

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】

東京工業大学

【2. 日本側研究代表者 所属部局名・職名・氏名】

理学院・准教授・西野 智昭

【3. 日本側協力機関名】

物質・材料研究機構、北海道大学、東京大学、名古屋大学

【4. 研究課題名】

原子スケール有機・無機ハイブリッド機能化とフレキシブル展開

Functionalization and Flexible Device Application of Atomic Scale Organic and Inorganic Material

【5. 研究分野】

材料科学。ただし、主として単一の材料をもとに物性や機能を発現させる従来の手法とは異なり、優れた物性、機能を有する原子スケールで規定された多種の低次元物質を相互接続するハイブリッド化に基づき新たな物質を創製するアプローチを確立する。本手法により、ハイブリッドを構成する各物質のみでは存在し得ない革新的な物性、機能発現を実現し、次世代の新材料創生へとつなげる。

【6. 実施期間】

平成30（2018）年8月～令和6（2024）年3月（5年8ヶ月間）

【7. 全交流期間を通じた目標】

第4次産業革命の推進、超スマート社会（Society5.0）の実現にむけ、情報量の急増を支える多機能のスマートデバイス、その基盤材料として高機能の新物質開発が急務となっている。本研究では新物質開発として、複雑な分子を合成する従来型のアプローチを超えて、原子スケールの有機・無機材料のハイブリッド化による物性・機能創出を目指す。このハイブリッド化では、2次元/1次元/0次元物質での既存の3次元系にはない物性や機能を引き出し、組み合わせることで新たな機能を賦与、あるいは積極的に相互作用させることで単体にはない機能を引き出す。新機能で、次世代情報システムに資する新技術への導出を目指す。当該研究分野では、携帯端末など先端製品の開発と製造が当該地域周辺で行われており、このうち3カ国（日本、韓国、中国）はさらに次の技術を開拓すべく、基礎からアプリケーションまでの先端研究を推進している。各国とも有機や無機の低次元新材料合成、計測、応用分野で世界的な研究成果が出ている一方で、日本は精密計測、韓国はデバイス応用、中国は物質合成を得意とする。三カ国が相補連携することで、革新的な物質やアプリケーションのフロンティア拠点となりうる環境にある。

本提案の背景として、2017年10月に、ソウルで日本学術振興会、韓国研究財団（NRF）、中国国家自然科学基金委員会（NSFC）の支援をうけ本事業に参画したPIが中心となって共同提案のためのシンポジウムを行い、議論を行った。そこでの議論を基に、本取り組みでは、当該分野で世界をリードしている3各国の研究者の研究交流を促進させてフロンティア拠点を形成し、次世代拠点の核となる若手研究者の育成を推奨する。具体的には本事業に参加するグループが世界をリードしてきた有機や無機の低次元材料を原子スケールで接続する研究を、「物質デザイン」、「精密物性計測」、「デバイスデザイン」の3分野として国を超えて集約した協力体制を作り上げ、従来の枠を超えた“ハイブリッド接続”で、共同研究の促進と若手育成を行う。特に共同研究では、これまで培ってきた共同研究を強化する一方、新たな組み合わせの共同研究を推進する。また若手育成では、若手が協力してスクールやセミナーを企画・準備・開催を行うことで、次世代の国境を超えたグローバル連携の起点を提供したい。スクール等では、第一線で活躍する研究者を講師として招くことで、世代を超えた刺激づ

令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

くりを工夫する。これらの研究交流活動を通じて、日中韓の大学院生を含む若手研究者同士のネットワークづくりを促進し、10～20年後には盤石な日中韓の研究者コミュニティへと結実させることを最重要使命とする。

【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】

研究交流拠点の構築

本研究課題における国際交流は、日本、中国、韓国のファンディングエージェンシーが2017年に韓国（ソウル）にて主催したシンポジウムに端を発する。低次元の基礎材料、ヘルスケアのためのセンシング、ウェアラブル性試作などの技術が提示された。それらの高次融合によって革新的な材料開発につながる可能性を多くの出席者が見出し、本研究交流拠点の形成につながった。そのため、課題開始当初より、国内外参加研究者間で本課題の研究理念は共有できており、円滑に国際共同研究に着手することができた。

後に詳述する共同研究を展開しながら、より強固で活発な研究交流を促進することを目的として毎年国際シンポジウムを開催することとした。第1回シンポジウムは2019年1月に日本（静岡県）で開催した（図1左）。参加者の分野が物理・化学・工学と多岐にわたっており、互いに異なる視点で活発な議論が展開され、期待以上に活気に満ちた会議となった。一方、応用研究に優れた中韓の研究者と基礎研究に秀でている日本の研究者との間に若干の考え方の違いがあることも感じられた。続く第2回は2019年11月に中国（黄山市）で開催され（図1右）、第1回と同様に活発な議論が長時間にわたり交わされた。また、基礎研究と応用研究の立場から生じる考え方の齟齬に関して相互の理解が徐々に形成され、より円滑に議論が進行するようになったと感じられた。



図1. （左）第1回国際シンポジウム、（右）第2回国際シンポジウム。

2020年初頭から新型コロナウイルス感染症が世界的に拡大し厳しい海外渡航制限が敷かれたことから、極めて残念ながら国際シンポジウムの開催は当面の間中止せざるを得なかった。この間、日中韓の研究代表者間で定期的にオンラインにて打合せを実施し、シンポジウムの再開時期やコロナ禍における共同研究の効率的な実施について議論を重ねた。日本側においても国内運営委員会にて同様の議論を行い、感染症の拡大が大きく鈍化した2022年12月に北海道にて対面形式によりシンポジウムを行った。開催にあたっては、事前の検査実施など十分な感染対策を施した。日本への入国制限の緩和が不十分であったことから、中国・韓国の海外研究者はオンラインで参加するハイブリッドセッションを設け国際交流を行った。長く続いたコロナ禍においてほぼ全ての国内学会、国際会議がオンラインで実施されていたためこのセッションにおいても有用な意見交換を行うことができた。研究遂行においても種々の制限が課せられていたにもかかわらず、着実な研究進捗が報告され、再び活発な議論が行われた。学会における対面形式による研究発表の機会がなかった学生が積極的に議論を行っていた点は印象的であった。本シンポジウムを通じ、対面による交流がより深く親密な関係の構築につながることを再認識された。

令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

以上の経緯のもと、日中韓3カ国の研究者が対面で参加できる国際シンポジウムを再び開催する必要があると考え、2023年7月の事業終了予定を繰り下げ、事業期間の延長を許可いただいた。JSPSのご配慮とご厚意に、この場をお借りし、深謝したい。結果、世界各国で対面形式の国際会議が開催され始めた2023年9月に韓国（済州島）にて3回目のシンポジウムを実施した（図3）。共同研究において研究実施のための相互の往来が叶わぬ状況下にもかかわらず、オンラインミーティング等の様々な工夫により研究に大きな進展が遂げられ、優れた機能を有する新規物質開発に関する成果が多数報告された。本事業による国際交流を通じて、有機、および無機材料を原子スケールにおいてハイブリッド化し機能化を図る本研究課題にて掲げた新たなアプローチが具現化され、革新的な物質創成へとつながる足がかりを得たことが確信された。また、シンポジウムでは、これまで構築した協力体制を確認し、事業終了後にこれを維持し、さらに発展させる計画についても議論した。



図3. 第3回国際シンポジウム。（左）参加者集合写真、（右）ポスターセッションにおける議論の様子。

共同研究とその成果

本研究課題は単原子膜をはじめとする原子スケール有機・無機材料をハイブリッド機能化し、フレキシブル展開を行うことを目的とした。このアプローチに従い革新的な物質創製を実現するために、事業開始時には、すでに共同研究の実績があった3項目に関して共同研究を実施し、さらに事業遂行に伴う交流によって新たに2項目の共同研究を追加した。具体的な共同研究項目は以下の通りである。

- 電導性配位高分子を用いたデバイス開発
- 有機・無機ハイブリッド超薄膜の創生と機能化
- π 電子化合物の構造と光物性の精密測定による解明
- high- k /2D 界面の界面準位解析
- 酸化物ナノシートの精密構造集積による新機能材料・デバイスの創製

これらの共同研究においては、日本が得意とする精密合成技術に基づき得られた、特徴的な電子構造を有する有機化合物を中国・韓国が有する精緻な測定・解析技術に基づき構造と物性を評価した。また、有機、または無機材料から原子スケールで規定された構造を有する薄膜を合成し、中国・韓国の技術によって精密な構造決定を行った。さらに、日本と中国・韓国の各々の独自技術により合成した超薄膜をハイブリッド化し、界面特性を詳細に評価するとともに、革新的機能化を果たすことができた。これらの研究成果は、*Nature Electronics*、*Nature Communications*、*Journal of the American Chemical Society*、*Angewandte Chemie International Edition*、*Chemical Science* など世界的に権威ある学術雑誌に多数掲載された。本事業の国際交流によって優れた研究拠点が形成された証左といえ、その国際プレゼンスを明確に示すことができた。また、上記共同研究により創出された機能性材料は、高容量コンデンサ、強誘電体、発光デバイス、光触媒、太陽電池など多岐の分野にわたってお

令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

り、原子スケールにおける有機・無機ハイブリッド化が次世代材料創製において柔軟で有効なアプローチであることを示している。

【9. 次世代の中核を担う若手研究者の育成】

国際シンポジウムでは、様々な研究分野の最先端のトピックスを、本計画に参画する先生方に講演してもらい、世界の現状、研究とは何かを把握してもらうよう心掛けた。通常の国際学会では修士、博士の学生が口頭発表する機会はあまりなく、学生に国際交流の場を提供することも重要である。これに対する一例として、会場に余裕があったシンポジウムでは、参加者全員にポスター発表を行ってもらった。この際、ポスター賞を設け動機づけに配慮した。また、その他のシンポジウムでは、日中韓各国の若手研究者が口頭発表する国際若手セッションを設けた。また、シンポジウムでは可能な限り、若手研究者、学生に時間・空間を共有してもらい、国際交流を図り、国際的人材ネットワーク形成を促進した。

研究交流では、若手研究者・大学院生が海外の研究室に滞在し共同研究を展開した。中国への渡航はまだ困難があるものの、韓国の共同研究施設への訪問は活発に行った。共同研究では、自分の研究技術を滞在する研究室の方に伝え、逆にその研究室の技術を学ぶ。相互のスキル向上を通じて研究者として研究の幅を広げてもらい、また、英語しか通じない場に身を置き、また新しい人間関係を築かねばならない場に置くことで、コミュニケーション力、行動力を身に着けるよう配慮した。

【10. 中間評価指摘事項への対応】

中間評価所見：

日本が得意とする低次元物質に関する基礎研究を、中国・韓国が多くのノウハウを有するデバイス応用へと共同研究によって相補的に展開することによって、国際的水準の研究交流拠点となり得る学術的成果が上げられている。共同研究の成果が著名な雑誌上で発表された点、また当初の3つの研究テーマに加え、事業開始後に新たに2つの共同研究を開始しており、研究交流を活発化させている点は評価できる。本事業により、日韓や日中の2国間連携にはない付加的效果が現れ、研究が高度化されることを期待したい。

また、研究交流・若手研究者の育成の観点からは、毎年三カ国間で順番に開催されるセミナーや若手研究者を派遣しての共同研究の実施により、情報交換や研究ネットワーク構築がなされているほか、視野を広げるための機会として中韓のトップの研究者と交流する場を設ける、セミナーでの若手の英語発表の機会を増やすなど、若手育成に配慮した拠点の運営がなされている。

本事業による日中韓の研究交流で、有機・無機ハイブリッド材料の基礎研究からデバイス応用までを行うことができる研究ネットワークを構築し、今後もさらに発展させることで、世界的にも波及効果の高い優れた研究成果が期待される。新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受けて中止となった対面でのセミナーの代わりに、オンラインでのセミナーも計画されており、共同研究や研究者間の交流を今後も維持・活発化させることが望まれる。

指摘事項を踏まえて共同研究を遂行した結果、【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】に記載の通り、多岐にわたる高度な機能性を有する材料開発につなげることができた。また、JSPSのご厚意のもと、コロナ禍をこえて韓国にて国際シンポジウムを開するなど共同研究や研究者間の交流を維持・活発化することができた。

【11. その他の成果・今後の課題・展望等】

本事業により実施した各シンポジウムにて参加者間で、今回形成した人的交流、国際研究拠点の維持、発展について議論を重ねてきた。少なくとも交流、共同研究は本事業終了後も多数継

令和5（2023）年度 日中韓フォーサイト事業成果報告書

続する予定であり、次の展開を見据えた予備検討、準備研究がすでに実施されている。今後は、本研究拠点为基础とした新たな国際交流プロジェクトの発足、推進を目指す。