

領域略称名：2.5次元物質  
領域番号：21A206

令和6年度  
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」  
に係る中間評価報告書

「2.5次元物質科学：  
社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」

領域設定期間

令和3年度～令和7年度

令和6年6月

領域代表者 九州大学・総合理工学研究院・主幹教授・吾郷 浩樹

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	6

## **研究領域全体に係る事項**

4	研究領域の目的及び概要	10
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	12
6	研究の進展状況及び主な成果	14
7	研究発表の状況	24
8	研究組織の連携体制	29
9	若手研究者の育成に係る取組状況	30
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	31
11	研究費の使用状況・計画	32
12	今後の研究領域の推進方策	33
13	総括班評価者による評価	35

**研究組織**

(令和6年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

**1 総括班及び総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	21H05232 2.5次元物質科学の総括	吾郷 浩樹	九州大学・総合理工学研究 院・主幹教授	12
A01 計	21H05233 2.5次元構造体のための物質創製	岡田 晋	筑波大学・数理物質系・教授	4
A02 計	21H05234 2.5次元集積構造の構築	宮田 耕充	東京都立大学・理学研究科・ 准教授	4
A03 計	21H05235 2.5次元構造体の分析技術開発	松田 一成	京都大学・エネルギー理工学 研究所・教授	4
A04 計	21H05236 2.5次元構造の新奇物性開拓	越野 幹人	大阪大学・大学院理学研究 科・教授	4
A05 計	21H05237 2.5次元構造体の電子・光・エネルギー 応用への展開	上野 貢生	北海道大学・大学院理学研究 院・教授	4
総括班及び総括班以外の計画研究 計 6 件 (廃止を含む)				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：X00

研究課題名：2.5次元物質科学の総括

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	吾郷 浩樹	九州大学・総合理工学研究院・主幹教授	領域代表・総括班代表
分担	岡田 晋	筑波大学・数理物質系・教授	事務担当・理論計算支援
分担	宮田 耕充	東京都立大学・理学研究科 准教授	若手育成支援
分担	松田 一成	京都大学・エネルギー理工 学研究所・教授	研究推進支援・共同利用拠点運営
分担	越野 幹人	大阪大学・大学院理学研究 科・教授	理論計算支援
分担	上野 貢生	北海道大学・大学院理学研 究院・教授	情報発信支援
分担	長汐 晃輔	東京大学・大学院工学系研 究科・教授	情報発信支援・共同利用拠点運営
分担	町田 友樹	東京大学・生産技術研究所 教授	共同利用拠点運営
分担	櫻井 英博	大阪大学・大学院工学研究 科・教授	研究推進支援
分担	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・教 授	国際連携支援・共同利用拠点運営
分担	西堀 英治	筑波大学・数理物質系・教授	大型装置共同利用支援
分担	大野 雄高	名古屋大学・未来材料・シ ステム研究所・教授	産学官連携支援
合計 12 名			

研究項目：A01

研究課題名：2.5次元構造体のための物質創製

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	岡田 晋	筑波大学・数理物質系・教授	DFTによる新規物質の設計と計算支援
分担	吾郷 浩樹	九州大学・総合理工学研 究院・教授	二次元物質のCVD成長とインターカレーション

分担	櫻井 英博	大阪大学・大学院工学研究科・教授	有機合成に基づく擬二次元構造の創製
分担	渡邊 賢司	物質・材料研究機構・特命研究員	高品質 h-BN の高圧合成と気相成長
合計 4 名			

## 研究項目 : A02

### 研究課題名 : 2.5次元集積構造の構築

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	宮田 耕充	東京都立大学・理学研究科・准教授	2.5次元物質の化学気相成長と集積化
分担	町田 友樹	東京大学・生産技術研究所教授	ロボティック積層による集積構造の構築
分担	荒井 俊人	物質材料研究機構・独立研究者/主任研究員	液相/印刷プロセスによる自己組織化分子膜形成
分担	松本 里香	東京工芸大学・工学部・教授	インターカレーションによるナノ空間の活用
合計 4 名			

## 研究項目 : A03

### 研究課題名 : 2.5次元構造体の分析技術開発

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	松田 一成	京都大学・エネルギー理工学研究所・教授	2.5次元物質の光技術と機能創発
分担	西堀 英治	筑波大学・数理物質系・教授	先端放射光 X 線回折による 2.5次元物質の構造評価
分担	末永 和知	大阪大学・産業科学研究所教授	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
分担	坂野 昌人	東京大学・大学院工学系研究科・助教	2.5次元物質におけるバンド構造の直接観測
合計 4 名			

## 研究項目 : A04

### 研究課題名 : 2.5次元構造の新奇物性開拓

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
-------	-------	-------------	------

代表	越野 幹人	大阪大学・大学院理学研究科・教授	ハイブリッド・モアレ物質の物性理論と新機能開拓
分担	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・教授	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
分担	笹川 崇男	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授	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
分担	蒲 江	東京工業大学・理学院・准教授	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
合計 4 名			

**研究項目 : A05**

**研究課題名 : 2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開**

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	上野 貢生	北海道大学・大学院理学研究科・教授	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
分担	長汐 晃輔	東京大学・大学院工学系研究科・教授	2.5次元界面制御によるトランジスタ特性制御
分担	大野 雄高	名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授	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
分担	松尾 吉晃	兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授	2.5次元材料の蓄電デバイスへの応用
合計 4 名			

### 3 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
公 A01	22H05465 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	加藤 幸一郎	九州大学・大学院工学研究院・准教授	1
公 A01	22H05441 アトミックレイヤーファンクショナル化によるヤヌス原子層科学の開拓	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	加藤 俊顕	東北大学・工学研究科・准教授	1
公 A01	22H05456 大気・熱安定性に優れた 14 族 2.5 次元物質の創製と熱電応用への展開	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	黒澤 昌志	名古屋大学・工学研究科・准教授	1
公 A01	22H05447 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	田代 省平	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授	1
公 A01	22H05461 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	久木 一朗	大阪大学・基礎工学研究科・教授	1
公 A01	22H05471 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	毛利 真一郎	立命館大学・理工学部・准教授	1
公 A01	22H05468 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	蓬田 陽平	東京都立大学・理学研究科・助教	1
公 A02	22H05445 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	上野 啓司	埼玉大学・理工学研究科・教授	1
公 A02	22H05458 1.5 次元から 2.5 次元への展開に基づく新物質群創出	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	北浦 良	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点	1
公 A02	22H05462 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	田中 秀和	大阪大学・産業科学研究所・教授	1
公 A03	22H05448 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	杉本 宜昭	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	1
公 A03	22H05459 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	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	高橋 康史	名古屋大学・工学研究科・教授	1

公 A03	22H05469 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	令和4年度 ～ 令和5年度	柳 和宏	東京都立大学・理学研究科・教授	1
公 A03	22H05478 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	令和4年度 ～ 令和5年度	Lin Yung-Chang	国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・主任研究員	1
公 A04	22H05449 2.5次元物質における高効率スピン電流変換	令和4年度 ～ 令和5年度	塩見 雄毅	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
公 A04	22H05444 (廃止) 格子ひずみによるグラフェン超格子構造の開拓	令和4年度 ～ 令和4年度	友利 ひかり	筑波大学・数理物質系・助教	1
公 A04	22H05473 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	令和4年度 ～ 令和5年度	若林 克法	関西学院大学・工学部・教授	1
公 A05	22H05452 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	令和4年度 ～ 令和5年度	石井 史之	金沢大学・ナノマテリアル研究所・教授	1
公 A05	22H05463 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	令和4年度 ～ 令和5年度	小野 倫也	神戸大学・工学研究科・教授	1
公 A05	22H05470 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	令和4年度 ～ 令和5年度	河野 行雄	中央大学・理工学部・教授	1
公 A05	22H05472 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	令和4年度 ～ 令和5年度	山本 真人	関西大学・システム理工学部・准教授	1
公 A01	24H01198 データ駆動型2.5次元物質モアレ超格子の探索と物性支配因子の抽出	令和6年度 ～ 令和7年度	加藤 幸一郎	九州大学・大学院工学研究院・准教授	1
公 A01	24H01165 アトミックレイヤーファンクショナル化によるヤヌス原子層科学の構築	令和6年度 ～ 令和7年度	加藤 俊顕	東北大学・工学研究科・准教授	1
公 A01	24H01210 単一分子誘起2.5次元物質の創製と光物性・機能開拓	令和6年度 ～ 令和7年度	小澤 大知	国立研究開発法人物質・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・主任研究員	1



公 A01	24H01179 3D層状結晶が生み出す新しい2D物質の創製	令和6年度 ～ 令和7年度	相馬 拓人	東京工業大学・物質理工学院・助教	1
公 A01	24H01174 2.5次元凸凹ナノ空間の転写による二次元物質表面での分子配列制御	令和6年度 ～ 令和7年度	田代 省平	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授	1
公 A01	24H01187 ハイエントロピー遷移金属ダイカルコゲナイドの創製と物性開拓	令和6年度 ～ 令和7年度	平井 大悟郎	名古屋大学・工学研究科・准教授	1
公 A02	24H01190 材料次元性の異なるナノシート結晶の積層・集積と機能開発	令和6年度 ～ 令和7年度	菅 大介	京都大学・化学研究所・准教授	1
公 A02	24H01166 ナノ空間を活用した2.5次元TMDs層間化合物の創生と電子物性解明	令和6年度 ～ 令和7年度	菅原 克明	東北大学・理学研究科・准教授	1
公 A02	24H01197 2次元物質とペロブスカイトナノ構造から成る2.5次元物質の構造制御と光電子機能開拓	令和6年度 ～ 令和7年度	鈴木 弘朗	岡山大学・環境生命自然科学学域・助教	1
公 A03	24H01209 超高速・超広帯域近接場顕微分光で拓く2.5次元物質の光科学	令和6年度 ～ 令和7年度	熊谷 崇	分子科学研究所・メゾスコピック計測研究センター・准教授	1
公 A03	24H01175 走査プローブ顕微鏡を用いた単原子層物質への分子配列	令和6年度 ～ 令和7年度	杉本 宜昭	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	1
公 A03	24H01189 2.5次元材料の触媒活性サイトの電気化学イメージング	令和6年度 ～ 令和7年度	高橋 康史	名古屋大学・工学研究科・教授	1
公 A03	24H01200 原子層積層界面における界面構造と熱・電荷輸送の関係解明	令和6年度 ～ 令和7年度	柳 和宏	東京都立大学・理学研究科・教授	1
公 A04	24H01176 2.5次元物質の量子相における新奇高周波電磁応答の開拓	令和6年度 ～ 令和7年度	井手上 敏也	東京大学・物性研究所・准教授	1
公 A04	24H01177 2.5次元物質におけるスピン電流変換の制御と効率化	令和6年度 ～ 令和7年度	塩見 雄毅	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
公 A04	24H01202 超高速光計測で拓く原子層二次元物質の動的界面エンジニアリング	令和6年度 ～ 令和7年度	藤井 瞬	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・助教	1

公 A04	24H01212 インターカレーション技術を用いた磁性の制御と新規開拓	令和6年度 ～ 令和7年度	松岡 秀樹	東京大学・生産技術研究所・特任助教	1
公 A05	24H01196 計算科学による2次元ナノ空間でのキャリア伝導と物質創製プロセスの解析・デザイン	令和6年度 ～ 令和7年度	小野 倫也	神戸大学・工学研究科・教授	1
公 A05	24H01206 強相関ゲート二次元半導体FETの創製	令和6年度 ～ 令和7年度	山本 真人	関西大学・システム理工学部・准教授	1
公募研究 計 40 件 (廃止を含む)					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

## 研究領域全体に係る事項

### 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

#### 1. 学術的背景と目的

グラフェンの剥離による興味深い物性が2004年に報告されたのを契機として、世界中で二次元物質に関する研究が活発になされてきた。なぜなら、二次元物質においては、(1) 原子レベルまで薄くすると、量子サイズ効果によって特異的なバンド構造をもつようになり、それによって非常に優れた物性やユニークな特性が得られる、(2) 導電性のグラフェン、半導体の遷移金属ダイカルコゲナイド、絶縁性の六方晶窒化ホウ素、さらには超伝導体や磁性体など、二次元物質の豊富な材料群が利用できる、(3) 集積回路やフレキシブルデバイス、光デバイスなど最先端の応用が期待できるからである。これらの二次元物質特有の特徴は物質科学の研究領域を大きく広げるもので、社会や産業にとっても極めて重要である。

単独の二次元物質に加え、複数の二次元物質の組み合わせは、さらに興味深く、新たな学術と応用の推進につながる。特に、単独の二次元物質では得ることができない予想外の物性や現象が、複数の二次元物質の共奏によって得られることが明らかになってきた。例えば、グラフェンを六方晶窒化ホウ素で挟むことでグラフェンの移動度は十倍以上に向上し、二枚の二次元物質を積層してできるモアレ超格子により、超伝導状態が生ずるなど、単独のシートでは得ることのできない物性が発現する。さらに、積層した層間にはユニークな二次元ナノ空間が存在し、そこに挿入された分子やイオンによる新構造や物性発現、そしてエネルギー応用までが可能となる。

つまり、二次元物質の組み合わせは、1+1が2以上にもなる、あるいはXやYのように異なる次元の物性につながる可能性を示しており、物質科学の新たなフロンティアにつながるものである。さらに、これら二次元物質を人為的に制御して積層することは、ファンデルワールス力を人工的に制御して物質を創出する新たな方法を与えるものであり、材料創製にパラダイムシフトをもたらす。そこで本領域では、多種多様な二次元物質に「集積の自由度」と「二次元ナノ空間」という新たな考えを導入し、複数の二次元物質が作り出す新たな可能性を0.5次元と象徴的に表現することで、従来の研究から大きく飛躍した「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」の学理構築と応用を、オールジャパンの体制により実現することを目指している。具体的には、図1に示すように、4つの研究課題、① 新物質・高結晶合成、② ファンデルワールス積層の科学、③ 二次元ナノ空間の科学、④ 機能発現・応用の推進を中心に取り組んでいる。

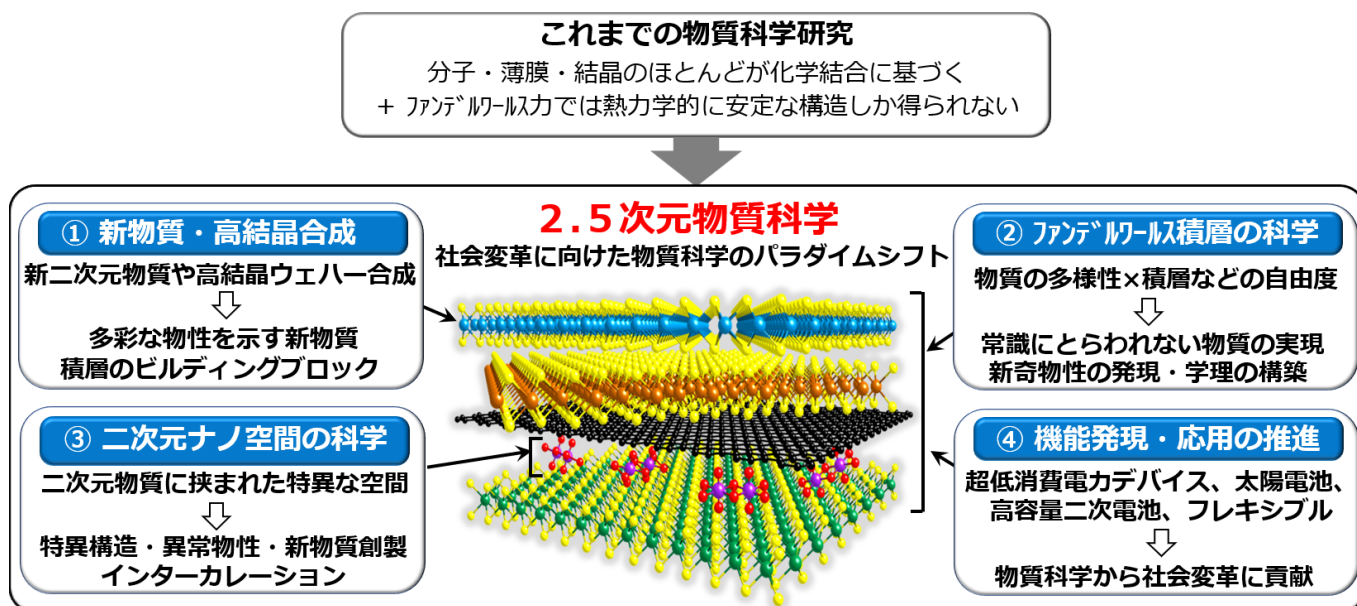


図1 本領域「2.5次元物質科学」の従来の物質科学研究との違い、ならびに重点研究課題

本領域の研究は学術と社会に大きなインパクトと波及効果を与えるものである。特に、図 2 に示すように、物質創製、新規現象や物性発現を通じて学理を構築し、さらに実際の応用を通じて社会変革の礎となることが期待できる。

**これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換する点**

- [1] ファンデルワールス相互作用の人為的制御により新たな物質創製と学理構築につながる
- [2] 二次元ナノ空間での物質科学の展開により、新規な現象や物性発現につながる
- [3] エレクトロニクス、エネルギーなど、2.5次元物質の応用を通じて社会変革につながる

図 2 本領域の推進によって期待される学術の変革・転換

**2. 領域の構成と運営体制**

領域として高いレベルの学術研究を展開するため、本領域では図 3 に示すように、**合成・集積・分析・物性・応用を担うチームからなる有機的なネットワークの形成を目指した**。具体的には、高品質の二次元物質を合成する A01 班、二次元物質をロボットなど様々な手法で集積して 2.5次元化する A02 班、極めて薄い 2.5次元物質を高感度で分析する A03 班、2.5次元物質の電子・光・磁気特性を測定するとともに理論構築を行う A04 班、そしてフレキシブルデバイスや発電・蓄電などの応用を進める A05 班の 5 班集体体とした。総括班は領域会議やワークショップ、セミナーなどの様々なイベントを通して、これら 5 班の連携を促進する。

さらには、**領域内に共同利用拠点を設置し、サンプル提供、積層支援、分析支援など組織的に領域内共同研究を促進する仕組みを導入した**。後述するように、これらの共同利用拠点は効果的に機能しており、領域内共同研究の発展に非常に大きな役割を果たしている。**さらには、若手育成のための海外インターンシップ支援や若手研究会、新産業創出に向けた産学官連携を推進するオープンイノベーションミーティングなど精力的に行ってきた**。



図 3 領域の組織構成。合成、積層、分析、物性、そして応用まで強固なネットワークで、世界をリードする学術と応用の研究を展開する。さらに、共同利用拠点を設置して、研究の活性化を促す。

**3. 領域終了後に期待される成果等**

領域立ち上げから 2 年半が過ぎた現在、領域内共同研究を通じて世界を先導しうる高いレベルの研究成果が着実に得られており、**Nature Electronics, Nature Communications など、多くの高インパクト論文が掲載されるようになってきた**。領域終了後に期待される大きな視点に立った成果を図 4 に示す。個別の学術的成果として、以下のような点が挙げられる。(1) 2.5次元物質の構成要素となる層状物質の高品質ウェハーレベルでの合成、(2) 層状物質の高度な積層技術や大面積転写技術の確立、(3) モアレをはじめとする、2.5次元ファンデルワールス系における多様な新奇物性の発現と学理構築、(4) 若手による新分野への展開や多くの人材の輩出、(5) 産学官連携を通じた成果の展開。このように、我が国の科学技術の発展に大きな貢献をすると期待できる。



**領域後に期待される成果**

- 2.5次元物質の学理の構築と学術の発展
- 次につながる国内異分野ネットワークの広がり
- 材料科学での国際ネットワークの強化
- 日本のサイエンスのプレゼンス向上
- 半導体などの新産業の興隆を通じた社会変革
- 次世代をリードする研究者の創出

図 4 本領域の終了後に期待できる成果



## 5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 【審査結果の所見における留意事項】

個別研究や共同研究の成果の単純な寄せ集めにならないように、領域設定期間内に構築する学理のイメージを明確にしながら領域内で共有し、各研究契約や参加研究組織の枠を超えた有機的な連携を強化する領域運営が望まれる。

2021年9月の領域採択時から、上記の所見を常に留意しながら領域運営を行ってきた。ここでは(1)領域運営の組織的な取り組み、(2)領域内の連携状況、(3)領域内連携によって得られてきた代表的な研究成果の3点について説明する。

### (1) 領域運営の組織的な取り組み

**1-1. 領域会議：**領域内の共同研究を推し進めるためには、対面での議論や交流が不可欠である、という領域代表の考えに基づき、(コロナ禍でやむを得なかった1回を除いて) **全ての領域会議を対面のみで行った**(図1a)。毎回、**領域メンバー全員が研究発表を行い、かつ議論の時間を十分に取った結果**、後述するように、数多くの共同研究がスタートし、多数の共著論文の発表につながってきている。さらに、議論を一層深めることができるよう、ポスター発表も2年目から継続して開催している(図1b)。

**1.2. オンライン領域セミナー：**年2回開催する領域会議を補完し、領域メンバーの連携をさらに促進するため、オンラインでの領域内セミナーを行ってきた。これまで **25回もの領域内セミナーを開催し、領域メンバー間での研究内容の周知とコミュニケーションをより密にすることができている**(図1c)。

**1.3. 共同利用拠点：**領域の総括班予算を用いて **4か所の共同利用拠点を整備し、領域内の研究者が、サンプルや分析装置などに自由にアクセスできるようにした**(合成(九大:吾郷)、集積(東大:町田・長汐)、分析【光】(京大:松田)、分析【構造】(北陸先端大:高村))(図1d)。これらの拠点は、共同研究の促進に大きく役立ち、これまでの **2年半で約250件も利用され、多くの論文発表につながってきている**。利用のうち訪問実験が半数を超え、**人的交流を含めて領域内共同研究のエンジンとして大きな役割を担っている**。

**1.4. 各種交流イベント：**領域会議のサテライトイベントとして、図1eに示す「**サンプル見本市**」や、「**理論相談会**」などを対面で開催してきた。前者では実際の試料を見ながら共同研究の相談ができ、後者では実験研究者が理論研究者のサポートを得られるなど、**2.5次元物質の学理構築で重要となる実験と理論の融合を進めた**。

**1.5. 国際ワークショップ：**EUの巨大プロジェクトであるグラフエン・フラッグシップ、米国ブルックヘブン研究所、日中韓3か国、チェコやケンブリッジのグループとのワークショップなど、**多数の国際的な会議を開催した**(図1f)。特に、ブルックヘブン研究所と行ったワークショップでは500名もの参加登録があり、15のワークショップの中で参加者が最も多く注目を集めていた。さらに、**海外の研究者による**

**オンライン国際セミナー(8回)**も企画して国際連携を進め、複数の国際共同研究につながった。

**1.6. 組織運営：**HP、メンバーリスト、Slackを活用して、領域内の有機的な連携を進めた。「さん」付けを奨励し、**研究者間の垣根を取り払うことに努めた**。



図1 領域内の有機的な連携を目指して行った領域内の活動の様子

## (2) 領域内の連携状況

先に示した組織的な取り組み、そして領域代表の継続的な動機付けにより、非常に多くの共同研究が展開されている。図2に研究者間の共同研究を実線で示している。特に中央に位置する計画研究者が中心となって共同研究を行い、それを囲む公募研究者が領域研究の幅や分析手法を広げるのに貢献している。

この2年半の間に、合計177件の共同研究が行われている（計画⇄計画78件、計画⇄公募79件、公募⇄公募20件）。特筆すべき点は、3名以上の研究者による共同研究が多く行われていることである。例えば、合成研究者、物性測定の実験研究者、理論計算の研究者などが関与して、一報の論文として発表されている。このことは、領域内のネットワークが極めて有効に機能し、レベルの高い研究につながっていることを示している。これまで領域から発表した209報の論文のうち、2名、3名、4名の領域研究者が共著になった論文はそれぞれ81報、35報、10報と非常に多く、有機的な連携体制が顕著に表れている。

## (3) 領域内連携により得られた研究成果

ファンデルワールス積層の科学は単一のモアレ励起子による発光 (*Nature Commun.* 2024) やバルク結晶とは異なる対称性で積層した系におけるバンド構造や電子輸送の変化の実験観測に大きな進展があった。また、合成、インターカレーション、電子顕微鏡、電池の研究者によって二層グラフェンなどのインターカレーションで大きな進歩があった (*Nature Commun.* 2024)。さらに、合成と転写、THz応用、電子顕微鏡の研究者間の共同研究に関して進展があった (*Nature Electron.* 2024)。他にも、TMDの上下で異なるカルコゲン原子で終端した「ヤヌスTMD」は計画班、公募班の多くのメンバーを巻き込んで、著しい進展が見られた (*ACS Nano* 2024 など)。CVD法による多層hBNの大面積合成とグラフェンの移動度向上 (*Nature Electron.* 2023) も特筆できる成果である。

### 【審査結果の所見における参考意見】

- ・新規物性の開拓、新学理の構築という観点から、理論系研究の強化が必要ではないかという意見が複数あった
- ・計画研究の中には、2.5次元物質というコンセプトと整合性の無い研究内容も見受けられるという意見が複数あったため、領域代表がリーダーシップを発揮して、領域のコンセプトに即した運営を行うことを期待する。

理論系研究の強化については、公募研究の公募の際に理論研究者を強く求めるというメッセージを込めた結果、計画研究者2名に公募研究者が4名加わり、領域として理論面の強化につながった。特筆すべき点として、計画班のモアレの理論物理の研究者と公募班のデータサイエンスの研究者の共同研究によって、網羅的に2.5次元積層系を理解・予測する世界で初めての学理の構築も進んでいる。

2.5次元物質と整合性がない研究内容が見受けられたというコメントに関しては、領域代表の考えからあえて分野が遠い研究者を計画に含めたためである。学術を変革するという大きな目的には、分野が近い研究者だけの領域では不十分であり、真の学術の変革には、異なる分野の研究者の協働が必要であることから、領域会議や定期的なメール配信など折を見て領域代表が共同研究を促すとともに、共同利用拠点のメンバーにより強力にバックアップがなされている。例えば、有機化学研究者が合成した分子を二次元材料に集積化させて機能付与を行うなど、分野からやや離れた研究者も積極的に領域内共同研究を進めており、興味深い成果が得られつつある。

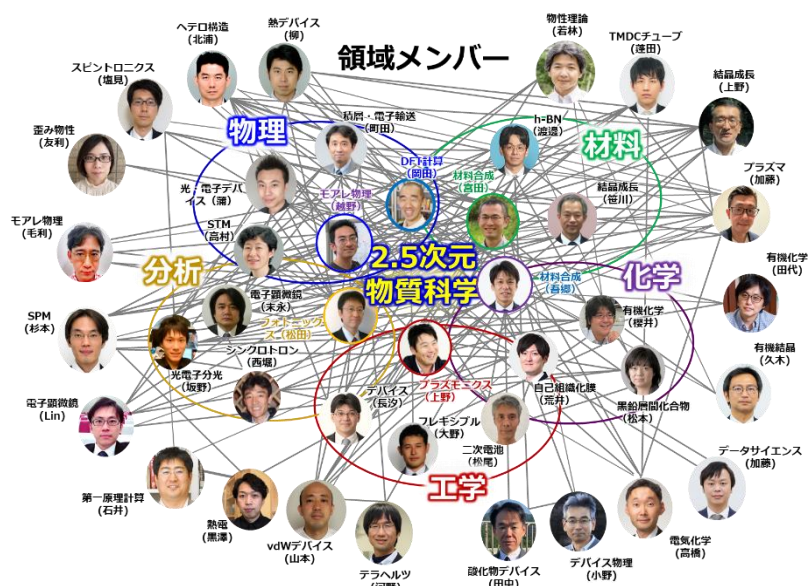


図2 領域内で行われている共同研究のネットワーク（実際にカウントしたのを線で表している）。中央が計画研究者で、周囲が第1期の公募研究者。分野をまたいだ共同研究が広く展開されている。



## 6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び (2) について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。)

### 研究項目 A01 2.5次元構造体のための物質創製

#### (1) 研究目的

**領域設定期間** 物質創製班 (A01) では、2.5次元物質の基盤となる**材料合成技術をベースとした研究**により、**新奇材料**の設計指針の開発、**高品質・大面積**二次元材料の合成・転写法の構築、ならびに**有機系との融合**による機能創出を実現する(図1)。

**中間評価実施時までの目標** DFT 計算に基づいた新規物性の提案や領域全体への理論支援体制の確立、グラフェンや hBN の高品質合成法の開発と領域内への提供、有機系と二次元物質との融合に向けた研究の取り組みと方向性の確認。

**中間評価実施時までの実績** 計算物質科学による**物質提案**に関

して**7報**の論文を発表するとともに、領域内の理論支援による**13報**に貢献した。さらに、**多層 hBN の CVD 法と二次元物質の革新的転写法を開発し、Nature Electronics 誌に2報**掲載された。特に、後者は2.5次元物質の応用を進める上で非常に重要な技術となる。また、**渡邊は高結晶 hBN を領域内外に提供し、Nature や Science 誌を含む250報**の論文につなげるなどプレゼンスを大いに高めるとともに、領域の基盤材料を提供した。有機分子も領域内で共有し、**理論・実験の両面から低次元物質との融合による機能化の可能性を見出した**。このように、物質合成や転写技術をはじめとした物質提供・理論支援などを通じて、領域の研究に大きく貢献した。

#### (2) 研究成果 (領域内共同研究による成果は★で示す)

##### 計画研究

#### A01-1. 計算物質科学による新奇物質の物質設計と理論支援 (岡田)

DFT 計算や理論構築により、ユニークな物性を示しうる新たな2.5次元物質の提案を行った。例として、図2に単層グラフェンを水素化、フッ素化した系の理論計算の結果を示す。**エキゾチックな物性が得られるフラットバンドの可能性を提示した**。同時に、面内ヘテロ TMD の積層系におけるキャリア分布の制御など、領域内の実験研究者に理論的側面から積極的に支援を行い、13報の論文発表につなげた。

#### A01-2. 高品質/大面積の2次元物質合成・転写技術の開発 (吾郷)

① **大面積の多層 hBN の CVD 成長とグラフェン FET 応用 (★Nat. Electron. 2023, A03 末永, A03 Lin との共同研究)**: 絶縁膜として重要な多層の hBN 膜を、Fe-Ni 合金箔を用いた CVD 法で大面積に合成する方法を開発した(図3上)。この hBN を用いてグラフェンの移動度が向上することを示し、有用性を実証した。

② **革新的テープ転写法の開発と THz センサ応用 (★Nat. Electron. 2024, A03 末永, A03 Lin, A05 河野との共同研究)**: 二次元材料に特化した UV 光で粘着力の変化するテープを作製し、クリー

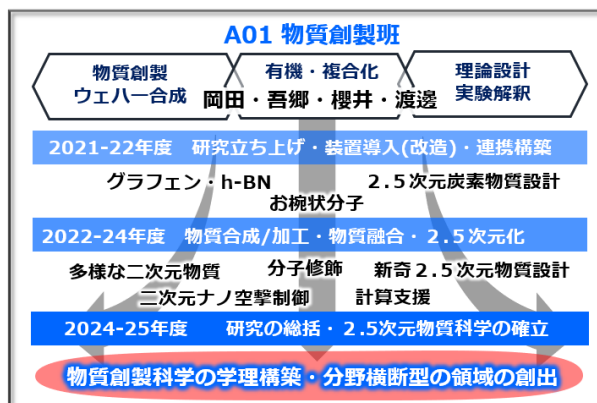


図1 A01の研究計画の概要とタイムライン

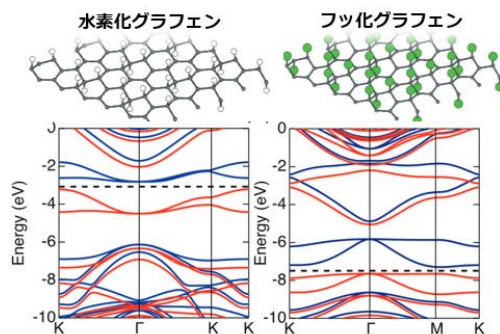


図2 フラットバンド系の理論的な探索と実験への提案 (Phys. Rev. B 2023)。

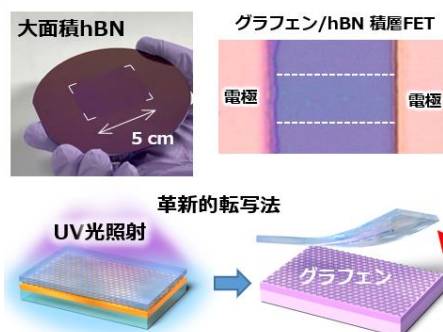


図3 (上)多層 hBN の成長と FET 応用。(下) 二次元物質の革新的転写法

ンで簡便な二次元材料の転写法を開発した (図 3 下)。さらには THz センサへの応用も実現した。大面積 2.5 次元物質の作製を可能とするものであり、今後の領域研究に大きく貢献するものである。

### A01-3. 分子系をはじめとした新規二次元物質材料群の開発 (櫻井)

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

制御: グラフェンのバンドギャップ制御は非常に重要である。本研究では、湾曲した  $\pi$  電子共役化合物である「スマネン」の 3 つのベンジル位炭素を酸化して得られるトリオキソスマネンと単層グラフェンとの相互作用を検討した。上向き (bowl-up) と下向き (bowl-down) のスマネンの吸着によって電子構造が変化し、特に下向きにスマネンを配置した場合には K 点付近で 0.18 eV のバンドギャップが形成されることを理論的に見出した (図 4)。今後実験的に検証する計画である。

さらに、スマネンとその誘導体を非平面擬二次元材料として各共同研究者に提供するとともに、スマネンユニットを導入した MOF (Metal Organic Framework)、COF (Covalent-bond Organic Framework) の合成研究を推進した。

スマネン誘導体修飾-グラフェン

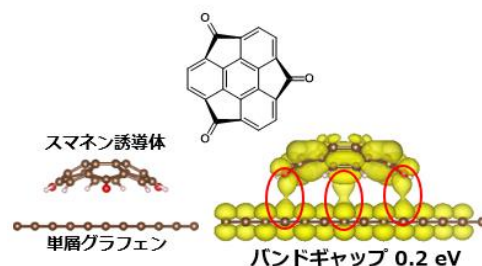


図 4 スマネン修飾グラフェンの電子構造。今後修飾グラフェンの合成を進めていく。

### A01-4. 2.5 次元構造体のための、超高品質六方晶窒化ホウ素薄膜の創製 (渡邊)

hBN は原子層の平面性を担保する基板として広く用いられており、2.5 次元物質の各種デバイスを構成する上でも同様に重要な役割を担うことが期待される。本研究で合成した hBN 単結晶を領域内に多く提供し、40 報の興味深い研究成果が高水準の国際誌において発表された。これらの発表では、TMD、TMD ヘテロ原子層、磁性薄膜、酸化膜、硫化物薄膜、グラフェンなど多彩な 2.5 次元物質に特徴的な物性の発現や hBN 自身の新しい特性評価など多岐に渡り、hBN の 2.5 次元物質群への重要性が証明された。

一方、六方晶窒化ホウ素の光物性を解明するための低欠陥・低不純物薄膜層の成長研究を目的として、図 5 に示す、レーザー加熱法を用いた気相成長技術の開発も進めた。主な不純物である炭素・酸素の成長層への取り込みがより少ない合成雰囲気を実現できており、成長試料の領域内研究への展開も検討している。



図 5 新たに製作したレーザー加熱 hBN 気相成長装置

### 公募研究

### A01-5. 2.5 次元 TMD 構造の合成と物性探索 (蓬田)

(★Nano Lett. 2023, A01 柳, A02 宮田との共同研究): 二次元物質をナノチューブ状の構造にすることは、一次元への電子閉じ込め効果が期待できる興味深いアプローチである。本研究では、図 6 に示すように、積層ヘテロ構造のナノチューブの合成に成功した。タイプ II のバンド構造が円周方向にできており、興味深い電子物性が期待できる。この他にも、hBN と TMD のヘテロナノチューブなど、多様な 2.5 次元物質の合成も可能となった。

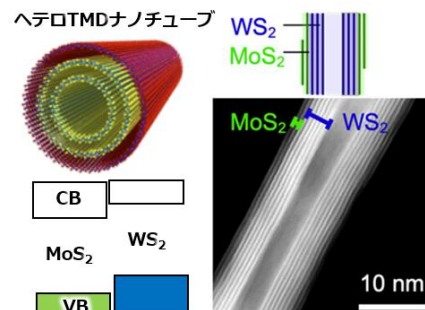


図 6 WS<sub>2</sub>@MoS<sub>2</sub> ヘテロナノチューブの創製とバンド構造 (Nano Lett. 2023)

### A01-6. 水素結合を用いたエキゾチックな原子層状物質の合成 (久木)

有機化学を駆使して合成される共役分子の誘導体を、図 7 に示すように水素結合で二次元ネットワーク化させた水素結合有機骨格物質 (HOF) は、ねじれた分子の構造から新たな 2.5 次元系とみなすことができる。本研究では、2 種類のピレン誘導体を用いることにより非組成論的共結晶の合成に成功した。今後、このような有機分子群と二次元物質との融合が期待される。

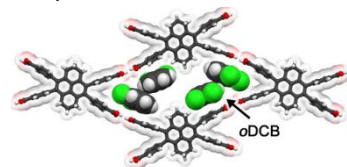


図 7 水素結合 2.5 次元物質ネットワーク (Ang. Chem. Int. Ed. 22023)

### A01-7. 単層 WS<sub>2</sub> を用いた高透明太陽電池の創製 (加藤俊顕)

CVD 法で大面積に単層 WS<sub>2</sub> を合成する技術を開発し、図 8 に示すように WS<sub>2</sub> 膜を用いて太陽電池を作製した。この太陽電池は、約 80% の非常に高い可視光透過率を示し、さらに素子を cm レベルで大規模集積することにより実用デバイスを駆動できるレベルの発電を実証した。

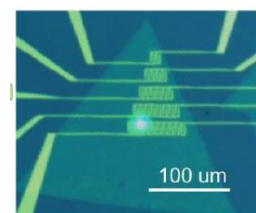


図 8 WS<sub>2</sub> 太陽電池 (Sci. Rep. 2022)



## 研究項目 A02 2.5次元集積構造の構築

### (1) 研究目的

**領域設定期間** 集積化班 (A02 班) では、二次元物質と原子・分子の集積技術を共通コア概念とし、**重ねる・ひねる・繋ぐ**などの「**集積の自由度**」と、「**二次元ナノ空間**」への**異種原子/分子挿入**を利用した2.5次元集積構造の構築を通じて領域に貢献する(図9)。

**中間評価実施時までの目標** 2.5次元物質創製に向けたロボティック積層技術の向上や新たな合成法の開発、二次元ナノ空間科学のためのインターカレーションの多角的な検討、ならびに有機系2.5次元構造の探索など多彩な集積構造の作製を行うとともに、領域内に技術やサンプルを提供して領域の活性化にも貢献する。

**中間評価実施時までの実績** ロボティック積層に関しては、アクティブ除振台を備えた高剛性の転写システムを構築したことにより、**積層位置およびツイスト角の精度が大幅に向上し、共同利用拠点の充実化**に寄与した。同時に、A03 班 (分析) との共同研究により、**2.5次元物質を大気に暴露することなく電子構造を測定する手法も構築でき、Nano Letters 誌に掲載**された。さらに、以下に示すように、ヤヌス構造をもつ遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) の研究に関して大きな進展が得られた。この**ヤヌス TMD の創製とそれに付随するナノスクロールの発見**は当初計画していなかった領域内共同研究から生み出された成果で **ACS Nano 誌の表紙にも採用**された。二層グラフェンの層間で従来、黒鉛層間化合物で知られていなかった**アルカリ金属の二層積層構造**を見出し、**Nature Communications 誌に掲載**された。

### (2) 研究成果 (領域内共同研究による成果は★で示す)

#### 計画研究

#### A02-1. 気相成長・反応による2.5次元構造の構築 (宮田)

① **ヤヌス TMD とナノスクロールの作製 (★ACS Nano 2024, A01 岡田, A01 加藤, A03 高橋, A04 高村との共同研究)**: 本研究では、上部と下部のカルコゲン原子の種類を変えたヤヌス TMD を作製し、この非対称な構造がスクロール化を促進することを見出した(図10)。実験と理論より、最小内径が5 nm 程度まで安定な構造となること、表面の電気的な特性の非対称性、水素発生特性などの基礎的性質を明らかにした。

② **化学的な TMD モアレ超格子の作製 (★Small Structures 2024, A01 岡田, A01 加藤, A01 渡邊, A03 松田, A04 高村, A04 越野との共同研究)**: 二層 MoSe<sub>2</sub> 等の最上部の Se 原子をプラズマ処理により S 原子に置換し、ヤヌス型の MoSSe/MoSe<sub>2</sub> 積層構造を作製した。上下層の格子不整合によってモアレ超格子を作製でき、清浄かつ大面積のモアレ超格子を作製する新たな手法として、モアレ系の物性・機能開拓への応用が期待される。

#### A02-2. ロボティック積層による2.5次元物質創製と物性創発 (町田)

**数層 WSe<sub>2</sub> 量子井戸における共鳴トンネル (★Nano Lett. 2022, ★Phys. Rev. Res. 2023, A01 渡邊, A04 笹川との共同研究)**: 数層 WSe<sub>2</sub> と hBN からなる量子井戸を用いた二重量子井戸構造において、量子井戸間のツイスト角度が共鳴トンネルに与える影響を調査した。この実験では、図11に示すように、

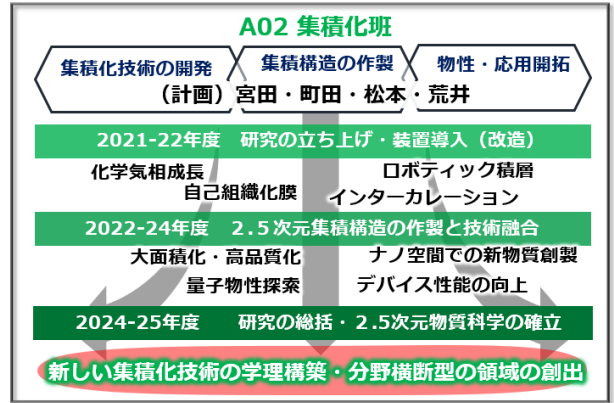


図9 A02の研究計画の概要とタイムライン

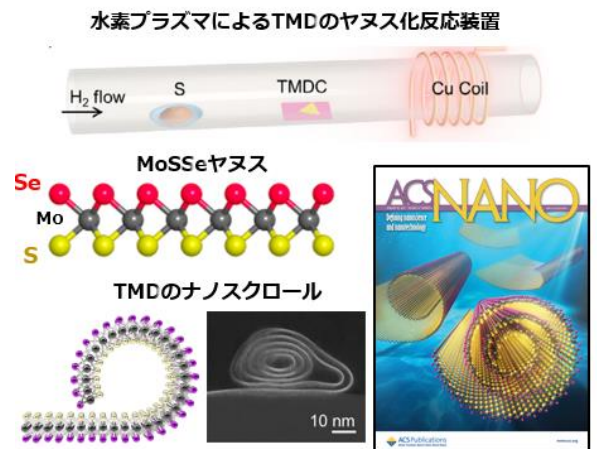


図10 ヤヌス TMD の合成装置と構造モデル。それから発展したナノスクロールの構造と掲載された表紙。

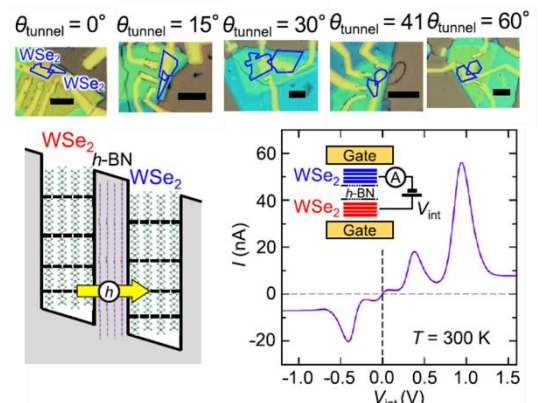


図11 WSe<sub>2</sub>/hBN/WSe<sub>2</sub>の角度制御積層と共鳴トンネリングの結果

ロボティック積層装置を用いて、WSe<sub>2</sub>間のツイスト角度まで高度に制御した WSe<sub>2</sub>/hBN/WSe<sub>2</sub>の積層構造からなる2.5次元物質を実現した。このように高度な構造が作れる研究室は世界でも非常に限られている。測定の結果、伝導キャリアが電子の場合、伝導帯のQ点周りのバンド分散を反映したツイスト角度依存性を示し、ホールの場合はΓ点キャリアであるためツイスト角度に依存しない結果となった。本成果は数層TMD量子井戸デバイスの開発や、サブバンドエレクトロニクスの開発に大きく貢献するものである。

### A02-3. インターカレーションを利用した新規2.5次元物質の創製 (松本) (★Nat. Commun. 202, A01 吾郷,

A03 Lin, A03 末永との共同研究) : インターカレーションは2.5次元物質を作り出す方法として重要であるが、挿入されるイオンなどは不安定な物質も多く、取り扱いには経験が必要である。本研究ではこれまで蓄積してきたインターカレーション技術を、二層グラフェンやグラフェン状黒鉛 (GLG)、あるいはスマネン結晶など多くの物質に応用してきた。特に、CVD合成した二層グラフェン層間に、K, Rb, Csなどのアルカリ金属を挿入すると、層間隔の柔軟な拡張性によって黒鉛の2倍のアルカリ金属が2層構造で最密充填されることを発見した(図12)。本成果は、従来の黒鉛層間化合物を超える二次電池の充電容量の増加に向けた重要な知見となる。

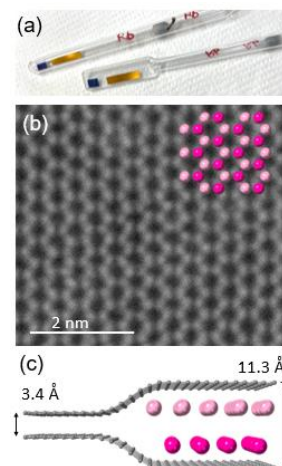


図12 (a)インターカレーションの様子。(b,c)二層グラフェンの層間で発見されたCsイオンからなる2層構造

### A02-4. 自己組織化分子膜と二次元物質との融合による2.5次元物質の創出 (荒井)

(Nat. Commun. 2023) : 本研究では、二次元物質と分子層を集積化するために、分子層転写技術の開発を進めている。この技術を基盤として、有機半導体の分子積層を操り、有機薄膜トランジスタの高性能化を進めた。また、有機半導体層内の対称性制御や異種分子挿入にも取り組み、高移動度化に適した分子配列の作製やp型・n型半導体の作り分けも可能になった。また、有機導体系における電荷ガラス-結晶間相転移に関する付加的な成果も得た。この層制御された有機分子膜は別基材に転写できることから、試料提供等を通じた領域内研究者との共同研究を進めている。

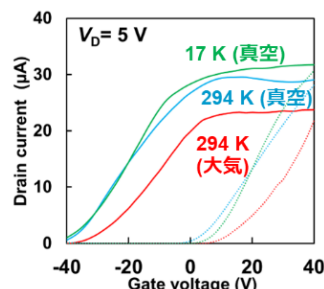


図13 GaSをバッファ層にしたMoS<sub>2</sub>トランジスタの伝達特性

## 公募研究

### A02-5. 2.5次元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)

本研究では合成班として、各種TMD単結晶を作製し、領域内の研究者に提供し、★ACS Appl. Mater. Interfaces 2023など計5報の共著論文につながった。また、大きなバンドギャップを有する硫化ガリウム (GaS) に注目し、その結晶成長、ならびにGaSをバッファ層とするMoS<sub>2</sub>トランジスタの作製と評価を行った。GaSを用いることで低温におけるオン電流の増加と移動度の向上が見出された(図13)。これはGaS層によりSiO<sub>2</sub>表面の凹凸や不純物によるキャリア散乱が抑制されたことを示唆しており、hBNに代わる絶縁層として期待できる結果である。

### A02-6. 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) (★

Appl. Phys. Express 2023, A01 渡邊との共同研究) : 二次元積層系において、層と層の間の清浄な界面が物性や応用非常に重要であると考えられている。本研究では、AFMで清浄な界面を創出すると、顕著な発光増強効果(図14)やバレーコヒーレンスが観測できることを見出した。さらに、TMDナノリボンなど1.5次元系にも研究を広げた。

### A02-7. 二次元物質表面場を利用した異種結晶の創製と機能集積 (田中)

(★Jpn. J. Appl. Phys. 2023, A01 渡邊との共同研究) : 本研究では、単結晶から剥離したhBNと67℃で絶縁体-金属相転移を示すVO<sub>2</sub>薄膜を組み合わせ、低電圧抵抗スイッチングデバイスの作製を行った(図15)。hBNフレイク境界領域における電流集中によって微小なVO<sub>2</sub>ドメインの相変化が優先的に誘起され、低バイアス領域で微小な抵抗スイッチングを観測することができた。

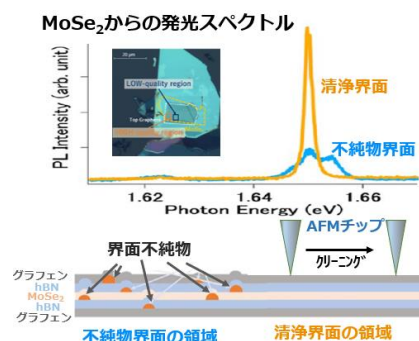


図14 清浄な積層界面の作製とそれに伴う発光の増強効果の観測

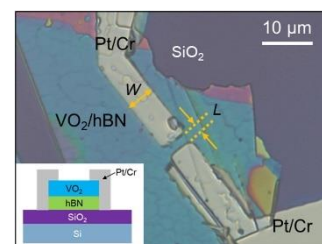


図15 hBN上に成長させて、作製したVO<sub>2</sub>デバイスの光学顕微鏡写真



## 研究項目 A03 2.5次元構造の分析技術開発

### (1) 研究目的

**領域設定期間** 分析班 (A03 班) では、非常に薄いため測定が難しい 2.5 次元物質に適した分析技術を開発するとともに、それではしか得ることのできない新たな知見を得ることで、物理・化学・工学にまたがる 2.5 次元物質科学の学理構築に貢献する (図 16)。

**中間評価実施時** 光・電子・X 線等を用いた 2.5 次元物質の究極的な測定法の可能性を探求して、物性測定や構造評価技術の高度化を進めるとともに、新たな物性や現象の観察につなげる。同時に、領域内での綿密な連携と情報共有を行って、2.5 次元物質の分析技術を飛躍的に向上させる。

**中間評価実施時までの実績** 光の利用では、二次元物質の積層によって生ずるモアレ超格子に関し、単一モアレからの発光の測定に成功し、*Nature Communications* 誌に掲載されている。電子顕微鏡では、電子線をプローブとした、原子レベルでの超局所分光測定を可能にするとともに、高分解観察技術を領域内に提供して *Nature* 姉妹紙をはじめとする多くの論文につなげた。X 線に関しては SPring-8 を用いて 2.5 次元物質の顕微構造観察技術の開発が進み、電子顕微鏡では観測できないデバイスなどの非破壊や *in-situ* 測定が可能となった。光電子分光では、ロボティック積層技術を活用して、不安定な二次元物質の電子構造を観察できるようになり複数の論文につながった。このように、2.5 次元物質を対象とした分析法の高度化が進み、構造観察から量子物性の創出まで「2.5 次元物質科学」の学理構築に大きく貢献している。

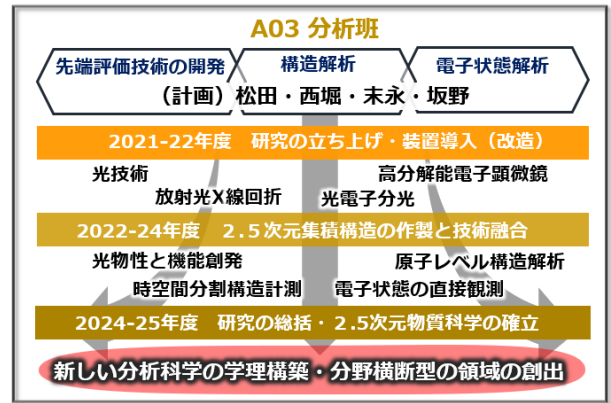


図 16 A03 の研究計画の概要とタイムライン

### (2) 研究成果 (本研究領域内の共同研究等による成果は★で示す)

#### 計画研究

#### A03-1. 2.5次元物質の光技術と機能創発 (松田)

① **モアレ励起子の量子コヒーレンス測定 (★*Nat. Commun.* 2024, A01 渡邊との共同研究)**: 2.5 次元物質の先端光計測技術の開発と併せて、2.5 次元物質科学の一つの研究の柱であるモアレ物理に関して研究を進めた。二次元半導体  $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$  ヘテロ構造において微細加工技術を組み合わせ、少数のモアレポテンシャルに起因するモアレ励起子からの発光を得た。これにより、**モアレ励起子による 2.5 次元物質を機軸とした新たな量子科学に向けた量子コヒーレンスの情報を得ることに成功した** (図 17)。

② **モアレ励起子・トリオン状態とバレーダイナミクス (★*ACS Nano* 2023, *ACS Nano* 2022, A02 渡邊との共同研究)**: ゲート電圧印加によるキャリアドーピングを通じてモアレ励起子からモアレトリオンを生成させ、その発光ピークを観測することに成功した。このモアレトリオンの円偏光分解発光スペクトルと時間分解測定から、数 100 ns に渡り極めて長時間バレー分極の情報が保持されていることを明らかにした。同時に、共同研究拠点として、先端光学計測技術の開発・提供を通じて領域研究に大きく貢献した。

#### A03-2. 先端放射光 X 線回折による 2.5 次元物質の構造評価 (西堀)

放射光 X 線の回折法を利用した 2.5 次元物質の構造評価法の開発を進めた。世界的に見て二次元物質の X 線を使った回折法による評価はほとんど行われていない。これは原子数層ではシグナルが弱いこと、ミクロンサイズ領域で方位を変化させ X 線回折の測定が困難であるためである。SPring-8 において最適なビームラインの調査、ビームサイズと回折計の精度の検討から、タンパク質構造解析用の生体高分子とナノビーム回折ビームラインで測定可能なことが分かった。このシステムにより、結晶方位の決定や格子定

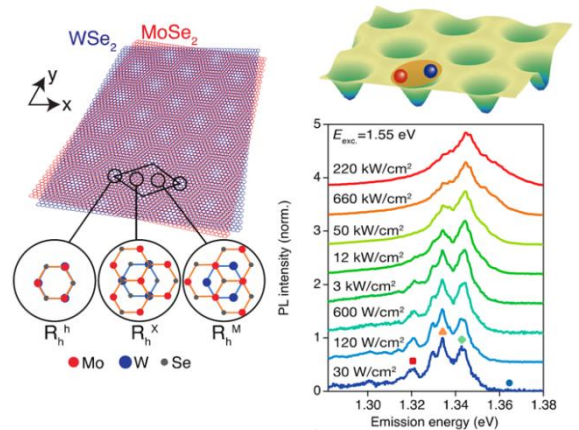


図 17 二枚の TMD 積層によって生じるモアレポテンシャルのイメージとそこから発光

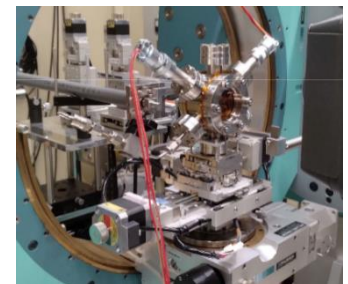


図 18 SPring-8 内で開発したインターカレーション *in-situ* 観察装置

数の評価ができるようになりつつある。また、インターカレーション過程の *in-situ* 観察については、キャピラリーの利用など様々な方法を試行し、現在では専用の装置を設計・作製して研究を進めている (図 18)。本装置を用いてグラフェン層間距離の温度依存性の計測に成功しており、今後、2.5次元物質の構造に関して様々な新しい知見が得られるものと期待できる。

### A03-3. 最先端電子顕微鏡を用いた原子レベル構造解析 (未永) (★ACS Nano 2023, A03 Lin との共同研究) :

原子レベルでの分析に高感度を持つ電子分光が 2.5次元物質の構造解析に広く応用されるように努め、多くの領域内の研究者との共同研究を遂行した。一つは、2.5次元物質の電子分光を用いた光学特性に関する研究が順調に進捗した。角度分解 EELS による励起子分散関係の測定で、**同位体識別した単層グラフェン (Nature 2022)** から TMD まで幅広い物質において検証できた。またモアレ構造を持つ 2.5次元物質の電子顕微鏡観察と局所的な電子分光測定に大きな進捗が見られた。特に、ツイスト角を持つ二層グラフェンにおいて、**コアロススペクトルからもその特徴的なピークを得ることに成功した (図 19)**。

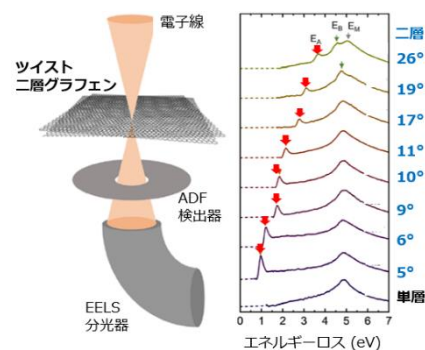


図 19 二層グラフェンのモアレ構造に関する EELS 分析

### A03-4. 2.5次元物質におけるバンド構造の直接観測 (坂野)

**数層  $WTe_2$  やツイスト二層  $ReSe_2$  におけるバンド構造の観測 (★Phys. Rev. Res. 2022&2024, A01 渡邊, A02 町田, A04 笹川との共同研究) :** 角度分解光電子分光は、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。本研究では、**ツイスト積層体のような複雑構造にも適用可能で、試料を大気に暴露せずに測定可能な角度分解光電子分光用の試料作製プロセスの開発し、2.5次元物質におけるバンド構造の直接観測を可能とした。**

この新たに構築した ARPES 測定システムを用い、**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偶奇効果という新現象を発見し、その起源を解明した (図 20)**。

### 公募研究

### A03-5. 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) (★ACS Nano 2023, A01 岡田, A01 加藤(俊), A02 宮田, A04 高村との共同研究) :

水素発生反応 (HER) の触媒活性サイトをサブマイクロスケールで可視化することが可能な走査型電気化学セル顕微鏡を独自開発し、ヤヌス TMD の HER 活性をイメージングした。その結果、テラスの HER 活性が高いことを明らかとした。また、**図 21 に示すように、ヤヌス TMD をナノスクロール構造にすると、非常に高い HER 触媒活性が得られることを見出した。**このようにナノ構造を巧みに制御することで特異な触媒活性を発現させられることが分かった。

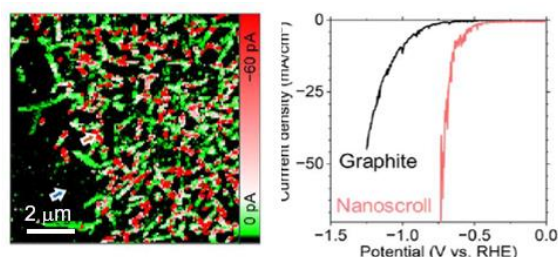


図 21 (a)ヤヌス TMD ナノスクロールの HER 活性イメージと(b)HER 特性。グラファイトよりも低い電圧で HER 反応が起こっている。

### A03-6. 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)

A01 の櫻井グループが有機合成したスマネンを超高真空中で基板へ蒸着することで単層膜を作製した。これらのお椀状分子からなる単層膜は、垂直方向に自由度を持つため、2.5次元物質と見なすことができる。超高真空 AFM によって、この単層膜を超高分解能観察した結果、**お椀状分子の配向を 1 分子ずつ完全に決定することができた (図 22)**。さらに、AFM の探針をスマネン分子に接近させることによって、個々のスマネン分子の配向を操作できた。このように、**単層膜の局所物性を AFM デザインすることができることを実証した。**

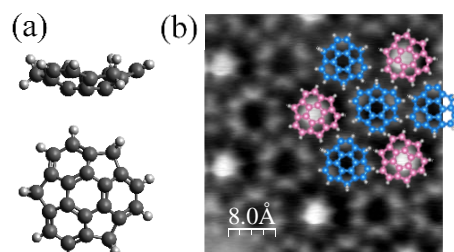


図 22 (a)スマネン単層膜の構造と(b)原子分解 AFM 像 (論文準備中)



## 研究項目 A04 2.5次元構造の新奇物性開拓

### (1) 研究目的

**領域設定期間** 物性開拓班 (A04 班) では、「2.5次元」という新たな視点に基づいて、様々な特異な系を舞台とした新たな電子・光・フォノン物性とそれらがもたらす超伝導や磁性をはじめとした様々な新奇物性の発現と学術の確立へと昇華させる (図 23)。

**中間評価実施時までの目標** 2.5次元物質の学理構築に向けたモアレ物性の理論構築と実験への理論支援、通常とは異なる TMD の単結晶試料の作製と基礎物性の測定、ポストグラフェン材料の合成手法の開発と観察技術の構築、そして積層・歪みによる物性変化の測定を行うとともに、2.5次元物質の新たな可能性を物性面から拓いていく。

**中間評価実施時までの実績** 積層した二次元物質に見られるモアレ超格子がもたらす物性を理論的な観点から研究を進めた。特に、三層グラフェンについて、モアレ×モアレの組み合わせがもたらすユニークな物性について理論提案を行うとともに、ツイスト積層グラファイトやトポロジカル絶縁体のツイスト積層など、多様な材料系に独自のモアレ理論を展開することができた。さらに、MoS<sub>2</sub> などとは異なる複雑な vdW 単結晶の育成法を構築して物性測定・バンド計算を行うとともに、領域内研究者にこれらの高品質結晶の試料提供を行って領域研究に大きく貢献した。また、シリセンやゲルマネンといったポストグラフェンの創製に向けた理論計算を進めるとともに、共同研究で測定法の検討も同時に進めた。さらに、TMD の積層や歪み印加によって生み出される新たなモアレの物理や光物理の観測を進め、Advanced Materials などの表紙も飾る成果が得られた。

### (2) 研究成果 (領域内共同研究による成果は★で示す)

#### 計画研究

#### A04-1. 2.5次元物質の理論設計と物性予測 (越野)

**モアレ準結晶の基礎理論の開拓 (Phys. Rev. X 2023, Phys. Rev. Res. 2022, Phys. Rev. B 2021)**: これまでのモアレ物質研究のほとんどは二層系を対象としていたが、三層以上のモアレ多層系は従来の物性理論の適用範囲を超える準周期構造が障壁となり、理論的な解析を阻んできた。本研究では、この膨大な未開拓領域を2.5次元物質科学の重要な一分野と位置づけ、重点的に研究を行った。まず準周期的構造をもつ三層系を取り扱う系統的理論を初めて構築し、ツイスト3層グラフェンにおいて構造緩和によって超モアレドメイン形成が生じること、それに伴うトポロジカル電子状態の出現を発見した (図 24)。その他にもトポロジカル絶縁体など対象を広げた。さらに、A01 公募の加藤

(幸)と共同で、モアレ物理とデータサイエンスとの融合を進め、新たなブレークスルーを目指した試みを始めた。

上記の他にも二次元 NbSe<sub>2</sub> と二次元強磁性体 V<sub>5</sub>Se<sub>8</sub> との vdW 界面で生じる自発的なスピン分極を持つ強磁性基底状態の計算、グラフェン/hBN モアレ系で生じる非線形ランダウ準位の計算など実験支援も行った (Nat. Commun. 2022, Nano Lett. 2024)。

#### A04-2. 新奇な2.5次元物質・物性の開拓 (笹川)

**多種多様な vdW 積層物質の単結晶開発と2.5次元構造体の物性開拓 (★Adv. Mater., A01 渡邊との共同研究)**: 二次元トポロジカル絶縁体として振る舞う WTe<sub>2</sub> の単結晶を合成し、図 25 に示すように、超伝導電極と組み合わせ、二次元ジョセフソン接合に関する研究を行った。

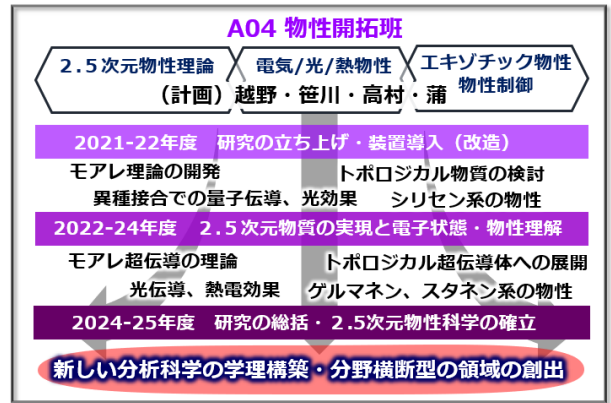


図 23 A04 の研究計画の概要とタイムライン

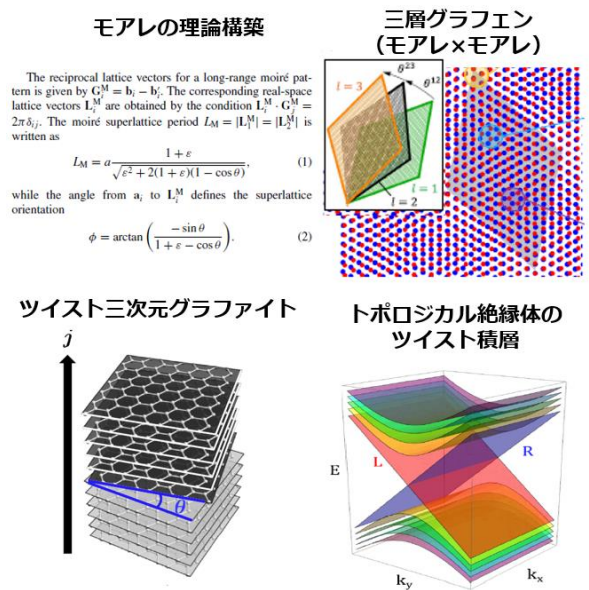


図 24 モアレ理論の構築と多様な積層系への理論展開

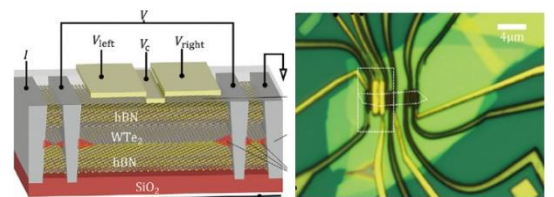


図 25 結晶成長した WTe<sub>2</sub> 積層に強磁性電極を組み合わせさせたジョセフソンデバイス

同時に様々な vdW 単結晶試料の合成を行い、実験系の領域内共同研究に大きく貢献した。特に、 $WSe_2$  や  $WTe_2$  を用いて、各グループが得意とする複数の手法を連携させることによって、ツイスト角によって変化する電子構造や電子物性の解明が大きく進展した(図 26)。

#### A04-3. 2.5次元構造の探索と創造 (高村)

**単元素 2次元材料の新規構造探索と創造 (Phys. Rev. B 2023)** : 正方格子をもつ新しいケイ素やゲルマニウムの二次元材料の安定性と電子状態を第一原理電子状態計算を用いて検討した。また、超高真空中で加熱することでシリセンを形成できる Si 基板上  $ZrB_2$  薄膜試料を A03 公募の杉本に供給し、共同研究を推進した。

さらに、**共同利用拠点 (構造)** として、2.5次元構造により生じるモアレなどの微細構造を高分解能走査透過顕微鏡 (STEM) で実空間観察して積層構造を特定し(図 26)、新たな2.5次元構造の探索と創造に貢献した。

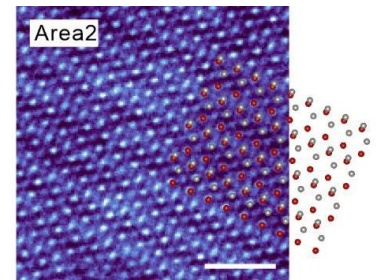


図 26 ツイスト角  $0^\circ$  の二層  $WTe_2$  の STEM 像。

#### A04-4. 2.5次元構造の自在制御と光機能・デバイス (蒲)

##### 2.5次元物質の光物性と機能創出 (★Adv. Mater. 2022,

A01 岡田, A02 宮田, A03 松田, A03 柳との共同研究) : A02 の宮田によって合成された様々な TMD 構造を用いて、特徴的な光・電子物性の観察、ならびに機能創出を進めた。図 27 に示すように、 $WS_2$  と  $WSe_2$  からなる単層アロイ TMD を使い、イオン液体でゲート印加することで TMD からの発光 (EL) を観察することができた。さらに、S と Se の組成によってバンドギャップが変わることを利用して、広範囲に発光色を連続制御可能なデバイス機能を実現した。

通常、モアレは角度や格子定数の違いで生ずるが、本研究では歪みの導入によってモアレを制御することを試みてきた。そして、**積層 TMD ヘテロ構造において、歪み効果を導入することで、新しいモアレパターンの自在構造制御手法を構築**することができた(論文投稿中)。その結果、長方形や一次元的なモアレパターンなど、既存技術では実現困難な構造と特異なバンド変調も見出し、モアレ超格子の新たな電子・光機能開拓につながるものと期待できる。

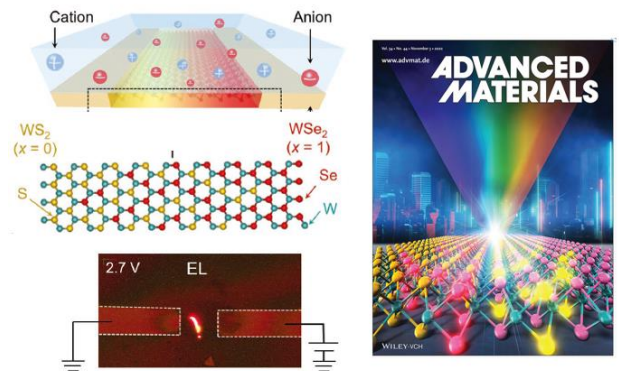


図 27  $WS_2$  と  $WSe_2$  からなるアロイ TMD とイオン液体を使った 2.5次元 EL デバイス。組成が空間的に変化することから、発光波長をチューニングできる。

#### 公募研究

##### A04-5. 積層自由度による圧電効果の制御 (塩見) (★Jpn.

J. Appl. Phys. 2023, A04 笹川との共同研究) : 二次元強誘電体  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$  には、ひねりながら二次元層が積層していく 2H 構造と、回転せずそのまま面直方向に積層する 3R 構造が知られている (図 28)。両者の単結晶試料において面直方向の圧電効果測定を行ったところ、空隙の多い 2H 構造の方が面直方向に原子が動きやすいことを反映して大きな圧電応答が観測された。本成果は積層自由度によって圧電応答など物性を大きくコントロールすることが可能であることを示している。

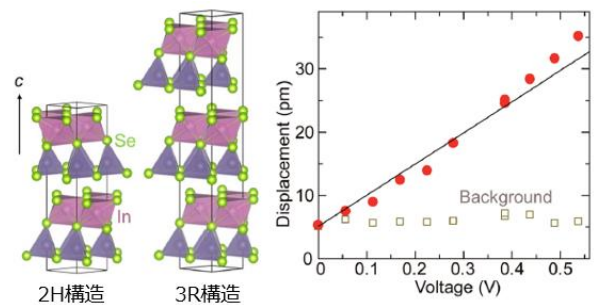


図 28  $In_2Se_3$  の結晶構造と 2H 構造で観察された圧電応用

##### A04-6. 二階建て二次元六角ネットワーク HexNet の電子物性解析 (若林)

水素結合性の有機フレームワーク (HOF) によって、二重層構造を有する二次元六角格子ネットワーク (HexNet) が作製できるようになっている (A01 班 久木・櫻井ら)。この系の特徴は、複数枚のナノシートが異なる層からの骨格が相互貫通の構造を有する点にある (図 29)。領域内共同研究として、HexNet のネットワーク構造に着目して、特徴的な電子状態とそのトポロジカル特性について解析を行った。配位構造に応じて、ラインノードを持つ金属状態、ザック位相に由来するエッジ状態が出現することが分かった。今後、電子状態設計に役立つと期待される。

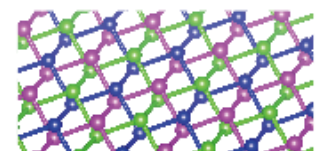


図 29 HexNet の結晶構造



## 研究項目 A05 2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開

### (1) 研究目的

**領域設定期間** 機能創出班 (A05 班) では、デバイスを構成する共通コアである「界面・空間」を制御しながら、集積化された2.5次元物質を利用した**電子デバイス、光デバイス、エネルギーデバイス等の創製・学理探索と応用展開**を行う(図30)。

**中間評価実施時までの目標** 将来的な社会変革を見据えた、2.5次元物質に基づく応用研究を展開するため、各種のデバイスや電池などの作製法の開発、応用の可能性、そして評価法の確立など基盤技術を構築する。そして、特性向上のための基礎データを収集するとともに、機能創出に資する学理探求も行う。

**中間評価実施時までの実績** 光機能では、二次元半導体である遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) と金ナノパターンを組み合わせた**2.5次元物質**を作り出し、**金のプラズモン共鳴を利用して TMD の発光特性や触媒機能を向上させる**ことができた。電子デバイス応用では、**超低消費電力デバイスであるトンネルトランジスタを TMD で動作**させるとともに、**二次元強誘電体を用いてバルク光起電力の観測に成功**して *Advanced Materials* 誌に掲載された。また、フレキシブルデバイスでは、**電気化学センサーアレー**を作製して、**糖尿病患者の血糖値の予測に成功**した。エネルギー応用では、化学修飾グラフェンを積層させた2.5次元構造を用いて、**デュアルイオン電池を動作**させるとともに、CVD 合成した数層グラフェンでは、**グラファイトよりも低電位で充放電が起こる可能性を見出す**ことができた。

### (2) 研究成果 (領域内共同研究による成果は★で示す)

#### 計画研究

#### A05-1. 2.5次元物質による光エネルギーデバイスの創製 (上野)

2.5次元物質の光応用を進めるため、A02 の宮田と共同で、プラズモニックデバイスの開発を推進した。一般に、TMD ヘテロ構造 ( $WSe_2/MoS_2$ ) では、電荷再結合速度が電荷分離によって遅くなって発光量子収率が減少してしまう欠点がある。本研究では**金からなるプラズモニックナノ構造とヘテロ TMD を組み合わせ、発光の量子収率が 10 倍増幅**できることを実証した (図31a,b)。

さらに、光のエネルギー応用も進めてきた。 $MoS_2$  は光触媒活性を示すが、光吸収効率が低いという欠点を補うため、マイクロチャンネル中で **Au のプラズモニックナノ構造と TMD シートを組み合わせることで、光還元反応の触媒活性を大幅に向上**できることを示した (図31c)。これらの成果は論文にとりまとめているところである。他にも、A01 吾郷、A05 松尾と共同で、赤外プラズモンとピラー化炭素のインターカレーション機能を利用した Fano 共鳴による高感度化学センサの構築を進めている。

#### A05-2. 2.5次元界面制御によるエレクトロニクス応用 (長汐)

① **層状強誘電 SnS におけるバルク光起電力発電の実証 (★ *Adv. Mater.* 2023, A01 渡邊, A03 松田との共同研究)**: 本研究では、太陽電池における Shockley-Queisser 限界を超える可能性がある空間反転対称性の破れた層状 SnS 結晶でのバルク光起電力発電を実証するため、SnS を物理蒸着法により作製した。第二高長波発生(SHG)により空間反転対称性の破れを確認し、計測した光電流の偏光依存性が結晶の2回対称と一致したことから、**SnS において初めてバルク光起電力効果を示すことに成功**した (図

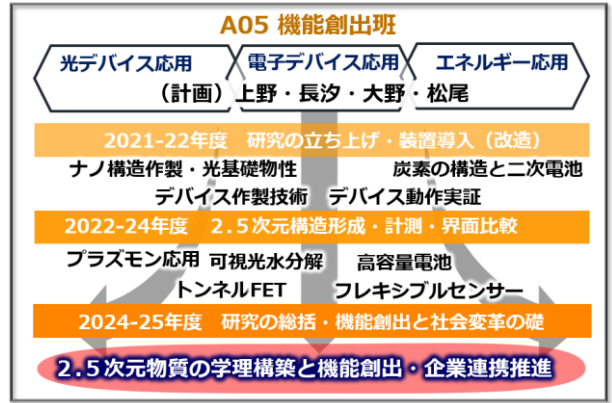


図30 A05の研究計画の概要とタイムライン

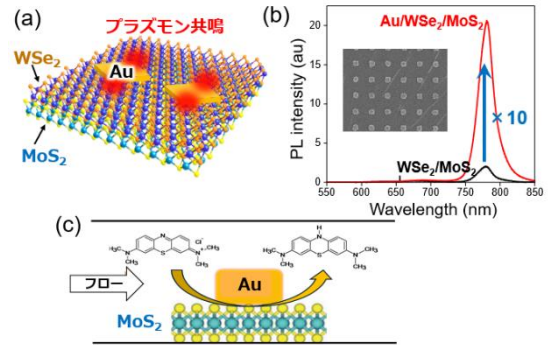


図31 (a,b)Au/TMDの2.5次元構造でのプラズモン共鳴による発光増強効果。(c)Au/MoS<sub>2</sub>光触媒ナノシート上の光還元反応

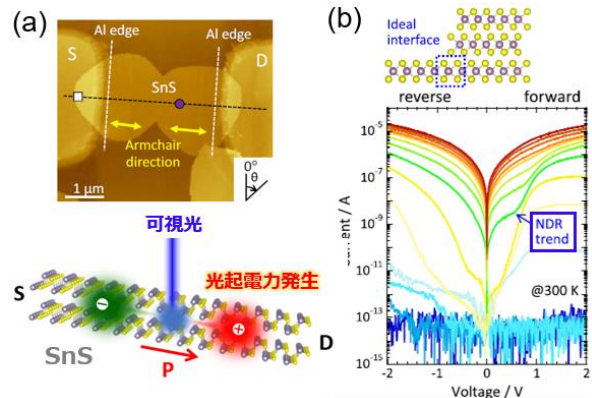


図32 (a)バルク光起電力効果を示す偏光依存性と (b) MoS<sub>2</sub>多層膜のトンネルFET動作

32a)。

② **Nb-doped MoS<sub>2</sub> 同一結晶面内トンネル FET の動作実証 (★ACS Appl. Mater. Interfaces. 2024, A01 渡邊, A02 宮田, A02 上野(啓)との共同研究)**: 2D-トンネル FET は低消費電力動作と高駆動電流が期待されているが、ヘテロ界面形成時の界面準位の導入のため期待ほどの特性が得られていない。本研究では、単層 *n*-MoS<sub>2</sub>/多層 *p*<sup>+</sup>-MoS<sub>2</sub> 結晶からなる同一結晶の面内ヘテロ構造において、室温で負性微分抵抗 (NDR trend) を観測したことから **トンネル FET 動作を実証した** (図 32b)。また、温度依存性をほとんど示さないキャリア輸送特性から、界面準位起因の生成・再結合電流は無視できるほど小さく、本構造は電氣的に不活性な理想界面に近いことが分かった。

### A05-3. フレキシブルエレクトロニクスの創製 (大野)

お椀型分子であるスマネンの分子レベルでの分極反転を利用したナノメモリの創出と物理リザーブの実現を目指し、A01 の櫻井と共同で超微細配線となる CNT との相互作用を調べた。フッ素化スマネンのフッ素原子の数に依存して CNT へのドーピング極性が変化し、スマネンの分極と界面近傍の静電的なキャリア再分布が生じることを明らかにした。

CNT 電気化学センサレイを物理リザーブとして用い、2.5 次元物理リザーブの実証に必要な実験系を構築した。複数のセンサを用いること、容量電流と酸化還元電流の 2 成分を用いることにより、リザーブの次元性と予測性能が向上することを見出した。これを用いて **I 型糖尿病患者の血糖値の予測に成功し、Carbon 2023 に掲載された** (図 33)。

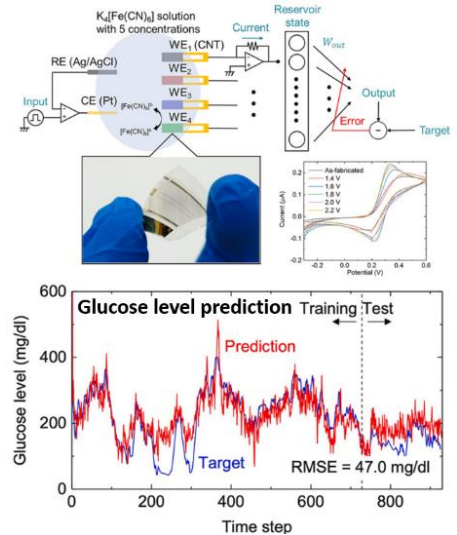


図 33 柔軟な電気化学リザーブによる血糖値予測の実証

### A05-4. 2.5 次元物質のエネルギーデバイスへの応用 (松尾)

酸素及びナノ孔を有するグラフェンを積層させた 2.5 次元材料はデュアルイオン電池の正極として用いた場合アニオンの貯蔵量が非常に大きいため高容量となる。この要因を DFT 計算によって検討し、グラフェンに導入された酸素の導入がアニオン挿入電位の低下させることで、アニオン挿入量が増加し **デュアルイオン電池正極として優れた特性を示すことを明らかにし、成果は J. Phys. Chem. C 2023 などに掲載された** (図 34)。この他にも A01 吾郷との共同研究で **複数層グラフェンへのアニオン挿入挙動の検討を行い、単層グラフェンでは見られない電流ピークの観測に成功し、これらがグラファイトよりも低電位で見られることを見出し、論文を準備中** である。

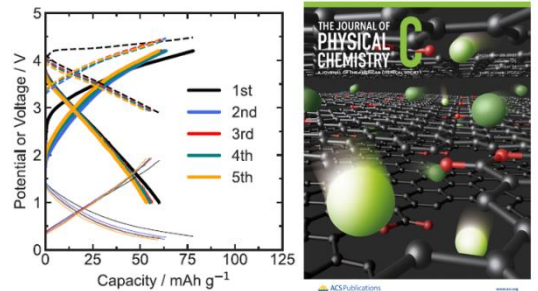


図 34 デュアルイオン電池の充放電曲線とカバーアート

### 公募研究

### A05-5. 2.5 次元構造による新規テラヘルツ・赤外機能素子・計測の創出 (河野)

光領域の中で未開拓であるテラヘルツ・赤外帯域の素子開発を 2.5 次元物質で実施した。A01 吾郷と共同で、高品質大面積グラフェンのテープ転写による **テラヘルツ・赤外撮像素子とその画像化応用を達成した** (図 35)。人の目に対して不透明の状態 (パッケージで覆われている状態を想定) でも、非可視光の利用によって内部が可視化できることを、静止画、動画双方で示し、*Nat. Electron.* 2024 の掲載に貢献した。このセンシング技術は対象物の非破壊画像分析につながる。

### A05-6. 計算科学手法による 2.5 次元高機能デバイスデザイン (小野)

計算科学的手法を活用して、hBN と機能性酸化物である VO<sub>2</sub> との組み合わせ (A02 田中との共同研究)、およびグラフェンや hBN と強磁性電極 (FeNi) との組み合わせ (A01 吾郷との共同研究) に関して安定構造や電子状態の計算を行い、実験支援を行った。特に、**FePd 電極とグラフェンを用いた磁気接合の伝導特性を解析し、実デバイスとして動作可能な高い磁気抵抗比を発現することを確認し、J. Appl. Phys. 2024 に発表した**。

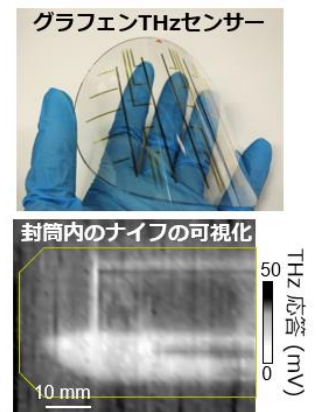


図 35 CVD グラフェンを検出器として用いた THz 異物検査



## 7 研究発表の状況

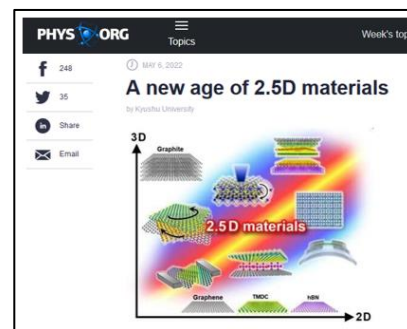
研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

計画・公募研究を含めて2024年3月までに計**209報の論文**を発表した。そのうち**81報(39%)が領域内共著**であり、うち**3名以上の領域研究者が含まれる論文は35報(17%)**もある。

また、これとは別にA01の渡邊(NIMS)が含まれる海外研究チーム等の共著の論文は251報があり、それらにも領域の謝辞が含まれている。

なお、本領域立ち上げ直後に、「**2.5D materials**」というワードのプライオリティ確保を目指して、領域代表と研究代表者を中心に以下の**レビュー論文を執筆、オープンアクセス誌に投稿**した。出版社からプレスリリースされ、**国内外の多くのwebサイトを中心に紹介**された（右図）。

H. Ago, S. Okada, Y. Miyata, K. Matsuda, M. Koshino, K. Ueno, K. Nagashio, *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **23**, 275 (2022). [プレスリリース](#) 「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次元物質人工知能（AI）、エレクトロニクス、自動車、エネルギー分野などへの応用が期待される2.5次元物質、英字サイト：“A new age of 2.5D materials”



### 研究項目 A01 2.5次元構造体のための物質創製

#### 計画研究

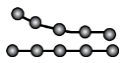
- [1] N. Sultana, Y. Gao, M. Maruyama, \*S. Okada, “Structural modulation of bilayer graphene under an external electric field and carrier doping”, *Appl. Phys. Express*, **7**, 035001 (2024).
- [2] M. Nakatani, S. Fukamachi, P. Solís-Fernández, S. Honda, M. Harada, K. Kawahara, Y. Tsuji, Y. Sumiya, M. Kuroki, K. Li, Q. Liu, Y.-C. Lin, A. Uchida, S. Oyama, H. Ji, K. Okada, K. Suenaga, Y. Kawano, K. Yoshizawa, A. Yasui, \*H. Ago, "Ready-to-transfer two-dimensional materials using tunable adhesive force tapes", *Nat. Electron.*, **7**, 119 (2024). [領域内共同](#), [プレスリリース](#) 「世界初、グラフェンなどの二次元材料テープを開発」
- [3] \*Y. Yakiyama, M. Li, D. Zhou, T. Abe, C. Sato, K. Sambe, T. Akutagawa, T. Matsumura, N. Matubayasi, \*H. Sakurai, “Biased bowl-direction of monofluorosumanene in the solid state”, *J. Am. Chem. Soc.*, **16**, 5224 (2024).
- [4] S. Fukamachi, P. Solis-Fernandez, K. Kawahara, D. Tanaka, T. Ohtake, Y.-C. Lin, K. Suenaga, \*H. Ago, "Large-area synthesis and transfer of multilayer hexagonal boron nitride for enhanced graphene device arrays", *Nat. Electron.*, **6**, 126-136 (2023). [領域内共同](#), [プレスリリース](#) 「六方晶窒化ホウ素の大量積層合成とグラフェン集積デバイスを実現」
- [5] M.-Y. Tsai, C.-T. Huang, C.-Y. Lin, M.-P. Lee, F.-S. Yang, M. Li, Y.-M. Chang, K. Watanabe, T. Taniguchi, C.-H. Ho, W.-W. Wu, M. Yamamoto, J.-L. Wu, P.-W. Chiu, Y.-F. Lin, “A reconfigurable transistor and memory based on a two-dimensional heterostructure and photoinduced trapping”, *Nat. Electron.*, **6**, 755 (2023). [領域内共同](#)
- [6] T. Mizoguchi, M. Maruyama, Y. Gao, Y. Hatsugai, \*S. Okada, “Unconventional gapless semiconductor in an extended martini lattice in covalent honeycomb materials”, *Phys. Rev. B*, **107**, L121301 (2023).
- [7] 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, “Nuclear spin polarization and control in hexagonal boron nitride”, *Nat. Mater.*, **21**, 1024 (2022).
- [8] M. Maruyama, Y. Gao, N. T. Cuong, \*S. Okada, “A two-dimensional magnetic carbon allotrope of hexagonally arranged fused pentagons”, *Appl. Phys. Express*, **15**, 035001 (2022).
- [9] Y. Araki, P. Solís-Fernández, Y.-C. Lin, A. Motoyama, K. Kawahara, M. Maruyama, G. Yanlin, R. Matsumoto, K. Suenaga, S. Okada, \*H. Ago, "Twist angle-dependent molecular intercalation and sheet resistance in bilayer graphene", *ACS Nano*, **16**, 14075 (2022). [領域内共同](#)
- [10] Y. Gao, H. Nakajima, M. Maruyama, T. Taniguchi, K. Watanabe, R. Kitaura, \*S. Okada, “Formation of a one-dimensional hole channel in MoS<sub>2</sub> by structural corrugation”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 015001 (2022). [領域内共同](#)
- [11] P. Solis-Fernandez, \*H. Ago, “Machine learning determination of the twist angle of bilayer graphene by Raman spectroscopy: Implications for van der Waals heterostructures”, *ACS Appl. Nano Mater.*, **5**, 1356 (2022).
- [12] M. Li, J.-Y. Wu, K. Sambe, Y. Yakiyama, T. Akutagawa, T. Kajitani, T. Fukushima, K. Matsuda, \*H. Sakurai, “Dielectric response of difluorinated sumanene caused by an in-plane motion”, *Mater. Chem. Front.*, **6**, 1752 (2022). [領域内共同](#)
- [13] H. Ago, "Synthesis and electronic applications of wafer-scale 2.5D materials", SSDM2023 (International Conference on Solid State Devices and Materials) (2023年9月 名古屋) [招待講演](#)
- [14] H. Ago, "Controlled CVD growth of multilayer hBN for 2.5D applications", Inaugural Workshop on Boron Nitride (2023年5月 フランス) [招待講演](#)

- [15] 吾郷浩樹, “ナノの世界のものづくり – 2.5次元物質とは? –”, 第5回大野城市こころサイエンスカフェ (2023年3月, 福岡) [アウトリーチ](#)
- [16] 吾郷浩樹, 深町悟, 河原憲治, 楠瀬宏規, 特願 2023-027540「磁気トンネル接合素子及びその製造方法」特許
- [17] T. Taniguchi, K. Watanabe, James C. McGroddy Prize for New Materials, American Physical Society (APS) (2023). [受賞](#)

### 公募研究

- [18] J. Doumani, M. Lou, O. Dewey, N. Hong, J. Fan, A. Baydin, K. Zahn, [Y. Yomogida](#), [K. Yanagi](#), M. Pasquali, R. Saito, J. Kono, \*W. Gao, “Engineering chirality at wafer scale with ordered carbon nanotube architectures”, *Nat. Commun.*, **14**, 7380 (2023). [領域内共同](#)
- [19] M. A. Rahman, [Y. Yomogida](#), A. Ahad, K. Ueji, M. Nagano, A. Ihara, H. Nishidome, M. Omoto, S. Saito, [Y. Miyata](#), Y. Gao, [S. Okada](#), \*[K. Yanagi](#), “Synthesis and optical properties of WS<sub>2</sub> nanotubes with relatively small diameters”, *Sci. Rep.*, **13**, 16959 (2023). [領域内共同](#)
- [20] \*[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). [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」
- [21] [T. Kato](#), “Highly transparent solar cell based on 2D materials”, MRM2023 Materials Research Meeting (2023年12月 京都) [招待講演](#)

## 研究項目 A02 2.5次元集積構造の構築



### 計画研究

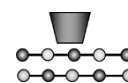
- [1] M. Kaneda, W. Zhang, Z. Liu, Y. Gao, M. Maruyama, Y. Nakanishi, H. Nakajo, S. Aoki, K. Honda, T. Ogawa, K. Hashimoto, T. Endo, K. Aso, T. Chen, Y. Oshima, [Y. Yamada-Takamura](#), [Y. Takahashi](#), [S. Okada](#), [T. Kato](#), \*[Y. Miyata](#), “Nanoscrolls of Janus monolayer transition metal dichalcogenides”, *ACS Nano*, **18**, 2772 (2024). [領域内共同](#), [プレスリリース](#)「非対称な二次元シートを利用したナノサイズの巻物構造の実現」
- [2] W. Zhang, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, [Y. Yamada-Takamura](#), M. Koshino, [S. Okada](#), [K. Matsuda](#), [T. Kato](#), \*[Y. Miyata](#), “Chemically tailored semiconductor moiré superlattices of Janus heterobilayers”, *Small Struct.*, 2300514 (2024). [領域内共同](#)
- [3] \*[Y.-C. Lin](#), [R. Matsumoto](#), Q. Liu, P. Soslis-Fernández, M.-D. Siao, P.-W. Chiu, [H. Ago](#), \*[K. Suenaga](#), “Alkali metal bilayer intercalation in graphene”, *Nat. Commun.*, **15**, 425 (2024). [領域内共同](#), [プレスリリース](#)「グラフェン層間に2層アルカリ金属の最密配列を発見」
- [4] \*[K. Murata](#), G. Kitahara, S. Inoue, T. Higashino, S. Matsuoka, [S. Arai](#), R. Kumai, T. Hasegawa, “Stability of ternary interfaces and its effects on ideal switching characteristics in inverted coplanar organic transistors”, *Phys. Rev. Appl.*, **21**, 024005 (2024).
- [5] K. Kinoshita, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, [T. Sasagawa](#), \*[T. Machida](#), “Polarity-dependent Twist-controlled Resonant Tunneling Device based on Few-layer WSe<sub>2</sub>”, *Phys. Rev. Res.*, **5**, 043292 (2024). [領域内共同](#)
- [6] \*[Y. Nakanishi](#), S. Furusawa, Y. Sato, T. Tanaka, [Y. Yomogida](#), [K. Yanagi](#), W. Zhang, H. Nakajo, S. Aoki, [T. Kato](#), [K. Suenaga](#), \*[Y. Miyata](#), “Structural diversity of single-walled transition metal dichalcogenide nanotubes grown via template reaction”, *Adv. Mater.*, **35**, 2306631 (2023). [領域内共同](#), [プレスリリース](#)「組成・構造の多彩な無機ナノチューブの合成技術の世界に先駆けて開発」
- [7] R. Natsui, H. Shimizu, Y. Nakanishi, Z. Liu, A. Shimamura, N. T. Hung, Y.-C. Lin, T. Endo, J. Pu, I. Kikuchi, T. Takenobu, [S. Okada](#), [K. Suenaga](#), R. Saito, \*[Y. Miyata](#), “Vapor-phase indium intercalation in van der Waals nanofibers of atomically thin W<sub>6</sub>Te<sub>6</sub> wires”, *ACS Nano*, **17**, 5561 (2023). [領域内共同](#)
- [8] X. Huang, Y. Guo, Y. Wu, S. Masubuchi, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, Z. Zhang, S. Volz, [T. Machida](#), \*M. Nomura, “Observation of phonon Poiseuille flow in isotopically purified graphite ribbons”, *Nat. Commun.*, **14**, 2044 (2023). [領域内共同](#)
- [9] Y. Zhang, K. Kamiya, T. Yamamoto, M. Sakano, X. Yang, S. Masubuchi, S. Okazaki, K. Shinokita, T. Chen, K. Aso, Y. Yamada-Takamura, Y. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, [K. Matsuda](#), [T. Sasagawa](#), K. Ishizaka, \*[T. Machida](#), “Symmetry engineering in twisted bilayer WTe<sub>2</sub>”, *Nano Lett.* **23**, 9280 (2023). [領域内共同](#)
- [10] H. Murase, [S. Arai](#), T. Hasegawa, K. Miyagawa, \*[K. Kanoda](#), “Spatiotemporal observation of quantum crystallization of electrons”, *Nat. Commun.*, **14**, 6011 (2023).
- [11] 小野寺 桃子 若藤 祐斎, 増淵 寛, 町田 友樹, 「ファンデルワールス複合原子層の作製: ロボティクスとPVCポリマーの活用」, 固体物理, **58**, 25 (2023).
- [12] \*W. H. Chang, S. Hatayama, Y. Saito, N. Okada, T. Endo, [Y. Miyata](#), \*T. Irisawa, “Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/MoS<sub>2</sub> van der Waals junctions with high thermal stability and low contact resistance”, *Adv. Electron. Mater.*, **9**, 2201091 (2022). [プレスリリース](#)「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」
- [13] 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 (2022). [領域内共同](#), [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」

- [14] [Y. Miyata](#), “1D nanostructures based on transition metal chalcogenides”, 2D TMDs 2023 (2023年6月、ケンブリッジ) 招待講演
- [15] 松本里香, “黒鉛層間化合物の色標本の作製”, 黒鉛化合物研究会 (2023年3月 福岡) 招待講演
- [16] [S. Arai](#), “Crystal engineering of layered organic semiconductors for high-performance printed transistors”, 2022 Asian Conference on Nanoscience & Nanotechnology (AsiaNANO 2022) (2022年11月 韓国) 招待講演
- [17] 宮田耕充, 吾郷浩樹, 松田一成, 長汐晃輔 監修、「遷移金属ダイカルコゲナイドの基礎と最新動向」, CMC 出版 (2024) 書籍

## 公募研究

- [18] M.-P. Lee, C. Gao, M.-Y. Tsai, C.-Y. Lin, F.-S. Yang, H.-Y. Sung, C. Zhang, W. Li, J. Li, J. Zhang, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, [K. Ueno](#), K. Tsukagoshi, C.-H. Ho, J. Chu, \*P.-W. Chiu, \*M. Li, \*W.-W. Wu, “Silicon-van der Waals heterointegration for CMOS-compatible logic-in-memory design”, *Sci. Adv.*, **9**, 49 (2023). 領域内共同
- [19] M. Xue, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, \*[R. Kitaura](#), “Gate-modulated reflectance spectroscopy for detecting excitonic states in two-dimensional semiconductors”, *Appl. Phys. Lett.*, **123**, 063101 (2023). 領域内共同
- [20] Y. Urano, M. Xue, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, \*[R. Kitaura](#), “Assessment of valley coherence in a high-quality monolayer molybdenum diselenide”, *Appl. Phys. Express*, **16**, 065003 (2023). 領域内共同
- [21] [T. Kato](#), “Nano/micro-scale phase change electronics using functional oxides/2D material heterostructures”, 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (2022年11月、徳島) 招待講演

## 研究項目 A03 2.5次元構造の分析技術開発



### 計画研究

- [1] H. Wang, H. Kim, D. Dong, K. Shinokita, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, \*[K. Matsuda](#), “Quantum coherence and interference of a single moiré exciton in nano-fabricated twisted semiconductor heterobilayers”, *Nat. Commun.*, **15**, 4905 (2024). 領域内共同
- [2] H. Kim, D. Dong, Y. Okamura, K. Shinokita, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, \*[K. Matsuda](#), “Dynamics of moiré trion and its valley polarization in a microfabricated WSe<sub>2</sub>/MoSe<sub>2</sub> heterobilayer”, *ACS Nano*, **17**, 13715 (2023). 領域内共同
- [3] K. Shinokita, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, \*[K. Matsuda](#), “Valley dynamics of the moiré Excitons in a WSe<sub>2</sub>/MoSe<sub>2</sub> heterobilayer”, *ACS Nano*, **16**, 16862 (2023). 領域内共同
- [4] T. Fujita, Y. Chen, Y. Kono, S. Takahashi, H. Kasai, D. Campi, M. Bernasconi, K. Ohara, H. Yumoto, T. Koyama, H. Yamazaki, Y. Senba, H. Ohashi, I. Inoue, Y. Hayashi, M. Yabashi, [E. Nishibori](#), R. Mazzarello, \*S. Wei, “Pressure-induced reversal of Peierls-like distortions elicits the polyamorphic transition in GeTe and GeSe”, *Nat. Commun.*, (2023). [プレスリリース](#)「相変化メモリの高度化につながる、圧力下でのガラス相転移機構を解明」
- [5] \*J. Zhang, D. Ishikawa, M. M. Koza, [E. Nishibori](#), L. Song, A. QR Baron, \*B. B. Iversen, “Dynamic lone pair expression as chemical bonding origin of giant phonon anharmonicity in thermoelectric InTe”, *Ang. Chem. Int. Ed.*, **135**, e202218458 (2023).
- [6] M. Shimasaki, T. Endo, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, \*[K. Matsuda](#), T. Nishihara, \*[Y. Miyata](#), \*Y. Miyauchi, “Exciton energy transfer under low temperature in a lateral heteromonolayer of WSe<sub>2</sub>-MoSe<sub>2</sub>”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 112002 (2023). 領域内共同
- [7] H. Kim, K. Aino, K. Shinokita, W. Zhang, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, \*[K. Matsuda](#), “Dynamics of moiré exciton in a twisted MoSe<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub> heterobilayer”, *Adv. Opt. Mater.* **11**, 2300146 (2023). 領域内共同
- [8] Miao, [E. Nishibori](#), R. Chetty, X. Bai, R. Si, J. Gao, X. Wang, Y. Zhu, N. Wang, \*H. Wei, \*T. Mori, “Charge transfer engineering to achieve extraordinary power generation in GeTe-based thermoelectric materials”, *Sci. Adv.*, **9**, adh0713 (2022).
- [9] Y. Zhang, H. Kim, W. Zhang, [K. Watanabe](#), T. Taniguchi, Y. Gao, M. Maruyama, [S. Okada](#), K. Shinokita, \*[K. Matsuda](#), “Magnon-coupled intralayer moiré trion in monolayer semiconductor-antiferromagnet heterostructures”, *Adv. Mater.*, **34**, 2200301 (2022). 領域内共同
- [10] \*R. Senga, [Y. Lin](#), S. Morishita, R. Kato, T. Yamada, M. Hasegawa, \*[K. Suenaga](#), “Imaging of isotope diffusion using atomic-scale vibrational spectroscopy”, *Nature*, **603**, 68 (2022). 領域内共同, [プレスリリース](#)「同位体を原子レベルで識別・可視化することに成功」
- [11] M. Shimasaki, T. Nishihara, [K. Matsuda](#), T. Endo, Y. Takaguchi, Z. Liu, [Y. Miyata](#), \*Y. Miyauchi, “Directional exciton-energy transport in a lateral heteromonolayer of WSe<sub>2</sub>-MoSe<sub>2</sub>”, *ACS Nano*, **16**, 8205 (2022). 領域内共同
- [12] \*[M. Sakano](#), Y. Tanaka, S. Masubuchi, 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<sub>2</sub>”, *Phys. Rev. Res.*, **4**, 023247 (2022). 領域内共同
- [13] Y. Yano, H. Kasai, Y. Zheng, \*[E. Nishibori](#), \*Y. Hisaeda, \*T. Ono, “Multicomponent crystals with competing intermolecular interactions: In situ X-ray diffraction and luminescent features reveal multimolecular assembly under mechanochemical conditions”, *Ang. Chem. Int. Ed.*, **135**, e202218458 (2022).
- [14] [K. Matsuda](#), “Optical science in nanocarbon and artificial atomically thin 2D materials”, Japan-US Network for Clean Energy Technologies Involving Oriented Nanotubes in PIRE program (2023年5月、横浜) 招待講演
- [15] [M. Sakano](#), “Breaking of spatial inversion symmetry in anti-parallel-stacked transition metal dichalcogenides”,



Superstripes 2023 (2023年6月、イタリア) 招待講演

[16] 松田一成, "2.5次元物質における光科学と物性開拓", 第16回物性科学領域横断研究会(2022年11月、オンライン) 招待講演

## 公募研究

[17] J. Doumani, M. Lou, O. Dewey, N. Hong, J. Fan, A. Baydin, K. Zahn, Y. Yomogida, K. Yanagi, M. Pasquali, R. Saito, J. Kono, \*W. Gao, "Engineering chirality at wafer scale with ordered carbon nanotube architectures", *Nat. Commun.*, **14**, 7380 (2023). 領域内共同

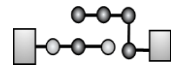
[18] Q. Liu, \*Y.-C. Lin, S. Kretschmer, M. Ghorbani-Asl, P. Soslís-Fernández, M.-D. Siao, P.-W. Chiu, H. Ago, \*A. V. Krasheninnikov, K. Suenaga, "Molybdenum chloride nanostructures with giant lattice distortions intercalated into bilayer graphene", *ACS Nano*, **17**, 23659 (2023). 領域内共同

[19] Y. Kawabe, \*Y. Ito, \*Y. Hori, S. Kukunuri, F. Shiokawa, T. Nishiuchi, S. Jeong, K. Katagiri, Z. Xi, Z. Li, Y. Shigeta, \*Y. Takahashi, "1T/1H-SnS<sub>2</sub> sheets for electrochemical CO<sub>2</sub> reduction to formate", *ACS Nano*, **17**, 11318 (2023).

[20] Y. Sugimoto, "Seeing how ice breaks the rule", *Science*, **377**, 264 (2022).

[21] 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, 堀場雅夫賞 (2022). 受賞

## 研究項目 A04 2.5次元構造の新奇物性開拓



### 計画研究

[1] \*T. Wakamura, M. Hashisaka, S. Hoshino, M. Bard, S. Okazaki, T. Sasagawa, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Muraki, N. Kumada, "Gate-tunable giant superconducting nonreciprocal transport in few-layer Td-MoTe<sub>2</sub>", *Phys. Rev. Res.*, **6**, 013132 (2024). 領域内共同

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

[3] M. Fujimoto, T. Kawakami, \*M. Koshino, "Perfect one-dimensional interface states in a twisted stack of three-dimensional topological insulators", *Phys. Rev. Res.*, **4**, 043209 (2023).

[4] \*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 (2023). 領域内共同

[5] \*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, "Large-scale 1T'-phase tungsten disulfide atomic layers grown by gas-source chemical vapor deposition", *ACS Nano*, **16**, 13069 (2023). 領域内共同

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

[7] 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<sub>2</sub> monolayers", *Phys. Rev. Mater.*, **6**, 064005 (2022). 領域内共同

[8] N. Nakatsuji, \*M. Koshino, "Moiré disorder effect in twisted bilayer graphene", *Phys. Rev. B*, **105**, 245408 (2022).

[9] K. Yamamoto, \*M. Koshino, "Topological gap labeling with third Chern numbers in three-dimensional quasicrystals", *Phys. Rev. B*, **105**, 115410 (2022).

[10] H. Matsuoka, T. Habe, Y. Iwasa, M. Koshino, \*M. Nakano, "Spontaneous spin-valley polarization in NbSe<sub>2</sub> at a van der Waals interface", *Nat. Commun.*, **13**, 5129 (2022). **プレスリリース**「二次元金属に「フェロバレー強磁性」を誘起することに成功 一第三のエレクトロニクスである「バレートロンクス」への応用展開が期待」

[11] Y. Zhang, R. Taniguchi, S. Masubuchi, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida, "Switchable out-of-plane shift current in ferroelectric two-dimensional material CuInP<sub>2</sub>S<sub>6</sub>", *Appl. Phys. Lett.*, **120**, 13103 (2022). 領域内共同

[12] 守谷頼, 竹山慶, 笹川崇男, 町田友樹, 「二次元物質と三次元物質の間にある物性」, 日本物理学会誌 **77**, 627 (2022) 領域内共同

[13] M. Koshino, "Quasicrystals in twisted 2D systems", Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2022 (2022年4月 中国) 招待講演

[14] 越野幹人, 「グラフェンの物理学」, 内田老鶴圃 (2023). 書籍

[15] 高村田紀子, "ケイ素でできた二次元材料「シリセン」の科学", 石川県高等学校文化連盟依頼で理科部所属高校生 (2022年11月、石川) **アウトリーチ**

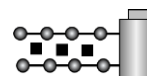
## 公募研究

[16] K. Koizumi, H. T. Phan, K. Nishigomi, \*K. Wakabayashi, "Topological edge and corner states in the biphenylene network", *Phys. Rev. B*, **109**, 035431 (2024).

[17] K. Ueda, R. Murata, T. Sasagawa, \*Y. Shiomi, "Piezoelectric effect in 2H and 3R phases of  $\alpha$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **62**, 061006 (2023). 領域内共同

- [18] T. Yokouchi, Y. Ikeda, T. Morimoto, \*Y. Shiomi, “Giant magnetochiral anisotropy in Weyl semimetal  $WTe_2$  induced by diverging Berry curvature”, *Phys. Rev. Lett.*, **130**, 136301 (2023).
- [19] K. Wakabayashi, “Theoretical design of electronic and optical properties of two-dimensional materials”, International Conference on Frontiers in Pure and Applied Physics (ICFPAP-2024) (2024年7月 インド) 招待講演
- [20] Y. Shiomi, “Reconfigurable single-material Peltier effect using magnetic phase junctions”, Young Research Leaders Group Workshop: Spins, Orbits, Charges, and Heat in Magnets (2022年7月 ドイツ) 招待講演
- [21] 塩見雄毅, 「新・物性物理入門」, 朝倉書店 (2023). 書籍

## 研究項目 A05 2.5次元構造体の電子・光・エネルギー応用への展開



### 計画研究

- [1] K. Imaeda, J. Yue, H. Takeuchi, \*K. Ueno, “Plasmon dephasing and near-field enhancement of periodical arrays of Au nanogap dimers”, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 5659 (2024).
- [2] N. Fang, Y. R. Chang, D. Yamashita, S. Fujii, M. Maruyama, Y. Gao, C. F. Fong, K. Otsuka, K. Nagashio, S. Okada, \*Y. K. Kato, “Resonant exciton transfer in mixed-dimensional heterostructures for overcoming dimensional restrictions in optical processes”, *Nat. Commun.*, **14**, 8152 (2024). 領域内共同, プレスリリース「ナノ半導体界面でのエネルギー共鳴現象を発見—異次元ヘテロ構造を用いた半導体デバイスへの応用に期待—」
- [3] T. Fukui, T. Nishimura, Y. Miyata, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, \*K. Nagashio, “Single-gate  $MoS_2$  tunnel FET with a thickness-modulated homojunction”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 8993 (2024). 領域内共同
- [4] H. Takeuchi, K. Imaeda, S. Ryuzaki, \*K. Ueno, “Exploring hybrid states and their ultrafast dynamics in exciton-plasmon strong coupling systems”, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 2567 (2024).
- [5] J. Inamoto, K. Aga, A. Inoo, \*Y. Matsuo, “Kinetic analysis of sodium-ion intercalation reaction into graphene-like graphite by electrochemical impedance spectroscopy”, *J. Electrochem. Soc.*, **170**, 060550 (2023).
- [6] Y.-R. Chang, R. Nanae, S. Kitamura, T. Nishimura, H. Wang, Y. Xiang, K. Shinokita, K. Matsuda, T. Taniguchi, K. Watanabe, \*K. Nagashio, “Shift current photovoltaics based on a noncentrosymmetric phase in in-plane ferroelectric  $SnS$ ”, *Adv. Mater.*, **35**, 2301172 (2023). 領域内共同
- [7] T. Shingu, H. Uchiyama, T. Watanabe, \*Y. Ohno, “Electrochemical reservoir computing based on surface-functionalized carbon nanotubes”, *Carbon*, **214**, 118344 (2023).
- [8] S. Li, T. Nishimura, M. Maruyama, S. Okada, \*K. Nagashio, “Experimental verification of  $SO_2$  and S desorption contributing to defect formation in  $MoS_2$  by thermal desorption spectroscopy”, *Nanoscale Adv.*, **5**, 405 (2023). 領域内共同
- [9] \*Y. Matsuo, K. Sekito, Y. Ashida, J. Inamoto, N. Tamura, “Factors affecting the electrochemical behaviors of graphene-like graphite as a positive electrode of a dual-ion battery”, *ChemSusChem*, e202201127 (2022).
- [10] T. Sasaki, K. Ueno, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Nishimura, \*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 (2022). 領域内共同
- [11] M. Matsunaga, J. Hirotsu, \*Y. Ohno, “In-plane dual-electrode triboelectric nanogenerator based on differential surface functionalization”, *Appl. Phys. Express*, **15**, 027006 (2022).
- [12] \*K. Funayama, H. Tanaka, J. Hirotsu, K. Shimaoka, Y. Ohno, Y. Tadokoro, “Carbon nanotube-based nanomechanical receiver for digital data transfer”, *ACS Appl. Nano Mater.*, **4**, 25659 (2021). プレスリリース「カーボンナノチューブ1本で視えないアンテナを開発! ~超小型センサなどIoT分野への応用に期待~」
- [13] K. Nagashio, “Device Technology for 2D Layered Semiconductor FETs: Challenge & Perspective”, 2023 Symposia on VLSI Technology and Circuits (2023年6月 京都) 招待講演
- [14] Y. Ohno, “Flexible resistive random-access memories based on carbon nanotubes and their application for reservoir computing”, 243rd ESC Meeting (2023年5月 米国) 招待講演
- [15] K. Ueno, “Plasmon-controlled photochemical processes for spectroscopy and chemical reactions”, SPIE Optics + Photonics 2023 (2022年8月 米国) 招待講演
- [16] 松尾吉晃, “アニオンの挿入脱離を利用したグラフェンライクグラファイトの正極材料としての応用”, 第410回電池技術委員会 (2022年2月 オンライン) 招待講演

### 公募研究

- [17] M. Uemoto, M. Nishiura, \*T. Ono, “Valley filters using graphene blister defects from first principles”, *J. Phys.: Condens. Matter*, **35**, 095301 (2023).
- [18] M.-Y. Tsai, C.-T. Huang, C.-Y. Lin, M.-P. Lee, F.-S. Yang, M. Li, Y.-M. Chang, K. Watanabe, T. Taniguchi, C.-H. Ho, W.-W. Wu, M. Yamamoto, \*J.-L. Wu, \*P.-W. Chiu, \*Y.-F. Lin, “A reconfigurable transistor and memory based on a two-dimensional heterostructure and photoinduced trapping”, *Nat. Electron.*, **6**, 755 (2023). 領域内共同
- [19] Y. Morishima, N. Yamaguchi, H. Sawahata, \*F. Ishii, *Appl. Phys. Express*, **16**, 043003 (2023).
- [20] K. Li, Y. Kinoshita, D. Sakai, \*Y. Kawano, “Recent progress in development of carbon-nanotube-based photo-thermoelectric sensors and their applications in ubiquitous non-destructive inspections”, *Micromachines*, **14**, 61 (2022).
- [21] Y. Kawano, “A Flexible and Stretchable Terahertz Imaging Sheet for Multi-View Visualization”, 29th International Display Workshops (IDW'22) (2022年12月 福岡) 招待講演

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 1. 共同利用拠点の設置・運営

領域内共同研究を組織的に活性化させる仕組みとして、**共同利用拠点を設置し、運営している**。具体的には、合成拠点（九州大学）、集積拠点（東京大学）、光分析拠点（京都大学）、構造分析拠点（北陸先端大学）の4拠点を総括班予算により支援した。これらの領域には、領域メンバーが誰でも自由にアクセスできるようにして、研究の促進を目指した。図1に利用件数を示しているが、**2年半の間に約250件の利用がなされ、領域研究の発展に大きな寄与があった**。東大で開発された自動積層転写装置、積層角度を測定可能な第二次高調波発生（SHG）光学装置など汎用ではない装置群が使用できることは大きな利点である。さらに、図2に示すように、拠点利用の中でも**訪問実験の割合が大きく、領域内での人的交流が盛んに行われた**ことも分かる。

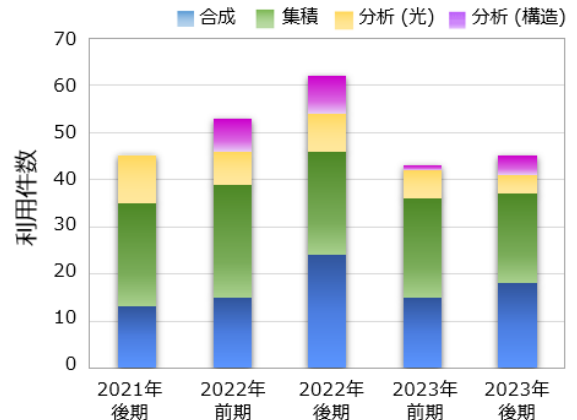


図1 共同利用拠点の利用実績。領域立ち上げ時から利用が伸び、現在は成果を出すステージに移行しつつある。2024年度は第2期の公募研究者の参加により、再度増えるものと考えている。

### 2. 領域内外との共同研究のための組織的取り組み

年2回の領域会議（2年半強で計7回）をはじめとする、サンプル見本市、理論相談会などの対面イベント、そしてオンラインでの領域内共同研究セミナー（これまで25回開催）など、**領域内共同研究を推進するためのイベントを、総括班が中心となって数多く開催した**。

また、領域外の研究者とも交流を深めるため、物性科学領域横断研究会（既に2回参加）、関連学会（応用物理学会、炭素材料学会）でのイベントの企画、さらに、国際連携のため、EUのグラフェン・フラッグシップやブルックヘブン研究所との**合同ワークショップなども開催した**。

### 3. 共同研究による論文発表の状況

領域内共同利用拠点の運営、各種イベント、そして領域研究者に対する共同研究への積極的な動機付けにより、以下に示す多くの成果が得られてきている。

領域から発表した論文209報のうち、**領域内共同研究が81報（39%）を占める**。この割合は非常に大きく、**領域の共同研究が論文の成果にダイレクトにつながったことを反映している**。表1に、共著論文の分布がどの班から出されたかを示しているが、**計画研究のメンバーだけの論文にとどまることなく、公募研究者も大きく関与して論文が多く出ている**。このことは、公募研究が効果的に運用され、領域研究の発展に寄与したことを表している。

さらに、領域内共同研究81報のうち、**3名以上の研究者の共著が35報（43%）もあり、合成→解析→応用、合成→物性→理論のように、領域のネットワークを活用した研究展開が実現できており、その結果、より高いレベルの雑誌への掲載につながっている**。

以上のように、領域運営が組織的、かつ効果的に行われており、非常に多くの共著論文につながっている。

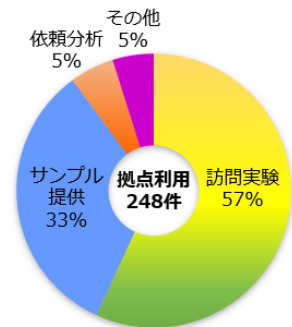


図2 共同利用拠点の利用の内訳。訪問実験が多く、活発な人的交流が行われている。

表1 領域内共同研究による論文数の分布。出版済みの論文数をカウントした（この表では共著は両方の著者をカウントしており、表中の論文数の総数は、実際の論文数（81報）より多い）。

共著論文数		計画					1期公募				
		A01	A02	A03	A04	A05	A01	A02	A03	A04	A05
計画	A01	7	29	22	14	13	3	12	9	0	2
	A02		0	19	17	3	6	3	13	0	0
	A03			1	10	2	3	0	10	0	1
	A04				2	1	2	0	5	1	0
	A05					1	0	6	1	0	0
1期公募	A01						1	0	9	0	0
	A02							0	1	0	0
	A03								0	0	0
	A04									0	0
	A05										0



## 9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

若手研究者の定義:博士課程を中心とする大学院生、および30歳程度までの博士研究員や助教を想定。領域として若手の育成や研究奨励のための活動を行ってきた。以下にその代表的なものを記す。

### 1. 若手研究者の海外インターシップ支援

総括班予算により、3名の大学院生の海外派遣を行った。具体的には、筑波大学の博士学生がデンマークのオーフス大学に3か月弱滞在して放射光の解析法を学び(図1a)、東京大学の博士学生は英国のユニバーシティ・カレッジ・ロンドンに1か月間滞在して、不安定な二次元磁性体の取り扱いを学んだ(図1b)。また、都立大学の修士学生は台湾師範大に滞在して、分光測定を行った。総括班の予算には限りがある中、このように**若手に海外研修の経験を与えたことは、次の世代の育成に大きな効果があった**といえる。

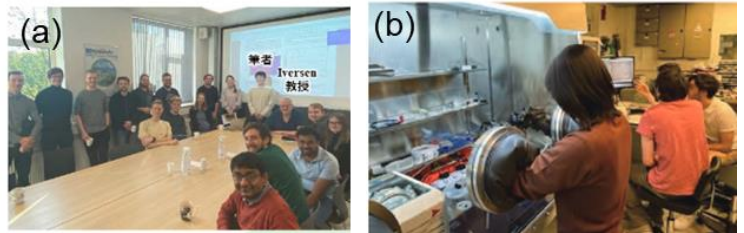


図1 若手研究者の海外インターンシップの写真。(a) デンマーク、(b) 英国での活動の様子。

### 2. 若手研究会の開催

大学院生と若手研究者の交流と育成、ならびに研究意欲向上のため、毎年、若手研究会を対面で開催している(図2)。参加者の研究内容の紹介に加え、領域研究者による基礎的な講義、そして歓談会などを行っている。また、領域の研究分担者である准教授や助教なども一部参加して、後進の進路相談などにも応じている。学生へのアンケートでは、**通常の学会では難しい、異なる大学間での学生の横のつながりを構築できる貴重な場となっており、博士課程進学を含めた進路を考える良い機会**にもなっている、と有用性が認められている。



図2 若手研究会の写真。(a) 第1回2022年6月名大、(b) 第2回2023年9月北大。

### 3. 領域会議による若手のエンカレッジ

これまでの6回の領域会議のうち、第3回以降の領域会議ではポスターセッションを設けて、大学院生を中心とする若手研究者をエンカレッジする場とした(図3)。優れたポスター発表者には奨励賞を授与して、やる気に満ちた学生を奨励している。**受賞した大学院生の中には、領域内の別の研究室のアカデミックポジションを得る者もいて、研究活動に向けた大きな励みになっている。**



図3 第5回領域会議での若手奨励賞の受賞者

### 4. 領域内の若手研究者の受賞や昇進

領域内の研究室に所属している学生は多数受賞している。ここでは計画研究者、および第1期公募研究者のトピックスを挙げる。

**【各種表彰】** 文部科学大臣表彰：(計画 A02 分担) 荒井、花王科学奨励賞：(計画 A02 分担) 荒井、第35回独創性を拓く文部科学大臣賞：(公募 A05 協力) 李

**【プロモーション】** 准教授から教授への昇進：(公募 A03) 杉本、助教から准教授への昇進：(計画 A04 分担) 蒲、助教から主任研究員への昇進：(計画 A02 分担) 荒井、

**【その他】** 学術変革領域研究(B)の立ち上げ (公募 A01 代表) 黒澤

## 10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 1. ニュースレターとパンフレットの発行

本領域では一般の読者にも読みやすく、研究活動や領域への入り口の役割を果たすことを目的としてニュースレターを作成している。総括班でサイエンスコミュニケーターを雇用して、2年半の間に31号と高い頻度で発行している(図1)。研究内容の紹介をはじめとして、複数の研究者による対談、領域会議や若手研究会の報告、海外インターンシップ報告など、多岐にわたる内容を紹介しており、領域の活動を一般に伝える強力なツールになっている。本ニュースレターは領域HPで公開するとともに、メーリングリストでも案内して、できるだけ広く読まれるよう努めている。

さらに、冊子体の領域パンフレットも作成し、各種学会や各種イベントで配布するなど、領域の広報活動に役立てるとともに、SNS(X)も逐次活用した。



図1 領域ニュースレター。2~4週間に1度の高い頻度で発行している。

### 2. オンラインでの公開シンポジウムの開催

領域の研究内容を幅広く知ってもらうため、2023年8月にオンラインで公開シンポジウムを開催した。参加者へのアンケートでは、図2に示す通り、9割以上が満足と回答しており、我が国の研究の活性化につながる、非常に効果的なアウトリーチとして機能した。そのため、今後も毎年開催していく予定である。参加者からのコメントの一部を以下に引用する。

- ・オンラインで開催していただいたため気軽に参加できました
- ・2.5D物質科学のコンセプトと将来ビジョンを理解することができました。
- ・よく成果がまとめられて報告されており、分かり易かった。招待講演も充実していた。

上記の他に、海外研究者によるオンラインの国際セミナーについても、発表者の許可を得て領域外にも公開し、国内研究の活性化へ寄与した。

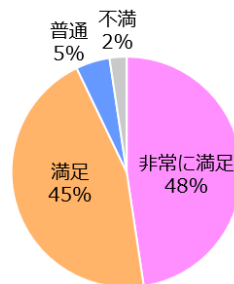


図2 公開シンポジウムのアンケート結果



図3 領域活動報告書

### 3. 年度成果報告書の作成、HPの充実

全研究者の研究内容、および領域としての活動をまとめた報告書を年度毎に作成している(図3)。この報告書は製本して配布するとともに、HPでも公開している。さらに、領域のHPに関しては、日本語はもちろん、英語版HPも毎月1回以上は更新して、世界での我が国の研究のビジビリティ向上にも積極的に取り組んでいる。

### 4. 広報漫画

図4に示すように、「2.5次元研究室へようこそ」と題した漫画を、理系の専門家に依頼して、制作・公開している(既に6話を公開済み)。内容は、学生が領域内の研究室に派遣されて実際の研究を体験するもので、最先端の学術研究が身近に感じられるようにしている。チラシも作成・配布し、大学生などへの啓もうや、中高生の理系への興味を引くことに有効と考えている。

さらに、国際的なアウトリーチを目的として、本漫画の英語版もHPで公開を始めた。



図4 領域研究の紹介漫画

### 5. その他、個別のアウトリーチ活動

サイエンスカフェや出前講義を積極的に行ってきた。特筆すべき点として、洗足学園の高校生によるビジネスプラン・グランプリへの応募とプレゼンテーションにA01吾郷とA05大野が協力することで、5000件の応募の中、審査員特別賞の受賞につながったことが挙げられる(図5)。



図5 ビジネスプラン・グランプリに出場した洗足学園の高校生への指導の様子




## 11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### 1. 総括班予算による共同利用拠点の整備

採択年度に、総括班予算を活用して4か所の共同利用拠点の設備を重点的に整備した。拠点の研究者が所有している特徴ある装置群を本予算でさらに強化することで、領域研究の推進に役立てることを目指した。表1にそれぞれの拠点で整備した装置を示している。共同利用拠点に関しては、領域内の全研究者がアクセスできることを前提としており、29頁に記載の通り、2023年3月末までの2年半の間に250件近くの利用があり、領域研究の活性化に大きく貢献している。これらの拠点を継続的に稼働させていくため、2年度目以降も装置維持費や消耗品、部分的な人件費など、総括班予算から支援を行っている。

表1 初年度に導入した共同利用拠点の装置を強化するための備品とその説明

合成拠点 九州大学 ガス分析システムとグローブボックス	集積拠点 東京大学1 簡易積層システム	集積拠点 東京大学2 高精度積層システム	分析拠点 (光) 京都大学 光学測定用クライオスタット	分析拠点 (構造) 北陸先端 多機能TEM試料ホルダ
				
CVD成長中の雰囲気をも二タリングできる微量ガス分析システムを導入し、高品質の2.5次元物質合成に利用できるようにした。さらに、不安定な二次元物質を扱えるグローブボックスも導入し、共同利用拠点として高品質、あるいは空气中で不安定な二次元/2.5次元物質（インターカレーション物質を含む）を提供できる体制を整えた。	集積拠点として、2ヶ所を東大内に配備している。本装置は簡易積層システムとして、上下に加熱機構を有し、x, y, z, θの全て電動操作が可能な積層用ステージを設計・導入した。また、剛性を高め位置ズレを数ミクロンまで低減したことで、積層が初めての領域メンバーも容易に実験を行えるようにした。	集積拠点として、2ヶ所を東大内に配備している。本装置は機械学習やロボティクスを活用した高度な積層システムを構築するため、電動アクチュエーターやアクティブ微小振動制御システム、ビデオマイクロスコープユニットを導入した。これにより領域内の研究者が高精度、かつ再現性高く所望の2.5次元物質を作製できるようにした。	2.5次元物質での先端光計測のための独自に設計された光学系と組み合わせる低振動無冷媒クライオスタットを導入した。4Kのサンプル冷却が可能であり、そのような極低温下での発光分光、時間分解分光、コヒーレント分光など様々な測定が可能となっており、本領域での共同研究推進のため活用されている。	透過電子顕微鏡 (TEM) に挿入して使用する特別に開発した試料ホルダを導入し、TEM中の2軸傾斜、4端子測定、および試料の大気非曝露挿入を可能となった。原子分解能観察を両立するため、超高分解能構成のTEMの狭いボールピース間隔に挿入できるよう、本領域のために特別に開発された。

### 2. 総括班予算の効果的な活用

本領域が対象とする研究分野は世界的な競争が激しい分野である。そのため、領域に所属する研究者が各自の研究に集中する時間やエフォートの確保は重要である。そこで、研究者の負担を軽減するため、総括班予算で領域の事務スタッフを領域代表の研究室で2名雇用し、領域のコントロールタワーの役割を持たせ、事務処理の円滑化・効率化を進めた。さらに、サイエンスライターと理系の漫画家と契約することで、より効果的なアウトリーチにつなげることを目指した。総括班予算はグラフィック・フラッグシップやアジア三か国 (A3) との国際ワークショップの支援、領域パンフレットや研究成果報告書などの印刷、ホームページの作成にも用いた。さらに、領域会議の開催費をはじめ、若手研究者の育成のための若手交流会の開催やインターシップの補助に総括班予算を活用した。また、ミーティングやセミナー等においては、オンラインを積極的に活用して経費削減に努めた。

### 3. 各研究計画での主要装置の導入

以下に、計画研究で購入した装置の一部を記載する。本領域予算で購入した装置は、領域内の研究者にオープンにする方針で運営しており、装置のリストを Google スプレッドシートにより情報共有して、必要な時に研究者に相談できるようにしている。

- ・A01 (物質創製) CVD 装置、窒化物合成装置、クロマトグラフ、ワークステーション
- ・A02 (集積構造) 原子間力顕微鏡、高倍率自動顕微観察システム、顕微冷却加熱測定システム、
- ・A03 (分析技術) 薄膜 X 線回折装置、レーザー光源、試料アライメント装置、グローブボックス
- ・A04 (物性開拓) 磁区観察装置、クラスタ計算機、微小単結晶方位解析システム、レーザー顕微鏡
- ・A05 (応用展開) 超高真空金属蒸着システム、プレジジョンソースメジャーユニット、排気ユニット

## 12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

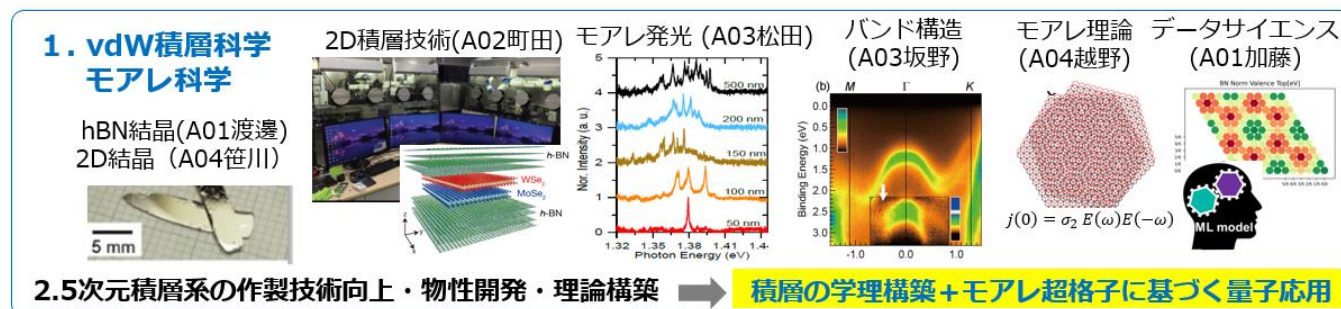
### 1. 領域としての研究の方向性

領域立ち上げから2年半が過ぎ、領域としての強みや連携体制が明確になりつつある。それと同時に、予期しなかった成果や新たな研究の萌芽も認められつつある。今後は、新たなシーズも含めて研究を一層発展させるとともに、将来の社会変革に向けた応用研究も積極的に推進していく計画である。以下に、今後の期間に強化していく研究の柱について説明する。

#### 1. ファンデルワールスの自在制御による積層科学とモアレ超格子が拓くサイエンス

ファンデルワールス力を自在に制御して、組成・角度・層数を自在に積層できることが、この2.5次元物質科学の大きな魅力であり、これまでの2年半で下図に示すように、領域内共同研究によって研究が飛躍的に発展した。特に一個のモアレからの発光の観測や物性理論とデータサイエンスの融合など興味深い試みが出てきた。今後、学術の変革を目指して、以下の2つの大きな研究を進展させていく。

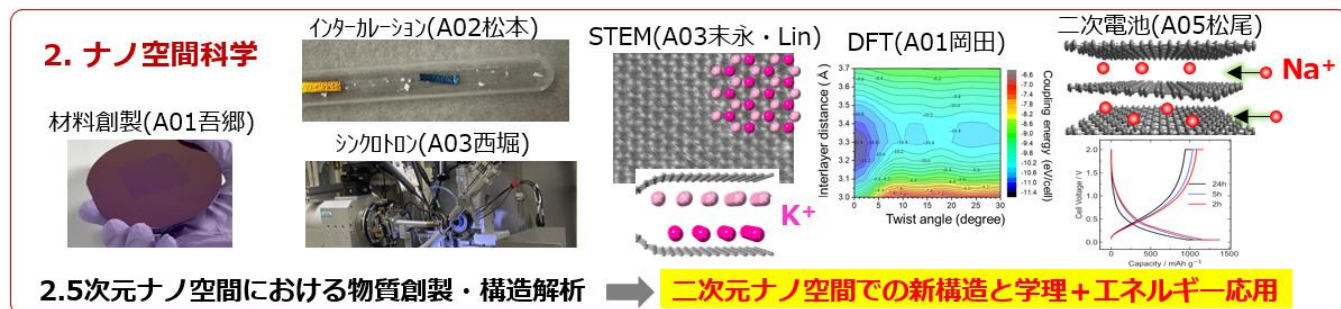
- ・モアレポテンシャルに閉じ込められた励起子からの単一発光の制御と量子応用
- ・モアレ理論（バンド計算）とデータサイエンスを融合させた積層系の学理構築



#### 2. 2.5次元物質のもつナノ空間を舞台とするサイエンスとエネルギーへの展開

高いフレキシビリティをもつ2.5次元物質の層間へのイオンや分子の挿入は、従来の黒鉛層間化合物などと大きく異なることが明らかになってきている。これまでの2年半の領域研究から、二層グラフェン層間でアルカリ金属の二重積層構造や、高角度積層への優先的なインターカレーションなど新たな発見があった。また、シンクロトロンでの層間距離を含む構造の直接測定や数層グラフェンの電池応用の研究なども進んできた。今後、社会変革も目指して、以下の2つの大きな研究を進展させていく。

- ・黒鉛では入らないとされるNaイオンの二層グラフェンへのインターカレーションと統一的理解
- ・数層グラフェンの二次電池への応用



#### 3. 2.5次元物質による新規機能をベースとしたエレクトロニクス、フォトニクス応用推進

2.5次元物質は原子レベルの厚みと優れた電子・光物性から、エレクトロニクスやフォトニクスへの応用が期待され、本領域では応用を支える転写技術などを含めて着実に研究が進展している。今後は社会変革に向けた取り組みとして応用研究により強くコミットしていく。なお、領域発足時に比べて半導体産業の重要性が大きく取り上げられ、**二次元/2.5次元物質の2030年代のポストシリコン半導体への応用**

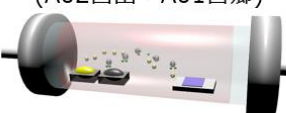


が大きな期待を集めており、領域としても貢献していく。

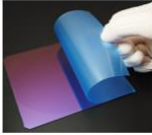
- ・ 2.5次元物質による省電力、創電力、センサの創製など、社会変革の基盤技術の構築
- ・ 合成から転写、積層までのプロセスをベースとしたエレクトロニクス分野への応用

### 3. エレクトロニクス フォトニクス応用

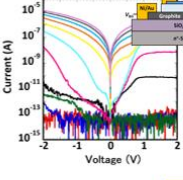
CVD成長  
(A02宮田・A01吾郷)



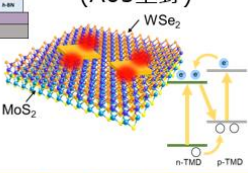
大面積転写技術  
(A01吾郷)



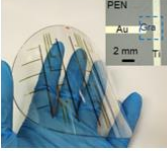
省電力トンネルFET  
(A05長汐)



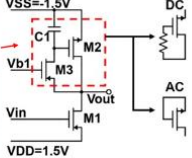
プラズモニクス  
エネルギー応用  
(A05上野)



THzセンサー  
(A05河野(公募))



回路応用  
(A05大野)



2.5次元の合成・転写技術とデバイス応用の融合➔2.5次元物質の特性を生かした電子・光デバイス応用

#### 4. 領域内の共同研究から新たに出てきた萌芽的研究の発展

本領域の立ち上げにより、ヤヌス TMD と TMD ナノスクロールの作製(16 頁)や革新的テープ転写法(14 頁)など、当初は予期しない成果が得られつつある。また、有機分子と二次元物質との組み合わせなど新たな試みも進んできた。さらに、透過電子顕微鏡、プローブ顕微鏡、電気化学プローブなど強みを持つ公募研究者が参加して、領域研究がさらに強化されてきた。これらの領域独自の萌芽研究や共同研究を残り 2 年間に発展させて、研究の新しい潮流を生み出していく。

#### 2 : 公募研究との協働

本領域の研究内容や取り組みの魅力が伝わったため、公募研究への申請が第 1 期の 96 件から第 2 期では 136 件と大幅に増加した (42%増加)。そのため第 2 期公募の採択率は約 15%となり、優れた研究者を迎えることができた。なお、2024 年 4 月に加わった第 2 期公募研究者の多くが、物性と応用に向けた基盤研究を行っており、領域としてさらなる広がりが得られ、既に多数の共同研究が始まっている。

#### 3 : 組織としての領域推進の方策

##### 1. 共同利用拠点の拡充

領域の共同研究拠点は、領域研究を活性化するのに極めて大きな貢献をしている。今後、この領域内の共同研究を一段と発展させるため、現在 4 カ所ある共同利用拠点に計算支援拠点 (筑波大学・岡田) を加えて理論的なサポートも担う 5 拠点体制として、高いレベルのアウトプットにつなげる

##### 2. 国際的なネットワークの構築

国際的なビジビリティ向上を目指して、領域として海外に出て行ってアピールするとともに、国際的なネットワークの強化を進め、本領域を中心とする学術の底上げに貢献していく。

- ・ 2024 年 9 月に、10 名の領域研究者が英国のケンブリッジ大学とチェコのヘイロフスキー物理化学研究所をめぐり、共同で国際ワークショップを開催することが決まっている。
- ・ 二次元物質に関するアジア最大の国際会議である RPGR2025 (Recent Progress of Graphene and Related Materials) を本領域が主体となって、2025 年 11 月に開催する。トップクラスの研究者が数多く集まる会議であり、30 人以上の海外からの招待講演者を招いて、我が国のサイエンスを世界にアピールする。

##### 3. 若手の活躍の支援

これまで若手だけの研究会や若手向けの講義、若手奨励賞の授与、国際的なインターンシップの機会を提供してきており、若手のモチベーションアップや博士課程進学率の向上、また助教への昇任など確実に成果が見えてきた。今後も若手の活躍を支援する取り組みを行い、我が国の次の科学技術の発展に寄与する。

##### 4. 社会変革に向けた取り組み

企業の研究者やベンチャー、ファンディングエージェンシーの担当者を招いたオープンイノベーションミーティングを本領域でこれまで 3 回行ってきたが、産学官連携の推進に大きく役立っている。今後も活動を継続して、領域から出てきた成果を産業界に展開していく。特許出願も強く推奨していく。

## 13 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 【総括班評価者による評価】

#### 齋藤 晋 先生（総括評価者、東京工業大学 特命教授・名誉教授（物理担当））

構造と物性に無限の自由度を持つナノメートルスケールの物質科学が1980年代に黎明期を迎え、その後、0次元フラレン系、1次元ナノチューブ系の研究を経てナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の広範な展開へと繋がってきた。現在、その中心に位置する領域が本2.5次元物質科学領域である。各国において最重要視されている領域の一つである本領域における研究展開の帰趨は、今後の世界における我が国の位置づけにも影響を与え得る重要なものである。そのような大きな責務を担う本研究領域メンバーによるこれまでの研究展開は、質・量ともに期待を大きく上回るものと評価される。本領域の組織構成の特徴として、「理論班」をおかないで5班（総括班を含むと6班）で構成され、かなり班数が多いこと、しかも、多くの学術変革領域研究では並立する研究課題がグループ化されて班が構成されており、班の数は「横の広がり」を示すものであるのに対し、本領域では各班の目標が物質創製から応用展開まで階層的なものとなっており、班の数が「縦の厚み」をも示すものとなっていることが挙げられる。これは、本領域の社会的な重要性を示すものであると同時に、通常以上に班を超えた（「縦断」した）共同研究展開が求められていることも示している。そして、実際に本領域では多くの研究者が縦横無尽に共同研究を実施し、多様な成果を挙げてきている。さらに、学術変革領域研究活動に期待される、成果の世界へのアピールと国際共同研究も順調に展開しはじめた状況である。今後のさらなる活動展開が非常に楽しみである。

#### 斉木 幸一朗 先生（総括評価者、東京大学 名誉教授（材料担当））

2次元物質の積層様式あるいは層間での物質制御を0.5次元と象徴的に表現した2.5次元物質科学は、従来の物性研究になかった独創的な構想に基づき、物質創製、構造評価、物性探索の第一人者が集まり、領域代表および総括班の強いリーダーシップの下、順調に運営されている。グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイドに代表される2次元物質の最大の特徴は、積層様式の違いによる多彩なポリタイプの存在と、その違いがもたらす豊穡な物性の発現である。従来、この積層様式を自由に制御することは不可能であったが、本プロジェクトではこの技術を発展させ、机上の空論であった様々な積層様式をロボティクス技術なども用いて効率的に作製し、理論との協奏によってその系がもたらす新しい物性の探求を進めている。合成、積層、構造解析、物性測定など共同利用拠点の整備とその有効な運用はプロジェクトの大きな特徴で、構成メンバーのほとんどが参加している様々な共同研究がすでに多数論文として結実していることは制度設計の成功として高く評価できる。国際ワークショップ、国際連携セミナーも多数開催され、また領域内の共同研究セミナー、サイトビジットも定期的におこなわれていてプロジェクトの活性化に大きく寄与している。引き続き革新的成果の創出とその国際的認知度を上げる努力を継続するとともに、新しいデバイス発現の芽となる知見の獲得を期待するものである。

#### 横山 直樹 先生（総括評価者、富士通株式会社 名誉フェロー）

複数の二次元物質を組み合わせ、単独の二次元物質では実現できない新物性の開拓を狙った2.5次元物質科学。そのコンセプトが共有され、2.5次元物質の合成、積層、分析、物性、応用、それぞれ分野を牽引する総括・研究代表者が総括班に集まっている。共同利用拠点とネットワーキングが極めて有効的に機能しており、例えば、六方晶窒化ホウ素膜や遷移金属ダイカルコゲナイドの成長技術が進展し領域内研究者にサンプル共有されるとともに、高度化されたロボティクス技術によりこれらの二次元物質を任意にファンデルワールス積層できるようになっている。それらの成果として、例えば、ツイスト二層 $WT_e_2$ の空間反転対称性がツイスト角により制御できることが見いだされている。また社会への還元を目指した研究も進んでおり、2.5次元物質の電子デバイス、化学センサ・光エネルギー変換素子、熱電・蓄電応用やテラヘルツ・赤外機能素子応用等が期待される。公募研究などを通じて異分野の研究者を巻き込むとともに、将来を担う若手研究者の育成に力をいれていることも評価できる。

#### 金子 克美 先生（総括評価者、信州大学 特別特任教授（化学担当））

我が国からの独自の成果に基づく高いレベルのカーボンナノチューブ研究が世界を牽引してきた影響で、

グラフェンに代表される 2 次元系の科学研究の取り組みが世界の進歩から見ると相対的に遅れていた。優れたグラフェンの創製と物性研究で独自の成果を上げてきた研究代表者を中心として、物理学、化学、材料科学などを包含する広い視点を強化したグループ研究によって、2次元系物質の科学を基にして高度の新物質科学領域を創成せんとする本学術変革領域研究の推進は時宜を得たものである。本学術変革領域は、2次元物質科学にナノテクスチャーを取り入れて独自の次元性を有する物質科学領域を創成して、世界の科学界でピークを形成しようとする意欲的なプロジェクトである。これまでの本領域の活動を見ていると、確かに各研究グループ間の活発な共同研究により、従来の”専門領域“を超えた学術が創成され始めている。このような専門領域を横でつなぐ学術の創成活動が進展にすると、次のステージにおいて縦に伸びる全く新たな学術の世界的なピーク形成に繋がると期待できる。

#### **齋藤 理一郎 先生（総括評価者、東北大学 名誉教授、台湾師範大学 講座教授（物理担当））**

昨年度より総括評価者になり、昨年度末の領域会議に出席いたしました。途中からの参加ですので、全体像を必ずしも把握しているわけではありませんが、領域会議に出席し領域代表をはじめ多くの研究者が、相互の連携に積極的に関与し、共同研究が多数確立しているように感じました。私自身も新学術領域研究「原子層科学」の領域代表をした関係で、吾郷領域代表の新しい工夫並びにご苦労が良くわかります。計画研究の代表者の方が、サンプルの提供を、10 を超える研究グループに提供されている状況もあり、提供者が共同研究を進めるスタート地点を非常に多く提供しています。今後サンプルを受けた研究者が中心となって、それぞれの共同研究がどのように研究成果としてまとめるかが中間報告や最終報告の焦点となると考えています。また、印象的だったのは総括班のメンバーの役割分担がはっきりして、領域代表の考えを忠実に実行されていることです。ニュースレターが毎月発行されるなど、領域のアクティビティが良く伝わります。大学院生のインターンシップ報告など、領域が主体となった活動も興味深く拝見しました。総括班を中心とした活動は十分であると思います。今後、独立した研究者による単独の大きな成果も育つような活動をサポートするような体制があるとよいと思いました。

#### **【海外アドバイザーからのコメント】**

**Prof. Stephan Roche (Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology, Spain)** I evaluate the “Science of 2.5 dimensional materials” project, led by Prof. Ago, as an exceptional research project on 2D materials which has achieved a large number of ground-breaking results in materials growth, integration, theory and applications. What is also quite remarkable is the level of internal collaborations and synergies between project members and the internationalization actions which are key for accelerating proper dissemination of results and fostering novel joint directions of work. The scientific achievements are first-class and position Japanese science in 2d materials in the ivy league of worldwide leaders.

**Prof. Young Hee Lee (Sungkyunkwan University, Korea (Former director of “IBS center”))** I can say that this team is conducting this project smoothly by looking at the published papers. This is outstanding performance in terms of quantity and quality of published paper. In particular, collaboration within the PIs is very impressive. This strongly indicates that PIs are really working together as a world-class leader. I have been actively presenting at many international conferences and in good contact with PIs in 2.5D project. They have actively demonstrated excellent presentations with the state-of-the-art sciences and applications. Overall, the project has well been acknowledged in the international community. (以上、要約)

**Prof. Chun-wei Chen (National Taiwan University (NTU), Taiwan)** This project has achieved significant success in advancing materials growth, as well as in the electronics and energy applications of 2D atomic-layered materials. The research team has published many high-impact papers in this field. The outstanding leadership and organization have effectively coordinated many excellent Japanese scientists to work together on this emerging research topic. I strongly recommend continued support for this project to further explore the new science based on the concept of 2.5D materials.

**Prof. Junichiro Kono (Rice University, USA (Director of Smalley-Curl Institute))** I am very impressed with the achievements made in this project during its first 2.5 years. A unique strength of this team is the assembly of luminary researchers in this field in Japan with combined expertise ranging from materials synthesis, theory to materials characterization, and device fabrication. The various collaborations enabled by the project are going well at all levels, resulting in an impressively large number of publications in a short period – more than 200 papers in only two and half years. Further achievements of new materials science are expected through this project in the next years. I strongly suggest that the funding period of this project should be extended for another 2.5 years and more international collaborations should be developed to promote the unique 2.5D concept. (以上、要約)