

## 令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

【1. 日本側拠点機関名】東京大学

【2. 日本側研究代表者 所属部局名・職名・氏名】大学院工学系研究科・教授・岩佐義宏

【3. 日本側協力機関名】東北大学、物質・材料研究機構、東京大学生産技術研究所、京都大学、九州大学、名古屋大学、理化学研究所、大阪大学

【4. 研究課題名】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

【5. 研究分野】

物理・化学・材料科学にまたがる分野において、ナノメートルスケールの物質を対象とした、物性と機能の探索研究である。これらの物質群は、ファンデルワールス結合で積層した層状物質をスコッチテープによるへき開や、化学気相堆積法(CVD)、分子線エピタキシー法(MBE)などによって作製される。厚みが1～数ナノメートル程度の2次元物質と呼ばれる極薄膜や、その人工的な積層構造物質が含まれる。主要な物質は、グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)などであり(図1)、積層構造には、異種物質のヘテロ接合や、同じ物質を角度をひねって積層するモアシ超格子などが含まれ、格子定数の整合性が悪くても形成できる積層構造で、人工的に作製可能な新物質と言える。この分野は近年世界的に急激に進展し、物質科学の中で非常に大きな分野に成長している。



岩佐（東京大学） Yuan（南京大学） Cheong（西河大学）

図1 2次元物質と日中韓代表者

【6. 実施期間】

平成30（2018）年8月～令和6（2024）年3月（5年8か月間）

【7. 全交流期間を通じた目標】

本研究交流の目的は、2次元物質分野において、我が国と中韓両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である。具体的には、①国際連携研究の加速・拡大、②1年3回の研究セミナーの定例開催と国際会議の主催、③中・韓共同研究機関への1週間から数か月レベルでの若手研究者の海外派遣を行う。

【8. 日中韓を中核とする世界的水準の研究交流拠点の構築状況】

・2次元物質科学分野において日中韓の三国は、それぞれ、材料、物理、デバイス応用に強みがある傾向にあり、実際、参画したメンバー構成もそのようになっていた。特に我が国は、NIMSの谷口、渡辺が合成する六方晶窒化ホウ素(hBN)が、2次元物質の基板材料あるいは保護膜として世界標準となっており、世界中の2次元物質研究者が彼らのhBNを使って研究するという状況にあった。そこで本A3事業では、谷口先生に分担者として加わっていただき、従来からの共同研究を続けるとともに、新しい中韓の共同研究者を開拓し、それを核としながら

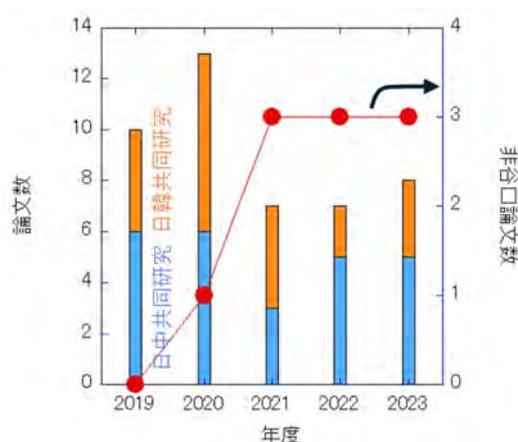


図2 論文数の年次推移

## 令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

も新たな共同研究を行いネットワークを広げるとの方針を取った。その結果、中国側の分担者である Zhang（復旦大学）ら、以前からの共同研究者から共著論文が順調に出版されるとともに、新しい共同研究者も着実に増えていった。最終的に、本 A3 事業期間に出版された日中、日韓の共同研究論文数は計 45 報（内訳：日中 25、日韓 20）となったが、その年次推移を図 2 に示す。期間中を通じて中韓両国との共同研究が安定して出版されていることがわかる。最初から共同研究論文が多いのは、谷口先生の hBN を用いた共同研究がすでに進行していたため、一方で 2 年目から谷口先生の hBN を必ずしも含まない共同研究が立ち上がっていったことがわかり、上記の方針通りに展開していったことがわかる。以下では本 A3 事業によってはじめて可能になった hBN を用いた新しい共同研究と、それ以外の共同研究の成果について、その代表例を説明する。

## ・本 A3 事業によって始まった、谷口先生の hBN を用いた新たな共同研究の代表例

- Cheong 教授グループ（西河大、韓国代表者）： 教授らは上下を hBN でカバーした  $\text{MoSe}_2$  と  $\text{WSe}_2$  の単分子膜からなるツイストしたファンデルワールス (vdW) ヘテロ構造の光学的性質を明らかにした。ラマン散乱からは、ツイスト角の全範囲において、モアレ周期性の追加による新しいフォノンモードと、層間振動モードも観測され、その周波数が特異なツイスト角依存性を示した。(ACS Nano, 2023)。また、このようなツイスト試料を  $800^\circ\text{C}$  で熱処理することによって、どのようなツイスト角でも原子の再配列が起こり、ねじれ角  $0$  度とねじれ角  $60$  度の完全整合構造に変化することを発見した (Nature Materials, 2023)。本成果は、ツイスト TMD ヘテロ構造のフォノン構造を詳細に明らかにした初の成果である。hBN は数層 TMD を空気中で安定して保持するために必須で、以下の例でも同じような目的で用いられた。

- Xi 教授グループ（南京大、中国分担者）： 1T 型の構造を有する  $\text{TaS}_2$  は古典的な物質で結晶格子がダビデの星形の電荷密度波 (CDW) 状態を取ることが知られている。Xi 教授らはこの CDW 状態に左回りと右回りの 2 つの回転自由度があることに注目した。10 ナノメートル程度の薄膜では、電場印加によって、この回転秩序を反転させることができることを、円偏向ラマン分光によって明らかにした (Nature Nanotechnology 2023)。本研究は CDW の回転自由度を電界制御した画期的な成果である。

## ・本 A3 事業によって始まった、谷口先生を含まない共同研究の代表例

- 末永教授（阪大、日本分担者）— Shin 教授（UNIST、韓国分担者）： Shin 教授らはグラフェンと hBN の界面のエッジで、強い青発光が起こることを発見した。この青色発光はグラフェン/hBN 界面の端に存在する乱れた構造に局在した電子状態に由来するという解釈を提案した (Nature Communications, 2020)。末永教授は、走査型高分解能電子顕微鏡によってその界面の構造を明らかにしたが、上記の解釈に本質的な役割を果たした。グラフェンと hBN の界面から発生する可視光領域の光機能はきわめて珍しく、今後の発展が期待される。

- 岩佐教授（東大、日本代表者）— Yuan 教授（南京大学、中国代表者）： vdW ヘテロ接合は、格子整合を必要としないヘテロ接合を形成することができるため、従来手法では不可能なヘテロ接合物質を、非常に多様に作製することができる。本研究グループは斜方晶構造の黒リンと三方晶構造の二セレン化タングステン  $\text{WSe}_2$  のヘテロ接合を形成することによって、面内極性が発生しゼロバイアス下で光電流が流れることを発見した。この証明を行うため、光電流のマッピングを南京大 Yuan 研に大学院生を派遣した。この成果は 2021 年に Science 誌に発表されたが、2 次元物質の対称性制御に vdW ヘテロ接合が使えることを示した重要な成果となった。本研究は、その後 Yuan-岩佐チームが継続発展させているだけでなく、

## 令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

Boston College のグループが量子計量(Quantum metric)と呼ばれる物理量を観測する際の手法にも応用された。

-菅原准教授（東大、日本分担者）-Zhou 教授（清華大学、中国分担者）：MBE はへき開やCVDでは作製できない2次元物質を作製する方法で、物質探索上、重要な位置を占めている。菅原先生はMBEと角度分解高電子分光（ARPES）を組み合わせて、他にはできない物質の作製と物性解明を行っている。本研究では、菅原氏側がグラフェン上の単層1T-TaTe<sub>2</sub>を作製する手法を確立し、この技術を清華大学に持ち込み、菅原氏にはできない時間分解光電子分光測定を行うという共同研究を行った。その結果、単層1T-TaTe<sub>2</sub>において光に対し強固なモット絶縁相を実現していることを明らかにした(Nature Communications, 2021)。菅原グループの単層TMDの研究はMBEでしか作製することができないため、きわめてユニーク且つ重要な研究と位置付けられ、そのため中韓の研究者も興味を持って共同研究をしている。現在は、ツイストグラフェンに関する共同研究について日本の放射光施設で行う事を検討している。

以上、個別の成果として説明したが、谷ログループのhBNは言うまでもなく、岩佐グループのvdWヘテロ接合や菅原グループの単層膜など、日本の強みである材料的な研究が、本A3事業の国際共同研究を通して学術的価値の高い成果につながったと総括できる。

- 本事業により得られた成果の社会への還元状況

-2023年2月韓国分担者の梨花女子大学 Sang Wook Lee 教授が、学生9名とともに教育の一環として東京大学の岩佐研究室を訪問した。これは本A3事業があって初めて可能になった新しい教育交流である（図3）。



図3 韓国梨花女子大学のLee教授と学生の東大訪問

- 本事業により日本側拠点機関が得た国際的な強み・特徴

-2021年、本A3メンバーの吾郷教授（九大）を代表者として科研費科研費学術変革領域研究（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」が立ち上がった。この分野を代表とする大型プロジェクトには、本A3メンバーが数多く参画し、総括班にも4名が参画している。下記のとおり2025年のRPGRの主催を予定しているとともに、2023年英国のケンブリッジで開催され、2024年は香港で開催するもう一つの国際会議2D TMDとも連携をとっている。A3が主催してきた年3回のセミナーも、この「2.5次元」プロジェクトの開始後は共催とし、「2.5次元」メンバーの参画もあった。このように、本A3事業に続いて「2.5次元」プロジェクトが立ち上がったことは、諸外国に向けて、当該分野における我が国の存在感をアピールする大きな強みとなった。

- 相手国側拠点機関や国内外協力機関との協力連携体制

-国際会議 Recent Progress on Graphene and Two-dimensional Materials Research (RPGR)への貢献：この会議は、毎年アジアで開催される、2次元物質に関する国際会議である。本A3事業の申請時から、2019年に松江市で、東大の岩佐組織委員長として開催することが決まっていたため、本A3事業では、このRPGRを日中韓における当該分野の拠点形成のスプリングボードとする計画を立てた。2019年の会議は大成功裏に終わったが、その会における国際諮問委員会（International Advisory Board (IAB) Meeting）において、本A3事業の参加者が多くIABに加わることが決定し、IABの議長にはまず東北大の尾辻教授（日本分担者）が就任した。その後は、韓国西河大学のCheong教授（韓国代表者）が引き継ぎ、議長を務めている。2020年はコロナのため中止されたが、続いてソウル（2021年オンライン形式）、台北（2022年ハイブリッド形式）、ベンガルール（2023年原

## 令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

則対面形式）と開催され、2024年は本A3事業の中国側代表者である南京大のYuan教授を組織委員長として南京で、対面形式開催されることが決まっている。さらに、2025年には本A3事業の日本側メンバー吾郷教授（九大）を組織委員長として、富山で開催するよう準備が進んでいる。このように、当該分野の重要な国際会議の運営をA3のメンバーが牽引し、A3事業の成果をアジアのみならず欧米からの参加者に広くアピールするとともに、A3メンバーとRPGRの多くの参加者が継続して交流できる機会を創ることができた。このことは、本事業による国際的ネットワーク形成において、初期の目的以上の大きな成果である。

## 【9. 次世代の中核を担う若手研究者の育成】

・若手研究者の能力・資質等向上に資する育成プログラムの実施及びその効果について：本項目はコロナの影響のために極端に制限されたが、数少ない機会を利用して特筆すべき成果があったので、これについて以下で説明する。

- 岩佐（東大）-Yuan（南京大）：コロナ禍の直前、2019年12月、2020年1月、2月にそれぞれ1週間ずつ、大学院生の赤松と助教の井手上が南京大学Yuan研に出張し、ゼロバイアス光電流のマッピング測定を行った（図4）。その成果は、赤松を第1著者、井手上を責任著者として2021年Science誌に発表された。



図4 南京大で実験中の赤松氏

- 菅原（東北大）-Zhou（清華大）：コロナ禍の真っ最中の2021年2月、大学院生の中田が、単層1T-TaSe<sub>2</sub>の時間分解光電子分光を行うために清華大学のZhou研究室に2週間程度滞在し実験を行った。その後、Zhouグループと共にデータ解析を行い、中田を第1著者として同年12月にNature Communications誌に出版した。

- 菅原（東北大）-Yeom（POSTECH）：韓国POSTECHのYeomグループの大学院生1名が2023年1月から約1ヶ月菅原研究室に滞在した。目的は、単層TaSe<sub>2</sub>や単層NbSe<sub>2</sub>などのTMD薄膜のMBE合成手順について学ぶことである。菅原研のMBE装置を用いて単層TaSe<sub>2</sub>薄膜の合成に成功し、ARPESを用いて単結晶薄膜が得られている事を確認した。現在この試料のSTM実験に関する共同研究を進めている。

## 【10. 中間評価指摘事項への対応】

- ・中間評価指摘事項は、以下の2点に集約される。
- ① 一方、多くの研究者が参画していることを考慮すると、もう少し活発な共同研究および共同発表が行われていてもよいのではないかと。特に、韓国側拠点機関との共同研究・交流の成果が少ないのは本事業推進上の課題と判断される。
- ② 若手研究者育成の側面では、コロナ感染の影響を直接受けて、交流会・若手セミナーを模索している様子が中間報告書から読み取れる。今後は、コロナに適應した効果的な若手研究者育成ネットワーク形成への工夫が期待される。

-上記指摘事項への対応は以下の通りである。

- ① 韓国との共同研究が少ないとのこと指摘は、報告書の説明文に韓国との共同研究に関する説明が不足していたことによる誤解である。図2にみられるとおり、韓国との共同研究も1年目から全期間を通して活発に行われていると考えている。この誤解を避けるため、本成果報告書では図2を示すこととした。全体を通して、谷口氏のhBNを用いた共同研究が主要な成果であるが、後半には新たな共同研究の成果が論文として出版されている。
- ② セミナーは計12回行い、若手講演やパネルディスカッションなどを導入し、若手の活性化を促す努力を続けた。しかしコロナ中のオンライン形式の交流では限界があった。やはりセ

## 令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

ミナー（会議）での若手交流に関するハイライトは対面でのポスター発表と交流会である。2023年2月にソウルで開催したセミナーは、ハイブリッド形式になり、久々に対面での議論、懇親会が可能になり、非常に盛り上がった。最終回の南京も同様であった（図5,6）。それまでのオンライン開催を余儀なくされた年3回のセミナーにおいて 様々な若手交流の工夫（若手講演・パネルディスカッションなど）が功を奏したと言える。

一方、制限がきつかったにも関わらず、少数ながらも院生、若手スタッフの派遣と受け入れを行い、それぞれに非常に有効な成果をもたらしたことは強調しておきたい。具体的には項目【9】で説明されている。



図5 左 2023年2月ソウルにおけるセミナー後の懇親会  
右 2023年7月南京大学でのポスターセッション

以上の個別のアクティビティに加え、組織的な成果としては、項目【8】に記した、国際会議 RPGR に IAB メンバーが多数加わり、A3 の精神を継続する形を作ったことが、最も重要である。これにより、継続的な交流と共同研究のみならず、若手研究者の継続的な交流が期待できる。



図6 2023年7月 南京大学における最終回セミナーの集合写真

#### 【11. その他の成果・今後の課題・展望等】

- 中国側代表者である Yuan 教授が所属する南京大学は、本 A3 事業を非常に高く評価しており、2023 年に大学から追加支援がなされた。本事業で構築した連携を継続的に発展させる新しい仕組みについて、議論を行っている。

- 2023年11月に出版された固体物理誌特集号「2次元ファンデルワールス物質の新展開」では A3 メンバー岩佐、松田（京大）が編集委員を務め、A3 メンバーの多くが解説記事を執筆した。