

CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」

研究領域事後評価報告書

1. 研究領域としての成果について

(1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

本研究領域は、「二次元機能性原子・分子薄膜による革新的部素材・デバイスの創製と応用展開」という戦略目標の達成に向けて、具体的なデバイス応用を想定して原理追及や指導原理の確立を基軸とした研究開発を行うという基本方針の下に、研究課題の選考と研究領域の運営が実施された。この基本方針にそって示された研究課題の選考方針は非常に明快であり、排除条件や提案書に盛り込むべき事項を具体的に示すなどの配慮もなされた。グラフェンのみならず他の二次元材料においても従来材料を凌駕するような新奇な機能や物性が報告され始めた状況において、本研究領域の設定がタイムリーであったのみならず、研究領域としての基本方針にも説得力があり、3年間の採択期間で計186件という多くの応募につながったものと考えられる。採択された11件の研究課題は、物理系から化学系、工学系、生物系までの学術分野としての広がりを持っており、さらに、無機材料のみならず脂質二分子膜やウイルス検知などの新しい応用にまで視野を広げるなど、新機能展開と画期的性能改善という応用への切り口に対してもバランスが取れている。結果として、研究者の所属や人材の多様性に関しては若干の片寄りが見られたものの、研究課題の選考方針は適切であったと評価できる。

本研究領域において、物性物理、デバイス工学、合成化学などの様々な専門性を必要とする研究課題が採択されているなかで、領域アドバイザーも、物性物理、化学、有機材料、デバイス関連の各分野の専門家がバランスよく配置されている。特に、基礎研究だけでなく具体的なデバイス応用を意識した研究開発に重点を置くことから、大学・国研だけでなく企業関係者からも領域アドバイザーを選任し、大学・国研と企業のバランスを半々とするなど、領域アドバイザーの構成は適切であったと判断できる。

研究進捗状況の把握のための進捗報告会（キックオフミーティングと領域会議）は年1回であるが、サイトビジットを少なくとも年1回（2020年度、2021年度はオンライン）実施し、更に突っ込んだ議論を行ってきた。また、2017年度からは領域アドバイザーに担当課題をアサインしてサイトビジットにも同行させており、専門的に深い有益な議論ができる環境を作った。領域会議においては、進捗状況の把握に加えて、研究成果の最大化のために、議論の活性化や連携の強化を図るための工夫がなされており、領域内の異なる研究グループ間での連携による新たな展開も認められることから、研究領域内によるシナジー効果が発揮されたものと評価できる。特に、第二回目の領域会議において、すべての課題に対して基礎学理の発表と徹底した議論の場を設けたことは、若い研究者に多くの刺激を与え、研究領域全体として高いインパクトファクターの学術論文を量産し得た要因になっていると推察される。さらに、試作・検証のループを早く回すなど企業経験の深い研究総括独自の工夫

や、成果発表に対しての知財的視点での十分な確認、プレスリリースへの積極的な対応などの種々の指導も適切であったと評価できる。加えて、中間評価で指摘があった特許出願についても適切に指導を実施し、新たな特許提案に結び付けた。

海外との連携については、EU Graphene Flagship とのワークショップを 2015 年から 5 回（2020 年はコロナ禍で延期、2021 年オンライン）開催したことに加えて、複数の課題において海外研究機関との情報交換や共同研究が実施されている。さらに、テーマを絞った国際ワークショップ開催も複数の課題で実施するなど、海外への成果発信と連携の強化を積極的に支援した点は高く評価できる。研究費配分に関しては、デバイス検証のための迅速なプロセス構築や計測を中心に増額を行うなどの工夫がされている。さらに、研究の進捗状況を見ての支援延長やコロナ禍による研究期間延長など、マネジメントは柔軟に実施されたと判断できる。人材育成に関しても、本研究領域に携わる若手研究者の育成の重要性を説き、結果として主たる共同研究者だけでなく、多くの研究参加メンバーの昇任や学生の受賞などにつながった点も非常に高く評価できる。

以上のことから、本研究領域の研究マネジメントは極めて優れていたと評価できる。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

① 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

本研究領域は、世界でもトップクラスの実績を有する研究チームによって構成されており、科学的・技術的にインパクトの大きな成果が多く得られている。著名な国際学術誌への論文掲載や主要な国際会議での発表が数多くなされており、研究領域全体としては、原著論文が 853 報（内、特に国際的に著名な学術系列誌が 67 報）、招待講演が 1004 件、さらに国内外での受賞 27 件と、量・質の双方において十分な成果が上げられている。

研究成果の科学的・技術的な具体的な貢献に関しては、物性物理の観点からは、富永課題、川崎課題、町田課題、笹川課題が極めて優れた成果を上げている。富永課題では、絶縁体とトポロジカル絶縁体による超格子構造を用いたデバイス開発に取り組み、基礎研究から実用化展開へと結びつけるような成果を上げた。特に、GeTe/Sb₂Te₃ 超格子デバイスにおいて室温で 120 μm 程度のスピン伝搬長を持つことを確認し、スピン蓄積能力とスピン整流作用を持つことを実証した点は、室温での新機能デバイス実現へとつながる重要な成果である。川崎課題では、トポロジカル絶縁体の物性・機能の開拓とデバイス応用を行っており、トポロジカル電子流の検出と制御、トポロジカル流のオン・オフ・スイッチなど、トポロジカル量子効果に関する基礎的研究成果を数多く上げると共に、超伝導マヨラナ粒子や電気回路を用いたトポロジカル量子コンピューティングの可能性など、将来への展開が期待される研究成果も得られている。町田課題では、原子層をデジタル的に組み合わせたファンデルワールス超格子構造を自動作製する装置を世界に先駆けて開発し、さらに原子層探索プロセスに機械学習、深層学習も導入することで、正確かつ迅速な積層構造の制作を可能とする革新的な技術を実証した。笹川課題では、トポロジカル超伝導体 Fe(Te, Se) においてマヨラナ

準粒子の検出に成功するなど、世界をリードする成果が得られている。また、領域内連携によってファンデルワールスヘテロ積層によるジョセフソン接合を作製し、マヨラナ状態の制御の可能性を見出した点も高く評価できる研究成果である。化学分野では、西原課題において、配位ナノシートの多様な系の合成と基礎物性評価を行い、二次電池応用や光電変換デバイス、発光デバイスなどへの応用の可能性を見出している。生物系では、平野課題において、脂質二分子膜へのイオンチャンネルの効率的な包埋法を確立すると共に、これを用いたイオンチャンネルの挙動を計測するデバイスに結び付けた。特に、電圧を膜平行に印加できるデバイス構造を実現してイオンチャンネルの開閉を膜平行電界で制御できることを示し、そのメカニズムの解明を行った点は、世界初の研究成果として高く評価できる。また、この脂質二分子膜のイオンチャンネルのメカニズム解明のために1年延長した研究統括のマネジメントも高く評価したい。電子デバイス分野では、宮田課題において、遷移金属カルコゲナイド (TMDC) ヘテロ接合を形成するための化学気相成長技術の開発を行い、トンネルトランジスタへの応用を検討するとともに、原子ビームによる異種元素の打ち込みや化学ドーピングによるキャリア制御が可能であることを示した。これらは、TMDC のデバイス応用に向けた基盤技術に関する研究成果である。また、鳥海課題においても、ネガティブキャパシタンス・トランジスタ (NC-FET) 用の強誘電体材料として、 HfO_2 が 3nm 以下の薄膜でも安定な強誘電性を示すことや電荷の振る舞いに立脚した動作モデルの提案を行うなど、CMOS デバイスへの応用につながる研究成果が得られている。

以上のように、本研究領域では、優れた研究成果が数多く得られており、科学的・技術的な貢献度は極めて高いと評価できる。

② 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

本研究領域では、出口に対する時間軸やデバイス応用への距離感には課題毎に差があるものの、研究総括の具体的なデバイス応用を想定した研究開発を行うという基本方針に沿って、社会的・経済的価値の創造に貢献することが期待できる卓越した研究成果が得られた。

研究成果の社会的・経済的な観点からの具体的な貢献に関しては、松本課題、佐藤課題、平野課題、川崎課題、西原課題、鳥海課題の成果が上げられる。松本課題では、ウイルスのヒト感染性の高感度鑑別を迅速・高感度に行うグラフェンFET の実現を目指しており、基礎研究の成果もあるが、グラフェン薄膜トランジスタ集積化アレイによる多項目同時測定手法の開発やインフルエンザウイルスのポータブル測定器の開発とヒト感染症に対する海外での実証実験、マイクロチャンバーによる亜型検出への展開、さらには、COVID-19の原因である新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) の検出に挑戦してその基本動作の確認にまで漕ぎ着けるなど、社会的観点から特筆すべき研究成果が得られている。また、この研究成果は科学技術振興機構 (JST) の未来社会創造事業に引き継がれるなど、本研究領域の研究計画が理想的に展開された成功例となっている点も高く評価したい。佐藤課題では、グラフェンナノリボンのボトムアップ合成手法に取り組み、エッジの化学修飾による

バンドギャップの制御により約0.6eVのバンドギャップを持つナノリボンの合成に世界で初めて成功した。集積回路デバイスへの応用にはまだ大きなハードルがあるが、グラフェンナノリボンの個別デバイスへの応用などに大きな道が開かれていくことを期待したい。平野課題では、微細加工シリコンチップ中で形成した脂質二分子膜中に、無細胞発現系を用いて合成したhERGチャネルを包埋することにより、正常型hERGチャネルの単一チャネル電流計測と副作用薬物による阻害作用の測定に成功した。将来のテーラーメイド医療の実現に対してインパクトのある研究成果と評価できる。川崎課題では、量子異常ホール効果を用いて、誤差がppbオーダーの精度を有する抵抗標準の実証に成功しており、応用的な観点から社会的・経済的な波及効果も期待できる。西原課題では、金属錯体を構成元素とする配位ナノシートを創製し、二次電池の正極材料や高量子収率光電変換デバイス材料、有機発光デバイス用のホール輸送層としての可能性を見出すなど産業界に与える影響は大きいと考えられる。さらに、鳥海課題においては、常に動作しているクロック回路のような回路ブロックに対してはNC-FETが有効であることや、電子密度の低い材料を金属/半導体接合の間に挟むことによりショットキー障壁の高さを低下させる技術を開発するなど、大規模集積回路の低消費電力動作の実現に貢献する研究成果も得られている。

特許出願に関しては、原著論文数と同様に、特許出願件数も中間評価時と比較してほぼ倍増しており、一部の研究課題を除けば、研究領域全体として知的財産創出にも十分健闘した運営がなされたと判断できる。

以上のように、本研究領域では、社会的・経済的な観点からもインパクトの高い成果が得られていると評価できる。

以上より、本研究領域は戦略目標の達成に資する成果の創出に十分に貢献をしたと評価できる。

以上