解明です。*cis*-1,4-ポリイソプレンは、ナフサの熱分解により生じるイソプレン（図2）を化学重合することでも合成可能ですが、その物性は天然ゴムの物性と同一にはなりません。天然ゴムのイソプレン単位の二重結合は、後述する酵素反応の厳密性から*cis*型に揃っているのに対し、イソプレンの化学重合においては、ポリマー中に数%の*trans*イソプレン単位が生じてしまいます。このわずかな構造の乱れが物性に大きな影響を与えているとされています。さらに、パラゴムノキの天然ゴムをタンパク質分解酵素処理とエステル交換処理することで、平均分子量とグリーン強度（未加硫のゴムの引張り強度）が低下することから、天然ゴムは、複

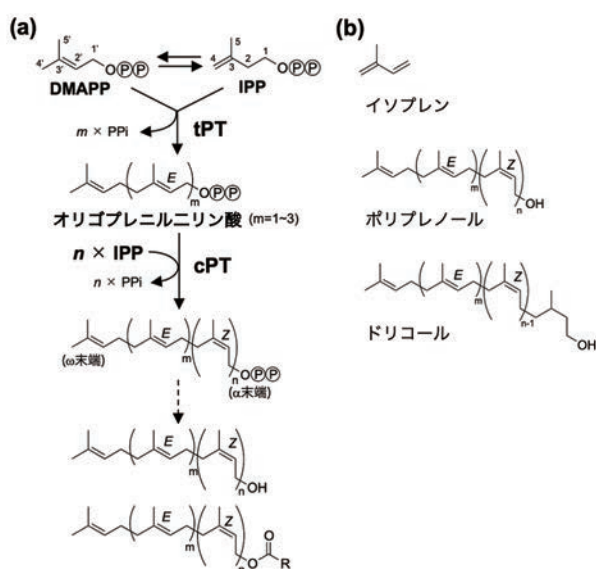


図2 天然ゴムおよび関連化合物の構造と生合成 (a)天然ゴム生合成経路の概要、(b)天然ゴム関連化合物の構造

数のポリイソプレン分子の末端がタンパク質やリン脂質、脂肪酸などを介して結合した複合体となっており、その構造も物性発現に重要であると考えられています<sup>2)</sup>。

**【産業的有用性】** ゴム工業に利用される天然ゴムの大部分は、熱帯～亜熱帯地域のプランテーションで大規模栽培されるパラゴムノキのラテックスから回収されています。天然ゴムのユニークな物性はタイヤ製造に必要であり、年間約1,400万トン生産される天然ゴムの約75%がタイヤ製造に利用されています。自動車用タイヤのゴム部材のうち約半分が天然ゴムですが、より大きな摩擦力がかかる航空機や大型トラックのタイヤでは、天然ゴムの割合を大きくする必要があります。多様な物性のポリマーが開発されている現代においても、化学合成ゴムのみでは必要な性能を発揮するタイヤを作ることができないため、天然ゴムは産業的に極めて重要な天然ポリマーのひとつです。近年、世界的な自動車普及率の増大を背景に天然ゴムの需要は増加の一途を辿っています。これに対応するため、パラゴムノキの農園開発も進められていますが、それによる森林破壊も問題となってきています<sup>3)</sup>。農法の改善や交配育種などによる収量増大にも限界があるため、天然ゴム生合成機構の解明と、それに基づく分子育種による天然ゴム高生産株の作製や、代替生物における生産系構築への期待が高まっています。

**【植物内における天然ゴムの蓄積】** パラゴムノキ等の多くの天然ゴム産生植物では、天然ゴムは管状に特殊に分化した乳管細胞内で合成・蓄積されます。乳管は自己毒性を示すような多様な代謝産物（その多くは生物防御に寄与）が隔離的に蓄積される重要な細胞であり、その細胞質成分（細胞内成分）を一般にラテックスと呼称します。また、パラゴムノキの乳管細胞内では、天然ゴム分子はゴム粒子と呼ばれる直径0.1～10 μmの細胞小器官内に蓄積されています

(図1)。ゴム粒子は疎水性ゴム分子がリン脂質一重層と膜タンパク質で覆われた構造であり、これにより細胞内の水的環境で疎水性ゴム分子が安定に分散した状態で存在できます。一般に、細胞内における疎水性炭化水素の高蓄積は膜構造などに影響を与え、細胞機能に障害をひきおこしますが、パラゴムノキでは、乳管細胞とゴム粒子による二重の隔離機構により、ゴム分子を大量に生産・蓄積することが可能になっています。パラゴムノキからの天然ゴム回収においては、幹の表面を薄く切り付けることで、天然ゴムを30～50% (w/v)含むラテックスを数百mL程度回収できます。同じ木からのラテックス回収は数日後に再び行うことが可能であり、それを十年以上継続可能です。回収されたラテックス中の天然ゴムは、遠心分離や酸添加によるゴム粒子凝集により簡便に分離可能です。一般的な植物からの有用物質生産・回収系では植物体を伐採、粉碎後に溶媒等で抽出・精製する必要があるのに対し、パラゴムノキの天然ゴム生産系は、プロセスコストが低く持続性が極めて高く、植物工場の理想型とも考えることができます。

### 3. 天然ゴム合成酵素の発見と試験管内ゴム合成

地球上の生物が合成する化合物は100万種以上と推定されていますが、そのうち、構造が解明されたものが約7万種であり、全生合成経路が解明されたものはわずか数百種です。膨大な未利用資源は新たな医薬や機能性材料になりうる可能性の宝庫です。これらの多様な化合物の多くは、生物界に普遍的なものではなく、植物や微生物の限られた種でのみ合成され、多様な環境ストレスに対する適応において利用される「特化代謝産物」(または二次代謝産物)です。それに対し、ある生物界において普遍的に見出され、共通の生物機能を示す化合物は「一次代謝産物」と呼ばれます。特化代謝の経路は、各生物種の進化の過程で一次代謝の経路から派生し獲得されたと考えられています。天然ゴムは特化代謝産物ですが、その基本構造から、対応する一次代謝産物が推定できます。それが、ドリコールやポリプレノールです(図2)。それらは天然ゴムよりも重合度の小さいポリイソプレン骨格を有する脂質であり、動物、植物、酵母などではドリコール(重合度15～20)、そして、大腸菌等の細菌ではポリプレノール(重合度11、12)が細胞機能維持に必須です。

ドリコールやポリプレノールの炭素骨格は、プレニルトランスフェラーゼ(PT)と総称される酵素により合成されます。合成ポリイソレンのモノマーはイソプレンであるのに対し、PTはC<sub>5</sub>のイソペンテニル二リン酸(IPP)をモノマー化合物として、その連続的な1,4-縮合反応を触媒します(図2)。PTの重要な特性として、IPPが縮合する毎にイソプレン単位中に形成される二重結合の立体配置を厳密に制御するということが挙げられます。PTのうち、縮合反応でtransイソプレン単位を形成する酵素はtrans-PT(tPT)、そして、cisイソプレン単位を形成する酵素はcis-PT(cPT)と総称されます。また、PTはIPPの重合回数も決定してお

り、自然界には多様な生成物重合度特性のPTが存在します。1987年にラットから最初のtPTをコードする遺伝子が同定されて以降、長らくcPT遺伝子は謎のままでしたが、1998年に東北大学多元物質科学研究所の古山種俊教授らのグループにより初めてcPTの遺伝子が細菌より同定されました<sup>4)</sup>。その後、酵素タンパク質の結晶構造が解明<sup>5)</sup>された結果、tPTとcPTは構造的に全く異なるタンパク質ファミリーに属することが明らかになりました(図3)。その後、私は古山教授のグループに合流し、ヒトや植物(非ゴム産生)のドリコール骨格合成に寄与するcPTのクローニングと酵素機能解析を進め、そこからcPTの反応機構制御機構を明らかにしてきました<sup>6-8)</sup>。

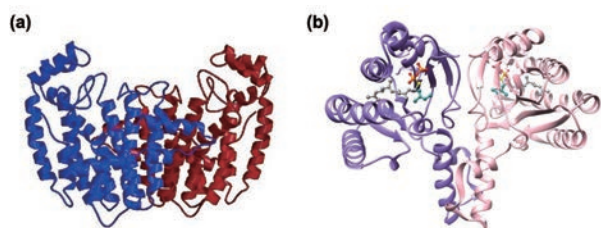


図3 tPTとcPTの構造比較 (a)ヒナドリ由来tPT、(b)大腸菌由来cPT

天然ゴムとドリコールの炭素骨格が類似であることから(図2)、天然ゴムの基本骨格は、ゴム粒子膜上に存在し特殊な生成物重合度特性を示すようなcPTの一種で合成されることが想定されました。そこで、タイのグループとの共同研究により、パラゴムノキの新鮮ラテックスからcPT遺伝子の探索を行い、*HRT1*、*HRT2*という2種類のcPT相同遺伝子が初めて単離されました<sup>9)</sup>。通常、酵素タンパク質をコードする遺伝子が得られた場合は、それを増殖が早い大腸菌内で異種発現させたのち、そこから組換え型タンパク質を回収し機能解析を行います。しかし、大腸菌で発現させた*HRT1*、*HRT2*は単独で触媒活性を示しませんでした。そこで、より植物に近いモデル生物である酵母で異種発現させたところ、組換え酵素は触媒活性を示したものの、その生成物は天然ゴムのような分子量100万を超える(単純計算でイソプレン単位14,700に相当)ポリマーではなく、ドリコールと同程度のものでした<sup>10)</sup>。これらの結果は、*HRT1*、*HRT2*が天然ゴムではなくドリコール合成のための酵素である可能性を示唆するものでしたが、*HRT1*はラテックス(乳管細胞)でのみ特異的に発現する<sup>11)</sup>ことから、私達は、これらの酵素が天然ゴム合成に寄与する酵素であるものの、何らかの追加因子が必要であるという作業仮説を立て、その未知因子の探索に取り組みました。

天然ゴム合成酵素はゴム粒子の膜上に存在しますが、その様な膜結合タンパク質のなかには、ポリペプチド鎖として合成され適切に折りたたまれる際に、膜脂質環境を必要とするものが知られています。そこで私達は、ゴム粒子が共存する環境下で*HRT1*を発現させる系の開発を行いました(図4)。ゴム粒子を大腸菌や酵母細胞内に導入することは不可能であるため、細胞内ではなく試験管内でタンパ

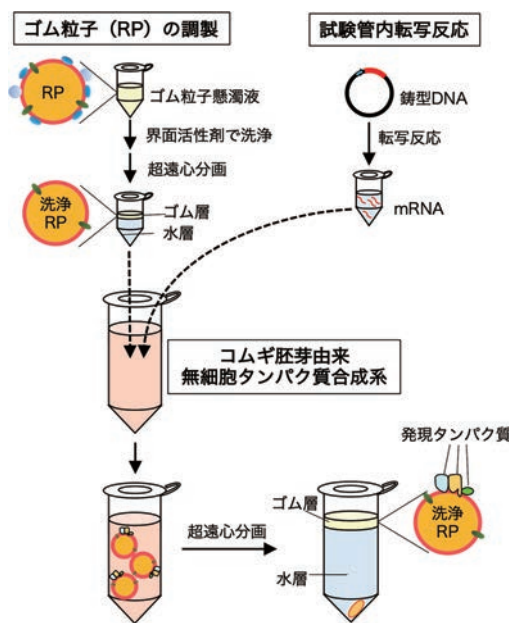


図4 無細胞タンパク質合成系によるゴム粒子へのタンパク質の導入

ク質を発現させることが可能である無細胞タンパク質発現系を利用することとし、その系内にゴム粒子を添加することで、発現タンパク質を折りたたみと共役させながらゴム粒子膜に導入する手法を開発しました。その結果、*HRT1*が分子量100万を超えるポリイソプレンを合成することが示され(図5)、これが組換え型酵素を用いた試験管内天然ゴム合成の初の報告例となりました<sup>12)</sup>。一方、無細胞タンパク質合成系で*HRT1*を人工脂質二重層膜であるナノディスクに導入した場合はドリコールサイズの生成物しか合成できない<sup>13)</sup>ことから、天然ゴム合成の鍵はゴム粒子であることが示されました。

天然ゴム合成に関連する他のタンパク質の探索のため、私達は新鮮ラテックスから天然ゴム合成活性を示すゴム粒子を単離し、そこに含まれるタンパク質をショットガンプロテオミクス解析で網羅的に同定しました。そこから見出されたタンパク質の機能解析において、タンパク質間相互作用ネットワーク解析を行った結果、*HRT1*はゴム粒子膜上で*HRBP*や*REF*と呼ばれるタンパク質と結合した酵素複

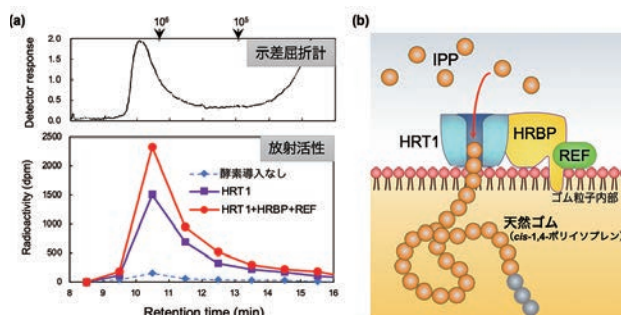


図5 組換え型酵素による試験管内ゴム合成 (a)ゴム粒子に導入した組換え型酵素により合成された生成物のゲル浸透クロマトグラフィ解析の結果。上:示差屈折計(ゴム粒子内在のゴム分子);下:放射性(組換え酵素で合成されたゴム分子)、(b)ゴム粒子上の天然ゴム合成マシナリの模式図

合体「天然ゴム生合成マシナリ」として存在していることも明らかになりました<sup>12)</sup>。この複合体形成により、HRT1がゴム粒子膜上に安定に保持され、その結果として、酵素反応で伸長し酵素タンパク質を飛び出す疎水性ポリイソプレン鎖がゴム粒子膜内部の疎水性空間内に導入されるといふ伸長モデルを提案できました<sup>14)</sup> (図5)。

#### 4. 新奇天然ゴム合成酵素の創出

天然ゴムのcis-1,4-ポリイソプレン鎖の末端には数個のtransイソプレン単位が結合していますが、それは、この酵素がIPPを重合する際に、tPTにより合成される全trans型のオリゴプレニル二リン酸を開始基質として必要とすることに起因します (図2)。つまり、酵素の反応機構的には、cisイソプレン単位100%の天然ゴムはほとんど合成されないこととなります。植物界には多様な生成物鎖長特性のcPTが存在しますが、トマトのcPTであるNDPS1は、IPPの異性体である炭素数5のジメチルアリル二リン酸 (DMAPP) を開始基質としてIPPを一単位縮合させ、ネリル二リン酸 (NPP, C<sub>10</sub>) を合成します。私達はこの結晶構造を解明し、それをもとに開始基質認識と重合度特性を決定する重要なアミノ酸残基を明らかにしました<sup>15)</sup>。それらの重要残基を置換したNDPS1変異体酵素をデザインし作製することで、DMAPPを開始基質としてC<sub>70</sub> (重合度14) のall-cis-ポリプレニル二リン酸を合成可能な酵素を創出することに成功しました。さらに、この改変型NDPS1をパラゴムノキのゴム粒子に導入すると、DMAPPを開始基質として分子量100万を超えるポリイソプレン、すなわち、全cis型の天然ゴムが合成できることを明らかにしました (図6)。また、この酵素はHRT1よりも高分子量のポリイソプレンを合成することも分かりました。さらに驚いたことに、この改変型NDPS1は、化学合成で末端に種々の官能基を付加した開始基質アナログを受け入れ、ポリイソプレンを合成できることも明らかになりました。つまり、この酵素を用いることでω末端に官能基を有するゴム分子が合成可能であり、それにより超分子構造の新規ゴムなどの開発が可能となります。

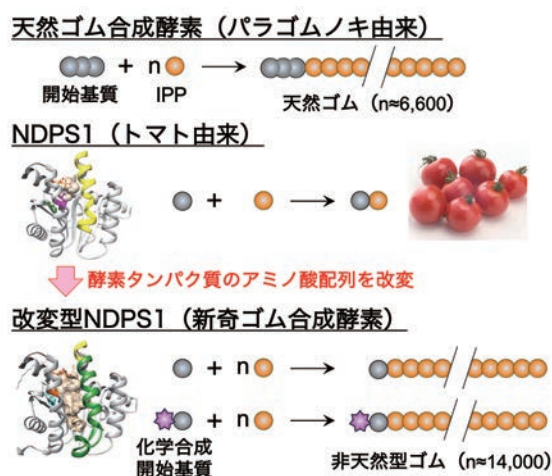


図6 改変型NDPS1による非天然型ゴム合成

#### 5. おわりに

パラゴムノキの乳管における天然ゴム生産系は、(1)生産性が既に工業レベルである；(2)目的化合物回収時に植物を伐採する必要が無く、低コスト、簡便で持続性が高い；(3)乳管細胞、ゴム粒子内に化合物を隔離蓄積させることで、宿主植物の生育への悪影響を回避できる、等の優れた特徴を有します。天然ゴム生合成酵素が解明されたため、その発現レベルを増強させることで、天然ゴム高生産型パラゴムノキの分子育種が可能となりました。また、機能改変型酵素を用いることで、新奇物性を示す非天然型構造のポリイソプレンゴムの開発にも期待できます。さらに、パラゴムノキを天然ゴム以外の有用化合物を高生産するための「植物工場」として活用することも想定されます。パラゴムノキにおける天然ゴム生産性の高さは、IPP供給経路の強さを示していますが、ゲノム編集などの手法で天然ゴム合成酵素群を破壊したパラゴムノキを作出することで、乳管内でIPPを高蓄積する変異体植物が作出可能です。IPPを共通前駆体とするイソプレノイドは自然界に5万種以上存在していますが、そこには医薬品、生物活性物質、工業原料などとして活用される産業的有用性が高い化合物が多く含まれます。そこで、それらの化合物を合成する酵素を上記の変異体植物の乳管細胞内にて特異的に発現させることで、乳管内のIPPを利用し有用イソプレノイドを高生産・蓄積させることが可能となります。それらの目的化合物は、樹皮の切り付けで簡便にラテックスとして回収可能です。今後、このようなアプローチにより、より現実的な植物生産系を開発することで、カーボンニュートラルの達成やサーキュラー／バイオエコノミー社会の早期実現に貢献していきたいと考えています。

#### 参考文献

- 1) Rosenboom, J.-G. *et al.*: *Nat Rev Mater*, **7**, 117 (2022).
- 2) 田中 and Hwee, E. A.: *高分子*, **46**, 816 (1997).
- 3) Wang, Y. *et al.*: *Nature*, **623**, 340 (2023).
- 4) Shimizu, N. *et al.*: *J Biol Chem*, **273**, 19476 (1998).
- 5) Fujihashi, M. *et al.*: *Proc Natl Acad Sci USA*, **98**, 4337 (2001).
- 6) Endo, S. *et al.*: *Biochim Biophys Acta*, **1625**, 291 (2003).
- 7) Kera, K. *et al.*: *FEBS J*, **279**, 3813 (2012).
- 8) Takahashi, S. and Koyama, T.: *Chem Rec*, **6**, 194 (2006).
- 9) Asawatreratanakul, K. *et al.*: *Eur J Biochem*, **270**, 4671 (2003).
- 10) Takahashi, S. *et al.*: *Plant Biotechnol*, **29**, 411 (2012).
- 11) Aoki, Y. *et al.*: *Plant Sci*, **225**, 1 (2014).
- 12) Yamashita, S. *et al.*: *eLife*, **5**, e19022 (2016).
- 13) Kuroiwa, F. *et al.*: *Sci Rep*, **12**, 3734 (2022).
- 14) Yamashita, S. and Takahashi, S.: *Annu Rev Biochem*, **89**, 821 (2020).
- 15) Kutsukawa, R. *et al.*: *FEBS J*, **289**, 4602 (2022).

### 著者略歴

たかはし せいじ  
高橋 征司

- 1995年3月 東北大学工学部生物化学工学科卒業
- 1997年3月 東北大学大学院工学研究科生物工学専攻博士課程前期2年の課程修了
- 2001年3月 筑波大学大学院生物科学研究科生物物理化学専攻博士課程修了
- 2001年4月 理化学研究所 協力研究員
- 2001年11月 東北大学・多元物質科学研究所 助手
- 2005年9月 東北大学大学院工学研究科バイオ工学専攻助手
- 2007年4月 東北大学大学院工学研究科バイオ工学専攻助教
- 2009年4月 東北大学大学院工学研究科バイオ工学専攻准教授
- 2025年6月 東北大学大学院工学研究科バイオ工学専攻教授  
現在に至る



## エネルギー・環境・医療を支える光技術 ～安全・安心な社会を照らす発光体の研究～

東北大学大学院工学研究科  
材料システム工学専攻  
教授 徐 超 男

### 1. はじめに

私たちの生活に「光」は欠かせません。一方で、自ら光を放つ物質、すなわち発光体はごく限られています。古代の人々は太陽や炎の明かりに頼っていましたが、現代社会では電気エネルギーを光に変換する発光体の発展により、生活のあらゆる場面が照らされています。人類の文明史は「あかり」の進化とともに歩んできたと言っても過言ではありません。

2008年にノーベル化学賞を受賞した緑色蛍光タンパク質 (GFP) は、生体反応によって光を放つ物質として生命科学に革命をもたらしました。また、2014年の青色発光ダイオード (LED) の開発 (ノーベル物理学賞) は、省エネで長寿命な光源として私たちの生活を一変させました。

LEDが電気エネルギーを利用して光るのに対し、私たちの研究室では電気を使わず、わずかな力を加えるだけで発光する全く新しい材料を開発しています。これが「応力発光体」と名付けています (図1)。

これまでに開発した新規応力発光体は、圧縮・引張・摩擦だけでなく、超音波や微小振動によっても発光します [6,9]。これは日本発・世界初の材料であり、現在、国内外で基礎研究から応用研究まで幅広く展開されています [10-21]。応力発光を利用した構造物の安全管理、インフラ診断、モノづくり、エネルギー・環境、AI・IoT・生命分野への応用など、多様な分野で研究が進んでいます (図2)。本稿では、私たちの研究室で進めているスマート発光体の基礎と応用の研究例を紹介します。

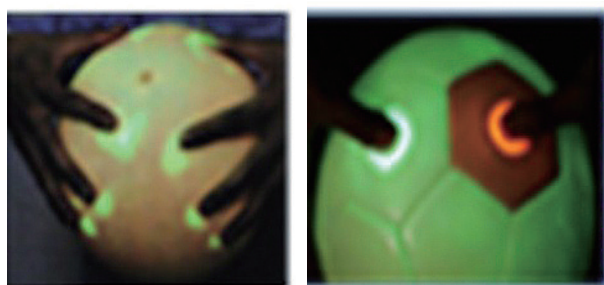


図1 わずかな力を加えることで光る「応力発光体」の微粒子を含む塗料で塗布したバルーン (左) とバレーボール (右) を指で軽く触れた際にボール自ら光を発する [1-9]

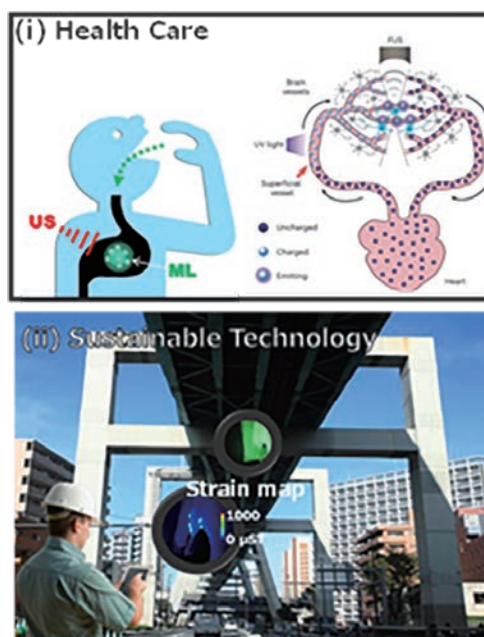


図2 応力発光によるヘルスケアと構造物診断：(i)超音波による発光を用いた光治療と診断の展開 [16,17]、(ii)橋の振動による損傷の早期検出と補修効果の評価例 [11]

### 2. マルチピエゾ型スマート応力発光体の開発

応力発光体の発光特性は、母体結晶と発光中心の組み合わせによって決まります。私たちはすでに多様な発光波長 (発光色) をもつ応力発光体を開発していますが、さらなる高機能化を目指した新材料の研究を進めています。

現在は特に、生体材料への応用を見据えた革新的な応力発光体の開発に力を入れています。可視光だけでなく、肉眼では見えない不可視領域 (赤外・近赤外) で発光する材料の開発も進めており、医療やセンシング分野で大きな可能性を秘めています。

新しい材料を創り出し、その機能を理解するには、結晶中の電子の振る舞いを明らかにする必要があります。そのため私たちはスーパーコンピュータを用いて電子構造計算を行い、材料の機能予測や発光機構の解明を進めています。この手法は、自然界に存在しない結晶構造の探索も可能にし、未知の巨大機能材料の創出につながっています。

圧電体の  $\text{LiNbO}_3:\text{Pr}$  について、非化学量論比を精密制御することにより応力発光と圧電性を同時に発現するマルチピエゾ体、 $\text{Li}$ リッチ  $\text{LiNbO}_3:\text{Pr-R3c}$  を見出し、図3に示す

ようにこの微粒子を含む塗料を塗布した試験片を百万分の一のひずみに対しても繰り返し発光する、閾値のない超高感度応力発光を示すことを見出した。この従来の閾値ある応力発光特性と異なる特性はピコニュートン (pN) のような微弱センシングにも期待できる。

さらに、NaをLiに置換することで、 $\text{LiNbO}_3\text{-}R3c$ ,  $\text{NaNbO}_3\text{-}R3c$ ,  $\text{NaNbO}_3\text{-}P2_1ma$ ,  $\text{NaNbO}_3\text{-}Pbma$ , 4つの相が $\text{Li}_{1-x}\text{Na}_x\text{NbO}_3\text{:Pr}^{3+}$ (LNNO:Pr)を合成しました。特に $\text{Li}_{0.12}\text{Na}_{0.88}\text{NbO}_3$ ではR3c相と斜方晶 $P2_1ma$ 相が共存する多形相境界 (MPB) が形成され、この領域で顕著な応力発光の増強を確認しました。MPB付近でR3c相を精密に制御することで、30倍高輝度の応力発光と高圧電特性を同時に達成しました。MPB近傍のLNNO材料において欠陥を精密制御した結果、応力記録 (Mechanical Recording, MR) 機能を新たに発現させることに成功しました。MR機能とは、過去に生じた応力履歴を光として読み出せる特性を指します。

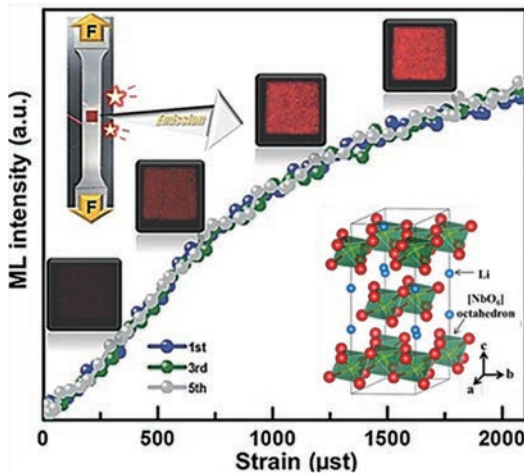


図3  $\text{LiNbO}_3\text{:Pr}$  の応力発光特性

従来の応力発光体は、力が加わった瞬間のみ光を放つものですが、MR機能では、過去に発生した応力情報の記録・

読み出しが可能です。対象物の表面に新材料を塗布し、フラッシュ光を照射して残光を計測することで、過去の応力分布を可視化できます (図4左)。有限要素法解析による応力分布シミュレーション (図4右) とともに良好に一致しました。さらに、記録された応力情報は5か月以上保持されることが確認されています。また、3Dプリンターで作製した微細な分解能検証実験により、MR機能の空間分解能は10 μm以上有することを明らかにしました。これは従来材料に比べて極めて高い保持・解像性能を示しています。

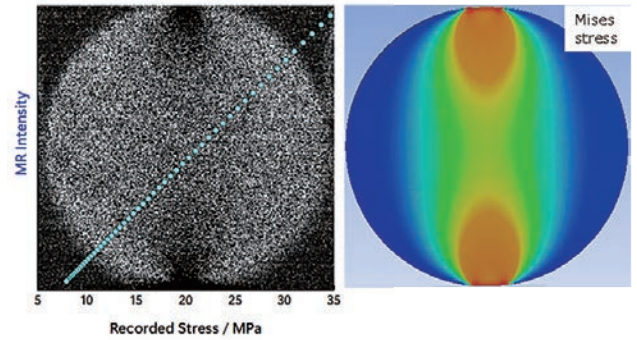


図4 応力分布記録画像 (左)、FEM解析で得た応力分布 (右)、両者一致している。

### 3. 応力発光体を活用した新しい計測・診断技術

橋梁・トンネル・道路などの大型インフラは、適切な維持管理によって安全性を保っています。従来の点検は専門家による目視や打音検査が中心でしたが、私たちは応力発光体を活用した迅速で簡便な診断技術を開発しています。

図5に示すように、本技術では、発光強度が損傷の度合いを定量的に示します。すなわち、発光が強いほど損傷が大きいことを意味し、直感的かつ視覚的に損傷を判断できます。さらに最近では、風力発電ブレード内部の損傷予測と可視化にも応力発光技術を応用しており、外観からは見えない劣化を非破壊で検出する新技術の開発を進めています。

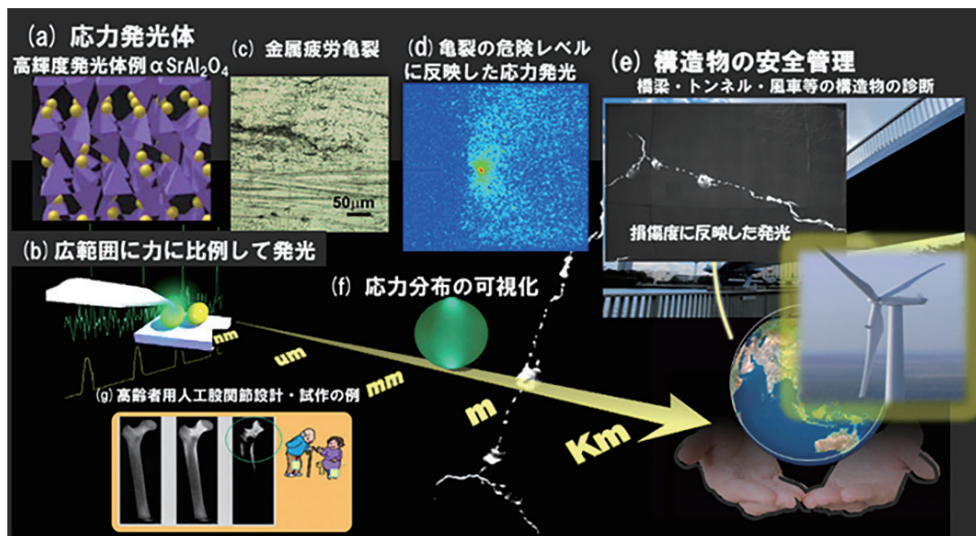


図5 応力発光による構造物診断の展開事例

応力発光現象は機械的刺激を受けたその時点でのみ観測でき、応力発光体は構造物の健全性診断、余寿命の予測などへ応用にはin-situ計測が必要です。一方、過去に受けた荷重の情報を読み出す機能を持つ材料の例としては、応力発光材料と感光材料を組み合わせることによって、感光痕跡の有無や感光強度から印加された応力を知ることができる応力記録材料が提案されています。しかし、その複雑な積層構造や暗反応、長期的な記録性能などに問題があるとされます。また、ある種の蛍光体は熱を加えることで過去の荷重履歴を知ることができるが、熱に耐えられる材料しか利用できないため、応用が限られています。この課題を解決するため、過去の荷重履歴を記録し読み出すことができる応力（ストレス、負荷）記録機能を持つスマート応力記録材料による計測診断技術を同時に開発しています。

応力発光は、わずかな弾性変形から、塑性変形、そして破壊に至るまでのさまざまな力学現象・過程を可視化できるという特徴があります。図5(a)に示すように、結晶に微小な変形により発光原子から強い発光を示し、ナノ領域での力を可視化することができます(b)。このような応力発光材料を構造物の表面に塗布することで外側から直接見ることのできない構造物内部の欠陥とその危険レベルを、応力発光体の発光強度分布として可視し、金属疲労亀裂(c,d)、橋梁の亀裂検出(e)、複合構造体や人工骨の応力分布可視化(f,g)などの構造物診断を可能に、構造物に潜んでいる欠陥の存在と、その起源レベル（応力集中、損傷度合）を同時に検出可能なだけでなく、微細な亀裂の発生とその進展を、応力発光を通してその場で可視化することができます。マイクロマシン(nm, ナノメートル)から大規模な構造物(km, キロメートル)に至るまで、さまざまなスケールでの応用が期待される。応力分布の可視化、破損予測、亀裂診断といったスケラブルセンサ機能により、橋梁やトンネルの大型構造物やパイプライン、圧力タンク、航空機等の安全管理、マイクロマシン部品非破壊検査など、近年では、生体深部に光を届けることで、医療分野への応用の可能性も探求されています(図6)。

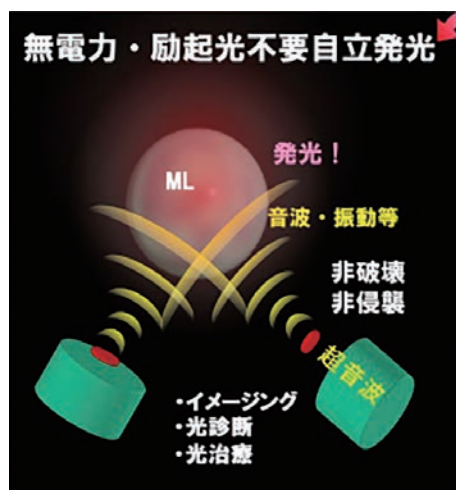


図6 深紫外～近赤外の応力発光体の進化

#### 4. まとめ

本稿では、私たちのスマート発光体の研究開発例を紹介しました。電源や複雑な装置を必要とせず、モニタリング可能な本技術は、構造診断の効率化・人手不足解消・コスト削減に大きく貢献することが期待されます。今後、AI・ITO分野と融合連携することで、スマート発光体のユビキタス新光源は持続可能で安全・安心な社会の実現に大きく貢献できると考えています。最後に、長年にわたり本研究を支えてくださった共同研究者の皆様、産学官連携の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。本稿では紹介しきれなかった研究も多くありますが、例えば放射光活用した構造解明[22, 23]、計算科学を活用した機能予測[24,25]、力・光・電磁気の多元変換機能開拓など[26-30]、我々の研究にご関心をお持ちの方は、ぜひご連絡いただければ幸いです。

#### 【参考文献】

- [1] C.N. Xu, et.al: Appl. Phys. Lett., 74, pp. 1236 (1999).
- [2] C.N. Xu, et.al: Appl. Phys. Lett. 74, pp. 2414 (1999).
- [3] C.N. Xu, et.al: Appl. Phys. Lett., 76, pp. 179 (2000).
- [4] C.N. Xu, et.al: J. Am. Ceram. Soc., 82, pp. 2342 (1999).
- [5] C.N. Xu, et.al: Appl. Phys. Lett., 84, pp.3040 (2004).
- [6] 徐 超男ら: 応力発光による構造体診断技術, NTS出版 (2012).
- [7] C.N. Xu: Encyclopedia of Smart Materials, John Wiley & Sons, 1, pp.190-201 (2002).
- [8] Y. Fujio, C.N. Xu, et.al: Int. J. Hydrogen Energy 41(2), 1333 (2016).
- [9] J.C. Zhang, C.N. Xu, et.al: Prog. Mater. Sci. 103, 678 (2019).
- [10] K. Hyodo, C.N. Xu, et.al.: IFMBE Proc. 31, pp.54 (2010).
- [11] L. Liu, C.N. Xu, et.al: Adv Mater Technol 4(1), (2019).
- [12] C. Li, C.N. Xu, et.al: J. Vis. 11(4), 329 (2008).
- [13] X. Wang, C.N. Xu, et.al: Adv. Mater. 17(10), 1254 (2005).
- [14] D. Tu, C.N. Xu, et.al: Adv. Mater. 32(25), 1908083 (2020).
- [15] J. Hao, and C.N. Xu: MRS Bull. 43(12), 965 (2018).
- [16] S. Jiang, G. Hong, et.al., Nat. Protoc. 18(12), 3787(2023).
- [17] T. Zhan, C.N. Xu, et.al: Ultrason. Sonochem. 18(1), 436 (2011).
- [18] N. Terasaki, and C.N. Xu: IEEE Sens. J. 13(10), 3999 (2013).
- [19] D. Tu, C.N. Xu, et.al: Adv. Mater. 29(22), 1606914 (2017).
- [20] Hara, C.N. Xu, et.al: J. Ceram. Soc. Jpn. 128(8), 518 (2020).
- [21] T. Uchiyama, C. N. Xu, et.al: Appl. Phys. Lett., 124(17), 171105 (2024).

- [22] K. Ninomiya, C. N. Xu, M. Nishibori: ACS Appl. Electron. Mater., 7, 8509 (2025).
- [23] T. Uchiyama, C. N. Xu, et.al: J. Ceram. Soc. Jpn. 133(7), 358 (2025).
- [24] S. Kawana, C. N. Xu, et.al: Adv. Theory Simul., 7, 2400099 (2024).
- [25] A. Sakatani, T. Uchiyama, C. N. Xu, et.al: J. Ceram. Soc. Jpn., 133(7), 349 (2025).
- [26] K. Su, T. Uchiyama, C. N. Xu, et.al: Adv. Optical Mater., e02451 (2025).
- [27] T. Uchiyama, C. N. Xu, APL Mater., 12, 090901 (2024).
- [28] X. G. Zheng, C. N. Xu, et.al: Nature Communications., 15, 9989 (2024). プレス発表(2024/11/28): パーコレーション理論を新規量子磁性体で初実証 新しい“静的短距離磁気秩序”を発見 一次世代磁気デバイスへの活用に期待— <https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2024/11/press20241128-01-magnetic.html>
- [29] X. G. Zheng, C. N. Xu, et.al: Adv.Sci., 12, 2410977 (2025). プレス発表, (2024/11/20): 世界初、安定な1価酸素イオンを含む結晶を発見 環境・エネルギー分野に期待されるp軌道強磁性を初観測. <https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2024/11/press20241120-01-ionic.html>
- [30] X. G. Zheng, C. N. Xu, et.al: Adv. Sci., 12, e09474 (2025). プレス発表(2025/8/7): 応力発光半導体でスピンドーブ強磁性を発見 エネルギー関連材料の機能革新に大きく寄与, <https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2025/08/press20250807-04-Spin.html>

## 【著者略歴】

- じょ ちょうなん  
徐 超男 (XU Chao-Nan)
- 1991年3月 九州大学総合理工学研究科 博士後期課程修了
- 1991年3月 九州大学 工学博士
- 1991年4月 福岡大学工学部化学工学科 助手
- 1995年4月 科学技術振興事業団 科学技術特別研究員
- 1998年4月 通商産業省工業技術院九州工業技術研究所 主任研究官
- 2001年4月 (行革改称) 産業技術総合研究所基礎素材研究部門 主任研究員
- 2006年4月 産業技術総合研究所企画本部 企画主幹
- 2007年4月 産業技術総合研究所生産技術研究センター 研究チーム長
- 2015年4月 産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域 総括研究主幹
- 2023年4月 東北大学大学院工学研究科材料システム工学専攻 教授
- 現在に至る
- この間、主な兼任：
- 2000年 中国西安交通大学 客員教授
- 2001年 米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 客員研究員
- 2001年 科学技術振興機構 さきがけ21研究員
- 2011年 九州大学カーボンニュートラルエネルギー国際研究所 WPI招聘教授 (～2017年)
- 2005年 九州大学大学院総合理工学学府 連携講座教授 (～2023年)
- 2023年 九州大学総合理工学研究院 教授 (クロスアポイントメント) (～2024年)



## 東日本大震災からの復興に関する一連の都市研究

東北大学災害科学国際研究所  
東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻  
教授 村尾 修

### 1. はじめに

1995年に発生した阪神・淡路大震災以降、都市の防災と復興の研究に従事してきました。2000年以降、筑波大学にて研究に勤しんできましたが、2011年3月に東日本大震災が発生し、その翌年に東北地方の学術的拠点である東北大学に災害科学国際研究所が設立され、2013年に教授として迎えられました。

東北大学に着任して間もなく、2015年3月に第3回国連防災世界会議が仙台で開催されることが決定し、会議の成功に向けて、研究所をあげてさまざまな企画や準備に奔走しました。この国際会議の最大の成果は、その後の世界的な防災政策の指針となる「仙台防災枠組 (Sendai Framework for Disaster Risk Reduction)」が採択されたことにあります。これは、同年に採択されたSDGs (持続可能な開発目標) やパリ協定と並び、21世紀の国際的な防災・持続可能性のアジェンダを支える重要な道標です。とくに、都市防災における事前投資の必要性や「より良い復興 (Build Back Better)」の理念を示した点は、東日本大震災後の復興を検証し、次の災害への備えを考えるうえで極めて意義深いものでした。

こうした理由から、これまで東北大学で私が行ってきた研究活動の多くは東日本大震災と切り離せないものです。そのため、本稿ではこうした東日本大震災に関する研究を抜粋して、紹介させていただきます。

### 2. 東日本大震災に関する都市研究の展開

これまでに私が関わってきた研究成果および活動をざっと整理してみたところ表1のようになりました。査読論文は19編 (日14/英5)、書籍7冊 (英3/日4)、報告書2冊、建築設計競技受賞1件、そして都市復興空間に関するデータベースの構築1件となります。まずは、こうした活動の大まかな経緯を説明します。

東日本大震災関連の研究活動としては2011年以前から手掛けていました。三陸海岸地域では1896年と1933年に三陸沖津波を体験しています。こうした津波からの復興(1)と20世紀の居住地の変遷(2)について研究をしていたのですが、そんな矢先に2011年東北地方太平洋沖地震が発生しました。

震災の直後は、人々の避難行動に関する研究 (3,6) をするとともに、名取市における復興計画策定委員会のメン

バーとして将来の被災地の復興ビジョンについて議論する機会を得るとともに、将来のまちづくりに関する設計競技(4)に応募するなどしていました。また、地域安全学会では学術の世界から被災地の復興に少しでも協力できないかという趣旨で、東日本大震災連続ワークショップ (5) なる研究会を立案し、2012年以降13の被災地で自治体の協力を得ながら実施してきました。

表1 東日本大震災に関する主な研究活動の展開

No.	年	研究活動(とくに【】の記載のないものは査読論文(著者等詳細省略))
1	2011	三陸海岸地域およびヒロにおける津波復興・防災計画の比較, 日本建築学会技術報告集
2	2012	岩手県沿岸部津波常襲地域における住宅立地の変遷—明治および昭和の三陸大津波被災地を対象として—, 日本建築学会計画系論文集
3	2012	東日本大震災事前と事後における千葉県御宿町住民の津波避難経路の比較分析, 日本地震工学会論文集
4	2012	【建築設計競技】記憶の街と夢の結晶プロジェクト—被災者と子どもたちのための7つの物語—, こども環境学会 子どもが元気に育つまちづくり 東日本大震災復興プラン国際提案競技 銀賞(優秀賞)
5	2012	東日本大震災連続ワークショップ開始 (~2025まで各被災地にて毎年継続中), 地域安全学会
6	2013	Foreigners' Evacuation Behavior in the Great East Japan Earthquake: A Case of Iwaki City in Fukushima Prefecture, Journal of Disaster Research
7	2014	【報告書】Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters, HFA IRIDeS Review Report Focusing on 2011 Great East Japan Earthquake <sup>1)</sup>
8	2014	【報告書】兵庫行動枠組み2005-2015—災害に強い国・地域の構築— HFA IRIDeS Review Report 2011年東日本大震災から見てきたこと, 東北大学災害科学国際研究所
9	2014	【書籍】Regional Comparison of Temporary Housing Construction Processes after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, "Tohoku Recovery: Challenges, Potentials and Future, Springer (分著)
10	2014	【書籍】Recovery after Sanriku Tsunamis in 1896 and 1933, and Transition of Housing Location before the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Tohoku Recovery: Challenges, Potentials and Future, Springer (分著)
11	2014	Comparative Study of the Post-tsunami Recovery Plans after the 2011 Great East Japan Earthquake, Journal of Disaster Research
12	2015	【書籍】施設を用いた津波避難対策の経緯と東日本大震災被災地における津波避難施設の利用状況, 東日本大震災合同調査報告, 建築編5 建築基礎構造/津波の特性と被害, 日本建築学会 (分著)
13	2016	【書籍】都市計画, 東日本大震災合同調査報告, 総集編, 東日本大震災合同調査報告書編集委員会 (分著)
14	2016	Business Recovery Conditions of Private Enterprises after the 2011 Great East Japan Earthquake and Issues on Business Continuity Measures for Large-scale Disaster Management: -A Case Study of Small and Medium-sized Enterprises-, IEICE TRANSACTIONS ON Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences
15	2017	東日本大震災体験後における住民の津波避難に関する意識—軽微な津波を体験した千葉県御宿町における震災前後のアンケート調査から—, 地域安全学会論文集
16	2018	Effect of Tsunami Drill Experience on Evacuation Behavior after the Onset of the Great East Japan Earthquake, International Journal of Disaster Risk Reduction
17	2018	東日本大震災の経験に基づく生活支障の定量的評価, 地域安全学会論文集
18	2019	【書籍】東日本大震災合同調査報告, 建築編11 都市計画, 東日本大震災合同調査報告書編集委員会 (監修・分著)

19	2020	津波災害における基礎自治体の代替庁舎での業務継続に関する考察—東日本大震災の南三陸町職員の初動対応検証調査より—, 地域安全学会論文集
20	2020	【書籍】Exchanging Disaster Science Expertise Between Countries—A Japanese Personal Perspective, "The Demography of Disasters, Springer (分著)
21	2021	Recovery Curves for Housing Reconstruction from the 2011 Great East Japan Earthquake and Comparison with Other Post-disaster Recovery Processes, International Journal of Disaster Risk Reduction
22	2021	地方自治体庁舎の立地を考慮した相対的な津波浸水リスクの評価と2011年東日本大震災後の代替拠点空間配置の事例分析, 地域安全学会論文集
23	2021	東日本大震災復興事業データを用いた陸前高田市市中心街地の事前高台移転による有益性に関する研究, 地域安全学会論文集
24	2021	東日本大震災復興再生期における関内地区の居住環境と災害公営住宅の住まい方, 日本都市計画論文集
25	2021	【書籍】都市の災害リスク評価, 東日本大震災からのスタート 災害を考える51のアプローチ, 東北大学災害科学国際研究所編 (分著)
26	2021	【都市復興事例データベース】2011年東日本大震災に関する災害対応の都市・建築空間データベース構築
27	2022	東日本大震災復興市街地における計画人口に対する居住人口の比較分析, 地域安全学会論文集
28	2023	東日本大震災被災地の復興事業データに基づく事前高台移転の有益性に関する比較研究, 地域安全学会論文集
29	2023	居住者アンケートに基づく東日本大震災前後の名取市関内地区の居住環境評価, 日本建築学会計画系論文集
30	2024	東日本大震災後の災害危険区域における土地利用の変遷と活用状況: 宮城県被災地を対象として, 地域安全学会論文集

災害科学国際研究所に着任し、最初に手掛けたのは2015年国連防災世界会議に向けて企画したHFA Review Report<sup>1)</sup>(7,8)の作成でした。所内の様々な研究者の視点から東日本大震災を振り返り、阪神・淡路大震災以降で何が変わり、何が課題として残されているのかを整理し、2014年に報告書としてまとめました(図1)。この頃には原発の影響を受けた福島被災地以外の復興計画はほぼ出揃い、また各地で仮設住宅での生活が始まっており、こうした状況を書籍(9,10,12)や論文(14)として発表しています。



図1 2011年東日本大震災被災沿岸地域の復興計画<sup>1)</sup>(7,8)

2010年代の半ばに入ると被災地の新しい街の姿も現れはじめ、都市復興計画の全体像も見えてくるようになりました。こうした中、震災関連8学会で構成された東日本大震災合同調査報告書編集委員会のメンバーとして都市復興を総括し、監修者として都市計画分野の報告書(18)を出版しました。そして、各地で復興が進むとともに重要な課題も移り変わっていきます。そうした課題が研究室内指導学生の卒論・修論テーマとして選ばれ、その時々研究成果に繋がっていきました(22-24,27-30)。

震災発生から10年もすると各地で新しい街がほぼ完成していきました。このタイミングで構築したのが、都市復興事例のデータベース<sup>2)</sup>(26)です。私の専門は都市と建築ですので、被災地における街や建物やモニュメントといった空間に関するデータを災害対応の視点でとりまとめ、公開しました。

以上、これまでの活動を概観しましたが、こうした活動の中から3つほど選定し、以下に詳述したいと思います。

### 3. 復興曲線を用いた東日本大震災復興過程の定量化

都市の復興と言っても、都市は様々な要素を含む巨大空間です。そのため都市の復興を考えるうえで、どのような視点を持っているかが重要になります。災害からの復興という都市の事象を演劇に例えるならば、そこには様々な演者がいます。その中で最も重要な主体は被災者です。そのため、私は被災者にとっての住宅再建が最も重要なものだと考え、復興を表すための物理的指標として住宅の建設データを用いることにしました。

本研究は、東日本大震災後の復興過程を定量化することを目的として、各地で建設された仮設住宅および災害公営住宅の建設データを用いた復興曲線作成方法を開発し、岩手県、宮城県、および福島県の復興過程を定量化したものです(図2)。この復興曲線により、被災後どのくらい経過した時期に住宅が多く供給されたか、またそれらの建設の集中の程度が分かります。

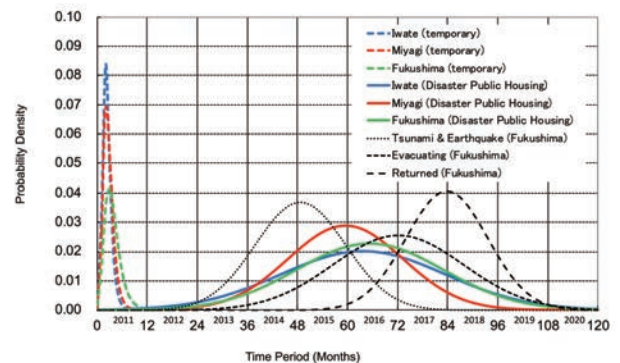


図2 仮設住宅と災害公営住宅建設データに基づく岩手県、宮城県、福島県の復興曲線

分析の結果、仮設住宅の建設は岩手県、宮城県、福島県の順に着工そして竣工し、また災害公営住宅の建設のピークは、宮城県、岩手県、福島県の順に59.5ヶ月(約6年)、63.7ヶ月(約6年4ヶ月)、65.3ヶ月(約6年5ヶ月)であり、宮城県と福島県の間におよそ半年の違いがあることがわかりました。また、福島県内では、「津波・地震被災者」用、「原発避難者」用、「帰還者」用の災害公営住宅が建設されましたが、それらのピークはそれぞれ48.7ヶ月(約4年1ヶ月)、72.1ヶ月(約6年)、83.8ヶ月(約7年)であり、最も早い「津波・地震被災者」用と「帰還者」用の建設ピークにはおよそ3年の違いが見られました。

こうして作成された復興曲線を用いて、1999年台湾集集地震の震源に最も近かった集集という街と、2004年インド洋津波により被災したスリランカ、インドネシア、タイとの復興過程の比較も行いました(図3)。その結果、建設のピークに関して集集とスリランカの間にはおよそ13.9ヶ月(約1年2ヶ月)の違い、集集と宮城県の間には37.4ヶ月(約3年1ヶ月)の違いがあることが明らかになりました。またスリランカでは恒久住宅の建設が集中的に行われたのに対し、東日本大震災後の住宅供給は数年かけて徐々に進んできたことが定量的に示されました。

本研究で提案された復興曲線を用いることにより、社会的背景の異なる地域で起きた災害後の復興過程の時間的な側面を定量的に比較することが可能となります。災害後の復興の評価は本研究で取り上げた建設の早さだけではなく、住宅の質や生活の改善具合などいくつもの評価軸がありますが、こうした客観的な指標を用いて復興過程の比較研究を進めることにより、災害後に施された都市復興施策の効果についてのより適切な議論が今後可能となり、将来的な復興施策提案に資する可能性もあります。

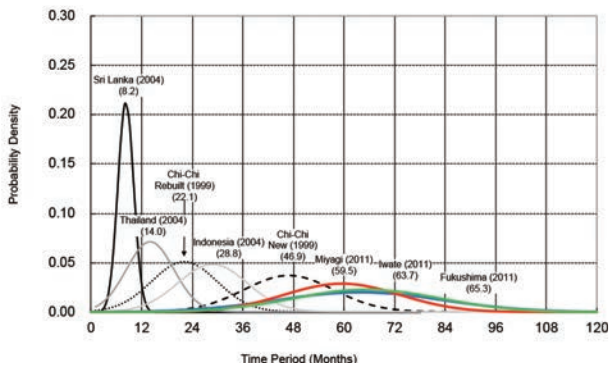


図3 1999年台湾集集地震、2004年インド洋津波、2011年東日本大震災による各被災地の復興曲線を用いた復興過程の比較

#### 4. 事前高台移転の被害軽減効果

東日本大震災による被災地では将来の津波に備えて居住地を高台あるいは内陸部に移転する政策がとられました。そうした動きとも連動し、東日本大震災被災地外の地域においても事前の高台移転が検討されています。しかし、実際に移転を実現させた自治体は数えるほどしかありません。その理由のひとつが費用対効果の不明確さです。そこで、私の研究室では、事前移転に取り組んでいる自治体の事例と課題を整理し、東日本大震災で甚大な被害を受けた陸前高田市等を対象とした事前高台移転のシナリオ(図4)を作成し、それに基づく被害軽減効果を分析しました<sup>4)</sup>。

その結果、津波避難対策特別強化地域における事前移転事例から、①公共施設を先行的に移転させ、高台での住環境整備後に住宅を移転させる傾向にあること、②年々事前移転を検討・実施している自治体の数は増えていること、③事前移転に対する住民の合意形成、移転事業費用の捻出、地勢的な用地確保の難しさから、被災前の集団移転の実現

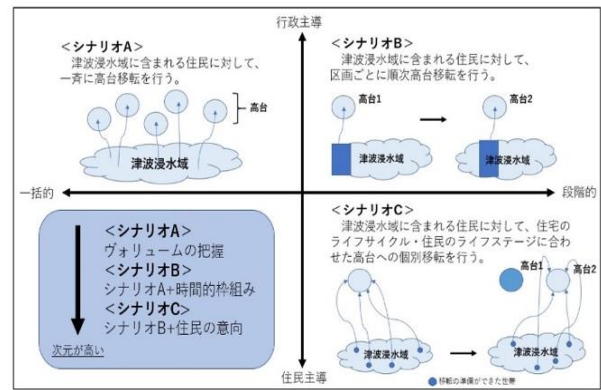


図4 事前高台移転のためのシナリオ区分

は困難なこと、が明らかになりました。

そして、陸前高田市の復興事業を考慮した上で作成シナリオにより事前移転をした場合、東日本大震災による総費用と比べ、2.5割から4割程度の支出で抑えられ、長期間かけて段階的に事前移転をした場合、約1/4程度の自治体年度予算で事前高台移転が可能であることを示しました(図5)。

さらに、立地や人口特性の異なる女川町、東松島市、石巻市に対しても分析を行い<sup>5)</sup>、いずれも事前移転が進めば進むほど、被害軽減効果が大きいことが分かりました。そして、住宅建設費負担パターン別の事前高台移転負担額表を提示しました(表2)。

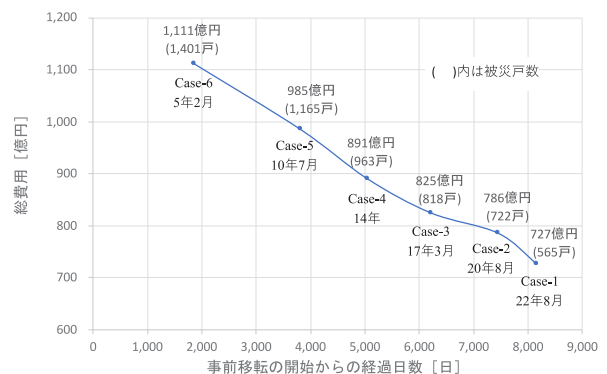


図5 移転開始から津波発生までの日数と総費用の変化

表2 住宅建設費負担パターン別事前高台移転負担額表

自治体 移転完了 期間	住宅建設費 負担パターン	令和4年度 歳入金額 (億円)	行政年度 負担額 (億円)	世帯負担額 (万円)
陸前高田市 22年8ヶ月	①行政全額負担	170.06	23.69 (13.9%)	0
	②行政半額負担	170.06	18.67 (11.0%)	1,025.76
	③住民全額負担	170.06	13.65 (8.0%)	2,051.53
女川町 16年	①行政全額負担	105.24	24.75 (23.5%)	0
	②行政半額負担	105.24	21.67 (20.6%)	925.59
	③住民全額負担	105.24	18.58 (17.7%)	1,851.18
東松島市 10年	①行政全額負担	230.47	33 (14.3%)	0
	②行政半額負担	230.47	27.61 (12.0%)	925.59
	③住民全額負担	230.47	22.22 (9.6%)	1,851.18
石巻市 20年9ヶ月	①行政全額負担	839.97	26.24 (3.1%)	0
	②行政半額負担	839.97	19.44 (2.3%)	925.59
	③住民全額負担	839.97	12.65 (1.5%)	1,851.18

現在、各地で地震や津波の被害想定が行われています。そのため膨大なデータが用いられていますが、想定どおりの災害になることは稀です。しかし、仮定の中でも当該地域における巨視的な数値やそこで見えてくる災害のイメージが具体化されることによって、地域防災計画策定等に活かされていくという意義があります。本研究においても、用いたデータの数や種類は限られており、その想定もいくつかの仮定のうえで算出された結果です。しかし、ここで事前移転の過程が時間的・経済的に定量化されることにより大まかでもそのイメージを掴むことができ、行政の立場からも住民の立場からも行動を起こすための一材料となることが期待されます。

### 5. 災害対応の都市・建築空間データベース

東日本大震災から10年以上が経過すると、東北沿岸部の被災地は新たな街に生まれ変わろうとしていました。甚大な痛みを伴う災害の記憶と未来に向けた希望を盛り込みつつ、各地の復興が進められている中で、私の研究室（国際防災戦略研究室）では、こうした都市・建築空間に関する被災と復興の過程を記録し、広く社会に活用してもらいたいという思いを込めて、災害対応の都市・建築空間データ

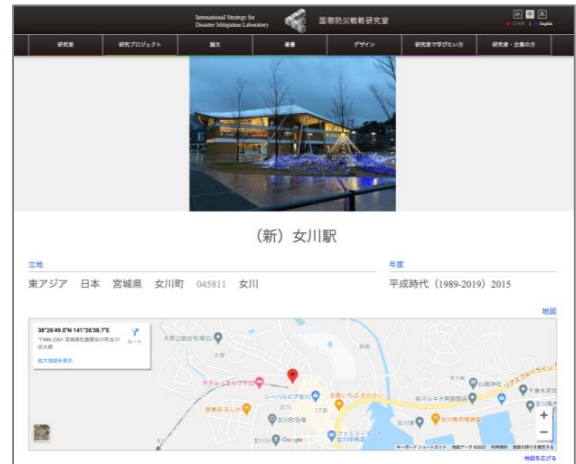


図6 災害対応の都市・建築空間データベースの画面(例)

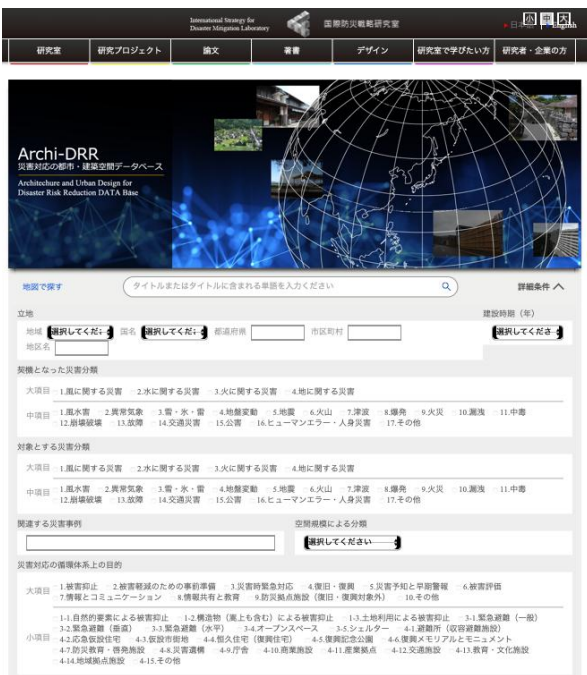
ベース (Archi-DRR DB) を構築し、2023年に公開しました(日・英語版)<sup>2)</sup>。本データベースは、東日本大震災関連の空間のみならず、世界中に存在する災害対応の都市・建築空間事例を学術的視点から一元的に管理し、防災教育および災害対策に携わる国内外のステークホルダーや研究者に情報を提供することを目的としています。

本データベースでは災害対応の各段階（緊急対応、復旧・復興、被害抑止、被害軽減の事前準備）に対応している空間を「災害対応の都市・建築空間（建築要素／建築単体／建築群（集落）／社会基盤／ランドスケープ／オープンスペース／地区全体／モニュメント／その他）」と定義づけ、立地、建設時期、契機となった災害、目的とともに、地図情報や関連資料等も提供しています。国内外を問わず研究者・専門家、自治体および被災地のステークホルダー、観光客および学校教育関係者を主な利用者として想定しており、利用用途に応じた有用な情報と資料となっています。

2024年9月末現在、東日本大震災に関する事例（岩手県、宮城県、福島県）を中心にデータ数は618件に達し、3,710件のアクセス数となっています。東日本大震災関連の事例のみならず、これまで蓄積してきたデータを適宜追加し、国内外における過去の災害事例をデータベース化し、災害からの教訓を記録し、未来に伝承していきたいと考えています。

### 6. おわりに

本稿では、主に私が東北大学に着任して以降の東日本大震災に関する研究活動を紹介させていただきました。2026年3月には東日本大震災の発生から実に15年を迎えることとなります。街の復興はほぼ終わりましたが、ここでは少子高齢化や過疎化の問題、あるいは空家問題が既に発生しており、現在は東日本大震災からの復興とは何だったのかという検証が必要な段階にあります。東日本大震災に関する研究はまだ続きます。



場所から探す



## 参考文献

- 1) Murao, O. (Chief Editor): Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters, *HFA IRIDeS Review Report Focusing on 2011 Great East Japan Earthquake*, 67, 2014.5, [https://irides.tohoku.ac.jp/media/files/HFA\\_IRIDeS\\_ReviewReport\\_Web\\_20140612\(1\).pdf](https://irides.tohoku.ac.jp/media/files/HFA_IRIDeS_ReviewReport_Web_20140612(1).pdf)
- 2) 東北大学災害科学国際研究所国際防災戦略研究室：災害対応の都市・建築空間データベース, <https://isdmlab.irides.tohoku.ac.jp/archi-drr/>
- 3) Murao, O.: "Recovery Curves for Housing Reconstruction from the 2011 Great East Japan Earthquake and Comparison with Other Post-disaster Recovery Processes," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.45, doi: org/10.1016/j.ijdrr. 2019.101467, 2020.5
- 4) 東野幹久, 村尾修：東日本大震災復興事業データを用いた陸前高田市中心市街地の事前高台移転による有益性に関する研究, 地域安全学会論文集No.39, 1-9, 2021.11
- 5) 東野幹久, 村尾修：東日本大震災被災地の復興事業データに基づく事前高台移転の有益性に関する比較研究, 地域安全学会論文集No.43, 257-264, 2023.11

## 【著者略歴】

むらお おさむ  
村尾 修

1989年3月 横浜国立大学工学部建設学科卒業  
1992年3月 横浜国立大学大学院工学研究科（博士課程前期）修了  
1995年3月 横浜国立大学大学院工学研究科（博士課程後期）単位取得後退学  
1995年4月 （株）防災都市計画研究所  
1996年11月 東京大学生産技術研究所 助手  
1999年12月 東京大学 博士（工学）  
2000年12月 筑波大学社会工学系 講師  
2005年12月 筑波大学大学院システム情報工学研究科 助教授  
2007年4月 筑波大学大学院システム情報工学研究科 准教授  
2013年4月 東北大学災害科学国際研究所 教授  
東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻



## Intelligent Reflecting Surface (IRS)による 高周波数帯無線通信の柔軟な利活用に向けて

東北大学大学院情報科学研究科  
基礎システム情報科学専攻  
教授 川本 雄一

### 1. はじめに

Society5.0の実現を支える次世代の超高速無線通信では、ミリ波やテラヘルツ波と呼ばれる高周波数帯の電波を利用した通信の活用が見込まれています。これは、高い周波数の電波を利用すると同時に送信できる情報量が多く、高速で通信できるためです。一方、高周波数帯の電波は直進性が高く障害物に弱いので、建物や壁などの陰には届きづらいという弱点があります。そこで検討が進められているのがIRS (Intelligent Reflecting Surface) と呼ばれる電波の反射板です。IRSは入射した電波の反射方向を任意の方向に制御することが可能であり、高周波数帯の弱点である障害物などを迂回して電波を届けることが可能になります(図1)。またIRSは基地局やリピータに比べ安価かつ低消費電力であるため、低コストでのネットワーク拡張に寄与します。さらに、IRSは屋内なら壁や天井、屋外ならビルの壁面や信号機など、設置場所の柔軟性が高く、景観に配慮した整備も可能です。このような特徴からIRSは6G以降の超高速通信を支える技術の一つとして世界的に注目を集めています。

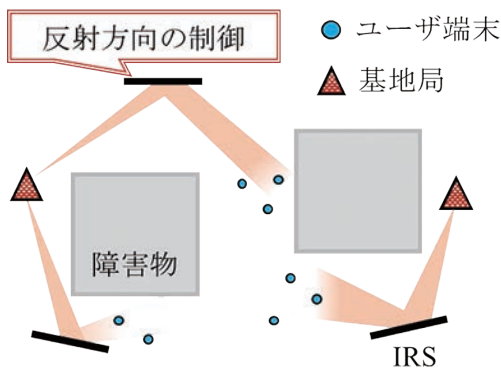


図1 IRSを用いた障害物迂回経路構築

### 2. IRSとは

IRSとは、図2に示すように波長に対して非常に小さい構造体で構成される素子を平面的に集積し、自然反射とは異なる反射特性を実現する反射板です。反射素子ごとに反射位相を調整し、所望のビーム形状を形成します。反射素子の電磁特性は電気的な方法で制御することで高速にビームの形状を切り替えることができ、伝搬環境の変動に追従した電波伝搬制御が可能となります。反射素子の特性を制

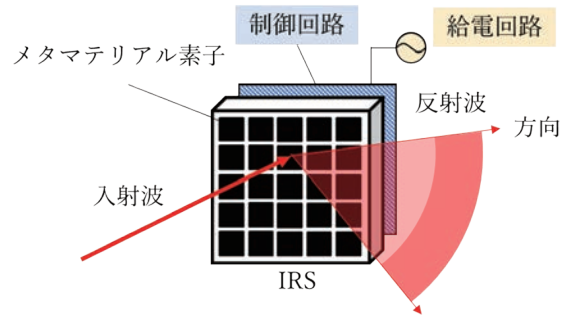


図2 Intelligent Reflecting Surfaceの構成

御する機構としては、プリント基板上に生成されたパッチに入射信号のスイッチとして機能するPINダイオードを挿入し、PINダイオードのON/OFFを切り替えることで反射位相を変化させる方法や、メタマテリアルで構成される素子における電波の透過率や位相を微小電子機械 (MEMS) により可変とする方法、液晶を利用する方法などが提案されています。

次に、通信システムにおけるIRSの制御方法について多くの学術論文などで一般的に想定されている方式を紹介します。IRS自体は変調・復調機能を持たず、自身において電波伝搬環境を把握することはできません。そのため、基地局など外部との制御信号の交換を可能とするための制御回線が用意されます。基地局がIRSを経由する伝搬路についてチャネル推定を実行し、取得したチャネル状態情報を基にIRSにおける反射係数を適切に設計します。この反射係数の制御により素子毎における入射波の位相を制御し、反射波の指向性制御を可能とします。

IRSを用いることで基地局の見通し外となるエリアなどに反射波を誘導でき、通信可能エリアの拡大が可能となります。次世代通信規格において利用の拡大が見込まれるミリ波帯などの高周波数帯を用いた通信においては、シャドウイングの影響による不感地帯増加の問題を解決し高速通信が可能となるエリアを拡大する技術の一つとして注目を集めています。

### 3. IRSを利用した不感地帯解消に関するシミュレーション検証

簡易評価の例としてレイトレース法を用いた電波伝搬評価を実施可能なシミュレータであるWireless InSiteを用い

でシミュレーションを行った結果を紹介します。図中丸点の位置に基地局を、受信電力計測エリアに2m間隔で受信電力計測点を配置し、各計測点における受信電力値を測定しました。この時、IRSの反射特性として、IRSの正面方向から図中上方70度方向に入射波を反射するよう設定しています。また、基地局、IRS、受信電力計測点の地表面からの高さはすべて2mに設定しました。また比較のためIRSを配置しなかった場合の計測結果についても検証を実施しました。

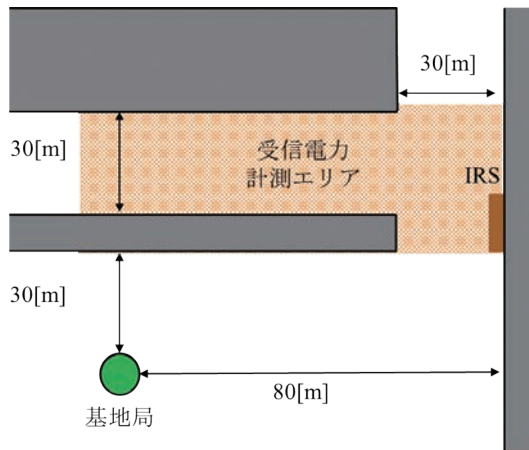


図3 シミュレーション環境

図4(a)にIRSを配置した場合、図4(b)にIRSを配置しない場合の計測点における受信電力の分布を示します。色が明るいエリアほど受信電力が高く、色が暗いエリアほど受信電力が低いことを示しています。結果の比較から、IRSを配置することで一定のエリアにおいて受信電力を大幅に改善していることが確認出来ます。結果はごく単純な想定

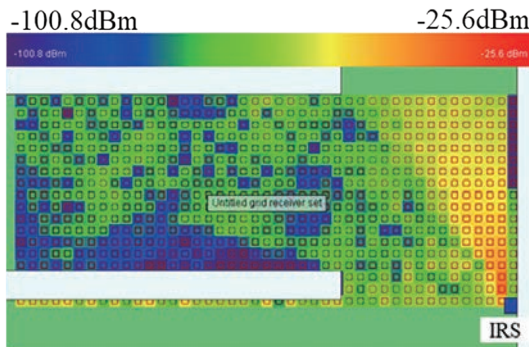


図4(a) IRSを配置した場合の受信電力分布

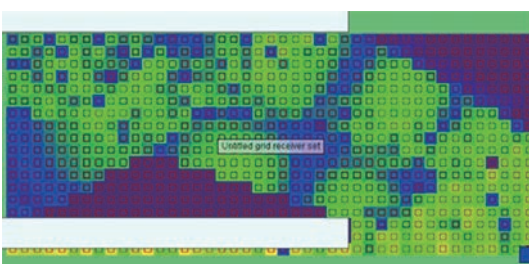


図4(b) IRSを配置しない場合の受信電力分布

環境におけるIRS利用の一例に過ぎませんが、本シミュレーションツールを利用することでより複雑な環境下における多様な反射設定を設定したIRS利用による電波環境の改善について解析が可能であることが分かります。

#### 4. IRS試作機を利用した実証実験

最後に、我々の研究グループが試作したIRSを利用した実証実験について紹介します。図5に示すのがIRSの試作機です。対応周波数帯は60GHz帯、素子数は6400(縦80×横80)、反射面部分のサイズは約20cm×20cmです。パッチ素子に実装されたPINダイオードのON/OFF切替によるビーム制御が可能です。60GHz帯に対応したIRSでこのようなサイズの開口面を有するIRSは世界初のものとなります。



図5 60GHz帯対応IRSの試作機

またこのIRSの基礎特性を計測した実験結果を図6に示します。この結果からも、設定した反射角度方向にビームのピークが確認でき、所望の反射角に利得を形成していることを確認しました。またこれまで、このIRSを利用した種々の検証実験を実施してきており、リアルタイム映像伝送にも成功しています。リアルタイム映像伝送実験では、屋外においてカメラで撮影する映像を送信機からIRS経由で受信機に送信し、PCの画面において送られてくる映像を確認しました。これにより、より実環境に近い状況においてもIRSを用いた無線電波伝搬路構築が有用であることが示されました。

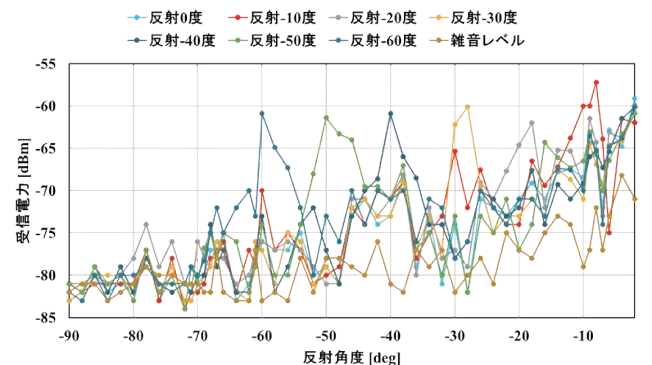


図6 IRSによる反射角度制御時の反射特性評価結果

## 5. おわりに

今回紹介したIRSは次世代の新たな通信を実現するための技術です。また単純に通信性能を向上させる技術としてのみならず、電波伝搬空間を制御するというコンセプトを実現するものとして世界的にも注目を集めています。従来、通信を行う立場にとって与えられるものであった電波伝搬の環境に対し、能動的に制御を加えることで通信環境の更なる改善を目指すこれらの取り組みは、情報通信技術に関する研究開発の新たな局面を切り拓く、6G時代に向けた新たなアプローチとして期待されています。

最後にIRSを含めた通信の将来像について少し述べます。図7にそのイメージ像を示します。今後は地上の通信だけでなく、空中にも通信が活躍する場が広がっていくと考えられています。例えばUAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機) やSkycar (空飛ぶ車)、Airship (飛行船)、衛星などといった新しい通信媒体がどんどん身近になってくるでしょう。これらに対応するためには前述した電波伝搬空間を制御するというコンセプトが重要となり、その実現のための一つの重要な要素がIRSです。未来の通信環境を想像しつつ、新技術の実現に向けた研究開発の展開を目指します。

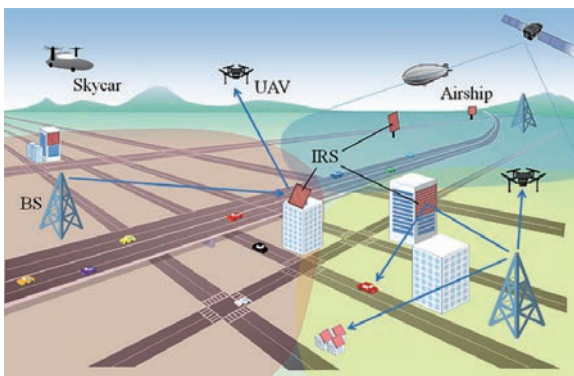


図7 IRSを利用する通信の将来像イメージ

## 参考文献

- [1] 川本雄一, 宇野博之, 上島博幸, "60GHz帯向けIntelligent Reflecting Surfaceの試作・検証," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 249, SR2023-49, pp. 13-15, 2023年11月.
- [2] 川本雄一, "IRS (Intelligent Reflecting Surface)," 映像情報メディア学会誌, vol. 76, no. 2, pp. 251-252, May 2022.
- [3] Y. Kawamoto, E. Tanaka, S. Verma, N. Kato, M. Iwabuchi, R. Ohmiya, Y. Ramamoorthi, and T. Murakami, "Simultaneous Multiple Connections and Increased Frequency Efficiency Using Beam Squint Approach

for IRS-Based Communication," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 73, no. 11, pp. 17073-17082, Nov. 2024.

- [4] H. Hashida, Y. Kawamoto, and N. Kato, "Machine Learning-based Infrastructure Sharing and Shared Operations for Intelligent Reflecting Surface-aided Communications," IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol. 10, no. 1, pp. 198-208, Feb. 2024.
- [5] H. Hashida, Y. Kawamoto, N. Kato, M. Iwabuchi, and T. Murakami, "Mobility-aware User Association Strategy for IRS-aided mm-wave Multi-beam Transmission Towards 6G," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 40, no.5, pp. 1667-1678, May 2022.
- [6] Y. Kawamoto, "How we construct spatial radio environment with intelligent reflecting surface," Smart-Com Virtual Workshop, Jan. 2022.
- [7] H. Uno, H. Uejima, H. Kosaka, K. Katsurashima, R. Hibi, and Y. Kawamoto, "Prototype and Evaluation of Intelligent Reflecting Surface for 60 GHz Band," Beyond 5G White Paper Supplementary Volume "Relay and Reflector Technologies", pp. 47-53, Mar. 2024.
- [8] H. Hashida, E. Tanaka, Y. Kawamoto, M. Iwabuchi, R. Omiya, Y. Ramamoorthi, and T. Murakami, "Beam Squint-aware Frequency Resource Allocation for IRS-aided Communication," Beyond 5G White Paper Supplementary Volume "Relay and Reflector Technologies", pp. 42-46, Mar. 2024.
- [9] H. Hashida, Y. Kawamoto, and N. Kato, "Intelligent Reflecting Surface Placement Optimization in Air-Ground Communication Networks Toward 6G," IEEE Wireless Communications, vol. 27, no. 6, pp. 146-151, Dec. 2020.

## 著者略歴

かわもと ゆういち  
川本 雄一

- 2016年 東北大学大学院情報科学研究科 博士課程後期3年の課程 修了
- 2016年 東北大学大学院情報科学研究科 博士研究員
- 2016年 東北大学大学院情報科学研究科 特任助教
- 2019年 東北大学大学院情報科学研究科 准教授
- 2024年 東北大学大学院情報科学研究科 教授



## 資源と二酸化炭素の循環をより効率的に。 同時に環境浄化も

東北大学大学院環境科学研究科  
先進社会環境学専攻  
教授 飯塚 淳

### 1. はじめに

近年地球の平均気温は上昇を続けており、地球温暖化問題に対する対策はより重要性を増している。2025年に入って世界の複数の機関から、2024年はこれまでで最も平均気温が高かった年であり、史上初めて産業革命時代からの上昇値が1.5℃を超えたとの報告がなされた。温暖化の主要な原因物質である二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を始めとした温室効果ガスの排出量を削減することが重要であるが、資源循環、環境汚染の浄化等のその他の問題ともバランスを取って対策を行っていく必要がある。

著者は、2023年4月から、大学院環境科学研究科の先進社会環境学専攻に新しく創設された資源循環・環境応用学分野<sup>1)</sup>を主宰している。研究室では、環境化学工学をベースとし、資源に関する様々な段階を幅広く対象として、持続可能な社会の形成に必要なとされる資源循環および脱炭素化システムに関する研究を行っている。本稿のタイトルでもある「資源とCO<sub>2</sub>の循環をより効率的に。同時に環境浄化も」(Efficiently cycling resources and CO<sub>2</sub> for a cleaner environment)をキーワードに様々な研究を進めている。

本稿では、その研究・活動内容の一部を紹介するが、今後、本稿を読んでいただいた皆様との協力関係につながるきっかけとなれば幸いである。

### 2. 炭酸塩鉱物化技術

現在、最も注力しているのは、CCU (Carbon Capture & Utilization) 技術の1つである炭酸塩鉱物化技術に関する研究である。炭酸塩鉱物化技術では、気相中のCO<sub>2</sub>が、アルカリ性のカルシウム化合物と反応し、安定な炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) として固定化される。得られたCaCO<sub>3</sub>は様々な用途に利用可能である (図1)。

著者は、コンクリート二次製品の製造時に発生するコンクリートスラッジ (セメントスラリー) を対象とした炭酸塩鉱物化技術の開発に関わった。コンクリートスラッジとボイラー排ガスから炭酸カルシウム (エコタンカル®)<sup>2,3)</sup>と環境浄化材 (PAdeCS®)<sup>3-6)</sup>を製造するプロセスが実用化されている。コンクリートスラッジは反応性に富み、水のみでカルシウムを抽出することが可能であるため、常温、常圧で、排ガスを直接利用可能な、化学物質消費の無い炭酸塩鉱物化を実現している。エコタンカル®はカーボンリサイクルによって製造された炭酸カルシウム製品であり、

様々な工業的用途に利用可能である。また、この環境浄化材 (PAdeCS®) は、セメントの水和鉱物に由来するアルカリ性の有効な成分を含んでおり、様々な水処理への応用を検討している。



図1 炭酸塩鉱物化技術の模式図

コンクリートスラッジよりも反応性が低い、コンクリート廃棄物 (コンクリートがら) やアルカリ性の岩石等を対象に、CO<sub>2</sub>の「圧力スイング法」<sup>7-11)</sup>に関する検討も進めている。これらの対象物質は、反応性が低いために、水のみでカルシウムを抽出することが困難である。カルシウムの抽出のために、酸などを添加することで抽出を促進することは可能であるが、後段で二酸化炭素を反応させて炭酸カルシウムを析出させることが困難になってしまうというデメリットがある。そこで、「圧力スイング法」では、CO<sub>2</sub>高圧 (例えば10気圧) の反応槽で (強い炭酸で) カルシウムを抽出し、その後CO<sub>2</sub>低圧の反応槽で (例えば1気圧の弱い炭酸の条件下で)、CaCO<sub>3</sub>の析出を行うことを考えている (図2)。このような手法について、基礎的な研究を進めている。この圧力スイングによる炭酸抽出・結晶析出の方法は、まったく別の対象にも応用できるのではな

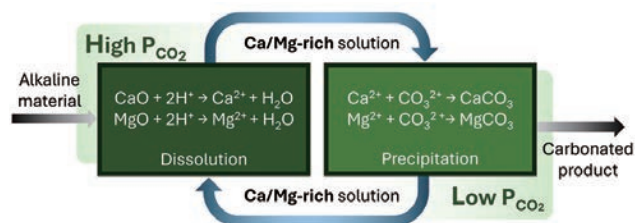


図2 圧力スイング法の模式図 (文献11の図を修正)

いかと考えている。

また、フライアッシュや鉄鋼スラグ等の更に反応性の低い物質を対象とするために、「バイポーラ膜電気透析を利用した循環型の炭酸塩鉱物化技術」<sup>12-14)</sup>についても検討を行っている。これらの反応性が低く、炭酸塩鉱物化反応のためのカルシウムの抽出が非常に困難である対象についても、塩酸 (HCl) や硝酸 (HNO<sub>3</sub>) などの強酸を用いることで、カルシウムの効率的な抽出が可能である。一方で、水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液等に気相中のCO<sub>2</sub>を吸収させ、この2液を混合させれば、CaCO<sub>3</sub>の析出が可能である。しかし、その結果、塩の廃液 (NaCl水溶液やNaNO<sub>3</sub>水溶液) が生じてしまう。この塩の廃液をバイポーラ膜電気透析によって、酸溶液 (HClやHNO<sub>3</sub>) とアルカリ溶液 (NaOH水溶液) に再生し、プロセスで循環的に使用することを検討している。

炭酸塩鉱物化のための代替溶媒あるいはカルシウム/マグネシウム源としての海水の利用にも着目している。海水は豊富に存在し、また、炭酸塩鉱物化に必要なカルシウムとマグネシウムを高濃度で含有する。その他にも多様な共存イオンを含むため、純水の場合とは異なるカルシウム抽出・炭酸塩の析出挙動が期待できる。既存の研究をレビュー論文<sup>15)</sup>としてまとめると共に、炭酸カルシウム系あるいは炭酸マグネシウム系の炭酸塩析出挙動に関する基礎的な検討<sup>16)</sup>を進めている。

これまでに紹介した炭酸塩鉱物化技術は、多段階から構成される間接炭酸塩鉱物化プロセスであり、いずれも高純度の炭酸カルシウムを生成することが可能である。一方、得られる炭酸塩の純度は低いものの、投入エネルギーやコストも低くなることから、直接炭酸塩鉱物化技術も重要なオプションの1つである。直接炭酸塩鉱物化技術では、1つの反応槽で、アルカリ性のカルシウムを含有する廃棄物等がCO<sub>2</sub>と反応し、(低純度の)炭酸カルシウムが生成する。コンクリート廃棄物 (コンクリートがら) からの再生骨材製造の際の副産物であるセメント水和物微粉やフライアッシュなどを対象とした湿式の直接炭酸塩鉱物化技術の基礎試験を進めている<sup>17-21)</sup>。特に利用用途の開発が重要である炭酸化後の固体の物理化学的性状の詳細把握も進めている。

### 3. その他の資源循環や環境浄化に関する研究

炭酸塩鉱物化技術以外にも資源循環や環境浄化に関する多数の研究に取り組んでいる。

重要な産業の1つである半導体産業から排出されるリンやフッ素を含有する廃水の処理<sup>22)</sup>や化学機械研磨 (CMP) プロセス廃水の再資源化<sup>23)</sup>についても基礎研究を進めている。

また、近年問題となっているペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物 (PFAS) の膜分離技術に関する基礎研究<sup>24)</sup>も進めている。

旧廃止鉱山から排出される酸性坑廃水 (AMD) の処理と二酸化炭素排出に関する基礎研究<sup>25)</sup>や低炭素型中和剤

に関する基礎研究も進めている。

また、前述のバイポーラ膜電気透析は、酸やアルカリの添加を行うことなく、溶液のpHを変化させてイオンの除去や濃縮を行うことが可能な技術であり、水中の各種イオンの除去/濃縮/回収への適用<sup>26-28)</sup>についても研究を行っている。

### 4. 海外の研究機関との共同研究

炭酸塩鉱物化技術や環境浄化技術に関して、地球規模課題対応国際科学技術協力 (SATREPS) プログラム<sup>29)</sup>の支援を受け、南アフリカ共和国の複数の研究機関との共同研究プロジェクト (Carbon Removal and Environmental Remediation (CRER) Project)<sup>30)</sup>を実施している。SATREPSプログラムでは、相手国での若手研究者の人材育成や技術の社会実装についても大きな目的の1つとなっている。プロジェクト期間は約5年間で2027年1月まで、現地での活動が行われる予定である。CRERプロジェクトでは、南アフリカ共和国のセメント産業を主要なターゲットとしており、二酸化炭素の炭酸塩鉱物化技術、副産物を利用した環境浄化技術に関する技術開発を行っている。二酸化炭素排出削減量の算出方法論の確立に向けた研究<sup>31, 32)</sup>や得られた炭酸カルシウムのコンクリート製造への再利用やその安定性に関する研究<sup>33)</sup>にも取り組んでいる。

### 5. おわりに

本稿では、資源循環・環境応用学分野 (飯塚研究室) で取り組んでいる資源循環および脱炭素化システムやその他の環境浄化技術に関する研究の一部を紹介した。炭酸塩鉱物化は、二酸化炭素を安定な炭酸塩として固定し、利活用する技術であり、様々な利点を有することから早期の社会実装と普及が期待されている。また、カルシウムを含有する資源の循環にも関わる重要な技術である。炭酸塩鉱物化技術に関わる基礎研究や展開のための研究に取り組んでいる。また、半導体産業から排出される廃水の処理や再資源化、ペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物 (PFAS) の膜分離技術、旧廃止鉱山から排出される酸性坑廃水 (AMD) に関する基礎研究も進めている。本稿が、地域の皆様との今後の連携や交流のきっかけとなれば幸いである。

### 引用文献

- 1) 資源循環・環境応用学分野 (飯塚研究室) website: <https://web.tohoku.ac.jp/envchemeng/>
- 2) 日本コンクリート工業株式会社website, エコタンカル®, <https://www.ncic.co.jp/products/environment/ecocaco3.html> (2025/11/10アクセス)
- 3) Iizuka et al., Pilot-Scale Operation of a Concrete Sludge Recycling Plant and Simultaneous Production of Calcium Carbonate, *Chemical Engineering Communications*, 204(1), 79-85, 2017. DOI: 10.1080/00986445.

- 2016.1235564
- 4) 日本コンクリート工業株式会社website, 環境浄化材 PAdeCS®(パデックス), <https://www.ncic.co.jp/products/environment/padecs.html> (2025/11/10アクセス)
  - 5) Iizuka et al., Phosphorus Adsorbent Derived from Concrete Sludge (PAdeCS) and Its Phosphorus Recovery Performance, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(34), 11266-11273, 2012. DOI: 10.1021/ie301225g
  - 6) Iizuka et al., Comparative Study of Acid Mine Drainage Neutralization by Calcium Hydroxide and Concrete Sludge-Derived Material, *Minerals Engineering*, 188, 107819, 2022. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107819
  - 7) 飯塚ら, 廃コンクリートを用いた新規な二酸化炭素固定プロセス, *化学工学論文集*, 28(5), 587-592, 2002. DOI: 10.1252/kakoronbunshu.28.587
  - 8) Iizuka et al., Development of a New CO<sub>2</sub> Sequestration Process Utilizing the Carbonation of Waste Cement, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(24), 7880-7887, 2004. DOI: 10.1021/ie0496176
  - 9) Katsuyama et al., Development of a Process for Producing High-Purity Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>) from Waste Cement Using Pressurized CO<sub>2</sub>, *Environmental Progress*, 24(2), 162-170, 2005. DOI: 10.1002/ep.10080
  - 10) Abe et al., Dissolution Rates of Alkaline Rocks by Carbonic Acid: Influence of Solid/Liquid Ratio, Temperature, and CO<sub>2</sub> Pressure, *Chemical Engineering Research and Design*, 91(5), 933-941, 2013. DOI: 10.1016/j.cherd.2012.09.001
  - 11) Ho and Iizuka, Chemical-Free Pressure-Swing Carbonation of Blast Furnace Slag for CO<sub>2</sub> Utilization and Sequestration, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2025, 13, 10, 3842-3852, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c05872>
  - 12) Shuto et al., A CO<sub>2</sub> Fixation Process with Waste Cement Powder via Regeneration of Alkali and Acid by Electrodialysis, *RSC Advances*, 4(38), 19778-19788, 2014. DOI: 10.1039/c4ra00130c
  - 13) Shuto et al., CO<sub>2</sub> Fixation Process with Waste Cement Powder via Regeneration of Alkali and Acid by Electrodialysis: Effect of Operation Conditions, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(25), 6569-6577, 2015. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b00717
  - 14) Ho et al., Circular Indirect Carbonation of Coal Fly Ash for Carbon Dioxide Capture and Utilization, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108269, 2022. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108269
  - 15) Ho and Iizuka, Mineral carbonation using seawater for CO<sub>2</sub> sequestration and utilization: A review, *Separation and Purification Technology* 307(11):122855, 2023, DOI:10.1016/j.seppur.2022.122855
  - 16) Ho and Iizuka, A Comparative Study of Mineral Carbonation Using Seawater for CO<sub>2</sub> Utilization: Magnesium-Based System Versus Calcium-Based System with Low Energy Input, *Adv. Energy Sustain. Res.*, 2400388 (2025), DOI: 10.1002/aesr.202400388
  - 17) Ho et al., CO<sub>2</sub> Utilization via Direct Aqueous Carbonation of Synthesized Concrete Fines under Atmospheric Pressure, *ACS Omega*, 5(26), 15877 (2020). DOI: 10.1021/acsomega.0c00985.
  - 18) Ho et al., Utilization of low-calcium fly ash via direct aqueous carbonation with a low-energy input: Determination of carbonation reaction and evaluation of the potential for CO<sub>2</sub> sequestration and utilization, *J. Environ. Manage.*, 288, 112411 (2021). DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112411
  - 19) Ho et al., Utilization of CO<sub>2</sub> in direct aqueous carbonation of concrete fines generated from aggregate recycling: Influences of the solid-liquid ratio and CO<sub>2</sub> concentration, *J. Clean. Prod.*, 312, 127832 (2021). DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127832
  - 20) Ho et al., Direct aqueous carbonation of dephosphorization slag under mild conditions for CO<sub>2</sub> sequestration and utilization: Exploration of new dephosphorization slag utilization, *Environ. Technol. Innov.*, 28, 102905 (2022). DOI: 10.1016/j.eti.2022.102905
  - 21) Ho et al., Identification of suitable conventional cooling methods for direct aqueous carbonation of blast furnace slags and their mechanism, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 32(7), 1566 (2025). DOI: 10.1007/s12613-024-3054-x
  - 22) Ho et al., Simultaneous removal of fluoride and phosphate from semiconductor wastewater via chemical precipitation of calcium fluoride and hydroxyapatite using byproduct of recycled aggregate, *Chemosphere*, 2023, 340, 139875. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139875
  - 23) Chang et al., Total resource circulation in chemical mechanical polishing wastewater treatment from semiconductor manufacturing industry: A review, *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 72: 107619. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107619
  - 24) Liu et al., Filtration and electrical membrane-based treatment methods for PFAS-contaminated water and preparation methods for the membranes employed, *Applied Water Science*, 2025, 15: 290. DOI: 10.1007/s13201-025-02644-6
  - 25) DuGuri et al., A critical review of current treatment methods of acid mine drainage with an assessment of associated CO<sub>2</sub> emissions toward carbon neutrality *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 77:

108347. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108347
- 26) Iizuka et al., Separation of Lithium and Cobalt from Waste Lithium-ion Batteries via Bipolar Membrane Electrodialysis Coupled with Chelation, Separation & Purification Technology, 113, 33-41, 2013. DOI: 10.1016/j.seppur.2013.04.014
- 27) Noguchi et al., Simultaneous Removal and Recovery of Boron from Waste Water by Multi-step Bipolar Membrane Electrodialysis, Journal of Water Process Engineering, 23, 299-305, 2018. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.04.010
- 28) Iizuka et al., Simultaneous Separation and Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Bipolar Membrane Electrodialysis, ISIJ International, 63(7), pp. 1172-1177, 2023.
- 29) 科学技術振興機構 (JST), 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) website (2025年10月31日アクセス), <https://www.jst.go.jp/global/index.html>
- 30) SATREPS実施課題: 脱炭素社会に向けた炭酸塩化を利用したカーボンリサイクルシステムの開発 (2025年10月31日アクセス), [https://www.jst.go.jp/global/kadai/r0203\\_southafrica.html](https://www.jst.go.jp/global/kadai/r0203_southafrica.html)
- 31) Izumi et al., Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry, J. Clean. Prod., 312, 127618 (2021). DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127618
- 32) Ho et al., Assessment of product carbon accounting associated with carbon dioxide-storing concrete via mineral carbonation and utilization, J. Environ. Chem. Eng., 118458 (2025). DOI: 10.1016/j.jece.2025.118458
- 33) Ho et al., A CO<sub>2</sub> removal technology based on mineral carbonation and the stability of product carbon storage in a cement matrix, Environ. Technol. Innov., 34, 103623 (2024). DOI: 10.1016/j.eti.2024.103623

### 著者略歴

いづか あつし  
飯塚 淳

- 2001年 東京大学 工学部化学システム工学科卒業
- 2003年 東京大学 大学院環境学専攻 博士前期課程 修了
- 2006年 東京大学 大学院環境システム学専攻 博士後期課程 修了
- 2006年 学術振興会特別研究員 (PD)
- 2007年 東京大学 大学院環境システム学専攻 産学官連携研究員、特任研究員
- 2010年 東北大学 多元物質科学研究所 助教
- 2017年 東北大学 多元物質科学研究所 准教授
- 2023年 東北大学 大学院環境科学研究科 教授



## 赤外光を用いたヘルスケアシステム開発

東北大学大学院医工学研究科  
医工学専攻  
教授 松浦 祐司

### 1. はじめに

タンパク質、脂質、糖質、およびそれらの代謝産物などの血液成分の分析は健康維持のために重要であるが、通常は採血を伴う血液検査を必要とするため、年数回の健診時にも情報を得られるのが現状である。これらの成分分析が非侵襲で日常的に実施できれば、極めて有用なヘルスケアシステムが実現可能となる。そのための非侵襲的な血液成分分析法としては、体表から光を照射するだけで、血管から間質液へとしみ出した血中成分の検出が可能で分光法が有力な候補となる。さまざまな分子はそれぞれ固有の運動エネルギーを有しており、そこへ白色光を入射すると、運動エネルギーに一致する波長の光のみが分子に吸収されるため、反射・透過光の波長スペクトルから、その分子を特定することが可能である（図1）。

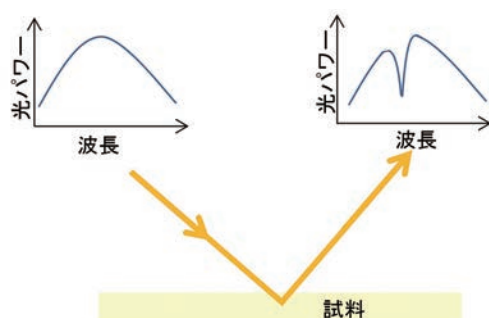


図1 赤外分光法の原理

光を用いた方法としては、体表からミリメートルのオーダーで体内に浸透する近赤外光（波長700-1600 nm程度）を用いたシステムが、半導体レーザーやフォトダイオードを用いて安価に構成することが可能なため、種々のものが提案されている。例えばLEDとフォトダイオードを装備したスマートウォッチを用いて、脈波検出を行うなどのウェアラブルデバイスが市販されている。しかし、近赤外領域に現れる生体分子の吸収ピークは微弱でなだらかなため、例えば血糖値に影響するブドウ糖（グルコース）のような、複雑な構造の分子に対しては正確な測定は難しいという問題点がある。（現在、血糖値測定可能とうたっているスマートウォッチなどの製品は、不正確な測定値により糖尿病治療において誤った対応につながる可能性がある」と警告されている<sup>1)</sup>。）一方、波長3 μm以上の中赤外光の領域にはタンパク質、糖質、脂質、アミノ酸、水など様々な分子の基

本振動による鋭敏で強力な吸収ピークが現れるため、正確かつ高感度な分析が可能となる。我々のグループでは当初、図2に示すようにプリズムを用いた減衰全反射（ATR）分光法を用いた手法について検討した。この手法では、プリズム内に赤外光を入射し、プリズム内部で光が全反射するときにわずかに外側にしみ出る光が、プリズムに触れている試料に吸収されることを利用するものである。このしみ出し深さは生体を対象とした場合は数ミクロンと小さく、皮膚を対象とした場合は、厚さ20 μm程度の角質層の下にある間質液には到達しないため、角質がほとんど存在しない口腔粘膜を測定対象として選択し、図中のATRプリズムの上下面を口唇で挟む形で測定を行っていた<sup>2-5)</sup>。

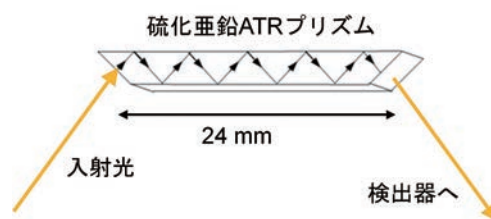


図2 赤外ATR分光システムの検出部

しかし衛生的な問題もあり、指先などの皮膚を対象とした測定が望まれる。そこで、中赤外域の光吸収により発生する熱を検出する中赤外光熱分光法に注目し、熱を音響的な方法を用いて検出する光音響分光法（PAS）について新たに検討した<sup>6-8)</sup>。試料にパルス光を照射し、それが吸収されて非発光過程で熱に変換されると、試料では熱の発生が源となり、これに伴う周期的な試料表面の膨張・収縮、熱弾性波の発生・伝搬が起こる。なお、このとき試料のごく近傍の空間にも熱が伝わるので、周辺温度が上昇し、試料に接する空気中の膨張・収縮により音波が発生する。この音波を検出するのがマイクロホン法（Microphone - PAS）、前述の熱弾性波を圧電素子で検出するのがトランスデューサ法（PZT - PAS）である。中赤外光を用いたPASにおいて、光の侵入長は約25 μmで、上記のATR法で得られる2-3 μmよりもはるかに大きく、角層下の間質液中の成分を検出することができる。またPASに基づく非侵襲的血液成分分析装置は、比較的安価でコンパクトなシステムで実現可能である。また将来的には図3に示すようなウェアラブルデバイスとしての開発についても可能性がある。本報告では、マイクロホン-PAS法とPZT-PAS法の両方につい

て検討し、それらの原理検証を行ったうえで、人を対象として行った血糖値推定に関する実験結果について述べる。

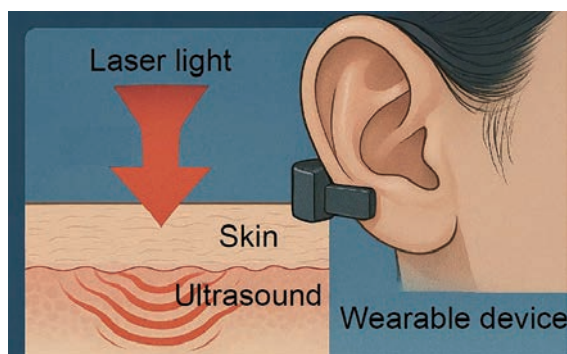


図3 光音響分光法の概念図および想定されるウェアラブルデバイス

## 2. マイクロホン-PAS法

前述のとおり、マイクロホン-PAS法はシンプルな構成で実現可能であるが、感度が比較的低く、周囲の雑音などの影響を受けやすいという欠点がある。ここでは、超小型の光音響セルを用いてPASの感度を向上させた。システムの概略図を図4に示す。920-1200  $\text{cm}^{-1}$  (波長8.3-10.9  $\mu\text{m}$ ) の範囲で波長を変化させることができる量子カスケードレーザ (QCL) を光源として用い、平均出力は人体に照射しても影響のない約5 mWとした。レーザ光は光チョッパで変調したのち、ビームエキスパンダで拡大し、試料に下方から集光して照射した。試料から放出された音響波は、コンデンサーマイクロホンで検出され、ロックインアンプで増幅される。

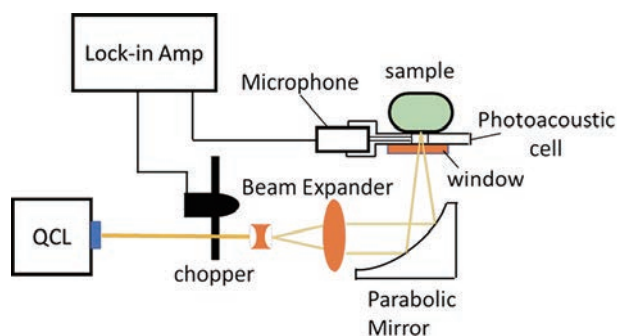


図4 マイクロホン-PAS法測定系

PASでは原理的に、ガスセルの体積を小さくすることで感度を向上させることができる<sup>9)</sup>。そこで、図5に示すようなガスセルを製作した<sup>10)</sup>。真鍮製のセンシングブロックには、ガスセルとして機能する直径2 mm、深さ2 mmの空洞があり、直径1 mm、長さ8 mmの接続孔でマイクロホンとつながっている。このガスセルの容積は、これまでに報告のあった他のセルの容積よりもはるかに小さいものである。また接続孔については、音波の伝達損失を最小限に抑えるため、可能な限り短く太くした。セルの底は中赤外領域で透明なセレン化亜鉛 (ZnSe) 窓で封じられており、上部の開閉口に試料を押し付けることにより、セルが密閉される。

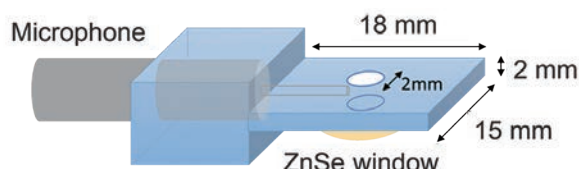


図5 光音響セルの構造

5%のグルコースを添加したゼラチンのPASスペクトルを測定した結果を図6に示す。波数ステップは2  $\text{cm}^{-1}$ 、スペクトル取得に要する時間は2分である。図には同じ試料のPASスペクトルとATRスペクトルをあわせて示してある。後者はフーリエ変換赤外分光計 (FT-IR) と多重反射ATRプリズムとの組み合わせによる系で測定した<sup>3)</sup>。このスペクトルに現れる複数のピークは、グルコースの分子構造によるものであり、いわゆる指紋スペクトルと呼ばれるものである。図6の2つのスペクトルの形状はほぼ同じで、PASスペクトルが吸収スペクトルとほぼ線形な関係にあることが確認された。

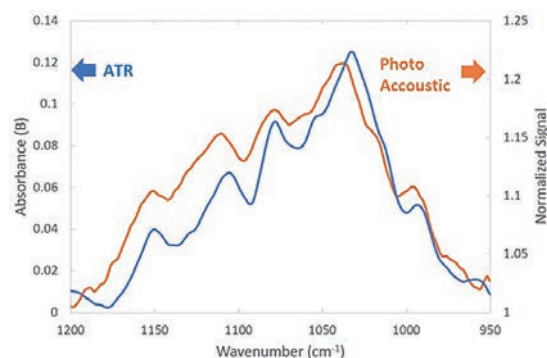


図6 グルコースゲルのPASおよびATRスペクトル (横軸は波数。1000  $\text{cm}^{-1}$ が波長10ミクロンに対応)

人を対象とした実験の際には、角質層が比較的薄い (10-20  $\mu\text{m}$ ) 手首の手のひら側を測定対象とした。実験では日本糖尿病学会の基準に従い、経口ブドウ糖負荷試験 (OGTT) を実施した。この方法で被験者は、少なくとも10時間絶食した後、75gのブドウ糖溶液を摂取し2時間にわたり5分ごとに採血による血糖値の測定と同時に、PASスペクトルを取得した。

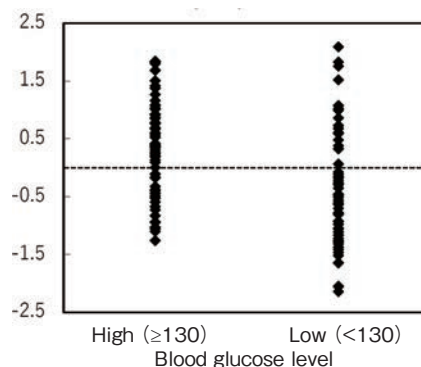


図7 6日間144スペクトルに対する判別分析結果 (縦軸のゼロを境に正が「高」、負が「低」)

健康成人被験者1人を対象に、6日間にわたって取得した144個のスペクトルについて線形判別分析を行った。図7は血糖値130 mg/dL以上を「高」血糖領域、130 mg/dL未満を「低」血糖領域として判別分析を行った結果であり、判別精度は70.8%となった。上記の144個のスペクトルのうち、180 mg/dL以上の血糖値に対応する37個のスペクトルと、100 mg/dL未満の27個のスペクトルを抽出し、同様に判別分析を行った結果を図8に示す。この場合の判別精度は90.6%と高いものになった。

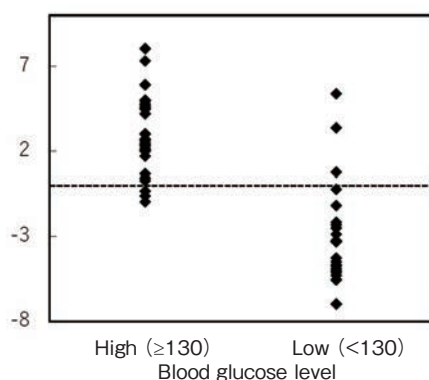


図8 180 mg/dL以上37スペクトル、100 mg/dL未満27スペクトルに対する判別分析結果

図9には、上記の「高」血糖領域と「低」血糖領域のスペクトルをそれぞれ平均したものを示している。スペクトルの形状は概ね一致しているが、特に1050 $\text{cm}^{-1}$ 付近でわずかな違いが見られる。この領域にはグルコースのC-O結合に起因する吸収ピークが存在するほか、血糖値の上昇とともに増加するインスリンの吸収ピークもあり、これらが複合的に現れている可能性がある。

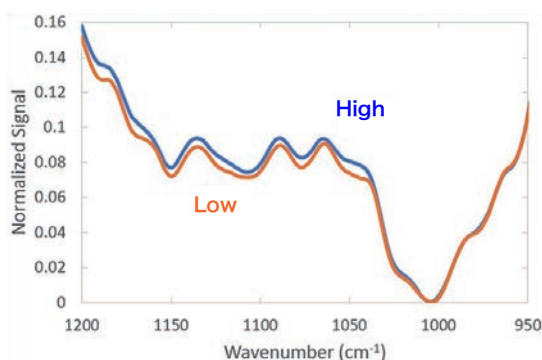


図9 「高」血糖領域と「低」血糖領域の平均スペクトル

### 3. PZT-PAS法

PZT-PAS法では、レーザー光を数百kHzといった超音波領域の周波数で変調し、試料内に発生した超音波を直接トランスデューサにより検出する。この方法ではマイクロホン-PAS法で用いる光音響セルを必要としないために、装置がより簡単になるうえに、環境音の影響や、セル内に蓄積する水蒸気の影響についても問題は生じない。図10に測定系の概略を示す<sup>14)</sup>。光源は図4のものと同じ波長可変

QCLであり、試料表面に配置したPZTトランスデューサを用いて、試料内に発生した超音波を検出した。試料のPASスペクトルは得られた信号強度スペクトルを照射光のパワースペクトルで除算することにより計算している。

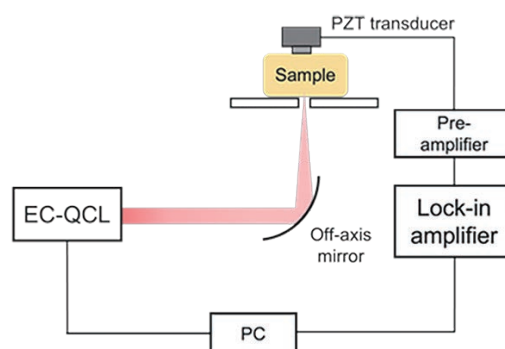


図10 PZT-PAS法測定系

本測定系で得られる分光特性と、ATR法で得られる光学吸収特性との関連付けを行うため、生体模擬試料として濃度10%のグルコースを添加したゼラチンファントムを用いて測定を行った。図11にファントムの本測定系により検出されたPASスペクトルと、ATRスペクトルとの比較を示す。図11より、ATRスペクトルに対応した吸収ディップを複数確認したが、PAS信号強度は吸光度におおよそ反比例する結果となった。このように信号強度が吸光度に対して非線形性を示すものの、グルコース濃度に対する信号強度の構成曲線を作成し、それを用いることにより、吸光度の推定が可能であることを確認した<sup>14)</sup>。

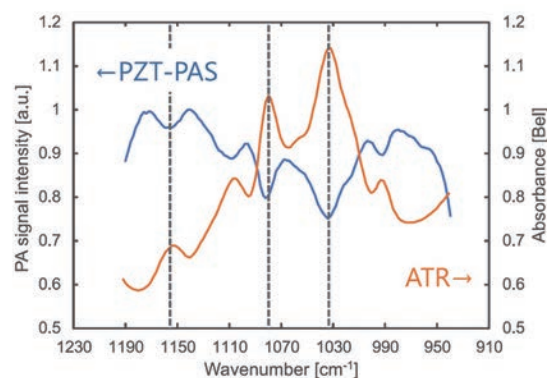


図11 10%グルコース含有ゼラチンのPZT-PASおよびATRスペクトル

ヒトの皮膚を対象に感度良く測定を行うため、光照射により試料の厚さ方向に誘起される超音波の共振を利用することを検討した。図12はポリウレタンジェルの厚さを変化させた場合の信号強度の変化である。なお実験ではレーザーの変調周波数を500 kHzおよび600 kHzとして信号を測定した。その結果、誘起される超音波の半波長の整数倍におおよそ対応する位置で信号強度が増大していることが確認できた。そこで2 mm程度の厚さが得られる第一指間膜(親指と示指の間の「水かき」)を新たな測定対象として選択し測定を行った。実験ではセンサを指間膜に固定した状態でレーザー光の変調周波数を450-550 kHzの範囲で変化させ、

最も強度が高くなる周波数に固定した状態で、レーザー光の波長を掃引してPASスペクトルを得た。

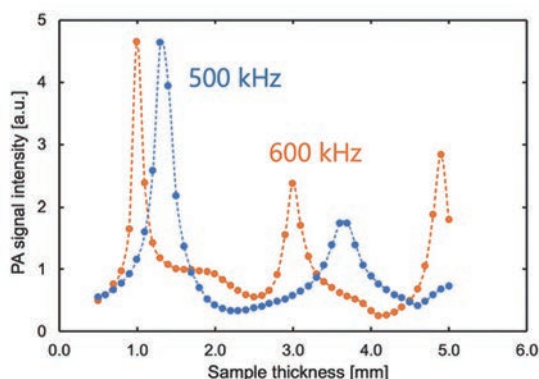


図12 サンプル厚さとPZT-PAS信号強度の関係

図13は健康な被験者の食前15分、食後120分間を約5分間隔で測定した3日分の合計83スペクトル（うち血糖値140 mg/dL未満：33、140 mg/dL以上50）点に対して、判別分析を行った結果であり、85.3%という高い判別率が得られた。

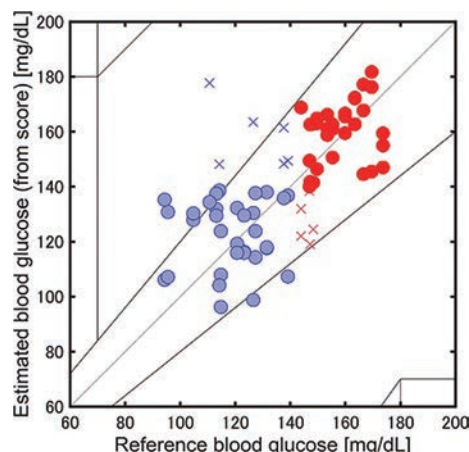


図13 推定血糖値と実測血糖値の関係

#### 4. おわりに

血糖値をはじめとする血中成分を非侵襲で測定する手法として、中赤外レーザーを光源とした光音響分光法に着目した。パルス変調されたレーザー光の吸収により、空气中に発生、伝搬する音波を検出するマイクロホン-PAS法と、試料中に生成する超音波を圧電素子で検出するPZT-PAS法について検討し、原理実証のうえ人を対象とした実験を行い、潜在的に血糖値推定が可能な手法であることを示した。採血による血糖値測定に匹敵するような測定精度を得る実用的な医療機器としてのシステム構築のためには、次のような問題点をクリアする必要がある。i)人を対象とした実験によるサンプル数の増加：間質液を対象としたこれらの分光分析法では、グルコースそのものの吸収のみを抽出することは困難であり、血糖値変化に付随して変化するさまざまな代謝物質の変動を総合的に検出していると考えられる。そのため、個人差や食事内容の影響を受けない推定モデル

を作成するためには、数多くのサンプルに対して機械学習などによる検討をする必要があると考えられる。ii)システムの小型化・低価格化：現状では波長可変QCLを用いているため、サイズ的には手のひら程度に収まるものの価格的には非常に高価（>1000万円）となっており、実用化には程遠い。今後はスペクトル解析によって離散的な重要波長を抽出して、いくつかの波長固定QCLなどを用いたシステムの構築が必要である。ただし、血糖値そのものを測定するのではなく、血糖値レベルを段階的に示すものでも健康管理のためには有用と考えられ、医療機器としての認可に要する時間・コストを考慮して、ヘルスケア機器としてのシステムを開発することも意義があるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) FDA Safety Communication, “Do Not Use Smartwatches or Smart Rings to Measure Blood Glucose Levels,” February 21, 2024.
- 2) S. Liakat, *et al.*, *Biomed. Opt. Express*, **5**, 2397 (2014)
- 3) S. Kino, S. Omori, and Y. Matsuura, *Biomed. Opt. Express*, **7**, 701 (2016)
- 4) R. Kasahara, S. Kino, S. Soyama, and Y. Matsuura, *Biomed. Opt. Express*, **9**, 289 (2017)
- 5) T. Koyama, N. Shibata, S. Kino, A. Sugiyama, N. Aki-kusa, and Y. Matsuura, *Sensors*, **20**, 3438 (2020)
- 6) J. Kottmann, J. M. Rey, and M. W. Sigrist, *Sensors*, **16**, 1663 (2016)
- 7) H. von Lilienfeld-Toal, M. Weidenmüller, A. Xhelaj, and W. Mäntele, *Vib. Spectrosc.*, **38**, 2095 (2005)
- 8) J. Kottmann, J. M. Rey, J. Luginbühl, E. Reichmann, and M. W. Sigrist, *Biomed. Opt. Express*, **3**, 667 (2012)
- 9) J. Kottmann, J. M. Rey, and M. W. Sigrist, *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 084903 (2011)
- 10) M. Maeno, S. Kino, and Y. Matsuura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 72001 (2023)
- 11) T., Makhnii, *et al.*, *Ukr. J. Phys.*, **61**, 853 (2016)
- 12) B. R. Wood, *Chem. Soc. Rev.*, **45**, 1980 (2016)
- 13) G. Romo-Cárdenas, *et al.*, *Results Phys.*, **7**, 1221 (2017)
- 14) R. Sasaki, S. Kino, and Y. Matsuura, *Biomed. Opt. Express*, **14**, 3841 (2023).

#### 【著者略歴】

まつうら ゆうじ  
松浦 祐司

- 1988年 東北大学工学部通信工学科卒
- 1992年 東北大学大学院工学研究科修了、博士（工学）
- 1993年 住友電気工業株式会社 研究員
- 1994年 米国ラトガース大学セラミック工学科 研究員
- 1996年 東北大学大学院工学研究科 助教授
- 2007年 導光技術合同会社 代表社員
- 2008年 東北大学大学院医工学研究科 教授



## 世界的なリン資源危機を打破するRinPhos法の開発

東北大学  
未来科学技術共同研究センター  
教授 長坂 徹也

### 1. はじめに

本稿では、著者らが未来科学技術共同研究センターで進めている廃リン酸からの黄リン生成プロセス開発<sup>1)</sup>について紹介する。リンの工業的重要性はあまり知られていないので、本プロジェクトの成功がもたらす大きなインパクトを理解していただくために、少し長くなるが最初に研究開発の背景を説明させて頂きたい。

リンは肥料の三大要素の一つとして農業にとって欠かせない元素であり、多くの人にとってリンは肥料原料として認識されている。しかしながら、実際には図1に示すように肥料だけではなく、電子部品（半導体、電池材料等）、自動車（鋼板表面処理液等）、医薬品、食品（酸化防止剤や乳化剤）、プラスチック（難燃剤や安定剤）など様々な日用品や工業分野のほぼ全域において用いられている。リン自体が表立って目立つことはほとんどないが、そもそもリンは骨やRNA、DNAなど人体にとって必須の構成元素であり、我々の生活にとって非常に重要な役割を担っている。

特に半導体や先進医薬品産業などの高度技術を必要とする産業分野においては、アルミや鉄などの不純物がppmレベル以下に制御された超高純度リン酸や、例えばInP等の高純度リン化合物が必要であり、現時点ではそれらは黄リン

( $P_4$ )のみから生産可能となっている。図1からわかるように、これら製品となるリン化合物は基本的に全て黄リンを（更に黄リンは全てリン鉱石を）出発原料として生産されている。なお、一般に諸外国では $P_4$ は黄リンではなく白リンと呼ばれているが、ここでは黄リンという呼称を使用することにする。このように、リンは純粋な元素である黄リンに限らず、リン酸塩やその含有物として広範な濃度と組成を持つ形で農業や工業にとって不可欠な重要物質として用いられているが、日本ではリンの全量を輸入に依存している非常にリスクな状態である。中でも黄リンは戦略的重要物質であり、その安定確保が極めて重要である。

工業的には黄リンは、人工衛星からスマートフォンまで至る所に使用されている半導体自体に加え、黄リンのみから製造可能な高純度リン酸などの半導体製造に不可欠な副資材の供給を担っている。さらに、黄リンは新型コロナウイルス感染症ワクチンを含む先進的な医薬品の開発においても重要な役割を果たしている。黄リンの需要は肥料に比べると比較的少ないものの、ハイテク産業において黄リンは不可欠な存在であり、黄リンのサプライチェーンに支障が生じれば、多くの工業製品の生産に深刻な影響が及ぶだけでなく、世界規模の経済危機を引き起こす可能性がある<sup>2)</sup>。黄リンが国家的戦略物質と捉えられている所以である。最

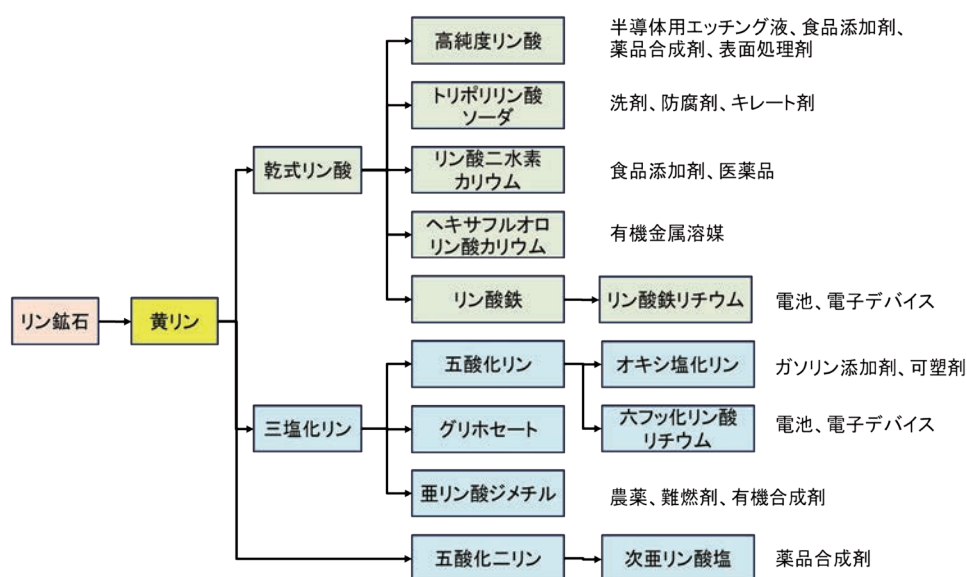


図1 リンが用いられている各種製品とその原料化合物

近の中国のレアアースの輸出制限から分かるように、日本において黄リン供給に支障をきたせば多くの産業の存亡にかかわる致命的な問題となる。従って、工業国である日本において黄リン供給に支障をきたすことは絶対に避けなければならない。

2014年、欧州連合（EU）は供給リスクを理由にリン鉱石を戦略物質「Critical Raw Materials」<sup>3)</sup>に指定し、続いて2017年には黄リンもそのリストに追加された。リストアップされた戦略物質は、単に近辺での資源的供給リスクのみならず、素材製造の技術的困難性や地政学的リスク、将来の潜在的枯渇性（原料の低品位化等）が考慮されている。黄リンはリン鉱石を原料にして製造されているが、リン鉱石はその枯渇への懸念により、黄リンは製造技術自体の問題により別個にリストに上げられている。商業的に採掘可能なリン鉱石の枯渇が差し迫っていることは、世界の食料生産に重大な影響を及ぼすため、社会不安定化につながる深刻な問題として大きな関心を集めている<sup>4)</sup>。

毎年、リン鉱石由来の約2000万トンのリンが世界経済に投入されている。残存リン鉱石埋蔵量は不確定であるが、紛れもなく有限であり、高品位リン鉱石が徐々に減少していることはよく知られている。現在の採掘率では高品位リン鉱石は早晩枯渇すると予想されており、低品質で入手困難な資源しか残らないことが懸念されている。このことは、農業分野と工業分野の双方において、リン供給の長期的な安全保障に重大な脅威をもたらすことを示している。

現在、亜リン酸などのリン含有化合物から黄リンを直接合成する実用的な方法は存在していない。現状で黄リンは、百年前に開発された方法と同じ電気アーク炉で1400～1500℃の高温でコークスを使用してリン鉱石を還元することによって生産されている。このプロセスには、黄リン1トンあたり約14 MWhの電力という膨大なエネルギー入力が必要であり、その半分は固体のリン鉱石を溶融させるために消費されている。さらに、このプロセスでは、生産される黄リン1トン毎に約10トンのスラグ（溶岩のようなもの）が生成される。また、特定の低品位鉱石には、カドミウムなどの有害な重金属や、ウランやトリウムなどの天然に存在する放射性元素が含まれていることが知られており、これらがスラグに濃縮され、重大な環境汚染を引き起こしている。そのため、高い電力コストと厳格な環境規制がある国では黄リン生産は不可能となる。結果として黄リンは、現在中国、米国、カザフスタン、ベトナムのわずか4か国のみで独占的に製造されている。米国は自国産業に対する黄リンの重要性を鑑み、1996年以来黄リンの輸出禁止措置を取っている。このことを受けて、他の生産国も輸出規制を強化した。その結果、国際市場に流通する黄リンはわずか18万トンとなり、各国間の黄リン調達競争が激化している。図2に日本における黄リンの輸入先を示した。以前は中国から多くを輸入していたが、現在はその殆どをベトナム一国に依存しており、非常に不安定な状況にある。ベトナムにおいてもリン鉱石の枯渇化が進行しており、将

来においても安定して黄リンを輸入できる保証はない。後述するがこれらの危機的状況に対応するため筆者らは黄リン生産の新たなプロセスを開発しており、支援を受けている経済産業省からは2030年度には黄リン12000トン/年の商業生産を実現するよう命じられている。大学の基礎研究成果を10年にも満たない短期間で商業化に結び付けようという施策は稀であり、筆者は非常に大きな責任の重さを感じている。

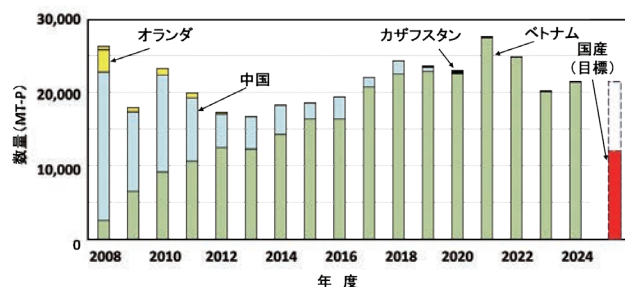


図2 黄リンの年度別輸入国

## 2. 二次国内リン資源からの黄リン製造プロセスの試み

前述したように多くの工業国において、リン資源枯渇リスクと黄リン供給の不安定化という複合的なリスクに直面している。輸入黄リンへの依存を脱却するためには、費用対効果が高く、環境的に持続可能な製造プロセスを確立し、安定的な国内供給を確保するための新たな黄リン製造の技術革新が急務である。そのためには、(1)リン鉱石に代わる代替リン資源の使用、(2)新たなリン資源を用いた黄リン製造プロセスの開発が必要となる。

我が国と同じく黄リンの全量輸入に依存する欧州連合（EU）では二次リン資源から黄リンを製造するために、2010年頃から下水汚泥から黄リンを抽出するための様々なプロセスが開発研究されてきた<sup>5)</sup>。最新の黄リン製造プロセスであるFlashPhos（オーストリア、ドイツ）は、2028年に商業規模の黄リン生産を開始する予定であり、欧州の現在の黄リン需要8万トンの半分以上を賄うことを目指している<sup>6)</sup>。しかしながら、これらの方法では焼却灰を1400～1500℃（FlashPhosでは2000℃以上）まで加熱する必要があるため、従来の電気炉プロセスと同様に多大なエネルギーコストがかかり、また下水汚泥焼却灰中の有害重金属による後処理の問題が生じる。したがって、FlashPhosはまだ黄リン生産に最適なプロセスとは言えず、エネルギー消費量が少なく環境への影響が少ないプロセスを開発するためのさらなる改良や研究開発が必要である。

## 3. 粗リン酸からの黄リン製造プロセスの開発

筆者らはFlashPhosのように下水汚泥などの2次資源を直接原料として用いるのではなく、これらの2次資源から製造した粗リン酸の炭素熱還元による連続黄リン製造プロセス、RinPhosプロセス（Revolutionally innovative next-generation white phosphorous production process）を開発

した<sup>1)</sup>。その概要を図3に示した。

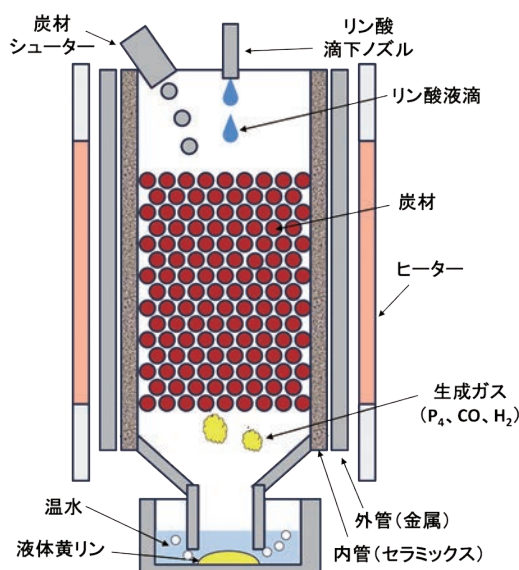
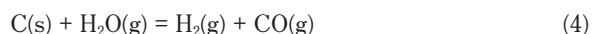
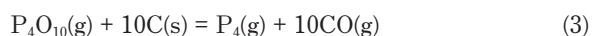
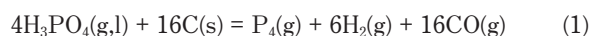


図3 Rinphosプロセスの装置概念図

東北大学で創案されたRinPhos法はリン酸の熱炭素還元プロセスであり、約1000℃の炭素充填層の上部に、原料であるリン酸液滴を一定の間隔で連続的に導入するものである。滴下されたリン酸はバイオチャーやコークスなどの加熱された炭素材料の表面で熱分解し、ガス状の $P_4O_{10}$ と $H_2O$ を生成する。生成した $P_4O_{10}$ ガスは炭素充填層を通過しながら炭素によって黄リンガス( $P_4$ )に還元され、生成した $P_4$ ガスは充填層を下降し、下部で黄リン液滴として凝縮する(黄リンの沸点は280℃である)。これらの凝縮液滴は充填層内で合体して下方に流下し、最終的に約70℃に保たれた温水貯留槽に液状黄リンとして回収される(黄リンの融点は44℃である)。本プロセスにおける総括反応(1)式は、(2)、(3)式のシーケンスで右に進むが、これ以外に副反応として主に(4)式の反応が起こる。

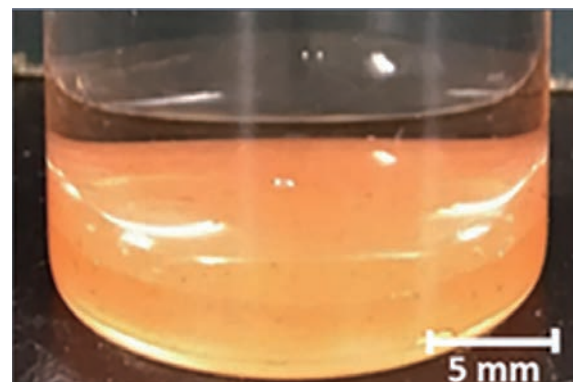


副生したCOと $H_2$ はエネルギー資源として利用できる。(2)式によるリン酸の脱水反応は単純ではなく、 $H_xPO_y$ で示されるポリリン酸を介して徐々にリンリッチなポリリン酸ガスとなり、最終的に $P_4O_{10}$ に至ることが著者らの研究により明らかになりつつある。

これら一連の反応により、試薬リン酸、および工場からの廃リン酸を原料としてRinPhos法で黄リンを生成できることが著者らによって実証された。得られた黄リンと市販の黄リンの不純物濃度を図4に示す。図からわかるようにこれらの試料において基本的に差異はなく、工場からの廃

リン酸を原料とした場合でもRinPhos法では半導体基準の不純物濃度の黄リンの製造が可能であることを示している。実際に半導体用高純度リン酸を製造するメーカーにおいても原料として使用可能であることが認証されている。

a)



b)

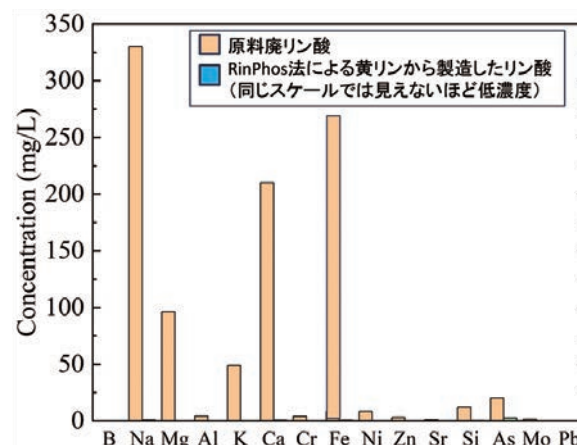


図4 a) 工場からの廃リン酸とそれを原料としてRinPhos法で得られた黄リンの外観と、b) その黄リンから製造したリン酸と原料リン酸との不純物濃度比較

RinPhos法は約1000℃で運転するため、1500℃で操業する従来の電気炉法に比べてエネルギー消費量が大幅に低減する。さらに、電気炉法によるリン鉱石還元とは異なり、粗リン酸には他元素含有量がリン鉱石の場合より遥かに低いため、有害な副産物は生成されない。これらのリン2次資源に含まれる有害成分は、下水処理などでの粗リン酸の製造中に効果的に除去できるため、電気炉法と比較して下流工程の精製負荷が大幅に軽減される。さらに注目すべき利点として、国内産の二次リン資源を原料として利用できるため、輸入黄リンおよびリン鉱石への依存から完全に脱却でき、安定した黄リン供給が可能となる。

これまでに蓄積した実験結果に基づいて公称1 kg- $P_4$ /日のパイロットプラントを工学研究科内に建設し、約1年半の操業を実施している。その結果に基づいて、年間数百トン規模のパイロットスケールの装置設計を進めており、2026年度から運転を行う予定である。最終的に2027年度

からRinPhosプロセスによる黄リン生産商業プラントを建設開始する計画である。

#### 4. おわりに

RinPhosプロセスの開発により、海外からの黄リン輸入に依存せず、日本国内にある二次リン資源を用いて黄リンを国内生産することが可能になった。RinPhosプロセスはEUで行われているFlashPhosなどのように二次リン資源を直接原料として黄リン製造するプロセスとは異なり、二次リン資源から粗リン酸を回収しそれを原料とすることを特徴とする。二次リン資源は下水汚泥、製鋼スラグ、家畜糞尿など、様々な種類があり、EUのFlashPhos法ではそれぞれ異なる前処理が必要となる。さらに黄リン回収後の残渣の後処理も必要となる。RinPhos法では種々の二次リン資源から回収した粗リン酸を原料とするため、前処理や後処理を必要せず、いかなる二次リン資源も原料として使用可能なプロセスである。

二次リン資源から粗リン酸を回収するプロセスは世界中で稼働しているが、経済的に見合うプロセスは少なく、今後RinPhos法を経済的にも魅力的なプロセスとして実体化していくには、従来とは異なる経済的な粗リン酸を調達できる新規プロセスの開発が重要となる。最近、日本やEUにおいて政府主導により下水汚泥からのリン回収の研究開発が活発化しており、経済的リン酸回収プロセスが開発されることを期待したい。なお、著者らは国土交通省の支援を得て、下水汚泥焼却灰からの粗リン酸抽出を並行して実証しているところである。

本プロジェクトを支援して頂いている住友商事株式会社、経済産業省、国土交通省およびNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）に感謝します。また、RinPhos法デモスケール装置の設置をお認め頂いた環境保全センターに深く謝意を表します。

#### 【参考文献】

1) Yu, H., R. Yoshida, H. Ohtake, K., Y. Sasaki, Nagasaka, T.: , White phosphorus production by a carbother-

mic reduction of upcycled crude phosphoric acid, *Resour., Conserv. Recycl.*, 211 (2024), p.107868.

- 2) Abelson, P.H.: A potential phosphate crisis, *Science* 283 (2015), p.2015.
- 3) European Commission: Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future, [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_1661](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661).
- 4) Elser, J., Bennett, E.: A broken biogeochemical cycle, *Nature*, 478 (2011), p.29.
- 5) Havukainen, J., Nguyen, M.T., Hermann, L., Horttanainen, M., Mikkila, M., Deviatkin, I., Linnanen, L.: Potential of phosphorus recovery from sewage sludge and manure ash by thermochemical treatment, *J. Waste Manag.*, 49 (2016), p.221.
- 6) Rapf M.: Raupenstrauch. RecoPhos and other therm-chemical processes for the recovery of phosphorous from sewage sludge, *International Recycling and Recovery Conference*, Berlin 2012.

#### 【著者略歴】

ながさか てつや  
長坂 徹也

- |         |  |
|---------|--|
| 1985年3月 | 東北大学大学院工学研究科金属工学専攻博士課程修了 工学博士              |
| 1985年4月 | 東北大学工学部金属工学科助手                             |
| 1992年4月 | 米国カーネギーメロン大学 Research Associate (~1993年4月) |
| 2001年3月 | 東北大学大学院工学研究科教授                             |
| 2018年4月 | 東北大学大学院工学研究科・研究科長、総長補佐                     |
| 2021年4月 | 東北大学副学長、未来科学技術共同研究センター長                    |
| 2025年7月 | 東北大学未来科学技術共同研究センター・リサーチプロフェッサー             |

# 令和6年度 事業報告

宮城県における工業技術に関する研究振興を図り、もって地域社会の科学技術・産業の向上発展等に寄与するため、次に掲げる事業を行った。

## 1. 学術及び科学技術の振興

### (1) 若手研究者育成のため「青葉工学振興会賞」及び「青葉工学研究奨励賞」の授与

#### ① 第18回「青葉工学振興会賞」の授与 「応募件数：8件」

研究者	研究業績名
東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻 准教授 安藤 大輔	マグネシウム合金の変形組織の観察およびその組織形成過程に 立脚した新機能創出

#### ② 第30回「青葉工学研究奨励賞」の授与 「応募件数：15件」

研究者	研究業績名
東北大学多元物質科学研究所 講師 岡 弘樹	環境適合な有機ハイドライドの創出とグリーン水素の製造・ 貯蔵法の構築
東北大学大学院工学研究科機械機能創成専攻 助教 久慈 千栄子	アモルファス合金の準安定性を活用した加工手法の開発
東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 助教 中野 貴文	薄膜材料およびそれを用いた多層膜構造の開発によるトンネル 磁気抵抗センサの高性能化

### (2) 国際会議、研究会等各種学術研究集会への助成

#### ① 国際学術会議

第1回量子コンピューターと量子センサーを指向した分子スピン量子ピットに関する国際会議 (2025/6/7～6/10) 外	2件
---	----

#### ② 学術研究集会

みちのく分析化学シンポジウム (2024/7/20) 外	3件
------------------------------	----

### (3) 大学院学生、学部学生等の視野を広めるための国際交流への助成

第21回流動ダイナミクスに関する国際会議 (2024/11/18～11/20) 外	2件
---	----

### (4) 東北大学工学研究科等における優秀な外国人留学生への奨学金の給付

令和6年度外国人留学生奨学金	6名
----------------	----

### (5) 東北大学工学研究科等における研究成果や工学情報を県内企業等に提供する機関誌「翠巒」を発行

「翠巒」第39号発行 (令和7年1月)	電子冊子
---------------------	------

### (6) 東北大学祭への助成

開催期間	令和6年10月25日(金)～10月27日(日)
場 所	川内北・南キャンパス (対面及びオンライン開催)

## 2. 研究教育活動助成

### (1) オープンキャンパスへの助成

#### ① 工学研究科、創造工学センター、男女共同参画委員会及び医工学研究科のオープンキャンパスへの助成

開催期間	令和6年7月30日(火)～7月31日(水)
場 所	青葉山キャンパス

#### ② 夏休み・秋休み子ども科学キャンパスへの助成

開催期間	令和6年8月7日(水)～8月8日(木)、10月15日(火)～16日(水)
場 所	工学研究科創造工学センター、サイエンスキャンパスホール

### (2) 教育研究活動への助成

#### ① 東北大学工学部・工学研究科等の教育研究活動や情報発信等の事業活動に対し助成

工学研究科教育研究助成金	1件
工学教育広報活動資金	1件

## 3. 工学に関する研究開発

### (1) 科学技術に関する試験研究

地域における科学技術の振興を推進するために、研究員を委嘱（非常勤研究員）し、施設・設備等については、東北大学工学研究科等と包括協定を締結し、試験研究を行った。

民間企業・団体、地方公共団体等からの委託研究	45件
------------------------	-----

### (2) 学術研究を行なうための指定研究助成金の交付

指定研究助成金として教育・研究の奨励を目的とする奨学寄附金	32件
-------------------------------	-----

### (3) 業務委託を活用した研究・教育活動への支援

研究代表者等が企画するコンソーシアム又は学術集会等の運営経費	23件
--------------------------------	-----

## 4. 広報活動事業等の助成

### 第63回 新春産学官交流大会及び第17回みやぎ優れMONO発信事業への参画

新春産学官交流大会において宮城県内産業と学術、行政機関、各関係者間で親交を深め、また、宮城県内の良いモノを「みやぎ優れMONO」として認定し、県内外に発信するための認定制度と、認定企業並びに認定を目指す企業への技術、経営、販売等について様々な支援を構築し、宮城から数多くのものづくりヒット商品を生み出すことを目的とした支援事業に共催団体として参画した。

区 分	認 定 式	場 所
第17回みやぎ優れMONO事業	令和7年1月28日(火)	仙台国際センター

## 5. 附属明細書

記載事項なし。

## 編集後記

令和八年を迎え、ここに一般財団法人青葉工学振興会の機関誌「翠巒」第四十号が完成いたしました。本号が、本財団に関係の多くの皆様のお手に取られ、広くご一読いただけましたら幸いです。

青葉工学振興会は、東北大学工学部同窓会「青葉工業会」を母体として、昭和六十年三月に発足いたしました。本会は、研究開発、研究・教育助成、普及・啓発といった公益事業を通して、宮城県および東北大学における工学の発展に貢献してまいりました。本誌「翠巒」は、こうした本会の活動の一環として、東北大学工学系の先生方から寄せられた最近の研究成果や活動報告を中心に、読者の皆様に産学官連携を一層深めていただくための一助となることを目的として発行されています。

毎号の巻頭言では、現工学研究科長・工学部長の先生よりご挨拶を賜っております。今回は、これまで約三年にわたり工学研究科長・工学部長をお務めになられております伊藤彰則先生より、「伝えることの難しさ、あるいは『縁』を結ぶこと」という示唆に富む話題をご寄稿いただきました。本会の主たる目的の一つである宮城県内における東北大学の産学連携において、企業と工学研究科・工学部の先生方とを繋ぐ「縁」の大切さと難しさについて、伊藤先生がこれまでのご経験を通して感じてこられた思いをお伝えいただいております。筆者も先日、みやぎ工業会主催の「第六十四回新春産学官交流会」に出席いたしました。改めて、産学の垣根を越えて産業界の皆様と連携を図ることの難しさを実感したところです。

さて、本財団の公益事業を支える重要な取り組みとして、「青葉工学振興会賞」および「青葉工学研究奨励賞」の授与があります。両賞につきましては、令和七年度も例年どおり、四月より候補者の推薦依頼を開始し、六月末に応募を締め切り、七月中旬から審査を開始いたしました。その後、書類審査を経て十月に候補者の先生方へのヒアリングを実施し、最終的に十一月に青葉工学振興会賞一名、青葉工学研究奨励賞三名を選考いた

しました。候補者の推薦依頼から約七か月にわたり、複数回の審査委員会を重ねたうえで、厳正な審査の結果です。さらに、十二月十二日（金）には、授賞式ならびに受賞者四名の先生方による講演会を開催し、その後の懇親会をもって、令和七年度における両賞授賞の全日程を無事に終了いたしました。毎年のごことではございますが、両賞にご応募いただく先生方のご業績はいずれも極めて高い水準にあり、また受賞者の先生方によるご講演は、ご専門分野の最先端の内容を異分野の者にも分かりやすくご紹介いただいております。受賞された先生方はもとより、惜しくも受賞に至らなかった先生方を含め、候補者の皆様の研究レベルの高さには、ただただ感服するばかりです。なお、本号の巻末では、本財団が進めております公益事業の令和六年度の実績についてもご紹介しております。本財団の設立趣旨と活動にご理解とご賛同を賜り、今後とも変わらぬご支援をお願い申し上げます。

また、毎号、工学系にご所属の先生方に、最近の研究成果をご紹介いただく「研究プロフィール」をご執筆いただいております。本号におきましても、十名の先生方より玉稿をお寄せいただきました。筆者自身は材料工学を専門としておりますが、分野横断的な学際研究から真理に迫る基礎研究に至るまで、東北大学工学系研究の奥深さと裾野の広さを改めて実感する内容となっております。本誌を通じて紹介された研究や活動にご関心をお持ちになりましたら、ぜひ執筆者の先生、あるいは本財団までご一報いただければ幸いです。

最後に、本誌が読者の皆様にとって有益な情報源となることにも、新たな「縁」を結ぶ契機となることを祈念し、あわせて本財団へのご理解とご支援を今後とも賜りますようお願い申し上げます。

（常務理事 東北大学大学院工学研究科教授 吉見 享祐 記）



一般財団法人青葉工学振興会  
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-04  
東北大学大学院工学研究科内  
電話 022-795-7991  
<http://www.aoba-found.or.jp/>

