

(5) サブナノ領域評価部門

教員：

西堀英治（数理工物質系・物理学域・教授）

Xu Zhihao（数理工物質系・物理学域・助教）

大学院生：

太田和希（数理工物質科学研究群・物理学学位プログラム・M2）

小川瑤介（数理工物質科学研究群・物理学学位プログラム・M2）

田中萌鈴（数理工物質科学研究群・物理学学位プログラム・M2）

穂刈絵理（数理工物質科学研究群・物理学学位プログラム・M1）

西堀英治

<研究成果>

エネルギー物質部門西堀グループでは、放射光を利用した回折法による構造計測に基づき部門のミッションであるエネルギー物質科学に貢献することを目指している。大型放射光施設 SPring-8、X 線自由電子レーザー-SACLA でも利用課題を実施し、放射光 X 線回折で国内外の先導する研究を進めている。本年度は国内共同研究を中心に複数の成果が得られた。それらのうち、いくつかについて下記に記述する。

【 1 】応力発光半導体でスピンドープ強磁性を発見

固体中の電子の電荷と、電子が持つ小さな磁石のような性質「スピン」の両方を工学的に利用、応用する「スピントロニクス」と呼ばれる分野において「希薄磁性半導体」が注目されている。一般的に、強磁性などをもたらす交換相互作用は隣接原子間距離程度の近接作用に限定されている（金属では伝導電子を媒介した別機構の磁性体の例外が存在する）。一方、相転移のユニバーサル理論であるパーコレーション理論は隣とのパス（磁気転移の場合は隣の磁性原子との結合に相当）が高密度に存在しなければ相転移しないと予測しており、量子スピン系の磁気転移でもこのパーコレーション理論

が厳密に成立することを研究グループは最近実証している。

「交換相互作用は近距離に限定される」「隣接する磁性原子同士の結合が高密度に存在しないと磁気転移しない」という磁性理論の常識が、応力発光半導体でのスピンドープ強磁性を実現した本研究により破れた。佐賀大学、東北大学、九州大学、高エネルギー加速器研究機構の共同研究により、代表的な応力発光物質として知られている Eu:SrAl₂O₄ において、希薄磁性原子の添加によるスピンドープ強磁性の発現を見出した。通常強磁性を示さない応力発光半導体に新機能を付与したことも応用上興味が持たれる。本成果は、基礎物性物理学への貢献とともに、未踏の力・光・スピントロニクスに道を拓き、エネルギー関連材料の機能革新に大きく寄与する。

【 2 】量子結晶学による L-alanine とタウリンの温度変化の研究

量子結晶学は実験から量子力学的情報を取り出すことを可能にする電子系と格子系の関係を調べることで、原子間の相互作用と熱振動の関係性を明らかにすることが期待されている。

本研究では、SPring-8 で PILATUS3 X CdTe 検出器を使用して、L-アラニン 40、85、100、150、200 K とタウリン 85、150、200 K の単結晶 X 線回折データを測定した。L-アラニン 40 K データは $\sin\theta/\lambda_{\max}=1.6667 \text{ \AA}^{-1}$ で 21 カウントから 670433 カウント、タウリンは $\sin\theta/\lambda_{\max}=1.3736 \text{ \AA}^{-1}$ で 47 から 288398 カウントの高精度・高分解能データの測定に成功した。L-アラニン 200 K は $\sin\theta/\lambda_{\max}=1.2821 \text{ \AA}^{-1}$ で 17 カウントから 683619 カウント、タウリン 200 K は $\sin\theta/\lambda_{\max}=1.1110 \text{ \AA}^{-1}$ で 34 から 235713 カウントであり、多温度の高精度・高分解能データを測定した。

全てのデータに対して量子結晶学的解析 MM、HAR、XCW、NoMoRe を行うことで、多温度の実験データから電子相関による電子構造のわずかな変化を取り出すことに成功した。（図 1）40 K から 200 K の多温度データの

量子結晶学的解析が行えた。多温度データの量子結晶学的解析から温度の分子間相互作用への影響は分子内と比べて結合長で 1 桁大きくなることが分かった。非調和熱振動は 100 K 以上の温度で有意に観測可能となることが分かった。また、量子結晶学的解析により、わずかな双晶の影響でタウリンの硫黄原子周りに差電子密度が現れることが分かった。

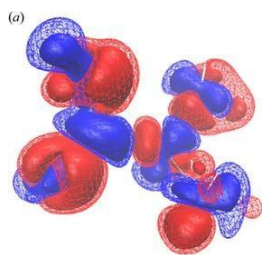


図 1 L-alanine の電子相関による電子密度の変形

【 3 】銀微粒子構造が引き出す常温高性能のフレキシブル熱電フィルム

β - Ag_2Se （セレン化銀）は、その優れた機械的特性と生体適合性から、ウェアラブル型熱電発電素子に非常に有望な材料とされている。しかし、これまで Ag/Se の組成比の調整や第二相の導入といった従来の手法では、電力因子の最適化には限界があった。

本研究では、スパークプラズマ焼結中に金属銀から銀セレン化物へと銀イオンを移動・析出させることで、フレキシブルな $\text{Ag}/\beta\text{-Ag}_2\text{Se}$ 複合膜中に大きくかつ結晶的連続性を持つ Ag リッチナノ析出物を形成する新たな方法を提示した。

その結果、303K（約 30°C）において $4000 \mu\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$ を超える前例のない高い電力因子を達成した。

さらに、最適化された 5 枚のフィルムを用いた熱電モジュールは、26.0 K の温度差で $10.89 \mu\text{Wcm}^{-2}\text{K}^{-2}$ の規格化出力電力密度を示した。

本研究は、 $\beta\text{-Ag}_2\text{Se}$ ベースの熱電材料における電気性能向上の鍵として Ag リッチナノ析出物の形成が極めて有効であることを明確に示した。

【 4 】放射光粉末法による熱電変換材料の精密な原子変位パラメータ決定

本研究では、SPring-8 BL13XU の高計数統計粉末回折データと、新たに導出した多原子系一次熱拡散散乱（TDS）モデルを用いて、熱電材料の精密結晶構造解析を行った。Al の温度依存粉末データを用いて、TDS がバックグラウンド散乱を定量的に説明でき、ADP の温度依存性と整合することを実証した。

その手法を Ag_8SnSe_6 の低温相（複雑な 11 独立原子サイト）に適用し、5 つの Ag サイトのうち $\text{Ag}1, \text{Ag}3, \text{Ag}5$ が非常に大きく、かつ強く異方的な ADP を示すことを明らかにした。これらのサイトでは Se_3 三角面の面積が小さく、温度上昇とともに負の熱膨張的な Ag-Se 距離変化を示し、「retreat from stress」機構に基づく非ケージ型ラトリングが成立することを示した。 $\text{Ag}2$ と $\text{Ag}4$ はほぼ等方的でラトリングは観測されなかった。

この方法により複雑材料でも精密 ADP が得られ、粉末回折における背景散乱解析の重要性が強調された。

【 5 】国際連携等

デンマーク・オーフス大学融合材料研究センター（Aarhus University Centre for Integrated Materials Research: iMAT）のセンター長 Bo Iversen 教授を筑波大学海外教育研究ユニット招致の PI として招致を 2024 年度 7 月から再開した。2025 年度、Iversen 教授は筑波大を 3 回訪れた。3 月には学生 4 名とスタッフでオーフス大学を訪問し、ミニワークショップを行い活発な交流を行った。また、2025 年 7 月には X 線自由電子レーザー施設 SACLA にて国際共同実験を行った。

<論文>

1. I. Inoue, T. Osaka, V. Tkachenko, T. Hara, K. J. Kapcia, Y. Inubushi, S. Kawaguchi, J. Yamada, E. Nishibori, M. Yabashi, B. Ziaja, High-intensity X-ray pump-monochromatic X-ray probe technique across time zero, Optica, 12, (2025) 2334-2536,

<https://doi.org/10.1364/OPTICA.555433>

2. Y. Yue, Y. Norikane, E. Nishibori, Biomimetic Adhesion/Detachment Using Layered Polymers with Light-Induced Rapid Shape Changes, *Angew. Chem. Int. Ed.* **64**, (2025), e202503748, doi.org/10.1002/anie.202503748
3. M. Hayashi, T. Nishioka, H. Kasai and E. Nishibori, Accurate temperature dependence of structure factors of L-alanine and taurine for quantum crystallography, *IUCrJ.* **12**, (2025), 384-392, <https://doi.org/10.1107/S2052252525002647>
4. A. Sakatani, T. Uchiyama, R. Omori, K. Otonari, G. Yang, E. Nishibori, X-G. Zheng, C-N. Xu, Elastic deformation induced near-infrared mechanoluminescence of ZnO co-doped with Li and Nd, *JCS-Japan*, **133**, **7**, (2025), 349-352, <https://doi.org/10.2109/jcersj2.25016>
5. T. Uchiyama, M. Okamoto, H. Su, E. Nishibori, M. Nishibori, X-G. Zheng, C-N. Xu, Effect of local structural symmetry on mechanoluminescent materials, *JCS-Japan*, **133**, **7**, (2025), 358-362, <https://doi.org/10.2109/jcersj2.25013>
6. J. Gao, J. Li, L. Miao, L. Jia, P. Qiu, T. Yin, S. Zhu, X. Yang, J-C. G, J-L. Chen, X. Wang, E. Nishibori, T. Sato, X. Shi, Coherent Ag-rich nanoprecipitates/ β -Ag₂Se flexible film with unprecedented thermoelectric performance by liquid-like sintering, *Nature Communications*, **16**, (2025), 6010, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61079-4>
7. S. Takahashi, E. Nishibori, Accurate determination of atomic displacement parameters for thermoelectric materials from synchrotron powder diffraction data with sophisticated background treatment, *CrystEngComm*, **27**, (2025), 4922-2931, <https://doi.org/10.1039/D5CE00297D>
8. K. Tanaka, E. Nishibori, Charge Density Study of Simple Inorganic Solids Using Synchrotron Single Crystal X-ray Diffraction, *Cryst. Growth Des.*, **25**, **20**, (2025), 8374-8381,

<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5c00528>

9. X.-G. Zheng, I. Yamauchi, T. Galica, E. Nishibori, T. Kawae, J. G. Nakamura, A. Koda, C.-N. Xu, Superlong-Range Magnetic Coupling and Ferromagnetic Spin Freezing in Mechanoluminescent Semiconductor Eu:SrAl₂O₄, *Advanced Science*, **12**, **38**, (2025), e09474, <https://doi.org/10.1002/advs.202509474>
10. Y-C. Lin, R. Matsumoto, M. G.-Asl, P. S.-Fernandez, E. Nishibori, H. Ago, A. V. Krashennnikov, K. Suenaga, Na Intercalation in Bilayer Graphene: Formation of a Close-Packed Trilayer, *ACS Nano*, **19**, (2025), 40612-40619, <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c16881>

<学会発表>

国際会議

1. E. Nishibori, X-ray Diffraction and Scattering Studies Using Advanced X-ray Sources, 1st ECCS International Symposium, Sendai Kokusai Hotel, Japan, January16, 2026 (**Invited**)
2. Y. Ogawa, H. Kasai, T. Koganezawa, H. Ago, E. Nishibori, Layer number dependence of systematic peak shift for graphene by X-ray study at SPring-8, AsCA 2025, Taipei International Convention Center (TICC), Taiwan, December1-6, 2025 (Poster)
3. K. Ota, Y. Ogawa, K. Tanaka, E. Hokari, L. J. Stockler, J. Kang, I. Inoue, B. Brummerstedt-Iversen, E. Nishibori, Improvements of serial femto-second crystallography of simple inorganics Al₂O₃ and BaTiO₃, AsCA 2025, Taipei International Convention Center (TICC), Taiwan, December1-6, 2025
4. K. Tanaka, E. Nishibori, Charge density study of simple tetrahedral coordinate covalent inorganic solids using synchrotron single crystal X-ray diffraction, AsCA 2025, Taipei International Convention Center (TICC), Taiwan, December1-6, 2025
5. E. Hokari, K. Tanaka, S. Kozai, K. Suekuni, E. Nishibori, Multi-temperature synchrotron radiation single-crystal X-ray diffraction of Cu-S based thermoelectrics, Cu₇V_{0.5}Ti_{0.5}Sn₈, AsCA 2025,

Taipei International Convention Center (TICC), Taiwan,
December 1-6, 2025

6. E. Nishibori, Structure of low temperature phase of Ag_8SnSe_6 , 2025 mini-workshop on Synchrotron and Electron Scattering for Material Science, Shanghai Institute of Ceramics (SICCAS), April 8, 2025
(Invited)
7. E. Nishibori, H. Kasai, Y. Ogawa, R. Matsumoto, H. Ago, Development of in situ synchrotron X-ray diffraction monitoring of vapor intercalation into multilayer graphene, RPGR2025, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, November 3-7, 2025
8. Y. Ogawa, H. Kasai, T. Koganezawa, H. Ago, E. Nishibori, Layer number dependence of systematic peak shift for graphene by synchrotron X-ray scattering, RPGR2025, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, November 3-7, 2025
9. Z. Xu, H. Kasai, E. Nishibori, Solvent-free Synthesis of $\delta\text{-CsPbI}_3$ via Ball Milling and Its Thermal Phase Transition to $\alpha\text{-CsPbI}_3$, PVSEC 2025, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, November 9 - 14, 2025

国内会議

1. 西堀英治 2.5次元構造の放射光構造計測 2.5次元物質科学第9回領域会議 東京科学大学 大岡山キャンパス 2025年6月12日～13日
2. 小川瑤介、笠井秀隆、西堀英治 放射光マイクロX線回折による2.5次元物質のマルチスケール構造解析 2.5次元物質科学第9回領域会議 東京科学大学 大岡山キャンパス 2025年6月12日～13日 (Poster)

サブナノ領域評価部門

教員：

上殿明良（数理物質系・物理工学域・教授）

上殿明良

<研究成果>

電子の反粒子である陽電子を用いて材料中の原子レベルの空孔やサブ nm オーダーの空隙を検出することができる。陽電子は 1970 年代から材料評価法としての有効性が検討され始めた。当初は、金属のフェルミ面の研究や空孔型欠陥評価方法として着目を浴び多くの成果を上げたが、今日では半導体、絶縁体、高分子等多くの材料に適用され、欠陥や空隙の検出、評価に使用されている。陽電子を材料評価に使用した場合の特徴としては、i) 検出できる欠陥は単一原子空孔からサブ nm サイズの空隙まで、ii) 高感度（原子空孔の検出下限： 10^{15} cm^{-3} オーダー）かつ非破壊、iii) 試料の温度、抵抗率等の制限が無い、iv) 試料表面から数 μm までの欠陥深さ分布検出が可能、等が挙げられる。本報告ではプラズマ励起化学気相成長（Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition: PECVD）により成膜した SiO_2 の評価に陽電子を適用した例を紹介する。

CVD ないしは PECVD により成膜した SiO_2 は低い温度で成膜しても高品質であることから前工程、後工程を問わず半導体プロセスで使用されている。一方、CVD- SiO_2 の密度は、熱酸化膜に比較して低く、膜中にはガスや水が含まれている。これらの不純物の存在状態や焼鈍による脱離過程を掌握することは重要である。本研究では、オルトケイ酸テトラエチル（TEOS）を用いて PECVD により成膜した SiO_2 膜の焼鈍依存性を評価した¹⁾。試料構造は $\text{SiO}_2(90 \text{ nm})/\text{Si}$ で成膜温度は 150°C 、また成膜後の焼鈍は 1000°C まで N_2 雰囲気（5 分）で行った。ラザフォード後方散乱分光法で試料中の Si、O、H の密度を評価したところ、それぞれ濃度の比率は $[\text{Si}]=29.0\%$ 、 $[\text{O}]=63.0\%$ 、 $[\text{H}]=8.1\%$ であった。H が H_2O として存在すると仮定し、この H と結合している分を $[\text{O}]$ から減じると、 $59.5/29.0=2.0$ となり、成膜後の SiO_2

には多くの水が存在することがわかる。

一般に、試料がサブ nm サイズの空隙を含む場合、陽電子は空隙中で電子と水素様の原子であるポジトロニウム（Ps）を形成して消滅する場合がある。Ps のスピン状態は 1 重項（ $p\text{-Ps}$ ）と 3 重項（ $o\text{-Ps}$ ）で、それぞれ 2 本と 3 本の γ 線を放出して消滅する。Ps の陽電子と電子の運動量の和はほぼ 0 なので、 $p\text{-Ps}$ の形成により消滅 γ 線の尖鋭度を示すパラメーターである S パラメーターの値は大きくなる。真空中では、 $p\text{-Ps}$ の寿命は約 0.125 ns 、 $o\text{-Ps}$ は約 142 ns である。空隙中に Ps が捕獲された場合、Ps は空隙壁面と衝突を繰り返すが、この際、陽電子と空隙壁面の電子との間に重なりが生じ消滅が起こる（ピックオフ消滅）。空隙サイズが小さく

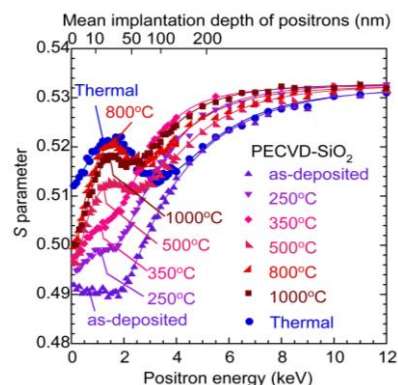


図 1. PECVD により作成した $\text{SiO}_2(90 \text{ nm})/\text{Si}$ の S パラメーターの陽電子打ち込みエネルギー依存性。熱酸化で形成した $\text{SiO}_2(100 \text{ nm})/\text{Si}$ の結果も示している。焼鈍により脱ガスが生じ、空隙が形成されることにより、 S 値が上昇している。

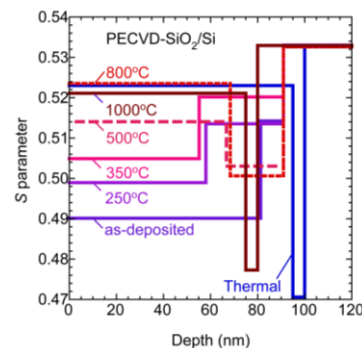


図 2. S - E カーブを解析して得た S 値の深さ分布。図 1 の曲線はフィッティングの結果である。500°C から観測される SiO_2/Si 界面近傍の S 値の低下は SiO_2 のマトリックス構造の変化に伴い Ps 形成率の低下に対応する。

なるほど、衝突が発生する確率は高くなり Ps の寿命は短くなる。この効果は *o*-Ps で顕著であり *o*-Ps の寿命とその相対強度から空隙サイズや空隙密度を推定することができる。

図 1 に PECVD により作成した SiO₂(90 nm)/Si の *S* パラメータの陽電子打ち込みエネルギー依存性を示す。図 1 において PECVD の *S* 値は $E < 2$ keV である。焼鈍温度が上昇すると *S* 値が上昇するのは、Ps 形成率が上昇しているからである。すなわち、焼鈍温度上昇に伴い、Ps 形成に必要な空隙の密度が上昇している。

図 2 は、得られた *S*-*E* カーブを陽電子拡散方程式を用いた解析を行い、*S* 値の深さ分布を求めた結果である。500°C 焼鈍後から SiO₂/Si 界面の *S* 値が低下し始め、1000°C 焼鈍後に熱酸化により形成した SiO₂/Si 界面と似た状態になることがわかる。

SiO₂ 膜中での陽電子消滅に対応する寿命スペクトルは陽電子消滅様式が 3 種類であるとして解析、得られた結果を *S* 値と共に図 3 に示した。図中、寿命が短い順に τ_i ($i=1,2,3$) と表記、また対応する相対強度を I_i とした。ピックアップ消滅に対応する寿命と相対強度は、図 3 の τ_3 と I_3 に対応する。図 3(a) に示した PECVD-SiO₂ 膜の *S* 値が熱酸化膜より低いことは Ps 形成率が低いことを示す。Ps の多くが空隙で形成されるので、焼鈍前の PECVD-SiO₂ の空隙率は低いと判断できる。焼鈍温度上昇に伴い 900°C まで *S* は連続的に上昇、900°C で熱酸化膜の *S* 値とほぼ同じ値となるが、1000°C 焼鈍後は値が低下する。

図 3(b) に示した τ_3 から推定できる空隙の直径を同図の右縦軸に示した。焼鈍前では、PECVD-SiO₂ 膜の τ_3 は熱酸化膜と同程度であるが (1.4 ns)、 I_3 は熱酸化膜より小さいため[図 3(c)]、熱酸化膜に比較して空隙密度が低いことがわかる。焼鈍温度の上昇により τ_3 は増大、800°C では 2.2 ns に達する。熱酸化膜の空隙と比較すると、体積比で 2.6 倍程度であり、PECVD-SiO₂ では非常に大きな空隙が形成されることがわかる。ただし、1000°C 焼鈍後においても I_3 は熱酸化膜より低い。同試料を昇温脱離ガス分析法により評価したところ、H₂

H₂O、O₂ 等の脱離と空隙サイズや空隙率の温度依存性と密接な関係があることが分かった。これらのガスは、焼鈍前には空隙に捕獲されると考えられる。焼鈍により、空隙からこれらの不純物が脱離すると、陽電子が空隙に捕獲されるようになり Ps が形成される。一方、H は 1000°C 焼鈍時にも残留しており、Si-O の結合を切断することにより空隙サイズの増大の一因となっていると考えられる。

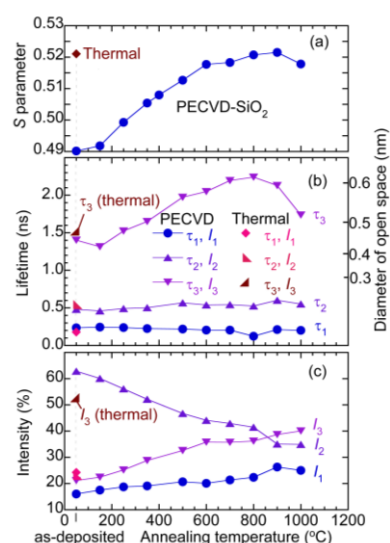


図 3. PECVD-SiO₂ 膜中の (a) *S* 値、(b) 陽電子寿命、(c) 相対強度の焼鈍温度依存性。 τ_3 が Ps のピックアップ消滅に対応する寿命で、この値から推定できる SiO₂ 膜中の空隙サイズを横軸右に示した。

文献

1. A. Uedono, R. Hasunuma, H. Kitagawa, Y. Yoshihara, F. Inoue, K. Mihara, S. Aoki, T. Hare, K. Mori, M. Murugesan, and T. Fukushima, "Defects in Plasma-Activated Amorphous SiO₂ Probed Using Positron Annihilation Spectroscopy," ACS Appl. Electron. Mater. 7, 10761 (2025).

<論文>

1. A. Uedono, R. Hasunuma, H. Kitagawa, Y. Yoshihara, F. Inoue, K. Mihara, S. Aoki, T. Hare, K. Mori, M. Murugesan, and T. Fukushima, “Defects in Plasma-Activated Amorphous SiO₂ Probed Using Positron Annihilation Spectroscopy,” *ACS Appl. Electron. Mater.* **7**, 10761–10767 (2025). [DOI: 10.1021/acsaelm.5c01992]
2. A. Uedono, H. Iguchi, M. Horita, J. Suda, K. Shima, S. F. Chichibu, and S. Ishibashi, “Vacancy-type defects in n-type GaN fabricated by low-dose ion implantation studied by a monoenergetic positron beam,” *Phys. Stat. Sol. B* **2025**, e202500409(1-9) (2025). [DOI: 10.1002/pssb.202500409]
3. A. Uedono, R. Tanaka, S. Takashima, K. Ueno, M. Edo, K. Shima, S. F. Chichibu, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, S. Ishibashi, K. Sierakowski, and Bockowski, “Characterization of Vacancy-Type Defects in Mg-and N-Implanted GaN by Using a Monoenergetic Positron Beam,” *IEEE J. Electron Devices Soc.* **13**, 1252-1257 (2025). [DOI: 10.1109/JEDS.2025.3603203]
4. A. Uedono, K. Kawakami, T. Kuribara, R. Hasunuma, Y. Harashima, Y. Shigeta, Z. Ni, R. Yan, H. Nakamura, A. Notake, T. Moriya, K. Michishio, S. Ishibashi, “Vacancy-type defects in HfO₂ layers and their role in amorphous-to-crystalline transition studied by monoenergetic positron beams,” *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **38**, 463-468 (2025). [DOI: 10.1109/TSM.2025.3548450]
5. S. Fujii, S. Shimabukuro, and A. Uedono, “Mechanistic insights into microwave annealing for lattice defect recovery,” *IEEE J. Electron Devices Soc.* **13**, 1258-1266 (2025). [DOI: 10.1109/JEDS.2025.3603559]
6. K. Shima, T. Narita, A. Uedono, M. Bockowski, J. Suda, T. Kachi, and S. F. Chichibu, “Impacts of ultra-high-pressure annealing on undoped and ion-implanted GaN studied by photoluminescence measurements,” *J. Appl. Phys.* **137**, 235702(1-12) (2025). [DOI: 10.1063/5.0266700]
7. K. M. Senados, T. Aizawa, I. Ohkubo, T. Baba, A. Uedono, T. Sakurai, and T. Mori, “Defects modification in thermoelectric Mg₂Sn (Ge) epitaxial thin films through modulation of Mg flux rate in MBE,” *J. Phys. Energy* **7**, 03501(1-10) (2025). [DOI: 10.1088/2515-7655/adc489]
8. H. Kitagawa, R. Sato, S. Ebiko, A. Nagata, C. Ahn, Y. Kim, J. Kang, A. Uedono, and F. Inoue. “Material-Mechanistic Interplay in SiCN Wafer Bonding for 3D Integration,” *ACS Omega* **10**, 27575-27584 (2025). [DOI: 10.1021/acsomega.5c03628]
9. A. Uedono, K. Kawakami, T. Kuribara, R. Hasunuma, Y. Harashima, Y. Shigeta, Z. Ni, R. Yan, H. Nakamura, A. Notake, T. Moriya, K. Michishio, and S. Ishibashi, “Vacancy-Type Defects in HfO₂ Layers and Their Role in Amorphous-to-Crystalline Transition Studied by Monoenergetic Positron Beams,” *IEEE Trans. Semicond. Manufacturing* (1-7) (2025). [DOI: 10.1109/TSM.2025.3548450]
10. S. F. Chichibu, K. Kikuchi, B. Moody, S. Mita, R. Collazo, Z. Sitar, Y. Kumagai, S. Ishibashi, A. Uedono, and K. Shima, “Roles of Al-vacancy complexes on the luminescence spectra of low dislocation density Si-doped AlN grown by halide vapor phase epitaxy,” *Appl. Phys. Lett.* **126**, 111905(1-7) (2025). [DOI: 10.1063/5.0252149]
11. R. Akaike, K. Uesugi, K. Shima, S. F. Chichibu, A. Uedono, T. Nakamura, and H. Miyake “Impacts of homoepitaxial AlN thickness on the qualities of AlGaIn QWs fabricated on the face-to-face annealed sputter-deposited AlN templates,” *Appl. Phys. Exp.* **18**, 065503(1-5) (2025). [DOI: 10.35848/1882-0786/ade2b7]
12. Y. Yuki, J. Fuse, S. Aoki, T. Hare, K. Mihara, T. Miyoshi, N. Yamamoto, S. Teranishi, T. Fukushima, A. Uedono, and F. Inoue, “Assessing queue time in D2W hybrid bonding through precise bond strength measurements,” *IEEE 75th Electronic Components & Tech. Conf. (ECTC)*, 878 - 884 (2025). [DOI:10.1109/ectc51687.2025.00154]
13. 上殿明良, “陽電子消滅を用いた材料評価,” *応用物理* **94**, 478-483 (2025).

[https://doi.org/10.11470/oubutsu.94.9_478]

<学会発表>

国際会議

1. A. Uedono, H. Iguchi, M. Horita, J. Suda, K. Shima, S. F. Chichibu, and S. Ishibashi, "Vacancy-type defects in low-dose Si-implanted GaN probed by positron annihilation," 8th Int. Sym. Growth of III-Nitrides, Tainan, Taiwan, 10 November 2025.
2. A. Uedono, Chao-Hsin Wu, and Gwénolé Jacopin, "Investigation of Defect Characteristics and Their Correlation with Device Performance in Wide Bandgap Semiconductors," Tsukuba Conf., 2 October 2025.
3. K. Awazu, K. Sasa, M. Sataka, and A. Uedono, "Sub-nano order structural change in amorphous silica induced with swift heavy ions," 17th Int. Conf. Phys. Non-crystalline Solids, Tsukuba, Japan, 11 August 2025.
4. A. Uedono, R. Tanaka, S. Takashima, K. Ueno, M. Edo, K. Shima, S. F. Chichibu, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, S. Ishibashi, K. Sierakowski, and M. Bockowski, "Characterization of vacancy-type defects in Mg- and N-implanted GaN by using a monoenergetic positron beam," 22nd Int. Workshop Junction Tech. 2025, Kyoto, Japan, 6 June 2025.
5. T. Kimura, J. Ahn, N. Deegan, K. Harmon, C. Wicker, N. Bitner, A. Dibos, J. Zhang, B. Pingault, C. Zhang, G. Galli, A. Uedono, D. Awschalom, and F. J. Heremans, "Comprehensive analysis of formation mechanism of vacancy complexes in 4H-SiC," Mat. Res. Soc. Spring Meeting & Exhibit, Washington, USA, 7 April 2025

国内会議

1. 嶋紘平, 石橋章司, 上殿明良, 秩父重英, "ZnO における反応性イオンエッチング誘起欠陥のルミネッセンス評価", 第 73 回応用物理学会春季学術講演会, 名城大学, 2026 年 3 月 16 日.
2. 栗原辰昇, 俣澤遠, 中村秀雄, ヤン ルオリン, 原田 豪繁, 趙祥勲, 上殿明良, 蓮沼隆, "ZrO₂ 薄膜の強誘電性緩和 第 31 回 電子デバイス界面テクノロジー研究会" 東レ総合研修センター, 静岡, 2026

年 1 月 29 日.

3. 上殿明良, "GaN への Mg/N 注入で生じる空孔型欠陥の焼鈍特性", INNOPEL シンポジウム 2025, 浅草橋ヒューリックホール&カンファレンス, 2026 年 1 月 27 日.
4. 秩父重英, 嶋紘平, 上殿明良, 石橋章, 司田中亮, 高島信也, 上野勝典, 成田哲生, 加地徹, 須田淳, "光学特性評価からみる GaN の p 型活性化と点欠陥の制御", INNOPEL シンポジウム 2025, 浅草橋ヒューリックホール&カンファレンス, 2026 年 1 月 27 日.
5. 嶋紘平, 堀田昌宏, 須田淳, 石橋章司, 上殿明良, 秩父重英, "電子線照射 GaN のルミネッセンス評価", 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 名城大学, 2025 年 9 月 4 日.
6. 西垣有紘, 廣田晴大, 大野峻太郎, 杉本麻水, 新井裕子, 南柚香, 島崎好広, 寅丸雅光, 神好人, 富田一義, 上殿 明良, 今井大地, 宮嶋孝夫, "パルスレーザアニールした Si イオン注入 GaN の電気特性評価", 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 名城大学, 2025 年 9 月 4 日.
7. 嶋紘平, 堀田昌宏, 須田淳, 石橋章司, 上殿明良, 秩父重英, "低ドーズ Si, Al, N イオン注入 GaN のルミネッセンス評価", 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 名城大学, 2025 年 9 月 4 日.

招待講演

1. A. Uedono, K. Shima, S. F. Chichibu, and S. Ishibashi, "Annealing Behaviors of Vacancy-type Defects in GaN and AlN Studied by Positron Annihilation Spectroscopy," Photonics & Electromagnetics Res. Sym., Chiba, Japan, 7 November 2025.
2. A. Uedono, K. Shima, S. F. Chichibu, and S. Ishibashi, "Annealing behaviors of vacancies and their impact on dopant activation in ion-implanted GaN studied by positron annihilation," Int. Conf. Nitride Semiconductors, Malmö, Sweden, 8 July 2025.

サブナノ領域評価部門

教員：

羽田真毅（数理物質系・物理工学域・教授）

腰原伸也（数理物質系・物理工学域・客員教授）

研究員：

Arnaud Arbouet（外国人受託研究員）

Gael Privault（外国人受託研究員）

大学院生：

塩谷海斗（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・D1）

野山豪大（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

岩崎ゆい（数理物質科学研究群・国際マテリアルイノベーション学位プログラム・M2）

平晴希（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M1）

長尾梨代（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M1）

羽田真毅

<研究成果>

当研究室では、フェムト秒からピコ秒の時間分解能を持つ超高速時間分解電子線回折法を用いて、分子から材料にわたる幅広い物質の構造ダイナミクス計測を行っている。本年度は、開発研究に注力し、高コヒーレンスかつ極短パルス電子線源の開発を行った。本研究では、探針型フォトカソードと、従来の超高速時間分解電子線回折装置に用いられてきた金属平板型フォトカソードとを比較し、それぞれの電子線の伝播特性（パルス幅、ビーム径、電子密度、コヒーレンス長など）の違いを、シミュレーションおよび実験を通して明らかにした。

実験では、直径が3–10 nmのカーボンナノチューブシートを用いて、得られた回折像から約10 nm程度のコヒーレンス長が得られていることを示し、また粒子シミュレーションによってもこれと一致する結果を得ている。また、電子線のパルス幅はMoTe₂の熱変化より見積もっており、約10 psのパルス幅を持つコヒーレント電子線であることが分かった。この優れ

たコヒーレンス特性と極短パルス性により、従来手法では観測困難であったナノ構造体（ナノメートルオーダーの周期構造を持つタンパク質や超分子など）の動的挙動を高精度に解析することが可能となり、超高速時間分解電子線回折装置の応用範囲が大幅に拡張されることが期待される。さらに、本成果は超高速時間分解電子線回折装置のみならず、透過電子顕微鏡や走査電子顕微鏡などの探針型電子線源を利用する各種顕微鏡における新規電子線源開発に対しても重要な知見を提供するものである。図1に開発した超高速時間分解電子線回折装置の概略図と、装置のパルス幅、コヒーレンス長、ビーム径などのパラメータなどを示す。

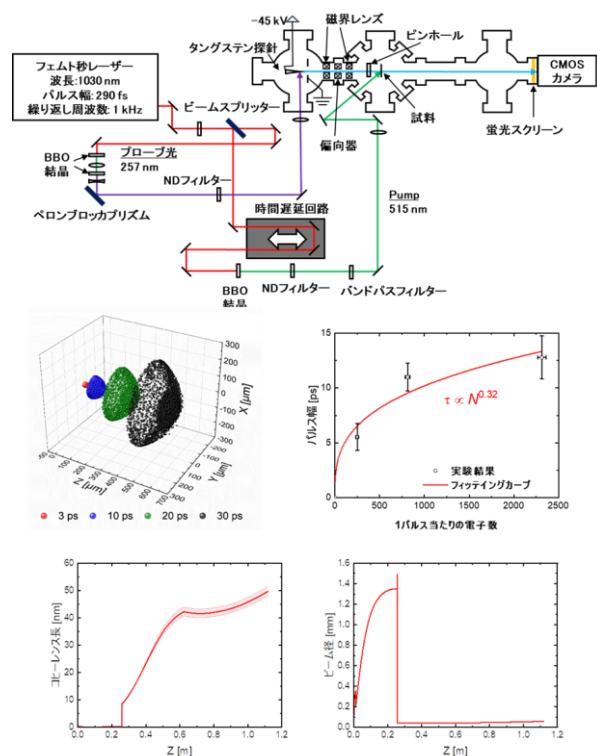


図1．開発した超高速時間分解電子線回折装置の概略図と、装置パラメータ

<論文>

1. V. Rollo, F. Kato, H. Taira, R. Nagao, G. Privault, S. Weber, M. Hada*, A. Arbouet*, Ponderomotive electron-light interactions in multi-electron pulses. New Journal of Physics 28, 024101 (2026).
2. R. Nagao, G. Privault, Y. Arashida, Y. Iwasaki, G.

- Noyama, H. Suzuki, Y. Hayashi, J. Fujita, A. Arbouet*, M. Hada*, Development of a high bunch charge and high transverse coherence ultrafast electron source for structural studies of large-periodicity materials. *The Journal of Chemical Physics* 163, 034201 (2025).
3. G. Noyama, T. Gauthier, Y. Arashida, Y. Iwasaki, R. Nagao, Y. Saida, N. Godin, G. Privault, H. Suzuki, Y. Hayashi, S. Ono*, R. Bertoni*, M. Hada*, Ultrafast dynamics of carrier relaxation determining the quasi-1D and non-1D electronic behaviors in carbon nanostructures. *Carbon Trends* 20, 100510 (2025).
- <総説・解説>
1. 長尾梨代、羽田真毅「高コヒーレンス・極短パルス電子線源の開発」顕微鏡 60, 107-111 (2025).
 2. 羽田真毅「光誘起時間分解電子回折 一装置開発と材料計測一」固体物理 60, 737-745 (2025).
- <学会発表>
- 国際会議
1. M. Hada, Local structural and electronic changes in vdW heterostructures observed by ultrafast complementary measurements. 23rd International Symposium on Correlation, Polarization and Ionization in Atomic and Molecular Collisions (COPIAMC 2025), Tokyo, Japan 2025. (Invited)
 2. M. Hada, Photoinduced dynamics generated by unusual electron transfer channels in a one-dimensional van der Waals heterostructure. Optics & Photonics International Congress 2025 (LSC2025), Yokohama, Japan, 2025. (Invited)
 3. G. Privault, M. Hervé, N. Godin, R. Bertoni, E. Trzop, Y. Watier, I. Chaban, R. G. Torres Ramírez, C. Mariette, A. Volte, M. Cammarata, M. Levantino, S. Akagi, M. Hada, J. Kubicki, S. Zerdane, H. Tokoro, S. Ohkoshi, E. Collet, Streaming powder technique for the study of non-reversible phenomena with X-ray diffraction and Infrared spectroscopy. Optics & Photonics International Congress 2025 (LSC2025), Yokohama, Japan, 2025. (Invited)
 4. G. Privault, M. Hervé, H. Taira, F. Kato, R. Bertoni, C. Mariette, M. Cammarata, M. Levantino, S. Akagi, H. Tokoro, S. Ohkoshi, M. Lorenc, M. Hada, E. Collet, Controlling ultrafast phase transition of Prussian Blue Analogue compounds through X-ray and electron diffraction experiments. Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems Gordon Research Conference 2026, Los Angeles, the USA, 2026.(poster)
 5. M. Hada, G. Privault, K. Sano, S. Ohmura, M. Sakamoto, Photoinduced transition from semiconducting to superionic conducting phases in Cu₂S observed by ultrafast time-resolved electron diffraction. Materials Research Meeting 2025 (MRM2025), Yokohama, Japan, 2026 (oral)
 6. G. Privault, M. Hervé, N. Godin, R. Bertoni, E. Trzop, Y. Watier, S. Zerdane, I. Chaban, R. G. T. Ramírez, C. Mariette, A. Volte, M. Cammarata, M. Levantino, S. Akagi, M. Hada, J. Kubicki, H. Tokoro, S. Ohkoshi, M. Lorenc, E. Collet, Coupling X-ray diffraction and Infrared spectroscopy for the study of ultrafast non-reversible phenomena in RbMnFe compounds. 34th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC2025) Sapporo, Japan 2025 (poster).
 7. R. Nagao, G. Privault, Y. Iwasaki, G. Noyama, Y. Arashida, H. Suzuki, Y. Hayashi, J. Fujita, A. Arbouet, M. Hada. Development of a high-coherence ultrafast electron diffraction setup: propagation of electron beams from plate-type and tip-type photocathodes. 34th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC2025) Sapporo, Japan 2025 (poster).
 8. H. Taira, R. Nishimori, K. En-ya, G. Noyama, G. Privault, Y. Arasida, K. Takubo, S. Koshihara, S. Yoshida, M. Hada, Determination of an electron pulse duration after compression by using a THz streaking methodology. 34th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC2025) Sapporo, Japan 2025 (poster).
 9. N. Yamamoto, W. Zhou, G. Privault, R. Nagao, A. Arbouet, S. Koshihara, T. Katayama, M. Hada, Ultrafast structural reorganization monitored by

electron diffraction in BaTiO₃ at room temperature with UV excitation. 34th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC2025) Sapporo, Japan 2025 (poster).

10. K. En-ya, A. Takada, G. Privault, M. Saigo, Y. Ikabata, K. Miyata, S. Kohata, Y. Saida, H. Suzuki, T. Ishikawa, M. Kuwahara, Y. Yamada, Y. Hayashi, S. Koshihara, H. Goto, H. Nakanotani, K. Onda, C. Adachi, M. Hada, Transient structures of organic molecular crystal observed by time-resolved electron diffraction measurements. Optics & Photonics International Congress 2025 (LSC2025), Yokohama, Japan, 2025. (oral)
11. H. Taira, R. Nishimori, K. En-ya, G. Noyama, G. Privault, Y. Arashida, K. Takubo, S. Koshihara, S. Yoshida, M. Hada, Interaction of Electron Pulse with Terahertz Waves. Optics & Photonics International Congress 2025 (LSC2025), Yokohama, Japan, 2025. (oral)
12. R. Nagao, G. Privault, Y. Iwasaki, G. Noyama, Y. Arashida, H. Suzuki, Y. Hayashi, A. Arbouet, J. Fujita, M. Hada, Development of a high-coherence and ultrashort pulsed electron source. Optics & Photonics International Congress 2025 (LSC2025), Yokohama, Japan, 2025. (oral)

国内会議

1. 平晴希、加藤英字子、塩谷海斗、Privault Gael、Arbouet Arnaud、腰原伸也、嵐田雄介、羽田真毅「THz波によるフェムト秒パルス電子線の偏向制御」レーザー学会学術講演会第46回年次大会 大阪府, 2026 (ポスター)
2. 長尾梨代、山本渚、Privault Gael、藤田淳一、鈴木弘朗、林靖彦、腰原伸也、Arbouet Arnaud、羽田真毅「高コヒーレンス時間分解電子線回折装置を用いたカーボンナノチューブのチューブ間相互作用の観測」レーザー学会学術講演会第46回年次大会 大阪府, 2026 (ポスター)
3. 塩谷海斗、高田亜美、Gaël Privault、西郷将生、五十幡康弘、吉田龍矢、宮田潔志、木幡真太郎、大庭拓也、大浦正仁、齋田友梨、鈴木弘朗、石川忠彦、桑原真人、山田洋一、林靖彦、腰原伸也、後

藤仁志、中野谷一、恩田健、安達千波矢、羽田真毅「有機発光材料の励起状態における構造変化の観測」第44回固体・表面光化学討論会、福島県, 2025 (口頭)

4. R. Nagao, N. Yamamoto, G. Privault, J. Fujita, H. Suzuki, Y. Hayashi, S. Koshihara, A. Arbouet, M. Hada「Direct observation of inter-tube dynamics in photoexcited CNTs」PCOS 2025 静岡県, 2025 (ポスター)
5. Y. Iwasaki, G. Privault, T. Fukuda, M. Hase, Y. Arashida, M. Hada「Observing the hot carrier relaxation in a 2H-MoTe₂ thin film with ultrafast optical transmission measurements」PCOS 2025 静岡県, 2025 (ポスター)
6. 塩谷海斗、高田亜美、Gaël Privault、西郷将生、五十幡康弘、吉田龍矢、宮田潔志、木幡真太郎、大庭拓也、大浦正仁、後藤仁志、中野谷一、恩田健、安達千波矢、羽田真毅「超高速時間分解電子線回折法を用いた有機発光材料の構造変化の観測」第15回 CSJ 化学フェスタ 2025、東京都, 2025 (ポスター)
7. 岩崎ゆい、Privault Gael、福田拓未、長谷宗明、嵐田雄介、羽田真毅「過渡透過率計測による2H-MoTe₂ 薄膜における熱電子緩和の観測」第86回応用物理学会秋季学術講演会 愛知県, 2025 (口頭)
8. 平晴希、西森亮太、加藤英字子、塩谷海斗、野山豪大、Privault Gael、Arbouet Arnaud、腰原伸也、嵐田雄介、羽田真毅「極短パルス電子線の特性評価のためのTHz波光学系の開発」第86回応用物理学会秋季学術講演会 愛知県, 2025 (口頭)
9. 山本渚、Zhou Weikun、Privault Gael、長尾梨代、Arbouet Arnaud、腰原伸也、片山司、羽田真毅「超高速時間分解電子線回折法を用いた紫外光励起によるBaTiO₃ 薄膜単結晶の構造変化の観測」第86回応用物理学会秋季学術講演会 愛知県, 2025 (口頭)
10. 加藤英字子、平晴希、Privault Gael、Rollo Valentin、腰原伸也、羽田真毅、Arbouet Arnaud「高速電子線のポンデロモータビブ相互作用」第86回応用物理学会秋季学術講演会 愛知県, 2025 (口頭)

11. 塩谷海斗、高田亜美、Privault Gaël、西郷将生、五十幡康弘、吉田龍矢、宮田潔志、木幡真太郎、大庭拓也、大浦正仁、齋田友梨、鈴木弘朗、石川忠彦、桑原真人、山田洋一、林靖彦、腰原伸也、後藤仁志、中野谷一、恩田健、安達千波矢、羽田真毅「有機単結晶の過渡構造解析」第86回応用物理学会秋季学術講演会 愛知県, 2025 (口頭)
12. 長尾梨代、Privault Gaël、嵐田雄介、岩崎ゆい、野山豪大、藤田淳一、Arbouet Arnaud、羽田真毅「フォトカソード形状の違いによる極短パルス電子線の伝播・特性の変化」第86回応用物理学会秋季学術講演会 愛知県, 2025 (口頭)

サブナノ領域評価部門

教員：

丸本一弘（数理物質系・物質工学域・教授）

岡本翔（数理物質系・物質工学域・助教）

研究員：

下位幸弘（研究員）

鈴木貴之（研究員）

大学院生：

佐藤睦（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・D3）

陳奕舟（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・D3）

王佳曦（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・D3）

劉李祺（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・D2）

何文皓（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・D1）

内海雄太（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

金子慎太郎（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

坂口泰基（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

高橋優羽（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

張旭波（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

楊彦秋（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

宗宮若葉（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M2）

五十住武久（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M1）

川久保怜（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M1）

山崎涉吾（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M1）

渡辺陽太（数理物質科学研究群・応用理工学学位プログラム・M1）

丸本一弘、岡本翔

<研究成果>

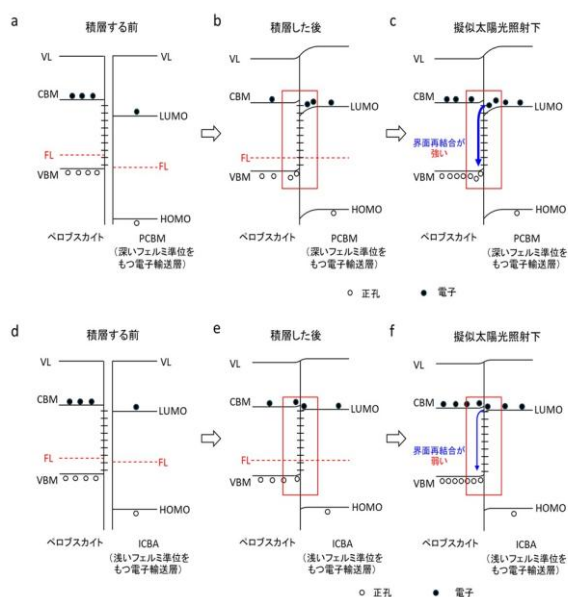
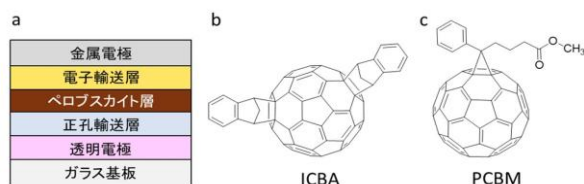
当研究室では、新しい有機半導体や無機半導体およびそれらのデバイスの研究を通して、有機・無機半導体材料をエレクトロニクスへ応用する新しい有機・無機エレクトロニクスの研究を推進している。本年度は、ペロブスカイト太陽電池、有機薄膜太陽電池、発光電気化学セル、有機トランジスタ、有機トランジスタメモリに関する研究を進めた。

【 1 】スズ系ペロブスカイト太陽電池が電子輸送層の改良で高効率化するメカニズムを解明

鉛を含まず環境負荷が少ないペロブスカイト太陽電池として注目されているスズ系ペロブスカイト太陽電池において、電子輸送層の改良でより高い開放電圧が実現されるメカニズムを、電子スピン共鳴法を用いて解明した。スズ系ペロブスカイト太陽電池のさらなる高効率化を目指す上で重要な成果である。

本研究では、電子スピン共鳴法を用いてスズ系ペロブスカイトと電子輸送層の界面の電子拡散を観測し、その界面におけるバンド曲がり調べた。その結果、これまで一般的だったフラーレン誘導体の PCBM を電子輸送層に用いた場合、スズ系ペロブスカイトとの界面において、開放電圧（取り出せる最大電圧）が低下する原因となる電荷再結合が生じやすいバンド曲がりが生じていた。一方、高い開放電圧が得られることが知られている ICBA を用いた場合には、電荷再結合の抑制に有利なバンド曲がりにつながる事が明らかになった。

本研究で得られた知見をもとにすることで、スズ系ペロブスカイト太陽電池のさらなる効率化への取り組みが進むことが期待される。



【 2 】電子スピン共鳴法を用いたペロブスカイトおよび有機薄膜太陽電池の特性向上および劣化機構

本研究では、電子スピン共鳴（ESR）法によるスズペロブスカイト太陽電池および有機薄膜太陽電池の評価から、これらの太陽電池における開放電圧向上機構および劣化機構を明らかにした。スズペロブスカイト/電子輸送層界面における電荷拡散の解析から、最低空軌道準位の浅い電子輸送材料である indene-C₆₀ bisadduct (ICBA) を用いることで、ペロブスカイト/ICBA 界面において開放電圧の向上に不利なバンドベンディングの形成が抑制されることが示された。また、poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) を正孔輸送層に用いたペロブスカイト太陽電池における正孔輸送層の電荷状態の解析から、PEDOT:PSS/ペロブスカイト界面における電子障壁の劣化や

PEDOT:PSS へのホール蓄積が性能劣化に寄与する要因のひとつとして挙げられることを明らかにした。さらに、PM6 (別名：PBDB-T-2F) と Y6 (別名：BTP-4F) を活性層に用いた非フラーレン型有機薄膜太陽電池における分子配向の解析から、擬似太陽光照射により PM6 および Y6 の分子配向比率が変化することを明らかにした。擬似太陽光照射下における分子配向変化の定量的な解析方法などの本研究で示したペロブスカイトおよび有機薄膜太陽電池の解析方法は、他の解析方法では得られない知見を与えた。

今後、他の評価・解析手法と相補的に組み合わせることにより、ペロブスカイトおよび有機薄膜太陽電池のエネルギー変換効率および耐久性の向上に貢献することが期待される。

【 3 】電子スピン共鳴分光法を用いたラドルステン・ポッパー型スズペロブスカイト太陽電池の界面における電荷輸送機構の解明

本研究では、電子スピン共鳴（ESR）分光法を用いて、RP スズペロブスカイト太陽電池およびその構成材料の電荷状態を調べた。正孔輸送層（HTL）と RP スズペロブスカイトの積層プロセスにおいて、HTL からペロブスカイトへの正孔拡散が観測された。この正孔拡散により、界面において電子障壁が形成され、デバイス性能の向上に寄与すると考えられる。また、擬似太陽光照射下において、紫外線等の短波長光に励起されたホットエレクトロンにより、ペロブスカイトから HTL への逆電子移動が観測された。さらに、素子駆動中の開放電圧および短絡電流密度の向上は、この逆電子移動と強く関連していることが見出された。これらの性能向上は、逆電子移動により、界面における電子障壁が増強され、電界効果パッシベーションが増強された結果、キャリア再結合が抑制されたことに起因すると示唆された。

また、カソードインターレイヤー（CIL）である PDINO を RP スズペロブスカイト太陽電池に導入し、電子輸送層（ETL）側の電荷移動機構の観測を試みた。光照射下において、

PDINO に明瞭な電荷蓄積が観測されなかった。さらに、低温 ESR 測定により、ETL/PDINO/金属電極の積層構造における電子拡散機構および PDINO による界面修飾機構について調べた。積層プロセスにおけるフェルミ準位の一致過程において、PDINO を介した、金属電極から ETL への電子拡散が直接に観測された。また、金属電極の仕事関数が小さくほど、ETL の LUMO が深いほど、この金属電極から ETL への電子拡散が生じやすいことが観測された。これらの結果から、PDINO の界面修飾機構が以下のように示唆される。PDINO が金属電極から ETL に向く界面双極子層を形成することにより、金属電極の実効的な仕事関数を低減させる。その結果、フェルミ準位の一致過程における電子拡散が制御され、界面におけるショットキーバリアが抑制され、オーミック接触が促進される。

本研究で得られた知見は、RP スズペロブスカイト太陽電池の埋もれた界面における電荷移動機構や界面修飾機構に関する理解を深化させ、スズペロブスカイト太陽電池の高効率化・長寿命化に向けた界面設計に知見を提供できると考えられる。

【 4 】スズ鉛ペロブスカイト太陽電池の界面修飾層の ESR 研究

本研究では界面修飾材の単膜、混合膜やその積層膜に対して ESR 分光法を用いて光照射下の電荷状態の調査をおこなった。またその結果を理論計算の点から説明するために、密度汎関数理論 (DFT) 計算もおこなった。

これらの調査から、光照射下で PP から CPTA へ光誘起電子移動が生じることを明らかにした。さらに本研究で得られた ESR 信号の起源は、CPTA 量体のアニオン由来であることが判明した。また光誘起電子移動の起源として、PP と CPTA のカルボキシル基やフラーレン部位との間のファンデルワールス相互作用が重要であることが明らかにし、PP と CPTA による素子の安定性向上メカニズムを解明した。

本研究で得られた界面修飾材料の電荷状態に関する知見は、ペロブスカイト太陽電池の今

後の高性能化に有用であると期待される。

【 5 】ペロブスカイト太陽電池におけるドーパントフリー正孔輸送層の電荷拡散の ESR 研究

本研究では、HTL に PTB7 および PM6、HCL に MoO_x を用いた PSCs に注目して、積層膜試料に対して電子スピン共鳴 (ESR) 分光法を適用し、HTL-HCL 間の電荷状態や電荷拡散をミクロな視点から解明することを目的とした。HTL に PM6 を用いた太陽電池素子が、PTB7 を用いた太陽電池素子よりも優れた性能を示すことを確認した。特に、PTB7 を用いた太陽電池素子の $J-V$ 曲線に S 字カーブが発現した。また、HTL/ MoO_x 積層膜の ESR 測定から、HTL は MoO_x に p 型ドーピングされること、 MoO_x は HTL に還元されることでバンドギャップ内の Gap states が誘起されることを明らかにした。積層膜試料の ESR 測定を基に作製したエネルギーバンド図から、 $\text{FAPbI}_3/\text{PTB7}$ 界面に $\text{FAPbI}_3/\text{PM6}$ 界面よりも大きい正孔障壁が形成される。この正孔障壁の差が、太陽電池性能の差に起因していると考えられる。

これらの知見は、ドーパントフリー-HTM を用いた PSCs の更なる開発にとって極めて重要である。

【 6 】Sn-Ge ペロブスカイト太陽電池における正孔輸送層界面の電荷移動の ESR 研究

本研究では、エタノールアミン (TEA) /N-メチル-2-ピロリドン (NMP) 混合溶媒を用いて作製したメチルアンモニウムスズ・ゲルマニウムヨウ化物 (methyllumonium tin germanium iodide, $\text{MASn}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}\text{I}_3$) ペロブスカイト太陽電池に着目し、界面電荷移動挙動および電子構造の変化を系統的に解明することを目的とした。特に、従来広く用いられてきたジメチルスルホキシド (DMSO) 処理溶媒で作製した素子との比較を通して、TEA 添加が薄膜形成、界面電子状態、および素子動作特性に及ぼす影響を明らかにした。

ITO/PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxy

thiophene):poly(styrene sulfonate), 正孔輸送層) /MASn_{0.5}Ge_{0.5}I₃/C₆₀/BCP (bathocuproine, 電子輸送補助層) /Ag 構造の太陽電池素子を作製し、電子スピン共鳴 (ESR) 分光法を用いて、素子動作中におけるスピンダイナミクスおよび電荷移動挙動を直接観測した。TEA/NMP 溶媒を用いることで、Sn-Ge 前駆体溶液の安定化が促進され、酸化が抑制されるとともに、平滑かつ緻密なペロブスカイト薄膜が形成されることが確認された。これにより、従来の DMSO 処理溶媒を用いた場合と比較して、素子性能の向上が達成された。

暗状態においては、TEA 混合溶媒を用いた素子は、DMSO 処理素子と比較して高いスピン密度 (N_{spin}) および狭い ESR 線幅を示した。この結果は、PEDOT:PSS とペロブスカイト界面におけるフェルミ準位整合が安定化し、過度なバンドベンディングが抑制されていることを示唆している。また、界面における電荷再分布により、ポーラロンおよびバイポーラロン状態の平衡が変化している可能性が示された。

さらに、光照射下におけるオペランド ESR 測定を行った結果、TEA 混合溶媒を用いた素子では、 N_{spin} の増加が抑制され、ESR 信号の時間変化も安定していることが明らかとなった。これは、光励起による過剰な電子移動や電荷蓄積が抑制されていることを示しており、界面における電荷トラップ形成が効果的に抑えられていることを示唆する。一方、DMSO 処理素子では光照射に伴い N_{spin} が顕著に増加し、電荷蓄積および局在スピンの生成が進行していることが確認された。

加えて、オペランド ESR 測定を通じて、長時間光照射下における N_{spin} の増加と、短絡電流密度 (J_{sc}) および開放電圧 (V_{oc}) の低下との間に明確な相関が見いだされた。この結果は、局在スピンの生成および電荷トラッピングが光劣化挙動を支配していることを示しており、界面電荷ダイナミクスが素子安定性を決定づける重要な因子であることを明らかにしている。

以上の結果より、TEA 配位は前駆体化学および界面エネルギー準位の双方を安定化し、Sn-Ge 系ペロブスカイト太陽電池の性能およ

び耐久性を向上させる上で重要な役割を果たすことが示された。また、本研究は、オペランド ESR 測定が鉛フリー型ペロブスカイト太陽電池における電荷移動ダイナミクスをミクロスコピックに解明する有効な手法であることを示すものであり、今後の高安定・高効率デバイス設計に対して重要な指針を与えるものである。

【 7 】 ESR を用いたインドリン色素 D149 増感ダブルペロブスカイト太陽電池の界面電荷状態の解明

本研究では、D149 色素増感 Cs₂AgBiBr₆ 太陽電池における電荷状態および劣化挙動を、微視的観点から検討した。電子スピン共鳴 (ESR) 分光法を用いて、1 SUN 照射下における電子輸送層および正孔輸送層内の電荷キャリアの生成および時間発展を解析した。同時に、長時間光照射中の開放電圧 (V_{oc}) および短絡電流密度 (J_{sc}) の変化を追跡した。その結果、既報のダブルペロブスカイトに存在するトラップ準位に加え、界面電気双極子の形成がデバイス性能劣化を引き起こす要因の一つであることが明らかとなった。D149 の導入により電子抽出が促進され、初期段階では J_{sc} の増加が確認された一方で、光照射の進行に伴い V_{oc} が徐々に低下する挙動が観測された。

以上の結果は、界面における電荷ダイナミクスがデバイス安定性および V_{oc} 特性を支配する重要な因子であることを示しており、高効率かつ高安定なダブルペロブスカイト太陽電池の合理的設計に向けた有用な指針を提供する。

【 8 】 三元系高分子太陽電池材料における電荷蓄積状態と分子配向に関する電子スピン共鳴研究

本研究では、低電圧で駆動可能で、柔軟性を有する有機電気化学トランジスタ (OEET) を用いて、電子スピン共鳴 (ESR) 分光法を生かし、PTzBT 素子内の電荷蓄積状態と分子配向を微視的観点から調べた。その結果、PTzBT 分子中の正孔の観測に成功し、PTzBT のカチ

オン状態の DFT 計算結果および角度変化 ESR 測定から、PTzBT における電荷蓄積は主に face-on 配向で発生することが確認された。3 元系太陽電池と同じの活性層を用いた PTzBT:PC₆₁BM:ITIC の OECT 素子の角度変化 ESR 測定により、電荷注入が少ない場合、電荷蓄積が主に edge-on 配向の分子で発生することに対して、大量の電荷が注入された場合、電荷蓄積は主に face-on 配向の分子で発生することが解明された。

【 9 】ペロブスカイト有機電気化学トランジスタのオペランド ESR 測定による動作機構の解明

本研究では、ペロブスカイトと共役系高分子を積層した構造を応用した有機電気化学トランジスタ (ペロブスカイト OECT) を作製した。電圧印加中のペロブスカイト OECT に ESR 測定を実施して、素子内部の電荷キャリアの様子を直接観測し、素子の電気的特性と微視的な物性の関係性を明らかにした。また、ペロブスカイト OECT の特徴的な動作特性を利用することにより、メモリデバイスとしての応用可能性があることが示された。本研究で得られた知見は、有機薄膜トランジスタの性能向上を目指すうえで、ペロブスカイトを使用した構造の利点を示し、さらなる性能向上を目指すうえで重要である。

【 10 】オペランド ESR 観測による有機半導体の *anti*-/*syn*-構造異性体がトランジスタの電荷輸送特性に与える影響の解明

本研究においては *anti*-/*syn*-DMADT の有機トランジスタに対し、オペランド電子スピン共鳴 (ESR) 計測法を適用した。この手法によりデバイス駆動中のポーラロンを直接観測したところ、C_{2h} 分子対称性を有する *anti*-異性体においては、分裂のない 1 本の明瞭な ESR スペクトルが得られた。しかし、*syn*-異性体では結晶乱れ等が原因と思われる ESR スペクトルの分裂がみられた。これがポテンシャル障壁となり、電荷輸送の妨げとなりうる可能性を示した。

本研究の調査により、有機エレクトロニクスの電荷輸送を妨げるポテンシャル障壁の起源を、オペランド ESR 計測によって特定できる可能性を見出した。有機半導体デバイスの性能向上に貢献し得る微視的観点からの貴重な知見を提供し、将来の有機トランジスタ開発に有用である。

【 11 】多重共鳴 TADF 材料を用いた発光電気化学セルの電荷状態のオペランド ESR 研究

本研究では、LEC の高性能化に向けた指針を得ることを目的として、青色発光 MR-TADF 材料を用いた LEC 素子を作製し、電子スピン共鳴 (ESR) 法により、素子駆動中の電荷状態を非破壊かつ分子レベルで解析した。ESR 測定により得られた信号を密度汎関数理論 (DFT) 計算の結果と比較検討した結果、MR-TADF 材料の正孔ドーピングが進行し、その後に電子ドーピングが生じる過程を明らかにした。

本研究の成果は、MR-TADF 材料を用いた LEC における電荷注入および輸送機構の詳細な理解に寄与するとともに、今後の LEC 素子特性の向上に向けた材料設計およびデバイス設計の指針を与えるものである。

<論文>

1. Y. Shan, H. Kanzawa, J. Huang, T. Yasuda, Y. Shimoi, K. Marumoto, T. Kanbara and J. Kuwabara, "Influence of Phenyl Substitution Position on the Physical Properties of Diazachrysenes", *Asian Journal of Organic Chemistry*, 15, e70356 (2026).
2. W. He, J. Wang, Y. Shimoi and K. Marumoto, "ESR study of charge accumulation in organic photoelectrochemical transistors under gate-voltage sweeps", *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 770, 932-939 (2026).
3. M. Kato, S. Kushida, N. U. Draz, D. Kyotani, E. Smarsly, K. Yoshinaga, W. He, U. H. F. Bunz, K. Marumoto, T. Mori and Y. Yamamoto, "Rational Device Design and Doping-Controlled Performance in Fast-Response π -Ion Gel Transistors", *Advanced*

- Functional Materials*, e21674-1-10 (2026).
4. Y. Chen, A. Sato, S. Yamaguchi, K. Inoue and K. Marumoto, "Charge Transfer at the PEDOT:PSS/Perovskite Interface in RP Sn Perovskite Solar Cells Elucidated by Operando ESR Spectroscopy", *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 38, 333-339 (2025).
 5. J. Wang, D. Xue, S. Inai, I. Osaka and K. Marumoto, "Operando ESR Elucidation of Charge Accumulation and Molecular Orientation in Ternary Polymer Solar Cell Materials Using Organic Electrochemical Transistor Structures", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17, 70634-70640 (2025).
 6. J. Ràfols-Ribé, A. Sato, A. Kirch, X. Zhang, S. Jenatsch, C. Larsen, K. Marumoto and L. Edman, "Pinpointing the Dynamic p-i-n Junction", *PRX Energy*, 4, 033015-1-20. (2025)
 7. N. Ishida, Y. Tsuchido, Y. Shimoi, K. Marumoto, T. Kanbara and J. Kuwabara, "Effects of Ring Strain on Molecular Dynamics of Sterically Hindered 4,7-Phenanthroline Unit", *European Journal of Organic Chemistry*, 28, e202500644 (2025).
 8. A. Sato, K. Inoue, Y. Shimoi and K. Marumoto, "ESR Analysis of Charge-Transporting Materials in Non-Fullerene Organic Solar Cells", *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 38, 121-12 (2025).
 9. M. Yamazoe, N. Tsunetomo, M. Takahashi, Y. Shimoi and K. Marumoto, "Orientation of Charge-Carrier-Injected Molecules in Ambipolar Organic Semiconductor Devices: An Operando Electron Spin Resonance Study", *ACS Applied Electronic Materials*, 7, 7073-7081 (2025).
 10. A. Sato, S. Yamaguchi, A. Hasegawa, Y. Shimoi, T. Nakamura, A. Wakamiya and K. Marumoto, "Electron diffusion at Sn perovskite/fullerene derivative interfaces and its influence on open-circuit voltage", *npj Flexible Electronics*, 9, 47-1-9 (2025).
 11. S. Akagi, M. Tanaka, J. Wang, H. Kiuchi, Y. Harada, Y. Chen, K. Marumoto, K. Imoto, S. Ohkoshi and H. Tokoro, "Pressure-induced water producing using a copper-chromium Prussian blue analog", *Journal of Materials Chemistry A*, 13, 18007-18013 (2025).
 12. R. Meena, O. P. Nagar, B. Kumar, R. J. Chowdhary, A. Sato, K. Marumoto and N. Chouhan, "Electroless plated loading of NiP₂/SnO₂@rGO for enhanced photocatalytic water splitting", *International Journal of Hydrogen Energy*, 135, 195-212 (2025)
 13. P. Yang, Y. Chen, T. Kuroda, H. Morishita, H. Fukumoto, M. Morita, K. Masada, T. Sasamori, K. Kubo, K. Marumoto, R. Inoue, S. Kato and T. Agou, "Dicationic dibenzo[1,4]azaborine with an open-shell electronic structure", *Chemical Communications*, 61,7847-7850 (2025).
 14. W. Dai, D. Xue, H. Kimata, X. Zou, T. Nakamura, A. Wakamiya and K. Marumoto, "Performance Improvement Mechanism of Perovskite Solar Cells by Device Interface Control", *Solar RRL*, 9, e2500183-1-11 (2025).
- < 著書 >
1. 丸本一弘、“電子スピン共鳴(ESR)分光法によるペロブスカイト太陽電池の電荷状態の観測—有機薄膜太陽電池・ペロブスカイト太陽電池の開発最前線—”(分担、第3編第1章第4節 521-528頁)、エヌ・ティー・エス (2025)
- < 総説・解説 >
1. 丸本一弘、スズペロブスカイト太陽電池の性能向上機構の解明、機能材料、第45巻第10号10月号、(2025)
 2. 丸本一弘、スズペロブスカイト太陽電池の性能向上に知見、Optronics、第45巻第522号6月号、(2025)
- < 特許 >
1. 坂口泰基、岡本翔、丸本一弘、“トランジスタ、メモリ、半導体装置、積層体の製造方法及びトランジスタの製造方法”、特願2025-188908(令和7年11月10日)日本

<学会発表>

国際会議

1. Y. Yang, Y. Chen, Y. Shimoi and K. Marumoto, "Deterioration mechanism analysis of double perovskite solar cell using indoline dye D149 as sensitizers", *Materials Research Meeting 2025 (MRM2025)*, PACIFICO Yokohama North, Yokohama, Japan, 2025.12.8-13 (oral).
2. K. Marumoto, "Microscopic Elucidation of Band Bending at Buried Interfaces in Perovskite Solar Cells", *14th Aseanian Conference on Nano Hybrid Solar Cells (NHSC-14)*, National Yang Ming Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, 2025.11.23-25 (oral) <Invited>
3. K. Marumoto, "Electron spin resonance of charge diffusion at buried interfaces in perovskite solar cells", *International Conference on "Role of Chemical Sciences in Sustainable Development"*, online, Pacific Academy of Higher Education and Research University, Udaipur, India, 2025.10.8-9 (oral) <Invited>
4. Y. Shimoi, T. Miura and K. Marumoto, "Molecular simulation on covalent-bond dissociation in epoxy resins: implication to in fatigued CFRPs", *The 10th International Conference on Fatigue of Composites (ICFC10)*, Clark Memorial Student Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2025.7.1-4 (oral)
5. Y. Chen, S. Yamaguchi, A. Sato, K. Inoue and K. Marumoto, "Charge Transfer at the PEDOT:PSS/Perovskite Interface in RP Sn Perovskite Solar Cells Elucidated by Operando ESR Spectroscopy", *The 42nd International Conference of Photopolymer Science and Technology (ICPST-42)*, Arcrea HIMEJI, Himeji, Japan, 2025.6.24-27 (oral)
6. A. Sato and K. Marumoto, "ESR Analysis of Charge-Transporting Materials in Non-Fullerene Organic Solar Cells", *The 42nd*

International Conference of Photopolymer Science and Technology (ICPST-42), Arcrea HIMEJI, Himeji, Japan, 2025.6.24-27 (oral) <Invited>

7. K. Marumoto, "Spin states of organic and inorganic electronic materials and devices by operando microscopic investigation", *The 10th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2025)*, Fukui Prefectural Hall, Fukui, Japan, 2025.6.11-14 (oral) <Invited>

国内会議

1. 丸本一弘「応物 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会連携シンポジウム『ソフトデバイスの物理と応用』はじめに」日本物理学会 2026 年春季大会、応物 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会連携シンポジウム「ソフトデバイスの物理と応用」、東京、2026.3.23（招待講演）
2. 岡本翔、五十住武久、清藤慎太郎、吉野凌平、伊澤誠一郎、丸本一弘「アップコンバージョン型 OLED における電荷状態のオペランド ESR 解析」2026 年第 73 回応用物理学会春季学術講演会、東京、2026.3.15-18
3. 丸本一弘「有機デバイスのオペランド電子スピン共鳴法の開発と基礎学理の探究」第 4 回物質循環電子材料・デバイス講演会、横浜、2026.2.10（招待講演）
4. 丸本一弘「有機無機フレキシブル電子デバイスの電荷スピン状態のオペランド電子スピン共鳴研究」東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻セミナー、柏、2026.1.20（招待講演）
5. 丸本一弘「ペロブスカイト太陽電池の埋もれた界面におけるバンド曲がりと素子性能との相関」オプトロニクスセミナー「日本発のペロブスカイト太陽電池一次なる技術の最前線」、オンライン、2025.12.3（招待講演）
6. 丸本一弘「スズペロブスカイト太陽電池の性能向上機構」技術情報協会セミナー「スズ系ペロブスカイト太陽電池の材料、プロセス技術」、オンライン、2025.12.3（招待講演）

7. 張旭波、劉李祺、陳奕舟、佐藤睦、丸本一弘「正孔輸送層と Sn-Ge ペロブスカイトの界面における電荷移動の ESR 研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
8. 佐藤睦、山口世力、尾坂格、丸本一弘「非フラーレン型有機薄膜太陽電池における分子配向の ESR による評価」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
9. 劉李祺、陳奕舟、佐藤睦、山口世力、丸本一弘「PEAI 界面修飾鉛ペロブスカイト太陽電池における界面電荷蓄積の ESR 直接観測」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
10. 陳奕舟、山口世力、井上開渡、佐藤睦、丸本一弘「ペロブスカイト太陽電池の電荷移動に対する PDINO 界面修飾の効果」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
11. 金子慎太郎、佐藤睦、下位幸弘、チョンミンアン、中村智也、若宮淳志、丸本一弘「スズ鉛ペロブスカイト太陽電池の界面修飾層の ESR 研究：安定性向上メカニズムの解明に向けて」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
12. 川久保怜、岡部紗代、坂口泰基、下位幸弘、丸本一弘「 $\text{PhC}_2\text{-BQQDI}$ を用いた n 型有機トランジスタの電荷蓄積と分子配向のオペランド ESR 研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
13. 渡辺陽太、金子慎太郎、陳奕舟、佐藤睦、楊彦秋、下位幸弘、丸本一弘「鉛ペロブスカイト太陽電池の電荷状態に対するスルホニウム塩界面修飾効果の ESR 研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
14. 山崎渉吾、坂口泰基、何文皓、下位幸弘、丸本一弘「n 型有機半導体 BBL を用いた有機電気化学トランジスタの電荷状態のオペランド ESR 研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
15. 内海雄太、佐藤睦、下位幸弘、丸本一弘「鉛ペロブスカイト太陽電池中のドーパントフリー正孔輸送層-正孔収集層間の電荷拡散の ESR 研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
16. 五十住武久、高橋優羽、南藤理花、下位幸弘、山岡敬子、アルブレヒト建、丸本一弘「デンドリマー型 TADF を用いた発光電気化学セルのオペランド ESR 計測：動作機構の研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
17. 高橋優羽、南藤理花、中島美華、下位幸弘、畠山琢次、丸本一弘「多重共鳴熱活性化遅延蛍光材料を用いた青色発光電気化学セルの電荷状態の研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
18. 王佳曦、薛冬、稲井聡志、下位幸弘、尾坂格、丸本一弘「有機電気化学トランジスタを用いた三元系高分子太陽電池材料の電荷挙動および分子配向の ESR 解析」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
19. 宗宮若葉、何文皓、下位幸弘、丸本一弘「有機半導体の構造異性体に依存した電荷状態に関するオペランド ESR 法を用いたマイクロ解明」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
20. 楊彦秋、陳奕舟、下位幸弘、丸本一弘「D149 色素増感ダブルペロブスカイト太陽電池の界面電荷状態のオペランド ESR 観測」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
21. 坂口泰基、岡部紗代、下位幸弘、丸本一弘「ペロブスカイト有機電気化学トランジスタの ESR 測定による電荷蓄積状態の研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
22. 何文皓、王佳曦、下位幸弘、丸本一弘「有機光電気化学トランジスタにおけるゲート電圧により蓄積された電荷に関する ESR 研究」第 64 回電子スピンサイエンス学会年会、桐生、2025.11.21-23
23. 丸本一弘「逆構造スズペロブスカイト太陽電池の界面電荷移動の ESR 直接観測」AndTech セミナー「逆構造型ペロブスカイト太陽電池」、オンライン、2025.11.14（招待講演）
24. 丸本一弘「ペロブスカイト太陽電池最前線：ESR による動作メカニズム解明と高効率化・長寿命化への指針」日刊工業新聞社セミナー、オンライン、2025.9.18（招待講演）
25. 内海雄太、佐藤睦、下位幸弘、丸本一弘「ドーパントフリー鉛ペロブスカイト太陽電池における正

- 孔輸送層-正孔収集層間の電荷拡散の電子スピン共鳴研究」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
26. 宗宮若葉、何文皓、下位幸弘、丸本一弘「有機電気化学トランジスタを用いた有機半導体の構造異性体の電荷状態の ESR 研究」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 27. 何文皓、王佳曦、坂口泰基、下位幸弘、丸本一弘「PEDOT:PSS チャネル有機電気化学トランジスタにおけるアスコルビン酸検出過程に関する ESR 研究」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 28. 坂口泰基、岡部紗代、下位幸弘、丸本一弘「ペロブスカイト有機電気化学トランジスタのオペランド ESR 測定による動作機構解明」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 29. 下位幸弘、丸本一弘、水野斎「(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー BP2T-CN の結晶多形に関する DFT 計算」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 30. 張旭波、劉李祺、陳奕舟、佐藤睦、丸本一弘「Sn-Ge ペロブスカイト太陽電池の界面における電荷移動の直接観測」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 31. 金子慎太郎、佐藤睦、下位幸弘、チョンミンアン、中村智也、若宮淳志、丸本一弘「スズ鉛ペロブスカイト太陽電池の安定性向上メカニズムの解明に向けた界面修飾層の ESR 研究」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 32. 楊彦秋、陳奕舟、下位幸弘、丸本一弘「D149 色素を用いたダブルペロブスカイト太陽電池の劣化機構解析」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 33. Y. Chen, S. Yamaguchi, K. Inoue, A. Sato, K. Marumoto"ESR Study on PDINO Interfacial Modification Effects at ETL/Metal Interfaces"2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 34. 劉李祺、陳奕舟、佐藤睦、山口世力、丸本一弘「ペロブスカイト太陽電池における PEAI 界面修飾効果の ESR 解明」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 35. 高橋優羽、南藤理花、中島美華、下位幸弘、畠山琢次、丸本一弘「多重共鳴 TADF 材料を用いた青色 LEC のスピン状態のオペランド ESR 研究」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 36. 五十住武久、高橋優羽、南藤理花、下位幸弘、山岡敬子、アルブレヒト建、丸本一弘「黄色発光 dendrimer 型 TADF LEC に対するオペランド ESR を用いた電荷状態の解明」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 37. 川久保怜、岡部紗代、坂口泰基、下位幸弘、丸本一弘「n 型低分子有機半導体 PhC₂-BQQDI を用いた有機電気化学トランジスタの電荷蓄積に関する ESR 研究」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 38. 山崎渉吾、坂口泰基、何文皓、下位幸弘、丸本一弘「n 型高分子 BBL を用いた有機電気化学トランジスタにおける電荷キャリア挙動と分子配向の ESR 研究」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 39. 佐藤睦、山口世力、尾坂格、丸本一弘「太陽電池構造中における非フラーレン型アクセプタの配向性の ESR 分光法を用いた解析」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 40. 渡辺陽太、金子慎太郎、陳奕舟、佐藤睦、楊彦秋、下位幸弘、丸本一弘「スルホニウム塩を界面修飾に用いた鉛ペロブスカイト太陽電池における電荷移動の電子スピン共鳴による直接観測」2025 年第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋、2025.9.7-10
 41. 丸本一弘「ペロブスカイト太陽電池の高効率化」公益財団協和協会・時代を刷新する会 第 383 回新エネルギー委員会、東京、2025.9.4（招待講演）
 42. 丸本一弘「ペロブスカイト太陽電池の動作機構と高性能化」2025 年第 8 回サワケセミナー、オンライン、2025.7.30（招待講演）
 43. 丸本一弘「有機・無機電子材料・デバイスのスピン状態のオペランド電子スピン共鳴研究」大阪大学工学研究科電気電子情報通信工学専攻有機フレキシブルシステム領域セミナー、吹田、2025.6.17

(招待講演)

44. 丸本一弘「電子スピン共鳴を用いたペロブスカイト太陽電池向け低コスト正孔輸送材料の性能低下の原因の解明」AndTechセミナー「ペロブスカイト太陽電池 電子輸送層・正孔輸送層」、オンライン、2025.5.26 (招待講演)
45. 丸本一弘「ペロブスカイト太陽電池の動作メカニズム：電荷状態のオペランドマイクロ観測による高性能化指針」日刊工業新聞社セミナー、オンライン、2025.5.19 (招待講演)