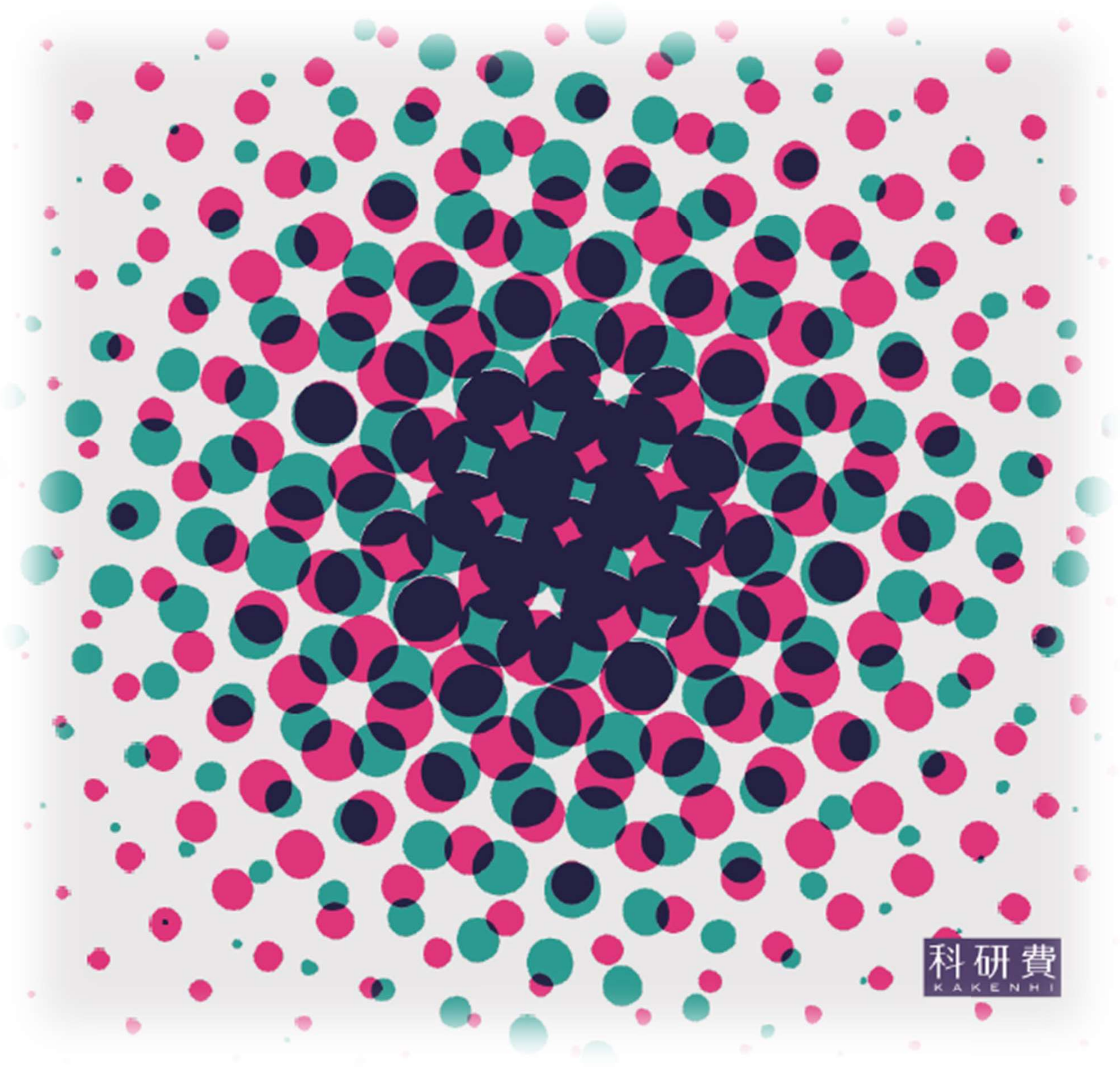
2.5D Materials

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

2021-2022年度 活動報告



2021・2022 年度　活動報告　　目次

１． はじめに

はじめに

2021-2022 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も 2023 年 8 月で丸 2 年になります。20 名の計画班のメンバー、4 名の領域アドバイザー、2 名の学術調査官の方々の協力の下、スタートした本領域も、2022 年 6 月に公募研究者 21 名を迎えて、計 41 名の研究者からなる大きなチームとなり、日本の低次元物質研究を支える研究組織となりました。

領域形成の意義は、分野をまたいだ共同研究にあるという私自身の考えで、「Boundary（境界）」をキーワードに共同研究を強く推奨してきました。その結果、今では数えきれないほど多くの共同研究が有機的に行われるようになりました。公募研究者も巻き込んだダイナミックな共同研究を通じて、これから、世界をリードする新たな研究成果が領域から次々と生み出されてくるものと信じています。

組織としても、領域内外との共同研究を強く後押しして、学術研究を推進することを目的に、年 2 回の領域会議をはじめ、サンプル見本市、理論説明会、若手の会、領域セミナー、サイトビジット、他の学会等との共催イベントなど様々な企画を行ってきました。領域のもう一つの目標である社会変革に向けても、産業界の研究者ともミーティングを行っています。さらに、国際共同研究の推進や国際的なプレゼンス向上のため、オンラインを活用した国際ワークショップや国際セミナー、国際会議への積極的な参加なども行いました。最近では、「2.5D materials」というユニークな名前のおかげもあり、本領域の国際的な認知度や期待が高まっていることを感じます。

領域開始から 1 年半の領域の活動を総括し、領域の活動と研究成果を広く知っていただくため、本報告書を作成しました。本報告書が、新たな研究の萌芽や分野をまたいだ共同研究のきっかけとなるとともに、本分野のさらなる興隆を通じて日本の科学技術の発展に寄与することを期待しています。

最後になりますが、文部科学省、関係者のご支援に厚くお礼申し上げるとともに、これからの領域への一層のご支援、ご協力をお願いできれば幸いです。

2023 年 7 月吉日

「2.5次元物質化学：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（九州大学主幹教授）

2．　活動内容

2. 活動内容

2021 年 9 月 10 日　交付内定

2-1 総括班会議

2021 年 9 月 11 日	第 0 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2021 年 10 月 4 日	第 1 回領域ミーティング［計画班］（オンライン）
2021 年 11 月 13 日	第 2 回領域ミーティング［総括班］（九州大学）
2021 年 12 月 3 日	第 3 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2022 年 2 月 22 日	第 4 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2022 年 4 月 5 日	第 5 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2022 年 6 月 14 日	第 6 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2022 年 7 月 19 日	第 7 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2022 年 9 月 30 日	第 8 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2022 年 10 月 14 日	第 9 回領域ミーティング［総括班］（北海道大学）
2023 年 1 月 4 日	第 10 回領域ミーティング［総括班］（オンライン）
2023 年 3 月 14 日	第 11 回領域ミーティング［総括班］（つくば国際会議場）
2023 年 3 月 30 日	第 12 回領域ミーティング［計画班］（オンライン）

2-2 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。

2-2-1 第 1 回領域会議（キックオフミーティング）

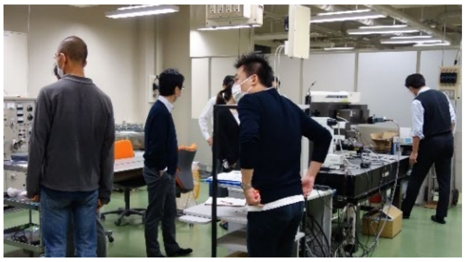
対面での議論を重視し、新型コロナウィルス感染症が小康状態にあった 2021 年 11 月に計画班研究者 20 名全員が集い、個々の研究内容の紹介と共同研究推進のための議論を行った。

日時：2021 年 11 月 13 日
場所：九州大学 グローバルイノベーションセンター 研修室

プログラム

9:00～ 9:05	開会挨拶（吾郷）
9:05～10:10	A01 班発表
10:20～11:20	A02 班発表
11:30～12:30	A03 班発表
	写真撮影、昼食休憩（総括班ミーティング/ラボツアー）*
13:20～14:20	A04 班発表

14:30～15:30　A05 班発表
15:40～17:00　フリーディスカッション（第 1 部：共同研究）
17:10～19:30　フリーディスカッション（第 2 部：領域運営）
19:30～19:35　閉会挨拶（岡田）
*総括班ミーティング開催 12:35～13:20



キックオフミーティングとラボツアーの様子

2-2-2　第 2 回領域会議

京都大学で対面での開催をするべく準備していたが、新型コロナウィルス感染症が蔓延していたため急遽オンラインでの開催に切り替え実施した。評価委員の先生方および学術調査官にもご参加いただき、領域研究や領域運営についてご意見を賜った。

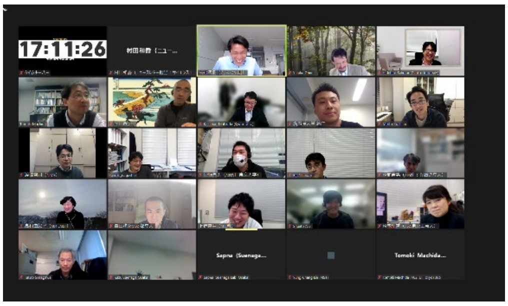
日時：2022 年 3 月 7 日～8 日
場所：オンライン（Zoom）

<u>プログラム　2022 年 3 月 7 日</u>
9:00～ 9:05　開会挨拶（吾郷）

9:05～ 9:10　領域アドバイザー、学術調査官の御紹介と御挨拶
9:10～10:50　A05 班発表
11:10～12:50　A04 班発表
写真撮影、昼食休憩（総括班ミーティング）*
13:50～15:30　A03 班発表
15:50～16:40　A02 班(１)発表
16:40～17:30　フリーディスカッション１（領域運営）
17:30～18:15　フリーディスカッション２（共同研究等：ブレークアウトルーム）
18:15～19:45　バーチャル懇親会（Remo）
*総括班ミーティング開催 13:00～13:50

プログラム　2022 年 3 月 8 日
9:00～ 9:50　A02 班(２)発表
9:50～10:15　A01 班(１)発表
10:35～11:50　A01 班(２)発表
11:50～12:20　フリーディスカッション３（共同研究：ブレークアウトルーム）
12:20～12:35　領域アドバイザー、学術調査官よりコメント
12:35～12:40　閉会挨拶（岡田）

オンライン領域会議での集合写真



全体会議(ﾌﾘｰﾃﾞｨｽｶｯｼｮﾝ)の様子

2-2-3　第３回領域会議

第１期公募研究者が加わってから初の領域会議であったため、公募研究の個々研究内容の紹介に重点を置いた。PI１名当たり最大２名までの帯同を可として 82 名が参加した。また、今回より PI1 名につき１枚のポスター発表を実施。発表の合間の休憩時間を長く設定してフリーディスカッションの時間とすることにより、多くの共同研究に繋がる議論が交わされた。

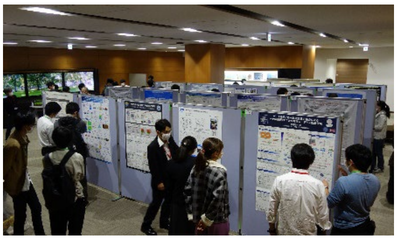
日時：2022 年 10 月 14 日～15 日
場所：北海道大学　フロンティア応用科学研究棟 レクチャーホール

プログラム　2022 年 10 月 14 日

9:30～ 9:35　開会挨拶（上野）
9:35～ 9:50　領域説明（吾郷）
9:50～10:20　A04 計画研究班 発表
10:20～11:05　A04 公募研究班 発表
11:35～12:05　A05 計画研究班 発表
12:05～13:05　A05 公募研究班 発表
昼食休憩（総括班ミーティング）*
14:05～14:35　A01 計画研究班 発表
14:35～15:20　A01 公募研究班(１) 発表
16:00～17:00　A01 公募研究班(２) 発表
17:00～18:30　ポスター発表
19:00～21:00　懇親会
*総括班ミーティング開催 13:05～14:05

プログラム　2022 年 10 月 15 日

9:00～ 9:30　A03 計画研究班 発表
9:30～10:30　A03 公募研究班 発表
11:10～11:40　A02 計画研究班 発表
11:40～12:25　A02 公募研究班 発表
12:25～12:40　全体会議（吾郷）
12:40～12:55　講評（領域アドバイザー、学術調査官）
12:55～13:00　閉会挨拶（岡田）



第 3 回領域会議の様子

第 3 回領域会議での集合写真

2-2-4　第 4 回領域会議

初の大学外の施設での開催となった第 4 回領域会議は、領域内限定にも関わらず 96 名の参加者で賑わった。前回同様、PI 全員が口頭発表を行う形式で共同研究の成果や進捗に関して報告した。さらに今回より若手のエンカレッジを目的としてポスター発表の場で「若手奨励賞」を設け、PI による審査により 7 名の学生に授与された。

日時：2023 年 3 月 13 日～14 日
場所：つくば国際会議場　１階　大会議室

プログラム　2023 年 3 月 13 日

9:30～ 9:35　開会挨拶（岡田）
9:35～ 9:45　領域説明（吾郷）
9:45～11:00　A01 班① 発表
11:30～13:00　A01 班② 発表
昼食休憩
14:00～15:00　ポスター発表
15:00～16:30　A03 班① 発表
17:00～17:30　A03 班② 発表
17:30～18:45　A02 班① 発表
19:00～21:00　懇親会

プログラム　2023 年 3 月 14 日

9:00～ 9:30　A02 班② 発表
9:30～10:15　A04 班① 発表
10:45～11:45　A04 班② 発表
11:45～12:15　A05 班① 発表
昼食休憩（総括班ミーティング）*
13:30～15:00　A05 班② 発表
15:00～15:20　講評（領域アドバイザー、学術調査官）
15:20～15:40　閉会式（若手奨励賞表彰式）
*総括班ミーティング開催 12:15～13:30




第 4 回領域会議の様子


第 4 回領域会議での集合写真

若手奨励賞 受賞者［７名］

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」

若手奨励賞受賞者の皆さん と 表彰式の様子

2-3　若手交流会

若手研究者、及び学生の交流を通じた領域の活性化を目指し、第1回若手交流会を名古屋大学において開催した。全国から26名の若手研究者と学生が対面で参加し、研究交流や友好を深めることにより新たな共同研究の芽となる貴重な機会となった。

日時：2022年6月17日
場所：名古屋大学 ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー 3階ラウンジ

<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）13：10～
3．フリーディスカッション・共同研究相談　～16：00
4．竹延研究室　ラボツアー　16：00～17：00頃
5．フリーディスカッション・共同研究相談　～17：55
6．閉会挨拶（宮田）　17：55～
7．（自由参加）大野研究室　ラボツアー　18：00～19：00頃

若手交流会の様子

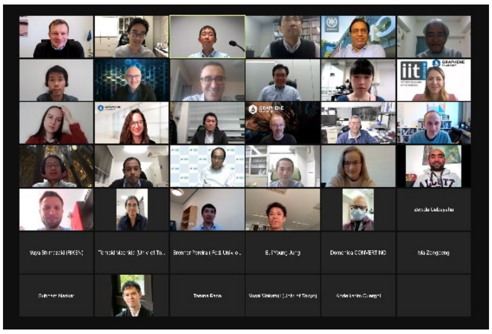
2-4　　国際ワークショップ

米国、EU 諸国、そしてアジア（中国・韓国）の研究者とのワークショップを実施し、二次元物質、2.5 次元物質研究の世界的な動向の把握および研究に関する情報収集を行い、国際的なネットワークを強化し連携を深めた。

2-4-1　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 として参加している。

5th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials
日時：2021 年 10 月 25 日（日本時間）
場所：オンライン
領域代表の吾郷が「2.5 次元物質科学」の発足について紹介、A02 宮田と A03 坂野が講演を行った。

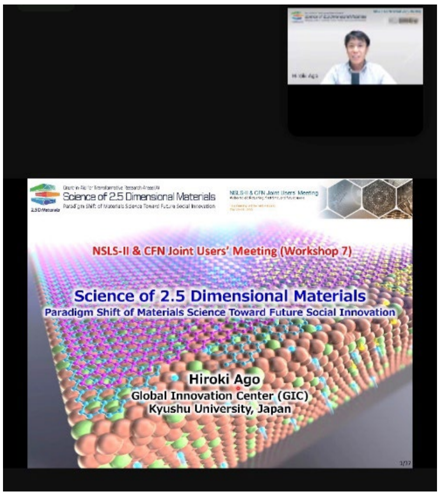


Workshop ウェブサイトのトップページと参加者の集合写真

2-4-2　米国ブルックヘヴン国立研究所とのワークショップ

米国ブルックヘヴン国立研究所の NSLS-II & CFN Joint Users' Meeting 内で、本領域と先方の共用施設の科学者とのオンラインワークショップを開催した。A04 高村がオーガナイザーとして参加、領域代表の吾郷が基調講演を、A02 町田、宮田、A03 松田、A04 越野が講演を行った。事前に 250 名近い参加登録があり、今回の NSLS-II&CFN Joint Users' Meeting の中では最大規模のワークショップとなった。

2D Materials and Beyond（Workshop 7）
日時：2022 年 5 月 25 日～26 日（日本時間）
場所：オンライン［一般公開］



ワークショップのチラシと当日の講演の様子

2-4-3　新材料に関する A3 シンポジウム　［https://www.f.waseda.jp/noda/A3/］

ナノカーボンや 2 次元材料、およびその他の関連するナノ材料について、アジア 3 カ国のトップサイエンティストが今後の方向性や連携の可能性について議論し、国際的な研究ネットワークを強化するためシンポジウムを本領域が共催となり行った。なお、A01 吾郷、A03 松田、A05 大野が組織委員会として活動している。

The 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment
日時：2022 年 11 月 7 日～9 日
場所：早稲田大学＋オンライン
A03 松田、A02 北浦、A03 柳、A05 大野、A02 宮田、A01 吾郷が講演を行った。

A3 シンポジウムでの集合写真

2-4-4　日中韓フォーサイトプログラム　［http://a3-2dmaterials.jp/］
２次元物質とそのファンデルワールスヘテロ構造の物性と機能開拓

二次元物質科学分野において、日本・中国・韓国の若手研究者間の組織的交流を促進し、共同研究により新しい学理を創出するとともに、3 カ国を中核とした世界トップ研究拠点の構築することを目的とした交流研究プロジェクトで、本領域から A03 末永、A02 町田、A03 松田、A01 加藤俊顕、領域代表 吾郷が日本メンバーとして名を連ねている。

第 9 回 2 次元材料国際ワークショップ
日時：2022 年 2 月 17 日～18 日
場所：オンライン
A04 高村、A03 坂野、A04 蒲江、A01 吾郷が招待講演を行った。

第 10 回 2 次元材料国際ワークショップ
日時：2022 年 7 月 5 日～7 日
場所：オンライン
A03 末永、A04 越野、A02 町田が招待講演を行い、領域代表の吾郷がパネルディスカッションに参加した。A05 長汐研の Ngamprapawat さん、A02 宮田研の中西さんも講演を行った。

2-4-5　チェコ共和国 Nanocarbon consortia とのワークショップ

本領域とチェコ共和国の Nanocarbon consortia との国際合同セミナーを開催した。A04 高村がオーガナイザーとして企画し、A01 吾郷、A03 松田、A05 大野が講演を行った。

Joint Japanese – Czech seminar: 2.5D Materials – Nanocarbon
日時：2022 年 12 月 5 日（日本時間）
場所：オンライン［一般公開］

Workshop のチラシ

2-5　国際連携セミナー（領域内限定）

A04 高村のアレンジにより、いずれもオンライン(Zoom)にて 5 回の国際連携セミナーを実施した。２.５次元物質に関連した研究の海外における動向の把握、国際的な共同研究の推進、若手研究者や学生の国際的な人材育成を目的に、海外で活躍する研究者や外国人研究者を講演者とするセミナーを開催した。

［日本時間］

2022 年 3 月 15 日　第 1 回国際連携セミナー
Dr. Jurek Sadowski（米国ブルックヘブン国立研究所）
講演題目：“CFN and NSLS-Ⅱ:User facilities for 2D materials and beyond”

2022 年 7 月 27 日　第 2 回国際連携セミナー
Dr. Hisato Yamaguchi（米国ロスアラモス国立研究所）
講演題目:「若手の方が２.５次元プロジェクトから学べると思うこと～海外研究者の視点から～」

2022 年 10 月 21 日　第 3 回国際連携セミナー
Prof. Andrew J. Mannix（米国 Stanford 大学）
講演題目：“Robotic In-Vacuum Assembly of 2D Materials Heterostructures”

2022 年 11 月 29 日　第 4 回国際連携セミナー
Prof. Jana Kalbacova Vejpravova（チェコ共和国 カレル大学）
講演題目：“Research on van der Waals Materials in NANOCARBON Group – Chemistry meets Physics”

2023 年 1 月 25 日　第 5 回国際連携セミナー
Dr. Anouar Benali（米国アルゴンヌ国立研究所）
講演題目：“Towards predictive simulations of molecules and solids in the era of exascale computing”

2-6　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、第１回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、研究シーズや今後の展望を議論し、組織を超えた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参加、A05 大野が講演を行った。

日時：2022 年 7 月 15 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　基調講演１（公開）
久保利隆（産業技術総合研究所）
13:45-14:30　基調講演２（公開）
大野雄高（名古屋大学）
14:45-15:15　企業からの講演（公開）
保井淳（日東電工株式会社）
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）
学術変革領域研究の活動紹介
技術開発の加速や連携研究に関する議論
講演者との議論など
18:00-20:00　意見交換会（非公開）

koine ミーティングのチラシ

２-７　　STAM 誌への論文掲載

国際誌 *Science and Technology of Advanced Materials (STAM)*に、領域代表 吾郷、A01 岡田、A02 宮田、A03 松田、A04 越野、A05 上野、長汐が執筆した「２.５次元物質科学」のレビュー論文がオープンアクセスにて掲載され、学術系のニュースを扱う多数のサイトからプレスリリースが配信された。国内ジャーナルトップクラスのインパクトファクターをもつ STAM 誌（IF＝8.090）への掲載により、世界の材料科学研究に強い影響力を与えるとともに、「２.５ D materials」という新たな word を世界にアピールすることができた。

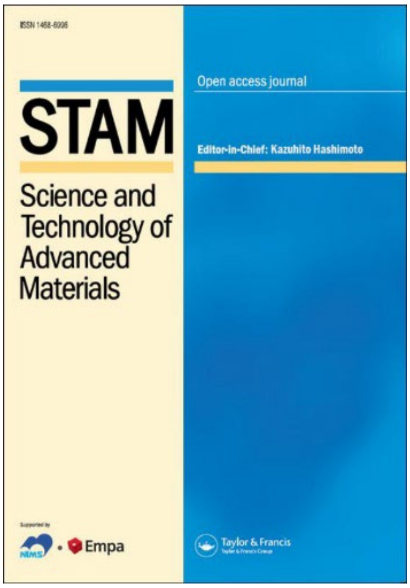
論文情報

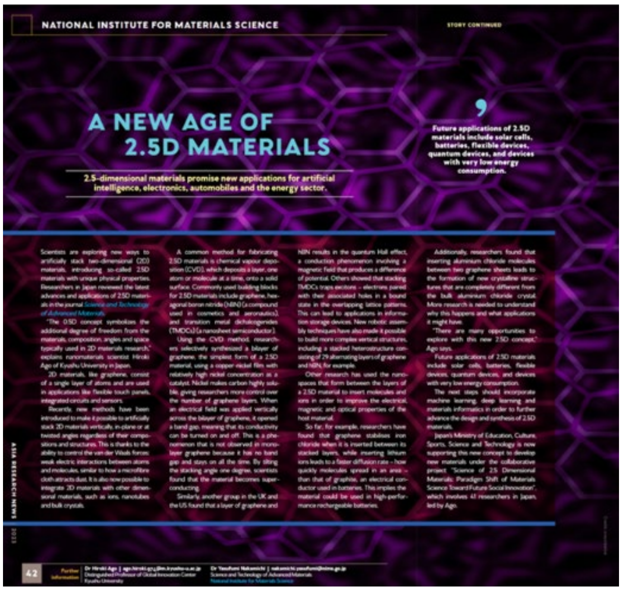
“Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation”

Hiroki Ago*, Susumu Okada, Yasumitsu Miyata, Kazunari Matsuda, Mikito Koshino, Kosei Ueno and Kosuke Nagashio

Science and Technology of Advanced Materials, 23, 275-299 (2022)

https://doi.org/10.1080/14686996.2022.2062576（オープンアクセス）





STAM 誌表紙と Editor's Choice 2022（Asia Research News 2023）の記事

2-8　学術変革領域研究(A)「2.5次元物質科学」領域紹介と公募研究の説明会

第１期公募研究班募集に際し、オンラインにて「2.5次元物質科学」の領域紹介および公募研究に関する説明会を開催した。事前参加登録のあった 130 名に向けて、領域全体や各班の紹介、公募研究へ期待することや事前に受け付けた質問への回答などを説明した。都合により参加できなかった方のために、後日、領域ホームページ内に動画を掲載した。

日時：2021 年 12 月 8 日（水）13:30～15:00
場所：オンライン（Zoom）

プログラム

13:00～13:45　領域の紹介（領域代表：吾郷 浩樹）
13:45～13:50　A01 班（物質創製班）の紹介（研究代表：岡田 晋）
13:50～13:55　A02 班（集積化班）の紹介（研究代表：宮田 耕充）
13:55～14:00　A03 班（分析班）の紹介（研究代表：松田 一成）
14:00～14:05　A04 班（物性開拓班）の紹介（研究代表：越野 幹人）
14:05～14:10　A05 班（機能創出班）の紹介（研究代表：上野 貢生）
休憩
14:30～14:40　公募研究に期待すること（吾郷）
14:40～15:00　質疑応答（吾郷・岡田・宮田・松田・越野・上野）

［公募研究 募集情報ページ］https://25d-materials.jp/info/details/

2-9　領域内共同研究セミナー

公募研究班の採択後より、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開催した。基本金曜日のランチタイムを利用し、発表者は持ち回りで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。領域内限定とし、各回 30～40 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た。

時間：12:10～12:35　発表
　　　12:35～12:50　質疑応答

第 1 回	2022 年 7 月 1 日	A03　西堀 英治 「SPring-8/SACLA の利用に関する紹介」
第 2 回	2022 年 7 月 15 日	A05　長汐 晃輔 「Si を酸化して電気的安定な SiO_2形成。2D の酸化をどう考える？」
第 3 回	2022 年 7 月 29 日	A04　笹川 崇男 「2.5D 用 vdW 単結晶素材の紹介」
第 4 回	2022 年 8 月 5 日	A03　杉本 宜昭 「AFM による局所構造解析の紹介」
第 5 回	2022 年 8 月 19 日	A01　毛利 真一郎 「（架橋）グラフェン上の金属蒸着や結晶成長についての研究の紹介」
第 6 回	2022 年 8 月 26 日	A04　若林 克法 「2.5 次元物質の光学応答の理論」
第 7 回	2022 年 9 月 16 日	A01　吾郷 浩樹 「2.5 次元領域の立ち上げの経緯とこれからへの期待」
第 8 回	2022 年 9 月 30 日	A01　蓬田 陽平 「2.5 次元遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブの紹介」
第 9 回	2022 年 10 月 28 日	A01　岡田 晋 「物質種とネットワークトポロジーによる電子物性デザイン」
第 10 回	2022 年 11 月 25 日	A03　高橋 康史 「走査型電気化学セル顕微鏡による局所電気化学計測の紹介」
第 11 回	2022 年 12 月 26 日	A02　宮田 耕充 「遷移金属ダイカルコゲナイドの成長と集積化」
第 12 回	2023 年 1 月 20 日	A04　越野 幹人 「モアレフォノンの理論」
第 13 回	2023 年 2 月 24 日	A02　町田 友樹 「原子層の劈開・転写・量子輸送」
第 14 回	2023 年 3 月 31 日	A05　上野 貢生 「プラズモンの化学：2.5 次元物質への展開」

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

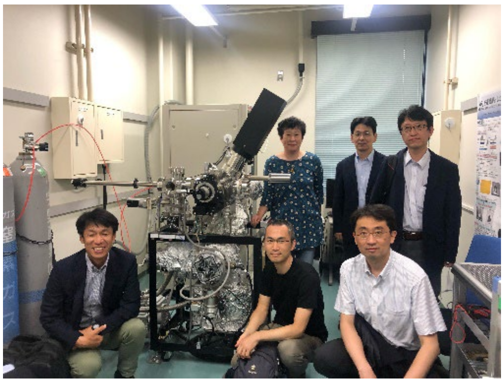
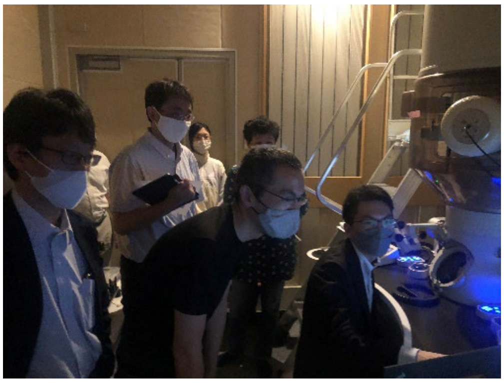
2-１０　領域内サイトビジット

本領域の共同利用拠点の一つである構造分析拠点の北陸先端科学技術大学院大学にて第１回領域内サイトビジットを実施した。7 名の領域メンバーが参加し、STEM やイオンビーム加工装置等共同利用拠点設備の見学、高村研、大島研、水田研の見学、及び領域運営や共同利用拠点についての議論等を行った。

日時：2022 年 6 月 6 日～7 日
場所：北陸先端科学技術大学院大学

<u>プログラム 2022 年 6 月 6 日</u>
13:00～13:10　挨拶（高村）
13:10～14:50　共同利用施設見学
15:00～16:20　研究室見学
16:30～17:30　共同利用拠点（構造解析）利用に関する議論
18:00～20:00　領域運営に関する意見交換会

<u>プログラム 2022 年 6 月 7 日</u>
10:00～12:00　透過電子顕微鏡による 2.5 次元物質観察（希望者）

参加者による集合写真と見学の様子

2-1 1　サンプル見本市

第 3 回領域会議のサテライト企画として開催した。試料の提供が可能な研究者 7 名が現物や写真を持ち寄りサンプルについて紹介し、提供の相談を受け付けた。

日時：2022 年 10 月 15 日 14:00～17:00
場所：北海道大学　理学部 5 号館 5-201


サンプル見本市の様子

2-1 2　理論相談会（理論のトリセツ）

第 3 回領域会議のサテライト企画として開催した。理論研究参画者 6 名による研究の説明の後、計算や解析についての個別相談を行った。

日時：2022 年 10 月 15 日 14:00～17:00
場所：北海道大学　理学部 5 号館 5-206


理論のトリセツの様子

２-１３　物性科学領域横断研究会

物性科学に関連した新学術領域研究および学術変革領域研究(A)が合同で開催する研究会で、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例年秋に開催している。

第 15 回物性科学領域横断研究会
日時：2021 年 11 月 26 日～27 日
場所：オンライン
https://www.rs.tus.ac.jp/ryoikioudan/2021/index.html
領域代表の吾郷が「今年度の採択領域からの講演」枠において、本領域について講演を行った。

第 16 回物性科学領域横断研究会
日時：2022 年 11 月 25 日～26 日
場所：オンライン

領域代表 吾郷、A03 松田、A02 町田が一般セッションにて講演、A02 宮田研の小倉さん、A02 町田研の小野寺さん、A05 大野研の内山さんが若手講演を行った。

2-14　その他のイベント

第 49 回炭素材料学会年会
特別セッション「次元性の拡張による炭素材料の高機能化」共催
日時：2022 年 12 月 7 日～9 日
場所：姫路市市民会館
https://www.tanso.org/contents/event/conf2022/index.html
本領域から A01 吾郷、A05 大野が招待講演を行った。

第 70 回応用物理学会春季学術講演会
シンポジウム「低次元材料のデバイス応用の最新動向」
日時：2023 年 3 月 15 日
場所：上智大学＋オンライン
A05 大野、長汐が世話人をつとめ、A05 河野が講演を行った。

領域共催にて下記のセミナーを行った。　https://25d-materials.jp/openseminar/
2021 年 12 月 7 日　　北大オープンセミナー
2022 年 1 月 11 日　　JAIST マテリアルサイエンス系セミナー
2022 年 5 月 25 日　　JAIST セミナー
2022 年 9 月 26 日　　JAIST マテリアルサイエンス系セミナー

2-15　昇進

2022 年 10 月 1 日　A02　荒井 俊人（東京大学 大学院工学系研究科 講師）
国立研究開発法人 物質・材料研究機構に主任研究員として栄転

2022 年 11 月 1 日　A02　荒井 俊人
令和 4 年度の文部科学省の卓越研究員に認定され、物質・材料研究機構の独立研究者となる

2022 年 12 月 1 日　A03　杉本 宜昭
東京大学大学院新領域創成科学研究科の教授に昇任

3． 研究者等 一覧

3．研究者等　一覧（2023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	東京大学 ／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	名古屋大学 大学院工学研究科	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 理工学研究所	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	名古屋大学 ／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
研究代表者	友利 ひかり	筑波大学 数理物質系	格子ひずみによるグラフェン超格子構造の開拓

A05班：2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開 (機能創出班)			
研究代表者	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 大学院理工学研究科 教授
横山 直樹	富士通株式会社　名誉フェロー
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

村田 和香	サイエンスコミュニケーター
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

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（筑波大学数理物質系）

研究協力者：丸山 実那（同上）・高 燕林（同上）

E-mail: sokada@comas-tsukuba.jp

2021～2022 年度にかけて、(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を行なった。特に sp^3 炭素原子を含みかつ５員環からなるネットワーク物質、スピログラフェンの種々の構造多形の提案を行った。(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、特に遷移金属カルコゲン化合物ヘテロ構造の電子物性の複合構造形成と外部電界による変調を明らかにした。(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。

主な成果としては、２層グラフェンとお椀状の炭化水素分子コラニュレン($C_{20}H_{10}$)からなる層間化合物の物質設計と物性解明を行い、当該物質系が極めてユニークな電子物性を有することを明らかにした。すなわち、グラフェン層間のコラニュレンの配向を制御することにより、上／下層のグラフェンに電子／正孔を誘起することが可能であり、系内において、コラニュレン分子の配向が異なる境界を導入することにより、境界近傍において、各グラフェン層での明確なバンドベンディング生じ、p/n 境界を作り込むことが可能であることを理論的に予言した(Fig. 1)。これは、コラニュレン分子が有する分子面鉛直方向の分極による電界効果である。

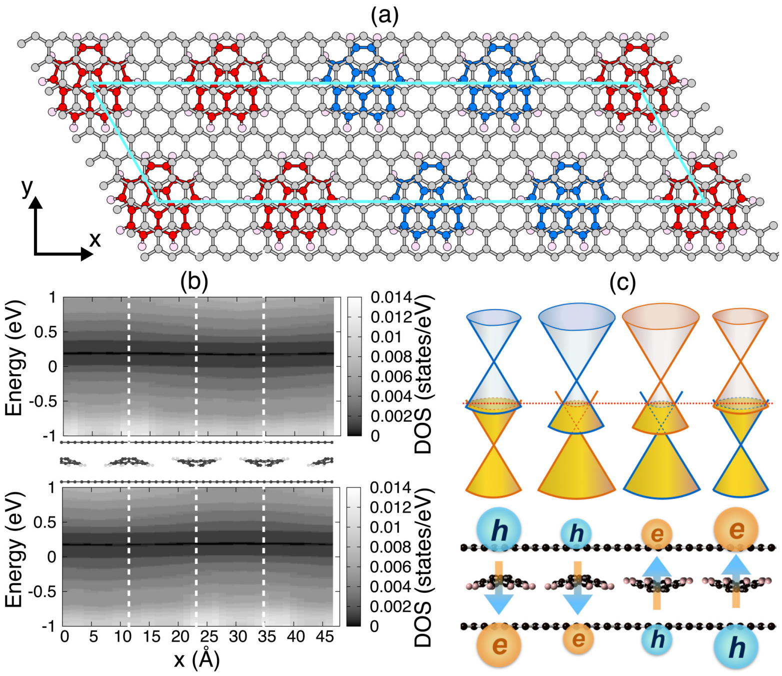


Fig. 1 (a) A geometric structure of superlattice consisting of strips of bilayer graphene where corannulene is alternately arranged in convex and concave with quadruple periodicity. Red, blue, gray, and pink balls denote C atoms of corannulene molecule with convex arrangement, C atoms of corannulene molecule with concave arrangement, C atoms of bilayer graphene, and H atoms, respectively. Right blue lines indicate a unit cell. (b) pDOS of corannulene-intercalated bilayer graphene on C atoms belonging to the upper layer and lower layer. (c) A schematic band diagram associated with the Dirac points near the interface between corannulene with convex and concave arrangements in bilayer graphene.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、櫻井(A01)、渡邊(A01)、加藤(俊) (A01)、蓬田(A01)、宮田(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、柳(A03)、蒲(A04)、越野(A04)、若林(A04)、友利(A04)、長汐(A05)、大野(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] M. Maruyama, R. Kitaura, S. Okada, et al. Gate-Induced Trans-dimensionality of Carrier Distribution in Bilayer In-plane Heterosheet of MoS_2 and WS_2 for electronics applications, ACS Appl. Nano Mate. **6**, 5434-5439 (2023).

[2] M. Maruyama, S. Okada, All carbon p-n border in bilayer graphene by molecular orientation of intercalated corannulene, J. Appl. Phys. **131**, 134303 (2022).

[3] Y. Gao, S. Okada, Electronic structure of diamond nanowires under an external electric field, Diam. Relat. Mater. **125**, 109029 (2022).

二次元物質の CVD 成長とインターカレーション

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（同上）

E-mail: h-ago@gic.kyushu-u.ac.jp

2021～2022 年度にかけて、(1) 2.5次元物質のビルディングブロックとなる二次元物質の高品質合成、(2) 金属塩化物を中心とする二層グラフェンへのインターカレーション、(3) CVD 膜の革新的転写法による2.5次元物質の作製法の開発、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グラフェンや hBN の提供を行って、領域内共同利用拠点としての役割も果たした。領域内の研究者による理論計算や各種の高度な測定の協力を得て、研究活動の高度化を進めることができた。また、ロスアラモス研究所やブルックヘブン研究所などとの国際共同研究も推進し、一部の成果は論文につながった。

主な成果としては、Fe-Ni ホイルを用いた CVD 法による多層 hBN の高品質合成を達成し、グラフェンと積層した2.5次元構造を作製し、転写プロセスの詳細な検討などを通じて、cm レベルでのグラフェン FET アレーの特性向上効果を確認することができた（Fig. 1）[1]。これまでの CVD-hBN を用いたデバイスは、清浄で皺がない非常に小さなエリアに電子線リソグラフィで作られていたが、本研究ではフォトリソグラフィを用いて、多数のデバイスを統計的に評価して、大面積 hBN の効果を示すことができた。また、皺や界面のバブルがグラフェンのキャリア移動度に及ぼす影響なども理解を深めた。

この他にも、領域メンバーの協力を得て、$AlCl_3$ と $CuCl_2$ のコインターカレーションが、二層グラフェンのツイスト角度に大きく依存し、ツイスト角が大きくなるほどインターカレーションの割合が増えることを見出すことができた [2]。

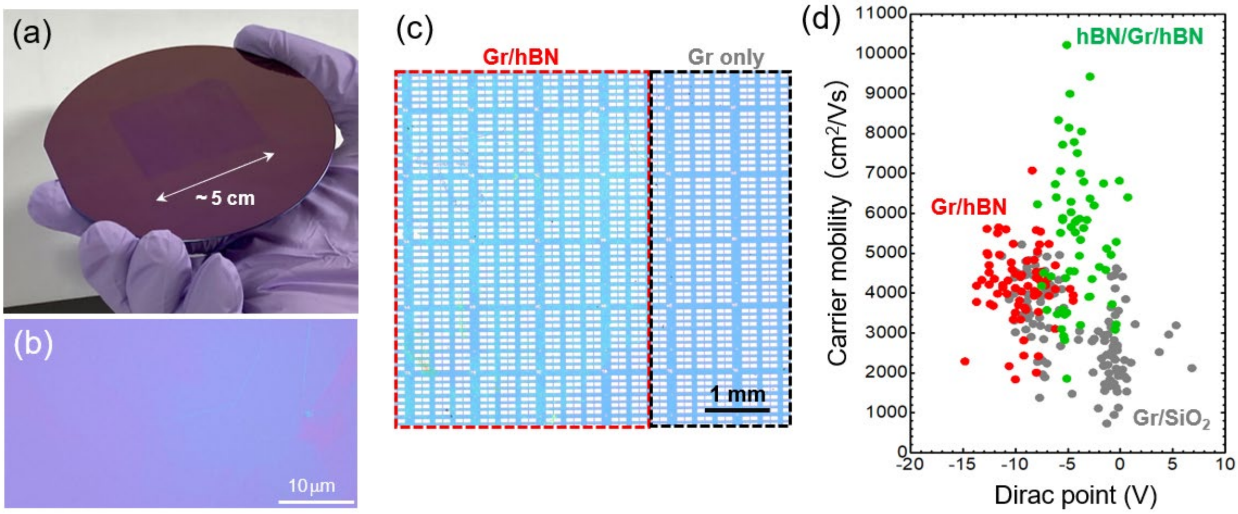


Figure 1 CVD synthesis of multilayer hBN and the integration with CVD-grown monolayer graphene. (a,b) Photograph and optical images of large-area, multilayer hBN. (c) Device arrays of graphene/hBN and graphene channels. (d) Comparison of the carrier mobility of different types of graphene devices.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、櫻井(A01)、毛利(A01)、宮田(A02)、荒井(A02)、松本(A02)、田中(A02)、末永(A03)、西堀(A03)、杉本(A03)、高橋(A03)、Lin(A03)、蒲(A04)、上野(A05)、松尾(A05)、河野(A05)、山本(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] S. Fukamachi, Y.-C. Lin, K. Suenaga, H. Ago *et al.*, Large-area synthesis and transfer of multilayer hexagonal boron nitride for enhanced graphene device arrays, *Nat. Electron.*, **6**, 126 (2023).

[2] Y. Araki, Y.-C. Lin, R. Matsumoto, K. Suenaga, S. Okada, H. Ago *et al.*, Twist angle-dependent molecular intercalation and sheet resistance in bilayer graphene, *ACS Nano*, **16**, 14075 (2022).

[3] H. Ago, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio, Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **23**, 275 (2022).

有機合成に基づく擬二次元構造の創製

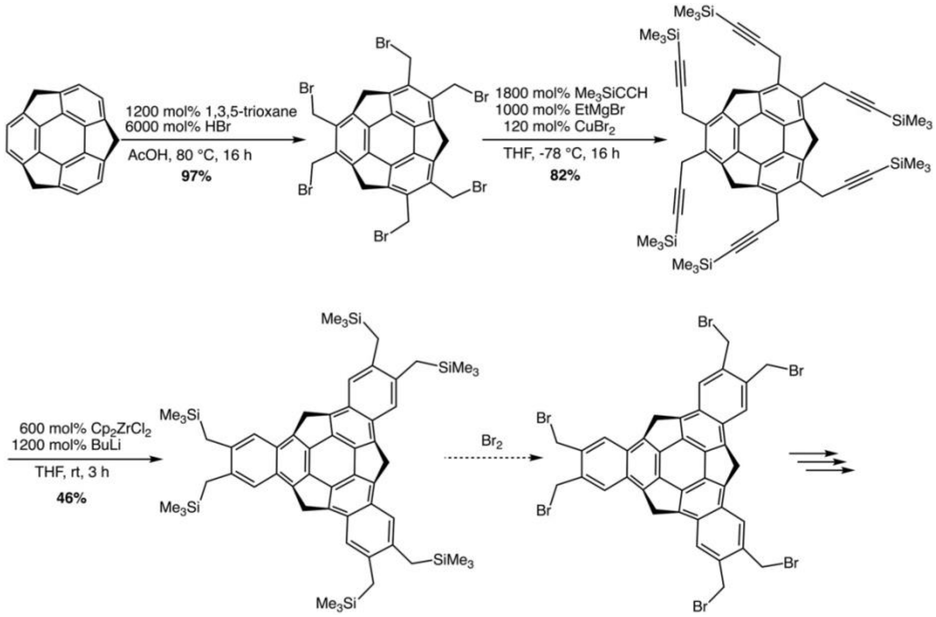
櫻井 英博（大阪大学大学院工学研究科）

研究協力者：燒山佑美（同上）

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

2021～2022 年度にかけて、(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、を中心に研究を行った。また並行して、関連研究としてスマネン結晶における in-plane motion を利用した誘電応答特性について共同研究を実施した[3]。さらに、領域内の研究者にスマネンやその誘導体を提供した。

主な成果としては、非平面グラフェン様２次元物質を合成する上で重要となるユニットである、スマネンを母骨格にもつ湾曲状のスターフェン”Curved Starphene(c-Starphene)”の基本ユニットに相当する、[7]-c-starphene の合成に初めて成功したことが挙げられる。



スマネンを出発とし、既報に従いヘキサブロモスマネンを 97%収率で得た。続いて銅触媒を用いたアルキニルを行い、前駆体を 82%収率で合成することができた。これに対し根岸試薬を用いたアルキンの分子内環化を行ったところ、目的の反応に続き、芳香環化を伴う異性化反応が進行し、[7]-c-starphene 誘導体が収率 46%で得られた。この合成ルートのメリットは、生成物に対してブロモ化を行うことで、環延長された同構造の誘導体に変換できることであり、原理的には逐次的な環延長が可能であることである。

現在は、合成した[7]-c-starphene の基礎物性の測定を行っており、同時に、湾曲 COF 合成へ向けた誘導化の検討を開始したところである。

【2021-2022 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)、松田(A03)、西堀(A03)、坂野(A03)、杉本(A03)、大野(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Nakazawa, M. Nakano, Y. Yakiyama, H. Sakurai *et al.*, Synthesis of Sumanene-fused Acenes, *Asian J. Org. Chem.*, **11**, e20220471 (2022).

[2] M. Li, Y. Yakiyama, T. Akutagawa, H. Sakurai *et al.*, Tuning Dielectric Response by Co-crystallisation of Sumanene and its Fluorinated Derivative, *Chem. Commun.*, **58**, 8950 (2022).

[3] M. Li, J.-Y. Wu, Y. Yakiyama, T. Akutagawa, T. Fukushima, K. Matsuda, H. Sakurai *et al.*, Dielectric Response of 1,1-Difluorosumanene Caused by an In-Plane Motion, *Mater. Chem. Front.*, **6**, 1752 (2022).

高品位六方晶窒化ホウ素の成長技術の開発

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

六方晶窒化ホウ素(hBN)は、ホウ素原子と窒素原子からなりグラファイトと似た結晶構造をもつ層状化合物である（Fig.1(a)）。2004 年に高温高圧法により高純度低欠陥単結晶の成長に成功し、その後 2010 年にグラフェンの基板として用いられると、原子レベルでの平坦性を担保し、かつグラフェンの表面ポテンシャルのゆらぎを最低限に抑制することができることから、グラフェンのみならず遷移金属カルコゲナイドなどの種々の 2 次元結晶などにも応用され基盤材料として広く用いられている。この優れた特性を 2.5 次元物質・材料応用に展開するために、我々は高圧法と比較してより柔軟性の高い気相成長法による高純度単結晶成長実験に取り組んでいる。原料ガスソースとしてジボランとアンモニアを用いた熱化学気相成長法（熱 CVD 法）により、高温高圧法により成長した高純度単結晶の剥離基板上に単結晶成長を行う。2 次元成長を行うためには高温成長が必要なので熱源としてレーザ加熱法を用いている（Fig.1(b)）。これまでの気相成長システムにおいて最適化された結晶成長条件によりホモエピタキシャル成長した六方晶窒化ホウ素薄膜試料の結晶性を光電子分光法（XPS）や発光分光法などを用い検証した結果、炭素および酸素不純物の取り込みが著しいことを見出した。これらの不純物の混入経路は成長中の雰囲気に由来することが成長槽雰囲気中のガス分析から予想され、高純度気相成長技術の改良への指針を得た。そこで本年度は、これまで使用してきた成長槽の交換を行うと同時に真空系を刷新し、オイルフリーな環境を実現した（Fig.1(c)）。これらの装置の改造により、成長槽内の炭素・酸素関連分子のガス分圧は、従来装置と比較して約 1 桁程度の改善が実現しており、新たな成長システムにおいて成長条件の最適化を進めている。

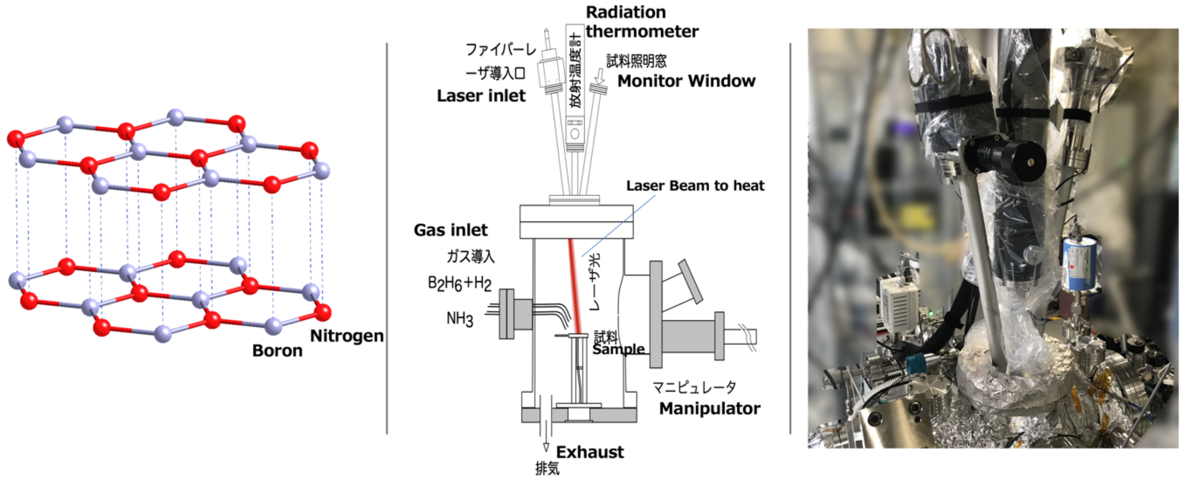


Figure 1 (a) hexagonal boron nitride　　**(b) Thermal CVD system**　　**(c) Laser heating components**

Figure 1 (a) Crystal structure of hexagonal boron nitride, **(b) and (c)** Schematics of Laser heated thermal CVD system for hBN growth.

【2021-2022 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：公募)、北浦(A02：公募)、松田(A03)、坂野(A03)、笹川(A04)、長汐(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果（URL)】

https://25d-materials.jp/achievement_search/?category_name=&member=a01_渡邊_賢司_%2F_kenji_watanabe&coauthor=領域内共著

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

2021～2022 年度にかけて、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(TMDC)に着目し、(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、(3) 面内および積層ヘテロ構造の作製と電子輸送特性の評価、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 CVD 法で合成した TMDC の提供を行い、共同研究を推進してきた。また、領域内の研究者により提供された試料や物性計測の協力を得て、一部の研究成果の論文発表に繋がっている。

主要な成果として、多層 TMDC 面内ヘテロ接合の実現とタイプ III バンドアライメントの検証が挙げられる[1]。TMDC の面内ヘテロ接合は、PN ダイオードやトンネル電界効果型トランジスタ(TFET)などの応用が期待されているが、高濃度にキャリアドープした試料の作製が困難であった。今回、WSe_2 や $Nb_xMo_{1-x}S_2$ のバルク結晶から、剥離により多層のフレークを基板上に作製し、その端から多層の MoS_2 を CVD 成長させることに成功した(Fig.1a,b)。また、$Nb_xMo_{1-x}S_2$/ MoS_2 面内接合では、トランジスタ構造の作製と電流電圧特性の評価より、バンドアライメントがタイプ II からタイプ III へと変化したことが示された(Fig.1c-e)。

この他にも、領域メンバーとの共同研究を通じて、W_6Te_6 原子細線結晶への In 原子のインターカレーション[2]、および窒化ホウ素ナノチューブの孤立化と単層 MoS_2 ナノチューブの合成[3]などを行った。

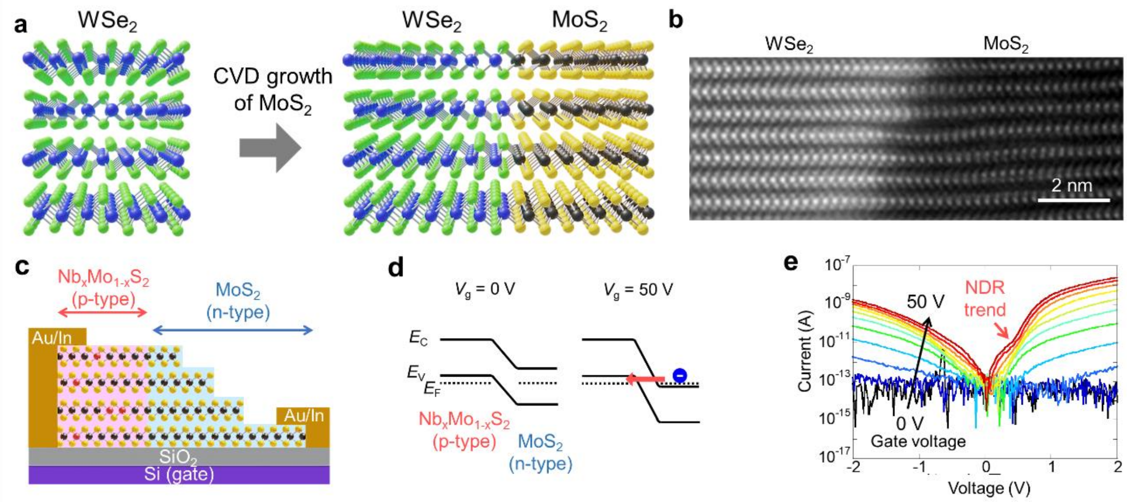


Figure 1 (a) Schematic of the growth process and (b) scanning transmission electron microscopy (STEM) image of an in-plane heterostructure of multilayer TMDCs. Schematics of (c) the device structure and (d) the band diagram of $Nb_xMo_{1-x}S_2$ and MoS_2 in-plane heterostructure. (e) Current-voltage curves as a function of gate voltage.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、吾郷(A01)、櫻井(A01)、渡邉(A01)、毛利(A01)、蓬田(A01)、加藤(A01)、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)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果

[1] H. Ogura, K. Yanagi, K. Ueno, S. Okada, K. Nagashio, Y. Miyata, *et al.*, Multilayer In-Plane Heterostructures Based on Transition Metal Dichalcogenides for Advanced Electronics, *ACS Nano* **17**, 6545-6554 (2023).

[2] R. Natsui, Y.-C. Lin, J. Pu, S. Okada, K. Suenaga, Y. Miyata, *et al.*, Vapor-Phase Indium Intercalation in van der Waals Nanofibers of Atomically Thin W_6Te_6 Wires, ACS Nano **17**, 5561-5569 (2023).

[3] S. Furusawa, Y. Yomogida, K. Yanagi, K. Suenaga, Y. Miyata, *et al.*, Surfactant-Assisted Isolation of Small-Diameter Boron-Nitride Nanotubes for Molding One-Dimensional van der Waals Heterostructures, *ACS Nano* **16**, 16636–16644 (2022).

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

2021～2022 年度にかけて、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) マイクロドーム型の PVC ポリマーを用いた原子層転写技術の構築、 (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、(3) ツイスト二層 WTe_2 においてツイスト角度の制御による対称性制御とバンド構造変調、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。また、トロント大学との国際共同研究も推進し、成果を論文発表した。

主な成果としては、複数層遷移金属ダイカルコゲナイドのサブバンドを利用して、二重量子井戸に相当する構造を作製して価電子帯におけるホールの共鳴トンネル効果を観測した。二次元結晶およびファンデルワールス接合を利用したサブバンドエレクトロニクスおよびオプトエレクトロニクス分野の基盤となる成果であり波及効果が大きい。さらに電極をグラフェンにすることで、伝導体の電子の共鳴トンネル効果も観測した。サブバンドが Q 点に形成されているため、トンネルツイスト角度に依存した共鳴トンネルが観測された。Q 点近傍のバンド分散構造を反映している。

作製技術に関する面では、Elvacite ポリマーを使用した方法と PVC ポリマーを使用した方法の 2 つのオリジナル転写技術を構築した。

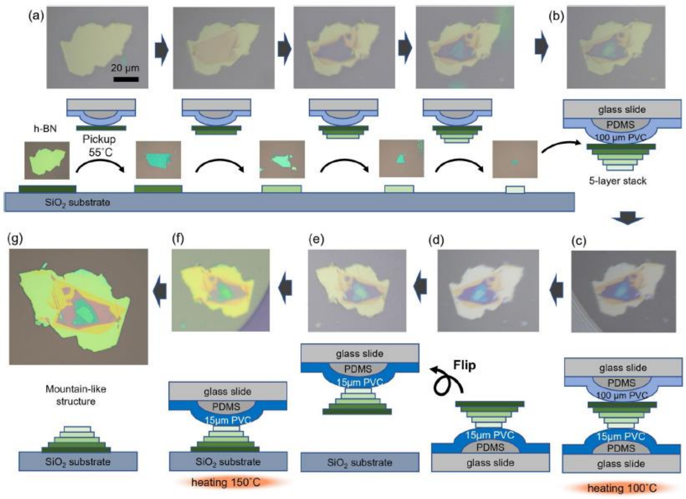


Figure 1 Demonstration of flip-over stacking. (a) Five h-BN flakes on a SiO_2/Si substrate were picked up by a 100-µm-PVC/PDMS stamp at $T = 55$ °C, starting with the largest and proceeding to sequentially smaller flakes, and hence (b) an inverse-mountain-like stacked structure was created. (c) The stack was brought into contact with and (d) transferred to a 15-µm-PVC/PDMS stamp at $T = 100$ °C. (e) The 15-µm-PVC/PDMS stamp was inverted and (f) brought into contact with a SiO_2/Si substrate before being slowly detached at $T = 150$ °C. (g) The stack was dry-released on the substrate, and a mountain-like layered h-BN structure was obtained.

【2021-2022 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)、柳(A03)、Lin(A03)、越野(A04)、高村(A04)、笹川(A04)、松尾(A05)、河野(A05)、山本(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, Resonant tunneling between quantized subbands in van der Waals double quantum well structure based on few-layer WSe_2, Nano Letters **22**, 4640 (2022).

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

2021～2022 年度にかけて、2.5 次元物質のビルディングブロックとなる有機薄膜内の分子配列制御に取り組んだ。具体的には（1）有機半導体の高移動度化に向けた薄膜層内の分子配列制御［1］、（2）新規 n 型半導体の創製に向けたドナー・アクセプタ分子混合結晶の構造解析と安定性評価［2］、（3）柔粘性/強誘電性結晶の分極ドメイン観察［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、有機半導体薄膜における層内分子配列の対称性を制御する指針を得たことが挙げられる［1］。二次元的なキャリア輸送に適した分子配列としてヘリンボーン型配列が知られている。これまでこの配列は、隣接するπ電子骨格平面のなす角（ヘリンボーン角）により特徴付けられてきた。(Fig. 1(a))。しかしながら、ヘリンボーン角が共通でも 2 種類の異なる対称性の配列が形成されうることに着目し（Fig. 1(b)）、実際にπ電子と直鎖アルキル基からなるモデル有機半導体系において、置換するアルキル鎖長を変えることで、こうした対称性の異なる配列が得られることを明らかにした（Fig. 1(c)）。この 2 つの結晶多形について、単結晶トランジスタの特性を比較すると、長鎖アルキルを付与した分子ではデバイス移動度が 10 倍程度高いことがわかった。各結晶相に対して熱物性の測定や分子間相互作用の解析を行うことで、結晶構造の変化が、層内で隣接するπ電子骨格間およびアルキル鎖間の相互作用が競合することに由来していることを見出した。本研究により、高移動度化に有利な結晶多形を選択的に作る指針が得られた。今後はより高い移動度が得られる相について、積層方向の配列制御と機能の開拓を進める。

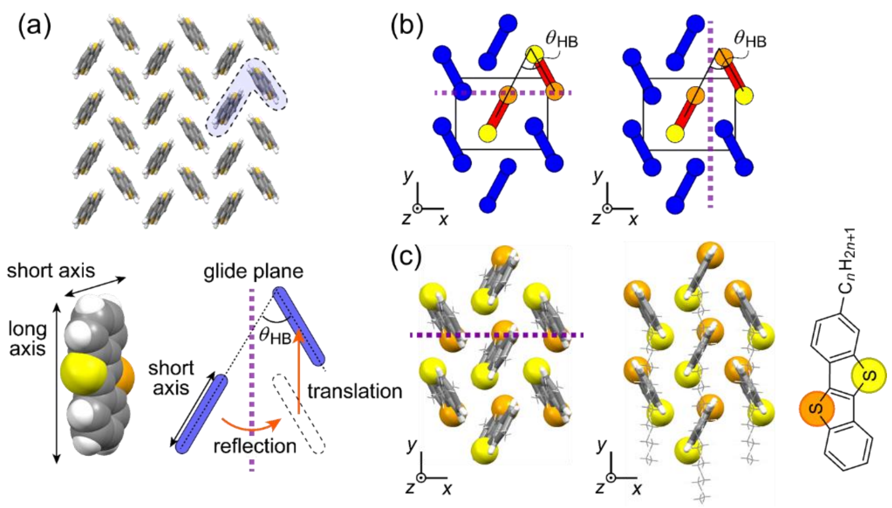


Figure 1 (a) (top) Layered herringbone (LHB)-type molecular packing. (bottom) Schematic illustration of the *T*-shaped molecular contact. The *T*-shape contacts are characterized by glide reflection symmetry. (b) Schematic representations of distinct glide symmetries in LHB polymorphs. The glide planes are perpendicular to the *y*-axis and *x*-axis, as indicated by the purple dotted lines. (c) Molecular packing structures of *mono*-C_n-BTBTs. The left and right panels show short-chain and long-chain type polymorphs, respectively.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、櫻井(A01)、宮田(A02)、杉本(A03)、柳(A03)、長汐(A05)、松尾(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】
[1] S. Arai, S. Inoue, M. Tanaka, S. Tsuzuki, R. Kondo, R. Kumai, T. Hasegawa, "Temperature-induced transformation between layered herringbone polymorphs in molecular bilayer organic semiconductors", *Phys. Rev. Mater.* **7**, 025602 (2023).
[2] S. Matsuoka, K. Ogawa, R. Ono, K. Nikaido, S. Inoue, T. Higashino, M. Tanaka, J. Tsutsumi, R. Kondo, R. Kumai, H. Matsui, S. Tsuzuki, S. Arai, T. Hasegawa, "Highly stable and isomorphic donor-acceptor stacking in a family of n-type organic semiconductors of BTBT-TCNQ derivatives", *J. Mater. Chem. C* **10**, 16471 (2022).
[3] Y. Uemura, S. Matsuoka, S. Arai, J. Harada, T. Hasegawa, "Intersecting multiaxial domain walls in plastic ferroelectric crystal films", *Phys. Rev. Mater.* **7**, 035601 (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

2021～2022 年度にかけて、(1) 二層～多層グラフェンへの Na インターカレーション、(2) 二層～多層グラフェンへのインターカレーション、(3) 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、などを中心に研究を行った。同時に、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や金属塩化物のインターカレーションを行い、提供した。黒鉛層間化合物の合成技法をさまざまな低次元物質へのインターカレーションに応用している。また、黒鉛結晶構造と層間内のインターカレート物質の状態の関係を調べるため、電気抵抗に現れる相転移温度の測定を始めた。

主な成果としては、バルク黒鉛にはインターカレーションしにくい Na も微小薄層黒鉛とみなせる多層グラフェンであれば、気相法であっても黒鉛よりもインターカレーションが進み易いことが分かった。ただし、二層グラフェンの場合は、K や Ca のインターカレーションを生じたが、Na に関しては検討中である(Fig.1(a))。これまでグラフェンへのインターカレーションの有無はラマンスペクトルで確認していが、領域内共同研究者の協力により、STEM や spring8 の放射光を利用した XRD による評価を始めた。

GLG へのインターカレーションに関しては、黒鉛にはインターカレートしにくい Na の他、黒鉛へのインターカレーションが確認されていない Mg に関してもインターカレーションが確認された（Fig.1(b)）。また、金属塩化物に関しても、GLG は黒鉛よりもインターカレーションが容易である兆候が得られた。ここまでの XRD はサンプルの大気曝露後に測定していたが、2022 年度末に大気非暴露での XRD 測定環境を導入したので、今後はより正確な構造解析を行うことができる。

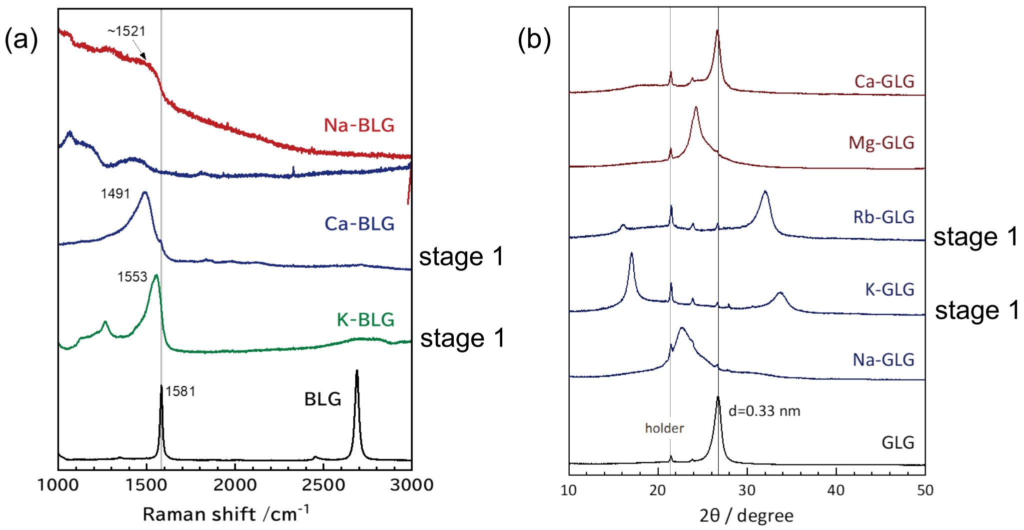


Figure 1 The products of vapor phase intercalations of bi-layer graphene (BLG) and graphene like graphite (GLG). (a) Raman spectra of intercalated BLGs. (b) XRD patterns of intercalated GLGs.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、櫻井(A01)、末永(A03)、西堀(A03)、Lin(A03)、松尾(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Araki, Y.-C. Lin, R. Matsumoto, K. Suenaga, S. Okada, H. Ago *et al.*, Twist angle-dependent molecular intercalation and sheet resistance in bilayer graphene, *ACS Nano*, **16**, 14075 (2022).
[2] Y.-C. Lin, A. Motoyama, R. Matsumoto, H. Ago, K. Suenaga, *Nano Lett.*, **21**, 24, 10386-10391 (2021).

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

2021～2022 年度にかけて、(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。同時に、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、非接触で二次元物質での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や、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、現在、共同研究者で論文の準備中を含め準備いただいており、来年度以降に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(Fig. 1(a))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状態やそのダイナミクスに関する知見が得られた。具体的には、発光に寄与する光学的に活性（ブライト）なモアレ励起子状態の数 meV 高エネルギー側に、光学的に不活性（ダーク）なモアレ励起子状態が存在することを明らかにした。また、そのモアレ励起子のダイナミクスに、ダークなモアレ励起子状態が深く関与し、発光の温度特性などを支配している事がわかるなど、系統的にモアレ励起子が関わるモアレ物理に関する理解を深めた(Fig. 1(b)-(d))。この他にも、二次元半導体と層状磁性体による人工ヘテロ物質を創成し、磁気素励起（マグノン）と結合したモアレ荷電励起子の存在などを明らかにできた。

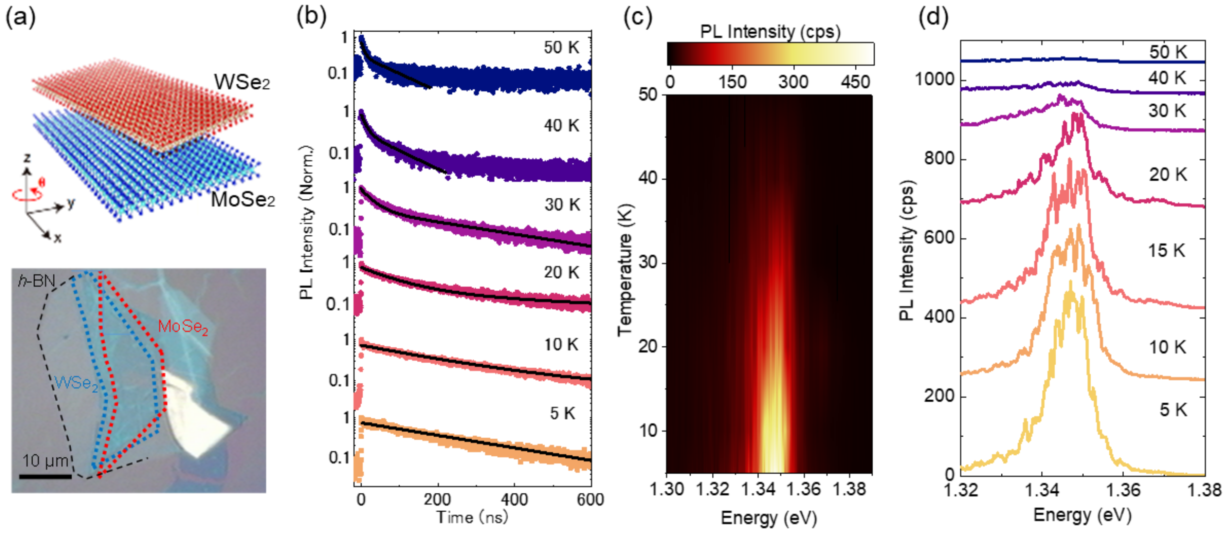


Figure 1 (a) Schematic of semiconducting $MoSe_2/WSe_2$ heterobilayer (upper part). Optical microscope image of $MoSe_2/WSe_2$ heterobilayer (lower part), (b) Photoluminescence (PL) decay profiles of moiré exciton as a function of temperature, (c) Temperature dependence of PL intensity, (d) Temperature dependence of PL spectra.

【2021-2022 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)、蒲(A04)、長汐（A05)、山本(A05)

【2021-2022 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 exciton in a twisted $MoSe_2/WSe_2$ heterobilayer, *Adv. Opt. Mater.*, 2301172 (2023).

[2] K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda, Valley relaxation of the moiré excitons in a $WSe_2/MoSe_2$ heterobilayer, *ACS Nano*, **16**, 16862 (2022).

[3] Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda *et al.*, Magnon-coupled intralayer moiré trion in monolayer semiconductor–antiferromagnet heterostructures, *Adv. Mater.*, **34**, 2200301 (2022).

2.5 次元物質の放射光を用いた構造評価

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) SPring-8 のアンジュレータ光源の薄膜ビームラインを利用したグラフェン試料の回折実験、(2)二層グラフェンへのインターカレーションの放射光その場観察法の開発、(3) 2.5 次元薄膜材料のマイクロビーム X 線回折、などを中心に研究を行った。研究開始の 2021 年度はマシンタイムを確保することが難しく、測定は 2 時間の代行測定 1 回しか行えなかった。加えて、SPring-8 のビームライン再編のため、薄膜ビームラインの移動が 2022 年 6 月まで行われたため、実際の SPring-8 を利用してのマシンタイムは 2022 年 8 月が最初となった。この間、吾郷グループ、松本グループ、末永グループと共同で、グラフェンインタカレーションのその場観察を実施するための装置開発を開始した。試料容器のキャピラリーから、加熱方法、真空引きの方法など複数の検討を重ね、オフラインでグラファイトのインターカレーションが可能なシステムを構築した。

複数回のビームタイムで、その場観察のセットアップの構築と測定法の確率を行い、K をインターカレーションのその場観察測定を実施した。試料管のキャピラリー内に同封した PGS グラファイトが金色に変色したことから、インターカレーションを行いながらの X 線実験には成功したと考えている。グラフェンからの反射に一目で見られる変化は見られなかったため、現在、詳細を解析中である。

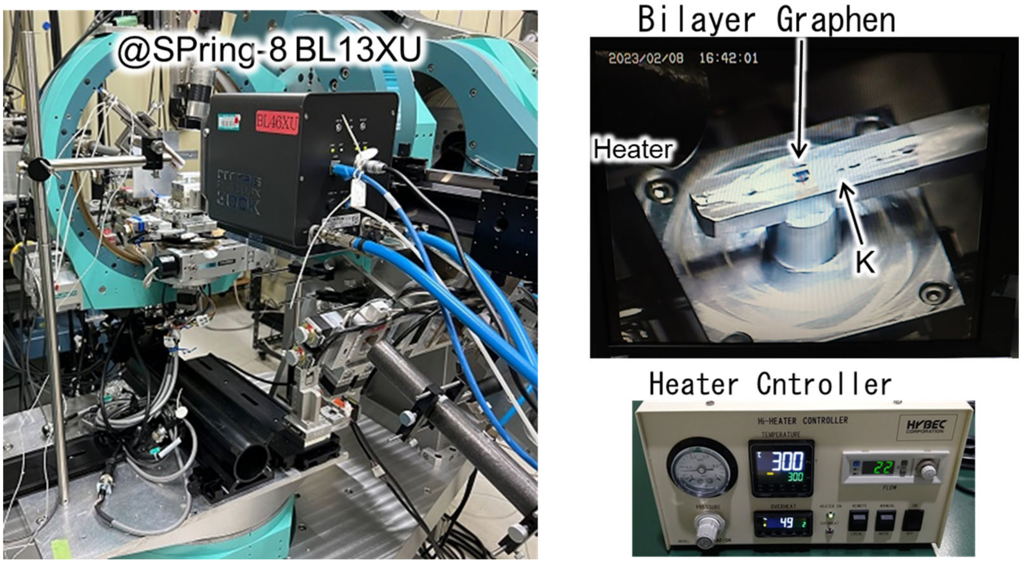


Figure 1 Photograph of experimental setup for in-situ X-ray diffraction experiment of K intercalation of bilayer graphene.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

吾郷（A01)、櫻井(A01)、宮田(A02)、松本(A02)、坂野（A03）末永(A03)、Lin(A03)、長汐（A05）

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Zheng, H. Kasai, S. Kobayashi, S. Kawaguchi, E. Nishibori, In situ observation of a mechanically induced self-sustaining reaction for synthesis of silver, *Mater. Adv.* **4**, 1005(2023).

[2] I. Inoue, V. Tkachenko, K. J. Kapcia, V. Lipp, B. Ziaja, Y. Inubushi, T. Hara, M. Yabashi, E. Nishibori, Delayed Onset and Directionality of X-Ray-Induced Atomic Displacements Observed on Subatomic Length Scales, *Phys. Rev. Lett.* **128,** 223203 (2022).

[3] J. Zhang, N. Roth, K. Tolborg, S. Takahashi, L. Song, M. Bondesgaard, E. Nishibori, B. B. Iversen, Direct observation of one-dimensional disordered diffusion channel in a chain-like thermoelectric with ultralow thermal conductivity, *Nat. Commun.*, **12**, 6709 (2021).

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：Qiunan Liu（同上）

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

2021～2022 年度にかけて、(1) ２.５次元物質の原子レベル構造評価として、新規一次元・二次元物質の構造解析を行った。原子レベルでの分析が各種材料に応用され、単原子感度を持つ電子分光の応用に努めた。また各種相変態や新しい相構造の検証に広く応用された。 (2) 2.5 次元物質の光学特性測定に関する基礎的研究も順調に進捗した。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。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 DTU など海外大学・研究所との国際共同研究にも着手した。

主な成果としては、Lin (A03)、およびシンガポール南洋理工大学、北京大学などと共同研究を行い、全く新しいバナジウム系２次元(2D)/１次元 (1D)ハイブリッド格子構造を合成することに成功した。特殊な走査型透過電子顕微鏡を用いてその特異なハイブリッド超格子構造を解明し、この新物質が 380K の高温でも予想外の面内異方性ホール効果を示すことを明らかにした（図１）。従来の超格子は半導体超格子に代表されるように、同次元の物質同士で形成されていました。2 次元物質（膜状）と 1 次元物質（鎖状）を組み合わせた周期的な積層構造を持つ異次元ハイブリッド超格子は実現されていなかった。

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おり、一部は論文として発表できた[2]。

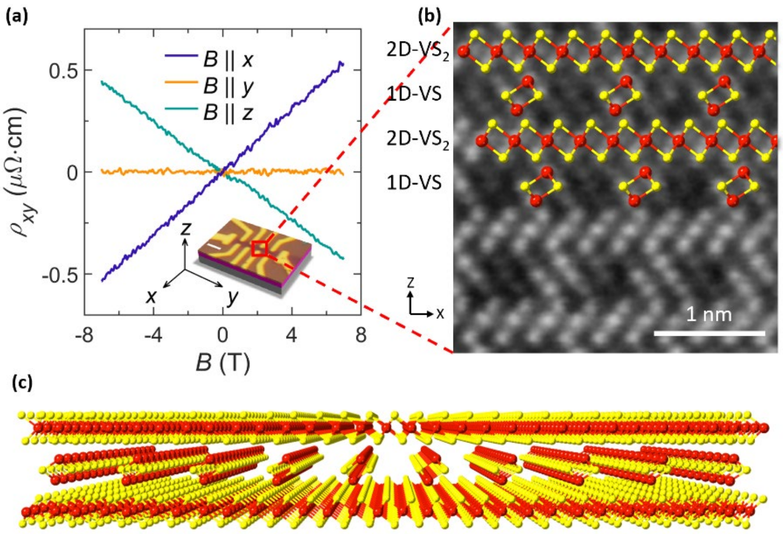


図１　異方性ホール効果を示す新しい超格子構造を発見。(a) 異方性ホール効果、(b)　2D-VS$_2$/1D-VS 超格子構造の走査透過電子顕微鏡(STEM)による断面像。(c) 2D/1D ハイブリッド超格子のモデル図。

【2021-2022 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

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] J. Zhou, W. Zhang,,, Y-C. Lin, K. Suenaga, et al.,, Heterodimensional superlattice with in-plane anomalous Hall effect, *Nature* 609 (2022) pp.46-51

[2] Y-C. Lin, A. Motoyama, P. Solís-Fernández, R. Matsumoto, H. Ago, and K. Suenaga Coupling and Decoupling of Bilayer Graphene Monitored by Electron Energy Loss Spectroscopy *Nano Lett.* 2021, 21, 24, 10386–10391

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：増渕覚（東京大学生産技術研究所）・町田友樹（同左）・石坂香子（同上）

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

2021～2022 年度にかけて、(1)角度分解光電子分光測定を用いて微小(~0.01 mm)な 2 次元物質を複雑に積層した 2.5 次元物質の電子状態（バンド構造）を直接観測するための試料作製方法の確立、(2) 開発した試料作製方法と顕微レーザー角度分解光電子分光装置を用いた 2-5 層 WTe_2 のバンド構造観測、(3) 遷移金属ダイカルコゲナイドのツイスト積層体のバンド構造観測、を中心に研究を行った。

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構造を有する 2.5 次元物質においてもバンド構造を観測できる強力な実験手法である。しかし一方で、光電子放出に伴う帯電の抑止、測定の表面敏感性、光源の顕微化といった解決すべき測定上の課題が多く存在する。本研究では町田グループと共同研究を行い、それら実験上の制約を克服して 2.5 次元物質のバンド構造を観測する手法を確立した[2]。さらに、その手法を用いて 2-5 層 WTe_2 のバンド構造を観測し、積層秩序が及ぼすスピン偏極したバンド構造における層数の偶奇効果という新現象を発見し、その起源を解明することができた(Fig.1) [3]。現在までに、遷移金属ダイカルコゲナイドのツイスト積層体やヘテロ接合体、磁性元素を層間挿入させた原子層薄膜[1]などの多種多様な 2.5 次元物質のバンド構造の精査を行っており、2.5 次元物質に特有な電子状態を明らかにしている。

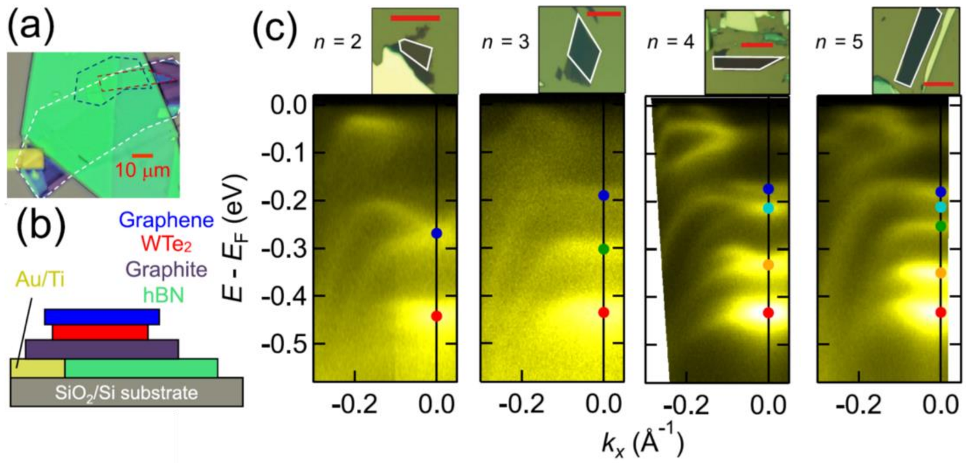


Figure 1 (a) Optical microscope image of the fabricated graphene/WTe_2/graphite/h-BN heterostructure sample. (b) Schematic of the fabricated sample. (c) Upper panels: The optical microscope images of the 2–5-layer WTe_2 flakes (white frames) used for ARPES. The red bars represent the 10-mm length. Lower panels: Obtained ARPES images for 2–5-layer WTe_2. The makers (•) indicate the positions of the intensity peaks at $k_x = 0$.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

吾郷(A01)、櫻井(A01)、渡邉(A01)、加藤俊(A01)、町田(A02)、松田(A03)、西堀(A03)、杉本(A03)、笹川(A04)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] B. K. Saika, S. Hamao, Y. Majima, X. Huang, H. Matsuoka, S. Yoshida, M. Kitamura, M. Sakano, T. Hatanaka, T. Nomoto, M. Hirayama, K. Horiba, H. Kumigashira, R. Arita, Y. Iwasa, M. Nakano, and K. Ishizaka, Signature of topological band crossing in ferromagnetic $Cr_{1/3}NbSe_2$ epitaxial thin film, *Phys. Rev. Research*, **4**, L042021 (2022).
[2] S. Masubuchi*, M. Sakano*, Y. Tanaka* (* equally contributed), Y. Wakafuji, T. Yamamoto S. Okazaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Li, H. Ejima, T. Sasagawa, T. Machida, K. Ishizaka, Dry pick-and-flip assembly of van der Waals heterostructures for microfocus angle-resolved photoemission spectroscopy, *Scientific Reports*, **12**, 10936 (2022).
[3] M. Sakano*, Y. Tanaka*, S. Masubuchi*(* equally contributed), S. Okazaki, T. Nomoto, A. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Arita, T. Sasagawa, T. Machida, K. Ishizaka, Odd-even layer-number effect of valence-band spin splitting in WTe_2, *Phys. Rev. Research*, **4**, 023247 (2022).

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

一般に二次元物質が積層した系は格子が整合しない準周期系であるため、結晶周期の存在に基づく通常の理論が適用できない。この様な準周期系での物理的性質を記述する汎用性の高い理論体系を確立することは、2.5 次元物質科学の学理の創出への大きな課題の１つである。2021～2022 年度は、モアレ物質を中心に 2.5 次元物理学の基礎理論構築に取り組んだ。主要な結果は以下の通りである。

(1) モアレ準結晶におけるトポロジー：hBN/グラフェン/hBN を始めとする様々な二次元準周期系で電子状態を計算し、二つのモアレ模様の干渉によってフラクタル状のスペクトルが現れること、さらに、高次元の量子ホール効果と数学的な対応を通して、各エネルギーギャップが第 2 Chern 数と呼ばれるトポロジカル数によって特徴づけられることを示した。この結果は３次元準結晶にも拡張可能であり、周期系とは異なる形でのトポロジカル数の概念が、準周期系に普遍的に存在することを示す。

(2) モアレフォノンの理論:モアレ物質では、電子バンドとともにフォノンバンドもモアレ模様によって大きな変調を受ける。ここではグラフェン/hBN モアレ超格子の面内音響フォノンを、連続体モデルを用いて計算した。個々の層のフォノンは強く混成され、平坦バンドを含むモアレフォノンバンドに再構築されること、またモアレフォノンは反転対称性の破れによって角運動量を持つことを明らかにした。この結果はモアレ物質での熱伝導などのフォノン的性質が単層とは大きく異なることを示唆する。

その他、ツイストトポロジカル絶縁体積層における界面状態、ツイスト二層グラフェンにおけるモアレ周期乱れの効果、二次元物質黒リン、青リンのエッジ状態とコーナー状態の理論、NbSe2 のファンデルワールス界面における自発的スピンバレー分極（東大岩佐グループとの共同研究）等を行った。

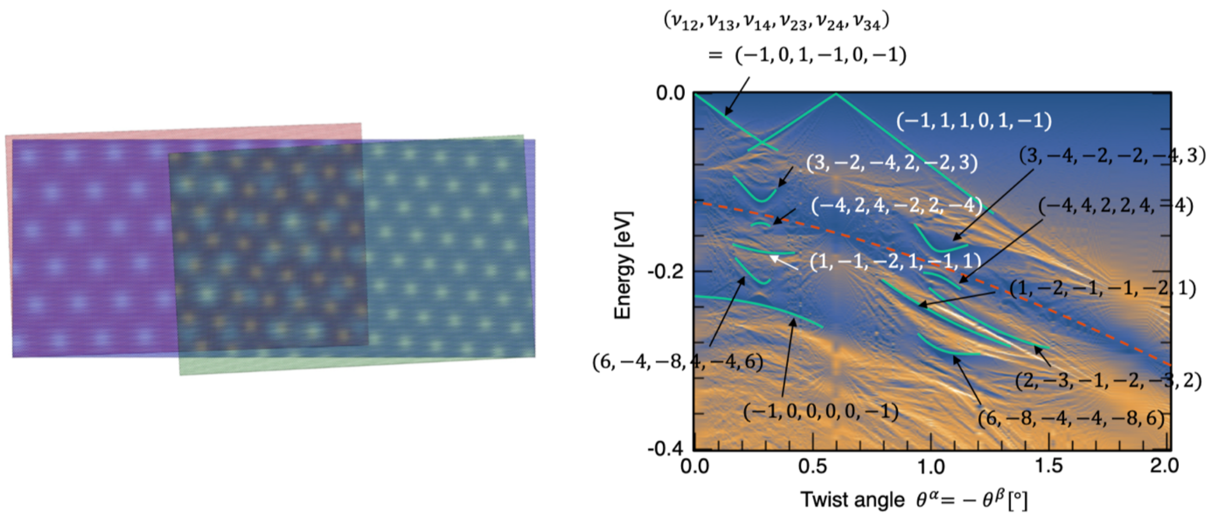


Figure 1 Moiré pattern in hBN/graphene/hBN trilayer system (left), and its electronic spectrum plotted against the relative twist angle (right).

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】岡田(A01)、渡邊(A01)、加藤(A01)、宮田(A02)、町田(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、高村(A04)、若林(A04)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] L. P. A. Krisna and M. Koshino, Moiré phonons in graphene/hexagonal boron nitride moiré superlattice, *Phys. Rev. B* **107**, 115301 (2023)

[2] M. Koshino, H. Oka, Topological invariants in two-dimensional quasicrystals, *Phys. Rev. Res.* **4**, 013028 (2022)

[3] H. Oka, M. Koshino, Fractal energy gaps and topological invariants in hBN/graphene/hBN double moiré systems, *Phys. Rev. B* **104**, 035306 (2021).

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

2021～2022 年度にかけて、(1) 単結晶基板上にのみ安定的に形成しうるセレン化ガリウム(GaSe) の準安定相、(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。同時に、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他、希望する領域内共同研究者に、超高真空下で加熱することでその表面上に再現性良くケイ素版グラフェンであるシリセンが形成される Si(111)基板上 ZrB_2 薄膜試料の提供を行った。領域内の研究者からは、特に、多様なカルコゲナイド層状物質と最先端の剥離・転写技術について学ぶことができ、今後の研究活動の発展につなげていきたい。また、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機関との連携を模索し、双方の学生や若手研究者の交流に向けた取組に着手した。

具体的な成果としては、通電や電圧印加その場観察を原子分解能で行うため、また、大気曝露に弱い試料を非曝露で STEM に導入するために、新たに超高分解能ポールピースに挿入可能な二軸四端子大気非曝露 TEM 試料ホルダ（Fig.1a）の開発を株式会社メルビルに依頼し、その完成品と 200μm のシリコンチップに転写したカルコゲナイド層状物質を用いて、本学で原子分解能観察を達成した。Ar 雰囲気下でこのホルダに試料の取り付けを可能にするグローブボックス等の整備も完了した（Fig.1b,c）。現在、独自にシリコンチップの開発を進めている。他にも、センチメートルスケールの ZrB_2 薄膜上シリセン/六方晶窒化ホウ素試料を作製するために薄膜成長装置に新たにプラズマ源を導入するなど装置整備が進んだ。また、物性面では、単結晶基板上でのみ安定化･形成可能な二次元材料のセレン化ガリウム(GaSe)の準安定相「反三角柱構造 GaSe」（Fig.1d）の光学的性質を共同利用拠点・分析拠点（光）等において計測し、紫外光域で従来相との違いが顕著に現れることを第一原理計算結果と合わせて明らかにした。この物質系では、第一原理計算でディラック・コーン様電子状態が予測されるゲルマニウム単結晶基板上 GaSe ハニカム格子の角度分解光電子分光による電子状態測定結果の解析も進み、GaSe 由来の分散の同定に成功した。この研究を主導した博士後期課程学生は 2022 年 3 月修了時に優秀修了者として表彰された。その他には、国際共同研究により、新たに正方格子の IV 族単元素二次元材料が安定に存在することが計算から明らかとなり、物性の理解も進んだ[1]。

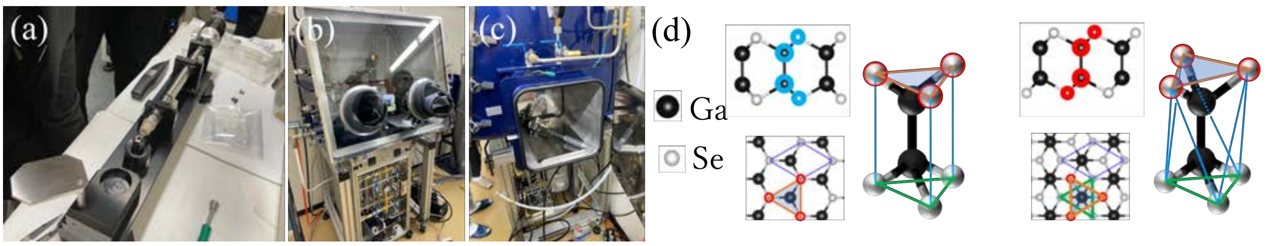


Figure 1 (a) Newly-developed double-tilt 4-electrodes air exposure preventing TEM sample holder for UHR pole piece from Mel-Build Corporation, (b) Glove box for setting TEM samples under Ar atmosphere and low humidity, (c) Pass box with the TEM sample holder inside, and (d) GaSe monolayer with conventional trigonal prismatic structure (left) and newly- discovered, metastable trigonal anti-prismatic structure (right).

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

渡邊(A01)、宮田(A02)、町田(A02)、松田(A03)、杉本(A03)、長汐(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] C.-E. Hsu, Y.-T. Lee, C.-C. Wang, C.-Y. Lin, Y. Yamada-Takamura, T. Ozaki, and C.-C. Lee, Atomically thin metallic Si and Ge allotropes with high Fermi velocities, *Physical Review B*, **107**, 115410 (2023).

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

2.5 次元構造体の素材となる van der Waals (vdW)層状物質について、様々な化合物を高品質な単結晶試料として開発することに取り組んだ。例えば、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDs)では、図 1 (a)の周期表中に緑色で示した 33 種類の元素組成 MX_2 の組合せについて、図 1 (b)に代表されるような単結晶試料を準備できる体制を整えて、領域内での共同研究も推進した。一括りに TMDs と呼称されるものの、図 1 (c)に示すような遷移金属－カルコゲン原子の配位様式や結晶対称性の多様性があり、それらも反映しながら、絶縁体/半導体、金属/半金属、誘電性、磁性、電荷密度波、超伝導、トポロジカル性などの様々な電子物性を示す。我々が特に注力したのは、先行研究が乏しかった 2M 構造の WS_2 や 3M 構造の $NbTe_2$ などを対象とした良質な単結晶試料の開発と物性の開拓である。いずれも超伝導を示すが、面内も含めた 3 軸に異方的な物性を実験的に解明することに成功した。一方で、領域内共同研究では、作製困難な数層 TMD の実験を下支えるべく、育成法を確立した vdW 単結晶試料の大量供給に努めた。これにより例えば、トポロジカル半金属として知られる WTe_2 を対象にして、自然には存在しない vdW 積層様式をもつ 2.5 次元物質を創製し、その電子構造も解明することに成功した[1,2]。

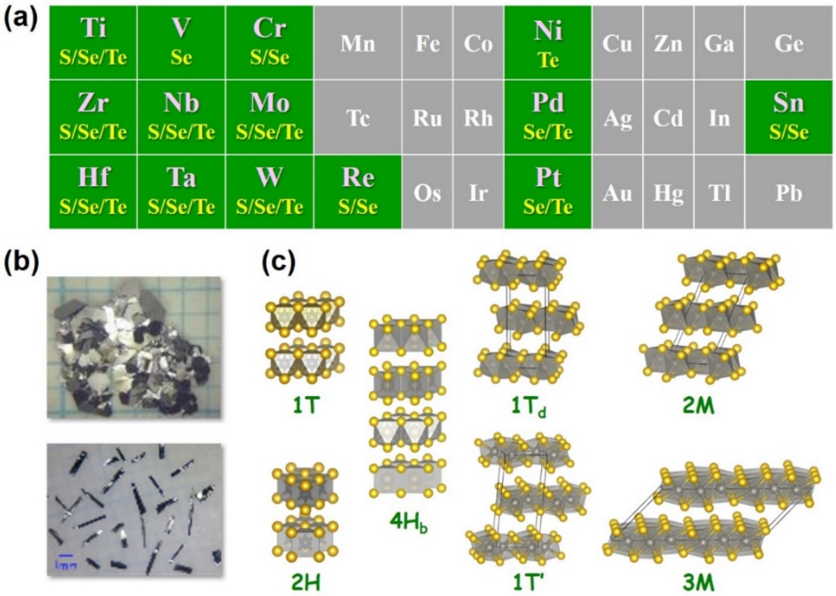


Figure 1 Catalogue of single crystals grown in Sasagawa group. (a) Available compositional combinations (indicated in green in the periodic table) for transition metal dichalcogenides (TMDs) with van der Waals (vdW) stacking structures. (b) Examples of grown single crystals. (c) Various crystal structures of vdW-TMDs.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

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

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] M. Sakano, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al*., Odd-even Layer-number Effect of Valence-band Spin Splitting in WTe_2, *Phys. Rev. Research* **4**, 023247 (2022).

[2] S. Masubuchi, M. Sakano, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al*., Dry Pick-and-flip Assembly of van der Waals Heterostructures for Microfocus Angle-resolved Photoemission Spectroscopy, *Scientific Reports* **12**, 10936 (2022).

[3] Y. Zhang, K. Watanabe, T. Sasagawa, and T. Machida *et al*., Switchable Out-of-plane Shift Current in Ferroelectric Two-dimensional Material $CuInP_2S_6$, *Appl. Phys. Lett.* **120**, 013103 (2022).

[4] Y.M. Itahashi, T. Sasagawa *et al*., Giant Second Harmonic Transport under Time-reversal Symmetry in a Trigonal Superconductor, *Nature Commun.* **13**, 1659 (2022).

[5] K. Takeyama, K. Watanabe, T. Sasagawa, T. Machida *et al*., Resonant Tunneling Due to van der Waals Quantum-Well States of Few-Layer WSe_2 in WSe_2/h-BN/p^+-MoS_2 Junction, *Nano Lett.* **21**, 3929 (2021).

2.5 次元物質の自在構造制御による物性開拓

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

2021～2022 年度にかけて、(1) 面内ヘテロ構造を用いた光デバイス作製と評価、(2) 歪みを用いた２.５次元構造の作製と制御、(3) 化学成長した２.５次元物質の熱電及び電気伝導特性評価、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、低温電気/磁気伝導や発光実験を通して共同研究を行った。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、多様な TMDC 面内ヘテロ構造において、発光デバイスの作製と電流励起発光の観測と機能開拓を達成した（Fig. 1）。例えば、急峻な接合界面を有する WS_2/WSe_2 面内ヘテロ構造では、界面の歪み効果に起因した室温円偏光発光が生成可能であることを見出した（Fig. 1a）[2]。また、組成を連続的に変化させた面内ヘテロ構造においては、発光位置を系統的に制御することで、広範囲に発光色を連続・可逆的に制御可能なデバイス機能を実現した（Fig. 1b）[1]。さらに、面内ヘテロ構造に加えて、面直ヘテロ構造を用いた発光デバイスの作製にも成功した。同時に、面直ヘテロ構造への歪み効果の導入と、それによるモアレパターンの変調も可能となり、モアレの構造制御による光デバイスの創製が今後期待できる。

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/BN ヘテロ構造における巨大な熱電変換特性の実現や、TMDC 発光デバイスへのプラズモン効果の導入と発光特性評価にも取り組んだ。

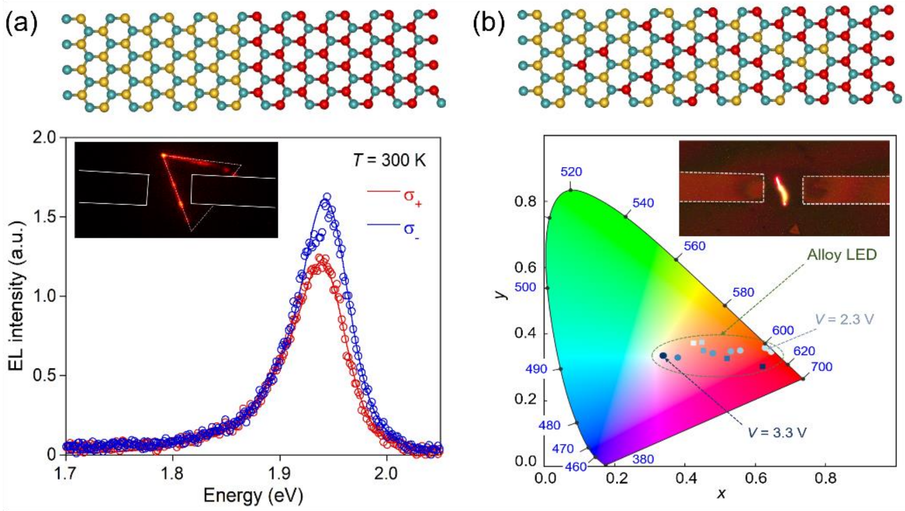


Figure 1 Monolayer in-plane heterostructure light-emitting devices. (a) Schematic, EL image, and EL spectrum obtained from WS_2/WSe_2 steep heterojunction interfaces. (b) Continuous color-tunable light-emitting devices based on compositionally graded interfaces of WS_2/WSe_2 alloys.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

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

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] J. Pu, H. Ou, T. Yamada, N. Wada, H. Naito, H. Ogura, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Yanagi, Y. Nakanishi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, T. Takenobu, Continuous color-tunable light-emitting devices based on compositionally graded monolayer transition metal dichalcogenide alloys, *Adv. Mater.*, **34**, 2203250 (2022)

[2] N. Wada, J. Pu, Y. Takaguchi, W. Zhang, Z. Liu, T. Endo, T. Irisawa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata, Efficient and chiral electroluminescence from in-plane heterostructure of transition metal dichalcogenide monolayers, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2203602 (2022)

[3] H. Ou, T. Yamada, M. Mitamura, Y. Edagawa, T. D. Matsuda, K. Yanagi, C.-H. Chen, L.-J. Li, T. Takenobu, J. Pu, Electric-field-induced metal-insulator transition and quantum transport in large-area polycrystalline MoS_2 monolayers, *Phys. Rev. Mater.*, **6**, 064005 (2022)

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

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

2021～2022 年度にかけて、(1) Au／WSe_2 ナノ構造の発光増強特性（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) TMDC 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）、などを中心に研究を行った。研究開始当初は、宮田 G や吾郷 G に TMDC やグラフェンの作製依頼を行っていたが、複数の研究室を訪問して CVD 合成方法や積層技術を習得し、現在では北海道大学の研究室で TMDC やそのヘテロ構造の作製を行っている。現在でも領域会議だけではなく活発に意見交換等を行って共同研究を進めている。

主な成果としては、CVD 合成した TMDC 上にナノギャップ金 2 量体構造を作製し、プラズモンによる発光や SHG の増強を観測した。これにより、プラズモンと励起子とのカップリングに関する新しい知見を得ることができた（Fig. 1(a), (b)）。また、2 層 WSe_2 構造を用いて TMDC 積層構造における層間呼吸振動モードを超高速分光により明らかにした（Fig. 1(c)）。さらに、MoS_2/WSe_2 ヘテロナノ構造を使用して、発光スペクトルを通じて電荷移動準位を明らかにした（Fig. 1(d)）。また、ヘテロナノ構造上に金ナノ構造を作製して（Fig. 1(e)）、プラズモン増強により MoS_2 と WSe_2 の発光増強をデモンストレーションした。電荷移動準位のプラズモン増強（EL 発光デバイス）については、令和 5 年度に明らかにする予定である（Fig. 1(f)）。

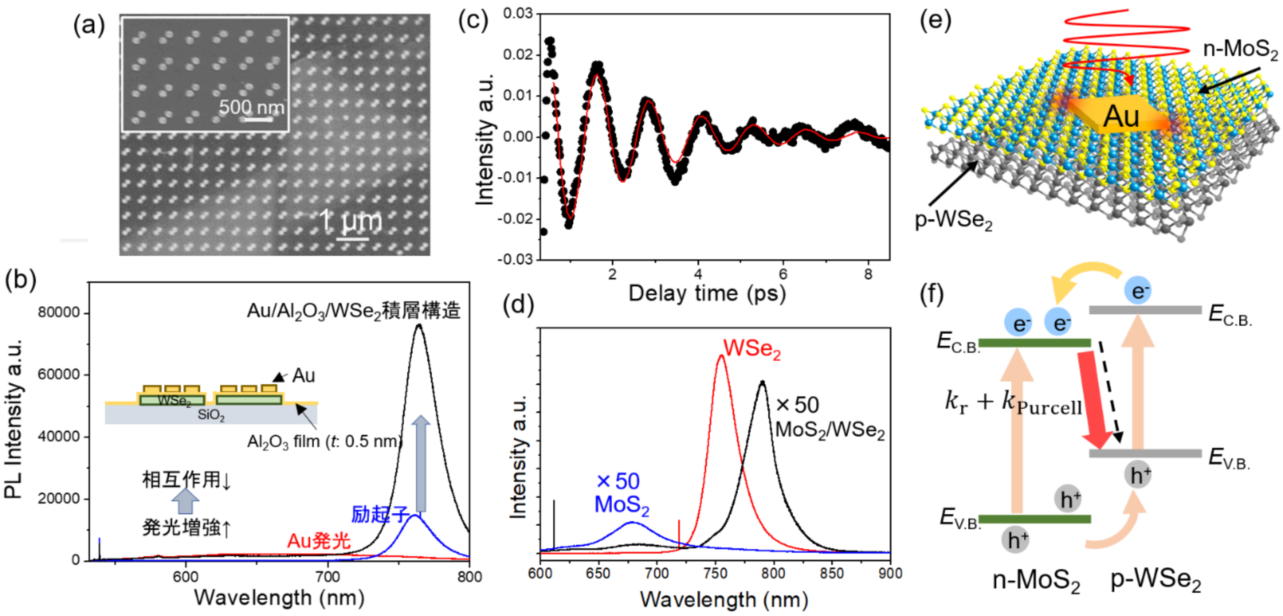


Figure 1 (a) SEM image of $Au/Al_2O_3/WSe_2$ nanostructures. (c) PL enhancement of $Au/Al_2O_3/WSe_2$ nanostructures. (c) Coherent optical phonon signals of interlayer breathing mode of bilayer WSe_2. (d) PL spectra of MoS_2/WSe_2 heterostructure, WSe_2 and MoS_2. (e) A schematic illustration of plasmon-enhanced light energy conversion devices using Au nanostructured TMDC heterostructure. (f) Energy diagram of plasmon-enhanced electroluminescence device using TMDC heterostructure.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】
吾郷 (A01)、宮田(A02)、蒲(A04)、長汐(A05)、松尾(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Ago, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio, Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **23**, 275 (2022).

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

2021～2022 年度にかけて、(1) ２次元層状チャネル FET のトップゲート絶縁膜における酸化膜換算膜厚(EOT)1.1 nm の達成、(2) 遠赤外領域と言われていた $PdSe_2$ のバンドギャップが 0.5 eV であることの実証、(3) パワーデバイスを目指した C dope された h-BN への電流注入、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。

主な成果としては、トップゲート絶縁膜における EOT = 1.1 nm の達成である。原子層材料は短チャネル効果に強いことから、次世代 CMOS チャネルとして注目されているが、原子層堆積法やスパッタリングを用いて成膜できる酸化膜(Al_2O_3, HfO_2 等)は高い誘電率を有するが、成膜時の原子層材料への欠陥導入だけでなく、原子層材料上での誘電率低下は依然として課題である。今回、加熱セル領域とメインチャンバー間に φ＝5 mm のアパチャーを導入し独立排気することで，希土類金属用セルは高真空に保ち，メインチャンバーの酸素分圧を独立して制御可能な蒸着チャンバーを構築した。本手法により原子層材料上への高誘電率絶縁膜 Er_2O_3 の形成を試み、急峻な I_D-V_{TG} 特性を得た(d)。また、トップゲートとバックゲート容量比から，κ_{TG} = 18, EOT = 1.1 nm を達成した。サブスレッショルド特性は MOS-FET の理論値である 60 mV/dec に近く(e)、MoS_2 への欠陥導入を抑えた絶縁膜堆積であることを示している(c)。本手法は、表面清浄な 2 次元材料上の絶縁膜の形成に有効であり、さらなる EOT 低減が可能である。

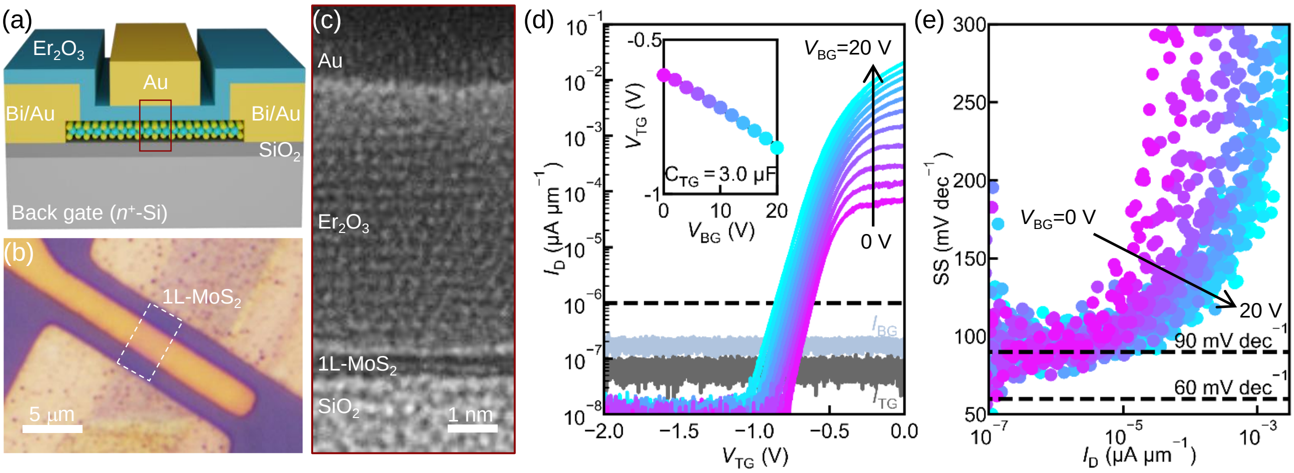


Figure 1 (a,b) Top-gated monolayer MoS_2 FET using a thermally-evaporated Er_2O_3 as the gate dielectric. (c) Cross-sectional TEM image of the top gate stack. (d) Bidirectional transfer characteristics at constant V_D = 2 V, various V_{BG}=0-20 V. Inset: V_{TG} at I_D=10^{-6} μA/μm as a function of V_{BG}. The slope of the linear fit yields the ratio of the top and bottom oxide capacitance, thus the extraction of C_{TG} was achieved. (e) Subthreshold swing as a function of I_D at different V_{BG}.

【2021-2022 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)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Uchiyama, K. Maruyama, E. Chen, T. Nishimura, K. Nagashio, "A monolayer MoS_2 FET with an EOT of 1.1 nm achieved by the direct formation of a high-κ Er_2O_3 insulator through thermal evaporation", *Small*, **19**, 2207394 (2023).
[2] S. Ngamprapawat, T. Nishimura, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio, "Current injection into single-crystalline carbon-doped *h*-BN toward electronic and optoelectronic applications", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **14**, 25731 (2022).
[3] W. Nishiyama, T. Nishimura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, and K. Nagashio, "Quantitative determination of contradictory band gap values of bulk $PdSe_2$ from electrical transport properties", *Adv. Funct. Mater.*, 32, 2108061 (2022).

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を目指し、2021～2022 年度にかけて、(1) リザバーコンピューティング実験系の構築、(2) ヒステリシスをもつカーボンナノチューブ薄膜トランジスタを用いたリザバーの構築と動作実証、(3) 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証と高次元化、(4) スマネンとカーボンナノチューブの相互作用の解析（A01 班との共同研究）などを中心に研究を行った。

主な成果としては、カーボンナノチューブ薄膜を用いた電気化学センサにおいて、リザバーコンピューティングが可能であることを実証し、特に糖尿病患者の血糖値の変化の予測を実証した。ここでは、４つのカーボンナノチューブ電極を用い、それぞれの表面を異なる条件で電気化学的に修飾し、電気化学的特性に変化をもたせることによってリザバーの次元性が向上している。さらに、酸化・還元に関わる拡散電流に加えて、電気二重層の充放電電流を用いることによって、さらにリザバーの次元性の向上が可能であることを明らかにした。これらによって、リザバー計算による予測性能が向上することを確認した。

また、超高密度ナノ積層ニューラルネットワークを実現する分子として注目しているスマネンについて、カーボンナノチューブ薄膜トランジスタを用いて、スマネンとカーボンナノチューブの相互作用を調べた。特に、フッ素化スマネンではフッ素の数によってカーボンナノチューブへのドーピングの極性や強度が変化することを見出し、領域内メンバーの理論的サポートを得て理解を進めた。

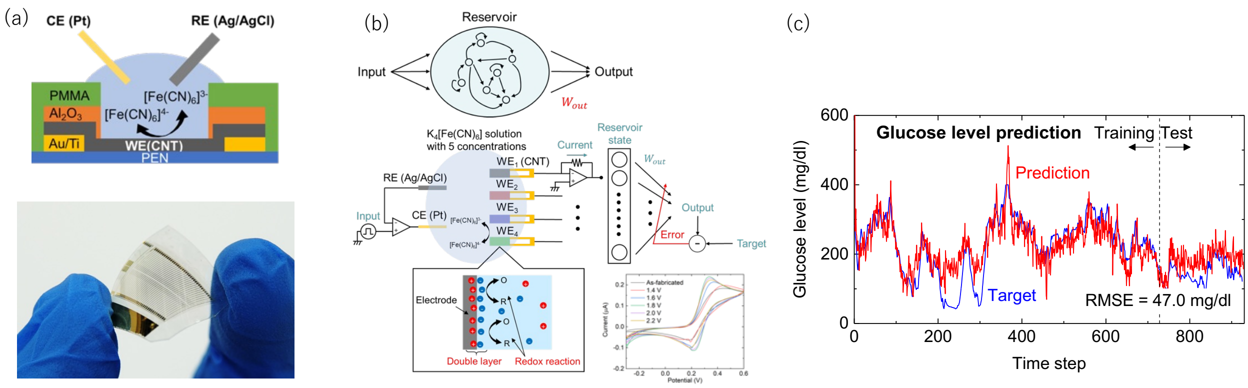


Figure 1 Reservoir computing based on carbon nanotube electrochemical sensors. (a) Schematic and photograph of carbon nanotube electrochemical sensor fabricated on plastic film. (b) Schematic of reservoir computing system based on carbon nanotube electrochemical sensor array. (c) Result of blood glucose level prediction task.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】
岡田(A01)、櫻井(A01)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Sun, P. Li, E. I. Kauppinen, D.-M. Sun, and Y. Ohno, “Key factors for ultra-high on/off ratio thin-film transistors using as-grown carbon nanotube networks”, *RSC Advances* **12**, 16291 (2022).
[2] F. W. Tan, J. Hirotani, and Y. Ohno, “PMMA/Al_2O_3 bilayer passivation for suppression of hysteresis in chemically doped carbon nanotube thin-film transistors”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, 034002 (2022).
[3] H. Oshima, K. Iwase, and Y. Ohno, “In situ monitoring of the electrical property of carbon nanotube thin film in floating catalyst chemical vapor deposition”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, 038002 (2022).
[4] M. Matsunaga, J. Hirotani, and Y. Ohno, “In-plane dual-electrode triboelectric nanogenerator based on differential surface functionalization”, *Appl. Phys. Exp.* **15**, 027006 (2022).

2.5次元材料の蓄電デバイスへの応用

松尾 吉晃（兵庫県立大学大学院工学研究科）

研究協力者：稲本 純一（同上）

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

2021～2022 年度にかけて、(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：Fig.1(a)）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の提供を行った。

主な成果としては、Fig.1(b)に示す可撓性を有し、粉末試料と同様のイオン貯蔵挙動を示す GLG のシートを作製できるようになり[1]、これを用い電気化学インピーダンス法を適用することで、電極電解液界面におけるイオン移動や電極内でのイオンの拡散挙動を評価することができるようになったことが挙げられる。

構造パラメータの異なる GLG シートに対する結果から GLG 層間におけるリチウムイオンの拡散係数を見積もったところ、Fig.1(c)に示すように黒鉛のものよりも 2～3 桁大きいことが分かった。またナノ孔量の多い GLG（GLG900）でより拡散係数が大きかったことから、リチウムイオンは層間で 2 次元的に拡散するだけでなくナノ孔を介して 3 次元的にも移動できるものと考えられ、これが GLG をリチウムイオン電池負極として用いた場合に急速充放電が可能な要因であることを明らかにできた[2]。

この他にも、領域メンバーの協力を得て、Na、Mg など黒鉛には挿入されない、もしくはされにくい化学種が GLG の層間には挿入できること、またアニオンの挿入脱離も容易であること[3]などを見出している。

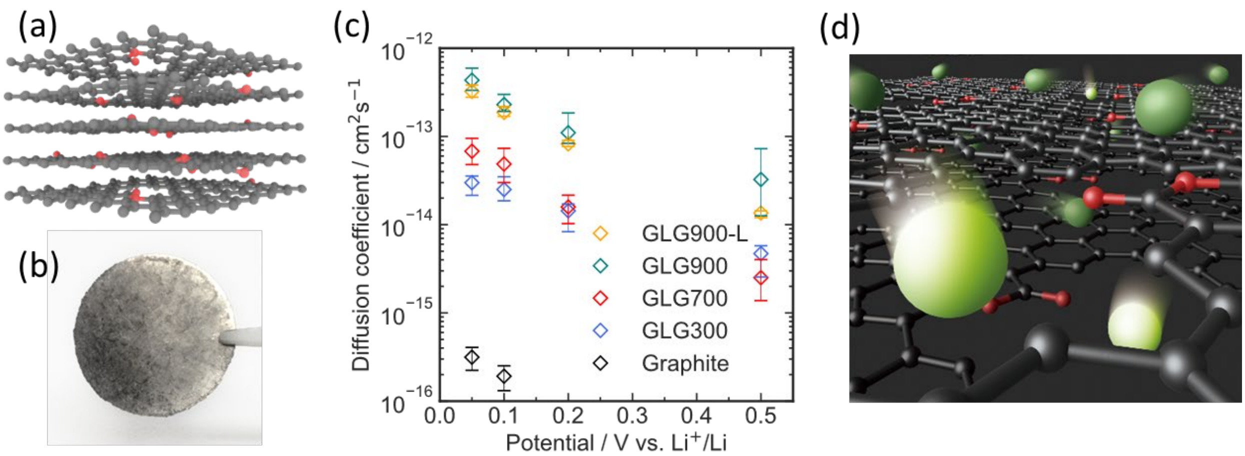


Figure 1 Synthesis of GLG sheet and elucidation of ion diffusion behaviors of it. (a) Structure model of GLG. (b) Photograph of GLG sheet. (c) Diffusion coefficient of graphite and GLGs at 0.05, 0.1, 0.2, and 0.5 V vs Li$^+$/Li. Here, GLG900-L is prepared from GO synthesized at 0 °C and then heat treated at 900 °C. (d) Schematic illustration of the diffusion of lithium ions through nanopores in GLG.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】

荒井(A02)、松本(A02)、吾郷(A01)、上野(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] J. Inamoto, S. Komiyama, and Y. Matsuo, "Synthesis of a flexible self-standing graphene-like graphite thin film and its application to an anode material for a thin-film all-solid-state lithium-ion battery," *Carbon Reports*, **1**, 142-146 (2022).
[2] J. Inamoto, S. Komiyama, S. Uchida, A. Inoo, and Y. Matsuo, "Insight into the Origin of the Rapid Charging Ability of Graphene-Like Graphite as a Lithium-Ion Battery Anode Material Using Electrochemical Impedance Spectroscopy," *J. Phys. Chem. C*, **126**, 16100-16108 (2022).
[3] Y. Matsuo, K. Sekito, Y. Ashida, J. Inamoto, and N. Tamura, "Factors Affecting the Electrochemical Behaviors of Graphene-Like Graphite as a Positive Electrode of a Dual-Ion Battery," *ChemSusChem*, **16**, e202001127 (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。2022 年度において、グラフェン、六方晶窒化ホウ素（hBN）、および 4 つの遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD：WS2、MoS2、WSe2、MoSe2）の計 6 つの原子層材料を対象に、電子状態に着目した積層パターンの探索を行った。具体的には、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、ベイズ最適化による積層パターン探索の有効性を検証した。その際、グラフェンを含む 2 層系においてはバンドギャップはほとんど開かず、hBN を含む 2 層系では大きなバンドギャップが開く傾向が分かった。そのため、材料種やずらしによって非自明なバンドギャップの変化を示す 4 種の遷移金属ダイカルコゲナイドからなる 2 層系を対象にベイズ最適化を適用した。ランダム探索とベイズ最適化によって、最大もしくは最小のバンドギャップを持つ積層パターンに到達するまでの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、2022 年度において約 500 構造の第一原理データを得たため、これらを皮切りにデータベース構築にも着手した。さらに、より高度な物性（トポロジカル物性など）を目的変数にしたベイズ最適化に向けたスクリプト等の拡張にも着手している。

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、越野グループ（A04 班）との共同研究も開始した。

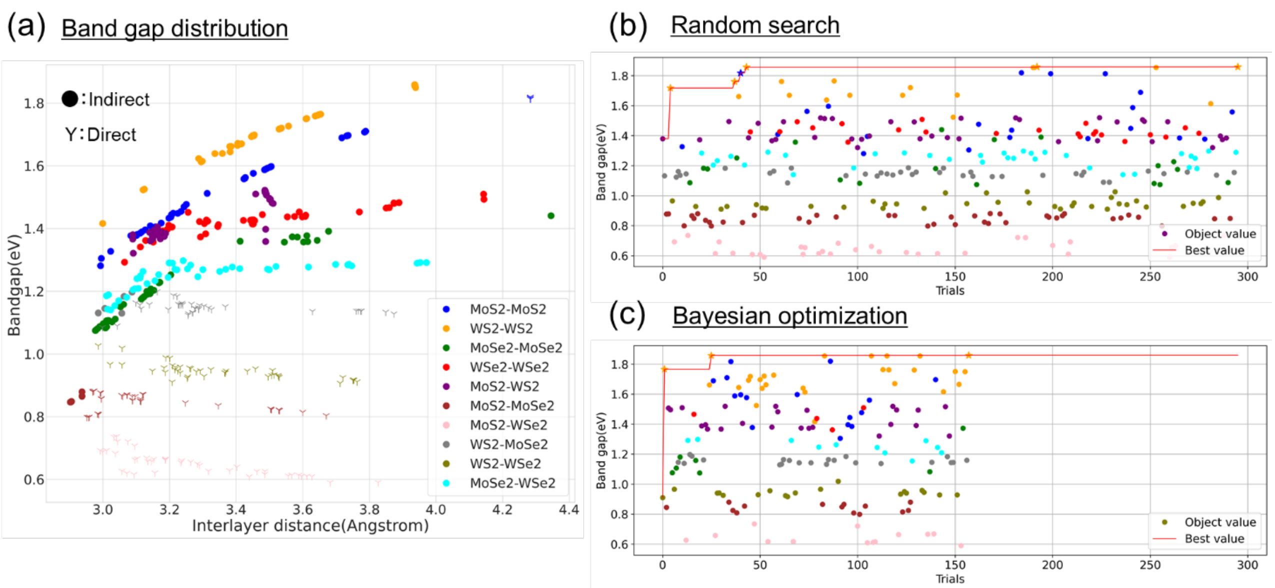


Figure 1 CVD synthesis of multilayer hBN and the integration with CVD-grown monolayer graphene. (a,b) Photograph and optical images of large-area, multilayer hBN. (c) Device arrays of graphene/hBN and graphene channels. (d) Comparison of the carrier mobility of different types of graphene devices.

【2022 年度の領域内共同研究者】
越野(A04)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Choi Beomgyu, Tsuyohiko Fujigaya, Koichiro Kato, Search for optimal hetero bilayer structure in 2.5D materials using first-principles calculations and Bayesian optimization, The 64th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium, March 2023.

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

一般的に同種のカルコゲン原子が上下面に配置された構造をとる遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）であるが、近年上下異なるカルコゲン原子から構成されるヤヌス TMD の存在が実証され大きな注目を集めている。ヤヌス TMD は通常の TMD とは異なり、面直方向にダイポールを持つため、新物性の発現が期待されている新機能性原子層材料である(Fig. 1(a))。2022 年度から公募班として参画した本領域研究では、主にこのヤヌス TMD を研究対象とし、高品質ヤヌス TMD の創製に重要である(1)その場観測プラズマ原子置換装置の開発、および同装置を活用した(2)ヤヌス化反応機構の解明などを中心に行った。同時に、多くの領域内共同研究者にヤヌス TMD の提供を行って、積極的な領域内共同研究の促進を行った。

主な成果としては、水素プラズマ照射中におけるヤヌス化反応過程を蛍光(PL)およびラマンスペクトルの空間マッピング計測により、リアルタイムでその場観測可能な手法を開発した。さらに、同装置に四重極質量分析器（Q-mass）を設置することで、ヤヌス化反応中気相内活性種の直接計測を可能とした。このその場観測プラズマ原子置換装置を用いて、ヤヌス化反応過程における蛍光(PL)マッピングのリアルタイム計測を行った結果、ヤヌス化反応が(i) 初期 TMD(WSe_2)PL 強度の急激な減衰, (ii)PL ピーク位置のブルーシフト、(iii)ヤヌス TMD(WSeS)の PL 強度増加という 3 つの特徴的な時間領域に分かれて進行することを明らかとした(Fig. 1(b))。さらに、気相内活性種計測から、硫黄と水素が反応した SH 系活性種が支配的な場合に良好なヤヌス TMD が生成されるのに対し、硫黄と酸素が反応した SO 系活性種が一定以上混入すると、ヤヌス TMD に欠陥が導入される可能性があることを見出した。これらの知見は、高品質ヤヌス TMD の創製に向けて重要な情報である。また、本手法で合成した高品質ヤヌス TMD の提供を通じた領域内共同研究により、ヤヌス TMD と通常 TMD の二層積層構造におけるモアレポテンシャル制御手法の開発、ヤヌス TMD を連続的に巻き込んだ構造のヤヌススクロールの創製、ヤヌス TMD の触媒活性計測、TMD ナノチューブのヤヌス化によるヤヌス TMD ナノチューブの創製、角度分解高電子分光を用いたヤヌス TMD の電子状態直接計測など数多くの共同研究開始に至った。

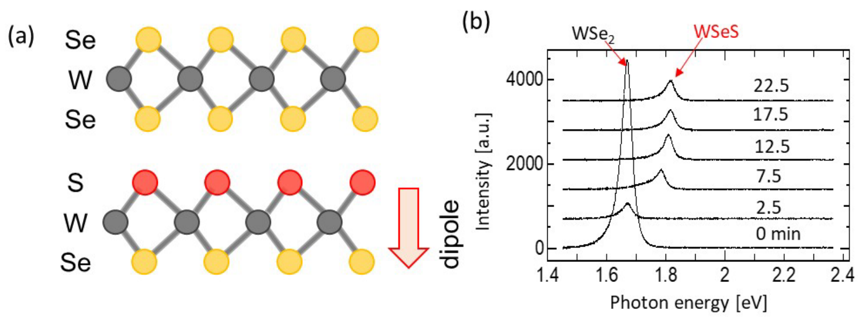


Figure 1 Fabrication of Janus TMD. (a) Typical structure of (top) normal TMD (WSe_2) and (bottom) Janus TMD (WSeS). (b) Time profile of PL spectra during Janus TMD (WSeS) formation obtained with in-situ monitoring plasma functionalization.

【2022 年度の領域内共同研究者】
岡田(A01)、蓬田(A01)、上野(A02)、宮田(A02)、高橋(A03)、坂野(A03)、笹川(A04)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] T. Kato, T. Kitada, M. Seo, W. Okita, N. Sato, M. Shinozaki, T. Abe, T. Kumasaka, T. Aizawa, Y. Muto, T. Kaneko, T. Otsuka, Scalable fabrication of graphene nanoribbon quantum dot devices with stable orbital-level spacing, *Commun. Mater.*, **3**, 103(2022).

[2] X. He, Y. Iwamoto, T. Kaneko, T. Kato, Fabrication of near-invisible solar cell with monolayer WS_2, *Sci. Rep.*, **12**, 11315 (2022).

高抵抗基板上における 14 族 2.5 次元物質の薄膜合成

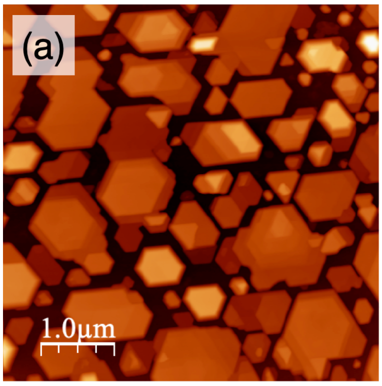
黒澤 昌志（名古屋大学大学院工学研究科）

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、今回の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絶縁膜上に合成すること）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。

公募班として参画した 2022 年度は、電気抵抗率が高く絶縁体と見なすこともできる floating zone 法で形成したシリコン(FZ-Si)基板の上に、$CaGe_2$ 層状物質（ゲルマネンの前々駆体）の薄膜を直接合成することに取り組んだ。具体的には、(1)固相拡散法（FZ-Si 基板上に Ge 層をエピタキシャル成長後、Ca 層を室温堆積させた後に熱処理を行う方法）および(2)同時蒸着法（FZ-Si 基板上に Ca と Ge を同時に蒸着する方法）により $CaGe_2$ 薄膜を作製し、結晶サイズ・結晶性等の比較を行った。固相拡散法では結晶粒の直径が 50 nmΦ程度と非常に小さかったが、同時蒸着法では 300 nmΦ程度と大きく結晶粒表面に平坦な部分がみられた。同時蒸着法で形成した薄膜から得られた X 線回折ピークの方が鋭い（すなわち、高品位な薄膜が得られる）ことも判明した。

同時蒸着法で形成した $CaGe_2$ 薄膜の表面形状を観察した例を Fig.1(a)に示す。基板温度を 800℃に上昇すれば 1000 nmΦ程度の結晶サイズを得ることも可能である。また、X 線回折法を用い、層状構造の積層配列（ポリタイプ）を評価したところ、準安定な 2H 構造が得られることも判明した（Fig. 1(b)）。これまでの先行研究（Ge(111)基板上への薄膜成長）では、最安定な 6R 構造が得られることが報告されている。つまり、本研究において新たな積層配列を得ることに成功したと言える。今後、領域メンバーの協力を得ながらこの理由を解明していきたい。この他にも、同時蒸着法で形成した $CaGe_2$ 薄膜を−40 °C の塩酸に浸漬することで、水素修飾ゲルマネン（ゲルマネンの前駆体）の薄膜合成にも成功した[1]。



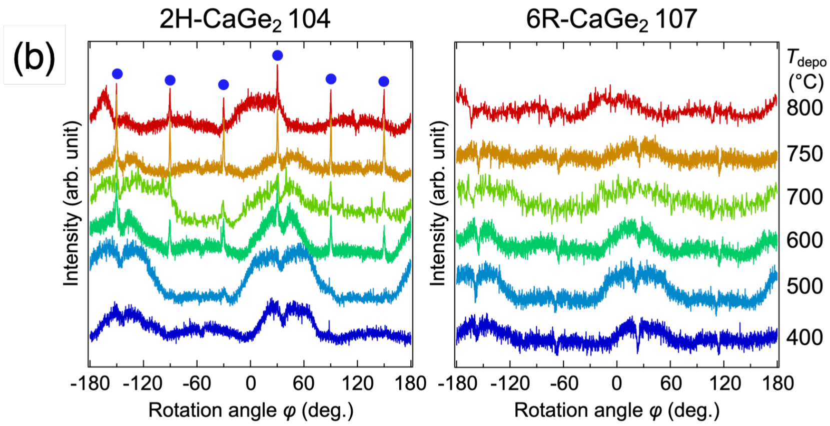


Figure 1 (a) Atomic force image of $CaGe_2$ films on FZ-Si(111) substrates grown by molecular beam epitaxy at 800 °C. (b) X-ray diffraction φ-scan of the 2H 104 and the 6R 107 obtained from the $CaGe_2$ films grown at different deposition temperatures (T_{depo} = 400–800 °C).

【2022 年度の領域内共同研究者】
長汐(A05)、杉本(A03)、石井(A05)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] K. Okada, S. Shibayama, M. Sakashita, O. Nakatsuka, and M. Kurosawa, Heteroepitaxial growth of $CaGe_2$ films on high-resistivity Si(111) substrates and its application for germanane synthesizing, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **161**, 107462 (2023).

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

本研究では、層間ナノ空間における分子・イオンの配列構造を精密に設計・制御することにより新規な構造・物性を開拓することを目指しており、そのための戦略として、分子認識場をあらかじめ有する環状中空分子をビルディングブロックとして集積構造を構築し、層間にて同種・異種ゲスト分子を積極的に配列化できる構造プラットフォームの構築を進めている（Figure 1a)。2022 年度の研究では、これまで我々が開発を進めてきた環状錯体集積型多孔性結晶 Metal-macrocycle framework (MMF)（*Acc. Chem. Res.* **2020**, *53*, 632）を二次元分子配列場として活用することを目的として、領域内共同研究を介して剥離条件の検討や細孔内へのクラスター導入などの実験を進めたところ、MMF 結晶を剥離できる良好な条件が共同研究者によって見出された。得られた剥離 MMF 薄膜を用いたさまざまな応用について現在検討を進めている。また、MMF 結晶は細孔内に異種複数の分子認識サイトを備えており、これまでにさまざまな有機分子や天然有機化合物、有機金属化合物が位置選択的に吸着することが明らかになっているので、剥離 MMF と他の二次元材料を複合化することにより、両者の特性を相乗的に活用したさらなる機能化を図る（Figure 1b)。

この他にも、独自に開発した環状中空分子を配位子として用いて MOF を合成することにより、ナノメートルサイズの凸凹を持つ二次元層が積層した 2D MOF 構造が得られることを明らかにした（Figure 1c)。この構造では、凸凹層がずれながら積層しており、層間に複数種のナノキャビティーを有する。この特異な構造特性を活用して、凸凹層間においてさまざまなゲスト分子を精密に配列することにより、新たな機能・物性の創出を目指して研究を進めている。

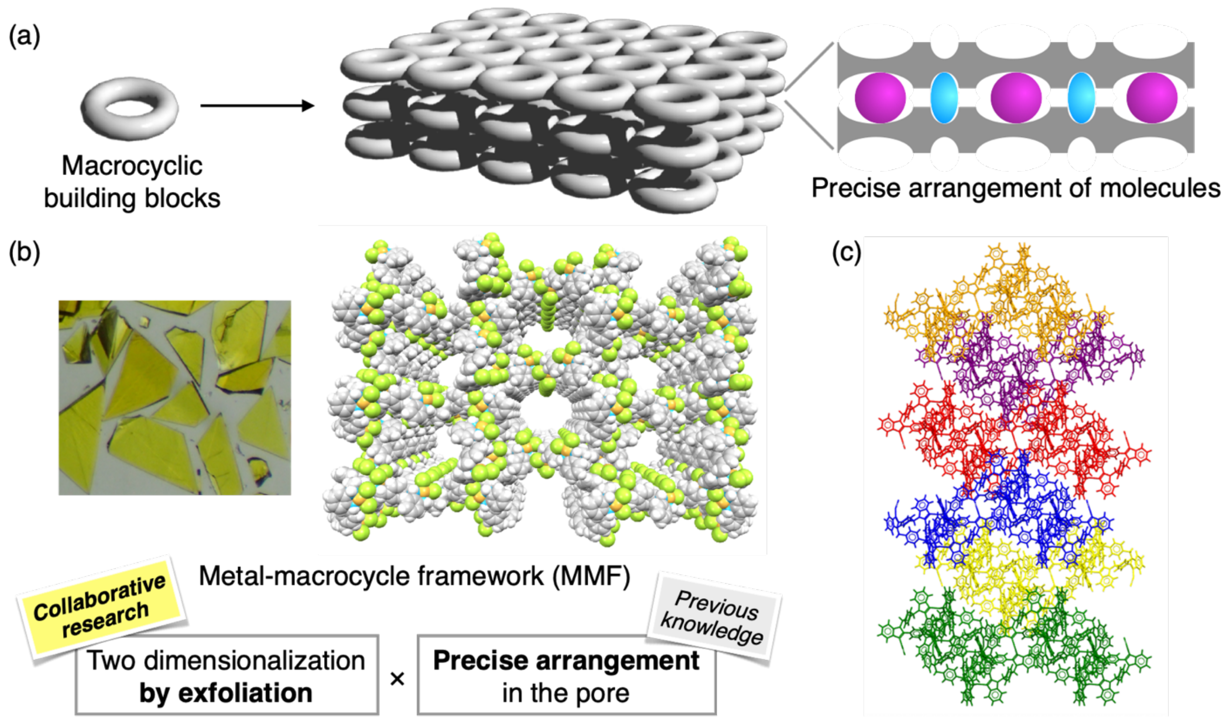


Figure 1 (a) Schematic of the basic concept of this work. (b) Structure of a porous crystal, metal-macrocycle framework, and its application for 2.5-dimensional materials. (c) Structure of a 2D-MOF with bumpy interlayer nanospaces.

【2022 年度の領域内共同研究者】
櫻井(A01)、友利(A04)

【2022 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

電子物性を自在に設計できるパイ共役系有機分子を水素結合によって 2 次元状にネットワーク化した有機結晶の複合化による 2.5 次元物質の創成に取り組んでいる。2022 年度はピレンのテトラカルボン酸 **CP-Py** とその水素化された類縁体 **CP-Hp** を用いた水素結合性２次元固溶体フレームワークの構築について研究を行った。複数の成分が不定比で混ざり合いネットワーク化した多孔性フレームワーク結晶は、機能の段階的な調整や機能創発の観点から注目されている。一般に、有機分子のみを用いて任意の組成をもつ不定比共結晶を構築することは困難であるため、カルボン酸の高指向性の水素結合２量化を利用して任意の割合で **Cp-Py** と **Cp-Hp** を混合させた２次元フレームワークの積層体の構築を行った（図 1)。共結晶化により得られた単結晶を **CP-HpPy-1**(x, y)　(0 < x < 1, 0 < y < 1) と表記する。X と y はそれぞれ、**CP-Hp** の初期溶液中のモル分率および得られた単結晶中の占有率を表す。**CP-HpPy-1**(x, y) において、分子がカルボキシ基の相補的な水素結合によって菱形の空孔をもつ 2 次元シートを形成し、このシートが積層することで 3 次元構造を構築していた。様々な仕込み比で得られた単結晶をディスオーダー解析し 2 成分の構成比を結晶学的に明らかにしたところ、初期溶液の混合比と単結晶中の構成比はよく相関することがわかった。水素結合部位をもたないピレンとヘキサヒドロピレンを混合し結晶化しても、それぞれが別々に単成分の結晶を与えることから、不定比共結晶の形成における分子間水素結合の重要性が示唆された。単結晶中における各成分の分布を明らかにするために、顕微ラマン分光測定を行ったところ、ラマンスペクトルは測定する位置によって異なる形状を示すことが明らかになった。これらの結果は、単結晶中の各成分が不均一に分布していることを示唆している。以上のように、ヘキサヒドロピレン誘導体（**CP-Hp**）とピレン誘導体（**CP-Py**）を用いて、明確な不定比共結晶 HOF（**CP-HpPy-1**）の構築を達成した。2 つの成分は任意の割合で 1 つの単結晶中に混ざり合うが、結晶中で不均一に分布していることが示された[1]。

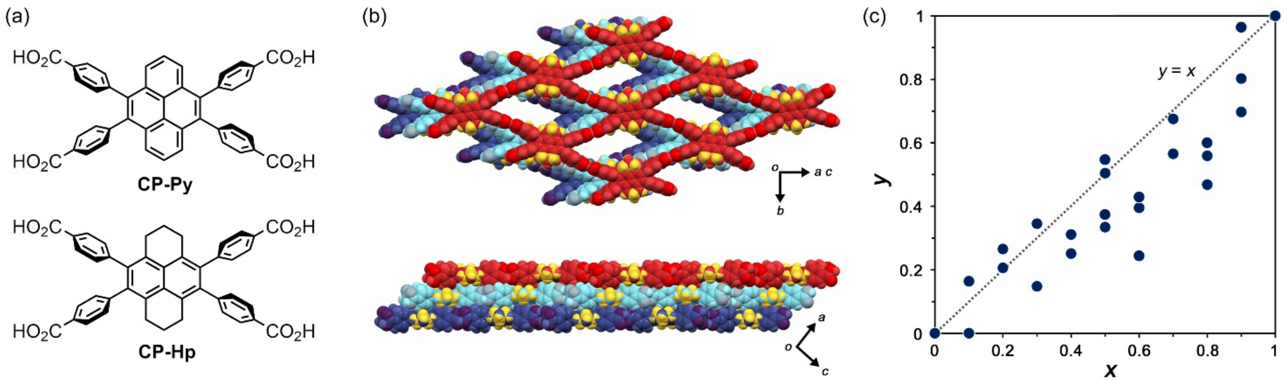


Figure 1. Non-stoichiometric co-crystalline frameworks formed through 2D hydrogen-bonded networking of **CP-Py** and **CP-Hp**. (a) Molecular structure of the components. (b) Crystal structure of the co-crystalline framework, where yellow-colored parts denote disordered moieties of **CP-Py** and **CP-Hp**. (c) Composition in single-crystals of **CP-HpPy-1**(x,y), where *x* and *y* denote the molar fraction and occupancy of **CP-Hp** in the initial solution and the resultant single crystal, respectively.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】
櫻井(A01)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] T. Hashimoto, R. Oketani, M. Nobuoka, S. Seki, I. Hisaki, Single Crystalline, Non-stoichiometric Cocrystals of Hydrogen-Bonded Organic Frameworks, *Angew. Chem. Int. Ed.* **62**, e202215836 (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

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。2022 年度は、（1）架橋ツイスト２層グラフェンの金属蒸着・結晶成長による物性制御、(2) 架橋ツイスト２層 h-BN へのグラフェンナノ構造成長を中心に研究を行った。

架橋ツイスト 2 層グラフェンについて、金属蒸着によるラマンシフトを詳細に調べた[1]。Fig. 1 (a)に示すように、銅箔上に CVD 成長したグラフェン２枚を転写して作った架橋ツイスト２層グラフェン（試料 A：銅箔上グラフェン 2 枚）の場合、測定場所(TEM グリッドの孔の違い)ごとのばらつきはあるが、Ga 金属の蒸着により G モードと 2D モードが共に低波数側にシフトする現象が観測された。グラフェンのラマンピークシフトはキャリアドーピング密度と歪みの影響を受けて変化することが知られており、蒸着によりドーピング密度の変化と引っ張り歪みの挿入が同時に起きていることが示唆される。一方、再表層として、銅(111)/サファイア基板上にエピタキシャル成長したグラフェンを転写した試料（試料 B:エピタキシャルグラフェン/銅箔上グラフェン）の場合、Fig. 1 (b)に示すように、蒸着によるシフトの方向が逆向きになる。2D モード変化が大きいことから、蒸着により 2 重共鳴過程と関連する電子状態変化が起きたと考えられる。

架橋ツイスト 2 層 h-BN については、銅箔上に成長した試料から架橋に用いる TEM グリッドへの転写が難しいことが課題となっているが、PMMA 濃度を変えることで転写収率が大きく変化することを見だした[2]。過硫酸アンモニウムと硫化鉄のそれぞれのエッチャントで収率が大きく変化するということも分かってきた。この試料に対し、アルコール CVD 法を用いてグラフェン成長を試みたところ、10 nm 程度の面積のグラファイトナノ構造の成長が確認できた。

以上の研究に加え、架橋原子層材料を用いたモアレ超格子の熱伝導測定や、分極反転構造上に生成した原子層材料のドーピング制御の研究、大面積原子層材料の半導体材料への直接成長の研究も進めており、PL 測定や試料提供について領域内で共同研究を行っている。

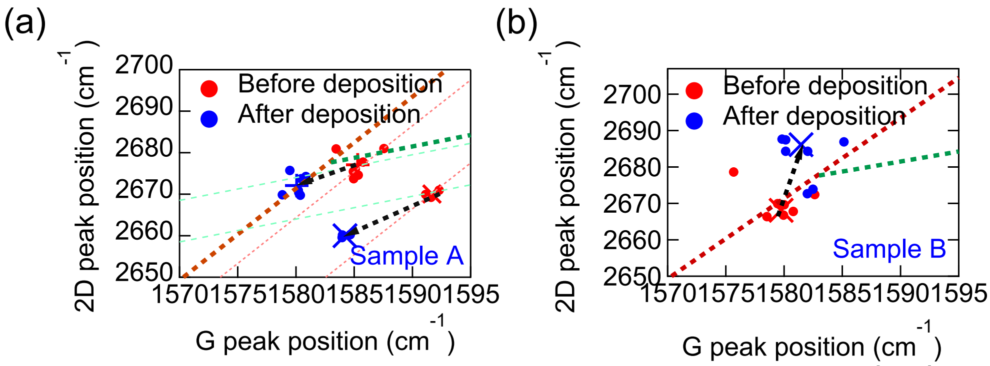


Figure 1 2D-G peak energy plots of the air suspended twisted bilayer graphene before（Red）and after (Blue) Ga metal deposition. Measurements were taken from several different holes of TEM grid. Figure (a) shows the plots for sample A composed of two CVD graphene and figure (b) shows that for sample B composed of both CVD and epitaxial graphene.

【2022 年度の領域内共同研究者】

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

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] 河瀬裕太、毛利真一郎 他、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会、2022 年 9 月

[2] 利根川舜、毛利真一郎 他、第 64 回フラーレンナノチューブグラフェン学会総合シンポジウム 2023 年 3 月

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

2022 年度は、2.5 次元遷移金属カルコゲナイドナノチューブ（TMDNT）の創製とその物性開拓に関する研究を行った。具体的には、(1)2.5 次元 TMDNT のベースとなる小直径ナノチューブ（NT）の合成と光物性解明、 (2)異なる遷移金属カルコゲナイド（TMD）を同軸積層したヘテロ NT の創製、 (3) TMD ヤヌス NT の創製と光物性開拓、(4)TMDNT の水素発生反応の研究を行った。

(1)構造制御された酸化タングステンナノワイヤを気相法により得て、その硫化により、直径 10 nm 程度の小直径 WS_2 NT、WSe_2 NT を得る合成技術を開発した（Fig. 1a）。従来の試料（直径 100 nm）に比べて、大幅な直径の低減に成功している。得られた試料は、赤方偏移した光励起発光を示す（Fig. 1b）。これは、バンド計算の予想とも一致し、NT の曲率効果によるバンドギャップの狭化の影響と考えられる。この小直径 NT の合成技術は、全ての 2.5 次元 NT 研究のベースとなり、以下の研究の進展に大きく貢献した。(2)得られた小直径 NT をテンプレートとして外壁に MoO_3 を形成し、その硫化により、半導体ヘテロ NT を創製した（Fig. 1c）。(3)小直径 WSe_2 NT をベースに、水素プラズマ処理・硫化を行い、ヤヌス WSSe NT を創製した。元の WSe_2 NT とは異なるヤヌス構造に由来するラマンスペクトルが得られている（Fig. 1d）。(4)小直径 NT を用いて HOPG 上に電気化学セルを作製し、TMDNT に由来する水素発生反応を観察した。

本研究は、領域内の多くの方々にサポートしていただいた。小直径 TMDNT のバンド計算（岡田 G）、TMDNT の水素発生反応（高橋 G）、TMD ヤヌス NT の創製（加藤 G）、TMDNT の SHG 応答（松田 G）等が関係する。特に、ヤヌス NT 創製と SHG 応答は、本領域が無ければ実現しえなかった研究である。今後、研究をさらに進め、2.5 次元 TMDNT 由来の物性・応用を見いだし、成果を論文にまとめる。

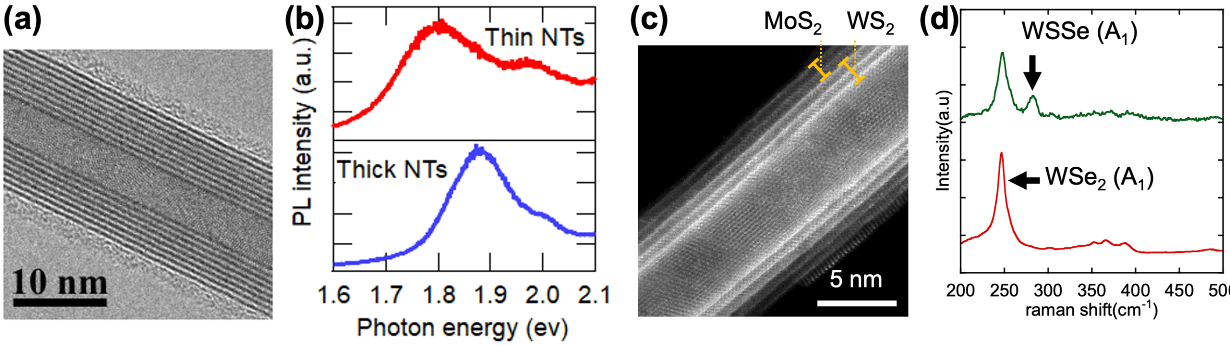


Figure 1 Creation of 2.5D transition metal dichalcogenide nanotubes (TMDNTs) (a,b) Transmission electron microscope (TEM) image (a) and photoluminescence properties (b) of small-diameter (thin) TMDNTs. (c) TEM image of TMD heteronanotubes composed of MoS_2 outerlayer and WS_2 innerlayer. (d) Raman spectra of Janus WSSe NTs and WSe_2 NTs.

【2022 年度の領域内共同研究者】

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

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] S. Furusawa, Y. Nakanishi, Y. Yomogida, Y. Sato, Y. Zheng, T. Tanaka, K. Yanagi, K. Suenaga, S. Maruyama, R. Xiang, Y. Miyata, Surfactant-Assisted Isolation of Small-Diameter Boron-Nitride Nanotubes for Molding One-Dimensional van der Waals Heterostructures, *ACS. Nano*, **16**, 16636-16644 (2022).

[2] K. Ueji, N. Muto, D. Heimfarth, Y. Matsuoka, Y. Ichinose, Y. Yomogida, T. Yagi, J. Zaumseil, K. Yanagi, Heat and Charge Carrier Flow through Single-Walled Carbon Nanotube Films in Vertical Electrolyte-Gated Transistors: Implications for Thermoelectric Energy Conversion, *ACS Appl. Nano Mater.*, **5**, 6100-6105 (2022).

[3] M. A. Rahman, Y. Yomogida, M. Nagano, R. Tanaka, K. Yanagi, Structures and optical properties of thin tungsten oxide nanowires treated with poly (ethylene glycol), *Jpn. J. Appl. Phys.*, **61**, SD1018 (2022).

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

2022 年度においては、(1) バッファ層に用いる硫化ガリウム（GaS）単結晶をブリッジマン法で成長するための縦型管状炉および石英アンプル垂直微動装置の設計・製作、(2) GaS 単結晶の試作、(3) 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）単結晶の成長、(4) 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、(5) 10 K 程度までの低温での FET 測定が可能なプローバ装置の作製、といった研究を行った。また、CVT 法で作製した多種多様な TMDC 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、納品がかなり遅れたものの、ブリッジマン法単結晶成長装置が完成した(Fig. 1(a))。本装置により、CVT 法で得られたものよりも大型で厚いバルク単結晶の成長に成功している(Fig. 1(b))。また、GaS をバッファ層、MoS_2 をチャネル層とする、Fig. 1(c)の模式図に示すような FET を作製した。バッファ層の有無による動作特性の違いを、同一の MoS_2 薄片で測定できるように S/D 電極（Au）を配置している。試料温度を変えて動作特性を測定し、GaS のバッファ層としての有効性について検証を進めている。

領域内共同研究者への試料提供については、VSe_2, VTe_2, $NbSe_2$, 2H-TaS_2, 1T-TaS_2, MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2, 2H-$MoTe_2$, 1T′-$MoTe_2$ 等の TMDC 単結晶を CVT 法により成長し提供した。今後は GaS, GaSe, InSe 等の、TMDC 以外の層状物質単結晶についても試料提供を進めていきたい。

Figure 1　(a) Single-crystal growth system by the Bridgman method.　(b) GaS single crystals grown by the Bridgeman method.　(c) Schematic diagram of a MoS_2 field-effect transistor with GaS as a buffer layer.

【2022 年度の領域内共同研究者】

岡田(A01)、渡邉(A01)、加藤（俊）(A01)、毛利(A01)、宮田(A02)、北浦(A02)、松田(A03)、杉本(A03)、柳(A03)、長汐(A05)、山本(A05)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] H. Ogura, S. Kawasaki, Z. Liu, T. Endo, M. Maruyama, Y. Gao, Y. Nakanishi, H.E. Lim, K. Yanagi, T. Irisawa, K. Ueno, S. Okada, K. Nagashio, Y. Miyata, Multilayer In-Plane Heterostructures Based on Transition Metal Dichalcogenides for Advanced Electronics, *ACS Nano*, **17**, 6545-6554 (2023).

[2] W. Nishiyama, T. Nishimura, M. Nishioka, K. Ueno, S. Iwamoto, and K. Nagashio, Is band gap of bulk $PdSe_2$ located really in far infrared region? Determination by Fourier Transform Photocurrent Spectroscopy, *Adv. Photonics Res.*, **3**, 2200231 (2022).

[3] T. Sasaki, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Nishimura, and K. Nagashio, Ultrafast Operation of 2D Heterostructured Nonvolatile Memory Devices Provided by the Strong Short-Time Dielectric Breakdown Strength of *h*-BN, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 25659–25669 (2022).

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

2021～2022 年度にかけて、(1) 有機金属化学気相成長(MOCVD)法による 1.5-２.５次元物質の成長と機能開拓、(2) 二次元積層系における光電子機能の探索、(3) 1.5 次元物質の光学応答観測のための手法開発、などを中心に研究を行った。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、高品質六方晶窒化ホウ素の試料提供、KPFM による表面電位の評価などで協力いただくと同時に、光電流マッピング測定で協力をするなど、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、MOCVD 装置の整備をすすめ新奇接合構造を実現したこと、積層構造・歪構造などにおいて光起電力を観測したこと、ゲート変調反射分光測定を実施し微弱なシグナルを捉えることに成功したことがある。Figure 1 には MOCVD 装置の写真を示した。こちらは名古屋大学在籍時に整備し、シャープな界面をもつ二次元接合が実現できることが明らかになっていたが、本年度は二層の二次元接合の作製にも成功し、今後の新たな機能開拓の足がかりを築くことができた。また、(b),(c)に示したように、積層構造において光起電力が生じることを光電流マッピングを始めとする種々の測定から明らかにした。KPFM 測定から、pn 接合などによる内蔵電位がないことも確認され、この光起電力は内蔵電位に駆動されるものではないことが明らかとなった[1],[2]。これら以外にも、二次元系に分子（ゼロ次元）をつけた構造で、Covid-19 ウイルスを検出する試みも進めた[3]。

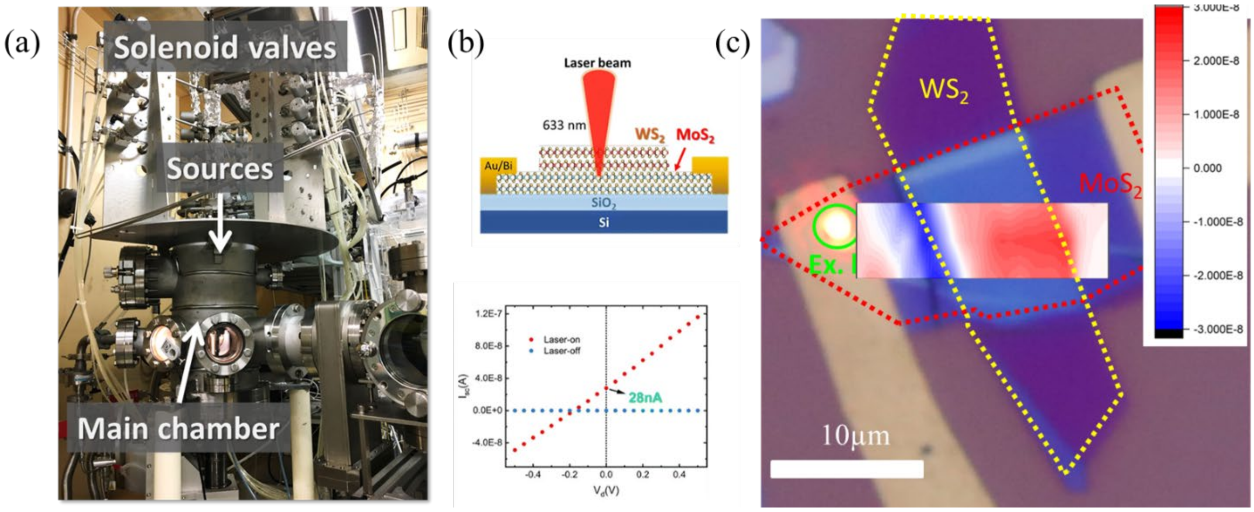


Figure 1 (a) Photograph of the MOCVD setup developed. Using this MOCVD setup, bilayer lateral heterostructures can be grown. (b) top: Schematic representation of a two-terminal device with a WS_2/MoS_2 channel, and bottom: IV characteristic under laser excitation. (c) Optical image of the two-terminal device and a photocurrent mapping result measured at room temperature.

【2021-2022 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)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] S. Zhang, M. Maruyama, S. Okada, M. Xue, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Hashimoto, Y. Miyata, R. Canton-Vitoria, R. Kitaura, Observation of the photovoltaic effect in a van der Waals heterostructure, *Nanoscale*, **15**, 5948 (2023).

[2] S. Zhang, M. Xue, F. Zeng, *R. Kitaura*, An observation of a photovoltaic effect in MoS_2 nanoribbons fabricated with a top-down approach, *Appl. Phys. Exp.*, **16**, 035003 (2023).

[3] R. Canton-Vitoria, K. Sato, Y. Motooka, S. Toyokuni, Z. Liu, R. Kitaura, Field-effect transistor antigen/antibody-TMDs sensors for the detection of COVID-19 samples, *Nanoscale*, **15**, 4570 (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、2022 年度は、(1) h-BN 単結晶上への金属～絶縁体相転移を示す VO_2 薄膜の形成とデバイス化、(2) CVD 成長大面積 hBN 薄膜への VO_2、強磁性 Fe_3O_4 の成長などを中心に研究を行なった。

主な成果としては、A01-渡邊グループより供給いただいた h-BN 単結晶上へパルスレーザ蒸着法を用いて VO_2 薄膜を形成し、1～10μm 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を形成し、電流スッチングを観測した（Fig.(a)）。特に、強い結合を有しないファンデルワールス表面を持つ hBN 上に成長した酸化物薄膜は大きな結晶粒を有し相転移特性も優れていることから、マイクロ二端子デバイスにおいて、シングルドメインに起因する多段階スイッチを見出した（Fig.(b)）[1]。また大面積での試料作成を可能とするため、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 薄膜を成長することにも成功した（Fig.(c)）。大面積試料を得たことにより、X 線構造解析により、(001)配向 hBN 上で VO_2 が（110）優先配向すること、また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（Fig.(d)）。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^- イオンがイオン/共有結合でピンされ、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界面モデルが提案された。このモデルは hBN 上で成長させた酸化物薄膜の物性が、殆ど膜厚依存性を示さないことを説明できる。

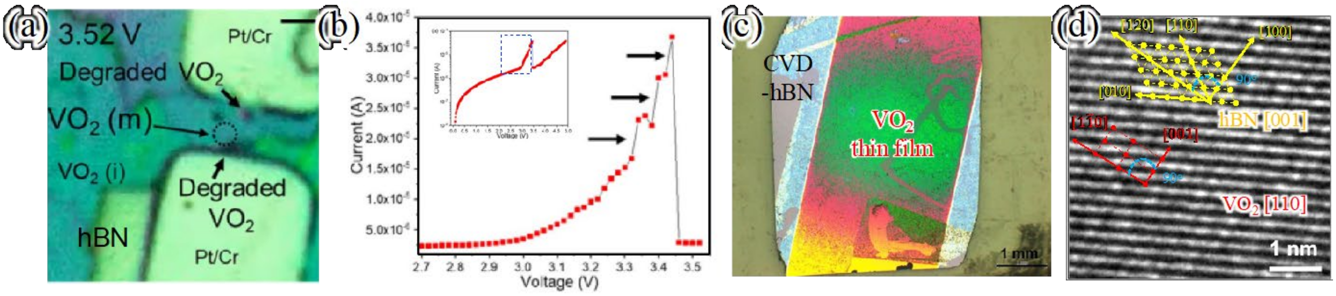


Figure 1 Optical microscope image of VO_2 film on single crystalline h-BN flake for current induced resistive switching device, (b) Voltage – Current characteristic of VO_2/crystalline h-BN flake device, (c) Optical microscope image of pulsed laser deposition grown VO_2 film on CVD-grown h-BN film, (d) Plane view TEM image of VO_2 film on CVD-grown h-BN.

【2022 年度の領域内共同研究者】

渡邊(A01)、吾郷(A01)、小野(A05)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] S. Genchi, S. Nakaharai, T. Iwasaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Wakayama, A. N. Hattori and H. Tanaka., Step electrical switching in VO_2 on hexagonal boron nitride using confined individual metallic domains, *Jpn. J. Appl. Phys.*,**62**, SG1008 (2023),

[2] 玄地真悟、田中秀和, 六方晶窒化ホウ素を用いた自由自在な機能性酸化物薄膜成長と素子応用展開への可能性 , 生産と技術, 74, 59-62 (2022)

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。特にシリセンに原子を吸着した系は、その電子物性や構造自体を局所的に変化させせうる 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、走査型プローブ顕微鏡を用いて、Si アドアトムをシリセンに導入し、原子スケールで観察と評価を行った。

本研究では、超高真空環境で動作する周波数変調方式原子間力顕微鏡 (AFM)を用いて、Ag(111)表面上に作製したシリセンの(4×4)相上 Si アドアトムの観察を原子分解能で行った[1]。Si アドアトムをシリセン上に吸着させるために、シリセン/Ag(111)を室温に保ちながら Si の蒸着を行った。図 1a は AFM を用いて得られたシリセンに吸着した Si アドアトムの凹凸像である。図 1b は密度汎関数理論に基づいた計算により得られたシリセンに吸着した Si アドアトムの構造モデルである。構造モデルは、AFM 観察をよく再現しており、Si アドアトムの吸着位置を完全に決定することができた。重要なことに、Si アドアトムの吸着によりシリセンの座屈構造が変化していることが判明した。したがって、この新しい 2.5 次元物質は、新たな物性を示す可能性がある。さらに、AFM を用いて個々の Si アドアトムをシリセン上で操作できることも示し、局所的な座屈構造を変化させることで局所物性の制御が可能である。

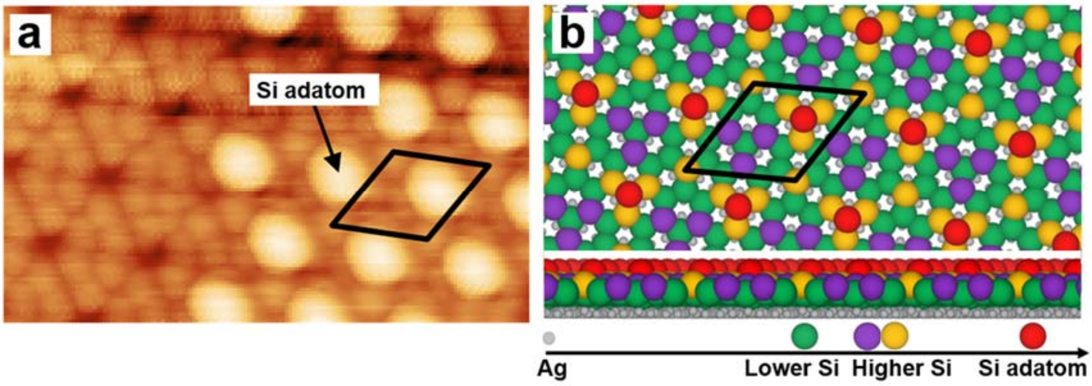


Figure 1 (a) AFM topographic image of silicene surface with additional Si adatoms. Imaging parameters: $\Delta f = -12$ Hz, V_S = 0.75 V, 3.8 × 8.0 nm^2, T = 78 K. (b) DFT optimized atomic structure of the silicene decorated with Si adatoms. Black rhombus indicates the unit cell of 2D island of Si adatom on silicene.

【2022 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)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Adachi, R. Zhang, X. Wang, M. Fukuda, T. Ozaki, and Y. Sugimoto, Atomic arrangement of Si adatom on the Silicene/Ag(111) surface, *Appl. Surf. Sci.*, **630**, 157336 (2023).
[2] D. Katsube, R. Shimizu, Y. Sugimoto, T. Hitosugi, and M. Abe, Identification of OH groups on SrTiO3(100)-(R13xR13)-R33.7 reconstructed surface by non-contact atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 071602 (2023).
[3] M. Kimura, and Y. Sugimoto, Lattice distortion of oxygen monolayer on Ag(111) observed by scanning probe microscopy, *Phys. Rev. B*, **106**, 115432 (2022).

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

2022 年度は、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、水素発生反応（HER）や CO_2 還元反応（CO_2RR）についてナノ構造と触媒活性の関係を評価した。CO_2RR による化成品合成では、HER が副反応として生じることで、生成効率が著しく下がる。HER では、触媒表面に吸着した水素原子（H*）同士が会合し、水素分子が発生する。水素発生が優位に進行する反応では、反応中間体である還元された一酸化炭素分子（CO*）よりも、H*が触媒表面を占有している。そのため、化成品の合成を優位に進行させるには、水素発生能力が低い触媒が原理的に良いと考えられる。この仮定を証明するため、水素発生触媒として二硫化モリブデンカルコゲナイド（MoS_2）を、化成品を選択的に電解合成する触媒として二硫化錫カルコゲナイド（SnS_2）をそれぞれ用いた。さらに構造と触媒能の関係を明確化させるために、ナノシート構造の触媒を作製し、構造と触媒活性の関係を電気化学的に評価した。MoS_2 ナノシートは、HER 触媒活性サイトが、エッジに局在することを確認している（*Angew. Chem. Int. Ed*. 2020, 59, 3601–3608.）。一方で、SnS_2 ナノシートは化成品合成（ギ酸）に有効な触媒として知られてきたが、どのようなサイトでどのように反応が進行しているかは分かっていない。そこで、SnS_2 の触媒活性サイトを明らかにするとともに、これらの触媒を比較することで、副反応である水素発生を抑えるためにどのような特徴が触媒に必要かを検討した。

SECCM では、半径 50 nm のナノピペットの中に、二酸化炭素ガスで飽和した水溶液を満たし、Pd-H_2 参照電極を挿入し、二酸化炭素の還元電流イメージングを行った（図１a）。先行研究により、MoS_2 ナノシートは、エッジが水素発生の高い触媒活性サイトとなることを確かめた（図１b）。一方で、SnS_2 ナノシートの二酸化炭素還元反応は、エッジだけではなくテラス上でも生じることが明らかとなった（図１c）。さらに、SECCM のナノピペットを SnS_2 ナノシートのエッジとテラスに配置し、線形掃引ボルタンメトリー法による計測を行ったところ、エッジとテラスで還元電流値の差がないことが確認できた（図１d）。また、二酸化炭素ガスで飽和した炭酸水素カリウム水溶液中での還元電流値（二酸化炭素の還元と水素発生由来の応答）は、アルゴンガスで飽和した炭酸水素カリウム水溶液中での還元電流値（水素発生由来）よりも優位に高いことが確認できました。以上から、本研究で作製した SnS_2 ナノシートは、表面全体を触媒サイトとして有効活用できることが分わかった。

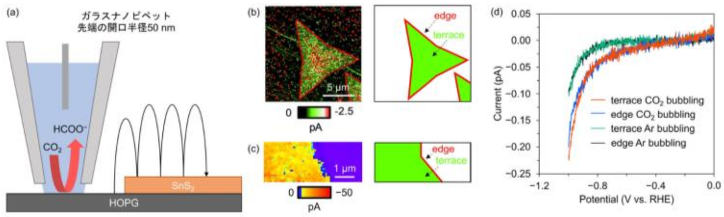


Fig. 1 (a) A schematic illustration of SECCM imaging. (b) HER imaging on MoS_2 nanosheet. (c) CO_2RR imaging on SnS_2 nanosheet. (d) cyclic voltammetry of edge and terrace of SnS_2 nanosheet.

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。

【2022 年度の領域内共同研究者】

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

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1]　Y. Kawabe, Y. Ito, Y.Hori, S. Kukunuri, F. Shiokawa, T. Nishiuchi, S. Jeong, K. Katagiri, Z. Xi, Z. Li, Y. Shigeta, and Y. Takahashi, 1T/1H-SnS2 Sheets for Electrochemical CO2 Reduction to Formate, *ACS Nano* Accepted.

[2]　Y. Takahashi, D. Takamatsu, Y. Korchev and T. Fukuma, Correlative Analysis of Ion-Concentration Profile and Surface Nanoscale Topography Changes Using Operando Scanning Ion Conductance Microscopy, *JACS Au* 2023, 3 (4), 1089-1099.

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）、蓬田陽平（同上）

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

2022 年度において、(1)大面積で合成された単層遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)薄膜の４層転写系における熱・電荷輸送の同時計測、(2)単一ドメイン単層 TMDC 薄膜における計測に向けた顕微時間領域サーモリフレクタンス（TDTR）計測技術の開発、(3)ファンデルワールス界面へのインターカレーションと熱・電荷輸送との相関、などを中心に研究を行った。2022 年度から参加となり、領域会議等を通して領域内研究者との議論により新たな共同研究も実施している。領域内の研究者による TMDC 薄膜試料やその転写手法に関して協力を得て、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、大面積合成された TMDC 薄膜積層系における熱伝導および電気伝導の同時計測を達成し、また界面構造を系統的に変化させるアプローチとしてアニーリング処理に着目し、系統的に界面電気伝導と熱伝導との相関を明らかにすることができた(Fig1)。これまでの人為的に積層した２次元界面においては極めて低い熱伝導が報告されているが、電気伝導との関係は明らかになっていなかった。本研究によって、電気伝導との相関が明らかになり、低熱伝導性の起源に関する理解を深めた。

この他にも、顕微 TDTR 測定系を構築し、現在、単一ドメイン単層 TMDC 積層膜での熱伝導計測を進めている。また、導電性ポリマーの層間にインターカレーションすることによる熱伝導の変化を見出し、電界効果による熱流制御が可能であることを見出すことができた。

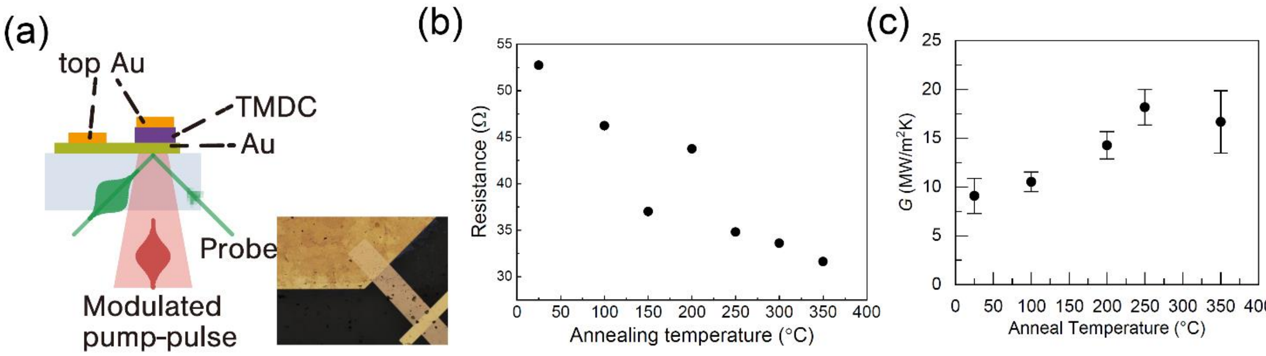


Figure 1 Schematic illustration of experimental setups for thermal and change transport measurements across vdW interfaces formed by four layered MoS2 samples. (b) Resistance and (c) thermal conductance as a function of annealing temperature.

【2022 年度の領域内共同研究者】

宮田(A02)、町田(A02)、荒井(A02)、蓬田(A01)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Kan Ueji, Nobuhiro Muto, Daniel Heimfarth, Yuya Matsuoka, Yota Ichinose, Yohei Yomogida, Takashi Yagi, Jana Zaumseil, Kazuhiro Yanagi “Heat and Charge Carrier Flow through Single-Walled Carbon Nanotube Films in Vertical Electrolyte-Gated Transistors: Implications for Thermoelectric Energy Conversion” ACS Applied Nano Materials 5, 6100-6105 (2022)

[2] Md Ashiqur Rahman, Yohei Yomogida, Mai Nagano, Ryoga Tanaka, Kazuhiro Yanagi , “Structures and optical properties of thin tungsten oxide nanowires treated with poly (ethylene glycol)” Japanese Journal of Applied Physics 61 SD1018 (2022)

[3] Shinpei Furusawa, Yusuke Nakanishi, Yohei Yomogida, Yuta Sato, Yongjia Zheng, Takumi Tanaka, Kazuhiro Yanagi, Kazu Suenaga, Shigeo Maruyama, Rong Xiang, Yasumitsu Miyata “Surfactant-Assisted Isolation of Small-Diameter Boron-Nitride Nanotubes for Molding One-Dimensional van der Waals Heterostructures” ACS Nano 10, 16636-16644 (2022)

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

Yung-Chang LIN（産業技術総合研究所）

研究協力者：Qiunan Liu（大阪大学）

E-mail: yc-lin@aist.go.jp

2021 年から 2022 年にかけて、私たちの研究は以下の 2 つの主要な領域に焦点を当てていました：(1) WS2 中での遷移金属のパターニングとドーピング、および (2) MoCl5 を用いた二層グラフェンのインターカレーション。

グラフェンをドーピングマスクとして利用し、WS2 への遷移金属の選択的ドーピングのための新しい方法を開発しました。グラフェンの薄い層は化学的に不活性であり、ホスト 2D 材料におけるドーピング反応の空間的な制御が可能となります。さらに、グラフェンは接触金属とドープされたチャネルの間に挿入層として機能し、低い接触抵抗のためにフェルミ準位のデピンニングを実現します。[1]

MoCl5 を用いた二層グラフェンのインターカレーションについて研究しました。走査透過型電子顕微鏡を用いてインターカレーション物質の原子構造を調査しました。驚くべきことに、MoCl5 ではなく、MoCl3 のネットワーク、MoCl2 の鎖、および Mo5Cl10 のリングから成るインターカレーション物質が存在することがわかりました。この結果は、インターカレーション材料の原子構造について正確に理解することが、それらの実用的な応用において誤解や誤った解釈を避けるために重要であることを示しています。[2]

さらに、FeCl3 やアルカリ金属を用いた二層グラフェンのインターカレーションに関する研究も現在進行中であり、近い将来に結果を発表する予定です。

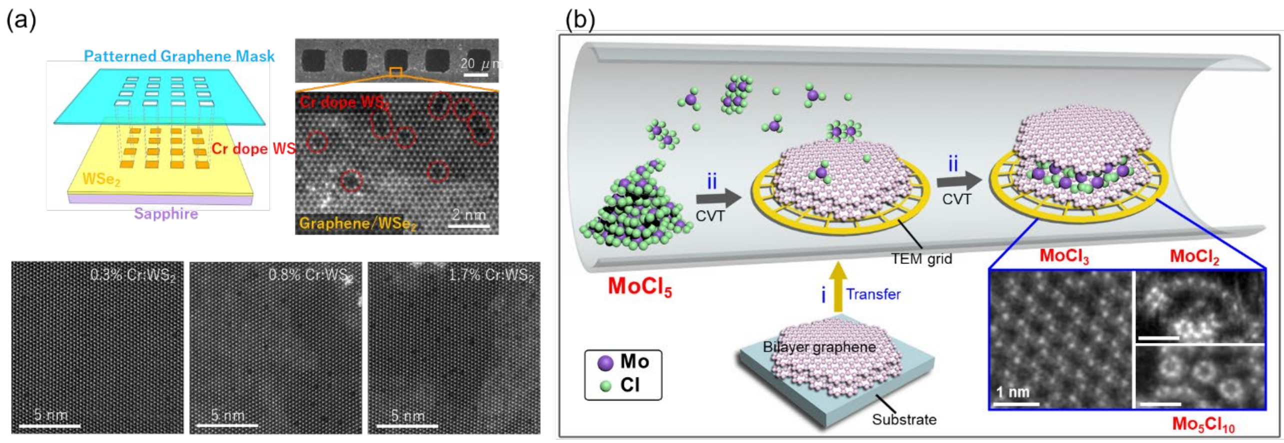


Figure 1 (a) Selective area Cr doping of WS2 using a prepatterned graphene mask. The doping concentration can be controlled by adjusting the reaction time. (b) Intercalation of bilayer graphene using MoCl5 as a precursor via gas-phase reaction. The resulting intercalated structures were identified as MoCl3 networks, MoCl2 chains, and Mo5Cl10 rings, rather than a MoCl5 lattice.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、松本(A02)、末永(A03)、

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Y.-C. Lin, K. Suenaga et al., “Patterning and doping of transition metals in tungsten dichalcogenides” Nanoscale, 14, 16968-16977 (2022).

[2] Qiunan Liu, Yung-Chang Lin, Hiroki Ago, Kazu Suenaga et al., Unique molybdenum chloride nanostructures with giant lattice distortions intercalated into bilayer graphene, *submitted*.

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

友利 ひかり

対称性の破れた二次元物質における物性研究

塩見 雄毅（東京大学大学院総合文化研究科）

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。公募研究の開始年度である 2022 年度においては、複数の領域研究者から測定試料を提供して頂き、共同研究を開始した。スピントロニクス実験に先立ち、提供された試料に対して様々な測定実験を精力的に行った。

領域内共同研究としての主な成果として、空間反転対称性の破れた二次元強誘電体であるα-In_2Se_3 において、積層自由度に依存した圧電応答を観測した。笹川(A04)らはα-In_2Se_3 において 2H 構造と 3R 構造を作り分けることに成功しており、対称性の考察からはどちらの積層構造においても面直方向に圧電効果の発現が許される。我々は、実際に室温で両構造のα-In_2Se_3 試料に対して逆圧電効果の測定を行い、積層の仕方が異なることに由来して圧電効果の大きさが異なることを見出した[1]。3R 構造は積層方向に直列に原子が配列する傾向があるのに対し、2H 構造では回転しながら積層しており、面直方向に空隙が多い傾向にある。2H 構造において面直方向に原子が動きやすいことを反映して、2H α-In_2Se_3 においては 3R α-In_2Se_3 より大きい圧電応答が観測されたと考えられる。本物質においては空間反転対称性の破れに起因する反対称スピン軌道相互作用に由来する物理現象の発現も期待されるため、引き続き共同研究を進める予定である。

この他にも、2.5 次元物質における特異なスピン流現象の観測を目指して、宮田(A02)らと共同でデバイス試料の作製を進めている。2023 年度は準備された試料に対してスピン計測実験を進めていく予定である。

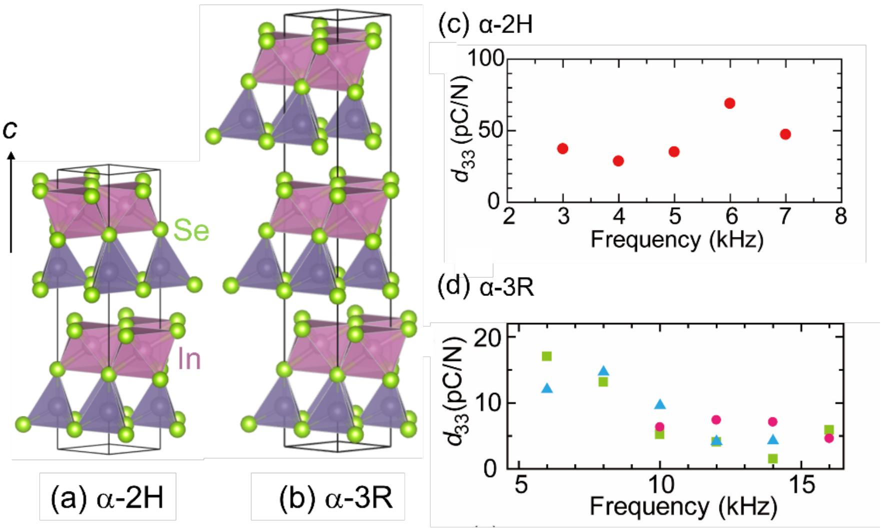


Figure 1 Piezoelectric effect in 2H and 3R phases of α-In_2Se_3. (a,b) Crystal structure of α-In_2Se_3 in (a) 2H and (b) 3R phases. (c,d) Piezoelectric d_{33} coefficient as a function of measurement frequency for (c) 2H and (d) 3R samples. Larger d_{33} values are observed for the 2H sample.

【2022 年度の領域内共同研究者】

加藤(A01)、宮田(A02)、坂野(A03)、笹川(A04)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1]K. Ueda, R. Murata, T. Sasagawa, and Y. Shiomi, Piezoelectric effect in 2H and 3R phases of α-In_2Se_3, *Jpn. J. Appl. Phys.* (2023) https://doi.org/10.35848/1347-4065/acdc72

[2] T. Yokouchi, Y. Ikeda, T. Morimoto, and Y. Shiomi, Giant Magnetochiral Anisotropy in Weyl Semimetal WTe2 Induced by Diverging Berry Curvature, *Phys. Rev. Lett.*, **130**, 136301 (2023). Editors' suggestion

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（関西学院大学工学部）

E-mail: waka@kwansei.ac.jp

本研究課題では、グラフェンや遷移金属カルコゲナイド系物質(TMDC)などの原子膜からなる 2.5 次元物質において、光学的な電子励起過程によって、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。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。

本年度は、少数層 TMDC 膜と光との相互作用に着目し、光照射による電子励起を活用したスピン状態の生成と制御機構、さらにはトポロジカル特性について、理論的に検討を進めてきた。具体的には、少数層の NbSe2 薄膜を考え、その電磁場照射の効果を理論数値計算によって解析を進めた。NbSe2 は、金属的な性質を示す TMDC であり、低温では超伝導転移をすることが知られている物質である。また、Nb 原子由来のスピン軌道相互作用から NbSe2 はイジング型スピン軌道相互作用を有することが知られている。奇数層の NbSe2 薄膜は空間反転対称性が破れているが、偶数層では空間反転対称性は保持されている。この結晶対称性の違いによる光学応答の変化を明らかにした。さらに、二次の非線形光学応答効果とその偏光依存性を求めた。特に、結晶の対称性を操作する 2 円偏光を照射したとき、NbSe2 の鏡面対称性を破るため、非線形光学効果が偶数層 NbSe2 でも誘起される。さらに、奇数層 NbSe2 では、トポロジカルシフト流が生成されることがわかった[1]。これらのことから、金属 TMDC 系物質は、光スピンデバイスへの応用が期待される。

この他にも、Twisted bilayer graphene に対する円偏光照射を利用した Valley 流の生成[2]に関する数値解析なども行なった。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。

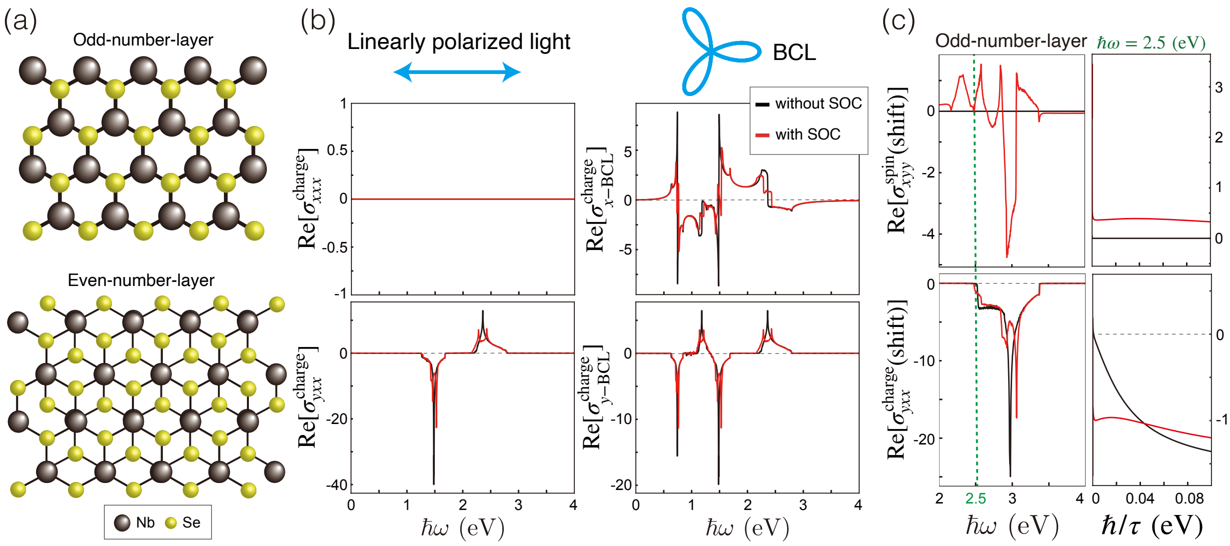


Figure 1 (a) Crystal structure of few-layered $NbSe_2$. (b) Nonlinear optical conductivities of monolayer $NbSe_2$ for SHG process (left) and incident BCL (right). (c) Spin and charge shift-current conductivities of monolayer $NbSe_2$ and the dependence of relaxation time τ.

【2022 年度の領域内共同研究者】岡田(A01)、越野(A04)、長汐(A05)、山本(A05)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] R. Habara, K. Wakabayashi, Symmetry manipulation of nonlinear optical effect for metallic transition dichalcogenides, *Phys. Rev.* B **107**, 115422 (2023).

[2] K. Nakagahara, K. Wakabayashi, Enhanced valley polarization of graphene on h-BN under circularly polarized light irradiation, *Phys. Rev.* B **106**, 075403 (2022).

周期歪みによるグラフェンの電気伝導特性変化

友利 ひかり（筑波大学 数理物質系 物理学域）

研究協力者：神田 晶申・岡田 晋・丸山 実那

E-mail: tomori.hikari.ge@tsukuba.ac.jp

周期歪み導入によってグラフェンの電気伝導を制御することを目的とし、（1）周期歪みを導入したグラフェンの電気伝導測定、（2）周期歪み導入によるグラフェンの電子バンド構造の数値シミュレーションを中心に研究した。また、同領域の東京大学の田代省平氏からサンプルの提供を受け、有機結晶表面の周期凹凸構造を利用した周期歪み導入の検討を行った。

(1) 周期歪みを導入したグラフェンの電気伝導測定

周期歪みがグラフェンの電気伝導特性に与える影響を評価するために、周期歪みを導入したグラフェン電界効果トランジスタを作製し、筑波大学低温グループが所有する希釈冷凍機システムを用いて電気伝導測定を行った。また、これまでの研究から、周期歪みの効果を観測するためにはグラフェンの平均自由行程の増大化が必要であることがわかっていたため、同領域のメンバーである渡邊賢司氏から hBN の提供を受けた。

周期歪みの導入には、シリコン基板に電子線レジスト HSQ の周期構造を作製し、そのレジスト構造上に hBN/グラフェンを転写する方法を用いた。ただし、今回試料に用いた hBN 薄膜が厚すぎたため、ラマン分光の評価ではほとんど周期歪み導入は観測できなかった。一方で、移動度・平均自由行程についてはグラフェンに hBN を密着させたことで増大化に成功した。特に平均自由行程に関しては、凹凸構造の周期 80 nm と同程度の値まで向上した。

(2) 周期歪みを導入したグラフェンの電子構造の数値シミュレーション

同領域のメンバーである筑波大学の岡田晋氏と丸山実那氏の協力のもと、周期歪みを導入したグラフェンの電子バンド構造の数値シミュレーションを行った。ここでは特に、グラフェンに導入する周期歪みの歪み量の大きさと周期の長さによって、グラフェンのバンド構造がどのように変化するかに着目した。

歪み量を 5%に固定し、周期の長さを 10~20 nm の範囲で変化させた場合と、周期の長さを 20 nm に固定し、歪み量を 0~10%の範囲で変化させた場合について計算した。その結果、周期歪みの導入によりディラック点においてバンドギャップが形成されること、また歪みの大きさや周期の長さに応じてバンドギャップの大きさが 0-40 meV の範囲で不規則に変化することがわかった。

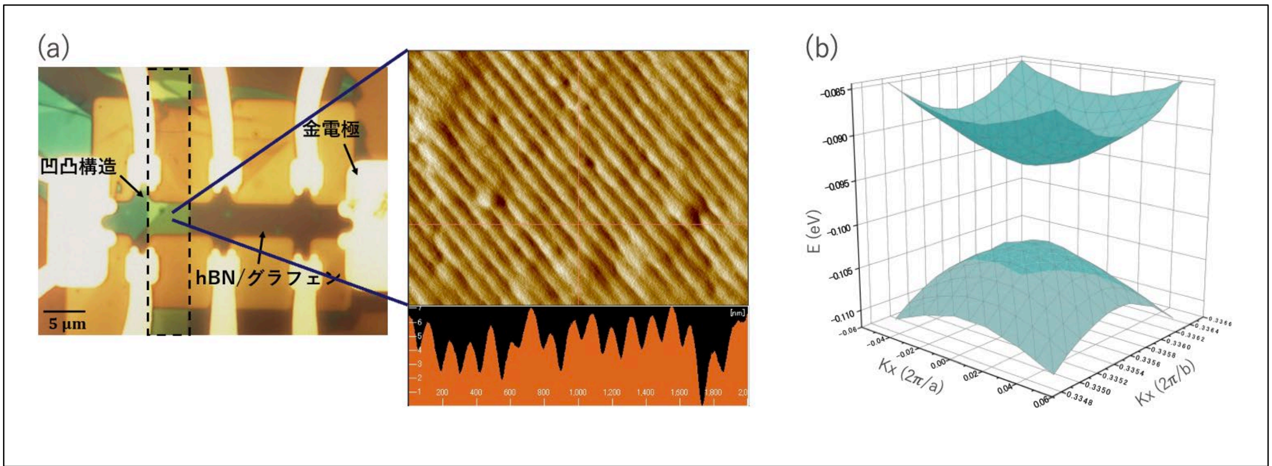


Figure 1 (a) Optical microscope image of the sample and AFM image of the line and space structure. (b) Calculated band structure of graphene with periodic strain (period 20 nm, strain 1%).

【2022 年度の領域内共同研究者】
岡田(A01)、田代(A01)

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

弱い相互作用（ファンデルワールス相互作用）で結合した二次元物質はその配置を自由に制御できる。本研究では、異なる周期性をもった二種の二次元物質からなるファンデルワールスヘテロ構造に注目し、系統的に構造を変化させた系について、量子力学に基づいたコンピュータシミュレーション（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、密度汎関数法に基づく第一原理計算手法によってバンド構造および輸送特性について局所的な秩序(原子配置、スピン配置・磁性)が誘起する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—電流変換）を活かした、機能物質をデザインする。

2022 年度は、(1) 層状物質 $CaGe_2$ の熱電効果、(2) ファンデルワールス層状磁性体 $MnBi_2Te_4$ のゼーベック効果誘起の異常ネルンスト効果、(3) 効率的な異常ホール伝導度計算手法の開発、などを中心に研究を行った。論文発表した研究実績は主に次の 2 点である。(1)強磁性層によって形成されているファンデルワールス反強磁性体 $MnBi_2Te_4$ について、Figure 1 に示すように、有限層の電子状態、異常ホール効果、熱電効果について調べ、フェリ磁性相で、量子化された異常ホール効果を示すことを明らかにし、ゼーベック効果に誘起された巨大な異常ネルンスト効果を示すことを明らかにした[1]。(2) 異常ホール効果と異常ネルンスト効果を効率的に計算する、第一原理計算手法開発をおこなった。異常ネルンスト係数を計算するためには、興味ある温度より細かいエネルギー幅のメッシュで異常ホール効果の化学ポテンシャル依存性を調べる必要があり、多くの計算コストが必要となる。我々は運動量空間での局所的なベリー位相を評価することでベリー曲率を効率的に計算し、従来用いられてきた Wannier90 に実装されている手法より高速に異常ホール係数の化学ポテンシャル依存性が評価できることを明らかにした[2]。

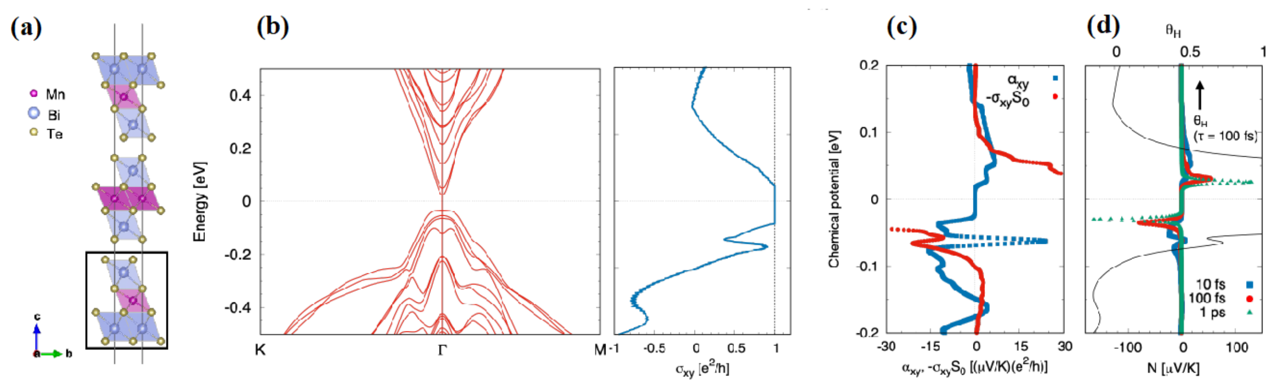


Figure 1 (a) The structure of $MnBi_2Te_4$ three septuple layers (3SLs). The lined areas indicate a septuple layer. (b) Electronic band structure and the chemical-potential dependence of anomalous Hall conductivity of $MnBi_2Te_4$ with 3SLs. (c) The transverse thermoelectric conductivity and Seebeck-induced term of $MnBi_2Te_4$ with 3SLs. (d) Calculated anomalous Nernst coefficient and Hall angle ratio with different constant relaxations for $MnBi_2Te_4$ with 3SLs.

【2022 年度の領域内共同研究者】

黒澤(A01)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] Y. Morishima, N. Yamaguchi, H. Sawahata, and F. Ishii, Seebeck-induced anomalous Nernst effect in van der Waals MnBi2Te4 layers, *Applied Physics Express*, **16**, 043003 (2023).

[2] H. Sawahata, N. Yamaguchi, S. Minami, and F. Ishii, First-principles calculation of anomalous Hall and Nernst conductivity by local Berry phase, *Physical Review B*, **107,** 024404 (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

強磁性金属とグラフェンや六方晶窒化ホウ素(h-BN)の 2 次元層状材料界面は、磁気抵抗素子の構造として期待されている。強磁性金属電極層として、高い垂直磁気違異方性と薄膜の低いギルバートダンピング定数をもつ鉄・パラジウム(FePd)や、グラフェンの格子とよく整合する Ni(111)、Co(0001)、FeNi(111)などが候補に挙げられている。金属・2 次元層状材料界面の物性は磁気トンネル接合素子の磁気抵抗比を決定する要因となる。しかしながら、FePd(001)/グラフェン界面のように格子の対称性が大きく異なる合金表面において、炭素原子がどのような配置をもつかまだ明らかになっていない。2022 年度は、第一原理計算を駆使し、エネルギー的に安定と考えられる界面構造の予測とその電子・磁気状態の解析を行った。とくに安定な構造として、ツイスト界面モデルが-0.19 ~ -0.22eV/atom の吸着エネルギーを持つことを明らかにした。また、吸着層間距離は STEM 測定による実験結果ともよく一致していた。さらに、グラフェン層にはモアレ状のバックリングが現れること(Fig. 1(a))を確認した。

また、2 次元層状材料表面上では弱い van der Waals 結合しか働かないため、原子配列が揃った VO_2 を成長させることができることを A02 田中班が提唱している。2022 年度は、VO_2 の成長様式を明らかにするため、A02 田中班と議論のもと、第一原理計算により h-BN/VO_2 界面の原子構造解析を行った。その結果、V 原子は h-BN の N 原子に弱い化学結合でピンされ、超格子的に原子配列を h-BN に合わせながら成長することが分かった(Fig. 1(b))。

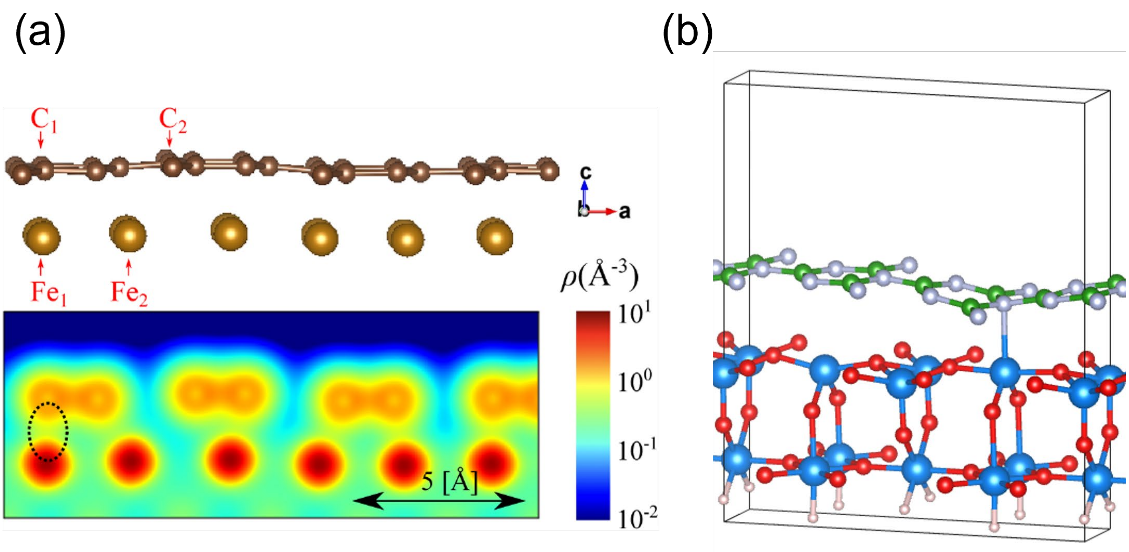


Figure 1 (a) Charge density profile of the FePd(001)/Gr interface. C_1 and Fe_1 represent the closest pair, and C_2 and Fe_2 are examples of sites with no close C or Fe atoms. Reprinted from M. Uemoto *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **132**, 095301 (2022). (b) Atomic structure of VO_2/h-BN interface. Blue, red, white, gray, green balls are V, O, H, N, and B atoms, respectively.

【2022 年度の領域内共同研究者】

田中(A02)

【2022 年度の代表的な研究成果】

[1] M. Uemoto, H. Adachi, H. Naganuma, and T. Ono, Density functional study of twisted graphene L10-FePd heterogeneous interface, *J. Appl. Phys.*, **132**, 095301 (2022).

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、すでに領域内共同研究を開始した。

2022 年度の主な成果は、(1)積層膜構造の付加による波長選択型赤外発光素子、(2)高品質大面積グラフェンによるテラヘルツ・赤外検出素子とその画像化応用（吾郷グループとの共同研究）である。(1)については、積層膜構造に対する電磁界シミュレーションを実施し、スペクトル解析から膜厚設計の最適化を行った（Fig. 1）。これにより、膜厚に応じた発光波長の選択性を示した。当研究室で開発したカーボンナノチューブ光センサにより、実際に作製した発光素子の評価を行ったところ、空間的に一様な発光分布を確認した。(２)については、吾郷グループで独自に作製方法を開発したグラフェンを用いて、当研究室にてテラヘルツ・赤外イメージングによる対象物の非破壊画像化を達成した。この成果は、吾郷グループと共著で論文投稿中である。

また前述の通り、テラヘルツ・赤外計測のプラットフォーム化を進めており、山本グループ(A05)との共同研究に関する検討を開始した。

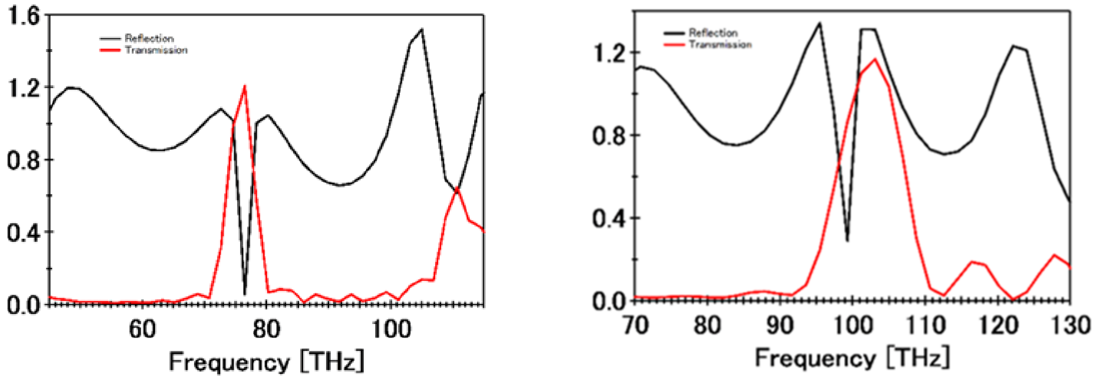


Figure 1 Electromagnetic field simulation of wavelength-selective infrared emitting devices with additional multilayer film structures. The results show tuning of the emission wavelength by different film thicknesses.

【2021-2022 年度の領域内共同研究者】
吾郷(A01)、山本(A05)

【2021-2022 年度の代表的な研究成果】

[1] K. Li, Y. Kinoshita, D. Sakai, and Y. Kawano, Recent Progress in Development of Carbon-Nanotube-Based Photo-Thermoelectric Sensors and Their Applications in Ubiquitous Non-Destructive Inspections, *Micromachines*, 14(1), 61 (2023).

[2] Y. Kawano (invited), A Flexible and Stretchable Terahertz Imaging Sheet for Multi-View Visualization, The 29th International Display Workshops (Fukuoka, December 2022).

[3] 河野 行雄（招待講演）、シート状広帯域テラヘルツ･赤外撮像センサと全方位検査分析応用、第 70 回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム｢低次元材料のデバイス応用の最新動向｣（2023 年３月，上智大学）

単結晶二酸化バナジウムナノフレークの合成

山本 真人（関西大学システム理工学部）

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

二酸化バナジウム(VO_2)は室温近傍で急峻な抵抗変化や透過率変化を伴う構造相転移を示すことから、トランジスタやメモリ、センサーなど多種多様なデバイスへの応用が注目されている。我々は VO_2 と二次元半導体をファンデルワールスヘテロ接合させることで新奇光物性の創出と高性能電子・光デバイスへの応用を目指して研究を行っている。2022 年度は上記目標達成に向けた第一段階として、転写可能な単結晶 VO_2 ナノフレーク合成法の確立を行った。

VO_2 は一般的には酸化物などのエピタキシャル基板を用いた薄膜成長によって得られるが、エピタキシャル VO_2 薄膜では作成可能なファンデルワールスヘテロ構造に制限があった。一方、化学気相成長(CVD)法によるアモルファス基板上での VO_2 成長も報告されているが、CVD 合成によって得られる VO_2 の多くがワイヤー状であり、やはり多様なファンデルワールスヘテロ構造を作成することが困難であった。そこで本研究では､CVD 成長時における基板－原料間の距離を最適化することによりフレーク状の VO_2 の合成を試みた。

基板としては熱酸化膜付きのシリコン基板を利用し、原料は VO_2 粉末とした。CVD 管状炉内において粉末を置いた石英ボートの直上に基板を配置することで、Fig. 1(a)に示すようなマイクロメートルスケールの VO_2 フレークを高密度で基板上に合成することに成功した。合成した VO_2 フレークに対して分析拠点(光)において温度可変ラマン分光測定を行ったところ、340 K で構造相転移を示すバルク VO_2 とは大きく異なり、360 K でも絶縁相が保たれていることが分かった(Fig. 1b)。さらに、絶縁体 VO_2 のラマンピークを解析したところ 300 K におけるピークは最安定相の M1 相に由来するものであったが、360 K では準安定相である M2 相のピークであることが分かった。これらの実験結果は CVD 成長によって得られた VO_2 フレークが歪みを受けていることを示している。

次に、CVD 合成した VO_2 フレークの抵抗値の温度依存性を調べたところ、およそ 400 K で 2 桁以上の急峻な抵抗変化を示すことが分かった(Fig. 1c)。エレクトロニクス応用の観点からみると VO_2 の相転移温度はチップの動作温度より高い必要があり､今回合成した VO_2 フレークは通常の VO_2 より高い相転移温度をもつことからエレクトロニクスの基盤材料として適していると言える。

今回合成した VO_2 フレークは、粘弾性ポリマーを用いてシリコン基板上からピックアップできることが分かったため、今後は二次元半導体と VO_2 フレークのファンデルワールスヘテロ構造を作成し発光特性等の評価を行う。

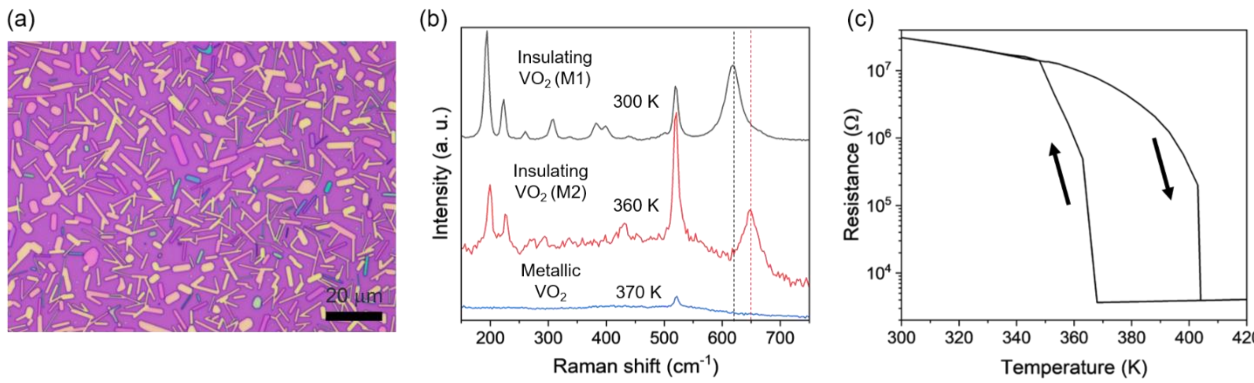


Figure 1 (a) Optical image of VO_2 grown by CVD on a Si/SiO$_2$ substrate. (b) Raman spectra of CVD-grown VO_2 at 300, 360, and 370 K. (c) Resistance-temperature curves of CVD-grown VO_2. The arrows indicate the directions of the temperature sweep.

【2022 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)

６．　研究業績リスト

6-1. 論文

-2023-

(1) **Anisotropic exciton drift-diffusion in a monolayer $WS_{2}xSe_{(2-2x)}$ alloy with a gradually changing composition**
M. Shimasaki, T. Nishihara, N. Wada, Z. Liu, K. Matsuda, Y. Miyata, Y. Miyauchi
Appl. Phys. Express, 16, 012010 (2023)
DOI: 10.35848/1882-0786/acae1a

(2) **Formation of a one-dimensional hole channel in MoS_2 by structural corrugation**
Y. Gao, H. Nakajima, M. Maruyama, T. Taniguchi, K. Watanabe, R. Kitaura, S. Okada
Jpn. J. Appl. Phys., 62, 015001 (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/acaae0

(3) **Ion-gel-based light-emitting devices using transition metal dichalcogenides and hexagonal boron nitride heterostructures**
H. Ou, K. Oi, R. Usami, T. Endo, Y. Miyata, J. Pu, T. Takenobu
Jpn. J. Appl. Phys., 62, SC1026 (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/acaeb2

(4) **Towards pump-probe single-crystal XFEL refinements for small-unit-cell systems**
L. J. Stockler, L. Krause, B. Svane, K. Tolborg, B. Richter, S. Takahashi, T. Fujita, H. Kasai, M. Sugahara, I. Inoue, E. Nishibori, B. B. Iversen
IUCrJ, 10, 103-117 (2023)
DOI: 10.1107/S2052252522011782

(5) **Dynamic Lone Pair Expression as Chemical Bonding Origin of Giant Phonon Anharmonicity in Thermoelectric InTe**
J. Zhang, D. Ishikawa, M. M Koza, E. Nishibori, L. Song, A. QR Baron, B. B. Iversen
Angew. Chem. Int. Ed., 135, e202218458(1-10) (2023)
DOI: 10.1002/ange.202218458

(6) **Temperature-induced transformation between layered herringbone polymorphs in molecular bilayer organic semiconductors**
S. Arai, S. Inoue, M. Tanaka, S. Tsuzuki, R. Kondo, R. Kumai, T. Hasegawa
Phys. Rev. Mater., 7, 025602 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.7.025602

(7) **Intersecting multiaxial domain walls in plastic ferroelectric crystal films**
Y. Uemura, S. Matsuoka, S. Arai, J. Harada, T. Hasegawa
Phys. Rev. Mater., 7, 035601 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.7.035601

(8) **s-Indacene Revisited: Modular Synthesis and Modulation of Structures and Molecular Orbitals of Hexaaryl Derivatives**
S.-J. Jhang, J. Pandidurai, C.-P. Chu, H. Miyoshi, Y. Takahara, M. Miki, H. Sotome, H. Miyasaka, S. Chatterjee, R. Ozawa, Y. Ie, I. Hisaki, C.-L. Tsai, Y.-J. Cheng, Y. Tobe
J. Am. Chem. Soc., 145, 8, 4716-4729 (2023)
DOI: 10.1021/jacs.2c13159

(9) **Uniaxial Negative Thermal Expansion Induced by Molecular Rotation in One-Dimensional Supramolecular Assembly with Associated Peculiar Magnetic Behavior**
K. Takahashi, Y. Shirakawa, H. Sakai, I. Hisaki, S. Noro, T. Akutagawa, M. Nakano, T. Nakamura
J. Mater. Chem. C, 11, 1891-1898 (2023)
DOI: 10.1039/D2TC04874D

(10) **Electronic structure of covalent networks of triangular graphene flakes embedded in hBN**
H. Zhang, M. Maruyama, Y. Gao, S.Okada
Jpn. J. Appl. Phys., 62, 025001 (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/acb51d

(11) **Unconventional gapless semiconductor in an extended martini lattice in covalent honeycomb materials**
T. Mizoguchi, M. Maruyama, Y. Gao, Y. Hatsugai, S. Okada
Phys. Rev. B, 107, L121301 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.L121301

(12) **Vapor-Phase Indium Intercalation in van der Waals Nanofibers of Atomically Thin W_6Te_6 Wires**
R. Natsui, H. Shimizu, Y. Nakanishi, Z. Liu, A. Shimamura, N. T. Hung, Y.-C. Lin, T. Endo, J. Pu, I. Kikuchi, T. Takenobu, S. Okada, K. Suenaga, R. Saito, Y. Miyata
ACS Nano, 17, 5561-5569 (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.2c10997
プレス発表あり　https://www.tmu.ac.jp/news/topics/35465.html

(13) **Observation of the photovoltaic effect in a van der Waals heterostructure**
S. Zhang, M. Maruyama, S. Okada, M. Xue, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Hashimoto, Y. Miyata, R. C.-Vitoria, R. Kitaura
Nanoscale, 15, 5948-5953 (2023)
DOI: 10.1039/D2NR06616E

(14) **Symmetry manipulation of nonlinear optical effect for metallic transition-metal dichalcogenides**
R. Habara, K. Wakabayashi
Phys. Rev. B, 107, 115422 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.115422

(15) **Trapping and manipulating skyrmions in two-dimensional films by surface acoustic waves**
Y. Miyazaki, T. Yokouchi, Y. Shiomi
Sci. Rep., 13, 1922 (2023)
DOI: 10.1038/s41598-023-29022-z

(16) **Giant Magnetochiral Anisotropy in Weyl Semimetal WTe_2 Induced by Diverging Berry Curvature**
T. Yokouchi, Y. Ikeda, T. Morimoto, Y. Shiomi
Phys. Rev. Lett., 130, 136301 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.136301

(17) **Identification of OH groups on $SrTiO_3$(100)-(R13×R13)-R33.7°　reconstructed surface by non-contact atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy**
D. Katsube, R. Shimizu, Y. Sugimoto, T. Hitosugi, M. Abe
Appl. Phys. Lett., 122, 071602 (2023)
DOI: 10.1063/5.0139493

(18) **A Monolayer MoS_2 FET with an EOT of 1.1 nm Achieved by the Direct Formation of a High-κ Er_2O_3 Insulator Through Thermal Evaporation**
H. Uchiyama, K. Maruyama, E. Chen, T. Nishimura, K. Nagashio
Small, 1002, 2207394 (2023)
DOI: 10.1002/smll.202207394

(19) **Experimental verification of SO_2 and S desorption contributing to defect formation in MoS_2 by thermal desorption spectroscopy**
S. Li, T. Nishimura, M. Maruyama, S. Okada, K. Nagashio
Nanoscale Adv., 5, 405-411 (2023)
DOI: 10.1039/D2NA00636G

(20) **Large-area synthesis and transfer of multilayer hexagonal boron nitride for enhanced graphene device arrays**
S. Fukamachi, P. S -Fernández, K. Kawahara, D. Tanaka, T. Otake, Y- C. Lin, K. Suenaga, H. Ago
Nat. Electron., 6, 126-136 (2023)
DOI: 10.1038/s41928-022-00911-x
プレス発表あり　https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/868

(21) **Pentagon-Fused Sumanenes on the Aromatic Peripheries en Route to the Bottom-Up Synthesis of Fullerenes**
H. Nakazawa, Y. Uetake, Y. Yakiyama, H. Sakurai
Synlett, 34, 374-378 (2023)
DOI: 10.1055/a-1992-0487

(22) **Synthesis of π-extended and bowl-shaped sumanene–ferrocene conjugates and their application in highly selective and sensitive cesium cations electrochemical sensors**
J. S. Cyniak, Ł. Kocobolska, N. Bojdecka, A. G. -Walczak, A. Kowalczyk, B. Wagner, A. Nowicka, H. Sakurai, A. Kasprzak
Dalton Trans., 52, 3137-3147 (2023)
DOI: 10.1039/D3DT00084B

(23) **Application of Monoferrocenylsumanenes Derived from Sonogashira Cross-Coupling or Click Chemistry Reactions in Highly Sensitive and Selective Cesium Cation Electrochemical Sensors**
A. Kasprzak, A. G. -Walczak, A. Kowalczyk, B. Wagner, A. M. Nowicka, M. Nishimoto, M. K. Stawińska, H. Sakurai
J. Org. Chem., 88, 4199-4208 (2023)
DOI: 10.1021/acs.joc.2c02767

(24) **Putting High-Index Cu on the Map for High-Yield, Dry-Transferred CVD Graphene**
O. J. Burton, Z. Winter, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Beschoten, C. Stampfer, S. Hofmann
ACS Nano, 17, 1229-1238 (2023)
DOI: 10.1021/acsnano.2c09253

(25) **Coupled ferroelectricity and superconductivity in bilayer Td-$MoTe_2$**
A. Jindal, A. Saha, Z. Li, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. C. Hone, T. Birol, R. M. Fernandes, C. R. Dean, A. N. Pasupathy, D. A. Rhodes
Nature, 613, 48-52 (2023)
DOI: 10.1038/s41586-022-05521-3

(26) **Magneto-Optical Chirality in a Coherently Coupled Exciton–Plasmon System**
S. Vadia, J. Scherzer, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Högele
Nano Lett., 23, 614-618 (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c04246

(27) **Aharonov–Bohm Oscillations in Bilayer Graphene Quantum Hall Edge State Fabry–Pérot Interferometers**
H. Fu, K. Huang, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Kayyalha, J. Zhu
Nano Lett., 23, 718-725 (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c05004

(28) **An ultra-high vacuum system for fabricating clean two-dimensional material devices**
S. Guo, M. Luo, G. Shi, N. Tian, Z. Huang, F. Yang, L. Ma, N. Z. Wang, Q. Shi, K. Xu, Z. Xu, K. Watanabe, T. Taniguchi, X. H. Chen, D. Shen, L. Zhang, W. Ruan, Y. Zhang
Rev. Sci. Instrum., 94, 013903 (2023)
DOI: 10.1063/5.0110875

(29) **Electrical Interrogation of Thickness-Dependent Multiferroic Phase Transitions in the 2D Antiferromagnetic Semiconductor NiI_2**
D. Lebedev, J. T. Gish, E. S. Garvey, T. K. Stanev, J. Choi, L. Georgopoulos, T. W. Song, H. Y. Park, K. Watanabe, T. Taniguchi, N. P. Stern, V. K. Sangwan, M. C. Hersam
Adv. Funct. Mater., 33, 2212568 (2023)
DOI: 10.1002/adfm.202212568

(30) **Phonon-mediated room-temperature quantum Hall transport in graphene**
D. Vaquero, V. Clericò, M. Schmitz, J. A. D. -Notario, A. M. -Ramos, J. S. -Sánchez, C. S. A. Müller, K. Rubi, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Beschoten, C. Stampfer, E. Diez, M. I. Katsnelson, U. Zeitler, S. Wiedmann, S. Pezzini
Nat. Commun., 14, 318 (2023)
DOI: 10.1038/s41467-023-35986-3

(31) **Broadband enhancement of absorption by two-dimensional atomic crystals modeled as non-Hermitian photonic scattering**
X. Chen, Z. Sun, M. Zhang, M. Li, Z. Hu, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Snoke, Z.-Y. Shi, J. Wu
Appl. Phys. Lett., 122, 041105 (2023)
DOI: 10.1063/5.0134789

(32) **Charge carrier density dependent Raman spectra of graphene encapsulated in hexagonal boron nitride**
J. Sonntag, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Beschoten, C. Stampfer
Phys. Rev. B, 107, 075420 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.075420

(33) **Evidence of the Coulomb gap in the density of states of MoS_2**
M. Masseroni, T. Qu, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Ihn, K. Ensslin
Phys. Rev. Research, 5, 013113 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.5.013113

(34) **Evidence for Dirac flat band superconductivity enabled by quantum geometry**
H. Tian, X. Gao, Y. Zhang, S. Che, T. Xu, P. Cheung, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Randeria, F. Zhang, C. N. Lau, M. W. Bockrath
Nature, 614, 440-444 (2023)

DOI: 10.1038/s41586-022-05576-2

(35) **Thickness-Dependent Cross-Plane Thermal Conductivity Measurements of Exfoliated Hexagonal Boron Nitride**
G. R. Jaffe, K. J. Smith, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. G. Lagally, M. A. Eriksson, V. W. Brar
ACS Appl. Mater. Interfaces, 15, 12545-12550 (2023)
DOI: 10.1021/acsami.2c21306

(36) **Analogy and dissimilarity of excitons in monolayer and bilayer of $MoSe_2$**
Ł. Kipczak, A. O. Slobodeniuk, T. Woźniak, M. Bhatnagar, N. Zawadzka, K. O. -Pucko, M. Grzeszczyk, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Babiński, M. R. Molas
2D Mater., 10, 025014 (2023)
DOI: 10.1088/2053-1583/acbc8b

(37) **Customizing Radiative Decay Dynamics of Two-Dimensional Excitons via Position- and Polarization-Dependent Vacuum-Field Interference**
S. Park, D. Kim, Y. -S. Choi, A. Baucour, D. Kim, S. Yoon, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Shin, J. Kim, M. -K. Seo
Nano Lett., 23, 2158-2165 (2023)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c04604

(38) **Quantum Dynamics of Attractive and Repulsive Polarons in a Doped $MoSe_2$ Monolayer**
D. Huang, K. Sampson, Y. Ni, Z. Liu, D. Liang, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Li, E. Martin, J. Levinsen, M. M. Parish, E. Tutuc, D. K. Efimkin, X. Li
Phys. Rev. X, 13, 011029 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevX.13.011029

(39) **Cyclotron and magnetoplasmon resonances in bilayer graphene ratchets**
E. Mönch, S. O. Potashin, K. Lindner, I. Yahniuk, L. E. Golub, V. Y. Kachorovskii, V. V. Bel'kov, R. Huber, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Eroms, D. Weiss, S. D. Ganichev
Phys. Rev. B, 107, 115408 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.115408

(40) **Layer-dependent optically induced spin polarization in InSe**
J. Nelson, T. K. Stanev, D. Lebedev, T. LaMountain, J. T. Gish, H. Zeng, H. Shin, O. Heinonen, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. C. Hersam, N. P. Stern
Phys. Rev. B, 107, 115304 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.115304

(41) **Atomically thin metallic Si and Ge allotropes with high Fermi velocities**
Chin-En Hsu, Yung-Ting Lee, Chieh-Chun Wang, Chang-Yu Lin, Yukiko Yamada-Takamura, Taisuke Ozaki, and Chi-Cheng Lee
Phys. Rev. B, 107, 115410 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.115410

(42) **Multilayer In-Plane Heterostructures Based on Transition Metal Dichalcogenides for Advanced Electronics**
H. Ogura, S. Kawasaki, Z. Liu, T. Endo, M. Maruyama, Y. Gao, Y. Nakanishi, H. E. Lim, K. Yanagi, T. Irisawa, K. Ueno, S. Okada, K. Nagashio, Y. Miyata
ACS Nano, 17,7, 6545-6554 (2023)

DOI: 10.1021/acsnano.2c11927

(43) **Sb_2Te_3/MoS_2 Van der Waals Junctions with High Thermal Stability and Low Contact Resistance**
W. H. Chang, S. Hatayama, Y. Saito, N. Okada, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa
Adv. Electron. Mater., 9,4, 2201091 (2023)
DOI: 10.1002/aelm.202201091
プレス発表あり　https://www.tmu.ac.jp/news/topics/35420.html

(44) **Heteroepitaxial growth of $CaGe_2$ films on high-resistivity Si(111) substrates and its application for germanane synthesizing**
K. Okada, S. Shibayama, M. Sakashita, O. Nakatsuka, M. Kurosawa
Mater. Sci. Semicond. Process., 161, 107462 (2023)
DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107462

(45) **First-principles calculation of anomalous Hall and Nernst conductivity by local Berry phase**
H. Sawahata, N. Yamaguchi, S. Minami, F. Ishii
Phys. Rev. B, 107, 024404 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.024404

(46) **First-principles study of anomalous Hall effect and anomalous Nernst effect in Fe_2Si**
T. Tominaga, N. Yamaguchi, H. Sawahata, F. Ishii
Ja. J. Appl. Phys., 62, SD1019 (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/acaca6

(47) **Persistent spin helix on a diamond surface**
H.P. Kadarisman, N. Yamaguchi, F. Ishii
Appl. Phys. Express, 16, 023001 (2023)
DOI: 10.35848/1882-0786/acb486

(48) **Moiré phonons in graphene/hexagonal boron nitride moiré superlattice**
L. P. Krisna, M. Koshino
Phys. Rev. B, 107, 115301 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.115301

(49) **Data cluster analysis and machine learning for classification of twisted bilayer graphene**
T. Vincent, K. Kawahara, V. Antonov, H. Ago, O. Kazakova
Carbon, 201, 141-149 (2023)
DOI: 10.1016/j.carbon.2022.09.021

(50) **Near-Threshold Photoemission from Graphene-Coated Cu(110)**
C. J. Knill, H. Yamaguchi, K. Kawahara, G. Wang, E. Batista, P. Yang, H. Ago, N. Moody, S. Karkare
Phys. Rev. Appl., 19, 014015 (2023)
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.19.014015

(51) **Structural analysis of graphene-capped copper by spectroscopic ellipsometry for humidity reliability assessment**
S. Nakajima, Y. Wasai, K. Kawahara, N. Nabatova-Gabain, P. Gomasang, H. Ago, H Akinaga, K. Ueno
Jpn. J. Appl. Phys., 62, SC1092 (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/acb77a

(52) **An observation of a photovoltaic effect in MoS_2 nanoribbons fabricated with a top-down approach**
S. Zhang, M. Xue, F. Zeng, R. Kitaura

Appl. Phys. Express, 16, 035003 (2023)
DOI: 10.35848/1882-0786/acbf9f

(53) **Synthesis and Characterization of Transition Metal Dichalcogenide Nanoribbons Based on a Controllable O_2 Etching**
R. Canton-Vitoria, T. Hotta, M. Xue, S. Zhang, R. Kitaura
JACS Au, 3, 3, 775 (2023)
DOI: 10.1021/jacsau.2c00536

(54) **Field-effect transistor antigen/antibody-TMDs sensors for the detection of COVID-19 samples**
R. Canton-Vitoria, K. Sato, Y. Motooka, S. Toyokuni, Z. Liu, R. Kitaura
Nanoscale, 15, 4570 (2023)
DOI: 10.1039/D2NR06630K

(55) **Step electrical switching in VO_2 on hexagonal boron nitride using confined individual metallic domains**
S.Genchi, S.Nakaharai, T.Iwasaki, K.Watanabe, T. Taniguchi, Y. Wakayama, A.N.Hattori, H. Tanaka
Jpn. J. Appl. Phys., 62, SG1008 (2023)
DOI: 10.35848/1347-4065/acb65b

-2022-

(1) **Machine learning determination of the twist angle of bilayer graphene by Raman spectroscopy: Implications for van der Waals heterostructures**
P. Solis-Fernandez, H. Ago
ACS Appl. Nano Mater., , 5, 1356-1366 (2022)
DOI: 10.1021/acsanm.1c03928

(2) **Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation**
H. Ago, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio
Sci. Tech. Adv. Mater., 23, 275-299 (2022)
DOI: 10.1080/14686996.2022.2062576
プレス発表あり　https://www.asiaresearchnews.com/content/new-age-25d-materials

(3) **Graphene-based deep-ultraviolet photodetectors with ultrahigh responsivity using chemical vapor deposition of hexagonal boron nitride to achieve photogating**
S. Fukushima, S. Fukamachi, M. Shimatani, K. Kawahara, H. Ago, S. Ogawa
Opt. Mater. Express, 12, 2090-2101 (2022)
DOI: 10.1364/OME.457545

(4) **Generation of ultralong liposome tubes by membrane fusion beneath a laser-induced micro bubble on gold surfaces**
C. Kojima, A. Noguchi, T. Nagai, K.-I. Yuyama, S. Fujii, Sho, K. Ueno, N. Oyamada, K. Murakoshi, T. Shoji, Y. Tsuboi
ACS Omega, 7, 13120-13127 (2022)
DOI: 10.1021/acsomega.2c00553

(5) **Performance enhancement of SnS/h-BN Heterostructure p-type FET via Thermodynamically Predicted Surface Oxide Conversion Method**
Y. Chang, T. Nishimura, T. Taniguchi, K. Watanabe,K. Nagashio
ACS Appl. Mater. Interfaces., 14, 17, 19928–19937 (2022)

DOI: 10.1021/acsami.2c05534

(6) **Structure Factors and Charge Density Description of Aluminum: A Quantum Crystallographic Study**
R. Pal, D. Jayatilaka, E. Nishibori
J. Phys. Chem. A , 126,12, 2042-2049 (2022)
DOI: 10.1021/acs.jpca.1c10730

(7) **Magnon-Coupled Intralayer Moiré Trion in Monolayer Semiconductor–Antiferromagnet Heterostructures**
Y. Zhang, H. Kim, W. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda
Adv. Mater., 34,18, 2200301 (2022)
DOI: 10.1002/adma.202200301

(8) **X-ray Electron Density Study of the Chemical Bonding Origin of Glass Formation in Metal–Organic Frameworks**
S. Sarkar, T. B. E. Grønbech, A. Mamakhel, M. Bondesgaard, K. Sugimoto, E. Nishibori, B. B. Iversen
Angew. Chem.Int. Ed., 61,22, e202202742 (1-7) (2022)
DOI: 10.1002/anie.202202742

(9) **Delayed Onset and Directionality of X-Ray-Induced Atomic Displacements Observed on Subatomic Length Scales**
I. Inoue, V. Tkachenko, K. J. Kapcia, V. Lipp, B. Ziaja, Y. Inubushi, T. Hara, M. Yabashi, E. Nishibori
Phys. Rev. Lett., 128, 223203(1-7) (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.223203
プレス発表あり

(10) **Imaging of isotope diffusion using atomic-scale vibrational spectroscopy**
R. Senga, Y. Lin, S. Morishita, R. Kato, T. Yamada, M. Hasegawa , K. Suenaga
Nature, 603, 68-72 (2022)
DOI: 10.1038/s41586-022-04405-w

(11) **Formation of a Two-Dimensional Electronic System in Laterally Assembled WTe Nanowires**
H. Shimizu, J. Pu, Z. Liu, H. E. Lim, M. Maruyama, Y. Nakanishi, S. Ito, I. Kikuchi, T. Endo, K. Yanagi, Y. Oshima, S. Okada, T. Takenobu, Y. Miyata
ACS Appl. Nano Mater., 5, 5, 6277-6284 (2022)
DOI: 10.1021/acsanm.2c00377

(12) **Electric-Field-Induced Metal-Insulator Transition and Quantum Transport in Large-Area Polycrystalline MoS2 Monolayers**
H. Ou, T. Yamada, M. Mitamura, Y. Edagawa, T. D. Matsuda, K. Yanagi, C.-H. Chen, L.-J. Li, T. Takenobu, J. Pu
Phys. Rev. Mater., 6, 064005 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.064005

(13) **Ultrafast Singlet Fission and Efficient Carrier Transport in a Lamellar Assembly of Bis[(trialkoxyphenyl)ethynyl]pentacene**
H. Sakai, K. Yoshino, Y. Shoji, T. Kajitani, J. Pu, T. Fukushima, T. Takenobu, N. V. Tkachenko, T. Hasobe
J. Phys. Chem. C, 126,22, 9396-9406 (2022)
DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c00864

(14) **Odd-even layer-number effect of valence-band spin splitting in WTe_2**
M. Sakano, Y. Tanaka, S. Masubuchi, S. Okazaki, T. Nomoto, A. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Arita, T. Sasagawa, T. Machida, K. Ishizaka
Phys. Rev. Res., 4, 023247 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.023247
プレス発表あり　https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-06-29-002

(15) **Dry pick-and-flip assembly of van der Waals heterostructures for microfocus angle-resolved photoemission spectroscopy**
S. Masubuchi, M. Sakano, Y. Tanaka, Y. Wakafuji, T. Yamamoto, S. Okazaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Li, H. Ejima, T. Sasagawa, K. Ishizaka T. Machida
Sci. Rep., 12, 10936 (2022)
DOI: 10.1038/s41598-022-14845-z

(16) **Geometric and electronic structures of spiro-graphene comprising fused pentagons and octagons**
S. Okada, N. T. Cuong, Y. Gao, M. Maruyama
J. Phys. Soc. Jpn., 91, 024602 (2022)
DOI: 10.7566/JPSJ.91.024602

(17) **A two-dimensional magnetic carbon allotrope of hexagonally arranged fused pentagons**
M. Maruyama, Y. Gao, N. T. Cuong, S. Okada
Appl. Phys. Express, 15, 035001 (2022)
DOI: 10.35848/1882-0786/ac55e8

(18) **All carbon p-n border in bilayer graphene by molecular orientation of intercalated corannulene**
M. Maruyama, S. Okada
J. Appl. Phys., 131, 134303 (2022)
DOI: 10.1063/5.0083616

(19) **Electronic structure of diamond nanowires under an external electric field**
Y. Gao, S. Okada
Diam. Relat. Mater. , 125, 109029 (2022)
DOI: 10.1016/j.diamond.2022.109029

(20) **Continuous Fermi level tuning of Nb-doped WSe_2 under an external electric field**
K. Hisama, M. Maruyama, Y. Gao, S. Okada
Jpn. J. App. Phys., 60, 065002 (2022)
DOI: 10.35848/1347-4065/ac3726

(21) **Electrostatic properties of two-dimensional C_{60} polymer thin films under an external electric field**
Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada
Jpn. J. Appl. Phys., 61, 075004 (2022)
DOI: 10.35848/1347-4065/ac7762

(22) **Enhanced valley polarization of graphene on h-BN under circularly polarized light irradiation**
K. Nakagahara, K. Wakabayashi
Phys. Rev. B, 106, 075403 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.106.075403

(23) **Directional Exciton-Energy Transport in a Lateral Heteromonolayer of Wse_2–$MoSe_2$**
M. Shimasaki, T. Nishihara, K. Matsuda, T. Endo, Y. Takaguchi, Z. Liu, Y. Miyata, Y. Miyauchi

ACS Nano, 16, 5, 8205–8212 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c01890

(24) **Factors Affecting the Electrochemical Behaviors of Graphene-Like Graphite as a Positive Electrode of a Dual-Ion Battery**
Y. Matsuo, K. Sekito, Y. Ashida, J. Inamoto, N. Tamura
ChemSusChem, e202201127 (2022)
DOI: 10.1002/cssc.202201127

(25) **Switchable out-of-plane shift current in ferroelectric two-dimensional material $CuInP_2S_6$**
Y. Zhang, R. Taniguchi, S. Masubuchi, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida
Appl. Phys. Lett., 120, 13103 (2022)
DOI: 10.1063/5.0074371

(26) **Probing dark exciton navigation through a local strain landscape in a WSe_2 monolayer**
R. J. Gelly, D. Renaud, X. Liao, B. Pingault, S. Bogdanovic, G. Scuri, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Urbaszek, H. Park, M. Lončar
Nat. Commun., 13, 232 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-021-27877-2

(27) **Enhancing Perpendicular Magnetic Anisotropy in Garnet Ferrimagnet by Interfacing with Few-Layer WTe_2**
G. Wu, D. Wang, N. Verma, R. Rao, Y. Cheng, S. Guo, G. Cao, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. N. Lau, F. Yang, M. Randeria, M. Bockrath, P. C. Hammel
Nano Lett., 22, 3, 1115-1121 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c04237

(28) **Raman spectra of twisted bilayer graphene close to the magic angle**
T. C. Barbosa, A. C. Gadelha, D. A. A. Ohlberg, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Medeiros-Ribeiro, A. Jorio, L. C. Campos
2D Mater., 9, 1115-1121 (2022)
DOI: 10.1088/2053-1583/ac4af9

(29) **Nonlinear intensity dependence of photogalvanics and photoconductance induced by terahertz laser radiation in twisted bilayer graphene close to magic angle**
S. Hubmann, P. Soul, G. Di Battista, M. Hild, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. K. Efetov, S. D. Ganichev
Phys. Rev. Mater., 6, 024003 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.024003

(30) **Spatiotemporally controlled room-temperature exciton transport under dynamic strain**
K. Datta, Z. Lyu, Z. Li, T. Taniguchi, K. Watanabe, P. B. Deotare
Nat. Photonics, 16, 242-247 (2022)
DOI: 10.1038/s41566-021-00951-3

(31) **Tunable angle-dependent electrochemistry at twisted bilayer graphene with moiré flat bands**
Y. Yu, K. Zhang, H. Parks, M. Babar, S. Carr, I. M. Craig, M. Van Winkle, A. Lyssenko, T. Taniguchi, K. Watanabe, V. Viswanathan, D. K. Bediako
Nat. Chem., 14, 267-273 (2022)
DOI: 10.1038/s41557-021-00865-1

(32) **Isospin magnetism and spin-polarized superconductivity in Bernal bilayer graphene**

H. Zhou, L. Holleis, Y. Saito, L. Cohen, W. Huynh, C. L. Patterson, F. Yang, T. Taniguchi, K. Watanabe, A. F. Young
Science, 375, 774-778 (2022)
DOI: 10.1126/science.abm8386

(33) **Subband-resolved momentum-conserved resonant tunneling in monolayer graphene/h-BN/ABA-trilayer graphene small-twist-angle tunneling device**
Y. Seo, S. Masubuchi, M. Onodera, Y. Zhang, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida
Appl. Phys. Lett., 120, 083102 (2022)
DOI: 10.1063/5.0080215

(34) **Hybridized Exciton-Photon-Phonon States in a Transition Metal Dichalcogenide van der Waals Heterostructure Microcavity**
D. Li, H. Shan, C. Rupprecht, H. Knopf, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Qin, S. Tongay, M. Nuß, S. Schröder, F. Eilenberger, S. Höfling, C. Schneider, T. Brixner
Phys. Rev. Lett., 128, 087401 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.087401

(35) **Direct STM measurements of R-type and H-type twisted $MoSe_2$/WSe_2**
R. Nieken, A. Roche, F. Mahdikhanysarvejahany, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. R. Koehler, D. G. Mandrus, J. Schaibley, B. J. LeRoy
APL Materials, 10, 31107 (2022)
DOI: 10.1063/5.0084358

(36) **Visualization of Dark Excitons in Semiconductor Monolayers for High-Sensitivity Strain Sensing**
S. B. Chand, J. M. Woods, E. Mejia, T. Taniguchi, K. Watanabe, G. Grosso
Nano Lett., 22, 3087-3094 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c00436

(37) **Trion-trion annihilation in monolayer WS_2**
S. Chatterjee, G. Gupta, S. Das, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Majumdar
Phys. Rev. B, 105, L121409 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.105.L121409

(38) **Efficient valley polarization of charged excitons and resident carriers in Molybdenum disulfide monolayers by optical pumping**
S. Park, S. Arscott, T. Taniguchi, K. Watanabe, F. Sirotti, F. Cadiz
Commun. Phys., 5, 73 (2022)
DOI: 10.1038/s42005-022-00850-1

(39) **Non-invasive digital etching of van der Waals semiconductors**
J. Zhou, C. Zhang, L. Shi, X. Chen, T. S. Kim, M. Gyeon, J. Chen, J. Wang, L. Yu, X. Wang, K. Kang, E. Orgiu, P. Samorì, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Tsukagoshi, P. Wang, Y. Shi, S. Li
Nat. Commun., 13, 1844 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-29447-6

(40) **Imaging the effect of high photoexcited densities on valley polarization and coherence in MoS_2 monolayers**
F. Cadiz, S. Gerl, T. Taniguchi, K. Watanabe
npj 2D Mater. Appl. , 6, 27 (2022)

DOI: 10.1038/s41699-022-00303-x

(41) **A High-Quality Entropy Source Using van der Waals Heterojunction for True Random Number Generation**
N. Abraham, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Majumdar
ACS Nano, 16, 5898-5908 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.1c11084

(42) **Clean BN-Encapsulated 2D FETs with Lithography-Compatible Contacts**
B. Liang, A. Wang, J. Zhou, S. Ju, J. Chen, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Shi, S. Li
ACS Appl. Mater. Interfaces, 14, 18697-18703 (2022)
DOI: 10.1021/acsami.2c02956

(43) **Optical absorption of interlayer excitons in transition-metal dichalcogenide heterostructures**
E. Barré, O. Karni, E. Liu, A. L. O'Beirne, X. Chen, H. B. Ribeiro, L. Yu, B. Kim, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Barmak, C. H. Lui, S. Refaely-Abramson, J. F. H. da, T. F. Heinz
Science, 376, 406-410 (2022)
DOI: 10.1126/science.abm8511

(44) **Terahertz radiation induced circular Hall effect in graphene**
S. Candussio, S. Bernreuter, T. Rockinger, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Eroms, I. A. Dmitriev, D. Weiss, S. D. Ganichev
Phys. Rev. B, 105, 155416 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.105.155416

(45) **Nanoscale solid-state nuclear quadrupole resonance spectroscopy using depth-optimized nitrogen-vacancy ensembles in diamond**
J. Henshaw, P. Kehayias, M. Saleh Ziabari, M. Titze, E. Morissette, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. I. A. Li, V. M. Acosta, E. S. Bielejec, M. P. Lilly, A. M. Mounce
Appl. Phys. Lett., 120, 174002 (2022)
DOI: 10.1063/5.0083774

(46) **Ultrasharp Lateral p–n Junctions in Modulation-Doped Graphene**
J. Balgley, J. Butler, S. Biswas, Z. Ge, S. Lagasse, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. Cothrine, D. G. Mandrus, J. Velasco, R. Valentí, E. A. Henriksen
Nano Lett., 22, 4124-4130 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c00785

(47) **Direct Patterning of Optoelectronic Nanostructures Using Encapsulated Layered Transition Metal Dichalcogenides**
T. K. Stanev, P. Liu, H. Zeng, E. J. Lenferink, A. A. Murthy, N. Speiser, K. Watanabe, T. Taniguchi, V. P. Dravid, N. P. Stern
ACS Appl. Mater. Interfaces, 14, 23775-23784 (2022)
DOI: 10.1021/acsami.2c03652

(48) **Defect-assisted tunneling spectroscopy of electronic band structure in twisted bilayer graphene/hexagonal boron nitride moiré superlattices**
Y. Seo, S. Masubuchi, M. Onodera, R. Moriya, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida
Appl. Phys. Lett., 120, 203103 (2022)
DOI: 10.1063/5.0084996

(49) **Site-Specific Fabrication of Blue Quantum Emitters in Hexagonal Boron Nitride**
A. Gale, C. Li, Y. Chen, K. Watanabe, T. Taniguchi, I. Aharonovich, M. Toth
ACS Photo, 9, 2170-2177 (2022)
DOI: 10.1021/acsphotonics.2c00631

(50) **Highly Nonlinear Biexcitonic Photocurrent from Ultrafast Interlayer Charge Transfer**
S. Das, G. Gupta, S. Chatterjee, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Majumdar
ACS Nano, 16, 9728-9735 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c03397

(51) **Observation of Reentrant Correlated Insulators and Interaction-Driven Fermi-Surface Reconstructions at One Magnetic Flux Quantum per Moir'e Unit Cell in Magic-Angle Twisted Bilayer Graphene**
I. Das, C. Shen, A. Jaoui, J. Herzog-Arbeitman, A. Chew, C.-W. Cho, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. A. Piot, B. A. Bernevig, D. K. Efetov
Phys. Rev. Lett., 128, 217701 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.217701

(52) **Synthesis of a flexible self-standing graphene-like graphite thin film and its application to anode materials for thin-film all-solid-state lithium-ion batteries**
J. Inamoto, S. Komiyama, Y. Matsuo
Carbon Rep., 1, 142-146 (2022)
DOI: 10.7209/carbon.010304

(53) **Spontaneous-polarization-induced photovoltaic effect in rhombohedrally stacked MoS_2**
D. Yang, J. Wu, B. T. Zhou, J. Liang, T. Ideue, T. Siu, K. M. Awan, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Iwasa, M. Franz, Z. Ye
Nat. Photonics, 16, 469-474 (2022)
DOI: 10.1038/s41566-022-01008-9

(54) **Current Injection into Single-Crystalline Carbon-Doped h-BN toward Electronic and Optoelectronic Applications**
S. Ngamprapawat, T. Nishimura, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Nagashio
ACS Appl. Mater. Interfaces, 14, 25731-25740 (2022)
DOI: 10.1021/acsami.2c04544

(55) **Cascade of isospin phase transitions in Bernal-stacked bilayer graphene at zero magnetic field**
S. C. de la Barrera, S. Aronson, Z. Zheng, K. Watanabe, T. Taniguchi, Q. Ma, P. Jarillo-Herrero, R. Ashoori
Nat. Phys., 18, 771-775 (2022)
DOI: 10.1038/s41567-022-01616-w

(56) **Resonant Tunneling between Quantized Subbands in van der Waals Double Quantum Well Structure Based on Few-Layer WSe_2**
K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida
Nano Lett., 22, 4640-4645 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c00396

(57) **Isospin competitions and valley polarized correlated insulators in twisted double bilayer graphene**
L. Liu, S. Zhang, Y. Chu, C. Shen, Y. Huang, Y. Yuan, J. Tian, J. Tang, Y. Ji, R. Yang, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Shi, J. Liu, W. Yang, G. Zhang

Nat. Commun., 13, 3292 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-30998-x

(58) **Electrically Tunable Localized versus Delocalized Intralayer Moiré Excitons and Trions in a Twisted MoS_2 Bilayer**
M. Dandu, G. Gupta, P. Dasika, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Majumdar
ACS Nano, 16, 8983-8992 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c00145

(59) **Quantum transport in CVD graphene synthesized with liquid carbon precursor**
X. Yi, Q. Song, Q. Chen, C. Zhao, K. Watanabe, T. Taniguchi, Q. Chen, C. Yan, S. Wang
Nat., 33, 355601 (2022)
DOI: 10.1088/1361-6528/ac72b1

(60) **Electrically Pumped Polarized Exciton-Polaritons in a Halide Perovskite Microcavity**
T. Wang, Z. Zang, Y. Gao, C. Lyu, P. Gu, Y. Yao, K. Peng, K. Watanabe, T. Taniguchi, X. Liu, Y. Gao, W. Bao, Y. Ye
Nano Lett., 22, 5175-5181 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c00906

(61) **Spin relaxation in a single-electron graphene quantum dot**
L. Banszerus, K. Hecker, S. Möller, E. Icking, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Volk, C. Stampfer
Nat. Commun., 13, 3637 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-31231-5

(62) **Chern mosaic and Berry-curvature magnetism in magic-angle graphene**
S. Grover, M. Bocarsly, A. Uri, P. Stepanov, G. Di Battista, I. Roy, J. Xiao, A. Y. Meltzer, Y. Myasoedov, K. Pareek, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Yan, A. Stern, E. Berg, D. K. Efetov, E. Zeldov
Nat. Phys., 18, 885-892 (2022)
DOI: 10.1038/s41567-022-01635-7

(63) **Interlayer Charge Transfer and Photodetection Efficiency of Graphene--Transition-Metal-Dichalcogenide Heterostructures**
A. Parappurath, S. Mitra, G. Singh, N. K. Gill, T. Ahmed, T. P. Sai, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Ghosh
Phys. Rev. Appl., 17, 064062 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.064062

(64) **Evaluation of polyvinyl chloride adhesion to 2D crystal flakes**
Y. Wakafuji, M. Onodera, S. Masubuchi, R. Moriya, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida
npj 2D Mater. Appl. , 6, 44 (2022)
DOI: 10.1038/s41699-022-00323-7

(65) **Light sources with bias tunable spectrum based on van der Waals interface transistors**
H. Henck, D. Mauro, D. Domaretskiy, M. Philippi, S. Memaran, W. Zheng, Z. Lu, D. Shcherbakov, C. N. Lau, D. Smirnov, L. Balicas, K. Watanabe, T. Taniguchi, V. I. Fal'ko, I. Gutiérrez-Lezama, N. Ubrig, A. F. Morpurgo
Nat. Commun., 13, 3917 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-31605-9

(66) **Quantum Hall Interferometry in Triangular Domains of Marginally Twisted Bilayer Graphene**
P. S. Mahapatra, M. Garg, B. Ghawri, A. Jayaraman, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Ghosh, U. Chandni

Nano Lett., 22, 5708-5714 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c00627

(67) **Stacking-dependent exciton multiplicity in WSe_2 bilayers**
Z. Li, J. Förste, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Urbaszek, A. S. Baimuratov, I. C. Gerber, A. Högele, I. Bilgin
Phys. Rev. B, 106, 045411 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.106.045411

(68) **Graphene Via Contact Architecture for Vertical Integration of vdW Heterostructure Devices**
Y. Shin, J. Kwon, Y. Jeong, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Im, G.-H. Lee
Small, 18, 2200882 (2022)
DOI: 10.1002/smll.202200882

(69) **Probing the charge and heat transfer channels in optically excited graphene — transition metal dichalcogenide hybrids using Johnson noise thermometry**
A. Majumdar, S. Kakkar, N. K. Anil, T. Paul, T. Phanindra Sai, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Ghosh
Appl. Phys. Lett., 121, 041103 (2022)
DOI: 10.1063/5.0099383

(70) **Uncovering the morphological effects of high-energy Ga+ focused ion beam milling on hBN single-photon emitter fabrication**
R. Klaiss, J. Ziegler, D. Miller, K. Zappitelli, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Alemán
J. Chem. Phys., 157, 074703 (2022)
DOI: 10.1063/5.0097581

(71) **Formation of moiré interlayer excitons in space and time**
D. Schmitt, J. P. Bange, W. Bennecke, A. AlMutairi, G. Meneghini, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. Steil, D. R. Luke, R. T. Weitz, S. Steil, G. S. M. Jansen, S. Brem, E. Malic, S. Hofmann, M. Reutzel, S. Mathias
Nature, 608, 499-503 (2022)
DOI: 10.1038/s41586-022-04977-7

(72) **Photoluminescence of metallic single-walled carbon nanotubes: Role of interband and intraband transitions**
T. Koyama, N. Umewaki, K. Saito, T. Tatsuno, A. Fujisaki, Y. Miyata, H. Kataura, H. Kishida
Phys. Rev. B, 106, 045421 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.106.045421

(73) **Large-Scale 1T′ -Phase Tungsten Disulfide Atomic Layers Grown by Gas-Source Chemical Vapor Deposition**
M. Okada, J. Pu, Y.-C. Lin, T. Endo, N. Okada, W.-H. Chang, A. K. Augustin Lu, T. Nakanishi, T. Shimizu, T. Kubo, Y. Miyata, K. Suenaga, T. Takenobu, T. Yamada, T. Irisawa
ACS Nano, 16, 13069-13081 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c05699

(74) **Efficient and Chiral Electroluminescence from In-Plane Heterostructure of Transition Metal Dichalcogenide Monolayers**
N. Wada, J. Pu, Y. Takaguchi, W. Zhang, Z. Liu, T. Endo, T. Irisawa, K. Matsuda, Y. Miyauchi, T. Takenobu, Y. Miyata
Adv. Func. Mater., 32, 2203602 (2022)

DOI: 10.1002/adfm.202203602
プレス発表あり　https://www.tmu.ac.jp/news/topics/34874.html

(75) **Surface Diffusion-Limited Growth of Large and High-Quality Monolayer Transition Metal Dichalcogenides in Confined Space of Microreactor**
H. Suzuki, R. Hashimoto, M. Misawa, Y. Liu, M. Kishibuchi, K. Ishimura, K. Tsuruta, Y. Miyata, Y. Hayashi
ACS Nano, 16, 11360-11373 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c05076

(76) **Laser-combined multiprobe microscopy and its application to the materials with atomic layer thickness**
H. Mogi, Z.-h. Wang, I. Kuroda, Y. Takaguchi, Y. Miyata, A. Taninaka, Y. Arashida, S. Yoshida, O. Takeuchi, H. Shigekawa
Jpn. J. Appl. Phys., 61, SL1011-1-9 (2022)
DOI: 10.35848/1347-4065/ac6a3c

(77) **Fabrication of high-entropy $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films by pulsed laser deposition**
A. Yamashita, K. Hashimoto, S. Suzuki, Y. Nakanishi, Y. Miyata, T. Maeda, Y. Mizuguchi
Jpn. J. Appl. Phys., 61, 050905 (2022)
DOI: 10.35848/1347-4065/ac5b39

(78) **Electrical transport properties of atomically thin Wse_2 using perpendicular magnetic anisotropy metal contacts**
S. Gupta, R. Ohshima, Y. Ando, T. Endo, Y. Miyata, M. Shiraishi
Appl. Phys. Lett., 120, 013102 (2022)
DOI: 10.1063/5.0079223

(79) **Ultrafast Operation of 2D Heterostructured Nonvolatile Memory Devices Provided by the Strong Short-Time Dielectric Breakdown Strength of h-BN**
T. Sasaki, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Nishimura, K. Nagashio
ACS Appl. Mater. Interfaces., 14, 25659–25669 (2022)
DOI: 10.1021/acsami.2c03198

(80) **Quantization of Mode Shifts in Nanocavities Integrated with Atomically Thin Sheets**
N. Fang, D. Yamashita, S. Fujii, K. Otsuka, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio, Y. K. Kato
Adv. Opt. Mater., 10, 2200538 (2022)
DOI: 10.1002/adom.202200538

(81) **Is the Band Gap of Bulk $PdSe_2$ Located Truly in the Far Infrared Region? -Determination by Fourier Transform Photocurrent Spectroscopy**
W. Nishiyama, T. Nishimura, M. Nishioka, K. Ueno, S. Iwamoto, K. Nagashio
Adv. Photon. Res., 2200231 (2022)
DOI: 10.1002/adpr.202200231

(82) **Ultrafast nanoscale exciton dynamics via laser-combined scanning tunneling microscopy in atomically thin materials**
H. Mogi, Y. Arashida, R. Kikuchi, R. Mizuno, J. Wakabayashi, N. Wada, Y. Miyata, A. Taninaka, S. Yoshida, O. Takeuchi, H. Shigekawa
npj 2D Mater. Appl., 6, 72 (2022)
DOI: 10.1038/s41699-022-00345-1
プレス発表あり　https://www.tmu.ac.jp/news/topics/35092.html

(83) **Insight into the Origin of the Rapid Charging Ability of Graphene-Like Graphite as a Lithium-Ion Battery Anode Material Using Electrochemical Impedance Spectroscopy**
J. Inamoto, S. Komiyama, S. Uchida, A. Inoo, Y. Matsuo
J. Phys. Chem. C, 126, 16100–16108 (2022)
DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c04780

(84) **Surfactant-Assisted Isolation of Small-Diameter Boron-Nitride Nanotubes for Molding One-Dimensional van der Waals Heterostructures**
S. Furusawa, Y. Nakanishi, Y. Yomogida, Y. Sato, Y. Zheng, T. Tanaka, K. Yanagi, K. Suenaga, S. Maruyama, R. Xiang, Y. Miyata
ACS Nano, 16, 16636-16644 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c06067
プレス発表あり　https://www.tmu.ac.jp/news/topics/35021.html

(85) **Continuous Color-Tunable Light-Emitting Devices Based on Compositionally Graded Monolayer Transition Metal Dichalcogenide Alloys**
J. Pu, H. Ou, T. Yamada, N. Wada, H. Naito, H. Ogura, T. Endo, Z. Liu, T. Irisawa, K. Yanagi, Y. Nakanishi, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, K. Shinokita, K. Matsuda, Y. Miyata, T. Takenobu
Adv. Mater., 34, 2203250 (2022)
DOI: 10.1002/adma.202203250

(86) **Observation and origin of isostructural donor-acceptor stacking in a family of molecular-compound organic semiconductors**
S. Matsuoka, K. Ogawa, R. Ono, K. Nikaido, S. Inoue, T. Higashino, M. Tanaka, J. Tsutsumi, R. Kondo, R. Kumai, H. Matsui, S. Tsuzuki, S. Arai, T. Hasegawa
J. Mater. Chem. C, 10, 16471－16479 (2022)
DOI: 10.1039/D2TC03634G

(87) **Signature of topological band crossing in ferromagnetic $Cr_{1/3}NbSe_2$ epitaxial thin film**
B. K. Saika, S. Hamao, Y. Majima, X. Huang, H. Matsuoka, S. Yoshida, M. Kitamura, M. Sakano, T. Hatanaka, T. Nomoto, M. Hirayama, K. Horiba, H. Kumigashira, R. Arita, Y. Iwasa, M. Nakano, K. Ishizaka
Phys. Rev. Res., 4, L042021 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.L042021

(88) **Field induced electron emission from graphene nanostructures**
Y. Gao, S. Okada
Nano Express, 3, 034001 (2022)
DOI: 10.1088/2632-959X/ac8822

(89) **Synchrotron X-ray Electron Density Analysis of Chemical Bonding in the Graphitic Carbon Nitride Precursor Melamine**
E. S. Vosegaard, M. K. Thomsen, L. Krause, T. B. E. Gronbech, A. Mamakhel, S. Takahashi, E. Nishibori, B. B. Iversen
Chem. Eur. J., 28, e202201295 (2022)
DOI: 10.1002/chem.202201295

(90) **Thermally responsive morphological changes of layered coordination polymers induced by disordering/ordering of flexible alkyl chains**
K. Omoto, S. Aoyama, T. Galica, E. Nishibori, S. Katao, K. Yasuhara, G. Rapenne

Dalton Trans., 51, 17967-17972 (2022)
DOI: 10.1039/D2DT03142F

(91) **Electron Density Analysis of Metal-Metal Bonding in a Ni_4 Cluster Featuring Ferromagnetic Exchange**
S. S. Leiszner, K. Chakarawet, J. R. Long, E. Nishibori, K. Sugimoto, J. A. Platts, J. Overgaard
Inorg. Chem., 62, 192-200 (2022)
DOI: 10.1021/acs.inorgchem.2c03170

(92) **Multicomponent Crystals with Competing Intermolecular Interactions: In Situ X-ray Diffraction and Luminescent Features Reveal Multimolecular Assembly under Mechanochemical Conditions**
Y. Yano, H. Kasai, Y. Zheng, E. Nishibori, Y. Hisaeda, T. Ono
Angew. Chem.Int. Ed., 61, e202203853(1-8) (2022)
DOI: 10.1002/anie.202203853

(93) **Luminescence color change of [3,4-difluoro-2,6-bis(5-methyl-2-pyridyl)phenyl- κ^3N,C^1,N']cyanido-platinum(II) by aggregation**
S. Hattori, T. Nakano, N. Kobayashi, Y. Konno, E. Nishibori, T. Galica, K. Shinozaki
Dalton Trans., 51, 15830-15841 (2022)
DOI: 10.1039/d2dt02360a

(94) **In situ observation of a mechanically induced self-sustaining reaction for synthesis of silver**
Y. Zheng, H. Kasai, S. Kobayashi, S. Kawaguchi, E. Nishibori
Mater. Adv., 4, 1005-1010 (2022)
DOI: 10.1039/D2MA00903J

(95) **Mixing-Induced Orientational Ordering in Liquid-Crystalline Organic Semiconductors**
K. Nikaido, S. Inoue, R. Kumai, T. Higashino, S. Matsuoka, S. Arai, T. Hasegawa
Adv. Mater. Interf. , 9, 2201789 (2022)
DOI: 10.1002/admi.202201789

(96) **Phase-change control of anomalous Hall effect in ferromagnetic MnBi thin films**
S. Zhang, Y. Miyazaki, T. Yokouchi, Y. Shiomi
Appl. Phys. Lett. , 121, 262402 (2022)
DOI: 10.1063/5.0121284

(97) **Lattice distortion of oxygen monolayer on Ag(111) observed by scanning probe microscopy**
M. Kimura, Y. Sugimoto
Phys. Rev. B, 106, 115432 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.106.115432

(98) **Wavelength Dependence of Polarization-resolved Second Harmonic Generation from Ferroelectric SnS Few Layers**
R. Moqbel, Y.-R. Chang, Z. -Y. Li, S. -H. Kung, H. -Y. Cheng, C. -C. Lee, K. Nagashio, K. -H. Lin
2D mater., 10, 15022 (2022)
DOI: 10.1088/2053-1583/acab74

(99) **Patterning and doping of transition metals in tungsten dichalcogenides**
Y. -C. Lin, Y. -P. Chang, K. -W. Chen, T. -T. Lee, B. -J. Hsiao, T. -H. Tsai, Y. -C. Yang, K. -I Lin, K. Suenaga, C. -H. Chen, P. -W. Chiu
Nanoscale, 14, 16968-16977 (2022)
DOI: 10.1039/D2NR04677F

(100) **Twist Angle-Dependent Molecular Intercalation and Sheet Resistance in Bilayer Graphene**
Y. Araki, P. S.-Fernández, Y.-C. Lin, A. Motoyama, K. Kawahara, M. Maruyama, Y. Gao, R. Matsumoto, K. Suenaga, S. Okada, H. Ago
ACS Nano, 16, 14075-14085 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c03997

(101) **Seeing how ice breaks the rule**
Y. Sugimoto
Science, 377, 264-265 (2022)
DOI: 10.1126/science.add0841

(102) **Synthesis of the C_{70} Fragment Buckybowl, Homosumanene, and Heterahomosumanenes via Ring-Expansion Reactions from Sumanenone**
M. Nishimoto, Y. Uetake, Y. Yakiyama, F. Ishiwari, A. Saeki, H. Sakurai
J. Org. Chem., 87, 2508-2519 (2022)
DOI: 10.1021/acs.joc.1c02416

(103) **Dielectric Response of Difluorinated Sumanene Caused by an In-plane Motion**
M. Li, J.-Y. Wu, K. Sambe, Y. Yakiyama, T. Akutagawa, T. Kajitani, T. Fukushima, K. Matsuda, H. Sakurai
Mater. Chem. Front. , 6, 1752–1758 (2022)
DOI: 10.1039/D2QM00134A

(104) **Turning Dielectric Response by Co-crystallisation of Sumanene and Its Fluorinated Derivative**
M. Li, X. Chen, Y. Yakiyama, J. Wu, T. Akutagawa, H. Sakurai
Chem. Commun., 58, 8950-8953 (2022)
DOI: 10.1039/D2CC02766F

(105) **Infrared and Laser-Induced Fluorescence Spectra of Sumanene Isolated in Solid para-Hydrogen**
I. Weber, M. Tsuge, P. Sundararajan, M. Baba. H. Sakurai, Y. -P. Lee
J. Phys. Chem. A , 126, 5283-5293 (2022)
DOI: 10.1021/acs.jpca.2c02906

(106) **Synthesis of Sumanene-fused Acenes**
H. Nakazawa, A. Ohya, Y. Morimoto, Y. Uetake, N. Ikuma, K. Okada, M. Nakano, Y. Yakiyama, H. Sakurai
Asian J. Org. Chem. , 11, e202200471 (2022)
DOI: 10.1002/ajoc.202200471

(107) **Sumanene-Functionalised Bis(terpyridine)-Ruthenium(II) Complexes Showing Photoinduced Structural Change and Cation Sensing**
J. Han, Y. Yakiyama, Y. Takeda, H. Sakurai
Inorg. Chem. Front, 10, 211–217 (2022)
DOI: 10.1039/D2QI01801B

(108) **Synthesis of Fully Substituted Sumanenes at the Aromatic Periphery through Hexabromomethylation**
H. Nakazawa, Y. Uetake, Y. Yakiyama, H. Sakurai
Asian J. Org. Chem. , 12, e202200585 (2022)
DOI: 10.1002/ajoc.202200585

(109) **Thermodynamic Differentiation of the Two Sides of Azabuckybowl through Complexation with Square Planar Platinum(II)**
M. Nishimoto, Y. Uetake, Y. Yakiyama, H. Sakurai

Chem. Asian J., 18, e202201103 (2022)
DOI: 10.1002/asia.202201103

(110) **Acceleration Effect of Bowl-Shaped Structure in Aerobic Oxidation Reaction: Synthesis of Homosumanene ortho-Quinone and Azaacene-Fused Homosumanenes**
M. Nishimoto, Y. Uetake, Y. Yakiyama, A. Saeki, J. Freudenberg, U. H. F. Bunz, H. Sakurai
Chem. Eur. J., 29, e202203461 (2022)
DOI: 10.1002/chem.202203461

(111) **Large Anomalous Hall Effect Induced by Weak Ferromagnetism in the Noncentrosymmetric Antiferromagnet $CoNb_3S_6$**
H. Tanaka, S. Okazaki, K. Kuroda, R. Noguchi, Y. Arai, S. Minami, S. Ideta, K. Tanaka, D. Lu, M. Hashimoto, V. Kandyba, M. Cattelan, A. Barinov, T. Muro, T. Sasagawa, T. Kondo
Phys. Rev. B, 105, L121102 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.105.L121102

(112) **Giant Second Harmonic Transport under Time-reversal Symmetry in a Trigonal Superconductor**
Y.M. Itahashi, T. Ideue, S. Hoshino, C. Goto, H. Namiki, T. Sasagawa, Y. Iwasa
Nature Commun., 13, 1659 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-29314-4

(113) **Unconventional Short-range Structural Fluctuations in Cuprate Superconductors**
D. Pelc, R. J. Spieker, Z. W. Anderson, M. J. Krogstad, N. Biniskos, N. G. Bielinski, B. Yu, T. Sasagawa, L. Chauviere, P. Dosanjh, R. Liang, D. A. Bonn, A. Damascelli, S. Chi, Y. Liu, R. Osborn, M. Greven
Scientific Reports, 12, 20483 (2022)
DOI: 10.1038/s41598-022-22150-y

(114) **Magnetic Phase Transitions and Magnetoelastic Coupling in a Two-Dimensional Stripy Antiferromagnet**
P. Gu, Y. Sun, C. Wang, Y. Peng, Y. Zhu, X. Cheng, K. Yuan, C. Lyu, X. Liu, Q. Tan, Q. Zhang, L. Gu, Z. Wang, H. Wang, Z. Han, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Yang, J. Zhang, W. Ji, P. -H. Tan, Y. Ye
Nano Lett., 22, 1233-1241 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c04373

(115) **Out-of-equilibrium criticalities in graphene superlattices**
A. I. Berdyugin, N. Xin, H. Gao, S. Slizovskiy, Z. Dong, S. Bhattacharjee, P. Kumaravadivel, S. Xu, L. A. Ponomarenko, M. Holwill, D. A. Bandurin, M. Kim, Y. Cao, M. T. Greenaway, K. S. Novoselov, I. V. Gregorieva, K. Watanabe, T. Taniguchi, V. I. Fal'ko, L. S. Levitov, R. K. Kumar, A. K. Geim
Science, 375, 430-433 (2022)
DOI: 10.1126/science.abi8627

(116) **Enhanced Radiative Exciton Recombination in Monolayer WS_2 on the hBN Substrate Competing with Nonradiative Exciton–Exciton Annihilation**
Y. Lee, T. T. Tran, Y. Kim, S. Roy, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. I. Jang, J. Kim
ACS Photo, 9, 873-879 (2022)
DOI: 10.1021/acsphotonics.1c01584

(117) **Electron recoil effect in electrically tunable $MoSe_2$ monolayers**
J. Zipfel, K. Wagner, M. A. Semina, J. D. Ziegler, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. M. Glazov, A. Chernikov
Phys. Rev. B, 105, 75311 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.105.075311

(118) **Isospin order in superconducting magic-angle twisted trilayer graphene**
X. Liu, N. J. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. I. A. Li
Nat. Phys., 18, 522-527 (2022)
DOI: 10.1038/s41567-022-01515-0

(119) **Optimizing cathodoluminescence microscopy of buried interfaces through nanoscale heterostructure design**
L. Francaviglia, J. Zipfel, J. Carlstroem, S. Sridhar, F. Riminucci, D. Blach, E. Wong, E. Barnard, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. W. -Bargioni, D. F. Ogletree, S. Aloni, A. Raja
Nanoscale, 14, 7569-7578 (2022)
DOI: 10.1039/D1NR08082B

(120) **Exploring the structural and optoelectronic properties of natural insulating phlogopite in van der Waals heterostructures**
A. R. Cadore, R. d. Oliveira, R. Longuinhos, V. d. C. Teixeira, D. A. Nagaoka, V. T. Alvarenga, J. R -Soares, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. M. Paniago, A. Malachias, K. Krambrock, I. D. Barcelos, C. J S. d. Matos
2D Mater., 9, 035007 (2022)
DOI: 10.1088/2053-1583/ac6cf4

(121) **Defect-Engineered Magnetic Field Dependent Optoelectronics of Vanadium Doped Tungsten Diselenide Monolayers**
K. Nisi, J. Kiemle, L. Powalla, A. Scavuzzo, T. D. Nguyen, T. Taniguchi, K. Watanabe, D. L. Duong, M. Burghard, A. W. Holleitner, C. Kastl
Adv. Optical Mater., 10, 2102711 (2022)
DOI: 10.1002/adom.202102711

(122) **Light emission properties of mechanical exfoliation induced extended defects in hexagonal boron nitride flakes**
G. Ciampalini, C. V. Blaga, N. Tappy, S. Pezzini, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Bianco, S. Roddaro, A. F. I Morral, F. Fabbri
2D Mater., 22, 035018 (2022)
DOI: 10.1088/2053-1583/ac6f09/meta

(123) **Electrically Self-Aligned, Reconfigurable Test Structure Using WSe_2/$SnSe_2$ Heterojunction for TFET and MOSFET**
P. Dasika, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Majumdar
IEEE Trans. Electron Devices, 69, 5377-5381 (2022)
DOI: 10.1109/TED.2022.3191991

(124) **Substrate influence on transition metal dichalcogenide monolayer exciton absorption linewidth broadening**
F. Shao, S. Y. Woo, N. Wu, R. Schneider, A. J. Mayne, S. M. d. Vasconcellos, A. Arora, B. J. Carey, J. A. Preuß, N. Bonnet, M. Och, C. Mattevi, K. Watanabe, T. Taniguchi, Z. Niu, R. Bratschitsch, L. H. G. Tizei
Phys. Rev. Materials, 6, 74005 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.074005

(125) **WSe_2 as Transparent Top Gate for Infrared Near-Field Microscopy**
N. C. H. Hesp, M. K. Svendsen, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. S. Thygesen, I. Torre, H. L. Koppens
Nano Lett., 22, 6200-6206 (2022)

DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c01658

(126) **Transport Spectroscopy of Ultraclean Tunable Band Gaps in Bilayer Graphene**
E. Icking, L. Banszerus, F. Wörtche, F. Volmer, P. Schmidt, C. Steiner, S. Engels, J. Hesselmann, M. Goldsche, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Volk, B. Beschoten, C. Stampfer
Adv. Electron. Mater., 8, 2200510 (2022)
DOI: 10.1002/aelm.202200510

(127) **Uncovering Topological Edge States in Twisted Bilayer Graphene**
M. F. -Deschênes, R. Pu, Y. -F. Zhou, C. Ma, P. Cheung, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Zhang, X. Du, F. Xia
Nano Lett., 22, 6186-6193 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c01481

(128) **Valley Isospin Controlled Fractional Quantum Hall States in Bilayer Graphene**
K. Huang, H. Fu, D. R. Hickey, N. Alem, X. Lin, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Zhu
Phys. Rev. X, 12, 031019 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevX.12.031019

(129) **Revealing the Thermal Properties of Superconducting Magic-Angle Twisted Bilayer Graphene**
G. D. Battista, P. Seifert, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. C. Fong, A. Principi, D. K. Efetov
Nano Lett., 22, 6465-6470 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c04512

(130) **Band Gap Opening in Bilayer Graphene-$CrCl_3$/$CrBr_3$/CrI_3 van der Waals Interfaces**
G. Tenasini, D. S. -Delgado, Z. Wang, F. Yao, D. Dumcenco, E. Giannini, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Moulsdale, A. G. -Ruiz, V. I. Fal'ko, I. G. -Lezama, A. F. Morpurgo
Nano Lett., 22, 6760-6766 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c02369

(131) **Quantum cascade of correlated phases in trigonally warped bilayer graphene**
A. M. Seiler, F. R. Geisenhof, F. Winterer, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Xu, F. Zhang, R. T. Weitz
Nature, 608, 298-302 (2022)
DOI: 10.1038/s41586-022-04937-1

(132) **Anomalous Hall effect at half filling in twisted bilayer graphene**
C.-C. Tseng, X. Ma, Z. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. -H. Chu, M. Yankowitz
Nat. Phys., 18, 1038-1042 (2022)
DOI: 10.1038/s41567-022-01697-7

(133) **Interlayer Exciton Diode and Transistor**
D. N. Shanks, F. Mahdikhanysarvejahany, T. G. Stanfill, M. R. Koehler, D. G. Mandrus, T. Taniguchi, K. Watanabe, B. J. LeRoy, J. R. Schaibley
Nano Lett., 22, 6599-6605 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c01905

(134) **Nuclear spin polarization and control in hexagonal boron nitride**
X. Gao, S. Vaidya, K. Li, P. Ju, B. Jiang, Z. Xu, A. E. L. Allcca, K. Shen, T. Taniguchi, K. Watanabe, S. A. Bhave, Y. P. Chen, Y. Ping, T. Li
Nat. Mater., 21, 1024-1028 (2022)
DOI: 10.1038/s41563-022-01329-8

(135) **Zero-field superconducting diode effect in small-twist-angle trilayer graphene**
J.-X. Lin, P. Siriviboon, H. D. Scammell, S. Liu, D. Rhodes, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Hone, M. S. Scheurer, J. I. A. Li
Nat. Phys., 18, 1221-1227 (2022)
DOI: 10.1038/s41567-022-01700-1

(136) **Proximity-magnetized quantum spin Hall insulator: monolayer 1 T' $WTe_2/Cr_2Ge_2Te_6$**
J. Li, M. Rashetnia, M. Lohmann, J. Koo, Y. Xu, X. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Jia, X. Chen, B. Yan, Y. -T. Cui, J. Shi
Nat. Commun., 13, 5134 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-32808-w

(137) **Natural p–n Junctions at the MoS_2 Flake Edges**
K. Wang, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Xue
ACS Appl. Mater. Interfaces, 14, 39039-39045 (2022)
DOI: 10.1021/acsami.2c09457

(138) **Room-temperature electrical control of polarization and emission angle in a cavity-integrated 2D pulsed LED**
J. F. G. Marin, D. Unuchek, Z. Sun, C. Y. Cheon, F. Tagarelli, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kis
Nat. Commun., 13, 4884 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-32292-2

(139) **Tunable Emission from Localized Excitons Deterministically Positioned in Monolayer p–n Junctions**
E. J. Lenferink, T. LaMountain, T. K. Stanev, E. Garvey, K. Watanabe, T. Taniguchi,N. P. Stern
ACS Photo, 9, 3067-3074 (2022)
DOI: 10.1021/acsphotonics.2c00811

(140) **Ultrafast intrinsic optical-to-electrical conversion dynamics in a graphene photodetector**
K. Yoshioka, T. Wakamura, M. Hashisaka, K. Watanabe, T. Taniguchi, N. Kumada
Nat. Photonics, 16, 718-723 (2022)
DOI: 10.1038/s41566-022-01058-z

(141) **Ultrafast pseudospin quantum beats in multilayer WSe_2 and $MoSe_2$**
S. Raiber, P. E. F. Junior, D. Falter, S. Feldl, P. Marzena, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Fabian, C. Schüller
Nat. Commun., 13, 4997 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-32534-3

(142) **Localized interlayer excitons in $MoSe_2$–WSe_2 heterostructures without a moiré potential**
F. Mahdikhanysarvejahany, D. N. Shanks, M. Klein, Q. Wang, M. R. Koehler, D. G. Mandrus, T. Taniguchi, K. Watanabe, O. L. A. Monti, B. J. LeRoy, J. R. Schaibley
Nat. Commun., 13, 5354 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-33082-6

(143) **Exciton fine structure splitting and linearly polarized emission in strained transition-metal dichalcogenide monolayers**
M. M. Glazov, F. Dirnberger, V. M. Menon, T. Taniguchi, K. Watanabe, D. Bougeard, J. D. Ziegler, A. Chernikov
Phys. Rev. B, 106, 125303 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.106.125303

(144) **Tunable quantum criticalities in an isospin extended Hubbard model simulator**
Q. Li, B. Cheng, M. Chen, B. Xie, Y. Xie, P. Wang, F. Chen, Z. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. -J. Liang, D. Wang, C. Wang, Q. -H. Wang, J. Liu, F. Miao
Nature, 609, 479-484 (2022)
DOI: 10.1038/s41586-022-05106-0

(145) **Valley Relaxation of the Moiré Excitons in a $WSe_2/MoSe_2$ Heterobilayer**
K. Shinokita, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Matsuda
ACS Nano, 16, 16862-16868 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c06813

(146) **Cathodoluminescence excitation spectroscopy: Nanoscale imaging of excitation pathways**
N. Varkentina, Y. Auad, S. Y. Woo, A. Zobelli, L. Bocher, J. -D. Blazit, X. Li, M. Tencé, K. Watanabe, T. Taniguchi, O. Stéphan, M. Kociak, L. H. G. Tizei
Sci. Adv., 8, abq4947 (2022)
DOI: 10.1126/sciadv.abq4947

(147) **Direct observation of ultrafast singlet exciton fission in three dimensions**
A. Ashoka, N. Gauriot, A. V. Girija, N. Sawhney, A. J. Sneyd, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Sung, C. Schnedermann, A. Rao
Nat. Commun., 13, 5963 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-33647-5

(148) **Magnetoconductance oscillations in electron-hole hybridization gaps and valley splittings in tetralayer graphene**
I. Klanurak, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Chatraphorn, T. Taychatanapat
Phys. Rev. B, 106, L161405 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.106.L161405

(149) **Excitons at the Phase Transition of 2D Hybrid Perovskites**
J. D. Ziegler, K. -Q. Lin, B. Meisinger, X. Zhu, M. K. -Czerny, P. K. Nayak, C. Vona, T. Taniguchi, K. Watanabe, C. Draxl, H. J. Snaith, J. M. Lupton, D. A. Egger, A. Chernikov
ACS Photo, 9, 3609-3616 (2022)
DOI: 10.1021/acsphotonics.2c01035

(150) **Controlled large non-reciprocal charge transport in an intrinsic magnetic topological insulator $MnBi_2Te_4$**
Z. Zhang, N. Wang, N. Cao, A. Wang, X. Zhou, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Yan, W. -b. Gao
Nat. Commun., 13, 6191 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-33705-y

(151) **A gate-tunable graphene Josephson parametric amplifier**
G. Butseraen, A. Ranadive, N. Aparicio, K. R. Amin, A. Juyal, M. Esposito, K. Watanabe, T. Taniguchi, N. Roch, F. Lefloch, J. Renard
Nat. Nanotech., 17, 1153-1158 (2022)
DOI: 10.1038/s41565-022-01235-9

(152) **A tunable monolithic SQUID in twisted bilayer graphene**
E. Portolés, S. Iwakiri, G. Zheng, P. Rickhaus, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Ihn, K. Ensslin, F. K. de Vries
Nat. Nanotech., 17, 1159-1164 (2022)
DOI: 10.1038/s41565-022-01222-0

(153) **Polarized Raman spectroscopy on topological semimetal $Co_3Sn_2S_2$**
K. Tanaka, T. Nishihara, A. Takakura, Y. Segawa, K. Matsuda, Y. Miyauchi
J. Raman Spec. , 54, 93-100 (2022)
DOI: doi.org/10.1002/jrs.6459

(154) **Gate-Tunable Proximity Effects in Graphene on Layered Magnetic Insulators**
C. -C. Tseng, T. Song, Q. Jiang, Z. Lin, C. Wang, J. Suh, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. A. McGuire, D. Xiao, J. -H. Chu, D. H. Cobden, X. Xu, M. Yankowitz
Nano Lett., 22, 8495-8501 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c02931

(155) **Ultra-Sensitive Extinction Measurements of Optically Active Defects in Monolayer MoS_2**
F. Sigger, I. Amersdorffer, A. Hötger, M. Nutz, J. Kiemle, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. Förg, J. Noe, J. J. Finley, A. Högele, A. W. Holleitner, T. Hümmer, D. Hunger, C. Kastl
J. Phys. Chem. Lett., 13, 10291-10296 (2022)
DOI: 10.1021/acs.jpclett.2c02386

(156) **Spontaneous time-reversal symmetry breaking in twisted double bilayer graphene**
M. Kuiri, C. Coleman, Z. Gao, A. Vishnuradhan, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Zhu, A. H. MacDonald, J. Folk
Nat. Commun., 13, 6468 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-34192-x

(157) **Single-crystalline nanoribbon network field effect transistors from arbitrary two-dimensional materials**
M. A. Aslam, T. H. Tran, A. Supina, O. Siri, V. Meunier, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Kralj, C. Teichert, E. Sheremet, R. D. Rodriguez, A. Matković
npj 2D Mater. Appl. , 6, 76 (2022)
DOI: 10.1038/s41699-022-00356-y

(158) **Cathodoluminescence monitoring of quantum emitter activation in hexagonal boron nitride**
S. Roux, C. Fournier, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. -P. Hermier, J. Barjon, A. Delteil
Appl. Phys. Lett., 121, 184002 (2022)
DOI: 10.1063/5.0126357

(159) **Cavity-Enhanced 2D Material Quantum Emitters Deterministically Integrated with Silicon Nitride Microresonators**
K. Parto, S. I. Azzam, N. Lewis, S. D. Patel, S. Umezawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Moody
Nano Lett., 22, 9748-9756 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c03151

(160) **Nanoscale infrared imaging and spectroscopy of few-layer hexagonal boron nitride**
M. Takamura, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Taniyasu
J. Appl. Phys., 132, 174301 (2022)
DOI: 10.1063/5.0107821

(161) **On-demand generation of optically active defects in monolayer WS_2 by a focused helium ion beam**
A. Micevic, N. Pettinger, A. Hötger, L. Sigl, M. Florian, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Müller, J. J. Finley, C. Kastl, A. W. Holleitner
Appl. Phys. Lett., 121, 183101 (2022)
DOI: 10.1063/5.0118697

(162) **Nanoscale View of Engineered Massive Dirac Quasiparticles in Lithographic Superstructures**
A. J. H. Jones, L. Gammelgaard, M. O. Sauer, D. Biswas, R. J. Koch, C. Jozwiak, E. Rotenberg, A. Bostwick, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. R. Dean, A. -P. Jauho, P. Bøggild, T. G. Pedersen, B. S. Jessen, S. Ulstrup
ACS Nano, 16, 19354-19362 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c08929

(163) **Single-exciton trapping in an electrostatically defined two-dimensional semiconductor quantum dot**
D. N. Shanks, F. Mahdikhanysarvejahany, M. R. Koehler, D. G. Mandrus, T. Taniguchi, K. Watanabe, B. J. LeRoy, J. R. Schaibley
Phys. Rev. B, 106, L201401 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.106.L201401

(164) **Infrared photoresistance as a sensitive probe of electronic transport in twisted bilayer graphene**
S. Hubmann, G. D. Battista, I. A. Dmitriev, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. K. Efetov, S. D. Ganichev
2D Mater., 10, 015005 (2022)
DOI: 10.1088/2053-1583/ac9b70

(165) **Exciton-polarons in the presence of strongly correlated electronic states in a $MoSe_2/WSe_2$ moiré superlattice**
A. J. Campbell, M. B. -Gisbert, H. Baek, V. Vitale, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Lischner, B. D. Gerardot
npj 2D Mater. Appl. , 6, 79 (2022)
DOI: 10.1038/s41699-022-00358-w

(166) **Charge Detection Using a van der Waals Heterostructure Based on Monolayer WSe_2**
J. B. -Chouinard, A. Bogan, N. Fong, P. Barrios, J. Lapointe, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. L. -Mayer, L. Gaudreau
Phys. Rev. Appl., 18, 54017 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.18.054017

(167) **Gate-tunable Veselago interference in a bipolar graphene microcavity**
X. Zhang, W. Ren, E. Bell, Z. Zhu, K.-T. Tsai, Y. Luo, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Kaxiras, M. Luskin, and K. Wang
Nat. Commun., 13, 6711 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-34347-w

(168) **Cumulative polarization in conductive interfacial ferroelectrics**
S. Deb, W. Cao, N. Raab, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Goldstein, L. Kronik, M. Urbakh, O. Hod, M. Ben Shalom
Nature, 612, 465-469 (2022)
DOI: 10.1038/s41586-022-05341-5

(169) **P-Type Ohmic Contact to Monolayer WSe_2 Field-Effect Transistors Using High-Electron Affinity Amorphous MoO_3**
Y. -H. Chen, K. Xing, S. Liu, L. N. Holtzman, D. L. Creedon, J. C. McCallum, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Barmak, J. Hone, A. R. Hamilton, S. -Y. Chen, M. S. Fuhrer
ACS Appl. Electron. Mater., 4, 5379-5386 (2022)
DOI: 10.1021/acsaelm.2c01053

(170) **Interlayer Electron-Hole Friction in Tunable Twisted Bilayer Graphene Semimetal**
D. Bandurin, A. Principi, I. Phinney, T. Taniguchi, K. Watanabe, P. Jarillo-Herrero

Phys. Rev. Lett., 129, 206802 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.206802

(171) **Coherent momentum control of forbidden excitons**
X. Ma, K. Kudtarkar, Y. Chen, P. Cunha, Y. Ma, K. Watanabe, T. Taniguchi, X. Qian, M. C. Hipwell, Z. J. Wong, S. Lan
Nat. Commun., 13, 6916 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-34740-5

(172) **Greatly Enhanced Emission from Spin Defects in Hexagonal Boron Nitride Enabled by a Low-Loss Plasmonic Nanocavity**
X. Xu, A. B. Solanki, D. Sychev, X. Gao, S. Peana, A. S. Baburin, K. Pagadala, Z. O. Martin, S. N. Chowdhury, Y. P. Chen, T. Taniguchi, K. Watanabe, I. A. Rodionov, A. V. Kildishev, T. Li, P. Upadhyaya, A. Boltasseva, V. M. Shalaev
Nano Lett., 23, 25-33 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c03100

(173) **Exciton spectroscopy and unidirectional transport in $MoSe_2$-WSe_2 lateral heterostructures encapsulated in hexagonal boron nitride**
D. Beret, I. Paradisanos, H. Lamsaadi, Z. Gan, E. Najafidehaghani, A. George, T. Lehnert, J. Biskupek, U. Kaiser, S. Shree, A. E. -Real, D. Lagarde, X. Marie, P. Renucci, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Weber, V. Paillard, L. Lombez, J. -M. Poumirol, A. Turchanin, B. Urbaszek
npj 2D Mater. Appl. , 6, 84 (2022)
DOI: 10.1038/s41699-022-00354-0

(174) **Axial-Bonding-Driven Dimensionality Effect on the Charge-Density Wave in $NbSe_2$**
D. Lin, A. Ranjbar, X. Li, X. Huang, Y. Huang, H. Berger, L. Forró, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. V. Belosludov, T. D. Kühne, H. Ding, M. S. Bahramy, X. Xi
Nano Lett., 22, 9389-9395 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c03280

(175) **Hot exciton effect in photoluminescence of monolayer transition metal dichalcogenide**
K. Xiao, R. Duan, Z. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, W. Yao, X. Cui
Nat Sci., 3, e20220035 (2022)
DOI: 10.1002/ntls.20220035

(176) **Frustrated ferromagnetic transition in AB-stacked honeycomb bilayer**
S. Wang, Y. Wang, S. Yan, C. Wang, B. Xiang, K. Liang, Q. He, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Tian, H. Lei, W. Ji, Y. Qi, Y. Wang
Science Bulletin, 67, 2557-2563 (2022)
DOI: 10.1016/j.scib.2022.12.009

(177) **Enhanced Field-Effect Control of Single-Layer WS_2 Optical Features by hBN Full Encapsulation**
A. Di Renzo, O. Çakıroğlu, F. Carrascoso, H. Li, G. Gigli, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Munuera, A. Rizzo, A. Castellanos-Gomez, R. Mastria, R. Frisenda
Nanomaterials, 12, 4425 (2022)
DOI: 10.3390/nano12244425

(178) **The study of contact properties in edge-contacted graphene–aluminum Josephson junctions**

Z. Huang, N. Lotfizadeh, B. H. Elfeky, K. Kisslinger, E. Cuniberto, P. Yu, M. Hatefipour, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Shabani, D. Shahrjerdi
Appl. Phys. Lett., 121, 243503 (2022)
DOI: 10.1063/5.0135034

(179) **Emergence of electric-field-tunable interfacial ferromagnetism in 2D antiferromagnet heterostructures**
G. Cheng, M. M. Rahman, Z. He, A. L. Allcca, A. Rustagi, K. A. Stampe, Y. Zhu, S. Yan, S. Tian, Z. Mao, H. Lei, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Upadhyaya, Y. P. Chen
Nat. Commun., 13, 7348 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-34812-6

(180) **Robust Interlayer-Coherent Quantum Hall States in Twisted Bilayer Graphene**
D. Kim, B. Kang, Y. -B. Choi, K. Watanabe, T. Taniguchi, G.-H. Lee, G. Y. Cho, and Y. Kim
Nano Lett., 23, 163-169 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c03836

(181) **Ultrafast response of spontaneous photovoltaic effect in 3R-MoS_2–based heterostructures**
J. Wu, D. Yang, J. Liang, M. Werner, E. Ostroumov, Y. Xiao, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. I. Dadap, D. Jones, Z. Ye
Sci. Adv., 8, eade3759 (2022)
DOI: 10.1126/sciadv.ade3759

(182) **A Gate Programmable van der Waals Metal-Ferroelectric-Semiconductor Vertical Heterojunction Memory**
W. Li, Y. Guo, Z. Luo, S. Wu, B. Han, W. Hu, L. You, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Alava, J. Chen, P. Gao, X. Li, Z. Wei, L.-W. Wang, Y.-Y. Liu, C. Zhao, X. Zhan, Z. V. Han, H. Wang
Adv. Mater., 35, 2208266 (2022)
DOI: 10.1002/adma.202208266

(183) **Fabrication of near-invisible solar cell with monolayer WS_2**
X. He, Y. Iwamoto, T. Kaneko T. Kato
Sci. Rep., 12, 11315 (2022)
DOI: 10.1038/s41598-022-15352-x
プレス発表あり　https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20220712_03web_tmd.pdf

(184) **Scalable fabrication of graphene nanoribbon quantum dot devices with stable orbital-level spacing**
T. Kato, T. Kitada, M. Seo, W. Okita, N. Sato, M. Shinozaki, T. Abe, T. Kumasaka, T. Aizawa, Y. Muto, T. Kaneko, T. Otsuka
Commun. Mater., 3, 103 (2022)
DOI: 10.1038/s43246-022-00326-3
プレス発表あり　https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20230106_01web_graphene.pdf

(185) **ortho-Substituted Aryldiazonium Design for the Defect Configuration-Controlled Photoluminescent Functionalization of Chiral Single-Walled Carbon Nanotubes**
B. Yu, S. Naka, H. Aoki, K. Kato, D. Yamashita, S. Fujii, Y. K. Kato, T. Fujigaya, T. Shiraki
ACS nano, 16, 21452–21461 (2022)
DOI: 10.1021/acsnano.2c09897

プレス発表あり　https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/844

(186) **All-dry flip-over stacking of van der Waals junctions of 2D materials using polyvinyl chloride**
M. Onodera, Y. Wakafuji, T. Hashimoto, S. Masubuchi, R. Moriya, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, and T. Machida
Sci. Rep., 12, 21963 (2022)
DOI: 10.1038/s41598-022-26193-z

(187) **Excitons and trions in WSSe monolayers**
K. O. Pucko, E. Blundo, N. Zawadzka, S. Cianci, D. Vaclavkova, P. Kapuściński, D. Jana, G. Pettinari, M. Felici, K. Nogajewski, M. Bartoš, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Faugeras, M. Potemski, A. Babiński, A. Polimeni, M. R. Molas
2D Mater., 10, 015018 (2022)
DOI: 10.1088/2053-1583/aca915

(188) **Dirac spectroscopy of strongly correlated phases in twisted trilayer graphene**
C. Shen, P. J. Ledwith, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Khalaf, A. Vishwanath, D. K. Efetov
Nat. Mater., 22, 316-321 (2022)
DOI: 10.1038/s41563-022-01428-6

(189) **Moiré Potential, Lattice Relaxation, and Layer Polarization in Marginally Twisted MoS_2 Bilayers**
N. Tilak, G. Li, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. Y. Andrei
Nano Lett., 23, 73-81 (2022)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c03676

(190) **Quasi-van der Waals Epitaxial Recrystallization of a Gold Thin Film into Crystallographically Aligned Single Crystals**
Y. Lee, Y. Chang, H. Ryu, J. H. Kim, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Kim, and G.-H. Lee
ACS Appl. Mater. Interfaces, 15, 6092-6097 (2022)
DOI: 10.1021/acsami.2c18514

(191) **Topological invariants in two-dimensional quasicrystals**
M. Koshino, H. Oka
Phys. Rev. B , 4, 013028 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.013028

(192) **Topological edge and corner states and fractional corner charges in blue phosphorene**
T. Tani, M. Hitomi, T. Kawakami, M. Koshino
Phys. Rev. B , 105, 075407 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.105.075407

(193) **Moiré disorder effect in twisted bilayer graphene**
N. Nakatsuji ,M. Koshino
Phys. Rev. B , 105, 245408 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.105.245408

(194) **Spontaneous spin-valley polarization in $NbSe_2$ at a van der Waals interface**
H. Matsuoka, T. Habe, Y. Iwasa, M. Koshino, M.i Nakano
Nat. Commun. , 13, 5129 (2022)
DOI: 10.1038/s41467-022-32810-2
プレス発表あり

(195) **Perfect one-dimensional interface states in a twisted stack of three-dimensional topological insulators**
M. Fujimoto, T. Kawakami, M. Koshino
Phys. Rev. Research, 4, 043209 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.043209

(196) **Topological gap labeling with third Chern numbers in three-dimensional quasicrystals**
K. Yamamoto, M. Koshino
Phys. Rev. B, 105, 115410 (2022)
DOI: 10.1103/PhysRevB.105.115410

(197) **Fermi energy dependence of ultrafast photoluminescence from graphene**
D. Inukai, T. Koyama, M. Araidai, K. Kawahara, H. Ago, H. Kishida
J. Appl. Phys., 132, 134301 (2022)
DOI: 10.1063/5.0092558

(198) **Carbon nanotube-based, serially connected terahertz sensor with enhanced thermal and optical efficiencies**
D. Suzuki, Y. Takida, Y. Kawano, H. Minamide, N. Terasaki
Sci. Tech. Adv. Mater., 23, 424–433 (2022)
DOI: 10.1080/14686996.2022.2090855

(199) **Recent Progress in Development of Carbon-Nanotube-Based Photo-Thermoelectric Sensors and Their Applications in Ubiquitous Non-Destructive Inspections**
K. Li, Y. Kinoshita, D. Sakai, Y. Kawano
Micromachines, 14, 61 (2022)
DOI: 10.3390/mi14010061

(200) **Trion confinement in monolayer $MoSe_2$ by carbon nanotube local gating**
T. Hotta, H. Nakajima, S. Chiashi, T. Inoue, S. Maruyama, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Kitaura
Appl. Phys. Exp., 16, 015001 (2022)
DOI: 10.35848/1882-0786/aca642

-2021-

(1) **Spiro-graphene: A two-dimensional metallic carbon allotrope of fused pentagons**
S. Okada, N. T. Cuong, Y. Gao, M. Maruyama
Carbon 185, 404-409 (2021)
DOI: 10.1016/j.carbon.2021.09.033

(2) **Geometric structure and piezoelectric polarization of MoS_2 nanoribbons under uniaxial strain**
Mina Maruyama, Yanlin Gao, Ayaka Yamanaka, Susumu Okada
FlatChem, 29, 100289 (2021)
DOI: 10.1016/j.flatc.2021.100289

(3) **Polymorphic phases of metal chlorides in the confined 2D space of bilayer graphene**
Y.-C. Lin, A. Motoyama, S. Kretschmer, S. Ghaderzadeh, M. Ghorbani-Asl, Y. Araki, A. V. Krasheninnikov, H. Ago, K. Suenaga
Adv. Mater., 33, 2105898 (2021)
DOI: 10.1002/adma.202105898

(4) **Coupling and decoupling of bilayer graphene monitored by electron energy loss spectroscopy**

Y.-C. Lin, A. Motoyama, R. Matsumoto, H. Ago, K. Suenaga
Nano Lett., 21, 10386-10391 (2021)
DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c03689

(5) **Identification of the position of piezoelectric polarization at the MoS_2/metal interface**
M. Umeda, N. Higashitarumizu, R. Kitaura, T. Nishimura, K. Nagashio
Appl. Phys. Express, 14 , 125002 (2021)
DOI: 10.35848/1882-0786/ac3d1f

(6) **Quantitative Determination of Contradictory Band Gap Values of Bulk $PdSe_2$ from Electrical Transport Properties**
W. Nishiyama, T. Nishimura, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Nagashio
Adv. Funct. Mater., 32, 2108061 (2021)
DOI: 10.1002/adfm.202108061

(7) **Crystalline boron monosulfide nanosheets with tunable bandgaps**
H. Kusaka, R. Ishibiki, M. Toyoda, T. Fujita, T. Tokunaga, A. Yamamoto, M. Miyakawa, K. Matsushita, K. Miyazaki, L. Li, S. L. Shinde, M. S. L. Lima, T. Sakurai, E. Nishibori, T. Masuda, K. Horiba, K. Watanabe, S. Saito, M. Miyauchi, T. Taniguchi, H. Hosono, T. Kondo
J. Mater. Chem. A , 9, 24631-24640 (2021)
DOI: 10.1039/D1TA03307G

(8) **Single-Component Molecular Conductor—Multi-Orbital Correlated π-d Electron Systems**
A. Kobayashi, B. Zhou, R. Takagi, K. Miyagawa, S. Ishibashi, A. Kobayashi, T. Kawamura, E. Nishibori, K. Kanoda
Bull. Chem. Soc. Jpn., 94, 2540-2562 (2021)
DOI: 10.1246/bcsj.20210230

(9) **Direct observation of one-dimensional disordered diffusion channel in a chain-like thermoelectric with ultralow thermal conductivity**
J. Zhang, N. Roth, K. Tolborg, S. Takahashi, L. Song, M. Bondesgaard, E. Nishibori, B. B. Iversen
Nat. Commun., 12, 6709 (2021)
DOI: 10.1038/s41467-021-27007-y

(10) **Complex Structural Disorder in a Polar Orthorhombic Perovskite Observed through the Maximum Entropy Method/Rietveld Technique**
A. M. Manjon-Sanz, T. W. Surta, P. Mandal, A. J. Corkett, H. Niu, E. Nishibori, M. Takata, J. B. Claridge, M. J. Rosseinsky
Chem. Mater., 34,1, 29-42 (2021)
DOI: 10.1021/acs.chemmater.1c01979

(11) **Recent Advances in Light-Emitting Electrochemical Cells with Low-Dimensional Quantum Materials**
J. Pu, T. Takenobu
Journal of the Imaging Society of Japan (日本画像学会誌), 60, 656-672 (2021)
DOI: 10.11370/isj.60.656

(12) **Nanowire-to-Nanoribbon Conversion in Transition-Metal Chalcogenides: Implications for One-Dimensional Electronics and Optoelectronics**
H. E. Lim, Z. Liu, J. Kim, J. Pu, H. Shimizu, T. Endo, Y. Nakanishi, T. Takenobu, Y. Miyata
ACS Appl. Nano Mater., 5, 2, 1775-1782 (2021)

DOI: 10.1021/acsanm.1c03160

(13) **Improving the Optical Quality of $MoSe_2$ and WS_2 Monolayers with Complete h-BN Encapsulation by High-Temperature Annealing**
X. Hua, T. Axenie, M. N. Goldaraz, K. Kang, E.-H. Yang, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Hone, B. Kim, I. P. Herman
ACS Appl. Mater. Interfaces, 2022, 14, 2255-2262 (2021)
DOI: 10.1021/acsami.1c18991

(14) **A Versatile Post-Doping Towards Two-Dimensional Semiconductors**
Y. Murai, S. Zhang, T. Hotta, Z. Liu, T. Endo, H. Shimizu, Y. Miyata, T. Irisawa, Y. Gao, M. Maruyama, S. Okada, H. Mogi, T. Sato, S. Yoshida, H. Shigekawa, T. Taniguchi, K. Watanabe, R. Canton-Vitoria, R. Kitaura
ACS Nano, 15, 19225-19232 (2021)
DOI: 10.1021/acsnano.1c04584

(15) **Control of Thermal Conductance across Vertically Stacked Two-Dimensional van der Waals Materials via Interfacial Engineering**
W. Yuan, K. Ueji, T. Yagi, T. Endo, H. E. Lim, Y. Miyata, Y. Yomogida, K. Yanagi
ACS Nano, 15, 15902–15909 (2021)
DOI: 10.1021/acsnano.1c03822

(16) **Tuning the sumanene receptor structure towards the development of potentiometric sensors**
A. Kasprzak, A. Tobolska, H. Sakurai, W. Wróblewski
Dalton Trans., 51, 468-472 (2021)
DOI: 10.1039/d1dt03467g

(17) **Multi-orbital edge and corner states in black phosphorene**
M. Hitomi, T. Kawakami, M. Koshino
Phys. Rev. B, 104, 125302 (2021)
DOI: 10.1103/PhysRevB.104.125302

(18) **Interlayer Interactions in 1D Van der Waals Moiré Superlattices**
S, Zhao, R.Kitaura, P. Moon, M. Koshino, F. Wang
Adv. Sci., 9, 2103460 (2021)
DOI: 10.1002/advs.202103460

6-2. 基調講演、招待講演

-2023-

(1) **一次元遷移金属カルコゲナイド細線の展望と課題**
宮田耕充, 研究会「１次元、２次元物質科学の展望と課題」

(2) **一次元二次元物質科学の展望と課題**
長汐晃輔, MoS2トランジスタの発表から約10年 ー現状と将来展望ー 研究会

(3) **超高真空原子間力顕微鏡を用いた局所構造解析**
杉本宜昭, NanospecFY2022mini

(4) **走査プローブ顕微鏡による局所構造解析**
杉本宜昭, 2022年度野口遵研究助成金講演会

(5) **Optical properties of Far-UV luminous hexagonal boron nitride and its applications**

渡邊 賢司, APS March Meeting 2023

(6) **Buckybowl Chemistry: Interplay of Experiments and Theory**
H. Sakurai, Pure and Applied Chemistry International Conference

(7) **Optical Science in Two-dimensional Material and its Hetero-structures**
Kazunari Matsuda, The 11th International Workshop on 2D Materials

(8) **Visualization of the catalytic activity on 2D materials using scanning probe microscopy**
高橋康史, 第64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

(9) **In-situ monitoring synthesis and functionalization of transition metal dichalcogenide**
T. Kato, The 11th International Workshop on 2D Materials

(10) **低温気相プロセスを用いた1–2次元材料の作製と量子ドットデバイス応用**
T. Kato, 令和４年度 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「革新的気相プロセスによるナノ材料創成と高機能デバイス応用」

(11) **Porous Crystalline Frameworks Constructed through Intermolecular Hydrogen Bonds of Carboxy Groups**
久木一朗, Kyoto Advanced Porous Science (KAPS) Symposium

(12) **シート状広帯域テラヘルツ・赤外撮像センサと全方位検査分析応**
河野行雄, 第70回応用物理学会春季学術講演会

(13) **エレクトロニクス応用を目指した２.５次元物質の研究開発**
吾郷浩樹, 第28回 電子デバイス界面技術研究会

-2022-

(1) **2.5-Dimensional Materials Science: Controlled Growth, Integration, and Applications of Graphene and h-BN**
H. Ago, ISPlasma2022

(2) **Bilayer graphene: CVD growth, machine learning-based analysis, and intercalation**
H. Ago, The 9th International Workshop on 2D Materials

(3) **From two-dimensional materials to 2.5-dimensional materials science（二次元物質から２.５次元物質科学へ）**
吾郷浩樹, 第62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

(4) **アニオンの挿入脱離を利用したグラフェンライクグラファイトの 正極材料としての応用**
松尾吉晃, 第410回電池技術委員会

(5) **MoS_2 FETから10年：何が解決して何が未解決なのか？**
長汐晃輔, 第69回応用物理学会春季学術講演会

(6) **2次元層状物質の新機能デバイスへの展開**
長汐晃輔, 電子デバイス界面テクノロジー研究会，第27回研究会

(7) **グラフェン&2Dデバイスの現状と将来展望**
長汐晃輔, システムデバイスロードマップ委員会，2021年度第5回BC, MtM合同委員会

(8) **Novel two-dimensional materials stabilized on substrates**
Yukiko Yamada-Takamura, 9th International Workshop on 2D Materials, A3 Foresight Program

(9) **Monolayer in-plane heterojunction light-emitting devices with tunable composition distribution**
J. Pu, A3 The 9th International Workshop on 2D Materials

(10) **Micro-focused ARPES study on atomically thin WTe_2 flakes**
Masato Sakano, Superstripes 2022

(11) **六方晶窒化ホウ素のCVD成長から２.５次元物質科学へ**

吾郷浩樹, 化学工学会 反応工学部会 第36回CVDシンポジウム

(12) **二次元物質から「２.５次元物質」の創出へ**
吾郷浩樹, 光電相互変換第125委員会 第260回研究会「2次元層状物質のデバイス創出に向けて」

(13) **Science of 2.5-Dimensional Materials: Controlled Growth, Integration, and Applications of 2D Materials**
H. Ago, IUMRS-ICAM2022

(14) **顕微角度分解光電子分光を用いた原子層フレークの電子状態観測**
坂野昌人, 日本放射光学会第14回若手研究会「次世代放射光で切り拓く軟X線科学」

(15) **一次元遷移金属カルコゲナイドの成長と評価**
宮田耕充, 第69回応用物理学会春季学術講演会

(16) **50 Ns Ultrafast Memory Operation in 2D Heterostructured Non-Volatile Memory Device**
K. Nagashio, 241st ECS Meeting, (June, 3, 2022, online).

(17) **Ultrafast Memory Operation in 2D Heterostructured Non-Volatile Memory Device**
K. Nagashio, The 22nd Int. Conf. on Sci & Appl. of Nanotubes and Low-dimensional Materials (NT22)

(18) **Novel high-k insulator deposition on 2D materials for future electronics**
K. Nagashio, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), (September. 29, 2022, Makuhari Mess Chiba).

(19) **Growth of one-dimensional transition metal chalcogenides**
Yasumitsu Miyata, 12th A3 Symposium on Emerging Materials

(20) **Crystal Engineering of Layered Organic Semiconductors for High-Performance Printed Transistors**
S. Arai, 2022 Asian Conference on Nanoscience & Nanotechnology (AsiaNANO 2022)

(21) **カイラル半導体テルル単体におけるスピン構造の観測**
坂野昌人, カイラル物質科学の新展開

(22) **Layered Organic Semiconductors for High-Performance Printed Transistors**
S. Arai, 13th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME2022)

(23) **Reconfigurable single-material Peltier effect using magnetic phase junctions**
Yuki Shiomi, Young Research Leaders Group Workshop: Spins, Orbits, Charges, and Heat in Magnets

(24) **Consider the S vacancy formation in MoS_2**
Kosuke Nagashio, A3 Foresight International Symposium 2022

(25) **原子間力顕微鏡を用いた単原子分子の計測と操作技術の開発**
杉本宜昭, 日本顕微鏡学会　第78回学術講演会

(26) **2.5次元物質科学に向けた六方晶窒化ホウ素の光学特性とその応用**
渡邊 賢司, 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会

(27) **Sumanenyl Cations as Redox-active Buckybowls**
H. Sakurai, 241st ECS Meeting

(28) **Fullerenol as a Unique, Non-coordinative Matrix for Colloidal Metal Nanoparticles**
H. Sakurai, The 4th International Symposium on the Synthesis and Application of Curved Organic pi-Molecules and Materials

(29) **スマネン合成から２０年**
櫻井英博, 第83回有機合成化学協会関東支部シンポジウム

(30) **2次元層状物質および人工ヘテロ構造の光科学とその応用**
Kazunari Matsuda, 日本学術振興会第125光電変換委員会

(31) **Optical science of moiré excitonic systems in artificial van der Waals heterostructures**

Kazunari Matsuda, 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment

(32) **Optical science and application of moiré excitonic systems in two-dimensional hetero-structures**
Kazunari Matsuda, The 13th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference

(33) **２.５次元物質における光科学と物性開拓**
松田一成, 第16回物性科学領域横断研究会

(34) **Oxidation-engineering of 2D semiconductors**
Mahito Yamamoto, 第63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

(35) **Growth mechanism of transition metal dichalcogenides revealed by in-situ monitoring CVD**
T. Kato, The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium

(36) **電解質を用いた機能性発光デバイス**
蒲 江, 高分子学会　有機エレクトロニクス研究会

(37) **14 族半導体ナノシートの結晶成長とデバイス応用**
黒澤昌志, 2022年度 応用物理学会東海ニューフロンティアリサーチワークショップ・東海地区若手チャプタージョイントワークショップ

(38) **First-principles Study of Topological Thermoelectrics**
石井史之, The 1st Conference on Quantum Sciences and Technology (ConQuest 2022)

(39) **Physics of twisted 2D materials**
M. Koshino, 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information

(40) **Moiré quasicrystals**
M. Koshino, Pioneer Symposium in the Korean Physical Society Meeting

(41) **Quasicrystals in twisted 2D systems**
M. Koshino, Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2022

(42) **Physics of twisted 2D materials**
M. Koshino, Brookhaven National Laboratory NSLS-II & CFN Joint Meeting ”2D materials and beyond”

(43) **Topological quasicrystals in twisted 2D systems**
M. Koshino, NT22: 22nd International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials

(44) **Quasicrystals in twisted 2D systems**
M. Koshino, 10th A3 Foresight Project Workshop“ Joint Research on Novel Physical Properties and Functionalities of Emerging 2D Materials and van der Waals Heterostructures ”

(45) **Topological quasicrystals in twisted 2D systems**
M. Koshino, Novel Electronic Properties of two-dimensional materials

(46) **Topological quasicrystals in moiré materials**
M. Koshino, Pan-Pacific Workshop on Topology and Correlation in Exotic Materials

(47) **Physics of Graphene and moir ´e materials**
M. Koshino, Novel Quantum States in Condensed Matter (NQS2022)

(48) **Moiré quasicrystals in twisted 2D systems**
M. Koshino, Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2022)

(49) **水素結合で分子をつなげた 多孔質構造体の構造・機能設計**
久木一朗, M&BE新分野開拓研究会

(50) **A flexible terahertz imaging sheet for multi-view visualization and inspection**
Y. Kawano, 12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics

(51) **カーボンナノチューブ膜型フレキシブルテラヘルツ波撮像シートカメラ**
河野行雄, 2022年度日本写真学会オンライン年次大会

(52) **A mechanically stretchable and optically broadband imager sheet**
K. Li, T. Araki, T. Sekitani, Y. Kawano, 8th International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics

(53) **シート状ブロードバンド撮像センサと検査分析応用～テラヘルツ光から可視光まで～**
河野行雄, 2022年度第2回プリンテッド・エレクトロニクス研究会

(54) **A Flexible and Stretchable Terahertz Imaging Sheet for Multi-View Visualization**
Y. Kawano, 29th International Display Workshops

(55) **Bilayer graphene: CVD growth, machine learning-based analysis, and intercalation**
H. Ago, The 9th International Workshop on 2D Materials

(56) **From two-dimensional materials to 2.5-dimensional materials science（二次元物質から２.５次元物質科学へ）**
吾郷浩樹, 第62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

(57) **2.5-Dimensional Materials Science: Controlled Growth, Integration, and Applications of Graphene and h-BN**
H. Ago, ISPlasma2022

(58) **二次元物質の魅力とこれからの展望：２.５次元物質科学への展開**
吾郷浩樹, 東京大学 第7回CURIEセミナー

(59) **From 2D materials to 2.5D materials science**
H. Ago, 第41回電子材料シンポジウム（EMS41）

(60) **Twist angle-dependent molecular intercalation and carrier transport in bilayer graphene**
H. Ago, 12th A3 Symposium on Emerging Materials

(61) **From 2D materials to 2.5D materials science**
H. Ago, RPGR2022

(62) **グラフェンの次元性拡張へ：二層グラフェンの選択成長と二次元ナノ空間、そして積層の科学**
吾郷浩樹, 第49回炭素材料学会

(63) **Nano/micro-scale phase change electronics using functional oxides/2D material heterostructures**
Hidekazu Tanaka, 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022)

(64) **New memory technologies using phase change oxides**
Hidekazu Tanaka, 11th imec Handai International Symposium

-2021-

(1) **二次元物質の高品質CVD成長とデバイス応用への展開**
吾郷浩樹, 第30回 ポリマー材料フォーラム

(2) **二次元物質のCVD成長と機能化**
吾郷浩樹, 日本学術振興会 分子系の複合電子機能第181委員会

(3) **Bilayer graphene: CVD growth, machine learning-based analysis, and intercalation**
H. Ago, 11th Asian Nanomaterials symposium (A3)

(4) **Room temperature in-plane ferroelectricity in SnS**
K. Nagashio, International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2021)

(5) **Two-dimensional tunnel FET**
K. Nagashio, International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS)
(6) **2次元層状物質のデバイス応用の現状と将来展望**
長汐晃輔, 化学工学会エレクトロニクス部会 先端技術シンポジウム
(7) **Direct observation of the layer-number-dependent electronic structure in few-layer WTe_2**
Masato Sakano, The 61st Fullerens-Nanotubes-Graphene General Symposium
(8) **Direct observation of the layer-number-dependent electronic structure in few-layer WTe_2**
Masato Sakano, 5th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials
(9) **Light-Emitting Electrochemical Cells for Functional Optoelectronic Device Applications**
Jiang Pu, 錯体化学会第71回討論会・シンポジウム
(10) **二次元物質の成長と集積化**
宮田耕充, 第82回応用物理学会秋季学術講演会
(11) **遷移金属カルコゲナイド原子層の化学気相成長**
宮田耕充, 第75回CVD研究会
(12) **Creation of a 2D electronic system with 1D wired materials**
Y. Miyata, The 5th Graphene Flagship EU-Japan Workshop on Graphene and related 2D Material
(13) **Growth and transport properties of transition metal chalcogenide atomic wires**
Y. Miyata, the 11th A3 Symposium on Emerging Materials
(14) **Recent Progress in Sumanene Chemistry**
H. Sakurai, Symposium on Organic and Applied Chemistry
(15) **Physics of twisted 2D materials**
M. Koshino, International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials Design
(16) **Online moiré IOP-EPS minicolloquium**
M. Koshino, Topological invariants in quasicrystals

6-3. 受賞

-2023-

(1) **The 64th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium 若手奨励賞**
Haonan Wang（松田研）
"Observation of a single moiré exciton in nano-fabricated twisted $MoSe_2/WSe_2$ heterobilayers"
(2) **プラズマ材料科学賞選考委員会 プラズマ材料科学賞「奨励部門賞」**
加藤 俊顕
"プラズマプロセスを駆使したナノカーボンエレクトロニクスに関する研究"
(3) **第70回応用物理学春季学術講演会　第21回 JSAPフォト＆イラスト コンテスト**
後藤新悟 (山本研)、山本真人
"Phase-flavored gummy worms"
(4) **第36回渋谷健一奨励賞**
酒井大揮（河野研）
(5) **第36回渋谷健一奨励賞**
木下祐哉（河野研）
(6) **第54回応用物理学会学術講演会/講演奨励賞**
中島 隆一（長汐研）
"表面偏析によるBi 薄膜化を利用したBi/Au コンタクトWSe_2 FET のp型動作"

(7) **第54回応用物理学会学術講演会/講演奨励賞**
大岩 樹（黒澤研）
"高濃度n型ドープSi_{1}－xSnx薄膜で観測された巨大熱電能"

(8) **第64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/**
楠瀬 宏規（吾郷研）
"Magnetic Tunneling Junction using CVD-grown Hexagonal Boron Nitride"

(9) **第64回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム/若手奨励賞**
夏井 隆佑（宮田研）
"Polarized Raman spectroscopy of Indium-Intercalated Nanofibers of W_6Te_6 Atomic Wires"

(10) **American Physical Society（APS）/James C. McGroddy Prize for New Materials**
渡邊 賢司

(11) **第55回市村清新技術財団/市村学術賞 貢献賞**
渡邊 賢司

-2022-

(1) **第62回FNTG総合シンポジウム 若手奨励賞　受賞**
古澤 慎平（宮田研）
"Vapor-phase synthesis of single-walled MX_2 nanotubes templated on surfactant-dispersed boron-nitride nanotubes"

(2) **The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Pacific Rim, CLEO-PR 2022) OPTICA Best Student Presentation Award**
Heejun Kim（松田研）
"Observation of Moiré Exciton Dynamics in Twisted $MoSe_2$ - WSe_2 Heterstrobilayer"

(3) **第62回FNTG総合シンポジウム 若手奨励賞 ／ Nanoscale Horizons賞 受賞**
Duanfei Dong（松田研）
"Electrically tunable moire trions in twisted WSe_2/$MoSe_2$ heterobilayers"

(4) **第52回 応用物理学会学術講演会　講演奨励賞　受賞**
荒木 勇治（吾郷研）
"二層グラフェンのツイスト角度に依存した金属塩化物のインターカレーション"

(5) **第51回 応用物理学会学術講演会　講演奨励賞　受賞**
佐々木太郎（長汐研）
高速パルス電圧ストレス下におけるh-BNの強靭な絶縁破壊耐性による2Dメモリデバイスの超高速動作

(6) **第61回FNTG総合シンポジウム 若手奨励賞 ／ Nanoscale Horizons賞　受賞**
小林幹旺（松田研）
Optical properties of transition metal dichalcogenides with microshperical optical cavity

(7) **第61回FNTG総合シンポジウム 第18回大澤奨励賞 受賞**
篠北 啓介（松田研）
Novel excitonic features of moire exciton In twisted van der Waals heterostructures

(8) **公益財団法人 花王 芸術・科学財団 令和４年度 花王科学奨励賞　受賞**
荒井 俊人
界面電子状態制御に向けた分子膜集積エレクトロニクスの開拓

(9) **Asian Research Network Korea/ARN Young Scientists Awards　受賞**
S. Arai

Crystal Engineering of Layered Organic Semiconductors for High Performance Printed Transistors

(10) **第59回炭素材料夏季セミナー 学生優秀発表賞**
榎翔也（松尾研）
グラフェンライクグラファイトのアニオン挿入脱離反応の速度論的解析

(11) **第63回FNTG総合シンポジウム 若手奨励賞　受賞**
小倉 宏斗（宮田研）
Fabrication and characterization of multilayer in-plane heterostructures based on transition metal dichalcoge

(12) **第49回炭素材料学会年会優秀ポスター発表賞**
宮本樹（松尾研）
グラフェンライクグラファイトのビス（フルオロスルホニル）アミドアニオンの挿入脱離特性の評価

(13) **第51回　応用物理学会学術講演会　講演奨励賞**
岡崎尚太（笹川研）
空間反転対称性の破れた磁性体 $M(Nb/Ta)_3S_6$ の 単結晶育成および磁気輸送特性

(14) **2022堀場雅夫賞**
高橋康史
触媒活性サイトの実空間イメージングに資する 電気化学セル顕微鏡の開発

(15) **第35回独創性を拓く　文部科学大臣賞**
李恒（河野研）
しなやかな環境親和性を持つ非破壊撮像プラットフォーム

(16) **8th Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO2022)　The Best Young Scientist Poster Presentation Award　受賞**
酒井大揮（河野研）
An all-printable CNT film-type photo-thermoelectric imager

(17) **近赤外研究会/優秀学生発表賞　受賞**
木下祐哉（河野研）
第38回近赤外フォーラム

(18) **応用物理学会フォトニクス分科会/優秀ポスター賞　受賞**
酒井大揮（河野研）
第7回フォトニクスワークショップ

(19) **炭素材料学会/学生優秀ポスター賞**
太田頼斗（河野研）
第49回炭素材料学会年会

(20) **npj Quantum Materials/Reviewer of the Year**
Masato Sakano
Reviewer of the Year

(21) **2022年物理学分野/クラリベイト引用栄誉賞**
渡邊 賢司
二次元材料の電子的挙動に関する研究に革命をもたらした、六方晶窒化ホウ素結晶の高純度化技術の開発
For fabrication of high-quality hexagonal boron nitride crystals, the availability of which enabled a revolution in research on the electronic behavior of two-dimensional materials

(22) **第59回炭素材料夏季セミナー/学生優秀発表賞**
榎 翔也（松尾研）
グラフェンラクグラファイトのアニオン挿入脱離反応の速度論的解析

(23) **第51回(2021年秋季)応用物理学会学術講演会/講演奨励賞**
岡崎 尚太（笹川研）
空間反転対称性の破れた磁性体 $M(Nb/Ta)_3S_6$ の 単結晶育成および磁気輸送特性

-2021-

(1) **RPGR2021　Best Poster Presentation Award　受賞**
Lim Hong En（宮田研）
Wafer-Scale Growth of 1D Transition Metal Telluride Atomic Wires

(2) **第48回炭素材料学会年会 学生優秀発表賞**
榎翔也（松尾研）
グラフェンライクグラファイトのアニオン挿入脱離反応の速度論的評価

(3) **第16回　日本物理学会　若手奨励賞 (Young Scientist Award of the Physical Society of Japan) 受賞**
荒井 俊人
ソフトマターの結晶化制御とエレクトロニクスへの応用

6-4. 書籍

-2023-

(1) **グラフェンの物理学**
越野幹人
248 (2023), 内田老鶴圃

-2022-

(1) **可視光の80%を通すほぼ透明な太陽電池の開発**
加藤俊顕
79 (7-10) (2022), 日本工業出版株式会社

(2) **機械学習・ディープラーニングによる“異常検知”技術と活用事例集**
木下祐哉，酒井大揮，李恒，河野行雄
351-361 (2022), 技術情報協会

6-5. 解説

-2023-

(1) **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, 292-296 (2023)

(2) **貼り付けるだけで水溶液濃度を計測できる光センサシートの開発**
李恒，河野行雄
月刊配管技術, 65, 19-27 (2023),

-2022-

(1) **高品質グラフェンのCVD成長と成長過程の可視化技術**
吾郷浩樹, 平良隆信
表面と真空, 65, 177-183 (2022)

(2) **遷移金属カルコゲナイド原子層・原子細線の化学気相成長**
宮田 耕充
表面と真空, 65 巻 4 号, 196-201 (2022)

(3) **二次元物質と三次元物質の間にある物性**
守谷頼, 竹山慶, 笹川崇男, 町田友樹
日本物理学会誌, 77, 627 (2022),

(4) **カーボンナノ材料のテラヘルツ検出・撮像デバイスへの応用**
酒井大揮，木下祐哉，李恒，河野行雄
月刊MATERIAL STAGE, 21, 37-44 (2022)

-2021-

(1) **二次元物質から２.５次元物質科学へ**
吾郷浩樹
応用物理学会誌, 90, 617 (2021)

６-６. プレスリリース

-2021- 2021.10.5 朝日新聞デジタル
A01 渡邊　記事
「ノーベル賞受賞者も絶賛　日本生まれの小さな結晶が集める大きな注目」
https://www.asahi.com/articles/ASPB4516SP9ZULBJ01C.html

-2022- 2022.5.6　asia RESEARCH NEWS
STAM誌レビュー論文に関する記事
「A new age of 2.5D materials」
https://www.asiaresearchnews.com/content/new-age-25d-materials

2022.5.6　PHYS ORG
STAM誌レビュー論文に関する記事
「A new age of 2.5D materials」
https://phys.org/news/2022-05-age-25d-materials.html

2022.5.6　newsmaker
STAM誌レビュー論文に関する記事
「A new age of 2.5D materials」
https://www.newsmaker.com.au/news/385490/a-new-age-of-25d-materials

2022.5.7 Graphene-Info
２.５D materials記事
「Japan launches a $8.5 million project to study 2.5D materials」
https://www.graphene-info.com/japan-launches-85-million-project-study-25d-materials

2022.5.9　nano-magazine
STAM誌レビュー論文に関する記事
「A new age of 2.5D materials」
https://nano-magazine.com/news/2022/5/9/a-new-age-of-25d-materials

2022.5.11　共同通信PRWire
STAM誌レビュー論文に関する記事
「最先端材料科学研究: 材料科学のニューフロンティア：2.5次元物質」
https://kyodonewsprwire.jp/release/202205111070

2022.5.11　NEWSRELEA.SE
STAM誌レビュー論文に関する記事
「最先端材料科学研究: 材料科学のニューフロンティア：2.5次元物質」
https://newsrelea.se/GA240a

2022.5.18　English Times
STAM誌レビュー論文に関する記事
「2.5D materials promise new applications for electronics,AI」

2022.5.19　Institute of Materials, Minerals & Mining
STAM誌レビュー論文に関する記事
「2.5D materials development project gets underway」
https://www.iom3.org/resource/2-5d-materials-development-projects-gets-underway.html

2022.6.29　東京大学
A03 坂野　A02 町田　A04 笹川　A01 渡邊　研究成果　プレスリリース
「２次元物質の電子構造の直接観測ー原子層の数の偶奇で大きく変わる性質を発見ー」
https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-06-29-002

2022.6.29　日本経済新聞
A03 坂野　A02 町田　A04 笹川　A01 渡邊　研究成果記事
「東大、原子レベルに薄い2次元物質WTe_2の電子構造の直接観測に成功」
https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP635502_Z20C22A6000000/

2022.6.30　OPTRONICS ONLINE
A03 坂野　A02 町田　A04 笹川　A01 渡邊　研究成果記事
「東大ら，２次元物質の電子構造の直接観測に成功」
https://optronics-media.com/news/20220630/77779/

2022.6.30　マイナビニュースTECH+
A03 坂野　A02 町田　A04 笹川　A01 渡邊　研究成果記事
「東大、原子レベルに薄い2次元物質の電子構造の直接観測に成功 」
https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220630-2384773/

2022.7.14　EurekAlert
A03 西堀　研究成果記事
「Salutary delay in the reaction of crystal atoms to avalanche of photons」
https://www.eurekalert.org/news-releases/958798

2022.7.29　科学新聞聞 1 面
A02 宮田　研究成果記事
「原子並みに薄い半導体材料 大面積・高品質合成に成功」

2022.8.27　EurekAlert
A02 宮田　A03 松田　A04 蒲　研究成果記事
「Weaving atomically thin seams of light with in-plane heterostructures」
https://www.eurekalert.org/news-releases/962655

2022.10.5　東京都立大学　東京大学
A02 宮田　A03 末永,柳　A01 蓬田　研究成果　プレスリリース
「無機ナノチューブの簡便な単層合成法を開発
～高効率な太陽電池や高活性な触媒などの開発への貢献が期待～」
https://www.tmu.ac.jp/news/topics/35021.html

2022.10.6　マイナビニュースTECH+
A02 宮田　A03 末永,柳　A01 蓬田　研究成果記事
「都立大など、無機ナノチューブの汎用的かつ簡便な単層合成法を開発」
https://news.mynavi.jp/techplus/article/20221006-2473575/

2022.11.9　日本経済新聞
A02 宮田　A03 末永,柳　A01 蓬田　研究成果記事
「無機材料のナノチューブ、簡便な合成法開発　東京都立大」
https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC20AB10Q2A021C2000000/

2022.11.17　産経新聞社 公式YouTubeチャンネル SankeiNews
A05 河野研 李さん　「理系の歩き方」第2回 特集
「「透視カメラ」が世界的評価 !! 検査革命」
https://youtu.be/H5ejosi6J7M

2022.12.1　読売新聞夕刊
A01吾郷研 楠瀬さん　記事
「みんなのカガク Snap shot：実験失敗が生んだ芸術」

-2023-

2023.1.6　東北大学
A01 加藤俊　研究成果　プレスリリース
「グラフェン量子ドットデバイスの集積化合成技術を開発
ー次世代高性能量子コンピュータの実現に期待ー」
https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2023/01/press20230106-01-graphene.html

2023.1.6　日本経済新聞
A01 加藤俊　研究成果記事
「東北大、グラフェン量子ドットデバイスの集積化合成技術を開発」
https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP647143_W3A100C2000000/

2023.1.10　fabcross forエンジニア
A01 加藤俊　研究成果記事
「グラフェン量子ドットデバイスの集積化合成技術を開発―
―グラフェンナノリボンを活用　東北大学」
https://engineer.fabcross.jp/archeive/220110_tohokuuniv.html

2023.1.11　EE Times Japan
A01 加藤俊　研究成果記事
「グラフェンナノリボンを活用　量子ドットデバイスを集積化合成する技術を開発」
https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2301/11/news036.html

2023.1.24　MIT Technology Review
A01 加藤俊　研究成果記事
「グラフェン量子ドットの集積化合成に成功、量子ビット応用に期待」
https://www.technologyreview.jp/n/2023/01/24/297160/

2023.2.7　九州大学　大阪大学　産総研　JST
A01 吾郷　A03 末永, Lin　研究成果　プレスリリース
「 六方晶窒化ホウ素の大面積合成とグラフェン集積デバイスを実現
大きな絶縁性二次元材料で半導体産業の未来へ貢献」
https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/868/

2023.2.8　EE Times Japan
A01 吾郷　A03 末永, Lin　研究成果記事
「九州大ら、グラフェンデバイスの特性を大きく向上」
https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2302/08/news060.html

2023.2.8　時事ドットコムニュース
A01 吾郷　A03 末永, Lin　研究成果記事
「六方晶窒化ホウ素を大面積合成　電気通さない極薄シート
―次世代半導体など貢献期待・九大や阪大」
https://www.jiji.com/jc/article?k=2023020800718&g=soc

2023.2.9　日刊工業新聞ニュースイッチ
A01 吾郷　A03 末永, Lin　研究成果記事
「次世代半導体の量産技術確立へ一歩、
九大が六方晶窒化ホウ素とグラフェンの大面積積層技術を開発」

2023.2.10　東京都立大学
A02 宮田　研究成果　プレスリリース
「ロジック半導体の性能向上のカギとなるトランジスタ材料を開発
ー2 次元材料 MoS_2と層状 Sb_2Te_3での低コンタクト抵抗の実現ー」
https://www.tmu.ac.jp/extra/download.html?d=assets/files/download/news/press/20230210_TMUpress.pdf

2023.2.10　日本経済新聞
A02 宮田　研究成果記事
「産総研、ロジック半導体の性能向上の鍵となるトランジスタ材料を開発」
https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP649206_Q3A210C2000000/

2023.3.3　共同通信PRWire
A02 宮田　A01 岡田　A03 末永, Lin　A04 蒲　研究成果記事
「無機ナノファイバーに金属原子を挿入する技術を開発
～次世代のエレクトロニクス応用に期待～」
https://kyodonewsprwire.jp/release/202303023533

2023.3.4　EurekAlert
A02 宮田　A01 岡田　A03 末永, Lin　A04 蒲　研究成果記事
「Scientists thread rows of metal atoms into nanofiber bundles」
https://www.eurekalert.org/news-releases/981243

7．　ニュースレター

7- 1
ニュースレター Vol. 1 （2022.3.15 発行）

NEWS LETTER
01

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

2.5次元物質科学の始動

領域代表　2.5次元物質科学の総括
（総括班・A01班）
吾郷 浩樹
九州大学
グローバルイノベーションセンター

始めに、この研究領域がスタートした経緯をお聞かせください。

吾郷　私が研究しているのは、「物質科学」という学問分野なのですが、これは優れた物性や機能をもつ物質を作り出し、そのサイエンスを理解することを目的としています。

近年、二次元物質と呼ばれる物質群が極めてユニークな性質を示し、IoTを中心とする幅広い応用が期待されるようになってきました。これを私たちは「2.5次元物質」という新しいコンセプトで研究を展開し、新たな学問分野を作りたいと考えました。そこで、材料、物理、化学、分析、工学など様々な分野の研究者でチームを作って学術変革領域研究（A）に申請し、2021年9月に採択されて本領域をスタートすることになりました。

「2.5次元物質」とは、どういうものなのでしょうか。

吾郷　元はと言えば、「二次元物質」の物性や電子状態、合成法などがとても興味深くて、応用の面でも大きなポテンシャルをもっている、という考えから始まった話になるのですが……

黒鉛の元になっているグラフェンのようなもののことでしょうか？

吾郷　その通りです。鉛筆の芯にも使われている黒鉛は、炭素原子の六員環が面状につながった二次元のシートがたくさん積み重なったもので、それを1枚だけ取り出したのがグラフェンです。グラフェンの他にも多くの種類の原子レベルの厚みのシートがあって、これらを総称して「二次元物質」（英語では2D materials）と呼んでいます。

その「二次元物質」が脚光を浴びている理由は、何になるのでしょう。

吾郷　例えばグラフェンは、通常の物質では考えられないような変わった電子構造をもっていて、原子1個分の厚みしかない究極的に薄いシートにもかかわらず、その中を移動する電子が物質中で最高の速さ（キャリア移動度）を示して大きな注目を集めました。その後、様々な原子から構成される「二次元物質」の研究が進められ、次世代半導体や各種センサー、フレキシブルデバイス、大容量バッテリーなどに応用できると期待されるようになったのです。

最近では、半導体に加え、超伝導体、強磁性体、トポロジカル絶縁体といった様々な特性を示す「二次元物質」が作られ、世界中で活発に研究が行われています。

でも今回は「二次元」ではなく「2.5次元」なのですね。

吾郷　「二次元物質」それ自体も大変興味深いことには変わりはないのですが、二次元物質同士を重ね合わせたり、つなげたり、ひねったりすること（私たちは「切る・貼る・ひねる」と呼んだりしています（笑））や、重なった二次元物質の間にできる空間を舞台として新しい材料科学のサイエンスが広がり、将来的な応用にもつながる、そう考え、これを「2.5次元物質」と名付けました。

重ね合わせる、ですか。

吾郷　ええ。グラフェンを例として説明すると、グラフェンは単体ではバンドギャップのない金属に近い性質を示しますが、二枚のグラフェンの向きを揃えて重ねると、電子構造が変化して半導体に変化させることができます。さらに、積層角度をたった1°ずらして重ねることで、超伝導状態を示すようになります。また、二枚の原子シート同士、角度をつけて重ねるとモアレと呼ばれる長距離の秩序構造が表れて、非常にユニークな物性を示します。

このように、1＋1が2ではなく、3にも10にも、あるいはAやBのように全く異なる特徴を示すようになることから、非常に大きな広がりが生まれてきます。

それからですね、これまで物質は化学結合や物理成長（薄膜のエピタキシャル成長など）を制御して作られてきました。しかし、本領域では二次元物質の間に働く非常に弱いファンデルワールス力を人口的に制御するというアイデアを活用していきます。このようなファンデルワールス力を自在に制御したモノづくりは、物質科学に大きなパラダイムシフトをもたらすものと期待しています。

確かに、ファンデルワールス力に着目した合成方法は、あまり聞いたことがありませんね。共有結合の1/100程度の強さしかないと言われている力が、それほどまでに大きな影響を及ぼすとは、驚きです。

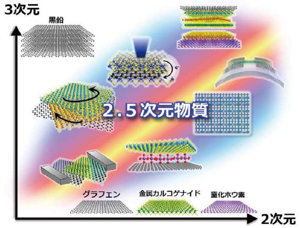
吾郷　近年、二次元物質の操作技術が進展し、人為的にコントロールしながら二次元物質を重ねることができるようになってきました。

本領域では、こういった技術を駆使して様々な組成や角度で積層した「新物質」を作り出していこうと考えています。これまで誰もできていなかったファンデルワールス力を制御した物質合成ですので、あっと驚くような性質をもつ「新物質」が生まれるのではないでしょうか。

さらに重なった層と層の間には、二次元的に広がったナノ空間が存在しています。そこに分子やイオンを挿入することで、三次元の世界では見られない新たな構造が得られるのです。ここから新物質の創出や新物性の発現などにつながることを期待しており、この方向性の研究も進めていきたいと考えています。

なるほど。だからこそ「2.5次元」なのですね。

吾郷　はい。二次元物質がもつ集積の仕方の自由度や二次元のナノ空間、そしてそれだけに留まらない可能性や広がりを、私たちは「0.5次元」と象徴的に表現し、「2.5次元物質」科学として総合的に研究していこうという思いを込めて領域名としました。
ちなみに、このキーワードはポップカルチャーの分野でも近ごろ使われていう言葉でもあります。こちらはアニメをミュージカルで演じるなど三次元（リアルの人間）と二次元（映像作品）を結びつけるものだとか。私たちはこの研究を通じて実際の社会（三次元）にも貢献していきたい、そういう意味合いも込めています。



この研究領域は、実に多くの研究者の方々が参加されていらっしゃいます。それぞれどういった研究をされていらっしゃるか、軽くご説明いただけますか？

吾郷　この領域は、第一線で活躍している研究者が集まって、物質創製、集積構造の作製、分析技術の開発、新奇物性の開拓、電子・光・エネルギーへの応用、という5つのグループで研究します。これらのグループが「2.5次元物質」を合言葉に有機的に連携して、分野融合的な共同研究を展開していきます。

お互いの強みを持ち寄って、オールジャパンの体制で新しい研究シーズを生み出すとともに、日本発の学問分野を拓いていきたいと考えています。また、これら5つのグループに加えて、総括班と呼ぶマネージメントチームも組織して、海外連携、産学連携、若手支援、広報、アウトリーチ活動などを推進する予定です。

最後に、皆様にメッセージをお願いします。

吾郷　昨今の新型コロナウイルスの影響で、オンラインでのコミュニケーションが世界中で行われるようになり、今まさに社会構造そのものも二次元と三次元が融合しつつあります。

物質科学の分野においても、「2.5次元物質」という新たなコンセプトで、科学のフロンティアを切り開いていくとともに、次世代につながるデバイスやエネルギーなどへの応用研究を通じて、これからの社会に貢献していきたいと考えています。

皆さまの期待に沿えるよう、メンバー全員で頑張っていきますので、どうぞよろしくお願いします。

Interviewee

吾郷 浩樹
九州大学
グローバルイノベーションセンター
主幹教授

領域ホームページ　https://25d-materials.jp

ニュースレター Vol. 2 （2022.3.25 発行）

NEWS LETTER
02

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

キックオフミーティング（第1回領域会議）レポート

第1回　九州大学
グローバルイノベーションセンター（福岡県春日市）

2021年11月13日、九州大学筑紫キャンパスグローバルイノベーションセンターにて、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1回領域会議が開催されました。

ほとんどの会議がオンラインになっている状況の中、対面での議論が重要だという考えが多く、早い段階からオンサイト会議の準備が進められました。幸いにも新型コロナウイルス感染症の拡大が小康状態にあったこともあり、しっかりとした感染対策を講じることで、領域の計画研究者20名が無事に顔を揃えることができました。

2.5D Materials

活発に交わされた議論

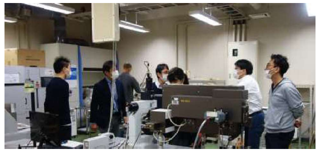
今回の会議は、領域全体で目指すビジョンを共有・確認しつつ、領域内で新たな共同研究を円滑に進められるよう話し合うことを主眼として開かれました。実際に、各研究者がそれぞれの研究内容を紹介した後、他のメンバーと互いの強みを生かして、研究をいかに発展させるか深く議論を交わしました。発表後の質疑・ディスカッションの時間では、話が途切れることなく、研究を発展させるためのアイデアや共同研究の案が数多く提案され、休憩時間に至るまで熱い議論が続きました。

対面会議の重要性

今回の会議では、共同研究の種になるような発展段階の研究についても数多く紹介があり、領域内連携を進めやすいアットホームな雰囲気が感じられました。また、普段の学会では顔を合わせる機会がなかった異なる分野の研究者との議論は、研究を進めるうえでたいへん良い刺激になりました。こうした多彩な本学術変革領域のメンバーと協働することで、新しい研究分野の開拓につながるようなブレイクスルーがこれから多数生み出されるだろうと確信できた1日となりました。

キックオフミーティングの様子。

休憩時間中の様子。
共同研究に向けて活発な議論が行われた。

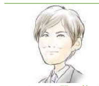


共同利用拠点の１つである吾郷研究室の見学ツアーも行われた。

お知らせ

・合成、集積、分析(光)、分析(構造)の4つの共同利用拠点が始動しました。
・3月7日，8日に第２回領域会議がオンラインで開催されました。
・米国ブルックヘヴン国立研究所の Jurek Sadowski 博士を講師としてお招きし、第1回　2.5次元物質国際連携セミナーを3月15日にオンライン開催しました。
・6月17日に第1回 2.5次元物質科学若手交流会を名古屋大学工学部にて開催予定です。

Reporter



イラスト：門田 英子

荒井 俊人
東京大学 工学系研究科
（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：2022年 3月24日）

NEWS Letter Vol.2　キックオフミーティング（第1回領域会議）レポート

ニュースレター Vol. 3 （2022.5.11 発行）

NEWS LETTER 03

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

現実と非現実の間からアプローチする2.5次元物質科学研究

A01班　物質創製班 研究代表者
（DFTによる新規物質の設計と計算支援）

岡田 晋
筑波大学

先生は元々、何にご興味を持たれて、どのようなご研究をされていらっしゃいましたか？

岡田　最初学部では日大の理工学部物理学科というところで、電子系の理論の研究室にいたんです。ただそこで勝手に卒研で、古典スピンの研究をやったんです。で、「大学院でも同じテーマをやりたい」と言ったら「君は東工大にいった方がいい」と、とある先生を紹介されて、そこに移ったんです。でも結局そこと折り合いが悪くて。その年の3/1に斎藤晋先生が助教授でいらっしゃって、そこに泣きついて拾ってもらったのがきっかけ（笑）。だからしょうがなく始めたってのが、多分正解だと思いますね。

その後、筑波大に助教として就職したんですが。最初に着任する予定の研究室のボスが、着任のちょうど半月前に亡くなられたんですよ。いわゆる「親なし助手」状態で宙ぶらりんで筑波大に入ったんです。そこにたまたま押山先生、カーボンナノチューブの電子状態の計算を世界で最初にやった先生がいらっしゃって、その方のところにまた泣きついて、グラフェンとかチューブの研究を始めたという経緯があります。

偶然の巡り合わせ、といったところでしょうか？

岡田　そう。だから主体的に「これをやりたいんだ」や「興味を持って今までこうやってきたんだ」って言うのも、なんか違うような気がしているんですよ（笑）。

今はまさにこの分野、この領域で対象にしているような物の理論計算をやっています。遷移金属カルコゲン化合物（TMDC）、グラフェン、六方晶窒化ホウ素（h-BN）や、カーボンナノチューブもやってますし……もちろんフラーレンも、まだまだ普通に研究していて。最近はTMDC関係の電子状態計算をメインにやってますね。

どうして「2.5次元物質」をターゲットにしようと先生は考えられたのでしょうか？

岡田　僕自身は元々は、フラーレン分子をずっとやってて。一番初めに、グラファイトの層間で、フラーレンを挟み込むという研究をさせられた。させられたって言ったら怒られますね（笑）だから「どうしてか」のきっかけは、指導教員ですね、僕にとっては（笑）。当時「2.5」なんて言葉は全くなかったんですが、そういうなんか異なる物質、次元性を持つものを混ぜましょうということで、94年にテーマをもらいました。28年前ですかね。

そのテーマを敢えて「続けよう」と思った面白さは、どこにあるのでしょうか？

岡田　実は当時はあんまり面白くなくて（笑）論文1本だけ書いて、その後は本当に純粋に分子だけの世界に入ったんですよ。だから正直に言うとその「隙間に入れる」って話は、その後しばらくはやってなかったんです。

理論の研究ってぶっちゃけ「面白いものがあったらとりあえずそれに飛びつく」みたいなところがあるんですよ。計算機にうまく乗っけられれば、こっちのものなんですよね。だから、結構節操無く色々やってたんです。

その後、就職するかしないかの時期に、チューブの中にフラーレンが入ってる物質、ピーポッドって言うんですけど、その研究もやりました。だから連続的に続けてないけど、断続的には続いてますね。

なんで続けてるかって言うと何ですかね……綺麗ですよね。見たときに形が（笑）。その面白さですかね。

面白い形、という意味では、事前にいただいたお写真(右図)も、とてもユニークでした。

岡田　左上は、C_{36}がベースになっています。C_{26}分子の赤道にある6枚の6員環を互いに共有させて作った構造で、二次元のネットワークを作って遊んでいたって話です。C_{36}とは違って、実在の物質ではないんですが。

絵と模型を作った時に、綺麗だなと思ったんですよ。純粋に見た目がかっこいいからっていうんで、やってみたというた研究です。

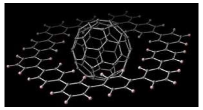
実験の人とのペアで「その状態について説明する」って研究はいっぱいやってますし、もちろんすごく楽しいんです。これはそれとは別にこういう遊び、あるいはパズル的な研究になるのかな。何かこう色々と形を組み合わせて綺麗なのができたらいいなーと思ってやった仕事です。

それと当時学生だった、今助教の方が折り紙が好きだったんですよ。彼女が「物理は嫌いだけど、折り紙は好き」って言ったんで、「じゃあ面白い形つくろっか」でやり始めたことがきっかけ。その中のゴールの1つですね。

確かに形を組み合わせて、それがきれいにはまると、それだけでわくわくしますよね。

岡田　そうですよね。僕もそう思うんです。右下のも本当に遊びで……物理学科って、一番人気は素粒子の理論なんですよ。二番目は宇宙関係の理論。で、物性の理論って、ぶっちゃけちゃうとものすごく人気ないんですよ。あまりにも癪に障ったんで、「宇宙でも作るか」ってなって（笑）。計算して"nano saturn"「ナノ土星」って論文を書いたんです。

真面目に実際の物質もやっているけど、そうじゃない遊び的な部分がある。それがうちの特徴なんですよ。あまりシリアスさがないっていうところを、あえてここに載せて欲しかった、というところがあります。



"nano saturn"
ナノ土星

なるほど。ところで先生が研究代表者のA01班は、領域においてどのようなポジションに当たるのでしょうか？

岡田　A01班というグループが、この領域の一番ベースにあるポジションなんですよ。

吾郷さんは、グラフェンのCVD合成を使って、ものすごくきれいな大面積のグラフェンを作れるという技術を持っていらっしゃいます。これは例えば、この後大きな系を作りたい時などに、よい材料となります。渡邊さんはさっきも話題に出た、h-BNHVの大家です。ほとんどの二次元、2.5次元物質の実験では、基盤としてh-BNを使っています。櫻井さんは、有機合成の方ですね。スマネンと言ってお椀状の3回対称の分子の合成をしていますが、それを使ったHOFやCOFやMOFといった、ネットワーク構造の合成もされている方です。

そういった意味でどなたも、それぞれのオリジナリティがある特技があって、そこで作られた物質や材料を通じて、常にA02〜05班の皆さんの実験をサポートする。そういう位置にあるんだと思っています。

その中でも先生は、どういった部分を担っていらっしゃいますか？

岡田　実はこの領域のかなりの先生と共同研究してるんですよ。新しい方を除いて、領域の大体半分以上の先生方と多分一緒に仕事したことがあるんじゃないですかね。一次的だけじゃなくて二次的な側面を入れたら、ほとんど全員になるんじゃないですか（笑）。物理だと計算する人は計算だけ、実験する人は実験だけをやるんです。プログラムがどうしても、専門に使っている人以外には使いにくいんです。なので例えば吾郷さんから「こんな計算して」って言われて、それを僕が計算するんですよ。

なので僕は領域の便利屋的なポジションなのかもしれないですね。物質設計もする。さらに、その安定性とか何故そうなるかとか反応のバリア見積もりとか、そういうところを色々とやっていく。だからこのグループに入っている、そんな気がしますね。

最後に、今後の展望について一言お願いします。

岡田　「2.5次元」ってそれ自体が非常に突拍子もない話で。共有結合ではないところの科学（サイエンス）をやりたいって話ですよね。その中でも「ポイント5」が重要じゃないかと。「ポイント5」という言葉に「たくさんの次元が畳みこまれている」んじゃないのかなって、僕はそう思っています。

その中で僕自身は、まずは堅実にその他の皆さんとコラボレーションして裏方に徹する。それとは別にさっきの変な絵がありましたよね。そんな感じで2.5次元に関連することで、「人が犬を噛んだような」変な何かを考えたいですね。それは物質の設計であったり、さっきみたいなナノ土星みたいなやつ。他のグループの実験の皆さんには「そんなのお前できないよ」と言われるようなやつ、そう言われるからこそ、やりたいんです。

Interviewee

岡田 晋
筑波大学
数理物質系
教授

領域ホームページ　https://25d-materials.jp

ニュースレター Vol. 4 （2022.7.7 発行）

NEWS LETTER 04

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

二次元物質を繋げる、重ねる

A02班 集積化班 研究代表者
（2.5次元物質の化学気相成長と集積化）

宮田 耕充

東京都立大学


2022年度の研究室メンバーの皆さんと

先生は元々、何にご興味を持たれて、どのようなご研究をされていらっしゃいましたか？

宮田　高校の時は、生き物や生命ってなんだろうみたいな話にすごい興味があったんですね。でもその後、予備校の物理の先生の授業が非常に面白かったので物理にも興味を持つようになりました。例えば量子力学でみえる小さな世界では、通常の感覚とは違う不思議な性質が出てきて、日常とはかけ離れたような現象が見えるよと。すごいなぁ不思議だなぁ、そういうところを理解したいなーと思って、物理学科を選んだみたいな経緯がありますね。

2000年に都立大に入学して4年生の時に、物理学科に片浦先生（現産総研）という方がいらっしゃいまして。研究室見学の時にカーボンナノチューブを例にして、このような構造では、円周方向に電子の周期的境界条件というのが課せられて量子効果が顕著に見られるよ、そんなお話をされていました。そういう「物質の不思議な性質」などに予備校の時から興味があったのと研究職志望だったこともあり、そこで大学院まで行って博士号を取りました。その後は産総研で1年間学振のポスドクをしてから、2009年から名古屋大学の篠原先生の研究室に移りました。篠原研ではナノカーボンを中心に研究されていて、幸い、いいタイミングで助教になることができたんです。

篠原先生も自分も新しいテーマとしてグラフェンに注目していたんですが、ちょうど合成ができる篠原研にいったのもあったので、ずっとやりたかった「モノを作るところ」をしたい、と。それまでは主に遠心分離を使った、カーボンナノチューブの分離精製をやっていたんです。でもそれって、買ってきたサンプルを使っていたので、いろんな面で制限を感じていました。

確かに合成した方が小回りが利きそうですね

宮田　ええ。当時カーボンナノチューブの合成法で「化学気相成長」(CVD)っていうやり方があり、これはグラフェンでも有用だろうと予想されていました。2009年に自分たちも始めたんですが、1年以内くらいにCVDで単層のグラフェンが合成できたとサイエンス誌に発表されて、さらに盛り上がってきたんですよ。その翌年頃に、六方晶窒化ホウ素(hBN)の上にグラフェンを置く、という研究が出てきました。二次元物質は非常に安定な薄い物質で、ファンデルワールス力で違うものを重ねることが出来るよ、と。それも非常に面白いなあと思ったんです。この領域でもこの論文の共著者の渡邊さんがいらっしゃって、今でも重要なトピックになってます。ただまあ、そこもガイム先生のようなノーベル賞クラスの研究者はじめ沢山の人がそっちの研究に手を出し始めて、同じことをやるのもなあ、と思って（笑）。じゃあ、横の方につなげてみようと。

横につなげる、とはどういう意味ですか？

宮田　1枚のグラフェンとhBNを端で繋げる、という感じですね。当時2つの異なる結晶を組み合わせたヘテロ構造の合成は、既に十分に確立された分野でした。その考え方を二次元物質に持ち込もう、と。で、実際にグラフェンに繋げるものとしては、格子定数がほぼ等しいhBNになるんですよ。当時は危険なボラジン等がhBNの原料として主流でしたが、名古屋大学で同僚だった瀬川先生(現分子研)にアンモニアボラン(BNH_6)を教えて頂きました。大気中での安定性が高く、約60℃から気相で供給できる非常に扱いやすい原料です。そのとき4年生で入った学生さんが楽しんで進めてくれたこともあって、一緒に約1年で目標としていたヘテロ構造を作ることができました。

それが、新奇性の高い研究結果に繋がった、と

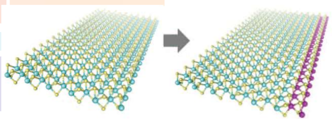
宮田　いや。そう話は単純でもなくて。この研究とは別に、カーボンナノチューブのレイリーイメージングという面白い研究をしていたJiwoong Park先生という方がコーネル大学にいて、2012年に2か月くらいその研究室に滞在していたことがあるんです。実はこの先生のグループは、まさにそのグラフェンとhBNのヘテロ構造の研究もやっていまして。私達の論文(Appl. Phys. Express誌)の掲載と同じ月に、ネイチャー誌にその論文が出てきました（笑）。

衝撃でしたねえ。やはり、仕事のクオリティが凄く高いんです。着眼点って意味では非常に近かったし、始めた時期もそこまで違わないようでした。ただ、あちらのグループは共同研究が上手いし非常に速い。ポスドクや博士の学生が大勢で協力してプロジェクトを進めている。一方で当時私は、そのようなやり方に慣れてなく、すぐに相談できる知り合いも今と比べればずっと少なかった状況でした。現地で滞在しながら、その様子を間近で見ることができたのは、本当に良い勉強になりましたね。

なるほど。では、そこから「2.5次元物質」を研究しようとなった理由は何でしょう？

宮田　またグラフェンとhBNの話に戻るのですが、グラフェンは電気を流す金属、hBNは絶縁体になります。ならやっぱり半導体も欲しいな、と。そこから遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)にターゲットが流れていきました。その後、このTMDCでもヘテロ構造が出来まして、このTMDCの研究を進めていくうちに、自然と研究対象になっていったという感じです。

私たちの場合は、普通の単一な二次元物質とはちょっと構造が違うものを作ったり、重ねることで、何か新しいことができるだろう。そう期待していることが、考え方のベースになっています。例えば、二次元物質の周りにちょっとだけ別の二次元物質を成長させてあげる。すると、細長いリボン状の構造をした二次元物質ができる。グラフェン/hBNの研究を始めたころからずっと考えていたのですが、2019年に出したTMDCの合成に関する論文で、ようやくそのような構造について報告できました（下図）。最近では、このような構造を構成材料として上に積み上げることで、単に二次元物質を使っただけではできないような物が出来ないかな、とも考えています。


単層のTMDCの端から別の組成を成長させたナノリボン構造のイメージ図

吾郷さんとご一緒に研究をしようと思われたきっかけなどはあるのでしょうか？

宮田　2013年に篠原研から都立大に移った後、その年にJSTの戦略的創造研究推進事業の「さきがけ」に採択されて、ちょうど吾郷さんや長汐さんと同じ研究領域だったんです。そこで、皆さんと結構話すようになったんですよ。「さきがけ」のユニークなところなんですが、年2回の合宿があるんです。そこで必ず研究の進捗や方向性などを発表しないといけない。しかも同じ場所に泊りがけでやるっていうのが、面白い点で。普通の学会などと比べて、滞在時間が長いんですよね。そこで今いる領域の皆さんとも結構話して、仲良くなったかなーと。

それがまさに、この領域が生まれるひとつのきっかけだったのかな、そう思います。このような経験を通じて、普段は話さない人たちと出会うことが出来た。それが非常に良かったですね。

先生の所属していらっしゃるA02班とは、どのようなポジションに当たるのでしょうか？

宮田　私たちのA02班は集積化班と言って二次元物質同士や二次元物質と分子膜を重ねたり、二次元物質同士を繋げたり、そのすき間に原子を入れたりといろいろな研究をやっています。その中で私は先ほども言いましたが、二次元物質を繋げたり、重ねたりみたいなところをしています。例えば他の班にサンプルを作って提供したり、合成班から頂いた物質を使って新しいものを作ってみたりとか。要は単純な二次元物質からもう一捻り入ってるみたいな2.5次元物質を作る、そんな感じのことをしています。

最後に、今後の展望について一言お願いします

宮田　この二次元物質をベースにしたモノづくりやその物性・応用研究は、まだまだ沢山の新しいことが出来そうだなあと、非常に面白く感じています。また、領域での連絡ツールとしてSlackを使い始めたおかげで、沢山の研究者の皆さんと気軽に連絡できるようになりました。今後も領域の中だけに限らず、多くの方々と共同研究を通じて楽しんでいければと考えています。

CVDで合成したTMDCの試料に興味があれば、是非お気軽にご連絡を頂ければと思います。

Interviewee

宮田 耕充
東京都立大学
理学研究科
准教授

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7日）

ニュースレター Vol. 5 （2022.7.14 発行）

NEWS LETTER 05

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回領域会議レポート

両日の発表の様子

第2回 オンラインミーティング

3/7の発表後の記念撮影タイムにて

2022年3月7日、8日、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2回領域会議が開催されました。

第1回領域会議と同様、当初は京都大学宇治キャンパスでの対面開催を予定していましたが、まん延防止等重点措置の発令中であったこともあり、社会情勢を鑑み、オンライン（Zoom）での開催となりました。

2021年11月に行われた第1回領域会議での議論を踏まえて、既にいくつもの共同研究が行われており、当日はその結果が多数報告されました。

例えば、予め物質創製班のメンバーが成長させた二次元材料を、デバイスへと新たに組み込んだものが紹介されたり、作製した2.5次元物質を分析班によって光学測定された結果が報告されるなど、各研究のスピード感は驚くものでした。また「共同利用拠点の構築」も本領域の強みであり、構築されて半年で既に45件の利用実績があることも、領域内での共同研究の活発さを裏付けるものと言えるでしょう。

また両日ともに、通常の発表後の質疑応答だけでなくZoomのブレイクアウトルーム機能を使用し、別途参加者が個別に議論を行えるフリーディスカッションタイムも設けました。その結果、参加者による活発な議論が随所で行われていました。

2日間の日程およびオンライン上での開催にもかかわらず、アドバイザー兼評価委員の先生方および学術調査官の先生方をはじめ、多くの皆様にご参加いただきました。今後の領域のさらなる発展が期待されます。

また、初日の夜にはオンラインツールRemoを用いて、懇親会が開かれました。いくつかのグループに分かれて団欒が始まり、その後それぞれ自由にブラウザ上のテーブルを行き来しながら、和やかな雰囲気で会話に花を咲かせていました。

途中、若手とベテラン勢とに分かれてしまう一幕もありましたが、気づいたベテランが若手のテーブルに自然と混ざるなど、空間と立場といった垣根を越えた、隔たりを感じさせない時間が流れていました。

札幌で計画している次回の領域会議では、対面で集まって議論が出来ることを期待しております。

懇親会の様子

お知らせ

- Science and Technology of Advanced Materials 誌に、本領域のreview論文が掲載されました。是非ご覧ください。
  https://doi.org/10.1080/14686996.2022.2062576
- 5/25,26の2日間、本領域とブルックヘヴン国立研究所の共用施設のメンバーによるオンラインでのワークショップ "2D Materials and Beyond (Workshop 7)" が開催され、200名を超える登録者がありました。
  https://www.bnl.gov/nslscfnum/
- 共同利用拠点の北陸先端科学技術大学院大学に、通電2軸大気非曝露ホルダーが納入されました。
- 6/7,8の2日間、「第1回領域内サイトビジット」を北陸先端科学技術大学院大学マテリアルサイエンス系にて、開催しました。高村研、水田研、大島研を中心に見学し、共同研究に向けた議論を行いました。
- 6/17に「第1回2.5次元物質科学若手交流会」を、名古屋大学工学部にて開催しました。
- 6月に公募研究が採択され、新たに21名の研究者の皆様が本領域に加わりました。
- 7/5-7に日中韓フォーサイト事業との共催で、2次元材料国際ワークショップを開催しました。
  http://a3-2dmaterials.jp/activities/index.html
- 7/15に「第1回産学官協働ミーティング」を九州大学グローバルイノベーションセンターにて開催予定です。

領域アドバイザーの先生方からのメッセージ

金子 克美
信州大学 特別特任教授

科研費で活発な科学者が集まって共同研究を推進できるのは、大変楽しいことと思う。我が国の科学が世界で極めて低いところに低迷している状況を考えると、お願いしたいことがある。本科研費のチームメンバーは日本の科学界のエリートであり、博士課程の学生もある程度参画できる環境にある。若い人に科学が楽しく、挑戦するに値することを是非それとなく教えて戴きたい。博士学生を増やすだけでは不十分であるが、私が学生であった頃から半世紀経っても、我が国は博士課程学生の科学技術変革に果たす役割を認めていない状況に本質的には変わりがないためである。

斉木 幸一朗
東京大学 名誉教授

第2回領域会議にオンライン参加して、層状構造物質の多様性と、その積層を制御することによる研究の大きな展開の可能性に深く印象づけられました。かつては机上の空論に過ぎなかった人工積層構造が実験的に作製され、理論との協奏によって新たな物理の領域が拓ける予感がいたします。共同研究を通じて画期的成果が得られることを期待する次第です。

横山 直樹
富士通株式会社 名誉フェロー

江崎氏らによる半導体超格子は、超薄膜の異種半導体を周期的に積層し新しい物質を創り出す画期的な提案でした。2.5次元物質科学は異種二次元原子層を積層し新しい物質と価値を創り出す科学であり、半導体超格子よりもさらに夢のある科学だと思います。この時代に研究できる喜びを噛みしめ、素晴らしい成果を挙げられる事に期待しております。

敬称略・五十音順

Reporter

イラスト：門田 英子

村田 和香
領域広報担当
（サイエンスコミュニケーター）

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14日）

NEWS Letter Vol. 5　第2回領域会議レポート

ニュースレター Vol. 6 （2022.8.30 発行）

NEWS LETTER 06

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

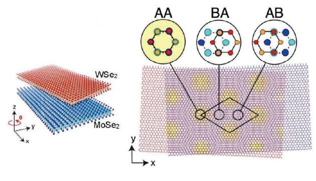
2.5D Materials

光が照らす2.5次元物質科学

A03班 分析班 研究代表者
（2.5次元物質の光技術と機能創発）

松田 一成

京都大学
エネルギー理工学研究所



2層のTMDCによるモアレ縞の模式図

先生は元々、どのようなご研究をされていらっしゃいましたか？

松田　カメラのフラッシュの原理と同じように、光を使うと一瞬の物理現象をストロボ写真のように捉えることができます。名古屋大学工学部応用物理学科で、レーザー光を使って物質中でピコからフェムト秒（10^{-12}～10^{-15}秒）の極短時間に起こる、光でつくられた電子の動きを明らかにする研究で学位を取りました。そういう意味では、今までずっと一貫して「光が照らす物質科学」に関する研究を進めています。2003年から京都大学の宇治キャンパスの化学研究所で助教授（准教授）として勤め、そのタイミングでカーボンナノチューブに関する研究をスタートしました。その後、2011年から現所属である京都大学のエネルギー理工学研究所に教授として、2012年頃から二次元半導体の研究をスタートしました。それがベースとなって、今の2.5次元物質科学の研究に繋がっている、そのような感じですね。

二次元物質に興味を持ったのはなぜですか？

松田　「たまたまそこに山があったから山を登る」みたいな話が、純粋な動機なんですけれど（笑）。もう少し学術的な話をすれば、物理を専攻する学生なら必ず量子力学を習いますが、そこで「狭い空間の井戸（型のポテンシャル）に電子が閉じ込められるとどうなりますか」という例題を、練習問題として解きます。カーボンナノチューブや二次元半導体は、狭い空間の中に電子が閉じ込められているという意味では共通していて、電子の波としての振る舞い、つまり量子力学的な性質が顕著に表れてきます。まさに、教科書で描かれているような美しい物理が現実に存在している。そういうところからですかね。

そこから「2.5次元物質」を研究しよう、となったきっかけは何でしょう？

松田　さきほどお話した通り二次元物質は、我々人間から見ると自然にできた極めて理想的な物質システムと言えます。それら二次元物質の層と層を重ねたり、回転させ捩じったり、貼ったりして、自然界にないものを生み出すことができます。我々自身も2015年頃から、まずは単純に二次元の半導体と半導体、次に半導体と磁性体を重ねて貼り合わせた系からスタートしました。それまで、例えば層と層とを回転させ重ねても、理想的には間に挟まった電子は、均一な波として振る舞うものと思っていました。ですがやはり大きかったのが、海外のグループからグラフェンでの超伝導、また、2019年末に半導体と半導体を捩じって重ねると現れる光学現象で、いずれも「モアレ縞」と呼ばれるものが関わっていることが報告されたことです。このモアレ縞のおかげで、電子の波は決して均一ではないのだと。特に、我々はこのモアレ縞ができることで電子の量子性が最大限使える、量子ドットという電子の箱がきれいに規則的に並んだものという、美しい物理の対象でできるのではないかと思った事が強い動機です。

「モアレ縞」って、印刷物だったり画像処理でよく聞く言葉ですけど、あれと同じですか？

松田　そうです、それと同じです。二つの間隔の違う縞を重ねると現れる独特の縞模様のことで、「モアレ」という言葉はフランス語が語源らしいです。そのようなものが物理として大事だとは思っていませんでしたが、ふと子供のころに受けた、モアレ縞を利用した背骨のゆがみ検査のことを思い出しました。

モアレ縞はとてもセンシティブで、微妙な具合で形も変わるし周期も変わります。だから、ちょっと背骨が曲がっていたり、バランスが悪いと顕著にわかるそうです。これは物質の中でも同じで、今、二次元半導体を捩じって重ねたもので観察していますが、モアレ縞が場所によってばらついていますが、いかに均一にするかもこれからの課題かもしれません。

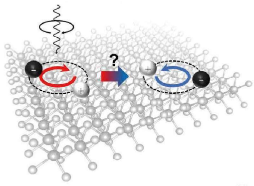
先生の所属していらっしゃるA03班とは、どのようなポジションに当たるのでしょうか？

松田　ちょうどプロジェクトの中で、真ん中の立ち位置つまりハブなんです。A01,02班の皆さんが作ったものを我々が新しい方法で調べて、そこでわかった構造や物性情報をA04班に繋いで、最終的にA05班の応用につなげていくというものです。例えば、2.5次元物質に対して私は光計測を専門としていますが、班の中には電子顕微鏡が専門の方や、さらにはX線回折や光電子分光法のメンバーもいます。それぞれの得意とする分析手法でアプローチし、2.5次元物質の新しい物理さらには機能や応用につなげていく事が班の役割です。

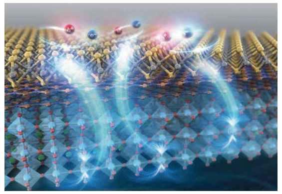
その中で、我々のグループでは、この2.5次元物質での新しい光科学とその応用を目標としています。特に、「バレースピン」という物理自由度があるのですが、それと先ほどの「モアレ」の物理を組み合わせて、フォトニクス応用に繋げていこうとしています。

バレースピンとはどういうものなのか、もう少し詳しく教えていただけますか？

松田　はい。今のコンピューターはエレクトロニクスが基礎となって、電子の有無で演算しています。ですが、原理的にジュール熱発生によるエネルギーロスが避けられません。そのため、電子の自転（スピン）の自由度を使うスピントロニクスに関する研究が進められていますが、ここではスピンだけでなく「バレースピン」という自由度を使って、新しいエレクトロニクスやフォトニクスを切り拓こうとしています。このバレースピンは、二次元半導体で初めて出てきた物理概念なんです。



バレースピン自由度のイメージ図



2.5次元物質によるバレースピンのイメージ図

そうなのですか？それはどうしてですか？

松田　物理的な説明になりますが、空間的な対称性が破れていること、重い元素を含んでいてスピン軌道相互作用が強い、という二つの要素を満たしたケースだけバレースピンという自由度が生じます。その二つの条件を満たす物質は、これまで二次元半導体が出現するまでなく、物理として新しい側面を持っています。また、電子の自転（スピン）は、光では制御しにくいですが、バレースピンは光で制御ができます。

それで、今まで我々が扱ってきた光とバレースピンにこのモアレの物理を組み合わせて、バレースピンフォトンクスと呼んでいる新しいフォトニクスを2.5次元物質で切り開きたいと考えています。

最後に、今後の展望について一言お願いします

松田　そうですね。いろんな側面があるんでしょうけども。せっかく皆さんでグループを組んでオールジャパンでやるので、この領域でしかできない、この領域だからこそできる、そんな研究を一緒できればと考えています。やはり、この領域でしか会えなかった人たちと一緒に研究することで、相乗効果として新しい研究ができることに意義があるのかと思っています。加えて、ターゲットとなる物質も新しいし、コンセプトも新しいですから。今後新しい研究成果がこの領域から次々出るのではないか、そう大きく期待しています。

Interviewee

松田 一成
京都大学
エネルギー理工学研究所
教授

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2022年 8月30日）

ニュースレター Vol. 7 （2022.9.22 発行）

NEWS LETTER 07

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

モアレ模様から生まれる新しい物理学

A04班 物性開拓班 研究代表者
（ハイブリッド・モアレ物質の物性理論と新機能開拓）

越野 幹人

大阪大学
大学院理学研究科

研究室の学生さんとスペインにて

先生は元々、何にご興味を持たれて物理学の分野に進まれましたか？

越野　東大の理科1類から理学部の物性物理学を、4年生の配属で選びました。なぜかと言うと、当時他の理論の研究室は輪読とかがメインだったんですけど、まずその先生は「4年生諸君の知識でも立派にできる研究ってあるから」そう言ったんですね。これはいいなと思って。東大では4年生配属は半年毎に別れてるんで、そこで半年やった地点で「今度はやっぱ実験だよなー」とか思って、実験系の研究室の見学会みたいなものに行ったんです。でも、段々と「こりゃあ自分にはちょっと無理やなー」と思い始めて、それで結局理論の研究室に。なので、割と消極的な感じで出したみたいになっちゃった形ですね（笑）。

そのままドクターまでいて、その後東工大で助手から助教までいました。2010年から東北大の准教授で、2016年からここ阪大で教授に就いたという感じです。

どのようなご研究を通じて、この分野に足を踏み入れられたのですか？

越野　大学院までは、2.5次元と直接的には関係ないことやってました。ただ僕が助手で行っていた研究室は、カーボンナノチューブの大家だったんです。そこに入ってちょうど一年半位経ったころに、グラフェンの発見があったんですよ。実は大学院までやっていた研究内容は、「この研究がすぐ役に立つ」とか、そういう観点ではやってない感じの、マニアックな研究だったんです。

グラフェンはそう言うややこしい研究から比較すると、随分単純なものに見えました。実際、電気伝導度とか計算してみると、パッと答えが出る。でも当時の僕は「こう理論って言うのはもっと魑魅魍魎で、難解で」って（笑）。

でも、考え方が変わった、と？

越野　そう。あの頃は、そうでなければならないと思っていた。でもそこの研究室の考え方は、全然違ってたんです。そこで僕は基本的な事って何なのか、っていうのを教わったんですよ。そこから段々と面白いなと思って研究していくうちに、後でも話が出てくるトポロジカル物質っていう研究分野に行きついて。それに手を付けだしたら、結局大学院まででやってたことと繋がる部分が出てきたんですよ。だから、二次元物質の分野が大きくなるとともに、自分も成長したというような感じですね。

そこから2.5次元へと移行されたきっかけは？

越野　前回の松田さんの話にもあった、グラフェンのモアレ模様の話、あれは歴史的には2018年に発見されて大ブレイクするんですけど、最初に僕が初めて見たのは2007年だったんですね。当時は超マイナーな分野でグラフェン同士を重ねて変な模様を作って、その上で電子構造計算するって面白い、ってやってる感じの人たちが数人いただけなんです。僕らは早い時期にそこに参入して、手探り状態で研究していました。色んな意外な結果が出て、それを見て少人数でキャッキャしていた感じかな。その頃は、「まだそんなのやってんの」って言う人もいました。

でもその大発見から、世界中の二次元物質関連の研究者たちがこの分野に大量に参入してきました。そこで僕らがやってたこととかも、併せてすごく注目してもらいました。ただ我々が砂遊びでちょこちょこ遊んでいるようなものだったのに、今や建設会社がそこら中でビルを建て出したみたいな感じ（笑）。なら、そろそろ他のことやりたいなーって気持ちがあったり（笑）。

わかります（笑）。では、今はどういう研究をされていらっしゃいますか？

越野　最近やっていることとしては、準結晶というものがあります。簡単に説明すると絶対に同じ模様の繰り返し部分がないんだけれども、隙間なく永遠に続いているっていう物質ですね。それって普通は合金とかで見られるんですけど、グラフェン2枚重ねてもある意味準結晶になりうるんじゃないかって。重ねて回転させたらモアレ模様ができるけど、これは見方を変えれば準結晶と言えるんじゃないかと。

実は今までずっと物性物理の歴史っていうのは、「周期系をどう扱うか」っていう観点からなんですよ。ほとんどの物質は結晶なので。準結晶ってのは1985年ぐらいに発見されたけど、これを理論的に記述するのが未だになかなか難しい。でも二次元物質を組み合わせることで準結晶的なものが簡単にできて、しかもその周期も自在に制御可能。これは新しいでしょっていう風に一生懸命言ってるんですよ。ただ、今の物性計算や理論とかは周期系の理論だから、当然そのままだと計算できないんですね。でもそれを工夫して非周期系でできるようにするための、基礎フレームワークを一生懸命、ここ何年か作ってるという段階です。

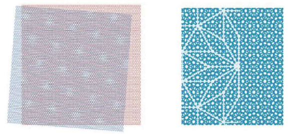
また周期系の話になるんですが、トポロジカル物質っていうのがまた別に、すごく大きな分野であります。

先ほど、話題に挙げていただいた物質ですね。

越野　本来連続なものを、とびとびの数で分類できるのが、トポロジーですよね。このトポロジー的な数字が物質には沢山埋め込まれてて、それがいろんなとこに、物性として顔を出す。例えばバンドギャップとか量子ホール効果とか。これをどうやって周期のない、理論のない世界に展開するかってのも一つのテーマです。コロナ禍で外に行くことができないから、こんな自由研究みたいなノリで学生さんと2人でやってたんです。それが意外といろんなとこで話すと、興味持ってもらえる（笑）。だから今後は実験の人もいっぱいいるんで、是非巻き込んで行きたいですね。

他の方ということで。先生が班長のA04班の、領域での位置を教えていただけますか？

越野　僕は先ほども言いましたが、理論なんで作るわけじゃなくて、計算して色んな物性量を出しましょう、と。でも、笹川さんはトポロジカル絶縁体とか超伝導体とかの「単純じゃない物質」を綺麗に作る合成のプロですし、高村さんはシリセンやゲルマネンとかの「炭素と周期表上では近いけど、合成するのが難しい」そんな二次元物質を作ってAFMとかで測定する。蒲さんがMoS_2などの遷移金属ダイカルコゲナイドに対して、光をうまく使って実験する。各先生方が、皆さんそれぞれ違う研究内容をやられてるんです。



モアレグラフェンと準結晶（模式図）

実は理論は理論、合成は合成でって単純に分けちゃうと、インタラクションが無いんです。集まって会議しましょうっていったところで、全然話題に広がりもないし。

よくある問題点ですよね、それは。

越野　他の班でも実はそうやってあえて混ぜているんですが、このA04班が分かれなかったことが一番顕著なグループかもです（笑）。なので、4人で足並みそろえて何かやろうって感じじゃなくて、皆さんでそれぞれやっていたもので共同研究をやる感じですかね。

最後に、今後の領域および先生のご研究の展望についてコメントをお願いします。

越野　「今までの物質科学系にはなかった考え方から新しい学理を作っていきたい」というのが、この領域のある種の至上命題で、自分もモアレや準結晶とかの理論計算でその一翼を担っています。また、そもそも理論自体、例えばある二次元物質を作ってそれを色々組み合わせた時に、「じゃあどういう面白い現象が出ますか？」っていうのを予言するのが役割の一つ。また実験で見つかった面白い現象を、「じゃあ何でそんなことが起こったの？」を説明するっていう役割がもう一つ。なので、その両方の役目を果たしていきたいと思っています。

直近は準結晶のバンド理論が確立したことで、いろんな物性を作る土台となったと思っていて、是非領域の他の方と一緒に具体的な話をしていきたいですね。

Interviewee

越野 幹人
大阪大学
大学院理学研究科
教授

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2022年 9月22日）

NEWS Letter Vol. 7　モアレ模様から生まれる新しい物理学

ニュースレター Vol. 8 （2022.11.22 発行）

NEWS LETTER 08

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3回領域会議レポート

参加者全員による記念撮影

第3回 北海道大学
フロンティア応用科学研究棟　レクチャーホール（北海道 札幌市）

2022年10月14日および15日の二日間、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3回領域会議が開催されました。

オンライン開催となった前回の第2回領域会議とは異なり、今回は晴れて対面での開催となりました。また公募班の研究者の方々や各研究室の学生さんも一堂に会して、盛大な会となりました。

計画班の共同研究の進捗と公募班の研究計画を中心に、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。

北海道大学　フロンティア応用科学棟

口頭発表の様子

研究発表では、東京大学の町田グループによる二次元結晶制御が話題になりました。転写装置を利用して2層WTe_2の0度回転と180度回転の試料を作り分け、結晶内の反転対称性の有無を京都大学の松田グループと共同で、SHGにより確認しました。さらに東京大学の坂野グループが、レーザーARPESにおいてバンド構造を計測することで、これらの構造の明確な違いを確認することができました。このような研究は、対称性のエンジニアリングという新しい領域を開拓しつつあると同時に、「2.5次元物質科学」ならではの展開とも言えます。成長、物性、デバイスの多岐にわたる2日間の研究発表から、今後の進展が非常に期待されます。

フリーディスカッションとポスターセッション

1日目のホワイエにてポスターセッションも行われました。ポスターセッションの時間だけに留まらず、コーヒーブレイクにも非常に活発な議論が行われていました。研究者のみならず学生も積極的に議論に参加し、新型コロナのため直接発表の機会に恵まれなかったメンバーにとっては、とてもよい意見交換の場となりました。また、下の写真のように異なる強みをもった複数の研究者による共同研究の話なども進められ、対面ならではの良さが出ていました。

その後、初日の夜には十分に感染症対策を行った上で懇親会が開かれました。特定のメンバーで固まりすぎることはなく、各々自由に久しぶりの対面での歓談を、大いに楽しんでいました。

フリーディスカッション中のひとこま

学生さんからのコメント

「参加されている方々の分野が幅広く、自分たちの研究とは異なる研究をされている方の方が多かったので、話についていくのが難しいと感じる面は正直ありました。ですが、とてもチャレンジングな学びの場であったと思います」

「母国語とは違うということと、やはり分野が違う研究者の方が多かったので、説明がちゃんとできたか不安でした。でもこういう機会は貴重だと思うので、また参加したいです」

「自分と同じ研究をされている方が多く、立場の垣根を越えて気負わず話をできる場として、とても新鮮でかつ得難い体験をしたと思います。今後の研究のアドバイスも沢山いただけたのも、非常にありがたいです」

ポスターセッションの様子

理論のトリセツ・サンプル見本市

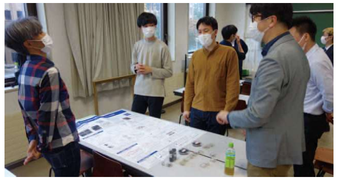
領域内共同研究の更なる活性化目的として、領域会議のメインプログラム終了後に、半日間の「理論のトリセツ」および「サンプル見本市」も企画されました。

「理論のトリセツ」では第一原理計算から大規模計算、そしてデータサイエンスまで、それぞれを得意としている研究者が、実験系の研究者を対象に分かりやすく説明を行いました。その後、実験系の研究者がどのように理論計算を取り込んで、研究内容を高めていくかといった議論が活発に行われました。

「理論のトリセツ」

「サンプル見本市」では、実験系の研究者が合成した二次元物質の単結晶や基板上の試料、Cu/サファイア基板上に合成された大面積グラフェンといった、多様なサンプルが展示されました。実物を直接見ながら説明を聞くことで詳細に知ることができ、新たな共同研究の話し合いが数多く進んでいました。

希望者のみの企画だったにもかかわらず、どちらも沢山のメンバーが参加し、非常に活発な議論が交わされており、本領域にとって非常に有意義な時間となりました。



「サンプル見本市」

Reporter

イラスト：門田 英子

村田 和香
領域広報担当
（サイエンスコミュニケーター）

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2022年 11月22日）

ニュースレター Vol. 9 （2022.12.15 発行）

NEWS LETTER 09

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

2.5次元物質の化学的応用: 光デバイスへ向けて

A05班 機能創出班 研究代表者
（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）

上野 貢生

北海道大学
大学院理学研究院

2022年度前期総まとめゼミ後のバーベキューにて

先生のご専門は化学ですが、今のご研究をされているきっかけは何でしょうか？

上野　化学の中でもメジャーな合成ではなく、反応機構の解明や反応制御に、ずっと興味を持っていたんです。分子レベルでは確かに反応は制御できますが、ちょっとそこからマクロスケールになると、途端に難しい。例えばナノ粒子。ナノ粒子1個は単結晶ですけど、そこに界面活性剤がくっついたりすると、表面や界面の状態が変化してしまいます。そこを人間の力で制御して化学反応場を人工的に作るような、新しい化学をやりたかったんです。

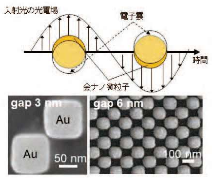
同じ条件で実験していたはずなのに実際に反応させたとき、人によって全然収率が違うなんてことが普通に起きます。そういうのが気になっちゃうんです（笑）。だから綺麗な系で、しっかり物理化学を明らかにしたいなと思ったんです。

確かに。その手の実体験は沢山あります（笑）

上野　例えば、マイクロ流路中においてAという液体とBという液体を反応させると、反応収率は流路の形が変わると比表面積や比界面積が変わることによって、見かけ上は変わります。でも本質的な量子収率は、変わらないんです。そこで、様々な物性が変化する表面・界面に関心を抱くようになりました。また、学生時代に金を使って、リソグラフィーという微細な電極を作る技術を身に着けていました。ドクターを取得後異動した先が北大の電子科学研究所で、クリーンルームや微細加工技術用の電子ビーム露光装置などがあったので、これを使って自分の得意なナノ加工と表面・界面の物理化学を組み合わせたら、新しい展開が生まれるなと。それで始めたのが、プラズモンの化学なんですね。

プラズモンとはどういったものなのでしょう？

上野　プラズモンはこの図のように、金属表面で自由電子を集団的に振動させることにより生じるナノスケールの光です。光を分子サイズレベルまで小さくすることができるので、光と物質の相互作用を極めて増幅することができます。また、プラズモンナノ構造にはこちらの電子顕微鏡写真に示すように数nmのギャップという、非常に光が増強する場があります。ただその場にぴったりと分子を持ってきたり、分子配向を揃えたりといった、分子を自在に扱うのって結構難しくて。そこで行き詰まったんですね。なんとか制御ないかと考えていた時に、2019年の秋に突然吾郷先生からお電話があり、この学術変革領域にお誘いいただいたんです。TMDCは単層で発光を示し、プラズモンとの相互作用を探索する励起子として有用で、プラズモン構造よりも大きいので、必ずナノギャップに励起子が存在し、その配向制御も Au/WSe_2 ナノ構造の電子顕微鏡写真に示しますように容易に行えるということで、光化学を研究している我々にとって何と魅力的な材料だなと思ったのが第一印象です。



光によるプラズモン共鳴の励起と
ナノギャップ金構造の電子顕微鏡写真

そこから「2.5次元」へと、研究対象を移行されたのはどうしてですか？

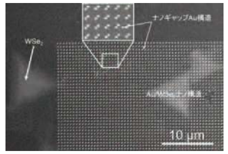
上野　プラズモンから2.5次元へではなくて、ちょうどやりたかったことが、この領域の先生方と一緒に研究することで初めて出来そうと感じたんです。例えば松尾先生のご研究では、グラファイト構造の間にピラー構造があって、そこにガス分子が取り込まれるんです。もし、中赤外に共鳴を有するプラズモン構造を組み合わせると、分子振動モードとプラズモンが、ダイポールーダイポール相互作用によってカップリングして、スペクトルの変調が期待されます。それによって少数のガス分子を高感度に検出できる可能性が生じます。太陽光発電の展開を見据えている WSe_2 と MoS_2 のヘテロナノ構造も、プラズモンによってその電荷分離の効率を向上させたり、プラズモン増強を使って光吸収を増幅することが期待できます。金の電子を MoS_2 のコンダクションバンドに注入してあげて、エネルギーの高い電子を使って水を還元して水素を発生させたりとか。

同時に、赤外のプラズモンとしてグラフェンのナノ構造も作ってます。可視・近赤外波長域における励起子とプラズモンとの強結合だけではなく、TMDCの振動モードと赤外のプラズモンとのカップリングに関する研究を行っています。赤外のプラズモンによる光電場増強効果に基づいて、光学フォノンが増強され励起子や分子の無輻射失活速度を増大させることができ、化学センサーや化学反応制御に応用することが期待されます。そのためにはグラフェンが必要ですし、TMDCと金ナノ構造を積層する技術やグラフェンを積層する技術も必要です。またグラフェンにインターカレーションして分子を取り込む技術とTMDCを大面積で合成する技術も必要になってきて、それらはこの領域の先生方が研究されていらっしゃる内容です。

直接の研究ターゲットとして「2.5次元物質」があるのではない、けれど絶対に必要と。

上野　そうなんですよ。少し話がずれますが、この領域の名前の「2.5次元」って吾郷先生が考えた単語なんですけど、実はこの名前に最終的に決まる前に、物理の人の中には「2.5って意味のない次元だよね」って戸惑いがあったみたいなんです（笑）。整数じゃない次元なんてありえないじゃないですか。でも私は強く同意しました。理由は、まさにこの「.5」っていうところなんです。私はプラズモンを研究してますが、これは二次元材料ではありません。でも二次元材料とプラズモンとのカップリングで新しい機能を出したいとか、新しい物理化学を理解したい。この「.5」の中に、二次元材料ってこの領域の人たちがみんなやってる研究と、私のような全く異なる研究内容を混ぜる。いや「積層する」、そういう意味合いを持たせたかったんです。

つまり「.5」っていうのは、何でも置き換えることができるんです。機能だったり物質だったりインターカレーションだったり。そこから私のような二次元材料の研究をバックグラウンドに持たない研究者にとっても、非常に参画しやすい名前になったなあ、と。



Au/WSe_2 ナノ構造の電子顕微鏡写真

先生が班長のA05班の、領域でのポジションを教えていただけますか？

上野　私は光を使った化学センサーに関する研究、領域内の共同研究でエネルギーデバイス、光デバイスを中心にさせていただいてます。もう一つはエネルギー変換でも、発光とかあるいは太陽電池とか。MoS_2 と WSe_2 のヘテロの構造に、プラズモンを組み合わせて光電変換とか発光ですね。後は MoS_2 っていう長汐先生や宮田先生とかがやられている遷移金属ダイカルコゲナイドは、電子伝導体のエネルギーが割とネガティブなんですね。なので水素発生にすごい適しています。またガスのセンサー、ガスは非常に高感度に濃縮したりしなければいけないんですけど、濃縮するのは松尾先生がやってるような、グラファイト構造の間にピラー構造があって、そこにガス分子を取り込むことで濃縮が可能になります。

この領域のサブタイトルが「社会変革へのパラダイムシフト」ってある以上、社会に還元できるものを作るのが、領域の使命としてあると思うんですよ。そこを強く意識した班がA05班ですね。

最後に、今後の領域および先生のご研究の展望についてコメントをお願いします。

上野　改めて考えていくと今のテーマは、やはり2.5次元物質科学研究者全員の力を組み合わせることで、初めてできる研究だと思ってます。その中でも化学センサー、エネルギー変換。この二つに絞って高効率なデバイスを作る。そしてこの領域のサブタイトルにもある「社会変革に向けたパラダイムシフト」に向かっていけるように、頑張っていきたいなと思っております。

Interviewee

上野 貢生
北海道大学
大学院理学研究院
教授

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2022年12月13日）

ニュースレター Vol. 10 （2023.1.12 発行）

NEWS LETTER 10

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 1

A02班
集積化班 公募班
（ファンデルワールス積層構造のための
新規バッファ層物質：硫化ガリウムの応用）
上野 啓司

×

A01班
物質創製班 公募班
（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）
加藤 幸一郎

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？

上野　私はいわゆる二次元の層状物質の研究は、卒業研究のときからずっとやっています。研究室配属のときに、指導教官の小間篤先生が「いろんな種類がある層状物質を積み重ねることで何か新しい物性が現れないか、ということをやりたい」と熱く語られまして、それに興味を惹かれ、今に至るという感じです。実はこの学術変革領域の前身の「原子層科学」にも、総括班と応用班の一員として参加していました。ですので、この領域の多くの先生とはそのときからお付き合いがあります。そのご縁もあって、今回の「2.5次元」にも参加させていただきました。

加藤　僕は東工大の齋藤晋先生のもとで物性物理の理論でドクターをとりました。なので、A01班のリーダーの岡田さんと同門の出身なんです。卒業後とある企業に入ってから今いる九大に来ることになったんですが、その企業でやっていた研究は創薬とか、高分子系のポリマー材料だったので、まずはそれらをメインで研究していました。でもやっぱりナノカーボンや層状材料とかの物性物理の研究も、またやれたらいいなってずっと思ってたんです。そこでこの2.5次元が立ち上がったと聞き、これをきっかけにまた昔お世話になった先生方と、是非一緒に新しい研究にチャレンジしていきたいなと思って参加しました。

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？

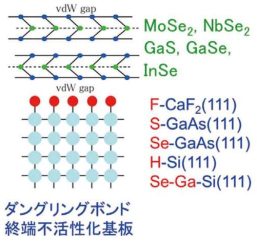
上野　私自身はほぼ二次元しかやらないので、他の次元の研究のために使える二次元層状物質を提供するというところでしょうか。その中で今回のメインテーマは、硫化ガリウムなんです。

これはこの領域でもよく使われる遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC）と比較してバンドギャップが広く、絶縁性がより高いんですね。実際に昔この結晶を使って電界効果トランジスタを作ってみたことがあるんですが、全然電気が流れてくれない。それなら逆に、hBNのようにバッファ層として使えるんじゃないかと。高品質なhBNを作れる環境は未だに世界中で限られているのですが、硫化ガリウムの結晶は実験室の机の上に乗る電気炉でできる。そういう手軽なもので代用できないか、と考えたんです。またhBNと構成元素が全く違うので、積層構造をとった時に何か新しい発見があるのでは、とも期待しています。

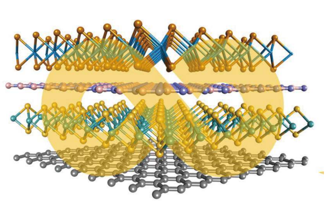
他にはTMDCの薄膜成長ですね。結晶性のいいものを作りたいときは800℃くらいまで温度を上げればいいのですが、もっと低い温度、できれば200℃以下のプラスチック基板が溶けない温度で、良質な膜を作れないか、という研究をしています。またうちの研究室のリムさんは宮田さんの研究室から異動したのですが、以前からカルコゲナイドナノワイヤーや、ナノリボンの研究をしているので、そちらはより2.5次元的です。

加藤　二次元材料自体いろいろな種類があって単純に「積み重ねる」だけでも、無限に近い数のパターンが考えられますよね。そういったことの最適化は、データ科学が得意とするところです。また、そのときにどういう物性が出るかっていうところは、第一原理計算が得意です。なので、2．5次元物質科学として私のところでやろうとしてるのは、第一原理計算とデータ科学の両立ですね。

1枚だけのグラフェンやhBNがどうなるかはよく知られてるんですけれど、それを「どういう順番で重ねるか」、「何層にするか」、さらに「2次元材料の構成を変える」という話があって、これらを総合的に組み合わせることで、どういった物性が出てくるのかというところを是非見ていきたいですね。



ダングリングボンドを終端した三次元物質上への
層状物質ファンデルワールス・エピタキシー



加藤研　研究テーマ模式図

また、一番シンプルな積層型の2.5次元物質をターゲットに、物性に深く関わるパラメータや因子のようなものを見つけられたらいいなと期待しています。

実のところ、やっぱり僕自身この2.5次元という領域が「戻ってきた」という感慨が深くて。ただブランクがあるので、領域の先生方には「今だったらこういう計算が面白そう」とか、様々なアドバイスをいただけたら嬉しいです。始めたてで、すぐにこのデータがありますとお見せできる状況ではないのですが、2年間頑張って領域に貢献したいと考えています。

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。

上野　他の次元の研究のために使える層状物質、特にカルコゲナイド層状物質の単結晶はほとんど提供できます。他には、剥離転写の実験をやってるんですけれども、なかなかうまくいかないところもあるので、町田さんや長汐さんに技術指導していただいて、共同研究を進めていきたいです。また以前の原子層科学の際に、理論講習会というものをやっていただいて、バンド計算とかラマンの計算ぐらいまではできるようになったんです。ですが、所属学科では分子の量子化学計算をする方が多く、固体結晶の第一原理計算は私もまだ自信がないところがあって（笑）。理論の方に是非教えていただければ。

加藤　昔はいろんな先生にお世話になってたんですけど、今現在何か一緒に共同研究してるかっていうと全然できてないという状況なんですね。なのでこれをきっかけにいろいろ新しく始められたらいいなというところがあって。そういう意味では岡田さんはずっと昔からお世話になっていますが、新しい分子を入れる前の受け入れ材料、母材としてこういう物性だといいんだよねっていう話や、こういうふうに積み重ねればそういう母材が見つかりますよみたいな、そんなところで連携ができたらなと考えてます。また町田さんの自動積層ロボットがありますよね、あれもういろいろこういうふうに積み重ねるとこんな物性になりそうですよみたいなところで連携して、積層させるのに面白い順番みたいなそんなところを私が提案させていただいて、実際に積んでもらったらどうなるか見ると面白いかな、なんて思ったりもしてますね。

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

上野　メインは硫化ガリウムをバッファ層として様々な層状カルコゲナイド半導体の電界効果トランジスタを作製し、その動作特性を低温まで測定して、バッファ層としての効果を検証することです。有効性が確認できたら、領域内の皆様にも利用していただければと思います。またそれ以外の層状物質についても、単結晶を成長するということでお手伝いができればと。ご面識ある先生方がたくさんいらっしゃいますし、公募班での2年間に限らず、その後もご要望があるかぎりお手伝いします。

加藤　私の方も計算とデータ科学とっていうところなので、「やっぱり今までそんな積み重ね方は考えてなかったな」とか「こんな面白いことが起こりそう」みたいな、そんな可能性を示せたらいいなと思ってますのでいろいろそんなことをやっていきたいなと思ってます。先ほど上野さんが原子層科学時代の講習会の話をしてくださいましたが、この領域でデータサイエンス講習会をもしやる、という話になればお手伝いできるかなと。また色々と違う切り口で貢献できたら、更にできることもあるかななんて思っています。

Interviewees

上野 啓司
埼玉大学
理工学研究科
教授

加藤 幸一郎
九州大学
大学院工学研究院
准教授

（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1月10日）

NEWS Letter Vol. 10　公募班メンバー特別対談 1

ニュースレター Vol. 11 （2023.1.16 発行）

NEWS LETTER 11

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

2022年 イベントレポート（サイトビジット／若手交流会）

サイトビジット

北陸先端科学技術大学院大学（JAIST）
（石川県能美市）

2022年6月6～7日の2日間にわたり、領域内の連携及び共同研究の促進のため、本領域の構造解析の共同利用拠点でもある北陸先端科学技術大学院大学（JAIST）にて、領域内サイトビジットが開催されました。第1回となる今回は、領域代表の吾郷を含め6名が参加しました。

施設見学から始まり、実際に2021年度に導入されたTEM用の通電2軸大気非曝露ホルダーと収差補正TEMを使用して、シリコンチップに転写した２.５次元物質の様々なモアレ構造を観察する様子を見学しました。参加者からは「可能性が広がりそう」との声が聞かれました。

その他、高村研のフロランス講師による超高真空走査プローブ顕微鏡を用いたシリセンなどの研究紹介や、グラフェンのNEMSデバイスで有名な水田研究室を訪問し、研究員の方々が、「最新のグラフェンセンサやNEMSデバイスの研究成果」を紹介してくださいました。

また、共同利用拠点の利用に関する議論や、領域運営に関する意見交換会が行われ、今後の共同研究につながる交流の場となりました。

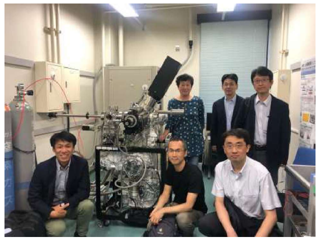
北陸先端化学技術大学院大学（JAIST）

JAIST所属 高村からのコメント

「今回のサイトビジットにより、新たな共同研究が何件も始まりました。今回訪問されなかった皆様も、お時間のある時にぜひお立ち寄りください」

あいにくの天気でしたが、領域内共同研究や共同利用拠点の利用に一段と弾みがつく、有意義な時間となりました。

今後も積極的で効果的な共同研究のために、各所にてサイトビジットの開催を検討しています。領域メンバーの皆さんは共同利用拠点を積極的にご活用ください。



サイトビジット参加者集合写真

通電2軸大気非曝露ホルダーなどの主要設備

若手交流会

名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー（VBL）
(愛知県名古屋市)

2022年6月17日、本領域による第1回若手交流会が名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー（VBL）にて開催されました。今回は若手研究者・学生の研究交流や友好を深めることを目的として、全国から26名の若手研究者と学生が参加しました。

まず始めに各自スライドを作成し、自己紹介や研究内容の紹介をして参加者同士お互いを知るきっかけを作りました。その後、フリーディスカッションや共同研究相談の時間が設けられ、同世代の研究者間で積極的な情報交換が行われました。日頃、全国各地の大学や研究機関で研究に励む若手研究者にとって、自らの研究の相談や悩みを打ち明けたり、互いの研究室の自慢をしたり、と、研究者の接点となる貴重な機会になったと思います。

また、A04班蒲江が所属する竹延研究室と、A05班大野の研究室のラボツアーも行い、参加者は真剣に耳を傾けていました。対面での交流は、若手研究者による新たな共同研究の芽となる貴重な時間となりました。

今後も若手研究者が活躍していけるような機会の提供を予定しています。若手研究者の皆さんは奮ってご参加下さい。皆さんの研究活動の活性化と継続的な交流を願っています。

若手交流会参加者集合写真

参加した学生さんからのコメント

「年齢の近い学生が多かったため気軽に研究についてのディスカッションができ、共同研究をしたいなどの話も上がるなど、刺激的な時間を過ごすことができたと思います。また、修士、博士学生関係なく、今後の研究もお互い頑張っていこうと支えあえる友人ができたため、非常に貴重な機会になりました。」

「若手交流会は、今後の2次元材料開発を担う若手同士で技術・情報交換できる点において、大変貴重で魅力的な会だと感じています。また、学会のような堅苦しさはなく、年齢の近い学生や先生方とフランクに交流することができました。特に、研究室に帰ってからも、研究の相談ができる関係性が構築できたことは、今後の研究にとって有意義なものとなりそうです。」

若手会担当 宮田からのコメント

「当初の予想以上に多くの学生や若手研究者の方に集まっていただき、楽しい交流会を開催することができました。改めて研究活動における、対面での交流の重要性を感じています。継続して交流会を開催し、領域の活性化に貢献できればと思います。」

Reporter

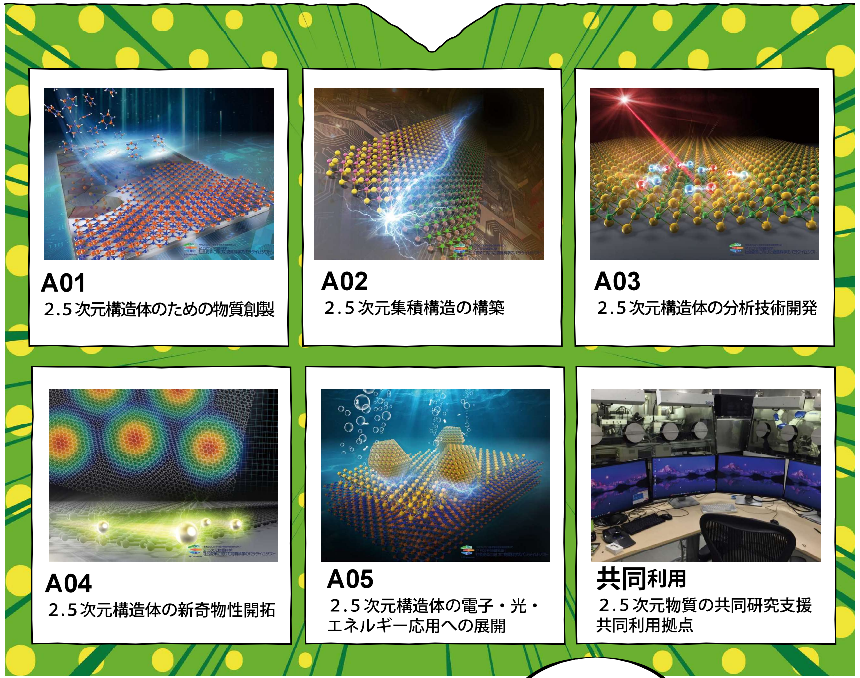
領域事務局　工藤 朋子
中村 奈津子

領域ホームページ　https://25d-materials.jp
（ニュースレター公開日：2023年 1月19日）

7-2
ニュースレター特別号　チラシ

グラフェンに代表される二次元物質は、材料や角度を任意に制御してファンデルワールス力により積層することができ、従来の結合に捉われない合成法を与えることから、物質科学に大きなパラダイムシフトをもたらすものです。
複数の二次元物質がもたらす新たな可能性を 0.5 次元と象徴的に表現し、オールジャパンの体制により、従来の物質科学を大きく変革する研究を展開していきます。

2.5 次元物質科学 領域代表者　吾郷 浩樹



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

詳しくはこちら

領域事務局　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内
〒816-8580　福岡県春日市春日公園 6-1
e-mail：secretary@25d-materials.jp　https://25d-materials.jp/

ニュースレター 特別号　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． アウトリーチ活動

2.5D Materials

8． アウトリーチ活動

8-1 A01 吾郷と A05 大野による高校生への支援協力

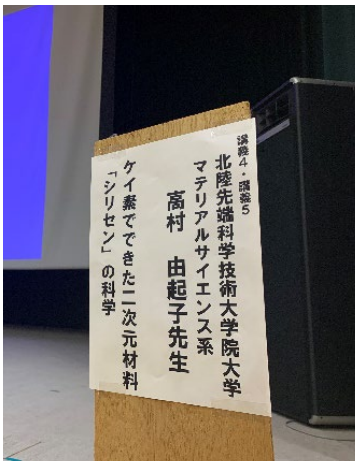
日本政策金融公庫主催の第 10 回高校生ビジネスプラン・グランプリに出場する洗足学園高等学校の高校生の雨滴発電に着目したビジネスプラン「傘による発電システムの開発、提供「あんぶらいと」」へのアドバイスを行った。これは A05 大野と A01 吾郷の成果を基にしたアイデアであることから両者が協力した。2023 年 1 月 8 日に開催された最終審査会でのプレゼンテーションでは提供した動画が紹介され、洗足学園高等学校は審査員特別賞を受賞した。

第 10 回 高校生ビジネスプラン・グランプリ 開催結果｜日本政策金融公庫（外部リンク）

8-2 A04 高村による石川県の高校理科部向け講演会

石川県高等学校文化連盟の依頼で、県内の理科部に所属する高校生 168 名と引率の先生が参加した講演会において「ケイ素でできた二次元材料「シリセン」の科学」の題目で講演を行い、本領域の取り組みについても紹介した。

日時：2022 年 11 月 11 日
場所：石川県立金沢泉丘高等学校



8-3　領域代表 吾郷によるサイエンスカフェ

九州大学と大野城市との連携イベント「ここふるサイエンスカフェ」において、領域代表の吾郷が講師をつとめ、36 名の参加者にグラフェンを通じた科学の世界を体験していただくとともに本領域の活動内容について紹介した。

日時：2023 年 3 月 3 日（金）19:00～20:30
場所：大野城心のふるさと館

9．　海外派遣報告

2.5D Materials

9． 海外派遣報告

A03 西堀研 高橋 聖弥さん（筑波大学 物理学学位プログラム D1）

派遣期間：2022 年 9 月 19 日～2022 年 12 月 7 日

派遣先：オーフス大学（デンマーク）

「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・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を観測するなど、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。

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

最初に購入した直行便のチケットがロシアーウクライナ間の戦争の影響によりフライトが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。

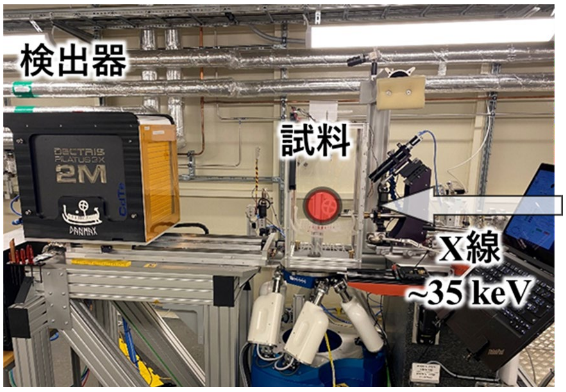
留学中はオーフス大学の学生宿舎に宿泊しました。寮はトイレやシャワールームを含め男女混合で、ジェンダーバランスに配慮されていました。デンマーク人は非常に友好的で、寮では“Common dinner”と呼ばれる食事会や、毎週金曜日には大学内の至る所で”Friday Bar“と呼ばれるイベントが開催されました。Friday Bar は学生が運営するバーで、お酒を飲みながら研究の話や、雑談をしたり、ボードゲームを楽しんだりしました。

オーフス大学の学生宿舎

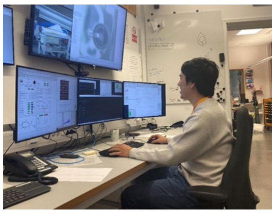
Common dinner の様子

Friday Bar の様子

11 月下旬に放射光施設 MAXIV のビームライン DanMAX で水熱合成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。



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

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 $P\text{-}3m1$ の六方晶で、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。

１０．　共同利用拠点

１０. 共同利用拠点

１０-１　共同利用拠点一覧

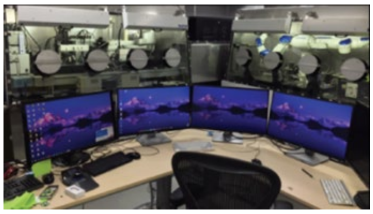
「2.5 次元物質科学」領域では、領域研究を一体的に推進するため、領域内の研究者および学生が無償で利用できる共同利用拠点を全国 5 カ所に設置している。
各拠点における装置や運用方法については、以下の表の通り。

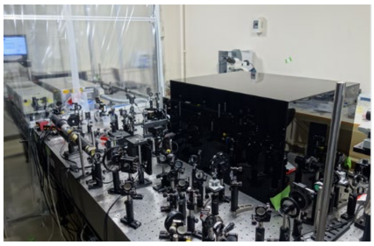
「2.5次元物質科学」領域　共同利用拠点一覧

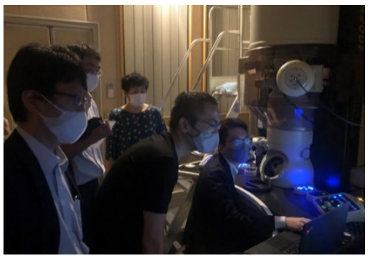
<table>
<tr><th>拠点</th><th>装置</th><th>運用方法</th><th></th></tr>
<tr><td rowspan="2">合成拠点

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>

１０-２　共同利用拠点 利用状況

４月と 10 月の半期ごとに、各拠点における利用状況調査を実施している。

領域発足からの半期ごとの利用回数は上昇傾向にあることから、共同利用拠点を利用した領域内共同研究が活発化し、本領域の研究活動に大きく貢献していることがわかる。

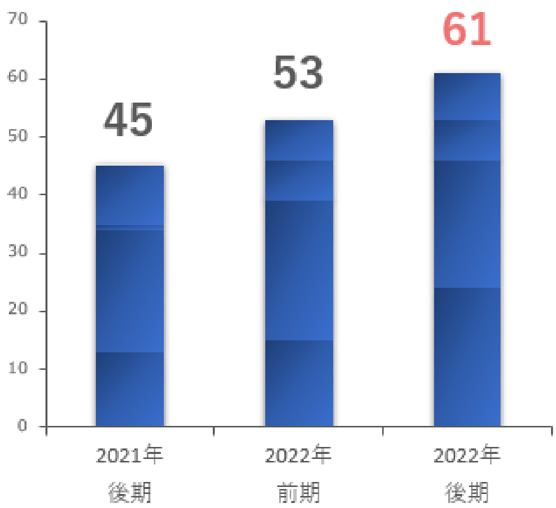
■内容別利用回数／半期　（回）

利用方法	2021年後期	2022年前期	2022年後期
サンプル提供	11	14	24
依頼分析	0	3	10
訪問実験	31	35	26
利用相談	2	0	1
その他	1	1	0
利用回数 合計（回）	45	53	61

＊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）

共同利用拠点　利用状況（半期毎の利用回数）



共同利用拠点　利用回数（利用方法別）