

ANNUAL REPORT | 2024

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

2024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「ゼロエミッショングループ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。カーボンニュートラル社会を支えるゼロエミッショングループエネルギーを基軸として、第2期拠点活動で高く評価していただいたエネルギー基礎科学分野における中核的な拠点活動を、第3期も推進しております。2024年10月に第3期の拠点活動の中間評価の結果が発表され、A評価をいただくことができました。これで当拠点は第1期から第3期までのすべての中間評価と期末評価において、連続してA評価をいただくこととなり、喜ばしく思っております。

また、2022年度に発足したカーボンネガティブ・エネルギー研究センターでは、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、そして技術の創出を目指した活動が、当初の計画をうわまわって進展し、ゼロエミッショングループ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。大学そして日本の研究力を強化するために、共同利用・共同研究拠点の果たす役割が益々大きくなっているなか、拠点の研究力を強化することが、拠点本来のミッションを果たすだけでなく、拠点間の連携によって新しい学術分野を開拓するうえでも必要になっています。そのためにも、創造的な研究と複合的な学術分野との質の高い共同研究を推進し、国内外の研究機関と密接に連携しながら、これからも関連コミュニティ、そして日本の研究力向上への貢献に努めてまいります。

今回、2024年度の成果報告書を発行する運びとなりました。新型コロナウイルス感染症蔓延によって大きな影響を受けた拠点の活動も、着実に以前の活動状況に戻りつつあります。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、結果的に多くの研究成果を挙げることができました。これも皆様の多大なご支援とご協力の賜物であり、厚く御礼申し上げます。また、2024年12月10日から13日の4日間にわたり、当拠点とエネルギー理工学研究所共催の国際シンポジウムを開催しました。国内外の著名な研究者による講演、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ポスター発表、採択課題の共同研究者等（多くは大学院生）によるポスター発表、および個別のテーマを設定して開催されたパラレルセミナーが行われました。高い学術レベルを有する発表と真剣な質疑応答がなされ、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。さらに、大学院生等による優秀な発表にはポスター賞が授与されました。次代を担う若手研究者の研究に対するモチベーションを高める一助となったのではないかと思います。和やかな雰囲気の懇親会においては、親交を深めるとともに、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いました。

本拠点が開始から10年を超えて皆様とともに取り組んできた「ゼロエミッショングループエネルギー」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。
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。

2025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

第一部 公募型共同利用・共同研究	1
第二部 抱点活動実績	171
2024 年度 活動実績	173
第三部 その他	177
2025 年度 公募案内	179
2024 年度 共同利用・共同研究推進室 アンケート調査結果	192

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. 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 (ZE2024A-01) 12
西村裕志 京都大学生存圏研究所
2. 熱交換器用高融点材料の劣化メカニズム (ZE2024A-02) 14
向井啓祐 核融合科学研究所超高温束縛材料ユニット
3. 高性能ナトリウム二次電池開発のための負極-電解質界面の構築 (ZE2024A-03) 16
坂口裕樹 鳥取大学学術研究院工学系部門
4. 核融合炉機器用マルチマテリアルにおける界面ひずみ緩和手法の開発 (ZE2024A-04) 18
笠田竜太 東北大学金属材料研究所
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 (ZE2024A-05) 20
高島 弘 奈良女子大学理学部化学生物環境学科
6. 植物や微生物の成長や増殖を制御する人工生体分子の NMR 解析 (ZE2024A-06) 22
坂本泰一 千葉工業大学先進工学部生命科学科
7. グラフェンナノリボンの電極触媒利用：
シリコン微細加工とエネルギー変換への応用 (ZE2024A-07) 24
深見一弘 京都大学大学院工学研究科
8. 硫化水素および食品加工副産物をエネルギー源とする発酵生産 (ZE2024A-08) 26
武田 穂 横浜国立大学大学院工学研究院
9. エネルギー材料における選択的格子振動励起の精密制御法の確立 (ZE2024A-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. Li_2O 蒸発によるトリチウム増殖材料 Li_8ZrO_6 焼結体中の
原子密度分布の変化 (ZE2024A-10) 30
新村潔人 弘前大学リチウム総合研究機構

11. 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 (ZE2024A-11)	32
和賀 祥	日本女子大学理学部化学生命科学科
12. 光誘起自由キャリアアラズマ過渡吸収分光によって決定した e 多元系酸化物ガーネット結晶中 3 値セリウム 4f 準位および格子欠陥準位のエネルギー位置 (ZE2024A-12)	34
北浦 守	山形大学理学部
13. イオン伝導による Li イオン電解質の機械的強度特性変化の機構解明 (ZE2024A-13)	36
佐々木一哉	弘前大学大学院理工学研究科
14. 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 (ZE2024A-14)	38
道見康弘	鳥取大学学術研究院工学系部門
15. TLS が引き起こす液液相分離を制御する長鎖非コード RNA と TLS の 相互作用の NMR 法による解明 (ZE2024A-15)	40
黒川理樹	埼玉医科大学医学部ゲノム基礎医学
16. 塗布光照射法を用いた全固体 Li イオン電池の電極/電解質界面の 界面設計に関する研究 (ZE2024A-16)	42
高橋伊久磨	千葉工業大学工学部先端材料工学科
17. 磁性化細胞を操作する技術の高度化 (ZE2024A-17)	44
上杉志成	京都大学化学研究所
18. 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反応性の解析 (ZE2024A-18)	46
松下泰幸	東京農工大学大学院農学研究院
19. 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 (ZE2024A-19)	48
金 宰煥	量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所
20. 発光性太陽光集光器への応用を指向する蛍光材料の開発 (ZE2024A-20)	50
清水正毅	京都工芸繊維大学分子化学系
21. 原子炉を延命させる熱処理条件の導出 (3) (ZE2024A-21)	52
松川義孝	熊本大学大学院先端科学研究所

22. 細胞内小器官の高効率エネルギー生成機構の解明 (ZE2024A-22)	54
坂口怜子	産業医科大学医学部
23. ウイルス蛋白質由来ペプチドと細胞増殖関連蛋白質複合体の NMR 構造解析 (ZE2024A-23)	56
楠 英樹	国立感染症研究所次世代生物学的製剤研究センター
24. 溶融塩を用いた水素同位体分離技術の研究 (ZE2024A-24)	58
松島永佳	北海道大学大学院工学研究院
25. Investigation on molecular structure changes of polylactide and polylactide-based materials induced by mid-infrared free electron laser (ZE2024A-25)	60
Sakhorn Rimjaem	Chiang Mai University (Thailand)
26. 好冷菌型ハイブリッド酵素による 結晶性セルロース低温分解システムの開発 (ZE2024A-26)	62
堀内正隆	北海道医療大学歯学部
27. 遺伝子発現調節が可能な大腸菌由来四重鎖の特性解析 (ZE2024A-27)	64
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
28. Investigation of Fast Charge Extraction in Perovskite Solar Cells with QDs-enhanced Electron Transfer utilizing MIR free-electron laser (ZE2024A-28)	66
Sukrit Sucharitakul	Chiang Mai University (Thailand)
29. 代謝反応制御に関する転写因子 Sp1 の核移行シグナルを可視化する 蛍光バイオセンサー (ZE2024A-29)	68
田嶋竣介	同志社女子大学薬学部医療薬学科
30. 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 (ZE2024A-30)	70
坂上和之	東京大学工学系研究科
31. スーパーエンプラ材料加工における化学反応解明 (ZE2024A-31)	72
藤岡 隼	東京理科大学総合研究院ナノカーボン研究部門
32. 形状自由度の高い強力超伝導バルク磁石の開発 (ZE2024A-32)	74
元木貴則	青山学院大学理工学部

33. Python-Based LV Microgrid Planning Strategies: Clustered Topology and PV Hosting Capacity (ZE2024N-01)76	Vannak Vai Institute of Technology of Cambodia (Cambodia)
34. 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 (ZE2024N-02)78	吉川榮和 京都大学大学院エネルギー科学研究所
35. Carbon Capture - Bioenergy System Design and Biofuel Readiness Analysis for Urban Communities (ZE2024N-03)80	Muhammad Almaududi Pulungan Telkom University (Indonesia)
36. Biochar Production from Cocoa Byproducts for Rural Application (ZE2024N-04)82	Juniza Md Saad Universiti Putra Malaysia Bintulu Sarawak Campus (Malaysia)
37. Achieving Carbon-Neutral Organic Coffee Cultivation through Biocontrol (ZE2024N-05)84	Keonakhone Khounvilay National University of Laos (Laos)
38. Proposing a Green Energy Ecosystem through Solar and Wind Energy in Indonesia (ZE2024N-06)86	Anugerah Yuka Asmara National Research and Innovation Agency of Indonesia (Indonesia)
39. Life Cycle Assessment of Rural Electrification in Malaysia (ZE2024N-07)88	Tan Chia Kwang UMPEDAC, University of Malaya (Malaysia)
<u>(B) 提案型共同利用・共同研究</u>	
40. 原子力圧力容器鋼モデル合金の機械特性・微細組織変化に及ぼす 損傷速度効果の研究 (ZE2024B-01)90	福元謙一 福井大学附属国際原子力工学研究所
41. 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 (ZE2024B-02)92	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
42. コヒーレントエッジ放射観測に基づく自由電子レーザー相互作用描像 (ZE2024B-03)94	清 紀弘 産業技術総合研究所分析計測標準研究部門

43. 水電解水素製造過程における気泡水素比率の光学計測法の開発 (ZE2024B-04) 96
安東航太 公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI)
44. 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 (ZE2024B-05) 98
沼田宗典 京都府立大学大学院生命環境科学研究科
45. Li-Br/F/I 系溶融塩の核融合炉液体プ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 (ZE2024B-06) 100
荻野靖之 東北大学金属材料研究所
46. 原子層物質複合物質大規模構造の電子物性探索 (ZE2024B-07) 102
岡田 晋 筑波大学数理物質系
47. ジルコニアセラミックスの高生体活性化と表面制御技術の開発 (ZE2024B-08) 104
薮塚武史 京都大学大学院エネルギー科学研究科
48. 針電極を用いたパルス界面放電の基礎と効率化 (ZE2024B-09) 106
松浦寛人 大阪公立大学研究推進機構
49. 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 (ZE2024B-10) 108
小鍋 哲 法政大学生命科学部環境応用化学科
50. 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 (ZE2024B-11) 110
佐藤慎一 熊本大学大学院先端科学研究所
51. カーボンナノチューブの発光熱特性に基づく
レシオ型光温度計測技術の開発 (ZE2024B-12) 112
青田 駿 兵庫県立工業技術センター
52. 赤外強光子場による気体のトンネル電離の研究 (ZE2024B-13) 114
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
53. 高強度レーザー照射による水素・ホウ素核融合を目指した構造性プラズマ生成のための
ナノ・材料工学技術によるマルチスケールターゲットの作製 (ZE2024B-14) 116
岸本泰明 京都大学大学院エネルギー科学研究科

54. 赤外自由電子レーザー照射後のマウスインスリンポールの解析 (ZE2024B-15)	118
中村和裕	群馬大学大学院保健学研究科
55. 高品質二次元ヘテロ構造の光学的性質 (ZE2024B-16)	120
張 文金	東京都立大学理学研究科
56. 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 (ZE2024B-17)	122
大槻幸義	東北大学理学研究科化学専攻
57. RNA 高次構造変化を誘起する新規修飾アンチセンス核酸の開発と 遺伝子発現制御 (ZE2024B-18)	124
萩原正規	弘前大学大学院理工学研究科
58. 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 (ZE2024B-19)	126
高嶋一平	東北大学多元物質科学研究所
59. 二酸化バナジウム薄膜の金属-絶縁体相転移温度が屈折率に与える影響 (ZE2024B-20)	128
磯部和真	岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域
60. 代謝系酵素遺伝子を制御する RNA 編集技術の開発 (ZE2024B-21)	130
福田将虎	福岡大学理学部化学科
61. 量子物質メタマテリアルによる新たな熱ふく射制御法の展開 (ZE2024B-22)	132
櫻井 篤	新潟大学工学部工学科機械システムプログラム
62. 赤外自由電子レーザーによるう蝕病原性菌の殺菌効果の検討 (ZE2024B-23)	134
遠山歳三	神奈川歯科大学歯学部歯学科
63. 単原子層物質における励起子の空間特性の研究 (ZE2024B-24)	136
酒井 優	山梨大学工学部先端材料理工学科
64. ヘリオトロンJ装置におけるインコヒーレントディ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 (ZE2024B-25)	138
川染勇人	香川高等専門学校情報工学科

65. Whole genome analysis and culture method development of
 Thai coffee leaf rust fungus (ZE2024B-26) 140
 Rampai Kodsueb Pibulsongkram Rajabhat University (Thailand)
66. 多糖における赤外自由電子レーザーを用いた選択的脱離現象の
 系統的研究 (ZE2024B-27) 142
 本田孝志 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所
67. アルゴン雰囲気中における酸化物分散強化合金粉末の高温酸化特性 (ZE2024B-28) 144
 岩田憲幸 久留米工業高等専門学校材料システム工学科
68. パルスレーザー除染における飛散汚染粒子の
 空間/粒径分布測定法の開発 (ZE2024B-29) 146
 小菅 淳 日本原子力研究開発機構
69. 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－ (ZE2024B-30) 148
 黒江康明 同志社大学モビリティ研究センター
70. 構造性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 (ZE2024B-31) 150
 松井隆太郎 京都大学大学院エネルギー科学研究所
71. カーボンニュートラルを目指した新型半導体電力デバイスの開発 (ZE2024B-32) 152
 岡本研正 特定非営利活動法人光半導体デバイス応用技術研究所
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 (ZE2024B-33) 154
 西野信博 (有)パウヒュッテ

(C) 共同利用

73. 相対論的電磁場の超高速計測に関する研究 (ZE2024C-01) 156
 太田雅人 核融合科学研究所可知化センシングユニット
74. ヒト口腔常在菌へのFEL照射による菌体内石灰化の検討 (ZE2024C-02) 158
 河野哲朗 日本大学松戸歯学部組織学講座

75. トロイダルプラズマ周辺乱流の径方向相關解析と配位間比較 (ZE2024C-03) 160
永島芳彦 九州大学応用力学研究所
76. 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 (ZE2024C-04) 162
高山定次 核融合科学研究所研究部
77. 一電子入射によるシンチレータの発光素過程の理解とその厳密な発光量測定、
および、暗黒物質探査と産業応用を目指した調査 (ZE2024C-05) 164
黒澤俊介 東北大学未来科学技術共同研究センター

(D) 研究集会

78. 「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 (ZE2024D-01) 166
岸本泰明 京都大学大学院エネルギー科学研究科
79. 第3回生体機能化学国際シンポジウム：生体エネルギーシステムの
理解と応用に向けて (ZE2024D-02) 167
坂口怜子 産業医科大学医学部
80. 日本バイオマテリアル学会関西ブロック第19回若手研究発表会 (ZE2024D-03) 168
足立哲也 京都府立医科大学医学研究科歯科口腔科学
81. 第4回スイスー日本生体分子化学シンポジウム (ZE2024D-04) 169
藤枝伸宇 大阪公立大学大学院農学研究科

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^{1,3}, 斎藤香織^{1,3}, 小林直子^{1,3}, 水越克彰¹, 佐野芽生¹, 井関優侑¹, 大西 京子¹, 牧村 裕¹, 岡野啓志^{1,3}, 近藤敬子^{2,3}, 永田崇², 片平正人^{2,3}, 渡辺隆司^{1,3}

1 京都大学生存圏研究所, 2 京都大学エネルギー理工学研究所, 3 バイオマスプロダクトツリー産学共同研究部門

1. 緒言

地球温暖化、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 CO₂ を吸収・固定化した存在であり、カーボンニュートラル・ゼロエミッションエネルギー社会構築の要である。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生産することでプロセス全体での経済性と低環境負荷を成立させることが重要である。リグニンは樹木をはじめとした維管束植物全般に存在する芳香族高分子であり、莫大な賦存量があるものの、利活用は限られている。本研究では、リグニンおよびリグノセルロースの基盤的な分子構造解析を進め、温和な反応条件下での木質バイオマスからのリグニン抽出、成分分離法の検討を進める。前者では木質バイオマスを丸ごと温和な条件下で溶解させる技術開発や、高分子オリゴマーとしてリグニンや糖-リグニン複合体を取得する技術開発を行い、得られたリグノセルロースとそのグリーンケミストリーによる反応生成物の分子構造解析を実施する。後者では自然界における木材腐朽菌のリグニン分解機構に関する基礎知見とこれらを応用したバイオミメティックなリグニン分解系、各種酵素反応の解析、タンパク質とリグノセルロースとの相互作用解析を行う。本研究によって植物バイオマス、木質系バイオマスの構造に関する理解を深化させ、その利活用に向けた基盤を得る事は、ゼロエミッションエネルギー研究の発展に寄与するものである。

2. NMR 法による木質バイオマス試料の分析

リグノセルロースバイオマス及びその変換試料の分子構造を解析、評価するために、溶液 NMR 法を用いた。木質バイオマスを直接分析する際には、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で溶解する必要がある。このため、微粉碎処理を遊星型ボールミル装置で 3-6 時間行い、試料へのダメージを最小限に抑えた。次に、NMR 用重水素標識溶媒 (DMSO-*d*₆ /pyridine-*d*₅ など) に溶解し、5 mm NMR 試料管に 500 μL の試料溶液を入れて NMR 測定を実施した。測定は Bruker 社製 600 MHzNMR 装置 (cryoprobe 装着 AVANCE III) を使用し、2 次元 NMR (HSQC, HMBC) 測定等を行った。

3. 結果

木質バイオマス試料として、針葉樹、広葉樹、草本系など多様な種類を供試した。試料は、有機酸をベースとした溶媒に温和な条件で溶解し、分析を行った。このプロセスは、木粉を α -ケト酸であるピルビン酸やグリオキシル酸、ギ酸などの有機酸で室温で変換する方法を開発した。おが屑や木材チップを 50°Cまでの穏和な条件で可溶化し、木材溶液からアクリル樹脂に匹敵する引張強度を持つ透明性のあるフィルムや、紙の風合いを持つ不透明なフィルムを作成した。また、これらのフィルムを木材や金属、陶器、ガラス、プラスチックに熱圧することにより、新規な表面コート材料を作成できることを見出した。さらに、木材のギ酸可溶物からガラス纖維強化樹脂に匹敵する曲げ弾性率を持つ木質圧縮成形物を製造できることを明らかにした。これらの木質新素

材は、合成高分子や接着剤を一切使用せずに製造している点が特徴である。ギ酸を用いた温和な条件の有機酸溶解により、木粉から成形体を作製した。ユーカリ (*Eucalyptusglobulus*) 由来のプラスチック様フィルムではアクリル樹脂に匹敵する強度を示した。2D HSQC および HMBC NMR 解析により、リグニンや糖鎖部分のホルミル化を確認し構造解析を行った。このホルミル化によりセルロース、ヘミセルロース、リグニンの分子間及び分子内水素結合が切断され、植物細胞壁を固めるこれらの高分子ネットワークが弛緩したと考えられる。

4. 成果リスト

[論文発表リスト]

1. Nishimura, H., and Watanabe, T. (2024). Matrix-free laser desorption/ionization mass spectrometry imaging for rapid evaluation of wood biomass conversion. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 38, e9716 (DOI: 10.1002/rcm.9716)
2. Kashimoto, R., Ohgitani, E., Makimura, Y., Miyazaki, T., Kimura, C., Shin-Ya, M., Nishimura, H., Pezzotti, G., Watanabe, T., Mazda, O. (2024). Lignin Isolated by Microwave-Assisted Acid-Catalyzed Solvolysis Induced Cell Death in Mammalian Tumor Cells by Modulating Apoptotic Pathways. *Molecules*, 29, 5490.
3. Kobayashi, N., Hashizume, T., Kondo, K., Kitayama, K., Katahira, M., and Watanabe, T. (2024). Reassembly of wood to plastic- and paper-like films ultra-mild dissolution in formic acid. *Mater. Adv.*, 5, 5398.

[受賞、プレス発表等]

なし

[発表リスト]

1. Hiroshi Nishimura, “Solution-state NMR of lignin and lignin-carbohydrate complexes”, Pre-Symposium. The 2nd ILS Pre-Symposium, 2024年9月7日、招待講演、パネリスト
2. 西村裕志, 木質バイオマスからつくるサステイナブル新素材, 高分子学会エコマテリアル研究会(京都工芸繊維大学), 2024年10月11日招待講演、
3. 西村 裕志, 「森林バイオマスから高付加価値サステイナブル新素材へ」, 京都市社会実装フォーラム, 2024年11月26日 招待講演
4. 西村 裕志, リグニンの多様性と持続可能な新素材への展望, 第40回日本腐植物質学会講演会(京都工芸繊維大学), 2024年11月30日 招待講演
5. 西村 裕志, パネリスト講演 「植物バイオマス新素材で創る持続可能な循環型社会」, GXリーグ(経済産業省), 2024年12月6日
6. 西村 裕志, 植物がつくるリグニンの見えない力 新素材の可能性を探る, 令和6年度 京都大学生存圏研究所 公開講座, 2024年12月13日
7. Hiroshi Nishimura, “Unlocking the Potential of Lignin, Next-Generation Green Polymers for a Carbon Neutral Future”, InnoVision from Top Universities of West Japan, 2025年1月21日 (Singapore) 招待講演

[書籍等]

1. 西村裕志(分担), リグニンの科学, リグニン学会編, 第1章5節 LCCの構造, 第4章4節 LCCの形成, 第10章4節リグニンの単離, リグニン学会編, 海青社(出版準備中)

熱交換器用高融点材料の劣化メカニズム

向井啓祐^{1,2}, 金森大悟², 八木重郎³

1 自然科学研究機構核融合科学研究所

2 総合研究大学院大学

3 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究背景と研究目的

核融合炉ではプラズマ周囲に配置された増殖ブランケットにおいて燃料生産と熱の回収を行う。様々な温度帯のブランケットコンセプトが提案されており、近年、発電効率を高めるために高温運転を想定したプラント概念が注目を集めている。液体増殖材として利用する高温ブランケットでは、リチウム鉛 (LiPb) などの液体増殖材はトリチウム増殖と熱輸送の両方の機能を同時に果たす。高温において材料の化学腐食や水素固溶が生じやすいことが予測されるが、特に 900 K 以上では腐食データが不足しており、過酷環境での材料の劣化機構はこれまでに十分に理解されていない。特に核融合炉において水素同位体の溶解や透過は、燃料の損失及び安全上の問題から、重要な研究課題として挙げられている。そこで本研究では、高融点材料であり熱交換器の候補材として検討されているモリブデン合金材料の劣化機構を明らかにすることを目的とし、液体リチウム鉛共晶合金中で高温共存性試験試験を実施した。流動場での腐食挙動を調べるために、液体リチウム鉛内で試料を回転させることで模擬流動環境下の実験を行った。

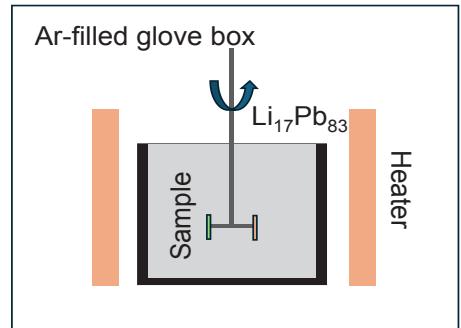


図 1 共存性試験装置

2. 研究手法

Ar ガスで満たしたグローブボックス内に図 1 の共存性試験装置を設置した。モリブデンと TZM 合金 (Mo: balance, Ti : 0.50%, Zr: 0.08% C: 0.02%) の薄板の試験サンプルをモリブデン製ディスクに取り付け、モリブデン製ロッドに固定した。鉛とリチウムをそれぞれ 83 at.% と 17 at.% に秤量し、タングステンるつぼ内に鉛を入れ、300°C で加熱し溶解した。リチウムを導入して、液体リチウム鉛を作成した。この液体リチウム鉛にサンプルを固定したディスクを導入し、750°C で 1000 時間の共存性試験を行った。流動環境を模擬するため、サンプルをリチウム鉛中で 200 rpm で回転させて試験を行った。

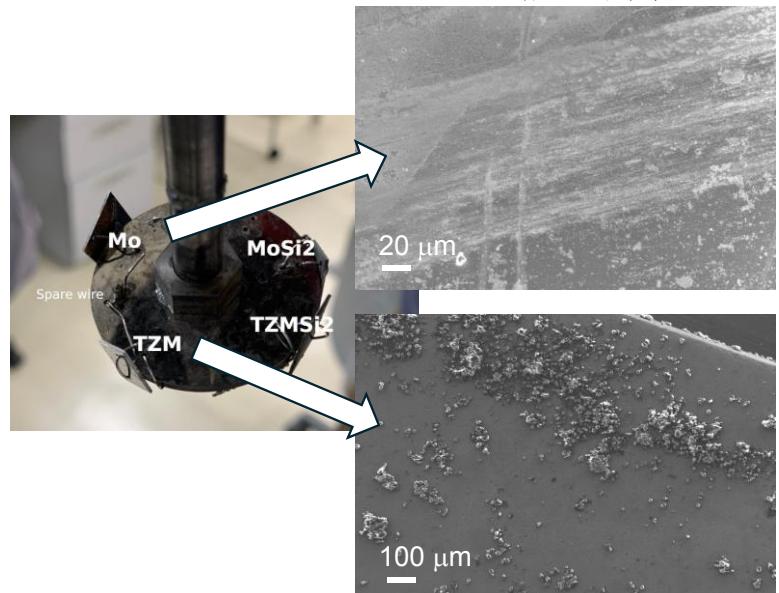


図 2 共存性試験後の Mo 及び TZM 合金の写真 (左) と表面顕微鏡画像 (右)

共存性試験の後、サンプルはディスクから取り外し、リチウム鉛を酢酸によって取り除いたのちに、サンプルの質量測定を行った。Co- $K\alpha$ 線を用いるX線回折と走査型電子顕微鏡により試料の表面状態の変化を観察した。

3. 実験結果

浸漬試料の重量測定の結果、モリブデン試料とTZM試料の重量変化は-2.25と-0.62 mg/cm²であった。試験前試料からの重量変化率を求めるに、それぞれ-0.4%と-0.2%であり、流動環境下での腐食に伴う重量変化は殆ど観測されなかった。

図2に試料表面の走査型顕微鏡(SEM)画像を示す。表面観察の結果、Mo試料では試験前後で大きな変化は見られなかったが、TZM試料表面には腐食生成物が観察された。SEMに搭載されたエネルギー分散型X線分光(EDX)によって表面生成物の組成を調べた結果、体心立方型(BCC)のMoピークに加え、酸素や炭素の特性X線ピークが観測された。図3にX線回折パターンを示す。体心立方型のMoのピークに加え、Mo₂Cのピークが確認された。この炭素はグローブボックス内に存在する微量CO₂に由来すると考えられる。CO₂によりリチウム鉛が酸化され、LiPb中に溶解した炭素が、試料表面に移行し反応した結果、Mo₂Cを形成したと考えられる。

4. 結論

本研究では核融合プランケットで増殖材として利用が検討されている液体金属LiPb共晶合金と熱交換器の候補材となるモリブデン及びモリブデン基合金TZMの共存性試験を模擬流動環境で750°C、1000時間で実施した。リチウム鉛中に存在する炭素不純物が試料表面で反応した結果、サンプル表面に腐食生成物としてMo₂Cが生成したと考えられる。共存性試験の前後で殆ど腐食による質量変化が<1%であったことから、Mo及びTZMは熱交換器材料として有効であると考えられる。過去の報告では不純物濃度がリチウム鉛による腐食を促進する例が報告されており、実際のプラント環境では熱交換器材料もステンレス配管などに含まれる成分(Cr, C等)の溶出により腐食が促進されることが予測される。磁場や放射線の影響など、不明な点が多く残されている。今後の研究では更に高温での試験を実施し、これらの溶存不純物がモリブデン基材料の腐食挙動に与える影響を明らかにする必要がある。

5. 成果発表

- Keisuke Mukai, Daigo Kanamori, Juro Yagi, Degradation mechanism of high melting point materials for heat exchanger applications, *The 15th International symposium of Advanced Energy Science 2024 Dec. 10–13.*

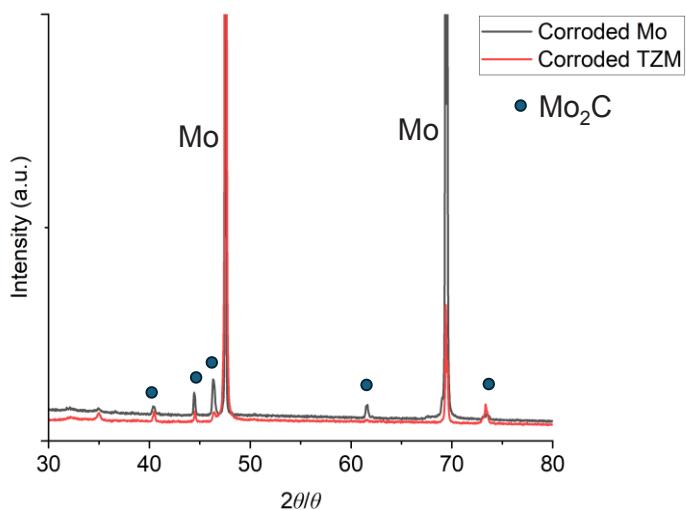


図3 腐食後サンプルのX線回折結果

高性能ナトリウム二次電池開発のための 負極－電解質界面の構築

坂口裕樹¹, 薄井洋行¹, 道見康弘¹, 野平俊之², 山本貴之², 松本一彦³

¹鳥取大学大学院工学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

³京都大学大学院エネルギー科学研究科

1. はじめに

太陽光エネルギーの有効利用のため、高性能な定置用蓄電池の開発が求められている。南米や豪州に偏在する Li 資源とは対照的に、Na の資源は海水中からほぼ無尽蔵に得られるため、Na イオン電池 (NIB) は安価な定置用蓄電池として期待されている。その負極材料としてハードカーボンの研究が行われており 450 mA h g^{-1} の可逆容量を 35 サイクルにわたり維持する性能が最近報告されている¹⁾。当グループは、NIB の普及のためより多くの Na^+ を吸蔵－放出できる負極材料の開発を行っている²⁾。リン (P) およびスズ (Sn) は 2596 および 847 mA h g^{-1} もの高い理論容量を有する。しかしながら、それぞれの単体からなる電極は充放電にともなう P の大きな体積変化で生じる応力や Sn の凝集により活物質層の崩壊を引き起こし、容量を失ってしまう欠点がある。当グループは、Sn と P の化合物 (Sn_4P_3) からなる電極がこれらの欠点を補いあうため優れた充放電サイクル性能を発揮できることを見出している³⁾。ただし、長期間にわたり充放電サイクルを繰り返すと Sn の凝集により容量衰退を引き起こす問題が確認されていた⁴⁾。そこで本研究では、 Sn_4P_3 に対し種々の活物質を添加し、Sn 粒子同士の接触を防ぎその凝集を抑制することでサイクル性能の改善を試みた。

2. 実験

負極材料として、 Sn_4P_3 (ラサ工業提供) と種々の活物質 M (Sb , Bi , Ge , TiO_2 , In , and Fe) の粉末を 70/30 wt.%の重量比となるように粉碎容器に入れ、メカニカルミリング処理を行ってコンポジット化させた試料を用いた。これを acetylene black, carboxymethyl cellulose, styrene-butadiene rubber とともに混合し、Cu 箔集電体上に塗布することで合剤電極を作製した。この電極を試験極に使用し、金属 Na を対極に用いて二極式の 2032 型コインセルを構築した。イオン液体電解液に濃度 1 M の $\text{Na}[\text{FSA}]\text{[C}_3\text{C}_1\text{pyrr}][\text{FSA}]$ (20:80 mol.%, $\text{C}_3\text{C}_1\text{pyrr}$: N -methyl- N -propylpyrrolidinium, FSA : bis(fluorosulfonyl)amide) を用いた。定電流充放電試験は電位範囲 0.005 – 2.000 V vs. Na^+/Na , 温度 303 K , 電流密度 500 mA g^{-1} (0.44 – 0.63 C) の条件で放電 (Na^+ 放出) 容量を 400 mA h g^{-1} に規制して行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 は Sn_4P_3 に種々の活物質を添加したコンポジットからなる電極の充放電サイクル性能を示す。 Sn_4P_3 単独電極は容量規制値の 400 mA h g^{-1} に達することなく 150 サイクル付近で急激な容量衰退を引き起こすことを確認した。 Sn_4P_3 に Ge および TiO_2 を添加しても性能の改善は見られなかった。添加したこれらの活物質は電子伝導性に乏しいため、電極の集電性が低下してしまい性能改善に至らなかったものと考えられる。 In および Fe を添加しても同様に性能は改善されなかった。これは、 In や Fe が Na^+ 拡散能に乏しいことで活物質層における Na^+ 伝導を阻害してし

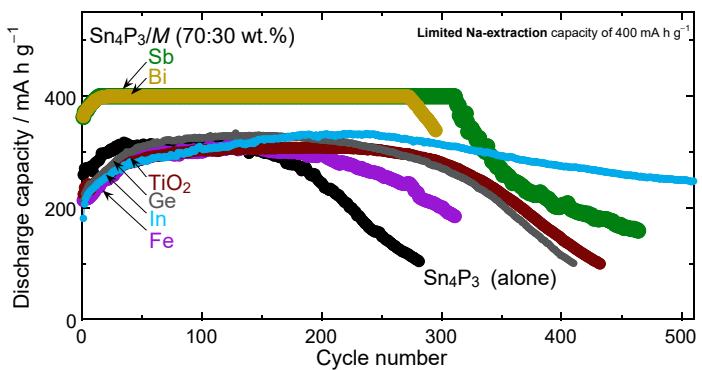


Fig. 1 Cycling performances of Sn_4P_3 electrode and $\text{Sn}_4\text{P}_3/M$ composite electrodes cycled under current density of 500 mA g^{-1} in $1 \text{ M} \text{Na}[\text{FSA}]\text{[C}_3\text{C}_1\text{pyrr}][\text{FSA}]$ electrolyte:

まったくと推測される。これらに対し、電子伝導性と Na^+ 拡散能の両方に優れる Sb および Bi を添加すると、270 サイクル以上にわたり 400 mA h g^{-1} の放電容量が維持できることを見出した。Fig. 2 は $\text{Sn}_4\text{P}_3/\text{Sb}$ 電極のサイクリックボルタモグラムを示す。 Sn_4P_3 電極と Sb 電極で確認された Na 吸蔵–放出のピークが $\text{Sn}_4\text{P}_3/\text{Sb}$ 電極においても出現することが確かめられた。これは、 $\text{Sn}_4\text{P}_3/\text{Sb}$ 電極中で Sb が Na^+ との合金化反応を示し、 Na^+ の伝導経路として機能していることを示している。

Fig. 3 は $\text{Sn}_4\text{P}_3/\text{Sb}$ コンポジット電極の充放電後の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像を示す。充放電反応が進むと Sn_4P_3 が相分離し、非晶質的な P のマトリックス中に結晶性の Sn と Sb のナノ粒子が分散した微細組織を形成することを確認した。このことから、期待通り Sb が Sn 粒子の凝集を抑制することで優れた負極性能が得られたものと推察される。

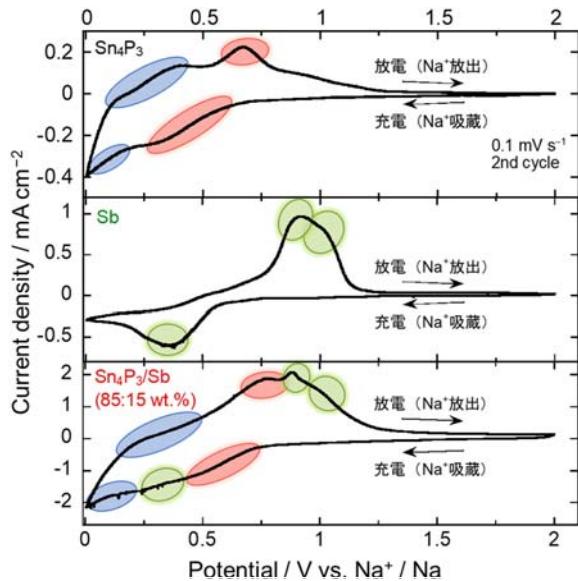


Fig. 2 Cyclic voltammogram of $\text{Sn}_4\text{P}_3/\text{Sb}$ composite electrode at the second cycle. For comparison, this figure shows the results of Sn_4P_3 electrode and Sb electrode.

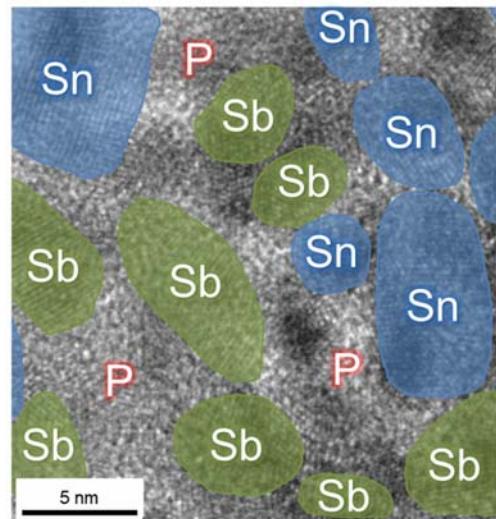


Fig. 3 Transmission electron microscopic image of $\text{Sn}_4\text{P}_3/\text{Sb}$ composite electrode after charge-discharge cycling.

References

- 1) A. Kamiyama, K. Kubota, Y. Tateyama, K. Gotoh, S. Komaba *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **60** (2021) 5114.
- 2) 萩原理加, 野平俊之, 山本貴之, 坂口裕樹, 薄井洋行ら, 特許第 6598707 号.
- 3) H. Usui, Y. Domi, T. Yamamoto, T. Nohira, R. Hagiwara, H. Sakaguchi *et al.*, *ACS Energy Lett.*, **2** (2017) 1139..
- 4) H. Usui, Y. Domi, R. Yamagami, H. Sakaguchi, *Green Energy Environ.*, **4** (2019) 121.

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] なし。

[受賞、プレス発表等]

寺前篤樹, Sn_4P_3 と Sb のコンポジットからなる電極の Na イオン電池負極性能, 電気化学会第 91 回大会, S8-2_1_20 (令和 6 年 3 月 14 日) 優秀学生講演賞, A. Teramae, Charge-Discharge Performances of Composite Electrodes Composed of Sn_4P_3 and Sb for Na-Ion Batteries, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, P1-19 (令和 6 年 12 月 10 日) Student Poster Award

[口頭発表リスト]

- [1] H. Usui, “High-Performance Anode Materials Using Metal Compounds for Na-Ion Battery”, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, P1-19 (招待講演), 令和 6 年 12 月 11 日
- [2] A. Teramae, H. Usui, Y. Domi, T. Yamamoto, T. Nohira, K. Matsumoto, R. Hagiwara, H. Sakaguchi, “Charge-Discharge Performances of Composite Electrodes Composed of Sn_4P_3 and Sb for Na-Ion Batteries”, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, P1-19 (ポスター), (令和 6 年 12 月 10 日),
- [3] $\text{Sn}_4\text{P}_3/\text{Sb}$ コンポジットからなる電極のナトリウムイオン電池負極特性, 寺前篤樹, 薄井洋行, 道見康弘, 大石脩人, 新田紀子, 坂口裕樹, 第 65 回電池討論会, 3I14 (令和 6 年 11 月 22 日)

核融合炉機器用マルチマテリアルにおける 界面ひずみ緩和手法の開発

関 航太朗^{1,2}, 笠田 竜太², Geng Diancheng², 近藤 創介², 余 浩², 萩野 靖之², 藤内 聖皓³

¹ 東北大学大学院工学研究科

² 東北大学金属材料研究所

³ 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究の背景

特性の異なる材料を組み合わせて、単一材料では達成できない機能を付与することを目指したマルチマテリアル化が様々な産業機器で進められている。マルチマテリアルの構造特性は、構成材料の個々の特性そのもよりは、構成材料間の特性のギャップが生じる界面の特性によって決定されることが多い。核融合炉においても、例えばタンクステンと鉄鋼あるいは銅合金を組み合わせた構造となるプラズマ対向機器や、超伝導材、絶縁体、金属の複合体となっている超伝導コイルなど、マルチマテリアル化は当初から指向されている。核融合炉の実用化に向けては、これらのマルチマテリアルに存在する界面の健全性実証と維持が課題となる。

本研究では、このようなマルチマテリアルの界面において存在し、構造機能劣化の要因となりうる残留ひずみを緩和するための新しい方法として、粒子線照射法を試みる。通常、金属材料に対して照射損傷による劣化を起こす要因となる粒子線照射を、マルチマテリアルの機能向上に用いようとする研究である。本手法の具体的な例として、核融合炉第一壁用に開発を進めている水中爆接法で作製したタンクステン被覆低放射化フェライト鋼に対する粒子線照射影響を調べることとした。本共同研究では、京都大学エネルギー理工学研究所に設置された電子線プローブマイクロアナライザ (EPMA) や電解放射型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) を用いて、界面構造や組成を調べた。

2. 実験方法

用いた試料は熊本大学において水中爆接法で作製したタンクステン被覆 F82H 鋼である。接合後に断面試料を作製して、EPMA (JXA-8500F, JEOL) や FE-SEM (Ultra55, Zeiss) による断面観察および分析を行った。

3. 実験結果および考察

図 1 に、EPMA によって得られた断面元素マップを示す。タンクステンと F82H の界面には爆発接合材特有の波状組織が形成されていることや、10 μm 程度までの不均一な厚さを有する混合層が形成されていることが明らかとなった。混合層には W と F82H の主成分である Fe や Cr がマーブル状に存在する渦構造が見られ、爆発接合時に界面が瞬間に溶融混合し、急冷凝固したことによって形成したと考えられる。図 2 に示す FE-SEM を用いた EBSD の結果からは、混合層は複雑かつ段階的に変化する組織を有していることが示された。また、タンクステンとフェライト鋼である F82H の熱膨張係数の差は大きく、接合体全体に大きな残留ひずみが導入されたことが推定されるが、予備的に行った X 線回折法による残留ひずみ測定結果はこの考察を支持している。

4. まとめと今後の計画

以上のように、水中爆発接合によって得られたタンクステン被覆 F82H の接合界面は複雑な組織を有しており、試料全体に残留ひずみが導入されていることが示唆された。残留ひずみが照射によって緩

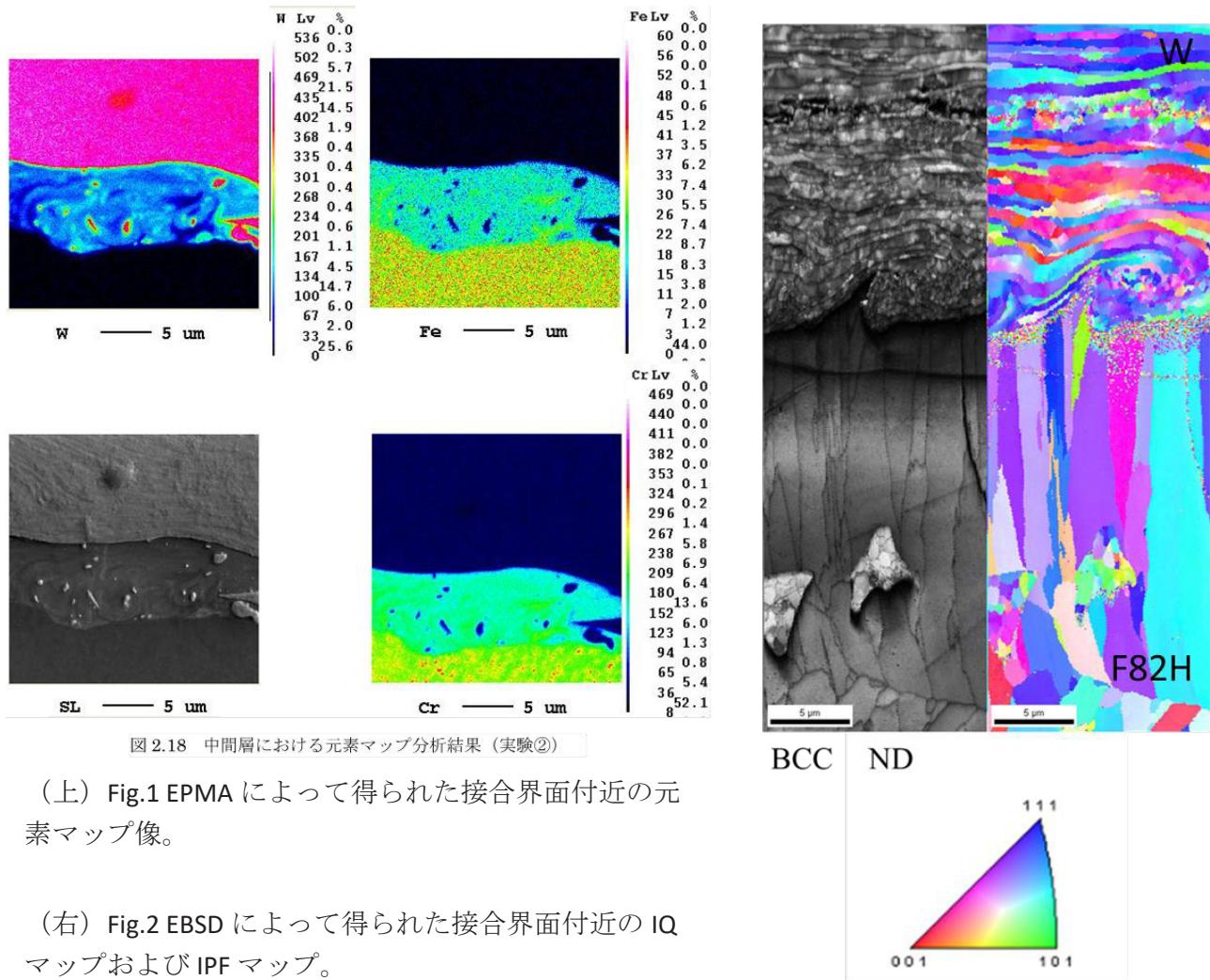


図 2.18 中間層における元素マップ分析結果（実験②）

(上) Fig.1 EPMA によって得られた接合界面付近の元素マップ像。

(右) Fig.2 EBSD によって得られた接合界面付近の IQ マップおよび IPF マップ。

和される過程を通して、照射硬化・脆化を抑制することが可能であることを示す実験結果も得られている（論文投稿中）。今後は、実際に残留ひずみによって発生する残留応力が照射硬化・脆化を抑制可能かについて、イオン照射法を用いて明らかにするとともに、マルチマテリアルの残留ひずみ緩和法としての粒子線照射法の適用性について明らかにする予定である。

[口頭発表リスト]

- [1] Kotaro Seki et al., “Evaluation of hardness change of W coated F82H by underwater explosive method after neutron irradiation”, 33rd Symposium on Fusion Technology (SOFT2024), Dublin City University, Ireland, Sep 22-27, 2024.
- [2] 関 航太朗ら、「水中爆接法で作製したW/F82H被覆材における照射硬化の抑制現象」、日本原子力学会 2024 年秋の大会、仙台、2024 年 9 月 11-13 日。

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¹, 橋本 彩花¹, 中田 栄司²

¹奈良女子大学理学部化学生物環境学科

²京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(CTH) やトリプシン(TRP)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π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ている。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。

そこで今年度の研究では、2,2'-ビピリジンに限らず、有機π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化合物のプロトン付加体の合成や、それらのイリジウム(III)錯体について合成と結晶構造解析を行った。さらに、これらの発光特性について、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、また査読付き原著論文として学術雑誌に掲載した。

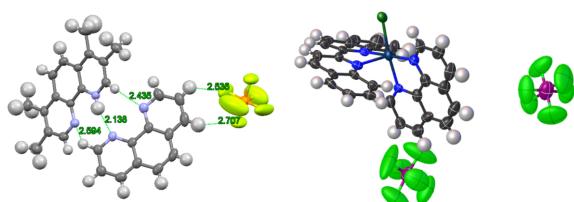


図 1 種々の窒素含有化合物のプロトン付加体およびそれらのイリジウム(III)錯体

[共同研究との関連性]

発光性π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「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、中田栄司准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、有機溶媒、合成用試薬などの薬品類、質量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充て、一部は共同利用での訪問にかかる旅費に充てた。

3. 「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) Shiori Eguchi, Mami Naoe, Asako Kageyama, Yoshitane Imai, Norimitsu Tohnai, Shoko Yamazaki, Eiji Nakata, Hiroshi Takashima*, “Circularly polarised luminescence from intramolecular excimer emission of bis-1,8-naphthalimide derivatives”, *Org. Biom. Chem.* 2024, **22**, 4318-4325. (発行済)

[口頭発表リスト]

- 1) 武田知大・高島弘・山崎祥子・藤内謙光・中田栄司, “1,1'-スピロジヒドロインダン骨格を持つキラルビス1,8-ナフタルイミド誘導体の合成”, 日本化学会第105春季年会(2025), 2025年3月, 関西大学 (ポスター)
- 2) 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エキシマー蛍光に基づく円偏光発光特性”, 日本化学会第105春季年会(2025), 2025年3月, 関西大学 (ポスター)
- 3) 橋本彩花・高島弘・山崎祥子・藤内謙光・中田栄司, “2,2'-ビキノリンを配位子とするイリジウム(III)錯体の合成とその発光特性”, 日本化学会第105春季年会(2025), 2025年3月, 関西大学 (ポスター)
- 4) 高島弘・直江麻美・今井喜胤・藤内謙光・山崎祥子・中田栄司, “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蛍光に基づく円偏光発光特性”, 第34回基礎有機化学討論会, 2024年9月12日, 札幌コンベンションセンター (ポスター)
- 5) 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合成と円偏光発光特性”, 2024年光化学討論会, 2024年9月5日, 九州大学 (ポスター)
- 6) 直江麻美・高島弘・今井喜胤・藤内謙光・山崎祥子・中田栄司, “ビス-1,8-ナフタルイミド誘導体およびその類縁体のエキシマー蛍光に基づく円偏光発光特性”, 第21回ホストゲスト・超分子化学シンポジウム, 2024年6月2日, 京都大学 (ポスター)

植物や微生物の成長や増殖を制御する 人工生体分子の NMR 解析

熊谷紀志¹, 神庭圭介², 鈴木拓也¹, 関川湧斗¹, 永田佳代子³, 高折晃史³, 万里², 片平正人²,
永田崇², 坂本泰一¹

¹ 千葉工業大学・先進工学部, ² 京都大学・エネルギー理工学研究所, ³ 京都大学・院医学研究科

1. 背景

人工核酸は、タンパク質のはたらきを制御したり、遺伝子発現を制御したりできることから、新しい創薬モダリティとして注目されている。このような人工核酸による制御は、遺伝子組換え技術とは異なる安全な技術であるため、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、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。

本研究では、HIV-1 の Virion infectivity factor (Vif) タンパク質を含む複合体の働きを抑制する人工核酸 (RNA アプタマー) を開発することとした。Vif は、CBFβ、ELOB、ELOC および CUL5 とよばれるタンパク質と複合体 (VβBCC 複合体) を形成し、宿主タンパク質である APOBEC3G (A3G) をポリュビキチン化することが知られている。A3G は、シチジン脱アミノ化活性をもち、HIV-1 のゲノムに変異をもたらすことによってウイルスの複製を阻害する抗ウイルスタンパク質である。VβBCC 複合体の働きを制御する RNA アプタマーを開発し、その制御機構について原子座標レベルで明らかにすることによって、RNA アプタマーを設計するための基盤技術を確立することを目的とした。

2. 方法

はじめに His タグ付き CBFβ を含む VβBCC 複合体を調製し、これを Ni²⁺ビーズに固定化した。次に、SELEX 実験によって RNA アプタマーを取得した。配列解析には、次世代シーケンサー MiniSeq (Illumina 社) を用いた。RNA アプタマーの調製については、鑄型 DNA を北海道システムサイエンス社に依頼合成し、T7 RNA ポリメラーゼによる試験管内転写合成法を用いた。転写後は、ポリアクリルアミドゲル電気泳動により精製した。

RNA アプタマーと VβBCC 複合体の相互作用解析には、BiacoreX100 (Cytiva 社) を用いた。5'末端をビオチン化した poly dT をセンサーチップ SA に固定化した。一方、アプタマーの 3'末端には poly A を付加し、poly dT と poly A の塩基対形成によってアプタマーをセンサーチップに固定化した。様々な濃度の VβBCC 複合体をアナライトとして注入し、センサーグラムを得た。相互作用解析用の緩衝液として、20 mM Tris-HCl (pH 8.0), 500 mM NaCl, 1 mM MgCl₂, 1 mM DTT, 0.005% Tween20 を用いた。

3. 結果および考察

SELEX 実験の結果、天然型のヌクレオチドのみで構成される VN アプタマーと C および U のリボースの 2'位を F 化した VF アプタマーを複数得ることに成功した。VN アプタマーおよび VF アプタマーの VβBCC 複合体に対する相互作用を解析したところ、最も結合が強い VF1 アプタマーの解離定数は 4 nM であった。二次構造を比較すると、どのアプタマーも UAGN テトラループを持ち、テトラループに隣接するステムには 5 つの塩基対があり、さらに内部ループを持つことが明らかになった。そこで、プライマー結合配列およびその近傍の配列を削ったところ、29 残基の長さに短鎖化しても結合活性を保持することが明らかとなった。さらに塩基置換した変異体の VβBCC 複合体に対する結合能を調べ

ることによって、UAGN テトラループ、AA を有する内部ループおよび 2 つのステムが結合に重要であることを明らかにした（図 1）。

2023 年に Li らが、A3G と Vif、CBF β 、ELOB、ELOC の複合体の立体構造を極低温電子顕微鏡（Cryo-EM）により解析した。その構造では A3G と Vif の間に RNA が存在し、その RNA が A3G と Vif の相互作用を促進していることが明らかとなっている。また、5'-CGGUUGACGUUUUAACAA-3' という RNA 配列が特に結合が強いことが示唆されている。この RNA とアプタマーは配列が異なり、二次構造も異なるので、V β BCC 複合体に対して、アプタマーはこの RNA とは異なる様式で結合していると考えられる。現在、このアプタマーが A3G と Vif の相互作用を阻害することを示唆されており、その阻害機序を明らかにすることを計画している。

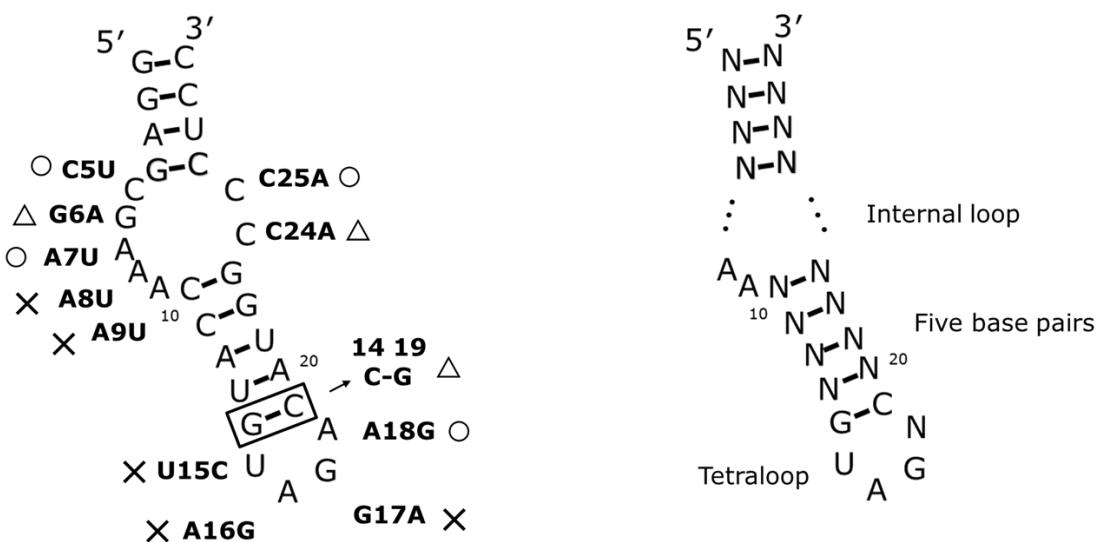


図 1 人工核酸の変異体の V β BCC 複合体に対する結合能（左）と結合に必要なモチーフ（右）

4. 研究業績

[論文発表リスト]

Kumagai, K., Kamba, K., Suzuki, T., Sekikawa, Y., Yuki, C., Hamada, M., Nagata, K., Takaori-Kondo, A., Wan, L., Katahira, M., Nagata, T., Sakamoto, T., Selection and characterization of aptamers targeting the Vif-CBF β -ELOB-ELOC-CUL5 complex, *J. Biochem.*, **176**, 205-215 (2024) 発行済

[口頭発表リスト]

- 1) 熊谷紀志, 神庭圭佑, 鈴木拓也, 関川湧斗, 永田佳代子, 高折晃史, 万里, 片平正人, 永田崇, 坂本泰一, V β BCC complex を標的とした aptamer の選別と特性解析, 2024 年度 日本生化学会関東支部例会, 2024 年 6 月, 東京
- 2) 篠崎智弘, 熊谷紀志, 鈴木拓也, 関川湧斗, 神庭圭佑, 永田佳代子, 高折晃史, 万里, 片平正人, 永田崇, 坂本泰一, V β BCC complex を標的とした aptamer の構造解析のための改変, 2024 年度 日本生化学会関東支部例会, 2024 年 6 月, 東京, ポスター
- 3) Kazuyuki Kumagai, Keisuke Kamba, Takuya Suzuki, Yuto Sekikawa, Kayoko Nagata, Akifumi Takaori-Kondo, Li Wan, Masato Katahira, Takashi Nagata, Taiichi Sakamoto, The RNA aptamers against the V β BCC complex, XXV International Round Table on Nucleosides, Nucleotides and Nucleic Acids, 2024 年 9 月, 東京, ポスター
- 4) 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, V β BCC complex を標的とした aptamer の改変, 第 47 回日本分子生物学会年会, 2024 年 11 月, 福岡, ポスター

グラフェンナノリボンの電極触媒利用： シリコン微細加工とエネルギー変換への応用

深見一弘¹, 鹿住健司, 小島崇寛², 坂口浩司²

¹ 京都大学大学院工学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

電極触媒は水の電気分解による水素製造を高効率で行ううえで必須の材料である。近年、数多くの水素発生電極触媒や酸素発生電極触媒が報告されており、中でも炭素を基本骨格とした電極触媒の研究が盛んに行われている。グラフェンなどの材料へ金属単原子をドープすることで電極触媒能を高める研究は多い。一方、グラフェンのエッジは六角形の炭素結合が終端される特異点であり、sp²炭素結合では実現できない電極触媒能の発現が期待できる。グラフェンナノリボンはリボンの短軸側の末端構造を精密に制御できる点で非常に興味深い材料である。本研究ではグラフェンナノリボンの表面合成で世界の最先端研究成果を挙げてきた坂口らとシリコンの微細加工で高い研究成果を挙げてきた深見らの共同研究により、グラフェンナノリボンの電極触媒性能を活かしたシリコンの化学エッチングによる新しい半導体微細加工研究を推進した。

2. 実験手法

本研究では、Two Zone-CVD 法によって作製可能なアームチェア型エッジ構造をもつ炭素原子 5 個分幅からなるグラフェンナノリボン (5-Armchair-edged GNR: 5-AGNR)、炭素原子 7 個分幅からなるグラフェンナノリボン (7-Armchair-edged GNR: 7-AGNR)、ならびに電気化学法によって作製可能な側鎖にブトキシ基を有するグラフェンナノリボン (EC-GNR) を合成し、シリコンエッチングの触媒として用いた。グラフェンナノリボンの合成は Au(111)表面へ行い、Au 薄膜を化学エッチングすることで基板からグラフェンナノリボンを剥離し、シリコンウェハ上へ転写した。転写するシリコンには水素終端化処理を施した比抵抗 10-20 $\Omega \text{ cm}$ の p-Si(100)を用いた。作製した試料を温度 50 °C に加熱した[HF]:[H₂O₂] = 25.9 : 0.19 (mol L⁻¹)のエッチング液の蒸気を満たした PFA ジャーに密封して 1 時間の気相エッチングを行った。エッチング速度の評価は、シリコンの断面を FE-SEM により観察し、エッチングされた領域の深さから見積もった。

3. 結果と考察

図 1 に電気化学合成により得られた EC-GNR の分析結果を示す。EC-GNR は主鎖から互い違いに側鎖が形成されていることが分かる。側鎖の間隔は 0.85 nm、側鎖を含めた EC-GNR の幅は 1.64 nm と測定された。これらの長さは、ブトキシ基を側鎖に

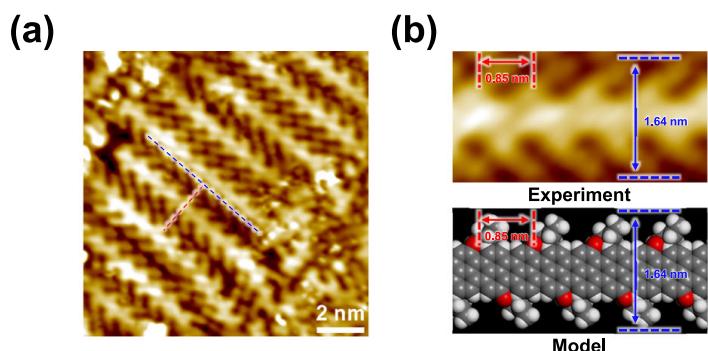


図 1. (a) 電気化学法により Au(111)上へ合成した EC-GNR の LT-STEM 像を示す。(b) は画像 a の拡大イメージと合成した EC-GNR の分子構造モデルを示す。

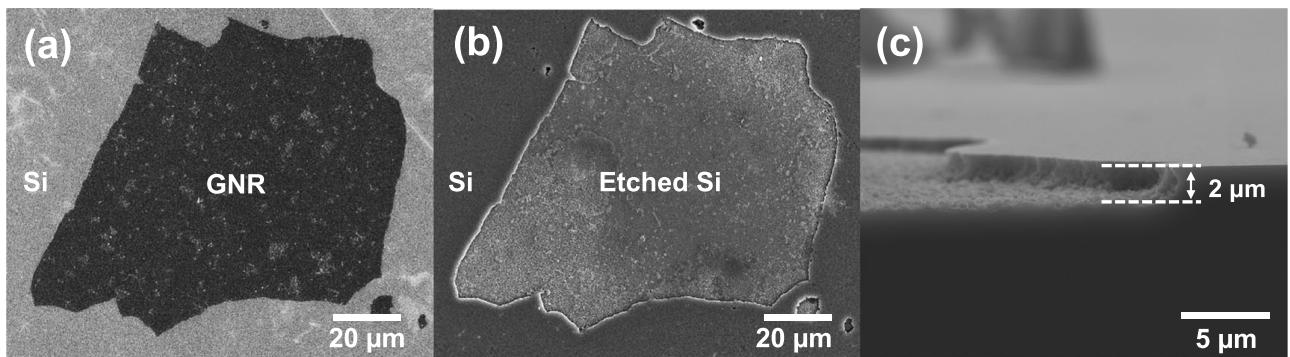


図 2. (a) シリコン表面へ転写した GNR、(b) EC-GNR のアシストによる化学エッティング後のシリコン表面、(c) EC-GNR アシストによる化学エッティング後のシリコン断面を示す SEM 画像。

もつ GNR の分子モデルから得られる値と良い一致を示す。これらの LT-STM 観察に加えて、ラマン散乱スペクトルの測定とシミュレーションなどの解析結果から、目的とする側鎖にブトキシ基を有する GNR の電気化学合成に成功したと判断した。側鎖に官能基を有する GNR を従来法（高真空の表面合成）で合成しようとすると 300°C から 500°C 程度の昇温が必要と考えられる。この温度では一般的に GNR が分解してしまうことから、側鎖への官能基の導入は極めて難しい検討課題であった。本研究では、この問題を常温で電気化学的にポテンシャルを与えることで克服した画期的な GNR 合成手法である。

次に、電気化学的に合成した EC-GNR を触媒に用いたシリコンの化学エッティングを実施した。比較対象として、Two Zone CVD で作製した 5-AGNR と 7-AGNR、その他に一般的なグラフェン、CNT（金属様ならびに半導体様）を用いた。また、従来からシリコンの化学エッティングで用いられる金属 Au も比較対象とした。図 3 に示すように、EC-GNR は金属 Au を含む全ての材料と比べて遥かに高いエッティングレートでシリコンを加工できることが明らかとなった。これは EC-GNR の高い電子ドナー性に基づく結果であると結論付けた。

4. 成果

[論文発表リスト]

Hiroshi Sakaguchi, Takahiro Kojima, Yingbo Cheng, Shunpei Nobusue, Kazuhiro Fukami,
"Electrochemical on-surface synthesis of strong electron-donating graphene nanoribbon catalyst"
Nature Communications **2024**, *15*, 5972.

[プレス発表]

2024 年 7 月 30 日 日本経済新聞「貴金属を使わずにシリコン微細加工」

2024 年 7 月 30 日 日刊工業新聞「京大、炭素細線で新製造法 酸素ドープ型 GNR 合成」

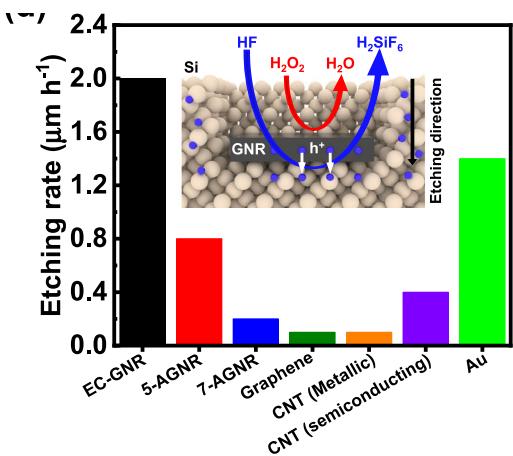


図 3. シリコンの化学エッティング速度の検討結果。EC-GNR は最も速いエッティングレートを達成できることが分かった。

硫化水素および食品加工副産物をエネルギー源とする 発酵生産

武田 穎¹, 斎藤朝昌¹, 荒木優衣¹, 松永直樹¹, 近藤敬子², 片平正人²

¹ 横浜国立大学工学研究院

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景・目的

二酸化炭素および有機廃棄物からの有用物質生産体制の構築は持続可能な社会の実現に不可欠である。本研究では硫黄酸化細菌 (*Thiothrix nivea*) を用いた多糖系セルロースアミノ化剤(セルロースに吸着してアミノ化をもたらす塩基性多糖、GG)の発酵生産技術の確立を目指して培養条件の検討を行った。また、食品加工副産物を培地成分として効率的に増殖する細菌の選抜を行った。*T. nivea* は二酸化炭素を炭素源とすること

(独立栄養)も酢酸などの有機酸を炭素源とすること(従属栄養)も可能な混合栄養性の硫黄酸化細菌である。複雑な栄養形式ゆえに高密度培養のための培養

条件は明らかになっていなかった。本研究では、どちらの栄養形式による増殖においても硫化水素の供給がエネルギー源および増殖因子として必須であることを明らかにした。また、海産物の加工工程で生じる廃棄物を資化して旺盛に増殖する *Sphaerotilus* 属細菌を見出した。

2. 二酸化炭素からの GG の生産

無機塩のみからなる培地 1.5 L を入れたジャー(培養槽)に通気、攪拌、および硫化ナトリウム供給(排気中硫化水素濃度が一定になるように供給速度を調整)しながら *T. nivea* を培養したところ、図 2 に示すように増殖(濁度の上昇)がもたらされた。増殖に伴い約 1 g の二酸化炭素が吸収された(給気系と排気系に設置した二酸化炭素センサーから算出)。また、得られた GG は 12 mg/L であり、純度を NMR スペクトルで確認するとともに濾紙のアミノ化が可能なことも確かめた。当然ながら、硫化ナトリウムを供給しなければ増殖はもたらされなかつた。意外なことに硫化ナトリウムの代わりにチオ硫酸ナトリウム (*T. nivea* はチオ硫酸の酸化に必要な SOX システムを有しているので増殖するはず) を添加しても増殖はもたらされなかつた。すなわち、硫化水素代謝系が活性化していないければ SOX システムが作動しない(SOX

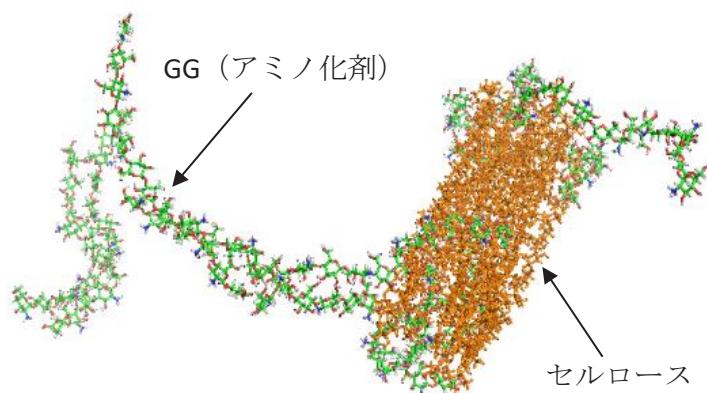


図 1 GG の吸着 (MD シミュレーション)

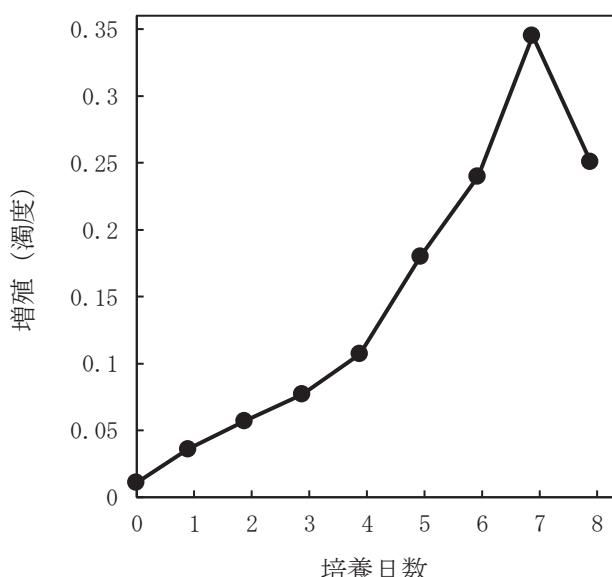


図 2 独立栄養による *T. nivea* の増殖

システムは硫化水素代謝系の制御下にある）ことが示唆された。このような硫黄代謝系の運動はこれまで知られていなかった。さらなる増殖には培養液に蓄積する硫化ナトリウムの除去が必要であることが判明した。

3. 従属栄養による GG の生産

無機塩のほかに酢酸を加えた培地 1.5 L を入れたジャー（培養槽）に通気、攪拌しながら硫化ナトリウムを一定速度で供給しながら *T. nivea* を培養したところ、硫化ナトリウム供給速度に応じて増殖速度が速まるとともに菌体収量も増加した（図 3）。菌体収量の増加は独立栄養による増殖が加味されたためと考えられる。また、硫化ナトリウムを供給しなければ増殖が起こらず、硫化ナトリウム供給速度が低い範囲（0.0003-0.03 mg/L/h）では供給速度に応じて増殖速度が上昇したことから、酢酸代謝経路（クエン酸回路）は硫化水素酸化系の制御下にあると考えられる。す

なわち、硫化水素は従属栄養における増殖因子であることが示唆された。硫化水素を一定速度でジャー（培養槽）に供給しつつ、酢酸とアンモニアの混合物を pH 上昇に応じて連続供給して *T. nivea* を増殖させたところ、8 日間の培養で 470 mg/L の GG が得られた。老廃物の蓄積による増殖阻害が示唆されたため、さらなる高密度化には老廃物の特定とその除去が必要と考えられる。

5. *S. hippei* の培養

Sphaerotilus hippei（図 4）は沼の水から発見された従属栄養性のマイクロチューブ形成細菌であり環境中に広く分布する。その培養には肉エキスが用いられてきたが、海産物加工の工程で生じた廃棄物の濃縮物を含む培地でより旺盛に増殖することを見出した。培養条件を最適化するとともにマイクロチューブの構造決定と用途開拓を目指してマイクロチューブの調製法を確立するべきである。*S. hippei* の属する *Sphaerotilus* 属のマイクロチューブは末端が開いているのが特徴とされているが、図 4 を見る限り、末端は閉じていると思われる。もし、閉塞末端型のチューブであれば形態学的に新規な鞘であり、化学構造も新規に違いない。同じく閉塞末端型のチューブの構成要素である GG のように応用展開も期待される。

7. 成果発表

[論文発表]

Saito T., Qiao Y., Araki Y., Matsunaga N., Osugi W., Kondo K., Katahira M., Takeda M., "Production of a cellulose-aminating polysaccharide from a filamentous sulfur-oxidizing bacterium, *Thiothrix nivea*, grown lithotrophically or mixotrophically", J Appl Microbiol. 135: lxae288 (2024).

[口頭発表]

斎藤朝智、荒木優衣、松永直樹、近藤敬子、片平正人、武田穣、硫化水素を増殖因子ないしエネルギー源とする多糖系セルロースアミノ化剤の発酵生産、第 76 回生物工学会大会、2024 年 9 月。

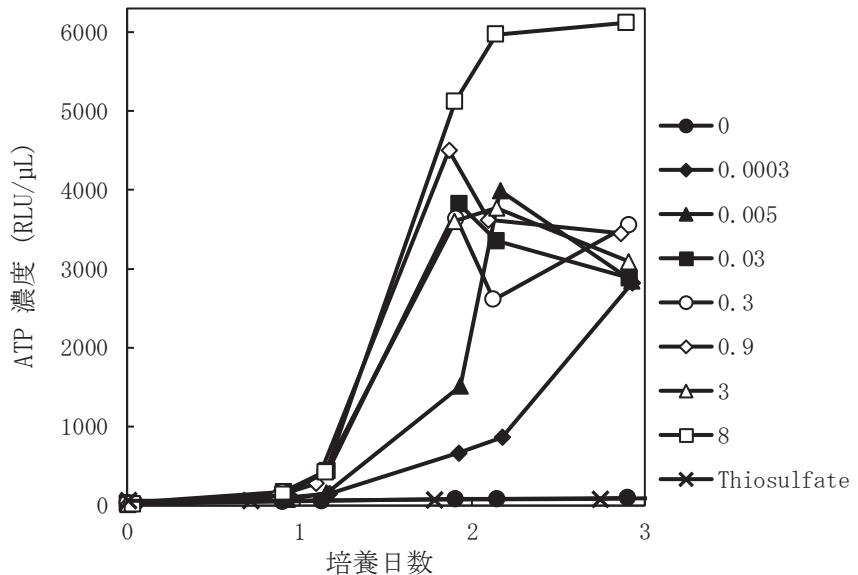


図 3 硫化ナトリウム供給速度 (mg/L/h) と従属栄養による増殖の関係

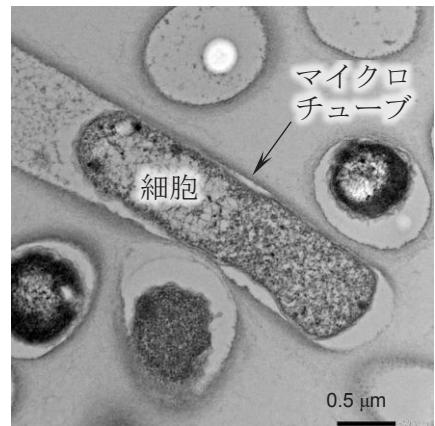


図 4 *S. hippei* の TEM 像

エネルギー材料における選択的格子振動励起の精密制御法の確立

吉田恭平¹, 全炳俊², 蜂谷寛³, 大垣英明²

¹熊本県産業技術センター 材料・地域資源室

²京都大学 エネルギー理工学研究所 ³京都大学 エネルギー科学研究所

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した波長の光を発する中赤外パルスレーザーにより、光学的、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 の 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の励起個数（温度換算）の相関性を明らかにした。しかしながら、ラマン散乱用分光装置の分解能が低かったため、フォノン励起個数の精度が不十分であった。本研究では、回折格子の刻線数を従来の 2 倍にしたラマン分光器を用いて、MSPE 時のフォノンの励起個数の精密な観測法を確立させることを目指す。

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]。 v_R 、 Ω 、 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 Ω の ASR 光の強度、周波数 Ω の SR 光の強度である。

$$\frac{I_{ASR}}{I_{SR}} = \left(\frac{v_R + \Omega}{v_R - \Omega} \right)^4 \exp \left(-\frac{h c \Omega}{k_B T} \right) \cdots (1)$$

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-YVO₄ レーザー(プロープレーザー)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)およびプロープ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 CaF₂ 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、回折格子に 600 line/mm、ブレーブス波長 500 nm の回折格子を用いて、従来よりラマン散乱分光器を高分解能化させた。

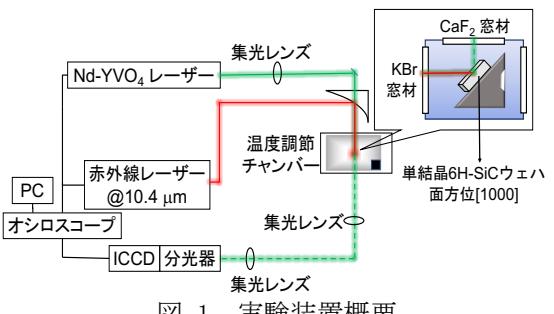


図 1 実験装置概要

4. 結果

ND-YVO₄ レーザーおよび FEL の同時照射により、4H-SiC から差周波(DFG)および和周波(SFG)が生じる。FEL の波長を 4H-SiC のフォノンと共鳴しない 8.0 μm, 9.0 μm, 11.2 μm として、Nd-YVO₄ レーザーと同時照射によって生じる SFG と DFG の強度比 (DFG/SFG の面積比) について検証した。その結果、DFG/SFG は 0.426 となった。FEL 照射時のストークス側 (低エネルギー側) のピーク面積から 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、DFG/SFG 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、DFG/SFG 比より計算した SFG 強度 (面積) の差分を取ることにより、ASR 光の強度 (I_{ASR}) を算出した。フォノンの励起個数算出のためには、SR 光の強度が必要になる。ここで、SR 光は、温度によらず一定と近似することができる。よって、FEL 未照射時の低エネルギー側のピークを SR 光として、その強度を SR 光の強度 (I_{AS}) とした。

式(1)より、ASR 光および SR 光より温度を算出する場合、 I_{ASR} と I_{SR} の強度比の自然対数 ($\ln(I_{ASR}/I_{SR})$) の計算が必要となる。図 2(a)に、本実験で観測された $\ln(I_{ASR}/I_{SR})$ を示す。 $\ln(I_{ASR}/I_{SR})$ は、FEL の強度に対して非線形に増加することが確認された。次に、サンプル温度と $\ln(I_{ASR}/I_{SR})$ と相関を検証した (検量線、図 2(b))。検量線は、R2 乗値が 0.995 の線形なグラフとなった。得られた検量線より、FEL エネルギーとフォノン励起個数 (温度換算) を算出した (図 2(c))。図 2(c)に示すように、FEL エネルギーとフォノンの励起個数の相関は非線形であった。また、FEL のエネルギーが 11 mJ の時、温度が負の値となった。この原因としては、FEL の照射により反転分布が形成されたことが考えられるが、さらなる検証が必要である。0.25 mJ ~ 8 mJ のエネルギーの FEL を照射したとき、最大 4000 K の温度に相当するフォノン励起個数となっていることが確認された。本実験では、観測された ASR 光と SR 光が複数に分裂したピークとして観測された。この原因として、サンプルが複数のピークを持つ可能性がある。今後は、ピーク分裂の原因の特定、フォノン励起個数の精度向上および理論的検証を行う。

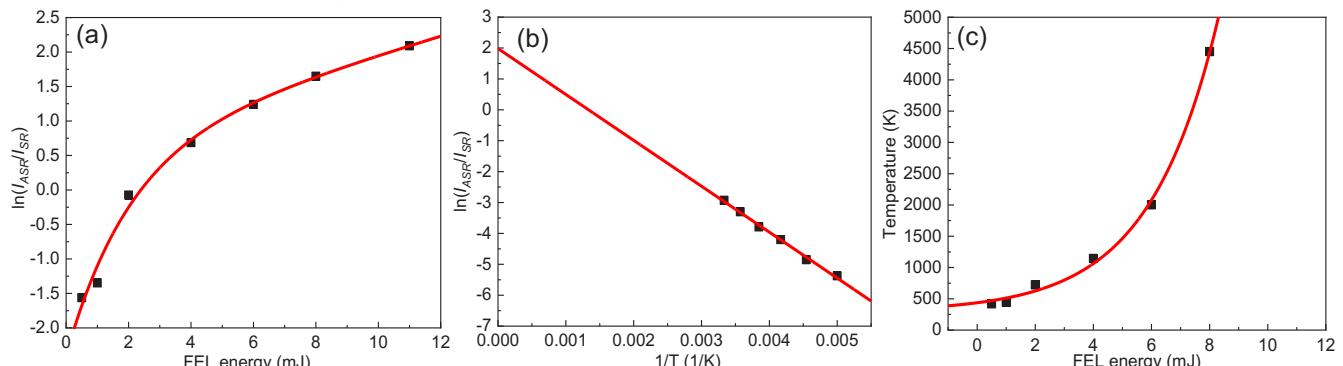


図 2 FEL エネルギーと $\ln(\text{ASR 光/SR 光})$ の相関(a), 算出した検量線(b)FEL エネルギーとフォノン励起個数 (温度換算) の相関(c)

[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] Hirotaka 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) Ju Yoon Hnin Bo, Heishun Zen, Kyohei Yoshida, Kan Hachiya, Rei Akasegawa, Hideaki Ohgaki, "Observation of Selective Excitation of Raman Inactive Phonon Mode of Strontium Titanate Through Anti-Stokes Hyper-Raman Scattering Process", *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 45, 999, 2024, 発行済
- 2) [口頭発表リスト]
 - 1) 吉田恭平, "SiC におけるモード選択的励起フォノンの励起個数分布のレーザーエネルギー依存性", 第 31 回 FEL と High Power Radiation 研究会, 2024 年 12 月 12 日, 宇治おうばくプラザ
 - 2) Kyohei Yoshida, Heishun Zen, Kan Hachiya, Hideaki Ohgaki, "Precise control of mode-selective phonon excitation on energy material", 15th International Symposium of Advanced Energy Science "Toward the Realization of Advanced and Carbon Negative Energy", 2024 年 12 月 10 日, 宇治おうばくプラザ (ポスター)
 - 3) 吉田恭平, 全炳俊, 蜂谷寛, 大垣英明, "SiC におけるモード選択的励起フォノンの励起個数分布のレーザーエネルギー依存性", 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 2024 年 9 月 20 日, 新潟県朱鷺メッセ (ポスター)

Li₂O 蒸発によるトリチウム増殖材料 Li₈ZrO₆ 焼結体中の原子密度分布の変化

(Changes in atomic density distribution in tritium breeding material Li₈ZrO₆ sintered body due to Li₂O evaporation)

新村 潔人¹, 八木 重郎², 佐々木一哉^{1,3}, 向井啓祐⁴

¹弘前大学リチウム資源総合研究機構

²京都大学エネルギー理工学研究所

³弘前大学理工学研究科

⁴自然科学研究機構核融合科学研究所

1. 背景

重水素とトリチウムの核反応による核融合炉では、プラズマの周りを覆うブランケット内に充填されるトリチウム増殖材料の構成元素である⁶Liと中性子の反応でトリチウム製造が行われる。ブランケットは限定される狭い空間であり、2~3年間にわたる発電期間を通して必要量のトリチウムを製造し続けられるよう、トリチウム増殖材料には高いLi原子密度、優れた熱化学的安定性および熱機械的安定性が求められる。トリチウム増殖材料の日本の候補材料であるLi過剰添加メタチタン酸リチウム(Li_{2+x}TiO₃)の実使用環境下での特性評価を進める一方で、より高いLi原子密度を有する革新的材料の研究が多くなされている。我々は、Li₂Oの次にリチウム原子密度が大きいLi₈ZrO₆を新たなトリチウム増殖材料の候補材料とすることの可能性を検討している。これまでに、320°C~900°Cの温度ごとのLi₈ZrO₆焼結体からのLi₂O蒸発速度等を明らかにした。本研究では、Li₈ZrO₆焼結体の構成元素について、マーカス型高周波グロー放電発光表面分析(rf-GD-OES)により、焼結体表面から深さ方向に向かうLi原子密度を測定することで、Li蒸発が表面から起きていることを調査する。

2. 実験方法

Li₈ZrO₆のペレットの作製方法を図1に示す。空気中のCO₂やH₂OとのLi₂Oとの反応を避けるため、グローブボックス内(Ar雰囲気)でLi₂OとZrO₂を秤量(Li/Zr=8.4 mol)、メノウ乳鉢を用いる混合、および一軸加圧成型を行った。手早く電気炉に入れ、酸素雰囲気中で800°C・30hの焼成を行った。その後、メノウ乳鉢で粉碎し、Li₈ZrO₆粉末を得た。作製したLi₈ZrO₆粉末を直径25mmの金型を用い、一軸加圧成型で成形し、1000°C、1h、酸素雰囲気中で焼成し、φ25mm×4~5mmのペレットを作製した。作製したペレットを、ブランケットの内雰囲気を模擬した、0.1%/HeあるいはO₂の気流中でLi蒸発試験を行った。0.1%/Heガスボンベ中のH₂OとO₂はドライカラムとガスクリーンで除去した。Li蒸発試験温度は320~900°C、時間は24~96hとした。ペレット表面からのLi原子密度をrf-GD-OESで分析した。Li蒸発試験中に結晶格子中のZrは移動も蒸発も生じないため、Liの濃度分布の変化をZrの存在量に対する相対値として決定した。

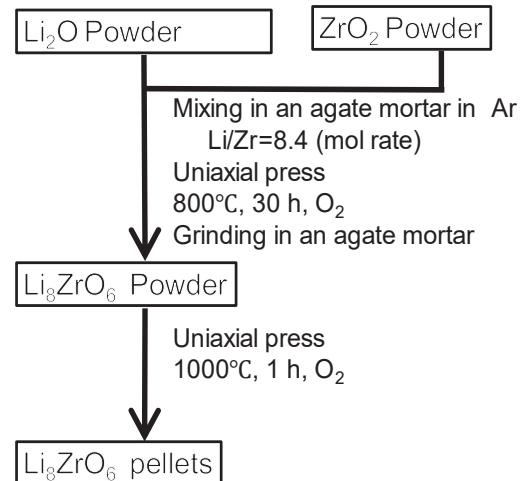


図1 Li₈ZrO₆ペレット作製フロー。

3. 結果および考察

焼結した直後の初期ペレットを粉碎し、粉末 XRD 分析した結果を図 2 に示す。作製された初期ペレットは、 Li_2O が僅かに残るもの、ほぼ単相の Li_8ZrO_6 であった。図 3 (左) には $900\text{ }^\circ\text{C}$ における Li 蒸発時間依存性、図 3 (右) には Li 蒸発温度依存性を示す。すべてのサンプルにて、表面近傍は Li 濃度が小さく、内部では Li 濃度が一定値であった。初期サンプルでも同様な傾向であり、ペレット作製時の $1000\text{ }^\circ\text{C}$ で実施した焼結中に表面から Li が蒸発した結果である。

しかし、図 3 左からわかるように、Li 蒸発前の試料の Li 濃度が Li 蒸発後の濃度より低かったことからわかるように、今回の rf-GD-OES 分析によるでは Li 濃度の絶対値を議論する精度はなさそうに思われる。したがって、 $900\text{ }^\circ\text{C}$ での Li 蒸発時間の影響や $320\text{ }^\circ\text{C}$ と $900\text{ }^\circ\text{C}$ の Li 蒸発温度の影響は、今回の実験では明確にできなかった。

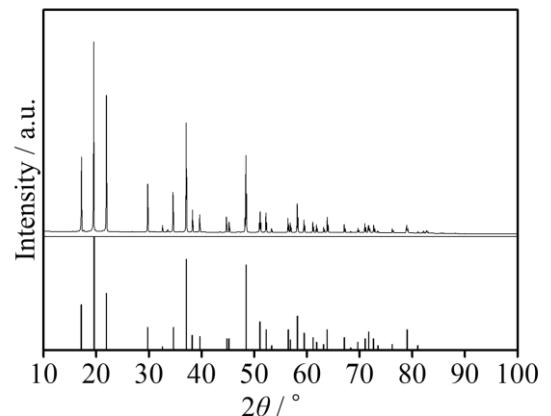


図 2 初期ペレットの XRD。

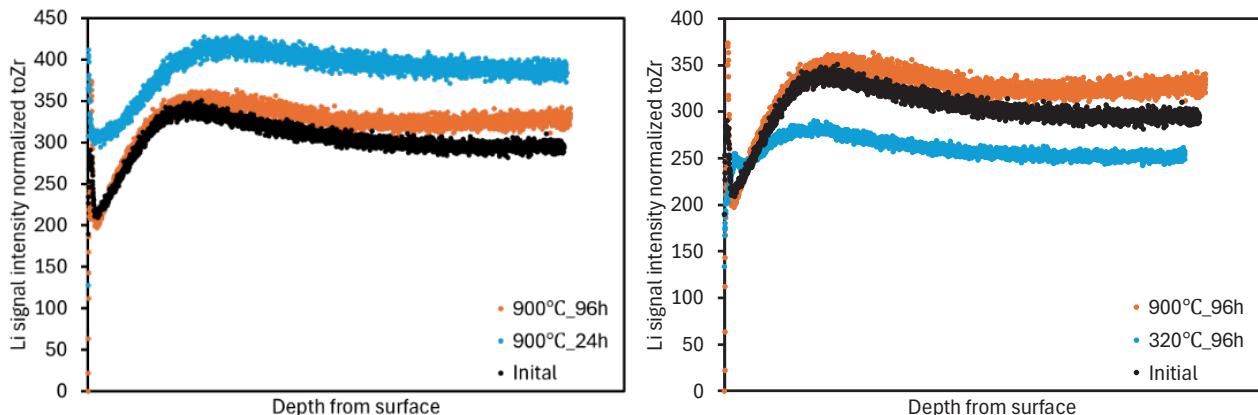


図 3 Li_8ZrO_6 表面近傍の Li 密度。 (左 : $900\text{ }^\circ\text{C}$ における時間依存性、右 : 温度依存性 [96 h])

4. まとめ

Li_8ZrO_6 焼結体の構成元素について、マーカス型高周波グロー放電発光表面分析 (rf-GO-OES) により、焼結体表面から深さ方向に向かう Li 原子密度を測定することで、Li 蒸発が表面から起きていることを調査した。

rf-GO-OES 分析では、深さ方向の Li 濃度変化を知ることはできる。 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ でのペレット作製時に Li_8ZrO_6 表面から Li 蒸発が生じていることが確認できた。

一方、Li 濃度の絶対値の議論は、現状では難しいことが判明した。

[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]

- K. Shin-mura*, J. Yagi, K. Sasaki, K. Mukai, “Composition changes due to lithium vaporization in Li_8ZrO_6 by thermal annealing” The 15th International symposium of advanced energy science, Kyoto, Japan. Dec. 10, 2024. (Poster)

複製開始点認識複合体 ORC と DNA グアニン四重鎖構造の相互作用解析

和賀祥¹, 山置佑大², 永田佳代子², 阪本知樹², 近藤敬子², 永田崇², 片平正人²

¹ 日本女子大学理学部

² 京都大学エネルギー理工学研究所

真核生物の DNA 複製過程においては、6 つのサブユニットから成る複製開始点認識複合体 (origin recognition complex: ORC) が、DNA 複製開始点を決定する重要な役割を担っている。ORC は巨大なゲノム DNA 上に点在する特定の複製開始点に結合し、種々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制御する。しかしながら、明確な配列特異性を示す酵母の ORC とは異なり、ヒトなどの高等真核生物の ORC は、結合する DNA 配列に特異性が見られず、ゲノム DNA 上の複製開始点をいかに認識するのかは分かっていない。近年、多くのヒトの複製開始点にはグアニンに富んだ DNA 配列が存在することが報告された。これらの領域ではグアニン四重鎖 (GQ) と呼ばれる DNA 構造が形成されると考えられている (図 1)。これまでに我々は、ヒト ORC サブユニット 1 (hORC1) が一本鎖状態の DNA (ssDNA) や二重鎖構造の DNA (dsDNA) 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)。また、hORC1 の GQ 結合領域と GQ DNA との複合体の NMR 解析を行い、その結合残基や立体構造に関する情報も取得してきた (Eladl *et al.*, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2023)。ここから、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いる。

これらの知見に基づき、本年度はさらにヒト ORC サブユニット 2 (hORC2) について、GQ DNA との相互作用を解析した。近傍に活発な複製開始点が存在することが知られている *c-myc* 遺伝子のプロモーター領域には GQ 構造を形成可能なグアニンに富んだ配列が存在する。この *c-myc* プロモーター由来の配列を有する GQ DNA に対し、hORC2 をくわえてゲルシフトアッセイ (EMSA) を行った。その結果、hORC2 が GQ DNA に対して結合能を有することを見出した。さらに、様々な領域に分割した hORC2 断片についても *c-myc* プロモーター GQ DNA との結合を評価し、約 20 アミノ酸残基程度の GQ 結合領域を同定することに成功した。

同定した hORC2 の GQ 結合領域に由来するペプチド (hORC2 ペプチド) を調製した。蛍光標識した *c-myc* プロモーター GQ DNA、ssDNA、dsDNA に対して hORC2 を様々な濃度で加えて蛍光異方性測定を行うことで、hORC2 と GQ DNA との結合の特異性を評価した。ssDNA および dsDNA については、hORC2 ペプチドを加えてもほとんど蛍光異方性が変化しないのに対し、GQ DNA の場合には、hORC2 ペプチドの濃度が上がるにつれて蛍光異方性の値が増加した (図 2)。この結果は、GQ

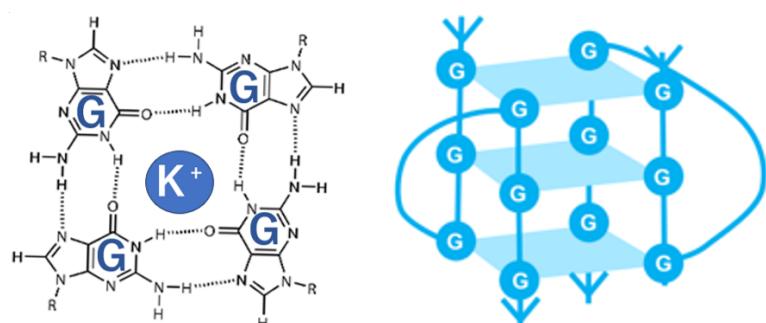


図 1. グアニン四重鎖 (GQ) 構造の模式図。4 つのグアニンで形成される平面構造 (G カルテット、左)。G カルテットが積層して形成される GQ 構造 (右)。シアンの四角は G カルテットを表している。

DNA に hORC2 ペプチドが結合し、GQ DNA の見かけの分子量が増大したことで、蛍光異方性が増大したと説明することができる。即ち、hORC2 ペプチドは ssDNA や dsDNA には結合せず、GQ DNA に対して特異的に結合することが示された。

本研究により、hORC の 6 つのサブユニットのうち、hORC1 だけでなく、hORC2 も優先的に DNA の GQ 構造に結合することが示された。本研究にて得られた知見を基に、hORC2 と GQ DNA の複合体構造の解析を進め、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。

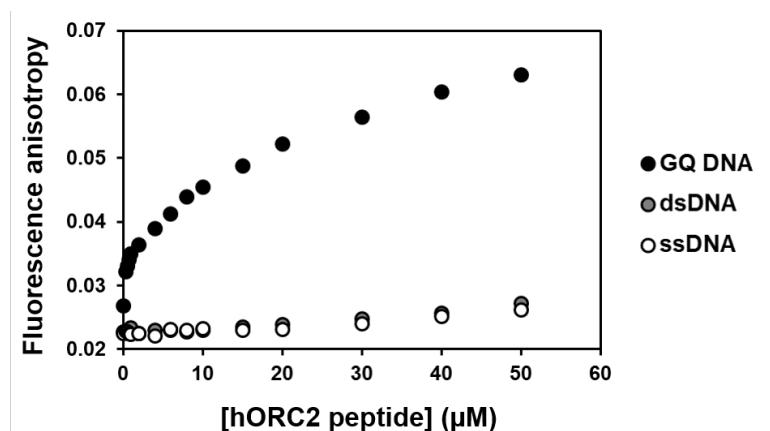


図 2. 蛍光異方性測定による hORC2 と各 DNA 構造との結合アッセイ。

[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, Y. Yamaoki, K. Horie, T. Sakamoto, C. Nakayama, T. Masunaga, K. Kondo, T. Nagata, M. Katahira 「The binding of human origin recognition complex subunit 1 to various G-quadruplex structure」 *The 15th International Symposium of Advanced Energy Science* (Dec. 10-13, 2024, Kyoto, Japan)
2. S. Waga, M. Takano, C. Nishio, K. Hosono, Y. Akiniwa, C. Shioda. 「Pre-RC forming proteins commonly have G-quadruplex binding activity in the intrinsically disordered regions」 *The 12th 3R+3C International Symposium* (Nov. 18-22, 2024, Fukuoka, Japan)

光誘起自由キャリアプラズマ過渡吸収分光によって決定した多元系酸化物ガーネット結晶中 3 値セリウム 4f 準位および格子欠陥準位のエネルギー位置

北浦 守¹, 全 炳俊²

¹ 山形大学理学部

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

セリウムを含むガーネット蛍光体では、セリウムの 4f-5d イオン内遷移とセリウム 4f 準位から母体の伝導帯への電荷移動遷移が共存し、最低エネルギー光学遷移が電荷移動遷移のキャラクターを色濃く帯びる場合に無輻射遷移が起こりセリウムの発光が生じないと考えられてきた[1]。一方、吸収スペクトルではセリウム 4f-5d 遷移による吸収が支配的であり、電荷移動遷移の吸収の痕跡は捉えることができない。そのため、吸収スペクトルからは最低エネルギー光学遷移の情報を得ることが困難であった。申請者はこれまで光誘起赤外分光によって中赤外領域に特徴的な吸収が現れるを見出しました[2]、その吸収が光励起で伝導帯に生じた自由電子のプラズマ振動に起因することを明らかにしてきました。自由電子レーザー(FEL)からの中赤外光を利用して光誘起自由キャリアプラズマ吸収の過渡吸収分光を行ったところ、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ において電荷移動遷移による吸収がセリウム 4f-5d 遷移による吸収よりも低エネルギー側に存在し、その無輻射発光過程において電荷移動遷移が重要な役割を果たすことを突き止めた[3]。これは過去に予見された無輻射遷移過程の存在を強く裏付ける。

$\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ とは対照的に $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ ではセリウム発光が観測され、最低エネルギー遷移がセリウムイオン内遷移の性格を帯びると予想されるが、実験で立証されることなく現在も不明なままである。ガーネット蛍光体における発光・非発光過程の細部を明らかにするには $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ において最低エネルギー光学遷移がイオン内遷移なのか電荷移動遷移なのかを特定する必要がある。本研究では、この点を明らかにするために $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}$ において光誘起自由電子プラズマ過渡吸収分光を行った。ここでは、その結果の一部を報告する。

2. 実験

実験に用いた $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ 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。試料をクライオスタットに取り付けて真空中に設置して冷却した。光誘起自由電子プラズマ過渡吸収分光は京都大学エネルギー理工学研究所において行った。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 2.9 eV の出力をポンプ光として用いた。FEL からの中赤外光マクロパルスをプローブ光として用いた。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 μJ と 120 μJ に設定した。中赤外光マクロパルスを参照測定用と透過測定用を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ー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 $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ 結晶において測定した光誘起自由キャリアプラズマ吸収分光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結論できる。 $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ ではセリウム発光が生ずることから、光励起された電子の大部分が選択的にセリウム発光の始状態へと緩和すると考えられる。このことは、最低エネルギー電子遷移のキャラクターだけでなく励起電子の緩和速度もまた発光・非発光過程を決定づける重要なファクターであることを示す。

これまで $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ と $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ において最低エネルギー電子遷移のキャラクターを明らかにしてきた。これらのガーネット蛍光体で見出された最低エネルギー電子遷移のキャラクターが他のガーネット蛍光体($\text{RE}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ と $\text{RE}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ ($\text{RE}=\text{Lu}, \text{Gd}$))においても成立するのか、この問い合わせるためにこれらの蛍光体でも光誘起自由キャリアプラズマ過渡吸収分光を行なっており、その成果を近いうちに公表したい。

4. まとめ

本研究では、FEL からの中赤外光を利用して光誘起光誘起自由キャリアプラズマ過渡吸収分光を行い、 $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ においてセリウムのイオン内遷移と電荷移動遷移が競合することを見出した。この状況においてセリウムの発光が生じるためにはその始状態への電子緩和が優先的に起こる必要がある。この事実は、ガーネット蛍光体における発光・非発光過程には最低エネルギー電子遷移のキャラクターだけでなく励起電子の緩和速度もまた重要なファクターであることを示す。

参考文献

- [1] P. Dorenbos: J. Lumin. 134 (2013) 310.
- [2] M. Kitaura et al.: Appl. Phys. Lett. 113 (2018) 041906.
- [3] M. Kitaura, H. Zen, et al. Opt. Mater.: X 25 82025) 100398.

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〕

Mamoru Kitaura, Heishun Zen, Shinta Watanabe, Hirokazu Masai, Kei Kamada, Kyoung-Jin Kim, Akira Yoshikawa, Jumpei Ueda, “Relationship between Ce^{3+} 5d₁ level, conduction-band bottom, and shallow electron trap level in $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ and $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ crystals studied via pump-probe absorption spectroscopy”, Optical Materials: X (Invited paper) Vol. 25, 100398 (1-10), (2025) (published).

〔口頭発表リスト〕

Mamoru Kitaura, Heishun Zen, Shinta Watanabe, Hirokazu Masai, Kei Kamada, Kyong Jin Kim, Akira Yoshikawa, “Visualizing Energy Levels of Lanthanides and Defects in Multicomponent Garnet Crystals by Mid Infrared Free Electron Laser (Invited lecture), 12th International Conference on Luminescence Detectors and Transformer of Ionizing Radiation (Lumdetr 2024), 16-21 June (2024), Riga, Latvia.

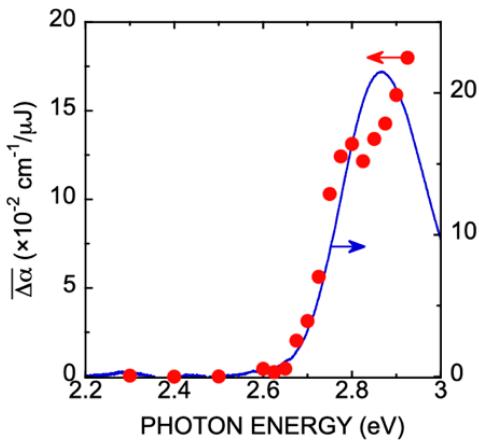


Fig.1: $\text{Gd}_3\text{Al}_1\text{Ga}_4\text{O}_{12}:\text{Ce}$ 結晶の光誘起自由電子プラズマ吸収の生成スペクトル(赤丸)とセリウム 4f-5d 吸収スペクトル(青線)の比較 [3]。

イオン伝導による Li イオン電解質の機械的強度特性変化の機構解明

(Mechanism of changes in mechanical strength properties of lithium-ion electrolyte due to ionic conduction)

佐々木一哉^{1,2}, 八木重郎³, 新村潔人², 高橋伊久磨⁴, 向井啓祐⁵, 笠田竜太⁶

¹ 弘前大学大学院理工学研究科

² 弘前大学リチウム資源総合研究機構

³ 京都大学エネルギー理工学研究科

⁴ 千葉工業大学工学部

⁵ 自然科学研究機構 核融合科学研究所

⁶ 東北大学金属材料研究所

1. 背景・目的

電気自動車やスマートグリッド電力システムに使用されるリチウムイオン電池 (LIBs) 用のリチウム資源 (Li) には供給量不足や価格高騰の課題がある。欧州電池規則への対応も求められる。そのため、塩湖などからの新たな Li 採取および使用済み LIBs や LIBs 製造工程の廃棄物からの Li 回収の技術確立は日本経済の維持・発展にとって重要である。リチウムイオン (Li^+) 伝導性固体電解質を隔膜とする電気透析は、有望な技術であり、自動車メーカー、電力会社、および製鍊会社等と共同で開発が進められている。リチウムイオン電解質 $\text{La}_{0.57}\text{Li}_{0.29}\text{TiO}_3$ (LLTO) 純密焼結体の板は、優れた Li^+ 伝導特性や化学的安定性から、当該電気透析用隔膜の有望な候補材料である。申請者らは、リチウムイオン電解質 LLTO 純密焼結体板において、室温の Li^+ 伝導により機械的強度や弾性率が大幅に向上することを見出した。セラミックス焼結体の機械的強度特性は組成や微細構造 (相対密度や結晶粒径等) で通常は説明でき、これらが変化しない室温の Li^+ 伝導による特異な特性変化の原因を説明できない。この特性変化のメカニズムを格子欠陥化学に基づき解明する本研究は、機械的強度特性と格子欠陥の関係を解明する点で、学術的にも価値がある。そこで、本申請研究では、マーカス型高周波グロー放電発光表面分析 (rf-GD-OES) により、LLTO の構成元素である La、Li、Ti、O、及び空格子点の密度分布を調べ、格子欠陥化学に基づき機械的強度特性の変化メカニズムを解明する。

2. 研究方法

市販の LLTO 板 (東邦チタニウム) の表裏に Pt メッシュを押し当て、電極とした。リード線は Pt 線を Pt メッシュにスポット溶接することにより取り付けた。アクリル製のセルに LLTO 板を挟み、 Li^+ 電気透析用セルを形成した。LLTO の両側の二つのセルに LiOH 水溶液を入れ、Pt 電極間に直流電圧を印加し、LLTO 中に一方から他方へ Li^+ 伝導させた。試料を短冊形に切り、万能試験装置による三点曲げ試験で、破壊強度と弾性率を測定した。 Li^+ 伝導させた LLTO 板とその処理を実施しない LLTO 板について、Li、Ti、および O の存在量を、rf-GD-OES で測定した。Ar エッティングと分析とを交互に繰り返し、LLTO の両表面から内部に向かう深さ方向の分布を調べた。電圧印加では、結晶格子中では La や Ti は移動せず、 Li^+ と O^{2-} の LLTO 表面での溶解・溶出と内部での拡散のみが生じる。そこで、Li や O の濃度分布の変化を La や Ti の存在量に対する相対値として決定した。原子価とマスバランスに基づ

き空格子点密度も決定した。

3. 結果

図1に、LLTO板の三点曲げ試験による破壊強度の電気透析前後の違いを示す。破壊強度は、結晶粒径が小さいほど大きく、いずれも電気透析による Li^+ 伝導実施後に約0.5 N(約1割)増大した。

図2に、rf-GD-OES分析による電気透析前後のLLTO板のアノード側及びカソード側の表面付近の深さ毎の Li^+ (左)と O^{2-} (右)の密度を示す。いずれも、電気透析による結晶格子内の移動が生じないTiイオンの密度で規格化してある。電気透析による Li^+ 移動の後に、LLTO板中の Li^+ と O^{2-} の密度は、いずれも40%以上低下した。LLTO板の機械的強度の増大は、当初は、 Li^+ や O^{2-} のサイトの格子欠陥確度の低減に起因すると想定していたが、実際には、格子欠陥密度が増大していた。

格子欠陥密度の増大とそれによる機械的強度増大のメカニズムについては、本年度の研究結果だけでは解明されなかった。

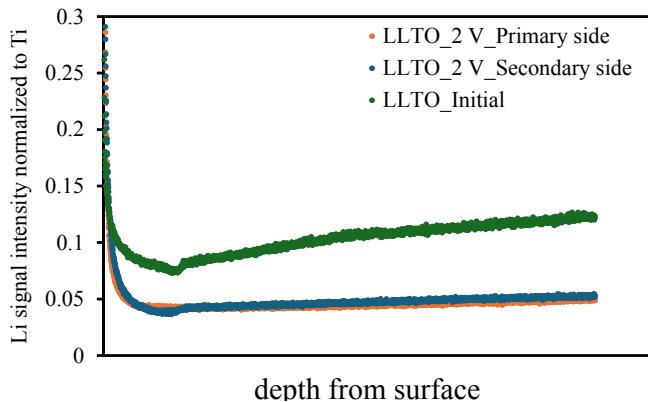


図2 電気透析前後のLLTO板の表面付近の Li^+ と O^{2-} の密度。

4. まとめ

リチウムイオン電解質 $\text{La}_{0.57}\text{Li}_{0.29}\text{TiO}_3$ (LLTO) の緻密焼結体を隔膜とする電気透析による Li^+ 採取において、電気透析によるLLTO板の機械的強度の変化と Li^+ および O^{2-} の原子密度(Li^+ サイトおよび O^{2-} サイトの格子欠陥密度)の変化を調べた。

電気透析により、LLTO板の機械的強度は約10%増大した。電気透析により Li^+ および O^{2-} の原子密度は40%～50%減少した(Li^+ サイトおよび O^{2-} サイトの格子欠陥密度は40%～50%増大した)。一般的に格子欠陥密度の増大は機械的強度を減少させると予測されるため、この矛盾する現象の説明は、本年度の研究結果のみでは説明が困難であり、継続検討が必要である。

[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]

- **K. Sasaki***, J. Yagi, K. Shin-mura, I. Takahashi, K. Mukai, R. Kasada, "Change in mechanical strength of lithium ion conducting solid electrolyte $\text{La}_{0.57}\text{Li}_{0.29}\text{TiO}_3$ by electrodialysis" The 15th International symposium of advanced energy science, Kyoto, Japan. Dec. 10, 2024. (Poster)

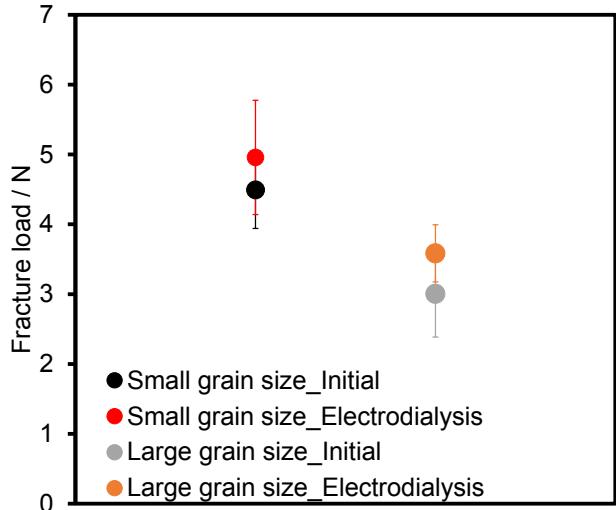


図1 電気透析前後の破壊強度

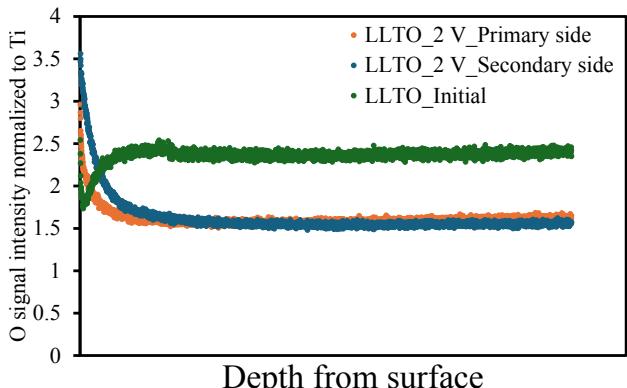


図1 電気透析前後の破壊強度

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¹, 坂口裕樹¹, 薄井洋行¹, 山本貴之², 野平俊之²

¹鳥取大学大学院工学研究科

²京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資源的制約の無い元素で構成された高性能な蓄電池の開発が必須である。リチウムイオン電池 (LIB)は高い作動電圧を有するため、高エネルギー密度化に有利であるが、Li 資源が政情不安定な南米に偏在しており、資源の安定供給に不安を抱えている。他方、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 LIB 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。KIB 用炭素系負極の可逆容量は 250 mA h g^{-1} 程と報告されているが¹、より高容量の新たな負極活物質の開発が望まれている。アンチモン (Sb)は高い理論容量 (660 mA h g^{-1} , $4420 \text{ mA h cm}^{-3}$)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サイクル性能しか得られない。このような欠点を補うためビスマス (Bi)と合金化させた Bi-Sb からなる電極に対して所内研究者の山本貴之助教らが開発した KIB 用イオン液体電解質 $K[FSA]-[C_3C_1pyrr][FSA]$ を適用したところ²、固溶強化により電極崩壊が軽減され優れたサイクル安定性が得られることを見出してきた。また、組成を変えて充放電試験を実施したところ、 $Bi_{0.5}Sb_{0.5}$ が特に優れたサイクル安定性を示すことを明らかにしてきた。しかしながら、KIB の実用化のためにはサイクル性能のさらなる向上が求められている。今年度は K 活性なリン (P)および K 不活性な鉄 (Fe)とコンポジット化させて性能改善を試みた。前者は $Bi_{0.5}Sb_{0.5}$ 電極の利用率を適度に低減させるために、後者は活物質層の支持骨格として機能させるために複合化しており、いずれの場合も電極崩壊を抑制できるものと期待した。

2. 実験

メカニカルアロイング法により $Bi_{0.5}Sb_{0.5}$ を調製した後に、第三元素として P または Fe を追加しメカニカルグラインディング処理を施しコンポジット試料を合成した。得られた試料を活物質に、アセチレンブラック (AB)を導電助剤に、Styrene-butadiene rubber (SBR)を接着材に、Carboxymethyl cellulose (CMC)を増粘剤に用いて活物質: AB : SBR : CMC = 70 : 15 : 5 : 10 の重量比でスラリーを作製し、これ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 $1.00 \pm 0.20 \text{ mg cm}^{-2}$ 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。また、放電容量を 400 mA h g^{-1} で規制して試験した。

3. 結果と考察

Fig. 1 は各コンポジット電極の充放電サイクル寿命を示す。比較として $Bi_{0.5}Sb_{0.5}$ 電極の結果も示す。 $Bi_{0.5}Sb_{0.5}$ 電極は 180 サイクル程で容量減衰したのに対して、P および Fe と

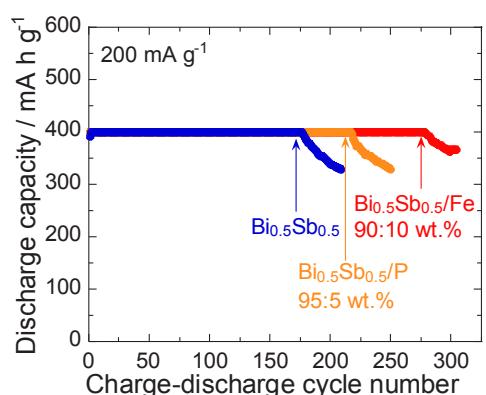


Fig. 1 Cycle life of $Bi_{0.5}Sb_{0.5}/P$ and $Bi_{0.5}Sb_{0.5}/Fe$ composite electrodes. For comparison, the result of $Bi_{0.5}Sb_{0.5}$ -alone electrode is also shown.

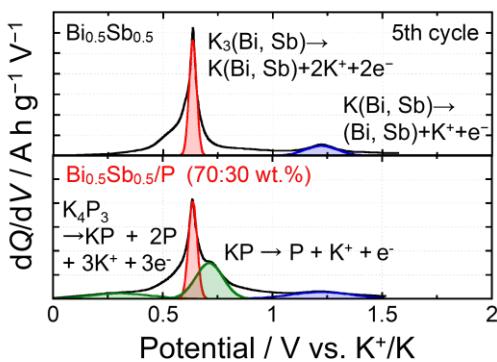


Fig. 2 Differential capacity plot of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ /P electrode.

コンポジット化させた場合はそれぞれ約1.2倍および1.5倍のサイクル寿命を示し期待通り性能が向上した。

Pとのコンポジット化により $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ の利用率を低減できたかを明らかにするために、放電曲線を電位で微分した微分

容量プロットを作成した (Fig. 2)。0.63 および 1.25 V 付近のピークは $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ からの K 放出、0.30 および 0.70 V 付近のピークは P からの K 放出に由来しており、各ピーク面積から利用率を算出したところ粗い通り 10% 低減されていることを確認した。他方、Fe が支持骨格として機能できているかを調べるために参考破壊強度に着目した。これは平面圧子を用いて単一粒子に負荷を加え加圧方向に粒径が 10 % 変形するのに必要な力のことであり、この値が高い程硬いことを意味する。測定の結果、Fe は $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ よりも 1.8 倍高い参考破壊強度を有していることがわかった。

第三元素をコンポジット化させることにより電極崩壊がどの程度抑えられたかを明らかにすべく走査型電子顕微鏡により充放電前後の電極断面を観察した (Fig. 3)。充電前ではコンポジット化に依らず厚さは同程度であったが、100 サイクル後の $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ 電極では大きなクラックが複数生じており厚さも不均質であり電極崩壊が進行していた。これに対して、P や Fe を添加した電極では小さなクラックしか生じておらず崩壊が抑制されていることがわかった。今後は他の第三元素および最適な添加量などについて調べていく予定である。

参考文献

- 1) Z. Jian, W. Luo, and X. Ji, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, *137*, 11566–11569.
- 2) T. Yamamoto, K. Matsumoto, R. Hagiwara, and T. Nohira, *J. Phys. Chem. C*, **2017**, *121*, 18450–18458.

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] 無し
- [受賞、プレス発表等] 無し
- [口頭発表リスト]

- 1) A. Miki, Y. Domi, H. Usui, Y. Yamasaki, T. Yamamoto, T. Nohira, and H. Sakaguchi, “Impact of the Third Element Addition to Bi–Sb Solid Solution on Electrochemical K-Insertion/Extraction Properties”, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, 2024/12/10, Kyoto (Poster).
- 2) A. Miki, Y. Domi, H. Usui, Y. Yamasaki, T. Yamamoto, T. Nohira, and H. Sakaguchi, “Improvement in Anode Properties of Bi–Sb Electrode for K-ion Batteries by the Third Element Addition”, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, 2024/12/10, Kyoto (Poster).
- 3) 山寄夢希斗、道見康弘、薄井洋行、山本貴之、野平俊之、坂口裕樹、 “Bi–Sb 固溶体への第三元素の添加が電気化学的 K 吸蔵–放出特性に与える効果”, 第 65 回電池討論会, 2024 年 11 月 22 日、京都.

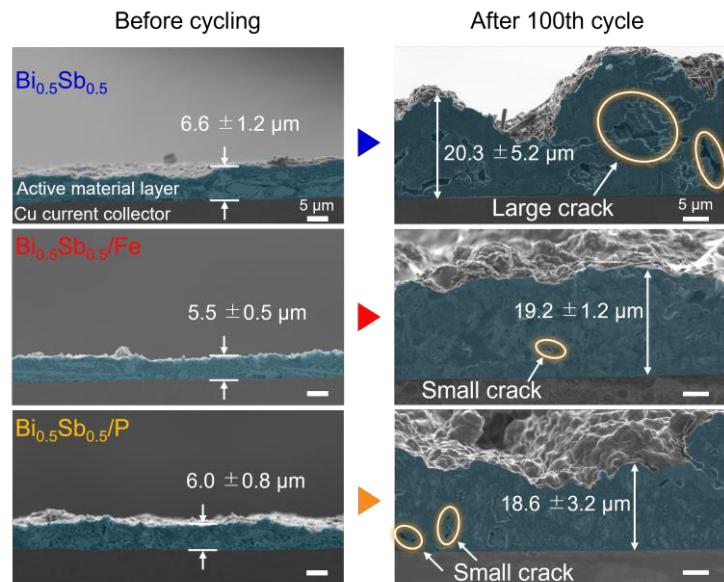


Fig. 3 Cross-sectional SEM image of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ -based electrodes before and after charge-discharge cycling.

核酸が液液相分離によって形成するコンデンセートに 内包される分子の NMR 法による運動性解析

黒川理樹¹, 山置佑大², 清水まこと², 川上愛加², 近藤敬子², 阪本知樹², 永田崇², 片平正人²

¹埼玉医科大学医学部

²京都大学エネルギー理工学研究所

異常に長鎖化した繰り返し配列を持つ核酸が、液液相分離によって液滴やゲルなどのコンデンセートを形成することが近年報告された。これにより、核酸コンデンセートの形成が神経変性疾患発症の直接的な原因である可能性が示唆された。また、核酸から成るコンデンセートは、酵素やリボザイムなどの触媒能を有する生体分子を集積することで、高効率な反応場となることも期待されている。タンパク質から成るコンデンセートについてはその物理化学的な物性が多数報告されているのに対し、核酸コンデンセートについては報告が限られており、その内部に存在する分子に関する物理化学的な理解が不十分である。神経変性疾患発症の分子機構を理解や、高効率反応場の構築を達成するには、コンデンセートの物理化学的特性を明らかにすることが重要である。

これまでに、3本のDNA鎖からなるY字型のDNAナノ構造体（Y-DNA）どうしが、互いに相補な配列を有するsticky end部分で分子間の塩基対を形成し、その結果、核酸コンデンセートを形成することが報告されている（図1）（Sato *et al.*, *Sci. Adv.*, 2020）。本研究では、このY-DNAのコンデンセート内に導入した種々のプローブ分子の運動性、即ち並進運動を反映する拡散係数と回転運動を反映する横緩和時間をNMR法によって解析した。Y-DNAコンデンセート内に導入する分子プローブとして、小分子であるアルギニン(Arg)とアデニル酸(AMP)、高分子として24ヌクレオチドから成り、グアニン四重鎖構造を形成するテロメアDNA(teloDNA)を用いた。

3種類のY-DNA配列を混合、アニーリングすることでY-DNA試料溶液を調製した。アニーリング直後のY-DNA試料にArg、AMP、teloDNAをそれぞれ加えてよく混合し、NMR試料管内で1日静し

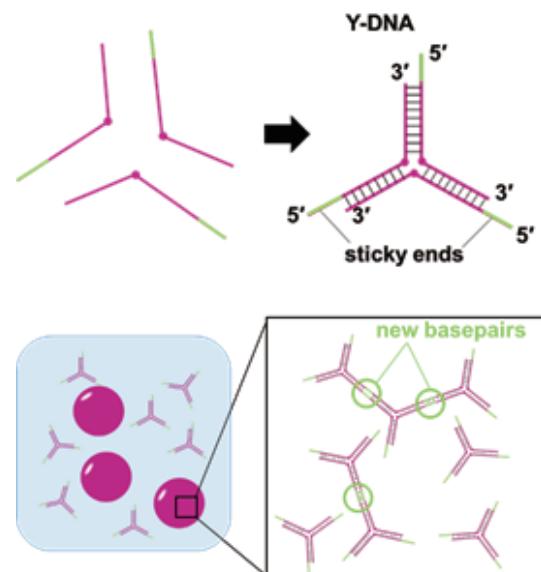


図 1. 3種類のDNA鎖から成るY-DNA構造体。各DNA鎖のsticky endどうしでY-DNAどうしがゆるやかにネットワークを形成することでコンデンセートが形成される。

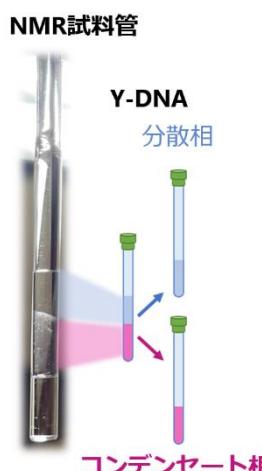


図 2. Y-DNAコンデンセート中にコンデンセート形成には関与しないプローブ分子としてArg、AMP、teloDNAを導入することで、核酸コンデンセート内部での分子の運動性を研究する。各試料は遠心分離によって分散相とコンデンセート相に分離してNMR解析に供した。

た。teloDNA は単独で事前にアニーリングしたものを Y-DNA に加えた。静置後の NMR 試料管を遠心分離し、分散相（上層）とコンデンセート相（下層）に分離し、NMR 解析に供した（図 2、右）。分散相およびコンデンセート相中の Arg、AMP、teloDNA について、Diffusion Ordered SpectroscopY (DOSY) 実験により、並進運動を反映する拡散係数を測定した。また、回転運動を反映する横緩和時間は、1-1 エコー実験を用いて測定した。

まず、プローブ分子の並進運動について評価した。Arg、AMP、teloDNA いずれのプローブについても、分散相中に比べ、コンデンセート相中では拡散係数が小さい値であった（図 3、左）。これは、コンデンセート中では、Y-DNA どうしがネットワークを形成しており、その内部に入り込んだプローブ分子の並進運動を抑制したためと考えられる。

次に、プローブ分子の回転運動について評価した。Arg と AMP については、分散相中に比べ、コンデンセート相中では横緩和時間が短くなっていた（図 3、右）。一方、teloDNA については、分散相中とコンデンセート相中で横緩和時間に明確な違いが見られなかった（図 3、右）。この結果は、Y-DNA コンデンセート中で Arg と AMP の回転運動が抑制されている一方で、より分子量の大きな teloDNA の回転運動がコンデンセートの影響を受けていないことを示している。この理由として、teloDNA がかさ高いのに対し、Arg や AMP などの小分子は Y-DNA の二重鎖構造の主溝などに入りこんでしまうことで、回転運動が制限された可能性が考えられる。本結果は、Y-DNA コンデンセート内に導入された分子の回転運動は、単純に分子量に相関するのではなく、プローブ分子と Y-DNA ネットワークとの相互作用のしやすさに依存している可能性を示唆している。

これらのプローブ分子の運動性に関する知見は、核酸コンデンセートによって区画化された化学反応場の形成とその将来的な応用という観点から興味深い知見である。

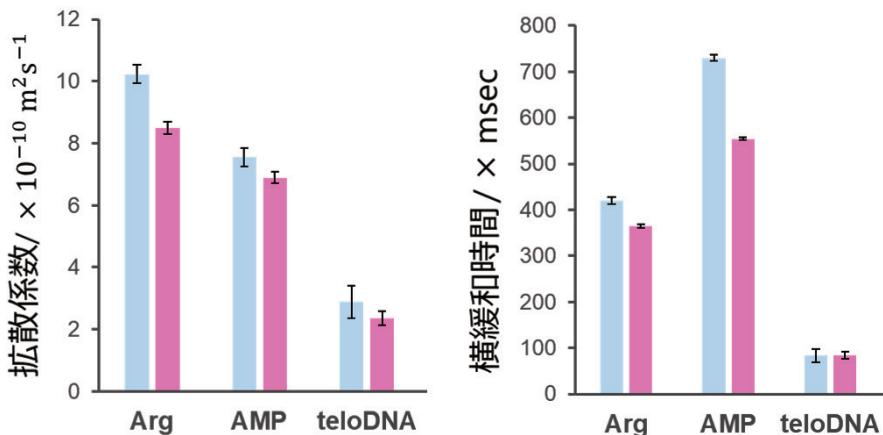


図 3. 分散相(青)とコンデンセート相(マゼンタ)の両方における Arg、AMP、teloDNA の拡散係数(左)と横緩和時間(右)。

[論文発表リスト]

1. Ueda, N., Yoneda, R. and Kurokawa, R., “Identification of Essential Components of RNA Binding Domain of TLS/FUS”, *Biomedical Sciences*, Vol.10,2:30-43, (2024).
doi.org/10.11648/j.bs.20241002.13 (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、「神経変性疾患の発症機構と RNA 結合タンパク質－神経難病の分子病理学的な解析と治療法へのアプローチー」、第 47 回分子生物学会年会、2024 年 11 月 28 日
2. 黒川理樹、「RNA 結合によるアロステリック効果と相分離・沈殿形成の抑制機構を解析する」第 47 回分子生物学会年会、2024 年 11 月 28 日
3. 片平正人、「核酸アプタマーと神経変性疾患の原因タンパク質の相互作用様式と不活化機構」 第 47 回分子生物学会年会、2024 年 11 月 28 日

塗布光照射法を用いた全固体 Li イオン電池の 電極/電解質界面の界面設計に関する研究

高橋伊久磨^{1,2}、出口宇宙¹、久保田紫雄¹、米山麗凜子²、佐々木一哉³、八木重郎⁴

¹千葉工業大学 工学部

²千葉工業大学大学院 工学研究科

³弘前大学大学院 理工学研究科

⁴京都大学 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に向けては、高容量、低成本、高温環境下でも安全、電力平準化に向けた高速充放電可能な蓄電池システムが求められる。本研究では、一般的な正極材料の 2 倍以上の容量を示し、コバルト含有量が少なく低成本であるリチウム過剰層状酸化物 (Li-rich) 正極と、酸化物電解質を組み合わせて、上記性能を満たす全固体電池の開発を目指す。

Li-rich 正極は高容量材料であるが、電解液を用いた系では初回充放電時に活物質表面で酸素脱離する特有の現象が生じ、続く充放電サイクル中に構造変化に伴う容量の低下、電圧低下する劣化が課題であり実用化には至っていない¹⁾。また、酸化物電解質は化学的に安定ではあるが、リチウム酸化物正極/酸化物電解質界面形成時の高温焼成において、リチウムイオン移動に高抵抗となる不純物相である低リチウム組成相が生成される課題が報告されている²⁾。

これまでに我々は、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による活物質、および酸化物電解質薄膜作製技術の検討を行なってきた。その検討の中で、不純物相の生成しない 400°C 程度の低温で電極活物質/酸化物電解質の界面形成条件を見出した³⁾。そこで本研究では、この塗布光照射法を用い、Li-rich 正極活物質表面において酸化物電解質被覆による酸素脱離抑制と、低リチウム組成相のない Li-rich 正極/酸化物電解質界面の作製について検討する。本報告では、Li-rich 正極と同様の層状構造を持つ正極活物質 $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ (NCM) を用い、この NCM と酸化物固体電解質の界面を有するシンメトリーセル (正極/固体電解質/正極) を従来の界面作製法である高温焼成と塗布光照射法で作製し、電気化学評価を行なった内容について報告する。

2. 実験

NCM 正極の前駆体溶液は、出発原料として、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、ポリビニルピロリドン、酢酸、2-プロパノールを用いて準備した。この際に、熱処理、レーザー照射によるリチウム揮発を考慮し、リチウムを 10 wt% 過剰となるように仕込んだ。固体電解質には、基板として LiCGC (株式会社オハラ : LICGCTM 焼結体-01) を用いた。LiCGC 基板に、上記前駆体溶液をスピンドルコート法により複数回塗布、乾燥を繰り返し、LiCGC 基板の両面に NCM 薄膜電極を形成した。その後、高温焼成による作製として 600 °C による熱処理を行ない、シンメトリーセル (HT-セル) を得た。一方、熱処理を行わず、ホットプレートで 400°C に加熱しながら、KrF エキシマレーザーをエネルギー 85 mJ/cm² で照射し、シンメトリーセル (EL-セル) を得た。作製したシンメトリーセルの NCM 薄膜電極に対し、X 線回折法 (XRD) により結晶構造の確認を行なった。また、電気化学評価として、シンメトリーセルに対して電気化学インピーダンス法 (EIS) により抵抗成分について比較した。EIS の測定条件は、開回路の状態で周波数は 1 MHz – 100 mHz、振幅は 100 mV とした。

3. 実験結果と考察

図1に、HT-セルとEL-セルの電極におけるXRDパターンを示す。HT-セルとEL-セルとともに、NCMのピークと基板のLiCGCのピークが重なった同様の形状となっていることから、両電極とともに不純物相のないNCM活物質が作製できた。次に、これらHT-セル、EL-セルに対して、EIS測定により得たナイキストプロットを図2に示す。両セルとともに円弧を含むスペクトル形状となった。この円弧は、NCM/LiCGCの電荷移動抵抗に伴う界面抵抗を示すことが報告されている⁴⁾。EL-セルはHT-セルでは比較して2桁ほど小さい界面抵抗を示している。この要因として、低温で界面を作製していることから、リチウムイオン移動に高抵抗となる不純物相である低リチウム組成相形成が抑制されていることを予想している。

4. まとめ

リチウムイオン電池の活物質/固体電解質界面形成において、従来の作製方法である600°Cの熱処理と、400°Cの低温で作製可能な塗布光照射法により、NCM/LiCGC界面を有するシンメトリーセルを作製した。EISによる抵抗評価から、塗布光照射法で作製したセルの界面抵抗は、熱処理で作製したセルの界面抵抗と比較して2桁ほど低い値を示した。今後は、界面の断面観察、および軟X線発光分光を用いて解析により低抵抗要因を明らかにし、本研究の対象であるLi-rich正極の応用へ展開予定である。

References

- 1) I. Takahashi et al, ACS Appl. Energy Mater. 2, 8118–8124 (2019)
- 2) Y. Kim et al, Chem. Mater. 32, 1928–1943 (2020)
- 3) 渡邊飛翔ら、第64回電池討論会要旨集、3A10 (2023)
- 4) P. Vadhva et al., ChemElectroChem. 8, 1930–1947 (2021)

5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

- Ikuma Takahashi et al., “Design of Electrode/Electrolyte Interface for All Solid State Battery by Photo-Induced Chemical Solution Process” The 15th International Symposium of Advanced Energy Science (2024/12)
- 高橋伊久磨ら「全固体Liイオン電池における電極/電解質界面の現象解析、および界面設計に関する研究」2023年度共同利用・共同研究成果報告会 (2024/3)

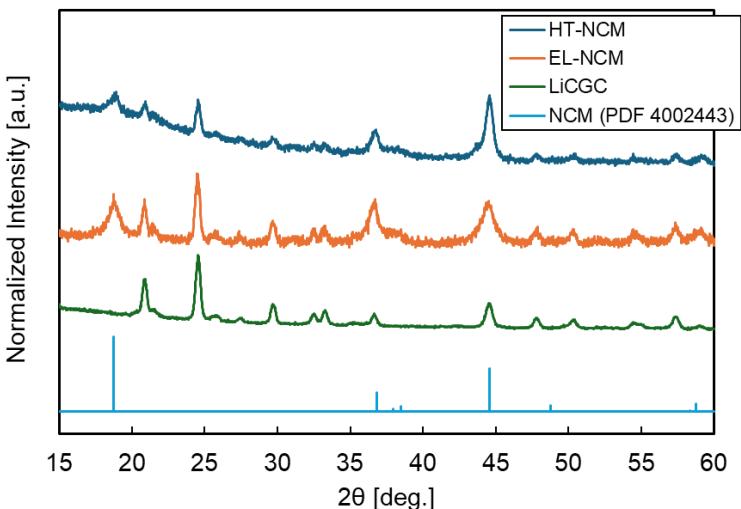


図1 HT-セル、EL-セル、LiCGC、およびNCMのXRDパターン

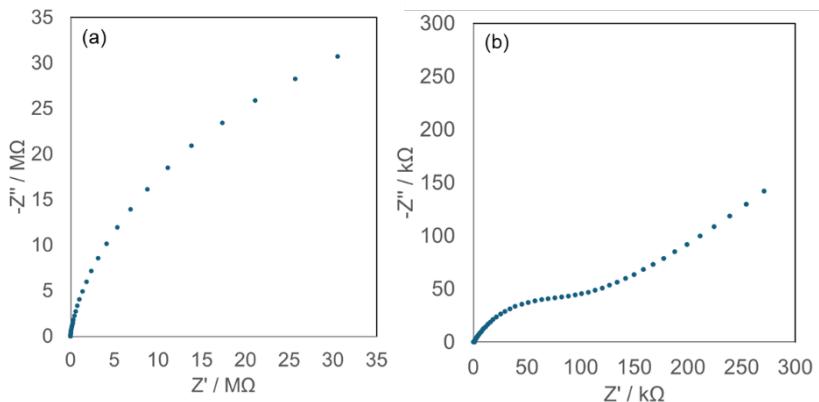


図2 (a) HT-セル、(b) EL-セルにおけるナイキストプロット

リチウムイオン電池の活物質/固体電解質界面形成において、従来の作製方法である600°Cの熱処理と、400°Cの低温で作製可能な塗布光照射法により、NCM/LiCGC界面を有するシンメトリーセルを作製した。EISによる抵抗評価から、塗布光照射法で作製したセルの界面抵抗は、熱処理で作製したセルの界面抵抗と比較して2桁ほど低い値を示した。今後は、界面の断面観察、および軟X線発光分光を用いて解析により低抵抗要因を明らかにし、本研究の対象であるLi-rich正極の応用へ展開予定である。

磁性化細胞を操作する技術の高度化

上杉志成¹, 紀井俊輝², 安保真裕¹, Hyoseok Kim¹

¹ 京都大学 化学研究所

² 理化学研究所, 京都大学エネルギー理工学研究所

●研究目的

これまでに化学研究所の上杉グループは、生体材料であるメラニンの生合成をハイジャックすることで、磁性メラニンを細胞内で合成することに世界で初めて成功した。常磁性チロシン誘導体を細胞に食わせると、チロシナーゼで重合されて磁性メラニンが細胞内で生合成される。常磁性物質が集積すると強く磁場に応答するようになる。細胞内で集積された磁性メラニンによって、細胞は磁気応答性をもち、砂鉄のように磁力線に沿って整列する。本手法をメカノバイオロジーへ利用する上での問題点は、細胞内生合成した磁性メラニンの磁性が一般の磁性材料に比べて弱いことである。この問題を克服するために、本共同研究ではエネ研紀井グループ（現所属：理化学研究所）で強度可変強磁場環境を生成し、上杉グループの方法によって作成された磁性細胞を強力な磁場を用いて遠隔操作することを試みる。さらに、常磁性チロシン誘導体の分子構造のチューニングにより、強い磁性を有する磁性メラニンを効率的に作成する手法の最適化を検討する。

●実験方法

アンジュレータ技術を駆使した強度磁場環境での磁性化細胞培養

紀井グループは、放射光向けの周期交替磁場生成装置アンジュレータの短周期化・強磁場化を目指し、超伝導材料を含む複数の磁性材料の組み合わせと外部ソレノイド磁場の組み合わせによる新しい周期磁場生成法を提案し、永久磁石の限界を超えた次世代アンジュレータの実現にむけて研究を進めてきた[J. Part. Acc. Soc. Jpn, 20, No.1, 10-19, 2023]。本研究では、アンジュレータ技術を細胞磁性化技術へ応用するために、細胞操作に適した局所強磁場環境の実現を目指す。

具体的には以下の実験を実施した。

- 既存の 6 T ソレノイド装置の均一磁場と非均一領域の磁場を活用することで、強磁場から低磁場まで磁性化細胞の磁場強度依存性の網羅的な評価を行った。
- これまでに上杉グループでは市販ネオジウム磁石により外部磁場（～50 mT）を発生させていた。それよりも高強度でかつ制御された磁場を印加する専用装置（細胞と動物に利用可）を開発する。

磁性チロシン誘導体の最適化

メラノーマ細胞をマウスに静脈注射すると肺転移することが知られている。上杉グループでは、以前、その転移の位置を磁場で遠隔操作できるかを調べた。メラノーマ細胞を磁性化し、それらを胸部にネオジム磁石を配置したマウスに尾静脈注射した。残念なことに、磁性化メラノーマ細胞の肺移行性は外部磁場存在下で顕著な増進が見られなかった。マウス体内で磁気制御できるほどの磁性が人工メラニンに備わっていないことが原因として考えられる。メラノーマ細胞に大きな磁性を発現させるためには、高濃度の磁性チロシン誘導体を効率的に細胞内のメラニンに集積させる必要がある。そこで、強磁場発生装置の開発と並行し、新規常磁性チロシン誘導体の合成も行い、高い生体安定性・低細胞毒性を有する誘導体の開発を試みた。

●結果・考察

磁場強度効果の検証

6T ソレノイド装置を用いた強磁場環境での培養の結果、小型ネオジム磁石存在下の CO₂ インキュベーターで培養した磁性細胞に特有の磁気配列は確認できなかった。ソレノイド装置内での培養環境は CO₂ 濃度・温度・湿度ともに CO₂ インキュベーターとは異なる。強磁場環境下での磁気応答性を評価するためには、通常の培養環境と同様の条件で強磁場を発生させる手法を確立する必要があった。

アンジュレータ技術を駆使した小型磁場発生装置の開発

インキュベーター内での強磁場環境の細胞培養実験を可能にするために、アンジュレータ技術を応用した小型磁場発生装置を作製した。Fig. 1 に示すように、リング状の磁気回路を構成しつつ磁極間隔を狭くすることでリング内に強度低下を抑制した磁場を発生させることに成功した。この装置を用いることで、インキュベータ内で細胞に強磁場を印加することができるようになった。理論的には、リング状回路の重層化により磁場強度の増強が可能である。今後、装置のさらなる高度化を行い、強磁場細胞培養を実現する。

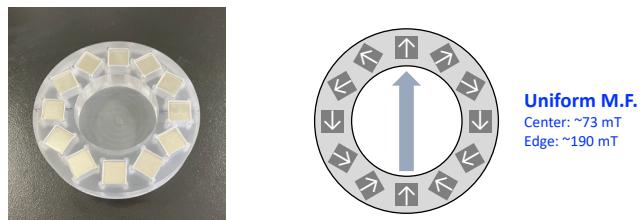


Fig. 1 アンジュレータ技術を応用した磁場発生装置

新規常磁性チロシン誘導体の合成

研究初期で開発した常磁性チロシン誘導体 mYR1 は水中で徐々に分解するため、細胞内メラニンの部分構造の約 9%と置き換わるに留まっている。水中での安定性・水溶性・細胞毒性を改善し、常磁性チロシンの集積化効率を向上させるために、種々の常磁性チロシン誘導体を合成した (Fig. 2)。mYR1 の C 末端のエステル基をアミド基に変換した mYR2 は水中での安定性・水溶性が向上した。さらに、常磁性鉄錯体の部分をサレン錯体からサルフェン錯体に変更した mYR3 は、水中での安定性が大幅に改善された (Fig. 3)。しかし、mYR3 は水溶性が低く、高い細胞毒性を示した。最適化の結果、サレン-鉄錯体のベンゼン環に電子供与性基を導入した mYR6、mYR7 が安定性と水溶性のバランスがよい化合物であった。今後は、さらなるチューニングにより常磁性鉄錯体の磁気特性の向上も検討する。

口頭発表リスト

K. Nishio, H. Kim, M. Uesugi, "Magnetic control of cells by chemical fabrication of melanin", 100 人, iCeMS Retreat 2024, 2024 年 7 月 4 日, 神戸ホテルフルーツフラワー (ポスター)

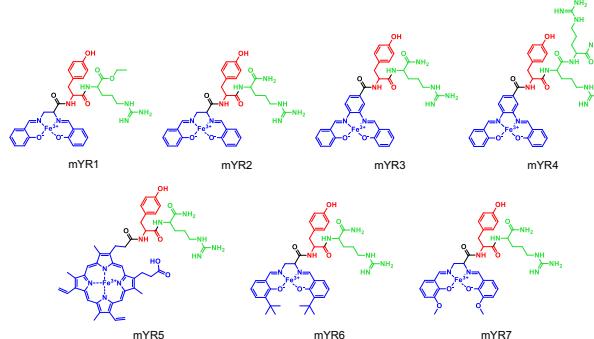


Fig. 2 常磁性チロシン誘導体の分子構造

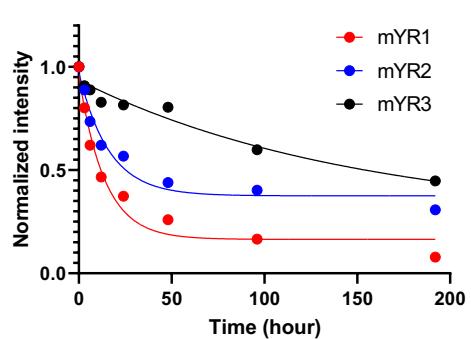


Fig. 3 常磁性チロシン誘導体の安定性

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反応性の解析

松下泰幸¹, 西本泰城¹, 峯岸光¹, 片平正人²

¹ 東京農工大学大学院農学研究院

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的および背景

セロエミッションを達成するために、バイオマスの重要性はますます大きくなっている。しかしながら、バイオマスの中でも膨大な賦存量を誇るリグニンは、地球上の2番目に多い有機物であるにもかかわらず、未だ有効利用がなされていないのが実情である。

リグニンは、モノリグノールと言われる前駆物質がラジカルカップリングをくり返すことにより、非常に複雑な構造を持つ高分子となる。リグニンを有効利用する一例として、化学反応による誘導体化が挙げられる。リグニンの反応性は“リグニン分子末端”と“リグニン分子内”とでは異なると考えられ、特にリグニンのフェノール性末端はリグニン内部よりも反応性が非常に高いと考えられる。しかしながら、リグニン分子の“分子末端”と“分子内”を選択的に識別することが非常に困難であることから、これまでこれらの反応性の差に着目した研究例はほとんどない。

本研究では“分子末端”と“分子内”を識別するため、分子末端のみを選択的に安定同位体標識したリグニン分子モデル化合物を合成し、誘導体化における反応メカニズムを解析することを目的とした。このモデルを用いて分子末端と分子内の反応性を比較することで、新たな誘導体化反応に関する知見を得ることが可能となる。

2. 実験

リグニン分子には2つの末端、すなわち“フェノール性末端”と“コニフェリルアルコール末端”が存在する（図1）。本研究では、安定同位体標識したそれぞれの末端モデル化合物を合成し、その反応性について調べることとした。

2.1. 安定同位体標識フェノール性末端モデル化合物

β -O-4 結合で形成されたリグニンモデルオリゴマーについては、これまでの研究で達成されている¹⁾。本研究ではよりリグニンに近い構造を持つ DHP (Enzymatic dehydrogenative polymer) のフェノール性末端を標識することとした。合成スキームを図2に示した。

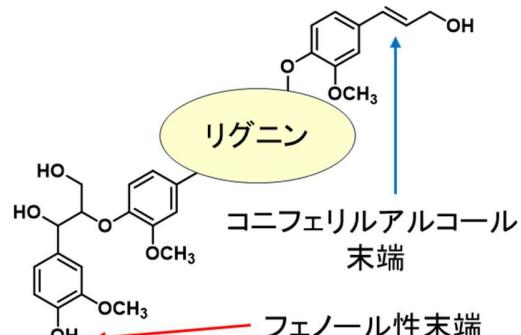


図1 リグニン分子の末端

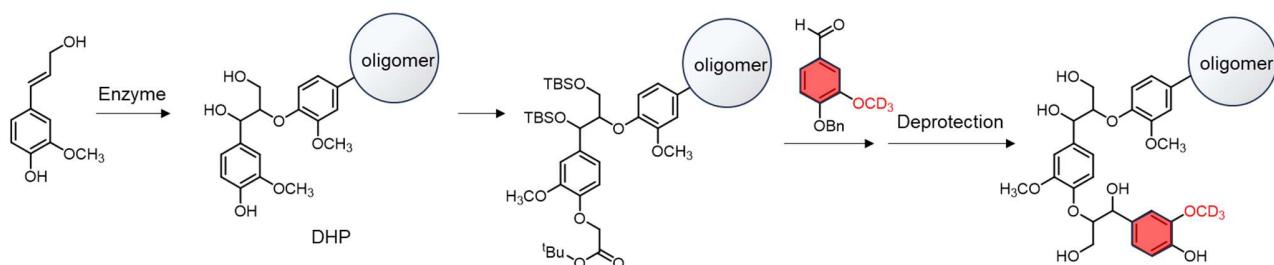


図2 DHP のフェノール性末端標識の合成

現在、鋭意進行中である。

2.2. 安定同位体標識コニフェリルアルコール末端モデル化合物

β 位を ^{13}C 標識したコニフェリルアルコールを酵素的に重合し、二量体を合成した。合成スキームを図 3 に示す。

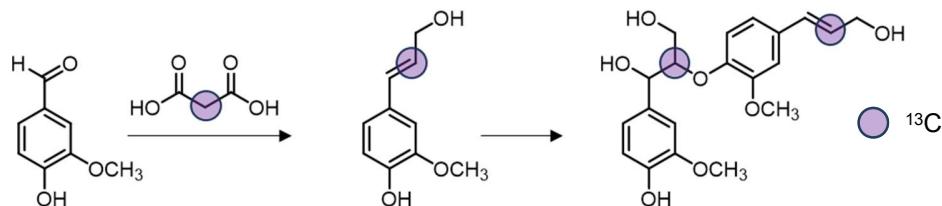


図 3 ^{13}C 標識した二量体リグニンモデル化合物の合成

この合成した標識二量体モデルを酵素的脱水素重合に供し、リグニン生合成時に“コニフェリルアルコール末端”で起きている反応を解析した。

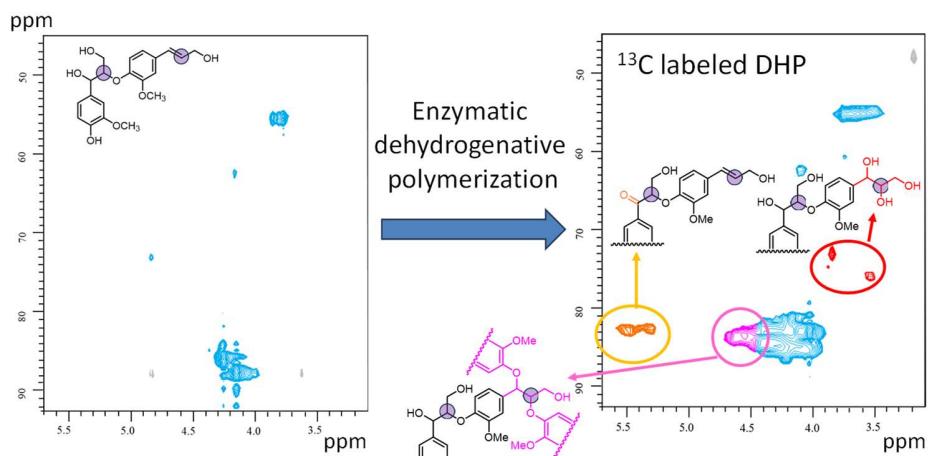


図 4 ^{13}C 標識二量体リグニンモデル化合物の酵素的脱水素重合物の HSQC スペクトル

生成物を HSQC NMR にて解析したところ、コニフェリルアルコール末端では、ヒドロキシ基の付加や α 位の酸化などが起きていることが分かった。

(参考文献)

- 1) T. Nishimoto, K. Takagi, D. Aoki, K. Fukushima, Y. Matsushita. Synthesis of β -O-4 linked model oligolignol with a selectively deuterium-labelled methoxy group at the phenolic terminal unit. Holzforschung, 78(3) 148-153 (2024) DOI: 10.1515/hf-2023-0095

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) 峯岸 光、松下泰幸 “酵素的脱水素重合における β -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）（発表予定）

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¹、黄 泰現¹、八木 重郎²、向井 啓祐³、

¹量子科学技術研究開発機構、²京都大学エネルギー理工学研究所、³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_2) 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、その後、昇温脱離試験（昇温速度：1K/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。先ず、高压水素 (10MPa) で暴露し、温度変化における圧力測定値を図 1 に示した。試験温度によって水素圧力の測定値が異なることから僅かであるが吸蔵されていることが分かった。

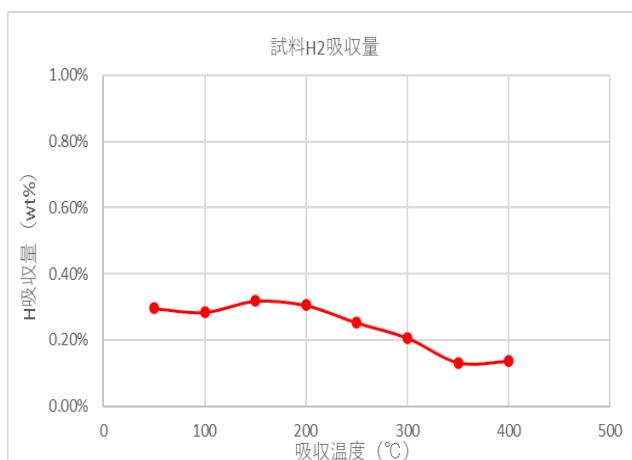


図 1。ベリライドの水素吸蔵量における温度依存性

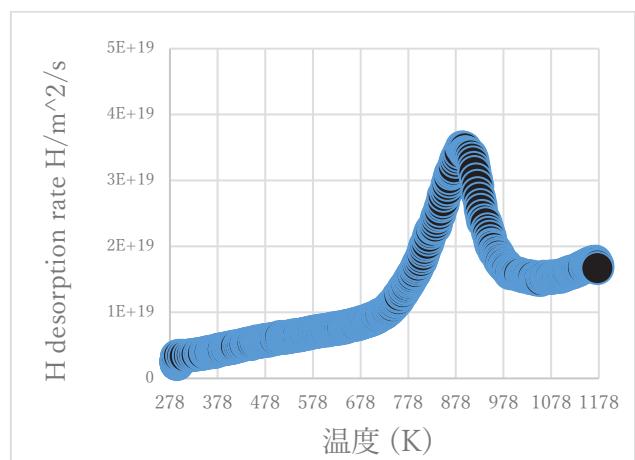


図 2。高压水素暴露したベリライドの昇温脱離ピーク

次に、このベリライドを用いて、昇温脱離試験を実施した結果（図 2）、約 873K の温度で最大ピークを有することが分かった。この高压暴露試験により、ベリライド中に水素が吸蔵していることを実験で再確認できた。またその水素は約 878K で最大放出ピークを有しており、過去の重水素イオン照

射試験[1]の結果(約600K)に比べ、250K程度高い温度で最大ピークを有していることが分かった。、詳細の水素の吸蔵状態等を調査するため、京都大学の施設設備である軟X線発光分光装置を用いて、化学状態の分析を行う予定である。

4. 参考文献

[1] Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Suguru Nakano, Mitsutaka Miyamoto, Hirotomo Iwakiri, Masaru Nakamichi, Deuterium desorption and retention of Beryllium intermetallic compounds for fusion applications, Journal of Nuclear Materials 550 (2021) 152936

5. 発表先

[1] Jae-Hwan Kim, Taehyun Hwang, Yutaka Sugimoto, Hiroyasu Tanigawa, Keisuke Mukai, Juro Yagi, Hydrogen absorption and desorption properties of beryllium intermetallic compounds, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, Dec 10th-13th, 2024

発光性太陽光集光器への応用を指向する蛍光材料の開発

清水正毅¹, 坂口浩司²¹京都工芸繊維大学 分子化学系²京都大学エネルギー理工学研究所

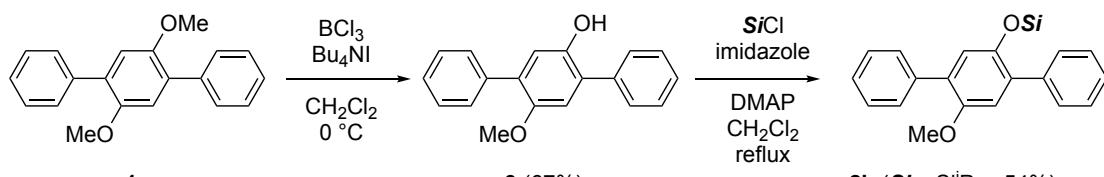
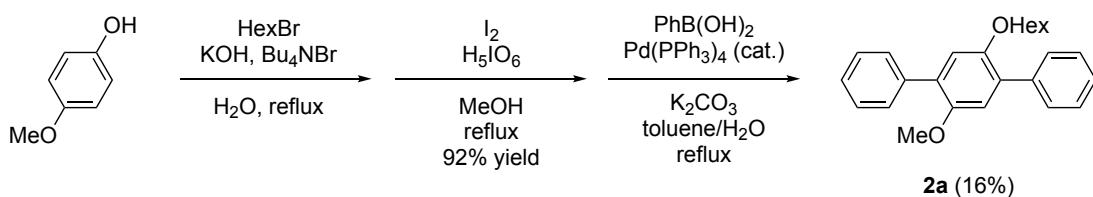
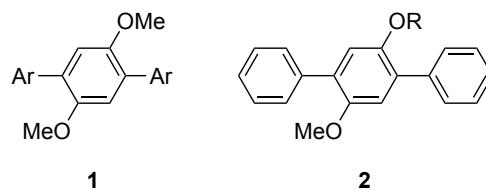
1. はじめに

1970年代にその概念が提唱された発光性太陽光集光器が、近年、低コスト性、環境負荷の低減、軽量化といった利点を有する太陽光エネルギー変換システムとして再評価されている¹⁾。本集光器は、透明高分子材料にドープされた発光材料が太陽光を吸収し、フォトルミネッセンスにより放出された光子を集光器に直結した光電変換素子で電気エネルギーに変換する光電変換デバイスである。すなわち発光ドーパントから放出された光子は、高分子ホストマトリックスの高い屈折率によりプレート内部に閉じ込められ、全反射を繰り返しながらプレート端部に直結された光電変換セルへと導かれ、そこで電気エネルギーに変換される仕組みである。したがって、発光性太陽光集光器のさらなる発展を図るには、高分子マトリックス中において高効率な発光を示す固体発光材料の開発が不可欠である。

我々のグループでは、これまでに固体状態や高分子薄膜に分散した状態で効率よく紫外発光する材料として 2',5'-dimethoxy-*p*-teraryls **1** を開発した²⁾。対応する無置換ターフェニルのほうが **1** よりも固体状態での発光量子収率が低いことから、メトキシ基二つの存在が良好な発光効率の発現に寄与していることが明らかになっている。そこで、このアルコキシ基と発光量子収率の関係に関する知見をさらに得るために、今回、一方のメトキシ基をヘキシルオキシ基やシロキシ基に変えた非対称型 *p*-ターフェニル **2** をデザインし、その合成と物性評価を行った。

2. 結果と考察

はじめに、ターフェニル **2** の合成について述べる。ヘキシルオキシ体 **2a** は、市販の 4-メトキシフェノールをまずヘキシル化したのち、これを二ヨウ素化して対応するジヨードジオキシベンゼンに導き、最後にパラジウム触媒を用いてフェニルボロン酸を鈴木-宮浦カップリングすることにより三工程収率 16%で合成した。シロキシ体 **2b-2e** は、まずテトラブチルアンモニウムヨージド存在下に

**2b** (*Si* = Si*i*Pr₃; 54%)**2c** (*Si* = Si*i*BuMe₂; 26%)**2d** (*Si* = Si*i*BuPh₂; 74%)**2e** (*Si* = SiPh₃; 67%)

ジメトキシターフェニル **1a** のモノ脱メチル化を行ってフェノール **3** を收率 67%で得たのち、これを定法にしたがってクロロシランでシリル化することにより、前頁のスキームに示す收率でそれぞれ合成した。各化合物の融点 (T_m) および 5%熱分解点 (T_d) を下表に示す。融点は 72~146 °C であり、いずれも **1a** の融点 (154 °C) より低い値であった。融点の低下が見られたのは、アルコキシ基二つが異なっていて分子の対称性が低下したためと考察している。一方、熱分解点は 193~281 °C であり **1a** の分解点が 217 °C であることを鑑みると、メトキシ基に代わる置換基にフェニル基が含まれない場合には分子の対称性低下は融点と同様に熱安定性の低下をもたらす一方、メトキシ基に代わる置換基がフェニル基含有シロキシ基である場合に熱安定性が **1a** よりも向上したのは、対称性低下よりも分子量増大の効果のほうが支配的に働いたためと考えている。

溶媒ジクロロメタン中での **2** の吸収極大波長 (λ_{abs}) およびモル吸光係数 (ε)、および、ジクロロメタン溶液、固体状態、およびシクロオレフィンポリマー Zeonoa フィルムに分散した状態での発光特性を下表に示す。いずれの状態においても、発光極大波長 (λ_{em}) は 369~389 nm であり、アルコキシ基二つを異なるものとしても紫外発光を示した。固体状態およびポリマー中での蛍光極大波長は、ジクロロメタン溶液のそれらと比較していずれも短波長化していた (**2a** の固体状態を除く)。これらの結果は、固体状態やポリマー薄膜に分散した状態の **2** は、電子的な分子間相互作用がほぼ生じていないことを示唆している。蛍光量子收率はいずれの状態においても **2a** が最高値を示した。したがって、発光効率の観点からはシロキシ基よりもヘキシルオキシ基を用いるほうが好ましいことがと判明した。

Table. Thermal and photophysical data of **2**.

2	2a	2b	2c	2d	2e
T_m (°C)	72	78	89	146	126
T_d (°C)	217	209	193	259	281
λ_{abs} (nm)	324	318	315	318	315
ε (M ⁻¹ cm ⁻¹)	12000	9900	6700	8900	6600
In CH ₂ Cl ₂					
λ_{em} (nm)	384	382	379	375	375
Φ	0.42	0.30	0.35	0.33	0.31
In the solid state					
λ_{em} (nm)	389	375	377	369	370
Φ	0.29	0.21	0.23	0.22	0.16
In Zeonoa film					
λ_{em} (nm)	377	372	370	370	369
Φ	0.30	0.28	0.20	0.21	0.16

3. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」

〔論文発表リスト〕

Shimizu, M.; Nishimura, K.; Mineyama, M.; Terao, R.; Sakurai, T.; Sakaguchi, H. "Bis(tricyclic) Aromatic Enes That Exhibit Efficient Fluorescence in the Solid State." *Molecules* **2024**, 29 (22), 5361.

〔口頭発表リスト〕

Masaki Shimizu, Hiroshi Sakaguchi "Development of Fluorophores Directed toward Application in Luminescent Solar Concentrators", The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, 2024 年 12 月 10 日, Kyoto University (Uji) (ポスター)

【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) 京都大学エネルギー理工学研究所 ゼロエミッショングエネルギー研究拠点 2023 年度報告書.

原子炉を延命させる熱処理条件の導出（3）

松川義孝¹, 藤枝秀斗¹, 牟田浩明², 森下和功³, 藤内聖皓³

¹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

²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

³京都大学 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3000億円から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。このような状況を鑑みた経団連に後押しされて、規制庁は昨年、原子炉の運転期間延長の制約を見直した。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。これはかなり大きな構造物であるため、それをオンラインで熱処理することは不可能であると思われがちだが、この問題については最近ロシアで技術的な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¹⁻²⁾。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³⁾。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。本研究の目的は、それを学術的な観点から解明することである。

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Ni₁₆Si₇Mn₆などの化合物になるが、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の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）⁴⁾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。析出物が化合物であったとしても、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 ($\text{Ni}_{16}\text{Si}_7\text{Mn}_6$) について検討した。この G 相は既往研究のもの ($\text{Ni}_{16}\text{Si}_7\text{Ti}_6$) とは組成が異なる。拡散対の実験によって、ロスマトムの熱処理条件でも分解して再固溶することや、その際の拡散係数が拡散データベースに記載されている値（トレーサー拡散係数）よりも数桁大きいことを明らかにした。さらに、実験結果を熱力学シミュレーション（Thermo-calc）と比較することによって、シミュレーションでは最新のデータベース（TCNI12, TCFE13/MOBFE8）を使用しても化学拡散や融点を大幅に過小評価してしまうことを明らかにした。

今年度は主に Γ_2 相 N_3SiMn_2 について検討した。 Γ_2 相は圧力容器の照射材に G 相と同程度頻出すると報告されている。拡散対の実験によって、分解・再固溶する臨界温度がロスマトムの熱処理条件よりもかなり高い（750°C）ことを明らかにした。これは圧力容器に Γ_2 相が析出した場合、ロスマトムの熱処理では除去できない可能性を示唆している。運転期間 30 年の炉ではこの熱処理が有効であることから判断すると、この時点では析出物が溶質元素クラスターのままであると考えられる。

圧力容器の析出物はナノサイズであるため、拡散対の実験で導出した再固溶温度よりも低い可能性がある。但し、このギャップの大きさを理論計算で導出することはほぼ不可能である。そのため、Ti の G 相についても拡散対を作製し、ギャップの大きさを実験で定量評価することを試みた。拡散対を作製すること自体は成功したが、再固溶温度については未だ検討中である。インゴットに含まれる不純物（炭素）の影響で、G 相の分解挙動が複雑になることが判明した。拡散対では 850°C で Ni と Si が溶出したが、Ti は溶出しなかった。この原因を EPMA で調査した結果、この温度になると界面に炭素が偏析することが判明した。おそらく Ti が炭化物 TiC を優先形成するため、Ti の溶出が阻害されていると考えられる。拡散対の場合に Ti の G 相が再固溶する臨界温度が 850°C であるのなら、ナノ析出物とのギャップは 100°C ということになる。

この実験に用いた Ti の地金は純度が低かった（99.7%）ため、その後高純度 Ti（99.99%）を入手して再実験を行ったが、結果は同じであった。炭素が混入した原因是、アーク溶解の電極（炭素棒）か、或いはアーク溶解炉の真空ポンプ（通常は油拡散ポンプ）であると考えられる。今後は、アーク溶解以外の方法（真空電子ビーム溶解）や、油拡散ポンプをターボポンプに換装してインゴットを作製し、それを用いて再実験を行う予定である。

【参考文献】

- 1) <https://www.neimagazine.com/features/featurerewnewal-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
- 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 2 件口頭発表（内 1 件は招待講演）
IGRDM2024 in Oxford, UK (Invited), NuMAT2024 in Singapore
- 3-5) 国内会議にて 2 件口頭発表、1 件ポスター発表
原子力学会 2024 年秋、金属学会 2024 年秋、原子力学会三部会合同夏季セミナー 2024 (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 恵子¹, 中田 栄司²

¹産業医科大学 医学部、²京都大学 エネルギー理工学研究所

細胞内的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要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充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テンパク質(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

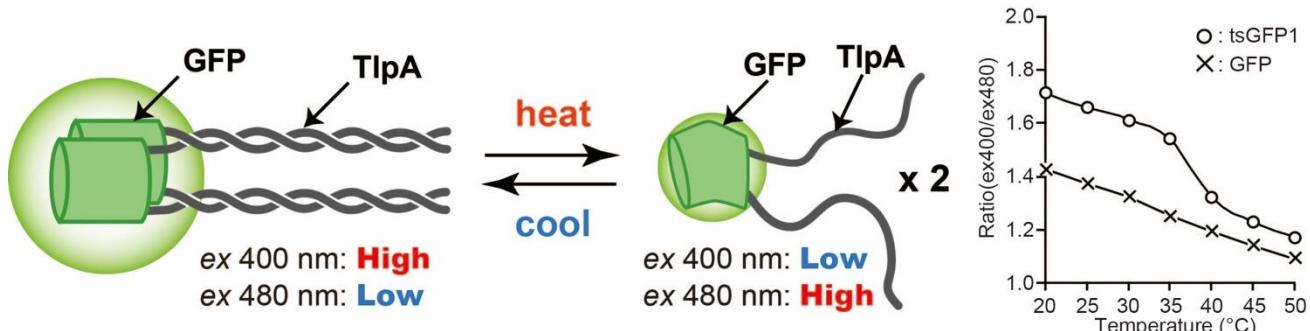


図 1 tsGFP1 の模式図。TlpA2 量体の温度依存的な結合解離に伴い GFP の蛍光特性が変化し、37°C付近の温度変化を鋭敏にできる(Kiyonaka et al., Nature Methods, 2013 より一部改変)。温度が上がるとレシオが下がる。

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(図 1 左)。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(図 1 右)。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できる。

他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。これらのセンサーを用いて、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さを示唆している。申請者らはさらに、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)。

本研究では、細胞内グルタチオン枯渢時や細胞外に N-アセチルシステイン・過酸化水素などの酸化剤・還元剤が存在する中でのミトコンドリアの活性を評価し、その際の熱の収受を温度変化として定量化することを試みた。tsGFP1-mito を HeLa 細胞に過剰発現させて 2 mM Ca²⁺溶液灌流中にレドックス刺激を与え、蛍光 Ratio 値の変化を観察することでミトコンドリアでの温度変化を評価した。グルタチオンは膜透過性が低いため、低分子で強い抗酸化能を持つ N-アセチル-L-システイン (NAC) を用いた。また、グルタチオン合成酵素阻害剤の L-ブチオニン-(S,R)-スルホキシイミン (BSO) を前処置して細胞内グルタチオンを枯渢させることで、あらかじめ酸化状態に傾いた細胞で評価を行った。BSO 処置した細胞に NAC を灌流溶液中で処置すると、次第に ex380/ex480 の Ratio 値上昇(温度低下)が見られた。このことから、グルタチオン枯渢により消去されず過剰に蓄積した活性酸素種が、細胞内のタンパク質や脂質、核酸などの生体成分を酸化することで熱を生じさせるが、NAC 投与による抗酸化作用で急激に酸化が抑制、ならびに酸化物が還元されたことで温度が低下した可能性が考えられる(図 2 左)。

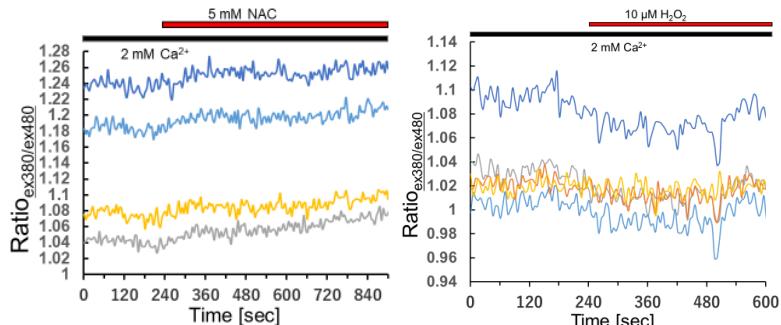


図 2 tsGFP1-mito を発現させた HeLa 細胞への NAC 刺激 (左)、H₂O₂ 刺激 (右) による Ratio 値変化。

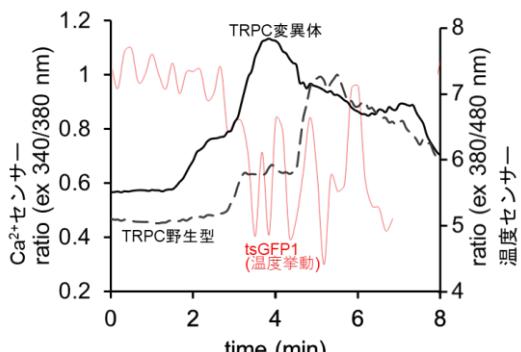


図 3 tsGFP1 と fura-2 を用いて測定した、細胞内温度変化に伴う野生型と変異型 TRPC チャネルを介した Ca²⁺流入の経時変化。

存的な TRPC のチャネル活性の経時変化を評価した(図 3)。その結果、tsGFP1 で計測した細胞内温度の上昇に伴って細胞内の Ca²⁺濃度が上昇し、その Ca²⁺流入量が TRPC 変異体では亢進していた。患者由来の点変異が、チャネルの温度感受性を亢進している可能性が考えられる。今後、この Ca²⁺濃度の上昇が細胞内エネルギー産生に与える影響を、ATP センサーなどを併用して検討する。

[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]

○Sakaguchi R, Nonaka R, Nakata E, Mori MX, "Elucidation of the highly efficient energy production system utilized by intracellular organelle". Biothermology Workshop 2024, 岡山理科大学、24/12/26-27 (ポスター発表)

次に、BSO の前処置なしの細胞へ過酸化水素 (H₂O₂) で酸化刺激を加えると、徐々に Ratio 値低下(温度上昇)が見られた。このことから、H₂O₂によって細胞内に熱が蓄積したと考えられ、先ほどの還元刺激による温度低下の結果も踏まえると、レドックス状態の変化が細胞内の温度上昇・低下に対応することが示された(図 2 右)。以上の結果から、細胞内のレドックス状態の変化に伴い温度変化が生じることが示唆された。

さらに、tsGFP1-mito を用いて、細胞内の温度変化に伴うイオンチャネルの機能制御を観察した。TRP チャネルファミリーは非選択性カチオンチャネルであり、そのうち TRPV や TRPM、TRPA は温度依存的にチャネルが開き、細胞内に Ca²⁺を流入させることで種々の細胞応答を司ることが報告されている。しかし、同じファミリーの一員であり、心臓、肺、腎臓などの疾患の原因遺伝子でもある TRPC は、顕著な温度応答性が知られていない。そこで、TRPC チャネルと腎疾患患者から同定された TRPC 点変異体を HEK293 細胞に過剰発現させ、蛍光性細胞内 Ca²⁺指示薬、fura-2 で温度依

ウイルス蛋白質由来ペプチドと細胞増殖関連蛋白質複合体の NMR構造解析

楠英樹¹、小林直宏²、永田崇³

¹ 国立感染症研究所、²理化学研究所、³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景

二酸化炭素の排出を抑えて地球温暖化を防止するためには、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て、二酸化炭素の削減を目指すことが重要である。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、今後のクリーンエネルギーの獲得のために必須である。その際、核磁気共鳴（NMR）法は、新規バイオ技術を利用・開発する上で必要不可欠である。ウイルス蛋白質の中には宿主因子と直接相互作用して、細胞増殖を制御できるものがあり、そのドメインや部分ペプチドもまた全長と同様に細胞増殖制御因子と結合し活性化できることが知られている。そこで、そのようなウイルス蛋白質の部分ペプチドを適切に利用することができれば、植物の成長を制御できる新規のバイオ技術の開発に繋がる可能性が高い。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ことが知られている。我々は、HBx の BH3 領域にある Trp120 と Leu123 が LC3B との結合に重要であると予想した。そこで、本研究では、HBx BH3 領域を含む部分ペプチドが LC3B と直接結合できるかを GST プルダウンアッセイ、等温滴定カロリーメトリー（ITC）解析、核磁気共鳴（NMR）解析で調べた。その結果、HBx 部分ペプチドが LC3B と直接結合できることが分かった。さらに、NMR による HBx 部分ペプチドと LC3B の複合体構造決定を試みたので報告する。

2. 方法

【サンプル調製】HBx BH3 領域ペプチドの残基 116-127[HBx(116-127)]、その W120A/L123A 変異体 [HBx(116-127)-W120A/L123A]、LC3B を GST 融合蛋白質発現系で調製した。GST プルダウンアッセイのため、GST-HBx(116-127) とその W120A/L123A 変異体を GST アフィニティーカラムで精製した。NMR と ITC 解析のため、非標識体と ¹³C/¹⁵N および ¹⁵N で安定同位体標識した HBx(116-127) と LC3B をそれぞれ調製した。HBx(116-127) と LC3B は下記のように調製した。GST-HBx(116-127) と GST-LC3B 融合蛋白質を GST アフィニティーカラムで精製した後、トロンビンで各 GST 融合蛋白質から HBx(116-127) 又は 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。

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

【NMR 実験】HBx(116-127) が LC3B のどこに結合するか及び、HBx(116-127) と LC3B の複合体構造を決定するため、Bruker 社 800 MHz AVANCE と 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% D₂O、0.02-0.1 mM DSS とした。HBx(116-127) が LC3B のどこに結合しているかを解明するため、¹⁵N で安定同位体標識した LC3B (0.1 mM) に非標識の HBx(116-127) を 0、0.5、1、2、4 等量となるよう添加して LC3B のアミドシグナルの移動を観測した。さらに、複合体構造決定のために、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 情報を用いて、CYANA で構造計算を行い、AMBER12 での精密化を試みた。

3. 結果および考察

最初に、GST-HBx(116-127)、その W120A/L123A 変異体、LC3B を用いて GST プルダウンアッセイを実施した。その結果、LC3B のバンドは GST-HBx(116-127)のみ観測された（データ未定示）。この結果は、HBx(116-127) の Trp120 と Leu123 が LC3B との結合に重要であることを示唆した。次に、ITC 解析で各

サンプルの LC3B に対する K_d 値を求めた。その結果、HBx(116-127) は K_d が約 0.5 μM で、W120A/L123A 変異体は K_d が約 7.6 μM で LC3B に結合することが分かった（データ未定示）。さらに、 ^{15}N で安定同位体標識した LC3B に非標識体 HBx(116-127) を 0~4 等量となるよう添加し、NMR 化学シフト摂動実験を行った。その結果、LC3B の 2 つの疎水性残基で形成されたポケットに HBx(116-127) が結合することが示唆された。総合して、我々の結果は HBx(116-127) が Trp120 と Leu123 を介して K_d が約 0.5 μM の強さで LC3B の疎水性表面に結合することを示した。

HBx(116-127) が上記のように LC3B と結合していることを解明するため、NMR による複合体構造解析を CYANA で実施し、現在、CYANA で計算した構造を AMBER12 で精密化しているところである。図 1A に CYANA で得られた複合体構造を示した。その結果、良く収束した HBx(116-127) と LC3B の複合体構造を得ることができた。この複合体構造から、HBx(116-127) 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。この複合体構造は NMR 化学シフト摂動実験結果とよく一致していた。HBx は細胞増殖制御因子 Bcl-x_L とその BH3 領域の 3 つの疎水性残基（Trp120、Leu123、Ile127）を介して K_d が約 27~92 μM で結合する。興味深いことに、HBx ペプチドは Bcl-x_L と結合したとき α ヘリックス構造を形成する（図 1C）。一方で、LC3B に結合した HBx ペプチドの構造は「伸びた構造」を示した。このことから、このペプチドは結合する相手分子に依存して「形」を変化できる能力を持つことが示唆された。HBx/LC3B 相互作用は細胞増殖を促すことから、今後は、本複合体構造をスタートとして、LC3B をより強く活性化できる HBx ペプチドの開発及びその開発方法の確立を目指す。そして、「生物の成長を促す機能性ペプチドの創生」のバイオ技術基盤の構築につながるよう努める。

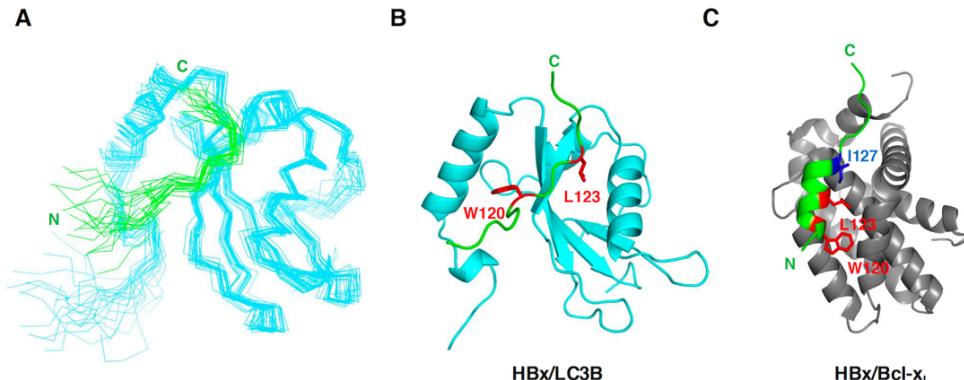


図 1 (A) HBxペプチド/LC3Bの20個のCYANAで計算した複合体構造と (B) エネルギーの最も低い複合体構造をリボン図で表示。 (C) HBxペプチド/Bcl-x_Lの複合体構造をリボン図で表示 (PDB 5B1Z)。

4. 「論文発表リスト」

H. Kusunoki, T. Sakamoto, N. Kobayashi, T. Kohno, K. Wakamatsu, and T. Nagata (2024) Structural insights into the interaction between the C-terminal-deleted BH3-like motif peptide of hepatitis B virus X protein and Bcl-x_L , *Biochemistry* 63, 632-643.

5. 「口頭発表リスト」

楠英樹、小林直宏、若松馨、田中俊之、永田崇 安定同位体標識した HBV X 蛋白質由来ペプチドの簡便な調製法と NMR による宿主蛋白質との弱い相互作用系への応用 第 24 回日本蛋白質科学会年会、2024 年 6 月、札幌 ポスター発表

H. Kusunoki, T. Kobayashi, N., and T. Nagata “NMR Structural Analysis of Cell Growth-Related Protein in Complex with Viral Protein-Derived Peptide” The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, December 10-13 2024, Institute of Advanced Energy, Kyoto University ポスター発表

溶融塩を用いた水素同位体分離技術の研究

松島 永佳¹, 名合 虎之介¹, 法川 勇太郎², 野平 俊之²

¹ 北海道大学大学院工学研究院

² 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い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、溶融塩中では、水溶液系とは全く異なるハイドライドイオン(H⁻)やデューテライドイオン(D⁻)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、高温系では工場の廃熱を利用して反応に必要な消費エネルギーを低減することもできる。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、溶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 溶融塩系で実験を行った。実験前に、LiCl と KCl をそれぞれ 453 K で 72 時間以上乾燥させ、引き続き 723K で 24 時間真空乾燥させた。試薬の混合比率を LiCl:KCl = 58.5:41.5 mol% とし、673 K で溶融させた。溶融塩中に LiH, LiD をそれぞれ 1 mol% となるよう添加した。電解は三電極方式で行い、対極にらせん状に折り曲げたアルミ線、疑似参照極として Ni ワイヤーを使用した。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配管の先端に蓋をするように隙間なく密着させ管内をポンプで約 20 kPa まで減圧した。パラジウム膜を透過して、ステンレス配管から排出された水素ガスを四重極質量分析計(QMS)にて分析し、ガス中の組成比(H₂ : HD : D₂) を調べた。

3. 結果および考察

LiCl-KCl 溶融塩に LiH, LiD をそれぞれ 1.0 mol% 添加して、パラジウム電極を用いて電解(1.2 V vs. Li⁺/Li)を行った。Fig.1 に、その際の電流値変化を示す。電流は 10-40mA の一定範囲内で増減を繰り返した。これはパラジウム電極表面上で発生した水素ガス気泡の成長・脱離により、電極の有効表面積が増減したためと考えられる。また電解で発生した水素ガスはパラジウム電極を透過させた後に QMS に導入し、ガスの組成比を分析した(Fig. 2)。縦軸のイオン化電流の比は、ガス中の各成分の分圧の比に一致する。電解により H₂(赤)、HD(青)、および D₂(緑)の混合ガスが発生し、電解開始 11 時間後にガスの組成比が安定した。

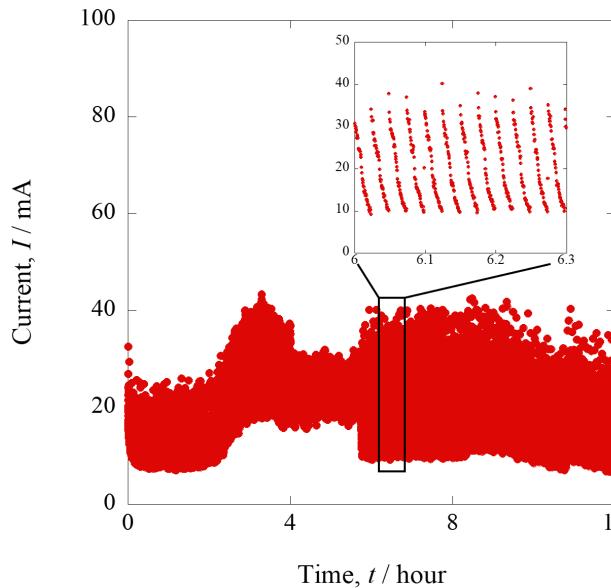


Figure 1 Time variation of current in constant potential electrolysis in LiCl-KCl-LiH-LiD molten salt with palladium electrode.

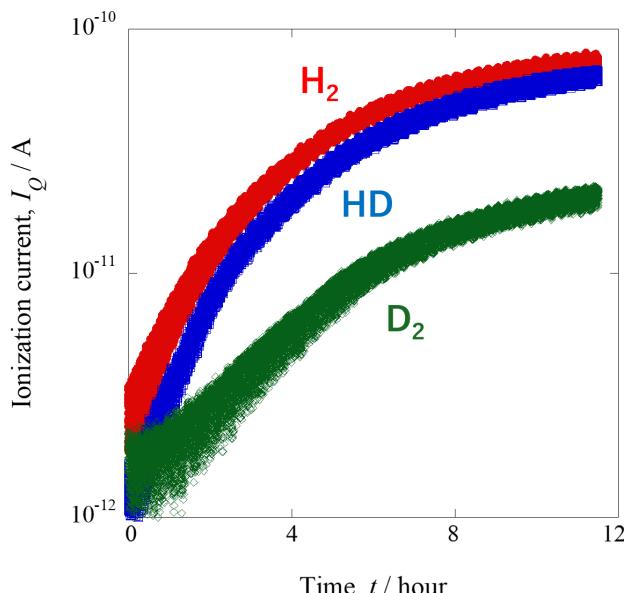


Figure 2 Time variation of ion currents in mass spectrometer for measuring hydrogen gases from the stainless tube with molten salt.

安定までに時間を要した理由は、水素ガスがセルや配管内部の Ar ガスを置換したことによる。H₂ ガスが最も多く発生し、HD ガス、D₂ ガスの順に割合が高かった。また、本実験では過去の実験と同じように、分離性能の指標として分離係数 α を以下によって算出した。

$$\alpha = ([H]/[D])_g / ([H]/[D])_i$$

式中の [L] はそれぞれの原子濃度を示し、g はパラジウム電極を透過して得られたガス、i は溶融塩を意味する。 α が 1 より大きい時、発生したガスに H が濃縮され、値が大きくなるほど分離性能が高くなることを示す。本研究では Fig.2 で得られたイオン化電流の比から $([H]/[D])_g$ を計算し、 $\alpha \approx 2$ が得られた。これは、発生ガス中に H が濃縮されたことを意味する結果となった。以前行った白金黒電極を用いた電解実験では、分離係数は $\alpha \approx 1.6$ であった。したがって、本実験では透過膜を使うことでより効率的な同位体ガス濃縮の可能性が分かった。

「論文発表リスト」

1. Toranosuke Nago, Yutaro Norikawa, Kenji Harada, Mikito Ueda, Hisayoshi Matsushima, Toshiyuki Nohira, “Deuterium Isotope Separation using LiCl-KCl-LiH-LiD Molten Salt”, , , 042502 (2024).

「口頭発表リスト」

1. Toranosuke Nago, Yutaro Norikawa, Hisayoshi Matsushima, Toshiyuki Nohira, “Study of Hydrogen Isotope Separation Technology by Molten Salt”, 17, *The 15th International Symposium of Advanced Energy Science*, 10 December, 2024, Uji, Japan, (Poster Presentation).

Investigation on Molecular Structure Changes of Polylactide and Polylactide-based Materials Induced by Mid-infrared Free Electron Laser

Sakhorn Rimjaem¹, Nuttawat Khammata¹, Nuttawut Khammata², Monchai Jitevisate³, Jutamas Kongsuk², Hideaki Ohgaki⁴, Winita Punyodom², Sukrit Sucharitakul¹, Kitttipong Techakaew¹, Heishun Zen⁴

¹ Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University

² Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University

³ School of Physic, Institute of Science, Suranaree University of Technology

⁴ Institute of Advanced Energy, Kyoto University

1. Outline of Research Project

The objective of this project is to study the molecular structural and properties changes in polylactide (PLA) and PLA copolymers after irradiation with mid-infrared free-electron laser (MIR-FEL) at Kyoto University. Synthetic polymers were irradiated using specific MIR-FEL wavelengths of 8.4, 5.8, and 5 μm and adjustable intensities. The Fourier transform infrared (FTIR) spectrum showed no significant changes, indicating minimal alterations in the chemical structure. However, analysis using X-ray Diffraction (XRD) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) revealed a significant increase in the polymer's crystallinity, particularly at wavelengths of 8.4 and 5.8 μm , which indicates that MIR-FEL radiation can stimulate molecular reorganization, resulting in more ordered structural arrangements. This reorganization enhances the polymer's mechanical properties and strength.

2. Introduction

Polylactide (PLA) is one of the most extensively studied biodegradable polymers for biomedical applications due to its environmental benefits and versatility. Derived from renewable resources like corn or sugarcane, PLA supports low-emission agricultural practices and contributes to a zero-emission society. A key application of PLA is cell encapsulation, where live cells are enclosed in a medium for therapeutic purposes. PLA and its copolymers are biodegradable and biocompatible, creating a tissue-like environment critical for cell survival.

However, PLA has limitations, including brittleness and poor shape stability. Under certain conditions, it may shrink and expel water, making it unsuitable for long-term encapsulation of biomolecules or sustained pharmaceutical delivery. Efforts to enhance PLA's performance include copolymerization, blending, and crosslinking. Crosslinking can be achieved through irradiation using electron beams, gamma rays, or UV light. While irradiation can improve material properties, it also triggers side reactions like branching and chain scission, making it challenging to control the resulting crosslinked structures. Managing these effects is crucial to optimizing PLA for advanced biomedical applications.

3. Methodology

This research investigates the effects of MIR-FEL irradiation on PLA and its copolymers, including poly(lactide-co-caprolactone) (PLC) and poly(lactide-co-glycolide) (PLG), and poly(lactide-co-glycolide-co-caprolactone). The PLA, PLC and PLG were synthesized in forms of resin and film at Chiang Mai University (CMU) and the FTIR spectroscopic measurements and other characterization techniques were conducted at CMU to establish baseline properties and identify expected changes after MIR-FEL irradiation. It was observed that the spectrum peaks in the fingerprint region of the samples align well with the wavelength range of the MIR FEL at KU. These peaks include CH_3 , CH_2 , CH stretching modes at wave numbers of $2,770 - 3,060 \text{ cm}^{-1}$ (3.6 – 3.3 micron), CH_3 , CH_2 , CH bending modes at wave numbers $1,220 - 1,560 \text{ cm}^{-1}$ (8.2 – 6.4 micron), C=O stretching mode at a wave number $1,760 \text{ cm}^{-1}$ (5.7 micron), C=O bending mode at wave numbers $1,160 - 1,240 \text{ cm}^{-1}$ (8.6 – 8.1 micron) and C-O-C stretching mode at wave numbers $980 - 1,160 \text{ cm}^{-1}$ (10.2 – 8.6 micron). Subsequently, the samples were transferred to Kyoto University (KU) for MIR FEL irradiation experiments.

Each sample was integrated into the KU-FEL experimental station, where the setup was aligned, and environmental conditions were controlled for stable operation. The electron beam with a macro-pulse duration of

7 μ s and a kinetic energy of 40 MeV was used to generate 2 μ s MIR pulse employing FEL oscillator technique. The MIR-FEL irradiation was performed at wavelengths of 8.4, 5.8, and 5 μ m corresponding to the IR spectrum peaks of the samples, and exposure time was 10 minutes for each experiment. The wavelength and energy spectra as well as the MIR FEL properties used in the experiments are depicted in Fig. 1 and Table 1.

Then, the samples were returned to CMU for further analysis using FTIR spectroscopy, X-ray Diffraction (XRD), and Differential Scanning Calorimetry (DSC) to evaluate changes in molecular structures, crystallinity, and thermal properties. Finally, the data from these analyses were compared and discussed to assess the structural and property modifications in PLA and its copolymers due to MIR-FEL irradiation, providing valuable insights into the potential of MIR-FEL for enhancing material properties.

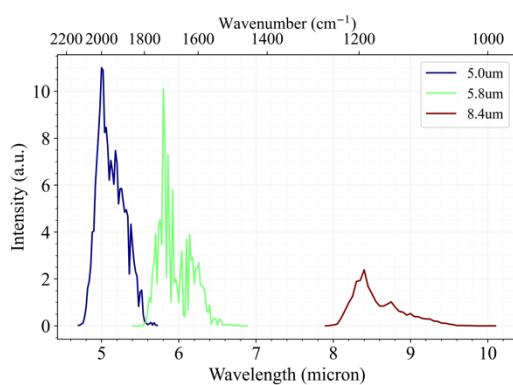


Fig.1. Wavelengths and energy spectra used in MIR FEL irradiation.

Table 1. MIR FEL properties used in the experiments

Parameter	Value	Unit
Spectral range	3.4 - 26	μ m
Micro-pulse repetition rate	2856	MHz
Macro-pulse repetition rate	2	Hz
Macro-pulse Energy	40	mJ
Bandwidth	1 – 6	%
Polarization (linear)	>95	%

4. Results and discussion

The mid-infrared free electron laser (MIR-FEL) technique was used for high-intensity infrared irradiation at wavelengths of 8.4, 5.8, and 5 μ m on PLA and its copolymers (PLC and PLG). The FTIR spectrum showed no significant changes, indicating minimal alterations in the chemical structure. However, analysis using X-ray Diffraction (XRD) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) revealed a significant increase in the polymer's crystallinity, particularly at wavelengths of 8.4 and 5.8 μ m. The absence of notable changes in the FTIR spectrum suggests that irradiation at these wavelengths does not substantially affect the main chemical bonds within the polymer structure. In contrast, the increased crystallinity observed in XRD and DSC analyses indicates that MIR-FEL radiation can stimulate molecular reorganization, resulting in more ordered structural arrangements. This reorganization enhances the polymer's mechanical properties and strength. Higher crystallinity is typically associated with improved material strength and durability, potentially broadening the polymer's application scope, particularly in industries requiring high-performance materials, such as medical devices or components designed for challenging environments.

5. Conclusion

This study demonstrated the potential of MIR-FEL irradiation to enhance the structural and thermal properties of PLA and its copolymers. While FTIR spectroscopy revealed minimal changes in chemical bonds, XRD and DSC analyses indicated significant increases in crystallinity, particularly at wavelengths of 8.4 and 5.8 μ m. These findings suggest that MIR-FEL irradiation induces molecular reorganization, resulting in more ordered structures. The enhanced crystallinity improves the mechanical properties and durability of PLA-based materials, expanding their application potential in high-performance and biomedical fields. This research underscores the utility of MIR-FEL as a tool for tailoring material properties for advanced applications.

6. List of Research Achievements

- [1] N. Khammata, N. Khammata, J. Kongsuk, H. Ohgaki, W. Punyodom, S. Sucharitakul, K. Techakaew, H. Zen, S. Rimjaem*, The Effects of Mid-infrared Free-electron Laser Irradiation on Polylactide (PLA) and PLA Copolymers, Poster presentation at the 12th international workshop on infrared microscopy and spectroscopy with accelerator-based sources (WIRMS 2024), October 7th-11th, 2024, Barcelona, Spain.

冷菌型ハイブリッド酵素による 結晶性セルロース低温分解システムの開発

堀内正隆¹, 片平正人², 永田崇²

¹ 北海道医療大学薬学部

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究の背景と目的

現代社会における化石燃料の使用は、地球温暖化を引き起こす主要因の一つとされるだけでなく、社会情勢の変化に伴う供給不安定性が生活や産業活動に重大な影響を及ぼしている。このため、バイオマス由来の代替燃料の生産性向上は、喫緊の課題として注目されている。バイオマス利用においては、地域の地形や平均気温などの条件に適した戦略が求められる。例えば、北海道のようにバイオマス資源が豊富であっても、低温期間が長い地域では、既存の高温型酵素を用いた代替燃料製造は高コスト化する傾向がある。

本研究では、研究チームがこれまでに蓄積したハイブリッド酵素作製技術と、氷温域で活性を示す好冷菌型セルラーゼ群を組み合わせることで、バイオマスの主要成分である結晶性セルロースを、低温域でも効率的にグルコースへ分解可能な“好冷菌型ハイブリッド酵素”を開発することを目指している(図1)。これにより、低エミッション型バイオマス利用の基盤構築を図り、持続可能なエネルギー社会の実現に寄与することを目的としている。

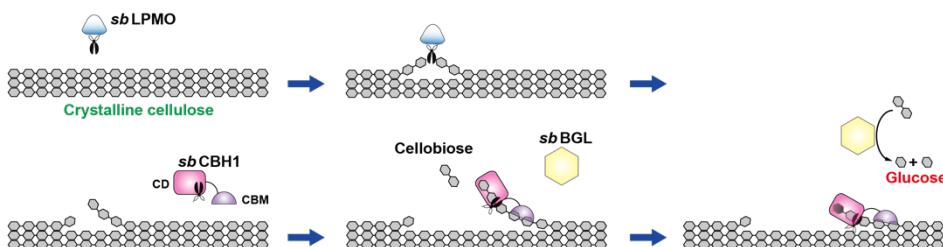


図1 好冷菌型セルラーゼ sbLPMO、sbCBH1 および β -グルコシダーゼ (sbBGL) による結晶性セルロースの協同的分解モデル

2. 結果

前年度、好冷菌 *Sclerotinia borealis* のゲノム配列中から探索・クローニングしたエクソグルカナーゼの一つであるセロビオヒドロラーゼ 1 について、その全長 (sbCBH1) および触媒ドメイン (sbCBH1CD) を対象に、複数の宿主を用いて組換えタンパク質の生産を試みた。すべての発現実験で、組換えタンパク質のカルボキシ末端にはアフィニティー精製用の His-tag を附加した。

大腸菌を用いた発現では、タンパク質が菌体内で不溶化し、不溶性画分からのリフォールディングも成功せず、現時点では可溶性酵素の回収には至っていない。酵母 *Pichia pastoris* においては、ネイティブシグナルペプチドまたは *Saccharomyces cerevisiae* の α 因子分泌シグナルペプチドをアミノ末端に附加した発現系を試みたが、培地中および菌体内のいずれからも発現は確認されなかった。

一方、*Brevibacillus* を用いた発現では、TMNm 培地または 2×YT 培地で分泌発現が確認された。発現後 5 日目の培地を回収し、Ni-Sepharose™ excel を用いたアフィニティー精製を実施した結果、抗 His-tag 抗体と交差反応する目的分子量の組換えタンパク質 (sbCBH1-His および sbCBH1CD-His) を得ることができた(図 2B、Lane 1 および 2)。

アフィニティー精製した sbCBH1CD-His を用いて、基質 Cellotriose に対する予備的な酵素活性を測定した。Cellotriose は CBH1 により切断され、1 分子のグルコースと 1 分子のセロビオースを生成すると期待される。これを pH 4 から 7 の範囲で、4 時間および 20 時間インキュベート後のグルコース生成量を測定した。その結果、sbCBH1CD-His が Cellotriose を分解し、pH 5 が至適 pH であることが明らかとなった(図 2(C))。

今年度は、2種類以上のセルラーゼまたは触媒ドメインを連結したハイブリッド酵素の作製に着手した。まず、アミノ末端側の酵素ユニットに *S. borealis* の溶解性多糖モノオキシゲナーゼ 97 の触媒ドメイン (*sbLPMO97CD*) を、カルボキシ末端側の酵素ユニットに *sbCBH1-His* または *sbCBH1CD-His* を選択し、(Gly₄-Ser)₃ リンカー配列を介して接続したハイブリッド酵素 (*sbLPMO97CD-sbCBH1-His* および *sbLPMO97CD-sbCBH1CD-His*) 生産用の発現プラスミドを構築した(図 2(A))。この発現プラスミドで形質転換した *Brevibacillus* を TMNm 培地で 3日間培養し、培地から Ni-Sepharose™ excel によるアフィニティー精製を行い、目的の組換えタンパク質を回収した(図 2(B)、Lane 3 および 4)。

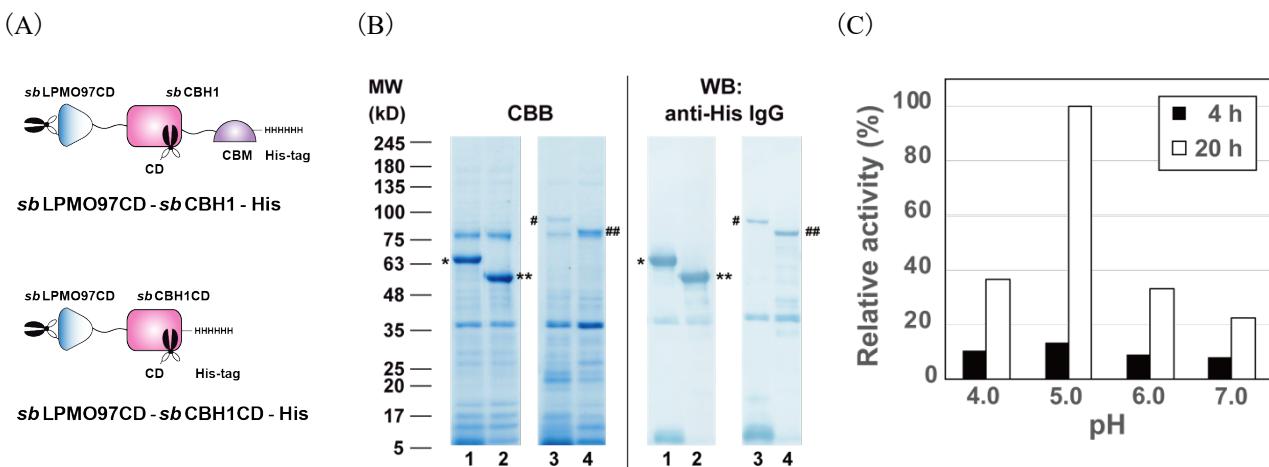


図 2 *sbCBH1* および *sbLPMO97CD-sbCBH1* ハイブリッド酵素の分泌発現

(A) ハイブリッド酵素の模式図

(B) *Brevibacillus* において分泌発現した好冷菌セルラーゼの電気泳動による確認

左: クマシーブリリアント染色、右: 抗 His-tag 抗体による Western blot;

Lane 1: *sbCBH1-His* (*), Lane 2: *sbCBH1CD-His* (**)

Lane 3: *sbLPMO97CD-sbCBH1-His* (#), Lane 4: *sbLPMO97CD-sbCBH1CD-His* (##)

(C) *sbCBH1CD-His* による Cellotriose 切断における至適 pH の検討

縦軸は、pH 5.0 で 20 h 反応させたときの Glucose 生成量を 100% とした場合の相対値。

3. 今後の方針

sbCBH1 および *sbCBH1CD* については、さらなる精製を進めて高純度酵素を得た上で、温度特性をはじめとする詳細な酵素活性の解析を実施する。また、X 線結晶構造解析を目的とした結晶化条件の最適化も並行して進める予定である。一方、ハイブリッド酵素に関しては、複数の酵素ユニットが協働して結晶性セルロースの分解を促進するかどうか、単独酵素の混合系と比較した活性評価を行う。協働的な分解活性が確認された場合には、NMR を用いて基質分解過程の詳細なメカニズムを解析する予定である。

4. 口頭発表リスト

M. Horiuchi, S. Kuninaga, M. Katahira, T. Nagata "Development of a Crystalline Cellulose Degradation System Using Psychrophilic Fungus-Derived Hybrid Enzymes." The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, December 10th, 2024, (ポスター)

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¹, 永田 崇²

¹ 横浜国立大学研究推進機構機器分析評価センター

² 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。これまでの共同研究の結果から、大腸菌ゲノム中に存在する *OxyR* 遺伝子および *MalK* 遺伝子の遺伝子発現調節領域に存在するグアニン四重鎖(G4OxyR 及び G4MalK)が四重鎖構造を形成し、レポータープラスミドの GFP 発現を抑制可能な事が分かった。さらに、G4OxyR 及び G4MalK を導入したプラスミドでは、K⁺イオンをトラップして四重鎖を不安定化させるクラウンエーテル(18-Crown-6)や K⁺イオンと競合して四重鎖を不安定化する LiCl を加えることで、四重鎖によって抑制された遺伝子発現の解除が可能である結果が得られた。非常に安定な四重鎖を形成する G3T(GGGTGGGTGGGTGGG)を導入したレポータープラスミドでは GFP の発現抑制が解除されなかつたことから、四重鎖による発現抑制の解除には四重鎖の安定性がある程度低い必要があると考えられる。このため、G4OxyR の変異体を作製し(表 1)、四重鎖の形成能を調べることで安定性をコントロール可能かどうかを検討した。

2. 方法

・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 MgCl₂, 20 mM HEPES (pH7.0))で 0.5 μM に溶解し、95°C で 5 分間加熱後、8 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。その後、SYBR Gold 染色液で再度染色して撮影した。

・AFM による DNA 分子の四重鎖構造の同定

各 DNA 分子をバッファ A で 10 μM に溶解し、95°C で 5 分間加熱後、8 時間で 15°C まで徐冷した。各 DNA は測定直前にバッファ A で 1 μM に希釈し、NiCl₂ を 10mM になるように加えて剥離したばかりのマイカ基板に固定した。基板表面を H₂O で洗浄後、乾燥して AFM で吸着粒子の形状像を測定した。各 DNA 粒子の形状データから、AFM データ解析ソフトウェア「Gwyddion」を用いて粒子の形状変数を抽出した。

表 1. 本研究で使用した OxyR 変異体

Name	Sequence	Length (nt)	remarks
G4OxyR	GGCGATGGAGGATGG	15	quadruplex
OxyR 3A	GGAGATGGAGGATGG	15	quadruplex mutant
OxyR 4C	GGCCATGGAGGATGG	15	quadruplex mutant
OxyR 4T	GGCTATGGAGGATGG	15	quadruplex mutant
OxyR 4A	GGCAATGGAGGATGG	15	quadruplex mutant
OxyR 5T	GGCGTTGGAGGATGG	15	quadruplex mutant
OxyR 6A	GGCGA AGGAGGATGG	15	quadruplex mutant
OxyR 9T	GGCGATGGTGGATGG	15	quadruplex mutant
OxyR 12T	GGCGATGGAGGTTGG	15	quadruplex mutant
OxyR 13A	GGCGATGGAGGA AGG	15	quadruplex mutant

* : 変異体中の変異を加えた配列を太字にした。

3. 結果及び考察

非変性 PAGE の結果、G4OxyR の各変異体はいずれも同じ位置にバンドが検出されたが、四重鎖特異的に染色する Thioflavin-T の染色に変化が見られた(図 1)。特に、OxyR 3A、5T および 6A ではバンドが染色されないか薄くなり、四重鎖の安定性が低下したことが示唆された。

次に、これまでに本研究で確立した AFM による四重鎖の評価法によって各変異体の四重鎖形成を評価した(図 2)。四重鎖構造を強く反映すると推定される各粒子のパラメーター(κ 1(粒子の曲率)及び B_{max} (粒子外周高さ))をプロットしたところ、OxyR 4A、4T、5T、6A で一本鎖と推定される粒子の割合が増加し、OxyR 12T、13A では四重鎖の粒子が増加する傾向が見られた。非変性 PAGE と AFM による評価法ではデータにある程度違いが見られたが、推定される四重鎖構造に当てはめた場合、ヌクレオチド 3-6 のループの変異は四重鎖を不安定化させ、ヌクレオチド 12 と 13 のループの変異は四重鎖を安定化させる傾向があった(図 3)。

今後、NMR による四重鎖の構造解析により詳細を明らかにし、得られた四重鎖変異体による遺伝子発現の抑制能力を調べることで、より高機能な発現制御を確立する予定である。

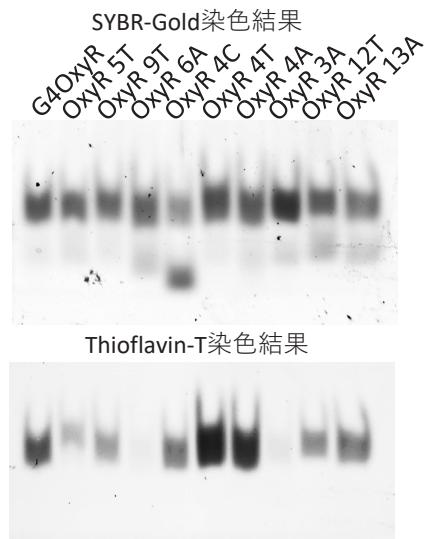


図 1. OxyR 変異体の非変性 PAGE

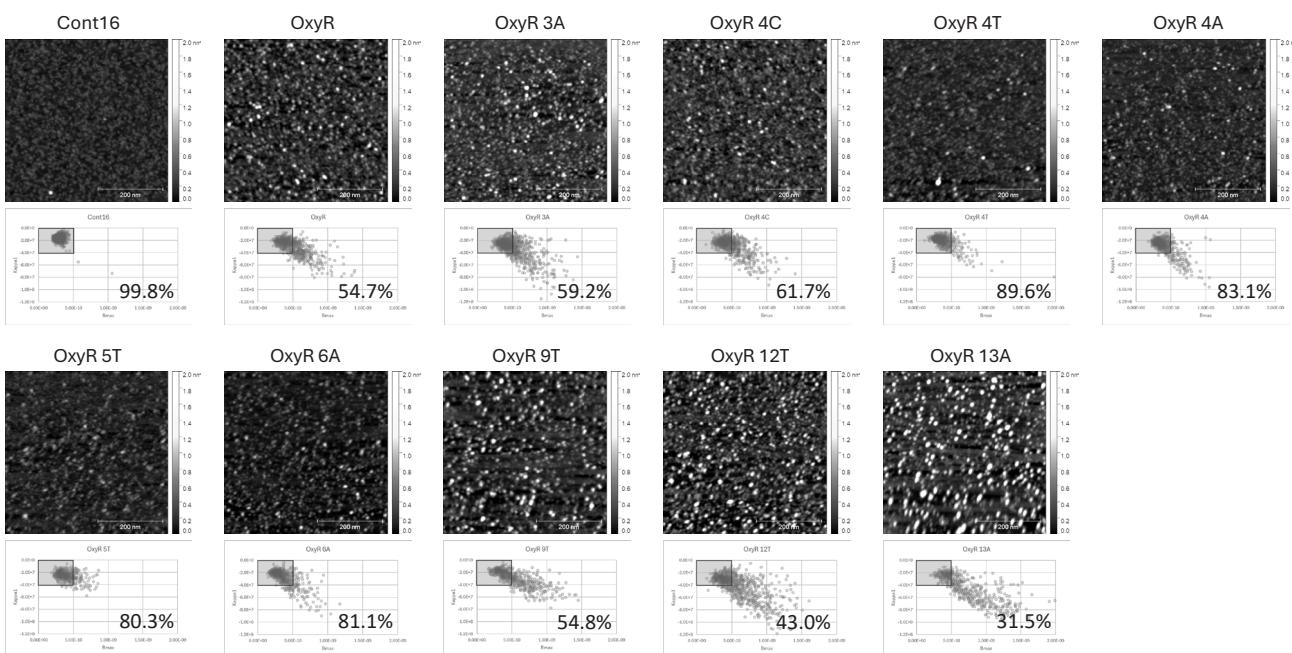


図 2. AFM による四重鎖形成の評価

各データ上部が AFM 測定像、下部が各粒子の曲率パラメーターのプロット図。

グレーの枠内は 1 本鎖と推定される領域。

プロット図左下の割合は一本鎖と推定される割合

4. 口頭発表リスト

- 1) Tanaka Y., Nagata T. "Characterization of *E. coli* derived G-quadruplexes which can regulate gene expression.", The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, 2024 年 12 月 10 日, 京都, ポスター

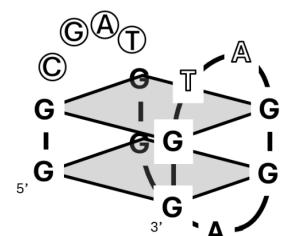


図 3. G4OxyR の推定される四重鎖構造と安定性が低下(○)または増加(白抜き)した塩基

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

Sukrit Sucharitakul^{1,2,3*}, Siripatsorn Thanasanvorakun¹, Vasan Yarangsi¹, Monchai Jitvisate⁴, Hideaki Ohgaki⁵, Suparoeck Yarin¹, Heishun Zen⁵, Sakhorn Rimjaem^{1,2,3,6}, Supab Choopun¹

¹Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

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

³Thailand Center of Excellence in Physics, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10400, Thailand, Bangkok, Thailand

⁴ School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue Muang Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

⁵Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Kyoto, Gokasho, Uji, 611-0011 Japan

⁶PBP-CMU Electron Linac Laboratory, Plasma and Beam Physics Research Facility, Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

Email: sukrit.sucharitakul@cmu.ac.th, sakhorn.rimjaem@cmu.ac.th

1. Introduction

This study examines the effects of near-infrared (NIR) Free Electron Laser (FEL) irradiation on the zeta potential of graphene-TiO₂ quantum dots (QDs), revealing a 40-50 mV inversion in surface charge. Conducted at Kyoto University's FEL facility (KU-FEL), the research demonstrates how controlled NIR irradiation can modify QD surface properties, with potential to improve their performance as electron transport layers (ETL) in perovskite solar cells (PSCs). QDs were synthesized at Chiang Mai University (CMU) and prepared in both solid and colloidal forms. The colloidal form, irradiated at wavelengths of 5.74, 8.00, and 9.14 micrometers, displayed a significant zeta potential shift. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed modifications in the ions surrounding the QDs, indicating that NIR irradiation facilitates changes in the surface chemistry. This observed inversion points to NIR FEL as a promising tool for enhancing charge transport properties in QDs, crucial for PSC efficiency. The KU-CMU collaboration also supports CMU's goal of developing its own FEL facility to enable advanced material research locally. Future work will explore further NIR effects on QD surface modifications, contributing to stable, high-performance PSCs.

2. Materials and procedures

2.1 Growth of Nanocomposite Quantum Dots

In this study, we employed an electrochemical growth process to synthesize TiO₂ [1] and graphene quantum dots (QDs) for use as a nanocomposite electron transport layer (ETL) in perovskite solar cells (PSCs) [2]. This process, conducted in a 0.3M KCl solution with 0.1M citric acid in deionized water, provides a controlled environment for the sequential formation of TiO₂ and graphene QDs on titanium and graphite rods. With a constant voltage of 10-15 volts DC applied across the electrodes for 30 minutes to one hour, the approach enables a stable passivation of QD surfaces through ionic interaction, particularly benefiting from the stabilizing roles of K⁺ and Cl⁻ ions, while citric acid buffers the electrochemical environment.

The electrochemical method is advantageous due to its simplicity, as it enables the synthesis of nanocomposites directly in colloidal form, suitable for scalable application in PSCs. Unlike more complex synthesis methods, this single-step process requires ambient conditions, supporting efficient charge transfer properties in the resulting TiO₂-graphene ETL. The enhanced surface chemistry provided by this passivated nanocomposite improves electron mobility and reduces recombination rates in the PSC devices. These findings underscore the potential of the electrochemical process for scalable and reproducible nanocomposite synthesis, suitable for addressing efficiency and stability challenges in PSC

2.2 Exposure at KU FEL

In our experiment, the synthesized TiO₂-graphene QDs nanocomposite underwent exposure to near-infrared (NIR) irradiation using Kyoto University's Free Electron Laser (KU-FEL) facility. Specific wavelengths of 5.74,

8.00, and 9.14 micrometers were selected to target the Ti-O-C, C=O, and C-OH bonds within the QDs. The colloidal samples, prepared in a deionized water solution with 0.3M KCl for stability, were irradiated for 10 minutes under high-power NIR conditions to examine potential changes in the chemical environment.

This NIR exposure led to an observed zeta potential shift of 40-50 mV, indicating a substantial alteration in the surface ion distribution surrounding the QDs. Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy confirmed the modifications in bonding, suggesting that the high-power NIR irradiation facilitates an inversion in zeta potential and enhances surface passivation. These results highlight the relevance of FEL-based NIR irradiation for controlled surface modifications, contributing to enhanced electron transport properties in the QDs for potential application in electron transport layers of perovskite solar cells.

3. Results and Discussion

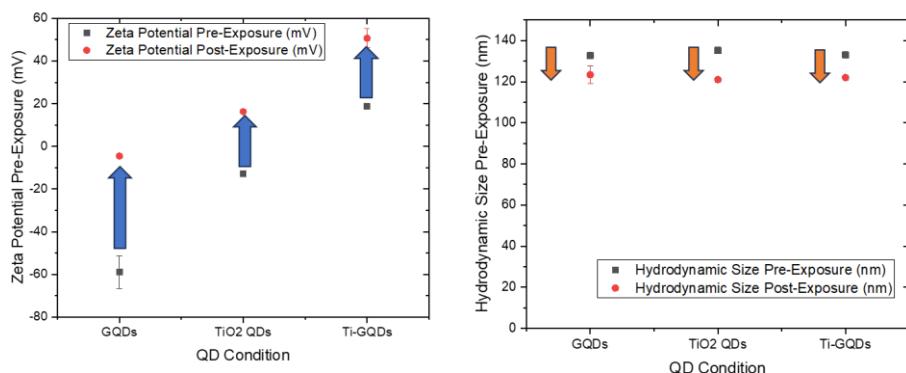


Figure 1 (left) Zeta potential and (right) hydrodynamic size of QDs before and after exposure

Free Electron Laser (FEL) irradiation in the near-infrared (NIR) range induced significant changes in the surface properties of electrochemically grown quantum dots (QDs). The zeta potential of the QDs shifted positively by 30-50 mV following exposure, indicating an enhancement in surface charge. This shift suggests a semi-permanent reorganization of the ionic environment around the QDs, attributed to FEL-induced interactions that alter ion species without disrupting the pH or the balance of OH⁻/H⁺ ions. The maintenance of this chemical equilibrium post-exposure highlights the non-destructive nature of FEL-induced modifications.

In parallel, dynamic light scattering (DLS) measurements revealed a 10 nm reduction in the hydrodynamic size of the QDs after FEL irradiation. This reduction indicates tighter ion binding on the QD surface, which could result from FEL-induced rearrangement of surface-bound ions or desorption of loosely bound species. Importantly, these changes occur without chemical alteration, suggesting that FEL irradiation acts as a precise tool for tailoring the physical and ionic properties of QDs in colloidal form. The combined increase in zeta potential and decrease in hydrodynamic size imply improved colloidal stability and stronger surface interactions, which are critical for applications such as perovskite solar cells where efficient charge transport and interface control are essential.

4. Lists of papers and oral presentations

This work was presented at EMSES 2025, through oral presentation at Kyoto University, Uji Campus by Professor Sakhorn Rimjaem under the topic of “Near-Infrared FEL-Induced Inversion of Zeta Potential in Electrochemically Grown Quantum Dots: Insights into Ion Alteration”.

5. References

- [1] T. Sintiam, N. Saranrom, S. Phadungdhitdhada, S. Choopun, and S. Sucharitakul, “Enhancement of Perovskite solar cells performance using electrochemically grown TiO₂ quantum dots,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2431, no. 1, p. 012054, Jan. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2431/1/012054.
- [2] S. Thanasanvorakun, T. Sintiam, S. Choopun, S. Phadungdhitdhada, and S. Sucharitakul, “Synthesis and characterization of TiO₂-graphene heterostructured quantum dots by electrochemical process,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2653, no. 1, p. 012058, Dec. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2653/1/012058.

代謝反応制御に関する転写因子 Sp1 の核移行シグナルを可視化する蛍光バイオセンサー

田嶋 竣介¹, 中田 栄司², 森井 孝^{2,3}, 桑原 淳¹

¹ 同志社女子大学薬学部

² 京都大学エネルギー理工学研究所

³ 京都光華女子大学健康科学部

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等の材料創製は、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生成・利用系であり、持続可能社会実現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各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膜に囲まれた核内への移行し、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 C₂H₂ zinc finger (zf) domain を 3 個有し、100 以上の遺伝子の転写を活性化する。当研究室では、Sp1 の核移行シグナルが、典型的な短鎖アミノ酸配列ではなく、約 90 残基の zf domain そのものであると明らかにした。さらに、細胞質内での Zn²⁺欠乏や配位アミノ酸の変異による zf 立体構造の形成阻害を通じた核移行の抑制も示唆した(図 1A)。しかし、Zn²⁺濃度の非常に低い細胞質での Sp1 zf の立体構造形成は不明のままである。本課題の解明には、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、導入した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 個の 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)。

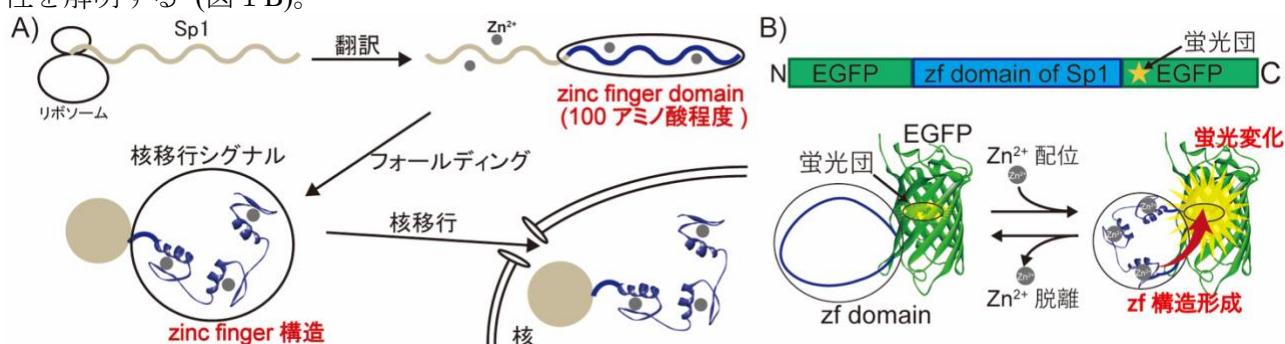


図 1 (A) Sp1 の予想される核移行経路。 (B) zf-EGFP の模式図。

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(純度 38%)を行った。この zf-EGFP に対して、キレーター-EDTA の添加による Zn²⁺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

EGFP の蛍光励起スペクトルで得られる 2 つのピークに起因する 395 nm 励起の蛍光強度 (F.I.₃₉₅)、466 nm 励起の蛍光強度 (F.I.₄₆₆) は各々、EGFP 蛍光団の phenol 型、phenolate 型に由来することが知られている。マイクロプレートリーダーを用いて、EDTA 添加による zf-EGFP の蛍光強度の時間変化を測定した。その結果、EDTA 存在下では、EDTA 非存在下に比べて、F.I.₃₉₅ が減少し、F.I.₄₆₆ が上昇した。即ち、蛍光強度のレシオ (F.I.₄₆₆/F.I.₃₉₅) の上昇 (13%) が確認された (図 2)。

(2) zinc finger の機能評価

EMSA 法により、zf-EGFP の DNA 結合能を評価した。Sp1 zf の標的 DNA を蛍光色素 Cy5 で標識しており、それぞれ、DNA を Cy5、EGFP を Cy2 測定チャネルの蛍光として、DNA と zf-EGFP タンパク質の所在を評価した。その結果、zf-EGFP 結合に伴う DNA のバンドシフト (Bound) (図 3, lane2) が、EDTA 存在下では検出されなかった (図 3, lane3)。このことから、EDTA の添加に伴い、Zn²⁺ が解離し、zf-EGFP は DNA 結合能を失活していることが確認された。

以上より、zinc finger の機能の変化を蛍光変化として検出可能なことが確認された。

続いて、zf-EGFP の 2 次構造を CD スペクトルから評価するため、精製純度の向上を図った。Histag affinity クロマトグラフィーと疎水性相互作用クロマトグラフィーによる二段階精製を行い、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、EDTA の添加により、蛍光強度レシオの上昇 (24%)、DNA 結合能の失活が確認されると共に、 α helix 構造の減少が CD スペクトルから観察され、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 Sp1 C2H2 zinc finger 構造の変化を蛍光強度レシオの変化として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の機能を確立するために、Zn²⁺ の再配位による zf 構造形成と EGFP の蛍光強度変化の相関を評価する。

[口頭発表リスト]

1. 田嶋 竣介、中田 栄司、森井 孝、桑原 淳, “転写因子 Sp1 の zinc finger 構造を検出する蛍光タンパク質型バイオセンサーの構築”, 2024 年 9 月 12 日—14 日, 第 18 回バイオ関連化学シンポジウム, つくば国際会議場 (ポスター)
2. Shunsuke Tajima, Eiji Nakata, Takashi Morii, Jun Kuwahara, “Fluorescence biosensor for visualizing nuclear localization signal of transcription factor Sp1 for regulating metabolic reactions”, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, Dec. 10 – 13, 2024, Uji, Japan (Poster)

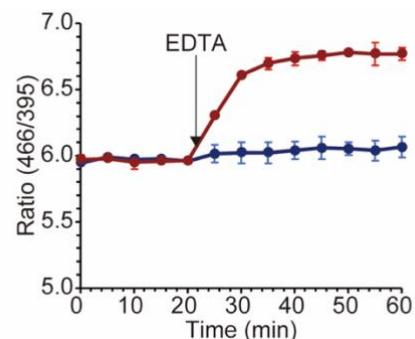


図 2. zf-EGFP の蛍光強度レシオの時間変化。20-25 分に 5 mM EDTA (赤) または buffer (青) を添加した。

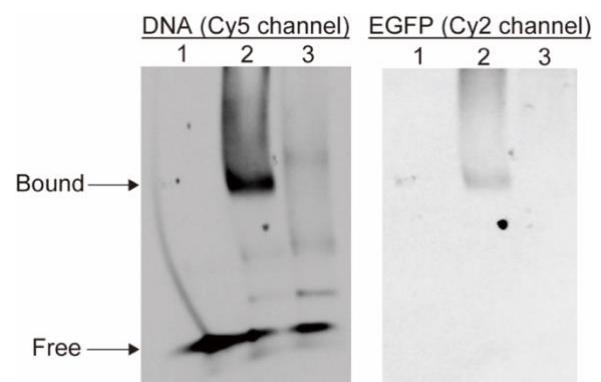


図 3. zf-EGFP の EMSA。(左) DNA (Cy5 channel)。(右) EGFP (Cy2 channel)。Lane 1: DNA のみ, lane 2: w/ zf-EGFP, lane 3: w/ zf-EGFP +-EDTA。Free は Free DNA、Bound は zf-EGFP 結合 DNA のバンドを示す。

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¹, 小林建輝¹, 柏木茂², 全炳俊³

¹東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻

²東北大学先端量子ビーム科学研究センター

³京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) のミクロパルスエネルギーは 1uJ 程度と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

一般的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) なレーザー発振が可能である。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、光共振器の改善とそれを用いたビーム試験を実施した。

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 装置に設置した改良型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。ミラーの設置位置は前年度までと同様であるが、上流側のミラーには電子ビームが通過するための小さな穴を設置している。これは電子ビームのミラーにおける散乱を回避するためのもので、今年度に新たに導入した。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。事前検討の結果、これらの改善により共振器のフィネスが 12.5 となる事が期待される。

改善された光共振器を用いて、超放射 FEL 発振に向けた実験を行った。改善後の共振器システムを図 1 に示した。電子銃によって生成した電子ビームは上流の穴あきミラーを通過後、アンジュレーターで放射を生成するとともに、光と相互作用することによって FEL 発振を目指す。その後電子ビームは中流ミラーを通過してビームダンプへ輸送される。生成した THz 放射は L 字型の共振器内に蓄積され、電子ビームとアンジュレーター内で相互作用し、増幅されることになる。生成した THz 光は下流ミラーの穴から取り出され、焦電

素子及びショットキーバリアダイオード (SBD) によって検出される。それぞれ焦電素子を用いて全体の光強度を測定するとともに、SBD によってパルス毎の強度変動を観測することが可能である。以下の図 2 にそれぞれの検出器で取得した結果を示した。図 2 (A) は放射波長 0.4THz における光強度と共振器長の関係を示している。共振器長と電子ビーム繰り返しが一致した共振器長において、強く共鳴が得られていることが分かる。この時の共振器長のフィネスは 13.2 であり、設計値とほぼ一致する結果を得ている。一方、共鳴ピークの強度分布に非対称が存在する。これは主に光共振器内における Guoy 位相に起因するもので、今後の改善点として挙げられる。(B) (C) は SBD によってパルス毎の強度を観測した結果で、(B) の共鳴ピークにおける観測結果から、パルスが共振器内に適切に蓄積されていることが分かる。計算との比較でも、前述のフィネス 13.2 に一致する蓄積時間で蓄積が進んでいることが確認できた。逆に言えば、FEL 相互作用による増幅が確認できていないとも言える。一方、(C) では共鳴から少しずらした点におけるパルスごとの強度を示した。パルス内で強度が変動していることがわかる。これはアンジュレーターに入射する電子ビームのパルス列の間隔が変動していることに起因していることが確認できており、電子銃の調整によって改善することが望まれる。

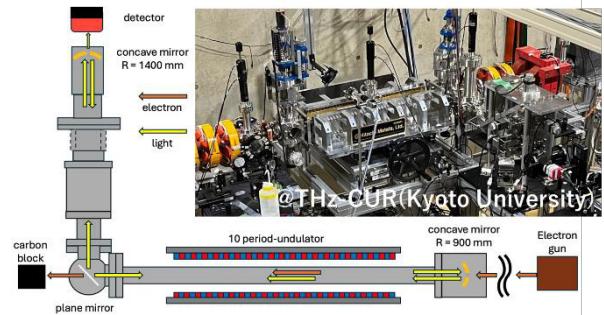


図 1：設置した共振器の模式図

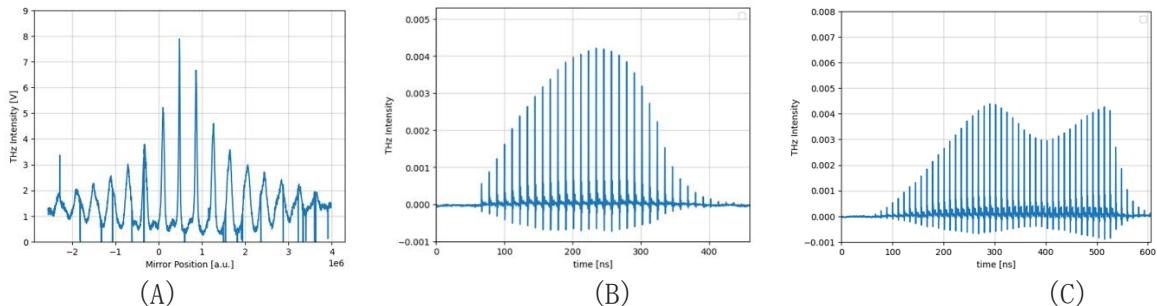


図 2：生成した THz 光の観測結果 (A) 共振器長と光強度の関係 (焦電素子検出) (B) 共鳴点付近におけるパルスごとの光強度 (C) 共鳴の肩におけるパルスごとの光強度 (SBD 検出)

4. まとめと今後の展望

超放射 FEL 発振に向けて共振器や検出器の改善とビーム試験を行った。その結果、予想した性能通りの結果は得られているものの、FEL 発振には至っていないことが確認された。一方で、超放射 FEL における課題などを世界に先駆けて明らかとしており、学術的には重要な知見を蓄積している。今後、新たに得られた課題を改善しつつ、世界で初めての超放射 FEL 発振に向けて研究を進める。

5. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について

[受賞、プレス発表等]

日本物理学会第 79 回年次大会 学生優秀発表賞受賞 (小林建輝)

ISBA2024 発表賞 (金賞) 受賞 (小林建輝)

[口頭発表リスト]

小林建輝、柏木茂、全炳俊、坂上和之、 “プリバンチド FEL 発振に向けた光共振器開発”、物理学会第 79 回年次大会、2025 年 9 月 16 日-19 日、札幌

スーパーエンプラ材料加工における化学反応解明

藤岡隼¹, 築山光一², 全炳俊³

¹東京理科大学総合研究院ナノカーボン研究部門

²東京理科大学理学部

³京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、CO₂ 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に鳴る光を用いて、PTFE に代表される難加工性樹脂に対するアブレーション実験を KU-FEL にて実施してきた。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の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に鳴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。そこで、本研究では、複合材料を用いたアブレーション実験を実施することとした。複合材料は、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。代表的な複合材料としては CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic, 図 1) があり、炭素繊維（ポリアクリルニトリル繊維）をエポキシ樹脂で補強した材料である。強度・弾性率が比較的高い熱硬化性樹脂として、航空機や自動車のフレームにも用いられる。加工に当たっては、エポキシ樹脂を除去した後、炭素繊維に損傷を与えることなく切削加工が可能となることが理想である。今回、その第一段階として、炭素繊維に損傷を与えることなくエポキシ樹脂のみを削除することとした。

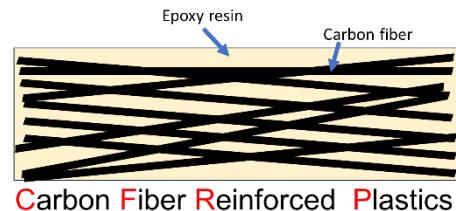


図 1 : CFRP の構造模式図

【方法】

初めに、FT-IR (JASCO FT/IR-6000) にて CFRP の赤外吸収スペクトルを測定した。結果を図 2 に示す。測定の結果、1508 cm⁻¹ (ベンゼン環伸縮振動モード), 1100 cm⁻¹ (非エポキシ由来), 1035 cm⁻¹ (エーテル C-O 伸縮振動), 826 cm⁻¹ (P 置換ベンゼン環 CH 面外変角) と吸収ピークの存在しない 1515 cm⁻¹ 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。KU-FEL は軸外放物面鏡 (f=228.6 mm) にて集光される。パルスエネルギーと切削深さ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。得られた試料は東京理科大学設置の走査型電子顕微鏡 (カールツァイス GeminiSEM360) と 3D 形状測定機キーエンス (VK-150) にて照射野の形状を観察した。

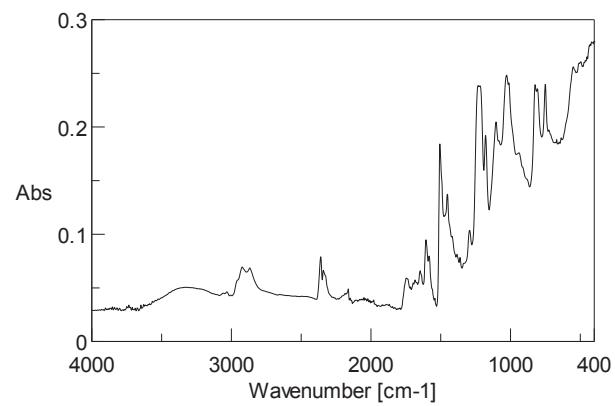


図 2 : CFRP の FT-IR スペクトル

【結果及び考察】

形状解析の結果、供試した波長条件の中では、 1035 cm^{-1} の波長条件が最も深い加工断面となっていた。これはエポキシ樹脂のエーテル基の振動伸縮に対応する波長である。更に、当該波長照射条件内において、パルスエネルギーを11, 23, 35 mJの条件に設定し、照射後、加工深さを測定した結果(図3参照)、エポキシ樹脂を削除するには11 mJで十分なエネルギー供給であることが判明した。パルスエネルギーが閾値を大幅に超過している場合、余剰なエネルギーは熱に変換され、ビーム周囲に熱損傷を与えている可能性が示唆される。また、電子顕微鏡でビーム周囲の試料断面を観察した結果(図4参照)、吸収を有さない波長条件(1515 cm^{-1})ではビーム周囲の樹脂損傷が認められた。単一組成樹脂と同様、分子に吸収を有さない波長は熱損傷が大きく、複合材料のレーザー加工においても分子に吸収を有する波長の光は熱損傷を抑制することが判明した。

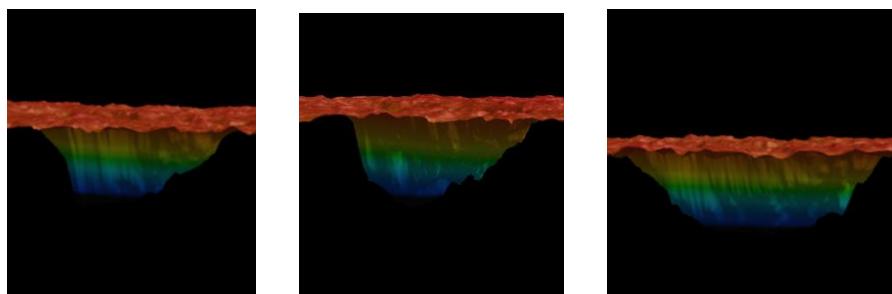


図3 1035 cm^{-1} におけるパルスエネルギーと加工断面の関係 (左：11 mJ 中央：23 mJ 右：35 mJ)

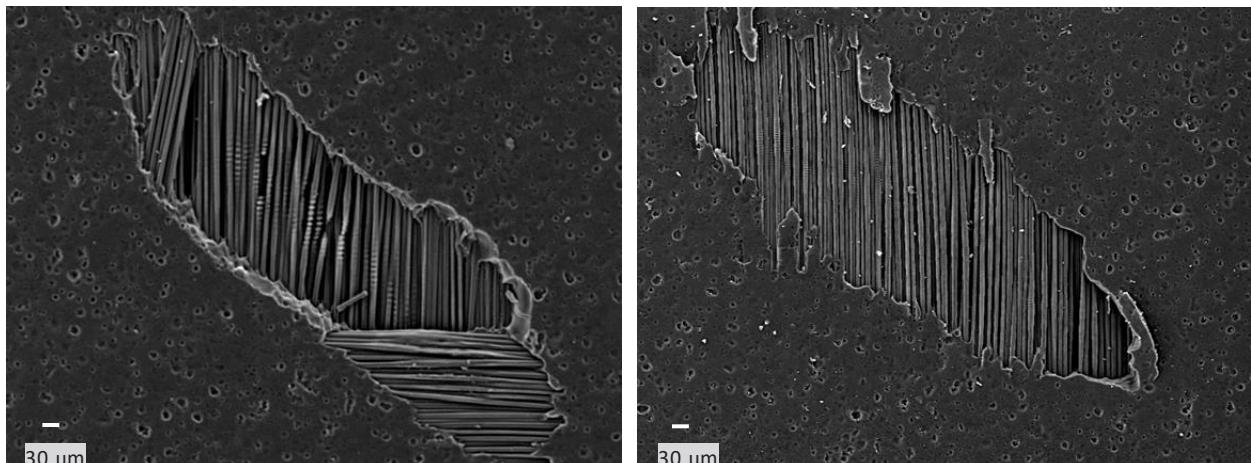


図4 ビーム周囲の表面電子顕微鏡像 (左： 1515 cm^{-1} 右： 826 cm^{-1})

【今後の展望】

本研究において、CFRPに対し様々な条件における照射実験を実施し、分子の吸収を有する波長のKU-FELは11 mJで十分エポキシを削除可能であることが判明した。エポキシ樹脂を削除するのに必要な波長・パルスエネルギーの条件が判明したので、今後、下層の炭素繊維を損傷なく露出させ、引き続きKU-FELを用いて、炭素繊維が強い吸収を持つ波長の光による、熱損傷を抑制した切削手法を確立していく予定である。

【口頭発表リスト】

- 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) J. Fujioka, T.Nakajima, K.Tsukiyama, H.Zen
 第31回 FELとHigh-Power Radiation 研究会 (2024.12.12) J. Fujioka

形状自由度の高い強力超伝導バルク磁石の開発

元木 貴則¹, 下山 淳一¹, 紀井 俊輝², 大垣 英明³

¹青山学院大学理工学部

²理化学研究所 Spring-8

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究背景

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO, RE: 希土類元素) は液体窒素温度(77 K) を超える 90 K 級の高い臨界温度(T_c) を有する高温超伝導体である。磁場中の臨界電流密度(J_c) 特性が他の超伝導材料に比べて優れており、高磁場応用に向けた材料開発が盛んに進められている。その中でも、REBCO 溶融凝固バルクは、内部を周回する永久電流により永久磁石よりはるかに強い磁場（最高で 17.6 T @~30 K [J. H. Durrell *et al* *Supercond. Sci. Technol.* (2014)]）を捕捉可能であることから、強力バルク磁石としての様々な応用が期待されている。超伝導バルク磁石の応用には強磁場だけでなく、磁場の高い均質性や様々なバルクの形状が求められる。例えば、アンジュレーター用途には半月状の、卓上型の小型 NMR 装置には中空リング状の均質なバルクが必要である。従来の一般的なバルクは、REBCO ペレット表面中心に小型の種結晶を設置し、溶融状態から徐冷することで種結晶を核としてバルク全体を 2 軸配向させる Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法により育成してきた。この方法では、円柱状や角柱状といった単純な形状のバルクしか得られない。複雑形状のバルクはこれらバルクを機械的に加工することで成形されるが、機械的損傷や材料損失が課題となっている。また、種結晶を起点とする 3 次元的な結晶成長機構であるため、大型化が困難で再現性、均質性が低いという課題を有する。このような課題に対して、我々は希土類元素の異なる REBCO の部分溶融温度(包晶温度, T_p) の差を利用して大型溶融凝固バルクを種結晶として一方向のみに結晶成長させる一方向溶融成長(Single-Direction Melt Growth, SDMG) 法を開発して報告してきた[T. Motoki *et al*, *Supercond. Sci. Technol.* (2022)]。この方法は、結晶成長が鉛直一方向のみに進行するためバルク形状の自由度が高いだけでなく、大型化も容易で均質なバルクを再現性良く得ることができる。昨年、この SDMG 法を用いた高機能なリングバルクの直接育成に成功し、77 K におけるリング内磁場の世界記録~1.8 T を達成した[T. Motoki *et al*, *Appl. Phys. Express* (2023)]。SDMG 法 REBCO 溶融凝固バルクの捕捉磁場特性はこれまで液体窒素浸漬下(77 K) でのみ評価してきたが、実際の応用が想定される 60 K 以下の中低温における 2 次元的な捕捉磁場特性は評価できる設備が世界的にも限られている。本共同研究により、強磁場ソレノイドとヘリウム連続フロークライオスタットを活用することで、SDMG 法 REBCO バルクの中低温捕捉磁場特性を評価した。

2. 実験方法

日本製鉄社製 EuBCO 溶融凝固バルクを切り出して seed plate とし、EuBCO よりも包晶温度の低い RE を用いて、円柱状の REBCO ペレット (RE=Dy) を seed plate にのせ SDMG 法により溶融凝固し REBCO バルク磁石を育成した。REBCO ペレットには、機械的強度向上と T_p の低下のため 10 wt% の Ag_2O を添加している。育成したバルクは seed plate から切り離し、酸素雰囲気における長時間の低温アニールを行うことでキャリア量を最適ドープ状態とした。得られたバルクは外周を研削して、内径 24 mm の無酸素銅の治具に入れ、図 1 に示すヘリウム連続フロークライオスタット内において磁場中冷却(FCM)法により最大 6 T の外部磁場印加下で着磁して評価した。

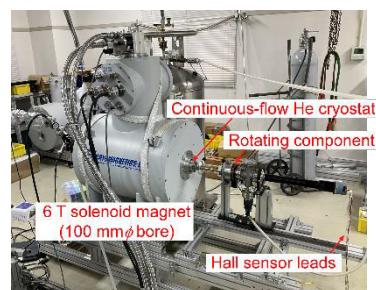


図 1 本共同研究で用いた中低温での超伝導バルク磁石の着磁、評価装置

3. 結果と考察

図2(a)-(c)に液体窒素浸漬下(77.3 K), FCM 40 K, 3 T, FCM 10 K, 6 T 着磁後の DyBCO バルク表面の捕捉磁場分布をそれぞれ示す。中低温捕捉磁場測定では、3 mm の間隔で配置されたホール素子アレーを回転することで 2 次元のマッピングを行い、測定点の間は内挿により推定している。通常 REBCO バルクの 2 次元の捕捉磁場特性は、測定の容易さから液体窒素浸漬でのみ実施されることが多く、今回のような実用が想定される中低温(10–60 K)における評価はほとんど報告がない。今回の測定結果により、二次元の磁場分布は 77 K での測定結果と大きくは変化せず同様の同心円状の分布を維持することが明らかになり、実用上重要な結果であるといえる。本成果は、他の中低温磁場測定の結果と合わせて、論文発表を行った。低温になるほど中心部での等磁場線の間隔が疎になっていることは、実際にはこのバルクはさらに強磁場まで捕捉できる能力を有していることを示している。

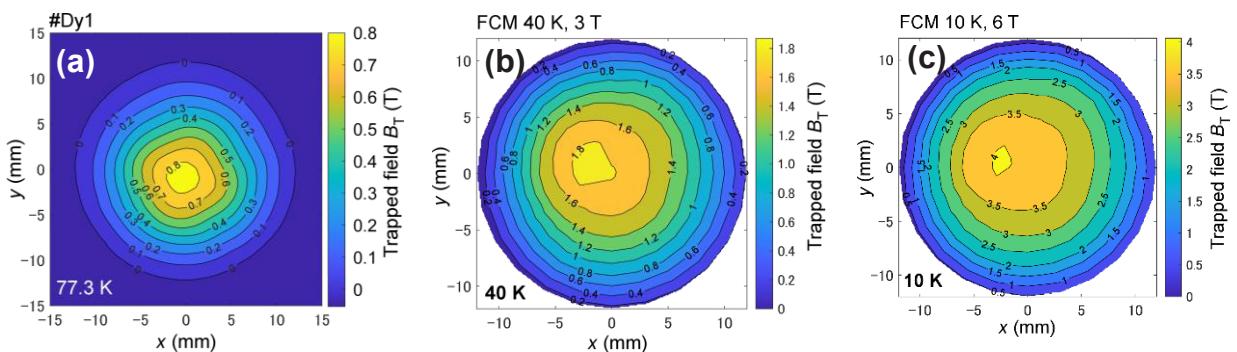


図2 DyBCO バルク表面の液体窒素浸漬下(77.3 K) (a)、40 K, 3 T 着磁後 (b)および 10 K, 6 T 着磁後の 2 次元捕捉磁場分布

また、さらなる大型化への試みとして、図3に示すような直径 100 mm の大型の金型を設計開発し、SDMG 法を用いた世界最大級（市販品に最大サイズは直径~60 mm 程度である）の大型バルク育成を目指した研究にも着手している。



図3 直径 100 mm の大型成型用金型

[論文発表リスト]

- T. Motoki, J. Shimoyama, “Excellent field–trapping properties of large ring–shaped REBCO melt–textured bulks fabricated by the single–direction melt growth (SDMG) method,” *Supercond. Sci. Technol.* **37** 115019 (2024)
- T. Motoki, T. Kii, J. Shimoyama, “Temperature-Dependent Trapped Magnetic Fields for $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE : Y, Dy) Melt-Textured Bulks Prepared Using the Single-Direction Melt Growth Method,” *IEEE Trans. Appl. Supercond* (2025) accepted.

[口頭発表リスト]

- T. Motoki, J. Endo, K. Kunimoto, J. Shimoyama, S. Nakamura, “Development of large and homogeneous REBCO melt-textured bulks with various shapes by the Single-Direction Melt Growth (SDMG) method”, ASC2024, 2024/9/3, Salt Lake City, USA
- ほか 5 件

Python-Based LV Microgrid Planning Strategies: Clustered Topology and PV Hosting Capacity

Dara Eam¹, Yoklin Noev¹, Lyhour You¹, Sievlong Suk¹, Sokleap Heang¹, Vannak Vai¹, Hideaki Ohgaki²

¹ Department of Electrical and Energy Engineering, Institute of Technology of Cambodia

² Institute of Advanced Energy, Kyoto University

1. Introduction

Renewable energy is a critical solution to address the rising levels of carbon dioxide (CO₂) emissions, a major contributor to global warming. As Cambodia works toward its climate goals and reducing CO₂ emissions, integrating photovoltaic (PV) systems into existing power grids becomes essential for achieving a sustainable energy future. PV systems not only reduce carbon footprints but also strengthen grid resilience. In rural areas, low-voltage (LV) grids use a three-phase system for the main line, but most households connect to a single phase (A, B, or C), leading to an unbalanced LVAC distribution network. This paper proposes optimizing radial LVAC topology using a shortest-path method to minimize cable connections between households and electrical poles while achieving load balancing¹, reducing power loss, and ensuring voltage constraints are met. Additionally, K-means clustering² is introduced to optimize PV cluster hosting, maximizing PV capacity integration into the grid. A techno-economic analysis is conducted to compare scenarios grid without PV and grids with PV¹ (i.e., zero export, with and without sell-back price) over 30 years. The findings aim to support a balanced and efficient LVAC system while promoting large-scale PV adoption. The paper details the proposed methodology in Section 2, presents the case study and simulation results in Section 3, and conclusion in Section 4.

2. Methodology

The proposed method is carried out in the following steps, such as Fig. 1. First, input data of LVAC network is needed to coordinate the substation, electrical poles (X, Y), loads data (P, Q) with a 3% growth rate. Second, planning parameters are provided for the planning period 30-year, lifetime of PVs, discount rate, and tariff (i.e., electrical tariff according to EAC, sell-back price of 0.118 \$/kWh). Third, optimal radial topologies are focused on minimizing cable connection length, and load balancing is applied to minimize total power loss and voltage improvements. Fourth, the PV hosting capacity is determined using the K-means method for PV installation at each centroid. The water cycle algorithm¹ (WCA) method is then applied to maximize PV capacity, focusing on

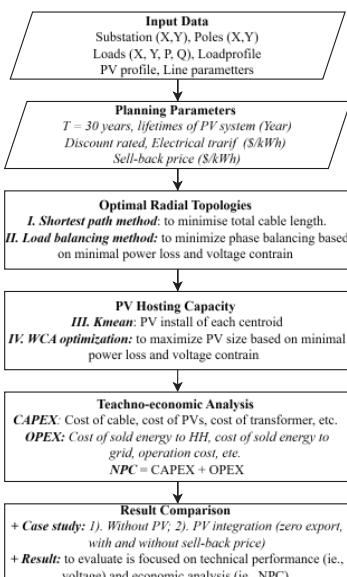


Fig.1. Several step of method

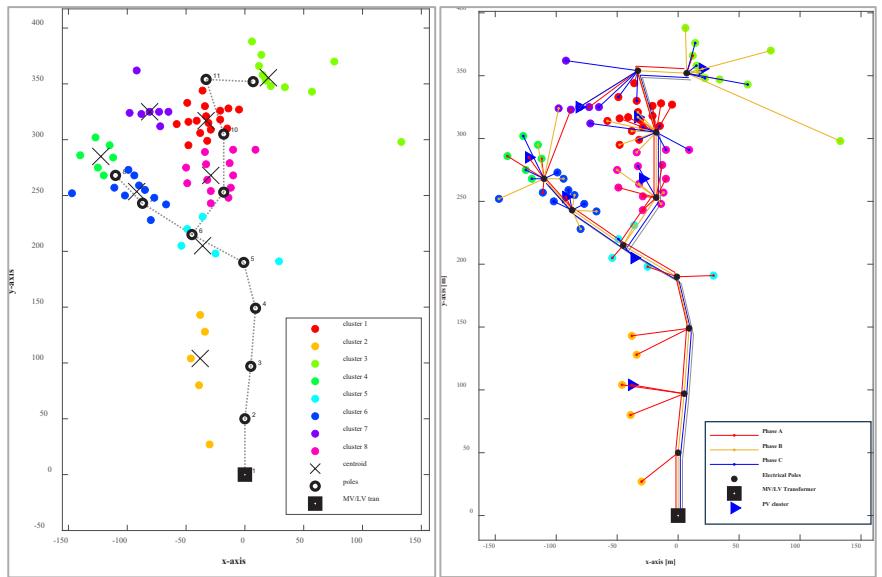


Fig.2. Coordinate LVAC network

Fig.3. Radial topology with PV clusters

power loss reduction and voltage improvement. Fifth, techno-economic analysis is used Capital Expenditure (CAPEX), Operational Expenditure (OPEX) and Net Present Cost (NPC). Sixth, the case study proposes three scenarios: 1) radial topology without PV, 2) integration of PV with zero export, and 3) integration of PV with and without a sell-back price. The evaluation of the results is based on technical performance and economic analysis.

3. Simulation Results and Discussion

The LV distribution system in a rural village in Koh Rong, Cambodia, is selected to validate the method. Fig. 2 illustrates the coordination of the 160 kVA transformer, 73 cluster households, 12 electrical poles², and 8 centroids determined using K-means clustering for PV installations. Fig. 3 presents the radial topology, including the shortest path and load balancing, as well as PV cluster installation. The load and average PV curves for the simulation are shown in Fig. 4. Table 1 summarizes the results of phase balancing and PV cluster penetration in the LV distribution system. All cases are profitable except for PV integration with a sell-back price. PV integration with a sell-back price is a favorable low-cost option, with an NPC of 74.406 k\$ and providing voltage improvement within the range of 0.90 to 1.05 pu in this case study.

Table 1. Several Indicators of the Proposed Method

Items	Grid without PVs	Grid with PVs intergration		
	SP-LB	Zero Export	with sellback price	without sellback price
Total PV Capacity [kWp]	-	159.5	159.5	159.5
Max. Voltage [pu]	1	1.009	1.097	1.097
Min. Voltage [pu]	0.9207	0.9207	0.9207	0.921
Energy Purchased from grid [MWh]	4601.896	2948.314	2943.807	2943.807
PV Produced [MWh]	-	1626.464	9638.627	9638.627
Cost of energy purchased from grid [k\$]	556.829	356.746	356.201	356.201
CAPEX [k\$]	5.910	255.504	255.504	255.504
OPEX [k\$]	42.017	5.588	329.910	5.720
NPC [k\$]	36.107	-249.916	74.406	-249.784

4. Conclusion

Digital tools for optimizing radial topologies with phase balancing over a 30-year planning horizon have been developed and successfully validated. The system was tested in Cambodia. The shortest path and load balancing methods were applied to the LVAC radial topology, while K-means clustering and WCA optimization were used to determine the location and size of the PV system based on objective criteria. Scenarios for the grid with and without PVs (including zero export, with and without sell-back price) were thoroughly analyzed, providing effective results in both technical operations and economic evaluation for long-term planning. The integration of PVs with a sell-back price proved to be a favorable option for the LVAC network when comparing technical and economic performance (NPC lowest value).

5. Oral presentations

[1] Dara Eam, Yoklin Noev, Lyhour You, Sievlong Suk, Sokleap Heang, Vannak Vai and Hideaki Ohgaki, "Python-Based LV Microgrid Planning Strategies: Clustered Topology and PV Hosting Capacity", The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, December 10-13, 2024, Poster.

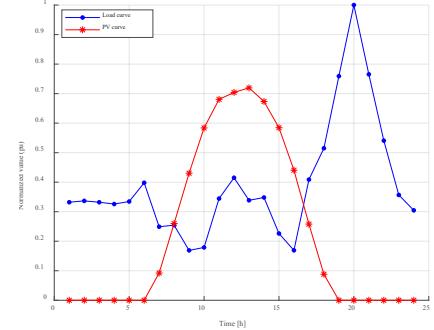


Fig.4. Normalized study load and PV curve in the case

¹ D. Eam, V. Vai, C. Chhlonh, and S. Eng, "Planning of an LVAC Distribution System with Centralized PV and Decentralized PV Integration for a Rural Village," *Energies*, vol. 16, no. 16, p. 5995, 2023.² K. Khon, C. Chhlonh, V. Vai, M.-C. Alvarez-Herault, B. Raison, and L. Bun, "Comprehensive Low Voltage Microgrid Planning Methodology for Rural Electrification," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2841, 2023.

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

吉川榮和¹、森下和功²、小林進二²、新田純也³、松岡猛⁴、高橋 信⁵、
大鋸谷 将樹⁶、安部正高⁷、五福明夫⁸、李徳衡⁹、出町和之¹⁰

¹京都大学名誉教授、²京都大学エネルギー理工学研究所、

³アルカディア・システムズ株、⁴宇都宮大学地域創成推進機構、

⁵東北大学大学院工学研究科、⁶関西電力株式会社、

⁷京都大学エネルギー科学研究所、⁸岡山県立大学、

⁹ Redasen Co.、¹⁰東京大学大学院工学系研究科

1. はじめに—これまでの経緯と 2024 年の研究計画

本研究は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いるので、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行い、複雑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るものとした提案型共同研究『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 2022-2023 年の 2 年間実施したものを 2024 年には企画型共同研究テーマ 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) として研究の発展を志向した。

2022 年度はシンビオ社会研究会主催の令和 4 年度第 1 回研究談話会で、リスク情報に基づく保全(risk-informed maintenance) に移行する機運にある原子力発電事業におけるリスク情報に基づく保全の指向する方法論の講演や原子力施設でのセキュリティ対策の一環として施設の監視カメラ画像に AI 画像認識を適用する研究状況の出町氏による講演を発表した⁽¹⁾また機器構成が比較的単純なエネルギー理工学研究所の DuET 実験施設に電気機器の高調波診断システムを設置しその施設を構成する電動機等の電気機器の劣化検知診断実験を行った実験結果の新田純也氏による報告、松岡猛氏によるシステムの動的信頼性解析法 GO FLOW の解析機能の向上を令和 4 年度第 2 回研究談話会で発表した⁽²⁾

2023 年度は、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だけでなく 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うものにした。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。令和 5 年 5 月 11 日第 1 回シンビオ講演会で小林進二氏によるヘリオトロン J 実験装置の紹介とプラズマ計測についての講演⁽³⁾令和 5 年 6 月 29 日、令和 5 年度の共同研究の実施計画を討議するとともにヘリオトロン核融合実験施設の実験設備の見学会を行った。その結果ヘリオトロン J 設備を対象に、①電気機器の高調波診断システムによる劣化診断(新田純也)、②GO FLOW によるヘリオトロン実験設備の信頼性評価(松岡)、③データ同化の適用によるプラズマシミュレーションの高度化(黒江康明)の 3 つのテーマを実施することとした。

2023 年 8 月 30 日、上記に述べた 3 つの研究テーマの結果報告と今後の予定を第 14 回先進エネルギー科学国際シンポジウム(ゼロエミッションエネルギーネットワーク)の研究活動での Ze ポスターセッションで英文ポスター発表⁽⁴⁾その後令和 5 年 12 月 13 日に令和 5 年度第 1 回研究談話会を開催。3 つの個別テーマの実施結果の報告とレビュー、核融合科学研究所六ヶ所研究センター横山雅之氏による招待講演「核融合研究におけるデータ駆動アプローチから統計数理核融合学の提案」ののち、今後の共同研究課題を討議⁽⁵⁾その結果 2023 年度実施の 3 テーマのうち、①、②は今後もヘリオトロン J 装置を対象に 2023 年度度の結果を踏まえ研究を深化したいとする一方で、③は 2023 年度にはヘリオトロン装置を対象に今後新たに共同研究メンバーを募って本研究グループとは別途に研究計画を立てたいとの黒江氏の希望により、2024 年度はヘリオトロンを対象にしたテーマ①、②の継続発展を図るとともに 2022 年度着手のシステム故障や劣化診断、リスク解析による信頼度評価による安全対策やセキュリティ対策に関する高度 ICT 技術の研究調査と統合して、企画共同研究テーマ 3 (エネルギー科学

におけるデジタルトランスフォーメーション)へ発展を期すことにした。要するに2024年度は具体的には以下の2つのAとBのテーマで共同研究を進めることにした。

A. 2023年度から継続のヘリオトロンJを対象とする実験研究

A.1 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

A.2 GO FLOWによる補機類の動的信頼性・アベイラビリティ解析の高度化

B. エネルギー科学のDX学理進化のための高度ICT基盤調査

B.1 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

B.2 AIのエネルギー産業分野への応用展望

2. 2024年度の研究実施結果の要約

第1回全体会議 2024年6月26日

テーマA:高調波診断システムとGO FLOW解析法の適用研究の進展の報告

テーマB: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・解析法に対し、「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

第2回全体会議 2024年10月29日

テーマA:高調波診断システムのヘリオトロンJへの適用再実験を検討。動的信頼性解析GO FLOWのヘリオトロンJ水冷却系の信頼性評価結果を国際会議PSAM2024で論文発表⁽⁶⁾

テーマB:機能の概念と機能モデルに基づく運転支援と、保全学研究者(森下・安倍)から故障生起汎化モデル(高橋)への提言とコメントおよび大規模言語モデルLLMの解説と応用の展望講演

第15回先進エネルギー科学国際シンポジウム動でのZeポスターセッションで英文ポスター発表⁽⁷⁾

第3回全体会議 2024年12月27日

高調波診断システムへのAI適用の考察とChat GPTのGO FLOW解析への適用の考察と次年度計画について意見交換

3. 結論と今後の展望

本年度の研究実施により、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のため、故障生起汎化知識(GFMK)のモデル高度化と機器劣化診断機能のGO-FOWによる動的信頼性とアベイラビリティの統計的解析実施との知的統合と連携高度化を図ることの見通しが得られた。しかし電気機器の劣化診断を行う高調波診断システムが行っている統計処理や数値モデルの詳細がブラックボックスではGO-FOWとの知的統合も実施不能である。そのために2025年度には、アルカディアシステム社の知的資産である高調波診断システムの京大への貸与によってその内容理解を深めて有効な活用をはかるために研究代表者を松岡氏に変更し、メンバー構成も絞り、エネルギー理工学研究所でのフィールド実験を加速し上記目標の確実な達成を図りたい。

参考文献

- (1) Symbio N&R, Vol.12, No.1, 2023 (symbio-newsreport.jpn.org)
- (2) Do, Vol.12, No.2, 2023 (do).
- (3) Do, Vol.12, No. 3, 2023 (do).
- (4) Do, Vol.12, No.6, 2023 (do).
- (5) Do, Vol.12, No.8, 2023 (do).
- (6) T. Matsuoka, S. Kobayashi, K. Morishita, H. Yoshikawa: Availability Analysis of Heliotron J Water-cooling System by the GO-FLOW methodology, PSAM17&ASRAM2024, 7-11 October, 2024, Sendai International Center, Sendai, Miyagi, Japan.
- (7) H. Yoshikawa, et al., Experimental research on the sophistication of advanced information infrastructure for the operation and maintenance of complex energy systems (ZE2024N-02)

Carbon Capture - Bioenergy System Design and Biofuel Readiness for Urban Communities

Yudha Prambudia¹, Muhammad Almaududi Pulungan¹, Tiara Verita Yastica¹, Isnaeni Yuli Arini¹

¹ Faculty of Industrial Engineering, Telkom University

1. Rationale

Negative emission technologies combine bioenergy production with CO₂ sequestration in geological storage (Moreira & Pires, 2016). Algae offer high photosynthetic efficiency and biomass yield, enhancing economic feasibility (Srimongkol et al., 2022). Dispersed CO₂ sources in urban areas, accounting for 71-76% of global emissions, stem from transportation, energy use, and commerce (Meng et al., 2023). Limited space and greenery in cities constrain natural CO₂ absorption through trees, making traditional afforestation impractical (Drew-Smythe et al., 2023). Cities increasingly adopt solar photovoltaic (PV) technology for renewable energy, primarily on rooftops, but PV systems require substantial urban space (Marzouk, 2022). Other strategies like green roofs and gardens help but also require significant space (Zheng et al., 2023; Yang & Ye, 2023; Busker et al., 2022). Algae CCS can effectively capture CO₂ in urban settings, reducing greenhouse gases (Kinnunen et al., 2022; Srimongkol et al., 2022). For sustainability, a community-based business model is essential, fostering ownership and participation to achieve carbon neutrality and resilience. Addressing these challenges necessitates integrating CO₂ capture with Bioenergy production for a sustainable solution. Accordingly, the goal of the research is in twofold, to design a system for CO₂ capture with bioenergy potential, and measures the market readiness for the system.

The proposed system would capture CO₂ emissions from dispersed sources while promoting bioenergy production. Algae or fast-growing plants cultivated in urban areas can absorb CO₂ via photosynthesis (Maghzian et al., 2022; Daneshvar et al., 2022). Biomass from these crops can be processed into bioenergy using anaerobic digestion or biofuel extraction (Nair et al., 2022), providing renewable energy for urban applications while reducing reliance on fossil fuels.

2. System Design

The CARBION reactor is a system designed for optimal CO₂ absorption and ease of maintenance. *Chlorella vulgaris* absorbs CO₂ through photosynthesis, which is influenced by sunlight intensity. To maximize CO₂ capture, the reactor is made from acrylic, a material that allows high light penetration while being lightweight and strong. The algae's photosynthesis residues, rich in lipids, proteins, and carbohydrates, can be converted into biodiesel and biogas, supporting renewable energy production. These residues settle at the reactor's bottom, simplifying biomass separation and further processing. The reactor design, with angled walls, aids in residue collection, helping maintain water quality and an optimal environment for algae growth. Figure 1 illustrates the CARBION reactor design and its prototype testing result.

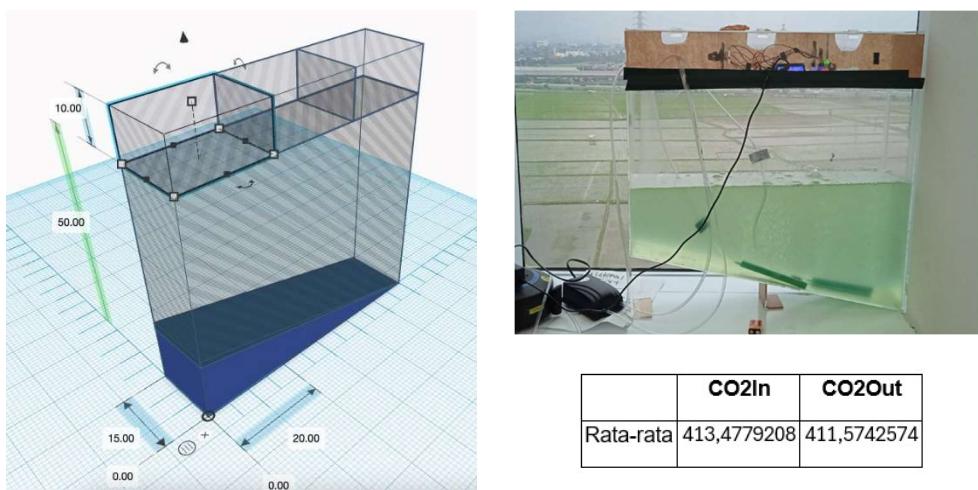


Figure 1. System Design and Prototype Testing Result

3. Market Readiness

A survey is conducted in two sub-districts, in Bandung City, West Java, Indonesia. Most respondents in the market readiness survey have a monthly expenditure ranging from IDR 1 million to IDR 6 million, accounting for 78.5%, while only 0.8% spends less than IDR 500,000. Respondents with expenditures of IDR 500,000 to IDR 1 million make up 15.7%, and those spending above IDR 6 million amount to 5.0%. This indicates that the majority of CARBION target users fall into the middle-income group, emphasizing the need to align pricing and marketing strategies with this segment's purchasing power.

In terms of ease of use, the product is well-received by most respondents. 83.5% believe that CARBION is easy to understand and use in daily life, while 16.5% disagree. This shows that the product design is sufficiently intuitive but still needs improvement to address the needs of the smaller group who find it difficult to use.

From an environmental impact perspective, most respondents trust the product's effectiveness. 93.4% respondent believe that in urban settings, the system can reduce air pollution better than other technologies. while only 6.6% are skeptical. Furthermore, 86.8% feel that the product is better at enhancing renewable energy sources compared to other technologies, whereas 13.2% disagree. This highlights CARBION strong perceived potential as a solution for environmental and renewable energy challenges.

However, perceptions about the monthly rental price vary. 42.1% consider a price below IDR 500,000 to be reasonable, while 36.4% think a reasonable price is IDR 500,000 to IDR 1 million. Only 7.4% are willing to pay IDR 1 million to IDR 2 million, and 2.5% for more than IDR 2 million. Additionally, 11.6% are unsure about the appropriate price. The majority prefer a price below IDR 1 million (78.5% when combined), underscoring the importance of setting a competitive price to ensure wider accessibility for users.

4. Lists of output

15th International Symposium of Advanced Energy Science.

-Toward the Realization of Advanced and Carbon Negative Energy-

Date: December 10-13, 2024

Poster title: “Compact Microalgae Based System for Carbon Dioxide Capture and Bioenergy”

Yudha Prambudia, Muhammad Almaududi Pulungan, Iqbal Yulizar Mukti

This work is supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (Reference No. ZE2024N-3)

5. Project abstract

Existing systems to curb urban CO₂ emission require substantial urban space. Negative emission technologies like algae-based carbon capture and storage (CCS) offer innovative solutions for urban CO₂ reduction. The CARBION system is a reactor designed for optimal CO₂ absorption. It uses *Chlorella vulgaris* to convert CO₂ into bioenergy via photosynthesis. Market readiness surveys reveal that 78.5% of respondents prefer a monthly rental price below IDR 1 million. With 93.4% affirming its environmental impact, CARBION demonstrates significant potential as a sustainable, community-driven solution for carbon neutrality.

Biochar Production from Cocoa Byproducts for Rural Application

(Biochar Production from Coconut Byproducts in Rural Applications)

Juniza Md Saad^{1*}, Adlansyah Abdul Rahman², Omar Faruqi Marzuki¹, Muhammad Rizzuwan Abdul Wahid³, Alvin Lim Teik Zheng¹, Aaliyawani Sinin Ezzerin¹, Jordi Cravioto⁴ and Hideaki Ohgaki⁴

¹Department of Science and Technology, Universiti Putra Malaysia Bintulu Sarawak Campus

²School of Engineering & Physical Sciences, Heriot Watt University Malaysia

³Department of Electrical Installation Engineering Technology, Institut Kemahiran MARA (IKM) Bintulu

⁴Institute of Advanced Energy, Kyoto University

1. Introduction

Coconut plantations are integral to the agricultural economy of the South East Asia (SEA) region. According to Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT, 2021), Asia accounts for 85% of global coconut production, followed by America (8%), Oceania (4%), and Africa (3%). In 2020, Malaysia produced approximately 542,000 metric tons of coconuts (<https://ap.fftc.org.tw/article/2938>). However, the byproducts from coconut production are often improperly managed, particularly in rural and indigenous communities, despite their potential for biochar production. Biochar, produced through thermal treatment, sequesters carbon and can be used as a soil conditioner, promoting a circular economy within plantations. Additionally, biochar reduces fertilizer runoff, lowering farm costs and preserving soil health.

Traditional commercial biochar systems are large and cumbersome, limiting their field deployment. This project aims to develop a compact, on-site rapid carbonizer system for biochar production directly within plantation areas. The innovative design of the carbonizer is self-sustaining, requiring no electrical power, and is optimized for ease of deployment and operation in remote locations. By producing biochar on-site, the system significantly reduces the carbon footprint associated with transporting raw materials to centralized facilities. This approach not only enhances the sustainability of coconut plantations but also provides a scalable solution for biochar production in various agricultural settings, particularly benefiting rural applications.

2. Methodology

This project is divided into three phases: background study including potential site surveys, system development and on-site testing. In the first phase, literature review is conducted to determine the target community while in the second phase, rapid carbonizer system is designed and fabricated. The final phase focuses on site visits to the selected community to collect data both for studying local demand and for evaluating the carbon footprint. This includes byproducts collection and on-site prototype testing to determine the suitability of the biochar produced for rural application and local demands.



Fig.1. Prototype on-site testing

The on-site testing as shown in Figure 1, and interview were conducted at Kelapa Pandan (scientific name: *Cocos nucifera*) Farm, Kg. Kuala Nyalau, Bintulu, Sarawak, Malaysia. Coconut shell was selected as coconut byproducts type for this prototype testing.

3. Result and Discussion

The pilot testing results indicated that the coconut shell was fully carbonized in approximately 1 hour, yielding biochar with a mass fraction of 33.3%. A review by Ajien, A. et.al., 2023 (*Waste Management & Research*, 41(1), 37-51) found that the

coconut shell biochar yield can range from 30% to 35% by weight, which aligns closely with the 33.3% observed. Figure 2 illustrates the biochar produced from the coconut shell.

The carbonizer validated the principle of self-sustaining combustion as shown in Figure 3, wherein the pyrolysis gases generated during the carbonization process are redirected through an exhaust tube to maintain the combustion environment. This method aligns with the theory of flame carbonization, which utilizes the exothermic reactions of pyrolysis gases to sustain the thermal process without external energy input. The self-sustaining combustion mechanism is a significant advantage of this carbonizer design.



Fig.3. Self-sustaining combustion

By redirecting the pyrolysis gases back into the combustion chamber, the system efficiently utilizes the energy released during the carbonization process. This not only reduces the need for external fuel sources but also minimizes energy losses, making the process more sustainable and cost-effective. The ability to maintain a stable combustion environment is crucial for achieving consistent biochar quality, as fluctuations in temperature can affect the physical and chemical properties of the final product.

Feedback from local villagers regarding the carbonizer was positive. Previously, villagers would discard coconut waste into streams or under trees. However, with the introduction of this on-site rapid carbonizer, the potential of converting this waste into valuable biochar is now recognized. The carbonizer's features and process were commended. The flexible design of the carbonizer allows it to be easily transported and deployed in various locations, making it ideal for use in remote and rural areas. Its lightweight construction ensures that it can be moved without the need for heavy machinery, reducing the logistical challenges associated with traditional biochar production systems. The ease of assembly further enhances its practicality, as it can be quickly set up and operated by them with minimal technical expertise. The short duration required to produce biochar is another notable advantage for them. Traditional biochar production methods can be time-consuming, often taking several hours or even days to complete. In contrast, this rapid carbonizer can produce biochar in less than 2 hours, depending on the volume of raw material. This efficiency allows them to integrate biochar production into their daily routines without significant disruption to their other agricultural activities.

4. Conclusion

This project demonstrates the feasibility and benefits of producing biochar from coconut byproducts using a compact, on-site rapid carbonizer system. The system's design and operation are well-suited for rural applications, providing a sustainable solution for managing agricultural waste and enhancing soil health. By producing biochar on-site, the system significantly reduces the carbon footprint associated with transporting raw materials to centralized facilities. This localized production approach not only minimizes greenhouse gas emissions but also promotes sustainable waste management practices within the community. Future research should focus on optimizing the carbonizer design, analyzing the produced biochar and expanding its application to other agricultural byproducts.

5. Lists of papers and oral presentations

[1] Juniza Md Saad, Adlansyah Abdul Rahman, Omar Faruqi Marzuki, Muhammad Rizzuwan Abdul Wahid, Alvin Lim Teik Zheng, Aaliyawani Sinin Ezzerin, Jordi Cravioto and Hideaki Ohgaki, On-Site Rapid Carbonizer for Biochar Production from Coconut Byproducts in Rural Applications, The 15th International Symposium of Advance Energy Science, December 10 – 13, 2024, Online, Poster



Fig.2. Prototype on-site testing

Achieving Carbon-Neutral Organic Coffee Cultivation through Biocontrol

Keonakhone Khounvilay¹, Sangkhom Singharaj¹, Yumiko Takatsuka², Tomojiro Hara², Bounma Phengphachanh³, Sonesouphap Orlavanh¹, Hatsachaly Sengthong³, Thonglern Sibounheung³, Dalany Phengphachanh³, and Hideaki Ohgaki^{2*}

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

² The Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611 - 0011, Japan.

³ NAFRI, Southern Agriculture Research Center, Ministry of Agriculture and Forestry, 717 Vientiane Capital, Lao PDR.

* IAE Keyperson

Abstract

Coffee is a key perennial crop in Laos, vital for both local and international markets. The government supports its production to address insect and disease issues that affect quality. Biocontrol methods, including cyclic lipopeptides (CLPs) from *Bacillus subtilis* strain YAE51, have effectively reduced pathogen presence. CLPs at concentrations of 1.25 µg, 3.13 µg, and 6.25 µg inhibited *Colletotrichum kahawae*, the fungus responsible for coffee berry disease (CBD).

I. Introduction

Coffee plays a vital role in the economy of Laos, ranking as the country's fifth-largest export.

Introduced by the French in the early 1900s on the Boloven Plateau, coffee cultivation initially included varieties like Robusta, Arabica, and Liberica. Over time, due to the impact of Arabica leaf rust and low market prices for Liberica, Robusta became the dominant species grown in the region (Edward Winston et al., 2005). Coffee is now the most important perennial crop in the Lao People's Democratic Republic (PDR), particularly in Paksong, Champasak Province. The genus *Colletotrichum* is responsible for anthracnose diseases in coffee and other economically important crops. These pathogens can exist as endophytes, epiphytes, or pathogens, leading to leaf necrosis, coffee berry disease (CBD), and dieback. Sixteen species of *Colletotrichum* have been reported on *Coffea arabica*, with six species documented in regions like Vietnam and Mexico. Notably, *C. asianum*, *C. fructicola*, *C. siamense*, and *C. cordylinicola* are associated with diseases affecting both green and red coffee berries in Laos and Thailand. Biocontrol methods have shown effectiveness in reducing pathogen inoculum and disease incidence in various crops, including coffee, offering a promising approach for disease management. This report discusses differentiating coffee pathogenic fungi using PCR techniques, preparing antifungal substances from *Bacillus subtilis* YAE51 strain, and detecting these substances.

II. Materials

The test fungus used in this study was *Colletotrichum kahawae* MAFF410176, a strain related to the coffee berry disease (CBD) fungus. This strain was provided by the Genetic Resources Research Center (NGRC) of the Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries of Japan.

III. Results (and Methods)

1. Identification of *C. kahawae* by PCR:

The test fungus used in this study was "*Colletotrichum kahawae* MAFF410176 strain", hereafter referred to as "C1." The control fungal strain is referred to as "R."

Two mycelial samples were collected into a microcentrifuge tube with TE buffer and lightly crushed using a toothpick. Genomic DNA was extracted according to the protocol provided with the FavorPrep Tissue Genomic DNA Extraction Mini Kit. PCR amplification was performed using ITS4 and ITS5 primers, which target the fungal ribosome's internal transcribed spacer (ITS) region. The amplified DNA was confirmed through agarose gel electrophoresis, after which the amplified portion was purified and subjected to DNA sequence analysis.

- The sequences of the ITS4: 5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'
- The sequences of the ITS5: 5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3'

The sequence analysis results were evaluated for homology using the Basic Local Alignment Search Tool (BLAST). The analysis showed that the gene sequence of C1 was highly homologous to that of *C. kahawae*, while R matched the control strain.

2. Evaluation of Antifungal Activity of CLPs Against *C. kahawae*:

Antifungal cyclic lipopeptides (CLPs) expressed by the *Bacillus subtilis* YAE51 strain (YAE51) were extracted using a liquid-liquid extraction method. This involved culturing the strain in LB broth and then adding an organic solvent to the culture supernatant.

-Collection of the supernatant of bacterial culture after that Precipitation by Ammonium and dialysis. Next step will Extraction by Butanol and evaporate by blow with N₂ gas.

Cyclic lipopeptides (CLPs) preparation:

1. Preculture: Culture the YAE51 strain in LB medium overnight with shaking 30°C.
2. Culture: Culture the YAE51 strain in LB medium for 2 days with shaking 30°C.
3. CLPs precipitation by ammonium sulfate: add ammonium sulfate (final concentration 30%) to the culture supernatant, centrifuge, and collect the precipitate fraction.
4. Desalination (Dialysis): Remove the ammonium sulfate by dialysis.
5. CLPs extraction by Butanol: Recovery butanol liquid-layer.
6. Purified CLPs: The butanol layer redissolves in methanol after solid drying by nitrogen gas and is stored at -20°C

On the other hand, the antifungal activity of the CLPs was evaluated through an agar-well diffusion assay. In this assay, four wells were arranged on a PDA plate surrounding a central culture of the test strain, *C. kahawae*. The arrangement of the wells followed a clockwise pattern: the first well contained only methanol as a control, the second well contained 1.25 µg of CLPs, the third well contained 3.13 µg of CLPs, and the fourth well contained 6.25 µg of CLPs.

- The culture conditions: 25°C and 5 days

To quantify antifungal activity, the distance of mycelial growth inhibition was measured and plotted on the Y-axis against the concentration of CLPs on the X-axis. The results indicated that the CLPs produced by the YAE51 effectively inhibited the growth of *C. kahawae*, with a more potent inhibitory effect observed at higher concentrations (See. Figure 1).

IV. Figure

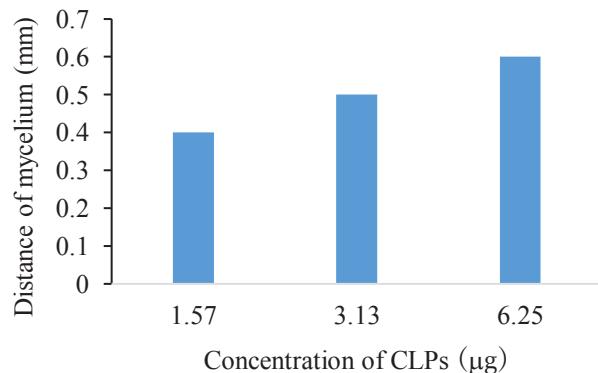


Figure 1 shows the relationship between the mycelial growth of *C. kahawae* and the amount of CLPs that inhibit that growth.

V. Acknowledgment

The work in this report was supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (Reference No ZE2024N-05)

VI. References

Edward Winston *et al.*, (2005). Arabica coffee manual for Lao-PDR. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok.

VII. Lists of papers and oral presentations

Keonakhone Khounvilay, Sangkhom Singhraj, Yumiko Takatsuka, Tomojiro Hara, Bounma Phengphachanh, Sonesouphap Orlavanh, Hatsachaly Sengthong, Thonglern Sibounheung, Dalany Phengphachanh, and Hideaki Ohgaki. Achieving Carbon-Neutral Organic Coffee Cultivation through Biocontrol. The 15th International Symposium of Advanced Energy Science Symposium, ZE2024N-05, December 10-13, 2024, Uji Kyoto.

PROPOSING A GREEN ENERGY ECOSYSTEM THROUGH SOLAR AND WIND ENERGY IN INDONESIA CASE: JEPARA AND REMBANG REGENCIES

Anugerah Yuka Asmara¹, Aditya Wisnu Pradana¹, Adhityo Nugraha Barsei¹, AR Rohman Taufiq Hidayat², Dhian Kusumawardhani¹, Hideaki Ohgaki³, Jordi Cravioto Caballero³

¹ Research Center for Public Policy, National Research and Innovation Agency (BRIN)

² Faculty of Engineering, University of Brawijaya

³ Institute of Advanced Energy – Kyoto University

1. Introduction

The concept of a "green energy ecosystem" has gained significant traction in recent years, driven by the urgent need to address environmental challenges and promote sustainable development. The utilization of fossil fuels raised awareness of reserves and their environmental impact. Rembang Regency and Jepara Regency located in the Central Java Province are areas where the ratio electrification approaching 99%. Mostly, electricity energy in those areas is provided by the state-owned electricity company of Indonesia (PLN). It means that there is no crucial issue of electricity networks to enlighten areas of Rembang and Jepara. Though, both areas are interesting to more explored related to the use of renewable energy especially solar and wind energy. Thus, this study propose two research questions as follows:

- 1) Why do communities or users use solar and wind energy in Jepara and Rembang Regencies?
- 2) Is there a collaboration to realize solar and wind energy? How do actors collaborate in realizing solar and wind energy in Jepara and Rembang Regencies?

2. Literature Reviews

2.1 Renewable Energy

Solar and wind energy, in particular, have emerged as critical components of renewable energy portfolios worldwide due to their scalability, environmental benefits, and declining costs. The primary objectives of solar and wind energy policies are to reduce greenhouse gas emissions, enhance energy security, and promote economic development. According to the International Renewable Energy Agency ([IRENA, 2020](#)), governments adopt renewable energy policies to align with international agreements such as the Paris Agreement, which aims to limit global warming to well below 2°C above pre-industrial levels. Solar and wind energy are particularly suited to these goals due to their minimal carbon footprint and potential for rapid deployment.

2.2 Solar and Wind Energy

Indonesia has a long coastline and is located on the equator. It gives Indonesia geographical advantages for wind and solar energy. Wind energy generation is predicted to reach 60.64 GW, and only a small fraction is optimized ([Adistia et al., 2020](#)). All at once, solar has huge potency too. [Afif and Martin \(2022\)](#) calculated that 207.8 GW of solar energy is available. According to the government report ([Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia, 2023](#)), 323.46 MW on-grid and 265.59 MW off-grid have been installed and contributed to the national energy mix. That number is increasing from the previous year. However, the number of installed wind power generators is beyond government plan expectations, that is, installing 17.87% of the energy mix from renewable energy sources.

2.3 Green Energy Ecosystem

Green energy ecosystems reveals a dynamic interplay between technological innovation, financial instruments, policy frameworks, and local contexts. The integration of these elements is essential for fostering sustainable practices and achieving the SDGs. The concept of a "green energy ecosystem" is increasingly relevant in the context of sustainable development, particularly as the world grapples with resource depletion and environmental degradation.

3. Research Method

This study uses a qualitative approach focusing on case studies. [Yin \(2003\)](#) defines case study as an empirical inquiry which investigates a phenomenon in its real-life context. We visited two regencies that have solar energy program that initiated by local government(s) units, namely Jepara Regency and Rembang Regency located in the Central Java Province, Indonesia in 19-23 January 2025.

4. Result and Analysis

4.1 Case Study of Jepara Regency

Renowned for its intricate wood carving industry, artisans have begun integrating solar energy into their production processes to reduce operational costs and promote sustainable practices. This initiative is particularly evident in Desa Senenan, Kecamatan Tahunan, where eight wood carving industries have benefited from solar energy installations provided by the Central Java Provincial Government. The implementation of rooftop solar power plants (PLTS) in these industries has led to significant cost savings. Artisans have reported a reduction in electricity expenses by approximately 30% to 40%,

4.2 Case of Rembang Regency

Rembang Regency has also optimized its significant renewable energy potential, particularly from solar and wind sources. One example is the innovative technology "Omah Setrum (Omset) Pintar", developed in Kedungasem Village, Sumber District. This technology combines wind and solar power to generate electricity, primarily aimed at improving infrastructure lighting for roads connecting village residents with economic activity areas like farmland and plantations. Additionally, the rooftop solar power plant (on-grid PLTS) has been adopted by the Village Office of Pamotan, Pamotan District, to support public services, and aiming to enhance the reliability of electricity, reduce the Village Office's operational costs, and promote a clean and sustainable environment.

5. Conclusion

Jepara and Rembang Regencies are two areas in the Central Java Province that have shown an energy transition in rural area and in the sphere of small-medium enterprises (SMEs). Solar and wind energy sources are mostly aimed to minimize the monthly electricity charge and to complement fossil energy in Rembang Regency. In addition, solar energy is used to minimize production cost for SMEs community in Jepara Regency. The presence of fossil-sourced electricity energy provided the state-owned electricity energy of Indonesia (PLN) is not a hurdle for developing green energy ecosystem in both areas.

Acknowledgment

This work was supported by the Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (Reference Number: ZE2024N-06).

References

- Adistia, N. A., Nurdiansyah, R. A., Fariko, J., Vincent, V., & Simatupang, J. W. (2020). Potensi Energi Panas Bumi, Angin, Dan Biomassa Menjadi Energi Listrik Di Indonesia. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, 22(2), 105. <https://doi.org/10.24912/tesla.v22i2.9107>.
- Afif, F., & Martin, A. (2022). Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, 6(1), 43. <https://doi.org/10.30588/jeemm.v6i1.997>.
- IRENA. (2020). *Renewable Energy Policies in a Time of Transition*. International Renewable Energy Agency.
- Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia. (2023). *Handbook Of Energy & Economic Statistics Of Indonesia 2023*.
- Yin, R. K. (2003). Case Study Research: Design and Methods, Third Edition. Thousand Oaks – California: SAGE Publications Incorportations.

Life Cycle Assessment of Rural Electrification in Malaysia

Xu Lingyao¹, ChiaKwang Tan¹, Hideaki Ohgaki², Cravioto Jordi², Shoki Kosai³, Christopher Wesley Ajan⁴

¹UMPEDAC, University of Malaya, ²Institute of Advanced Energy, Kyoto University, ³Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University, ⁴Sarawak Energy Berhad

1. Introduction

Rural electrification in Malaysia has shifted towards standalone renewable energy systems due to their cost-effectiveness and faster deployment compared to grid expansion. However, environmental impacts, alongside rising carbon tax/credit systems, necessitate a deeper understanding of the carbon footprint of these systems to achieve sustainable development goals (SDGs). This study examines electricity consumption in two rural households in Sarawak, Malaysia, using energy loggers to monitor real-time data. A Life Cycle Assessment (LCA) was performed to evaluate four electrification scenarios: grid connection, solar home system (SHS), diesel generator, and diesel generator with limited operation. The analysis identifies environmental impacts and highlights variability in energy use between households. By addressing environmental and socioeconomic considerations, this research aims to reduce carbon emissions, enhance clean energy adoption, and support equitable rural development.

2. Objectives

The objectives of the project are:

1. To develop a comprehensive LCA framework to evaluate the environmental impacts of various rural electrification schemes.
2. To quantify the carbon footprint of four rural electrification scenarios, incorporating installation and operation phases: grid connection, solar home system (SHS), diesel generator, and diesel generator with limited operation.
3. To identify critical environmental impact categories, focusing on life cycle GHG emissions.

3. Methodology

An overview of the methodology for this project is elaborated below:

1. LCA Scope Definition: Conduct LCA within a system boundary that includes installation, operation, and maintenance phases for 4 scenarios
2. Life Cycle Inventory (LCI): Gather data on materials, energy inputs, and emissions for each electrification scenario and household.
3. Data Collection: Install energy loggers in two rural households to monitor electricity consumption, complemented by surveys and interviews to gather lifestyle and energy usage data.
4. Life Cycle Impact Assessment (LCIA): Use OpenLCA software to assess environmental impacts.
5. Scenario Analysis: Perform LCA for each household under all four electrification scenarios to evaluate environmental impacts specific to their energy consumption patterns. The final input data for OpenLCA comprises of the annual energy usage of each family, measured in kWh.
6. Data Interpretation: Compare and analyze results for each household across the four scenarios, identify critical contributors to environmental impacts.

4. Results and Discussions

Figure 1 shows the distribution of appliance energy consumption collected for Henry and Michael's house while Figure 2 shows their daily energy consumptions. Figure 3 shows the carbon footprint for 4 scenarios. The diesel generator produces the highest CO₂ emissions across every scenario. For both houses, the SHS appears cleaner than the grid connection; nevertheless, the distinction between these two situations is negligible in Henry's instance, whereas in Michael's case, despite having two SHS to supply electricity, the usage remains lower than that of a grid connection. As electricity use rises, the benefits of SHS will become evident. In the Grid Connection scenario,

both households exhibit lower pollution levels compared to the fourth scenario, in which the diesel generator operates for only 6 hours a day.

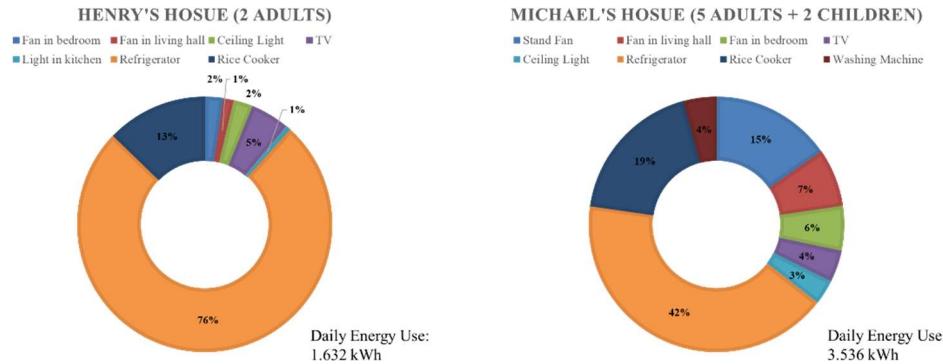


Fig. 1. Distribution of appliance energy consumption for Henry (left) and Michael's (right) house

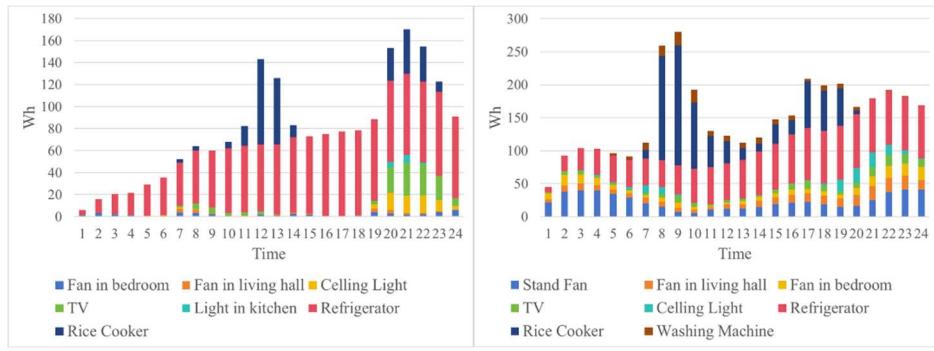


Fig. 2. Average daily energy consumption in Henry (left) and Michael's (right) house.

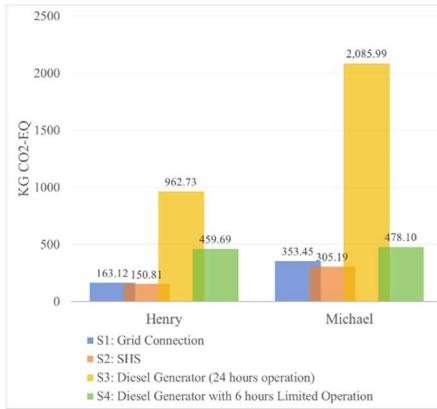


Fig. 3. Carbon footprint for 4 scenarios of two households

5. Conclusions

In conclusion, electrification using diesel generators is saddled with reduced comfort, high cost and high pollution compared to other electrification schemes. The utilization of SHS for power consumption results in minimal environmental impact across all scenarios, particularly when electricity usage grows, wherein the benefits become increasingly evident.

6. Lists of papers and oral presentations

1. Xu Lingyao, ChiaKwang Tan, Hideaki Ohgaki, Cravioto Jordi, Shoki Kosai, Christopher Wesley Ajan, Life Cycle Assessment of Rural Electrification in Malaysia, Poster Presentation, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, Kyoto University Uji Campus, Kyoto, Japan. 12-13 December 2024.

原子力圧力容器鋼モデル合金の機械特性・微細組織変化に及ぼす損傷速度効果の研究

福元謙一¹、藪内聖皓²

¹福井大学附属国際原子力工学研究所、²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

原子力発電所の高経年化問題の中で原子炉圧力容器(RPV)の中性子照射脆化が重要課題の一つである。中性子照射によって、RPV 鋼母相内に転位ループや析出物が生成され、硬化・脆化に寄与して RPV の健全性に影響する。脆化予測研究において、監視試験片の分析と試験炉での中性子照射加速試験が用いられてきた。加速試験では、試験炉において長期間運転相当の中性子損傷量を短時間で照射するため、商用炉と比較して中性子束は 2-4 衍程度高い。この差は、照射脆化量の違いとして現れ、低損傷速度ほど脆化量が大きいことが示唆されている。そのため、試験炉を用いた研究データの取り扱いには慎重に検討する必要がある。先行研究として3桁にわたる損傷速度範囲でプロトン照射した RPV モデル合金(Fe-0.05wt%Cu)の硬さ試験を実施し、照射硬化量の損傷速度依存性を確認した。しかし、損傷速度依存性に対応する微細組織変化についてはデータを取得していないため硬さ変化と組織の相関性に及ぼす損傷速度効果は不明であった。

本研究では、プロトン照射した RPV 鋼の微細組織変化から照射脆化に及ぼす損傷速度の影響を明らかにするため、3桁にわたる損傷速度範囲でプロトン照射した RPV モデル合金の微小領域組成分析を伴う微細組織観察を行った。

2. 実験方法

2024 年度の共同利用に置いて試料作製とし RPV 鋼モデル合金を京都大学エネルギー理工学研究所のアーク炉を用いて作製した。作製した試料の組成について表 1 に示す。これらの試料は今後 Cu を含まない EOV 鋼モデル合金として使用する。

試験に用いた試料は、2023 年度の共同利用にて京都大エネルギー理工学研究所でアーク溶解にて作製した RPV モデル合金 Fe-0.05wt%Cu 合金である。この合金を板状に成形してプロトン照射した。照射条件は、若狭湾エネルギー研究センターの 200kV イオン注入装置を用い、照射温度 300°C にて 190keV の H⁺を照射した。深さ 800nm にて最大損傷量 0.10dpa、損傷速度は $7.0 \times 10^{-7} \sim 7.2 \times 10^{-4}$ dpa/s の範囲で照射した。照射時間は低フラックス照射において最大 50 時間で行った。

透過電子顕微鏡(TEM)観察用試料は、複合イオンビーム加工観察装置(FIB:JEOL 製 JIB-4500)を用いて、マイクロサンプリング法により加工した。厚さ約 150nm の薄膜試料を切り出した後、精密イオン研磨装置による 0.5kV のアルゴンイオンビームスパッタリングを用いて加工時の Ga イオン照射によるダメージ層を除去した。薄膜試料に対しウイークビーム暗視野法を用いた TEM 観察で転位ループの観察を行った。欠陥の数密度の測定は回折ベクトル $g=200$ で撮影された暗視野像で行った。

走査透過型電子顕微鏡(STEM)観察用試料は、九州大学超顕微解析センターのイオンビーム・電子ビーム複合型精密加工分析装置(TFS 製 Helios 5 UX)で製作し、同センターの広電圧超高感度原子分解能電子顕微鏡(JEOL 製 JEM-ARM200CF)を用いたエネルギー分散型 X 線分光法(EDS)より X 線カウントマップを取得した。

3. 結果

損傷速度 7.0×10^{-5} 、 6.6×10^{-6} dpa/s の TEM 観察の結果、転位ループの形成が確認された。

図 1 では、STEM/EDS による X 線カウントマップ(Cu)の結果を示す。低損傷速度条件ほど、Cu が高密度に形成した。これから、Cu リッチ析出物(CRP)は硬化量に寄与し、CRP 形成に及ぼす損傷速度効果が示唆された。

4. まとめ

3 桁損傷速度を変化させてプロトン照射した RPV モデル合金に対する硬さ試験により、照射硬化に対する損傷速度依存性が明らかになった。この照射硬化量の相違について STEM/EDS 観察から CRP 形成に及ぼす損傷速度効果に起因することが示唆された。

表1 京大エネ理工研でアーク溶解にて作製した RPV 鋼組成

試料名	Ni	Si	Cu	Mn
Fe-1.5Mn	<0.01	<0.01	<0.01	1.20
Fe-1.5Mn-0.6Ni	0.59	<0.01	<0.01	1.33
Fe-1.5Mn-0.25Si	<0.01	0.21	<0.01	1.33
Fe-1.5Mn-0.6Ni-0.25Si	0.59	0.21	<0.01	1.32
Fe-1.5Mn-0.6Ni-0.25Si-0.02Cu	0.59	0.21	0.02	1.35
Fe-1.5Mn-0.6Ni-0.25Si-0.06Cu	0.59	0.22	0.06	1.35
参考：A533B 鋼 (JAEA)	0.67	0.30	0.15	1.34

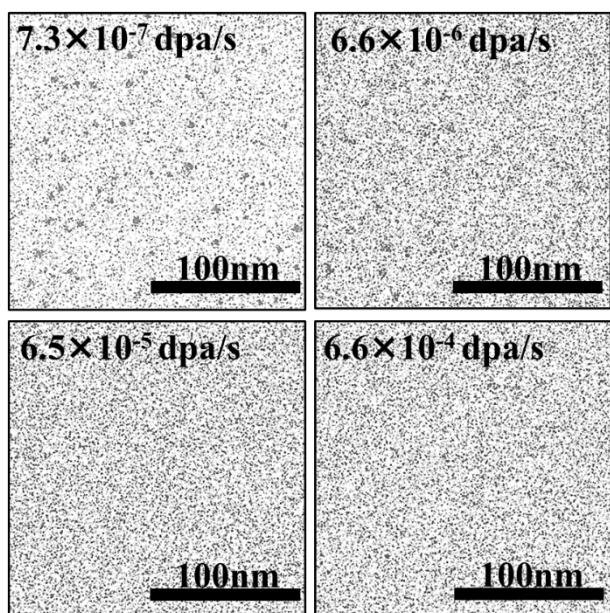


図1 各損傷速度条件での Cu カウントマップ

右上から： 7.3×10^{-7} dpa/s, 6.6×10^{-6} dpa/s,
 6.5×10^{-5} dpa/s, 6.6×10^{-4} dpa/s,

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^{1,2}, 升野振一郎², 全 炳俊³

¹東海大学 総合科学技術研究所、²京都大学 化学研究所、³京都大学 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： J/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 μm 以下の空間領域で固相・溶融液相・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6千個のミ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がある。そこでR6年度はFEL 1パルス照射できる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。

表面プラズマ波の初期形成過程を調べるために、ミクロパルス列を单一にし、単一レーザーパルス照射によりできるプラズマ密度変調を捉える必要があることが推察された。本年度は、プラズマミラーによりミクロパルス列を6000程度から単一パルスに切り出す実験を行った。

2. 実験

プラズマミラーの光学配置を図1に示す。中赤外（ピーク波長 $11.4\mu m$ ）自由電子レーザーはマクロパルス幅 $3.7\mu s$ 、繰り返し周波数 $2Hz$ 、ミクロパルス幅 $150fs$ 、繰り返し周波数 $29.75MHz$ 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。図2にはパルス切り出したオシロスコープの計測結果を示す。緑色がゲルマニウムを透過した自由電子レーザーパルス、橙色がYAG レーザーパルスを示す。YAG レーザーが照射された瞬間に自由電子レーザーの反射パルス（青色）が測定された。単一パルスのみ反射されていることを確かめた。YAG レーザーのパルスエネルギー $20mJ$ で、自由電子レーザー単一パルスのエネルギーが最大 $4\mu J$ を示した。

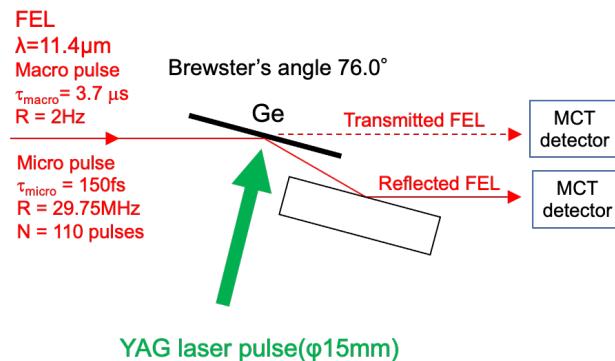


図1 プラズマミラー

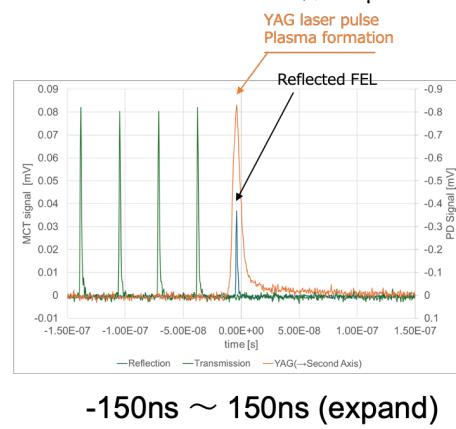


図2 自由電子レーザーの透過パルスと反射パルス

Z-Scan 法により 0.5mm 厚の Si 基板を用い自由電子レーザー単一パルスの非線形吸収を調べた。実験では自由電子レーザー単一パルスを $f=12.5\text{mm}$ のレンズで Si 基板に集光し透過してきたパルスのエネルギーを検出器により測定した結果を図 3 に示す。縦軸を透過した自由電子レーザー単一パルス、横軸がシリコン基板の移動距離である。レーザー集光点付近 ($Z = 6.4\text{mm}$) で非線形吸収が起こり FEL の透過量が減少している。自由電子レーザー単一パルス $4\text{ }\mu\text{J}$ においてパルス幅が短く強度が高いため非線形吸収したと考えられる。次年度はこの非線形吸収したシリコン表面をその場計測する計画である。

3. 研究成果報告

[論文発表リスト]

- (1) Shin-ichiro Masuno, Masaki Hashida, Heishun Zen: "Formation of periodic surface structures on semiconductors under mid-infrared free electron laser irradiation", IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials **143** (2023)pp.320-324.

[口頭発表リスト]

- (1) 橋田昌樹、鶴田茂樹、升野振一郎、山口 滋、岩森 晓、全 炳俊"レーザー微細構造形成解明を目指したプラズマミラーによる単一 FEL パルスの切り出し"第 31 回 FEL と High Power Radiation 研究会 2024 年 12 月 13 日
- (2) Masaki Hashida, Hitoshi Sakagami, Mitsuhiro Kusaba, Satoru Iwamori, Shigeru Yamaguchi and Shigeki Tokita, "Laser Induced Periodic Structures: generation and applications", The 25th International Symposium on Laser Presision Microfabrication, 11-14 June 2024, San Sebastian, Spain.
- (3) Masaki Hashida, "Recent progress of laser induced nano structuring for solar cell production and biomimetics", 28 June 2024, Biomedical Engineering Workshop, "Varna, Bulgaria.

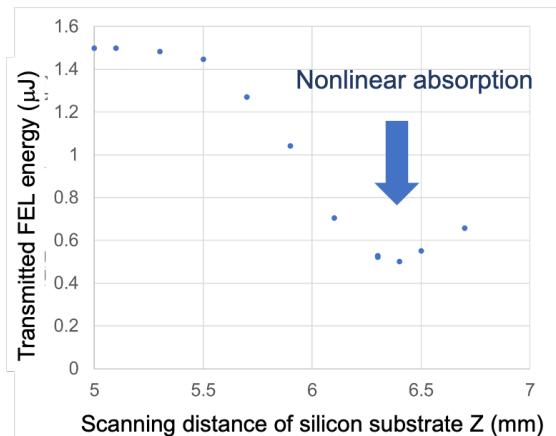


図 3 単一自由電子レーザー単一パルスに置けるシリコン基板の非線形吸収

コーヒーレントエッジ放射観測に基づく 自由電子レーザー相互作用描像

清 紀弘¹, 全 炳俊², 大垣 英明²

¹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

²京都大学 エネルギー理工学研究所

1. はじめに

あらゆる波長にて発振可能であり相対論的電子ビームから効率よくエネルギーを抽出できる自由電子レーザー (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、テラヘルツ帯コー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。コー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、この放射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ーヒーレントエッジ放射 (CER) を、中空平面鏡を利用して FEL 発振に過負荷になることなく 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 CER の抽出システムを改修して FEL 発振中の CER 出力を増大し、高い周波数における CER 出力の時間発展計測を実施した。

2. 実験方法

昨年度より実施している CER 取り出し効率の改善作業を完了した。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、下流に向かって内面が拡張するようにテーパーが付けられた偏向磁石真空容器およびベローズを通過して ICF114 規格の六方キューブに到達する。ここで遠隔制御によって挿入できるアルミニウム製平面鏡にて 90 度偏向し、開口が 63 mm の結晶石英窓を介して大気へ取り出される。平面鏡には 50 mm 離れた位置に二つの楕円状の孔が設けられており、この孔を通過することで往復できる FEL の光軸に垂直な面における孔の直径はそれぞれ 15 mm および 21 mm である。今回の CER 取り出し効率の改善によって、真空容器にて反射されることなく中空平面鏡によって FEL 共振器から大気へ直接取り出される CER ビームの立体角は約 4 倍になった。

大気中に取り出された CER ビームは曲率半径 1 m の凹面鏡にて集光かつ 90 度偏向される。厚さ 2 mm の Tsurupica 平行板をビームスプリッタとして使用して、この平行板で反射された CER ビームは焦点距離 76 mm の非軸放物面鏡で集光された後に W-band ダイオード検波器にて CER 出力の時間波形を測定した。電子バンチ形状に多少の変動があっても W-band 帯では CER の強度はほとんど影響を受けないため、電子バンチ内に含まれる電荷量をモニタするのに利用した。一方で平行板を透過した CER ビームは、もう一つの焦点距離 76 mm の非軸放物面鏡で集光されて広帯域ダイオード検波器 (TeraSense 社 : Ultrafast) に入射した。非軸放物面鏡の上流に中心周波数 1 THz かつ相対バンド幅 15% のバンドパスフィルター (Sensor- und Lasertechnik 社 : BP-1000) を挿入し、1 THz 帯の CER 強度を測定した。本実験の光学系と測定器の配置を写した写真を図 1 に示す。

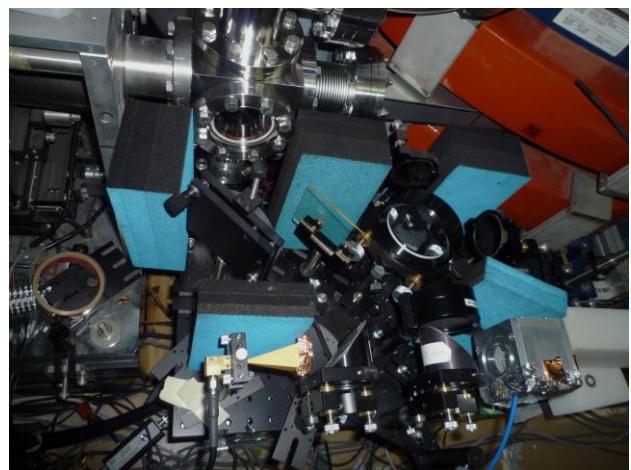


図 1 本実験における光学系と測定器の配置

3. 実験結果

電子エネルギー32 MeV、マクロパルス幅 6.9 μ s、ミクロパルス平均電荷量 44.6 pC の電子ビームを使用し、アンジュレータ磁石間隙を 16.4 mm に設定して波長 8.5 μ m の FEL を発振した。中空平面鏡の孔径は 21 mm を選択し、中空平面鏡による共振器損失が無視できることを確認した。制御室にて観測された最大 FEL エネルギーは約 50 mJ であった。周波数帯 1 THz における CER 出力時間波形と FEL 共振器の共振器ディチューニング長との関係を図 2 に示す。FEL 出力が最大になる完全同期条件を挟んでディチューニング長が負から正に変化するとき、高い FEL 出力が観測される時刻 4~6.9 μ s において、CER 出力は FEL が発振していない時の条件（ディチューニング長が -40 μ m の場合）と比較して増大から減少へと転じていることが明瞭に示された。これは、FEL 相互作用によって誘起される電子バンチの伸縮作用が FEL 出力に正の相関があり、バンチ長増減率とディチューニング長との符号が一致していることを意味している。時刻 5.9 μ s における CER 出力では、ディチューニング長によって最大 2 倍の相違が生じていた。高い周波数帯にて CER 出力の時間発展を測定することで、形状因子変化をより正確に測定できることを確認した。

4. まとめと今後の展開

FEL 施設 KU-FEL において中空平面鏡の更新を行うなど CER 取り出し効率の改善作業を完了し、FEL 共振器から大気へ直接取り出される CER ビームの立体角は従前の約 4 倍に増大した。そして広帯域ダイオード検波器とバンドパスフィルターを使用して 1 THz 帯における CER 出力の時間発展を測定した。FEL 共振器のディチューニング長によって CER は最大 2 倍の出力変化が生じており、FEL 相互作用が電子バンチ長変形を誘起していることが確認できた。今後は、複数の帯域における CER 出力の時間発展を同時に測定することで、電子バンチ形状の時間発展をより高精度に評価する予定である。

参考文献

1. N. Sei, H. Zen, H. Ohgaki, and R. Hajima, *iScience*, **27** (2024) 111402.

発表リスト

[論文発表リスト]

- 清 紀弘、「線形加速器施設における共振器型自由電子レーザーが誘起する電子バンチ変形の観測」、放射光 **37** No. 3 (2024) 195.
- N. Sei, H. Zen, H. Ohgaki, and R. Hajima, “Temporal evolution of electron-bunch length in macropulse of resonator-type free-electron lasers”, *iScience*, **27** (2024) 111402.

[口頭発表リスト]

- N. Sei, H. Ohgaki, H. Zen, “Observation of coherent edge radiation for electron-bunch length monitoring during free-electron laser oscillations at KU-EFL”, the 41st International Free Electron Laser Conference (FEL2024), Warsaw, Poland, 2024/08/20、ポスター発表
- 清 紀弘、大垣 英明、全 炳俊、境 武志、「共振器型自由電子レーザーが誘起する電子バンチ変形の研究」、日本物理学会 第 79 年次大会、2024/9/18、口頭発表
- 清 紀弘、大垣 英明、全 炳俊、早川 恭史、境 武志、高橋 由美子、早川 建、田中 俊成、野上 杏子、「コーヒーレントエッジ放射を用いた自由電子レーザー発振中のバンチ形状変化に関する研究」、日本赤外線学会 第 33 回日本赤外線学会研究発表会、2024/10/11、口頭発表

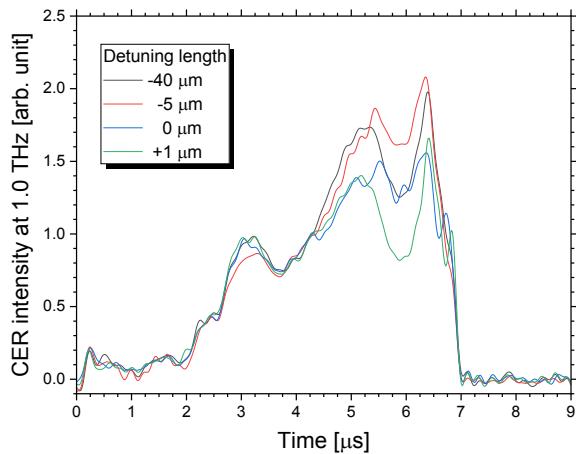


図 2 CER 出力の時間発展とディチューニング長の関係

参考文献

1. N. Sei, H. Zen, H. Ohgaki, and R. Hajima, *iScience*, **27** (2024) 111402.

水電解水素製造過程における 気泡水素比率の光学計測法の開発

安東 航太¹, 中嶋 隆²

¹ 公益財団法人高輝度光科学研究所 (JASRI)

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究背景

アルカリ水電解による水素製造は脱炭素社会を実現する基盤技術である。電解性能の向上には、電解反応表面積の増大と電解生成した気泡の速やかな電極離脱 (=電解反応表面積の確保) をともに満たすような、電極表面のマイクロ/ナノ構造化が有効であり、我々は前年度に電極性能の電気化学計測と気泡挙動の光学計測を通じて、両者を同時に実現するような水素生成電極のレーザー加工プロトコルの開発に成功した。一方、電極面の構造化により気泡数の増加が避けきれず、せっかく増やした反応表面積が全て活かしきれていない懸念も生じた。そこで気泡が生み出す対流に注目した。電極上に滞留する気泡は反応表面積を減少させるので電解効率を低下させるが、電極離脱した気泡は浮上により対流を生み出し気泡の電極離脱や溶存気体の対流輸送を促進するため、電解効率の低下を抑制するという好ましい効果をもたらす。気泡の生成も電極面からの離脱も促進する可能性があるマイクロ/ナノ構造化電極を用いれば、高い電流密度でも高効率な水電解を実現できるだろうと考えた。つまり、水電解によって生成した水素は、電解液に溶存したまま拡散して排出(溶存拡散排出)されるか、水素気泡となって排出(気泡輸送排出)されるかのいずれかであるが、水素の総発生量に対する後者の比率を増やすことができれば水素輸送が高効率でおこなわれる所以好ましい、ということである。これを確かめるには溶存水素からマイクロ水素気泡への変換率が重要な指標となる。

以上のような背景から、本研究では電極から生成するマイクロ気泡の全数計測を行って、溶存水素がマイクロ水素気泡へ変換する割合(気泡変換率=生成した全ての水素気泡の総体積/生成水素分子の総体積)を求める計測法の開発を行った。

2. 実験

水素発生電極には幅 3 cm、直径 100 μm 、200 μm の Pt ワイヤーを用いた。これを 1 M の KOH が入った透明なアクリルセル中に図 1 のように水平に固定し、一定電流で水素発生を行った。ワイヤーで発生した水素気泡は、電極離脱後、ワイヤー上方を垂直に浮上する。この様子をワイヤー正面からカメラで撮影し、全ての気泡にピントのあった画像を取得した。低電流ではワイヤーの場所によって水素気泡の発生量が異なったので、2 mm 間隔で計 5箇所の計測点を設け、各箇所で 2 秒間、1000 枚の画像を記録した。画像解析では 2 値化後、距離変換を施して個々の気泡を分離して直径と位置を算出し、さらに連続する画像の差分を取って気泡の浮上速度も算出した。ただし、ワイヤー近傍は複数の気泡が重なり、個別に分離できない場合があったので、ワイヤーから 400 μm 離れた縦幅 100 μm を解析範囲とした。最後に気泡変換率 R_b を以下の式より算出した。

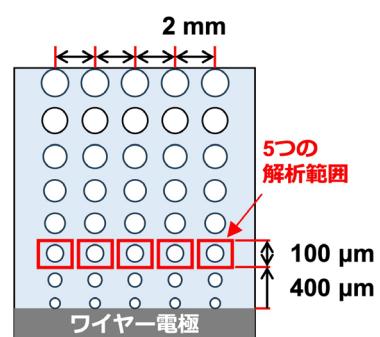


図 1. 気泡解析範囲

$$R_b = \frac{\sum_j \frac{4\pi}{3} (r_j)^3 \times L}{\frac{I}{2F} \frac{h}{v}}$$

ここで r_j : 個々の気泡の半径、 L : ワイヤー電極の長さ、 W : 解析範囲の横幅、 I : 電流値、 F : ファラデー定数、 h : 解析範囲の縦幅、 v : 気泡の平均浮上速度である。

3. 結果と考察

図2に気泡の総数、平均浮上速度、平均直径および気泡変換率の電流増加に伴う変化を示す。気泡の総数は100 μm と 200 μm のPtワイヤー径で異なる傾向が見られたが、どちらも電流値とともに増加した。光学顕微鏡でワイヤー表面を観察した際に200 μm ワイヤーの方が多くのマイクロ構造を有していたことから、表面粗さが大きいほど気泡生成が起きやすく、傾向の違いが現れたと考えられる。また、気泡の総数と同様に、平均浮上速度も電流値に対して単調に増加した。一方、気泡の平均直径は電流値が増えるほど減少していった。これは気泡数が増えるほどより速い対流が生み出され、気泡の電極離脱が促進された結果と考えられ、狙い通りの結果が得られた。この効果は気泡が多ければ多いほど、つまり気泡変換率が高ければ高いほど大きくなるはずである。しかし、気泡変換率は0.7~0.8で頭打ちとなった。気泡生成には溶存水素濃度が飽和濃度を上回っている必要があり、また溶存水素は対流輸送とは異なる方向にも拡散してしまう。これらが気泡変換率が1に達しない原因と考えられる。従って、気泡変換率の最大値が大幅に向上する可能性はないものの、表面が粗い200 μm ワイヤーの気泡変換率が5 mA付近で100 μm ワイヤーの気泡変換率を大幅に上回っていることから、マイクロ/ナノ構造化電極を使えば、低い電流値でも高い気泡変換率を得られる可能性があることは示唆された。

4. まとめ

本研究では生成した全ての水素がマイクロ水素気泡へと変換される割合(=気泡変換率)を求める計測法の開発を行った。気泡生成には溶存水素濃度の過飽和が必要であり、また溶存水素は対流輸送とは異なる方向にも拡散することから、気泡変換率の最大値は0.7~0.8と1に達しないことが分かった(論文投稿準備中)。また、マイクロ/ナノ構造化電極を使えば、低い電流値でも高い気泡変換率を得られる可能性も示唆された。

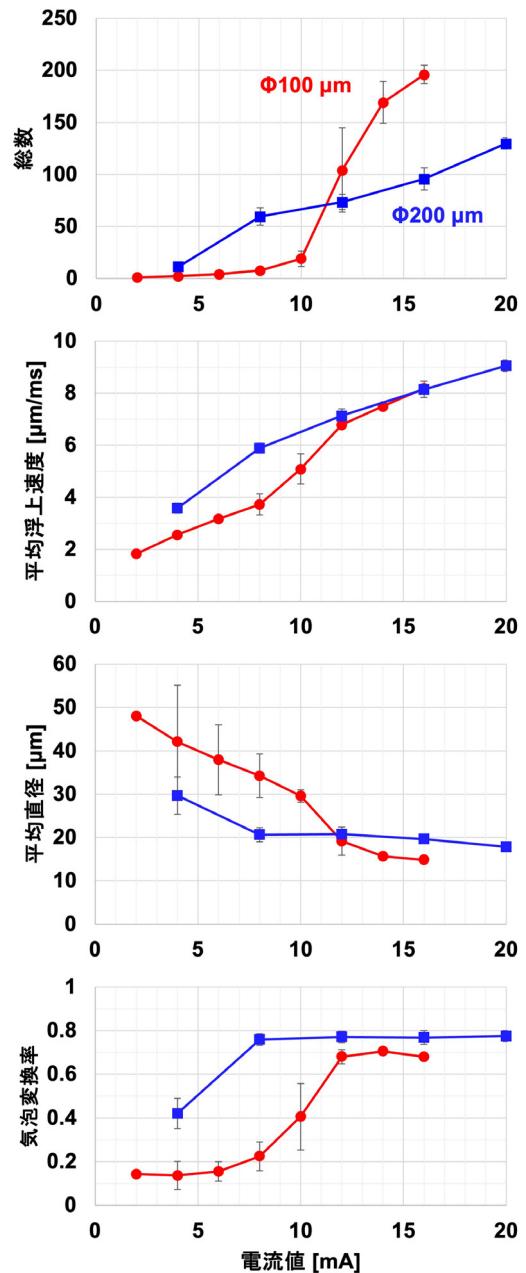


図2. 電流増加に伴う気泡の総数、平均浮上速度、平均直径および気泡変換率の変化。各点は5箇所の平均値、エラーバーはその標準偏差を表す。電極の表面粗さの違いを反映しPtワイヤー径100 μm (●)と200 μm (■)でそれぞれ異なる結果が得られた。

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¹, 田口尋香¹, 藤原沙楓¹, 中田栄司²

¹ 京都府立大学大学院・生命環境科学研究科

² 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

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さ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。

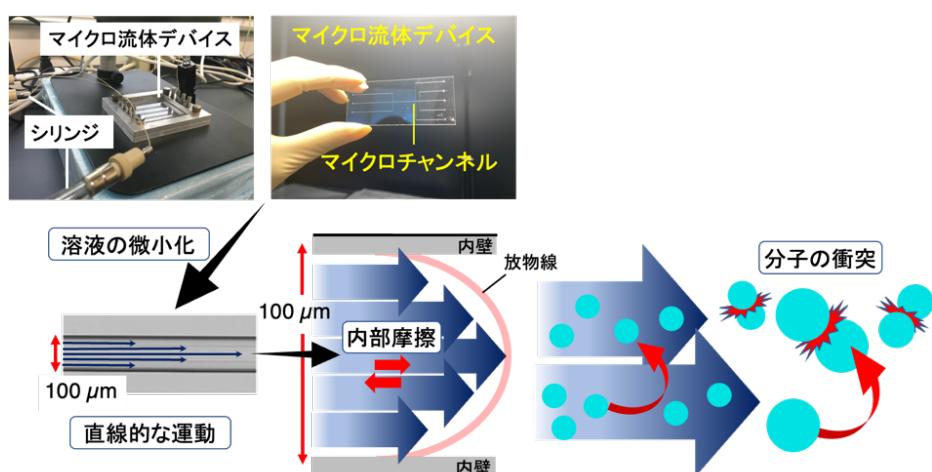


図1：マイクロ流体デバイスと内部における流体運動-分子会合変換機構の模式図
かすだけで、従来の溶液化学では組み合わされることのなかった様々な分子同士の能動的な相互作用の可能性が開かれ、超分子構造体の枠組みが拡張できる可能性を秘めている。

これまで水溶性ポルフィリンである Tetrakis(4-sulfonatophenyl)porphyrin (TPPS) をはじめ、様々なπ共役系分子をモノマーとした超分子重合を実施してきた。マイクロフロー空間内における定常的な溶液の流れが、能動的な分子会合を引き起こす駆動力となることを報告している。これらの成果を踏まえ、本研究では、高分子をゲスト、環状分子をホストとしたホスト-ゲスト相互作用（ポリロタキサン合成）に着目し、高分子-分子間相互作用がマイクロ流体中の非平衡環境によってどのような影響を受けるのかを検証した。

2. 実験

高分子溶液と環状分子の溶液をマイクロフロー空間で混合し、速度論環境下においてポリロタキサンの形成を行なった。流流出溶液を基板にキャストして、原子間力顕微鏡 (AFM) 観察及び走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察を実施した。また、濃度やホスト/ゲスト比を揃えて同一の条件の下にバイアル管を用いた溶液も調製した。これら溶液についても同様の評価を実施した。

3. 結果と考察

蛍光性色素を修飾したホスト分子用い、ポリロタキサン形成過程を蛍光測定により定量的に評価した。その結果、マイクロフロー空間導入前後において包接率が上昇することが明らかとなった。この結果は赤外線吸収測定および X 線散乱測定からも支持された。次に、得られた溶液をマイカ基板にキャストし、AFM 観察を行うと、 μm 領域にまで発達したファイバー構造が確認された。この結果から剪断応力によりポリロタキサンが高度に階層化したことが示唆される。SEM を用いた観察の結果、シート状あるいはテープ状の構造体の創製が確認された（図 2）。一辺の長さは数～数十 μm に及び複数の構造体が階層的に組織化していることが強く示唆される。一方、バイアル管を用いてポリロタキサン形成を行なった場合は、特定の形態を有する構造体は観察できなかった。

創製したポリロタキサンは高分子間の相互作用を駆動力としてさらに自発的に会合し、 μm サイズの構造体へと組織化することが明らかとなった（図 2）。一方、同じ高分子溶液と環状分子の溶液を、バイアル管を用いて混合しても、こうした巨大な構造体の形成は認められなかった。以上の結果より、高分子と環状分子がマイクロ流体の粘性応力を駆動力として速度論的に会合することにより、マイクロ領域の階層化が可能な特殊な構造体が創製されたと推察される。これらの結果を総合的に考察することにより、今後詳細な会合メカニズムの解明を進めていく予定である。また、様々な高分子と環状分子の組み合わせから多彩な構造体の創製を目指していく予定である。

4. 論文発表リスト

- (1) Photostimuli Reach a Selective Intermediate in a Microflow: One-Shot Transformation from a Supramolecular Co-Polymer to a Micro-Disk Structure, Kaneyoshi, A.; Nomura, S.; Maeda, T.; Kusukawa, T.; Kikkawa, Y.; Numata, M. *ChemSystemsChem*, 6, e202400031 (2024) (doi.org/10.1002/syst.202400031).

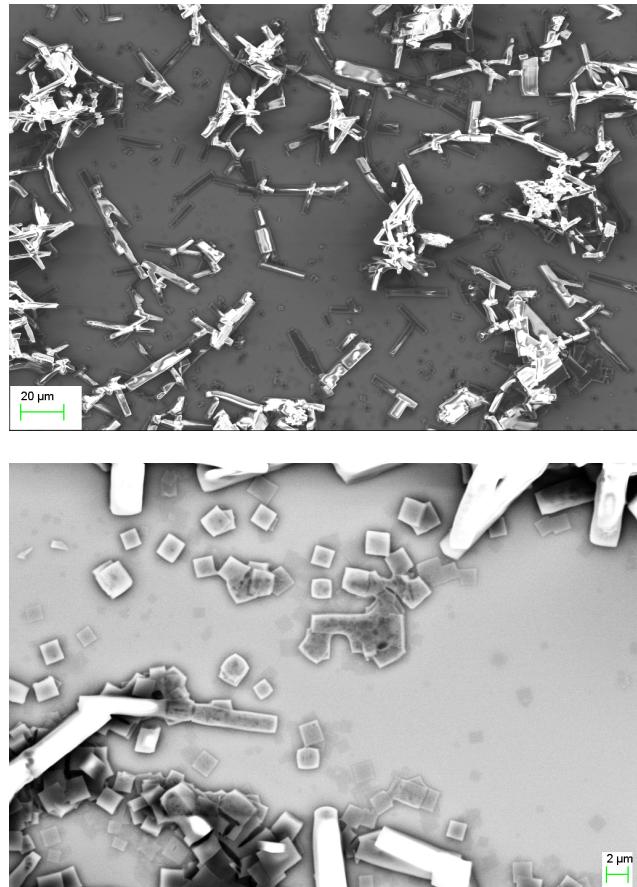


図 2：本研究課題で実施した走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察の結果。

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¹, 八木重郎²

¹ 東北大学金属材料研究所

² 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。

今日までに、純 Li や LiPb といった液体金属、あるいは FLiBe、FLiNaK、LiCl-KCl といった溶融塩が提案されており、輸送計算による TBR の検討や構造材料との共存性、水素溶解・脱離性、比熱・密度などの基礎物性およびブランケット工学に特化した物性研究が進められている。一方で、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、本研究では、Li-Br/F/I 系溶融塩に着目することでこれら溶融塩について調査をし、より融点が低い組み合わせについてその中性子工学的成立性の検証を行うことを目的とする。

2. 検討手法

溶融塩選定の初期段階として、候補となりうる溶融塩の組み合わせにおける状態図を Phase Equilibria Diagrams Online にて調査した。ここでは、前述した Li を含有するハロゲン系塩をベースとして、これに新たな塩を加えた 2 元系・3 元系以上の溶融塩の状態図を確認した。特に、3 元系以上の溶融塩については、2 元系溶融塩のうち特に融点が低い組み合わせに着目し、この組み合わせに新たに加える形で調査を行った。以上の調査を経て、既存候補として挙げられる FLiBe、LiCl-KCl を基準として融点が

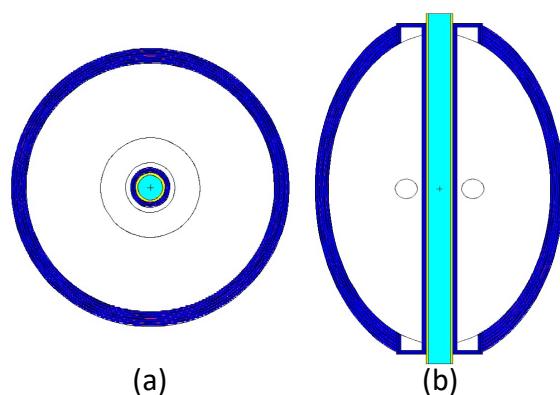


図 1 ARIES-ST を元に作成した粒子輸送計算における体系の(a) 水平断面および(b) 鉛直断面

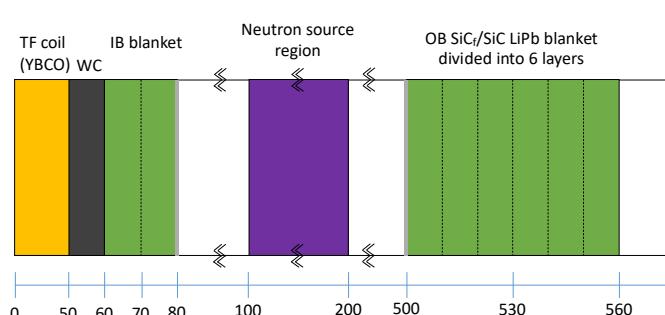


図 2 ST 計算体系における炉中心からのラジアルビルド

ることによって、UAGN テトラループ、AA を有する内部ループおよび 2 つのステムが結合に重要であることを明らかにした（図 1）。

2023 年に Li らが、A3G と Vif、CBF β 、ELOB、ELOC の複合体の立体構造を極低温電子顕微鏡（Cryo-EM）により解析した。その構造では A3G と Vif の間に RNA が存在し、その RNA が A3G と Vif の相互作用を促進していることが明らかとなっている。また、5'-CGGUUGACGUUUUAACAA-3' という RNA 配列が特に結合が強いことが示唆されている。この RNA とアプタマーは配列が異なり、二次構造も異なるので、V β BCC 複合体に対して、アプタマーはこの RNA とは異なる様式で結合していると考えられる。現在、このアプタマーが A3G と Vif の相互作用を阻害することを示唆されており、その阻害機序を明らかにすることを計画している。

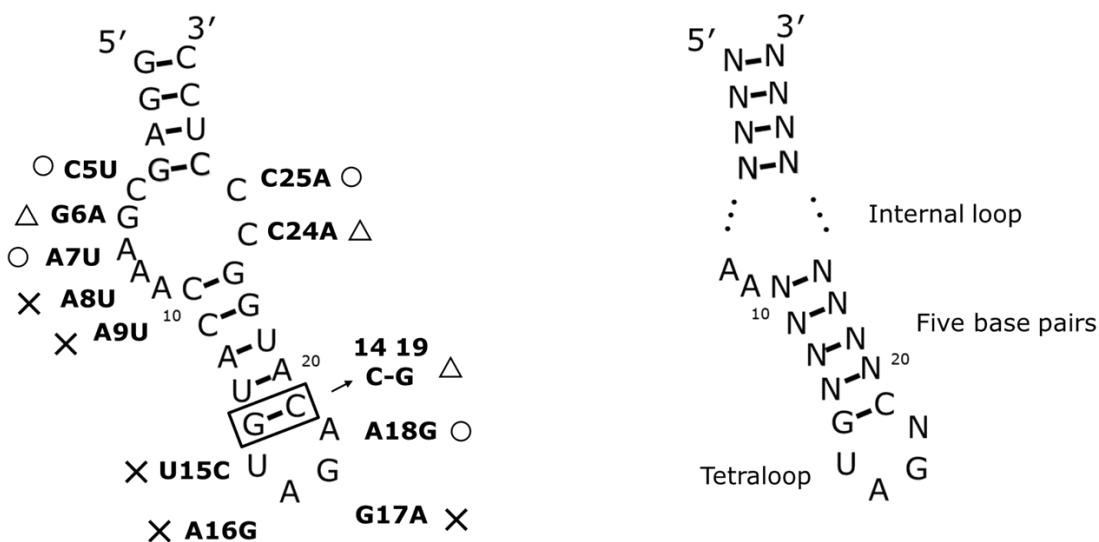


図 1 人工核酸の変異体の V β BCC 複合体に対する結合能（左）と結合に必要なモチーフ（右）

4. 研究業績

[論文発表リスト]

Kumagai, K., Kamba, K., Suzuki, T., Sekikawa, Y., Yuki, C., Hamada, M., Nagata, K., Takaori-Kondo, A., Wan, L., Katahira, M., Nagata, T., Sakamoto, T., Selection and characterization of aptamers targeting the Vif-CBF β -ELOB-ELOC-CUL5 complex, *J. Biochem.*, **176**, 205-215 (2024) 発行済

[口頭発表リスト]

- 1) 熊谷紀志, 神庭圭佑, 鈴木拓也, 関川湧斗, 永田佳代子, 高折晃史, 万里, 片平正人, 永田崇, 坂本泰一, V β BCC complex を標的とした aptamer の選別と特性解析, 2024 年度 日本生化学会関東支部例会, 2024 年 6 月, 東京
- 2) 篠崎智弘, 熊谷紀志, 鈴木拓也, 関川湧斗, 神庭圭佑, 永田佳代子, 高折晃史, 万里, 片平正人, 永田崇, 坂本泰一, V β BCC complex を標的とした aptamer の構造解析のための改変, 2024 年度 日本生化学会関東支部例会, 2024 年 6 月, 東京, ポスター
- 3) Kazuyuki Kumagai, Keisuke Kamba, Takuya Suzuki, Yuto Sekikawa, Kayoko Nagata, Akifumi Takaori-Kondo, Li Wan, Masato Katahira, Takashi Nagata, Taiichi Sakamoto, The RNA aptamers against the V β BCC complex, XXV International Round Table on Nucleosides, Nucleotides and Nucleic Acids, 2024 年 9 月, 東京, ポスター
- 4) 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, V β BCC complex を標的とした aptamer の改変, 第 47 回日本分子生物学会年会, 2024 年 11 月, 福岡, ポスター

原子層物質複合物質大規模構造の電子物性探索

岡田晋¹, 丸山実那¹, 高燕林¹, 松田一成²

¹筑波大学数理物質系

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. ヤヌス WSSe の構造探索とスクロール構造構築の機構解明 (文献[5])

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 WSSe に注目して、スクロール構造をチューブ状構造でモデル化し、スクロール構造が実現される物理的起源の解析を行った。計算の結果、Se 原子が外層にある曲がった構造では、WSSe の直径が 4.5nm より大きくなると平面構造よりも安定化することが明らかになった(図1)。また、チューブ直径が約 10nm で、曲率構造が最も安定になることを予言した。次に、詳細な原子構造の解析を行った。その結果、この高い安定性は、曲率の印加下で Se-W 間の圧縮歪みと S-W 間の伸長歪みが解消されるためであることを明らかにした。エネルギーの曲率に対する強い依存性に比べて、曲率が WSSe の電子状態に及ぼす影響はチューブ直径が極めて小さい領域に限られており、実験的に見られる直径領域では曲率の影響が小さいことが明らかになった。

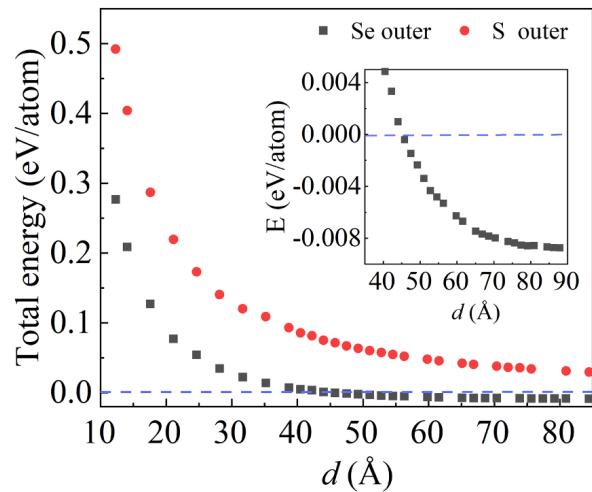


図1. WSSe ナノチューブの全エネルギーのチューブ直径依存性。エネルギーは WSSe シートを原点としている。

2. 六方晶窒化ホウ素薄膜の誘電特性の解明 (文献[7])

二層六方晶窒化ホウ素(hBN)は、その層間の原子配置が Bernal 型(AB 積層型)の時、反転対称性が消失し層鉛直方向に有限の静電分極が誘起されることが実験的に報告されている。本研究では、hBN 薄膜に対して密度汎関数理論に基づく全エネルギー電子状態計算を行い、その誘電特性の積層構造と積層数依存性の理論解明を行った。初めに、二層 hBN に対しての解析を行った。層鉛直方向の静電分極は、層間の並進変位に対して滑らかに変化し、Bernal 積層で最大で AA' 積層でゼロとなり、ある特定の層間積層構造で分極の向きが反転することが明らかになった(図2)。他方、層間の捻り変異に対しては、わずかな捻り(9度)で、速やかに分極が消失することが明らかになった。また、膜圧依存性については、AB 積層では分極が総数の偶奇に依存し消失/発現を繰り返すのに対して、菱面体積層(ABC 積層)では総数の増加に伴い、分極が線形的に増加する。

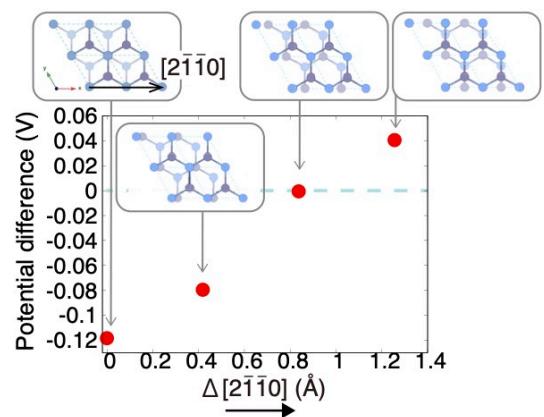


図2. 二層 hBN 薄膜の面鉛直方向の静電分極の積層配置依存性 $\Delta=0$ が AB 積層に対応。水色、紫の円はそれぞれホウ素と窒素を表す。

3. 層間で非対称な歪を有する二層グラフェンの構造と電子物性 (文献[8])

積層に捻りが入った二層グラフェンでは、モアレと呼ばれる長周期の干渉縞構造が発現する。このようなモアレ干渉縞は、層間で異なる格子定数を有する系についても発現が期待される。ここでは、格子伸長を有するグラフェンと平衡格子定数にあるグラフェンからなる二層グラフェンの構造と電子状態の解析を行った。計算の結果、両層の格子定数の違いに起因する、層間の原子配置の最適化を促すような構造の再配置は生じないことが明らかになった。他方、格子定数の伸長が、静電ポテンシャルを浅くすることから、両層の間で電位差が誘起され、それに伴う電荷移動が生じる(図3)。さらに、両層のバンドの交点においてバンドの反発が生じ、歪みの量をより小さくすることにより、平坦バンドの出現と成長が期待される。

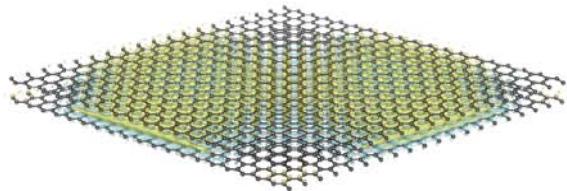


図3. 歪みのあるグラフェンと平衡状態にあるグラフェンからなる二層グラフェンでの電荷移動。黄色が電子増加、青がホール増加を表す。水色、紫の円はそれぞれホウ素と窒素を表す。

[論文発表リスト]

- [1] H. Zhang, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Trans-dimensionality of electron/hole channels in multilayer in-plane heterostructure of graphene and hBN, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 015004 (2024).
- [2] N. Sultana, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Structural modulation of bilayer graphene under an external electric field and carrier doping, *Appl. Phys. Express* **17**, 035001 (2024).
- [3] Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Energetics and electronic structures of Janus WS₂Se by continuous chalcogen substitution, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 065001 (2024).
- [4] M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Metal-semiconductor transition in bilayer graphene by bowl inversion of monofluorosumanene, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 065002 (2024).
- [5] Y. Gao, M. Kaneda, T. Endo, H. Nakajo, S. Aoki, T. Kato, Y. Miyata, S. Okada, Strain-induced scrolling of Janus WS₂Se, *Phys. Rev. B* **110**, 035414 (2024).
- [6] Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Energetics and electronic structure of graphene nanoscrolls, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 085001 (2024).
- [7] M. Maruyama S. Okada, Effect of interlayer stacking arrangement on the dielectric properties of hexagonal boron nitride thin films, *FlatChem* **48**, 100751 (2024).
- [8] M. Maruyama, N. Sultana, Y. Gao, S. Okada, Geometric structure and electronic properties of bilayer graphene with a moiré superlattice by asymmetric tensile strain, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 115003 (2024).

[口頭発表リスト]

- [1] M. Maruyama, Electronic Structures of Atomic Layer Materials: Covalent Networks, Interlayer Interaction, and External Electric Field, The 11th Korean Symposium on Graphene and 2D Materials, 10–12 July 2024, Pusan, South Korea (招待講演)
- [2] M. Maruyama, Electronic properties of atomic layer materials and their hybrid structures, The 25th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations (ASIAN-25) 28–30 October 2024, Ulsan, South Korea (招待講演)
- [3] 高燕林、「電場下における2次元層状物質の電子構造について」(応用物理学 会応用電子物性分科会研究会 2次元層状物質研究の最前線)、2024年2月、オンライン。(招待講演)

ジルコニアセラミックスの高生体活性化と 表面制御技術の開発

薮塚 武史¹, 高井 茂臣¹, 藪内 聖皓²

¹ 京都大学大学院エネルギー科学研究所

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的

セリヤ安定化ジルコニアアルミナ複合材 (CSZ/Al₂O₃) は優れた機械的性質を持ち、従来のジルコニア系インプラント材料の課題である低温劣化を改善した材料であり、硬組織代替材料としての幅広い応用が期待されている。しかし、CSZ/Al₂O₃ はそのままでは生体活性を持たず、骨と直接結合することができない。したがって、CSZ/Al₂O₃ に生体活性を付与することで、優れた機械的強度と生体活性を併せ持つ新規人工骨材料の開発が期待される。ヒトの血漿とほぼ等しい濃度の無機イオンを含む擬似体液 (SBF) の pH と温度を上昇させると、均一核形成によりリン酸カルシウム微粒子 (アパタイト核) が生成する。本研究ではサンドblast処理およびフッ化水素酸処理を施した CSZ/Al₂O₃ 基板表面近傍にアパタイト核を導入し、生体活性を付与した。得られた生体活性 CSZ/Al₂O₃ の SBF ならびに HBSS(+) 中におけるアパタイト形成能を評価した。

2. 方法

CSZ/Al₂O₃ 基板にサンドblast処理を施し、洗浄および乾燥を行った後、1450°Cで 2 時間の焼成を行った。CSZ/Al₂O₃ 基板にフッ化水素酸による酸エッチング処理を施した後、洗浄および乾燥を行った。Ca イオン、Mg イオン、リン酸水素イオンなどを成分に含む反応溶液を調製し、塩酸およびトリス緩衝剤を用いて pH 8.20、25 °Cに調節した。上述の反応溶液中に CSZ/Al₂O₃ 基板を 70 °Cで 1 日浸漬し、基板表面近傍にアパタイト核を析出させた。得られた生体活性 CSZ/Al₂O₃ を SBF (ISO 23317) ならびに HBSS(+) (フェノールレッド不含) に 36.5 °Cで浸漬し、基板表面におけるアパタイト形成能を調べた。

3. 結果

アパタイト核処理を施した生体活性 CSZ/Al₂O₃ を SBF に浸漬したところ、浸漬 1 日以内でアパタイト形成が観察され、4 日以内にアパタイトが基板表面全体を被覆した。さらに、SBF 浸漬期間が長くなるにつれ、アパタイトがさらに成長している様子が観察された。この結果より、サンドblast処理およびフッ化水素酸エッチング処理を施した CSZ/Al₂O₃ 基板表面近傍にアパタイト核を析出させることで、CSZ/Al₂O₃ 基板に SBF 中で発現される高いアパタイト形成能が付与されたことが分かった。HBSS(+) に生体活性 CSZ/Al₂O₃ を浸漬したところ、浸漬 4 日以内ではアパタイト形成は観察されなかつたが、浸漬 7 日以内にアパタイト形成が開始されたことが分かった。

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] Yuwei Wu, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, "Development of Rapid Bioactivity-Expressed Zr-50Ti Alloys by Surface Treatment with Modified Simulated Body Fluid", *Int. J. Mol. Sci.*, **25**, 6587 (2024.05), 発

行済.

- [2] 薮塚 武史, 「人工材料（無機）：生体活性材料機能」, 人工臓器, **53**, 184-187 (2024.12), 発行済.
- [3] Yuwei Wu, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, "Enhancement of bioactivity of Zr-50Ti alloys through sulfuric acid treatment followed by modified simulated body fluid treatment", *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy*, 印刷中.

[口頭発表リスト]

- [1] 薮塚 武史, 「アパタイト核担持イットリア安定化ジルコニアのアパタイト形成能におけるマグネシウム添加の影響」, 第82回日本歯科理工学会学術講演会, ポスター講演(国内) 200名 (2024.04.20), かごしま県民交流センター (カクイックス交流センター) .
- [2] 綿引 淳大, 高井 茂臣, 薮塚 武史, 「生体活性アパタイト核担持セリア安定化ジルコニアーアルミナ複合材料の開発」, 日本バイオマテリアル学会関西ブロック第19回若手研究発表会, ポスター講演 (国内) 200名 (2024.07.27), 京都府立医科大学.
- [3] 綿引 淳大, 高井 茂臣, 薮塚 武史, 「アパタイト核担持セリア安定化ジルコニアーアルミナ複合材料の生体活性評価」, 日本セラミックス協会関西支部第18回学術講演会, ポスター講演 (国内) 200名 (2024.08.09), 滋賀県立大学.
- [4] 薮塚 武史, 「アパタイト核を用いた表面制御による生体活性複合材料の創出～医療および環境への貢献を目指して～」, 日本セラミックス協会東海支部東海若手セラミスト懇話会第67回秋期講演会, 招待講演 (国内) 50名 (2024.10.11), 豊田中央研究所.
- [5] 綿引 淳大, 高井 茂臣, 薮塚 武史, 「アパタイト核担持セリア安定化ジルコニアーアルミナ複合材料のアパタイト形成能の検証」, 日本バイオマテリアル学会シンポジウム2024, ポスター講演 (国内) 787名 (2024.10.28), 仙台国際センター.
- [6] Yudai Watabiki, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, "Apatite Formation Ability of Bioactive Ceria-stabilized Zirconia/Alumina Composite in Various Kinds of Simulated Body Environment", 一般講演 (国際) 82名, The 22nd Asian BioCeramics Symposium (2024.12.3), Kitakyushu International Convention Center, Kitakyushu, Japan.
- [7] Takeshi Yabutsuka, Yudai Watabiki, Soichiro Naka, Shigeomi Takai, Kiyohiro Yabuuchi, "Development of Highly Bioactive Zirconia Ceramics and Surface Control Technology", ポスター講演 (国際) 200名, The 15th International Symposium of Advanced Energy Science Symposium (2024.12.10), Kyoto University, Uji, Kyoto, Japan.
- [8] Yudai Watabiki, Shigeomi Takai, Takeshi Yabutsuka, "Apatite formation ability of bio-environment compatible apatite nuclei-incorporated ceria-stabilized zirconia/alumina composites in various kinds of simulated body environment", 一般講演 (国際) 200名, 9th International Conference on Sustainable Energy and Environment (2024.12.19), Millenium Hilton Bangkok, Bangkok, Thailand.

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^{1,2}, ブイスアンニヤットソン², 関林², 岩谷良郎², 矢野達識²,

朝田良子^{1,2}, 坂元仁¹, 武村祐一朗³, 門信一郎⁴

¹ 大阪公立大学研究推進機構

² 大阪公立大学大学院工学研究科

³ 近畿大学理工学部

⁴ 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性化に、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。

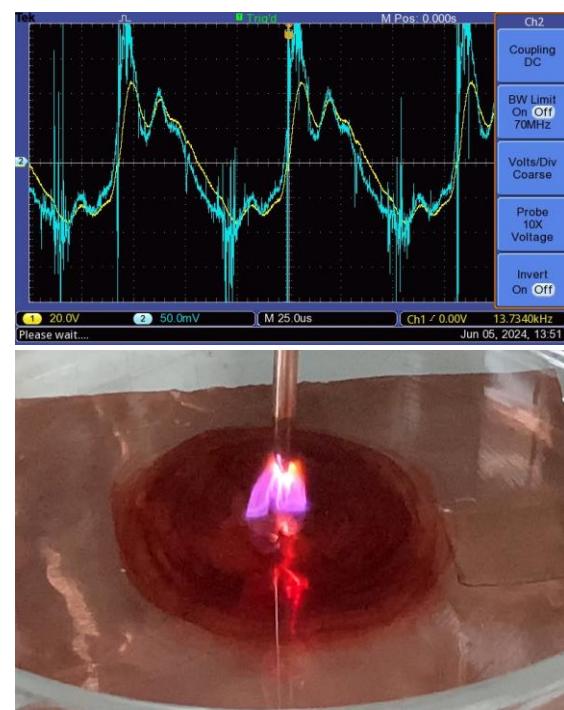
エネルギー理工学研究所で永年培われたプラズマ分光計測を適用することにより気相中の活性酸素ラジカルや分子イオンの挙動、ラジカル生成の効率化のための基礎データを習得できると期待される。これまでの、本拠点での共同研究で開発した化学プローブは、プラズマ源周りの気相中およびプラズマ照射された液相中のラジカル研究に有用なツールとなった。また、熱量計測によってもラジカル生成量の評価に応用できている。これらの知見も、本研究課題の遂行に大きな寄与をするものと期待される。

2. 接地電極の配置の効果

当初、銅製の接地電極は処理対象の水中に設置していた。しかし、放電時間が長引き、水中に各種化学活性種が蓄積すると、電極材料と好ましくない副反応を引き起こす恐れがある。韓国の研究グループの報告を参考にして、接地電極を水中に置いた場合と水容器の下に設置した場合の影響を調べた。

右上には水面上に設置した中空針電極に印加された電圧信号(黄色)と電極に蓄積する電荷量(水色)の一例を示す。後者は放電に伴う電流の時間積分値であり、接地電極を水中から取り出すと微小なパルスが多数見られる様になる。元々、電荷のパルスは電極間に誘電体バリア放電が起こったことを示していたが、増えた分のパルスは電極間以外で微小な放電が起きていることを反映している。実際、背景を暗くすると接地電極の表面に多数の放電の光が認められる。また、印加電圧と電荷量のリサージュ図形の解析で評価した放電維持電力は 4 倍程度に増大している。

他方、プラズマによるラジカル生成は PVI-KI 化学プローブで可視化(右下の赤色領域)、定量化できる

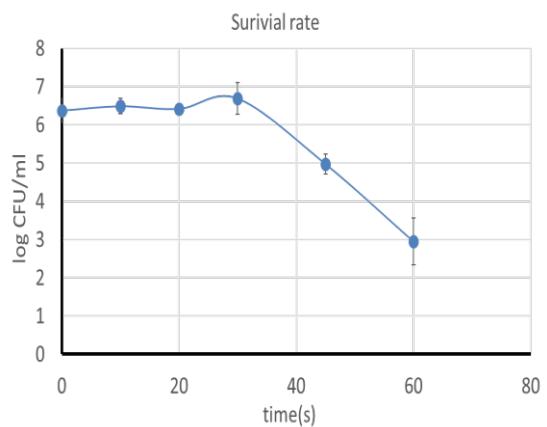


が、接地電極の移動による影響は小さい。このため、効率よいプラズマ源とするためには、接地電極前面のギャップ放電を抑制する工夫が望まれる。

3. 大腸菌不活化試験

培養した大腸菌溶液を 35mm シャーレに 3ml 入れて、照射時間を使ってプラズマ照射を行った。接地電極はシャーレ下部に設置しているため、材料の銅と大腸菌との直接的な反応はない。照射後の溶液中の大腸菌数をコロニーカウント法で評価し、右に示す生残曲線を得た。横軸はプラズマの照射時間、縦軸は大腸菌数の mL 当たりのコロニー形成単位 CFU である。照射後 30s は、大腸菌数はほとんど変化していないが、照射後 60s には 3 衍の大腸菌の減少が確認され、照射後 2min にはコロニーが確認できなくなってしまった。すなわち、今回のパルス界面放電プラズマ源は、バイオ分野やさらに環境分野での応用に有用であると期待できる。

照射中は放電を起こしている針電極は固定したままシャーレの中心部にのみプラズマ照射を続けていた。放電プラズマの太さが 5 mm 程度であるので、生成された化学活性種などがサンプル水中で急速に輸送されたことを意味する。他の可能性として、プラズマ照射により水中に大規模な対流が誘起されて、大腸菌が放電部に運ばれたのかもしれない。さらに、プラズマ照射後のサンプル容器が、以前に行った DBD アルゴンプラズマジェットを用いた不活化実験の時に比べて、加熱されていることが見いだされた。熱の効果が大腸菌の不活化を助長している可能性があり、今後の検討対象である。



プラズマ照射した大腸菌の生残曲線

[口頭発表リスト]

- 関林、松浦寛人、仲野匠, "大気圧下における水面放電によるプラズマ発生とその特性解析", 第 41 回 プラズマプロセッシング研究会, 令和 6 年 1 月 23 日, 東工大(ポスター).
- H. Matsuura, L. Guan, T. Nakano, "Basic study on pulse discharge plasma at water surface", 16th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/13th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology, March 5, 2024, Gifu University (ポスター).
- 松浦寛人、仲野匠、ブイスアンニヤットソン, "水ターゲットを利用したプラズマ熱流束計測法の提案", 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 2024 年 3 月 22 日、東京都市大.
- L. Guan, T. Nakano, R. Asada, H. Matsuura, "Generation of plasma by water surface discharge at atmospheric pressure and analysis of its characteristics", 51st International Conference on Plasma Science/4th Asia-Pacific Conference on Plasma and Terahertz Science, June 16–20, 2024, Beijing(ポスター).
- 関林、岩谷良郎、朝田良子、秋吉優史、松浦寛人, "Plasma generation by gas-liquid discharge under atmospheric pressure and detection of its radicals with their environmental applications", 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 2024 年 9 月 16–20 日、新潟(ポスター).
- 松浦寛人、関林、矢野達識、朝田良子, "プラズマバイオプロセスに及ぼすサンプル水加熱の効果", プラズマ・核融合学会第 41 回年会講演会, 2024 年 11 月 17–21 日, 船堀(ポスター).

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¹, 宮内雄平²

¹法政大学生命科学部環境応用化学科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 本研究の目的

1次元物質のカーボンナノチューブや2次元物質の原子層物質などの低次元ナノ量子物質は、低次元性による電子の閉じ込め効果により様々な興味深い量子特性を示す。最近、宮内・西原らによってカーボンナノチューブにおいて、励起子(電子と正孔の束縛状態)による狭帯域熱放射が発見された(Nishihara, Miyauchi, Nat. Commun. 9, 3144 (2019))。この現象は、熱放射における新たな量子力学的効果として熱エネルギーの高効率・高機能利用への可能性が期待されている。本研究では、励起子熱放射の理解と応用への橋渡しを見据え、カーボンナノチューブの類縁量子物質である単層遷移金属ダイカルコゲナイト(TMD)における励起子熱放射の物理を明らかにすることを目的とする。

2. 研究の背景

従来の光電変換プロセスでは、変換効率に Shockley-Queisser (SQ) 限界という理論限界があるため、変換効率は最大でもおよそ 33% である。この SQ 限界を超えるために、これまで、熱光起電力(TPV)効果を含む様々なアプローチが提案されてきた。TPV では、熱源から吸収した熱エネルギーをエミッターを用いて(光電変換素子のバンドギャップにマッチした)狭帯域の熱放射に変換し、光電変換素子に照射することで SQ 限界以上の効率が得られることが理論的に知られている。狭帯域熱放射のためのエミッターを実現する方法として、励起子による熱放射が期待されている。しかし、励起子熱放射の物理は未だ完全に明らかになっているわけではなく、励起子熱放射を制御し、利用するためにはさらなる理解が必要である。そこで、本研究は、ドープされた単層 TMD における励起子ポーラロンの熱放射特性を理論的に調べた。励起子ポーラロンは、電子と正孔の束縛状態である励起子とドープしたキャリアにより形成されたフェルミ面状態とのコヒーレントな重ね合わせであり、ドープされた単層 TMD の光学特性を支配する量子状態である。励起子ポーラロンは、カーボンナノチューブにおける励起子に似た量子状態であるが、ドーピングにより状態を容易に制御できる利点がある。

3. 結果

熱放射は、以下に示すようにプランク分布と物質を特徴づける放射率 $\eta(\omega)$ により表される：

$$H(T) = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \int_0^\infty \eta(\omega) \frac{\omega^3}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} d\omega$$

ここで $\hbar = h/2\pi$ (h はプランク定数) で、 c は光の速さ、 k_B はボルツマン定数である。単層 TMD の熱放射特性を調べるためにには、単層 TMD の放射率を計算すれば良い。そこで、まず、揺動電磁気学を用いて、単層 TMD を含む 2 次元半導体に一般に成り立つ放射率公式を導出した：

$$\eta(\omega) = \frac{4\omega d}{3c} \text{Im}[\varepsilon(\omega)]$$

ここで、 ε は誘電関数、 d は原子層物質の厚みを表す。次に、放射率公式の入力に必要な単層 TMD の誘電関数を計算した。励起子ポーラロンの効果は、この誘電関数に含まれることになる。具体的な計算方法は、励起子とキャリアによるフェルミ面との相互作用を T 行列近似により扱い、励起子ポーラロンのグリーン関数を求め、このグリーン関数の虚部を取ることで励起子のスペクトル関数が得られる。励起子ポーラロンの基底状態だけに限れば誘電関数をスペクトル関数で表すことができるので、その結果、放射率は以下のようにスペクトル関数で表すことができる：

$$\eta(\omega) = \frac{8\sigma_0 E_X}{3\epsilon_0 c} A_X(\omega)$$

ここで、 E_X はキャリアが無いときの励起子束縛エネルギー、 A_X は励起子ポーラロンスペクトル関数、 σ_0 は量子化コンダクタンスである。

図 1 に、温度が 800K と 1000K の場合について、放射率のキャリア濃度依存性の計算結果を示す。キャリア濃度はフェルミエネルギー E_F を用いて表している。また、キャリア濃度がゼロの場合の励起子エネルギーを横軸の原点にしている。図 1 から、放射率は励起子(ポーラロン)エネルギーの位置でピーク構造を示すことがわかる。キャリア濃度が小さい領域では励起子による熱放射を表し、キャリア濃度が増加するにつれ、励起子とキャリアの重ね合わせ状態である励起子ポーラロンによる熱放射に変わる。特に、キャリア濃度の増加に伴い、ピーク形状は非対称になり、ピーク位置はレッドシフトし、さらにピークの高さは減少することが明らかとなった。また、温度の上昇に伴いピークの高さが減少することもわかった。

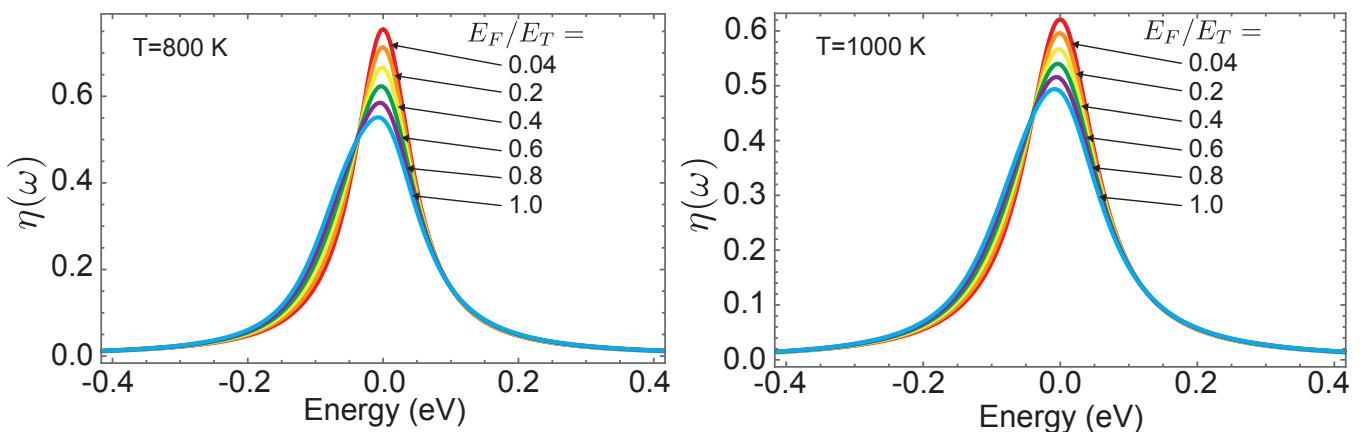


図 1 単層 TMD の放射率

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, “Anomalous thermal radiation due to the chiral magnetic effects in Weyl semimetals”, *Physical Review B* **109**, 085145 (2024)
- (2) Satoru Konabe, “Exciton-Polaron Thermal Radiation in Two-Dimensional Semiconductors”, *Optics Letters* **50**, 77 (2025)

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 慎一¹, 嘉藤 美来¹, 長谷川 結愛¹, 橋本 遥香¹, 中田 栄司²

¹熊本大学

²京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、これまでに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で観察・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。

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、蛍光クエンチャーバイオキサン (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 のクエンチャーハンモック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)。

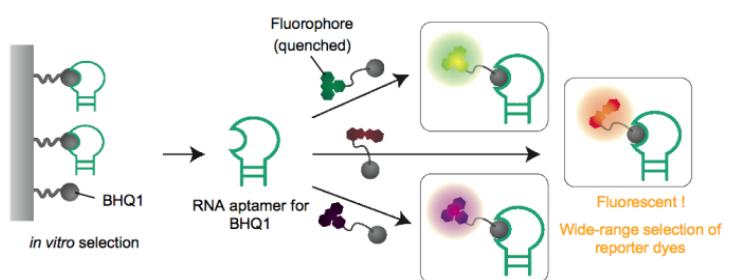


図 1. 蛍光化合物プローブと RNA アプタマーを利用した RNA 蛍光標識法

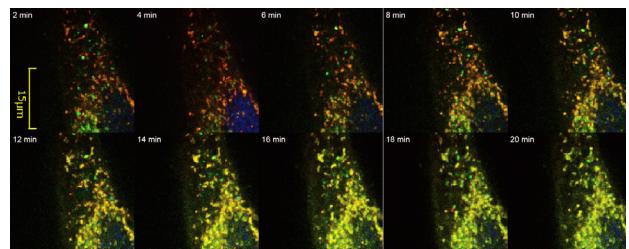


図 2. HeLa 生細胞内 mRNA の顆粒形成過程の可視化 (*Chem. Commun.* 2018)

【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て、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。

：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。今後、この知見を基に人工核酸プローブの合成を行う予定である。

：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 の観察を目指す。得られた一RNA アプタマーを組み込んだベクターの配列は、共同利用機器 DNA シーケンサーにより確認する。得られた RNA アプタマーの標的配列認識能は、試験管内で標的 RNA を蛍光標識できることを確認した。今後、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る予定である。

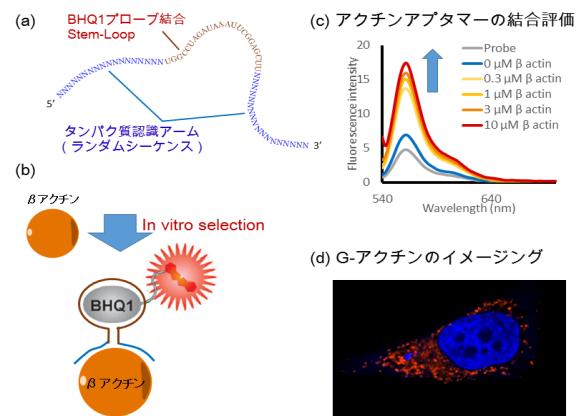


図 3. BHQ1 アプタマーによるタンパク質標識 (a) BHQ1 認識ループとタンパク質認識アームの配置 (b) 標的タンパク質の検出モデル (c) in vitro 実験におけるアクチンタンパク質蛍光ラベル (d) 固定細胞でのアクチンタンパク質染色 (*Nucleic Acids Res.*, 2021)

カーボンナノチューブの発光熱特性に基づく レシオ型光温度計測技術の開発

青田 駿¹, 劉 知銳², 西原大志², 松田一成², 宮内雄平²

¹ 兵庫県立工業技術センター

² 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, CO₂ 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, 热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, カーボンナノチューブ極薄膜フィルムのアップコンバージョン発光^[1-2]の室温からの強度比を利用して, 光温度計測として利用できることがわかった。

今年度の目標は, カーボンナノチューブ極薄膜フィルムを貼り付けた基板表面の温度分布を 2 次元画像として計測し, 相対感度, 温度分解能, 安定性を評価する。

2. 実験方法

本研究では, 直径が約 0.7 nm の半導体型单層カーボンナノチューブ(以下 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^[3](図 1(a))。ろ過用のメンブレン膜上に作製した CNT 極薄膜フィルムを数 mm 角に切断し, サファイア基板上に貼り付けた。サファイア基板をセラミックヒーターで加熱することで, CNT 極薄膜フィルムを加熱した。CNT 極薄膜フィルムの温度を変化させながら, 図 1(b)に示す 2 次元発光イメージングが可能な光学システムを自作で構築することで, 発光画像を取得した。高価な InGaAs 検出器ではなく安価な CCD で検出できる波長範囲で測定を行った。CNT 極薄膜フィルムのアップコンバージョン発光(以下 UCPL)画像の温度依存性(励起波長: 1064 nm, 発光波長: 800 nm から 950 nm まで, 試料加熱温度: 室温～約 430 K)を測定し, 光温度計測の性能として相対感度, 温度分解能, 安定性を評価した。

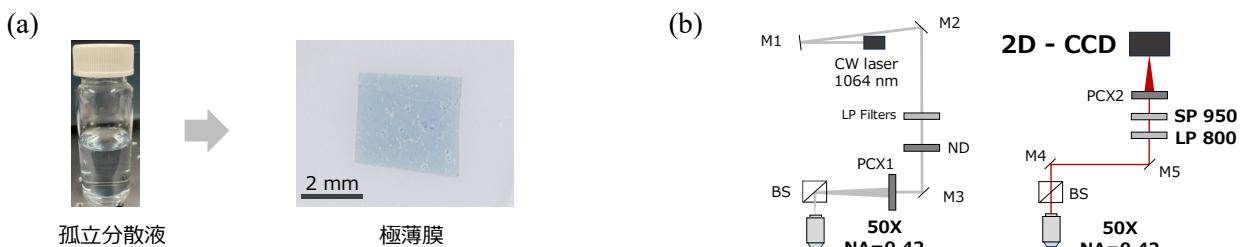


図 1 (a) カーボンナノチューブ孤立分散液と, 作製した極薄膜フィルム(サファイア基板上)の外観写真,
(b) オリジナル光学系システムの概要図。

3. 結果と考察

温度変化させながら取得した発光イメージを図 2(a)に示す。本研究で構築した光学システムにおいて, 測定画像の 1 画素は 6.3 μm となっており, 10 画素×10 画素の 63 μm×63 μm の発光画像を測定した。測定した発光画像は, 303 K で強度を規格化した。353 K, 453 K と加熱しても, CNT 極薄膜フィ

ルムの面内における発光強度のバラつきは大きく変動していない。加熱温度に対する、UCPL 強度の関係性を図 2(b)に示す。室温からの発光強度比 *Ratio* を縦軸に示しており、強度比の平均値をプロットし、エラーバーは標準偏差を表す。UCPL のエネルギー変換効率は $\exp(-\Delta E / k_B T)$ に比例するため^[1]、極薄膜フィルムの発光強度比 *Ratio* も同様に比例すると仮定し、フィッティングした結果を図 2(b)のグレー線で示す。フィッティングで用いた ΔE は、193 meV であった。このエネルギー差 ΔE は、励起波長(1064 nm)と極薄膜フィルムの UCPL 波長 (900 nm ~ 950 nm)のエネルギー差と一致しており、孤立分散した CNT^[1-2]と同様の UCPL 現象が、バンドル化した膜状の CNT においても観測されたことがわかった。

光温度計としての性能を検討するため、相対感度、温度分解能、安定性に関する評価を行った。相対感度 S_R 、温度分解能 δT は以下の式を用いて評価を行った^[4]。

$$S_R [\%/\text{K}] = \frac{100}{\text{Ratio}} \cdot \frac{d\text{Ratio}(T)}{dT}$$

$$\delta T [\text{K}] = \frac{1}{S_R} \cdot \frac{\sigma_{\text{Ratio}}(T)}{\text{Ratio}(T)}$$

$\sigma_{\text{Ratio}}(T)$ は、各温度における標準偏差を示す。測定温度領域において平均化した相対感度、温度分解能はそれぞれ、1.89 %/K、0.049 K であった。相対感度は典型的な光温度計である希土類元素と比べて、同等のオーダーであった。温度分解能は、本実験で用いた温度計の温度分解能が 0.1 K であるため、温度分解能は少なくとも 0.1 K であることがわかった。励起レーザーの連続照射(30 min)や、温度サイクル(室温から 423 K を 3 回)においても、発光強度の劣化は見られず非常に安定した性能を示した。

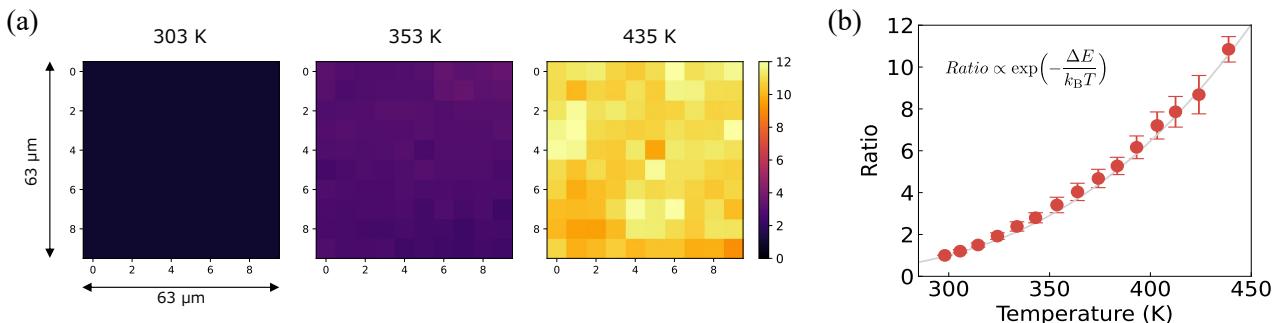


図 2 (a) 2 次元の発光画像。63 μm × 63 μm の領域を示し、左から 300 K, 353 K, 435 K に加熱した場合の発光画像。
(b) 加熱温度に対する、アップコンバージョン発光の強度。

4. まとめと今後

CNT 極薄膜フィルムを貼り付けた基板表面の温度分布を 2 次元画像として測定した。UCPL 発光強度の温度依存性より、相対感度、温度分解能はそれぞれ、1.89 %/K、0.049 K であった。またレーザー照射や温度サイクルに対して安定性があることも確認した。一方で相対感度は希土類元素には届いていないため、今後は CNT 極薄膜を高機能化することで、感度向上を目指す。

[口頭発表リスト]

S.Aota, Z. Liu, T. Nishihara, T. Tanaka, H. Kataura, Y. Miyauchi, “Uponversion photoluminescence properties of (6,4) single-chirality carbon nanotube membranes for optical thermometry applications”, 第 67 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム, 2024 年 9 月 1 日~3 日, 高知工科大学 (ポスター)。

[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] L. Marciniak, *et al.*, *Coor. Chem. Rev.* 469, 214671, 2022.

赤外強光子場による気体のトンネル電離の研究

羽島良一¹, 川瀬啓悟¹, 全炳俊², 大垣英明²

¹ 量子科学技術研究開発機構

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

京都大学の共振器型自由電子レーザー (Free-Electron Laser; FEL) 施設、KU-FEL では、発振に寄与する電子数 (N) の二乗でピーク強度が増大し、 $1/N$ に比例してパルス幅が短くなる超放射発振が実現している。このような発振では、FEL パルスを集光した時の光強度が、原子や分子にトンネル電離を生じる強度 (およそ 10^{13} W/cm^2) を超え、これを用いた強光子場科学的研究の展開が可能となる。2023 年度までの実験にて、KU-FEL (光陰極運転) で生成した FEL パルスを N_2 、 Ar 、 O_2 中で集光した際に、それぞれのガスがトンネル電離することを確認した。トンネル電離で生成される光電子の最大エネルギーは入射レーザー波長の 2 乗に比例することから、長波長赤外 ($8\mu\text{m}$ 以上) では大きなエネルギーを持った光電子の生成が期待できる。本研究では、特に長波長赤外の波長領域に注目し、強光子場による気体のトンネル電離の研究を行うことを目的とする。

2. 実験

2023 年度までに行った気体のトンネル電離実験では、阻止電場型のエネルギー分析装置を用いて、FEL パルスで発生したトンネル電離光電子のエネルギー測定を行った。光電子の最大エネルギーは FEL 集光強度に比例するはずであるが、測定された光電子エネルギーはマクロパルスのエンベロープに追随しない結果であった。そこで、今年度は、マクロパルスの任意のタイミングで光電子を取り出し、そのエネルギーを測定することを試みた。

実験では、ガス中の FEL 集光点を金属箱で囲い、これにパルス電場を印加し、直流バイアス電場と組み合わせることで、マクロパルス中の任意のタイミングで、エネルギーが一定の条件 ($E > V_b - V_p$) を満たす光電子のみを取り出すこととした。図 1 に実験配置を示す。全ての装置はガスチャンバーの内部に収めている。

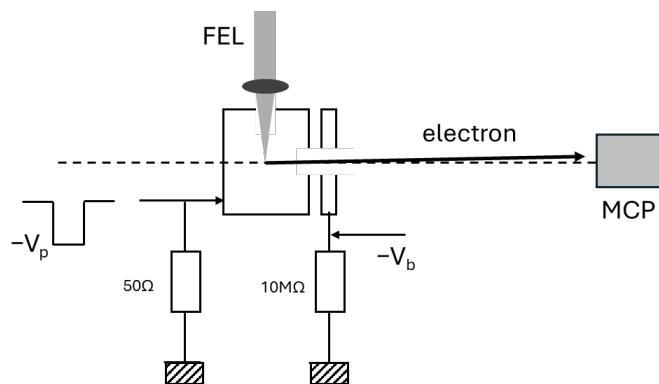


図 1: トンネル電離電子の測定実験の配置。発生点にはパルスで負電位を印加し、マクロパルス中の任意のタイミングにて光電子を取り出す。取り出された電子をマイクロチャネルプレート (MCP) で検出する。この時、取り出される電子のエネルギーは、 $E > V_b - V_p$ である。

パルス電場の時間波形を決めるトリガー時間幅を 220 ns とした時、 50Ω 抵抗負荷時のパルス波形は 100ns (FWHM) であった。光陰極モードの FEL 繰り返しが 33 ns であることから、ミクロパルス 3 つ分の光電子を切り出せることを期待した。

実験では、Ar ガス (0.05 Pa) について、 V_p を -500 V、または、-800 V に固定し、 V_b を -500 V から -1100 V まで変えながら MCP の信号を取得したが、パルス電源の電磁ノイズが信号線に回り込み、十分な S/N が取れないことが判明した。

FEL 集光点の金属箱を取り除き、パルス電圧を印加しない状態で光電子の検出を行ったところ、図 2 に示すように FEL マクロパルスが減衰した後で MCP の信号が現れる場合があった。これは、電子ではなく飛行速度の遅いイオンを検出している可能性が示唆される。

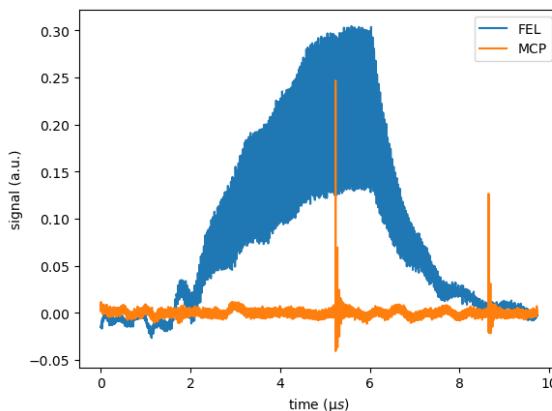


図 2:Ar (0.4 Pa) 中で FEL を集光した際の FEL マクロパルスと MCP 信号の時間波形。マクロパルスピークと減衰後の信号は、それぞれ、電子とイオンに由来することが示唆される。

3. まとめ

2023 年に引き続き、KU-FEL (光陰極モード運転) で発生した光パルスによる気体のトンネル電離実験を行った。トンネル電子の最大エネルギーがマクロパルス内における FEL 集光強度の変化に追随しない原因を調べるために、マクロパルスの任意のタイミングで光電子を切り出す実験を行ったが、パルス電源の電磁ノイズにより十分な S/N を得ることができなかった。実験では、マクロパルス減衰後に MCP 信号が現れる場合があり、トンネル電離により発生したイオンに由来することが示唆された。パルス電圧でイオンを切り出せば、電磁ノイズと信号を分離してイオンの測定が可能である。今後、こうした測定を検討したい。

〔論文発表リスト〕

R. Hajima, K. Kawase, J. K. Koga, H. Zen, H. Ohgaki, “Breakdown of argon by a train of high-repetition long-wave-infrared pulses from a free-electron laser oscillator”, Optics Express 32, 22722-22737 (2024). <https://doi.org/10.1364/OE.524887>

〔口頭発表リスト〕

羽島良一, “High-harmonic generation from infrared free-electron laser pulses in the superradiant regime”, The 9th Symposium on Photon and Beam Science (OPTO 2024), Jun. 6, 2024, QST 関西研、口頭発表

高強度レーザーと構造性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^{1,2,3}, 松井隆太郎^{1,2}, 阪部周二^{2,4}, 升野振一郎^{2,4},
橋田昌樹^{4,6}, 時田茂樹⁵, 深見一弘⁵, 坂口浩司³

¹京都大学大学院エネルギー科学研究所, ²非線形・非平衡プラズマ科学研究所ユニット,
³エネルギー理工学研究所, ⁴化学研究所, ⁵工学研究所, ⁶東海大学総合科学技術研究所

1. 研究背景と目的

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 $10^{18-22} \text{ W/cm}^2$ 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 [$^1\text{P} + ^{11}\text{B} \rightarrow ^3\text{He} + 8.6\text{MeV}$] 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100μm)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。

本研究は、上記の着想に基づいて、①水素・ホウ素(PB)核融合を起こす温度領域が数100 keV～数MeVの高エネルギー密度プラズマを高強度レーザーとデザインされた物質との相互作用を通して生成するとともに、磁場方式とレーザー方式の双方のプラズマで現出する多様な**自己組織化機能**を共通の素過程として両者を融合することにより、これを長時間にわたって閉じ込める方法論を開拓して実験で検証すること、②このように生成した閉じ込め状態にあるプラズマを共通のプラットホームとして、PB核融合を実現する方法論を開拓するとともに、宇宙における高エネルギー粒子加速など、**非熱現象**を含む学術・応用研究を展開することを目的とする。

本提案者等は、これまでサブμmサイズでデザインされた比表面積の大きな微細な構造体をターゲットとして、これに高強度レーザーを照射すると、レーザーの輻射圧(動重力)によってレーザーの進行方向にkA(アンペア)レベルの電流が駆動されるとともに、プラズマ中に閉じた**電流路**を自己組織的に形成させることによって準定常的な**高強度磁場**を維持してプラズマを長時間閉じ込めが出来ることをシミュレーションで示した。また、これを実現するアプローチとして、これまで坂口浩司教授(京大エネ理工/本經典申請者)および深見一弘准教授(京大工学研究所)の指導を受け、直径がサブμmで高さが数10 μmレベルの円柱状物質が多数配列したロッド集合体(以下、「構造性ターゲット」)を電子線リソグラフィーとプラズマエッティ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、そのノウハウを蓄積してきた経緯がある。

2. 研究の方法と得られた成果

これらの研究の進展を受け、当該年度は、(i)これまで作製したサブμmレベルの高アスペクト比の構造体を基本に、プラズマエッティング時の主要パラメータである加速電圧(BIAS)や保護膜長(ICP)に対する条件出しを詳細に行うなど、作製技術を大幅に向上させるとともに問題点を抽出すること、(ii)作製した構造性ターゲットに高強度レーザーを照射する実験をT6レーザーシステム(本学化学研究所)で用いて行い、生成された高エネルギー密度プラズマが上記の目的に沿った特性を示すことを検証すること、(iii)取得した実験データに基づいて、サブmmサイズの微細構造体とともに、照射レーザー光をバルク内部に誘導・伝播させて電流路を安定に形成・保持する1桁大きなスケール(10～50μm)の導波路を有するマルチスケールの構造を有するターゲット作製を行う。

図1は、これまで本申請者等がこれまで開発してきた粒子コード(EPIC)を用いて、同じ空間重点率($p=0.2$)でロッド径の異なる二つのロッド集合体(A:φ=0.5μmとB:0.125μm)に $1.8 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ のレーザーを照射した場合のシミュレーションで得られた電子のエネルギー分布を示している。ターゲットの質量密度が同じでもロッド系が異なるとバルク全体としてのレーザーと相互作用する表面積が異なることから、それを反映して両者の温度が異なっていることが分かる(両者の温度比が約4程度)。この結果から、ミクロな構造(表面積比)の選択・制御によってマクロなレーザーの吸収・加熱特性やプラズマの分布関数の制御が可能なことが示された。これらの結果に基づいて、これを検証する高精度のターゲット作製とレーザー照射実験を実施した。

構造性ターゲットは、これまで開発してきた電子線リソグラフィーとプラズマエッチング技術(京都大学ナノテクノロジー拠点)において、リソグラフィーの工程を従来のネガ型からポジ型に変更することでネガ型レジストを用いた工程で生じていた諸問題(磁気中性線ドライエッティング時のパラメータ調整の困難さや工程数の多さなど)を解決するとともに、BIAS 電圧(非等方性エッティングの割合を調整)、および、ICP 電圧(保護膜の厚みを調整)の詳細な条件出しを行った。その結果 $\phi=0.5\mu\text{m}$ (アスペクト A~60) と B: $0.25\mu\text{m}$ (A~120) ロッド集合体の作製に成功した。図 2 は $\phi=0.5\mu\text{m}$ の上面(左図)および側面(右図)の SEM 画像を示す。アスペクト比が高くなると、基盤下部においてエッティングが不完全な領域が発生することが判明し(右図)、今後は鉛直方向の深堀技術を向上させる研究も進める予定である。

これらの構造性ターゲットを用いて、 T^6 レーザー(京大化研)を用いた照射実験を実施した。具体的には、ロッド集合体の軸方向(高さ方向)を“上面”、軸に垂直な方向を“側面”と定義して、ロッド集合体の上面および側面から集光強度が 10^{19} W/cm^2 領域のレーザー照射を行い、京大化研所有の電子スペクトルメータ(ESM)、および、令和 3 年度に本申請者等が作製した ESM(京大化研の ESM と同一の性能を有する点は確認済)を使用して、2 台の ESM をロッドの上面、および、側面方向に設置することで、生成する高エネルギー電子の 2 方向での同時計測を実現した。その結果、図 3 に示すように、ロッド集合体の側面方向において、1MeV を基準とした電子がロッド径の違いを反映した温度特性を示すことを見出し、より微小サイズの B ターゲット($\phi=0.25\mu\text{m}$)の高エネルギー電子温度は(A) $\phi=0.5\mu\text{m}$ の場合に比べて電子温度が低いことが示された。これは、比表面積の大きな B ターゲットがレーザーと相互作用する電子数が多く、単位電子あたりのエネルギー付与が小さいことに起因すると考えられる。これは図 1 の結果を反映した結果と考えられ、磁場の発生やプラズマの長時間保持・閉じ込めの観点から本構造性ターゲットが有効であることを示していると考えられる。

本年度の実験では、使用可能なターゲットの個数の制約、および、レーザー装置のメンテナンス等のためショット数が限られていたため、来年度は、引き続き本実験を継続し、イオンのエネルギー計測のためのトムソンパラボラの導入などを通じて、ロッド集合体を用いて得られる高エネルギー密度プラズマの特性を多角的に検証する予定である。また、図 2 のロッド状の微細構造に加え、ターゲット内部にレーザー光を積極的に導入する導波路や駆動電流を積極的に維持する構造を付与したマルチスケールターゲットの作製を今後試みる予定である。

1. [論文発表] 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., Accepted 20, December (2024), 掲載決定済 2015 年 1 月。謝辞に 2024 年度共同研究課題番号 (ZE2024B-14) を記載
2. [口頭発表] R. Matsui, N. Hayashi, K. Kondo, K. Matsuda, K. Fukami, H. Sakaguchi, S. Masuno, M. Hashida, S. Sakabe, S. Tokita and Y. Kishimoto, (oral), “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.

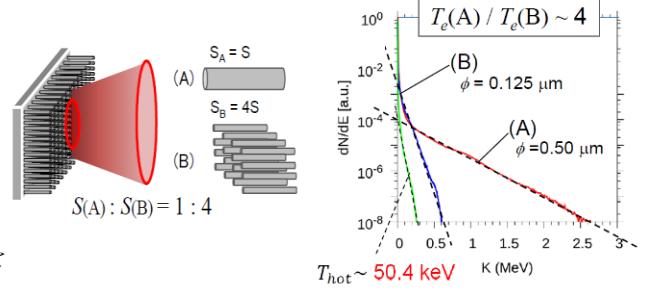


図1:(左図)重点率 $p=0.2$ の(A) $0.5\mu\text{m}$ と(B) $0.125\mu\text{m}$ のロッド集合体(表面積比 1:4)に $1.8 \times 10^{19}\text{ W/cm}^2$ のレーザーを照射したときの電子エネルギー分布(右図)。(A)(B)の温度比は表面積に比例して 1:4 となる。

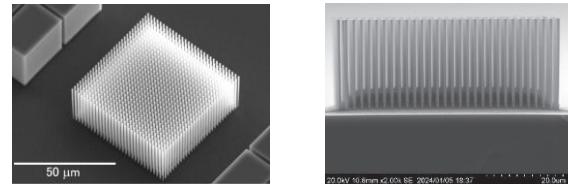


図2: 作製した重点率 $p=0.2$ のロッド径 $\phi=0.5\mu\text{m}$ (高さ 30~40 μm)の上面(左図)および側面(右図)の SEM 画

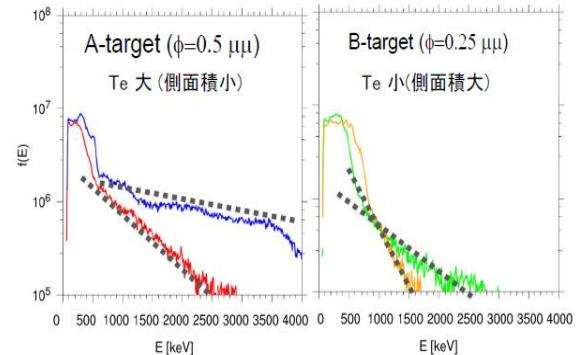


図3: 図2の重点率 $p=0.2$ の(A 左) $\phi=0.5\mu\text{m}$ と(B 右) $\phi=0.25\mu\text{m}$ のロッド集合体に T^6 レーザー(集光強度 10^{19} W/cm^2 領域)を照射した場合の電子エネルギースペクトル。A および B 内の二つは同じ条件下での2回のレーザー照射による。

赤外自由電子レーザー照射後の マウスインスリンボールの解析

土岐明子¹, 全炳俊², 中村和裕¹

¹群馬大学大学院保健学研究科 生体情報検査科学

²京都大学エネルギー理工学研究所

背景と目的；糖尿病患者におけるインスリン注射部位では、インスリンのアミロイド凝集体を含む皮下結節（インスリンボール）が形成されることが知られている。結節部位にインスリンを注射すると薬物の吸収が妨げられ、血糖コントロールに難渋する原因となりうる。一方、自由電子レーザー（FEL）照射がインスリン凝集体（インスリンフィブリル）を解離させる可能性が報告されている。本研究では、FEL を用いてインスリンフィブリルを解離させることができ、インスリンボールに対する治療的アプローチの出発点となるかどうかを検討した。

方法：ヒト組換えインスリン（Humulin R）をグリシン-HCl 溶液（pH2.5）に混合し、55°Cで48時間振とうさせた。生成したフィブリルを遠心分離し、生理食塩水で3回洗浄した。波長 6.1μm により FEL 照射を行い、FEL 处理および未処理インスリンフィブリルをマウス大腿部に7日間連日皮下注射し8日目に組織を採取、組織学的検討を行った。

結果：

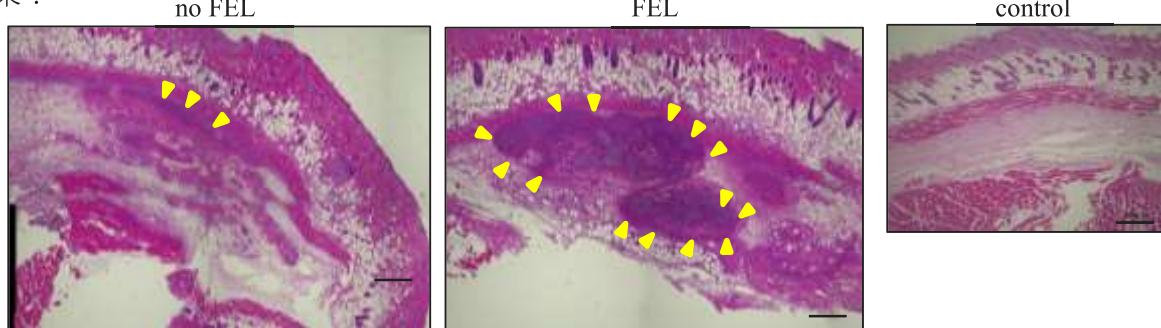


図 1 FEL 未処理 (no FEL) と処理済 (FEL) インスリンフィブリルを投与したマウス皮下組織の HE 染色を示す。矢頭は結節と内部の炎症細胞浸潤を示す。Control では生理食塩水を皮下注射した。スケール 300μm.

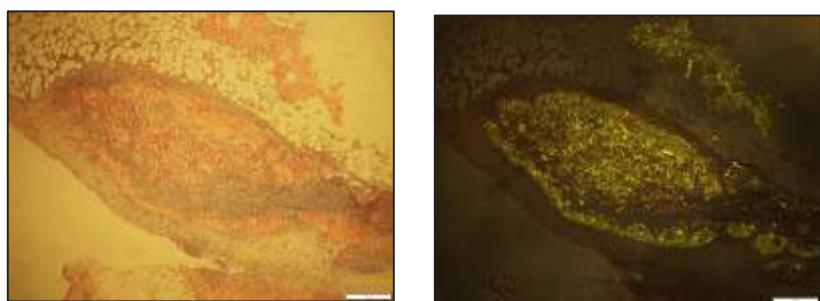


図 2 CongoRed 染色による通常観察（左下）と偏光観察（右下）、スケール 20μm

図 1HE 染色で示すようにインスリンフィブリルの連日投与により、マウス皮下組織には肉眼的に判定できる結節性病変が認められた。結節内部には好中球主体の炎症細胞の浸潤を伴っていた。図 2 で示すように CongoRed 染色後に偏光顕微鏡で観察すると、アミロイドタンパクに典型的であるアップルグリーンの蛍光を呈する。すなわち結節はインスリンフィブリルによるアミロイドにより形成されており、これは臨床で認められるインスリンボールと同じ組織学的所見である。

FEL 照射処理をしたインスリンフィブリル投与によって形成された結節内部への炎症細胞浸潤は FEL 未処理の場合よりも有意に高度であることが示された（図 3）。照射によりインスリンフィブリルの塊が疎となり、結果として結節内部のフィブリル間隙に炎症細胞が入り込んだと推察される。

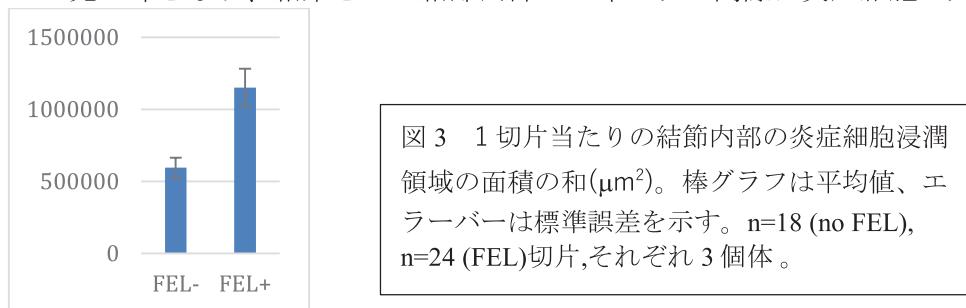
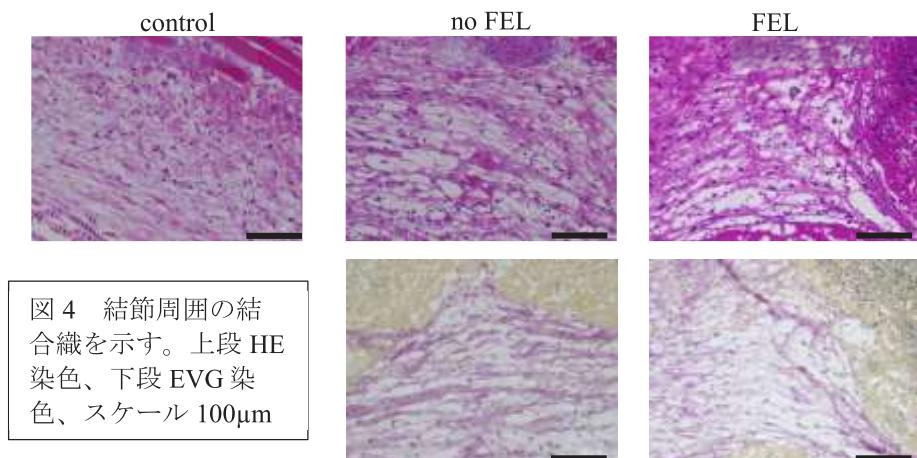


図 4 では膠原纖維を赤色に染めるエラスチカワングーソン (EVG) 染色を示す。FEL 照射処理の有無にかかわらず、結節近傍の結合組織に膠原纖維の増生と浮腫性変化を認める。この変化はコントロールに比較して明らかである。

考察と展望；これまでに FEL 照射によりインスリンフィブリルが断片化することは透過型電子顕微鏡での観察から示されている（2023 年次報告）。マウス皮下にインスリンフィブリルを投与して生じる結節を組織学的に観察すると、FEL 照射処理のインスリンフィブリルでは未処理に比べてフィブリル間の間隙が大きいので炎症細胞の浸潤が活発に見られたと推測される。今後は時間経過による変化や、免疫応答に関与する細胞の種類、サイトカインを検討し、FEL 照射処理後のインスリンフィブリルが生体に与える影響を明らかとしたい。これらを根拠に FEL 照射をインスリンボールの治療に用いる可能性についてさらなる検討を行う。



「論文発表リスト」 該当なし

[受賞、プレス発表等] 該当なし

[口頭発表リスト]

Katano-Toki A, Zen H, Nakamura K. Analysis of insulin ball in mice given infrared free electron laser-irradiated insulin 第 15 回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム, 2024 年 12 月 京都 ポスター

Optical properties of high-quality two-dimensional heterostructures

Wenjin Zhang¹, Kazunari Matsuda², Yuhei Miyauchi², Toshiaki Kato³, and Yasumitsu Miyata¹

¹ Department of Physics, Tokyo Metropolitan University;

² Institute of advanced energy, Kyoto University;

³ School of Engineering and AIMR, Tohoku University

1. Background

The use of nanomaterials is attracting a great deal of attention for device applications such as highly efficient energy conversion. Recently, van der Waals (vdW) heterostructures, which can be created by stacking 2D materials, are attractive because of their tunable physical properties. However, conventional 2D materials are generally prepared using micrometer-sized flakes by mechanical exfoliation from their bulk crystals, which severely limits their practical use. Recently, a plasma assisted chemical reaction method was used to fabricate Janus monolayers of transition metal dichalcogenides. These asymmetric structural materials have a built-in out-of-plane potential, which possess various novel properties, including piezoelectricity, nonlinear optical response, and long-lived charge transfer excitons. In this project, we used this method to prepared MoSSe/MoSe₂ (or WSSe/WSe₂) Janus heterobilayers from chemical vapor deposition (CVD) grown bilayer MoSe₂ (WSe₂) which has clean layer interface and controllable size. Optical spectroscopy was conducted to characterize the structures and optical properties of the fabricated heterobilayers.

2. Experimental methods

Bilayer TMDCs, including WSe₂ and MoSe₂, were synthesized on SiO₂/Si (SiO₂ thickness: 285 nm) substrates using CVD method. CVD-grown TMDC bilayers were placed in a quartz tube with S powder in the upstream, then, a hydrogen plasma assisted surface chemical reaction was carried out under room temperature conditions using a radio frequency power source. Optical images were recorded with an optical microscope (Nikon, ECLIPSE-LV100D). PL and Raman spectra were measured by a micro spectrometer (Renishaw, inVia) with an excitation laser operating at 532 nm.

3. Results and discussions

Figure 1a shows the schematic of experimental process. After the H₂ plasma treatment, the transition metal atoms (M) were covalently bonded to the top S and underlying Se atoms within the top layer, resulting in the formation of MSSe/MSe₂ heterobilayers (Figure 1b). Owing to the smaller lattice constant of the upper Janus monolayers, the present process leads to the formation of moiré superlattices from nontwisted bilayer MSe₂. An optical microscopy image of a grain composed of monolayer and bilayer regions after the plasma treatment. The optical image shows stacked triangular grains of different sizes. The same orientation of the triangles suggests the formation of 3R-like stacking (Figure 1b). As shown in Figure 1c, in the bilayer region, the A_{1'} mode of MoSSe at 290 cm⁻¹ had comparable intensity to the A_{1'} mode of MoSe₂ at 240 cm⁻¹, whereas only the A_{1'} mode at 240 cm⁻¹ was observed in the pristine bilayer MoSe₂. The PL spectra of the MoSSe/MoSe₂ showed two typical peaks corresponding to MoSSe (1.65 eV) and MoSe₂ (1.47 eV), which differed from that of the bilayer MoSe₂ before the plasma treatment (Figure 1d). The optical spectroscopy suggests the successful fabrication of Janus heterobilayer TMDCs. These Janus-based heterostructures provide a long-period moiré system with built-in potential even for nontwisted heterobilayers, allowing the future functionalization of confined and correlated electron systems.

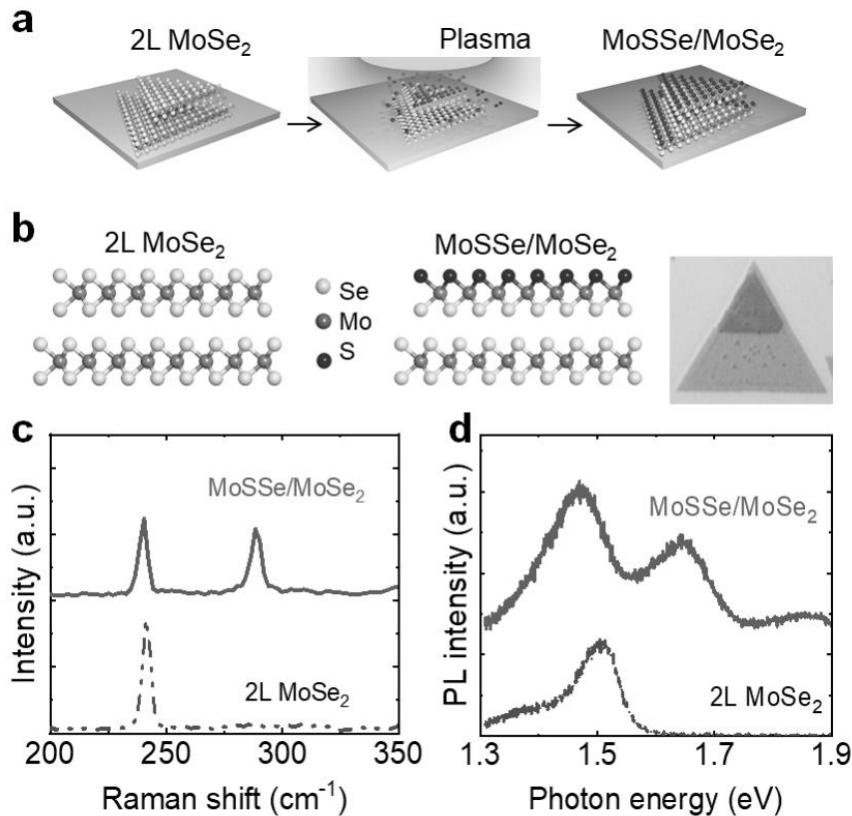


Figure 1. Fabrication and optical characterization of MoSSe/MoSe₂ heterobilayer. (a) Schematic of the conversion process from bilayer (2L) MoSe₂ to heterobilayer MoSSe/MoSe₂ using H₂ plasma treatment. (b) Side and top views of bilayer MoSe₂ and Janus heterobilayer MoSSe/MoSe₂. (c) Raman and (d) PL spectra of the bilayer MoSe₂ and heterobilayer MoSSe/MoSe₂.

4. Lists of papers and oral presentations

[学会発表リスト]

- (1) **W. Zhang**, T. Ogawa, T. Endo, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sannomiya, **K. Matsuda**, Y. Miyata, “Dry transfer and optical properties of CVD-grown transition metal dichalcogenides”. JSAP-OSA. 2024 Autumn, Niigata, (Oral).
- (2) **W. Zhang**, Z. Liu, H. Nakajo, S. Aoki, H. Wan, Y. Wang, Y. Gao, M. Maruyama, T. Kawakami, Y. Makino, M. Kaneda, T. Chen, K. Aso, T. Ogawa, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, M. Koshino, S. Okada, **K. Matsuda**, T. Kato, and Y. Miyata, “Chemically-tailored semiconductor moiré superlattice in transition metal dichalcogenide heterobilayers”. 14th A3 Symposium. 2024, China, (Poster).

[論文発表リスト] *corresponding author

- (1) **W. Zhang***, Z. Liu, H. Nakajo, S. Aoki, H. Wan, Y. Wang, Y. Gao, M. Maruyama, T. Kawakami, Y. Makino, M. Kaneda, T. Chen, K. Aso, T. Ogawa, T. Endo, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, M. Koshino, S. Okada, **K. Matsuda**, T. Kato*, and Y. Miyata*, “Chemically-tailored semiconductor moiré superlattice of Janus heterobilayers”, *Small Structures* **2024**, 5 (5), 2300514.

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¹, 中嶋 隆²

¹ 東北大学大学院理学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 序

本共同研究の目的は光化学過程の場合研究を通して、ゼロミッショナーエネルギーの実現に向けた理論・シミュレーション研究を進めることである。光化学反応を含む多くの化学反応では分子の立体配置が効率化を高める上での重要な因子になっている。更に、分子を空間固定系に対して整列させることは、化学反応の実時間追跡のための最初のステップと考えられている[1]。これらの研究動機を背景に、レーザー誘起の分子整列制御が盛んに研究されてきた。しかし剛体近似を仮定したとしても、一般的の分子は非対称コマであり複雑な回転エネルギー準位で特徴づけられる。そのため物理・化学的な考察だけでは、高い整列度合いを達成することは難しい。我々は自身で開発した非線形量子最適制御シミュレーション法を使い、個々の分子に関しての整列制御法を提案してきた。個々の分子に対する結果から、一般的かつ効果的な制御ルールの知見を得るアプローチである。その結果、制御の有効性を評価するのによく使われる SO_2 分子を例に、互いに直交する直線偏光ダブルパルスが整列制御に効果的であることを報告した[2]。本研究では、機械学習を使い本制御法を多数の分子に対して適用し制御の有効性を系統的に明らかにする[3]。

2つ目の研究目標は、中嶋グループが開発したガラス基板に対するアブレージョン・アシスティッドナノ秒レーザー加工法（以下 AANL 法）[4]に関して、機械学習を用いて実験パラメータを予測することである。ガラス光拡散板の作製の例では、まず、赤外ナノ秒レーザーパルを Ni 基板に照射し、高エネルギーの Ni アブレーションフラグメントを生成する。直上に置かれたガラス基板に対し、フラグメントが衝突することで加工が進む。非線形の光学過程かつ間接加工であることから、目的の加工に最適なレーザーパラメータの決定には多数回の系統的な試行が必要である。本研究では機械学習を使ってパラメータの決定の課題解決を目指す。ただし、実験による訓練サンプル作成の限界から、比較的少数の訓練データから機械学習モデルを開発する必要がありチャレンジングなテーマである。

2. 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

剛体近似を仮定すると一般的の分子はいわゆる非対称コマとして表される。我々は SO_2 分子に対する最適制御シミュレーションから、「互いに直交する直線偏光ダブルパルス」による制御の有効性を報告している[2]。この制御では、パルスの遅延時間と各パルスのフルエンスが重要である。後者に関しては、全パルスフルエンスを経験的に求めることでフルエンス割合に着目する。各分子ごと、各制御パラメータの組に対して、達成できる最大の 3 次元整列度合いを考える。特に、制御パラメータの関数として最大の 3 次元整列度合いを表した図を制御ランドスケープ図とよぶことにする。制御ランドスケープ図が分かれば、その中から最適な制御パラメータの組が分かるだけでなく、制御機構に関しても豊富な情報が期待できる。しかし、仮に遅延時間を 120 通り、フルエンス割合を 50 通りに分割しても、分子ごとに 6000 回の時間発展の計算が必要がある。そこで、我々は C_2v 対称性を有し、かつ偏長タイプの非対称コマに着目し、機械学習による制御ランドスケープ図の作成（予測）を目指した。

教師あり機械学習モデルとして畳み込みニューラル ネットワーク (CNN) を用いる。 C_2v 対称性を持つ偏長タイプの非対称コマ分子は NIST データベースより選んだ。なお、基底電子状態、スピノー重項状態を仮定し、核スピノン異性体は考慮しないとする。様々な分子を統一的に扱うために、回転定数 A を使ってシュレーディンガー方程式を無次元化する。ただし、この無次元化だけでは不十分であった

ため、ダイナミクスは更に無次元時間 $T_{\text{rot}} = \pi/(\tilde{B} + \tilde{C})$ (便宜上、回転周期とよぶ) で再スケールしている。分子は無次元化された回転定数 B と C および分極率の差の比 $\Delta\alpha_{ac}/\Delta\alpha_{bc}$ (a, b, c は分子の主軸を表す) で特徴づけられる。これを分子空間とよび分子の分布の様子を図 1 に示す。現実の分子には分布に大きな偏りがあり、機械学習の訓練の観点からは問題である。そこで我々は「人工分子」を着想し(図 1 の星印)課題を克服した。予測の例として 35 個のテストサンプル分子の最適な整列度合いの結果を図 2 に示す。全般的に予測と実際の値にはよい一致が見られる。大きめのズレも一部見られるが、これは分子空間の境界に存在するために予測精度が低下したためと解釈できる。

各分子のランドスケープ図は 6000 点から成り、それを 6000 次元のベクトルとみなすことで分子間距離を定義できる。距離に基づき 3 つのクラスターに分割した結果を図 3 に示す。「互いに直交する直線偏光ダブルパルス」による制御は、 $\Delta\alpha_{ac}/\Delta\alpha_{bc}$ の比が大きな分子に対して特に有効なことが分かる。一方、 $\Delta\alpha_{ac}/\Delta\alpha_{bc}$ の比がそれほど大きくない場合でも、対称コマに近い形状の分子であれば、回転波束のリバイバル構造のために比較的大きな整列度合いを達成できることも分かる(クラスター 2)。

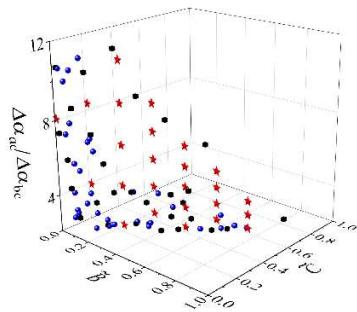


図 1 分子パラメータ空間における分子の分布。星印は人工分子を表す[3]。

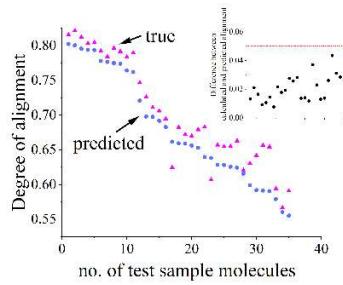


図 2 35 個のテスト分子に対する最適な整列度合いの予測と数値解との比較[3]。

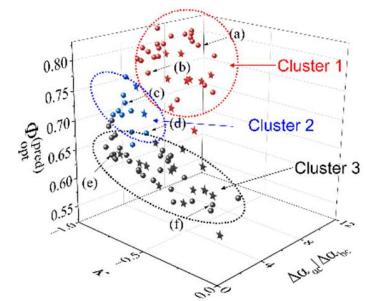


図 3 人工分子を含む全分子に対するクラスター分割。最適な整列度合いの値にしたがって、3 クラスターによく分類される[3]。

3. 光拡散板のレーザー加工への機械学習の応用

中嶋グループによる AANL 法を使ったガラス光拡散板作成の論文[4]に従い、レーザー加工パラメータとしてレーザーパルス強度 (Power)・アブレーション用の金属基板とガラス基板との距離・加工回数・加工速度の 4 つを考える。加工後のガラス基板(光拡散板)にレーザー光を照射し、拡散パターンから加工度合いを評価する。実際、表面上の光学画像から評価した加工度合いと非常に良く相關していることを確認している[5]。加工パラメータ空間に適度に分布した 28 個の訓練サンプルを使い、CNN モデルを訓練した。図 4 に示すように、実験で得られた光拡散プロファイルを非常に良く再現している。更に、加工度合いを「定量化」した量 D を定義し(i)「量 D 」の直接予測、および(ii)「量 D 」の加工パラメータに対する非線形な依存性を明らかにしつつある[5]。現在、成果をとりまとめている。

4. 参考文献

- [1] E. T. Karamatskos *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 3364 (2019).
- [2] M. Yoshida, N. Takemoto, and Y. Ohtsuki, *Phys. Rev. A* **98**, 053434 (2018).
- [3] T. Namba and Y. Ohtsuki, *Phys. Rev. A* **110**, 053107 (2024).
- [4] W. Rong, K. Ando, and T. Nakajima, *Opt. Lasers. Eng.* **167**, 107621 (2023).
- [5] R. Kawaoto, T. Namba, Y. Ohtsuki, Y. Feng, and T. Nakajima, *to be submitted*.

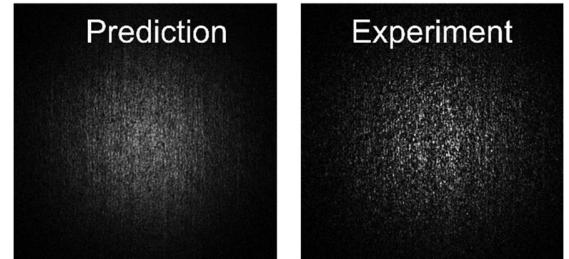


図 4 光拡散プロファイルに関する CNN モデルによる予測と実験データの比較[5]。

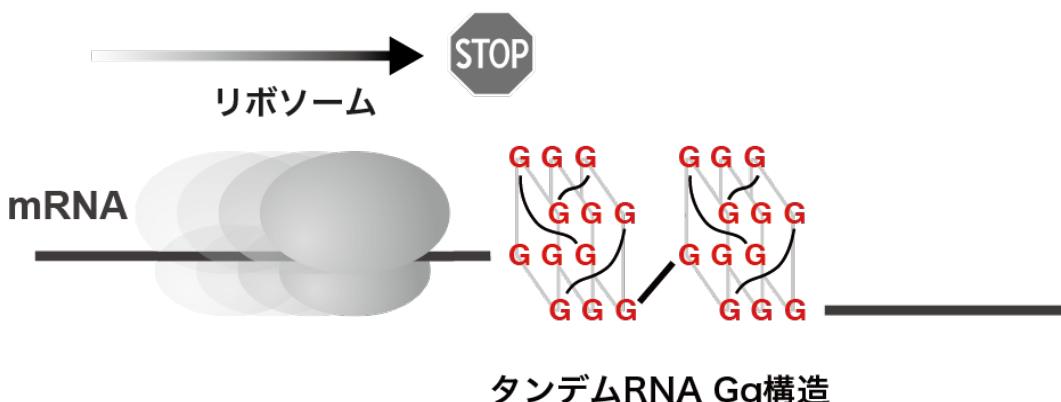
RNA 高次構造変化を誘起する 新規修飾アンチセンス核酸の開発と遺伝子発現制御

萩原 正規¹, 中田 栄司²¹弘前大学大学院理工学研究科²京都大学エネルギー理工学研究所

グアニン塩基に富む一本鎖の DNA や RNA は、グアニン塩基間の特異的な Hoogsteen 水素結合により、カリウムイオン存在下で特徴的な四重鎖構造を形成する。ヒトの染色体末端に存在する一本鎖の繰り返し DNA 配列 (5'-(TTAGGG)n-3') が形成するグアニン四重鎖構造が、染色体の安定性や、細胞の癌化など生物学的に重要な機能を果たすことが明らかになってきた。また近年、遺伝子上流に存在するプロモーター領域において形成される DNA グアニン四重鎖構造が、遺伝子の転写過程に重要な役割を有することも明らかとなった。

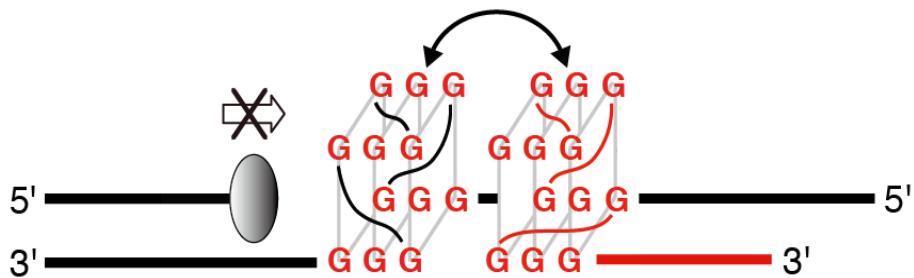
一方、mRNA 配列中に形成されるグアニン四重鎖構造は、リボソームによるタンパク質への翻訳過程を阻害することが明らかにされ、グアニン四重鎖構造はタンパク質発現に重要な役割を果たすことが理解され、RNA グアニン四重鎖構造に選択的に結合する人工分子を用いた遺伝子発現制御の試みがなされている。近年、医薬品開発の分野では、世界的にも低分子化合物からバイオ医薬へ大きくシフトしつつある。中でも核酸を利用した核酸医薬品が次世代の医薬として注目され、開発が精力的に行われており、本研究では、RNA 高次構造変化を誘起する新規修飾アンチセンス核酸の開発と遺伝子発現制御を目標とした。

グアニン塩基に富む一本鎖の DNA あるいは RNA は、四重鎖構造間同士が相互作用により安定化された、タンデム型四重鎖構造を形成する。RNA 中に形成されたタンデム型四重鎖構造は、極めて低濃度のカリウム塩存在条件下でも安定な構造体を形成し、高い効率でタンパク質への翻訳過程を阻害することがわかった（図 1）。



（図 1）連続するグアニン連続配列が形成するタンデム RNA グアニン四重鎖構造

本研究では、予め末端にグアニン四重鎖を形成するように設計した新たなアンチセンス核酸を作製し、タンデム型グアニン四重鎖構造体を人工的に模倣した RNA-DNA ヘテロタンデム型四重鎖構造体を設計し（図 2）RNA 中へのタンデム型グアニン四重鎖構造形成能、および、タンデム型四重鎖構造形成が遺伝子発現に及ぼす影響を解析した。



(図2) グアニン四重鎖導入型アンチセンスによる RNA-DNA タンデム型グアニン四重鎖構造の誘起

アンチセンスに導入したグアニン四重鎖構造の配列により、グアニン四重鎖構造を有する標的 RNA 中に形成されるタンデム型四重鎖構造の安定性が変化することを明らかにした。アンチセンス領域を欠損させたところタンデム型四重鎖構造が消失することが確認でき、グアニン四重鎖を特定の位置に近接させることが構造形成に必須であることが明らかになった。無細胞タンパク質発現系においてタンデム型四重鎖構造形成に伴う下流遺伝子の発現量、ヒト細胞において遺伝子翻訳に及ぼす影響を確認したところ、アンチセンス核酸添加によりタンパク質合成を効果的に阻害することが確認できた。本結果より、グアニン四重鎖構造体修飾アンチセンス核酸は RNA 構造中に安定なタンデム型四重鎖構造を誘起することにより、タンパク質への翻訳過程を阻害できることを明らかにした。

今後、標的遺伝子に対する親和性の向上、より安定にタンデム型四重鎖構造を形成するグアニン四重鎖構造の探索を通じて、タンパク質翻訳過程を制御可能な修飾アンチセンス核酸の開発を行いたい。

参考文献

1. "In Vivo mRNA Hacking with Staple Oligomers Prevents Myocardial Hypertrophy" Y. Katsuda*, *bioRxiv* 2023.04.18.537290; doi: <https://doi.org/10.1101/2023.04.18.537290> T. Kamura, T. Kida, T. Saeki, Y. Itsuki, Y. Kato, T. Nakamura, M. Nishida, Y. Kitamura, T. Ihara*, M. Hagihara*, and S. Sato*
2. "Inhibition of protein synthesis through RNA-based tandem G-quadruplex formation" Chemical Communications, 2021, 57, 8063–8066
Masaki Hagihara*

[学会発表リスト]

第15回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム
Masaki Hagihara, and Eiji Nakata
Development of novel guanine-tethered antisennse oligonucleotides

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¹、中田 栄司²、水上 進^{1,3}

¹東北大学多元物質科学研究所、²京都大学エネルギー理工学研究所、³東北大学大学院生命科学研究所

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である。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。その背景として、細胞内のマンガンを高解像度で可視化する手段がなく、局所濃度を追跡できないことが挙げられる。一般的に生化学研究では、金属種の挙動を蛍光解析するが、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は解析できない。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り蛍光プローブの開発が困難であった。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)を解析できないので、サイズが大きく電子密度の高い構造に変換して検出する必要がある。過去には遺伝子工学的に導入したタグ構造を用いて AFM イメージ[Y. F. Dufrêne, *Integr. Biol.*, 2012]や EM イメージ[R. Y. Tsien, *PLOS Biol.*, 2011; G. He, *Nat. Methods*, 2020]の報告例はあるが、その適用範囲は限られた種類のタンパク質のみであった。以上のことから、本研究では金属や小分子などの多様な化学種に対して AFM/EM イメージングを可能とする技術概念を提唱するとともに、マンガンのミトコンドリア内の濃度分布を解析することを目指している。

2. 研究成果

本研究で開発する技術では、マンガン選択的に駆動する酵素を用いており、マンガン濃度が上昇した細胞内区域で合分子(酵素基質)が酵素反応を介して活性化されて周辺のタンパク質へ結合する。さらに本分子へクリック反応を介して化合物リンカーやモジュールタンパク質を連結して、最終的に AFM や EM で可視のタンパク質複合体を構築することで、細胞内マンガン濃度を「タンパク質複合体の形成量」で間接的に解析することを目指す。本タンパク質複合体は電子密度と分子サイズが大きい特異な構造となるように設計しており、細胞内夾雜な背景の上でも人工物として容易に検出できる。

前年までに筆者らは、見出した変異酵素がマンガン選択的に駆動することを確認するとともに、さらに金属配位サイトにあるアミノ酸残基を変更しながら金属選択性や金属配位能の向上を検討してきた。本年度は、上述の AFM や EM で検出可能なタンパク質複合体の調製について検討している。本タンパク質複合体は、上述した合分子へクリック反応を介してモジュールタンパク質を複数導入して形成する。更にモジュールタンパク質にはメタロチオネイン由来の配列を導入しており、金属配位によって電子密度と分子サイズを上昇することによって AFM や EM で検出できることを期待した。まず本手法の有効性を確認するため、大腸菌の形質転換で本モジュールタンパク質を発現した(His タグ・サイズ排除カラムで精製)。さらに複数の化合物をクリック反応で連結したリンカ一部位に対して、リンカ構造の末端へ Halo tag や SNAP

tag の技術により複数のモジュールタンパク質を導入して複合体を調製した(本複合体もサイズ排除カラムで精製)。次に金属イオン (Cd^{II}, Au^{III})を配位した錯体構造を TEM (JEM2100plus, acceleration voltage 200 kV) で観察したところ、期待に反して電子密度が低く検出不能であった。そこで代替として、メタロチオネインを核として金ナノ粒子 (2-5 nm) を形成する戦略を検討した。その結果、4~5 nm のナノ粒子を複数含むクラスター構造を上記複合体上に構築して TEM 観察での可視化に成功した。来年度以降は、上述で開発した変異酵素によるマンガン検出と金ナノ粒子構築技術を融合することで、細胞内でのマンガン濃度分布を AFM や EM で可視化する技術の開発に挑戦していく。

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]

特になし。

[受賞、プレス発表等]

特になし。

[口頭発表リスト]

Ippei Takashima, Hiroto Takahashi, Eiji Nakata, Shin Mizukami, AFM/EM imaging of intracellular metals with nanostructures constructed via signal amplification systems. 第 15 回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム、Institute of Advanced Energy, Kyoto University / The Joint Usage/Research Center for Zero Emission Energy Research、2024 年 12 月 10 日、京都大学宇治おうばくプラザ。

二酸化バナジウム薄膜の金属-絶縁体相転移温度が屈折率に与える影響

磯部和真¹, 和多田光希¹, 西原大志², 山田寛¹, 堀部明彦¹

¹岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

低炭素社会の実現へ向けて、空調機器の使用に伴うエネルギー消費の抑制が不可欠である。我々の生活領域の温度に関わる、地表面での太陽光の受光や地表から宇宙への熱放射（放射冷却）に起因する熱の移動を無動力で制御するため、温度によって光反射率を可逆的に変化させる材料である二酸化バナジウム（ VO_2 ）が着目されている。 VO_2 は結晶構造の変化のために、高温では金属のような導電性と赤外線反射性、低温ではガラスのような絶縁性と赤外線透過性を示す。光（電磁波）制御の材料として VO_2 を応用するためには、電磁波に対する反射率や吸収率を決定する要因であり物質内の電子や結晶格子の振動による電荷の振動挙動を記述する物性値である、複素屈折率を詳細に分析する必要がある。しかし、 VO_2 を含むバナジウム酸化物にはVとOの組成比が異なる多数の結晶が存在するため、合成手法によっては VO_2 以外の酸化バナジウム結晶が混在する多結晶となり、複素屈折率や相転移温度が純粋な VO_2 から乖離する。本研究では、VとOの比が異なる数種類の酸化バナジウム薄膜の光学物性を測定し、薄膜の多結晶化が薄膜の屈折率に与える影響を評価した。

2. 実験方法

本研究では、 VO_2 ターゲットを用いたマグネットロンスパッタリングにより酸化バナジウム薄膜の成膜を行った。基板は 10mm × 10mm の片面研磨 Si (100) 基板または両面研磨サファイア (0001) 単結晶基板とし、マスクを用いて基板中央の直径 6mm の円内に限定して厚さ約 300nm の酸化バナジウム薄膜を成膜した。成膜直後の膜はアモルファスであるため、環状電気炉を用いてアニール処理を行った。このとき、VとOの組成比を調整するため、酸化雰囲気あるいは還元雰囲気下においてアニール処理を行った。その後、X線回折装置を用いて薄膜の結晶性を評価した。薄膜の光学物性の評価にはフーリエ変換赤外分光器 (FT-IR) 及びエリプソメトリを用いた。これらの分析はいずれも 20°C の室温下で行った。

本報告書では紙面の都合上、膜厚測定、X線回折及びエリプソメトリを用いた屈折率の詳細な評価については割愛する。

3. 結果と考察

図 1 はアニール処理後の酸化バナジウム薄膜である。図 1(a), (c) の薄膜は Si 基板上に、(b), (d) はサファイア基板に成膜したものである。図 1(a), (b) は酸化アニール処理のみを行った薄膜であり、X線回析の分析により V_2O_5 の結晶であることがわかっている。図 1(c), (d) は酸化後に還元アニール処理を行った薄膜であり、 V_6O_{13} の結晶であることがわかっている。いずれの薄膜もスパッタリング直後は鏡面であったが、アニール処理によって算術平均粗さ約 150nm まで表面粗さが悪化していた。サファイア基板を用いた試料の赤外透過率及び反射率を、FT-IR 装置により測定した結果を図 2 に示す。波長 2-6 μm の範囲において、 V_2O_5 薄膜は赤外線をほとんど反射も吸収もしておらず、基板の透過率に漸近する一方で、 V_6O_{13} 薄膜の透過率は低い。これは V_2O_5 と V_6O_{13} の相転移温度がそれぞれ 530, 155K であり [1]、常温においては複素屈折率の虚部（吸収）の小さい

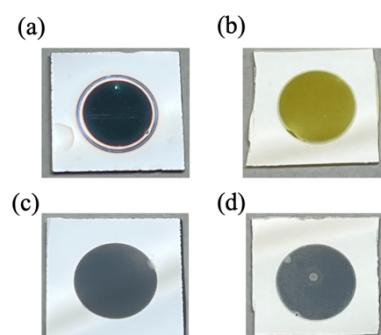


図 1 アニール処理後の酸化バナジウム薄膜

絶縁体、虚部の大きい金属としてそれぞれ振る舞うためである。一方で、両者の反射率スペクトルの差は小さく、複素屈折率の実部の差も小さいといえる。特に、本研究で成膜した V_6O_{13} 薄膜の複素屈折率の実部は純粋な VO_2 薄膜が金属として振る舞うときの実部よりも小さく、金属らしさが弱いといえる[2]。そのため、 VO_2 にこれらが不純物として混在することは、相転移に伴う光学物性の変化量を小さくしてしまうと示唆される。

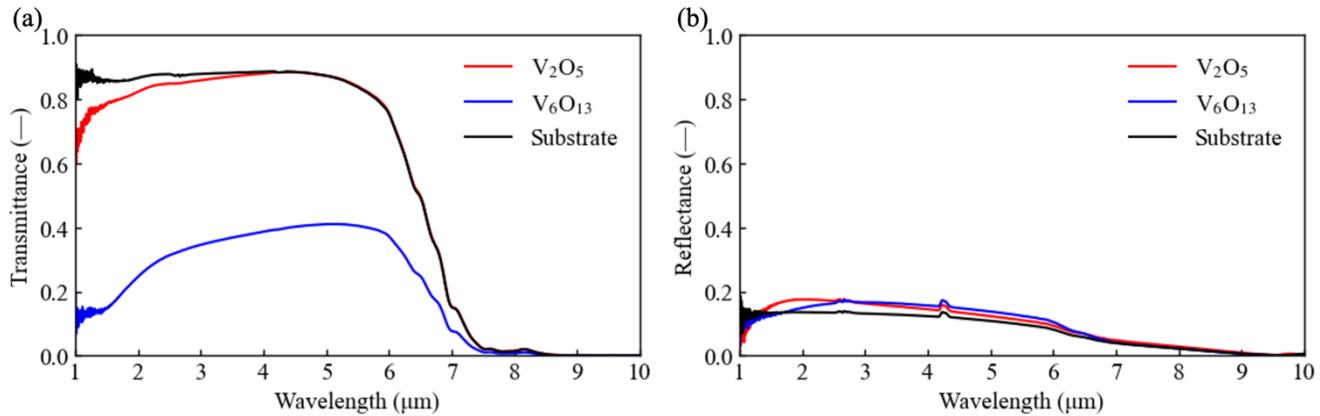


図2 サファイア基板上に成膜した酸化バナジウム薄膜の(a)透過率及び(b)反射率スペクトル

4. 今後の展望

本研究では、スパッタリングによって成膜した V_2O_5 及び V_6O_{13} 薄膜の光学物性を分析した。今後は、 VO_2 を含むより多くの種類の酸化バナジウム結晶についても光学物性の分析を進め、光制御により適した酸化バナジウム薄膜についての検討を進めていく。

5. 参考文献

- [1] Peng Hu et al., Chem. Rev., 123 (8), 4353 (2023).
- [2] Chenghao Wan et al., Ann. Phys., 531 (10), 1 (2019).

[論文発表リスト]

- Kazuma Isobe, Yutaka Yamada, Akihiko Horibe, Katsunori Hanamura, "Radiative energy transfer via surface plasmon polaritons around metal-insulator grating: For better understanding of magnetic polariton," Journal of Thermal Science and Technology, 19 (1), 23-00531 (2024), (発行済)
- Kazuma Isobe, Kaketo Yamauchi, Yutaka Yamada, Akihiko Horibe "Synthesize of π -octadecane@ VO_2 microcapsules with high thermal storage density for cascade latent thermal storage system," (投稿中)

[受賞、プレス発表等]

- 2024 AUTSE Young Scientist Award (Asian Union of Thermal Science and Engineering), 2024. 6. 24, Kazuma Isobe

[口頭発表リスト]

- 磐部和真, 亀井遙瑛, 山田寛, 堀部明彦, 中西亮太, 岡野航佑, "ゾルゲル法により成膜した二酸化バナジウム薄膜の屈折率スペクトル," 第61回日本伝熱シンポジウム, 2024年5月30日, 神戸国際会議場.
- Kazuma Isobe, Taishi Nishihara, Yutaka Yamada, Akihiko Horibe, "Effect of the metal-insulator transition temperature of vanadium dioxide film on its refractive index," The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, 2024/12/10, Kyoto University (ポスター)

代謝系酵素遺伝子を制御する RNA 編集技術の開発

福田 将虎¹, 緒方 悠岐¹, 嶋津 尚輝¹, 島内 駿¹, 中田 栄司²

¹福岡大学理学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

【研究背景・目的】

生物が行うクリーンかつ高効率なエネルギーの产生・利用システムは、遺伝情報に基づいて合成されるさまざまなタンパク質の働きによって構築されている。また細胞は、エネルギーの产生・利用を適切に行うために、タンパク質の発現量や機能を転写や翻訳の段階で精密に調節している。つまり、遺伝子発現の過程でタンパク質の機能を自由に改変できれば、細胞内のエネルギー产生・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にとどまらず、生体を利用した有用物質の生産や、生物のエネルギーシステムを社会実装するための応用にもつながると期待される。

これまでに RNA 編集を基盤とする遺伝子改変技術 (RNA 編集技術) を開発してきた。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 編集機構が備わっている。この機構は、細胞内に内在的に存在する RNA 編集酵素 (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に特定のアデノシン (A) がイノシン (I) に変換される仕組みである。mRNA 上で生じた I は、タンパク質翻訳の際にグアノシン (G) として認識されるため、A-to-I RNA 編集は RNA レベルの A-to-G 遺伝子変異と等価な効果を持ち、タンパク質の機能を改変することが可能である。我々は、ADAR の基質となる RNA の構造情報をもとに、ADAR の RNA 編集活性を標的 RNA に誘導し、特定の部位に A-to-I RNA 編集を導入する RNA 編集核酸 (AD-gRNA) を開発した (図 1)。本研究では、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产生・利用を人為的に制御する方法論の開発を目指す。

従来の AD-gRNA は、標的 RNA との結合がハイブリダイズに依存するため、目的編集部位が二本鎖構造中に存在する場合は、ADAR を誘導することが困難である。そのため、従来技術だけでは標的部位周辺の環境により望みの部位に RNA 編集を誘導できない場合がある。そこで本研究では、RNA 編集基質構造が標的部位周辺配列と ASR がハイブリダイズして構成される二本鎖構造 (D-dsRNA) と ARR (A-dsRNA) の二つの二本鎖構造領域で構成されることに着目し (図 2a)、アンチセンス RNA を用いて二本鎖構造中の標的アデノシンを RNA 編集する方法に応用できるかを検証した。

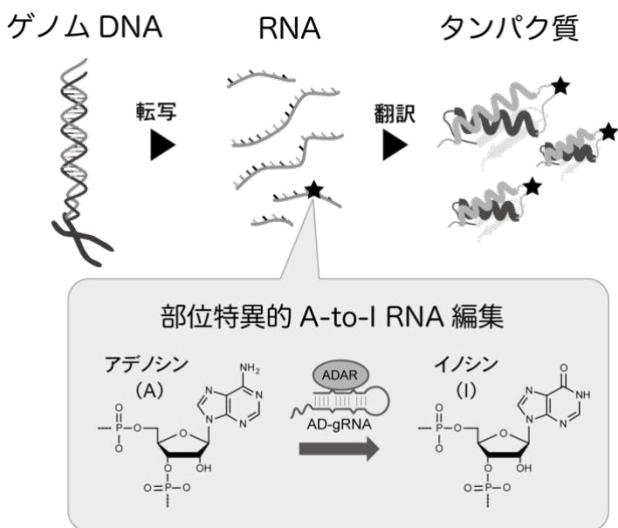


図 1 RNA 編集機構と RNA 編集技術の概要

RNA 編集技術 (部位特異的 A-to-I RNA 編集技術) は、エネルギー产生・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】

・二本鎖構造中の標的アデノシンを RNA 編集する方法の開発

従来の AD-gRNA は、相補的な配列で標的 RNA を認識するアンチセンス領域 (ASR) と、RNA 編集酵素 ADAR と相互作用し、編集活性を効率的に誘導するためのステムループ領域 (ADAR 誘導領域 : ARR) で構成される (図 2a)。本研究では、RNA 編集基質構造が標的部位周辺配列と ASR がハイブリダイズして構成される二本鎖構造 (D-dsRNA) と ARR (A-dsRNA) の二つの二本鎖構造領域で構成されることに着目した。この特徴から、二本鎖構造中に存在するアデノシンを標的にする場合、標的部位が存在する二本鎖構造領域を D-dsRNA とし、周辺配列とハイブリダイズするアンチセンス RNA を用いて近傍に A-dsRNA を形成することで、目的アデノシンに RNA 編集を誘導できると考えた (図 2b)。この仮説を実証するため、図 2c に示すモデル標的 RNA (182 nt) とアンチセンス RNA (19 nt) を設計した (図 3c)。アンチセンス RNA 非存在下および存在下で、組換え ADAR2 を用いた *in vitro* RNA 編集反応を行い、標的 RNA の A1-A5 の編集割合を解析した (図 3d)。結果、今回解析した位置では、A1 以外の全て部位で編集が確認された。また、編集効率は位置により異なっていた。以上の結果より、アンチセンス RNA により標的部位近傍に二本鎖構造を形成させることで、二本鎖構造中のアデノシンを編集できることを明らかにした。今後、効率的に編集されるアデノシンの位置とアンチセンス RNA 配列を最適化することで、新たな RNA 編集技術として応用できる可能性がある。

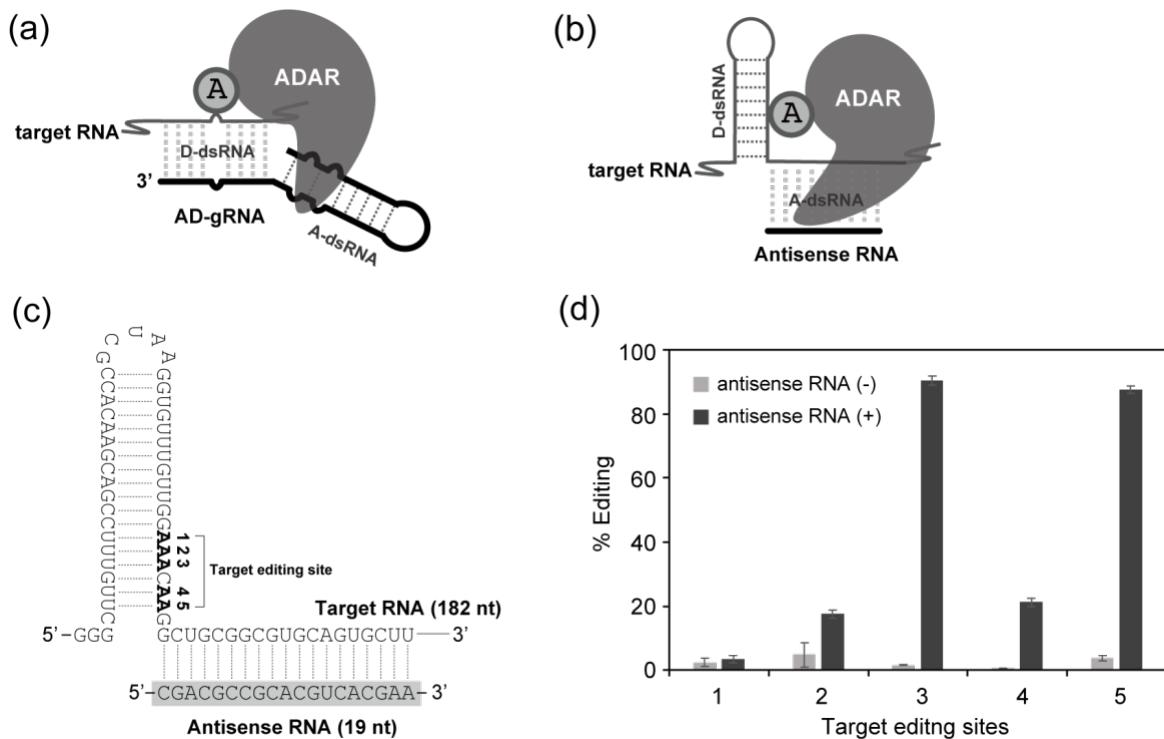


図 2 アンチセンス RNA を用いた二本鎖構造中のアデノシンに対する RNA 編集誘導

(a) 従来型 AD-gRNA と標的 RNA の複合体模式図。 (b) 二本鎖構造中に標的アデノシンが存在する標的 RNA とアンチセンス RNA の複合体模式図。 (c) モデル標的 RNA とアンチセンス RNA の配列設計。解析対象のアデノシンは太字で示し、それぞれの位置は上の数字で示す。 (d) *in vitro* RNA 編集解析結果。アンチセンス RNA 非存在下、存在下における各アデノシンの RNA 編集割合を示す。

量子物質メタマテリアルによる新たな熱ふく射制御法の展開

鈴木 佳那¹, 西原 大志², 宮内 雄平², 櫻井 篤³

¹新潟大学自然科学研究科材料生産システム専攻

²京都大学エネルギー理工学研究所

³新潟大学工学部工学科機械システムプログラム

1. はじめに

近年、エネルギー問題や水不足問題への解決策として、再生可能エネルギーの利用が急務となっている。現在、エネルギー供給の多くを化石燃料が占めているが、それに伴う温室効果ガスの排出や資源枯渇が深刻な問題として浮上している。一方でエネルギー需要は増加傾向にあり、持続可能なエネルギー資源への移行が求められている。

再生可能エネルギーの中でも、太陽熱エネルギーは供給量が豊富で持続可能性に優れるため、有望な選択肢として注目されている。その効率的利用には「波長選択性」が重要である。波長選択性とは、太陽光のエネルギーに応じて吸収と放射を制御する技術であり、太陽光の高エネルギー域で吸収率を高めつつ、赤外域での放射率を抑えることで効率的な熱利用が可能となる。この技術は熱光起電力発電 (STPV) や海水淡水化など、様々な応用分野で活用されている。STPV システムでは、太陽光を吸収材で熱エネルギーに変換し、PV セルを用いて発電を行う仕組みが採用されている。

しかし、従来の波長選択性太陽光吸収材は構造が複雑で製造が難しく、また熱に弱いという課題があった。持続可能な太陽光利用を実現するには、簡易な製造プロセスで低コストかつ耐熱性に優れた材料の開発が求められる。

本研究では、波長選択性太陽光吸収材としてカーボンナノチューブ (CNT) 膜に着目した。CNT 膜は近赤外域で高い吸収率を示し、それ以外の波長域では放射率が低い。また、熱安定性にも優れている。この特性を生かし、CNT 膜と他材料を組み合わせることで、簡易な構造で耐熱性に優れる吸収材を開発できる可能性がある。本研究では、シミュレーションと実験を通じて CNT 膜の有効性を示し、新たな波長選択性太陽光吸収材の設計と作製を行う。

2. 計算方法および構造設計

本研究では、カーボンナノチューブ (CNT) 膜を用いた波長選択性太陽光吸収材料の設計と評価を行った。計算には、厳密結合波解析法 (RCWA) を用い、吸収率および放射率を算出し、性能評価指数 (FOM) に基づいて最適構造を決定した。材料設計では、CNT 膜の構造と基板の組み合わせを検討し、(1) W 基板 + CNT 膜 (2 層構造)、(2) W 基板 + MgF₂ + CNT 膜 (3 層構造)、(3) W 基板 + MgF₂ + CNT 膜 + MgF₂ (4 層構造) (図 1) を比較した。計算の結果、CNT 膜の励起子共鳴と光の干渉効果により、4 層構造で最も高い波長選択性 (FOM=0.78) を示した (図 2)。これらの知見から、CNT 膜の光学特性を活かすことで、高効率な波長選択性太陽光吸収材料の設計が可能であることが明らかとなった。

3. 実験方法

本研究では、カーボンナノチューブ (CNT) 膜を用いた波長選択性太陽光吸収材料を作製し、その光学特性を評価した。まず、(10,3)の单一カイラリティ CNT 膜をゲルクロマトグラフィ一分離法で精製し、真空濾過法によって成膜した。作製した CNT 膜は、サファイア基板および金属ワッシャーに転写し、誘電関数の測定に用いた。

次に、W 基板および MgF₂層をスパッタリング法と蒸着法により成膜し、2 層 (W+CNT)、3 層 (W + MgF₂ + CNT)、4 層 (W + MgF₂ + CNT + MgF₂) の試料を作製した (図 3)。作製後、膜厚を非接触三次元測定機で測定し、設計値との誤差を確認した。

光学特性評価には、UV-Vis/NIR 分光計および FTIR 分光計を用い、試料の反射率および透過率を測定した。透過率を 0 と仮定し、反射率データから吸収率および放射率を算出し、計算結果と比較した。

4. 結果と考察

計算結果では、CNT(10,3)膜を用いた2層 (W + CNT)、3層 (W + MgF₂ + CNT)、4層 (W + MgF₂ + CNT + MgF₂) の構造を比較し、層数を増やすことで波長選択性が向上することを確認した。特に、4層構造では FOM=0.78 を達成し、2.0 μm 以下の短波長領域で高い吸収率を示した。PDD (Power Dissipation Density) 解析の結果、CNT 膜の励起子共鳴と MgF₂層による光の干渉が波長選択性の向上に寄与していることが示された。

図 4 に示す実験結果では、計算結果と同様に、4層構造が最も高い波長選択性を示し、短波長域での吸収率向上が確認された。特に、測定された吸収率および放射率のスペクトルは、計算結果と良い一致を示した。さらに、PDD 解析による光エネルギー分布も、CNT(10,3)膜内での吸収が強くなることを示し、計算予測と一致した。ただし、実験値と計算値にわずかな差異が見られ、その原因是 MgF₂や W の実際の屈折率が計算で用いた文献値と異なることによるものと考えられる。

以上より、本研究で設計した CNT 膜を用いた波長選択性太陽光吸収材料は、理論・実験の両面で高い性能を確認できた。今後は CNT 膜の大面積製造や耐久性評価が課題となる。

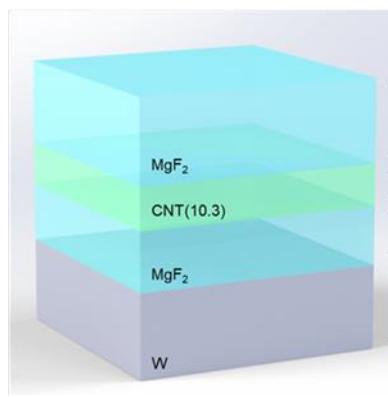


Fig. 1 4-layer structure.

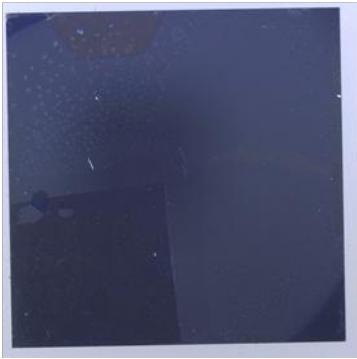


Fig. 3 Fabricated device of 4-layer.

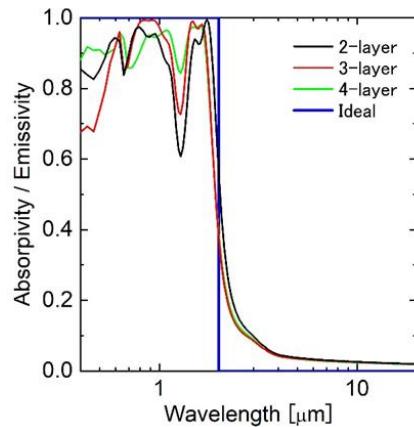


Fig. 2 Computational design.

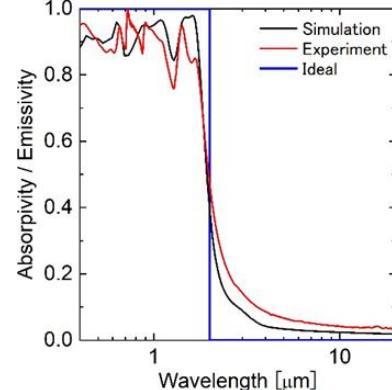


Fig. 4 Comparison between computational result and experimental measurement.

口頭発表リスト

1. Kana Suzuki, Kota Matsui, Hengkai Wu, Mioko Kawakami, Takeshi Tanaka, Hiromichi Kataura, Taishi Nishihara, Yuhei Miyauchi and Atsushi Sakurai "Development of a New Method for Controlling Thermal Radiation by Quantum Metamaterials", The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, 2024.
2. Kana Suzuki, Kota Matsui, Hengkai Wu, Mioko Kawakami, Takeshi Tanaka, Hiromichi Kataura, Taishi Nishihara, Yuhei Miyauchi and Atsushi Sakurai "A solar-selective absorber based on carbon nanotube films", The 15th International Symposium of Advanced Energy Science, 2024.

赤外自由電子レーザーによるう蝕病原性菌の殺菌効果の検討

遠山歳三¹, 全柄俊², 稲葉啓太郎¹, 吉野文彦¹, 浜田信城¹

¹神奈川歯科大学口腔細菌学

²京都大学エネルギー理工学研究所

【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なものの、菌体由来成分の引き起こす炎症や歯質の破壊を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困難になり患者のQOLを低下させる。現在、医療に使用されている波長固定式レーザーは、熱による正常細胞の破壊や、光増感物質として使用されるメチレンブルーは生細胞の核をも染色し光励起に誘導された活性酸素種により正常細胞へも毒性を示す。赤外自由電子レーザー (FEL) は、特定の波長が特定の分子結合を選択的に切断することが可能であるため、菌体に特異的に発現している分子を標的にして、選択的に不活化することができる。歯周病治療、う蝕治療において、病原細菌および菌体成分 (リポ多糖 : LPS) の排除が必須であるが、デンタルプラークは複数の細菌が形成するバイオフィルムである上、思春期以降の口腔に安定して定着している常在細菌であるため、その完全な除去は非常に困難である。このような背景を踏まえ、本研究では、波長可変性を有し、温度変化を伴わない FEL を用いて菌体由来病原因子を失活させることができる波長を特定することにより、感染領域におけるグラム陽性菌の殺菌効果および、バイオフィルム形成の抑制や除去効果を検討した。

【方法】

1. 本研究ではグラム陽性菌として *Streptococcus mutans* (*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。照射後の各種細菌を走査型電子顕微鏡で観察し菌体の構造変化を観察した。また、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) にて複数の波長のスペクトルが得られた。これらの波長を *S.mutans* に 5 分、10 分、15 分赤外自由電子レーザーを照射した結果、波長 9.26 μm において有意な殺菌効果が認められ、電子顕微鏡においても菌体破壊増が認められた。

15 分間照射による遺伝子発現量に関して、9.26 μm 、9.41 μm および 10.46 μm で、glucosyltransferase C 遺伝子の発現が減少し、特に、10.46 μm 照射では、glucosyltransferase D 遺伝子の発現も減少していた。同様の作用は、10.46 μm 10 分間照射でも認められた。glucosyltransferase D 遺伝子の発現に対する抑制作用は、10.46 μm 以外の波長では認められなかった。

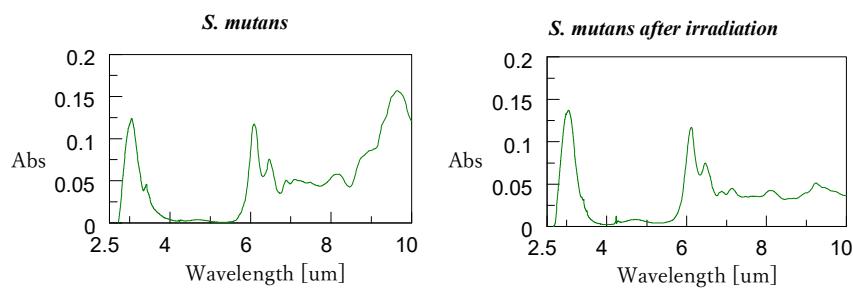
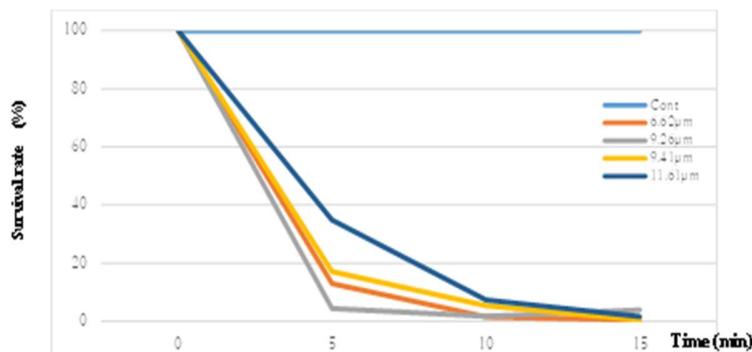
Fig.1 FT-IR にて得られた *S. mutans* のスペクトル。FEL コントロール (A)、FEL 照射後 (B)

Fig.2 赤外自由電子レーザーの殺菌効果

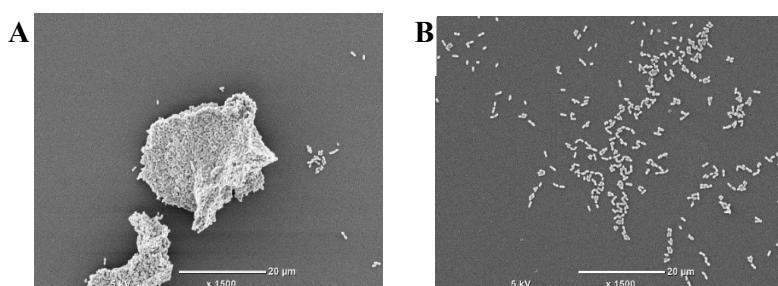
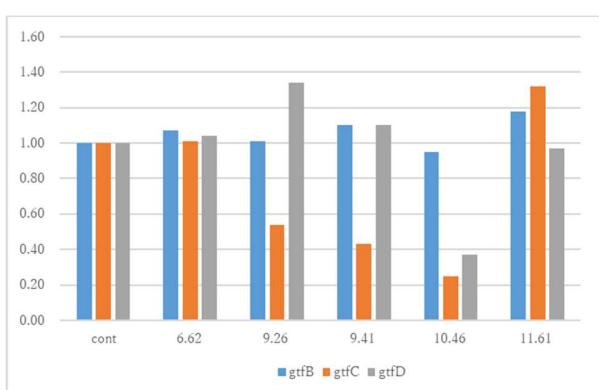
Fig.3 *S. mutans* の電子顕微鏡像
FEL コントロール (A)、FEL 照射後、菌体破壊増が認められた (B)

Fig.4 Glucosyltransferase 活性に対する影響

単原子層物質における励起子の空間特性の研究

酒井 優¹, 松田 一成²

¹山梨大学 工学部 先端材料理工学科

²京都大学 エネルギー理工学研究所

1. はじめに

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の研究として、遷移金属ダイカルコゲナイトに代表される半導体原子層物質の光学特性が近年注目されている。原子層物質中では極限的な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。このような原子層物質を利用した、究極的に小さな機能性光電子デバイスへの応用が近年注目されている。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を理解する必要があるが、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。

そこで我々は、光学顕微鏡に比べて1桁ほど高い空間分解能を有する近接場光学顕微鏡(Scanning Near-field Optical Microscope; SNOM)を用いることで、~100 nmの分解能で原子層物質の光学観察を行っている。SNOMは、走査トンネル顕微鏡(STM)や原子間力顕微鏡(AFM)と同じプローブ走査型顕微鏡(SPM)であり、観察材料に適したナノ光プローブを選択することで、高空間分解能かつ高感度

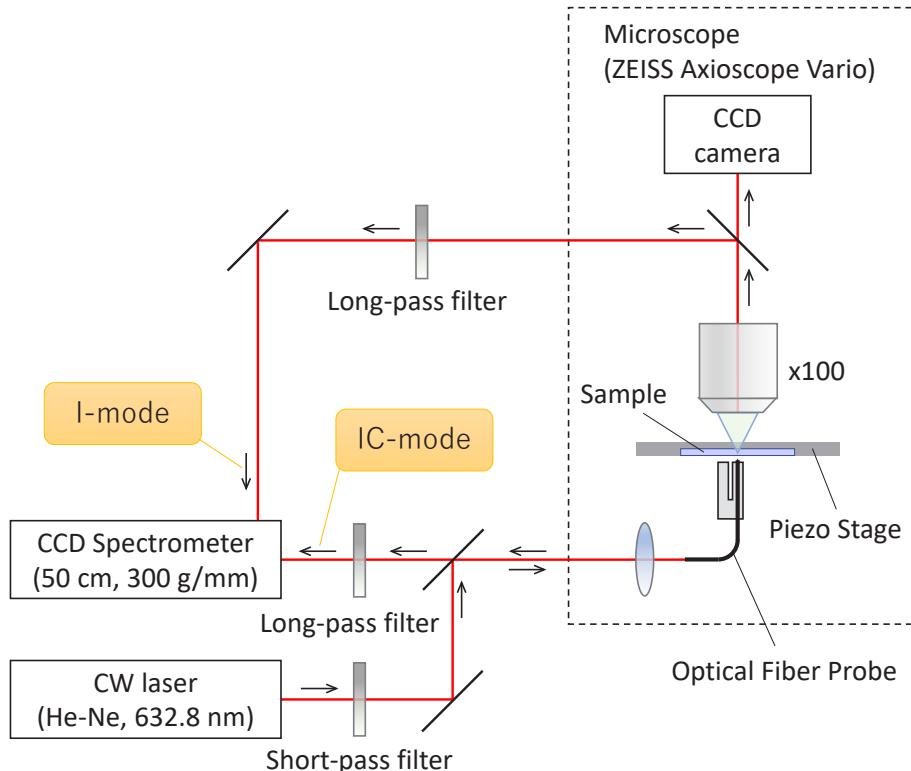


図1 SNOM測定系の模式図

な光学観察を実現できる。本研究では、原子層物質のナノスケール観察のために構築した SNOM 測定系を用いて、2 種類の観察モードによる同時測定を行った。観察モードは、図 1 に示すように、局所照射集光モード (Illumination-Collection mode; I-C mode) と局所照射モード (Illumination mode; I mode) の 2 種類で、これらは冷却 CCD 分光器にて同時計測が可能である。I-C mode では局所的に励起して同じ場所で発光するキャリアを局所的に観察するのに対し、I mode では局所的に励起されたキャリアが物質中を拡散した後にどこかで発光するときのその全発光をマクロに観察する。このため、I-C mode の測定結果と I mode の測定結果を比較することで、物質中での光励起キャリアの拡散をはじめとするキャリアの空間的な振る舞いについて議論することができる。

2. 実験と結果

本研究では、遷移金属ダイカルコゲナイトの 1 つ、単層の二セレン化タンゲステン (WSe_2) を測定試料として用い、剥離法により石英基板 (厚さ 1.0 mm) 上に転写した。励起光源には、He-Ne レーザー (中心波長: 632.8 nm, CW)、検出には冷却 CCD 分光器 (焦点距離: 50 cm, グレーティング: 1200 本/mm) を用いた (図 1)。ナノ光プローブには、緩衝弗化水素酸 (BHF) エッチングによって先鋭化した二段テーパー・開口型光ファイバープローブを使用した。図 2 に、単層 WSe_2 の I-C mode と I mode の同時 SNOM 測定結果を示す。測定では、3 μm 四方の領域を 30 × 30 点で測定している。各点で測定した発光スペクトルより得られた積分強度を (a) I-C mode、(b) I mode についてマッピングした。単層膜の不連続性や基板との密着の不均一性などから、ポテンシャル分布に揺らぎが生じ、励起子の拡散や発光強度に影響を与えていていることが示唆された。今後は、励起子の時空間ダイナミクスの解明へ向け、SNOM 測定と表面形状像測定を組み合わせるなど、より詳細な測定を行う予定である。

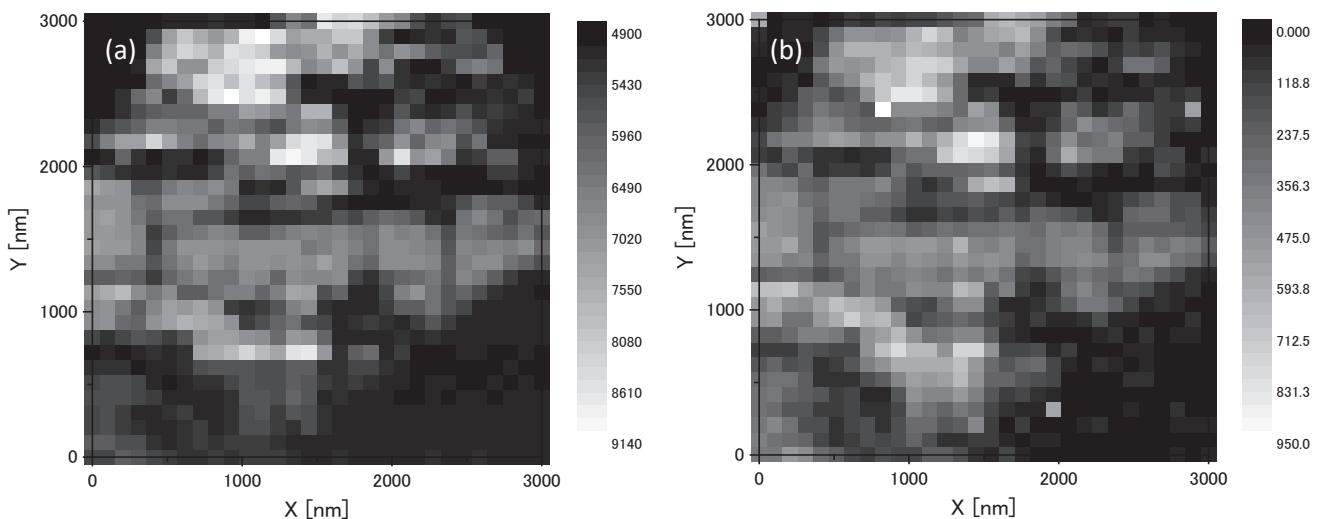


図 2 (a) I-C mode と (b) I-mode による SNOM 測定結果

[口頭発表リスト]

- (1) 酒井 優, 中山 都嵩, 松田 一成, “近接場光学顕微鏡を用いた単層 WSe_2 の局所観察”, 2025 年第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P07-18 (ポスター発表), 2025 年 3 月 14 日(金)~17 日(月), 東京理科大学野田キャンパス & オンライン (千葉県野田市).

ヘリオトロン J 装置におけるインコヒーレントディジタル 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¹, 西野 信博², 門 信一郎³, 宮崎 貴大¹

¹香川高等専門学校情報工学科

²パウヒュッテ

³京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ており、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として挙げられる。立体磁気軸配位は 3 次元構造であり、それに起因する物理特性を 3 次元で測定することが、効果的であると言える。通常、分光計測は線積分値であり、このような測定において、2 次元分布を得るには、計測視線を複数本並べるアレー等を用いて、アーベル変換や CT 法を適用する。また、同様に 3 次元画像は、2 次元画像を残された 1 軸方向にスキャンすることで得られる。しかしながらヘリオトロン J 装置では、2 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、また、限られた放電回数内でのスキャニングは非効率的であり、現実的ではない。そこで、本研究では、インコヒーレントディジタルホログラフィによる 3 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する。本年度は、Off-axis 光学系により検証実験を行った。

2. Off-axis 光学系によるインコヒーレントディジタルホログラフィ

インコヒーレントディジタルホログラフィでは、観測物体にインコヒーレントな光源を照射して、その反射光を用いて自己干渉を起こすことによりホログラムを記録する。本研究では、プラズマ自体が発光体であることを利用するため、参照光の照射は必要ない。令和 4 年度は He-Ne レーザーを光源とした位相シフト法による検証実験を行った。位相シフトを実現する際に通常は、ピエゾ素子を用いるが予算の都合上、高分解能電動ステージを使用した。その結果、レーザー光源の像再生を行うことが出来た。しかしながら高分解能電動ステージの動作を高磁場下で保証することが難しいことから、本年度は、フーリエ変換法(FT 法)により物体光を割り出し像再生する手法を検証する事とした。

FT 法では、測定された干渉パターンに 2 次元フーリエ変換を施し、パワースペクトルとして 0 次光、物体光および共役像を得る。このパワースペクトルにマスクを施し画像処理を行うことで、物体光のみを取り出して像再生を施す。この際、物体波と参照波とが同軸でイメージセンサーに入射する On-axis 光学系では、0 次光と物体光や共役像が重なってしまうため適切なマスクを設定することが困難となる。一方、物体波と参照波を別々の光路で伝搬させてイメージセンサー上で合流させる Off-axis 光学系では、0 次光、物体光、共役像をそれぞれパワースペクトル空間上で分離することが出来る。

ディジタルホログラフィの空間分解能は、参照光(物体光)の波長と CCD カメラの画素の大きさにより決まる。物体光が CCD 受光面に対して垂直に入射して、参照光が角度 θ_r で入射する場合、十分な解像度を有する干渉縞を観測するには、

$$\theta_r < \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2d_{pixel}} \right) \quad (1)$$

である必要がある。ここで、 λ は光源の波長であり、 d_{pixel} は CCD 素子のサイズである。ここでは、まずは Off-axis 法の検証であるため光源には He-Ne レーザー(波長: 632.8 nm)を使用する。CCD 素子サイズは、8 μm であるので、式(1)を満足するには、 $\theta_r < 2.27$ 度である必要がある。

図1に構成されたOff-axis光学系を示す。図において青い光路は物体光であり、黄色い光路は参照光である。光路長を確保するために、光源であるレーザー光は、ミラーにより折り返しており、またビームエキスパンダーによって、ビーム径を拡大されている。

3. 本研究でのOff-axis光学系による干渉縞の測定における問題点

図1に示す光学系によりHe-Neレーザー及び赤色LEDを光源とした干渉縞を計測することができた。しかしながら、像再生を行うと妥当な像を得ることができなかつた。物体光、参照光の各光路での光の伝搬を注意深く観察したところ、ビームスプリッターによる裏面反射や物体光と参照光の強度を同程度のものとするための光学フィルターの調整不足が原因であることが分かった。

改善策として、裏面反射は、位相シフト法を用いた場合は、異なる位相において計測された干渉縞を組み合わせて引き算するため裏面反射の影響が相殺されると考える。しかしながらFT法では、裏面反射そのものを除去しなければならず、ビームスプリッターをプリズム型から平板型に変更する必要がある。光学フィルターによる減光は、光路の適切な位置に素子を組み込み、調整を行う。

4. まとめ

ヘリオトロンJ装置において、H α 線の3次元発光強度分布をインコヒーレントディタルホログラフィーにより計測することを目標として、He-NeレーザーおよびLEDライトを光源としたOff-axis法によるホログラムの計測と像再生を予備実験として行った。計測されたホログラムを解析したところ、ビームスプリッターによる裏面反射が引き起こす干渉縞や、物体光と参照光の強度差が像再生に悪影響を与えていたことが判明した。今後は、光学素子の変更を含めた、干渉計システムの改良を行う。また、実際にヘリオトロンJ装置での測定に向けて、観測ポートの選定や治具の設計製作および光学系の再構築を行う予定である。

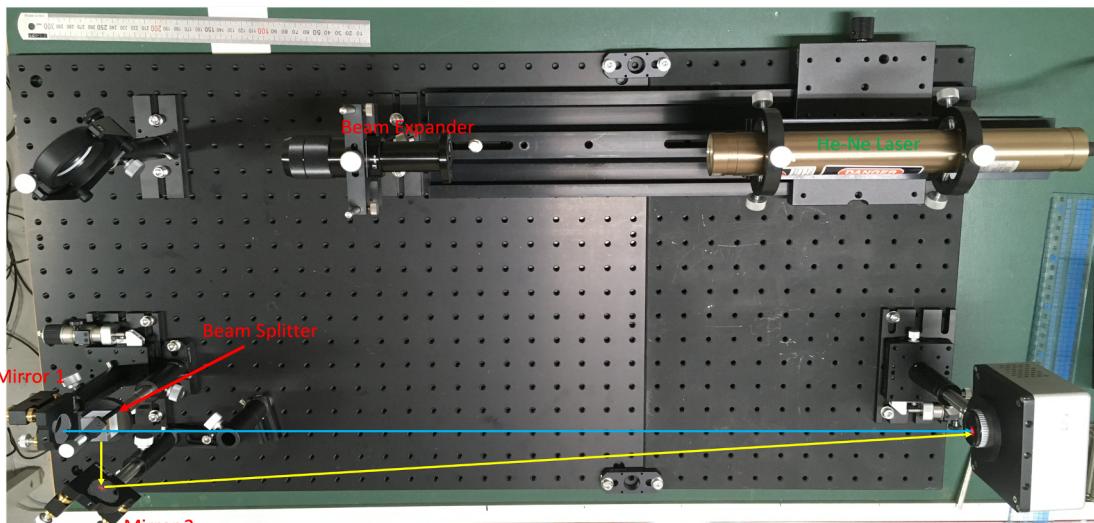


図1 Off-axis光学系

Whole genome analysis and culture method development of Thai coffee leaf rust fungus

R. Kodsueb¹, R. Cheewangkoon², S. Haituk², Y. Takatsuka³, T. Hara³

¹ Microbiology Program, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

² Department of Entomology and Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University

³ Institute of Advanced Energy, Kyoto University

In 2024, our ZE project focuses on the whole genome analysis of *Hemileia vastatrix*, the fungus responsible for Coffee Leaf Rust (CLR), and the conservation of fungal strains for future research. Preliminary DNA extraction, PCR amplification, and sequencing were performed on CLR samples collected from the Bolaven Plateau in Champasak Province, Laos, using three DNA extraction methods: the heating method, the Skudkeng kit, and the Favorgen kit (Fig. 1). Using universal primers and in the absence of urediniospores on CLR leaf samples, only DNA extracted with the commercial Favorgen kit was successfully sequenced; however, the sequences obtained belonged to the coffee plant. A second attempt at DNA extraction, PCR amplification, and sequencing was conducted on CLR samples collected from Mae Rim and Mae Taeng districts in Chiang Mai, Thailand. DNA from CLR samples containing urediniospores was extracted using two commercial kits (Favorgen and Omega) and amplified with two primer sets: a set of universal primers (ITS1/ITS4) and a set of specific primers for *H. vastatrix* (Hv-ITS-F/HV-ITS-R; Wu *et al.*, 2023). Sequencing results revealed that only the specific primers successfully amplified the ITS rDNA of CLR from both kits, achieving 99.29% identity with other *H. vastatrix* sequences submitted to GenBank. This result suggests the specific primers' capability to amplify CLR DNA accurately. With this set of primers, detecting CLR during the early stages of infection in coffee fields becomes possible. Morphological studies of CLR samples from Chiang Mai displayed the typical characteristics of the disease. Initial symptoms included small, pale-yellow spots on the upper surface of the leaves, which later developed into orange, circular lesions (pustules) with urediniospores on the underside of the leaves (Fig. 2c). Microscopic examination revealed that the urediniospore size of CLR samples from Chiang Mai was smaller than those reported by Pelayo *et al.* (2024), measuring $7-9 \times 4-6 \mu\text{m}$ (mean = $8 \times 6 \mu\text{m}$, n = 50); Fig. 2e-2l). A phylogenetic tree of the DNA sequences constructed using the MEGA software program confirmed the placement of Chiang Mai CLR in the class *Pucciniomycetes*, identifying it as the same species as CLR strains found worldwide (Fig. 3).

A: Heating-extraction

Sample in TE buffer + incubated in boiling water for 15 min

B: Favorgen Kit

FavorPrep Tissue Genomic DNA Extraction Mini Kit
(<https://www.favorgen.com/en/product.php?act=view&cid=12&id=22>)

C: Skudkeng Kit

Centrifuge-free DNA extraction kit
(Skudkeng Extract Co., Ltd.; <http://www.skudkeng.com>)

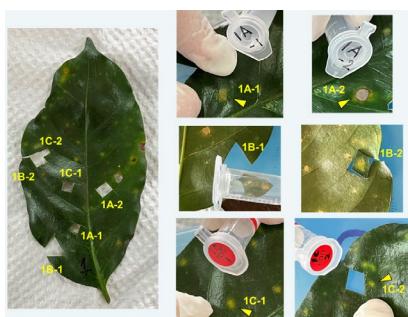


Fig.1. Three DNA extraction methods for Laos CLR samples

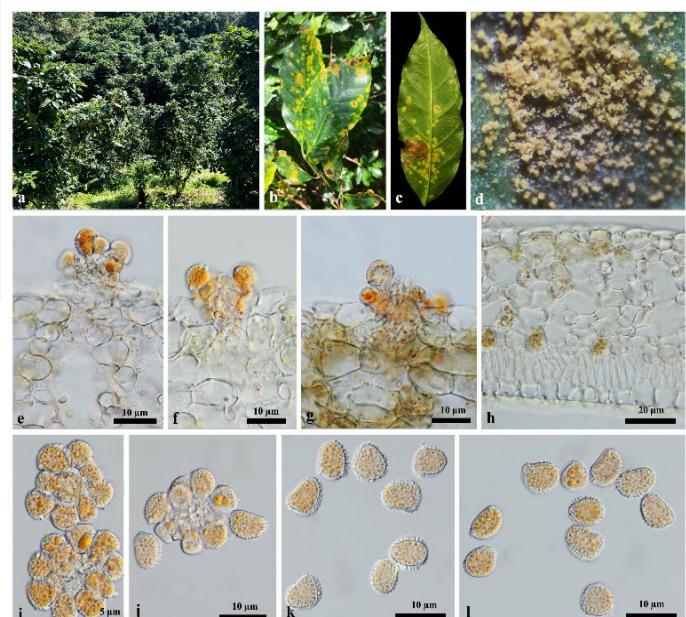


Fig.2. Morphological characteristics of CLR from Chiang Mai, Thailand

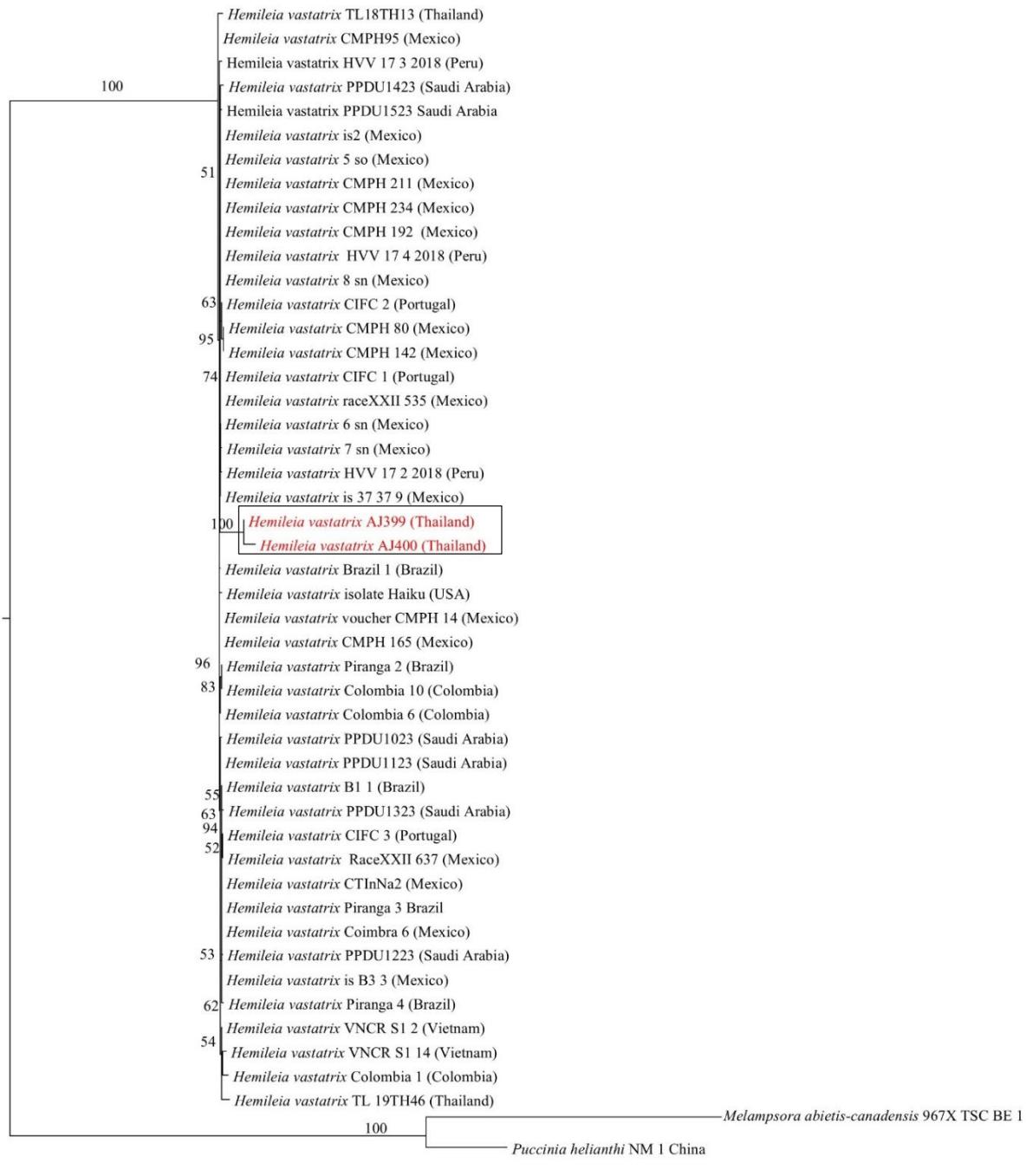


Fig.3. The phylogenetic placement of CLR samples from Chiang Mai, Thailand

References

- Pelayo G. *et al.* 2024. Urediniospore size variation and morphological novelties of *Hemileia vastatrix* on *Coffea* spp. in Mexico. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4336373/v1>.
- 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

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 15th International Symposium of Advanced Energy Science. 10th – 13th December 2024. Kyoto University, Uji Campus. ZE Poster Session. ZE2024B-26.

多糖における赤外自由電子レーザーを用いた 選択的脱離現象の系統的研究

本田孝志¹, 川西邦夫², 全炳俊³

¹高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

²昭和大学 医学部 解剖学講座 顕微解剖学部門

³京都大学 エネルギー理工学研究所

糖鎖は第3の生命鎖として着目されるが、その合成には酵素が必要である。ムコ多糖の一つであり医薬品として活用されるヘパリンナトリウム塩に関して、2022年度には赤外自由電子レーザー(IR-FEL)を用いた酵素によらない選択的脱離に成功しており、昨年度にはどの側鎖からの脱離かを判別するためキャピラリ電気泳動法を含めた多角的な評価を行ってきた。照射実験後の構造評価において、実験試料量の観点からNMR(数十mg必要)は不可である一方で、100μg弱で十分実験可能なキャピラリ電気泳動とのマッチングはよく、脱離後試料の評価に関しても赤外分光光度計の結果をサポートする結果が得られている。2024年度では、ヘパリン同様にムコ多糖である硫酸化ヒアルロン酸およびコンドロイチン硫酸(硫酸置換サイトによって複数のタイプが存在)に対して、IR-FEL照射による選択的脱硫酸実験を行い、脱ガス成分の評価も合わせて行った。

実験試料である硫酸化ヒアルロン酸、コンドロイチン硫酸は近畿大学、薬学部創薬科学科の薬品分析学研究室から提供頂いた。実験波長は赤外吸収の大きい硫酸基に対する振動励起波長(8.2, 9.6-9.8μm)を用いて照射実験を行った。図1にヘパリンナトリウム塩(HEP)、硫酸化ヒアルロン酸(HA)、コンドロイチン硫酸A(CS-A)における照射前後の赤外スペクトルを示す。HAはHEPと同様に脱硫酸過程が確認され、CS-Aにおいては反応しないことが判明した。硫酸基の配置に対応しており、HAはHEPと類似点がある一方で、CS-AはHEPと異なる点があり、HEPのFEL照射による脱硫酸過程が6-O位で起こっていることと対応している。

また、2022年度に製作したガスセルを用いた脱ガス成分の評価も行った。ガスセル内の試料に硫酸基に対する振動励起波長を照射し、脱ガス成分をKU-FEL付設のFT-IRで赤外スペクトル測定を行った。今年度はガスセルの改良を行い、実験手法の改善を行った。図2にガスセル実験の改善前後のスペクトルを示す。改善点としては、①スウェージロックからのリーク、脱ガス実験において真空下ではなく、大気圧下での実験にしたことである。真空下の場合、FEL照射によって試料が飛散し、十分な照射実験ができないことが判明し、脱ガス実験では差スペクトルを測ることから大気圧下でも成立する

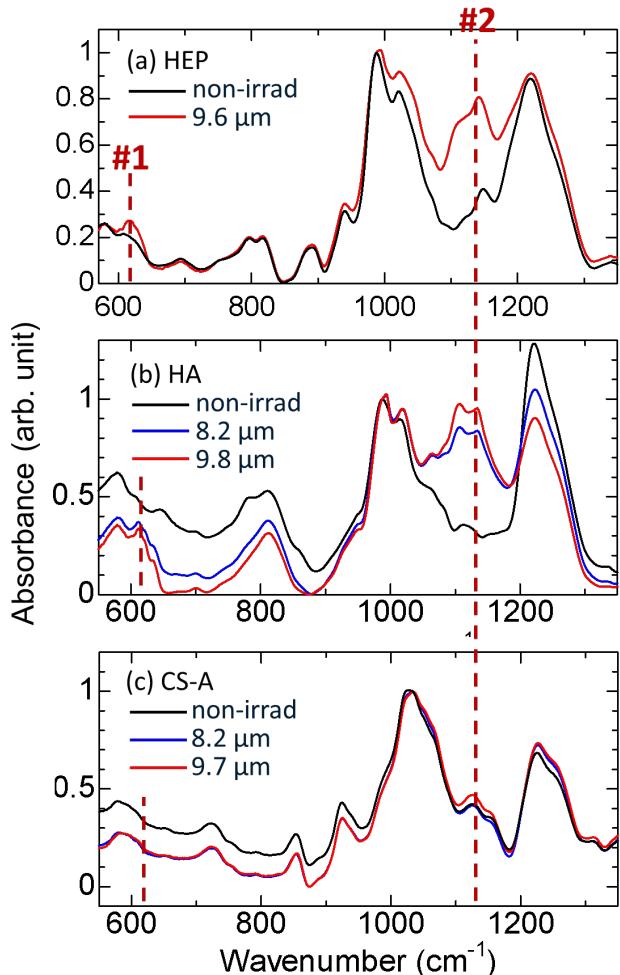


図1 (a)HEP、(b)HA、(c)CS-A 粉末試料の未照射/照射後試料における赤外スペクトル。

ことを確認した。これまで大気成分に埋もれていたスペクトルが観測されたので、現在、詳細な解析を行っている。

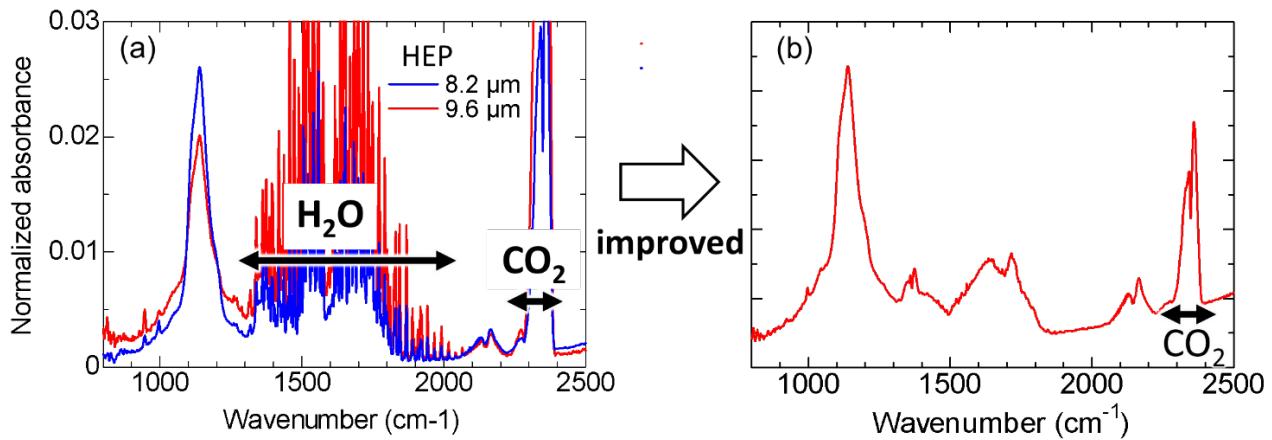


図2 HEP 試料におけるガスセルの(a)改善前,(b)改善後の脱ガス成分の赤外スペクトル。

〔口頭発表リスト〕

T. Honda, K. Kawanishi, H. Zen, "Systematic study of selective desulfation phenomena in glycosaminoglycans using infrared free electron laser", The 15th International Symposium of Advanced Energy Science -Toward the Realization of Advanced and Carbon Negative Energy-, 2024年12月10日-13日、京都大学宇治キャンパス、Poster Presentation

本田 孝志、川西 邦夫、全 炳俊、久野 敦、"分子振動励起現象を用いたグリコサミノグリカンの選択的構造制御"、第38回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2025年1月10日-12日、つくば国際会議場、Oral Presentation

アルゴン雰囲気中における 酸化物分散強化合金粉末の高温酸化特性

岩田憲幸¹, 森園靖浩¹, 木村晃彦², 藤内聖皓²

¹久留米工業高等専門学校材料システム工学科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景と目的

安全性の確保を前提とした原子力発電は、発電過程で二酸化炭素を排出しないことから、先進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広く進められている。とりわけ、鉛ビスマス冷却高速炉（LBE-FR）や超臨界圧水冷却高速炉（SCW-FR）などの先進原子力システムを実現するためには、高温環境下における強度特性、耐照射性能および耐食性に優れた構造材料を開発することが不可欠である。酸化物分散強化（ODS）合金は、金属母相中に高温で安定な酸化物粒子をナノレベルで分散させた鉄鋼材料であり、高温での強度や耐食性、および耐照射性に優れるため、次世代原子力システムの燃料被覆管の最有力候補材料として注目されている。ODS 合金は、一般的な鉄鋼材料とは異なり、メカニカルアロイング（MA）によって得られる MA 粉末を熱間固化成形して製造される。

一方、従来は一連の粉末冶金法で得られる ODS 合金の高温酸化に関する研究は広く行われているが、その二次原料である MA 粉末に焦点を当てた調査はほとんどない。本研究では、アルゴン（Ar）雰囲気中における ODS 合金粉末の高温酸化特性を評価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-0.1Ti-0.35Y₂O₃ (wt%) を基本組成として選定した。この組成をもとに、Ti および Y₂O₃ を一定量増大させた成分の ODS 合金粉末を作製した。先ず、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と Y₂O₃ 粉末を秤量・プレミックスした。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、ODS 合金粉末を得た。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、粉碎ボールおよび粉末の重量比を 15 : 1 とした。MA 処理後、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。

得られた MA 粉末に対して、昇温速度 10°C/min、ガス流量 200 mL/min の Ar 雰囲気下で 1200°C まで加熱を行い、その前後の重量変化を測定した。また、これと同じ熱処理条件で、MA 粉末の加熱変化を熱重量・示差熱分析 (TG/DTA) により調査した。さらに、CoK α を線源とした粉末 X 線回折 (XRD) 測定を実施して、加熱前後における結晶相を同定した。

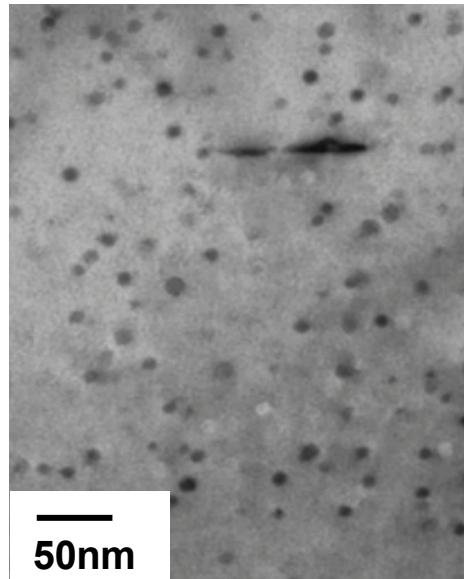


図 1 ODS 合金の微細組織

3. 結果と考察

混合粉末および MA 粉末の XRD 測定を行ったところ、混合粉末の回折図形には、原料成分に由来する Fe, Cr, Ti, Y_2O_3 の回折線がそれぞれ見られた。MA 処理が進むにつれて Fe, Cr, Ti のピークは小さくなり、合金化されていることが分かった。一方、この混合粉末を 48 h 処理した MA 粉末の回折図において、 Y_2O_3 に帰属するピークが減少あるいは消失していた。これは、MA の強加工により合金粉末中に大量の転位が導入され、結晶子径が小さくなることに起因している。 Y_2O_3 の合金粉末中への分解は、MA によって Fe マトリックスに導入される歪みに依存しており、 Y_2O_3 のピークは 48 h の MA 処理でほとんど消滅した。

また、MA 粉末断面の FE-SEM/EDS 分析を

実施した結果、原料粉末に由来する全元素が粉末内部に均一に分布していることが明らかとなった。

この MA 粉末を、昇温速度 10°C/min、ガス流量 200 mL/min の Ar 雰囲気下で 1200°Cまで加熱すると、温度上昇とともに、およそ 200°C以上で粉末重量が線形的に増加する傾向を示した。さらに同様に、Ar 流通下で加熱して測定した MA 粉末の TG/DTA 曲線を図 1 に示す。DTA 曲線の基線変動から、500°C付近よりも低温では発熱変化が見られ、それよりも高温で吸熱変化が認められた。同時測定した TG 曲線では、約 180°Cよりも高温で重量が増加することが見てとれるが、その重量増加は雰囲気中に存在する酸素が取り込まれたためと判断された。なお、酸化による重量増加率は 4.13% であった。また、1200°Cまで加熱した MA 粉末の XRD 測定を実施した。その結果、一般的な ODS 合金中に形成される $Y_2Ti_2O_7$, Y_2TiO_5 , $YTiO_3$ などの Y-Ti 複合酸化物の他に、酸化クロム (Cr_2O_3) やヘマタイト (Fe_2O_3) が形成していることが分かった。Fe-Cr 合金では、Cr は Fe より酸素との親和力が大きいため合金表面で選択的に酸化され、 Cr_2O_3 を生成する。このことから、ODS 合金粉末の加熱過程で Ar 雰囲気中に存在する過剰酸素が酸化反応に寄与することで、 Cr_2O_3 や Fe_2O_3 などの酸化皮膜が合金粉末表面に生成することが示唆された。

4. まとめ

Fe-16Cr-0.1Ti-0.35 Y_2O_3 (wt%) を基本組成として、各種金属元素粉末と Y_2O_3 粉末をともに MA 処理することにより、Ti および Y_2O_3 をいずれも一定量増大させた ODS 合金粉末を作製した。これをアルゴンガス流通下において 1200°Cまで加熱した結果、 $Y_2Ti_2O_7$, Y_2TiO_5 , $YTiO_3$ などの Y-Ti 複合酸化物だけでなく、 Cr_2O_3 や Fe_2O_3 が生成することが明らかとなった。

〔口頭発表リスト〕

- 野林美羽音, 岩田憲幸, 藤内聖皓, 木村晃彦, “Ar 雰囲気下における ODS 合金粉末の高温酸化特性”, 令和 6 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, 2024.12.27, 水戸駅エクセルホール, 茨城県水戸市, ポスター
- Noriyuki Y. Iwata, Yasuhiro Morizono, Kiyohiro Yabuuchi, Akihiko Kimura, “High-temperature oxidation properties of oxide dispersion strengthened alloy powder in argon atmosphere”, 15th International Symposium of Advanced Energy Science, 2024.12.10-12.13, Uji Obaku Plaza, Kyoto University, Kyoto, Japan, ポスター

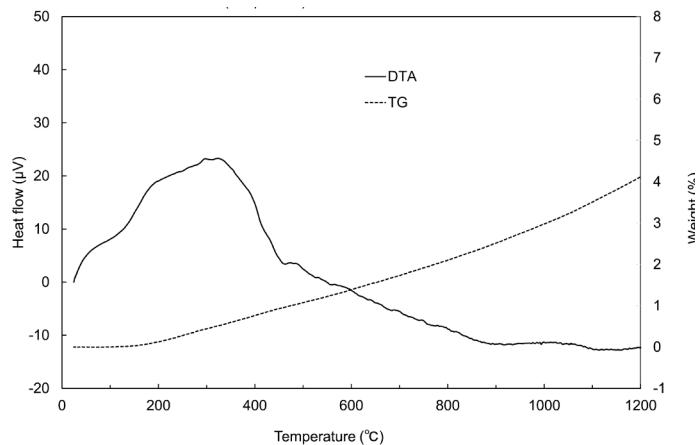


図 1 MA 粉末の TG/DTA 曲線

パルスレーザー除染における飛散汚染粒子の 空間/粒径分布測定法の開発

Developing a technique to monitor the spatial size distribution of radioactive
micro/nano fragments during laser decontamination

小菅 淳¹、安東 航太²、中嶋 隆³

¹ 日本原子力研究開発機構 敦賀総合研究開発センター、² 公益財団法人高輝度光科学研究センター、

³ 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や運転期間を終えた原子炉の廃止措置においては大量の放射性廃棄物が発生する。放射能レベルの高い高レベル放射性廃棄物は少量で、廃棄物の大部分は低レベル放射性廃棄物である。この放射能レベルの低い原子炉配管などの金属部品の除染を効率的に行うことにより、廃棄物の量を減らし、保管コストを大幅に下げる事が可能となる。一般的に用いられている化学除染や機械除染などと比較して、レーザーを用いる除染は、非接触で、遠隔操作が可能であり作業員の被ばく量の低減や二次廃棄物の発生を大幅に抑制することができる。

ステンレス鋼からなる金属部品の除染を行う場合、表面に付着した汚染物を取り除くだけでは完全に除染することはできず、金属の亀裂の中に入り込んだ汚染物を取り除く必要があり、そのため金属母材の表面を数十 μm 程度の深さまで削り取らなくてはならない。これまで日本国内では、高出力連続波レーザー除染が主流となっており、実際、2019年に福島第一原子力発電所の処理水タンク内壁の高出力連続波レーザー除染が実施されたが、高い除染効率は得られなかった。つまり、高出力連続波レーザー除染においては、強い連続波レーザーを照射すればするほど表面の汚染物質が溶融して母材内部に拡散してしまい汚染物が除去できない(二次汚染)ことと、レーザー照射において発生する汚染マイクロ/ナノ粉塵の効率良い捕獲回収が困難である、という2つの大きな問題がある。

本研究では、汚染粉塵の回収のための集塵条件の最適化や、粉塵の粒径に適したフィルターの開発、など、ナノ秒レーザー除染効率を高めるための重要な情報を得るために、ナノ秒パルスレーザー照射時に発生する飛散粉塵の空間分布および粒径分布をその場測定する手法の開発を行った。

2. 実験結果

斜め前方レーザー散乱測定法の実験配置を図1(a)に示す。この手法は、粉塵によるレーザー散乱光の観測方向をレーザー照射方向に対して真横ではなく、斜め前方とすることにより高い検出感度を得ることができる。除染には、波長 1064 nm のナノ秒パルスレーザー

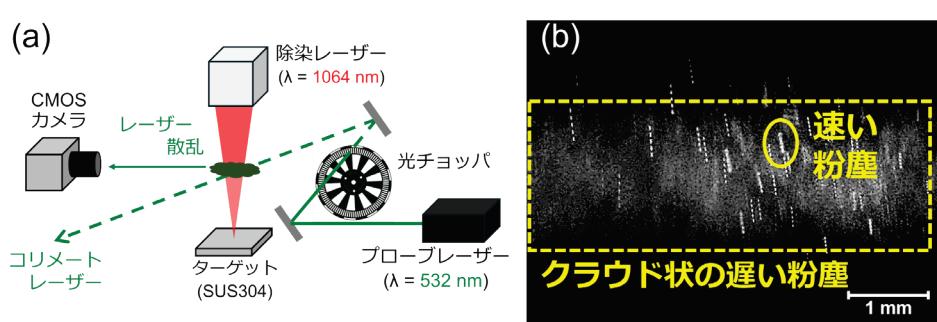


Fig. 1. (a) 斜め前方レーザー散乱実験配置. (b) マイクロ/ナノ粉塵のレーザー散乱画像の例.

を用い、レーザー出力 (17 W)、繰り返し周波数 (200 kHz) を固定し、パルス幅を 15 から 200 ns まで変化させた。粉塵のレーザー散乱検出には、プローブレーザーとして波長 532 nm の CW レーザーからのコリメート光を用い、ターゲットからの高さ 18.5 から 118.5 mm の位置にレーザーを通した。さ

らに、CW レーザーを光チョップでパルス幅が 100 μ s、繰り返し周波数 5 kHz の疑似パルス化した。CMOS カメラによってレーザー散乱光の撮影を行った。カメラの設定値は、フレームレート 400 fps、露光時間 1 ms に固定した。プローブレーザーを疑似パルス化する理由は、カメラの露光時間が 1 ms では、粉塵は線状の軌跡となり、100 μ s 間隔でレーザーを ON-OFF することで破線状の軌跡となる。これにより粉塵の飛行時間を正確に測定する事ができ、飛行時間と飛行距離から粉塵の速度を計測することができる。ターゲットとして、厚さ 5 mm の SUS304 ステンレス鋼を用いた。得られた散乱画像データの例を図 1(b) に示す。画像解析した結果、汚染粉塵は、個別粒子が確認できる速い粉塵と、個別粒子が確認できないクラウド状の遅い粉塵に大別できることが分かった。速い粉塵について、除染レーザーのパルス幅 15 ns (青)、100 ns (緑)、150 ns (赤)における粉塵速度のターゲットからの高さ依存性を図 2(a) に示す。ターゲットからの高さが高くなると、速度が遅くなり、すべてのパルス幅の条件で同じ傾向が観測された。また、ターゲットからの高さ 18.5 mm (赤)、33.5 mm (赤)、58.5 mm (赤)、118.5 mm (赤)における粉塵速度のパルス幅依存性を図 2(b) に示す。パルス幅が長くなると、速度が遅くなり、すべての高さで同じ傾向が観測された。さらに、クラウド状の遅い粒子は、ターゲットからの高さ、パルス幅に依存せず、粉塵速度が 0.05 から 0.1 m/s (図 2(a), (b) の赤いハッチングの領域) であることがわかった。

3. まとめ

我々は、ナノ秒パルスレーザー照射によるレーザー除染時に発生するナノ/マイクロ粉塵の速度と空間分布を斜め前方レーザー散乱によってその場計測する手法の開発を行った。飛散粉塵は速い粉塵とクラウド状の遅い粉塵が存在していることがわかった。さらに、粉塵速度のターゲットからの高さおよびパルス幅依存性もレーザー散乱画像の解析から評価することができた。今後、レーザー散乱を用いて粉塵の粒径分布測定を目指す。レーザー散乱によって粉塵粒径を評価するために、予め粒径のわかっているナノ粒子の散乱強度測定し、レーザー照射による飛散粉塵の散乱強度と比較することによって粉塵粒径を評価することを考えている。

口頭発表リスト

[論文発表リスト]

- 論文は現在執筆中。

[口頭発表リスト]

- 中嶋 隆、小菅 淳、“ナノ秒パルスレーザー除染法の開発 (1) なぜ今、パルスレーザー除染か”、原子力学会 2024 年秋の大会、2024 年 9 月 13 日、仙台
- 小菅 淳、安東 航太、中嶋 隆、“ナノ秒パルスレーザー除染法の開発 (2) 飛散粉塵の時間空間分解その場計測”、原子力学会 2024 年秋の大会、2024 年 9 月 13 日、仙台
- 小菅 淳、山本 恵輔、中嶋 隆、“ナノ秒パルスレーザー除染によって発生する粉塵の時間空間分解計測”、第 85 回 応用物理学会秋季学術講演会、2024 年 9 月 19 日、新潟
- 小菅 淳、山本 恵輔、安東 航太、中嶋 隆、“ステンレス材のナノ秒パルスレーザー除染：粉塵の時間空間分解計測”、レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会、2025 年 1 月 22 日、広島

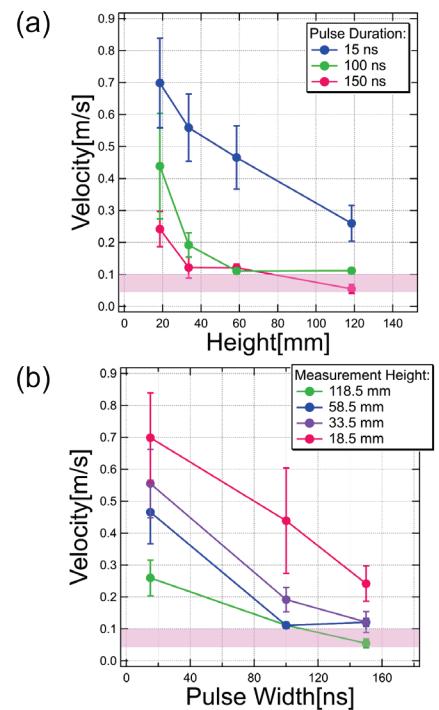


Fig. 2 (1) 除染レーザーのパルス幅 15 ns (青)、100 ns (緑)、150 ns (赤)における粉塵速度のターゲットからの高さ依存性。(2) ターゲットからの高さ 18.5 mm (赤)、33.5 mm (赤)、58.5 mm (赤)、118.5 mm (赤)における粉塵速度のパルス幅依存性。(赤色のハッチングは、クラウド状粒子の速度領域。)

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¹, 小林進二², 横山雅之³, 政宗貞男⁴, 三瓶明希夫⁵, 中村祐司⁶, 松山顕之⁶

¹同志社大学モビリティ研究センター, ²京都大学エネルギー理工学研究所

³核融合科学研究所六ヶ所研究センター, ⁴中部大学工学部

⁵京都工芸繊維大学電気電子工学系, ⁶京都大学エネルギー科学研究所

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、著者ら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説明することができる。すなわちこの図に示すように、対象のモデルやシミュレータ(Simulator)の未知な部分をパラメetrize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。

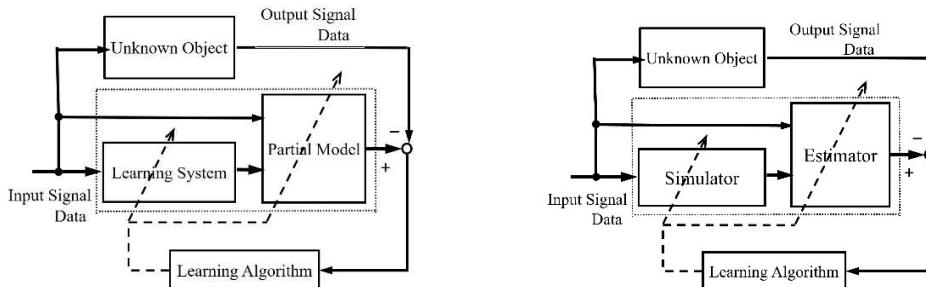


図1 モデル内包学習の枠組み

図2 データ同化の問題の枠組み

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當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最適化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る。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る。

ここで注意すべきことは、感度方程式に基づく方法の場合、評価関数のパラメータに関する勾配を求めるのにパラメータの数だけの感度方程式を解く必要があるのに対し、随伴方程式に基づく方法においては1つの随伴方程式を解くだけで勾配が求まることである。従って随伴方程式に基づく方法は、感度方程式に基づく方法に比べ計算時間の短縮がはかれる。一方、感度方程式の場合は、偏微分方程式である感度方程式の偏微分オペレータが対象のプラズマの偏微分方程式のそれと同じとなり、これらはグリーン関数を用いて連立して解くことが可能となる。一方、偏微分方程式である随伴方程式の偏微分オペレータは一般には対象のプラズマのそれとは異なり、その解法を別途考える必要がある。

著者らはこれまで、軸対称トロイダルプラズマを対象として、感度方程法に基づく方法[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た結果を示し、これらの方法が有効であることを実証している。

4. 検討中の課題と今後の展望

これまでの平衡再構成法は、軸対称トロイダルプラズマすなわち2次元の問題に適用され良好な結果が得られているが、これをヘリカル対称系など3次元の問題に拡張することを検討している。その際プラズマの3次元平衡のモデル式の随伴方程式を導く必要があるが、その一般的な方程式はすでに導いている。また現在はデータ同化のための最適化アルゴリズムとして勾配法に基づく方法を用いている。この方法はある条件で一次収束することが知られているが、二次収束することが知られているニュートン法を用いて最適化するとさらに高速なデータ同化が可能になる。ニュートン法を用いるためには、目的関数のパラメータに関するヘッセ行列を計算する必要がある。その導出法についても検討している。この導出には随伴方程式に対する随伴方程式を導く必要があるが、これについては既に導いており、現在、その解法と実装を検討中である。

さらにモデル内包学習は、平衡再構成だけでなく、プラズマの多くの問題に適用可能であると考えられ、その検討を行っている。その1つとしてプラズマの不安定性に起因する密度変動および磁場変動の時空間構造の解析などに適用することを検討している。これにより、得られたデータだけを用いて時空間構造を解析するのではなく、何らかの物理モデルを内包させて解析することができ、これより対象の物理を考慮した解析が可能となり、非常に有用であると考えられる。

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.

構造性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^{1,2}, 高井亮汰¹, 升野振一郎^{2,3}, 橋田昌樹^{2,3,4}, 阪部周二^{2,3}, 時田茂樹^{2,3}, 岸本泰明^{1,2,5},
松田一成⁵

¹ 京都大学大学院エネルギー科学研究所

² 京都大学プラズマ科学ユニット

³ 京都大学化学研究所

⁴ 東海大学総合科学技術研究所

⁵ 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究背景と目的

集光強度が 10^{19-21} W/cm² 領域のフェムト秒極短パルス高強度レーザーを物質に照射することで、kT オーダーの磁場や 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 オーダー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。一方で、このような強電磁場を伴う相対論プラズマは通常、パルス幅と集光径で決まる時空間領域に局在する非平衡状態であるため、プラズマは慣性時間（～プラズマ長／音速）程度で飛散する。したがって、このような相対論プラズマの適用範囲を広げるためには、レーザーと物質との相互作用過程を制御する必要がある。この視点のもと、我々はレーザー波長オーダーの微細構造を付与したロッド集合体（構造性ターゲットとして参照）に注目し、これに集光強度領域が 10^{18-19} W/cm² のレーザーを照射する 2 次元・3 次元粒子シミュレーションを実施した。その結果、(1) レーザー場の集合体内部への TM 波様伝播によりバルク状態の相対論プラズマが生成し、(2) プラズマ中に準定常な電流路が自己組織的に形成されることで、プラズマを保持する機能を有する準定常強磁場がパルス幅を 2-3 枝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いる。

研究代表者は、上記の(1)(2)を実現する構造性ターゲットとしてカーボンナノチューブ (CNT) に注目し、2022-2023 年度のエネ研共同研究課題において、エネ研・松田一成教授より貸与の CNT を用いて、これに京都大学化学研究所（京大化研）の高強度レーザー T⁶ を照射する実験を実施した。CNT は固体炭素の 1/5 程度の質量密度であり、直径数 nm のミクロな纖維が束となりマクロな指向性を有する。これは、先に述べたロッド集合体において、空間充填率が一定の条件下でロッド径を下げ、アスペクト比を極限まで大きくした物質と捉えることができる。CNT へのレーザー照射実験の結果、レーザー照射の方向によらず、CNT の軸方向に特徴的な平坦構造を持つ電子エネルギースペクトルが得られている。これは、ターゲットに方向性を付与することで、生成プラズマの電子温度や指向性が制御可能であることを示しており、近年注目を集めている粒子線治療に有用 [Dante Roa, Jeffrey Kuo, Harry Moyses, Peter Taborek, Toshiki Tajima, Gerard Mourou and Fuyuhiko Tamanoi, Photonics 9, 403 (2022).] である可能性がある。これらの動機のもと、本研究課題では、CNT やロッド集合体等の指向性を持つ物質（構造性ターゲット）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を通じてプラズマの制御機能を検証することを目的とする。この目的に沿って、電子線リソグラフィーやプラズマエッチング工程を含む最新の半導体製造技術を用いて、高アスペクト比（高さ／直径～50）かつ 100 nm-1 μm 領域のロッド集合体を精緻に作製する手法を確立し、作製したロッド集合体への高強度レーザー照射実験を通じて、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。

(1) 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、直径が 100 nm-1 μm で高さが数 10 μm オーダーのロッドからなるロッド集合体を作製した。作製工程では、従来のネガ型からポジ型に変更したことで、高精度のロッド集合体を高精度かつ安定して作製することに成功した。一方で、直

径が 250 nm 程度のロッド集合体の作製工程では、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）が困難であり、高アスペクト比のロッド集合体の作製は成功していない。次年度の研究課題では、引き続き条件出しを行い、直徑が 100 nm-250 nm 領域のロッド集合体の作製に挑戦する。

(2) 理論・シミュレーション：レーザー照射実験に先立ち、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に、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を実施した。(1)において作製に成功したロッド集合体におけるロッド径が 0.5 μm および 1.0 μm の 2 種類、ロッド高さが 20 μm であることを踏まえて、これを模擬した 3 次元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 T⁶ レーザーを想定し、集光強度が 10^{19} W/cm^2 で波長は 0.81 μm 、パルス幅（FWHM）は 40 fs とした。図 1(a)に高強度レーザーとロッド集合体の相互作用の様子を示している。ロッドの軸は y 軸に並行であり、レーザーは図 1(a)に示すようにロッドの上面から y 軸方向に時刻 $t = 0$ で照射している。

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、ロッド径が 0.5 μm および 1.0 μm のどちらの場合においても、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、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。図 1 は、ロッド径が (b) 1.0 μm 、(c) 0.5 μm の場合における、レーザー照射後 80 fs における電子のエネルギースペクトルを示している。緑実線はロッド由来、紫実線は基板由来の電子を表している。電子 1 つあたりが受け取るエネルギーはロッドの側面方向の表面積に反比例することが予想され、両者のエネルギー吸収率がほぼ等しいことを考慮すると、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 1(b)(c) に示すように、電子温度はロッド径にはほぼ比例していることが分かり、 x, z 方向のイオンの膨張速度（音速）も電子温度の比を反映する結果となった。

(3) レーザー照射実験：(2) で得られた結果を実験で検証するため、京大化研 T⁶ レーザーをロッド集合体に照射する実験を実施した。ショット数を十分に確保できなかつたが、図 1(b)(c) と似た傾向を示す電子のエネルギースペクトル結果が得られている。次年度も引き続き照射実験を実施し、トムソンパラボラ等の新たな計測器を導入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。

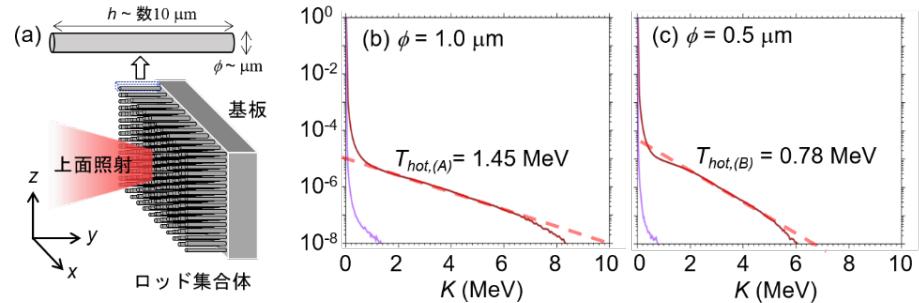


図 1.(a) ロッド集合体と高強度レーザーとの相互作用を表した模式図。ロッドは基板表面の (x, z) 平面上に等間隔で配置されており、今回実施した 3 次元シミュレーションでは x, z 方向の周期性を利用していている。(b)(c) ロッド集合体の質量密度を一定にしてロッド径を変化させた場合の電子のエネルギースペクトル。

[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., Accepted 20, December (2024), 掲載決定済。謝辞に 2024 年度共同研究課題番号 (ZE2024B-31) を記載。2025 年 1 月中に出版予定。

[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.

カーボンニュートラルを目指した 新型半導体電力デバイスの開発

岡本研正¹, 森下和功²

¹特定非営利活動法人光半導体デバイス応用技術研究所

²京都大学エネルギー理工学研究所

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¹, 門信一郎², 岡田浩之²

¹有限会社バウヒュッテ

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 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の一つである。近年、核融合技術の進歩に伴い、DT反応以外の核融合反応も研究され始めている。特に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、核融合は一般に入出力の電力比が低く、経済的ではない。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 α 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 α 粒子が熱化されて出てくるところから荷電分離を検討していたが、これは困難であった。そこで、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 α 粒子を背景プラズマから分離することを考えた。上流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ている（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）。核反応後、核反応生成物（= α 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する。

2. 方法

薄いプラズマからの出力を単粒子軌道で近似するシミュレーションであり、以下のように進める。

1. 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. 電極の数、位置、電圧を決定する
4. 粒子、陽子、電子の収集効率を計算する
5. 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
6. 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、薄いプラズマの影響の考察として、

1. 空間電位の影響
2. 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。

3. 計算結果

現時点まで前節の1と2の計算を行っている。

プラズマ出口をミラー磁場端としたので、出力に適した磁場配位としてカスプ磁場を考えるのは自然である。そこで、コイル半径を1mとし、出口コイル中心の磁場を1Tのカスプ磁場を考えて、テスト粒子として、高エネルギー α 、高エネルギー陽子（p）と背景プラズマの電子の軌道を計算した。カスプ磁場のパラメータは磁場の強さ以外に、半径、コイル間距離などがあり、この組み合わせだけでも無限通り作りうる。今回はコイル間距離を1mとし、通常カスプと対向コイルの電流がミラー端コイルの電流の2倍と0.5倍の3通りの磁場配位を考えた。紙面の都合でカスプ磁場の図は省略し、軌道計算結果の一例を図1-6に示す。z軸を中心軸として、出口コイルは $z=-0.5\text{m}$ 、対向コイルは $z=0.5\text{m}$ に置いた。通常、 $z=0\text{m}$ が線カスプの位置となる。図1から3は試験粒子として1MeVの α の粒子軌道を、図4から6に10keVの電子の軌道を示している。

図1、3を見ると、 α 粒子の多くは左側のミラー端から右側の対向コイルの中心部に到達している。但し、対向コイルの電流が大きい（磁場が大きい）図2では α 粒子でも反射されている様子が分かる。

また、図 4 では一部の電子が、図 5 では全部の電子が反射されており、図 6 の対向コイルの電流が小さい場合のみ、全電子がカスプ磁場から出していく様子が分かった。

本計算の目的は荷電分離の提案であり荷電粒子の閉じ込めではないため、対向コイルの電流が小さい場合に高エネルギーのイオンと背景プラズマの電子が分けられると予想される。但し、上述の通り、パラメータは無限であり、よりよい磁場配位を求め今後コイルの半径等を変え計算を行う必要がある。

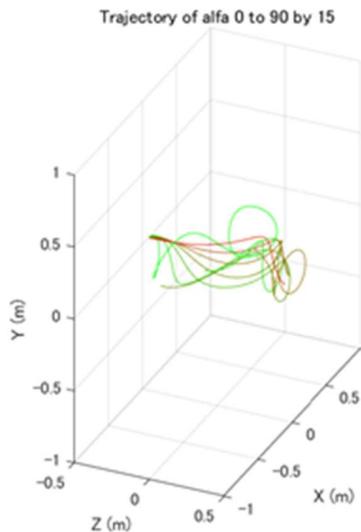


図 1 カスプ磁場(1 : 1)
での 1 MeV α 粒子の軌道

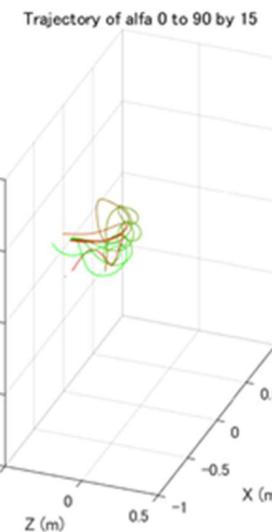


図 2 カスプ磁場(1 : 2)
での 1 MeV α 粒子の軌道

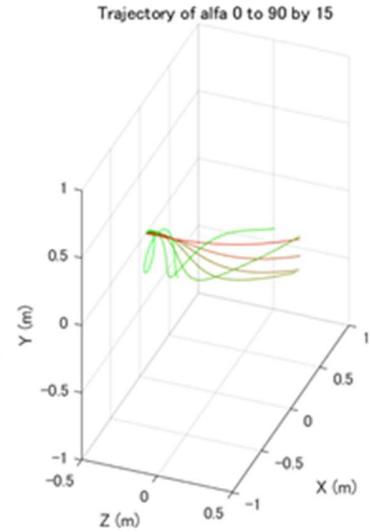


図 3 カスプ磁場(1 : 0.5)
での 1 MeV α 粒子の軌道

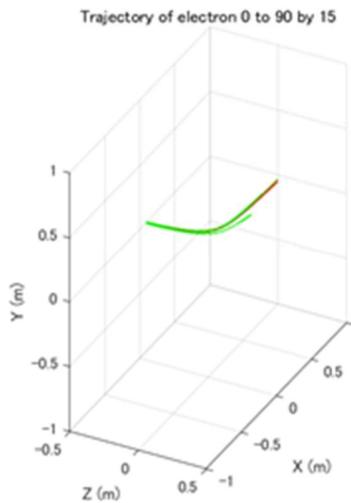


図 4 カスプ磁場(1 : 1)
での 10keV 電子の軌道

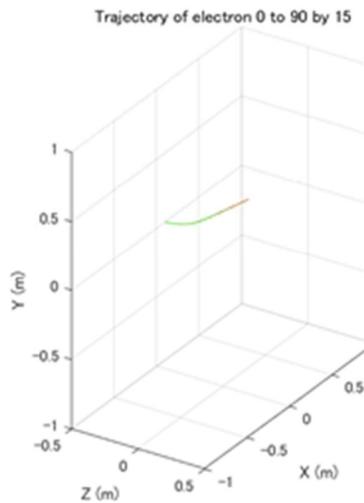


図 5 カスプ磁場(1 : 2)
での 10keV 電子の軌道

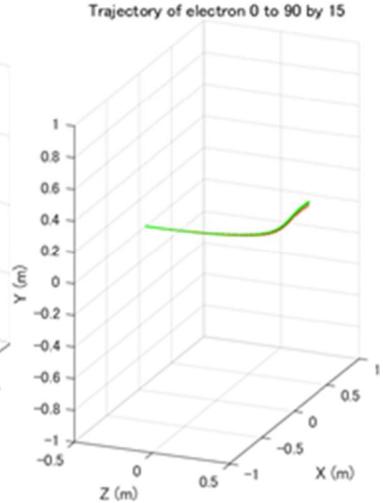


図 6 カスプ磁場(1 : 0.5)
での 10keV 電子の軌道

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]

計算途上であり、論文はない

[受賞、プレス発表等]

計算途上であり、論文はない

[口頭発表リスト]

計算途上であり、論文はない

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。また、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、相対論的放射場の研究も実施する。

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非線形光学結晶に印加し、その際に生じる結晶内の屈折率変化（非線形光学効果）を計測し、電磁場の強度を導出する。その際、非線形光学結晶の屈折率変化は、結晶を通過するプローブ光の偏光変化（直線偏光が楕円偏光化する）から読み取る。

上述のように、本研究では、先行研究（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 用電子加速器）はこれを満たす。

3. 研究結果

自由電子レーザーKU-FEL用電子加速器には、加速器に同期されたフェムト秒レーザーが存在していなかったため、研究代表者が所有するTi:sapphireレーザーを持ち込み、計測系を構築した。レーザーの光学系のセットアップを図1に示す。波長532nmの可視光レーザーはTi:sapphire結晶に集光され、カーレンズモード同期によって発振する。共振器のエンドミラーの一つは出力ミラーとなっており、このミラーを透過して取り出されたレーザーを電気光学検出のプローブ光として用いる。もう片側のエンドミラーはピエゾステージ上に設置されており、Phase Lockシステムにより電気的に共振器長が数マイクロ秒の距離（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る。オシロスコープで計測されたPhase Lockシステムからのミキサー出力を図2に示す。右側のリサ

一ジュ図は真円に近く、位相検出できている事を示す。また、Phase Lockシステムのパラメータ設定の調整により、レーザーと加速器のRF間のジッターを90 ps以下とする事が可能であることを確認した。

電気光学検出で相対論的電磁場を計測する際、つまり非線形光学結晶到達時の電子ビームの動径方向の密度プロファイル計測を行った。実験セットアップを図3に示す。真空排気されたビームパイプから金属薄膜を通して大気中に取り出し、150 mm大気中を伝搬された後に蛍光板に照射された際に生じる光の空間分布を測定した（図4）。水平方向（x軸）のビームサイズは、3.61 mm (FWHM)と計測された。これは、先行研究[1]と同程度であり、電荷量も同程度であることから、電気光学検出によって相対論的電場計測が可能であるという見通しが立った。

電気光学検出を行うための計測光学系の構築を行った。電子ビームとプローブ光（Ti:sapphire レーザー）は共に電気光学結晶に入射され、両者の結晶到達時間をディレイステージによって調整し、マルチショットで電場の時間発展計測の取得を試みた。しかし、結晶に電場が印加される際に生じる複屈折を観測することはできなかった。プローブ光の強度分布はCMOS カメラで取得したが、現在の Ti:sapphire レーザーは強度が弱いため、時間発展取得の際に、各時刻において、数千ショットの積算を行なっている。電子ビームのパルス幅が 1 ps と想定されるのに対して、上述の通り、ジッターは最大で 90 ps 存在するため、積算の間に信号がならされてしまい、信号強度が検出限界以下になっていることが考えられる。そこで、Ti:sapphire レーザーの強度を上げ、シングルショットで電場時間発展計測を行う必要があることが判明した。今後は、再生増幅器を構築することで、レーザー出力を向上させ、来年度からの相対論的電磁場の超高速計測の実施を目指す。

4. 「論文発表リスト」および「口頭発表リスト」について 特になし。

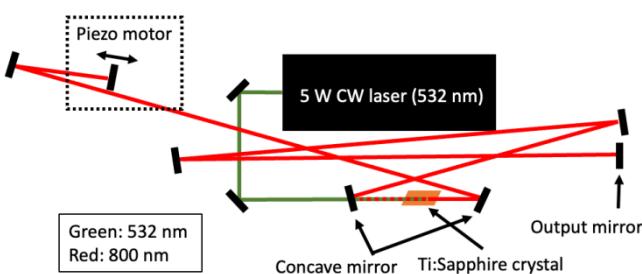


図 1. Ti:sapphire レーザーの光学系。

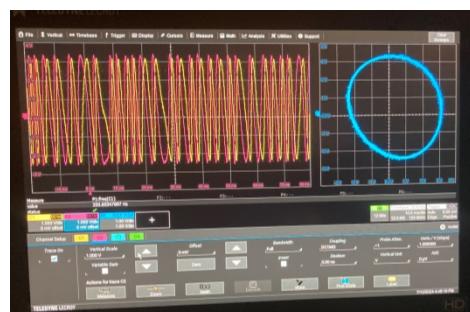


図 2. オシロスコープで得られた Phase Lock システムのミキサー出力の画像。

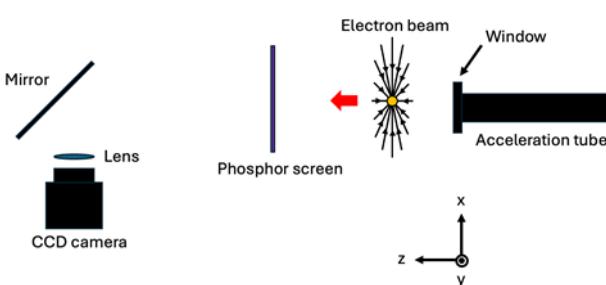


図 3. 電子ビームプロファイル計測実験系

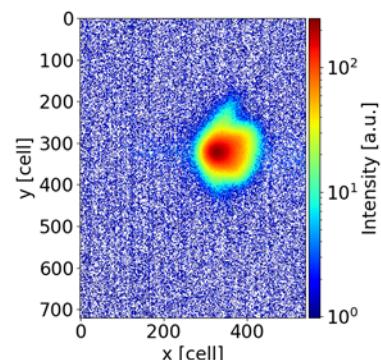


図 4. 蛍光板でイメージングした動径方向の二次元電子密度プロファイル。

ヒト口腔常在菌への FEL 照射による菌体内石灰化の検討

河野哲朗¹, 寒河江登志朗¹, 岡田裕之¹, 境武志², 早川建²,
早川恭史², 全炳俊³, 大垣英明³

¹ 日本大学 松戸歯学部

² 日本大学 量子科学研究所

³ 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、情報処理などに加え、臨床医学などでも利用されている。レーザーは従来の光源とは異なり、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¹⁾。

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。また、短波長側の中赤外線領域は両施設の FEL は重複波長になるので、実験の追試ならび検証に貴重な波長である。そこで、当研究グループでは中赤外線領域の 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、貝類にて光生物反応の研究を行ってきた。今回の研究は、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* (C. m, ATCC: 14266[®]) を選択した。C. m は成熟した歯垢のプラーク中にみられる corncob の芯の部分に位置する細菌であり、カルシウムやリンの存在下で菌体内に石灰化が起きる。いくつかの動物において歯石はハイドロキシアパタイト結晶を成分とする報告がある²⁻⁴⁾。本研究の目的は C. m の光依存性を確かめるために、種々の波長領域での石灰化物生成能の多寡を調べることである。

2. 方法

C. m は Brain Heart Infusion (BHI)+0.5 %Yeast 液体培地にて培養したものを BHI+0.5 %Yeast 寒天培地を 24 well plate (φ 2.0 cm/ well) 上に作製し、播種したものを用意した。24 well plate は FEL 照射直前まで冷温下にて保存し、細菌の成長を抑制した。実験群は KU-FEL を波長 10.6 μm, 9.6 μm, 8.17 μm, 7.0 μm, 6.45 μm および 5.75 μm で、1 plateあたり 1, 5, 10 および 20 分間照射した。いずれもエネルギー密度は偏光板を介して 4.0 mJ/cm² に設定し行った。対照群は同じ環境下で FEL が照射されない箇所に同じ時間、静置した。照射後、実験群および対照群の Plate は 37 °C, 5 % CO₂ の恒温器内でコロニー形成が確認できるまで培養を行った。コロニー形成を確認後、実体顕微鏡下による観察を行い、コンタミネーションが無いことを確認した。24 well plate 上に増殖した C. m をさらに φ 8.0 cm の plate に分離培養用と増殖培養用にそれぞれ plate 2 枚に播種し、先程と同じ条件で恒温器内にて培養した。分離培養用の plate からは、独立したコロニー形態を実体顕微鏡にて観察した。石灰化評価セット(PG リサーチ株式会社、東京、日本)を用いて石灰化物(リン酸カルシウム)を染色し、λ=450 nm にて吸光度測定を行い、石灰化の評価をした。また、増殖培養用の plate からは、増殖した細菌を全て回収し、1.5 mL マイクロチューブ中に蒸留水にて懸濁後、直ちに-80 °C にて凍結し、凍結乾燥器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、エックス線回

析装置(XRD)にて菌体内の結晶構造や分子構造の変化を測定した。また、微小部フーリエ変換赤外分光光度計(micro-FTIR)にて、*C.m* の菌体の組成変化を探求した。

なお、本研究で使用した菌は国立感染症研究所病原体等安全管理規定において BSL1 であり、日本大学松戸歯学部バイオセイフティ委員会に届出済みである。

3. 結果および考察

前年度までのデータでは、照射したすべての FEL 波長において、FTIR では 1740 cm^{-1} , 3300 cm^{-1} 付近のピークに変化みられた。粉末 XRD の結果では、一部の試料からハイドロキシアパタイトの前駆物質である Octacalcium phosphate (OCP)と考えられる回折線が確認された。今年度、我々はアリザリンレッド染色を用

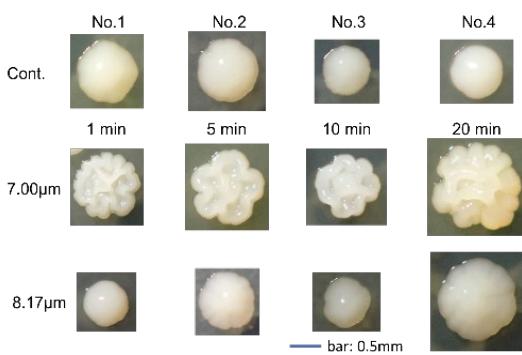
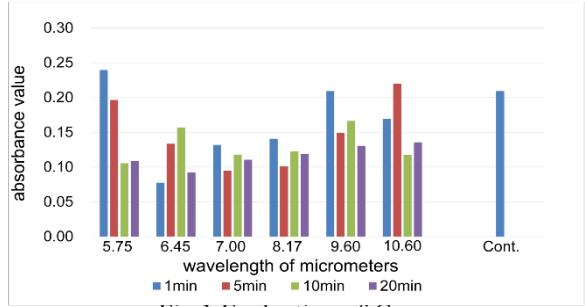


Fig.1 Results of culturing *Corynebacterium matruchotti* before and after FEL irradiation

いた吸光度測定の方法を確立した。その結果、FEL 波長と照射時間の関係から菌体の石灰化物生成量に差が出ることが示唆された。特に FEL 波長 $8.17\text{ }\mu\text{m}$ では、照射時間 1 min でも石灰化物生成量が減少する。(Fig.1 統計処理は現在実施中)。波長 $5.75\text{ }\mu\text{m}$, $8.17\text{ }\mu\text{m}$, $10.6\text{ }\mu\text{m}$ はそれぞれ、C=O 伸縮振動モード, C-O 伸縮振動モード, O-H 変角振動モードに対応している。これらが *C.m* 菌体内に生成される石灰化物の生成過程に対し、分子振動を励起することで、OCP 生成抑制や OCP からハイドロキシアパタイト結晶への成長抑制が現れる可能性が示唆された。また *C.m* の分離培養において、石灰化物生成の抑制が見られるに従い *C.m* のコロニー形態に変化があることを確認した。

4. 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 (Accessed 2024-01-17)
- 2) 高添一郎: 菌体内石灰化現象, 日細菌誌, 28: 489-497, 1973
- 3) 伊藤康雅: 口腔衛生と口腔内細菌, 耳展, 45: 226-234, 2002
- 4) Ooi SW, Smillie AC, Kardos TB, et al.: Intracellular mineralization of *Bacterionema matruchotii*. Can. J. Microbiol., 27: 267-270, 1981
- 5) Sammons R, Wang A, Thackray A, et al.: Bacterial Calcification: Friend or Foe?. Nano Biomed, 2: 71-80, 2010.
- 6) Toyama T, Fujioka J, Watanabe K, et al.: Investigation of bactericidal effect of a mid-infrared free electron laser on *Escherichia coli*, 12: 18111, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-22949-9

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]

- Kono T, Sakae T, Tsuzukibashi O, Zen H, Sakai T, Takahashi Y, Saito M, Shinozaki-Kuwahara N, Nakada H, Kuwada-Kusunose T, Watanabe A, Kaneda T, Hayakawa Y, Ohgaki H, Okada H., Bacterial Biomineralization: A Review and X-ray Diffraction Determination Table for Bacterial Biominerals, J.Hard Tissue Biology, Submitting.

[口頭発表リスト]

- Kono T, Sakae T, Okada H, Hayakawa Y, Sakai T, Zen H, Ohgaki H., Effect of FEL irradiation on the efficiency of carbon dioxide fixation in bacterial cells., 京都大学, 第 15 回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム, 2024 年 12 月 10 日

トロイダルプラズマ周辺乱流の径方向相関解析と配位間比較

永島芳彦¹, 稲垣滋², 金良史², 大島慎介³, 藤澤彰英¹,

¹九州大学応用力学研究所

²京都大学エネルギー理工学研究所

³University of California Irvine

1. 本研究の背景と目的

核融合プラズマ研究では、核融合反応を発生させる上で求められる高性能プラズマの実現に向けて、プラズマの乱流輸送の大域的構造とその形成メカニズムの解明が急務である。プラズマの境界から離れたスクレイピオフ層ではプロップと呼ばれる非拡散的輸送が注目され、スクレイピオフ層の密度勾配が拡散モデルと比較してフラットになる原因とされ、プロップが周辺部のプラズマ分布構造を支配している。プロップをトリガーする粒子や熱の起源はプラズマ境界の強い乱流揺動に内在すると考えられるが、両者を直接結びつける研究は希少である。本研究課題では、究極には境界乱流揺動データの統計解析を通じて、両者の関係性を明らかにすることを目的としている。乱流揺動は主に強く線形不安定性な微視的揺動を起源とし、スペクトルではピーク周波数と同オーダーのスペクトル広がりが観測され、ライフタイムが短く時空間に局在構造を持つ。波の情報がある程度保存されている場合はウェーブレット解析が有用であるが、そうでない場合は統計解析が有用である。本研究課題では、統計解析によって乱流揺動場に内在する見えにくい局在構造を捉えることを目標としている。本研究に先立ち、閉じ込めプラズマではないが準乱流状態の大域的揺動駆動粒子・運動量輸送の確率密度関数の非ガウス性特に大偏差統計にかかる研究を行ってきた[1]。また、統計解析には観測物理量として高時空分解能が求められる、通常観測可能なイオン飽和電流や浮遊電位よりもより輸送の統計量を得るために必要な電子温度揺動や電子密度揺動を局所的にプローブで取得し[2]、大域観測が可能な発光トモグラフィーシステムとプローブ計測を比較しトモグラフィー計測から局所電子温度・電子密度揺動を得る手法の開発[3, 4]など、多角的に研究を行っている。

2. 本研究課題に於ける前年度の研究の進捗

前年度は、改良した計測回路[5]を用いた実験によって、プラズマ密度揺動の周辺乱流揺動の領域とプロップが存在する領域を網羅した同時観測データが得られた[6]。半径方向位置 $R \sim 50-55\text{mm}$ 付近を境にプラズマ外側では、歪度が 0 から乖離するにつれ揺動のガウス分布からのズレと正負の凸構造（4 次モーメント）が顕著となり、プロップ様の揺動時系列構造が卓越する。この実験データは、観測点が外側に移動するにつれて揺動の構造が質的に変化していることを示している。

3. 本年度の研究の進捗

前年度に示されたデータの中に（コアプラズマ側の）乱流揺動中の低頻度の間欠的成分と（周辺プラズマ側の）プロップ的揺動の関係性の有無が潜んでいるという作業仮説を立てている[6]。非ガウス性が変化する領域では間欠的揺動は低頻度であるため、スペクトル解析を元とする相関解析では今の所明確な関係性は見られていない。本年度は、そのような低頻度の相関関係を可視化するために、プラズマ密度揺動の間欠性と乱流粒子束（の近似値）の間欠性との相関関係について確率密度関数や散布図を用いた。まず揺動の確率密度関数から、間欠性を示す揺動の領域について揺動の標準偏差 σ を基準にしておおよそ 3σ 程度より大きな変動とした。次に、空間 2 点の浮遊電位揺動データとイオン飽和電流揺動データから近似的に乱流粒子束に関わる量を計算し、乱流密度揺動との散布図を計算して低頻度の相関関係を見出せないかどうかサーチした。図 1 は、多チャンネルプローブをショット毎に径方向にスキャンして得られた、イオン飽和電流揺動と乱流粒子束の散布図である。このとき、両データ間の時間差は 0 としている。各図のタイトルに径方向位置が示されており、赤色の点は正のイオン飽和電流と正の乱流粒子束の相関関係、茶色の点は正のイオン飽和電流と負の乱流粒子束の相関関係を

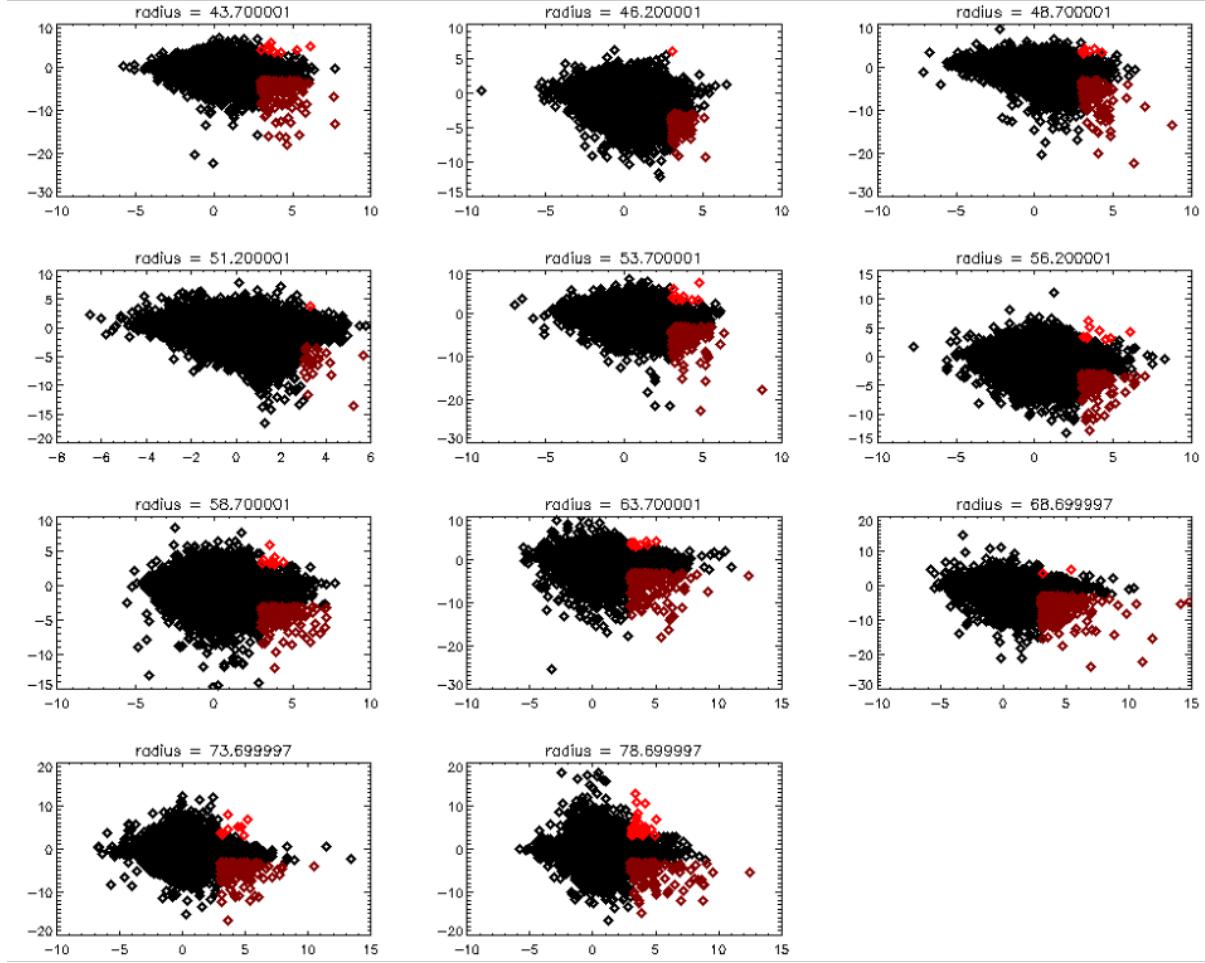


図1 スクレイプオフ層の複数の半径方向位置におけるイオン飽和電流と乱流粒子束近似値の散布図。3次モーメントの変化が始まる位置はおよそ 50-55mm あたりである[7]。イオン飽和電流と乱流粒子束はそれぞれ標準偏差で規格化されており、イオン飽和電流は平均値が差し引かれている。揺動強度の絶対値が $\pm 3\sigma$ 以上の揺動に着目し、正の揺動同士の相関を表す領域を赤で、正のイオン飽和電流と負の揺動粒子束の相関を表す領域は茶で示されている。粒子束の符号の向きは今後検証が必要である。

示している。ここに粒子束の符号の物理的意味は明示せず、今後検証していく。これらそれぞれの散布図からは、およそ赤色の点よりも茶色の点が視覚的には多くの頻度があり、このことは間欠的な密度揺動と間欠的な負の乱流粒子束に一定の関係性があることと矛盾しない。本年度の解析によって低頻度の間欠的な相関関係を見出す手段の手がかりが得られた[7]。

4. 今後の課題

本解析では、散布図を得る上で時間遅れを考慮しておらず、今後は時間遅れを考慮した解析を進める予定である。

5. 参考文献

- [1] Y. Nagashima, et al., Phys. Plasmas 18 (2011) 070701
- [2] Y. Nagashima, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 84 (2015) 063501
- [3] Y. Nagashima, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 89 (2020) 093501
- [4] Y. Nagashima, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 92 (2023) 033501
- [5] S. Ohshima, et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 016009
- [6] Y. Nagashima, et al., 第14回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム 2023年8月30日
- [7] Y. Nagashima, et al., 第15回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム 2024年12月10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¹, 八木重郎², 田宮裕之²

¹ 自然科学研究機構 核融合科学研究所

² 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る上に、再生可能エネルギーで得られる電気をエネルギー源とすることから、二酸化炭素排出量削減に貢献できる可能性を秘めており盛んに研究されている。本研究では、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、セルロースを分解し、直接グルコースに変換することによって、燃料等に用いる試みである。

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⁽¹⁾。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いないので、セルロースの分解過程の解明を目指している。

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。



図1 マイクロ波加熱装置及びガス分析測定系の写真

実験に用いた試料は、セルロース、ケイ酸タンクスチレン、水を重量比 1:1:1 で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。また、一般的な加熱実験としてマントルヒーターに水を入れたビーカーを設置して、沸騰状態で、水溶液を入れた石英管を加熱した。加熱温度は、ともに沸点とした。

3. 実験結果と考察

図2にマイクロ波とマントルヒーターで加熱した後の水溶液の写真を示す。マイクロ波加熱の水溶液は色が黒く変色していたが、マントルヒーターで加熱した水溶液は、加熱前と変化がなかった。図3にマイクロ波加熱時の四重極型試料分析計の結果を示す。この測定で、水素、メタン、酸素、一酸化炭素、二酸化炭素、エタノールが検出されたことから、セルロースがマイクロ波によって分解されたと考えられる。



(a)マイクロ波加熱



(b)マントルヒーター加熱

図2 加熱後の試料の写真

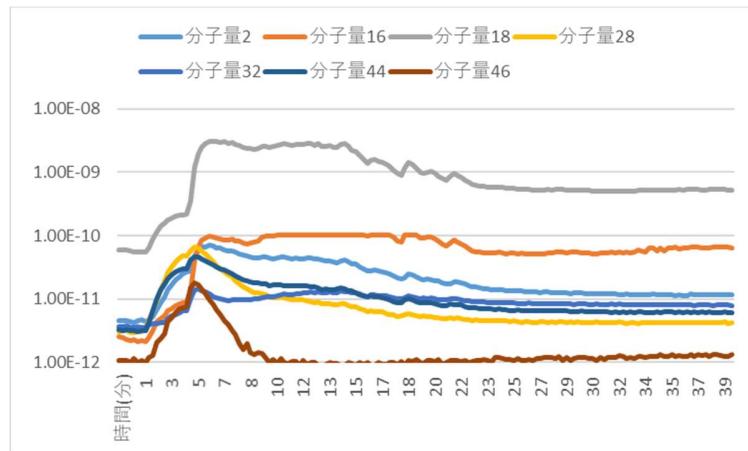


図3 マイクロ波加熱時のガス分析結果

マントルヒーターとマイクロ波は共に、沸点で同じ温度であるにもかかわらず、マイクロ波の電場でのみセルロースの分解反応が進行したことから、熱エネルギーではなくマイクロ波の電界エネルギーが直接セルロースの分解反応に寄与した可能性が示された。今後は、このマイクロ波特有の効果の解明に取り組む予定である。

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]

なし

[受賞、プレス発表等]

なし

[口頭発表リスト]

第15回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム -Research Activities on Zero-Emission Energy Network ポスター発表

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

一電子入射によるシンチレータの発光素過程の理解と その厳密な発光量測定、および、暗黒物質探査と 産業応用を目指した調査

黒澤俊介^{1,2,3}, 山路晃広^{1,2}, 浦野雄介², 全炳俊⁴, 大垣英明⁴

¹東北大学 未来科学技術共同研究センター

²東北大学 金属材料研究所

³大阪大学 レーザー科学研究所

⁴京都大学 エネルギー理工学研究所

1. 暗黒物質探査用異方性結晶の電子線応答

宇宙の構成成分の約 23%を占めるるとされる仮説上の「物質」である暗黒物質（ダークマター）の正体を突き止めることは現代物理学の 1 つの大きなテーマであるが、その 1 つの候補となっているのが Weakly interacting massive particles (WIMPs) と呼ばれる質量があり（重力相互作用がある）、弱い相互作用は起こし、電磁相互作用は無視できるほど小さいか 0 である物質である。この WIMPs は銀河に付随していると考えられ、太陽系が天の川銀河内を約 230 km/s の速度で円周運動をしており、地球からみて白鳥座の方向に進んでいるため、あたかも WIMPs の風が白鳥座から吹いているように見えると期待されている。

シンチレータとは放射線によって励起された電子が脱励起の際に蛍光を生じる機能性材料のことと、光検出器と組み合わせることで放射線を間接的に検出している。暗黒物質がシンチレータ内の構成元素の中の原子核との弱い相互作用によって原子核を散乱させれば、散乱で生じたエネルギーの解放としてシンチレーション発光が見える。さらに、暗黒物質が入射する結晶面ごとの発光量が異なる場合には方向の推定が可能になる。

従来、シンチレーション現象での発光量は入射する放射線の到来方向に依存しない、発光現象が起きた時に、その発光は一様等方であるというのが「常識」であった。しかし、ZnWO₄をはじめとするいくつかの結晶ではその常識から外れることが、ここ 10 年程度のアルファ線や陽子線などの再現性実験を経

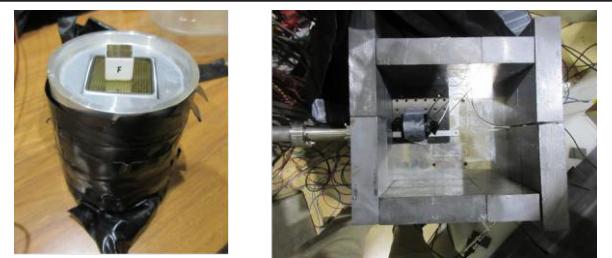


図 1 KU-FEL での光学的異方性の調査の様子

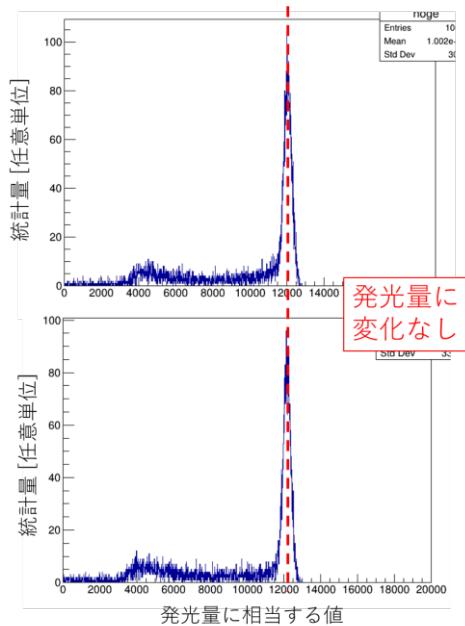


図 2 同一結晶の電子入射の方位面を変えたとき（上下図）の波高値スペクトル

て、信憑性を帯びてきている。

これまで、KU-FEL の電子源を用いて、入射する放射線の結晶方位ごとに発光量が異なるか（光学的異方性の調査）を $ZnWO_4$ に電子を照射させて調査を進めている（図 1）。電子線は原子核ではなくシンチレータの電子と電磁相互作用を起こして電子線のエネルギーをシンチレータに渡して発光しているため、アルファ線や陽子線とは電子の電離までの過程およびエネルギー輸送過程が異なる。

これまでの結果から、電子線については顕著な発光量と入射面との関係性を見ることができなかつた（図 2）。これは、これまでのアルファ線やガンマ線などとは異なった結果であり、非常に興味深い。当該現象は今までの「常識」を覆すため、慎重に反例を集める必要があり、異なる結晶ロット、入射電子線のエネルギーなど様々な条件を変えて実証してきたが、2024 年度までの結果をみると、電子線では「発光量の変化は無い」という結論に達した。また、 $PbWO_4$ などの似た構造をもつ材料についても同様に測定を進めており、同一の結晶サンプルにおいて、 $PbWO_4$ の発光量は入射する面に依存しないことが示唆された。

以上のことから、仮に陽子、中性子等のハドロンでは、入射粒子の結晶方位による発光量依存があつたとして、暗黒物質がシンチレータの内部での発光過程においてハドロン的振る舞いをするのであれば、当該シンチレータ材料は暗黒物質の探索に使える可能性が出てきた。

なお、上記研究以外に、シンチレータの発光効率向上の指針を得るための、一電子入射によるシンチレーション発光過程の理解として、電子を 1 個ごとに入射したときの蛍光寿命の解析なども実施した。

なお、今年度（昨年度の報告書後からの差分を含む）の関連受賞、対外発表は以下の通り。

[口頭発表リスト]

1. Shunsuke Kurosawa

Development of Infrared Emitting Scintillator for the Ultra High-Dose Rate Monitor
Phosphor Safari 2024 (The 13th International Symposium for Luminescent Materials
Taipei, Taiwan, 2024 年 7 月 31 日発表 (招待講演)

2. Shunsuke Kurosawa

Scintillation Properties of Red and Infrared Scintillator and their Applications
– Dose-Rate Monitoring System for Decommissioning –
12th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing
Radiation · LUMDETR 2024
Riga, Latvia, 2024 年 6 月 18 日発表 (招待講演)

ほか 5 件

[参考文献]

- [1] S. Kurosawa et al., NIMA **744** 30 - 34 (2014)
- [2] S. Kurosawa et al., IEEE TNS **65(8)** 2136-2139 (2018)

「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^{1,2,3}, 松田一成³

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

³京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・非平衡をキーワードとして幅広いプラズマ研究を追求する「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を中心に据えた「広帯域エネルギー融合科学」を推進する当該拠点の豊富で多様な知見を取り入れて、次世代のプラズマ研究を展開することを目的に、関連分野の国内外の専門家が集い、最新の研究成果や情報を報告・議論する場を設けることを趣旨とする。令和2-5年度(第1-33回)に統いて、本年度は第34-36回(うち国際集会1回)のプラズマ科学セミナー、および、1回の核融合プラズマ領域国際セミナー(Center for Transport Barrier Physics)と1回の非線形・非平衡数理物理領域研究集会を実施し、最新の研究成果についての情報共有と意見交換を行った。全71名が議論に参加した。

(1) **核融合プラズマ領域(国際集会):** 第34回のプラズマ科学セミナーでは、西南物理研究所(SWIP)の Deliang Yu 教授を招聘して、"Development of diagnostics and plans for burning plasma experiments on HL-3 tokamak" のタイトルで、HL3 トカマクによる燃焼実験計画について講演いただいた(図1参照)。当領域では SWIP と国際共同実験研究を実施しており、同じ SWIP から訪問した Wei Wang 博士を含む 25 名が参加して活発な議論が交わされた。また、同 SWIP の Yihang Chen 博士には、HL2A で観測された非局所輸送の一つである Staircase に関する領域国際セミナーを実施いただいた(ONLINR 15名参加)。

(2) **光量子プラズマ領域:** 第35回セミナーでは、大阪大学レーザー科学研究所の岩田夏弥教授に高強度レーザーが駆動するプラズマ中の輸送現象における非熱的粒子の役割についてご講演いただいた(ONLINE・23名参加)。本講演は核融合・非線形プラズマを専門とする幅広い研究者が参加し、活発な質疑応答・意見交換がなされるなど、緩やかな異分野連携が実現されたと考えている。第36回プラズマ科学セミナーでは、核融合科学研究所の樋田美栄子教授に「磁化プラズマ中の無衝突衝撃波によるイオンの加速」のタイトルでご講演いただいた(オンライン・11名参加)。

(3) **非線形・非平衡プラズマ数理領域:** 2025年1月には、核融合・光量子・宇宙プラズマを専門とする研究者が集まり、京都大学東京オフィス(新丸の内)において、「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」に関する研究会を開催した(オンラインを含め 12名が参加)。太陽コロナ加熱問題に取り組む鈴木建教授を含め、日本大学の浅井朋彦教授、QST の森林研吾博士を含む5人に講演を頂いた。図2に示すような和やかな雰囲気のもと活発な議論がなされ、プラズマの非局所性・非平衡性を共通のプラットホームとして、それらを積極的に生成・制御するための分野横断的な情報交換が実現した。

文献: <http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp/UNIT/index.html> 2020-2023年プラズマユニット報告書



図1: 講演風景(第34回・Yu先生のプラズマ科学セミナーより: 北4号棟大会議)。



図2: 非平衡プラズマ研究会の風景。研究代表者(岸本)が司会進行を担当。

The 3rd International Symposium of Biofunctional Chemistry

坂口 恵子¹, Lin Peng²

¹産業医科大学 医学部, ²京都大学 エネルギー理工学研究所

本シンポジウム : The International Symposium of Biofunctional Chemistry は、国内外からバイオエネルギー・酵素学・生体工学などの幅広い分野から研究者らを招き、生物が構築している効率の良いエネルギー产生・利用・回収システムの解明と応用利用を目指す研究者同士の情報交換と交流促進・ネットワーク構築を目的としている。第 1 回目は 2019 年 4 月、第 2 回目は同年 11 月にいずれも京都大学宇治キャンパスで開催した。各回 5-10 名の招待講演者らの講演があり、エネルギー理工学研究所・エネルギー科学研究所に所属する学生や外国人研究者も含む 40 名程度が積極的な議論を行ってきた。

第 3 回目となる今回は、2024 年 6 月 29 日に京都キャンパスプラザならびにホテルグランヴィア京都で行った。サテライトシンポジウムと合わせて、国内外から合計 14 名の演者を招き、11 カ国からオンラインも含め 60 名程度の参加者があった。メインシンポジウムでの招待演者は、森井孝教授（京都大学名誉教授）、Prof. Zhongping Yao (The Hong Kong Polytechnic Univ)、Associate Prof. Ts. Liew Fong Fong (MAHSA University)、Dr. Tien Anh Ngo (CL BIOTECH Ltd.)、Dr. Dinh Huyen (Tam Anh Medical Research Institute) の 5 名であった。講演は、生体高分子の工学応用や人工酵素の設計、生体内の事象の可視化技術など多岐に渡り、当初予定時間を超過して充実した議論が行われた。



図 1 午前に開催されたサテライトシンポジウムの参加者

本シンポジウムは、関連分野の研究者を招いてゼロエミッションエネルギー拠点と共に実施することで、本拠点の事業を知らなかった研究者に対しての拠点の知名度向上への貢献と、将来的な共同研究・共同利用のきっかけを作ることができたと考えている。さらに、エネルギー理工学研究所の学生たちの参加を促したこと、次世代のゼロエミッションエネルギー研究者の為のグローバルなネットワーク構築にも資する研究集会となつた。国内外の研究者たちに本拠点の概要を紹介したことによって、今回のメインテーマであるソフトエネルギー以外の、他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）についても関心を持ってもらうことができたことから、本研究集会は、本拠点で実施したことで最大の人的・知的交流の効果が得られたと確信している。

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、ならびに会場設営や運営に協力して下さった生物機能化学分野の皆様にこの場を借りて感謝したい。

日本バイオマテリアル学会関西ブロック

第 19 回若手研究発表会

足立 哲也^{1,2}, 山本 健太², 武元 宏泰³, 藤塚 武史⁴, 中田 栄司⁵

¹ 京都府立医科大学 医学研究科歯科口腔科学, ² 同 免疫学, ³ 同医系化学

⁴ 京都大学 大学院エネルギー科学研究所 エネルギー基礎科学専攻

⁵ 京都大学 エネルギー理工学研究所エネルギー利用過程研究部門

1. 開催概要

人口増加と産業発展により、石油化学からのポリマー材料や動物由来ポリマー（コラーゲンやゼラチン等）の需要が増加している。一方、それらの合成には環境に多大な負荷を与えるため、持続可能で再生可能な微生物由来バイオポリマーが注目されている。これらは生分解性があり、医療・産業分野での用途に有望である。日本バイオマテリアル学会関西ブロック第 19 回若手研究発表会では、材料学だけでなく様々な分野の若手研究者が意見交換できる場を提供することで、今後の研究・開発をスムーズに推進するための研究者間のネットワークの構築を促す。また持続可能な素材の合成法の開発だけでなく、それらの分解を制御する技術についても議論する。これらはバイオマテリアルの医療分野への応用と貢献にはもちろん、エネルギー問題や地球環境問題を意識した持続可能な現代社会において求められる研究姿勢であり、本会においてその意見交換を活発におこないネットワークを形成することは、その解決の一助となり、ゼロエミッションエネルギー研究の発展に大きく寄与すると考えられる。

2. 若手研究発表会・シンポジウムの開催

日本バイオマテリアル学会関西ブロック第 19 回若手研究発表会が、足立と山本を担当幹事として、京都府立医科大学河原町キャンパス 基礎医学学舎 1 階・2 階にて 2024 年 7 月 27 日に開催された。関西近隣の大学、研究機関ならびに企業から、一般講演 14 件、学生講演 54 件の発表があり、参加者は、医師・アカデミア研究者 52 名、企業 25 名、学生 123 名の計 200 名となった。また、武元、藤塚の司会進行のもとゼロエミッションエネルギー研究拠点共催シンポジウムを開催した。特別講演として京都大学大学院医学研究科の秋吉 一成 先生に「ナノゲルテクトニクスによる DDS・再生医療用バイオマテリアルの開発」と題したご講演をいただいた。ナノゲルを集積させ、ナノレベルで構造を制御したゲルマテリアル、その医療応用についてご紹介いただいた。秋吉先生の開発した、黒カビが産生する多糖プルラン由来のナノゲルは、環境負荷の少ないエシカル素材として医療応用が期待される。中田による招待講演では、DNA ナノ構造体を足場とした蛍光センサーが紹介され、センサーの活用により、生物のエネルギー取り込み機構であるマクロピノサイトーシスを可視化され、理解が深まったことが示された。徐 于懿 先生(大阪大学)の依頼講演では、海洋プラスチックによる汚染やマイクロプラスチックによる健康被害の対策として、でんぶんを基盤とした海洋生分解性バイオプラスチックの開発とその応用について伺うことができた。いずれの演題も、様々な分野の研究者たちの白熱した議論が行われた。本会は、ゼロエミッションエネルギー研究拠点の指針と合致し、近年世界中で叫ばれている SDGs に寄与する内容であることから、幅広い参加者の興味を掻き立てるものであったとともに、環境問題に取り組む企業からも高い関心が示された。

第4回スイスー日本生体分子化学シンポジウム

藤枝伸宇¹, 中田栄司²

¹大阪公立大学農学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

2024年11月7日(木)・8日(金)にゼロエミッションエネルギー研究拠点との共同研究集会として、援助いただき、京都大学宇治キャンパス黄櫻プラザにて第4回スイスー日本生体分子化学シンポジウムを開催した。二酸化炭素などの温室効果ガスや有害物質を排出しないテクノロジーの開発は急務であり、なかでもバイオの能力を用いたソフトエネルギーは有望戦略の一つとされている。それは光合成や窒素固定などの高難度化学反応を温和な環境下、高効率で達成する細胞の能力を鑑みても想像に難くない。そのため、世界中でバイオテクノロジーを用いたエネルギー・物質変換手法の開発が盛んに行われている。合成生物学的に作り出された細胞による燃料生産や新規生理活性物質合成がその良い例であり、無駄なエネルギーを削減し、副産物もほとんどないゼロエミッションシステムである。

関連分野として細胞内イメージングでは Prof. Stefan Matile (UGe), Prof. Yuichiro Hori (Kyushu Univ.), Prof. Pablo Rivera-Fuentes (UNIZ), Prof. Michelle Frei (ETHZ), Prof. Mako Kamiya (Tokyo Inst. Tec.)、ペプチド・核酸分野では Prof. Hiroaki Suga (Univ. Tokyo), Prof. Shiroh Futaki (Kyoto Univ.), Prof. Sascha Hoogendoorn (UGe), Prof. Hiroshi Abe (Nagoya Univ.), Prof. Nicolas Winssinger (UGe), Prof. Rikiya Watanabe (Riken), Prof. Kazunari Matsuura (Tottori Univ.)、細胞内輸送・センサーにおいては、Prof. Kaori Sugihara (Univ. Tokyo), Prof. Chan Cao (UGe), Prof. Shinya Tsukiji (Nagoya Tech.), Prof. Beat Fierz (EPFL), Prof. Kazushi Kinbara (Tokyo Inst. Tec.), Prof. Angela Steinauer (EPFL)、人工酵素・酵素改変関連では Prof. Paola Laurino (OIST), Prof. Don Hilvert (ETHZ), Prof. Alexandria Deliz Liang (UNIZ), Prof. Thomas Ward (UBasel), Prof. Nobutaka Fujieda (OMU) に講演いただいた。ゼロエミッション、さらにはネガティブカーボンの理念に通じるバイオの力を活用しての効率的な有用物質生産や、それらを人為的に改変することで天然を凌駕するような人工物質生産システムの構築を目指している研究者も数多く含まれていた。その研究手法も分子生物学、生化学、分光学、物理化学、有機合成化学、システムバイオロジーなど広範囲に及んでおり、このような研究者が一ヶ所に集合し、活発な議論をおこなった。ポスター発表は学生の発表も含め、57件となり2日間にわたって議論した。国内の学部生・院生にとって海外の著名な研究者に対して日頃の研鑽を發揮する貴重な時間となり、自身の視野を広げる重要な機会となっていた。人手不足が叫ばれるなか若手研究者の啓発となったことは幸いと考える。このような機会を起点として、この分野の研究を引き続き遂行し発展させることができれば、より多くの二酸化炭素の取り込み、安定物質への変換も可能となり、ネガティブエミッション系の構築も夢ではない。このように、本シンポジウムでの成果が、国際共同研究の開始、進展が加速し、バイオテクノロジーを基盤とした分散型ソフトエネルギー開発が飛躍的に進展することを期待し、報告とさせていただく。



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
2024年度 共同利用・共同研究
【活動実績】**

2024年5月

5月20日 令和6年度第1回シンビオ社会研究会講演会（研究集会 ZE2024N-2）
(ハイブリッド開催 参加者数：44名)

2024年6月

- 6月10日 第34回プラズマ科学セミナー（研究集会 ZE2024D-1）
「HL3における実験成果と今後の計画について」
(ハイブリッド開催 参加者数：25名)
- 6月28日 バイオマテリアル研究特別講義（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催）（研究集会 ZE2024D-3）
(参加者数：64名)
- 6月29日 第3回生物機能化学国際シンポジウム/ 3rd International Symposium of Biofunctional Chemistry（研究集会 ZE2024D-2）
(ハイブリッド開催 参加者数：55名)

2024年7月

- 7月24日 シンビオ社会研究会第2回講演会（研究集会 ZE2024N-2）
(ハイブリッド開催 参加者数：20名)

2024年8月

- 8月30日 国際シンポジウムの参加登録の案内（今年度は国際シンポジウムのZEポスターセッションを成果報告会と兼ねる）

2024年9月

- 9月6日 第1回共同利用・共同研究計画委員会（メール会議）
「2025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18日に確定し、運営委員会に諮る)
- 9月12日 令和6年度シンビオ社会研究会第3回講演会・OPV研究コンソ講演会一次
世代太陽電池としてのペロブスカイト太陽電池—可能性と課題—
(研究集会 ZE2024N-2) (ハイブリッド開催 参加者数：100名)
- 9月24日 第1回共同利用運営委員会（オンライン会議）
議題：
1. 2024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. 2025年度共同利用・共同研究公募要項・申請書類案確認
3. 今後の拠点活動に関する意見交換について
4. その他
※2025年度共同利用・共同研究公募要項・申請書類案について、
10月7日に確定し、教授会、協議員会に諮る

2024年10月

10月20日 京都大学エネルギー理工学研究所 第29回公開講演会
(参加者数：115名)

2024年11月

11月1日 経費執行依頼

11月7日-8日 4th Switzerland-Japan Biomolecular Chemistry Symposium (SJBCS2024)
(研究集会 ZE2024D-4) (参加者数：110名)

11月22日 第35回プラズマ科学セミナー (研究集会 ZE2024D-1)
「高強度レーザーが駆動するプラズマ中の輸送現象における非熱的粒子
の役割」(オンライン開催 参加者数：23名)

2024年12月

12月2日 2025年度共同利用・共同研究公募開始

12月10日-13日 第15回エネルギー理工学研究所 国際シンポジウム
The 15th International Symposium of Advanced Energy Science
- Toward the Realization of Advanced and Carbon Negative Energy -

場所等：
• オーラルセッション：対面（京都大学宇治おうばくプラザはだホール）
および YouTube 配信
• ポスターセッション：対面（京都大学宇治おうばくプラザハイブリッドス
ペース）
• パラレルセミナー：対面および Zoom

内容：
12月10日-12日：全体会議 基調講演者1名、招待講演者14名、
IAE 講演者2名

【基調講演】

- 田中伸男（国際エネルギー機関元事務局長）

【招待講演】(順不同)

- Geoff WEHMEYER (Rice University, USA)
- Sudip CHAKRABORTY (University of Calabria, Italy)
- Jonghyun KIM (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea)
- Hiroshi GOTA (TAE Technologies, Inc., USA)
- Yoong Ahm KIM (Chonnam National University, Korea)
- Harald SCHWALBE (Goethe-University Frankfurt, Germany)
- 久保貴哉（東京大学）
- 松田知子（東京科学大学）
- 山田竜彦（国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所）

- 魚住浩一 (一般財団法人 電力中央研究所)
- 金子俊郎 (東北大学)
- 薄井洋行 (鳥取大学)
- 笠田竜太 (東北大学)
- 跡見晴幸 (京都大学)

【IAE 講演】

- 野平俊之 (京都大学エネルギー理工学研究所)
- 宮内雄平 (京都大学エネルギー理工学研究所)



12月10日-11日：ポスターセッション

- ZE 研究課題発表：76件
 - 若手発表：50件
- 審査の上、優秀な発表に「Symposium Poster Award」を授与した。
(6件)

12月12日-13日：パラレルセミナーI

The 31st FEL and High-Power Radiation Workshop (講演者 14名)

12月13日：パラレルセミナーII

Symposium on Exploring Carbon Negative Energy Science 2024 (講演者 18名)

全体会議：250名 (対面 237名、オンライン 13名)

パラレルセミナーI：20名 (対面のみ)

パラレルセミナーII：40名 (対面 30名、オンライン 10名)

全期間：310名 (対面 287名、オンライン 23名)

延べ参加者数：600名

12月16日 成果報告書と研究概要提出依頼

12月16日 積分球を用いた光吸收・透過測定に関する技術講習（参加者数：9名）

12月20日 第36回プラズマ科学セミナー（研究集会 ZE2024D-1）
「磁化プラズマ中の無衝突衝撃波によるイオンの加速」
(オンライン開催 参加者数：11名)

2025年1月

1月7日 「非局所・非平衡・巨視軌道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 ZE2024D-1）
(ハイブリッド開催 参加者数：12名)

1月10日 共同利用・共同研究推進室アンケート調査依頼

1月17日 2025年度共同利用・共同研究公募期日

1月30日 第2回共同利用・共同研究計画委員会（メール会議）
「2025年度共同利用・共同研究公募申請書 審査依頼」

2025年2月

2月26日 第3回共同利用・共同研究計画委員会（オンライン会議）
「2025年度共同利用・共同研究課題採否と配分額の原案作成」

2025年3月

3月1日 2024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11日 第2回共同利用運営委員会（オンライン会議）

議題： 1. 拠点中間評価報告

2. 2025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）

3. 2024年度ゼロエミッションエネルギー研究拠点活動の総括

4. 2025年度活動計画

5. 今後の拠点活動に関する意見交換

6. 2025年度運営委員・計画委員について

7. その他

3月下旬 2025年度共同利用・共同研究公募課題の採択結果（内定）の通知

第三部 その他

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¹」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、2025年度の共同利用・共同研究を下記の要項で公募します。

ただし、当研究拠点での共同利用・共同研究による核融合研究に関しては、自然科学研究機構核融合科学研究所が実施する双方向型共同研究に含まれない研究を実施する課題を募集します。

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一種類のみで、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/3b9nBTnQqDEosWHcA>

問合せ先：

メール：ze-shinsei@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp 電話：(0774)38-3413（ダイヤルイン）

¹ 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

2025年1月17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：2025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・機器については添付資料を参照してください。

また、Web上(https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero_emission/summary/application.html)に随時更新データを掲載します。

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(7月初旬および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、省エネルギーに関する高機能有機／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か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一種類のみで、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、2026年1月23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、2025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2025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、2025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を含む1名以上の所内研究者が参加していか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一種類のみで、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けます。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、2026年1月23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、2025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2025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、2025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： ゼロエミッショナリー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一種類のみで、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「ゼロエミッショナリーエネルギー」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、2026年1月23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、2025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2025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、2025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： ゼロエミッショナリー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、ゼロエミッショナリー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： 2025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「ゼロエミッショナリーエネルギー」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、2026年1月23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、2025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2025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、2025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。

FY2025 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 Energy¹ with the goal of solving global environmental problems. In this spirit, we have the following public offerings for joint usage/joint research in FY 2025. With regard to nuclear fusion research through joint usage/joint research at our research base, we are looking for research themes that are not included in the interactive collaborative research carried out by the National Institute for Fusion Science within the National Institute of Natural Science.

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.)

¹ 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/3b9nBTnQqDEosWHcA>

Contact Information:

E-mail: 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 17, 2025 (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 2025.

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:

For joint usage facilities and equipment, see Attachments. Additionally, updated information is available on our website.

(https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/zero_emission_e/summary/application.html)

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 July 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 23, 2026**. Additionally, the research representative must report the research outcomes at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2025.

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 2025 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 23, 2026**. Additionally, the research representative must report the research outcomes at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2025.

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 2025 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 23, 2026**.

Additionally, the research representative must report the research outcomes at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2025.

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 2025 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 FY2025.

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:

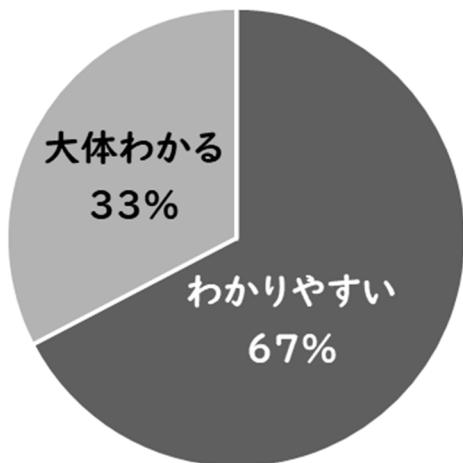
Users must submit a Joint Usage Implementation Result Report (meeting outlines; A4: 1 sheet) to the Director of the Institute by **Friday, January 23, 2026**. Additionally, users may be required to report the implementation result outlines at the Research Outcome Meeting, which is scheduled for the second half of FY2025.

6. Travel Expenses:

For those in remote areas, travel expense applications are accepted beginning around November 2025 to participate in the Outcome Meeting scheduled. Travel expenses may be denied or partially allocated, depending on the budget.

2024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

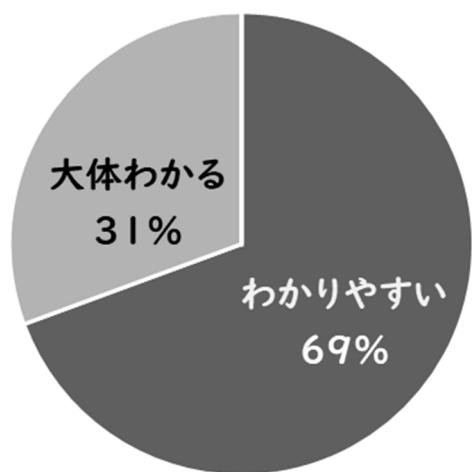
Q1. 共同研究申請書類はわかりやすかったですか？



申請書類に対するご意見・ご要望

- ◆ It is okay.
- ◆ It would be more helpful if it is in English.

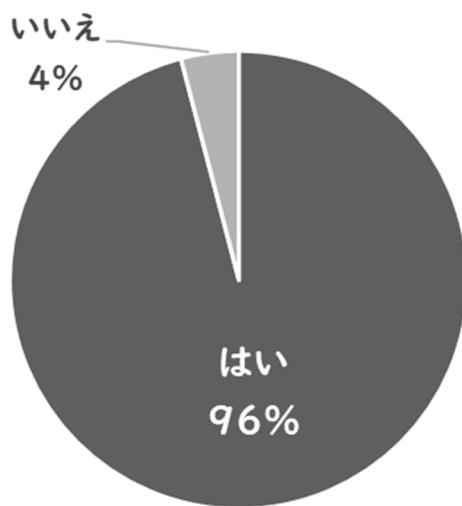
Q2. 共同研究実施に際しての事務手続きはわかりやすかったですか？



事務手続きに対するご意見・ご要望

- ♦ とても丁寧に迅速に行ってくれたと思います。
- ♦ 何かあればメールで迅速に対応いただいているので、現時点での支障は感じていません。
- ♦ 配当金の残額が分かるとありがたい。
- ♦ いつも親切に対応していただき大変助かっております。
- ♦ It is okay.
- ♦ It would be more helpful if it is in English.

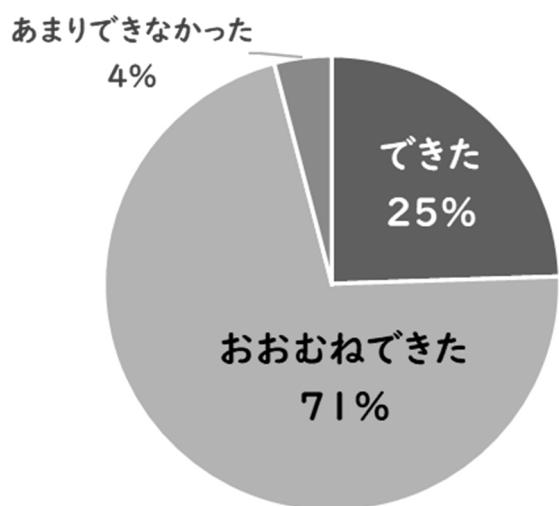
Q3. ゼロエミッションエネルギー研究拠点のホームページに各種書類の様式が掲載されているのはご存知ですか？



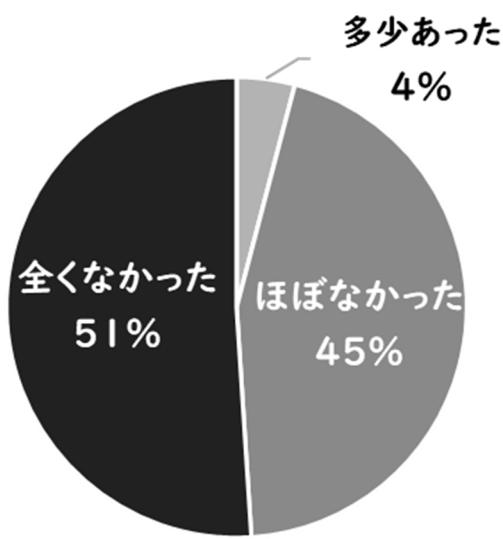
ホームページへのご要望

- Disseminating more to public about information on the website.
- It would be more helpful if it is in English.

4. 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？

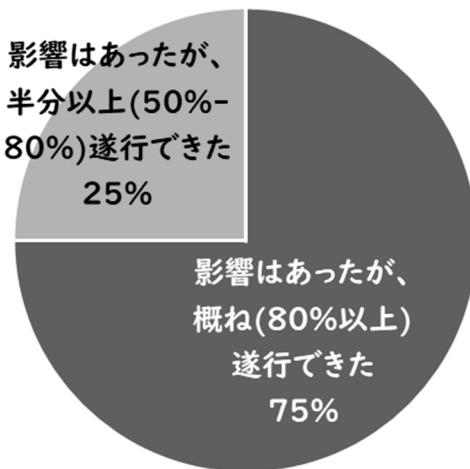


Q5. 新型コロナウイルスの影響による研究活動への遅延や影響等



- 共同研究者が感染した、移動距離が長いため、慎重をきくなど影響はあると思われる。
- 新型コロナはなかったが、流感の影響があった。
- No impact

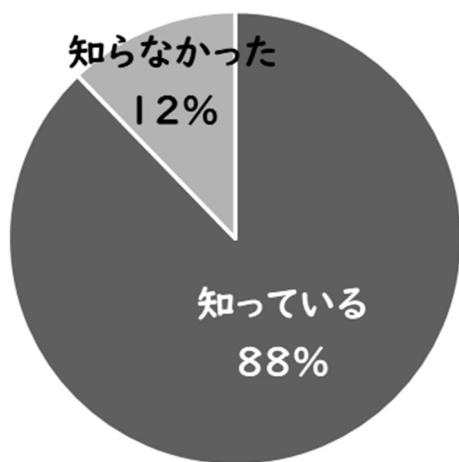
(Q5で「影響があった」と回答された方にお尋ねします) 新型コロナウイルス禍は、共同研究の遂行にどの程度影響しましたか？



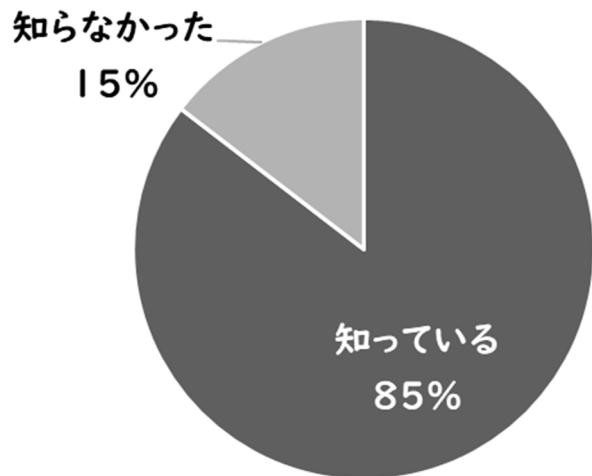
役立ったエネ研（世話人）からのフォロー等をご記入ください。

- ◆ 高感度 NMR 装置での NMR 測定と複合体構造解析および、結果の解釈とディスカッションで常にお世話になっており、感謝しております。
- ◆ 実験、書類提出など全般フォローしていただき助かりました。
- ◆ 研究内容に関する議論および学会発表資料の確認。
- ◆ 実験の提案や議論を積極的に行えた。
- ◆ 申請書類を事前に確認いただいた点は助かりました。
- ◆ 光学部品選定の際の適切なアドバイス。
- ◆ 計算内容についていろいろ意見をうかがえた。
- ◆ 書類作成時の内容の確認や修正をいつも大変迅速に対応していただきました。心より感謝しております。
- ◆ 6月の国際シンポジウムの際は、中田先生の研究室の皆さんに会場の手配など大変お世話になりました。
- ◆ I could know the important announcements/updates from the institute.
- ◆ 進行中の共同研究に関してメールでのサポートで助けられている。
- ◆ 実験の際の光学系のアドバイスが大変ありがたかったです。
- ◆ 大変お世話になった。
- ◆ 実験方法への具体的なアドバイス。
- ◆ 稲垣 教授、金 助教
- ◆ 光学系構築にあたってのアドバイス。
- ◆ 装置などについて懇切丁寧に指導していただきました。ありがとうございます。
- ◆ NMR 測定や構造モデルについて貴重な意見を頂きました。
- ◆ The number of research budget can be increased, the support for publication fee, and global workshop/seminar by offline in Kyoto University.
- ◆ 研究を進めるうえでの考察、実験条件などに関して、アドバイスをいただいた。
- ◆ 宮内雄平教授
- ◆ 世話人から研究に関する貴重なご助言をいただきました。

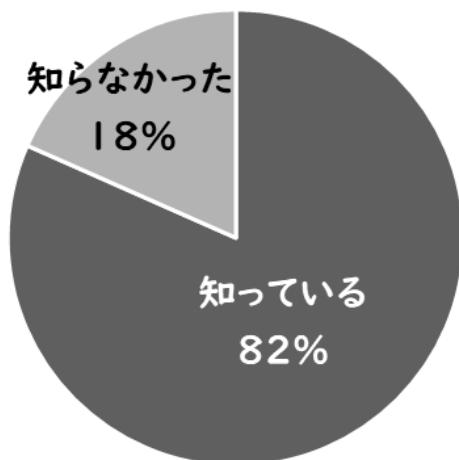
Q6. 物品購入の際に10万円以上の商品は備品として登録される場合があること、10万円未満でも換金性物品は少額資産として登録される場合があることをご存知でしたか？



Q7. 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？



Q8. 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？

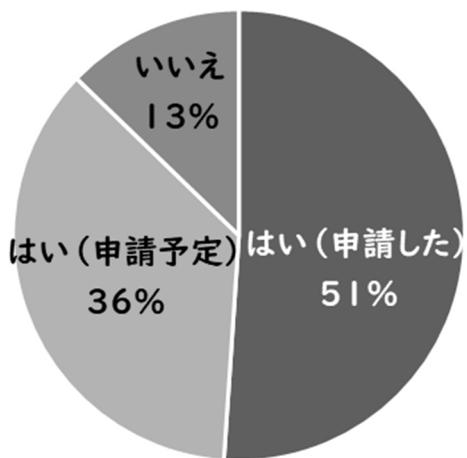


Q9. 成果報告会について：昨年度までは、9月の国際シンポジウムでのご報告に加えて、3月の成果報告会でご報告いただきましたが、今年度は、12月の国際シンポジウムにて、ZEセッション（oral, poster）を設け、成果報告を行っていただきました。この変更に関して、ご意見等ございましたらご記入ください。

- ◆ 今年度の12月開催のシンポジウムも良かったです。
- ◆ 9月ではデータが揃わず報告が難しい。12月の方が良いと思う。
- ◆ 良いと思います。
- ◆ 様々なテーマの話が聞けて良かった。
- ◆ 研究成果が出る後期に開催して頂けるのはとても良かった。時期も事務業務や他の学会業務が多い9月ではないため、私の場合は都合も良かった。
- ◆ 9月は全国的に各種学会があり、3月は年度末で大学行事も多く、12月に実施していただいた方が、参加しやすかったです。
- ◆ 良い時期でした。大変良いシンポジウムに参加させて頂き感謝しております。
- ◆ 今年度の運営方法の方が多いです。
- ◆ 9月開催に関しては他の学会イベントと重複しやすい日程だったので、12月は比較的調整しやすいのかと思います。
- ◆ 実施時期が遅くなつたため、中間発表ではなく、最終発表に近いと思われる。その分、きちんとしたpptの作成が必要だが、報告書も同様なので、良し悪し不明です。
- ◆ 9月と3月の2回が、12月の1回に集約されるのは効率がよいと思います。ただ、講義等と日程が重なり、初日のみの参加となつてしまつました。申し訳ありませんでした。
- ◆ 夏過ぎにKU-FELを利用するので、時期的に12月以降の方がありがたいです。
- ◆ I think it is nice that the ZE symposium was held at once in December instead of March and September, separately.
- ◆ 本専攻の学位の予備審査時期と重複するため困つた。
- ◆ 国際シンポが12月になってよかったです。
- ◆ 良いと思う。

- ◆ 9月の報告は4月から期間が短いため、ある程度まとまった期間が取れる12月でありがたかったです。
- ◆ 例年、利用が9~10月頃になるので、12月シンポジウム開催の方が個人的にはありがたい。
- ◆ Offline conference/seminar in Kyoto is preferable to widen our connections (funded by ZEE institute)
- ◆ 良かったです。

Q10. 来年度の共同研究公募にも申請を予定されていますか？



その他、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。

- ◆ 旅費申請について、宿泊費用の上限が、昨今のインバウンドによるホテル代の高騰についていかないのではなかろうか？
- ◆ 今後ともよろしくお願ひいたします。
- ◆ 繼続しての共同研究を希望しています。引き続きよろしくお願ひいたします。
- ◆ 特にない
- ◆ 旅費がエネルギー理工学研究所行きのみになっているのは不自由。
- ◆ 旅費を成果発表の出張費に使えばありがたい。
- ◆ たいへん研究がやりやすい制度で、重宝しております。
- ◆ The funding support can be varied in the publication fee and attending to the energy workshop by offline conference.

