2.5D Materials

2.5D MATERIALS
Grant-in-Aid for Transformative Reseach Areas (A)
SCIENCE OF 2.5 DIMENSIONAL MATERIALS
Paradigm Shift of Materials Science Toward Future Social Innovation
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

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

2023年度 活動報告

科研費
KAKENHI

2023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５回領域会議＠大阪　2023/7/2-3

3 - 2 - 2　第６回領域会議＠名古屋　2023/12/26-27

3 - 3　　公開シンポジウム／公募説明会

3 - 4　　若手交流会

3 - 5　　国際ワークショップ

3 - 5 - 1　Graphene Flagship

3 - 5 - 2　International Workshop on Sience of 2.5 Dimensional Materials

3 - 5 - 3　2023 Workshop on JUNCTIONS

3 - 5 - 4　JAIST International Symposium on Nano-Materials for Novel Devices 2023

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 - 1 0　書籍の出版

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　研究業績リスト
6 - 1　論文
6 - 2　基調講演、招待講演
6 - 3　受賞
6 - 4　書籍
6 - 5　解説（日本語のみ）
6 - 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. 12 〜 28
7 - 2　ニュースレター特別号

8　海外派遣報告
夏井 隆佑　（東京都立大学／A02 宮田研）
仲川 久礼亜（東京大学／A04 塩見研）

9　共同利用拠点
9 - 1　共同利用拠点一覧
9 - 2　共同利用拠点 利用状況

１．　はじめに

はじめに

2023 年度 領域報告書発行に際して

複数の二次元物質が作り出す自由度を 0.5 次元と象徴的に表現した「2.5 次元物質」に関する学理構築と将来の社会変革を目指す本領域は、2021 年 10 月から始まり、早いもので折り返し地点を過ぎ、残り 2 年となりました。この成果報告書は、領域の活動や研究成果を年度単位で総括し、社会に還元することを目的に作成しました。

本領域では「Boundary（境界領域）」をキーワードに、創造的な共同研究を進めています。当初は計画班の 20 名で始まった本領域も、2022 年度に第 1 期公募で 20 名が加わり、研究の幅が大きく広がるとともに、領域内共同研究がより一層活発になりました。そして、この 2 年半の間に多くの学術論文が領域メンバーの共著で発表され（3 名以上の領域メンバーが共同研究するケースが多いのもの本領域の特徴といえます）、今後も領域から論文などの成果が多く出ていくものと考えられます。

近頃のハイ・インパクトな論文は、非常に多くのレベルの高いデータを詰め込む傾向にあります。そのような状況において、本領域の存在は、共同研究によってお互いの研究分野を補完し、かつ研究内容を深めるのに素晴らしい場になっていると考えています。実際、私の研究室から2024年2月にテープを使った二次元/2.5次元物質の転写に関する論文を*Nature Electronics* 誌に発表しましたが、これも河野さん、末永さん、ユンチャンさんとの共同研究なくして実現できなかったもので領域の恩恵を大きく受けています（研究者間の垣根を減らして共同研究を活性化するため、本領域では「さん」付けキャンペーンでなるものをやっています）。

ところで、最近、*Nature* 誌に「Japanese research is no longer world class – here's why」という衝撃的（というか屈辱的な）記事が掲載され、いろいろなところで話題になりました。日本の科学技術を表す論文数の引用など、数々の指標が相対的に減っているのは確かですが、こういった状況においても、領域から優れた成果を発信し、日本の科学技術の向上と世界的なプレゼンス強化に努めていきたいと、メンバー全員考えています。最近は、国際会議で私や他のメンバーが領域を紹介する機会も多く、特に韓国や中国などでは「2.5D materials」というと、日本のグループ研究だね、と認知されつつあります。今後は、欧米にも活動を広げていく予定で、国際的なネットワークの強化や認知度向上にも取り組んでいきます。

一方、組織としては、2023 年度も、年に 2 回の領域会議をはじめ、共同利用拠点の活用、オンラインの領域セミナーと国際セミナーなど研究を促進するための数々の活動を行いました。2023 年度の新たな試みとして、公開シンポジウムや国際セミナーをオンラインで一般に開放するなど、領域外への貢献を念頭においた活動もしました。また、若手会やインターン

シップ支援、領域での若手優秀賞の授与など、次世代の育成も取り組んできました。それらと同時に、月に複数本発刊するニュースレターに加え、「２.５次元研究室へようこそ」と銘打った漫画をこれまで 5 話発行するなど、多面的、かつユニークな広報活動を行ってきたと自負しています。なお、これら広報活動は専門のスタッフを中心に行ってもらうことで、研究者が研究に専念する時間が確保できるように努めました。

この領域の活動には非常に多くの方が携わってくださっています。特に、領域アドバイザーの先生方、共同利用拠点や各種会議の開催などで領域を支えてくれている研究者の方、広報のスタッフ、領域事務局のスタッフの多大な支援なくして運営できません。また、領域外の多くの方にもご協力いただいています。

2024 年 4 月からは新たに第 2 期の公募班として、新進気鋭の研究者が加わります。より一層、研究を活発化することで、本領域から世界をリードする成果・コンセプトを生み出し、将来的な社会変革につながるよう尽力して参ります。皆様のご協力を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

2024 年 4 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 一覧

2.5D Materials

2．研究者等　一覧（2024年3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
宮田 耕充	東京都立大学	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 由起子	JAIST	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

■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 ｸﾞﾛｰﾊﾞﾙｲﾉﾍﾞｰｼｮﾝｾﾝﾀｰ	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	東京都立大学 理学研究科	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創発
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	東京大学 大学院工学系研究科	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	東京工業大学 科学技術創成研究院	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	東京工業大学 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

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 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 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 一朗	大阪大学 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 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 理工学研究科	ファンデルワースル積層構造のための新規バッファ層物質：硫化ガリウムの応用
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 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 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	国立研究開発法人 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 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機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

■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 幸一朗	東京大学　名誉教授
斎藤 晋	東京工業大学　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
中村 奈津子	領域セクレタリー

3.　活動内容

2.5D Materials

3．活動内容

3 - 1　総括班会議

2023 年 4 月 5 日	第 13 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2022 年 7 月 2 日	第 14 回領域ミーティング［総括班］（大阪大学）
2022 年 7 月 3 日	第 15 回領域ミーティング［総括班］（大阪大学）
2023 年 8 月 2 日	第 16 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2023 年 11 月 7 日	第 17 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2023 年 12 月 26 日	第 18 回領域ミーティング［総括班］（名古屋大学）
2023 年 12 月 27 日	第 19 回領域ミーティング［総括班］（名古屋大学）

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 5 回領域会議

第 4 回領域会議に引き続き、対面での議論を重視し、領域内より過去最大規模となる 115 名の参加者のもと、大阪大学にて開催した。PI が個々の研究の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。前回同様、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 9 名の学生に授与された。

日時：2023 年 7 月 2 日～3 日
場所：大阪大学 豊中キャンパス 基礎工学国際棟 1 階 シグマホール

<u>プログラム　2023 年 7 月 2 日（日）</u>

（総括班ミーティング）
13:00～13:05　開会挨拶（越野）
13:05～13:15　領域説明（吾郷）
13:15～14:35　A04 班 発表
15:05～16:45　A05 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
*総括班ミーティング開催 11:30～13:00

<u>プログラム　2023 年 7 月 3 日（月）</u>

9:00～10:20　A01 班① 発表
10:50～11:40　A01 班② 発表
昼食休憩（総括班ミーティング）*
12:50～14:20　A02 班 発表
15:00～16:40　A03 班 発表
16:40～17:00　講評（領域アドバイザー、学術調査官）
17:00～17:10　若手奨励賞表彰式
17:10～17:15　閉会挨拶（岡田）
*総括班ミーティング開催 11:40～12:50

第 5 回領域会議の様子

第 5 回領域会議での集合写真

若手奨励賞 受賞者［9 名］

福岡 諒　　　（東京工業大学、修士課程 2 年）

「vdW トポロジカル超伝導体候補物質 $NbTe_2$の単結晶育成と物性評価」

金田 賢彦　　　（東京都立大学、博士課程 2 年）

「ヤヌス遷移金属カルコゲナイドスクロールの作製と評価」

黒木 麻衣　　　（九州大学、修士課程 2 年）

「機能性テープを用いた多層 hBN と単層 MoS_2の 2.5 次元構造の作製と特性評価」

朝田 秀一　　　（京都大学、博士課程 1 年）

「MoS_2/$CrPS_4$ヘテロ界面における非線形光電流現象・磁性相関の解明」

赤塚 俊輔　　　（東京大学、修士課程 2 年）

「ヤヌス WSeS におけるバンド構造の直接観測」

欧 昊　　　（名古屋大学、博士課程 3 年）

「Continuous Deformation of Moiré Patterns under Uniaxial Heterostrain」

中島 隆一　　　（大阪大学、博士課程 1 年）

「表面偏析による積層構造制御を利用した二次元 p 型 FET の作製」

伊原 茜　　　（東京都立大学、修士課程 1 年）

「Synthesis of Janus transition metal dichalcogenide nanotubes」

伊藤 駿一郎　　　（名古屋大学、博士課程 2 年）

「導電性高分子におけるラメラ層間インターカレーションと熱輸送」

若手奨励賞受賞者の皆さんと表彰式の様子

３-２-２　第６回領域会議

領域内から 109 名が参加し、今回も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。最終年度を迎えた第１期公募班の成果発表については特に活発な議論が交わされ、２年の短い研究期間にも関わらず、多くの優れた成果が報告された。材料・解析手法・理論的アプローチ方法・応用デバイスに多様性があり、さらに次元を拡張した物質科学の探究へと今後の革新的な進展が期待される。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。

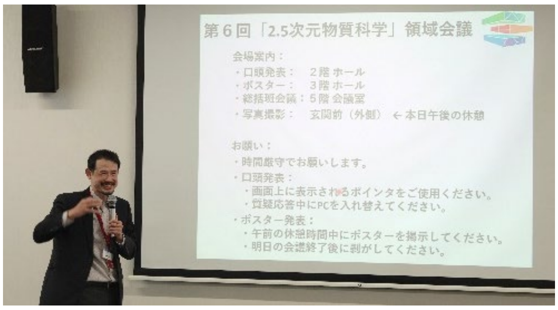
日時：2023 年 12 月 26 日～27 日
場所：名古屋大学 未来材料・システム研究所 研究所共同館Ⅱ　２階ホール

プログラム　2023 年 12 月 26 日（火）

9:30～ 9:35　開会挨拶（大野）
9:35～ 9:45　領域説明（吾郷）
9:45～11:25　A03 班 発表
11:55～13:20　A02 班 発表
昼食休憩（総括班ミーティング）*
14:30～15:30　A01 班① 発表
16:05～16:15　副島 智大 氏（ハーバード大学 博士研究員）講演
16:15～17:25　A01 班② 発表
17:25～18:00　ポスター発表①
18:00～18:45　ポスター発表②
19:00～20:30　懇親会
*総括班ミーティング開催 13:20～14:30

プログラム　2023 年 12 月 27 日（水）

（総括班ミーティング）
9:30～11:10　A05 班 発表
11:40～12:50　A04 班 発表
12:50～13:10　講評（領域アドバイザー、学術調査官）
13:10～13:25　若手奨励賞表彰式
13:25～13:30　閉会挨拶（松田）
*総括班ミーティング開催 9:00～9:30








第６回領域会議の様子

第６回領域会議での集合写真

若手奨励賞 受賞者［７名］

木下 圭　（東京大学、博士課程３年）

「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」

赤塚 俊輔　（東京大学、修士課程２年）

「原子層 WTe_2フレークの電子・スピン構造の直接観測」

來村 颯樹　（東京大学、修士課程１年）

「偏光顕微鏡法による強誘電 SnS 薄膜の面内 90° ドメイン観察」

窪田 信司　（大阪大学、博士課程１年）

「スマネン誘導体から成るかご型錯体を用いた層状構造の構築」

小野 孝浩　（東京大学、博士課程１年）

「非接触原子間力顕微鏡による 1T-TaS_2電荷密度波相の直接観測」

Ma Zongpeng　（九州大学、博士課程２年）

「Aligned growth and applications of TMD nanoribbons」

松﨑 勇斗　（中央大学、修士課程１年）

「全印刷かつ機械的に位置合わせ可能な CNT 膜型広帯域イメージセンサアレイ」

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・第2期公募説明会

本領域での取り組みを周知するため、また第2期公募研究について紹介するため、オンラインにて第 1 回公開シンポジウムおよび第 2 期公募説明会を開催した。前回の公募説明会を大きく上回る 185 名から参加登録があった。

本領域の国際アドバイザーでもある成均館大学の Young Hee Lee 教授の基調講演を皮切りに、各班および個人での際立った研究成果について一般に公開した。事後アンケートでは領域に対し概ね好評価をいただいた。また、公募研究の説明については、当日参加できなかった方のために後日ホームページにて動画を公開した。

日時：2023 年 8 月 2 日（水）10:00～16:10

場所：オンライン（Zoom）

<u>プログラム</u>

10:00～10:15　はじめに：領域の紹介（領域代表 吾郷 浩樹）

10:15～11:00　Invited Talk：‘van der Waals magnetic semiconductors’
Prof. Young Hee Lee (Sungkyunkwan University)

11:00～11:20　A01 班（物質創製班）の研究成果紹介
研究代表　岡田 晋（筑波大学）

11:20～11:40　A02 班（集積化班）の研究成果紹介
研究代表　宮田 耕充（東京都立大学）

13:00～13:20　A03 班（分析班）の研究成果紹介
研究代表　松田 一成（京都大学）

13:20～13:40　A04 班（物性開拓班）の研究成果紹介
研究代表　越野 幹人（大阪大学）

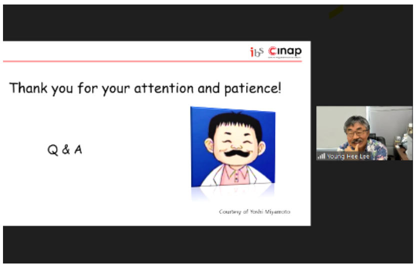
13:40～14:00　A05 班（機能創出班）の研究成果紹介
研究代表　上野 貢生（北海道大学）

14:15～15:30　2.5 次元物質科学の研究成果の紹介
A02 班　荒井 俊人（物質材料研究機構）
A04 班　高村 由起子（北陸先端科学技術大学院大学）
A04 班　蒲 江（東京工業大学）
公募 A01 班　加藤 幸一郎（九州大学）
公募 A03 班　杉本 宜昭（東京大学）

15:30～15:45　第 2 期 公募内容の説明（領域代表 吾郷 浩樹）

15:45～15:50　おわりに（領域副代表 岡田 晋）

15:50～16:10　第 2 期の公募に向けての質問や意見交換



公開シンポジウムの様子

［公募研究 募集情報ページ］

https://25d-materials.jp/info/publicly-offered-research-2/

第１回公開シンポジウムおよび第２期公募説明会参加者アンケート　集計結果

イベント開催日時：2023年8月2日（水）10:00～16:10

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）

周　知　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：42件

*は必須回答

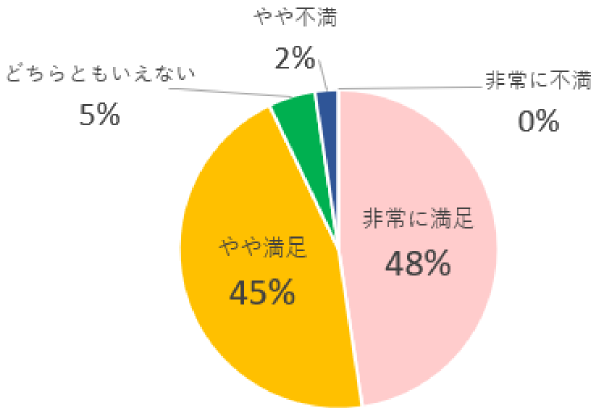
Q1. 参加したきっかけ　*

学会・団体・大学等のメーリングリスト等による案内メール	15
２.５次元物質科学領域のWEBサイト	14
領域会議等のイベントや領域メンバー宛のメール	9
知り合いの研究者からの情報	3
その他（領域事務局からの連絡）	1

Q2. 参加理由　*（複数回答可）

２.５次元物質科学に関する情報・知識を得るため	29
興味のある分野だったため	28
公募研究への応募を検討しているため	28
領域運営に関する情報・知識を得るため	6
領域関係者のため	6
職務上の必要性から	2

Q3.　イベントに対する満足度　*



Q4.　Q3の理由　*

■非常に満足 と答えた方　（一部抜粋）

・基調講演・各班の報告ともに非常にレベルが高く、公募説明会でも丁寧に質疑応答していただいたため

・第二期公募の狙いがよくわかったから

・共同研究がどのように進められているのか非常によくわかりました
・共同研究のための支援体制も整っており、大変興味深く感じました
・領域全体の目標および各班の活動の概要を知ることができました
・オンラインで開催していただいたため気軽に参加できました
・領域の情報をよく知ることができ、また研究の最前線にも触れることができた

■やや満足 と答えた方　（一部抜粋）
・質疑応答がもっと柔軟にあったら良かったと思いました
・別件があり全てに参加することができませんでしたが、オンライン開催のため貴重な情報を得ることができました
・2.5D 物質科学のコンセプトと将来ビジョンを理解することができました
・Informative presentations and discussion
・多分野にまたがる最新状況を聞くことができたため
・領域内の研究だけではなく、海外の有名研究者のトークを聞くことができたため

■どちらともいえない と答えた方
・やや時間が押していたので、online の場合はタイムスケジュールが正確になるよう考慮して欲しい
・長時間になっても構わないので，成果の話をもう少ししっかりお聞きしたかったです

■やや不満 と答えた方
・領域の中核をされている方々の考えを聞くことができたため

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）　（一部抜粋）
・しっかりした運営がなされている
・所内申請の時期が早いため、開催時期がもう少し早いと研究計画立案の下準備がしやすい
・大学の夏季休業期間中だったため参加しやすい日程でした
・施設のユーザータイムが終わってからだったので、時期はよかったです
・Zoom の URL はメールで送ってほしかった
・オンライン開催は有難いです

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）
（一部抜粋）
・研究協力サポート体制がしっかりしていて素晴らしいと思いました
・分野横断的な共同研究や共同利用施設が魅力的だと思います
・今回のような公開シンポジウムは領域外の研究者にとっても非常にありがたいです
・オンラインでのイベントを定期的に開催お願いします
・研究成果をまとめた冊子を発行していただいていますが、応募を検討している者にとって

良い参考になります
・これまでになかった材料の出現を期待しています
・採択金額が 500 万円か 300 万円か領域側で審査していただけると、応募側としては楽ではあります
・多彩な人材を取り込んだ多様で持続的なプロジェクトが続いて欲しいです
・新材料なので基礎研究に寄るのはしょうがないとは思いますが、従来のドット・チューブ・シート・バルクではない 2.5 次元物質だからこそできるクリティカルな応用・出口戦略が何なのかがあまり見えていない気がします　低次元材料に関するオールジャパンのメンバー構成なのは間違いないですので、今後の成果を楽しみにしております
・技術進歩のロードマップや製品展開についても、今後議論が活発化することを期待しています
・日本の国際的競争力がますます強くなることを願っております

回答者属性

教員	27
研究員	12
会社員	3

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、北海道大学において第2回若手交流会を開催した。全国から46名の若手研究者と学生が集まり、研究内容の紹介やポスター発表、夜には懇親会を行うことで、互いに交流を深めるきっかけとなった。日頃研究分野の異なる若手同士の交流により、領域内の新たな共同研究の芽吹きの一助となった。

日時：2023年9月25日
場所：北海道大学 理学部5号館低層棟 205/206教室

<u>プログラム</u>

1．開会挨拶（宮田）　13：00～
2．自己紹介・研究内容紹介（司会進行：坂野）13：05～
3．ポスターセッション①　　～16：00
4．上野研究室　ラボツアー　16：00～17：00頃
5．ポスターセッション②　　～17：45
6．閉会挨拶（宮田）　17：45～
7．（自由参加）懇親会　18：00～20：00

若手交流会の様子

3-5　国際ワークショップ

これまで米国、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、2023 年度も引き続き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　Graphene Flagship　［https://graphene-flagship.eu/］

Graphene Flagship はグラフェンおよび関連 2 次元材料の基礎的な材料合成、物理、デバイスに関連する欧州連合の科学研究イニシアチブで、共同研究推進を目的としたワークショップを開催している。日本での開催については、本領域の国際ワークショップとして全面的に協力し、共催として行った。本領域からは A02 の町田と A04 の越野が Programme chair としてワークショップを企画している。

6th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials
日時：2023 年 5 月 25 日～26 日
場所：東京大学 生産技術研究所 コンベンションホール
領域代表の吾郷が「2.5 次元物質科学」の現状について紹介、A02 宮田と A04 越野、A04 蒲、公募 A04 塩見、公募 A01 加藤俊顕、A01 岡田が講演を行った。

ワークショップのウェブサイトのトップページと当日の様子

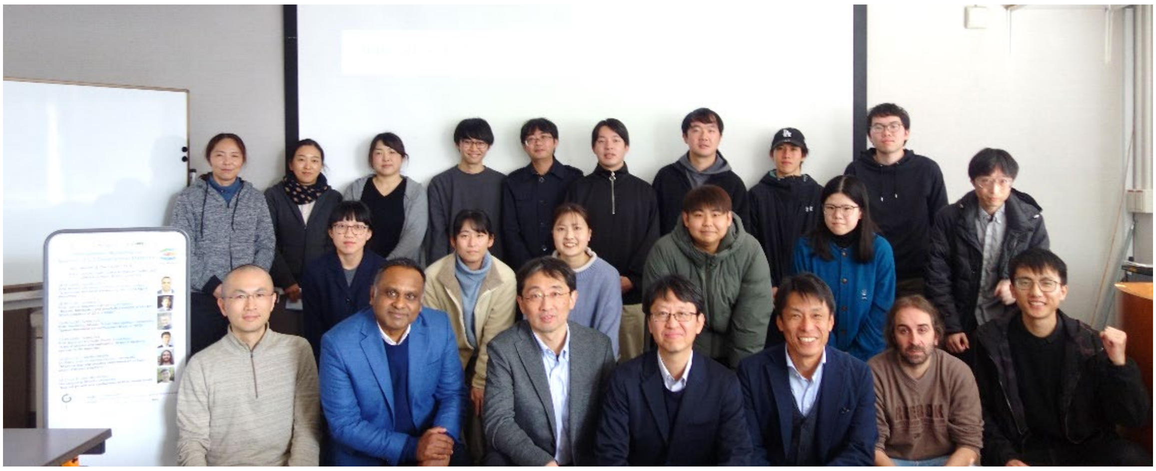
3-5-2　第１回 国際ワークショップ ［一般公開］

英国ケンブリッジ大学の Manish Chohowalla 教授の来日に合わせ、九州大学にて本領域単独では第 1 回目となる国際ワークショップを開催した。事前アナウンス期間が短い中での、事前申込不要・聴講自由の公開にての開催だったが、約 30 名が参加し講演を行った。領域代表の吾郷が座長を務め、Manish 教授による基調講演をはじめとして、A02 町田、宮田、A03 松田が講演を行った。

日時：2024 年 1 月 16 日（火）
場所：九州大学　グローバルイノベーションセンター 3 階研修室

プログラム

10:00～10:40　基調講演：Prof. Manish Chhowalla (University of Cambridge)
　“Ultra-clean interfaces between 2D MoS_2 and high k dielectrics”
10:40～11:00　招待講演：A02 町田 友樹（東京大学）
　“ Robotic fabrication and quantum transport of van der Waals junctions of 2D materials ”
11:00～11:20　招待講演：A02 宮田 耕充（東京都立大学）
　“Low-dimensional nanostructures of Janus TMDs”
11:40～12:00　招待講演：A03 松田 一成（京都大学）
　“Optical science and application of moiré excitonic systems in 2D materials”
12:00～12:15　講演：Dr. Pablo Solís-Fernández（九州大学）
　“Machine learning-assisted determination of twist angle of bilayer graphene”
12:15～12:30　講演：Ma Zongpeng（九州大学）
　“Aligned growth and applications of MoS_2 nanoribbons”
12:30～13:30　Lunch meeting［非公開］
13:30～13:45　ラボツアー［非公開］
14:00～15:00　国際共同研究に関する意見交換会［非公開］



第１回 国際ワークショップでの集合写真

International Workshop on Science of 2.5 Dimensional Materials

2.5D Materials

Date: January 16 (Tue) 10:00～12:30

Place: Lecture room, Global Innovation Center (GIC)
Chikushi campus, Kyushu University

10:00-10:40 Keynote talk
Prof. Manish Chhowalla (University of Cambridge)
"Ultra-clean interfaces between 2D MoS_2 and high k dielectrics"

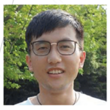
10:40-11:00 Invited talk
Prof. Tomoki Machida (University of Tokyo)
"Robotic fabrication and quantum transport of van der Waals junctions of 2D materials"

11:00-11:20 Invited talk
Prof. Yasumitsu Miyata (Tokyo Metropolitan University)
"Low-dimensional nanostructures of Janus TMDs"

11:40-12:00 Invited talk
Prof. Kazunari Matsuda (Kyoto University)
"Optical science and application of moiré excitonic systems in 2D materials"

12:00-12:15 Contributed talk
Dr. Pablo Solís-Fernández (Kyushu University)
"Machine learning-assisted determination of twist angle of bilayer graphene"

12:15-12:30 Contributed talk
Ma Zongpeng (Kyushu University)
"Aligned growth and applications of MoS_2 nanoribbons"



Global Innovation Center

Correspondence:
Prof. H. Ago (GIC, Kyushu University, h-ago@gic.Kyushu-u.ac.jp)

ワークショップのチラシと当日の様子

3 - 5 - 3　2023 Workshop on JUNCTIONS

Japan-US Network for Clean energy Technologies Involving Oriented Nanotubes

［https://qmse.fpark.tmu.ac.jp/pire/index-e.html］

ナノチューブおよびナノ材料を利用したクリーンエネルギー科学技術の発展を目的とし、2023 年よりスタートした日米間の国際共同研究教育パートナーシッププログラム(PIRE-JUNCTION)で、本領域の公募 A03 柳が日本側の代表を務め、A03 松田がメンバーとして名を連ねている。本領域との共催で横浜にて Kickoff Workshop を開催した。

日時：2023 年 5 月 22 日

場所：横浜情報文化センター　 7 F　情文ホール

https://www.comp.tmu.ac.jp/qmse/pire/kickoff.html

本領域から 公募 A03 柳、A01 吾郷、A03 松田が講演を行った。

Workshop のウェブサイトより

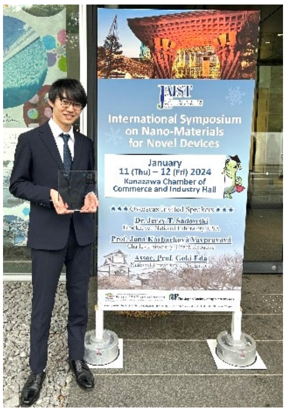
3-5-4 JAIST International Symposium of Nano-Materials for Novel Devices 2023

ナノデバイスに関する研究をテーマにした JAIST 主催のシンポジウムが金沢商工会議所にて開催され、本領域も共催にて参画した。海外からの基調講演者含め約 90 名が参加し、活発な議論や交流が行われた。

日時：2024 年 1 月 11 日～12 日
場所：金沢商工会議所 ホール
https://www.jaist-nmnd2023.com/

A04 高村が組織委員をつとめ、講演を行ったほか、A01 吾郷、A05 長汐が招待講演を行った。ポスター発表では、A01 吾郷研の江本さんが Best Presenter Award を受賞した。

シンポジウムでの集合写真



シンポジウムのチラシと Best Presenter Award を受賞した江本さん

3-6　国際連携セミナー

2023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3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6回および第8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］

2023年10月27日　第6回国際連携セミナー　［公開］
Dr. Vitaly Babenko（英国 University of Cambridge）
講演題目："Realization of electronic grade 2D materials and their applications outlook"

2024年2月19日　第7回国際連携セミナー　［領域内限定］
Prof. Francesca lacopi（ｵｰｽﾄﾗﾘｱ University of Technology Sydney）
講演題目："More-than-Moore miniaturisation with graphene and cubic silicon carbide"

2024年3月14日　第8回国際連携セミナー　［公開］
Prof. Jianting Ye（ｵﾗﾝﾀﾞ University of Groningen）
講演題目：" Field Effect Control of Quantum Phases in 2D Materials"

第7回国際連携セミナーのスクリーンショット

3-7　産学官協働ミーティング

九州大学グローバルイノベーションセンター（GIC）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)」と本領域がタイアップし、２回の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。A01 吾郷がオーガナイザーとして企画し、当領域の産学官連携支援担当の A05 大野も参加した。

◆第 2 回産学官協働ミーティング

日時：2023 年 5 月 19 日

場所：九州大学 グローバルイノベーションセンター ３階　研修室

プログラム

13:00-13:45　企業からの講演（公開）
　佐藤 信太郎（富士通株式会社）

13:45-14:30　基調講演（公開）
　田中 敬二（九州大学）

14:45-15:15　2.5 次元物質科学領域からの講演（公開）
　長汐 晃輔（東京大学）

15:30-17:30　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 2 回産学官協働ミーティングのチラシ


第 2 回産学官協働ミーティングの様子

◆第 3 回産学官協働ミーティング

日時：2024 年 1 月 19 日

場所：九州大学 グローバルイノベーションセンター ３階 研修室

<u>プログラム</u>

13:00-13:40 企業からの講演（公開）
　　西山 彰（キオクシア株式会社）

13:40-14:20 招待講演（公開）
　　川那子 高暢（東京工業大学）

14:40-15:20 ２.５次元物質科学領域からの講演（公開）
　　高橋 康史（名古屋大学）

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 3 回産学官協働ミーティングのチラシ

第 3 回産学官協働ミーティングの様子

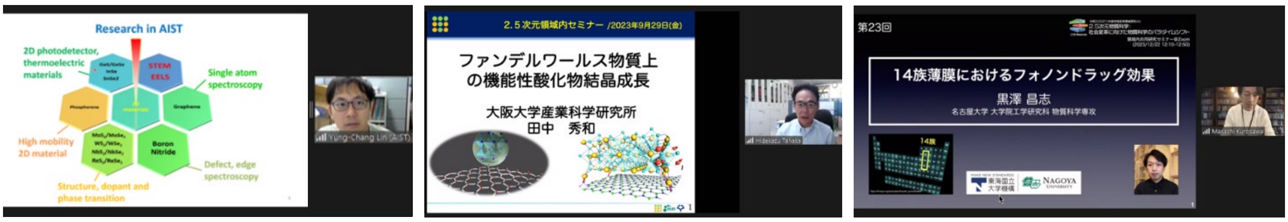
3-8　領域内共同研究セミナー　（領域内限定）

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 15 回　2023 年 4 月 14 日　A01　櫻井 英博
　「2.5 次元物質としてのバッキーボウルの化学」
第 16 回　2023 年 4 月 28 日　A05　大野 雄高
　「リザーバーってなに？物理構造における非線形記憶と機械学習」
第 17 回　2023 年 6 月 9 日　A03　Lin Yung-Chang
　「走査型透過電子顕微鏡を用いた 2.5 次元物質の研究
　(Study of 2.5D materials using scanning transmission electron microscopy)」
第 18 回　2023 年 7 月 14 日　A01　加藤 俊顕
　「その場観測によるヤヌス化反応の直接観測」
第 19 回　2023 年 7 月 28 日　A05　山本 真人
　「表面酸化した二次元層状物質のメモリ動作」
第 20 回　2023 年 8 月 18 日　A03　柳 和宏
　「制御されたファンデルワールス界面における熱・電荷輸送の同時計測」
第 21 回　2023 年 9 月 29 日　A02　田中 秀和
　「ファンデルワールス物質上の機能性酸化物結晶成長」
第 22 回　2023 年 11 月 24 日　A04　塩見 雄毅
　「二次元層状物質のアモルファス化による磁性・伝導制御」
第 23 回　2023 年 12 月 22 日　A01　黒澤 昌志
　「14 族薄膜におけるフォノンドラッグ効果」
第 24 回　2024 年 3 月 29 日　領域代表　吾郷 浩樹
　［PI 限定］　「ハイ・インパクト論文の出版を目指して」

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　第 17 回 物性科学領域横断研究会

新学術領域及び学術変革領域のうち物性科学に関わりの深い合計 14 領域が一堂に会し、160 名の参加者のもと、名古屋工業大学にて開催した。本研究会は、各領域の研究内容を専門外の研究者や大学院学生に対し解説し、領域間のシナジー効果を高めると共に、物性科学のホットな話題を 2 日間で概観することを目的としている。

本領域が参画後はオンライン開催が続いたため、初の対面開催での参加となった。
本領域からは、領域代表の吾郷が組織委員として参加、A01 岡田、A03 末永が講演を行った。また、A02 宮田研の金田さん（東京都立大学)、A03 松田研の朝田さん（京都大学)、A04 越野研の立石さん（大阪大学）がポスター発表を行い、立石さんが若手奨励賞を受賞した。

日時：2023 年 11 月 24 日～25 日
場所：名古屋工業大学 4 号館ホール
https://www.rs.tus.ac.jp/ryoikioudan_17th/index.html

［2.5 次元物質科学］
9:00-9:40 (40 min)　座長：吾郷 浩樹
A01　岡田 晋 （筑波大学）「原子層物質複合構造の電子物性」
A03　末永 和知（大阪大学）「電子線エネルギー損失分光を用いたエキシトン分散関係の測定 」

［ポスター発表］
金田 賢彦（東京都立大学）「Janus 原子層を利用したナノスクロール構造の形成」
朝田 秀一（京都大学）「$MoS_2/CrPS_4$ヘテロ界面における特異な非線形磁気光電流」
立石 幾真（大阪大学）「Topological mosaics in moiré materials」


若手奨励賞を受賞した立石さん


第 17 回 物性領域横断研究会のウェブサイト

3-10　書籍の出版

『グラフェンの物理学』ディラック電子とトポロジカル物性の基礎

A04 越野がグラフェンの物理学を主に理論的側面から解説する教科書を執筆した。グラフェンはもちろんのこと、グラフェンの物理を理解するために必要な現代の物性物理に頻出する Dirac 粒子、Berry 位相、エッジ状態、バンドトポロジーといった概念や、従来からある電気伝導，Boltzmann の輸送理論，Landau 準位，量子 Hall 効果といった固体物理学の基礎知識も習得できる構成になっており、グラフェンを通して古典的な物性物理と最新の物性物理の橋渡しとなるよう期待がこめられている。

出版元：　内田老鶴圃
著者：　越野 幹人
発行日：　2023 年 3 月 31 日
体裁：　A5 判、248 頁
ISBN コード：978-4-7536-2321-1

『遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向』

A02 宮田、A01 吾郷、A03 松田、A05 長汐の共同監修で、二次元層状物質として多彩な物性や機能が注目される遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)について、合成技術、物性、応用などの基礎知識と最新の研究による新たな知見や技術を整理した書籍を出版した。

出版元：　シーエムシー出版
監修：　宮田 耕充、吾郷 浩樹、松田 一成、長汐 晃輔
発行日：　2023 年 12 月 27 日
体裁：　B5 判、326 頁
ISBN コード：978-4-7813-1758-8

執筆者一覧（青字：本領域研究関係者）

宮田 耕充	東京都立大学（A02）
吾郷 浩樹	九州大学（A01）
松田 一成	京都大学（A03）
長汐 晃輔	東京大学（A05）
斉木 幸一朗	東京大学名誉教授（アドバイザー）
小鍋 哲	法政大学

末永 和知	大阪大学（A03）
丸山 実那	筑波大学（A01 岡田研）
高 燕林	筑波大学（A01 岡田研）
岡田 晋	筑波大学（A01）
坂野 昌人	東京大学（A03）
齋藤 理一郎	東北大学名誉教授;台湾師範大学特別教授（アドバイザー）
宮内 雄平	京都大学
柳 和宏	東京都立大学（公募 A03）
岩佐 義宏	東京大学;理化学研究所
井手上 敏也	東京大学
島﨑 佑也	理化学研究所
笹川 崇男	東京工業大学（A04）
上野 啓司	埼玉大学（公募 A02）
木下 圭	東京大学（A02 町田研）
小野寺 桃子	東京大学（A02 町田研）
町田 友樹	東京大学（A02）
岡田 光博	産業技術総合研究所
山田 貴壽	産業技術総合研究所
李 世勝	元・物質・材料研究機構
谷口 貴章	物質・材料研究機構
北浦 良	物質・材料研究機構（公募 A02）
蓬田 陽平	東京都立大学（公募 A01）
入沢 寿史	産業技術総合研究所
森 伸也	大阪大学
安田 憲司	コーネル大学
白石 誠司	京都大学
竹延 大志	名古屋大学
蒲 江	東京工業大学（A04）
加藤 俊顕	東北大学（公募 A01）
張 奕勁	東京大学
大野 雄高	名古屋大学（A05）
河邉 佑典	名古屋大学（公募 A03 高橋研）
高橋 康史	名古屋大学;金沢大学（公募 A03）
桐谷 乃輔	東京大学
早水 裕平	東京工業大学

４．　計画班 研究成果

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)

岡田 晋

吾郷 浩樹

櫻井 英博

渡邊 賢司

計算物質科学による2.5次元物質の物質設計と物性解明

岡田 晋（筑波大学）

研究協力者：丸山 実那・高 燕林（同上）

E-mail: sokada@comas-tsukuba.jp

2023 年度は、(1) 2.5次元物質の構成物質としての可能性を秘めた新奇原子層物質の物質設計と物性解明として、周期的コルゲーションを有する WS_2 の物性解明を行なった[1]。(2)さらに、種々の原子層物質からなる、面間ヘテロ/ホモ複合構造、ならびに面内ヘテロ複合構造の電子物性の解明を行なった [2]。特に WS_2 と MoS_2 からなる面内／面間ヘテロ構造の提案とそこに発現する電子物性と、外部電界による変調の可能性を提示した。 (3)加えて、領域内の共同研究として、実験結果に対する理論解析、特に、エネルギー論と電子構造の観点からの解析を行なった。

主要な成果として、MoS_2 と WS_2 からなる面内ヘテロ構造が積層した、2 層構造の電子物性の解明を行なった (Fig. 1a)。その結果、この系は面内での遷移金属原子種依存のバンド端ミスアラインメントに加えて、面間の遷移金属原子種配置の違いによるバンド端ミスアラインメントが発現し、複雑な type II のバンド端アラインメント構造を有することを明らかにした (Fig. 1b)。加えて、この 2 層 MoS_2/WS_2 ヘテロ構造に電界効果により電子／ホールを注入すると、この複雑なバンド端構造を反映した、キャリア分布の次元性変調が誘起される。すなわち、キャリア濃度を増加するにつれて、0 次元→1 次元→ 2 次元と逐次的にキャリア分布が変調する(Fig. 1c)。

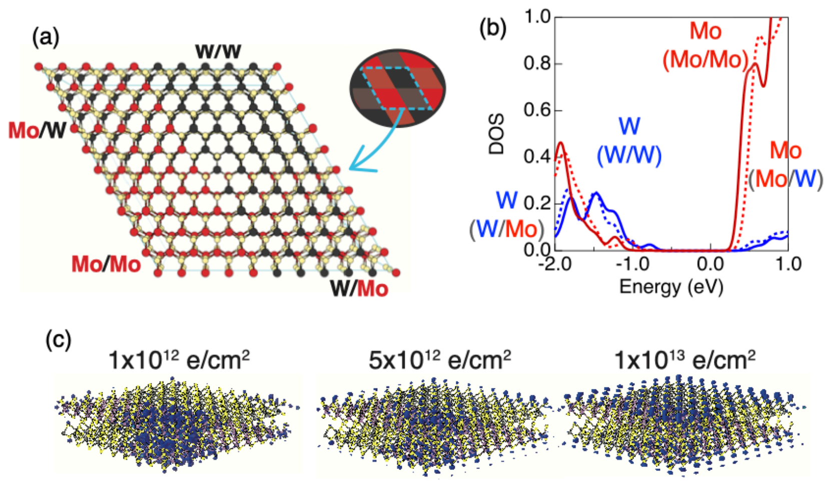


Figure 1 (a) Structure model of bilayer in-plane heterostructure of MoS_2/WS_2. Blue, red, and yellow balls denote W, Mo, and S atoms respectively. (b) Projected density of states of the metal atoms of the bilayer MoS2/WS2 heterostructure. The red, blue, red dotted, and blue dotted lines represent the DOSs of Mo located at the center of the Mo/Mo sector, W located at the center of the W/W sector, Mo located at the center of the Mo/W sector, and W located at the center of the W/Mo sector, respectively. Energies are measured from the Fermi level. (c) Isosurfaces of accumulated carriers in a bilayer lateral heterostructure under electron doping.

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、櫻井(A01)、渡邊(A01)、蓬田(A01)、加藤俊顕(A01)、北浦(A02)、蒲(A04)、長汐(A05)、大野(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Gao, K. Watanabe, R. Kitaura, S. Okada *et al.*, Formation of a one-dimensional hole channel in MoS_2 by structural corrugation, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, 015001 (2023).

[2] M. Maruyama, R. Kitaura, S. Okada *et al.,* Gate-induced trans-dimensionality of carrier distribution in bilayer lateral heterosheet of MoS_2 and WS_2 for semiconductor devices with tunable, *ACS Appl. Nano Mater.* **6**, 5434 (2024).

CVD 成長と転写技術の融合による２．５次元物質科学の推進

吾郷 浩樹（九州大学グローバルイノベーションセンター）

研究協力者：Pablo Solís Fernández・深町 悟・中谷 真季（同上）

E-mail: ago.hiroki.974@m.kyushu-u.ac.jp

2023 年度は、(1) ２．５次元物質作製のための革新的転写法の開発、(2) 二次元物質や２．５次元物質の高品質合成と物性評価、(3) 二次元ナノ空間でのインターカレーション・物質合成、(4) 多層 hBN の CVD 成長とデバイス応用、などを中心に研究を行った。領域内共同利用拠点として、12 名の領域内共同研究者にグラフェンや hBN の提供を通じて、領域の研究活動に貢献した（2023 年度 31 件、延べ 78 サンプル）。さらに、領域内の研究者による理論計算や各種の高度な測定技術の協力を得て、研究内容のレベルアップも進めた。

今年度の主な成果としては、UV 光で粘着力の変化する転写テープ（UV テープ）を用いた二次元物質の革新的転写法を開発したことが挙げられる（Fig. 1）[1]。本方法は、Fig. 1b,c に示すように従来の高分子膜（PMMA）を用いた方法よりも清浄で、破れが少なく、簡便かつ短時間に転写できるという利点がある。また、高分子膜の除去のために有機溶媒を必要としないことから、フレキシブル基板にも転写可能である。企業と共同で 4 インチのグラフェンの転写も行った。さらに、TMD と hBN にも適した UV テープを別途作り、それぞれ転写だけでなく、グラフェンと hBN、TMD からなる大面積ヘテロ積層膜（２．５次元膜）の作製にも成功した。薄くて破れやすい PMMA 保護膜とは異なり、テープには硬さがあるので二次元物質をキャッチした後にカットして用いることができ、二次元物質を節約するとともに、Fig. 1d に示すように簡便にパターン転写できる方法も開発した（cut-and-transfer）。今回の転写テープの実現は、エンドユーザーによる二次元物質の転写を可能とするもので、二次元材料の研究開発のスタイルを大きく変え、エレクトロニクスなど新産業の創出を大きく後押しする成果として期待できる [1]。

この他にも、領域メンバーによる、二層グラフェンのインターカレーションにおいて、特異的なアルカリ金属の二層構造の発見などにも協力した [2]。

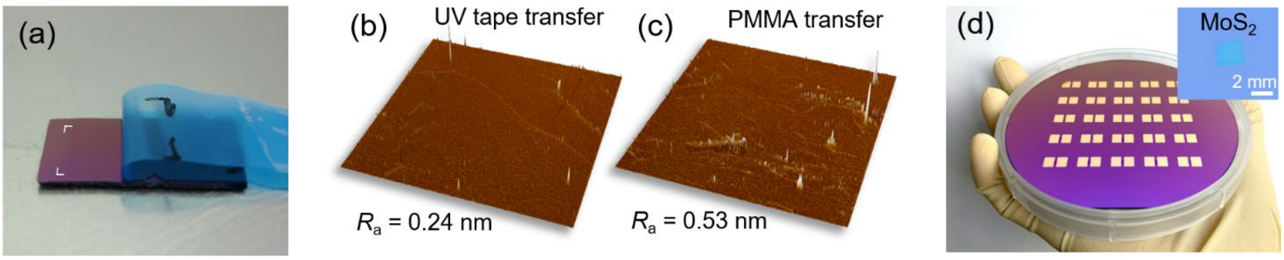


Figure 1 Photograph taken during releasing monolayer graphene from the UV tape. (b) AFM images of monolayer graphene transferred with the UV tape (b) and PMMA (c). (d) Device arrays of the patterned monolayer MoS_2, which were transferred by the newly proposed “cut-and-transfer” method.

【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、櫻井(A01)、毛利(A01)、加藤(A01)、田代(A01)、久木(A01)、荒井(A02)、松本(A02)、田中(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、末永(A03)、西堀(A03)、杉本(A03)、高橋(A03)、Lin(A03)、柳(A03)、上野(A05)、松尾(A05)、河野(A05)、山本(A05)、小野(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] 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).
[2] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, H. Ago, K. Suenaga *et al.*, Alkali metal bilayer intercalation in graphene, *Nat. Commun.* **15**, 425 (2024).
[3] H.-L. Liu, H. Ago, R. Saito *et al.*, Interference of excitons and surface plasmons in the optical absorption spectra of monolayer and bilayer graphene, *Phys. Rev. B* **107**, 165421 (2023).

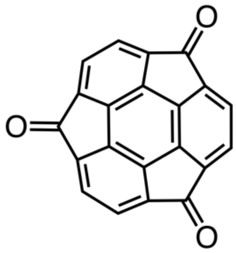
有機合成に基づく擬二次元構造の創製

櫻井 英博（大阪大学大学院工学研究科）

研究協力者：燒山 佑美（同上）

E-mail: hsakurai@chem.eng.osaka-u.ac.jp

2022～2023 年度にかけて、領域内の研究者にスマネンやその誘導体を提供するとともに、以下の研究を中心に実施した。(1) 湾曲（波状）2 次元物質、特に MOF、HOF、COF 合成へ向けたユニット分子”Curved Starphene”の合成研究. (2) スマネンケージ分子の合成とその nCOF 生成についての研究、(3) トリオキソスマネンのグラフェンへの物理吸着によるバンドギャップ制御に関する理論研究、(4)スマネン誘導体の 2 次元物質を含む個体表面への化学吸着に関する研究。



trioxosumanene (**1**)

グラフェンのバンドギャップを拡大する方法は複数存在するが、より容易な方法が精力的に研究されている。一方、双極子モーメントを有しているスマネンは、グラフェンなどのナノカーボン材料との相互作用が非常に特異的であることが予想されている。今回、トリオキソスマネン(**1**)の単層グラフェン上への物理吸着体がバンドギャップを生じることを見出した。**1** のお椀を上向きに配置した場合、ディラックポイントが下方にシフトすることを観測したが、バンドギャップの形成は観測できなかった。一方、**1** のお椀を下向きに配置した場合、K 点付近で 0.18 eV のバンドギャップの形成を観測した(Figure 1)。波動関数解析では、酸素の *p* 軌道がグラフェンの炭素原子の p_z 軌道と混成していることが示された。電子密度解析では、特に酸素原子の直下のグラフェンで局所化した正孔が観測された。仮想的に平坦な **1** の場合においてもグラフェンのバンドギャップの拡大を観測できたため、双極子モーメントはバンドギャップの形成に影響しないことが示唆された。フェルミレベル近傍に **1** の LUMO に由来する平坦なバンドが確認できた。そこで **1** に種々の官能基を修飾させ、LUMO の値を変化させた場合のグラフェンの電子状態を分析したところ、-4.5 ～-4.6 eV 間、つまりフェルミレベル近傍に LUMO の値を持つ誘導体を配置した時のみ、バンドギャップの拡大が確認できた。

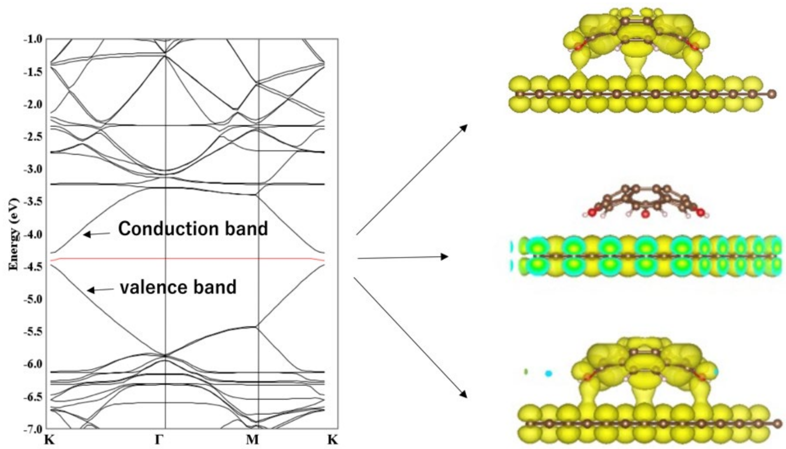


Figure 1. A flat band around Fermi Level and its wave function of trioxosumanene adsorbed on monolayer graphene.

【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、吾郷(A01)、渡邉(A01)、田代(A01)、久木(A01)、毛利（A01)、宮田(A02)、荒井(A02)、松本(A02)、西堀(A03)、坂野(A03)、杉本(A03)、大野(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] 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).

[2] Y. Shoji, S.-i Adachi, H. Nakamura, H. Sakurai, T. Fukushima *et al.*, Collective bending motion of a two-dimensionally correlated bowl-stacked columnar liquid crystalline assembly under a shear force, *Science Adv.*, **9**, eadg8202 (2023).

[3] H. Mizuno, Y. Yakiyama, H. Sakurai, G. Fukuhara *et al.*, Sumanene-stacked supramolecular polymers. dynamic, solvation-directed control, *Chem. Commun.* **59**, 9595 (2023).

高品位六方晶窒化ホウ素の成長技術の開発～積層欠陥の制御にむけて

渡邊　賢司（国立研究開発法人物質・材料研究機構）

研究協力者：谷口　尚（同上）

E-mail: WATANABE.Kenji.AML@nims.go.jp

高圧法により成長した六方晶窒化ホウ素（h-BN）単結晶を 2 枚の金属平板などで挟んで軽くつぶすと積層欠陥が生じ励起子が束縛状態を作り、低エネルギー側に大きくシフトすることは h-BN 結晶の光物性研究の初期から知られていた（APL 89, 141902 2006）。比較的高品位の高圧法 h-BN においても、低温領域で束縛励起子発光が顕著に観測されることから、積層欠陥がある程度含まれていることを示唆している。h-BN においてはファンデルワールス積層構造の宿命として積層欠陥が結晶成長中に生成されやすい。六方晶窒化ホウ素の高効率なエキシトン発光は紫外発光材料のひとつとして期待されているが、積層欠陥は自由励起子発光の発光効率を低下させる原因のひとつと考えられる。この積層欠陥を減らし自由励起子発光メカニズムの本質に迫ることが気相成長技術の開発の目的のひとつである。また、この束縛励起子発光を積層欠陥評価の基準として使用できる。図 1a に示すようにヘテロエピタキシャル成長した h-BN の積層はランダムでバンド端で束縛励起子発光が支配的である。一方、ホモエピタキシャル成長した結晶からは自由励起子と束縛励起子が競合するような高圧合成(HPHT)結晶同等の励起子発光を示す結晶が得られた（図 1b）。本研究では、より積層欠陥の少ない成長条件を光学特性評価を利用して継続的に探索している。

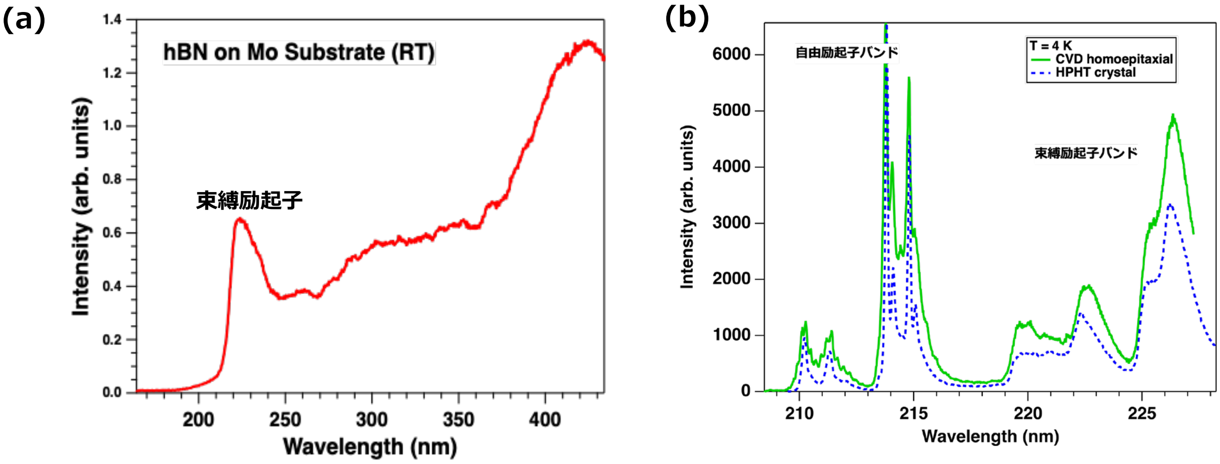


Figure 1 Photoluminescence spectra for (a) heteroepitaxial CVD crystal at room temperature and (b) homoepitaxial crystal at 4 K.

一方、二層あるいは数層の周期構造の重ね合わせによりなるモアレ超格子構造は、近年盛んに研究されているグラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）などのファンデルワールス接合により、電子・光応答に関して特異な物性を示すことで知られている。理論計算から h-BN においても層間の積層状態を高度に制御することにより新しい電子相関の場として特色のある現象が予想され、たいへん興味深い。そこで積層秩序に関する領域内共同研究（岡田(A01)、松本(A02)、町田(A02)）を進めている。

【2023 年度の領域内共同研究者】
岡田(A01)、上野(A02)、宮田(A02)、町田(A02)、田中(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、坂野(A03)、笹川(A04)、長汐(A05)、松本(A02)、加藤(俊)(A01)、山本(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果（領域内共同研究 7 件）】（下記 URL リンクを参照）
https://25d-materials.jp/achievement_search/?category_name=&keyword=&member=a01_渡邊_賢司_%2F_kenji_watanabe&grouptype=&coauthor=領域内共著&pressrelease=&yyyy=2023

4．　計画班 研究成果

A02班

2.5次元集積構造の構築
（集積化班）

宮田 耕充

町田 友樹

荒井 俊人

松本 里香

2.5次元集積構造の化学気相成長と機能開拓

宮田 耕充（東京都立大学）

研究協力者：中西 勇介・Zhang Wenjin（同上）

E-mail: ymiyata@tmu.ac.jp

2023 年度は、2.5 次元物質の構成要素となる遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)に着目し、昨年度に続き(1)化学気相成長(CVD)による高品質試料の合成、(2) ポリマーを利用した転写技術の開発、そして(3) Janus TMD を利用したナノ構造作製などの研究を行った。また、領域内共同研究者へ CVD 合成 TMD 試料の提供や測定依頼を通じて共同研究を推進し、複数の論文発表を行った。

主要な成果として、ドライ転写による CVD TMD の積層構造の作製法の開発[1]、Janus TMD を利用したナノスクロールの作製[2]、BN ナノチューブをテンプレートとした TMD ナノチューブの合成[3]、が挙げられる。特に、TMD のナノスクロールに関しては、多層 TMD ナノチューブと類似したカイラル構造を持ち、光起電力効果などが注目されている。一方で、通常の TMD をナノスクロールにした場合、構造の不安定性よりリボン型のスクロールが形成することが多かった。本研究では、MoSSe や WSSe などの Janus TMD を利用することで、内径の細い円筒状の TMD ナノスクロールを効率よく作製できることを見出した（Fig.1)。具体的には、CVD 法で $MoSe_2$ を合成し、A01 加藤グループにおいてプラズマ処理によって MoSSe に変換する。この MoSSe を液相処理することでスクロール構造が作製できる。本手法より、様々な組成や構造を持つスクロールの実現、電気伝導や光学応答と巻き方の関係の解明、触媒やデバイス応用など、幅広い研究の展開が期待される

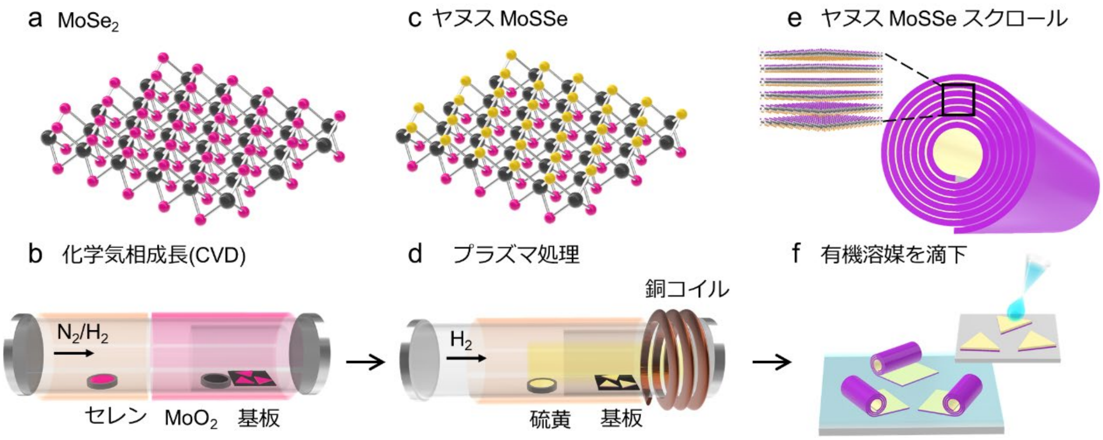


Figure 1 (a) Structure model of monolayer $MoSe_2$. (b) Schematic illustration of thermal CVD system. Monolayer $MoSe_2$ was grown on a SiO_2/Si substrate. (c) Structure model of Janus monolayer MoSSe. (d) Schematic illustration of sulfurization process assisted by hydrogen plasma. Top Se atoms of $MoSe_2$ were replaced with S atoms to form MoSSe at room temperature. (e) Structure model of Janus MoSSe nanoscrolls. (f) Rolling up process of Janus monolayers by spin-coating of PMMA/chloroform solution.

【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、吾郷(A01)、櫻井(A01)、渡邊(A01)、毛利(A01)、蓬田(A01)、加藤俊顕(A01)、町田(A02)、荒井(A02)、上野(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、末永(A03)、西堀(A03)、高橋(A03)、柳(A03)、Lin(A03)、越野(A04)、高村(A04)、蒲(A04)、塩見(A04)、上野(A05)、長汐(A05)、山本(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Naito, K. Watanabe, K. Matsuda, Y. Miyata *et al.*, High-throughput dry transfer and excitonic properties of twisted bilayers based on CVD-grown transition metal dichalcogenides, *Nanoscale Adv.* **5**, 5115 (2023).

[2] M. Kaneda, Y. Yamada-Takamura, Y. Takahashi, S. Okada, T. Kato, Y. Miyata *et al.*, Nanoscrolls of janus monolayer transition metal dichalcogenides, *ACS Nano* (2024) in press.

[3] 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).

ロボティック積層による集積構造の構築

町田 友樹（東京大学生産技術研究所）

E-mail: tmachida@iis.u-tokyo.ac.jp

2023 年度はファンデルワールス集積構造の構築と物性創発の研究を推進した。具体的には、(1) ツイストファンデルワールス積層を用いた二層 WTe_2 の対称性制御、 (2) WSe_2 のサブバンド準位を利用した共鳴トンネル伝導の観測を中心に研究を行った。同時に、多くの領域内共同研究者に原子層転写技術の支援を行い、領域内共同利用拠点としての役割も果たした。領域内の研究者から結晶の提供やバンド構造計算の協力を得て、研究活動を高度に高効率で進めることができた。

主な成果としては、単層 WTe_2 をファンデルワールス積層したツイスト二層 WTe_2 を作製し、第二高調波発生(SHG)や角度分解光電子分光(ARPES)を用いてツイスト角が物性に与える影響を調べた。SHG 測定から、二層 WTe_2 の空間反転対称性の有無がツイスト角によって制御できることを確認した。ARPES によるバンド構造観察により、対称性の変化がスピン分裂の有無を支配していることを明らかにした。本研究で観測した対称性制御の効果は角度誤差に対して堅固であり、ツイストファンデルワールス積層を用いた対称性制御という物性探索の新しい手法を提案・実証したという点で非常に大きな意義を持つ。

また、数層 WSe_2 量子井戸を用いた二重量子井戸構造において、量子井戸間のツイスト角度が共鳴トンネルに与える影響を調査した。伝導キャリアが電子の場合、伝導帯の Q 点周りのバンド分散を反映した顕著なツイスト角度依存性が見られたが、ホールの場合はΓ点キャリアであるためツイスト角度に依存しない結果となった。本成果は数層 TMD 量子井戸デバイスの開発において重要な指針を与えるものである。特にホール側のトンネルでは顕著なピーク・バレー比が見られるため、さらなるピーク・バレー比増大に向けた検討を推進するしている。

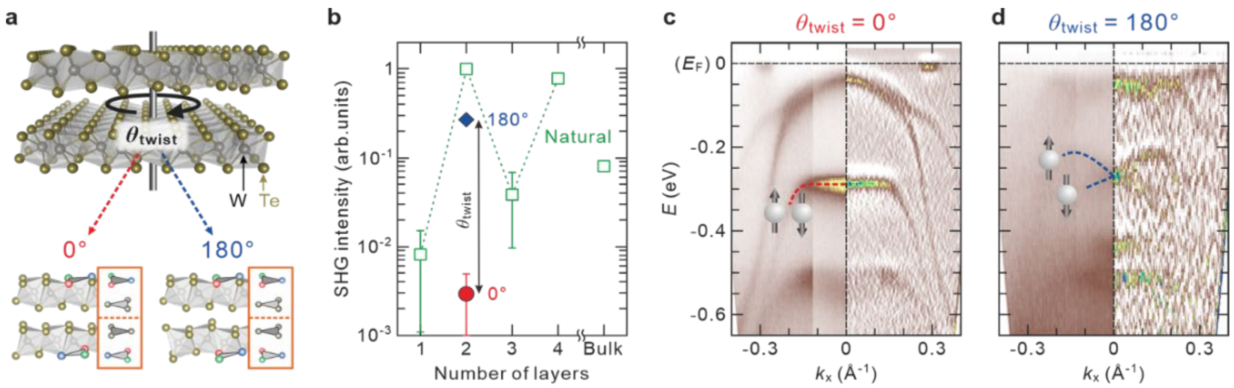


Figure 1 Symmetry engineering using van der Waals assembly. (a) Twisted bilayer WTe_2 with twist angle of 0° and 180°. (b) SHG amplitude. (c) Band structures of twisted bilayer WTe_2 with twist angle of 0°. (d) Band structures of twisted bilayer WTe_2 with twist angle of 180°.

【2023 年度の領域内共同研究者】

渡邊(A01)、宮田(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、末永(A03)、坂野(A03)、Lin(A03)、越野(A04)、高村(A04)、笹川(A04)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. J. 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).

[2] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, Polarity-dependent twisted-resonant tunneling device based on few-layer WSe_2, *Phys. Rev. Research* **5**, 043292 (2023).

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）

E-mail: ARAI.Shunto@nims.go.jp

2023 年度は２.５次元物質の構成要素となる有機分子層の伝導特性に関する研究に取り組んだ。具体的には（1）有機半導体の分子配列制御にもとづく有機薄膜トランジスタ（OTFT）の高性能化 [1]、（2）ボトムゲート・ボトムコンタクト（BGBC）型 OTFT における半導体／金属／誘電体の３成分界面の構造制御とキャリア注入の高効率化 [2]、（3） 有機導体系における電荷ガラス－結晶間相転移の研究 [3] を中心に進めた。同時に、試料のやり取りや、実験・計算技術の提供をもとに多くの領域内研究者と共同研究も進めた。

主な研究成果としては、半導体／金属／誘電体の３成分界面の安定性が、BGBC 型 OTFT の動作にどのように寄与しているか見出したことが挙げられる [2]。昨年度までの研究から、ゲート絶縁層の表面状態を制御することで、いくつかの有機半導体（OSC）を用いた BGBC 型 OTFT において、良好な ON-OFF スイッチング特性が得られることを明らかにした。しかしながら、デバイス移動度に関してはトップコンタクト型 OTFT とは異なる傾向の材料依存性があり、その値を改善することが課題となっていた。そこで、図１(a)に示す２種類の材料、Ph-BTBT-C_n と Ph-BTNT-C_n を用いて、さまざまな厚み（すなわち分子積層数）の単結晶 OSC 層を作製し、OTFT の活性層として用いた（図１(b)）。その伝達特性は、材料や層数などに依存する経時変化を示した（図１(c)）。ケルビンプローブフォース顕微鏡測定により、この劣化はソース電極付近の接触抵抗に起因しており、薄い分子層では移動度が低下しやすく、その劣化速度もチャネル材料に依存する傾向があることを見出した（図１(d)）。これにより、電極付近の分子層構造制御がデバイス性能の安定性に寄与し、高い移動度を安定して得るために必要であることが示唆された。今後は自在に分子層を積層形成する技術を開発するとともに、他の２.５次元半導体材料との組み合わせに適した絶縁材料の開発も進める。

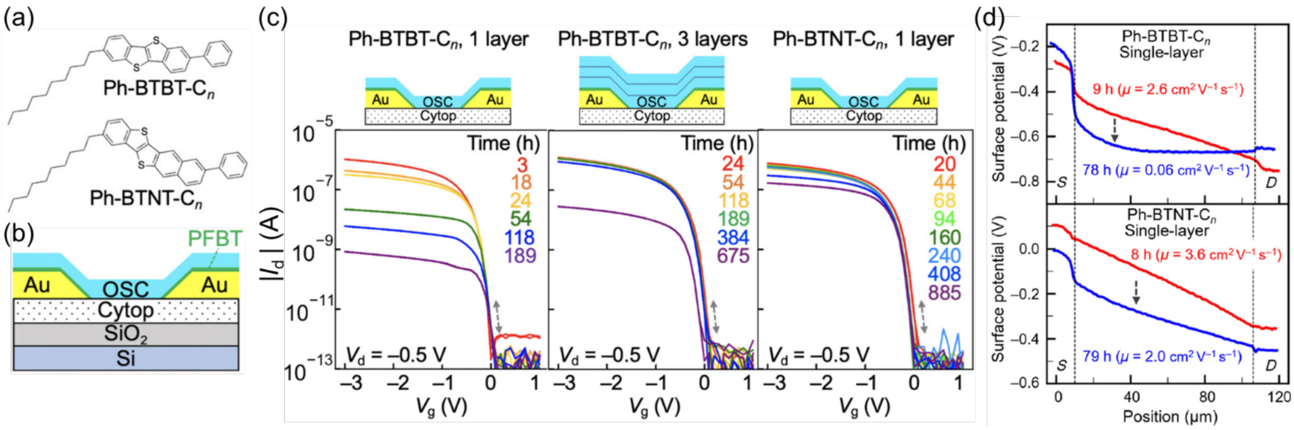


Figure 1 (a) Chemical structures of Ph-BTBT-C_n and Ph-BTNT-C_n. (b) Schematic cross section of BGBC-type OTFTs. The surfaces of the source and drain electrodes were modified with pentafluorobenzenethiol (PFBT). (c) Typical transfer characteristics of OTFTs of different thickness (or number of stacking molecular bilayers). (d) Surface potential distribution along the TFT channel. Time dependence of surface potential in the linear regime (V_d = −0.5 V, V_g = −3 V) of single-layer Ph-BTBT-C_n (top) and Ph-BTNT-C_n (bottom) TFTs.

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、櫻井(A01)、宮田(A02)、北浦(A02)、杉本(A03)、柳(A03)、長汐(A05)、大野(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] S. Arai, Advanced self-assembly control of rod-shaped organic semiconductors, *SPIE Conf. Proc.* to appear.

[2] 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**, 024005 (2024).

[3] H. Murase, S. Arai, T. Hasegawa, K. Miyagawa, K. Kanoda, Spatiotemporal observation of quantum crystallization of electrons, *Nat. Commun.* **14**, 6011 (2023).

インターカレーションによるナノ空間の活用

松本 里香（東京工芸大学工学部）

E-mail: mrika@t-kougei.ac.jp

2023年度は、継続テーマとして、(1) 二層～多層グラフェンへのNaインターカレーション、(2) グラフェンライクグラファイト (GLG) へのインターカレーション、(3) スマネン類のインターカレーション、(4) 黒鉛層間内のインターカレート物質の観察、などを中心に研究を行った。今年度から（5）hBN へのインターカレーションの検討も始めた。さらに、領域内共同研究者の2.5次元物質サンプルへのアルカリ金属のインターカレーションを行い、提供した。

(2) に関して、黒鉛にはインターカレーションが難しいNaやMgが、黒鉛類似物質であるGLGへインターカレーションし、ステージ1構造を形成することをX線回折より確認した(Fig.1)。Na-GLGの層間距離は4.3Åとなり黒鉛の場合（4.6Å）と近い値であった。Mg-GLGの層間距離は 3.8Åで、Mg イオンサイズより妥当な値であると考えられる。ただし、Mg-GLGの場合、ラマンスペクトルにインターカレーションによる変化が現れていないため、引き続き検討する。

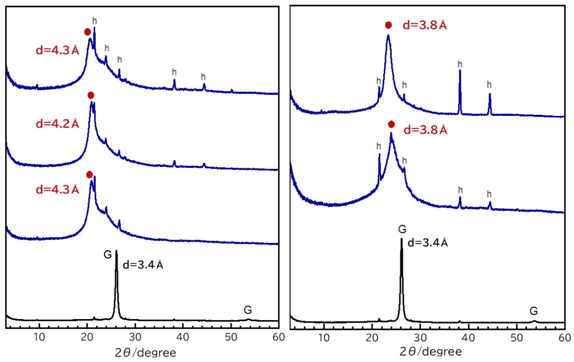


Figure 1 XRD patterns of intercalated GLGs; (a) Na-GLG, (b) Mg-GLG.

(3) に関して、トリオキソスマネンと$AlCl_3$の混合物が黒鉛と反応し、新しいタイプの黒鉛層間化合物を形成することを確認した。層間化合物の構造はまだ明らかにできていないが、$AlCl_3$-GICの層間距離(9.5Å)とは一致しないため、$AlCl_3$とトリオキソスマネンによる三元型GICを形成していると考えられる(Fig.2(a))。ラマン分光測定では、ステージ 3～6 構造に相当するスペクトルを得ている(Fig.2(b))。

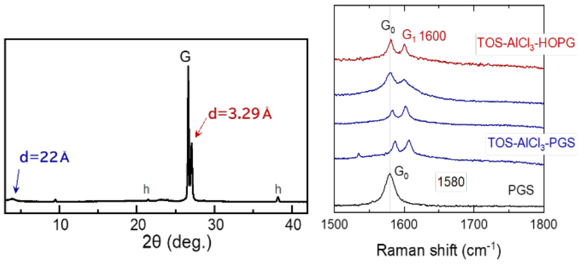


Figure 2 Trioxo-sumanene and $AlCl_3$ intercalated graphite; (a) XRD patern, (b) Raman

(4) に関して、結晶性の異なる黒鉛をホストとしたステージ2のK-GIC(KC_{24})の電気抵抗率の温度依存性を測定した。層間内のKはある温度で相転移を生じ、それが抵抗異常として観測される。ポリイミドフィルムを2000℃で低温熱処理した低結晶性黒鉛フィルム(Kaneka_HTT2000)をホストと用いた場合、その転移が認められないことを確認した。一方、3000℃熱処理のPGSグラファイトシートの場合、100-120 Kに抵抗異常を確認できた(Fig.3)。このように、GIC層間物質の状態はホストの結晶構造に強く依存することを実験的に明らかにすることができた。

また、(1) に関しては、バルク黒鉛にはインターカレーションしにくいNaも極薄層黒鉛とみなせる多層グラフェンであればインターカレーションがより進むことがわかってきた。インターカレーションしたNa-MLGの構造を明らかにするため、Ramanスペクトル以外に、STEMや放射光分析による評価を領域内共同研究者の協力により行っている。

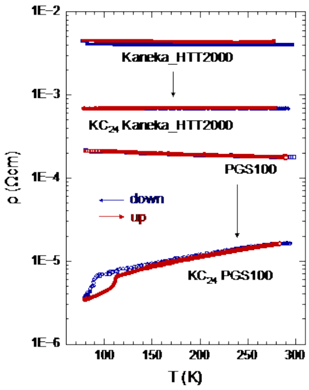


Figure 3 Temperature dependence of electrical resistivity of KC_{24} prepared from PGS and Kaneka_HTT2000.

【2023年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、櫻井(A01)、渡邉(A01)、末永(A03)、西堀(A03)、Lin(A03)、松尾(A05)

【2023年度の代表的な研究成果】

[1] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, K. Suenaga *et al.*, Alkali metal bilayer intercalation in graphene. *Nat Commun* 15, 425 (2024).

4．　計画班 研究成果

A03班

2.5次元構造体の分析技術開発
(分析班)

松田 一成

西堀 英治

末永 和知

坂野 昌人

二次元物質の光計測技術の開発と光科学

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）

E-mail: matsuda@iae.kyoto-u.ac.jp

2023 年度は、前年度からに引き続き、(1)　2.5 次元物質の先端光計測技術の開発、(2) 2.5 次元物質における光科学の対象であるモアレの物理の理解、(3) 2.5 次元科学のための人工ヘテロ物質の創成、などを中心に研究を行った。併せて、多くの領域内共同研究者からの要望であり、領域として重要な活動である領域内共同利用拠点（計測拠点）の一端としての役割も果たした。具体的には、空間反転対称性に関する情報が得られる第二高調波発生、室温での発光マッピング、極低温での発光計測などの技術を提供し、領域内における研究活動の高度化を進めることができた。これらの研究成果は、共同研究者から原著論文として準備中、また、論文として出版されたものなどが含まれており、来年度以降も継続して成果の公表につながるものと思われる。

主な成果としては、二次元半導体 $MoSe_2/WSe_2$ ヘテロ構造において発現する特異な光学的性質を支配するモアレ励起子・トリオン状態やそのバレーダイナミクスに関する知見が得られた。具体的には、ガリウムイオンビームによる微細加工技術を利用して、グラフェン電極を施した $MoSe_2/WSe_2$ ヘテロ構造デバイスの観測エリアを制限することで、これまで困難であった極めて少数のモアレポテンシャルに起因する光学信号を得ることに成功した。これにより、Fig.1(a)に示すようにゲート電圧を変えキャリアドーピングを行うことで、明瞭にモアレ励起子からモアレトリオンからの発光ピークが観測されている。このモアレトリオンに着目し、円偏光分解発光スペクトルとその時間分解測定を行うことで、数 100ns に渡り極めて長時間バレー分極の情報が保持されている(Fig.1(b))ことなど、モアレ励起子・トリオンが関わるモアレ物理(Fig.1(c))に関する新たな知見を得ることに成功した。

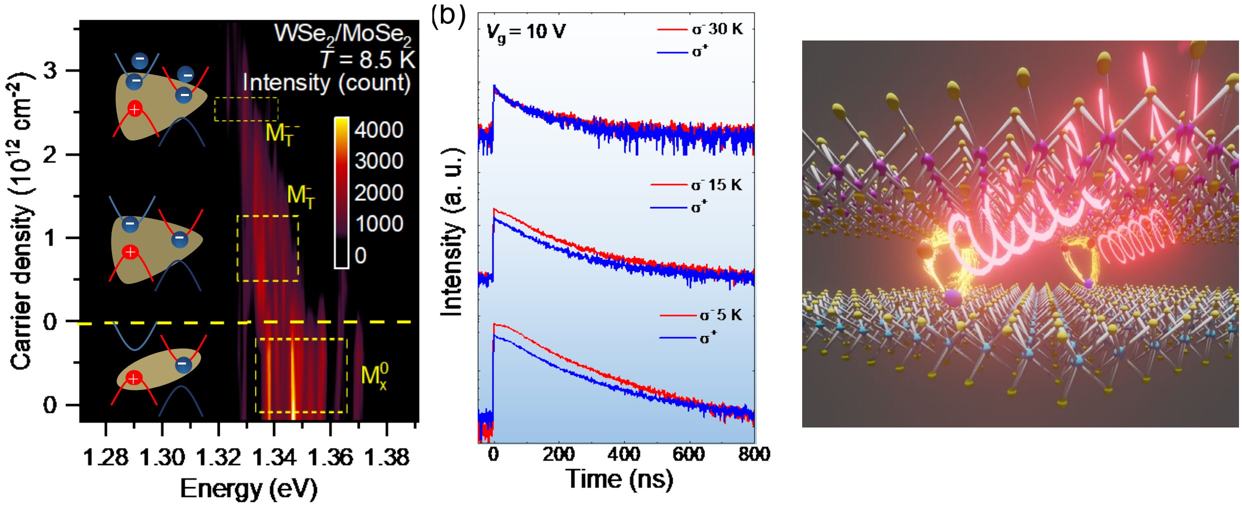


Figure 1 (a) Gate dependent photoluminescence (PL) map of $MoSe_2/WSe_2$ heterobilayer. Schematics of electron and hole configuration of moiré exciton and trion are shown. (b) Circularly polarization resolved PL decay profiles of moiré trion with various temperatures, (c) Schematic image of this study about novel valley dynamics of moiré trion in $MoSe_2/WSe_2$ heterobilayer.

【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、渡邊(A01)、櫻井(A01)、毛利(A01)、蓬田(A01)、上野(A01)、北浦(A02)、宮田(A02)、町田(A02)、坂野(A03)、柳(A03)、高村(A04)、蒲(A04)、長汐(A05)、山本(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Kim, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda *et al.*, Dynamics of moiré trion and its valley polarization in a microfabricated $WSe_2/MoSe_2$ heterobilayer, *ACS Nano*, **17**, 13715 (2023).

2.5次元物質の放射光構造計測

西堀 英治（筑波大学エネルギー物質科学研究センター）

研究協力者：笠井 秀隆（同上）

E-mail: nishibori.eiji.ga@u.tsukuba.ac.jp

2021～2022 年度にかけて、(1) 2.5次元物質のもととなる二次元物質の X 線回折による層間距離評価に適した SPring-8 ビームラインの選定、(2) アルカリ金属、金属塩化物のグラフェンインタカレーション放射光その場観察実験の実施、(3) グラフェンインタカレーションの基礎データとなるアルカリ金属、金属塩化物のグラフェンインタカレーションの放射光 X 線回折その場観察測定の研究を進めてきた。その過程において、10μm 角程度の領域を調べることが必須となる 2 次元薄膜の X 線回折実験でシグナルを測定するには、SPring-8 のアンジュレータ光を数μm サイズに集光したマイクロビームが必要なこと、一般の X 線回折計の±10μm の交差精度では回折実験は難しく、±1μm 精度の回折計が必要なことが分かってきた。2023 年度は物質科学分野以外も含めて SPring-8 全体のビームラインを調査し、集光マイクロビームと±1μm 以下の交差精度を有する生体高分子ビームラインで 2 次元物質薄膜の実験を行うための開発を進めた。

生体高分子ビームラインで 2 次元物質の薄膜実験を可能にするために、Fig 1(a)のサンプルフォルダを設計作成した。このフォルダに Si 基盤上に作成した 2 次元物質を Fig 1(b)のように設置し、X 線回折実験を行った。その結果、遷移金属カルコゲナイドの 2 次元物質 MoTe の 2～4 層試料からの回折線を観測することに成功した。測定のルーチン化を進め、1 試料当たり調整と測定で 10 分程度、1 時間 5～10 サンプルの数層の 2 次元材料の層間距離等を評価できるシステムを確立した。今後は、層間距離の層数依存性などの解析を進めていく。

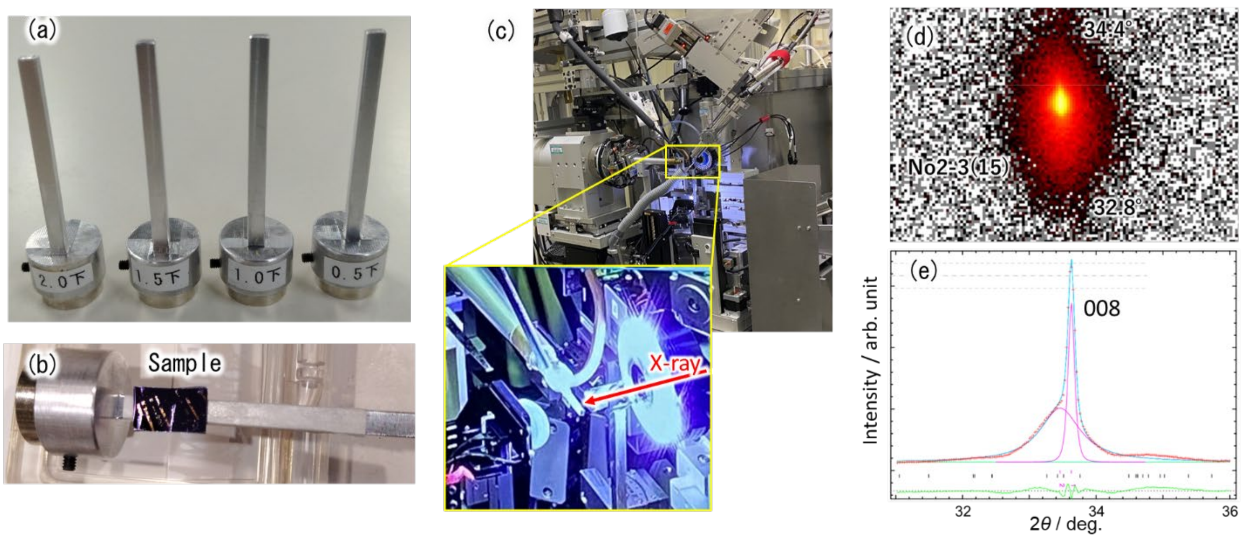


Figure 1 Photograph of (a) sample folders, (b) sample with folder and (c) experimental setup. The measure (d)2D and (e) 1D diffraction data of MoTe thin film for 008 reflection..

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、宮田(A02)、松本(A02)、末永(A03)、Lin(A03)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] T. Fujita, Y. Kono, E. Nishibori, R. Mazzarello, S. Wei *et al.*, Pressure-induced reversal of Peierls-like distortions elicits the polyamorphic transition in GeTe and GeSe, *Nat. Commun*, **14**, 7851 (2023).

[2] H. Kasai, J. Liu, C-N Xu, E. Nishibori, Synchrotron X-ray powder diffraction under high pressures up to 33 MPa for mechanoresponsive materials, *J. Synchrotron. Rad.*, **30**, 555 (2023).

[3] L. Miao, E. Nishibori, N. Wang, H. Wei, T. Mori *et al.*, Charge transfer engineering to achieve extraordinary power generation in GeTe-based thermoelectric materials, *Sci. Adv.*, **7**, eadh0713 (2023).

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：Ming Liu（同上）

E-mail: Suenaga-kazu@sanken.osaka-u.ac.jp

2022～2023 年度にかけて、(1) 2.5 次元物質の光学特性測定に関する基礎的研究が順調に進捗した。とくに角度分解 EELS によるエキシトン分散関係の測定には単層グラフェンから TMDC まで幅広い物質において検証された。(2) モアレ構造を持つ 2.5 次元物質の電子顕微鏡観察と局所的な電子分光測定に大きな進捗が見られた。(3)原子レベルでの分析が各種材料に応用され、高感度を持つ電子分光が 2.5 次元物質の構造解析に広く応用されるように努めた。領域内の研究者との共同研究も幅広く行われた。また Wien 大学やローマ大などとの国際共同研究も進行している。

主な成果としては、町田(A02)、Lin(A03)、吾郷(A01)などと共同研究を行い、各種２次元材料のモアレ構造解析を進めた。とくにツイスト角によって異なる特性が得られることが期待されており、そのオリジンとなる緩和構造の直接観察などを行なった。一例として、比較的大きなツイスト角を持つ二層グラフェンにおいて、価電子帯スペクトルだけでなくコアロススペクトルからもその特徴的なピークを得ることに成功した[1]。

この他にも、領域内共同研究として、吾郷および松本、宮田などとの共同研究が進んでいる。

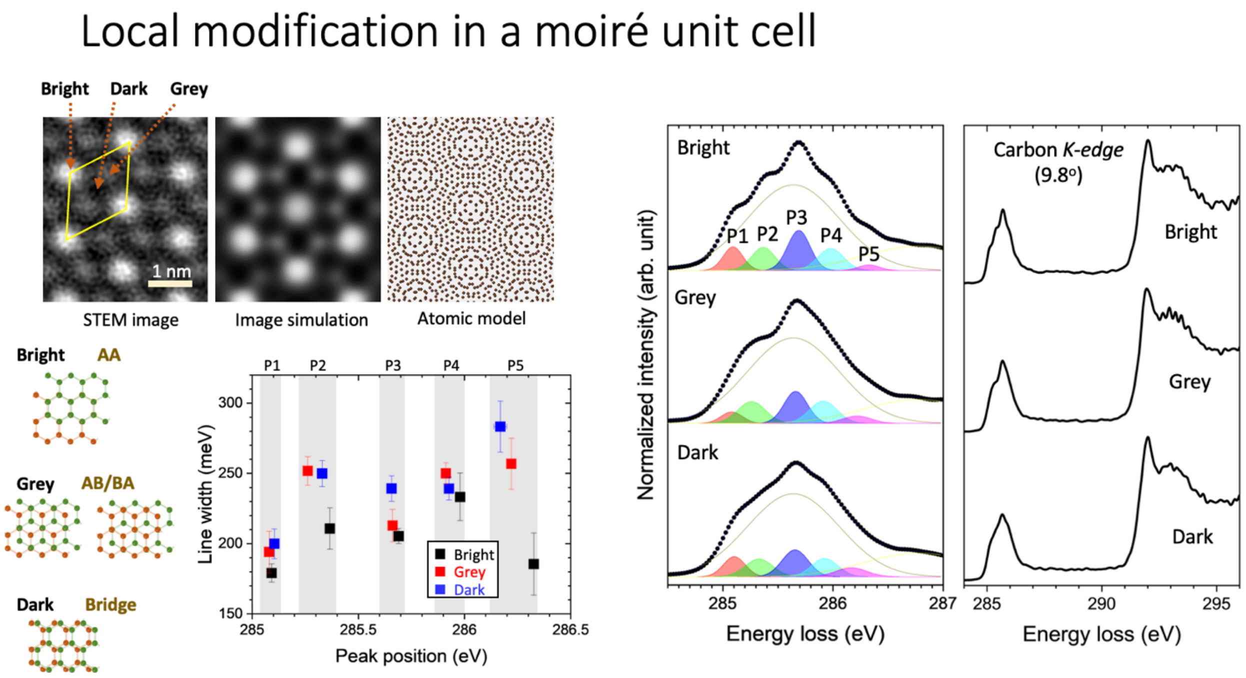


図１　二層グラフェンのモアレ構造に関する EELS 分析の例。C-K エッジに vHS に対応するピークが見られる。これらのピークの強度比はモアレの局所構造（局所的な原子位置）によって変化する。

【2023 年度の領域内共同研究者】

松本(A02)、吾郷(A01)、Lin(A03)、岡田(A01)、宮田(A02)、西堀(A03)、蒲(A04)、町田(A02)など

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] M. Liu, R. Senga, M. Koshino, Y.-C. Lin, K. Suenaga, Direct observation of locally modified excitonic effects within a moiré unit cell in twisted bilayer graphenes, *ACS Nano*, **17**, 18433(2023).

[2] A. Guandalini, R. Senga, Y.-C. Lin, K. Suenaga *et al.*, Excitonic effects in energy-loss spectra of freestanding graphene, *Nano Lett.*, **23**, 11835(2023).

2.5次元物質におけるバンド構造の直接観測

坂野 昌人（東京大学大学院工学系研究科）

研究協力者：石坂 香子（同上）

E-mail: sakano@ap.t.u-tokyo.ac.jp

角度分解光電子分光は、第一原理的な電子構造の計算予測が難しい複雑な構造を有する物質においても電子状態（バンド構造）を直接観測することが可能であり、2.5 次元物質における未開拓物性の探求に対して強力な力を発揮する。これまで本プロジェクトでは町田(A02)との共同研究によって、機械的剥離で得られた微小(~0.01 mm)な 2 次元結晶を複雑に積層した 2.5 次元物質のバンド構造を直接観測するための試料作製の方法を確立している。現在では笹川(A04)や渡邊(A01)の高品質単結晶を使用した領域内の共同研究を通して、バルク結晶や単純な 2 次元結晶では実現しない特異な電子構造の探索を行っている。

2023 年度は、主にツイスト積層体：180 度ツイスト 2 層 $ReSe_2$(論文投稿中)および 0 度積層 2 層 WTe_2[1]、ヤヌス単層遷移金属ダイカルコゲナイド：ヤヌス単層 WSeS の電子状態の研究を進めた。ツイスト積層体の研究では、角度分解光電子分光[Figs. 1(a)-1(c)]と第二次高調波発生[Figs. 1(d)-1(f)]を用いて、ツイスト積層によって空間反転対称性の破れの有無が制御可能であることを明らかにした。ヤヌス単層 WSeS では、加藤俊(A01)と石井(A05)の協力のもと、Se 原子から S 原子への元素置換がバンド構造に及ぼす影響を明らかにする研究を進めている。この他にも、西堀(A03)や蒲(A04)、鈴木(東大物性研)[2]との共同研究を行い、2.5 次元物質のバンド構造と結晶構造の関係を明らかにする研究を行っている。

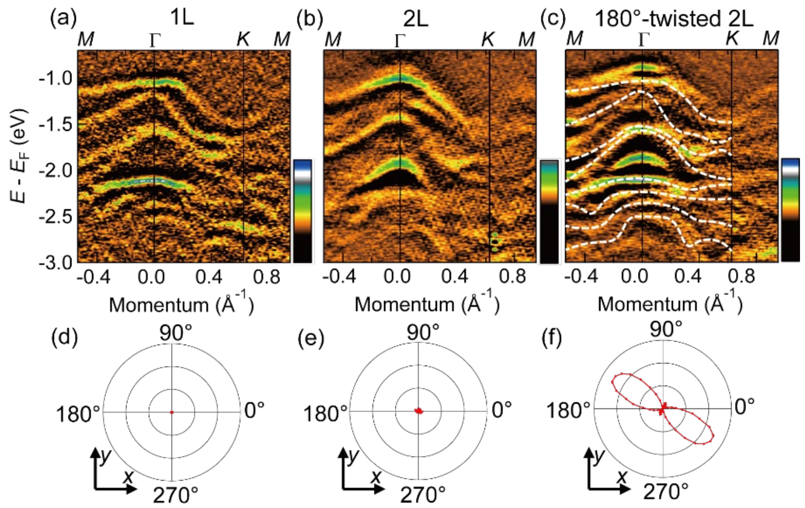


Figure 1 (a)-(c) ARPES (curvature) images of monolayer (1L), bilayer (2L), and 180°-twisted 2L $ReSe_2$. White broken lines in (c) represent the band dispersions of monolayer $ReSe_2$ obtained from the ARPES image, which are inevitably observed from the 180°-twisted 2L $ReSe_2$ samples. (d)-(f) Polar plot of the second harmonic generation (SHG) from 1L, 2L, and 180°-twisted $ReSe_2$. Linear-polarized component of the SHG parallel to the linear polarization of the incident light is detected.

【2023 年度の領域内共同研究者】

渡邊(A01)、加藤俊(A01)、町田(A02)、松田(A03)、西堀(A03)、笹川(A04)、蒲(A04)、石井(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] 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**, 9280-9286 (2023).

[2] T. Suzuki, Y. Kubota, N. Mitsuishi, S. Akatsuka, J. Koga, M. Sakano, S. Masubuchi, Y. Tanaka, T. Togashi, H. Ohsumi, K. Tamasaku, M. Yabashi, H. Takahashi, S. Ishiwata, T. Machida, I. Matsuda, K. Ishizaka, K. Okazaki, Ultrafast control of the crystal structure in a topological charge-density-wave material, *Phys. Rev.B*, **108**, 184305 (2023).

4．　計画班 研究成果

A04班

2.5次元構造の新奇物性開拓
（物性開拓班）

越野 幹人

高村 由起子

笹川 崇男

蒲 江

2.5次元物質の物性理論の開拓

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）

E-mail: koshino@phys.sci.osaka-u.ac.jp

2023年度は、従来の二層モアレ系を超えた複数層モアレ系の物性を記述する理論の構築を中心として、主に以下の成果を上げた。

(1) ツイスト3層グラフェンにおける格子緩和と電子構造の理論：近年モアレ材料への関心は、複数のモアレ模様の干渉によって準周期モアレ構造が生じる多層系にまで拡大している。しかしこのような超モアレ構造は数十 nm から 100nm 以上の長大なスケールを持ち、従来の理論手法による解析を阻んできた。この研究では、汎用的な連続体理論を構築することで、2 つのモアレパターンが競合するツイスト三層グラフェンにおける格子緩和と電子構造を理論的に調べた。その結果、グラフェンの原子格子の緩和に加え、モアレ格子もまた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という「マルチスケール・ドメイン生成」が生じることを発見した（下図）。さらにその下で、非自明なトポロジーに起因してドメイン壁に一次元的な電子チャネルを生じることを明らかにした。この理論の枠組みは任意の二次元物質のツイスト系に適用することが可能であり、モアレ物質の理論研究の範囲を多層系に大きく広げる成果である。

(2) 3 次元グラファイトツイスト接合における電気伝導の理論：グラファイトがツイスト界面を介して接合したツイスト構造は、通常のグラファイトの積層欠陥としてよく見られる構造である。ここではこの界面を挟んだ量子的な電気伝導度を再帰的グリーン関数法によって求めた。その結果、界面に存在するフラットバンド的な局在状態によって、伝導度の角度依存にファノ共鳴が生じることを明らかにした。今後は同様の理論を用いて 3 次元超伝導層状物質のツイストジョセフソン接合を理論的に記述する計画である。

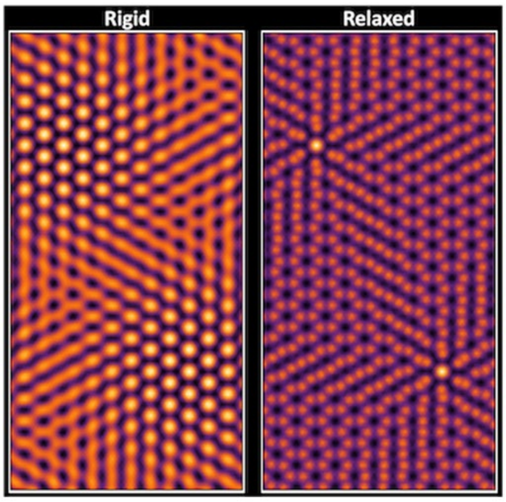


Figure 1 Moiré pattern in a chiral twist trilayer graphene; (right) without and (left) with lattice relaxation.

【2023年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、渡邊(A01)、加藤幸一郎(A01)、加藤俊顕(A01)、宮田(A02)、町田(A02)、若林(A04)

【2023年度の代表的な研究成果】

[1] N. Nakatsuji, T. Kawakami, M. Koshino, Multiscale lattice relaxation in general twisted trilayer graphenes, *Phys. Rev. X*, **13**, 041007 (2023).

[2] 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).

[3] T. Kawakami, G.Tamaki, M. Koshino, Topological domain walls in graphene nanoribbons with carrier doping, *Phys. Rev. B,* **108**, 045401 (2023).

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 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：Antoine Fleurence・麻生 浩平・大島 義文（同上）

E-mail: yukikoyt@jaist.ac.jp

2023 年度は、(1) 半導体基板上スタネンの創成、(2) 二ホウ化ジルコニウム（ZrB_2）薄膜の窒化による六方晶窒化ホウ素単原子層大面積化のためのプラズマ源の導入、(3) 走査透過電子顕微鏡（STEM）中で二次元材料に対する電圧印加その場観察や大気非曝露試料導入を可能とする設備の整備、などを中心に研究を進めた。一方で、学生複数名を領域内研究者のもとに派遣して、理論計算やカルコゲナイド層状物質の最先端剥離・転写技術について学ばせ、今後の研究活動の発展への寄与が期待できる。本学の原子分解能顕微鏡と研究協力者の尽力により共同利用拠点・分析拠点（構造解析）として領域内共同研究者の多種多様な試料の観察を行った結果、一部の成果は論文発表につながった[1][2]。他に、国際連携担当として、米国や欧州の二次元材料研究に強みをもつ研究者とのオンラインセミナーやオンサイトシンポジウムを企画・実施し、今後の連携のための議論を行った。実際に、博士前期課程学生を米国ブルックヘヴン国立研究所に 3 ヶ月派遣し、放射光施設に設置された最先端顕微鏡の技術を学ばせた。また、チェコ共和国の研究コンソーシアムと本領域のシンポジウム共催、及び学生と若手研究者の国際交流に向けた準備に着手した。

具体的な研究成果としては、Fig.1a に示すように、人工的に二層を積層した試料の結晶構造を、STEM を用いて原子・元素分解能観察することで、他の方法では特定することが難しいそれぞれの層内原子配置を明らかにすることができた。二層を同じツイスト角で積層しても、界面における面内方向シフトを考慮すると様々な積層構造の可能性が存在するが、この観察手法を用いることで特定が可能である。また、博士後期課程学生が、Fig.1b に示すように InSb(111)A ウェハ上に Sn を蒸着・加熱することで、スタネンと思われる、極限まで薄い Sn の蜂の巣格子と InSb(111)表面のつくるモアレ様構造が生じることを走査トンネル顕微鏡（STM）観察により明らかにした。今後、試料作製条件を最適化することにより、相補的な分析手法で結晶構造と電子状態の解析・測定が可能な試料をつくり、モアレ様構造の詳細を明らかにしていく。

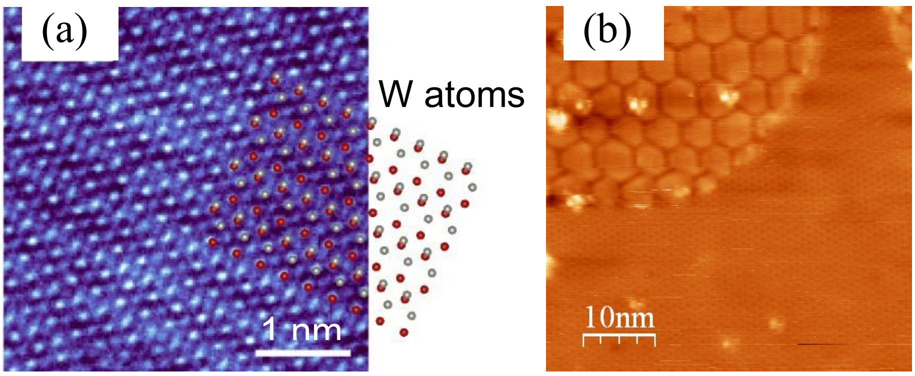


Figure 1 (a) STEM image of twisted bilayer WTe_2 with 0° twist angle. Schematics of a possible W atom arrangement in two layers are overlaid. Reprinted with permission from [1]. Copyright 2023 American Chemical Society. (b) STM image of InSb(111)A surface after Sn deposition and annealing, revealing moiré-like structure.

【2023 年度の領域内共同研究者】
岡田(A01)、渡邊(A01)、加藤(俊)(A01)、宮田(A02)、町田(A02)、松田(A03)、坂野(A03)、杉本(A03)、高橋(A03)、笹川(A04)、長汐(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】
[1] 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**, 9280-9286 (2023).
[2] 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).

新奇物性を示す2.5次元物質の開拓

笹川 崇男（東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所）

E-mail: sasagawa@msl.titech.ac.jp

van der Waals (vdW)層状物質は、2.5次元構造体の重要な構成要素である。そこで我々は、剥離・積層法用の出発素材として、様々な vdW 層状物質の高品質単結晶試料の開発に取り組んでいる。その成果として、開発した単結晶試料を用いた領域内共同研究も順調に進んでいる。具体的には、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDCs)では、WSe_2やWTe_2の1~数層の薄片単結晶を用いたデバイス構造を対象として、各グループが得意とする複数の手法を連携させることによって、ツイスト角によって変化する電子構造と電子物性の解明や、トポロジカル電子状態を活用するデバイスの開発について大きく進展させることができ、共同研究としての大きな成果が得られた［1-3］。同様に、vdW 絶縁体としては稀有な面直方向に極性をもつ二次元強誘電体であるα-In_2Se_3についても、多形（積層様式）まで選択できる単結晶試料の開発が進み、共同研究として、その積層様式に依存した圧電応答の評価にも成功した［4］。

我々の単独の成果としては、TMDCs の中でも先行研究がほとんどない 2M 構造のWS_2の良質な単結晶試料の開発と超伝導を中心とした物性評価が進んだ。準安定相である 2M-WS_2は、K を含む単結晶を育成した後に K をデインターカレーションする工程として最適化を進めた。図1に示すように、準備に成功した単結晶試料を用いて、面内も含めた3軸に異方的な超伝導物性を実験的に解明し、臨界磁場が Pauli 限界を超える振る舞いを示す非従来型超伝導の兆候も見出した。

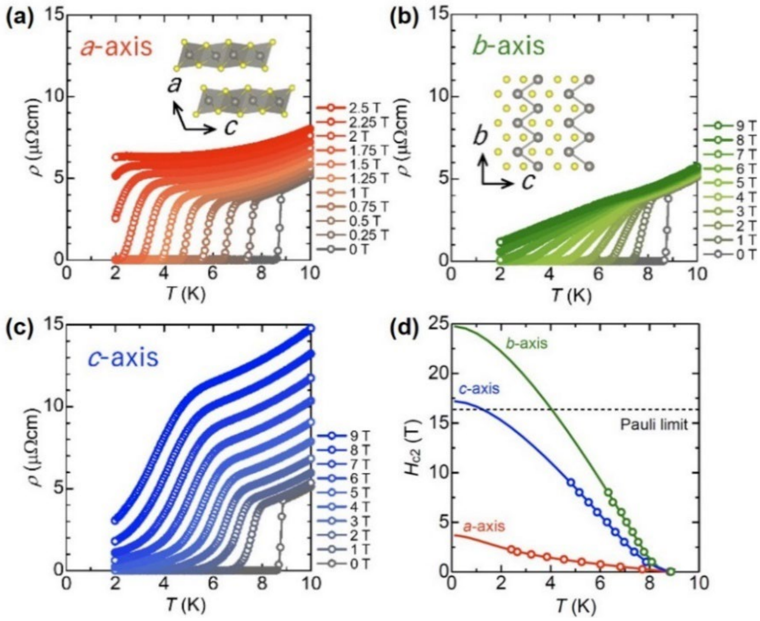


Figure 1 Tri-axial anisotropy of superconducting transitions under magnetic fields in 2M-WS_2 single crystals. (a)-(c) Magnetic fields parallel to the *a*-, *b*-, and *c*-axes, respectively. (d) Temperature dependence of the upper critical fields H_{c2} (solid lines: fitting curves based on the two-gap model).

【2023 年度の領域内共同研究者】

渡邊(A01)、町田(A02)、末永(A02)、坂野(A03)、松田(A03)、高村(A04)、加藤(A01)、杉本(A03)、塩見(A04)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] 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. Res.* **5**, 043292 (2023).

[2] Y. Zhang, M. Sakano, Y. Yamada-Takamura, K. Watanabe, K. Matsuda, T. Sasagawa, T. Machida *et al.*, Symmetry Engineering in Twisted Bilayer WTe_2, *Nano Lett.* **23**, 9280 (2023).

[3] M.D. Randle, K. Watanabe, T. Sasagawa, K. Ishibashi *et al.*, Gate-defined josephson weak-links in monolayer WTe_2, *Adv. Mater*. 2301683 (2023).

[4] K. Ueda, R. Murata, T. Sasagawa, Y. Shiomi, Piezoelectric effect in 2H and 3R phases of α-In_2Se_3, *Jpn. J. Appl. Phys*. **62**, 061006 (2023).

歪みを用いた２.５次元物質の構造制御とデバイス創製

蒲 江（東京工業大学　理学院物理学系）

研究協力者：竹延 大志（名古屋大学　工学研究科）

E-mail: pu@phys.titech.ac.jp

2023 年度は、(1) 歪みを用いた２.５次元構造の作製と構造制御技術の構築、(2) 歪み印加した２.５次元物質の発光デバイス作製と評価、(3) 歪み印加した２.５次元物質の電子構造評価などを中心に研究を行った。特に、多くの領域内共同研究者から試料提供を受け、デバイス作製と顕微・観察評価を通して共同研究を行った[2-4]。また、領域内研究者による理論計算や高度な測定技術の協力を得て研究活動の高度化も進めた。

主な成果としては、柔軟な基板上にヘテロ構造を作製する技術を確立し、歪みを印加した際のモアレパターンの観察を行った。その結果、歪みによりモアレパターンが連続的かつ自在に制御可能であることを明らかにした。(Fig. 1a)。特に、モアレ構造を変調した際のバンド構造変化に関しても、理論計算による検証を行った。また、これらの積層構造を用いた発光デバイスの作製にも成功し、実際に電流励起発光も観測した（Fig. 1b）[1]。さらに、歪み印加した原子層物質のバンド構造変化の直接観測にも取り組み、領域内共同研究により、歪み効果と電子構造変化の相関を示唆する結果も得られた。以上の技術構築及び観測・評価技術をもとに、今後、モアレ超格子の構造制御に起因した新奇の電子・光機能及びデバイスの創製が期待できる。

この他にも、領域メンバーの協力を得て、大面積グラフェンにおける磁気抵抗効果や、ヤヌス TMDC を用いた電子・光デバイス、プラズモン効果を導入した発光デバイスの作製と発光特性評価にも取り組んだ。

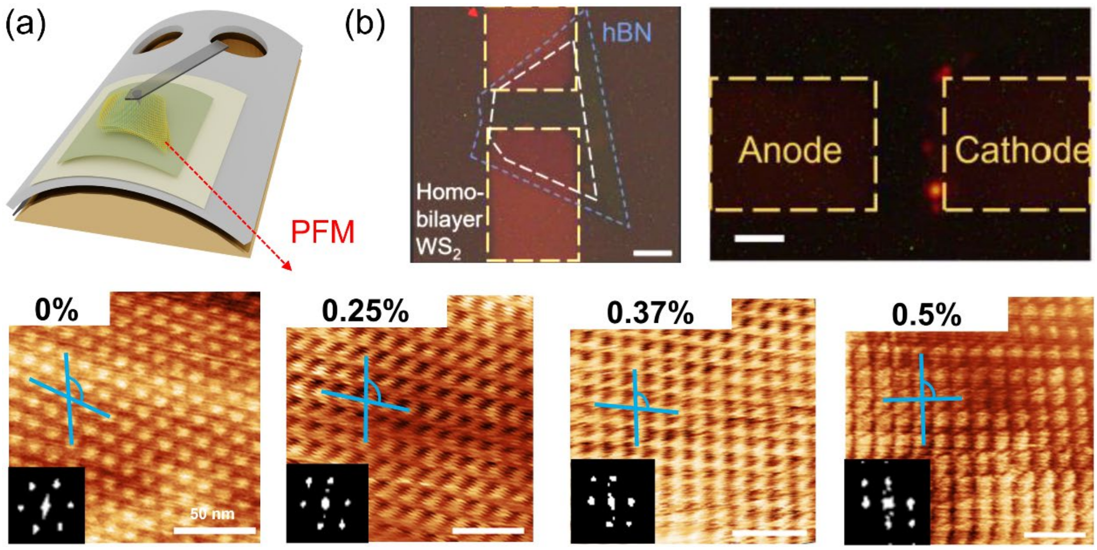


Figure 1 (a) Strain-tuning of Moire pattern in the stacked TMDC structure. Top panel shows the samples on flexible substrates, and bottom panel indicates the continuous change of piezo-AFM images. (b) Optical image of light-emitting device based on the stacked TMDC structure and its EL image.

【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、吾郷(A01)、加藤(A01)、宮田(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、坂野(A03)、末永(A03)、Lin(A03)、柳(A03)、越野(A04)、上野(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Ou, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu *et al.*, Ion-gel-based light-emitting devices using transition metal dichalcogenides and hexagonal boron nitride heterostructures, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, SC1026 (2023).

[2] R. Natsui, Y.-C. Lin, J. Pu, T. Takenobu, 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 (2023).

[3] 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).

[4] Y. Oshima, T. Takenobu, J. Pu, T. Kusamoto *et al.*, A memristive oscillator, *Adv. Phys. Res.*, 2300117 (2023).

4．　計画班 研究成果

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）

上野 貢生

長汐 晃輔

大野 雄高

松尾 吉晃

プラズモン／2 次元積層ナノ構造を用いた化学センサー・光エネルギー変換

上野 貢生（北海道大学大学院理学研究院）

研究協力者：龍﨑 奏、今枝 佳祐（同上）

E-mail: ueno@sci.hokudai.ac.jp

2023 年度は、(1) Au／$MoSe_2$ 結合系ナノ構造の近接場分光特性と位相緩和ダイナミクス（宮田 G・長汐 G 共同研究）、(2) グラフェン・ピラー化カーボンナノ構造を用いた化学センサー（吾郷 G・松尾 G 共同研究）、(3) TMD ヘテロナノ構造を用いたプラズモン誘起エネルギー変換（宮田 G・蒲 G・長汐共同研究）、(4) Au／MoS_2 積層ナノ構造を用いた光触媒反応システムの構築（宮田 G・高橋 G）などを中心に研究を行った。TMD 上への金ナノ構造の作製や TMD ヘテロ構造をねじれ角を厳密に制御して作製する技術を習得した。

主な成果としては、CVD 合成した $MoSe_2$ 上に金ナノブロック構造を作製し、Fano 共鳴が誘起されていることを明らかにするとともに、位相緩和ダイナミクスがダークプラズモン励起に基づいて長寿命化することを明らかにした（Fig. 1(a), (b)）。また、WSe_2/MoS_2 ヘテロ構造のねじれ角を第二高調波発生の偏光依存性を測定することにより厳密に見積もり、層間励起子の発光波長や電荷再結合速度にねじれ角依存性があることを明らかにした。（Fig. 1(c), (d)）。また、ヘテロナノ構造上に 1 nm 厚の Al_2O_3 層を介して金ナノ構造を作製して（Fig. 1(e)）、層間励起子の発光をパーセル効果により 10 倍増幅することが可能であることを明らかにした（Fig. 1(f)）。メチレンブルーの光触媒反応を Au/MoS_2 構造により加速することに成功した。

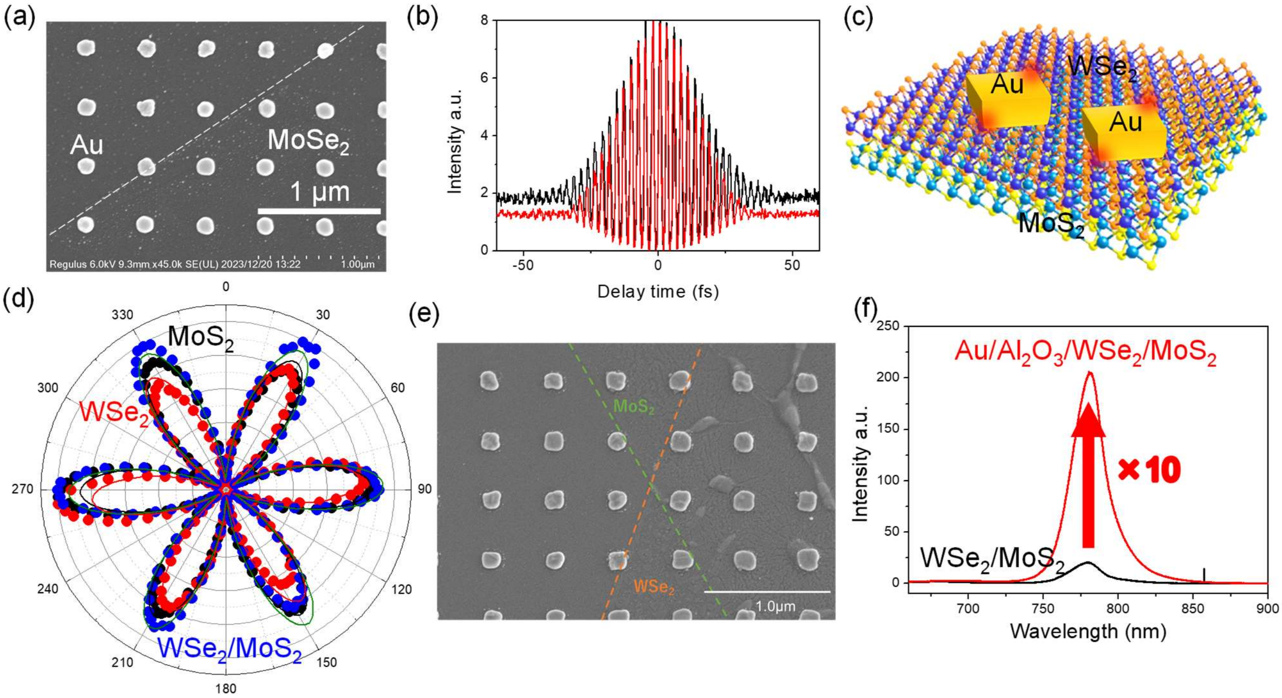


Figure 1 (a) SEM image of Au/$MoSe_2$ nanostructures. (c) Autocorrelation trace of Au/$MoSe_2$ nanostructures. (c) A schematic illustration of Au/WSe_2/MoS_2 heteronanostructures. (d) Polarization dependence of second harmonic intensity of MoS_2, WSe_2, and WSe_2/MoS_2 heterostructures. (e) SEM image of Au/Al_2O_3//WSe_2/MoS_2 heterostructures. (f) Photoluminescence spectra of WSe_2/MoS_2 and Au/Al_2O_3//WSe_2/MoS_2 heterostructures

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷 (A01)、宮田(A02)、高橋(A03)、蒲(A04)、長汐(A05)、松尾(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] 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*, 10.1021/acs.jpcc.3c08299(2024).

[2] 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(2023).

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）

E-mail: nagashio@material.t.u-tokyo.ac.jp

2022～2023 年度にかけて、(1) ２次元層状強誘電 SnS におけるバルク光起電力効果の実証、(2) コンタクト領域での局所酸化 WO_x 形成による *n* 型 WSe_2 の *p* 型化、(3) Nb-doped MoS_2 同一結晶面内トンネル FET の動作実証、などを中心に研究を行った。同時に、多くの領域内共同研究者との共同研究も進めた。

主な成果として、N 型トンネル FET（TFET）の動作実証について説明する。2D-TFET は低消費電力動作と高駆動電流が期待されているが、ヘテロ界面形成時の界面準位の導入のため期待ほどの特性が得られていない。本研究では、同一結晶の面内ヘテロ構造を利用することで TFET 動作を試みた。単層 *n*-MoS_2/多層 p^+-MoS_2 結晶からなる TFET デバイスを作製し（図 a)、室温でのダイオード特性のバックゲート(BG)依存性において、順バイアス側に負性微分抵抗（NDR trend)が観測した（図 b)。このことから type III バンドアライメントが形成されていることがわかる。また、室温における I_D-V_{BG} 特性において(図 c)、温度依存性がほとんどないことから、界面準位起因の生成・再結合電流殆ど無視できるほど小さく、今回のヘテロ界面は電気的に不活性な理想界面に近いものと考えられる。以上より、p^+-MoS_2 を利用した単一ゲート同一結晶面内ヘテロにおいて、界面準位が低減された TFET 特性を実証した。

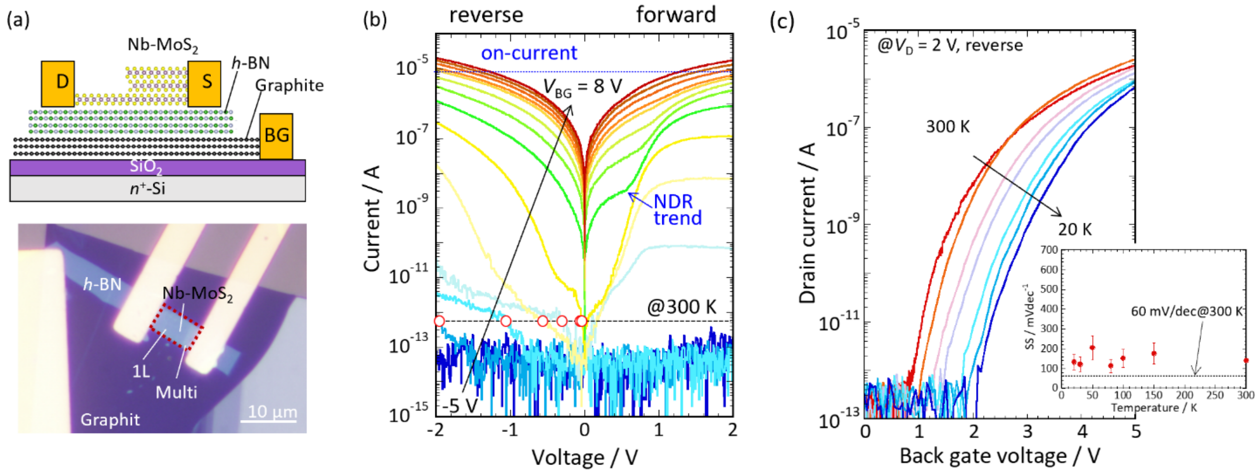


Figure (a) Schematic and photograph of 1L *n*-MoS_2/multilayer p^+- MoS_2 TFET. (b) Diode properties of the homojunction Nb-doped MoS_2 TFET at different V_{BG}s and 300 K. (c) Temperature dependence of transfer characteristics at V_D = 2 V (reverse bias) (20, 30, 50, 80, 100, 150, and 300 K). Inset: SS as a function of temperature.

【2022-2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、宮田(A02)、荒井(A02)、上野啓(A02)、松田(A03)、西堀(A03)、若林(A04)、上野貢(A05)

【2022-2023 年度の代表的な研究成果】

[1] Y.-R. Chang, R. Nanae, S. Kitamura, T. Nishimura, H. Wang, Y. Xiang, K. Shinokita, K. Matsuda, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, "Shift current photovoltaics based on a noncentrosymmetric phase in in-plane ferroelectric SnS", ***Adv. Mater.***, **35**, 2301172(2023).
[2] R. Kato, H. Uchiyama, T. Nishimura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. Chen, K. Nagashio, "*p*-type conversion of WS_2 and WSe_2 by position-selective oxidation doping and its application in top gate transistors", ***ACS appl. mater. interfaces***, **15**, 26977(2023).
[3] 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.***, 2300083(2023).

ナノスケールの積層構造に基く超高密度ニューラルネットワークの創出

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

E-mail: yohno@nagoya-u.jp

カーボンナノチューブと分子の作るナノスケールの積層構造の形成とそれを用いた超高密度ニューラルネットワークの創出、およびリザバーコンピューティングへの応用の研究を推進し、これまでにカーボンナノチューブ電気化学センサにおけるリザバー動作の実現とそれを用いたＩ型糖尿病患者の血糖値変動の予測の実証などを行ってきた。2023 年度は、リザバー動作に必要な分子スケールのメモリの創出を目指し、メモリ媒体として期待されるスマネン分子とその分極反転の高感度検出のための半導体カーボンナノチューブとの積層構造の試作、およびそれらの相互作用の理解を中心に研究を行った。

スマネンとカーボンナノチューブは共にπ共役系の炭素材料であり、これらの材料を積層すると電荷移動や軌道混成など様々な相互作用を生ずると考えられ、分子メモリ等の機能デバイスの実現に向けて界面で生ずる相互作用の解明が必要である。本研究では、A01 班 櫻井らの合成したスマネンおよび多様なフッ素末端スマネン(フルオロスマネン)と半導体カーボンナノチューブの相互作用を明らかにするため、それらの積層構造をもつカーボンナノチューブ薄膜トランジスタ(Fig. 1(a))を試作し、その電気的特性を調べた。その結果、フルオロスマネンがカーボンナノチューブにキャリアをドープすること、その極性やドーピング濃度がフルオロスマネンの末端に依存することなどを見出した(Fig. 1(b))。この現象を理解するため、フルオロスマネンとグラフェンの複合構造に対して密度汎関数理論計算を行い（A01 班 岡田ら）、グラフェンのディラック点のエネルギーがフルオロスマネンの電気双極子によって変化することが示された。

今後は、カーボンナノチューブ近傍の電界集中によるスマネンの構造反転とその検出に挑戦する。特に、反転電界の低いスマネン誘導体の構造やカーボンナノチューブへの修飾手法について検討し、メモリ動作の実証を目指す。

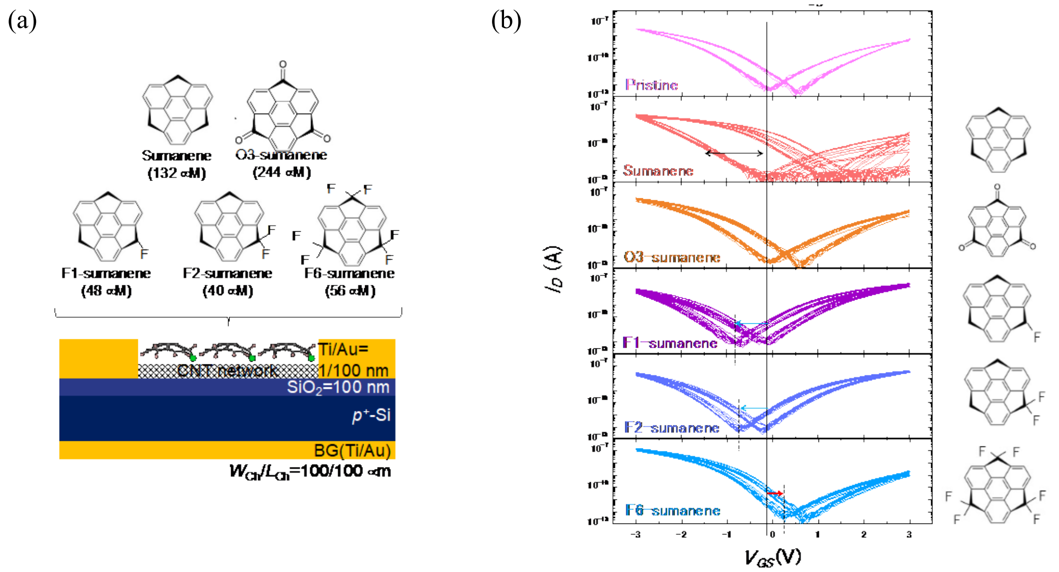


Figure 1 Carbon nanotube thin-film transistors with sumanene and various types of fluorinated sumanene. (a) Schematic device structure and molecular structures. (b) I_D-V_{GS} characteristics.

【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、櫻井(A01)、荒井(A02)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] T. Shingu, H. Uchiyama, T. Watanabe, Y. Ohno, Electrochemical reservoir computing based on surface-functionalized carbon nanotubes, *Carbon,* **214**, 118344 (2023).

2.5次元材料の蓄電デバイスへの応用

松尾 吉晃（兵庫県立大学）

研究協力者：稲本 純一（同上）

E-mail: ymatsuo@eng.u-hyogo.ac.jp

2023年度も引き続き、(1) 2.5次元物質の合成、(2) 2.5次元物質の各種蓄電池活物質としての応用などを中心に研究を行った。同時に領域内共同研究者に、酸素を含み1-5 nm程度のナノ孔を有するグラフェン層が積層した構造のグラフェンライクグラファイト（GLG）やグラフェンをシルセスキオキサンで接続した構造のピラー化炭素（Fig.1(a)）の提供を行った。また、領域内の研究者から高品質な2.5次元材料の提供を受け、これに対して電気化学測定を行うことで研究活動の高度化を進めることができた。

主な成果としては、エーテル、ラクトン等種々の含酸素官能基を炭素面内に導入したモデルGLGに対するＤＦＴ計算により、GLGの特異なアニオン挿入挙動はこれまでに考えていた黒鉛よりも大きな層間距離によるものではなく、酸素の導入により生じるフェルミ準位付近の新たなバンドの生成によるものが主であることを明らかにできたことが挙げられる（Fig.1(b)）[1]。これにより黒鉛とのアニオン挿入電位の差も定量化することができた。

また、GLG薄膜を電極としてインピーダンス法を適用することにより、ナトリウムイオン電池負極として用いた場合のナトリムイオン挿入反応の活性化エネルギーを53.7 – 58.9 kJ mol^{-1}と算出できた。この値はハードカーボンで報告されている72 kJ mol^{-1}程度よりも小さく、GLGを負極に用いるとナトリウムイオン電池の大幅な高速化が期待されることを示している[2]。

さらに、ピラー化炭素前駆体薄膜を熱処理する際に加圧することで、Fig.1(c)に示すように薄膜の緻密化に成功し、これまで問題となっていた、全固体型リチウムイオン電池負極として用いた場合の固体電解質の分解による不可逆容量を低減できた。これとともに充放電電位の低下が見られピラー化炭素が1000 mAh g^{-1}以上の容量を示すこと、Si含有量の増加とともに容量が幾分増加することも明らかにできた。

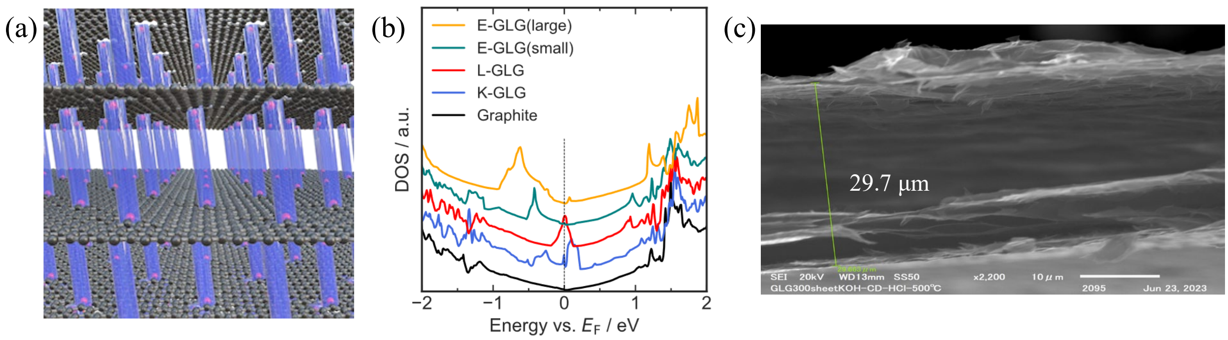


Figure 1 (a) A structure model of pillared carbon. (b) Density of states for the various GLG models without intercalated anions. The samples of E-GLG(large), E-GLG(small), L-GLG and K-GLG are GLG with four pairs of ether groups ($C_{136}O_8$), a pair of ether groups ($C_{142}O_2$), a lactone group ($C_{138}O_2H_5$), and a ketone group ($C_{141}OH_4$), respectively. (c) SEM image of a dense pillared carbon film.

【2023年度の領域内共同研究者】
松本(A02)、吾郷(A02)、上野(A05)

【2023年度の代表的な研究成果】

[1] J. Inamoto, A. Inoo, Y. Matsuo, Elucidating the origin of the low anion intercalation potential of graphene-like graphite: A DFT Study, *J. Phys. Chem. C*, **127**, 9481 (2023).

[2] J. Inamoto, K. Aga, A. Inoo, Y. Matsuo, Kinetic analysis of sodium-ion intercalation reaction into graphene-like graphite by electrochemical impedance spectroscopy, *J. Electrochem. Soc.*, **170**, 060550 (2023).

5． 公募班 研究成果

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）

加藤 幸一郎

加藤 俊顕

黒澤 昌志

田代 省平

久木 一朗

毛利 真一郎

蓬田 陽平

第一原理計算とデータ科学手法による２.５次元材料の合目的的探索

加藤 幸一郎（九州大学大学院工学研究院）

E-mail: kato.koichiro.957@m.kyushu-u.ac.jp

本研究では、多様な積層パターンを有する積層型の２.５次元材料に対して、第一原理計算とデータ科学手法を用いることで、所望の物性を有する積層パターンの合目的的な探索や電子状態を左右する因子の探索を進めている。2023 年度において、4 つの遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD：WS_2、MoS_2、WSe_2、$MoSe_2$）を対象に、電子状態の中でもベリー曲率に着目した積層パターンの探索を行った。ベリー曲率は、2 層の同種・異種積層型の２.５次元材料に対して、1 層目と 2 層目の積層位置のずらしまでを考慮した多様な積層パターンに対する第一原理計算を実施し、得られた結果を最局在ワニエ関数へと変換した上で算出した。ベリー曲率の最大化を目的変数にランダム探索とベイズ最適化による積層パターン探索を比較し、ベイズ最適化の有効性を検証した。ランダム探索とベイズ最適化のそれぞれについて独立に 20 回の探索を実施し、最大のベリー曲率を持つ積層パターンに到達するまでの平均探索回数を比較したところ、ベイズ最適化の方が 2～3 倍ほど早く最適パターンに到達することが可能であることが分かった。

また、積層位置をずらすことによって得られたデータを用いることで、モアレ物理に関する２.５次元材料探索も可能であると考えられることから、越野グループ（A04）との共同研究も開始した。4 つの遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD：WS_2、MoS_2、WSe_2、$MoSe_2$）の同種・異種積層（2 層）を対象に、ずらしによる電子物性の変調の強さを解析し、ベイズ最適化で目的変数に設定可能なモアレ物理と関連する物性値の検討を進めている。

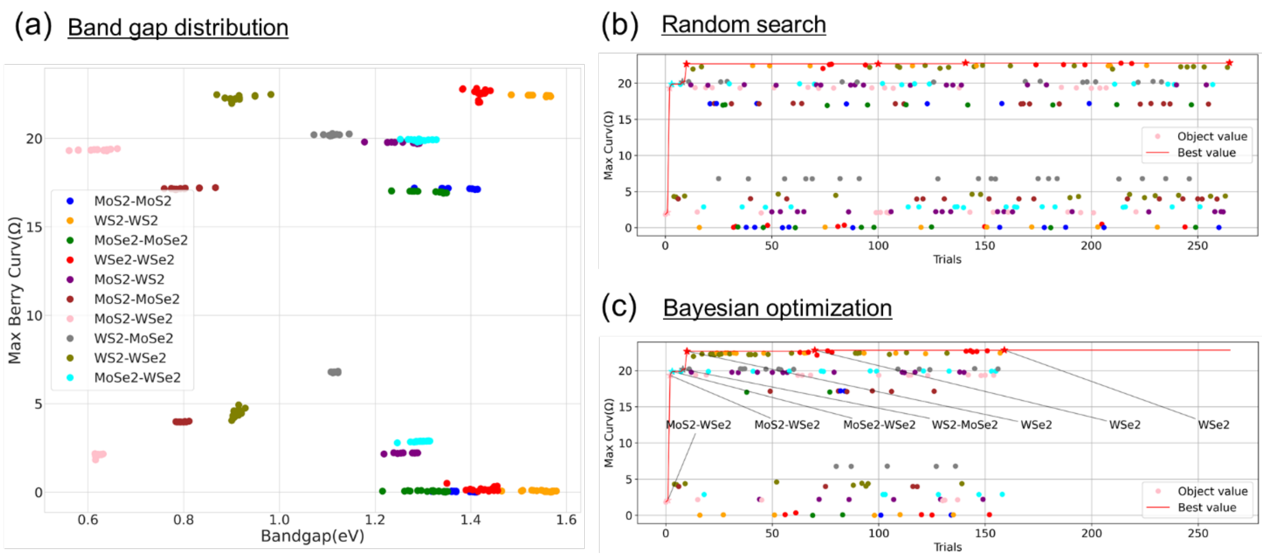


Figure 1. (a) Relationship between band gap and Berry curvature. (b) Random search and (c) Bayesian optimization of stacking pattern search for maximum Berry curvature.

【2023 年度の領域内共同研究者】
越野(A04)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1]. C. Beomgyu, T. Fujigaya, K. Kato, Efficient stacking pattern search for van der Waals hetero structures via Bayesian optimization, MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting, December 2023.

[2]. K. Kato, Efficient search for stacking patterns in van der waals heterostructures using bayesian optimization, The 66th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, March 2024.

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

加藤 俊顕（東北大学 大学院工学研究科）

E-mail: kato12@tohoku.ac.jp

2022～2023 年度にかけて、（1）高品質ヤヌス遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)の創成と（2）ヤヌス反応機構の解明などを中心に研究を行った。同時に、多くの領域内共同研究者にヤヌス TMD 試料の提供を行って、領域内共同研究を活発に推進した。領域内の研究者による材料合成技術と高度な計測との協力を得て、研究活動の高度化を進めることができたとともに、一部の成果は論文につながった。

主な成果としては、欠陥を導入したヤヌス TMD に対して酸素ガスを暴露した場合に、蛍光(PL)強度が著しく増大する現象を見出した（Fig.1）。これはヤヌス TMD 特有の面直電場に加え、欠陥構造が酸素吸着サイトとして複合的に作用しているものと考えている。またこの他にも、ヤヌス化反応を電気伝導特性の観点で”その場観測”可能な装置の開発に成功した。剥離法により採取した単層二硫化モリブデン(MoS_2)を六方晶窒化ホウ素(h-BN)の上に積層して形成したバックゲート型の電界効果型トランジスタに対して、ヤヌス化のための H_2 プラズマ照射と電流電圧特性計測を、大気暴露することなく”その場”で繰り返し行った結果、プラズマ照射に伴い電気伝導特性が著しく変化することを見出した。今後、既に確立している光学的なその場観測と組み合わせることで、ヤヌス化反応に伴う反応機構の詳細解明が期待できる。また、共同研究としてヤヌス TMD 特有の歪効果を積極的に活用することで、ヤヌス TMD スクロールの創成に成功した[1]。さらに、MoS_2 ナノチューブの最外面 S を Se にヤヌス化することで、ヤヌスナノチューブ（MoSSe）の創成に世界で初めて成功した[2]。

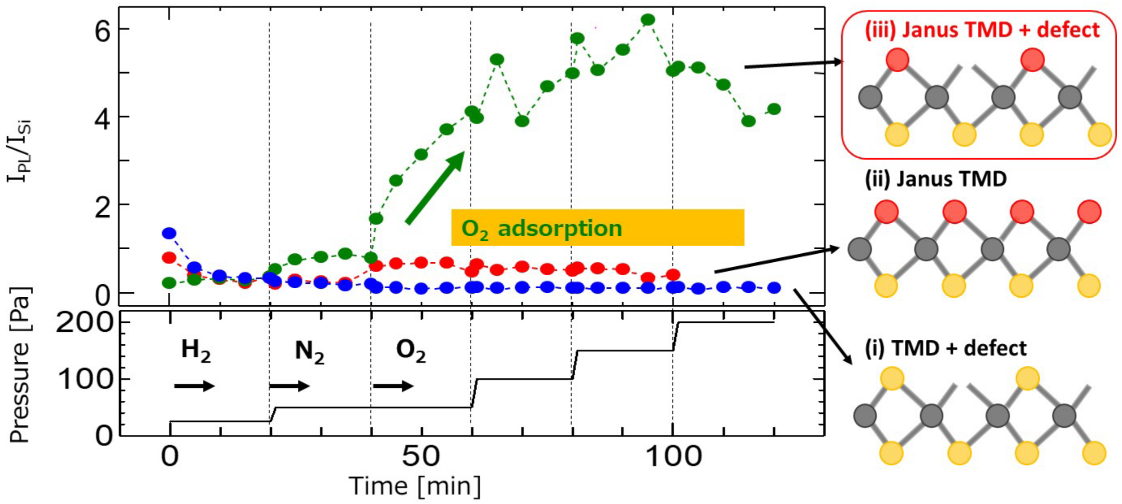


Figure 1 Typical normalized PL intensity (I_{PL}/I_{Si}) profiles of (i) TMD + defect, (ii) Janus TMD, (iii) Janus TMD + defect during various gas exposure (H_2, N_2, O_2)).

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、岡田(A01)、渡邊(A01)、蓬田(A01)、宮田(A02)、町田(A02)、上野(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、末永(A03)、坂野(A03)、高橋(A03)、柳(A03)、Lin(A03)、高村(A04)、笹川(A04)、蒲(A04)、塩見(A04)、石井(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] 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 (2024).
[2] Y. Nakanishi, S. Furusawa, Y. Sato, T. Tanaka, Y. Yomogida, K. Yanagi, W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, T. Kato, K. Suenaga, Y. Miyata, Structural diversity of single-walled transition metal dichalcogenide nanotubes grown via template reaction, *Adv. Mater.*, **35**, 2306631 (2023).

14 族 2.5 次元物質の薄膜合成と熱電物性評価

黒澤 昌志（名古屋大学大学院工学研究科）

E-mail: kurosawa@nagoya-u.jp

14 族 2.5 次元物質（グラフェンの炭素原子をシリコン、ゲルマニウム、スズに置換した二次元物質：シリセン、ゲルマネン、スタネン）は、超高真空中で導電性基板上でのみ、その合成に成功しており、理論的に予測されている卓越した物性を応用するには至っていない。この課題解決に向けて、本公募研究では、ゲルマネンの物性計測やデバイス応用に資する構造（大気・熱安定性に優れる薄膜を高抵抗基板上に合成すること）を早期に実現するとともに、熱電物性を世界に先駆け解明しその応用可能性を議論することを目指している。

本領域に参画して 2 年目となる 2023 年度は、前半に研究室移設があり装置の復帰に苦慮したが、後半から試料合成および熱電物性評価に取り組んだ。同時に、領域内の共用設備の利用や理論研究者との共同研究も推進し、以下の成果が得られた。

[水素修飾ゲルマネン(GeH)薄膜の層間距離制御] ゲルマネン合成法として、代表者らは GeH の真空中加熱による水素脱離を提案してきた。本年度は、Ge(111)基板上に合成した GeH 薄膜試料を用い、水素脱離する際の加熱条件と結晶構造の相関を調査した。300℃加熱前後の試料の XRD 測定結果をそれぞれ Fig. 1(a)および 1(b)に示す。加熱前と比較し、加熱後の GeH 002 の回折位置が高角度側に若干シフトしていることがよく分かる。この回折位置の変化は層間距離の 10%縮小に対応し、水素脱離の影響だと推測している。

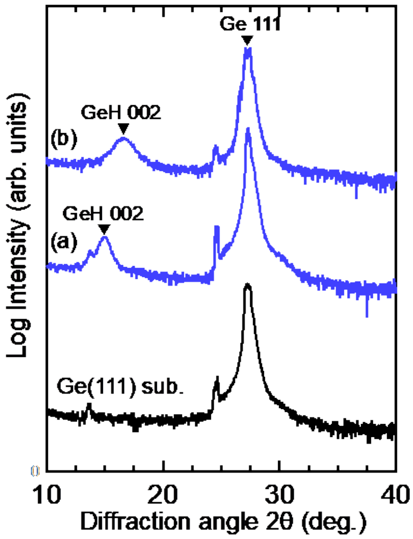


Figure 1 XRD 2θ/ω scans obtained from various GeH layers on Ge(111) substrate: (a) before and (b) after de-hydrogen annealing at 300 ºC in a vacuum ambient.

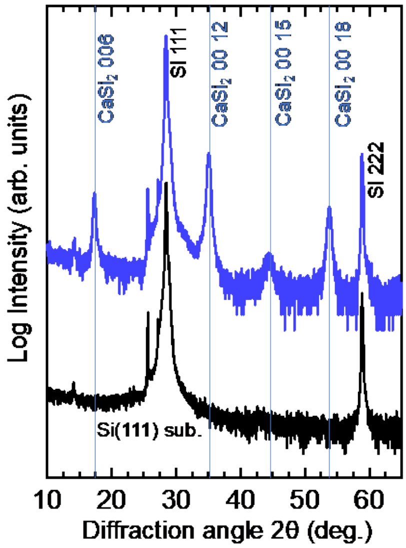


Figure 2 XRD 2*θ*/*ω* scan obtained from a $CaSi_2$ layer grown on Si (111) substrates. That for the Si substrate is also shown for comparison.

[カルシウムシリサイド($CaSi_2$)薄膜の合成および熱電物性評価] 高抵抗 Si(111)基板上に合成した薄膜試料の X 線回折 2θ/ω スキャンの結果を Fig. 2 に示す。6R-$CaSi_2$ 006, 0012, 0015, 0018 に帰属される回折位置にピークが観測された。6R-$CaSi_2$ 0012 のピーク位置から c 軸長を算出したところバルク（3.060 nm）に対して 0.2%大きな値が得られた。これは 6R-$CaSi_2$ 薄膜と Si 基板の間に存在する格子ミスマッチ（~4%）に由来すると考えられる。熱電物性を室温で測定したところ、パワーファクターは 9.6 μV/cmK^2 と先行研究に比べると低い値であったが、低温領域においてフォノンドラッグ起因のゼーベック係数の増大が見られることを発見した。

【2023 年度の領域内共同研究者】
長汐(A05)、石井(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] M. Kurosawa, A. Ohta, M. Araidai, S. Shibayama, M. Sakashita, O. Nakatsuka, A new challenge in group-IV materials: energy harvesting application & 2D crystal synthesizing, 14th International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, Sendai (Japan), I-05, 2023/12/14-15 (招待講演).

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

田代 省平（東京大学大学院理学系研究科）

E-mail: tashiro@chem.s.u-tokyo.ac.jp

2023 年度は、環状中空分子をビルディングブロックとしてさまざまな結合を介した二次元集積化を設計することにより、層間に優れた分子配列場を備えた多孔質二次元材料を設計することを目的として研究を進めた（Figure 1a）。加えて共同研究に基づいて、高い分子配列能を持つ多孔質結晶を劈開して他の二次元材料と複合化することにより、分子配列に基づく新機能を創成することも目指した。具体的には、当研究室で開発した非対称トリトピック配位子（*Chem. Sci.* **2018**, *9*, 7614）を環状ビルディングブロックとして、これと銀塩を組み合わせた錯体形成反応を検討することにより、ハニカム状の二次元シート構造が積層した 2D-MOF 結晶を効率よく合成できることを明らかにした（Figure 1b）。ハニカム構造を形成する六角形はナノサイズのキャビティーを形成しており、このキャビティー内には多様な分子認識サイトが配置されていることから、優れた分子配列場として機能することが期待された。そこでさまざまなゲスト分子を結晶内に導入したところ、ゲスト分子が層内もしくは層間に精密に配列することが単結晶 X 線回折測定などより明らかとなった（Figure 1c）。また、さまざまな劈開条件を検討することにより、本 2D-MOF が劈開でき得ることが AFM 測定などより示唆された。

この他にも、当研究室で独自開発した優れた分子配列能を有する環状錯体集積型多孔性結晶 Metal-macrocycle framework（MMF）（*Acc. Chem. Res.* **2020**, *53*, 632）について、元 A04 友利グループとの共同研究を介して 2022 年度に良好な結晶剥離条件を見出すことができたため、本年度においては A01 吾郷グループとの共同研究によって、MMF 剥離結晶の基板転写や電気伝導度測定などを検討するとともに、グラフェンなどの二次元材料との複合化についての検討を進めた。

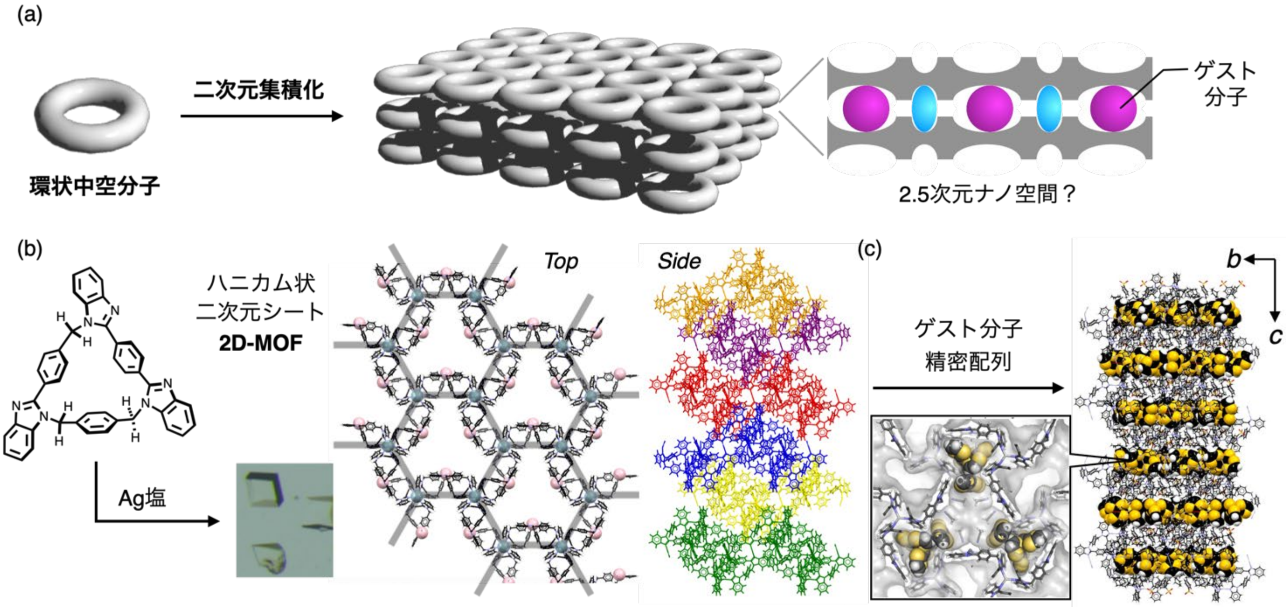


Figure 1. Concept of this study and its specific example. (a) Two-dimensional self-assembly of macrocyclic hollow building blocks to form 2D materials with unique interlayer nanospaces for guest arrangement. (b) The formation of a 2D-MOF by the reaction of an asymmetric tritopic ligand and silver salts. (c) A guest arrangement structure in the 2D-MOF determined by single-crystal X-ray diffraction analysis.

【2023 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、櫻井(A01)

【2023 年度の代表的な研究成果】

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

久木 一朗（大阪大学大学院基礎工学研究科）

E-mail: i.hisaki.es@osaka-u.ac.jp

構造を自在に設計できるテトラカルボン酸を、水素結合によって 2 次元状にネットワーク化したフレームワーク（Hydrogen-bonded organic framework: HOF）を基盤として 2.5 次元物質の創成に取り組んできた。2023 年度は、ピレンのテトラカルボン酸誘導体（**CP-Py**）の 2 次元水素結合ネットワーク（図 1a）が積層した HOF が溶媒分子の吸着・脱離によって静的かつ動的に構造変化することを明らかにした。空間に包接された溶媒分子（ジクロロベンゼン: DCB）の脱離と吸着により、**CP-Py-1** と **CP-Py-2** の 2 つの形態間で可逆的な構造変化を引き起こし、後者はさらに **CP-Py-3** へと不可逆的に変化しすることを見出した（図 1e）。特筆すべき点は、これら 3 つの形態の構造を単結晶 X 線構造解析（SXRD）によって明らかにしたことである。その結果、可逆的な水素結合の形成と解離（図 1c）に加えて、カルボキシフェニル基の歪みや水素結合二量体の変形（ねじれや曲がり）が本 HOF の構造柔軟性の起源であることを特定した（図 1b）。一方、構造転移において強固な積層構造が一意的な構造変化を可能にしていることも明らかになった（図 1d）。これらの結果は、新しい動的層状 HOF を開発するための基本的な知見を与えるものである。

また他にも、**CP-Py** の類縁体であり、フォトクロミック特性を有するジヒドロジメチルピレン誘導体を用いて、同様の 2 次元水素結合ネットワークが積層した HOF の構築を達成した[2]。残念ながら本 HOF は可視光を照射してもフォトクロミック反応を示さなかったが、より光異性化の量子効率が高い類縁体を用いることによって同様の設計指針により光応答性の層状 HOF が構築できると期待される。

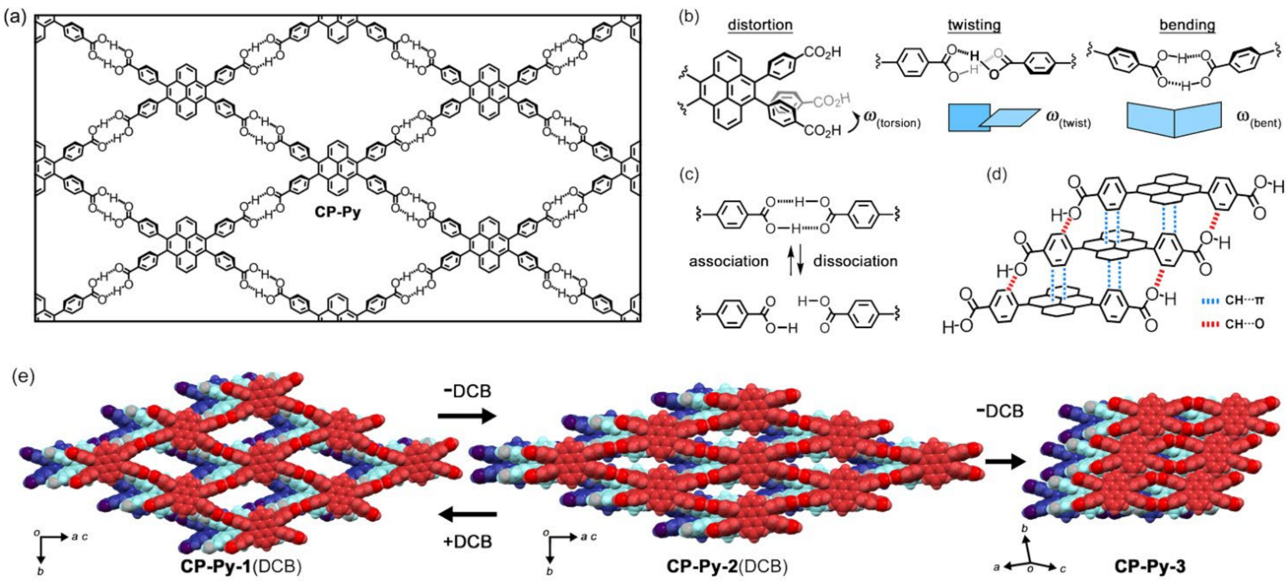


Figure 1 Flexible HOF composed of **CP-Py**. (a) Schematic representation of the framework. (b) Structural factors providing flexibility of the framework: distortion of the peripheral arm and twisting and bending of the H-bonded dimer of the carboxy groups. (c) Reversible H-bonding formation and dissociation. (d) Robust stacked structural motif. (e) Crystal structures of **CP-Py-1**(DCB), **CP-Py-2**(DCB) and **CP-Py-3**.

【2023 年度の領域内共同研究者】
櫻井(A01)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] T. Hashimoto, R. Oketani, I. Hisaki *et al.*, Statically and dynamically flexible hydrogen-bonded frameworks based on 4,5,9,10-Tetrakis(4-carboxyphenyl) pyrene, *Chem. Commun.*, **59**, 7224 (2023).
[2] Y. Yamaguchi, K. Kasuya, R. Oketani, I. Hisaki, Construction of hydrogen-bonded crystalline frameworks using tetrakis(carboxyphenyl) dimethyl-dihydropyrene derivative, *Chem. Lett.*, **52**, 542 (2023).

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

毛利 真一郎（立命館大学 理工学部）

研究協力者：Abdul Kuddus・Rong Kaipeng（同上）

E-mail: iguchan@fc.ritsumei.ac.jp

本研究では、グラフェンや MoS_2 などの原子層材料の積層によって形成される原子層モアレ超格子系の物性を、結晶成長や分子吸着などの手法で局所的に制御する手法の開拓を目指している。2023 年度は、(1) 架橋ツイスト２層グラフェンの金属蒸着による物性制御におけるツイスト角度依存性 (2) 架橋ツイスト 2 層 h-BN のラマン分光による熱伝導計測、などの研究を中心に行った。また、領域内共同研究で、強誘電分極反転構造上に生成した原子層材料のリモートドーピング制御の研究でも一定の成果が得られている。

昨年度に引き続き、架橋ツイスト 2 層グラフェンについて、金属ガリウム蒸着によるラマンシフトを詳細に調べたところ、積層角度依存性を示唆する結果が得られた[1]。蒸着前後の G モード2D モードのスペクトルシフトを調べたところ、Fig. 1 (a)に示すように、積層角度によって異なる特徴を示す結果が得られた。積層角度が 20°以上の試料では蒸着により G モードはあまりシフトせず、2D モードが低波数側に 5 cm^{-1} ほどシフトする。一方、5~20°では、歪みの影響を受けて G、2D モードともに低波数側に 10 cm^{-1} ほどシフトした。また、0~5°では、G、2D モード共に高波数側に大きくシフトする結果が得られた。積層角度により蒸着の形態が大きく変化することを示しているが、詳細なメカニズムは不明である。

また、強誘電分極反転構造上に生成した原子層材料のリモートドーピング制御の研究では、Fig. 1 (b)に示すように、h-BN 中間層（サンプル断面は挿入図を参照のこと）の厚みが 20 nm 以下の領域で強誘電体によるリモートドーピング効果が顕著にみられることがわかった。一方で、厚みが大きくなるとドーピングの効果が小さくなるが、これは、h-BN 内部で電界が遮蔽されていることが示唆される結果となっている。

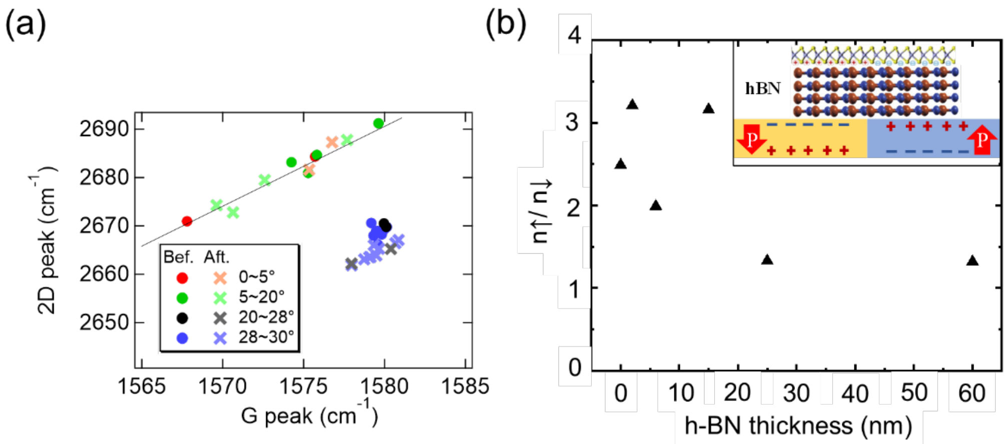


Figure 1 (a) Energy plots of the 2D-G peak for air-suspended twisted bilayer graphene before (in red) and after (in blue) gallium (Ga) metal deposition. Data were collected from various holes in a transmission electron microscopy (TEM) grid, with each color representing measurements from holes exhibiting different stacking angles (b) Carrier density ratio of MoS_2 on up and down polarization domain region depending on the h-BN spacer thickness.

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、櫻井(A01)、岡田(A01)、宮田(A02)、松田(A03)、上野(A02)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] S. Mouri *et.al.*, The 66 th Fullerens-Nanotubes Graphene General Synposium (2024).

[2] K. Rong *et.al.*, NMC 2023 (2023).

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応用

蓬田　陽平（東京都立大学）

研究協力者：柳　和宏（同上）、上治　寛（同上）

E-mail: yomogida@tmu.ac.jp

2023 年度は、2.5 次元遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブ（TMDCNT）の創製とその物性開拓に関する研究をさらに進展させた。具体的には、(1)2.5 次元 TMDCNT のベースとなる小直径 TMDCNT、(2)異なる TMDCNT を同軸積層したヘテロ NT、(3)TMDC ヤヌス NT、(4)TMDCNT における異方的な非線形光学効果、等に関する研究を行った。

(1)酸化タングステンナノワイヤを前駆体として直径 10 nm 程度の小直径 WS_2NT を合成し、その組成分析により、$W_{18}O_{49}$ ナノワイヤから WS_2NT が得られる合成経路を明らかにした[2]。 (2)MoS_2NT・WS_2NT で構成される半導体ヘテロ NT を合成し（Fig. 1a)、その電子線回折により（Fig. 1b)、試料が数 100 nm のスケールで単一ドメインであり、特定のカイラリティで NT を形成する高品質試料であることを明らかにした。[1]　(3)小直径 WSe_2NT をベースにヤヌス WSSeNT を合成し、EELS 測定によるヤヌス構造の直接観察により（Fig. 1c,1d)、ヤヌス NT の合成を実証するとともに、ラマンマッピング測定により、マイクロメートルのヤヌス NT の合成が可能なことを実証した。 (4) 番地を形成した基板上に TMDCNT を分散し、その非線形光学応答（第二高調波発生（SHG)）の強度と TMDCNT の構造との相関を調べた。小直径 NT において SHG が増強する傾向が得られた一方で、SHG が NT の結晶性にも依存することが分かり、詳細な比較研究には結晶性のばらつきが少ない試料を用いることが重要であることを確認した。

本研究は、領域の多くの方々にサポートいただいた。ヤヌス TMDCNT のバンド計算（岡田 G)、TMDCNT の水素発生反応（高橋 G)、TMDC ヤヌス NT の合成（加藤 G)、TMDCNT の光学特性評価（松田 G）など、幅広い研究を進めることができた。

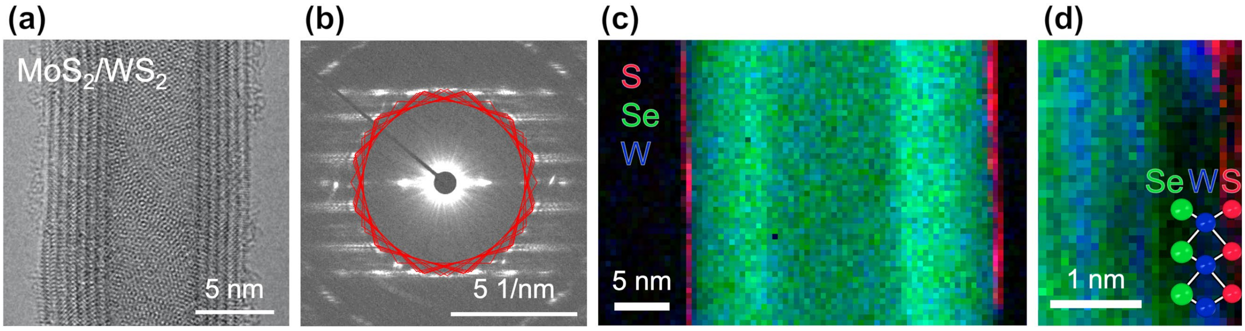


Figure 1 Creation of 2.5D transition metal dichalcogenide nanotubes. (a,b) Transmission electron microscope (TEM) image (a) and its fast Fourier transform (FFT) image (b) of small-diameter transition metal dichalcogenide heteronanotubes. (c,d) Electron energy-loss spectroscope (EELS) mapping of small-diameter Janus transition metal dichalcogenide nanotubes.

【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、加藤(A01)、宮田(A02)、松田(A03)、高橋(A03)、柳(A03)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Yomogida, M. Nagano, Z. Liu, K. Ueji, Md 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**, 10103 (2023).

[2] Md 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 WS_2 nanotubes with relatively small diameters, *Sci. Rep.*, **13**, 16959 (2023).

[3] Y. Nakanishi, S. Furusawa, Y. Sato, T. Tanaka, Y. Yomogida, K. Yanagi, W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, T. Kato, K. Suenaga, Y. Miyata, Structural diversity of single-walled transition metal dichalcogenide nanotubes grown via template reaction, *Adv. Mater.*, **35**, 2306631 (2023).

5．　公募班 研究成果

A02班

2.5次元集積構造の構築
（集積化班）

上野 啓司

北浦 良

田中 秀和

ファンデルワースル積層構造のための新規バッファ層物質:硫化ガリウムの応用

上野 啓司（埼玉大学大学院理工学研究科）

研究協力者：Lim Hong En（同上）

E-mail: kei@chem.saitama-u.ac.jp

2023 年度においては、(1) 2022 年度に立ち上げた縦型ブリッジマン単結晶成長装置による硫化ガリウム（GaS)、セレン化ガリウム（GaSe)、セレン化インジウム（InSe）単結晶の作製、(2) 化学蒸気輸送法（CVT）によるさまざまな遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC）単結晶の作製、(3) GaS をバッファ層、半導体 TMDC をチャネル層とする電界効果トランジスタ（FET）の作製と特性評価、(4) 2022 年度に作製した低温プローバ装置による FET 低温特性評価、(5) GaSe 単結晶の硫黄雰囲気中加熱処理によるヤヌス化、といった研究を行った。また、作製した多種多様な TMDC、GaS 等の単結晶試料を領域内共同研究者に提供し、共同研究を推進した。一部の共同研究成果は論文発表につながっている。

主な成果としては、まず GaS をバッファ層として MoS_2 チャネル層と SiO_2 ゲート誘電体の間に挿入した FET(Fig. 1(a))の動作特性を、試料温度を変えて測定したところ、低温において ON 時のドレイン電流の増加と移動度の向上が確認された。これは GaS の挿入によって、SiO_2 表面の凹凸や不純物の影響によるキャリア散乱がある程度抑制されたことを示唆している。一方で低温においても、Fig. 1(b)に示すように FET 伝達特性には大きなヒステリシスが見られた。これは、GaS バッファ層の表面あるいは内部に存在する硫黄欠陥に由来する正電荷トラップによって起こる、と考えられる。今後は GaS 単結晶の成長条件改善や、劈開面の硫黄アニール処理などによって硫黄欠陥を減少させ、ヒステリシスが減少するかどうか検証を進める。

GaSe 単結晶のヤヌス化では、劈開した GaSe 単結晶表面を硫黄雰囲気中で 900 ℃に加熱した試料についてラマン分光測定を行ったところ、Fig. 1(c)に示すように純粋な GaS, GaSe とは異なるスペクトルが得られた。また、S と Se がランダムに混合した GaS_xSe_{1-x} 混晶のスペクトルとも異なっていることから、ヤヌス化の実現が期待できる。今後は単層膜のヤヌス化、及び詳細な構造解析や理論的な検証も進めていく。

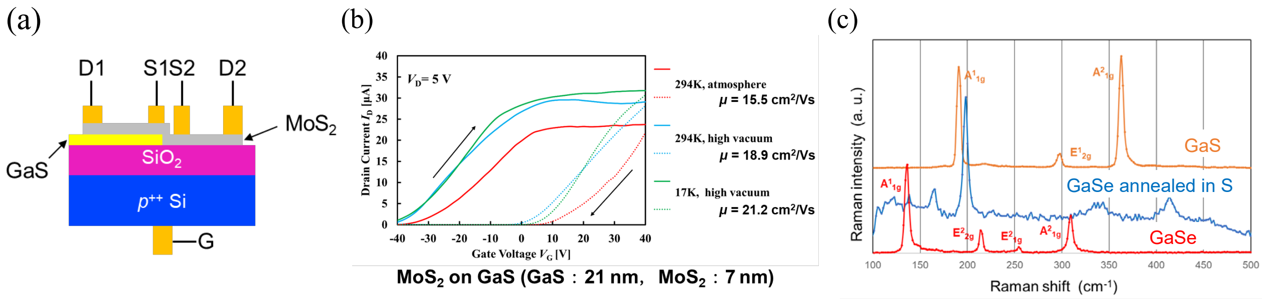


Figure 1 (a) Schematic diagram of a MoS_2 FET with a GaS buffer layer. (b) Transfer characteristics of the MoS_2 FET with a GaS buffer layer measured at 294 K and 17 K. (c) A Raman spectrum of the GaSe surface annealed in a sulfur atmosphere at 900 °C. Raman spectra of pure GaS and GaSe surfaces are also shown.

【2023 年度の領域内共同研究者】

加藤（俊）(A01)、毛利(A01)、宮田(A02)、杉本(A03)、長汐(A05)、山本(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] R. Kato, H. Uchiyama, T. Nishimura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. Chen, K. Nagashio, p-type conversion of WS_2 and WSe_2 by position-selective oxidation doping and its application in top gate transistors, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **15**, 26977-26984 (2023).

[2] M.-P. Lee, C. Gao, M.-Y. Tsai, C.-Y. Lin, F.-S. Yang, H.-Y. Sung, C. Zhang, W. Li, J. Li, J. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, K. Tsukagoshi, C.-H. Ho, J. Chu, P.-W. Chiu, M. Li, W.-W. Wu, Y.-F. Lin, Silicon-van der Waals heterointegration for CMOS-compatible logic-in-memory design, *Sci. Adv.*, **9**, eadk1597 (2023).

[3] R. Nakajima, T. Nishimura, K. Ueno, K. Nagashio, Work function modulation of Bi/Au bilayer system toward p-type WSe_2 FET, *ACS Appl. Electron. Mater.* DOI:10.1021/acsaelm.3c01091 (2023)

1.5次元から2.5次元への展開に基づく新物質群創出

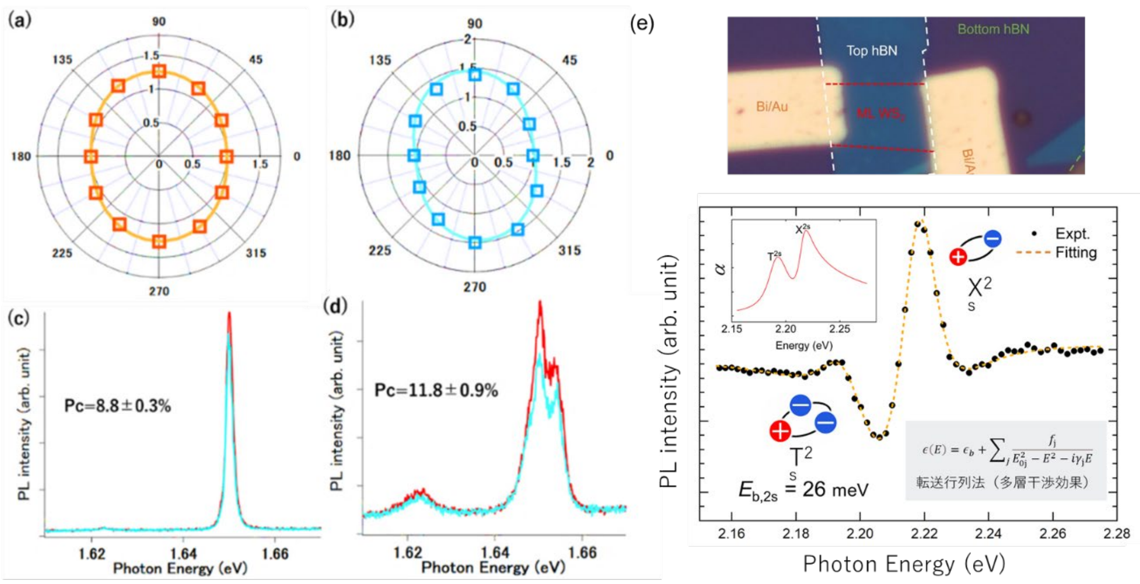
北浦　良（物質・材料研究機構　ナノアーキテクトニクス材料研究センター）

研究協力者：小澤　大知・Shaochun Zhang（同上）

E-mail: KITAURA.Ryo@nims.go.jp

2023 年度は、研究代表者の異動に伴い実験室の移転をする必要があったため、年度の前半に実験室の再構築に多くの時間を割くこととなった。こうした移設・再立ち上げを進めつつ、 (1) 結晶成長法による1.5-2.5次元物質の開発と機能開拓、(2) 二次元積層系の光機能探索、を主に行った。これらの研究を進めるにあたり、第一原理計算による電子状態解析、乾式転写による架橋構造の作製、高品質六方晶窒化ホウ素(hBN)の試料提供、ツイスト積層グラフェンの試料提供などで協力いただくと同時に、極低温分光実験で協力をするなど、多くの領域内共同研究者との共同研究を実施し、一部の成果は論文につながった。

主な成果としては、2 次元積層構造およびヘテロ構造においてバレーコヒーレンスの観測をしたこと、ゲート変調分光によってリドベルグ状態を観測したこと、高精度・動的歪印加法の開発と光起電力への応用などがある。Figure 1(a)-(d)には、hBN/$MoSe_2$/hBN 積層構造のフォトルミネッセンス(PL)の偏光依存性を示す。ポイントは、AFM チップによる掃引によって原子レベルで清浄な界面をもつ部分を作製したことである。励起光の偏光に対する PL 強度の偏光依存性から求まるバレーコヒーレンスは、界面を清浄化した試料とそうでない試料で差がなく、バレーコヒーレンスは両者とも 10 %程度であった。このことは、バレーコヒーレンスを制限している要因が試料のクオリティではないことを示している。一方、WSe_2/$MoSe_2$ ツイスト積層を用いたモワレ超格子でも同様の検討をしたところ、バレーコヒーレンスは 2-3 倍増強されていることがわかった。もう少し慎重な検討が必要であるが、ゼロ次元による準位の離散化によってデコヒーレンスが抑制されている可能性がある。また、Figure 1(e)には、hBN/WS_2/hBN のゲート変調反射スペクトルを示す。通常の反射コントラストではノイズに埋もれているエネルギー領域で、明瞭な信号が得られた。このスペクトルは、励起子および荷電励起子の 2s 状態によるものとしてよく解釈できた。この手法は、局所構造からの弱い光学応答を観測する手法として今後1.5-2.5次元物質の解析に有用であると考えられる。



【2023 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、吾郷(A01)、渡邊(A01)、宮田(A02)、町田(A02)、松田(A02)、蒲江(A02)、上野(A02)、高橋(A03)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] M. Xue, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Kitaura, Gate-modulated reflectance spectroscopy for detecting excitonic states in two-dimensional semiconductors, *Appl. Phys. Lett.*, **123**, 6 (2023).

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

田中 秀和（大阪大学産業科学研究所）

研究協力者：李 好博・服部 梓（同上）

E-mail: h-tanaka@sanken.osaka-u.ac.jp

遷移金属酸化物は金属-絶縁体相転移、強磁性、強誘電性、超伝導性など多彩な物性を示し、種々のデバイス応用が期待されている。その表面にファンデルワールス結合のみ存在する 2 次元層状物質の表面（2.5 次元空間）は、非常に束縛が弱く、異種物質の結晶構造・格子定数の違いによらず良質な結晶成長が可能となる新規合成場となり、異種物質の一層の高度機能物性を引き出せると期待される。この考えの元、2023 年度は (1) CVD 成長大面積 hBN 薄膜上へ成長させた VO_2 薄膜を利用した界面構造の解明と(2)単結晶片(フレーク)境界を有する単結晶 hBN 上へ成長させた VO_2 薄膜による低電圧抵抗スイッチングデバイスの作製を行った。

主な成果としては、A01 吾郷グループより CVD で成長させた大面積 hBN を供給いただき、VO_2 薄膜を成長させ TEM グリッド上へ剥離転写し、透過型電子顕微鏡を用いた平面原子像観察により、hBN と VO_2 が面内でエピタイシャル関係にあることを示唆する結果を得た。さらに A05 小野グループとの共同研究により、VO_2/hBN 界面安定構造の第一原理計算を行っていただいた。VO_2 と hBN の間で一部の V^+イオンと B^-イオンが（おそらく）イオン結合で公倍数エピタキシー的にピンされ、その他の界面接合部分は弱いファンデルワールス結合を有している新たな界面モデルを提案した（図 1(a)）。また A01-渡邊グループより供給いただいた、特に単結晶フレーク境界を含む h-B 結晶上へ VO_2 薄膜を形成し、境界を跨いだ 10μm のギャップを有する二端子電極を付与した電流誘起抵抗スイッチグデバイス（図 1(c)）を形成し電流抵抗スッチングを測定したところ、境界無しの単結晶上に形成したデバイス(図 1(b))に比して、低バイアス領域で微小な抵抗スイッチングを観測した（Fig.1(d)）。特にフレーク境界領域において電流が集中するにより、ジュール加熱により境界近傍の微小な VO_2 ドメインの相変化が優先的に誘起されたためと考えられる。CVD 成長 hBN 薄膜上へ成長させた VO_2 薄膜はグレイン境界を多数含む為、本知見はその低消費電力化に有用と考えられる。

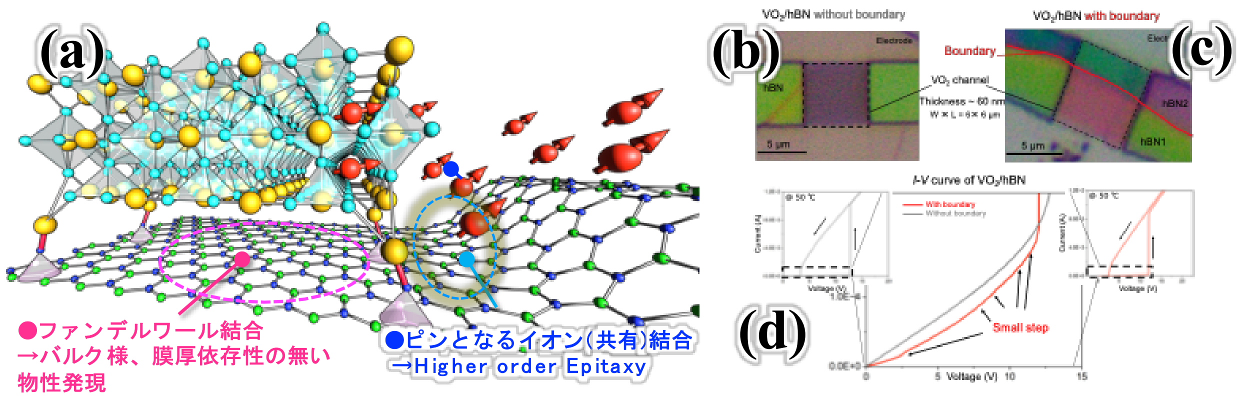


Figure 1 (a) Schematic illustration of ionic functional oxide/ van der Waals h-BN hetero-interface. (b) Optical microscope image of VO_2/hBN two terminal resistive switch device without hBN single crystal flake boundary, (c) Optical microscope image of the device with the flake boundary. (d) Current -Voltage curve for the VO_2/hBN two terminal resistive switch devices with/without hBN single crystal flake boundary.

【2023 年度の領域内共同研究者】
渡邊(A01)、吾郷(A01)、小野(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Tanaka, *et al*, Heterostructuring functional oxides and two-dimensional material toward transferable electronics, Invited Talk, *the 13th International Conference on Advanced Materials and Devices* (ICAMD2023), Korea

5.　公募班 研究成果

A03班

2.5次元構造体の分析技術開発
（分析班）

杉本 宜昭

高橋 康史

柳 和宏

Lin Yung-Chang

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

杉本 宜昭（東京大学大学院新領域創成科学研究科）

研究協力者：安達 有輝（同上）

E-mail: ysugimoto@k.u-tokyo.ac.jp

シリセンはSi原子がハニカム状に配列した二次元物質である。近年、シリセンはその優れた電子物性により注目を集めている。シリセンに異種元素を混在させた系は、その電子物性や構造自体を局所的に変化させうる2.5次元物質とみなすことができ、本研究のターゲットとした。シリセンは座屈構造を持っているため、原子スケールにおける正確な構造決定が非常に難しい。そこで、今回、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて、ZrB_2上のシリセンを原子スケールで観察し、構造解析と異種元素のドーピングの効果を調べた。

本研究では、超高真空環境で動作する周波数変調方式AFMを用いた。Si基板上のZrB_2薄膜を超高真空中で加熱することによって、高品質なシリセンを作製した。これまでの走査プローブ顕微鏡では、空間的に高いSi原子しか観察されていなかったが、今回、低いSi原子も含めて、シリセンを構成する全てのSi原子をAFMによって観察することに成功した。図1はシリセンの AFM凹凸像と、密度汎関数理論に基づいた計算により得られた構造モデルである。構造モデルは、AFM像をよく再現しており、シリセンの構造モデルが正しいことを確認することができた。AFM像では、高いSi原子と低いSi原子との高さの差が、計算で得られたものより小さく計測されており、それが高分解能が得られた原因である。AFMの探針によって、Si原子が緩和していることが示唆される。さらに、このシリセンにSn原子を混在させた試料も作製して、Si原子とSn原子が区別できることを確かめた。そして、AFMの探針先端との化学結合力を計測した。その結果、Si原子とSn原子との最大の化学結合力の違いによって、両者を明確に識別できることがわかった。シリセンに様々な異種元素を混在させた新しい2.5次元物質を創製して評価する道が切り拓かれた。

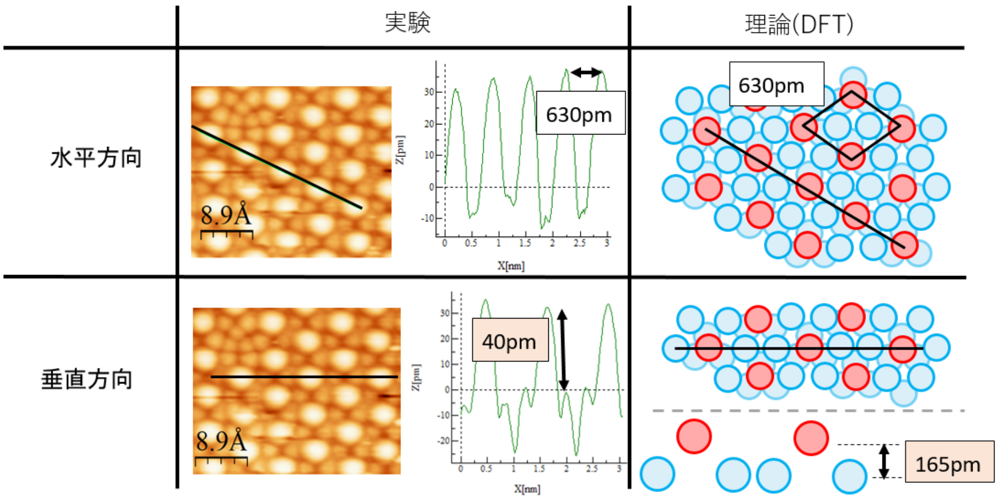


Figure 1 AFM topographic images and DFT optimized structure models of silicene on ZrB_2. Lateral and vertical positions of individual Si atoms are compared.

【2023年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、岡田(A01)、櫻井(A01)、上野(A02)、荒井(A02)、坂野(A03)、高村(A04) 、笹川(A04)

【2023年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Adachi, R. Zhang, X. Wang, M. Fukuda, T. Ozaki, <u>Y. Sugimoto</u>, Atomic arrangement of Si adatom on the Silicene/Ag(111) surface, *Appl. Surf. Sci.*, **630**, 157336 (2023).

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

高橋　康史（名古屋大学工学研究科）

E-mail: takahashi.yasufumi.v5@f.mail.nagoya-u.ac.jp

2023 年度も引き続きナノシート材料の構造と触媒活性の関係について、独自開発を進めている走査型電気化学セル顕微鏡(SECCM)による電気化学イメージングを行った。具体的には、ナノスクロール構造やナノリボン構造を有するカルコゲナイト材料について、構造と水素発生反応（HER）の触媒活性を評価した。

宮田グループ、加藤グループから提供いただいたナノスクロール構造の MoSSe について、SECCM による電気化学イメージングを行った結果を図１(a)に示す。スクロールした MoSSe の端で高いＨＥＲ活性を観察することができた。また、リニアスイープボルタンメトリーにより、ナノスクロール構造は、過電圧が低く高い HER 活性があることが分かった。これまでの報告でも歪みと HER 活性に相関性があることが報告されており、ナノスクロールの直径や層数に依存した触媒活性などを今後評価していく予定である。

吾郷グループから提供いただいたナノリボン構造の MoS_2では、対象とするナノリボンの幅が数百 nm であるため、高解像度の電気化学計測が必要となる。そこで、独自開発してきたナノピペットの作製法を適用することで、半径が 30 nm以下のナノピペットを作製して計測に使用した。(図１b)。SECCM により、幅 300 nm ほどのナノリボンの HER 活性を捉えることができた。また、エッジ部分で高い触媒活性を確認することができた。ナノリボンの構造は、テラスに対するエッジ部分の比率が高いため、HER の効率的な触媒構造であるといえる。今後、硫黄欠陥の密度と HER 活性の関係に関しても調査する予定である。

領域内共同研究では、HER 活性に焦点を当て、吾郷らと MoS_2 ナノリボン、加藤・宮田らとヤヌスナノシート、蓬田らとカルコゲナイトナノチューブ、中西らとカルコゲナイトナノクラスター、北浦らとカルコゲナイトナノバンド構造体の計測を行っている。

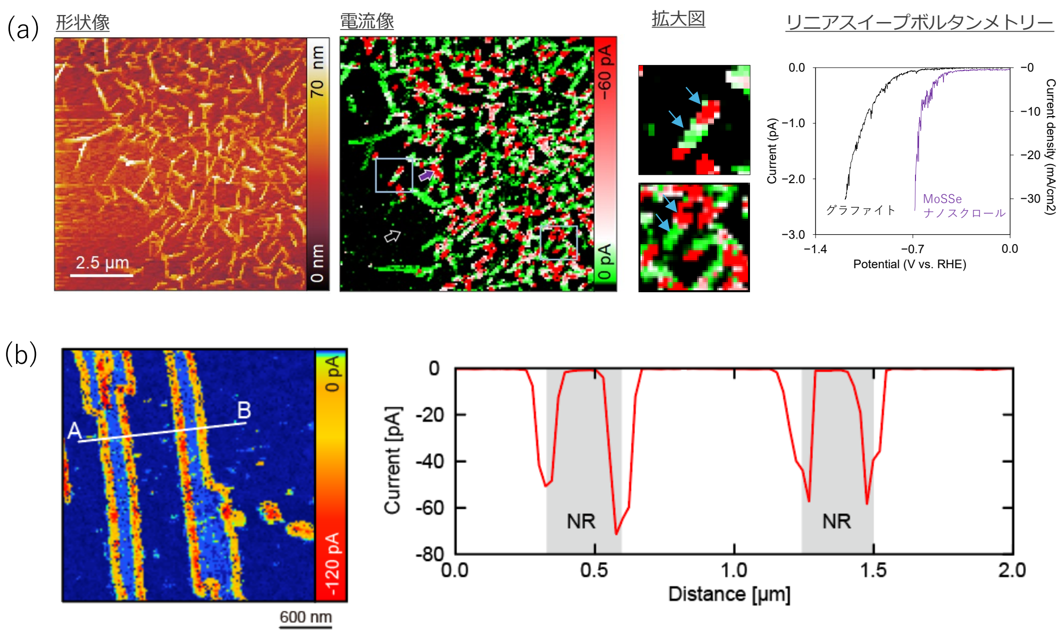


Fig. 1 SECCM HER current images on (a) MoSSe nanoscroll and (b) MoS_2 nanoribbon.

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、加藤(俊) (A01)、蓬田(A01)、宮田(A02)、北浦(A02)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] M. Kaneda, W. Zhang, Z. Liu, Y. Gao, M. Maruyama, Y. Nakanishi, H. Nakaj, 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*, 2306631(2024).

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

柳 和宏（東京都立大学理学研究科物理学専攻）

研究協力者：上治 寛（同上）

E-mail: yanagi-kazuhiro@tmu.ac.jp

ナノ界面の熱・電荷輸送が評価可能な金をトランスデューサとして用いた時間領域サーモリフレクタンス計測技術(TDTR)を駆使して、2023 年度においては、(1)多結晶 MoS_2 4 層積層界面における熱・電荷輸送の相関の解明、(2)顕微 TDTR 法の確立と単結晶原子層積層界面における熱伝導評価、(3) 電気化学的手法をもちいたナノ界面における熱スイッチ、などを中心に研究を行った。また、有機半導体積層界面の熱輸送や、遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブ合成といった領域内共同研究も進めた。

それぞれの成果は以下の通りである。（１）多結晶 $MoS_2$4 層を積層し、その層に垂直方向を流れる熱流と電流の相関を明らかにした。熱伝導と電気伝導を同時に計測可能であることを実証し、界面のカップリングを真空アニーリングにより系統的に変化させ、両者の相関を明らかにした。理論的な計算も進め、現在、論文投稿準備中である(Fig1(a1) (a2))。（２）単結晶試料のサイズでも熱輸送と電気伝導の両者を計測可能とさせる為、顕微 TDTR 計測系の開発を行い、スポットサイズ 10μm程で計測可能なシステムを構築し、２層積層した単結晶 MoS_2 の熱伝導値を決定可能であることを示した(Fig1 (b))。（３）導電性ポリマーを対象として、電気化学ドーピングにより、熱輸送の変調が起こることを調べた。試料側に熱が大きく流れる構造にする為、低熱伝導基板を用い用いることにより、ゲート電圧のシフト（ホールドーピング）により大きく熱輸送が変調されることを見出した(Fig1(c))。

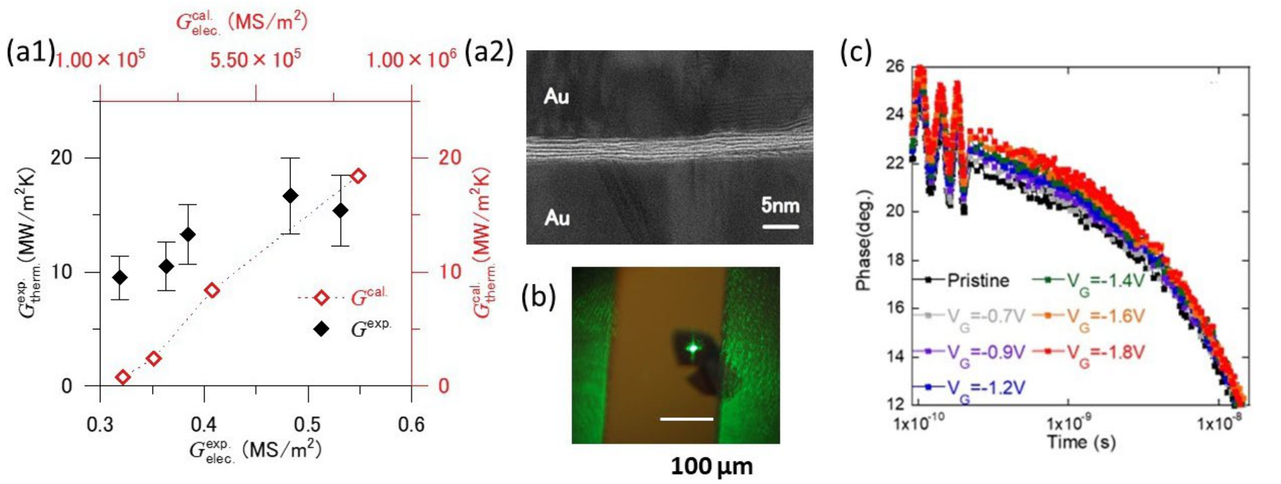


Figure 1 (a1) Correlation between experimental (theoretical) thermal conductance G_{therm}^{exp} (G_{therm}^{cal}) and electrical conductance G_{ele}^{exp} (G_{ele}^{cal}) across 4 layered MoS_2, and their cross-sectional TEM image (a2). (b) The laser spot in micro-Au-TDTR measurements (c) TDTR signal on conducting polymer (PBTTT) as a function of gate voltage V_G.

【2023 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、岡田(A01)、蓬田(A01)、宮田(A02)、荒井(A02)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Yomogida, Y. Miyata, K. Yanagi *et al.*, Semiconducting transition metal dichalcogenide heteronanotubes with controlled outer-wall structures, *Nano Lett.* **23**, 10103 (2023).

[2] H. Hamasaki, K. Yanagi, K. Hirahara *et al.*, Thermoelectric power of a Single van der Waals Interface between carbon nanotubes, *ACS Nano* 18, 612 (2024)

[3] Md. A. Rahman, Y. Yomogida, Y. Miyata, S. Okada, K.Yanagi *et al.*, Synthesis and optical properties of WS_2 nanotubes with relatively small diameters, *Sci. Rep.* **13**, 16959 (2023).

二層グラフェンへのアルカリ金属および金属塩化物の挿入に関する研究

林 永昌（LIN, Yung-Chang）（産業技術総合研究所）
研究協力者：LIU, Qiunan（大阪大学）
E-mail: yc-lin@aist.go.jp

本公募研究では、走査透過電子顕微鏡（scanning transmission electron microscopy、STEM）を使用して、2.5次元物質科学のメインテーマの一つである二次元ナノ空間の科学に関する研究を行った。特に、電子線に対してほぼ透明な二層グラフェンを用いて、層間に挿入されたイオンや分子の電子顕微鏡による微細構造観察を行い、主に以下の2種類のインターカラントについての研究を進めた。

(1) 塩化モリブデン（$MoCl_5$）や塩化鉄（$FeCl_3$）などの金属塩化物

(2) カリウム（K）、ルビジウム（Rb）、セシウム（Cs）などのアルカリ金属

領域内の複数の共同研究者の協力により、CVD合成した大面積の高品質の二層グラフェンを用いて様々な分子やイオンのインターカレーションを行い、STEM 観察に適したサンプルを作製することができた。さらに、低電圧超高真空 STEM による高分解能観察を行うことで、これまで予測されなかった新たな構造の発見に成功した。

$MoCl_5$を使用したインターカレーションでは、層間で安定化された構造が$MoCl_5$ではなく$MoCl_3$であることを明らかにした。さらに、この$MoCl_3$構造に加え、チェーン状などユニークな構造も見出すことができた (Figure 1a) [1]。一方、アルカリ金属のインターカレーションでは、二層グラフェンの層間に挿入されたアルカリ金属が単一原子層の構造ではなく、六方最密充填（hcp）構造をもつ二層のアルカリ金属構造であることを見出した。これは従来のアルカリ金属の黒鉛層間化合物では知られていなかった構造であり、グラファイトのインターカレーションでも部分的に確認している。これらは *Nature Communications* にも掲載され、数十年にわたるアルカリ金属のインターカレーションの常識を覆し、新たなインターカレーションモデルを提案することができた（Figure 1b,c) [2]。

本研究は、異なる分野で高い専門性を持つメンバーが協力して得られた成果であり、今後のさらなる発見とともに、バッテリーなど応用への貢献も期待されるものである。

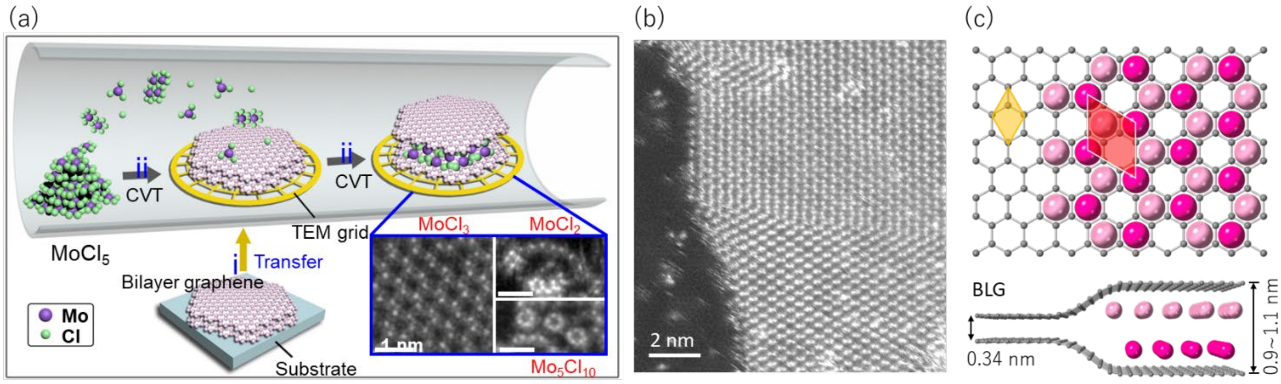


Figure 1 (a) Experimental setup for $MoCl_5$ intercalation in BLG. The discovered intercalated structures are $MoCl_3$, Mo_5Cl_{10} and $MoCl_2$. (b) STEM image of Cs intercalation in BLG showing honeycomb lattice. (c) The atomic structure illustrated the intercalated structure as a bilayer form of Cs showing a superdense $C_6Cs_2C_6$ structure.

【2023年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、松本(A02)、末永(A03)

【2023年度の代表的な研究成果】

[1] Q. Liu, Y.-C. Lin, H. Ago, K. Suenaga *et al.*, Molybdenum chloride nanostructures with giant lattice distortions intercalated into bilayer graphene, *ACS Nano*, **17**, 23659-23670 (2023).
[2] Y.-C. Lin, R. Matsumoto, H. Ago, K. Suenaga *et al.*, Alkali metal bilayer intercalation in graphene, *Nat. Commun.*, DOI:10.1038/s41467-023-44602-3 (2024).

5.　公募班 研究成果

A04班

2.5次元構造の新奇物性開拓
(物性開拓班)

塩見 雄毅

若林 克法

WS_2/MoS_2 面内ヘテロ構造における電流スピン流変換の光学的測定

塩見 雄毅（東京大学大学院総合文化研究科）

研究協力者：横内 智行（同上(現 理化学研究所)）

E-mail: yukishiomi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

スピンホール効果やエデルシュタイン効果などのスピン輸送を中心としたスピントロニクス現象および磁気輸送現象の計測技術を武器として、物性物理学の実験研究を行ってきた。本プロジェクトでは、2.5 次元物質に特有のスピン関連現象を探索し、新しいスピン機能を開発することを目指している。これまで複数の領域研究者から測定試料を提供して頂き、共同研究を進めてきた。特に、笹川(A04)から提供された二次元強誘電体α-In_2Se_3 において、2H 構造と 3R 構造という積層自由度に依存した圧電応答を観測し[1]、さらには空間反転対称性の破れに起因した新しい磁気輸送現象の観測を目指して共同研究を続けている。

2023 年度は主として宮田(A02)が作製した高品質な二次元物質面内ヘテロ構造において、ヘテロ界面での対称性の破れに起因した電流スピン変換現象（エデルシュタイン効果）の観測を目指して研究を進めてきた。我々が構築した磁気光学カー効果を用いた高感度磁気イメージング技術[Fig. 1(a)]は、ヘテロ界面で生じるエデルシュタイン効果を選択的に観測できる。実際に、Fig. 1(b),(c)に示すように、WS_2 と MoS_2 のヘテロ界面において電流（電場）に応答して生じるカー効果信号が観測された。得られた信号の物理的起源を解明すべく、様々な対照実験を宮田(A02)と協力して進めている。

この他にも、加藤俊(A01)の協力のもと、ヤヌス物質におけるスピントロニクス実験を開始した。ヤヌス物質を用いたスピントロニクスデバイスの作製は実験例がないようであり、大変興味がもたれる。

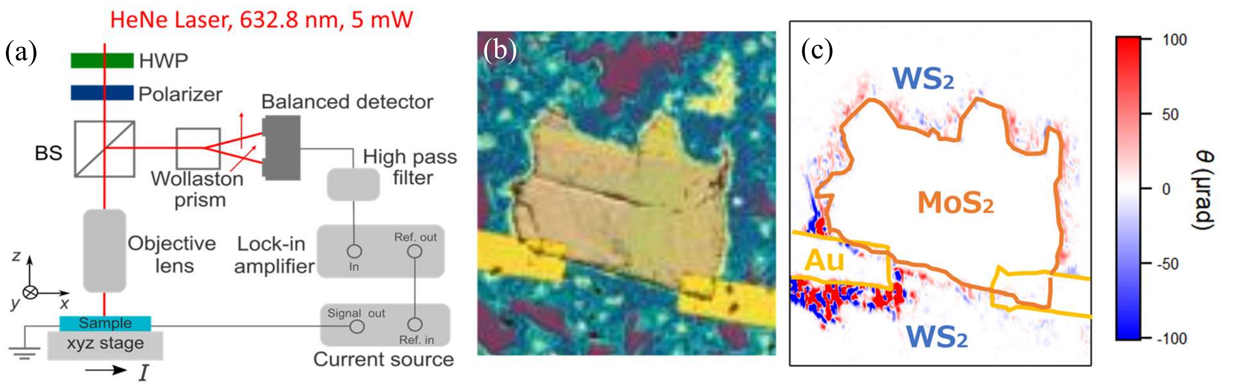


Figure 1 Measurement of charge-spin conversion effect (Edelstein effect) at WS_2/MoS_2 interface using magneto-optical Kerr effect imaging. (a) Schematic illustration of measurement setup. Electrically induced Kerr signals are selectively detected using a lock-in amplifier. (b) Photograph of a WS_2/MoS_2 device. The yellow area denotes Au pads for electrical contact. (c) Two-dimensional image of Kerr angle.

【2023 年度の領域内共同研究者】

加藤俊(A01)、宮田(A02)、坂野(A03)、笹川(A04)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] K. Ueda, R. Murata, T. Sasagawa, Y. Shiomi, Piezoelectric effect in 2H and 3R phases of α-In_2Se_3, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, 061006 (2023).

[2] Z. Wang, X.-X. Zhang, Y. Shiomi, T. Arima, N. Nagaosa, Y. Tokura, N. Ogawa, Exciton-magnon splitting in the van der Waals antiferromagnet $MnPS_3$ unveiled by second-harmonic generation, *Phys. Rev. Research* **5**, L042032 (2023).

[3] 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 TaS_2 layers on $SrTiO_3$ substrates, *APL Mater.* **11**, 081106 (2023).

[4] S. Zhang, K. Harii, T. Yokouchi, S. Okayasu, Y. Shiomi, Amorphous ferromagnetic metal in van der waals materials, *Adv. Electron. Mater.* DOI:10.1002/aelm.202300609 (2023).

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

若林 克法（関西学院大学）

E-mail: waka@kwansei.ac.jp

本研究課題では、2 次元および 2.5 次元物質における電子波動関数のトポロジカル特性を系統的に解析することで、電子物性の基礎学理を構築に貢献するとともに、エネルギーハーベスティングデバイスなど新しい光・電子デバイス設計のアイデアを提示することを目的とする。さらに、2.5 次元物質における光学的な電子スピン励起過程に理論的に解析することで、スピン流の生成を制御し、エネルギー効率性の高い光・電子デバイスを設計することにある。

2023 年度は、最近合成が報告された二次元炭素材料であるビフェニレンネットワーク(BPN)に着目し、その電子状態とトポロジカル特性を解析し、さらにフォトニック結晶への応用展開の可能性を探求した。BPN は、グラフェンと同じく炭素原子のみからなる二次元物質であり、四員環、六員環、八員環を含むユニークな結晶構造を持つ。そのため、ハニカム構造のグラフェンとは結合のトポロジーが異なる。我々は、BPN の結晶構造に基づく強束縛模型を用いて、電子状態およびザック位相を数値解析した。図 1(a), (b)に示すように二種類のホッピングエネルギー γ, γ'を考慮し、バルク構造および二種類のエッジ構造をもつナノリボン構造の BPN について解析した。このとき、ホッピング比(γ'/γ)に応じてトポロジカル相転移が起こる。また、図 1(c)はナノリボン構造のエネルギーバンド図および対応するザック位相である。図中の青(赤)線で示したトポロジカルエッジ状態が、有限値のザック位相に起因していることが確認できる。さらに、エッジ状態をもつ端構造を組み合わせて、「エッジのエッジ」として出現するコーナー状態の出現条件を解明した[1]。また、本研究成果をもとに、トポロジカルフォトニック結晶の設計を行なった[2]。

この他にも、遷移金属モノカルコゲナイド系に対する非線形光学応答効果に関する数値解析なども行なっている。また、領域メンバーとの共同研究を実施し、二階建て HexNet における電子状態解析などを行なっている。さらに、二次元配位ナノシートの電子状態解析と歪み効果に関する研究、およびスケーリング関数による最大局在ワニエ関数の構築手法の開発[3]を実施した。

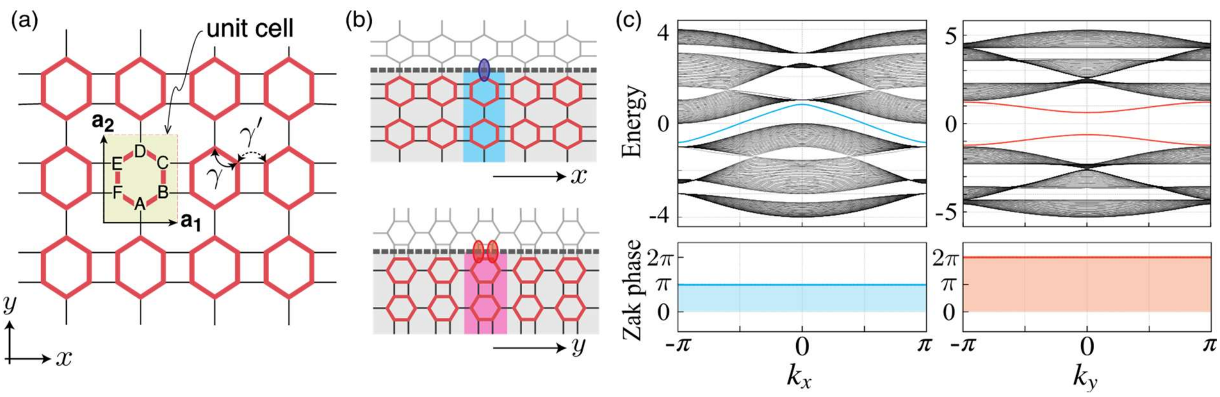


Figure 1 (a) Lattice structure of two-dimensional biphenylene network (BPN). (b) Edge structure of BPN lattice: (upper) zigzag (lower) armchair edges. The eclipses indicate Wannier centers. (c) Energy band structures and with the corresponding Zak phases: (upper) zigzag BPN nanoribbons (lower) armchair BPN nanoribbons.

【2023 年度の領域内共同研究者】
岡田(A01)、久木(A01)、櫻井(A01)、越野(A04)、長汐(A05)、山本(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】
[1] K. Koizumi, H. T. Phan, K. Nishigomi, K. Wakabayashi, Topological edge and corner states in the biphenylene netowrk, *Phys. Rev. B* **109**, 035431 (2024).
[2] H. T. Phan, K. Koizumi, F. Liu, K. Wakabayashi, Topological edge and corner states in biphenylene photonic crystal, *Optics Exp.* **32**, 2223-2234 (2024).
[3] Y. Hamai, K. Wakabayashi, Approximating maximally localized Wannier functions with position scaling eigenfunctions, *Phys. Rev. B* **108**, 245413 (2023).

5． 公募班 研究成果

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）

石井 史之

小野 倫也

河野 行雄

山本 真人

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

石井 史之（金沢大学ナノマテリアル研究所）

研究協力者：山口 直也（同上）

E-mail: ishii@cphys.s.kanazawa-u.ac.jp

ファンデルワールス相互作用で結合した二次元物質は、層内部の構造を大きく変えずに層間の相対的な位置を他の物質群に比べて容易に制御できる。本研究では、ファンデルワールス層状物質特有の電子状態や、結晶構造に注目し、密度汎関数法に基づいた第一原理電子状態計算を実施し、熱を電気に変える熱電デバイスや、省電力なスピントロニクスデバイスへの応用が可能な新しい物質の探索をおこなう。具体的には二次元物質特有のバンド構造および輸送特性について、異常な量子輸送現象（異常ホール効果、異常ネルンスト効果、スピン流一電流変換）を活かした、機能物質をデザインする。

2023 年度は、2022 年度に引き続き(1) 層状物質の熱電効果の研究を実施した。新たなテーマとして(2)反強磁性のトポロジカル絶縁体等の表面における異常ネルンスト効果を評価するため、表面異常ホール効果の計算手法開発に取り組んだ。また、(3) モアレ構造を高速に予測する機械学習ポテンシャルの構築に取り組んだ。さらに (4) 遺伝的アルゴリズムを用いた結晶構造探索手法による層状物質 BiTeI の準安定構造および物性の予測、(5)遷移金属カルコゲナイドのヤヌス系の電子状態と有効電荷の計算、などの研究を行った。論文発表した研究実績は主に次の 2 点である。(i)遺伝的アルゴリズムを用いた結晶構造探索手法によって生成された 3000 構造のうち、安定な新たな 3 種の結晶構造を発見した。Figure 1 にそのうちの一つであるファンデルワールス層状構造で空間反転対称性を有する空間群 $P6_3/mmc$ の結晶構造(a)とそのフェルミ準位近傍のバンド構造(b)を示した。Γ点(k=0)でグラフェンの様な Dirac 的な線形に近いバンド分散を有すること、Z_2 不変量の計算から、強いトポロジカル絶縁体であることを明らかにした [1]。 (ii) ファンデルワールス層状物質における熱電効果の設計指針を得るために、カゴメ格子のカイラルスピン状態の模型（３バンド模型）を詳しく調べ、ゼーベック効果および異常ネルンスト効果が二次元物質特有の鞍点型の van Hove 特異点で増大することが明らかになった[2]。

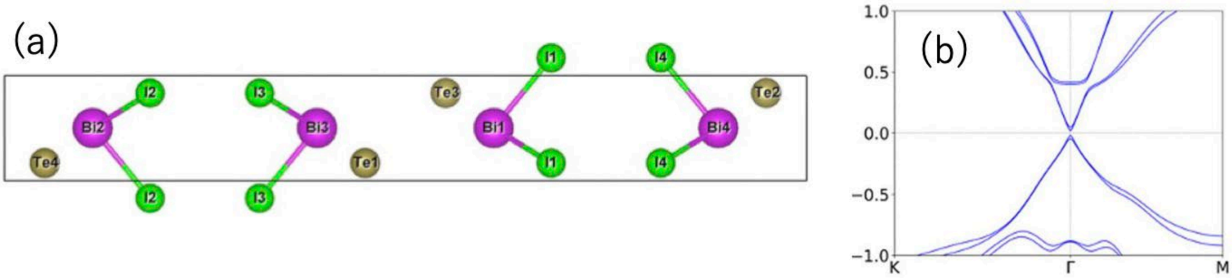


Figure 1 (a) The crystal structure of BiTeI, newly discovered $P6_3/mmc$ phase, (b) calculated band structure around the Fermi level [1].

【2023 年度の領域内共同研究者】
黒澤(A01), 坂野(A03)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Zhang, N. Yamaguchi, H. Sawahata, F. Ishii, Prediction of wide-gap topological insulating phase in metastable BiTeI, *Appl. Phys.s Express* **16**, 053002 (2023).
[2] K. Shibata, N. Yamaguchi, H. Sawahata, F. Ishii, Thermoelectric effect in kagome lattice enhanced at van Hove singularity, *J. Phys. Soc. Jpn* **92**, 124704 (2023).
[3] R. Syariati, V. Saraswati, H. Sawahata, N. Yamaguchi, F. Ishii, First-principles study of anomalous Nernst effect in Cr-doped Bi_2Se_3, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 01SP26 (2023).

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機能デバイスデザイン

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（同上）

E-mail: t.ono@eedept.kobe-u.ac.jp

2 次元層状物質を強磁性金属で挟んだ構造は、磁気接合素子としての用途が期待されている。2023 年度は、A01 吾郷班で作成されている h-BN が FeNi 表面上に吸着した構造の界面原子構造を第一原理計算で調べた。ここでは、h-BN に加えグラフェンを吸着させた構造も同様に評価した。計算モデルを図 1(a)に、2 次元層状物質が吸着していないベアな FeNi 表面の表面形成エネルギーと表面元素組成の関係を調べた結果を図 1(b)に示す。ベアな表面では、Ni:Fe の比が 1:3 の場合が最も安定であった。次に、h-BN 及びグラフェンを吸着させた際の 1 原子当たりの結合エネルギーを図 1(c)、(d)に示す。原子構造は、h-BN の場合は N 原子が表面原子の直上、B 原子が金属第 2 層原子の直上に、グラフェンの場合は C 原子が表面原子及び金属第 2 層原子の直上に配置した場合が安定であった。吸着エネルギーは、Fe 組成比が増えると増大し、界面原子構造が安定化することが分かった。今後、これらの構造に対して伝導特性計算でスピン依存電気伝導特性を調べ、磁気抵抗比を評価する予定である。

2023 年度はこの他に、グラフェンを FePd(001)電極で挟んだ磁気抵抗素子の原子構造とスピン依存電気伝導特性を調べ、磁気抵抗比が 150-200%得られることを明らかにした[1]。さらに、A02 田中班で行われている 2 次元層状物質表面場上での VO_2 結晶構造を解析し、h-BN 上は h-BN のオリエンテーションを反映できる程度に VO_2 結晶との相互作用があるが、グラフェン上ではほとんど相互作用が無いことが分かった。

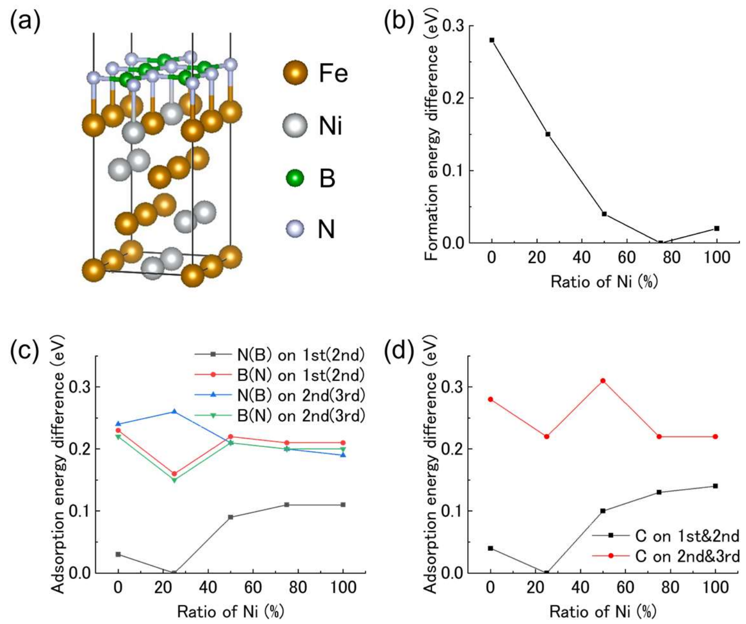


Figure 1 (a) Computational model for h-BN/FeNi interface, (b) formation energy of bare FeNi surface, (c) adsorption energy of h-BN/FeNi interface, and (d) adsorption energy of graphene/FeNi interface.

【2023 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、田中(A02)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Adachi, R. Endo, H. Shinya, H. Naganuma, T. Ono, M. Uemoto, First-principle study of spin transport property in $L1_0$-FePd(001)/graphene heterojunction, *J. Appl. Phys.* **135**, 043902 (2024).
[2] 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).
[3] M. Uemoto, M. Nishiura, T. Ono, Valley filters using graphene blister defects from first principles, *J. Phys.* Condens. Matt. **36**, 095301 (2024).
[4] 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).

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

河野 行雄（中央大学理工学部）

E-mail: kawano@elect.chuo-u.ac.jp

原子層物質は従来の半導体にはない優れた特長を有しており、光領域の中で未開拓であるテラヘルツ・赤外帯の機能探索による新規なデバイス応用が期待できるものの、実際の応用化・実装化は発展途上である。本研究は，カーボン物質に対して新たな+0.5 次元の構造を付加することによってテラヘルツ・赤外光機能を探求し、発光・検出素子へとつなげることを目的とする。基礎から応用までを一気通貫につなぐことで、原子層物質科学分野の出口としての役割も担う。平行して、当研究室のテラヘルツ・赤外計測を領域内研究者に使用していただくことも計画しており、領域内共同研究を実施した。

2023 年度では、吾郷グループとの共同研究により、高品質大面積グラフェンテープの転写によるテラヘルツ・赤外撮像素子とその画像化応用を達成した（Fig. 1）[1]。吾郷グループで作製したグラフェン素子を用いて、当研究室にてイメージング測定を行った。人の目に対して不透明の状態（パッケージで覆われている状態を想定）でも、非可視光の利用によって内部が可視化できることを、静止画、動画双方で示した。これは対象物の非破壊画像分析につながる成果であり、所望の場所、形状に貼り付け可能なテープ上大面積グラフェン膜の特長を活かし、柔軟な運用が期待できる。また、別種のカーボン系物質としてカーボンナノチューブによるテラヘルツ・赤外センサ研究も平行して進めた [2,3]。

当研究室のサブ波長赤外計測応用として、山本グループとの共同研究を実施した。山本グループで作製した BN/VO_2 ヘテロ構造に対し、当研究室のナノスケール赤外分光イメージングを用いてミクロな領域での赤外光学特性の観測を行った。金属絶縁体転移前後で特性の違いが見出され、現在さらなる研究を進めている。

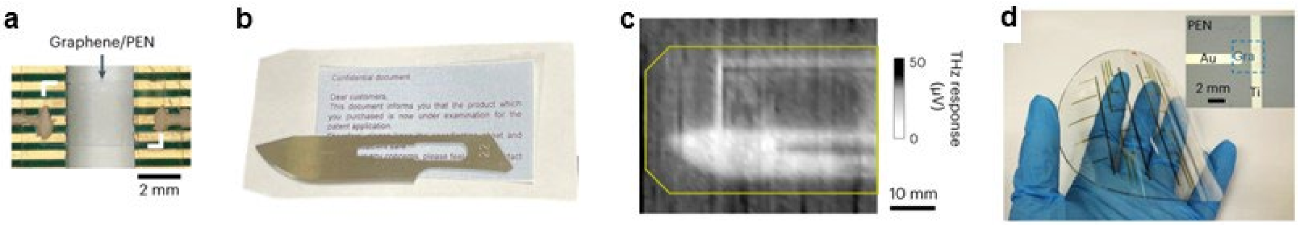


Figure 1 a, Photograph of the graphene terahertz (THz) sensor on a PEN substrate. **b**, Materials enclosed in an envelope (metal blade and a piece of paper) used for THz imaging. **c**, THz transmission image of the envelope at a wavelength of 577 μm. **d**, Photograph of a large-area imager based on 5 × 5 graphene array on a four-inch PEN substrate.

【2023 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、山本(A05)

【2023 年度の代表的な研究成果】

[1] 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.*, published online, DOI: 10.1038/s41928-024-01121-3 (2024).
[2] K. Li, Y. Kinoshita, D. Shikichi, M. Kubota, N. Takahashi, Q. Zhang, R. Koshimizu, R. Tadenuma, M. Yamamoto, L. Takai, Z. Zhou, I. Sato, Y. Kawano, Simple non-destructive and 3D multi-layer visual hull reconstruction with an ultrabroadband carbon nanotubes photo-imager, *Adv. Opt. Mater.*, 2302847 (2023).
[3] R. Kawabata, K. Li, T. Araki, M. Akiyama, K. Sugimachi, N. Matsuoka, N. Takahashi, D. Sakai, Y. Matsuzaki, R. Koshimizu, M. Yamamoto, L. Takai, R. Odawara, T. Abe, S. Izumi, N. Kurihira, T. Uemura, Y. Kawano, T. Sekitani, Ultraflexible wireless imager integrated with organic circuits for broadband infrared thermal analysis, *Adv. Mater.*, 2309864 (2024).

金属－絶縁体相転移材料 VO_2 を用いた MoS_2 の発光強度の局所変調

山本 真人（関西大学システム理工学部）

E-mail: myama@kansai-u.ac.jp

昨年度は、物理気相成長(PVD)法によって SiO_2 基板上にマイクロスケールの二酸化バナジウムフレークを合成することに成功し、さらに得られた VO_2 フレークが SiO_2 基板との熱膨張率係数の差によって生じた歪みによってバルクにおける相転移温度である 340 K を超えても絶縁相を有することを明らかにしている。今年度は、絶縁相と金属相が共存する VO_2 フレークを基板として用いることで単層 MoS_2 の発光特性の局所変調を行った。単層 MoS_2 は A02 班の宮田グループが化学気相成長法によって合成したものを用いた。A01 班渡邊グループが合成したバルク単結晶から機械剥離した六方晶窒化ホウ素(h-BN)とポリマーを用いて MoS_2 を基板上からピックアップし VO_2 に転写することで、h-BN/MoS_2/VO_2 ファンデルワールスヘテロ構造を形成した。作成した h-BN/MoS_2/VO_2 ファンデルワールスヘテロ構造のフォトルミネッセンス(PL)特性の評価は、分析拠点(光)(A03 班:松田グループ)で波長 532 nm の励起光を用いて大気中、300 – 400 K で行った。

Figure 1a は 350 K における h-BN/MoS_2/VO_2 ファンデルワールスヘテロ構造の光学顕微鏡像を示している。VO_2 のストライプ状のコントラストは絶縁相と金属相の違いによるものである。Figure 1b の PL 強度マップに示すように、金属 VO_2 上の MoS_2 の PL 強度は絶縁 VO_2 上に比べて高いことが分かった。一方で、Figure 2a に示すように PL ピーク位置やエキシトンとトリオンの強度割合は絶縁 VO_2 上と金属 VO_2 上で大きな変化がないことが分かった。以上の結果は、VO_2 の相状態による PL 強度の変化が、VO_2 からの電荷輸送や歪み、誘電遮蔽の効果が変化したことによるものでないことを示唆している。

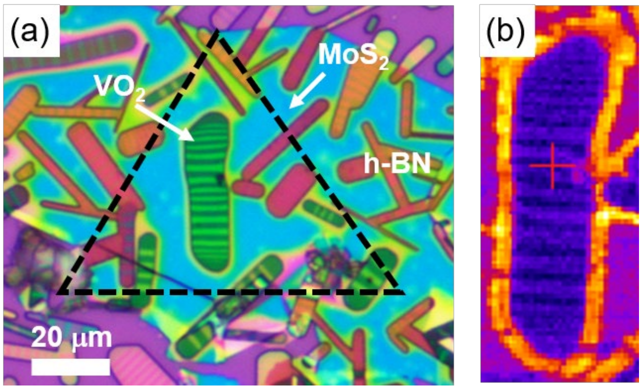


Figure 1 (a) Optical image and (b) PL intensity map of h-BN/MoS_2/VO_2 van der Waals heterostructures at 350 K.

そこで、励起光と PL 光のそれぞれが h-BN/MoS_2/VO_2 ファンデルワールスヘテロ構造を伝播する際の干渉効果が VO_2 の相状態によってどのように変化するかを数値計算によって調べた。その結果、Figure 2b に示すように絶縁 VO_2 上 MoS_2 と金属 VO_2 上 MoS_2 からの PL 強度の比が SiO_2 や VO_2 の厚さに依存して変化することが分かり、実験結果とよく一致した。さらに、PL 強度比は励起光や PL 光の波長によっても変わることが分かった。以上の結果より、VO_2 フレークを基板に用いることで二次元半導体の発光特性を広範囲かつ局所的に変調できることを示した。

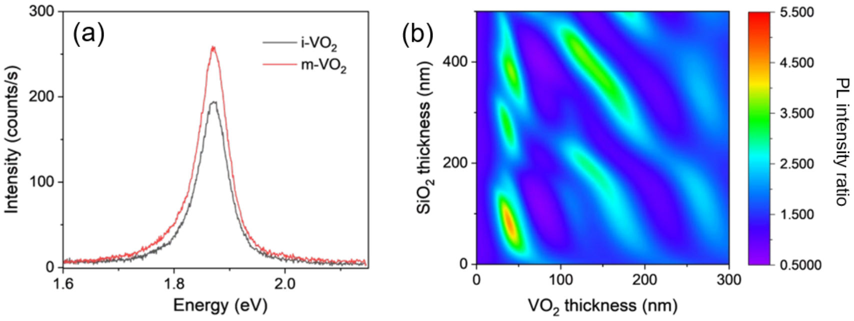


Figure 2 (a) PL spectra of MoS_2 on insulating and metallic VO_2. (b) The PL peak intensity ratio of MoS_2 on insulating and metallic VO_2.

【2023 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01), 渡邊(A01)、上野(A02)、宮田(A02)、松田(A03)、河野(A05)

６．　研究業績リスト

2.5D Materials

6-1. 論文

-2024-

(1) **Trans-dimensionality of electron/hole channels in multilayer in-plane heterostrcuture of graphene and hBN superlattice**
H. Zhang, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada
Jpn. J. Appl. Phys., 63, 015004 (2024)
DOI: 10.35848/1347-4065/ad1718

(2) **Topological edge and corner states in biphenylene photonic crystal**
H. T. Phan, K. Koizumi, F. Liu, K. Wakabayashi
Opt. Express, 32, 2223-2234 (2024)
DOI: 10.1364/OE.510595

(3) **Topological edge and corner states in the biphenylene network**
K. Koizumi, H. T. Phan, K. Nishigomi, K. Wakabayashi
Phys. Rev. B, 109, 035431 (2024)
DOI: 10.1103/PhysRevB.109.035431

(4) **Alkali metal bilayer intercalation in graphene**
Y.-C. Lin, R. Matsumoto, Q. Liu, P. Soslís-Fernández, M.-D. Siao, P.-W. Chiu, H. Ago, K. Suenaga
Nat. Commun., 15, 425 (2024)
DOI: 10.1038/s41467-023-44602-3

(5) **Expanding the library of sumanene molecular receptors for caesium-selective potentiometric sensors**
J. Ażgin, M. Wesoły, K. Durka, H. Sakurai, W. Wróblewski, A. Kasprzak
Dalton Trans., 53, 2964-2972, (2024)
DOI: 10.1039/d3dt03885h

(6) **Nanoscrolls of Janus Monolayer Transition Metal Dichalcogenides**
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
ACS Nano, 18, 2772-2781, (2024)
DOI: 10.1021/acsnano.3c05681
プレス発表あり　https://www.tmu.ac.jp/news/topics/36340.html

(7) **Density functional theory study on effect of NO annealing for SiC(0001) surface with atomic-scale steps**
M. Uemoto, N. Funaki, K. Yokota, T. Hosoi, T. Ono
Appl. Phys. Express, 17, 011009, (2024)
DOI: 10.35848/1882-0786/ad1bc3

(8) **First-principle study of spin transport property in L10-FePd(001)/graphene heterojunction**
H. Adachi, R. Endo, H. Shinya, H. Naganuma, T. Ono, M. Uemoto
J. Appl. Phys., 135, 043902, (2024)
DOI: 10.1063/5.0175047

(9) **カーボンナノチューブの熱電応答**
柳 和宏, 山本 貴博
固体物理, 59, 5-15, (2024)

(10) **An Expanded Hydrogen-bonded Organic Framework Formed by A Tetrakis(terphenyl)ethene Derivative**
M. Yamaguchi, M. H. Tomás, A. Fujiwara, R. Oketani, K. Okubo, K. Oka, N. Tohnai, A. Douhal, I. Hisaki
Bull. Chem. Soc. J. , 97, uoae004, (2024)
DOI: 10.1093/bulcsj/uoae004

(11) **Stability of ternary interfaces and its effects on ideal switching characteristics in inverted coplanar organic transistors**
K. Murata, G. Kitahara, S. Inoue, T. Higashino, S. Matsuoka, S. Arai, R. Kumai, T. Hasegawa
Phys. Rev. Appl., 21, 024005, 1-11, (2024)
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.21.024005

(12) **Single-gate MoS_2 Tunnel FET with a Thickness-Modulated Homojunction**
T. Fukui, T. Nishimura, Y. Miyata, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio
ACS Appl. Mater. Interfaces 2024, 16, 8993-9001, (2024)
DOI: 10.1021/acsami.3c15535

(13) **Gate-tunable Giant Superconducting Nonreciprocal Transport in Few-layer Td-$MoTe_2$**
T. Wakamura, M. Hashisaka, S. Hoshino, M. Bard, S. Okazaki, T. Sasagawa, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Muraki, N. Kumada
Phys. Rev. Research, 6, 013132, (2024)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.013132

(14) **Ready-to-transfer two-dimensional materials using tunable adhesive force tapes**
M. Nakatani, S. Fukamachi, P. Solís-Fernández, S. Honda, K. Kawahara, Y. Tsuji, Y. Sumiya, M. Kuroki, K. Li,

Q. Liu, Y.-C. Lin, A. Uchida, S. Oyama, H. Ji, K. Okada, K. Suenaga, Y. Kawano, K. Yoshizawa, A. Yasui, H. Ago
Nat. Electron., 7, 119-130, (2024)
DOI: 10.1038/s41928-024-01121-3
プレス発表あり　https://www.kyushu-u.ac.jp/f/56008/24_0213_01.pdf

(15) **Exploring hybrid states and their ultrafast dynamics in exciton-plasmon strong coupling systems**
H. Takeuchi, K. Imaeda, S. Ryuzaki, K. Ueno
J. Phys. Chem. C, 128, 2567-2576, (2024)
DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c08299

(16) **Distance-dependent energy transfer under modal strong coupling from CdSe/ZnS quantum dots to a plasmonic Fabry-Perot cavity**
T. Okamoto, A. Onishi, X. Shi, T. Oshikiri, K. Ueno, H. Misawa, V. Biju
J. Phys. Chem. C, 128, 4208-4214, (2024)
DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c08503

(17) **Biased Bowl-Direction of Monofluorosumanene in the Solid State**
Y. Yakiyama, M. Li, D. Zhou, T. Abe, C. Sato, K. Sambe, T. Akutagawa, T. Matsumura, N. Matubayasi, H. Sakurai
J. Am. Chem. Soc., 146, 5224-5231, (2024)
DOI: 10.1021/jacs.3c11311
プレス発表あり　https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2024/20240227_1

(18) **Emergence of electrochemical catalytic activity via an electrochemical-probe on defective transition metal dichalcogenide nanosheets**
A. Kumatani, H. Ogawa, T. Endo, J. Lustikova, H. Ida, Y. Takahashi, Y. Miyata, Y. Ikuhara, H. Shiku, Y. Wakayama
APL Energy, 2, 016107, (2024)
DOI: 10.1063/5.0175653

(19) **Plasmon dephasing and near-field enhancement of periodical arrays of Au nanogap dimers**
K. Imaeda, J. Yue, H. Takeuchi, K. Ueno
J. Phys. Chem. C, 128, 5659-5666, (2024)
DOI: 10.1021/acs.jpcc.4c00500

(20) **Chemically Tailored Semiconductor Moiré Superlattices of Janus Heterobilayers**
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
small structures, 2300514, 2300514(1-8), (2024)
DOI: 10.1002/sstr.202300514

(21) **Structural modulation of bilayer graphene under an external electric field and carrier doping**
N. Sultana, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada
Appl. Phys. Express, 17, 035001, (2024)
DOI: 10.35848/1882-0786/ad2ecc

-2023-

(1) **Seebeck-induced anomalous Nernst effect in van der Waals $MnBi_2Te_4$ layers**
Y. Morishima, N. Yamaguchi, H. Sawahata, F. Ishii
Appl. Phys. Express, 16, 043003, (2023)
DOI: 10.35848/1882-0786/accacc

(2) **Interference of excitons and surface plasmons in the optical absorption spectra of monolayer and bilayer graphene**
H. -L. Liu, B. D. Annawati, N. T. Hung, D. P. Gulo, P. S- Fernández, K. Kawahara, H. Ago, R. Saito
Phys. Rev. B, 107, 165421, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.165421

(3) **Charge transfer engineering to achieve extraordinary power generation in GeTe-based thermoelectric materials**
C. Liu, Z Zhang, Y. Peng, F. Li, L. Miao, E. Nishibori, R. Chetty, X. Bai, R. Si, J. Gao, X. Wang, Y. Zhu, N. Wang, H. Wei, T. Mori
Sci. Adv., 9, adh0713, (2023)
DOI: 10.1126/sciadv.adh0713

(4) **Observation of phonon Poiseuille flow in isotopically purified graphite ribbons**
X. Huang, Y. Guo, Y. Wu, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, Z. Zhang, S. Volz, T. Machida, M. Nomura
Nat. Commun., 14, 2044, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-37380-5

(5) **Spin-defect characteristics of single sulfur vacancies in monolayer MoS_2**
A. Hötger, T. Amit, J. Klein, K. Barthelmi, T. Pelini, A. Delhomme, S. Rey, M. Potemski, C. Faugeras, G. Cohen, D. Hernangómez-Pérez, T. Taniguchi, K. Watanabe, C. Kastl, J. J. Finley, S. Refaely-Abramson, A. W. Holleitner, A. V. Stier
npj 2D Mater. Appl. , 7, 30, (2023)
DOI: 10.1038/s41699-023-00392-2

(6) **Tailoring the dielectric screening in WS_2–graphene heterostructures**
D. Tebbe, M. Schütte, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Stampfer, B. Beschoten, L. Waldecker
npj 2D Mater. Appl. , 7, 29, (2023)
DOI: 10.1038/s41699-023-00394-0

(7) **Electroluminescence from a phthalocyanine monolayer encapsulated in a van der Waals tunnel diode**
T. James, J. Bradford, J. Kerfoot, V. V. Korolkov, M. Alkhamisi, T. Taniguchi, K. Watanabe, A. S. Nizovtsev, E. Antolín, E. Besley, S. A. Svatek, P. H. Beton
Mol. Phys., 121, e2197081, (2023)
DOI: 10.1080/00268976.2023.2197081

(8) **Identification of Exciton Complexes in Charge-Tunable Janus WSeS Monolayers**
M. S. G. Feuer, A. R.-P. Montblanch, M. Y. Sayyad, C. M. Purser, Y. Qin, E. M. Alexeev, A. R. Cadore, B. L. T. Rosa, J. Kerfoot, E. Mostaani, R. Kalęba, P. Kolari, J. Kopaczek, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. C. Ferrari, D. M. Kara, S. Tongay, M. Atatüre
ACS Nano, 17, 7326-7334, (2023)
10.1021/acsnano.2c10697

(9) **Chemomechanical modification of quantum emission in monolayer WSe_2**
M. I. B. Utama, H. Zeng, T. Sadhukhan, A. Dasgupta, S. C. Gavin, R. Ananth, D. Lebedev, W. Wang, J.-S. Chen, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. J. Marks, X. Ma, E. A. Weiss, G. C. Schatz, N. P. Stern, M. C. Hersam
Nat. Commun., 14, 2193, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-37892-0

(10) **Tunable spin and valley excitations of correlated insulators in Γ-valley moiré bands**
B. A. Foutty, J. Yu, T. Devakul, C. R. Kometter, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Fu, B. E. Feldman
Nat. Mater., 22, 731-736, (2023)
DOI: 10.1038/s41563-023-01534-z

(11) **Electrical control of hybrid exciton transport in a van der Waals heterostructure**
F. Tagarelli, E. Lopriore, D. Erkensten, R. Perea-Causín, S. Brem, J. Hagel, Z. Sun, G. Pasquale, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Malic, A. Kis
Nat. Photonics, 17, 615-621, (2023)
DOI: 10.1038/s41566-023-01198-w

(12) **Tunable electron–flexural phonon interaction in graphene heterostructures**
M. M. Sadeghi, Y. Huang, C. Lian, F. Giustino, E. Tutuc, A. H. MacDonald, T. Taniguchi, K. Watanabe, L. Shi
Nature, 617, 282-286, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-05879-y

(13) **Two-Photon Interference from a Quantum Emitter in Hexagonal Boron Nitride**
C. Fournier, S. Roux, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Buil, J. Barjon, J.-P. Hermier, A. Delteil
Phys. Rev. Applied, 19, L041003, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.19.L041003

(14) **Interface engineering of charge-transfer excitons in 2D lateral heterostructures**
R. Rosati, I. Paradisanos, L. Huang, Z. Gan, A. George, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Lombez, P. Renucci, A. Turchanin, B. Urbaszek, E. Malic
Nat. Commun., 14, 2438, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-37889-9

(15) **Fluorosumanenes as building blocks for organic crystalline dielectrics**
Y. Yakiyama, M. Li, H. Sakurai
Pure Appl. Chem., 95, 421-430, (2023)
DOI: 10.1515/pac-2023-0211

(16) **Transfer of van der Waals Heterostructures of Two-dimensional Materials onto Microelectromechanical Systems**
M. Onodera, T. Machida
Sens. Mater., 35, 1929, (2023)
DOI: 10.18494/SAM4363

(17) **Thermoelectrics in thin films with van der Waals interfaces**
K. Yanagi
JSAP Review, 2023, 230424, (2023)
DOI: 10.11470/jsaprev.230424

(18) **Dynamics of Moiré Exciton in a Twisted $MoSe_2/WSe_2$ Heterobilayer**
H. Kim, K. Aino, K. Shinokita, W. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda
Adv. Opt. Mat., 11, 2300146, (2023)
DOI: 10.1002/adom.202300146

(19) **Prediction of wide-gap topological insulating phase in metastable BiTeI**

Y. Zhang, N. Yamaguchi, H. Sawahata, F. Ishii
Applied Physics Express, 16, 053002, (2023)
DOI: 10.35848/1882-0786/acccd3

(20) **Self-Limiting Growth of Monolayer Tungsten Disulfide Nanoribbons on Tungsten Oxide Nanowires**
H. Suzuki, M. Kishibuchi, M. Misawa, K. Shimogami, S. Ochiai, T. Kokura, Y. Liu, R. Hashimoto, Z. Liu, K. Tsuruta, Y. Miyata, Y. Hayashi
ACS Nano, 17,10, 9455-9467, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c01608
プレス発表あり　https://www.okayama-u.ac.jp/tp/release/release_id1088.html

(21) **Rotational and dilational reconstruction in transition metal dichalcogenide moiré bilayers**
M. Van Winkle, I. M. Craig, S. Carr, M. Dandu, K. C. Bustillo, J. Ciston, C. Ophus, T. Taniguchi, K. Watanabe, A. Raja, S. M. Griffin, D. K. Bediako
Nat. Commun., 14, 2989, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-38504-7

(22) **Temperature Dependence of Excitonic Auger Recombination in Excitonic-Complex-Free Monolayer WS_2 by Considering Auger Broadening and Generation Efficiency**
D. Kim, T. T. Tran, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Kim, J. I. Jang
J. Phys. Chem. Lett., 14, 4259-4265, (2023)
DOI: 10.1021/acs.jpclett.3c00305

(23) **Direct Spectroscopic Observation of Cross-Plane Heat Transfer in a Two-Dimensional Van der Waals Heterostructure**
D. Chen, M. Fortin-Deschênes, Y. Lou, H. Lee, J. Xu, A. A. Sheikh, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Xia, F. Xia, P. Guo
J. Phys. Chem. C, 127, 9121-9128, (2023)
DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c01144

(24) **Gate-Tunable Bound Exciton Manifolds in Monolayer $MoSe_2$**
Y. Chen, H. Liang, L. Loh, Y. Ho, I. Verzhbitskiy, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Bosman, A. A. Bettiol, G. Eda
Nano Lett., 23, 4456-4463, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00814

(25) **Particle–hole symmetry protects spin-valley blockade in graphene quantum dots**
L. Banszerus, S. Möller, K. Hecker, E. Icking, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Hassler, C. Volk, C. Stampfer
Nature, 618, 51-56, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-05953-5

(26) **Lattice Reconstruction in $MoSe_2$–WSe_2 Heterobilayers Synthesized by Chemical Vapor Deposition**
Z. Li, F. Tabataba-Vakili, S. Zhao, A. Rupp, I. Bilgin, Z. Herdegen, B. März, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. R. Schleder, A. S. Baimuratov, E. Kaxiras, K. Müller-Caspary, A. Högele
Nano Lett., 23, 4160-4166, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c05094

(27) **Fermi Pressure and Coulomb Repulsion Driven Rapid Hot Plasma Expansion in a van der Waals Heterostructure**
J. Choi, J. Embley, D. D. Blach, R. Perea-Causín, D. Erkensten, D. S. Kim, L. Yuan, W. Y. Yoon, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Ueno, E. Tutuc, S. Brem, E. Malic, X. Li, L. Huang
Nano Lett., 23, 4399-4405, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00678

(28) **Correlated insulator of excitons in WSe_2/WS_2 moiré superlattices**
R. Xiong, J. H. Nie, S. L. Brantly, P. Hays, R. Sailus, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Tongay, C. Jin
Science, 380, 860-864, (2023)
DOI: 10.1126/science.add5574

(29) **Electrical switching of ferro-rotational order in nanometre-thick 1T-TaS_2 crystals**
G. Liu, T. Qiu, K. He, Y. Liu, D. Lin, Z. Ma, Z. Huang, W. Tang, J. Xu, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Gao, J. Wen, J.-M. Liu, B. Yan, X. Xi
Adv. Mater., 35, 2301172, (2023)
DOI: 10.1038/s41565-023-01403-5

(30) **Anomalous Interfacial Electron-Transfer Kinetics in Twisted Trilayer Graphene Caused by Layer-Specific Localization**
K. Zhang, Y. Yu, S. Carr, M. Babar, Z. Zhu, B. J. Kim, C. Groschner, N. Khaloo, T. Taniguchi, K. Watanabe, V. Viswanathan, D. K. Bediako
ACS Cent. Sci., 9, 1119-1128, (2023)
DOI: 10.1021/acscentsci.3c00326

(31) **Nonreciprocal Supercurrents in a Field-Free Graphene Josephson Triode**
J. Chiles, E. G. Arnault, C.-C. Chen, T. F. Q. Larson, L. Zhao, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Amet, G. Finkelstein
Nano Lett., 23, 5257-5263, (2023)

DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01276

(32) **Diffusion of Excitons in a Two-Dimensional Fermi Sea of Free Charges**
K. Wagner, Z. A. Iakovlev, J. D. Ziegler, M. Cuccu, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. M. Glazov, A. Chernikov
Nano Lett., 23, 4708-4715, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c03796

(33) **Investigating the fast spectral diffusion of a quantum emitter in hBN using resonant excitation and photon correlations**
C. Fournier, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Barjon, S. Buil, J.-P. Hermier, A. Delteil
Phys. Rev. B, 107, 195304, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.195304

(34) **p-type conversion of WS_2 and WS_2 by position-selective oxidation doping and its application in top gate transistors**
R. Kato, H. Uchiyama, T. Nishimura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. Chen, K. Nagashio
ACS Appl. Mater. Interfaces, 15, 26977-26984, (2023)
DOI: 10.1021/acsami.3c04052

(35) **Surface anisotropic magnetoresistance in the antiferromagnetic semiconductor $CrSb_2$**
K. Nakagawa, M. Kimata, T. Yokouchi, Y. Shiomi
Phys. Rev. B, 107, L180405, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.L180405

(36) **Shift current photovoltaics based on a non-centrosymmetric phase in in-plane ferroelectric SnS**
Y-R. Chang, R. Nanae, S. Kitamura, T. Nishimura, H. Wang, Y. Xiang, K. Shinokita, K. Matsuda, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio
Adv. Mater., 35, 2301172, (2023)
DOI: 10.1002/adma.202301172

(37) **Construction of Hydrogen-bonded Crystalline Frameworks Using Tetrakis(carboxyphenyl)dimethyldihydropyrene Derivative**
Y. Yamaguchi, K. Kasuya, R. Oketani, I. Hisaki
Chem. Lett., 52, 542-545, (2023)
DOI: 10.1246/cl.230198

(38) **Statically and Dynamically Flexible Hydrogen-bonded Frameworks Based on 4,5,9,10-Tetrakis(4-carboxyphenyl)pyrene**
T. Hashimoto, R. Oketani, A. Inoue, K. Okubo, K. Oka, N. Tohnai, K. Kamiya, S. Nakanishi, I. Hisaki
Chem. Commun., 59, 7224-7227, (2023)
DOI: 10.1039/d3cc01877f

(39) **Kinetic Analysis of Sodium-Ion Intercalation Reaction into Graphene-Like Graphite by Electrochemical Impedance Spectroscopy**
J. Inamoto, K. Aga, A. Inoo, Y. Matsuo
J. Electrochem. Soc., 170, 060550, (2023)
DOI: 10.1149/1945-7111/ace084

(40) **Dipole ladders with large Hubbard interaction in a moiré exciton lattice**
H. Park, J. Zhu, X. Wang, Y. Wang, W. Holtzmann, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Yan, L. Fu, T. Cao, D. Xiao, D. R. Gamelin, H. Yu, W. Yao, X. Xu
Nat. Phys., 19, 1286-1292, (2023)
DOI: 10.1038/s41567-023-02077-5

(41) **Approaching the Intrinsic Properties of Moiré Structures Using Atomic Force Microscopy Ironing**
S. K. Palai, M. Dyksik, N. Sokolowski, M. Ciorga, E. Sánchez Viso, Y. Xie, A. Schubert, T. Taniguchi, K. Watanabe, D. K. Maude, A. Surrente, M. Baranowski, A. Castellanos-Gomez, C. Munuera, P. Plochocka
Nano Lett., 23, 4749-4755, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c04765

(42) **Excitation-Dependent High-Lying Excitonic Exchange via Interlayer Energy Transfer from Lower-to-Higher Bandgap 2D Material**
A. Karmakar, T. Kazimierczuk, I. Antoniazzi, M. Raczyński, S. Park, H. Jang, T. Taniguchi, K. Watanabe, A. Babiński, A. Al-Mahboob, M. R. Molas
Nano Lett., 23, 5617-5624, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01127

(43) **Specular Electron Focusing between Gate-Defined Quantum Point Contacts in Bilayer Graphene**
J. Ingla-Aynés, A. L. R. Manesco, T. S. Ghiasi, S. Volosheniuk, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. S. J. van der Zant
Nano Lett., 23, 5453-5459, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00499

(44) **Super-Ballistic Width Dependence of Thermal Conductivity in Graphite Nanoribbons and Microribbons**
X. Huang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida, M. Nomura
Nanomaterials, 13, 1854, (2023)
DOI: 10.3390/nano13121854

(45) **Signatures of fractional quantum anomalous Hall states in twisted $MoTe_2$**
J. Cai, E. Anderson, C. Wang, X. Zhang, X. Liu, W. Holtzmann, Y. Zhang, F. Fan, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. Ran, T. Cao, L. Fu, D. Xiao, W. Yao, X. Xu
Nature, 622, 63-68, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06289-w

(46) **Local spectroscopy of a gate-switchable moiré quantum anomalous Hall insulator**
C. Zhang, T. Zhu, T. Soejima, S. Kahn, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Zettl, F. Wang, M. P. Zaletel, M. F. Crommie
Nat. Commun., 14, 3595, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-39110-3

(47) **Twist-angle dependent dehybridization of momentum-indirect excitons in $MoSe_2$/MoS_2 heterostructures**
N. Sokolowski, S. Palai, M. Dyksik, K. Posmyk, M. Baranowski, A. Surrente, D. Maude, F. Carrascoso, O. Cakiroglu, E. Sanchez, A. Schubert, C. Munuera, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Hagel, S. Brem, A. Castellanos-Gomez, E. Malic, P. Plochocka
2D Mater., 10, 034003, (2023)
DOI: 10.1088/2053-1583/acdbdb

(48) **Dielectric Environment Sensitivity of Carbon Centers in Hexagonal Boron Nitride**
D. I. Badrtdinov, C. Rodriguez-Fernandez, M. Grzeszczyk, Z. Qiu, K. Vaklinova, P. Huang, A. Hampel, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Jiong, M. Potemski, C. E. Dreyer, M. Koperski, M. Rösner
Small, 19, 2300144, (2023)
DOI: 10.1002/smll.202300144

(49) **Assessment of valley coherence in a high-quality monolayer molybdenum diselenide**
Y. Urano, M. Xue, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Kitaura
APEX, 16, 065003, (2023)
DOI: 10.35848/1882-0786/acd985

(50) **Electrically tunable moiré magnetism in twisted double bilayers of chromium triiodide**
G. Cheng, M. M. Rahman, A. L. Allcca, A. Rustagi, X. Liu, L. Liu, L. Fu, Y. Zhu, Z. Mao, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Upadhyaya, Y. P. Chen
Nat. Electron., 6, 434-442, (2023)
DOI: 10.1038/s41928-023-00978-0

(51) **Engineering the Strain and Interlayer Excitons of 2D Materials via Lithographically Engraved Hexagonal Boron Nitride**
Y.-C. Hsieh, Z.-Y. Lin, S.-J. Fung, W.-S. Lu, S.-C. Ho, S.-P. Hong, S.-Z. Ho, C.-H. Huang, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y.-H. Chan, Y.-C. Chen, C.-L. Wu, T.-M. Chen
Nano Lett., 23, 7244-7251, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01208

(52) **High Magnetic Field Stability in a Planar Graphene-$NbSe_2$ SQUID**
A. Zalic, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Gazit, H. Steinberg
Nano Lett., 23, 6102-6108, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01552

(53) **Interaction-driven transport of dark excitons in 2D semiconductors with phonon-mediated optical readout**
S. B. Chand, J. M. Woods, J. Quan, E. Mejia, T. Taniguchi, K. Watanabe, A. Alù, G. Grosso
Nat. Commun., 14, 3712, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-39339-y

(54) **Programming correlated magnetic states with gate-controlled moiré geometry**
E. Anderson, F.-R. Fan, J. Cai, W. Holtzmann, T. Taniguchi, K. Watanabe, D. Xiao, W. Yao, X. Xu
Science, 381, 325-330, (2023)
DOI: 10.1126/science.adg4268

(55) **Exciton-assisted electron tunnelling in van der Waals heterostructures**
L. Wang, S. Papadopoulos, F. Iyikanat, J. Zhang, J. Huang, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. Calame, M. L. Perrin, F. J. García de Abajo, L. Novotny
Nat. Mater., 22, 1094-1099, (2023)
DOI: 10.1038/s41563-023-01556-7

(56) **Nanoscale electrostatic control in ultraclean van der Waals heterostructures by local anodic oxidation of graphite gates**
L. A. Cohen, N. L. Samuelson, T. Wang, K. Klocke, C. C. Reeves, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Vijay, M. P. Zaletel, A. F. Young
Nat. Phys., 19, 1502-1508, (2023)
DOI: 10.1038/s41567-023-02114-3

(57) **Observation of half-integer Shapiro steps in graphene Josephson junctions**
Z. Huang, B. H. Elfeky, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Shabani, D. Shahrjerdi
Appl. Phys. Lett., 122, 262601, (2023)
DOI: 10.1063/5.0153646

(58) **Operando electron microscopy investigation of polar domain dynamics in twisted van der Waals homobilayers**
K. Ko, A. Yuk, R. Engelke, S. Carr, J. Kim, D. Park, H. Heo, H.-M. Kim, S.-G. Kim, H. Kim, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Park, E. Kaxiras, S. M. Yang, P. Kim, H. Yoo
Nat. Mater., 22, 992-998, (2023)
DOI: 10.1038/s41563-023-01595-0

(59) **Interspecies exciton interactions lead to enhanced nonlinearity of dipolar excitons and polaritons in MoS_2 homobilayers**
C. Louca, A. Genco, S. Chiavazzo, T. P. Lyons, S. Randerson, C. Trovatello, P. Claronino, R. Jayaprakash, X. Hu, J. Howarth, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Dal Conte, R. Gorbachev, D. G. Lidzey, G. Cerullo, O. Kyriienko, A. I. Tartakovskii
Nat. Commun., 14, 3818, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-39358-9

(60) **Landau level transition and magnetophonon resonance in a twisted bilayer graphene**
M. DeCapua, Y.-C. Wu, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Yan
Solid State Commun., 371, 115265, (2023)
DOI: 10.1016/j.ssc.2023.115265

(61) **Low-frequency noise in hBN/MoS_2/hBN transistor at cryogenic temperatures toward low-noise cryo-CMOS device applications**
S. Nakaharai, T. Arakawa, A. Zulkefli, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Wakayama
Appl. Phys. Lett., 122, 262102, (2023)
DOI: 10.1063/5.0152475

(62) **Imaging Field-Driven Melting of a Molecular Solid at the Atomic Scale**
F. Liou, H.-Z. Tsai, Z. A. H. Goodwin, A. S. Aikawa, E. Ha, M. Hu, Y. Yang, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Zettl, J. Lischner, M. F. Crommie
Adv. Mater., 35, 2300542, (2023)
DOI: 10.1002/adma.202300542

(63) **Fe-Intercalation Dominated Ferromagnetism of van der Waals Fe_3GeTe_2**
Y. Wu, Y. Hu, C. Wang, X. Zhou, X. Hou, W. Xia, Y. Zhang, J. Wang, Y. Ding, J. He, P. Dong, S. Bao, J. Wen, Y. Guo, K. Watanabe, T. Taniguchi, W. Ji, Z.-J. Wang, J. Li
Adv. Mater., 35, 2302568, (2023)
DOI: 10.1002/adma.202302568

(64) **Piezoelectric effect in 2H and 3R phases of α-In_2Se_3**
K. Ueda, R. Murata, T. Sasagawa, Y. Shiomi
Jpn. J. Appl. Phys., 62, 061006, (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/acdc72

(65) **From h-BN to graphene: characterizations of hybrid carbon-doped h-BN for applications in electronic and optoelectronic devices**
S. Ngamprapawat, J. Kawase, T. Nishimura, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio
Adv. Electronic Mater., 9, 2300083, (2023)
DOI: 10.1002/aelm.202300083

(66) **Gate-Defined Josephson Weak-Links in Monolayer WTe_2**
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
Adv. Mater., 35, 2301683, (2023)
DOI: 10.1002/adma.202301683

(67) **1T/1H-SnS_2 Sheets for Electrochemical CO_2 Reduction to Formate**
Y. Kawabe, Y. Ito, Y. Hori, S. Kukunuri, F. Shiokawa, T. Nishiuchi, S. Jeong, K. Katagiri, Z. Xi, Z. Li, Y. Shigeta, Y. Takahashi
ACS Nano, 17, 11318–11326, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.2c12627

(68) **Extreme Polarization Anisotropy in Resonant Third ‐ Harmonic Generation from Aligned Carbon Nanotube Films**
S. Zhu, W. Li, S. Yu, N. Komatsu, A. Baydin, F. Wang, F. Sun, C. Wang, W. Chen, C. S. Tan, H. Liang, Y. Yomogida, K. Yanagi, J. Kono, Q. J. Wang
Adv. Mater., 2023, 2304082, (2023)
DOI: 10.1002/adma.202304082

(69) **Gate-Defined Electron Interferometer in Bilayer Graphene**
S. Iwakiri, F. K. d. Vries, E. Portolés, G. Zheng, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Ihn, K. Ensslin
Nano Lett., 22, 6292-6297, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c01874

(70) **Electronic structure of graphene thin films under a perpendicular electric field**
N. Sultana, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada
Jpn. J. Appl. Phys., 62, 075001, (2023)

DOI: 10.35848/1347-4065/acde66

(71) **Ultrafast dynamics of bright and dark excitons in monolayer WSe_2 and heterobilayer WSe_2/MoS_2**
J. P. Bange, P. Werner, D. Schmitt, W. Bennecke, G. Meneghini, A. AlMutairi, M. Merboldt, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Steil, D. Steil, R. T. Weitz, S. Hofmann, G. S. M. Jansen, S. Brem, E. Malic, M. Reutzel, S. Mathias
2D Mater., 10, 035039, (2023)
DOI: 10.1088/2053-1583/ace067

(72) **Electrically Driven Site-Controlled Single Photon Source**
S. Guo, S. Germanis, T. Taniguchi, K. Watanabe, F. Withers, I. J. Luxmoore
ACS Photo, 10, 2549-2555, (2023)
DOI: 10.1021/acsphotonics.3c00097

(73) **Spin-orbit coupling-enhanced valley ordering of malleable bands in twisted bilayer graphene on WSe_2**
S. Bhowmik, B. Ghawri, Y. Park, D. Lee, S. Datta, R. Soni, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Ghosh, J. Jung, U. Chandni
Nat. Commun., 14, 4055, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-39855-x

(74) **Twisted cuprate van der Waals heterostructures with controlled Josephson coupling**
M. Martini, Y. Lee, T. Confalone, S. Shokri, C. N. Saggau, D. Wolf, G. Gu, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Montemurro, V. M. Vinokur, K. Nielsch, N. Poccia
Materials Today, 67, 106-112, (2023)
DOI: 10.1016/j.mattod.2023.06.007

(75) **Controlled alignment of supermoiré lattice in double-aligned graphene heterostructures**
J. Hu, J. Tan, M. M. Al Ezzi, U. Chattopadhyay, J. Gou, Y. Zheng, Z. Wang, J. Chen, R. Thottathil, J. Luo, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. T. S. Wee, S. Adam, A. Ariando
Nat. Commun., 14, 4142, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-39893-5

(76) **Doping-Free High-Performance Photovoltaic Effect in a WSe_2 Lateral p-n Homojunction Formed by Contact Engineering**
H. Y. Le Thi, T. D. Ngo, N. A. N. Phan, H. Shin, I. Uddin, A. Venkatesan, C.-T. Liang, N. Aoki, W. J. Yoo, K. Watanabe, T. Taniguchi, G.-H. Kim
ACS Appl. Mater. Interfaces, 15, 35342-35349, (2023)
DOI: 10.1021/acsami.3c05451

(77) **Radiation Pressure Backaction on a Hexagonal Boron Nitride Nanomechanical Resonator**
I. Sánchez Arribas, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. M. Weig
Nano Lett., 23, 6301-6307, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00544

(78) **Extended Spatial Coherence of Interlayer Excitons in $MoSe_2/WSe_2$ Heterobilayers**
M. Troue, J. Figueiredo, L. Sigl, C. Paspalides, M. Katzer, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. Selig, A. Knorr, U. Wurstbauer, A. W. Holleitner
Phys. Rev. Lett., 131, 036902, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.036902

(79) **Mixed-dimensional moiré systems of twisted graphitic thin films**
D. Waters, E. Thompson, E. Arreguin-Martinez, M. Fujimoto, Y. Ren, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Cao, D. Xiao, M. Yankowitz
Nature, 620, 750-755, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06290-3

(80) **Superconductivity and strong interactions in a tunable moiré quasicrystal**
A. Uri, S. C. de la Barrera, M. T. Randeria, D. Rodan-Legrain, T. Devakul, P. J. D. Crowley, N. Paul, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Lifshitz, L. Fu, R. C. Ashoori, P. Jarillo-Herrero
Nature, 620, 762-767, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06294-z

(81) **Observation of the Time-Reversal Symmetric Hall Effect in Graphene–WSe_2 Heterostructures at Room Temperature**
P. Tiwari, D. Sahani, A. Chakraborty, K. Das, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Agarwal, A. Bid
Nano Lett., 23, 6792-6798, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00045

(82) **Annealing of blue quantum emitters in carbon-doped hexagonal boron nitride**
Y. Chen, A. Gale, K. Yamamura, J. Horder, A. Condos, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Toth, I. Aharonovich
Appl. Phys. Lett., 123, 041902, (2023)
DOI: 10.1063/5.0155311

(83) **Layer-Dependent Interaction Effects in the Electronic Structure of Twisted Bilayer Graphene Devices**
N. Dale, M. I. B. Utama, D. Lee, N. Leconte, S. Zhao, K. Lee, T. Taniguchi, K. Watanabe, C. Jozwiak,

A. Bostwick, E. Rotenberg, R. J. Koch, J. Jung, F. Wang, A. Lanzara
Nano Lett., 23, 6799-6806, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c00253

(84) **Effects of Floquet Engineering on the Coherent Exciton Dynamics in Monolayer WS_2**
M. A. Conway, S. K. Earl, J. B. Muir, T.-H.-Y. Vu, J. O. Tollerud, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. S. Fuhrer, M. T. Edmonds, J. A. Davis
ACS Nano, 17, 14545-14554, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c01318

(85) **Phase diagram of the ν=2 quantum Hall state in bilayer graphene**
U. Khanna, K. Huang, G. Murthy, H. A. Fertig, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Zhu, E. Shimshoni
Phys. Rev. B, 108, L041107, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.108.L041107

(86) **Polaritonic Probe of an Emergent 2D Dipole Interface**
D. J. Rizzo, J. Zhang, B. S. Jessen, F. L. Ruta, M. Cothrine, J. Yan, D. G. Mandrus, S. E. Nagler, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. M. Fogler, A. N. Pasupathy, A. J. Millis, A. Rubio, J. C. Hone, C. R. Dean, D. N. Basov
Nano Lett., 23, 8426-8435, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01611

(87) **A sumanene-containing magnetic nanoadsorbent for the simple and effective removel of caesium salts from aqueous solutions**
A. Kasprzak, M. Matczuk, H. Sakurai
Chem. Commun., 59, 9591-9594, (2023)
DOI: 10.1039/D3CC02657D

(88) **Sumanene-Stacked Supramolecular Polymers. Dynamic, Solvation-Directed Control**
H. Mizuno, H. Nakazawa, M. Harada, Y. Yakiyama, H. Sakurai, G. Fukuhara
Chem. Commun., 59, 9595-9598, (2023)
DOI: 10.1039/D3CC02990E

(89) **Dynamics of Moiré Trion and Its Valley Polarization in a Microfabricated WSe2/MoSe2 Heterobilayer**
H. Kim, D. Dong, Y. Okamura, K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda
ACS Nano, 17, 13715-13723, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c02952

(90) **Quadrupolar excitons and hybridized interlayer Mott insulator in a trilayer moiré superlattice**
Z. Lian, D. Chen, L. Ma, Y. Meng, Y. Su, L. Yan, X. Huang, Q. Wu, X. Chen, M. Blei, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Tongay, C. Zhang, Y.-T. Cui, S.-F. Shi
Nat. Commun., 14, 4604, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-40288-9

(91) **Valley Polarized Holes Induced Exciton Polaron Valley Splitting**
Y.-C. Wu, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Yan
ACS Nano, 17, 15641-15647, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c02737

(92) **Electron density control in WSe_2 monolayers via photochlorination**
E. Katsipoulaki, G. Vailakis, I. Demeridou, D. Karfaridis, P. Patsalas, K. Watanabe, T. Taniguchi, I. Paradisanos, G. Kopidakis, G. Kioseoglou, E. Stratakis
2D Mater., 10, 045008, (2023)
DOI: 10.1088/2053-1583/ace980

(93) **Edge Contacts to Atomically Precise Graphene Nanoribbons**
W. Huang, O. Braun, D. I. Indolese, G. B. Barin, G. Gandus, M. Stiefel, A. Olziersky, K. Müllen, M. Luisier, D. Passerone, P. Ruffieux, C. Schönenberger, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Fasel, J. Zhang, M. Calame, M. L. Perrin
ACS Nano, 17, 18706-18715, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c00782

(94) **Gate-modulated reflectance spectroscopy for detecting excitonic states in two-dimensional semiconductors**
M. Xue, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Kitaura
Appl. Phys. Lett., 123, 063101, (2023)
DOI: 10.1063/5.0159245

(95) **Observation of First-Order Quantum Phase Transitions and Ferromagnetism in Twisted Double Bilayer Graphene**
L. Liu, X. Lu, Y. Chu, G. Yang, Y. Yuan, F. Wu, Y. Ji, J. Tian, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Du, D. Shi, J. Liu, J. Shen, L. Lu, W. Yang, G. Zhang
Phys. Rev. X, 13, 031015, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevX.13.031015

(96) **Phonon-Mediated Quasiparticle Lifetime Renormalizations in Few-Layer Hexagonal Boron Nitride**

H. I. Røst, S. P. Cooil, A. C. Åsland, J. Hu, A. Ali, T. Taniguchi, K. Watanabe, B. D. Belle, B. Holst, J. T. Sadowski, F. Mazzola, J. W. Wells
Nano Lett., 23, 7539-7545, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02086

(97) **Single Atomic Defect Conductivity for Selective Dilute Impurity Imaging in 2D Semiconductors**
N. T. T. Vu, L. Loh, Y. Chen, Q. Wu, I. A. Verzhbitskiy, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Bosman, Y. S. Ang, L. K. Ang, M. Trushin, G. Eda
ACS Nano, 17, 15648-15655, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c02758

(98) **Photoinduced edge-specific nanoparticle decoration of two-dimensional tungsten diselenide nanoribbons**
G. Murastov, M. A. Aslam, T.-H. Tran, A. Lassnig, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Wurster, M. Nachtnebel, C. Teichert, E. Sheremet, R. D. Rodriguez, A. Matkovic
Commun. Chem, 6, 166, (2023)
DOI: 10.1038/s42004-023-00975-6

(99) **Unusual magnetotransport in twisted bilayer graphene from strain-induced open Fermi surfaces**
X. Wang, J. Finney, A. L. Sharpe, L. K. Rodenbach, C. L. Hsueh, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. A. Kastner, O. Vafek, D. Goldhaber-Gordon
Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 120, e2307151120, (2023)
DOI: 10.1073/pnas.2307151120

(100) **Observation of fractionally quantized anomalous Hall effect**
H. Park, J. Cai, E. Anderson, Y. Zhang, J. Zhu, X. Liu, C. Wang, W. Holtzmann, C. Hu, Z. Liu, T. Taniguchi, K. Watanabe, J.-H. Chu, T. Cao, L. Fu, W. Yao, C.-Z. Chang, D. Cobden, D. Xiao, X. Xu
Nature, 622, 74-79, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06536-0

(101) **Exciton Superposition across Moiré States in a Semiconducting Moiré Superlattice**
Z. Lian, D. Chen, Y. Meng, X. Chen, Y. Su, R. Banerjee, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. Tongay, C. Zhang, Y.-T. Cui, S.-F. Shi
Nat. Commun., 14, 5042, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-40783-z

(102) **Observation of ultrafast interfacial Meitner-Auger energy transfer in a Van der Waals heterostructure**
S. Dong, S. Beaulieu, M. Selig, P. Rosenzweig, D. Christiansen, T. Pincelli, M. Dendzik, J. D. Ziegler, J. Maklar, R. P. Xian, A. Neef, A. Mohammed, A. Schulz, M. Stadler, M. Jetter, P. Michler, T. Taniguchi, K. Watanabe, H. Takagi, U. Starke, A. Chernikov, M. Wolf, H. Nakamura, A. Knorr, L. Rettig, R. Ernstorfer
Nat. Commun., 14, 5057, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-40815-8

(103) **Twist angle dependent interlayer transfer of valley polarization from excitons to free charge carriers in WSe_2/$MoSe_2$ heterobilayers**
F. Volmer, M. Ersfeld, P. E. Faria Junior, L. Waldecker, B. Parashar, L. Rathmann, S. Dubey, I. Cojocariu, V. Feyer, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. M. Schneider, L. Plucinski, C. Stampfer, J. Fabian, B. Beschoten
npj 2D Mater. Appl. , 7, 58, (2023)
DOI: 10.1038/s41699-023-00420-1

(104) **Magnetism-Induced Band-Edge Shift as the Mechanism for Magnetoconductance in $CrPS_4$ Transistors**
F. Wu, M. Gibertini, K. Watanabe, T. Taniguchi, I. Gutiérrez-Lezama, N. Ubrig, A. F. Morpurgo
Nano Lett., 23, 8140-8145, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02274

(105) **Liquid-activated quantum emission from pristine hexagonal boron nitride for nanofluidic sensing**
N. Ronceray, Y. You, E. Glushkov, M. Lihter, B. Rehl, T.-H. Chen, G.-H. Nam, F. Borza, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Roke, A. Keerthi, J. Comtet, B. Radha, A. Radenovic
Nat. Mater., 22, 1236-1242, (2023)
DOI: 10.1038/s41563-023-01658-2

(106) **Superconductivity in twisted double bilayer graphene stabilized by WSe_2**
R. Su, M. Kuiri, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Folk
Nat. Mater., 22, 1332-1337, (2023)
DOI: 10.1038/s41563-023-01653-7

(107) **Complex third-order nonlinear susceptibility of single-layer graphene governing third-harmonic generation**
D. Inukai, T. Koyama, K. Kawahara, H. Ago, H. Kishida
Phys. Rev. B, 108, 075408, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.108.075408

(108) **Electrochemical imaging correlated to hydrogen evolution reaction on transition metal dichalcogenide, WS_2**

A. Kumatani, H. Ogawa, T. Endo, Y. Kobayashi, J. Lustikova, H. Ida, Y. Takahashi, T. Matsue, Y. Miyata, H. Shiku
J. Vac. Sci. Technol. B, 41, 052401, (2023)
DOI: 10.1116/6.0002706

(109) **Electrochemical reservoir computing based on surface-functionalized carbon nanotubes**
T. Shingu, H. Uchiyama, T. Watanabe, Y. Ohno
Carbon, 214, 118344-1-8, (2023)
DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118344

(110) **Integration of 3-Level MoS Multibridge Channel FET With 2D Layered Contact and Gate Dielectric**
S. Hitesh, P. Dasika, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Majumdar
IEEE Electron Device Lett., 43, 1993-1996, (2023)
DOI: 10.1109/LED.2022.3206866

(111) **Atomic arrangement of Si adatom on the Silicene/Ag(111) surface**
Y. Adachi, R. Zhang, X. Wang, M. Fukuda, T. Ozaki, Y. Sugimoto
Appl. Surf. Sci., 630, 157336, (2023)
DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.157336

(112) **Spatiotemporal observation of quantum crystallization of electrons**
H. Murase, S. Arai, T. Hasegawa, K. Miyagawa, K. Kanoda
Nat. Commun. , 14, 6011, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-41731-7

(113) **Pair Distribution Function from Liquid Jet Nanoparticle Suspension using Femtosecond X-ray Pulses**
L. J. Støckler, R. S. Christensen, M. Kløve, A. D. Bertelsen, A. B. Borup, L. Krause, S. Takahashi, T. Fujita, H. Kasai, I. Inoue, E. Nishibori, B. B. Iversen
ChemPhysChem, 24, e202300407, (2023)
DOI: 10.1002/cphc.202300407

(114) **Trapping-induced quantum beats in a van-der-Waals heterostructure microcavity observed by two-dimensional micro-spectroscopy**
D. Li, H. Shan, H. Knopf, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Qin, S. Tongay, F. Eilenberger, S. Höfling, C. Schneider, T. Brixner
Opt. Mater. Express, 13,10, 2798-2807, (2023)
DOI: 10.1364/OME.492545

(115) **Revealing flat bands and hybridization gaps in a twisted bilayer graphene device with microARPES**
Z. Jiang, K. Hsieh, A. J. H. Jones, P. Majchrzak, C. Sahoo, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. A. Miwa, Y. P. Chen, S. Ulstrup
2D Mater., 10, 045027, (2023)
DOI: 10.1088/2053-1583/acf775

(116) **Kapitza-resistance-like exciton dynamics in atomically flat $MoSe_2$-WSe_2 lateral heterojunction**
H. Lamsaadi, D. Beret, I. Paradisanos, P. Renucci, D. Lagarde, X. Marie, B. Urbaszek, Z. Gan, A. George, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Turchanin, L. Lombez, N. Combe, V. Paillard, J.-M. Poumirol
Nat. Commun., 14, 5881, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-41538-6

(117) **Nonlinear intensity dependence of ratchet currents induced by terahertz laser radiation in bilayer graphene with asymmetric periodic grating gates**
E. Mönch, S. Hubmann, I. Yahniuk, S. Schweiss, V. V. Bel'kov, L. E. Golub, R. Huber, J. Eroms, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Weiss, S. D. Ganichev
J. Appl. Phys., 134, 123102, (2023)
DOI: 10.1063/5.0165248

(118) **Observation of Integer and Fractional Quantum Anomalous Hall Effects in Twisted Bilayer $MoTe_2$**
F. Xu, Z. Sun, T. Jia, C. Liu, C. Xu, C. Li, Y. Gu, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Tong, J. Jia, Z. Shi, S. Jiang, Y. Zhang, X. Liu, T. Li
Phys. Rev. X, 13, 031037, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevX.13.031037

(119) **A reconfigurable transistor and memory based on a two-dimensional heterostructure and photoinduced trapping**
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
DOI: Nat. Electron., 6, 755-764, (2023)
10.1038/s41928-023-01034-7

(120) **Ballistic transport spectroscopy of spin-orbit-coupled bands in monolayer graphene on WSe_2**
Q. Rao, W.-H. Kang, H. Xue, Z. Ye, X. Feng, K. Watanabe, T. Taniguchi, N. Wang, M.-H. Liu, D.-K. Ki
Nat. Commun., 14, 6124, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-41826-1

(121) **Effects of nonlinear photoemission on mean transverse energy from metal photocathodes**
C. J. Knill, S. Douyon, K. Kawahara, H. Yamaguchi, G. Wang, H. Ago, N. Moody, S. Karkare
Phys. Rev. Accel. Beams, 26, 093401, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.093401

(122) **High-throughput dry transfer and excitonic properties of twisted bilayers based on CVD-grown transition metal dichalcogenides**
H. Naito, Y. Makino, W. Zhang, T. Ogawa, T. Endo, T. Sannomiya, M. Kaneda, K. Hashimoto, H. E. Lim, Y. Nakanishi, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, Y. Miyata
Nanoscale Adv., 5, 5115-5121, (2023)
DOI: 10.1039/D3NA00371J

(123) **Unidirectional optical swarming of gold nanoparticles on lithographically fabricated gold nanopatterns**
C.-H. Huang, Y.-C. Lee, T. Kudo, X. Shi, K. Ueno, T. Sugiyama, H. Misawa, H. Masuhara
J. Phys. Chem. C, 128, 19044-19054, (2023)
DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c04949

(124) ウェアラブルデバイスへの実装を目指した柔軟な摩擦帯電型エネルギーハーベスタ
松永 正広，大野 雄高
繊維機械学会誌「せんい」, 76, 479-486, (2023)

(125) **A quantum ruler for orbital magnetism in moiré quantum matter**
M. R. Slot, Y. Maximenko, P. M. Haney, S. Kim, D. T. Walkup, E. Strelcov, S. T. Le, E. M. Shih, D. Yildiz,S. R. Blankenship, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Barlas, N. B. Zhitenev, F. Ghahari, J. A. Stroscio
Science, 382, 81-87, (2023)
DOI: 10.1126/science.adf2040

(126) **Optically Induced Symmetry Breaking Due to Nonequilibrium Steady State Formation in Charge Density Wave Material 1T-$TiSe_2$**
H. Jog, L. Harnagea, D. Rout, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. J. Mele, R. Agarwal
Nano Lett., 23,20, 9634-9640, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c03736

(127) **Sub-THz wireless transmission based on graphene-integrated optoelectronic mixer**
A. Montanaro, G. Piccinini, V. Mišeikis, V. Sorianello, M. A. Giambra, S. Soresi, L. Giorgi, A. D'Errico, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Pezzini, C. Coletti, M. Romagnoli
Nat. Commun., 14, 6471, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-42194-6

(128) **Excited state spectroscopy and spin splitting in single layer MoS_2 quantum dots**
P. Kumar, H. Kim, S. Tripathy, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. S. Novoselov, D. Kotekar-Patil
Nanoscale, 15, 18203-18211, (2023)
DOI: 10.1039/D3NR03844K

(129) **Stabilizing the Inverted Phase of a WSe_2/BLG/WSe_2 Heterostructure via Hydrostatic Pressure**
M. Kedves, B. Szentpéteri, A. Márffy, E. Tóvári, N. Papadopoulos, P. K. Rout, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Goswami, S. Csonka, P. Makk
Nano Lett., 23, 20, 9508-9514, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c03029

(130) **Optical Imaging of Ultrafast Phonon-Polariton Propagation through an Excitonic Sensor**
S.-W. Cheng, D. Xu, H. Su, J. M. Baxter, L. N. Holtzman, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. C. Hone, K. Barmak, M. Delor
Nano Lett., 23, 21, 9936-9942, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02897

(131) **Orbital multiferroicity in pentalayer rhombohedral graphene**
T. Han, Z. Lu, G. Scuri, J. Sung, J. Wang, T. Han, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Fu, H. Park, L. Ju
Nature, 623, 41-47, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06572-w

(132) **Observation of quadrupolar and dipolar excitons in a semiconductor heterotrilayer**
L. Yu, K. Pistunova, J. Hu, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. F. Heinz
Nat. Mater., 22, 1485-1491, (2023)
DOI: 10.1038/s41563-023-01678-y

(133) **Quadrupolar–dipolar excitonic transition in a tunnel-coupled van der Waals heterotrilayer**
W. Li, Z. Hadjri, L. M. Devenica, J. Zhang, S. Liu, J. Hone, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Rubio, A. Srivastava
Nat. Mater., 22, 1478-1484, (2023)
DOI: 10.1038/s41563-023-01667-1

(134) **Charge Oscillations in Bilayer Graphene Quantum Confinement Devices**
H. Fu, K. Huang, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Zhu

Nano Lett., 23, 21, 9726-9732, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02253

(135) **Spin and valley-polarized multiple Fermi surfaces of α-$RuCl_3$/bilayer graphene heterostructure**
S. Kim, J. Hong, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Falson, J. Kim, Y. Kim
Appl. Phys. Lett., 123, 173101, (2023)
DOI: 10.1063/5.0170810

(136) **Symmetry Engineering in Twisted Bilayer WTe_2**
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
Nano Lett., 23, 9280, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02327

(137) **Structural Diversity of Single-Walled Transition Metal Dichalcogenide Nanotubes Grown via Template Reaction**
Y. Nakanishi, S. Furusawa, Y. Sato, T. Tanaka, Y. Yomogida, K. Yanagi, W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, T. Kato, K. Suenaga, Y. Miyata
Adv. Mater., 35, 2306631, (2023)
DOI: 10.1002/adma.202306631
プレス発表あり　https://www.tmu.ac.jp/news/topics/36072.html

(138) **Synthesis and optical properties of WS_2 nanotubes with relatively small diameters**
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
Sci. Rep., 13, 16959, (2023)
DOI: 10.1038/s41598-023-44072-z

(139) **Semiconducting Transition Metal Dichalcogenide Heteronanotubes with Controlled Outer-Wall Structures**
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
Nano Lett., 23, 10103-10109, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01761

(140) **Promise of dual carbon batteries with graphene-like graphite as both electrodes**
J. Inamoto, S. Enoki, A. Inoo, N. Tamura, Y. Matsuo
Carbon, 216, 118512, (2023)
DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118512

(141) **GPU acceleration of conjugate gradient method obtaining Green's function for transport-property calculation**
T. Akamatsu, M. Uemoto, Y. Egami, T. Ono
Comput. Phys. Commun., 295, 108989, (2023)
DOI: 10.1016/j.cpc.2023.108989

(142) **Unified Quantification of Quantum Defects in Small-Diameter Single-Walled Carbon Nanotubes by Raman Spectroscopy**
F. L. Sebastian, F. Becker, Y. Yomogida, Y. Hosokawa, S. Settele, S. Lindenthal, K. Yanagi, J. Zaumseil
ACS Nano, 17, 21771-21781, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c07668

(143) **Isomeric Effect of Naphthyl Spacers on Structures and Properties of Isostructural Porous Crystalline Frameworks**
Y. Suzuki, M. Yamaguchi, R. Oketani, I. Hisaki
Mater. Chem. Front., 7, 106-116, (2023)
DOI: 10.1039/D2QM01091G

(144) **Single Crystalline, Non-stoichiometric Cocrystals of Hydrogen-Bonded Organic Frameworks**
T. Hashimoto, R. Oketani, M. Nobuoka, S. Seki, I. Hisaki
Angew. Chem. Int. Ed., 62, e202215836, (2023)
DOI: 10.1002/anie.202215836

(145) **Evidence for two dimensional anisotropic Luttinger liquids at millikelvin temperatures**
G. Yu, P. Wang, A. J. Uzan-Narovlansky, Y. Jia, M. Onyszczak, R. Singha, X. Gui, T. Song, Y. Tang, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. J. Cava, L. M. Schoop, S. Wu
Nat. Commun., 14, 7025, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-42821-2

(146) **Universal chiral Luttinger liquid behavior in a graphene fractional quantum Hall point contact**
L. A. Cohen, N. L. Samuelson, T. Wang, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. P. Zaletel, A. F. Young
Science, 382, 6670, 542-547, (2023)
DOI: 10.1126/science.adf9728

(147) **Modulating the Electrochemical Intercalation of Graphene Interfaces with α-RuCl3 as a Solid-State Electron Acceptor**
J. Nessralla, D. T. Larson, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. Kaxiras, D. K. Bediako

Nano Lett., 23, 22, 10334-10341, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02877

(148) **Molecular Beam Epitaxy Growth of Cadmium Telluride Structures on Hexagonal Boron Nitride**
A. K. Szczerba, J. Kucharek, J. Pawłowski, T. Taniguchi, K. Watanabe, W. Pacuski
ACS Omega, 8, 47, 44745-44750, (2023)
DOI: 10.1021/acsomega.3c05699

(149) **Second-Order Temporal Coherence of Polariton Lasers Based on an Atomically Thin Crystal in a Microcavity**
H. Shan, J.-C. Drawer, M. Sun, C. Anton-Solanas, M. Esmann, K. Yumigeta, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Tongay, S. Höfling, I. Savenko, C. Schneider
Phys. Rev. Lett., 131, 206901, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.206901

(150) **Kinetic magnetism in triangular moiré materials**
L. Ciorciaro, T. Smoleński, I. Morera, N. Kiper, S. Hiestand, M. Kroner, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Demler, A. İmamoğlu
Nature, 623, 509-513, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06633-0

(151) **Disorder-induced bulk photovoltaic effect in a centrosymmetric van der Waals material**
C.-Y. Cheon, Z. Sun, J. Cao, J. F. Gonzalez Marin, M. Tripathi, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Luisier, A. Kis
npj 2D Mater. Appl. , 7, 74, (2023)
DOI: 10.1038/s41699-023-00435-8

(152) **Imaging quantum oscillations and millitesla pseudomagnetic fields in graphene**
H. Zhou, N. Auerbach, M. Uzan, Y. Zhou, N. Banu, W. Zhi, M. E. Huber, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Myasoedov, B. Yan, E. Zeldov
Nature, 624, 275-281, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06763-5

(153) **Tuning the supercurrent distribution in parallel ballistic graphene Josephson junctions**
P. Schmidt, L. Banszerus, B. Frohn, S. Blien, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. K. Hüttel, B. Beschoten, F. Hassler, C. Stampfer
Phys. Rev. Applied, 20, 054049, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.20.054049

(154) **Cascade of Multielectron Bubble Phases in Monolayer Graphene at High Landau Level Filling**
F. Yang, R. Bai, A. A. Zibrov, S. Joy, T. Taniguchi, K. Watanabe, B. Skinner, M. O. Goerbig, A. F. Young
Phys. Rev. Lett., 131, 226501, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.226501

(155) **Charge Transfer and Asymmetric Coupling of $MoSe_2$ Valleys to the Magnetic Order of CrSBr**
C. Serati de Brito, P. E. Faria Junior, T. S. Ghiasi, J. Ingla-Aynés, C. R. Rabahi, C. Cavalini, F. Dirnberger, S. Mañas-Valero, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Zollner, J. Fabian, C. Schüller, H. S. J. van der Zant, Y. G. Gobato
Nano Lett., 23, 23, 11073-11081, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c03431

(156) **Evidence for chiral supercurrent in quantum Hall Josephson junctions**
H. Vignaud, D. Perconte, W. Yang, B. Kousar, E. Wagner, F. Gay, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Courtois, Z. Han, H. Sellier, B. Sacépé
Nature, 624, 545-550, (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06764-4

(157) **Coherent charge oscillations in a bilayer graphene double quantum dot**
K. Hecker, L. Banszerus, A. Schäpers, S. Möller, A. Peters, E. Icking, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Volk, C. Stampfer
Nat. Commun., 14, 7911, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-43541-3

(158) **Exciton energy transfer under low temperature in a lateral heteromonolayer of WSe_2–$MoSe_2$**
M Shimasaki, T. Endo, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda, T. Nishihara, Y. Miyata, Y. Miyauchi
Jpn. J. Appl. Phys., 62, 112002, (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/ad03ce

(159) **Effect of incoherent electron-hole pairs on high harmonic generation in an atomically thin semiconductor**
K. Nagai, K. Uchida, S. Kusaba, T. Endo, Y. Miyata, K. Tanaka
Phys. Rev. Res., 5, 043130, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.5.043130

(160) **ファンデルワールス複合原子層の作製：ロボティクスとPVCポリマーの活用**
小野寺 桃子 若藤 祐斉, 増渕 覚, 町田 友樹
固体物理, 58, 25, (2023)

(161) **複数層の遷移金属ダイカルコゲナイドで発現するサブバンド量子化物性**

守谷 頼, 木下 圭, 町田 友樹, 笹川 崇男
固体物理, 58, 143, (2023)

(162) **Ultrafast control of the crystal structure in a topological charge-density-wave material**
T. Suzuki, Y. Kubota, N. Mitsuishi, S. Akatsuka, J. Koga, M. Sakano, S. Masubuchi, Y. Tanaka, T. Togashi, H. Ohsumi, K. Tamasaku, M. Yabashi, H. Takahashi, S. Ishiwata, T. Machida, I. Matsuda, K. Ishizaka, K. Okazaki
Phys. Rev. B, 108, 184305, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.108.184305

(163) **二次元ファンデルワールス物質の概観**
越野 幹人, 松田 一成, 岩佐 義宏
固体物理, 58, 1-14, (2023)

(164) **2次元半導体とそのモアレ構造における光科学**
篠北 啓介・松田 一成
固体物理, 58, 117-132, (2023)

(165) **Oxidation-derived anticancer potential of sumanene-ferrocene conjugates**
A. Kasprzak, A. Zuchowska, P. Romanczuk, A. Kowalczyk, I. Grudzinski, A. Malkowska, A. Nowicka, H. Sakurai
Dalton Trans, 53, 56-64, (2023)
DOI: 10.1039/d3dt03810f

(166) **Engineering chirality at wafer scale with ordered carbon nanotube architectures**
J. Doumani, M. Lou, O. Dewey, N. Hong, J. Fan, A. Baydin, K. Zahn, Y. Yomogida, K. Yanagi, M. Pasquali, R. Saito, J. Kono, W. Gao
Nat. Commun., 14, 7380, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-43199-x

(167) **Influence of Laser Intensity and Location of the Fermi Level on Tunneling Processes for High-Harmonic Generation in Arrayed Semiconducting Carbon Nanotubes**
H. Nishidome, M. Omoto, K. Nagai, K. Uchida, Y. Murakami, J. Eda, H. Okubo, K. Ueji, Y. Yomogida, J. Kono, K. Tanaka, K. Yanagi
ACS Photon. , 11, 171-179 , (2023)
DOI: 10.1021/acsphotonics.3c01244

(168) **Pressure-induced reversal of Peierls-like distortions elicits the polyamorphic transition in GeTe and GeSe**
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
Nat. Commun., 14, 7851, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-43457-y
プレス発表あり https://www.tsukuba.ac.jp/journal/technology-materials/20231207190000.html

(169) **Overbias Photon Emission from Light-Emitting Devices Based on Monolayer Transition Metal Dichalcogenides**
S. Shan, J. Huang, S. Papadopoulos, R. Khelifa, T. Taniguchi, K. Watanabe, L. Wang, L. Novotny
Nano Lett., 23, 23, 10908-10913, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c03155

(170) **Strong In-Plane Optoelectronic Anisotropy and Polarization Sensitivity in Low-Symmetry 2D Violet Phosphorus**
W. Chen, A. Chen, R. Zhang, J. Zeng, L. Zhang, M. Gu, C. Wang, M. Huang, Y. Guo, H. Duan, C. Hu, W. Shen, B. Niu, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Zhang, J. Li, X. Cai, G. Liu
Nano Lett., 23, 23, 10821-10831, (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c02951

(171) **Visualizing the merger of tunably coupled graphene quantum dots**
D. Walkup, F. Ghahari, S. R. Blankenship, K. Watanabe, T. Taniguchi, N. B. Zhitenev, J. A. Stroscio
Phys. Rev. B, 108, 235407, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.108.235407

(172) **High-mobility transport in isotopically enriched ^{12}C and ^{13}C exfoliated graphene**
S. Iwakiri, J. Miller, F. Lang, J. Prettenthaler, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. S. Lee, P. Becker, D. Günther, T. Ihn, K. Ensslin
Phys. Rev. Research, 5, 043212, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.5.043212

(173) **Versatile optical manipulation of trions, dark excitons and biexcitons through contrasting exciton-photon coupling**
Z. Li, X.-Y. Zhang, R. Ma, T. Fu, Y. Zeng, C. Hu, Y. Cheng, C. Wang, Y. Wang, Y. Feng, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Wang, X. Liu, H. Xu
Light Sci. Appl., 12, 295, (2023)
DOI: 10.1038/s41377-023-01338-5

(174) **Moiré synaptic transistor with room-temperature neuromorphic functionality**
X. Yan, Z. Zheng, V. K. Sangwan, J. H. Qian, X. Wang, S. E. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, S.-Y. Xu, P. Jarillo-Herrero, Q. Ma, M. C. Hersam
Nature, 624, 551-556, (2023)

DOI: 10.1038/s41586-023-06791-1

(175) **Approximating maximally localized Wannier functions with position scaling eigenfunctions**
Y. Hamai, K. Wakabayashi
Phys. Rev. B, 108, 245413, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.108.245413

(176) **Work function modulation of Bi/Au bilayer system toward p-type WSe_2 FET**
R. Nakajima, T. Nishimura, K. Ueno, K. Nagashio
ACS Appl. Electron. Mater., 6, 144-149, (2023)
DOI: 10.1021/acsaelm.3c01091

(177) **Silicon-van der Waals heterointegration for CMOS-compatible logic-in-memory design**
M.-P. Lee, C. Gao, M.-Y. Tsai, C.-Y. Lin, F.-S. Yang, H.-Y. Sung, C. Zhang, W. Li, J. Li, J. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, K. Tsukagoshi, C.-H. Ho, J. Chu, P.-W. Chiu, M. Li, W.-W. Wu, Y.-F. Lin
Sci. Adv., 9, 49, (2023)
DOI: 10.1126/sciadv.adk1597

(178) **Resonant exciton transfer in mixed-dimensional heterostructures for overcoming dimensional restrictions in optical processes**
N. Fang, Y. R. Chang, D. Yamashita, S. Fujii, M. Maruyama, Y. Gao, C. F. Fong, K. Otsuka, K. Nagashio, S. Okada, Y. K. Kato
Nat. Commun., 14, 8152, (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-43928-2

(179) **Molybdenum Chloride Nanostructures with Giant Lattice Distortions Intercalated into Bilayer Graphene**
Q. Liu, Y.-C. Lin, S. Kretschmer, M. Ghorbani-Asl, P. Soslís-Fernández, M.-D. Siao, P.-W. Chiu, H. Ago, A. V. Krasheninnikov, K. Suenaga
ACS Nano, 17, 23659-23670, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c06958

(180) **Polarity-dependent Twist-controlled Resonant Tunneling Device based on Few-layer WSe_2**
K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida
Phys. Rev. Research, 5, 043292, (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.5.043292

(181) **Thermoelectric Power of a Single van der Waals Interface between Carbon Nanotubes**
H. Hamasaki, Y. Li, M. Ohnishi, J. Shiomi, K. Yanagi, K. Hirahara
ACS Nano, 18, 612-617, (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.3c08694

(182) **Birefringent Optical Responses of Single-chirality Carbon Nanotube Membranes**
H. Wu, T. Nishihara, A. Takakura, K. Matsuda, T. Tanaka, H. Kataura, Y. Miyauchi
Carbon, 218, 118720, (2023)
DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118720

(183) **Pyridine-mediated B–B bond cleavage of tetrahydroxydiboron to synthesize n-doped SWCNTs with long-term air stability**
N. Tanaka, A. Hamasuna, I. Yamaguchi, K. Kato, T. Fujigaya
Scientific Reports, 13, 21926, (2023)
DOI: 10.1038/s41598-023-48847-2

(184) **ねじれて積層した2次元半導体のモアレ構造における新規な励起子光物性**
篠北 啓介, 松田 一成
応用物理学会誌, 92, 524-529, (2023)
DOI: 10.11470/oubutsu.92.9_524

6-2. 基調講演、招待講演

-2024-

(1) **Advanced self-assembly control of rod-shaped organic semiconductors**
S. Arai, SPIE. Photonics West

(2) **Low-dimensional nanostructures of Janus TMDs**
Yasumitsu Miyata, International Workshop on Science of 2.5 Dimensional Materials

(3) **遷移金属ダイカルコゲナイドヘテロ構造の作製と評価**
宮田 耕充, 応用物理学会応用電子物性分科会主催 応用電子物性分科会 研究例会 ２次元層状物質研究の最前線

(4) **Growth and Characterization of 1D Transition Metal Chalcogenides**
Yasumitsu Miyata, International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials 2024

(5) **非接触原子間力顕微鏡による個々の分子の可視化と力学応答**
杉本 宜昭, 理化学研究所2023年度「一分子の科学」研究会

(6) **プラズモン－分子結合系の時間分解分光**
上野 貢生, 日本分光学会2023年度北海道支部シンポジウム
(7) **Theoretical desgin of electronic and optical properties of two-dimensional materials**
University of Science & Technology Meghalaya, International Conference on Frontiers in Pure and Applied Physics (ICFPAP-2024)
(8) **ナノチューブの構造制御と物性**
柳 和宏, 第73回化合物新磁性材料専門研究会
(9) **構造が精密に制御されたファンデルワールス界面の熱電物性解明にむけた計測技術開発**
柳 和宏, ATF conference ナノカーボン研究会
(10) **ナノカーボン系の熱電応答～基礎から社会実装まで～**
柳 和宏、山本貴博, 第66回FNTG総合会議
(11) **Novel 2D Materials Beyond Graphene Stabilized on Substrates**
Yukiko Yamada-Takamura, JAIST International Symposium on Nano-Materials for Novel Devices
(12) **表面科学的手法によるエピタキシャル二次元材料の構造・電子状態評価**
高村（山田）由起子, 応用物理学会薄膜表面・物理分科会 Controlled growth and characterization 研究会
(13) **Large scale integration of graphene-based quantum devices**
Toshiaki Kato, Workshop Materials for Quantum Electronics (Mat4QE)
(14) **Large scale integration of quantum devices based on 1D and 2D materials**
Toshiaki Kato, AOS Quantum Forum & Seminars in Tohoku University
(15) **その場観測プロセスを活用した2次元原子層材料の高品質合成とヤヌス化**
加藤 俊顕, 2024年第71回応用物理学会春季学術講演会
(16) **Efficient Search for Stacking Patterns in van der Waals Heterostructures Using Bayesian Optimization**
Koichiro Kato, 第66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
(17) **Plasmon-enhanced photochemistry with nanoengineered structures**
K. Ueno, Emerging Trends in Photodynamics and Photochemistry (ETPP-2024)
(18) **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**
荒井 俊人, 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」
(19) **柔軟なカーボンナノチューブCMOS集積回路：最近の話題と課題**
大野 雄高, ナノカーボン研究会
(20) **ハイエントロピーアンチモン化合物 M1-xPtxSb (M = Ru, Rh, Pd, Ir)における超伝導**
平井 大悟郎, 金研研究会2024 ~強相関物質における創発物性研究の現状と将来展望~

-2023-
(1) **Controlled CVD gowth of multilayer hBN for 2.5D applications**
H. Ago, Inaugural Workshop on Boron Nitride
(2) **Breaking of spatial inversion symmetry in anti-parallel-stacked transition metal dichalcogenides**
Masato Sakano, Superstripes 2023
(3) **層状有機半導体の集合構造制御と高効率キャリア輸送**
荒井 俊人, 超分子研究会 ~π共役系有機分子の合成・集合構造と機能~
(4) **A new challenge in group-IV materials: energy harvesting application & 2D crystal synthesizing**
M. Kurosawa, A. Ohta, M. Araidai, S. Shibayama, M. Sakashita, and O. Nakatsuka
14th International Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics
(5) **二次元物質による次世代デバイスの展望**
長汐 晃輔, 第6回koineミーティング, (2023年5月19日, 九州大学筑紫キャンパス, 春日)
(6) **2次元層状材料トランジスタの発表から約10年**
長汐 晃輔, 第2回 NanoHubシンポジウム
(7) **二次元原子層材料デバイスの現状課題と開発展望**
長汐 晃輔, 2023年電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会
(8) **Device Technology for 2D Layered Semiconductor FETs: Challenge & Perspective**
Kosuke Nagashio, 2023 Symposia on VLSI Technology and Circuits
(9) **Inversion Symmetry Broken Bulk SnS Formed by Step-edge-induced Spiral Growth for Energy Harvesting**
Kosuke Nagashio, 3rd Nucleation and Growth Research Conference (NGRC)
(10) **2D layered semiconductors: Challenge & Perspective**
Kosuke Nagashio, 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC)
(11) **Shift current photovoltaics in ferroelectric SnS**
長汐 晃輔, International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2023(ICMaSS)
(12) **Sumanene: A C3v-symmetric Fragment of C60**
櫻井 英博, 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

(13) **Recent Progress in Sumanene Chemistry**
H. Sakurai, International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan

(14) **1D nanostructures based on transition metal chalcogenides**
Yasumitsu Miyata, 6th EU‐Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (2023)

(15) **1D Transition Metal Chalcogenides: Growth, Structures, and Properties**
Yasumitsu Miyata, NT23

(16) **1D nanostructures based on transition metal chalcogenides**
Yasumitsu Miyata, 2D TMDs 2023

(17) **Low-dimensional nanostructures of Janus transition metal dichalcogenides**
Yasumitsu Miyata, 13th A3 Symposium on Emerging Materials

(18) **遷移金属ダイカルコゲナイドの合成と機能**
宮田 耕充, 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」

(19) **Growth and Characterization of 1D Transition Metal Chalcogenides**
Yasumitsu Miyata, Mini-Workshop at NTNU-Physics

(20) **Controlled CVD growth of multilayer hBN for 2.5D applications**
H. Ago, 2D Transition Metal Dichalcogenides

(21) **Synthesis and Electronic Applications of Wafer-Scale 2.5D Materials**
H. Ago, SSDM2023 (International Conference on Solid State Devices and Materials)

(22) **Controlled synthesis and electronic applications of 2.5D materials**
H. Ago, 33rd International Conference on Diamond and Carbon Materials (ICDCM2023)

(23) **From 2D materials to 2.5D materials science**
H. Ago, The 7th Symposium on Challenges for Carbon-based Nanoporous Materials (7CBNM)

(24) **グラフェンからはじまる２.５次元物質の科学と応用**
吾郷 浩樹, 産学連携炭素材料研究会

(25) **Wafer-scale synthesis and applications of multilayer hexagonal boron nitride**
H. Ago, 2023 International Workshop on Dielectric Thin Films for Fugure Electron Devices (IWDTF2023)

(26) **Large-area synthesis and transfer of multilayer hexagonal boron nitride for high-performance graphene device arrays**
H. Ago, 13th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment

(27) **Large area hexagonal boron nitride sheet for 2D electronic devices**
H. Ago, International Display Workshops (IDW'23)

(28) **非接触原子間力顕微鏡による個々の原子分子の分析**
杉本 宜昭, 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

(29) **非接触原子間力顕微鏡による局所構造解析**
杉本 宜昭, 日本顕微鏡学会 第79回学術講演会

(30) **Plasmon-controlled photochemical processes for spectroscopy and chemical reactions**
K. Ueno, SPIE Optics + Photonics 2023

(31) **Plasmon‐based chemistry**
K. Ueno, The 12th Asian Photochemistry Conference (APC2023)

(32) **Plasmon-enhanced photoluminescence of Au nanostructured transition metal dichalcogenide heterostructures**
Y. Takahashi, S. Ushikoshi, K. Imaeda, S. Ryuzaki, K. Ueno, The 12th Asian Photochemistry Conference (APC2023)

(33) **Metal-Benzimidazole[3]arene Framework-1 (MBAF-1) with Dynamic Binding Sites in its Structurally Complex Pores**
田代 省平, International Congress on Pure & Applied Chemistry

(34) **Investigating intercalated graphite, multi-layer graphene, and bi-layer graphene synthesized via the vapor phase method**
Rika Matsumoto, フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム

(35) **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**
山本 真人, 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」

(36) **原子層物質及びそのヘテロ構造の新しい物性と機能**
蒲 江, 物性談話会 名古屋大学工学研究科

(37) **Monolayer in-plane heterostructure light-emitting devices with tunable composition distribution**
Jiang Pu, 6th EU‐Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials

(38) **Functional optoelectronic devices based on strained monolayers and heterostructures**
Jiang Pu, A3 12th International Workshop on 2D Materials

(39) **イオンゲルを用いた機能性原子層発光デバイス**
蒲 江, 応用物理学会 秋季学術講演会シンポジウム

(40) **Correlation between Charge and Heat flows across two dimensional van der Waals interfaces**
柳 和宏, ATIナノカーボン研究会

(41) **ナノチューブの階層制御と熱電物性**
柳 和宏, 日本物理学会　第78回年次大会

(42) **単層カーボンナノチューブにおける高次高調波発生の制御**
柳 和宏, ATFコンフェレンス
(43) **Thermoelectric performance of single walled carbon nanotubes**
Kazuhiro Yanagi, ISSP Regular Workshop
(44) **ガラスナノピペットを用いた 機能性イメージング技術の創成**
高橋 康史, 第３回マテリアル・計測ハイブリッド研究センター シンポジウム
(45) **Dislocation Annihilation in Epitaxial Silicene**
Yukiko Yamada-Takamura, 19th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids
(46) **Structure determination of novel 2D materials**
Yukiko Yamada-Takamura, Symposia of the 30th Anniversary of the Advanced Science Research Center (Japan Atomic Energy Agency)
(47) **Dislocation annihilation in epitaxial silicene formed on diboride thin films**
Yukiko Yamada-Takamura, Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023
(48) **Synthesis and applications of 1D and 2D materials**
Toshiaki Kato, Univ. Manchester – Tohoku Univ. Academic Exchange Workshop on 2D Materials
(49) **Fabrication of high quality Janus TMD by in-situ monitoring plasma functionalization**
Toshiaki Kato, 6th EU‐Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (2023)
(50) **その場観測プラズマ機能化法による高品質ヤヌスTMDの創製**
加藤 俊顕, 第12回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン若手研究会
(51) **Growth and functionalization dynamics of atomically thin 2D materials revealed with in-situ monitoring processing**
Toshiaki Kato, MNC 2023
(52) **Highly transparent solar cell based on 2D materials**
Toshiaki Kato, MRM2023 Materials Research Meeting
(53) **Optical science in nanocarbon and artificial atomically thin 2D materials**
Kazunari Matsuda, Japan-US Network for Clean Energy Technologies Involving Oriented Nanotubes in PIRE program
(54) **Recent progress on optical physics in two-dimensional materials and its hetero-structures**
Kazunari Matsuda, The 13th A3 Symposium on Emerging Materials
(55) **Quantum optics based on moiré excitonic systems in artificial van der Waals semiconducting heterostructures**
Kazunari Matsuda, 13th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment
(56) **ナノサイエンスによる二次元半導体の光科学とその進展**
松田 一成, 光圧マニュピレーション研究会
(57) **ナノサイエンスで拓く二次元半導体の光科学とその展望**
松田一成, 大阪公立大学工学研究科電子物理セミナー
(58) **Flexible resistive random-access memories based on carbon nanotubes and their application for reservoir computing**
Y. Ohno, 243rd ESC Meeting
(59) **Carbon nanotube-based physical reservoir computing**
Y. Ohno, The 23rd Int. Conf. on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials
(60) **Electrochemical reservoir computing based on functionalized carbon nanotubes for machine learning**
Y. Ohno, ATI 2023 1st Nanocarbon Workshop
(61) **Physical reservoir computing based on ensemble of CNT-junction nano-memories**
Y. Ohno, SWCNT30
(62) **Electrochemical reservoir based on functionalized carbon nanotube electrodes for in-sensor machine learning**
Y. Ohno, 13th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment
(63) **Carbon nanotube-based flexible electronics: From transistors and integrated circuits to machine learning"**
Y. Ohno, 34th 2023 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science
(64) **柔軟なウェアラブルセンサの実現を目指したカーボンナノチューブ薄膜デバイス技術**
大野 雄高, 2023年度　第1回センサ＆IoTセミナー
(65) **Electrochemical reservoir based on functionalized carbon nanotube electrodes for machine learning**
大野 雄高, ナノカーボン研究会

6-3. 受賞

-2024-

(19) **JAIST International Symposium Best Presenter Award**
江本 暁(吾郷研)
Application of large-area CVD-grown few-layer hexagonal boron nitride to magnetic tunnel junction devices

-2023-

(1) **第2回応用物理学会関西支部講演会「SDGsと応用物理」優秀賞**
西込 健人（若林研）
CoBHTの電子状態の歪み効果とトポロジカル特性

(2) **第7回応用物理学会フォノンエンジニアリング研究会/優秀ポスター賞**
大岩 樹（黒澤研）
高濃度n型ドープ$Si_{1-x}Sn_x$薄膜の低温熱電物性評価

(3) **The 36th International Symposium on Superconductivity / ISS Best Presentation Award**
福岡 諒（笹川研）
Superconducting and Topological Properties of Monoclinic $NbTe_2$ Single Crystals

(4) **第13回CSJ化学フェスタ2023 優秀ポスター発表賞**
古澤 慎平（宮田研）
絶縁性テンプレートを用いた遷移金属カルコゲナイド単層ナノチューブの合成と構造解析

(5) **2.5次元物質科学（学術変革A）第5回領域会議　若手奨励賞**
金田 賢彦（宮田研）
ヤヌス遷移金属カルコゲナイドスクロールの作製と評価

(6) **錯体化学会第73回討論会 ポスター賞**
山田 慶彦
低対称銀多核カプセル錯体から成る22核ナノビーズ高次構造体の階層的自己集合

(7) **電気学会電子材料研究会技術委員会奨励賞**
金谷 瞳(山本研)
二次元WSe_2/WOx光シナプスデバイスにおける短期・長期可塑性

(8) **令和5年度 挑戦的研究賞 東京工業大学**
蒲 江
一次元モアレ超格子における量子輸送・光機能の開拓

(9) **第65回FNTG総合シンポジウム 若手奨励賞**
若藤 祐斉(町田研)
Fabrication of folded graphene/h-BN van der Waals dual-gated devices using 3D manipulation technique with micro-dome polyvinyl chloride

(10) **ナノ科学シンポジウム2023 優秀ポスター賞**
川瀬 仁平(町田研)
原子層モアレ超格子直接観察用試料の作製

(11) **2023 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems, Outstanding Presentation Award**
小野寺 桃子(町田研)
All-dry flip-over stacking of 2D crystal flakes using polyvinyl chloride

(12) **第21回 JSAPフォト＆イラストコンテスト**
後藤 新悟(山本研)
phase-flavored gummy worms

(13) **第65回FNTG総合シンポジウム 飯島賞**
蓬田 陽平
Near-infrared circularly polarized photoluminescence and electroluminescence from enantiopure single-wall carbon nanotubes

(14) **第65回FNTG総合シンポジウム 若手奨励賞**
伊原 茜(柳研)
Synthesis of Janus transition metal dichalcogenide nanotubes

(15) **IWDTF2023 Young Researcher Award**
Eui Young Jung(吾郷研)
Transferable High-k/Boron Nitride Gate Dielectric for Two-Dimensional Field-Effect Transistors

(16) **第55回(2023年秋季)応用物理学会 Poster Award**
深町 悟(吾郷研)
多層hBNの大面積合成とグラフェン積層デバイスアレーへの応用

(17) **第55回（2023年秋季）応用物理学会 講演奨励賞**
名苗 遼(長汐研)
ショットキー接合と明確に分離されたBPVEによるSnSの90°回転強誘電ドメインの確認

(18) **第17回物性科学領域横断研究会 若手奨励賞**
立石 幾真(越野研)
Topological mosaics in moiré materials

6-4. 書籍

-2023-

(1) **Encyclopedia of Condensed Matter Physics(Second Edition)**
Pablo Solís-Fernández, Hiroki Ago
310-328(4466) (2023), Academic Press

(2) **新・物性物理入門**
塩見雄毅
216 (2023), 朝倉書店

(3) **固体物理**
長汐晃輔
605-612 (2023), 株式会社　アグネ技術センター

(4) **遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向**
宮田耕充、吾郷浩樹、松田一成、長汐晃輔
2023, 株式会社シーエムシー出版

(5) **Polyimides: Advances in Blends and Nanocomposites (Chapter 7 "Characteristics and potential applications of graphite intercalation compounds prepared from polyimide-based pyrolytic graphite films")**
Rika Matsumoto
267-291 (2023), Elsevier

(6) **遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向**
蒲 江
255-263 (2023), シーエムシー出版

(7) **遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向(第14章 剥離と転写)**
木下 圭, 小野寺 桃子, 町田 友樹
8(134-141) (2023), シーエムシー出版

(8) **遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向**
(第28章 数層遷移金属ダイカルコゲナイドの高透明太陽電池応用)
加藤 俊顕
(2023), シーエムシー出版

(9) **光と物質（第3篇第6章 二次元物質）**
松田一成
(2023),エヌ・ティー・エス出版

(10) **遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向**
（第5章 第二次元半導体ヘテロ構造におけるモアレの物理と光科学）
松田一成
(2023),シーエムシー出版

(11) **遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向（第30章 二次元材料表面を運動する液滴による発電現象）**
大野雄高
287-293 (2023), シーエムシー出版

6-5. 解説

-2024-

(1) **原子層モアレ超格子系におけるフォノン物性制御**
毛利真一郎, 荒木努
応用物理学会誌, 93巻3号, 174-177 (2024)

-2023-

(2) **1次元遷移金属カルコゲナイド細線の気相成長**
中西 勇介, リム ホンエン, 宮田 耕充
応用物理学会誌, 92巻5号, 292-296 (2023)

(3) **層状有機半導体の結晶構造エンジニアリングと高性能薄膜トランジスタ**
荒井 俊人
日本化学会 有機結晶部会ニュースレター, 53, 11 (2023)

6-6. プレスリリース

-2024-

2024.1.18　朝日新聞デジタル
A02宮田　公募A01加藤俊　A01岡田　公募A03高橋　A04高村　研究成果記事
「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」
https://www.asahi.com/and/pressrelease/424435948/

2024.1.24　産経新聞
公募A03Lin　A03末永　A02松本　A01吾郷　研究成果記事
「グラフェン層間に２層アルカリ金属の最密配列を発見」
https://www.sankei.com/pressrelease/prtimes/H4CWHDR4KRM3NFKFAX4K6Z3OEM/

2024.2.13　九州大学
A01吾郷　公募A03Lin　A03末永　公募A05河野　研究成果　プレスリリース
「世界初、グラフェンなどの二次元材料テープを開発」
https://www.kyushu-u.ac.jp/f/56008/24_0213_01.pdf

2024.2.13　高市経済安全保障担当大臣　記者会見
A01吾郷　公募A03Lin　A03末永　公募A05河野　研究成果
「世界発！二次元材料テープの実現」
https://www.youtube.com/watch?v=IcKpR3hwQvg

2024.2.18　Yahoo！ニュース
A01吾郷　公募A03Lin　A03末永　公募A05河野　研究成果記事
「「次世代半導体」開発加速…二次元材料を容易に転写、九大・日東電工などが新手法」
https://news.yahoo.co.jp/articles/5d95bbd9e82cae16bfafe8dfab1c274c97ab4fa9

2024.2.27　日本経済新聞
A01櫻井　研究成果記事
「阪大・東北大、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」
https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP668804_X20C24A2000000/

-2023-

2023.5.12　岡山大学
A02宮田　研究成果　プレスリリース
「原子層半導体の一次元構造化に成功～次世代ナノスケール光電子デバイスへの応用に期待～」
https://www.okayama-u.ac.jp/tp/release/release_id1088.html

2023.5.14　日本経済新聞
A02宮田　研究成果記事
「原子層半導体の一次元構造化に成功～次世代ナノスケール光電子デバイスへの応用に期待～」
https://www.nikkei.com/compass/content/PRTKDB000001417_000072793/preview

2023.10.6　東京都立大学
A02宮田　公募A01蓬田　公募A03柳　公募A01加藤俊　A03末永　研究成果　プレスリリース
「組成・構造の多彩な無機ナノチューブの合成技術を世界に先駆けて開発」
https://www.tmu.ac.jp/news/topics/36072.html

2023.10.6　日本経済新聞
A02宮田　公募A01蓬田　公募A03柳　公募A01加藤俊　A03末永　研究成果記事
「都立大・東北大・阪大、組成および構造の多彩な無機ナノチューブの合成技術を開発」
https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP662981_W3A001C2000000/

2023.10.18　九州大学
公募A01加藤幸　研究成果　プレスリリース
「共重合体を含むアニオン交換膜の特性・劣化を予測可能な機械学習モデルを構築」
https://www.kyushu-u.ac.jp/f/54683/23_1018_03.pdf

2023.12.7　筑波大学
A03西堀　研究成果　プレスリリース
「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」
https://www.tsukuba.ac.jp/journal/pdf/p20231207190000.pdf

2023.12.14　EE Times Japan
A03西堀　研究成果記事
「筑波大ら、圧力下でのガラス相転移機構を解明」
https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2312/14/news068.html

2023.12.15　日刊工業新聞
A03西堀　研究成果記事
「筑波大など、圧力下でのガラス相転移機構を解明」

7．　ニュースレター

7-1
ニュースレター Vol. 12 （2023.4.24 発行）

NEWS LETTER
12

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

第4回領域会議レポート


参加者による記念撮影

第4回 つくば国際会議場
1階 大会議室101+102（茨城県つくば市）

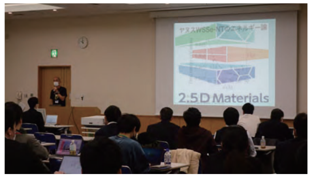
2023年3月13日および14日の二日間、つくば国際会議場にて学術変革領域「2. 5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」の第４回領域会議が完全対面で開催されました。

総勢96名が集まり、対面でのコミュニケーションにより活発な議論が交わされました。計画班及び公募班のメンバー全員が、共同研究の成果や進捗に関して口頭での報告を行いました。

研究発表では、東北大学の加藤グループと都立大学の宮田グループの単層WSe_2の上部SeをSに置換させたヤヌス構造が話題となりました。通常WSe_2には自発分極は存在しませんが、ヤヌス化することで面外方向に自発分極が形成され圧電特性が現れることから、新たな物性開拓が期待されています。TEM観察はLinグループ、電子状態計算は筑波大の岡田グループ、光物性計測は京都大学の松田グループとの共同研究で行われており、領域研究ならではの研究推進になっています。

また、領域アドバイザーの先生方から様々な視点で領域研究の活性化に繋がる大変貴重なアドバイスを頂きました。今後の研究成果発表に向け、メンバーそれぞれ一層意識が高まりました。

対面での開催は、領域研究メンバー間の連携を深め、大変有益なものとなりました。今後の領域内でのさらなる融合研究に繋がると期待しています。



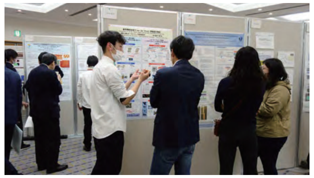
口頭発表の様子


つくば国際会議場

ポスター発表

1日目の午後にはポスター発表が行われました。合計38件のポスター発表での議論は盛り上がり、活発、かつ白熱した議論が参加者間で行われました。ポスター発表時間のみならず、コーヒーブレイクや懇親会の時間にも熱い議論が交わされていました。

また、今回から、若手のエンカレッジを目的としてポスター発表者の中から「若手奨励賞」を設けました。審査を希望した演題について当日会議に参加したPIによる審査を行い、７名の学生に「若手奨励賞」を授与しました。閉会式にて表彰を行い、受賞者には表彰状と副賞のロゴ入りタンブラーを贈呈しました。


ポスター発表の様子

「若手奨励賞」受賞者リスト

発表者	所属(大学/ポジション)	ポスタータイトル
Vanessa Chou Hui Yin	九州大学/博士課程１年	Twist angle dependence of chemically functionalized twisted bilayer graphene
小倉 宏斗	東京都立大学/博士課程３年	Fabrication and characterization of multilayer in-plane heterostructures based on transition metal dichalcogenides
名苗 遼	東京大学/修士課程１年	SnSにおける強誘電相同定とその振動モード取得
川﨑 盛矢	東京大学/修士課程１年	p^+-MoS_2/数層h-BN/p^+-MoS_2ファンデルワールス接合における共鳴トンネル効果
谷 天太	大阪大学/修士課程２年	ツイストグラファイトにおける垂直電気伝導の理論
河邉 佑典	名古屋大学/博士課程１年	Mo_3S_4におけるナノスケールの触媒活性の直接可視化
野本 直也	北海道大学/修士課程１年	グラフェンプラズモンナノ構造の赤外分光特性


「若手奨励賞」受賞者


副賞の
ロゴ入りタンブラー

受賞者からのコメント

「先生方や学生さん達の興味深い発表を聞いて、直接交流する貴重な機会になりました。領域が抱える幅広い分野の情報を得られ、また、私の研究に対する助言や評価を頂き、研究意欲と研究推進能力を養われた大変有意義な会議となりました。」
野本 直也（北海道大学、修士課程１年）

「この度は、若手奨励賞をいただき、光栄に感じております。先生方の発表のレベルが高く、そこから研究へのやる気を再充電していたところに、最後に若手奨励賞にも選んでいただき、それによるものも重なり二重にやる気が湧き上がる領域会議でした。」
名苗 遼（東京大学、修士課程１年）

次回、第5回領域会議は7月2、3日に大阪大学にて開催予定です。

領域が立ち上がって早いもので２年が経過しました。これまでの共同研究の成果として、Nature Electronics (2023), Nature (2022), Adv. Mater. (2022), Nano Lett. (2022)などハイインパクトな論文を多数、本領域から発表することができました。2021年9月から1年間で54本の査読付き論文を発表し、そのうち23件が領域内共同研究の成果であり、領域内での動機づけや各種の機会提供による領域内でのシナジー効果を実感しています。

Reporter

長汐 晃輔　東京大学
大学院工学系研究科
教授　（広報担当）

中村 奈津子　領域事務局

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年 4月24日）

ニュースレター Vol. 13 （2023.5.2 発行）

NEWS LETTER 13

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

海外インターンシップレポート 1

若手支援　オーフス大学（デンマーク）　2022. 9. 19 〜 2022. 12. 7

高橋 聖弥
筑波大学　西堀研究室（A03班）

「2.5次元物質科学」領域の支援を受けて、2022年9月から12月の約3か月間、デンマークのオーフス大学へ留学しました。以前より西堀研と国際共同研究を盛んに行っていた化学科のBo Brummerstedt Iversen教授の研究グループで、2.5次元物質における原子層の乱れの観測のための解析技術を習得してきました。

西堀研とIversen研の間では、2018年に大型放射光施設SPring-8のX線単結晶回折法による層状化合物（TiS_2）の精密電子密度分布の測定、2022年にグラファイト状窒化炭素の放射光X線単結晶回折法による精密電子密度解析により面内外の化学結合及び相互作用の観測をするなど、2.5次元物質と関連する層状化合物の共同研究を行ってきています。

コペンハーゲン空港

Iversen教授の研究グループには
教授の他にポスドクが4名、PhDが13名在籍

留学準備と渡航

最初に購入した直行便がロシアーウクライナ間の戦争の影響によりキャンセルとなり、急遽乗り継ぎ便を手配するなど、今回はCOVID-19とウクライナ情勢のため、準備・渡航の手続きが複雑で大変でした。デンマークでは空港などの混雑した場所でさえ、マスクを着けている人がほとんどいないことに衝撃を受けました。

留学中の生活

留学中はオーフス大学の学生宿舎に宿泊しました。寮はトイレやシャワールームを含め男女混合で、ジェンダーバランスに配慮されていました。デンマーク人は非常に友好的で、寮では“Common dinner”と呼ばれる食事会や、毎週金曜日には大学内の至る所で”Friday Bar“と呼ばれるイベントが開催されました。Friday Barは学生が運営するバーで、お酒を飲みながら研究の話や雑談をしたり、ボードゲームを楽しんだりしました。

Friday Barの様子

研究について

11月下旬に放射光施設MAXIVのビームラインDanMAXで水熱合成のその場観察実験を行いました。参加者は私を含めて5人で、合計7日間、昼間と夜間のシフトに分け、12時間交代で測定に臨みました。加熱・加圧下での試料の合成中にX線回折を行い、合成中の粒子の成長過程の測定を行いました。私は実験装置の制御と試料の交換を担当しました。

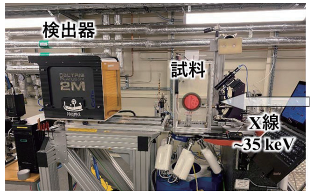
留学中は二体分布関数(PDF)法による層状化合物の$SrMn_2P_2$のデータを元に構造解析に取り組みました。二体分布関数では物質内の局所構造（ある原子から見た隣接原子までの配位距離、配位数など）を解析することができます。$SrMn_2P_2$は空間群P-3m1の三方晶で、c軸方向にSrの層とMn及びPの層が交互に積層した層状化合物です。PDF法により得た物質の構造パラメータをRietveld法により得た構造パラメータと比較しました。二体分布関数による構造解析は、筑波大学で私が行っている研究テーマにも利用可能な方法であり、今後の研究に取り入れて発展させていきたいと考えています。

今回、このような貴重な機会を与えていただいた西堀先生、Iversen先生、そして大学や領域をはじめとする関係の皆様に御礼申し上げます。

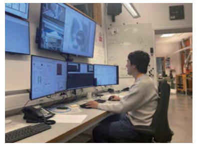
2.5D Materials

オーフス大学の学生宿舎

Common dinner の様子



右側から左に向かってX線が入射、赤い丸で示した試料で
回折したX線を左側の検出器で観測



実験装置の制御の様子

試料交換の様子

Reporter
高橋 聖弥　筑波大学大学院
数理物質科学研究群
物理学学位プログラム D1

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年 5月 2日）

ニュースレター Vol. 14 （2023.7.27 発行）

NEWS LETTER 14

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 2

A01班
物質創製班 公募班
（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）
加藤 俊顕

×

A03班
分析班 公募班
（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）
杉本 宜昭

今回、公募班にご応募された理由を教えていただけますか？

加藤　前身の原子層科学からこの分野にはお世話になっています。カーボンナノチューブもまだやってるんですけど、グラフェンが一次元状になったグラフェンナノリボンっていう材料と、後は遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)という3本柱で、今は研究を進めています。個人的には合成がすごく好きで、特に合成機構に関していろいろ理解していきたいなというところが根底にあります。更に電子工学専攻に属しているので、手軽にデバイスが作れる環境やファシリティが潤沢にあるんですよ。そこを使って何か研究室として新しい材料を自分たちで作ってデバイス化して、最後にその物性を測るというところを、一つのサイクルとして回している感じですかね。

杉本　私は計測屋でして。具体的には走査プローブ顕微鏡という「原子が見れる顕微鏡」の装置を開発してきて、その分解能を上げていくっていう仕事をやってきました。これは先端が原子1つレベルになっている、すごく鋭くとがった針を対象の表面に近づけて現象認識する装置です。通常の顕微鏡の原理とは全く異なり、レコードプレーヤーみたいなイメージが近いです。これは物質の表面しか見ることができないんですが、二次元材料とか2.5次元材料というのはある意味「表面しか存在しない」物質なので、この顕微鏡が最大限生かされるのでは、そう期待して応募しました。

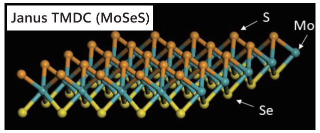
先生方が進められているご研究は、どういったところが2.5次元的だとお考えでしょう？

加藤　最近始めたのが、「ヤヌス」という構造をもつ物質に関する研究になります。

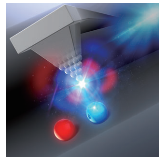
TMDCは、簡単に言えば表と裏が同じサンドイッチ状の構造ですが、ヤヌスはその表と裏の構成する原子が異なる非対称な構造ですね。TMDCでは面の垂直方向は対象性が保たれてると思うんですけども、ヤヌスは当然偏りがあるので、垂直方向のダイポール*1が自発的に備わっています。だからこそ、光物性や電気伝導特性といったヤヌスの物性は、普通の二次元材料とは違うんじゃないかなということを期待しています。この生成技術のポイントがプラズマ状態を使うことなんですよ。実はプラズマ材料科学が元々の専門だったので、そこからのアイディアです。ただ、そんな対称性が保たれていない中途半端な構造なのに、どうして安定に生成可能なのかっていうのは、まだ分かっていはいないんです。いや、でもわからない方が「この先に面白いのがある」っていうところに繋がるので(笑)。それから今ネックになっていることが、「様々な種類のヤヌスを作るために、まずはいかにもとのTMDCを単層化するか」だったりします。剥離法で単層化しづらいTMDCがたくさんありまして……その辺り、何かしらの方法で単層化ができれば、世界でまだ作られてない種類のヤヌスが実現できると思うので。それは本気で狙っていますね。

*1 ダイポール：電気双極子、電荷の偏り

杉本　いろんな面白い2.5次元材料を作る先生がいらっしゃるので、とにかく沢山それを測りたいっていう願望があったのは、正直、否定できないんですけど。でもそれだけでは当然、研究としてはダメですからね(笑)。そこで今「シリセン」という、シリコン原子がハニカム状に並んだ物質があるんですが、その表面上に原子を吸着させる、そういう研究も始めました。特に我々が普段使用している顕微鏡は「原子を動かす」ことができるので、ただ闇雲にめちゃくちゃに吸着させるのではなく、吸着させる原子の並び方を自由にデザインした上で、更にその場で直接評価できるのでは、そう考えたんですよ。特にシリコン原子を載せたいですね。



ヤヌスTMDC構造



走査プローブ顕微鏡の原理(模式図)

なぜかといえば、本来シリコンとは磁性を持たない原子です。でも、シリセンの上に1個のシリコン原子を吸着することで、吸着した原子にスピンが発現して最小単位の磁石ができるんじゃないか、っていうことを理論的に思いついたからなんです。その磁性を利用して、将来的には極めて小型のメモリや記録素子として使用できる可能性があるんじゃないかと。これはシリセンの特殊性によるもので電子1個分の不対電子から、最大の磁性が生まれるんですよ。私も率直に言えば、それについて書かれた理論の論文を読むまでは、意外な感じがしましたけど。

今後この領域で共同研究をしていきたいテーマなどがあれば、教えていただけますか。

加藤　特にヤヌスに関しては、去年ぐらいから安定に合成でき始めたので、世界的にものすごく競争が激しくなっており、そこに遅れないよう気を付けています。また、ヤヌスナノチューブを作りたいんですよ。TMDCナノチューブっていうのは、最近蓬田さんや中西さんもやってるんですけど、ヤヌスのナノチューブができれば、これまた世界初なので。また杉本さんから、先ほどダイポールを観測することが得意という話を伺って、例えばヤヌス同士が重なったときに本当にダイポール同士も足し合わせになるのか、あるいは反対に打ち消しあうのか。そこはまだ、しっかりとは研究されていない話なんです。なので、是非ご一緒に研究できたら、と思いました。

そこが分かれば、例えば更に最近の流行りのツイストの話と絡めて、「このアングルだとちゃんと直列の乾電池みたいに、すごく大きな巨大ダイポールができるよ」そんな仮説が実測できたらな、といった応用的な研究へと繋がっていくので。是非よろしくお願いします。

杉本　わかりました。こちらこそよろしくお願いします(笑)。それから、大阪大学の櫻井さんがスマネンというお椀型の分子の研究をしているのですが、これは表面が湾曲しているので、炭素でしか構成されていない分子のはずなのに、ダイポールがあるという非常に面白い特性があるんですよ。それが、どういったメカニズムで表面にひっつくかっていうのを、吾郷さんや櫻井さんに頼まれて分析しています。また我々の顕微鏡は、電気分極を計測するのも、クーロン力が識別できますので得意です。合わせてそこも測ることで、面白い特性が見られるかなと期待しています。その点、岡田さんも、結構色んなアイディアをお持ちなので、是非相談していきたいですね。

せっかくなので将来的には合成からデバイス化、理論の解釈といった研究者同士の垣根を超えてタッグを組むことで、より大きな枠組みで研究を進めていきたいなという野望もあります。

今後二年間で公募班としてやっていきたいテーマや展望について教えてください

加藤　実はこれまで私、そんなに共同研究が得意じゃなかったんですよ(笑)。ですが、せっかくこの領域に参加させていただいた訳ですからそのご縁を通じて、研究者同士の相互作用から自分1人ではできなかった新しい発想を生み出したり、また反対に皆さんにも貢献できるようにしていきたいですね。更に将来的に、まだ体系立っていない「ヤヌスの学理」を構築したいんです。是非、領域の皆さんと一緒にそこへと辿り着けたら、そう思います。

杉本　私が専門としている走査プローブ顕微鏡は表面しか見えないという欠点がありますが、表面に対しては100%その良さを生かすことができます。これは2.5次元材料を評価する非常に良いツールだと考えています。今回公募班に選んでいただいたことで、この技術を通じて2.5次元物質科学の分野で活躍できる場を提供していただきました。今後はより様々な皆さんのニーズに応えられるように一層技術力を上げていきたいですし、より自分の研究を高める機会にもできたらなと思っています。

Interviewees

加藤 俊顕
東北大学
大学院
工学研究科
准教授

杉本 宜昭
東京大学
大学院
新領域創成科学研究科
教授

(五十音順　敬称略)

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
(ニュースレター公開日：2022年7月27日)

ニュースレター Vol. 15 （2023.8.24 発行）

NEWS LETTER 15

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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

2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 3

A01班
物質創製班 公募班
（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）
毛利 真一郎

×

A05班
機能創出班 公募班
（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）
山本 真人

今回、公募班にご応募された理由を教えていただけますか？

山本　学生の時から今まで15年ほど二次元材料の研究をずっと行っていますが、最近では特に二次元材料と機能性酸化物と呼ばれる材料を組み合わせることで新しいデバイスを生み出すことを目指して研究を行っています。二次元材料と異種材料を組み合わせて新しい機能を生み出すという考え方が、2.5次元領域の目指している方向に合致していると思い公募班に応募しました。また、2.5次元領域の計画班には様々な専門家がいらっしゃるので、そのような方々と共同研究することが出来れば私自身の研究の幅を大きく広げられるのではないかと考えたのも動機の一つです。

毛利　僕のほうは、2.5次元の前の新学術領域研究「原子層科学」が立ち上がっていたタイミングで異動したので、公募に出せなかったんです。原子層科学の活動でメンバーの方々が共同研究を進めている様子を拝見し、次に同じような場があれば参加したいと思っていました。同じようなモチベーション持って研究されてる方々と交流する機会がある、そのことにとても魅力を感じまして。

そう思いながら2.5次元領域に参加したところ、計画班を中心に7割くらいは知っている方々でした。これまで機会があったらご一緒したいと思っていたことが、この領域で実現しているところです。

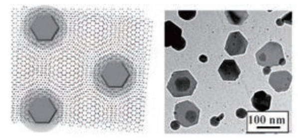
山本　毛利さんとは関西圏の私立大学教員同士なのでいろいろとお話したいと思っていました。これまでは学会で少しお会いするぐらいだったのですが、2.5次元領域でご一緒できてお話する機会が増えたのは嬉しく思っています。

先生方が最近取り組んでいらっしゃることを伺いたいです。

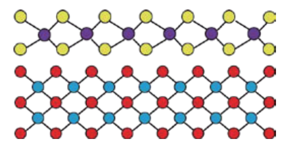
山本　今は二次元半導体と機能性酸化物を組み合わせることで新しい機能や良い特性を持つデバイスをつくることを目指して研究を行っています。機能性酸化物の中でも特に興味を持っているのが、二酸化バナジウムです。二酸化バナジウムは室温では絶縁体なのですが、ある温度を超えると急に金属になる不思議な物質です。二酸化バナジウムが絶縁体となっている理由の一つとして、電子間に働く強い相互作用が考えられています。この二酸化バナジウムと二次元半導体のヘテロ構造を作製し、二酸化バナジウムの強相関性に由来して二次元半導体に新しい機能や物性が生まれることを期待して研究を行っています。

毛利　山本さんと似てるところがあるのですが、二次元材料と他の材料の組み合わせをいろいろと考えて、何か二次元材料の方の機能を出せないかなど、そういったところを目指しているところです。先ほど山本さんからもあった酸化物、他には立命館に来てから結構長く携わっている窒化物材料などと二次元材料を組み合わせることで、新しい物性発現やデバイス応用を目指しています。分子なんかも組み合わせてみたら面白いかなと、2.5次元領域に入ってから同じA01班の櫻井さんから分子をいただいて最近進め始めたところです。このように二次元材料と他の材料・ナノ粒子的なものを組み合わせて、機能をさらに強化できないか、機能発現できないかということを研究しています。

あともう1点、最近分極に興味を持っています。二次元材料との相互作用がどうあるのかなと。2.5次元領域全体でも、シフトカレントなどの分極と関係する面白そうな現象が議論されていますし、ヤヌス原子層なども分極を持つ材料ということで注目されています。自分は二次元材料と接する材料の分極に注目して研究していますが、共通する物理などがあれば面白いなと思って取り組んでいます。



ナノ結晶や分子の集積による
2.5次元モアレ超格子の創生（毛利）


二酸化バナジウムと
二次元半導体のヘテロ構造（山本）

この領域に限らず、今後進めていきたいテーマについてお聞かせください。

山本　最終的なゴールとして考えているのは、二酸化バナジウムと二次元半導体を組み合わせることで太陽電池を作ることです。理論的には、二酸化バナジウムと半導体を組み合わせることで高効率な太陽電池がつくれると言われています。今は二酸化バナジウムと二次元半導体のヘテロ構造を使った高効率太陽電池を実現するために、予備的な知見が得られたらいいなと思って研究をしています。

毛利　僕は太陽電池を山本さんが進めていくと伺って、ちょっと意外に感じました！

山本　最初の領域会議でもちょっとお話したんですけど、二酸化バナジウムと二次元半導体を組み合わせることで二酸化バナジウムの強相関性に由来した多励起子生成が見られればと思っています。多励起子生成を利用することで太陽電池の高効率化に繋がるんじゃないかと考えています。ただ光学実験は私の専門分野から離れているので、松田さん(A03班)にお世話になっています。

毛利　僕のほうは、領域に限らずということでしたら、先々やっていきたいのはやっぱり、この二次元材料のデバイス応用に向けた研究です。すごく魅力的な材料だなと思うので、それを活かして、世の中の役に立つデバイスを作りたいなと。今までは単純に切って貼ったみたいなことをして物性を調べることだけでやってきていて、それだけじゃなく役立つアプリケーション自体も作りたいですね。他の半導体と組み合わせたりして。

そのためにも、ベースとなる二次元の技術において、この2.5次元領域で共同研究させてもらえたらいいなと思います。また測定に関してもすごい技術をお持ちの方々がいらっしゃるので、コラボレーションしたり、お互いに意見交換をしていきたいです。

これまでの領域活動の中で、感じたことは？

毛利　一番刺激を受けてるのは、領域会議がとても充実していることですね。領域会議の度に、いろんな方とディスカッションしてもらって刺激を受けています。議論の風通しがよくて、過ごしやすいです。それだけでなく、たまたま帰りの電車でご一緒した方と席が隣になり、お話ししているうちにサンプル提供していただくことになったりもしました。

山本　計画班のメンバーをはじめ、皆さん親切というか全く出し惜しみをしないですよね。聞いたらなんでも答えてくれますし、共同研究もすぐに進みますし、そのスピード感がすごいと感じています。

私はもともと二次元材料の研究をしていて、2.5次元領域に公募班として参加してから機能性酸化物の結晶の作製を始めました。そのうち良い結晶が出来るようになって領域会議で発表すると、何人かの方から共同研究に関してお声をかけていただきました。また、私からもお声がけすることで思いもよらない共同研究にもつながりました。

毛利　領域会議に参加すると新しい人と出会いがあって、ちょっとずつネットワークが広がってるなという実感があります。山本さんとも元々学会等で存じていたのですが、懇親会の時などにお話させていただき刺激を受けました。関西で近い同士なので、これからも何か交流させてもらえればと思います！

Interviewees


毛利 真一郎
立命館大学
理工学部
准教授


山本 真人
関西大学
システム理工学部
准教授

（五十音順　敬称略）

聞き手：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年8月24日）

ニュースレター Vol. 16 （2023.8.24 発行）

NEWS LETTER 16

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

第5回領域会議レポート

第5回 大阪大学　豊中キャンパス
基礎工学国際棟 シグマホール（大阪府豊中市）

2023年7月2日および3日の二日間、大阪大学豊中キャンパスにて学術変革領域「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」の第5回領域会議が完全対面で開催されました。過去最多となる総勢116名が参加し、計画班および公募班全員による成果に関しての報告とポスター発表が行われました。

今回の会場であるΣ（シグマ）ホールは、科学と技術の融合に由来しており、異なるバックグラウンドを持つ研究者同士が新たなアイデアや連携の可能性を模索するには最適な場所となりました。2日間で39件の口頭発表というタイトなスケジュールでしたが、それぞれの研究班の研究の進捗報告について、大変活発な質疑応答と議論が行われました。

研究発表では、2.5次元物質で展開が期待されているモアレに関する物性開拓が話題となりました。大阪大学の越野グループによる3層グラフェンにおけるモアレの安定性理論、東京大学の町田グループによる遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC）のモアレのバンド分散をトンネル分光で解明する実験、TMDCの積層構造のバンド分散をレーザー角度分解光電子分光（ARPES）による直接観察等、モアレの研究が進んでいます。さらに、TEM観察は末永グループ、電子状態計算は笹川グループ、光物性計測は京都大学の松田グループとの共同研究で推進されています。

また、九州大学の吾郷グループが成長させた大面積六方晶窒化ホウ素（hBN）上に大阪大学の田中グループが二酸化バナジウム（VO_2）を成膜し、(110)優先配向する様子を観察しています。大阪大学の小野グループによる、VO_2/hBN界面安定構造の第一原理計算から、一部の原子はピンどめされますが、その他の界面接合部分は弱いファンデルワールス結合となる界面モデルが提案されています。従来であれば酸化物薄膜の物性は薄膜化と共に劣化しますが、hBN上のVO_2の物性がほとんど膜厚依存性を示さないことをこのモデルは説明しており、今後の展開に期待がもてそうです。

シグマホール


口頭発表の様子


コーヒーブレイクの様子


参加者集合写真

ポスター発表

1日目の口頭発表の後にはポスター発表が行われました。合計46件のポスター発表があり、活発な質問や意見交換が行われました。90分間の発表の中でそれぞれの研究に対して深い交流ができ、大変有意義な機会になりました。

また、前回同様、若手のエンカレッジを目的としてポスター発表者の中から「若手奨励賞」が選出されました。PIとアドバイザーが審査に当たり、9名の優秀な学生および若手研究者が「若手奨励賞」を受賞しました。


「若手奨励賞」受賞者

受賞者からのコメント

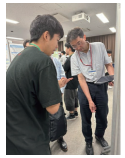
「自身の日々の研究活動が、目前の課題解決に囚われがちな中、個々の研究活動の先に、その連綿とした発展と社会変革を見据えた先生方の発表は、本当に強く刺激を受けるものでした。これからもその一端として、若手奨励賞に恥じぬよう研究を進めて参ります。」
朝田 秀一（京都大学、博士課程１年）

「レベルの高い発表が多く、まさか奨励賞を頂けるとは思っていなかったので、大変驚きました。領域の多くの方々から自分の研究に興味を持っていただけたことが非常に嬉しく、今後の研究をより一層頑張っていきたいと思いました。」
黒木 麻衣（九州大学、修士課程２年）

受賞おめでとうございます!!
今後のますますのご活躍を祈念いたします。

「若手奨励賞」受賞者リスト

発表者	所属(大学/ポジション)	ポスタータイトル
福岡 諒	東京工業大学/博士課程2年	vdWトポロジカル超伝導体候補物質$NbTe_2$の単結晶育成と物性評価
金田 賢彦	東京都立大学/博士課程2年	ヤヌス遷移金属カルコゲナイドスクロールの作製と評価
黒木 麻衣	九州大学/修士課程2年	機能性テープを用いた多層hBNと単層MoS_2の2.5次元構造の作製と特性評価
朝田 秀一	京都大学/博士課程1年	MoS_2/CrPS4ヘテロ界面における非線形光電流現象・磁性相関の解明
赤塚 俊輔	東京大学/修士課程2年	ヤヌスWSeSにおけるバンド構造の直接観測
欧 昊	名古屋大学/博士課程3年	Continuous Deformation of Moiré Patterns under Uniaxial Heterostrain
中島 隆一	東京大学/博士課程1年	表面偏析による積層構造制御を利用した二次元p型FETの作製
伊原 茜	東京都立大学/修士課程1年	Synthesis of Janus transition metal dichalcogenide nanotubes
伊藤 駿一郎	名古屋大学/博士課程2年	導電性高分子におけるラメラ層間インターカレーションと熱輸送


ポスター発表の様子

懇親会

1日目の夜には、立食による懇親会を開催しました。組織の枠を超え、アドバイザーの先生方と領域メンバーが一堂に会し忌憚のない場で議論を交わす、貴重な機会となりました。





懇親会の様子

第5回領域会議も、最後まで領域メンバーや若手研究者間の研究討議が活発に行われ、大盛況のうちに幕を閉じました。これまでの領域の活動を通して「2.5次元物質科学」の研究におけるお互いの理解が深まった分，非常に高いレベルの議論が行われました。

また、領域アドバイザーの斉木幸一朗東京大学名誉教授より、学会において多くの領域にまたがる研究が一つの研究に高いレベルで集約されており非常に順調に領域研究が進んでいる旨のコメントを頂くことができました。

今後も領域研究の発展につながるよう、領域全体で一丸となって努力していきたいと思います。

お知らせ

- 9月25日に北海道大学にて第2回若手交流会を開催予定です。
- 12月26, 27日に名古屋大学にて第6回領域会議を開催予定です。
- 公募研究【第２期】の募集を開始しました。

Reporter
長汐 晃輔　東京大学
大学院工学系研究科
教授　（広報担当）
中村 奈津子　領域事務局

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年 8月24日）

ニュースレター Vol. 17 （2023.9.11 発行）

NEWS LETTER 17

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 4

A03班
分析班 公募班
（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）
高橋 康史

×

A03班
分析班 公募班
（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）
柳 和宏

公募班にご応募された理由を教えてください。

高橋　私の研究室では電気化学顕微鏡を作っていて、触媒活性を計測しています。サンプルを探していたところ領域が立ち上がり、目指していた方向性に近かったため応募しました。また共同研究していた宮田さん(A02)が計画班にいらっしゃるというご縁もありました。

柳　私自身は、柔らかい材料系の熱電変換現象、温度差から熱起電力が発生するという現象を研究しています。カーボンナノチューブをこれまで扱ってきましたが、より正確な議論をするため界面が制御された系で研究をする必要がありました。研究を進めていくと、1次元より2次元的な界面の方が実験しやすいと分かり、宮田さんと一緒に二次元原子層を積層した系での研究をスタート。その後、ヘテロに積層した界面で非常に熱伝導が小さいという面白い現象が見つかり、その研究を広げたいと思ったところ、2.5次元領域が立ち上がったのです。それで公募研究として参加したくなり応募しました。

先生方の研究について教えていただけますか?

高橋　最近の取り組みの１つは、表面の反応性の違いを可視化することです。水素の発生のしやすさ、CO_2還元のしやすさなどについて進めています。CO_2還元で重要になるのは、有用な化合物を作り出すための触媒を作ること。その触媒を作るための指針を得るためには、局所的な計測が重要になり、そのため走査型電気化学セル顕微鏡などを独自に開発して、計測を行っています。

柳　高橋さんは最初からずっと、走査型近接場顕微鏡（SNOM）と電気化学を研究されておられたんですか?

高橋　結構いろいろやっており、4年生のときは計算化学、修士のときはSNOM、電気化学顕微鏡も作っていました。入学先は医学部だったので、その影響があり、別の研究テーマでは細胞といった生物関係の計測をしています。

柳　私も研究をしながら、いつの間にか熱物性という、どちらかというと機械工学分野の研究に足を踏み入れています。物性物理の王道は、例えば磁性や超伝導、光物性ですが、だんだん離れてなぜか熱の研究をしてるなと（笑）。

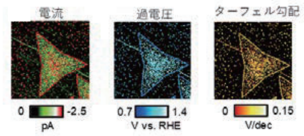
最近の取り組みでは、構造が制御されたファンデルワールス力で形成された界面において、熱がどのように流れているか、また電気伝導との関係がどうなっているかを調べています。さらに、熱起電力の生じ方や、界面での物質の電子構造、特にヘテロ構造やモアレ積層構造ではより複雑になるので、そのあたりを総合的に見ていきたいですね。

領域内ではどのような活動を行っていますか?

高橋　この領域で主に研究している、ダイカルコゲナイドのナノシートは試料としてすごく良いです。2.5次元の0.5の部分が従来とは違うアプローチとなり、エッジを照らすだけでも、曲げ、ひずみ、欠陥と、様々なものを含むので、そこが進めたかったことに近いなと感じています。

進行中の活動としては、宮田さん、東北大の加藤さん(A01)のグループと、ヤヌスシートの触媒能を測ることなどを。他にも新しいダイカルコゲナイドの材料を作ってもらい、その触媒能を測ったりも。蓬田さん(A01)とはナノチューブの半径と触媒能の関係を調べています。吾郷さんのグループとはMoS_2ナノリボンを計測しています。

場合によっては下請けのように計測することも過去の経験上ありますが、2.5次元領域の中は風通しがよくて議論しやすく、計測で得られた情報を開発者側にフィードバックして何か作ってもらうことも。また、知り合いの知り合いを紹介してもらう、逆に紹介するということで、研究の広がりを感じることができています。



走査型電気化学セル顕微鏡による
MoS_2のHER活性サイトの可視化（高橋）

柳　僕のほうは、元々この2.5次元の研究に足を踏み入れたきっかけの宮田さんに色々と教えてもらいながら、一緒に研究しています。また界面の熱輸送や電気伝導は、界面の状況が非常に大きく効いてきて、転写方法がすごく大事です。そのため転写方法を町田さん(A02)のところで学ばさせてもらったりも。他にも、グラフェン系の材料も調べていきたい状況になり吾郷さんに試料をお願いしたり、計算科学で岡田さん(A01)にサポートに入っていただいたり、たくさんの方々と活動中です。

また有機半導体を研究していらっしゃる荒井さん(A02)が、温度で層間の構造が変わるという研究を領域会議で発表されていました。そこで僕は熱がどうなるか非常に興味深く感じ、荒井さんの材料を使った熱の変化に関する研究も進めています。

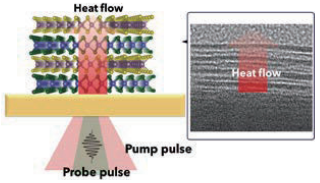
これまでの領域活動の中で、感じたことは?

高橋　メンバーの皆さんはそれぞれが近い研究分野の中で、ご自身が持っている独自の技術をオープンにして交流している様子がみられて、すごいなと。さらにこの領域に初めて参加する方も入りやすい雰囲気を感じています。

領域会議では色々な方と話す機会があり、予想していなかった新しい研究が始まることも。宮田グループの中西さんとの研究は偶然のスタートでした。僕が偶然示した情報に対して、たまたまその場にいた中西さんがそれと同じ構造がある試料を持っていて、測ったら本当にすごいのが出て。コミュニケーションをとることやアンテナを張ることの大切さを実感しました。

逆もあり、絶対いいはずだというものがあまりよくないことも。でもそのときに、例えば転写方法が影響を与えていたことが原因だったりすると、他のメンバーの方に伺うことができます。そこも領域の良いところですね。

柳　活動を通してすごく若手をエンカレッジしてくれてるなって感じています。というのも、この前の領域会議で、指導している学生が若手奨励賞をいただきました。そのテーマは本筋にしている2次元と積層界面の研究ではなく、高分子を積層し、そこにイオンを挿入したとき、どのように熱伝導が変わるかという研究でした。割と面白いデータが出たので、ぜひポスター発表してみたらと学生に声をかけたところ、発表の経験値だけでなく賞もいただくことに。その学生にとって間違いなく今後の励みになり、すごくありがたいなって思いました。



ファンデルワールス界面における熱輸送（柳）

高橋　そのテーマのきっかけを伺っても?

柳　共同研究している中で、高分子材料のケースだとイオンがたくさんインターカレートして、電気伝導率も、構造も変わる傾向があるので、これを熱計測すると何か信号の変調が見えるんじゃないかっていう読みがあって。研究指導委託で４か月間来る学生にこのテーマはどうかという話になり、3ヶ月ほどでデータを出しました。出てきたデータが納得のいくもので、ちょうど大阪で領域会議があるから、ポスターにまとめて発表したらどうか?と。

高橋　色々な方が関係して始まったテーマですね。

柳　ただやっぱり解釈が難しく、今悩んでます（笑）

高橋　本当に僕らも、何か明らかにするために計測してるのに余計に謎が深まるみたいなことが結構あります。逆に学生がものすごく古くなったサンプルを計測していたら、触媒能が逆転していてエッジが悪くなってテラスが良くなってるみたいな発見も。学生の思いつきも、思わぬ展開があるので重要だと感じますね。

Interviewees

高橋 康史
名古屋大学
工学研究科
教授

柳 和宏
東京都立大学
理学研究科
教授

（五十音順　敬称略）

聞き手：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年9月11日）

ニュースレター Vol. 18 （2023.10.3 発行）

NEWS LETTER 18

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 5

A01班
物質創製班 公募班
（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）
久木 一朗

×

A02班
集積化班 公募班
（1.5次元から2.5次元への展開に基づく新物質群創出）
北浦 良

先生方がこれまで進めてきた研究と、公募班へのご応募の理由を教えていただけますか？

北浦　院生までさかのぼると、現在と全然違う分野にいました。そのため当時からの知り合いに会うと、全然変わったねってとても驚かれます。その頃は今でいう多孔性配位高分子(PCP*[1]/MOF*[2])の錯体、多孔性材料系統の研究をしていました。ドクター取得後は企業に入りましたが、その後アカデミックに戻るとき、たまたまカーボンナノチューブを扱っている研究室の助手になり、この世界に入ったのです。カーボンナノチューブ中心に研究するようになってからは、学生時代から出る学会もガラッと変わり、一次元の材料を中心にやってきたところ、グラフェンという二次元のものがでてきて。自然とそちらにも興味を移していき、この2.5次元に繋がりました。

久木　私のほうは、学生時代は構造有機化学という、いかにヘンテコな分子、ヘンテコな電子状態を持つような分子を作るか、ということを楽しんでいました。アセチレンを3つ繋げたポリインを曲げることや、π共役電子を持つ分子系にこだわって研究をしていました。大学のポストについてからは同じ有機分子の分野で、どのように分子を集めると機能が出るか、あるいは単純に結晶なので、有機分子が規則的な構造で並んだだけでも美しいなという観点から研究を進め、今に至っています。有機分子を弱い相互作用で配列させることで、二次元プラスアルファにあたる2.5次元ができればと考え、応募しました。

現在の研究内容、2.5次元的ポイントは？

北浦　我々のところでは、金属化学気相成長法を二次元系に適用する研究を少し前から進めています。装置開発も行い、その結果これまでにないくらい正確に、二次元結晶を繋ぎ合わせることが可能になりました。異なる種類の結晶（例えばWS_2とMoS_2）を、ナノスケールで幅を制御しながら、きれいな界面で接合します。一見、構造体としては二次元ですが、その中に多数の一次元の接合界面がある状態です。このつぎはぎの板だけでも非常に面白いのですが、二次元同士を重ねたり、間に棒を挟んで一次元と二次元の混合次元系を試したり、そこに出現する新しい機能や物性が非常に面白く、このようなことが2.5次元的だなと思っています。

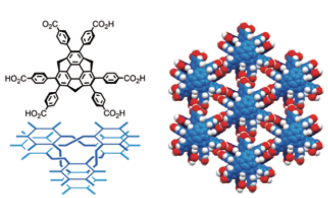
2.5次元的って、".5"の解釈が人によって様々で、逆にそれが良いですね。この公募研究で申請したテーマでは、ただの二次元じゃないっていうところが".5"になるという考えです。二次元と二次元をきれいに繋いだ構造体を作っているので、様々な方と協力してさらに開拓していきたい。そしてただの二次元1枚ではできない接合、積層、界面を中に持つものを作って、新しい物を生み出していきたい。それが私なりのアプローチです。

久木　今私が進めている研究は、π共有系有機分子を二次元に並べることです。二次元だけじゃなく三次元でも、配列を制御するために可逆性のある水素結合を使って、分子を自己集合させた構造体を作っています。水素結合やファンデルワールス結合は指向性があまりないので、これまでは分子配列がどのようになるか分子構造から予想できませんでしたが、カルボン酸の2量体のような、結合に指向性がある水素結合モチーフを使うことで、比較的簡単にデザインできるようになってきました。

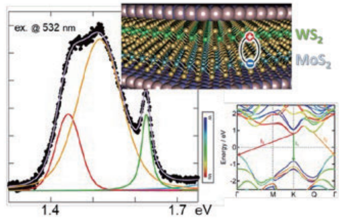
また他にも、北浦さんが昔研究していた多孔質構造について積極的に進めています。特定のガスを吸着する、二酸化炭素吸着してその場で反応させる、構造が似ている分子を分離するなどができる多孔質材料は、省エネルギーの点からニーズがあるものです。そのような観点から多孔質フレームワークを構築し、複合機能性HOF*[3]の開発を行っています。

2.5次元としては、まず二次元構造をした平面分子の外側に水素結合基を作り、タペストリーのように二次元構造をデザインする。それを用いて、シート上に物理的な穴を作ることや、ゲスト分子が選択的に入ったようなものを考えています。他にも層間レイヤーを作り、そこに何かインターカレートすることも可能かと思っています。

ただ水素結合やファンデルワールス結合の最大の弱点は、剥離したときにきれいな層として単離できないこと。そこで、どのように自立した膜を剥離するかが今回の課題の1つです。具体的には1層で作ると弱いため2層で作る、水素結合の数を増やしてできるだけ強固にするなど、そんな方法で何とかトライしたいと考えています。



水素結合でネットワーク化した有機二次元結晶（久木）



2.5次元ヘテロ接合の電子状態（北浦）

領域での共同研究について教えてください。

北浦　岡田さん(A01)とは新しい二次元構造体の電子状態の計算に関して、光物性関係では町田さん(A02)のところと、宮田さん(A02)ともいろいろな細かいテーマで共同研究しています。

久木　櫻井さん(A01)の分子を使って結晶光学的に自己集合体を作っていく研究、岡田さん(A01)が計算化学の観点から提案するネットワーク構造を、実際に分子集合を利用して作っていくことなど進行中です。率直な感想としては、共同研究の難しさを感じています。ただその中から何を生み出すことができるか、全然違う発想で何か生まれるんじゃないかと。そのため今回北浦さんのお話を伺う中で、実際に無理やり一緒にやるとしたら何ができるのかという観点でお聞きしていました。ですが、なかなか難しいですね（笑）

北浦　確かに（笑）でも領域の活動でご縁がなかったらお話しする機会がなかったと思うので、活かしていきたいですね。

久木　北浦さんはとてもきれいな接合界面を作る技術をお持ちなので、その上に複数の分子を乗せると、その面によって選択性が出てくるのか、同じ分子でも下の層によって界面部分に特徴的な電子状態がみられたりするかななど、考えながらお話し伺っていました。

北浦　そうですね、分子を二次元に乗せると面白いことが見れそうですね。分子はチューニングできるところが魅力的なので、二次元を土台にして分子を発光センターのように並べて、しかも状態はコントロールできるようにすると面白いなと思いました。

領域の皆様へメッセージをお願いします。

北浦　他では作れない接合体、二次元でもただの二次元じゃない、そこが".5"に繋がる可能性があるところだと思います。それを自分1人でやるのではなく、様々な計測技術、理論を取り入れ、メンバーの方々と議論しながら、".5"を形として残せるよう精一杯頑張りたいです。

久木　私のほうは異世界からやってきたというイメージで、荒唐無稽な発想もあるかもしれません。しかし、それが化けるかもしれない。周囲の方々からいただく刺激で世界を広げながら、無から".5"を生み出せるような、そんな組み合わせを探していきたいと思います。

用語説明
＊1 PCP：Porous coordination polymer（多孔性配位高分子）
＊2 MOF：Metal-organicframework（金属-有機構造体）
＊3 HOF：Hydrogen-bonded organic framework（水素結合性有機構造体）

Interviewees

北浦 良
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
2次元系量子材料グループ
グループリーダー

久木 一朗
大阪大学
基礎工学研究科
教授

（五十音順　敬称略）

聞き手：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年10月3日）

ニュースレター Vol. 19 （2023.11.6 発行）

NEWS LETTER 19

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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

2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 6

A01班
物質創製班 公募班
（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）
田代 省平

×

A05班
機能創出班 公募班
（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）
石井 史之

先生方がこれまで進めてきた研究と、公募班へのご応募の理由を教えていただけますか？

石井　院生時代から理論分野で研究をしていました。物質の電子状態を明らかにするという研究室で、電子状態計算いわゆる第一原理バンド計算という手法を用いた研究です。その後、金沢大学に赴任した際、所属した研究室で岡田さん(A01)のグループと一緒に、グラフェンナノリボンに関する共同研究を行いました。コンパクトな系ですが多彩な磁性を持ち、ノンコリニア磁性というスピンが平行や反平行ではない不思議な磁性があり、大変興味深く感じました。その後、スピントロニクスに強く興味を持ち、そちらの研究を進めていきました。

研究対象はこれまで、二次元物質だけでなく、三次元物質である結晶も扱ってきています。結晶には並進対称性があり、無限に、周期的に並んでいるということがとても大事ですが、2.5次元ではその周期性を少し壊して、回転等によるずれを加えています。そういった特殊な系はこれまで取り組んでいなかったため、新しさを感じ、この領域に応募しました。また今回の2.5次元領域活動では、初めて見るスピントロニクス的な側面や熱電材料的な側面にも期待しています。

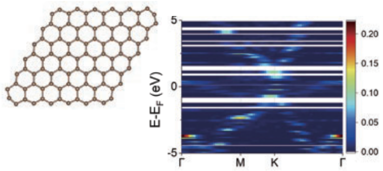
田代　博士号を取るまでは、超分子化学、錯体化学の研究室にいました。溶液の中に溶けているので、0次元のナノキャビティのようなものを作り、その中で分子認識をするという研究です。そこでは、生物中で見られる分子認識を人工的にデザインすることは面白いなと感じていました。その後、現在のポストで助手になり、引き続き錯体化学と超分子化学を研究しています。

今現在は、金属イオンと配位子を組み合わせて結晶を作るプロジェクトにどんどんシフトし、主に孔の開いた結晶を作ることが多いです。結晶を作る中で、材料としては錯体で三次元に繋がるものがよくあるのですが、金属と配位子が二次元状に繋がった構造も期せずできることがあります。そこから二次元物質って面白そうだなと興味が湧いたのです。もともと僕自身、何か新しい物質を作ってみたい、手法も試してみたいという思いがありました。生み出した新しい物質は、こんな面白いことに使えるかもしれないというモチベーションも。これまで生み出せていなかった二次元物質が得られるようになり、そのタイミングで2.5次元の理念を読ませていただき、何かコントリビューションできそうだなと考えて応募につながりました。

現在の研究内容や、2.5次元的ポイントは？

石井　基本的には今までずっと結晶を研究してきました。並進対称性があるもの、例えば数オングストロームいったら、また同じ構造が繰り返しあるものです。二次元だと完全に二次元方向に数オングストロームいったらの繰り返しで、同じ構造が繰り返されて結晶になります。2.5次元と言うと少し分かりにくいのですが、三次元ではないので二次元に直行する方向に無限に繋がっていかず、何らかの厚みがあるというイメージになります。ただ厚みがあるだけではなく、最近の研究動向を考えると、回転等のずれを加えることが重要です。層状物質をずらして重ねることによって既存の周期性が壊れ、新しく長い周期性が見られるようになる。このようにして、周期性が壊れた中で出てくる新しい物性に強く興味をひかれます。そしてそのような現象をいかに理解するか、基礎的な部分もとても興味深いです。さらに応用的な観点では、2.5次元を考えることで初めて出てくるような物性、磁性や熱電物性、輸送特性がどのように変わるのか、それらに非常に強い興味を持ってます。

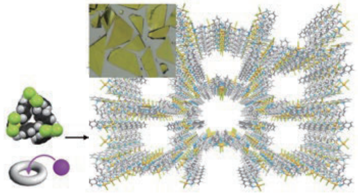
現在少しずつ進めているのは、分子のような系で作り結晶の電子状態などを再現する、そのような理論の計算をまず最初にやってます。それがあると、例えば上図に示す6×6程のグラフェンフレークで、ディラックコーンという電子状態が再現できるようになります。その後は有限サイズの二次元物質を貼り合わせて、それを回転していくことを考案中です。これはグラフェンに限らず、遷移金属ダイカルコゲナイトでも進めています。



6×6のグラフェンフレークとそのディラック電子状態（石井）

田代　領域の理念に書かれていた2.5次元の定義の中で一番近いなと思ったのは、二次元と二次元の間の空間は二次元だが、そこにも何か分子が並ぶことができる。それはある意味三次元かもしれないのですが、やはりこの層と層の間にある空間が、僕の中の2.5次元というイメージです。

自分の研究では色々な錯体で結晶を作っており、最近特に扱っているのはクラウンエーテルのような環状分子です。それら分子は輪の真ん中に様々な分子を効果的に置くことができるので、そのような環状分子を錯体で集積化して二次元の構造を作っています。僕が作っているのは、環がフラットに繋がっていないため、波打った凸凹状の二次元物質です。波と波が重なるように積層し、結晶になっています。グラフェンのようにフラットでなく、でこぼこの凸と凹の間に明確な空間があります。その空間は普通の二次元の層間よりも、もっと積極的に色々な分子やイオンを自在に並べることができる空間になるのではと考えているところです。様々なバージョンの二次元構造を作り、それらにおける層間を使い、色々な機能を出していけたらと考えています。



環状分子が集積化した多孔性結晶（田代）

領域での共同研究について教えてください。

石井　電子状態計算を行っているので、何か新しい物質の物性を明らかにすることで共同研究していきたいと考えています。そこで、黒澤さん(A05)とは熱電効果についての共同研究を、坂野さん(A03)とは遷移金属ダイカルコゲナイドの電子状態についての共同研究を進めています。

田代　二次元物質と我々の結晶をハイブリッドすることで新しい機能を出すことが、切り口の1つと考えています。これまで進めてきた共同研究は、A04友利さんグループ（R4年度在籍）およびA01吾郷さんグループと、多孔性結晶の劈開と基板への転写、およびその機能化について、A01櫻井さんグループと、多孔性結晶と金ナノ粒子の複合化についてです。

領域の皆様へメッセージをお願いします。

石井　成果を出していくっていうのは当然なのですが、なるべく領域の方々と共同で面白いテーマにあたって、何かしら面白いことを明らかにしていきたいです。

田代　この領域で共同研究をして、何か成果を出すことが第1目標です。自分のフィールドに寄ったものより、2.5次元領域に寄せた中での共同研究として、一緒に進めることができたら一番嬉しい。そして、それがきっかけとなり、自分の研究の興味や方向性、可能性が広がっていくように思います。領域会議はすごくいい機会ですし、領域内で定期的に開催している金曜日お昼のセミナーもとても勉強になっています。分野が違う私には初めて聞くような話が多く、純粋に興味深く聞かせていただいてます。ただ分野が異なるので、私の研究をそこで20～30分説明するのはちょっと気が引けるなと･･･

石井　大丈夫だと思いますよ（笑）、物理半分、化学半分ですから。同じ大学内で物質科学の化学の方がいらっしゃって、日頃からお話聞きたいなと思っていますが、なかなか聞く機会がなかったりするものです。ですので、ぜひ発表していただければと思います。

田代　そうですね、前向きに頑張りたいと思います！

Interviewees

田代 省平
東京大学
大学院理学系研究科
准教授

石井 史之
金沢大学
ナノマテリアル研究所
教授

（活動班順、五十音順　敬称略）

聞き手：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年11月6日）

ニュースレター Vol. 20 （2023.11.9 発行）

NEWS LETTER 20

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

第2回 若手交流会レポート

第2回　北海道大学
理学部5号館低層棟 205/206教室　（北海道 札幌市）

2023年9月25日、若手の交流を通じた領域の活性化を目指して、北海道大学にて第2回若手交流会が開催されました。今回は全国から、前回を上回る46名の若手研究者・学生が参加しました。そこで今回は、領域の広報担当であり、幹事のお一人でもある荒井先生（A02）にお話をうかがいました。

今回はどのような交流会になりましたか？

初参加の方も多くいましたが、全体を通してとても和やかな雰囲気だったので、これまで関わったことのない分野の人同士が話し合う良い機会になったと思います。参加者の多くは学生さんで、皆さん初対面でしたが、研究の話が弾んでいるようでした。分野が違うと使う言葉も変わります。そういったことに対しても理解をしながら話ができるという意味で、本領域の「若手の層の厚さ」を感じました。

また、博士課程の学生は特に孤立しやすいので、異なる研究室の人と研究のみならず、進路の相談もできる機会があるのはとても貴重だと思います。

プログラムの内容や当日の進行についてお聞かせください。

前回同様、自己紹介のスライドを皆さんに用意してもらい、当日全員の前で話す機会を設けました。研究の話を淡々とするのではなく、趣向を凝らしたスライドが多く、お互いを知る上でとても有用でした。今回から導入されたポスター発表も好評で、ポスター前での議論も盛んになされていました。特に、学会発表を経験したことがない学生も発表にチャレンジしていたのがとても印象的でした。発表したことにより、たくさんのアドバイスをもらえるなど、貴重な経験になったことと思います。

プログラムについては、今回ホストだった上野研の方々の対応がしっかりしていたおかげで、ほぼ予定通りスムーズに進行ができました。実験室の案内では質問が多すぎて時間が押す場面もありましたが…。また、上野さんの配慮で皆さんに名札を配っていただいたのもとても良かったと思います。

↑口頭発表の様子

ポスター発表の様子→

参加者集合写真

対面でのメリットを感じた点はありますか？

今回、このような会をを現地開催にして本当に良かったと思っています。オンラインでは多くの場合、話し手に注目が集まるため、学生さんは「知りたい！」という気持ちが強くても、聞きたいことを聞けなくなってしまうことが多いとよく聞きます。対面のポスター発表を行うことで、自然な会話の中で些細なことも聞けるというのは研究を進める上でとても大切なことだと思います。今回はそういった会話がとても多かった印象です。

もう１つ重要なこととしては、とても「笑い」が多い会になったと思います。オンラインで行う場合には、聞き手がマナーを守ってミュートにしていると、聴衆の笑い声は聞こえません。聴衆の反応がわかることで、発表者も安心して話すことができたと思います。皆さんが自然に話せたことで、発表者の「キャラ」もよくわかりました。

次回開催に向けて改善点を挙げるとすれば？

今回、多数の学生さんにご参加いただきましたが、特定の研究室からの参加が多かったので、研究室のバリエーションを増やしていくことが次の課題だと感じました。参加・発表しても成果にはならない会ですので、先生方もなかなか学生の参加に対し、積極的になりづらいかと思います。今後若手交流会で知り合った方同士で研究を行い、目に見える形で成果につながっていくと、参加への障壁も下がり、若手交流会がより良いものになっていくのではないかと思います。

若手の皆さんへメッセージをお願いします。

若手交流会は普段参加する学会とは異なるコミュニティに属する同年代の人たちに出会える機会です。研究がうまくいっている人はもちろん、何か困っている・悩みがある人も勇気を出して来ていただけると、解決の糸口が見つかるかもしれません。是非来年の参加を検討ください！

懇親会の様子

交流会当日の様子

参加した学生さんからのコメント

「自分の研究のどのような点が面白いのか，どのような点で苦労しているのかなど，学会とは異なったフランクな雰囲気で交流することができました。また，様々な分野の学生や先生方と交流することができ，自分の視野を広げる良い機会となったと感じています。」
小子内 行羅（九州大学、修士課程１年）

「私はこの分野への取り組みがまだ浅いため、知識や人脈が限られていましたが、他大学の学生とポスターを通じたディスカッションに参加することで、新たな発見や洞察を得ることができ、さらに交流を深める貴重な機会をいただいたと嬉しく感じています。」
矢藤 千菜（北海道大学、修士課程1年）

お知らせ

- 12月26, 27日に名古屋大学 研究所共同館 II にて第6回領域会議を開催します。
- 2024年1月11,12日に金沢商工会議所にてJAIST国際シンポジウムを共催で開催します。
- 2024年1月19日に九州大学グローバルイノベーションセンターにて第3回産学官協働ミーティングを開催します。

Interviewee

イラスト：門田 英子

荒井 俊人
物質材料研究機構
独立研究者・主任研究員
（広報担当）

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年 11月9日）

ニュースレター Vol. 21 （2023.11.20 発行）

NEWS LETTER 21

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 7

A01班
物質創製班 公募班
（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）
黒澤 昌志

×

A04班
物性開拓班 公募班
（2.5次元物質における高効率スピン電流変換）
塩見 雄毅

先生方がこれまで進めてきた研究と、公募班ご応募の理由を教えてください。

黒澤　学生の頃からシリコンやゲルマニウム等の14族半導体で、ダイヤモンド構造の結晶成長を行ってきました。きっかけは、九州大学で受講した授業が面白く、この先生から学びたいなと思って選んだのが、シリコン等の14族半導体に取り組む研究室で。実際に研究を進めると結晶を作ることが意外に面白く、新しい結晶を作ることや何か発見することが楽しくなりました。その後ポスドクで名古屋大学に行き、数年後、次のポストを探すタイミングで白石賢二先生と議論する機会がありました。白石研では、計算によると実現可能な14族二次元結晶のプロジェクトが進行しており、学内の若手新分野創成プロジェクトで自分がその結晶成長にチャレンジすることに。分析に詳しい先生と理論計算の先生、結晶作製担当の私でグループを組み進めています。プロジェクトがスタートして7～8年が経ち、ようやくうまくいき始めたところで今回の応募に繋がりました。

塩見　学生時代はたまたま磁性がテーマの研究室に配属され、温度を下げて磁場もかけてという、本当に基礎的な物理の研究を行っていました。物性物理は黒澤さんと違い応用が全然見えない分野です。教授に聞くと30年後に役に立つんだとか言いますが、当時は疑問に感じることも。いろいろ悩んだりしました。応用寄りの研究もやってみたい、そういう世界を見てみたいと思うようになった頃、磁性を使った応用分野でスピントロニクスが流行り始めました。電子は電荷だけでなく「スピン」という磁石の性質もあり、このスピンを使ったスピントロニクスに積極的だった東北大で運よく助教に採用されました。

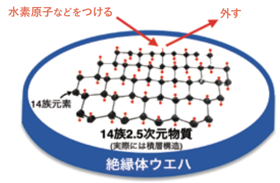
スピントロニクスの研究者は応用を目指しているので、役に立ちそうな室温で磁性があるものに注目します。一方で、自分は物性物理学の人が興味を持つ、役に立たないような物質も扱ってきた経験があります。そこで物性物理の物質を使ってスピントロニクス機能を出すように組み合わせるなど、両分野の境界で研究を進めてきました。2.5次元でも、物性物理とスピントロニクスの技術をうまく絡めて、スピン流の性質をもって何か面白いことができるのではと考えて応募しました。

現在の研究内容や2.5次元的ポイントは？

塩見　電流とスピン流を高効率に変換できる材料の開発は、スピントロニクスでずっとテーマになっています。コンセントにプラグを挿したらスピン流を出せるかというと、それはなかなか難しい。電気からスピン流を作り、スピン流を測る時も電流に変換して測ります。そこで重要となるのは、どのように電流とスピンを高効率に変換するのかということ。そのロスを減らすことができればスピン流を使ったデバイスに繋がります。

私もそのような観点で材料開発をしていて、2.5次元を使うとよい結果が得られるのでは？と期待しています。物質を材料開発する際、ある1つの物を作って一生懸命試行錯誤していきますが、通常の材料系と比べて2.5次元材料は自由度が違うのです。何か違うものをくっつける、ひねるなどが2.5次元ではできるので、ある種の人工物質のように扱うことが可能です。それにより、高効率なスピン流と電流の変換ができるのではないかというところに興味があり、領域の方々からサンプルをいただきながら、進めていきたいと考えています。

黒澤　私が進めていることは2つあり、1つは熱電応用への展開。もう1つは白石先生との議論で計算から成長が可能だと予測されているゲルマネン結晶を作ることです。六角形の蜂の巣のような形状で14族元素から成る二次元結晶のゲルマネンを作り、その電気的な物性測定が大きな目標です。その測定のためには、絶縁体の上に結晶を作らなければなりません。まずそれをクリアすること、そのため現在は結晶成長を頑張っています。



絶縁体ウエハ上に形成した
14族2.5次元物質のイメージ図（黒澤）

2.5次元の".5"については、グラフェンが完全にフラットであることに対して、シリセンやゲルマネンは横から見て若干屈曲しており、完全にフラットではないという特徴があるというところ。もう1つは、シリコンやゲルマニウムは共有結合のうち3つは隣同士で繋いでいるのに対し、シリセンやゲルマネンでは1つ繋げないダングリングボンドがあります。そこに何か原子をつけたり、外したりできれば、物性が変えられるということが分かっています。そのため結晶を壊さずに、つける・外すが可能かどうかにもチャレンジ中です。

領域での共同研究について教えてください。

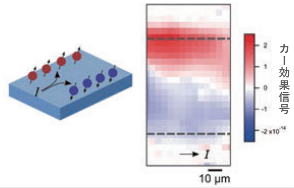
黒澤　私は結晶を作ることが得意な方なので、私が作った結晶で何か面白い物性が出れば領域の方々とコラボレーションできるのではと考えています。また計画研究班の方々がお持ちの評価装置などを使わせていただけると有難いです。実際に動いているものは、熱電というキーワードが一致した石井さん(A05)との共同研究です。計算を石井さんが、私は14族2.5次元結晶に関して温度差をかけて電気を取り出す計測を行っています。

塩見　この領域の共同研究では、化学の方も多く、様々な試料をお持ちの方がいらっしゃいます。そこで、いろいろな方から試料をいただき、専門分野であるスピントロニクスに関してたくさん仕事をしていきたいです。

笹川さん(A04)からはポスター発表されていた試料をいただき、圧電効果に関する結果が得られ論文に。宮田さん(A02)からは1次元の面内ヘテロ構造を持つ試料をいただき、界面に電流を流した時のスピン偏極について研究を進めています。また加藤俊顕さん(A01)が創成したヤヌスの試料に対して光を使い磁性を計測することも行っています。

領域活動を通じて、ご自身にどのような変化がありましたか？

塩見　領域の活動に参加することで、これまでなかった繋がりや広がりができました。電車でお互い行き来できることもあり、宮田さんの装置がうちに来ることに。黒澤さんともこれまで面識なかったのですが、お互い同期で、さらに知り合いが一致していることが分かりました。



電流に誘起されたスピン偏極の
磁気光学カー効果を用いたイメージング（塩見）

また領域内の活動については1つ1つに意図があり、しっかり準備されていると感じていますし、メンバーの方々がフランクでありがたかったです。初めて領域会議に参加した時は、いるかいないかわからないくらいの存在感で、終盤には存在感をちょっと発揮できるようになりたいと思っていましたので（笑）

黒澤　分かります（笑）、私も同じような感じです。人脈が広がったと実感しています。

また、初めて参加した領域会議で立ち話をしたとき、デバイスを作る人が少ないよ、ぜひ何か作ってと言っていただきました。その時、せっかくだから熱電物性を測るだけじゃなくて、デバイスチックなもの、簡単なプロトタイプでもいいので何か作れたらなと思いました。いつか自分の研究したものや2.5次元領域で生まれたものが、生活の中で広く使われるようになったら嬉しいですね。

デバイスのように役に立つかどうかという視点も必要ですが、領域会議では皆さんが純粋に楽しまれている様子も印象に残っています。何か構造が面白いとか、くるくる巻いてるのが面白い、美しいねという観点のものだったり。研究を進めていく上で自分も何か面白いことを発見したら、それをとことん追求していくのもありだなと思いました。自分たちに2.5次元の".5"の解釈を任されてるので、そこがとてもありがたいです。

Interviewees

黒澤 昌志
名古屋大学
大学院工学研究科
准教授

塩見 雄毅
東京大学
大学院総合文化研究科
准教授

（五十音順　敬称略）

ライター：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年11月20日）

NEWS Letter Vol.21　公募班メンバー特別対談7

ニュースレター Vol. 22 （2023.12.7 発行）

NEWS LETTER 22

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 8

A02班
集積化班 公募班
（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）
田中 秀和

×

A05班
機能創出班 公募班
（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機能デバイスデザイン）
小野 倫也

特別対談がきっかけとなり共同研究が進行中と伺いました。どのような研究でしょうか？

田中　小野さんとの共同研究は第５回領域会議で報告したもので、吾郷グループ(A01)がCVDで合成した大面積六方晶窒化ホウ素（hBN）上に我々が二酸化バナジウム（VO_2）を成膜し、優先配向する様子を観察しています。二次元層状物質と酸化物を組み合わせることで見られる新奇物性を明らかにしていくことが目標です。

小野　私の方ではVO_2/hBN界面安定構造の第一原理計算から、一部の原子はピンどめされるが、その他の界面接合部分は弱いファンデルワールス結合となる界面モデルを提案しました。このモデルによると、従来の酸化物薄膜の物性は薄膜化と共に劣化して使えなくなりますが、hBN上のVO_2の物性は膜の厚さが薄くなっても維持できることがわかってきました。ファンデルワールス界面の特徴ではないかと考えています。

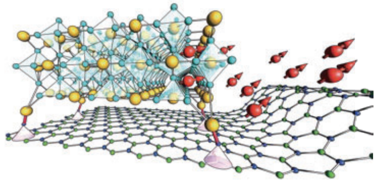
田中　この共同研究のきっかけになったのはニュースレター用のインタビューです。小野さんが説明していたスライドの中に「界面の束縛が弱い」とあり、自分の研究の中で気になっているキーワードだなと思って。実際何が結合してるのか、そうでないのかよくわからないって話しをしたところ、結合距離について詳しく聞くことができました。実は特別対談より前に、第3回領域会議で「理論相談会」があり、そこで小野さんのお話をお聞きしたのですが、その時はいきなり「こんなことできますか」ってお声がけしにくく、お話ができなかったんです。材料系が異なるので、マッチしてなかったらと思うとハードルが高くて。

小野　田中さんが計算に興味を持って下さったことが第一歩としてあったと思います。それを受けて、さらに対談という機会があってよかったです。私も界面原子構造に興味をお持ちの方と一緒に進めていきたいと考えていて、共同研究を探していました。原子構造をモデリングするときに計算があると楽できる場合もあり、私たちも予測した構造に関して実験があると嬉しいものです。田中さんとの共同研究は現在進行中のため、今後の成果についても後日報告していきたいと思います。

共同研究にもつながった、先生方それぞれの研究について教えてください。

小野　電力変換などの用途で使われるパワーデバイスをシリコン以外の材料に置き換えて省エネ化を図る研究は、いろいろなところで進められています。しかし電力変換で最も重要な材料界面についてよくわかってない部分があります。その界面の原子構造は材料によって異なるので、原子同士がきれいに結びついてない欠陥が必ずできるのです。機能を発する部分は界面で、そこに未解明なものがあると機能予測の妨げになります。何があると機能劣化するか、特に今問題としてるのは大幅に劣化するものです。例えばシリコンカーバイドと絶縁膜の界面では、電子デバイスを作ったときに電子の走る速度、電流がかなり少なくなります。シリコンでは期待された値が出ていたが、それをシリコンカーバイドに置き換えると10%、あるいは5%しか出ない。界面を電子が走るので、結合がうまく結びついてない、欠陥があるということが考えられます。そこで私たちの研究では、どういう欠陥があると悪さをするか予測し、それを修復する方法、プロセス、それらについて提案しています。その中でも特に、電子状態を計算することと、キャリアの電子の流れを予測することを進めているところです。

田中　僕の研究の出発点は、光で磁性の制御をやりたいということ。そこで光機能の遷移金属ダイカルコゲナイドなどを半導体と組み合わせています。他にもスピンを持つ酸化物と二次元層状の半導体でダイオードを作ったり。あとは二次元材料で誘電体のhBNと酸化物を組み合わせて、誘電体で酸化物のスピンを制御して磁性をスイッチングし、スピントロニクスに使うことも試しています。以前は酸化物の薄膜を作り、上から貼り付けてトランジスタなどを作っていました。今はそれを逆にして、最初に二次元層状材料を基板に置き、上に酸化物の薄膜を成長させています。例えば下が誘電体で、その上に酸化物を乗せてスピンを制御する、そういう界面を持ったヘテロ接合を作りたいと考えています。逆にした理由は、酸化物を成長させるとき、酸化物同士だと結合が強く、ペタッとくっついてしまうから。そのため酸化物を使うとき、この酸化物にはこの単結晶を選ぶというように組み合わせが決まってしまうのです。その点、二次元層状物質はファンデルワールス結合のため、結合が非常に弱くあまり相互作用がない。この特徴を活かせば、結晶構造が違っても成長させていけるのではと考え、研究を進めています。



金属酸化物/二次元物質の異種ヘテロ界面（田中）

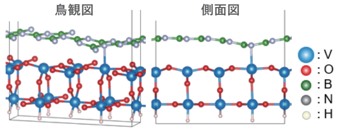
公募班にご応募された理由と 2.5次元ポイントを伺いたいです。

小野　昔は電子デバイスのシリコン/シリコン酸化物の界面制御が重要でしたが、今はパワーデバイス用のシリコンカーバイドなどの新しい材料界面がターゲットです。スピントロニクスデバイスでは、磁性金属/絶縁体界面での電気伝導など、それらを第一原理計算で明らかにするという研究に取り組んでいます。特にスピントロニクスのような材料の設計がこの2.5次元科学に近いテーマと思い、応募させていただきました。

2.5次元については、半導体の界面や、界面遷移層である2つの材料において、それぞれは明瞭に分離してるのではなく、どちらの材料とも言えない領域が出てきます。界面というのはきっちり二次元ということはできなくて、垂直方向にも何かある、それが私にとっての".5"の解釈です。

田中　これまで薄膜合成の研究分野で、マンガンやバナジウムなど色々な酸化物を組み合わせてきました。酸化物同士でも面白いのですが、他の材料も試したいと考えていたところでグラフェンが出てきました。二次元材料は薄く、ぺらっとしており、薄膜と貼り合わせるのにちょうどよいと感じたことが出発点です。機能性酸化物と二次元材料など化学的性質の異なる材料で、組み合わせる範囲をもっと広げて新しい機能発現を狙いたいという思いがあり、今回の応募につながりました。

僕にとって2.5次元の".5"は二次元そのものではなく、その上の空間という解釈です。その空間はあまり束縛がないので、宇宙空間のように合成が何でもできる空間になっているのではないかと。いわば薄膜の中にあるナノの宇宙空間のような場所。そこで期待するのは、1番目がその二次元の上にある束縛のない空間を利用して結晶性成長させること、2番目が二次元層状物質の光や電気の機能と酸化物のスピンの機能を合体させたら新しいデバイスができるのではないかということ、3番目が作ったあと剥いであちこちに貼り付けられたら嬉しいなということ。一石三鳥になることを期待しています。



第一原理計算で求めたVO_2/h-BN界面の原子構造（小野）

領域の皆様へメッセージをお願いします。

小野　理論計算では予想が実現することに醍醐味があります。この領域内ではいろいろな実験の方がいらっしゃるので一緒に組んで様々な解析を行ったり、逆に私たちが予測した構造の機能実証をしていただいたり、これからも相互に進めていけたら嬉しいです。

田中　酸化物と二次元材料を組み合わせて、そこで初めてみられる特性を出していきたい。さらに界面で何が起こっているか分からないところを明らかにしていきたいです。今回は領域活動の中でこれまでネットワークが広がり、お互いに成果も得られました。これからもそれぞれが専門を深めながら、全体として次の段階に上がっていけるように活動していきたいですね。

Interviewees

田中 秀和
大阪大学
産業科学研究所
教授

小野 倫也
神戸大学
工学研究科
教授

（活動班順、五十音順　敬称略）

ライター：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年12月7日）

ニュースレター Vol. 23 （2024.2.5 発行）

NEWS LETTER 23

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 9

A04班
物性開拓班 公募班
（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）
若林 克法

×

A05班
機能創出班 公募班
（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）
河野 行雄

公募班にご応募された理由を教えてください。

若林　僕はグラフェンや二次元材料とかの理論計算をしているんですが、平成25年から5年間、学術領域研究「原子層科学」に参加していました。この領域研究はとても盛り上がって、成果もたくさん出たんです。色々な分野の人たちと交流できて、ネットワークも広がって、組織がフラットで居心地よくて、原子層科学がずっと続いて欲しいくらいでした。そんな風に思っていたところで、2.5次元が立ち上がりました。2.5次元は原子層とは異なるコンセプトになりますが、引き継いでいるところがいくつもあります。原子層科学が終わって残念でしたし、新しく立ち上がった2.5次元も自分の研究分野と重なっていましたので、応募につながりました。

河野　私も原子層からのつながりがあります。原子層では公募班で、1期と2期の両方とも参加しました。若林さんも仰っている通り、化学、物理、分析、理論と異分野間の垣根を越えて活動することができて、活動が終わるときには一抹の寂しさを感じていました。原子層での成果もあり、現在の自分の研究の強みを持って2.5次元領域に改めて参加し、さらに先を見てみたいと考え応募しました。

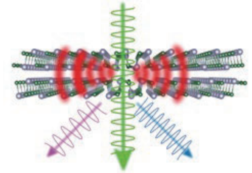
現在取り組まれている研究について教えていただけますか？

若林　理論計算や大規模数値計算によって、グラフェンや二次元材料などの電子物性の予測や設計を行っています。グラフェンのように原子１個分の厚みしかない物質や、原子10個分くらいのナノスケールの物質は、そうでない物質とは全く異なる電子物性を示します。表面、界面、エッジの影響が、ナノスケール物質の物性に大きく関わってくるのです。例えば蜂の巣のように六角形が繋がった構造をしているグラフェンは、切り取ったときの角度により端の結晶構造が異なります。ジグザグとかアームチェアとか。それにより磁気的性質や電気的性質が大きく変化すると理論計算で予測していて、実際の実験でも観測できています。そこで僕の研究室では、グラフェンナノリボン*1のエッジだけでなく、回転積層グラフェンの電子状態、フォトニック結晶、これまでにない新しい組み合わせの材料、新奇物質について、それぞれで観測された現象の解析、電子物性等の理論提案を行っています。

河野　私の方は、電波と光の中間領域にあたるテラヘルツ光に注目し、赤外光やミリ波にも範囲を広げながら、基礎研究から応用まで様々なテーマで研究を進めています。主な取り組みは、インフラ検査や製品検査において、非破壊・非接触で素材を同定し、内部構造の可視化を行うことです。そこで基礎研究では近接場光をとらえて可視化する顕微鏡を使った解析などを、応用では薄くて軽いカーボンナノチューブを利用したカメラの開発、テラヘルツ波を用いた計測をより向上できるアンテナ開発などを進めています。

先生方がこれまで進めてこられた研究について伺いたいです。

若林　学生の時に遡ると、選んだ研究室は理論研究の藤田先生（筑波大学）のところでした。その頃、学生は自分しかいなくて。ある日突然、先生が「ナノチューブを切って開いたら、どうなると思う?」って言うんですよ。なんだそれって思ったけど、理論計算してみたら面白い結果が出て、これが修士論文になりました。このあとグラフェンのエッジについて研究していきましたが、当時周りはナノチューブが多く、自分はグラフェンのエッジやっ



2.5次元物質と光との相互作用による電子物性の制御（若林）

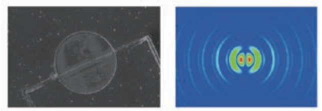
ている珍しい人って思われてましたね。大学からNIMSに移ると、実験との共同研究を積極的に行いプロジェクトを動かさなくちゃならなくて。他にも、これまで取り組んでこなかったラマン分光解析とかも、やらなくちゃならなくて。一時期グラフェンから離れて他の材料を扱っていたこともありましたが、2004年にグラフェンの発見がありグラフェン大ブームが！その時、自分と藤田先生の書いた約30年前の論文（1996年）が海外から"再発見"されたんです。何が起こるか分からないものだなって思いましたね。

河野　グラフェンの大発見、私は助手として基礎的な物理の研究を行っていた頃です。その研究をしていたのは院生から助手の時期で、半導体における量子ホール効果などに取り組んでいました。その後移った理化学研究所では、半導体ナノワイヤやカーボンナノチューブなどを扱う環境の中で、以前から計測手段として用いていたテラヘルツ波の研究を進めていきました。テラヘルツ光は電波と光の間の周波数帯域で、扱いにくいとされてきた領域です。研究を進めるにあたり、これまでの経験や得意を活かして半導体やカーボンナノ材料の微細加工を行い、電気伝導測定やイメージング測定を進めました。当時テラヘルツ光には、画像にすると解像度が低いことや室温で動作する検出器の性能が低いという課題がありました。そこで画像の解像度を上げるために、近接場光を発生し照射する仕組みを一体化した検出器を開発したのです。近接場光は、一例として、波長よりも小さい孔にテラヘルツ波を照射したとき発生する、極めて微量な光のことです。

理研から東工大に移ってからは、応用に関する期待があり、より実用的なものにシフトしました。これまで積み重ねてきたテラヘルツ光とミリ波等に関する研究、半導体やカーボンナノ材料を応用に活かして、カーボンナノ材料によるセンサアレイを用いた、室温で利用できる広帯域（ミリ波・テラヘルツ波・光）検出器に繋げていったのです。

若林　ミッションに応えているうちに技が増えて、経験値も増えるんですよね。視野も広がり、見通しも立てられるようになって。

河野　視野・視点といえば、ある1つの分野においては、その分野に特化した研究者が多いので、他の分野にまたがった視点を持つ人は珍しいものです。私は基礎的な物理分野と応用に関わっているので、視点が変わっているとよく言われます。そんな視点を得られたのは、ご縁



プラズモニック構造結合グラフェン光センサ（河野）

があった先々で自分をアップデートできたからなのかなと。まるで船に乗って出発した先で、釣りができるようになったり、島を発見したり。今も航海途中と思うと、以前よく読んでいた湯川秀樹先生の著書「旅人」を思い起こします。きっとこれからも、学生の頃には想像しなかった体験があったり、見える世界が変化したりするのかなと思います。

領域内ではどのような活動を行っていますか？

若林　僕の方では、久木さん(A01)の持つ面白い構造のヘックスネットから着想を得て、久木さん、岡田さん(A01)、越野さん(A04)と共同研究を進めています。

河野　吾郷さん(A01)のグラフェンを利用した、デバイス化や計測応用に関する研究を進めています。山本さん(A05)との共同研究は、第4回領域会議（つくば）でお話ししてからのスタートしたもので、二次元半導体と機能性酸化物(VO_2)に関する計測と解析を行っています。

2.5次元領域では、異分野とのマッチアップ、フラットな組織といった、原子層の良いところを引き継いでいると思います。

若林　領域がなかったら繋がることがなかった点と点、小さなきっかけがチャンスの芽になるので、これからも領域活動で広がったネットワークや成果をみんなで繋いでいきたいですね。

用語説明
＊1　グラフェンナノリボン：グラフェンを細いリボン状に切り取ったナノカーボン材料。その幅、エッジ形状により電気的特性が異なる。

Interviewees

若林 克法
関西学院大学
工学部
教授

河野 行雄
中央大学
理工学部
教授

（活動班順、五十音順　敬称略）

ライター：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2024年2月5日）

ニュースレター Vol. 24 （2024.2.13 発行）

NEWS LETTER
24

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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

2.5D Materials

第6回領域会議レポート

第6回　名古屋大学
研究所共同館 II（愛知県名古屋市）

参加者全員による記念撮影

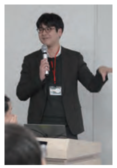
2023年12月26日と27日の二日間、名古屋大学 研究所共同館 II にて、第6回領域会議を開催しました。

総勢108名が集まり、口頭発表(40件)、ポスター発表(46件)を通して活発な議論が行われました。学術変革領域研究の全期間55か月のうち28か月経過し、ちょうど折り返し地点ですが、すでに論文等の成果に繋がっている多岐に渡る成果が報告されました。
公募班の研究成果と計画班の共同研究の進捗を中心に口頭での発表が両日ともに行われ、発表後も白熱した議論が交わされていました。

また、冒頭で吾郷領域代表より、「日本の研究はもはやワールドクラスではない」と科学誌Natureが指摘したことを引用しながら、本領域メンバーの有機的な連携により流れを変えていきたい旨の挨拶がありました。

研究発表では、名古屋大学の大野グループが進めている物理リザバーの研究が注目を集めました。これまでCNTデバイスのCNT/絶縁膜界面での高い界面準位密度に起因したノイズの問題が顕在化していました。このノイズの問題に対して、NIMSの荒井グループが開発しているトラップ密度の低い有機絶縁膜を利用することでノイズ低減に結び付けようという共同研究が今回の会期中に始まっており、今後の展開が期待されます。

また、九州大学の吾郷グループが開発したテープ転写法に関する研究が話題になりました。吾郷グループは、紫外光の照射により粘着性が弱まるテープを用いることで、４インチもの大面積基板上に良質なグラフェンを転写形成することに成功しました。さらに、中央大学の河野グループと連携することで、この技術を赤外撮像素子作製に応用できることを見出しています。この転写手法は六方晶窒化ホウ素（hBN）をはじめとする、さまざまな原子層物質にも応用できることから、領域の研究開発がさらに広がりを見せると期待されます。



口頭発表の様子

名古屋大学　研究所共同館 II

ポスター発表

1日目の夕方にはポスター発表が行われました。46件の発表があり、熱心に説明している大学院生や若手研究者の姿が印象的でした。こういった活気に満ちた意見交換が、今後自身の研究の発展や、共同研究に繋がることを期待しています。

また、前回同様、若手のエンカレッジを目的として、優れた研究発表に対し、「若手奨励賞」が授与されました。今回は7名の優秀な学生が選出されました。将来を担う若手研究者が本領域内で育ってきていると感じました。

「若手奨励賞」受賞者リスト

発表者	所属(大学/ポジション)	ポスタータイトル
木下 圭	東京大学/博士課程3年	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
赤塚 俊輔	東京大学/修士課程2年	原子層WTe_2フレークの電子・スピン構造の直接観測
來村 颯樹	東京大学/修士課程1年	偏光顕微鏡法による強誘電SnS薄膜の面内90°ドメイン観察
窪田 信司	大阪大学/博士課程1年	スマネン誘導体から成るかご型錯体を用いた層状構造の構築
小野 孝浩	東京大学/博士課程1年	非接触原子間力顕微鏡による1T-TaS_2電荷密度波相の直接観測
Ma Zongpeng	九州大学/博士課程2年	Aligned growth and applications of TMD nanoribbons
松崎 勇斗	中央大学/修士課程1年	全印刷かつ機械的に位置合わせ可能なCNT膜型広帯域イメージセンサアレイ

「若手奨励賞」受賞者

ポスター発表の様子

学生さんからのコメント

「若手奨励賞を頂きまして大変光栄に思います。領域会議には初めて参加いたしましたが、この場から共同研究の種が盛んに発掘されていることを知り、自分は何をもって領域の発展に貢献できるかを考える非常に良い機会となりました。」　木下 圭（東京大学/博士課程3年）

「専門分野の学会とは異なり、様々な興味深い研究・実験手法を聞くことができ、貴重な機会となりました。ポスター発表でいただいたご助言を参考にして、今後よりよい成果発表ができるように研究に取り組んでいきたいと思います。」　窪田 信司（大阪大学/博士課程1年）

第6回領域会議主催　大野からのコメント

「年末の多忙な時期にもかかわらず、多くの方々にお越しいただきました。時間が限られやや忙しい会議でしたが、皆様のご協力で小気味良いテンポで会議が進行し、濃縮された議論になりました。休憩時間には共同研究の打合せの様子も伺え、今回の領域会議が革新的な研究成果の源流のひとつになれば幸いです。」

領域代表　吾郷からのコメント

「第1期の研究者のみなさんに加わっていただいたことで、領域の研究が非常に大きく広がりました。第1期の方との領域会議はこれで最後になりますが、本領域への参加をきっかけにして、今後も引き続き多くの方との共同研究を期待しています。」

第7回領域会議は、6月中旬に京都にて開催予定です。

今回は第1期の公募班が揃う、最後の領域会議となりました。アドバイザーの齋藤理一郎東北大学名誉教授教授より、「共同研究のレベルの高さに驚いた。今後もソーシャルキャピタルを意識し、更に高みを目指してほしい。」と、激励のお言葉を頂くことができました。

来年度はいよいよ４年目に突入し、第2期公募研究者も加わります。本領域がますます発展するよう、引き続き様々なイベントを開催していきます。

Reporter
長汐 晃輔　東京大学
大学院工学系研究科
教授　（広報担当）
中村 奈津子　領域事務局

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2024年 2月13日）

ニュースレター Vol. 25 （2024.2.29 発行）

NEWS LETTER 25

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

公募班メンバー特別対談 10

A01班
物質創製班 公募班
（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）
蓬田 陽平

×

A03班
分析班 公募班
（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）
Lin Yung-Chang

先生方の研究について教えていただけますか？

蓬田　学生時代は様々な材料のデバイスに関する研究を行っていました。その後、材料設計の立場からデバイスの性能を向上させたいと考え、カーボンナノチューブの構造制御の研究に移りました。ナノチューブの性質は、直径などの構造により大きく変化します。通常、合成後は様々な直径のナノチューブが混在しており、ナノチューブの構造に由来する性質を見出すことは難しい状況でした。そこで、様々な直径の中から1つの直径のものを取り出す分離技術開発を行い、最近ではナノチューブの構造由来の性質が見えてきています。このようにナノ構造を制御することで、ナノ物質のユニークな性質を引き出すということに興味があります。現在はカーボンナノチューブに加え、遷移金属カルコゲナイドナノチューブを対象に、物質開発や性質解明の研究をしています。

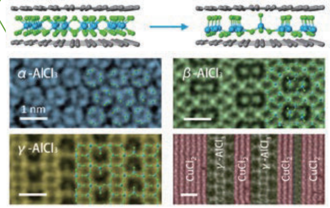
現在、遷移金属カルコゲナイドナノチューブでは大量合成が確立されており、直径100nm程度のナノチューブを得ることができます。一方で最近私たちが開発した合成法では、直径を10nmほどに低減可能です。直径を小さくすると、チューブに丸める際の曲率の効果が大きくなり、歪みの影響でバンド構造が変わるというユニークな性質が現れます。そこで重要となるのが、このサンプルの持つ可能性を示しながら、多くの人が使いやすい条件を整えることです。そのため、様々な物性の調査、ある程度の量、精度で合成できる技術開発を進めています。活用の場を広げるため合成のスケールアップ、最終的にはカーボンナノチューブのように分離精製を用いて均一な構造のサンプルを得られるようにしたいです。

Lin　私は透過電子顕微鏡(TEM)、走査透過型電子顕微鏡(STEM)等を使って2.5次元材料の研究をしています。その中でも最近は、二層グラフェンにおけるアルカリ金属および金属塩化物のインターカレーションに取り組んでいます。挿入されたアルカリ金属および金属塩化物の原子構造は、STEMを使って可視化し、観察時の構造変化もその場でSTEMイメージングを利用し捉えることができます。化学分析はEELSを使用しています。これらを利用しながら二層グラフェン中のアルカリ金属の密度について研究を進めたところ、バルクのグラファイトよりも二層グラフェンの方にアルカリ金属が2倍インターカレート可能であると明らかにすることができました。

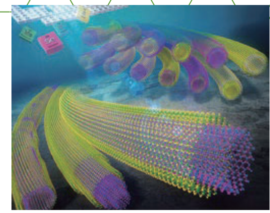
公募班にご応募された理由を教えてください。

蓬田　2.5次元領域が始まる前から宮田さん(A02)と一緒に研究しており、応募してみないかと声をかけていただいたことがきっかけです。ナノチューブは1次元物質と見なされることが多いですが、私たちのナノチューブは直径が大きく、2次元物質としての特徴も持っています。例えば、チューブの軸方向から断面を見ると曲率がある2次元物質と見なすことも可能です。この曲率は、遷移金属カルコゲナイドのバンド構造や空間反転対称性に影響し、電気的な性質や光学的な性質を大きく変化させます。さらに、同軸上に異なるナノチューブを積層させたヘテロナノチューブを作ることができれば、様々な光機能が期待されます。このような曲率の効果や同軸積層の自由度を+0.5次元ととらえ、2.5次元ナノチューブの研究として応募しました。通常の2次元物質では、曲率をつけるための特殊な構造が必要ですが、最初から曲率がついていることや、多層でも空間反転対称性が破れているナノチューブの特徴を活かし、ナノチューブ特有の物理の解明や応用展開につなげたていきたいです。

Lin　私はTEMを使って様々な二次元材料を研究しており、興味深い原子構造と特性を持つ新しい低次元材料を常に探していました。以前、二層グラフェンへ$AlCl_3$と$CuCl_2$を挿入し原子構造を可視化する研究を吾郷さん(A01)と共同で行う機会がありました。その際に、$AlCl_3$と$AlCl_3/CuCl_2$合金の予期せぬ新しい相を発見したことから、二層グラフェンの層間というのは結晶が成長したり、新しい構造に再配置されたりする、理想的な二次元ナノスペースであると認識しました。そのことから、二次元材料のインターカレーションに関連する研究を進めたいと考え、応募を決めました。



二層グラフェンへの$AlCl_3$多形相のインターカレーション（Lin）


2.5次元遷移金属カルコゲナイドヘテロナノチューブ創製イメージ（蓬田）

この2年間で先生方が進めてこられた共同研究について教えてください。

蓬田　遷移金属カルコゲナイドナノチューブ合成方法の研究を宮田さん、柳さん(A03)と進めています。そのナノチューブの表面で起こる水素発生反応に関して、電気化学顕微鏡の研究をしている高橋さん(A03)と一緒に行っています。筒状になると曲率によってバンド構造が変わるため、バンド計算を筑波大学の岡田さん(A01)と進行中です。また松田さん(A03)とはナノチューブの光応答に関して、SHG（第2次高調波発生）の研究を進めています。さらに加藤俊顕さん(A01)ともヤヌスチューブの研究を行っています。この研究は領域会議での質疑応答がきっかけとなり発展したもので、会議に参加していなかったら取り組んでいなかったかもしれません。

Lin　私の方は、吾郷さん、松本さん(A02)、末永さん(A03)と一緒に、アルカリ金属塩化物をインターカレーションし、その構造に関する研究を行っています。他には松田さんのサンプル、ひねりが加わったWS_2バイレイヤーにおけるモアレ励起子、光学光応答関連の研究を始めました。加藤俊顕さんのヤヌスのサンプルについても進めています。今日はこれから加藤さんの研究室の学生が来てサンプルトランスファー方法を教えるのですが、そのように相互に協力する機会が生まれていますね。

私は構造や物理が面白いものや、新しいアイデアがあるサンプルにとても興味を持っています。蓬田さんのサンプルは、これまでにない新しさがあり、とても興味深いです。試してみたいことがあるのですが、もしよかったらチャレンジしてみませんか？

蓬田　私もインターカレーションに関して試したいことがあり、また相談させてください！遷移金属カルコゲナイドナノチューブは、構造評価や応用展開に関してもっと研究を進めたいと思っています。領域活動を通して、様々なアイデアが得られており、研究の幅の広がりを感じています。今後も様々な方と繋がり、ここでしかできない共同研究を展開していきたいです。

領域活動を通して感じたことや、メッセージをお願いします。

蓬田　2.5次元領域に参加し、いろいろな方と交流することから始まった研究がいくつもあります。本当に共同研究を進める上で大きな機会となりました。

もう1つ、とても良かったのは共同利用拠点です。領域内で使っていいよという設備があり、それをメンバーが利用しやすいように拠点の先生方がアナウンスしてくださり、とても使いやすかったのです。私自身、松田さんの光学測定機器を使わせていただきましたが、「こういう研究したいのですが」とお話したら、もう二つ返事でいいよと言ってもらえて、サポートもしていただきました。領域活動に参加していなかったら設備に関する情報を得ることも、使いたいとお願いすることも難しかったと思います。研究を広げていきやすい雰囲気やサポート体制がすごく整っていて有難かったです。

Lin　2.5次元材料チームのメンバーとして活動できたことは、とても素晴らしい経験になりました。皆さんとの活動の中で多くの知見を得ることができました。この領域では異なる研究分野であっても協力しあって進めていこうというスタンスがあり、研究に対するエネルギーを高めてくれましたし、優れた成果にも結びついていきました。今後も2.5次元領域メンバーの方々と共同研究の機会があることを楽しみにしています。

Interviewees

蓬田 陽平
東京都立大学
理学研究科
助教

Lin Yung-Chang
産業技術総合研究所
材料・化学領域
主任研究員

（活動班順　敬称略）

ライター：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2024年2月29日）

ニュースレター Vol. 26 （2024.3.11 発行）

NEWS LETTER 26

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

海外インターンシップレポート2

若手支援　University College London（イギリス）　2024. 1. 9 ～ 2024. 2. 2

仲川 久礼亜
東京大学　塩見研究室（A04班）

２.５次元物質科学領域の支援を受け、2024年1月9日～2月2日の4週間にわたり、ロンドンにあるUniversity College London（UCL）の紅林研究室（Spintronicsグループ）に滞在し、二次元層状物質のデバイス作製技術を学ばせていただきました。


University College Londonの建物

志望動機

私はこれまでバルク単結晶におけるスピントロニクス研究を行ってきましたが、新たに二次元物質に対象を広げることで、更なるスピントロニクス機能の開拓を目指し、今回のインターンシップを志望しました。


大学近くにInstitute of Physics(IOP)の本部がありここでワークショップに参加しました

滞在先での人材交流

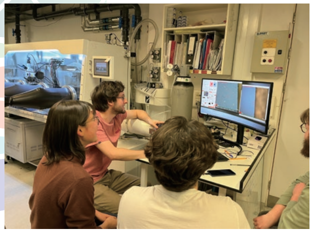
滞在先グループには国籍の異なる多くのPhD学生がおり、互いに協力しながら日々研究を進めていく様子は刺激的でした。私自身同年代の学生らと意見を交わしながら研究を進めていけたことはとても楽しかったです。滞在中にはロンドンで行われたIOPのワークショップに参加させていただく機会もあり、近隣諸国の著名な先生方のお話を聞くことができました。

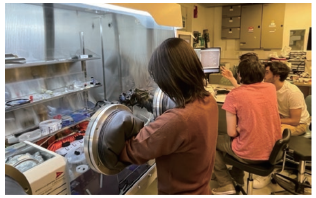

グループ内でのセミナーの様子

研究について

滞在中には主に二次元カイラル磁性体$Cr_{1/3}NbS_2$のデバイス作製に取り組みました。グローブボックス内における劈開、そしてトランスファーシステムを用いた対象サンプルの選定、基板への積層を行うことにより、ホールバーデバイスやPt接合デバイスを作製し、さらに、作製したデバイスを用いてスピントルク強磁性共鳴や磁気抵抗の測定に取り組みました。実際にデバイス作製過程でのトライアンドエラーを繰り返す中で、技術的な困難や気を付けるべき点を学ぶことができました。測定に際してもサンプルの劣化・チャージアップなどに注意を払った慎重な測定が求められる点など、二次元物質デバイスに特有な注意点に気づくことができました。さらに、Fe_3GeTe_2や$CrPS_4$などの他の二次元物質の劈開・トランスファーにも取り組む機会もあり、物質ごとの特徴を汲んだ作業方法の違いについても学ぶことができました。


トランスファーシステムを用いた二次元物質のデバイス作製


トランスファーシステムを用いて物質の選定を行っている様子


グローブボックスでの二次元物質の劈開作業

留学中の生活

UCLはロンドンの中でも中心地に位置しており、研究外の面においても非常に過ごしやすい環境でした。昼食は学校周辺の様々な国のレストランのテイクアウトをみんなで食べたり、休みの日には大英博物館や観劇などにも出かけたりと、日々楽しく充実した生活を送ることができました。


グループメンバーでご飯に行く機会もありました

限られた時間ではありましたが、新しい環境での経験と新しい実験手法の習得は非常に意義深いものでした。今回の滞在で得た知見を生かして、今後は独自の二次元スピントロニクス研究にも取り組んでいきたいと考えています。このような貴重な機会を与えていただいた塩見先生、紅林先生、吾郷先生、そして大学や領域をはじめとする関係の皆様に御礼申し上げます。

Reporter
仲川 久礼亜　東京大学
総合文化研究科
博士課程２年

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2024年 3月 11日）

ニュースレター Vol. 27 （2024.3.26 発行）

NEWS LETTER 27

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

共同研究・国際連携で拡がる 2.5次元物質科学

A04班　物性開拓班　研究分担者
国際連携支援・共同利用拠点運営
(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

修了する学生さんと

先生が進めていらっしゃる研究について教えてください。

高村　私たちの研究室では薄膜や二次元材料を研究しています。成果の中で有名なものはシリセンです。シリセンはグラフェンの炭素原子をケイ素に置き換えた、蜂の巣状の結晶構造をもつ物質で、1994年ぐらいに理論計算でこういうものができてもおかしくないと予言されていました。このシリセンについて、理論の論文はとてもたくさんありましたが、実験でできたという報告は2012年の我々やエクス=マルセイユ大学（仏）のGuy Le Lay先生などの論文が初めてと言われてます。このシリセンの発見ですが、作ろうと思ってできたのではなくて、できているのを発見したというのが実際の経緯です。元々シリコン基板の上に二ホウ化ジルコニウムを成長する研究を進めており、その過程で薄膜の表面構造を走査トンネル顕微鏡(STM)で見ていました。そこで見えたのは想定と異なる構造でした。STMは電子状態の分布を見る顕微鏡で、そこにどんな元素があるのかは分からないもの。そこでいろいろな人と共同研究をしながら、その表面の謎を解いていくうちに、基板から拡散してきたケイ素原子がこの薄膜上に蜂の巣構造をつくっているということが分かり、大発見につながりました。

シリセンとは、どのような材料でしょうか？

高村　シリセンはとても期待値の高い材料です。グラフェンと同じような性質を持つことが電子状態から予見されていて、さらに我々が到達できる程度の低温で2次元トポロジカル絶縁体*1になるという予測もあります。しかし理論で扱われているシリセンは、基板上ではなく真空中に自立したものです。現実世界でシリセンを作ると基板との相互作用があり、理論で予言されてるような性質をなかなか発揮してくれません。シリセンについては、まだまだやることがいろいろあるという状況です。私たちはシリコン基板上に成長させた二ホウ化ジルコニウム上のシリセンを使い、例えば六方晶窒化ホウ素(hBN)と二ホウ化ジルコニウムにサンドイッチされた構造を作る、ゲルマニウムを混ぜて二次元的なアロイを作るといった試みを進めています。

先生はもともと何に興味を持たれて、どのような研究をしていらっしゃいましたか？

高村　小学生の時にNASAがあるヒューストンのクリアレイクシティで暮らしていたこと、高校生の頃に日本初の国産スペースシャトルを作るという話があったことなど、それらが宇宙や工学、材料分野に興味を持つきっかけになっています。また海外の人と働く機会の多かった父から、博士号を持っている人が多いと聞いていました。そのため大学の先生になろうとは思っていませんでしたが、博士号は取ろうと考えていました。

大学ではプラズマプロセスを使って、普通ではできない材料を作る研究に携わり、窒化ホウ素膜を成長させていました。窒化ホウ素には黒鉛とダイヤモンドの関係のように、同じ元素の組み合わせで異なる性質の物質が存在します。六方晶のhBNが炭素系の黒鉛に相当し、立方晶窒化ホウ素（cBN）がダイヤモンドに相当します。ダイヤモンドに次ぐ硬さを持つといわれているcBNは、鉄を加工するときに有効です。ダイヤモンド薄膜に比べると研究しているところは少なく、世界でも研究者が少ない、ちょっとマイナーな材料でした。そのようなcBNに関して、バイアススパッタリングという成長表面にもイオンがエネルギーを持ってぶつかってくる、非平衡プロセスを使って薄膜を作る、そんな研究をしていました。普通ではできない物質が特殊なプロセスを経るとできる、それが面白いと感じていましたね。それは今にも通じていて、二次元材料の中でも普通ではできないようなものを作ること、普通とは違う構造を持つものを見つけることが楽しくて研究しています。

ご担当されている、共同利用拠点についてお聞かせください。

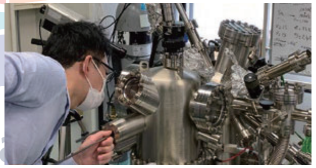
高村　構造の分析拠点では、主に透過電子顕微鏡(TEM)を用いて、いろいろな方のサンプルを見ています。私はどちらかというと走査プローブ顕微鏡が専門ですが、そちらよりもTEMの依頼の方が多く、私が代表を務める北陸先端科学技術大学院大学(JAIST)の文科省マテリアル先端リサーチインフラ事業を通じて、TEM専門の先生に協力してもらっているところです。皆さんのサンプルをTEMで見ると、モアレ構造が回折パターンだけではなく実空間像でも見ることができるので感動します。松田さん(A03)、町田さん(A02)、一番使ってくれてるのは宮田さん(A02)でしょうか。皆さんが工夫を凝らしたサンプルを持ち込んでくださり、こちらが見たことのないものを見ることができて、とても面白い思いをしています。

共同利用拠点の担当者としては、この領域だから開発できた測定法を実現させたいです。TEMの中で電圧をかけた時に構造がどう変化するかを原子分解能で見ていくなど、自分たちで工夫しながら、何か面白い測定ができるように試行錯誤しています。

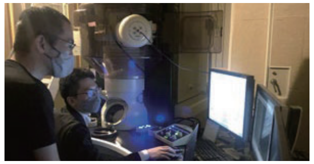
国際連携もご担当し、多くのセミナーを開催していらっしゃいますね。

高村　私が所属しているJAISTは、国際交流しやすい環境が整っている大学です。事務からのメールも全部日英併記ですし、学内も寮も英語に対応しています。共同研究による繋がりやインターンシップで受け入れた学生のつてなど、様々な経緯でいろいろな国の学生が研究に来ていて国際色豊かです。そのような経緯もあり国際連携を担当しています。

国際連携では、日本の二次元材料研究の成果をもっと海外の人々に知ってもらい、一緒に研究することで新しい成果をあげられるといいなと考えています。ワークショップをしていて感じるのは、お互いに相手の研究内容を知るところまではいけているけど、その先に今ひとつ進めてないということ。一部ではいい関係の構築が進んでいるので、さらに相互に行き来ができるようになるとより発展していくのではないかと考えています。



走査プローブ顕微鏡を使った研究の様子



透過電子顕微鏡を使用した共同利用の様子

この分野ではせっかく日本にいい研究者がたくさんいるので、皆さんのことが国際的に知られて欲しいです。これから伸びていく学生さんや若手の方もどんどん成果を出して、世界で活躍してくれるといいなと思っています。

領域活動も後半戦に入りました。今後の活動について一言お願いします。

高村　共同利用拠点からのメッセージとしては、成果になるか分からないから声をかけにくいという気持ちの方がいらしたら、やってみないと分からないので遠慮なく利用して欲しいです。公募班で参加しているメンバーの方々は、短い期間の中でどのように成果に結びつけるか難しい面もあると思います。共同利用拠点は2.5次元領域ならではの取り組みの1つなので、ぜひご活用下さい。お声がけ、お待ちしています！

2.5次元物質の自分の研究に関しては、シリセンやゲルマネンのように、基板の上でしかできない、あるいは非平衡プロセスでしかできない材料を作るのが私たちのオリジナリティだと思っています。そういった積層構造であっと驚くようなものができたらいいですね。

用語説明
＊1 トポロジカル絶縁体：中身は電気を流さない絶縁体、表面（エッジ）は電気を流す金属的性質を持つ物質。その性質は、表面と中身で化学組成が異なる等に起因せず、価電子帯における波動関数のねじれに起因している。

Interviewee

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
教授

ライター：柏田 百代（広報担当）
領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2024年3月26日）

ニュースレター Vol. 28 （2024.3.26 発行）

NEWS LETTER 28

令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
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
2.5D Materials

海外インターンシップレポート３

若手支援　国立台湾師範大学（台湾） 2023. 11. 30 ～ 2023. 12. 5

夏井 隆佑
東京都立大学　宮田研究室（A02班）

2.5次元物質科学領域の支援を受け、2023年11月30日から12月5日までの期間、私は国立台湾師範大学の劉 祥麟（Hsiang-Lin Liu）教授の研究室で、劉教授および東北大学名誉教授で領域アドバイザーでもある齋藤理一郎教授らとともに異なる温度条件下における分光エリプソメトリー測定を行わせていただきました。

志望動機

私の所属する東京都立大学のナノ物性研究室と齋藤理一郎教授は、2022年から三元系遷移金属モノカルコゲナイド（Transition Metal Monochalcogenide, TMM）の一つであるInドープしたW_6Te_6結晶のラマン散乱分光に関する共同研究を行っています。2023年には、この成果をまとめた私たちの論文がACS Nano誌に掲載されました。三元系TMMは、その一次元的な細線構造や結晶の対称性に由来した電子状態が注目を集めています。一方で、分光を用いた実験の研究は報告されていませんでした。今回、国立台湾師範大学の玉山学者特聘教授でもある齋藤先生のご紹介により、劉先生らと共同

進修推廣學院の建物外観

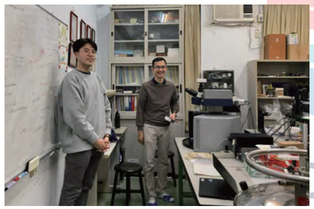
国立台湾師範大学の入口にて

研究する機会をいただいたこともあり、特に、低温での分光エリプソメトリーやラマン分光の測定により、低温における光学相転移の有無が検証できると期待して訪問しました。

滞在先での人材交流

現地では、劉先生の研究室の博士研究員の方から実験手法の詳細を教えていただくことができました。

研究に関する初めての海外の滞在になるため、英語でのコミュニケーションについて最初は不安も大きかったです。しかし、実験手法や原理なども私が理解できないときには図や文章を書いて教えてくれるなど、大変親切に対応していただきました。



親切にレクチャーいただきました

研究について

劉先生の研究室の方々の協力のもと、異なる温度条件下でのW_6Te_6の光学特性についてデータを無事に収集することができました。また、得られたスペクトルの解析手法を教わりながら、温度に依存したピークの強度や位置の変化についてまとめ、滞在中に劉先生らと議論をすることもできました。今後も引き続き共同研究を継続し、本物質系における新たな知見が得られると期待しています。

齋藤理一郎先生によるレクチャー

留学中の生活

研究以外にも、台北では大変に楽しい滞在となりました。台湾師範大学は台北市内にあり、空港からは地下鉄で40分ほどの場所にあります。大学内には、日本のビジネスホテルのような宿泊施設もあり快適に滞在することができました。宿舎の近くには師大夜市と呼ばれる有名な市場があります。この市場では、夕方から夜にかけて賑わう屋台が立ち並ぶ市場があり、台湾師範大学の学生と思われる多くの若者がこの夜市を楽しんでいるようでした。このような賑やかな雰囲気を日常で楽しめる台湾師範大学の学生が羨ましく感じられました。

賑わいを見せる師大夜市の様子

また、休日には齋藤先生に台北市内を案内いただきました。歴史ある寺院である龍山寺や国立中正紀念堂、そして魯肉飯、ガチョウ肉の燻製、乾扁四季豆（いんげん炒め）などの日本では味わったことのない食を体験することができました。

ガチョウ肉の燻製 もちもちでジューシーな味わいでした

国立中正紀念堂にて

今回、このような貴重な機会を与えていただいた宮田先生、齋藤先生、劉先生、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。

Reporter

夏井 隆佑　東京都立大学
大学院理学研究科
物理学専攻
修士課程２年

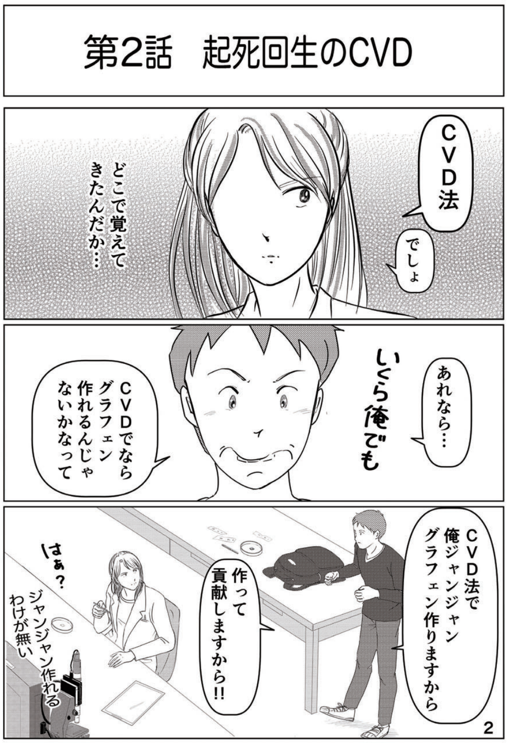
領域ホームページ https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2024年 3月 26日）

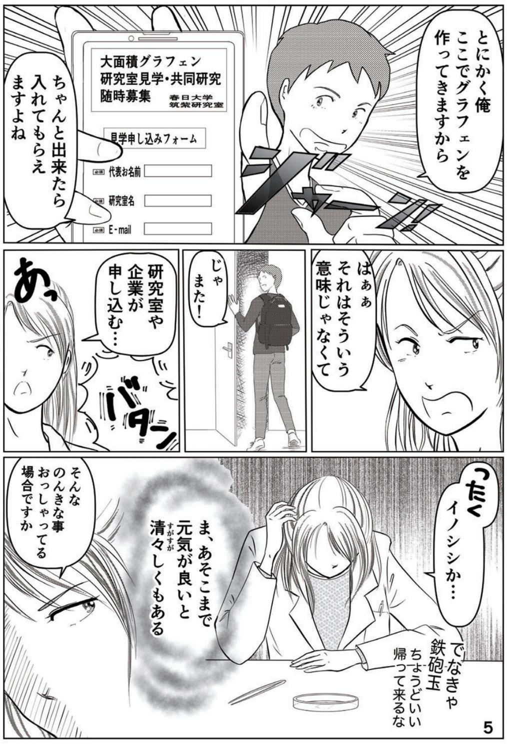
7-2
ニュースレター特別号　第１話（抜粋）［2022.10.27 公開］

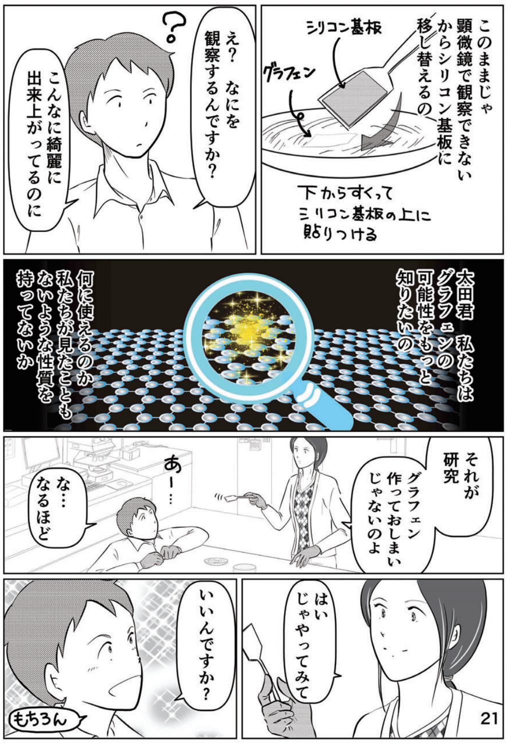
※2021-2022活動報告に未掲載のため、本活動報告にて掲載しました

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２話（抜粋）［2023.1.12 公開］



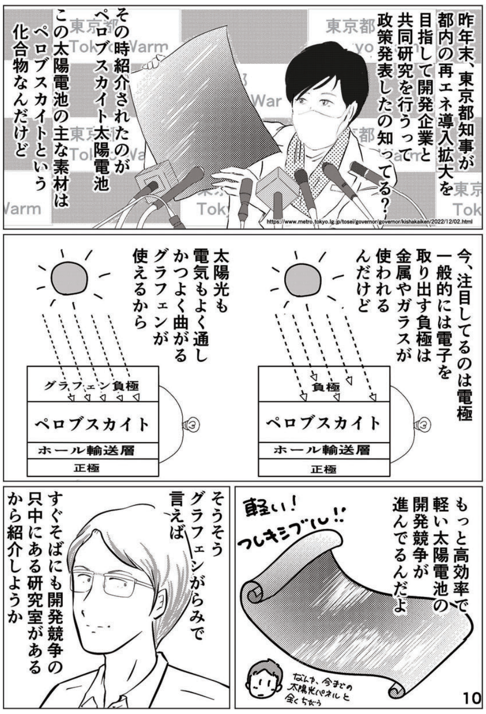




※2021-2022活動報告に未掲載のため、本活動報告にて掲載しました

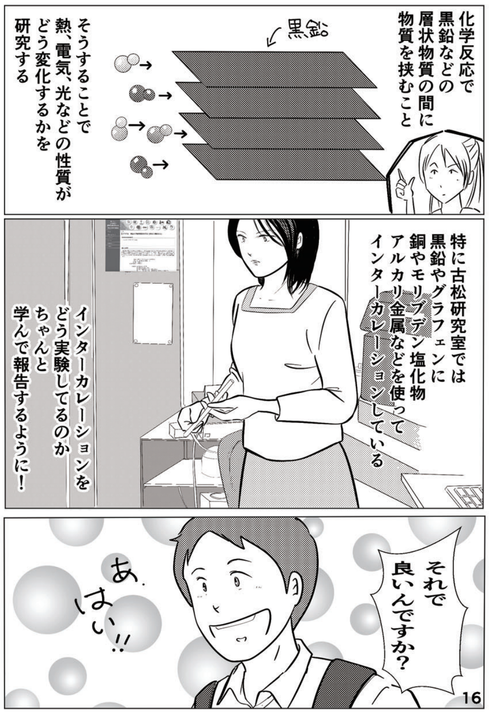
連載マンガ「２.５次元研究室へようこそ」https://25d-materials.jp/outreach/newsletter_manga/

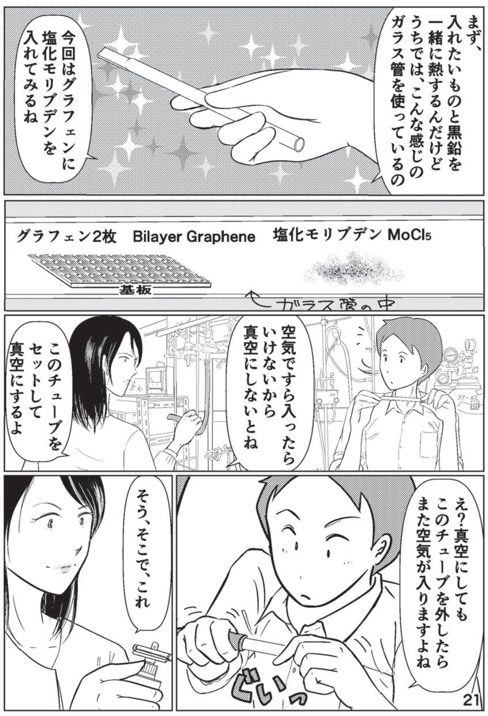
ニュースレター特別号 第３話（抜粋）［2023.5.25 公開］



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

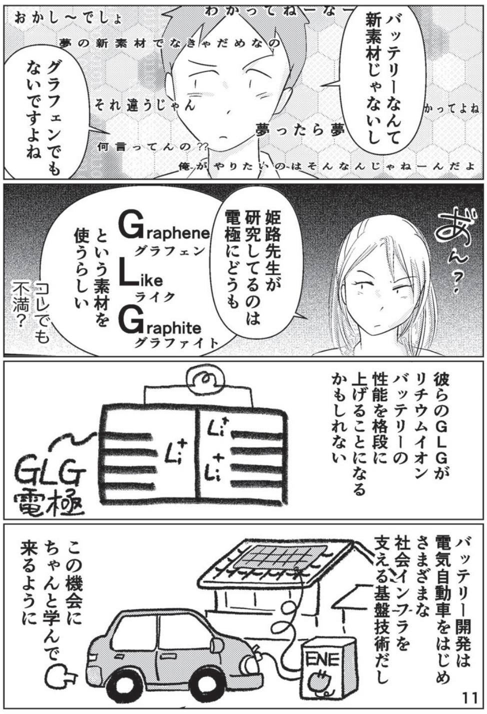
ニュースレター特別号 第４話（抜粋）［2023.9.29 公開］

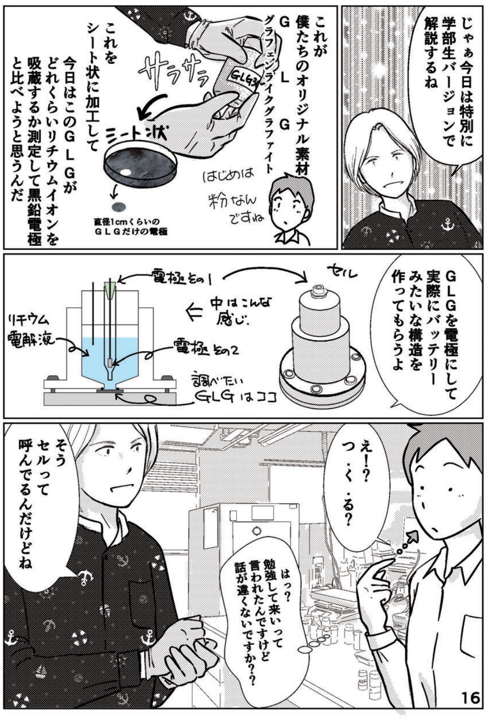




連載マンガ「２.５次元研究室へようこそ」https://25d-materials.jp/outreach/newsletter_manga/

ニュースレター特別号 第５話（抜粋）［2024.2.29 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/

８．　海外派遣報告

８． 海外派遣報告

A02 宮田研 夏井 隆佑 さん（東京都立大学 大学院理学研究科物理学専攻Ｍ２）

派遣期間：2023 年 11 月 30 日～2023 年 12 月 5 日

派 遣 先 ：国立台湾師範大学（台湾）

「2.5 次元物質科学」領域の支援を受け、2023 年 11 月 30 日から 12 月 5 日までの期間、私は国立台湾師範大学の劉 祥麟（Hsiang-Lin Liu）教授の研究室で、劉教授および東北大学名誉教授で領域アドバイザーでもある齋藤理一郎教授らとともに、異なる温度条件下における分光エリプソメトリー測定を行わせていただきました。

私の所属する東京都立大学のナノ物性研究室と齋藤理一郎教授は、2022 年から三元系遷移金属モノカルコゲナイド（Transition Metal Monochalcogenide, TMM）の一つである In ドープした W_6Te_6 結晶のラマン散乱分光に関する共同研究を行っています。2023 年には、この成果をまとめた私たちの論文が ACS Nano 誌に掲載されました。三元系 TMM は、その一次元的な細線構造や結晶の対称性に由来した電子状態が注目を集めています。一方で、分光を用いた実験の研究は報告されていませんでした。今回、国立台湾師範大学の玉山学者特聘教授でもある齋藤先生のご紹介により、劉先生らと共同研究する機会をいただいたこともあり、特に、低温での分光エリプソメトリーやラマン分光の測定により、低温における光学相転移の有無が検証できると期待して、領域インターンシップを志望しました。

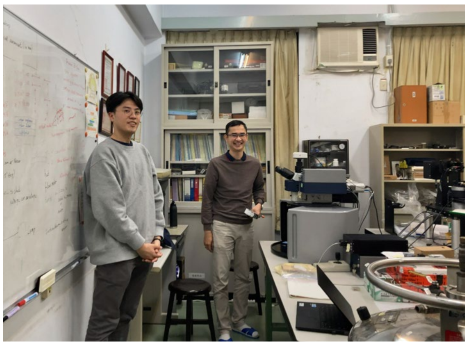
国立台湾師範大学の入口にて

進修推廣學院の建物外観

現地では、劉先生の研究室の博士研究員の方から実験手法の詳細を教えていただくことができました。研究に関する初めての海外の滞在になるため、英語でのコミュニケーションについて最初は不安も大きかったです。しかし、実験手法や原理なども私が理解できないときには図や文章を書いて教えてくれるなど、大変親切に対応していただきました。

このような協力のもと、異なる温度条件下での W_6Te_6 の光学特性についてデータを無事に収集することができました。また、得られたスペクトルの解析手法を教わりながら、温度に依存したピークの強度や位置の変化についてまとめ、滞在中に劉先生らと議論をすることもできました。

今後も引き続き共同研究を継続し、本物質系における新たな知見が得られると期待しています。



親切にレクチャーいただきました

齋藤理一郎先生によるレクチャー

研究以外にも、台北では大変に楽しい滞在となりました。台湾師範大学は台北市内にあり、空港からは地下鉄で 40 分ほどの場所にあります。大学内には、日本のビジネスホテルのような宿泊施設もあり快適に滞在することができました。宿舎の近くには師大夜市と呼ばれる、有名な市場があります。この市場では、夕方から夜にかけて賑わう屋台が立ち並び、台湾師範大学の学生と思われる多くの若者がこの夜市を楽しんでいるようでした。このような賑やかな雰囲気を日常で楽しめる台湾師範大学の学生が羨ましく感じられました。

賑わいを見せる師大夜市の様子

ガチョウ肉の燻製　もちもちでジューシーな味わいでした

また、休日には齋藤先生に台北市内を案内いただきました。歴史ある寺院である龍山寺や国立中正紀念堂、そして魯肉飯、ガチョウ肉の燻製、乾煸四季豆（いんげん炒め）などの日本では味わったことのない食を体験することができました。

国立中正紀念堂にて

今回、このような貴重な機会を与えていただいた宮田先生、齋藤先生、劉先生、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。

A04 塩見研 仲川 久礼亜 さん（東京大学 総合文化研究科Ｄ２）

派遣期間：2024 年 1 月 9 日～2024 年 2 月 2 日

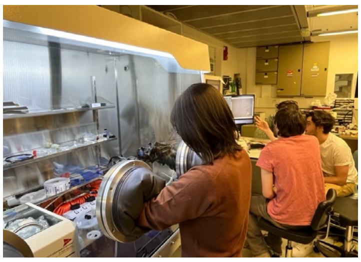
派 遣 先：University College London (イギリス)

2.5 次元物質科学領域の支援を受け、2024 年 1 月 9 日~2 月 2 日の 4 週間にわたり、ロンドンにある University College London (UCL) の紅林研究室(Spintronics グループ)に滞在し、二次元層状物質のデバイス作製技術を学ばせていただきました。私はこれまでバルク単結晶におけるスピントロニクス研究を行ってきましたが、新たに二次元物質に対象を広げることで、更なるスピントロニクス機能の開拓を目指し、今回のインターンシップを志望しました。

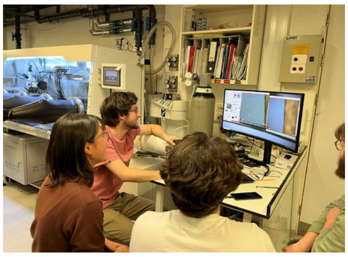
University College London の建物

グループ内でのセミナーの様子

滞在中には主に二次元カイラル磁性体 Cr$_{1/3}$NbS$_2$ のデバイス作製に取り組みました。グローブボックス内における劈開、そしてトランスファーシステムを用いた対象サンプルの選定、基板への積層を行うことにより、ホールバーデバイスや Pt 接合デバイスを作製し、さらに、作製したデバイスを用いてスピントルク強磁性共鳴や磁気抵抗の測定に取り組みました。実際にデバイス作製過程でのトライアンドエラーを繰り返す中で、技術的な困難や気を付けるべき点を学ぶことができました。測定に際してもサンプルの劣化・チャージアップなどに注意を払った慎重な測定が求められる点など、二次元物質デバイスに特有な注意点に気づくことができました。さらに、Fe$_5$GeTe$_2$や CrPS$_4$などの他の二次元物質の劈開・トランスファーにも取り組む機会もあり、物質ごとの特徴を汲んだ作業方法の違いについても学ぶことができました。



グローブボックスでの二次元物質の劈開作業



トランスファーシステムを用いて物質を選定

トランスファーシステムで二次元物質のデバイスを作製

滞在先グループは国籍の異なる多くの PhD 学生がおり、互いに協力しながら日々研究を進めていく様子は刺激的でした。私自身同年代の学生らと意見を交わしながら研究を進めていけたことはとても楽しかったです。滞在中にはロンドンで行われた IOP のワークショップに参加させていただく機会もあり、近隣諸国の著名な先生方のお話を聞くことができました。

ワークショップが行われた
Institute of Physics(IOP)の本部

グループメンバーでご飯に行く機会もありました

UCL はロンドンの中でも中心地に位置しており、研究外の面においても非常に過ごしやすい環境でした。昼食は学校周辺の様々な国のレストランのテイクアウトをみんなで食べたり、休みの日には大英博物館や観劇などにも出かけたりと、日々楽しく充実した生活を送ることができました。

限られた時間ではありましたが、新しい環境での経験と新しい実験手法の習得は非常に意義深いものでした。今回の滞在で得た知見を生かして、今後は独自の二次元スピントロニクス研究にも取り組んでいきたいと考えています。このような貴重な機会を与えていただいた吾郷先生、塩見先生、紅林先生、そして大学や領域をはじめとする関係の皆様に御礼申し上げます。

9．　共同利用拠点

9． 共同利用拠点

9-1　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5カ所に設置している。

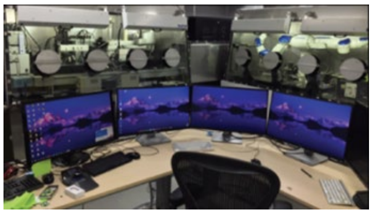
各拠点における装置や運用方法については、以下の表の通り。

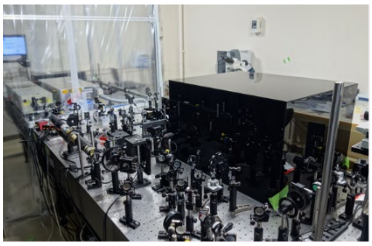
「2.5次元物質科学」領域　共同利用拠点一覧

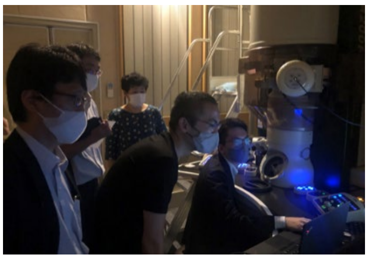
<table>
<tr><th>拠点</th><th>装置</th><th>運用方法</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="2">合成拠点

九州大学
グローバルイノベーションセンター
吾郷研究室</td><td>CVD合成装置、およびその関連装置</td><td>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）</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">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</td></tr>
<tr><td rowspan="2">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</td><td>二次元物質積層システム</td><td>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</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">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</td></tr>
<tr><td rowspan="2">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</td><td>温度可変先端分光装置およびその関連装置</td><td>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）</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">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）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">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</td><td>超高真空走査プローブ顕微鏡および透過電子顕微鏡</td><td>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）</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">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</td></tr>
</table>

9-2　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。

半期ごとの各拠点の利用回数について、昨年度までは上昇傾向であったため、拠点を利用した領域内共同研究の活性化が見受けられたが､2023 年度前期においては利用回数が減少した。これは公募班の利用が落ち着いたこと、ならびに研究が成果発表に向けた次のフェーズへと進んだためとみられる。しかしながら、2023 年度後期においても 40 件以上の高い水準で活用されているのがわかる。

また、第 2 期公募班募集のための説明会終了後に実施したアンケートでは、共同利用拠点の設備や利用体制に関する好意的な意見が多数寄せられた。

2024 年度は第 2 期公募班の始動と共同利用拠点の拡充を予定しているため、再び利用数の増加が見込まれ、本領域でのさらなる共同研究推進と成果創出のため、利用の呼びかけを活発化させる予定である。

■内容別利用回数／半期　（回）

利用方法	2021年 後期	2022年 前期	2022年 後期	2023年 前期	2023年 後期
サンプル提供	11	14	24	15	18
依頼分析	0	3	10	0	0
訪問実験	31	35	27	27	21
利用相談	2	0	1	1	1
その他	1	1	0	0	5
利用回数 合計（回）	45	53	62	43	45

＊前期：当年4/1～9/30　後期：当年10/1～翌年3/31

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