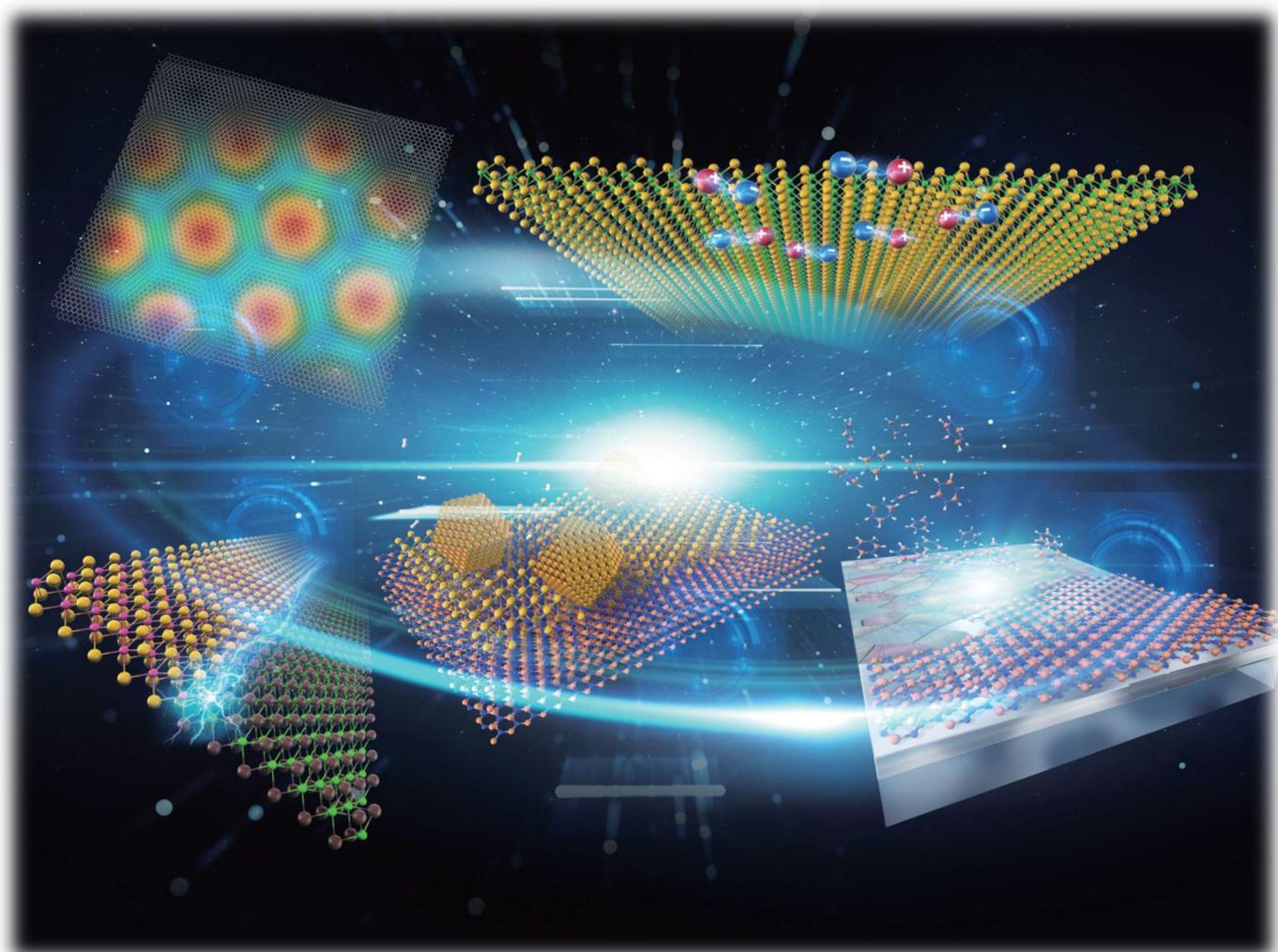


2.5次元物質科学

社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト

2024-2025年度 活動報告



2024-2025 年度 活動報告 目次

1 はじめに 領域代表 吾郷 浩樹

2 研究者等 一覧

3 活動内容

3-1 総括班会議

3-2 領域会議

3-2-1 第7回領域会議@京都大学 2024/6/14-15

3-2-2 第8回領域会議@東京大学 2024/12/8-9

3-2-3 第9回領域会議@東京科学大学 2025/6/12-13

3-2-4 第10回領域会議・第4回公開シンポジウム@九州大学 2026/1/23-24

3-3 公開シンポジウム

3-3-1 第2回公開シンポジウム 2024/8/8

3-3-2 第3回公開シンポジウム 2025/8/6

3-4 若手交流会

3-5 国際ワークショップ

3-5-1 RPGR2025

3-5-2 UK-Japan Symposium on 2D Materials

3-5-3 International Czech – Japan Symposium on Advanced MultiScale Materials

3-5-4 新材料に関する第15回A3シンポジウム

3-5-5 NT'25

3-5-6 Pacifichem 2025

3-5-7 FNTG

3-6 国際連携セミナー

3-7 産学官協働ミーティング

3-8 領域内共同研究セミナー

3-9 物性科学領域横断研究会

3-9-1 第18回物性科学領域横断研究会

3-9-2 第19回物性科学領域横断研究会

3-10 サンプル見本市・理論相談会

3-11 その他のイベント

3-11-1 第105日本化学会 春季年会 シンポジウム特別企画

3-11-2 日本物理学会 第80回年次大会 シンポジウム

3-11-3 領域共催セミナー・特別講演会

3-12 栄転・昇進

4 計画班 研究成果

- A01 班：2.5次元構造体のための物質創製（物質創製班）
- A02 班：2.5次元集積構造の構築（集積化班）
- A03 班：2.5次元構造体の分析技術開発（分析班）
- A04 班：2.5次元構造の新奇物性開拓（物性開拓班）
- A05 班：2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開（機能創出班）

5 公募班 研究成果

- A01 班：2.5次元構造体のための物質創製（物質創製班）
- A02 班：2.5次元集積構造の構築（集積化班）
- A03 班：2.5次元構造体の分析技術開発（分析班）
- A04 班：2.5次元構造の新奇物性開拓（物性開拓班）
- A05 班：2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開（機能創出班）

6 プレスリリース

7 ニュースレター

- 7-1 ニュースレター Vol. 29 ～59
- 7-2 ニュースレター特別号

8 アウトリーチ活動

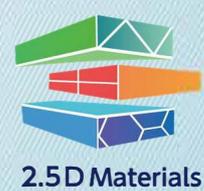
9 海外派遣報告

- 江本 暁（九州大学／A01 吾郷研）
- 本田 航大（名古屋大学／A03 高橋研）

10 共同利用拠点

- 10-1 共同利用拠点一覧
- 10-2 共同利用拠点 利用状況

1. はじめに



はじめに

2024-2025 年度 領域活動報告発行に際して

「2.5次元物質」という斬新な物質科学のコンセプトを提案して始まった本領域も、約4年半の活動を経て、2026年3月で終わりを迎えます。私たちの領域では、領域内共同研究をはじめ、年2回の領域会議、国内外での研究会やシンポジウム、若手会や海外インターンシップ支援、ホームページ・ニュースレター・漫画による広報など多岐にわたる活動を積極的に行ってきました。このような活動を広く知ってもらい、また記録として残すため、この「2024-2025年度」活動報告を作成しました（これまでの「2021-2022年度活動報告」、「2023年度活動報告」も、領域のホームページでご覧いただけます）。

本活動報告において、「2.5次元物質科学」の掛け声の下、私たちの領域メンバーがいかに精力的に、そして幅広く多くのことに挑戦してきたことが分かっていただけたと思います。特に、2025年度は日本の研究アクティビティを世界に示すため、本領域が主体となって2025年11月に富山で国際会議「RPGR2025 (International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research)」を開催しました。15か国から370名を超える参加者があり、成功裡に終わりました。また、領域立ち上げ時に班長らと一緒に執筆した Science and Technology of Advanced Materials (STAM) 誌のレビュー論文がその年の最も注目を集めた論文に選ばれ、2025年3月に STAM Award をいただくことができました。

もちろん研究活動においても、非常に多くの進展が見られ、世界をリードする成果も数多く出ています。特に、領域内の共同研究を通じて、モアレ科学、ヤヌス構造、二次元ナノ空間科学といった研究が著しく進展しました（領域のニュースレター 51~53号に詳しく書かれています）。「2.5次元物質」の「0.5（プラスアルファ）」を研究者自身で定義して研究を展開していく、というスタイルが、異分野を含む多くの研究者の参加と研究シーズの導入を促し、共同研究に大きな広がりをもたらしました。そういった点において、私たちのユニークな領域名はとても良かったと感じています。また、何より覚えやすく、海外の研究者への認知向上にも役立ちました。上記の領域の研究成果は、CREST、さきがけ研究、創発研究、次世代エッジ半導体プロジェクトなどにつながって、今後、ますます発展していくものと期待されます。また、高い研究レベルを反映し、A01の渡邊さん（領域内共同研究を推進するため、当領域では「さん」付けキャンペーンをしています）の朝日賞をはじめ、領域メンバーが多くの賞を受賞しました。これらの詳細については、各研究者の成果のページをご覧ください。

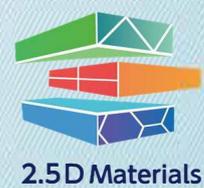
この領域の存在が、これから先の我が国のサイエンスとテクノロジーにインパクトを与え、研究レベルの向上、研究の広がり、若手の育成につながったと言われるようになって信じています。現在、領域最後の大きな取り組みとして、A04の高村さんの協力を得てSTAM誌のFocus Issue（特集号）の企画を進めています。この特集号では、“Science and Technology of 2.5D Materials”をメインテーマに、レビュー論文とオリジナル論文の計10報以上を含める予定です。この出版により、2.5D materialsのコンセプトと領域研究の成果を海外に向けて発信するとともに英語の論文として残す、といった点で非常に重要なものになると考えています。

上記のように、この4年半、領域の成功、そして我が国の科学技術の向上を目指して、領域メンバー全員で、全力で取り組んできました。領域研究者はもちろん、研究室の若手研究者や学生のみなさん、領域アドバイザー、広報スタッフ、そして本領域の運営を大きく支えていただいた事務局スタッフに深く感謝します。同時に、領域を支援いただいた文部科学省、学術調査官、大学・研究所の事務スタッフの方々、その他多くの関係者のご支援に厚くお礼申し上げます。

2026年3月吉日

「2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」
領域代表 吾郷 浩樹（九州大学大学院総合理工学研究院 主幹教授）

2. 研究者等 一覽



2. 研究者等 一覧 (2026年2月時点)

■ 総括班

吾郷 浩樹	九州大学	領域代表・共同利用拠点運営
岡田 晋	筑波大学	領域副代表・理論計算支援・共同利用拠点運営
宮田 耕充	物質・材料研究機構	若手育成支援
松田 一成	京都大学	研究推進支援・共同利用拠点運営
越野 幹人	大阪大学	理論計算支援
上野 貢生	北海道大学	情報発信支援
長汐 晃輔	東京大学	情報発信支援・共同利用拠点運営
町田 友樹	東京大学	共同利用拠点運営
櫻井 英博	大阪大学	研究推進支援
高村(山田) 由起子	北陸先端科学技術大学院大学	国際連携支援・共同利用拠点運営
西堀 英治	筑波大学	大型装置共同利用支援
大野 雄高	名古屋大学	産学官連携支援
蒲 江	東京科学大学	若手育成支援

■ 領域アドバイザー・評価委員

金子 克美	信州大学 特別特任教授
斉木 幸一郎	東京大学 名誉教授
斎藤 晋	東京科学大学 特命教授/名誉教授
横山 直樹	富士通株式会社 名誉フェロー
齋藤 理一郎	東北大学 名誉教授
Stephan Roche	Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology, Spain
Young Hee Lee	Sungkyunkwan University, South Korea
Junichiro Kono	Rice University, USA
Chun-wei Chen	National Taiwan University (NTU), Taiwan

■ 領域サポートスタッフ

柏田 百代	領域広報担当
門田 英子	イラストレーター・サイエンスコミュニケーター
工藤 朋子	領域セクレタリー
福田 亜由美	領域セクレタリー

■ 計画班

A01班：2.5次元構造体のための物質創製 (物質創製班)			
研究代表者	岡田 晋	筑波大学 数理物質系	DFTによる新規物質の設計と計算支援
研究分担者	吾郷 浩樹	九州大学 大学院総合理工学研究院	二次元物質のCVD成長とインターカレーション
研究分担者	櫻井 英博	大阪大学 大学院工学研究科	有機合成に基づく擬二次元構造の創製
研究分担者	渡邊 賢司	物質・材料研究機構	高品質h-BNの高圧合成と気相成長

A02班：2.5次元集積構造の構築 (集積化班)			
研究代表者	宮田 耕充	物質・材料研究機構	2.5次元物質の化学気相成長と集積化
研究分担者	町田 友樹	東京大学 生産技術研究所	ロボティック積層による集積構造の構築
研究分担者	荒井 俊人	物質・材料研究機構	液相/印刷プロセスによる自己組織化分子膜形成
研究分担者	松本 里香	東京工芸大学 工学部	インターカレーションによるナノ空間の活用

A03班：2.5次元構造体の分析技術開発 (分析班)			
研究代表者	松田 一成	京都大学 エネルギー理工学研究所	2.5次元物質の光技術と機能開発
研究分担者	西堀 英治	筑波大学 数理物質系	先端放射光X線回折による2.5次元物質の構造評価
研究分担者	末永 和知	大阪大学 産業科学研究所	最先端電子顕微鏡を用いた2.5次元物質の原子レベル構造解析
研究分担者	坂野 昌人	電気通信大学 大学院情報理工学研究科	2.5次元物質におけるバンド構造の直接観測

A04班：2.5次元構造の新奇物性開拓 (物性開拓班)			
研究代表者	越野 幹人	大阪大学 大学院理学研究科	ハイブリッド・モアレ物質の物性理論と新機能開拓
研究分担者	高村 由起子	北陸先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科	シリセンなど単一組成原子膜と複層化による新奇電子物性創出
研究分担者	笹川 崇男	東京科学大学 総合研究院	結晶成長(トポロジカル物質、超伝導物質)を駆使したエキゾチック物性開拓
研究分担者	蒲江	東京科学大学 理学院	多様な2.5次元物質の電気伝導・光伝導・熱電特性の機能発現

A05班：2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開 (機能創出班)			
研究代表者	上野 貢生	北海道大学 大学院理学研究院	2.5次元材料による化学センサ・光エネルギー変換デバイス
研究分担者	長汐 晃輔	東京大学 大学院工学系研究科	2.5次元界面制御によるトランジスタ特性制御
研究分担者	大野 雄高	名古屋大学 未来材料・システム研究所	2.5次元材料に基づくフレキシブルエレクトロニクスの創製
研究分担者	松尾 吉晃	兵庫県立大学 大学院工学研究科	2.5次元材料の蓄電デバイスへの応用

■公募班 [第2期：2024.4.1～2026.3.31]

A01班：2.5次元構造体のための物質創製 (物質創製班)			
研究代表者	加藤 幸一郎	九州大学 大学院工学研究院	データ駆動型2.5次元物質モアレ超格子の探索と物性支配因子の抽出
研究代表者	加藤 俊顕	東北大学 大学院工学研究科	アトミックレイヤーファンクショナリゼーションによるヤヌス原子層科学の構築
研究代表者	小澤 大知	物質・材料研究機構	単一分子誘起2.5次元物質の創製と光物性・機能開拓
研究代表者	相馬 拓人	東北大学 多元物質科学研究所	3D層状結晶が生み出す新しい2D物質の創製
研究代表者	田代 省平	東京大学 大学院理学系研究科	2.5次元凸凹ナノ空間の転写による二次元物質表面での分子配列制御
研究代表者	平井 大悟郎	名古屋大学 大学院工学研究科	ハイエントロピー遷移金属ダイカルコゲナイドの創製と物性開拓
A02班：2.5次元集積構造の構築 (集積化班)			
研究代表者	菅 大介	大阪大学 大学院工学研究科	材料次元性の異なるナノシート結晶の積層・集積と機能開発
研究代表者	菅原 克明	東北大学 大学院理学研究科	ナノ空間を活用した2.5次元TMDs層間化合物の創生と電子物性解明
研究代表者	鈴木 弘朗	岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域	2次元物質とペロブスカイトナノ構造から成る2.5次元物質の構造制御と光電子機能開拓
A03班：2.5次元構造体の分析技術開発 (分析班)			
研究代表者	熊谷 崇	分子科学研究所 メソスコピック計測研究センター	超高速・超広帯域近接場顕微分光で拓く2.5次元物質の光科学
研究代表者	杉本 宜昭	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	走査プローブ顕微鏡を用いた単原子層物質への分子配列
研究代表者	高橋 康史	名古屋大学 大学院工学研究科	2.5次元材料の触媒活性サイトの電気化学イメージング
研究代表者	柳 和宏	東京都立大学 大学院理学研究科	原子層積層界面における界面構造と熱・電荷輸送の関係解明
A04班：2.5次元構造の新奇物性開拓 (物性開拓班)			
研究代表者	井手上 敏也	東京大学 物性研究所	2.5次元物質の量子相における新奇高周波電磁応答の開拓
研究代表者	塩見 雄毅	東京大学 大学院総合文化研究科	2.5次元物質におけるスピン電流変換の制御と効率化
研究代表者	藤井 瞬	慶應義塾大学 理工学部	超高速光計測で拓く原子層二次元物質の動的界面エンジニアリング
研究代表者	松岡 秀樹	東京大学 生産技術研究所	インターカレーション技術を用いた磁性の制御と新規開拓
A05班：2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開 (機能創出班)			
研究代表者	小野 倫也	神戸大学 大学院工学研究科	計算科学による2次元ナノ空間でのキャリア伝導と物質創製プロセスの解析・デザイン
研究代表者	山本 真人	関西大学 システム理工学部	強相関ゲート二次元半導体FETの創製

■ 公募班 [第1期：2022.6.16～2024.3.31]

* 所属表記は2024年3月時点

A01班：2.5次元構造体のための物質創製 (物質創製班)			
研究代表者	加藤 幸一郎	九州大学 大学院工学研究院	データ科学と第一原理計算の融合によるヘテロ積層型2.5次元材料のデザイン指針探索
研究代表者	加藤 俊顕	東北大学 大学院工学研究科	アトミックレイヤーファンクショナリゼーションによるヤヌス原子層科学の開拓
研究代表者	黒澤 昌志	名古屋大学 大学院工学研究科	大気・熱安定性に優れる14族2.5次元物質の創製と熱電応用への展開
研究代表者	田代 省平	東京大学 大学院理学系研究科	環状中空分子の二次元集積化に基づく2.5次元ナノ空間の創製と機能化
研究代表者	久木 一郎	大阪大学 大学院基礎工学研究科	水素結合でネットワーク化した2次元有機結晶の積層による2.5次元物質創成
研究代表者	毛利 真一郎	立命館大学 理工学部	ナノ結晶・分子集積による「2.5次元モアレ超格子」の創製とその物性解明
研究代表者	蓬田 陽平	東京都立大学 大学院理学研究科	2.5次元遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブの創製とその大表面積応用

A02班：2.5次元集積構造の構築 (集積化班)			
研究代表者	上野 啓司	埼玉大学 大学院理工学研究科	ファンデルワールス積層構造のための新規バップァ層物質：硫化ガリウムへの応用
研究代表者	北浦 良	物質・材料研究機構	1.5次元から2.5次元への展開に基づく新物質群創出
研究代表者	田中 秀和	大阪大学 産業科学研究所	2次元層状物質表面場を利用した良質異種結晶の創製と機能集積

A03班：2.5次元構造体の分析技術開発 (分析班)			
研究代表者	杉本 宜昭	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	走査プローブ顕微鏡を用いた2.5次元物質の創製と評価
研究代表者	高橋 康史	名古屋大学 大学院工学研究科	2.5次元材料における局所触媒活性の実空間イメージング
研究代表者	柳 和宏	東京都立大学 大学院理学研究科	格子不整合二次元ナノ界面における熱・電荷輸送の相関の解明と制御
研究代表者	Lin Yung-Chang	産業技術総合研究所	原子レベルでの層間インターカレーション機構のリアルタイム可視化技術の開発

A04班：2.5次元構造の新奇物性開拓 (物性開拓班)			
研究代表者	塩見 雄毅	東京大学 大学院総合文化研究科	2.5次元物質における高効率スピン電流変換
研究代表者	若林 克法	関西学院大学 工学部	2.5次元物質における光学応答効果と光・電子機能設計の理論

A05班：2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開 (機能創出班)			
研究代表者	石井 史之	金沢大学 ナノマテリアル研究所	不整合ファンデルワールスヘテロ構造の熱電効果とスピン軌道結合係数の第一原理計算
研究代表者	小野 倫也	神戸大学 大学院工学研究科	計算科学手法による2次元ナノ空間でのキャリア伝導予測と高性能デバイスデザイン
研究代表者	河野 行雄	中央大学 理工学部	カーボン系原子層物質の空間次元制御による新規テラヘルツ・赤外機能素子・計測の創出
研究代表者	山本 真人	関西大学 システム理工学部	二次元強相関酸化物の創製とファンデルワールスヘテロ構造デバイスへの展開

3. 活動内容



3. 活動内容

3-1 総括班会議

2024年6月14日	第20回領域ミーティング [計画班] (京都大学)
2024年6月15日	第21回領域ミーティング [総括班] (京都大学)
2024年7月15日	総括班特別ミーティング [総括班] (九州大学)
2024年9月11日	第22回領域ミーティング [総括班] (オンライン)
2024年12月9日	第23回領域ミーティング [総括班] (東京大学)
2025年2月25日	第24回領域ミーティング [総括班] (オンライン)
2025年6月13日	第25回領域ミーティング [総括班] (東京科学大学)
2026年1月23日	第26回領域ミーティング [総括班] (九州大学)

3-2 領域会議

研究状況の進捗確認および領域内での共同研究を推進するため、半期に1回PI全員が発表する形式にて領域会議を開催した。

3-2-1 第7回領域会議

第2期公募により新しく加わったメンバーを迎え、過去最多を更新する121名の参加登録があり、115名が参加し、京都大学にて開催した。新規採択の公募班PIは個々の研究内容について紹介、継続のPIについては成果や進捗について発表し、共同研究推進のための議論を行った。これまでと同様に、若手のエンカレッジを目的としてポスター発表における「若手奨励賞」を設定し、PIの審査により8名の学生に授与された。

日時：2024年6月14日～15日

場所：京都大学 宇治キャンパス おうばくプラザ 1階 きはだホール

プログラム 2024年6月14日（金）

- 9:30～ 9:35 開会挨拶（松田）
- 9:35～ 9:45 領域説明（吾郷）
- 9:45～11:20 A04班 発表
- 11:50～12:30 A02班① 発表
- 昼食休憩（計画班ミーティング*）
- 13:40～14:25 A02班② 発表
- 14:25～15:05 A01班① 発表
- 15:35～16:50 A01班② 発表
- 16:50～17:10 特別講演：領域アドバイザー 金子先生
- 17:10～18:00 ポスター発表①
- 18:00～18:50 ポスター発表②
- 19:00～21:00 懇親会

*計画班ミーティング開催 12:30～13:40



プログラム 2024年6月15日（土）

- （総括班ミーティング**）
- 9:30～10:55 A03班 発表
- 11:25～12:25 A05班 発表
- 12:25～12:45 講評（領域アドバイザー、学術調査官）
- 12:45～13:00 若手奨励賞表彰式
- 13:00～13:05 閉会挨拶（岡田）

**総括班ミーティング開催 9:00～9:30

午後から研究室見学・サンプル見本市・理論相談会実施



第7回領域会議の様子



第7回領域会議での集合写真

若手奨励賞 受賞者 [8名]

仲川 久礼亜 (東京大学、博士課程3年)

「カイラル磁性体 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ におけるカイラルソリトンの生成・消滅」

岡崎 尚太 (東京工業大学、博士課程1年)

「磁性元素を分数規則挿入した TMD における新奇トポロジカル電子相開拓」

江本 暁 (九州大学、修士課程2年)

「大面積数層 hBN の CVD 成長と磁気トンネル接合素子への応用」

楊 瀟涵 (東京大学、博士課程2年)

「STEM observation of 1D moire in large-angle twisted bilayer WTe_2 」

川瀬 仁平 (東京大学、修士課程2年)

「グラフェン/TMD/グラフェン接合におけるスピン保存共鳴トンネル効果」

北村 天太 (東京工業大学、修士課程1年)

「歪み印加した原子層デバイスの作製と電子構造評価」

中辻 直斗 (大阪大学、特任研究員)

「ツイスト三層遷移金属ダイカルコゲナイトにおける格子緩和と電子状態」

田母神 唯 (東京都立大学、博士課程1年)

「Interlayer excitons in WS_2/WSe_2 heterobilayers grown on hexagonal boron nitride」



若手奨励賞受賞者の皆さんと表彰式の様子

3-2-2 第8回領域会議

領域内より前回の過去最多の参加者を上回る 134 名が参加し、東京大学山上会館にて対面開催した。計画班と公募班の全員が共同研究の進捗や成果について報告を行った。ポスター発表においては、大学院生や若手研究者が熱心に説明する姿が見られ、特に優れたポスター発表者 9 名に若手奨励賞が授与された。

日時：2024 年 12 月 8 日～9 日

場所：東京大学 山上会館 大会議室

プログラム 2024 年 12 月 8 日 (日)

- 11:00～12:00 研究室見学 (長汐 G、坂野 G)
- 13:00～13:03 開会挨拶 (長汐)
- 13:03～13:13 領域説明 (吾郷)
- 13:13～14:31 A05 班 発表
- 15:01～16:45 A04 班 発表
- 16:45～17:30 ポスター発表①
- 17:30～18:15 ポスター発表②
- 18:30～20:30 懇親会



プログラム 2024 年 12 月 9 日 (月)

- 9:00～10:18 A03 班① 発表
- 10:48～11:14 A03 班② 発表
- 11:14～11:40 A02 班① 発表
- 昼食休憩 (総括班ミーティング*)
- 13:00～14:05 A02 班② 発表
- 14:05～14:57 A01 班① 発表
- 15:27～16:45 A01 班② 発表
- 16:45～17:05 講評 (領域アドバイザー、学術調査官)、若手奨励賞表彰式
- 17:05～17:10 閉会挨拶 (岡田)

*総括班ミーティング開催 11:40～13:00



第8回領域会議の様子



第8回領域会議での集合写真

若手奨励賞 受賞者 [9名]

前田 誠貴 (東京科学大学、修士課程2年)

「多形制御した TaSe₂の単結晶作製と電子輸送特性評価」

西島 皓平 (東京大学、修士課程1年)

「Force-Induced Structural Change of Trioxosumanene with Scanning Probe Microscopy」

西上 莉楓 (東北大学、修士課程1年)

「VTe_{2-x} 薄膜の高分解能 ARPES」

夏井 隆佑 (東京都立大学、博士課程1年)

「Anisotropic Optical Properties of Bundles Composed of W₆Te₆ Atomic Wires」

荻田 俊貴 (東京大学、修士課程2年)

「h-BN/グラフェン/黒リンにおけるバルク光起電力効果の観測」

辻 悠基 (東京大学、博士課程1年)

「欠陥アシストトンネルを用いたグラフェンのサイクロトロン共鳴吸収検出」

本田 航大 (名古屋大学、博士課程1年)

「遷移金属ダイカルコゲナイドの触媒活性評価」

高橋 悠太 (慶應義塾大学、修士課程1年)

「表面弾性波デバイス上の単層 WSe₂における励起子発光特性の動的変調」

Mian WEI (東京大学、Postdoc)

「Effect of Nb Doping Concentration on the Characteristics of Monolayer MoS₂」



若手奨励賞受賞者の皆さんと表彰式の様子

3-2-3 第9回領域会議

領域内から 114 名が参加し、計画班と公募班の全員が共同研究の進捗や成果について報告を行った。また、学術変革領域研究(A)「超セラミックス」代表の前田先生にもご講演をいただいた。ポスター発表においては、大学院生や若手研究者が熱心に説明する姿が見られ、特に優れたポスター発表者7名に若手奨励賞が授与された。

日時：2025年6月12日～13日

場所：東京科学大学 西9号館 デジタル多目的ホール

プログラム 2025年6月12日(木)

- 11:00～12:00 研究室見学(蒲江 G、相馬 G)
- 13:10～13:15 開会挨拶(蒲江)
- 13:15～13:30 領域説明(吾郷)
- 13:30～14:50 A03 班 発表
- 15:20～15:50 前田 和彦 氏(超セラミックス領域代表) 招待講演
- 15:50～16:50 A05 班 発表
- 17:00～17:50 ポスター発表①
- 17:50～18:40 ポスター発表②
- 19:00～21:00 懇親会



プログラム 2025年6月13日(金)

- 9:30～10:40 A01 班① 発表
- 11:10～11:40 A01 班② 発表
- 11:40～12:00 A02 班① 発表
- 昼食休憩(総括班ミーティング*)
- 13:30～14:20 A02 班② 発表
- 14:20～14:40 A04 班① 発表
- 15:10～16:10 A04 班② 発表
- 16:20～16:40 講評(領域アドバイザー、学術調査官)
- 16:40～16:55 若手奨励賞表彰式
- 16:55～17:00 閉会挨拶(岡田)

*総括班ミーティング開催 12:00～13:30



第9回領域会議の様子



第9回領域会議での集合写真

若手奨励賞 受賞者 [7名]

渥美 圭脩 (東京大学、博士課程2年)

「MOCVD 成長MoS₂単一粒・連続膜による極小チャネルデバイス評価」

村田 陵河 (東京科学大学、博士課程3年)

「van der Waals マルチフェロイック CuCrP₂S₆のバルク光起電力効果」

西村 有紗 (東京大学、修士課程2年)

「ReSe₂/h-BN/ReSe₂ファンデルワールスヘテロ接合における共鳴トンネル効果」

加藤 大尊 (東京科学大学、修士課程2年)

「新規 NbS₂系インターカレーション化合物の単結晶育成と超伝導探索」

鎌田 一輝 (分子科学研究所、博士課程1年)

「表面フォノンポラリトンの超高速ナノイメージング」

小子内 行羅 (九州大学、博士課程1年)

「金属触媒に CVD 合成した多層六方晶窒化ホウ素の特異なラマンピーク」

榊原 涼太郎 (物質・材料研究機構、研究員)

「Improved Strain Engineering of Monolayer TMDs Grown on Graphene/SiC」



若手奨励賞受賞者の皆さんと表彰式の様子

3-2-4 第10回領域会議・第4回公開シンポジウム

本領域の集大成として、公開シンポジウムを兼ねた第10回領域会議を九州大学にて開催し、領域内外より112名が参集した。丸2日間にわたり領域研究者全員がこれまでの研究成果を発表した。また、「イオン渋滞学」領域代表の東京大学の一杉先生をお招きしご講演いただいた。ポスター発表では厳正な審査の結果、優秀な発表を行った学生9名に若手奨励賞を授与した。領域研究を総括するにふさわしく、活発な議論が交わされる盛会となった。

日時：2026年1月23日～24日

場所：九州大学 総合研究棟(C-CUBE)1F 筑紫ホール



プログラム 2026年1月23日(金)

9:30～9:45 開会挨拶・領域説明(吾郷)

9:45～10:49 A04班①発表

11:19～12:07 A04班②発表

12:07～12:55 A03班①発表

昼食休憩(施設見学*)

13:55～14:59 A03班②発表

15:30～15:54 A05班①発表

15:54～16:10 A01班①発表

16:10～16:40 一杉 太郎 氏(イオン渋滞学領域代表)招待講演

16:40～17:30 ポスター発表①

17:30～18:20 ポスター発表②

*プラズマ核融合の大型実験施設 QUEST を見学



プログラム 2026年1月24日(土)

9:30～10:34 A05班②発表

10:34～11:06 A01班②発表

11:36～12:28 A01班③発表

昼食休憩(総括班ミーティング**、研究室見学***)

13:28～14:04 A01班④発表

14:04～14:52 A02班①発表

15:22～16:14 A02班②発表

16:14～16:34 講評(領域アドバイザー、学術調査官)

16:34～16:54 若手奨励賞表彰式

16:54～17:00 閉会挨拶(岡田)

**総括班ミーティング開催 12:28～13:28

***吾郷研究室の見学



第10回領域会議の様子



第10回領域会議での集合写真

若手奨励賞 受賞者 [9名]

伊藤 美香 (東京大学、修士課程1年)

「p-MoS₂/h-BN/p-MoS₂共鳴トンネル接合における負性微分抵抗を用いた高周波発振」

山本 快知 (九州大学、博士課程2年)

「二層 MoS₂ナノリボンの配向成長」

神澤 英寿 (慶應義塾大学、修士課程1年)

「表面弾性波による半導体二次元材料の第二高調波発生的高速変調」

池辺 翔真 (大阪大学、修士課程1年)

「スマネンを用いた新規 COF の合成と機能探索」

小川 瑠介 (筑波大学、修士課程2年)

「2.5次元物質の放射光マイクロビーム先端計測」

石井 俊匡 (東京大学、博士課程1年)

「wafer-scale での WSe₂ を用いた p-type FET の検証」

森 義聖 (東京科学大学、修士課程2年)

「van der Waals 強磁性体 NbFeTe₂の単結晶育成と磁気輸送特性評価」

柳沢 幸紀 (東北大学、博士課程2年)

「原子層 TMD/グラフェンのヘテロハイブリッド化による多重ディラック電子状態: 放射光マイクロ ARPES」

能見 彩音 (関西大学、修士課程1年)

「液相剥離 TaS₂のオゾン酸化によって形成した high-k TaOx のゲート絶縁膜応用」



若手奨励賞受賞者の皆さんと表彰式の様子

3-3 公開シンポジウム

本領域での取り組みや領域研究の成果を広く周知するため、各年度オンラインにて公開シンポジウムを開催した。各回において実施した参加者アンケート（任意回答）では、シンポジウムや本領域に対しおおむね高評価をいただいている。

3-3-1 第2回公開シンポジウム

2024年度に開催した第2回公開シンポジウムでは、本領域の国際アドバイザーでもある Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology の Stephan Roche 教授による基調講演のほか、コーネル大学の安田憲司助教、産業技術総合研究所の入沢寿史氏による招待講演、ならびに9名のPIが領域における研究成果について紹介した。

公募説明会と同時開催だった第1回公開シンポジウムより参加登録数は減ったものの、企業の方からの参加は前を上回った。

日時：2024年8月8日（木）10:00～17:00

場所：オンライン（Zoom）

プログラム

- 10:00～10:10 はじめに：領域の紹介（領域代表 吾郷 浩樹）
- 10:10～10:50 招待講演①「スライディング強誘電体の物理と応用」
安田 憲司 氏（コーネル大学）
- 10:50～11:30 招待講演②「層状テルル化物によるファンデルワールス低抵抗コンタクト」
入沢 寿史 氏（産業技術総合研究所）
- 11:30～11:50 2.5次元物質科学の研究成果の紹介①
A04班 越野 幹人（大阪大学）
- 13:00～14:40 2.5次元物質科学の研究成果の紹介②
A01班 吾郷 浩樹（九州大学）
A05班 大野 雄高（名古屋大学）
A03班 坂野 昌人（東京大学）
A02班 松本 里香（東京工芸大学）
公募 A04班 塩見 雄毅（東京大学）
- 15:00～16:00 2.5次元物質科学の研究成果の紹介③
公募 A02班 菅 大介（京都大学）
公募 A01班 加藤 俊顕（東北大学）
公募 A03班 柳 和宏（東京都立大学）
- 16:00～16:40 Keynote lecture :
“Ten Years of Research & Innovation in 2DM-based Spintronics: Highlights & Future”
Prof. Stephan Roche (Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology)
- 16:40～ おわりに：斎藤 晋（領域アドバイザー）



第2回公開シンポジウムの様子



第2回公開シンポジウムの様子

3-3-2 第3回公開シンポジウム

2025年度の第3回公開シンポジウムでは、三菱電機株式会社の小川様、ペンシルベニア州立大学(米国)の Saptarshi Das 先生による招待講演、および、復旦大学(中国)の Wenzhong Bao 先生の講演を予定していたが急遽ご都合が合わなくなったため代理で Xiangqi Dong 先生にご講演いただいた。また、当領域の研究者10名が研究成果について紹介した。

日時：2025年8月6日(水) 10:00~17:05

場所：オンライン (Zoom)

プログラム

- 10:00~10:07 開会挨拶 (領域代表 吾郷 浩樹)
- 10:07~10:10 公開シンポジウムの企画の意図 (A05 山本 真人)
- 10:10~10:50 招待講演①「グラフェンイメージセンサの開発」
小川 新平 (三菱電機株式会社)
- 10:50~11:30 招待講演② “2D Materials for Advanced Logic, 3D Integration, and More”
Saptarshi Das (Pennsylvania State University)
- 11:30~12:06 2.5次元物質科学の研究成果の紹介①
 - A01 班 岡田 晋 (筑波大学)
 - A02 班 宮田 耕充 (NIMS)
- 13:30~14:42 2.5次元物質科学の研究成果の紹介②
 - A03 班 松田 一成 (京都大学)
 - A04 班 笹川 崇男 (東京科学大学)
 - 公募 A01 班 相馬 拓人 (東京科学大学)
 - 公募 A02 班 鈴木 弘朗 (岡山大学)
- 15:00~16:12 2.5次元物質科学の研究成果の紹介③
 - A04 班 高村 由起子 (北陸先端科学技術大学院大学)
 - A05 班 長汐 晃輔 (東京大学)
 - 公募 A05 班 山本 真人 (関西大学)
 - 公募 A03 班 高橋 康史 (名古屋大学)
- 16:20~17:00 招待講演③
“Could 2D semiconductors be candidates for the next generation of electronics?”
Xiangqi Dong (Fudan University)
- 17:00~17:05 閉会挨拶 (副領域代表 岡田 晋)



第3回公開シンポジウムの様子

公開シンポジウム参加者アンケート 集計結果

イベント開催日時：第1回 2023年8月2日(水)10:00~16:10
 第2回 2024年8月8日(木)10:00~17:00
 第3回 2025年8月6日(水)10:00~17:05

イベント開催方法：オンライン (Zoom)

アンケート実施方法：Google フォーム (無記名式)

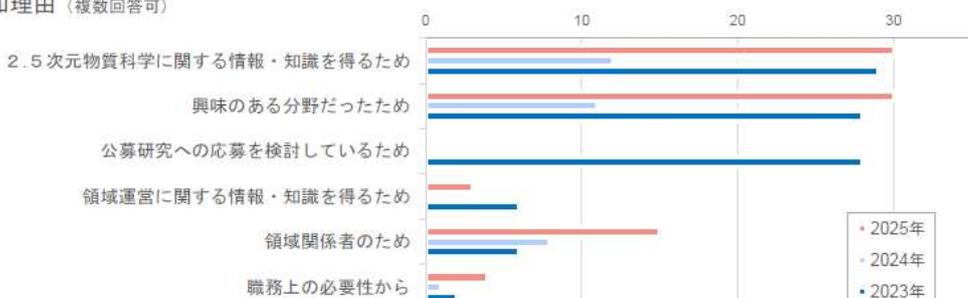
依頼方法：シンポジウム終盤に Zoom 内で案内・開催翌日参加申込登録者へメールで案内

回答数：第1回 (2023年) 42件
 第2回 (2024年) 21件
 第3回 (2025年) 45件

Q1. 参加したきっかけ

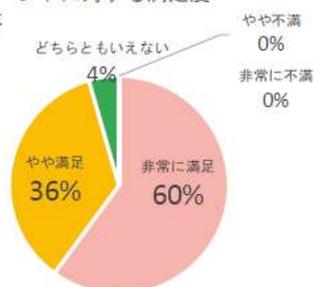


Q2. 参加理由 (複数回答可)

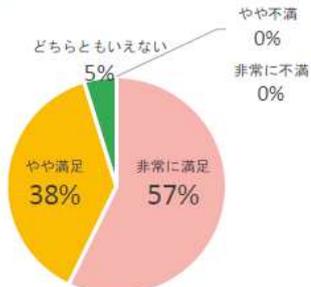


Q3. イベントに対する満足度

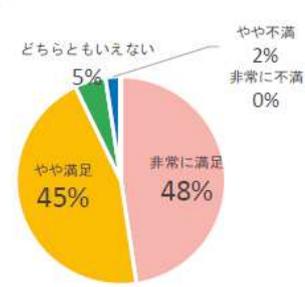
2025年



2024年



2023年



Q4. Q3の理由

■5 (非常に満足) と答えた方

2025年	2024年
<ul style="list-style-type: none"> ・ 関心のある内容だった ・ 最先端の結果と課題を知れてよかった ・ 最先端の研究について、特に海外も含めての知見が得られたから ・ 様々な研究視点をしれたから ・ 非常に勉強になりました ・ 招待講演で実用化の詳しい状況が聞けたため ・ 光ゲート効果を用い、グラフェンフォトディテクタを高感度化させていることが凄かった ・ 応用に関する現状が聞けた ・ 様々な講演が聴けた ・ 最新の成果について知ることができた ・ 数々の最新の2.5D材料の研究成果を知ることができたので ・ 最新の研究動向に加えて、半導体デバイス応用に関する発表もあったため ・ 領域の先生方の研究内容に触れることができ、有意義な時間を過ごせました ・ 特に、招待講演のレベルが高かった ・ 幅広い内容でたいへん勉強になりました ・ 二次元材料を使用したデバイスに関する講演をいくつも聞くことができたため ・ 領域内の様々な分野の研究内容が知れるいい機会となったため ・ 国内外の最新の研究内容についての発表が聞けたため ・ 知りたい研究内容と進捗が聞けて、大満足でした ・ 領域研究の進展を概観できたため ・ 班の代表者が班の位置づけ、目的・目標、そしてこれまでの業績について分かりやすく説明された ・ 最新の研究について知れたため ・ 最後の年度を意識して皆さんが精力的に研究されていることがよく伝わってきました ・ 最新の半導体応用に関する情報が得られた ・ 研究分野と近い内容であったため参考になった ・ 海外も含めた最新の研究動向やプロジェクトの進捗が聞けることができたため ・ 各領域の最新情報を紹介いただきわかりやすかった 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2次元物質の積層方法や2.5次元物質の物性や測定方法について知り、この学問分野の理解が進んだにつながったと思ったから ・ 最新の進行中の研究など興味深い話が聞けた ・ 永遠の研究学生みたいな先生方同士の質疑応答がとても楽しかったため ・ 領域の最新研究について知ることができた ・ 原子層材料研究の多岐にわたる発展の可能性を知ることができたため ・ 最新の原子層科学の動向が知れてよかったです ・ 招待講演者の講演内容が素晴らしい ・ 2次元材料に関する様々な研究を聞けたため ・ 層状誘電体に興味があり、関連の話題が多かったため ・ 2次元物質の新たな側面を見ることができたため ・ 低次元物質科学に関する知識を得る ・ 幅広い講演が聞けた

■4 (やや満足) と答えた方

2025年	2024年
<ul style="list-style-type: none"> ・ 2.5次元物質の研究について、様々な最先端の知見を得られた ・ 招待講演者がよかった ・ 講演内容が充実していた ・ 魅力的で興味深い発表が多かった ・ 非常に興味深い学術成果や応用への取り組みが聞けたので良かった ・ 領域内外の方から基礎的な研究内容だけでなく社会実装に向けた内容や展望も聞くことができた ・ 研究成果がどれも素晴らしいと思いました ・ 企業の方のお話も聞けて、アカデミアの外でのグラフェンの応用例が聞けて大変勉強になりました ・ 発表内容が大変勉強になった ・ 新しいことが知れた ・ ディスカッションがもっと活発になれば良かったと思います ・ 様々な領域の研究内容について知ることができたため ・ 普段あまり講演を聞くことのない企業の方や海外の研究者の講演を聞けたので ・ 具体的な用途の話題もあったため ・ 興味のある技術について理解を深めることができた ・ 応用と基礎の両面の最先端の研究成果が聞けたので 	<ul style="list-style-type: none"> ・ いくつか知らない概念を知ることができた ・ この領域の現在までの成果がわかりやすかった ・ 初回参加であり、研究範囲を理解してなかったところ、様々な興味深い研究分野に驚かされました ・ 5ではなく4にしたのは、私自身の勉強不足のうえ、手元資料もなく、きちんとしたフォローが難しかった点にあり、主に個人的な問題です ・ 午前中は領域外の人の発表だったので興味深く聞けた。 ・ 海外の研究が進んでいるので、海外の研究者などの発表ももう少し増えるとよい ・ 内容は面白かったが、他用もあり、すべてを聞くことができなかった ・ 2.5次元物質について、多方面に渡って有益な情報が得られたから ・ 招待講演が良かったとくにRocheさんの話はおもしろかった

■3 (どちらともいえない) と答えた方

2025年	2024年
<ul style="list-style-type: none"> ・ 領域の先生方がどのような研究をされているかを知る良い機会となりました ・ 午前中会議で聞きたい講演を逃してしまいました 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 企業の研究員としては、全体的にはまだ純粋な学術的興味の域を出ない内容が多めに感じた別に悪い事ではないのだが、単に個人的期待とは若干のずれがあった

Q5. プログラム、開催時期、その他イベント運営全般について (自由記述)

2025年	2024年
<ul style="list-style-type: none"> ・ もう少し、社会実装へ向けたの議論は多くてもよい気がする ・ 特に音声トラブルもなくスムーズな進行だったと思います ・ 今回はあまりに質問が出ない状況だった。オンラインだと聞きづらいかとも思うが、内輪の議論になりやすい環境になってしまった。 ・ 大学関係者にとっては入試などで少し忙しい時期だったかもしれませんが ・ できれば、プログラムは題名だけでなく、学会の概要集のようにアブストラクトが事前にわかればよい (可能な範囲ですが) ・ 研究の代表者だけでなく、大学院生やポスドクの皆さんの発表もお聞きしたいと思いました。(すでにあるとは思いますが、) ・ web開催であるため参加しやすかった 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 途中からの参加でしたが、進行も非常にスムーズで良かったです ・ 16時までの徹底したタイムキープが素晴らしいです ・ 概して難しい内容でしたが吾郷先生の発表はかろうじて理解できたような気がします ・ 午後のみのように少し短くした方がよいかと思いました。(午後は会議のため欠席しましたが、) ・ 開催時期は、この時期でよいと思います ・ オンライン開催なので参加しやすかった

Q6. 2.5次元物質科学領域に対するご意見や、今後期待・希望されること等 (自由記述)

2025年	2024年
<ul style="list-style-type: none"> ・ 素人ながらMoS₂-FETを用いた実験を行なっているのですが、良い性能を持ったデバイスを作成するには、たくさんのノウハウが必要だと感じております。この領域での研究で明らかになった技術的なノウハウをぜひ公開して頂きたいと思っております。応用でのチュートリアルやデバイス作製の実技講習会など何かの形で啓蒙して頂ければ大変ありがたいです。 ・ この研究分野が更に発展されることを期待しております ・ さらなる領域研究の発展を期待しています ・ 是非とも、頑張ってください、世界をリードする研究開発を行ってほしい ・ 2.5次元物質科学で技術ロードマップを作成すれば良いかと思っております (大変な仕事ですが) ・ 後継プロジェクトに発展する事を願っています ・ 個別具体的な研究もさることながら、ここでの実験技術や基礎的な知見が今後の様々な分野に活かされると考えております。 ・ 色々な分野の方を交えて公開の機会があると良いと思いました。(すでにやられている気もしますが) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 先生方同士の「○○さん」が浸透していて、こういうことから研究者同士の交流がさらに広がるのかなと少し良かったような気がします ・ 日本語では敬語もあり、遠慮が出るのでしょうか、もっと広がればよいと思いました。また、Sroche先生の熱量が凄かったです。日本の先生方も負けたくないので、 ・ 参加したばかりで恐縮ですが、今後とも宜しくお願致します ・ こうしたイベントを積極的に行って欲しい ・ 2.5次元物質の応用 (社会実装) について、キラーアプリが出てくることを期待しています ・ 今後も公開シンポジウムを続けてほしい

3-4 若手交流会

若手の交流を通じた領域の活性化を目指し、年に一度若手交流会を開催している。2024年度は東京大学において第3回若手交流会を、2025年度は東京科学大学にて第4回若手交流会を開催し、全国各地から学生や若手研究者が多く参加した。所属機関の枠を超え交流を深めることにより、領域内でのネットワーキングの強化につながった。

第3回 若手交流会

日時：2024年6月21日

場所：東京大学 工学部6号館 3階

参加者による研究内容の紹介やポスター発表、ラボツアーを行い、研究分野の異なる若手同士が互いの研究について知るきっかけとなった。また、A03班 坂野によるチュートリアル講演も実施し、当該分野における理解を促す機会となった。

プログラム

- 13:30~13:35 開会挨拶 (宮田)
- 13:35~14:15 チュートリアル講演：「バンド構造の読み解き方」坂野 昌人
- 14:20~14:50 自己紹介・研究内容紹介① (司会進行：坂野)
- 15:10~15:40 自己紹介・研究内容紹介② (司会進行：坂野)
- 15:40~17:45 ポスターセッション
- 16:00~17:00 頃 長汐研究室・石坂研究室 ラボツアー
- 18:00~20:00 フリーディスカッション
- 20:00~ 閉会挨拶 (荒井)



第3回若手交流会の様子

第4回 若手交流会

日時：2025年6月11日

場所：東京科学大学 南2号館 204室

第9回領域会議前日に開催した第4回若手交流会は、前回同様、参加者による研究内容のほか、紹介講演を中心とした構成とし、夕方以降はフリーディスカッションと懇親会を行った。翌日の領域会議での活発な意見交換に繋がる機会となった。

プログラム

- 13:30～ 開会挨拶（蒲江）
- 13:40～ 自己紹介・研究内容紹介①
- 14:15～ 招待講演「戦場物理学者の日常」岩切秀一（NIMS）
- 14:45～ 招待講演「六方晶窒化ホウ素の大面積CVD合成とその応用展開」
小子内行羅（九州大学）
- 15:20～ 自己紹介・研究内容紹介②
- 15:55～ 招待講演「学変で研究の本当の楽しさを知ろう」相馬拓人（東京科学大）
- 16:25～ 招待講演「MOCVD配向成長したMoS₂連続膜・極小単一粒のデバイス特性評価」
渥美圭脩（東京大学）
- 17:00～ 蒲江研、大友-吉松-相馬研 ラボツアー
- 18:00～ フリーディスカッション・懇親会



第4回若手交流会の様子

3-5 国際ワークショップ

これまでも米国、EU 諸国、アジア（中国・韓国）の研究者とのワークショップを実施してきたが、2024-2025 年度もさらなる関係強化を目的としたシンポジウムおよびワークショップを開催し、国際的な研究の動向を把握するとともに当領域における研究成果を世界に示し、国際的なネットワークの構築と海外での本領域および日本の研究のプレゼンス向上につとめた。

3-5-1 国際会議 Recent Progress on Graphene and Two-dimensional Materials Research (RPGR)2025 [<https://smartconf.jp/content/rpgr2025>]

本領域主催で二次元物質に関する国際会議 RPGR2025 を富山で開催した。RPGR とは、グラフェンおよびその他の新規二次元材料に焦点を当てた、アジア太平洋地域の科学者が主催する最高峰の国際会議で、国内外の著名な研究者が参加し、活発な議論が行われている。2013 年の東京、2019 年の松江に次いで、約 6 年ぶりの日本での開催となった。2025 年は領域代表の吾郷が組織委員長となり本領域メンバーが中心となって富山で対面にて開催した。

本領域における成果をアジアのみならず諸外国からの参加者に広くアピールするとともに、各国から参加した多くの研究者の国際的ネットワークの構築に貢献した。

本会における国際諮問委員会（International Advisory Board (IAB) Meeting）にも本領域メンバーが名を連ねており、当該分野の重要な国際会議の運営に携わった。

RPGR2025

日時：2025 年 11 月 3 日～7 日

場所：富山国際会議場



RPGR2025 のロゴ

RPGR2025 組織委員会

組織委員長 Conference Chair 吾郷 浩樹（領域代表/IAB）

共同組織委員長 Conference Co-Chair 高村 由起子（A04）

事務局長 Chief Executive Secretary 町田 友樹（A02/IAB）

会計担当 Treasurer 蒲江（A04）

プログラム委員長 Technical Program Committee Chair 末永 和知（A03/IAB）

プログラム共同委員長 Technical Program Committee Co-Chair 宮田 耕充（A02）

企業担当 Industrial Liaison 長汐 晃輔（A05）

広報担当 Public Relations 加藤 俊頭（公募 A01）

Plenary Speakers:

Manish Chhowalla University of Cambridge
Sarah Haigh University of Manchester
Mikito Koshino The University of Osaka



RPGR2025 のチラシ

Kin Fai Mak	Cornell University
Hyeon Suk Shin	Sungkyunkwan University
Xinran Wang	Nanjing University
Xiaodong Xu	University of Washington Seattle
Yuanbo Zhang	Fudan University

Special Session Speakers:

Yoshihiro Iwasa	RIKEN
Young Hee Lee	Hubei University of Technology/Peking University
Takashi Taniguchi	National Institute for Materials Science

Plenary Speakers:

Igor Aharonovich	University of Technology Sydney
Jong-Hyun Ahn	Yonsei University
Denis Bandurin	National University of Singapore
Wen-Hao Chang	National Yang Ming Chiao Tung University
Chun-Wei Chen	National Taiwan University
Hyeonsik Cheong	Sogang University
Ya-Ping Chiu	National Taiwan University
Goki Eda	National University of Singapore
Naoki Higashitarumizu	The University of California, Berkeley
Toshiya Ideue	The University of Tokyo
Shuichi Iwakiri	Weizmann Institute of Science
Toshiaki Kato	Tohoku University
Ki-Kang Kim	Sungkyunkwan University
Young Duck Kim	Kyung Hee University
Gwan-Hyoung Lee	Seoul National University
Lain-Jong Li	National University of Singapore
Kaihui Liu	Peking University
Kazunari Matsuda	Kyoto University
Masahiro Nomura	The University of Tokyo
Jiang Pu	Institute of Science Tokyo
Kosuke Nagashio	The University of Tokyo
Young-Woo Son	Korea Institute for Advanced Study
Miuko Tanaka	The University of Tokyo
Vincent Tung	The University of Tokyo
Jana Vejpravova	Charles University
Yan Wang	University of Cambridge



RPGR2025 の会期中の様子

Yi Wan National University of Singapore
 Xiaoxiang Xi Nanjing University
 Wang Yao The University of Hong Kong
 Kenji Yasuda Cornell University
 Hyobin Yoo Seoul National University
 Katsumasa Yoshioka NTT Basic Research Laboratories
 Hongtao Yuan Nanjing University

(青字：本領域関係者)



Program at a Glance

RPGR 2025
07 November 2025

	Nov.3(Mon, Holiday)	Nov.4 (Tue)	Nov.5 (Wed)	Nov.6 (Thu)	Nov.7 (Fri)	
8:45		Opening Ceremony				8:45
9:00		Plenary Talk Xinran Wang	Plenary Talk Yuanbo Zhang	Plenary Talk Kin Fai Mak	Plenary Talk Sarah Haigh	9:00
9:15						9:15
9:30		Plenary Talk Manish Chhowalla	Plenary Talk Mikito Koshino	Plenary Talk Xiaodong Xu	Plenary Talk Hyeon Suk Shin	9:30
9:45						9:45
10:00		Coffee Break	Coffee Break	Coffee Break	Coffee Break	10:00
10:15						10:15
10:30		Invited Wang Yao	Invited Hyobin Yoo	Invited Masahiro Nomura	Invited Takashi Taniguchi	10:30
10:45		Invited Lain-Jong (Lance) Li	Invited Joan Redwing ⇒ Kosuke Nagashio	Invited Yan Wang	Invited Young Hee Lee	10:45
11:00						11:00
11:15		Invited Toshiya Ideue	Invited Young-Woo Son	Invited Goki Eda	Invited Katsumasa Yoshioka	11:15
11:30		Invited Naoki Higashitarumizu	Invited Vincent Tung	Invited Katsumasa Yoshioka	Invited Yoshihiro Iwasa	11:30
11:45		Invited Jana Vejpravova	Invited Shuichi Iwakiri	Invited Denis Bandurin	Invited Chun-Wei Chen	11:45
12:00		Invited Ya-Ping Chiu	Invited Gwan-Hyung Lee	Invited Chun-Wei Chen		12:00
12:15					Closing Ceremony	12:15
12:30		Lunch Break (IAB Meeting)	Lunch Break (Luncheon Seminar)	Lunch Break		12:30
12:45						12:45
13:00						13:00
13:15		Invited Miuko Tanaka	Invited Hyeonsik Cheong	Invited Kazunari Matsuda	Invited Wen-Hao Chang	13:15
13:30		Invited Kaihui Liu	Invited Yi Wan	Invited Young Duck Kim	Invited Toshiaki Kato	13:30
13:45						13:45
14:00		Invited Hongtao Yuan	Invited Kenji Yasuda	Invited Jang-Hyun Ahn	Invited Ian Babich	14:00
14:15		Invited Ki-Kang Kim	Invited Igor Aharonovich	Invited Jiang Pu	Invited Yu-Chuan Lin	14:15
14:30		Invited Pengfei Yang	Invited Nils Fritof Langlotz	Invited Chun-Liang Lin	Invited Qinke Wu	14:30
14:45		Invited Xiaoxiang Xi				14:45
15:00		Coffee Break	Coffee Break	Coffee Break		15:00
15:15						15:15
15:30		Invited Yijin Zhang	Invited Alperen Tugen	Invited Der-hsien Lien	Invited Artur Shilov	15:30
15:45		Invited Wanqing Meng	Invited Chaw-Keong Yong	Invited Kei Kinoshita	Invited Takashi Uto	15:45
16:00		Invited Mikhail Kravtsov	Invited Ibrahim Sarpkaya	Invited Yuta Seo	Invited Takashi Kumagai	16:00
16:15		Invited Alexander Chernov	Invited Louis Smet	Invited Meng-Kai Lin	Invited Chee Fai Fong	16:15
16:30		Invited Seohak Park	Invited Shao-Yu Chen	Invited Yu-Cheng Chang	Invited Dongun Kim	16:30
16:45		Invited Akash Gugunani	Invited Ikuma Tateishi	Invited Hideki Matsuoka	Invited Takuto Kawakami	16:45
17:00		Invited Ryo Nouchi	Invited Momoko Onodera	Invited Elena Titova	Invited Dong Li	17:00
17:15		Invited Motomi Aoki	Invited Zhe Wang		Invited Jie Pan	17:15
17:30		Invited Yutaka Takaguchi			Invited Andrei Kudriashov	17:30
17:45		Invited Kazuki Yamamoto			Invited Yuki Itahashi	17:45
18:00		Invited Redhwan Moqbel				18:00
18:15		Invited Ilia Begichev				18:15
18:30		Invited Taketo Uchida				18:30
18:45						18:45
19:00		Poster Session 1	Poster Session 2	Banquet	Excursion	19:00
19:15						19:15
19:30						19:30
19:45						19:45
20:00						20:00



RPGR2025 での集合写真

3-5-2 UK-Japan Symposium on 2D Materials

2023 年度に開催した第 1 回国際ワークショップで講演いただいた英国ケンブリッジ大学の Goldsmiths' Professor of Materials Science である Manish Chhowalla 教授による多角的な連携構築のご尽力を賜り、本領域の研究者 10 名による英国派遣が実現した。現地の精鋭研究者らと開催した合同シンポジウムは、日本の「2.5D Materials」の取り組みを英国の本研究分野の研究者に広く周知することができ、また、双方の知見を融合させる貴重な機会となり、国際共同研究の深化に向けた強固な基盤を築くことができた。

UK-Japan Symposium on 2D Materials

日時：2024 年 9 月 23 日～24 日

場所：Goldsmiths 1, Department of Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge



シンポジウム当日の様子

プログラム

Day 1: Monday, 23 September 2024

- 8:45 – 9:00 Opening Remarks : Manish Chhowalla, University of Cambridge
- 9:00 – 9:25 Rahul Nair, University of Manchester
- 9:25 – 9:50 Hiroki Ago, Kyushu University
- 9:50 – 10:15 Yan Wang, University of Cambridge
- 10:15 – 10:40 Yasumitsu Miyata, Tokyo Metropolitan University
- 11:10 – 11:35 Wenqing Liu, University of Liverpool
- 11:35 – 12:00 Kosuke Nagashio, The University of Tokyo
- 12:00 – 12:25 Amalia Patane, University of Nottingham
- 13:30 – 13:55 Yasir Noori, University of Southampton
- 13:55 – 14:20 Rika Matsumoto, Tokyo Polytechnic University
- 14:20 – 14:45 Radha Boya, University of Manchester
- 15:15 – 15:40 Kazunari Matsuda, Kyoto University
- 15:40 – 16:05 Brian Gerardot, Herriot-Watt University
- 16:05 – 16:30 Andrea Ferrari, University of Cambridge
- 16:30 – 16:55 Cecilia Mattevi, Imperial College London

Day 2: Tuesday, 24 September 2024

- 9:00 – 9:25 Yasufumi Takahashi, Nagoya University
- 9:25 – 9:50 Cinzia Casiraghi, University of Manchester
- 9:50 – 10:15 Yukiko Takamura, Japan Advanced Institute of Science and Technology
- 10:15 – 10:40 John Robertson, University of Cambridge
- 11:10 – 11:35 Mikito Koshino, Osaka University
- 11:35 – 12:00 Antonio Lombardo, University College London
- 12:00 – 12:25 Soumya Sarkar, University of Cambridge
- 13:30 – 13:55 Ivan Vera Marun, University of Manchester
- 13:55 – 14:20 Tomoki Machida, The University of Tokyo
- 14:20 – 14:45 Stephan Hofmann, University of Cambridge
- 15:15 – 15:40 Hannah Stern, University of Manchester
- 15:40 – 16:05 Jiang Pu, Tokyo Institute of Technology
- 16:05 – 16:30 Akshay Rao, University of Cambridge
- 16:30 – Closing Remarks

3-5-3 International Czech – Japan Symposium on Advanced MultiScale Materials

[<https://www.projekt-amulet.cz/en/news/international-czech-japanese-symposium-advanced-multiscale-materials>]

第4回国際連携セミナーでのご講演をきっかけに、2022年にはオンラインにて国際合同セミナーを開催したカレル大学の Jana Kalbacova Vejpravova 教授が統括するチェコ共和国の研究プロジェクト AMULET と合同で、対面形式のシンポジウムを実施した。本領域からは UK-Japan Symposium on 2D Materials に引き続き 10名の研究者がチェコ共和国を訪れ、AMULET の研究者と先端材料やナノテクノロジーに関する最新の知見を交わした。両国間の国際協力の促進を果たす上で重要な機会となった。

International Czech – Japan Symposium on Advanced MultiScale Materials

日時：2024年9月26日～28日

場所：Brdička Lecture Hall, J. Heyrovský Institute of Physical Chemistry CAS, Prague, Czech Republic

Organizers:

Jana Kalbáčová Vejpravová (Charles University / AMULET PI)

Martin Kalbáč (J. Heyrovský Institute of Physical Chemistry, CAS)

Invites Speakers:

From Japan:

Yukiko Yamada-Takamura (Japan Advanced Institute of Science and Technology)

Hiroki Ago (Kyushu University)

Tomoki Machida (University Tokyo)

Kazunari Matsuda (Kyoto University)

Yasumitsu Miyata (Tokyo Metropolitan University)

Kosuke Nagashio (University Tokyo)

Jiang Pu (Tokyo Institute of Technology)

Mikito Koshino (Osaka University)

Rika Matsumoto (Tokyo Polytechnic University)

Yasufumi Takahashi (Nagoya University)

From Czech Republic:

Otakar Frank (J. Heyrovský Institute of Physical Chemistry, CAS)

Jaroslav Kočíšek (J. Heyrovský Institute of Physical Chemistry, CAS)

Jiří Klimeš (Faculty of Mathematics and Physics, Charles University)

Vaibhav Varade (Faculty of Mathematics and Physics, Charles University)

Dominika Zákutná (Faculty of Science, Charles University)

Zdeněk Sofer (VŠCHT – University of Chemistry and Technology Prague)

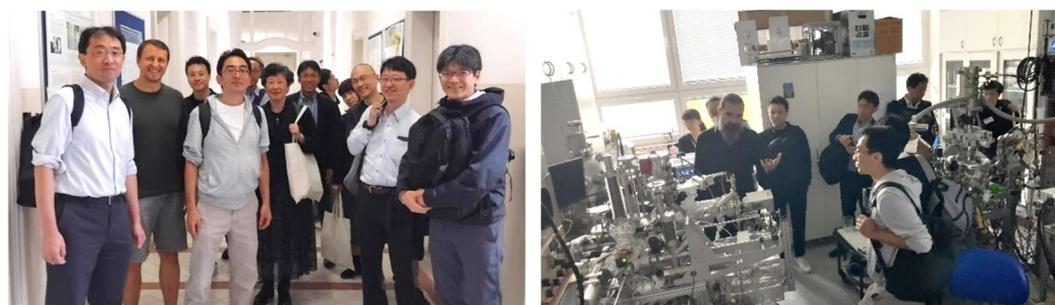
Petr Malinský (Institute of Nuclear Physics, CAS)

Jiří Červenka (Institute of Physics, CAS)

Petr Cígler (Institute of Organic Chemistry and Biochemistry, CAS)



シンポジウムのチラシ



シンポジウム当日の様子

3-5-4 新材料に関する第15回A3シンポジウム

[\[https://sites.google.com/view/15th-a3-symposium/\]](https://sites.google.com/view/15th-a3-symposium/)

A3シンポジウムは、日中韓3か国の第一線で活躍するナノ材料の研究者が集まり、情報交換や共同研究を通じて国際的なネットワークを形成し、国際交流とともに研究のさらなる発展を目指すことを目的とし、毎年1回、各国が持ち回りで開催している。15回目となる今回は福岡県北九州市にて開催し、A03松田がChairsに名を連ね、A01加藤幸一郎やA01吾郷らが組織委員を務めるなど、本領域も共催として運営に参画した。

本領域からはA02宮田、A02北浦、A03松田、A03柳、A05大野が講演を行い、日中韓の研究者との今後の国際共同研究の進展に向けた関係性の構築と、本領域のプレゼンスを高める有意義な機会となった。

15th A3 symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment

日時：2025年11月13日（木）～15日（土）

場所：Asia Pacific Import Mart (AIM)



シンポジウムでの集合写真

3-5-5 The 25th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT'25) [<https://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/nt/>]

NT'25 は、カーボンナノチューブ、グラフェン、その他二次元物質等のナノ炭素系物質および低次元材料を対象とする、当該分野で最も権威ある国際会議の一つで、これらの物質の基礎科学から応用技術に至る最新の研究成果を共有し、世界各国の研究者による議論や親睦を図る場として、世界各地で開催されている。「NT'15 (名古屋)」以来 10 年ぶり、3 度目の日本開催となった本会議では、A03 松田、A05 大野らが主催者に名を連ね、本領域も協賛にて参画した。会期中は、関連セッションへの出席や研究者との情報交換を通じて、本領域の研究成果の発信および国際的な協力体制の構築に努めた。

NT'25

日時：2025 年 6 月 15 日 (日) ~ 20 日 (金)

場所：京都大学 吉田キャンパス 時計台ホール



Web サイトの TOP 画とロゴ



シンポジウムでの集合写真

3-5-6 Pacifichem 2025 [<https://pacifichem.org/>]

2025年12月にハワイのホノルルで開催された世界最大級の化学会議「Pacifichem 2025」において、A05 大野が Carbon Nanotubes and Related Low-Dimensional Materials セッションのメインオーガナイザーを務めた。このセッションでは、カーボンナノチューブ (CNT) を中心に、グラフェン、2次元層状物質、その他の低次元ナノ材料の合成・物性・応用の最新研究動向を包括的に議論することを目的としており、低次元物質群の学術的深化と社会実装に向けた課題が集中的に議論された。

Pacifichem 2025

日時：2025年12月15日（月）～ 20日（土）

場所：ハワイ州ホノルル



Pacifichem 2025 のウェブサイトより

3-5-7 Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (FNTG)

A05 大野が会長を務めるフラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会が主催するシンポジウムで、フラーレンやカーボンナノチューブやグラフェンなどのナノ炭素系物質に関する基礎科学および応用技術についての情報提供および会員である研究者の親睦を図る場として、年2回、国内外で開催されている。本領域においても、当該分野のネットワーク構築および学術発展への寄与を目的として協賛にて参画した。

第67回シンポジウム [<https://fntg.jp/symp/fntg67/>]

日程：2024年9月1日(日)～3日(火)

場所：高知工科大学 永国寺キャンパス

第68回シンポジウム [<https://fntg.jp/symp/fntg68/>]

日程：2025年3月3日(月)～5日(水)

場所：名城大学 天白キャンパス 共通講義棟 南1階 S103

第69回シンポジウム [<https://fntg.jp/symp/fntg69/>]

日程：2025年9月24日(水)～26日(金)

場所：国立台湾師範大学 和平校区 II

実行委員長：齋藤 理一郎（領域アドバイザー）, Hsiang-Lin Liu

第70回記念シンポジウム [<https://fntg.jp/symp/fntg70/>]

日程：2026年3月3日(火)～5日(木)

会場：名古屋大学 野依記念学術交流館

実行委員長：大野 雄高 (A05)



第69回シンポジウムでの集合写真

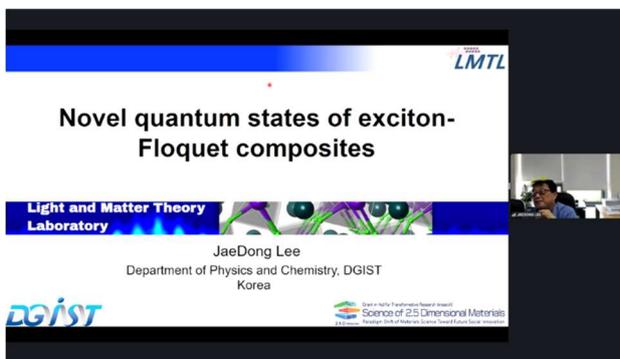
3-6 国際連携セミナー

2024、2025 年度も A04 高村のアレンジにより、海外で活躍する研究者を招き、オンライン (Zoom) にて計 2 回の国際連携セミナーを実施し、国際共同研究の推進および国際的な人材の育成を推進した。第 9 回、第 10 回においては、講演者ご了承のもと公開にて実施し、領域内外に向け 2.5 次元物質に関連した国際的な研究の知見を広めるとともに新たな国際ネットワークの構築に役立てた。

[日本時間]

2024 年 8 月 29 日 **第 9 回国際連携セミナー** [公開]
 Prof. JaeDong Lee (韓国 大邱慶北科学技術院 (DGIST))
 講演題目: “Novel Quantum States of Exciton-Floquet Composites”

2025 年 7 月 18 日 **第 10 回国際連携セミナー** [公開]
 Prof. Kalon Gopinadhan (インド Indian Institute of Technology Gandhinagar)
 講演題目: “Designing 2D material based nanofiltration membranes for desalination, dye separation and blue energy generation”



第 9 回国際連携セミナーのスクリーンショット



第 10 回国際連携セミナーのチラシ

3-7 産学官協働ミーティング

九州大学総合理工学府のグローバルイノベーション部門におけるオープンイノベーション推進の取り組み「koine」が開催する「二次元材料に関する koine ミーティング(NanoFoundry)」とタイアップし、産学官協働ミーティングを開催した。企業、大学、国立研究所、ベンチャーキャピタル等が一堂に会し、技術開発や連携研究に関して議論を深め、研究開発の加速化や交流のきっかけの場となった。

第4回産学官協働ミーティング

日時：2024年8月23日(金) 13時～

場所：九州大学 オープンイノベーション棟 3階 研修室

プログラム

- 13:00-13:40 基調講演1 (公開)
寺井 隆幸 (エネルギー総合研究所、東京大学名誉教授)
- 13:40-14:20 基調講演2 (公開)
柳田 剛 (東京大学、九州大学)
- 14:40-15:20 2.5次元物質科学領域からの講演 (公開)
加藤 幸一郎 (A01 / 九州大学)
- 15:40-17:45 二次元材料の研究開発を話題としたフリーディスカッション (非公開)
- 18:00-20:00 意見交換会 (非公開)



第4回産学官協働ミーティングの様子

二次元材料に関する 第8回 koine meeting

*Kyudai global Open Innovation Network Engine
学術変革領域研究(A)「2.5次元物質科学」共催：第4回産学官協働ミーティング

2024年
8月23日(金)
13:00～15:20

九州大学 筑紫キャンパス
オープンイノベーション棟
3F 研修室
※聴講歓迎 (事前登録不要)

	<p>13:00～13:40 基調講演1 (公開) 「カーボンニュートラルとそための研究開発」 寺井 隆幸先生 (エネルギー総合工学研究所理事長、東京大学名誉教授)</p>
	<p>13:40～14:20 基調講演2 (公開) 「酸化物ナノ構造体を用いた堅牢な人工嗅覚デバイス」 柳田 剛先生 (東京大学大学院工学研究科教授、九州大学先端物質化学研究所主幹教授)</p>
	<p>14:40～15:20 学術変革領域研究(A)からの講演 (公開) 「分子シミュレーションとデータ科学の融合による多様な系への挑戦」 加藤 幸一郎先生 (九州大学大学院工学研究院准教授)</p>
<p>15:40～17:45 二次元材料の研究開発に関するフリーディスカッション (非公開)</p>	

■ NanoFoundry の HP
<http://www.gic.kyushu-u.ac.jp/ago/nanofoundry.html>

■ 学術変革領域「2.5次元物質科学」の HP
<https://25d-materials.jp/>



九州大学
KYUSHU UNIVERSITY

2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学の(ラタイム)シフト
25d Materials

連絡先：九州大学大学院総合理工学研究院 西郷 (ago.hiroki.974@em.kyushu-u.ac.jp)

第4回産学官協働ミーティングのチラシ

第5回産学官協働ミーティング

「二次元材料に関する koine ミーティング (NanoFoundry)」と学術変革領域研究 (B)「機能進化エレクトロニクスの創出」とのタイアップ開催

日時：2025年2月21日(金) 13時～

場所：九州大学 オープンイノベーション棟 3階 研修室

プログラム

- 13:00-13:40 招待講演1 (公開)
竹井 邦晴 (北海道大学)
- 13:40-14:20 招待講演2 (公開)
牛場 翔太 (村田製作所)
- 14:40-15:20 2.5次元物質科学領域からの講演 (公開)
菅 大介 (A02 / 京都大学)
- 15:40-17:45 2D/2.5D 材料の研究開発を話題としたフリーディスカッション (非公開)
- 18:00-20:00 意見交換会 (非公開)



第5回産学官協働ミーティングの様子

二次元材料に関する
第9回 **koine*** meeting
*Kyudai global Open Innovation Network Engine
学術変革領域研究 (A)「2.5次元物質科学」
第5回産学官協働ミーティング

2025年
2月21日(金)
13:00-15:20

九州大学筑紫キャンパス
オープンイノベーション棟 3階 研修室
聴講歓迎 (事前登録不要)

■13:00～13:40 招待講演
「瞬時解析顕微鏡を有したマルチモーダル・フレキシブルセンサシステム」
竹井 邦晴
(北海道大学 大学院情報科学研究科 情報エレクトロニクス部門 教授)

■13:40～14:20 招待講演
「グラフェンデバイスの安定的な製造に向けた挑戦」
牛場 翔太
(村田製作所 技術・事業開発本部先端技術研究開発部 マネージャー)

■14:40～15:20 2.5次元物質科学領域からの講演
「酸化ハフニウム基二次元強誘電体」
菅 大介
(京都大学 化学研究所 附属元素科学国際研究センター 准教授)

■15:40～17:15 2D/2.5D 材料の開発を話題としたフリーディスカッション (非公開)

九州大学
KYUSHU UNIVERSITY

共催：学術変革領域研究 (B)「機能進化エレクトロニクスの創出」
* 先進デバイスエレクトロニクス研究センター

Contact：九州大学 大学院理工学工学研究科 菅 大介
(ago.hiroki.974@m.kyushu-u.ac.jp)

第5回産学官協働ミーティングのチラシ

3-8 領域内共同研究セミナー（領域内限定）

今年度も、共同研究促進のためオンラインにて領域内共同研究セミナーを継続して開催した。領域会議では発表時間が限られるため、金曜日のランチタイムを利用して気楽に研究内容の紹介や議論ができる場として実施した。各回 25~40 名前後の領域メンバーおよび研究室に所属するメンバーが参加して、活発な議論が行われた。

時間：12:10~12:35 発表
12:35~12:50 質疑応答

- 第 25 回 2024 年 5 月 31 日 A03 熊谷 崇
「低次元物質における超高速光誘起ダイナミクスのナノイメージング」
- 第 26 回 2024 年 11 月 8 日 A01 相馬 拓人
「酸化物薄膜から迫る 2.5 次元物質」
- 第 27 回 2024 年 11 月 22 日 A02 鈴木 弘朗
「大面積 TMDC 結晶上へのペロブスカイト材料のヘテロ成長」
- 第 28 回 2025 年 7 月 4 日 A04 松岡 秀樹
「分子インターカレーションによる量子相研究/現在の潮流と今後の方向性」

<https://25d-materials.jp/category-seminar-internalseminar/>



領域内共同研究セミナーのスクリーンショット

3-9 物性科学領域横断研究会

物性科学に関連した学術変革領域研究(A)および学術変革領域研究(B)が合同で開催する研究会に参加し、専門外の研究者や学生へ向けて領域の研究成果を広く共有した。2日間にわたり物性科学の最新トピックを概観するとともに、若手研究者によるポスター発表や凝縮系科学賞の授賞式を通じ、領域間のシナジー創出と次世代育成を図った。採択以来の継続参加により、学際的な連携をより一層深める貴重な機会となった。

3-9-1 第18回 物性科学領域横断研究会 [\[https://ryoikioudan.issp.u-tokyo.ac.jp/2024/\]](https://ryoikioudan.issp.u-tokyo.ac.jp/2024/)

本領域より A04 越野と A04 井手上が講演を行い、A01 相馬、A01 吾郷 G 江本さん、A02 町田 G 木下さん、A04 塩見 G 仲川さん、A04 越野 G 中辻さん、A05 小野 G 遠藤さんがポスター発表をした。A04 井手上が凝縮系科学賞を、木下さん(東京大学)が若手奨励賞を受賞した。

日時：2024年11月26日(火)～11月27日(水)

場所：神戸大学 100年記念館 六甲ホール

[2.5次元物質科学]

10:30-11:10 (40 min)

A04 越野 幹人 (大阪大学) 「モアレ物質の物性理論」

A04 井手上 敏也 (東京大学) 「2.5次元物質の制御と光起電力機能開拓」

[ポスター発表]

仲川 久礼亜 (東京大学) 「カイラル磁性体 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ におけるカイラルソリトンの生成・消滅」

中辻 直斗 (大阪大学) 「モアレ三層 TMD における高制御可能な量子ドット」

木下 圭 (東京大学) 「数層 WSe_2 量子井戸を用いた共鳴トンネルデバイスの機能開拓」

江本 暁 (九州大学) 「大面積数層 hBN の CVD 成長と磁気トンネル接合素子への応用」

遠藤 竜佑 (神戸大学) 「第一原理計算による L10 秩序合金/二次元物質界面の構造予測」

相馬 拓人 (東京科学大学) 「2H- NbO_2 層における超伝導ドームと量子臨界性」



研究会当日の様子



受賞した A04 井手上と木下さん

3-9-2 第19回 物性科学領域横断研究会 [\[https://ryoikioudan.issp.u-tokyo.ac.jp/2025/\]](https://ryoikioudan.issp.u-tokyo.ac.jp/2025/)

運営委員長の小泉雄一郎教授（「超温度場材料創成学」領域代表）とともに、本領域も共同主催者として参画した。A04の井手上を中心にローカルおよび会計担当として研究会の企画・運営に携わった。学術面では、本領域よりA03松田とA05長汐が講演を行ったほか、若手研究者（A01吾郷G・小子内さん、A03杉本G・西島さん、A04笹川G・岡崎さん、A04井手上G・石井さん、A04藤井G・高橋さん）がポスター発表を行った。その中で、石井さんが最優秀若手奨励賞を受賞し、本領域の研究水準の高さを広く示した。

日時：2025年11月27日(木)～11月28日(金)

場所：東京大学 物性研究所 6階講義室



[2.5次元物質科学]

10:30-11:10 (40 min)

A03 松田 一成（京都大学） 「2.5次元物質を舞台にしたモアレ光科学とその物性開拓」

A05 長汐 晃輔（東京大学） 「二次元材料のウエハースケール集積の現状と展望」

[ポスター発表]

小子内 行羅（九州大学） 「金属触媒上にCVD合成した多層六方晶窒化ホウ素の特異なラマンピーク」

岡崎 尚太（東京科学大学） 「トポロジカル電子構造を伴う交替磁性体候補 $V_{1/3}NbS_2$ における多様な磁気輸送現象」

石井 智博（東京大学） 「原子層磁性体へテロ構造における新奇磁気異方性の発現」

西島 皓平（東京大学） 「走査型プローブ顕微鏡によるAu(111)表面上のトリオキソスマネンの単分子化学反応の研究」

高橋 悠太（慶應義塾大学） 「表面弾性波による原子層二次元材料の励起子発光の動的変調」



研究会での集合写真



受賞した石井さん

3-10 サンプル見本市・理論相談会

研究現場における具体的な課題解決とマッチングを目的とし、第7回領域会議のサテライト企画として開催した。試料の提供が可能な研究者が現物や写真を持ち寄り材料サンプルについて紹介し、提供の相談を受け付けた。また同時に、理論研究者が解析手法の提案や物理モデルの構築について直接アドバイスを行うなど、実践的な対話の場を提供した。本会を契機とした新規共同研究が数多く発足しており、領域内の異分野融合を加速させる実効性の高い取り組みとなった。

日時：2024年6月15日（土）14：30～17：00

場所：京都大学 きはだホール セミナー室



3-1-1 その他のイベント

3-1-1-1 第105日本化学会 春季年会（2025）シンポジウム特別企画

[https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/csj105th/session/2F_420201-08]

第105日本化学会 春季年会のシンポジウムにおいて、特別企画「二次元材料の新展開：2.5次元物質科学への誘い」を実施した。第一線で活躍する研究者による講演が行われ、化学の強みを活かした新材料創製の可能性について、分野の枠を超えた議論が行われ、当該研究のさらなる発展に向けた大きな一歩となるシンポジウムとなった。

第105日本化学会 春季年会（2025）シンポジウム 特別企画

「二次元材料の新展開：2.5次元物質科学への誘い」

日時：2025年3月27日（木） 9：00～11：40

場所：関西大学 千里山キャンパス 第4学舎4号館 2階 4202

プログラム

- 9:00- 9:20 「2.5次元物質が拓く新たな物質科学と応用」
吾郷 浩樹(九州大学) A01 物質創成班（計画）
- 9:20- 9:40 「シリセンをベースとした複合二次元材料とヘテロ積層構造」
高村(山田) 由起子（北陸先端科学技術大学院大学） A04 物性開拓班(計画)
- 9:40-10:00 「ナノグラフェンの精密合成と分子構造に依存した特異な物性」
成田 明光（沖縄科学技術大学院大学、マックス・プランク高分子研）
- 10:00-10:20 「モアレ物質の物理学」
越野 幹人（大阪大学） A04 物性開拓班（計画）
- 10:20-10:40 「2.5次元物質による光科学と量子科学への応用」
松田 一成（京都大学） A03 分析班（計画）
- 10:40-11:00 「グラフェンイメージセンサ」
小川 新平（三菱電機株式会社）
- 11:00-11:20 「2層グラフェンの電気化学的アニオン挿入脱離挙動ーデュアルイオン電池正極の高性能化に向けてー」
松尾 吉晃（兵庫県立大学大学院） A05 機能創出班
- 11:20-11:40 「バイオセンサ応用に向けたグラフェン FET」
牛場 翔太（村田製作所）



日本化学会でのシンポジウムの様子

3-1 1-2 日本物理学会 第80回年次大会 (2025) シンポジウム

https://onsite.gakkai-web.net/jps/jps_search/2025au/data2/html/program07.html#j18pSK211

日本物理学会 第80回年次大会にて2.5次元物質に関連した一般シンポジウムを開催した。化学会でのシンポジウムと併せ、2.5次元物質科学という新領域が、物理・化学の両側面から着実に加速していることを印象づける絶好の機会となった。

日本物理学会 第80回年次大会 一般シンポジウム「2.5次元物質科学の現状と展開」

日時：2025年9月18日(木) 13:30~17:15

場所：広島大学 東広島キャンパス 総合科学部 K棟 2階 SK211 会場

プログラム

- 13:30 - 13:35 「はじめに」岡田 晋 (筑波大学) A01 物質創成班 (計画)
- 13:35 - 14:00 「2.5次元物質が拓く新たな物質科学と応用」
吾郷 浩樹 (九州大学) A01 物質創成班 (計画)
- 14:00 - 14:25 「2次元接合・積層ヘテロ構造の構築と機能探索」
北浦 良 (NIMS) A02 集積化班 (第1期公募)
- 14:25 - 14:50 「基板上二次元材料とその積層ヘテロ構造」
高村(山田) 由起子 (JAIST) A04 物性開拓班 (計画)
- 14:50 - 15:15 「ナノ物質集積半導体の光学応答におけるマルチスケール物理」
宮内 雄平 (京都大学)
- 15:30 - 15:55 「ナノカーボン物質の次元制御と光機能創出」
河野 行雄 (中央大学) A05 機能創出班 (第1期公募)
- 15:55 - 16:20 「2.5次元半導体および磁性体における創発光起電力応答」
井手上 敏也 (東京大学) A04 物性開拓班 (公募)
- 16:20 - 16:45 「原子層積層界面における熱輸送と電気輸送の相関」
柳 和宏 (東京都立大学) A03 分析班 (公募)
- 16:45 - 17:10 「1 nm 世代以降の先端 CMOS 向け 2D トランジスタ技術」
入沢 寿史 (産総研)
- 17:10 - 17:15 「まとめ」宮田 耕充 (NIMS) A02 集積化班 (計画)



日本物理学会でのシンポジウムの様子

3-1 1-3 領域共催セミナー・特別講演会 [<https://25d-materials.jp/openseminar/>]

領域共催にて下記の特別講演会を行った。

- 2024年6月6日 特別講演会 九州大学筑紫キャンパス
今岡 享稔 (東京工業大学)
「電子顕微鏡で明らかにするクラスターの原子ダイナミクス」
- 2024年12月20日 特別講演会 九州大学筑紫キャンパス
Wen-Hao Chang (National Yang Ming Chiao Tung University)
「Recent progress of 2D materials research for semiconductor industry」
- 2025年3月13日 特別講演会 九州大学筑紫キャンパス
Vittorio Bellani (University of Pavia)
「The Italian National Quantum Science and Technology Institute and Research at the University of Pavia on 2D Materials」
- 2025年7月4日 特別講演会 東京科学大学大岡山キャンパス
Steven G. Louie (University of California at Berkeley and Lawrence Berkeley National Lab)
「Excitons in Atomically Thin Two-Dimensional Semiconductors and Moiré Structures」

3-12 栄転・昇進 (2024/4~2026/3)

- 2024年4月1日 第1期公募 A01 蓬田 陽平 (東京都立大学)
北海道大学に准教授として栄転
- 2025年2月1日 公募 A01 加藤 幸一郎
九州大学大学院工学研究院の教授に昇任
- 2025年2月1日 A03 坂野 昌人 (東京大学)
電気通信大学大学院情報理工学研究科の准教授として栄転
- 2025年4月1日 A02 宮田 耕充 (東京都立大学)
物質・材料研究機構ナノアーキテクトニクス材料研究センターのグループリーダーとして栄転
- 2025年4月1日 公募 A03 菅 大介 (京都大学)
大阪大学大学院工学研究科の教授として栄転
- 2025年4月1日 公募 A01 加藤 俊顕
東北大学大学院工学研究科の教授に昇任
- 2025年10月1日 公募 A01 相馬 拓人 (東京科学大学)
東北大学多元物質科学研究所の講師として栄転

4. 計画班 研究成果





4. 計画班 研究成果

A01

物質創製班

2.5次元構造体のための 物質創製

岡田 晋

吾郷 浩樹

櫻井 英博

渡邊 賢司



原子層物質ナノ複合構造の電子物性解明と物質探索



岡田 晋 (筑波大学数理物質系)

研究協力者：丸山 実那、高 燕林

1. 研究の目的

量子論に立脚した計算物質科学の手法を用いて、2.5次元物質の構成要素となる各種の二次元物質の構造安定性と電子物性の解明を行う。さらに実験グループと協働し既存の2.5次元物質の物性解明を行う。加えて、新たな2.5次元物質の物質設計を行い、実験で目指すべき新たな2.5次元物質合成の指針の提示を目指す。

2. 研究成果

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

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

2.2. スマネンカラムを用いた遷移金属カルコゲン化合物の電子物性制御

炭化水素分子スマネンは、そのお椀状構造と端の終端水素原子から、お椀鉛直方向に双極子モーメントを有することが知られている。我々は、これまで2層グラフェンの層間へのスマネン分子インターカレーションによる上下グラフェン間での電荷再分布の可能性を提示した。ここでは、スマネンが互いに積層したカラム構造を凝集相として取り得ること、カラムの双極子モーメントが分子の線形和で与えられることに着目し、遷移金属カルコゲン化合物表面へのスマネンカラム吸着による電子物性制御の可能性の探索を行った(論文[2])。密度汎関数理論を用いて、1~4個のスマネンがスタックしたカラムが吸着したWS₂のエネルギー論と電子構造の解明を行った。計算の結果、スマネンカラムの向きと長さに依存して、WS₂のバンド端エネルギーがほぼ線形に制御可能であることが明らかになった[Fig. 1(b)]。また、スマネンカラムを用いた表面部分修飾により、WS₂に対して有効的なpn接合界面を構築することが可能であることを予言した。

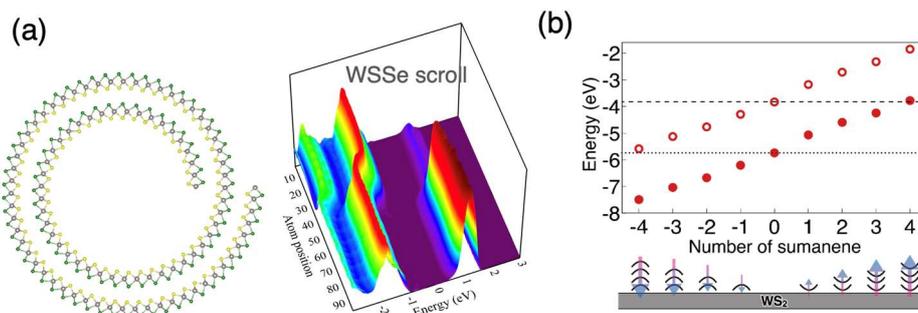


Figure 1. (a) Geometric and electronic structure of Janus WSSe nanoscrolls. (b) Band edge diagram of WS₂ as a function of the sumanene column length and orientation.

3. 研究成果

3.1. 論文、解說記事等

- [1] Y. Gao, S. Okada, Energetics and electronic structures of Janus WSSe nanoscroll, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **7**, 5861-5867 (2025).
- [2] M. Maruyama, S. Okada, Band engineering of monolayer WS₂ by sumanene columns, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **7**, 6885 (2025).
- [3] N. Sultana, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Anomalous electrostatic properties of double-walled BN nanotubes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **64**, 065001 (2025).
- [4] M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Band-edge localization of twisted bilayer hBN, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **94**, 073702 (2025).
- [5] M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Formation of type-I quantum wells in hexagonal boron nitride bilayers with strain-induced Moire superlattice, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **64**, 75004 (2025).
- [6] T. Mizoguchi, M. Maruyama, Y. Hatsugai, S. Okada, Evolution of flat bands in two-dimensional fused pentagon network, *Phys. Rev. B*, **112**, 085421 (2025).
- [7] M. Maruyama, N. Sultana, Y. Gao, S. Okada, Geometric structure and electronic properties of bilayer graphene with a moire superlattice by asymmetric tensile strain, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63**, 115003 (2024).
- [8] M. Maruyama, S. Okada, Effect of interlayer stacking arrangement on the dielectric properties of hexagonal boron nitride thin films, *FlatChem*, **48**, 100751 (2024).
- [9] Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Energetics and electronic structure of graphene nanoscrolls, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63**, 085001 (2024).
- [10] Y. Gao, M. Kaneda, T. Endo, H. Nakajo, S. Aoki, T. Kato, Y. Miyata, S. Okada, Strain-induced scrolling of Janus WSSe, *Phys. Rev. B*, **110**, 035414 (2024).
- [11] K. Wakabayashi, M. Koshino, S. Okada, Topological Electronic States of 2D HexNet, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **93**, 083701 (2024).
- [12] M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Metal-semiconductor transition in bilayer graphene by bowl inversion of monofluorosumanene, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63**, 065002 (2024).
- [13] Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Energetics and electronic structures of Janus WSSe by continuous chalcogen substitution, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63**, 065001 (2024).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Y. Gao, S. Okada, Energetics and electronic structure of bilayer Janus WSSe, *Appl. Phys. Express*, **16**, 075004 (2023).
- [17] N. Sultana, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Electronic structure of graphene thin films under an external electric field, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 075001 (2023).
- [18] M. Maruyama, N. Ichinose, Y. Gao, Z. Liu, R. Kitaura, S. Okada, Gate-Induced Trans-dimensionality of Carrier Distribution in Bilayer In-plane Heterosheet of MoS₂ and WS₂ for electronics applications, *ACS Appl. Nano Mater.*, **6**, 5434-5439 (2023).
- [19] H. Zhang, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Electronic structure of covalent networks of triangular graphene flakes embedded in hBN, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 025001 (2023).
- [20] Y. Gao, H. Nakajima, M. Maruyama, T. Taniguchi, K. Watanabe, R. Kitaura, S. Okada, Formation of a one-dimensional hole channel in MoS₂ by structural corrugation, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 015001 (2023).
- [21] Y. Gao, S. Okada, Field induced electron emission from graphene nanostructures, *Nano Express*, **3**, 034001 (2022).
- [22] Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, Electrostatic properties of two-dimensional C₆₀ polymer thin films under an external electric field, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, 075004 (2022).

二次元物質の CVD 成長から 2.5 次元物質への展開

吾郷 浩樹 (九州大学 大学院総合理工学研究院)

研究協力者 : Pablo Solís Fernández



1. 研究の目的

2.5次元物質の構成要素となる各種の二次元物質を高品質、かつ高度に制御して CVD 合成する手法を開発するとともに、共同研究を通じて各種物性やデバイス応用を進めていく。2.5次元物質の作製にとって重要となる革新的な転写法も開発する。さらに、共同利用拠点の一つとして、領域内の研究者にグラフェンや hBN の提供を行い、領域研究の活性化に貢献する。

2. 研究成果

2.1. MoS₂ ナノリボンの創製とエネルギー・デバイス応用

クリーンエネルギーの必要性から、水素への期待が高まり、効果的に水素を製造する方法が望まれている。電気化学的に水から水素を発生する方法 (HER) では、白金が高い触媒活性を示すことが知られているが、白金は希少で非常に高価であることが課題となっている。二次元半導体性である MoS₂ は安価で、高い触媒活性を示すことが知られていたが、その活性サイトに関しては議論があった。また、MoS₂ は微細化の限界に近付きつつあるシリコンデバイスに代わる次世代半導体として、近年大きな注目を集めている。

本年度、我々は、MoS₂ のナノリボンを基板上に高密度で配向成長させる方法を開発した (論文[1])。一般に MoS₂ の CVD 合成は c 面サファイアを用いて行われるが、我々は異方性をもつ a 面、および r 面サファイアを用い、通常よりも高い合成温度で反応すると MoS₂ ナノリボンが特定の結晶方位に沿って配向することを見出した (Fig. 1a,b)。A03 班の末永と第 1 期公募の Lin による電子顕微鏡観察によって、配向成長したナノリボンは欠陥がほとんどない単結晶であり、Mo エッジと S エッジで異なる構造をもつことを明らかにした (Fig. 1c)。さらに、A04 班の高橋と共同でナノスケールの電気化学的な測定を行い、ナノリボンの端が中心部の 100 倍近い HER 活性を示すことを見出した。さらに、この MoS₂ ナノリボンは、エッチングを行わないことからクオリティが高く、44 cm²/Vs と高いキャリア移動度を示し半導体チャネルとしても優れた特性を示すことも明らかにした。また、MoS₂ ナノリボン合成後に WS₂ を成長させることで、MoS₂ と WS₂ からなる面内ヘテロナノリボンの合成も実現した。本研究成果は、クリーンエネルギーの開発に寄与するとともに、次世代半導体開発に大きく貢献するものと期待される。

2.2. hBN の CVD 成長と 2.5 次元デバイス応用

二次元絶縁体である六方晶窒化ホウ素 (hBN) の多層膜の CVD 合成や応用も進めた。hBN の層間に Sn を挟んで硫化することで p 型半導体の SnS と n 型の SnS₂ の合成を行う (論文[3]) とともに、機能化した hBN を ALD 絶縁膜のテンプレートとした MoS₂ トランジスタへの応用 (論文[2]) なども進めた。

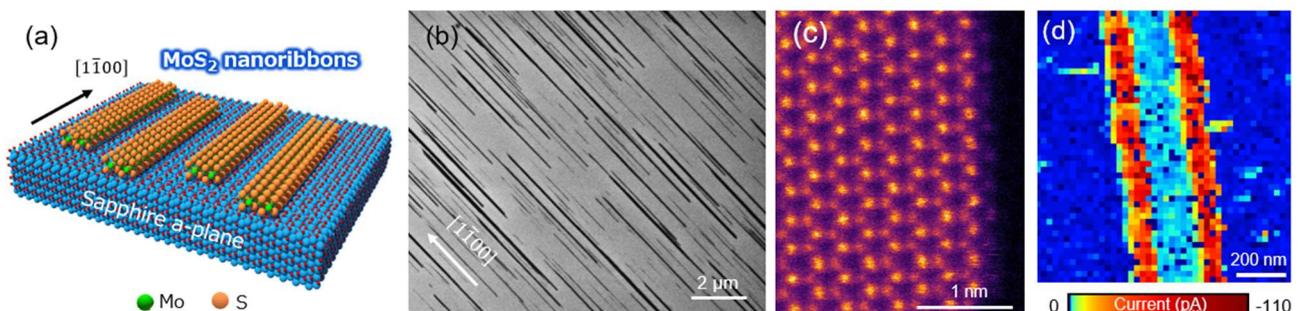


Figure 1. Achievement during this project. (a) CVD growth of multilayer hBN (*Nat. Electron.* 2023). (b) Development of “Ready-to-transfer” UV tapes (*Nat. Electron.* 2024). (c) CVD growth of massively aligned MoS₂ nanoribbons and their application to hydrogen evolution reaction (*Sci. Adv.* 2025).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] Z. Ma, P. Solís-Fernández*, Y.-C. Lin, K. Matsuda, K. Suenaga, S. Okada, T. Kato, Y. Takahashi, H. Ago* *et al.*, Lattice-guided growth of dense arrays of aligned transition metal dichalcogenide nanoribbons with high catalytic reactivity, *Sci. Adv.*, **11**, eadr8046 (2025).
- [2] E. Y. Jung, H. Ago* *et al.*, Integration of high-k material and hexagonal boron nitride for top-gate WS₂ field-effect transistors, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **7**, 6420 (2025).
- [3] H. Yi, P. Solís-Fernández*, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago* *et al.*, Bottom-up confined synthesis of air-stable two-dimensional SnS and SnS₂ between hexagonal boron nitride nanosheets, *ACS Appl. Nano Mater.*, **8**, 2693 (2025).
- [4] M. Nakatani, Y.-C. Lin, K. Suenaga, Y. Kawano, H. Ago* *et al.*, Ready to transfer two-dimensional materials using tunable adhesive force tapes, *Nat. Electron.* **7**, 119 (2024).
- [5] H. Ago*, P. Solís-Fernández, Science and applications of 2.5D materials: Development, opportunities and challenges, *NPG Asia Mater. (Perspective)*, **16**, 31 (2024).
- [6] S. Emoto, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago* *et al.*, Synthesis of few-layer hexagonal boron nitride for magnetic tunnel junction application, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 31457 (2024).
- [7] S. Fukamachi, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago* *et al.*, Large-area synthesis and transfer of multilayer hexagonal boron nitride for enhanced graphene device arrays, *Nat. Electron.*, **6**, 126 (2023).
- [8] Y. Araki, Y.-C. Lin, R. Matsumoto, K. Suenaga, S. Okada, H. Ago* *et al.*, Twist angle-dependent molecular intercalation and sheet resistance in bilayer graphene, *ACS Nano*, **16**, 14075 (2022).
- [9] H. Ago*, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio, Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **23**, 275 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] H. Ago, Lattice-guided, dense arrays of TMD nanoribbons and their applications, 2D Transition Metal Dichalcogenides 2025 (2D-TMDs 2025), Cambridge, UK, 2025 年 7 月
- [2] H. Ago, Science of 2.5 dimensional materials: Integration of high-quality 2D materials for electronic devices and catalysis, 36th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2024), Ottawa, Canada, 2024 年 8 月
- [3] H. Ago, CVD synthesis and transfer of 2D materials for "2.5D materials science", RPGR 2024 (The 15th Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research Conference), Nanjing, China, 2024 年 7 月
- [4] H. Ago, Controlled CVD growth of multilayer hBN for 2.5D applications, Inaugural Workshop on Boron Nitride, Montpellier, France 2023 年 5 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] Young Scientist Award, China Nano 2025 年 8 月
- [2] STAM Best Paper Award 2025 年 3 月
- [3] プレス発表、水素発生と半導体応用を兼ね備えた二次元半導体ナノリボンを実現 (九州大学) 2025 年 1 月
- [4] プレス発表、世界初、グラフェンなどの二次元材料テープを開発 (九州大学) 2024 年 2 月
- [5] プレス発表、六方晶窒化ホウ素の大面积合成とグラフェン集積デバイスを実現 (九州大学) 2023 年 2 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 応用物理学会理事 2025 年度、2024 年度、機関誌『応用物理』編集委員長/副編集委員長
- [2] 第 206 回 Q-AOS ブラウンバッグセミナー 2025 年 10 月
- [3] ここふるサイエンスカフェ Vol.5 (福岡県大野城市) 2023 年 3 月
- [4] 洗足学園高等学校の高校生のビジネスプラン・グランプリを支援 審査員特別賞を受賞 2023 年 1 月
- [5] 特願 2023-027540、磁気トンネル接合素子及びその製造方法 2023 年 2 月

有機合成に基づく擬二次元構造の創製

櫻井 英博 (大阪大学大学院工学研究科)

研究協力者: 焼山 佑美 (同上)



1. 研究の目的

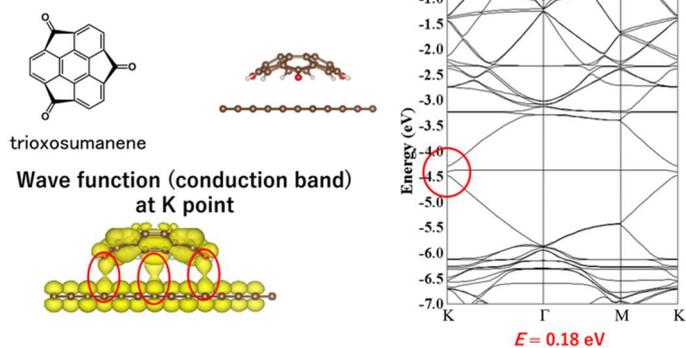
湾曲構造を有する非平面共役有機化合物「スマネン」をモチーフとして、平面性のグラフェン様物質に対して、「湾曲面を付与する」「湾曲物質をドーピングする」「湾曲物質をインターカレート」することによって、新たな2.5次元物質を創製することを目指す。また、有機合成手法を用いた、他の2次元物質の化学修飾に関与することで、領域の共同研究に寄与する。

2. 研究成果

2.1. トリオキソスマネンの物理吸着による単層グラフェンのバンドギャップ制御

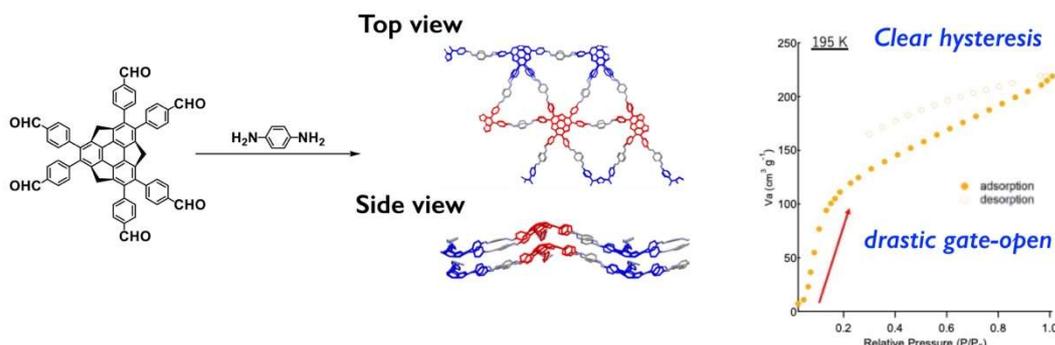
グラフェンの特徴の一つに、バンドギャップが0であることがあるが、半導体としての応用を想定した場合、適度なバンドギャップを簡便に付与する技術が求められる。これまでグラフェンナノリボン、2層グラフェン、フッ素化グラフェンの利用など、様々な手法が報告されているが、今回、理論計算により、スマネンの誘導体である「トリオキソスマネン」を物理吸着するだけで、単層グラフェンのバンドギャップが開くことを見出した。

トリオキソスマネンがお椀下向きに吸着する時のみ 0.18 eV のバンドギャップが開き、お椀上向きの場合には全く開かない。またさまざまな類縁体との比較により、お椀形状と酸素原子の存在、さらに有機分子の LUMO レベルがこの現象に大きな影響を与えていることが明らかとなった。



2.2. スマネン誘導体をモチーフとした波状 COF の合成

湾曲共役化合物をグラフェン様2次元炭素ネットワークに挿入できれば、2次元シートに湾曲性を付与することができる。若林らの理論予測により、そのような非平面シート構造には特異なバンド構造が生じると期待されることから、今回、スマネンを含む共有結合性有機構造体 (COF) の初めての合成に成功した。X線回折からのシミュレーションにより、このCOFは波状の構造を有していることがわかった。二酸化炭素ガス吸着測定において極めて低圧状態における顕著な構造変化およびヒステリシスを示し、湾曲構造に由来する特徴を示した。これは湾曲面に生じる局所的な双極子、あるいは四重極子に由来するものと考えられる。



3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] K. Kaibara, Y. Yakiyama, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, H. Sakurai, Bandgap engineering of graphene by molecular conformation of trioxosumanene, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **64**, 075002 (2025).
- [2] H. Uchiyama, T. Nakano, Y. Yakiyama, H. Sakurai, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, H. Kataura, Y. Ohno, Carrier doping in semiconducting carbon nanotubes with fluorosumanenes, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 17668 (2024).
- [3] D. Ecija, E. Pérez-Elvira, A. Gallardo, J. Santos, C. Martín-Fuertes, K. Lauwaet, J. M. Gallego, R. Miranda, H. Sakurai, J. I. Urgel, J. Björk, N. Martín, A. Barragán, Coronene-Based 2D Networks by On-Surface Skeletal Rearrangement of Sumanene Precursors, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **63**, e202414583 (2024).
- [4] H. Mizuno, H. Nakazawa, A. Miyagawa, Y. Yakiyama, H. Sakurai, G. Fukuhara, R Amplification sensing manipulated by a sumanene-based supramolecular polymer as a dynamic allosteric effector, *Sci. Rep.*, **14**, 12534 (2024).
- [5] Y. Yakiyama, M. Li, D. Zhou, T. Abe, C. Sato, K. Sambe, T. Akutagawa, T. Matsumura, N. Matubayasi, H. Sakurai Biased Bowl-Direction of Monofluorosumanene in the Solid State, *J. Am. Chem. Soc.*, **146**, 5224 (2024).
- [6] J. Han, Y. Uetake, Y. Yakiyama, H. Sakurai, Derivatization of sumanenetrione through Lewis acid-mediated Suzuki-Miyaura coupling and an unprecedented ring opening, *Chem. Commun.*, **59**, 4632 (2023).
- [7] H. Nakazawa, Y. Uetake, Y. Yakiyama, H. Sakurai, Synthesis of fully substituted sumanenes at the aromatic periphery through hexabromomethylation, *Asian J. Org. Chem.*, **12**, e202200585 (2023).

3.2. 招待講演

- [1] H. Sakurai, Sumanene as a unique motif for the curved network structure, Pasifichem 2025, Waikiki, Hawaii, USA, 2025 年 12 月
- [2] H. Sakurai, Buckybowl as a New Motif for 2.5-Dimensional Materials, 13th International Conference on Materials Science and Technology, Tashkent, Uzbekistan, 2025 年 10 月
- [3] H. Sakurai, Recent Progress in Sumanene Chemistry: A C_{3v} -symmetric Fragment of C_{60} , The 3rd Symposium for the Distinguished Lectureship Awards on the International Conference on Cutting-Edge Organic Chemistry in Asia, Bangkok, Thailand, 2025 年 6 月
- [4] H. Sakurai, Buckybowl Meets Carbons (Graphene), The 12th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2024), Astana, Kazakhstan, 2024 年 8 月
- [5] 櫻井 英博, スマネン科学の過去、現在、そして未来, 有機合成化学協会中国四国支部第 84 回パネル討論会「新しいn共役系の科学」, 広島, 2024 年 5 月
- [6] H. Sakurai, Recent Progress in Sumanene Chemistry: A C_{3v} -symmetric Fragment of C_{60} , XXIII NOST - Organic Chemistry Conference, Bhubaneswar, India, 2024 年 3 月
- [7] H. Sakurai, Sumanene: A C_{3v} -symmetric Fragment of C_{60} , The 65th FNTG General Symposium, Fukuoka, 2023 年 9 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、超分子ポリマー形成に起因する化学センサーの感度増幅 — ダイナミックアロステリックエフェクターの概念を提唱 (東京工業大学) 2024 年 6 月
- [2] プレス発表、単一分子だけで異なる誘電応答性を示す結晶作成に成功 (大阪大学) 2024 年 2 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 日本化学会理事 2024 年度、2023 年度
- [2] 日本化学会第 105 回春季年会特別企画：二次元材料の新展開—2.5 次元物質科学への誘い 企画 2025 年 3 月
- [3] 化学工業日報「日本化学会第 105 春季年会 二次元材料の新展開：2.5 次元物質科学への誘い “化学”の貢献で無限の可能性」 2025 年 3 月

高温高压法六方晶窒化ホウ素の成長ドメイン観察

渡邊 賢司 (物質・材料研究機構)

研究協力者：谷口 尚 (物質・材料研究機構)



1. 研究の目的

六方晶窒化ホウ素 (h-BN) は原子レベルで高い平坦性を有することから、2次元原子層材料研究において欠かせない絶縁体基板材料となっている。特に h-BN の均一で平滑な表面は、グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) などとのヘテロ構造を形成することにより、電子移動度や発光効率などのデバイス性能を飛躍的に向上させる上で重要な役割を果たしている。現在、世界的に幅広く使用されている高温高压法 (HPHT 法) 単結晶は、炭素を $10^{18}/\text{cm}^3$ 程度含む不純物成長ドメインが存在することが知られている。これらの不純物ドメインは、グラフェン等を用いた電子特性計測において、界面散乱やキャリア輸送特性へ影響を及ぼしたり、TMD 等の発光効率を低下させたりする可能性があることが指摘されている (M.Onodera, Carbon 167, 785, (2020))。最近では、このような欠陥に起因する発光の量子応用に向けた研究も盛んに行われるようになっておりその重要性が増している。そこで材料の信頼性評価や将来デバイス応用への指針を得るために、不純物成長ドメインの構造及び分布を詳細に観察した。

2. 研究成果：高温高压法六方晶窒化ホウ素の成長ドメイン観察

高温高压法により成長した結晶の中心部分に観測される六角形状の炭素ドメイン領域は 4.1eV からなる一連のブロードな不純物発光を示しエキシトン発光のみが観測される周囲の領域と比較することにより成長ドメイン領域を同定できる (Fig.1 a, b)。その中心部にしばしば放射線状のラインが観測される。この放射線状の形状は、ツイスト 2 層グラフェンや h-BN など SEM 観察されるパターンと類似しているが、そのサイズは 2 層グラフェン等の数 100 nm 程度に比べ桁違いに非常に大きく、数 100 ミクロンにもおよび、その積層構造がどのように形成されているか興味深い。まず、カソードルミネッセンス分光イメージで観察すると、放射線パターン上ではエキシトン発光が強く 215nm では明るいライン (幅 $10\mu\text{m}$ 程度) [Fig. 1 (a)]として、また、不純物発光波長領域では暗いラインとして観察される[Fig.1(b)]。いわゆる剛体層モードのラマン散乱マッピングではこのラインとドメイン領域の違いはほとんどなく、ドメイン領域全域のピーク位置の分布 (Fig.1(c))は非常に狭く、Fig.1(c)に示されるように分布の半値幅 0.08cm^{-1} である。これから導出される歪み分布は 0.01%以下であり、積層欠陥構造により格子定数が大きく変化しているとは考えにくい。

hBN はそれぞれの積層間に対称中心を持つので、もしこのような形状が 2 層グラフェンなどで見られるような積層の乱れに起因するものであれば、そのことにより新たな分極が生じる可能性がある。実際にケルビンプローブフォース顕微鏡 (KPFM：東大・町田研瀬尾氏) により評価してみたところ、周辺部と中心部で見られる表面電位のゆらぎに大きな差はなく、積層の乱れによるような大きな分極成分は観測できなかった。この領域を積極的に使った小野寺らの論文では炭素欠陥準位の影響が考察されているが、積層の乱れの影響の有無も含めてさらなる解析が必要であると思われる。

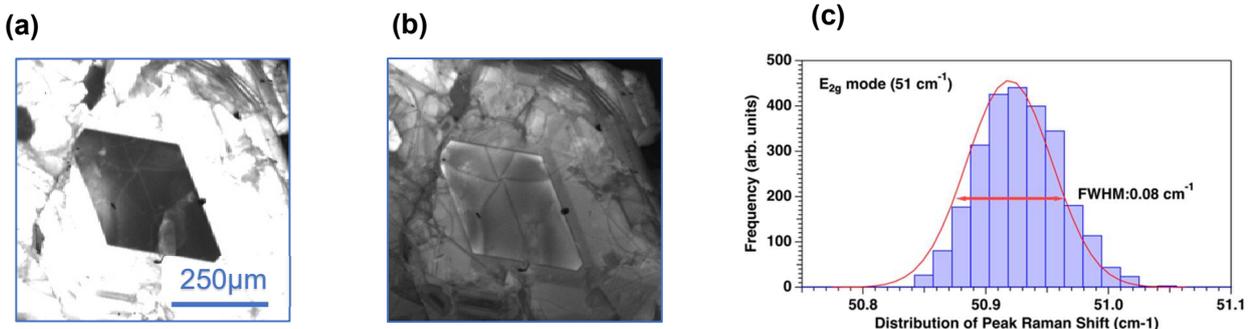


Figure 1. Cathodoluminescence images of carbon-rich domain: (a) Exciton emission at 5.76 eV (215 nm); (b) Defect band around 4.1 eV (300 nm); (c) Distribution of peak energy of the rigid layer mode (E_{2g}).

3. 研究成果

3.1. 領域内共同論文(2025年)

- [1] A. Nishimura, K. Kinoshita, R. Moriya, Y. Seo, M. Onodera, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, Negative differential resistance in ReSe₂/h-BN/ReSe₂ van der Waals tunnel junction, *Appl. Phys. Lett.*, **127**, 213101 (2025).
- [2] K. Kinoshita, R. Moriya, M. Onodera, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, Resonant Tunneling in WSe₂/h-BN/WSe₂/h-BN/WSe₂ van der Waals Triple Quantum Well Device, *ACS Nano*, **19**, 35592-35600 (2025).
- [3] R. Nakajima, T. Nishimura, K. Kanahashi, S. Hatayama, W. H. Chang, Y. Saito, T. Irisawa, K. Ueno, Y. Miyata, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Structural and Electric Characterization of Sputtered Pt/WSe₂ Contacts toward High-Performance 2D p-FETs, *ACS Omega*, **10**, 42973-42979 (2025).
- [4] S. Park, R. Moriya, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida, Emergent photo-thermoelectricity in localized bulk quantum Hall state of graphene, *Appl. Phys. Lett.*, **127**, 103105 (2025).
- [5] Y. Tsuji, R. Moriya, Y. Seo, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida, Defect-Assisted Photocurrent Generated in Landau-Quantized Graphene/Carbon-Doped h-BN/Graphite van der Waals Tunnel Junctions, *Nano Lett.*, **25**, 13334-13340 (2025).
- [6] H. Wang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, K. Matsuda, Direct Identification of Valley Coherence and Its Manipulation in Monolayer Two-Dimensional Semiconductor, *ACS Nano*, **19**, 21484-21491 (2025).
- [7] Y. Xiang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Magnetic brightening and its dynamics of defect-localized exciton emission in monolayer two-dimensional semiconductor, *Sci. Adv.*, **11**, eadr5562 (2025).
- [8] S. Asada, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Nonlinear photovoltaic effects in monolayer semiconductor and layered magnetic material hetero-interface with P- and T-symmetry broken system, *Nat. Commun.*, **16**, 4827 (2025).
- [9] D. Murase, K. Shinokita, Y. Wakafuji, M. Onodera, T. Machida, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Bi, Z. Zhou, S. Zhao, K. Matsuda, All Dry Transfer Processes Utilizing Au Exfoliation for Predetermined Shapes of Transition Metal Dichalcogenide, *Langmuir*, **41**, 10099-10107 (2025).
- [10] X. Yang, Y. Zhang, L. Chen, K. Aso, W. Yamamori, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, T. Machida, Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe₂, *ACS Nano*, **19**, 13007-13015 (2025).
- [11] H. Kim, H. Wang, Y. Wang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, K. Matsuda, Identification of Two-Dimensional Interlayer Excitons and Their Valley Polarization in MoSe₂/WSe₂ Heterostructure with h-BN Spacer Layer, *ACS Nano*, **19**, 322-330 (2025).

3.2. 招待講演

- [1] K. Watanabe, Optical Properties and Applications of h-BN: high Luminous Efficiency and Beyond, 2025 KPS (Korea Physical Society) Spring Meeting, Daejeon, Korea, 2025年4月
- [2] K. Watanabe, T. Taniguchi, Abundant optical properties of hexagonal boron nitride, META 2024 (14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics), Toyama, Japan, 2024年7月
- [3] K. Watanabe, Unique optical properties and applications of hexagonal boron nitride, FNTG65 (第65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), 福岡市, 国内, 2023年9月
- [4] K. Watanabe, Optical properties of Far-UV luminous hexagonal boron nitride and its applications, APS March Meeting 2023, Las Vegas, USA, 2023年3月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 2024年度 朝日賞 2025年1月
- [2] 第35回 つくば賞 2024年11月
- [3] K. Watanabe, T. Taniguchi, American Physical Society's 2023 James C. McGroddy Prize 2023年3月
- [4] K. Watanabe, T. Taniguchi, 2022 Clarivate Citation Laureate Award 2022年11月



4. 計画班 研究成果

A02

集積化班

2.5次元集積構造の構築

宮田 耕充
町田 友樹
荒井 俊人
松本 里香



2.5 次元集積構造の構築

宮田 耕充 (物質・材料研究機構ナノアーキテククス材料研究センター)

研究協力者：中西 勇介(現東京大学), 張 文金, 榎原 涼太郎



1. 研究の目的

2.5次元物質の構成要素としての遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)に着目し、高品質単結晶の CVD、およびそれらの面内接合や積層化する手法を開発する。また、試料提供による共同研究を通じて電子・光物性の探索やトランジスタ等の電子デバイス応用を推進し、領域研究の活性化に貢献する。

2. 研究成果

2.1. Janus WSSe/WSe₂ を利用した直径可変スクロール

TMD スクロールは、曲率やカイラリティに依存した物理現象を研究するための有望なナノ構造として、近年注目を集めている。しかしながら、直径を制御した多層スクロールを作製するための体系的な戦略や、構造に依存した光学特性を調べる手法は、いまだ十分に確立されていない。これまでに、本グループでは、その非対称構造に起因した内在ひずみにより、Janus TMD 単層が自発的にナノスクロールを形成することを報告してきた。本研究では、この発見を発展させ、Janus WSSe/WSe₂ ヘテロ構造から形成する直径可変なナノスクロールを実証した(Fig.1a)。多層の中に単層 Janus WSSe を組み込むことで、ヘテロ構造のスクロール化が促進され、約 10 nm から約 1 μm に至る広い範囲でスクロール直径を連続的に制御することが可能となった。得られた構造は、走査透過電子顕微鏡観察により、結晶性および組成の均一性を有することが確認された。さらに光学特性評価から、ラマン散乱の異方的応答や、一軸ひずみに起因する第二高調波発生 (SHG) の変調が観測された。本成果は、Janus TMD ベースのスクロールにおける構造制御性の実証および TMD の曲げ応答の理解に向けた重要な基盤となる。

2.2. グラフェン/SiC 基板による 単層 WSe₂ の熱歪み制御

TMD の物性や機能を制御する上で、熱歪みの制御は極めて重要である。熱歪みは、TMD と基板との間の熱膨張係数 (TEC) の不一致に起因して生じるが、従来用いられてきた基板では、表面粗さや帯電不純物の影響により、電子構造や光学応答における不均一性が生じることが課題であった。本研究では、graphene/SiC(0001) 基板上での van der Waals エピタキシーにより、単層 WSe₂ に均一な熱歪みを導入できることを示す。グラファイト基板上に成長した WSe₂ と比較すると、発光ピークは低エネルギー側にシフトし、さらに線幅が約 30% 狭くなることが確認された(Fig.1b)。これらの結果は、引張歪みに起因するバンド構造の変調と励起子散乱の抑制で解釈できる。また、SiC の小さな熱膨張係数に起因して WSe₂ に一様な引張歪みが導入されるとともに、界面に存在するグラフェンが不均一広がりを抑制していることを示唆している。本研究成果は、多様な vdW ヘテロ構造の物性・機能を熱歪みによって制御する新たな手法を提供し得るものとして期待される。

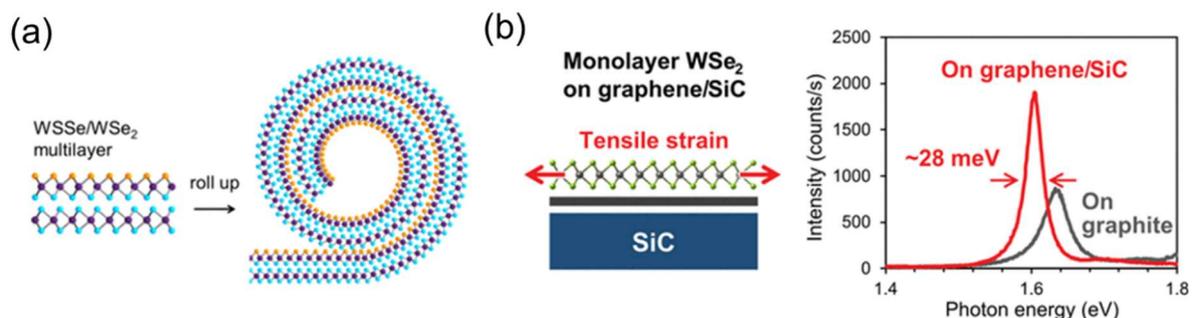


Figure 1. (a) Structure model of WSSe/WSe₂ heterobilayer and the corresponding nanoscroll (*ACS Nano* 2025). (b) Schematic illustration of tensile strain in monolayer WSe₂ on graphene/SiC(0001), together with typical photoluminescence spectra of monolayer WSe₂ grown on graphene/SiC (red) and on graphite (gray) (*Nano Lett.* 2025).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] R. Natsui, N. T. Hung, D. P. Gulo, K. R. Pasoquen, M. S. Ukhtary, H.-L. Liu, R. Saito, Y. Miyata^{*}, Optical anisotropy in laterally aligned W_6Te_6 nanowire bundles, *Appl. Phys. Lett.*, **127**, 151907 (2025).
- [2] T. Tanaka, Y. Sato, M. Aizaki, S. Furusawa, R. Senga, K. Suenaga, T. Endo, Y. Miyata, Y. Nakanishi^{*}, Confined growth of few-nanometer MoS_2 nanoribbons with optical anisotropy in insulating nanotubes, *Nano Lett.*, **25**, 14645–14652 (2025).
- [3] M. Kaneda, W. Zhang, D. Bi, T. Sun, H. Ogura, T. Endo, Y. Takahashi, S. Fujii, T. Kato^{*}, Y. Miyata^{*}, Tunable-diameter nanoscrolls from Janus $WSSe/WSe_2$ heterostructures, *ACS Nano*, **19**, 34918–34927 (2025).
- [4] R. Sakakibara^{*}, K. Hirata, Y. Takahashi, W. Norimatsu, Y. Miyata^{*}, Improved strain engineering of monolayer transition metal dichalcogenides via van der Waals epitaxy on graphene/ $SiC(0001)$, *Nano Lett.*, **25**, 12851–12858 (2025).
- [5] S. Toida, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio, Y. Miyata^{*} *et al.*, Transport properties of multilayer $Nb_xMo_{1-x}S_2/MoS_2$ in-plane heterostructure tunnel FETs on hexagonal boron nitride substrate, *Appl. Phys. Lett.*, **124**, 263101 (2024).
- [6] W. Zhang^{*}, K. Watanabe, Y. Yamada-Takamura, M. Koshino, S. Okada, K. Matsuda, T. Kato^{*}, Y. Miyata^{*} *et al.*, Chemically tailored semiconductor moiré superlattices of Janus heterobilayers, *Small Struct.*, **5**, 2300514 (2024).
- [7] M. Kaneda, Y. Yamada-Takamura, Y. Takahashi, S. Okada, T. Kato^{*}, Y. Miyata^{*} *et al.*, Nanoscrolls of Janus monolayer transition metal dichalcogenides, *ACS Nano*, **18**, 2772–2781 (2024).
- [8] Y. Nakanishi^{*}, Y. Yomogida, K. Yanagi, T. Kato, K. Suenaga, Y. Miyata^{*} *et al.*, Structural diversity of single-walled transition metal dichalcogenide nanotubes grown via template reaction, *Adv. Mater.*, **35**, 2306631 (2023).
- [9] R. Natsui, Y. Nakanishi^{*}, Y.-C. Lin, J. Pu, S. Okada, K. Suenaga, R. Saito^{*}, Y. Miyata^{*} *et al.*, Vapor-phase indium intercalation in van der Waals nanofibers of atomically thin W_6Te_6 wires, *ACS Nano*, **17**, 5561–5569 (2023).
- [11] H. Ago^{*}, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio, Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **23**, 275 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] Y. Miyata, Quantitative defect analysis in CVD-grown monolayer WSe_2 , 2D Transition Metal Dichalcogenides 2025 (2D-TMDs 2025), Cambridge, UK, 2025 年 7 月
- [2] Y. Miyata, Strain and defects engineering in transition metal dichalcogenide nanostructures, The 25th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT25), Kyoto, Japan, 2025 年 6 月
- [3] Y. Miyata, In-plane heterostructures based on 2D materials for advanced electronics, 2024 Workshop on Nanoscale Innovative Devices and Systems (WINDS), Hawaii, 2024 年 12 月
- [4] Y. Miyata, In-plane heterostructures based on transition metal dichalcogenides for advanced electronics, 2D Transition Metal Dichalcogenides 2024 (2D-TMDs 2024), Hong Kong, 2024 年 5 月
- [5] Y. Miyata, Growth and characterization of 1D transition metal chalcogenides, International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials 2024 (IWEPNM 2024), Kirchberg in Tirol, Austria, 2024 年 3 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] STAM Best Paper Award 2025 年 3 月
- [2] プレス発表、非対称な二次元シートを利用したナノサイズの巻物構造の実現（東京都立大学）2024 年 1 月
- [3] プレス発表、トンネル効果を示す層状半導体の接合構造を実現（東京都立大学）2023 年 4 月
- [4] プレス発表、無機ナノファイバーに金属原子を挿入する技術を開発（東京都立大学）2023 年 3 月
- [5] 昇進、中西 勇介、東京大学 准教授への昇進 2024 年 8 月
- [6] 昇進、榊原 涼太郎、物質・材料研究機構 研究員への昇進 2025 年 4 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] 長野県立飯田高校大学見学講座（東京都立大学）2024 年 8 月

ファンデルワールス複合原子層における物性創発と素子応用



町田 友樹 (東京大学生産技術研究所)

1. 研究の目的

ファンデルワールス (vdW) 積層技術を活用して、原子層の配列やツイスト角度を自在に制御した複合原子層を作製し、特異な物性の発現と素子応用への展開を目的とする。領域内の各研究者と有機的に共同研究して物性の解明・制御・創発を推進した。

2. 研究成果

2.1. ファンデルワールストンネル素子によるサブバンドエレクトロニクス

ファンデルワールス複合原子層を用いて、巨大なピーク・バレー電流比 (> 60) の負性微分抵抗を示す共鳴トンネル素子を実現した。今回達成した $PVR = 64$ (低温) は二次元層状物質の中で突出した大きさである。高周波発振においては PVR が大きいほど、印加 DC 電圧から発振 AC 電圧への変換効率が高くなるサブバンドエレクトロニクスおよびオプトエレクトロニクス分野の基盤となる成果であり波及効果大きい。

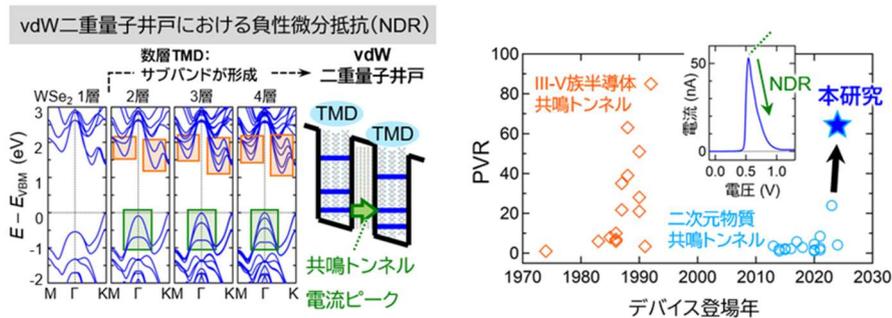


Figure 1. Observation of negative differential resistance in $WSe_2/h-BN/WSe_2$ vdW tunnel junctions.

2.2. モアレ超格子の実空間観測

vdW 積層により形成したモアレ構造のモアレ格子緩和の様子を透過型電子線顕微鏡観察および原子間力顕微鏡観察を活用して系統的に解明した。ツイスト WTe_2/WTe_2 , $ReSe_2/ReSe_2$ において一次元モアレ構造を観測した。原子層 + 原子層 + 原子層のツイスト三層積層構造 (グラフェン/グラフェン/h-BN) において二重モアレ構造を実空間観測し、モアレとモアレの干渉による特異な整合状態を発見した。

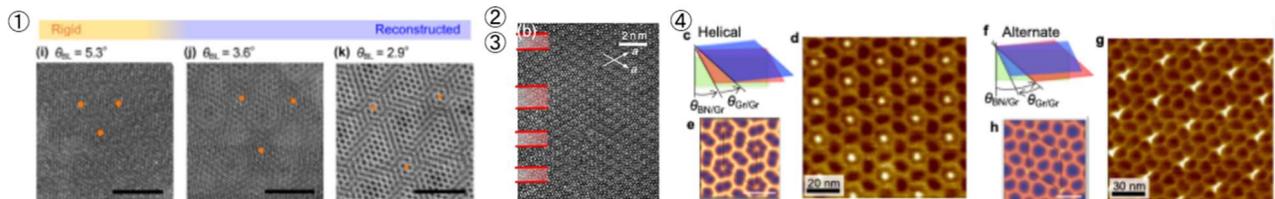


Figure 2. Observation of moire superlattices: twisted-bilayer WSe_2 , twisted-bilayer WTe_2 , graphene/graphene/h-BN.

2.3. 対称性エンジニアリング

空間反転対称性が破れている結晶では、電圧印加なしで光電流が発生するバルク光起電力効果が出現する。主要な起源として考えられているシフト電流は、価電子帯と伝導帯のベリー接続の差に起因し、系の対称性と密接な関わりがある。系の対称性を人工的に制御する方法として、h-BN/グラフェン/黒リン(BP)を vdW 積層した。グラフェン、h-BN、BP はそれぞれ空間反転対称性を持つが、結晶方位を揃えて積層することで 1つの鏡面对称性のみをもつ対称性の低い構造を実現できる。鏡映面と平行な向きにバルク光起電力効果が出現し、光電流が発生した。光電流のレーザーパワー依存性、偏光依存性、励起強度依存性はいずれもシフト電流が起源の場合に予想される振舞いと一致した。テラヘルツ放射分光を用いて光電流のダイナミクスを評価したところ、短時間で電流の向きが反転していることを確認した。この振舞いは観測した光電流がシフト電流由来であることの決定的な証拠である。

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] K. Kinoshita, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Resonant Tunneling Oscillators Based on WSe_2/h -BN/ WSe_2 van der Waals Double Quantum Wells, *Nano Lett.* (2025).
- [2] A. Nishimura, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Negative differential resistance in $ReSe_2/h$ -BN/ $ReSe_2$ van der Waals tunnel junction, *Appl. Phys. Lett.*, **127**, 213101 (2025).
- [3] K. Kinoshita, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Resonant Tunneling in WSe_2/h -BN/ WSe_2/h -BN/ WSe_2 van der Waals Triple Quantum Well Device, *ACS Nano*, **19**, 35592 (2025).
- [4] Y. Tsuji, K. Watanabe, T. Machida *et al.*, Defect-Assisted Photocurrent Generated in Landau-Quantized Graphene/Carbon-Doped h-BN/Graphite van der Waals Tunnel Junctions, *Nano Lett.*, **25**, 13334 (2025).
- [5] X. Yang, K. Watanabe, T. Sasagawa, M. Koshino, T. Machida *et al.*, Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe_2 , *ACS Nano*, **19**, 13007 (2025).
- [6] Y. Seo, K. Watanabe, T. Machida *et al.*, Spectrum of Tunneling Transport through Phonon-Coupled Defect States in a Carbon-Doped Hexagonal Boron Nitride Barrier, *Nano Lett.*, **24**, 13733 (2024).
- [7] K. Kinoshita, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Negative Differential Resistance Device with High Peak-to-Valley Ratio Realized by Subband Resonant Tunneling of Γ -Valley Carriers in WSe_2/h -BN/ WSe_2 Junctions, *ACS Nano*, **18**, 28968 (2024).
- [8] K. Kinoshita, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Control of Subband Energies via Interlayer Twisting in an Artificially Stacked WSe_2 Bilayer, *Nano Lett.*, **24**, 12211 (2024).
- [9] K. Kinoshita, Y.-C. Lin, K. Watanabe, T. Sasagawa, K. Suenaga, T. Machida *et al.*, Crossover between rigid and reconstructed moiré lattice in h-BN-encapsulated twisted bilayer WSe_2 with different twist angles, *Nanoscale*, **16**, 14358 (2024).
- [10] S. Kawasaki, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Minigap-induced negative differential resistance in multilayer MoS_2 -based tunnel junctions, *Phys. Rev. Research*, **6**, 033011 (2024).
- [11] K. Kinoshita, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Polarity-dependent twist-controlled resonant tunneling device based on few-layer WSe_2 , *Phys. Rev. Research*, **5**, 043292 (2023).
- [12] Y. Zhang, M. Sakano, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Symmetry Engineering in Twisted Bilayer WTe_2 , *Nano Lett.*, **23**, 9280 (2023).

3.2. 招待講演

- [1] T. Machida, Symmetry engineering and subband electronics using van der Waals assembly of transition metal dichalcogenides, Grahpen 2025, San Sebastian, Spain, 2025 年 6 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、二次元格子をひねって重ねると一次元超格子が出現——二次元原子層物質が一次元物性研究の新しいプラットフォームに——（東京大学）2025 年 3 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] 特願 2025-134755、層状物質の薄膜の生産に用いる粘着フィルム、及び該粘着フィルムを用いて層状物質の薄膜を生産する方法 2025 年 8 月
- [2] 特願 2025-026751、ナノシート脱着用フィルムおよびその製造方法とナノシート脱着方法 2025 年 2 月
- [3] 特願 2022-94928、フレーク状物質の操作方法、及びフレーク状物質を用いた物品の生産方法
- [4] 登録番号：12459818（アメリカ）、フレーク状物質の操作方法、及びフレーク状物質を用いた物品の生産方法 2025 年 11 月

二次元有機分子層を用いた2.5次元構造の構築と機能開拓

荒井 俊人 (物質・材料研究機構 高分子・バイオ材料研究センター)



1. 研究の目的

2.5次元物質の構成要素となる高品質な有機分子層を形成する手法を開発し、共同研究を通じて物性開拓やデバイス応用を進める。有機半導体・強誘電体の高性能化に加えて、領域内で主として用いられている原子層・ナノチューブといった半導体と複合化するためのゲート絶縁層材料の開発も行うことで、2.5次元集積構造の高機能化につなげる。

2. 研究成果

2.1. 分子層の自在積層と高急峻スイッチング有機トランジスタの作製

有機半導体は、軽い・柔らかい・塗布製膜可能という、シリコンなどの半導体にはない特長を有し、電子デバイスの軽量化・ウェアラブル化に適した素材の1つである。こうした有機半導体を用いた電子デバイスのなかでも有機薄膜トランジスタ (TFT) は基本的なスイッチング素子であり、その移動度の向上や低電圧・安定駆動化が求められている。これまでの本領域での研究により、高移動度化に適した分子層内の配列制御や、電極付近での分子積層構造制御の重要性が明らかになり、高性能化にむけた基盤が整ってきた。しかしながら、こうした層内配列や分子積層が高度に制御された薄膜を自在に作製することは困難であり、とくに低電圧駆動に有効な撥液性の高い絶縁層表面に半導体層を自在に形成することは困難だった。

そこで我々は、原子層物質で行われているような転写法を応用し、分子層を1層ずつ転写形成する方法を検討した (Fig. 1(a))。ここでは半導体機能を担うn電子骨格を構成する複素環の数(n)を変えた素材を対象に、その膜安定性を調べた。n=4の結晶では転写時に特定の結晶方位に沿ってごく微細な亀裂ができ、デバイス性能が悪化するのに対して、そこにベンゼン環を1つ加えたn=5の素材ではn電子骨格間の相互作用が増強されることで亀裂なく転写できることがわかった。そこで、この素材を用いて、分子層を1層ずつ積層した人工格子を構築した。これをもとに作製した有機TFTは線形領域・飽和領域ともに $10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ を超える移動度と2V以下の低電圧駆動、 70 mV dec^{-1} 以下の急峻なスイッチング特性を示した (Fig. 1(b))。本研究成果は、低電圧駆動が求められるウェアラブルデバイスの応用に寄与するものと期待される。

2.2. 薄層内の分子運動自由度を活用した絶縁層材料の開発

これまで有機TFTにおいて主として用いてきた絶縁層素材は、電荷キャリアのトラップ要因を抑制すべく、きわめて高い撥液性を有することから、リソグラフィ等のデバイス製造プロセスに不向きであるという課題があった。そこで、ポリマー系の素材でありながら、適切な触媒を加えることで硬化を促し、プロセス耐性を高めた絶縁層材料の開発に取り組んだ (投稿準備中)。特に、この硬化型絶縁層の層内に適切な有機分子を取り込むことで、配向分極に由来する高い比誘電率が得られることがわかった。そこで、実際にこの素材をゲート絶縁層として、有機半導体やカーボンナノチューブのTFTを試作したところ、いずれの場合も良好なスイッチング特性が得られた。これは有機・無機複合デバイスの新たな開発指針を拓くものと期待される。

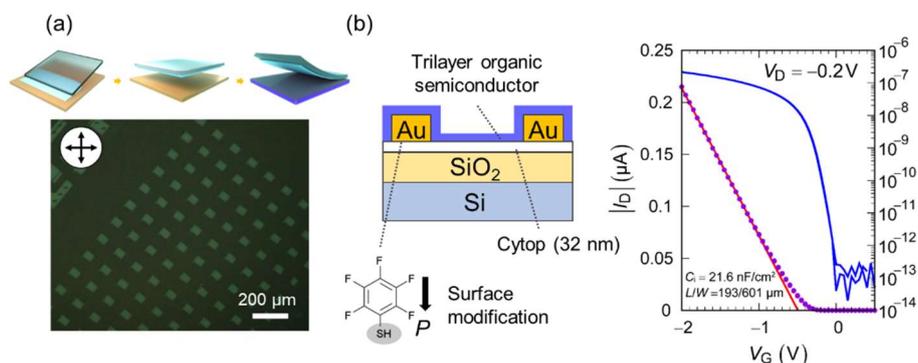


Figure 1. (a) (top) Schematic for the molecular layer transfer technique. (bottom) Crossed-Nicol image of the transferred film. (b) (left) Schematic for device structure. (right) Typical characteristics of a fabricated organic TFT.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] L. Li, S. Arai *et al.*, Synergistically Coordinated Ni Complex Ink for Low-Temperature and Highly Reliable Printed Electronics, *Adv. Funct. Mater.*, in press.
- [2] M. Tenjimbayashi, S. Arai *et al.*, Manipulating Pico-to Nanoliter Droplets on Surfaces without Sticking, *ACS Nano*, **19** (45), 39398 (2025).
- [3] S. Arai^{*}, Advanced self-assembly control of rod-shaped organic semiconductors, *SPIE Conf. Proc.*, **12907**, 28 (2024).
- [4] K. Murata, G. Kitahara, S. Inoue, T. Higashino, S. Matsuoka, S. Arai, R. Kumai, T. Hasegawa, Stability of ternary interfaces and its effects on ideal switching characteristics in inverted coplanar organic transistors, *Phys. Rev. Appl.*, **21** (2), 024005 (2024).
- [5] S. Arai^{*} *et al.*, Temperature-induced transformation between layered herringbone polymorphs in molecular bilayer organic semiconductors, *Phys. Rev. Mater.*, **7**, 025602 (2023).
- [6] H. Murase, S. Arai *et al.*, Spatiotemporal observation of quantum crystallization of electrons, *Nat. Commun.*, **14**, 6011 (2023).
- [7] Y. Uemura, S. Matsuoka, S. Arai *et al.*, Intersecting multi-axial domain walls in plastic ferroelectric crystal films, *Phys. Rev. Mater.*, **7**, 035601 (2023).
- [8] K. Nikaïdo, S. Inoue, R. Kumai, T. Higashino, S. Matsuoka, S. Arai, T. Hasegawa, Mixing-Induced Orientational Ordering in Liquid-Crystalline Organic Semiconductors, *Adv. Mater. Interfaces*, **9** (35), 2201789 (2022).
- [9] S. Matsuoka, K. Ogawa, R. Ono, K. Nikaïdo, S. Inoue, T. Higashino, M. Tanaka, J. Tsutsumi, R. Kondo, R. Kumai, H. Matsui, S. Tsuzuki, S. Arai, T. Hasegawa, Observation and origin of isostructural donor-acceptor stacking in a family of molecular-compound organic semiconductors, *J. Mater. Chem. C*, **10**, 16471 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] 荒井 俊人, 有機トランジスタの高効率キャリア輸送に向けた分子配列制御, ISSP ワークショップ 「デバイス活用で臨む有機伝導体の未来」 東京大学物性研究所, 日本, 2024 年 3 月
- [2] S. Arai, Advanced self-assembly control of rod-shaped organic semiconductors, SPIE. Photonics West, San Francisco, United States, 2024 年 3 月
- [3] 荒井 俊人, 層状有機半導体の集合構造制御と高効率キャリア輸送, 超分子研究会 ~n共役系有機分子の合成・集合構造と機能~, 東京, 日本, 2023 年 5 月
- [4] S. Arai, Layered Organic Semiconductors for High-Performance Printed Transistors, 13th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME2022) 2022 年 12 月
- [5] S. Arai, Crystal Engineering of Layered Organic Semiconductors for High-Performance Printed Transistors, 2022 Asian Conference on Nanoscience & Nanotechnology (AsiaNANO 2022), Busan, Korea, 2022 年 11 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 日刊工業新聞「接着層なし異材接合」 2025 年 5 月
- [2] 日刊工業新聞「高均質分子膜作製 有機 TFT 高性能化」 2024 年 4 月
- [3] 理事長賞 (研究奨励賞) 物質・材料研究機構 2025 年 4 月
- [4] 令和 6 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 2024 年 4 月
- [5] ARN Young Scientists Awards, Asian Research Network Korea 2022 年 11 月
- [6] 昇進、物質・材料研究所 独立研究者、2022 年 11 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 特願 2025-064549 複合体の製造方法、複合体、多孔層形成用組成物、及び多孔層 2025 年 4 月
- [2] nano tech 2025 第 24 回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 2025 年 1 月

気相法による二次元物質へのインターカレーション

松本 里香 (東京工芸大学工学部)



1. 研究の目的

グラフェンをはじめとする二次元物質にアルカリ金属、アルカリ土類金属、および金属塩化物等をインターカレーションし、2.5次元物質となる層間化合物の合成を行う。特に、従来の黒鉛では実現しないナトリウムやマグネシウムの層間化合物の形成を目指す。さらに、領域内共同研究者が作製した2.5次元物質試料に対してアルカリ金属インターカレーションを行い、提供する。

2. 研究成果

2.1. グラフェンを用いた Na インターカレーション

ポストリチウムイオン電池としてナトリウムイオン電池が注目されており、一部では実用化も始まっている。しかし、リチウムイオン電池で確立された炭素負極材料を、そのままナトリウムイオン電池へ適用することはできない。これは、ナトリウムが黒鉛へのインターカレーションを十分に進行させないためである。我々はこれまで、グラフェンを用いた Na インターカレーションについて、反応条件および GIC 構造の検討を進めてきた。その結果、A01 班の吾郷グループの二層グラフェン (BLG) を用いて、Na のインターカレーションを可能とし、Na-BLG の構造を明らかにした (論文[1])。さらに、我々は重アルカリ金属 (K, Rb, Cs) をインターカレーションした BLG において、BLG 層間でアルカリ金属が 2 層構造を形成していることを明らかにしているが (論文[5])、Na の場合には 3 層構造を形成していることを確認した。この結果は、炭素材料への Na 吸蔵量の増加に寄与するだけでなく、高密度 Na 層の形成による超伝導性の発現など、新規物性の創出につながる可能性を示している。

2.2. グラフェンライクグラファイトを用いた Na および Mg のインターカレーション

黒鉛類似物質であるグラフェンライクグラファイト (GLG) への Na および Mg のインターカレーションを進めている。Na は黒鉛ではステージ 8 構造 (8 層ごとに挿入) 程度の層間化合物しか形成しないが、GLG の場合には茶褐色のステージ 1 構造を形成した。一方、Mg-GLG では X 線回折測定からステージ 1 構造の形成が示唆されたものの、ラマンスペクトル、電気伝導率、外観変化に乏しく、明確な判断が困難であった。そこで今期は Mg-GLG の合成条件を再検討し、その結果、ラマンシフトの観測に成功した。現在は、さらに GLG の結晶性を制御し、より高濃度にインターカレーションさせる条件の探索を進めている。Mg-GLG は黒鉛系材料において初めてステージ 1 構造を形成した可能性がある。

2.3. 結晶性の異なる KC_{24} 化合物の層間内に置ける相転移の観測

二次元物質とインターカレーション物質の相互関係は、形成挙動や層間化合物の物性に大きく影響するため重要である。我々は、ステージ 2 構造のアルカリ金属層間化合物 KC_{24} および RbC_{24} を、結晶性の異なる黒鉛をホストとして合成し、電気抵抗率の温度依存性に現れる相転移を調査した。黒鉛はポリイミドフィルムを異なる温度で熱処理して調製した。その結果、熱処理温度 2400~2600℃付近で層間距離および抵抗率が大きく変化する構造転移が確認された。この温度域を境に、低結晶性黒鉛をホストとした場合には、層間アルカリ金属の秩序-無秩序転移が観測されなくなることが明らかとなった。

2.4. アルカリ金属黒鉛層間化合物の色標本

黒鉛へのアルカリ金属インターカレーションにより、顕著な色変化が生じることは知られているが、体系的な記録は存在しない。そこで、同一黒鉛を用いて合成した各種アルカリ金属 GIC を、統一条件下で撮影・構造解析・物性測定し、整理・記録した (Fig. 1, 論文[2])。

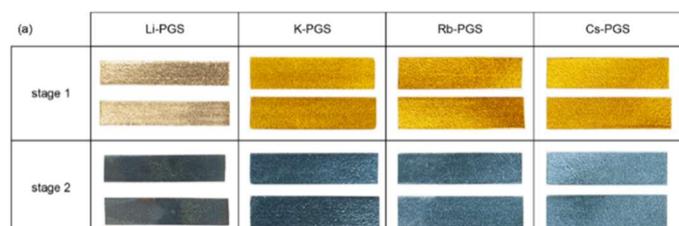


Figure 2. Color samples of Li-, K-, Rb-, and Cs-GICs prepared from PGS graphite sheets.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, M. G. -Asl, P. Solís-Fernández, E. Nishibori, H. Ago, A.V. Krasheninnikov, K. Suenaga, Na Intercalation in Bilayer Graphene: Formation of a Close-Packed Trilayer, *ACS Nano*, **19**, 40612-40619 (2025).
- [2] R. Matsumoto, M. Oshima, K. Yamada, T. Yukiya, M. Sanekata, Compilation and characterization of the visual appearance of alkali metal graphite intercalation compounds, *Carbon Reports*, **4**, 201-214 (2005).
- [3] J. Inamoto, A. Inoo, R. Matsumoto, Y. Matsuo, Role of Oxygen Functional Groups in Electrochemical Sodium Ion Intercalation into Oxygen-Functionalized Graphitic Carbon Materials, *Electrochemistry*, **93**, 057001 (2025)
- [4] H. Ando, K. Hashi, S. Ohki, R. Matsumoto, K. Gotoh, Strategic approaches to observing 39K NMR signals from potassium-graphite intercalation compounds, *Chem. Lett.*, **53**, 195 (2004).
- [5] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, Q. Liu, P. Solís-Fernández, M.-D. Siao, P.-W. Chiu, H. Ago, K. Suenaga, Alkali metal bilayer intercalation in graphene. *Nat Commun.*, **15**, 425 (2024).
- [6] R. Matsumoto, Polyimides: Advances in Blends and Nanocomposites (Chapter 7 "Characteristics and potential applications of graphite intercalation compounds prepared from polyimide-based pyrolytic graphite films"), *Elsevier*, 267-291 (2023).
- [7] Y. Araki, P. Solís-Fernández, Y.-C. Lin, A. Motoyama, K. Kawahara, M. Maruyama, Y. Gao, R. Matsumoto, K. Suenaga, S. Okada, H. Ago, Twist angle-dependent molecular intercalation and sheet resistance in bilayer graphene, *ACS Nano*, **16**, 14075-14085 (2022).
- [8] Y.-C. Lin, A. Motoyama, P. Solís-Fernández, R. Matsumoto, H. Ago, K. Suenaga, Coupling and Decoupling of Bilayer Graphene Monitored by Electron Energy Loss Spectroscopy, *Nano Lett.*, **21**, 24, 10386-10391 (2021).

3.2. 招待講演

- [1] 松本 里香, 黒鉛系材料におけるドナー型インターカレーション: 最近の話題, ナノフロンティア材料研究会 2025, NIMS 筑波, 2025 年 12 月
- [2] R. Matsumoto, Investigating intercalated graphite, multi-layer graphene, and bi-layer graphene synthesized via the vapor phase method, 第 65 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, 九州大学, 2023 年 9 月
- [3] 松本 里香, 黒鉛層間化合物に関する最近の話題, CPC 研究会, オンライン, 2022 年 11 月
- [4] 松本 里香, 黒鉛層間化合物の色標本の作製, 黒鉛化合物研究会, オンライン, 2022 年 2 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

なし

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

なし



4. 計画班 研究成果

A03

分析班

2.5次元構造体の 分析技術開発

松田 一成
西堀 英治
末永 和知
坂野 昌人



2.5次元物質のナノ光科学の展開



松田 一成 (京都大学エネルギー理工学研究所)

研究協力者：篠北 啓介 (同上、現分子科学研究所)

1. 研究の目的

本研究では2.5次元物質科学において重要となる、2.5次元物質で発現する特異な構造や電子状態の解明に資する分析手法や技術を開発し、その学術発展を支えることにある。具体的には、光による先端分析技術とそれによって得られる知見を通して、物質創製や新奇物性、機能創出によるデバイス応用研究などを支援するとともに、「2.5次元物質科学」の基盤となる分析科学の学理を担う。

2. 研究成果

2.1. 2.5次元物質の量子科学応用に向けたモアレ励起子での量子コヒーレンス

量子コンピューティングなどに代表される量子技術では、量子ビットと呼ばれる演算単位を用意する必要があり、その量子ビットではコヒーレンス時間が重要な物理量となっている。二次元半導体を積層した2.5次元物質においては、モアレ干渉縞によって閉じ込められた電子とホール対(モアレ励起子)を、量子ビットとして機能させることが期待されている。しかし、光計測では回折限界により十分に光を絞り込めず、多数のモアレ励起子からの信号観測しかできず、量子コヒーレンス時間に関する情報は未解明のままであった。

本研究期間において、この技術的な困難を克服するため $WSe_2/MoSe_2$ からなるヘテロ構造において、微細加工技術によって、観測するモアレ励起子数を制限する新しい手法を開発した(論文[7])。これにより、単一のモアレ励起子からの発光を検出することが可能となり、それにマイケルソン干渉計での計測を組み合わせることで、一個のモアレ励起子の量子コヒーレンス時間を直接測定することを可能とした(Fig.1(a))。その結果、モアレ励起子の量子コヒーレンスは、5 Kの低温で12 ps以上維持されていることが明らかとなった(Fig.1(b))。これは、二次元半導体での励起子のコヒーレンス時間よりも10倍以上長く、励起子がモアレポテンシャルに閉じ込められることで、コヒーレンス消失が抑制されていることを明らかにした。さらに量子ビートと呼ばれる現象から、二つの異なるモアレに閉じ込められたモアレ励起子間の量子干渉などその間での結合が示唆されている。モアレ干渉縞に閉じ込められたモアレ励起子は、その量子コヒーレンス時間が判明し、次のステップとしてその量子操作の実験を行う足掛かりができた(Fig. 1(c))。

2.2. 2.5次元物質での量子欠陥による量子光学

二次元半導体である単層 WSe_2 に欠陥を導入し、そこからの発光を通して、量子情報通信に必要とされる単一光子源としての機能を調べた。その結果、わずかな磁場をかけると、発光強度が強くなり単一光子発生の様子が変化することを見出した(論文[2])。これは、外部磁場を用いて単一光子源を制御するという新しい手段を提供し(Fig.1(d))、量子通信や量子コンピューティングの将来技術にとって重要な進展と言える。

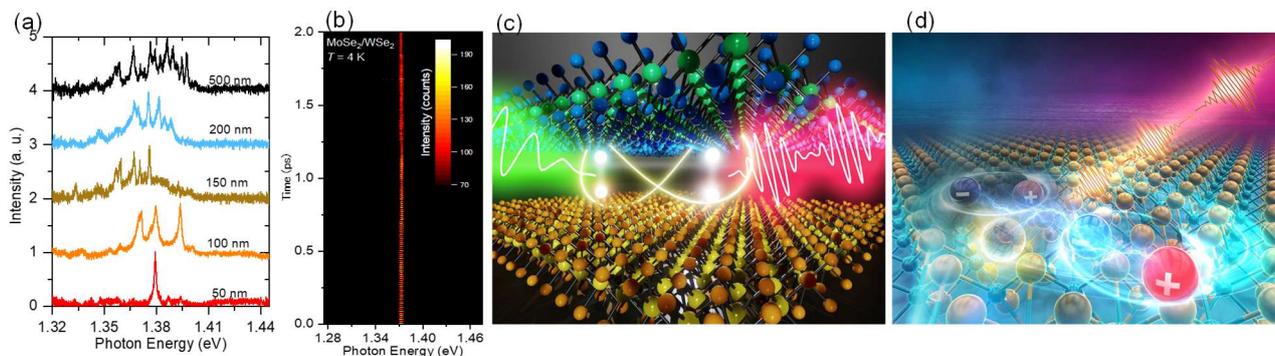


Figure 1. Achievement during this project. (a), (b) Selection of photoluminescence peak and interferogram of moiré excitons (*Nat. Commun.*2024). (c) Schematic of moiré exciton coherence. (d) Schematic of increase of single photon emission rate by magnetic field (*Sci. Adv.* 2025).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] S. Asada, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda^{*}, Nonlinear photovoltaic effects in monolayer semiconductor and layered magnetic material hetero-interface with *P*- and *T*-symmetry broken system, *Nat. Commun.*, **16**, 4827 (2025).
- [2] Y. Xiang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda^{*}, Magnetic brightening and its dynamics of defect-localized exciton emission in monolayer two-dimensional semiconductor, *Sci. Adv.*, **11**, adr5562 (2025).
- [3] F. Yang, W. Idehara, K. Tanaka, K. Shinokita, H. Zhao^{*}, K. Matsuda^{*}, Autonomous robotic mechanical exfoliation of two-dimensional semiconductors combined with Bayesian optimization, *ACS Nano*, **19**, 39005 (2025).
- [4] H. Wang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, K. Matsuda^{*}, Direct identification of valley coherence and its manipulation in monolayer two-dimensional semiconductor, *ACS Nano*, **19**, 21484 (2025).
- [5] H. Kim, H. Wang, Y. Wang, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Konabe, K. Matsuda^{*}, Identification of two-dimensional interlayer excitons and their valley polarization in MoSe₂/WSe₂ heterostructure with *h*-BN spacer layer, *ACS Nano*, **19**, 322 (2025).
- [6] D. Murase, K. Shinokita, M. Onodera, T. Machida, K. Watanabe, K. Matsuda^{*}, *et. al.*, All dry transfer processes utilizing Au exfoliation for predetermined shapes of transition metal dichalcogenide, *Langmuir*, **41**, 10099 (2025).
- [7] H. Wang, H. Kim, D. Dong, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda^{*}, Quantum coherence and interference of a single moiré exciton in nano-fabricated twisted monolayer semiconductor heterobilayers, *Nat. Commun.*, **15**, 4905 (2024).
- [8] H. Kim, D. Dong, Y. Okamura, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda^{*}, Dynamics of moiré trion and its valley polarization in a microfabricated WSe₂/MoSe₂ heterobilayer, *ACS Nano*, **17**, 13715 (2023).
- [9] Y. Zhang, H. Kim, W. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda^{*}, Magnon-coupled intralayer moiré trion in monolayer semiconductor–antiferromagnet heterostructures, *Adv. Mater.*, **34**, 2200301 (2022).
- [10] K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda^{*}, Valley relaxation of the moiré excitons in a WSe₂/MoSe₂ heterobilayer, *ACS Nano*, **16**, 16862 (2022).
- [11] H. Ago^{*}, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio, Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **23**, 275 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] K. Matsuda, Recent progress of optical science using moiré excitonic states in van der Waals heterostructure, 2D Transition Metal Dichalcogenides 2025 (2D-TMDs 2025), Cambridge, UK, 2025年7月
- [2] K. Matsuda, Optical physics and quantum optics using moiré excitons in artificial van der Waals semiconducting heterobilayer, Graphene 2025, 25-28, June, 2025, San Sebastian, Spain 2025年6月
- [3] K. Matsuda, Quantum optics and application using moiré excitons in artificial van der Waals semiconducting heterobilayer, RPGR 2024 (The 15th Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research Conference), Nanjing, China, 2024年7月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、二次元半導体ヘテロ界面における磁気バルク光起電力効果の実証 (京都大学) 2025年6月
- [2] プレス発表、次世代半導体中の欠陥からの磁場による発光の増強と単一光子発生 (京都大学) 2025年6月
- [3] 昇進、篠北 啓介、分子科学研究所 准教授、2025年1月
- [4] プレス発表、二次元半導体を重ねたモアレ縞からの量子コヒーレンス測定に成功 (京都大学) 2024年7月

2.5次元物質の先端量子ビーム構造計測



西堀 英治 (筑波大学数理物質系・エネルギー物質科学研究センター)

研究協力者：笠井 秀隆 (2024年度まで)

1. 研究の目的

2.5次元物質の構成要素となる各種の二次元物質および構成された2.5次元物質の原子配列構造を放射光X線やX線自由電子レーザー等の先端X線光源を高度に利用して計測する技術を開発するとともに、共同研究を通じて開発した手法の物質科学研究への応用を進めていく。定期的な施設のマシンタイム獲得により、領域内の研究者から試料を集め、グラフェンやhBNなどの軽元素系から遷移金属ダイカルコゲナイドまでの幅広い二次元物質を対象として、領域研究の活性化に貢献する。

2. 研究成果

2.1. 多層グラフェンのX線構造評価法の確立

グラフェンにおける層間距離はそのバンド構造や物性を決定づける重要な因子である。マクロな物質の層間距離の決定法としてもっとも一般的に用いられる手法はX線回折である。一般にX線回折で得られる情報は、周期構造に基づくバンド構造が定期可能な μm スケールの範囲の平均的な層間距離や格子定数を与えることができる。これまでにX線回折により3.55~3.664Åの2層グラフェンの層間距離が報告されている。この層間距離はグラファイトの層間距離3.35Åよりも0.2Å以上長く、DFT計算の結果やX線反射率や高エネルギー陽電子回折の結果と一致していない。

我々はSPring-8の高強度で高平行性をもつ放射光を用いて、数層グラフェンの層間距離を精密に決定する方法の開発を進めている。これまでに、Bragg散乱としての解析、薄膜反射率の解析に利用されるParrattの方法による解析、動力学的回折理論を利用した解析など様々な解析法で検討を行ってきた。Parrattの方法による解析は、European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)のグループの研究で利用され、 $10\mu\text{m}^2$ 程度の領域の均一な2層グラフェンで3.35Åの層間距離が得られると報告されている。一方でセンチメートルオーダーの面積でのCVDグラフェンのX線回折を調べたHuhらのX線回折の結果では明瞭なピーク位置変化が観測されており、3.6Å程度から層数の増加に伴い3.35Åに近づく様子が観測されている。Huhの結果の問題点は、回折線幅から見積もった全体の層の厚みがグラフェンと整合しないこと、理論や別の測定で観測されていない層数の減少に伴う層間の拡大が見られることにある。2024~2025年度は、CVDグラフェンにSPring-8で開発を進めてきた $5\mu\text{m}^2$ サイズのX線による薄膜評価法を適用し、グラフェンの層間距離を調べた。その結果、 $5\mu\text{m}^2$ サイズのX線でも、Huhの測定と同様の散乱peakの層数変化に伴う移動が観測された (Fig 1)。この結果を様々な方法で解析した結果、ピーク位置の変位はグラフェンの層間距離変化ではなく、その平坦性の低下に起因することが分かった。現在、論文を執筆中である。

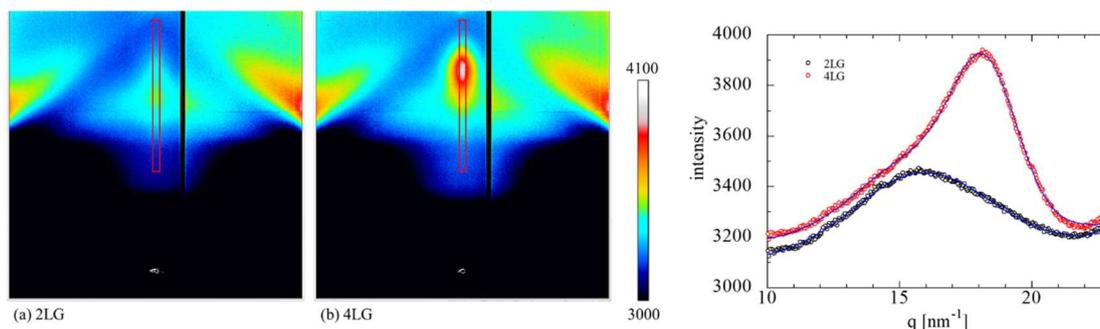


Figure 1. Micro-beam X-ray diffraction patterns of two and four layer graphene (2LG and 4LG). (a) 2D pattern of 2LG (b) 2D pattern of 4LG and 1D profiles.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] J. Zhang, N. Roth, K. Tolborg, S. Takahashi, L. Song, M. Bondesgaard, E. Nishibori, B. B. Iversen, Direct observation of one-dimensional disordered diffusion channel in a chain-like thermoelectric with ultralow thermal conductivity, *Nat. Commun.*, **12**, 6709 (2021).
- [2] R. Pal, D. Jayatilaka, E. Nishibori, Structure Factors and Charge Density Description of Aluminum: A Quantum Crystallographic Study, *J. Phys. Chem. A*, **126**, 2042-2049 (2022).
- [3] E. S. Vosegaard, M. K. Thomsen, L. Krause, T. B. E. Gronbech, A. Mamakhel, S. Takahashi, E. Nishibori, B. B. Iversen, Synchrotron X-ray Electron Density Analysis of Chemical Bonding in the Graphitic Carbon Nitride Precursor Melamine, *Chem. Eur. J.*, **28**, e202201295 (2022).
- [4] Y. Zheng, H. Kasai, S. Kobayashi, S. Kawaguchi, E. Nishibori, In situ observation of a mechanically induced self-sustaining reaction for synthesis of silver, *Mater. Adv.*, **4**, 1005-1010 (2022).
- [5] T. Fujita, Y. Chen, Y. Kono, S. Takahashi, H. Kasai, D. Campi, M. Bernasconi, K. Ohara, H. Yumoto, T. Koyama, H. Yamazaki, Y. Senba, H. Ohashi, I. Inoue, Y. Hayashi, M. Yabashi, E. Nishibori, R. Mazzarello, S. Wei, Pressure-induced reversal of Peierls-like distortions elicits the polyamorphic transition in GeTe and GeSe, *Nat. Commun.*, **14**, 7851 (2023).
- [6] H. Kasai, K. Maeda, E. Nishibori, Reaction Pathway in the Hydrothermal Synthesis of Metal Nanoparticles Using Formic Acid, *ACS Appl. Nano Mater.*, **7**, 26698-26705 (2024).
- [7] S. Takahashi, H. Kasai, C. Liu, L. Miao, E. Nishibori, Rattling of Ag Atoms Found in the Low-Temperature Phase of Thermoelectric Argyrodite Ag_8SnSe_6 , *Cryst. Growth Des.*, **24**, 6267-6274 (2024).
- [8] T. Nishioka, M. Hayashi, H. Kasai, E. Nishibori, Multiscale structure of LaAlO_3 from single-crystal X-ray diffraction, *Acta Cryst. B*, **80**, 275-280 (2024).
- [9] K. A. H. Stouckler, N. Roth, A. A. Feidenhans'l, S. Takahashi, E. Nishibori, B. B. Iversen, Models of polaron fluctuations in LuFe_2O_4 , *Phys. Rev. Mater.*, **8**, 034409 (2024).
- [10] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, M. G. -Asl, P. Solís-Fernández, E. Nishibori, H. Ago, A.V. Krasheninnikov, K. Suenaga, Na Intercalation in Bilayer Graphene: Formation of a Close-Packed Trilayer, *ACS Nano*, **19**, 40612-40619 (2025).
- [11] K. Tanaka, E. Nishibori, Charge Density Study of Simple Inorganic Solids Using Synchrotron Single Crystal X-ray Diffraction, *Cryst. Growth Des.*, **25**, 8374-8381 (2025).
- [12] 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**, 384-392 (2025).

3.2. 招待講演

- [1] E. Nishibori, Effects of twinning for charge density study from high-resolution synchrotron single crystal diffraction data, SagamoreXX-2024, SHIV NADAR University Delhi, India, 2024年11月
- [2] E. Nishibori, Time resolved charge density study of diamond in non-thermal melting, IUCr2023, Melbourne, Australia, 2023年8月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] Quantum Crystallography Prize, IUCr 2023年9月
- [2] AsCA2022 Paper Award 2022年11月
- [3] プレス発表、相変化メモリの高度化につながる、圧力下でのガラス相転移機構を解明（筑波大学）2023年12月
- [4] プレス発表、単純構造の熱電変換材料で原子鎖の無秩序構造を発見～熱から電気への変換効率を高める原子の並び～（筑波大学）2021年11月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] SPring-8 ユーザー共同体会長 2022年度、2023年度、SPring-8 秋の学校校長

最先端電子顕微鏡を用いた2.5次元物質の原子レベル構造解析

末永 和知 (大阪大学産業科学研究所)

研究協力者 : Haiming Sun, Qiunan Liu, YungChang Lin



1. 研究の目的

電子顕微鏡および電子分光法を用いて、2.5次元物質の原子レベル構造と光学特性の関連付けを目指した研究を行う。とくにグラフェンやTMDC試料において、アルカリ金属など異種元素がドーピングされた構造およびその物性に及ぼす影響について明らかにしていくことを目的とする。

2. 研究成果

2.1. 二層グラフェン(BLG)への金属塩化物インターカレーション (p型ドーピング)

金属塩化物、特に塩化鉄(FeCl_x)のグラファイト炭素構造へのインターカレーションは、近年大きな注目を集めている。これは、この二次元(2D)磁気物質を環境の影響から保護するだけでなく、インターカレントとホスト材料の両方の磁氣的、電子的、光学的特性を大幅に変化させることができるためである。同時に、インターカレーションは構造欠陥の形成をもたらす、外部刺激によって欠陥が出現するので、材料性能に影響を与える可能性がある。本研究では、走査透過型電子顕微鏡と第一原理計算(DFT)を用いて、二層グラフェンにインターカレーションされた塩化鉄における原子スケールの欠陥の挙動を調査した。 FeCl_2 相と FeCl_3 相間の転移を観察し、転移における欠陥の役割を解明した。具体的には、3種類の欠陥が特定された。 FeCl_2 ドメインのFe空孔、 FeCl_3 ドメインのFe原子および格子間原子であり、それぞれが異なる動的挙動を示す。また、これまで報告されていない、 $\text{Fe}_5\text{Cl}_{18}$ の異常な化学量論を持つ結晶相も観察された。研究結果は、2D材料のインターカレーション機構の理解を深めるだけでなく、原子スケールの欠陥がその特性や潜在的な技術的应用に及ぼす重大な影響を浮き彫りにする(論文[1])。

2.2. 二層グラフェン(BLG)へのアルカリ金属インターカレーション (n型ドーピング)

バルクのグラファイトへのナトリウム(Na)のインターカレーションはエネルギー的に不利であると予測され、そのため長い間達成が困難であると考えられてきた。本研究では、不活性条件下で実施したインターカレーション後のSTEMによる特性評価によって確認された、二層グラフェン(BLG)へのNaのインターカレーションの成功について報告した。Naは単層ではなく、BLGのファンデルワールスギャップ内に最密充填面心立方(fcc)(111)積層構造を持つ三層構造を形成することが明らかになりました。DFT計算により、三層構造は単層または二層構造よりもエネルギー的に有利であることがさらに確認された。この発見は、低次元系におけるアルカリ金属のインターカレーションの理解に欠けていた部分を補うものであり、エネルギー貯蔵およびナノエレクトロニクス用途におけるNaおよびBLGの有望な候補としての可能性と、リチウムを用いた電極よりも安全性と安定性に優れていることを示す(論文[2])。

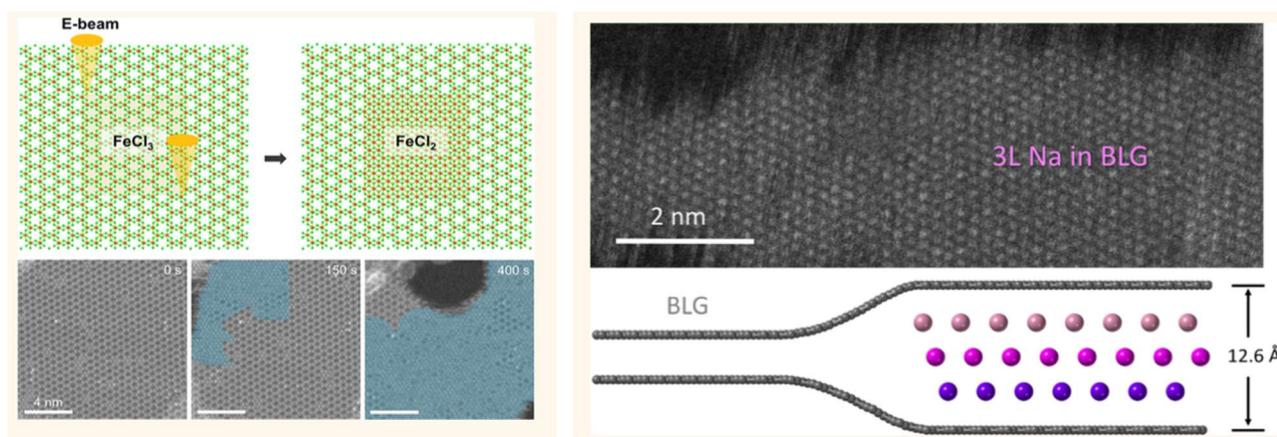


Figure 1. Achievement during this project. (Left) Atomic defects migrations in BLG with p-type dopants of FeCl_x . (Right) Na trilayer encapsulated in BLG.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] Q. Liu, H. Sun, Y.-C. Lin, M. Ghorbani-Asl, S. Kretschmer, CC Cheng, PW. Chiu, H. Ago, A. Krasheninnikov, K. Suenaga, Defect Migration and Phase Transformations in Two-Dimensional Iron Chloride inside Bilayer Graphene, *ACS Nano*, **19**, 4845–4854 (2025).
- [2] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, M. Ghorbani-Asl, P. Solis-Fernandez, E. Nishibori, H. Ago, A. Krasheninnikov, K. Suenaga, Na Intercalation in Bilayer Graphene: Formation of a Close-Packed Trilayer, *ACS Nano*, **19** (47), 40612-40619 (2025).
- [3] Z. Ma, P. Solís-Fernández*, Y.-C. Lin, K. Matsuda, K. Suenaga, S. Okada, T. Kato, Y. Takahashi, H. Ago* *et al.*, Lattice-guided growth of dense arrays of aligned transition metal dichalcogenide nanoribbons with high catalytic reactivity, *Sci. Adv.*, **11**, eadr8046 (2025).
- [4] H. Yi, P. Solís-Fernández*, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago* *et al.*, Bottom-up confined synthesis of air-stable two-dimensional SnS and SnS₂ between hexagonal boron nitride nanosheets, *ACS Appl. Nano Mater.*, **8**, 2693 (2025).
- [5] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, Q. Liu, P. Solis-Fernandez, MD. Siao, PW. Chiu, H. Ago, K. Suenaga, Alkali metal bilayer interaction in graphene, *Nature Comm.*, **15**, 425 (2024).
- [6] M. Nakatani, Y.-C. Lin, K. Suenaga, Y. Kawano, H. Ago* *et al.*, Ready to transfer two-dimensional materials using tunable adhesive force tapes, *Nat. Electron.*, **7**, 119 (2024).
- [7] S. Emoto, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago* *et al.*, Synthesis of few-layer hexagonal boron nitride for magnetic tunnel junction application, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 31457 (2024).
- [8] S. Fukamachi, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago* *et al.*, Large-area synthesis and transfer of multilayer hexagonal boron nitride for enhanced graphene device arrays, *Nat. Electron.*, **6**, 126 (2023).
- [9] Y. Araki, Y.-C. Lin, R. Matsumoto, K. Suenaga, S. Okada, H. Ago* *et al.*, Twist angle-dependent molecular intercalation and sheet resistance in bilayer graphene, *ACS Nano*, **16**, 14075 (2022).
- [10] R. Senga, Y.-C. Lin, S. Morishita, R. Kato, T. Yamada, M. Hasegawa, K. Suenaga, Imaging of isotope diffusion using atomic-scale vibrational spectroscopy, *Nature*, **603**, 68-72 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] 基調講演 International R&D Industry Conference 2024, 韓国, 2024 年
- [2] 基調講演 Hong Kong Advanced Transmission Electron Microscopy 2024, 中国, 2024 年 11 月
- [3] 基調講演 ELMINA2024, セルビア, 2024 年 9 月
- [4] 受賞講演 IFSM Award Lecture, 2023 IMC20, 韓国, 2023 年 9 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] Clarivate (により Highly Cited Researcher (Cross-field) 2025 に選出
- [2] The Hatsujiro Hashimoto Medal (Application for Physical Science) , International Federation of Societies for Microscopy, 2023 年 9 月
- [3] プレスリリース、グラフェン層間に 2 層アルカリ金属の最密配列を発見 (産総研・大阪大) 2024 年 1 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

なし

2.5次元物質におけるバンド構造の直接観測



坂野 昌人（電気通信大学大学院情報理工学研究所）

1. 研究の目的

二次元結晶をひねって積層する/最表面の元素を置換するなどの新たな自由度のもと作製された2.5次元物質では構成要素である二次元結晶が単独では発現しない物性が創発され得る。本研究ではマイクロ集光光源を用いた角度分解光電子分光による2.5次元物質のバンド構造の直接観測を通して、そのような新奇物性の起源解明および開拓を行うことを目的とする。

2. 研究成果

2.1. 単層 WSe₂ からヤヌス単層 WS₂Se₂ へのバンド構造の変化の観測

ヤヌス遷移金属ダイカルコゲナイドとは、プラズマを用いた後処理によって最表面一層のカルコゲン層を別のカルコゲン元素に置換することで得られる、 $X-M-X$ 構造から非対称な $X-M-Y$ 構造[図 1(a)]を有した2.5次元物質である。その特徴的な非対称性を有する構造に起因して、単層遷移金属ダイカルコゲナイドにはない新たな物性が発現することが知られている。さらには置換するカルコゲン元素の組み合わせや積層構造の作製、スクロール構造の物性開拓など、新たな材料開拓・物性探査の研究が盛んにおこなわれている。一方で、ヤヌス TMD は大気中で劣化しやすいことに加え、平坦な単層構造よりもスクロール状構造を取りやすい傾向がある。このため、デバイス応用を見据えた平坦構造の試料に対して角度分解光電子分光 (ARPES) などによる高精度な電子構造の評価は十分には行われてこなかった。

そこで本研究では、A01 班加藤グループ・渡邊グループ、A02 班町田グループ・菅原グループと共同研究を行い、図 2(a,c)に示したような試料構造で明瞭な ARPES 像が得られた単層 WSe₂ 試料を、水素プラズマを用いた後処理によって単層ヤヌス WS₂Se₂ に変化させ、ARPES 測定を行った[図 2(b,d)]。ヤヌス化の前後でスペクトルはブロードになったものの、明瞭なバンド分散を観測することができた。その結果、ヤヌス WS₂Se₂ に特徴的なバンド構造を観測するとともにヤヌス化前後におけるバンド構造の変化を定量的に評価することができた。本研究ではプラズマによる元素置換を行った試料に対しても高精度な電子構造測定が可能であることを示した。今後、積層体などのさらなる複雑構造における物性開拓が進展することが期待される。

2.2. 分子挿入 NbSe₂ における電子構造の観測

本研究では、A04 班松岡グループ、A02 班町田グループと共同研究を行い、キラルな分子イオン[S-MBMim]⁺を電気化学的に挿入した NbSe₂ の電子構造を測定した。分子イオン挿入前後で、NbSe₂ 層間の距離が広がり、電子構造に変化が起きていることを明らかにした。

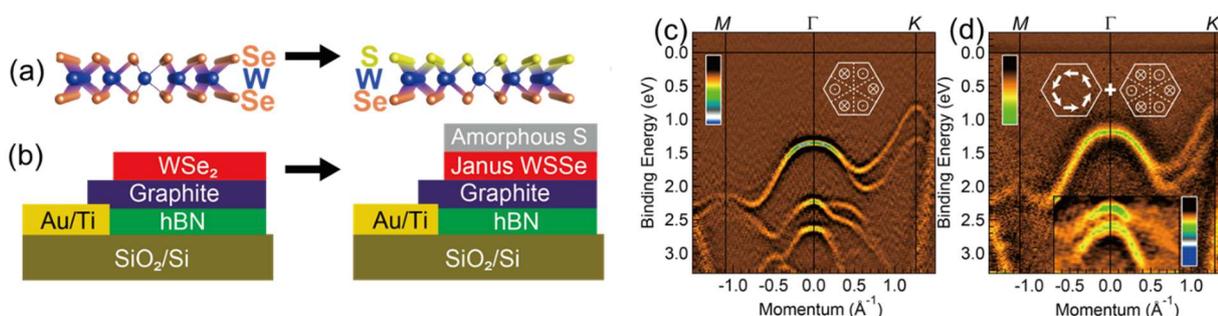


Figure 1. Sample fabrication of monolayer WSe₂ and Janus WS₂Se₂ and angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES) images. (a) Crystal structures of monolayer WSe₂ (left) and Janus WS₂Se₂ (right). (b) Schematics of the van der Waals stacked monolayer WSe₂ (left) and Janus WS₂Se₂ (right) samples for μ -ARPES measurements. An additional amorphous-sulfur cap is introduced on the Janus WS₂Se₂ sample to suppress ambient degradation. The sulfur cap is removed before μ -ARPES measurement by annealing ($\sim 180^\circ\text{C}$, 3 hours) in ultrahigh vacuum chamber. (c),(d) ARPES curvature plots recorded along $M-\Gamma-K$ for pristine monolayer WSe₂ (c) and Janus WS₂Se₂ (d).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] A. Mine, M. Sakano, T. Sasagawa *et al.*, Direct Observation of the Surface Superconducting Gap in the Topological Superconductor Candidate β -PdBi₂, *Phys. Rev. Lett.*, **135**, 236002 (2025).
- [2] 坂野昌人, 顕微角度分解光電子分光を用いた二次元結晶およびその積層体における電子構造の研究, 表面と真空 68 巻, 283–288 ページ, 2025 年 5 月
- [3] B. K. Saika, M. Sakano *et al.*, Dimensionality-driven power-law gap in the bilayer TaTe₂ grown by molecular-beam epitaxy, *APL Mater.*, **12**, 071105 (2024).
- [4] S. Akatsuka, M. Sakano^{*}, T. Sasagawa, K. Watanabe, K. Sugawara, K. Matsuda, T. Machida *et al.*, 180°-twisted bilayer ReSe₂ as an artificial noncentrosymmetric semiconductor, *Phys. Rev. Res.*, **6**, L022048 (2024).
- [5] N. Mitsuishi, M. Sakano *et al.*, Unveiling the orbital-selective electronic band reconstruction through the structural phase transition in TaTe₂, *Phys. Rev. Res.*, **6**, 013155 (2024).
- [6] T. Suzuki^{*}, M. Sakano, T. Machida *et al.*, Ultrafast control of the crystal structure in a topological charge-density-wave material, *Phys. Rev. B*, **108**, 184305 (2023).
- [7] Y. J. Zhang^{*}, M. Sakano, T. Sasagawa, K. Watanabe, K. Sugawara, K. Matsuda, T. Machida^{*} *et al.*, Symmetry Engineering in Twisted Bilayer WTe₂, *Nano Lett.*, **23**, 9280–9286 (2024).
- [8] K. Kazama, M. Sakano *et al.*, Charge transport and thermopower in the electron-doped narrow gap semiconductor Ca_{1-x}La_xPd₃O₄, *Phys. Rev. Mater.*, **7**, 085402 (2023).
- [9] B. K. Saika, H. Matsuoka, M. Sakano *et al.*, Signature of topological band crossing in ferromagnetic Cr_{1/3}NbSe₂ epitaxial thin film, *Phys. Rev. Res.*, **4**, L042021 (2022).
- [10] S. Masubuchi[†], M. Sakano[‡], T. Tanaka[‡] ([‡]equally contributed) K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida^{*} *et al.*, Dry pick-and-flip assembly of van der Waals heterostructures for microfocus angle-resolved photoemission spectroscopy, *Sci. Rep.*, **12**, 10936 (2022).
- [11] M. Sakano^{*}, T. Tanaka[‡], S. Masubuchi[‡], ([‡]equally contributed) K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Odd-even layer-number effect of valence-band spin splitting in WTe₂, *Phys. Rev. Res.*, **4**, 023247 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] 坂野 昌人, ファンデルワールス積層体における電子構造の直接観測, 第 1 回 HiSOR-II に向けたミニワークショップ ~ARPES と分光技術の新展開~, 広島大学東千田キャンパス, 広島県広島市, 2025 年 9 月
- [2] 坂野 昌人, ファンデルワールス積層体における電子構造の直接観測, ナノテラス ARPES 若手シンポジウム, 東北大学片平キャンパス, 宮城県仙台市, 2025 年 3 月
- [3] 坂野 昌人, μ ARPES を用いたファンデルワールス積層体の電子構造観測, 若手研究者分野横断交流会—物性研究の現状と今後の展開—, 湯沢グランドホテル, 新潟県南魚沼郡, 2025 年 3 月
- [2] M. Sakano, Direct observation of electronic structures in atomically thin flakes by using micro-focused angle-resolved photoemission spectroscopy, JSAP-Optica Joint Symposia 2023, Kumamoto, Japan, 2023 年 9 月
- [4] M. Sakano, Micro-focused ARPES study on atomically thin WTe₂ flakes, online 2022 年 6 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 昇進、電気通信大学 大学院情報理工学研究科 准教授、2025 年 2 月
- [2] Reviewer of the Year 2022, npj quantum materials, 2023 年 3 月
- [3] プレス発表、2 次元物質の電子構造の直接観測—原子層の数の偶奇で大きく変わる性質を発見— (東京大学) 2022 年 6 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 日本物理学会 領域 4 運営委員 2022 年 10 月-2023 年 9 月



4. 計画班 研究成果

A04

物性開拓班

2.5次元構造の 新奇物性開拓

越野 幹人

高村 由起子

笹川 崇男

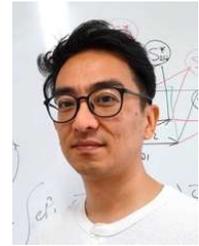
蒲 江



2.5次元物質の理論構築：幾何学構造から生まれる量子状態

越野 幹人 (大阪大学大学院理学研究科)

研究協力者：川上 拓人 (同上)



1. 研究の目的

モアレ構造や準周期構造などの幾何学的に特異な原子配列を有する2.5次元物質に着目し、そこに発現する量子物性の理論的解明を目的とする。層間ねじれや格子ミスマッチにより生じる新たな長さスケールと有効自由度を取り入れ、従来の結晶理論を超える記述法を構築する。電子・フォノン・トポロジカル物性の統一的理解を通じて、非自明な量子相の発現機構を明らかにする。

2. 研究成果

2.1. モアレ多層系の理論：遷移金属カルコゲナイドへの展開

従来のモアレ物質の研究は2層系を中心になされてきたが、3層以上の系では複数のモアレパターン同士が互いに干渉することで準周期的な構造が生じ、2層系にはない様々な性質を示す。汎用的な連続体理論を構築することで、一般に3層以上の系では、モアレ格子が原子格子のように振る舞って高次のドメイン構造を作る「超モアレスケール・ドメイン生成」を生じる。この研究を遷移金属カルコゲナイド系に展開し、モアレ格子の構造緩和により、平坦バンドを含むカゴメ格子が自発的に生成することを明らかにした(論文[1]、Fig. 1)。この発見はカゴメ格子の平坦バンドにおける物理の探索に寄与するものと期待される。

2.2. 一次元モアレ超格子の発見

グラフェンや遷移金属カルコゲナイドをはじめ、多くの二次元物質のモアレ格子は二次元構造を取ることが、3回対称以下の低い回転対称性をもつ物質では、特定の角度で一次元モアレ構造が普遍的に生じることを発見した。実際に、東大、北陸先端大の実験グループとの共同研究で、ニテルル化タングステン(WTe₂)の原子層二枚からなる系において、58度、62度という大きな角度で1次元的なモアレ模様が生じることを透過型電子線顕微鏡(TEM)で測定するとともに、その発生機構を理論的に解明した(論文[2])。また九大との共同研究による第一原理計算(投稿準備中)では、完全に1次元的な電子状態が出ることが示された。精密に配列した無数の一次元チャンネルは他に類を見ないものであり、その特異な物性の解明は今後の重要な課題である。また、同様な一次元モアレ構造は、1T構造やモノクリニック構造を持つ広い範囲の二次元物質で予想され、金属、半導体を含む豊富な一次元物質クラスが新奇物性探索の新しい舞台になることが期待される。

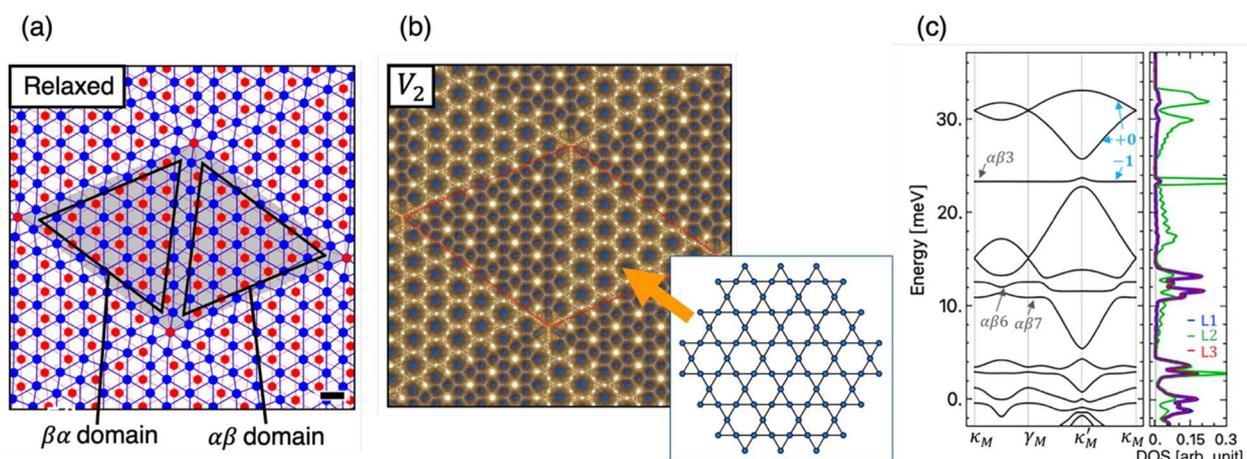


Figure 1. (a) Schematic illustration of the moiré domain formation in TMDC trilayer. (b) Moiré potential of the middle layer. Kagome-type potential emerges in $\alpha\beta$ -domain. (c) Local band structure in $\alpha\beta$ -domain (Commun. Mat. 2025).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] N. Nakatsuji, T. Kawakami, H. Tateishi, K. Kato, M. Koshino, Moiré band engineering in twisted trilayer WSe₂, *Commun. Mat.*, **6**, 274 (2025).
- [2] X. Yang, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, T. Machida et al, Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe₂, *ACS Nano*, **19**, 13007 (2025).
- [3] L. P. A. Krisna, T. Kawakami, M. Koshino, Low-temperature Thermal Transport in Moiré Superlattices, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **94**, 044602 (2025).
- [4] I. Sequeira, N. Nakatsuji, M. Koshino, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. D. Sanchez-Yamagishi et al, Manipulating Moirés by Controlling Heterostrain in van der Waals Devices, *Nano Lett.*, **24**, 15662 (2024).
- [5] T. Tani, T. Kawakami, M. Koshino, Perpendicular electronic transport and moiré-induced resonance in twisted interfaces of three-dimensional graphite, *Phys. Rev. B*, **108**, 165422 (2023).
- [6] N. Nakatsuji, T. Kawakami, M. Koshino, Multiscale Lattice Relaxation in General Twisted Trilayer Graphenes, *Phys. Rev. X*, **13**, 041007 (2023).
- [7] T. Kawakami, G. Tamaki, M. Koshino, Topological domain walls in graphene nanoribbons with carrier doping, *Phys. Rev. B*, **108**, 045401 (2023).
- [8] L. P. A. Krisna, M. Koshino, Moiré phonons in graphene/hexagonal boron nitride moiré superlattice, *Phys. Rev. B*, **107**, 115301 (2023).
- [9] H. Matsuoka, T. Habe, Y. Iwasa, M. Koshino, M. Nakano, Spontaneous spin-valley polarization in NbSe₂ at a van der Waals interface, *Nat. Commun.*, **13**, 5129 (2022).
- [10] N. Nakatsuji M. Koshino, Moiré disorder effect in twisted bilayer graphene, *Phys. Rev. B*, **105**, 245408 (2022).
- [11] M. Koshino, H. Oka, Topological invariants in two-dimensional quasicrystals, *Phys. Rev. Research*, **4**, 013028 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] M. Koshino, Moiré Band Engineering in Twisted Trilayer 2D Materials: From Graphene to TMDs, Graphene2025 Conference, San Sebastian, Spain, 2025 年 6 月
- [2] M. Koshino, Moiré Band Engineering in Twisted Trilayer Transition Metal Dichalcogenide, The 25th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT25), Kyoto, Japan, 2025 年 6 月
- [3] M. Koshino, Physics of moiré multilayers, The Hong Kong Forum of Physics 2024, Hong Kong, 2024 年 12 月
- [4] M. Koshino, Moiré multilayers --- Towards Topological Quasicrystals, Euro Graphene Forum 2024 Joint International Conferences, Barcelona, Spain, 2024 年 10 月
- [5] M. Koshino, Topological moiré multilayers, The 14th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2023), Bengaluru, India, 2023 年 12 月
- [6] M. Koshino, Topological moiré trilayers, BIRS Workshop: The Mathematics and Physics of Moire Superlattices, Banff, Canada, 2023 年 10 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、二次元金属に「フェロバレー強磁性」を誘起することに成功（大阪大学）2022 年 9 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] 湯川記念講演会「トポロジカル物質の不思議」2023 年 11 月
- [2] 教科書「グラフェンの物理—ディラック電子とトポロジカル物性の基礎」内田老鶴圃 (2023).
- [3] サイエンスナイト「厚さ 100 万分の 1mm の物質—グラフェンの物理学」 2022 年 6 月

シリセンなど単一組成原子膜と複層化による新奇電子物性創出

高村(山田) 由起子 (北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科)

研究協力者 : 大島 義文、麻生 浩平 (同上)



1. 研究の目的

三次元物質である単結晶基板にのみ形成しうる準安定二次元物質 (2.5 次元物質) の成長を行い、その構造解析と物性測定を行う。さらに、領域の共同利用拠点・分析拠点 (構造) として、領域内研究者の創り出した 2.5 次元物質の構造解析を行い、領域研究の活性化に貢献する。

2. 研究成果

2.1. 基板上二次元材料の成長と評価

炭素の蜂の巣格子であるグラフェンは黒鉛からの機械的剥離により創り出されたが、Xenes と呼ばれるグラフェン以外の単元素二次元材料は、ごく一部の例外を除いて母材となる層状物質が存在しないためにその合成と評価は困難を極める (論文[3], 総説論文)。Xenes を物理的に成長する代表的な手法としては、(1)単結晶基板表面への原料の供給による気相成長法と、(2)エピタキシャル成長した薄膜の単結晶基板が原料となる、薄膜表面上への偏析法がある。(1)の手法により、スズ版グラフェンと言われるスタネンを実現する目的で In のカゴメ格子で終端された InSb(111)A 基板に Sn を蒸着し、その構造を走査トンネル顕微鏡と低速電子線回折、組成をオージェ電子分光で評価し、Sn の室温蒸着後加熱条件を系統的に変化することで Sn のカゴメ格子と蜂の巣格子のどちらかが表面を完全に覆う試料の作製を試みた。また、(2)の手法により、Ge ウェハ上に ZrB₂ 薄膜を成長すると、薄膜表面に Ge が拡散してフラットバンドを有する二重三角格子が形成される。低温で 3 倍周期を持つ相へと転移するため、光電子分光により電子状態測定を行った。一方、基板であるポロフェンの層間に Zr が挿入された構造の ZrB₂ 薄膜の電子物性の影響を明らかにするために低温での伝導特性評価を行ったが、エピタキシャル歪みなどに起因する超伝導転移は観測されなかった。

2.2. 2.5 次元物質の構造解析

二次元材料を積層して創り出す 2.5 次元物質の構造解析に特化した領域内共同利用拠点として開発した二次元材料の転写・積層に適した特製 SiN_x 窓つき Si チップとそれを高分解能 (UHR) の球面収差補正走査透過電子顕微鏡に挿入可能な特注の試料ホルダを用い、A03 班町田グループが対称性の低い WTe₂ シートを大きい角度で 2 枚重ねることで創り出せると予測して作製した積層体に発現する、従来報告のない、全く新しい一次元モアレ超格子構造を実空間観察することに成功した (Fig.1a, 論文[1])。また、A05 班長汐グループの Nb をドーピングした WSe₂ の単層試料を環状暗視野走査透過電子顕微鏡法により観察し、得られた像から試料に含まれる Nb 原子と Se 欠陥の場所と位置関係を特定し、それぞれの量を定量的に評価することに成功した (Fig.1b, 論文[2])。

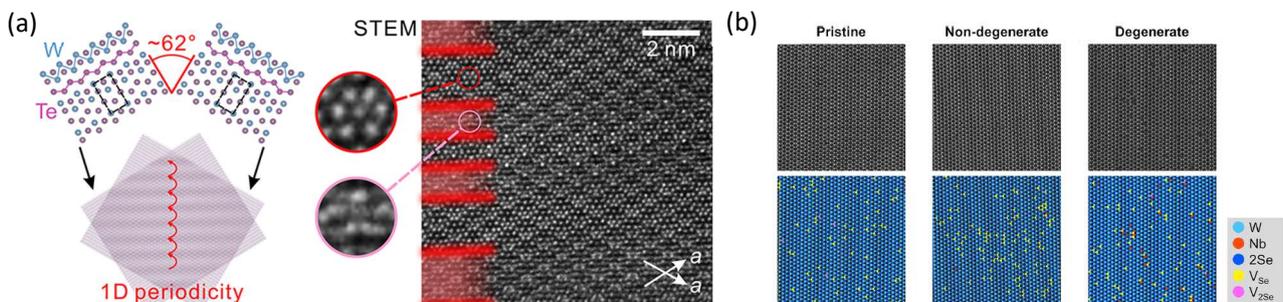


Figure 1. Achievement during this project. (a) Real-space, atomic-resolution observation of one-dimensional moiré superlattice emerged in large-angle twisted bilayer WTe₂ (*ACS Nano* 2025, Copyright © 2025, American Chemical Society). (b) Identification and quantification of dopant atoms and chalcogen vacancies observed in ADF-STEM images of non-doped (pristine) and Nb-doped WSe₂ monolayers (*ACS Nano* 2025, Copyright © 2025, American Chemical Society).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] X. Yang, Y. Zhang, L. Chen, K. Aso, W. Yamamori, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, T. Machida, Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe₂, *ACS Nano*, **19**, 13007-13015 (2025).
- [2] K. Kanahashi, I. Tanaka, T. Nishimura, K. Aso, A. K. A. Lu, S. Morito, L. Chen, T. Kakeya, S. Watanabe, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, K. Ueno, A. Azizi, K. Nagashio, Dimensionality-Induced Transition from Degenerate to Nondegenerate States in Nb-Doped WSe₂, *ACS Nano*, **19**, 10244-10254 (2025).
- [3] A. Molle, J. Yuhara, Y. Yamada-Takamura, Z. Sofer, Synthesis of Xenos: physical and chemical methods, *Chem. Soc. Rev.*, **54**, 1845-1869 (2025).
- [4] C.-C. Lee, Y. Yamada-Takamura, Stabilizing charge density waves by mixing transition metal elements in monolayer XS₂ with trigonal-prismatic coordination, *Phys. Rev. B*, **111**, 035120 (2025).
- [5] W. Zhang, Z. Liu, H. Nakajo, S. Aoki, H. Wang, 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, Y. Miyata, Chemically Tailored Semiconductor Moiré Superlattices of Janus Heterobilayers, *Small Structures*, **5**, 2300514(1-8) (2024).
- [6] M. Kaneda, W. Zhang, Z. Liu, Y. Gao, M. Maruyama, Y. Nakanishi, H. Nakajo, S. Aoki, K. Honda, T. Ogawa, K. Hashimoto, T. Endo, K. Aso, T. Chen, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, Y. Takahashi, S. Okada, T. Kato, Y. Miyata, Nanoscrolls of Janus Monolayer Transition Metal Dichalcogenides, *ACS Nano*, **18**, 2772-2781 (2024).
- [7] Y. Zhang, K. Kamiya, T. Yamamoto, M. Sakano, X. Yang, S. Masubuchi, S. Okazaki, K. Shinokita, T. Chen, K. Aso, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, T. Sasagawa, K. Ishizaka, T. Machida, Symmetry Engineering in Twisted Bilayer WTe₂, *Nano Lett.*, **23**, 9280 (2023).
- [8] C.-E. Hsu, Y.-T. Lee, C.-C. Wang, C.-Y. Lin, Y. Yamada-Takamura, T. Ozaki, C.-C. Lee, Atomically thin metallic Si and Ge allotropes with high Fermi velocities, *Phys. Rev. B*, **107**, 115410 (2023).

3.2. 招待講演

- [1] Y. Yamada-Takamura, Polymorphism in monochalcogenides: Trigonal-antiprismatic phase in films grown from vapor phase, 2D Transition Metal Dichalcogenides 2025 (2D-TMDs 2025), Cambridge, UK, 2025年7月
- [2] Y. Yamada-Takamura, Emergence of nearly flat bands in epitaxial 2D Ge bitriangular lattice, 15th Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research Conference (RPGR2024), Nanjing, China, 2024年7月
- [3] Y. Yamada-Takamura, Novel 2D materials stabilized on surfaces, 17th European Vacuum Congress and 37th European Conference on Surface Science (EVC-17 and ECOSS-37), Harrogate, UK, 2024年6月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、二次元格子をひねって重ねると一次元超格子が出現（東京大学、北陸先端科学技術大学院大学、大阪大学、科学技術振興機構）2025年3月
- [2] プレス発表、非対称な二次元シートを利用したナノサイズの巻物構造の実現（東京都立大学、筑波大学、東北大学、名古屋大学、金沢大学、北陸先端科学技術大学院大学）2024年1月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] Co-Chair として The 16th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research (RPGR2025)を日本に誘致し、2025年11月に富山国際会議場で開催
- [2] 連携会員、日本学術会議、2023年10月～2029年9月
- [3] 石川県高等学校文化連盟理科専門部主催の高校生のための秋の実験・実習セミナーにて講演、ケイ素でできた二次元材料「シリセン」の科学、石川県立金沢泉丘高等学校、2022年11月

単結晶で切り拓く vdW 量子物質のエキゾチック物性開拓



笹川 崇男 (東京科学大学総合研究院)

1. 研究の目的

高品質な van der Waals 単結晶の開発を出発点として、2.5 次元物質の量子物性開拓に 3 次元から迫る。領域内の自在積層技術や結晶・電子構造の精密観察技術などと連携しながら、2.5 次元積層構造体を設計・作製して、量子物性や機能の評価に取り組む。第一原理計算も活用しながら、それらの設計指針や学理構築の確立を目指す。

2. 研究成果

2.1. van der Waals 量子物質の単結晶開発

2.5 次元構造体の素材となる van der Waals 層状化合物について、(物理/化学) 気相輸送法、熔融法、ブリッジマン法、フラックス法、(溶媒移動) フローティングゾーン法など、あらゆる結晶成長技術を駆使して、稀少で合成困難な既知物質から、合成法の確立していない新物質まで単結晶化を実現した [図 1]。遷移金属ダイカルコゲナイドを中心に、多数の単結晶試料の提供を行って領域内共同研究を推進した。

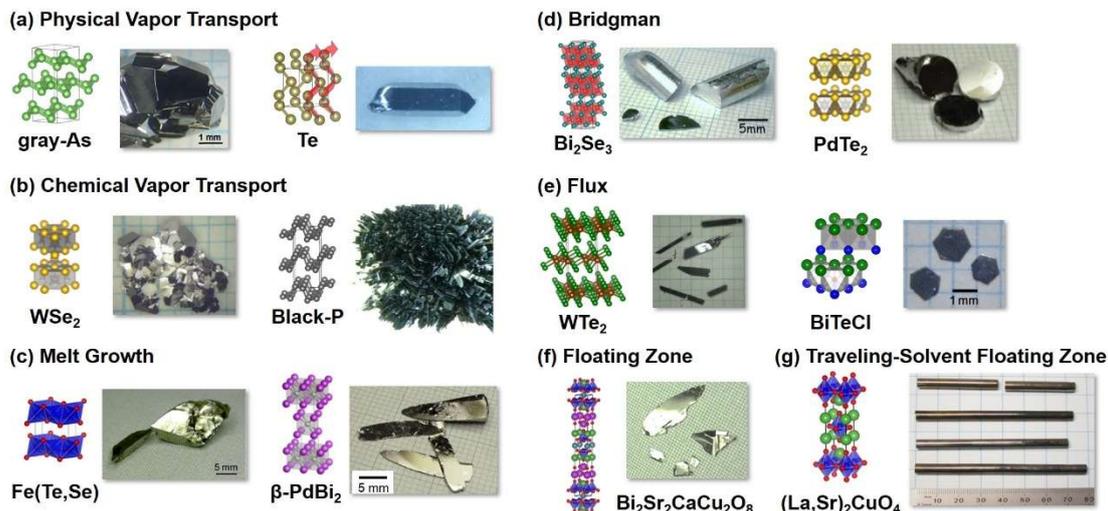


Figure 1. Various crystal growth techniques applied to layered compounds, together with their crystal structures and the resulting single crystals.

2.2. van der Waals 単結晶における量子物性の追究

超高純度 (6N, 7N) 原料の使用、独自炉によるその場観察、最適熱処理、磁気輸送特性評価からのフィードバックなど徹底した工夫を重ね、育成した単結晶において世界最高水準の物性値達成を目指した。代表例のトポロジカル Weyl 半金属 WTe_2 は、非磁性ながら超巨大磁気抵抗 (XMR) を示す物質として注目され、市販単結晶も流通している [図 2 (a)]。XMR は結晶純度指標の残留抵抗比 (RRR) に強く依存するが、最適化結晶では既報最高値を RRR で 3 倍、 MR で 1 桁上回り、世界一品質の定量的実証に成功した。一方、市販結晶は RRR で 2 桁、 MR で 4 桁劣ることが判明し、我々の試料の有用性が鮮明に示された [図 2]。高磁場下での Shubnikov-de Haas (SdH) 量子振動の解析から、市販結晶の性能劣化要因にも迫ることができた [図 2 (c)]。

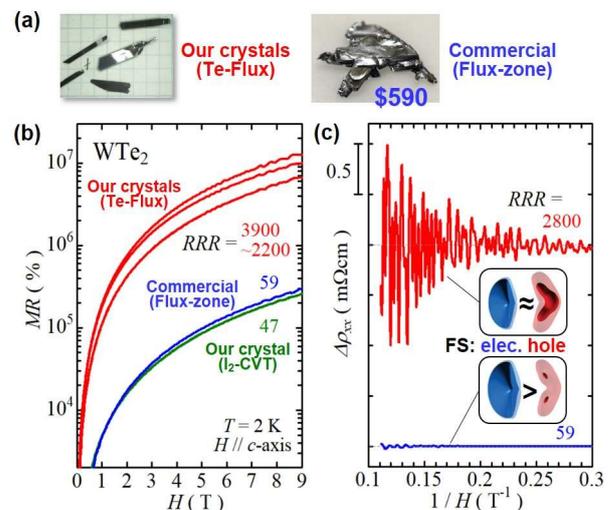


Figure 2. (a) Our single crystals and commercially available ones. (b) Field-dependence of MR for single crystals with various RRR . (d) Shubnikov-de Haas (SdH) oscillatory components extracted from MR .

3. 研究成果

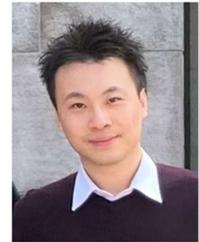
3.1. 論文、解説記事

- [1] 笹川 崇男*, ファンデルワールス積層化合物の単結晶開発 – 遷移金属ダイカルコゲナイドでの新展開 –, *日本結晶成長学会誌*, **53** (2026), in press.
- [2] J. Lefevre, M. Kobayashi, G. Patriarche, T. Sasagawa*, R. Deblock, Quantum Coherent Transport of 1D Ballistic States in Second Order Topological Insulator Bi_4Br_4 , *Phys. Rev. X* (2025), in press.
- [3] K. Kinoshita, R. Moriya, M. Onodera, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa*, T. Machida, Resonant Tunneling in $\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{WSe}_2$ van der Waals Triple Quantum Well Device, *ACS Nano*, **19**, 35592 (2025).
- [4] A. Mine, T. Suzuki, Y. Zhong, S. Najafzadeh, K. Okawa, M. Sakano, K. Ishizaka, S. Shin, T. Sasagawa*, K. Okazaki, Direct Observation of the Surface Superconducting Gap in the Topological Superconductor Candidate $\beta\text{-PdBi}_2$, *Phys. Rev. Lett.*, **135**, 236002 (2025).
- [5] X. Yang, Y. Zhang, L. Chen, K. Aso, W. Yamamori, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa*, N. Nakatsuji, M. Koshino, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, T. Machida, Intrinsic One-Dimensional Moire Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe_2 , *ACS Nano*, **19**, 13007 (2025).
- [6] C. J. Butler, M. Murase, S. Sawada, M.-C. Jiang, D. Hashizume, G.-Y. Guo, R. Arita, T. Hanaguri, T. Sasagawa*, Valley Polarization of Landau Levels Driven by Residual Strain in the ZrSiS Surface Band, *Phys. Rev. X*, **15**, 011033 (2025).
- [7] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Kawasaki, S. Okazaki, M. Onodera, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa*, T. Machida, Negative Differential Resistance Device with High Peak-to-Valley Ratio Realized by Subband Resonant Tunneling of Γ -valley Carriers in $\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{WSe}_2$ Junctions, *ACS Nano*, **18**, 28968 (2024).
- [8] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, M. Onodera, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa*, T. Machida, Control of Subband Energies via Interlayer Twisting in an Artificially Stacked WSe_2 Bilayer, *Nano Lett.*, **24**, 12211 (2024).
- [9] R. Noguchi, M. Kobayashi, K. Kawaguchi, C. Lin, H. Tanaka, K. Kuroda, A. Harasawa, V. Kandyba, M. Cattelan, A. Barinov, M. Hashimoto, D. Lu, T. Sasagawa*, T. Kondo, A Robust Weak Topological Insulator in a Bismuth Halide $\text{Bi}_4\text{Br}_2\text{I}_2$, *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 086602(2024).
- [10] Y. Zhang, K. Kamiya, T. Yamamoto, M. Sakano, X. Yang, S. Masubuchi, S. Okazaki, K. Shinokita, T. Chen, K. Aso, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, T. Sasagawa*, K. Ishizaka, T. Machida, Symmetry Engineering in Twisted Bilayer WTe_2 , *Nano Lett.*, **23**, 9280 (2023).
- [11] M.D. Randle, M. Hosoda, R.S. Deacon, M. Ohtomo, P. Zellekens, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Okazaki, T. Sasagawa*, K. Kawaguchi, S. Sato, K. Ishibashi, Gate-Defined Josephson Weak-Links in Monolayer WTe_2 , *Adv. Mater.*, 2301683 (2023).
- [12] Y.M. Itahashi, T. Ideue, S. Hoshino, C. Goto, H. Namiki, T. Sasagawa*, Y. Iwasa, Giant Second Harmonic Transport under Time-reversal Symmetry in a Trigonal Superconductor, *Nat. Commun.*, **13**, 1659 (2022).
- [13] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa*, T. Machida, Resonant Tunneling between Quantized Subbands in van der Waals Double Quantum Well Structure based on Few-layer WSe_2 , *Nano Lett.*, **22**, 4640 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] 笹川 崇男, トポロジカル/2.5次元量子物質の開拓, 第7回固体化学フォーラム研究会/ISSP ワークショップ「固体物質・材料研究の現在と未来」, 千葉, Japan, 2025年6月
- [2] 笹川 崇男, 遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるトポロジカル/2.5次元物質科学, 第34回日本MRS年次大会, 神奈川, Japan, 2024年12月

2.5 次元物質の構造制御と機能・デバイス開拓



浦江 (東京科学大学理学院物理学系)

研究協力者: 欧 昊 (同上)

1. 研究の目的

2.5 次元物質に特徴的な物性・機能を開拓するために、精密積層/接合技術と歪み効果を組み合わせた自在構造制御技術を構築し、特殊な対称性や次元性を有する 2.5 次元物質・構造を実現する。特に、領域内の密な共同研究を通して、歪み効果を活かした様々な物性評価を進め、2.5 次元物質を用いた新しい電子・光機能デバイスの創製を目的としている。

2. 研究成果

2.1. 歪み効果による物性制御とモアレ構造制御への展開

単層遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) に歪みを印加する技術を開発し、A01 班~A03 班との共同研究を通して、バンド構造計算、顕微分光 (SHG) 測定、角度分解光電子分光及び X 線構造解析により歪み効果を評価した。例えば、バンド構造変化に起因したトランジスタ特性の制御が可能になり、歪みにより移動度と閾値電圧を大きく変調できることを見出した (Fig. 1a)。このような歪み効果を活かした物性・機能制御は、A04 の公募班とも積極的に連携し、歪み印加技術の提供を通じて磁気伝導制御や表面弾性波評価にも拡張した。また、歪み効果は結晶構造・対称性を直接変調できる利点があり、これを活かすことで小さな歪みにおいて、劇的に積層モアレ構造を変調できることも可能にした (論文[1])。特に、非対称なモアレ構造や一次元的なモアレ構造の作製も見出し、歪みによるモアレ構造の特殊な対称性や異方性を活かした量子伝導・光機能の開拓に今後の展開が見込める。

2.2. 3 層モアレ構造の特殊な格子緩和と電場効果

精密モアレ構造の作製技術を 3 層試料にも拡張し、より複雑な格子緩和によるモアレ超格子の作製にも取り組んだ。例えば、周期の異なる 3 層モアレ構造では、それぞれの層間の干渉・格子緩和に起因したモアレパターンの重ね合わせになるが (Fig. 1b)、同程度の周期で積層した場合は、2 層間のモアレ同士が相互作用 (モアレスケールの格子緩和) して、カゴメ格子を示唆する超格子構造が観測された (Fig. 1c)。これら特殊な格子緩和については、A01 班及び A02 班と連携して理論的な計算評価も行った。さらに、3 層モアレ構造の電場効果についても、A02 班の試料提供と観測技術と連携して取り組み、局所的な歪み効果がドメイン構造の変形に及ぼす影響なども明らかにした。このような 3 層モアレ構造性開拓は未踏であり、上述の歪み効果とも組み合わせることで、2.5 次元構造の新たな強誘電機能や量子デバイス探索に繋がると期待できる。

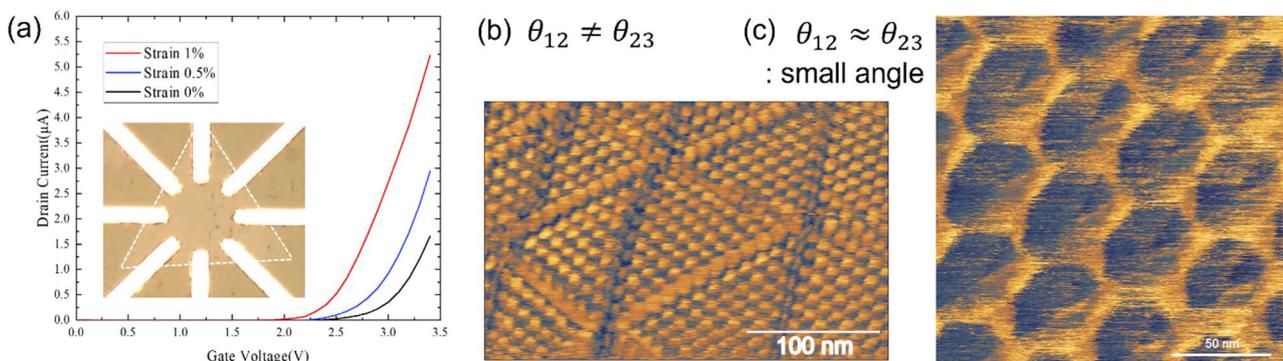


Figure 1. (a) Strain-dependent transistor characteristics of monolayer WS_2 . As increasing the uniaxial strains, the mobility can be drastically enhanced. (b,c) Piezo-AFM (PFM techniques; *Small* 2025) images for trilayer Moiré superlattice with different twist angles (b) and same small twist angles (c) for each layer. The small twist angle Moiré shows a peculiar lattice relaxation, which is possibly related to formation of Kagome-type lattice.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] H. Ou, K. Oi, R. Usami, T. Endo, K. Shinokita, R. Kitaura, K. Matsuda, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu, Continuous Strain Modulation of Moiré Superlattice Symmetry From Triangle to Rectangle, *Small*, **21**, 2407316 (2025)
- [2] Y. Oshima, T. Takenobu, J. Pu, K. Ishiguro, R. Kato, H. M. Yamamoto, T. Kusamoto, A Memristive Oscillator, *Adv. Phys. Res.*, **3**, 2300117 (2024)
- [3] H. Ou, K. Oi, R. Usami, T. Endo, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu, Ion-gel-based light-emitting devices using transition metal dichalcogenides and hexagonal boron nitride heterostructures, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62** SC1026 (2023)
- [4] R. Natsui, H. Shimizu, Y. Nakanishi, Z. Liu, A. Shimamura, N. T. Hung, Y.-C. Lin, T. Endo, J. Pu, I. Kikuchi, T. Takenobu, S. Okada, K. Suenaga, R. Saito, Y. Miyata, Vapor-Phase Indium Intercalation in van der Waals Nanofibers of Atomically Thin W₆Te₆ Wires, *ACS Nano*, **17**, 5561 (2023)
- [5] Y. Tanaka, S. Ito, J. Liu, H. Ou, H. Tanaka, J. Pu, A. Ikeno, T. Hatakeyama, T. Takenobu, Solution-Processable Ultrapure-Blue Light-Emitting Electrochemical Cells, *Adv. Opt. Mater.*, **11**, 2301119 (2023)
- [6] J. Pu, H. Ou, T. Yamada, N. Wada, H. Naito, H. Ogura, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Yanagi, Y. Nakanishi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, T. Takenobu, Continuous Color-Tunable Light-Emitting Devices Based on Compositionally Graded Monolayer Transition Metal Dichalcogenide Alloys, *Adv. Mater.*, **34**, 2203250 (2022)
- [7] M. Okada, J. Pu, Y.-C. Lin, T. Endo, N. Okada, W.-H. Chang, A. K. A. Lu, T. Nakanishi, T. Shimizu, T. Kubo, Y. Miyata, K. Suenaga, T. Takenobu, T. Yamada, T. Irisawa, Large-Scale 1T'-Phase Tungsten Disulfide Atomic Layers Grown by Gas-Source Chemical Vapor Deposition, *ACS Nano*, **16**, 13069 (2022)
- [8] N. Wada, J. Pu, Y. Takaguchi, W. Zhang, Z. Liu, T. Endo, T. Irisawa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata, Efficient and Chiral Electroluminescence from In-Plane Heterostructure of Transition Metal Dichalcogenide Monolayers, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2203602 (2022)
- [9] H. Ou, T. Yamada, M. Mitamura, Y. Edagawa, T. D. Matsuda, K. Yanagi, C.-H. Chen, L.-J. Li, T. Takenobu, J. Pu, Electric-field-induced metal-insulator transition and quantum transport in large-area polycrystalline MoS₂ Monolayers, *Phys. Rev. Mater.*, **6**, 064005 (2022)
- [10] H. Shimizu, J. Pu, Z. Liu, H. E. Lim, M. Maruyama, Y. Nakanishi, S. Ito, I. Kikuchi, T. Endo, K. Yanagi, Y. Oshima, S. Okada, T. Takenobu, Y. Miyata, Formation of a Two-Dimensional Electronic System in Laterally Assembled WTe Nanowires, *ACS Appl. Nano Mater.* **5**, 6277 (2022)

3.2. 招待講演

- [1] J. Pu, Electronic & optical functional devices of strained monolayers and heterostructures, *RPGR2025*, Toyama, Japan, 2025年11月
- [2] J. Pu, “Strain effects in monolayer semiconductor and heterostructure devices”, *2D TMDs 2025*, Cambridge Univ., UK, 2025年7月
- [3] 蒲江, “原子層物質及びヘテロ構造の歪み効果と光機能デバイス”, 日本物理学会春季大会 シンポジウム, オンライン, 2025年3月
- [4] J. Pu, “Functional optoelectronic devices based on strained monolayers and heterostructures”, *2024 MRS Fall Meeting & Exhibit*, U.S., Boston, 2024年12月
- [5] 蒲江, “イオンゲルを用いた機能性原子層発光デバイス”, 応用物理学会 秋季学術講演会シンポジウム, 熊本城ホール, 2023年8月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 令和7年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞 2025年4月
- [2] 2024年度 大隅基礎研究賞, 東京科学大学 2025年2月
- [3] 欧 昊, 東京科学大学 理学院物理学系 助教への昇進 2024年10月
- [4] 令和5年度 挑戦的研究賞, 東京工業大学 2023年8月
- [5] 昇進、東京工業大学 (東京科学大学) 理学院物理学系 准教授、2023年4月
- [6] プレス発表、高品質な二次元半導体の接合構造を利用した発光デバイスを実現 (名古屋大学) 2022年8月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 蒲江, 遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向, 「発光デバイス」シーエムシー出版 255-263, ISBN:978-4-7813-1758-8 (2023)



4. 計画班 研究成果

A05

機能創出班

2.5次元構造体の電子・光・
エネルギー応用への展開

上野 貢生
長汐 晃輔
大野 雄高
松尾 吉晃



2.5 次元構造体の光応用への展開

上野 貢生 (北海道大学大学院理学研究院)

研究協力者：今枝 佳祐 (同上)



1. 研究の目的

本研究では、すべての構成原子が表面原子と認識される二次元物質の特徴を最大限引き出して機能化するために、2.5次元構造内の界面・空間の理解やその制御を班内で連携して行うとともに、二次元物質群の無限の組み合わせによる2.5次元構造が示す特徴的な物性を利用して機能創出し、新規で価値の高い光デバイスを創製することを目的とする。

2. 研究成果

2.1. シリル化酸化グラファイトによる分子取り込みを利用した赤外化学センサー

赤外域における表面増強赤外吸収 (SEIRA) は、金属ナノ構造により誘起される局在表面プラズモン共鳴に伴う強い光電場増強効果を利用し、通常の赤外吸収測定と比較して数桁に及ぶ高感度検出を可能とする。一方で、その感度はプラズモン近傍に存在する分子数に強く依存するため、分子を効率的に増強場へ集積させることがさらなる高感度化の鍵となる。本研究では、中赤外域にプラズモン共鳴を有する Au ナノチェーン/Al₂O₃/Au からなる金属/絶縁体/金属 (MIM) 構造に、松尾 G と共同で層間への分子取り込みが可能なシリル化酸化グラファイト (シリル化 GO) 薄層を組み合わせ、SEIRA 場における分子濃縮効果の導入を試みた。Au ナノチェーン構造では、ナノ構造と下部 Au 膜との電磁的相互作用によりダークプラズモンモードが形成され、分子振動との干渉に基づく Fano 共鳴が観測される。実験の結果、Al₂O₃ 層厚が約 20 nm のときに最も顕著な Fano dip が得られ、SEIRA に適した構造条件が明らかとなった。さらに、ヘキサデシルアミン分子を取り込んだシリル化 GO 薄膜を導入することで、CH₂ 伸縮振動に由来する赤外吸収信号が、ヘキサデシルアミン単層膜の場合と比較してさらに増幅されることを確認した (Fig. 1(a))。この増幅は、すでに高い増強を示す SEIRA に分子濃縮効果が重畳された結果であり、赤外吸収信号は約 3.0 倍向上した。以上より、2.5 次元的な層間空間を利用した分子集積が、SEIRA 感度のさらなる向上に有効であることを示した。

2.2. 薄膜 MoS₂ 半導体におけるキャリア寿命制御と光電気化学的水素発生反応

光触媒反応や光電気化学反応においては、光励起によって生成したキャリアの有効寿命が反応効率を支配する。二次元層状半導体 MoS₂ は高い還元力を有する一方で、電子-正孔再結合が速いという課題がある。本研究では、p 型半導体 WSe₂ との積層によって形成される MoS₂/WSe₂ ヘテロ構造に着目し、タイプ II バンドアライメントに基づく電荷分離によるキャリア寿命制御と光電気化学的水素発生を宮田・長汐 G と共同で検討した。過渡反射測定の結果、MoS₂ 単層では約 15 ps であったキャリア寿命が、MoS₂/WSe₂ 積層ヘテロ構造では約 55 ps まで延長されることが明らかとなった。この寿命延長を反映して、光電気化学測定では MoS₂/WSe₂ ヘテロ構造において顕著な光還元電流が観測され、局所測定によりその電流値は MoS₂ 中心部の約 4 倍に達することが定量的に示された (Fig. 1(b), (c), (d))。さらに、Au ナノ粒子を担持した

AuNPs/MoS₂/WSe₂ 構造では、光還元電流および入射光子変換効率が一層増大し、その作用スペクトルは Au ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴と良く一致した。これらの結果は、2.5 次元ヘテロ構造によるキャリアの長寿命化とプラズモンによる光吸収増強を組み合わせることで、水素発生効率を効果的に向上できることを示している。

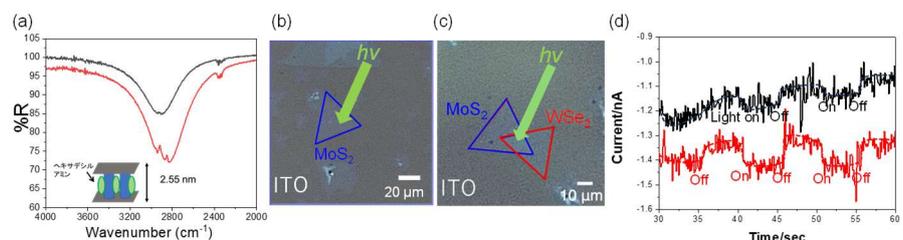


Figure 1. (a) Extinction spectra of a hexadecylamine self-assembled monolayer and hexadecylamine-intercalated silylated graphene oxide on a plasmonic Au nanochain/MIM structure, showing enhanced SEIRA signals due to molecular intercalation. (b, c) Optical microscopy images of (b) MoS₂ and (c) MoS₂/WSe₂ stacked heterostructures. Arrows indicate the positions of local photoirradiation. (d) Photoreduction currents in response to chopped light illumination. Upper panel: MoS₂; lower panel: MoS₂/WSe₂ stacked heterostructure.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] K. Imaeda, Y. Takahashi, S. Ushikoshi, T. Endo, Y. Miyata, K. Nagashio, S. Ryuzaki, K. Ueno^{*}, Plasmon-enhanced photoluminescence of interlayer excitons induced in WSe₂/MoS₂ heterobilayers, *J. Phys. Chem. Lett.*, Published on web, doi: 10.1021/acs.jpcclett.5c03746.
- [2] H. Takeuchi, X. Qian, X.-T. Pan, K. Imaeda, S. Ryuzaki, K. Ueno^{*}, Gap-controlled plasmon dephasing and near-field confinement in metal–insulator–metal nanostructures, *J. Phys. Chem. C*, **129**, 21704 (2025).
- [3] K. Imaeda^{*}, R. Miyazaki, S. Ryuzaki, K. Ueno^{*}, High-Q plasmonic nanocavities enabled by integration of Au nanogap dimers with a distributed Bragg reflector, *J. Phys. Chem. C*, **129**, 5095 (2025).
- [4] K. Ozawa, H. Sugimoto^{*}, D. Shima, T. Hinamoto, M. Karimi Habil, Y. J. Lee, S. Raza, K. Imaeda, K. Ueno, M. L. Brongersma, M. Fujii^{*}, Routing light emission from monolayer MoS₂ by Mie resonances of crystalline silicon nanospheres, *ACS Appl. Opt. Mater.*, **3**, 375 (2025).
- [5] K. Imaeda^{*}, Y. Shikama, S. Ushikoshi, S. Sakai, S. Ryuzaki, K. Ueno^{*}, Coherent acoustic vibrations of Au nanoblocks and their modulation by Al₂O₃ layer, *J. Chem. Phys.*, **160**, 144702 (2024).
- [6] K. Imaeda^{*}, J. Yue, H. Takeuchi, K. Ueno^{*}, Plasmon dephasing and near-field enhancement of periodic arrays of Au nanogap dimers, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 5659 (2024).
- [7] H. Takeuchi, K. Imaeda, S. Ryuzaki, K. Ueno^{*}, Exploring hybrid states and their ultrafast dynamics in exciton–plasmon strong coupling systems, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 2567 (2024).
- [8] C.-H. Huang, Y.-C. Lee, T. Kudo, X. Shi, K. Ueno, T. Sugiyama, H. Misawa, H. Masuhara^{*}, Uni-directional optical swarming of gold nanoparticles on lithographically fabricated gold nanopatterns, *J. Phys. Chem. C*, **127**, 19044-190 (2023).
- [9] P. P. F. da Rosa, Y. Kitagawa, S. Shoji, H. Oyama, K. Imaeda, N. Nakayama, K. Fushimi, H. Uekusa, K. Ueno, H. Goto, Y. Hasegawa^{*}, Preparation of photonic molecular trains via soft-crystal polymerization of lanthanide complexes, *Nat. Commun.*, **13**, 3660 (2022).
- [10] H. Ago^{*}, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio, Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **23**, 275 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] K. Ueno, Acceleration of indirect interlayer exciton recombination by momentum-resolved plasmon coupling, 13th Asian and Oceanian Photochemistry Conference (APC2025), Kochi, India, 2025 年 10 月
- [2] K. Ueno, Control of electron transfer rate by plasmonic Purcell effects, The 15th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics (APNFO15), Bali, Indonesia, 2025 年 8 月
- [3] K. Ueno, Acceleration of excited-state relaxation dynamics via the infrared Purcell effect on intermolecular vibrations, The 32nd International Conference on Photochemistry (ICP2025), Aachen, Germany, 2025 年 7 月
- [4] K. Ueno, Ultrafast dynamics of plasmon-enhanced hot carriers in photocatalytic reactions, The 247th ECS Meeting, Montreal, Canada, 2025 年 5 月
- [5] K. Ueno, Photoluminescence properties of gold nanostructured transition metal dichalcogenide heteronanostructures and their carrier dynamics, SPIE Optics + Photonics 2024, San Diego, USA, 2024 年 8 月
- [6] Y. Takahashi, S. Ushikoshi, K. Imaeda, S. Ryuzaki, K. Ueno, Plasmon-enhanced photoluminescence of Au nanostructured transition metal dichalcogenide heterostructures, The 12th Asian Photochemistry Conference (APC2023), Melbourne, Australia, 2023 年 11 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 上野 貢生, 光化学協会賞, 結合系プラズモニクナノ構造のコヒーレンス時間の制御と光化学反応に関する研究 (光化学協会) 2024 年 9 月
- [2] 上野 貢生, 北海道分析化学賞, 「制御されたナノ構造のレーザー分光分析化学に関する研究 (日本分析化学会北海道支部) 2024 年 2 月

二次元層状物質の電子デバイス応用

長汐 晃輔 (東京大学マテリアル工学専攻)
研究協力者: 西村 知紀・金橋 魁利 (同上)



1. 研究の目的

2.5次元物質の電子デバイス応用を目指し、成膜後の置換型ドーピング等の材料特性改善から、コンタクト及びゲートスタック形成技術を構築し電子デバイスの輸送特性評価までを系統的に研究を進める。また、共同研究を通じて新規材料の各種物性やデバイス応用を進める。

2. 研究成果

2.1. MOCVDによる自己整合成長と室温で $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える移動度の実現

単層 TMDC のスケラブルなエピタキシャル成長に関して、c面サファイア基板上における MOCVD による単結晶 MoS_2 の新しい成長メカニズムを提案した。初期核生成では、 0° および反平行な 60° ドメインに加えて、小角ねじれドメインも成長するが、合体過程においてエネルギー的に安定な 0° ドメインへと決定論的に自己整合・接合され、粒界のない連続した一方向性膜が形成されることを見出した。本手法により得られたエピタキシャル成長 MoS_2 膜において、図 1a に示すように、室温で $\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、20 K で $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超え、フォノン散乱律速の高い移動度によって支持されている。この研究により MoS_2 ウエハーの利用が可能となった。実際、MOCVD によりサファイア基板上に製膜された MoS_2 上に直接 Er_2O_3 を堆積することで、通常のデバイスプロセスで避けられないレジストプロセスを利用することなく、GIXR で密度を決定した。従来プロセスでは、経時変化が大きいが、レジストフリーなプロセスの場合、100 日後においても経時変化を示さなかった。 Er_2O_3 堆積により MoS_2 内へ歪が導入される一方で、時間と共に MoS_2 の歪が緩和され、レジストの再配列に伴う低誘電率領域の形成が経時変化の原因であると予想される。今後、ゲートファーストプロセスでデバイスを作製することで、電気的信頼性の高い high-k/ MoS_2 界面特性が可能であると期待している。

2.2. 置換型ドーピング技術の確立

置換型ドーピングしたバルクおよび単層 WSe_2 における縮退半導体に変化する臨界濃度 Critical dopant level, CDL) を概算する半経験的なモデル構築を試みた。単層におけるイオン化エネルギーは、単層 WSe_2 の面内誘電率と環境の誘電率を考慮した二次元水素原子モデルを基盤としつつ、ドーパントイオンからの静電相互作用を組み合わせて算出した。Nb ドープバルク WSe_2 におけるイオン化エネルギーを計算した結果を図 1b に示す。バルクから単層に変化する際、次元性の低下及び環境の誘電率の低下によりイオン化エネルギーが増加している様子が見て取れる。また、Nb ドープ単層 WSe_2 において、上下層を $k = 15$ の high-k HfO_2 膜とした場合、単層の CDL 低減 ($\sim 1\%$) が確認された。以上の結果から、置換型ドーピングによる効率的なキャリア制御に向けて、環境の誘電率の適切な制御が極めて重要であることが定量的に明らかになった。

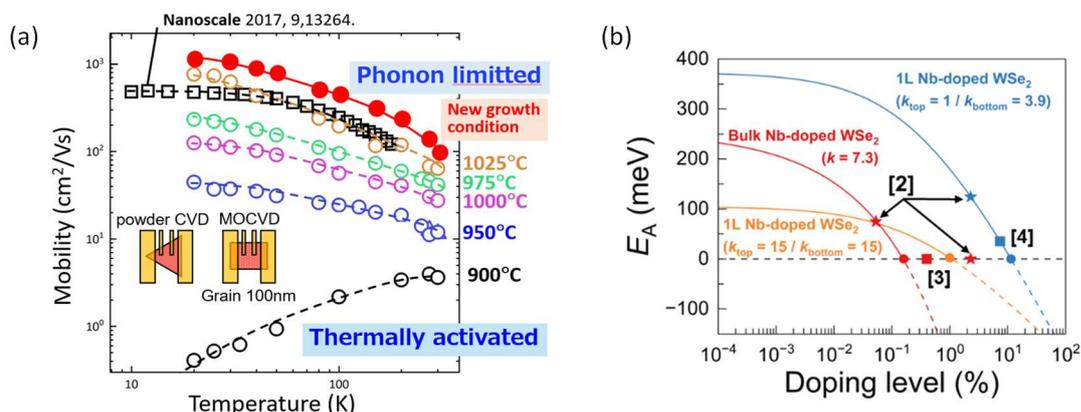


Figure 1. (a) Phonon-limited Mobility of MOCVD- MoS_2 (*Nat. Commun.* 2026). (b) Estimation of ionization energy for bulk and monolayer WSe_2 (*ACS nano* 2024).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] Y. Sakuma, K. Atsumi, S. Li, T. Nishimura, K. Kanahashi, K. Nagashio, *et al.*, Self-aligned and self-limiting van der Waals epitaxy of monolayer MoS₂ for scalable 2D electronics, *Nat. Commun.*, **17**, 602 (2026).
- [2] I. Tanaka, T. Nishimura, K. Kanahashi, K. Ueno, A. Azizi, K. Nagashio, *et al.*, Quantitative ToF-SIMS Assessment of In-Plane and Out-of-Plane Nb Doping Uniformity in CVT-Grown MoS₂ Crystals, *Small Methods*, **9**, e01405 (2025).
- [3] S. Li, R. Otake, T. Nishimura, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. Sakuma K. Nagashio, Reliability Challenges in Equivalent Oxide Thickness Scaling with High-k Er₂O₃ Dielectrics on two-dimensional MoS₂ Field-Effect Transistors, *ACS Mater. Lett.*, **7**, 1993, (2025).
- [4] K. Kanahashi, S. Watanabe, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, K. Ueno, A. Azizi, K. Nagashio, *et al.*, Dimensionality-induced transition from degenerate to non-degenerate states in Nb-doped WSe₂, *ACS Nano*, **19**, 10244 (2025).
- [5] R. Nanae, K. Kanahashi, T. Nishimura, R. Moqbel, K.-H. Lin, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, *et al.*, Bulk Photovoltaic Effect in Single Ferroelectric Domain of SnS Crystal and Control of Local Polarization by Strain, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2406140 (2024).
- [6] T. Fukui, T. Nishimura, Y. Miyata, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Single-gate MoS₂ Tunnel FET with thickness-modulated homojunction, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 8993 (2024).
- [7] S. Ngamprapawat, J. Kawase, T. Nishimura, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio, From *h*-BN to graphene: characterizations of hybrid carbon-doped *h*-BN for applications in electronic and optoelectronic devices, *Adv. Electronic Mater.*, **9**, 2300083 (2023).
- [8] Y.-R. Chang, T. Nishimura, K. Shinokita, K. Matsuda, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, *et al.*, Shift current photovoltaics based on a noncentrosymmetric phase in in-plane ferroelectric SnS, *Adv. Mater.*, **35**, 2301172 (2023).
- [9] H. Uchiyama, K. Maruyama, E. Chen, T. Nishimura, K. Nagashio, A Monolayer MoS₂ FET with an EOT of 1.1 nm Achieved by the Direct Formation of a High-*k* Er₂O₃ Insulator Through Thermal Evaporation, *Small*, **19**, 2207394 (2023).
- [10] W. Nishiyama, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, *et al.*, Quantitative Determination of Contradictory Band Gap Values of Bulk PdSe₂ from Electrical Transport Properties, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2108061 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] K. Nagashio, Control of Ferroelectric Domains and Their Impact on the Bulk Photovoltaic Effect in SnS, 2025 Materials Research Society (MRS) Fall meeting, Boston, USA, 2025 年 12 月
- [2] K. Nagashio, Towards the Development of Wafer-Scale Integration Using 2D Materials, 2D Transition Metal Dichalcogenides 2025 (2D-TMDs 2025), Cambridge, UK, 2025 年 7 月
- [3] K. Nagashio, Layered 2D Insulators: from electrical reliability to current injection, KPS spring meeting, Daejeon, Korea, 2025 年 4 月
- [5] K. Nagashio, 2D layered semiconductor FETs: P type operation & large-scale device characterization, 2024 Advanced Epitaxy for Freestanding Membranes and 2D Materials (AEFM), The University of Tokyo, Tokyo, 2024 年 7 月
- [4] 長汐 晃輔, 二次元材料のウエハースケール集積の現状と展望, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学, 千葉, 2025 年 3 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 金橋 魁利, 第 68 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 若手奨励賞 2025 年 9 月
- [2] 金橋 魁利, 第 58 回応用物理学会講演奨励賞 2025 年 9 月
- [3] 長汐 晃輔, 矢崎学術賞 (功績賞) 2024 年 2 月
- [4] 名苗 遼, 第 55 回応用物理学会講演奨励賞 2023 年 9 月
- [5] 中島 隆一, 第 54 回応用物理学会講演奨励賞 2023 年 3 月
- [6] 佐々木 太郎, 第 51 回応用物理学会講演奨励賞 2022 年 3 月

2.5 次元物質のニューラルネットワークデバイス応用

大野 雄高 (名古屋大学未来材料・システム研究所)

研究協力者：内山 晴貴



1. 研究の目的

AIの普及により電力需要が急速に増加しており、ニューラルネットワークデバイスの低消費電力が急務である。本研究では、ナノ物質の低消費電力性を生かした超低消費電力ニューラルネットワークデバイスの創製を目指し、領域内外との共同研究を通じ、基本構造となるナノ積層材料・デバイスの創出と機能実証を進める。

2. 研究成果

ニューラルネットワークコンピューティングの一種であるリザバーコンピューティングを中心に研究を進めた。学習コストと高速な機械学習手法であり、時系列データを扱うのに適しており、非線形性、高次元性、短期記憶という特性もつ物理系で実現できる。特に、我々のもつカーボンナノチューブ(CNT)デバイス技術と櫻井 (A01 班) のスマネンや荒井 (A02 班) のポリマー-SiO₂などの本領域特有の材料とのハイブリッドナノ構造を用いた系について検討を進めた。

2.1. ナノ物質の表面制御による高次元物理リザバーの創出

電気化学センサは電気二重層の充放電や電極-電解質液界面での酸化還元種の拡散に起因する短期記憶や非線形性をもち、センシングのみならず物理リザバーとして有用であり、センサ自体に機械学習の機能を実装できる可能性がある。CNT 薄膜電極を用いたセンサについて、表面修飾を電気化学的に制御し、リザバーの高次元化と予測性能の向上を実現するとともに、それを用いて I 型糖尿病患者の血糖値の予測を実証した (Fig. 1, 論文[6])。

2.2. ポリマー酸化膜のイオン伝導性を用いた低電圧動作物理リザバーの創出

荒井 (A02 班) の開発したポリマー-SiO₂ を CNT FET のゲート電極に導入し、従来の Al₂O₃ 絶縁膜に比べ、優れた低電圧動作性を得た。特に低温焼成の場合、絶縁膜容量が周波数分散をもつことから、イオン伝導性を有することを明らかにした。低電圧動作性と容量の周波数分散に着目し、低電圧動作可能なリザバーを実現し、波形生成タスク等が可能であることを実証した。

2.3. スマネン/CNT 複合構造の創出

ナノスケールでメモリやニューラルデバイスの実現を目指すべく、櫻井 (A01 班) と共同で強誘電性をもつ分子であるスマネンと CNT の複合材料の創出を進めた。はじめに、フルオロスマネンと CNT との相互作用を FET 特性から調べ、フルオロスマネンのフッ素原子数によってキャリアドーピングの極性や密度が異なること、その機構を岡田 (A01 班) と共同で理論的考察から明らかにした (論文[5])。さらに、ラジカル付加反応によってスマネンが CNT に化学的に吸着したスマネン/CNT 複合構造を初めて実現した。ラマン散乱分光により、反応速度が CNT の直径に依存することを見出し、アリルラジカルの CNT への求電子付加反応であることを考慮し、直径により CNT の求核性が異なることが推察された。

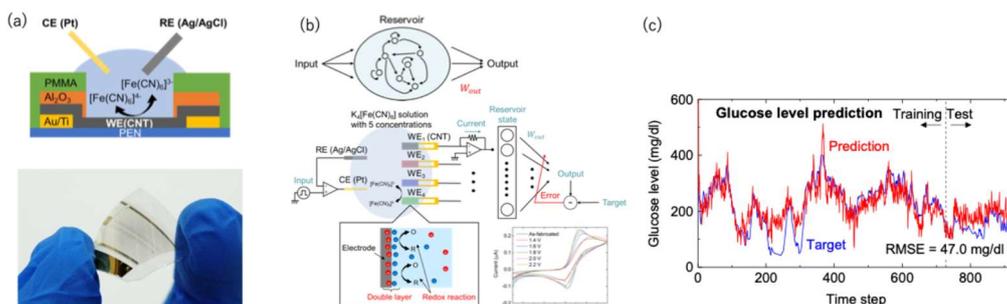


Figure 1. Electrochemical reservoir based on CNT sensor array. (a) Schematic and photograph of CNT sensor, (b) configuration of reservoir, (c) demonstration of blood glucose level in type-I diabetes patients (Carbon 2023).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] A. Nagamine, H. Uchiyama, K. Kamiya, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Y. Ohno, Energetics and electronic structures of carbon nanotubes adsorbed with amino acids, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **64**, 125003 (2025).
- [2] J. Liang, C. Liu, Y. Wei, S. Feng, Y. Sun, Y. Ohno, H.-M. Cheng, D.-M. Sun, Native GaN/GaOx Heterostructure Platform for Wafer-Scale Integration of High-Performance Complementary Transistors, *Research*, **8**, 1058 (2025).
- [3] N. V. Anh, L. K. Toana, P. H. Thuonga, N. V. Thuca, N. M. Ngoca, Y. Ohno, N. X. Viet, Laser-induced graphene-based flexible and all-inorganic-carbon thin film transistor for non-invasive monitoring of cortisol, *Microchimica Acta* **192**, 746 (2025).
- [4] A. T. Khan, N. Wei, O. Salmela, K. Mustonen, Y. Liao, A. Hussain, E.-X. Ding, M. G. Uddin, H. Jiang, Y. Ohno, E. I. Kauppinen, High-Performance Field-Effect Transistors with Semiconducting-Rich Single-Walled Carbon Nanotube Bundle, *Carbon*, **239**, 120320 (2025).
- [5] H. Uchiyama, T. Nakano, Y. Yakiyama, H. Sakurai, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, H. Kataura, Y. Ohno, Carrier Doping in Semiconducting Carbon Nanotubes with Fluorosumanenes, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 17668 (2024).
- [6] T. Shingu, H. Uchiyama, T. Watanabe, Y. Ohno, Electrochemical reservoir computing based on surface-functionalized carbon nanotubes, *Carbon*, **214**, 118344 (2023).
- [7] Y. Sun, P. Li, E. I. Kauppinen, D.-M. Sun, Y. Ohno, Key factors for ultra-high on/off ratio thin-film transistors using as-grown carbon nanotube networks, *RSC Adv.*, **12**, 16291 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] Y. Ohno, Interfaces in Semiconductor Devices Based on Low-dimensional Materials: The Case of Flexible Carbon Nanotube TFTs and Analog ICs, 2025 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Yokohama, Japan, 2025 年 9 月
- [2] Y. Ohno, Interfaces of Carbon Nanotube Thin Film Transistors on Flexible Film, 247th ECS Meeting, Montreal, Canada, 2025 年 5 月
- [3] Y. Ohno, Importance of interfaces in semiconductor devices based on low-dimensional materials, 12th International Forum on graphene in Shenzhen, Shenzhen, China, 2025 年 4 月
- [4] Y. Ohno, Low-frequency Noise in Flexible Carbon Nanotube Thin-Film Transistors, 2024 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA, 2024 年 12 月
- [5] Y. Ohno, Low-frequency noise in carbon nanotube thin-film transistors and its impact on analog integrated circuits, The World Conference on Carbon 2024, Shenzhen, China, 2024 年 7 月
- [6] Y. Ohno, Carbon nanotube thin-film transistors and functional integrated circuits for fully-flexible, wearable sensors, The Twenty-Fourth International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials, Boston, USA, 2024 年 6 月
- [7] Y. Ohno, Low-Frequency Noise in Flexible Carbon-Nanotube Analog Circuits, 245th ECS Meeting, San Francisco, USA, 2024 年 5 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

該当なし

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会 会長
- [2] 日本科学協会 サイエンスメンター 2024 年

2.5 次元物質のエネルギー貯蔵材料としての応用

松尾 吉晃（兵庫県立大学大学院工学研究科）

研究協力者：稲本 純一（同上）



1. 研究の目的

グラフェンライクグラファイト（GLG）とピラー化炭素のエネルギー貯蔵材料としての応用・反応解析を進めるとともに、領域内の研究者にこれらを提供し共同研究を行う。さらに、領域内で合成された2.5次元物質のイオン貯蔵挙動を調べることで、エネルギー貯蔵材料の設計指針を明らかとする。

2. 研究成果

2.1. 1-4 層グラフェンのアニオン貯蔵挙動

炭素材料へのアニオン挿入脱離反応を正極に適用するデュアルイオン電池は、遷移金属が不要な電池として期待されている。しかしながら現在正極として検討されている黒鉛の容量は、遷移金属酸化物には及ばずまた、反応電位が高すぎて電解液分解が懸念されるなどの課題があった。しかしながら、これまでは炭素の構造パラメータのうち何が容量やアニオン挿入電位、さらには入出力特性等の電池特性に寄与するのか不明であった。

本年度、我々は1-4層グラフェンのアニオン挿入脱離挙動をサイクリックボルタンメトリーにより検討した。この結果、グラフェンの積層数を減らすと層間へアニオンが挿入される電位が低下することを見出し、この効果は、グラフェンの積層にねじれを加えることによっても発現することも明らかとなった。(Fig.1(a))。その一方で、グラフェン層間でのアニオンの拡散速度は積層数やねじれの導入によって変化することはないことも見出した。これらの知見はデュアルイオン電池正極用の炭素材料を設計していくうえで重要な指針となるものと期待できる。

2.2. グラフェンライクグラファイトのデュアルイオン電池正極特性

酸素及びナノ孔を有するグラフェンが、黒鉛よりも幾分大きな層間距離で積層した材料であるGLGのデュアルイオン電池正極への応用も進めた。

本年度は、電解液が正極特性に及ぼす影響を詳細に検討し、中程度の塩濃度で容量が極大となることを見出し、これが、挿入脱離反応の平衡電位の変化より、むしろ電解液の抵抗の変化に依存していることを明らかとした(Fig.1(b))。加えて、GLGの界面アニオン移動と内部拡散の活性化エネルギーを電気化学インピーダンス法によって調べ、前者はGLGの酸素含有量が大きくなると黒鉛よりも小さくなるのに対して、後者は直線的に増加していくことも見出した。

2.3. ピラー化炭素薄膜の合成と全固体型リチウムイオン電池負極正極特性

安全性が高く高入出力特性が期待できる全固体型リチウムイオン電池では、リチウムイオン吸蔵/脱離時に体積変化の小さい活物質が望まれる。ピラー化炭素はこのような特性を示すが、充放電時の電解質の分解が問題であった。

本年度は、このピラー炭素を薄膜化し電解質との接触面積を小さくすることによりこれを低減することを試みた。メチルトリクロロシランによって3回シリル化した酸化黒鉛に*n*-ヘキサデシルアミンを添加することで有機溶媒に分散させこれをキャスト、その後熱処理することで薄膜を得ることに成功した。この薄膜の負極特性を調べたところ、リチウムイオンが比較的低電位で挿入・脱離できるとともに、ピラー化炭素の容量はシリコン含有量の増加に伴って増加し、最大で1280 mAhg⁻¹に達することを明らかにできた。(Fig.1(c))

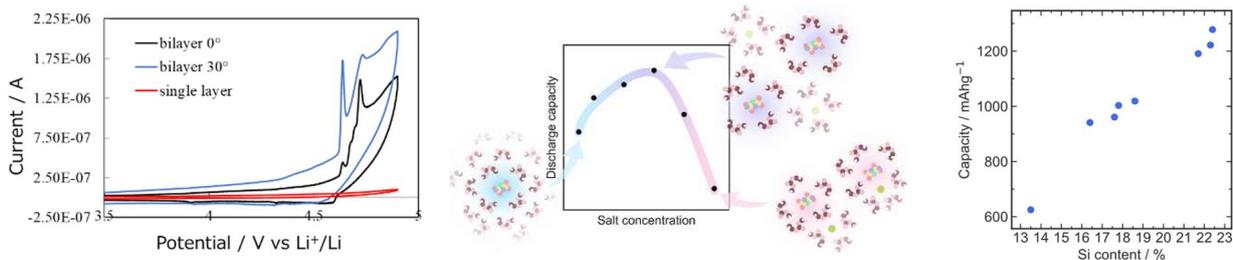


Figure 1. Achievement during this project. (a) Cyclic voltammograms of single and bilayer graphenes. (b) Schematic variation of capacity of GLG as a function of electrolyte concentration (*JPCS*, 2024). (c) Variation of discharge capacity of pillared carbon as a function of silicon content.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] Y. Matsuo, J. Inamoto, N. Tamura, Effect of the Electrolyte Solution on the Electrochemical Behaviors of Graphene-like Graphite as the Cathode of Dual-Ion Batteries, *J. Phys. Chem. C*, **129**, 4358-4365 (2025).
- [2] J. Inamoto, Akane Inoo, R. Matsumoto, Y. Matsuo, Role of Oxygen Functional Groups in Electrochemical Sodium Ion Intercalation into Oxygen-Functionalized Graphitic Carbon Materials, *Electrochemistry*, **93**, 057001 (2025).
- [3] J. Inamoto, S. Nakano, A. Inoo, Y. Matsuo, Sodium-Based Dual Carbon Batteries with Graphene-Like Graphite: Achieving High Reversible Capacity and Stable Cycling, *Electrochemistry*, **93**, 057002 (2025).
- [4] J. Inamoto, S. Enoki, A. Inoo, N. Tamura, Y. Matsuo, Promise of dual carbon batteries with graphene-like graphite as both electrodes, *Carbon*, **216**, 118512 (2024).
- [5] J. Inamoto, S. Enoki, T. Miyamoto, A. Inoo, Y. Matsuo, Unraveling the Factors of Host Materials Affecting the Kinetics of Electrochemical Anion Intercalation Reaction, *ACS App. Energy Mater.*, **7**, 10701 (2024).
- [6] Y. Matsuo, A. Inoo, J. Inamoto, Electrochemical intercalation of anions into graphite: Fundamental aspects, material synthesis, and application to the cathode of dual-ion batteries, *ChemistryOpen*, **13**, 8, e202300244 (2024).
- [7] Y. Matsuo, K. Sekito, Y. Ashida, J. Inamoto, N. Tamura, Factors Affecting the Electrochemical Behaviors of Graphene-Like Graphite as a Positive Electrode of a Dual-Ion Battery, *ChemSusChem*, **16**, 4, e202001127 (2023).
- [8] J. Inamoto, S. Komiyama, Y. Matsuo, Synthesis of a flexible self-standing graphene-like graphite thin film and its application to an anode material for a thin-film all-solid-state lithium-ion battery, *Carbon Reports*, **1**, 142-146 (2022).
- [9] J. Inamoto, S. Komiyama, S. Uchida, A. Inoo, Y. Matsuo, Insight into the Origin of the Rapid Charging Ability of Graphene-Like Graphite as a Lithium-Ion Battery Anode Material Using Electrochemical Impedance Spectroscopy, *J. Phys. Chem. C*, **126**, 16100-16108 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] H. Shirai, J. Inamoto, Y. Matsuo, Anodic Performance of Pillared Carbon for All-Solid-State Lithium Ion Battery, The 5th UOH-FZU-OMU Joint International Symposium, Himeji, 2024 年 11 月
- [2] 松尾 吉晃、架橋型炭素多孔質材料の合成と特性、活性炭技術研究会第 179 回講演会、大阪、2024 年 7 月
- [3] 稲本 純一、松尾 吉晃、アニオンの挿入脱離を利用したグラフェンライクグラファイトの正極材料としての応用、第 410 回電池技術委員会講演会、大阪、2022 年 2 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 昇進、稲本 純一、助教から准教授への昇進、2025 年 4 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 炭素材料学会運営副委員長/委員長 2022-2023/2024-2025 年度

5. 公募班 研究成果





5. 公募班 研究成果

A01

物質創製班

2.5次元構造体のための 物質創製

加藤 幸一郎

加藤 俊顕

小澤 大知

相馬 拓人

田代 省平

平井 大悟郎

データ駆動型 2.5 次元物質モアレ超格子の探索と物性支配因子の抽出

加藤 幸一郎 (九州大学大学院工学研究院)



1. 研究の目的

モアレ超格子の基礎理論 (特に有効連続体理論) に着目し、①第一原理計算・多目的最適化を連動させることで、これまで検討されてこなかった 2.5 次元物質を対象とした新たなモアレ超格子の探索を進めるとともに、②探索段階で蓄積したデータを用いた説明可能 AI によってモアレ超格子の物性支配因子の抽出を目指す。また、新規モアレ超格子の大規模第一原理計算による物性解析を進める。

2. 研究成果

2.1. 多目的最適化によるモアレ超格子の探索

モアレ超格子の新奇物質探索と物性の学理的理解は、本学術変革領域における重要な研究課題の一つであり、二次元材料の積層やツイスト構造に関する研究が世界的に進展している。本研究では、モアレ超格子の基礎理論に立脚し、第一原理計算と多目的最適化を組み合わせた探索手法を構築した。具体的には、二層の遷移金属ダイカルコゲナイド系を対象とし、「モアレの影響」を強く受けることが期待される 2.5 次元物質の探索を行った。探索には、有効連続体模型から着想を得た 2 つの代理指標を用いた。これらは、(i) 局所積層構造間のエネルギー差、および (ii) 局所積層構造における価電子帯上端のスピ軌道相互作用によるバンド分裂幅の変化量である。これらの指標は、通常の二層単位胞において、ずらし方を変えた複数の微小ずらし積層構造に対する第一原理計算から評価可能である。第一原理計算で得たこれらの代理指標を用いた多目的最適化によって計 12 回の探索を行った結果を Figure 1 に示す。Figure 1 の右上の領域にある材料ほど、2 つの代理指標の数値が大きいため、より強く捻りの影響を受けると期待される材料である。今回得られた $\text{WTe}_2\text{-MoTe}_2$ のヘテロ積層系はこれまでにモアレ超格子として報告されていない系であり、現在大規模第一原理計算による構造・電子状態の解析を進めている。

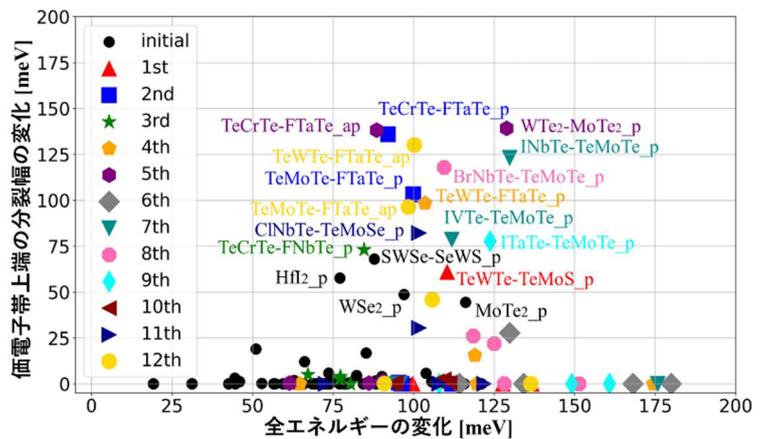


Figure 1 Multi-objective optimization of bilayer materials using two surrogate descriptors. Black circles show the initial dataset, and colored symbols denote candidates suggested in the 1st–12th cycles.

2.2. $1T'\text{-WTe}_2$ の一次元モアレ構造と電子状態の解析

近年実験的に観測された一次元モアレ超格子を有する $1T'\text{-WTe}_2$ のツイスト二層系に対して、原子構造及び電子状態を密度汎関数理論により解析し、越野グループによる理論構築につなげると共に、町田グループによる実験観測結果との比較による体系的な理解を進めた。密度汎関数理論による解析の結果、一次元モアレ超格子においても、通常の二次元モアレ超格子と同様のモアレ再構成が起こり一次元の縞構造の幅が変化することを明らかにした。さらに、縞構造の方向に沿った一次元的な伝導性を示唆する電子状態が形成されることを示した (Figure 2)

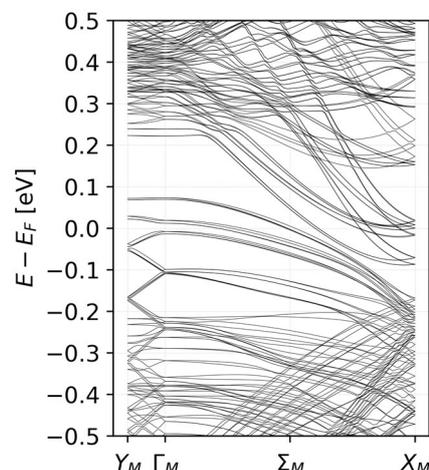


Figure 2 Electronic band structure of the twisted bilayer $1T'\text{-WTe}_2$.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] N. Nakatsuji, T. Kawakami, H. Tateishi, K. Kato, M. Koshino, Moiré band engineering in twisted trilayer WSe₂, *Commun. Mat.*, **6**, 274 (2025)
- [2] A. B. M. Nazmul Islam, N. Kayo, Y. Motoishi, R. Hamano, N. Tanaka, K. Kato, T. Fujigaya, Kinetics and thermodynamics analysis of the polybenzimidazole adsorption onto carbon materials using adsorption isotherm measurements, *Polym. J.*, **56**, 1153-1163 (2024)
- [3] A. B. M. Nazmul Islam, M. Akamine, C. Kim, N. Tanaka, K. Kato, T. Fujigaya, Selective adsorption of indole on mesoporous carbon in an aqueous system, *Carbon Rep.*, **3**, 3, 134-141 (2024)
- [4] Y. Niidome, H. Matsumoto, R. Hamano, K. Kato, T. Fujigaya, T. Shiraki, Polymer Wrapping State Changes at Defect Sites of Locally Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Chem. Phys. C*, **128**, 5146-5155 (2024)
- [5] N. Tanaka, A. Hamasuna, I. Yamaguchi, K. Kato, T. Fujigaya, Pyridine-mediated B–B bond cleavage of tetrahydroxydiboron to synthesize n-doped SWCNTs with long-term air stability, *Sci. Rep.*, **13**, 21926 (2023)
- [6] B. Yu, S. Naka, H. Aoki, K. Kato, D. Yamashita, S. Fujii, Y. Kato, T. Fujigaya, T. Shiraki, ortho-Substituted Aryldiazonium Design for the Defect Configuration-Controlled Photoluminescent Functionalization of Chiral Single-Walled Carbon Nanotubes, *ACS Nano*, **16**, 12, 21452-21461 (2022)

3.2. 招待講演

- [1] K. Kato, Computational Exploration of Novel Moiré Superlattices via First-Principles Calculations and Multi-Objective Optimization, 14th Young Researcher Symposium a FNTG69 Satellite Meeting, Taipei, Taiwan, 2025 年 9 月
- [2] 加藤 幸一郎, 第一原理計算と多目的最適化によるモアレ超格子探索, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月
- [3] 加藤 幸一郎, 分子シミュレーションとデータ科学の融合による多様で複雑な系への挑戦, 第 8 回 koine ミーティング (二次元材料オープンイノベーション・ミーティング), 九州大学, 福岡, 2024 年 7 月
- [4] K. Kato, Efficient Search for Stacking Patterns in van der Waals Heterostructures Using Bayesian Optimization, The 66th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, Nagoya, Japan, 2024 年 3 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 立石 駿斗、第 62 回化学関連支部九州合同大会若手研究者奨励賞、2025 年 7 月
- [2] 立石 駿斗、九州地区高分子若手研究会・夏の講演会優秀ポスター賞、2025 年 7 月
- [3] 立石 駿斗、令和 6 年度日本化学会九州支部長賞 (大学・学部)、2025 年 3 月
- [4] 昇進、九州大学大学院工学研究院 教授、2025 年 2 月
- [5] チェボムギユ、第 60 回化学関連支部九州合同大会若手研究者奨励賞、2023 年 7 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業、共用推進委員会 データ基盤 WG 副 WG 長 2025 年度
- [2] 文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業、データ連携基盤委員会 委員長 2024 年度
- [3] 出前講義、下関西高校 2022 年 10 月

ヤヌス原子層科学の構築



加藤 俊顕 (東北大学大学院工学研究科)

1. 研究の目的

本研究では、原子層物質である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)の上面カルコゲン原子を異種原子に置換した“ヤヌス TMD”の高品質合成を目指す。また、同サンプル提供を通じ領域内共同研究を活発に展開しヤヌス TMD の物性解明も進める。さらにこれらの活動を通じて最終的に、ヤヌス原子層科学という新たな学術基盤構築を目指す。

2. 研究成果

2.1. その場観測プラズマ機能化装置の開発

ヤヌス TMD は面外方向の空間反転対称性が破れることで、2次元面垂直方向に電場が自発的に形成される極めてユニークな特徴をもつ“2.5次元原子層物質”であるが、その合成や物性に関する研究は極めて限定的である。特にヤヌス化反応機構には、未解明な点が多く残されている。そこで、これまで開発した光学(ラマン、蛍光(PL))スペクトルをヤヌス化反応中に直接観測可能なその場観測装置に、電気伝導特性も同時計測可能な測定系を追加した“その場観測光・電気ヤヌス化装置”を開発した(図 1(a))。あらかじめ作成した MoSe_2 をチャネルとした電界効果型トランジスタに対し、連続的にプラズマ照射を行うことで、ヤヌス化反応に伴う電気伝導特性変化を明確に測定することに成功した。さらに同時に計測したラマンスペクトルの変化と比較し、ユニークなヤヌス化反応モデルの構築に至った。この知見は、今後の高品質ヤヌス TMD や新規ヤヌス TMD の創製に向けて重要な知見である。

2.2. ヤヌス TMD 超格子の創製

ヤヌス TMD を複数層積層させたヤヌス TMD 超格子の創製に取り組んだ。二層 Se(上面)WS(下面)に関して、積層オーダーを変化させた、SeWS/SeWS, SeWS/SWSe, SWSe/SeWS という三つの異なる接合界面を持つヤヌス超格子の創製を実現した。PL 特性を評価した結果、積層オーダーに依存した明確な PL スペクトルの変化を確認した(図 1(b))。ヤヌス TMD 特有の自由度である積層オーダーが、光物性変調に有効である可能性を示した本成果は、今後のヤヌス TMD 超格子の設計において重要な価値を持つものである。

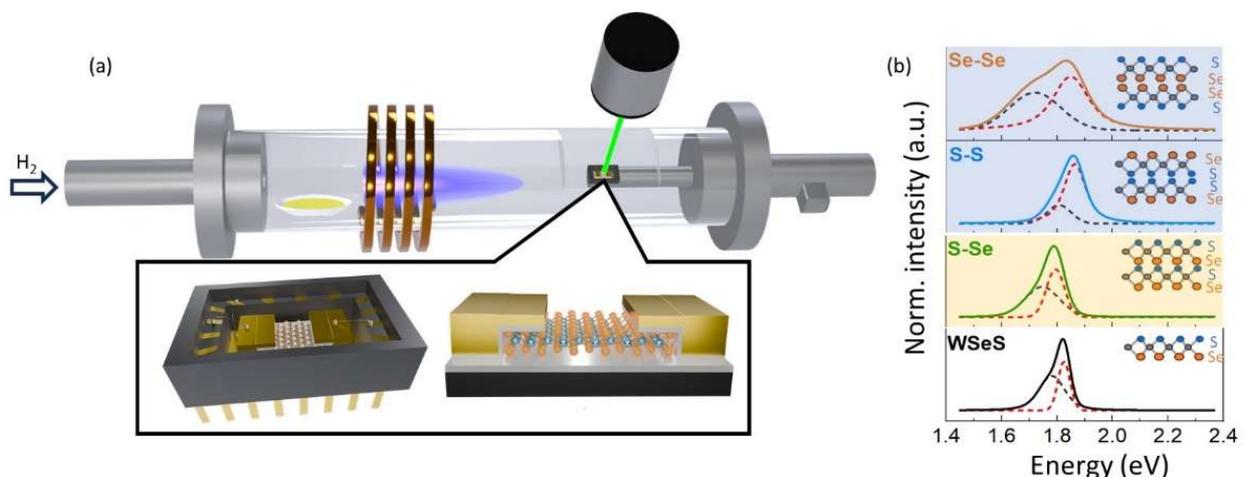


Figure 1. (a) Schematic diagram of the in-situ observation optical and electrical measurement system for Janusization process. (b) Typical PL spectra (room temperature) of a two-layer WSeS superlattice dependent on the stacking order.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] M. Kaneda, Y. Takahashi, S. Fujii, T. Kato^{*}, Y. Miyata^{*} *et al.*, Tunable-Diameter Nanoscrolls from Janus WSSe/WSe₂ Heterostructures, *ACS Nano*, **19**, 34918 (2025).
- [2] T. Okonai, T. Kato, S. Ryu, K. Suenaga, H. Ago *et al.*, Anomalous Raman signals in multilayer hexagonal boron nitride grown by chemical vapour deposition on metal foil catalysts, *Nanoscale Adv.*, **7**, 7538 (2025).
- [3] Z. Ma, P. Solís-Fernández^{*}, Y.-C. Lin, K. Matsuda, K. Suenaga, S. Okada, T. Kato, Y. Takahashi, H. Ago^{*} *et al.*, Lattice-guided growth of dense arrays of aligned transition metal dichalcogenide nanoribbons with high catalytic reactivity, *Sci. Adv.*, **11**, eadr8046 (2025).
- [4] Y. Gao^{*}, M. Kaneda, T. Endo, H. Nakajo, S. Aoki, T. Kato, Y. Miyata, S. Okada, Strain-induced scrolling of Janus WSSe, *Phys. Rev. B*, **110**, 35414 (2024).
- [5] S. Shiina, T. Kato^{*} *et al.*, Synthesis of Ultrahigh-Purity (6,5) Carbon Nanotubes Using a Trimetallic Catalyst, *ACS Nano*, **18**, 23979 (2024).
- [6] M. Kaneda, Y. Yamada-Takamura, Y. Takahashi, S. Okada, T. Kato^{*}, Y. Miyata^{*} *et al.*, Nanoscrolls of Janus Monolayer Transition Metal Dichalcogenides, *ACS Nano*, **18**, 2772 (2024).
- [7] W. Zhang, K. Watanabe, Y. Yamada-Takamura, M. Koshino, S. Okada, K. Matsuda, T. Kato, Y. Miyata^{*} *et al.*, Chemically Tailored Semiconductor Moiré Superlattices of Janus Heterobilayers, *Small Struct.*, **5**, 2300514 (2024).
- [8] Y. Nakanishi^{*}, Y. Yomogida, K. Yanagi, T. Kato, K. Suenaga, Y. Miyata^{*} *et al.*, Structural Diversity of Single-Walled Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes Grown via Template Reaction, *Adv. Mater.*, **35**, 2306631 (2023).
- [9] T. Kato^{*}, *et al.*, Scalable fabrication of graphene nanoribbon quantum dot devices with stable orbital-level spacing, *Commun. Mater.*, **3**, 103 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] T. Kato, Synthesis and Characterization of High-Quality Janus Transition Metal Dichalcogenides, The 16th International Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research (RPGR2025), Toyama, Japan, 2025 年 11 月
- [2] T. Kato, Ultra-Pure Synthesis of (6,5) Carbon Nanotubes with Multiphase Catalysts, (NT25) The 25th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials, Kyoto, Japan, 2025 年 6 月
- [3] T. Kato, 新規ヤヌス TMD の創製と応用, 日本物理学会 2025 年春季大会, 日本, 2025 年 3 月
- [4] T. Kato, Fabrication and Engineering of Janus Transition metal Dichalcogenides as Novel 1D and 2D Materials, 2024 MRS FALL MEETING & EXHIBIT, Boston, USA, 2024 年 12 月
- [6] T. Kato, 1D and 2D Janus TMDs formed by In-situ Atomic Functionalization, The 15th Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research Conference (RPGR2024), Naning, China, 2024 年 7 月
- [7] T. Kato, Creation of 1D and 2D Janus TMDs via In-situ Atomic Functionalization, The 11th Korea Graphene/2D Materials Symposium, Busan, Korea, 2024 年 7 月
- [8] T. Kato, Highly transparent solar cell based on 2D materials, MRM2023, Kyoto, Japan, 2023 年 12 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 昇進、東北大学大学院工学研究科 教授、2025 年 4 月
- [2] Masaru Hori Prize, ISPlasma 2024, 2024 年 3 月
- [3] プレス発表、カーボンナノチューブの原子配列を制御して合成する手法を開発 (東北大学)、2024 年 9 月
- [4] プレス発表、グラフェン量子ドットデバイスの集積化合成技術を開発 (東北大学)、2023 年 1 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 特願 2023-551512、カーボンナノチューブ組成物、カーボンナノチューブ製造用の触媒、カーボンナノチューブの製造方法およびカーボンナノチューブ、2025 年 12 月

単一分子誘起 2.5 次元物質の創製と光物性・機能開拓



小澤 大知 (物質・材料研究機構ナノアーキテククス材料研究センター)

1. 研究の目的

独自技術「決定論的単一分子結合法」により位置、個数、構造を精密に制御した量子欠陥を原子層に導入し、その量子機能、励起子物性を開拓する。カーボンナノチューブで確立した気相光化学反応技術を二次元材料へ展開し、単一分子誘起 2.5 次元物質がもつ量子光源や量子ビットとしての可能性を検証する。

2. 研究成果

2.1. 決定論的単一分子結合法の確立

有機発光中心は、原子レベルで構造を制御した発光性量子欠陥になりうる。しかし、従来技術では量子欠陥の位置・個数・構造を精密に制御することが困難であった。この課題に対して、我々は in-situ 光化学反応により、カーボンナノチューブ上に単一の有機発光中心（カラーセンター）を決定論的に形成する手法を開発した（論文[1]）。発光スペクトルの離散的な強度変化をリアルタイムでモニタリングすることで、単一分子レベルでの反応制御を実現した。さらに、励起光を集光することで位置選択的な分子結合が可能であることを発光イメージングにより実証した。光子相関測定で室温で $g^{(2)}(0) = 0.45$ という明確なアンチバンチングを観測し、形成された欠陥の量子性を確認した。本成果は、原子レベルで定義された量子発光体の精密制御技術として、量子フォトニクスデバイスへの展開が期待される。

2.2. 二次元材料への展開

さらに、カーボンナノチューブで確立した決定論的単一分子結合法を二次元材料へ展開する研究を進めている。遷移金属ダイカルコゲナイド WS_2 に対して同様の気相光化学反応を適用し、極低温において発光中心からの発光を観測することに成功した。現在、発光特性の詳細な評価を進めており、単一分子誘起 2.5 次元物質の光物性解明に向けた基盤データを蓄積している。

2.3. 異次元ヘテロ構造における量子発光の発見

また、A01 班の岡田、A04 班の藤井、A05 班の長汐らとの共同研究により、1 次元半導体（カーボンナノチューブ）と 2 次元半導体 (WSe_2) からなる異次元ヘテロ構造において、室温で動作する量子光源を発見した（論文[2]）。タイプ II ヘテロ構造における界面励起子が局在化し、単一光子を発生することを二光子相関測定により実証した。本成果は、2.5 次元物質における新たな量子機能の発現を示すものであり、室温量子技術への応用が期待される。

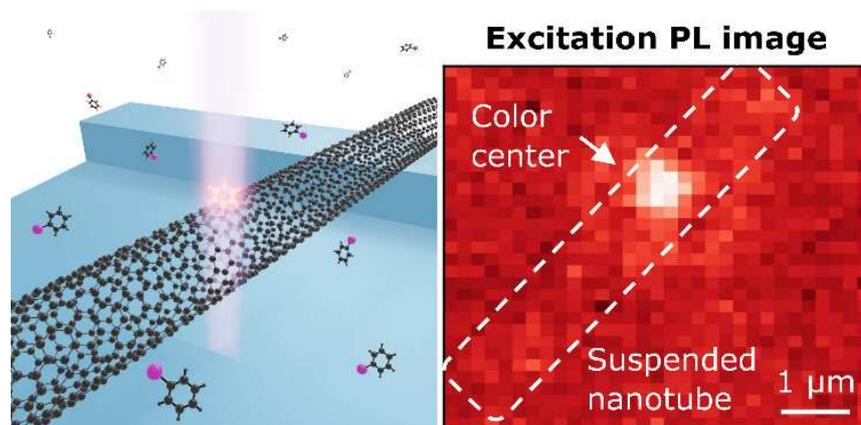


Figure 1. Fig. 1: (left) Schematic of the deterministic formation of a single color center in an air-suspended carbon nanotube with iodobenzene vapor. (right) Excitation PL image of a functionalized nanotube (*Nano Lett.* 2025).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] D. Kozawa, Y. Shiota, M. Wang, Y. K. Kato, Deterministic Formation of Single Organic Color Centers in Single-Walled Carbon Nanotubes, *Nano Lett.*, **25**, 13103–13109 (2025).
- [2] N. Fang, Y. R. Chang, S. Fujii, D. Yamashita, M. Maruyama, Y. Gao, C. F. Fong, D. Kozawa, K. Otsuka, K. Nagashio, S. Okada, Y. K. Kato, Room-temperature quantum emission from interface excitons in mixed-dimensional heterostructures, *Nat. Commun.*, **15**, 2871 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] D. Kozawa, Y. Shiota, Y. K. Kato, Deterministic formation of single organic color centers in single-walled carbon nanotubes, META 2025, 2025 年 7 月
- [2] D. Kozawa, S. Fujii, Y. K. Kato, Intrinsic process for upconversion photoluminescence via K-momentum phonon coupling in carbon nanotubes, NT'25 Symposium on Fundamental, Structural and Optical Properties of 1D and 2D Materials and their Heterostructures, 2025 年 6 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、カーボンナノチューブ量子光源を狙い通りにつくる（理化学研究所）2025 年 8 月
- [2] プレス発表、異次元ナノ半導体界面に潜む量子光源の発見（理化学研究所）2024 年 4 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] NIMS 一般公開 2025 2025 年 5 月
- [2] NIMS 一般公開 2024 2024 年 5 月
- [3] 特開 2025-078177、反応制御装置及び反応制御方法 2025 年 5 月
- [4] 日本物理学会 領域 7（分子性固体・有機導体）運営委員 2025 年 10 月

3D層状結晶が生み出す新しい2D物質の創製



相馬 拓人 (東北大学多元物質科学研究所)

1. 研究の目的

通常では2次元物質の仲間に含まれない酸化物や窒化物などのセラミックス材料に着目し、薄膜合成技術と化学反応を駆使することで新しい2次元物質へと転換する。強相関物性など一般にイオン性の高い3D物質でしか発現しない特性に着目し、2D物質における新たな機能性を拓く。また薄膜合成技術や高品質試料を提供することで、領域共同研究の新たな方向性を拓く。

2. 研究成果

2.1. 強相関 van der Waals 酸化物 $2H-NbO_2$ の創製

van der Waals (vdW) 物質は二次元層が積み重なった構造を持つ物質の総称であり、二次元物質のもとになる物質群である。その一方で、金属酸化物はしばしば強相関物質と呼ばれ、多彩な自由度に起因する創発電子物性が発現する。しかしながら、金属酸化物はその高いイオン性から一般にvdW物質とならず、これまでこの二つの領域は異なった文脈で発展を遂げてきた。

そこで我々は、3次元的な層状構造を持つ $LiNbO_2$ という物質に着目し、層間からLiを引き抜く化学反応を設計することで2次元的なvdW構造を持つ酸化物へと転換する“2.5次元のアプローチ”を着想した (Fig. 1a)。実際にナノ薄膜単結晶を用いた高温ソルボサーマル反応を独自に開発することで、強相関vdW酸化物である $2H-NbO_2$ の合成に成功した。その特性を調べると、強相関電子系に典型的なMott絶縁体状態が実現していることが明らかになった。更に、キャリアドーピングに伴って金属-絶縁体転移や超伝導転移が起こり、銅酸化物や2次元物質のMoiré超格子と類似した強相関電子相図を示すことが明らかになった (Fig. 1b)。本研究成果は、強相関物質とvdW物質の特徴を併せ持つ物質の合成が可能であることを示しており、強相関二次元材料トランジスタなど、本質的に新しい次世代電子デバイスの設計が期待できる。

2.2. 強相関酸化物薄膜技術×2D物質の新展開の開拓

酸化物薄膜合成技術を駆使し領域内共同研究を展開することで、2D物質科学の新たな展開を拓くことを行った。A01班の吾郷が作製したhBN上に Ti_2O_3 薄膜を成長すると、強相関酸化物に特有な金属-絶縁体転移が増強されることが明らかになった (Fig. 1c)。これは理想的な Ti_2O_3 /hBN 界面構造に由来しており、ナノシート化や高感度歪みセンサとしての展開が期待される。また高結晶性の WO_3 極薄膜を作製し、A02班の鈴木がCVD反応を行うことにより、平坦で大面積な単層 WS_2 を合成する新たな手法開発に成功した。

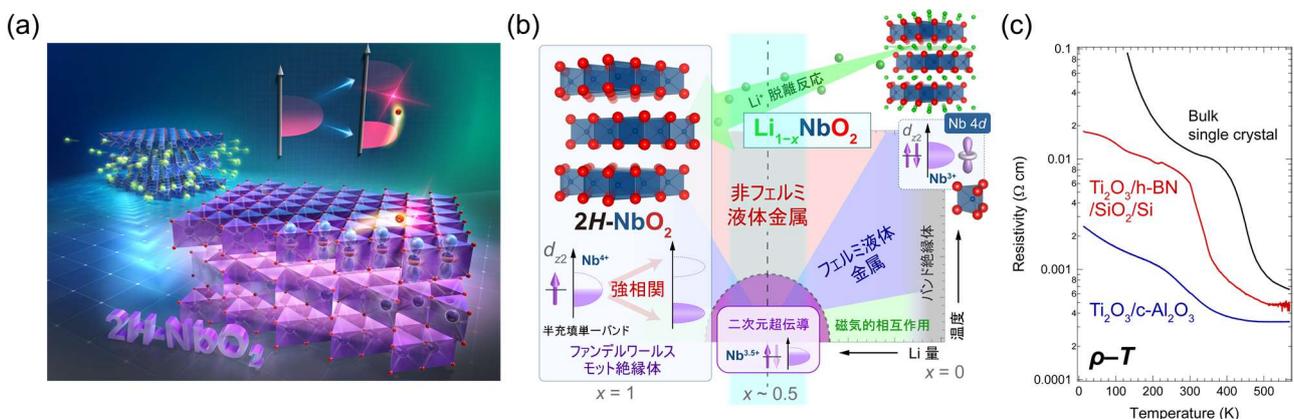


Figure 1. Achievement during this project. (a) Schematics of the synthesis of strongly correlated van der Waals oxide $2H-NbO_2$ (*ACS Nano* 2025). (b) Strongly correlated phase diagram of $2H-NbO_2$ (c) Pronounced metal-insulator transition in Ti_2O_3 grown on van der Waals hBN (*to be submitted*).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] H. Tsuchikado, Y. Kinoshita, M. Hattori, M. Okazaki, T. Soma, F. Ishiwari, M. Hara, A. Saeki, K. Maeda*, Topochemical Synthesis and Photocatalytic Activity of Layered $K_2LaTa_2O_6N$ Using $CsLaTa_2O_7$ Precursor Prepared by Flux Method, *Inorg. Chem.*, **64**, 49, 24256–24263 (2025).
- [2] A. Sato, T. Soma*, H. Kumigashira, K. Yoshimatsu, A. Ohtomo, Strongly Correlated van der Waals Oxide: $2H-NbO_2$, *ACS Nano*, **19**, 29, 26592–26599 (2025).
- [3] K. Koreishi*, T. Soma, A. Ohtomo*, Structural and electrical properties of (100) $\beta-(Sc_xGa_{1-x})_2O_3/Ga_2O_3$ heterojunctions, *J. Appl. Phys.*, **138**, 015302 (2025)
- [4] H. Tsuchikado, S. Anabuki, O. Cretu, Y. Kinoshita, M. Hattori, Y. Shiroma, D. Fan, M. Okazaki, T. Soma, F. Ishiwari, S. Nozawa, T. Yokoi, M. Hara, K. Kimoto, A. Yamakata, A. Saeki, K. Maeda*, Effects of Metal-Cation Doping on Photocatalytic H_2 Evolution Activity of Layered Perovskite Oxynitride $K_2LaTa_2O_6N$, *ACS Appl. Energy Mater.*, **8**, 6, 3541–3552 (2025).
- [5] K. Koreishi*, T. Onuma, T. Soma, A. Ohtomo*, Strain-induced band-gap widening in (100) $\beta-Ga_2O_3$ thin films grown on $\theta-Al_2O_3$ buffer layers, *Phys. Rev. Mater.*, **9**, L031601 (2025).
- [6] K. Koreishi*, T. Soma, H. Kumigashira, A. Ohtomo*, Epitaxial growth and band offsets of $\beta-(Sc_xGa_{1-x})_2O_3$ thin films grown on (100) $\beta-Ga_2O_3$ substrate, *Appl. Phys. Lett.*, **125**, 152101 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] T. Soma, Late Transition Metal Perovskite Oxides: Ligand Hole Metallic States and Their Instabilities. Mini Workshop on Oxide Thermo-Iontronics, Sapporo, Japan, 2025 年 10 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 昇進、東北大学 多元物質科学研究所 講師 2025 年 10 月
- [2] 東京科学大学挑戦的研究賞 2025 年 9 月
- [3] プレス発表、二次元ファンデルワールス酸化物の合成に成功（東京科学大学）2025 年 8 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

特になし

2.5 次元凸凹ナノ空間の転写による二次元物質表面での分子配列制御



田代 省平 (東京大学大学院理学系研究科)

1. 研究の目的

我々はこれまでに、錯体化学および超分子化学を基盤とした機能結晶材料の開発を進め、例えば細孔内に分子認識ポケットを備えた特異な多孔性結晶について報告してきた。本研究では、これらの多孔性結晶がもつナノ空間を二次元物質上に転写することによって、二次元物質との界面上にさまざまな分子を精密配列する技術を開発し、二次元物質に新たな機能を付与することを目的として研究を進めた。

2. 研究成果

2.1. 結晶ナノ細孔における二種アミノ酸の精密同時配列

我々の開発した多孔性結晶 Metal-macrocycle framework (MMF)が優れた分子配列能を示すことを実証するため、二種の異なるアミノ酸を同時かつ位置選択的に配列することに挑戦した。多孔性結晶 MMF は 1.4 nm × 1.9 nm 径からなる一次元細孔をもち、その細孔表面に異種複数の分子認識ポケットを備えている (Acc. Chem. Res. 2020, 53, 632)。この結晶をセリン溶液に浸して単結晶 X 線回折 (ScXRD) 測定を行ったところ、セリンが多点水素結合を介して細孔天井の認識サイトに位置選択的に配列することが明らかとなった。また、別のアミノ酸としてトリプトファン溶液で同様の実験を行ったところ、トリプトファンは天井ではなく下隅の認識ポケットにそのインドール環が捕捉されることが分かった。これら二種のアミノ酸はそれぞれ別の認識サイトに位置選択的に配列することから、次にこれら両者のアミノ酸を同時に混合して実験を行ったところ、設計通りにセリンが天井、トリプトファンが下隅のポケットにそれぞれ同時かつ位置選択的に配列した。また、これらの知見をもとに六種アミノ酸混合液を用いた分離実験を行ったところ、他のアミノ酸に対してセリンとトリプトファンを優先的に分離できることが明らかとなった (論文[1])。このような精密配列能を示す多孔性結晶の例は希少であり、本材料を二次元物質と複合化することによって、生体分子の高感度かつ高選択的センシング等に応用できると考えられる。

2.2. 両親媒性有機アンモニウム塩による自己組織化結晶群の構築と機能化

有機アンモニウム塩を適切な条件下で結晶化させることにより、その両親媒性構造に基づいた超分子集合様式をもつさまざまな結晶材料を合成できることを明らかにした。例えば 2-エチルアニリン塩酸塩では、その極性部位であるアンモニウム基と塩化物イオンが螺旋状ネットワーク構造を形成し、極性かつキラルな結晶を生じることを明らかにした (CrystEngComm 2025, 27, 729)。現在、領域内共同研究を介してこの極性結晶の機能探索を進めている。また、別のアニリン塩酸塩の結晶を作成したところ、親水部位が二次元ネットワークを形成したラメラ状結晶構造を形成し、その二次元親水部位の構造変換に伴って温和な条件下で水蒸気を可逆的に吸脱着できることを明らかにした (投稿準備中)。この優れた水分子認識能をもつ二次元ネットワーク構造を二次元物質上に転写することで、可逆的分子認識に基づく機能展開へとつなげたい。

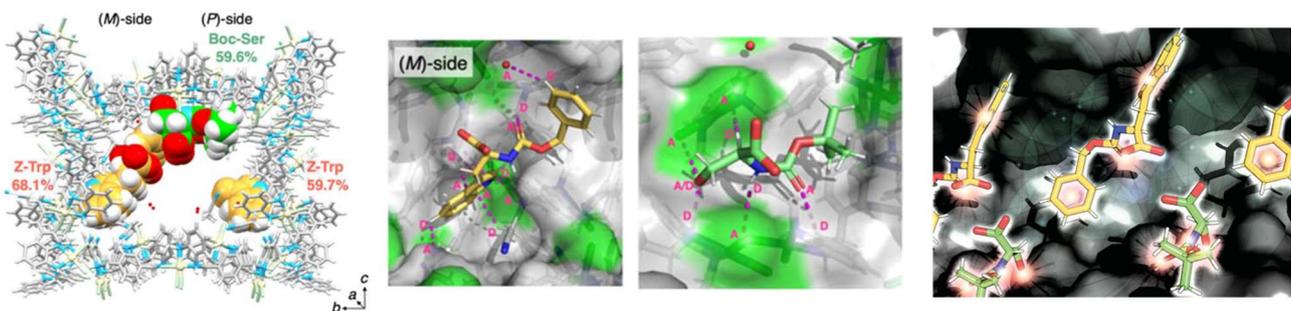


Figure 1. Achievement during this project. Shape sorting of two distinct amino acids at multiple binding sites of a porous metal-macrocycle framework (Chem. Sci. 2025).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

[1] S. Tashiro^{*}, K. Nakata, R. Hayashi, M. Shionoya^{*}, Shape sorting of two distinct amino acid residues at the multiple binding sites of a porous metal-macrocycle framework, *Chem. Sci.*, **16**, 12303-12308 (2025).

3.2. 招待講演

[1] S. Tashiro, Site-selective molecular recognition of bio- and biomass-derived compounds within a porous metal-macrocycle framework, ACCC10, Hanoi, Vietnam, 2025 年 9 月

[2] S. Tashiro, Metal-Benzimidazole[3]arene Framework-1 (MBAF-1) with Dynamic Binding Sites in its Structurally Complex Pores, International Congress on Pure & Applied Chemistry, Bali, Indonesia (Zoom), 2023 年 9 月

[3] S. Tashiro, Selective Catalytic Conversion of Natural Products in a Confined Nanospace of a Porous Metal-Macrocycle Framework, International Congress on Pure & Applied Chemistry, Sabah, Malaysia (Zoom), 2022 年 11 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

[1] プレス発表、分子のねじれの強さを調節して分子運動を制御する（東京大学）2023 年 12 月

[2] 山田 慶彦、錯体化学会第 73 回討論会 ポスター賞、2023 年 10 月

[3] プレス発表、酵素の動作原理を手本として細孔形状が自在に変形する多孔質結晶の開発（東京大学）2023 年 8 月

[4] 中島 朋紀、錯体化学若手の会夏の学校 2022 優秀ポスター賞、2022 年 8 月

[5] 中島 朋紀、日本化学会第 102 春季年会 学生講演賞、2022 年 4 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

[1] 紙と黒鉛筆だけで描く化学模型式 (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.29983891.v5>) 2025 年 8 月

[2] 特願 2024-185777、有機結晶材料 2024 年 10 月

[3] 錯体化学会誌 BJSCC 編集委員 2021–2024 年度

ハイエントロピー遷移金属ダイカルコゲナイドの創製と物性開拓

平井 大悟郎 (名古屋大学大学院工学研究科)



1. 研究の目的

近年、物質科学では、5種類以上の元素をほぼ等量で混合するハイエントロピー化により、単一元素系では得られない新規物性や機能の創出が注目されている。本研究では、代表的な二次元物質である遷移金属ダイカルコゲナイドの遷移金属サイトに多元素を導入し、ハイエントロピー化を実現する。共同研究を通じて、多元素混合に起因する新奇物性・機能性を探索し、新規 2.5 次元物質の開発を目指す。

2. 研究成果

2.1. ハイエントロピー遷移金属ダイカルコゲナイドの物質開発

遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) の遷移金属サイトに多元素を導入し、ハイエントロピー化を図る研究はこれまでも報告されている。しかし、用いられてきた元素は層状 TMDC を形成する前期遷移金属にほぼ限られており、組成の多様性には大きな制約があった。パイライト型などの三次元構造をとる Fe や Ni といった後期遷移金属元素を層状構造中に安定化できれば、磁性を有する新たな層状 TMDC の創出が期待される。そこで本研究では、後期遷移金属元素を含む 15 通りの組成を有するハイエントロピー-TMDC の合成を試み、配置エントロピーによる層状構造安定化の可能性を検証した。その結果、これまでに報告例のない 5 種類の新規ハイエントロピー-TMDC の合成に成功した。特に、Fe や Ni を含む組成においても層状構造が安定に形成され、磁化測定から磁性の兆候が確認された。さらに、A04 班・高橋グループとの共同研究により、触媒活性を示すことも明らかになった。本成果は、ハイエントロピー-TMDC の合成可能な組成領域を大幅に拡張し、層状機能性物質開発に新たな指針を与えるものである。

2.2. ハイエントロピー遷移金属ダイカルコゲナイドの単結晶育成と単原子相化

ハイエントロピー-TMDC を二次元物質として確立するためには、単原子層化の実現と、低次元化に伴う電子物性の解明が不可欠である。本研究では、ハイエントロピー-TMDC の単結晶育成およびスコッチテープ法による薄膜化に取り組んだ。単結晶育成には、TMDC の単結晶合成に広く用いられている化学気相輸送法を適用し、原料組成、育成温度、温度勾配、輸送剤の条件最適化を行った。その結果、単結晶の育成自体には成功したものの、多くの場合、得られた結晶の化学組成は出発組成から乖離し、目的とするハイエントロピー-TMDC は得られなかった。一方で、特定の組成および温度条件において、複数の遷移金属元素がほぼ等量含まれた単結晶の育成に成功した。得られた単結晶を用い、A04 班・蒲グループとの共同研究により剥離法による薄膜化を試みた。金属的伝導を示す Te 化合物では層間結合が強く薄膜化は困難であったのに対し、絶縁体的伝導を示す硫化物では数原子層までの薄膜化が可能であることが明らかとなった。今後、単結晶の大型化と品質向上を進めることで、単層ハイエントロピー-TMDC の実現と低次元電子物性の解明が期待される。

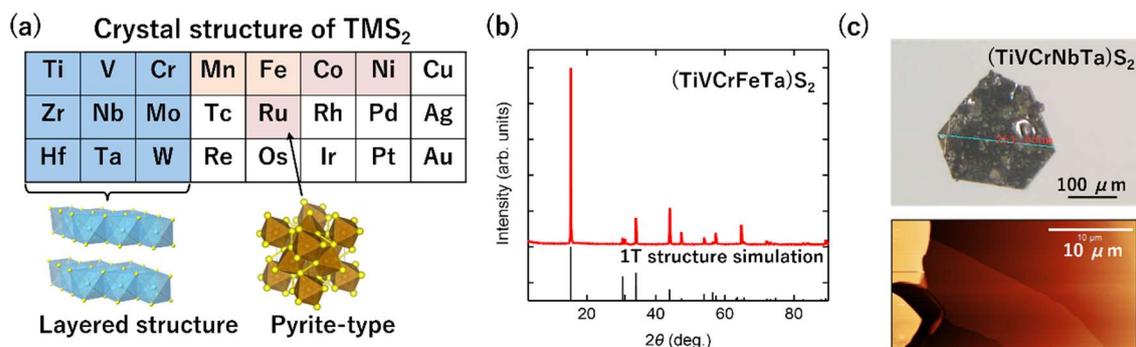


Figure 1. (a) Crystal structures of TMS_2 . Early transition metals preferentially form layered structures, whereas late transition metals tend to stabilize pyrite-type structures. (b) Powder X-ray diffraction pattern of the synthesized high-entropy TMDC, indicating a 1T-type layered structure. (c) Photograph of a grown high-entropy TMDC single crystal and an atomic force microscopy (AFM) image of an exfoliated thin flake.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] D. Hirai^{*}, Strongly Correlated High-Entropy Materials: Electronic and Phononic States under Disorder, *Chem. Mater.* (Perspective), in press (2026).
- [2] Y. Yamada, S. Kitagawa^{*}, T. Ihara, K. Ishida, N. Uematsu, D. Hirai, K. Takenaka, Uniform electronic states and s-wave superconductivity in a strongly disordered high-entropy compound $X_{0.6}Pt_{0.4}Sb$ ($X = Ru, Rh, Pd, Ir$), *Phys. Rev. B*, **112**, L020508 (2025).
- [3] Y. Muramatsu, K. Miyata, D. Hirai^{*}, K. Takenaka, High-Entropy Germanide $(RuRhPdPt)_{1-x}Ir_xGe$: Synthesis, Phase Stability, and Transport Properties, *Inorg. Chem.*, **64**, 13302–13308 (2025).
- [4] D. Hirai^{*}, N. Uematsu, Y. Muramatsu, K. Deguchi, Y. Shimura, T. Onimaru, K. Takenaka, Increased superconducting transition temperature and upper critical field of a high-entropy antimonide superconductor $(RuRhPdIr)_{1-x}Pt_xSb$, *Chem. Mater.*, **36**, 9547–9556 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] D. Hirai, Increased Superconducting Transition Temperature and Upper Critical Field of a High-Entropy Antimonide Superconductor $(RuRhPdIr)_{1-x}Pt_xSb$, Metals Research Meeting 2025 (MRM2025), Yokohama, Japan, 2025 年 12 月
- [2] 平井 大悟郎, ハイエントロピー遷移金属ダイカルコゲナイドの創製と単結晶育成, 第 29 回 D センター VBL シンポジウム 原子層材料の科学と工学, 名古屋大学, 2025 年 11 月
- [3] D. Hirai, Cocktail Effects in Superconductivity: High-Entropy Approach to Antimonide Compounds, Cavendish Laboratory Quantum Materials Seminar, Cambridge, UK, 2025 年 5 月
- [4] 平井 大悟郎, ハイエントロピーアンチモン化合物 $(RuRhPdIr)_{1-x}Pt_xSb$ における超伝導~強相関物質における創発物性研究の現状と将来展望~, 金研研究会 2024, 東北大学, 2024 年 4 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

該当なし

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

該当なし



5. 公募班 研究成果

A02

集積化班

2.5次元集積構造の構築

菅 大介

菅原 克明

鈴木 弘朗



材料次元性の異なるナノシート結晶の積層・集積と機能開発



菅 大介 (大阪大学大学院工学研究科)

1. 研究の目的

エピタキシャル超薄膜を基板から剥離して得られるメンブレン結晶は、二次元層状物質のように様々な物質上へ積層できる。本課題では、強誘電性ハフニアをベースにした強誘電性メンブレン結晶を人工的に積層することで、強誘電特性など物性の制御を目指した。

2. 研究成果

2.1. 二次元強誘電体の人工積層による分極スイッチング電場の低下

強誘電性ハフニアとして $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ (HZO) に着目した。HZO メンブレン結晶は、(1) パルスレーザー堆積法によって $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) 犠牲層で表面修飾した (100) SrTiO_3 (STO) 単結晶基板上に厚さ 5nm の HZO 膜をエピタキシャル成長させ、その後 (2) LSMO 犠牲層を選択的にエッチングし、ZO 膜を STO 基板から剥離することで作製した。剥離した HZO メンブレン結晶は下部電極として Au を蒸着した Si 基板上に転写した。Au/Si 基板上に転写した HZO メンブレン結晶上に、再度 HZO メンブレン結晶を転写することで、HZO メンブレンの積層構造を形成した。Figure 1a には作製したメンブレン積層構造の光学顕微鏡像を示す。メンブレン結晶の積層数に応じて像コントラストが変化しているのが見て取れる。また Figure 2 に示すのは、圧電応答顕微鏡(PFM)を用いて評価したメンブレン積層構造の強誘電分極の反転電場のメンブレン積層数依存性である。メンブレン結晶単層の場合における分極反転電場は $\sim 7\text{MV/cm}$ と高いのに対して、メンブレン結晶を複数積層した場合には、反転電場は $\sim 5\text{MV/cm}$ にまで低下することが分かった。これらの結果は、メンブレン結晶の積層によって形成された界面に生じた分極電荷が分極反転プロセスに重要な役割を果たしていることを示唆するものである。HZO メンブレン結晶における表面電荷の存在は、HZO メンブレンに転写した単層 MoS_2 の発光スペクトルからも見て取れる (Fig. 1c)。HZO メンブレンに転写した単層 MoS_2 のバンド間遷移に由来する発光スペクトル (Peak A) は、 SiO_2 上の単層 MoS_2 のそれと比べると低エネルギー側にシフトしていることがわかる。この発光ピークのシフトは HZO メンブレンから MoS_2 への電荷移動を示唆する結果である。これらの結果を総合すると、HZO メンブレン界面においては、メンブレン表面の電荷が補償しきれず、分極反転プロセスに影響した結果、分極反転電場が低下したと考えられる。

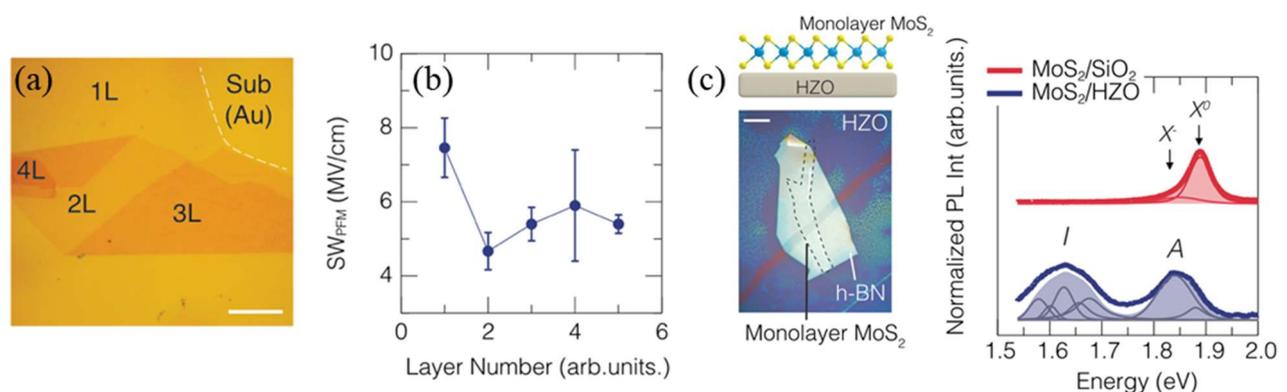


Figure 1. (a) Optical microscope image of multilayered HZO homostructures. The scale bar denotes $10\mu\text{m}$. (b) Dependence of the switching window (SWPFM) on the number of the HZO membranes in the homostructures. (c) Optical microscope image and measured PL spectrum (thick solid line) of monolayer MoS_2 transferred onto HZO (MoS_2/HZO). In the PL plot, the spectrum for the $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2$ stack is also presented for comparison. The filled color area is the total sum of exciton contributions that were determined by fitting the measured PL spectra using Voigt functions (thin solid lines).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] Y. Shen, K. Ooe, D. Zhang, L. Xie, H. Zhang, S. Kobayashi, J. Seidel, Y. Shimakawa, D. Kan, Ferroelectric $ZrO_2/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ Epitaxial Moiré Heterostructures, *Appl. Phys. Lett.*, **127**, 112901 (2025).
- [2] A. Dastgir, X. Yuan, Y. Shen, D. Kan, Y. Shimakawa, H. Sawaki, S. Kondo, T. Yamada, Thickness Dependence of Electro-optic Property in Epitaxial $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ Thin Films: Evident Response down to 3 nm, *Appl. Phys. Lett.*, **126**, 242901 (2025).
- [3] H. Zhang, Y. Shen, D. Zhang, K. Ooe, S. Kobayashi, P. Sharma, Y. Shimakawa, D. Kan, J. Seidel, Humidity-Driven Modulation of Ferroelectricity in Hafnia-zirconia Membranes, *Mater. Horiz.*, **12**, 5762-5770 (2025).
- [4] Y. Shen, K. Ooe, K. Shitara, S. Kobayashi, T. Yoshimura, T. Yamada, L. Xie, Y. Shimakawa, D. Kan, Ultrathin Freestanding Membranes of ZrO_2 with Metastable Structures and Strain-dependent Electrical Properties, *Phys. Rev. Materials*, **9**, 024411 (2025).
- [5] Y. Shen, K. Ooe, X. Yuan, T. Yamada, S. Kobayashi, M. Haruta, D. Kan, Y. Shimakawa, Ferroelectric freestanding hafnia membranes with metastable rhombohedral structure down to 1-nm-thick, *Nat. Commun.*, **15**, 4789 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] D. Kan, Two-dimensional materials created by exfoliating ultrathin epitaxial films, The International Symposium on Solid State Chemistry (ISSSC), Shimane, Japan, 2025 年 12 月
- [2] 菅 大介, 強誘電材料の特性・基礎と強誘電デバイス・二次元強誘電体の作製および応用展望, サイエンス&テクノロジー オンラインセミナー, 2025 年 10 月
- [3] 菅 大介, ハフニア強誘電体メンブレン結晶の作製と機能開発, セラミクス協会第 38 回秋季シンポジウム, 群馬大学荒巻キャンパス, 2025 年 9 月
- [4] 菅 大介, 極薄強誘電体メンブレンの作製と機能開発, マルチ機能調査専門委員会第 2 回委員会, オンライン開催, 2025 年 9 月
- [5] D. Kan, Ultrathin Freestanding Membranes of Ferroelectric Hafnia, South Asia Ferroelectric Symposium, Bangalore, India 2025 年 8 月
- [6] 菅 大介, エピタキシャル薄膜を剥離してつくる二次元物質, 金属材料研究所 2025「強相関物質における創発物性研究の現状と将来展望」, 東北大学片平キャンパス, 2025 年 5 月
- [7] 菅 大介, 酸化ハフニウム基二次元強誘電体, koine ミーティング, 九州大学筑紫キャンパス, 2025 年 3 月
- [8] D. Kan, Ultrathin Freestanding Membranes of Ferroelectric Hafnia, 2025 Hsinchu Oxide Forum, Hsinchu Taipei, 2025 年 1 月
- [9] D. Kan, Two-dimensional ferroelectrics of Hafnia, The 14th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-14), Yokohama, Japan, 2024 年 10 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 昇進、大阪大学大学院工学研究科応用化学専攻 教授 2025 年 4 月
- [2] プレス発表、二次元強誘電体の作製に成功 2024 年 6 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] 該当なし

原子層物質の結晶構造制御および 2.5 次元化の試み ～高分解能マイクロ ARPES による電子状態イメージング～



菅原 克明 (東北大学大学院理学研究科)

1. 研究の目的

近年様々な層状物質の極薄化による新規物性創発の研究が行われている。一方、それらの結晶構造を自在に制御する試みやアルカリ金属インターカレーションによる 2.5 次元物質化に関連した電子状態研究は行われていない。本研究では、原子層物質の結晶構造の自在制御およびアルカリ金属インターカレーションによる 2.5 次元物質化に関してマイクロ ARPES による電子状態観測から明らかにすることが目的である。

2. 研究成果

2.1. 原子層 WTe_2 の結晶構造制御および W 原子の局所歪み

原子層 WTe_2 は三角プリズム型構造ではスピンバレー結合半導体を、正八面体型構造では量子スピンホール絶縁体が理論実験で示唆されている。そこで MBE 法を用いて成長基板を精密制御することで、三角プリズム型構造と正八面体型構造を作り分けすることができることを ARPES による電子状態から明らかにした。さらに正八面体型構造の原子層 WTe_2 の電子状態における温度依存性を調べ第一原理計算と比較を行ったところ、温度に強く依存した W 原子の局所歪みが特異な電子状態の温度依存性を誘起したと結論した。

2.2. 2層 TiSe_2 へのアルカリ金属インターカレーション

2層 TiSe_2 へのアルカリ金属蒸着による電子状態の変化を明らかにすることを目的として、MBE 合成した 2層 TiSe_2 に Li 金属蒸着を行い、その際の電子状態の変化をマイクロ ARPES を用いて測定を行った。その結果、Li 金属が TiSe_2 層間電子へインターカレーションされる際に期待される電子状態の変化を観測した [Fig.1]。一方、インターカレーションによって期待される層間に局在した層間電子の観測には至らず、 TiSe_2 の 3d 軌道に由来する M 点周辺の電子バンドへの電子ドーピング効果を観測した。この振る舞いは、バルク Cu 挿入 TiSe_2 超伝導体で観測された電子状態の振る舞いを同じであることから、超伝導を発現する場合、 TiSe_2 の 3d 軌道が密接に関与している可能性が示唆される。

2.3. 2層 h-BN/FeNi へのアルカリ金属インターカレーション

2層 h-BN 間にアルカリ金属をインターカレーションすることで出現する層間電子が強相関電子系に関わる新規物性を発現することが期待されている。本研究では、A01 班の吾郷との共同で 2層 h-BN にアルカリ蒸着後の電子状態をマイクロ ARPES によって測定を行った。その結果、層間電子に関連する自由電子の直接観測されなかった。この原因は、h-BN とアルカリ金属間の電子陰性度が比較的小さいためアルカリ金属から h-BN への電荷移動が生じず、アルカリ金属と h-BN 間の金属結合が形成されない可能性が考えられる。

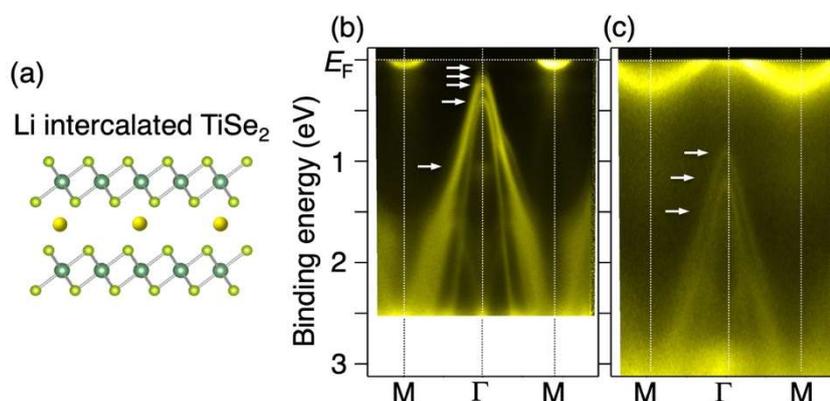


Figure 1. (a) Crystal structure of Li-intercalated TiSe_2 . (b,c) ARPES intensity plots of (b) pristine and (c) Li-deposited TiSe_2 on bilayer graphene.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] T. Kawakami, K. Sugawara^{*}, H. Oka, K. Yanagizawa, M. Nakano, Y. P. Chen, T. Takahashi, T. Sato^{*}, Dichotomy of Charge Density Wave and Superconductivity in Monolayer NbS₂ and NbSe₂: a View from Fermiology, *Phys. Rev. Materials*, **9**, L111001 (2025).
- [2] H.-H. Jia, Y. Nakata, S. Souma, K. Sugawara, Y.-H. Chan, C.-M. Cheng, M.-C. Chen, T., C.-W. Luo, A. Chainani, P.-H. Lin^{*}, Quasi-equilibrium and ultrafast non-thermal electron dynamics in single crystal graphite probed by Tr-ARPES, *Phys. Rev. B*, **111**, 195430 (2025).
- [3] K. Yanagizawa, K. Sugawara^{*}, T. Kawakami, M. Nishigami, K. Nakayama, T. Takahashi, T. Sato^{*}, Band structure of monolayer 1T-TiS₂ and its implications for the phase diagrams of Ti-based transition metal dichalcogenides, *Phys. Rev. B*, **111**, 205111 (2025).
- [4] C.-W. Chuang^{*}, T. Kawakami, K. Sugawara, K. Nakayama, S. Souma, M. Kitamura, K. Amemiya, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, A. Chainani, T. Sato^{*}, Spin-valley coupling enhanced high- T_c ferromagnetism in monolayer Cr₂Se₃ on graphene, *Nat. Commun.*, **16**, 3448 (2025).
- [5] K. Yaegashi, K. Sugawara^{*}, T. Takahashi, T. Sato^{*}, Role of spin-orbit interaction to the band splitting in α -Sb and α -Bi on SiC(0001), *J. Phys.: Cond. Matter*, **37**, 13, 135501 (2025).
- [6] R. Ando, K. Sugawara^{*}, T. Kawakami, K. Yanagizawa, K. Yaegashi, T. Takahashi, T. Sato^{*}, Unusual temperature dependence of band structure associated with local atomic distortion on monolayer WTe₂, *Phys. Rev. Materials*, **9**, L011001 (2025).
- [7] S. Akatsuka, M. Sakano^{*}, T. Yamamoto, T. Nomoto, R. Arita, R. Murata, T. Sasagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Kitamura, K. Horiba, K. Sugawara, S. Souma, T. Sato, H. Kumigashira, K. Shinokita, H. Wang, K. Matsuda, S. Masubuchi, T. Machida, K. Ishizaka^{*}, 180°-twisted bilayer ReSe₂ as an artificial noncentrosymmetric semiconductor, *Phys. Rev. Research*, **6**, L022048-1-6 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] 菅原 克明, マイクロARPESによる粉状層状半導体の電子状態イメージング, 第17回日本放射光学会若手研究会 材料研究×イメージング:基礎から融合研究へのステップアップ, 高エネルギー加速器研究機構(筑波), 2025年8月
- [2] 菅原 克明, 粉状層状半導体のマイクロARPES, R7量子物性情報計測プロジェクト研究交流会, ホテル松金屋アネックス (山形), 2025年7月
- [3] 菅原 克明, 放射光 ARPES による 2 次元物質の研究と NanoTerasu での将来展望, 第二回 SRIS NanoTerasu セミナー, 東北大学 SRIS 棟 (宮城), 2025 年 1 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、バルクでは磁石に付かない物質を原子層厚の薄膜で磁石に変換 (東北大学) 2025 年 4 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

特になし

二次元半導体/有機無機ペロブスカイトヘテロの光電子デバイス応用



鈴木 弘朗 (岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域)

1. 研究の目的

二次元半導体の遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) と有機無機ペロブスカイト材料 (e.g. MAPbI₃) のヘテロ構造は、高速光励起キャリア輸送などの特性をもつことから光電子デバイスへの応用が期待されている。本研究では構造制御合成した TMDC を用いて MAPbI₃ とのヘテロ構造化を行い、光電子デバイス応用を目指す。

2. 研究成果

2.1. TMDC の構造制御合成

有機無機ペロブスカイト材料と単層 TMDC とのヘテロ構造作製に向けて、単層 TMDC を構造制御合成する手法を研究した。単層 WS₂ の大面積合成が可能で、基板積層マイクロリアクタと気相-液相-固相 (VLS) 成長を組み合わせた手法を用いた。マイクロリアクタ中の単層 WS₂ の成長形態制御のため、光学顕微鏡によるリアルタイムモニタリングを試み、成長過程の観測に成功した (論文[1])。また同様の手法で、単層 WS₂ ドメイン内にデンドライト状のナノリボンネットワークの成長することに成功した。また、高橋 (A03 班) との共同研究により走査型電気化学セル顕微鏡を用いて、基板-単層 WS₂ ドメインの閉じ込め界面で成長が起きることを明らかにした (論文[2])。これらの TMDC 結晶の結晶方位や積層構造を藤井 (A04 班) との共同により、第二次高調波発生測定を用いて解析を行った。

2.2. WS₂/MAPbI₃ ヘテロ構造の作製と光電子機能開拓

大面積単層 WS₂ にスピンコート法を用いて MAPbI₃ ナノワイヤを成長し、単層 WS₂/MAPbI₃ ヘテロ構造を作製した。原料濃度の調節によって、単層 WS₂ 上で MAPbI₃ ナノワイヤー層分が配向成長した、WS₂/MAPbI₃ ヘテロ構造の作製に成功した (Fig.1a)。WS₂/MAPbI₃ ヘテロ界面における光励起キャリアダイナミクスを観察するため、レーザー照射下におけるケルビンプローブフォース顕微鏡 (KPFM) 測定を行った (Fig.1b)。接触電位差マップから、レーザー照射下では、MAPbI₃ が正に帯電することが明らかになった。これは、MAPbI₃ で生成された電子-ホール対がヘテロ界面で乖離し、電子が WS₂ 側に輸送され、MAPbI₃ がホールドープされたことを示唆している (Fig.1c)。さらに、大面積 WS₂ 結晶の清浄な表面を保ちつつ、メタルマスク法により電極を形成し、電界効果トランジスタ (FET) を作製した。表面清浄な WS₂-FET に対して直接 MAPbI₃ ナノロッドを成長することにより、WS₂-MAPbI₃ ヘテロ構造をチャンネルとした FET の作製に成功した (Fig. 1d)。この WS₂/MAPbI₃-FET の光照射下で伝達特性を測定したところ、光電流の生成が確認された。さらに、光電流がゲートバイアス (V_{gs}) で変調可能で、 V_{gs} が正のとき大きくなることが明らかになった。同サイズのチャンネル長をもつ WS₂-FET では光電流が観測されなかったことから、WS₂/MAPbI₃ ヘテロ界面において励起子分離が促進され、光電流の増加に寄与したと考えられる。

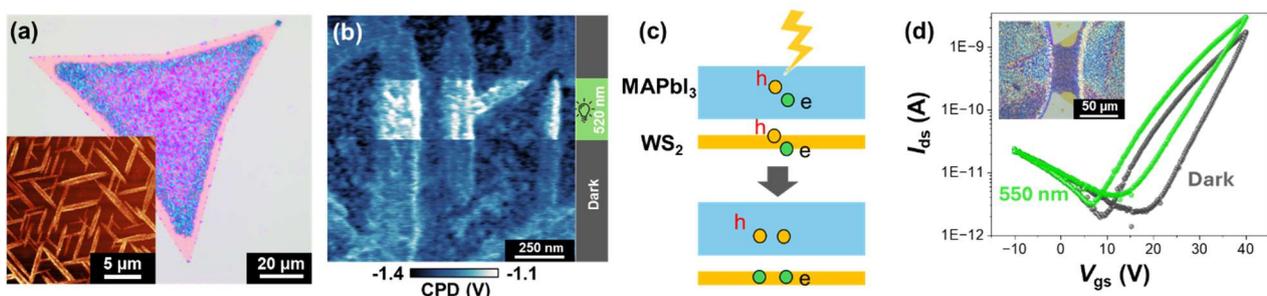


Figure 1. (a) Optical micrograph of MAPbI₃/WS₂ heterostructure and inset shows AFM image of MAPbI₃ nanorods. (b) Contact potential difference (CPD) image of MAPbI₃/WS₂ heterostructure with and without laser (520 nm) irradiation. (c) Charge transfer model between MAPbI₃ and WS₂ under photo-irradiation. (d) Transfer curves of MAPbI₃/WS₂ heterostructure-based FET with and without photo-irradiation and inset shows optical micrograph of MAPbI₃/WS₂ heterostructure-based FET.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] H. Suzuki*, Y. Senda, K. Hisama, S. Aso, Y. Takahashi, S. Fujii, Y. Hayashi, Inside the Microreactor: In Situ Real-Time Observation of Vapor-Liquid-Solid Growth of Monolayer TMDCs, *Adv. Sci.*, e16784 (2025).
- [2] H. Suzuki*, K. Hirata, Y. Takahashi, S. Fujii, M. Misawa, T. Tokunaga, I. Nakaya, Y. Senda, Y. Hayashi, Y. Takahashi*, Dendritic WS₂ Nanoribbon Networks Grown in Interfacial Confinement Space: Edge-Rich Architectures for Enhanced Hydrogen Evolution, *Small Struct.* **7**, e202500542 (2025).
- [3] 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, *J. Chem. Phys.*, **163**, 034201 (2025).
- [4] 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).
- [5] T. Htun, H. Elbohy, H. Suzuki, K. Horigane, C. Nakano, T. Nishikawa, A. K. K. Kyaw*, Y. Hayashi*, Exploring the structural and optical properties in Cs₃Fe₂Cl₉ perovskite through ruthenium doping, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **36**, 31 (2025).
- [6] Y. Chen, H. Suzuki, S. Fukumoto, C. Nakano, T. Nishikawa, S. Umezawa, Y. Hayashi*, Enhanced capacity of aluminum-ion batteries by adjusting the average pore size of the porous carbon cathode, *J. Mater. Chem. A*, **13**, 8052 (2025).
- [7] T. Htun, A. Elattar, H. Elbohy, K. Tsutsumi, K. Horigane, C. Nakano, X. Gu, H. Suzuki, T. Nishikawa, A. K. K. Kyaw*, Y. Hayashi*, Lead-free iron-doped Cs₃Bi₂Br₉ perovskite with tunable properties, *RSC Adv.*, **14**, 23177 (2024).
- [8] Y. Saida, T. Gauthier, H. Suzuki*, S. Ohmura*, R. Shikata, Y. Iwasaki, G. Noyama, M. Kishibuchi, Y. Tanaka, W. Yajima, N. Godin, G. Privault, T. Tokunaga, S. Ono, S. Koshihara, K. Tsuruta, Y. Hayashi, R. Bertoni* & M. Hada*, Photoinduced dynamics during electronic transfer from narrow to wide bandgap layers in one-dimensional heterostructured materials, *Nat. Commun.*, **15**, 4600 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] H. Suzuki, Structural Control in Monolayer TMDCs: From Millimeter Growth to Atomic Engineering, MNC2025 (38th International Microprocesses and Nanotechnology Conference), Tokyo, Japan, 2025 年 11 月
- [2] H. Suzuki, Advanced Synthesis Strategies for Monolayer TMDCs: Structural Control from Millimeter-Scale Growth to Atomic-Level Configuration, JVSS 2025 (Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2025), Tsukuba, Japan, 2025 年 10 月
- [3] H. Suzuki, Multi-scale Structural Control in Synthesis of Monolayer Transition Metal Dichalcogenides: From Millimeter to Atomic Scale, The 12th Korean Symposium on Graphene and 2D Materials, Busan, South Korea, 2025 年 7 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、二次元半導体の成長過程のリアルタイム観測に成功～次世代半導体材料の高品質化に期待～ (岡山大学) 2026 年 1 月
- [2] プレス発表、二次元半導体ナノネットワーク構造の合成法開発に成功～次世代の水素発生触媒の応用に期待～ (岡山大学) 2025 年 12 月
- [3] 受賞、岡山大学若手トップリサーチャー研究奨励賞 2025 年 3 月
- [4] プレス発表、入れ子状にした物質への光照射で生じる新しいエネルギー現象を観測 (岡山大学) 2024 年 6 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

無し



5. 公募班 研究成果

A03

分析班

2.5次元構造体の 分析技術開発

熊谷 崇

杉本 宜昭

高橋 康史

柳 和宏



2.5 次元物質の超高速光科学



熊谷 崇 (分子科学研究所)

1. 研究の目的

2.5次元物質を活用した新しい光科学の創出を目的として、原子層物質における超高速光誘起ダイナミクスをフェムト秒・ナノメートルの時空間スケールで直接観測できる先端ナノ計測を応用した研究を行った。特に、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) やカーボンナノチューブ (CNT) の光キャリア、六方晶窒化ホウ素 (hBN) のフォノンポラリトンの超高速ダイナミクスを解明することを目指した。

2. 研究成果

2.1. 単層 WS₂ における電子-正孔プラズマの超高速多体ダイナミクスの解明

単層 TMD における光キャリアダイナミクスは、強い量子閉じ込めに起因する特異な光物性を理解する上で本質的に重要である。原子層物質は極めて大きな表面一体積比を有しており、その物性は局所構造や基板、周辺環境との相互作用によって強く影響を受ける。そのため、光励起後に生成されるキャリアのダイナミクスをナノスケールで直接可視化する技術が不可欠となる。本研究では、超高速近接場光顕微鏡を用いた可視ポンプ-中赤外プローブ時間分解ナノイメージングにより、単層 WS₂ 中に高密度に生成された電子-正孔プラズマの多体ダイナミクスにおける不均一な時空間発展を観測し、そのメカニズムを解明した[1]。

2.2. CNT における励起子の局所ダイナミクスの解明

CNT における光キャリアダイナミクスには、一次元性に由来する特徴が顕在化し、光・電子デバイス応用においても重要な役割を担っている。本研究では、2.1.の手法を CNT へと応用し、一次元系における局所的な励起子ダイナミクスを解明した。特に、CNT と基板との相互作用に起因する CNT の格子歪みや、CNT 間の相互作用によって局所的な励起子ダイナミクスが変調を受けるメカニズムを解明した[2]。

2.3. hBN/WS₂ におけるフォノンポラリトンの超高速制御

hBN のフォノンポラリトンは中赤外近接場光学において、様々な応用が期待されている。一方で、フォノンポラリトンの超高速制御に関する研究はほとんど未開拓である。本研究では、超高速近接場光顕微鏡によって高い時間分解能と周波数分解能を同時に得られる新しい手法を開発し、hBN と WS₂ の積層ヘテロ構造において、hBN のフォノンポラリトンを WS₂ 中に生成する光キャリアによって超高速変調を与え、その結果生じるポラリトン波のダイナミクスを直接観測した。理論計算も行い、光キャリア生成に伴う誘電環境の変化が、フォノンポラリトンの過渡応答を変調するメカニズムを解明した[論文投稿中]。

以上の研究によって、従来方法では空間平均に埋もれてしまう局所的な光誘起ダイナミクスを解明する手法を確立するだけでなく、ナノスケールの構造や周辺環境の動的変調による光学特性の制御に向けた基礎的な知見を得ることができた。

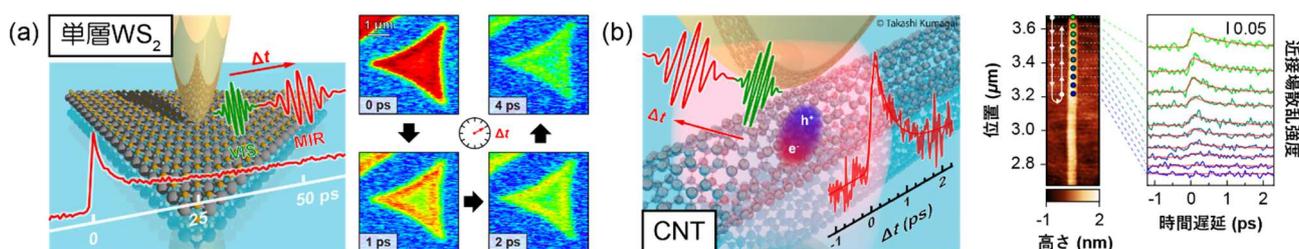


Figure 1. Achievement of this project: Ultrafast nano-imaging of photocarrier dynamics in (a) monolayer WS₂ and (b) CNT, visualized using femtosecond visible-pump/mid-infrared-probe time-resolved near-field optical microscopy.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] J. Nishida*, K. Otsuka, T. Minato, Y. K. Kato, T. Kumagai*, Ultrafast infrared nano-imaging of local electron-hole dynamics in CVD-grown single-walled carbon nanotubes, *Sci. Adv.*, **11**, eadv9584 (2025).
- [2] Y. Wang, J. Nishida*, K. Nakamoto, X. Yang, Y. Sakuma, W. Zhang, T. Endo, Y. Miyata, T. Kumagai*, Ultrafast Nano-Imaging of Spatially Modulated Many-Body Dynamics in CVD-Grown Monolayer WS₂, *ACS Photonics*, **12**, 207–218 (2025).

3.2. 招待講演

- [1] T. Kumagai, Ultrafast Nano-Spectroscopy of Photo-Induced Dynamics in Low-Dimensional Materials, The 2nd Sino-German Workshop on Surface Science of Complex Systems, online, 2025 年 9 月
- [2] T. Kumagai, Ultrafast Nano-Spectroscopy of Photo-Induced Dynamics in Low-Dimensional Materials, The 82nd Okazaki Conference "Recent Advances and Perspectives of Interfacial Materials and Molecular Sciences lead by Next-Generation Laser Techniques and Computational Science", Aichi, Japan, 2025 年 7 月
- [3] T. Kumagai, Atomic-Scale Phonon Studies Using Tip-Enhanced Near-Field Optical Spectroscopy, The 22nd International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy, Shiga, Japan, 2025 年 5 月
- [4] T. Kumagai, Ultrafast Nano-Spectroscopy of Photo-Induced Dynamics in Low-Dimensional Materials, DPG Spring Meeting, Regensburg, Germany, 2025 年 3 月
- [5] T. Kumagai, Nanomaterial Characterization Using Infrared Nano-Spectroscopy, ISSP International Workshop "Materials Science of Solids and Surfaces using Radiation Field Controlled in Time/Space Domain", Tokyo, Japan, 2024 年 10 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、カーボンナノチューブと光の局所的な相互作用を可視化－精密ナノ赤外顕微分光で見る励起子の超高速ダイナミクス－2025 年 6 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] 第 17 回分子研一般公開 2024 年 10 月
- [2] 第 18 回未来の科学者賞選考委員会（岡崎市教育委員会主催）2025 年 10 月
- [3] 第 17 回あいち科学技術教育推進協議会発表会 科学三昧 in あいち 2025 2025 年 12 月

周波数変調原子間力顕微鏡による 1T-TaS₂ の電荷密度波の直接観察



杉本 宜昭 (東京大学大学院新領域創成科学研究科)

1. 研究の目的

1T-TaS₂ は、室温においてほぼ整合な電荷密度波 (CDW) 相を示す。走査型トンネル顕微鏡 (STM) では、CDW の周期が観察されるものの、格子歪みと電子状態のどちらが画像化機構に寄与しているのかわからない。そこで、周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) を用いて、それらを局所的かつ定量的に抽出・解明することを目指した。

2. 研究成果

遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) の一種である 1T-TaS₂ において、室温 (303 K) で現れる「ほぼ整合 (NC)」な電荷密度波 (CDW) 相を対象とし、周波数変調原子間力顕微鏡 (FM-AFM) を用いてその原子スケールでの構造的特徴を精密に解明した。走査型トンネル顕微鏡 (STM) による従来の観測では分離が困難であった、CDW に伴う純粋な幾何学的構造歪みである「周期的な格子歪み (PLD)」を、電子状態の空間的な変調から生じるコントラストを排除して定量的に抽出することに成功した。具体的な実験成果として、三次元走査力分光法 (3D-SFS) を駆使して探針-試料間に働く相互作用力の距離依存性を詳細に測定した結果、13 個のタンタル (Ta) 原子が集まって形成される「ダビデの星」クラスターの中心部と縁の部分において、物理的な格子の盛り上がり高が約 20 pm であることがわかった。これは、STM で観測される約 180 pm という値に比べ極めて小さく、STM 像がいかにか局所状態密度 (LDOS) という電子的要因に支配されているかを明らかにした。さらに、FM-AFM のコントラストが純粋に構造を反映していることを裏付けるため、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KPFM) を用いた局所接触電位差 (LCPD) の精密測定を実施し、CDW に起因する電位変動が測定限界 (30 mV) 以下であることを確認した。これに加えて、密度汎関数理論 (DFT) に基づく第一原理計算を行い、表面から数オングストローム離れた位置における静電ポテンシャルの変動が極めて微小であることを理論的にも証明し、FM-AFM が電子状態の影響を受けずに原子の物理的な位置を捉えていることを明確にした。また、実空間での広範囲な観察を通じて、CDW の位相が原子格子と整合している「ドメイン」と、位相が不連続に変化する「ドメイン境界 (discommensuration)」の微細構造を直接可視化することにも成功した。本成果は、FM-AFM が CDW 物質の微細な構造変化を正確に測定できる強力なツールであることを実証したものであり、今後、光誘起相転移や電界制御による超高速スイッチングデバイスといった、次世代の相変化材料や量子材料の研究において極めて重要な指針を与えるものと期待される。

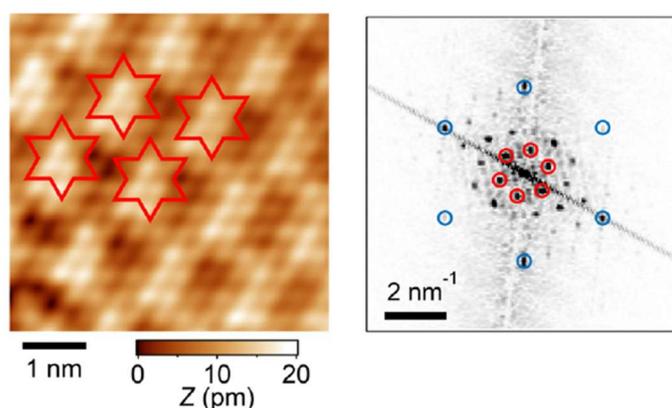


Figure 1. FM-AFM topographic image on 1T-TaS₂ in the NC-CDW phase and the corresponding Fast Fourier transform image. The red and blue circles represent the peaks of CDW and atomic lattice, respectively. (*Appl. Phys. Lett.* 2025).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] M. Kimura, Y. Kunisada, Y. Sugimoto^{*}, Real-space observation of spin-induced lattice distortion of O₂ monolayers revealed by atomic force microscopy, *ACS Nano*, **20**, 3, 2633–2640 (2026).
- [2] T. Ono, T. Shigeno, Y. Yasui, M. Fukuda, T. Ozaki, K. Ueno, Y. Sugimoto^{*}, Frequency-modulation atomic force microscopy observation of 1T-TaS₂ in the nearly commensurate charge density wave phase, *Appl. Phys. Lett.*, **126**, 263102 (2025).
- [3] Y. Adachi, Y. Yasui, A. Iiyama, W. Kurahashi, R. Nagase, Y. Sugimoto^{*}, Probing the Spin Spiral in Fe Chains on Ir(001) using Magnetic Exchange Force Microscopy, *Nanoscale Horiz.*, **10**, 1653-1659 (2025).
- [4] R. Zhang, Y. Yasui, M. Fukuda, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, T. Ozaki, Y. Sugimoto^{*}, Dimer ribbon structures on diamond (001) surfaces revealed with atomic force microscopy, *Phys. Rev. Research*, **7**, 023036 (2025).
- [5] M. Kimura, Y. Kunisada, Y. Sugimoto^{*}, Structure identification of CO monolayer on Ag(111) using atomic force microscopy, *Adv. Mater. Interfaces*, **12**, 10, 2400904 (2025).
- [6] R. Zhang, Y. Yasui, M. Fukuda, T. Ozaki, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, Y. Sugimoto^{*}, Atomic Observation on Diamond (001) Surfaces with Near-Contact Atomic Force Microscopy, *Nano Lett.*, **25**, 3, 1101–1107 (2025).
- [7] Y. Yasui^{*}, K. Iwata, S. Okazaki, S. Miyasaka, Y. Sugimoto, T. Hanaguri^{*}, H. Takagi, T. Sasagawa, Closing of the Mott gap near step edges in NiS₂, *Phys. Rev. B*, **110**, 045139 (2024).
- [8] Y. Yasui^{*}, K. Matsunaga, K. Sagisaka, Y. Sugimoto^{*}, Element-selective structural visualization for the oxygen-induced surface of Nb(110), *Phys. Rev. B*, **109**, 195417 (2024).
- [9] Y. Adachi, R. Zhang, X. Wang, M. Fukuda, T. Ozaki, Y. Sugimoto^{*}, Atomic arrangement of Si adatom on the Silicene/Ag(111) surface, *Appl. Surf. Sci.*, **630**, 157336 (2023).
- [10] D. Katsube^{*}, R. Shimizu, Y. Sugimoto, T. Hitosugi, M. Abe, Identification of OH groups on SrTiO₃(100)-(√13×√13)-R33.7° reconstructed surface by non-contact atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 071602 (2023).
- [11] Y. Sugimoto^{*}, Seeing how ice breaks the rule, *Science*, **377**, 6603, 264-265 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] Y. Sugimoto, High-resolution observation and manipulation of individual nano-carbons, The 68th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, Nagoya, Japan, 2025 年 3 月
- [2] Y. Sugimoto, Spin-induced lattice distortion in physisorption systems revealed by SPM, International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '24, Matsue, Japan, 2024 年 11 月
- [3] 杉本 宜昭, 超高真空中 FM-AFM の基礎とその応用展開, 第 53 回薄膜・表面物理 基礎講座 (2024), 新宿区, 日本, 2024 年 11 月
- [4] 杉本 宜昭, 走査プローブ顕微鏡による低次元材料の構造解析と操作, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 世田谷区, 日本, 2024 年 3 月
- [5] 杉本 宜昭, 非接触原子間力顕微鏡による個々の原子分子の分析, マイクロビームアナリシス技術部会 (MBA 技術部会) 第 14 回研究会, 千代田区, 日本, 2023 年 9 月
- [6] 杉本 宜昭, 非接触原子間力顕微鏡による局所構造解析, 日本顕微鏡学会 第 79 回学術講演会, 松江, 日本, 2023 年 6 月
- [7] 杉本 宜昭, 超高真空原子間力顕微鏡を用いた局所構造解析, 合同ミニカンファレンス NanospecFY2022mini, オンライン, 2023 年 3 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、ダイヤモンド表面の個々の原子の可視化に成功 (東京大学) 2025 年 1 月
- [2] 日本顕微鏡学会 第 67 回学会賞 2022 年 5 月

二次元物質の CVD 成長から 2.5 次元物質への展開

高橋 康史 (名古屋大学工学研究科電子工学専攻)

研究協力者：平田 海斗



1. 研究の目的

高機能かつ安価な触媒開発において、立体的な構造を活用した新奇物性を発現させる 2.5 次元の概念を志向した触媒開発が不可欠である。効率的な触媒開発には、触媒活性と構造の理解が必要である。そこで、独自開発した電気化学イメージング技術を用いて、歪みやモアレ、ナノリボンなど構造を巧みにかつようした材料の触媒活性サイトを、実空間で電気化学的に可視化する。

2. 研究成果

2.1. エッジ/表面積に富んだ二次元構造の創製と水素発生触媒への応用

脱炭素社会の実現に向け、水の電気分解による水素発生反応 (HER) を高効率に進行させる貴金属フリー触媒の開発が重要な課題となっている。遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) は有望な候補であるが、触媒活性を担うエッジ密度が低いことが課題であった。鈴木 (岡山大学) らが中心となって、単層 TMDC と成長基板界面に形成されるナノスケール閉じ込め空間を反応場とする独自の化学気相成長 (CVD) 成長法を開発し、 WS_2 のデンドライト状ナノネットワーク構造を作製した。また、吾郷 (九州大学) らは、異方性サファイア基板上において、CVD 成長法を用いた格子誘導成長により、高密度かつ配向した MoS_2 ナノリボン配列を実現する汎用的手法を示した。これらの高品質試料に対して、走査型電気化学セル顕微鏡 (SECCM) を用いて局所的な HER 活性のイメージングを行った結果、エッジにおいて顕著な還元電流の増大が観測され、エッジが高活性な HER サイトであることを直接的に示した (図 1 (a, b))。本成果は、貴金属フリー高性能触媒設計への指針を与えるものである。

2.2. グラフェン/SiC 基板を用いた二次元材料の熱歪み制御と触媒活性イメージング

TMDC の物性・機能制御において、基板との熱膨張係数 (TEC) 差に起因する熱歪みは有効な制御因子である。本研究では、宮田、榊原 (NIMS) らが中心となって、グラフェン/SiC(0001) 基板上で単層 WSe_2 を成長させ、均一な引張歪みを導入した高品質試料を作製した。PL 測定から、グラファイト基板上試料と比較してピークの赤方シフトおよび線幅の約 30% の狭小化が確認され、歪みの均一性向上が示された。これらの試料に対して SECCM による HER 活性イメージングを担当し、歪み導入試料ではテラス領域においても触媒活性が向上していることを明らかにした (図 1 (c))。従来はエッジ構造が主に活性制御因子とされてきたが、本成果は、歪み制御によってナノシート全体の触媒活性を高められることを実験的に示した点に特徴があり、新たな電極触媒設計指針を提示するものである。

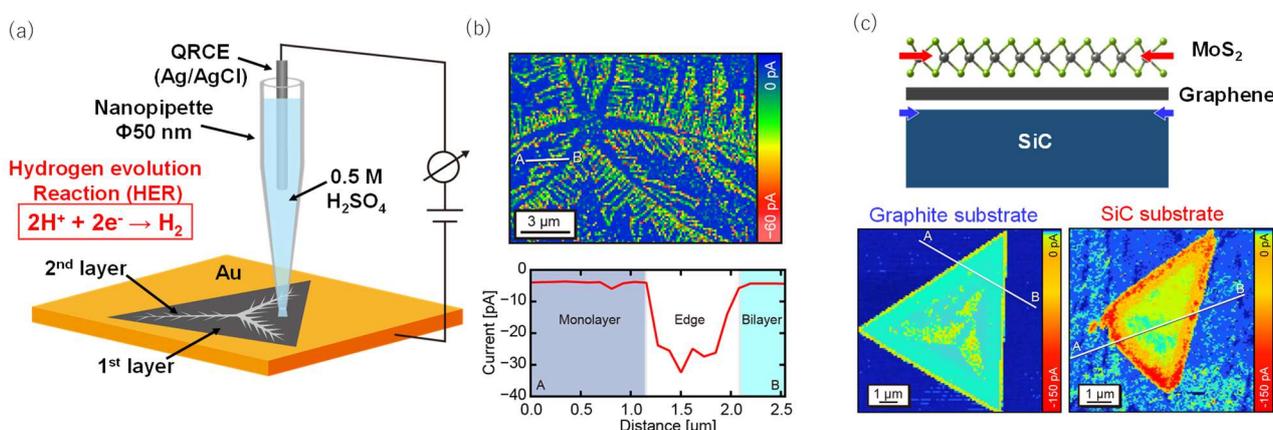


Figure 1. (a) Schematic illustration of electrochemical imaging of a TMDC nanosheet using scanning electrochemical cell microscopy (SECCM). (b) SECCM image of the hydrogen evolution reaction (HER) activity map and the corresponding cross-sectional current profile. (c) Evaluation of the hydrogen evolution reaction (HER) activity of TMDC nanosheets in which strain is induced by exploiting differences in thermal expansion coefficients.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] H. Suzuki, K. Hirata, Y. Takahashi, S. Fujii, M. Misawa, T. Tokunaga, I. Nakaya *et al.*, Dendritic WS₂ nanoribbon networks grown in interfacial confinement space: edge-rich architectures for enhanced hydrogen evolution, *Small Struct.*, **7**, 1, e202500542 (2025).
- [2] R. Sakakibara, K. Hirata, Y. Takahashi, W. Norimatsu, Y. Miyata, Improved strain engineering of monolayer transition metal dichalcogenides via van der Waals epitaxy on graphene/SiC (0001), *Nano Lett.*, **25**, 34, 12851–12858 (2025).
- [3] Z. Ma, P. Solís-Fernández*, Y.-C. Lin, K. Matsuda, K. Suenaga, S. Okada, T. Kato, Y. Takahashi, H. Ago* *et al.*, Lattice-guided growth of dense arrays of aligned transition metal dichalcogenide nanoribbons with high catalytic reactivity, *Sci. Adv.*, **11**, eadr8046 (2025).
- [4] Y. Nakanishi, N. Kanda, M. Aizaki, K. Hirata, Y. Takahashi, T. Endo, Y.-C. Lin, R. Senga, K. Suenaga, S. Aoyagi, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada, Y. Miyata, Z. Liu, Superatomic layer of cubic Mo₄S₄ clusters connected by Cl cross-linking, *Adv. Mater.*, **36**, e2404249 (2024).
- [5] M. Kaneda, W. Zhang, Z. Liu, Y. Gao, M. Maruyama, Y. Nakanishi, H. Nakajo, S. Aoki, K. Honda, T. Ogawa, K. Hashimoto, T. Endo, K. Aso, T. Chen, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, Y. Takahashi, S. Okada, T. Kato, Y. Miyata, Nanoscrolls of Janus monolayer transition metal dichalcogenides, *ACS Nano*, **18**, 2772–2781 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] Y. Takahashi, Glass nanopipette-based scanning probe microscopy for electrochemical imaging, ICSPM33, Japan, 2025 年 12 月
- [2] Y. Takahashi, Electrochemical imaging of hydrogen evolution reaction sites on two-dimensional materials, 2D Transition Metal Dichalcogenides 2025, UK, 2025 年 7 月
- [3] Y. Takahashi, Real-space electrochemical imaging of catalytically active sites of two-dimensional materials, International Czech–Japan Symposium on Advanced MultiScale Materials, Czech, 2024 年 9 月
- [4] Y. Takahashi, Electrochemical visualization of catalytic active sites on two-dimensional materials, UK–Japan Symposium on 2D Materials, UK, 2024 年 9 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、二次元半導体ナノネットワーク構造の合成法開発に成功～次世代の水素発生触媒の応用に期待～（名古屋大学）2025 年 12 月
- [2] プレス発表、水素発生と半導体応用を兼ね備えた二次元半導体ナノリボンを実現（名古屋大学）2025 年 1 月
- [3] プレス発表、立方体型の超原子が結合した 2 次元シートを創出～高効率な水素発生触媒の開発に期待～（名古屋大学）2024 年 7 月
- [4] プレス発表、非対称な二次元シートを利用したナノサイズの巻物構造の実現 ～高性能な触媒や発電デバイスへの応用に期待～（名古屋大学）2024 年 1 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

なし

構造が精緻に設計された原子層積層界面における熱・電荷輸送の同時計測



柳 和宏 (東京都立大学理学研究科物理学専攻)

1. 研究の目的

近年、単層の層状化合物である原子層物質を、自在に積層する技術が発展し、構造が精密に制御された新たなファンデルワールス (vdW) 界面が創出可能となった。そこでは、異なる原子層が積層したヘテロ界面や、積層角のずれによるモアレ構造を有する界面など、新たな界面設計が可能であり従来にはない特性が見いだされている。本研究の目的は、申請者が有する独自の計測技術を発展させ、系統的に構造を変えた原子層積層界面における構造と熱・電荷輸送の相関を解き明かし、電荷輸送とフォノン輸送を独立して制御する可能性を探ること。またその積層界面における熱起電力計測技術を確立し、熱電特性を系統的に明らかにする計測技術を確立する。

2. 研究成果

2.1. 積層角に依存した熱輸送・電荷輸送の相関

原子層を人為的に積層した界面においては熱伝導率が極めて小さいことが知られている。また、モアレ積層界面に見られる急峻な状態密度を持つ新たな電子状態など、熱電応答の観点から興味深い物性が生じている。原子層材料を用いたエレクトロニクス応用の観点から、積層界面の構造と界面電気抵抗・熱抵抗の理解は重要であり、また、ナノ構造界面における構造および熱伝導、電気伝導および熱起電力の三者の解明の理解は、熱電変換性能の向上指針の設計にも寄与する。しかしながら、界面構造が支配的となる厚み数 10nm 程度の薄膜の面直方向の熱伝導計測はあるが、電子輸送計測を面直方向で計測した例はなく、又、熱起電力をも計測した例は皆無である。そこで本研究では、柳グループが有する金をトランスデューサとして用いる時間領域サーモリフレクタンス法 (TDTR 法) を活用して、原子層三層積層系における電気輸送・熱輸送の相関の理解を進めた (Fig.1(a))。はじめにマルチドメインの薄膜試料に対して計測を行い、電気伝導と熱伝導との相関を世界ではじめて明らかにした (Fig.1(b), 論文[4])。また、単一ドメインの積層構造に対する実験を行い、積層角に依存して熱伝導・電子輸送が変化することが示唆される結果を得たが、現状の Dry 転写法では、界面構造の均一性・再現性 (データのバラつき) の抑制が困難であり、更に積層手法の改善が必要であることが分かった。

2.2. 原子層積層薄膜における薄膜面直方向熱起電力計測

積層界面の構造および電子構造と熱起電力の相関を理解する為には、厚み数 nm の薄膜の薄膜面直方向の熱起電力を計測する必要がある。温度差は数 mK 程度の状況で、熱起電力計測をする必要がある為、柳グループでは周期加熱 (ω) を用いて、 2ω によるロックイン検波による熱起電力計測技術開発を進め、約 5 層積層の MoS_2 の面直方向の熱起電力計測が可能であることを明らかにした (Fig.1(c))。

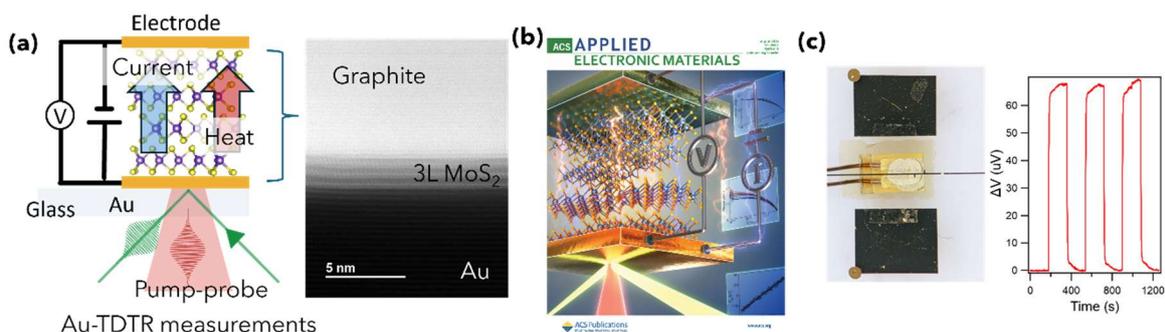


Figure 1. (a) Schematic illustration of in situ electrical and thermal conductance measurements across artificially stacked 2D layered materials, and (b) cover art in Appl. Ele. Mater. (2024). (c) Thermoelectric voltage across 5 layered MoS_2 .

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] S. Saito, J. Doumani, S. Kusaba, J. Kono, K. Yanagi*, Controlled thinning of aligned single-wall carbon nanotube films by multiple exfoliation, *Appl. Phys. Lett.*, **127**, 171906 (2025).
- [2] K. Ueji, S. Asatori, Y. Ichinose, R. Abe, Y. Yamashita, S. Saito, Y. Yomogida, S. Kusaba, T. Yagi, G. Wehmeyer, J. Kono, K. Yanagi*, Multiple ZT Peaks Caused by van Hove Singularities in Semiconducting Carbon Nanotube Films, *ACS Nano*, **19**, 29440-29447 (2025).
- [3] A. Ahad, Y. Yomogida, M.D. Rahman, A. Ihara, Y. Miyata, Y. Hirose, K. Shinokita, K. Matsuda, Z. Liu, K. Yanagi*, Synthesis of Arrayed Tungsten Disulfide Nanotubes, *Nano Lett.*, **24**, 14286-14292 (2024).
- [4] K. Zhou, K. Ueji, T. Shiga, H. Nishidome, S. Saito, S. Nakamura, T. Endo, Y. Yomogida, Y. Miyata, J. Kobayashi, T. Yamamoto, T. Yagi, K. Yanagi*, Correlation between the Cross-Plane Thermal and Electrical Conductance in Randomly Stacked MoS₂, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **6**, 8, 5934–5941 (2024).
- [5] H. Nishidome, M. Omoto, K. Nagai, K. Uchida, Y. Murakami, J. Eda, H. Okubo, K. Ueji, Y. Yomogida, J. Kono, K. Tanaka, K. Yanagi*, Influence of Laser Intensity and Location of the Fermi Level on Tunneling Processes for High-Harmonic Generation in Arrayed Semiconducting Carbon Nanotubes, *ACS Photonics*, **11**, 1, 171–179 (2023).
- [6] Y. Yomogida, M. Nagano, Z. Liu, K. Ueji, M.A. Rahman, A. Ahad, A. Ihara, H. Nishidome, T. Yagi, Y. Nakanishi, Y. Miyata, K. Yanagi*, Semiconducting Transition Metal Dichalcogenide Heteronanotubes with Controlled Outer-Wall Structures, *Nano Lett.*, **23**, 22, 10103–10109 (2023).
- [7] M.A. Rahman, Y. Yomogida, A. Ahad, K. Ueji, M. Nagano, A. Ihara, H. Nishidome, M. Omoto, S. Saito, Y. Miyata, Y. Gao, S. Okada, K. Yanagi*, Synthesis and optical properties of WS₂ nanotubes with relatively small diameters, *Sci. Rep.*, **13**, 16959 (2023).
- [8] K. Yanagi*, Thermoelectrics in thin films with van der Waals interfaces, *JSAP Review*, **92**, 2, 79-83 (2023).
- [9] K. Ueji, N. Muto, D. Heimfarth, Y. Matsuoka, Y. Ichinose, Y. Yomogida, T. Yagi, J. Zaumseil, K. Yanagi*, Heat and Charge Carrier Flow through Single-Walled Carbon Nanotube Films in Vertical Electrolyte-Gated Transistors: Implications for Thermoelectric Energy Conversion, *ACS Appl. Nano Mater.*, **5**, 5, 6100-6105 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] K. Yanagi, Thermoelectric physics of arrayed carbon nanotubes: from thermoelectric figure of merit to THz detection, PCOS 2025 (2D-TMDs 2025), Atami, Japan, 2025 年 12 月
- [2] 柳 和宏, 原子層積層界面における熱輸送と電気輸送の相関, 日本物理学会第 80 回年次大会, 広島, 日本, 2025 年 9 月
- [3] K. Yanagi, Controlled synthesis of WS₂ nanotubes with a diameter of 10 nm: Optical properties and arrayed synthesis, Pacificchem 2025, Hawaii, USA, 2025 年 12 月
- [4] K. Yanagi, Correlation between heat and charge transport across the designed van der Waals interfaces, A3 symposium, Tokyo, Japan, 2025 年 1 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] Abdul Ahad, Outstanding Researcher Award 2025, Comilla Univ. Bangladesh 2025 年 10 月
- [2] Hiroyuki Fujinami, Poster Award NT 2026, Tokyo Japan 2025 年 7 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] 特願 2025-94700、半導体デバイス及びテラヘルツ波検出装置 2025 年 6 月



5. 公募班 研究成果

A04

物性開拓班

2.5次元構造の
新奇物性開拓

井手上 敏也

塩見 雄毅

藤井 瞬

松岡 秀樹



2.5次元磁性体の制御と新奇輸送現象の開拓



井手上 敏也 (東京大学物性研究所)

1. 研究の目的

2.5次元磁性体を静的あるいは動的に制御することで新食物性の開拓を目指す。特に、一軸性歪み印加やマイクロ波誘起スピン共鳴現象によって2.5次元磁性体の対称性を制御し、特徴的磁気輸送現象の創出に取り組む。

2. 研究成果

2.1. 2.5次元磁性体の歪み制御による物性開拓

層間に磁性元素が挿入された2.5次元磁性体と見なせる $Mn_3Si_2Te_6$ および CoM_3S_6 ($M=Nb, Ta$)に着目し、それらに一軸性歪みを印加することによって対称性を制御することにより、磁性を反映した輸送現象を大きく変調できることを明らかにした。 $Mn_3Si_2Te_6$ は面内磁気異方性を有するフェリ磁性秩序相において面直磁場を印加することにより非従来型超巨大磁気抵抗効果が生じることが知られているが、本研究では、一軸性歪み印加によりこの磁気抵抗効果の歪み制御に成功すると同時に、軌道磁気モーメントを反映した電子状態やドメイン構造の歪み応答に関する知見を得た。 CoM_3S_6 ($M=Nb, Ta$)は非共線的磁気構造を示す時間反転対称性の破れた2.5次元反強磁性体であるが、一軸性歪み印加によって対称性が変化し、磁気構造や電子構造、それらを反映した磁気輸送特性が効果的に制御できることを明らかにした。

これらの成果は、特徴的磁気秩序とそれに起因する磁気輸送特性を示すような2.5次元磁性体において、微視的電子状態を理解するための重要な知見を与えると同時に、2.5次元磁性体の一軸性歪み印加による機能開拓の新しい方向性を開拓したと言え、様々な2.5次元磁性体の歪み物性制御研究の契機になると期待される。

2.2. 2.5次元磁性体の新奇高周波応答開拓

2.5次元磁性体の高周波応答に関する知見を得ると同時に、対称性を動的に制御することで新食物性を創出するための手法開拓に取り組んだ。特に、 $Mn_3Si_2Te_6$ のマイクロ波応答に着目し、コプレーナ導波路上に $Mn_3Si_2Te_6$ 試料を配置して、マイクロ波伝送係数やマイクロ波照射下における輸送特性を評価し、軌道磁気モーメントを反映した特徴的スピン共鳴の様子や、スピン共鳴が生じている状況において電気伝導が変調されることを見出した(論文[2], 図1)。このような手法は様々な2.5次元磁性体に適応可能であると考えられ、2.5次元磁性体におけるスピン波研究やマイクロ波を用いた新奇高周波機能の研究が今後加速するものと期待される。

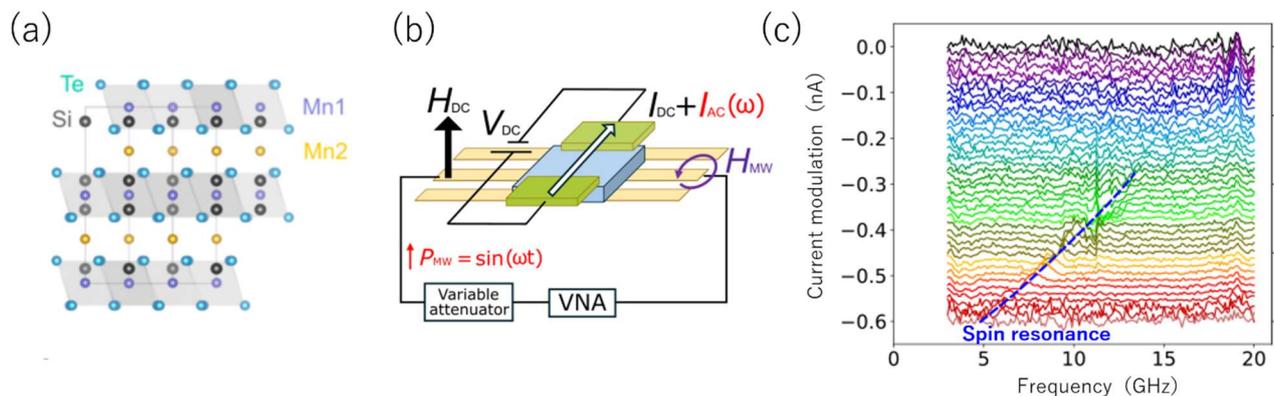


Figure 1. Resistance modulation of $Mn_3Si_2Te_6$ under magnetic resonance. (a) Crystal structure of $Mn_3Si_2Te_6$. (b) Schematic of the measurement of microwave-induced resistance modulation. (c) Current modulation as a function of the microwave frequency.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] P. J. Huang, Y. Ando, M. Tanaka, Y. Nishio, T. Ideue, K. Taniguchi, Proximity-induced chirality at the achiral conductive interface by electrical control of enantiopure ion adsorption, *Sci. Adv.*, **11**, 47, eadx2281 (2025).
- [2] M. Tanaka, A. Ahad, D. A. Deaconu, V. Shah, D. Nishio-Hamane, T. Ishii, M. Hashisaka, S. Sakamoto, S. Miwa, M. S. Bahramy, T. Ideue^{*}, Magnetic resonance and microwave resistance modulation in van der Waals Ferrimagnet $Mn_3Si_2Te_6$, *Phys. Rev. B*, **112**, L180401 (2025).
- [3] R. D. Septianto, A. P. Romagosa, Y. Dong, H. Matsuoka, T. Ideue, Y. Majima, Y. Iwasa, Gate-Controlled Potassium Intercalation and Superconductivity in Molybdenum Disulfide, *Nano Lett.*, **24**, 43, 13790–13795 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] 井手上 敏也, 原子層磁性体の制御と物性開拓, 第3回 ATF コンファレンス 界面ナノ科学研究会, Plaza Verde, 静岡, 2025年11月
- [2] T. Ideue, Emergent nonlinear optical responses in symmetry controlled two-dimensional magnets, International Symposium MSSp2025: Materials Science and Spintronics for Sustainable Futures, Sendai, Japan, 2025年11月
- [3] T. Ideue, Emergent nonlinear optical responses in noncentrosymmetric two-dimensional magnets, RPGR2025 (The 16th Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research Conference), Toyama, Japan, 2025年11月
- [4] T. Ideue, Emergent photovoltaic responses in two-dimensional materials, 2025年日本表面真空学会学術講演会, つくば国際会議場, 茨城, 2025年10月
- [5] T. Ideue, Emergent nonlinear optical responses in symmetry-controlled two-dimensional van der Waals magnets, Superstripes 2025, Erice, Italy, 2025年10月
- [6] 井手上 敏也, 2.5次元半導体および磁性体における創発光起電力応答, 日本物理学会第80回年次大会, 広島大学, 広島, 2025年9月
- [7] T. Ideue, Nonlinear optical responses in symmetry-controlled two-dimensional van der Waals magnets, ICAUMS 2025 (International Conference of Asian Union of Magnetism Societies), Okinawa, Japan, 2025年4月
- [8] T. Ideue, Symmetry control and nonlinear optical/electrical responses in van der Waals crystals, IFGSZ 2025 (12th International Forum on Graphene & 1st International Conference on two-dimensional Materials), Shenzhen, China, 2025年4月
- [9] T. Ideue, Nonlinear optical responses in symmetry-controlled two-dimensional materials, Topological Nonlinear Optics in Quantum Materials, Kashiwa, Japan 2025年2月
- [10] 井手上 敏也, 2次元物質の対称性と光電流応答, 応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会, 東京大学山中寮内藤セミナーハウス, 山梨, 2024年11月
- [11] 井手上 敏也, 原子層物質の外場制御と物性開拓, 日本物理学会第79回年次大会, 北海道大学, 北海道, 2024年9月
- [12] T. Ideue, Spontaneous photovoltaic effect in symmetry-controlled van der Waals nanomaterials, FOPS (Fundamental Optical Processes in Semiconductors) 2024, Newfoundland, Canada, 2024年7月
- [13] T. Ideue, Nonlinear optical responses in symmetry-controlled van der Waals crystals, RPGR2024 (The 15th Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research Conference), Nanjing, China, 2024年7月
- [14] T. Ideue, Straintronics functionalities in two-dimensional van der Waals materials, Superstripes 2024, Ischia, Italy, 2024年6月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 第28回丸文研究奨励賞 2025年3月
- [2] 第19回凝縮系科学賞 2024年11月

低対称性 2.5 次元物質における電子機能・スピン機能の開拓



塩見 雄毅 (東京大学大学院総合文化研究科)

1. 研究の目的

本領域が強みをもつ様々な 2.5 次元物質に対して、研究代表者の得意とするスピントロニクス技術を用いた物質機能開拓を目指す。特に、結晶構造や界面における対称性の破れに注目し、対称性の破れに起因した磁気輸送応答や光学応答、およびスピン応答の観測を目指す。

2. 研究成果

2.1. 二次元強誘電体 α - In_2Se_3 における対称性の破れに起因した磁気輸送応答

様々な機能をもつファンデルワールス層状物質の中でも、自発分極の向きを電場で制御できる二次元強誘電体は次世代エレクトロニクス素子への応用の観点から注目を集めている。我々は典型的な室温二次元強誘電体である α - In_2Se_3 において、対称性の破れに起因する様々な物性を明らかにしてきた。特に、本物質は合成中に生じる欠陥により完全な絶縁性をもたないことに着目し、結晶構造の低対称性と、半導体的伝導に特徴的な大きなゼーベック係数 (熱電係数) を利用することで、非線形ゼーベック効果の観測に成功した。我々が観測した非線形ゼーベック効果は温度差の二乗に比例する効果であり、温度勾配の方向に電圧が依存しないというダイオード的な一方向性をもっている点が興味深い。また、我々は α - In_2Se_3 に Sn を 1% 意図的にドーピングすることにより、金属的な電気伝導特性を示す単結晶試料の合成にも成功している (論文[1])。微量なドーピングにより半導体から金属へと変化させられる特性は、 α - In_2Se_3 が二次元強誘電体としてだけでなく、新たな「強誘電金属」としての魅力も持ち合わせた、優れた物質材料であることを意味している。

2.2. 二次元スピンデバイスにおける対称性の影響

近年、低対称性物質において、従来知られていたスピン流とは異なるスピン偏極方向や伝播方向を有する非従来型スピン流が見いだされ注目を集めている。本研究では、一軸圧で容易に対称性を制御できる 2.5 次元物質の特性を活かし、フレキシブル基板上にスピントロニクスデバイスを作製し、一軸歪みによる対称性低下がスピン流特性に与える影響を実験的に明らかにした。

2.3. 単層 MoS_2 におけるポッケルス効果の観測

単層 MoS_2 は対称性が破れており、非線形光学応答の一種であるポッケルス効果 (電場により屈折率が変化する現象) が生じることが期待される。本研究では、CVD 法で作製された単層-二層 MoS_2 膜に対して、反射法により室温でポッケルス効果の測定を行った。Fig.1 に示す通り、対称性が破れた単層領域ではポッケルス効果に伴う入射レーザー光の偏光回転が見られた一方で、対称性が回復する二層領域では信号は見られない。単層領域のポッケルス係数は典型的な半導体 GaAs と同程度であることを明らかにした (論文[2])。

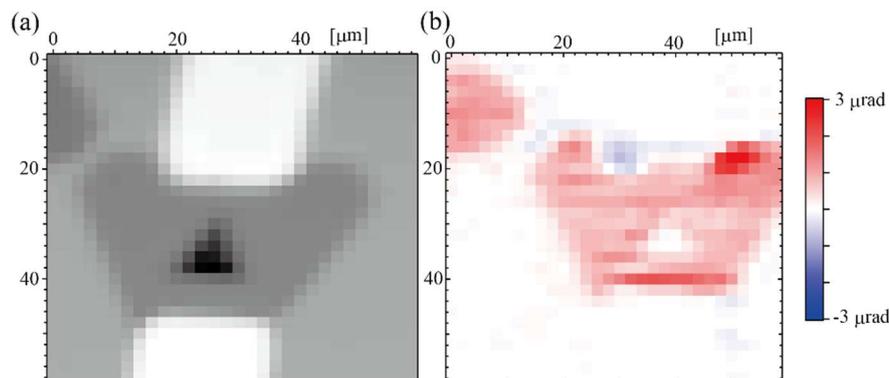


Figure 1. Polarization rotation due to the Pockels effect in monolayer and bilayer MoS_2 crystal. 2D mapping of (a) intensity of the reflected light and (b) polarization rotation for MoS_2 monolayer-bilayer sample. The applied voltage was set to 20 V.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] S. Kawai, M. Sato, S. Zhang, R. Murata, T. Kawada, T. Sasagawa, Y. Shiomi, Influence of Weak Localization on Nonreciprocal Magnetoresistance, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **94**, 123701 (2025).
- [2] M. Tanabe, R. Okukawa, T. Yokouchi, Y. Miyata, Y. Shiomi, Pockels effect in CVD-grown monolayer MoS₂, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **64**, 055002 (2025).
- [3] M. Sato, R. Murata, T. Yokouchi, T. Sasagawa, Y. Shiomi, Signature of nonreciprocal Seebeck effect in 2D ferroelectric semiconductor α -In₂Se₃, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **3161**, 012002 (2026).
- [4] Z. Wang, M. Wang, J. Lehmann, Y. Shiomi, T. Arima, N. Nagaosa, Y. Tokura, N. Ogawa, Electric-field-enhanced second-harmonic domain contrast and nonreciprocity in a van der Waals antiferromagnet, *Nat Commun.*, **15**, 7542 (2024).
- [5] R. Obata, M. Kosugi, T. Kikkawa, K. Kuroyama, T. Yokouchi, Y. Shiomi, S. Maruyama, K. Hirakawa, E. Saitoh, J. Haruyama, Coexistence of Quantum-Spin-Hall and Quantum-Hall-Topological-Insulating States in Graphene/hBN on SrTiO₃ Substrate, *Adv. Mater.*, **36**, 19, 2311339 (2024).
- [6] Z. Wang, X.-X. Zhang, Y. Shiomi, T. Arima, N. Nagaosa, Y. Tokura, N. Ogawa, Exciton-magnon splitting in van der Waals antiferromagnet MnPS₃ unveiled by second-harmonic generation, *Phys. Rev. Research*, **5**, L042032 (2023).
- [7] T. Yokouchi, Y. Ikeda, T. Morimoto, Y. Shiomi, Giant Magnetochiral Anisotropy in Weyl-semimetal WTe₂ Induced by Diverging Berry Curvature, *Phys. Rev. Lett.*, **130**, 136301 (2023) (Editors' suggestion).
- [8] Z. Wang, M. Gao, T. Yu, S. Zhou, M. Xu, M. Hirayama, R. Arita, Y. Shiomi, W. Zhou, N. Ogawa, Real-Space Observation of Ripple-induced layer decoupling in ultrathin MnPS₃, *ACS Nano*, **17**, 3, 1916-1924 (2023).
- [9] M. Kosugi, R. Obata, K. Suzuki, K. Kuroyama, S. Du, B. Skinner, T. Kikkawa, T. Yokouchi, Y. Shiomi, S. Maruyama, K. Hirakawa, E. Saitoh, J. Haruyama, Gate-tunable resistance drops related to local superconducting gaps in thin TaS₂ layers on SrTiO₃ substrates, *APL Mater.*, **11**, 081106 (2023).
- [10] K. Ueda, R. Murata, T. Sasagawa, Y. Shiomi, Piezoelectric effect in 2H and 3R phases of α -In₂Se₃, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 061006 (2023).

3.2. 招待講演

- [1] Y. Shiomi, Amorphous ferromagnetic metallic state of 2D semiconductor CrGeTe₃, The 5th international symposium on advanced magnetic materials and applications (ISAMMA2024), Quang Binh, Vietnam, 2024 年 8 月
- [2] Y. Shiomi, Giant nonreciprocal magneto-transport in Weyl-semimetal WTe₂ induced by diverging Berry curvature, 6th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials, Univ. Tokyo, Japan, 2023 年 5 月

超高速光計測で拓く二次元物質の動的界面エンジニアリング

藤井 瞬 (慶應義塾大学理工学部)



1. 研究の目的

表面弾性波による高速・微小な歪みを 2 次元物質における +0.5 次元と定義し、超高速光計測技術を駆使して、二次元物質界面で起こる未知の物性を明らかにすると同時に、新奇デバイス応用を見据えた二次元物質の活用基盤を創出する。また、二次元物質の精密光計測系を基盤とした領域内共同研究を進展させる。

2. 研究成果

2.1. 遷移金属ダイカルコゲナナイドにおける動的歪みによる励起子発光変調の多次元分光イメージング

遷移金属ダイカルコゲナナイド(TMDC)に代表される二次元物質は、原子数層レベルの厚みしかないというユニークな構造的特徴を有し、トランジスタに代表されるエレクトロニクスのみならず、光物性やスピントロニクスなどの学理においても非常に興味深い物性を生み出すことが知られている。TMDC はその究極的な薄さゆえ、周囲の環境に敏感にその物性が変化することが知られており、近年、歪みを用いた光物性の制御と活用に注目が集まっている。表面弾性波 (SAW) は、固体表面を伝搬する高周波弾性波であり、その活用により、TMDC の新奇物性の発現や電気・光応答の高度な利用が可能になると期待されている。一方、SAW による歪みは微小かつ高速な進行波成分をもつため、その効果の精密な計測、評価は容易ではなかった。

そこで我々は、超短パルスレーザーの繰り返し周波数と SAW の周波数を精密に位相同期させた独自の超高速精密光計測系を開発し、表面弾性波によって変調される励起子発光特性の時間・空間・スペクトル分解測定を行った。単層 WSe₂ を SAW 基板に転写したデバイスを作製し、表面弾性波の励起時におけるフォトルミネセンス (PL) スペクトルと時間分解 PL を測定した。図 1 に示すように、位相同期条件下では、PL エネルギー、強度、および線幅が SAW の位相に同期して周期的に変調される様子が明瞭に観測された。特に、引張歪みが最大となる SAW の山の位置では、PL は高強度かつ狭線幅となる一方、圧縮歪みが支配的な谷の位置では、PL 強度の低下と線幅の増大が生じた。発光エネルギーは歪みの符号に応じてそれぞれ赤方・青方へと変調されており、これは歪みによる type-I バンドギャップ変調を反映していると考えられる。さらに、線幅および強度の同時変化から、歪みによって K バレーと Q バレー間のエネルギー差が変調され、フォノン散乱の一種であるインターバレー散乱が抑制あるいは促進されていることが示唆された。

本研究成果は、SAW を用いて PL 発光を任意に制御可能であることを示しており、動的歪みを用いた励起子物性制御の有効性を明確に実証するとともに、新たなデバイス応用の可能性を拓くものである。

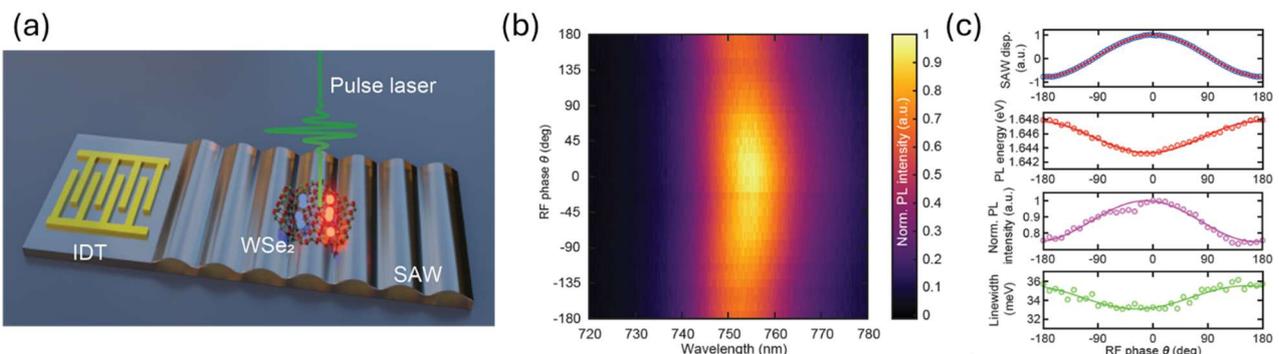


Figure 1. (a) Conceptual illustration of dynamic modulation of monolayer WSe₂. (b) Spatio-spectral visualization of PL modulation by dynamic strain. (c) Evolution of the SAW displacement, PL peak energy, intensity, and linewidth as a function of the RF phase.

2.2. 偏光分解二次高調波測定と大面積イメージング

フェムト秒パルスレーザーを用いた二次元物質における二次高調波発生(SHG)に関する研究も実施した。二次元物質はSHGを測定、解析することでその結晶方位や結晶中の歪みといった様々な情報が得られる。表面弾性波による動的歪みによって、TMDCの非線形光学特性が大きく変調されることを確認した。さらに、開発したSHG評価系を用いて、領域内の共同研究を多数実施した。その結果、A02班の宮田G、A01班の加藤Gと共同で多層ヤスナノスクロールの構造同定(論文[3])、A02班の鈴木Gとは大面積イメージング測定を用いた二層フラクタル構造における $2H \cdot 3R$ 積層の混成比の同定(論文[2])、 WS_2 ナノリボンの構造同定(論文[1])などの成果につながった。その他にもA04班の蒲江G、A01班の吾郷Gとの共同研究を進めた。

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] H. Suzuki, Y. Senda, K. Hisama, S. Aso, Y. Takahashi, S. Fujii, Y. Hayashi, Inside the Microreactor: In Situ Real-Time Observation of Vapor–Liquid–Solid Growth of Monolayer TMDCs, *Adv. Sci.*, e16784 (2025).
- [2] H. Suzuki, K. Hirata, Y. Takahashi, S. Fujii, M. Misawa, T. Tokunaga, I. Nakaya, Y. Senda, Y. Hayashi, Y. Takahashi, Dendritic WS_2 Nanoribbon Networks Grown in Interfacial Confinement Space: Edge-Rich Architectures for Enhanced Hydrogen Evolution, *Small Struct.*, e202500542 (2025).
- [3] M. Kaneda, W. Zhang, D. Bi, T. Sun, H. Ogura, T. Endo, Y. Takahashi, S. Fujii, T. Kato, Y. Miyata, Tunable-Diameter Nanoscrolls from Janus $WSSe/WSe_2$ Heterostructures, *ACS Nano*, **19**, 39, 34918–34927 (2025).
- [4] D. Nishikawa, K. Maezawa, R. Shibata, S. Fujii, S. Watanabe, Ultrafast movies of the photoinduced phonon and magnon propagation using dual frequency-comb technology, *Opt. Lett.*, **50**, 6, 1929-1932 (2025).

3.2. 招待講演

- [1] S. Fujii, Cavity-enhanced Second-Order Nonlinearities in Two-Dimensional van der Waals Materials, 第69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, Taipei, Taiwan, 2025年9月
- [2] 藤井 瞬, 動的歪みによる遷移金属ダイカルコゲナイドの超高速界面エンジニアリング, 第86回応用物理学会秋季学術講演会, 名城大学, 2025年9月
- [3] S. Fujii, Dynamic strain engineering of two-dimensional transition metal dichalcogenides, JSAP-Optica Joint Symposia 2025 Nagoya, 2025年9月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 若手奨励賞 (第69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) 2025年9月
- [2] NT25 Poster Award (NT'25) 2025年6月
- [3] Young Researcher Best Paper Award (ICNNQ2025) 2025年4月

3.4. その他(アウトリーチ、特許など)

特になし

イオン트로ニクスによる2.5次元量子相の制御と開拓

松岡 秀樹 (東京大学生産技術研究所)



1. 研究の目的

本研究の目的は、イオン性の原子・分子を駆動・蓄積して機能を引き出すイオントロニクスを二次元量子相へ適用し、量子相を制御・設計する指針を確立することである。具体的には、(1)磁性体にイオンゲートを適用して新しい磁性制御法を提案・実証すること、(2)イオン性分子を層状物質に挿入した有機無機超格子を設計し物性を開拓すること、の二方針で推進する。これらを通じて、イオンと二次元量子相の協奏による新奇な2.5次元物性の創発を目指す。

2. 研究成果

2.1. イオンゲートによる二次元磁性の制御

磁性体の外場制御は、基礎物理の深化とスピントロニクスデバイス開拓の両面で重要である。中でもイオンゲートは高密度キャリア制御が可能であり、有力な磁性制御手法として期待されている。本研究では、この枠組みを拡張する新奇イオンゲート手法を提案し、その実証を行った。

第一に、層状磁性体に対するバルクゲートを提案・実証した。従来、ゲート制御は薄膜試料のみを対象とする前提が強かったが、バルクゲートはバルク合成により得られるエキゾチックな磁性体に対してゲート制御を実現する概念である。本研究では、バルク合成した層状磁性体をFIB(集束イオンビーム)でマイクロ加工し、さらにイオン挿入(インターカレーション)と組み合わせることで、バルク試料においてもゲートによる磁性制御が可能であることを示した(論文[3])。第二に、キラルイオンゲートを提案・実証した。これは電気二重層トランジスタ(EDLT)に用いるイオン性分子をキラル化し、試料表面へキラリティを付与する手法である。キラリティと磁性のカップルを活用した新たな磁性制御法として有望であり、本研究では二次元トポロジカル磁性表面に適用してその有効性を示した(論文[1])。

2.2. イオン性分子挿入による有機無機超格子構造の開拓

近年、ファンデルワールス物質の層間へイオン性有機分子を電気化学的手法でインターカレーションすることで、有機分子層を含む新たな階層構造体、すなわち有機無機超格子構造を安定的に作製できることが示され、注目を集めている。本研究では、この有機無機超格子構造を合成しそのミクロな構造と電子状態を多角的に評価した。なお、本研究はA02 班町田グループ・A03 班坂野グループとの共同研究として推進した。

その結果、NbSe₂母体の有機無機超格子構造において、ゲスト分子の秩序化に協奏してホスト無機格子に超格子構造が誘起されることを見出し、これを協奏的超構造(cooperative superstructure; CSS)相と名付けた。さらに、CSS相で生じる超格子構造が、分子層周期と無機格子の非整合性に起因するモアレ構造であることを明らかにした。加えて、電気抵抗測定および熱クエンチ測定から、本転移が無機固体に典型的な電荷・磁気秩序とは異なり、極めて遅い秩序-無秩序ダイナミクスに支配されることを示した。これは、ホスト格子と結合した分子運動の遅さに由来すると考えられる。以上の成果は、分子秩序化を設計自由度として界面・超構造を制御する新たな指針を与えるとともに、熱履歴によって切り替え可能なモアレ超構造の設計概念を提示するものである。

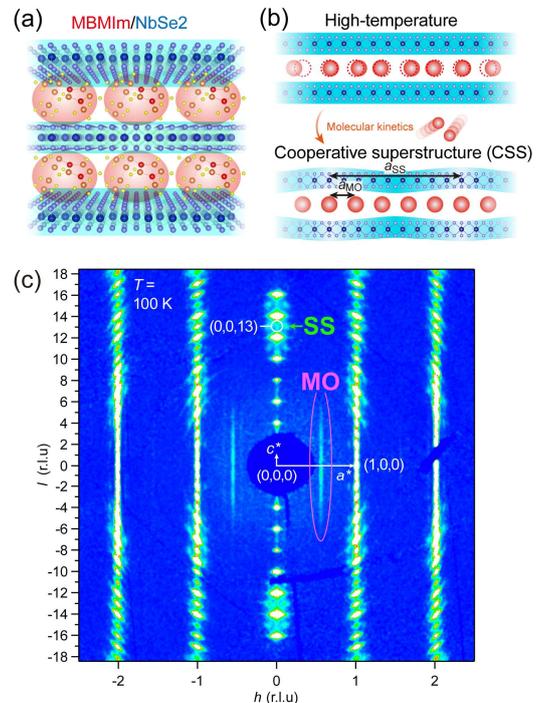


Figure 1. (a) Schematic crystal structure of molecule(MBMIm)-intercalated NbSe₂. (b) Schematic of the cooperative superstructure (CSS) phase. (c) Reciprocal-space map of the CSS phase, showing molecular ordering (MO) and the emergent superstructure (SS).

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] H. Matsuoka, A. Moriyama, T. Hori, Y. Tokura, Y. Iwasa, S. Seki, M. Suda, N. Kanazawa, Electric-field control of two-dimensional ferromagnetic properties by chiral ionic gating. *Nano Lett.*, **25**, 42, 15297–15304 (2025).
- [2] Y. M. Itahashi, Y. Nohara, M. Chazono, H. Matsuoka, K. Arioka, T. Nomoto, Y. Kohama, Y. Yanase, Y. Iwasa, K. Kobayashi, Misfit layered superconductor $(\text{PbSe})_{1.14}(\text{NbSe}_2)_3$ with possible layer-selective FFLO state, *Nat. Commun.*, **16**, 7022 (2025).
- [3] H. Matsuoka, Y. Fujishiro, S. Minami, T. Koretsune, T. Ueda, N. Kanazawa, R. Arita, Y. Tokura, Y. Iwasa, Electron-doped magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ by bulk gating, *Phys. Rev. Mater.*, **9**, 064406 (2025).
- [4] U. Narusaka, N. Yoshikawa, H. Matsuoka, Y. Tanaka, M. Musashi, M. Nakano, Y. Iwasa, R. Shimano, Intense terahertz pulse induced nonthermal melting of charge density wave order in a thin film of $3\text{R-Ta}_{1+x}\text{Se}_2$, *Phys. Rev. B*, **111**, 045146 (2025).
- [5] R. D. Septianto, A. P. Romagosa, Y. Dong, H. Matsuoka, T. Ideue, Y. Majima, Y. Iwasa, Gate-controlled potassium intercalation and superconductivity in molybdenum disulfide, *Nano Lett.*, **24**, 43, 13790–13795 (2024).
- [6] B. K. Saika, S. Yoshida, M. Pardo-Almanza, N. Mitsuishi, M. Sakano, Y. Fujisawa, Y. Wang, Y. Iwasa, H. Matsuoka, H. Takahashi, S. Ishiwata, Y. Okada, M. Nakano, K. Ishizaka, Dimensionality-driven power-law gap in the bilayer TaTe_2 grown by molecular-beam epitaxy, *APL Mater.*, **12**, 071105 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] 松岡 秀樹, インターカレーション技術による量子物性設計, 第 2 回構造物性研究会, 広島, 日本, 2025 年 9 月
- [1] H. Matsuoka, Quantum phase engineering in two-dimensional materials fabricated by molecular beam epitaxy, Japan-Taiwan Joint Workshop -Atomic Layer Materials, Surfaces & Interfaces, Thin Films-, Tokyo, Japan, 2025 年 7 月
- [2] 松岡 秀樹, 分子線エピタキシー法を用いて作製した二次元物質における量子相設計, 日本磁気学会第 94 回スピントロニクス専門研究会, 京都, Japan, 2024 年 11 月
- [3] H. Matsuoka, Tunable Itinerant Magnetism in Magnetic Semimetals via Ionic Gating, International Workshop on Iontronics 2024 Program, Nagano, Japan, 2024 年 10 月
- [4] H. Matsuoka, Gate-tunable itinerant ferromagnetism in magnetic semimetal, 2D Transition Metal Dichalcogenides 2024, HongKong, China, 2024 年 5 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、キラルイオンゲート技術を世界初実証～分子対称性によるトポロジカル表面磁性の超省電力制御に成功～（東京大学生産技術研究所）2025 年 10 月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

- [1] 日本物理学会 領域 4 運営委員 2025 年 10 月-2026 年 9 月



5. 公募班 研究成果

A05

機能創出班

2.5次元構造体の電子・光・
エネルギー応用への展開

小野 倫也
山本 真人



計算科学による2次元ナノ空間でのキャリア伝導と物質創製プロセスの解析・デザイン



小野 倫也 (神戸大学大学院工学研究科)

研究協力者: 植本 光治

1. 研究の目的

本研究は、実際の実験を模した大規模な計算モデルを用いた第一原理計算により、本学術変革領域で開発・発見された2次元層状物質を用いたデバイス界面でのキャリア移動や、物質・デバイス構造作製プロセスにおける化学反応現象の予測と、その予測に基づいた高機能デバイス用界面原子構造の提案と実証実験グループと連携したデバイスの機能実証を行う。

2. 研究成果

2.1. NiFe/グラフェン界面の原子構造探索

スピントロニクスデバイスのひとつである強磁性金属の間に絶縁性の材料をトンネル層として挟んだトンネル磁気抵抗素子では、現在のところトンネル磁気抵抗素子のトンネル層には酸化物が広く使われているが、酸化物薄膜よりも平坦性に優れるシート状の物質である2次元層状物質がトンネル層用材料として注目を集めている。しかしながら、接合界面作製プロセスにおける強磁性金属表面の酸化や2次元層状物質の劣化など、デバイスの普及に向けた課題が残っており、問題解決に向けてこれまで様々な界面作製プロセスが提案されている。例えば、強磁性金属基板上に2次元層状物質を転写する方法や2次元層状物質上に強磁性金属を蒸着する方法が挙げられる。2次元層状物質/強磁性金属界面の磁気特性とトンネル磁気抵抗素子のスイッチング特性は深く関係すると考えられているため、本研究では量子力学に基づく理論計算を活用して、NiFe強磁性合金とグラフェン界面の吸着エネルギーと磁気特性について、図1(左)のようにNiFe強磁性合金とグラフェンが吸着したモデルを用いて、グラフェンの吸着位置のみならずNiFe強磁性合金基板および表面の組成比を変化させながら調べた。

図1(右)のようにNiFe強磁性合金上におけるグラフェンの吸着位置を調べたところ、グラフェンは表面金属原子の直上に炭素原子が位置する構造をとることが明らかになった。表面のFe原子とNi原子の組成と吸着エネルギーの関係調べたところ、図2に示すように、NiFe強磁性合金基板のFe原子とNi原子の組成比にかかわらず、基板表面層にFe原子が多い構造が最も大きい吸着エネルギーを示すことが分かった。この原因は、表面のFe原子のd軌道とグラフェンの炭素原子のp軌道が混成軌道を構成し、ファンデルワールス相互作用よりも強い結合が発現しているためである。この結果は、グラフェン上にNiFe強磁性合金を蒸着するプロセスでは、まずFe原子の多い層がグラフェン上に形成され、その上にNiFe強磁性合金層が形成されることを示している。次に、グラフェンが転写される前のNiFe強磁性合金基板の表面元

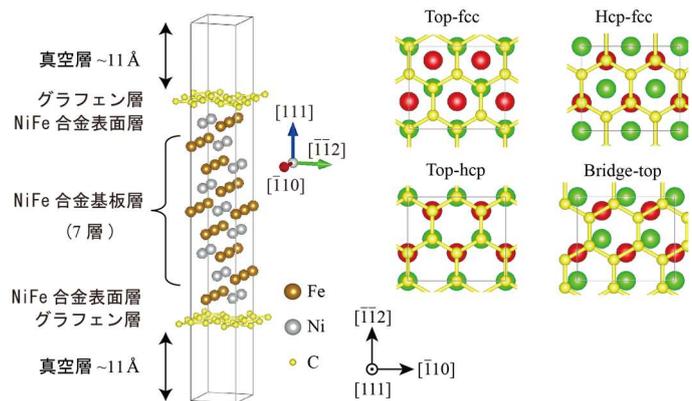


Figure 1. (Left) Overall view of a computational model. (Right)

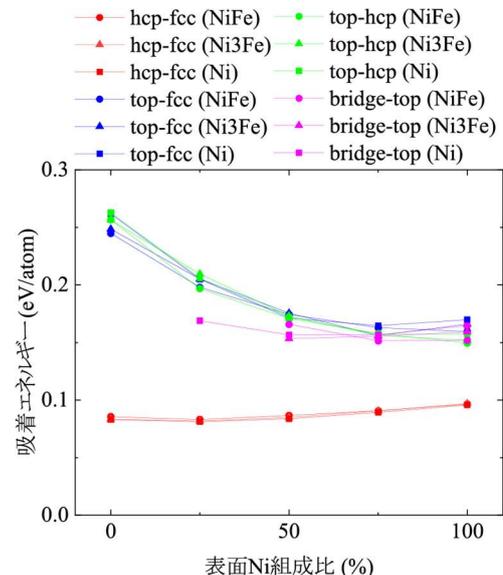


Figure 2. Adsorption energy of graphene on an NiFe alloy substrate. (J. Appl. Phys. 2025)

素組成を調べたところ、図 3 に示すように NiFe 強磁性合金基板の元素組成比にかかわらず、ニッケル原子が多い表面が現れやすいことが分かった。したがって、グラフェンを転写するプロセスではグラフェンと NiFe 強磁性合金基板の間の基板表面層はニッケル原子が多いことが予想される。これらの結果は、界面作製プロセスによって界面遷移層の磁気モーメントを制御できることを示唆している。

2.2. FePd/PdSe₂ 界面の原子構造探索

磁気抵抗素子用界面として、高い垂直磁気異方性と薄膜の低いギルバートダンピング定数をもつ FePd 電極が注目されている。本研究では、FePd/PdSe₂ 界面の原子構造を調べ、PdSe₂ は界面遷移層を形成して安定化することを発見した。

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] N. Matsumoto, R. Endo, M. Uemoto, T. Ono, Theoretical investigation of interface atomic structure of graphene on NiFe alloy substrate, *J. Appl. Phys.*, **138**, 104305 (2025).
- [2] T. Akamatsu, M. Uemoto, Y. Egami, T. Ono, GPU acceleration of overbridging boundary matching method without Green's functions based on real-space finite-difference method, *Comput. Phys. Commun.*, **312** 109585 (2025).
- [3] H. Adachi, R. Endo, H. Shinya, H. Naganuma, T. Ono, M. Uemoto, First-principle study of spin transport property in L1₀-FePd(001)/graphene heterojunction, *J. Appl. Phys.*, **135**, 043902 (2024).
- [4] M. Uemoto, N. Funaki, K. Yokota, T. Hosoi, T. Ono, Density functional theory study on effect of NO annealing for SiC(0001) surface with atomic-scale steps, *Appl. Phys. Express*, **17**, 011009 (2024).
- [5] M. Uemoto, M. Nishiura, T. Ono, Valley filters using graphene blister defects from first principles, *J. Phys.: Condens. Matter*, **36**, 095301 (2024).
- [6] T. Akamatsu, M. Uemoto, Y. Egami, T. Ono, GPU acceleration of conjugate gradient method obtaining Green's function for transport-property calculation, *Comput. Phys. Commun.*, **295**, 108989 (2024).

3.2. 招待講演

- [1] 小野 倫也, 計算科学手法を用いた界面電子構造の解析・予測, Controlled growth and characterization 研究会 2024-II, 大阪, 2024 年 12 月
- [2] T. Ono, Density functional theory calculation for carrier scattering at electronic device interface, International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics (MPQCP 2024), Tokyo, 2024 年 1 月
- [3] 小野 倫也, 計算科学手法による SiC-MOS 界面の電子状態・キャリア伝導特性解析, 電子情報通信学会令和 5 年 11 月度 SDM 研究会, 東京, 2023 年 11 月
- [4] T. Ono, Density functional theory calculation for carrier scattering at 4H-SiC(0001)/SiO₂ interface, International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD) 2023, Kobe, 2023 年 9 月

3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] プレス発表、デバイス界面の作り方で磁気特性が変わることを予測 (神戸大学) 2025 年 9 月

3.4. その他 (アウトリーチ、特許など)

- [1] 新聞記事、デバイス界面の作り方で磁気特性が変わることを予測, 科学新聞 2025 年 10 月
- [2] Altering the atomic composition ratio of magnetic tunnel junction interfaces, Scilight 2025, 371104 (2025)

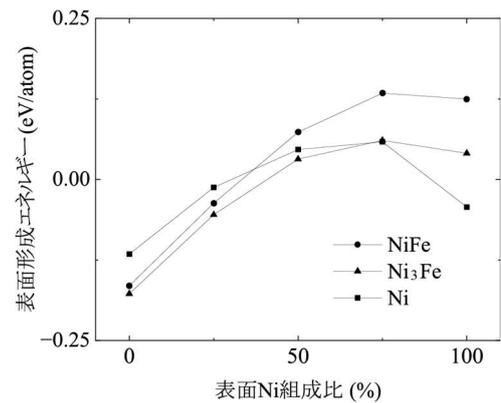


Figure 3. Formation energy of a surface layer. (J. Appl. Phys. 2025)

二次元物質/ VO_2 ヘテロ構造の創成とデバイス応用

山本 真人 (関西大学システム理工学部)



1. 研究の目的

室温近傍で電気抵抗率や透過率の劇的な変化を伴う絶縁体—金属相転移を示す二酸化バナジウム(VO_2)と、原子レベルの厚さに由来した特異な機能を示す二次元半導体をヘテロ構造化させることで2.5次元構造を創成する。そして、 VO_2 の相転移を利用することで二次元半導体の電子・光機能を制御し、低消費電力スイッチングデバイスへと応用する。

2. 研究成果

2.1. 歪んだ VO_2 による MoS_2 からの局所発光制御

直接遷移型半導体である単層 MoS_2 は ~ 1.9 eV で強い発光を示し、さらにその光学特性を電界、ドーピング、歪みなどの外場によって制御可能なことからフォトリックデバイスへの応用が期待されている。単層 MoS_2 を実際にフォトリックデバイスへと応用するためには、発光特性を局所的に制御する必要がある。我々はこれまでに、歪みによって結晶内に相転移温度の異なる絶縁相が存在する VO_2 の合成に成功している(Fig. 1a)。本研究では、この歪んだ VO_2 と CVD 合成した単層 MoS_2 をヘテロ構造化し、 VO_2 結晶内の局所的な相状態の違いを利用することで MoS_2 からの発光特性の局所制御を試みた。Fig. 1b は、実際に作製した VO_2/MoS_2 ヘテロ構造の 350 K における光学顕微鏡像と PL 強度マップである。 VO_2 上 MoS_2 からの発光の強度は絶縁相に比べ金属相上で増強されることが分かった。数値計算によってこの発光強度の違いは、 VO_2 の相状態によって複素屈折率が変化し反射光の干渉効果が変調されたことに由来することを明らかにした(論文[2])。この結果は、適当な歪みを加えた VO_2 と MoS_2 をヘテロ構造化することで、 MoS_2 からの発光を自在に制御できることも示唆しており、多様なフォトリックデバイスへの応用展開を期待させるものである。

2.2. VO_2 /グラファイトヘテロ構造における低電圧相転移スイッチングの実現

VO_2 は室温近傍で巨大な抵抗変化を伴う絶縁体—金属相転移を示すことから低消費電力スイッチングデバイスへの応用が期待されている。しかし、 VO_2 スwitchングデバイスにおいて低電圧動作を実現するためには、電極間距離をナノメートルスケールまで縮小させる必要があり、実用化へのボトルネックとなっていた。本研究では、二次元材料研究で確立されたフレーク状結晶の転写技術を用いて VO_2 に応用することで、膜厚 100 nm 以下の VO_2 をグラファイトと電極で挟み込んだ構造を作製することに成功した(Fig. 1c)。そして、実際に VO_2 /グラファイトヘテロ構造において、室温で 1.2 V 以下の低電圧相転移スイッチングが可能であることを明らかにした。この低電圧駆動 VO_2 /グラファイトヘテロ構造は、ニューロモロフィックコンピューティングなどの新原理コンピューティングへの応用が期待できる。

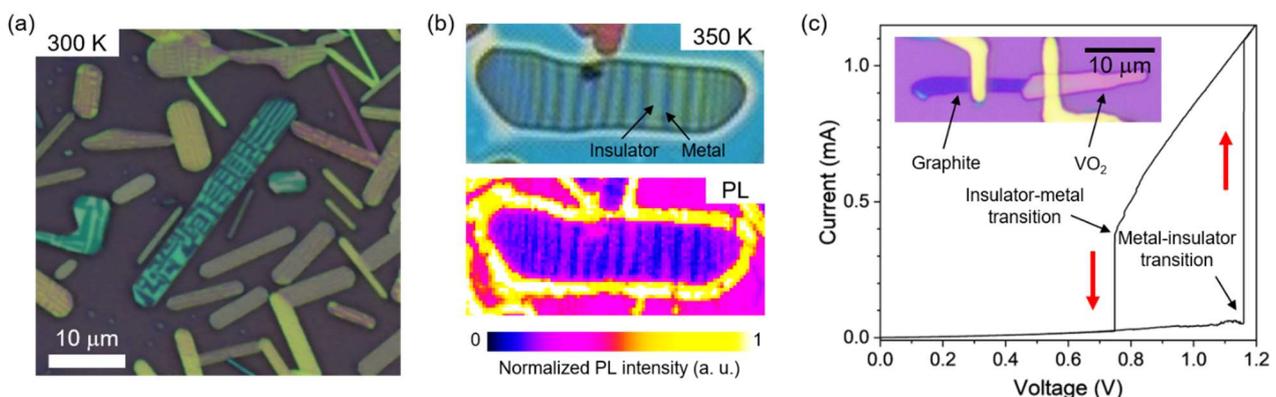


Figure 1. (a) Optical image of phase-coexisting VO_2 . (b) An optical image and a PL intensity map of VO_2/MoS_2 heterostructure at 350 K (Appl. Phys. Lett., 350 K). (c) Current-voltage curve of a VO_2 /graphite heterostructure at 300 K. The inset is the optical image of the device.

3. 研究成果

3.1. 論文、解説記事等

- [1] C.-Y. Lin, B. C. Chen, Y.-C. Liu, S. -F. Kuo, H. -C. Tsai, Y. -M. Chang, C.-Y. Kuo, C. -F. Chang, J. -H. Chen, Y. -H. Chu, M. Yamamoto, C. -H. Shen, Y. -L. Chueh, P. -W. Chiu, Y. -C. Chen, J. -C. Yang, Y. -F. Lin, Integration of freestanding hafnium zirconium oxide membranes into two-dimensional transistors as a high- κ ferroelectric dielectric, *Nat. Electron.*, **8**, 560-570 (2025).
- [2] K. Nakayama, S. Toida, T. Endo, M. Inada, S. Sato, H. Tani, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Yamamoto, Spatial and reconfigurable control of photoluminescence from single-layer MoS₂ using a strained VO₂-based Fabry-Pérot cavity, *Appl. Phys. Lett.*, **125**, 223106 (2024).
- [3] 山本 真人, 「2次元半導体応用のための界面・表面制御」, 半導体・磁性体・電池の固/子界面制御と接合・積層技術(S&T出版), 第5章第3節 (2024).
- [4] M.-Y. Tsai, C.-T. Huang, C.-Y. Lin, M.-P. Lee, F.-S. Yang, M. Li, Y.-M. Chang, K. Watanabe, T. Taniguchi, C.-H. Ho, W.-W. Wu, M. Yamamoto, J.-L. Wu, P.-W. Chiu, Y.-F. Lin, A reconfigurable transistor and memory based on a two-dimensional heterostructure and photoinduced trapping, *Nat. Electron.*, **6**, 755-764 (2023).
- [5] C.-Y. Lin, M.-P. Lee, Y.-M. Chang, Y.-T. Tseng, F.-S. Yang, M. Li, J.-Y. Chen, C.-F. Chen, M.-Y. Tsai, Y.-C. Lin, K. Ueno, M. Yamamoto, S.-T. Lo, C.-H. Lien, P.-W. Chiu, K. Tsukagoshi, W.-W. Wu, Y.-F. Lin, Diffused beam energy to dope van der Waals electronics and boost their contact barrier lowering, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 36, 41156-41164 (2022).

3.2. 招待講演

- [1] 山本 真人, 二次元材料/相転移材料ファンデルワールスヘテロ構造のデバイス応用, 化学工学会 CVD 反応分科会 第39回シンポジウム「二次元材料の合成と応用の最新動向と展望」2023年11月
- [2] M. Yamamoto, Oxidation-Engineering of 2D Semiconductors, The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, 2023年9月

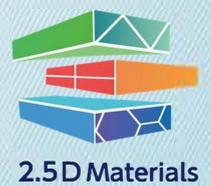
3.3. 受賞、プレス発表、昇進など

- [1] 第21回JSAPフォト&イラストコンテスト優秀賞 2023年3月
- [2] 電気学会電子材料研究会技術委員会奨励賞 2024年1月
- [3] 新聞報道、次世代センサー担う「お菓子」(読売新聞) 2023年5月

3.4. その他（アウトリーチ、特許など）

該当なし

6. プレスリリース



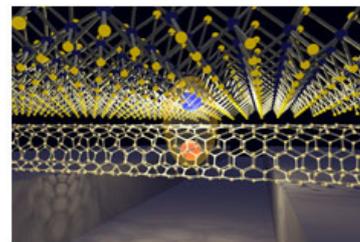
6. プレスリリース

-2024-

2024.4.10 理化学研究所、筑波大学、東京大学、慶應義塾大学
A01岡田 A05長汐 公募A01小澤 公募A04藤井 研究成果 プレスリリース
「異次元ナノ半導体界面に潜む量子光源の発見
—室温量子技術への応用に期待—」

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2024-04-12-001>

(*Nature Communications*, **15**, 2871 (2024))

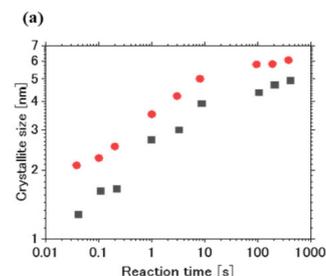


2024.6.4 東北大学、筑波大学
A03西堀 研究成果 プレスリリース

「従来困難であった5nm以下の金属酸化物微粒子を精密に合成できる
技術を開発—放射光分析で構造歪が誘起する特異な電子状態を発見—」

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2024/06/press20240604-03-ceo2.html>

(*Journal of the American Chemical Society*, **146**, 16324 (2024))

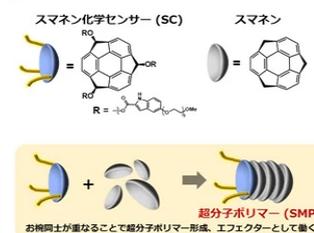


2024.6.19 東京工業大学、大阪大学
A01櫻井 研究成果 プレスリリース

「超分子ポリマー形成に起因する化学センサーの感度増幅
—ダイナミックアロステリックエフェクターの概念を提唱—」

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2024/20240619_1

(*Scientific Reports*, **14**, 12534 (2024))



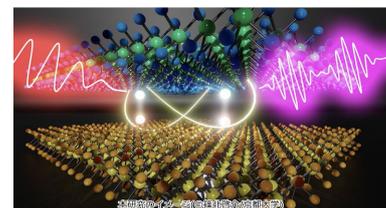
2024.7.2 京都大学

A02松田 A01渡邊 研究成果 プレスリリース

「二次元半導体を重ねたモアレ縞からの量子コヒーレンス測定に成功
：次世代ナノ半導体による量子技術への第一歩」

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2024-07-02>

(*Nature Communications*, **15**, 4905 (2024))



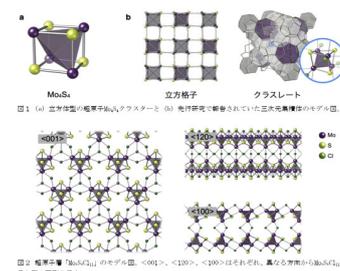
2024.7.26 東京都立大学、名古屋大学、産業技術総合研究所、大阪大学、
名古屋市立大学、筑波大学、金沢大学、科学技術振興機構

A02宮田 公募A03高橋 A03末永 A01岡田 公募1期A03Lin 研究成果
プレスリリース

「立方体型の超原子が結合した2次元シートを創出
—高効率な水素発生触媒の開発に期待—」

<https://www.tmu.ac.jp/news/topics/36815.html>

(*Advanced Materials*, **36**, 2404249 (2024))



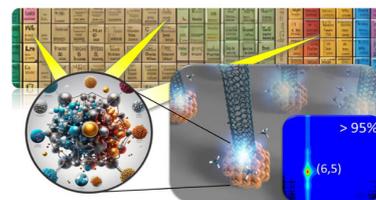
2024.9.3 東北大学、理化学研究所、東京大学

公募A01加藤俊顕 研究成果 プレスリリース

「カーボンナノチューブの原子配列を制御して合成する手法を開発
—革新的半導体デバイス創出に期待—」

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2024/09/press20240903-02-carbon.html>

(*ACS Nano*, **18**, 23979 (2024))



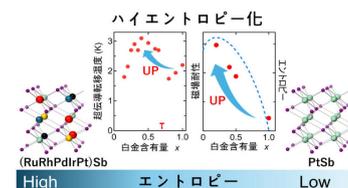
2024.9.20 名古屋大学、広島大学

公募A01平井 研究成果 プレスリリース

「ハイエントロピー化合物における超伝導特性向上
—磁場に強く転移温度の高い超伝導体開発の新たな戦略—

<https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2024/09/post-725.html>

(*Chemistry of Materials*, **36**, 9547 (2024))



-2025-

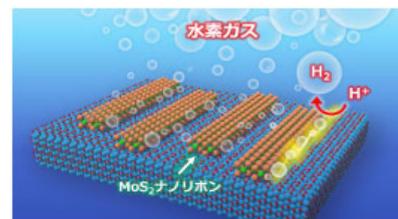
2025.1.7 九州大学、名古屋大学、東北大学、筑波大学、大阪大学、
産業技術総合研究所、京都大学、熊本大学、科学技術振興機構

A01吾郷 公募1期A03Lin A03松田 A03末永 A01岡田 公募A01加藤俊顕
公募A03高橋 研究成果 プレスリリース

「水素発生と半導体応用を兼ね備えた二次元半導体ナノリボンを実現
MoS₂ナノリボンで高い触媒活性とトランジスタ動作を実証」

<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/1197>

(*Science Advances*, **11**, eadr8046 (2025))



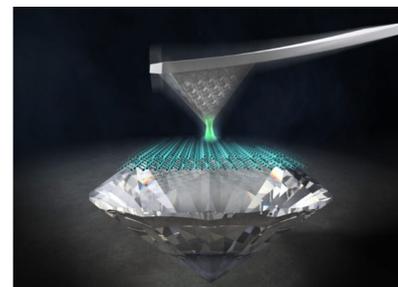
2025.1.8 東京大学、産業技術総合研究所

公募A03杉本 研究報告 プレスリリース

「ダイヤモンド表面の個々の原子の可視化に成功
—ダイヤモンドデバイスを原子レベルで分析する道が開ける—

<https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/news2.html?pid=25769>

(*Nano Letters*, **25**, 1101 (2025))



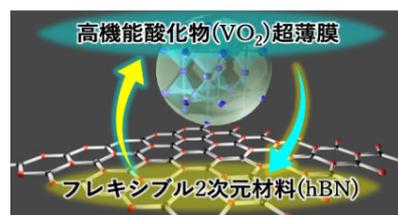
2025.2.19 大阪大学

A01渡邊 公募1期A02田中 研究成果 プレスリリース

「二次元材料上で二酸化バナジウムの超薄膜化に成功！
—安価で柔軟な次世代エレクトロニクス用材料の合成技術—

<https://doi.org/10.35848/1882-0786/adaf09>

(*Applied Physics Express*, **18**, 025502 (2025))



2025.3.24 東北大学、産業技術総合研究所、大阪大学、
防衛大学校、科学技術振興機構

A03末永 研究成果 プレスリリース

「有機材料中の水素と重水素の分布を
単一分子スケールで識別することに成功
新たな電子線分光技術により、分子や結合位置の特定に効力」

<https://doi.org/10.1038/s41565-025-01893-5>

(*Nature Nanotechnology*, **20**, 740 (2025))

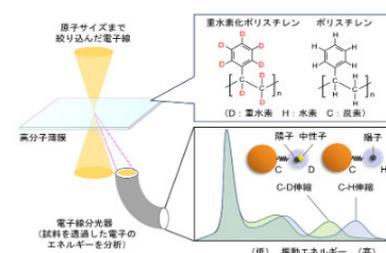


図1. 本研究で開発した手法の概要

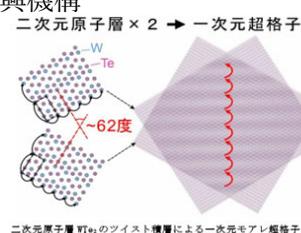
2025.3.28 東京大学、北陸先端科学技術大学院大学、大阪大学、科学技術振興機構

A02町田 A04越野 A04高村 A01渡邊 A04笹川 研究成果 プレスリリース

「二次元格子をひねって重ねると一次元超格子が出現
—二次元原子層物質が一次元物性研究の新しいプラットフォームに—

<https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/4726/>

(*ACS Nano*, **19**, 13007 (2025))



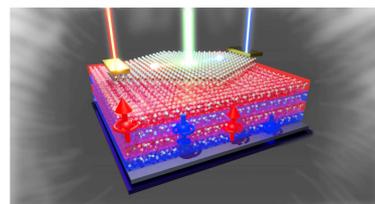
2025.6.2 京都大学

A03松田 A01渡邊 研究成果 プレスリリース

「二次元半導体へテロ界面における磁気バルク光起電力効果の実証
—量子力学的な効果を利用した太陽電池デバイスへの新たな設計指針—

<https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/topics/2025/06/02/950/>

(*Nature Communications*, **16**, 4827 (2025))



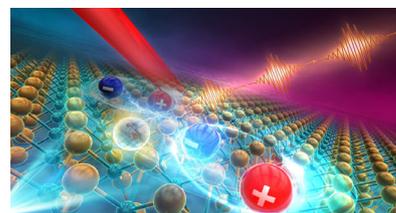
2025.6.12 京都大学

A03松田 A01渡邊 研究成果 プレスリリース

「次世代半導体中の欠陥からの磁場による発光の増強と単一光子発生
—量子情報通信のためのデバイスの高性能化への新たなアプローチ—

<https://www.iae.kyoto-u.ac.jp/topics/2025/06/12/444/>

(*Science Advances*, **11**, eadr5562 (2025))

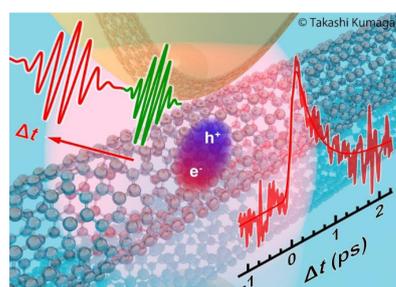
2025.6.19 分子科学研究所、東京大学、理化学研究所、
総合研究大学院大学、科学技術振興機構

公募A03熊谷 研究成果 プレスリリース

「カーボンナノチューブと光の局所的な相互作用を可視化
—精密ナノ赤外顕微分光で見る励起子の超高速ダイナミクス—

<https://www.ims.ac.jp/news/2025/06/0619.html>

(*Science Advances*, **11**, eadv9584 (2025))



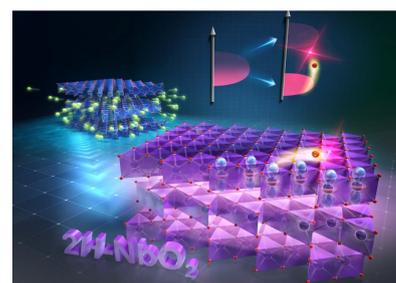
2025.8.1 東京科学大学、東北大学

公募A01相馬 研究成果 プレスリリース

「二次元ファンデルワールス酸化物の合成に成功
—強相関酸化物と二次元物質の両方の特徴を併せ持つ新材料—

<https://www.isct.ac.jp/ja/news/xe59totnsa2v>

(*ACS Nano*, **19**, 26592 (2025))



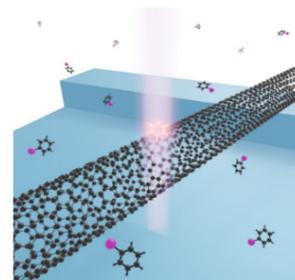
2025.8.28 理化学研究所

公募A01小澤 研究成果 プレスリリース

「カーボンナノチューブ量子光源を狙い通りにつくる
—次世代量子通信技術の実用化に前進—

https://www.riken.jp/press/2025/20250828_1/index.html

(*Nano Letters*, **25**, 13103 (2025))



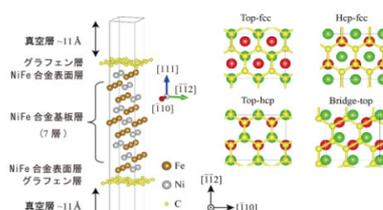
2025.9.18 神戸大学

公募A05小野 研究成果 プレスリリース

「デバイス界面の作り方で磁気特性が変わることを予測
—次世代スピントロニクスデバイスの性能向上に期待—

<https://www.kobe-u.ac.jp/ja/news/article/20250918-67095/>

(*Journal of Applied Physics*, **138**, 104305 (2025))

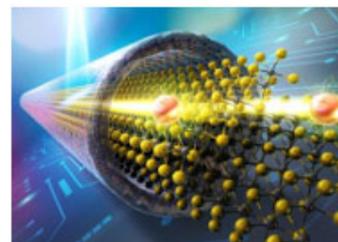


2025.9.24 東京大学、産業技術総合研究所、大阪大学、科学技術振興機構
A02宮田 A03末永 研究成果 プレスリリース

「高い光学異方性を備えた極細幅の無機ナノリボンを実現
—絶縁性のナノ空間を反応場とした精密合成—」

<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/achievement/release/20250924.html>

(*Nano Letters*, **25**, 14645 (2025))

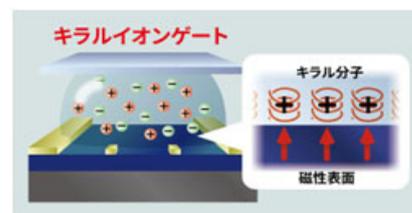


2025.10.10 東京大学、科学技術振興機構、名古屋大学
公募A04松岡 研究成果 プレスリリース

「キラリオンゲート技術を世界初実証
—分子対称性によるトポロジカル表面磁性の超省電力制御に成功—」

<https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/4897/>

(*Nano Letters*, **25**, 15297 (2025))

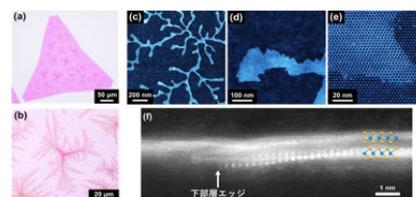


2025.12.12 岡山大学、名古屋工業大学、名古屋大学、金沢大学、慶応義塾大学
公募A02鈴木 公募A03高橋 公募A04藤井 研究成果 プレスリリース

「二次元半導体ナノネットワーク構造の合成法開発に成功
—次世代の水素発生触媒の応用に期待—」

<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000003706.000072793.html>

(*Small Structures*, **7**, e202500542 (2025))



-2026-

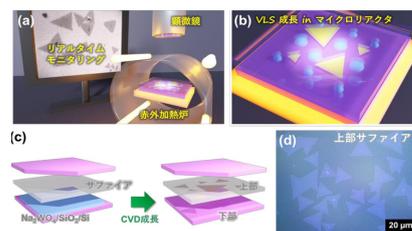
2026.1.7 岡山大学、慶応義塾大学

公募A02鈴木 公募A04藤井 研究成果 プレスリリース

「二次元半導体の成長過程のリアルタイム観測に成功
—次世代半導体材料の高品質化に期待—」

<https://www.elst.okayama-u.ac.jp/researchproject/7119/>

(*Advanced Science*, **13**, e16784 (2025))



2026.1.21 東京大学、物質・材料研究機構、

東京エレクトロンテクノロジーソリューションズ株式会社、

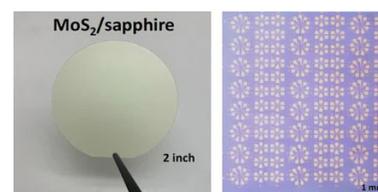
名古屋大学、筑波大学、科学技術振興機構

A05長汐 研究成果 プレスリリース

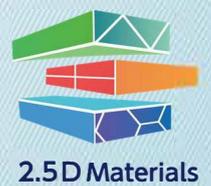
「次世代半導体MoS₂の革新的ウエハースケール成膜技術を開発
—結晶成長の自己整合および自己停止メカニズムにより高移動度を達成—」

<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2026-01-21-001>

(*Nature Communications*, **17**, 602 (2025))



7. ニュースレター



ニュースレター Vol. 59 (2026.3.5 発行)



名古屋2021年産学協働高度化研究(A)
**2.5次元物質科学:
社会変革に向けた物質科学のバリエーション**

NEWS LETTER

59

NEWS LETTER Vol. 59 海外インターンシップレポート5

海外インターンシップレポート5

レポート ケンブリッジ大学 (イギリス) 2026.1.13 ~ 1.24

本田 航大

名古屋大学 高橋研究室 (A03班)

「2.5次元物質科学」領域の支援を受けて、2026年1月13日から1月24日の11日間、ケンブリッジ大学のManish Chhawal先生の研究室にて、専攻金メダルコロンナイド (TMOC) ナノシートの特長と物性評価に関する研究活動を行っていただきました。

志望動機

私はこれまで非置型電気化学セル蓄電池 (SECCM) という、ナノスケールで局所的な電気化学計測が可能な技術の発展に取り組み、その技術を用いた二次元材料の物性評価を行ってきました。今回のインターンシップのきっかけは、昨年夏に開催されたUK-Japan Symposium on 2D Materialsにおいて、私の指導教員である高橋先生とManish先生が電気化学材料に関する共同研究について議論されたことにあります。TMOCナノシートの酸素発生反応 (OER) の構造依存性な触媒活性をSECCMで評価する研究を志望し、Manish先生から「是非、当面の機会から研究について学んでみてください」とご提案いただきました。私もSECCMによる評価というこれまでの研究に加え、多方面からの研



グローブボックス内での作業

研究室入口にて

興味点を学びたいという思いや、これまで海外での生活経験がなく短期間でも国際的な環境の中で研究を行い、海外の研究室の文化を体験したいと考え志望しました。

研究について

インターンシップ期間中は、HISのバルク材料からナノシートを製作し、それを酸化させることでTMOCナノシートを製作するプロセスに取り組まれました。また、製作した試料について、X線光電子分光法 (XPS) や原子顕微鏡観察などを用いて酸化状態や構造に関する評価を行いました。

これまで遷移金属コロンナイドを含む二次元材料の作製経験がほとんどない私にとって、バルク材料からナノシートができる過程や基板への転写など、どれも興味深いものでした。グローブボックス内での試料ハンドリングは手袋的に難しかったものの、検体のコツを教わりながら何とか行うことができました。また物性評価では、酸化条件を変えた試料について物性評価が段階的に変化していく様子を確認することができ、試料作製条件の重要性や測定結果の解釈について深く理解することができました。今回製作したサンプルは、今後、本研究室のSECCMを用いて構造と触媒活性の関連性を評価する予定です。

滞在先の人材交流

研究室では、主にTMOCの研究を進めているPhD学生の方と共同研究を進めました。英語で議論しながら研究を進めていくことは初めての経験でしたが、たどたどしさがありつつも、初めは確認しながら研究を進めることができました。また、研究室には多くの博士研究員の方が在籍しており、実験手法や設備の取り扱いなどで困った際は初音も助けられました。このように研究室では、様々なテーマに取り組むインターン生とチームレスに協力しながら研究を進めている点が印象的でした。さらに、研究に関する対話を非常に重要視しており、学生やManish先生、博士研究員の方が積極的に議論をしながら研究の方向性を決ましていく様子を観望に驚くことができました。このような研究室の環境がコミュニケーションが、研究の質を高めるのに重要な要素であると実感することができました。

留学中の生活

ケンブリッジは街の至るところに大学施設やカレッジが点在し、街と大学が密接に結びついているため、学生が生活しやすいという印象を受けました。中心部には生活に必要な店が揃っており、少し歩くとも自然と多く、研究に専念する上でも非常に適した環境だと感じました。

研究空想終日には、一緒に実験を行ってくれたPhD学生の方に、いくつかのカレッジを案内してもらいました。歴史を感じるチャペルや巨大な食堂など、カレッジごとに異なる個性豊かなカレッジが、初めて女性の入寮が許されたカレッジで、異文化には女性の卒業生の指導員が多めでした。そこで食べたフィッシュアンドチップスはとてもおいしかったです。また、有名な雰囲気であったことが印象に残っています。さらにManish先生とのチャペル・カレッジでのデイナーでは、研究の勉強や準備など、さらさらと雑談が楽しかったです。ケンブリッジはロンドンへのアクセスも良く、簡単に



ピットバベン



スタッカトスタジアム

非常に短い期間の中ではありましたが、TMOCナノシート作製から物性評価までの一連の流れを経験できたことは、これまで主にサンプルの電気化学反応評価を行ってきた私にとっては非常に新鮮で、大変勉強になりました。今後作製・評価したサンプルをSECCMによる局所的な電気化学計測によりさらに評価すると、今後も協力しながら共同研究を進めていきます。今回このような貴重な機会を与えてくださった高橋先生とManish先生、そして大学と環境をはじめとする関係者の皆様には御礼申し上げます。



セント・ニコラス教会



セント・ニコラス教会



最終日のカレッジツアー

Reporter

本田 航大 名古屋大学大学院 工学研究科電子工学専攻 博士後期課程1年

編集ホームページ <https://25d-materials.jp>
(ニュースレター公開日: 2026年3月5日)

ニュースレターはこちらからご覧いただけます <https://25d-materials.jp/outreach/newsletter/>



ニュースレター特別号 第8話 (抜粋) [2025.3.10 公開]

毎度 すまませんけど
なにかですか?
カルコゲナイド!
遷移金属
カルコゲナイド!

色々な遷移金属がある中でも、カルコゲナイドは以外のもので、第16族元素を含む化合物

13	14	15	16	17	18
5	6	7	8	9	10
13	14	15	16	17	18
30	31	32	33	34	35
48	49	50	51	52	53
80	81	82	83	84	85

2モリブデンモリブデン:MoSe2
セレン化タンタム:WSe2

それ、量子コンピュータに
応用するんですか?
それらしいわね
それらしいわね
3!

第8話 群雄割拠な量子ビット

あおおお...

2

実はこの他に、ナノワイヤで指定した位置に小さな作業室を構築する

①光子をめちゃ短い時間間隔で送り込む

②対物レンズを通して光子をチップに当てる

③エキシトンができる

④出て来た光子の時間間隔が入った時より延びているのはパルスビンのせい

⑤この光子の時間間隔をもとにコヒーレンス時間を決める

ここにチップがある

20

MoSe2
WSe2
h-BN

グラフェンや遷移金属を配置して、カルコゲナイドは

少し解れて、ずらすと

電子顕微鏡で見るとこんな感じ

光を当てると、エキシトンが現れるんだけど、エキシトンはそこに閉じ込められるんだ

モリブデンとセレンが結合してグラフェンみたくて構造を持っているんだ

モリブデンとセレンが結合してグラフェンみたくて構造を持っているんだ

電子
低エネルギー

光

モリブデンの中には、規則的に出来ているから、出来たエキシトンはそこに閉じ込められるんだ

なにしろ、モリブデンの守りから量子ビットもお行儀よく配置されたいから、さあ

ここで、量子ビットを量子コヒーレンスとして使おうというアイデアなんだ

14

連載マンガ「2.5次元研究室へようこそ」 https://25d-materials.jp/outreach/newsletter_manga/



ニュースレター特別号 第9話 (抜粋) [2025.6.23 公開]



連載マンガ「2.5次元研究室へようこそ」 https://25d-materials.jp/outreach/newsletter_manga/



ニュースレター特別号 英語版 第1話 (抜粋) [2024.4.3 公開]



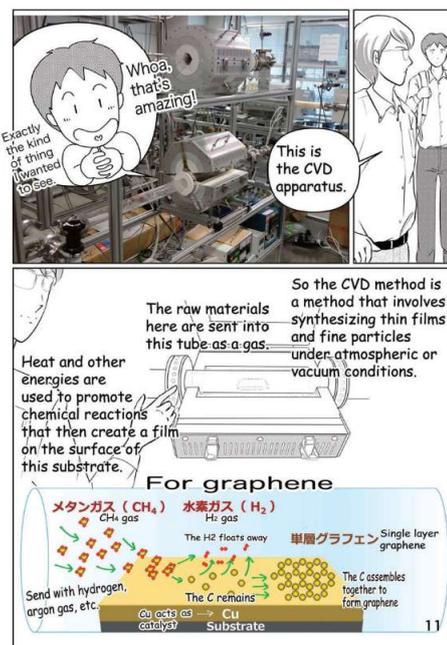
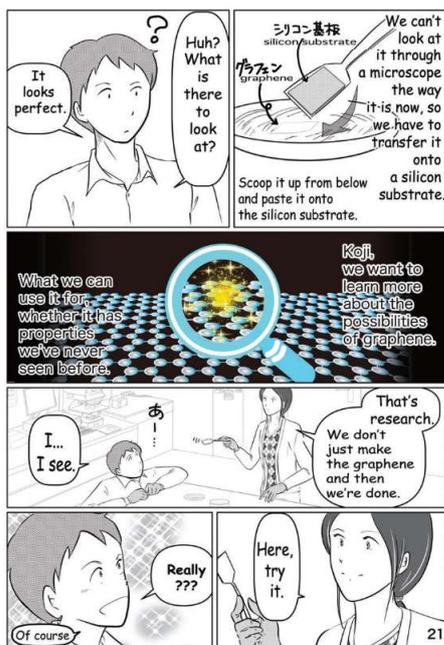
Chapter One: The Uninvited Senior Thesis Student



連載マンガ「2.5次元研究室へようこそ」 <https://25d-materials.jp/en/manga/>



ニュースレター特別号 英語版 第2話 (抜粋) [2024.5.13 公開]



連載マンガ「2.5次元研究室へようこそ」 <https://25d-materials.jp/en/manga/>



ニュースレター特別号 英語版 第3話 (抜粋) [2025.3.11 公開]

東京都 Do you remember at the end of last year, the Governor of Tokyo announced a policy for joint research with development companies to expand the use of renewable energy in Tokyo?

The technology that was introduced then was perovskite solar cells. These solar cells are made primarily of a chemical compound called perovskite.

But graphene, which conducts sunlight and electricity well and is very flexible, can also be used for this.

A lot of the attention right now is on electrodes. Generally, the extraction of electrons is done through metal or glass anodes.

Oh, and speaking of graphene. There's a research lab nearby that's right in the middle of this sort of development race.

Lightweight! Flexible! which is why there's now a race to develop more efficient and lightweight solar cells.

Huh, seems completely different from the solar panels we've seen that for

10

Chapter Three: The Unprecedented Nature of Terahertz-Waves

But normally we'd do a proper coating on the completed graphene, and melt the copper substrate with etchant.

We used a basic recipe this time, which is why you'd have to scoop it up with the silicon substrate on a spatula.

Could've told me that sooner

Here you go

And also... We'd scoop it up with these special forceps.

While you were fighting for your life out here, I coated the last one.

Hahaha. Hey, I'm sorry. This is the last one.

Whoa, this thing really does feel like an ultimate. But now I won't have to worry about the substrate moving around.

2

... would be truly wonderful for modern society.

This is my one focus here at graduate school.

Being able to conduct these inspections without having to stop electricity, disrupt logistics, or disassemble anything...

He seems reserved but he's actually really passionate about this

Wow!

We don't just make the graphene and then we're done

CNT Solution

Patterned polyimide film

Graphene sheet

There's more.

I just told you that nanocarbon material can move electrons and electron holes at high speeds, and absorbs a ton of light

But the key here is that it retains this property even in room temperature.

21

I guess that's true.

Gah!

Not Animate!

You'd think so. But with X-rays you're exposing yourself to unnecessary radiation.

The properties of terahertz-waves mean that they reflect off the metal of something like a weapon.

Uhhh, I don't have anything like that!

... which pose no harm to the human body, come in.

radio waves Terahertz waves Infrared rays

That's where terahertz-waves...

Areas where the terahertz-waves were reflected (White)

Other areas where the terahertz-waves penetrated (Black)

Paper clip inside envelope

Optimized series

Fluorescopic image

It'll show a paper clip inside of an envelope like this, for instance.

Whoa, so clear!

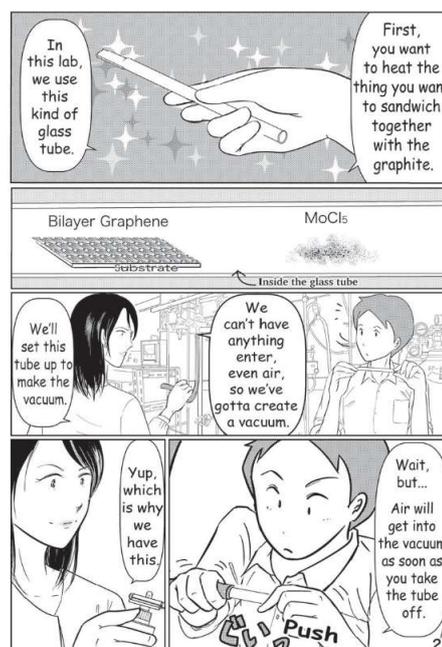
K. Li, et al. Advanced Photonics Research 2021, 2, 2000095

14

連載マンガ「2.5次元研究室へようこそ」 <https://25d-materials.jp/en/manga/>



ニュースレター特別号 英語版 第4話 (抜粋) [2025.3.11 公開]



連載マンガ「2.5次元研究室へようこそ」 <https://25d-materials.jp/en/manga/>



8. アウトリーチ活動



8. アウトリーチ活動

8-1 領域代表 吾郷による（公財）中山報恩会 令和6年度講演交流会での講演

民間の奨学団体である（公財）中山報恩会からの依頼で、現役奨学生と卒業奨学生との相互の研鑽を目的として開催された講演交流会において「ナノの世界の研究者生活」の題目で講演を行い、本領域の取り組みや成果について紹介した。

日時：2024年10月24日（木）18:30～

場所：ホテルオークラ福岡



中山報恩会ウェブサイト <https://nakayama-foundation.jp/>

8-2 A05 大野による高校生への支援協力

北海道の市立札幌開成中等教育学校の高校生より問合せがあり、カリキュラムの一環として実施されている研究プログラム「プレコモンズサイエンス」においてA05 大野が水滴発電についてアドバイスを行った。

また、日本科学協会が実施している「サイエンスメンタープログラム」において、徳島市立高等学校1年生のグループによる研究テーマ「水滴発電の実用性と応用性」の科学研究を専門研究者として指導・助言等の支援を行った。

公益財団法人 日本化学協会 <https://www.jss.or.jp/fukyu/mentor/>

8-3 領域代表 吾郷による高専生を対象とした講義

佐世保高専からの依頼により、大学院につながっていくトップ人材教育として高専専攻科1年生を対象とした講義を行い、本領域研究についても紹介した。

日時：2024年12月6日（金）14:40～（90分）

場所：佐世保工業高等専門学校

受講対象：佐世保高専専攻科1年生（対面）および

半導体教育実践校の全国26校の高専生（オンライン）

講義科目：機能材料論

8-4 領域代表 吾郷による「第206回 Q-AOS ブラウンバッグセミナー」での講演

九州大学 アジア・オセアニア研究教育機構 (Q-AOS) が異分野研究ネットワークや交流やきっかけの場として実施している「ブラウンバッグセミナー」にて「半導体の未来 - 原子の薄いシートが次世代半導体を担う」の題目にてオンライン講演を行った。半導体とはどういうものなのかという基礎的な話から、グラフェンを通じた最先端研究の紹介や、今後の新しい産業構築に繋げていく当領域研究の取り組みについて紹介した。

日時：2025年10月8日(木) 12:10~12:50

場所：オンライン (Zoom Webinar)

The image shows the registration page for the 206th Brown Bag Seminar. The title is "半導体の未来：原子の薄いシートが次世代半導体を担う" (Future of semiconductors: Atom-thick sheet for next-generation semiconductors). The speaker is 吾郷 浩樹 (Hiroki AGO), an associate professor at Kyushu University. The seminar is held online on October 8, 2025, from 12:10 to 12:50. The fee is 2,000 yen for the first time and 1,250 yen for repeat attendees. The page includes a QR code for registration and a brief biography of the speaker.

The image is a promotional poster for the seminar. It features a blue and green background with a circuit board and a glowing atom. The text includes the seminar title, the speaker's name (吾郷 浩樹 / Hiroki AGO), and his affiliation with the Faculty of Engineering Sciences and the Center for Semiconductor and Device Ecosystem (CSeDE) at Kyushu University. The poster also provides contact information and a QR code.

九州大学 アジア・オセアニア研究教育機構 (Q-AOS) <https://q-aos.kyushu-u.ac.jp/>

第206回 Q-AOS ブラウンバッグセミナー

https://q-aos.kyushu-u.ac.jp/events/events_view.php?page=1&r_search=&event_type_ids=%7C1147%7C&finished=&&Id=2160

9. 海外派遣報告



2.5D Materials

9. 海外派遣報告

* 学年表記は派遣時点

A01 吾郷研 江本 暁 さん (九州大学 総合理工学府 総合理工学専攻 材料理工学メジャーM2)

派遣期間：2024年7月28日～2024年10月5日

派遣先：ロスアラモス国立研究所 (アメリカ)

2.5次元物質科学領域の支援を受け、2024年7月28日から10月5日までの期間、ロスアラモス国立研究所の山口尚登先生のもとで、二次元層状物質(主にグラフェンと六方晶窒化ホウ素(hBN))を用いたガスバリア性評価と加速器用フォトカソード応用に関する研究を行いました。

インターンを希望したきっかけは、2023年7月に九州大学にて開催された2.5次元物質科学共催の特別講演会で山口先生と初めてお会いし、山口先生の研究内容および海外で活躍する研究者視点での研究に対する向き合い方についてお聞きしたことです。私が博士課程後の進路について考えていた時に、この講演を聞いて海外での研究活動にも挑戦してみたいという思いが膨らんできました。また実際に山口先生と密接に関わることで、海外で研究活動に向き合う思考やマインドを直接学びたいと考え、このインターンシップを志望しました。



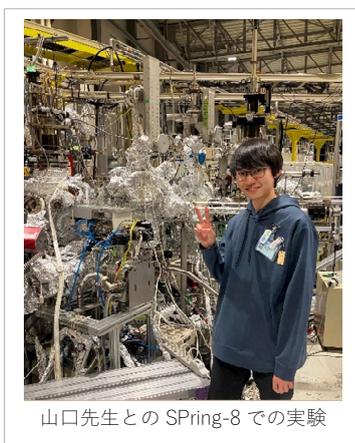
米国ロスアラモス国立研究所は、ニューメキシコ州のロスアラモスに位置し、広大な自然環境に囲まれています。標高約2200mの高地のため乾燥した気候で、8月でも気温は25°C前後と、日本の猛暑に比べ涼しく、快適な環境で研究することができました。

最初は、実験を行う前の安全講習がほとんどで、オンラインと対面で約50講座を受講しました。すべて終わるのに約1か月を要し、研究所のセキュリティ、倫理関係や実験関連の注意事項について学びました。英語での講習に難しさを感じつつも、非常にフレンドリーな環境のおかげで何とかついていくことができました。

研究面では、研究計画を山口先生とすり合わせながら進めることで効率的に実験に取り組むことができました。実際に山口先生と研究を進めていく中で、研究内容についてはもちろんのこと、研究を効率よく進めるための時間管理やプレゼンテーション能力についてもご指導いただき、これからの研究活動への向き合い方について見直すきっかけをいただきました。

具体的には、二次元材料を保護膜として用いたガスバリア性評価と加速器用フォトカソード応用についての研究をしました。残り1か月の滞在期間に、今後使用する実験装置のトレーニングに加えて、材料特性評価用のXPS装置の組み立てをメインで行いました。XPS装置は、約 10^{-8} Pa以上の超高真空環境を用意する必要があるため、X線源取り付けやリークチェックは、かなり根気のいる作業でした。帰国後も、SPring-8等の放射光施設で山口先生のグループと実験やミーティングなどを行っており、研究に対する理解を深めることができています。

今回の滞在中では、今後引き続き共同研究を継続していく上で必要な安全講習や実験セットアップをメインで行ってきました。来年度からは本格的に研究面で貢献できるように頑張っていきたいと思っています。



山口先生との SPring-8 での実験



山口先生とカフェで一息

滞在中は、山口先生のミーティングに同席したり、実験装置の組み立てをしたりする中で、多くの研究員の方々にお会いしたりしました。中でも同時期にテキサス A&M からサマーインターンでロスアラモスに来ていた Ph.D. の学生には、研究に関する話し合いに加えて、買い物やドライブなどにも連れて行っていただきました。滞在中には数多くのワークショップなども開催され、研究面でも充実した日々を送ることができました。



ロスアラモスの広大な自然

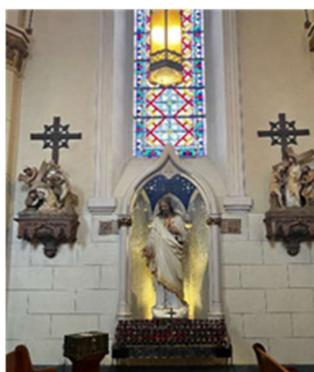


ロスアラモスの町

滞在中始めて1~2週間は、生活リズム、とりわけ睡眠時間のコントロールに苦労しました。日本との時差は-15時間。毎日数十分のウォーキングとテニスをして無理やり眠気を誘い、2週間後くらいにはアメリカでの生活リズムに順応していきました。来年度も滞在予定なので、ロスアラモスでの生活環境を学べたのは大きな学びの1つです。

食文化も大きく異なっていましたが、幸いロスアラモス内にある大型スーパーでアジアンフードを売っていたので、お米やインスタント麺を買って食べていました。

ロスアラモスは研究所関係の方が多く住んでいるため比較的治安が良く、多くの自然に囲まれていることもあり研究をするには最適な環境でした。また、街中には無料バスも走っており、買い物やカフェに気軽に出かけることのできるため非常に住みやすい環境でした。休日には、車で約1時間の場所にあるサンタフェやチマヨを訪れ、アートや歴史的な建物が落ち着いた雰囲気を楽しみました。また、ニューメキシコ名物のグリーンチリの入った料理（タコスやブリトー）も堪能しました。山口先生には多くの名所を案内していただき、ロスアラモスとニューメキシコ州の魅力を存分に味わうことができました。



ロレットチャペル内のイエス像
(サンタフェ観光にて)



サントワリオ・デ・チマヨ教会



メキシカン料理を食べる著者

米国の皆さんの働き方について特に印象に残っています。早朝（6時～7時くらい）には出勤し、早めに帰る生活をしている方が多く、平日の帰宅後、公園に行くと家族単位でスポーツを楽しんでおり、日本ではあまり見られない光景に少し衝撃を受けました。また、良い意味でも悪い意味でも時間にとらわれない自由な方が多いように感じました。

日本へ帰国する際、ロサンゼルスにも立ち寄りました。町並みはエンターテインメント性に溢れており、治安はいいとは言えない印象でしたが、ロスアラモスとは180°違った雰囲気を味わうことができました。

今回のインターンシップでは異なる視点を持つ海外の研究者と協力しながら計画を進めることで、研究面はもとより、柔軟な考え方や時間の使い方などについても学びました。この経験をもとに、今後も学んだことを意識しながら、国際的な場で活躍できる研究者を目指してさらに成長していきたいと思えます。今回、このような貴重な機会を与えていただいた山口先生、吾郷先生、そして大学や領域をはじめとする関係者の皆様に御礼申し上げます。

A03 高橋研 本田 航大 さん (名古屋大学 工学研究科電子工学専攻・博士後期課程1年)

派遣期間：2026年1月13日～2026年1月24日

派遣先：ケンブリッジ大学 (イギリス)

2.5次元物質科学領域の支援を受けて、2026年1月13日から1月24日の11日間、ケンブリッジ大学の Manish Chowalla 先生の研究室にて、遷移金属オキシカルコゲナイド (TMOC) ナノシートの作製とその物性評価に関する研究活動を行わせていただきました。

私はこれまで、走査型電気化学セル顕微鏡 (SECCM) という、ナノスケールで局所的な電気化学計測が可能な技術の開発に取り組み、その技術を用いた二次元材料の触媒活性評価を行ってきました。今回のインターンシップのきっかけは、昨年度に開催された UK-Japan Symposium on 2D Materials において、私の指導教官である高橋先生と Manish 先生が電極触媒材料に関する共同研究について議論されたことにあります。TMOC ナノシートの酸素発生反応 (OER) の構造依存的な触媒活性を SECCM で評価する研究を進めるにあたり、高橋先生から「合成など異なる視点からの研究について学んでください」と提案いただきました。私自身も SECCM による評価というこれまでの研究に加え、多方面からの研究視点を学びたいという思いや、これまで海外での生活経験がなく短期間でも国際的な環境の中で研究を行い、海外の研究室の文化を体験したいと考え志望しました。



研究室建物入口にて



グローブボックス内での作業

インターンシップ期間中は、 HfS_2 のバルク材料からナノシートを作製し、それを酸化させることで TMOC ナノシートを作製するプロセスに取り組みました。また、作製した試料について、X線光電子分光法 (XPS) や原子間力顕微鏡などを用いて酸化状態や構造に関する評価を行いました。

これまで遷移金属ダイカルコゲナイドを含む二次元材料の作製経験がほとんどない私にとって、バルク材料からナノシートができる過程や基板への転写など、どれも興味深いものでした。グローブボックス内での試料ハンドリングは手技的に難しかったものの、操作のコツを教わりながら何とか行うことができました。また物性評価では、酸化条件を変更した試料について物質状態が経時的に変化していく様子を確認することができ、試料作製条件の重要性や測定結果の解釈について深く理解することができました。今後、本研究室の SECCM を用いて構造と触媒活性の関連性を評価し、さらに研究を進めていく予定です。

研究室では、主に TMOC の研究を進めている PhD 学生の方と共に研究を進めました。英語で議論しながら研究を進めていくことは初めての経験でしたが、たどたどしさがあっても、何度も確認しながら研究を進めることができました。また、研究室には多くの博士研究員の方が在籍しており、実験手法や装置の取り扱いなどで困った際は何度も助けていただきました。このように研究室では、異なるテーマに取り組むメンバー同士でもシームレスに協力しながら研究を進めている点が印象的でした。さらに、研究に関する対話を非常に重要視しており、学生や Manish 先生、博士研究員の方が密接に議論をしながら研究の方向性を決定していく様子を間近に見ることができました。このような研究室の雰囲気やコミュニケーションが、研究の質を高めるのに重要な要素であると実感することができました。



ケンブリッジのマーケット



ガートン・カレッジの食堂



フィッシュアンドチップス

ケンブリッジは街の至るところに大学施設やカレッジが点在し、街と大学が密接に結びついているため、学生が生活しやすい街という印象を受けました。中心街には生活に必要な店が揃っており、少し歩くと公園や自然も多く、研究に集中する上でも非常に適した環境だと感じました。研究室最終日には、一緒に実験を行ってくれた PhD 学生の方に、いくつかのカレッジを案内してもらいました。各カレッジ内には、チャペルや非常に大きな食堂など、それぞれのカレッジごとに特色のある建物や雰囲気がありました。その学生の所属するガートン・カレッジは、初めて女性の入寮が許されたカレッジで、食堂内には女性の卒業生の肖像画が多く飾られていました。そこで食べたフィッシュアンドチップスはとてもおいしかったです。また、有名なキングス・カレッジのチャペルは非常に美しく、荘厳な雰囲気であったことが印象に残っています。さらに、Manish 先生とのチャーチルカレッジでのディナーでは、研究の内容や進め方など、ざっくばらんに様々なこととお話しできたことは非常に良い経験となりました。



キングス・カレッジ



キングス・カレッジのチャペル



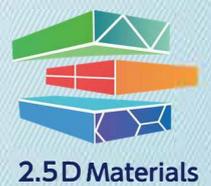
チャーチルカレッジにて
右から筆者、主に研究と一緒に進めてくれた学生、
Manish 先生、TMOC に関して研究をしている学生

ケンブリッジはロンドンへのアクセスも良く（電車で1時間程度）、休日にはロンドンにてビッグベンを見たり、プレミアリーグの試合を観戦したりと、短期間ながらイギリスでの滞在を楽しむことができました。



非常に短い時間の中ではありましたが、TMOC ナノシート作製から物性評価までの一連の流れを経験できたことは、これまで主にサンプルの電気化学反応評価を行ってきた私にとっては非常に新鮮で、大変勉強になりました。今後作製・評価したサンプルを SECCM による局所的な電気化学計測によりさらに評価するなど、今後も協力しながら共同研究を進めていきます。今回このような貴重な機会を与えてくださった高橋先生と Manish 先生、そして大学や領域をはじめとする関係者の皆様に御礼申し上げます。

10. 共同利用拠点

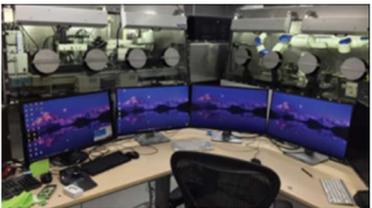
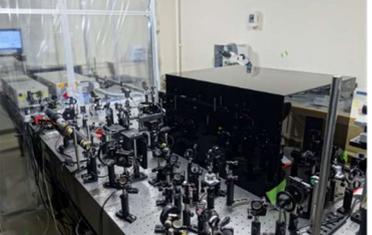
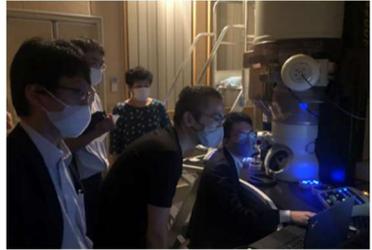


10. 共同利用拠点

10-1 共同利用拠点一覧

「2.5次元物質科学」領域では、領域研究を一体的に推進するため、領域内の研究者および学生が無償で利用できる共同利用拠点を全国6カ所に設置している。
各拠点における装置や運用方法については、以下の表の通り。

「2.5次元物質科学」領域 共同利用拠点一覧

拠点	装置	運用方法	
合成拠点 九州大学 オープンイノベーション棟 吾郷研究室	CVD 合成装置、およびその関連装置	サンプル提供を中心とする (希望される方には一緒に合成を行うことも可能)	
	2.5次元物質の基本材料となるグラフェン(単層・二層)、六方晶窒化ホウ素(単層・多層)、遷移金属ダイカルコゲナイド(単層 MoS_2 , WS_2) のCVD合成が可能		
集積拠点 東京大学 生産技術研究所 町田研究室 東京大学 マテリアル工学専攻 長汐研究室	二次元物質積層システム	研究室に来てもらい、研究員の協力の下で2.5次元物質を作製	
	剥離した各種二次元材料を大気中または不活性雰囲気下でファンデルワールス積層して2.5次元物質を作製する深層学習による原子層探索も可能		
分析拠点(光) 京都大学 エネルギー理工学研究所 松田研究室	温度可変先端分光装置およびその関連装置	サンプルを預かって測定 (希望される方には一緒に測定を行うことも可能)	
	遷移金属ダイカルコゲナイド(単層 MoS_2 , WSe_2 など)などの低次元半導体とそれらの2.5次元物質、および有機・無機半導体材料の分光・時間分解分光など(分光法については相談可)		
分析拠点(構造) 北陸先端科学技術大学院大学 マテリアルサイエンス系 高村研究室	超高真空走査プローブ顕微鏡および透過電子顕微鏡	サンプルを預かって測定 (希望される方には一緒に測定を行うことも可能・学生や研究員の滞在も歓迎)	
	2.5次元物質の走査トンネル顕微鏡または原子間力顕微鏡による表面構造観察、および透過電子顕微鏡内での加熱や電流・電圧測定と微細構造同時観察など		
計算支援拠点 筑波大学 数理物質系 岡田研究室	並列計算サーバ	受託による計算 (ネットワークを介した自身による計算実行も可能)	
	2.5次元物質材料やその複合構造/物質の安定構造探索、ならびに電子状態計算支援		

10-2 共同利用拠点 利用状況

本領域では、4月と10月の半期ごとに、領域内共同利用拠点における利用状況調査を実施している。

本共同利用拠点は、2021年度の開設以来、累計375回に及ぶ着実な利用実績を重ねてきた。

2022年度の急増期を経て、現在は利用形態が「訪問実験」と「サンプル提供」の二軸に定着し、全体の約九割を占めるに至っている。特に、研究者や学生が直接来訪する「訪問実験」が過半を維持している点は、当拠点の設備環境が現場のニーズに合致している証左と言える。

近年の利用回数は微減傾向にあるものの、これは初期の試験的利用から、実利を重視した選別的利用への移行を経て、各研究活動に深く浸透した結果と捉えられる。半期ごとの推移においても、一定水準の稼働を維持し続け、研究基盤としての役割を十分に果たしてきた。

これまでの本拠点における活発な利用実績から培われたネットワークと技術的知見は、各研究室の貴重な財産となっており、これらが今後の自律的な共同研究を支える強固な礎となっており、得られた成果が次なる研究の深化に繋がることを期待したい。

■ 内容別利用回数／通年

(回)

利用方法	2021	2022	2023	2024	2025	累計
サンプル提供	11	38	33	27	29	138
依頼分析	0	13	0	0	5	18
訪問実験	31	62	48	33	17	191
利用相談	2	1	2	8	2	15
その他	1	1	5	4	2	13
利用回数 合計 (回)	45	115	88	72	55	375

* 年度集計：当年4/1～翌年3/31

* 領域期間：2021/9/10～2026/3/31 (2021/9/10～30は該当なし)

