

令和2(2020)年度日中韓フォーサイト事業 中間評価資料(進捗状況報告書)

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	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		
日本側拠点機関名	東京大学		
研究代表者 所属部局・職名・氏名	工学系研究科・教授・岩佐 義宏		
相手国側	国名	拠点機関名	研究代表者 所属部局・職名・氏名
	中国	Nanjing University	College of Engineering and Applied Sciences, and National Laboratory of Solid-State Microstructures, Professor, Hongtao Yuan
	韓国	Sogang University	Department of Physics, Professor, Hyeonsik Cheong

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、当初目的の達成に向け代替的に行った取組があれば、その成果も含めて記入してください。

○申請時の研究交流目標

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を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。これらの事業は、独立研究者のみならずグループの博士研究員、大学院生にも積極的な参加を推奨する。上記の施策によって、アジアのコミュニティーと個人ベースでより交流の機会を増やし国際共同研究を活性化させ、アジア各国で開催されている2次元物質に関する国際会議の誘致による我が国のビジビリティの向上、さらには、これらを通して、我が国の若手研究者の育成を図る。我が国として特に重要なことは、中長期的な人材育成に、日中韓のネットワークを積極的に活用することであると考えている。

研究の方向性は、物性物理とデバイス機能に注力することとした。我が国は2次元物質分野において、物質・材料の基礎研究分野で存在感を示しており、この分野の更なる推進が我が国のビジビリティを高めると期待されるためである。中韓両国も物性物理とデバイスを中心としつつも、各国が世界的に存在感を示す物性物理（中国）とデバイス（韓国）のトップランナーを集めたメンバー構成となっている。グラフェンや遷移金属ジカルコゲナイド（TMD）を中心とする二次元物質を対象として、研究項目は下記の4つとする。(1) 新規2次元物質とファンデルワールスヘテロ接合の形成、(2) 量子輸送現象の開拓、(3) 励起子物理および非線形光学、(4) 機能性デバイス。

○目標に対する達成度

上記目標に対する2年分の計画について

(※繰越対象課題の令和元年度事業については、繰越期間終了日までの状況を踏まえること。)

- 研究交流目標は十分に達成された。
- 研究交流目標は概ね達成された。
- 研究交流目標はある程度達成された。
- 研究交流目標はほとんど達成されなかった。

【理由】

具体的な目標は、上記○申請時の研究交流目標の下線部分に示した通りである。この3つの目標の達成度から、研究交流目標は十分に達成されたと自己評価した。

① 国際連携研究の加速・拡大

本 A3 事業の国際共同研究から、交流目標にあげた4つの研究項目に該当する20報の論文出版があった。これらの論文は、Nature 誌、Science 誌などを含むとともに、学術的に非常に価値の高いもので、日中韓のレジリエンスの向上に寄与するものである。論文化されていないものでも、本事業を契機に始まった新しい共同研究が進行している。

② 1年3回の研究セミナーの定例開催と国際会議の主催

新型コロナウイルス感染症のために中止になった2020年2月を除き、毎年3回のセミナーを継続してこれまでに計7回のセミナーを開催してきた。各セミナーにはおおむね100名前後の参加があった。このセミナーをきっかけに、PIをはじめとする参加者がお互いに知己を得、主に個人的な交流を活性化してきた。また、新型コロナウイルス感染症に対応するためZoomでの開催に切り替えたり、若手の積極的な参加を促す仕組みを導入したりするなど、常に運営方法を改善してきた。一方、東アジア地域での当該分野の主要国際会議である RPGR を、2019年(松江市 オンサイト)、2021年(ソウル市 2020年開催が延期され、本年10月開催予定。現在、方式を検討中)と、本 A3 事業関係者が中心になって連続開催し、最先端情報の交換と国際交流の場を提供するとともに、本事業の成果をアピールすることができた。

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

上記セミナーが契機となる国際連携研究を加速・推進するための交流が、コロナの影響でストップされるまで盛んに行われ、すでに一部は、論文のような見える成果につながっている。また、研究には直接つながらないが、人材交流のネットワークが特に中国を中心に形成されつつあり、今後の発展が期待される。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、代替的に行った取組があれば、その内容及び成果も含めて記入してください。

(1) 令和2年7月末までの研究交流活動(繰越対象課題の令和元年度事業は繰越期間終了日までの状況を含む)について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。

※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

事業開始から中間評価時点(R3年4月)までに、PI間の国際共同研究論文を20報発表した。その内訳は Nature (3)、Science (1)、Nature Physics(1)、Nature Materials (1)、Advanced Materials (1)、ACS Nano (1)、Nano Letters(1)、PNAS (2)、Science Advances (1)、Nature Communications (6)、Scientific Reports (1)、APL (1)であり、非常にレベル

の高い成果が発信されている。これの核となっているのが谷口(NIMS)であり、本事業を通じた日中韓の共同研究体制が、世界的な2次元物質研究の拠点となりつつあることを示している。以下にその代表的な5報の論文を列挙する。

(1)黒リンの量子ホール効果:

谷口(NIMS)-Y. Zhang(復旦大、中) Nano Letters 18, 6611 (2018).

(2)3層グラフェンのモアレ超格子の超伝導

谷口(NIMS)-Y. Zhang(復旦大、中) Nature 572, 215 (2019).

(3)2H遷移金属ジカルコゲナイドの電荷密度波状態の機構

Bahramy(東大)-谷口(NIMS)-X. Xi(南京大、中) Nature Communications 11, 2406 (2020).

(4)グラフェン-hBNの1次元ヘテロ接合からの青色発光

末永(産総研)-H. Shin(UNIST、韓) Nature Communications 11, 5359 (2020).

(5)ファンデルワールス・ヘテロ接合のバルク光起電力

岩佐(東大)-谷口(NIMS)-H. Yuan(南京大、中) Science 372, 68 (2021).

中でも(5)の研究は、本事業の成果として特筆される。2018年11月の第1回セミナーでの議論により着想され、H30~R元年度にかけて、3名延べ7回の研究者交流による共同実験を経て、R3年4月にScience誌に出版に至った純粋なA3の研究成果である。また、(3)も第1回セミナーでの議論により開始された本事業の成果である。この研究では、日本は理論(Bahramy)と試料提供(谷口)から貢献した。

谷口は高品質hBN(六方晶窒化ボロン)を世界で唯一供給できるグループで、世界的共同研究ネットワークを形成している。本事業でも、共同研究論文のほとんどすべてに貢献するとともに、新しいネットワーク形成の核になっている。末永の電子顕微鏡の技術も世界的に有名で、これらが共同研究論文の牽引車としての役割を果たしてきた。また、吾郷(九大)のグラフェン、町田(東大)の2次元物質の自動探索等で、中韓と共同研究が進むなど、本事業の日本グループの2次元物質の試料を中心に、共同研究が進行している。

○セミナー

	平成30年度	令和元年度	令和2年度4~7月末 (繰越対象課題は終了日まで)
国内開催	1回	1回	0回
海外開催	1回	1回	1回
合計	2回	2回	1回

【概要】

第1回 H30年11月:東京都(日) PI全員の研究紹介と交流会を開催。

第2回 R元年2月:南京大学(中) チュートリアル講義6件と若手・院生の口頭発表を含むスクール形式で開催。

第3回 R元年7月:西江大学(韓) ワークショップ形式で開催。若手・院生の口頭発表セッション。

第4回 R元年10月:松江市(日) 国際会議RPGR2019の分科会として開催。

第5回 R2年7月:南京大学(中) Zoom開催。

開催実績は、上記の通りである。セミナーは、年度内3回を目標に計画した。新型コロナウイルス感染症によるR2年2月の韓国開催が中止となった以外は、順調に開催できた。ただし、第5回はオンライン開催となっている。第4回は、国際会議直後の分科会として開催し、PIのみで共同研究の情報交換やそれ以降の運営などに関する議論に当たった。各回の参加者数は、第4回を除き、おおむね80~110名である。開催方法も、通常の研究報告であるワークショップ形式に加え、チュートリアル講演を含めたスクール形式も導入している。また、若手・院生セッションを設け、彼らの積極的な参加を促している。交流を促すために、第4回までのオンサイト開催では交流会を設置し、それ

が有効に作用して研究者交流につながった。オンラインになってからの交流会は、これまでに Zoom と Remo などを導入して試したが、まだ有効に機能しているとはいいいがたい。新たな交流の在り方については今後引き続き検討する。

○研究者交流

【概要】

研究者交流については、5件の例があった。

本項の第 1 例として、岩佐研究室(東大)と Yuan 研究室(南京大)との交流を説明する。この交流は、ファンデルワールス(vdW)・ヘテロ接合における光起電力に関する共同研究であり、論文成果につながった本事業の代表的な交流事例である。vdW ヘテロ界面では通常、界面に垂直方向に起電力が発生するが、東大の岩佐研究室では、WSe₂/黒リン(BP)の間の vdW ヘテロ界面に平行に、pn接合とは関係ない光起電力が発生することを見出していた。この現象の機構解明には、光起電力のレーザー照射位置依存性、すなわち光起電力のマッピング測定が必須となるが、岩佐研究室では必要な設備を保有していなかった。第 1 回セミナーでの交流・議論を通じて、南京大学の Yuan 教授の研究室が、上記の設備を保有していることが明らかになった。そこで、すぐに南京大学に岩佐研究室の若手研究者を派遣し、共同実験をすることになった。結果として、2018 年度から 2019 年度にかけて助教 1 名、修士課程院生 1 名、博士課程院生 1 名の計 3 名が、延べ 7 回、計 30 人日程度の滞在を行い、光起電力の機構に関する核心的なデータを取得することに成功した。

第 2 例として、町田研究室(東大)と Zhang 研究室(復旦大)との交流について説明する。2次元物質の自動探索に関する共同研究であり、お互いが有する独自技術を活用した技術協力事例である。2次元物質の原子層膜フレークの探索には光学顕微鏡が一般に用いられ、干渉効果により生じた光学コントラストにより原子層数を同定する。東大の町田研究室では深層学習を用いた画像解析アルゴリズムで自動的に所望の原子層膜を探索する技術を保有しており、復旦大の Zhang 教授の研究室に技術協力することになった。Zhang 教授の研究室では独自の原子層劈開・転写システムを構築しており、自動探索機能の追加導入を行った。2018 年度から 2019 年度にかけて教授 1 名、特任講師 1 名、助教 1 名の計 3 名が、述べ 5 回、計 10 人日程度の滞在を行い、自動探索システムの導入と活用に寄与した。お互いの技術を組み合わせるさらに発展した新システム的设计・構築も検討した。

第 3 例として、菅原グループ(東北大)と Zhou 研究室(清華大)との交流について説明する。この交流は、単原子層 TMDs における電子状態に関する共同研究であり、現在一部の研究成果について論文投稿中である。最近菅原グループで発見された単層 1T-NbSe₂ および 1T-TaSe₂ におけるモット絶縁相の電子状態に関する新たな知見を得ることを目的として、Zhou 研究室が得意とする高分解能時間分解光電子分光実験を行った。その結果、原子層 1T-TaSe₂ が非平衡状態においても壊れない強固なモット絶縁相を形成することを見出した。時間分解測定には、研究環境に強く依存する高強度レーザー装置と光学系の精密な制御が必須であるが、菅原グループ(東北大)にはその要素技術を保有していない。そのため、菅原グループの学生(当時博士課程2年)を Zhou 研究室に派遣し、共同実験をすることになった。また、TMDs バルク NbSe₂ のスピントクスチャーを明らかにすることを目的として、菅原グループが得意とするスピン分解光電子分光装置を用いて、Zhou 研究室から派遣された博士研究員 1 名および学生 2 名と共に共同実験を行った。本研究は引き続き共同研究を実施する予定である。

第 4 例としては、尾辻研究室(東北大)が、Chen 教授(南京大)を東北大に客員教授として招聘し、尾辻(東北大) - Chen, Yuan(南京大)の間で、グラフェン等トポロジカル材料を利用したテラヘルツ発振に関するテーマで共同研究を推進している。

第 5 例としては、Yuan 研(南京大)の学部生が、岩佐研(東大)に 2 か月間滞在し、2次元超伝導に関する共同実験を行った。共同研究は、学部生の帰国後も継続し、現在論文を執筆中である。

これらの人的交流は、2020 年 1 月以降、コロナウイルスの影響で完全にストップしているが、共同研究は着実に継続されている。

(2) (1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、以下の観点から記入してください。

○世界的水準の研究交流拠点の構築状況

・日本側拠点機関及び相手国拠点機関の交流によってえられた、世界的水準の国際研究交流拠点となりうるような学術的価値の高い成果

当該分野は世界的なスケールで見て、もっとも盛んに研究が行われている物質・材料である。事業開始から中間評価時点(R3年4月)までに、Nature 誌、Science 誌を含む国際共同研究論文を20報発表した。特に、本事業が開始されてから、コロナ禍の活動停止にもかかわらず、前項目に示したように(3)(4)(5)の論文が純粹に事業内の共同研究の成果として出版されたことは、本事業が世界的水準の交流拠点になっていることを示している。

特に論文(5)では、3 回対称の構造を有する単層物質と 2 回対称の構造を有する物質という、構造が全く異なる物質を積層して、pn 接合を必要としない量子力学的機構に基づく光起電力という、新しい機能を発現させることに成功した。重要なことは、構造の異なる物質の積層を実現し、そこから機能が引き出せることを示したことで、これは従来型の無機物質のヘテロ界面では考えられなかったことである。電子的な相互作用は弱いだがゼロではない vdW ヘテロ接合の特徴を最大限に生かすとともに、vdW ヘテロ接合が対称性の制御、ひいては機能性の設計に有用であることを示したものである。

・研究交流活動の成果から発生した波及効果

本 A3 事業の提案書と計画書に、交流活動の強化のために、グラフェンと 2 次元物質に関する国際会議(RPGR)を 2019 年日本に招致して、日中韓の交流を加速することを提案した。RPGR は毎年、アジア地区で開催されている当該分野の国際会議で、欧米からも多くの参加があり、日本では 2013 年に開催されていた。2018 年に開催された国際運営委員会で岩佐が提案し承認され、翌年 2019 年の日本の松江市にて開催することが決定した。RPGR2019 の主要実行委員会 5 名のうち、A3 事業から岩佐、町田、尾辻、榎の 4 名が占めた。本会議そのものは A3 事業とは独立ではあったが、A3 事業としては、本会議を交流促進の重要なイベントと位置付けるとともに、本会議への A3 関係者の旅費を支援した。さらに、本会議の分科会としてセミナーを開催した。ここには日中韓三国の PI 計 18 名が参加し、A3 事業内での共同研究の進行と今後の事業展開についての議論を行うとともに、PI 間の親睦を行った。

RPGR2019 本会議には 299 名の参加があり大変盛況であった。A3 事業からは我が国だけではなく中韓からも多くの参加があった。2019 年の日本開催を受け、2020 年度に韓国での RPGR の開催が決まり、A3 関係者がやはり運営にかかわることになった。2020 年度はコロナの影響で延期されたが、2021 年度 10 月の開催(形式は検討中)が決定し、現在韓国側の準備が進んでいる。以上の通り、A3 事業を核に国際会議を回して分野全体に貢献するとともに、三国間の連携を強める施策が順調に進行している。

さらに松田(京大)は、セッションチェアを務める The GLE0/Pacific Rim Conference series(2022 年 8 月開催予定)のセッション 14 のコチェアとして、A3 事業で知己を得た中韓の 2 人の PI、Zhang(北京大)、Jang(西江大)に依頼、快諾をいただき、準備を進めている。

○若手研究者育成への貢献

・若手研究者が身につけるべき能力・資質等の向上に資する育成プログラムの実施及びその効果

本事業の主要施策は年 3 回開催するセミナーと共同研究である。ここでは、セミナーにおける若手育成の試みについて述べる。

(1) セミナーにおける懇親会は、PI のみならず若手研究者にとっても重要な、ネットワークづくりの機会である。1 回のセミナーは通常 2 日間開催するため、セミナーあたり 2 回の懇親会を行うが、そのうち 1 回

は学生主宰とし、PI が出席しない若手懇親会を開催した。オンサイトのセミナーが行われていた時代には、若手同士の交流を促進するため、学生同士の交流を促進する企画を行った。オンサイト開催時はこれでよかったが、オンラインになってから交流の機会がなくなってしまった。

(2) 第1回は、若手の発表はポスターで行ったが、第2回より若手の口頭発表を取り入れた。若手の口頭発表は、力の入った非常にレベルの高い講演が多い。また、ポスターでも若手の間で活発な議論が行われる様子が多くみられた。ところが、オンライン開催になってから問題が発生した。オンライン形式のポスターでは、必ずしも多くの訪問があるわけではなく、Zoomのブレイクアウトルームでほとんど孤独に1時間半程度過ごす場合があることが分かった。そのため、2021年2月には若手の発表をすべて口頭発表とし、平行セッションで行う試みを行った。若手の発表総数はポスターを行っていた時に比べて漸減したが、議論はすべての講演でおおむね活発に行われていた。開催法は今後も模索が続くと考えられる。

(3) セミナーの運営が軌道に乗った時点で、若手主催のセミナー開催を計画していた。残念ながら、これは、コロナの影響でZoom形式になり開催形式を新たに模索する必要があったため、実現していない。

・日本と交流相手国における次世代の中核を担う若手研究者の研究ネットワーク構築状況

本 A3 事業の谷口は、独自の高品質 hBN によって世界中の 2 次元物質研究コミュニティーに広がるネットワークを形成しており、それが高レベルの論文リストをけん引している。このネットワークを起点に本事業では、新たな人材交流が進行している。下記には南京大学（中）および延世大学（韓）と、本 A3 事業の連携について述べる。

まず、本事業には 5 名の PI が南京大学から参画しているが、メンバーではない同大の Chen 教授を、尾辻（東北大）が東北大学客員教授として招聘し、南京大学との人脈を強化した。一方、南京大 Yuan 研究室の学部生が 2019 年の 2 か月間、岩佐研究室（東大）に滞在し、共同実験を行った。その学生は、そのまま Yuan 研の大学院生となり、共同研究を継続しており、最近論文を執筆中である。また、Yuan 研で卒業研究を行った別の学部生が、東大の大学院に入学し岩佐研究室の修士生となり vdW ヘテロ接合の研究を行っている。その学生は博士課程に進学する予定である。さらに、2020 年 3 月、岩佐研究室で博士課程を修了した学生が、Yuan 研究室の博士研究員となり南京大に移り、2 次元物質に関する共同研究を開始している。以上の活動により、南京大学と A3 には研究ネットワークが形成されている。これを基盤に包括的なネットワークに発展させたい。

一方、日韓では Im 教授（延世大学）がセンター長を務める van der Waals Materials Research Center と、岩佐研究室は 2019 年 8 月、共同研究に関する覚書を交わし、若手研究者交流の下地を作った。

以上のネットワークによる共同研究には、谷口の hBN が重要な役割を果たしている。