

戦略的創造研究推進事業
—CREST(チーム型研究)—

研究領域

「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」

研究領域事後評価用資料

研究総括：黒部 篤

2022年3月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	6
(3) 研究総括	8
(4) 採択研究課題・研究費.....	9
2. 研究総括のねらい.....	11
3. 研究課題の選考について.....	13
4. 領域アドバイザーについて.....	19
5. 研究領域のマネジメントについて.....	22
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	49
7. 総合所見	67

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「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」

①達成目標

近年のナノテクノロジーやナノエレクトロニクス技術の進展に伴い、構造の特異性・新規性に基づいた多様かつ驚異的な物性や機能が明らかになりつつあり、世界的に注目されているグラフェンやトポロジカル絶縁体を先行例として、二次元機能性原子・分子薄膜（原子・分子の二次元的構造、あるいはそれと等価な二次元的電子状態を表面・界面等に有する機能性を持った薄膜物質）の基礎学理の構築と革新的部素材・デバイスへの応用双方の視点を包括する研究を戦略的に推進することにより、以下の目標を達成することを目指す。

- 二次元機能性原子・分子薄膜のシーズ技術の先鋭化や多様性の拡大に資する新構造
原子・分子薄膜及びその特性・機能を保持した革新的部素材・デバイスの創出
- 機能性原子・分子薄膜の特性・機能の研究による薄膜創成や部素材・デバイス設計に係る学理の創出
- 社会的ニーズに応える機能性原子・分子薄膜による多様な革新的部素材・デバイスに係る基盤技術の創出

②将来実現しうる重要課題の達成ビジョン

従来のバルクや一般的な薄膜とは異なる特性・構造（高キャリア移動度、低抵抗性、柔軟性、透明性、高強度、高耐熱等）を持ち、新しい機能や従来材料の特性を凌駕する機能の発現が期待される二次元機能性原子・分子薄膜の研究開発を推進し、新規材料や革新的部素材・デバイスに展開することで、主として以下の3点の実現が期待される。

- アプリケーション・ニーズに資する新機能・新物質・新現象の発見及び複数の学術分野間（物理学、化学、関連するデバイス工学等）の連携促進。
- 次世代の部素材・デバイスに求められる省エネルギー化、小型化、軽量化、及び新機能の創出
- 部素材産業やエレクトロニクス産業並びに次世代のデバイス・システムの創出等に供される関連産業の国際競争力の強化

③具体的内容

（背景）

二次元機能性原子・分子薄膜には、(i) 二次元性という構造の単純性や独特の対称性等

に起因して三次元物質と比べて特異な性質を有する、(ii) 異種材料との組合せが容易である、(iii) 薄膜であるが故に例えば電界による外部変調が容易である、等の多くの長所があり、新たな機能発現の場として利用できる可能性がある。同時に、これらの課題の達成においては、新たなサイエンスが切り拓かれる可能性が含まれており、実験及び理論面において新概念が創出される期待が大きい。

これまでは、高品質な二次元機能性原子・分子薄膜の安定的な作製は必ずしも容易ではなかったものの、グラフェンを始めとして、様々な新しい二次元薄膜作製に係る手法の提案が試みられている。我が国でも、これまで半導体分野で培われた結晶成長技術など、多くの技術や知識が蓄積されており、それらを活用して従来の薄膜とは異なる究極の物質としての二次元機能性原子・分子薄膜に係る研究を推進することで、新たな現象・原理に基づく革新的な特性を有する材料、部素材・デバイス創製への展開が大きく開けることが期待される。

このような新しい展開を引き起こすためには、物性実験・理論、合成化学、デバイス工学等の分野の研究者との連携促進が不可欠であるとともに、近年進展の著しい計測技術や計算科学との協働も必須である。

(研究内容)

構造の特異性・新規性に基づいた多様かつ高度な特性・機能の発現が期待されている二次元機能性原子・分子薄膜に関して、構造と機能に関する基礎学理の構築と、機能性部素材・デバイスへの応用の双方の視点を包括する研究を戦略的に推進する。例としては以下のとおりである。

- 二次元機能性原子・分子薄膜のシーズ技術の先鋭化や多様性の拡大に資する新構造原子・分子薄膜及びその特性・機能を保持した革新的部素材の創出・デバイスの創出
 - ・原子・分子薄膜の完全結晶実現を志向する結晶成長・合成技術の創出
 - ・原子・分子薄膜の構造や物性に関する計測・解析・加工プロセス技術開発
- 機能性原子・分子薄膜の特性・機能の研究による薄膜創成や部素材・デバイス設計に係る学理の創出
 - ・部素材・デバイス設計に本質的に重要な、電子輸送特性、光吸収特性、フォノン散乱、熱伝導、スピン流等の物理的・化学的相互作用に起因する物性に関する基礎的知見の探求とその蓄積
- 社会的ニーズに応える機能性原子・分子薄膜による多様な革新的部素材・デバイスに係る基盤技術の創出
 - ・異方的な電子輸送特性や熱伝導性、物質選択性など、二次元性の特徴を生かした部素材創成のための基盤技術、あるいは大面積化・大量生産化等の技術に関する研究
 - ・透明電極・配線・導電性薄膜など、極限薄膜としての導電性に着目し、同時にその他の特異的物質機能を付加した応用技術に関する研究
 - ・センサーデバイス等、原子・分子薄膜の物性が物質の吸着などにより敏感に変化する

- 性質（高感度性）をデバイス応用する技術に関する研究
- ・高速電子デバイス等、原子・分子薄膜中の電子の高速輸送特性など特有の優れた電子物性をデバイス応用する技術に関する研究
 - ・原子・分子薄膜と異種材料との接合による新機能デバイスの提案と原理実証

④政策上の位置付け（政策体系における位置付け、政策上の必要性・緊急性等）

第4期科学技術基本計画（平成23年8月19日閣議決定）では、我が国が直面する重要課題への対応として、「産業競争力の強化に向けた共通基盤の強化」が求められており、「付加価値率や市場占有率が高く、今後の成長が見込まれ、我が国が国際競争力のある技術を数多く有している先端材料や部材の開発及び活用に必要な基盤技術、高機能電子デバイスや情報通信の利用、活用を支える基盤技術など、革新的な共通基盤技術に関する研究開発を推進するとともに、これらの技術の適切なオープン化戦略を促進する」こととされている。

また、科学技術イノベーション総合戦略（平成25年6月7日閣議決定）では、クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現に向けて、「革新的デバイスの開発による効率的エネルギー利用の取組」を進め、そのことにより、「革新的デバイスを用いた製品による新市場の創出及び我が国の国際競争力強化を図るとともに、エネルギーの効率的な利用と国際展開をねらう先端技術を有する社会を実現する」こととされている。

さらに、日本再興戦略－JAPAN is BACK－（平成25年6月14日閣議決定）では、クリーン・経済的なエネルギー需給の実現に向けて、「広域系統運用、無駄を徹底排除するデバイス・部素材や蓄電池の普及により、時間・場所の制限を超えた効率的なエネルギー流通を達成し、日本全体で最適なエネルギー利用が可能となる社会を目指す」こととされている。

以上から、本戦略目標下で実施する研究開発の実施により、大幅な軽量化や小型化、低消費電力化等を実現する革新的部素材・デバイスを用いた製品やシステムに供される関連産業の国際競争力強化を図ることは、政策的にも求められているところである。

⑤他の関連施策との連携及び役割分担・政策効果の違い

我が国では、例えば戦略目標「ナノデバイスやナノ材料の高効率製造及びナノスケール科学による製造技術の革新に関する基盤の構築（平成18年度設定）」や「新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発（平成19年度設定）」の下、二次元機能性原子薄膜に関連する公的研究開発は部分的に実施されているものの、いずれも個別の要素技術に特化した研究課題の域を出ない状況にあり、今後の国際競争に対応できるような、本戦略目標で掲げる基礎と応用をシームレスにつなぐ、様々な要素技術と応用開発を包括する取り組みはなされていないのが現状である。

本戦略目標においては、近年、欧米アジア各国でもグラフェン関連の研究開発に戦略的に資金が投入される中、大学等におけるこれまでの取組の成果を積極的に活用するとともに、「情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナ

ノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成（平成 25 年度設定）」等の関連する戦略目標やプロジェクト間と緊密な連携を確保し、速やかな成果の実用化を目指す。さらに、経済産業省の協力を得て、当該目標において創出される成果を民間企業プロジェクトへ速やかに展開し（例えば、実用化への取組を行う研究機関や民間企業の部材試作ラインを活用する）、あるいは経済産業省の事業において発生する科学的に深堀を要する課題について、本戦略目標に参画する研究者の協力を得て解決を図る（例えば、民間企業等から研究を受託する）といった取組を実施する。特に、幅広い産学官の研究者が集結する TIA（つくばイノベーションアリーナ）の枠組みを最大限生かし、本目標におけるオールジャパンのドリームチームによる基礎研究の成果を、我が国の産業競争力の強化に直結する体制を構築する。

⑥科学的裏付け（国内外の研究動向を踏まえた必要性・緊急性・実現可能性等）

これまで日本は、部素材の産業が、自動車産業やエレクトロニクス産業とともに国際的な競争力を得てきており、これらを支える役割を担ってきた。世界の主要各国は、研究開発の拠点化とアライアンス化を進める一方、日本企業の研究開発アクティビティは大幅に低下しており、更に昨今の公的な研究開発投資低減の流れのもとで、アカデミアの基礎研究・開発も他国に後れをとりつつあるのが現状であり、今後、長期的観点に立って革新的部素材・デバイスに係る基盤技術を創出し、育てていくことは喫緊の課題である。

一方で、日本でも基盤的な研究成果は幾つか出てきている。例えば、2010 年のノーベル物理学賞の受賞研究対象となったグラフェンを、従来のシリコンに代わる半導体材料として利用する場合に鍵となるバンドギャップ導入に関して、日本の物質・材料研究機構の研究グループが、電界効果型トランジスタ (FET) 構造を用いたバンドギャップ導入を確認した。現時点では電気伝導率の面から、すぐに実用化に至ることは難しいとされているものの、欧米・アジア各国ではグラフェンの産業応用での大型の研究開発投資を進めている。グラフェン素子におけるバンドギャップ制御技術の確立は”Beyond CMOS” 実現につながり、半導体技術の観点からも注目すべき研究である。

グラフェンに関しては 2010 年のノーベル物理学賞受賞対象研究となったことから明らかなように、現在精力的な研究が世界中で行われており、ナノカーボン研究において最も注目すべき分野であるといえる。ただし、我が国の研究開発施策は欧米に比較して不活発であり、この分野全体としてみたときの国際的な貢献も低いとの声が大勢である。特に、欧州では、グラフェンが EU Future Emerging Technology flagship に採択され、今後 10 年間で 10 億ユーロが措置される予定である。また、アジアでも韓国を中心に、グラフェン関連の研究成果が目立ってきており、今後の産業化へのシナリオ次第では強力な存在となる可能性がある。

我が国は材料分野の研究では国際的にトップレベルであり、機能性原子・分子薄膜研究では、物理学者と化学者の連携・融合が核心であることを考えると、今後の我が国の取り組み

として、周辺分野との融合、応用分野との垂直連携を基軸とし、これまでに培ったナノカーボン材料研究に係る技術と手法、人材を基にして、人材育成や国際連携も視野に入れた大型の国家プロジェクトやプログラムを推進すべきである。

⑦検討の経緯

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 ナノテクノロジー・材料科学技術委員会がまとめた「ナノテクノロジー・材料科学技術の研究開発方策について<中間取りまとめ>」（平成 23 年 7 月）において、「エレクトロニクスの省エネルギー化、多機能化」が課題解決に向けた重点研究開発課題とされ、省エネルギー性能の向上やグローバルな競争環境を注視しながら研究開発を加速することが重要であるとされた。具体的な課題として「カーボンナノチューブ、グラフェン等のカーボンナノエレクトロニクス」が挙げられ、自在制御など実用化に向けた課題の克服が必要とされた。

グラフェンを始めとする二次元薄膜が注目を集めている中、独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター（CRDS）科学技術未来戦略ワークショップ「機能性原子薄膜／分子薄膜の創生と展開」（平成 24 年 2 月）が開催され、エレクトロニクス動作に際してのエネルギーロス最小化には、究極的に薄い膜、つまり原子薄膜、分子薄膜が理想的であることが指摘された。

上記の議論を踏まえ、CRDS 戦略プロポーザル「二次元機能性原子薄膜による新規材料・革新デバイスの開発」（平成 24 年 3 月）が策定された。

本戦略目標案は、これらの検討の結果を踏まえて作成したものである。

⑧留意点

特になし。

(2) 研究領域

「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」(2014年度発足)

① 研究領域の概要

本研究領域は、次世代省エネルギー部素材・デバイスの構成要素としての二次元機能性原子・分子薄膜(原子・分子の二次元的構造、あるいはそれと等価な二次元的電子状態を表面・界面等に有する機能性を持った薄膜物質)に着目し、原子・分子薄膜の二次元的構造並びに有限薄膜系におけるエッジ(端)構造等の創製、新規な機能発現に関する現象の解明、新機能・新原理・新構造に基づくデバイスの創出等に資する研究開発を基礎基盤的アプローチから進めることにより、新たな価値の創造や新たな市場の創出等に繋げる道筋を示していくことを目的とします。具体的な研究分野としては、二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に関する物性科学、合成化学、デバイス工学等を対象としつつ、互いの分野間が複合的に連携することで、革新的部素材・デバイスの実現に資する結晶成長技術、構造や物性の解明と制御のための計測・解析・加工プロセス技術、部素材・デバイス設計技術等の基盤を創出するとともに、基礎学理の構築に取り組みます。

② 研究領域設定の理由

本戦略目標は、二次元機能性原子・分子薄膜(原子・分子の二次元的構造、あるいはそれと等価な二次元的電子状態を表面・界面等に有する機能性を持った薄膜物質)の基礎学理の構築と革新的部素材・デバイスへの応用双方の視点を包括する研究を戦略的に推進することによって、革新的部素材・デバイスの創出を通じた部素材産業、エレクトロニクス産業並びに関連産業の将来の競争力強化に貢献しようとするものである。

本研究領域は、この戦略目標の下で、原子・分子薄膜の二次元的構造並びに有限薄膜系におけるエッジ(端)構造等の創製と新規な機能発現に関する現象の解明、新機能・新原理・新構造に基づくデバイスの創出等に資する研究開発を基礎基盤的アプローチから進めることにより、シーズ技術の先鋭化や多様性の拡大に資する新構造二次元原子・分子薄膜及びその特性・機能を保持した革新的部素材・デバイスの創出、薄膜創成や部素材・デバイス設計に係る学理の創出、社会的ニーズに応える機能性原子・分子薄膜による多様な革新的部素材・デバイスに係る基盤技術の創出を目指すものである。

本研究領域では、上記目的の実現に向けて、二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に関する物性科学、合成化学、デバイス工学等を対象としつつ、互いの分野間が複合的に連携することで、革新的部素材・デバイスの実現に資する結晶成長技術、構造や物性の解明と制御のための計測・解析・加工プロセス技術、部素材・デバイス設計技術等の基盤創出、及びそのもととなる基礎学理の構築といった多岐にわたる研究テーマを対象としている。

また、上記のように複数分野の複合的な連携が有効であることから、研究推進体制としては、チームの編成が可能なCRESTとしている。

さらに、平成 25 年度に発足した CREST・さきがけ複合領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」では、材料・電子デバイス・システム最適化の研究を連携・融合することにより、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現を可能にする研究開発を進めており、当該研究領域と本研究領域とが緊密かつ相互補完的な連携を取ることで、シーズ技術の先鋭化や多様性の拡大、社会的ニーズ等に資する成果をより効果的に創出することが期待できる（図 1-1）。

以上を総合すると、本研究領域は、戦略目標の達成に向けて適切に設定されている。

一方、本研究領域は、総じて国際的に我が国の研究水準が高いナノテクノロジー、ナノエレクトロニクス研究を基盤としている。加えて、今後大きな進展が期待される二次元機能性原子・分子薄膜による素材技術、新原理・新構造素子技術の構築は、部素材・デバイスの省エネルギー化、小型化、軽量化、および新機能の実現を目指す取組であり、社会的要請のみならず、過去の関連施策による研究成果の発展や研究基盤の強化、ひいては新たな産業競争力の強化という観点においても、学界や産業界等からの要請や関心も高い。以上から、本研究領域に対し、先見性を有する優れた研究提案が多数見込まれる。

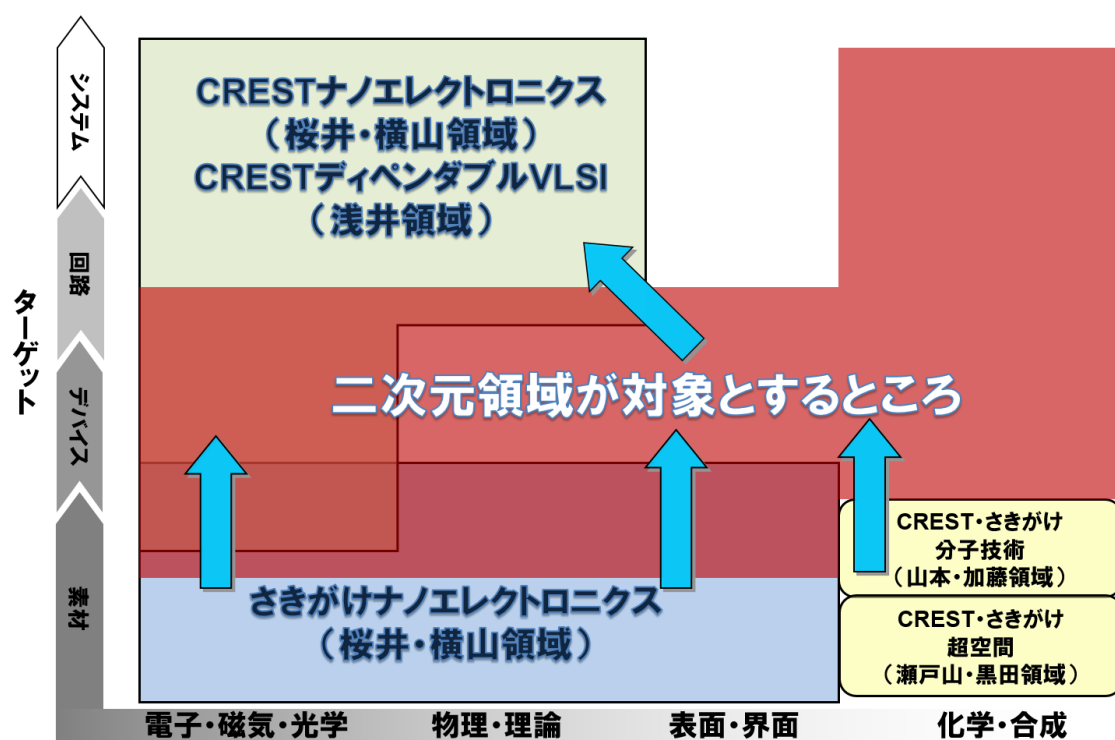


図 1-1 CREST「二次元」領域の位置づけ

CREST さきがけ「ナノエレクトロニクス」領域を中心に連携し
 出口はデバイスに軸足を置く

(3) 研究総括

黒部 篤 (元(株)東芝 研究開発センター 首席技監)

黒部 篤氏は、これまで企業における先端研究者の立場から、固体物性や半導体物理を応用した半導体デバイス・プロセスに関する第一線級の研究開発に従事し、卓越した研究業績を上げてきた。また Toshiba Cambridge Research Centre 駐在時代は、Cambridge 大学 Cavendish 研究所客員研究員としても研究に従事し、当時から二次元薄膜を含む低次元系物性の可能性に着目していた。最近では、将来の不揮発性メモリに重要な磁性材料によるスピンメモリや有機材料を応用したメモリの研究開発においてもリーダーとして活躍している。

これらの業績は国内外にも認められ、VLSI Symposia JSAP Executive Committee 委員や IEEE IEDM の Solid State Device の論文委員、IEEE Electron Device Society の日本チャプターChair、Japan Nano の論文委員を歴任すると同時に、最先端研究開発支援プログラム (FIRST) や (独) 理化学研究所の研究戦略会議等に外部有識者として招聘されている。これらの点を踏まえると、同氏は、本研究領域を推進するために必要な先見性及び洞察力を有しているとともに、優れた研究実績を有し、関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行うと認められる。

また同氏は、企業における事業部門の研究開発センター長も経験しており、将来の社会・産業ニーズに基づく研究開発にトップマネジメントの立場から、研究計画の推進等に関して統括する力量を十分に発揮していると同時に、半導体デバイス・プロセスからシステム設計研究、アプリケーションへの実装までの幅広い見識を有している。これらの点を踏まえると、同氏は、本研究領域での研究課題の効果的な推進を目指し、適切な研究マネジメントを行う経験、能力を有していると認められる。

以上を総合すると、同氏は、本研究領域の研究総括として適任であると認められる。

なお、上記内容の詳細は、以下の URL にも掲載されているので併せてご参照ください。

○JST 公開情報：新規研究領域の事前評価

<https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

○上記の情報の中の<平成 26 年度新規研究領域の事前評価>

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h26.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 採択時 ²	研究課題	研究費 ¹
2014年度	富永 淳二	産業技術総合研究所・ 首席研究員	カルコゲン化合物・超格子のトポ ロジカル相転移を利用した二次 元マルチフェロイック機能デバ イスの創製	369
	鳥海 明	東京大学・教授	二次元界面場により創出される 新規材料物性の機能化	370
	平野 愛弓	東北大学・准教授 (東北大学・教授)	超絶縁性脂質二分子膜に基づく イオン・電子ナノチャネルの創成	309
2015年度	佐藤信太郎	富士通(株)・本部長 付	革新的デバイス創製のためのグ ラフェンナノリボンのテイラー メイド合成	309
	西原 寛	東京大学・教授 (東京理科大学・教 授)	有機・無機複合二次元物質、配位 ナノシートの創製と電子・光・化 学複合機能の創出	302
	町田 友樹	東京大学・准教授 (東京大学・教授)	ファンデルワールス超格子の作 製と光機能素子の実現	411
	松本 和彦	大阪大学・教授 (大阪大学・特任教 授)	糖鎖機能化グラフェンを用いた 二次元生体モデルプラットフォーム の創成	414
2016年度	川崎 雅司	東京大学・教授	トポロジカル絶縁体ヘテロ接合 による量子技術の基盤創成	366
	笹川 崇男	東京工業大学・准教授	トポロジカル量子計算の基盤技 術構築	360
	宮田 耕充	首都大学東京・准教授 (東京都立大学・准教 授)	原子層ヘテロ構造の完全制御成 長と超低消費電力・3次元集積デ バイスの創出	319
	若林 整	東京工業大学・教授	二次元 TMDC 相補型 MISFETs の LSI プロセスによる性能向上と 応用	258
				総研究費

¹各研究課題とも研究期間の総額，進行中の課題は予定を含む(2021年12月31日現在)

²変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

2014年度では提案予算総額上限をCRESTの上限である500百万円で募集した。富永課題は上限の500百万円での応募であったが人件費削減と共通設備の活用をお願いし355百万円に削減し採択した。鳥海課題は450百万円での応募であったが共通設備の活用をお願いし345百万円に削減し採択した。

平野課題は250百万円での応募であったが脂質二分子膜単電子トランジスタの計画が不明確であったので、その予算を削減し200百万円で採択した。研究が進捗する中、脂質二分子膜の開閉メカニズム解明や無細胞タンパク質合成を利用した薬物副作用評価検討など有意義な展開があり必要な機器や材料を増額支援した。また開閉メカニズムについては学理としても意義があり1年追加支援を実施した。

2015年度以降は採択課題数を増やしたく提案予算総額上限300百万円とした。佐藤課題が298百万円、西原課題、町田課題、松本課題が上限の300百万円での応募であったが、佐藤課題、西原課題、松本課題については共用設備の活用推進や消耗品費の効率的な運用を検討頂き250百万円で採択した。一方、町田課題は前年度特定調査課題であったが、テラヘルツ発光へ展開するという具体的な応用を狙う提案になっており、申請通り300百万円で採択した。

佐藤課題については評価機器や大量合成のための機器の導入を支援した。町田課題についてはケンブリッジ大学はじめフランス、カナダとの国際共同研究を支援した。また二次元物質探索へ機械学習を展開するための環境導入を支援した。なおコロナ禍による半年延長支援も実施した。西原課題もケンブリッジ大学と共同研究を実施しており、その支援を実施した。研究設備ではグローブボックスや東京理科大への異動における実験環境を支援した。なおコロナ禍半年延長を含め1年追加支援を実施した。松本課題はグラフェンセンサーの性能向上にかかわる機器を支援した。またオックスフォード大学やエジプトとの国際共同研究の支援も行った。研究後半は新型コロナウイルス検出への展開も支援した。なおコロナ禍半年延長を含め1年追加支援を実施した。

2016年度採択は4課題とも300百万円での応募であったが、笹川課題、宮田課題、若林課題は250百万円で採択した。一方、川崎課題はトポロジカル物質を先導する期待が高く270百万円で採択した。

川崎課題の進捗は期待以上に素晴らしく、新たな材料や物性評価についての機器や材料を支援した。笹川課題も新規材料の展開を支援した。特にマヨラナ準粒子の制御の可能性があり増額支援した。宮田課題も独自のヘテロエピタキシャル接合確立に向けた支援を実施した。

2. 研究総括のねらい

これまでの電子機器の発展において半導体、特にシリコン CMOS LSI における微細加工技術の進展が果たしてきた役割は非常に大きい。特にインテル社創業者の一人であるゴードン・ムーア氏提唱の「ムーアの法則」をよりどころに、IBM 社のロバート・デナード氏による「スケーリング則」の設計指針もあり、3年もしくは2年で4倍の集積度と20%～30%の動作速度向上もしくは低消費電力化を達成してきた。このように高性能化と製造コスト低減を同時に達成することは電子機器にとって大変魅力的であり、その対象を大型計算機からパーソナルコンピュータあるいはデジタル家電へと変えつつも、半導体メーカーはその技術革新に注力し、巨大なマーケットを築き上げてきた。

1998年からは国際半導体技術ロードマップ (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS) が発行されるようになり、それはムーアの法則を堅持するための課題を国際的に共有する活動に発展し、国際学会でもその課題解決の構造や材料の提案が相次いだ。2017年の IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) ではインテル社の10nm CMOS 技術やAMD社の7nm CMOS 技術の発表があり、現在も CMOS 微細加工技術の進展が続いている。

しかしながら有限なサブ・スレッショルド・スイングによる低電圧化の限界や短チャネル効果によるチャネル制御性の低下などの物理限界や、加工やドーパントのばらつきによる微細加工限界が近づいているとの意見がある。また、それ以前に消費電力低減のメリットが薄れていることや、製造装置の導入やプロセス・インテグレーションに莫大な投資が必要であることから、10nm以降の微細 CMOS プロセス技術を構築しているのはわずか数社に留まっている。もちろん、EUV (極端紫外線リソグラフィ) やナノインプリントリソグラフィなどの新たな露光技術や3次元集積化技術などの導入により、微細化・集積化は、まだ続くと思われるが、集積回路の性能向上・消費電力低減の傾向は確実に鈍化していくと考えられる。

このような背景を踏まえシリコンに変わる材料が、古くは GaAs に代表される III-V 族系化合物半導体材料、さらには II-VI 族系、あるいはカーボンナノチューブ (CNT)、グラフェンなどのカーボンナノ材料やナノワイヤ (NW) などの新規構造の検討が盛んになされている。特にグラフェンは2010年にアンドレ・ガイム氏とコンスタンチン・ノボセロフ氏が「二次元物質グラフェンに関する革新的実験」でノーベル物理学賞を受賞したこともあり、非常に注目されるに至った。

本研究領域ではグラフェンを先行例としながらも幅広い二次元材料を対象とし、新たな機能を実現することを目標としている。ただし「二次元機能性薄膜」イコール「無限に広い膜」というイメージだけでは不十分で、「有限のもの」でも本質的に新たな機能が期待できる立場をとる。なぜならグラフェンなどでも、ナノリボンでバンドギャップ形成や高移動度が発見されていることやトポロジカル絶縁体のコンセプトは、量子ホール効果 (二次元) のエッジ状態から発展してきたからである。

対象学術分野は、中心になると思われる物性物理分野では、二次元機能性薄膜の機能を司

る物性の理解と制御に加え、電子物性だけでなく、磁性(スピン)、光、構造・機械、熱(フォノン)、化学反応制御など、各種物性を対象とした。一方、化学分野では、合成・加工プロセスの構築、工学面では、部素材・デバイスの設計なども対象とした。さらに生物学も対象分野の一つとし、例えば細胞膜を構成する脂質二重層もまた、二次元機能性薄膜そのものであり、ナノスコピックな機能解明及びその制御も対象とした。

これらの学術分野がそれぞれの分野で学理構築を目指すことに加え、本研究領域内にて連携し新たな学術領域が生まれることを期待している。もちろんこれらの学術分野は世界中の研究機関で多額の投資がなされている。例えば 2013 年に発足した EU の Graphene Flagship では 10 年間で 10 億ユーロが投入され、研究費も研究者人口も到底太刀打ちができない。

以上を踏まえ、本研究領域では二次元薄膜材料をベースにデバイス機能化を目指すことに軸足を置く。もちろんその機能は、従来技術では到底実現できない圧倒的な性能改善、もしくは新規機能に資するものを目指すことは言うまでも無い。

3. 研究課題の選考について

(1) 選考方針

研究開発当初は必ずしも十分なビジョンが明確化されなくても、研究開始から 3 年後程度には、目指すアプリケーションがある一定程度設定できて、そのための最低限の条件はクリアできることが期待されることを採択の条件とした。

ただし応用は重要だが、最初からそれに固執しすぎて新たな着想や「気づき」を狭めることは本意でない。研究開発の基軸は、あくまでサイエンスベースでの原理追究や指導原理の確立であり、新しい技術のシーズが、どのようなニーズを目指すのか、あるいは満たしうるのかは、継続して検討することを基本スタンスとした。

具体的な出口が見え始めた時に、ターゲットアプリを満たすために不足している他技術も見え始め、分野横断連携が必要になる可能性がある。募集要項ではエレクトロニクス分野を例にとり以下のような記述をした。

“More Moore” を狙う提案ではデバイス性能だけでなく、スケーリング可能性（あるいは、微細領域での発現）を示す必要がある。微細化の技術ロードマップは ITRS (The International Technology Roadmap for Semiconductors) などによって比較的明確になっているので、それにミートできる技術かの見極めが重要である。例えば高集積不揮発メモリ、ストレージクラスメモリ、Scaled CMOS などがそれに相当する。

“More Than Moore” を狙う提案では既存デバイスの代替（性能やコストなどの優位性）があるが、それ以外は、新たなアプリの同時開拓も必要とし、例として各種の物理・化学センサ、低コスト高性能太陽電池、熱電素子、新光源、LSI 用配線材料、光素子用透明電極、耐環境素材、二次電池用電極などをあげた。

選考に当たっては以下の点を考慮した。まず研究実施に係る体制や規模については以下のような要項に沿って組織化がなされているかの確認をした。

- (i) 研究提案者自身の構想実現に向けて、それを補完する最適なチーム編成であること。
- (ii) 「二次元機能性薄膜」に関する研究はまだ歴史が浅いところがある反面、ここ数年で世界的な研究競争が激化していることから提案される構想の斬新さや実現性の継続的ベンチマークが明白になっていること、関連する分野を国際的にかつ中長期的に先導できる人材の活躍の場が提供されること。
- (iii) 研究チームとしての取組を重視しつつも、領域内チーム間・研究者間、全国の共用設備や関連研究室との共同研究、CREST・さきがけ「ナノエレクトロニクス」領域との連携を実践できる体制であること。

本研究領域で期待する募集テーマとして、以下が明確化されているかの確認をした。

- (i) 実用的なアプリが想定され、その実現に向けたブレークスルーを生み出すための基礎

学理の探求

- (ii) 現時点ではアプリ・アイデアとしては柔らかいが、基礎学理の研究を通じて、将来のアプリにブレークスルーをもたらすことを期待させるような、インパクトのある研究テーマ
- (iii) 3年後くらいには、具体的なアプリが想定できることを期待

また本研究領域の募集範囲外のテーマも明確にし、排除することを宣言した。

- (i) 基礎学理のみを探求するテーマ
- (ii) 実用化のみを探求するテーマ
- (iii) 実行すればできると、ほぼ分かっているテーマ

採択に当たっては、何とか課題を達成したいという研究提案者の強い思いを読み解き判断したいと考えた。それを半定量的にでも確認したく、提案書へ盛り込んで載せたいこととして以下のことを明確にした。

- (i) 新規性や自らの持つ強みを明記すること
- (ii) 研究の意義を明記すること
 - なぜ、その研究をすることが重要なのか、想定される成果と、その社会的な位置づけ、解決しようとしている課題や想定するデバイスなど
 - 例えば単に「移動度が高くなる」といった、デバイスの一側面だけでは不十分。
 - 最終的に、デバイスがもたらす価値にまで踏み込むこと。
- (iii) ベンチマーク（研究内容、想定デバイス、研究期間）を行うこと
- (iv) 研究開発～実用化までに必要と想定される時間軸を明記すること
- (v) 類似デバイス、他研究機関に対する強み・弱みを明記すること
- (vi) 形成しようとしている研究チームの優位性を明記すること

(2) 選考結果

選考に当たっては、

- (i) 実用的なアプリケーションが想定され、その実現に向けたブレークスルーを生み出すための基礎学理の探求が期待できること
- (ii) 現時点でアプリケーションのアイデアとしては柔らかくても、基礎学理の研究を通じてそのアイデアが具体化され、将来のアプリケーションにブレークスルーが期待されるインパクトのある研究テーマであること

この2点を重視し、幅広い分野から経験豊富な10名の領域アドバイザーの協力のもと選考を実施した。

①2014年度選考結果

初年度は物性物理学分野から 59 件、化学分野から 17 件、工学分野から 6 件、生物学分野から 4 件、合計で 86 件と多くの応募を頂くと同時に、研究分野の拡がりも確認することができた。8 件を面接選考対象とし、選考の結果以下の 3 課題を採択した。

- (i) 富永課題 「カルコゲン化合物・超格子のトポロジカル相転移を利用した二次元マルチフェロイック機能デバイスの創製」
- (ii) 鳥海課題 「二次元界面場により創出される新規材料物性の機能化」
- (iii) 平野課題 「超絶縁性脂質二分子膜に基づくイオン・電子ナノチャネルの創成」

富永課題は、室温トポロジカル絶縁体に由来する電磁気特性を活用し、実験・理論両面のアプローチにより新たな学理の構築と革新的な機能デバイスの創製が期待できる。鳥海課題は既存の Si-MOSFET 研究とは一線を画し LSI デバイスの課題に真っ向から挑むことで目標達成時には非常に大きなインパクトが期待できる。平野課題は脂質二分子膜をエレクトロニクス素子に融合する独創的な着眼点で、高感度な化学・物理センサ創出に大きな成果が期待できる。

物性、工学、生物と幅広く採択したといえる一方で、本研究領域の先行例であるグラフェンをベースにした提案も多く頂いたが、採択には至らなかった。翌年度は、これまでの研究とは一線を画す新規機能や、既存デバイスでは到底実現できない性能改善を目指す提案を期待した。

なお翌 2015 年度採択となった町田課題はアプリケーションイメージが希薄であるもののファンデルワールス超格子は魅力的であり特定課題調査（採択には至らなかったが、今回の提案で不十分な部分を検討し翌年度に再度提案頂く制度）とした。

②2015 年度選考結果

2 年目となる 2015 年度は 55 件の応募があり、物性物理学分野、化学分野、工学分野から生物学分野まで幅広い学術分野から応募があった。8 件を面接選考対象とし、選考の結果以下の 4 課題を採択した。

- (i) 佐藤課題 「革新的デバイス創製のためのグラフェンナノリボンのテイラーメイド合成」
- (ii) 西原課題 「有機・無機複合二次元物質、配位ナノシートの創製と電子・光・化学複合機能の創出」
- (iii) 町田課題 「ファンデルワールス超格子の作製と光機能素子の実現」
- (iv) 松本課題 「糖鎖機能化グラフェンを用いた二次元生体モデルプラットフォームの創成」

佐藤課題は、独自に開発した前駆体及び新規前駆体堆積法でグラフェンナノリボンの実現と新機能の発現を目指す。西原課題は「二次元錯体配位ナノシート」で、幅広い独創的な二次元物質群の創製と種々の応用展開が期待できる。町田課題は、ファンデルワールス超格子構造で、既存の技術では実現できない複合原子層構造の実現と新たな物理現象の開拓が期待できる。松本課題は、グラフェンを多種多様な糖鎖分子と複合化して高感度計測可能な生化学反応場の創成が期待できる。

2年目は二次元材料の先行例であるグラフェンを中心に、化学分野からの研究提案も採択することができた。本研究領域の趣旨がより理解され、学術的な探索だけでなく出口を見据えた提案が増えたが、解決しようと想定する課題の踏み込みが十分でない提案や、逆に課題解決にフォーカスしすぎてしまい、本来の基礎基盤的なアプローチが置き去りにされた提案も散見された。次年度は最終年度となるので、これまでの研究とは一線を画す新規機能や、既存デバイスでは到底実現できない性能改善を目指す基礎学理からの提案を期待した。

③2016 年度選考結果

最終年度である 2016 年度は 45 件の応募があり、三期目もこれまで同様、物性物理学分野、化学分野、工学分野から生物学分野まで幅広い学術分野から応募があった。10 件を面接選考対象とし、選考の結果以下の 4 課題を採択した。

- (i) 川崎課題 「トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子技術の基盤創成」
- (ii) 笹川課題 「トポロジカル量子計算の基盤技術構築」
- (iii) 宮田課題 「原子層ヘテロ構造の完全制御成長と超低消費電力・3次元集積デバイスの創出」
- (iv) 若林課題 「二次元 TMDC 相補型 MISFETs の LSI プロセスによる性能向上と応用」

川崎課題、笹川課題はともにトポロジカル電子状態を用いたもので、前者は非散逸流でジュール熱を発生しないデバイス機能を狙うもの、後者は材料探索からマヨラナ粒子の検出を狙うものである。採択後発表された 2016 年ノーベル物理学賞が「トポロジカル相転移および物質のトポロジカル相の理論的発見」であり、また 2018 年度には CREST・さきがけ「トポロジー」研究領域が立ち上がるなど、重要な課題を先行して採択できた。

また宮田課題、若林課題は遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) を用いたもので、前者はトンネル型 FET で低消費電力デバイスに挑戦するもの、後者は相補型 MISFET の高性能化に取り組むものである。「二次元」領域において TMDC はグラフェンと同等以上重要な材料であり、本研究領域に取り込みたい材料であったことから、最終年度に 2 課題採択できた意義は大きい。

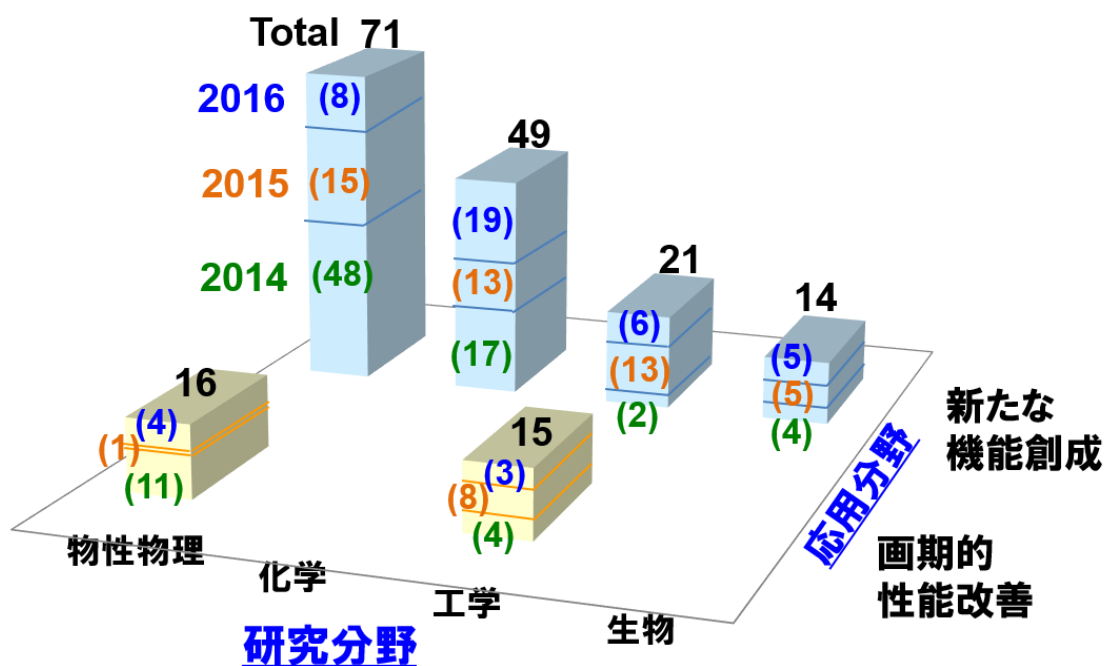


図 3-1 研究提案のポートフォリオ

数字は応募件数 () 内上段は 2016 年度、中段が 2015 年度、下段が 2014 年度

結果的に 3 年間の採択期間で 186 件の応募が有り、11 課題を採択した。図 3-1 に示すように物性物理学分野からの応募が多かったが、化学、工学から生物分野までに拡がりもあった。

図 3-2 に採択課題のポートフォリオを示す。先行例であるグラフェン、グラフェン以上に電子デバイスへの応用が期待されている TMDC、近年注目を集めているトポロジカル材料に加え、化学分野、生物系とバランス良く採択することができた。

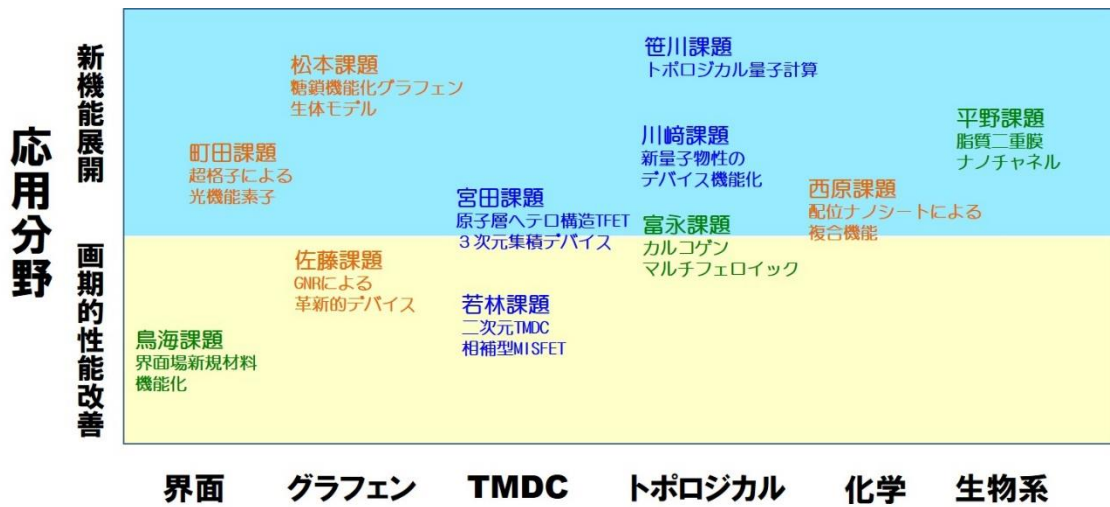


図 3-2 採択課題のポートフォリオ
2016 年度、2015 年度、2014 年度

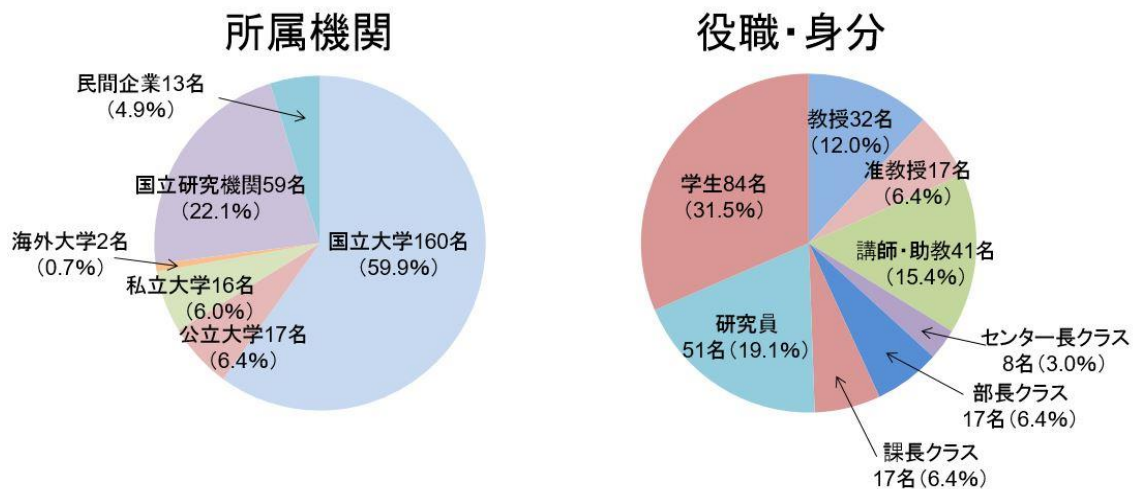


図 3-3 研究参加者人員構成 (合計 267 名、採択時)

図 3-3 に研究参加者の人員構成を示す。大学関係が 3/4 をしめる構成となっており、それを反映し 1/3 近くが学生となっている。若手育成の重要性を常に説いていきたい。なお、女性が 27 名 (10.1%)、外国人が 16 名 (6.0%) 参加している。

4. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 ¹	役職	任期
榎 敏明 (物理化学・分子性物質の電子的・磁氣的性質)	東京工業大学	名誉教授	2014年5月～2022年3月
久保 孝史 (構造有機化学)	大阪大学大学院	教授	2014年5月～2022年3月
小林 俊之 (半導体電子物性、半導体デバイス工学)	ソニー(株)	リサーチャー	2014年5月～2022年3月
齋藤 理一郎 (固体物理学、ナノチューブ、グラフェン)	東北大学大学院	教授	2014年5月～2022年3月
内藤 勝之 (有機電子材料)	東芝リサーチ コンサルティング(株) (元(株)東芝)	シニアフェロー (シニアフェロー)	2014年5月～2022年3月
永野 広作 (有機電子材料)	(株)カネカ	取締役専務執行 役員 (エグゼクティブ・フェロー)	2014年5月～2022年3月
中村 志保 (スピントロニクス、スピン偏極表面分析・イメージング)	(株)東芝 (キオクシア (株))	参事 (参事)	2014年5月～2022年3月
長谷川 雅考 (材料工学、炭素材料)	産業技術総合研究所	研究チーム長 (上級主任研究員)	2014年5月～2022年3月
三浦 佳子 (高分子化学 生体)	九州大学大学院	教授	2014年5月～2022年3月

関連高分子)			
横山 直樹 (化合物半導体材料・ デバイス、ナノエレクトロニクス)	産業技術総合研 究所 (富士通(株))	顧問 (名誉フェロー)	2014年5月～2022年3月

¹変更/移動のあった場合、下段に括弧つき記載

本研究領域は物性物理が中心になることを想定しながらも、化学分野からさらには生物系までの広がりを目指したいことから、幅広い分野から領域アドバイザー (AD) に参画頂いた。特に CREST さきがけ「ナノエレクトロニクス」研究領域との連携を重要視しており横山直樹副総括にも参画いただいた。また科学研究費補助金新学術領域研究「原子層科学」の齋藤理一郎領域代表にも参画頂いた。

本領域ではデバイス化を意識することから 10 名の領域アドバイザーの内半数に当たる 5 名の方は企業系の領域アドバイザーである。

(1) 専門的視点

物性物理 3 名 ; 齋藤 AD、中村 AD、長谷川 AD

化学分野 3 名 ; 榎 AD、久保 AD、三浦 AD

有機材料 2 名 ; 内藤 AD、永野 AD

デバイス 2 名 ; 小林 AD、横山 AD

(2) 産業的視点

企業 5 名 ; 小林 AD、内藤 AD、永野 AD、中村 AD、横山 AD

大学等 5 名 ; 榎 AD、久保 AD、齋藤 AD、長谷川 AD、三浦 AD

なお本研究領域では各課題に担当アドバイザーを決めている。領域アドバイザーの専門性の参考として分担を図 4-1 に示す。



図 4-1 採択課題のポートフォリオと担当アドバイザー

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 研究課題の進捗状況の把握と評価、それに基づく研究課題の指導

領域アドバイザーにも協力頂き、最大限の支援を行っている。成功の秘訣は早く失敗することと考え、試作・検証のループを早く回す工夫をお願いした。また成果は、関連学会へすみやかに発表するだけでなく、常に知財的視点での確認を十分行うことを指導している。加えてプレスリリースも積極的な対応をお願いした。

進捗確認は年1回の進捗報告会で実施した。採択期間である2014年度から2016年度まではキックオフミーティング、2017年度以降は領域会議がその場である。

サイトビジットも毎年1回は必ず実施している。研究進捗、研究体制、研究費執行状況などの確認、研究上、運営上の課題ヒアリングを実施した。2017年度からは各課題に担当アドバイザーを決め、サイトビジットに同行いただき、より専門的な立場からフォローアップ、指導を行った。

①キックオフミーティング

採択期間の3年間はキックオフミーティングを開催し、新規課題の研究計画を確認した。加えて既存課題の進捗も確認した。

第1回 2014年12月23日 JST 東京別館

新規課題： 富永課題、鳥海課題、平野課題

第2回 2015年12月23日 JST 東京別館

新規課題： 佐藤課題、西原課題、町田課題、松本課題

既存課題： 富永課題、鳥海課題、平野課題

第3回 2016年12月20日 JST 東京別館

新規課題： 川崎課題、笹川課題、宮田課題、若林課題、

既存課題： 富永課題、鳥海課題、平野課題、

佐藤課題、西原課題、町田課題、松本課題

②サイトビジット

研究進捗確認と研究実施環境の確認、および今後の展開のアドバイスを目的に各課題とも年1回のサイトビジットを開催している。

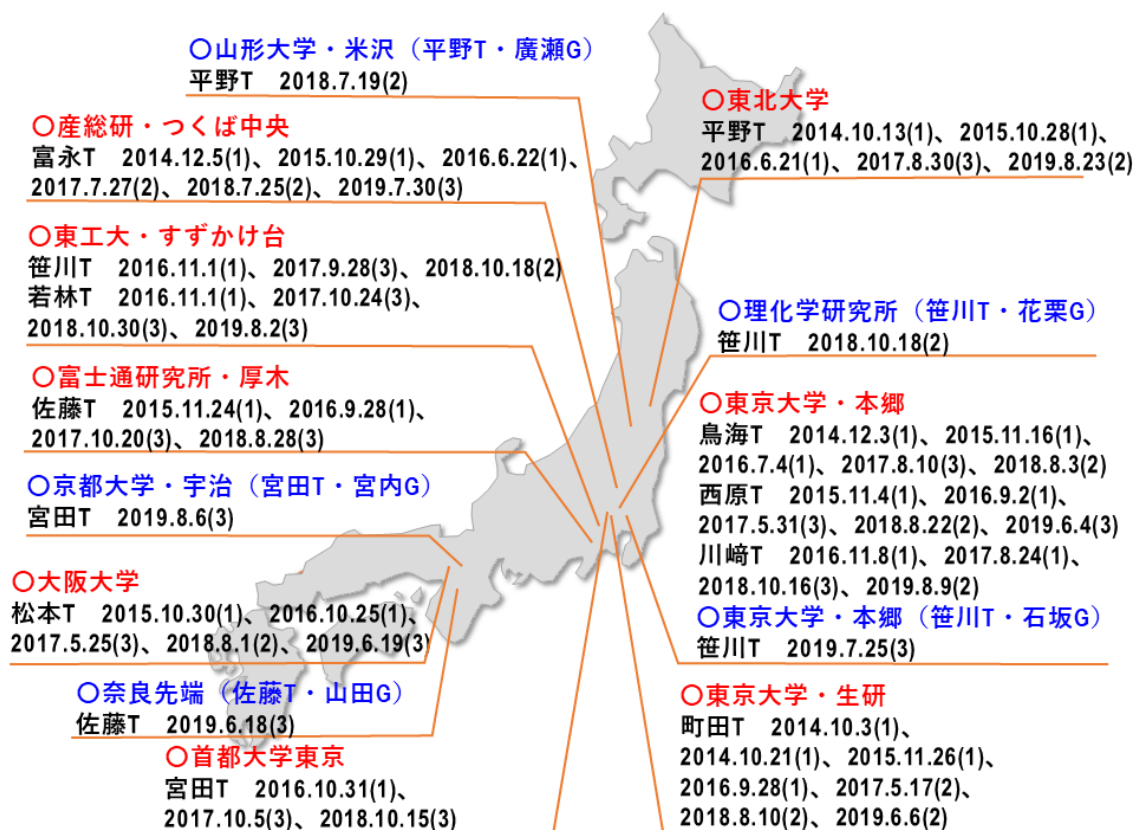


図 5-1 サイトビジット実施状況。なお日付の後の()内の数字は評価者参加人数である。

なお 2020 年度、2021 年度はすべて On Line 開催となった。

また青文字は主たる共同研究者のサイトで開催を示す。

◆2014 年度◆

採択が決定すると研究計画書を提出頂くがこれと平行しサイトビジットによる突っ込んだ議論を実施した。キックオフミーティング前に実施しキックオフミーティングでは領域全体で議論した。

平野課題 2014 年 10 月 13 日 東北大学青葉山キャンパス

鳥海課題 2014 年 12 月 3 日 東京大学本郷キャンパス

富永課題 2014 年 12 月 5 日 産業技術総合研究所つくば中央

町田特定課題 2014 年 10 月 3 日、10 月 21 日 東京大学生産技術研究所

町田特定課題については 2 度訪問しアプリケーションイメージの重要性を説いた。

◆2015 年度◆

2015 年、2016 年度も新規採択課題についてキックオフミーティング前にサイトビジットを実施した。加えて既存課題も研究開始 1 年後に訪問し、進捗を確認した。

既存課題

平野課題	2015 年 10 月 28 日	東北大学青葉山キャンパス
富永課題	2015 年 10 月 29 日	産業技術総合研究所つくば中央
鳥海課題	2015 年 11 月 16 日	東京大学本郷キャンパス

新規採択課題

松本課題	2015 年 10 月 30 日	大阪大学吹田キャンパス
西原課題	2015 年 11 月 4 日	東京大学本郷キャンパス
佐藤課題	2015 年 11 月 24 日	富士通研究所厚木地区
町田課題	2015 年 11 月 26 日	東京大学生産技術研究所

◆2016 年度◆

既存課題

平野課題	2016 年 6 月 21 日	東北大学青葉山キャンパス
富永課題	2016 年 6 月 22 日	産業技術総合研究所つくば中央
鳥海課題	2016 年 7 月 4 日	東京大学本郷キャンパス
西原課題	2016 年 9 月 2 日	東京大学本郷キャンパス
町田課題	2016 年 9 月 28 日	東京大学生産技術研究所
佐藤課題	2016 年 9 月 28 日	富士通研究所厚木地区
松本課題	2016 年 10 月 25 日	大阪大学吹田キャンパス

新規採択課題

宮田課題	2016 年 10 月 31 日	首都大学東京南大沢キャンパス
若林課題	2016 年 11 月 1 日	東京工業大学すずかけ台キャンパス
笹川課題	2016 年 11 月 1 日	東京工業大学すずかけ台キャンパス
川崎課題	2016 年 11 月 8 日	東京大学本郷キャンパス

◆2017 年度◆

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、サイトビジットに同行頂き、より専門的な深い議論を実施した。実際に参加頂いた領域アドバイザーも記す。

国際強化支援対象課題：進捗に加え国際共同研究の内容も議論した。

町田課題	2017 年 5 月 17 日	東京大学生産技術研究所、榎 AD
松本課題	2017 年 5 月 25 日	大阪大学吹田キャンパス、内藤 AD、永野 AD
西原課題	2017 年 5 月 31 日	東京大学本郷キャンパス、久保 AD、三浦 AD

課題中間評価対象：進捗に加え課題中間評価に向けた議論を実施することでより深い評価

を目指した。

富永課題	2017年7月27日	産業技術総合研究所つくば中央、中村 AD
鳥海課題	2017年8月10日	東京大学本郷キャンパス、小林 AD、横山 AD
平野課題	2017年8月30日	東北大学片平キャンパス、内藤 AD、三浦 AD

その他の課題も年1回のサイトビジットを開催し、進捗を確認した。

川崎課題	2017年8月24日	東京大学本郷キャンパス
笹川課題	2017年9月28日	東京工業大学すずかけ台キャンパス、小林 AD、中村 AD
宮田課題	2017年10月5日	首都大学東京南大沢キャンパス、久保 AD、横山 AD
佐藤課題	2017年10月20日	富士通研究所厚木地区、榎 AD、長谷川 AD
若林課題	2017年10月24日	東京工業大学すずかけ台キャンパス、永野 AD、長谷川 AD

◆2018年度◆

前年度中間評価対象：課題中間評価から半年経過後の進捗を確認した。

平野課題	2018年7月19日	山形大学米沢キャンパス、内藤 AD 主たる共同研究者・廣瀬グループのサイトで開催
------	------------	---

富永課題	2018年7月25日	産業技術総合研究所つくば中央、中村 AD
------	------------	----------------------

前年度中間評価対象、課題事後評価対象：鳥海課題は研究期間が4年半と1年短く課題中間評価から半年経過後の進捗に加え、課題事後評価に向けた議論を実施した。

鳥海課題	2018年8月3日	東京大学本郷キャンパス、横山 AD
------	-----------	-------------------

課題中間評価対象：より深い課題評価を目指しサイトビジットを実施した。

松本課題	2018年8月1日	大阪大学吹田キャンパス、永野 AD
町田課題	2018年8月10日	東京大学生産技術研究所、榎 AD
西原課題	2018年8月22日	東京大学本郷キャンパス、久保 AD
佐藤課題	2018年8月28日	富士通研究所厚木地区、榎 AD、長谷川 AD

その他の課題も年1回のサイトビジットを開催し、進捗を確認した。

宮田課題	2018年10月15日	首都大学東京南大沢キャンパス、久保 AD、横山 AD
川崎課題	2018年10月16日	東京大学本郷キャンパス、齋藤 AD、中村 AD
笹川課題	2018年10月18日	東京工業大学すずかけ台キャンパス、中村 AD
若林課題	2018年10月30日	東京工業大学すずかけ台キャンパス、永野 AD、長谷川 AD

◆2019年度◆

前年度中間評価対象：課題中間評価から半年経過後の進捗を確認した。

西原課題	2019年6月4日	東京大学本郷キャンパス、久保 AD、三浦 AD
------	-----------	-------------------------



図 5-2 CREST 研究費で導入したグローブボックスについて説明を受ける

町田課題	2019年6月6日	東京大学生産技術研究所、小林 AD
佐藤課題	2019年6月18日	奈良先端科学技術大学院大学、榎 AD、長谷川 AD 主たる共同研究者・山田グループのサイトで開催
松本課題	2019年6月19日	大阪大学吹田キャンパス、内藤 AD、永野 AD
課題中間評価対象		
笹川課題	2019年7月25日	東京大学本郷キャンパス、小林 AD、中村 AD 主たる共同研究者・石坂グループのサイトで開催
若林課題	2019年8月2日	東京工業大学すずかけ台キャンパス、永野 AD、長谷川 AD
宮田課題	2019年8月6日	京都大学宇治キャンパス、久保 AD、横山 AD 主たる共同研究者・宮内グループのサイトで開催
川崎課題	2019年8月9日	東京大学本郷キャンパス、中村 AD
課題事後評価対象		
富永課題	2019年7月30日	産業技術総合研究所つくば中央、齋藤 AD、中村 AD
平野課題	2019年8月23日	東北大学片平キャンパス、内藤 AD

◆2020 年度◆

2020 年度はコロナ禍によりすべて On Line での開催となった。対象は 2015 年採択 4 課題、2016 年採択 4 課題に加え、チャンネル開閉メカニズムの学理深更を目的に研究期間を 1 年延長した平野課題の 9 課題である。

2015 年採択：課題事後評価対象

西原課題 2020 年 7 月 8 日 On Line 開催、三浦 AD



図 5-3 西原課題サイトビジット、左：研究代表者・西原教授、右：西原グループ参加者



図 5-4 西原課題サイトビジットにてラボツアーは動画で紹介

町田課題 2020 年 7 月 10 日 On Line 開催、榎 AD、小林 AD、横山 AD

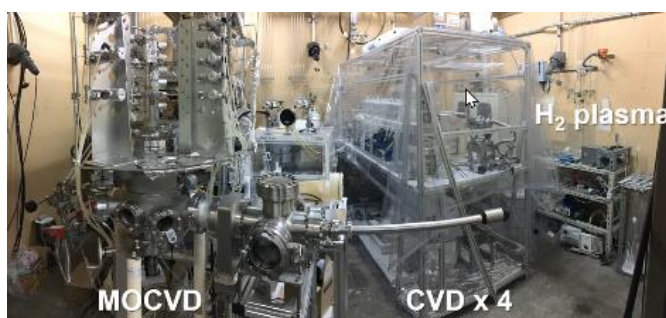


図 5-5 町田課題サイトビジットのラボツアーはタブレットで中継

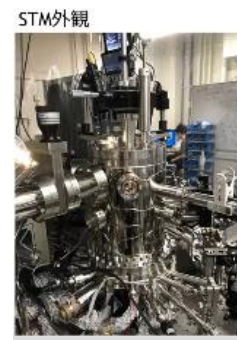
佐藤課題 2020年7月22日 On Line 開催、榎 AD、久保 AD、長谷川 AD
 松本課題 2020年7月29日 On Line 開催、内藤 AD、永野 AD

2016年採択：前年度中間評価対象（課題中間評価から半年経過後の進捗を確認）

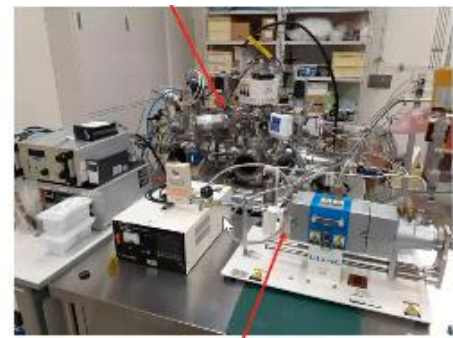
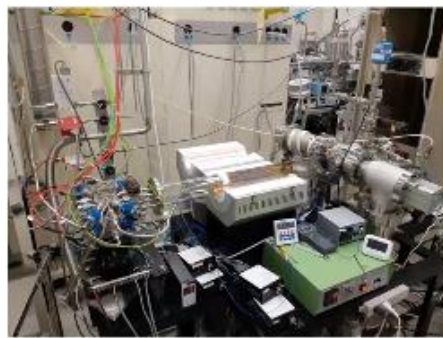
宮田課題 2020年7月14日 On Line 開催、横山 AD



名古屋大グループ



筑波大グループ



産総研グループ

図 5-6 宮田課題では On Line 利点を生かし主たる共同研究者サイトも紹介

若林課題 2020年7月16日 On Line 開催、永野 AD、長谷川 AD
 川崎課題 2020年7月21日 On Line 開催、小林 AD、齋藤 AD、横山 AD
 笹川課題 2020年8月4日 On Line 開催、小林 AD、中村 AD、横山 AD
 1年追加支援課題
 平野課題 2020年8月18日 On Line 開催、久保 AD、内藤 AD、永野 AD、三浦 AD

◆2021 年度◆

2021 年度もコロナ禍によりすべて On Line で開催した。対象は 2016 年採択 4 課題に加え、コロナ禍により半年延長支援した町田課題、1 年追加支援の西原課題、松本課題の 7 課題が対象である。

2016 年採択課題

宮田課題	2021 年 8 月 19 日	On Line 開催、久保 AD、小林 AD、横山 AD
川崎課題	2021 年 8 月 24 日	On Line 開催、齋藤 AD、中村 AD、横山 AD
若林課題	2021 年 8 月 25 日	On Line 開催、榎 AD、永野 AD、長谷川 AD
笹川課題	2021 年 8 月 25 日	On Line 開催、榎 AD、小林 AD、中村 AD、横山 AD

1 年追加支援課題

西原課題	2021 年 8 月 12 日	On Line 開催、久保 AD、長谷川 AD、三浦 AD
松本課題	2021 年 8 月 31 日	On Line 開催、久保 AD、内藤 AD、永野 AD、横山 AD

コロナ禍半年延長課題

町田課題	2021 年 9 月 29 日	On Line 開催、榎 AD、小林 AD、齋藤 AD、長谷川 AD、横山 AD
------	-----------------	--

③領域会議

[第 1 回：2018 年 1 月 11 日]

TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター5 階ホール 5C にて開催した。

二次元材料・構造をベースに新たな機能を実現することで社会的課題の解決に資することを基本方針していること事を踏まえ、各研究課題の目標と研究進捗を再確認し、CREST 研究の成果展開を時間軸も含めて再検討・議論することで、新たな気づきを触発し、新技術への発展可能性を広げることを目的にした。以下の分類にカテゴライズし、各領域アドバイザーにファシリテートして頂き議論した。

- TMDC、グラフェンデバイス

ファシリテータ： 長谷川 AD、内藤 AD

対象課題： 若林課題、宮田課題、町田課題

- トポロジカル物質の展開

ファシリテータ： 中村 AD、小林 AD、齋藤 AD

対象課題： 富永課題、川崎課題、笹川課題

- 医工学、化学の連携融合

ファシリテータ： 久保 AD、永野 AD、三浦 AD

対象課題： 平野課題、西原課題、松本課題

- ・” More Moore” と “More Than Moore” LSI の発展にいかにかに寄与できるか
 ファシリテータ： 横山 AD、榎 AD
 対象課題： 鳥海課題、佐藤課題

[第2回：2019年1月17日]

AP 市ヶ谷にて開催した。第1回は成果展開であったので今回はそれを実現するための基盤・基礎技術について議論を行った。

先行研究で構築された基礎研究成果を踏まえ、各研究チームが培ってきた基礎学理、さらには CREST 研究開始後になされた学術的成果を発表頂き、課題達成に向けた展開を議論することで、研究成果の最大化、領域内の連携強化を狙う。

- ・デバイス創成に向けた基礎学理は？新規機能にどのように結びつけるのか？
 ファシリテータ： 榎 AD、長谷川 AD、横山 AD
 対象課題： 富永課題、若林課題、佐藤課題、鳥海課題
- ・医工学と化学：狙うべき機能は？それを実現するための基礎学理は？
 ファシリテータ： 内藤 AD、久保 AD、永野 AD、三浦 AD
 対象課題： 西原課題、平野課題、松本課題
- ・物性材料：材料物性の基礎学理は？成膜プロセスの基礎学理は？
 ファシリテータ： 齋藤 AD、小林 AD、中村 AD
 対象課題： 宮田課題、町田課題、笹川課題、川崎課題

基礎学理は幅広いものがあり、領域内共通のものは物理学・化学に集約される結果に終わった。

[第3回：2020年1月17日]

AP 市ヶ谷にて開催した。第1回領域会議で議論した成果展開についてその後の展開を発表頂き、議論することで、研究成果の最大化、領域内の連携強化を狙う。

- ・TMDC、グラフェンデバイス分野
 ファシリテータ： 長谷川 AD、榎 AD、横山 AD
 対象課題： 若林課題、宮田課題、町田課題、佐藤課題
- ・化学、医工学分野
 ファシリテータ： 久保 AD、内藤 AD、永野 AD
 対象課題： 西原課題、平野課題、松本課題
- ・トポロジカル物質分野
 ファシリテータ： 中村 AD、小林 AD、齋藤 AD
 対象課題： 富永課題、川崎課題、笹川課題

[第4回：2021年1月22日]

コロナ禍のため On Line 開催になり内容も進捗確認に終始した。

- ・化学、医工学分野

対象課題：西原課題、平野課題、松本課題

- ・TMDC デバイス分野

対象課題：若林課題、宮田課題

- ・トポロジカル物質分野

対象課題：川崎課題、笹川課題

- ・グラフェンデバイス分野

対象課題：佐藤課題、町田課題

[第5回：2022年1月28日（予定）]

On Line で開催を予定しており、研究終了後の展開を議論する予定である。

④課題評価

中間評価時点に比べ事後評価ではデバイス動作を目的としている課題も多く、評価も厳しくならざるを得ないところがある。

松本課題はグラフェンに糖鎖を修飾したセンサにてインフルエンザ・ウィルスの亜型鑑別の基本動作は確認したもののデバイス動作が不安定という課題があった。サイトビジット等で領域アドバイザーも含め議論することで、安定動作を実現しプロトタイプモジュールを作成し、さらに COVID-19 の検出まで果敢に挑戦したことは評価したい。

川崎課題は研究開始から現在に至るまでトポロジカル物質分野の先端を走り続けているが、電気回路によるトポロジカル量子計算手法への新たな展開もあり既に 3 件の特許提案を行ったことも評価できる。

特許については西原課題も 1 年延長期間に応用検討に注力し 5 件の提案を行ったことも評価できる。

笹川課題は、研究期間前半は研究代表者の材料探索が中心で、それでも注目すべき成果は出ていたが、課題達成に向けてはチーム内の評価、理論、デバイスグループとの連携を強く要望した。その結果、マヨラナ準粒子の検出から制御に関する手がかりをつかむまで進展した。

(2) チーム型のネットワーク研究所として、研究課題間や他の研究領域、国内外の他の研究機関、異分野との連携・協力の推進

本研究領域では領域内の連携に加え、海外との連携に注力している。これを踏まえ以下の活動を実施してきた。

① EU Graphene Flagship とのワークショップ

EU 側は大きな投資（10年間で10億ユーロ）をしており米国、中国、韓国そして日本とのベンチマークを実施しながら進めることを求められている。また国際連携も視野に入れている。本研究領域にとってもEUの研究動向把握は重要であり、国際連携も期待したく重要なワークショップと位置づけ、これまでに以下に示す5回のワークショップを共同で開催した。

第1回 2015年10月31日～11月2日 東北大学の東京分室

第2回 2017年5月6日～8日 スペイン・バルセロナ Universitat Autònoma



第2回ワークショップ参加者

第3回 2018年11月19日～11月21日 東北大学片平キャンパス

なお第3回ワークショップ終了後、以下の3ヶ所にわかれ、各々の研究分野についてのより詳細な研究内容や共同研究について突っ込んだ議論をするシンポジウムを開催した。

- ・CREST「二次元」町田チーム@東京大学生産技術研究所
- ・グラフェンコンソーシアム（代表は本領域の長谷川アドバイザー）@秋葉原
- ・東京大学物性研究所・大谷 義近教授チーム

第4回 2019年11月18日～11月20日 イタリア・ピサ大学



ワークショップ参加者



会場の様子

第5回は2020年に日本で開催予定であったが、コロナ禍で延期となった。

2021年になってもコロナ禍の状況が改善されず、2021年10月25日にOn Lineで開催し、互いの研究進捗を発表し意見交換を行った。

②国際強化支援

海外との連携については国際強化支援を積極活用してきた。それに先立ち2016年2月25日の「日英先端材料ワークショップ」(於：ヨーク大学、主催：JSTパリ事務所)への参加を機にケンブリッジ大学、マンチェスター大学の視察を実施した。とくにケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所(理学部物理部門)や電子工学部門は、物理や材料に関する深い議論が期待され、各研究チームの自主性は重んじるものの、強く連携を推奨するとの結論に至った。

すでに多くの研究チームで国際共同研究を実施してきたが、その中でも、国際強化支援を利用したものを以下に列挙する。

(i) 町田チーム

・2016年度、2017年度 英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所 (Charles Smith 教授グループ)

超高移動度グラフェン/h-BN ファンデルワールスヘテロ構造を作製し、ケンブリッジ大学に研究者を派遣して伝導キャリアの空間分布イメージング測定・評価・解析を実施した。

・2016年度 フランス École Normale Supérieure (Bernard Plaçais 教授グループ)

ファンデルワールス超構造自動作製システムを用いて作製したグラフェン/h-BN ファンデルワールスヘテロ構造を用いて、ディラックフェルミオン光学を利用した新機能素子の原理実証を実施した。

・2017年度 スイス連邦工科大学チューリッヒ校 (Jérôme Faist 教授グループ)

町田チームの成果展開で狙っている量子カスケードレーザーの第一人者との連携である。ランダウ準位と基板埋め込み型共振器との強結合モード観測を行い、デバイス設計にフィードバックした。

・2018年度 カナダ・トロント大学 (Tobin Fillter 教授グループ)

ファンデルワールス接合の平坦性を議論して超格子作製に向けた基礎情報を得るとともに、h-BNにおけるC-rich不純物ドメインを摩擦測定で検出する手法を試みた。ファンデルワールス接合をMEMS応用へ展開するための基礎ともなる。

(ii) 西原チーム

・2016年度 英国ケンブリッジ大学 Hughes Hall におけるワークショップ

配位ナノシートの化学、物理および応用をテーマにケンブリッジ大学およびサウザンプトン大学所属の研究者7名に発表頂き、情報交換と技術議論を実施した。



UK-Japan Workshop 会場 (Hughes Hall、英国ケンブリッジ大学)

・2017年度、2018年度 英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所 (Henning Sirringhaus 教授グループ)

上記ワークショップから共同研究に発展した。金属錯体二次元物質「配位ナノシート」の電子状態や物性を実験・理論の両面から評価、獲得した測定結果のより深い議論により目的の物性を有する二次元物質の効率的な設計に結びつけた。

(iii) 松本チーム

・2017年度 オックスフォード大学 (Sonia Contera 准教授グループ)

AFMの第一人者との共同研究で、二次元表面でのウィルス反応による微小な電気的变化とナノスケールの形態的变化を同時計測する手法を構築した。

先方への若手研究者駐在に加え、Contera 准教授を大阪大学に招聘し大阪大学でのAFM観測について指導頂いた。

・2018年、2019年度 エジプト・ダマンフル大学 (M. S. Ibrahim 教授)

鳥インフルエンザが蔓延しヒト感染事例が多数報告される海外地域でグラフェンウイルス検出センサを実地適用し、実用性を確認した。2018年12月にエジプトで試料を採材・計測した。これらの結果を元に前処理の検討や計測法を最適化し、2019年度に再度エジプトの農場等で実地試験を行った。

(iv) 笹川チーム

・2017年度 米国 Temple 大学 Maria Iavarone 教授招聘

花栗グループで招聘し、マヨラナ状態が期待される $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ の渦糸のSTM実験を行い、議論した。

2020 年以降はコロナ禍の影響でアクティビティが下がったのは残念である。

③国際会議、国際ワークショップ

研究成果の発信は非常に重要との認識にたつが、国際的な場で展開すべきとの考えから以下の活動を実施してきた。

(i) 2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2017)における成果発表

2017年11月26日(日)より12月1日(金)まで松本チームが主催として米国ハワイ島で開催された2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS)にて本研究領域から5課題の発表を招待して頂き、成果発表した。本ワークショップは1989年よりInternational Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (NPMS)として2年に1回開催されてきたが、昨年よりWorkshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS)として毎年開催に発展しものである。ナノデバイス・物理研究関連の研究者が一堂に集まる会議としては数少ない継続された研究発表の場として重要な役割を果たしてきている。



WINDS 2017 参加者

具体的には以下の課題の成果を発表した。

- 富永課題 産総研・富永首席研究員：トポロジカル相転移デバイス
- 川崎課題 東京大学・川崎先生：トポロジカルインシュレータ
- 佐藤課題 富士通・佐藤部長付：グラフェンナノリボン
- 宮田課題 首都大・宮田先生：TMDC TFET

西原課題 東京大学・福井研究員：ナノシートのデバイス検討

(ii) International Workshop on TMDC Materials and Devices

若林チームが宮田チームと共同し二次元材料でも重要な TMDC の研究者を集めた研究会を開催した (2017 年 3 月 2 日)。若林チームの主たる共同研究者である UCSB のバナジー教授をはじめ、両チームから 10 件の講演を行った。参加者は 21 名と少なかったが、電子物性から光物性までの幅広い分野の研究者が一同に会し密度の濃い議論がなされた。

(iii) Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM) に連携したワークショップ

EDTM は 2017 年より始まった比較的歴史の浅い学会であるが、半導体デバイスの最高峰である IEDM のアジア版との位置づけの IEEE の国際会議でありレベルは高い。本研究領域では上記ワークショップを発展させ TMDC に限らず二次元材料の成果を発表するため神戸で開催された EDTM 2018 にて併設のワークショップを 2018 年 3 月 16 日に開催した。若林課題をはじめ、町田課題、佐藤課題より発表した。



会場の様子@2018 EDTM

EDTM 2019 は 3 月にシンガポールで開催され、ここでも併設のワークショップを開催した。若林課題、佐藤課題、町田課題、宮田課題の成果を発表すると同時にシンガポール国立大学の Kah-Wee Ang 教授の招待講演頂いた。

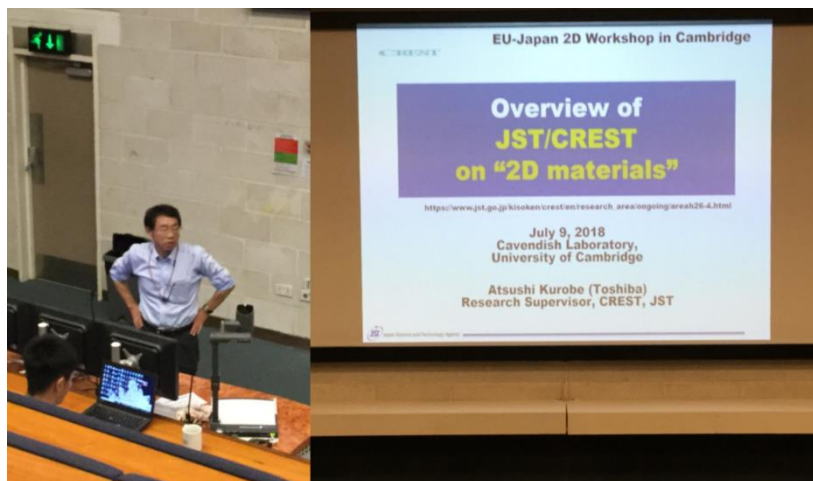


招待講演中の Kah-Wee Ang 教授

(iv) ケンブリッジ大学におけるワークショップ

2018年7月9日にケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所で開催した。

本研究領域では町田課題と西原課題の2課題がケンブリッジ大学との本格共同研究を推進しており、さらに佐藤課題が共同研究の検討を進めている。また松本課題がオックスフォード大学との共同研究を実施している。ここで関係者が一堂に会し互いの共同研究推進状況を共有し今後の連携について議論した。



総括による開会挨拶と CREST「二次元」の紹介



黒部総括と
ケンブリッジ大学・
スミス教授

(v) 「Okinawa Colloids 2019」におけるワークショップ

医工学、化学関係の課題発表の場として以下の国際会議「Okinawa Colloids 2019」において2019年11月8日にCREST「二次元」のワークショップを開催し、平野課題、西原

課題、松本課題の成果を発表した。



ワークショップ発表者

(3) 研究費配分上の工夫

本研究領域はデバイス機能を目指しており、デバイス検証に向け必要な研究環境を支援することを中心に以下の増額を行った。よって成膜加工装置、デバイス評価装置の増額に集中している。

表 各課題の増額金額および内訳（単位：100万円）

採択年	課題	採択時	現在	増額	総括裁量	その他*
2014年	富永課題	355	369	14	5.15 測定器 4.25 分光検出	4.60 顕微鏡
	鳥海課題	345	370	25	2.94 SWマトリックス	7.50 加工装置 15.00 プローバ
	平野課題	200	309	109	12.33 測定装置 2.00 加工装置 2.50 EWS 9.95 人件費 17.48 消耗品	18.05 加工装置 34.69 測定機器 3.00 消耗品 10.00 1年延長
2015年	佐藤課題	250	309	59	5.00 前駆体抽出	16.55 プローバ 12.40 冷却器 6.00 真空プローバ 21.35 前駆体合成
	西原課題	250	302	52	7.40 測定環境 4.00 国際共同研究	5.10 グローブボックス 11.00 移設、実験環境 3.50 国際ワークショップ 11.00 国際共同研究 10.00 1年延長
	町田課題	300	411	111	5.50 THz光源 1.20 機械学習 2.00 国際共同研究 7.80 評価装置	6.90 機械学習 56.46 評価装置 21.10 国際共同研究 12.04 コロナ半年延長
	松本課題	250	414	164	7.80 解析装置 1.60 ウィルス鑑別	6.23 SMU 45.01 評価装置 6.70 画像解析 3.90 清浄Process 8.00 材料費 1.37 機械学習 23.10 国際共同研究 7.04 ダイバーシティ 14.25 コロナ半年延長 40.00 コロナ研究

2016年	川崎課題	270	366	96	6.90 解析装置 8.30 成膜装置	30.58 成膜装置 51.22 評価装置
	笹川課題	250	360	110	2.50 加工装置	11.00 電子線描画 92.95 加工装置 3.55 国際共同研究
	宮田課題	250	319	69	10.10 成膜装置 1.30 評価装置	41.20 成膜加工装置 14.40 評価装置 2.00 消耗品
	若林課題	250	258	8	2.00 モデリング	6.00 純粋装置
	計	2970	3787	817	130	695

* <総括裁量経費>は採択予算よりプールしたものであるのに対し、<その他>は国際強化、国際研究者招聘など諸制度の活用や、期中予算調整による純増を指す。

本領域では 11 課題を採択したが、採択金額の合計は 29 億 7 千万円である。詳細は Page10～11 に記したので繰り返さないが、検証用デバイス作製のための迅速なプロセス構築や計測、国際連携などを中心に 8 億 1700 万円の増額を行い、全研究費は 37 億 8700 万円となった。この内、採択枠よりプールした総括裁量経費からの増額は 1 億 3000 万円であり、他の 6 億 9500 万円は国際強化支援等の JST 戦略事業の諸制度や予算調整における追加支援によるものである。この場を借りて感謝したい。

(4) 研究領域中間評価時に頂いたコメントへの対応

<コメント1>

知的財産については、課題ごとにばらつきがあるのみならず、全体としても必ずしも多いとは言えないので、後半戦に期待したい。

<対応状況>

知財権の獲得の重要性についてはアドバイザーとも協力し領域会議やサイトビジットなどあらゆる機会を捉え指導した。そのなか西原課題は延長支援の目標として配位ナノシートの実用化についての特許提案を置き、検討中含め5件の提案を行った。また平野課題、川崎課題も特許提案に貢献した。特に川崎課題からは理論的なアプローチからの提案も行うべきと指摘し3件の提案に結びついた。一方、貢献のない課題もあり厳しく評価した。

<コメント2>

選考時に『基礎学理、実用化のどちらか一方を探求するテーマは排除する』と宣言され、『基礎学理の構築とデバイス応用の双方の視点を包括する』課題を採択されたとの認識だが、それにもかかわらず、中間評価時では、基礎中心の研究課題、あるいは実用化中心の研究課題と一方に偏っているように思われる研究課題が複数あった。後半戦では、当初の理念に沿った研究姿勢で進めて頂けることを期待する。

<対応状況>

基礎研究色が強い課題もあるが、時間軸が異なるもののすべての課題が出口イメージを評価者共有して研究を推進するよう指導してきた。川崎課題はトポロジカル絶縁体のジュール熱を発しない非散逸流で動作するデバイスの実用化に必要な物性の確認に取り組んでいる。笹川課題も将来の量子コンピュータ実現に向けマヨラナ準量子の検出、制御に挑戦している。一方、平野課題も脂質二分子膜のセンサ応用が先行していたが、チャンネル開閉メカニズムを学理として解明すべきと指導した。ともすると学理的な興味が先行したり、結果のわかりやすい性能評価にとらわれたりすることがある。出口を踏まえた学理の意義や性能改善のメカニズムを問いかけることで基礎学理の構築と応用展開のバランスを取るよう運営してきた。

<コメント3>

本研究領域内におけるチーム間連携（共同研究）としては、どのようにアドバイスを行い、具体的な成果としてはどのような共著論文や特許に結びついたのか、後半戦では、その辺を具体的に明示して欲しい。

<対応状況>

領域会議の発表は分野ごとにセッションを組み、領域アドバイザーがファシリテーションすることで研究内容が共通化され共同研究から共著論文に結びついている。またサイトビジットで課題を解決するため、他のチームとの共同研究を紹介した。その結果、笹川チ

ームは町田チームのファンデルワールス超格子作成手法を活用しジョセフ接合を作成することでマヨラナ準粒子の制御に近づく成果を上げている。

<コメント4>

プレスリリースに関しても多くの研究グループが実施しているわけではなく、偏りがある。オリジナルな研究成果が達成された場合には、より一層、積極的なプレスリリースの実施を期待する。

<対応状況>

プレスリリースは成果発信としての重要性を領域会議で強調している。当初は川崎課題、笹川課題が中心であったが、後半も両課題のアクティビティが高いことは変化がないものの西原課題、佐藤課題、宮田課題のプレスリリースも出てきた。特に西原チームは海外にも発信し、Altmetric にて高いスコアを得た。

(5) その他マネジメントに関する特記事項(人材育成等)

若手研究者の人材育成の重要性を常にお願ひしている。

第3回キックオフミーティングでも「ポスト不足、若手に閉塞感」(2016.12.19 日経新聞)といった報道を例にとり、論文数は研究者数に強い相関があるとの解析結果や、研究者数が減少している事実を示し、危機的状況にあることを共有した。加えて UK' s performance in physics research の「中国の論文シェアが急上昇。米、英、日本の論文シェアは下がる一方。2004年に日本は中国に抜かれている」、「インパクトファクターでも中国も徐々に質を高めている。2006年には日本を抜いている」といったレポートや Web of Science のデータに見える「日本からの論文数は停滞。とくに、物理学・物質科学・分子生物学の3分野で、急激に減少」や「企業は1997年以来減少。2003年ころからの減少は、大学からの論文数の減少による。その内訳は、物性物理の減少そのもの。(素粒子・原子核は増加)」といった現状も紹介し、人材育成の重要性を説いた。

◎関係者の昇任

研究代表者、主たる共同研究者、さらに研究参加メンバーでも以下の方々が、これまで昇任している。

筑波大学・長谷 宗明 (富永課題・主たる共同研究者) 准教授⇒教授
東京大学・矢嶋 赳彬 (鳥海課題・参加メンバー) 助教⇒九州大学・准教授
産総研・右田 真司 (鳥海課題・主たる共同研究者) 主任研究員⇒上級主任研究員
東北大学・平野 愛弓 (平野課題・研究代表者) 准教授⇒教授
東京大学・前田 啓明 (西原課題・参加メンバー) 特任研究員⇒東京理科大・助教
東京大学・福居 直哉 (西原課題・参加メンバー) 特任研究員⇒東京理科大・助教
東京大学・PAL, Tigmansu (西原課題・参加メンバー) 博士後期課程⇒東京理科大・助教
京都工芸繊維大・佐々木 園 (西原課題・主たる共同研究者) 准教授⇒教授
東京大学・町田 友樹 (町田課題・研究代表者) 准教授⇒教授
東京大学・守谷 頼 (町田課題・参加メンバー) 助教⇒特任講師
東京大学・増渕 覚 (町田課題・参加メンバー) 特任助教⇒特任講師
NIMS・谷口 尚 (町田課題・主たる共同研究者) グループリーダー⇒フェロー
東京大学・打田 正輝 (川崎課題・参加メンバー) 助教⇒東京工業大学・准教授
東京大学・藤田 貴啓 (川崎課題・参加メンバー) 博士後期課程⇒助教
東京大学・金澤 直也 (川崎課題・参加メンバー) 助教⇒講師
東京大学・石坂 香子 (笹川課題・主たる共同研究者) 准教授⇒教授
名古屋大学・川口 由紀 (笹川課題・主たる共同研究者) 准教授⇒教授
首都大学東京・柳 和宏 (宮田課題・参加メンバー) 准教授⇒教授
京都大学・宮内 雄平 (宮田課題・主たる共同研究者) 准教授⇒教授

◎関係者の受賞

また受賞や学会のフェロー就任も多く、主なものを以下に明記する。

◇富永チーム

富永淳二（研究代表者）：本多フロンティア賞（本多記念会）2016/5/27

村上修一（主たる共同研究者）：井上學術賞（井上科学振興財団）2017/2/3

村上修一（主たる共同研究者）：APS Fellow (American Physical Society) 2018/3/6

◇鳥海チーム

鳥海明（研究代表者）：応用物理学会業績賞（応用物理学会）2018/3/17

◇平野チーム

平野愛弓（研究代表者）：応用物理学会フェロー（応用物理学会）2019/9/18

平野愛弓（研究代表者）：日本表面真空学会フェロー（日本表面真空学会）2020/11/19

◇佐藤チーム

佐藤信太郎（研究代表者）：応用物理学会フェロー（応用物理学会）2018/9/18

山田容子（主たる共同研究者）：日本化学会学術賞（日本化学会）2019/3/17

◇西原チーム

西原寛（研究代表者）：日本化学会賞（日本化学会）2016/3/26

◇町田チーム

谷口尚（主たる共同研究者）：リサーチフロントアワード（トムソン・ロイター）

渡邊賢司（研究参加者）：リサーチフロントアワード（トムソン・ロイター）

2016/10/21

小野寺桃子（研究参加者）：ロレアルーユネスコ女性科学者日本奨励賞

（日本ロレアル）2020/7/20

◇川崎チーム

永長直人（研究参加者）：紫綬褒章（内閣府）2018/04/28

十倉好紀（主たる共同研究者）：APS Fellow (American Physical Society) 2020/09/21

江澤雅彦（主たる共同研究者）：久保亮五記念賞（井上科学振興財団）2020/10/03

川崎雅司（研究代表者）：紫綬褒章（内閣府）2020/11/03

十倉好紀（主たる共同研究者）：令和2年度文化功労者（文部科学省）2020/11/04

永長直人（研究参加者）：本多記念賞（本多記念会）2021/02/05

◇笹川チーム

笹川崇男（研究代表者）：AAPPS / C.N. Yang Award 2016 (Association of Asia

Pacific Physical Societies) 2016/12/07

川口由紀（主たる共同研究者）：久保亮五記念賞（井上科学振興財団）2017/10/07

笹川崇男（研究代表者）：フロンティアサロン第7回永瀬賞特別賞

（フロンティアサロン財団）2017/11/15

笹川崇男（研究代表者）：井上学術賞（井上科学振興財団）2020/02/04

川口由紀（主たる共同研究者）：米沢富美子記念賞（日本物理学会）2020/02/17

柏谷聡（主たる共同研究者）：文部科学大臣表彰（文部科学省）2020/04/07

◇若林チーム

Kaustav Banerjee（主たる共同研究者）：Fellow (American Association for the Advancement of Science) 2016/11/01

若林整（研究代表者）：応用物理学会理事（応用物理学会）2019/04/01

若林整（研究代表者）：EDS BoG Members (IEEE) 2019/04/01

◎学生指導の一環としてのアワード受賞

また学生には重要な研究テーマを与え、それを生かした学会投稿の機会を与えるようお願いした。その結果、研究のアクティビティ活性化に連動して、以下の方々が主要な学会でアワードを受賞することにつながっている。

氏名の（ ）内は受賞時の学年

所属	氏名	賞の名称	授与者	受賞日
鳥海 T 鳥海 G	Lun Xu (D2)	Young Paper Award	IWDTF 2015	2015/11/4
	Lun Xu (D3)	2016 IEEE EDS Japan Chapter Student Award (IEDM)	IEEE EDS-Japan	2017/2/15
	Lun Xu (D3)	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 Young Scientist Presentation Award	応用物理学会	2016/9/15
平野 T 平野 G	山浦大地 (D3)	Best Student Poster Award, International Symposium on Organic Molecular Electronics	電気情報通信学会	2018/5/31
	Madoka Sato (M2)	Best poster award (Okinawa Colloids 2019)	Chemical Society of Japan	2019/11/7
西原 T 西原 G	松岡亮太 (D3)	優秀ポスター賞	高分子学会	2016/9/15
	和田慶祐 (D2)	錯体化学会第 68 回討論会学生講演賞	錯体化学会	2018/7/29

西原 T 佐々木 G	合田真美 (M2)	Award for Encouragement of Research in IUMRS-iCAM 2017 Symposium C-2	International Union of Materials research Society 2017	2017/8/28
町田 T 町田 G	森川生 (D3)	第 30 回ダイヤモンドシ ンポジウム講演賞	ニューダイヤモ ンドフォーラム	2016/11/18
	瀬尾優太 (M1)	The A3 Symposium on Emerging Materials Best Poster Award	The 9th A3 Symposium on Emerging Materials	2018/10/31
町田 T 町田 G	小野寺桃子 (D2)	RPGR Young Scientist Prize	RPGR2019	2019/10/9
	小野寺桃子 (D3)	2020 年秋季大会 学生優秀発表賞	日本物理学会	2020/10/10
松本 T 松本 G	鎌田果歩 (M2)	応用物理学会講演奨励 賞	応用物理学会	2016/9/13
	奥田聡志 (D3)	SSDM Young Researcher Award	2018 SSDM	2018/9/11
	奥田聡志 (D3)	応用物理学会講演奨励賞	応用物理学会	2018/9/18
笹川 T 川口 G	Sozinho Amorim Cassio (D2)	優秀ポスター賞	第 10 回物性科学 領域横断研究会	2016/12/9
笹川 T 笹川 G	松川慶太郎 (M1)	Excellent Poster Award	IUMRS-ICA2017	2017/11/15
	三澤哲郎 (D2)	高絶縁性トポロジカル絶 縁体 Sn-BSTS における表 面伝導のゲート制御	応用物理学会	2018/9/18
宮田 T 北浦 G	堀田貴都 (D1)	IGER Annual Meeting 2017 Poster Award	IGER Annual Meeting 2017	2018/1/10

6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

本研究領域では二次元材料にこだわりつつデバイス創成を出口とし、既存デバイスで到底実現できない性能改善や新規機能の創出を狙っている。図 3-2 の横軸は学術分野であるが、目標達成に向けた状況を述べるには、むしろ時間軸に配慮すべきである。

ここでは、(1) 具体的なデバイスイメージを有するもの（鳥海課題、佐藤課題、若林課題、宮田課題）、(2) 新規物性の発現で新規機能を目指すもの（町田課題、富永課題、川崎課題、笹川課題）、(3) 医工学、化学分野から新規機能を目指すもの（松本課題、平野課題、西原課題）に分け達成状況を記述する。

(1) 具体的なデバイスイメージを有するもの

11 課題あるうち、比較的具体的なデバイスイメージを持っているものは、鳥海課題、佐藤課題、若林課題、宮田課題の 4 課題である。

①鳥海課題「二次元界面場により創出される新規材料物性の機能化」

【課題概要】

表面・界面の二次元的性質の影響を強く受けることによりバルク材料では存在しない物性的特徴を持った新規材料薄膜を創製し、その機能化を実証する。さらにこれらの二次元材料の特性を導入することで電子デバイスの機能を格段に広げる。それによって、新たな機能を持った More Moore の世界を開く基盤技術を提案・実証する。

【達成状況】

本課題は既存 CMOS デバイスの性能向上を狙うものである。すでに大きな市場を形成している Si LSI において低消費電力動作が実現できれば非常に大きなインパクトがあり、Si LSI 屋からすると野心的な試みである。トランジスタの低電力動作で重要な Steep Slope の実現にあたり VO₂ のモット転移の応用、ネガティブキャパシタンス・トランジスタ (NC-FET) の検討に取り組んだ。加えて微細 CMOS で問題となっているコンタクト抵抗低減にも注力した。

VO₂ では、液体 (EDLC: 電気二重層キャパシタ) ではなく固体絶縁膜のゲートスタックで電界効果を確認するという重要な成果に結びついた。

T. Yajima, T. Nishimura, and A. Toriumi,

"Positive-bias gate-controlled metal-insulator transition in ultrathin VO₂ channels with TiO₂ gate dielectrics",

Nature Commun. 6, 10104, 2015.

しかしながら、LSI への展開は困難との判断から研究メンバーによるさきがけ「微小エネルギー (谷口・秋永領域)」に展開した。

NC-FET については、ゲート絶縁膜に負性容量を採用すると、ゲート電圧に対する電流の

立ち上がりを室温での理論限界である 60mV/decade 以下に急峻化できる可能性が理論的に示唆されている。これは、低電圧動作、すなわち低消費電力化という重要課題解決に繋がることから、ここ数年で爆発的に注目が集まっている。具体的には CMOS のゲート絶縁膜に強誘電体膜を利用することで実現の可能性がある、多くの研究機関で世界的に検討が進められている。すでに先端 LSI で実績のある HfO₂ が強誘電性を示すことから、NC-FET の強誘電体材料として有望であるが、微細 CMOS に適用するためには薄膜化が重要である。本研究チームにより 3 nm 以下の薄膜でも安定した強誘電体性が得られることが初めて示された。

L. Xu, T. Nishimura, S. Shibayama, T. Yajima, S. Migita, and A. Toriumi,

"Ferroelectric phase stabilization of HfO₂ by nitrogen doping,"

Applied Physics Express 9, 091501, 2016.

このことより、HfO₂ の CMOS への適用が現実味を帯びてきた。

2018 年の IEDM (IEEE International Electron Device Meeting) でも多くの研究機関から試作結果の発表がある一方で、動作モデルにおいては様々な議論がなされ、混沌とした状態が続いている。本研究チームは図 6-1 に示すように電荷の振る舞いに立脚したモデルを提案しており、IEDM に 3 件採択された。

Xiuyan Li and Akira Toriumi,

"Direct relationship between sub-60 mV/dec subthreshold swing and internal potential instability in MOSFET externally connected to ferroelectric capacitor,"

2018 IEDM, p.715.

Shinji Migita, Hiroyuki Ota, and Akira Toriumi,

"Assessment of Steep-Subthreshold Swing Behaviors in Ferroelectric-Gate Field-Effect Transistors Caused by Positive Feedback of Polarization Reversal,"

2018 IEDM, p.715.

Hiroyuki Ota, Tsutomu Ikegami, Koichi Fukuda, Junichi Hattori, Hidehiro Asai, Kazuhiko Endo, Shinji Migita and Akira Toriumi,

"Multidomain Dynamics of Ferroelectric Polarization and its Coherency-Breaking in Negative Capacitance Field-Effect Transistors, 2018 IEDM, p.197.

このモデルによる検討ではクロック回路等の常に動作しているブロックのみで効果があるのが結論である。

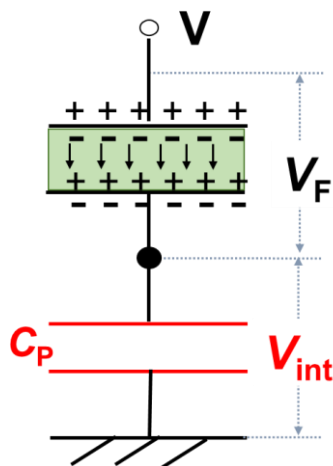


図 6-1 強誘電体を用いた NC-FET
強誘電体の分極反転電荷に注目しモデル化

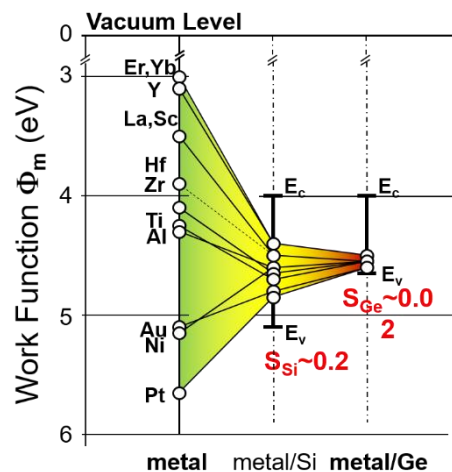


図 6-2 金属-半導体のピニング現象

一方、微細デバイスではオーミックコンタクトが非常に問題となっており、コンタクト抵抗の上昇が低消費電力化の妨げになっている。通常、金属と半導体のコンタクトはショットキー接合となり整流性を示すが、金属種を選択することでショットキー障壁を下げる、あるいは半導体側の不純物濃度を上げるなどして見かけ上のオーミック接合を実現している。しかしショットキー接合の障壁高さは図 6-2 に示すピニング現象のため金属種を変えても大きく変わらない。結果、さらに半導体側の不純物濃度を高くせざるを得ない問題があった。本課題ではピニング現象を回避する解決策として、波動関数モデルを適用し金属と比較し電子濃度の低い材料を金属/半導体接合の間に挟むことが有効であることを発見し（出願番号：2016-170939、出願日：2016/9/1、国際出願：PCT/JP2017/006776）、 $10^{17}/\text{cm}^3$ 程度の低不純物濃度でもオーミックコンタクトを取ることに成功した。論理 LSI だけでなく半導体メモリにも広く適用できる可能性があり、注目すべき成果と考えられる。

②佐藤課題「革新的デバイス創製のためのグラフェンナノリボンのテイラーメイド合成」

[課題概要]

炭素一原子層の材料であるグラフェンを短冊状にしたグラフェンナノリボン (GNR) は、高移動度、バンドギャップ可変、長いスピン緩和時間などの優れた特性が予言され、超高速デバイス、高効率太陽電池、量子コンピュータなどへの応用が期待される。トップダウン加工による作製では困難な、幅とエッジが制御された GNR のボトムアップ合成技術を開発し、応用に応じた GNR のテイラーメイド合成を実現することで、革新的デバイス創製を目指す。

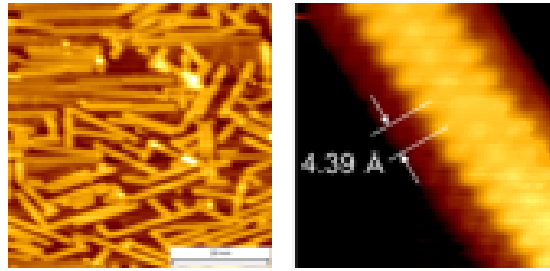


図 6-3 GNR の STM 像

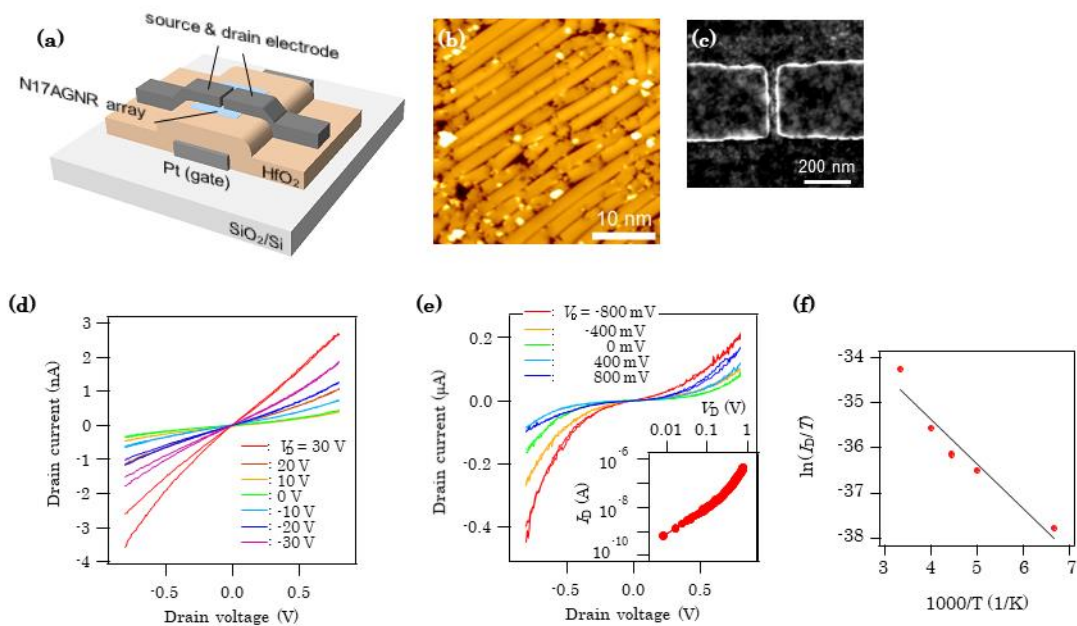


図 6-4 (a) 酸化膜の上に作製した 17-AGNR-FET、(b) 17-AGNR の STM 像。(c) 作製した Pd ナノギャップの SEM 像、(d) 17-AGNR-FET の出力特性、(e) 17-AGNR-FET の出力特性。ソース・ドレイン電極は Pd であり、ゲート電極は Pt である。挿入図は、 $V_D = -0.8$ V の時の ISD- V_D 特性の両対数プロットである。(f) 17-AGNR-FET の Richardson plot とそれに対するフィッティング

[達成状況]

本課題はカーボン材料であるグラフェンナノリボン (GNR) を用い、バンドギャップが存在しないグラフェンの弱点を克服することなどにより、シリコンを超える性能を有するデバイス実現に取り組むものである。GNR はエッジ形状でバンドギャップ制御が可能という特徴があるが、グラフェンをナノサイズに加工するトップダウン・プロセスではリボン・エッジに原子の欠損が発生するため不向きである。この研究課題では有機化学合成した前駆体を設計・合成し、熱反応でポリマー化することでリボンを形成するボトムアップ・プロセスを選択している。

図 6-3 に示す STM 像から分かるように良好な形状が得られ、ボトムアップ・プロセスの有効性を確認した。さらに GNR のエッジをフッ素や臭素を修飾することで広い幅でバンドギャップの制御が可能となることを理論的に見出した。特にフッ素修飾は Ge に近いバンドギャップが期待されているが、前駆体を合成する途上で離脱してしまうという問題があった。本研究チームは第一原理計算で最適な前駆体の形状を解析し、世界で初めて 17-AGNR の合成に成功した。

Hironobu Hayashi, Junichi Yamaguchi, Hideyuki Jippo, Ryunosuke Hayashi, Naoki Aratani, Mari Ohfuchi, Shintaro Sato, and Hiroko Yamada,

“Experimental and Theoretical Investigation for a Dissociation of Carbon–Fluorine Bonds at the Edge Position of Polyanthrylenes During a Cyclodehydrogenation”,

ACS Nano, 11, 6, 6204-6219, 2017.

このように GNR はバンドギャップを制御しやすいという特徴がある。

特に図 6-4 に示す 17-AGNR はバンドギャップが 0.6eV と有望な値であり、電気的特性も確認している。大規模 LSI への展開はプロセス・インテグレーションに大きなハードルがあり、当面は高周波デバイスやセンサなど個別デバイスへの展開が期待される。

③若林課題「二次元 TMDC 相補型 MISFETs の LSI プロセスによる性能向上と応用」

[課題概要]

二次元原子層状構造をもつ遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) は、バンドエンジニアリングが可能な二次元物質として注目されている。TMDC のうち、比較的素性の分かっている硫化物半導体をチャネルとする相補型 MIS トランジスタについて、清浄度・制御性が高い先端 LSI プロセス(スパッタや MOCVD 法)により高性能化し、プロセス物性とデバイス動作理論を体系化する。また、新たな TMDC 材料の開拓も行う。高速・低電力性に加えて透明・柔軟性を活かして、人との親和性を高めた高性能ディスプレイや人体パッチ等の応用を探索する。

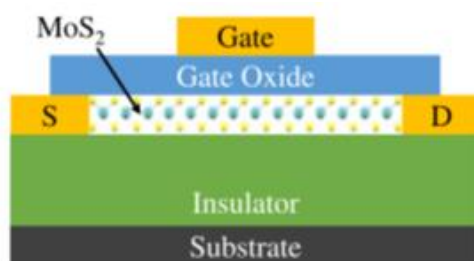


図 6-5 TMDC MISFET

[達成状況]

本研究課題は二硫化モリブデン (MoS_2) などの遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) をチャンネルに用いた FET の実現を狙うものである。図 6-5 に示すようにオーソドックスな構造で成膜もスパッタというかなり量産化を意識した課題である。現在の TMDC デバイスは材料のポテンシャルを生かしきれておらず、それを実現するためにはスパッタ・ターゲットやプロセス・ガスに立ち返り、徹底した純度の向上が鍵との視点に立ち研究開発を進めている。すでに膜質としてはその効果が確認されている。

Kentaro Matsuura, Takumi Ohashi, Iriya Muneta, Seiya Ishihara, Kuniyuki Kakushima,

Kazuo Tsutsui, Atsushi Ogura, Hitoshi Wakabayashi,

"Low-Carrier-Density Sputtered MoS_2 Film by Vapor-Phase Sulfurization,"

Journal of Electronic Materials, Vol.47, No.7, pp.3497-3501, 2018.

特に ZrS_2 では $1250\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ という高いホール移動度を実現した。しかしながらデバイス化するとその高い移動度を生かした性能を実現できていない。コンタクト抵抗の改善には取り組んでいるが、さらなる改善に注力する必要がある。

④宮田課題「原子層ヘテロ構造の完全制御成長と超低消費電力・3次元集積デバイスの創出」

[課題概要]

異なる原子層物質が「面内で接合した原子層ヘテロ構造」に着目し、接合部に生じる「一次元界面」を利用した超低消費電力・三次元集積デバイスの実現に向けた学理と技術の構築を目指す。特に、遷移金属ダイカルコゲナイド原子層を中心に、成長位置・結晶方位が完全制御されたヘテロ構造の集積プロセスの確立、界面電子状態の解明と制御、そしてトンネル電界効果トランジスタ等の電子デバイスや光デバイスも視野に入れたデバイスの基礎実証を目指す。

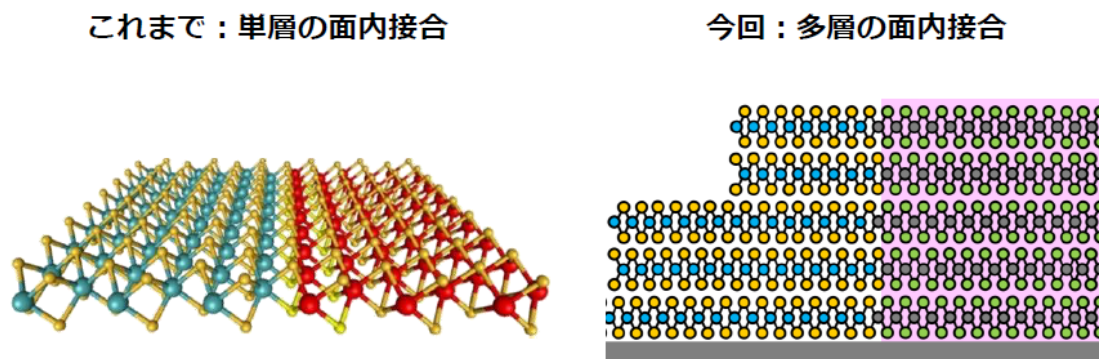


図 6-6 原子層ヘテロ構造モデル (左：単層構造、右：多層構造)

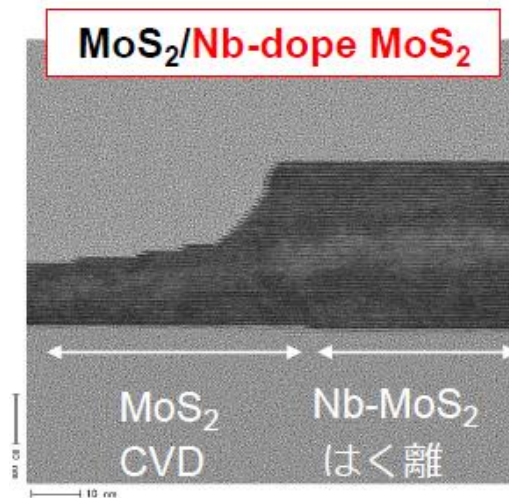


図 6-7 多層接合の STEM 像

[達成状況]

図 6-6 左に示す TMDC 二次元原子層によるヘテロ構造を利用した PN 接合、しかもソースとなる原子層はゲート電極と自己整合となる構造で、トンネル FET (TFET) 作成、Steep Slope を実現し、超低消費電力デバイスの実現を目指している。結晶成長技術としても多くの基礎学理構築が期待される課題である。単原子層横方向ヘテロ成長は非常に高度な技術であるにも関わらず良好な形状が得られている。

Yu Kobayashi, Shoji Yoshida, Mina Maruyama, Hiroyuki Mogi, Kota Murase, Yutaka Maniwa, Osamu Takeuchi, Susumu Okada, Hidemi Shigekawa, and Yasumitsu Miyata

“Continuous Heteroepitaxy of Two-Dimensional Heterostructures Based on Layered Chalcogenides”
ACS Nano (2019) 13, 7, 7527–7535.

2017 年に開催された Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS) にて本研究領域より 5 課題発表した中で最も注目を集めた。

Yasumitsu Miyata,

“Semiconductor heterojunctions based on 2D materials,”

2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS),

Hapuna Beach Prince Hotel, Kohala Coast, Hawaii, USA.

また室温で右巻き・左巻き円偏光発光を自在に切替えることにも成功し、次世代量子通信の光源技術として応用に期待されている。

Jiang Pu, Wenjin Zhang, Hirofumi Matsuoka, Yu Kobayashi, Yuhei Takaguchi, Yasumitsu Miyata, Kazunari Matsuda, Yuhei Miyauchi, Taishi Takenobu,

“Room-Temperature Chiral Light-Emitting Diode Based on Strained Monolayer Semiconductors”,

Advanced Materials, Volume 33, Issue 36, 2100601 (2021).

一方、単層では界面均一性に問題があり研究後半では右の多層構造にシフトした。その走査型透過電子顕微鏡 (STEM) 像を図 6-7 に示すが、ダイオード特性まで確認する事ができた。またコンタクト抵抗の改善も進んでいる。しかしながら TFET の実現にはまだ時間がかかる。

(2) 新規物性の発現で新規機能を目指すもの

町田課題はファンデルワールス接合で原子層を積層する超格子構造で、また、富永課題、川崎課題、笹川課題の3課題はトポロジカル物質で、それぞれ新規デバイス機能を目指すものである。

① 町田課題「ファンデルワールス超格子の作製と光機能素子の実現」

〔課題概要〕

グラフェンおよび h-BN などの二次元結晶はメカニカル劈開法により単原子層まで薄層化が可能である。二次元結晶を高効率・高品質に積層して、原子層をデジタル的に組み合わせるファンデルワールス超格子構造を自動作製する装置技術の基盤を確立し、量子カスケードレーザーをはじめとしたファンデルワールス超格子による光機能素子の実現に向けた研究を推進する。



図 6-8 ファンデルワールス超格子作製システム

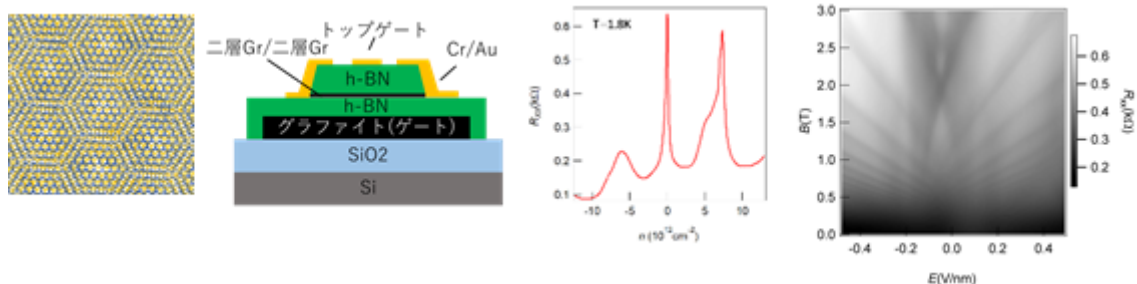


図 6-9 ツイスト二層／二層グラフェンにおける磁気抵抗振動と電場印加によるバンド構造変調

[達成状況]

図 6-8 のようなファンデルワールス超格子を自動作製するシステムは完成の域にあり、10 層以上の二次元結晶を積層できるのは世界的にも本研究チームのみである。

S. Masubuchi, M. Morimoto, S. Morikawa, M. Onodera, Y. Asakawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, and T. Machida,

“Autonomous robotic searching and assembly of two-dimensional crystals to build van der Waals superlattices,”

Nature Communications, vol.9, pp.1413-1-12, 2018.

単なる積層だけでなく、ちぎる、劈開する、折りたたむといった三次元的な操作を実現した。加えて原子層の探索に機械学習を導入することでより高度なオペレーションも可能になっている。

多方面へのデバイス応用が考えられるが、採択時の提案にある量子カスケードレーザーによる THz 発振では、従来の化合物ヘテロ超格子では発振が不可能な 5~10THz 帯を狙って開発を進めた。量子カスケードレーザーの提唱者の一人である、ETH の Jérôme Faist 教授とも検討しているが、発光にはいたっていない。その検討を進める中、単層 TMD のダーク励起子ダイナミクス、グラフェン-超伝導体間における熱輸送、ホイスラー合金からグラフェンへの電子スピン注入、ファンデルワールス磁気トンネル接合、ファンデルワールスジョセフソン接合、グラフェン/NbSe₂ 接合における近接効果と Andreev 反射などの検討を行い、それぞれ論文化した。

また近年、図 6-9 に示すツイスト二層グラフェンで発現する物性が注目されているが、2020 年度に発足した CREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能 [自在配列システム]」研究領域に「原子層のファンデルワールス自在配列とツイスト角度制御による物性の創発」という研究課題で採択されており、本格的な検討が進むと期待している。

②富永課題「カルコゲン化合物・超格子のトポロジカル相転移を利用した二次元マルチフェロイック機能デバイスの創製」

[課題概要]

カルコゲン化合物やその人工超格子がもつトポロジカル絶縁体とよばれる新しい量子物理現象を室温で発現させることにより、外部磁場ではなく電場により電子のスピンを制御し電気と磁気の両方の物性が制御できる日本発の革新的な機能デバイスの創製を目指す。中でも、ゲルマニウム・テルル/アンチモン・テルル積層薄膜（超格子）等がもつ新しい量子物理現象を応用して、超省電力型の新機能デバイスの開発を行う。

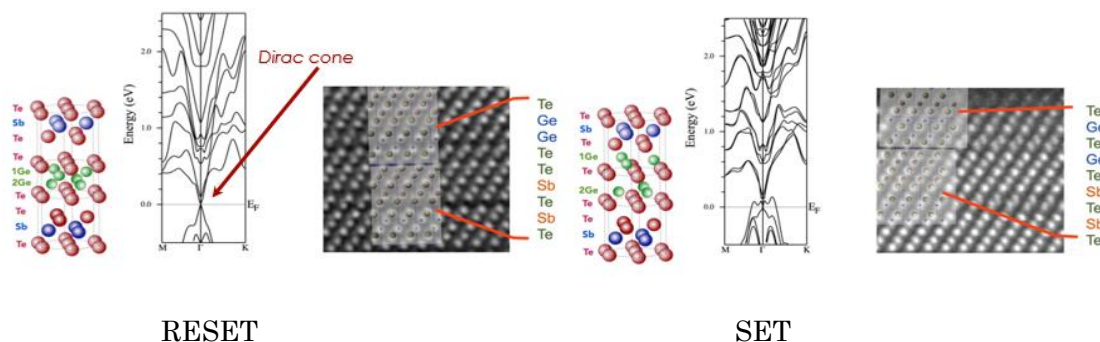


図 6-10 外部電場による SET、RESET の制御

[達成状況]

図 6-10 に示す結晶間の構造相転移を基本的なアイデアにして、マルチフェロイック機能デバイスの創製を目指す課題である。研究代表者はこの相転移を不揮発性メモリに展開することで多くの実績を有する。

これまでの研究においてカルコゲン化合物超格子における抵抗変化モデルの第一原理計算による検証を実施した。

H. Nakamura, I. Rugger, S. Sanvito, N. Inoue, J. Tominaga and Y. Asai,

“Resistive switching mechanism of GeTe-Sb₂Te₃ interfacial phase change memory and topological properties of embedded two-dimensional states,”

Nanoscale, vol.9, pp.9386-9395, 2017.

さらに、スピンに関する新規機能の発現、バイポーラ動作を用いたディラックコーンの電場による開閉の実証などを実現した。理論グループと実験グループの有機的な連携により研究前半でマルチフェロイック機能デバイス実現に向けた有効な基礎研究成果が蓄積した。その中において GeTe 層は僅かに Ge がプラスに Te がマイナスに電荷分布を持つため、面直方向に電気ダイポールをもち、その薄膜は大きなラシュバ効果を発生する。したがって Weyl 相の GeTe/Sb₂Te₃ 超格子にはスピン状態のエネルギー差が生じ、スピン流を発生させることが理論的に期待された。実際に測定用のデバイスを作製して室温でスピン伝搬を評価したところ、120um 程度のスピン伝搬長を持つことが確認された。スピン蓄積装置、スピン整流器などへの展開が考えられ、企業との共同研究に発展した。

③川崎課題「トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子技術の基盤創成」

[課題概要]

トポロジカル絶縁体ヘテロ接合により、電荷流とスピン流の高効率変換やゼロ磁場における量子ホール効果などを実現し、半導体では実現不可能な量子物性のデバイス機能化を行う。強誘電性や超伝導など類似化合物群に現れる多様な物性とトポロジカル物性の界面接合化により、量子化した電気磁気効果や新しい量子統計を実現し、トポロジカル絶縁体を電子素子として活用するための基盤構築を目指す。

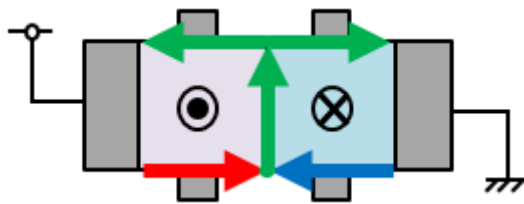


図 6-11 強磁性体トポロジカル絶縁体の量子化異常ホール効果エッジ電流

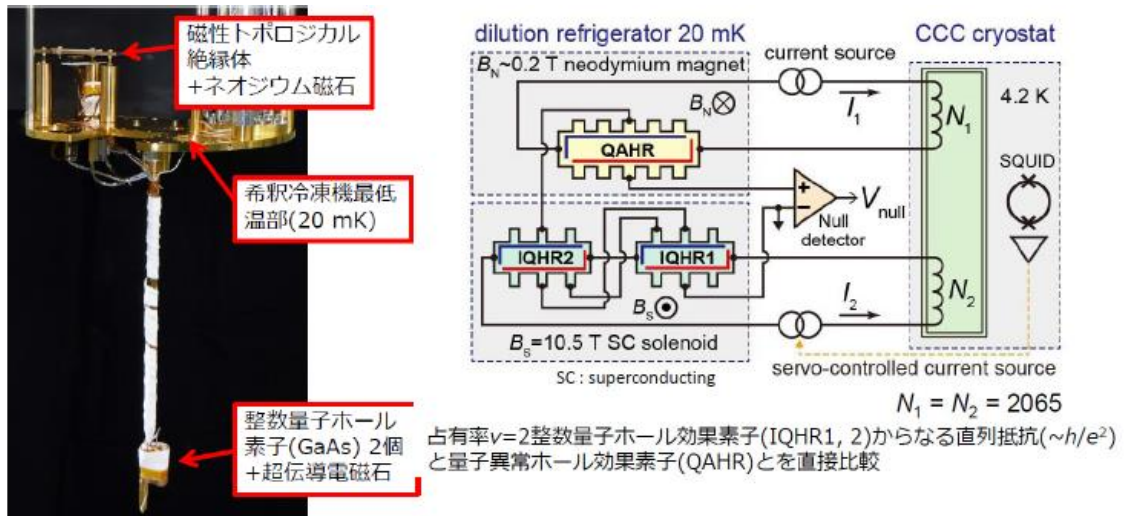


図 6-12 量子化異常ホール効果を利用した抵抗標準

[達成状況]

トポロジカル絶縁体によりデバイス機能を目指す挑戦的課題である。ジュール熱を発生しない非散逸流であるエッジ流を制御することで論理素子や記憶素子を目指すもので、研究成果として、図 6-11 に示す磁壁界面でのエッジ流制御：

K. Yasuda, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, F. Kagawa, Y. Tokura,

“Quantized chiral edge conduction on domain walls of a magnetic topological insulator,”

Science, vol.358, Issue 6368, pp.1311-1314, 2017.

量子化電気磁気効果の発現につながるアクシオン絶縁体状態を世界で初めて実現：

M. Mogi, M. Kawamura, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, N. Shirakawa, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura,

“A magnetic heterostructure of topological insulators as a candidate for an axion insulator,”

Nature Materials, vol.16, pp.516-521, 2017.

など、要素技術の一つ一つが大きな先行研究成果になり得る高レベルな基礎研究成果を次々に実現している。本研究グループは、世界的にも著名な研究者集団で構成されており、期間中における堅実な研究成果が期待通り進展している。Nature および Science 系のハイ・インパクトファクター論文が 40 報以上で、それらを含め、本資料をまとめている段階です。すでに 180 報以上の論文が公開されており、その研究成果は高く評価されている証と言える。

また産業的視点では量子化異常ホール効果を利用した抵抗標準の作成（図 6-12）も注目すべき成果であり英国物理学会誌のニュースでもとりあげられた。

<https://physicsworld.com/a/electrical-resistance-standard-could-get-a-revised-quantum-definition/>

さらに電気回路によるトポロジカル量子計算手法という興味深い提案もあり、本格的な検討へと発展させ、CREST「トポロジー」領域に採択された。

④笹川課題「トポロジカル量子計算の基盤技術構築」

[課題概要]

トポロジカル超伝導体に出現するマヨラナ粒子を、近未来のデバイス技術へ繋ぐ基盤を構築する。量子計算にマヨラナ粒子を利用すると、フォールト・トレラントな量子コンピュータを構築できることが知られており、消費電力・計算精度・回路拡張性・量子機能（演算＋メモリー）の全てにおいて、既存の古典的な計算技術を凌駕できるだけでなく、ゲート型の量子コンピュータに対しても優位性が確保できる。このような「トポロジカル量子計算」の実現に向けて、その要素技術（マヨラナ粒子の検出・操作）の確立と革新的素材（トポロジカル超伝導体）の創製をめざす。

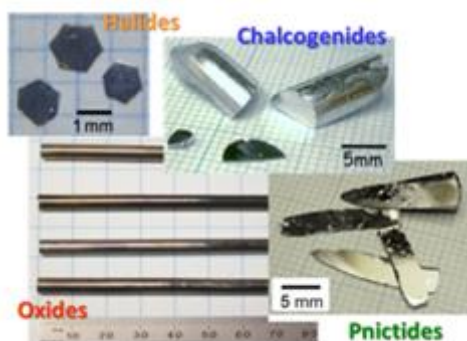


図 6-13 高品質結晶および薄膜

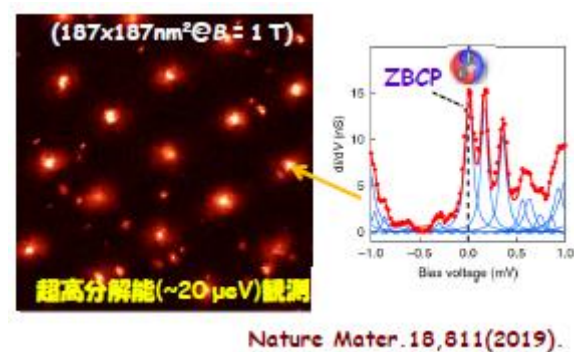


図 6-14 マヨラナ準粒子の検出

[達成状況]

図 6-13 に示す材料群の作製と物性の第一人者である研究代表者に、デバイス研究者、理論家、測定の実験家が集結したバランスの良いチーム構成となっている。図 6-14 に示す基本デバイスのコンセプトを提案し、マヨラナ粒子の生成、検出から制御を目指している。

研究を進めた結果、走査トンネル分光の準粒子干渉データから、スピン軌道相互作用の効果を抽出できる新たな手法を確立した。

Y. Kohsaka, T. Machida, K. Iwaya, M. Kanou, T. Hanaguri, and T. Sasagawa,

“Spin-orbit Scattering Visualized in Quasiparticle Interference,”

Phys. Rev. B, vol.95, p.115307, 2017.

さらに、 β -PdBi₂ の表面状態でフルギャップ超伝導を検証：

K. Iwaya, Y. Kohsaka, K. Okawa, T. Machida, M. S. Bahramy, T. Hanaguri and T. Sasagawa,

“Full-gap superconductivity in spin-polarised surface states of topological semimetal β -PdBi₂,”

Nature Communications vol.8, p.976, 2017.

分光イメージングが可能な STM として世界最低温、最高磁場を達成：

T. Machida, Y. Kohsaka, T. Hanaguri,

“A scanning tunneling microscope for spectroscopic imaging below 90 mK in magnetic fields up to 17.5 T,”

Rev. Sci. Instrum. Vol.89, p.093707. 2018.

など各グループは個々に第一線の研究成果を達成した。

その結果、図 6-14 に示すようにマヨラナ準粒子の検出を行い、その制御についても手がかりを掴みつつあることは、最先端の物性物理の扉を開かんとしているポジションまで到達していると考えられる。原著論文 127 報、内インパクトファクター10 を越える論文誌への掲載が 21 報と、その研究成果は高い評価を得ている査証である。

(3) 医工学、化学分野から新規機能を目指すもの

①松本課題「糖鎖機能化グラフェンを用いた二次元生体モデルプラットフォームの創成」

[課題概要]

糖鎖分子を結合したグラフェン上で、ウイルス感染過程を高精度・定量的に再現する。これにより鳥インフルエンザ・ウイルスがヒト感染性を得て世界流行を起こすメカニズムを解明し、インフルエンザ診断の迅速・高感度化を実現する。二次元材料の生体モデル化という全く新しい可能性を提案し、ウイルス感染の基礎研究から世界流行阻止の医療応用まで、幅広い貢献を目指す。

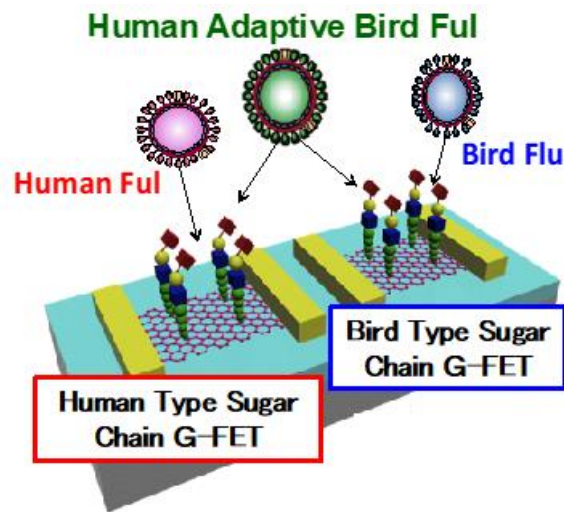


図 6-15 糖鎖修飾グラフェン FET によるウイルスセンサ

[達成状況]

グラフェン FET というナノテクノロジーを推進してきた研究代表者を中心に、センサ機能を持たせる糖鎖の研究グループ、さらに対象となるインフルエンザ・ウイルスを研究するグループが参画した医工学連携チームである。特にグラフェンによるバイオセンサーはほとんど前例がなく、電気化学、電子工学の知見をバイオセンサーのコミュニティに浸透させることも意義がある。

研究初期の段階で、糖鎖で捕獲されたウイルスでグラフェン FET のディラック・ポイントの変化を検出する基本原理は確認できた。

Kazuhiko Matsumoto,

“Sugar Chain Modified Graphene FET for Detection of Influenza Virus,”

IUMRS-ICAM, 15th International Conference on Advanced Materials, Kyoto, Japan, 2017.

またグラフェン SAW センサによる質量・電荷同時検出にも成功した。

Satoshi Okuda, Takashi Ikuta, Yasushi Kanai, Takao Ono, Shinpei Ogawa, Daisuke Fujisawa, Masaaki Shimatani, Koichi Inoue, Kenzo Maehashi and Kazuhiko Matsumoto,

“Acoustic carrier transportation induced by surface acoustic waves in graphene in solution,”

Applied Physics Express, vol.9, No.4. pp.045104-1-4, 2016.

このように、学術的にも興味深い成果を挙げている。

前半の課題であった素子特性の均一性もチーム一丸となり解決した。延長期間ではCOVID-19の検出にも取り組み基本動作を確認し得る所まで到達したことは、今後の医療センシングデバイス展開への大きな試金石になると考えられる。

②平野課題「超絶縁性脂質二分子膜に基づくイオン・電子ナノチャネルの創成」

[課題概要]

細胞膜の基本構造である脂質二分子膜が(1) ナノ絶縁性の流動膜であること、(2) 脂質分子の自己集合により容易に形成できることに着目し、脂質二分子膜内でのイオンや電子の通り道(ナノチャネル)を創成する。イオンチャネル蛋白質や金属ナノ粒子、半導体ナノ粒子等の包埋により、脂質二分子膜中にイオンや電子が縦横方向に通過できるナノチャネルを形成し、水溶液中で機能する高感度な化学・物理センサの構築を目指す。

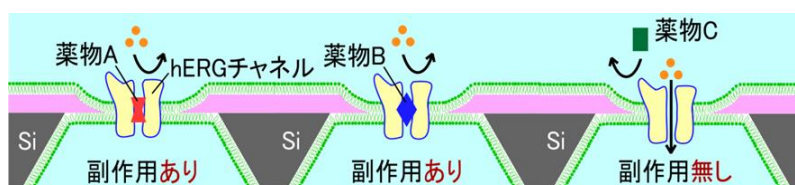


図 6-16 薬物副作用評価センサ

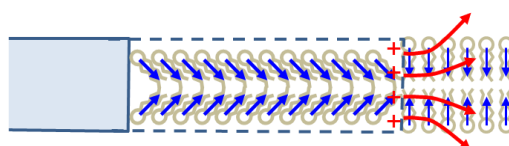


図 6-17 チャネル表面電荷移動モデル

[達成状況]

脂質二分子膜を二次元系機能性物質として捕らえ、その機能を電子デバイス、薬物副作用センサ等に利用する発想は、新規で独創性のある研究である。研究代表者のリーダーシップのもと、役割の異なる3グループ間の密接な連携により積極的な協同研究が展開されており、いくつかの優れた研究成果や当初予定していなかった新たな展開が得られている。

研究開始時は図 6-16 に示す副作用評価センサといった具体的な応用を想定しており、研

究成果としては、包埋過程のリアルタイム観察：

Ryugo Tero, Kohei Fukumoto, Toshinori Motegi, Miyu Yoshida, Michio Niwano,
Ayumi Hirano-Iwata

"Formation of Cell Membrane Component Domains in Artificial Lipid Bilayer"

Sci. Rep., vol.7, 17905, 2017.

電界仮説の検証、電界シミュレーション等の追加項目も含め、進捗状況は良い。なかでも、人工脂質二分子膜再構成系の最大の課題であったイオンチャネル包埋効率の問題の解決：

Ayumi Hirano-Iwata, Yutaka Ishinari, Miyu Yoshida, Shun Araki, Daisuke Tadaki,

Ryusuke Miyata, Kenichi Ishibashi, Hideaki Yamamoto, Yasuo Kimura, Michio Niwano,

"Reconstitution of human ion channels into solvent-free lipid bilayers enhanced
by centrifugal forces"

Biophys. J., vol.110, pp.2207-2215, 2016.

など、注目される研究成果を挙げた。

研究終盤ではそもそもチャネルの開閉メカニズムが明確になっていない事からその学理を追求するよう指導し、図 6-17 に示すようなチャネル表面電荷移動モデルの提案に至った。

③西原課題「有機・無機複合二次元物質、配位ナノシートの創製と電子・光・化学複合機能の創出」

[課題概要]

金属イオンと平面形 π 共役架橋配位子の様々な組み合わせで、多彩な化学構造、幾何構造の二次元分子薄膜「配位ナノシート (CONASH)」を二相界面でのボトムアップ合成により創製する。その単層・多層シートやヘテロ積層体の精密構造解析と多様な電子、磁気、光物性や化学的性質、メカニカルな特性の探求を行うとともにその魅力的な性質を活用した電子デバイス、光・電気化学デバイス、化学反応システムの創出を目指す。

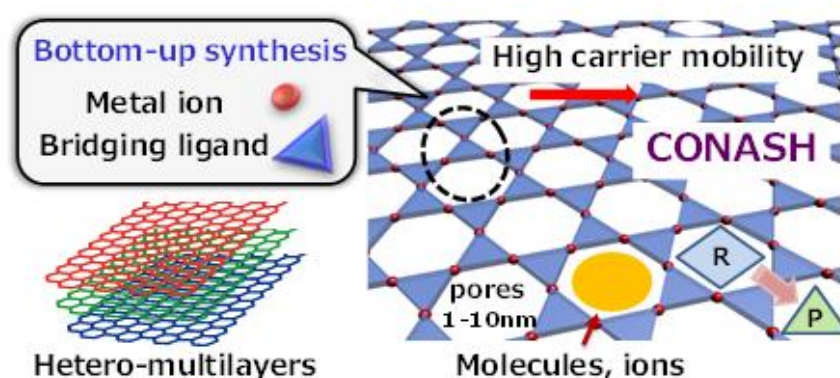


図 6-18 コーディネーション・ナノシート (CONASH)

[達成状況]

金属錯体を核にしたナノシート (CONASH) では他の研究機関をリードし、液-液界面からの合成に関する以下の論文は広く引用されている。

Ryota Matsuoka, Ryota Sakamoto, Ken Hoshiko, Sono Sasaki, Hiroyasu Masunaga,
Kosuke Nagashio and Hiroshi Nishihara,

“Crystalline Graphdiyne Nanosheets Produced at a Gas/Liquid or Liquid/Liquid Interface,”

J. Am. Chem. Soc., vol.139, pp.3145-3152, 2017.

多岐にわたる応用が期待される中、カーボンニュートラルを意識しつつ図 6-19 の太陽電池応用や図 6-20 の水素発生への展開を検討した。特に延長期間の最終年度は産業界との連携を意識し特許出願に注力し出願準備中を含め 5 件の特許提案を行った。具体的には 1) 高い安定性を長期間維持する有機-無機複合ナノシートの合成を開発し電源不要の受光センサに応用するもの、2) FeTPY/CoTPY ヘテロ積層によるダイオード、3) 導電性配位ナノシートのヘテロ接合形成による pn 接合、ショットキー接合あるいは新量子物性に展開するもの、4) 燃料電池用プロトン・電子伝導体に関するもの、5) 水素発生反応の触媒活性に関する提案である。多種多様の展開が可能であることが示され今後に期待したい。

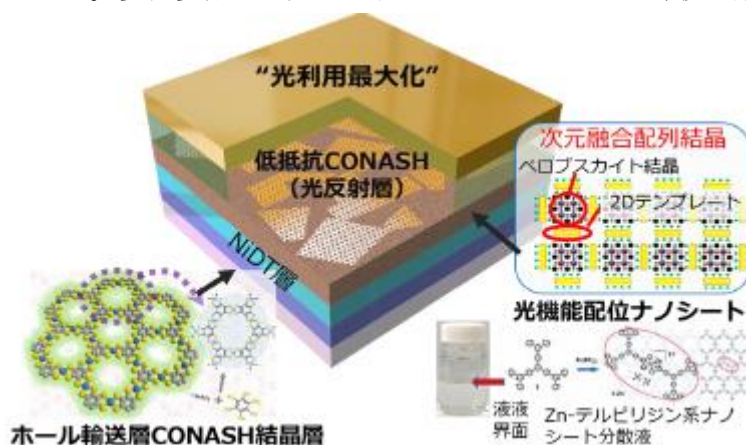


図 6-19 太陽電池応用

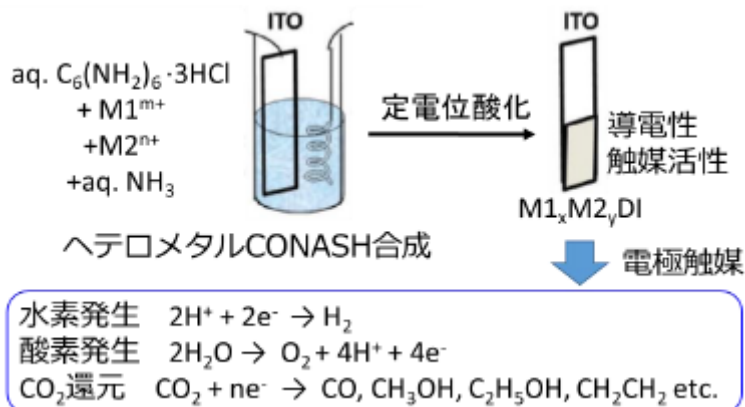


図 6-20 電極触媒

以上課題ごとに達成状況を報告したが代表的な表現でまとめると以下の様になる。

(1) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

- ・富永課題： 非常に長いスピン伝搬長の実現
- ・平野課題： 脂質二分子膜におけるチャネルの開閉メカニズム
- ・西原課題： 配位ナノシートの実現
- ・町田課題： ファンデルワールス超格子を自動作製するシステムの実現と様々な新規物性の発現
- ・川崎課題： 非散逸流のデバイス展開にむけた様々な新規物性の発現
- ・笹川課題： マヨラナ準粒子の検出
- ・宮田課題： 高性能ヘテロエピタキシャル技術

(2) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

- ・鳥海課題： 負性容量 FET が有効なのはクロック回路のみ
- ・平野課題： 薬物副作用評価センサ
- ・西原課題： 配位ナノシートの応用提案
- ・佐藤課題： 17-AGNR によるバンドギャップ 0.6eV のグラフェンナノリボンの実現
- ・松本課題： インフルエンザ・ウィルスの亜型鑑別モジュールの実現と COVID-19 検出への展開
- ・川崎課題： 量子化異常ホール効果を利用した抵抗標準の実現
- ・若林課題： 高品位 TMDC 膜の実現

7. 総合所見

多くの先行研究の実績を有するチームによる 186 件に及ぶ提案の中からわずか 11 件の採択（採択率は 6%）であり、精鋭中の精鋭による研究チームである。よって基礎研究推進は抜かりなく各チームで推進して頂けているものと想定して自主性を重んじており、実際にサイトビジットでもそれを十分に確認しているつもりである。

一方、戦略目標を受けデバイスの創出にも軸足を置いた。ただし幅広い分野の課題を採択していると同時に、実現時期という意味でもスペクトルが広い。あくまでも比較論ではあるが、松本課題、若林課題は早めに産業化に向けた次のステップに進むことを期待している。一方、町田課題、笹川課題、宮田課題、さらに川崎課題は、基礎研究を更に深耕する中で多くの学術的成果を期待したいが、実用化には時間がかかると考えている。

鳥海課題は、グラフェンを先行研究とするという意味では二次元材料とは言えないかもしれないが、半導体デバイスの薄膜化は留まるところを知らず、MOS の微細化・薄膜化の知見から、いわゆる二次元材料が貢献できる土俵を見極めて行くことには意味があると考えている。半導体デバイス産業の市場 50 兆円うち、システム LSI 市場は 20 兆円と想定され、Steep Slope やコンタクト抵抗で低消費電力デバイス設計に寄与できれば大きな成果になる。

富永課題、平野課題、佐藤課題、西原課題も大きな成果を出して頂いているが、デバイス応用という点では、産業の出口も具体的に想定した詳細な議論が引き続き必要である。

二次元材料の先行事例はグラフェンであり、海外でも EU Graphene Flagship に代表される大型プロジェクトが進行するなか、CREST で二次元領域の看板を立てた意義は大きいと感じている。科研費では基礎研究の進展は期待できるものの、CREST ではデバイス創成も柱に国内の有力なチームを結集することができたと考えているからである。

その結果、国際論文誌への掲載が 848 報、国際会議での発表が 1576 件、内招待講演が 578 件とその成果は国内外から高く評価されている。

知財に関しては、桁違いに大きな予算で推進されている EU Graphene Flagship で、わずか 70 件（ただし登録数）にとどまっていることが 2021 年 10 月 25 日の交流会で判明した。Graphene Flagship においては、かなり実用に近いテーマも数多く抱えていることを考えると、本領域の 64 件（出願数）は各研究チームが鋭意努力頂いた賜と評価できるだろう。ちなみに、このときの Graphene Flagship の発表によると、171 partners（課題数と想定）で 4250 件超の publications であった。単純には比較できないが、プロジェクト規模の差異を勘案すると、アウトプットの数字でもかなり健闘頂いたと言えるかと思う。

出口については、アプリケーションそのものも Moving Target であり、その意味でも基

礎をしっかりとやることが重要であると思われる。たとえば、ここ数年のアプリとして新たに顕在化しているものとして、TMDC が最先端 CMOS のチャンネル材料としての期待が大きくなっていること、量子コンピュータの研究開発の急激な進展で、クライオ CMOS のような極低温で動作する超低消費電力の「古典」デバイスへの期待が大きくなっていることなどがある。アプリの動向にアンテナを張ると同時に、基礎学理を継続的にしっかりと進めることが重要であると考えられる。

研究期間終了後も新たなデバイス創成に向け、その基礎検証と基盤となる学理の構築に期待したい。

以上