

# ANNUAL REPORT | 2025

京都大学エネルギー理工学研究所  
ゼロエミッションエネルギー研究拠点  
共同利用・共同研究 成果報告書

**Zero-Emission Energy Research**

Joint Usage/Research Center,  
Institute of Advanced Energy,  
Kyoto University







# Zero-Emission Energy Research

Joint Usage/Research Center,  
Institute of Advanced Energy,  
Kyoto University

---

京都大学エネルギー理工学研究所  
ゼロエミッションエネルギー研究拠点  
共同利用・共同研究 成果報告書

2025年度





ご挨拶

エネルギー理工学研究所が2011年度に開始した共同利用・共同研究拠点「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」は、2022年度から第3期（2022年4月1日～2028年3月31日）の活動に入っています。この間に文科省によって行われた合計5回の中間評価と期末評価のすべてにおいてA評価をいただいております。また、当研究所が6年に一回実施している外部評価が2025年11月1日に行われましたが、ここにおきましても外部評価委員から当「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」の活動実績を高く評価していただきました。これらは皆様方の当拠点における優れた研究活動・実績と拠点運営への日頃からのご協力の賜物であり、感謝申し上げます。

また、2022年度に発足した当研究所附属のカーボンネガティブ・エネルギー研究センター（ICaNS）では、学内他部局から兼任教員を迎えて異分野連携研究を推進し、二酸化炭素を高付加価値材料・有用資源として固定化して活用する原理の解明と技術の創出を目指した活動を行っております。ゼロエミッションエネルギー研究から萌芽したエネルギー理工学の新しい概念、そして学理が着実に芽生えています。文科省によって2027年度からICaNSが基幹経費化されることを目指して、研究活動を今後さらに進展させていきます。

今回、2025年度の成果報告書を発行する運びとなりました。今年度も90件に近い応募をいただき、創造的で融合的な共同研究を進めていただいたことによって、多くの研究成果を挙げることができました。皆様の多大なご支援とご協力に改めて御礼申し上げます。2025年12月11日には当拠点の成果報告会（ZE年会）を開催しました。本年度に当拠点の研究課題に採択されたすべての研究代表者による高い学術レベルの口頭発表とポスター発表が行われ、活発な質疑応答がなされました。また、今後の共同研究の打ち合わせ等もあちらこちらでなされておりました。各研究者の研究の活性化に資するものであったと感じております。

本拠点が開始から15年間皆様とともに取り組んできた「ゼロエミッションエネルギー」の考え方は、2050年に温室効果ガスの排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラル社会には欠かせないものです。カーボンニュートラル社会を実現し、より豊かなものにするためにも、「ゼロエミッションエネルギー」の概念を深化させ、さらに「カーボンネガティブ・エネルギー」の概念を確立できるように、関連コミュニティの皆様と連携、協力して活発な研究活動を進めたいと考えています。

2025年12月に京都大学は国際卓越研究大学の認定候補に選ばれました。この認定により当研究所に今後どのような影響があるのかは、現時点では不透明な面があります。しかし当拠点のアクティビティを高めていくことで、いかなる状況においても当研究所のより良い未来を切り開いていけると考えております。

引き続きご支援、ご協力を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

2026年3月  
京都大学エネルギー理工学研究所  
所長 片平 正人



# 目 次

<b>第一部 公募型共同利用・共同研究</b> .....	1
<b>第二部 拠点活動実績</b> .....	177
2025 年度 活動実績 .....	179
<b>第三部 その他</b> .....	183
2026 年度 公募案内 .....	185
2025 年度 共同利用・共同研究推進室 アンケート調査結果 .....	198



# 第一部 公募型共同利用・共同研究



## 第一部 公募型共同利用・共同研究

### (A) 企画型共同研究

1. 非金属触媒を用いた半導体の化学ダイシング (ZE2025A-01) .....12  
深見一弘 京都大学大学院工学研究科
2. 核融合炉小型化に向けた革新的中性子遮蔽材の開発 (ZE2025A-02) .....14  
笠田竜太 東北大学金属材料研究所
3. カリウムイオン電池開発のための化合物系負極の創製と  
イオン液体電解質との適合性に関する研究 (ZE2025A-03) .....16  
道見康弘 鳥取大学学術研究院工学系部門
4. 脱炭素社会に向けた NMR 分光法による  
リグノセルロース系バイオマスの構造解析 (ZE2025A-04) .....18  
西村裕志 京都大学生存圏研究所
5. 酵素反応中心への光増感分子の導入による酵素複合体の発光特性  
および光誘起電子移動反応 (ZE2025A-05) .....20  
高島 弘 奈良女子大学理学部化学生物環境学科
6. 細胞内小器官の高効率エネルギー生成機構の解明 (ZE2025A-06) .....22  
坂口怜子 産業医科大学医学部
7. 赤外自由電子レーザーを用いた繊維の分解研究 (ZE2025A-07) .....24  
川崎平康 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設
8. 複合体構造に基づいた細胞増殖を制御する  
機能性ペプチドの創生に向けた研究 (ZE2025A-08) .....26  
楠 英樹 国立健康危機管理研究機構国立感染症研究所
9. ワイドギャップ半導体におけるコヒーレントフォノンの定量的評価 (ZE2025A-09) .....28  
吉田恭平 熊本県産業技術センター材料・地域資源室
10. 原子炉を延命させる熱処理条件の導出 (4) (ZE2025A-10) .....30  
松川義孝 熊本大学大学院先端科学研究部

11. rf-GD-OES 分析によるリチウムイオン伝導性固体電解質内部の  
電子伝導発現メカニズムの解明 (ZE2025A-11) ……………32  
佐々木一哉 弘前大学大学院理工学研究科
12. 高強度中赤外パルスによる有機分子の蛍光物性制御 (ZE2025A-12) ……………34  
筒井祐介 京都大学工学研究科
13. 複製開始タンパク質 ORC のグアニン四重鎖認識機構の  
構造生物学的基盤 (ZE2025A-13) ……………36  
和賀 祥 日本女子大学理学部化学生命科学科
14. 核融合炉における先進中性子増倍材の水素吸着脱離挙動の  
実験的な検証 (ZE2025A-14) ……………38  
金 宰煥 量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所
15. 電極-電解質界面の構築に基づくナトリウム貯蔵性材料の創製 (ZE2025A-15) ……………40  
薄井洋行 鳥取大学学術研究院工学系部門
16. 酸化物分散強化合金粉末の熱変化に及ぼすメカニカルアロイング処理の影響 (ZE2025A-16) ……………42  
岩田憲幸 久留米工業高等専門学校材料システム工学科
17. 植物や微生物の成長や増殖を制御する生体分子の  
開発のための NMR 解析 (ZE2025A-17) ……………44  
坂本泰一 千葉工業大学先進工学部生命科学科
18. 発光性太陽光集光デバイスのための有機発光材料の創出 (ZE2025A-18) ……………46  
清水正毅 京都工芸繊維大学分子化学系
19. リグニン活用のための革新的アプローチ：選択的安定同位体標識法による  
精密反応挙動解析 (ZE2025A-19) ……………48  
松下泰幸 東京農工大学大学院農学研究院
20. Tunable Surface Engineering of Electrochemically Grown Quantum Dots via  
Free Electron Laser Irradiation in the IR Range for PSCs (ZE2025A-20) ……………50  
Sukrit Sucharitakul Chiang Mai University (Thailand)

21. 代謝反応制御に関わる転写因子 Sp1 の zinc finger 構造を可視化する		
	蛍光バイオセンサーの構築 (ZE2025A-21) ……………	52
田嶋竣介	福岡大学理学部	
22. 光誘起過渡吸収分光による多元系酸化物ガーネット結晶における		
	3 価/4 価セリウムの価数変化の動的過程追跡 (ZE2025A-22) ……………	54
北浦 守	山形大学理学部	
23. 事故耐性ハイブリッドの水素同位体放出挙動 (ZE2025A-23) ……………		56
向井啓祐	核融合科学研究所超高流束協奏材料ユニット	
24. 量子ビームを用いた結晶 PET の酵素分解 (ZE2025A-24) ……………		58
田所大輔	京都大学生存圏研究所	
25. Impact of Irradiation on the Structural and Functional Properties of		
	Polymer-Based Nanoparticles for Drug Delivery Applications (ZE2025A-25) ……………	60
Winita Punyodom	Chiang Mai University (Thailand)	
26. TLS により誘導される液液相分離を促進する RNA と TLS の		
	相互作用の NMR 法による解析 (ZE2025A-26) ……………	62
黒川理樹	埼玉医科大学医学部ゲノム基礎医学	
27. 共振器型超放射自由電子レーザーによる		
	革新的テラヘルツパルス光源の構築 (ZE2025A-27) ……………	64
坂上和之	東京大学工学系研究科	
28. 核酸の異常構造の解析 (ZE2025A-28) ……………		66
今村比呂志	長浜バイオ大学バイオサイエンス学部	
29. リグニンの重合機構と化学構造の解明 (ZE2025A-29) ……………		68
岸本崇生	京都大学生存圏研究所	
30. 塗布光照射法を用いた全固体リチウムイオン電池セルの		
	作製に関する研究 (ZE2025A-30) ……………	70
高橋伊久磨	千葉工業大学工学部先端材料工学科	
31. 溶融塩を用いた水素同位体分離技術の研究 (ZE2025A-31) ……………		72
松島永佳	北海道大学大学院工学研究院	

32. 好冷菌型セルラーゼによる結晶性セルロース分解システムの研究 (ZE2025A-32) .....74  
堀内正隆 北海道医療大学歯学部教養教育学系
33. Enhancing mechanical properties of PCL-based sutures using  
selective-wavelength mid-infrared free-electron laser irradiation (ZE2025A-33) .....76  
Sakhorn Rimjaem Chiang Mai University (Thailand)
34. 遺伝子発現調節が可能な大腸菌由来グアニン四重鎖の特性解析 (ZE2025A-34) .....78  
田中陽一郎 横浜国立大学研究推進機構機器分析評価センター
35. トリチウム増殖材  $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  と  $\text{Li}_2\text{O}$  の二相混合焼結体の  
原子密度分布の変化 (ZE2025A-35) .....80  
新村潔人 弘前大学リチウム資源総合研究機構
36. 酸素過剰および酸素欠損を示す  $\text{PbWO}_4\text{-BiVO}_4$  系酸化物イオン伝導体の  
高温熱膨張率測定 (ZE2025A-36) .....82  
高井茂臣 京都大学エネルギー科学研究科
37. 複合樹脂素材の選択的アブレーションと表面反応解析 (ZE2025A-37) .....84  
藤岡 隼 東京理科大学総合研究院ナノカーボン研究部門
38. 水産加工副産物からの新規多糖の発酵生産 (ZE2025N-01) .....86  
武田 穰 横浜国立大学大学院工学研究院
39. 複雑なエネルギーシステム運用保守のための  
先進的情報基盤高度化に関する実験研究 (ZE2025N-02) .....88  
松岡 猛 宇都宮大学地域創成推進機構
40. Achieving Carbon-Neutral Organic Coffee Cultivation through Biocontrol (ZE2025N-03) .....90  
Keonakhone Khounvilay National University of Laos (Laos)
41. Renewable Energy (Solar & Wind) Transition in Indonesia:  
Perspective of Policy and Community Empowerment (ZE2025N-04) .....92  
Anugerah Yuka Asmara National Research and Innovation Agency of Indonesia (Indonesia)
42. Electricity Usage Behavior and Habits for Rural and Urban Community to  
Facilitate Lifestyle Life Cycle Assessment Research (ZE2025N-05) .....94  
TanChia Kwang UMPEDAC, University of Malaya (Malaysia)

## **(B) 提案型共同利用・共同研究**

43. アルミニウムフリーマグネシウム合金へのリン酸カルシウムコーティング  
および微細構造評価 (ZE2025B-01) ……96  
藪塚武史 京都大学大学院エネルギー科学研究科
44. コヒーレントエッジ放射観測による自由電子レーザー相互作用の解明 (ZE2025B-02) ……98  
清 紀弘 産業技術総合研究所分析計測標準研究部門
45. 低融点 Li-Br/F/I 系溶融塩の核融合炉液体ブランケットへの  
材料共存性の研究 (ZE2025B-03) ……100  
荻野靖之 東北大学金属材料研究所
46. 構造の不完全性が原子層物質に誘起する物性の探索 (ZE2025B-04) ……102  
岡田 晋 筑波大学数理物質系
47. 高効率・高機能エネルギー変換に向けた量子物質の基礎物性の解明 (ZE2025B-05) ……104  
小鍋 哲 法政大学生命科学部環境応用化学科
48. 機械学習と量子最適制御を用いたレーザー誘起光化学過程の高効率化 (ZE2025B-06) ……106  
大槻幸義 東北大学理学研究科化学専攻
49. 針電極を用いたパルス界面放電の基礎と効率化 (ZE2025B-07) ……108  
松浦寛人 大阪公立大学研究推進機構
50. 水素製造水電解における水素気泡と酸素気泡の挙動の違いの解明 (ZE2025B-08) ……110  
安東航太 公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI)
51. 高繰り返し赤外パルスによる気体の電離現象の研究 (ZE2025B-09) ……112  
羽島良一 量子科学技術研究開発機構関西光量子科学研究所
52. ヘリオトロンJ装置におけるインコヒーレントデジタルホログラフィを  
用いた三次元発光分布計測システムの開発 (ZE2025B-10) ……114  
川染勇人 香川高等専門学校情報工学科
53. エネルギー産生遺伝子を標的とする RNA 編集技術の開発 (ZE2025B-11) ……116  
福田将虎 福岡大学理学部化学科

54. 高品質錫カルコゲナイド単結晶の作製とその物性評価 (ZE2025B-12) ..... 118  
川西咲子 京都大学大学院エネルギー科学研究科
55. 酸素ドーピングによるカーボンナノチューブ光温度計の計測感度向上 (ZE2025B-13) ..... 120  
青田 駿 兵庫県立工業技術センター
56. 半導体モアレ超格子の合成と光物性 (ZE2025B-14) ..... 122  
張 文金 国立研究開発法人物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センター
57. 特殊なマイクロ空間内で形成された階層性分子組織構造の構造評価 (ZE2025B-15) ..... 124  
沼田宗典 京都府立大学大学院生命環境科学研究科
58. 高強度レーザーと構造型媒質の相互作用による  
高エネルギー密度プラズマの生成と保持 (ZE2025B-16) ..... 126  
岸本泰明 京都大学大学院エネルギー科学研究科
59. 中赤外自由電子レーザーにより半導体表面に形成される  
微細周期構造のその場計測 (ZE2025B-17) ..... 128  
橋田昌樹 東海大学総合科学技術研究所/京都大学化学研究所
60. 農作物の病害感染を防ぐための、簡便・迅速な遺伝子診断手法の開発 (ZE2025B-18) ..... 130  
萩原正規 弘前大学大学院理工学研究科
61. Towards Zero-Emission Agriculture: Advanced Hyperspectral Imaging for  
Early Detection of Coffee Paramyothecium Leaf Blotch (ZE2025B-19) ..... 132  
Ratchadawan Cheewangkoon Chiang Mai University (Thailand)
62. シグナル増強システムを介したナノ構造形成による細胞内金属種の  
A F M/E Mイメージング (ZE2025B-20) ..... 134  
高嶋一平 函館工業高等専門学校
63. 社会共生を促進するトランスサイエンス問題における  
意思決定プロセスの革新 (ZE2025B-21) ..... 136  
岩切宏友 琉球大学教育学部
64. 細胞内エネルギー代謝に影響する遺伝子発現を可視化する  
人工核酸プローブ (ZE2025B-22) ..... 138  
佐藤慎一 熊本大学大学院先端科学研究部

65. Residential Microgrid Design and Management with  
Open-Source Tool and GIS (ZE2025B-23) .....140  
Vannak Vai Institute of Technology of Cambodia (Cambodia)
66. グラム陽性菌感染層への FEL 照射による効率的な感染層除去の検討 (ZE2025B-24) .....142  
遠山歳三 神奈川歯科大学歯学部歯学科
67. 構造的ターゲットへの高強度レーザー照射による  
高エネルギー電子生成に関する実験研究 (ZE2025B-25) .....144  
松井隆太郎 京都大学大学院エネルギー科学研究科
68. Whole genome analysis and culture method development of  
Thai coffee leaf rust fungus (ZE2025B-26) .....146  
Rampai Kodsueb Pibulsongkram Rajabhat University (Thailand)
69. ナノ秒パルスレーザー除染における飛散粉塵の粒径その場計測法の開発 (ZE2025B-27) ..148  
小菅 淳 日本原子力研究開発機構敦賀総合研究開発センター
70. 単原子層物質における励起子輸送の高分解能観察 (ZE2025B-28) .....150  
酒井 優 山梨大学工学部先端材料理工学科
71. モデル内包学習の核融合プラズマ科学への応用  
ープラズマの平衡再構成ー (ZE2025B-29) .....152  
黒江康明 同志社大学モビリティ研究センター
72. サイクロトロン運動による荷電分離を使った直接発電方法の解析 (ZE2025B-30) .....154  
西野信博 有限会社バウヒュッテ
73. 超硫黄分子の輸送機構から解明する生体機能調節システム (ZE2025B-31) .....156  
清水隆之 奈良女子大学大学院自然科学系
74. DNA 三重鎖の塩基対開閉ダイナミクスに対する  
分子込み合い効果の研究 (ZE2025B-32) .....158  
阪本知樹 東京薬科大学薬学部

## (C) 共同利用

75. マイクロ波照射によるセルロース性資源の直接糖化メカニズムの解明 (ZE2025C-01) ……160  
高山定次 核融合科学研究所研究部超高流束協奏材料ユニット
76. ヒト常在菌への FEL 照射によるバイオフィーム形成の変化 (ZE2025C-02) ……162  
河野哲朗 日本大学松戸歯学部組織学講座
77. Na<sup>+</sup>輸送型 NADH-キノン酸化還元酵素の阻害剤作用機構の解明と  
新規阻害剤開発 (ZE2025C-03) ……164  
梶谷貴洋 京都大学大学院農学研究科
78. 相対論的電磁場の超高速計測に関する研究 (ZE2025C-04) ……166  
太田雅人 核融合科学研究所可知化センシングユニット
79. タンパク質間相互作用を光で操作する化学ツールの開発 (ZE2025C-05) ……168  
松尾和哉 京都工芸繊維大学分子化学系
80. 新奇細菌ヌクレアーゼと DNA の相互作用解析 (ZE2025C-06) ……170  
石川聖人 長浜バイオ大学バイオサイエンス学部

## (D) 研究集会

81. 第 2 回 KU-FEL ユーザーミーティング (ZE2025D-01) ……172  
北浦 守 山形大学理学部
82. Biothermology Workshop 2025 (ZE2025D-02) ……173  
坂口怜子 産業医科大学医学部
83. 「広帯域エネルギー融合科学の概念に基づく非線形・非平衡プラズマの物性・制御」に  
関する分散型研究集会 (ZE2025D-03) ……174  
岸本泰明 京都大学大学院エネルギー科学研究科
84. 第 22 回セラミックブランケット相互作用に関する国際ワークショップ (ZE2025D-04) ……175  
向井啓祐 核融合科学研究所超高流束協奏材料ユニット



# 非金属触媒を用いた半導体の化学ダイシング

深見一弘<sup>1</sup>, 鹿住健司<sup>1</sup>, 小島崇寛<sup>2</sup>, 坂口浩司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 緒言

次世代半導体の研究開発は蓄電池や水素製造と並んで、国家レベルで推進される重要な課題である。特に半導体の微細加工プロセスの高速化や高精度化は近年の研究開発における最重要課題といわれている。電子ビームリソグラフィなどを用いたプロセスでは高精度化は可能であるが、描画速度が遅く、その後のエッチング加工も十分な精度が得られない。我々これまで、ゼロエミッションエネルギー研究拠点の共同研究活動を通じて、触媒材料を用いたシリコンの化学エッチングの共同研究を推進してきた。特に近年、金属成分を含まない炭素材料（側鎖修飾型電子供与性グラフェンナノリボン）がシリコンの化学ダイシングにおいて、極めて高活性な触媒として機能することを明らかにしてきた [1]。その他にも、生体内で様々な触媒反応を担うリン P についても共同研究を推進し、新規同素体であるオレンジリンの合成と解析にも成功してきた [2]。このような、金属を含まない軽元素からなる触媒の開発は化学ダイシングのみならず、様々な触媒反応を高効率化するため、非常に重要なゼロエミッションエネルギー研究と位置づけられる。本研究では、シリコンのダイシングへの利用を想定し、オレンジリンのもつ触媒性能を理解するために、その形成メカニズムを明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験

本研究で使用した  $\text{Na}_2\text{P}_{16}$  前駆体溶液は、酸素濃度 0.1 ppm 以下のグローブボックス内で調製した。赤リン、金属ナトリウム、無水 THF を反応させ、得られた溶液を基板上にドロップキャストしてアモルファス  $\text{Na}_2\text{P}_{16}$  薄膜を形成した。オレンジリン合成では、封入した石英セル内で 532 nm DPSS レーザーを 2D 走査し、照射後にエタノールおよびエタノール/水混合液で未反応物と副生成物 Na を除去した。また、 $\text{NaP}_{15}$  を得たのち、5 Pa の減圧下で 250 °C にてアニールすることでオレンジリンへ転換した。

一方、type-II red P の生成には空気中でレーザー照射を行い、同様の洗浄工程によって未反応 Na を除去した。構造解析には Raman 分光、UV-vis-NIR 吸収測定、HAADF-STEM、SAED、EDX、XPS を用いた。計算手法としては、DMol<sup>3</sup> による構造最適化と TS 探索、CASTEP による Raman シミュレーションを実施し、吸着エネルギー評価や反応経路解析に用いた。

## 3. 結果と考察

本研究では、光アシストボトムアップ手法によるオレンジリンの形成機構を、実験結果と DFT 計算を組み合わせることで詳細に検討した。まず、前駆体であるアモルファス  $\text{Na}_2\text{P}_{16}$  薄膜にレーザー照射を行ったところ、光熱効果により結晶化が進み、その後光化学的反応を伴う重合が生じて  $\text{NaP}_{15}$  が形成されることが Raman スペクトル測定により確認できた。特に 405 nm および 532 nm の光では  $\text{Na}_2\text{P}_{16}$  から  $\text{NaP}_{15}$  への変換が進行し、吸収特性と一致した波長依存性が見られた。

DFT 計算による経路解析では、 $\text{Na}_2\text{P}_{16}$  の光誘起分解によって生成する P6]P2[P7 断片が、未分解の

$\text{Na}_2\text{P}_{16}$  とヘテロカップリングする経路が最も低エネルギーであることが分かった。実際に、当該反応スキームの活性化エネルギーは 53.3 kcal/mol と、他の反応経路 ( $\sim 180\text{--}210$  kcal/mol) より著しく低く、レーザー光子エネルギー (2.33 eV) と整合することから、光化学的に優先的に進行する反応機構であると考えられた。このヘテロカップリングにより生成した  $\text{NaP}_{15}$  鎖は末端に反応性の高い  $\text{P}_7$  を保持し、光誘起分解と再カップリングを繰り返すことで鎖伸長が連続的に進むことも確認された。

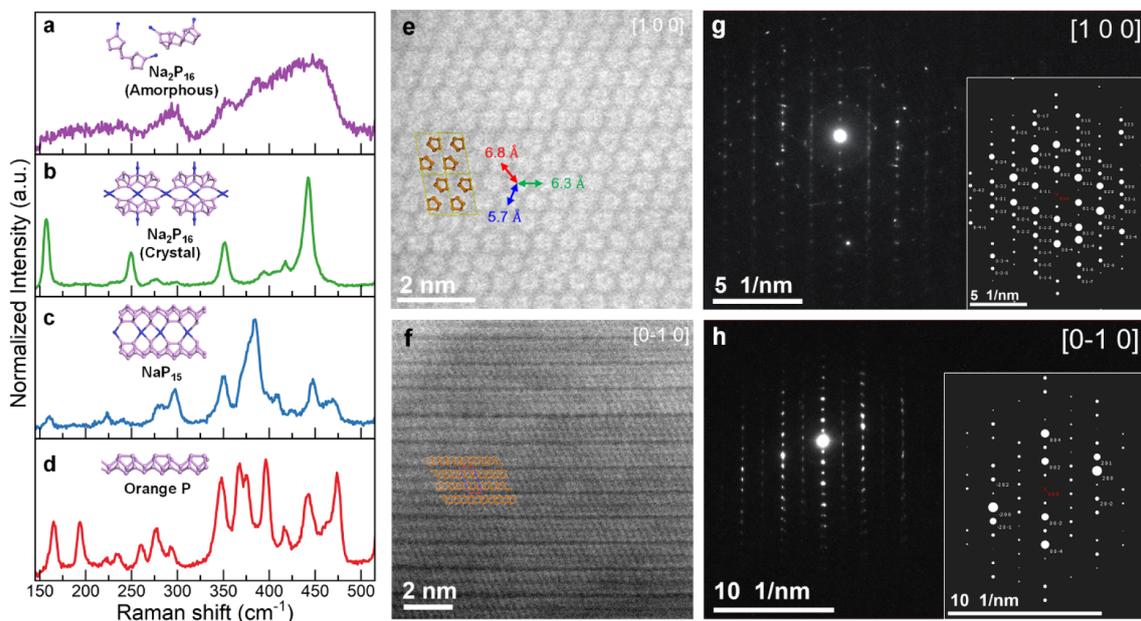


図 1. (a–d) アモルファス  $\text{Na}_2\text{P}_{16}$ 、結晶化した  $\text{Na}_2\text{P}_{16}$ 、生成中間体  $\text{NaP}_{15}$ 、最終生成物であるオレンジリンの Raman スペクトルと対応する分子構造。(e, f) オレンジリンを [100] および [0–10] 方向から観察した HAADF-STEM 像。五角形チューブ構造および一次元鎖構造が明瞭に観察される。(g, h) それぞれの観察方向で得られた SAED パターンとシミュレーションによる回折パターン。

次に、 $\text{NaP}_{15}$  がオレンジリンへ変換する段階における酸素の役割を調べたところ、微量の  $\text{O}_2$  が不可欠であることが明らかになった。1–5 Pa の  $\text{O}_2$  下で熱または光処理を行うと  $\text{NaP}_{15}$  はオレンジリンへ変換したが、10 Pa 以上では逆に分解が進み、生成物が消失することが示された。DFT による吸着解析では、 $\text{O}_2$  は  $\text{Na}^+$  付近に最も強く吸着し ( $-18.46$  kcal/mol)、電子移動を介して  $\text{O}_2^{2-}$  と  $\text{Na}_2\text{O}$  を形成しつつ  $\text{Na}^+$  を鎖から除去することが示唆された。この過程で  $[\text{P}8]\text{P}2[\text{P}3]\text{P}2$  構造が中性化され、局所的な “unzipping” によって再配置が進み、最終的に直線状の  $[\text{P}8]\text{P}2$  [鎖すなわちオレンジリン] が形成されると考えられる。

#### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

P. Qiu, J.M. Wang, T. Kojima, K. Sathiyam, K. Kazumi, K. Fukami, H. Sakaguchi, Formation Mechanism of Orange Phosphorus via Photoassisted Bottom-Up Synthesis, *Inorg. Chem.* **2025**, *64*, 23679–23688,

[受賞、プレス発表等]

該当なし

[口頭発表リスト]

該当なし

# 核融合炉小型化に向けた革新的中性子遮蔽材の開発

## Development of Innovative Neutron Shielding Materials for Miniaturization of Fusion Reactors

笠田竜太<sup>1</sup>, 山村海爾<sup>1,2</sup>, 荻野靖之<sup>1</sup>, 藪内聖皓<sup>1</sup>, 近藤創介<sup>1</sup>, 八木重郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学金属材料研究所

<sup>2</sup> 東北大学工学研究科 (院生)

<sup>3</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

### 1. 序論

昨今、核融合エネルギーの経済性を向上させるために核融合炉の小型化を目指す計画がスタートアップ企業を中心に展開されている。そこでは、高温超伝導材の実用化やプラズマ閉じ込めの革新的なアイデアによって小型化を達成するという目標が示されているものの、小型化によって核融合中性子の遮蔽が困難になることが言及されていることが少ないのは核融合材料工学者として懸念しているところである。例えば従来のトカマクに比べて小型化が可能とされる球状トカマクにおいては、内側ブランケットを設置する領域が構造的に著しく狭くならざるを得ず、高い遮蔽性能を有する中性子遮蔽材の開発が必須となると考えられる。非中性子発生型とされる p-B 核融合においても不純物や多段核反応によって中性子の発生は避けがたいという意見もある。

本研究グループでは、中性子遮蔽性能が高くプラズマとの共存性にも優れることが期待されるホウ化タングステンに着目し、焼結密度や破壊靱性の向上に向けた遮蔽材料開発を進めている。W-B 系の状態図は複雑な金属間化合物相を多く含んでおり、脆性的な破壊を防止するためには適切な組織制御や複合化が必要と考えられるが、高融点であることも相まって十分な焼結密度も達成できていないのが現状である。そこで本共同研究では、当研究グループで焼結密度改善とそれに伴う特性向上を狙って開発を進めるホウ化タングステン Cu サーマット材に対して EPMA 分析を行うことにより Cu の存在状態を明らかにし、今後の材料開発指針を得ることを目的とした。

### 2. 実験結果

ホウ化タングステン粉末に Cu 粉末を混合して 1100°C において通電加熱焼結を行った結果、Cu 未添加材 (理論密度比 76%) よりも密度が 10% 程度向上した焼結体が得られた。EPMA 分析結果によると、図 2 のように Cu はホウ化タングステン粒界を網目状に覆うチャンネル様組織を形成しており、サーマット材料としての機能が期待される焼結体が得られた。しかし、Cu の浸漬が不十分な粒界も見られており、Cu の低い濡れ性が焼結密度向上の限界に関与していることが示唆された。

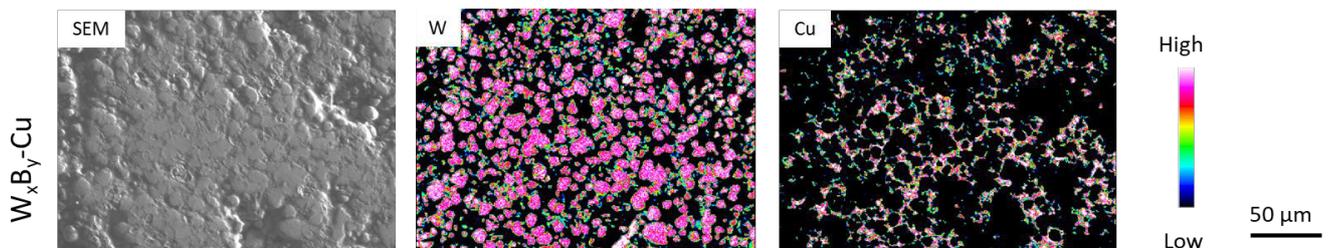


図 2 ホウ化タングステン Cu サーマットの EPMA による元素マップ分析結果

### 3. 今後の予定

次年度は焼結密度向上を狙った改良材の EPMA 分析を進めるとともに、ホウ素の化学状態分布をエネルギー理工学研究所の EPMA に設置された軟 X 線発光分光装置 (SXES) を用いて調べ、ホウ化物相形成状態と材料特性の関係について明らかにする。代表者は既に ZE2020A-13, ZE2022A-02 において他の高融点ホウ化物の EPMA-SXES 分析を実施し幾つかの投稿論文も出版済みであり、興味深い結果が得られるものと期待される。

### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

[論文発表リスト]

1. K.G. Yamamura et al., “Development of Tungsten Boride Cermet for Enhanced Radiation Shielding in Compact Fusion Reactors”, (投稿中)

[口頭発表リスト]

1. K.G. Yamamura et al., ” Optimization of Sintering Conditions for Tungsten Boride Cermets for Application as Radiation Shielding Materials”, 22th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-22), Shizuoka, Japan. Sep. 28 to Oct. 3, 2025 (ポスター)

2. 山村海爾ら、“小型核融合炉用放射線遮蔽材  $W_xBy-Cu$  サーメットの材料特性に及ぼす Cu 合金化の影響”、プラズマ・核融合学会 2025 年会、京都工芸繊維大学、2025 年 12 月 1-4 日

# カリウムイオン電池開発のための化合物系負極の創製と イオン液体電解質との適合性に関する研究

道見康弘<sup>1</sup>, 坂口裕樹<sup>1</sup>, 薄井洋行<sup>1</sup>, 山本貴之<sup>2</sup>, 野平俊之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>鳥取大学大学院工学研究科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

脱炭素社会の構築に向けて再生可能エネルギーの有効利用が切望されており、そのためには高性能な大型定置用蓄電池の開発が急務である。カリウムイオン電池 (KIB)は資源的制約が無いこと (地殻中濃度 K: 2.14%, Li: 0.0018%)に加え、作動電圧もリチウムイオン電池に匹敵する (標準電極電位  $K^+/K$ :  $-2.94$  V,  $Li^+/Li$ :  $-3.04$  V)ため、幅広い用途の蓄電デバイスとして有望である。アンチモン (Sb)は高い理論容量 ( $660$  mA h  $g^{-1}$ )を有するため大変魅力的な KIB 負極活物質であるが、K 吸蔵-放出にともなう大きな体積変化に起因して電極が崩壊してしまうため乏しい充放電サイクル性能しか得られない。そこで、種々の希土類アンチモナイド (RESb)を Sb と複合化させたコンポジットに対して、世話人の山本貴之講師らが開発した KIB 用イオン液体電解質  $K[FSA]-[C_3C_1pyrr][FSA]$ を適用したところ<sup>1</sup>、特に CeSb/Sb 電極が Sb 単独電極の3倍以上も長いサイクル寿命を示すことを見出してきた。また、種々の Sb 系合金の負極特性を調べたところ、特に  $FeSb_2$  電極が比較的高い容量と優れたサイクル安定性を兼ね備えていることも明らかにしてきた<sup>2</sup>。今年度は RESb/Sb コンポジットにおける単体の Sb を  $FeSb_2$  に置き換え、さらなる長寿命化を図った。

## 2. 実験

遊星型ボールミルを用いて RESb/ $FeSb_2$  (10/90 wt.%, RE: Y, La, Ce, Sm, Gd)コンポジット試料を2段階で合成した。1段階目としてメカニカルアロイング法により RESb および  $FeSb_2$  を別々に調製し、2段階目として両者を機械的に混合し目的の活物質を得た。導電助剤にアセチレンブラック (AB)を、結着材に Styrene-butadiene rubber (SBR)を、増粘剤に Carboxymethyl cellulose (CMC)を用いて活物質: AB : SBR : CMC = 70 : 15 : 5 : 10 の重量比で作製したスラリーをデスクトップ塗工機 (宝泉製、HSCM-MJS02)により銅箔基板上に塗布し試験極を作製した。塗工量は  $0.93 \pm 0.08$  mg  $cm^{-2}$  とした。K 金属を対極に、 $K[FSA]-[C_3C_1pyrr][FSA]$  (20:80 mol.%,  $C_3C_1pyrr$ : *N*-methyl-*N*-propylpyrrolidinium, FSA: bis(fluorosulfonyl)amide)をイオン液体電解質として用い 2032 型二極式コインセルを構築した。充放電試験は電流密度  $200$  mA  $g^{-1}$ 、電位幅  $0.005$ – $2.000$  V vs.  $K^+/K$ 、測定温度  $303$  K の条件で実施した。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 は YSb/ $FeSb_2$  電極の充放電曲線を示す。両アンチモナイドの形成エネルギー (YSb:  $-231$  kJ  $mol^{-1}$ ,  $FeSb_2$ :  $-20$  kJ  $mol^{-1}$ 、この値が負に大きいほど安定な化合物)に基づく、YSb は充放電後に Y および Sb 相には分相せず、一方で  $FeSb_2$  は Fe および Sb 相に分相すると推察される。このことを確かめるために充放電後における微細組織を透過型電子顕微鏡 (TEM)により観察したところ、予想通り YSb 相は分相していなかったのに対して  $FeSb_2$  の一部は分相し単体の Sb 相が生じていることを確認した。また、サイクリックボルタンメトリー測定の結果から、YSb/Sb 電極は Sb 単独電極とほぼ同じ電位で K を吸蔵-放出しているのに対して、YSb 電

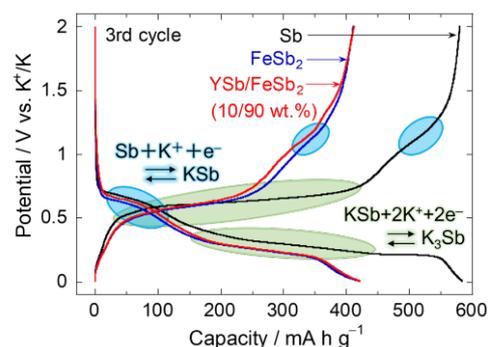


Fig. 1 Charge-discharge curves of YSb/ $FeSb_2$  electrode. For comparison, the results of Sb and  $FeSb_2$  electrodes were also shown.

極は異なる電位で反応していることがわかった。したがって、YSb/FeSb<sub>2</sub> 電極における FeSb<sub>2</sub> は充放電初期において Fe 相と Sb 相に分相し、生じた Sb 相が容量の大部分を担っていると考えられる。

Fig. 2 はこの電極のサイクル寿命を示す。比較として Sb、FeSb<sub>2</sub> および YSb/Sb 電極の結果も示す。なお、この試験は FeSb<sub>2</sub> の分相により生じる単体の Sb の重量当たり 400 mA h g<sup>-1</sup> で充電容量を規制して実施した。Sb 単独電極の場合では 50 サイクル程で容量が減衰してしまったのに対して、YSb をコンポジット化させるとサイクル寿命が約 4 倍伸長した。また、YSb/Sb の単体の Sb を FeSb<sub>2</sub> に置き換えることにより 550 サイクル程と 2 倍以上も性能が向上した。この性能向上メカニズムを RESb の機械的性質、ここでは参考破壊強度に着目して考察した。この値が高いほど硬く、低いほど柔らかいことを意味しているから、容量を担う Sb 相と比較して Fe 相は硬く、YSb 相は柔らかい機械的性質を有していることがわかった (Fig. 3)。したがって、Fe 相は電極層の支持骨格として機能し、YSb 相は充放電時に Sb 相から発生する応力を緩和するため、両相の相乗効果により電極崩壊が抑制されサイクル寿命が向上したと推察される。

種々の RESb を FeSb<sub>2</sub> とコンポジットさせたところ、GdSb、LaSb、CeSb、SmSb および YSb の順にサイクル寿命が向上することがわかった。この性能の違いは RESb の機械的性質の違いに起因すると推察し、サイクル寿命を参考破壊強度に対してプロットしたが、両者に高い相関性は認められなかった。他方、サイクル寿命試験の初期挙動および充放電前後における電極の TEM 観察の結果から、GdSb を用いた場合は FeSb<sub>2</sub> の分相が遅く YSb と複合化すると分相が早いことを見出した。前者では支持骨格として機能する Fe 相が少なく活物質の微粉化、ひいては電極崩壊が起こりやすいと考えられる。他方、後者では Fe 相による支持骨格としての機能および YSb 相による応力緩和の相乗効果が十分に得られ、最も長いサイクル寿命が得られたと結論した。

#### 参考文献

- 1) T. Yamamoto, K. Matsumoto, R. Hagiwara, and T. Nohira, *J. Phys. Chem. C*, **2017**, *121*, 18450–18458.
- 2) Y. Domi, H. Usui, K. Kuritani, N. Wada, K. Nishikawa, T. Takayuki, T. Nohira, H. Sakaguchi, *ACS Appl. Energy Mater.*, **2023**, *6*, 11583–11591,

#### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト] Y. Domi, H. Usui, N. Wada, T. Takayuki, T. Nohira, K. Nishikawa, H. Sakaguchi, “Electrochemical Potassiation/Depotassiation Properties of Rare-Earth Antimonide/Antimony Composite Electrodes”, *ACS Appl. Energy Mater.*, **8**, 15952–15960, 2025, 発行済.

[受賞、プレス発表等] 無し

[口頭発表リスト] 道見康弘, “カリウムイオン電池開発のための化合物系負極の創製とイオン液体電解質との適合性に関する研究”, 2025 年度京大 ZE 拠点年会, 2025 年 12 月 11 日, 京都。[依頼講演] 三木惇嗣, 道見康弘, 薄井洋行, 山本貴之, 野平俊之, 西川慶, 坂口裕樹, “FeSb<sub>2</sub> 系コンポジット電極のカリウムイオン電池負極性能”, 第 66 回電池討論会, 2025 年 11 月 18 日, 名古屋。

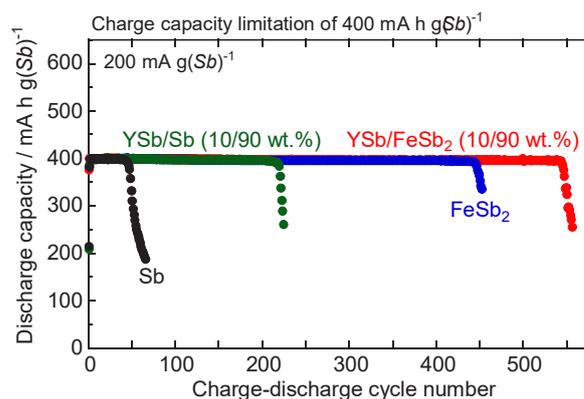


Fig. 2 Cycle life of YSb/FeSb<sub>2</sub> electrodes in K[FSA]–[C<sub>3</sub>C<sub>1</sub>pyrr][FSA]. The results of other Sb-based electrodes were also shown.

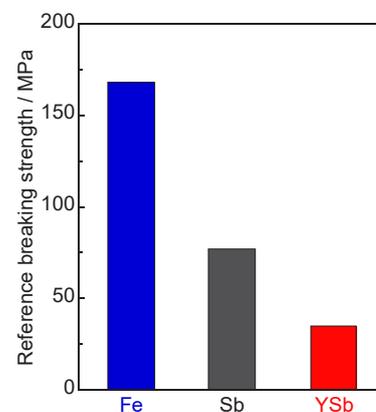


Fig. 3 Reference breaking strength of Fe, Sb and YSb phases.

# 脱炭素社会に向けた NMR 分光法によるリグノセルロース系 バイオマスの構造解析

西村裕志<sup>1</sup>, 牧村裕<sup>1</sup>, 井関優侑<sup>1</sup>, 富士元みゆ<sup>1</sup>, 大西 京子<sup>1</sup>,  
小牧真樹<sup>1</sup>, 近藤敬子<sup>2</sup>, 永田崇<sup>2</sup>, 片平正人<sup>2</sup>

1 京大生生存圏研究所, 2 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 緒言

地球温暖化や資源枯渇問題を背景として、環境調和型の温和な反応条件で木材からリグニン成分や抽出成分を分離し、有効に利活用することが重要な課題となっている。植物バイオマスは、大気中の CO<sub>2</sub> を吸収・固定して形成される再生可能資源であり、ゼロエミッション社会構築において重要な役割を担っている。特に、陸生バイオマスの大部分を占める木質系バイオマスから、高付加価値の有機素材を創出しつつバイオエネルギーを同時に生産することで、プロセス全体としての経済性と低環境負荷を両立させることが重要である。このようにして、植物バイオマスを包括的に利活用することは、ゼロエミッション型社会の構築やカーボンネガティブの達成に寄与すると考えられる。また、木材を含む植物にはアルカロイド類などの有用な抽出成分を含むものもあり、これらの解析および利活用は、植物バイオマスの総合的利用を進める上で重要である。

## 2. 方法

リグノセルロースバイオマスおよびその変換試料の分子構造を解析・評価するため、溶液 NMR 法を用いた。解析対象として、針葉樹・広葉樹を含む各種木質バイオマスに加え、薬用植物として利用されてきた広葉樹キハダ (*Phellodendron amurense*) の木部および樹皮試料を用いた。これらの試料について、リグノセルロースおよび抽出成分の分子構造解析を行った。

木質バイオマスを直接分析する場合、木材や植物試料といった固体試料をできるだけ温和な条件下で溶解する必要があるため、遊星型ボールミル装置を用いて 3–6 時間の微粉碎処理を行い、試料へのダメージを最小限に抑えた。微粉碎後の試料は、NMR 用重水素標識溶媒 (DMSO-*d*<sub>6</sub>) に溶解し、5 mm NMR 試料管に 500 μL の試料溶液を封入して測定を行った。

NMR 測定には Bruker 社製 600 MHz NMR 装置 (cryoprobe 装着 AVANCE III) を使用し、主として 2 次元 NMR (HSQC) 測定を実施した。また、キハダに含まれる低分子抽出成分についても、同様の NMR 測定条件下で構造解析を行った。

## 3. 結果と考察

本研究では、これまでにリグノセルロースの分子構造解析を通じて、木質バイオマスの複雑な細胞壁構造、特にリグニンと多糖から成る高次構造の理解を進めてきた。植物細胞壁中に形成されるリグニンマトリックスは、バイオマス変換における大きな障壁として知られており、その克服は、リグニン、糖成分、さらには微量成分を統合的に利活用する環境調和型プロセスの確立に不可欠である。植物バイオマスは大気中 CO<sub>2</sub> を固定する再生可能資源であり、その高度利用はカーボンニュートラル材料循環の観点からも重要な意義を持つ。

これらの背景のもと、本研究では、これまでエネルギー理工学研究所・片平正人教授らとの共同研究を通じて蓄積してきた「木質バイオマスの定量 2D-NMR 解析法」や「リグニン-多糖間結合の構造解析」に関する知見を基盤として、リグノセルロースの構造理解をさらに深化させた。共同利用拠点

に整備された NMR 装置に実装された独自の測定・解析手法を活用することで、温和な条件下で調製した木質試料について、分子レベルでの構造情報を高い再現性で取得することが可能となった。

今年度の取り組みとしては、広葉樹キハダ (*Phellodendron amurense*) を対象に、LDI-FT-ICR-MS イメージングを用いた組織レベルでの成分分布解析を行い、薬効成分として知られるベルベリンなどのアルカロイド類が特定の組織に局在していることを明らかにした。あわせて、2D-HSQC NMR 解析により、これら成分の構造同定を行った (口頭発表 1)。キハダは日本における代表的な薬用植物であり、その内樹皮に含まれるアルカロイド類は古くから利用されてきたが、樹体全体に占める割合はごく限られている。本研究により、これら有用成分の組織特異的分布を把握するための基礎的知見が得られた。リグニンの部分構造解析と低分子成分の構造情報を併せて整理することで、植物細胞壁中の芳香族成分ネットワークと生理活性物質の存在形態に関する理解を深めるための基礎的知見が得られた。

#### 4. 成果リスト

##### [論文リスト]

1. Chen, Q., Mikame, K., Ohashi, Y., Nishimura, H., Koike, K., Watanabe, T. Characterization of an Oligomeric Lignin-Derived UV Absorber Produced from Hardwood Beech. ACS Omega, 10, 22960-22969 (2025)

##### [口頭発表リスト]

1. Fujimoto, M., Nishimura, H. “Enhancing the Utilization of “Kihada” (*Phellodendron amurense*): Distribution of Medicinal Alkaloids.” The 10th ARN Symposium, National Cheng Kung University (NCKU), Tainan, Taiwan, 2025 年 9 月 17 日 (ポスター発表)
2. Nishimura, H. “革新 GX による植物バイオマス新素材創製、持続可能な循環型社会を実現” TECHNIUM Global Conference, 2025 年 5 月 8 日 (招待講演)
3. 西村裕志 “植物バイオマスの潜在力を活かす新技術で循環型未来社会を実現” 第 1 回「京都ディープテック研究・交流会」 (虎ノ門ヒルズ・ハイブリッド開催), 2025 年 9 月 5 日 (招待)
4. 西村裕志 “持続可能な社会に挑む、グリーンケミカルスタートアップ最前線” INNOVATION LEADERS PROGRAM PEAK TRIAL (オンライン), 2025 年 5 月 29 日 (招待)
5. 西村裕志 “植物バイオマスの分子多様性が拓く循環型社会” 2025 年度 JPEC フォーラム (カーボンニュートラル燃料技術センター), 2025 年 5 月 13 日 (招待)
6. 西村裕志 “植物バイオマス新素材で、自然と調和した未来を創る” MEET UP CHUBU, 2025 年 10 月 9 日 (招待講演)
7. 西村裕志 “植物バイオマスから環境調和型プロセスでつくるリグニン素材” イノベーションリーダーズサミット (ILS2025) 2025 年 12 月 2 日
8. 西村裕志 “京大発マテリアル革命、新素材リグニンが循環型産業を拓く” ILS2025 中小機構スタートアップピッチ (ILS2025) 2025 年 12 月 2 日

##### [書籍等]

1. 西村裕志 (分担執筆) 『リグニンの科学』 (リグニン学会 編) 海青社, 2026 年. ISBN: 978-4-86099-408-2
2. 西村裕志 (分担執筆) 『京大大学生存圏研究所 (編) 京大研究でわかるサステナビリティ』オーム社, 2025 年. ISBN: 978-4-274-23347-0

# 酵素反応中心への光増感分子の導入による酵素複合体の 発光特性および光誘起電子移動反応

高島 弘<sup>1</sup>, 橋本 彩花<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>奈良女子大学理学部化学生物環境学科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 序

現在、生命・医療・環境・エネルギー問題などの観点から、クリーンなエネルギーである光（太陽光）を利用する生体分子の機能発現システムの開発が注目を集めている。生体内では光合成を始めとした、光を利用したエネルギー生産やゼロエミッションな代謝経路等が良く知られており、それらの本質である重要な素過程として、蛋白質・酵素が中心的な役割を担う、高速・高効率な多段階電子移動・エネルギー移動反応が挙げられる。我々は、蛋白質・酵素が行う複雑な生体内光電子・エネルギー移動反応を、より単純化した系として人工的に再構築することで、その反応機構の解析や新たな蛋白質の光電子移動・エネルギー伝達を利用した反応系への応用に向けての基礎的研究を進めてきている。

このような観点から、蛋白質・酵素とその反応中心へ共有結合を介して結合する小分子の作用機序に着目して、光増感分子・光機能分子と酵素からなる複合体の構築とその発光特性の検討や、多段階的な光誘起電子移動反応系の開発を行っている。具体的には、構造・機能が良く知られている加水分解酵素キモトリプシンやトリプシンに着目し、その反応中心への特異的共有結合によって人工的な酵素複合体を構築した。また、電子アクセプターの添加により、生体内多段階電子移動反応において重要な反応中間体とされる、蛋白質ラジカル種の安定な生成も可能となった。本研究は、複雑な生体内多段階電子移動反応の素過程解明や、ゼロエミッションな人工光合成を視野に入れた蛋白質の光触媒反応活性発現などへ向けた、有意義な基礎的知見を与えると期待される。

## 2. 実験および結果

研究初年度からの取りかかりとして、光増感作用や発光特性を有する金属錯体および有機 $\pi$ 電子系化合物の、加水分解酵素である CHT や TRP 反応中心への導入を行い、その光電子移動・エネルギー移動反応解析を行ってきた。例として、トリス(2,2'-ビピリジン)型ルテニウム(II)錯体およびその類縁化合物と酵素との複合体を構築し、その光誘起電子移動反応について検討した。その結果、ルテニウム錯体の MLCT 吸収極大波長においてレーザー光励起したときの過渡吸収スペクトル測定から、この複合体において、CHT 中のチロシン残基(Tyr 94)からの蛋白質内電子移動によって生じたと考えられる、チロシンラジカル由来シグナルの観測に成功した。

そこで近年の研究では、2,2'-ビピリジンに限らず、有機 $\pi$ 電子系化合物の光励起状態安定性を系統的に検討するため、図 1 に示したような種々の窒素含有 $\pi$ 電子系配位子の合成を行なっている。

今年度は、図 2 に示したようなイリジウム(III)錯体について結晶構造解析を行った。さらに、これらのりん光発光特性について、実験的および DFT 計算による理論的アプローチから詳細に検討し、励起状態由来の発光機構を明らかにした。

これらの成果の一部については、今年度の学会で発表した。

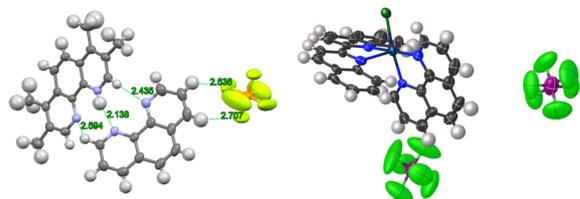


図 1 種々の窒素含有 $\pi$ 電子系配位子のプロトン付加体およびそれらのイリジウム(III)錯体の構造例

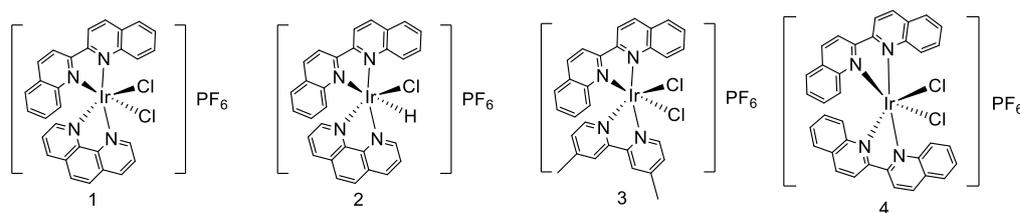


図2 開発したイリジウム(III)錯体の例

## [共同研究との関連性]

発光性 $\pi$ 電子化合物の同定については、質量分析計などによる分子量の評価が不可欠であるため、本共同研究を通じて所内の設備機器である「日本電子製 JMS-T100LP」および「島津製作所製 MALDI-TOF-MS AXIMA」などを利用した。これらの測定により、精製された化合物全体の分子量の決定が可能となった。装置の利用にあたっては、中田栄司教授に大変多くのサポートを頂いた。また、本研究計画の遂行には、分析を行う際に必要となる分析用消耗品、クロマトグラフィー担体、各種ガラス器具類が不足していたため、研究経費はそれらの消耗品の購入に多くを充て、残り一部は共同利用での訪問にかかる旅費交通費に充てた。

## 3. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

## [口頭発表リスト]

- 1) Hiroshi Takashima · Shoko Yamazaki · Yoshitane Imai · Norimitsu Tohnai · Eiji Nakata, “CPL Properties of Bis-1,8-Naphthalimide Derivatives and Their Analogues Based on Intramolecular Excimer Fluorescence”, International Conference on Chiroptical Science 2025, 2025年9月19日, 京都府立大学 (ポスター)
- 2) 橋本彩花 · 高島弘 · 山崎祥子 · 藤内謙光 · 中田栄司, “2,2'-ビキノリン配位子を用いたイリジウム(III)錯体の発光特性”, 錯体化学会第75回討論会, 2025年9月15日, 長崎大学 (ポスター)
- 3) 奥田紗矢香 · 高島弘 · 今井喜胤 · 藤内謙光 · 山崎祥子 · 中田栄司, “光学活性なビス-2,3-ナフタルイミド誘導体の分子内エキシマー形成とその発光特性”, 第35回基礎有機化学討論会, 2025年9月9日, 名古屋大学 (ポスター)
- 4) 直江麻美 · 高島弘 · 今井喜胤 · 藤内謙光 · 山崎祥子 · 中田栄司, “光学活性なビス-1,8-ナフタルイミド誘導体およびその類縁体の分子内エキシマー形成に基づく円偏光発光特性”, 第35回基礎有機化学討論会, 2025年9月9日, 名古屋大学 (ポスター)
- 5) 高島弘 · 橋本彩花 · 山崎祥子 · 藤内謙光 · 中田栄司, “2,2'-ビキノリン配位子含有イリジウム(III)錯体の構造および発光特性”, 2025年光化学討論会, 2025年9月5日, 立教大学 (ポスター)
- 6) 岩瀬由樹 · 高島弘 · 今井喜胤 · 藤内謙光 · 山崎祥子 · 中田栄司, “1,1'-スピロジヒドロインダン骨格を有するキラルビス1,8-ナフタルイミド誘導体の合成と性質”, 第36回配位化合物の光化学討論会, 2025年8月6日, 高知プリンスホテル (ポスター)
- 7) 橋本彩花 · 高島弘 · 山崎祥子 · 藤内謙光 · 中田栄司, “2,2'-ビキノリン配位子を用いたイリジウム(III)錯体の合成と発光特性”, 第36回配位化合物の光化学討論会, 2025年8月6日, 高知プリンスホテル (ポスター)
- 8) 奥田紗矢香 · 高島弘 · 今井喜胤 · 藤内謙光 · 山崎祥子 · 中田栄司, “キラルビス-2,3-ナフタルイミド誘導体の分子内エキシマーに基づく発光特性”, 第22回ホストゲスト・超分子化学シンポジウム, 2025年6月8日, 東京大学 (ポスター)

# 細胞内小器官の高効率エネルギー生成機構の解明

坂口 怜子<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産業医科大学 医学部、<sup>2</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所

細胞内の小器官であるミトコンドリアは、生物が活動するために必須なエネルギーの産生を担っている。ミトコンドリアのエネルギー産生システムは非常に効率が高いことが知られており、外部環境の変化や体内におけるエネルギー需要に応じて産生するエネルギーを調節している。その際、重要な役割を果たしているのが「温度」であり、生物は効率の良いエネルギー産生・消費のために、状況に応じた温度制御を細胞小器官のレベルで能動的に行っている。ミトコンドリアなどの細胞内小器官内の温度の経時変化や空間分布を測定する事が出来れば、生物の用いている効率の良いエネルギーシステムに対する知見が得られ、応用に繋がると考えられるが、細胞内の温度を直接的に計測する手法は限られている。また、哺乳類の熱産生に関しては、特定の細胞内小器官からの熱産生が提唱されているが、これを直接的に評価する方法が不十分であったことから、熱産生の定量的な議論や実際の体温変化への寄与はほとんど理解されていなかった。申請者らはこれまでに、サルモネラ菌由来の温度感知タンパク質である TlpA と GFP を融合した、細胞内および細胞内小器官の温度計測を可能とする温度センサータンパク質(tsGFP)を開発してきた。TlpA は、温度上昇に伴い、そのコイルドコイル構造が可逆的に変化する転写制御タンパク質である。この TlpA のコイルドコイル領域の一部を、GFP の N 末端および C 末端に結合させることで tsGFP シリーズを設計した。そのうちの一つ、tsGFP1 は、哺乳動物の体内温度に相当する、37°C 付近の温度変化を鋭敏に感知し、励起スペクトルの 2 つの極大 (400 nm と 480 nm) の変化をレシオメトリックな変化として検出することができた。また、TlpA が形成するコイルドコイル領域の長さやアミノ酸配列を操作し、熱安定性を変化させることで、鋭敏に感知できる温度領域を制御することが可能である。

これまでも、細胞内の温度変化を図るセンサーとして、温度感受性ポリマーや有機小分子、量子ドットなどが報告されているが、これらの細胞内温度センサーと比べた tsGFP の大きな利点として、タンパク質ベースであることから、遺伝子を導入するだけで非侵襲的に生細胞内・組織内で発現させることができ、さらに細胞内小器官局在シグナル配列を付与することで、各小器官における特異的な観察が可能であることが挙げられる (図 1)。これらの tsGFP1 センサーの誘導体を用いて、申請者らは小胞体特異的な熱産生や、ミトコンドリア内の不均一な温度分布の可視化にも成功している。これらの変化はいずれも、細胞質内に発現する tsGFP1 では検出できない事象であり、熱やエネルギーが産生されるまさにその場所で温度計測を行う事の重要性を示唆している。さらに、HeLa 細胞のミトコンドリアの中では「活発にエネルギー産生 (ATP 産生) を行っている領域は温度が高い」という相関関係が存在することを、ミトコンドリア型 tsGFP1 (tsGFP1-mito) を用いて実証している (Kiyonaka *et al.*, *Nature Methods*, 2013, Kiyonaka *et al.*, *Nature Methods*, 2015)。

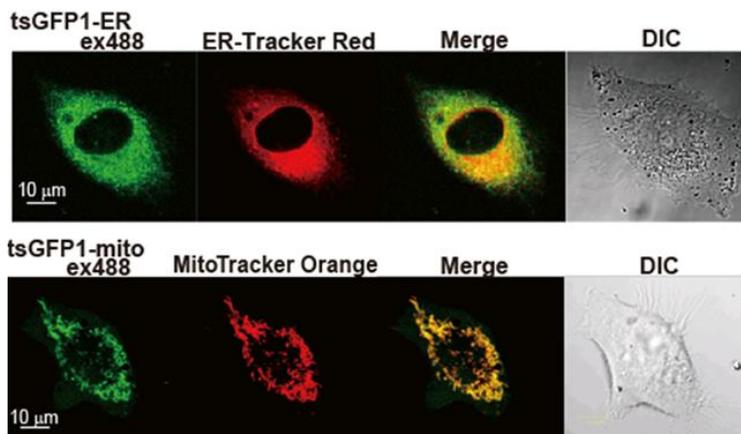


図 1 細胞内局在シグナルを付加し、任意の細胞内小器官に発現させた tsGFP1 誘導体の傾向顕微鏡画像。(Kiyonaka *et al.*, *Nature Methods*, 2013 より一部改変)。

本研究では、測定できる温度領域の拡張を目指して、タンパク質工学の手法で tsGFP1 中のアミノ酸への変異導入を試みた。tsGFP1 中のコイルドコイル構造はロイシンジッパー構造を有しており、4 番目のロイシン同士が疎水性相互作用を引き起こすことにより、 $\alpha$ -ヘリックスが二量化する。この二量化体の熱安定性を低下させると、GFP 部分の蛍光強度変化域が低温側にシフトすると考えられる。そこで、このロイシンをプロリンに置き換える変異を設計した。プロリンは水素結合が形成できないため、プロリン周囲では  $\alpha$ -ヘリックス構造が崩れることが知られている。この変異を挿入することによって、

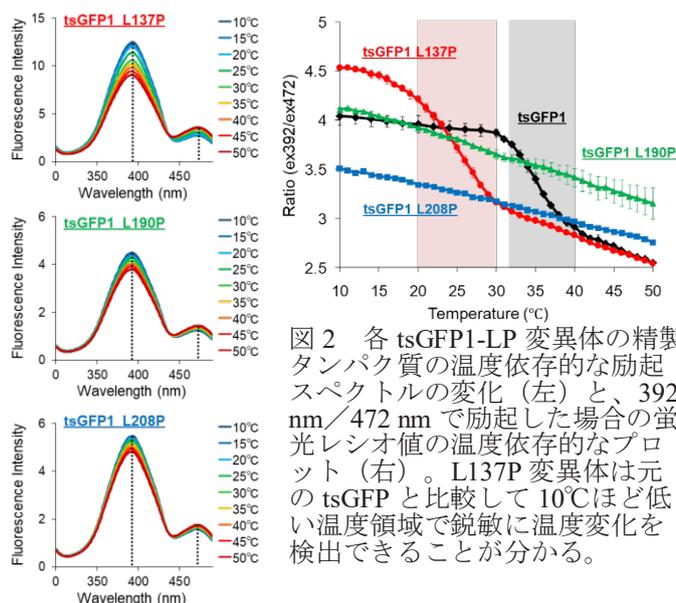


図2 各 tsGFP1-LP 変異体の精製タンパク質の温度依存的な励起スペクトルの変化 (左) と、392 nm/472 nm で励起した場合の蛍光レシオ値の温度依存的なプロット (右)。L137P 変異体は元の tsGFP と比較して 10°C ほど低い温度領域で鋭敏に温度変化を検出できることが分かる。

本来のロイシン同士の相互作用が消失し、コイルドコイル構造を部分的に不安定化させ、温度上昇による解離の促進が期待できる。tsGFP1 のコイルドコイル内に含まれる 20 個のロイシンをそれぞれプロリンへ変異させたときの安定性の変化をシミュレーションしたところ、137 番目、190 番目、208 番目のロイシンを置き換えた変異で、コイルドコイル構造の安定性が大きく減少することがわかった。そこで、それぞれの変異体を作製し、これらの変異体を L137P, L190P, L208P とした。

次に、作製した変異体の温度依存的な蛍光レシオ値を測定したところ、L137P において、20°C から 30°C の間で蛍光レシオ比が大きく減少する挙動を示した。一方、L190P, L208P は温度上昇に伴い、徐々に蛍光強度が減少し、特筆すべき急峻な変化は見られなかった (図 2)。

さらに、GFP 部分の二量体形成を抑制する変異体の作製を試みた。これまでの報告により、GFP の 206 番目のアラニンをリジンに変換 (A206K) すると、GFP の二量化が阻害されることが知られている。作製した L137P に対して A206K 変異を挿入することで、GFP の二量化による立体的な束縛が解消され、効率的に  $\alpha$ -ヘリックス構造の二量化を起こすことが期待された。しかし、GFP に A206K 変異を挿入した変異体では、蛍光レシオ比の急激な変化が消失した。この結果から、温度感受性に重要な蛍光レシオ比の鋭敏な変化に、GFP の二量化が不可欠であることが示唆された。

[論文発表リスト]、[受賞、プレス発表等]

いずれも該当なし

[口頭発表リスト]

○坂口怜子、中田栄司、「細胞内小器官の高効率エネルギー生成機構の解明」  
2025 年度 ZE 拠点年会、京都大学、25/12/11.

# 赤外自由電子レーザーを用いた繊維の分解研究

川崎 平康<sup>1</sup>, 全 炳俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 目的

衣類は人々の生活に欠かせない必需品であるが、使われなくなった古着の大半は有効活用されることがなく廃棄されている。燃やせばCO<sub>2</sub>排出につながり、土壌に捨てられる化学繊維は環境汚染を引き起こしている。このような環境悪化の状況を食い止めるためには使用済み繊維を再生又は再資源化する技術開発が必要である。本研究では、繊維を分解し産業上有用な物質に変換するための新たな方法を開発することを目的として KU-FEL を用いた共同利用・共同研究を実施した。

## 2. 方法

- 1) ポリエステル等の化学繊維及びタンパク質繊維の赤外吸収スペクトル(FT-IR)を測定し(高エネルギー研の装置を使用)、吸収の強い波長を特定した。
- 2) 各繊維試料約 1 g を反応容器に添加し、赤外吸収の強い波長で KU-FEL をパラボリックミラーを用いて真上方向から集光しながら 10~30 分間繊維材料に照射した。その後ガラス管に試料を回収した。
- 3) エレクトロスプレーイオン化質量分析(ESI-MS)装置(物質・材料研究機構の共同利用設備)及び放射光赤外顕微鏡(UVSOR の BL6B)を用いて KU-FEL 照射後の繊維の構造を解析した。

## 3. 結果及び考察

タンパク質繊維の質量スペクトルでは、KU-FEL 照射後には質量 1000 付近のフラグメントピークが顕著に増大したことが判明した(図1)。

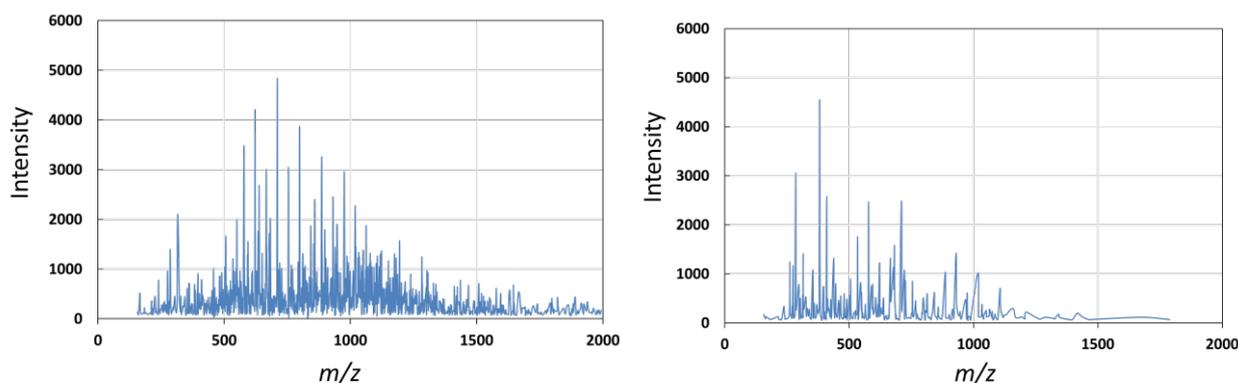


図1 タンパク質繊維の ESI-MS スペクトル  
(左) 照射後 (右) 照射前

化学繊維の遠赤外領域スペクトルでは、KU-FEL 照射によって 400-600  $\text{cm}^{-1}$  のバンドの形状が大きく変化した (図 2)。

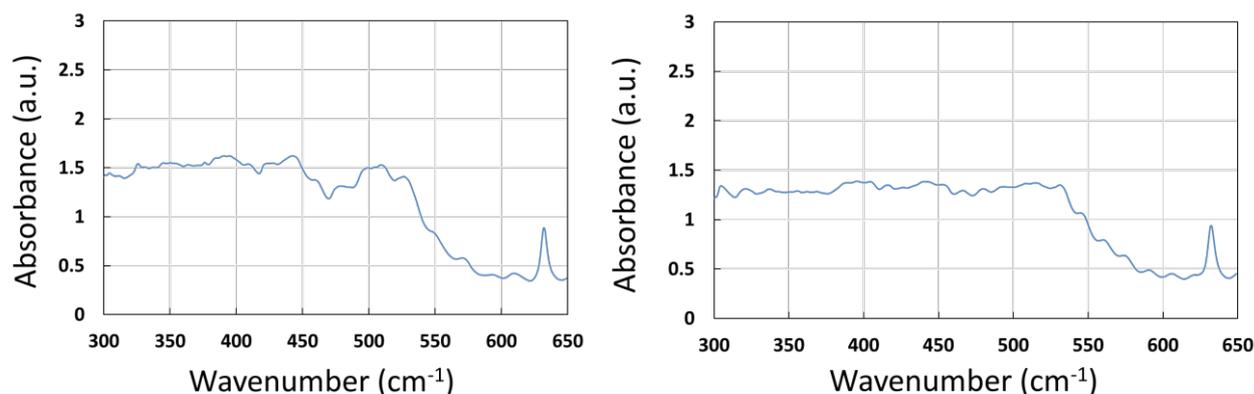


図 2 化学繊維の遠赤外領域スペクトル

(左) 照射後 (右) 照射前

以上の結果から、KU-FEL の照射によって繊維構造が大きく変化することが明らかとなった。今後は NMR 等を用いて詳細に解析を行う予定である。

#### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

(1) T. Kawasaki, A. Nagase, K. Hayakawa, F. Teshima, K. Tanaka, H. Zen, F. Shishikura, N. Sei, T. Sakai, and Y. Hayakawa, “Infrared Free-Electron Laser: A Versatile Molecular Cutter for Analyzing Solid-State Biomacromolecules” *ACS Omega*, 2025, 10, 13860–13867. 発行済

(2) T. Kawasaki, H. Zen, K. Nogami, K. Hayakawa, T. Sakai, and Y. Hayakawa, “Direct Analysis of Solid-Phase Carbohydrate Polymers by Infrared Multiphoton Dissociation Reaction Combined with Synchrotron Radiation Infrared Microscopy and Electrospray Ionization Mass Spectrometry” *Polymers*, 2025, 17, 2273. 発行済

[口頭発表リスト]

川崎平康, 長瀬敦, 宍倉文夫, 早川建, 境武志, 早川恭史, 全炳俊, 手島史綱, 田中清尚

“分子振動励起反応を用いたセルロース及びキチンの分解” セルロース学会第 32 回年次大会、北海道立道民活動センター 2025 年 7 月 10-11 日

# 複合体構造に基づいた細胞増殖を制御する機能性ペプチドの創生に向けた研究

楠英樹<sup>1</sup>、天野亮<sup>1</sup>、水上拓郎<sup>1</sup>、永田崇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国立健康危機管理研究機構、<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 背景

これまでの化石燃料からクリーンなバイオ燃料へ変換し、大気中の CO<sub>2</sub> を削減することは地球温暖化を防ぐ上で重要である。また、バイオ燃料となる植物の成長を制御するバイオ技術は、クリーンエネルギーの獲得に有用であり、ゼロエミッションエネルギーに貢献できると期待される。ウイルス蛋白質の中には宿主蛋白質と直接相互作用して、細胞増殖を制御できるものがあり、そのウイルス蛋白質由来ペプチドもまた全長と同様に機能できることが知られている。つまり、そのようなウイルス蛋白質由来ペプチドは、将来、植物の成長を制御する機能性ペプチドに成り得る可能性が高く、ゼロエミッションエネルギーに役立つことが期待される。その一例として、B 型肝炎ウイルス (HBV) X 蛋白質 (HBx) は、細胞増殖制御因子 LC3B と直接相互作用し細胞増殖を誘導する。つまり、HBx ペプチドは細胞増殖を制御できる有用な機能性ペプチドに成り得る可能性が高いと考えられる。これまで、我々は、LC3B と直接結合できる HBx の領域を同定し、実際にこの領域を含むペプチドが LC3B に結合することを GST プルダウン、等温滴定カロリメトリー (ITC)、核磁気共鳴 (NMR) 解析を用いて明らかにしてきた (ZE2024A-23)。同時に、NMR による HBx ペプチド-LC3B 複合体構造解析を試みてきた。本年度は、HBx ペプチド-LC3B 複合体構造を決定し、その複合体構造に基づいて、HBx ペプチド (野生型) より LC3B に強く結合する HBx 改変体ペプチドの創生を目的として研究を進めた。

## 2. 方法

【サンプル調製】HBx ペプチド (残基 116-127) [HBx(116-127)]、3 つの N 末側アミノ酸 [バリン 116 (Val116)、フェニルアラニン 117 (Phe117)、リジン 118 (Lys118)] をアスパラギン酸 (Asp) に置換した改変体 [HBx(116-127)-K118D (KD)、HBx(116-127)-F117D/K118D (FKDD)、HBx(116-127)-V116D/F117D/K118D (VFKDDD)、120 番目のトリプトファン (Trp120) と 123 番目のロイシン (Leu123) をアラニンに其々置換した HBx(116-127)-W120A/L123A (WLAA)、LC3B を GST 融合蛋白質発現系で其々調製した。GST プルダウンアッセイのため、GST-HBx(116-127)、上記 3 つの GST-HBx(116-127) 改変体、GST-HBx(116-127)-W120A/L123A を GST アフィニティーカラムで精製した。NMR 構造解析と ITC 解析のため、非標識体と <sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N 又は <sup>15</sup>N で安定同位体標識した HBx(116-127) と LC3B、上記 3 つの非標識体 HBx(116-127) 改変体を下記のように調製した。GST-HBx(116-127)、3 つの GST-HBx(116-127) 改変体、GST-LC3B を GST アフィニティーカラムで精製した後、トロンピンで各 GST 融合蛋白質から HBx(116-127)、その改変体、LC3B を切り離した。最終的にサイズ排除クロマトグラフィーで各サンプルを精製した。

【NMR 構造解析】HBx(116-127) と LC3B の複合体構造を決定するため、Bruker 社 600MHz AVANCE III HD (極低温高感度プローブ装着) を用いて、測定温度 25°C で NMR 測定を実施した。NMR 測定用緩衝液は 20 mM リン酸カリウム緩衝液 (pH 7)、50 mM NaCl、10% D<sub>2</sub>O、0.02 mM DSS とした。さらに、安定同位体標識した HBx(116-127) と LC3B を混合したサンプルについて一連の 3 重共鳴 NMR 測定を実施した。得られた NMR 制限情報を用いて、CYANA で構造計算を行い最終的に 20 個の複合体構造を取得した。

【結合実験】精製した GST-HBx(116-127)、3 つの GST-HBx(116-127) 改変体、GST-HBx(116-127)-W120A/L123A、LC3B を用いて GST プルダウンアッセイを実施した。また、HBx(116-127)、3 つの HBx(116-127) 改変体、LC3B を用いて ITC 実験を実施した。

### 3. 結果および考察

HBx ペプチドがどのように LC3B と結合しているかを解明するため、NMR による複合体構造を決定した。その結果、HBx ペプチドの Trp120 から Leu123 までと N 末側を除いた LC3B の構造は良く収束していた。また、HBx ペプチドは LC3B と結合したとき「伸びた構造」を形成すること、2つの疎水性残基 Trp120 と Leu123 が LC3B の疎水性ポケットに入り込むことが示唆された（データ未提示）。一方で、HBx ペプチドの N 末側 3 残基 (Val116-Phe117-Lys118) の収束度合いは顕著に低かった。その理由として、HBx の N 末側 3 残基周辺には LC3B の塩基性アミノ酸 (Arg10、Arg11、Lys51) が存在しており、その結果、HBx の塩基性アミノ酸 Lys118 と反発する可能性が示唆された。そこで、HBx ペプチドの 118 番目の Lys を Asp に置換した HBx(116-127)-K118D、117 番目と 118 番目の Phe と Lys を Asp に其々置換した HBx(116-127)-F117D/K118D、116 番目、117 番目、118 番目の Val、Phe、Lys を Asp に其々置換した HBx(116-127)-V116D/F117D/K118D をデザインし (図 1A)、LC3B との結合能を GST プルダウンアッセイで調べた。その結果、HBx ペプチド

(野生型)と上記 3 つの HBx 改変体ペプチドは LC3B と結合することが示唆された (図 1B)。一方で、HBx(116-127)-W120A/L123A において、LC3B との結合を示すバンドは見られなかった (図 1B)。次に、ITC 解析で各サンプルの LC3B に対する  $K_D$  値を求めた (図 1C-F)。その結果、野生型は  $K_D$  値が 654 nM、HBx(116-127)-K118D は  $K_D$  値が 40 nM、HBx(116-127)-F117D/K118D は  $K_D$  値が 5.1 nM、HBx(116-127)-V116D/F117D/K118D は  $K_D$  値が 4.2 nM という結果が得られた。これらの結果は、HBx ペプチドの N 末側を酸

性アミノ酸の Asp 残基に置換し、さらに Asp 残基の数が増えることにより、LC3B との結合が強くなることを示した。これは、置換された Asp 残基が LC3B の塩基性残基 Arg10、Arg11、Arg51 の何れかとイオン結合を形成している可能性が高い。本研究において、我々は、構造生物学視点から、野生型より LC3B と強く結合できる HBx 改変体ペプチドの創生することができた。LC3B とより強く結合できる HBx 改変体ペプチドは、野生型より低濃度で細胞増殖を制御できることが期待される。

今後は、今回見出した HBx 改変体ペプチドがどのように LC3B と結合しているかを NMR 及び MD シミュレーション解析から明らかにする予定である。

### 4. 「論文発表リスト」

なし

### 5. 「発表リスト」

楠英樹、天野亮、水上拓郎、永田崇

複合体構造に基づいた細胞増殖を制御する機能性ペプチドの創生に向けた研究

2025 年度 ZE 拠点年会、2025 年 12 月 11 日、京都大学 ポスター発表

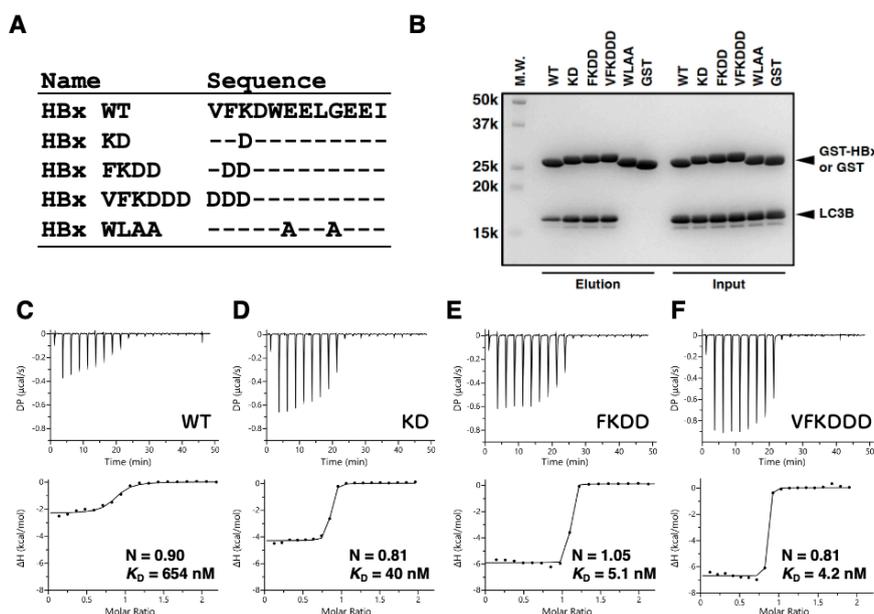


図1 HBx改変体ペプチドとLC3Bの相互作用解析

(A)HBx改変体ペプチドの1次配列。(B)GSTプルダウンアッセイ。(C-F)ITC解析。

# ワイドギャップ半導体における コヒーレントフォノンの定量的評価

吉田恭平<sup>1</sup>, 全炳俊<sup>2</sup>, 蜂谷寛<sup>3</sup>, 大垣英明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>熊本県産業技術センター 材料・地域資源室

<sup>2</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所 <sup>3</sup>京都大学 エネルギー科学研究科

## 1. 研究背景

固体の格子振動（フォノン）は、その材料の物理的・電気的性質を決定する重要な因子である。近年は、フォノンの吸収波長に対応するエネルギーの光を発する中赤外パルスレーザーにより、光学的かつ非熱的に特定のフォノンモードの選択励起（Mode-Selective phonon excitation: MSPE）が可能となっている[1-4]。MSPEは、固体材料の金属-絶縁体転移、超伝導、磁性などの物性制御を実現でき、エネルギー材料の開発に重要な技術として注目されている。超伝導や金属-絶縁体転移などの物性制御を精密に行うためには、中赤外パルスレーザー照射によって励起される特定のフォノンの定量的な評価、すなわち MSPE で励起されるフォノンの励起個数分布の観測が重要となる。これまでに、中赤外レーザー（KU-FEL : FEL）を用いて SiC における MSPE の FEL エネルギー依存性を検証し、FEL の照射エネルギーとフォノン励起個数（温度換算）との相関を明らかにした。本研究では、ラマン散乱分光装置の回折格子の刻線数を従来比 2 倍（600 line/mm）に変更し、観測するスペクトルの高分解能化を図ることで、より精密なコヒーレントフォノンの定量評価の実現を目指した

## 2. 実験原理

本研究では、MSPE 時のフォノンの励起個数の観測のために、ラマン散乱分光を用いる。ラマン散乱分光は、励起光と同じエネルギーのレイリー散乱光、励起光のエネルギーがフォノンのエネルギーの分だけ増加されたアンチストークスラマン散乱(ASR)光、励起光のエネルギーがフォノンのエネルギー分だけ低下したストークス散乱(SR)光の3種の光が観測される。ここで、ASR 光と SR 光は、測定対象の温度( $T$ )との間で下記の式で表される関係にある[5]。 $\nu_R$ 、 $\Omega$ 、 $h$ 、 $c$ 、 $k_B$ 、 $I_{ASR}$ 、 $I_{SR}$  は、励起光（レイリー散乱光）の周波数、フォノン周波数、プランク定数、光速、ボルツマン定数、周波数  $\Omega$  の ASR 光の強度、周波数  $\Omega$  の SR 光の強度である。

$$\frac{I_{ASR}}{I_{SR}} = \left( \frac{\nu_R + \Omega}{\nu_R - \Omega} \right)^4 \exp\left(-\frac{hc\Omega}{k_B T}\right) \dots (1)$$

式(1)に示す様に、ASR 光と SR 光の強度比は、サンプルの温度に依存していることがわかる。すなわち、ASR 光と SR 光の強度が明らかになれば、サンプルの温度（フォノンの励起個数）の定量評価が可能となる。本研究では、サンプルの温度を変化させ、その温度の ASR 光と SR 光の強度比を測定し検量線を作成する。その後、MSPE を行ったときの ASR 光と SR 光の強度比から、検量線を用いてその強度比に対応する温度を明らかにし、MSPE 時のフォノンの励起個数を明らかにする。

## 3. 実験装置

構築した光学系を図 1 に示す。励起光として 532 nm の波長の光を発振する Nd:YVO<sub>4</sub> レーザー（プローブレーザー）を用いた。試料とする SiC ウェハ（単結晶 6H-炭化ケイ素: 6H-SiC）は、温度調節可能なチャンバー内に設置し、5 K まで冷却した。FEL の波長を 10.4  $\mu$ m (FLO フォノンの吸収波長)、FEL の照射強度を 0.5 mJ から 8.0 mJ まで掃引した時のラマン散乱スペクトルについて、FEL の強度依存性を測定した。チャンバーの窓材として、中赤外パルスレーザー(KU-FEL)およびプローブレーザーを透過する KBr、可視光であるラマン散乱光を透過する CaF<sub>2</sub> を用いた。ラマン散乱光をレンズで集光したのち、分光器および検出器 (Intensified CCD 検出器 (ICCD)) によりスペクトル測定を行なった。本研究では、刻線数 600 line/mm、ブレイズ波長 500 nm で、厚みを 6 mm と分光器の光学系に最適化させた回折格子を導入し、スペクトルの高分解能化を測った。

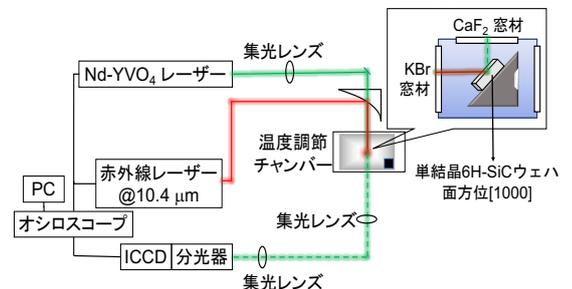


図 1 実験装置概要

4. 結果

本測定で観測されたストークスラマン散乱スペクトルを図 2 に示す。コヒーレントフォノンの定量評価にむけた検量線を作成するために、6H-SiC ウェハの温度を 220 K ~ 300 K の範囲で変化させ、ストークスラマン散乱およびアンチストークスラマン散乱スペクトルの FLO フォノンに相当する  $965\text{ cm}^{-1}$  のピークの温度依存性を測定した。図 2 示すように、ストークスラマン散乱においてピークにショルダーが観測された。このショルダーは、 $990\text{ cm}^{-1}$  にピークを持ち、LOPC モードに由来するラマン散乱光であることがわかった。LOPC モードは、LO フォノンとは異なる温度依存性を示すことが明らかとなっている。よって、検量線作成時に LOPC モードのピークは除外する。本結果より、新たに導入した回折格子で精密にラマン散乱分光測定が可能であることが明らかとなった。

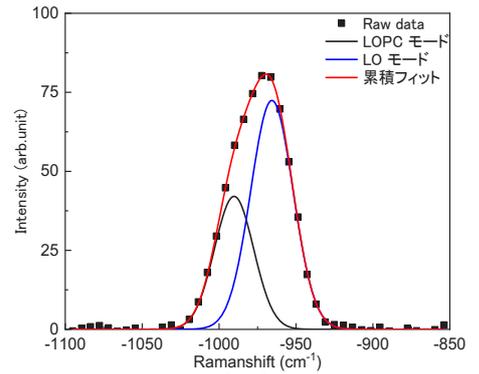


図 2 FEL 未照射時のストークスラマン散乱スペクトル@300 K

FEL とプローブレーザーを同時照射することで、SiC から和周波 (SFG) と差周波 (DFG) が発生することが明らかとなっている。すなわち、コヒーレントフォノンを生成させるために 6H-SiC に FEL を照射することで、SFG と DFG が ASR 光および SR 光と同じエネルギーのピークとして生成する。そこで、SFG と DFG の強度比を他の波長であらかじめ測定し、コヒーレントフォノン生成のための FEL とプローブレーザーの同時照射で発生する SFG と DFG の強度比を調べた。その結果、SFG/DFG は、2.80 となることがわかった。

次に、 $10.4\text{ }\mu\text{m}$  の FEL 照射時のストークス側 (低エネルギー側) のラマン散乱スペクトルピーク面積から、FEL 未照射時のストークス側のピーク面積の差分を取ることで DFG 強度を算出し、SFG/DFG の比率よりアンチストークス側 (高エネルギー側) で観測されるピークの SFG 強度 (面積) を計算した。FEL 照射時のアンチストークス側のピーク面積から、算出された SFG の強度の差分を取ることで、ASR 光の強度 ( $I_{ASR}$ ) を算出した。同時に、フォノンの励起個数算出のためには、SR 光の強度の算出が必要となる。ここで、SR 光は、温度によらず一定近似できる。よって、FEL 未照射時の低エネルギー側のラマン散乱のピークを SR 光として、その強度を SR 光の強度 ( $I_{SR}$ ) とした。ここで、所定の FEL のパルスエネルギーと  $I_{ASR}$  と  $I_{SR}$  の強度比 ( $\ln(I_{ASR}/I_{SR})$ ) の相関性 (図 3(a)) と、作成した検量線により、FEL 照射時のコヒーレントフォノンの励起個数分布を温度の関数として算出した (図 3 (b))。図 3 に示すように、FLO フォノンのコヒーレントフォノンの励起個数分布は、FEL のパルスエネルギーに対して、非線形に増加することが明らかとなった。また、最大出力の FEL (8 mJ) で、およそ 1500 K に相当する励起個数のコヒーレントフォノンが生成されることが示唆された。今後、再現性の確認と、励起個数分布の理論的な検証を行う。

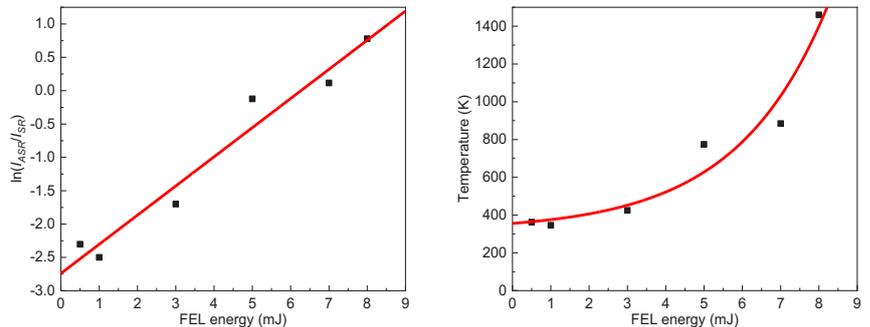


図 3(a) FEL パルスエネルギーと  $\ln(I_{ASR}/I_{SR})$  の相関、(b) FEL パルスエネルギーとコヒーレントフォノンの励起個数分布 (温度換算)

分布は、FEL のパルスエネルギーに対して、非線形に増加することが明らかとなった。また、最大出力の FEL (8 mJ) で、およそ 1500 K に相当する励起個数のコヒーレントフォノンが生成されることが示唆された。今後、再現性の確認と、励起個数分布の理論的な検証を行う。

[1] Kyohei Yoshida, et al., Appl. Phys. Lett., 103, 182103 (2013) [2] Muneyuki Kagaya, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 56, 022701 (2017) [3] Oji Sato, et al., Phys. Lett. A, 384, 126223 (2020) [4] Rei Akasegawa, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 60, 102001 (2021) [5] Hiroataka Fujimori, et al., Appl. Phys. Lett., 79, 937 (2001)

5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

- 1) 村田 智哉, 吉田 恭平, 全 炳俊, 蜂谷 寛, 紀井 俊輝, 増田 開, 大垣 英明, “時間分解アンチストークスラマン散乱分光を用いた中赤外パルスレーザーによる選択的フォノン励起の直接的証明”, Journal of the Japan Society of Infrared Science and Technology, (印刷中)

[口頭発表リスト]

- 1) Kyohei Yoshida, Heishun Zen, Kan Hachiya, Hideaki Ohgaki, “The quantitative estimation of coherent phonon on wide-bandgap semiconductors” ZE 報告会 2025 年 12 月 11 日, 宇治おうばくプラザ (ポスター)
- 2) 吉田 恭平, 全 炳俊, 蜂谷 寛, 大垣 英明, “ラマン散乱分光法を用いた SiC におけるコヒーレントフォノンの励起状態の評価”, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 2025 年 9 月 9 日, 名城大学 天白キャンパス (ポスター)

## 原子炉を延命させる熱処理条件の導出 (4)

松川義孝<sup>1</sup>, 牟田浩明<sup>2</sup>, 森下和功<sup>3</sup>, 藪内聖皓<sup>3</sup>

<sup>1</sup>熊本大学 大学院 先端科学研究部 物質材料生命工学研究部門

<sup>2</sup>大阪大学 大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 環境エネルギー材料工学領域

<sup>3</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所 エネルギー基盤材料研究分野

ギガワット級の原子炉の建設コストは、30年前は1基当たり3000~4000億円であったが、現在は安全基準の見直しと物価上昇のため1兆円になると見積もられている。経済水準が30年前から殆ど成長していない日本では、年間純利益が1兆円を超える企業が4社しかない。原子炉の新規建設にかかる経費は当然、電気料金の値上げで賄われることになるが、日本の電気料金は現時点で既に中国の3倍である。カーボンニュートラル2050の計画通りに化石燃料を全廃して電力需要が急増することになれば、日本の製造業の国際的な競争力は、相対的に更に落ちていくことになるだろう。このような状況を危惧した経団連に後押しされて、規制庁は2023年に、原子炉の運転期間延長の法的制約を見直した。法的な寿命を延ばすことは勿論重要であるが、物理的な寿命を延ばせるのであれば、それに越したことはない。圧力容器は金属材料製であるため、適切な熱処理を施せば、経年劣化をリセットすることが可能である。これはかなり大規模な構造物であるため、それをオンサイトで熱処理することは技術的に不可能であると思われていたが、この問題については最近ロシアでブレイクスルーがあった。2018年にロスアトム社が、ロシア製の加圧水型軽水炉(VVER-1000)の圧力容器を熱処理する技術を実用化することに成功した<sup>1-2)</sup>。VVER-1000は西側の加圧水型軽水炉(PWR)とサイズがほぼ同じであり、ロスアトムはPWRにも適用可能であると公式にアナウンスしている<sup>3)</sup>。しかしながら、2022年にロシアがウクライナに武力侵攻したことによって、この技術は日本で利用できなくなってしまった。代替技術をこれから開発するのであれば、実用化までにかかなり時間がかかるだろう。それまでに圧力容器の照射脆化は着実に進行する。ロスアトムは運転期間が30年程度の炉にこの熱処理を施して成果を上げているが、60年超の炉に対してどこまで有効かは未知数である。それを解明することが本研究の目的である。

圧力容器(鋼)の照射脆化の主な要因は、中性子照射によって導入された点欠陥が不純物や合金元素の拡散を促すことによって、それらがナノサイズの粒子となって析出することである。析出物の内訳は、運転開始から数年間は不純物(Cu)であるが、30年超の長期運転では合金元素(Ni, Si, Mn)である。Ni-Si-Mn析出物は、最終的にG相Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>などの金属間化合物になるが、多くの場合、その前駆段階である溶質元素クラスターの状態に留まっていると考えられている。両者の違いは結晶構造であるが、析出物のサイズが極端に小さいため、判別することは最新の分析装置を駆使しても容易ではない。ロスアトムの熱処理条件は実機の監視試験片を用いた熱処理実験から導出した値であるが、その試験片に含まれていた析出物が化合物か否か、化合物であるのならばどの化合物なのかは不明である。彼らの熱処理条件(565°C100時間)は、鋼に析出したG相をマトリックスに再固溶させるのに必要とされる熱処理条件(750°C100時間)<sup>4)</sup>よりも温度がかなり低い。溶質元素クラスターは熱力学的に準安定な状態であるため、理論上、化合物よりも比較的低い温度でマトリックスに再固溶する。また、析出物が化合物であった場合、再固溶の臨界温度は化合物の種類によって当然異なる筈である。

本研究の具体的な目的は、析出物が化合物になってしまった場合でもロスアトムの熱処理(565°C100時間)で再固溶させることは可能か否か、それを調査することである。検討すべき化合物は、G相を含めて10種類ある。鋼にこれらの化合物を析出させたモデル合金を用意できるのであれば理想的だが、析出物の種類をコントロールすることは容易ではないため、現実的な実験プランではない。本研

究では代替案として、拡散対を使用して再固溶温度を同定することを試みる。拡散対とは、析出物とマトリックスの界面を模擬したモデル試料であり、化合物の単相インゴットと純鉄を拡散接合して作製する。代替案ではあるが、この手法では界面に跨る相互拡散を EPMA で詳細に分析できるため、拡散係数を定量的に評価できるというメリットがある。本研究では拡散対を作製するために化合物の単相インゴットをアーク溶解で作製するが、Ni-Si-Mn 三元系化合物の単相インゴットを作製すること自体、前例がない試みである。

昨年度までは主に G 相 ( $\text{Ni}_{16}\text{Si}_7\text{Mn}_6$ ) と  $\Gamma_2$  相 ( $\text{Ni}_3\text{SiMn}_2$ ) について検討した。この 2 つの化合物を用いた拡散対の実験によって、ロスアトム熱処理条件で分解して再固溶する化合物としない化合物があることが明らかとなった。G 相は前者、 $\Gamma_2$  相は後者である。

今年度は G 相と  $\Gamma_2$  相以外の 8 種類の化合物について、単相インゴットと拡散対を作製することを試みた。単相化に成功したのは 8 種類中 4 種類である (S 相  $\text{NiSiMn}_2$ 、 $\Gamma_1$  相  $\text{Ni}_{10}\text{Si}_8\text{Mn}_9$ 、N 相  $\text{Ni}_9\text{Si}_8\text{Mn}_3$ 、E 相  $\text{NiSiMn}$ )。最終的に、拡散対作製に成功したのは 4 種類のうち S 相のみであった。 $\Gamma_1$  相に関しては、接合はできたが各元素の拡散が著しく不均一であり、拡散実験には不適な状態であった。N 相と E 相は、接合温度が  $850^\circ\text{C}$  (純鉄が bcc 構造を保持される上限温度) という制約下では、接合自体が不可能だった。これは N 相と E 相が、ロスアトム熱処理温度よりも遥かに高い  $850^\circ\text{C}$  まで加熱しても、分解・再固溶しないことを意味している。

以上、これまで 4 年を費やした本研究テーマを総括すると、化合物の単相インゴットを作製できたのは 10 種類中 6 種類のみであったが、そのうちの 2/3 はロスアトム熱処理条件で分解・再固溶しないことが明らかとなった。これは压力容器の高経年化が進行して析出物が化合物になってしまった場合、その 2/3 は熱処理では取り除けないことを意味する。析出物が化合物に相変化するタイミングが運転期間に換算して何年目に相当するのかは未だ明らかではないが、いずれにしても、延命熱処理は可能な限り早期に実施した方が安全であるということが明らかとなった。さらに、単相インゴットが作製できなかった化合物が 4 種類もあったという事実から、既存の状態図は不正確であることが明らかとなった。状態図は熱力学データベースの精度を判断する指針である。状態図の精度を向上させることは、析出を予測するモデルの定量精度を向上させるために必要不可欠である。次年度以降は、状態図を修正することを第一の目的とした新規の研究テーマとして、本研究を推進する。

## [参考文献]

- 1) <https://www.neimagazine.com/features/featurerenewal-by-annealing-7171272/>
- 2) [https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-has-piloted-an-innovative-annealing-technology-enabling-life-extension-of-large-capacity-rea/?sphrase\\_id=550945](https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-has-piloted-an-innovative-annealing-technology-enabling-life-extension-of-large-capacity-rea/?sphrase_id=550945)
- 3) <https://rosatomnewsletter.com/2021/02/25/taking-care-of-old-plants/>
- 4) J.M. Vitek et al., Metall. Trans. 18A (1987) 1987–1195.

## [学会発表リスト]

- 1-2) 国際会議にて 3 件口頭発表 (内 2 件は招待講演)  
IGRDM2025 @ Nara, Japan (Invited), Thermec2025 @ Tour, France (Invited), ICFRM-22 @ Shizuoka, Japan
- 3-5) 国内会議にて 3 件口頭発表 (内 1 件は招待講演)  
原子力学会 2025 年秋、金属学会 2025 年春、東北大学金属材料研究所 大洗・アルファ合同研究会 2025 (Invited)

# rf-GD-OES 分析によるリチウムイオン伝導性固体電解質内部の電子伝導発現メカニズムの解明

新村潔人<sup>1</sup>, 八木重郎<sup>2</sup>, 佐々木一哉<sup>1</sup>, 向井啓祐<sup>3</sup>, 高橋伊久磨<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 弘前大学リチウム資源総合研究機構

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

<sup>3</sup> 自然科学研究機構核融合科学研究所

<sup>4</sup> 千葉工業大学工学部先端材料工学科

## 1. 背景

リチウム資源の安定供給は経済安全保障上きわめて重要である。Li<sup>+</sup>導電率が高く、かつ Li<sup>+</sup>輸率が 1 であるリチウムイオン伝導性固体電解質 La<sub>0.57</sub>Li<sub>0.29</sub>TiO<sub>3</sub> (LLTO) の緻密焼結体板を隔膜として用いる電気透析法は、高選択的なリチウム資源採取技術として有望である。しかしながら、本技術では LLTO 隔膜に高電圧を印加するとリチウム抽出速度は増大する一方で、LLTO の構成元素である Ti<sup>4+</sup>が Ti<sup>3+</sup>に還元され、電子伝導性の発現に伴う電流効率の低下などの問題が生じる。この現象は、Ti<sup>4+</sup>/Ti<sup>3+</sup>の酸化還元電位よりも高電位である LLTO のアノード側表面近傍においても Ti<sup>4+</sup>の還元が進行することを意味しており、その発現機構の解明が求められている。我々はこれまでに、マークス型高周波グロー放電発光分光分析 (rf-GD-OES) を用いた解析により、高電圧印加時に LLTO 隔膜のアノード側およびカソード側の両表面近傍 (サブサーフェス領域) において Li<sup>+</sup>密度が増大することを明らかにしてきた。また、2つの電源と3つの電極を用いる独自のセル構造 (2電源3電極式セル) と電位制御を組み合わせることで、LLTO 隔膜に高電圧を印加した場合でも Ti<sup>4+</sup>の Ti<sup>3+</sup>への還元が抑制されることを見出した。これらの知見を総合すると、LLTO は高電圧印加前には Li<sup>+</sup>輸率が 1 であり、ペロブスカイト型結晶構造の A サイトに約 13% の格子欠陥を有しているが、高電圧印加時にはサブサーフェス領域における Li<sup>+</sup>密度の増大により電荷の不均衡が生じ、それを補償するために Ti<sup>4+</sup>→Ti<sup>3+</sup>の還元が誘起される、という新たなメカニズムが考えられる。本仮説に基づけば、2電源3電極式セルに高電圧を印加した場合には、サブサーフェスにおける Li<sup>+</sup>密度の増大は生じないと予想される。そこで本研究では、2電源3電極式セルに高電圧を印加した際の LLTO サブサーフェス領域の Li<sup>+</sup>密度を rf-GD-OES により評価し、上述の仮説の妥当性を検証することを目的とした。

## 2. 実験方法

市販の LLTO 板 (東邦チタニウム製) の表裏両面に、パターン/スペース=0.5 mm/0.5 mm のモデル電極を Pt ペーストによりスクリーン印刷し、1100 °C、1h、大気中で焼成して電極を形成した。リード線には Pt 線を用い、ガラスフリットを含む Pt ペーストで仮固定後、同条件で焼成し固定した。作製した LLTO 板をアクリル製セルに挟み、二次側タンクの沖合に Ni メッシュ電極を配置することで、Li<sup>+</sup>電気透析用セルを構築した。一次側には 4 mol/L の LiOH 水溶液、二次側には超純水をそれぞれ充填した。溶液量を確保するため、一次側および二次側の双方にポンプと外部タンクを接続した (図 1)。LLTO 電極間および二次側の Pt-Ni 間にそれぞれ直流電源を接続し、所定の電圧を印加して電気透析を行った。電気透析後の溶液中 Li 濃度は誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP-OES) により測定した。また、Li<sup>+</sup>伝導後の LLTO 板について、一次側および二次側の表面近傍における Li、Ti、および O の存在量を rf-GD-OES により評価した。

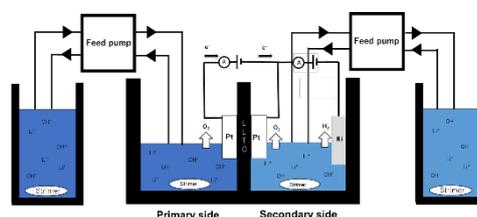


図 1 2電源3電極式セル。

### 3. 結果および考察

電気透析時間に対する電流値の変化を図2に示す。実験開始時の二次側溶液を超純水（低伝導率）としたため、初期37hはLLTO電極間のみ電圧を印加した。二次側溶液中の $\text{Li}^+$ 濃度がある程度まで高くなった後、2電源3電極式電気透析に切り替え、LLTOへの印加電圧を段階的に上昇させた。電圧の上昇に伴い、電子伝導の発現を示唆する電流挙動が観察された。 $\text{Li}^+$ 輸率は、ICP-OESにより求めた実際のリチウム移動量を、電流値の時間積分から得られる電荷量を用い、 $\text{Li}^+$ 輸率=1を仮定したファラデーの法則に基づく理論的リチウム移動量で除して求めた。

その結果、ICP-OESにより求めた実際のリチウム移動量は0.76 gに対し、理論的移動量は1.38であり、 $\text{Li}^+$ 輸率は0.55と算出された。このことから、本条件下において電子伝導が発現していることが確認された。図3に、一次側および二次側表面から深さ方向に対するrf-GD-OESの測定結果を示す。Pt電極と露出したLLTO領域を同時に測定したところ、ある深さ以降ですべての元素強度が増加し始めた。これは、スパッタリングフロントがLLTO層に到達したことを示している。一次側では、TiおよびOの強度が深さとともに増加した一方で、Liのシグナルは減少した。二次側では、OおよびLiは一次側と同様の挙動を示したが、Tiの挙動は異なっていた。Tiシグナルは初期に増加した後、わずかに減少し、その後はほぼ一定となり、全体として一次側よりも高い強度を示した。一次側および二次側の両方におけるLi強度の低下は、両側の表面近傍にLiが過剰に存在していることを示唆している。これは、セル動作中の電気化学的リチウム抽出に伴うLi移動により、表面近傍にLi過剰領域が形成された可能性を示すものである。

また、LLTO表面における非対称な還元反応あるいは構造変化の可能性も考えられる。特に二次側では、 $\text{Ti}^{4+}$ の $\text{Ti}^{3+}$ への還元がより強く進行した、あるいは表面再構成が生じた結果、スパッタリング挙動および見かけの元素強度が変化した可能性が示唆される。

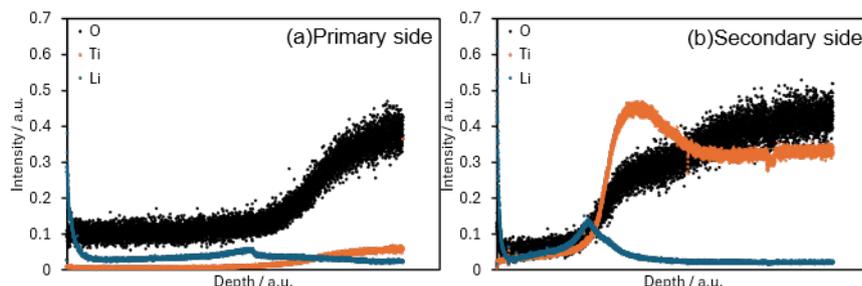


図3 (a) 一次側、(b) 二次側表面から深さ方向へのrf-GD-OES。

### 4. まとめ

本研究では、リチウムイオン伝導性固体電解質LLTOを隔膜とする電気透析法において、高電圧印加時に発現する電子伝導の起源を明らかにすることを目的として、2電源3電極式セルを用いた電気透析実験およびrf-GD-OESによるサブサーフェス解析を行った。その結果、2電源3電極式電気透析においても高電圧印加条件下では $\text{Li}^+$ 輸率が0.55に低下し、電子伝導の発現が確認された。rf-GD-OES分析により、一次側および二次側の両表面近傍においてLi強度の低下が観察され、LLTOサブサーフェス領域におけるLi過剰状態の形成が示唆された。また、Tiの深さ方向プロファイルには一次側と二次側で顕著な非対称性が認められ、特に二次側では $\text{Ti}^{4+}$ の $\text{Ti}^{3+}$ への還元や表面再構成がより強く進行している可能性が示された。本研究により、電子伝導発現は単なる電極反応やバルク特性ではなく、サブサーフェスにおけるLi分布と結晶構造変化に強く起因する現象であることが示唆された。以上より、LLTOを用いた高効率リチウム回収プロセスの実現には、サブサーフェスにおける $\text{Li}^+$ 密度制御およびTi還元の抑制が重要である。本研究の知見は、固体電解質を用いた電気透析法の高電圧動作限界の理解および高性能化に向けた設計指針を与えるものである。

[論文発表リスト] なし

[受賞、プレス発表等] なし

[口頭発表リスト] なし

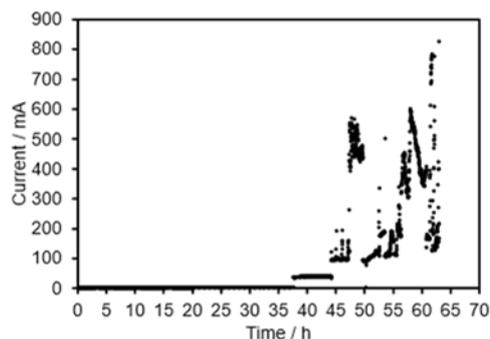


図2 電気透析の時間に対する電流変化。

# 高強度中赤外パルスによる有機分子の蛍光物性制御

筒井祐介<sup>1</sup>, 坂本隆紀<sup>1</sup>, 全炳俊<sup>2</sup>, 関修平<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 緒言

材料の発光特性は、励起状態からの非放射・放射過程の競合で説明される。新たな材料の戦略的な開発のためには、発光のミクロな機構を分子論的に理解することでこれらを制御し、望みの機能性材料を戦略的に創成できる環境の構築が必須である。ゼロエミッションに向けた材料開発領域において、このような戦略的な分子設計指針の確立は重要な課題である。本研究ではこのような背景に基づき、分子の振動と電子状態の結合をミクロな観点で理解する測定を提案・実施することを目的とした。

## 2. 実験方法・結果

電子励起状態からの発光緩和過程と、京都大学自由電子レーザー施設 (KU-FEL) で発生できる中赤外 (MIR) パルスを用いた分子振動励起を組み合わせ、どのような振動モードが発光過程の阻害・促進に寄与しているのか、ミクロなメカニズムを探索する。図 1 に示すベンゾフルオレノン誘導体を合成して発光特性を評価したところ、励起状態においてプロトンが移動する現象 (Excited State Intramolecular Proton Transfer: ESIPT) が起きていることが分かった。プロトン互変異性を光で操作するため、電子励起状態を生成する 355 nm ナノ秒パルスと、FEL から発生する高強度 MIR パルス ( $1000 \text{ cm}^{-1}$ ) を同時に照射したところ、FEL 照射強度の上昇に伴い蛍光量の減少が確認された (図 1 下段)。別途取得した高温と低温の蛍光スペクトルの差分 (図 1 上段) とスペクトル形状は類似している。これについて電子基底状態の振動励起が引き起こす現象 (蛍光量は増加または減少)・単純な温度上昇 (蛍光量は減少) が考えられるが、今回の実験では蛍光量の増加は確認できず原因の切り分けまでは至らなかった。基板を熱伝導性の高いものに変更するなどの工夫が必要だと考えられる。

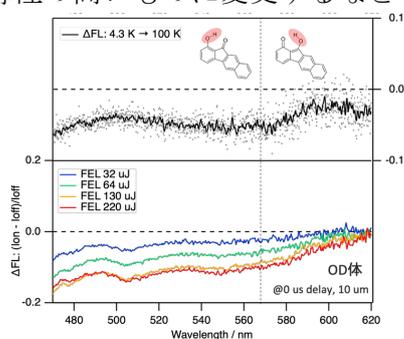


図 1: 上段: 4.3 K と 100 K でのベンゾフルオレノン誘導体の蛍光スペクトルの差分。下段: FEL 照射 ( $1000 \text{ cm}^{-1}$ ) が引き起こした蛍光強度の変化。

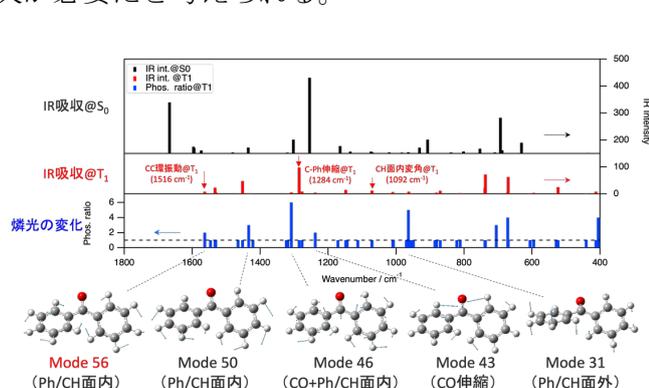


図 2: ベンゾフェノンの振動スペクトルの理論計算。モード 56 を励起することで燐光強度が増加すると考えられる。

また、長い寿命を持つ燐光に着目して、ベンゾフェノン結晶中で三重項状態 ( $T_1$ ) を効率的に生成し、その振動励起を行う実験を実施した。理論計算を用いて三重項状態のどの振動モードが燐光の増加を促すかを評価したところ、パイ電子系が分布するカルボニル基や Ph 基の振動励起が有効に働く必要条件であることが明らかになった (図 2)。過渡赤外分光での振動モードの観測 (S. Yabumoto, S. Sato, H. Hamaguchi *Chem. Phys. Lett.* 2005, 416, 100) や電子基底状態の振動モードとの良好な分離を考慮し、モード 56 の Ph/CH 面内振動の励起を行うことにした。

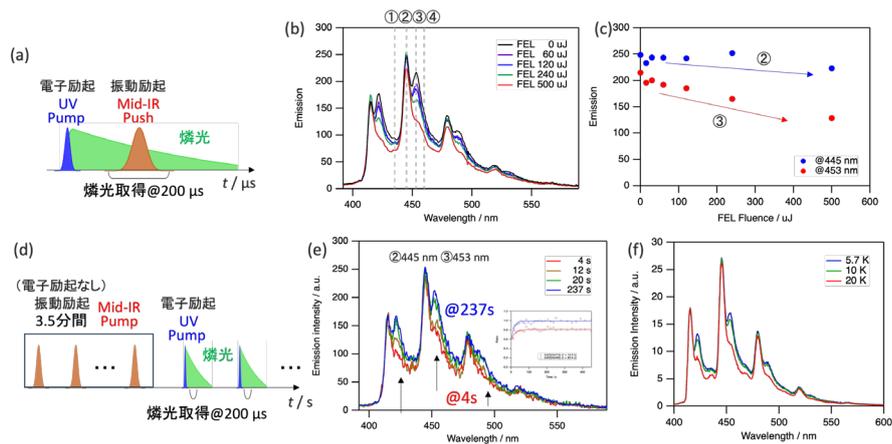


図 3: (a) 実験で使用したパルスの関係。(b) FEL 照射時の蛍光スペクトルの変化。(c) ②③のピーク強度の変化。(d) 電子基底状態のみを選択的に励起する実験。(e) (d)の条件における蛍光スペクトルの変化。(f) 蛍光スペクトルの温度依存性。

$T_1$  の振動モード 56 を励起する条件で実験を行ったところ、図 3 (b) のように③453 nm の蛍光ピークの大きな減少が見られた。対照実験として (d) のように電子励起を行わない状態で FEL を照射し続け、直ちに蛍光スペクトルを取得する実験を行ったところ同様の減少が見られ、10 秒程度の時定数で回復することが示された。このことから、FEL の照射は電子基底状態に大きく影響を与えており、蛍光スペクトルの温度依存性と近い変化であるため、振動励起が熱となった状態を観測している可能性が考えられる。

### 3. 結論

ベンゾフルオレノン誘導体およびベンゾフェノンについて、その発光特性と MIR 照射時の発光応答について評価した。どちらの物質に関しても電子基底状態の影響や MIR パルスによる熱の発生が結果に影響を及ぼす可能性が示唆された。熱伝導性の良好な基板や成膜条件の最適化が必要だと考えられる。

### 4. 成果リスト

[論文発表リスト]

なし

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

- 筒井祐介, “自由電子レーザーを用いた物性制御への挑戦”, 第 2 回 KU-FEL ユーザーズミーティング, 2025 年 12 月 12 日, 京都大学宇治キャンパス
- 坂本隆紀, 筒井祐介, 全炳俊, 関修平 “Photophysical Process of Benzophenone Revealed by Irradiation of Intense Mid-Infrared Laser”, ゼロエミッションエネルギー研究拠点年会, 2025 年 12 月 11 日, 京都大学宇治キャンパス, ポスター
- 筒井祐介, “テラヘルツトリプルパルス分光法による電子フォノン結合評価技術の開発:高強度赤外パルスを用いた物性制御への挑戦”, 第 19 回さきがけ研究者交流会, 2025 年 11 月 14 日, ポスター

# 複製開始タンパク質 ORC の グアニン四重鎖認識機構の構造生物学的基盤

和賀祥<sup>1</sup>, 山置佑大<sup>2</sup>, 堀江健生<sup>2</sup>, 永田佳代子<sup>2</sup>, 阪本知樹<sup>2</sup>, 近藤敬子<sup>2</sup>, 永田崇<sup>2</sup>, 片平正人<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 日本女子大学理学部

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

複製開始タンパク質 ORC は、真核生物の DNA 複製開始点を決定する役割を担っている。ORC は DNA 上の複製開始点に結合し、そこに一連の複製関連タンパク質をリクルートすることで複製開始位置を決定する。しかしながら、ヒトをはじめとする高等真核生物の ORC については、結合する DNA 配列に特異性がなく、染色体 DNA 上の複製開始点をどのように認識しているのかという分子機構が不明である。近年、グアニン四重鎖 (GQ) 構造を形成可能なグアニンに富む DNA 配列が、ヒトの複製開始点の約 80% に存在することが明らかにされた。これまでに我々は、ヒト ORC1 (hORC1) が一本鎖状態の DNA や二重鎖構造の DNA よりも、GQ 構造を形成している DNA (GQ-DNA) に優先的に結合することを発見している (Hoshina *et al.*, *J. Biol. Chem.*, 2013; Eladl *et al.*, *Int. J. Mol. Sci.*, 2021)。これらの知見に基づき、hORC1 が染色体 DNA 上に形成された GQ 構造を認識して結合することで、DNA 複製開始点を決定するというモデルを提案してきた。本共同研究では上記のモデルをさらに検証するため、hORC1 の GQ 結合領域と GQ-DNA との複合体について、NMR 法をはじめとした各種分光法と生化学的手法を組み合わせて解析を進めている。

これまで、NMR 法による hORC1 の GQ 結合領域 hORC1(413-511) と GQ-DNA との相互作用解析を行い、GQ-DNA との直接の相互作用に関わる残基を同定した (Eladl *et al.*, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2023)。しかしながら、hORC1(413-511) は天然変性領域であったため、NMR シグナルの重複によって複合体構造の決定が困難であった。そこで、上記で同定した相互作用している残基を含む短鎖の断片 (hORC1 fragment) を設計し、hORC1 由来のシグナル数を減らすことで、より解析に適した NMR スペクトルを取得することを目指した。

また、近年、複製開始点近傍で転写された RNA が hORC1 による複製開始位置の決定に寄与している可能性が報告されつつある。そのため、本研究では G4-DNA のみならず、DNA と RNA の両者からなる DNA-RNA ハイブリッドグアニン四重鎖

(HQ) 構造との相互作用についても解析を試みた。通常、HQ を調製するにはグアニンに富む DNA と RNA を混合するが、この混合試料中には DNA のみで形成される GQ (DQ)、RNA のみで形成される GQ (RQ)、および DNA と RNA の両者を含む HQ が共存し、HQ の解析が困難となる。本研究では、グアニンに富む DNA および RNA 配列を連結することでキメラ核酸を設計し、HQ のみを形成する条件を確立した。この HQ と hORC1 fragment との相互作用を解析した。

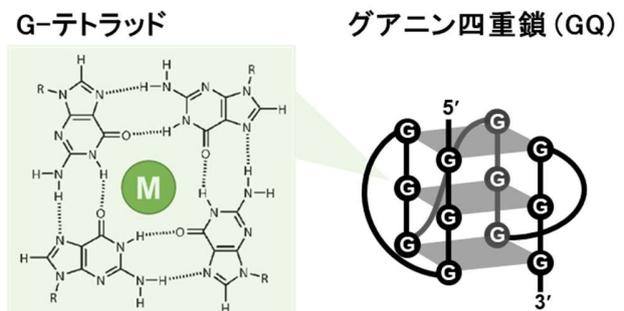


図 1. グアニン四重鎖 (GQ) 構造の模式図。4 つのグアニンで形成される平面構造 (G カルテット、左)。G カルテットが積層して形成される GQ 構造 (右)。灰色の四角は G カルテットを表している。

Parallel-type DQ、3+1-type DQ、一本鎖 (ss)、二重鎖 (ds) の各構造を形成する各 DNA および parallel-type HQ を形成するキメラ核酸を蛍光標識し、蛍光異方性アッセイにより、hORC1 fragment との結合能を評価した。hORC1 fragment を加えるにつれ、parallel-type DQ、3+1-type DQ、ssDNA および dsDNA の蛍光異方性が上昇した。この結果は、hORC1 fragment が各核酸構造に結合することを示しており、hORC1 fragment が全長 hORC1 および hORC1 の GQ 結合領域 hORC1(413-511)の性質を維持していることを意味している。

興味深いことに、hORC1 fragment の添加に伴い、parallel-type HQ を形成するキメラ核酸についても蛍光異方性の上昇が観察された。この結果は、hORC1 fragment が DQ のみならず、parallel-type HQ にも結合することを意味している。

さらに、カーブフィッティングによって各結合の解離定数を求めた。得られた解離定数を比較すると、hORC1 fragment は parallel-type DQ および 3+1-type DQ に対し、ssDNA および dsDNA よりも 5 倍以上結合親和性が高いことが示された。また、parallel-type HQ を形成するキメラ核酸に対しては、parallel-type DQ および 3+1-type DQ よりもさらに高い結合親和性を示した。

本研究により、GQ 構造に高い特異性を示す hORC1 の短鎖断片を得ることに成功した。本断片は、これまで我々が解析に用いてきた hORC1(413-511)よりもはるかに短鎖であるため、NMR 法による DQ-DNA と hORC1 fragment との複合体構造の解析を促進すると期待される。これにより、hORC による GQ 構造認識機構の全容解明を目指す。生物の基盤的な生命現象である DNA 複製機構の理解を目指す本研究から得られる知見は、バイオマス資源としての利用が期待される種々の生物の細胞増殖技術の向上に寄与することが期待される。

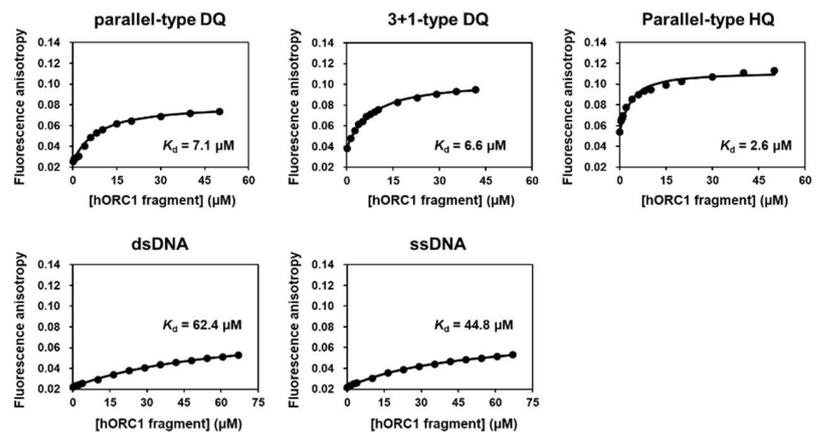


図 2. 蛍光異方性アッセイによる各構造を形成する蛍光標識核酸と hORC1 fragment との結合解析。

#### [参考文献]

- [1]. S. Hoshina, K. Yura, H. Teranishi, N. Kiyasu, A. Tominaga, H. Kadoma, A. Nakatsuka, T. Kunichika, C. Obuse, S. Waga, *J. Biol. Chem.*, 288, 30161, (2013).
- [2]. A. Eladl, Y. Yamaoki, S. Hoshina, H. Horinouchi, K. Kondo, S. Waga, T. Nagata, M. Katahira, *Int. J. Mol. Sci.*, 22, 3481, (2021).
- [3]. A. Eladl, Y. Yamaoki, K. Kamba, S. Hoshina, H. Horiouchi, K. Kondo, S. Waga, T. Nagata, M. Katahira, “NMR characterization of the structure of the intrinsically disordered region of human recognition complex subunit 1, hORC1, and of its interaction with G-quadruplex DNAs” *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 683, 149112 (2023).

#### [学会発表リスト]

- [1]. S. Waga 「Pre-RC forming proteins commonly have G-quadruplex binding activity in the intrinsically disordered regions」 CSHL Meeting for Eukaryotic DNA Replication & Genome Maintenance (Sep. 2-6, 2025, NY, USA)

# 核融合炉における先進中性子増倍材の水素吸着脱離挙動の実験的な検証

金 宰煥<sup>1</sup>、黄 泰現<sup>1</sup>、杉本 有隆<sup>1</sup>、八木 重郎<sup>2</sup>、向井 啓祐<sup>3</sup>

<sup>1</sup>量子科学技術研究開発機構、<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所、<sup>3</sup>核融合科学研究所、

## 1. 研究背景と目的

核融合炉では、核融合反応で生じる中性子をリチウムにあてて生産するが、より効率よく燃料を生産するため、炉心の周りを覆っているブランケット内において中性子の数を増やすための機能材料である中性子増倍材が不可欠である。その中性子増倍材の候補材であるベリリウムやベリライドは、トリチウムを生み出す核反応を有しているため、この材料における水素同位体の吸着脱離挙動が極めて重要な課題である。本研究では、ベリリウムとベリライドを高温高压水素（H<sub>2</sub>）の雰囲気中に暴露し、材料の吸蔵・吸着挙動を実験的に検証することを目的とする。

## 2. 研究手法

今回は、高压水素の圧力を 10MPa に加熱条件を最大 400°C までに調整し、ベリライドに暴露試験を行い、水素を吸着・吸蔵しているベリライド（Be<sub>12</sub>Ti）サンプルを用いて、昇温脱離試験（昇温速度：1、2、5 K/s）を実施し、水素吸蔵特性と放出特性を調べた。

## 3. 結果と考察

先進中性子増倍材であるベリライドにおける水素同位体の吸着脱離挙動が極めて重要な課題であるため、本試験では、ベリライドの水素暴露試験を行い、水素吸蔵・放出特性を調べた。まず、高压水素（10MPa）で暴露したベリライド（Be<sub>12</sub>Ti）サンプルの昇温脱離試験を実施した結果を図 1 に示した。昇温速度が早ければ早いほど、昇温脱離ピークが高温側にシフトすることが分かった。

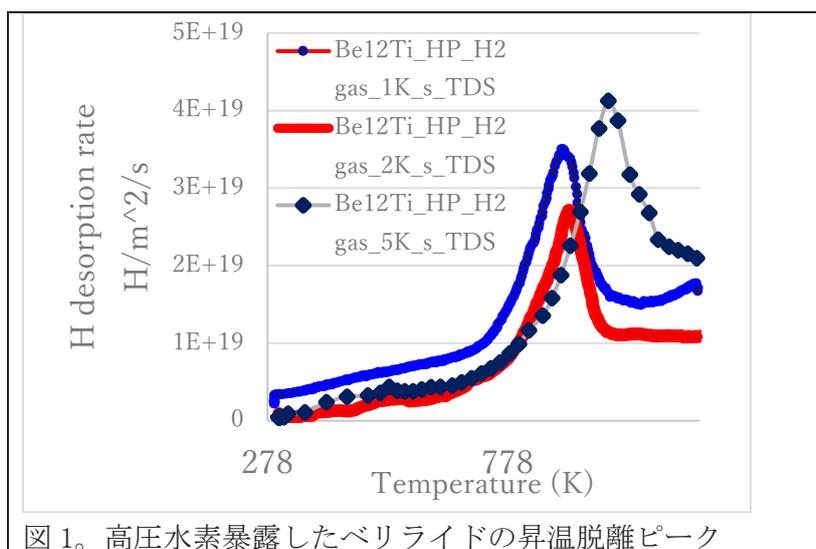


図 1. 高压水素暴露したベリライドの昇温脱離ピーク

このピーク温度と、昇温速度の関係から、下記の Kissinger 式を用いて、有効活性化エネルギーを求めた。(R : ガス常数、 $\beta$  : 昇温速度、 $T_p$  : 昇温脱離ピーク)

$$E = -R \frac{d \ln \left( \frac{\beta}{T_p^2} \right)}{dT_p^{-1}}$$

水素の脱離に必要な有効活性化エネルギー値は、0.97eV を示した。この値は、過去の研究代表者グループ[1]から重水素イオン照射したサンプルから求めた活性化エネルギー0.14eV よりは、大きい値である一方、HIDOBE[2]での中性子照射試験後の昇温脱離試験の結果から得られた活性化エネルギー (3.1~4.2eV) よりは、小さいことが分かった。今後、水素吸着・吸蔵させたベリライドサンプルを用いて、更なる分析を実施する予定である。

#### 4. 参考文献

- [1] Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Suguru Nakano, Mitsutaka Miyamoto, Hirotomoto Iwakiri, Masaru Nakamichi, Deuterium desorption and retention of Beryllium intermetallic compounds for fusion applications, Journal of Nuclear Materials 550 (2021) 152936
- [2] V. Chakin. et al. Fusion Engineering and Design 161,(2020) 111938

#### 5. 発表先

- [1] Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Yutaka Sugimoto, Hiroyasu Tanigawa, Keisuke Mukai, Juro Yagi, Hydrogen isotope absorption and desorption properties of advanced neutron multipliers for fusion applications, The 16th International Symposium of Advanced Energy Science, Dec 11-12, 2025

# 電極－電解質界面の構築に基づくナトリウム貯蔵性材料の創製

薄井洋行<sup>1</sup>, 道見康弘<sup>1</sup>, 野平俊之<sup>2</sup>, 山本貴之<sup>2</sup>, 坂口裕樹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>鳥取大学大学院工学研究科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

発電量が不安定な太陽光エネルギーの有効利用のため、安価で高性能な定置用蓄電池の普及が望まれている。Na イオン電池 (NIB) は、コストと資源の面で Li イオン電池 (LIB) より優れた蓄電池として期待されている。現行のハードカーボン負極は  $450 \text{ mA h g}^{-1}$  の可逆容量を 35 サイクル程度維持することが最近報告されている。ただし、NIB の普及のためには、さらなる高容量化や長寿命化が必須である。負極材料の開発には、①充放電反応を詳細に解析できるような安定な負極－電解質界面を構築することと、②多彩な Na 吸蔵反応機構 (図 1) に応じた負極材料設計が必要である。当グループはこれまでにルチル型  $\text{TiO}_2$  がインサージョン反応系の NIB 負極として動作し、Nb のドーピングによりその性能を改善できることを初めて見出してきた<sup>1)</sup>。これをさらに発展させた新規 NIB 負極材料として、*c* 軸方向に Nb と Ti がそれぞれ規則配列したルチル型  $\text{TiNbO}_4$  複合酸化物 (図 2) の創製に成功してきている<sup>2)</sup>。 $\text{TiNbO}_4$  は  $\text{Na}^+$  拡散経路のサイズに対応する格子の *a* 軸長が大きいことから高速拡散に有利である。 $\text{TiNbO}_4$  は合成時の焼成温度が高くなると、*a* 軸長が拡大する一方で、結晶子サイズも増大することが知られている。また、われわれは毬藻形状の  $\text{TiO}_2$  が電解液との広い接触面積を有するため優れた NIB 負極性能を示すことも明らかにしてきた<sup>3)</sup>。そこで本研究では、ルチル型  $\text{TiNbO}_4$  について合成条件の検討により  $\text{Na}^+$  拡散経路と結晶子のサイズを変え、さらに、その粒子形態を毬藻形状とすることで負極性能の向上を試みた。

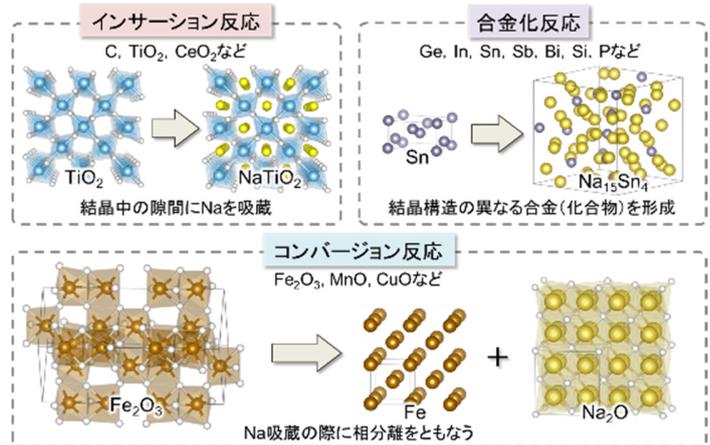


図 1. Na イオン電池負極材料の 3 種類の反応機構。高性能化のため、それぞれの異なる特徴に応じた材料設計が求められる。

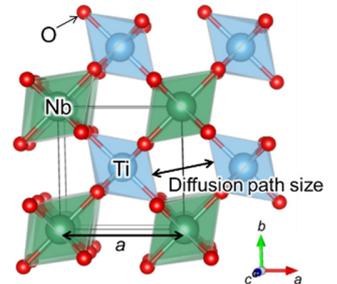


図 2. ルチル型  $\text{TiNbO}_4$  の結晶構造。

## 2. 実験

$\text{TiNbO}_4$  はゾルゲル法により調製した。エチレングリコール溶媒に、Ti 源 (Titanium tetrabutoxide) と Nb 源 (Niobium ethoxide) を加えて攪拌し、遠心分離により得られたゲル状沈殿物を洗浄・乾燥して前駆体粉末を得た。これを真空中において  $600\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$  で 2 時間焼成することによりルチル型  $\text{TiNbO}_4$  粉末を調製した。導電助剤や結着剤を必要としないガスデポジション法により、 $\text{TiNbO}_4$  を Cu 箔基板上に製膜した。これを試験極に用いて対極には Na 金属を使用し二極式コインセルを構築した。NIB の電解液には電気化学的安定性に優れたイオン液体が有効であることを確認してきているが、本研究では有機溶媒電解液である  $1 \text{ mol dm}^{-3}$  の  $\text{NaPF}_6/\text{EC}:\text{DMC}$  ( $\text{NaPF}_6$ : Sodium hexafluorophosphate, EC: Ethylene carbonate, DMC: Dimethyl carbonate) に対して電極－電解質界面の安定化に有効な FEC (Fluoroethylene carbonate) を 10 wt.% 溶解させたものを用いた。定電流充放電試験は、電位範囲を  $0.005\text{--}3.000 \text{ V vs. Na}^+/\text{Na}$ 、充放電電流密度を  $0.19\text{--}100\text{ C}$  ( $1\text{C} = 262 \text{ mA g}^{-1}$ )、温度を  $30\text{ }^\circ\text{C}$  として実施した。

## 3. 結果と考察

透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察の結果, 700 °C で焼成した  $\text{TiNbO}_4$  は単結晶の一次粒子が凝集した毬藻形状を有することがわかった. X線回折測定により,  $\text{TiNbO}_4$  の焼成温度が 600 °C から 1100 °C まで上昇するにつれて  $\text{TiNbO}_4$  の  $\text{Na}^+$  拡散経路のサイズが広がり (234.0→235.2 pm), 結晶子サイズが増大する (約 3→24 nm) ことを確認した. 図 3 は, 充放電の速度を変えた試験における  $\text{TiNbO}_4$  負極の放電 ( $\text{Na}^+$  放出) 容量を示す. 低速充放電 (0.19C) においては, 焼成温度の低下にともない, 放電容量が増加することが確かめられた. これは, 多孔質構造内に電解液が浸透するため, 結晶子サイズが減少すると電解液との接触面積が増大し,  $\text{TiNbO}_4$  の利用率が向上したためと考えられる. 一方, 高速充放電 (5C) の場合においても同様に焼成温度の低下により放電容量が増加したものの, 600 °C 付近では減少し, 700 °C で焼成した  $\text{TiNbO}_4$  が最も高い放電容量を示した. この結果は, 700 °C では 600 °C の場合に比べて高速で  $\text{Na}^+$  を吸蔵できる広いサイズの拡散経路を有し, かつ, 結晶子サイズがある程度小さいため活物質の利用率が向上したことによるものと考えられる. 700 °C で焼成した  $\text{TiNbO}_4$  からなる電極は 1000

サイクルもの長期間にわたり  $210 \text{ mA h g}^{-1}$  の容量を維持する非常に優れたサイクル寿命を示した (図 4)<sup>4)</sup>. 以上の結果から, 焼成温度の最適化により  $\text{Na}^+$  拡散経路のサイズと結晶子サイズの制御が可能となり, 高速充放電特性とサイクル寿命特性に優れた毬藻状  $\text{TiNbO}_4$  負極材料を創製できることが確かめられた.

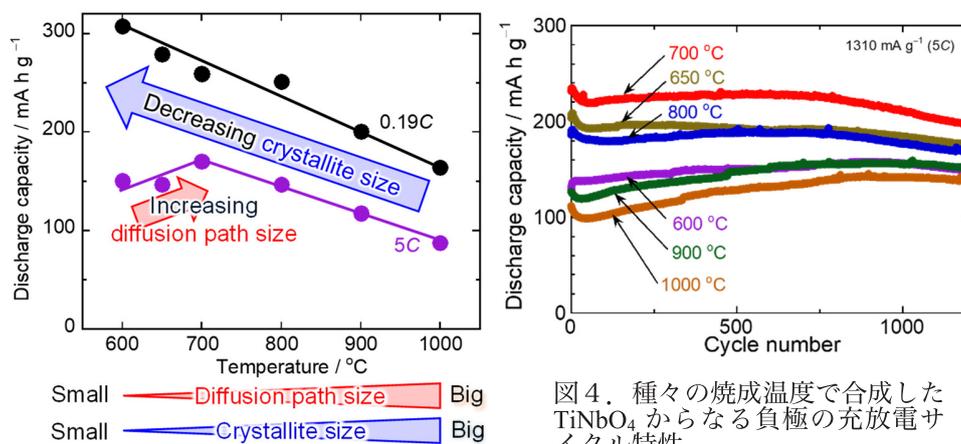


図 3. 異なる充放電速度下での  $\text{TiNbO}_4$  負極の放電容量の焼成温度依存性.

図 4. 種々の焼成温度で合成した  $\text{TiNbO}_4$  からなる負極の充放電サイクル特性.

#### References

- 1) H. Usui, S. Yoshioka, K. Wasada, M. Shimizu, H. Sakaguchi, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7** (2015) 6567.
- 2) H. Usui, Y. Domi, T. Tanaka, M. Takemoto, N. Oishi, N. Nitta, H. Sakaguchi, *Electrochem. Commun.*, **155** (2023) 107579.
- 3) Y. Tanaka, H. Usui, Y. Domi, M. Ohtani, K. Kobiro, H. Sakaguchi, *ACS Appl. Energy Mater.*, **2** (2019) 636.
- 4) N. Ikemoto, H. Usui, Y. Domi, M. Takemoto, T. Tanaka, H. Sakaguchi, *ACS Nanosci. Au*, **5** (2025) 369.

#### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

[論文発表リスト]

- [1] N. Ikemoto, H. Usui, Y. Domi, M. Takemoto, T. Tanaka, H. Sakaguchi, *ACS Nanosci. Au*, **5** (2025) 369.
- [2] H. Usui, Y. Domi, Y. Sadamori, R. Tanaka, T. Hoshi, T. Tanaka, H. Sakaguchi, *ACS Mater. Au*, **5** (2025) 558.

[受賞, プレス発表等]

- [1] 相馬悠利, 薄井洋行, 道見康弘, 寺前篤樹, 坂口裕樹, 組成の異なる Bi-Sb 固溶体と  $\text{Sn}_4\text{P}_3$  のコンポジットからなる電極の Li イオン電池負極特性, 第 15 回 CSJ 化学フェスタ 2025, P9-109 (令和 7 年 10 月 24 日 タワーホール船堀) 最優秀ポスター発表賞 (CSJ 化学フェスタ賞) (材料化学分野)
- [2] 池本奈月, 薄井洋行, 道見康弘, 田中俊行, 坂口裕樹, 毬藻形状を有するルチル型  $\text{TiNbO}_4$  からなる電極のナトリウム吸蔵-放出特性, 2025 年度第 3 回関西電気化学研究会, P6 (令和 7 年 12 月 6 日 大阪公立大学) 関西電気化学奨励賞

[口頭発表リスト]

- [1] Yuto Sohma, Hiroyuki Usui, Yasuhiro Domi, Yoshitatsu Itoda, Takayuki Yamamoto, Toshiyuki Nohira, Kazuhiko Matsumoto, Hiroki Sakaguchi, "Charge-Discharge Performances of Composite Electrodes Composed of Bi-Sb and P for Na-Ion Batteries", 2025 年度 ZE 拠点年会 (令和 7 年 12 月 11 日 京都大学宇治おうばくプラザ きはだホール) (ポスター).

# 酸化物分散強化合金粉末の熱変化に及ぼす メカニカルアロイング処理の影響

岩田憲幸<sup>1</sup>, 森園靖浩<sup>1</sup>, 藪内聖皓<sup>2</sup>, 八木重郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>久留米工業高等専門学校材料システム工学科

<sup>2</sup>東北大学金属材料研究所

<sup>3</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 背景と目的

原子力発電は、発電過程で CO<sub>2</sub> を排出しないことから、原子力システムの高効率化を目指す研究開発が世界的にも広く推進されている。酸化物分散強化 (ODS) 鋼は、優れた高温強度特性、耐食性および耐照射性能を示すことが知られている。このため、福島第一原子力発電所事故を踏まえたシビアアクシデントへの対応を強化するために、軽水炉事故耐性型燃料被覆管や先進原子力システム用燃料被覆管の有力候補材料として開発が進められている。ODS 鋼は、通常の鉄鋼材料に直径が数 nm の微細な酸化物粒子を高密度、且つ、均一に分散させた合金である。また、その製造プロセスは通常の鉄鋼材料とは異なり、各種金属元素粉末と熱的に安定な酸化物粒子を出発原料として、メカニカルアロイング (MA) 処理を利用した粉末冶金法により製造される。この鋼が優れた性能を発現する主要因は、鋼中に微細分散させた酸化物粒子のサイズと数密度であり、その分散状態は MA 処理や熱間押出などのプロセス条件に依存する。

既開発 ODS 鋼の製造においては、酸化物分散粒子源として Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が使用されている。これがミリングにより強加工されて一旦非晶質となり、その後の加熱により再び酸化物として MA 粉末中に析出することが報告されている。一方、MA 粉末を熱間固化した鋼中に存在する Y-Ti 複合酸化物 (たとえば、Y<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Y<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> など) を調査した報告は多数あるが、ODS 鋼の一次原料であるプレミックス粉末や二次原料である MA 粉末中の酸化物形成を対象とした研究はわずかである。このことから、ODS 鋼原料粉末中に形成される Y-Ti 複合酸化物の形成過程については十分に知られていない。

そこで本研究では、まず、高効率な実験的評価を可能とする ODS 鋼原料粉末の合金成分を検討した。その上で、ODS 鋼の原料となる混合粉末および ODS 合金粉末を作製し、これらを Ar 雰囲気下で加熱することにより、ODS 合金粉末の熱変化に及ぼす MA 処理の影響を調査することを目的とした。

## 2. 実験方法

本研究においては、Fe-16Cr-2W-0.1Ti-0.35Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (wt%) を基本組成として選定した。この組成をもとに、Cr を含有せず、Ti 量と Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 量を複合的に高めた成分の混合粉末と ODS 合金粉末をそれぞれ作製した。まず、高純度 Ar ガスを雰囲気としたグローブボックス中で、所定量の各種金属元素粉末および Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末を秤量・プレミックスし、混合粉末とした。次に、遊星ボールミルを用いて、この混合粉末に MA 処理を施し、MA 粉末を準備した。なお、MA 条件は、雰囲気を高純度 Ar ガス、ミリング時間を 48 h、回転速度を 180 rpm、粉砕ボールおよび粉末の重量比を 15:1 とした。得られた各粉末試料は、昇温速度 10°C/min、ガス流量 200 mL/min の Ar 雰囲気下で 1200°C まで加熱した。

電界放出走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型 X 線分光分析装置 (FE-SEM/EDS) により、MA 粉末内部の元素分布を観察した。粉末断面試料は、MA 粉末を熱間埋込樹脂に埋設し、鏡面研磨を施して仕上げた。また、上記の加熱と同じ条件で、熱重量・示差熱分析 (TG/DTA) を実施し、各粉末試料の加熱変化を調査した。さらに、CuK $\alpha$  を線源とした X 線回折 (XRD) 測定を行い、加熱前後における結晶相を同定した。

### 3. 結果と考察

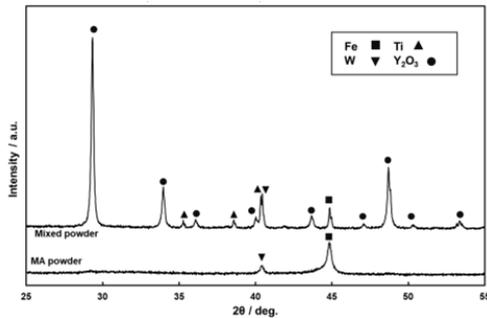


図1 MA 粉末および混合粉末の XRD 図

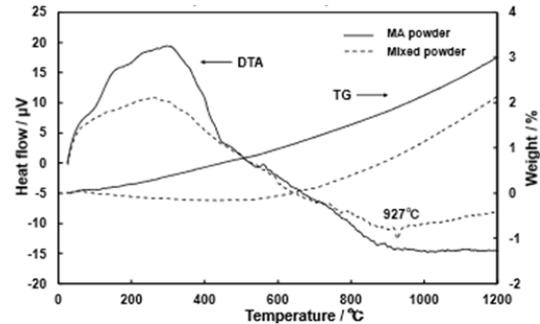


図2 ODS 合金粉末および混合粉末の TG/DTA 曲線

図1に各粉末試料の XRD 図を示す。混合粉末にはすべての金属元素粉末と  $Y_2O_3$  に帰属される回折線が見られるが、MA 粉末には  $\alpha$ -Fe と W の回折線が確認され、Ti や  $Y_2O_3$  の回折線は認められない。 $Y_2O_3$  は、48 h のミリングによって非晶質となり、 $\alpha$ -Fe 中に分解していると考えられる。また、 $\alpha$ -Fe のピークがミリング後に低角度側にシフトし、さらにその強度が増加したことから、Ti が  $\alpha$ -Fe 相に固溶したことを示唆している。TG/DTA 測定を実施した結果 (図2)、各粉末試料において、加熱開始直後から  $500^\circ\text{C}$  付近まで顕著な発熱変化が観測された。この温度領域での両粉末試料の発熱量の対比から、MA 粉末では、ミリングにより強加工された粉末組織の回復が起こっていると思われる。それ以降、DTA 曲線は約  $900^\circ\text{C}$  まで緩やかに下降し、さらなる温度上昇とともに弱い発熱変化が所々で見られた。これは、何らかの酸化物の形成に起因している可能性がある。また、混合粉末の DTA 曲線には、 $927.5^\circ\text{C}$  に吸熱ピークが認められた。これは、 $\alpha$ -Fe から  $\gamma$ -Fe への相転移によるものであり、MA 粉末ではこの相転移は生じないことを確認した。

XRD 測定を行い、各粉末試料の加熱に伴う結晶相の変化を調べた。混合粉末の XRD 図には、 $800^\circ\text{C}$  から  $1100^\circ\text{C}$  にかけて、 $TiO_2$  よりも酸素が少ない  $Ti_6O$  の弱いピークが見られた。また、 $1200^\circ\text{C}$  で  $Ti_6O$  の回折線が消え、 $TiO$ ,  $TiO_2$ ,  $Y_2Ti_2O_7$  の生成が確認された。 $Ti_6O$ ,  $TiO$ ,  $TiO_2$  などの Ti 酸化物が形成されたのは、Ti が酸素との親和性が高いためである。一方、MA 粉末では、室温で  $\alpha$ -Fe と W の回折線が見られた。また、 $800^\circ\text{C}$  で  $Y_2O_3$  の回折線が出現し、さらに高温領域では W のピーク強度が次第に低下するとともに、 $\alpha$ -Fe と  $Y_2O_3$  の強度が増加した。また、 $1100^\circ\text{C}$  で W のピークは消失し、 $Y_2Ti_2O_7$  の生成が見られた。 $1200^\circ\text{C}$  まで加熱することで、いずれの粉末試料にも  $Y_2Ti_2O_7$  が形成されることがわかった。

### 4. まとめ

Fe-16Cr-2W-0.1Ti-0.35 $Y_2O_3$  (wt%) を基本組成として、Cr を含まず、Ti および  $Y_2O_3$  をいずれも一定量高めた成分の混合粉末と ODS 合金粉末をそれぞれ作製した。各粉末試料を Ar 流通下で  $1200^\circ\text{C}$  まで加熱したところ、いずれにも  $Y_2Ti_2O_7$  が形成された。また、Ti 酸化物の形成を防ぐためには、MA 処理による  $\alpha$ -Fe 相への Ti の合金化、固溶化が不可欠であることが実証された。

#### [口頭発表リスト]

- ・林田大和, 岩田憲幸, 藪内聖皓, 八木重郎, “ODS フェライト合金の粉末プロセス改良”, 令和7年度国際原子力人材育成イニシアティブ事業フォーラム, 2025.12.26, ラゾーナ川崎東芝ビル, 川崎市, ポスター
- ・岩田憲幸, 森園靖浩, 藪内聖皓, 八木重郎, “酸化物分散強化合金粉末の熱変化に及ぼすメカニカルアロイング処理の影響”, 2025年度 ZE 拠点年会, 2025.12.11, 京都大学宇治おうぼくプラザきはだホール, 京都府宇治市, ポスター

# 植物や微生物の成長や増殖を制御する生体分子の開発のための NMR 解析

長谷川拓矢<sup>1</sup>, 阪本智樹<sup>2,3</sup>, 関口真裕<sup>4</sup>, 堀内正隆<sup>5</sup>, 石川岳志<sup>6</sup>, 片平正人<sup>2</sup>, 永田崇<sup>2</sup>, 山岸賢司<sup>4</sup>, 坂本泰一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学・先進工学部, <sup>2</sup>京都大学・エネルギー理工学研究所, <sup>3</sup>東京薬科大学・薬学部,

<sup>4</sup>日本大学・工学部, <sup>5</sup>北海道医療大学・歯学部, <sup>6</sup>鹿児島大学・学術研究院

## 1. 背景

核酸およびペプチドなどの中分子は、低分子化合物と異なり、タンパク質間の相互作用を阻害できることから創薬モダリティとして注目されている。このような中分子を利用する技術を、バイオ燃料となる植物の成長の制御やセルロースを糖化する微生物の増殖の制御に応用すれば、有用な技術となることが期待される。このような技術を確立するためには、人工核酸の物性を明らかにする必要がある。そこで本研究では、人工核酸の作用メカニズムについて明らかにし、植物の成長や微生物の増殖を制御する人工核酸の開発の基盤技術を確立することを目的とした。これを実現できれば、遺伝子組換え技術を使わずに、ゼロエミッションエネルギーを安全に達成できることが期待される。

アプタマーは、特定の標的分子に対して相補的な立体構造を形成して高い親和性を示す一本鎖核酸分子であり、試験管内分子進化 (SELEX) 法によって取得される。2008年に宮川博士らにより、抗体医薬品の分離資材を開発するため、ヒト IgG1 の Fc ドメイン (hFc1) に結合する RNA アプタマーが取得された。さらに、抗体を精製するためのアプタマーカラムの製造コストを下げるため、RNA アプタマーの一部を DNA に置換したキメラアプタマーが作製されており、キメラアプタマーは hFc1 との親和性を保持していることが確認されている。また、我々は RNA アプタマーと hFc1 の複合体の結晶構造を明らかにしている。しかし、RNA アプタマーとキメラアプタマーの作用機序の違いについては明らかになっていない。そこで、等温滴定熱量測定 (ITC)、核磁気共鳴 (NMR) 法および分子動力学 (MD) 計算を用いて、それらのアプタマーの作用機序について明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

RNA アプタマーおよびキメラアプタマーについては、GeneDesign 社より購入した。ヒト IgG1 Fc 領域 (hFc1; 120~330 残基) をコードする DNA 断片を PCR で増幅し、哺乳類発現コンストラクト pcDNA-SecreconAA-P01857(120~330)-His を作製した。Expi293GnTI<sup>-</sup> cells にプラスミドを導入し、Fc1 を大量発現した後、Ni-Sepharose 樹脂およびゲル濾過カラムクロマトグラフィにより、精製した。

ITC 測定については、MicroCal iTC200 システム (Malvern Panalytical 社製) を用いて 25°C で行った。ITC 測定用緩衝液として、20 mM Tris-HCl (pH 7.5), 145 mM NaCl, 5.4 mM KCl, 14.4 mM CaCl<sub>2</sub>, 6.4 mM MgCl<sub>2</sub> を用いた。10 μM hFc1 に対して 100 μM のアプタマーを滴定した。

NMR スペクトルの測定には、超高感度クライオプローブと Z 軸グラジエントを備えた Bruker AVANCE600 および AVANCE III HD 600 分光計を用いた。NMR 測定用緩衝液として、20 mM リン酸ナトリウム (pH 6.5), 50 mM NaCl, 95% H<sub>2</sub>O/5% D<sub>2</sub>O を用いた。アプタマーのイミノプロトンシグナルを、NOESY スペクトル (混合時間 = 150 ms) によって帰属した。<sup>1</sup>H R<sub>1ρ</sub> relaxation dispersion (RD) 実験および phase-modulate CLEAN chemical Exchange experiment (CLEANEX-PM) 実験により、アプタマーの塩基対の安定性およびイミノプロトンと水との交換速度について解析し、アプタマーの構造の柔軟性について解析した。

最後に、RNA アプタマーと hFc1 の複合体の結晶構造を基に、キメラアプタマーと hFc1 の複合体の

構造モデルを構築し、RNA アプタマーおよびキメラアプタマーのゆらぎについて MD 計算により解析した。Assisted Model Building with Energy Refinement (AMBER) 18 ソフトウェアパッケージを使用して、周期境界条件下で計算した。

### 3. 結果および考察

ITC 解析の結果、キメラアプタマーと hFc1 の結合は RNA アプタマーに比べて  $\Delta H$  の寄与が大きい、 $\Delta S$  は不利にはたらいっていることが明らかになった。また、NMR 解析の結果、キメラアプタマーの方が RNA アプタマーより構造の揺らぎが大きいことが示された。さらに、MD 計算の結果、NMR 解析と同様に、hFc1 結合部位における揺らぎはキメラアプタマーの方が RNA アプタマーより大きいことが示唆された。これらの揺らぎは、hFc1 と結合することによって小さくなった。したがって、構造の揺らぎの減少が大きいキメラアプタマーにおいて  $\Delta S$  が大きかったと考えられる。また、キメラアプタマーの方が、hFc1 との接触面積が大きいことが示唆された。これは、キメラアプタマーにおいて  $\Delta H$  の寄与が大きいことと一致した。柔軟な構造を持つキメラアプタマーは、hFc1 との結合による不利な  $\Delta S$  が大きい一方で、induced fit により hFc1 との接触面積が大きくなり、大きな  $\Delta H$  となったことが示唆された。

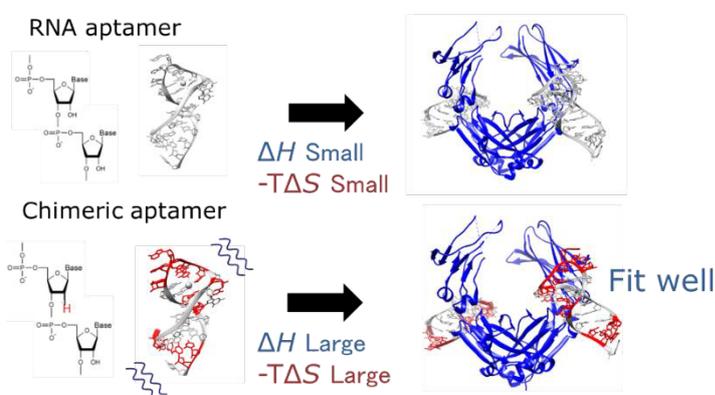


図1 RNA型人工核酸とキメラ型人工核酸の熱力学的パラメータの比較と考察

### 4. 研究業績

[口頭発表リスト]

- 1) 長谷川拓矢, 関口真裕, 阪本智樹, 堀内正隆, 石川岳志, 片平正人, 永田崇, 山岸賢司, 坂本泰一, RNA と DNA の物理化学的特性の違いに由来する RNA aptamer と RNA-DNA Chimera aptamer の作用機序の違い, 2025 年度 日本生化学会関東支部例会, 2025 年 6 月, 東京
- 2) 山本春香, 熊谷紀志, 神庭圭佑, 万里, 片平正人, 永田崇, 坂本泰一, HIV-1 の Vif タンパク質を含む複合体を標的とした aptamer の NMR 解析, 第 72 回日本ウイルス学会学術集会, 2025 年 10 月, 浜松, ポスター
- 3) Tomohiro Shinozaki, Kentaro Tozawa, Kazuyuki Kumagai, Keisuke Kamba, Li Wan, Masato Katahira, Takashi Nagata, Taiichi Sakamoto, The inhibition of interaction between VβBCC complex and A3G by RNA aptamer, The 52nd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry, 2025 年 11 月, 富山, ポスター
- 4) Taiichi Sakamoto, Takuya Hasegawa, Yusuke Nomura, Masataka Horiuchi, Hisae Yoshida, Tomoki Sakamoto, Masato Katahira, Takashi Nagata, Kenji Yamagishi, Biophysical analysis of the interaction between aptamers and human IgG, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025, 2025 年 12 月, ホノルル
- 5) Taiichi Sakamoto, Ryo Amano, Yusuke Nomura, Yoichiro Tanaka, Kenji Yamagishi, Masato Katahira, Takashi Nagata, Biophysical analysis of the interaction between aptamers and AML1 Runt domain, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025, 2025 年 12 月, ホノルル, ポスター

# 発光性太陽光集光デバイスのための有機発光材料の創出

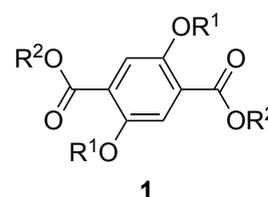
清水正毅<sup>1</sup>, 坂口浩司<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都工芸繊維大学 分子化学系  
<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

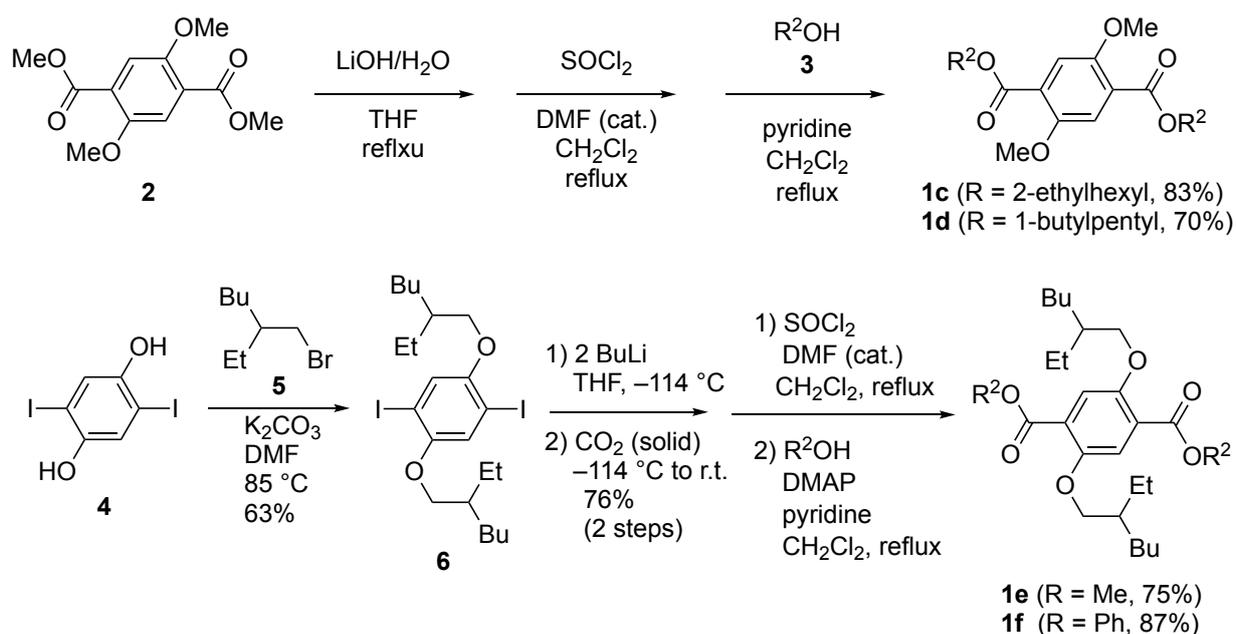
近年、低コスト性、環境負荷の低減、軽量性といった観点から、発光性太陽光集光デバイスが太陽光エネルギー変換システムとしてその重要性が再認識されている<sup>1)</sup>。1970年代にその概念が提唱された発光性太陽光集光デバイスは、透明高分子薄膜中に分散された発光材料（発光ドーパント）が太陽光を吸収し、吸収光よりも長い波長の光をフォトルミネッセンスにより再放出する原理に基づいている。発光ドーパントから放出された光子は、ホスト高分子の高い屈折率によって薄膜内部に閉じ込められ、全反射を繰り返しながらデバイス端部に設置された光電変換セルへと導かれ、吸収した光エネルギーは最終的に電気エネルギーへと変換される。そのため、発光性太陽光集光デバイスの高性能化を実現するためには、高分子マトリックス中に分散された状態において高効率で発光する有機低分子材料の開発が極めて重要となる。

これまでに我々のグループでは、右図に示す2,5-ジメトキシテレフタル酸ジメチル (**1a**: R<sup>1</sup>=R<sup>2</sup>=Me) や2,5-ジメトキシテレフタル酸ジフェニル (**1b**: R<sup>1</sup>=Me, R<sup>2</sup>=Ph) がポリ(メチルメタクリレート) (PMMA) の薄膜に分散した状態で青色の蛍光を量子収率 0.33 および 0.30 で発することを明らかにしている<sup>2)</sup>。ジアルコキシテレフタル酸ジエステルの PMMA 薄膜に分散した状態での蛍光量子収率の向上を目指して **1** の置換基 R<sup>1</sup> や R<sup>2</sup> に長鎖アルキル基を導入する分子改良を行なって分子の液体化を図ると、期待通り **1a** や **1b** よりも高い蛍光量子収率が実現できることを明らかにした。以下、長鎖アルキル基含有ジアルコキシテレフタル酸ジエステル **1c**~**1f** の合成と基礎物性について報告する。



## 2. 結果と考察

標的分子は次のスキームにしたがい合成した。すなわち、ジメトキシテレフタル酸ジエステル **1c**



および **1d** は、ジメトキシテレフタル酸ジメチル (**2**) を水酸化リチウムで加水分解してジメトキシテレフタル酸に導いたのち、これを塩化チオニルで酸塩化物とし、最後に 2-エチルヘキサノールあるいは 1-ブチルペンタノールと脱水縮合することによりそれぞれ収率 83% および 70% で合成した。また、2-エチルヘキシルオキシ体 **1e** および **1f** は、2,5-ジヨードヒドロキノン (**4**) を出発化合物にして合成した。まず **4** に 1-ブロモ-2-エチルヘキサン (**5**) を作用させてジアルキル化したのち (収率 63%)、ブチルリチウムを 2 当量作用させてジリチオ化してからドライアイスを加えることにより、対応するテレフタル酸誘導体を収率 76% で得た。これを塩化チオニルで酸塩化物としメタノールもしくはフェノールと脱水縮合することにより、**1e** および **1f** を収率 75% および 87% で合成した。

合成した **1c**~**1f** の熱物性および光物性を表 1 に示す (比較のため **1a** および **1b** のデータも示す)。示差走査熱量 (DSC) 分析により長鎖アルキル基の置換する **1c**~**1f** はいずれも融点を持たず  $-40$  °C 以下のガラス転移温度 ( $T_g$ ) を有する液体であることが明らかになった。例として **1c** の DSC チャートを図 1 に示す。また、**1a** や **1b** に含まれるメチル基が 2-エチルヘキシル基や 1-ブチルペンチル基に代わると、**1c**~**1f** の熱分解点 (5% 質量損失点) は対応する **1a** や **1b** よりも高く (**1a** と **1c**~**1e** の比較、**1b** と **1f** の比較)、アルキル基の長鎖化が想定通りに熱安定性の向上をもたらすことも認められた。

ジメトキシテレフタル酸ジエステル **1c** と **1d** は、PMMA の薄膜に分散した状態 (1 wt%) においてそれぞれ蛍光極大波長を 400 nm、411 nm とする青色蛍光を示した。**1a** の蛍光極大波長は 402 nm であったので、アルコキシカルボニル基のアルキル基の長鎖化は発光色にはほとんど影響を与えないことがわかった。その一方、**1c** と **1d** の蛍光量子収率は 0.53 と 0.62 であり、**1a** の 0.33 に比べて 2 倍近い高い値であった。また、**1e** の蛍光極大波長および量子収率は 408 nm および 0.62 であった。すなわち、2 位および 5 位に置換するアルコキシ基を長鎖化すると、発光色には影響を与えない一方、量子収率は大幅に向上することがわかった。この光物性挙動はジフェニルエステル **1f** の場合にも観測された。以上のことから、**1** のアルコキシ基やアルコキシカルボニル基を長鎖することは、熱安定性を向上させるとともに PMMA 薄膜に分散した状態で効率よく蛍光発光させる分子改良として大変有効であることが明らかとなった。

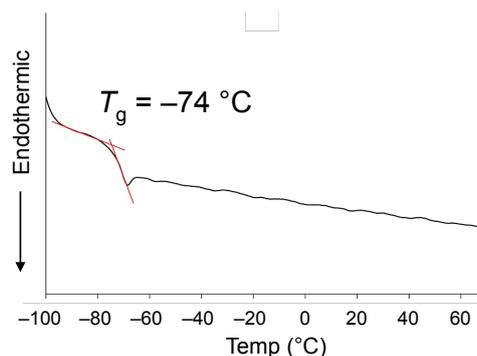


図 1 テレフタル酸ジエステル **1c** の DSC チャート

表 1 テレフタル酸ジエステル **1** の熱および光物性

1	$T_g$ (°C)	$T_d$ (°C)	In PMMA	
			$\lambda_{em}$ (nm)	$\phi$
<b>1a</b>	–	162	402	0.33
<b>1b</b>	–	250	418	0.30
<b>1c</b>	-74	247	400	0.53
<b>1d</b>	-65	243	411	0.62
<b>1e</b>	-72	217	408	0.62
<b>1f</b>	-40	288	420	0.69

### 3. 論文発表リスト

Shimizu, M.; Tosabayashi, Y; Nakagawa, M.; Kawamura, T.; Sakurai, T.; Sakaguchi, H. “Synergistic Effects of Siloxy and Silylmethoxy Moieties on Room-Temperature Phosphorescence of 1,4-Dibenzoylbenzene Luminophores.” *ChemPhotoChem* **2025**, 9 (9), e202500069.

#### 【参考文献】

- 1) B. Zhang, G. Lyu, E. A. Kelly, R. C. Evans, *Adv. Sci.* **2022**, 9, 2201160; I. Papakonstantinou, M. Portnoi, M. G. Debije, *Adv. Energy Mater.* **2021**, 11, 2002883; Roncali, J., *Adv. Energy Mater.* **2020**, 10, 2001907.
- 2) M. Shimizu, R. Shigitani, T. Kinoshita, H. Sakaguchi, *Chem. Asian J.* **2019**, 14, 1792–1800.

# リグニン活用のための革新的アプローチ：選択的安定同位体標識法による精密反応挙動解析

松下泰幸<sup>1</sup>, 西本泰城<sup>1</sup>, 峯岸光<sup>1</sup>, 片平正人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京農工大学大学院農学研究院

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究背景と目的

ゼロエミッション達成に向け、バイオマスの有効利用はますます重要性を増している。その中でも膨大な賦存量を誇るリグニンは、地球上で2番目に多い有機化合物であるにもかかわらず、十分な有効活用が進んでいない。

リグニンは、モノリグノールと呼ばれる前駆物質がラジカルカップリングを繰り返すことによって形成される、非常に複雑な構造を有する高分子である。リグニンに含まれるヒドロキシ基は、化学変換において重要な官能基であることから、利用における「ファーストチョイス」と位置付けられる。ヒドロキシ基はフェノール性とアルコール性に分類されるが、フェノール性ヒドロキシ基の存在量は限られているため、より一般的に存在するアルコール性ヒドロキシ基の積極的な活用が求められている。しかしながら、リグニン分子中のアルコール性ヒドロキシ基の化学反応性については、これまでに詳細な検討がほとんど行われていない。

本研究では、アルコール性ヒドロキシ基を有するリグニンの側鎖部位を選択的に安定同位体標識したリグニンモデル分子を合成し、化学変換反応のメカニズムを解析することを目的とした。本研究により、リグニン中に存在するアルコール性ヒドロキシ基の新たな誘導体化反応に関する基礎的知見が得られることが期待される。

## 2. 実験

アルコール性ヒドロキシ基を有するリグニン分子の側鎖には、“分子末端側鎖”と“分子内側鎖”の2種類が存在する(図1)。本研究ではそれぞれの反応性を比較し、評価するために、分子末端側鎖 $\gamma$ 位のみを選択的に安定同位体標識したモデル化合物、ならびに全ての側鎖 $\alpha$ 位と $\gamma$ 位を安定同位体標識したモデル化合物を合成した。これらのモデル化合物を酵素的脱水素重合反応に供し、側鎖構造の反応性について検討した。

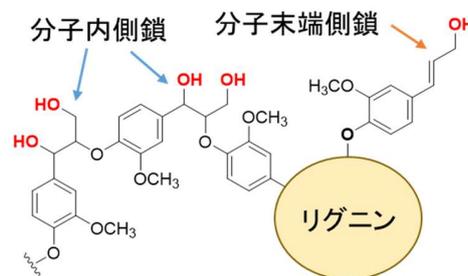


図1 リグニン分子の側鎖

### 2.1. 分子末端側鎖を選択的に安定同位体標識したリグニンモデル二量体

リグニン分子の末端構造には、フェノール性ヒドロキシ基を有するフェノール性末端とアルコール性ヒドロキシ基を有するコニフェリルアルコール末端が存在する。本研究では、アルコール性ヒドロキシ基が存在するコニフェリルアルコール末端を選択的に標識したリグニンモデル量体を合成した(図2)。

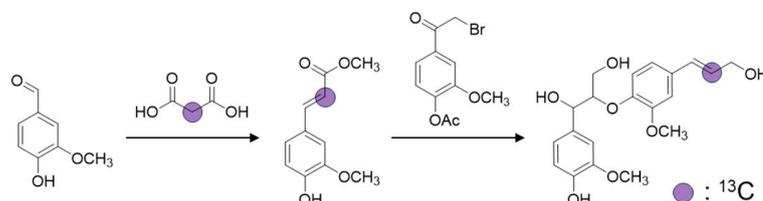


図2 <sup>13</sup>C 標識したリグニンモデル二量体の合成

### 2.2. 分子内側鎖を安定同位体標識したリグニンモデルポリマー

リグニンの分子内側鎖には、 $\alpha$ 位と $\gamma$ 位に2つのヒドロキシ基が存在する。それぞれの反応性を評価するために、 $\alpha$ 位または $\gamma$ 位を安定同位体標識したリグニンモデルポリマーを合成した(図3)。

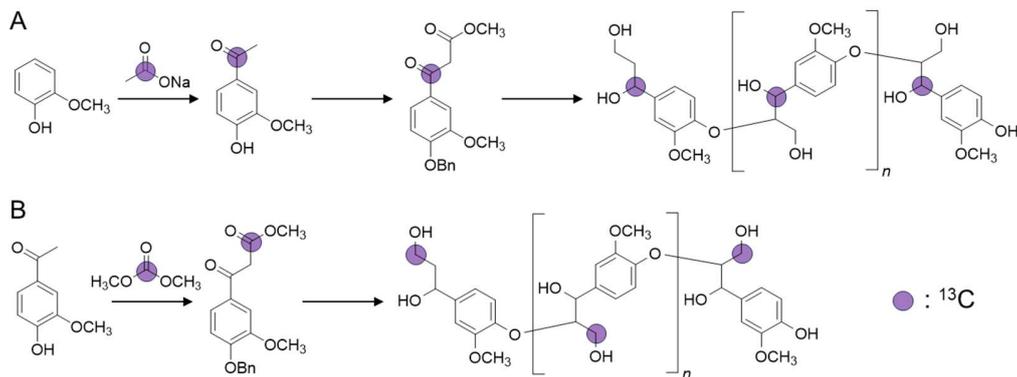


図 3  $^{13}\text{C}$  標識したリグニンモデルポリマーの合成 A:  $\alpha$  位標識、B:  $\gamma$  位標識

### 3. 結果と考察

合成した安定同位体標識リグニンモデル化合物および酵素的脱水素重合反応後試料の HSQC スペクトルを示す。分子末端側鎖は酵素的脱水素重合反応において、グリセロール基やアルデヒド基へと変換された (図 4 A)。その他に未帰属のピークが確認された。現在、詳細な解析を行っている。それに対し分子内側鎖構造では変換は認められず、比較的安定な構造である可能性が示唆された (図 4 B, C)。

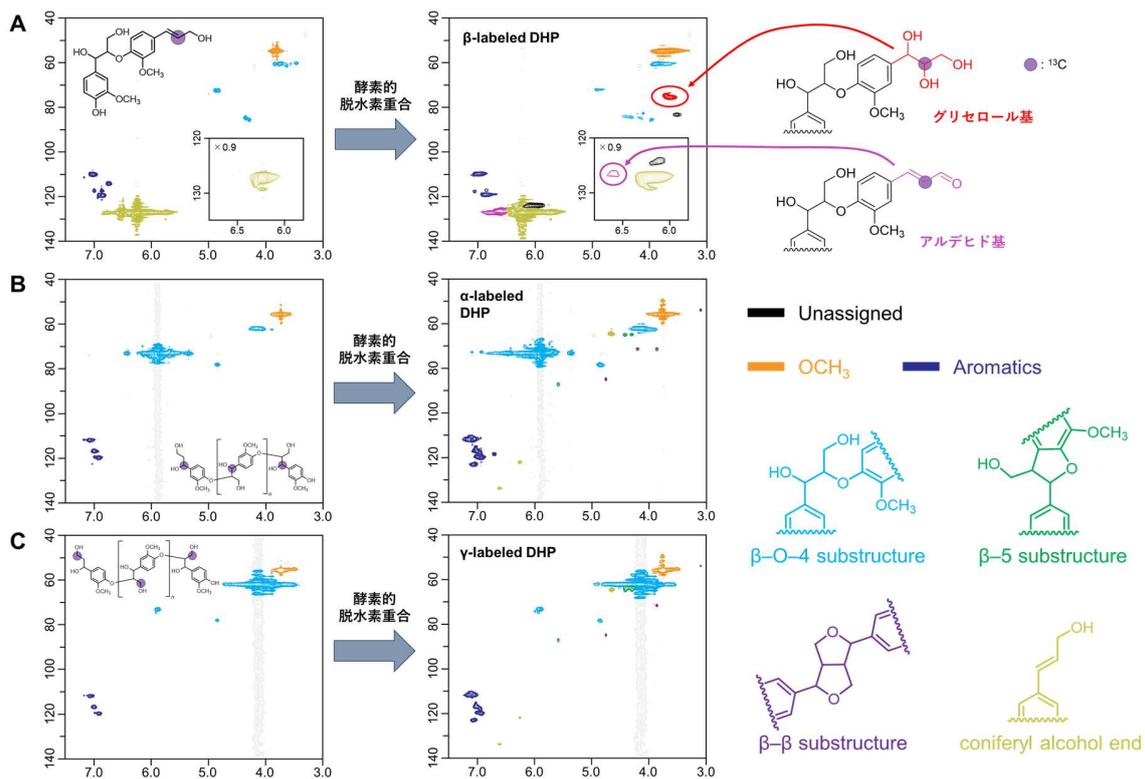


図 4  $^{13}\text{C}$  標識リグニンモデル化合物の酵素的脱水素重合物の HSQC スペクトル A: 分子末端側鎖標識リグニンモデル二量体、B:  $\alpha$  位標識リグニンモデルポリマー、C:  $\gamma$  位標識リグニンモデルポリマー

### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

[口頭発表リスト]

- 1) 峯岸 光、松下泰幸 “酵素的脱水素重合における  $\beta$ -O-4 結合型二量体側鎖の挙動解析：安定同位体標識法を用いた検討”、第 75 回日本木材学会大会 (仙台大会)

# Wavelength-Selective MIR–FEL Surface Modification of Electrochemically Grown Quantum Dots for Perovskite Solar Cell Interfaces

Sukrit Sucharitakul<sup>1</sup>, Siripatsorn Thanasanvorakun<sup>1,2</sup>, Vasan Yarangsi<sup>1</sup>, Monchai Jitvisate<sup>3</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>4</sup>, Heishun Zen<sup>4</sup>, Sakhorn Rimjaem<sup>1,2</sup>, Supab Choopun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

<sup>2</sup> Research Unit for Development and Utilization of Electron Linear Accelerator and Ultrafast Infrared/Terahertz Laser, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

<sup>3</sup> School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>4</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

**ABSTRACT** Mid-infrared free-electron laser irradiation was applied to electrochemically grown TiO<sub>2</sub> quantum dots, graphene quantum dots, and TiO<sub>2</sub>–graphene nanocomposites to control surface electrostatics relevant to perovskite solar cells. FEL exposure induced large zeta-potential shifts and modified photoluminescence without structural damage. The results demonstrate wavelength-selective FEL processing as an effective non-contact surface engineering method for quantum-dot-based transport layers.

## 1. Main text

Quantum dots (QDs) are widely used in optoelectronic and photovoltaic devices due to their tunable electronic structure and strong surface sensitivity. In perovskite solar cells (PSCs), oxide- and carbon-based QDs, including TiO<sub>2</sub> QDs, graphene quantum dots (GQDs), and TiO<sub>2</sub>–GQD nanocomposites, have emerged as promising electron transport materials. However, their performance is critically limited by surface chemistry, ionic environment, and defect-related trap states that are difficult to control using conventional treatments. This ZE2025 project explored mid-infrared free-electron laser (MIR–FEL) irradiation as a non-contact, wavelength-selective surface engineering approach for electrochemically synthesized QDs relevant to PSC interfaces. Experiments were conducted at the Kyoto University Free-Electron Laser (KU-FEL) facility using tunable MIR wavelengths around 5.7, 8.0, and 9.1 μm, corresponding to vibrational modes of surface functional groups and metal–oxygen bonds.

Electrochemically grown TiO<sub>2</sub> QDs, GQDs, and TiO<sub>2</sub>–GQD nanocomposites were prepared in aqueous colloidal form and characterized before and after FEL exposure. A key finding is that MIR–FEL irradiation induces large and reproducible zeta potential shifts of approximately 40–50 mV, accompanied by a reduction in hydrodynamic size. These changes indicate a reorganization of the electrical double layer and surface ionic environment rather than bulk structural modification. The resulting photophysical responses are summarized in Figure 1. Optical measurements reveal material-dependent behavior following FEL exposure. TiO<sub>2</sub> QDs exhibit systematic modulation of photoluminescence (PL) intensity without spectral distortion, consistent with changes in non-radiative recombination pathways. In contrast, GQDs and TiO<sub>2</sub>–GQD nanocomposites show enhanced PL intensity after irradiation (Figure 1), indicating suppression of surface trap states and improved electronic passivation. Transmission electron microscopy confirms preservation of crystalline cores across all samples (not shown), demonstrating that FEL processing selectively modifies surface states without inducing structural damage.

The relevance of these surface modifications to device performance is reflected in PSCs incorporating FEL-treated QDs, which show improved photovoltaic metrics compared to untreated controls (Figure 2). These results establish a direct link between FEL-induced surface electrostatic control and enhanced interfacial charge extraction in PSCs. Overall, this work demonstrates that MIR–FEL irradiation using KU-FEL is a powerful and gentle method for tuning QD surface electrostatics and interfacial properties, offering a unique capability beyond conventional thermal or chemical treatments and providing a solid foundation for high-performance PSC applications. This work was supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (ZE2025A-20).

## 2. Figures and tables

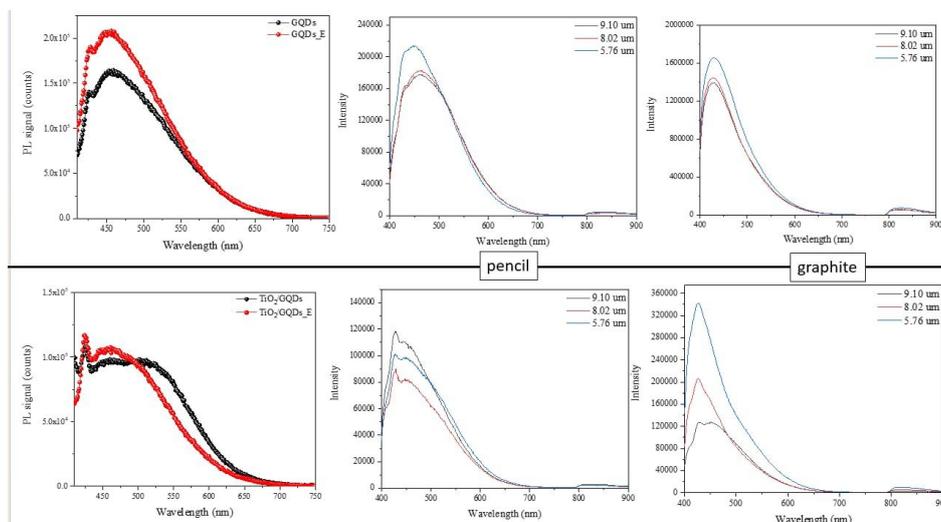


Figure 1. PL Results on Exposed Ti-GQDs Quantum Dots

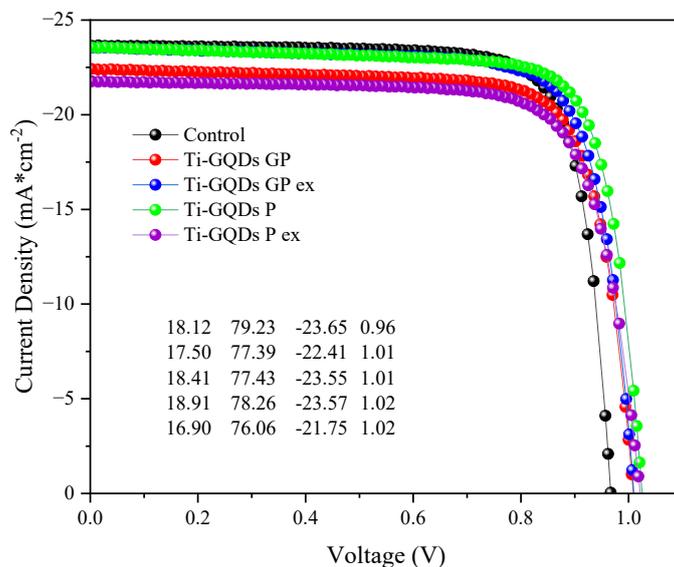


Figure 2. Performances of Exposed QDs in PSCs

### 3. Lists of papers and oral presentations

[List of papers]

3.1.1) Sucharitakul, S.; Thanasanvorakun, S.; Yarangsi, V.; Yarin, S.; Jitvisate, M.; Ohgaki, H.; Zen, H.; Rimjaem, S.; Choopun, S.

Infrared FEL-Induced Alteration of Zeta Potential in Electrochemically Grown Quantum Dots: Insights into Ion Modification.

Nanomaterials, 15, 1543, 2025. **Published**

[List of oral presentations]

3.2.1) Sucharitakul, S.; Thanasanvorakun, S.; Yarangsi, V.; Yarin, S.; Hongsith, K.; Jitvisate, M.; Ohgaki, H.; Phadungdhithhada, S.; Zen, H.; Rimjaem, S.; Choopun, S. “Infrared FEL-Induced Alteration of Zeta Potential in Electrochemically Grown Quantum Dots: Insights into Ion Modification”, presented as oral speaker at EMSES, 2025 international conference in Japan, January, 2025

3.2.2) Sucharitakul, S.; Thanasanvorakun, S.; Yarangsi, V.; Yarin, S.; Hongsith, K.; Jitvisate, M.; Ohgaki, H.; Phadungdhithhada, S.; Zen, H.; Rimjaem, S.; Choopun, S. “Advances in Low Dimensional Materials”, presented as KEYNOTE speaker at ICAPMA-ICREM 2025 international conference in Thailand, December, 2025.

# 代謝反応制御に関わる転写因子 Sp1 の zinc finger 構造を可視化する蛍光バイオセンサーの構築

田嶋 峻介<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>, 森井 孝<sup>3</sup>, 桑原 淳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>福岡大学理学部化学科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

<sup>3</sup>京都光華女子大学健康科学部

<sup>4</sup>同志社女子大学薬学部

## 1. 研究背景・目的

生物の代謝反応を利用した燃料・プラスチックや医薬品の創製は、バイオマスを原料とし、水中・常温・常圧下で高効率に進行する、ゼロエミッションなエネルギー利用系であり、持続可能社会への貢献が期待される。効率的な材料創製には、複雑な代謝反応を担う種々の酵素の遺伝子発現の時間・量を適切に制御する必要がある。酵素の発現には、転写因子が細胞質から核内への移行し、遺伝子に作用しなければならない。つまり、転写因子の核移行機構の解明が、代謝機構の理解・制御の上で重要である。

転写因子 Sp1 は、代表的な DNA 結合モチーフである C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> zinc finger (zf) domain を 3 個有する。当研究室では、Sp1 の核移行を促すシグナルが、典型的な短鎖アミノ酸配列ではなく、約 90 残基の zf domain の配列であると明らかにした。さらに、細胞質内での Zn<sup>2+</sup>配位による zf 立体構造の形成の核移行への関与も示唆した (図 1A)。しかし、Sp1 の細胞内 zf 立体構造の直接検出には至ってなく、Zn<sup>2+</sup>濃度の非常に低い細胞質での zf 立体構造形成は不明であり、Sp1 の核移行機構の実態は未解明のままである。Sp1 の核移行機構の解明には、生細胞内での Sp1 の zf 立体構造形成を直接可視化する必要がある。

蛍光タンパク質型バイオセンサーは、タンパク質機能構造の標的との認識・反応による構造変化を、蛍光タンパク質の蛍光強度変化として検出する。我々は、カルシウム透過型イオンチャネル TRPC5 の部分構造を、蛍光タンパク質 EGFP の蛍光団近傍に導入することで、TRPC5 の開口に伴う予想される構造変化を、EGFP の蛍光発光変化として効率的に検出した。本研究では、Sp1 の zf 全域に渡る立体構造検出のため、Sp1 の 3 連 zf domain をそのまま標的認識ドメインとして、蛍光タンパク質 EGFP の蛍光団近傍に導入することで、Sp1 の zf 構造形成を EGFP の蛍光強度変化で直接検出するバイオセンサー-zf-EGFP を作製し、Sp1 の細胞質内での zf 立体構造形成と核移行との関連性を解明する (図 1B)。

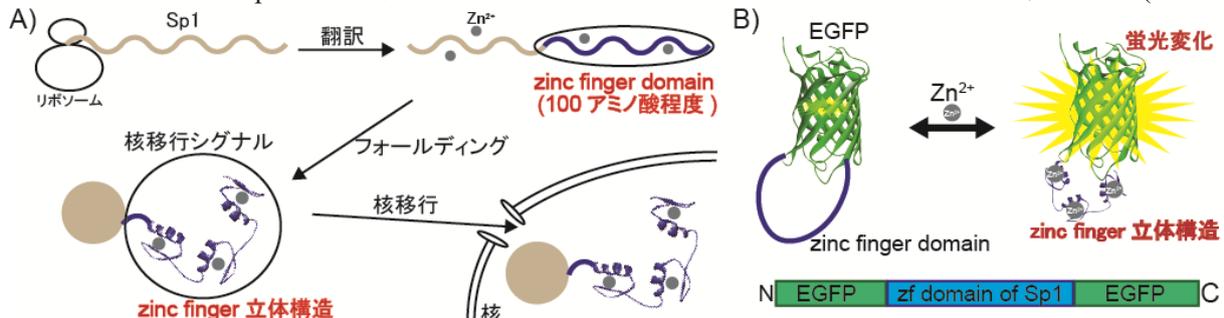


図 1 (A) Sp1 の予想される核移行経路。 (B) Zinc finger バイオセンサーの模式図。

## 2. 結果と考察

zf-EGFP を大腸菌にて発現後、イオン交換クロマトグラフィーにより精製した (純度 38%)。この zf-EGFP に対して、キレーター EDTA の添加による Zn<sup>2+</sup>の解離に伴う (1) EGFP 部位の蛍光応答、及び (2)

zinc finger 部位の機能変化の両面から評価した。

### (1) 蛍光応答評価

EDTA 添加による zf-EGFP の 395 nm 励起の蛍光強度 (F.I.<sub>395</sub>)、及び 466 nm 励起の蛍光強度 (F.I.<sub>466</sub>) の変化を測定した。その結果、EDTA 存在下において、F.I.<sub>395</sub> が減少し、F.I.<sub>466</sub> が上昇することが確認された。結果として、蛍光強度のレシオ (F.I.<sub>466</sub>/F.I.<sub>395</sub>) において上昇 (13%) が確認された (図 2)。

### (2) zinc finger の機能評価

EMSA 法により、EDTA 添加による zf-EGFP の DNA 結合能の変化を評価した。Sp1 zf の結合標的 DNA を蛍光色素 Cy5 で標識し、zf-EGFP と DNA の結合による DNA (Cy5) と EGFP (Cy2) 由来の蛍光バンドのシフトを評価した。その結果、EDTA 非存在下では確認された DNA と EGFP 由来のバンドのシフト (図 3, lane2) が、EDTA 存在下では確認されなかった (図 3, lane3)。このことから、EDTA 存在下では、zf-EGFP は Zn<sup>2+</sup>遊離により DNA 結合能を失活していることが確認された。

続いて、EDTA 添加による zf-EGFP の構造変化を CD スペクトルから評価するため、精製純度の向上を図り、純度 82% の zf-EGFP を獲得した。この zf-EGFP に対して、前述と同様の評価を行ったところ、蛍光強度レシオの上昇 (24%)、DNA 結合能の失活が確認された。さらに、CD スペクトルから、EDTA 存在下で  $\alpha$  helix の減少が確認され、zf 構造が解消していることが示唆された。以上より、zf-EGFP は zf 構造の解消を蛍光強度レシオの上昇として検出可能なことが確認された。

さらに、zf-EGFP が可逆的なバイオセンサーとして構築可能であるか確認するため、Zn<sup>2+</sup>配位による蛍光応答を評価した。上記の精製 zf-EGFP に対して、Zn<sup>2+</sup>存在下で蛍光強度レシオ (F.I.<sub>466</sub>/F.I.<sub>395</sub>) が有意に減少した (図 4)。この変化は、前述の zf 構造解消による蛍光強度レシオの変化と逆向きであった。このことから、zf-EGFP は Zn<sup>2+</sup>配位による zf 構造の形成を蛍光強度レシオの上昇として検出可能な事が示唆された。

以上より、zf-EGFP は Sp1 C2H2 zinc finger 構造の変化を可逆的に検出可能なバイオセンサーであることが強く示唆された。今後は、zf バイオセンサーとして確立するため、Zn<sup>2+</sup>配位による蛍光強度レシオの減少が zf domain 部位の zf 構造形成に因ることを CD スペクトル及び EMSA 法により評価する。

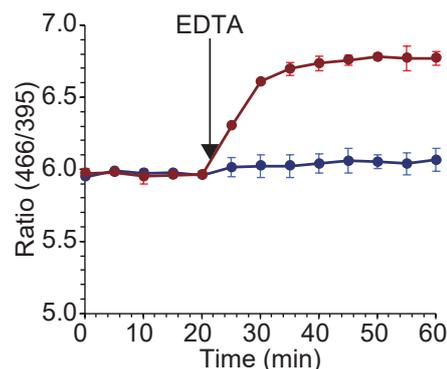


図 2. zf-EGFP の蛍光強度レシオの時間変化。20-25 分に 5 mM EDTA (赤)または buffer (青)を添加

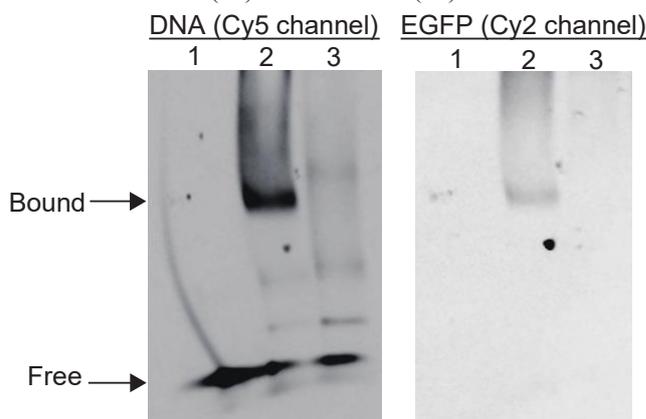


図 3. zf-EGFP の EMSA。(左) DNA (Cy5 channel)。(右) EGFP (Cy2 channel)。Lane 1: DNA のみ, lane 2: w/ zf-EGFP, lane 3: w/ zf-EGFP + EDTA。Free は Free DNA、Bound は zf-EGFP 結合 DNA のバンドを示す。

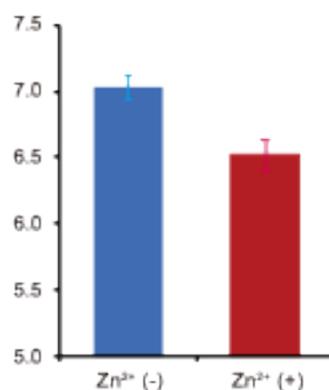


図 4. zf-EGFP の蛍光強度レシオ変化。10  $\mu$ M ZnCl<sub>2</sub> (赤)または buffer (青)を添加。

# 光誘起過渡吸収分光による多元系酸化物ガーネット結晶における 3 価/4 価セリウムの価数変化の動的過程追跡

北浦 守<sup>1</sup>, 全 炳俊, Ju Yoon Hnin Bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山形大学理学部

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

ガーネット蛍光体はレーザー、白色 LED、シンチレータ、長残光蛍光体など様々な用途に利用されており、その光学応答の制御を中心として数多くの研究が現在でも行われている。その研究過程において、この蛍光体の非発光過程には 2 つのイオン化過程が関わると考えられている。一つは発光始状態である  $Ce^{3+}$  の 5d 準位から伝導帯への熱イオン化過程であり、もう一つは  $Ce^{3+}$  の 4f 準位から伝導帯への光イオン化過程である。前者は温度上昇とともに顕在化し、後者は母体の伝導帯が  $Ce^{3+}$  の 5d 準位よりも低エネルギー側に位置する条件において顕在化する。後者の場合には電荷移動を伴って  $Ce^{3+}$  が  $Ce^{4+}$  へと価数変化するので、光励起キャリアが母体の電子状態を介して無輻射的に緩和する一連の非発光過程を調べることができる。このような条件を満たすのは  $RE_3Ga_5O_{12}:Ce(RE=Gd, Lu, Y)$  であり、 $Ce^{3+}$  発光を伴わないためにその光励起キャリアの動的過程は調べられていなかった。我々は  $Gd_3Ga_5O_{12}:Ce(GGG:Ce)$  において中赤外域に現れる自由キャリアのプラズマ吸収をプローブして  $Ce^{3+}/Ce^{4+}$  の価数変化の動的過程を追跡することに成功しており [2]、この光誘起過渡吸収分光の実験手法を用いて、本研究では  $Lu_3Ga_5O_{12}:Ce(LuGG:Ce)$  において  $Ce^{3+}/Ce^{4+}$  の価数変化に深く関わる光励起キャリアの動的過程を追跡したので、その結果を報告する。

## 2. 実験

実験に用いた LuGG:Ce 結晶はマイクロ引き下げ法で育成された。セリウムイオンの仕込み濃度は約 0.5% であった。試料をクライスタットに取り付けて真空中に設置して冷却した。KU-FEL に設置されたナノ秒 Nd:YAG レーザーシステムからの第 3 高調波を光パラメトリック発振器に入射して得た 2.2 eV から 2.9eV の出力をポンプ光として、FEL からの中赤外光マクロパルスを用いた。中赤外領域には Reststrahlen 反射が存在するので、中赤外光マクロパルスの波長はその反射の高エネルギー側にあたる 0.2 eV に設定した。ポンプ光とプローブ光の出力はそれぞれ約 10  $\mu$ J と 120  $\mu$ J に設定した。中赤外光マクロパルスビームスプリッターにより参照測定用と透過測定用とに分割し、それぞれ高速 MCT 検出器を用いて検出した。高速 MCT 検出器の出力信号はデジタルストレージオシロスコープに入力しパーソナルコンピュータに取り込んで解析した。FEL の不安定性による出力信号の変動は 2 つの高速 MCT 検出器の出力信号の比を取ることでキャンセルし、その他の原因に起因する出力信号の変動の影響は 100 ショットの平均をとることで低減した。

## 3. 実験結果と考察

図 1 に LuGG:Ce 結晶において測定した自由キャリアプラズマの生成スペクトルを示す。比較のために、セリウム 4f-5d 遷移の吸収スペクトルも示した。2 つのスペクトルは、ほぼ同じエネルギー位置から立ち上がっており、セリウム 4f-5d 遷移と電荷移動遷移が競合して起こることを示す。つまり、セリウム 4f 準位を基準とするとセリウム 5d 準位と伝導帯底部はほぼ同じエネルギー位置に存在すると考えられる。この結果は経験的情報に基づいて計算された LuGG:Ce の真空準位基準結合エネルギー

準位図と定性的に一致する[2]。自由電子プラズマの中赤外吸収は主に数十マイクロ秒の時定数で減少する長寿命成分からなる。ガーネットでは伝導帯近傍に欠陥準位が存在しており、光励起キャリアが欠陥準位と伝導帯の間で捕獲・放出を繰り返すことで長寿命成分が出現すると考えられる。温度上昇によって、この長寿命成分は急激に弱められ、約 50K でほぼ消失した。これは欠陥準位を介して光励起キャリアが無輻射的に消失したことを示す。このような欠陥準位からの無輻射過程の存在は文献[3,4]において示唆されている。さらなる温度上昇とともに時定数は次第に短くなり自由キャリアプラズマ吸収は弱められた。時定数の温度依存性は伝導帯底部から他の状態への熱活性的な無輻射遷移過程が存在することを示唆する。欠陥準位を介した無輻射消失も含めて、本研究ではこれまで捉えることができなかった非発光過程の原因の一端を捉えることができた。しかし、その無輻射失活過程には例えば  $Ce^{3+}$  5d 準位などが中間状態として介するののか、その詳細は現状で不明である。

#### 4. まとめ

本研究では、LuGG:Ce の非発光過程を自由キャリアの過渡吸収分光によって調べた。自由キャリアの生成スペクトルと  $Ce^{3+}$  4f-5d 吸収スペクトルの比較から、伝導帯底部と  $Ce^{3+}$  5d 準位のエネルギー位置がほぼ同じであることが判明した。自由キャリア吸収の時間応答から、伝導帯と欠陥準位の間において自由キャリアの移動が生じており、その結果として自由キャリア吸収の時間応答に長寿命成分が現れた。温度上昇に伴い、その長寿命成分は急激に減少した。欠陥準位から自由キャリアの消失が起こることと考えられる。さらなる温度上昇に伴い、時間応答の時定数は短くなった。欠陥準位での無輻射消失も含めて、本研究では、これまで捉えることができなかった非発光過程の原因の一端を捉えることができ、ガーネット蛍光体の非発光過程に関する重要な情報を得ることができた。

#### 参考文献

- [1] M. Kitaura et al.: Opt. Mater. X: 25, 100398 (2025).
- [2] P. Dorenbos: J. Lumin. 134, 310 (2018).
- [3] M. Kitaura et al.: J. Appl. Phys. 115, 83517 (2014).
- [4] A. Satoh et al: Jpn. J. Appl. Phys. 53, 05FK01 (2014).

#### 5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

- (1) M. Kitaura, H. Zen et al.: “Pump-Probe Spectroscopy Using Mid-Infrared Free Electron Laser for Determinating the Positions of  $Ce^{3+}$  5d Level and Host Conduction Bands in  $Lu_3Al_{5-x}Ga_xO_{12}:Ce$  ( $x=4,5$ ) Crystals”, ZE 拠点年会、12月12日、宇治（ポスター発表）。

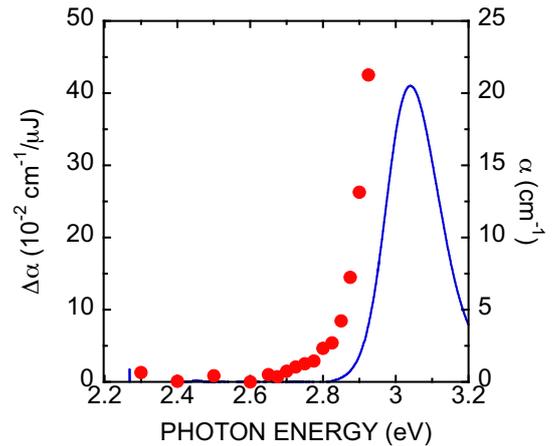


Fig.1: LuGG:Ce 結晶の自由電子プラズマ吸収の生成スペクトル(赤丸)とセリウム 4f-5d 吸収スペクトル(青線)の比較。

# 事故耐性ハイブリッドの水素同位体放出挙動

向井啓祐<sup>1,2</sup>, 金森大悟<sup>2</sup>, 金宰煥<sup>3</sup>, 八木重郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>核融合科学研究所, <sup>2</sup>総合研究大学院大学, <sup>3</sup>量子科学技術研究開発機構, <sup>4</sup>京都大学

## 1. 研究背景と目的

核融合炉における固体増殖ブランケットは、燃料トリチウムを炉内生産すると同時に、中性子のエネルギーを熱として変換・回収する機能を担う。固体増殖ブランケットは技術的成熟度が高い設計である一方、金属ベリリウム (Be) を中性子増倍材として用いる点に起因する安全上の課題を抱えている。特に、冷却材喪失事故 (in-box LOCA) 時には、金属 Be と水蒸気の酸化反応により、爆発性の水素ガス大量が発生し、容器の健全性を脅かすリスクがある。

十分なトリチウム増殖性能と高い事故耐性を両立する新規材料として、Li-Be 系ハイブリッドセラミックスに着目した。本研究では四元系 Li-Be-Si-O 系の安定相を合成し、高温水蒸気環境での水素発生を調べることで化学的安定性を評価した。

## 2. 合成および結晶構造解析

始発原料として LiOH·H<sub>2</sub>O、BeO、SiO<sub>2</sub> を用い、固相反応法により Li<sub>2</sub>BeSiO<sub>4</sub> を合成した。中間相の生成や融解を避けるため、5 at.% の BeO 過剰組成とし、これらの始発原料を混合した。これらの混合粉末をコールドプレスし、Ar ガス中で 1200 °C の熱処理を行った。合成時の示差熱-熱重量同時分析 (TG-DTA) の結果、100 °C および 475 °C 付近で水分脱離および LiOH 分解に起因する質量減少が観測されたが、1000 °C 以上では顕著な質量変化は認められず、高温での化学的安定性の高い相が合成されたと考えられる。得られた粉末試料の X 線回折 (XRD) およびリートベルト解析結果を図 1 に示す。信頼度因子は  $R_{wp} = 3.44\%$ ,  $R_p = 2.32\%$ ,  $S = 5.90$  であった。この結果、主相として斜方晶  $\gamma$ -Li<sub>2</sub>BeSiO<sub>4</sub> と少量の BeO からなる二相系材料が形成していることが示された。結晶構造解析および DFT による電子密度分布解析から、Li-O および Be-O の結合は主としてイオン結合性を、Si-O は共有結合性を持ち、Li や Be の価電子は酸素側にほとんどの価電子が奪われていることが示された。つまり、高温水蒸気環境において、これ以上の酸化反応を起こしにくい電子構造を持つことが示唆された。

## 3. トリチウム増殖性能評価

PHITS コードと JENDL 核データを用いた一次元中性子輸送計算により、Li<sub>2</sub>BeSiO<sub>4</sub>-BeO 系のトリチウム増殖性能が評価された (図 2)。BeO 含有率を 40-99 at.% の範囲で変化させた結果、BeO 97 at.% において、Local TBR = 1.24 (<sup>6</sup>Li 90%濃縮) が得られた。これはブランケット被覆率を約 85% と仮定した場合に TBR ≈ 1.05 相当し、燃料自給に必要な条件を満たす値である。

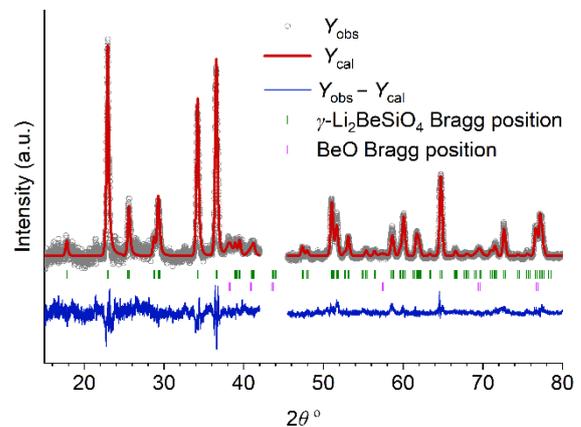


図 1 合成試料のリートベルト解析結果

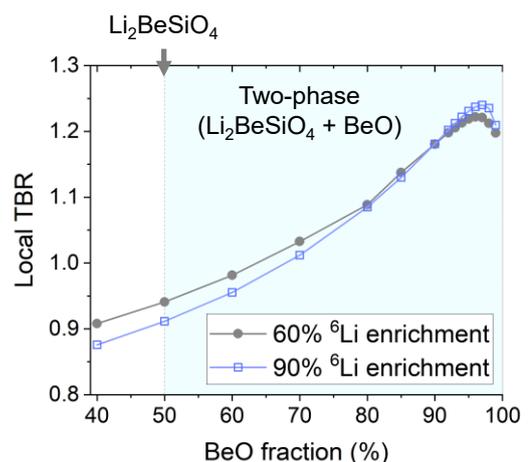


図 2 BeO-Li<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> において BeO 比を変化させたときの Local TBR

る。また、特筆すべき点として、本材料は金属 Be や  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  といった金属系中性子増倍材を一切用いない場合においても、従来材料 ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 、 $\text{Li}_8\text{SnO}_6$ 、 $\text{Li}_8\text{PbO}_6$ 、 $\text{FLiBe}$ ) と同等あるいはそれ以上の増殖性能を示した。

#### 4. 水蒸気雰囲気下での水素発生

In-box LOCA を模擬するため、 $\text{Ar} + 1 \text{ vol.}\% \text{ H}_2\text{O}$  雰囲気下での昇温試験が実施され、試料より発生した水素はガスクロマトグラフィーにより測定された。金属 Be 粉末も同条件で試験を行い、単位面積あたりの水素発生量を比較した。

図 3 に試験結果を示す。金属 Be では、 $400^\circ\text{C}$  以上で顕著な酸化反応と水素発生が観測され、最終的な水素発生量は  $263 \text{ ppm}/\text{cm}^2$  であり、 $1200^\circ\text{C}$  到達後も水素を発生し続けていたことから、さらなる水素発生の余地を残していると考えられる。一方、 $\text{Li}_2\text{BeSiO}_4 + \text{BeO}$  二相ハイブリッドセラミックスでは、 $1000^\circ\text{C}$  以上でも水素の発生量はわずかであり、ほとんどの測定点において発生水素は検出限界以下であった。総水素発生量は  $0.013 \text{ ppm}/\text{cm}^2$  であり、金属 Be よりも 5~6 桁低い値であった。この極めて低い水素発生量は、前述の電子構造解析で示されたカチオンの化学結合状態に起因するものと考えられる。

#### 4. 結論と今後の展望

本研究では、新たな機能材料として  $\text{Li}_2\text{BeSiO}_4\text{-BeO}$  二相ハイブリッドセラミックスを合成し、トリチウム増殖性能と水素の発生量を評価した。過酷事故環境を模擬した高温水蒸気試験の結果、本材料は高温水蒸気に曝されてもほとんど水素を発生しないことが示された。また、中性子輸送計算により、金属 Be を含まないブランケットにした場合にも、Be リッチな組成においては燃料自己自給性を達成できることが示唆された。本研究の成果は、優れた固有安全性を持つ新たなブランケット設計を可能にする成果であると位置づけられる。しかしながら、本材料はこれまでに照射試験の実績がなく、トリチウムの生産・放出特性が十分理解されていない。そこで今後の研究では、イオン照射を行ったハイブリッドセラミックスを対象に、水素を高温で吸蔵させた試料を準備し、昇温脱離ガス分析法によって水素の放出特性を明らかにしていく。また、中性子照射後トリチウム放出挙動を明らかにするために、国内外の実験炉を活用した試験を計画している。

#### 5. 発表リスト

- 向井 啓祐, 黄 泰現, 草場 稷, 金 宰煥, 核融合ブランケット用事故耐性ハイブリッドセラミックス (招待講演)、プラズマ・核融合学会 第 42 回年会 2025 年 12 月 1~4 日 京都工芸繊維大学 松ヶ崎キャンパス

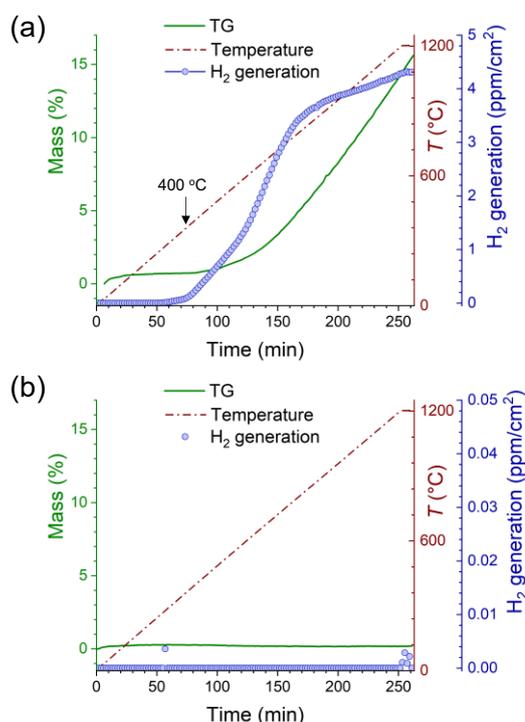


図 3 Ar+1% $\text{H}_2\text{O}$  雰囲気酸化における(a)Be 金属粉末および(b) $\text{Li}_2\text{BeSiO}_4 + 5\text{wt}\%\text{BeO}$  の質量変化と水素発生

# 量子ビームを用いた結晶 PET の酵素分解

田所 大輔<sup>1</sup>, 全 炳俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学生存圏研究所

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 緒言

近年、天然資源消費量および使用済みプラスチック廃棄量削減の観点から循環型プラスチック経済の実現が求められている。汎用プラスチック材料であるポリエチレンテレフタレート (PET) のリサイクル法には3つの技術がある。その中で酵素を用いたバイオケミカルリサイクルが低環境負荷化環境経済学試算を一定クリアし注目が高まっている。このバイオケミカルリサイクル法による工業化の実現には大きく2つの課題があった。1つは、酵素の分解速度が遅いことであったが、この20年の間のバイオインフォマティクスと遺伝子工学の発展により工業化に耐え得る酵素分解速度の高速化が達成された。もう1つの大きな課題が、酵素は結晶 PET の分解ができないことである。しかし、これはほとんど解決されていない。つまり、PET ボトルや衣服などの繊維などの結晶 PET をリサイクル回収したまま酵素分解工程に回せないことが、バイオケミカルリサイクル法の工業化の大きな足かせになっている。そこで、企業研究を中心に、粉碎凍結法などの結晶 PET 材料の前処理開発研究が行われている。本研究において、中赤外自由電子レーザーを用いた PET ボトルの分子配向秩序の破壊的制御を行い、PET ボトルの酵素分解の達成を目指す。

## 2. 実験項

試料にはキリン社製ミネラルウォーターPET ボトルの胴部分の切片 (約 10 mm×20 mm) を用いた。自由電子レーザー照射は京都大学エネルギー理工学研究所 KU-FEL にて行った。その照射条件は、波長は先行研究 [1] から 7.22 / 9.83 / 11.40  $\mu\text{m}$  の3波長を選択した。パルスエネルギー 30 - 50 mJ、パルス間隔 2 Hz のパルス波をビーム直径約 2 mm で走査照射した (200  $\mu\text{m}$  毎に走査)。照射切片の広角小角 X 線同時測定 (WAXD & SAXS) は SPring-8 の BL40B2 で行った (X 線波長は 1  $\text{\AA}$ )。検出器は浜松フォトニクス flatpanel (WAXD) と Pilatus 3S2M (SAXS) を用いて、カメラ長はそれぞれ 0.05 m (WAXD)、1.8 m (SAXS) で測定した。

## 3. 結果と議論

被照射 PET ボトル切片の照射痕は、7.22  $\mu\text{m}$  照射では照射痕がはっきりついたが、高波長側で徐々に弱まった。また、自由電子レーザーをボトル切片に照射すると「バチッバチッ」といった音がするが、11.40  $\mu\text{m}$  照射ではその音はほとんど鳴らなかった。7.22  $\mu\text{m}$  ( $1385\text{ cm}^{-1}$ ) 照射は PET のテレフタル酸由来部分を主な吸収ターゲットとしていて、対して、11.40  $\mu\text{m}$  ( $875\text{ cm}^{-1}$ ) 照射は PET のエチレングリコール由来部分をターゲットとしている。つまり、エチレングリコール部を吸収ターゲットとする赤外波長を照射すると音がならず照射痕がつかなかった。

図 1 に被照射 PET ボトル切片の WAXD 曲線を示した。中赤外自由電子レーザー照射によって、複数の bragg ピークが出現した。7.22 / 9.83  $\mu\text{m}$  照射は、 $q \sim 30\text{ nm}^{-1}$  のピークが増加したが、11.40  $\mu\text{m}$  照射では増加しなかった。 $q \sim 17.5\text{ nm}^{-1}$  のピークは 7.22 / 9.83 / 11.40  $\mu\text{m}$  照射で増加したが、増加率は 11.40  $\mu\text{m}$  照射が大きかった。11.40  $\mu\text{m}$  照射では (1 0 0) 面に対応する強度が増加した (挿入図中矢印)。

PET ボトルは金型を用いた射出ブロー成形加工によって製造され、目視で透明であるので、ラメラ積層構造のような可視光波長程度サイズを持つはっきりとした結晶構造はできていない。そして、アモルファスハローは示さずいくつかのピークやショルダーが存在し (図 2 青丸)、SAXS (図 3d) ではうっすらとした等方的な散乱がみられるために、目視での透明性を保ったまま擬結晶によるラメラ前駆体的構造が積層しているようだ。自由電子レーザー照射による bragg ピーク強度の増加とピーク出現は、

PET ボトルの結晶化が少し進んだことを意味する。照射 PET は磁場によって配向秩序化することが知られており、自由電子レーザーの磁場による結晶化の可能性がある [2]。但し、アモルファスフィルムへの同波長の照射では bragg ピークの出現は観測されなかったため、そのメカニズムははっきりしない。

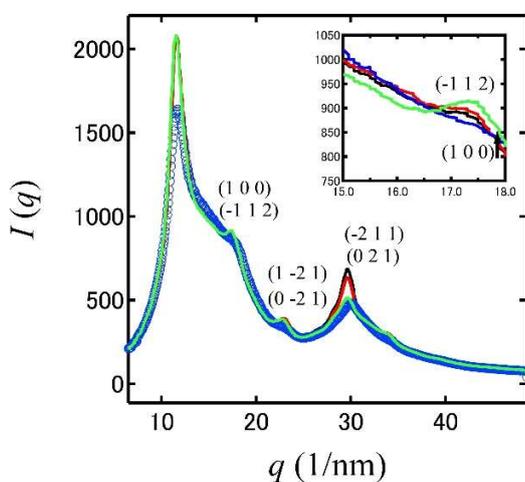
図 2 に被照射 PET ボトル切片の SAXS 像を示した。未照射に比べると、照射切片の散乱強度は増加し、7.22  $\mu\text{m}$  照射は強度増加が大きくなり、そして、散乱の赤道方向が短軸を持つ楕円形となった。尚、照射磁場は赤道方向を向いている。アモルファス糸まり構造にラメラ前駆体的構造を少し持たせたような構造を取る PET ボトルの分子鎖集団が若干の楕円形状へと照射を受けて変化した。PET のテレフタル酸由来部分の振動バンドをターゲットとした方が、分子鎖集団の楕円形状へより変化した。自由電子レーザー照射がどのようにしてこの PET ボトルの分子鎖集団の楕円形状性を持たせているかはわからず、今後の課題である。

#### 4. 結論

中赤外自由電子レーザー照射は PET ボトルの擬結晶構造を破壊せず、結晶性が増した。なので、酵素分解活性を持たせる結果とはならなかった。しかし、自由電子レーザー照射による PET ボトルの結晶化機構に照射波長選択性があることがわかり、特に、WAXD 結晶面と SAXS 方位の関係性という非常に興味深い課題を得た。

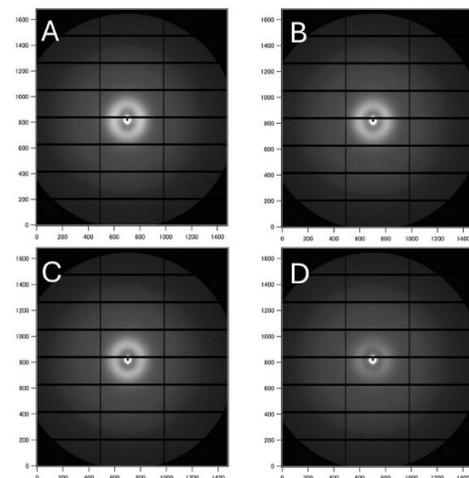
[1] Grime, D., and I. M. Ward. "The assignment of infra-red absorptions and rotational isomerism in polyethylene terephthalate and related compounds." *Transactions of the Faraday Society* 54 (1958): 959-971.

[2] Kimura, T., T. Kawai, and Y. Sakamoto. "Magnetic orientation of poly (ethylene terephthalate)." *Polymer* 41.2 (2000): 809-812.



**Figure 1**

被照射 PET ボトルの WAXD 曲線。それぞれ、未照射(青)、7.22  $\mu\text{m}$  照射 (黒)、9.83  $\mu\text{m}$  照射 (赤)、11.40  $\mu\text{m}$  照射 (緑)PET 切片の回折像。図中に指数を示した。挿入図中矢印は (1 0 0) の回折。



**Figure 2**

被照射 PET ボトルの SAXS 像。それぞれ、7.22  $\mu\text{m}$  照射 (A)、9.83  $\mu\text{m}$  照射 (B)、11.40  $\mu\text{m}$  照射 (C)、未照射(D)PET 切片の散乱像。

[口頭発表] 田所大輔、全炳俊、加藤政博、中赤外自由電子レーザー照射による非晶質 PET フィルム改質、第 2 回 KU-FEL ユーザーミーティング、2025 年 12 月 12 日、京都大学エネルギー理工学研究所

# Impact of Irradiation on the Structural and Functional Properties of Polymer-Based Nanoparticles for Drug Delivery Applications

Winita Punyodom<sup>1</sup>, Nuttawut Khammata<sup>1</sup>, Nuttawat Khammata<sup>2</sup>, Jutamas Kongsuk<sup>1</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>3</sup>, Sakhorn Rimjaem<sup>2</sup>, Heishun Zen<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University

<sup>2</sup> Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University

<sup>3</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

## 1. Outline of Research Project

This research project focuses on investigating the effects of mid-infrared free-electron laser (MIR-FEL) irradiation on polymer-based nanoparticles intended for drug delivery applications. The study utilizes biodegradable polymers, poly(lactide-co-glycolide) (PLGA) and poly(lactide-co-glycolide-co-caprolactone) (PLGC), which are widely recognized for their biocompatibility, low toxicity, and controlled drug release capabilities. By applying selective MIR-FEL wavelengths corresponding to characteristic infrared absorption bands of the polymers, the research aims to induce controlled structural modifications such as chain scission or cross-linking. These modifications are expected to influence molecular structure, thermal stability, particle size, and colloidal behavior of the nanoparticles. The ultimate goal is to optimize nanoparticle properties for enhanced drug delivery performance while supporting the development of sustainable materials aligned with zero-emission energy research initiatives. The research is performed through collaboration between Chiang Mai University (CMU) and Kyoto University (KU-FEL) under the Zero-Emission Energy Research framework.

## 2. Introduction

Polymer-based nanoparticles are submicron colloidal systems widely employed in pharmaceutical and biomedical applications. Their ability to encapsulate both hydrophobic and hydrophilic drugs, combined with tunable surface characteristics and degradation behavior, makes them highly suitable for advanced drug delivery systems. Among available polymers, PLGA and PLGC have been extensively studied due to their biodegradability, compatibility with various tissues, and predictable degradation through hydrolysis.

Previous studies have demonstrated that irradiation techniques can significantly modify polymeric materials by altering crystallinity, thermal behavior, molecular weight, and morphology. Quantum beam irradiation, in particular, may cause cross-linking or chain scission depending on irradiation conditions, thereby influencing mechanical strength, degradation rate, and drug release profiles.

Mid-infrared free-electron laser (MIR-FEL) irradiation offers a unique advantage because of its wavelength tunability, allowing selective excitation of specific molecular bonds. In this project, MIR-FEL irradiation was applied at wavelengths corresponding to CH stretching, C=O stretching, and C–O–C stretching vibrations of PLGA and PLGC polymers. This selective approach may provide insight into structure–property relationships and may offer a promising pathway for tailoring nanoparticle performance for controlled drug delivery while maintaining biocompatibility.

## 3. Methodology

PLGA and PLGC polymeric nanoparticles were synthesized at Chiang Mai University using established nanoparticle fabrication techniques. The prepared samples included blank polymeric nanoparticles, Nile red-loaded nanoparticles, and paclitaxel-loaded nanoparticles. All samples were prepared in two physical forms: dry powder and aqueous solution at a concentration of 1 mg/mL, to allow evaluation of irradiation effects under different sample conditions. Prior to irradiation, comprehensive physicochemical characterization was performed to establish baseline material properties. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was employed to analyze the chemical structures of the polymers, with particular focus on characteristic absorption bands corresponding to CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, and CH stretching vibrations at 2,900–3,030 cm<sup>-1</sup> (3.3–3.5 μm), C=O stretching vibrations at 1,660–

1,880  $\text{cm}^{-1}$  (5.3–6.0  $\mu\text{m}$ ), and C–O–C stretching vibrations at 975–1,110  $\text{cm}^{-1}$  (9.0–10.2  $\mu\text{m}$ ). Molecular weight variations were estimated using viscosity measurements, while thermal properties were examined by differential scanning calorimetry (DSC). Particle size distribution and colloidal stability were evaluated using dynamic light scattering (DLS) and zeta potential analysis.

Mid-infrared free-electron laser irradiation was conducted at the Kyoto University Free-Electron Laser (KU-FEL) facility. The MIR-FEL system provided tunable wavelengths corresponding to the infrared absorption peaks of the polymers. Samples were irradiated at wavelengths of 5.0, 5.8, and 9.3  $\mu\text{m}$  with pulse energies ranging from approximately 50 to 54 mJ. A parabolic mirror was used to focus the laser beam to an area of approximately  $2.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ . During irradiation, samples were continuously shaken to ensure uniform exposure, and irradiation durations of 1 and 5 minutes were applied.

Following irradiation, post-treatment analyses are carried out to evaluate laser-induced modifications. Changes in chemical structure will be investigated using FTIR and nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy to identify potential bond scission or cross-linking events. Thermal behavior and stability will be reassessed by DSC to determine alterations in glass transition temperature and degradation patterns. Variations in particle size, surface charge, and colloidal behavior will be analyzed using DLS and zeta potential measurements. This systematic approach enabled direct comparison between pre- and post-irradiation properties, providing insight into the influence of selective mid-infrared irradiation on the structural and functional characteristics of polymer-based nanoparticles.

#### 4. Results and discussion

Pre-irradiation characterization confirmed successful synthesis of polymeric nanoparticles. FTIR spectra showed characteristic absorption peaks corresponding to functional groups of PLGA and PLGC. NMR analysis of PLGC indicated a monomer composition ratio (LL:GL:CL) of approximately 63.62:27.51:8.86. DSC thermograms revealed glass transition temperatures in the range of 35–40  $^{\circ}\text{C}$ , while DLS measurements indicated nanoscale particle sizes of approximately 250 nm.

During MIR-FEL irradiation, strong interaction between the laser wavelengths and polymer functional groups was observed, as evidenced by physical responses such as smoke generation. These observations suggest efficient vibrational excitation of targeted molecular bonds. Post-irradiation analyses are ongoing; however, preliminary findings indicate that MIR-FEL exposure can induce structural modifications in polymeric nanoparticles. Such changes are expected to influence molecular weight distribution, thermal behavior, and colloidal stability. The ability to selectively modify chemical bonds using wavelength-specific irradiation represents a powerful approach for tuning nanoparticle performance without introducing chemical additives. Overall, the results demonstrate the feasibility of MIR-FEL irradiation as an advanced tool for engineering polymer-based nanoparticles with tailored physicochemical properties suitable for controlled drug delivery applications.

#### 5. Conclusion

This study demonstrates the application of MIR-FEL irradiation to modify the structural and functional properties of PLGA and PLGC nanoparticles. The goal is to optimize nanoparticle properties for drug delivery by irradiating selective wavelengths of MIR FEL, providing insights into the design of more efficient drug delivery systems with controlled release profiles and enhanced stability. Comprehensive characterization before irradiation confirmed suitable nanoparticle size, thermal stability, and chemical composition. Ongoing post-irradiation analyses indicate that MIR-FEL treatment has strong potential to tailor nanoparticle properties. Future work will focus on optimizing irradiation parameters, fully correlating property changes with functional performance, and evaluating in-vitro biocompatibility. The outcomes of this research contribute valuable insight into sustainable nanomaterial design and support the advancement of zero-emission energy research through precision quantum-beam technologies.

#### 6. List of Research Achievements

- [1] N. Khammata, N. Khammata, J. Kongsuk, H. Ohgaki, S. Rimjaem, H. Zen, W. Punyodom\*, Impact of Irradiation on the Structural and Functional Properties of Polymer-Based Nanoparticles for Drug Delivery Applications, Poster presentation at the 2025 Annual Meeting of ZE program, December 12th, 2025, Kyoto, Japan.

# TLS により誘導される液液相分離を促進する RNA と TLS の相互作用の NMR 法による解析

黒川理樹<sup>1</sup>、山置佑大<sup>2,3</sup>、山本章平<sup>2,3</sup>、近藤敬子<sup>2,3</sup>、永田崇<sup>2,3</sup>、片平正人<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> 埼玉医科大学医学部、<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所、<sup>3</sup> 京都大学大学院エネルギー科学研究科

Translocated in LipoSarcoma/Fused in Sarcoma (TLS/FUS) は、遺伝子発現制御、恒常性維持、細胞増殖など多様な機能を有する RNA 結合タンパク質である。TLS は筋萎縮性側索硬化症 (ALS) などの神経変性疾患の原因遺伝子として注目されており、近年の研究では、ALS において TLS が液液相分離、液滴や沈殿を形成することが示唆されている。これまでに我々は、長鎖非コード RNA であるプロモーター関連非コード RNA (pncRNA-D) や lncRNA3 が TLS に特異的に結合し、相分離と沈殿を抑制することを実証した。この結果は、これらの非コード核酸が ALS 創薬の候補となる可能性を示唆している。有望な創薬シーズを得るためには、これらの非コード核酸が細胞内においてどのような構造を形成し、TLS と相互作用するのかを理解することが重要である。加えて、液液相分離中では特に、核酸分子の並進運動性、すなわち拡散係数も重要な物性である。また、TLS が誘導する液液相分離は、細胞内のミトコンドリアや膜の無い細胞内小器官の形成に関与し、細胞内のエネルギー代謝にも深く関与していることから、ゼロエミッションエネルギー研究の推進の観点からも TLS と非コード核酸との相互作用の理解は重要である。

生きたヒト細胞内において非コード核酸の構造と運動性を解析するためには、観察対象の核酸分子を内包する生細胞まるごとを NMR 測定試料とする in-cell NMR 法が強力な手段となる。In-cell NMR 法を用いることでヒト生細胞内の核酸分子について、その構造、並進運動、相互作用に関する情報を同時に取得できる可能性があり、これらの相関関係についても知見が得られると期待される。しかしながら、拡散係数に関しては in-cell NMR 法による解析の報告例がなかった。これは、拡散係数の計測に必要な DOSY と呼ばれる測定の感度が低く、細胞内へと導入した微量な核酸分子には適用困難だったからである。

本研究では、感度を向上させるため、核酸のシグナルのみを選択的に検出可能な選択励起の DOSY パルスプログラムを開発した。このパルスプログラムを用いて試験管内において核酸の DOSY スペクトルを測定した。選択励起パルスを用いることにより、共存塩に由来する強いバックグラウンドシグナルを抑制し、目的とする核酸のイミノプロトンシグナルのみを高感度に検出することに成功した (図 1)。In-cell DOSY 実験においてもこのパルスプログラムを用いる

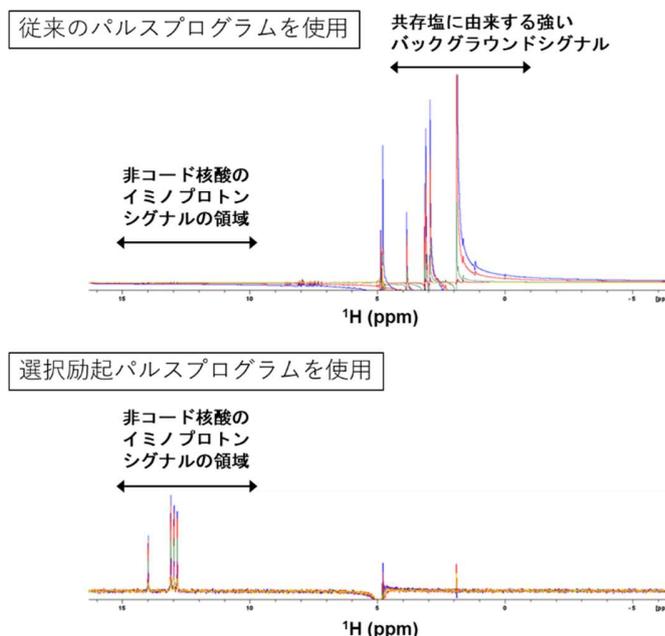


図 1. 試験管内における核酸分子の選択励起 DOSY スペクトル。

ことで、細胞内に存在する大量の共存分子に由来するシグナルを避け、目的の非コード核酸のシグナルのみを高感度に検出可能と期待できる。

さらに、ヒト細胞内への核酸導入効率を向上させるため、エレクトロポレーション法の実験条件を最適化した。エレクトロポレーション時に印加するパルスの長さを従来の 10 ms (図 2、中) から 20 ms (図 2、右) に変更することで核酸の導入量 (赤枠で囲った象限) が 2 倍以上に向上した。

改良したパルスプログラムと最適化したエレクトロポレーションの条件を用いることで核酸の in-cell DOSY スペクトルの取得に成功した (図 3、左)。今回、細胞内に導入した核酸分子のスペクトルパターンは試験管内におけるスペクトルとよく一致しており、ヒト生細胞内においても試験管内とよく似た立体構造を維持していることが示された。一方、顕著な核酸構造の変化がないにも関わらず、細胞内における拡散係数は試験管内に比べ半分程度であることが明らかになった (図 3、右)。これは、細胞内においては、タンパク質などの細胞内在性分子が導入した核酸分子と相互作用することでその拡散運動を抑制しているためと考えられた。

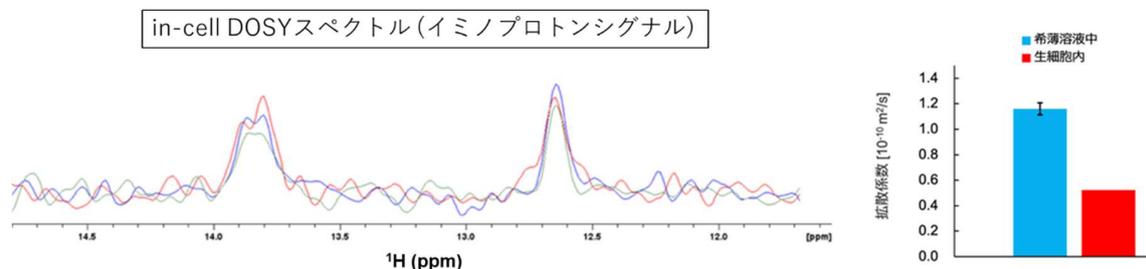


図 3. ヒト生細胞内の核酸分子の in-cell DOSY スペクトル (左) と細胞内核酸の拡散係数 (右)。

#### [論文発表リスト]

[1] Ueda, N., Yoneda, R., Kurokawa, R., PolyG RNA Induces Phase Separation and Precipitation of TLS/FUS, *Biomedical Sciences*, (2025). (謝辞あり)

#### [口頭発表リスト]

- [1] オーガナイザー：黒川理樹、片平正人、「RNA と結合タンパク質が支配する超複雑系の作用原理の解析」、第 48 回分子生物学会年会、2025 年 12 月 5 日。
- [2] 黒川理樹、「相分離・沈殿形成を誘導する RNA の解析」第 48 回分子生物学会年会、2025 年 12 月 5 日。
- [3] 片平正人、「試験管内及び生細胞内における核酸アプタマーと標的病因タンパク質の相互作用解析」第 48 回分子生物学会年会、2025 年 12 月 5 日。

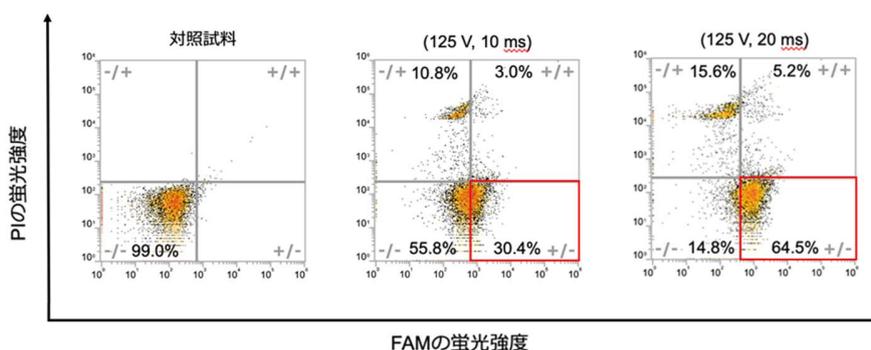


図 2. ヒト生細胞内への核酸導入条件の最適化. エレクトロポレーションの印加パルスの長さが 10 ms (中) と 20 ms (右) の場合のフローサイトメトリー解析の結果. FAM 標識核酸に由来する蛍光強度が高く、死細胞のマーカである PI の蛍光強度が低い右下の象限 (赤枠) が、目的核酸が導入された生細胞を意味する。

# 共振器型超放射自由電子レーザーによる 革新的テラヘルツパルス光源の構築

坂上和之<sup>1</sup>, 小林建輝<sup>1</sup>, 柏木茂<sup>2</sup>, 川瀬啓吾<sup>3</sup>, 全炳俊<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻

<sup>2</sup> 東北大学先端量子ビーム科学研究センター

<sup>3</sup> 量子科学技術研究開発機構関西光量子科学研究所

<sup>4</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

KU-FEL 内に設置されている THz コヒーレントアンジュレータ放射発生装置 (THz-CUR) において、これまでに得られているコヒーレントアンジュレータ放射 (Coherent Undulator Radiation: CUR) は比較的大きな強度ではあるが、レーザーなどを用いた他の手法による光源の進展も著しく、より顕著な特徴を示すことの重要性が高まっている。THz 帯の特に高強度な光パルスの応用のトレンドは非線形光学研究や半導体等の物性制御研究、磁性体・超伝導体・強誘電体の物性研究など環境・エネルギーに関連する材料開発研究であり、ユニークな光源の構築によって、これらの研究分野に対して求心力を持つ拠点となることが可能である。

加速器を用いた光生成においてさらに大強度な光を得る手法としては、共振器型の自由電子レーザー (Free Electron Laser: FEL) があり、THz-CUR 装置においては、THz 帯にてすでに電子バンチを十分に圧縮した状態から FEL 発振が可能な体制 (超放射 FEL) が整っている。そこで光共振器の導入によって THz パルスの強度を指数関数的に増幅すること、またスペクトル幅が広いシングルサイクルのパルス、つまり高ピーク強度のパルス生成が可能であるため、超放射 FEL 発振を目標として本研究を開始した。この様にして発生させた非常に強力な THz 波はその強力な電場で駆動される新奇なレーザー加工や電子線の高効率高勾配加速、アト秒 X 線パルスの発生、強電場科学研究など、従来の枠を超えた幅広い応用分野への展開が期待される。

## 2. 超放射自由電子レーザー

一般の自由電子レーザーと比較して、すでに発振光波長以下に圧縮された電子ビームを用いる超放射 FEL では、電子ビームのエネルギー変調・密度変調といった過程をスキップし、速やかにレーザー発振に至ることができると考えられている。これは電子ビームからの放射がすでにコヒーレント放射となっていることに起因する。また、その相互作用効率が高いことから、光強度を前方に集中させ、短パルス (広帯域) なレーザー発振に至ることが予見されている。これまでの研究において、THz-CUR 装置における電子ビームが超放射 FEL に適していること、設置した共振器の課題抽出が済んでいる状態であり、本研究課題では、現在の共振器内における蓄積やビームとの相互作用について絶対値評価などを用いて詳細に解析し、シミュレーションと比較することによって、超放射 FEL 発振に必要な要件について調査した。

## 3. 自由電子レーザー用共振器システムとビーム試験結果

KU-FEL 内 THz-CUR 装置に設置した光共振器の模式図を以下の図 1 に示す。共振器は L 字型の構成として、その共振器長は電子ビームパルス繰り返しである 89.25 MHz と光の往復周波数が一致する様に 1679.5mm となる様に設計・調整されている。電子ビームは上流ミラーに設置された穴を通過して共振器内に導入される。

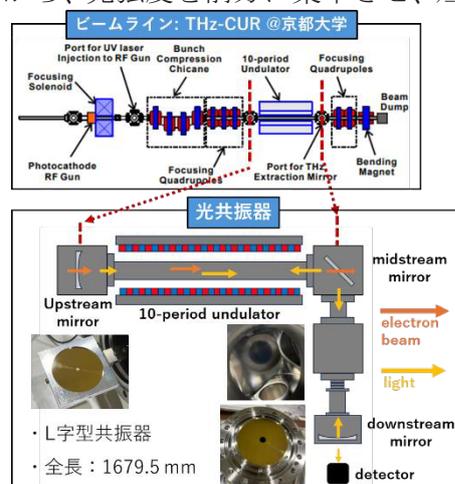


図 1 : 設置した FEL 共振器の概要図

中流ミラーは平面ミラーで、上流・下流ミラーが凹面ミラー（曲率半径それぞれ 0.9m と 1.4m）となっており、共振器内におけるロスを極力減らすよう設計されている。下流ミラーも同様に穴あきミラーとなっており、電子ビームから生成された光を共振器外および真空チャンバー外に取り出して、観測・評価できるようになっている。

まず共振器内でテラヘルツパルスが蓄積されている様子について、図 2 (A) に示した。実験結果と合わせて数値計算の結果を示している。明らかに数値計算よりも実験結果の方が中心の共鳴点において強い光強度を蓄積できていることが分かる。概ね 20%程度、テラヘルツ光とアンジュレーター内で共鳴的に相互作用することによって誘導放射を得ていることが分かる。これは FEL 発振に向けた第 1 歩を観測したことに相当する。次に、シミュレーションとの比較を精密に行うことを目的として、校正された焦電検出器と高時間分解能なショットキーバリアダイオード (SBD) を合わせた計測を実施した。図 2 (B) のように時間分解で蓄積されているパルスの強度を観測しつつ、校正された検出器によってマクロパルスのパルスエネルギーを測定した。これによって共振器内に蓄積されているパルスごとのパルスエネルギーを明らかにすることができる。測定の結果、最大の蓄積強度の点において 314nJ/pulse のパルスエネルギーを生成していることが確認された。

この結果を 1 次元シミュレーションと比較・検証した。まずは現在までの実験結果は再現できることを確認し、さらに発振に至るために必要な要件を明らかにすることができた。発振に至る要件の一例としては、電荷量を 45pC/bunch に増やし、共振器の周回ロスを 20%以下として、アンジュレーター内の光モード径を 5mm 程度とすることが示された。

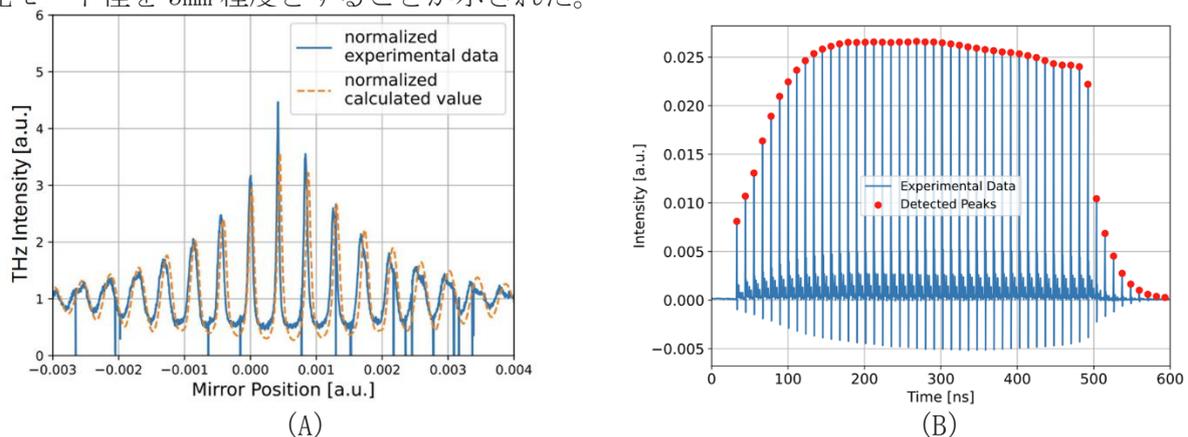


図 2 : THz 光の観測結果 (A) 光共振器内における共鳴の観測 (B) 時間分解したパルスごとの強度計測

#### 4. まとめと今後の展望

超放射 FEL 発振に向けて現在の共振器性能を絶対値計測も含めて詳細に解析した。その結果をシミュレーションと比較し、1 次元シミュレーションが現在の状況を再現できることを確認した。またそのシミュレーションの外挿を用いることによって、超放射 FEL 発振に至る設計パラメータを得ることができた。今後は世界で初めての超放射 FEL 発振に向けて、シミュレーションで得られたパラメータを実現するシステム構成を検討していく。

#### 5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[発表リスト]

坂上和之、小林建輝、柏木茂、全炳俊 “自由電子レーザー逆過程加速に向けたテラヘルツ自由電子レーザーの開発”、原子力学会 2025 年秋の大会、2025 年 9 月 10 日、北九州

小林建輝、坂上和之、柏木茂、全炳俊 “テラヘルツ帯のプリバンチド FEL に関する研究”、第 22 回加速器学会年会、2025 年 8 月 6 日、東京

Tatsuki Kobayashi, Kazuyuki Sakae, Shigeru Kashiwagi, Heishun Zen “Study on Pre-bunched Free Electron Laser in the Terahertz Wavelength Range”、IPAC2025、2025 年 6 月 2 日、台湾

# 核酸の異常構造の解析

今村比呂志<sup>1</sup>, 永田崇<sup>2</sup>, 片平正人<sup>2</sup>, 山置佑大<sup>2</sup>

<sup>1</sup>長浜バイオ大学・バイオサイエンス学部

<sup>2</sup>京都大学・エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

化学プロセスは石炭・石油などの化石資源への依存度が高く、高温・高圧条件や有機溶媒を使用するため、大量の CO<sub>2</sub>、エネルギーコスト、有害な廃棄物の発生を伴う。一方、微生物や細胞を利用したバイオプロセスは、再生可能資源を原料とし、常温・常圧条件かつ水系溶媒で反応を進行させることが可能であるため、CO<sub>2</sub>排出、エネルギーコスト、廃棄物の抑制が実現でき、ゼロエミッション社会の実現に向けた基盤として期待されている。

バイオプロセスにおいて、核酸は生産物や反応酵素の設計情報を担う中核的分子である。しかし、突然変異、挿入、リピート伸長、損傷などの異常が生じると、遺伝情報の不安定化を引き起こし、生産性の低下のみならず、副反応や不純物生成の要因となる危険性がある。

生体内にはこのような核酸の異常を修復する機構が備わっており、その認識と修復反応を触媒する代表的酵素の例として poly(ADP-ribose) polymerase-1 (PARP1) が挙げられる。この酵素が核酸の異常構造をどのように認識し、修復に至るかということは強い関心を持たれている。酵素断片体と核酸の複合体構造（異常構造の認識後）の解析の成功例(図 1)はあるものの、異常構造の認識前の酵素（特に全長の PARP1 の構造）も核酸の異常構造自体も十分に分かっていないのが現状である。

通常、“正常な”核酸はよく知られた右巻き二重らせん構造を形成している。核酸の鎖に切れ目や欠損ができた場合、それらの“異常な”化学構造の核酸はどのような立体構造を形成するであろうか？本研究はその典型例として、損傷 DNA の一種であるニック (nick) DNA に着目した。ニック DNA とは、二本鎖 DNA の一方の鎖に切れ目を有する構造を指す(図 1)。

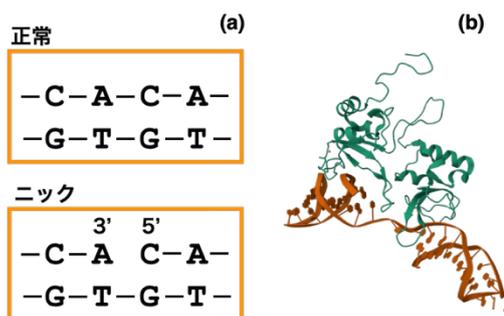


図 1. DNA の異常構造とその認識 (a) ニック DNA の例 (b) 異常構造の認識後の酵素核酸複合体 (PDB: 2N8A)

ニック DNA は損傷部分を起点として、構造がゆらぐことが予想される。このような動的な構造を捉えるために、本研究では溶液構造に適した手法を採用した。一つは小角 X 線溶液散乱 (Small-angle X-ray Scattering; SAXS) 法であり、分子全体の概形や構造ゆらぎを見るのに適している。また、核磁気共鳴法 (Nuclear Magnetic Resonance; NMR) は溶液中で塩基対などの局所構造を調べるのに適している。本研究ではさらに分子動力学シミュレーションを組み合わせ、ニック DNA の構造解析を試みた。

## 2. 結果と考察

塩基配列 5'-d(CACGTGTGTGCGTGCA)-3' [1]の合成 DNA (FASMAC Co., Ltd.) を pH 6.5 の緩衝溶液 (50 mM リン酸 K 緩衝塩, 100 mM KCl) に対して透析し、5 mg/mL の DNA 溶液を得た。測定前に 95 °C で 5 分間インキュベーションし、アニーリングした。

【SAXS 実験】高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、Photon Factory (PF)のビームライン BL-10C で SAXS 測定を実施した。0.7 mg/mL、25 °Cでの SAXS プロファイル(log-log プロット)はギニエ領域でフラットであったが、16 °Cへ冷却した場合あるいは 3 mg/mL へ濃縮した場合に小角領域に向けて散乱の立ち上がりが見られた。この変化は可逆的であり、可逆会合が温度、濃度依存的に誘導されることがわかった。ゲルろ過クロマトグラフィー(SEC)を組み合わせた SEC-SAXS 法で観測すると、5 mg/mL、12 °C の SEC では会合画分と単量体画分に分離されたが、各画分の SAXS プロファイルはいずれも単量体を示していた。これは SEC の希釈効果により、会合画分の分子が単量体になったことを意味している。

【NMR 実験】800 MHz AVANCE III HD (Bruker) (極低温高感度プローブ装着)を用いて、12 °Cで <sup>1</sup>H-NMR スペクトルを得た。イミノプロトン、塩基のプロトン、メチルプロトンの各化学シフトおよびスペクトルパターンを先行研究[1]と比較した結果、本 DNA が 2 つのステムループ構造を持つダンベル型構造を形成していることが示された(図 2)。ダンベル構造はステム中心部に 5'端と 3'端が位置するため、ニック DNA のモデルとなる。興味深い点として、0.1–4 mg/mL の間で濃度増加に伴う新しいピークの出現とその強度の増加が確認された。前述の SAXS 実験の結果を踏まえると、可逆会合による NMR スペクトル変化と考えられる。

【分子動力学シミュレーション】5'-d(CGCACACA)-3'と 5'-d(TGTGTGCG)-3'の二本鎖からなる B 型ヘリックス構造を w3DNA 2.0[2]で構築した後、下線部の塩基 (C→T, A→G) を DSSR[3]を用いて置換し、Chimera[4]に組み込まれた minimize structure モジュールで一本鎖のニック DNA へ構造最適化した。このモデルを初期構造として、CHARMM-GUI[5]の solution builder を用いて溶解し、CHARMM36m 力場を適用した。0.1 M KCl 存在下、25 °C、pH 6.5 の条件で、GROMACS 2024.4[6]を用いた分子動力学シミュレーションにより 100 ns の平衡化を行った。DNA の損傷部分の 5'側の C1-G8 塩基対の間の距離はほとんど変化しないのに対し、3'側の T9-A16 塩基対の間の距離は大きく変動することがわかった。T9-A16 ペアの部分のゆらぎが可逆会合のしやすさにつながっていることが示唆される。

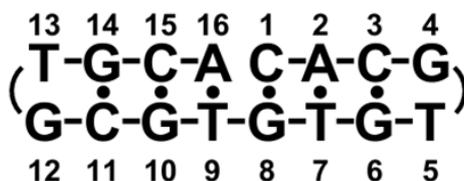


図 2. 対象 DNA の配列および形成しているダンベル型構造の模式図

## 3. 参考文献

- [1] Rinkel L. J., Tinoco I., Nucleic Acid. Res. **19**, 3695-3700 (1991)
- [2] Li S., Olson W. K., Lu X.-J., Nucleic Acid. Res. **47**, W26-W34 (2019)
- [3] Lu X.-J., Bussemaker H. J., Olson W. K., Nucleic Acid. Res. **43**, e142 (2015)
- [4] Pettersen E. F., Goddard T.D., Huang C.C., Couch G.S., Greenblatt D.M., Meng E.C., Ferrin T.E., J. Comput. Chem. **25**, 1605-1612 (2004)
- [5] Jo S., Kim T., Iyer V.G., Im W., J Comput Chem **29**, 1859–1865 (2008)
- [6] Abraham M.J., Murtola T., Schulz R., Páll S., Smith J.C., Hess B., Lindahl E., SoftwareX, **1-2**, 19-25 (2015)

# リグニンの重合機構と化学構造の解明

泉田香音<sup>1</sup>, 片平正人<sup>2</sup>, 岸本崇生<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学生存圏研究所

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

木材などのリグノセルロース系バイオマスの主要成分の一つであるリグニンは、ペルオキシダーゼやラッカーゼなどの酸化酵素の存在下、コニフェリルアルコール (G 核モノマー) やシナピルアルコール (S 核モノマー) などのモノリグノール (図 1) が脱水素重合した非常に複雑な構造をした天然高分子化合物である。リグニン中の構成単位 (モノマー) の割合や単位間結合の割合はこれまでに十分に解明されているが、それらがどのような順序で結合しているかといった配列の問題は未解明のまま残されている。我々は、これまで、独自のフローマイクロリアクター法 (FMR 法) や、 $H_2O_2$  量を制限した滴下法などを用いて、モノリグノールの酵素的脱水素重合を行い、リグニン形成機構の検討を行ってきた<sup>1)</sup>。重合の初期構造を明らかにし、天然のリグニンの化学構造と比較することにより、リグニンの重合メカニズムを解明し、重合の規則性に基づくリグニンの化学構造の法則性を明らかにすることを目的としている。

トウモロコシやタケなどのイネ科植物のリグニンには、*p*-hydroxyphenyl (H) 核が含まれており、その前駆体である *p*-coumaryl alcohol (図 1) の脱水素重合に関する研究がこれまでに報告されているが<sup>2,3,4)</sup>、他のモノリグノールと比較して、十分に検討されているとはいえない。本年度は、*p*-coumaryl alcohol の酵素脱水素重合を再検討した。得られた重合体からオリゴリグノールを単離し、NMR により構造を決定した。さらに  $\beta$ -O-4 構造の立体異性体比を評価した。

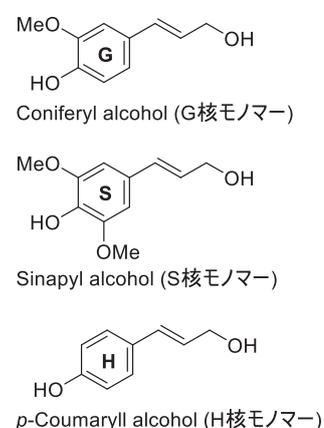


図 1. リグニンの主要モノマー (モノリグノール)

## 2. 実験

*p*-coumaryl alcohol を基質として、HRP (Horseradish peroxidase) および  $H_2O_2$  を用いた脱水素重合を実施した。反応溶媒には、水/アセトン (90/10, v/v) の混合溶媒を用いた。反応生成物は酢酸エチルで抽出し、得られた反応生成物全体を HSQC NMR により分析した。さらに、分取 TLC によりオリゴマーを単離し、構造解析を行った。

## 3. 結果と考察

脱水素重合体から、 $\beta$ -O-4、 $\beta$ -5、 $\beta$ - $\beta$  型二量体、monoepoxy lignan を単離した (図 2、3)。それぞれの割合は、モノマー供給方法によって若干差があったが、滴下法 ( $H_2O_2$  0.5 eq.) では  $\beta$ -O-4 28%、 $\beta$ -5 42%、 $\beta$ - $\beta$  25%、monoepoxy lignan 5%であった。また、 $\beta$ -O-4 型二量体は、立体異性体である *erythro* 型、*threo* 型の混合物であった。反応物全体の HSQC NMR における Ha/Ca、および H $\beta$ /C $\beta$  のシグナル強度から両者の存在比を算出した結果、*erythro* 型 28%、*threo* 型 72%であった。同様の脱水素重合反応を coniferyl alcohol (G 核) および sinapyl alcohol (S 核) で行った場合、*erythro*/*threo* 比はそれぞれ 49/51、90/10 であり<sup>1)</sup>、芳香核のメトキシ基の増加に伴い *erythro* 型の割合が増加することが示された。この結果は、中性緩衝液を用いた *p*-coumaryl alcohol の脱水素重合体の  $\beta$ -O-4 構造において *threo* 型が優勢であるという報告<sup>3)</sup> および、キノンメチド中間体への水付加実験の結果と矛盾しない。また、広葉樹リグニンで観察された、メトキシ基の増加に伴い *erythro* 型の割合が増加する報告<sup>4)</sup> も支持する結果と

なった。さらに、空間的に近接したプロトン間相関を観測できる NOESY 測定により monoepoxy lignan の  $\beta$  位と  $\beta'$  位の立体構造を再検証した。芳香環の隣接するオルト位プロトンを基準に相関強度を比較した結果、cis 関係で強く、trans 関係で弱い相関を示すことから、monoepoxy lignan の  $\beta$ - $\beta'$  結合部分は trans 体であることを確認した。

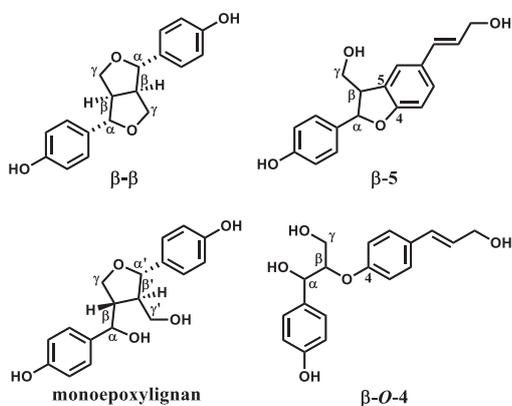


図2 単離したジリグノール

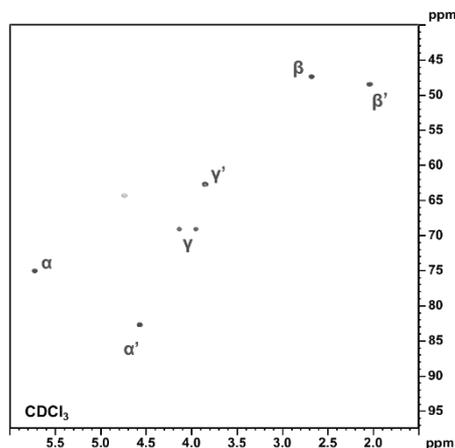


図3 Monoepoxy lignan の HSQC NMR スペクトル

#### 4. 参考文献

- 1) Yamaguchi, A., Kishimoto, T. Urabe, D. Initial stage of syringyl lignin formation from sinapyl alcohol, *J. Agric. Food Chem.* 71, 14666–14677, 2023.
- 2) Nakatsubo, F., T. Higuchi. Enzymic dehydrogenation of *p*-coumaryl alcohol I. Structure of dimeric compounds, *Holzforchung*, 29, 64-68, 1975.
- 3) Nakatsubo, F., T. Higuchi. Enzymic dehydrogenation of *p*-coumaryl alcohol. III. Analysis of dilignols by gas chromatography and NMR spectrometry. *Wood Research*, 58, 12-19, 1975.
- 4) Akiyama, T., H. Goto, D. S. Nawawi, W. Syafii, Y. Matsumoto, G. Meshitsuka, Erythro/threo ratio of  $\beta$ -O-4 structures as an important structural characteristic of lignin. Part 4: Variation in the *erythro/threo* ratio in softwood and hardwood lignins and its relation to syringyl/guaiacyl ratio *Holzforchung*, 59, 276-281, 2005.

#### 5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

[論文発表リスト]

なし

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

- 1) Ayu Yamaguchi, Daisuke Urabe, Takao Kishimoto, Guaiacy-Syringyl Lignin Formation Mechanism Revealed by Copolymerization of Coniferyl and Sinapyl Alcohols, International Symposium on Wood, Fiber and Pulping Chemistry, ISWFPC 2025, Ralgh, USA, June 2025.
- 2) Takao Kishimoto, Elucidation of the polymerization mechanisms and chemical structure of lignin, RISH/BOKU Joint Seminar, Uji, Sep 17, 2025.
- 3) 泉田香音、岸本崇生：「*p*-クマリルアルコールの脱水素重合により生成するオリゴリグノールとその立体異性」、第70回リグニン討論会、津、2025年11月7日
- 4) 清水終伍、占部大介、岸本崇生：「コニフェリルアルコールの脱水素重合により得られる水溶性画分の解析」、第76回日本木材学会大会、広島、2026年3月17日
- 5) 泉田香音、近藤敬子、永田崇、片平正人、占部大介、岸本崇生：「*p*-クマリルアルコールの酵素的脱水素重合物の化学構造解析」、第76回日本木材学会大会、広島、2026年3月17日

# 塗布光照射法を用いた全固体リチウムイオン電池セルの作製に関する研究

高橋伊久磨<sup>1</sup>, 出口宇宙<sup>1</sup>, 久保田紫雄<sup>1</sup>, 向井啓祐<sup>2</sup>, 新村潔人<sup>3</sup>, 佐々木一哉<sup>3</sup>, 八木重郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>千葉工業大学大学院 工学研究科

<sup>2</sup>核融合科学研究所

<sup>3</sup>弘前大学 リチウム資源総合研究機構

<sup>4</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 背景と目的

ゼロエミッションエネルギーである太陽光発電を有効活用するためには、高容量、低コストであると同時に、高温環境下においても安全に動作し、電力の平準化に対応可能な高速充放電型蓄電池システムの実現が不可欠である。全固体電池は、可燃性電解液を用いず高い安全性を有することから、次世代蓄電池として注目されている。

本研究では、これまで一般的な正極材料と比較して高い容量を示すリチウム過剰層状酸化物(Li-rich)正極と酸化物固体電解質の組み合わせに着目し、低温プロセスによる界面形成技術の検討を進めてきた。本年度はその基礎的検討として、Li-rich 正極と同様の層状構造を有し、かつ正極材料として広く用いられている  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  (NCM) 正極を対象とした。NCM 正極は反応機構や劣化挙動に関する知見が豊富であり、界面形成条件が電極/電解質界面抵抗や充放電特性に与える影響を評価するためのモデル材料として適している。

本報告では、従来の高温焼成プロセス (HT: Heat treatment) および低温界面形成プロセスとしてエキシマレーザーを用いた塗布光照射法 (ELAMOD: Excimer-laser-assisted metal-organic deposition) により作製した NCM 正極/酸化物固体電解質を組み合わせたセルについて、充放電試験を中心とした電気化学特性評価を行なった結果について報告する。

## 2. 実験

NCM 正極薄膜の前駆体溶液は、これまでの報告と同様に、酢酸リチウム二水和物、酢酸ニッケル(II)四水和物、酢酸コバルト(II)四水和物、酢酸マンガン(II)四水和物を原料とし、ポリビニルピロリドンを追加して、酢酸および 2-プロパノール中で調製した。熱処理およびレーザー照射時のリチウム揮発を考慮し、リチウム量は 10 wt%過剰とした。

LICGC (株式会社オハラ製) を基板とし、前駆体溶液をスピコート法により基板上に塗布・乾燥を繰り返して NCM 薄膜を形成し、HT では 600 °C で熱処理を行なった。一方、ELAMOD では 400 °C に加熱した状態で KrF エキシマレーザー (85 mJ cm<sup>-2</sup>) を照射し NCM 薄膜電極を作製した。

HT および ELAMOD により作製した NCM/LICGC に対して、走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて断面観察を行なった。NCM/LICGC の充放電特性評価は、負極に Li-In 合金を用いた NCM/LICGC/Li-In 全固体セルを作製し評価した。

## 3. 結果・考察

図 1 に、HT と ELAMOD で作製した NCM/LICGC の断面 SEM 像を示す。HT により作製した NCM は、ミルフィーユ状の形態を示し、LICGC との界面には空隙が観測された。一方、ELAMOD により作製した NCM は粒子状の形態を示しており、LICGC との接合が観測された。

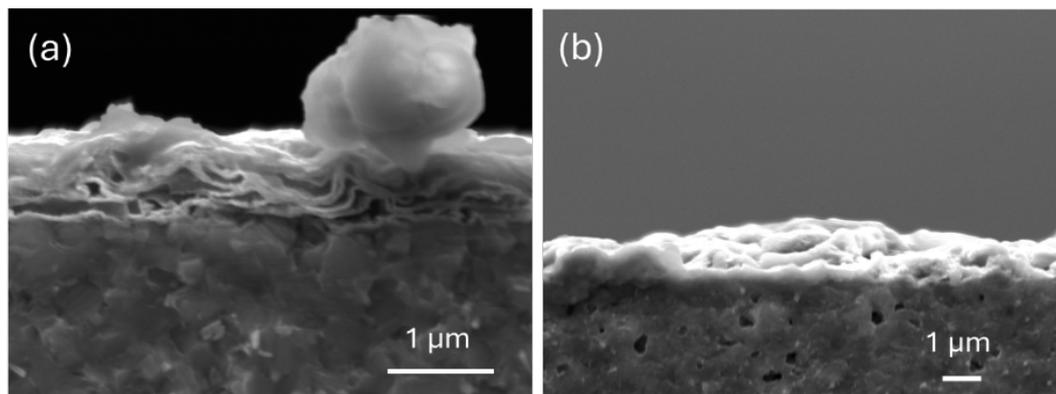


図1 (a) HT、(b) ELAMOD により作製した NCM/LICGC 断面の SEM 像

図2にHTおよびELAMODにより作製した NCM/LICGC/Li-In 全固体セルの充放電特性を示す。HTセルでは充放電反応が進行しなかったことに対し、ELAMODセルでは容量は小さいが充放電可能であった。これは、HTでは NCM/LICGC 界面に空隙が存在し高抵抗となる一方、ELAMODでは NCMとLICGCの接合性が向上したためであると考えられる。この結果から、ELAMODによる界面形成プロセスの優位性は示すことが出来たが、依然としてセル全体の抵抗は高く、今後はELAMOD条件の最適化が必要である。

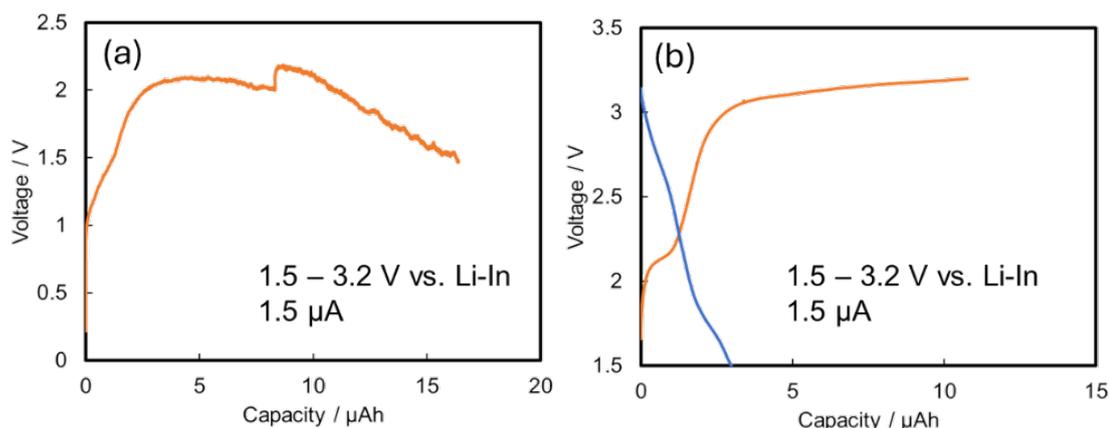


図2 (a) HT、(b) ELAMOD により作製した NCM/LICGC/Li-In 全固体セルの充放電特性

#### 4. まとめ

HTおよびELAMODにより、NCM/LICGC/Li-In全固体セルを作製し、NCM薄膜の形態と充放電特性の比較を行なった。NCM/LICGC/Li-Inの全固体セルにおいては、HTセルにおいては NCM/LICGCに空隙があることから充放電はできなかった。一方、ELAMODセルでは接合性の高い界面接合性が向上し、充放電が可能となった。しかしながら、セル抵抗は依然として高く、今後は高抵抗要因の解析およびELAMOD条件の最適化が課題である。

#### 5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

高橋伊久磨ら「塗布光照射法を用いた全固体Liイオン電池の電極/電解質海面の界面設計に関する研究」共同利用・共同研究成果報告書 p.42~43 (2025/3)

# 熔融塩を用いた水素同位体分離技術の研究

名合 虎之介<sup>1</sup>, 松島 永佳<sup>1</sup>, 法川 勇太郎<sup>2</sup>, 野平 俊之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院工学研究院

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 緒言

ゼロエミッションエネルギーを実現させる重要な技術の一つとして核融合炉が挙げられる。そこでは、水素同位体 (D および T) が燃料として使われるが、現在の製造技術では、エネルギー消費が大きという問題点がある。その解決に向け、本研究代表者は、水電解と燃料電池を組み合わせた省エネ型水素同位体分離法を提案し研究している。そこでは、水電解で発生する水素・酸素ガスを燃料電池発電に使い、電気エネルギーの回収を行う。さらに、燃料電池によって生成した重水素やトリチウムを含む水を再び水電解槽に還流させる。今までの研究では、水溶液を用いた電解で同位体分離は実証できたが、分離係数が小さく、消費電力量が想定値の約 20%しか削減されなかった。

一方、熔融塩中では、水溶液系とは全く異なるハイドライドイオン(H<sup>-</sup>)やデューテライドイオン(D<sup>-</sup>)の酸化反応により水素発生が進行する。そのため、水素電極反応メカニズムの違いにより、水溶液よりも大きな同位体分離係数が期待できる。また、高温のため反応速度の増大が可能であり、実用的な分離速度を達成するために必要な過電圧も大きく低減できる。結果として、システム全体のエネルギー消費を大幅に削減できる可能性を秘めている。そこで本研究では、分離係数がより高い手法を開拓するため、熔融塩電解を用いた方法を検討した。

## 2. 実験方法

本研究では LiCl-KCl 熔融塩系で実験を行った。LiCl と KCl をそれぞれ 453 K で 72 時間以上、723 K で 24 時間真空乾燥させたのち、LiCl:KCl = 58.5:41.5 mol%になるように混合し、673 K で熔融させた。対極に Al 線、参照極には電気化学的に形成させた( $\alpha + \beta$ )二相共存状態の Al-Li 合金を使用し、電位は Li<sup>+</sup>/Li 電極の電位で校正した。作用極にはパラジウム( $\phi = 6$  mm)を使用した。パラジウムはステンレスパイプの先端に蓋をするように隙間なく密着させ、熔融塩に浸漬した。パラジウムにはパイプを通して Ar ガスと H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> ガスを一定の流量で交互に供給した。1.1 V vs. Li<sup>+</sup>/Li で電解を行い、電流値の応答からパラジウム中の H, D の拡散係数を調査した。

## 3. 結果および考察

LiCl-KCl 熔融塩中にてパラジウム電極で電解(1.1 V vs. Li<sup>+</sup>/Li)を行った。Fig.1A には、供給ガスを Ar から H<sub>2</sub> に切り替えた際の電流値変化を示す。1.6 mA cm<sup>-2</sup>の限界電流に達するまでに 2 種類の電流値の傾きが観測された。下記の式から推測される電流値の挙動を各傾きにフィッティングすることで、拡散係数を推定した。

$$i_H = i_{st} \left( 1 - \exp\left(-\frac{6D_H t}{L^2}\right) \right)$$

$i_H$ ,  $i_{st}$  はそれぞれ水素還元電流値と限界電流を示す。 $D_H$  はパラジウム中の H の拡散係数、 $t$  は経過時間、式中の  $L$  はパラジウム電極の厚さを示す。 $D_H$  は電流立ち上がり直後の傾きと限界電流に達するまでの傾きからそれぞれ  $6.75(\pm 3.25) \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $6.25(\pm 2.25) \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  となった。

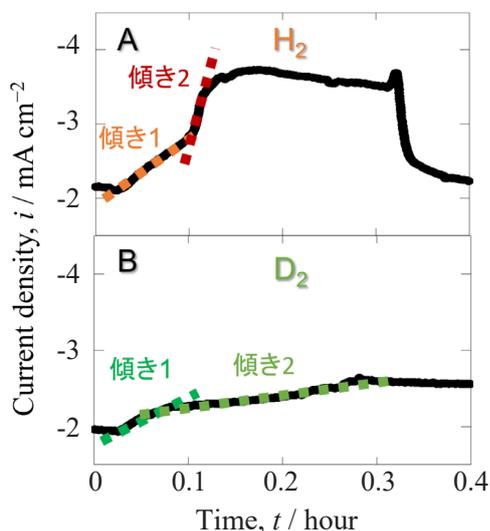


Fig. 1 Current density in constant potential electrolysis with supplying (A)  $\text{H}_2$  and (B)  $\text{D}_2$ .

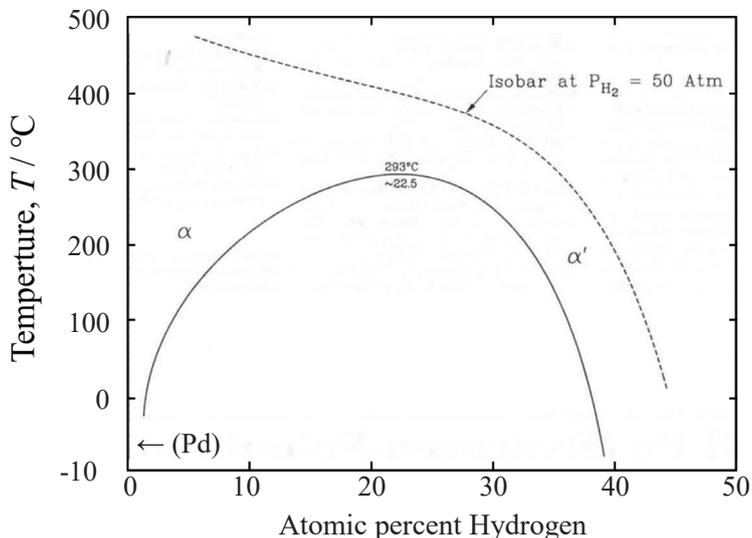


Fig. 2 Pd-H binary phase diagram.

Fig.1B には供給ガスを Ar から  $\text{D}_2$  に切り替えた際の電流変化を示す。ここでも  $0.7 \text{ mA cm}^2$  の限界電流に達するまでに 2 種類の電流値の傾きが観測された。 $D_H$  と同様に、パラジウム中の D の拡散係数  $D_D$  は電流立ち上がり直後の傾きと限界電流に達するまでの傾きからそれぞれ  $4.50(\pm 1.50) \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $2.50(\pm 1.50) \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  となった。これは  $D_H$  のおよそ半分の値であり、パラジウム中の H の速い拡散が確認された。本実験の結果は、パラジウム透過を用いた水素同位体の分離係数が約 2 という昨年度の報告を裏付けるものである。

$D_H$ 、 $D_D$  はともに 2 つの値が確認された。Fig. 2 に Pd-H 系の状態図を示す。Pd-H 系の状態図は水素分圧により変化する。673 K の時、1 atm の水素分圧ではどの H 濃度でも相変化が見られない一方で、50 atm になると約 20 at %H を境に相変化する。故に電位操作によって疑似的に水素分圧が上昇し、パラジウムの相変化が起こったため、2 種類の  $D_H$ 、 $D_D$  が観測されたと推測される。

来年度は、水溶液系から 773 K まで温度を変化させることでパラジウムの相変化を制御し、 $D_H$ 、 $D_D$  の変化がパラジウムの相変化に由来するか確認する。また、サイクリックボルタンメトリーを行い、LiCl-KCl 熔融塩中におけるパラジウムの詳細な電気化学的情報も調査する。

#### 4. 「口頭発表リスト」

1. Toranosuke Nago, Hisayoshi Matsushima, Yutaro Norikawa, Toshiyuki Nohira, “Study of Hydrogen Isotope Separation Technology by Molten Salt”, 2025 年度 ZE 拠点年会 – (Poster Presentation), 11/12/2025, Uji, Japan.

# 好冷菌型セルラーゼによる 結晶性セルロース分解システムの研究

堀内正隆<sup>1</sup>, 片平正人<sup>2</sup>, 永田崇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道医療大学薬学部

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究の背景と目的

植物バイオマスを原料としたエネルギー・化成品生産において、結晶性セルロースを効率的に分解し、グルコースを低コストで得る技術の確立は重要な課題である。特に、低温条件下で稼働可能な糖化プロセスの構築は、エネルギー投入量削減の観点から重要である。本研究は、好冷性微生物由来酵素を基盤とし、植物体中の結晶性セルロースを低温条件下で効率的に分解するシステムの構築を目的とする。植物細胞壁は複数の多糖成分から構成されるため、本研究では多糖連続分解モデルを構築し(図1)、その構成要素の整理を通じて低温分解系の高度化を図る。本年度は、 $\beta$ -1,3-グルカン分解に関与する酵素候補の探索および機能解析基盤の整備を行った。

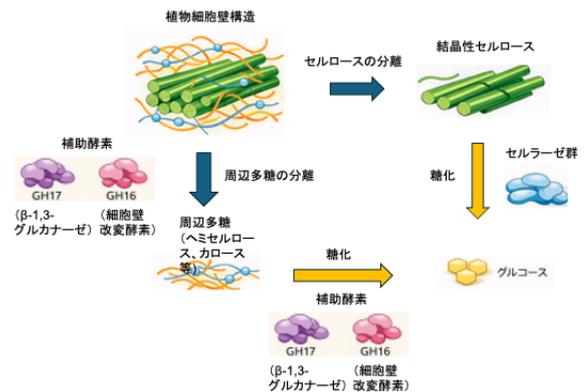


図1 好冷菌型セルラーゼおよび補助酵素を利用した植物細胞壁構造からのグルコース生産

補助酵素により分離された結晶性セルロースはセルラーゼ群により、また、周辺多糖はさまざまな補助酵素により、無駄なく糖化される。

## 2. 研究内容および結果

### (1) $\beta$ -1,3-グルカン分解酵素候補の *in silico* 探索

図1に示した分解モデルに基づき、好冷菌 *Sclerotinia borealis* ゲノムにコードされた結晶性セルロース分解過程に影響を及ぼす周辺多糖分解補助酵素の探索を行った。CAZy データベースを用いた配列検索により、GH17 候補として ESZ96290.1、GH16 候補として ESZ98398.1 を同定した。

### (2) 一次構造比較解析

GH17 候補 ESZ96290.1 について既知 GH17 酵素との一次構造比較を行った結果、GH17 に特徴的な保存領域が確認された(図2)。一方、GH16 候補 ESZ98398.1 については、 $\beta$ -1,3-グルカナーゼおよび XET との比較により、GH16 に保存される領域を有し、XET 群との近縁性が示唆された。

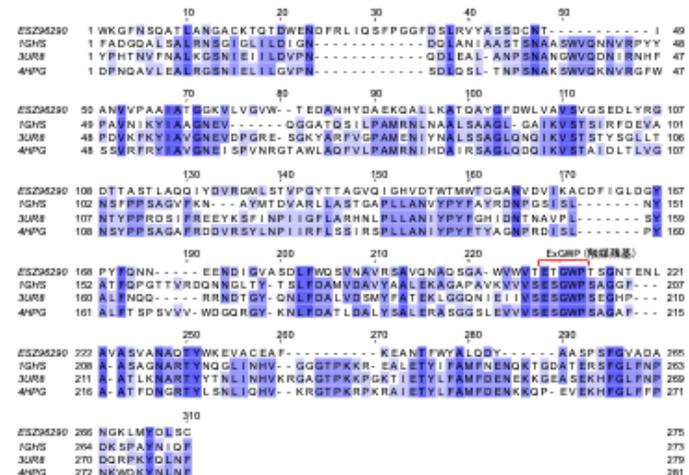


図2 *S. borealis* ゲノムにコードされた GH17 型酵素 ESZ96290.1 と類縁酵素の一次構造比較

ESZ96290.1 には、ExGWP 配列が存在し、endo- $\beta$ -1,3-glucanase 活性を有する可能性が示唆された。

### (3) 転写発現解析

*S. borealis* 菌体由来 total RNA を鋳型として RT-PCR 解析を行った結果、ESZ96290.1 および ESZ98398.1 の両遺伝子について転写発現が確認された (図 3)。

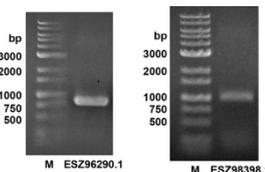


図 3 *S. borealis* の total RNA を鋳型とした ESZ96290.1 および ESZ98398.1 の RT-PCR

### (4) 組換え発現系の構築

各候補遺伝子の cDNA を pET-GRP-3C-His 発現ベクターにクローニングし、大腸菌 SHuffle T7 express lysY 株を用いて組換え発現を行った。Ni アフィニティークロマトグラフィーにより精製を行い、目的分子量付近のタンパク質バンドを確認した (図 4)。

## 3. 考察

本研究により、*S. borealis* に由来する 2 種の  $\beta$ -グルカン関連酵素候補について、探索、配列解析、発現確認および組換え生産系の構築に成功した。ESZ96290.1 は  $\beta$ -1,3-グルカンを直接分解する酵素として、グルコース生成に寄与する可能性が高い。一方、ESZ98398.1 は細胞壁多糖の構造改変を通じて、結晶性セルロースへの酵素アクセス性を制御する補助的機能を担う可能性が示唆された。これらの酵素は、結晶性セルロース分解系において異なる役割を分担することで、低温条件下での総合的な糖化効率向上に寄与すると考えられる。

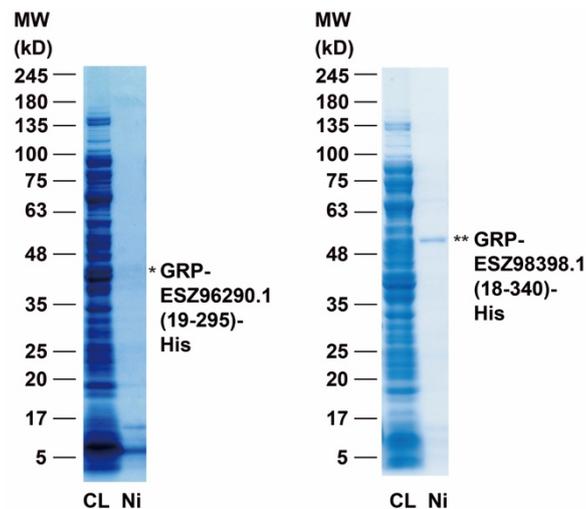


図 4 大腸菌を用いた *S. borealis* ESZ96290.1 および ESZ98398.1 組換えタンパク質生産

CL: 組換え菌体の超音波破碎液  
Ni: Ni キレートカラム精製物

## 4. 今後の方針

今後は、本年度に構築した発現・精製系を基盤として、各酵素の基質特異性および低温条件下での反応特性を解析する。さらに、好冷菌由来セルラーゼ群との組合せによる協働的分解系の構築を進め、植物細胞壁からの結晶性セルロース低温分解システムの高度化を図る。また、*Brevibacillus* 発現系で生産した *S. borealis* 由来 LPMO 触媒ドメインの活性が弱かったことから、全長 LPMO を生産して、触媒ドメインのみの場合との活性比較を進める。なお、全長 LPMO-GRP はすでにヒト浮遊細胞 Expi293GnTI-による分泌発現およびカードランビーズによる精製系を構築済みである。

## 5. 口頭発表リスト

- 堀内正隆, 国永史朗, 片平正人, 永田崇 “好冷菌型セルラーゼによる結晶性セルロース分解システムの研究” 2025 年度 ZE 拠点年, 2025 年 12 月 (ポスター)
- 堀内正隆, 堀内留美, 坂本泰一, 永田崇, 落合正則 “動物細胞における GRP-tag 融合タンパク質の分泌生産と多様なカードラン担体への固定化技術の開発” 第 48 回日本分子生物学会年会, 2025 年 12 月 (ポスター)

# Enhancing mechanical properties of PCL-based sutures using selective-wavelength mid-infrared free-electron laser irradiation

Sakhorn Rimjaem<sup>1</sup>, Nuttawat Khammata<sup>1</sup>, Nuttawut Khammata<sup>2</sup>, Jutamas Kongsuk<sup>2</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>3</sup>,  
Winita Punyodom<sup>2</sup>, Heishun Zen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University

<sup>2</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University

<sup>3</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

## 1. Outline of Research Project

This research project focuses on studying the mechanical enhancement of polycaprolactone (PCL)-based bioresorbable sutures through selective-wavelength mid-infrared free-electron laser (MIR-FEL) irradiation. PCL is widely used in biomedical applications due to its biodegradability, biocompatibility, and chemical stability, but its relatively low tensile strength and limited toughness restrict broader clinical use, particularly in load-bearing wound closure. The project investigates whether MIR-FEL irradiation, tuned to specific vibrational absorption bands of PCL molecules, can induce controlled molecular reorganization, particularly changes in crystallinity, without altering chemical composition or compromising biodegradability. We aim to demonstrate the use of MIR-FEL as a powerful tool for precision modification of polymeric biomaterials. The work is conducted through collaboration between Chiang Mai University (CMU) and Kyoto University (KU-FEL) under the Zero-Emission Energy Research framework.

## 2. Introduction

Bioresorbable sutures play a critical role in modern surgery by eliminating the need for removal procedures and reducing patient trauma. Among biodegradable polymers, PCL is attractive due to its resistance to moisture and chemicals, ease of processing, and suitability for long-term implantation. In addition, PCL is derived from renewable resources, supporting low-emission and sustainable material development. Despite these advantages, PCL sutures often suffer from insufficient mechanical strength, slow degradation rates, and limited toughness. Conventional post-treatment methods to improve mechanical properties may negatively affect chemical structure or biodegradability. Therefore, a non-contact, non-chemical modification technique is desirable.

Mid-infrared free-electron lasers provide high-power, tunable IR radiation capable of selectively exciting molecular vibrational modes such as C–H, C=O, and C–O–C bonds. Previous studies on PLA and related polymers have shown that MIR-FEL irradiation can increase crystallinity without inducing chemical bond scission. Building on these findings, this project applies MIR-FEL irradiation to PCL-based sutures to explore structure–property relationships relevant to biomedical applications.

## 3. Methodology

PCL-based polymer sutures were synthesized at Chiang Mai University and prepared in filament form with controlled dimensions suitable for irradiation and characterization. Prior to irradiation treatment, the samples were systematically characterized to establish baseline physical and chemical properties. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was employed to identify characteristic absorption bands associated with CH, C=O, and C–O–C functional groups. Inherent viscosity measurements were performed to estimate molecular weight stability, while differential scanning calorimetry (DSC) was used to determine thermal properties, including melting temperature and initial crystallinity.

MIR-FEL irradiation experiments were conducted at the Kyoto University Free Electron Laser facility (KU-FEL). The FEL wavelength was selectively tuned to 5.0, 5.8, and 9.3  $\mu\text{m}$  in order to target specific vibrational modes within the PCL molecular structure. A focused FEL beam with an approximate size of  $2.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$  was scanned across both the top and bottom surfaces of the sutures to ensure uniform exposure. Irradiation was performed under controlled conditions of pulse repetition rate and energy to avoid thermal degradation while enabling molecular reorganization.

Following irradiation, the PCL sutures were re-characterized to evaluate structural and property changes

induced by MIR-FEL exposure. FTIR spectroscopy was used to verify the preservation of chemical bonds, while viscosity measurements assessed potential molecular weight variations. DSC analysis was conducted to quantify changes in crystallinity and thermal behavior. Additional analyses, including mass spectrometry and nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy, are planned to confirm chemical integrity at the molecular level. Mechanical testing, specifically tensile strength and elongation at break, is scheduled as a subsequent step to correlate structural modifications with macroscopic mechanical performance.

#### 4. Results and discussion

The experimental results indicate that MIR-FEL irradiation does not alter the chemical composition or molecular weight of PCL-based sutures, as confirmed by FTIR spectra (shown in Fig. 1) and viscosity measurements. No evidence of bond breakage or degradation was observed, demonstrating that the irradiation conditions are non-destructive at the molecular level. However, significant changes in crystallinity were detected by DSC analysis. Depending on the irradiation wavelength, crystallinity either increased or was reorganized within the polymer matrix. In particular, irradiation at 5.8  $\mu\text{m}$  and 9.3  $\mu\text{m}$  showed notable enhancement of crystallinity in certain PCL formulations. This structural reorganization is attributed to selective vibrational excitation, which promotes molecular chain alignment and ordering without chemical modification.

Macroscopic observations revealed that irradiated sutures became less transparent, consistent with increased crystalline domains. Based on established polymer physics, higher crystallinity is strongly correlated with improved tensile strength and toughness. Therefore, the observed crystallinity enhancement is expected to translate into improved mechanical performance, which will be verified through tensile testing in the next phase of the project. These findings are consistent with prior MIR-FEL studies on PLA-based polymers and support the hypothesis that MIR-FEL is a powerful tool for precision tuning of polymeric biomaterials.

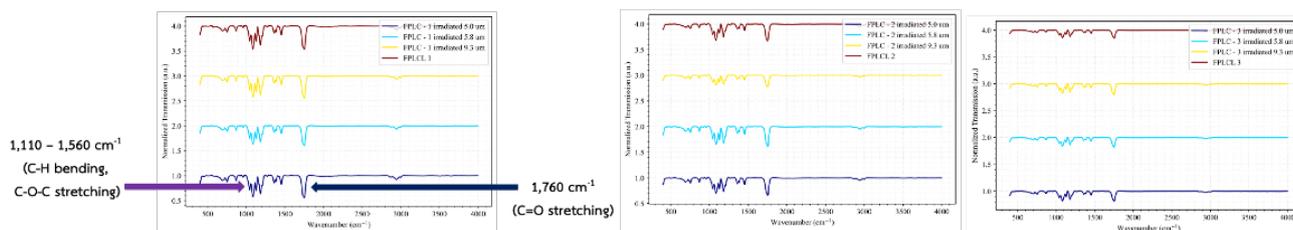


Fig.1. FTIR spectra of PCL-based sutures before and after MIR-FEL irradiation.

#### 5. Conclusion

This study demonstrates that selective-wavelength MIR-FEL irradiation is a non-invasive method for modifying the mechanical properties of PCL-based sutures. While the chemical composition and molecular weight remain unchanged, crystallinity can be significantly altered by appropriate wavelength selection, offering a promising route to enhance mechanical properties without compromising biodegradability or biocompatibility. The results highlight the potential of MIR-FEL technology for advanced biomedical material engineering and contribute to the development of stronger, more reliable bioresorbable sutures. Future work will focus on detailed tensile testing, comprehensive spectroscopic analysis, and correlation of irradiation parameters with mechanical performance, paving the way toward clinical translation.

#### 6. List of Research Achievements

- [1] N. Khammata, N. Khammata, J. Kongsuk, H. Ohgaki, W. Punyodom, H. Zen, S. Rimjaem\*, Mechanical Properties of PCL-Based Sutures Using Selective-Wavelength Mid-Infrared Free Electron Laser Irradiation, Poster presentation at the 2025 Annual Meeting of ZE program, December 12th, 2025, Kyoto, Japan.

# 遺伝子発現調節が可能な大腸菌由来四重鎖の特性解析

田中 陽一郎<sup>1</sup>, 永田 崇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学研究推進機構機器分析評価センター

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 背景

バイオ燃料の利用増加に伴い、その合成の効率化と低価格化は重要な課題である。この課題の達成には、大腸菌、酵母、藻類等様々な微生物に対する遺伝子導入や代謝経路の改変による有用化合物の生産性向上が不可欠だが、その効率化や安全性確保には遺伝子改変と同時に発現調節法の開発が重要である。また、多くの生物種で共通に利用可能な遺伝子発現調節法が開発できれば、多様なバイオ燃料産生法に応用できる。そこで、本研究では、ゼロエミッションエネルギーを達成するためのエネルギー生成の基盤技術として、新たな遺伝子発現調節法の開発を目指している。

本研究では、モデル生物として大腸菌を使用して遺伝子発現調節に使用可能なグアニン四重鎖を同定し、四重鎖による遺伝子発現調節法の基盤を確立することを目標としている。これまでに、大腸菌ゲノム由来の四重鎖を形成する DNA 配列をプロモーター領域に組み込んだ GFP 発現ベクターを作製し、四重鎖形成によって遺伝子発現調節が可能かどうかを検討した結果、大腸菌ゲノム中の OxyR 及び MalK 遺伝子の翻訳開始点近傍にある四重鎖 (以下、G4OxyR、G4MalK という) が遺伝子発現を調節可能であることを明らかにした。しかし、GFP の蛍光強度で換算した発現量の変化は 50%程度で、実用的な遺伝子発現調節法にはより厳密な発現調節が必要である。このため、2025 年度には G4OxyR 及び G4MalK の機能改良を行った。安定性の高い四重鎖は、発現ベクター上で転写を抑制する能力が高いものの、構造変化を起こしにくく転写抑制を解除しにくいと推定される。適切な安定性の四重鎖をデザインし、転写制御しやすいベクターを作製するため、四重鎖の推定立体構造から安定化に重要な残基を予測し、点変異体を作製することで安定性の評価を行った。

## 2. 方法

### ・温度変化非変性ポリアクリルアミドゲル電気泳動(PAGE)

各 DNA 分子をバッファ A(50mM KCl, 10 mM MgCl<sub>2</sub>, 20 mM HEPES (pH7.0))で 0.5 μM に溶解し、95°Cで 5 分間加熱後、2 時間で 15°Cまで徐冷した。16%変性ポリアクリルアミド TBE ゲル及び 14%ポリアクリルアミド TB(Tris-Borate)非変性ゲル(pH 7.4)にアプライし、泳動後四重鎖特異的に染色可能な Thioflavin T で染色してゲルを撮影した。撮影を除く全ての作業は恒温器内で温度をコントロールして行った。その後、SYBR Gold 染色液で再度染色して撮影した。

## 3. 結果及び考察

### ・G4OxyR の立体構造予測

OxyR の DNA 配列を元に、AlphaFold3 によって G4OxyR の三次元構造予測を行った(Fig.1)。推定さ

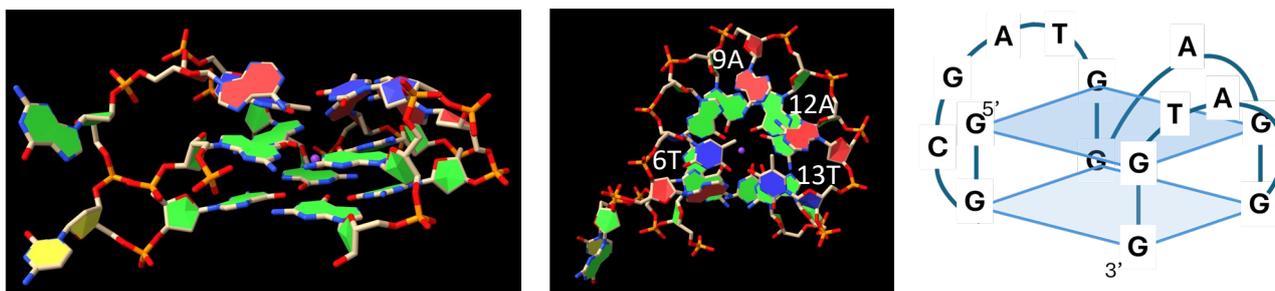


Fig.1 (左、中) Alpha Fold3 によって計算された四重鎖構造 (右)模式図

れた構造は2つの四重鎖平面を持ち、さらに6T、9A、12A、13Tが四重鎖の平面にスタッキングすることで四重鎖を安定化していることが推定された。

・ G4OxyR 変異体の安定性

G4OxyR の安定性を変化させるため、Table.1 に示すようなループ部分の変異体を合成し、各 DNA を温度変化非変性 PAGE で安定性を評価した(Fig.3)。20℃では、ほとんどの変異体と同じ位置にバンドが見られたが、四重鎖を選択的に染色する ThioFlavin-T での染色に濃淡が見られた。また、温度を上げるとバンドのシフトと同時に Thioflavin-T 染色が薄くなっていった。解析の結果、OxyR4T、4A の各変異体は安定性が上昇し、6A、4C、3A、12T、13A の各変異体は安定性が低下することがわかった。推定立体構造で安定性に寄与していると推定された4残基のうち、6、12、13番目の塩基の置換が安定性を低下させることがわかった。さらに、外側を向いていると推定された4番目のGを置換することで、安定性が増加する事がわかった。

・ G4MalK 変異体の安定性

G4OxyR と同様に G4MalK についてもループ部分の変異体を合成し(Table.2)、温度変化非変性 PAGE による解析を行った。

Table.2 作製した G4MalK 変異体

Name	Sequence	Length (nt)
MalK	CAGGGGGTGGAGGAT	15
MalK 5A	CAGGAAGTGGAGGAT	15
MalK 5C	CAGGCGGTGGAGGAT	15
MalK 5T	CAGGTGGTGGAGGAT	15
MalK 8A	CAGGGGAGGAGGAT	15
MalK 8G	CAGGGGGGGAGGAT	15
MalK 8C	CAGGGGGCGGAGGAT	15
MalK 11G	CAGGGGGTGGGGAT	15
MalK 11C	CAGGGGGTGGCGGAT	15
MalK 11T	CAGGGGGTGGTGGAT	15

G4MalK 変異体は、安定化した変異体は得られなかったが、5残基目の変異体は安定性が低下することがわかった。さらに、MalK11G ではバンドパターンが変化したことから、構造が変化している可能性がある。

現在、NMR で OxyR の構造解析を進めており、同時に各変異体による遺伝子発現調節能力の変化を確認している。

4. 口頭発表リスト

- 1) 田中陽一郎, 永田崇" Characterization of E.coli-Derived G-quadruplexes Capable of Regulating gene expression.", 2025年度 ZE 拠点年会, 2025年12月11日, ポスター

Table.1 作製した G4OxyR 変異体

Name	Sequence	Length (nt)
OxyR	GGCGATGGAGGATGG	15
OxyR 3A	GGAGATGGAGGATGG	15
OxyR 4C	GGCCATGGAGGATGG	15
OxyR 4T	GGCTATGGAGGATGG	15
OxyR 4A	GGCAATGGAGGATGG	15
OxyR 5T	GGCGTTGGAGGATGG	15
OxyR 6A	GGCGAAGGAGGATGG	15
OxyR 9T	GGCGATGGTGGATGG	15
OxyR 12T	GGCGATGGAGGTGG	15
OxyR 13A	GGCGATGGAGGAGG	15

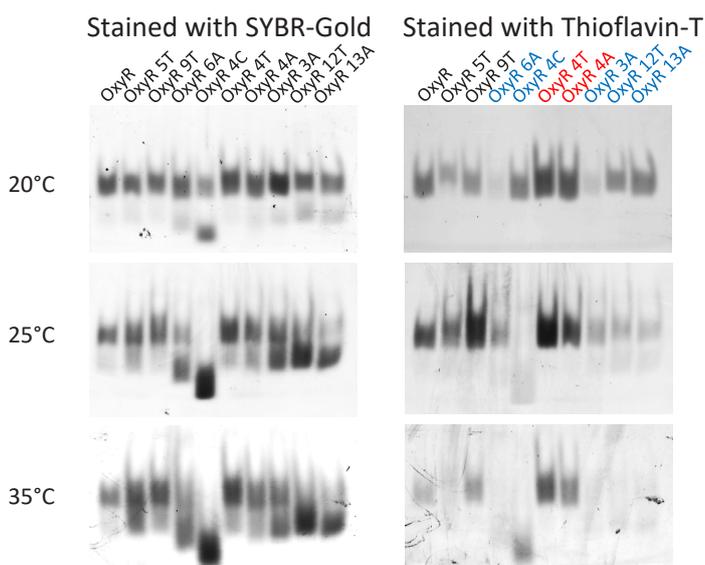


Fig.2 OxyR の変異導入による四重鎖形成温度の変化  
赤字：安定性が増加した変異体、青字：低下した変異体

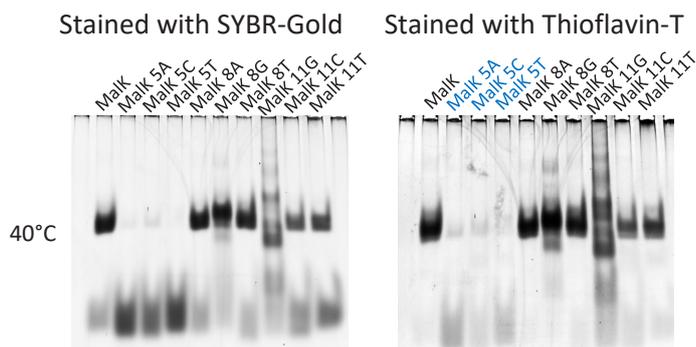


Fig.3 Fig.2 MalK の変異導入による四重鎖形成温度の変化 (一部データ)

青字：安定性が低下した変異体

# トリチウム増殖材 $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$ と $\text{Li}_2\text{O}$ の二相混合焼結体の原子密度分布の変化

新村潔人<sup>1</sup>, 八木重郎<sup>2</sup>, 佐々木一哉<sup>1</sup>, 向井啓祐<sup>3</sup>, 高橋伊久磨<sup>4</sup>, 志藤広典<sup>1</sup>, 岩崎俊平<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 弘前大学リチウム資源総合研究機構

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

<sup>3</sup> 自然科学研究機構核融合科学研究所

<sup>4</sup> 千葉工業大学工学部先端材料工学科

<sup>5</sup> 弘前大学大学院理工学研究科

## 1. 背景

重水素およびトリチウムの核反応を利用する核融合炉では、プラズマを覆うブランケット内に充填されたトリチウム増殖材料が、 ${}^6\text{Li}$  と中性子との核反応によりトリチウムを生成する。ブランケットは空間的制約を受けるため、発電期間（2～3年間）を通じて必要量のトリチウムを安定的に供給するには、トリチウム増殖材料に高いLi原子密度、優れた熱化学的安定性、ならびに熱機械的安定性が求められる。申請者は、日本におけるトリチウム増殖材料の有力候補であるLi過剰添加メタチタン酸リチウム ( $\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_3$ ) の実使用環境下における特性評価を進めるとともに、より高いLi原子密度を有する革新的材料として  $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  を提案している。これまでの研究において、低温条件下ではLi蒸発速度が小さいことを確認してきた。本研究では、さらなるLi原子密度の向上を目的として、 $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  と  $\text{Li}_2\text{O}$  の二相混合焼結体を作製した。Li蒸発試験を実施し、Liの蒸発挙動を評価するとともに、マークス型高周波グロー放電発光分光分析 (rf-GD-OES) を用いて、表面から深部にかけての原子密度分布を測定し、焼結体中のどの領域から  $\text{Li}_2\text{O}$  の蒸発が生じるのか、ならびにその蒸発挙動の解明を目的とした。

## 2. 実験方法

$\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  と  $\text{Li}_2\text{O}$  の二相混合焼結ペレットの作製方法を図1に示す。グローブボックス内 (Ar 雰囲気) において、 $\text{Li}_2\text{O}$  および  $\text{ZrO}_2$  を  $\text{Li}/\text{Zr}=16$  (モル比) となるよう秤量し、メノウ乳鉢で十分に混合した後、一軸加圧成形を行った。得られた成形体を  $800^\circ\text{C}$ 、30 h、酸素雰囲気中で焼成し、その後、再度メノウ乳鉢で粉砕することで、 $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  と  $\text{Li}_2\text{O}$  の二相混合粉末を作製した。作製した粉末を、直径 5 mm および 27 mm の金型を用いて一軸加圧成形し、 $1000^\circ\text{C}$ 、1 h、酸素雰囲気中で焼成することで、直径 5 mm・高さ 3 mm および直径 27 mm・高さ 2 mm のペレットを作製した。得られたペレットについて、ブランケット内雰囲気を模擬した  $0.1\%\text{H}_2/\text{He}$  雰囲気および酸素雰囲気中でLi蒸発試験を行った。 $0.1\%\text{H}_2/\text{He}$  ガス中に含まれる  $\text{H}_2\text{O}$  および  $\text{O}_2$  は、ドライカラムおよびガス精製カラムを用いて除去した。Li蒸発試験は  $320\text{--}900^\circ\text{C}$  の温度範囲で 24 h および 48 h 行った。直径 5 mm のペレットについては、試験前後の重量変化を電子天秤により測定し、試験後のペレットを粉砕して、Li および Zr の平均濃度を誘導結合プラズマ

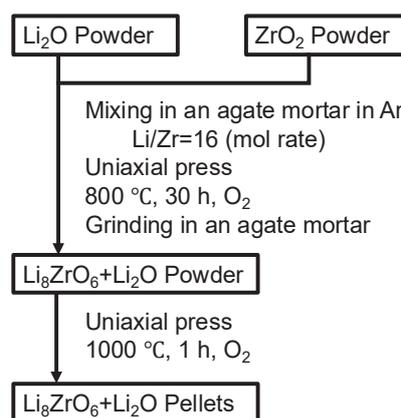


図1  $\text{Li}_8\text{ZrO}_6 + \text{Li}_2\text{O}$  ペレット作製フロー。

発光分光分析 (ICP-OES) により測定した。また、結晶構造の変化を X 線回折法 (XRD) により評価した。さらに、直径 27 mm のペレットについては、表面からの Li 原子密度分布を rf-GD-OES により分析することを試みた。

### 3. 結果および考察

初期ペレットを粉砕した試料の粉末 XRD パターンを図 2 に示す。作製した初期ペレットは、 $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  と  $\text{Li}_2\text{O}$  の二相混合相で構成されていることが確認された。本試料を用いて Li 蒸発試験を実施した。図 3 に、320–900 °C で 48 h の Li 蒸発試験における温度ごとの重量減少 (左軸) および ICP-OES により算出した Li/Zr 比 (右軸) を示す。これらの結果から、700 °C 以下では重量および Li/Zr 比に顕著な変化は見られなかったが、800 °C 以上において Li の減少が確認された。各温度条件における XRD パターンを図 4 に示す。800 °C 以上の試験後試料では、 $\text{Li}_2\text{O}$  に由来する回折ピークの減少が確認された。この結果は、 $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  と比較して  $\text{Li}_2\text{O}$  の Li 蒸気圧が高いことに起因すると考えられる。Li 蒸発が表面から進行しているかを確認するため rf-GD-OES 分析を試みたが、装置へのセッティング時にサンプルが破損したため、測定を実施することができなかった。

### 4. まとめ

本研究では、 $\text{Li}_8\text{ZrO}_6$  と  $\text{Li}_2\text{O}$  の二相混合焼結体を作製し、Li 蒸発試験を実施した。その結果、700 °C 以下では Li 蒸発はほとんど確認されず、Li 原子密度の変化は極めて小さいことが明らかとなった。一方、800 °C 以上では Li 蒸発が顕著となり、 $\text{Li}_2\text{O}$  相の減少に伴って Li 原子密度が低下することが確認された。ペレット表面からの Li 原子密度分布を rf-GD-OES により評価することを試みたが、試料破損により測定ができず、表面からどの深さまで Li の減少が生じているかを直接的に評価することはできなかった。本研究で検討した Li 蒸発試験時間範囲においては、700 °C 以下では Li 密度の変化がほとんど生じなかったことから、トリチウム増殖材料の発熱を 700 °C 以下に制御可能な条件下では、 $\text{Li}_2\text{O}$  を過剰に添加することが有効である可能性が示唆された。今後は、より長時間の Li 蒸発試験を実施し、表面からの Li 原子密度分布の変化を通じて、Li 蒸発挙動を継続的に検討する必要がある。

[論文発表リスト]

なし

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

なし

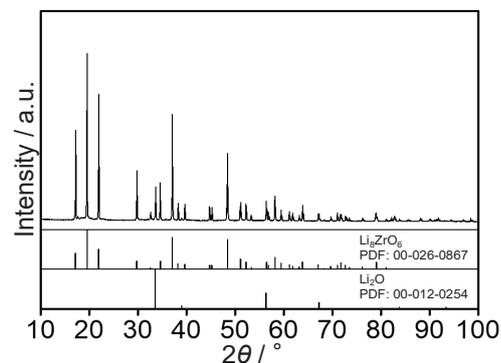


図 2 初期ペレットの XRD。

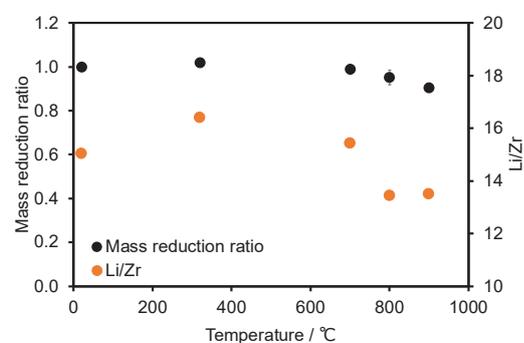


図 3 Li 蒸発試験 48 h 後の各温度の重量変化と Li/Zr 変化。

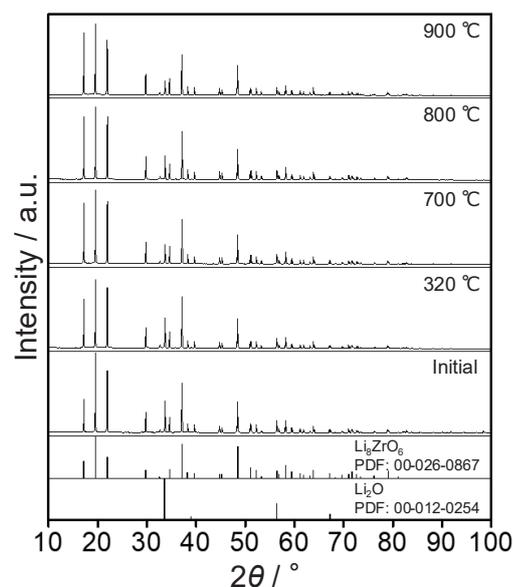


図 4 Li 蒸発試験 48 h 後の各温度の XRD。

# 酸素過剰および酸素欠損を示す $\text{PbWO}_4\text{-BiVO}_4$ 系 酸化物イオン伝導体の高温熱膨張率測定

高井茂臣<sup>1</sup>, 廣田智也<sup>1</sup>, 藪塚武史<sup>1</sup>, 野平俊之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院エネルギー科学研究科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

灰重石型構造を示す  $\text{PbWO}_4$  の  $\text{Pb}$  の一部を  $\text{La}$  で置換すると、 $\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x\text{WO}_{4+x/2}$  のように格子間サイトに過剰な酸化物イオンが形成し、高温で高い酸化物イオン伝導性が発現する。我々はこのイオン伝導体の欠陥構造と導電機構について様々な観点から研究を行ってきた。一方高温で灰重石型構造を示す  $\text{BiVO}_4$  の  $\text{Bi}$  の一部を 2 価のカチオンで置換すると、 $\text{Bi}_{1-x}\text{A}_x\text{VO}_{4-x/2}$  のように酸化物イオン空孔を形成し、高温で酸化物イオン伝導性を示すことが近年報告されるようになった。 $\text{Pb}$  と  $\text{Bi}$  および  $\text{W}$  と  $\text{V}$  は価数は異なるものの化学的性質が比較的類似していることから、両者の混晶系  $(\text{PbWO}_4)_{1-y}(\text{BiVO}_4)_y$  は比較的広い固溶領域で灰重石型構造を示し、 $\text{Pb}/\text{Bi}$  の割合を変えることにより連続的に欠陥構造を格子間酸化物側から酸化物イオン空孔側へと変化するものと考えた。

室温におけるX線回折の結果、 $y \leq 0.9$  まで灰重石型構造の固溶体を形成し、中間の組成である  $y = 0.5$  の  $(\text{PbBi})_{0.5}(\text{WV})_{0.5}\text{O}_4$  を母体として  $\text{Pb}_{0.5-x}\text{Bi}_{0.5+x}(\text{WV})_{0.5}\text{O}_{4+x/2}$  のように  $\text{Pb}$  と  $\text{Bi}$  の割合を変化させると  $-0.2 < x < 0.2$  の領域で灰重石型構造の単一相を形成することがわかった。また電気伝導率を測定すると、Fig. 1 のように欠陥が相殺される  $x = 0$  に比べて、酸化物イオン空孔をもつ  $x = -0.15$  や格子間酸化物イオンをもつ  $x = 0.20$  では電気伝導率が向上することも明らかになった。したがって、 $\text{Pb}_{0.5-x}\text{Bi}_{0.5+x}(\text{WV})_{0.5}\text{O}_{4+x/2}$  系では、連続的に欠陥構造を酸化物イオン空孔から格子間酸化物イオンに変化させ、それぞれの欠陥構造を利用して酸化物イオン伝導が発現することがわかった。同一の構造であり、格子間機構でも実際には正規の酸化物イオンサイトを導電パスとして介していることから、両者のイオン伝導機構を比較すれば灰重石型構造の酸化物イオン伝導機構の詳細が明らかになると考えられる。本研究ではまず、酸化物イオン空孔や格子間酸化物イオンが伝導に寄与しはじめる領域で、格子定数どのような影響をもたらすかを調べるために、高温 X 線回折実験を行い、熱膨張率の違いを明らかにすることにした。

## 2. 実験

試料は  $\text{PbO}$ 、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{WO}_4$  および  $\text{V}_2\text{O}_5$  を出発物質として、通常の固相反応法で合成した。組成には、 $\text{Pb}_{0.5-x}\text{Bi}_{0.5+x}(\text{WV})_{0.5}\text{O}_{4+x/2}$  に対して  $x = -0.10$ 、 $0$  および  $0.10$  を選び、いずれの試料についても 1 次および 2 次焼成温度はそれぞれ  $700^\circ\text{C}$  および  $800^\circ\text{C}$  とした。得られた試料は室温で X 線回折実験(Ultima IV, Rigaku)を行い、単一相であることを確かめた。合成および室温 X 線回折は京都大学大学院エネルギー科学研究科で行った。

これらの試料を白金ホルダ上へのせ、京都大学エネルギー理工学研究所既設の X 線回折計で高温 X 線回折実験を行った。対陰極管のターゲットは  $\text{MoK}\alpha$  を用い、 $300^\circ\text{C}$  から  $700^\circ\text{C}$  の温度領域で  $100^\circ\text{C}$  ごとに測定

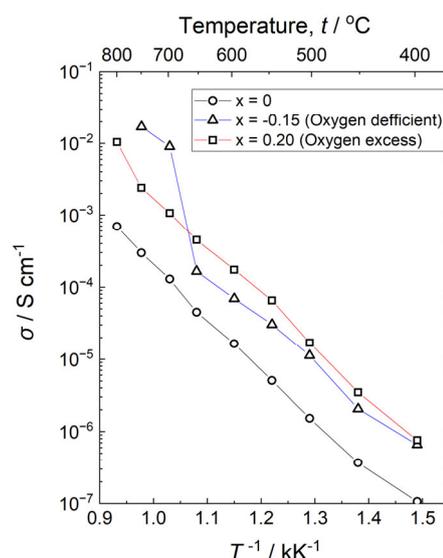


Fig. 1 Electrical conductivities of  $\text{Pb}_{0.5-x}\text{Bi}_{0.5+x}(\text{WV})_{0.5}\text{O}_{4+x/2}$ .  $\circ$ :  $x = 0$  without defect,  $\triangle$ :  $x = -0.15$  (oxygen deficiency), and  $\square$ :  $x = 2.0$  with oxide ion interstitial.

した。得られたデータは灰重石型構造( $I4_1/a$ )を仮定して Rietveld 解析を行い、それぞれの欠陥構造における格子定数の温度依存性を求めた。

### 3. 結果と考察

Fig. 2 に得られた X 線回折パターンを示す。組成によって各ピークの強度比は異なっているものの、灰重石型構造の単一相で解析できた。また、いずれの組成においても構造相転移による結晶相の変化は見られなかった。

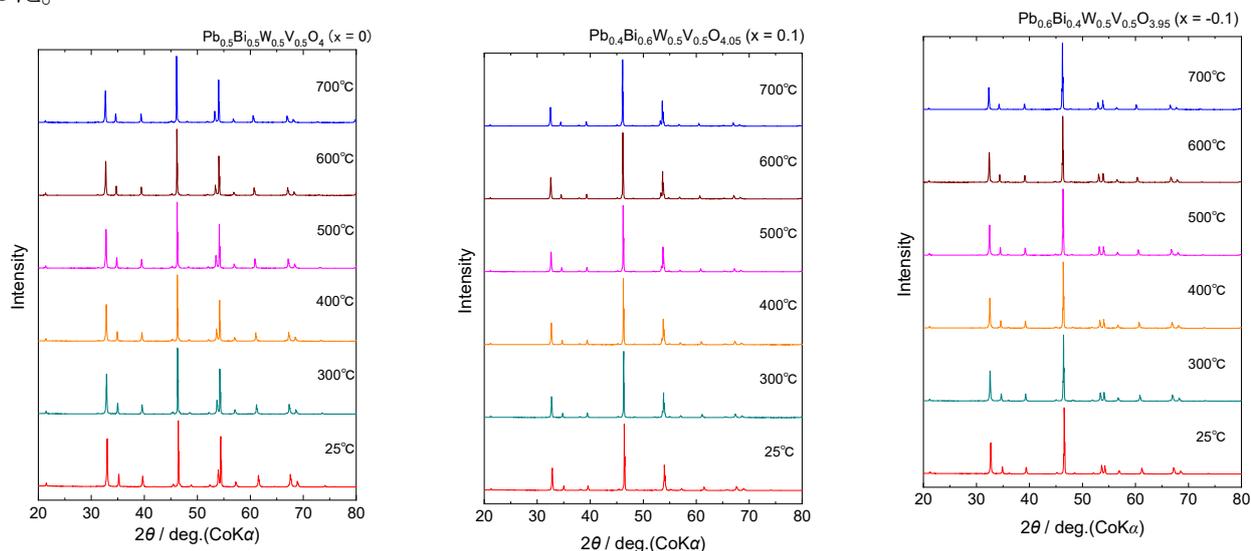


Fig. 2 X-ray diffraction patterns of  $\text{Pb}_{0.5-x}\text{Bi}_{0.5+x}(\text{WV})_{0.5}\text{O}_{4+x/2}$  measured in the temperature range 25°C to 700°C.  $x = 0$  indicates the composition without defects, and  $x = 0.1$  and  $-0.1$  corresponds to the oxygen excess and oxygen deficiency compositions, respectively.

Rietveld 解析によって求めた格子定数の温度依存性を Fig. 3 に示す。2 価の Pb の割合が多く、酸化物イオン空孔による反発の影響の大きい  $x = -0.1$  の組成では a 軸、c 軸ともに  $x = 0$  や 0.1 の組成に比べて大きい値を示した。  $x = 0.1$  では 3 価の Bi の割合が多いものの格子間酸化物イオンを格納するために、 $x = 0$  に比べてわずかに大きい値であった。熱膨張率は比較的近い値であったが、 $x = -0.1$  の試料については 300°C から 400°C で大きな熱膨張を示し、それより高温では一定であった。これは低温では局在化していた空孔が、300°C から 400°C で空孔が動きはじめるためであると考えられた。

今後は、原子位置の解析などから局在化した空孔や格子間イオンの動きについて調べてゆく予定である。

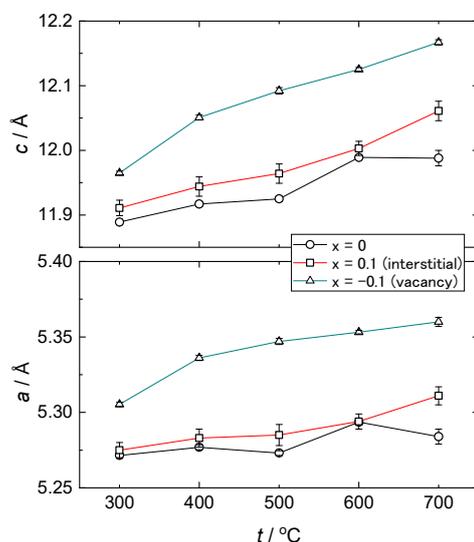


Fig. 3 Lattice parameters of tetragonal scheelite-type structured  $\text{Pb}_{0.5-x}\text{Bi}_{0.5+x}(\text{WV})_{0.5}\text{O}_{4+x/2}$  plotted versus temperature.  $\circ$ :  $x = 0$ ,  $\triangle$ :  $x = -0.1$ , and  $\square$ :  $x = 0.1$ .

# 複合樹脂素材の選択的アブレーションと表面反応解析

藤岡 隼<sup>1</sup>, 築山 光一<sup>2</sup>, 全 炳俊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京理科大学総合研究院ナノカーボン研究部門

<sup>2</sup>東京理科大学理学部

<sup>3</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 【研究背景・目的】

レーザー加工は樹脂加工において有用な加工法であるが、可視・紫外領域に発振する光源が多用されている。一部、CO<sub>2</sub> レーザーのように赤外領域に発振する光源もあるものの、いずれも分子の振動モードに共鳴する波長ではなく、熱損傷の発生が問題となっている。これまで、分子の振動モードと共鳴する光を用いて、PTFE (Polytetra fluoro ethylene) に代表される難加工性樹脂や、複数の異なる熱膨張係数・吸収波長の素材により構成される為、加工が困難とされている CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) に対するアブレーション実験を KU-FEL にて実施した。有機成分を主とする樹脂素材には複数の分子振動モードが存在し、いずれのモードがレーザー加工に適しているか否かは未知であった為、波長可変である KU-FEL の存在意義は大きく、様々な波長の光を供試してアブレーション実験を実施した。その結果、単一組成の樹脂においては、分子の振動モードと共鳴する光は共鳴しない光と比較し、ビーム周囲の加工断面における熱損傷が少なかった。また、アブレーション時に発生した気体を赤外分光法にて定性分析した結果、照射波長によってアブレーション時に構造が異なる気体が発生する気体が異なっていた。これら一連の実験より、実験手法を確立し、またアブレーションのパラメータ (波長・パルス数・パルスエネルギー) の知見を得た。当初、本研究においては、複合材料の切削に対する詳細な料を用いたアブレーション実験を実施する予定であったが、並行して、歯科材料でもある PEEK (ポリエーテルエーテルケトン) のアブレーション実験において、特定の波長 (8.2 μm) の光照射が他の波長とは異なる気体を発生させる現象を見出した為、当該実験を進行させた。PEEK は数年前から歯科治療における冠の材料として健康保険へ採用されたが、機械的加工に頼っているのが現状であり、臨床現場でも難加工性故の調整作業に戸惑いを感じている声も多い。レーザー加工の知見も少なく、加工時の反応も未だ判明しているとは言い難い為、計画を変更して当該材料の加工に対する知見を得ることとした。

## 【方法】

FT-IR (JASCO FT/IR-6000) にて PEEK の赤外吸収スペクトルを測定した。測定結果を図 1 に示す。測定の結果、1646 cm<sup>-1</sup> (C=O 伸縮振動)、1215 cm<sup>-1</sup> (C-O 伸縮振動) と吸収ピークの存在しない 1725 cm<sup>-1</sup> を照射波長として選定した。CFRP を X-Z の 2 軸自動ステージに設置し、照射深度を変化させて 1 パルスのみ照射するスキャン照射の実験系を構築した。更に、減圧したセル内に試料を挿入し、レーザー光を照射し、発生した気体を FT-IR を用いて、定性分析を行った。KU-FEL は軸外放物面鏡 (f = 228.6 mm) にて集光され、更に、パルスエネルギーと切削深さや、気体発生条件との相関も追跡する為、光路内に偏光子を挿入し、パワーエネルギーを調整可能とした。これにより、照射パルス数とパルスエネルギーを変化させ、発生気体のパルス数・エネルギー依存性を確認した。照射後に得られた試料は東京理科大学設置の 3D 共焦点形態顕微鏡 (Keyence, VK-150) を用いて試料の照射スポット近傍の形態観察を行った。

## 【結果および考察】

3 種類の異なる波長の KU-FEL 光を PEEK に同一条件で照射し、FT-IR にて発生気体の定性分析を行った結果 (図 2~4)、1215 cm<sup>-1</sup> 照射の条件のみ、CO 分子が発生していた。他の波長においては、CO 分子の生成は確認されなかった。また、1215 cm<sup>-1</sup> の KU-FEL 光照射において、パルスエネルギーを

55, 33, 20 mJ に、各エネルギーパルスにおいて 120, 360, 840 パルスにおける照射実験を行った結果、パルスエネルギーが 33 mJ 以上、360 パルス以上の条件において CO 分子が生成する現象を見出した。これにより、アブレーションの条件に対する知見が得られた。現在、照射後試料は立命館大学において XAFS による構造解析を実施中である。また、3D 共焦点形態顕微鏡の結果は現在、解析中である。

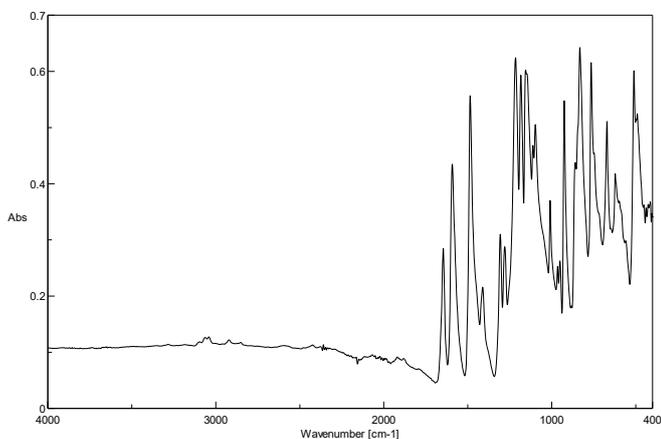


図 1 PEEK の FT-IR スペクトル

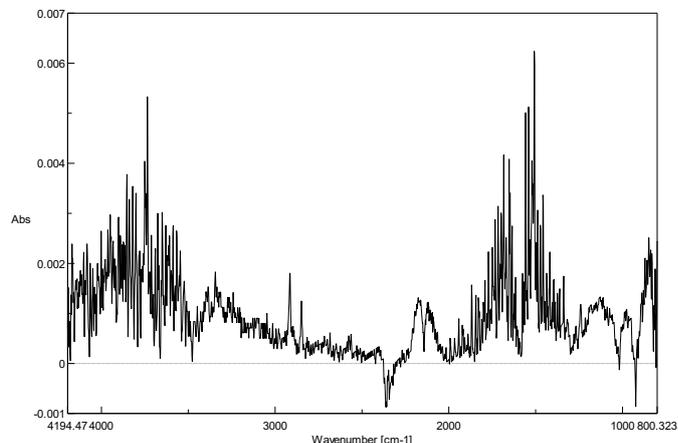


図 2 1215 cm<sup>-1</sup>FEL 照射後の発生気体 FT-IR スペクトル

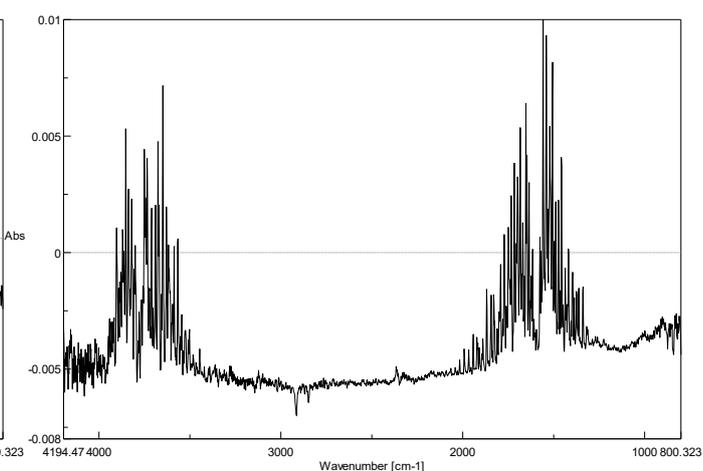
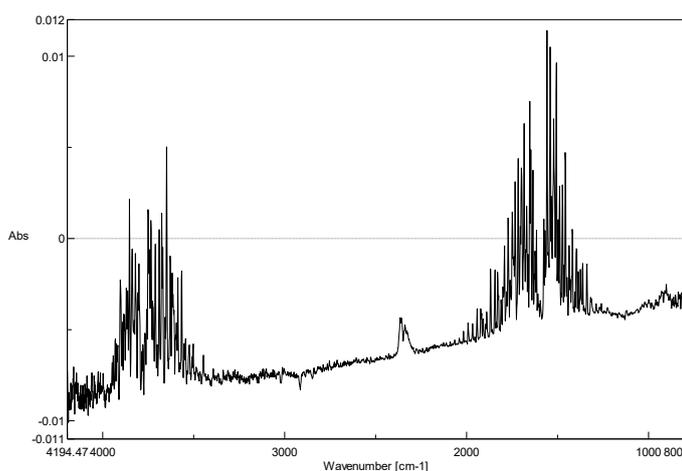


図 3 1646 cm<sup>-1</sup>FEL 照射後の発生気体 FT-IR スペクトル 図 4 1725 cm<sup>-1</sup>FEL 照射後の発生気体 FT-IR スペクトル

#### 【今後の展望と計画】

引き続き、PEEK を用いて、他の波長（例：1280 cm<sup>-1</sup>；C-O フェニル-カルボニル伸縮振動に対応）の照射実験や、マクロパルスをプラズマシャッターにて切断、照射レーザーのパルス構造の差異がアブレーションにおける加工断面や反応機構に及ぼす影響を検討する予定である。また、立命館大学のシンクロトロン放射光施設を用い、XAFS で照射後の試料表面の組成解析も行う予定である。

#### 【口頭発表リスト】

- ・第 32 回 FEL と High power radiation 研究会 Spring-8, 2025/12/18 -19
- ・2025 年度 ZE 拠点年会 2025/12/11 京都大学宇治キャンパス

# 水産加工副産物からの新規多糖の発酵生産

武田 穰<sup>1</sup>, Mishal Shafiq<sup>1</sup>, Chen Shiqian<sup>1</sup>, 斎藤朝昌<sup>1</sup>, 荒木優衣<sup>1</sup>, 松永直樹<sup>1</sup>,  
近藤敬子<sup>2</sup>, 片平正人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学工学研究院

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 背景・目的

水産庁によれば、漁獲量等を適切に管理すれば水産資源は永続的に利用可能とされている。すなわち、水産資源は再生可能である。水産資源は食料および飼料として活用されており、新鮮な状態ないし加工を経た後に市場に供される。常温保存可能で調理の手間も省ける缶詰は利便性の高い水産加工品である。業界団体のまとめによれば、缶詰（魚介類）の生産量は年間約7万トンである。加工で生じる廃液は十分に利用されていない状況であり、発酵生産用の窒素源としての有効活用が模索されている。発酵生産に従来の獣肉由来ではなく水産物由来の原料を用いれば、宗教上のタブーを回避できる利点もある。しかし、種々の微生物を用いた検証は道半ばである。本研究ではマイクロチューブ形成細菌（*Sphaerotilus hippiei*, 図1）の培養に魚エキスをを用いることによって汎用性の確認を目指すこととした。本細菌が水産廃棄物で旺盛に増殖することを確認済みである。さらに、マイクロチューブ（細胞を覆う薄膜）がガラクトマンナン系の多糖で形成されている可能性が高いことも予備的な組成分析で判明している。ガラクトマンナンは植物から得られ増粘剤・ゲル化剤として加工食品などに広く利用されているが、発酵生産された例はない。植物セルロースと細菌セルロースの特性の違いに象徴されるように、細菌由来の多糖は植物由来に比べ圧倒的に高純度である。高純度ゆえに、加工食品だけでなく研究用途への用途の拡大が見込まれる。未利用資源（水産加工副産物）から有用物質を生産できればゼロエミッションの一助となる。

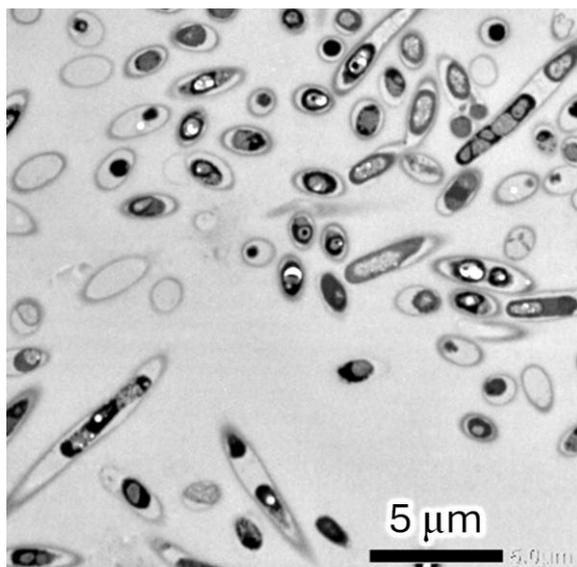


図1 *S. hippiei* の断面の透過電子顕微鏡像

## 2. 実験方法

水産加工副産物（カツオおよびマグロの加工で生じる廃液）由来の窒素源を主成分とする培地で *S. hippiei* を培養した。比較のために従来の（植物および家畜由来の）有機窒素源での培養も行った。菌体収量は培養液当たりの乾燥重量を測定することによって算出した。培養後に菌体を回収し、水酸化ナトリウムと界面活性剤の存在下で加熱して細胞を溶解した。そして、残渣としてマイクロチューブを得た。得られたマイクロチューブを十分に水洗することによって夾雑物を除去した後、化学構造の構造決定および用途の検討に用いた。マイクロチューブを酸触媒存在下で完全加水分解し、誘導体化（アルジトールアセテート化および(R)-2-ブチル配糖体化）を経てガスクロマトグラフィーを行うことによって糖組成を調べた。部分加水分解によって可溶化（低分子化）したマイクロチューブについては、メチル化分析による各糖残基の結合位置の決定を行うとともに、1D-NMR および 2D-NMR スペクトルを測定することによって糖の結合様式と配列を確認した。一連の分析によりマイクロチューブ形成多糖の構造を決定した後に、水中を想定した分子動力学シミュレーションを行って安定配座および分子間相互作用を予測した。マイクロチューブの応用に関しては、熱可塑性（すなわち加熱冷却によるハイドロゲル形成能）に着目し、ゲル化に及ぼす塩や pH の影響を調べた。また、培地の固化剤としての特徴を寒天と比較することによって明らかにした。

### 3. 実験結果

*S. hippei* は培養用基質として一般的な植物および家畜由来の有機窒素源よりもカツオおよびマグロ由来の有機窒素源を配合した培地を好むことが菌体収量の比較によって明らかとなった。最適化した培地を用いて得られた菌体からマイクロチューブを調製し、その塊を透過電子顕微鏡で観察したところ、図2に示すように、本来の中空構造を保った状態でマイクロチューブを調製可能であることが確認された。マイクロチューブの完全加水分解物に対して行った組成分析では、当モルのマンノースとガラクトースが検出された。メチル化分析及びNMR測定によって、図3に示す繰返し単位からなる化学構造の決定に至った。シミュレーションでは分子の会合（形態形成）を再現することができた。糖組成としてはガラクトマンナン的一种と言えるものの、既知のガラクトマンナンは主鎖がマンノースのみからなるため、構造としては異なる新系統の複合多糖である。また表1に示すように、近縁種の鞘とは異なる特徴を持つことから、*Sphaerotilus* 属の鞘の多様性に関する理解が深まった。

精製したマイクロチューブを 100°C程度に加熱すると溶解し、溶液を冷却するとゲル化することを見出した。ゲル化は塩の添加でもさほど妨害されなかった。また幅広い pH でのゲル化が可能だった。得られるゲルの透明度が高いのも特徴だった。大腸菌用の培地を固化させ、寒天で固化させた場合と比較しながら培養したところ、寒天培地は白濁していたのに対し、マイクロチューブ形成多糖で固化した培地は透明だった。大腸菌の増殖は遜色なく、増殖阻害がないことが確認された。透明ゆえにコロニーの観察が容易な点において寒天よりも優れていた。

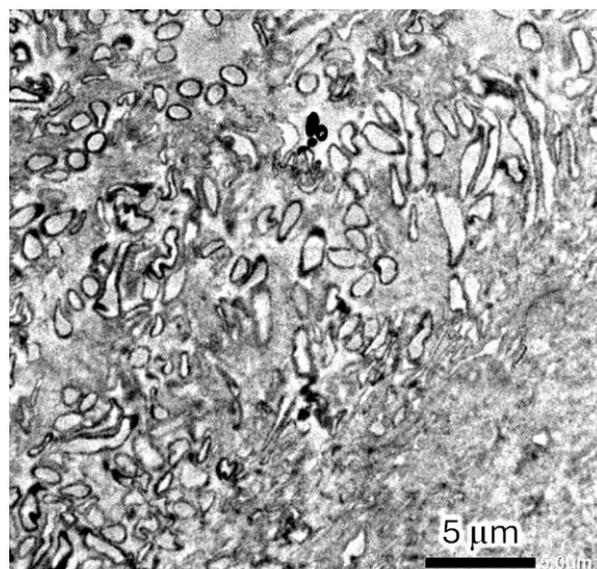


図2 *S. hippei* から得られたマイクロチューブの断面の透過電子顕微鏡像

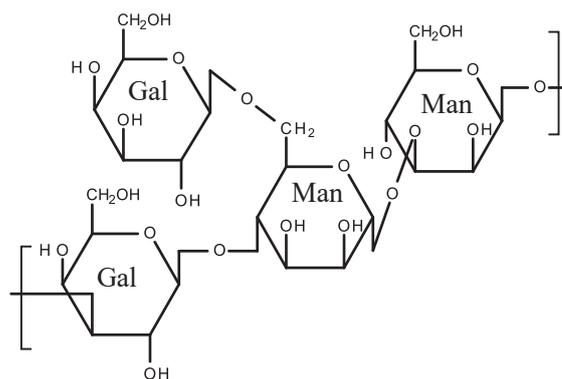


図3 マイクロチューブ形成多糖の化学構造

表1 *Sphaerotilus* 属の鞘の特徴

種	<i>S. natans</i>	<i>S. montanus</i>	<i>S. hippei</i>
末端形状	解放	解放	閉塞
主成分	両性多糖+ペプチド	両性多糖	中性多糖

### 4. 成果発表

[論文発表]

Mishal Shafiq, Shiqian Chen, Naoki Matsunaga, Aoi Hagio, Ichiro Suzuki, Daisuke Koizumi, Rie Togawa, Yudai Yamaoki, Keiko Kondo, Masato Katahira, Minoru Takeda, “Novel gelling agent similar to galactomannan from the sheath-forming bacterium *Sphaerotilus hippei*”, J Appl Microbiol. 136(9):lxaf220 (2025).

[ポスター発表]

Naoki Matsunaga, Keiko Kondo, Masato Katahira, Yu Ibusuki, Shinya Matsumoto, Minoru Takeda, “Involvement of dihydrostreptose in extracellular microtube formation in a filamentous sulfur-oxidizing bacterium *Thiothrix nivea*” Rare Sugar Congress 2025, Nov. 2025.

# 複雑なエネルギーシステム運用保守のための 先進的情報基盤高度化に関する実験研究

松岡猛<sup>1</sup>、森下和功<sup>2</sup>、吉川榮和<sup>3</sup>、小林進二<sup>2</sup>、五福明夫<sup>4</sup>、安部正高<sup>5</sup>、  
チェン ユーチン<sup>2</sup>、東使 潔<sup>2</sup>、新田純也<sup>6</sup>

<sup>1</sup>宇都宮大学地域創成推進機構、<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所、  
<sup>3</sup>京都大学名誉教授、<sup>4</sup>岡山県立大学、<sup>5</sup>京都大学エネルギー科学研究科、  
<sup>6</sup>アルカディア・システムズ(株)、

## 1. はじめに—これまでの経緯と 2025 年の研究計画

京大エネルギー理工学研究所にはゼロエミッションエネルギーインフラを構成する計測器、電動機、変圧器、弁、配管、電線ケーブル等が多数の実験設備で用いられており、個々の機器の劣化や故障診断手法の開発検証の場として活用し、設備全体の信頼性評価やリスク予測解析手法の開発検証を実験的に進める格好の場である。これらは複雑大規模なエネルギーシステムの運用管理のための高度 ICT 基盤の構成に役立てられる。

2022-2023 年の 2 年間は提案型共同研究『複雑なエネルギーシステムの先進的な故障診断・信頼性評価手法の実験研究』を、2024 年には企画型共同研究のテーマ 3（エネルギー科学のデジタルトランスフォーメーション (DX) の学理）として『複雑なエネルギーシステム運用保守のための先進的情報基盤高度化に関する実験研究』を開始している。

2022 年度では、エネルギー理工学研究所の DuET 実験施設での高調波診断システムによる劣化検知診断実験、システムの動的信頼性解析法 GO-FLOW の解析機能向上を実施し、ついで 2023 年度には機器構成の複雑なヘリオトロン核融合実験施設を対象にその構成機器の劣化診断、故障検知実験を行うとともに GO-FLOW による信頼度解析モデルにより動的信頼性の定量評価も行った。また核融合プラズマのシミュレーションにデータ同化の概念を適用する新たな研究課題を調査した。これらの成果は第 14 回先進エネルギー科学国際シンポジウム (ZE 国際シンポジウム) で英文ポスター発表<sup>(1)</sup>を行った。

2024 年度はエネルギー科学の DX 基盤調査の一環として、「故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現」を一般的に汎化して記述する知識ベースとして故障生起汎化知識 (GFMK) の表現法を提案。高調波診断システムの再実験を実施し、GO-FLOW 解析法への適用の検討を実施。動的信頼性解析 GO-FLOW を用いたヘリオトロン J 水冷却系信頼性評価結果を国際会議 PSAM2024<sup>(2)</sup>で論文発表。また機能の概念と機能モデルに基づく運転支援、保全学研究者 (森下・安倍) から故障生起汎化モデル (東北大・高橋) への提言を行い、関連して大規模言語モデル LLM の解説と応用の展望講演を持った。第 15 回先進エネルギー科学国際シンポジウムでは Ze ポスターセッションで英文ポスター発表<sup>(3)</sup>を行った。また、高調波診断システムへの AI 適用及び Chat GPT の GO-FLOW 解析への適用方法の検討も行った。

2025 年度は以上の経緯を踏まえて、具体的には以下の構成・テーマで共同研究を進めることにした。  
ヘリオトロン J を対象とする実験研究

- A. 電気機器劣化の高調波診断システムの現場設置継続実験
  - B. GO-FLOW による水冷却系の動的信頼性・アベイラビリティ解析の高度化
- エネルギー科学の DX 学理進化のための高度 ICT 基盤研究
- C. システム基礎としての機能の表現法、劣化現象の物理モデル・解析法
  - D. AI のエネルギー産業分野への応用展望 (知的統合/連携高度化)

## 2. 2025 年度の研究実施結果の要約

### 第 1 回全体会議 2025 年 6 月 19 日

テーマ A：高調波診断技術の詳細についての説明がなされた。特に機器の劣化度の導出方法、意味合いについて研究者間で再確認が行われた。

テーマ B: GO-FLOW 解析への高調波診断結果の取り込み方法。高調波診断の結果から得られる劣化度

を如何に解析に取り込むかの検討経過について報告があった。

テーマ D: 複雑システムのプロアクティブなトラブル防止のための新しい知識ベースの研究について報告があった。予防的トラブル防止知識基盤の高度化を目指し、知識基盤構築法のさらなる発展を目指している。ここではテーマ C の GFMK モデルを参考とし、多種多重な失敗モードを考慮する失敗生起メカニズムの知識モデルを作る予定である。

#### 第2回全体会議 2025年10月22日

テーマ A: 高調波診断の測定波形から、整数倍以外の周波数を機械学習により解明し、新たな知見を得る方法の検討について報告があった。

テーマ B: 「ChatGPT による GO-FLOW 解析の支援および高調波診断結果のアベイラビリティ解析への反映」という題目により、今年度における研究の実施内容が説明された。

テーマ C: システム基礎としての機能の表現法の一環として機能モデルを基礎とした異常原因診断手法の検討の報告があった。また、保全学会での「複雑システムのトラブル未然防止用先進知識基盤の構築法に関する研究」報告<sup>(4)</sup>について内容説明があった。

テーマ D: 「原子力への AI 応用についての IAEA 及び国内動向の調査」について内容報告があった。さらに、原子力 AI 学シンポジウム参加報告、生成 AI アカデミア〈第一回 成果報告会〉出席報告がなされた。国際会議 IEEE ICIEA 2025 (Yantai) への出席報告もあり、この会議で関連研究 2 件<sup>(5) (6)</sup>が発表されている。2025 年 ZE 年会でのポスターセッションでもポスター発表<sup>(7)</sup>を行った。

#### 第3回全体会議 2026年1月22日

東京大学原子力国際専攻特任教授出町和之氏を招いて AI の原子力分野への適用について情報提供を頂いた<sup>(8)</sup>。AI 技術を応用した、ヘリオトロン水冷却系のアベイラビリティ解析の高度化、複雑システムのトラブル未然防止用先進知識基盤の構築、中国でのスマート原子力発電プラント構想の紹介の発表もなされた。さらに今後の研究の進め方について意見交換がなされた。

### 3. 結論と今後の展望

本年度の研究実施により、ヘリオトロン J を対象とし、具体的には電気機器劣化の高調波診断システムの検討、GO-FLOW によるアベイラビリティ解析の高度化、エネルギー科学の DX 学理進化のための高度 ICT 基盤研究を実施し、システム運用管理のための高度技術開発の端緒が得られた。これらデジタルトランスフォーメーション技術を積極的に活用して開発する要素技術の統合による、複雑システム運用管理のための総合的運用・保守支援体系実現の見通しが得られた。

今後は高調波診断の実績を積み上げるとともに、システム運用担当者との密接な連携のもと、現場の装置の実態（劣化度、点検保守の状況）を反映したアベイラビリティ解析の高度化を達成し、開発されるトラブル未然防止用先進知識基盤とを合わせて総合的運用・保守支援体系を実現させて行く。

### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

- (1) 2023 年第 14 回 ZE 国際シンポのポスター
- (2) T. Matsuoka\*, S. Kobayashi, K. Morishita, and H. Yoshikawa, Availability Analysis of Heliotron J Water-cooling System by the GO-FLOW methodology, Proceedings of PSAM17&ASRAM2024, 7-11 October, 2024, Sendai International Center, Sendai, Miyagi, Japan
- (3) 2024 年第 15 回 ZE 国際シンポのポスター
- (4) 吉川 榮和、新田純也、高橋信、森下和功、五福明夫、安部正高、松岡猛：複雑システムのトラブル未然防止用先進知識基盤の構築法に関する研究、第 21 回日本保全学会学術講演会（松江）（2025 年 8 月）。
- (5) T. Matsuoka, S. Kobayashi, K. Morishita, H. Yoshikawa, Availability Analysis of Heliotron J by the GO-FLOW methodology with AI Technologies, The 20th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2025), 03-06 August 2025, in Yantai, Shandong, China.
- (6) H. Yoshikawa, K. Morishita, J. Nitta, M. Takahashi, A. Gofuku, T. Matsuoka, Research on Advanced Knowledge Bases for Proactive Trouble Prevention in Complex Systems, ICIEA 2025.
- (7) 2025 年 ZE 年会シンポのポスター (8) Symbio N&R, Vol. 15, No. 2, 2026 (symbio-newsreport. jpn. org)

## Isolation of *Bacillus subtilis* strain from Rice Straw and Soil for Biocontrol and Plant Growth Hormone Promotion

Orlavanh Sonesouphap<sup>1</sup>, Keonakhone Khounvilay<sup>1</sup>, Yumiko Takatsuka<sup>2</sup>,  
Hara Tomijiro<sup>2</sup> and Hideaki OHGAKI<sup>2\*</sup>.

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, National University of Laos. Sokpaluang Campus, 01030 Lao-Thai Friendship Rd, Vientiane, Lao PDR.

<sup>2</sup>Environmental Microbiology Research Section, The Institute of Advanced Energy, Kyoto University. Gokasho, Uji, Kyoto 611 - 0011, Japan.

### Abstract

The search for environmentally friendly alternatives to chemical fertilizers and pesticides has increased interest in beneficial soil microorganisms, particularly *Bacillus subtilis*, due to its strong biocontrol activity and plant growth promoting capabilities. This study aimed to isolate and characterize *B. subtilis* strains from rice straw and agricultural soil to evaluate their potential for biological control of plant pathogens and production of plant growth promoting hormones. Samples were collected from rice fields, and bacterial isolates were obtained through serial dilution, heat treatment, and selective culturing. Total 304 isolates were screened from straw and soil samples with two locations Hatxayfong District and Naxaythong District (168 and 136 isolates respectively).

Keyword: *Bacillus subtilis*, *Colletotrichum kahawae* (coffee berry disease (CBD)), Rice straw and Rice farm soil, Biocontrol and Plant growth promoting.

### 1. Introduction:

Agriculture is a vital sector in Lao PDR, where rice cultivation plays a central role in food security and rural livelihoods. Large quantities of rice straw are produced each season, yet much of this biomass remains underutilized despite its potential as a source of beneficial microorganisms. As Lao farmers increasingly seek sustainable and low-chemical farming practices, the development of locally sourced microbial solutions has become an important priority.

Rice straw and agricultural soils harbor diverse microbial communities with significant potential for sustainable crop management. Among these microorganisms, *Bacillus subtilis* is widely recognized for its ability to suppress phytopathogens and promote plant growth through multiple mechanisms, including the production of antibiotics, lytic enzymes, cyclic lipopeptides and phytohormones such as indole-3-acetic acid (IAA). As growing concerns about chemical pesticides and fertilizers drive the search for eco-friendly alternatives, isolating and characterizing native *B. subtilis* strains from agricultural environments has become increasingly important (Yuexia Sha et al, 2020).

This study focuses on screening *Bacillus subtilis* strains derived from rice straw and soil for their biocontrol efficacy and plant growth-promoting traits. By evaluating their antagonistic activity against plant pathogens and assessing their ability to produce key plant growth hormones, this research aims to identify promising strains that can contribute to sustainable agriculture and integrated pest management strategies.

### 2. Material and Method

Rice straw and soil samples were collected from organic rice fields in Hatxayfong and Naxaythong Districts, with 20 samples obtained from each site. Samples were placed in sterile bags, transported in ice boxes, and stored at 4 °C prior to analysis. Rice straw was cut into small pieces (0.5–1 cm), while soil samples were mixed with 0.9% saline solution, vortexed for 2 min, heat-treated at 80 °C for 25 min, and serially diluted. Dilutions were cultured on LB medium, and heat-shock treatment was applied to select spore-forming bacteria. Selective media supplemented with chloramphenicol, tetracycline, and ampicillin were used, and cultures were incubated at 37 °C. Distinct colonies were isolated, and *B. subtilis* strains were identified using 16S rRNA sequencing followed by whole-genome sequencing. Antagonistic activity against *Colletotrichum kahawae* was evaluated using an agar-well diffusion assay. In addition, enzymatic activities and plant growth-promoting traits, including siderophore and IAA production, were assessed.

### 3. Results and Discussion

□ Sample Collection Rice straw and soil samples were collected from organic rice field at Hatxayfong District and Naxaythong District, 20 samples per each and place. Some activities and samples were showed in Fig. 1.



Fig. 1. 1.A. Rice field, 1.B. Sample collecting, 1.C. Rice straw sample and 1.D. Soil sample

□ Isolation of microorganism: The pure isolates were selected from all samples were 304 isolates, some different observe by colony were showed in Fig. 2. From the results showed that there are different strains of bacteria which will be identify in the next step. And total number of isolates were screened from rice straw and soil samples were showed in table 1.

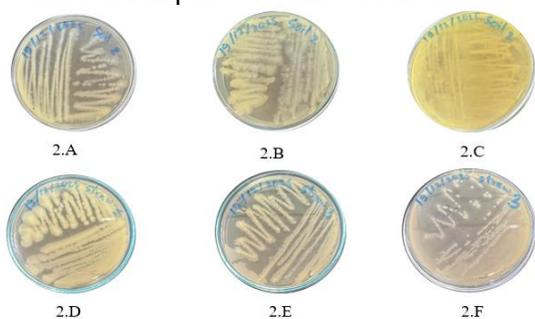


Table 1. The summary number of isolates were screened from rice straw and soil samples

Location	Samples/ (20 points)	Number of Isolates
Hatxayfong District	Straw	71
	Soil	97
Naxaythong District	Straw	57
	Soil	79
Total		304

Fig. 2. (2.A, 2.B, 2.C) isolates from Soil sample code 2, 2.D isolates from straw sample code 1 and 2. E and 2.F isolates from straw sample code 3 which collected from rice field at Hatxayfong District.

From the results founded that the number of isolates from Hatxayfong District were 168 isolates (Straw samples 71 and Soil sample 97) which showed that the number of isolates from soil sample were more than rice straw samples and the results from Naxaythong District (136 isolates) was similar which were soil samples isolates were more than rice straw samples, 79 and 57 isoltes respectively. Beside that, founded the number of isolates from Hatxayfong District were more than Naxaythong District, because Hatxayfong area is agriculture land which the soil is rich in nutrients, resulting in a high microbial population.

### 4. Conclusion

The study focuses on *Bacillus subtilis* strains isolated from rice straw and soil exhibit both biocontrol potential and plant growth promoting ability. Selected strains could be developed into eco-friendly bioinoculants to support sustainable and low-chemical agriculture. Total 304 bacteria isolates were screened from two locations. Next step will be bacteria strains confirmed using morphology and 16S RNA sequencing followed by whole-genome sequencing, then, anti-phytopathogen and plant growth hormone production activities will be tested.

### Acknowledged

This research was a part of Collaborative research internship entitled "ACHIEVING CARBON NEUTRAL ORGANIC COFFEE CULTIVATION THROUGH BIOCONTROL." and the grant supports of the Environmental Microbiology Research Section, The Institute of Advanced Energy, Kyoto University, are gratefully acknowledged.

### Reference

Yuexia Sha, Qingchao Zeng, and Shuting Sui, 2020, Screening and Application of Bacillus Strains Isolated from Nonrhizospheric Rice Soil for the Biocontrol of Rice Blast. The Plant Pathology Journal, 36(3) : 231-243, <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.02.2020.0028>

# Proposing a Renewable Energy Transition to Promote Sustainable Development: The Case of Solar Energy Utilization in Sumenep Regency

Anugerah Yuka Asmara<sup>1</sup>, Aditya Wisnu Pradana<sup>1</sup>, Adhityo Nugraha Barsei<sup>1</sup>, Galuh Syahbana Indraprahasta<sup>2</sup>, Ardanawati Ayu Pitaloka<sup>2</sup>, AR Rohman Taufiq Hidayat<sup>3</sup>, Jordi Cravioto Caballero<sup>4</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Public Policy, National Research and Innovation Agency of Indonesia, <sup>2</sup>Research Center for Population, National Research and Innovation Agency of Indonesia, <sup>3</sup>Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, <sup>4</sup>Institute of Advanced Energy, Kyoto University

## 1. Introduction

Sumenep Regency, located at the easternmost part of Madura Island, has a unique geographical characteristic consisting of both mainland and numerous small islands. This archipelagic condition creates significant challenges in infrastructure development, particularly in electricity provision. Although electrification has reached approximately 92 percent, many islands still experience limited electricity supply hours, largely relying on diesel-based power plants (PLTD) and a small number of solar or hybrid systems. The uneven distribution of electricity has had substantial socio-economic consequences, especially for coastal and island communities whose livelihoods depend on fisheries, small-scale industries, and tourism. Limited access to reliable electricity constrains cold storage for fish preservation, hinders business productivity, and perpetuates poverty pockets predominantly found in island regions. In response to these challenges, renewable energy, particularly solar energy, has emerged as a promising solution due to Sumenep's high solar irradiation potential.

## 2. Findings and Discussions

### 2.1 Energy Access Challenges in Archipelagic Region

#### Local Government of Sumenep (Agency for Planning and Development Agency and Village Empowerment Agency)

The findings highlight that geographical fragmentation is the main structural barrier to achieving universal and reliable electricity access in Sumenep. Out of the many islands in the regency, only 21 islands currently have electricity infrastructure, dominated by diesel power plants and limited solar or hybrid systems. This condition has reinforced regional inequality. Bappeda Sumenep Regency confirmed that most poverty concentrations in Sumenep are located in island areas where electricity access remains limited. The lack of cold storage facilities for fisheries, for example, forces fishermen to discard fish during peak harvest seasons due to the absence of ice production. This illustrates how energy poverty directly translates into economic vulnerability, limiting opportunities for income generation and value-added activities.

In terms of utilization, one of the most critical findings relates to the sustainability of solar energy systems. Communal solar plants often fail after several years, not due to technological limitations but because of weak maintenance culture and lack of community ownership. High replacement costs for batteries and inverters further exacerbate the problem. However, institutional support remains limited. Although DPMD expressed readiness to involve BUMDes in renewable energy management, no fully community-managed PLTS has yet been implemented. This indicates a gap between policy aspirations and actual operational frameworks.

### 2.2. Solar Energy Initiatives and Institutional Settings

#### Islamic Boarding School and Government Roof Top of Sumenep Regency

One of the most successful solar energy implementations in Sumenep can be observed at Pesantren Annuqayah, which received a 30.73 kWp on-grid rooftop solar PV system through a CSR program initiated by PT Paiton Energy in collaboration with IBEKA. The system supplies approximately 40% of the pesantren's electricity needs, supporting schools, dormitories, and religious facilities. Beyond energy provision, the installation serves as an

environmental education tool for students and surrounding communities. A key success factor in this case is strong local capacity building. The pesantren's internal technicians were trained for six months, enabling them to manage installation, operation, and routine maintenance independently.

Similarly, the Sumenep Regency Government installed a 50 kWp rooftop solar PV system at the Regent's Office through a grant from the Ministry of Energy and Mineral Resources. The system contributes 30–40% of the building's electricity consumption, symbolizing the government commitment to clean energy transition. Nevertheless, sustainability has been weakened by limited technical capacity following staff turnover, resulting in maintenance being reduced to simple panel cleaning without proper system monitoring. Technical issues such as abnormal inverter noise have also emerged without adequate troubleshooting mechanisms.

### **2.3. Community-Based and Tourism Sector Application Lombang Beaches**

In the tourism sector, Pantai Lombang represents a localized attempt to integrate renewable energy solutions into destination infrastructure, particularly through solar-powered public street lights and a portable charging station provided as part of external assistance initiatives. The beach itself is jointly managed by the local government and the community through the Pokdarwis (Tourism Awareness Group), creating a dual governance structure. While the eastern part of the beach falls under government administration, the western side is managed independently by Pokdarwis, resulting in visible disparities in infrastructure quality, waste management systems, and facility maintenance.

Pokdarwis plays a crucial role as a grassroots tourism institution responsible for daily operations, visitor services, and community-based management of the western coastal area. In relation to renewable energy initiatives, Pokdarwis members were also involved in safeguarding and informally managing the solar-powered charging station provided by ITS. Due to the high risk of theft and material degradation caused by the corrosive coastal environment, the device was stored by one of the Pokdarwis administrators rather than being permanently installed for public use. This reflects both the community's awareness of asset protection and the absence of formal operational guidelines for renewable energy facilities in tourism sites.

However, despite Pokdarwis active involvement in tourism management, the solar-powered public street lights installed earlier have ceased functioning and have not been repaired. Responsibility for these lights remains unclear, as street lighting is generally under government authority, while Pokdarwis lacks both technical capacity and budget allocation for maintenance.

### **2.4 Governance, Land Issues, and Investment Barriers The Support of Local Government and State-Owned Electricity Enterprise (PLN)**

Renewable energy transition in Sumenep Regency is primarily driven by top-down government initiatives aimed at ensuring energy equity in island regions, rather than by market incentives. Local development planning agencies such as Bappeda and DPMD play roles in policy coordination and limited renewable programs, while large-scale electrification and solar power deployment remain under PLN's authority. This fragmented governance structure results in weak coordination, limited data integration, and unclear accountability, reducing the effectiveness of renewable energy planning. Although communities strongly demand reliable electricity, project implementation depends heavily on government goodwill, budget availability, and PLN's feasibility considerations. Land availability and legal status present significant structural barriers to solar energy investment, particularly for off-grid and hybrid systems in island areas. Solar installations require large land areas that may belong to local governments, villages, PLN, or private individuals. Investment constraints are closely linked to both governance and geographic conditions. Electrification in island regions is considered high-cost and low-return by PLN due to expensive infrastructure logistics and small customer bases.

# A High-Resolution Comparative Analysis of Appliance Usage Behavior in Rural and Urban Malaysian Households

ChiaKwang Tan<sup>1</sup>, Lingyao Xu<sup>1</sup>, Christopher Wesley Ajan<sup>2</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>3</sup>, Cravioto Jordi<sup>3</sup>, Muhammad Asyraf Mansor<sup>4</sup>, Shoki Kosai<sup>5</sup>

<sup>1</sup>UMPEDAC, University of Malaya, <sup>2</sup>Sarawak Energy Berhad, <sup>3</sup>Institute of Advanced Energy, Kyoto University, <sup>4</sup>Universiti Malaya Community Engagement Centre Universiti Malaya, <sup>5</sup>College of Gastronomy Management, Ritsumeikan University

## 1. Introduction

Residential energy consumption is a critical driver of global power demand, yet most Malaysian studies rely on aggregated surveys rather than appliance-level monitoring. This study addresses a significant gap by comparing high-resolution usage behaviors between rural households reliant on off-grid solar systems and urban households with stable grid connections. Understanding these disparities is essential for designing effective rural electrification strategies and optimizing demand-side management (DSM) in urban centers.

## 2. Objectives

- (1) Develop a high-resolution, appliance-based analytical framework for behavioral comparison.
- (2) Extract behavioral features using BULM parameters, usage probability, and Statistical Parameter Index.
- (3) Compare rural vs. urban consumption to inform Demand-Side Management (DSM) and rural electrification policies.

## 3. Methodology

As seen in Fig.1, We employed a multi-layered analytical framework on high-resolution logger data collected from two representative households: a rural home in Sarawak powered by a standalone solar system, and a grid-connected urban home in Selangor. The methodology integrates three feature extraction techniques: Bottom-Up Load Modeling (BULM) to simulate daily profiles, state-based probability analysis to map usage consistency, and the Statistical Parameter Index (SPI) to quantify cycle-level metrics such as frequency and energy intensity.

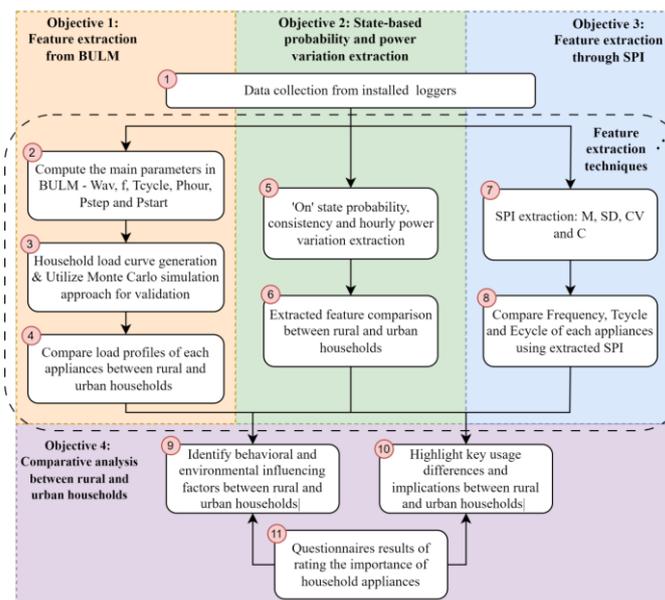


Fig.1. Workflow for methodology.

The rural household possesses 6 appliances, whereas the urban household has 13 appliances. We refer to the shared appliances of both families as 'Core appliances', while the remaining appliances in urban households are designated as 'Exclusive appliances'.

**4. Result and Discussion**

Simulated load profiles reveal distinct consumption hierarchies, as depicted in Figure 2. The urban household exhibits a dynamic, peak-driven profile with usage exceeding 1200 W, primarily fueled by high-power appliances like air conditioning and water heaters. Conversely, the rural household maintains a conservative, flat load profile generally under 400 W, where the refrigerator dominates nearly half of the total energy demand due to the absence of competing high-load devices. These patterns highlight how infrastructure constraints in rural areas enforce energy-conserving behaviors compared to the convenience-driven lifestyle of urban residents.

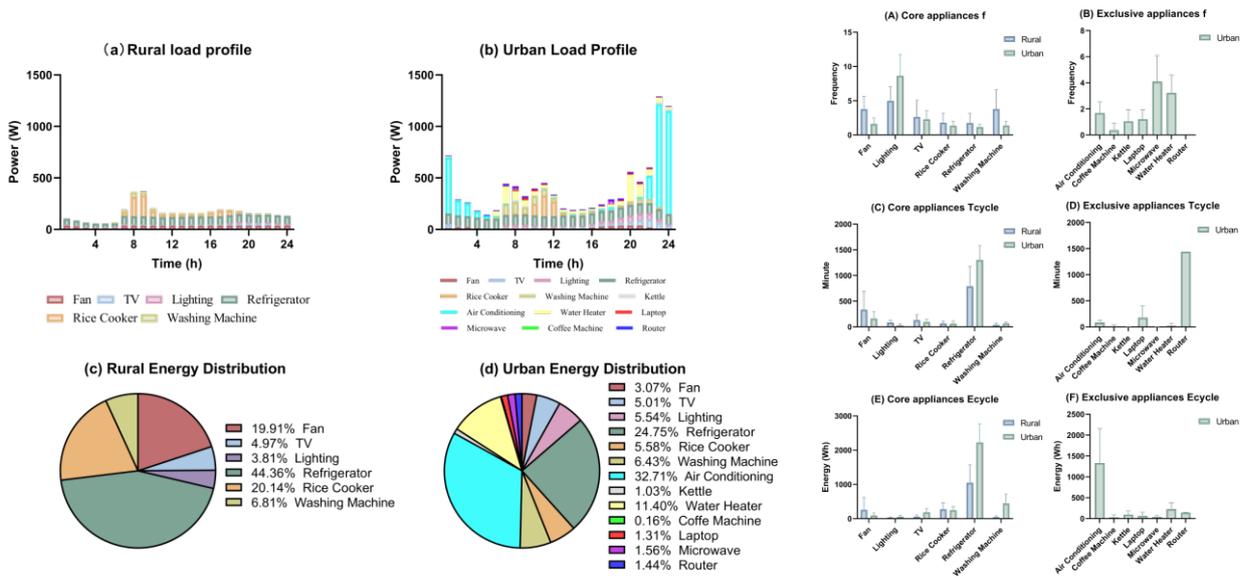


Fig.2. Average daily load profiles and energy distribution for two households. (a), (b): Average daily load profile. (c), (d): Energy distribution; Fig.3. Variation of Frequency, Tycle and Eycle.

The Statistical Parameter Index (SPI) reveals distinct behavioral disparities, as seen in Figure 3. Rural households rely heavily on fans, exhibiting significantly higher usage frequency (3.77 vs. 1.60 times/day) and energy per cycle (255 Wh vs. 92 Wh) compared to urban homes, reflecting a lack of air conditioning. In contrast, urban households demonstrate higher energy intensity for modern conveniences such as air conditioning and water heaters. Urban TVs and refrigerators consume double to triple the energy per cycle compared to rural counterparts, driven by larger screens and continuous grid operation. Overall, urban usage is characterized by high-power stability, while rural patterns are defined by necessity and solar resource constraints.

**5. Conclusion**

This study confirms that energy behavior is not uniform but heavily shaped by infrastructure, lifestyle, and environment. Rural usage is defined by "solar-constrained" simplicity, while urban usage is characterized by "peak-driven" diversity. These insights suggest that rural electrification policies must prioritize efficient core appliances to match solar availability, while urban energy planning should focus on DSM strategies to mitigate peak loads caused by thermal comfort appliances.

# アルミニウムフリーマグネシウム合金への リン酸カルシウムコーティングおよび微細構造評価

藪塚 武史<sup>1</sup>、西川 洗平<sup>1</sup>、高井 茂臣<sup>1</sup>、八木 重郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院エネルギー科学研究科

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 緒言

骨折治療などに用いられる金属製インプラントは、治癒後に抜去手術が必要となり患者への負担が大きい。生体吸収性を示すマグネシウム (Mg) 合金は骨に近い弾性率を持つ利点があるが、生体内での腐食速度が速すぎることで、そして腐食時に発生する水素ガスが組織再生を阻害することが課題である。本研究では、耐食性向上を目的とした表面改質技術として、高価な装置を必要としない水溶液法によりアルミニウムフリーの Mg-Zn-Zr 合金表面に生体吸収性リン酸八カルシウム (OCP) 被膜を形成する手法を開発した。OCP 被膜形成の前処理として行う陽極酸化処理が OCP 被膜形成と Mg 合金の耐食性に与える影響を調べた。

## 2. 実験

Mg-Zn-Zr 合金板を表面研磨した。研磨後、1 M NaOH 水溶液中で 15 V、200 s の陽極酸化処理を行った。pH 6.0、36.5 °C に調整した反応溶液 (6.0 mM K<sup>+</sup>、7.5 mM Ca<sup>2+</sup>、3.0 mM HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、15.0 mM Cl<sup>-</sup>) を調製し、研磨後ならびに陽極酸化処理後の試料を 12 時間浸漬した。各試料を擬似体液 (pH 7.40、36.5 °C) に 7 日間浸漬した。Mg-Zn-Zr 合金の腐食に伴い発生する水素ガスを捕集し、その体積を経時的に計量することで耐食性を評価した。SEM、EDX、薄膜 XRD、FT-IR を用いて、各段階の試料表面の形態、組成、結晶相を評価した。

## 3. 結果および考察

上述の反応溶液への浸漬により、研磨後および陽極酸化処理後の試料表面には、リン酸八カルシウム (OCP) の鱗片状結晶が形成されたことがわかった。擬似体液中的の水素発生量評価の結果、陽極酸化処理後に反応溶液に浸漬した試料が最も耐食性を示すことがわかった。陽極酸化処理後に反応溶液に浸漬した試料は、研磨のみの試料と比較して水素発生量を 46% 抑制した。これは、陽極酸化被膜と OCP 被膜の相乗効果によるものと考えられる。一方、研磨後に陽極酸化処理のみを行った試料、陽極酸化処理を経ずに反応溶液に浸漬した試料における水素発生量は、研磨のみの試料と比較してそれぞれ 35%、37% の抑制が認められた。以上の結果から、Mg-Zn-Zr 合金に陽極酸化処理を施した上で反応溶液に浸漬し OCP 被膜を形成する本手法は、耐食性を大幅に向上させる上で有効であることが示された。

### [論文発表リスト]

1. Yuwei Wu, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, "Fabrication of Bioactive, 3D-Printed, Porous, Yttria-Stabilized Zirconia via Mg/Zn-Incorporated Modified Simulated Body Fluid Pretreatment" *International Journal of Molecular Sciences*, **26**, 10950-10950 (Nov 12, 2025). 発行済
2. 藪塚 武史, "アパタイトカプセル表面における酵素吸着・固定化挙動の検証", *アグリバイオ*, **9**, 1037-1041 (2025 年 10 月 20 日). 発行済
3. 藪塚 武史, "卓越した生体活性の実現を指向したアパタイト核担持ポリエーテルエーテルケトンの界面設計", *細胞*, **57**, 893-897 (2025 年 10 月 10 日). 発行済
4. 藪塚武史, "アパタイト核による界面制御に着目したポリエーテルエーテルケトンの生体活性機能デザイン", *細胞*, **57**, 624-628 (2025 年 7 月 20 日). 発行済

5. Takeshi Yabutsuka, Kota Nakanishi, Shigeomi Takai, “Effect of Surface Functional Groups and Calcium Ion Adsorption on Formation of Polystyrene/Apatite Core–Shell Microspheres by Aqueous Solution Method”, *Journal of Composites Science*, **9**, 323-323 (Jun 24, 2025). 発行済
6. Yuwei Wu, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, “Enhancement of Bioactivity of Zr-50Ti Alloys through Sulfuric Acid Treatment Followed by Modified Simulated Body Fluid Treatment”, *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, **72**, S971-S976 (Mar 15, 2025). 発行済

[口頭発表リスト]

1. 藪塚武史, 西川洗平, 木田俊太郎, 高井茂臣, 八木重郎, “アルミニウムフリーマグネシウム合金へのリン酸カルシウムコーティングおよび微細構造評価”, 2025年度 ZE 拠点年会, 2025年12月11日, 京都大学宇治キャンパス.
2. Takeshi Yabutsuka, “Impartation of osteoconductivity to polymeric implant materials focusing on interface control with bioactive ceramic process”, Poland-KUMP Joint Mini-Symposium on Biomedical Materials, 2025年11月6日, 関西大学吹田キャンパス (招待講演).
3. 藪塚 武史, “低結晶性アパタイト前駆体微粒子を用いた界面制御による生体活性材料機能の構築”, 日本セラミックス協会第38回秋季シンポジウム, 2025年9月18日, 群馬大学荒牧キャンパス (招待講演).
4. 西川洗平, 木田俊太郎, 高井茂臣, 藪塚武史, “アルミニウムフリー生体吸収性マグネシウム合金表面におけるリン酸八カルシウム被膜の水溶液合成”, 日本バイオマテリアル学会関西ブロック第20回若手研究発表会, 2025年8月2日, 大阪歯科大学.
5. Takeshi Yabutsuka, “Development of Bio-environment Compatible Materials by Surface Modification Techniques with Apatite Nuclei —from Biomedicine to Environmental Technologies—”, CNU-KU Collaborative Symposium on Advanced Energy Materials, 2025年7月18日, Chonnam University, Korea (招待講演).
6. 藪塚武史, “アパタイト核による表面修飾を基調とした生体活性医療用複合材料の開発”, 第58回ケミカルエンジニアリング交流会, 2025年6月13日, あきた芸術劇場ミルハス (招待講演).

# コヒーレントエッジ放射観測による 自由電子レーザー相互作用の解明

清 紀弘<sup>1</sup>, 全 炳俊<sup>2</sup>, 大垣 英明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門

<sup>2</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

相対論的電子ビームが周期電磁場中を運動することで生成する自由電子レーザー (FEL) は、ミリ波から X 線に至るあらゆる波長で発振が可能である。FEL の発振技術開発に貢献するため、産業技術総合研究所は京都大学エネルギー理工学研究所と共同し、FEL 施設 KU-FEL にて、テラヘルツ帯コヒーレント放射源の開発とそれを利用した電子ビーム計測技術の研究を推進している。コヒーレント放射には電子バンチの運動方向の電子密度情報が含まれており、そのスペクトルを観測することで電子密度分布を評価することができる。我々は FEL 直線部下流偏向磁石から電子ビームが射出するコヒーレントエッジ放射 (CER) を、中空平面鏡を利用して FEL 発振を抑制することなく FEL 共振器から取り出すことに成功した。そして FEL 発振中の CER スペクトルを観測することで、FEL 相互作用により FEL 共振器の共振器長に依存した電子バンチ変形が誘起されていることを発見した [1]。今年度は改修した CER の分離システムを利用し、複数の帯域にて同時に CER 強度のマクロパルス内時間発展を測定した。

## 2. 実験方法

FEL 直線部下流偏向磁石の上流端面にて電子ビームが射出した CER ビームは、改修された CER 分離システムにて FEL 共振器から分離され、結晶石窓を介して大気中へと射出される。この CER 分離システムは、FEL 光軸に対して水平方向に 45 度傾き、有効直径が 15 mm および 21 mm の楕円形の孔が空いた中空平面鏡を挿入できる。中空平面鏡の位置を水平面内にて調整できるので、波長 5.8  $\mu\text{m}$  における FEL に対しては、小さい孔の中空平面鏡でも回折損失が増大しないことを確認した。

大気中に射出された CER ビームは焦点距離 500 mm の凹面鏡にて緩やかに集光されて、入射角 45 度に設定した厚さ 2 mm の ZEONEX<sup>®</sup> 平行板およびサファイア平行板にて分光される。前者にて反射された CER ビームの低周波数成分はペリクル (エドモンド社: #39-487) にて更に分光することが可能であるが、今回の実験では分光せずに W-band 帯の成分のみピラミッド型アンテナ付きの検波器を使用して時間波形を測定した。厚さ 0.1 mm のサファイア板は、0.67 THz の CER の約 6 割を反射し、1.0 THz の CER の約 9 割を透過することができる。

分光後にそれぞれ放物面鏡にて集光し、0.67 THz (QMC Instruments: 0.67THz) および 1.0 THz (Sensor- und Lasertechnik: BP-1000B) を周波数中心としたバンドパスフィルターを直前に配置した検波器 (TeraSense: Ultrafast-150) にて時間波形を測定した。CER の分離システム及び分光測定システムを図 1 に示す。

CER ビームの時間波形測定は、熱陰極電子銃を用いて電子ビームエネルギーを 35 MeV に設定して実施した。電子ビームのマクロパルス幅は約 6.9  $\mu\text{s}$  である。平面アンジュレータの  $K$  値は 1.52 に設定した。

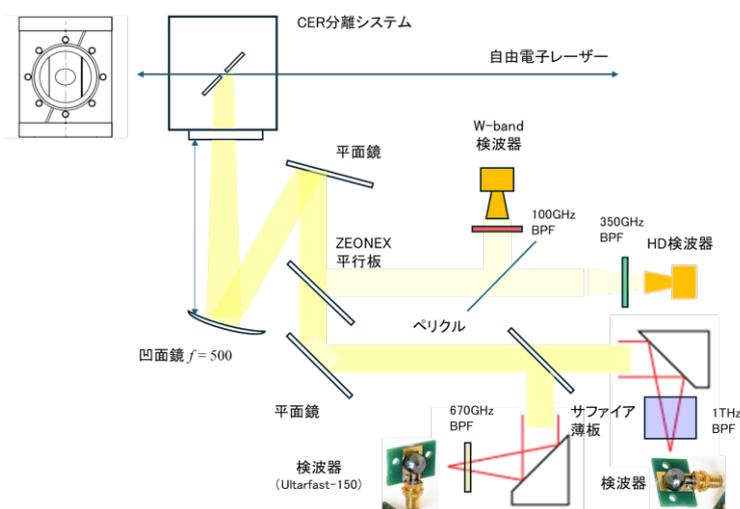


図 1 KU-FEL の CER 分離システム及び測定システム。

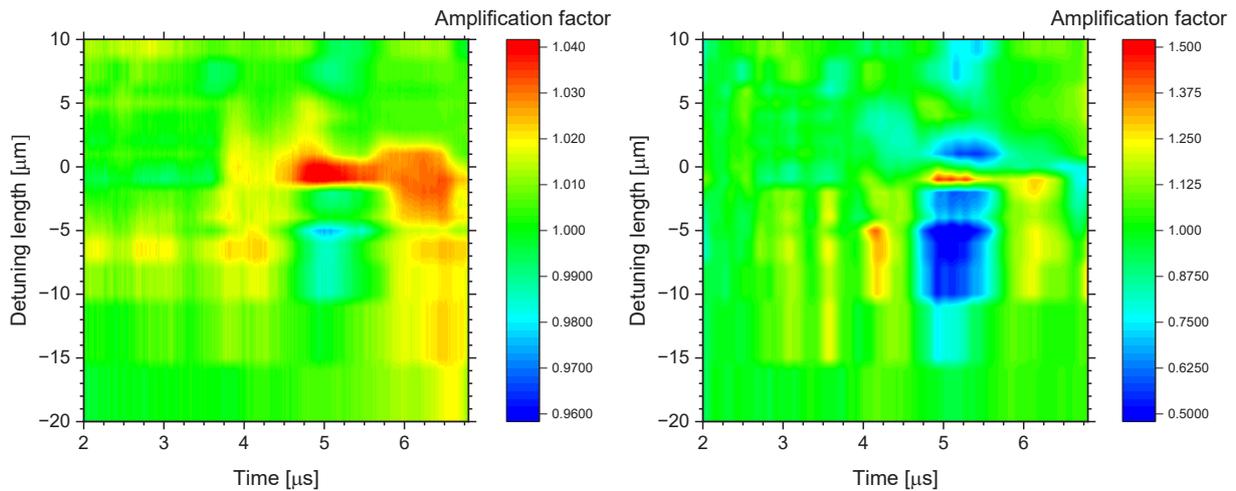


図2 CER 相対強度の時間発展の共振器長依存性。周波数帯は W-band (左) と 1.0 THz 帯

### 3. 実験結果

FEL は波長  $8.05 \mu\text{m}$  を中心に発振し、制御室にて観測されたマクロパルスあたりの最大 FEL エネルギーは約  $70 \text{ mJ}$  であった。中空平面鏡は有効径が  $15 \text{ mm}$  のものを選択し、FEL の回折損失は  $4.0\%$  であった。W-band、 $0.67 \text{ THz}$  帯および  $1.0 \text{ THz}$  帯における CER 強度の時間発展を、幾つかの FEL 共振器の共振器長に対して測定した。このうち W-band と  $1.0 \text{ THz}$  帯について、上流共振器鏡の前にシャッターを入れて測定した CER 強度時間発展を基に規格化した結果を図 2 に示す。W-band でも CER 強度変化はあるが、その比率は  $\pm 4\%$  以内と小さい。一方で周波数の高い  $1.0 \text{ THz}$  帯では CER 強度変化比は  $\pm 50\%$  程度と大きく、バンチ長が著しく変化していることを示唆している。マクロパルス内で電荷量の大きな時刻  $6 \sim 7 \mu\text{s}$  付近において、ディチューニング長が負から正に変化する際に CER 強度も 1 倍以上から 1 倍以下へと反転していることがわかる。FEL 相互作用によって、バンチ長が圧縮から伸長へと変化していることが確認できた。

### 4. まとめと今後の展開

改修した CER 分離システムを使用して、FEL 発振中における CER 強度のマクロパルス内時間発展を、複数の帯域において同時に測定することに成功した。共振器のディチューニング長が負から正になる際に、FEL 相互作用によってバンチ長が圧縮から伸長へと変化していることが確認された。今後は、マクロパルス内の電荷量変化が小さい光陰極運転を使用して、FEL 相互作用によるバンチ長変化について定量測定を実施する予定である。

#### 参考文献

1. N. Sei, H. Zen, and H. Ohgaki, Phys. Scr. **98** (2023) 025510.

#### 発表リスト

##### [論文発表リスト]

- N. Sei, T. Sakai, H. Zen, H. Ohgaki, "Proposal of Difference-Frequency Wave Amplification Induced by Dual-wavelength Free-electron laser oscillations", (Invited, submitted to Photonics)

##### [口頭発表リスト]

- 清 紀弘、「赤外光源の基礎と現状」、新版 赤外線工学—基礎から応用まで—出版記念講習会、2025/7/4、口頭発表（招待講演）
- 清 紀弘、境 武志、大垣 英明、全 炳俊、「二波長自由電子レーザー発振が誘起する差周波増幅の検討」、第 34 回 日本赤外線学会研究発表会、2024/11/6、口頭発表
- 清 紀弘、大垣 英明、全 炳俊、境 武志、金安 達夫、「光クライストロンを使用した二波長 FEL による差周波増幅観測の検討」、第 32 回 FEL と High-power Radiation 研究会、2024/12/18、口頭発表

# Li-Br/F/I 系溶融塩の核融合炉液体ブランケットへの中性子工学的成立性および材料共存性の研究

荻野靖之<sup>1</sup>, 八木重郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学金属材料研究所

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究背景・目的

核融合炉液体増殖・増倍材ブランケットにおいては、液体金属または溶融塩を用いることが想定されており、今日までに種々の材料候補が挙げられている。液体ブランケットに求められる材料特性のうち、炉内でのトリチウム増殖比 (TBR) が 1 を越え、燃料の自給自足が行える組成であること、また構造材との腐食やブランケットシステムで適用温度範囲に収まっている必要があるなどの要求があり、これらの性能を有する新たな材料が検討されている。

FLiBe をはじめとする一部の溶融塩は TBR の高い溶融塩として候補であるが、その高い融点 (FLiBe は 460°C) から、配管部をはじめとするブランケットシステム全体の設計要件を制限することとなり、工学的成立性の観点から早期の実装が困難であると考えられる。これに対し、一般に Br/F/I 系溶融塩は既往候補材料である FLiBe や FLiNaK と比較してより低い融点を持つことから、より温度領域での運用が期待でき、また従来検討していた LiCl-KCl 溶融塩に対して塩素を含まないことから、効率的な増殖反応による燃料トリチウム生産が期待される。

そこで、2024 年度より Li-Br/F/I 系溶融塩を新たに調査し、その中性子工学的成立性の検証を実施した。中性子輸送計算により、ハロゲン系溶融塩の一部の組成において既存の候補材料である LiCl-KCl よりも低い融点を有することが確認された。また、これらの TBR は FLiBe を下回るものの LiCl-KCl より高いことが計算によって明らかとなり、増殖性能において優れていることが示された。

本研究では、これら溶融塩について、その核融合炉へ適合する中性子工学的成立性の検証の継続およびラボスケールでの試作・物理特性の測定を行うことを目的とする。

## 2. 検討手法

トリチウム増殖性能の検証では、昨年度までに行った計算結果をもとに、中性子増倍材を体系中に組み込むことでよりトリチウム増殖性を高め、従来の液体金属・溶融塩との比較を行った。計算において使用する核融合炉体系は、米国にて行われた炉設計研究である ARIES-ST の球状トカマクを参照した体系を構築した。構造材には SiC<sub>f</sub>/SiC を採用し、インボード・アウトボードともにブランケットを配置した。TF コイルは中心を通る部分のみを考慮して計算体系に反映し、ブランケットの最外縁部以降は大気として設定、そのさらに外側に輸送境界を設定した。また、二元系臭化物系溶融塩 LiBr-KBr、および二元系・三元系ヨウ化物系溶融塩



図 1 溶融塩サンプルペレット (LiBr-KBr, LiI-KI)

LiI-KI、LiI-KI-CsI についてグローブボックス内での試作を行い、温度変化を伴う溶融状態での密度測定の実施、およびレーザーフラッシュ法による熱拡散率の測定を試みた。溶融塩サンプルは図 1 のような、直径 10 mm 厚さ 2 mm のペレット状のものを作成した。

3. 結果

既存の候補材料に LiBr-KBr、LiI-KI、LiI-KI-CsI を加えた各液体金属・溶融塩について、ST 体系中での TBR を計算し、融点ごとに比較したものを図2・表1に示す。Be 増倍材のない場合の TBR はそれ自体に中性子増倍材を有する FLiBe、Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> には劣るものの、LiCl と同等もしくはそれ以上の TBR であることが示された。Be 増倍材を加えた場合は、LiCl-KCl および LiBr-KBr の TBR が FLiBe、Li の TBR と同等の値を示した。

二元系臭化物系溶融塩 LiBr-KBr、および二元系・三元系ヨウ化物系溶融塩 LiI-KI、LiI-KI-CsI についてグローブボックス内での試作を行い、温度変化を伴う溶融状態での密度測定を実施した結果を図3に示す。既存の液体金属 LiPb と比較したところ、溶融塩の密度は実使用温度（200 度～500 度付近）において顕著な変化を示さず、安定していることが示された。一方で、熱拡散率の測定を試みたが、レーザーフラッシュ法による測定は試作したペレットの密度不足および黒化処理の困難さにより正しい値が得られず断念するに至った。

4. 結論

本研究によって、Be 増倍材を体系内に組み込むことで、既存の溶融塩に加えて新たに LiBr-KBr が液体ブランケット材料として十分な TBR を有し、核融合炉へ適用できることが示された。また、ラボスケールでの溶融塩試作については、実用温度範囲における密度測定を実施し、LiPb よりも実使用温度範囲での密度安定性に優れることが示された。

今後は、増倍材（特に Be）を含有する、よりブランケットへ適合しうる低融点溶融塩の調査、および溶融塩を用いた比熱の測定、F82H など構造材料との共存性試験などを行い、液体ブランケット材料としての成立性を検討していく予定である。

[口頭発表リスト]

荻野靖之、八木重郎、「Li-Br/F/I 系溶融塩の核融合炉液体ブランケットへの中性子工学的成立性および材料共存性の研究」、2025 年度 ZE 拠点年会（口頭・招待）

Yasuyuki Ogino, Juro Yagi, “Neutronics feasibility and compatibility of halogen-based molten salts applied for fusion reactor liquid blanket.” 16th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-16), 2025. Knoxville, USA. (Poster)

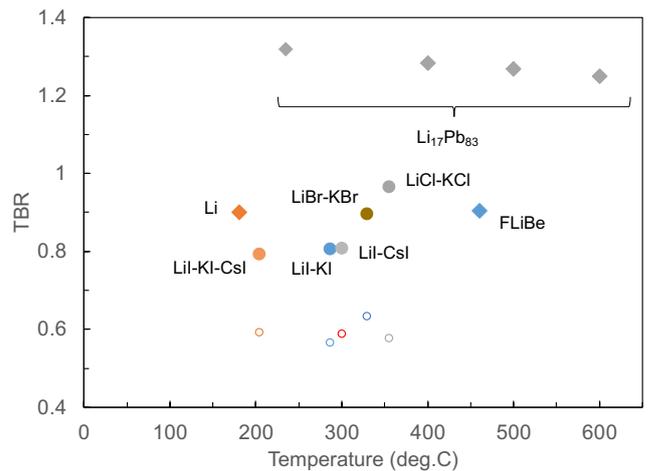


図2 TBR 計算結果（白抜きは Be 増倍材なし）

表1 液体金属・溶融塩の融点・密度・TBR

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Melting point (°C)	Li composition (at%)	TBR*
Li <sub>17</sub> Pb <sub>83</sub>	9.52	235	17	1.32
Li	0.534	180.5	100	0.90
FLiBe	1.94	460	33.5	0.90
LiCl-KCl	1.71	355	29.4	0.58/0.97
LiBr-KBr	2.75	329	30	0.64/0.90
LiI-KI	3.07	286	31.6	0.57/0.81
LiI-CsI	3.30	300	33	0.59/0.81
LiI-KI-CsI	3.80	204	31	0.59/0.80

\*TBR は Be 増倍材なし/Be 増倍材ありの値

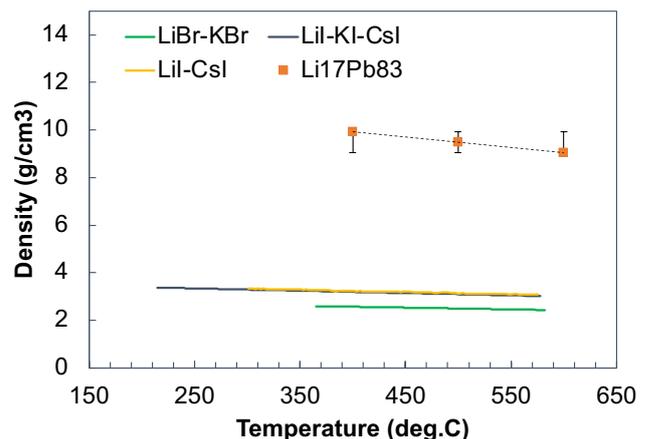


図3 液体金属・溶融塩サンプルの密度測定結果

# 構造の不完全性が原子層物質に誘起する物性の探索

岡田晋<sup>1</sup>, 丸山実那<sup>1</sup>, 高燕林<sup>1</sup>, 松田一成<sup>2</sup>

<sup>1</sup>筑波大学数理物質系

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. ヤヌス遷移金属カルコゲン化合物ナノスクロールのエネルギー論と電子物性

遷移金属原子層が異なるカルコゲン原子層によって挟まれたヤヌス遷移金属カルコゲン化合物は、その構造の非対称性からスクロール状のユニークな大局構造を形成することが知られている。ここではヤヌス WSe に注目して、密度汎関数理論を用い、WSe ナノスクロール構造のエネルギー安定性と電子物性の解明を行った。計算の結果、WSe ナノスクロールはエネルギー的に WSe の平面構造より安定であり、WSe は本質的にスクロール構造をその基底状態構造として取り得ることが明らかになった。WSe ナノチューブ、2層 WSe のエネルギー論から、ナノスクロールの安定性は曲げによる非対称な歪みの緩和と層間の強いファンデルワール相互作用によるものである。次に、種々の WSe ナノスクロール構造に対する電子状態解析の結果、WSe ナノスクロールはスクロールに沿って一様な組成を有するにも関わらず、内壁と外壁の間で Type-II 型のバンド端配置を有する半導体となることが明らかになった [図 1]。このことは、スクロールに沿った電気伝導パスを構築することにより一様組成からなる整流素子応用の可能性を示したものである。

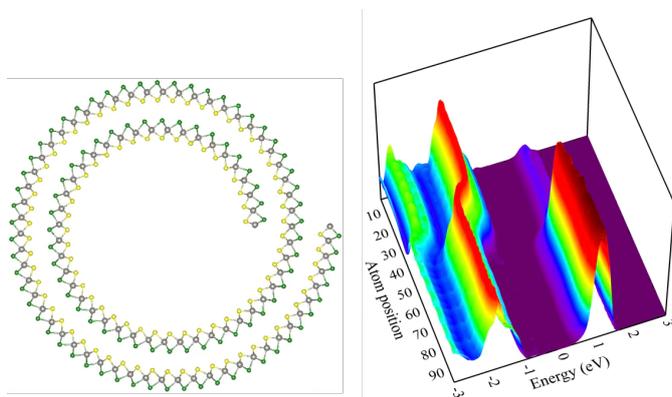


図 1. ヤヌス WSe ナノスクロールの構造と局所電子状態密度(pDOS). 黄色が硫黄原子、緑がセレン原子、灰色がタングステン原子を表す。

## 2. スマネンカラムを用いた遷移金属カルコゲン化合物の電子物性制御

炭化水素分子スマネンは、そのお椀状構造と端の終端水素原子から、お椀鉛直方向に双極子モーメントを有することが知られている。我々は、これまで2層グラフェンの層間へのスマネン分子インターカレーションによる上下グラフェン間での電荷再分布の可能性を提示した。ここでは、スマネンが互いに積層したカラム構造を凝集相として取り得ること、カラムの双極子モーメントが分子の線形和で与えられることに着目し、遷移金属カルコゲン化合物表面へのスマネンカラム吸着による電子物性制御の可能性の探索を行った。密度汎関数理論を用いて、1~4個のスマネンがスタックしたカラムが吸着した WS<sub>2</sub> のエネルギー論と電子構造の解明を行った。計算の結果、スマネンカラムの向きと長さに依存して、WS<sub>2</sub> のバンド端エネルギーがほぼ線形に制御可能であることが明らかになった [図 2]。また、スマネンカラムを用いた表面部分修飾により、WS<sub>2</sub> に対して有効的な pn 接合界面を構築することが可能であることを予言した。

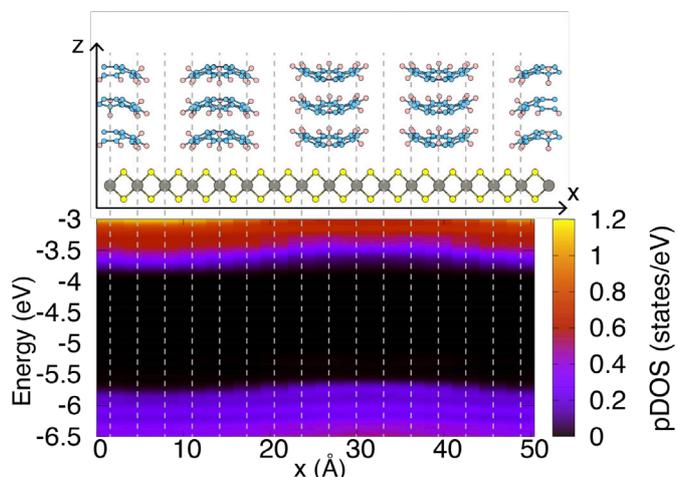


図 2. スマネンカラム吸着による WS<sub>2</sub> バンド端変調。

### 3. 捩れ積層六方晶窒化硼素にバンド端局在

捻り積層を有する原子層物質では、空間的に非一様な層間相互作用に起因するユニークな電子物性が発現する。ここでは、原子層物質に対して絶縁基板として注目を集める六方晶窒化硼素(hBN)について、その捩れ積層系の構造と電子物性の理論探索を行った。計算の結果、層間の束縛エネルギーは捻れ角に対しほとんど依存しないこと、また、ここで取り扱った捩れ角の範囲(9~28度)では面内ならびに面鉛直方向での有意な構造緩和は生じないことが明らかになった。他方、電子構造に関しては、比較的大きな捩れ角である9度において、価電子バンド端がバルクバンドから孤立し、平坦化の兆しを見せることを明らかにした。さらに、その波動関数分布の解析から、価電子バンド端が層間において窒素が積層する領域に局在することを明らかにした[図3]。これは、局所的に窒素原子のpz軌道の強い層間相互作用によるバンド分裂に起因する。この結果は、比較的大きな捩れ角を有する2層hBNにおいて、バンド端制御による量子井戸列の実現可能性を示唆している。

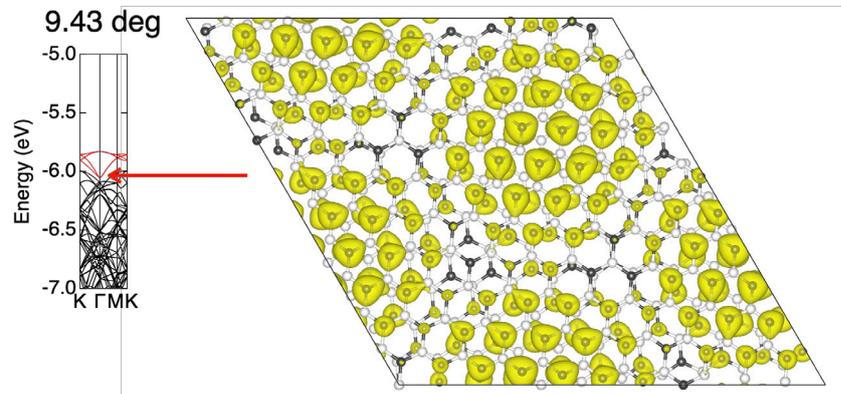


図3. 捩れ角 9.43 度を有する 2 層 hBN の価電子端近傍のバンド構造と価電子端の波動関数分布.白丸が N 灰色が B 原子を表す。

これは、局所的に窒素原子のpz軌道の強い層間相互作用によるバンド分裂に起因する。この結果は、比較的大きな捩れ角を有する2層hBNにおいて、バンド端制御による量子井戸列の実現可能性を示唆している。

#### [論文発表リスト]

- [1] Y. Gao, S. Okada, “Energetics and electronic structures of Janus WSSe nanoscroll”, ACS Appl. Electron. Mater. 7, 5861 (2025).
- [2] M. Maruyama, S. Okada, “Band engineering of monolayer WS<sub>2</sub> by sumanene columns”, ACS Appl. Electron. Mater. 7, 6885 (2025).
- [3] N. Sultana, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, “Anomalous electrostatic properties of double-walled BN nanotubes”, Jpn. J. Appl. Phys. 64, 065001 (2025).
- [4] M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, “Band-edge localization of twisted bilayer hBN”, J. Phys. Soc. Jpn. 94, 073702 (2025).
- [5] M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, “Formation of type-I quantum wells in hexagonal boron nitride bilayers with strain-induced Moire superlattice”, Jpn. J. Appl. Phys. 64, 75004 (2025).
- [6] T. Mizoguchi, M. Maruyama, Y. Hatsugai, S. Okada, “Evolution of flat bands in two-dimensional fused pentagon network”, Phys. Rev. B 112, 085421 (2025).

#### [受賞]

第20回(2026年)日本物理学会若手奨励賞(日本物理学会), 2025年11月、丸山実那、原子層物質の電場効果に関する理論研究

# 高効率・高機能エネルギー変換に向けた量子物質の基礎物性の解明

小鍋哲<sup>1</sup>, 宮内雄平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>法政大学生命科学部環境応用化学科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 本研究の目的

キルヒホッフの法則を破る「非相反熱輻射」は、熱光起電力発電 (TPV) などのエネルギー変換効率における理論的限界 (Shockley-Queisser 限界) を超えるための重要な手段として期待されている。しかし、薄膜極限において達成可能な非相反性の強さや帯域幅が、物質のどのような基本的性質によって制限されるのかは未解明であった。本研究では、非相反熱輻射の物理的限界を明らかにするため、真空中の自立極薄膜における「半球平均非相反性」の上限を理論的に導出することを目的とした。特に、近年物性物理学で注目されている電子状態の幾何学的量である「量子重み (Quantum Weight)」に着目し、熱輻射特性と量子幾何学との直接的な関係を解明することを目指した。

## 2. 研究の背景

TPV や放射冷却において、熱輻射スペクトルの制御は極めて重要である。特に、エミッターを光学的に薄い膜 (薄膜) にすることで、不要な吸収を抑え、スペクトルを整形する手法が有効であるとされている。これまでに、カーボンナノチューブや遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) などの低次元量子物質を用いた薄膜エミッターの研究が進められてきた。一方、エネルギー変換効率を最大化するには、時間反転対称性を破り、放射と吸収のバランス (詳細釣り合い) を崩す「非相反性」の導入が不可欠である。しかし、薄膜系において、どの程度の非相反性が原理的に実現可能かは明らかではなかった。最近、Onishi と Fu によって、物質の光吸収スペクトルの周波数積分 (対数重み付き) が、電子基底状態の「量子重み」と呼ばれる幾何学的量で上から抑えられるという総和則が導かれた [Phys. Rev. X **14**, 011052 (2024)]。本研究では、この総和則を一般化されたキルヒホッフの法則および薄膜の光学的受動性 (Passivity) の条件と組み合わせることで、熱輻射の非相反性に対する普遍的な限界式を導出した。

## 3. 結果

本研究では、半球平均したスペクトル放射率  $\epsilon$  と吸収率  $\alpha$  の差 (非相反性) の対数周波数モーメント  $N$  を性能指数として定義し、その上限を解析的に導出した。その結果、以下の不等式が得られた。

$$N \leq \frac{8}{3}\beta K$$

ここで、 $\beta$  は定数、 $K$  は電子状態の量子重み (量子計量のブリルアンゾーン積分) である。この式は、達成可能な非相反性の総量が、物質固有の量子重みによって制限されることを示している。

さらに、ある周波数帯域  $\Delta\omega$  において非相反性の大きさ  $\eta$  が一定であると仮定した場合、以下のトレードオフ関係が成立することを明らかにした。

$$\eta \ln\left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) \leq \frac{8}{3}\beta K$$

この関係式 (図 1 参照) は、高い非相反性を実現しようとするれば帯域幅が制限され、逆に広帯域化を図れば非相反性の大きさが制限されることを意味する。具体的な物質系への適用として、(1) 励起子系 (TMD 薄膜など) と (2) ディラック電子系 (磁性トポロジカル絶縁体など) のケーススタディを行った。その結果、励起子系は大きな量子重みを持つため広帯域かつ強い非相反性を実現できる可能性がある一方、ディラック電子系は量子重みが比較的小さく、帯域幅が数%~10%程度に制限される傾向

があることが判明した。これにより、量子重み $K$ が次世代の熱輻射制御デバイス設計における重要な指標となることが示された。

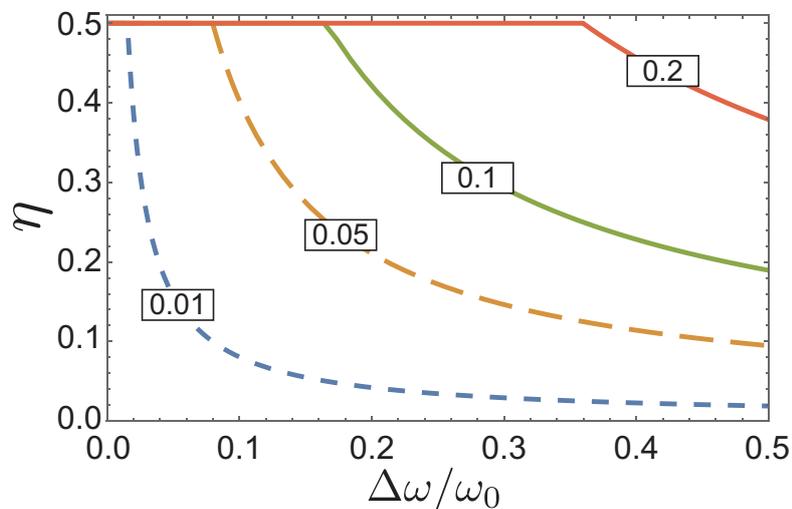


図1 量子幾何学的限界による非相反性の大きさと帯域幅のトレードオフ。曲線より上の領域は物理的に禁止されている。量子重み $K$ が大きいほど、許容される領域が広がる。

#### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

(1) Satoru Konabe, “Quantum Geometric Limit for Hemispherically Averaged Nonreciprocity in Thin-Film Thermal Emitters”, accepted for publication in *Optica* (2026)

# 機械学習と量子最適制御を用いた レーザー誘起光化学過程の高効率化

大槻幸義<sup>1</sup>, 中嶋 隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東北大学大学院理学研究科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 序

ゼロエミッションエネルギーの実現のためには、研究分野および分野横断的アプローチが不可欠である。本共同研究はレーザー誘起光化学過程の観点から、2025年度は主に2つの場合研究を通して高効率化に取り組んだ。1つ目はガラス光拡散板の作製に関する課題である。ガラス基板は安価であり、光吸収の弱さから可視～近赤外領域の光拡散板に適している。しかし、光吸収が弱いため、安価な近赤外ナノ秒レーザーパルスを使った直接加工は困難である。中嶋グループは簡便かつ安価な作成手法として、アブレーション支援近赤外ナノ秒レーザー加工とレーザークリーニングを組み合わせた完全乾式法を提案した[1]。前半の過程は間接加工であり、①ナノ秒レーザーパルスと金属基板との相互作用（アブレーション）と、②アブレーションフラグメントとガラス基板との相互作用を含む。全く性質が異なる2種類の非線形相互作用を含むために、最適な加工条件を見出すには多数回の試行錯誤が必要である。本共同研究では機械学習を用いて、加工パラメータの最適化のコストの問題の解決を目指した。本テーマは2024年度から引き続き共同研究を進めており、光拡散画像（ビームプロファイル）と加工深さとの関係など、新たな知見を得ることに成功し原著論文として報告した[2]。

2つ目は分子整列制御に関する課題である。多くの（光）化学反応において、分子の立体配置は効率を高めるのに重要である。また、化学反応を実時間追跡し分子の動きを可視化する「分子動画」は、究極のゴールとして長年にわたり活発に研究されている。分子動画は化学反応の高効率化に重要な知見を直接に与え、ゼロエミッションエネルギーに大きく貢献すると期待できる。いずれにおいても分子の整列制御が重要な要素であり、それを踏まえてレーザー誘起の分子整列制御が盛んに研究されている。しかし、非対称コマ分子（剛体近似下での一般の分子）に関しては、整列制御の難しさ、および実験・計算の高コストのために、分子を網羅的に扱った研究は未報告であった。2024年度の共同研究を通し、機械学習により計算コストの課題を解決し、基本制御法の一つである「互いに直交する直線偏光ダブルパルス制御」に関して分子網羅的に制御機構を明らかにした[3]。本年度はもう一つの基本制御法である「楕円偏光パルス」に関して共同研究を行った。

## 2. 光拡散板のレーザー加工への機械学習の応用[2]

中嶋グループによるアブレーション支援近赤外ナノ秒レーザー加工法[1]に従い、32通りの加工条件でガラス光拡散板を作製した。なお、図1(a)に示すように4つの加工パラメータ、すなわちレーザーパルス強度(P)・アブレーション用の金属(Ni)基板とガラス基板との距離(G)・加工速度(S)・加工回数(T)に着目した。光拡散板の特性はビームプロファイルにより評価する(図1(b))。

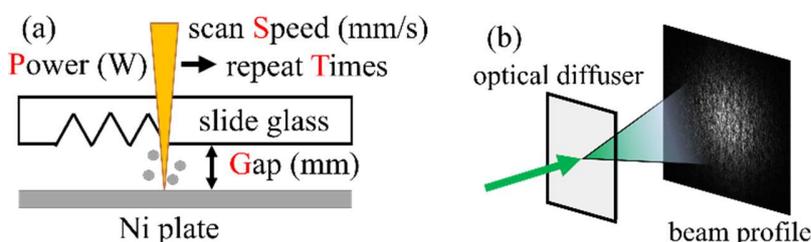


図1 (a)アブレーション支援近赤外ナノ秒レーザー加工を使った光拡散板の作製および4つの加工パラメータの概念図。(b)光拡散板の特性を評価するためのビームプロファイル測定の概念図。

32 個のビームプロファイルに Kennard-Stone アルゴリズムを適用し、28 個の訓練サンプルと 4 個のテストデータに分割した。予測と実測のピクセル値の平均二乗誤差 (MSE) が最小になるように全結合ニューラルネットワーク (FNN) モデルを訓練した。テストサンプルに対する予測と実測の例を図 2 に示す。高い精度で予測できていることが分かる。

一方、未加工のガラス基板からのビームプロファイル (画素値) を、光拡散板を透過したビームプロファイルから差し引くことで、「加工由来」の画素値にも注目した。文献[1]において光学測定で求めた表面の凹凸の値を、前述した加工由来の画素値と比較した所、非常に良い直線関係が得られることを見出した。これに基づき、加工由来の画素値の平均を「加工度合い ( $D$ )」として定量化し、加工度合いの加工パラメータ依存を新たな FNN モデルを用いて予測した (図 2(c))。図 2(c)では、図 2(d)に示す簡単なモデルを使い、距離 (Gap) の代わりにフラックス密度の相対値を横軸に取っている。図 2(c)から、加工度合いにおいては距離 (Gap) に対して加工の「閾値」が存在することを見出した[2]。

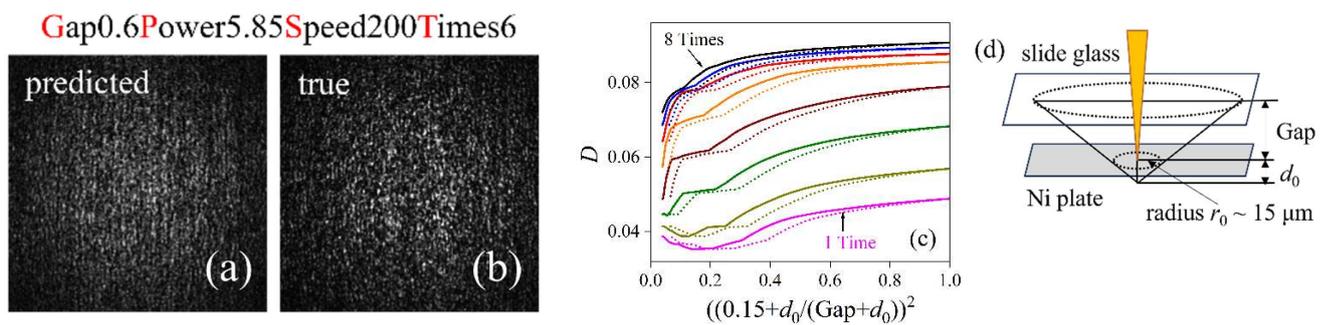


図 2 テストサンプルのビームプロファイルの(a)予測と(a)実測 (実験)。 (c)FNN で予測した加工度合い ( $D$ ) に対する相対フラックス密度および加工回数依存性。 (d)アブレーションフラグメントのフラックスを見積もるモデル。図(c)における実線と点線は、仮定したオフセット距離  $d_0 = 0$  と  $d_0 = 0.05 \text{ mm}$  に対応。

### 3. 非対称コマ分子のレーザー誘起 3 次元整列に対する制御ランドスケープ図の機械学習予測 [4]

剛体近似を仮定すると一般の分子はいわゆる非対称コマとして表される。計算機資源の都合上、本研究では  $C_{2v}$  対称性を持つ偏長タイプの非対称コマ分子を網羅的に扱うことにした。分子の整列制御すなわち回転運動に着目すると、3 つの回転定数と 2 つの分極率成分の差で記述できる。この点に着目し「人工分子」を積極的に導入すれば、「分子空間」全体において制御機構の変化を連続的に予測できることを提案した。具体的には、エネルギーを  $\hbar A$  単位で表すと、回転ダイナミクスは無次元の回転定数  $B, C$ 、および分極率成分の差の比  $\Delta\alpha_{ac}/\Delta\alpha_{bc}$  ( $a, b, c$  は分子主軸を表す) で記述できる。楕円偏光パルスのパラメータ (制御パラメータ) はパルス幅  $\sigma$  と長軸・短軸方向の偏光成分のフルエンス割合  $r$  (楕円率  $e = \sqrt{r/(1-r)}$ ) を選択し、全パルスフルエンスは各分子で最適な値とした。最大の 3 次元整列度合い  $\phi = \phi(\sigma, r)$  に着目し、各分子・制御パラメータに対して  $\phi$  を予測する機械学習モデルを構築した。この機械学習モデルを用いて  $\phi$  の等高線図 (制御 LS 図) を分子パラメータ空間内で連続的に予測し、階層的クラスタリングを適用したところ 3 つのグループに分類できることが分かった。現在、機械学習モデルが予測する 3 分類の意味について解析中である [4]。

### 4. 参考文献

- [1] W. Rong, K. Ando, and T. Nakajima, *Opt. Lasers. Eng.* **167**, 107621 (2023).
- [2] R. Kawaoto, T. Namba, Y. Ohtsuki, Y. Feng, and T. Nakajima, *Results in Optics* **21**, 100865 (2025).
- [3] T. Namba and Y. Ohtsuki, *Phys. Rev. A* **110**, 053107 (2024).
- [4] T. Namba *et al.*, *to be submitted*.

# 針電極を用いたパルス界面放電の基礎と効率化

松浦寛人<sup>1,2</sup>, 矢野達識<sup>2</sup>, 鄭従声<sup>2</sup>, 山田修平<sup>2</sup>,  
朝田良子<sup>1,2</sup>, 坂元仁<sup>1</sup>, 武村祐一朗<sup>3</sup>, ヴコンカン<sup>2</sup>, 門信一郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>大阪公立大学研究推進機構

<sup>2</sup>大阪公立大学大学院工学研究科

<sup>3</sup>近畿大学理工学部

<sup>4</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 本研究の目的

プラズマプロセスは 20 世紀後半に製造業の基盤技術として発展し、その応用の対象は医療、農業、環境保全の分野に広がってきている。申請者は、これまでに一連の研究課題で、これらの新しい分野に適用可能な、非平衡大気圧プラズマ源の開発、分光法およびこれを補う計測法の開発を進めてきた。また、申請者のグループが開発改良しているプラズマ源を用いて、液中の有害化学物質の分解や大腸菌の不活化に、大気圧プラズマジェットが生成する活性酸素ラジカルが有効な働きを示すことを見出してきた。本研究課題では、より大規模なプラズマ処理に有利な、水界面でのプラズマ放電を利用したプラズマ源を導入し、運用コスト及びラジカル生成の観点から最適化研究を進める。

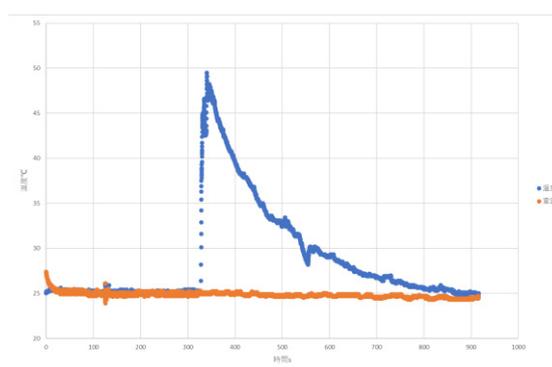
エネルギー理工学研究所で永年培われたプラズマ分光計測を適用することにより気相中での活性酸素ラジカルや分子イオンの挙動、ラジカル生成の効率化のための基礎データを習得できると期待される。これまでの、本拠点での共同研究で開発した化学プローブは、プラズマ源周りの気相中およびプラズマ照射された液相中のラジカル研究に有用なツールとなった。また、熱量計測によってもラジカル生成量の評価に应用できることが示されている。これらの知見も、本研究課題の遂行に大きな寄与をするものと期待される。

## 2. プラズマ照射時の水サンプル温度増加の考察

本研究の対象のパルス界面放電プラズマは大腸菌不活化実験で有望な結果を示しているが、サンプルの入ったシャーレが照射の間に加熱されていることが報告され、加熱による不活化効果の重畳が疑われた。

しかしながら、大気圧プラズマが照射される水の温度変化は、温度測定に通常用いられる熱電対センサーの信号が異常になるため、これまで正確な測定の報告はほとんどない。我々は照射停止直後に熱電対端子をサンプル水に挿入し、増加した水温とその現象の様子を調べ、DBD プラズマジェット照射の場合と比較した。右図はその一例で、5 分の照射後には水温は 25 度ほど増加していることがわかる。他方、温度低下の時定数が 170 秒であり、水からの容器などへの熱損失の大きさが定量的に評価できる。

プラズマからの熱流量が時間的に一定であれば、測定されていない照射時の温度変化は、0 次元温度応答関数と呼ばれる解析関数で記述できる。そして、その関数を外挿することで、仮に照射時間がいくら伸びても上記照射条件では温度上昇は 30 度に抑えられることが予想される。これは、熱損失が増大しプラズマからの熱流と釣り合ってしまうことに対応する。



界面放電プラズマ照射後のサンプル水の温度変化(熱電対測定データ)

### 3. モニター用温度計の改良

プラズマ照射時の熱電対信号のトラブルは、測定回路に放電電流の一部または全部が流入するため、信号が異常になり、場合によっては回路の損傷につながっていた。最近、フランスのトカマク型核融合装置のプラズマ対向材のモニターに FBG センサーを使うことが報告された。ファイバーの熱膨張を光学的に測定する方法で、電磁ノイズに強い。本研究でも適用を検討し準備を進めたが、本年度は使用した光ファイバーの損傷でやむなく延期に至った。

幸いにも、白金の電気抵抗の変化を利用する RTD センサーも測定回路が熱電対と異なるため、プラズマ照射中の水温の変化もモニターすることができた。測定例を右図に示す。600s から 1000s の間のプラズマ照射で約 40 度の温度上昇が起こっている。前節で考察した温度応答関数と類似の時間変化を示すが、若干温度上昇が早い。

温度変化の時系列データから、核融合プラズマの研究で開発したパルス分解法で熱流束の時間変化を解析した。熱流束密度を評価するための放電プラズマの実効面積の評価はまだ十分できていないため  $2000\text{W/m}^2$  という絶対値はあくまでも目安であるが、放電直後の 2000 から 200s 後に 1500 に下がっていることがわかる。

いずれにせよ、大腸菌不活化の効果が表れ始めるのが照射開始後 30s という短時間であったことから、サンプル溶液の温度上昇が不活化のトリガーになったという可能性は完全に排除されたといえるだろう。

#### [口頭発表リスト]

松浦 寛人、関林、矢野達識、朝田良子, "大気圧水面放電照射によるバイオサンプル水加熱量の計測", , 第 42 回プラズマプロセッシング研究会, 令和 7 年 1 月 30 日, 大分.

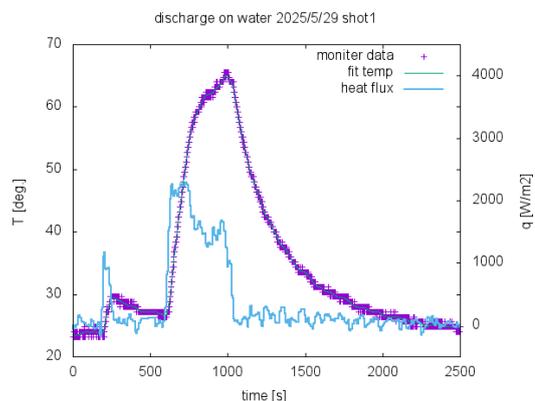
H. Matsuura, L. Guan, T. Nakano, "Suppression of gap discharge and improvement of plasma production efficiency", , 17th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, March 5, 2025, Chubu University (ポスター).

松浦寛人、関林、朝田良子, "気水界面放電とラジカル生成に及ぼす接地電極配置の効果", , 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 2025 年 3 月 17 日, 東京理科大.

松浦寛人、矢野達識, "プラズマ照射水の温度測定の改良と熱バランス評価", , 物理学会第 81 回年次大会, 2025 年 9 月 17 日, 広島大.

H. Matsuura, T. Nakano, L. Guan, R. Asada, "Improvement of pulse water surface discharge and estimation of heat load on process in water", , 14th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering, November 5, 2025, Phuket.

松浦寛人、矢野達識、皇甫度均、永岡賢一, "パルス熱流束分解法による熱流束推定の誤差と最適化の検討", , プラズマ・核融合学会第 42 回年会講演会, 2025 年 12 月 3 日, 京都.



界面放電プラズマ照射した水温 (RTD データ) と解析したプラズマ熱流束の変化

# 水素製造水電解における 水素気泡と酸素気泡の挙動の違いの解明

安東 航太<sup>1</sup>, 中嶋 隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI)

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究背景

アルカリ水電解は、脱炭素社会の実現に向けた重要な水素製造技術である。電解性能の向上には、反応表面積の拡大と、生成した気泡の迅速な電極離脱を両立させることが不可欠であり、その手法として電極表面のマイクロ/ナノ構造化が有効である。我々はこれまで、電気化学計測と気泡挙動の光学計測を組み合わせることで、両者を同時に実現する水素生成電極のレーザー加工プロトコルを確立してきた。さらに、電極から離脱した気泡が誘起する対流に着目し、生成した水素のうち気泡に変換される割合（気泡変換率）を定量的に評価する計測手法の開発に取り組んできた。一方、これらの研究を通じて、酸素気泡は水素気泡と比べて気泡同士の融合が起きやすく、さらに電極から離脱しにくいいため、電極からの離脱径が大きくなる傾向を示すことを経験的に確認している。しかし、その物理的要因については未解明である。水素/酸素気泡の挙動差の要因として、表面張力の違いや気泡表面電荷の影響が指摘されているが、いずれについても定量的理解は十分ではない。本研究では、電場中での気泡の応答を定量的に評価するとともに、電解液温度を変化させて表面張力を制御した際に、酸素気泡の電極からの離脱径が変化するかを検証した。

## 2. 実験

ガス発生電極には、長さ 3 cm、直径 200  $\mu\text{m}$  の Pt ワイヤを用いた。これを 1 M KOH 水溶液を満たした透明アクリルセル中に、水平に固定した。対極には Pt メッシュを用い、Pt ワイヤから約 30 mm 離れた位置に配置した。両電極間に一定電流を印加して水電解を行い、電極上で生成した水素/酸素気泡が電極から離脱後、ワイヤ上方を垂直に浮上する過程を、10 倍顕微鏡レンズを装着した高速カメラを用いてワイヤ正面から撮影した。

電場応答評価実験では、Pt ワイヤの上方約 1 mm の位置に、絶縁被覆を施した 2 枚の板電極を 3 mm 間隔で垂直に配置し、両電極間に 17 V の電位差を印加した。この電場中を浮上する気泡の水平方向変位を計測した。一方、電解液昇温実験では、あらかじめ 25°C、32°C、42°C に温度制御した 1 M KOH 水溶液を用いて水電解を行った。

撮影した気泡画像は、2 値化後に距離変換処理を施して個々の気泡を分離し、それぞれの直径および位置を算出した。また、連続画像間の差分解析により、気泡の浮上方向および浮上速度を評価した。

## 3. 結果と考察

図 1 に、3 mm 間隔の絶縁被覆電極間に 17 V の電位差を印加した際に観測された、水素/酸素気泡の水平方向移動速度を示す。強アルカリ水溶液中では、気泡は負に帯電していると考えられており、理想的には電場と逆向きに移動することが期待される。実際には、浮上気泡が誘起する流れの影響が大きく、移動速度は正負の両方向に大きくばらつくものの、統計的には正方向（電場と逆方向）への偏

りが見られ、全体平均として約  $+100 \mu\text{m/s}$  の移動速度が得られた。しかし、この値は典型的な気泡の浮上速度（数  $\text{mm/s}$ ）と比べると2桁以上小さい。

電場中を移動する気泡も、浮上時と同様に粘性抵抗を受けて終端速度に達していると考えられる。このため、観測された速度差は、電場に起因する力および浮力が、それぞれ粘性抵抗と釣り合った結果を反映していると解釈できる。水電解時にガス発生電極と対極間に生じる電位差は高々数  $\text{V}$  程度であり、かつ電極間距離は通常  $1 \text{ mm}$  以上である。したがって、酸素発生電極（正極）から離脱しつつある酸素気泡を電極上に留めようとする電氣的な引力は、本実験条件と同程度あるいはそれ以下であり、浮力と比較すると無視できるレベルであると考えられる。

図 2a に、電解液温度を  $25^\circ\text{C}$ 、 $32^\circ\text{C}$ 、 $42^\circ\text{C}$  と変化させた際の酸素気泡の電極からの離脱径を示す。温度上昇に伴い気液界面の表面張力は低下するが、それに対応して酸素気泡の離脱径が小さくなる傾向が確認された。この結果は、表面張力の低下が気泡の電極離脱挙動に影響を与えていることを示唆している。ここで、最も単純なモデルとして気泡が成長中も電極と一定の接触面積を保ち、表面張力に由来する付着力が一定であると仮定すると、浮力は気泡直径の3乗に比例するため、離脱径は表面張力の1/3乗に比例すると予想される。しかし、図 2b に示すように、 $25^\circ\text{C}$  から  $42^\circ\text{C}$  までの温度上昇に伴う表面張力の1/3乗の変化は1%未満であるのに対し、実測された平均離脱径は10%以上減少している。したがって、酸素気泡が水素気泡よりも大きな電極離脱径を示す要因の一つとして表面張力の差は考えられるものの、単純な表面張力差のみでは説明できず、現時点では他の要因の寄与を考慮する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では、アルカリ水電解における水素および酸素気泡の挙動差の要因を明らかにすることを目的として、電場中での気泡の応答を定量的に評価するとともに、電解液温度を変化させて表面張力を制御した際の酸素気泡の電極離脱挙動を検証した。電場中を浮上する気泡の水平方向移動を解析した結果、気泡は電場に応答して系統的な移動を示すものの、その移動速度は浮上速度と比べて十分に小さく、通常の水電解条件下では、電場に起因する力が気泡の電極離脱挙動を支配しないことが分かった。一方、電解液温度を上昇させて表面張力を低下させると、酸素気泡の電極からの離脱径は有意に減少することが確認された。しかし、表面張力の変化量から予想される離脱径の変化は実験結果よりも小さく、酸素気泡が水素気泡よりも大きな電極離脱径を示す要因を、単純な表面張力差のみで説明することは困難であることが明らかとなった。以上の結果から、酸素気泡と水素気泡の挙動差には、表面張力や電場に起因する力以外の要因が関与している可能性が示唆された。

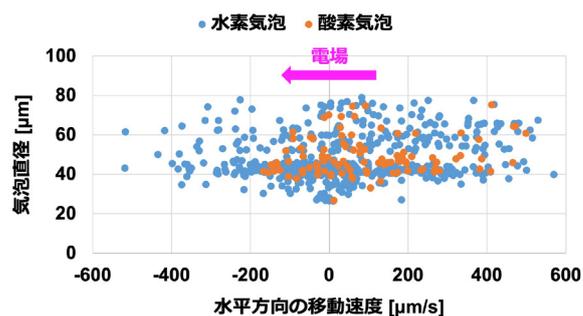


図 1 被覆絶縁電極間（電位差：17 V、距離：3 mm）を浮上した気泡の水平方向の移動速度

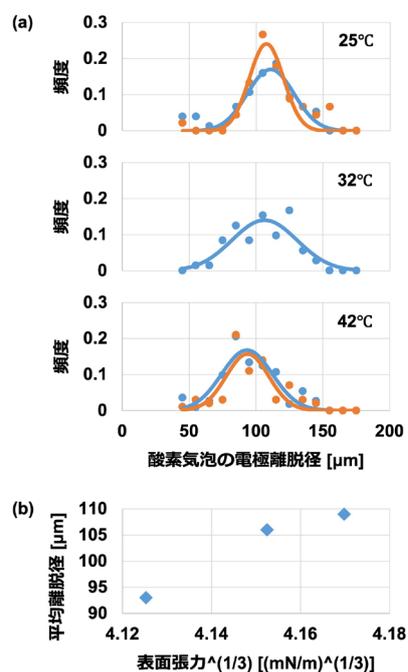


図 2 (a) 電解液 (KOH 1M) の温度を上げていった時の酸素気泡の電極離脱径の変化 (b) 平均離脱径と表面張力との関係

# 高繰り返し赤外パルスによる気体の電離現象の研究

羽島良一<sup>1</sup>, 川瀬啓悟<sup>1</sup>, 全炳俊<sup>2</sup>, 大垣英明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所

<sup>2</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

レーザーパルスによる気体の電離は、トンネル電離、再衝突電離、多光子電離など複数の過程で起こる。これらは、原子分子と光子場の基礎となる物理現象として興味深いだけでなく、高次高調波発生によるアト秒 X 線の発生、レーザー誘起放電による気体中の微粒子の分析 (LIBS)、レーザー誘雷といった応用の観点からも重要な研究テーマである。

KU-FEL は 2.856 GHz (熱陰極モード)、29.75 MHz (光陰極モード) の高繰り返しで中赤外パルスを生成でき、マクロパルス中での平均パワーは kW を超える。これらは、他のレーザー (固体レーザー、ガスレーザー) にはない特徴である。研究代表者らは、前年までに KU-FEL 熱陰極モードにて、FEL パルスを気体中で集光した際に生じる放電が、パルス列によるカスケード電離であることを明らかにした。この研究では、ガス圧、ガス中の浮遊粒子の多寡による放電確率の違いについて、実験とシミュレーションを比較することで、電離電子の蓄積のみならず、励起状態原子の蓄積が電離の成長に寄与していることが示唆された。また、これとは別に行った実験 (光陰極モード) では、トンネル電離による高次高調波発生がマクロパルス内での FEL 強度の増減に対してヒステリシスを示す結果が得られた。ここでも励起状態原子の蓄積がヒステリシスをもたらす可能性が示唆されている。

本研究では、FEL の高繰り返しパルスによる気体の電離実験を行い、パルス列内での励起状態原子の蓄積 (または緩和) が電離に寄与する効果、また、電離に伴う大気密度の変化と、この密度変化が後続パルスの伝搬に与える影響を調べることを目的とする。高繰り返し赤外パルスが励起状態の気体原子 (または分子) を蓄積できることが示されれば、これらの励起状態を経由した化学反応をゼロエミッションエネルギー技術に利用する可能性にも道がつながる。

## 2. 実験

レーザーパルスを大気中で集光すると、集光により生成した気体プラズマの膨張が衝撃波となり集光点のまわりに圧力分布を生じることが知られている。このような圧力分布を空気導波路として、後続のレーザーパルスの伝搬に利用するアイデアが提唱されている。KU-FEL は、マイクロパルス、マクロパルスのユニークな時間構造をもっており、こうしたパルス列の中赤外レーザーを大気に集光した時、集光点のまわりにどのような圧力分布が形成されるかを調べることは興味深い。

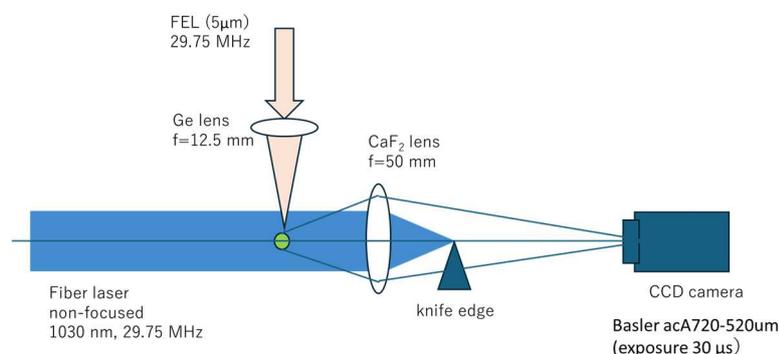


図1 実験体系。FEL パルスを大気中で集光、FEL と 90 度の角度からファイバーレーザー (波長 1030 nm) を入射し、シュリーレンイメージを取得した。

今年度の実験では、FEL パルス (光陰極モード、波長 5 μm、繰り返し 29.75 MHz) をゲルマニ

ウム非球面レンズ ( $f=12.5$  mm) で大気中に集光し、FEL パルスに同期したファイバーレーザー (波長 1030 nm) を用いて、集光点の影絵 (シュリーレンイメージ) を取得した。実験体系を図 1 に示す。

ファイバーレーザーは、QST 関西研で開発した装置一式を、KU-FEL 実験室に移設したものであるが、光学台に設置したレーザーをアクリルカバーで覆うことで、実験に必要な安定動作を得ることができた。今回の実験では露光時間  $30 \mu\text{s}$  のカメラを用いており、シュリーレンイメージは  $30 \mu\text{s}$  の時間積分画像である。

取得したシュリーレンイメージの例を図 2 に示す。ナイフエッジの向きと垂直方向の画像の濃淡が大気密度分布に対応している。本手法で集光点の密度分布が測定できることを確認した。次年度の実験では、シャッタータイミング、プローブレザータイミングを制御することで、集光点の大気密度分布の時間発展を測定することを試みる予定である。

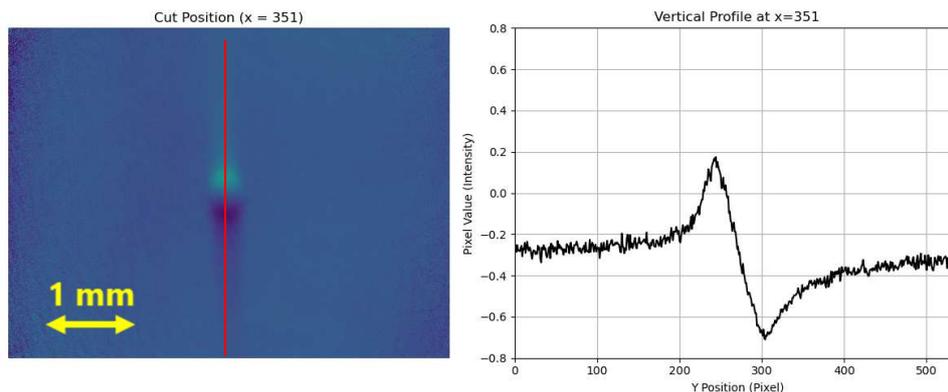


図 2 (左) 取得したシュリーレンイメージの例。ここではナイフエッジを水平に設置し、垂直方向の大気密度分布を観測している。(右) 赤線に沿った画像の濃淡をプロットした図。

### 3. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

なし

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

羽島良一, “高繰り返し赤外パルスによる気体の電離現象の研究”, ZE 拠点年会, 2025 年 12 月 12 日, 京都大学エネルギー理工学研究所

羽島良一, “高繰り返し FEL パルスによる気体の放電現象”, KU-FEL ユーザーミーティング, 2025 年 12 月 11 日, 京都大学エネルギー理工学研究所 (ポスター発表)

# ヘリオトロン J 装置におけるインコヒーレントデジタルホログラフィを用いた三次元発光分布計測システムの開発

川染 勇人<sup>1</sup>, 西野 信博<sup>2</sup>, 門 信一郎<sup>3</sup>, 宮崎 貴大<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 香川高等専門学校情報工学科

<sup>2</sup> バウヒュッテ

<sup>3</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

ヘリオトロン J 装置は特徴的な立体磁気軸を有し、その磁場配位による粒子閉じ込め改善の検証が重要な課題の一つである。立体磁気軸配位は三次元構造であり、それに起因する物理特性を三次元で測定することが効果的である。通常、分光計測は線積分値であり、二次元分布を得るには計測視線を複数並べるアレーを用いてアーベル変換や CT 法を適用する。同様に三次元画像は二次元画像を残された一軸方向にスキャンすることで得られる。しかしヘリオトロン J 装置では、二次元分布を得るために必要な視線アレーの確保や観測ポートの制限によりトロイダル方向へのスキャンが困難であり、限られた放電回数内でのスキャンは非効率的で現実的ではない。そこで本研究では、インコヒーレントデジタルホログラフィによる三次元発光分布画像の測定の有効性を検証することを目標とし、本年度は位相シフト法による測定の検証と光学系の設計を行った。

## 2. 4 パケット位相シフト法

本研究で採用した 4 パケット位相シフト法は、参照光の位相を 90 度ずつ 4 段階に変化させながら干渉画像を取得し、各画像の強度情報から物体波の複素振幅を算出する手法である。この方法により、干渉縞の位相情報を高精度で抽出し、物体波の実振幅と位相を再構成することが可能となる。再構成には Fresnel 変換を用い、三次元像を得る。4 パケット法は計算の安定性が高く、ノイズに対する耐性も優れているため、プラズマ診断に適している。

さらに、この手法では各パケット間の位相差を正確に制御することが重要であり、ピエゾ駆動ステージ等による微小変位制御が不可欠となる。4 パケット法は、従来の 2 パケット法や 3 パケット法に比べて演算精度が高く、再構成画像の品質向上に寄与する。また、取得した干渉画像から複素振幅を求める際には、光学系の安定性と CCD の分解能が結果に大きく影響するため、実験条件の最適化が必要である。これらの特徴により、4 パケット位相シフト法はプラズマ発光の三次元分布を効率的かつ高精度で再現するための有力な手段である。

## 3. マイケルソン干渉計

本研究では、図 1 に示すように、Michelson 型干渉計を採用し、参照光と物体光を分割するビームスプリッタを中心に配置した。令和 6 年度は、ビームスプリッタにプリズム型のものを用いていたが、裏面反射により不要な干渉縞

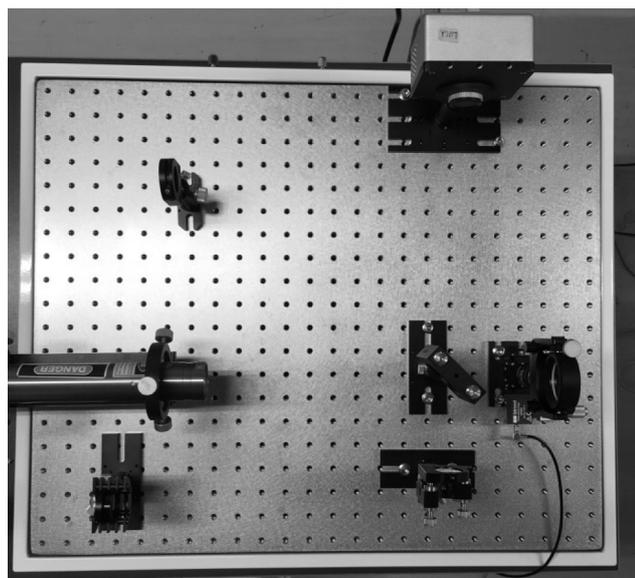


図 1 位相シフト機構を有したマイケルソン型干渉計。

が CCD 受光面上に生成されるため令和 7 年度は、プレート型のものに変更した。参照光路にはピエゾ駆動ステージを組み込み、微小な位相変化を精密に制御できるよう設計している。光源には波長 632.8 nm の He-Ne レーザーを使用し、干渉縞は CCD カメラで記録する構成とした。この設計により、位相シフトの安定性と再現性を確保し、後段の画像再構成に必要な高品質な干渉データを取得することが可能となる。

#### 4. ピエゾ駆動ステージの移動量校正

位相シフト精度を保証するため、ピエゾ駆動ステージの変位量を干渉縞の移動量で校正した。図 2 には He-Ne レーザーによって生成された干渉縞を示す。干渉縞観測のため、物体光用ミラーにわずかな角度を付与し、干渉縞のコントラストを最適化している。さらに、ビームスプリッタをプレート型に変更することで、裏面反射による不要な干渉縞を除去し、測定精度を向上させた。

校正手順としては、ピエゾ素子に印加する電圧を段階的に変化させ、その際に干渉縞の移動量を CCD 画像上で測定する。図 3 にピエゾ素子コントローラを目盛り（実際にはピエゾ素子に印加される電圧）と素子の移動量の関係を示す。図 2 で示された干渉縞は、複数回の測定により、電圧と変位の線形性を確認し、ヒステリシスの影響を評価した。実験結果では 1 目盛あたりの変位が 61.75 nmであることを確認し、この値を基準として位相シフト量を算出した。

さらに、電圧と変位の関係を詳細に解析し、ステージの応答特性（応答速度、再現性、温度依存性）を評価することで、位相シフト操作の信頼性を高めることが可能である。これらの解析結果は、今後の自動制御や高精度ホログラム再構成に向けた重要な基礎データとなる。

#### 5. まとめ

本研究ではインコヒーレントデジタルホログラフィを用いたプラズマ三次元計測を行うための基盤を構築した。ピエゾ素子駆動ミラーの移動量の構成では、複数回の測定により、電圧と変位の線形性を確認し、ヒステリシスの影響を評価した。実験結果では 1 目盛あたりの変位が 61.75 nmであることを確認し、この値を基準として位相シフト量を算出した。さらに、電圧と変位の関係を詳細に解析し、ステージの応答特性（応答速度、再現性、温度依存性）を評価することで、位相シフト操作の信頼性を高めることが可能である。今後はレーザー光源による画像再構成の実証を経て、LED 光源やプラズマ自身の発光を利用した非干渉性ホログラムの取得を目指す。本技術は核融合炉のプラズマ診断精度を飛躍的に向上させ、ゼロエミッション社会の実現に向けた重要な基盤技術となる。

#### [口頭発表リスト]

川染勇人、西野信博、門信一郎、“インコヒーレントデジタルホログラフィのプラズマ 3D 計測への利用の検討”、第 42 回プラズマ・核融合学会年会（京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス、2025 年 12 月 1-4 日）2P17（ポスター）

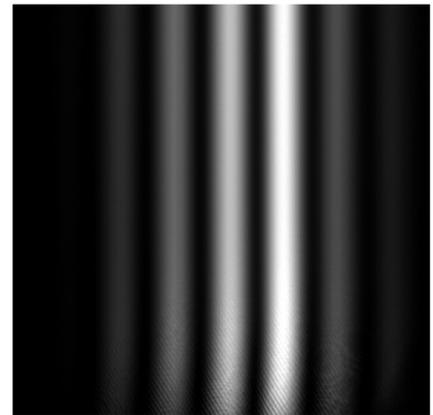


図 2 He-Ne レーザーにより生成された干渉縞。

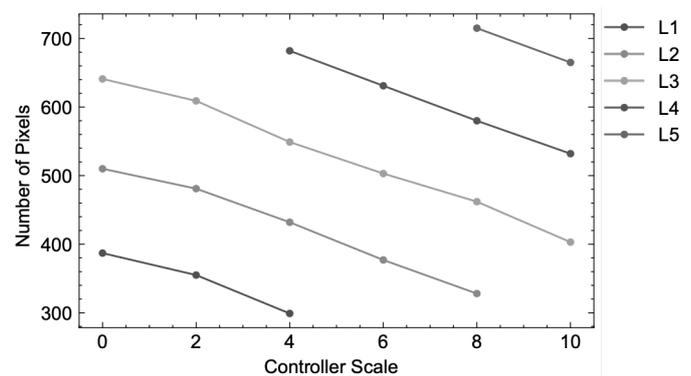


図 3 位相シフト機構

# エネルギー産生遺伝子を標的とする RNA 編集技術の開発

福田 将虎<sup>1</sup>, 緒方 悠岐<sup>1</sup>, 一ノ宮 彩涼花<sup>1</sup>, 富倉 桃々子<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福岡大学理学研究科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 【研究背景・目的】

細胞は、エネルギーの産生・利用を適切に行うため、タンパク質の発現量や機能を転写および翻訳の段階で精密に制御している。したがって、遺伝子発現過程においてタンパク質の機能を自在に改変できる技術が確立されれば、細胞内のエネルギー産生・利用を人為的に制御することが可能となる。このような遺伝子制御技術は、タンパク質によって構築されるエネルギーシステムの理解を深める基礎研究のみならず、生体を利用した有用物質生産や、生物のエネルギーシステムの社会実装に向けた応用研究にもつながる。

当研究室では、RNA 編集を基盤とする遺伝子改変技術（RNA 編集技術）の開発を進めてきた。ヒトを含む高等生物には、RNA レベルで塩基配列情報を変換する A-to-I RNA 編集機構が内在的に備わっている。この機構では、二本鎖特異的アデノシンデアミナーゼ（ADAR）によって、転写中または転写後の RNA 中の特定のアデノシン（A）がイノシン（I）に変換される。mRNA 上で生成した I は、翻訳過程においてグアノシン（G）として認識されるため、A-to-I RNA 編集はアミノ酸コドン変換を介してタンパク質機能を改変することが可能である。

我々はこれまでに、ADAR の基質となる RNA の構造情報に基づき、ADAR の RNA 編集活性を標的 RNA へと誘導する RNA 編集核酸（AD-gRNA）を開発してきた（図 1）。本研究では、この RNA 編集技術を代謝関連遺伝子に適用することで、細胞内のエネルギー産生・利用を人為的に制御する方法論の確立を目指す。

一方で、従来の AD-gRNA では、二本鎖構造中に存在する特定のアデノシンに対して高効率な RNA 編集を誘導することが困難であった。そこで本研究では、RNA 編集基質構造が二つの二本鎖構造領域から構築可能である点に着目した。すなわち、標的 A を含む二本鎖構造領域の近傍にアンチセンス RNA をハイブリダイズさせ、新たな二本鎖構造を形成することで、標的 A に対する RNA 編集効率を向上できると考えた。

本研究では、この新たに設計した RNA 構造において、二本鎖構造領域内のどの位置に存在する A が効率的に編集されるのかを明らかにすることを目的とし、組換え ADAR2 タンパク質を用いた *in vitro* RNA 編集解析を行った。

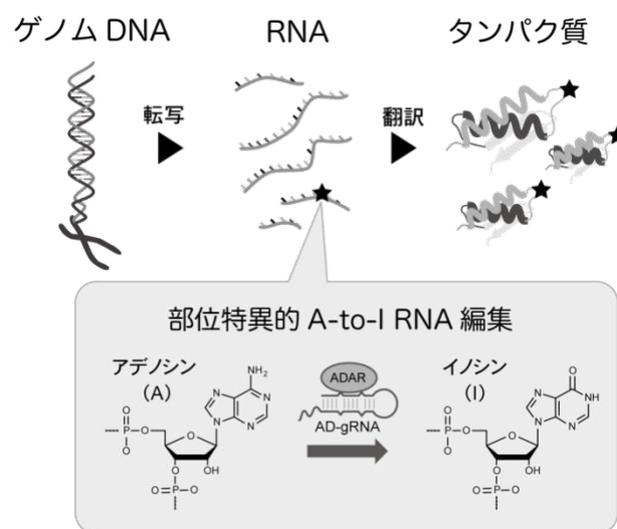


図 1 RNA 編集機構と RNA 編集技術の概要  
RNA 編集技術（部位特異的 A-to-I RNA 編集技術）は、エネルギー産生・利用に関わるタンパク質の機能制御に応用できる。

【実験方法・結果】

・アンチセンス RNA が形成する二重二本鎖 RNA 構造における RNA 編集位置特異性の解析

本研究では、アンチセンス RNA によって形成される二重二本鎖 RNA 構造における RNA 編集位置特異性を評価するため、モデル二重二本鎖 RNA を設計した。具体的には、A を含む二本鎖構造領域を有する標的 RNA に対し、その近傍にアンチセンス RNA をハイブリダイズさせた構造を用いた (図 2a)。標的 RNA の二本鎖構造領域には、GUCAN の繰り返し配列を採用し、この配列を 1 塩基ずつシフトさせた 5 種類の配列を設計することで、二本鎖構造内のあらゆる位置に A が配置された RNA 構造を作製した (図 2b)。これらの RNA 構造に対して組換え ADAR2 タンパク質を用いた in vitro RNA 編集反応を行い、各位置に存在する A の編集割合を解析した。その結果、Top strand では position 5 を中心とした前後 3 塩基の範囲において有意な RNA 編集が観測された。一方、Bottom strand においても position 5 周辺で編集が認められたものの、その編集効率は Top strand と比較して低かった。以上の結果から、二本鎖構造領域の 3' 側にアンチセンス RNA をハイブリダイズさせた場合、Top strand の position 5 が最も高効率に RNA 編集を誘導できる位置であることが明らかとなった。この知見は、これまで用いてきたステム-ループ構造を有する gRNA において、gRNA 側の二本鎖構造自体も RNA 編集の基質となり得ることを示唆している。今後は、5' 側にアンチセンス RNA をハイブリダイズさせた二重二本鎖 RNA 構造についても同様の解析を行うことで、二重二本鎖 RNA 構造において高効率に RNA 編集が誘導される位置の包括的な特定を目指す。

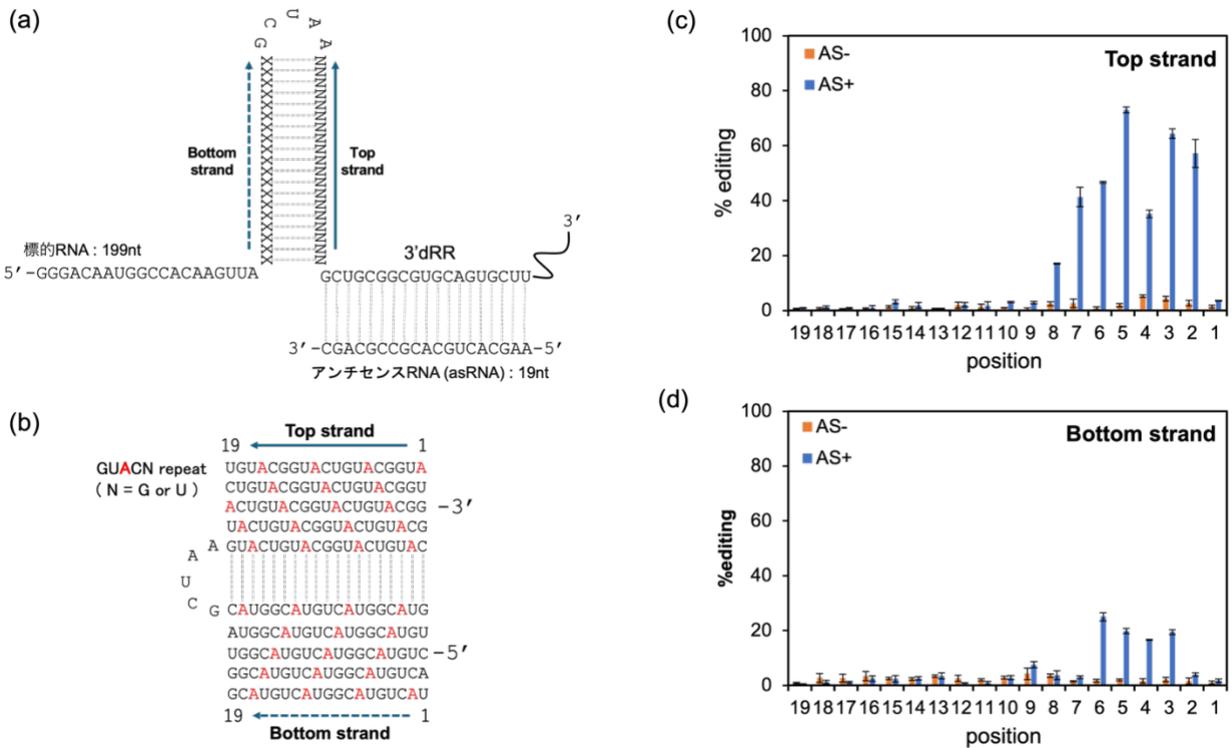


図 2 アンチセンス RNA が形成する二重二本鎖 RNA 構造における RNA 編集位置特異性の解析

(a) 二本鎖構造領域を有する標的 RNA とアンチセンス RNA のハイブリダイゼーションによって形成される ADAR 基質構造の模式図。(b) 二本鎖構造領域における Top strand および Bottom strand の配列。(c) Top strand における各アデノシン (A) 位置の RNA 編集割合。(d) Bottom strand における各アデノシン (A) 位置の RNA 編集割合。

# 高品質錫カルコゲナイド単結晶の作製とその物性評価

川西咲子<sup>1,2</sup>, 宮井隆行<sup>1</sup>, 堀池大輝<sup>1</sup>, 川上未央子<sup>3</sup>, 鈴木一誓<sup>2</sup>, 小俣孝久<sup>2</sup>, 寺井慶和<sup>4</sup>, 宮内雄平<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院エネルギー科学研究科

<sup>2</sup> 東北大学多元物質科学研究所

<sup>3</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

<sup>4</sup> 九州工業大学大学院情報工学研究院

## 1. はじめに

典型元素カルコゲナイドの硫化スズ(II) (SnS)は、太陽光発電、熱電発電、振動発電をはじめとする環境発電デバイスへの応用に適した物性値を有する材料である。SnSは低価電子状態の $\text{Sn}^{2+}$ が局在化した $5s^2$ 孤立電子対をもつために右図に示すような層状の構造を有する。その独特なパッカード構造により、層状物質の代表例であるグラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイド( $\text{MoS}_2$ など)とは異なり、機械的および輸送特性には面外異方性だけでなく強い面内異方性が現れる。面内におけるSn-S-Sn結合の特徴から、 $b$ 軸方向はZigzag方向、 $c$ 軸方向はArmchair方向と呼ばれ、この面内における強い異方性に起因して顕著な光学異方性が生じる。しかし、カルコゲンの高い蒸気圧等の影響により、高品質な単結晶の育成が容易でないことから、既報では面内異方性にまで着目した物性評価やデバイス応用の研究は非常に少ない。そこで本研究では、高品質なアンドープおよびBrドープSnS単結晶を作製し、面内異方性も含めたSnSの光物性をフォトルミネッセンス(PL)測定により評価した。間接バンドギャップ近傍における放射再結合およびその方位依存性を明らかにした。

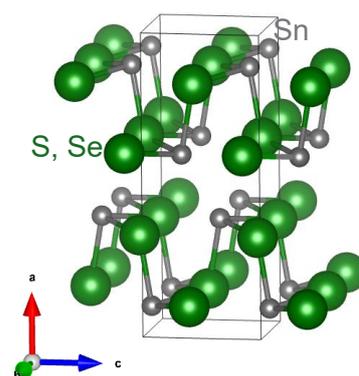


図1 SnSの結晶構造.

## 2. 実験方法

アンドープおよびBrドープSnS単結晶は、著者らの開発した液相成長法を用いて作製した。得られた単結晶は高い結晶性を有しており、偏光依存光学測定に適している。偏光PL測定を用いて、室温(300 K)および低温(9 K)における発光スペクトルを取得し、結晶方位(Zigzag方向およびArmchair方向)に対する偏光依存性を評価した。得られたPLスペクトルについて、結晶の特徴および既報の第一原理計算(DFT)結果を踏まえて解析を行い、観測された発光の起源として、バンド端遷移および欠陥準位に起因する遷移を同定した。

## 3. 結果と考察

間接バンドギャップ( $E_g$ )より高エネルギー側では、300 KにおけるPL測定において、約1.3 eVおよび約1.6 eVに偏光依存性を示す発光が観測された(図2)。これらの発光は、それぞれ $\Gamma$ -Y (Zigzag方向)および $\Gamma$ -Z (Armchair方向)に沿った直接遷移に起因するものと帰属される。特に、約1.3 eVの発光は非常に高い偏光度を示し、これまでに報告されている気相成長法で作製された微結晶[5]に比べ、著しく高いS/N比が得られた。この結果は、液相成長により作製されたSnS単結晶が、構造的異方性の揃った極めて高品質な結晶であることを示している。

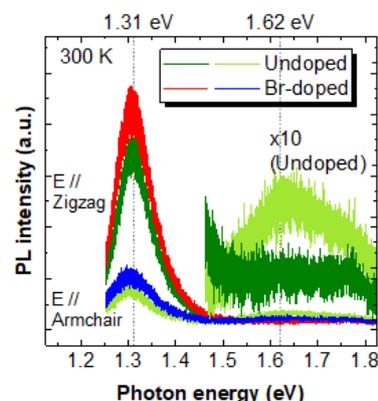


図2 SnSの300 KでのPLスペクトル.  
Copyright © 2025, American Chemical Society

$E_g$ より低エネルギー側では、欠陥準位を介した再結合に起因する新たな発光が9 Kにおいて観測された(図3 左)。BrドープSnSにおいて最も強い発光ピークは1.082 eVに位置し、Zigzag方向に沿って最も強い偏光依存性を示した(図3 中)。励起光強度依存性の解析から、本発光は $E_g$ 内の欠陥準位に関連した遷移であることが示された。また、この発光はアンドープSnSでは観測されなかったことから、Brドープに由来する欠陥が関与する発光であることがわかった。強い偏光特性およびDFT計算により予測された欠陥準位を考慮すると、本発光は $\text{Br}_S\text{-V}_{\text{Sn}}$ のドナー・アクセプターペア(DAP)による、Zigzag方向に沿った直接遷移に起因するものと帰属された(図3 右)。

本研究の結果は、液相成長により作製したSnS単結晶が、異方性光学遷移および欠陥関連発光の詳細な評価を可能にすることを示している。バンド端および欠陥準位の双方に由来する偏光発光の観測は、SnSが有する強い面内異方性を明確に示すとともに、偏光依存発光に関する重要な知見を提供するものである。本研究は、層状構造を有する典型元素カルコゲナイドにおける欠陥物理の理解を深化させるとともに、偏光特性を生かしたデバイス応用に向けた基盤を与えるものである。

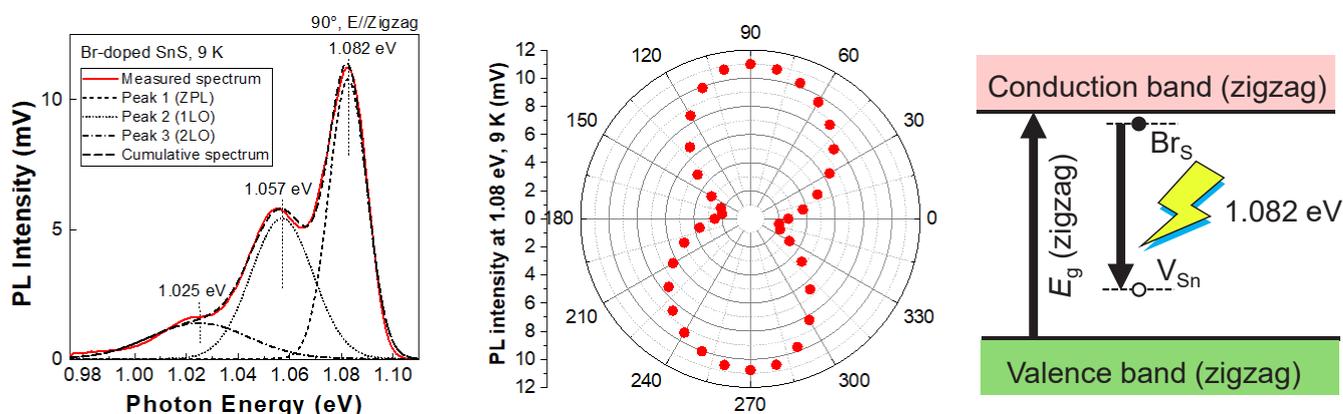


図3 BrドープSnSの9 KでのPLスペクトル(左)、角度依存性(中)、およびDAP発光の起源(右)。  
Copyright © 2025, American Chemical Society

#### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

Sakiko Kawanishi, Takayuki Miyai, Issei Suzuki, Takahisa Omata, Yoshikazu Terai, “Polarized Photoluminescence Study of Anisotropic Optical Properties in Undoped and Br-Doped SnS Single Crystals,” *Inorganic Chemistry*, 64, 24351-24356, 2025, 発行済.

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

Sakiko Kawanishi, Takayuki Miyai, Issei Suzuki, Takahisa Omata, Yoshikazu Terai: “Unveiling Anisotropic Optical Properties of High-quality SnS Single Crystals by Polarized Photoluminescence”, 2025 MRS Fall Meeting & Exhibit, December 2nd, 2025, Boston, USA.

Sakiko Kawanishi, Issei Suzuki, Takahisa Omata, Yoshikazu Terai: “Optical properties of Br-doped n-type SnS single crystals: Characterization via PR and PL measurements”, ACCGE-24, July 15th, 2025, Stevenson, USA.

# 酸素ドーピングによる カーボンナノチューブ光温度計の計測感度向上

青田 駿<sup>1</sup>, 劉 知鋭<sup>2</sup>, 松田一成<sup>2</sup>, 宮内雄平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>兵庫県立工業技術センター

<sup>2</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所

## 1. 背景と目的

近年、情報化社会における IoT 機器、ネットワーク設備、データセンターなどで使用されている集積回路の数と密度は爆発的に増加しており、CO<sub>2</sub> のゼロエミッション化に向けて集積回路の熱損失低減による更なる省エネルギー化が求められている。一方で、熱損失対策のため極微細構造をもつ集積回路の発熱解析を行う際に、従来の赤外線熱放射を用いたサーモグラフィカメラなどの熱計測方法では空間分解能に制限があるため、極微細構造内の温度分布を測定することが出来ず解析に限界があった。そこで本研究では、従来の解析限界を凌駕する高空間分解能な光温度計測機能を有した貼り付け型カーボンナノチューブ(CNT)フィルムの開発を研究目的とする。昨年度までの研究から、CNT 極薄膜フィルムを貼り付けた基板表面の温度分布を、アップコンバージョン発光<sup>[1-2]</sup> (UCPL)の室温からの強度比を利用することで、2次元画像として計測することを実現した。

今年度は、CNT 極薄膜フィルムに対して、UCPL を増強するような酸素ドーピングを施す安定的かつ簡易なプロセスを開発、及び光温度計の計測感度を向上させることを目指す。

## 2. 実験方法

本研究では、直径が約 0.7 nm の半導体型単層 CNT の孤立分散水溶液を用いた。吸引ろ過を用いることで、分散水溶液から極薄膜フィルムを作製した<sup>[3]</sup>(Fig. 1(a))。ろ過用のメンブレン膜上に作製した CNT 極薄膜フィルムを 2 mm 角に切断し、サファイア基板上に貼り付けた。

UCPL 強度を増強させるには、CNT への発光欠陥を導入することが有効である。一方、その導入プロセスは、繊細な化学反応を用いる方法や長時間処理する必要性があった。産業応用を目指す上では、短い時間で大面積に拡張可能で、かつ簡易な方法が望まれる。そこで、汎用的な基板洗浄用の UV/O<sub>3</sub> 装置を用いた酸素ドーピング手法の検討を行った。また、作製した極薄膜フィルムの発光(PL)スペクトルを取得し、PL 特性及び UCPL 特性、光温度計としての相対感度評価を行った。

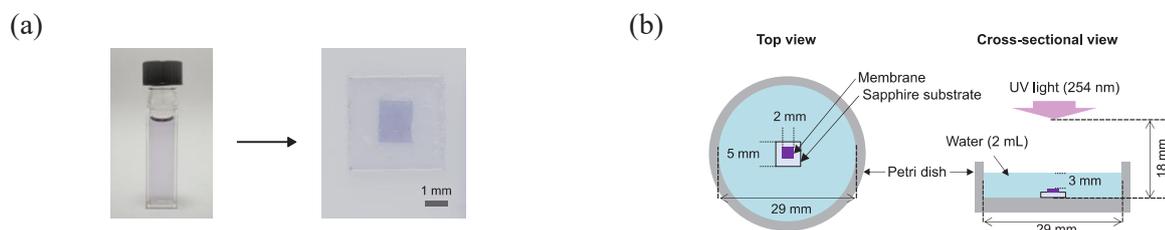


Fig. 1 (a) カーボンナノチューブ孤立分散液と、作製した極薄膜フィルム(サファイア基板上)の外観写真、  
(b) UV 照射型の O<sub>2</sub> ドーピング手法の概要図。水は蒸留水。

## 3. 結果と考察

Fig. 1(b)に示す UV 照射環境において、処理なし(Pristine)、水なしで UV 処理(Air)、水ありで UV 処理(Water)した場合の PL スペクトルの結果を示す。1.23 eV のピークは、(6,5)単層 CNT の固有励起子準位  $E_{11}$  からの PL を示す。Air 処理では、0.9 - 1.2 eV 領域でブロードニングが生じるのに加え、 $E_{11}$  か

らの PL が Pristine と比較し小さくなっている。これは、UV 処理によって CNT の構造が損傷し、励起子の消光サイトが増加したと考えられる。一方で、Water 処理では  $E_{11}$  からの PL が増強された。これは、試料内に残存していた不純物が UV 処理によって除去されたためと考えられる。更に、0.9 - 1.2 eV の領域の PL が増強された。Ma ら<sup>[4]</sup>の量子化学計算の結果とスペクトルフィッティングの結果を比較すると、CNT 表面に形成された ether 及び epoxide 結合に由来する、発光欠陥準位の  $E_{11}^*$ (1.08 eV) 及び  $E_{11}^{*-}$ (0.97 eV) が出現していることがわかった。また Fig. 2(b) より、発光欠陥由来の PL 強度は UV 処理時間を増加させることで、増強できることがわかった。

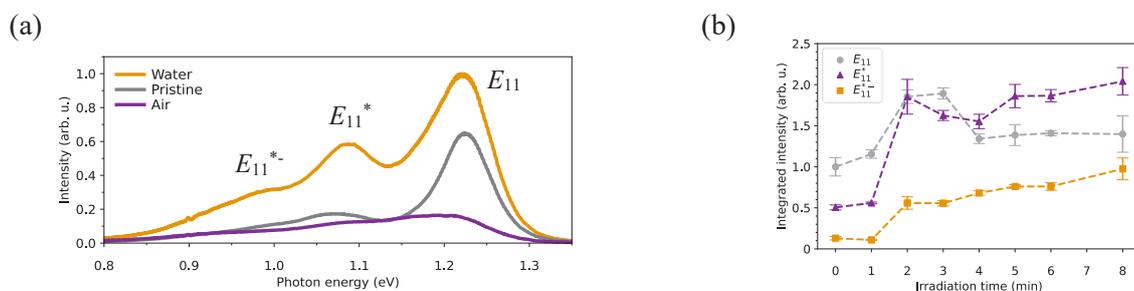


Fig. 2 (a) UV 処理方法の違いによる PL スペクトル (UV 2 分), (b) UV 照射時間に伴う  $E_{11}$ ,  $E_{11}^*$ ,  $E_{11}^{*-}$  の PL 強度。

UV 照射時間に対する、UCPL スペクトルの結果を Fig. 3(a) に示す。UV 照射時間に伴い、発光欠陥の密度が増加したことで上方変換できる励起子の数が増え、UCPL が増強したと考えられる。光温度計として利用する際は UV 処理を利用することで、光検出の S/N 比改善が期待できる。

最後に、励起する励起エネルギーを 1.03, 1.08, 1.13 eV と低エネルギー側に変化させた場合の、光温度計の相対感度  $S_R$  の評価を行う。Fig. 3(b) より、どの励起エネルギーの場合でも温度に対して UCPL 強度が単調増加している。さらに、励起エネルギーを 1.13, 1.08, 1.03 eV と低下させることで、UCPL がどの温度においても増強された。Fig. 3(b) の結果を利用して各温度に対する光温度計として相対感度  $S_R$  (%/K) を計算した結果を Fig. 3(c) に示す。300~450 K の温度領域における平均相対感度は、励起エネルギーが 1.03, 1.08, 1.13 eV に対してそれぞれ、1.45, 1.15, 0.75 %/K となった。従って、励起エネルギーを 1.03 eV から 1.13 eV に変更することで、相対感度を 1.93 倍向上させることに成功した。

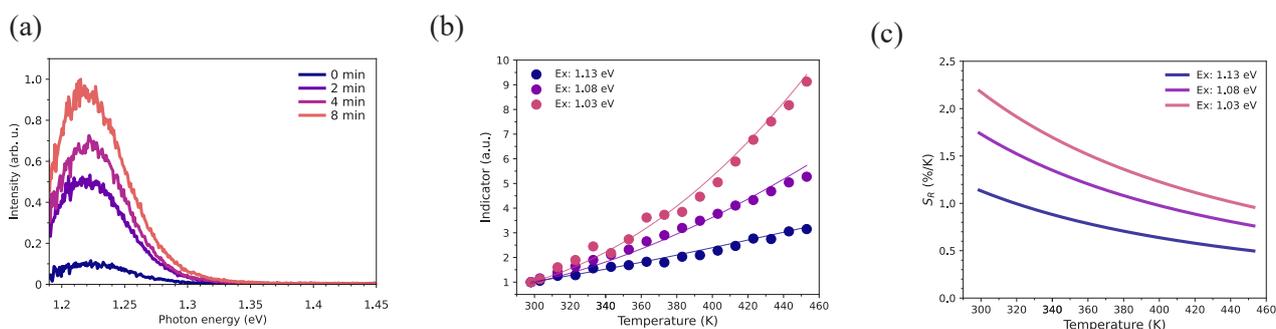


Fig. 3(a) UV 処理時間を変化させた場合の UCPL スペクトル (励起光子エネルギーは 1.08 eV). (b) 励起エネルギー一別の UCPL 温度依存性. 縦軸は UCPL 強度を 300 K で規格している. 実線は計算値. (c) (b) の計測結果より計算を行った、各温度に対する対感度  $S_R$  (%/K).

#### 4. 論文発表リスト

S. Aota, Z. Liu, T. Nishihara, and Y. Miyauchi, Jpn. J. Appl. Phys., accepted.

[参考文献]

[1] N. Akizuki, *et al.*, Nat. Commun. 6, 8920, 2015. [2] S. Aota, *et al.*, Appl. Phys. Exp. 9, 045103, 2016. [3] T. Nishihara, *et al.*, Nanophotonics 11, 5, 2022. [4] X. Ma, *et al.*, ACS Nano 8, 10782, 2014.

# Synthesis and optical properties of semiconductor moiré superlattices

Wenjin Zhang<sup>1</sup>, Yuhei Miyauchi<sup>2</sup>, Toshiaki Kato<sup>3</sup>, and Yasumitsu Miyata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Center for Materials Nanoarchitectonics, NIMS

<sup>2</sup> Institute of advanced energy, Kyoto University

<sup>3</sup> School of Engineering and AIMR, Tohoku University

## 1. Background

Nanomaterials have attracted significant attention for energy conversion device applications. Moiré superlattices are a promising platform for the study of novel physical phenomena and future quantum information technologies. However, conventional moiré superlattices are typically fabricated using stacking and transfer method that relies on micrometer sized flakes obtained by mechanical exfoliation from bulk crystals. This process often introduces interfacial contaminations and various defects. Recently, a plasma assisted chemical reaction method has been used to fabricate Janus moiré superlattices of transition metal dichalcogenides on SiO<sub>2</sub> substrates, introducing an additional degree of freedom for modulating their physical properties. In this project, we develop a fabrication strategy for semiconductor moiré superlattices that are directly prepared on hBN substrates, which reduces substrate induced strain. Monolayer and bilayer TMDCs (WSe<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub>) are grown directly on ultra flat hBN substrates using chemical vapor deposition (CVD). An atomic substitution method is subsequently used to modify the atomic composition of the top layer, whereby monolayer WSSe (MoSSe) and Janus heterobilayers WSSe/WSe<sub>2</sub> (or MoSSe/MoSe<sub>2</sub>) are fabricated by selectively replacing the top-layer Se atoms in WSe<sub>2</sub> (or MoSe<sub>2</sub>) with S atoms via H<sub>2</sub> plasma treatment. Optical spectroscopy is then conducted to characterize the structural and optical properties of the fabricated heterobilayers.

## 2. Experimental methods

Monolayer and bilayer TMDCs, including WSe<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub>, were grown on ultra flat hBN substrates using chemical vapor deposition (CVD) method. The hBN substrates were mechanically exfoliated from bulk crystals. The CVD grown TMDC monolayers and bilayers were subsequently placed in a quartz tube with sulfur powder placed at upstream, and a hydrogen plasma assisted surface chemical reaction was carried out at room temperature using a radio frequency power source. Optical images were obtained using an optical microscope (Nikon ECLIPSE LV100D). Room temperature photoluminescence (PL) and Raman spectra were obtained using a micro spectrometer (Renishaw inVia) with a 532 nm excitation laser.

## 3. Results and discussions

Figure 1a shows the schematic of the experimental conversion process. Monolayer and bilayer TMDCs (WSe<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub>) were prepared on hBN substrates. After H<sub>2</sub> plasma treatment, an atomic substitution reaction occurs in which the top-layer chalcogen atoms are replaced by different atoms (Se replaced by S in this case), resulting in the formation of WSSe Janus monolayers and WSSe/WSe<sub>2</sub> Janus heterobilayers. Because of the smaller lattice constant of the upper Janus monolayer, this process leads to the formation of moiré superlattices even in non-twisted bilayer WSe<sub>2</sub>. Furthermore, due to the weak 2D van der Waals interaction between TMDCs and hBN, substrate induced strain is strongly suppressed, which typically results in enhanced optical quality.

Figure 1b shows an optical microscopy image of a grain composed of monolayer and bilayer regions after plasma treatment. The image reveals stacked triangular grains with different sizes, and the opposite orientations of the

triangles indicate the formation of 2H-like stacking. As shown in Figure 1c, the PL spectra of the MoSSe/MoSe<sub>2</sub> heterobilayer exhibits two typical peaks corresponding to WSSe (1.81 eV) and WSe<sub>2</sub> (1.65 eV). In the bilayer region, the peak at 290 cm<sup>-1</sup> corresponds to the A<sub>1</sub>' mode of WSSe. These optical spectroscopy results confirm the successful fabrication of Janus heterobilayer TMDCs.

Such Janus based heterostructures prepared directly on hBN substrates provide a new high optical quality moiré platform with an intrinsic built-in potential, even in non-twisted heterobilayers, enabling future exploration and functionalization of confined and correlated electron systems.

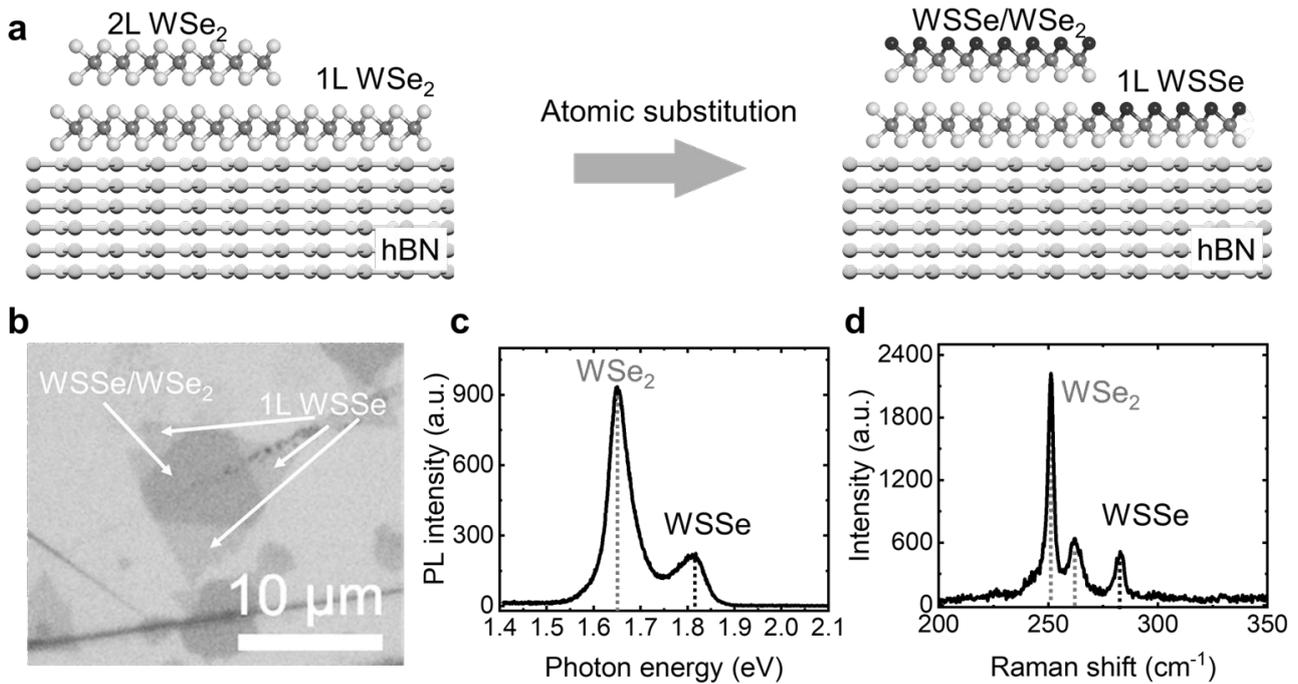


Figure 1. Fabrication and optical characterization of MoSSe/MoSe<sub>2</sub> heterobilayers directly prepared on hBN substrates. (a) Schematic side view illustrating the conversion of bilayer (2L) MoSe<sub>2</sub> into a MoSSe/MoSe<sub>2</sub> heterobilayer via an atomic substitution method. (b) Optical microscopy image of MoSe<sub>2</sub> and MoSSe/MoSe<sub>2</sub> after atomic substitution. (c) Photoluminescence (PL) and (d) Raman spectra of the MoSSe/MoSe<sub>2</sub> heterobilayer, showing two characteristic peaks originating from MoSe<sub>2</sub> and MoSSe.

#### 4. Lists of papers or presentations

[学会発表リスト]

(1) Tomoya Ogawa, **W. Zhang**, Takahiko Endo, Yuta Sawai, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Toshiaki Kato, and Yasumitsu Miyata, “Optical properties of Janus TMD monolayers directly prepared on hBN”. 9<sup>th</sup> project meeting: Science of 2.5 Dimensional Materials: Paradigm Shift of Materials Science Towards Future Social Innovation. 2025, Tokyo, Japan, (Poster).

(2) **W. Zhang**, Takahiko Endo, and Yasumitsu Miyata, “Substrate effects on the optical evaluation of CVD-grown monolayer MoS<sub>2</sub>”. RPGR 2025, Toyama, Japan, (Poster).

# 特殊なマイクロ空間内で形成された 階層性分子組織構造の構造評価

沼田宗典<sup>1</sup>, 藤原沙楓<sup>1</sup>, 中田栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>京都府立大学大学院・生命環境科学研究科

<sup>2</sup>京都大学大学院・エネルギー理工学研究所

## 1. 研究背景と研究目的

【背景】我々はマイクロフロー空間が非共有結合の形成を促進する一種の触媒空間として機能することを様々な系で確かめてきた。マイクロフロー空間内を流通する溶液はバルク溶液とは異なり、内部には常に粘性応力が作用する。フラスコ内の溶液を攪拌すると局所的にはこうした粘性応力が発生していると考えられるが、溶液を微小化することによりその影響は全ての溶質分子に均質に作用するようになる。粘性応力は流体の運動に伴い発生する溶液内部での一種の摩擦であり、流れというマクロな流体運動を分子会合の駆動力へと変換する作用とみなすことができる(図1)。最近、こうしたマイクロ流体の流れそのものが、分子集積化の基本エネルギーとして利用できることが明らかとなってきた。例えば、1次元分子集積である超分子重合に適応すれば、重合率の向上や重合分子数(分子量)の制御だけでなく、異種分子との接合を鍵としたブロック構造などの創製が可能となる。溶液を微小化して規則的に動かすだけで、従来の溶液化学では組み合わせられることのなかった様々な分子同士の能動的な相互作用

の可能性が開かれ、超分子構造体の枠組みが拡張できる可能性を秘めている。本年度はこれまで確立した超分子形成原理に基づき、ポリロタキサン形成をモデルとして、流体中におけるホスト-ゲスト相互作用について検証を行った。流体の影響を受けた特殊なポリロタキサン構造の構造解析を目的とした。

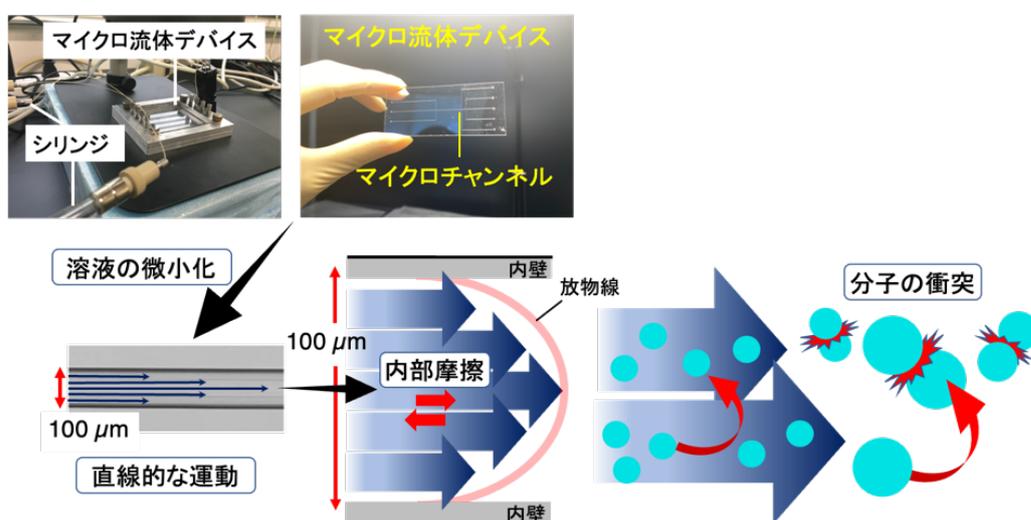


図1: マイクロ流体デバイスと内部における流体運動-分子会合変換機構の模式図

【目的】ポリロタキサンは、環状分子が鎖状高分子を包接し、末端を嵩高い置換基でキャップした超分子構造である。本研究では、シクロデキストリン( $\gamma$ -CD)をホスト、ポリエチレングリコール(PEG)をゲストとして、マイクロ流体中における能動的な環貫通反応(active-threading)の可能性を検討した(図2a,b)。マイクロチャンネルから流出した $\gamma$ -CD/PEG混合溶液を蛍光分光法、動的分散法(DLS)、原

子間力顕微鏡 (AFM)、X 線散乱法 (XRD)を用いて解析した。蛍光測定には、ダンシル基修飾 CD (Dan- $\gamma$ -CD) をホストとして用いた。通常のマイクロチャンネルでは、流路の幅や長さに制約があり、反応場としての拡張性が乏しい。そこで本年度は、管径や長さを容易に変更できるキャピラリーチューブを採用した。管径や長さがポリロタキサン形成に及ぼす影響を精査することにより、効果的なホスト-ゲスト相互作用が起きるための最適な反応場の条件を検証することにした。

【実験方法】 直径の異なる 5 本の PEEK 製キャピラリーチューブを使用した。適切な長さの 4 本のキャピラリーチューブを直径 300  $\mu\text{m}$  の十字型流路に接続し、十字型マイクロ流路を作製した。これら 4 本の短いキャピラリーのうち 3 本は流入口として機能し、中央の長いキャピラリーは長さが 20cm から 300cm まで段階的に変化させ、反応場としての機能を検証した。予め調製した PEG/CD 溶液を中央から流量 10  $\mu\text{L}/\text{min}$  で導入し、側方から純水を流量 5  $\mu\text{L}/\text{min}$  で導入した (合計流量: 20  $\mu\text{L}/\text{min}$ )。その後、

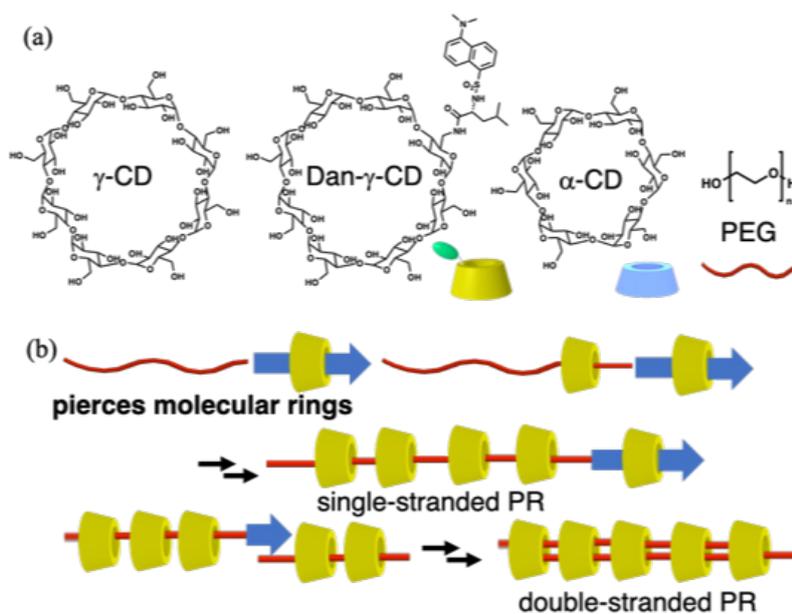


図 2: (a) 本実験で用いたシクロデキストリン (ホスト分子) と PEG (ゲスト) の構造; (b) マイクロ流体中で起こる active-threading 機構によるポリロタキサン形成。

溶出した溶液 ( $\gamma$ -CD ; 0.05 mM、PEG ; 1 mg/mL) を回収し、直ちに蛍光スペクトル測定および動的光散乱 (DLS) 測定、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて分析した。蛍光測定にはゲストの包接により蛍光強度の減少が起きるダンシル基修飾  $\gamma$ -CD ( $\gamma$ -CDDn) を使用し、包接挙動を間接的に評価した。

【実験結果】 流出溶液の蛍光測定を実施した結果、管径が細くチューブ長が長いほど、蛍光強度が減少することが分かった。この結果は、管径の減少によりホスト-ゲスト相互作用の効果が増大することを意味する。同様に DLS 測定の結果、管径の減少により、流体力学半径が増加することが確かめられた。この結果は蛍光測定の結果とよく一致する。これらの結果より、キャピラリー管の管径が十分に細い場合のみ、ポリロタキサンの形成に影響を及ぼすことが明らかとなった。今後は得られたポリロタキサン構造の詳細な構造解析を AFM や電子顕微鏡 (SEM, TEM) を用いて実施していく予定である。

## 2. 論文発表リスト

S. Fujiwara, S. Tanaka, M. Numata, "Practical polyrotaxane synthesis using capillary tubes based on active-threading mechanism" *Chem. Lett.* **2025**, 54, upaf123 (<https://doi.org/10.1093/chemle/upaf123>).

# 高強度レーザーと構造的媒質の相互作用による 高エネルギー密度プラズマの生成と保持

岸本泰明<sup>1,2,3</sup>, 松井隆太郎<sup>1,2</sup>, 升野振一郎<sup>2,4</sup>, 時田茂樹<sup>5</sup>, 深見一弘<sup>5</sup>, 坂口浩司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院エネルギー科学研究科, <sup>2</sup>非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット,

<sup>3</sup>エネルギー理工学研究所, <sup>4</sup>化学研究所, <sup>5</sup>工学研究科, <sup>6</sup>東海大学総合科学技術研究所

**研究背景:** 次世代のエネルギー源である核融合研究は、プラズマを媒質として、磁場方式とレーザー（慣性）方式が独自に発展し、前者は ITER、後者は NIF において共に重水素・三重水素（DT）による燃焼プラズマを実現するレベルに到達した。特に後者と関係して、近年発展の著しい集光強度が  $10^{18-22}$  W/cm<sup>2</sup> に及ぶ高強度レーザーを物質に照射すると、DT 核融合に求められる値を大きく上回る数 100 keV～数 MeV の温度、数 G bar～数 T bar の圧力の高エネルギー密度プラズマを生成することが可能なことから、これまで困難とされてきた中性子を発生しない水素・ホウ素（PB）による究極の核融合 [ $P + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3{}^4\text{He} + 8.6\text{MeV}$ ] の実現も視野に入る。しかし、これらのプラズマの保持（閉じ込め）時間はプラズマのサイズ（数 10～数 100 $\mu\text{m}$ ）と音速 Cs で決まる慣性時間程度と短いことから応用研究も対象がこの時空間スケールに限られる。しかし、慣性時間を超えてこれを長時間閉じ込めることができれば PB 核融合を含む応用研究のクラスも格段に広がることを意味する。

**研究目的・目標:** 本研究では、サブ  $\mu\text{m}$  オーダーでデザインした微細構造を持つ物質（構造的媒質）をターゲットとして、これに集光強度が  $10^{18-22}$  W/cm<sup>2</sup> 領域の超高強度レーザーを照射することで、相対論電子とイオンおよび広帯域の電磁場が結合した高エネルギー密度プラズマを生成するとともに、その過程で現出する磁場の自己組織化機能を制御することにより、慣性時間を超えた長時間の閉じ込め状態を実現できるとの着想に至り、これまで坂口浩司教授（京大エネ理工／本経典申請世話人）および深見一弘准教授（京大工学研究科）の指導を受け、直径がサブ  $\mu\text{m}$  で高さが数 10  $\mu\text{m}$  レベルの円柱状物質が多数配列したロッド集合体（以下、「構造的ターゲット」）を電子線リソグラフィとプラズマエッチングを組み合わせた融合技術による作製することに成功した。これまで蓄積してきたこれらの成果の下に、本当該年度は、(1)より精緻な構造的ターゲットの作製とともに、(2)それを用いた高強度レーザーとターゲットとの相互作用実験を行うとともに、得られた結果と粒子モデルに基づくシミュレーションを比較することで相互作用過程における高強度の磁場の発生やそれによる生成された高エネルギー密度プラズマの慣性時間を超えた閉じ込め状態を同定することを目標とする。

## (1) 高精度・高アスペクト比の多様なロッド集合体の作製

サブ  $\mu\text{m}$  の構造的ターゲットに関して、2024 年度までの当該拠点との共同研究を通して、これまでのネガ型のリソグラフィに対して、これをポジ型に変更することにより、ターゲット精度の向上を図るとともに、電子線リソグラフィにおいて dose 量に関する条件出しを行い、作製工程の大幅な短縮を達成した。

一方で、ロッド集合体の作製領域を広域に設定した場合、中央部分と周辺部分でエッチングの割合に不均一性が生じること、さらに、ボッシュプロセスの回数を増やすことで高アスペクト比（高さ／直径：50-100）のロッド集合体を作製した場合、ロッドの根元部分細る等、高さ方向のロッドの太さが不均一となるなどの現象に遭遇した経緯がある。このため、当該年度（2025 年度）では、ボッシュプロセスにおける調整）および ICP 電圧（保護膜厚を調整）について綿密な条件検討を行い、高さ方向におけるロッド

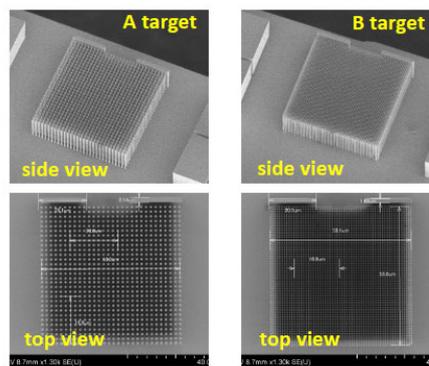


図1.(左図)重点率  $p=0.2$  のターゲット (A)  $\Phi 1.0$   $\mu\text{m}$  と (B)  $\Phi 0.5$   $\mu\text{m}$  のロッド集合体(表面積比 1:4)の(上)側面方向図と(下)上面方向の様子。集合体サイズは  $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ 。

ド径の不均一性の解消と、直径 100 nm オーダーのより微細なロッド集合体の作製を試みた。図 1 は、今年度に作製したシリコン (Si) 製ターゲットの外観を示す。空間充填率  $p \approx 0.2$  (設計値) に対し、(a) 直径  $\Phi = 1.0 \mu\text{m}$ 、アスペクト比  $A = 18$ 、および (b) 直径  $\Phi = 0.5 \mu\text{m}$ 、アスペクト比  $A = 36$  の構造である。ここでは、前年度と比べて、周辺領域と中心領域の差異なども解消されている。一方、ロッド間間隔は電子線リソグラフィの設計値とほぼ厳密に一致するものの、各々のロッドの直径は約 5-10% 程度の差異が生じている。具体的には、図 1 に示す実測値として、a) では  $\Phi = 0.9 \mu\text{m}$  ( $p \approx 0.16$ )、b) では  $\Phi = 0.32 \mu\text{m}$  ( $p \approx 0.08$ ) が得られた。これより、ロッドの空間充填率は半径に依存して変化し、特にロッド径が小さい系ほど相対的な縮小率が大きくなることから分かる。一方、比表面積は、設計値では b) は a) の 2 倍であるのに対し、実測値では約 1.4 倍にとどまっている。これらの差異を定量的かつ厳密に評価するためには、BIAS 電圧および ICP 電圧のロッド径に依存した最適条件出しが必要であると考えられる。空間重点率を  $p \approx 0.1$  とした場合においても、A および B ターゲットの作製には成功している。しかし、 $p \approx 0.2$  の場合と比較すると、周辺領域のロッドには変形・倒壊が起きている。周辺領域では対称性が失われるため、ロッドのエッチング過程において力のバランスが崩れ、倒壊などの現象が発生すると考えられる。(使用施設：京大ナノテクノロジーハブ拠点)

## (2) 構造的ターゲットと高強度レーザー照射実験の実施

前項 (1) で作製したロッドターゲットを使用して、京大化研の T6 レーザーによる照射実験を行った。相互作用時に生成される電子エネルギーの空間分布特性を調べるため、電子エネルギースペクトルメータ (ESM) 2 台を用い、レーザー入射角に対して異なる 2 方向 (ロッド軸方向と垂直方向) に対して電子エネルギー分布を計測し、加熱および粒子加速の状況の評価した。さらに、サブ  $\mu\text{m}$  スケールの微細構造はレーザーメインパルスに先行するプレパルスによる崩壊が懸念されるため、T6 システムに備わるプラズマミラー (PM) を導入した。

図 3 は、260mJ のエネルギーのレーザーを重点率の異なる A および B ターゲットのロッドに対して上面から照射 (22.5°) したときの上面方向 (a) (b) および側面方向 (c) (d) の電子のエネルギー分布を示している。同一ターゲットにおいては、ともに  $E \leq 0.5\text{MeV}$  のエネルギー領域では上面粒子数が側面に比べて多い一方、 $E \geq 0.5\text{MeV}$  のエネルギー領域では比表面積の大きい B ターゲットでテール成分が強く発生するとともに、 $0.5\text{MeV} \leq 1.0\text{MeV}$  にプラトーの領域が発生して様子が分かる。これらの結果は、質量密度の同じバルク構造体が微細構造の差異によって相互作用が異なることを示すとともに、構造とレーザー照射の組み合わせにより、生成される高エネルギー密度のプラズマ状態の制御が可能であることを示している。

参考： 2024 年度ゼロエミッションエネルギー研究拠点報告書 ZE2024B-14 (岸本・松井他)

文献： R. Matsui, H. Sakaguchi, Y. Kishimoto, et al.,

Kishimoto et al., Int. Conf. of HED Sciences 2024 (HEDS2024), PACIFICO Yokohama, Japan, April 26th, 2024.

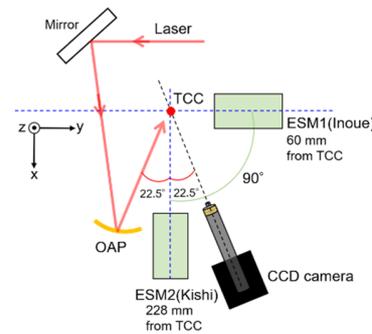


図 2. レーザー照射配位。電子エネルギー分布をロッドの軸方向 (ESM1) と垂直方向 (ESM2) の 2 方向から同時計測。

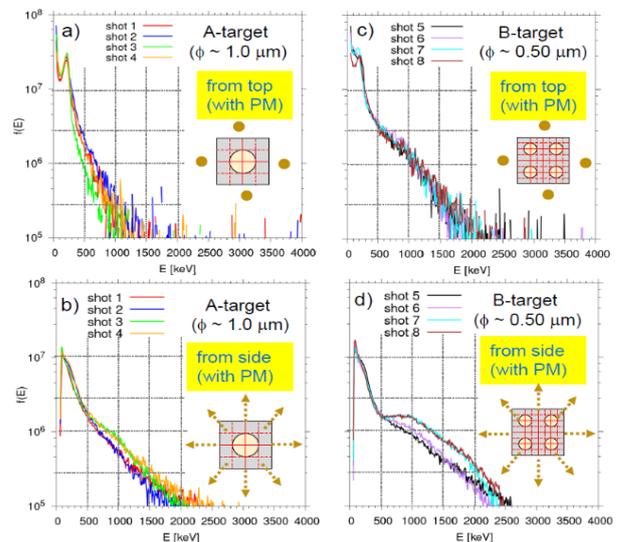


図 3. 空間重点率の異なる A および B ターゲットへのレーザー照射 (260mJ) で得られた上面方向 ((a) と (c)) および側面方向 ((b) と (d)) の電子のエネルギー分布。

# 中赤外自由電子レーザーにより半導体表面に形成される微細周期構造のその場計測

橋田昌樹<sup>1,2</sup>, 升野振一郎<sup>2</sup>, 全 炳俊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東海大学 総合科学技術研究所、<sup>2</sup>京都大学 化学研究所、<sup>3</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

材料の破壊閾値を越えるレーザーフルエンス（単位面積あたりのレーザーエネルギー： $\text{J}/\text{cm}^2$ ）に調整された短パルスレーザーを固体に照射すると、表面の一部が飛散・剥離し照射痕が形成する。照射痕の底面にはレーザー波長よりも短い格子間隔（以下、大きさと呼ぶことにする）の微細周期構造（以下LIPSS; Laser Induced Periodic Surface Structures と呼ぶ）が自己組織的に形成される。LIPSS形成解明のためには $\mu\text{m}$ 以下の空間領域で固相・熔融液相・気相・プラズマ等が混在し（以下、全ての相を含めて物質と呼ぶ）、相互に物質・エネルギー輸送を伴いながらフェムト秒からナノ秒の時間領域へと発展する複雑な物理が関わっている。したがって、レーザー場と物質との相互作用を、高い分解能を保ったまま十分に広い空間スケールで実時間計測する手法の構築やモデル構築が必要になる。本課題では、中赤外自由電子レーザー（FEL）で形成されるLIPSSをその場計測することで形成機構解明に挑戦するものである。R3-R5年度は、半導体材料（Si）についてLIPSSを形成し形成に深く関わっていると言われている表面プラズマ波を捉えることに成功した。これらの成果からレーザーと物質の相互作用の結果生成される表面プラズマ密度が形成に深く関係することが分かった。しかしLIPSS形成のメカニズムについて議論を深めるために疑問が生じた。上記の実験で用いられたFELは約6千個のマイクロパルスで構成されるバーストパルスであり、LIPSSはバーストパルスにより形成されているのか、それとも1パルス照射で形成されているのか分離できないことにある。そこでR6年度は単一パルスのFEL照射でできるLIPSSの種（表面プラズマ波）に注目し、FELの1パルス切り出しシステムを構築した。本年度（R7年度）は単一パルス照射でも表面プラズマ波は形成されるのかを明らかにするため「その場計測システム」を構築し、単一パルス照射された材料表面の様子を観測し形成機構を議論した。

## 2. 実験

プラズマミラーを導入した「その場計測」のための概略図を図1に示す。中赤外（ピーク波長  $11.4 \mu\text{m}$ 、直径  $14 \text{ mm}$ ）自由電子レーザーはマクロパルス幅  $3.7 \mu\text{s}$ 、繰り返し周波数  $2 \text{ Hz}$ 、マイクロパルス幅  $150 \text{ fs}$ 、繰り返し周波数  $29.75 \text{ MHz}$  のモードで運転して出力されるパルス切り出しを行った。プラズマミラーにはゲルマニウム基板を用い、YAG レーザー照射により形成される表面プラズマにより単一パルスを切り出した。本年度は単一パルスの自由電子レーザーをサンプル（シリコン）表面に  $f=50 \text{ mm}$  の ZnSe レンズで集光照射し、その照射による表面変化を Nd:YAG の二倍高調波（波長  $532 \text{ nm}$ ）により「その場計測」する光学系を新たに構築した（図1）。その場計測の概略図を図2に示す。中赤外自由電子レーザーを約  $55^\circ$  の入射角度でサンプル（シリコン）表面に集光照射し、その表面状態を Nd:YAG の二倍高調波パルスを照射することでプローブ計測した。表面変化は CMOS カメラにより測定する光学系である。



図1 微細構造形成のための「その場計測」

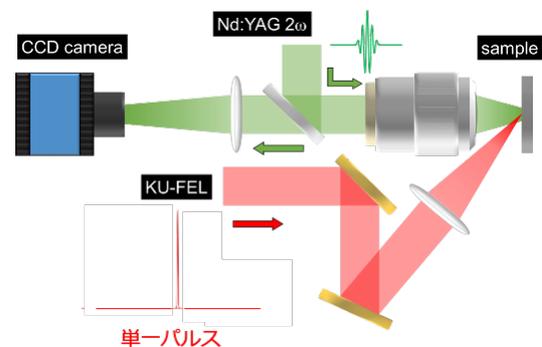


図2 「その場計測」の概略図

中赤外自由電子レーザーは、回折限界に近い集光スポットを得るため2組の軸外し放物面鏡を配置した。放物面鏡は $90^\circ$ の軸外しで $f=101.6\text{ mm}$  (MPD249-M03) と $f=25.4\text{ mm}$  (MPD119-M03) を2組用いた。図3はサンプル表面における集光スポットをマイクロプロメータにより測定した空間分布プロファイルを示す。2組の軸外し放物面鏡を調整することで回折限界の大きさのスポットが得られた。単一パルスの中赤外自由電子レーザーのエネルギー $2.6\text{ }\mu\text{J}\sim 2.9\text{ }\mu\text{J}$  をシリコン表面に照射したが表面に加工痕跡は見つからなかった。1パルスでは加工痕跡は見つからなかったが表面プラズマは計測される可能性がある。

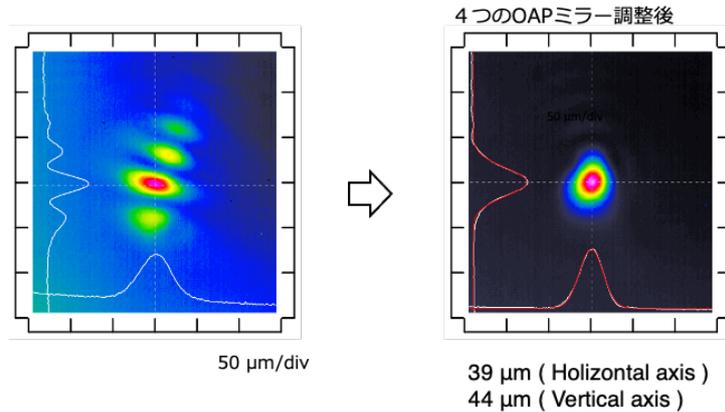


図3 集光点における自由電子レーザーの空間分布

微細構造形成のメカニズムについて、レーザー照射により表面に形成される高密度プラズマがレーザー反射率を増大させ、反射レーザーにより形成される表面プラズマ波が重要な役割を果たしていることを明らかにした。そして中赤外自由電子レーザー照射により微細構造が形成されるモデルを構築し、その有効性を半導体の材料種 (Si, Ge, SiC-4H, GaN) について適応されることを確かめた。

### 3. 研究成果報告

[口頭発表リスト]

- (1) 橋田昌樹、時田茂樹、升野振一郎、山口 滋、岩森 暁、全 炳俊“中赤外レーザー単一レーザーパルス照射シリコン表面のプラズマ密度計測に向けた取り組み”，第2回KU-FEL ユーザーズミーティング 2025年12月12日
- (2) M. Hashida, M. Kusaba, H. Sakagami, S. Kulinich, S. Iwamori, " Nanostructures formation on solid materials irradiated with laser pulses", Tokai University University of Sussex University of Brighton Workshop on Carbon Neutral Technologies, 28 May 2025.
- (3) 橋田昌樹、 “レーザー量子加工による表面改質と機能性付与の最新動向と展望”，東海大学マイクロ・ナノ研究開発センター2025年度シンポジウム，東海大学 19号館2階207, 10 December 2025.

[受賞]

- (1) 橋田昌樹，塚本 雅裕，佐藤 雄二，竹中 啓輔，草場 光博，坂上 仁志， “ナノドット構造形成による材料機能性付与 ー見えてきたレーザー量子加工ー”大阪大学共同利用・共同研究賞、令和7年5月23日

# 農作物の病害感染を防ぐための、 簡便・迅速な遺伝子診断手法の開発

萩原正規<sup>1</sup>，中田栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>弘前大学大学院理工学研究科

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

本研究提案「農作物のウイルス感染を、現場で簡便・迅速に検出する方法の開発」では、申請者が開発を進める『現場で診断判定可能な遺伝子検査法』を応用し、農場現場において作物のウイルス・ウイルス感染状況を簡便に診断するための方法を開発することを目指す。ウイルスやウイルスによる感染は、イネやジャガイモなどの主要作物に深刻な被害をもたらしており、これらの病害を早期に検出し、拡大を防ぐ体制の構築が求められている。

このような背景のもと、国内農業を保護し、食用植物およびバイオマス植物の安定生産を実現するためには、植物検疫を含む感染診断技術の高度化が必要不可欠である。現在、ウイルスやウイルス感染の診断には、PCR 法や ELISA 法といった高感度な検査法が用いられている。特に遺伝子検査は、対象遺伝子を増幅・検出するため、極めて高感度に検出可能であり、臨床応用、食品分析、犯罪捜査等に幅広く利用されている。しかしながら、これらの手法はいずれも高価な専用装置や熟練した操作を必要とするため、実験室内でしか実施できないという課題がある。そのため、検疫現場や生産現場において、迅速に感染の有無を判断することは容易ではない。

本申請では、遺伝子増幅に用いるウイルス・ウイルス遺伝子特異的な短鎖 DNA（プライマー）に申請者が開発した化学修飾を施すことにより、高価な専用機器を使用することなく、ウイルス・ウイルス感染の有無を抽出液の色調変化として可視化できる、『全ての操作を現場で行うことが可能』な簡便なウイルス・ウイルス感染診断法を確立することを目的とした。本手法の最大の特長は、検体の前処理から判定まで、すべての操作を現場で完結できる点にある。このような現場完結型の遺伝子診断技術に対する社会的ニーズは高く、本研究成果は、農作物の感染状況把握にとどまらず、食品分野における遺伝子組換え体の迅速検出や犯罪捜査など、幅広い分野への応用も期待される。

これまでに、遺伝子特異的プライマーに酵素活性を有する塩基配列を融合したプライマーを設計し、ウイルス遺伝子の逆転写反応産物を PCR により増幅した。PCR 反応溶液に金属錯体および過酸化水素を添加することにより、酸化された発色基質が呈色する反応を利用して遺伝子増幅を検出することができる。本反応は触媒反応であるため呈色は経時的に増強され、5-10 分後には遺伝子増幅の有無が視覚的に判断できる。これまでに、遺伝子増幅に伴い触媒活性が増強され、呈色反応が促進される二種類の手法の開発に成功した（Chem. Lett. 2024, Chem. Lett. 2024）。しかしながら、これまでに開発した融合プライマーでは、(1) 特別な化学修飾を必要とするためプライマー合成のコストが高い点、(2) プライマーに修飾した核酸酵素の活性を完全にオフ状態にすることができない点（標的遺伝子が存在しない場合のバックグラウンド発色）、が課題として残っていた。

本年度はその課題を克服する手法の開発を目指し、新たなプライマー修飾法を検討した。新たなプライマー修飾法では、特別な修飾塩基を利用することのないプライマー合成を行い、遺伝子増幅反応時に初めて核酸酵素配列が合成される。遺伝子増幅産物は、熱力学的に安定な構造へと自発的に立体

構造が変化し、酵素活性を発揮する。本コンセプトを実証するために、融合プライマーを設計し、PCR 反応産物の酵素活性を確認した。熱力学的に安定な核酸酵素を生じるように設計したプライマーでは、PCR による DNA 増幅反応は問題なく進行し、遺伝子増幅産物は特別な操作を必要とすることなく酵素活性を示した。

一方、生じる核酸型酵素の熱力学的安定性が低下するように設計したプライマーでは、遺伝子増幅は問題なく進行するものの、増幅産物は酵素活性を示さなかった。これは、DNA 増幅反応により生じた二重鎖 DNA が、核酸型酵素を形成する状態よりも熱力学的に安定であるためと考えられる。熱力学的に安定な核酸酵素を生じるように設計したプライマーでは、増幅産物の自発的な構造変換により核酸酵素が形成されることを、円偏光二色性スペクトル解析および紫外吸収スペクトルを利用した融解温度解析により確認した。

現場完結型の遺伝子診断技術に必要な点として、高価な機器を用いることなく遺伝子増幅・検出を行う手法が必要不可欠である。そこで、一定温度で遺伝子増幅を行う等温遺伝子増幅法への応用を検討した。これまでにさまざまな等温遺伝子増幅法が報告されているが、標的の遺伝子だけを選択的に増幅可能な Loop-Mediated Isothermal Amplification (LAMP) および Helicase-dependent amplification (HDA) に適用できるように、プライマーへの修飾位置やプライマー長を検討し、遺伝子増幅および発色反応を評価した。HDA 法では特異的な遺伝子増幅は進行したものの、遺伝子増幅量が少なく、増幅産物を 10 分以内に可視化検出することは困難であった。一方、LAMP 法では十分な増幅に伴う発色が確認できた。今後、実際のウイルスやウイロイドサンプルを用いて感染の可視化検出を検討するとともに、簡便に操作が行える all-in-one のキット化も検討したい。

#### [論文発表リスト]

(1) Hironao Munakata, Yuri Sohma, Kaito Utsumi, Rinka Ohno, Kotaro Ishida, Eiji Morita, Shin-ichi Sato, Masaki Hagihara  
Chemistry Letters, Volume 53, Issue 11, November 2024, upae212,  
<https://doi.org/10.1093/chemle/upae212>

(2) Hironao Munakata, Yuri Sohma, Kotaro Ishida, Eiji Morita, Shin-ichi Sato, Masaki Hagihara  
Chemistry Letters, Volume 53, Issue 10, October 2024, upae190,  
<https://doi.org/10.1093/chemle/upae190>

# Advanced Hyperspectral Imaging for Early Detection of Coffee *Paramyrothecium* Leaf Blotch

Ratchadawan Cheewangkoon<sup>1</sup>, Tomijiro Hara<sup>2</sup>, Yumiko Takatsuka<sup>2</sup>, Sararat Monkhang<sup>3</sup>, Anuruddha Karunarathna<sup>4</sup>, Dulanjalee Lakmali Harishchandra<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Entomology and Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University

<sup>2</sup> Institute for Advanced Energy, Kyoto University

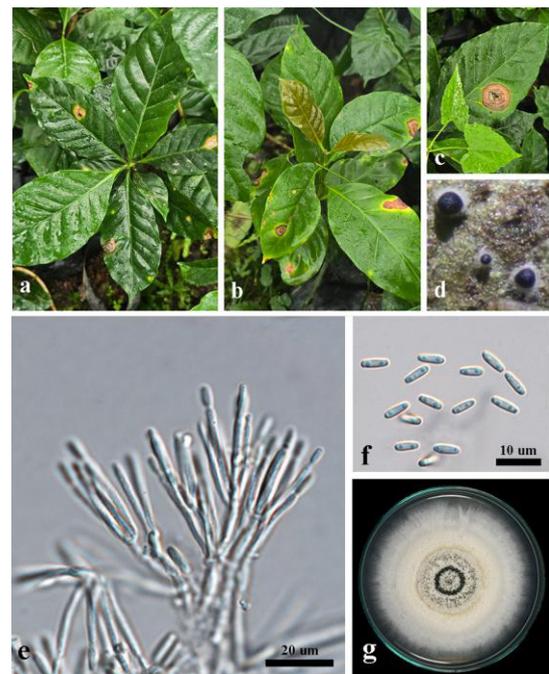
<sup>3</sup> Faculty of Animal Sciences and Agricultural Technology, Silpakorn University

<sup>4</sup> Office of the Research Administration, Chiang Mai University

This project applies hyperspectral imaging (HSI) as a non-destructive approach for early detection of coffee leaf blotch caused by *Paramyrothecium roridum*, aiming to support precision disease management and zero-emission agriculture. Field surveys were conducted to collect coffee leaves representing healthy, chlorotic, and diseased conditions, followed by pathogen isolation and identification to confirm the causal agent (Fig. 2). A schematic overview of the integrated methodological framework, including field sampling, laboratory preparation, spectral sensing, and hyperspectral imaging, is presented in Fig. 1. Spectral data were acquired using CI-710s leaf spectrometry as a point-based reference system and hyperspectral imaging platforms Specim IQ and Specim FX, covering the visible to near-infrared wavelength range (400–1000 nm), under controlled laboratory conditions to ensure consistency and reproducibility.



**Fig.1** Schematic methodological framework outlining the integration of spectral sensing and hyperspectral imaging for early detection of infection in coffee leaves.

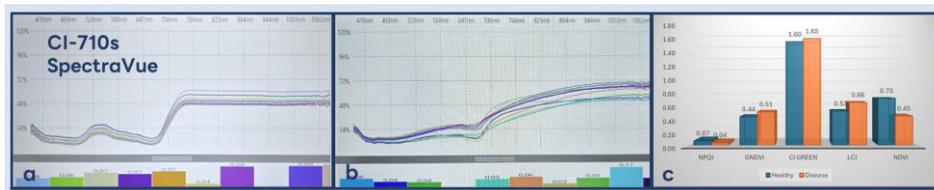


**Fig.2** Coffee Leaf Blotch caused by *Paramyrothecium roridum*: (a–c) leaf symptoms, (d) sporodochia, (e) penicillate conidiophores, (f) conidia, and (g) colony on PDA.

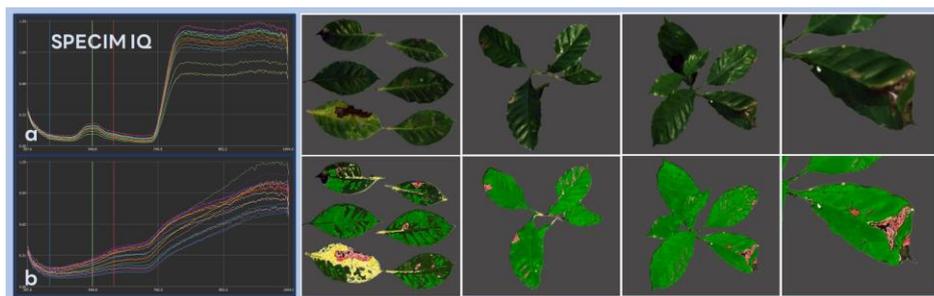
Preliminary spectral analyses revealed clear differences between healthy and infected leaf tissues. Leaf spectrometry results showed distinct spectral profiles and vegetation index responses between healthy and diseased leaves (Fig. 3), although conventional indices exhibited only limited sensitivity. Hyperspectral imaging with Specim IQ further demonstrated consistent shifts in reflectance profiles between healthy and infected tissues and enabled spatial delineation of symptomatic areas using Spectral Angle Mapper (SAM) classification (Fig. 4). High-resolution hyperspectral imaging using Specim FX confirmed these trends, clearly separating healthy, chlorotic,

and diseased tissues based on full-spectrum reflectance characteristics and SAM-based classification maps (Fig. 5). Across all platforms, infected tissues generally exhibited increased reflectance in the visible region and reduced reflectance in the near-infrared region, indicating early pigment degradation and structural damage.

These results demonstrate the strong potential of hyperspectral imaging for detecting disease-related physiological changes prior to visible symptom development, thereby enabling earlier and more targeted disease management. By supporting timely intervention and reducing unnecessary fungicide applications, this approach contributes to lower greenhouse gas emissions associated with chemical inputs and aligns with the objectives of zero-emission agriculture. The project is currently advancing toward controlled inoculation experiments using detached leaf and whole-plant systems to systematically monitor early infection stages and corresponding spectral changes. At this stage, the work represents foundational research that establishes essential datasets, analytical workflows, and spectral references necessary for future model development and potential translation toward cost-effective multispectral systems for practical field applications.



**Fig.3** Spectral profiles and vegetation indices of healthy vs. diseased coffee leaves measured with a CI-710s Leaf Spectrometer.(a) Healthy spectra; (b) diseased spectra; (c) indices (NPQI, GNDVI, CI-GREEN, LCI, NDVI) distinguishing leaf conditions.



**Fig.4** Spectral profiles and SAM-based classification of *Paramyrothecium* infection in coffee leaves using Specim IQ. (a) Healthy leaf spectra; (b) diseased leaf spectra. Right: RGB images (top) and Spectral Angle Mapper (SAM) classification maps (bottom) generated using two reference spectra for symptomatic tissue and one for healthy tissue to detect infection boundaries.



**Fig.5** Spectral profiles and SAM-based classification. measured with Specim FX. (a) Spectral curves of healthy, chlorotic, and diseased tissues. (b) RGB image. (c) SAM classification maps identifying symptomatic leaf regions.

**Conference Presentation:**

Cheewangkoon R., Haituk S., Takatsuka Y. and Hara, T. 2024. Towards Zero-Emission Agriculture: Advanced Hyperspectral Imaging for Early Detection of Coffee *Paramyrothecium* Leaf Blotch. The 16<sup>th</sup> International Symposium of Advanced Energy Science. 11<sup>th</sup> – 13<sup>th</sup> December 2025. Kyoto University, Uji Campus. ZE Poster Session. ZE2025B-19.

# シグナル増強システムを介したナノ構造形成による 細胞内金属種のAFM/EMイメージング

高嶋 一平<sup>1</sup>, 伊山 夏椰乃<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>函館工業高等専門学校、<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究課題の概要

マンガンは主に +2/+3 の酸化還元性を活かして、ミトコンドリア内のエネルギー産生における制御因子として機能する重要な微量元素として知られる。しかし、マンガンのミトコンドリアへの移行経路や生体内局在の解明は未だに課題となっている。その要因として、細胞内マンガンを高解像度で可視化検出する手段がなく、局所濃度を追跡できないことが挙げられる。本研究ではマンガンの機能解析を指向して、ミトコンドリアに取込まれるマンガンの濃度分布を明らかとする。一般的に生化学研究では、金属種の挙動を蛍光解析することで多くの事象を明らかとしてきた。しかし、蛍光顕微鏡はレーザー光の回折限界に伴って解像度が限られており、ミトコンドリア等の組織内での微細な分子挙動を解析できない。加えて、マンガンの常磁性による金属消光やマンガン選択的な結合分子が未開発であるために蛍光解析は困難であった。そこで細胞内微小環境でのマンガンの挙動を解析するために、筆者らは高速原子間力顕微鏡(以下、AFM)や電子顕微鏡(以下、EM)に注目した。これらの技術は高解像度である一方で、小さい分子や金属種(マンガン)は直接に解析できない。そこでこれら顕微鏡観察において高いシグナル比を有するタグ構造を導入する。過去には遺伝子工学的に導入したタグ構造によるAFM イメージ [Y. F. Dufrière, *Integr. Biol.*, 2012] や EM イメージ [R. Y. Tsien, *PLOS Biol.*, 2011; G. He, *Nat. Methods*, 2020] の報告例はあるものの、その解析対象は数種のタンパク質のみであった。本研究は、多様な化学種に対して AFM/EM イメージを可能とするタグシステムを提供し、マンガンのミトコンドリア内の濃度分布を高解像イメージングすることを目指している。

## 2. 研究成果 (公表できない部分があるため、詳細は割愛して報告する)

今回の酵素反応を用いた手法では、立体的嵩高さにより内因性酵素に対する選択性を付与し、さらに酵素反応でシグナル分子が解離して蛍光発光する基質分子を設計・合成した。通常のプローブ分子は標的分子と 1 : 1 で反応して、さらに生成物は拡散してしまう。しかし、本戦略ではマンガン特異的に駆動する酵素反応によりマンガン 1 つに対してシグナル分子が多数放出される。加えてシグナル分子が周囲に固定されることでシグナル分子は拡散せずに蓄積する設計とした。

前回での報告で市販の基質分子を用いた野生型酵素での評価により、野生型は ① 2 量体形成、② 反応条件の厳しさ (塩基性、高温)、③ 金属間選択性、という 3 点で問題を有することが判明した。本年度は、上記の合成基質だけでなく、機能改変した変異体を新たに発現・精製して、本基質と本変異体を併用した評価を実施した。その結果、本酵素は 2 量体形成を避けられるだけでなく、pH 7.4, 37°C 条件での温和な条件でも酵素反応が速やかに進行することを確認した (図 1)。金属間選択性も高く、特

に野生型で問題となった Mg や Zn への非特異応答が解消された。

一方で、今後の酵素の構造最適化では反応速度論的解析を必要とする。上記の合成基質では（濃度依存性のない）会合誘導型蛍光発光であるため、反応速度論的解析が不可能であった。そこで筆者の研究室では、緑色蛍光色素 (Tokyo Green) を導入した基質分子の新たに設計・合成しており、今後は開発した多種の変異体に対してマンガン検出における速度論的解析へ活用する予定である。また同時に本酵素の活性部位近傍での変異を導入した誘導体 4 種の発現ベクターを調製した。今後は、これら蛋白質の発現精製を行いつつ、マンガン検出能での詳細な比較検討による構造最適化を推し進める。

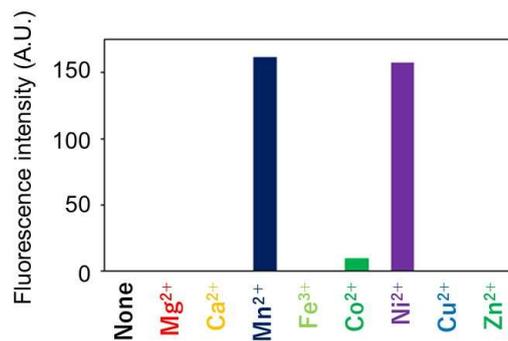


図 1 変異体での酵素活性（蛍光発光強度変化）。金属濃度 20  $\mu$ M (1 mM Ca<sup>2+</sup>, 1 mM Mg<sup>2+</sup>), enzyme 20 ng/mL, 100 mM HEPES (pH 7.4), 37°C, 1 時間反応 (30 分以内で飽和)。

### 3. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

特に無し。

[受賞、プレス発表等]

特に無し。

[口頭発表リスト]

伊山 夏椰乃、中田 栄司、高嶋 一平、改変酵素と合成基質ペアによるマンガン(II) 選択的な検出法の開発. 2025ZE 拠点年会、京都大学 宇治おうばくプラザ きはだホール（京都大学エネルギー理工学研究所）、2025 年 12 月 11 日。

# 社会共生を促進するトランスサイエンス問題における 意思決定プロセスの革新

岩切宏友<sup>1</sup>, 村吉範彦<sup>2</sup>, 森下和功<sup>3</sup>

<sup>1</sup>琉球大学教育学部

<sup>2</sup>東村立東中学校

<sup>3</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究の背景および目的

再生可能エネルギーや原子力発電に関する意思決定は、科学的知見だけでなく社会的価値観や倫理観とも深く関わるトランスサイエンス問題として位置づけられる。こうした課題に対し、国民が科学技術と社会の関係性を理解し、情報格差を是正した上で公正な意思決定を行える仕組みの整備が必要である。本研究では、より公正（と考えられる）情報提供を行い、参加者間の情報格差を減らしたうえで意思決定を試みる新しいアプローチを検討した。この取り組みは、ディベート型授業を簡略化した形式にもなり、トランスサイエンス問題を考えさせる新規的な教育手法の一つとしての可能性も有する。本研究はトランスサイエンス問題に対する意思決定プロセスの革新に向けた試行的な取り組みであり、原子力発電等のエネルギー問題に関する多角的な議論を促進し、併せて科学教育への還元を目指すものである。

## 2. 研究方法

本研究では、原子力発電に対する多面的理解を促し、情報格差を是正したうえで公正な意思決定を行う教育的アプローチを試みた。具体的には、主要な 12 の論点（賛否が分かれる原子力議論）を提示し、それぞれに対する反論と反駁を整理した教材を用い、参加者が多角的に判断できる状況を整備した。具体的な論点を以下に列記する。

- ① 原発の利用は電気料金の抑制につながる
- ② 原発は放射性廃棄物を生み出し、将来に禍根を残す
- ③ 再生可能エネルギー賦課金は不公平。原子力を活用して電力コストを抑えるべき
- ④ 自然エネルギーの拡大で原発は不要になる
- ⑤ 原発は地域経済へ貢献する
- ⑥ 原発があると、付近住民の健康に害を及ぼす
- ⑦ 原発維持はエネルギー安全保障と国際交渉力強化に必要不可欠である
- ⑧ 原発はどれほど安全対策を強化しても、戦争やテロによる大きなリスクが存在する
- ⑨ 新型原子炉（小型モジュール炉）の建設推進をすべき
- ⑩ 市民の不安を考慮し、原発を廃止すべき
- ⑪ 既存原発を長く使うことが現実的な選択肢
- ⑫ 原発は安全性より利益を優先しているので信用できない

対象は R 大学教育学部の学生 45 名であり、90 分間の授業を実施した。授業では、原子力発電の基本的仕組み、国内外の現状、再生可能エネルギーとの比較などを動画・スライドで導入したのち、原子力に関する 12 の主張と反論・反駁を講義形式で提示した。受講者は各主張に対して 5 段階リッカ

ート尺度で賛否を判断し、授業前後で意識変化を測定した。また、原子力発電に対する授業前後の認識変化についての調査も行った。それぞれの質問内容は以下の通りである。

Q1：原子力発電の現状を理解していると思う

Q2：原子力発電に対して不安を感じる

Q3：原子力発電は環境にやさしいと思う

Q4：原子力発電は日本にとって必要だと思う

これらの変化に加え、各主張への賛否と図1で示した「原子力発電は日本にとって必要か」という総合的判断との関連を、ポリコリック相関係数を用いて算出した。ポリコリック相関は順序尺度データ間の関係を推定でき、偏りの大きい回答分布でも相関を適切に評価できる利点がある。

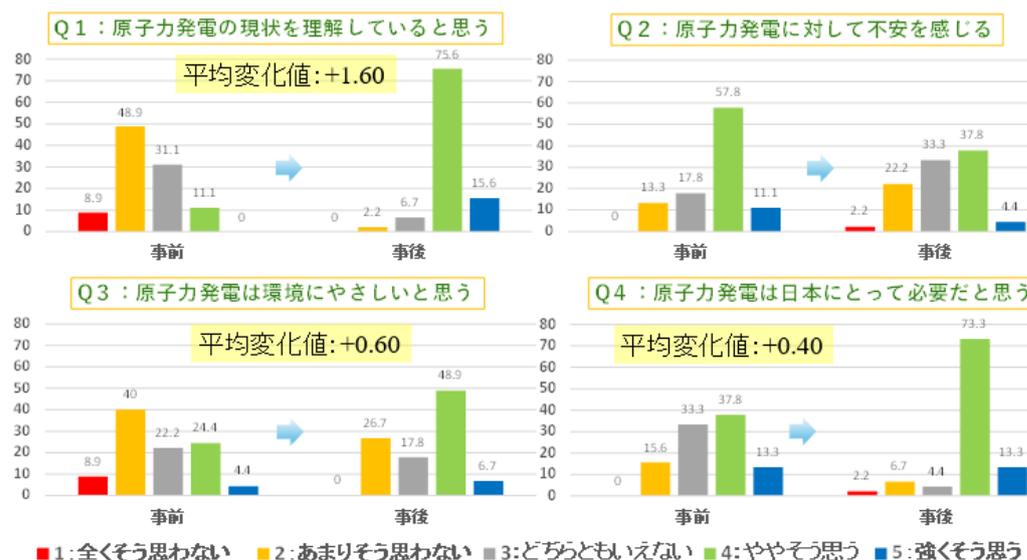


図1 原子力発電に対する授業前後の認識変化

### 3. 研究結果と考察

分析の結果、エネルギー安全保障（主張⑦）が最も強い正の相関を示し（ $r=0.91$ ）、続いて小型モジュール炉の推進（⑨、 $r=0.70$ ）が高い相関を示した。また、再エネ賦課金の不公平性（③）は中程度の正の相関（ $r=0.46$ ）を示した。一方、市民不安を考慮すべきという主張（⑩）は強い負の相関（ $r=-0.72$ ）を示し、放射性廃棄物（②）、健康リスク（⑥）も否定的評価と結びついた。授業前後の比較では、基礎知識理解（Q1）に顕著な改善が見られ、環境面での原子力評価（Q3）も上昇した。必要性認識（Q4）は全体として肯定方向にシフトしたが、個人差が大きく、新情報に対する受け止め方の多様性が明確になった。

本研究の結果より、原子力発電に対する意思決定では、経済性やエネルギー安全保障などの実利的要因が支持方向の主要因であり、倫理性・健康リスク・不安心理などの要素が否定方向の判断と結びつくことがわかった。このことから、政策議論において単一の観点のみを強調するのではなく、多元的要因を適切に説明する必要があるといえる。また、情報格差を縮小し、公正な意思決定を実現するためには、科学的知識に加えて社会的価値観・倫理観を見える化する教育的枠組みが重要である。今回の授業のように、賛否双方の論点と反論・反駁を体系化して提示する手法は、トランスサイエンス問題の理解促進に有効であり、科学教育への応用可能性も示された。

[口頭発表リスト]

岩切宏友, 村吉範彦, 森下和功 “社会共生を促進するトランスサイエンス問題における意思決定プロセスの革新”, 2025年12月11日, 京都大学 宇治おうばくプラザ, ポスター発表

# 細胞内エネルギー代謝に影響する遺伝子発現を 可視化する人工核酸プローブ

佐藤 慎一<sup>1</sup>, 長谷川 結愛<sup>1</sup>, 嘉藤 美来<sup>1</sup>, 橋本 遥香<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>熊本大学

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 【研究背景と目的】

細胞は、核酸やタンパク質などの機能性生体分子の時空間的な発現量を絶妙に調整することで恒常性を保っている。それら生体分子の時空間的な動態や濃度変化を視覚的に捉えることができれば、複雑な生命現象を解明する上で大きな知見を得ることができる。細胞生物学研究において、これまでも様々な生体分子のイメージング法が利用されてきた。しかし、生細胞内の生体分子の動的・空間的な制御機構の大部分は未だ謎に包まれている。その一因は、細胞自身が生産する内在性の生体分子を天然のまま観察・解析するためのツールが少ないなど技術面の難しさにあった。誰もが簡便かつ合目的に利用可能な研究ツールの開発が課題であろう。本研究提案では、高い分子認識能を付加できる RNA の性質に着目し、細胞が生産する内在性 RNA の細胞内動態を観察できる技術基盤の確立を目指す。

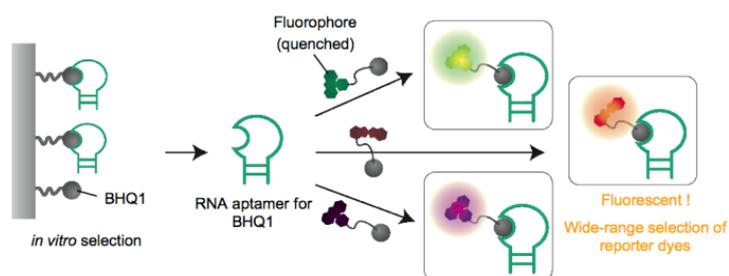


図 1. 蛍光化合物プローブと RNA アプタマーを利用した RNA 蛍光標識法

これまでに申請者は、種々の蛍光波長で標的 RNA を検出可能な小分子蛍光プローブの開発を行ってきた [Chem. Commun. 2011]。このアプローチでは、まず、蛍光クエンチャー BHQ1 分子に親和性を有する RNA アプタマーを選出する。この RNA アプタマーは、BHQ1 により消光されている「蛍光基-BHQ1 プローブ」の BHQ1 部分に結合し、BHQ1 のクエンチャーとしての機能を無効化することで、プローブの蛍光を回復させる。BHQ1 は幅広い波長領域の蛍光を消光する性質を持つため、様々な「色」の蛍光で標的 RNA アプタマーを蛍光標識することが可能となった(図 1)。また申請者は、この RNA 標識法を哺乳動物細胞内で任意の mRNA を観察可能な方法へと改良した [ACIE 2015, Chem. Commun. 2018] (図 2)。この方法は、BHQ1 認識 RNA アプタマーにタンパク質認識能を付与することで、生細胞内における内在性タンパク質検出法と改変できた [NAR 2021] (図 3)。

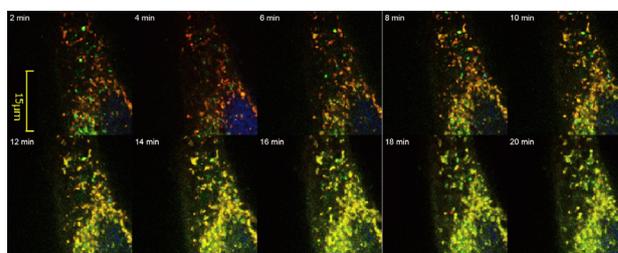


図 2. HeLa 生細胞内 mRNA の顆粒形成過程の可視化 (Chem. Commun. 2018)

## 【方法と実験結果】

### ：人工核酸アプタマーによる RNA イメージング法の開発：

これまでに、本共同利用・共同研究助成を利用し、小分子蛍光化合物プローブと RNA アプタマーを用いる内在性 RNA やタンパク質の検出法を開発し、その成果を国際的な学術論文に報告してきた。しかし、標的認識分子である RNA アプタマーの分子量が大きいことやその安定性の低さ、高濃度の RNA アプタマーにより生じるバックグラウンド蛍光が原因で、方法の一般化が達成されていない。本研究では、細胞内で安定かつ分子量の小さい人工核酸アプタマーを設計し、細胞自身が生産する内在性 RNA の生細胞内動態の長時間観察を実現する。新たに設計された最小化 RNA アプタマーは期待通り、認識 RNA を高選択的に蛍光ラベルすることが確認できた。今後、この最小化 RNA アプタマーを基に人工核酸アプタマー化し、最終目的である人工核酸を基にした高標的選択的 RNA イメージング法の確立を目指す。

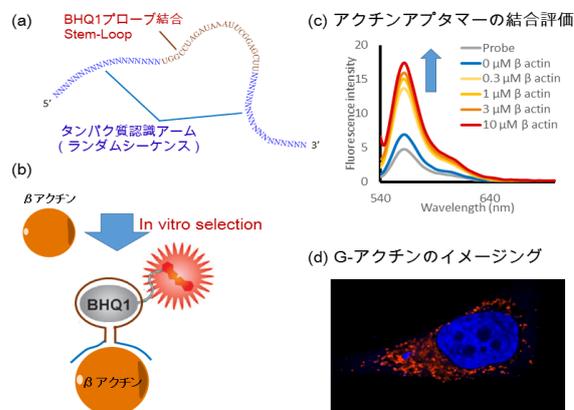


図3. BHQ1 アプタマーによるタンパク質標識 (a) BHQ1 認識ループとタンパク質認識アームの配置 (b)標的タンパク質の検出モデル (c) in vitro 実験におけるアクチンタンパク質蛍光ラベル (d) 固定細胞でのアクチンタンパク質染色 (*Nucleic Acids Res.*, 2021)

### ：人工核酸プローブによる標的 RNA 認識：

生細胞内タンパク質検出には、BHQ1 クエンチャーと Cy3 をコンジュゲートしたプローブを利用する (図3)。蛍光プローブは合成後、HPLC で精製し、共同利用機器 MALDI-TOF マスによって分子量を測定した。本研究では、人工核酸プローブを利用した細胞自身が生産する内在性 RNA の動態観察法の確立を目指す。In vitro 実験では、標的 RNA を高い標的選択性で認識する RNA アプタマーの設計に成功した。また、この知見を基に完全人工核酸化を行なった核酸プローブが RNA プローブと同等の機能を持つことを確認した。

### ：細胞内 RNA イメージングへの適用を検討：

申請者は、方法の有効性を確認するため、まず、最小化 RNA アプタマーを small RNA 発現ベクターである pSuper により細胞内に過剰発現し、生細胞内 mRNA の観察を行なった。試験管内で標的 RNA を蛍光標識することで標的配列認識能を評価した RNA アプタマーは、続けて、これまでに確立している生細胞内の β アクチン mRNA の観察条件を基に、β アクチン mRNA の生細胞内動態観察を試みた。その結果、生細胞内の β アクチン mRNA 顆粒の観察に成功した。今後、人工核酸化した核酸プローブを生細胞内導入することで、内在性 mRNA の生細胞内動態観察を試みる予定である。

# Residential Microgrid Design and Management with Open-Source Tool and GIS

Dara Eam<sup>1</sup>, Yoklin Noev<sup>1</sup>, Lyhour You<sup>1</sup>, Sievlong Suk<sup>1</sup>, Sokleap Heang<sup>1</sup>, Vannak Vai<sup>1</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical and Energy Engineering, Institute of Technology of Cambodia

<sup>2</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

## 1. Introduction

Rising carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions are a key driver of global warming, highlighting the need for renewable energy integration. In Cambodia, incorporating photovoltaic (PV) systems into low voltage alternating current (LVAC) networks can reduce emissions while improving grid reliability. Rural LVAC networks typically use a three-phase main line, but most households connect to a single phase (A, B, or C), causing unbalanced networks, voltage deviations, and higher power losses. Optimizing network topology and strategically integrating PV systems are essential to address these challenges. This paper proposes a GIS-based methodology for radial LVAC network optimization. Households, poles, and transformers are pinned using the AtoE tool. The Topology Design tool applies a shortest-path algorithm to minimize cable connections and achieve phase load balancing. Voltage profiles are visualized with the Voltage Profile Plotting tool, and system behavior under 3% annual load growth over a 25-year horizon is predicted using the Load Growth Forecasting tool. Simulation results are exported and managed via the Download All Data and Plot Manager tools. The approach enables efficient network design, reduces losses, maintains voltage stability, and supports optimal PV cluster placement. The methodology is detailed in Section 2, the case study and results in Section 3, and conclusions are presented in Section 4.

## 2. Methodology

The proposed method is carried out in the following steps, as illustrated in Fig. 1. First, input data for map locations (transformers, poles, and households) and demand (P and Q) are obtained using the AtoE tool. Second, the Topology Design tool is used to optimize feeder routing (i.e., shortest path, SP) and phase balancing (i.e., load balancing, LB). Third, the Voltage Profile Plotting tool is used to visualize the network voltage profile. Fourth, the Load Growth Forecasting tool is used to predict system operation based on load growth and the planning horizon (i.e., 3% load growth per year over 25 years). Fifth, the Download All Data tool and the Plot Manager tool are used to export all data to an Excel file and manage the results on the map.

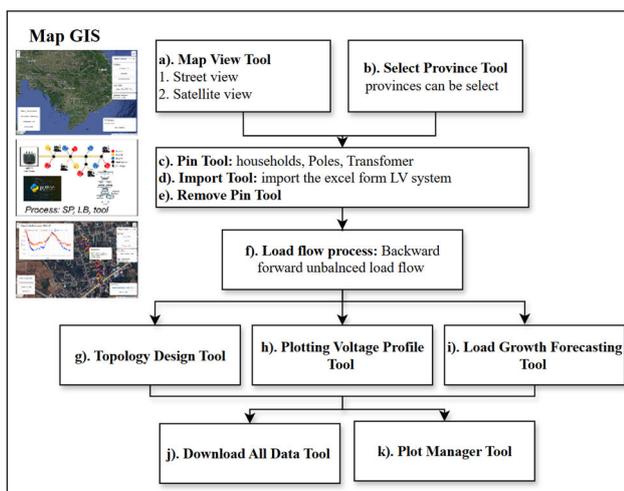


Fig.1. Several step of method

## 3. Simulation Results and Discussion

The LVAC distribution system in Boeung Raing Village, Kamrieng District, Battambang Province, Cambodia, is selected to validate the method. Fig. 2 illustrates the coordination of the 160 kVA transformer, mainline cable of 4x150mm<sup>2</sup>, and secondary lines of 2x4mm<sup>2</sup> and load profile is from the survey. This LV distribution has 19 poles, to which 107 single-phase customers are connected.

Fig. 2 illustrates the GIS-based data acquisition process using the Pin tool for georeferencing residential loads and electrical distribution poles at the village level. Fig. 3 presents the GIS map-based visualization of the network analysis results, obtained using the topology design tool and the voltage profile plotting tool. Table 1. Base-case results with the system operated under no load growth. The phase-wise active power is balanced at approximately 31 kW

per phase. Table 2. Comparison of system performance under two scenarios: (1) base case without load growth, and (2) 25-year planning with 3% annual load growth. In the base case, the maximum voltage is 230 V, the minimum voltage is 218.5 V (0.95 pu), and the total power loss is 2.38 kW. Under the load growth scenario, the maximum voltage remains 230 V, the minimum voltage drops to 207 V (0.90 pu), and the total power loss increases to 11.23 kW. These results demonstrate the impact of load growth on voltage profiles and system losses.



Fig.2. Load collation using the household and pole pin tool

Table 1. Base case without load growth (power balance)

Phase	Real Power [kW]	Total of Households	Max. Current [A]
A	31.31	33	451.18
B	31.40	37	
C	31.47	37	

Table 2. Result from base case with and without load growth tool

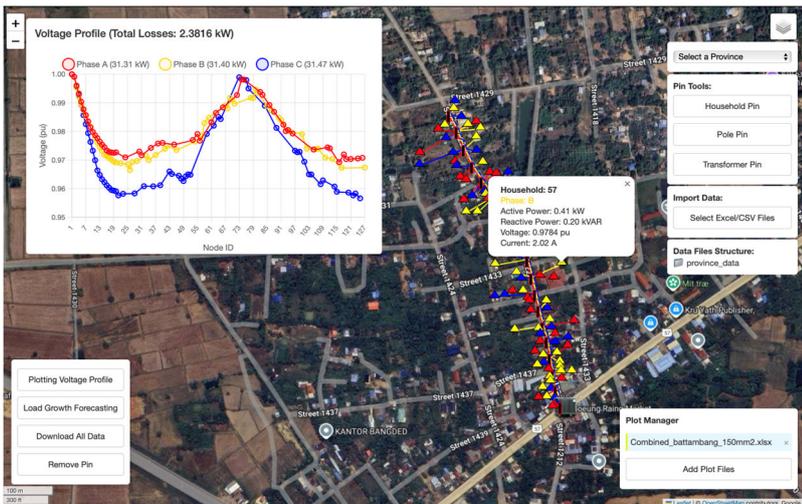


Fig.3. The results from the topology design tool (minimum cable connection and load balancing)

Items	1. Base case without load growth	2. Load growth Forecasting (load growth 3%, 25years)
Mainline Cable size [mm <sup>2</sup> ]	150	150
Max. Voltage [V]	230	230
Mim. Voltage [V]	218.5	207
Mim. Voltage [Pu]	0.95	0.9
Power Loss [kW]	2.38	11.23

#### 4. Conclusion

All microgrid planning tasks are integrated within a single GIS software platform, enabling seamless operation of pin-based field data collection, automated topology design, voltage profiling, and load forecasting. The topology design tool efficiently determines the shortest cable connections and provides key outputs, including voltage profiles and power-loss estimates. Survey and analysis data can be easily imported or exported, facilitating data management. Overall, the platform enhances the speed, accuracy, and reliability of rural microgrid planning and supports informed decision-making for LVAC network design and PV integration.

#### 5. Oral presentations

[1] Dara Eam, Yoklin Noev, Lyhour You, Sievlong Suk, Sokleap Heang, Vannak Vai and Hideaki Ohgaki, Residential Microgrid Design and Management with Open-Source Tool and GIS, The 16<sup>th</sup> International Symposium of Advanced Energy Science, December 2025, Offline, Poster.

# グラム陽性菌感染層への FEL 照射による効率的な感染層除去の検討

遠山 歳三<sup>1</sup>, 全 炳俊<sup>2</sup>, 藤岡 隼<sup>1,3</sup>, 渡辺 清子<sup>1</sup>, 稲葉 啓太郎<sup>1</sup>, 吉田 彩佳<sup>1</sup>, 築山 光一<sup>3</sup>,

吉野 文彦<sup>1</sup>, 濱田 信城<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川歯科大学

<sup>2</sup> 京都大学 エネルギー理工学研究所

<sup>3</sup> 東京理科大学

## 【研究背景・目的】

グラム陽性菌は、歯牙組織の破壊と歯槽骨吸収を特徴とするバイオフィルムを形成するデンタルプラークを構成する。う蝕治療では、感染部位の除去として専門的メカニカル清掃が一般的に行われるが、改善が認められない場合は、根管治療もしくは抜歯を施さなければならない。しかしながら、このような一般的なう蝕治療は感染部位の除去には効果的である一方、菌体由来成分が引き起こす炎症や歯質の破壊を完全に排除することは困難である。また、重度う蝕による多数の抜歯は咀嚼機能の低下を招き、患者の QOL を著しく低下させる。

現在医療に使用されている波長固定式レーザーは、熱による正常組織の損傷を引き起こす可能性があり、また光増感物質として使用されるメチレンブルーは正常細胞にも取り込まれ、光励起により生じる活性酸素種が正常細胞に対しても毒性を示すという課題がある。

赤外自由電子レーザー (FEL) は、波長可変性を有し、特定の分子結合を選択的に励起・失活させることが可能であるという特長を有する。前年度 (ZE2024B-23) の研究において、FEL 照射が *Streptococcus mutans* (*S. mutans*) に対して波長依存的な殺菌効果を示すことが確認された。

本研究では、これらの前年度成果を踏まえ、同一の実験系および評価手法を用いながら照射実験を反復することでデータ数を蓄積し、殺菌効果および遺伝子発現抑制効果の再現性と評価精度の向上を目的とした継続研究として検討を行った。なお、本研究は前年度に得られた結果の妥当性を検証することを目的として、照射条件および評価手法を変更せずに実験回数を重ね、データ数を増加させることで、殺菌効果および遺伝子発現抑制効果の再現性と評価精度を高めた点に特徴がある。特に、感染領域におけるグラム陽性菌の殺菌効果ならびにバイオフィルム形成に関与する因子への影響について、安定した評価を行うことを目的とした。

## 【方法】

1. 本研究ではグラム陽性菌として *S. mutans* を用いた。培養には brain heart infusion (BHI, Beckton, Dickinson and Company, Sparks, MD) に 0.5% yeast extract (Beckton, Dickinson and Company) を加えた物を用い、必要に応じて Bacto agar (Beckton, Dickinson and Company) を 1.5% 濃度で添加し、平板培地とし嫌気下で培養した。
2. 培養した *S. mutans* の赤外吸収波長の解析は、赤外吸収波長分光計 (FT-IR) を用いて解析を行った。嫌気下にて培養し、発育条件を一定にした後、凍結乾燥機にて一昼夜、乾燥させた後、FT-IR にて吸収波長を解析し、照射波長及び照射時間を決定した。
3. 決定された条件で各波長の FEL の照射を行い、照射後の細菌を各種培地に塗抹、培養し生菌数を算出する Colony Forming Unit 測定により FEL の殺菌効果の評価を行った。また、FEL 照射後の菌体減少および形態変化を確認するため、一部条件において走査型電子顕微鏡観察を行い、培養結果との整合性を確認した。さらに、プラーク形成に関与する *S. mutans* の glucosyltransferase 活性に対する影響の評価を行った。

【結果・考察】 赤外吸収波長分光計 (FT-IR) により複数の吸収波長が確認された。これらの波長を用いて *S. mutans* に対し 5 分、10 分、15 分間 FEL 照射を行った結果、波長 9.26  $\mu\text{m}$  において有意な殺菌効果が認められた。

また、前年度と同一条件で照射実験を反復した結果、殺菌効果が再現性をもって確認された。

15 分間照射後の遺伝子発現解析では、9.26  $\mu\text{m}$ 、9.41  $\mu\text{m}$  および 10.46  $\mu\text{m}$  において glucosyltransferase C 遺伝子の発現低下が認められ、特に 10.46  $\mu\text{m}$  照射では glucosyltransferase D 遺伝子の発現も低下した。同様の作用は 10.46  $\mu\text{m}$ ・10 分間照射においても認められ、glucosyltransferase D 遺伝子に対する抑制効果は他の波長では認められなかった。これらの結果から、FEL 照射は波長選択的にバイオフィーム形成関連因子へ影響を及ぼす可能性が示唆された。

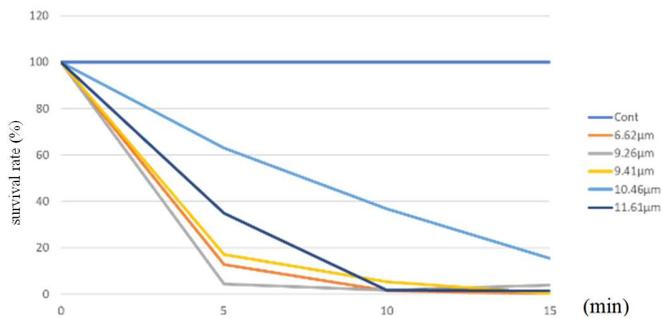


図 1 赤外自由電子レーザーの殺菌効果

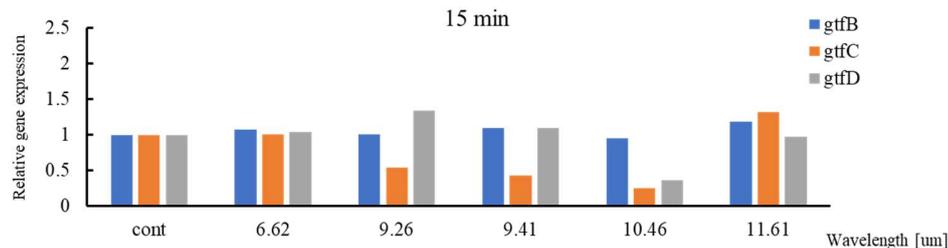


図 2 グルコシルトランスフェラーゼ遺伝子発現解析

### 「発表リスト」

- ① Toshizo Toyama, Heishun Zen, Jun Fujioka, Kiyoko Watanabe, Ayaka Yoshida, Keitaro Inaba, Koichi Tsukiyama, Fumihiko Yoshino, Nobushiro Hamada, Efficient removal of infected layers by FEL irradiation of Gram-positive bacteria infected layers : 2025 年度 ZE 拠点年会. 2025.12.11 ポスター
- ② Toshizo Toyama, Heishun Zen, Jun Fujioka, Kiyoko Watanabe, Ayaka Yoshida, Keitaro Inaba, Koichi Tsukiyama, Fumihiko Yoshino, Nobushiro Hamada, Bactericidal Effect of Infrared Free Electron Laser on Dental Caries-Pathogenic Bacteria: 第 15 回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム. 2024.12.10-13 2023 年度 ポスター
- ③ Toshizo Toyama, Heishun Zen, Jun Fujioka, Kiyoko Watanabe, Ayaka Yoshida, Keitaro Inaba, Koichi Tsukiyama, Fumihiko Yoshino, Nobushiro Hamada. Bactericidal effect of the infrared free electron laser: 第 14 回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム. 2023.8.30-9.1 ポスター

# 構造的ターゲットへの高強度レーザー照射による 高エネルギー電子生成に関する実験研究

松井隆太郎<sup>1,2</sup>, 高井亮汰<sup>1</sup>, 升野振一郎<sup>2,3</sup>, 橋田昌樹<sup>2,3,4</sup>, 阪部周二<sup>2,3</sup>, 時田茂樹<sup>2,3</sup>, 岸本泰明<sup>1,2,5</sup>,  
松田一成<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院エネルギー科学研究科

<sup>2</sup> 京都大学プラズマ科学ユニット

<sup>3</sup> 京都大学化学研究所

<sup>4</sup> 東海大学総合科学技術研究所

<sup>5</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究背景と目的

近年のレーザー技術の進展により実現している、集光強度が  $10^{19-21}$  W/cm<sup>2</sup> 領域のフェムト秒極短パルス高強度レーザーを物質（ターゲット）に照射することで、kT（キロテスラ）オーダの磁場や TV/m を上回る電場を伴う相対論プラズマが生成する。このプラズマを用いて、医療利用可能な高エネルギー粒子線源の開発を目指した研究、kT-MT（メガテスラ）オーダの強磁場が支配する宇宙での極限現象の解明や核融合炉の実現に向けた基礎研究が世界的に展開されている。我々は、レーザー波長オーダの微細構造を付与したターゲット（構造的ターゲット）を導入し、ターゲットを適切に設計・作製することで、レーザー場のターゲット内部への伝播過程の「制御」が実現可能であると着想し、電子線リソグラフィーを含む最先端の半導体製造技術を駆使することで、サブ $\mu\text{m}$  オーダの微細構造を有するロッド集合体（図 1 参照）を精緻に設計・作製する手法を確立している。先行する 2 次元・3 次元粒子シミュレーションでは、ロッド集合体に集光強度領域が  $10^{18-19}$  W/cm<sup>2</sup> のレーザーを照射することで、相対論プラズマを保持する機能を有する kT オーダの準定常強磁場がパルス幅を 2-3 桁上回る時間スケールで生成・維持されることを見いだしており、レーザー生成相対論プラズマを「保持」する方法論の開拓を目指して、これを検証する高強度レーザー照射実験に着手している。

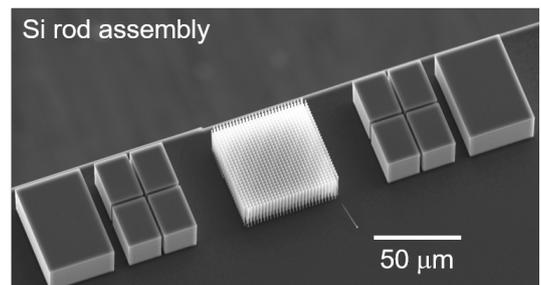


図 1 本拠点における共同研究で作製したシリコンロッド集合体の SEM 画像。直径サブ $\mu\text{m}$ 、高さ  $20 \mu\text{m}$  の円柱状シリコンが  $\mu\text{m}$  間隔で多数整列している。

本研究課題では、CNT やロッド集合体等の方向性を持つ物質（構造的ターゲット）と高強度レーザーとの相互作用に関する理論・シミュレーションおよび実験を実施し、プラズマの電子温度計測とイオンのエネルギー計測を通じてこれらの機能を検証する。また、最先端の半導体製造技術を用いて、現状のロッドよりさらに直径を小さくしたロッド集合体の作製に挑戦し、CNT と合わせてターゲットの指向性が生成プラズマの指向性・温度分布に及ぼす影響を調べることを目的とする。

## 2. 研究の方法と得られた成果

(1)理論・シミュレーション：構造的ターゲットは、レーザー波長オーダの微細構造を有するため、同一質量の平板固体薄膜等と比較して、比表面積（質量に対する表面積）が非常に大きいという特性を持つ。そのため、固体薄膜ターゲットを用いた場合は数%のレーザーエネルギー吸収率であるのに対し、構造的ターゲットを用いることで吸収率が格段に増大する（80%以上）ことが知られている。さらに、微細構造の幾何学的形状を適切に設計・作製することで、高エネルギー密度プラズマの生成と、プラズマ中に形成される準定常磁場によるプラズマの長時間保持が期待される。そこで、高強度レーザーをロッド集合体に照射することで生成する高エネルギー密度プラズマの特性を調べるため、レーザー照射実験に先立ち、相対論的電磁粒子コード EPIC3D を用いてこれを模擬する 3 次元粒子シミュレーション

オンを実施した。具体的には、図 2(a)に示す通り、直径が  $0.25\ \mu\text{m}$  および  $1.0\ \mu\text{m}$  の 2 種類、高さが  $10\ \mu\text{m}$  のロッドからなるシリコンロッド集合体を設定した (周期境界条件を利用して複数のロッドを模擬)。なお、ロッド集合体の質量 (空間充填率) は同一である。高強度レーザーは、京大化研の T<sup>6</sup> レーザーを想定し、集光強度が  $10^{18-19}\ \text{W}/\text{cm}^2$  で波長は  $0.81\ \mu\text{m}$ 、パルス幅 (FWHM) は  $40\ \text{fs}$  とした。

シミュレーションの結果、レーザー場はロッド側面の電子を加熱しながら TM 波としてロッド間の空隙を伝播し、いずれ直径の場合においても、ロッド集合体のレーザーエネルギーの吸収率は 80% 程度と非常に高いことが分かり、さらに、ロッド集合体におけるレーザーエネルギーの吸収はロッドの側面方向が支配的であることを見いだした。これを踏まえると、エネルギー吸収率が同程度の場合、電子 1 つあたりが受け取るエネルギーはロッド集合体の側面積に反比例し、ロッド径が小さい方が電子温度 (レーザー場により直接加速された高エネルギー成分) が低くなることが予想される。実際、図 2(b)に示すように、ロッドの側面方向に運動する電子のエネルギースペクトルにおいて、電子温度の高温成分は、直径  $1.0\ \mu\text{m}$  の場合と比較して、直径  $0.25\ \mu\text{m}$  の場合で低くなっていることが確認できた。本結果は、レーザーエネルギー吸収率がほぼ等しい条件下では、ロッド径を調整することで電子温度 (高温成分) が制御可能であることを示唆している。

(2) ロッド集合体の作製: 京都大学ナノテクノロジーハブ拠点において、ポジ型レジストを用いた工程により、直径が  $0.25\text{-}1.0\ \mu\text{m}$  で高さが  $10\text{-}20\ \mu\text{m}$  の円柱状シリコン (シリコンロッド) が複数整列したシリコンロッド集合体を作製した。本年度は、プラズマエッチング (ボッシュプロセス) 時において相反する 2 つのパラメータの調整 (非等方性エッチングにおける BIAS 電圧と保護膜の膜厚) を調整することで、直径が  $0.25\ \mu\text{m}$  で高さが  $10\ \mu\text{m}$  オーダの高アスペクト比 (高さ/直径  $\sim 40$ ) のロッド集合体の作製に成功した。

(3) レーザー照射実験: (1) で得られた結果を実験で検証するため、(2) で作製したロッド集合体に京大化研 T<sup>6</sup> レーザーを照射する実験を実施した。直径がサブ  $\mu\text{m}$  オーダの微細構造を用いる場合、レーザーのプレパルスによる影響 (溶解) が大きいと考えられるため、本年度はプレパルス成分の除去を目的として、照射時にプラズマミラーを導入した。その結果、図 2(b) 同様、ロッド径を変化させることでロッド側面方向の電子温度 (高温成分) が制御可能であることを示す電子エネルギースペクトルが得られた。来年度は、トムソンパラボラの導入によりイオンエネルギースペクトルを取得することで、生成プラズマの特性を検証していく予定である。

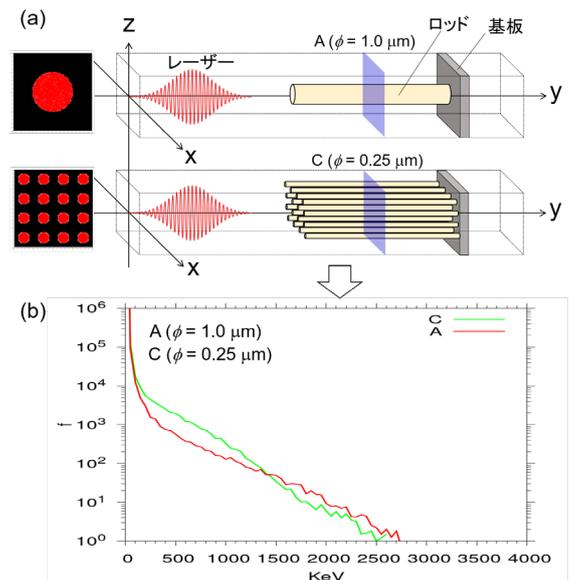


図 2 (a)シリコンロッド集合体と高強度レーザーとの相互作用を模擬する 3 次元粒子シミュレーションの模式図。(b)直径  $1.0\ \mu\text{m}$  (赤)、 $0.25\ \mu\text{m}$  (緑) の場合における、x 軸方向の電子エネルギースペクトル (シミュレーション結果)。

#### [論文発表リスト]

1. R. Matsui and Y. Kishimoto, "Transient bifurcation induced rocket acceleration leading to a relativistic bulk medium induced by designed high-intensity lasers", Phys. Rev. Res., 7, 013119 (2025). ※謝辞に The 2023-2024 joint research project numbers (2023-128, 2024-121) を記載。

#### [口頭発表リスト]

1. R. Matsui, N. Hayashi, K. Kondo, K. Matsuda, K. Fukami, H. Sakaguchi, S. Masuno, M. Hashida, S. Sakabe, S. Tokita and Y. Kishimoto, "Control of multiscale expansion/relaxation dynamics of micro-structured designed targets irradiated with a high-intensity laser" (oral), International Conference of High Energy Density Sciences 2024 (HEDS2024), PACIFICO Yokohama, Japan, April 26th, 2024.

# Whole genome analysis and culture method development of Thai coffee leaf rust fungus

R. Kodsueb<sup>1</sup>, R. Cheewangkoon<sup>2</sup>, S. Haituk<sup>2</sup>, T. Hara<sup>3</sup>, Y. Takatsuka<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Microbiology Program, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

<sup>2</sup> Department of Entomology and Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University

<sup>3</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Our ZE project focuses on whole-genome analysis of *Hemileia vastatrix*, the fungus responsible for Coffee Leaf Rust (CLR), and on the conservation of fungal strains for future research. In 2024, preliminary DNA extraction, PCR amplification, and sequencing were performed on CLR samples containing urediniospores collected from Mae Rim and Mae Taeng districts in Chiang Mai, Thailand. By conducting genome identification, we established specific conditions for determining the genome of *H. vastatrix* via the ITS-specific primers (Hv-ITS-F/HV-ITS-R; Wu *et al.*, 2023), achieving 99.29% identity with other *H. vastatrix* sequences submitted to GenBank. This year, DNA extraction and PCR amplification have been attempted on severe typical CLR samples collected from Paksong, Laos, using two DNA extraction methods: the heating method and the commercial (Favorgen) kit (Fig. 1). The gross morphology of CLR samples collected from four sites at Paksong is also examined in this study. The morphological studies revealed that CLR samples from Paksong displayed the typical characteristics of the disease, with urediniospores on the underside of leaves (Fig. 2). DNA samples from the Favorgen kit and the heating method were successfully amplified with the universal primers ITS1/ITS4; however, they yielded multiple PCR bands. Sequencing has been performed after DNA gel purification and the result obtained is consistent with previous result of Santana *et al.* (2018), where the universal ITS1 and ITS4 primers amplified multiple bands: 950 bp fragments of rDNA regions of *H. vastatrix* and 600 bp of *Coffea arabica* L. (Fig. 3). The DNA extraction and PCR amplification have also been performed on the CLR samples collected from Paksong, using the specific primers Hv-ITS-F and Hv-ITS-R at the same time. However, the PCR amplification failed. It is worth noting that for ITS1/TTS4 primers, DNA obtained from both the Favorgen kit and the heating method could be amplified using standard PCR conditions, and the resulting sequences have been identified as belonging to the same species as CLR strains found worldwide.

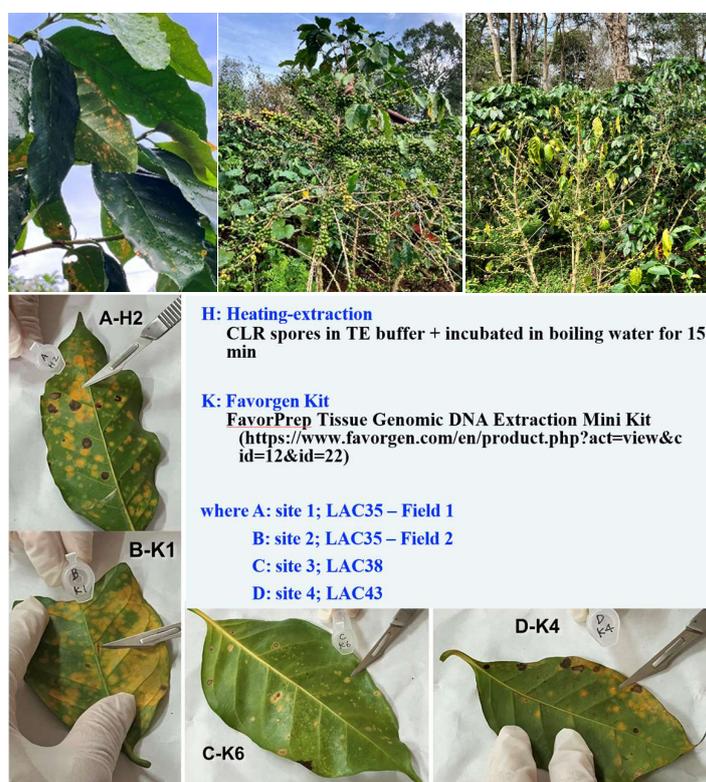


Fig.1. Two DNA extraction methods for CLR samples

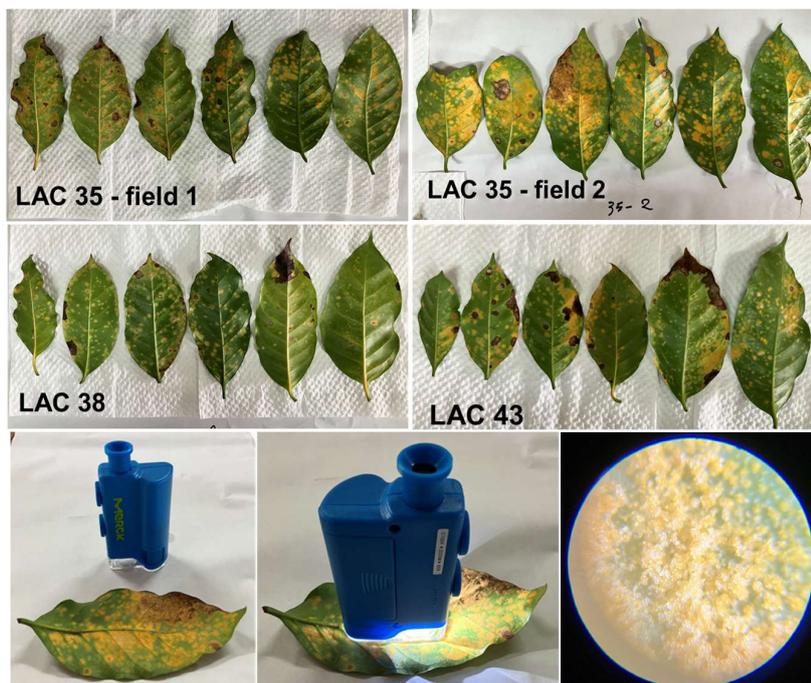


Fig.2. Morphological characteristics of CLR from Paksong, Laos

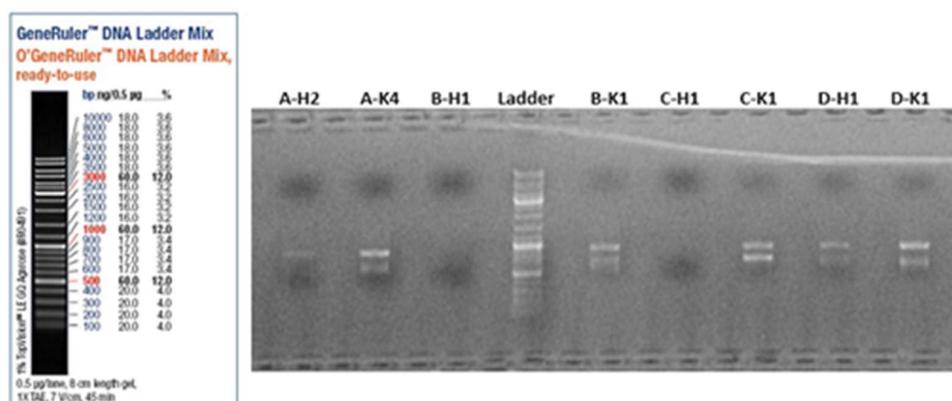


Fig.3. Multi-band PCR results obtained from ITS1/ITS4 primers  
(upper band = *H. vastatrix*, lower band = *Coffea arabica*)

#### References:

- Santana, M.F. *et al.* (2018). Population genetic structure of the coffee pathogen *Hemileia vastatrix* in Minas Gerais, Brazil. *Trop. plant pathol.* 43, 473–476. <https://doi.org/10.1007/s40858-018-0246-9>
- Wu W. *et al.* 2023. A PCR-Based Assay for Early Diagnosis of the Coffee Leaf Rust Pathogen *Hemileia vastatrix*. In: Ingelbrecht I.L., Silva M.d.C.L.d., Jankowicz-Cieslak J. (eds) *Mutation Breeding in Coffee with Special Reference to Leaf Rust*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-67273-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-662-67273-0_18)

#### Conference Presentation:

- Kodsueb R., Cheewangkoon R., Haituk S., Takatsuka Y. and Hara, T. 2024. Whole genome analysis and culture method development of Thai coffee leaf rust fungus. The 15<sup>th</sup> International Symposium of Advanced Energy Science. 10<sup>th</sup> – 13<sup>th</sup> December 2024. Kyoto University, Uji Campus. ZE Poster Session. ZE2024B-26.
- Kodsueb R., Cheewangkoon R., Haituk S., Hara T. and Takatsuka Y. (2025). Whole genome analysis and culture method development of Thai coffee leaf rust fungus. The FY2025 ZE Research Center Annual Meeting. Poster Session. ZE2025B-26.

# ナノ秒パルスレーザー除染における飛散粉塵の 粒径その場計測法の開発

## Developing the in-situ technique to measure the size of radioactive fragments

小菅 淳<sup>1</sup>、山本 恵輔<sup>3</sup>、安東 航太<sup>2</sup>、中嶋 隆<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構 敦賀総合研究開発センター、<sup>2</sup> 公益財団法人高輝度光科学研究センター、  
<sup>3</sup> 京都大学 エネルギー理工学研究所

### 1. 緒言

福島第一原子力発電所を含む原子炉の廃止措置では大量の放射性廃棄物が発生し、その大部分を原子炉配管等に由来する低レベル放射性廃棄物が占めている。これら放射能レベルの低い金属部品を効率的に除染し、放射性廃棄物としての最終処分量を減少させることは、廃止措置全体のコスト低減の観点から極めて重要である。一般に利用される化学除染や機械除染と比較して、レーザー除染は非接触かつ遠隔操作が可能であり、作業員の被ばく低減とともに、二次廃棄物の発生量を大幅に抑制できる点で極めて有利な手法である。

ステンレス鋼からなる配管等の除染においては、表面付着物の除去に加え、微細亀裂内部に侵入した汚染物質まで確実に除去する必要がある。そのため、金属母材表面を数十  $\mu\text{m}$  の深さまで除去可能な除染技術の確立が求められている。これまで国内では高出力連続波 (CW) レーザーを用いた除染が主流であったが、2019 年に福島第一原子力発電所処理水タンク内壁に対して実施された事例では、十分な除染効率が得られなかったことが報告されている。その主な原因として、(1) 照射に伴う汚染物質の熔融および母材内部への拡散による二次汚染、(2) マイクロ・ナノ粉塵の効率的捕集の困難さ、という課題が指摘されている。

我々は、熱的影響を抑制しつつアブレーションによる除去が可能なナノ秒パルスレーザーに着目し、飛散粉塵の速度分布、空間分布および粒径分布の把握を目的とした。さらに、レーザー出力、スキャン速度、スポット径、パルス時間幅およびパルス繰返し数といった複数のレーザーパラメータについて、系統的な探索と最適化を行うこととした。

昨年度から引き続き、出力 20 W のナノ秒パルスレーザーを用い、ステンレス材への照射によって発生する飛散粉塵について、試料から離れた位置における粒子速度のパルス幅依存性の測定を行った。斜め前方レーザー散乱法により、高速で飛散する個別粒子群と、低速でクラウド状に広がる粒子群とに分類可能であることを明らかにした。さらに、それらの粒子速度の高さ依存性およびパルス幅依存性の取得にも成功した。本成果は現在、原著論文として投稿中である。

### 2. 実験結果

今年度は、MOPA 型ナノ秒パルスファイバーレーザーを用い、単位面積当たりの投入レーザーエネルギーが一定となるよう、レーザー出力およびスキャン速度を固定した条件下で、パルス時間幅およびパルス繰返し数を変化させ、非汚染金属試料 (SUS304 材) の除去量を比較した。波長 1064 nm のナノ秒パルスファイバーレーザーを試料に照射した際の様子を Fig. 1 に示す。また、レーザー出力 100 W、スキャン速度 2000 mm/s の条件における除去量のパルス幅依存性を Fig. 2 に示す。各パルス繰返し数において、除去量が最大となるパルス幅が存在し、その値は繰返し数ごとに異なっていた。最大除去量が得ら

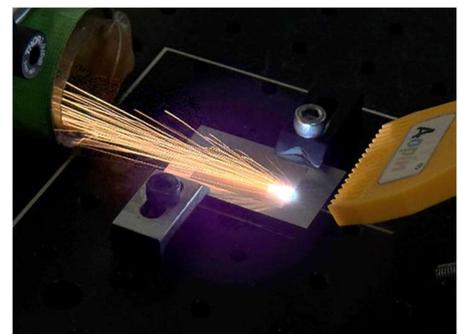


図1 レーザー出力 100 W のナノ秒パルスレーザーをステンレス材に照射時の様子。

れた繰返し数 250 kHz（青線）に注目すると、パルス幅が短い場合にはピーク強度は高いものの、熱拡散効果が小さいため除去量は低下する。一方、パルス幅が長い場合には熱拡散効果は大きくなるが、ピーク強度が低下することでアブレーションが起こりにくくなり、除去量は低下する。これらの効果が釣り合う条件として、本実験ではパルス幅 250 ns 付近で除去量が最大となることが示された。繰返し数が高くなるとパルス間隔が短縮され、熱蓄積効果が増大する一方でピーク強度が低下するため、最大除去量を与えるパルス幅は短パルス側へシフトし、全体の除去量も減少すると考えられる。さらに、同一出力 100 W の CW レーザーによる除去量（赤破線）との比較から、ナノ秒パルスレーザーの方が約 10 倍高い効率で物質除去を実現できることが示された。

次に、繰返し数およびスキャン速度を固定した条件下において、パルス幅 200 ns および 80 ns、ならびに CW 条件での除去量のレーザー出力依存性を Fig. 3 に示す。ナノ秒パルスレーザー条件では、パルス幅 200 ns と 80 ns の比較において、熱拡散効果の寄与が大きい 200 ns の方が高い除去量を示しており、いずれのパルス幅においても除去量はレーザー出力の増加に伴いほぼ線形に増大する傾向が認められた。一方、CW レーザーでは、低出力領域において表面温度の上昇が不十分であるため、熔融除去の寄与が限定的となり、ナノ秒パルスレーザーと比較して除去量は小さい値にとどまっている。以上の結果から、レーザー出力をさらに高くすることにより、ナノ秒パルス条件における除去量の一層の向上が期待される。

### 3. まとめ

ナノ秒パルスレーザーを用いた照射実験により、除去量のパルス幅および繰返し数に対して最適条件が存在することを確認した。また、CW レーザーとの比較から、ナノ秒パルス条件では高い物質除去効率を得られることが明らかとなった。さらに、レーザー出力依存性の評価により、ナノ秒パルス条件では除去量がレーザー出力に対してほぼ線形に増加する一方、CW 条件では除去効率が低いことが示された。

今後は、実機適用を想定した高出力条件として 300 W クラスのナノ秒パルスレーザーを用い、除去特性および飛散粉塵挙動解析を 100-300 W の高出力領域へ拡張する予定である。

#### 【論文発表リスト】

論文は現在投稿中。

#### 【口頭発表リスト】

山本 恵輔、小菅 淳、中嶋 隆、「ナノ秒パルスレーザー除染におけるレーザーパラメータの最適化と飛散粉塵粒径評価の試み」、第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、2025 年 9 月 7 日、名古屋

山本 恵輔、小菅 淳、中嶋 隆、「ナノ秒パルスレーザー除染法の開発(III) (1) 飛散粉塵の速度および粒径評価」、原子力学会 2025 年秋の大会、2025 年 9 月 10 日、北九州

小菅 淳、山本 恵輔、中嶋 隆、「ナノ秒パルスレーザー除染法の開発(III) (2) 100 W のナノ秒パルス連続発振レーザーによるターゲット除去量の比較」、原子力学会 2025 年秋の大会、2025 年 9 月 10 日、北九州

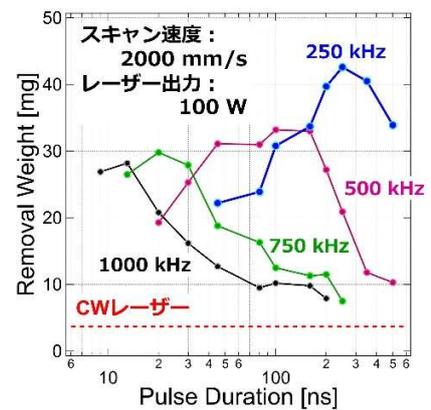


図2 レーザー出力 100 W のナノ秒パルスレーザーをスキャン速度 2000 mm/s で照射した際の各繰返し数における除去量のパルス幅依存性。破線（赤色）は CW レーザーでの除去量。

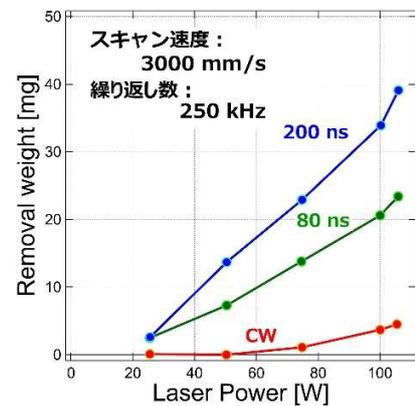


図3 繰返し数 250 kHz のナノ秒パルスレーザーをスキャン速度 3000 mm/s で照射した際の各パルス幅および CW レーザーにおける除去量のレーザー出力依存性。

# 単原子層物質における励起子輸送の高分解能観察

酒井 優<sup>1</sup>, 松田 一成<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山梨大学 工学部 先端材料理工学科

<sup>2</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

近年、遷移金属ダイカルコゲナイドに代表される半導体原子層物質の光学特性が注目されている。原子層物質はグラフェンに端を発する原子数層の極めて薄い新たな物質系であり、極限的な 2 次元量子閉じ込め効果により室温においても安定した励起子や荷電励起子が存在し、従来の半導体とは様相の異なる励起子物性が発現する。さらに、複数の単原子層物質を積層することで人工的なモアレポテンシャルを作り出し、励起子をさらに低次元に閉じ込めることも出来るようになってきており、新しい量子物性の研究プラットフォームや究極的に小さな機能性光電子デバイスへの応用が期待されている。そのような微小デバイスの実現に向けては、局所領域での光と物質の相互作用、物質中での励起子ダイナミクスなどの特性の理解が不可欠だが、この系におけるナノスケール領域での励起子の時空間ダイナミクスは未だ十分に明らかになっていない。さらに、複合原子層においては原子層の面内における空間的な閉じ込め効果が注目されているが、実験的に観察するにはナノスケール分解能での光学測定が不可欠である。

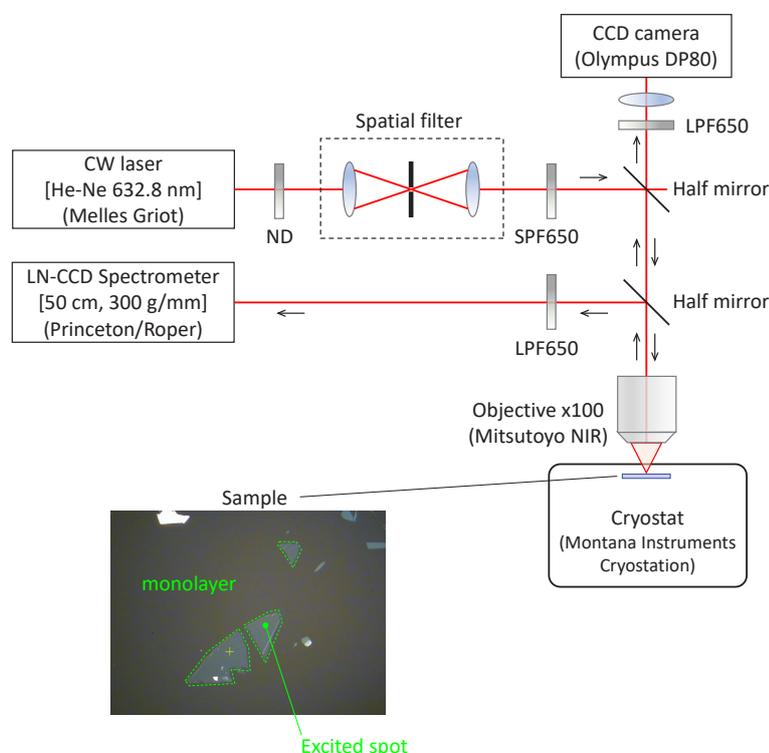


図 1 温度依存性測定の光学測定系の模式図

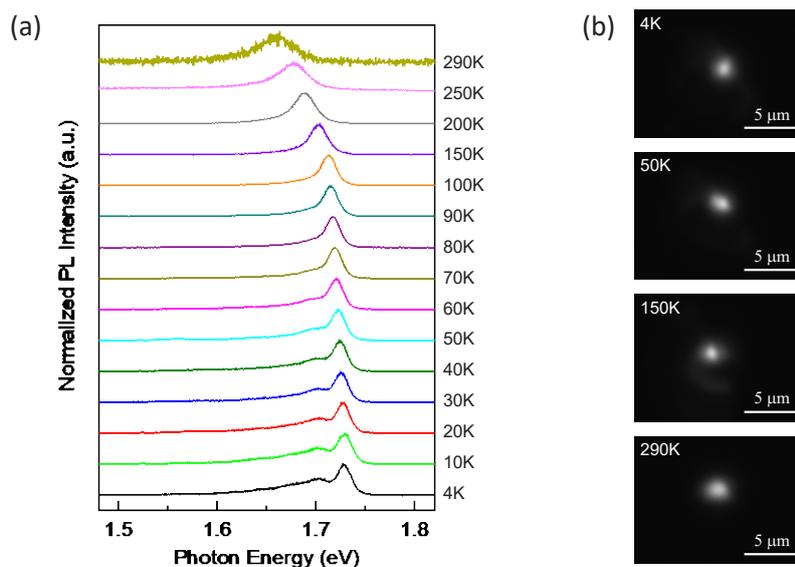


図2 (a)発光スペクトルの温度依存性と、(b)各温度における発光の空間分布

## 2. 実験と結果

我々は、励起子をはじめとする光励起キャリアの空間特性を明らかにすべく、遷移金属ダイカルコゲナイドの1つである単層の2セレン化タングステン (WSe<sub>2</sub>) を測定試料として用いて、顕微分光測定および近接場光学顕微鏡 (Scanning Near-field Optical Microscope; SNOM) を用いた高分解能測定を行ってきた。今年度は、顕微分光の温度依存性測定を行い、極低温から室温までの発光スペクトルの変化、及び、各温度における発光の空間的広がりを高分解能カメラで測定した。図1に測定系の模式図を示す。励起レーザー (He-Ne レーザー) はピンホールを使った空間フィルタを通して、試料に照射される励起スポット径を絞っている。試料からの発光は、ハーフミラーで分けることで、スペクトルと空間イメージを同時に測定している。図2に測定結果を示す。発光スペクトルの温度依存性 (図2(a)) では、低温において 1.73 eV 付近に観察され 100 K 付近から低エネルギーシフトする主ピークが観察され、自由励起子発光と考えられる。また、低温において 1.6-1.7 eV 付近にブロードなピークが観察され、温度上昇に伴い 60 K 付近で消失する振る舞いがみられた。これは局在励起子による発光とみられる、トリオンによる発光が混在していることも考えられる。一方、空間分布 (図2(b)) では、温度上昇によって励起子の拡散長が長くなり発光イメージが広がることが予想されたが、あまり大きな変化は観察されなかった。今後は、空間分布のスペクトル分解測定等を行い、個々の光励起キャリアを分離して空間特性を明らかにしたいと考えている。

### [口頭発表リスト]

- (1) 小林 寿幸、出原 渉、松田 一成、酒井 優、「SiO<sub>2</sub> 基板上的単層 WSe<sub>2</sub> における発光の温度特性」、日本光学会ナノオプティクス研究グループ第 30 回研究討論会、2025 年 11 月 13 日(木)、豊橋 emCAMPUS (ポスター発表)。

# モデル内包学習の核融合プラズマ科学への応用

## — プラズマの平衡再構成 —

黒江康明<sup>1</sup>, 小林進二<sup>2</sup>, 横山雅之<sup>3</sup>, 政宗貞男<sup>4</sup>, 三瓶明希夫<sup>5</sup>, 中村祐司<sup>6</sup>, 松山顕之<sup>6</sup>

<sup>1</sup>同志社大学モビリティ研究センター, <sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

<sup>3</sup>核融合科学研究所六ヶ所研究センター, <sup>4</sup>中部大学工学部

<sup>5</sup>京都工芸繊維大学電気電子工学系, <sup>6</sup>京都大学エネルギー科学研究科

### 1. はじめに

モデル内包学習は、著者らが提案している機械学習法で、これがデータ同化など、システムとモデリングとデータに関わる様々な問題を解決できることをこれまでいくつかの例に対し示してきた[1]。この学習法は未知なる対象の入出力データだけでなく、対象に対する何らかの知識をも用いて学習する方法で、プラズマ科学の種々の問題に応用できると考えられ、これを本研究の目的とする。具体的には、申請者がこれまで取り組んできたデータ同化に基づくプラズマの平衡再構成法の研究[2, 3]をさらにすすめ、より良い方法を構築することを目的の1つとする。さらには、プラズマ科学の他の問題にモデル内包学習を適用することを検討することを目的の2つ目とする。

### 2. モデル内包学習

対象に対する事前知識をモデル化したものを Partial Model と呼ぶことにすると、モデル内包学習は、図1に示すように Learning System と Partial Model を配置する。それらに対し未知なる対象と同じ入力信号・データ (Input Signal・Data) を与え、その出力が未知なる対象の出力信号・データ (Output Signal・Data) と一致するよう適当な学習アルゴリズムを用いて、Learning System の (必要ならば Partial Model の) 可調整な部分を調整することにより、未知なる対象のモデルを構築する。以上のようにこの枠組みは、モデルを学習ループに内包させて学習させることでモデル内包学習と呼ばれる。モデル内包学習の特徴は、1. 教師信号が得られない場合にも対応できる、2. 事前知識を有効に利用でき、定性的・定量的に優れたモデリングを実現することができる、3. もとの問題が不良設定問題である場合、それを解消できる、4. 過学習を防ぐことができる、などが挙げられる。

図1のモデル内包学習の枠組みは、データ同化の枠組みにもなり得る。複雑で大規模なシステムをモデリング、推定、シミュレーションする問題などにおいて、対象の完全なモデルが得られない場合が多く、その場合はセンサーなどで得られたデータを補完させて行う方法が、気象学の分野をはじめとして様々な分野でデータ同化の研究として進められている。データ同化の問題解決の枠組みは、図1に示すモデル内包学習の枠組みを図2のように変更することにより得られる。すなわち、対象のモデルやシミュレータ (Simulator) の未知な部分をパラメトライズし、対象より得られるデータに適合するように何らかの最適化アルゴリズムでパラメータを調整する、あるいは推定器 (Estimator) を実装し時々刻々得られるデータを用いて未知なる変数を推定するという問題解決の枠組みである。

### 3. データ同化に基づくプラズマの平衡再構成法

データ同化に基づくプラズマの平衡状態の再構成問題は、次のように定式化される。プラズマの平衡状態は、一般に偏微分方程式で表されることが知られており、その偏微分方程式と境界条件における未知な部分や要素を適当なパラメータを導入してパラメトライズする。対象のプラズマ装置に設置されたセンサーにより得られるデータとパラメトライズされた方程式より得られる解より得られるセンサー情報との誤差を評価関数とすると、この問題はこの誤差を最小化する等式制約条件付きパラメータ最適化問題として定式化される。この最適化問題の解法には、最急降下法、共役勾配法、準ニュートン法など多くのアルゴリズムが開発されている勾配法に基づく方法を用いればよい。これらのアルゴリズムを適用する際問題となるのは、評価関数のパラメータに関する勾配をいかに効率よく必要な精度で求めるかであり、これには、感度方程式に基づく方法と随伴方程式に基づく方法の二つが考え

られ、それぞれ導いている。これまで、軸対称トロイダルプラズマを対象として、感度方程式に基づく方法[2]および随伴方程式に基づく方法[3]による平衡再構成の方法を提案している。また、京都工芸繊維大学で開発されたRFP実験装置を用いて実験し、これらの方法が有効であることを実証している。

以上の実績を受けて現在、以下の研究をすすめている。これまでの研究は軸対称トロイダルプラズマすなわち2次元の問題を対象にしていたが、これをヘリカル対称系など3次元の問題に拡張する検討を行っている。またプラズマの平衡状態の安定性は特に考慮していない方法であったが、安定性を考慮した平衡再構成法の検討を行う。さらにデータ同化のための最適化法の高速化を目的として二次微分情報を用いたアルゴリズムを導出し、高速に平衡再構成を実現する方法を開発している。

#### 4. モデル内包によるプラズマ周辺磁場揺動解析

核融合プラズマ性能を向上させるためには、MHD不安定性によって引き起こされる周辺磁場揺動の時間的変化を測定し解析することが極めて重要となる。その解析の重要な1つがスペクトル解析で、これにモデル内包学習の考え方を導入し、モデル内包スペクトル解析法を提案している。通常のスเปクトル解析の枠組みは図3のように表される。すなわちプラズマより得られたデータと空間フーリエ級数展開表現との誤差が最小になるようフーリエ級数の係数を決める。それに対し提案している方法は、データとの誤差の最小化だけではなく、対象に成り立っている既知の物理法則を満たす様にする。この問題の場合、プラズマの周辺電流は零である( $\nabla \times B = 0$ )ことが成り立つので、これを満たすように図4のようにスペクトル解析する。すなわち、データとの誤差および周辺電流が同時に最小となるようフーリエ級数の係数を決める方法を導いている。これにより定性的にも定量的にもすぐれた解析結果が得られることになる。

#### 5. 三次元プラズマの平衡状態の最適化問題の解法

核融合プラズマの実現において、三次元プラズマの平衡状態の解析、設計、制御の方法論を確立することが急務となっている。本研究では一般的な三次元プラズマの平衡状態に対しそのパラメータ最適化問題を定式化しその解法を導出している。プラズマの平衡状態は3本の式で表されていることが知られており、これに解析、データ同化、制御などの実現のためのパラメトライズされた式を加え、これらに対し評価関数を与えてパラメータ最適化問題を定式化し、この問題をアジョイント法で解くためのアジョイント方程式を導出している。この導出に基づき現在以下の二つのことを検討している。1. 導出した方法の実際の三次元プラズマの平衡状態の最適化問題への適用。2. 導いた三次元プラズマの平衡状態のアジョイント方程式を軸対称系に変換すると、我々が文献[3]で導いているGrad-Shafranov方程式に対するアジョイント方程式と一致することの検証。

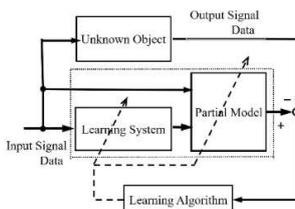


図1 モデル内包学習

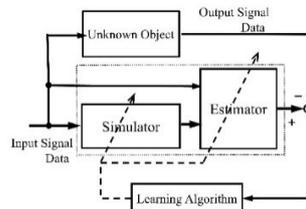


図2 データ同化

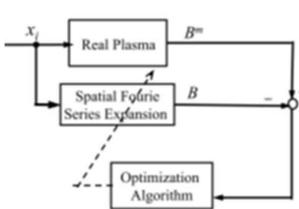


図3 スペクトル解析

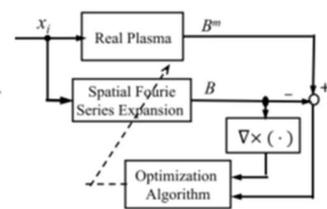


図4 モデル内包スペクトル解析

#### 参考文献

- [1] 黒江康明, 「モデリングとインテリジェンス—モデル内包学習を中心として—」, 計測自動制御学会誌, Vol. 63, No.10, pp.607-614, 2024
- [2] A. Sanpei, T. Okamoto, S. Masamune, and Y. Kuroe, “A Data-Assimilation Based Method for Equilibrium Reconstruction of Magnetic Fusion Plasma and Its Application to Reversed Field Pinch,” IEEE Access vol. 9, pp. 74739-74751, May 2021
- [3] A. Sanpei, S. Masamune, and Y. Kuroe, “A Data-Assimilation Based Method for Equilibrium Reconstruction of Magnetic Fusion Plasma: Solution by Adjoint Method,” IEEE Access vol. 11, pp. 62639-62651, June 2023.

# サイクロトロン運動による荷電分離を使った 直接発電方法の解析

西野信博<sup>1</sup>, 門信一郎<sup>2</sup>, 水内亨<sup>2</sup>, 岡田浩之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>有限会社バウヒュッテ

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 研究の背景と目的

核融合エネルギーは人類の将来のエネルギー源として有望な選択肢である。米国のトランプ大統領の会社が核融合ベンチャーTAEと合併したという報道もあり、pB核融合は注目されつつある。pB反応は中性子出力がほとんど出ないため、より安全な核融合炉への利用に大きな可能性を秘めている。しかし、核融合は一般に大きな入力パワーを要し、入出力の電力比は低く、経済性は不利とされる。そのため、有効な（高い）入出力の電力比をいかに実現するかが課題となっている。幸い、pB反応の出力のほとんどは $\alpha$ 粒子であるため、荷電分離が実現できれば、核融合プラズマの出力を効率的に回収することができる。これまでの研究では、高密度プラズマによって $\alpha$ 粒子が熱化されて出てくるところから荷電分離を検討されており、非熱化の場合は検討されていなかった。

本研究では熱化されていない MeV オーダーの高エネルギー $\alpha$ 粒子を背景プラズマから分離することを検討している。核融合プラズマ生成部では、600keV NBIを用いてホウ素イオンを含むプラズマ中でpB反応を起こすパルス核融合を想定した（よく知られているように、pB反応断面積は600keVで最初の大きなピークを持つ）上流部分から、核反応後に核反応生成物（= $\alpha$ 粒子）と背景プラズマはミラー磁場の端から出てくるものとして、高エネルギー粒子と背景プラズマの分離を検討する。

## 2. 方法

密度の低い（薄い）プラズマからの出力を計算するため、MHD（流体）としてではなく、荷電粒子の単粒子軌道で近似するシミュレーションとしている。以下に計算のプロセスを示す。

1. ミラー端からのプラズマ出力に適した磁場構成を選択する
  2. テスト粒子の軌道を追跡する
  3. 高エネルギー粒子と背景プラズマの分離を確認する。十分でない場合は、1.に戻る。
  4. 電極の配置（数と位置）、電圧を決定する
  5. 粒子、陽子、電子の軌道を計算し、電極の粒子収集効率とエネルギー回収（発電）効率を計算する
  6. 粒子収集と発電の効率が十分でない場合は、3. または 1.に戻る
  7. 目的の発電効率が得られるまで、上記のプロセスを繰り返す。
- また、プラズマ密度への影響の考察として、
- A. 空間電位の影響
  - B. 主にクーロン衝突による粒子の減速
- 等を将来計算に入れる予定である。  
当初、発電効率の目標として、70%以上とする。

## 3. 計算結果と考察

昨年度は前節の1と2の計算を行った。本年度は、4を行って電極の配置などを検討した。昨年度の結果から、プラズマ出口から高エネルギー粒子と背景プラズマの分離に適した磁場配位としてカサブ磁場とした。但し、出口のミラーコイルに対する対抗コイルには、ミラーコイルの電流の半分以下が望ましい事が分かったので、電流比は1: -0.5（符号は電流の向き）としている。

最初、ミラーコイルと対抗コイルの間に電極を入れることを考えた。図1にポテンシャル分布の例

を示す。この場合、粒子は出口から電極のない場合に比べて軌道を大きく変えている（図 2）。この時図 1 に示された電位分布をみると、出口付近まで電極の作る電位が形成されていた。 $\alpha$  粒子のエネルギーは MeV オーダーであるため、電極の電位も MV のオーダーとなり、出口付近でも比較的大きな電位勾配（＝電場）が形成される。そのために、粒子軌道が最初から変わっていた事が分かった。

そこで、コイル同士の磁力線が最も近づく線カスプの場所に金属メッシュを置いたと考え、その電位を 0 にした。こうすることで、出口付近に電極の電位は影響を及ぼさない（図 3）。但し、粒子軌道はなかなか電極には入りにくい（図 4）。色々な配置を試みたが、コイル間距離を 1m とした現在のコイル配置では、高エネルギー粒子は反射されて電極には向かなかった。そこで、計算領域を広げて電極を対抗コイルの外側（粒子出口の反対側）に置くことを考えた。また、電極電位の影響を出口付近に及ぼさないように、アース電位（計算上 0V）の電極を対抗コイルのすぐ右側に置いた。磁力線分布を図 5 に、また、ポテンシャル分布の例を図 6 に示す。この配置で高エネルギー粒子軌道を計算すると、高エネルギー粒子は左側の出口から対抗コイルの中心部を通り、右側の領域に達すること（図 7）、さらに、背景プラズマ（低エネルギーの電子、陽子）はカスプ磁場から出ていくことが確認され、荷電分離と高エネルギー粒子の回収に期待が持てる事が分かった。

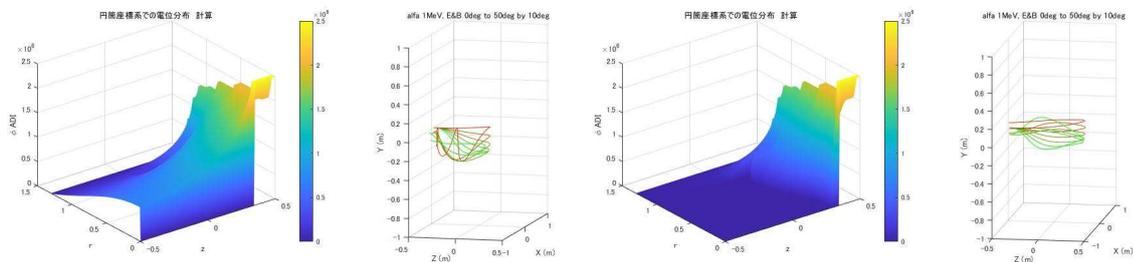


図 1 ポテンシャル分布

図 2 粒子軌道の例

図 3 ポテンシャル分布

図 4 粒子軌道の例

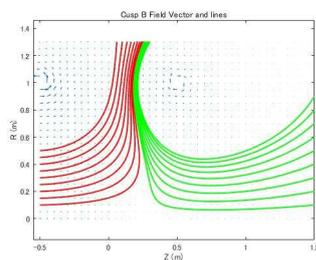


図 5 拡張領域の磁力線分布

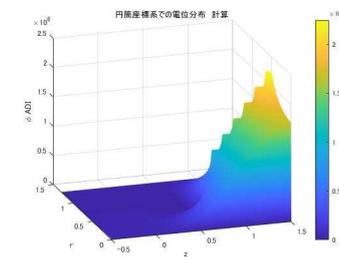


図 6 ポテンシャル分布

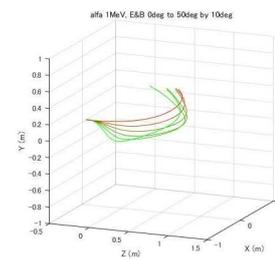


図 7 粒子軌道の例

#### 4. 結論と今後の課題

初年度に磁場配位のみで荷電分離可能な磁場配位を見出し、2 年目の本年度で電極の配置に関する貴重な情報を得た。次年度は、電極配置（位置と電圧）の最適化を図り、エネルギー回収効率を計算する予定である。

#### 5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

[論文発表リスト]

特になし。

[口頭発表リスト]

西野信博、他、“サイクロトロン運動による荷電分離を使った直接発電方法の解析”，第 42 回プラズマ核融合学会 2025. 12. 京都工業繊維大学，（ポスター）

西野信博、他、“サイクロトロン運動による荷電分離を使った直接発電方法の解析”，2025ZE 拠点年会 2025. 12. 11 京都大学（ポスター）

# 超硫黄分子の輸送機構から解明する生体機能調節システム

清水隆之<sup>1</sup>, 幾島美夢<sup>1</sup>, 中川秀彦<sup>2</sup>, 中田栄司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>奈良女子大学理学部

<sup>2</sup>名古屋市立大学大学院薬学研究科

<sup>3</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 背景

超硫黄分子は、分子内に過剰な硫黄原子が付加されたポリスルフィド構造をもつ硫黄化合物の総称で、太古の地球環境下から生物を支えてきた生命素子として、近年大きな注目を集めている（図1）。また、その普遍的な生理機能への影響から、生物圏における硫黄循環を支える要素としても重要な化合物である。したがって、超硫黄分子の細胞内動態と生理機能への影響を解明

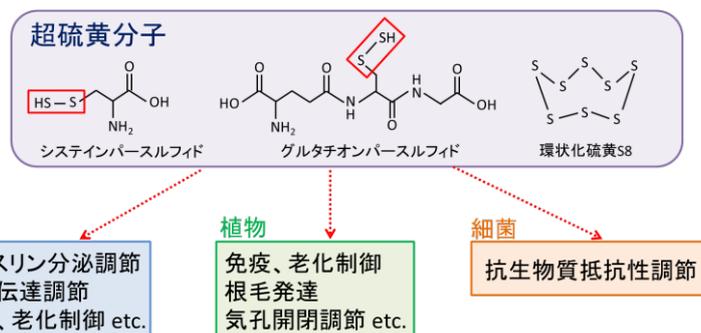


図1 ポリスルフィド化合物である超硫黄分子は、生物普遍的な生理活性調節物質として機能する。

することは、地球規模での物質循環の理解を深化させ、国連の持続可能な開発目標（SDGs）に掲げられる環境・資源循環に関する複数の目標達成に資する基盤的知見を提供することが期待される。

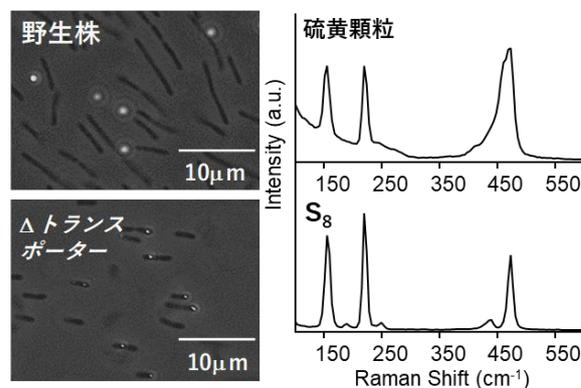
超硫黄分子は細胞内で産生された後、分配・輸送されることで機能すると考えられているが、その輸送を担うトランスポーターや分子機構はほとんど明らかにされていない。これまでに、我々は、硫化水素要求性の光合成細菌をプラットフォームにして、超硫黄分子の検知機構と代謝に関する研究を行ってきた。その過程で、超硫黄分子の細胞外輸送に関わるトランスポーターを同定した。

そこで本研究では、光合成細菌における超硫黄分子トランスポーターの解析を通じて、硫黄化合物の細胞内外動態を規定する分子基盤を明らかにし、生物学的硫黄循環の理解に新たな視座を提供することを目指す。

## 2. 実験方法

本光合成細菌は、硫化水素を酸化して硫黄顆粒と呼ばれる顆粒を細胞外に蓄積することが知られている。実際に、硫化水素存在下で生育させた本細菌を位相差顕微鏡で観察すると、硫黄顆粒が白く光って観察される（図2）。一方、我々が同定したトランスポーターの欠損株では、細胞内に硫黄顆粒の蓄積が観察された。さらに、これらの硫黄顆粒の組成を解析するために、顕微ラマン分光で解析したところ、細胞内外の硫黄顆粒は、どちらもS<sub>8</sub>が主要成分であることがわかった（図2）。

そこで、超硫黄分子トランスポーターの基質特異



硫黄顆粒の顕微鏡観察 硫黄顆粒とS<sub>8</sub>のラマン分光解析

図2 野生株では細胞外に蓄積した硫黄顆粒（白い粒）が輸送体欠損株では細胞内に蓄積した。これら顆粒はS<sub>8</sub>と同じラマンスペクトルを示した。

性やその分子機構を精査するために、その輸送活性を試験管内で測定する解析系の確立を目指した。しかし、本トランスポーターは内膜と外膜にそれぞれサブユニットを持つ複合体として機能するため（図3）、通常のプロテオリポソームを用いた解析系では実現できない。

そこで、京都大学の中田栄司教授らが開発した、球体状のDNA ナノ構造体を内包したプロテオリポソームの構築技術を活用することで、本解析系の実現を目指した。具体的には、内膜部ユニットと外膜サブユニットのプロテオリポソームを別々に構築し、それらを連結させることでトランスポーターを再構成する（図4）。この際、リポソームに内包したDNA ナノ構造体と膜タンパク質をリンカーで結合させることで、各サブユニットの配向を揃える。さらに、片方のDNA ナノ構造体内には超硫黄分子の蛍光プローブを内包することで、プロテオリポソーム内に輸送された基質を定量する（図4）。

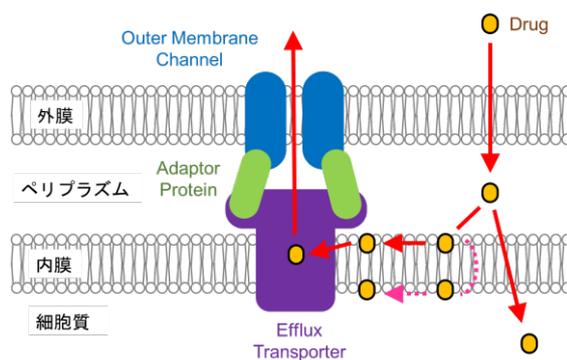


図3 本トランスポーターは内膜と外膜に局在するサブユニットとそれらのリンカーから構成される。内膜から供給される基質を細胞外に排出する機能をもつ。

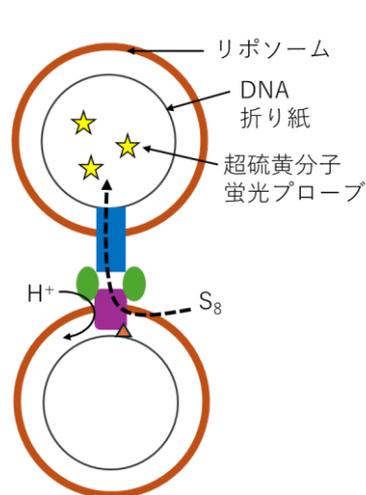


図4 内膜サブユニットあるいは外膜サブユニットのプロテオリポソームをリンカータンパク質で連結させる。基質のプロテオリポソーム内への輸送は、DNA ナノ構造体内に内包した超硫黄分子蛍光プローブで検出する。

### 3. 結果および考察

DNA ナノ構造体に超硫黄分子の蛍光プローブを包埋するために、ナノ構造体の材料となるDNA と蛍光プローブを縮合させた。アミノ基を付加したDNA と活性エステルを付加した蛍光プローブ（図5）を合成し、これらを縮合した。

DNA と蛍光プローブは、pH8 のリン酸バッファー内で反応させたが、蛍光プローブのキサンテン環上のエステルが加水分解を受けて、その機能が失活してしまった。そこで、pH7 で反応を行ったところ、蛍光プローブの分解は抑制できたが、アミド結合が起これず、ほとんど反応産物が得られなかった。

これは、各反応や各化合物の安定性がpH に依存していることが問題であるため、pH に依存しないクリック反応を利用してDNA と蛍光プローブを縮合することを計画している。アルキン化したDNA と反応させるために、図5の蛍光プローブの活性エステルをアジド基に変えた化合物の合成に着手した。

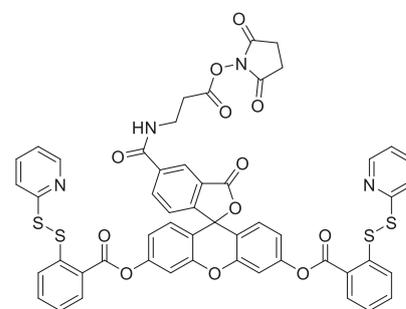


図5 フルオレセインをベースとした蛍光プローブの5位カルボキシル基のNHS体。

### 4. 研究業績

[口頭発表リスト]

清水隆之, 幾島美夢, 菅野菜々子, 河合繁, 中田栄司, 中川秀彦, 重藤真介, 増田建, Dahl Christiane, “超硫黄分子の輸送機構から解明する生体機能調節システム”, 2025年度ZE拠点年会, 2025年12月11日, 京都大学宇治キャンパス (ポスター)

# 三重鎖の塩基対開閉ダイナミクスに対する 分子込み合い効果の研究

阪本知樹<sup>1,2</sup>, 山置佑大<sup>2</sup>, 永田崇<sup>2</sup>, 片平正人<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京薬科大学薬学部薬学科

<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

細胞内の生化学反応は、タンパク質・核酸・多糖・代謝物など多様な分子が、全体として約 5 から 40% という高濃度で存在する分子込み合い環境のもとで驚くほど効率的に進行している。核酸は、二重らせん構造だけでなく三重鎖などの非標準構造を形成し、さらに塩基対の開閉 (open/close) を伴うダイナミクスを通じて分子認識や機能発現を行う。しかし、実際に核酸が働く細胞内環境において、この分子込み合い環境が核酸の構造・ダイナミクス・熱力学的特性にどのように影響するかについての解明が不十分である。

生体分子が常温常圧・水溶液中という温和な条件で実現している高効率反応制御の原理を理解することは、自然界に学ぶ形での触媒設計、エネルギー変換材料、反応場設計 (効率的な反応が進む場の再現・創出) といった新しい方法論の創出へとつながり得る。また医療分野においても、核酸構造とそのダイナミクスの理解は、病態解明や新薬開発に向けた基盤知識として重要である。

本研究では、遺伝子発現制御、複製停止、ゲノム不安定性などとの関連が報告され、さらにフリードライヒ運動失調症との関与も示されている DNA 三重鎖構造に焦点を当てた。特に、平行型 DNA 三重鎖構造 (図 1A) における塩基対の開閉ダイナミクス (図 1B) が、細胞内分子込み合い環境でどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。塩基対の開閉ダイナミクスは核酸の機能に深く関わるにもかかわらず、分子込み合い環境中での影響はこれまでほとんど未解明であった。

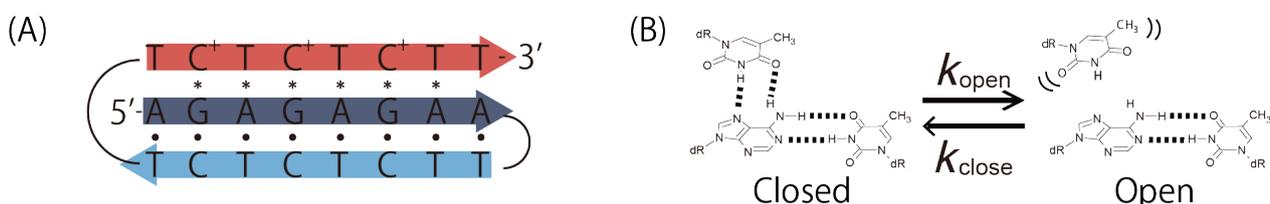


図 1 (A) 本研究で使用した DNA 三重鎖構造を形成するオリゴ DNA の二次構造。ポリプリン鎖 (藍色) とポリピリミジン鎖 (水色) がワトソン・クリック塩基対を形成して二重鎖構造となり、そのポリプリン鎖に対して、赤色で示すポリピリミジン鎖がフーグスティーン塩基対を形成して三本目の鎖として結合し、三重鎖構造となる。(B) 塩基対開閉ダイナミクス。塩基対が閉じた状態 (Closed) と開いた状態 (Open) の二状態を仮定する。

そこで本研究では、細胞内環境の込み合いを、異なる物理化学的要因を代表するクラウダーを使い分けることで、複雑な細胞内の分子込み合い環境の影響を切り分けて解析することを試みた。具体的には、主に排除体積効果を強く反映する Ficoll PM 70 (分子量約 70,000 の多糖分子) と、水の活量の低下を引き起こす PEG 200 (分子量約 200 のポリエチレングリコール分子) を用い、DNA 三重鎖構造の塩基対開閉ダイナミクスを種々の NMR 法により評価した。

その結果、分子込み合い条件下で個々の塩基対の開く速度 ( $k_{\text{open}}$ ) と閉じる速度 ( $k_{\text{close}}$ ) の決定に初めて成功し、閉状態の寿命 ( $\tau_{\text{closed}} = 1/k_{\text{open}}$ ) および開状態の寿命 ( $\tau_{\text{open}} = 1/k_{\text{close}}$ ) を塩基対ごとに定量化することに成功した。さらに、両状態の平衡を反映する自由エネルギー差として  $\Delta G_{\text{open}}^{\circ} = -RT \ln K_{\text{open}}$  を算出し、分子込み合いが速度論 ( $k_{\text{open}}$  および  $k_{\text{close}}$ ) と熱力学 ( $\Delta G_{\text{open}}^{\circ}$ ) の双方を通じて

塩基対ダイナミクスに影響を及ぼすことを示した。

分子込み合い環境は DNA 三重鎖構造の全体的な構造自体を大きく崩さない一方で、塩基対開閉ダイナミクスの速度定数・自由エネルギー差には明確な影響を与えた。特に、フーグスティーン塩基対で形成される第 3 鎖に着目すると、Ficoll PM 70 の添加では多くの塩基対において  $\tau_{\text{closed}}$  と  $\tau_{\text{open}}$  が延長し、とりわけ  $\tau_{\text{closed}}$  の延長が顕著であった。結果として  $\Delta G_{\text{open}}^{\circ}$  が増加し、塩基対が安定化する方向に働いた。

一方で PEG 200 の添加は、ほとんどの塩基対で  $\tau_{\text{closed}}$  を短縮させ、 $\tau_{\text{open}}$  への影響は一様ではなく、中心付近では  $\tau_{\text{open}}$  が減少し、末端付近では  $\tau_{\text{open}}$  が増加するという部位依存性を示した。これら ( $\tau_{\text{open}}$  の増減と  $\tau_{\text{closed}}$  の短縮または微妙な増加の組合せ) により、全体として  $\Delta G_{\text{open}}^{\circ}$  は低下し、塩基対は不安定化する方向へ変化した。分子込み合い環境の影響を代表する要因が異なると、同じ三重鎖構造でも塩基対開閉ダイナミクスへの影響が異なることを、塩基対分解能で速度論・自由エネルギー差という具体的な指標で示した点が本研究の中核的成果である。

本研究により、細胞内分子込み合い環境における核酸の非標準構造の構造・安定性・ダイナミクスに関する理解が大きく前進した。特に、複雑な細胞内環境を Ficoll PM 70 や PEG 200 などの分子込み合い環境を再現する試薬によって異なる要因を切り分けて再構成し、比較するというアプローチにより、核酸の構造・安定性・ダイナミクスを支配する因子を定量的に整理する道筋を示した。これは、核酸の生物学的意義の理解に新しい視点を与えるだけでなく、将来的には、細胞内で高効率に反応が進む場を再現・設計するための基礎にもなり得る。

本成果は原著論文として *The FEBS Journal* に投稿し、2026 年 1 月 16 日に受理された (Sakamoto *et al.*, Accepted, 2026)。今後は、本研究で確立した種々の NMR 法を組み合わせた解析の枠組みと知見を基盤に、より生細胞に近い条件、相互作用するタンパク質が存在する条件、あるいは生細胞内でのみ観察される構造・ダイナミクスにより駆動される現象を対象とすることを計画している。

#### [論文発表]

Tomoki Sakamoto, Yudai Yamaoki, Takashi Nagata, Masato Katahira, “Contrasting effects of different molecular crowding environments on base-pair opening/closing dynamics of DNA triplex structures”, *The FEBS Journal*, 2026, Accepted.

#### [受賞、プレス発表等]

なし

#### [和文解説記事]

阪本知樹, “核酸分子が持つ構造ダイナミクス: DNA ヘアピン構造中の Hoogsteen 型塩基対”, *ファルマシア*, 2026 年 62 巻 1 号 p.73

#### [口頭発表]

阪本 知樹, 山置 佑大, 永田 崇, 片平 正人, “細胞内分子込み合い環境における三重鎖構造をはじめとする非標準構造を形成する核酸の構造とダイナミクスの in-cell NMR 法による解析”, 日本薬学会第 146 年会, 演題番号: 28-13-am07, 2026 年 3 月 26 日-29 日(28 日に発表予定)

#### [招待講演]

阪本知樹, “NMR 法で捉える生体高分子の構造ダイナミクス”, 第 64 回 NMR 討論会チュートリアルコース, 2025 年 11 月 25 日

# マイクロ波照射によるセルロース性資源の直接糖化メカニズムの解明

高山定次<sup>1</sup>，八木重郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>自然科学研究機構 核融合科学研究所

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

マイクロ波を利用した化学反応の研究は、省エネ効果が期待でき、さらに再生エネルギーである電気を利用できるので、二酸化炭素排出量削減に期待されている。そこで、今後問題と考えられているエネルギー問題解決の一つの手法として、セルロースからグルコースを製造して、燃料等に用いることを考えている。

酒井先生らは、マイクロ波と触媒（ケイ酸タングステン）の共存下では、セルロースが分解してアルコール類が生成されると報告している。この実験は、市販の電子レンジで実験を行っており、分解のメカニズムなどは明らかになっていない。そのため、申請者との共同研究でそのメカニズムの解明を試みた結果、ケイ酸タングステン水溶液中の各種イオンが選択的にマイクロ波を吸収していることが明らかとなった。しかし、セルロースの分解過程については、未だ明らかになっておらず、バイオマスの知見が豊富な先生方の協力いただくことで、セルロースの分解過程の解明を目指している。

初年度は、マイクロ波加熱と通常加熱の比較実験を行った。その結果、マントルヒーターで沸騰させてもセルロースの分解反応は進行しないが、マイクロ波加熱ではセルロースの分解反応が進行して、エタノールが検出された。本年度は、セルロースの分解反応にケイ酸塩が作用しているのか、あるいはタングステンイオンが作用しているのか検証実験を行った。

## 2. 実験方法について

図1にマイクロ波共振器の写真を示す。このマイクロ波共振器はTE103モードの定在波を生成する。定在波は、最大磁場の位置では電場がゼロに、最大電場の位置では磁場がゼロとなるので、試料の挿入位置を変えることで、電場加熱と磁場加熱を選択できる。発振器は、最大出力150Wの半導体発振器を用いた。また半導体発振器を用いることで、試料を共振器に設置後に、ベクトルネットワークアナライザーでチューニングすることができ、より再現性が高くなる。

発生ガスの分析は、四重極型質量分析計を用いた。発生したガスをアルゴンガスでフローさせ、四重極型質量分析計の手前で差動排気して測定した。

実験に用いた試料は、セルロースにケイ酸タングステン、あるいはケイ酸カルシウムを混合した水溶液を用いた。この水溶液を石英試験管に入れてマイクロ波共振器の電場の最大位置に設置して加熱実験を行った。加熱温度は、ともに沸点とした。



図1 マイクロ波加熱装置及びガス分析測定系の写真

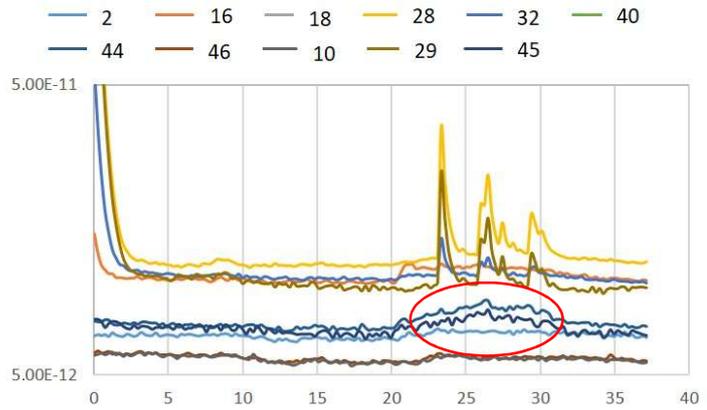
### 3. 実験結果と考察

図2に各水溶液をマイクロ波加熱した時に発生したガスを四重極型試料分析計で測定した結果を示す。

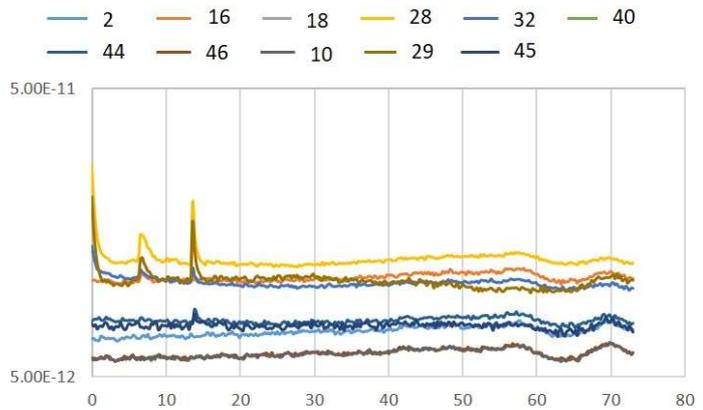
(a) のケイ酸タングステン水溶液のマイクロ波加熱では、水素、メタン、酸素、一酸化炭素、二酸化炭素が、また、赤丸で示したところにエタノール関連のガス放出が検出された。以上のことからセルロースの分解反応が進行したと考えられる。

一方、ケイ酸カルシウム水溶液を用いた実験では、図2(b)に示すように水素、メタン、酸素、一酸化炭素、二酸化炭素は検出されたが、エタノール関連のガス放出は観察されなかった。

以上のことから、両方の水溶液に共通に含まれるケイ酸塩は、セルロースの分解反応に寄与しないと考えられる。また、両者の水溶液の違いであるタングステンとカルシウムは、ケイ酸タングステン水溶液でのみエタノール関連ガスが検出されたことから、タングステンがセルロースの分解反応に大きく寄与していると考えている。



(a)ケイ酸タングステンの結果



(b)ケイ酸カルシウムの結果

図2 マイクロ波加熱時のガス分析結果

### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

なし

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

なし

### 参考文献

- (1) 「ポリ酸共存下でのマイクロ波照射によるセルロース性資源の物質変換とその応用」  
課題番号：23655131 の科研費報告書

# ヒト常在菌への FEL 照射によるバイオフィーム形成の変化

河野哲朗<sup>1</sup>, 寒河江登志朗<sup>1</sup>, 岡田裕之<sup>1</sup>, 境武志<sup>2</sup>, 早川恭史<sup>2</sup>, 全炳俊<sup>3</sup>, 大垣英明<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本大学 松戸歯学部

<sup>2</sup> 日本大学 量子科学研究所

<sup>3</sup> 京都大学 エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

レーザーの応用分野はきわめて広く、精密計測、製品加工、光通信、情報処理に加え、臨床医学などでも利用されている。従来の光源とは異なりレーザーは、単色性、指向性、収束性および干渉性などの優れた特性を有している。ただし、市販のレーザー機器で発生する光の波長は、波長が限られる欠点がある。そこで、注目されたのが加速器で発生する自由電子を利用する自由電子レーザー (Free Electron Laser: FEL) である。FEL は波長可変で、遠赤外から軟 X 線領域まで利用可能である<sup>1)</sup>。

日本大学電子線利用研究施設 (Laboratory for Electron Beam Research and Application: LEBRA) では、高調波への波長変換を含め、波長 400 nm - 6 μm の範囲で FEL が得られる。一方、京都大学エネルギー理工学研究所 (Kyoto University: KU) では、波長 3.4 - 24 μm の範囲で FEL が得られる。LEBRA-FEL、KU-FEL の両 FEL 施設を共同利用することにより、分子の指紋領域 (5 - 20 μm) に対応する中赤外線領域の主要な波長の照射実験に対応できる環境が得られる。そこで、当研究グループは中赤外線領域の FEL が生物の生理作用にどのような影響をもたらすか、両施設の FEL を照射することで炭酸ガス固定の増進を指標に、先行研究として、実験対象生物において培養実験が容易かつ石灰化能を有する *Corynebacterium matruchotti* を選択した実験を行った。その結果、特定波長の照射により石灰化能の抑制とコロニー形態の変化を観察してきた。

昨今、多剤耐性菌の出現が世界的な課題となっており、化学物質に依存しない物理的な細菌制御法の確立が急務である。本研究は、抗菌剤など環境負荷の高い薬剤の使用量を削減し、ゼロエミッションに資する新たな感染制御法の基盤構築を目的として、バイオフィーム形成菌の光依存性を検討し、特定波長におけるバイオフィーム産生能力の変化を検証した。

## 2. 方法

バイオフィーム形成菌の代表としてう蝕関連菌 *Streptococcus mutans* (*S.m*) を Brain Heart Infusion (BHI) に 0.5% スクロスを加えた液体培地に播種し使用した。FEL 照射直前まで冷温下にて保存し成長を抑制したうえで京都大学 FEL 施設 (KU-FEL) に搬入した。なお、本研究で使用する菌は国立感染症研究所病原体等安全管理規定において BSL-1 であり、日本大学松戸歯学部バイオセーフティー委員会に届出済みである。

照射直前に paper disc に菌液を滴下し、実験群はタンパク質 (アミド I、II、III) や糖鎖、核酸等の分子を標的として、KU-FEL において波長 11.0 μm、9.26 μm、8.09 μm、7.14 μm、6.62 μm、および 5.78 μm 付近で照射を行った。照射野の直径は約 1 cm 程度とし、これまでの研究結果を考慮し 1 disc あたりの照射時間は 20 分を基本とした。いずれもエネルギー密度は各波長で出せる最大値 (約 30.0 - 50.0 mJ/cm<sup>2</sup> 付近) で行った。対照群は同一環境下で非照射とした。照射直後の同一試料から分注し、(1) 生存率、(2) コロニー形態、(3) FTIR および (4) バイオフィーム形成能、感受性を並列評価した。

FEL 照射後の実験群および対照群の各 disc を 1 mL のリン酸緩衝液 (PBS) にて希釈し、希釈液 100 μL を BHI 寒天培地 (plate) 2 枚に接種した。1 枚は菌の生存率およびコロニー形態の観察用の培養とし、もう 1 枚は増殖用とした。各 plate は恒温器 (37 °C、5% CO<sub>2</sub>) 内にてコロニー形成が確認できるまで培養を行った。増殖用に培養させた plate は、コロニー採取後、凍結乾燥機にてフリーズドライ化した。フリーズドライ化した菌体は、フーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR、日大

松戸現有)にて測定し、指標領域のスペクトル変化を比較解析した。また希釈液の一部はバイオフィーム形成の評価のためにバイオフィーム形成能測定キット、バイオフィーム薬剤感受性能測定キットを用いて吸光度測定を行った。

### 3. 結果および考察

ヒト常在菌の光依存性を検証するため、*S.m*を用いてバイオフィーム産生能力の変化を調査してきた。その結果、*S.m*のコロニー形態に巨視的な変化は認められなかった。さらに、菌の生存率にも明確な減少は観察されず殺菌性は認められなかった。実施回数が少ないため確定的ではないが、*S.m*では、6.62  $\mu\text{m}$ 等の照射においてバイオフィーム形成能の低下がみられた(データ未提示)。

また、波長 6.62  $\mu\text{m}$  の FEL 照射後の *S.m* 菌体において、FTIR スペクトル上の 1750 - 800  $\text{cm}^{-1}$  付近に特異的なピーク変化がいくつか確認された。特にタンパク質アミド II ( $\approx 1580 - 1480 \text{cm}^{-1}$ ) および細胞壁多糖類 ( $\approx 1100 - 1000 \text{cm}^{-1}$ ) に起因すると推定されるバンドにおいて、ピーク強度と形状の変化が認められ、FEL 照射による菌体外多糖の変化を示している可能性がある(図 1)。この事実は、FEL 照射が細菌を死滅させたり細胞構造を破壊したりすることなく、病原性因子(バイオフィーム形成能)のみを選択的に不活化できる可能性が示唆された。これは、口腔内フローラのバランスを温存しつつ病原性のみを制御する新しい歯科治療戦略につながる重要な知見であると考えられる。現時点では定量的評価と再現性の検証が必要であるが、将来的に化学的抗菌剤・消毒薬の使用量やそれに伴う薬剤廃液を低減できれば、ゼロエミッションに資する技術基盤となり得る可能性がある。

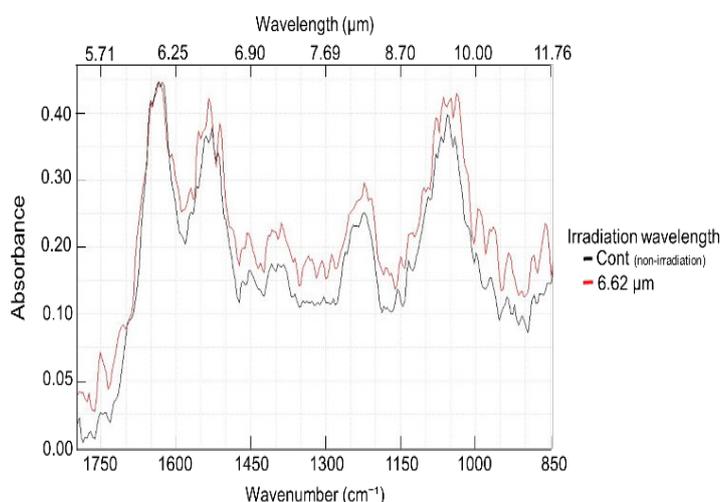


図 1. FTIR spectra of non-irradiated (control) and 6.62  $\mu\text{m}$  wavelength FEL-irradiated *S.m*

#### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: 自由電子レーザー装置(08-01-03-15) [https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_08-01-03-15.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_08-01-03-15.html) (Accessed 2026-01-09)
- 2) Toyama T, Fujioka J, Watanabe K, et al.: Investigation of Bactericidal Effect of a Mid-infrared Free Electron Laser on *Escherichia coli*, *Sci Rep*, 12: 18111, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-22949-9
- 3) Ojeda JJ, Dittrich M: Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Molecular Analysis of Microbial Cells. In: *Microbial Systems Biology. Methods in Molecular Biology (Methods and Protocols)* (Navid A, ed), Vol 881. 1st ed, 187-211, Humana Press, Totowa, 2012.

### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[論文発表リスト]

・ Tetsuro Kono, Toshiro Sakae, Osamu Tsuzukibashi, Heishun Zen, Takeshi Sakai, Yumiko Takahashi, Masanori Saito, Noriko Shinozaki-Kuwahara, Hiroshi Nakada, Kanami Sato, Arata Watanabe, Takao Kuwada-Kusunose, Kunihiro Suzuki, Takashi Kaneda, Yasushi Hayakawa, Hideaki Ohgaki, Hiroyuki Okada, *Bacterial Biomineralization: A Review and X-ray Diffraction Determination Table for Bacterial Biominerals*, *J. Hard Tissue Biology* Vol. 34(4): 181-198, 2025

[口頭発表リスト]

・ Tetsuro Kono, Toshiro Sakae, Hiroyuki Okada, Takeshi Sakai, Yasushi Hayakawa, Heishun Zen, Hideaki Ohgaki, FEL irradiation-induced changes in biofilm formation by human resident bacteria: 京都大学, 2025 年度 ZE 拠点年会, 2025 年 12 月 11 日

# Na<sup>+</sup>輸送型 NADH-キノン酸化還元酵素の阻害剤作用機構の 解明と新規阻害剤開発

梶谷 貴洋<sup>1</sup>, 石川 萌<sup>1,2</sup>, 岸川 淳一<sup>3,4</sup>, 村井 正俊<sup>1</sup>, Danielle McFee<sup>2</sup>,  
加藤 貴之<sup>4</sup>, Blanca Barquera<sup>2</sup>, 三芳 秀人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京大院・農,<sup>2</sup>レンセラー工科大・生物科学,<sup>3</sup>京都工繊大・応用生物学,<sup>4</sup>阪大・蛋白研

## 【目的】

コレラ菌や緑膿菌などの多くの病原性細菌のエネルギー代謝に必須である Na<sup>+</sup>輸送型 NADH-キノン酸化還元酵素 (NQR) は、基質の酸化還元と共役して Na<sup>+</sup>の能動輸送を行う膜タンパク質複合体である。本酵素は6つのサブユニット (NqrA~F) から構成され、 $\text{NADH}^{\text{NqrF}} \rightarrow \text{FAD}^{\text{NqrF}} \rightarrow 2\text{Fe-2S}^{\text{NqrF}} \rightarrow 2\text{Fe-2S}^{\text{NqrD}} \rightarrow \text{FMN}^{\text{NqrC}} \rightarrow \text{FMN}^{\text{NqrB}} \rightarrow \text{リボフラビン (RBF)}^{\text{NqrB}} \rightarrow \text{ユビキノン}$ と電子が流れる (図 1A)。NADH とキノンを基質として利用し、ATP 合成に必要なイオン濃度勾配を形成するという意味で、哺乳類ミトコンドリアの H<sup>+</sup>輸送型 NADH-キノン酸化還元酵素 (呼吸鎖複合体-I) とは生物内での役割は同様であるが、進化的にも構造的にも異なるため、NQR は病原性細菌に対する有望な創薬標的として注目されている。これまでに応募者らは、NQR の強力な阻害剤としてコロルミシン A (IC<sub>50</sub>=5 nM、図 1B) を見出し、そのプローブ化分子を駆使した生物有機化学的研究や、cryo-電子顕微鏡 (EM) を用いた構造生物学的研究により、結合部位は NqrB サブユニットの N 末端領域と膜貫通ヘリックス (TMH) 1、TMH2、TMH3 に囲まれた領域であることを示した。コロルミシン A は NQR を標的とした抗菌剤のリード化合物として注目されているのだが、すでにコロルミシン A に耐性がある NQR を持つ細菌が知られており、それらのコレラ菌 NQR で NqrB の 141 番目の Gly に相当するアミノ酸残基が Ala や Leu、Thr であることが知られている。また、NqrB の 141 番目の Gly を Ala に置換した変異体 (Gly141Ala<sup>NqrB</sup>) は、コロルミシン A の阻害が IC<sub>50</sub>=840 nM で、160 倍ほど阻害活性が低下した中程度のコロルミシン耐性になることが報告されている。しかし、このようなコロルミシン耐性の分子機構は不明なままである。そこで本研究では、Gly141Ala<sup>NqrB</sup> 変異体がコロルミシン A 耐性を発揮する機構の解明を目指した。

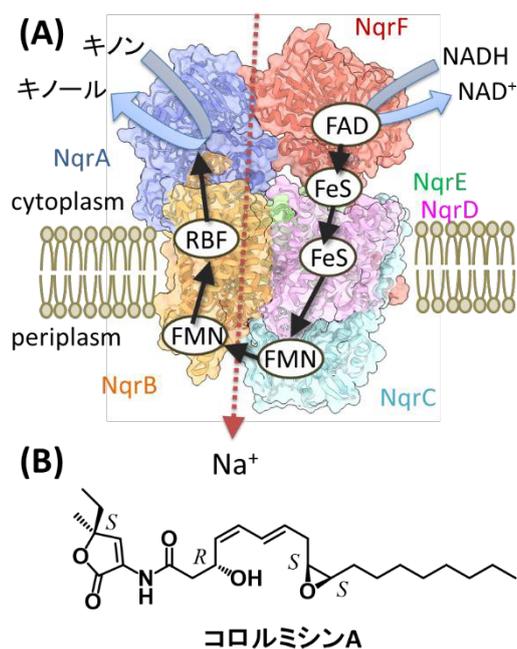


図 1. (A) NQR の構造。

(B) コロルミシン A の構造式。

## 【方法および結果】

2 種の分子が相互作用するとき生じる反応熱を直接測定できる等温滴定カロリーメトリーを用いて野生型 NQR と Gly141Ala<sup>NqrB</sup> 変異体とのコロルミシン A の結合親和性を比較した。5 μM の酵素溶液 200 μL に対して 60 μM のコロルミシン溶液を 2 μL ずつ添加することで発生する熱量をプロットし、解離定数算

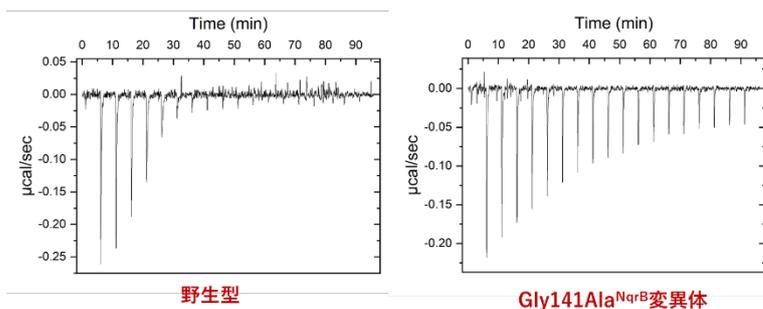


図 2. 等温滴定カロリーメトリーの測定結果

出した。その結果、野生型では  $K_D$  値が 67 nM であるのに対して Gly141Ala<sup>NqrB</sup> 変異では 4.5  $\mu$ M であり、結合親和性が大きく低下していることがわかった。

次に、コロールミシン A が結合した Gly141Ala<sup>NqrB</sup> 変異体の cryo-EM 構造の取得を目指した。変異型酵素にコロールミシン A を加え cryo-EM 測定用のグリッドに塗布して凍結し、電子顕微鏡により撮影したものを cryoSPARC で画像解析し、2.68 Å 分解能でコロールミシン A が結合した Gly141Ala<sup>NqrB</sup> 変異体構造を取得した。野生型のコロールミシン A 結合型構造と比較すると、野生型に対してはコロールミシン A のアルキル側鎖がタンパク質表面のクレフトに沿う形で結合していたものが、Gly141Ala<sup>NqrB</sup> 変異体ではクレフト中に位置する Ala141<sup>NqrB</sup> によりアルキル側鎖が押し出されるような形で結合していた。これらの結果から、Gly141Ala<sup>NqrB</sup> の変異によりコロールミシン A のアルキル鎖が阻害剤結合部に結合し難くなり、阻害活性の低下につながっていると考えられた。

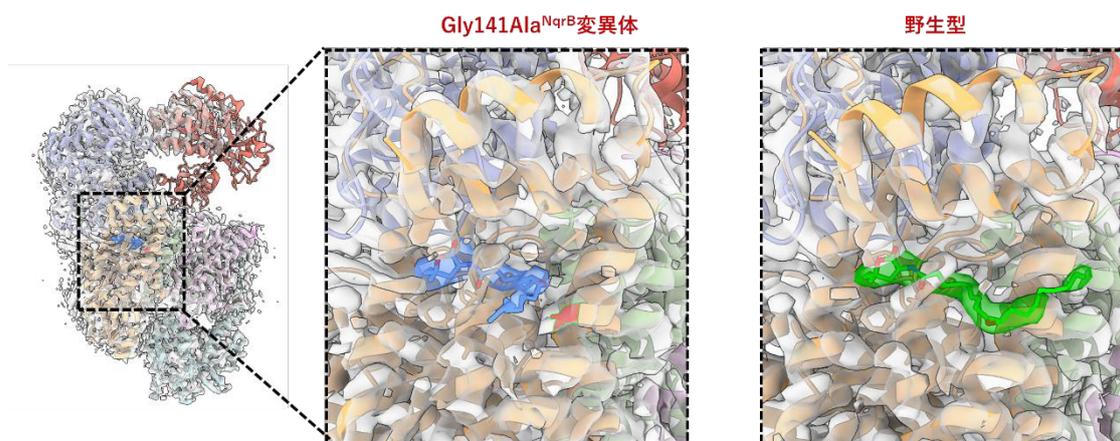


図 2. 等温滴定カロリメトリーの測定結果.

### 【謝辞】

本研究で使用した等温滴定カロリメトリーは、エネルギー理工学研究所の中田栄司先生に借りさせていただきました。大変感謝しております。

### 【論文発表リスト】

- Ishikawa-Fukuda, M., Kishikawa, J., Masuya, T., Ito, T., Butler, N. L., Mcfee, D., Kato, T., Barquera, B., Miyoshi, H., and Murai, M. (2025)  
Structural elucidation of the mechanism for inhibitor resistance in the Na<sup>+</sup>-translocating NADH-ubiquinone oxidoreductase from *Vibrio cholerae*  
*Biochemistry* 64, 1963–1972

# 相対論的電磁場の超高速計測に関する研究

太田雅人 1, 全炳俊 2

1 核融合科学研究所 可知化センシングユニット

2 京都大学 エネルギー理工学研究所

## 1. 本研究の目的

本研究では、高周波加速器（自由電子レーザーKU-FEL用電子加速器）で生成された高エネルギー電子ビームの周りに形成される相対論的電磁場の超高速計測を実施し、その基礎学理の探索を行う。研究代表者は、電気光学検出と呼ばれる非線形光学効果による超高速電場計測を用いて、上述の相対論的電場、特に、クーロン電場の可視化（時空間分布計測）に成功し、論文化に成功している[1]。そこで、さらなる相対論的電磁場の性質を探索することを本研究では目指す。

そもそも電磁場は、二つに分類することができる：1. クーロン場（静止、または等速直線運動を行う荷電粒子の周りに形成）。2. 放射場（加速度運動を行う荷電粒子の周りに形成）。先の研究[1]では、相対論的クーロン電場に関する実験であったが、今回は電子ビームの軌道を磁場で曲げて、加速度運動を行わせることで、相対論的放射場の計測を行う。また、相対論的クーロン磁場の計測を磁気光学検出によって行う。先行研究で使用されていた電気光学結晶を磁気光学結晶に入れ替えるだけで実験実施が可能である。

自由電子レーザーはゼロエミッションエネルギー研究拠点の基幹装置であり、広く共同利用・共同研究に供されている。高エネルギー電子の纏うクーロン場や放射場の性質の探索は自由電子レーザーの高性能化や加速器駆動THz光源の高度化に繋がり、これら光源を利用した研究によるゼロエミッション社会の実現に貢献するものである。

[1] M. Ota, et al., Nat. Phys. 18, 1436–1440 (2022).

## 2. 研究方法

共同利用・共同研究は、研究代表者（核融合科学研究所・太田）が提案する実験を、世話人（京都大学・全）の協力を得て、自由電子レーザー発生用電子加速器を用いて実施する。本実験では、高エネルギー電子ビームの周りの相対論的電磁場を電気光学検出と呼ばれる超高速電場計測手法で観察する。本手法では、非線形光学結晶に、計測対象である相対論的クーロン電場を印加し、その際に生じる結晶内の屈折率変化（非線形光学効果）を計測光の偏光変化（直線偏光が楕円偏光化する）として読み取り、電場の強度を推定する（図1(a)）。

本研究では、先行研究（上述の相対論的クーロン電場の計測[1]）を更に発展させ、相対論的クーロン磁場、相対論的放射場の計測を実施する。その際に必要となる電子ビームの性能は、エネルギー：数十 MeV、パルス幅：1 ps 以下、電荷量：数百 pC であり、この要求に答える電子加速器は世界的にも珍しいが、本拠点の装置（KU-FEL 施設の電子加速器）はこれを満たす。

## 3. 研究成果

本研究で実施する電気光学検出には、計測光としてフェムト秒パルスレーザーが必要となる。しかし、自由電子レーザーKU-FEL には、同期されたフェムト秒レーザーシステムが存在していなかった。そこで、研究代表者は Ti:sapphire ベースのパルスレーザーシステムを構築した。レーザーシステムは主に、Oscillator と Amplifier の二つから構成されている。

Oscillator は、周波数 89.25MHz（S バンド加速器の加速電圧周波数 2856 MHz の分周）でエネルギーは一パルスあたり 0.3nJ である。Oscillator は、Phase Lock システムにより、加速器に印加される高周波電圧の基準信号に対して電氣的に同期される。この時、Oscillator 中の共振器の一つのエンドミラーはピエゾステージ上に設置されており、共振器長が数マイクロンの距離（数フェムト秒）で調整され、レーザーの共振周波数と加速空洞の加速周波数を一致させている。Phase lock が機能している際の、ミキ

サーによって出力される信号を図2に示すが、右図のようにリサージュ曲線は円を描く。2024年度の実験では、Oscillatorの光を計測光として用いたが、光量が弱いため、マルチショットの積算でデータの取得を行なった。しかし、ショットバイショットのジッターが大きく、有効データの取得には至らなかった。

本年度は、この問題を解決するべく、新たに amplifier の開発を行なった (図1(c))。まず、Ti:Sapphire結晶にナノ秒パルス、エネルギー数十 mJ の YAG レーザーパルスを照射し、励起状態にしたところに、Oscillator で生成されたパルスレーザーを照射し、誘導放射によってエネルギーを増加させる。ポッケルスセルに電圧を印加することで、励起された Ti:Sapphire 結晶を何度も通過するように (Amplifier の共振器 (Regen) 中を往復するように) 偏光状態を制御した。エネルギー増加の過程が図3に示されている。Regen 中にエネルギー (フォトダイオードの検出信号) が増加し、最後の取り出し口で高出力なパルスが形成された。来年度は、このレーザーシステムを用いて、本実験を実施する。

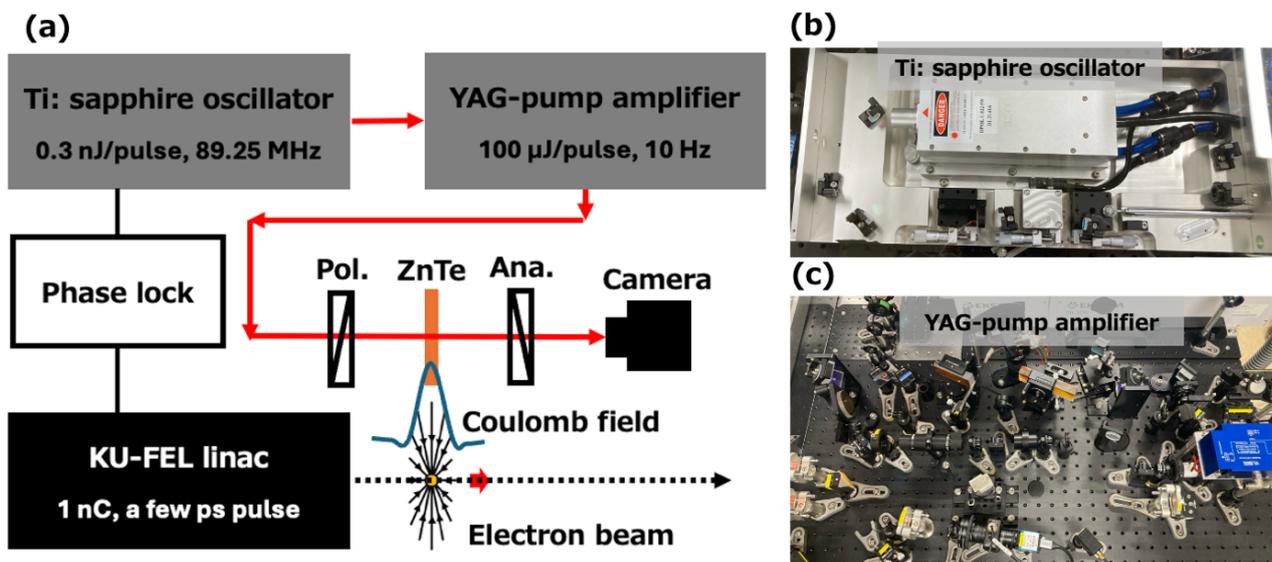


図1. (a)電気光学検出系の模式図。(b)Oscillator 写真。(c)Amplifier 写真。

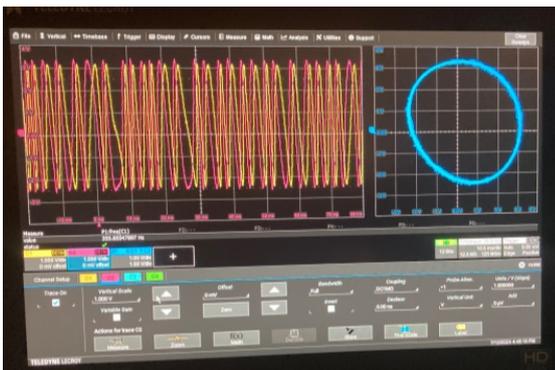


図2. Phase Lock 信号。

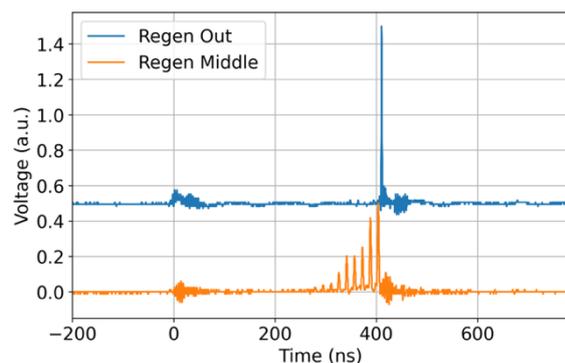


図3. Amplifier の Regen 内部と外部のパルス強度。

#### 4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

- 日本物理学会第 80 回年次大会, 太田雅人, 島田啓太郎, 中川桂一, 時田茂樹, “超高速計測を用いた電磁場とプラズマの基礎研究” (2025 年 9 月 18 日)
- 2025 年度 ZE 拠点年会, 太田雅人, 全炳俊, “Study on ultrafast measurement of relativistic electromagnetic fields” (2025 年 12 月 11 日)
- 2025 年度 KU-FEL ユーザーミーティング, 太田雅人, 全炳俊, “超高速計測を用いた相対論的電磁場生成機構の検証” (2025 年 12 月 12 日)

# タンパク質間相互作用を光で操作する化学ツールの開発

松尾和哉<sup>1</sup>, 小川帆乃香<sup>1</sup>, 藤原壮汰<sup>1</sup>, 岩本真依<sup>1</sup>, 中田栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都工芸繊維大学分子化学系  
<sup>2</sup> 京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. 背景

低分子医薬品では標的とすることが困難であったタンパク質間相互作用 (PPI) などにアプローチできる中分子医薬品における新規創薬モダリティとして、ステーブルペプチド<sup>1</sup>が注目される。ステーブルペプチドとは、 $\alpha$ -ヘリックスにおけるアミノ酸側鎖を共有結合で架橋したペプチドであり、二次構造が高度に安定化することで、標的との多点での相互作用することができる上に、プロテアーゼ耐性や細胞膜透過性が向上することが知られる。既存のステーブルペプチドには外部刺激応答性がないため、標的との相互作用を自在に制御することはできないが、ステーブルペプチドの架橋部位に外部刺激応答性を付与することで、PPI などの生命現象を自在に操作するための新たな分子ツールになると期待できる。そこで、本研究では、非侵襲で高い時空間分解能で操作できる外部刺激である「光」に着目し、光に応答して可逆的に制御できるステーブルペプチドの論理的設計指針を確立し、それを用いて PPI を自在に光操作するツールを確立することを目指した。

## 2. 方法

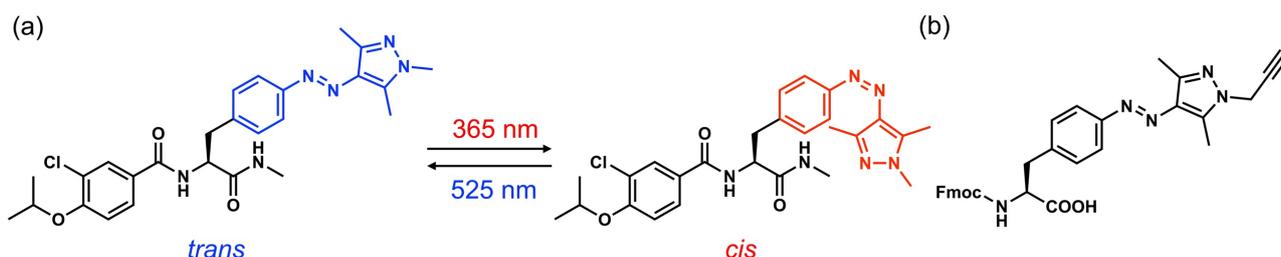


Figure 1. (a) Photoswitchable CENP-E inhibitor **1**. (b) Arylazopyrazole-based amino acid.

これまでに、我々は、分裂期染色体の運搬を司るモータータンパク質 CENP-E (Centromere-associated protein E) の活性を自在に制御できる低分子型化学ツールとして、光制御型 CENP-E 阻害剤 **1** (Figure 1a)<sup>2</sup>を報告した。**1**は、ほぼ定量的な *cis-trans* 光異性化反応を呈する arylazopyrazole 誘導体であり、365 nm の光照射によって *cis* 体リッチな光定常状態となり、525 nm の光照射によって *trans* 体リッチな光定常状態となる。この光異性化反応に応じて CENP-E の阻害能が変化することから、CENP-E 活性を自在に光操作し、CENP-E に依存した染色体の動きを制御できた。その開発過程において確立した arylazopyrazole 型アミノ酸の効率的合成法を基に、arylazopyrazole 誘導体を組み込んだ alkyne 型アミノ酸 ( $X_1$ , Figure 1b) を合成した。さらに、 $X_1$  および市販の azide 型アミノ酸 ( $X_2$ ) とを、(i, i+4) の位置に導入し、銅触媒クリック反応によって架橋したヘリックス性モデルペプチド **stapled LK** (Ac-LKKLLKX<sub>1</sub>LKKX<sub>2</sub>LKLAG-NH<sub>2</sub>) を設計・合成した。得られた **stapled LK** を用いて、光応答性や二次構造解析などの物性評価を行い、光制御型ステーブル法としての性能を評価した。

## 3. 結果および考察

得られた **stapled LK** は、さまざまな波長の光に応答して *cis-trans* 光異性化反応を呈し、その異性化反応は何度も繰り返すことができた (Figure 2a)。円二色性 (CD) スペクトルを用いて、二次構造を解析したところ、光照射前および 525 nm の光照射時の *trans* 体リッチな状態のとき、**stapled LK** は  $\alpha$ -helix 含有率が 26%であったのに対し、365 nm の光を照射した *cis* 体リッチな状態のとき、**stapled LK** の  $\alpha$ -

helix 含有率は 54%であったことから、*cis* 体を誘起すると、ヘリシティが増強することが示唆された (Figure 2b)。また、**stapled LK** の N 末端に蛍光色素である rhodamine を導入し、細胞膜透過性を確認したところ、照射前あるいは 525 nm の照射時には細胞膜を透過しなかったが、365 nm の光を照射した *cis* 体リッチな条件において、細胞膜透過性が蛍光イメージング結果から確認された。このことは、ヘリックス状態になった **stapled LK** が細胞膜を透過したことを示唆している。

以上から、モデルペプチドにおいて、照射に依存して、二次構造を可逆的に光制御できたことから、(i, i+4)型の光制御型ステーブルペプチドの設計指針を確立することに成功した。本分子戦略を基盤として、今後はエストロゲン受容体・coactivator 間における PPI を標的としたペプチド<sup>3</sup>を光制御型ステーブル化し、その性能を評価する。

#### 4. 参考文献

1. Q. Chu, R. E. Moellering, G. J. Hilinski, Y.-W. Kim, T. N. Grossmann, J. T.-H. Yeh, G. L. Verdine, *Med. Chem. Comm.*, **2015**, 6, 111–119.
2. (a) N. N. Mafy, K. Matsuo, S. Hiruma, R. Uehara, N. Tamaoki, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, 142, 1763–1767. (b) K. Matsuo, T. Kikukawa, T. Waku, A. Kobori, N. Tamaoki, *RSC Med. Chem.* **2024**, 15, 3795–3799.
3. T. E. Speltz, J. M. Danes, J. D. Stender, J. Frasier, T. W. Moore, *ACS Chem. Biol.* **2018**, 13, 676–684.

#### 5. 成果リスト

[論文発表]

該当なし

[受賞、プレス発表等]

1. 日本化学会秋季事業第 15 回 CSJ 化学フェスタ 2025 優秀ポスター発表賞 (公益社団法人日本化学会)、2025 年 11 月 27 日、小川帆乃香・和久友則・小堀哲生・松尾和哉、光応答性ステーブルペプチドの論理的設計指針の確立と PPI 光制御への応用
2. 第 15 回 4 大学連携研究フォーラム 優秀賞 (京都工芸繊維大学、京都府立医科大学、京都府立大学、京都薬科大学)、2025 年 11 月 26 日、小川帆乃香・和久友則・小堀哲生・松尾和哉、光で PARP1 活性を操作するツールの開発

[口頭発表リスト]

1. 松尾和哉、生命現象を光操作する化学技術の確立、第 25 回 スクリプス・バイオメディカルフォーラム、2025 年 11 月 29 日、大阪市
2. 小川帆乃香・中田栄司・松尾和哉、タンパク質間相互作用を光で操作する化学ツールの開発、2025 年度 ZE 拠点年会、2025 年 12 月 11 日、宇治市、ポスター発表

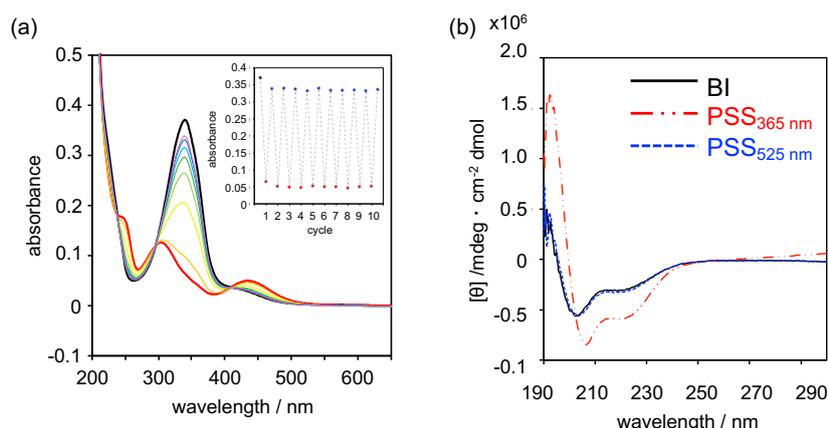


Figure 2. (a) Absorption spectral changes of **stapled LK** under light illumination at 365, 385, 405, 430, 450, 470, 505, 525 nm. Inset : Absorbance changes at 335 nm under alternating 365/525 nm light illumination. (b) Circular dichroism spectra of **stapled LK** with or without light illumination at 365 nm and 525 nm.

# 新規細菌ヌクレアーゼと DNA の相互作用解析

石川 聖人<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>長浜バイオ大学バイオサイエンス学部

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 研究背景・目的

ファージは地球上で最も多く存在するウイルスである。その推定総数は約  $10^{31}$  個に達するとされ、地球上の全細菌数を 10 倍以上も上回る。ただし、細菌はファージに対して無防備ではなく、多種多様な防御機能を進化させながら対抗してきた。例えば、制限-修飾系や CRISPR/Cas システムといった防御機構は、細胞内に侵入したファージ DNA を特異的に分解して感染を阻止する。これらの生物機能は制限酵素や CRISPR-Cas9 法といった、DNA を操作するバイオ技術に応用されている。ゆえに、細菌の防御機構の研究は、微生物学の基礎研究として重要なだけでなく、バイオ技術応用においても有益である。CRISPR/Cas システムは細菌全体の 4 割程度が有しており、細菌にとって有効なファージ防御機構であることがわかる (図 1)。一方で、残りの 6 割の細菌は CRISPR/Cas システムとは異なる防御機構を有していることを想起させ、新奇バイオ技術への応用展開を期待させる。

我々は、スフィンゴモナス科の細菌において、CRISPR/Cas システムを持たないゲノムは、DUF4402 遺伝子群を持っている傾向があることに注目した。これら細菌は、CRISPR/Cas システムではなく、DUF4402 遺伝子群の産物による防御機構を進化の過程で選択した可能性がある。同様に、CRISPR/Cas システムを持つ種と持たない種が排他的に分布している *Vibrio* 属で、かつ遺伝子操作しやすい *Vibrio natriegens* の DUF4402 遺伝子を欠損させたところ、ファージに対する抵抗性が変化したことから、DUF4402 遺伝子群の産物はファージ防御に関与することが示唆された。さらに、*V. natriegens* の DUF4402 遺伝子群の役割を組換えタンパク質を用いて解析したところ、あるタンパク質には  $Mg^{2+}$  依存的な DNA 結合とヌクレアーゼの活性があった (図 2)。このタンパク質 X (未発表のため X とする) は、CRISPR/Cas システムの Cas9 に相当するタンパク質であると示唆される。

上記の研究経緯から、*V. natriegens* の DUF4402 遺伝子群は、新奇ファージ防御システムであり、タンパク質 X は新奇ヌクレアーゼであると考えに至った。しかし、タンパク質 X には既知のヌクレアーゼ活性部位や、既知の DNA 結合モチーフは見当たらず、図 2 の実験結果に確信を持たずにいた。そこで、本共同研究では、ゼロエミッションエネルギー (ZE) 研究拠点の設備を用いながら、タンパク質 X と DNA の相互作用を詳細に検討することを目的とした。

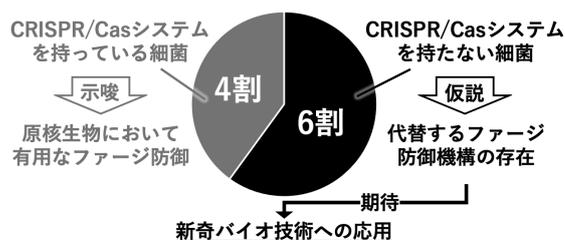


図 1 CRISPR/Cas システムの分布

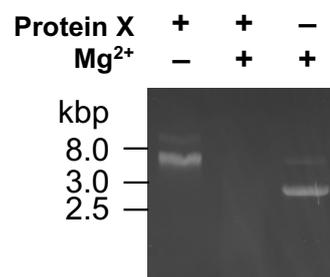


図 2 タンパク質 X の  $Mg^{2+}$  依存的な DNA 結合とヌクレアーゼ活性

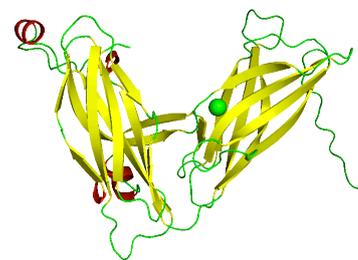


図 3 タンパク質 X の立体構造予測 (AlphaFold3)。緑の球体は  $Mg^{2+}$  を示している。

## 実験方法・結果

タンパク質 X の遺伝子を発現プラスミドにクローニングし、His タグ融合タンパク質として大腸菌に生産させた。大腸菌を超音波破碎した後、アフィニティークロマトグラフィーにて精製し、TEV プロテアーゼ消化により His タグを除去した。最終精製としてゲルろ過クロマトグラフィーを行い、シングルピークの画分を回収した。得られた精製タンパク質は、45 bp の dsDNA と  $Mg^{2+}$  の存在下・非存在下で反応させ、ヌクレアーゼ活性をマイクロ流路電気泳動、DNA 結合をゲルシフトアッセイにより評価した。加えて、ZE 研究拠点に整備されているマイクロプレートリーダーを利用し、蛍光標識 dsDNA との相互作用を蛍光異方性測定により解析した。

His タグがタンパク質 X に DNA 結合とヌクレアーゼ活性を付与している可能性を否定するために、His タグフリーのタンパク質 X を精製した。得られた精製タンパク質は、 $Mg^{2+}$  存在下でヌクレアーゼ活性を示し、 $Mg^{2+}$  非存在下で DNA に結合していることが認められた (図 4A)。大腸菌発現系から精製した組換えタンパク質であるため、大腸菌由来のタンパク質がコンタミしていることを危惧し、無細胞転写翻訳系 (PURE system) でのタンパク質 X の生産・精製も実施した。PURE system からの精製物であっても、同様の活性が認められたことから、タンパク質 X は新奇ヌクレアーゼであることの自信を深めることができた。さらに、タンパク質 X の機能ドメインを特定する目論見で、N 末端側と C 末端側の分割変異体の構築を試みた。不思議なことに、N 末端のみからなる変異体 (N 末変異体) は大腸菌における発現量が著しく下がってしまい、精製することができなかった。C 末側のみからなる変異体 (C 末変異体) は問題なく発現・精製することができたため、ヌクレアーゼ活性と DNA 結合活性を評価した。その結果、C 末変異体は DNA を切断する活性を保持するものの、DNA との結合は著しく低下していることが明らかとなった (図 4B)。タンパク質 X の C 末端側は  $Mg^{2+}$  が結合することが AlphaFold3 によって予測されており (図 3)、ヌクレアーゼ活性に重要なドメインであることが示唆された。一方で、N 末端側は DNA との結合に重要なドメインであると考えられる。N 末変異体を取得し、実験的に検証することが直近の課題である。

共同研究申請時は、タンパク質 X と DNA の親和性を蛍光異方性測定によって定量化することを予定していた。しかし、想定よりもタンパク質の調製に時間を要してしまったことから、測定条件の検証に留まり、本報告書作成時点では結果を得られていない。残りの研究期間において実験を実施し、タンパク質 X、及び C 末変異体の DNA との親和性を定量的に評価したいと考えている。

[論文発表リスト]

なし

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

なし

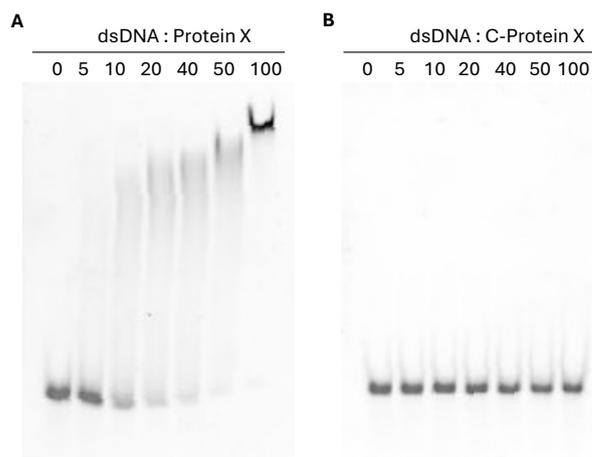


図 4  $Mg^{2+}$  存在下でのゲルシフトアッセイ結果。  
(A) 全長のタンパク質 X (B) タンパク質 X の C 末変異体。C 末変異体には DNA バンドのシフトが認められない。

## 第 2 回 KU-FEL ユーザーミーティング

北浦 守<sup>1</sup>, 全 炳俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山形大学理学部

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

### 1. はじめに

京都大学小型中赤外自由電子レーザー(KU-FEL)は 2009 年から中赤外レーザーパルス光をユーザー利用に供給してきており、2025年度には 16 グループの研究に中赤外光を提供し、基礎から応用までの研究を広くカバーしている。2011 年にゼロエミッション研究拠点として認定を受けてから 10 年の節目を迎えた 2021 年に第一回 KU-FEL ユーザーミーティングを行った。その後、研究成果も着実に増加し、新たなユーザーも加わり、KU-FEL を活用した研究ニーズが益々高まってきているように思われる。そこで、現場でのユーザーニーズを捉えるために第 2 回 KU-FEL ユーザーミーティングを企画した。

### 2. シンポジウムの概要

第 2 回 KU-FEL ユーザーミーティングは 2025 年 12 月 12 日(金)午後に宇治キャンパス N 棟 N273-E で行われた。開催するにあたって、KU-FEL ユーザーの研究分野を「材料・加工分野」と「ビーム物理分野」の 2 つに分けてこれらがうまくミックスするように前半と後半に分けて 7 名の方に話題提供者として発表して頂いた。はじめに、助教に着任された京都大学エネルギー理工学研究所 Bo 先生から話題提供して頂いた。KU-FEL の特徴である「波長可変性」と「パルス性」を活用したポンプ・プローブ分光の研究例を紹介して頂いた。NiO 結晶中の反強磁性ドメインが格子振動励起によって消失・回復し、その時間応答が格子振動の選択的励起によって変化することを報告して頂いた。量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所の羽島氏には KU-FEL の高繰返し励起の下で気体の放電現象を再現しその基礎過程に関する研究成果を発表して頂いた。気体の放電現象がカスケード励起で主導される一方、実験系の清浄度など様々な要因にも影響されることを教えて頂いた。京都大学大学院工学研究科の筒井先生にはご自身の物性研究に KU-FEL を用いるに至った背景を説明して頂き、その一例として強い燐光を示す有機配位化合物における一重項状態と三重項状態の項間交差の光制御に関する成果をお話し頂いた。京都大学生存圏研究所の田所氏には PET 樹脂への KU-FEL 照射による材料改質について話題提供して頂き、KU-FEL を利用した材料加工の要素技術としての展望を解説して頂いた。小休憩を挟んだ後、核融合研究所の太田氏にはアインシュタインの予言において未解明問題である相対論的クーロン電場の収縮を検証するために重要な鍵となる超高速計測技術の原理と KU-FEL の必要性を解説して頂いた。京都大学化学研究所/東海大学総合科学技術研究所の橋田先生にはレーザー照射で生ずるナノ周期構造の研究を紹介して頂き、その機構には固体中でのプラズマの形成が関係することを教えて頂いた。東京大学大学院工学研究科の坂上先生には自由電子レーザーの高輝度化および短パルス化に欠かせないプリバンチ技術の基本とそのために必要な短パルス生成技術について解説して頂いた。7 名のユーザーから話題提供して頂いた後、世話人の京都大学エネルギー理工学研究所の全先生から KU-FEL の現状について報告があった。設備の老朽化のために KU-FEL の運転に支障をきたす可能性が述べられ、その対策について意見交換が行われた。

### 3. 次回にむけて

前回のユーザーミーティングはオンラインで行わなければならなかったが、今回は対面で開催することができた。活発な質疑応答が行われ、学会等の講演では知り得ない貴重な情報を得ることができた。分野の異なる研究者への話題提供ということもあって発表内容はとてもわかりやすく KU-FEL を利用する上でのメリット・デメリットを共有することができた。次回は 2 年後に第 3 回 KU-FEL ユーザーミーティングを開催する予定である。

## Biothermology Workshop 2025

坂口 怜子<sup>1</sup>, 中田 栄司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産業医科大学 医学部, <sup>2</sup>京都大学 エネルギー理工学研究所

2025年12月25-26日の2日間にわたって、Biothermology Workshop 2025を福岡県北九州市で開催した。本研究集会は、生体中の「温度」と「熱」について様々な切り口から議論する、動物・植物・微生物などの生物種を問わない分野横断型の研究集会であり、自然界における動植物の振舞いから解析技術開発、分子レベルの理論研究など多岐にわたるテーマを扱っている。恒温（内温）動物・変温（外温）動物を問わず、生体の恒常性を保つための熱産生の機構を理解することは、生物が構築している効率の良いエネルギー産生・利用・回収システムを理解し、応用する事につながると考えられる。

10回目の節目である今回は、バイオエネルギー・酵素学・生体工学などさらに幅広い分野の研究者らを招き、生体における温度と熱の制御機構の解明とその応用利用を目指す研究者同士の情報交換と交流促進のために、本研究助成を得て、「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」との共同開催が実現した。13名の基調・招待講演者を招き、ポスターセッションも13の演題発表があった。講演は、生体内の温度変化の可視化や植物の概日リズム、寒冷時の生体応答など多岐に渡り、オンラインも含め50名近い参加者と積極的な議論が行われた。近隣の大学に所属する学生たちにも周知し、参加してもらうことができた。

さらに、中田教授からゼロエミッションエネルギー拠点活動の紹介があり、拠点の認知度の向上や他分野のゼロエミッションエネルギー研究（核融合エネルギー・エネルギー材料など）について関心を持ってもらうことに役立ったと考えられる。



図1 会場の様子



図2 集合写真

最後に、本研究会の開催にあたり、ゼロエミッションエネルギー研究拠点からの支援と、事務手続きや招待演者の対応などにおいて終始献身的にサポートして下さった共同利用・共同研究推進室の皆様、世話を引き受けて下さった中田教授にこの場を借りて感謝の意を表したい。

# 「広帯域エネルギー融合科学の概念に基づく非線形・非平衡プラズマの物性・制御」に関する分散型研究集会の開催

岸本泰明<sup>1,2</sup>, 松田一成<sup>2</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院エネルギー科学研究科・非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット

<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

**開催概要:** 本提案は、非線形・非平衡を共通のキーワードとして、ともに「プラズマ」と呼ばれる第4の物質状態が重要な役割を担う核融合および光とプラズマ相互作用を基盤に多様な応用研究へと展開可能な光量子科学を探究する「非線形・非平衡プラズマ科学研究ユニット」が、ゼロエミッションエネルギー概念のもと「広帯域エネルギー融合科学」を推進する当該拠点の豊富かつ多様な知見を取り入れ、次世代のプラズマ研究を展開することを目的とする。その一環として、関連分野の国内外の専門家が最新の研究成果および情報を報告・議論する場を設ける。これまで、令和2(2020)–6(2024)年度の5年間に議論を中心とした36回のオンラインセミナーを実施した。本年度は、3回のユニットセミナー(第37~39回)実施するとともに、3回の研究集会(内1回は2月開催予定)実施し、関連情報の共有および意見交換を行った。これまでに、延べ62名が議論に参加した。

**核融合プラズマ領域:** 当該ユニットでは、核融合プラズマにおける乱流輸送と閉じ込め改善に関する研究を中国西南物理研究所(SWIP)と連携して行っている(JWG17)(2022・23年度ユニット報告書)。この取り組みの一環として、同研究所のLi教授等3名が京大を訪問した機会を活用して、藤田隆明教授(名古屋大学)および高橋裕己準教授(核融合科学研究所)による研究報告を、第38・39回ユニットセミナーとして実施した(7/29)。藤田教授には、“Control issues on ITB plasmas in reactor-relevant conditions”と題し、トカマク装置(JT60U)における内部輸送障壁形成(ITB)現象の背景物理を、高橋裕己準教授には“Simultaneous achievement of ITB plasmas with Te~Ti in the LHD”の題し、電子加熱が主要なエネルギー源となるヘリカル系核融合炉におけるITBの生成・制御に関する方法論に関する講演いただいた。ITBに関わる研究はこれまで多数報告がなされている一方、核融合炉条件下においてITBを生成・制御する方法論は、いまだ確立されていない。今セミナーシリーズは、核融合炉条件下におけるITBプラズマの実現と制御に向けての研究の方向性を検討する上で極めて重要な機会となった。

**非線形・非平衡数理領域/光量子プラズマ領域:** 本ユニットでは、重水素・三重水素(DT)による熱化プラズマによる核融合に加え、反応過程に放射性物質や中性子を含まない一方、DT核融合を1桁以上上回る高温プラズマを必要とする重水素・ヘリウム3(D<sup>3</sup>He)や水素・ホウ素(PB)による非熱的な核融合の可能性を追求している(2024年度報告書)。そのような非熱的特性が重要な役割を果たすプラズマに関する研究集会を東京大学柏キャンパス(4/30)で開催(参加者6名)するとともに、これを発展させた研究会を2025年度内に実施予定(2025/02/14)である(参加予定者14名)。

このような非熱平衡性の観点から、乱雑性の高い光エネルギーを、より短波長で乱雑性の低い光に変換するなどの方法論を開拓することで高効率の熱光デバイスの開発を目指している宮内雄平教授に「低次元物質中の電子正孔系の熱光科学—宇宙・核融合・プラズマ科学との接点を科学」と題して第37回ユニットセミナーをいただいた。低次元物質であるグラフェンやカーボンナノチューブは常温でも励起子が安定に存在することから熱揺らぎで励起子が生成され、その再結合過程で狭帯域の熱放射を得られること、それを利用することで、熱光変換などの多様な応用が期待されるとの説明をいただいた。光量子プラズマの専門家から電子・正孔の集合としての量子プラズマ生成や超高速の磁場計測など、非熱性に起因する新しいプラズマへの展開が議論され、分野融合の重要性が指摘された。

文献: <http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp/UNIT/index.html> 2020-2024年プラズマユニット報告書

# 第 22 回セラミックブランケット相互作用に関する 国際ワークショップ

向井啓祐<sup>1,2</sup>, 金宰煥<sup>3</sup>, 近田巧未<sup>4</sup>, 八木重郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>核融合科学研究所, <sup>2</sup>総合研究大学院大学, <sup>3</sup>量子科学技術研究開発機構

<sup>4</sup>静岡大学, <sup>5</sup>京都大学

## 1. 固体増殖ブランケット相互作用国際ワークショップ CBBI-22

2025年10月6日から8日に京都大学宇治キャンパスのおうばくプラザにおいて、第22回固体増殖ブランケット相互作用国際ワークショップ(CBBI-22)が開催された。本ワークショップは1992年より国内外で開催されており、固体増殖ブランケット材料とその相互作用に関する最先端研究の進展を討論する場として機能してきた。ワークショップでは製造、モデリング、照射効果、トリチウム挙動といったテーマについて合計41件の口頭発表が行われ、今後の共同研究の方向性について有益な示唆が得られた。参加者数は日本、英国、欧州、韓国、米国、インド、中国、カザフスタンから合計46名であり、日本からの参加者が10名と最多であった(図1)。また、複数企業からの参加があり、産業界を含めた核融合エネルギー材料研究への関心の高まりが感じられた。

## 2. BeWS との合同セッションとテクニカルツアー

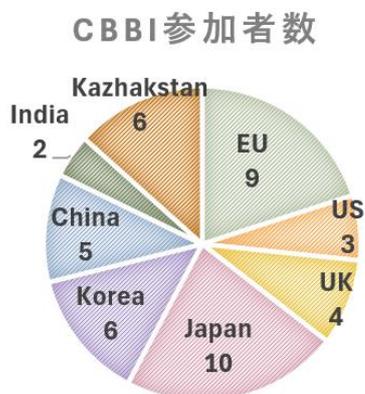
本ワークショップは第17回ベリリウム技術に関する国際会議(BeWS)と合同で開催された。10月6日と7日にはCBBIとBeWSの合同セッションが行われ(図1)、約80名の研究者間で活発に意見交換が行われ、セッション全体として例年以上にインタラクティブな議論が展開された。

会議最終日の10月8日にヘリオトロンJの施設見学ツアーを実施した。参加者は大型装置を間近で視察し、参加者から好評の声が聞かれた。見学にご協力いただいた京都大学エネルギー理工学研究所の稲垣滋教授と金史良助教に謝意を表す。

## 3. 会議録(プロシーディングス)

CBBI-22の会議録をオープンアクセス・レポジトリ Zenodo に公開した。

- Keisuke Mukai (Ed.) Proceedings of the 22nd International Workshop on the Ceramic Breeder Blanket Interactions, Zenodo, 2025, <https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.17685909>



国/地域別の CBBI 参加者数 (左) と CBBI/BeWS 合同セッションでの集合写真 (右)



## 第二部 活動実績



京都大学エネルギー理工学研究所  
ゼロエミッションエネルギー研究拠点  
2025年度 共同利用・共同研究  
【活動実績】

2025年4月

- 4月23日 第1回共同利用運営委員会（オンライン会議）  
「委員紹介、運営委員長選出」
- 4月25日 第1回共同利用・共同研究計画委員会（オンライン会議）  
「委員紹介、計画委員長選出」
- 4月30日 「広帯域エネルギー融合科学の概念に基づく非線形・非平衡プラズマの物性・制御」に関する研究会（研究集会 ZE2025D-03）  
（ハイブリッド開催 参加者数：6名）

2025年5月

2025年6月

- 6月12日 ZE拠点年会（成果報告会兼）開催日程案内

2025年7月

- 7月4日 第2回共同利用・共同研究計画委員会（メール回議）  
「第1回期間外申請の審査及び採否と配分額原案作成、審査方法の変更についての提案」（申請数：5件）
- 7月15日 第37回プラズマ科学セミナー（エネルギー理工学研究所 宮内先生）  
（研究集会 ZE2025D-03）（オンライン開催 参加者数：18名）
- 7月22日 第2回共同利用運営委員会（メール回議）  
「第1回期間外申請の採否及び配分額の決定」（申請数：5件）
- 7月29日 第38回プラズマ科学セミナー（名古屋大学 藤田先生）  
（研究集会 ZE2025D-03）（ハイブリッド開催 参加者数：19名）
- 第39回プラズマ科学セミナー（核融合科学研究所 高橋先生）  
（研究集会 ZE2025D-03）（オンライン開催 参加者数：19名）

2025年8月

- 8月1日 ZE拠点年会参加登録の案内
- 8月6日 2025年度公募期間外申請の採択結果通知

2025年9月

- 9月1日 第3回共同利用・共同研究計画委員会（メール回議）  
「2026年度共同利用・共同研究公募要項・申請書類案確認依頼」

9月29日 第3回共同利用運営委員会（オンライン会議）

- 議題：
1. 2025年度ゼロエミッションエネルギー研究拠点活動状況について
  2. 2026年度共同利用・共同研究公募について
  3. 新カテゴリー（テーマ3）の成果と今後の方針について
  4. その他

## 2025年10月

10月6日－8日 22nd International Workshop on the Ceramic Breeder Blanket Interactions (CBBI-22)

(研究集会 ZE2025D-04) (参加者数：46名)

10月19日 第30回京都大学エネルギー理工学研究所公開講演会

(参加者数：58名)

10月24日 2025年度共同利用・共同研究研究費の追加配分通知

(84課題中43課題対象、1課題あたり20,000円)

## 2025年11月

11月11日 2026年度共同利用・共同研究公募開始

11月18日 ZE技術講習会「SEM講習会」(参加者数：5名)

11月28日 経費執行依頼

## 2025年12月

12月4日 ZE技術講習会「原子間力顕微鏡 (AFM) 講習会」

(参加者数：4名)

12月10日 ZE技術講習会「高圧反応器使用説明会」(参加者数：4名)

12月11日 2025年度ZE拠点年会 (参加者数：200名)

- 場所等：
- ・オーラルセッション：京都大学宇治おうばくプラザきはだホール
  - ・ポスターセッション：京都大学宇治おうばくプラザハイブリッドスペース

内容： 12月11日 13:30～17:35

【口頭発表4名】(順不同)

- 道見 康弘 (鳥取大学)
- 坂口 怜子 (産業医科大学)
- 荻野 靖之 (東北大学)
- CRAVIOTOCABALLERO Jordi (京都大学)



【ポスターセッション】

- ZE研究課題発表：78件

12月12日 第2回 KU-FEL ユーザーミーティング (研究集会 ZE2025D-01)  
(参加者数：20名)

12月15日 成果報告書と研究課題概要提出依頼

12月16日 ZE拠点年会アンケート調査依頼

12月25日-12月26日 Biothermology Workshop 2025  
(研究集会 ZE2025D-02) (参加者数：18名)

**2026年1月**

1月8日 共同利用・共同研究推進室アンケート調査依頼

1月9日 2026年度共同利用・共同研究公募期日

1月23日 第4回共同利用・共同研究計画委員会 (メール回議)  
「2026年度共同利用・共同研究公募申請書 審査依頼」

**2026年2月**

2月14日 「非局所・非平衡概念に基づくプラズマの背景物理と制御法の開拓」に関する研究会 (研究集会 ZE2025D-03)

2月25日 第5回共同利用・共同研究計画委員会 (オンライン会議)  
「2026年度共同利用・共同研究課題採否と配分額原案作成」

**2026年3月**

3月2日 2025年度共同利用・共同研究成果報告書を拠点ホームページへ掲載

3月9日 第4回共同利用運営委員会 (オンライン会議)

- 議題：
1. 2026年度公募型共同利用・共同研究課題採否と配分額の決定  
(確定後、教授会、協議員会に諮る)
  2. 2025年度ゼロエミッションエネルギー研究拠点活動の総括
  3. 2026年度活動計画
  4. 今後の拠点活動に関する意見交換
  5. 2026年度運営委員・計画委員について
  6. その他

3月下旬 2026年度共同利用・共同研究公募課題の採択結果通知



## 第三部 その他



**2026年度京都大学エネルギー理工学研究所**  
**「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」**  
**共同利用・共同研究の公募要項**

**目的**

本研究拠点は、地球環境問題を抜本的に解決する「ゼロエミッションエネルギー<sup>1</sup>」に関するエネルギー研究の推進のために、京都大学エネルギー理工学研究所が有する、先端的・分野横断的な知識・情報ならびに研究施設・設備を、全国の関連する研究者に供することを目的としています。

この主旨に沿って、2026年度の共同利用・共同研究を下記の要項で公募します。

記

**1. 公募事項：**

ゼロエミッションエネルギーを指向する次の4種類の研究課題を広く公募します。なお、研究代表者あるいは利用代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用の3種類の内のいずれか1種類のみで、かつ1件のみです。また、集会代表者として(D) 研究集会に申請できるのは1件のみです。

※(D)については(A)、(B)、(C)に申請していても申請可能です。

**(A) 企画型共同研究**

本研究所共同利用運営委員会(以後、「運営委員会」と略称)が、既存分野間の融合的な研究を促進することを目的にして企画した課題テーマに基づいて、本研究所の研究者と共同で行う研究課題。

**(B) 提案型共同利用・共同研究**

申請者が提案し、本研究所の研究者と共同で行う研究課題

**(C) 共同利用**

本研究所の設備・施設を利用する研究計画

**(D) 研究集会**

ゼロエミッションエネルギー研究に関する研究集会の開催

**2. 応募資格：**

大学および国・公立研究所等の研究機関の研究者、または、これと同等の研究能力を有すると本研究所所長が認める者。原則として、所属機関もしくは公的機関による研究倫理教育を受講していること(※必要に応じて受講証明書を提出していただく場合があります)。

**3. 応募方法：**

応募期間内に、該当する申請書(世話人確認済)をGoogleフォームより提出してください。

GoogleフォームURL：<https://forms.gle/xM9RqmCWA2L13dCXA>

問合せ先：

メール：[ze-shinsei@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp](mailto:ze-shinsei@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp) 電話：(0774)38-3413 (ダイヤルイン)

---

<sup>1</sup> 二酸化炭素、有害物質を可能な限り放出しないエネルギーシステム

4. 応募期限：  
(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用、(D) 研究集会

2026年1月9日(金) 正午 必着

5. 採否：  
採否は、運営委員会の議を経て決定されます。なお、研究期間が年度を超えるような課題についても、次年度以降、公募手続きに従って改めて申請書を提出していただきます。
6. 採否決定通知の時期：2026年3月下旬
7. 研究経費：  
予算の範囲内において本研究所で支出します。
8. 旅費：  
予算の範囲内において国立大学法人京都大学旅費規程により支給します。
9. 保険等の加入：  
大学院学生および学部学生等が共同利用・共同研究のため来所する際には、(財)日本国際教育支援協会の学生教育研究災害傷害保険(付帯賠償責任保険を含む)またはこれと同等以上の保険に加入していることが条件となります。申請した研究課題が採択された場合、学生(研究生を含む)、所属を持たない名誉教授および国外からの研究者は「学生教育研究災害傷害保険」又は同等の傷害保険に必ずご加入ください。
10. 施設等の利用：  
研究所内諸施設の利用にあたっては、研究所の諸規則を遵守し、所内担当者の指示に従ってください。
11. 放射性同位元素や放射線発生装置等の使用：  
放射性同位元素や放射線発生装置等を使用する場合は、原則として、事前に所属する機関で放射性同位元素等取扱者およびエックス線装置取扱者の資格を取得する必要があります。その後、研究所へ登録申請していただきます。ご不明な点は所内の教職員へお問い合わせください。
12. 保健および安全保持に関して：  
保健および安全保持に関しては、本学の規程に従っていただきます。詳細は共同利用・共同研究推進室までお問い合わせください。
13. 知的財産権の取扱いについて：  
京都大学発明規程に定めるところによります。
14. 宿泊施設：  
研究者用の宿泊施設は特に用意していません。近隣のホテルなどをご利用ください。
15. 共同利用機器：  
共同利用設備・機器については当拠点のホームページ内に随時更新データを掲載します。  
掲載URL：<https://zero-emission.iae.kyoto-u.ac.jp/summary/application/>
16. 応募期限以降の応募：  
応募期限以降も応募を受け付ける場合があります(企画型共同研究を除く)。共同利用・共同研究推進室までお問い合わせください。ただしこの場合、審査は年2回(6月および10月初旬を予定)まとめて行いますので、審査に時間を要する場合や研究費・旅費を配分できない場合もあります。可能な限り期間内にご応募ください。また、申請書の「期間外の応募となった理由」の欄に、期間外の応募となった理由を記してください。
17. その他：

共同研究費で購入される物品のうち、消耗品以外の備品や少額資産は京都大学エネルギー理工学研究所で保管することが原則となり、管理は所内世話人が責任を持って行います。また、備品や少額資産は京都大学にて資産登録され、共同研究終了後は京都大学にご返却いただきます。共同利用機器の複合ビーム・材料実験装置（DuET）は、2023年度末で運用停止となりました。その他ご不明な点は、共同利用・共同研究推進室までお問い合わせください。

## (A) 企画型共同研究公募要項

### 1. 企画型共同研究：

運営委員会よりテーマ課題を設定し、これに基づいて本研究所の研究者と共同で行う研究です。本年度設定されたテーマは以下の3つです。申請に際しては、所内の教員と十分協議してください。

#### テーマ1 「太陽光・レーザー・バイオ等を利用したエネルギーシステムに関する研究」

- a) ゼロエミッションエネルギーシステムの一つである太陽エネルギー変換システムに関して、発電、蓄電、省エネルギーに関わる高機能有機／無機／生体材料の開発や、精密分析に関する革新的技術の創成を目指す研究課題
- b) 超短パルスレーザーや中赤外レーザー、バイオ技術等を利用した環境・エネルギーに関連する精密分析技術の開発や材料創製、エネルギー生成等を目指す研究課題

#### テーマ2 「先進原子力システムおよびプラズマ利用に関する研究」

- a) 社会基盤となるエネルギー源の開発を目的とした、先進エネルギー材料とプラズマとの相互作用の理解、および、核融合を含めた受動安全性の高い新しい原子力システム実現の可能性を高める金属／セラミックス材料の創製を目指す研究課題
- b) 核エネルギーの広範囲にわたる応用を目的とした、プラズマ／マイクロ波技術の応用や熱／粒子エネルギーの利用に関する革新的技術の創成を目指す研究課題

#### テーマ3 「ゼロエミッションエネルギー新領域開拓に関する研究」

「カーボンネガティブ」、「グリーントランスフォーメーション」、または「エネルギー科学に関連したデジタルトランスフォーメーション」に関する研究であり、かつテーマ1、テーマ2に含まれる個別の要素技術に関するものではなく、複数の要素技術や分野の融合に基づいてゼロエミッションエネルギーの新しい学理やシステムの創出を目指す研究課題

2. 研究期間： 1年以内

3. 研究代表者： 所外の研究者。ただし、研究組織の中に所内世話人を含む1名以上の所内研究者が参加していなければなりません。なお、同一人が研究代表者あるいは利用代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用の内のいずれか1種類のみで、かつ1件のみです。

4. 内容等の説明： 研究内容、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。申請書には、当該共同研究が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載してください。なお、申請における購入経費と旅費の合計額は、テーマ1、テーマ2は60万円、テーマ3は70万円を上限とします。

5. 研究報告書： 研究代表者は、**2027年1月29日(金)**までに共同研究実施成果報告書(得られた研究成果(A4:2枚)、発表論文リストおよび口頭発表リスト)を所長へ提出していただきます。また、2026年度後半に開催予定の研究成果報告会において、その研究概要を報告していただきます。
6. 謝辞について： 成果発表の際には、謝辞に  
This work is (was) supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (整理番号).  
または、  
This work is (was) supported by the ZE Research Program, IAE (整理番号).  
の一文を加えてください。
7. 旅費について： 遠隔地の方は、2026年度後半に開催予定の成果報告会に参加するための旅費申請を、2026年11月頃に受け付けます。なお、予算の状況によっては未配分もしくは、一部配分の場合もあります。

## (B) 提案型共同利用・共同研究公募要項

1. 提案型共同利用・共同研究：申請者が提案し、本研究所の研究者と共同で行う研究です。  
申請に際しては、所内の教員と十分協議してください。
2. 研究期間： 1年以内
3. 研究代表者： 所外の研究者。ただし、研究組織の中に所内世話人を含む1名以上の所内研究者が参加していなければなりません。なお、同一人が研究代表者あるいは利用代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用の内のいずれか1種類のみで、かつ1件のみです。
4. 内容等の説明： 研究内容、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。申請書には、当該共同研究が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載してください。なお、申請における購入経費と旅費の合計額は、**40万円**を上限とします。
5. 研究報告書： 研究代表者は、**2027年1月29日(金)**までに共同研究実施成果報告書(得られた研究成果(A4:2枚)、発表論文リストおよび口頭発表リスト)を所長へ提出していただきます。また、2026年度後半に開催予定の研究成果報告会において、その研究概要を報告していただくことがあります。
6. 謝辞について： 成果発表の際には、謝辞に  
This work is (was) supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (整理番号).  
または、  
This work is (was) supported by the ZE Research Program, IAE (整理番号).  
の一文を加えてください。
7. 旅費について： 遠隔地の方は2026年度後半に開催予定の成果報告会に参加するための旅費申請を、2026年11月頃に受け付けます。なお、予算の状況によっては未配分もしくは、一部配分の場合もあります。

## (C) 共同利用公募要項

1. 共同利用：ゼロエミッションエネルギーを指向する研究を促進するために、本研究所の設備・施設を利用する研究計画。申請に際しては、所内の教職員と十分協議してください。
2. 利用期間：1年以内
3. 利用代表者：所外の研究者。なお、同一人が研究代表者あるいは利用代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用の内のいずれか1種類のみで、かつ1件のみです。
4. 内容等の説明：利用内容、利用期間、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。申請書には、当該共同利用が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載してください。なお、申請における購入経費と旅費の合計額は、40万円を上限とします。
5. 研究報告書：利用者は、2027年1月29日(金)までに共同利用実施成果報告書(得られた研究成果(A4:2枚)、発表論文リストおよび口頭発表リスト)を所長へ提出していただきます。また、2026年度後半に開催予定の研究成果報告会において、その研究概要を報告していただくことがあります。
6. 謝辞について：成果発表の際には、謝辞に  
This work is (was) supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (整理番号).  
または、  
This work is (was) supported by the ZE Research Program, IAE (整理番号).  
の一文を加えてください。
7. 旅費について：遠隔地の方は2026年度後半に開催予定の成果報告会に参加するための旅費申請を、2026年11月頃に受け付けます。なお、予算の状況によっては未配分もしくは、一部配分の場合もあります。

#### (D) 研究集会公募要項

1. 研究集会：ゼロエミッションエネルギーを指向する研究者間の情報交換と交流を促進し、ゼロエミッションエネルギー研究のためのネットワークの構築に資する研究集会。申請に際しては、所内の教職員と十分協議してください。
2. 開催時期：2026年度内に実施
3. 集会代表者：所外の研究者。なお、同一人が集会代表者として申請できるのは1件のみです。
4. 内容等の説明：研究集会の内容、期間、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。また、研究集会は当拠点と共催の形をとっていただきます。申請書には、当該研究集会が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載してください。なお、申請における開催費と旅費の合計額は、40万円を上限とします。
5. 成果報告書：利用者は、2027年1月29日(金)までに共同利用実施成果報告書(開催概要A4:1枚)を所長へ提出していただきます。また、2026年度後半に開催予定の研究成果報告会において、その成果概要を報告していただくことがあります。

6. 旅費について： 遠隔地の方は2026年度後半に開催予定の成果報告会に参加するための旅費申請を、2026年11月頃に受け付けます。なお、予算の状況によっては未配分もしくは、一部配分の場合もあります。

以上

**FY2026 Institute of Advanced Energy, Kyoto University**  
**“Zero-Emission Energy Research Base”**  
**About the Public Offerings of Joint Usage/Joint Research**

**Purpose**

Our research base provides relevant researchers nationwide with advanced and interdisciplinary knowledge/information and access to research facilities/installations possessed by the Kyoto University Institute of Advanced Energy in an effort to promote energy research on Zero-Emission Energy<sup>1</sup> with the goal of solving global environmental problems. In this spirit, we have the following public offerings for joint usage/joint research in FY2026.

**Body**

**1. Description of Public Offerings:**

We publicly invite applications for the following four research areas directed towards Zero-Emission Energy: **(A) Planned joint research, (B) Proposal-based joint usage/joint research, (C) Joint usage of facilities, and (D) Research meetings. For (A) – (C), applicants may apply for one category as either a research representative or a user representative. Additionally, applicants may also apply as a meeting representative for (D).**

NOTE: Applicants may apply to (D) in addition to one of (A) – (C).

**(A) Planned Joint Research**

The applicant proposes research based on the themes set by the Joint Usage Steering Committee of the Institute (hereinafter abbreviated as “Steering Committee”) to promote integrated research among existing fields. Research in this category is conducted in collaboration with researchers of the Institute.

**(B) Proposal-based Joint Usage/Joint Research**

The applicant proposes a unique research theme, which is conducted jointly with researchers of the Institute.

**(C) Joint Usage of Facilities**

The applicant proposes a research plan that utilizes the facilities of the Institute.

**(D) Research Meetings**

The applicant proposes a research meeting on Zero-Emission Energy research hosted jointly with the Institute.

**2. Application Qualifications:**

Applicants must be researchers of a research institution (e.g., university or a national/public research institute) or persons approved by the Director of the Institute of Advanced Energy. As a general rule, the applicants are required to have already taken the course of research ethics education offered by either your affiliated institution or public agencies. (Depending on the situation, you may be required to submit the certificate of course completion.)

---

<sup>1</sup> Energy system that reduces or eliminates carbon dioxide emissions and harmful substances.

**3. Application Submissions:**

Applications must be submitted through Google Forms during the application period. (After your Key Person has checked the application)

Google Form URL: <https://forms.gle/xM9RqmCWA2L13dCXA>

Contact Information:

E-mail: [ze-shinsei@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp](mailto:ze-shinsei@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp) Tel: +81-774-38-3413

**4. Application Period:**

For (A) – (D), applications are accepted until noon on Friday, January 9, 2026 (JST)

**5. Application Results:**

The Steering Committee determines and accepts the applications. For themes that span multiple fiscal years, a new application must be submitted each year in accordance to the public offering procedure.

**6. Notification of Results:**

Successful applicants are notified in late March 2026.

**7. Research Expenses:**

The Institute provides support within its budget.

**8. Travel Expenses:**

The Institute provides support within its budget and in accordance to Kyoto University's Travel Expense Regulations.

**9. Insurance:**

Graduate and undergraduate students, post-doctoral fellows, and industry researchers at the Institute for joint usage/joint research must apply for the Personal Accident Insurance for Students Pursuing Education and Research (including Incidental Liability Insurance) of the Japan Educational Exchanges and Services or its equivalent. Students (including research students), professors emeritus not belonging to a specific entity, and researchers from abroad whose applied research theme has been adopted, must apply for the "Personal Accident Insurance for Students Pursuing Education and Research" or its equivalent.

**10. Facility Usage:**

When using the Institute's facilities, all rules of the Institute and the instructions of the personnel in charge must be followed.

**11. Radioactive Isotopes and Radiation Generators:**

A person, whose research requires the use of radioactive isotopes or radiation generators, must acquire the qualifications of the Persons Handling Radioactive Isotopes and the Persons Handling X-ray Equipment from your home entity prior to coming to the Institute. Additionally, you must register compliance with the Institute. Please direct all questions to our faculty or staff.

**12. Health and Safety:**

All University rules for health and safety must be followed. For details, please contact the Joint Usage/Joint Research Promotion Office.

**13. Handling of Intellectual Property Rights:**

Intellectual property rights are managed as per Kyoto University's Invention Regulations.

**14. Accommodations:**

Accommodations for researchers are not available. Please use neighboring hotels or the like.

**15. Joint use Equipment:**

Information on joint usage facilities and equipment is available on our website.  
Website: <https://zero-emission.iae.kyoto-u.ac.jp/en-summary/application/>

**16. Applications Submitted after the Application Deadline:**

The Institute reserves the right to accept applications after the application deadline. Please contact the Joint Usage/Joint Research Promotion Office (except for Planned joint research). Such applications are reviewed twice a year in June and October. It is possible that research and/or travel expenses will not be allocated. To secure funding, please apply during the normal application period. If applying outside the normal period, a justification of why the application cannot be submitted during the normal application period must be written in the "Reason for application outside the normal period " column.

**17. Miscellaneous:**

Of the items purchased with the joint research funds, equipment other than consumables and small assets are stored at the Institute and the key person in the facility is responsible for management. In addition, equipment and small assets will be registered as assets at Kyoto University and will be returned to Kyoto University after the joint research is complete. The operation of the Dual-Beam Facility for Energy Science and Technology (DuET) was discontinued at the end of FY2023. For other inquiries, please contact the Joint Usage/Joint Research Promotion Office.

**(A) Planned Joint Research Public Offerings**

**1. Planned Joint Research:**

The Steering Committee selects themes for research to be conducted jointly with the researchers of the Institute. For this fiscal year, the following three themes are selected. Prior to submitting an application, please consult with a faculty member of the Institute.

**Theme 1** Energy Systems Using Sunlight/Lasers/Biology

- a) Research on solar energy conversion systems, which are Zero-Emission Energy systems, with the aim of developing high-performance organic/inorganic/biological materials related to power generation, storage, and energy conservation, or innovative technologies.
- b) Research with the aim of developing precise analytical techniques, creating materials to generate energy, or investigating the environment and energy using ultrashort pulse lasers, mid-infrared lasers, or biotechnology.

**Theme 2** Advanced Nuclear Power Systems and Plasma Uses

- a) Research with the aim of understanding the interactions between advanced energy materials and plasmas, creating metal/ceramic materials with the potential to realize new nuclear systems possessing a high passive safety, including nuclear fusion, or developing energy sources as social infrastructure.
- b) Research with the aim of creating innovations related to applications of plasma/microwave technologies or using thermal/particle energy for diverse applications of nuclear energy.

### **Theme 3** Exploring New Frontiers in Zero-Emission Energy Science

Research on Carbon Negative, Green Transformation, or Digital Transformation related to energy science, and not on the development of individual elemental technologies that should be included in Theme 1 and Theme 2, but on the development of new science or systems of Zero-Emission Energy based on the integration of multiple elemental technologies and disciplines.

#### **2. Research Period:**

Less than one year.

#### **3. Research Representatives:**

Outside researchers as well as one or more in-house researchers, including in-house caretakers, should participate in the research organization. **A person can apply as a research representative or a user representative for (A) Planned Joint Research, (B) Proposal-based Joint Usage/Joint Research, or (C) Joint Usage of Facilities. Each applicant may submit one proposal.**

#### **4. Briefing:**

An applicant may be required to explain the research content, required expenses, and other pertinent information to the Joint Usage/Joint Research Planning Committee. The application must clearly explain how the joint research proposal relates to Zero-Emission Energy. The maximum allowable funding, which includes purchase and travel expenses, per application is six hundred thousand (600,000) JPY for Theme 1 and 2, and seven hundred thousand (700,000) JPY for Theme 3, respectively.

#### **5. Research Report:**

The research representative must submit a Joint Research Implementation Result Report [research results obtained (A4: 2 sheets), a list of published papers, and a list of oral presentations] to the Director of the Institute by **Friday, January 29, 2027**. Additionally, the research representative must report the research outcomes at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2026.

#### **6. About Acknowledgments:**

When reporting outcomes, one of the following sentences must be added: “This work is (was) supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (Reference No.)” or “This work is (was) supported by the ZE Research Program, IAE (Reference No.)”

#### **7. Travel Expenses:**

For those in remote areas, travel expense applications are accepted beginning around November 2026 to participate in the Outcome Meeting. Travel expenses may be denied or partially allocated, depending on the budget.

## **(B) Proposal-based Joint Usage/Joint Research Public Offerings**

### **1. Proposal- based Joint Usage/Joint Research:**

A research project proposed by the applicant and conducted jointly with researchers of the Institute. Prior to submitting an application, please consult with a faculty member of the Institute.

### **2. Research Period:**

Less than one year.

### **3. Research Representatives:**

Outside researchers as well as one or more in-house researchers, including in-house caretakers, should participate in the research organization. **A person can apply as a research representative or a user representative for (A) Planned Joint Research, (B) Proposal-based Joint Usage/Joint Research, or (C) Joint Usage of Facilities. Each applicant may submit one proposal.**

### **4. Briefing:**

An applicant may be required to explain the research content, required expenses, and other pertinent information to the Joint Usage/Joint Research Planning Committee. The application must clearly explain how the joint research proposal relates to Zero-emission Energy. The maximum allowable funding, which includes purchase and travel expenses, per application is four hundred thousand (400,000) JPY.

### **5. Research Report:**

The research representative must submit a Joint Research Implementation Result Report [research results obtained (A4: 2 sheets), a list of published papers, and a list of oral presentations] to the Director of the Institute by **Friday, January 29, 2027**. Additionally, the research representative must report the research outcomes at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2026.

### **6. About Acknowledgments:**

When reporting outcomes, one of the following sentences must be added: “This work is (was) supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (Reference No.)” or “This work is (was) supported by the ZE Research Program, IAE (Reference No.)”

### **7. Travel Expenses:**

For those in remote areas, travel expense applications are accepted beginning around November 2026 to participate in the Outcome Meeting. Travel expenses may be denied or partially allocated, depending on the budget.

## **(C) Joint usage of facilities public offerings**

### **1. Joint Usage:**

A research plan to utilize the facilities and/or equipment of the Institute in order to promote research oriented toward Zero-Emission Energy. Prior to submitting an application, please consult with a faculty member of the Institute.

### **2. Use Period:**

Less than one year.

### **3. Use Representatives:**

Outside researchers. **A person can apply as a research representative or a user representative for (A) Planned joint research, (B) Proposal-based Joint Usage/Joint Research, or (C) Joint Usage of Facilities. Each applicant may submit one proposal.**

### **4. Briefing:**

An applicant may be required to explain the research content, required expenses, and other pertinent information to the Joint Usage/Joint Research Planning Committee. The application must clearly explain how the joint research relates to Zero-Emission Energy. The maximum allowable funding, which includes purchase and travel expenses, per application is four hundred thousand (400,000) JPY.

### **5. Research Report:**

The user must submit a Joint Research Implementation Result Report [research results obtained (A4: 2 sheets), a list of published papers, and a list of oral presentations] to the Director of the Institute by **Friday, January 29, 2027**.

Additionally, the research representative must report the research outcomes at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2026.

### **6. About Acknowledgments:**

When reporting outcomes, one of the following sentences must be added: “This work is (was) supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (Reference No.)” or “This work is (was) supported by the ZE Research Program, IAE (Reference No.)”

### **7. Travel Expenses:**

For those in remote areas, travel expense applications are accepted beginning around November 2026 to participate in the Outcome Meeting. Travel expenses may be denied or partially allocated, depending on the budget.

## **(D) Research meetings public offerings**

### **1. Research Meeting:**

A research meeting to promote information exchange and communications among researchers studying Zero-Emission Energy and to help establish a network for Zero-Emission Energy research. Prior to submitting an application, please consult with a faculty member of the Institute.

### **2. To be Held:**

Within FY2026.

### **3. Meeting Representatives:**

Outside researchers. **Note that a person can only apply once as a meeting representative.**

### **4. Briefing:**

An applicant may be required to explain the research meeting outlines, meeting period, required expenses, and other pertinent information to the Joint Usage/Joint Research Planning Committee. In addition, the research meeting must be organized jointly with this research base. The application must clearly explain how the joint research relates to Zero-Emission Energy. The maximum allowable funding, which includes purchase and travel expenses, per application is four hundred thousand (400,000) JPY.

### **5. Implementation Result Report:**

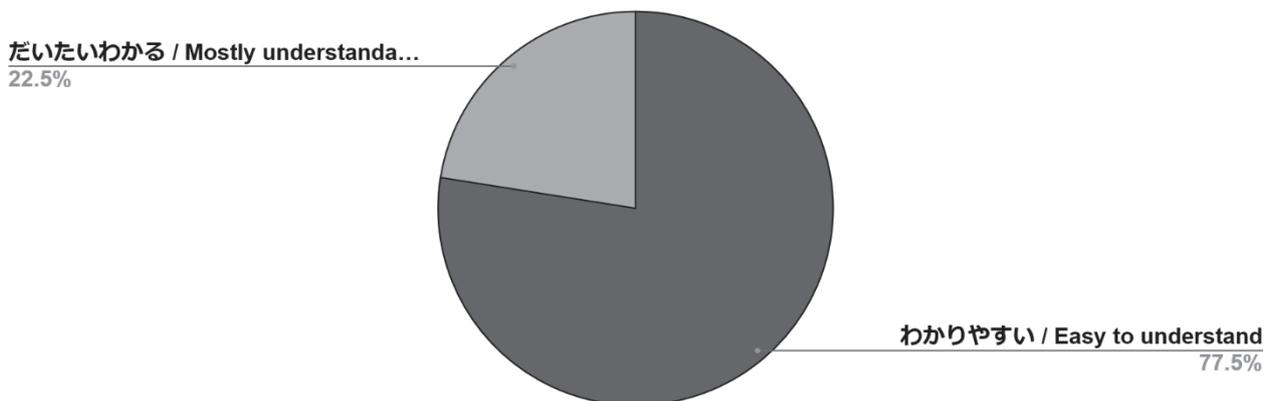
Users must submit a Joint Usage Implementation Result Report (meeting outlines; A4: 1 sheet) to the Director of the Institute by **Friday, January 29, 2027**. Additionally, users may be required to report the implementation result outlines at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2026.

### **6. Travel Expenses:**

For those in remote areas, travel expense applications are accepted beginning around November 2026 to participate in the Outcome Meeting scheduled. Travel expenses may be denied or partially allocated, depending on the budget.

2025年度 京都大学エネルギー理工学研究所  
ゼロエミッションエネルギー研究拠点  
共同利用・共同研究推進室 アンケート調査結果

Q1.  
共同研究申請書類の説明はわかりやすかったですか？

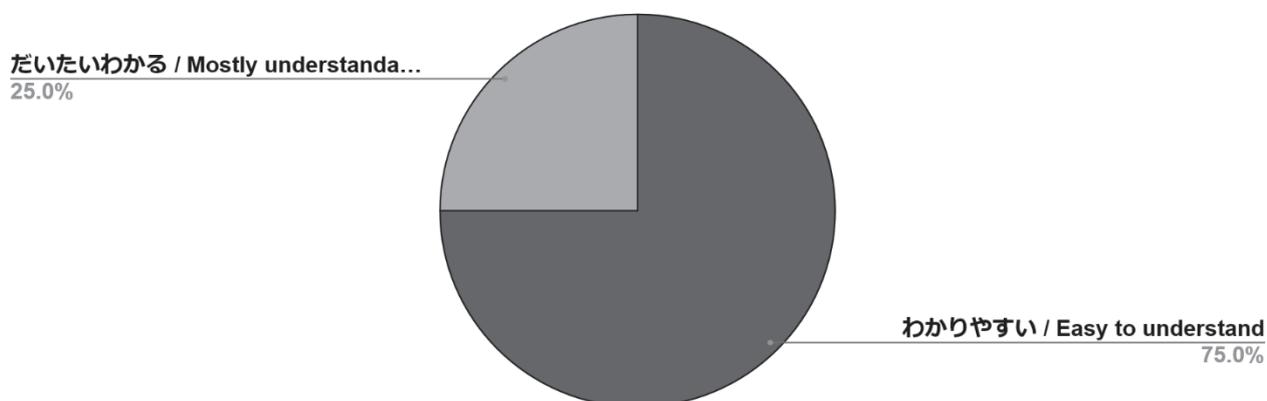


そう感じた理由、申請書類に対するご意見・ご要望

- 特に疑問などを持たずに申請書を作成することができたから。
- 継続申請であり、手順を把握しているため。
- 太枠内だけ記入となっていたと思ったのですが、そうっていないなら、記入欄を太枠にするのはいかがでしょうか？
- 特につまづく場所はなかった。
- 記入例を見ずに作成したところ、申請者の担当分野と性別、世話人の先生の役職と性別の記入を忘れました。ご迷惑をお掛けし、申し訳ありませんでした。
- 必要な情報がシンプルに記載されているので、読み取りやすかったです。
- 非常にわかりやすかったです。

## Q2.

共同研究実施に際しての事務手続きはわかりやすかったですか？

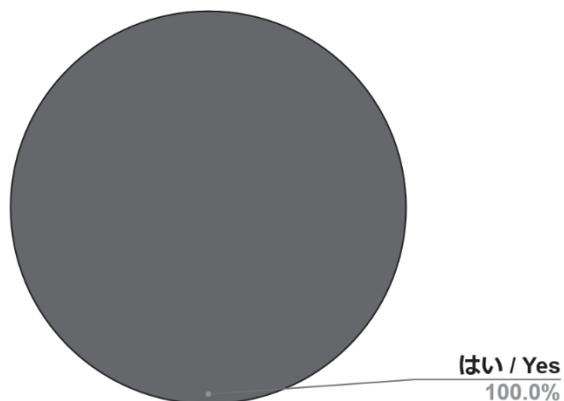


### そう感じた理由、事務手続きに対するご意見・ご要望

- 違う場合には、事務の方が丁寧に教えていただけのため。
- 物品購入について、少しややこしかったが、一度わかれば問題なく理解できました。
- いつも適切に事務手続きをしていただき、感謝しております。
- 事務の方の対応が丁寧であり、レスポンスが早かった。
- いつも適切にフォローしていただき、感謝しております。
- 研究費の執行に関するご連絡に対し、いつも迅速にご対応いただき、大変感謝しております。
- やむを得ないことですが、発注と納品や予算管理の事務手続きが、異なる大学間でのやり取りになるため、すこし難しい部分があります。
- 細かい点はまだよくわかっていないところもありますが、お蔭様でだいぶ慣れてきました。
- 非常にわかりやすかったです。

Q3.

ゼロエミッションエネルギー研究拠点のホームページに各種書類の様式が掲載されているのはご存知ですか？

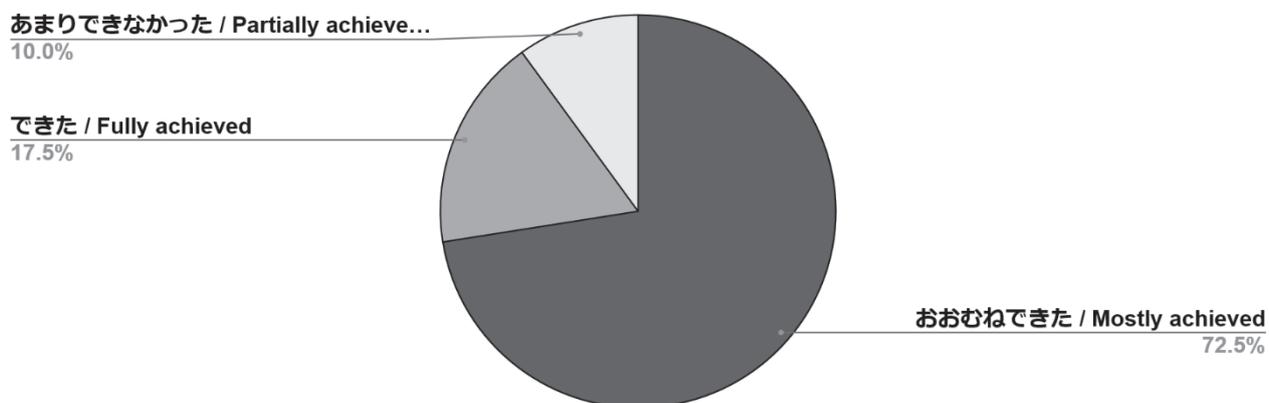


ゼロエミッションエネルギー研究拠点のホームページへのご要望

- 特になし

Q4.

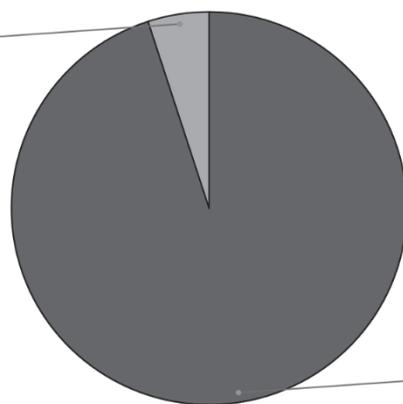
今年度の実際の配分額で共同研究を計画通りに行うことができましたか？



Q5.

物品購入の際に 10 万円以上の商品は備品として登録される場合があること、10 万円未満でも換金性物品は少額資産として登録される場合があることをご存知でしたか？

知らなかった / No, I didn't know  
5.0%

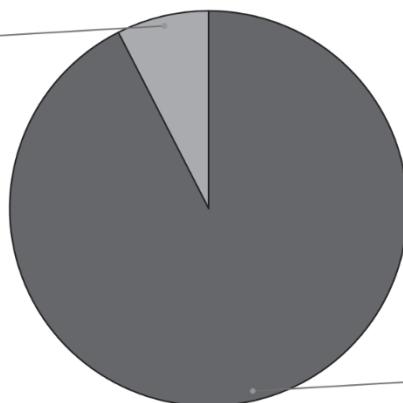


知っていた / Yes, I knew  
95.0%

Q6.

共同研究費で購入される物品のうち、消耗品以外の備品や少額資産は京都大学エネルギー理工学研究所で保管することが原則となり、管理は所内世話人が責任を持って行うこと、また、備品や少額資産は京都大学にて資産登録され、共同研究終了後は京都大学にご返却いただくことをご存じでしたか？

知らなかった / No, I didn't know  
7.5%

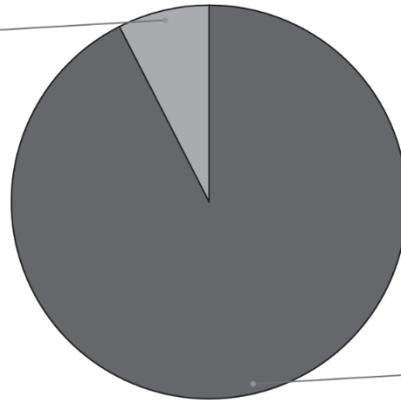


知っていた / Yes, I knew  
92.5%

Q7.

旅費申請した公共交通機関以外での来所はできないことをご存じでしたか？

知らなかった / No, I didn't know  
7.5%



知っていた / Yes, I knew  
92.5%

Q8.

成果報告について：

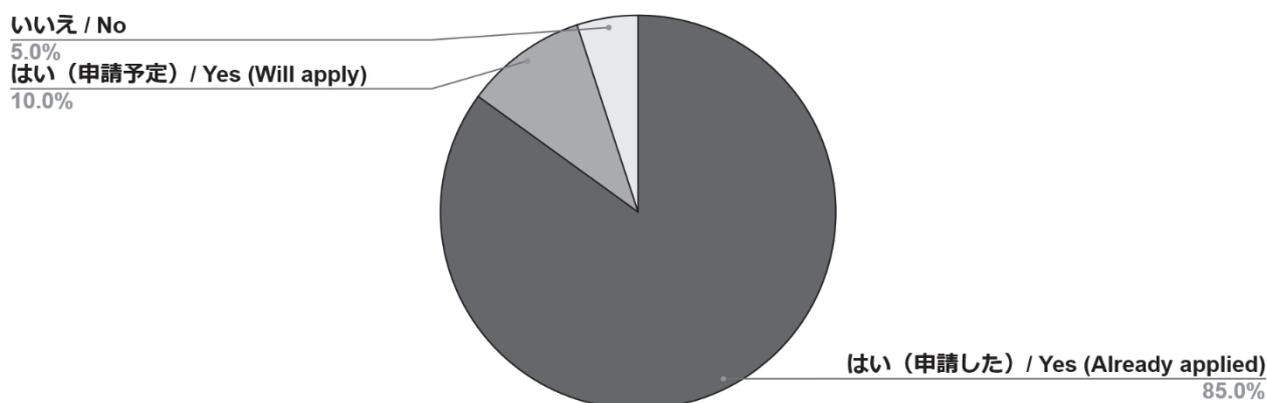
昨年度は12月の国際シンポジウムで成果をご報告いただきましたが、今年度は国際シンポジウムに代わり、ZE 拠点年会にて報告を行っていただきました。

この変更について、ご意見やご感想がございましたらご記入ください。

- どちらでもいろいろな分野の発表が聞けて勉強になった。
- 国際シンポジウムの方が、国際学会への参加業績として報告できるので良いと思います。
- 私の代理で学生に参加・発表してもらいましたが、大変勉強になったと喜んでいました。
- 時期を早めに知りたい。以前あった年度末の報告会は無くなったのですか？
- 国際シンポジウムを毎年開催されるのは大変だと思いますので、全く問題ありません。
- 国際シンポジウムを毎年開催するのは開催側の負担が大きいですので、良い取り組みだと思いません。
- I did not attend the meeting this year.
- 年会にて報告も良いと感じました。
- 2年に一度の国際シンポジウム開催の方が負担も少なく、メリハリがあって良いと思います。また、2年に一度なら修士学生に一度は国際シンポジウムの方に参加させることができるので、良い経験になると思います。
- 国際シンポジウムを開催するのは非常の労力を要しますので、隔年開催で問題ないと思いません。
- いろいろと簡略化されており、効率的だと思います。
- 初めて ZE 拠点年会に参加しましたが、ポスター発表の時間がかなり長いように思いました。

Q9.

来年度の共同研究公募にも申請を予定されていますか？



Q10.

役立ったエネルギー理工学研究所（世話人）からのフォロー等をご記入ください。

- 世話人の先生や学生さんたちと色々と議論ができ研究が進んだ。
- 構造解析や木質バイオマス研究の専門家の立場からアドバイスをいただき助かっています。
- 実験装置構造について有益な助言をしていただいた。
- 共同研究の申請書類の作成、共同研究の成果発表のための投稿論文の作成などにおいてご連絡を差し上げると、いつも即座にご返信を頂戴できますことに大変感謝しております。
- 施設の説明など非常に分かりやすくフォローしていただきました。
- これまで実施したことのない実験方法とその結果の解釈について、丁寧に説明や議論をしていただけました。ありがとうございました。
- 研究の方針を相談しました。
- 貴重な実験データを頂きました。
- 学会や論文などの成果発表の際に的確なコメントや助言をいただき、軌道修正するうえで大変助かりました。
- My key person helps me through several steps、 from the application to the research.
- 永田先生には研究計画から研究実施において、良いご助言をいつもいただいております。
- 機器を使用させていただく際に、毎回対応いただいたこと。
- 綿密な打ち合わせに従って実験を行ったり、時間をかけて装置開発や実験機器を充実させてもらったり、成果につながるまで辛抱強くまっただいただいている点。

- 逐一丁寧に説明頂き非常に助かりました。ありがとうございました。
- 分析手法に関してアドバイスをいただきました。
- 有用な研究のアドバイスをいただきました。
- 装置の使い方とかを丁寧に教えていただき、うまくいかないときの対応をすくにしていただいた。
- 研究でのアドバイスや発展研究の提案。
- 実験および論文投稿で非常にお世話になっています。
- 研究のアドバイスと ppt の印刷など。
- 共同利用に際して親身にフォローアップいただいた。
- 大垣先生にはいつも寛大なご配慮を頂きまして感謝しております。

#### Q11.

今後のゼロエミッションエネルギー研究拠点活動に対するご意見・ご要望がありましたら、ご記入ください。

- 大変だと思いますが、継続をしていただき、本活動に参加させていただけますと幸いです。
- 次年度も継続区分で申請させていただきましたが、引き続きよろしく願いいたします。
- とても満足しています。
- 大変使いやすい経費で大変助かっております。今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。
- 今後ともよろしくお願いいたします。