

戦略的創造研究推進事業
—さきがけ(個人型研究)—

研究領域

「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」

研究領域事後評価用資料

研究総括:村上 修一

2024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	1
(3) 研究総括	1
(4) 採択研究課題・研究費.....	2
2. 研究総括のねらい	4
3. 研究課題の選考について	5
4. 領域アドバイザーについて	12
5. 研究領域のマネジメントについて.....	13
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	27
7. 総合所見	53

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「トポロジカル材料科学の構築による革新的材料・デバイスの創出」

(2) 研究領域

「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」(2018 年度発足)

(3) 研究総括

氏名 村上 修一 (東京工業大学 理学院 教授)

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

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

平成 30 年度新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h30.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

以下の表 1.1 に、研究代表者、所属(採択時)、研究課題名、最終研究費を示す。

表 1.1 採択課題の最終研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 (採択時)	研究課題	研究費 ¹
2018 年度	青木 大輔	東京工業大学 物質理工学院 助教	空間結合を創る高分子トポロ ジー変換反応を鍵とした異種 トポロジーの融合	63.3
	打田 正輝	東京大学 大学院工学系研究科 講師	薄膜技術を駆使したトポロジ カル半金属の非散逸伝導機能 の開拓	77.6
	葛西 伸哉	物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス 材料研究拠点 主幹研究員	磁気スキルミオン素子の構築 と新規材料探索	45.3
	塩崎 謙	理化学研究所 開拓研究本部 基礎科学特別研究員	一般コホモロジー理論に基づ いたトポロジカル材料科学理 論の構築	8.2
	関 真一郎	理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー	磁気構造と電子構造のトポロ ジーを利用した巨大創発電磁 場の生成と制御	51.9
	竹内 一将	東京大学 大学院理学系研究科 准教授	液晶トポロジカル乱流の構造 決定と負粘性材料科学の開拓	41.4
	中山 耕輔	東北大学 大学院理学研究科 助教	全結晶方位 ARPES 法による新 規トポロジカル材料開拓	39.3
	松尾 貞茂	東京大学 大学院工学系研究科 助教	並列二重ナノ細線と超伝導体 の接合を用いた無磁場でのマ ヨラナ粒子の実現	47.5
	森竹 勇斗	東京工業大学 理学院 助教	メタ原子鎖による新奇な光ト ポロジカルエッジ状態の開拓	40.0
渡邊 悠樹	東京大学 大学院工学系研究科 講師	対称性の表現に基づくトポロ ジカル材料の探索	23.5	
2019 年度	井手上 敏也	東京大学 大学院工学系研究科 助教	ファンデルワールス結晶の対 称性制御とトポロジカル非線 形輸送	44.0
	小澤 知己	理化学研究所 数理創造プログラム 上級研究員	原子・分子・光物理学における トポロジカル物性とその応用	10.5
	小門 憲太	北海道大学 大学院理学研究院 助教	トポロジー精密制御による革 新的ネットワーク高分子材料 の創出	59.5

	谷口 耕治	東北大学 金属材料研究所 准教授	有機・無機ハイブリッド系を基軸としたトポロジカルスピン材料の開発	50.3
	那須 譲治	横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授	量子トポロジカル磁性体のもつ素励起の時空間的制御	26.1
	新居 陽一	東北大学 金属材料研究所 助教	トポロジカルフォノンクスと革新的な音波・熱物性の開拓	42.7
	林 晋	産業技術総合研究所 数理先端材料モデリング オープンイノベーション ラボラトリ 産総研特別研究員	指数理論に基づく多様な形状の系のトポロジーの研究と展開	29.0
	町田 理	理化学研究所 創発物性科学研究センター 研究員	トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子の検出と制御	42.1
	森本 高裕	東京大学 大学院工学系研究科 准教授	トポロジカル物質の非線形応答および非平衡現象の理論的研究	31.1
	横田 紘子	千葉大学 大学院理学研究院 准教授	トポロジカルプラットフォームとしての強誘電分域境界	45.5
	Le Duc Anh (レデウック アイン)	東京大学 大学院工学系研究科 助教	強磁性半導体を用いたトポロジカル超伝導状態の実現	52.5
2020 年度	翁 銭春	理化学研究所 開拓研究本部 基礎科学特別研究員	ノイズの画像化によるトポロジカル材料の電子ダイナミクスの解明	44.3
	鎌田 大	パリ高等師範学校 物理学科 博士研究員	トポロジカルエッジ状態におけるスピン・電荷ダイナミクスの観測と制御	40.6
	北村 恭子	京都工芸繊維大学 電気電子工学系 講師	歪(ひずみ)フォトニック結晶科学の構築と新奇ビームレーザーへの展開	46.1
	草本 哲郎	自然科学研究機構 分子科学研究所 准教授	三回対称ラジカルを基とするカゴメーハニカムハイブリッド格子の構築と機能開拓	58.1
	張 奕勁	東京大学 生産技術研究所 助教	極性二次元物質とそのヘテロ構造におけるバルク光起電力効果	52.3
	中田 陽介	大阪大学 大学院基礎工学研究科 准教授	光誘起テラヘルツトポロジカル状態の時空間制御	41.0
	野本 拓也	東京大学 大学院工学系研究科 助教	第一原理計算に基づくトポロジカル磁性材料探索	28.6
	速水 賢	東京大学 大学院工学系研究科 講師	らせん構造に立脚した新規トポロジカル磁性体の理論的研究	25.2

	広部 大地	自然科学研究機構 分子科学研究所 助教	chiral-induced spin selectivity の幾何学的性質と分子スピン・ 光機能の探究	48.5
	松永 隆佑	東京大学 物性研究所 准教授	トポロジカル半金属を用いた テラヘルツ高速エレクトロニクス・ スピントロニクス素子開拓	48.6
	山本 慧	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 任期付研究員	非相反表面波：材料科学に使える アノマリー	11.1
			総研究費	1315.7

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(2023年12月1日現在)

2. 研究総括のねらい

(1) 背景

本研究領域の背景として、①トポロジカル絶縁体に起源を発するトポロジカル物質群への世界的な注目(スピントロニクス、フォトニクス、量子情報処理など広範な分野で大きな変革を生み出す可能性)が集まっており、②実空間のトポロジーにおける、位相欠陥などのトポロジカルな性質を積極的に利用したスピン流制御、超空間・超流動現象、分子の幾何学的性質や絡み合いの制御による高分子・超分子材料などの高機能化の進展が著しいことがある。とりわけ、個別の分野・学問領域で発展してきたトポロジーに立脚した物質探索・材料開発をトポロジカル材料科学として体系化し飛躍させることは、次世代の材料・デバイスを牽引し我が国の競争力を高めていくために急務と考えられる。

(2) 概要

本研究領域の主目的としては、①トポロジーという新たな物質観に立脚したトポロジカル材料科学の構築、②革新的な新規材料・新規機能創出を考えている。すなわち、「トポロジカル絶縁体」に代表される様々なトポロジカル量子材料を始めとし、広範な領域における“トポロジカル材料科学”の探求を通して、原理的にその性能向上の限界が顕在化してきているエレクトロニクスデバイス分野等において新たなパラダイムを築くことを目指す。

3. 研究課題の選考について

(1) 研究課題の選考方針

選考における研究総括の方針として、①トポロジカルな特性を利用した新規物質・材料開発および機能創出、②トポロジカル材料科学の構築のための理論・計算、③トポロジカル材料の計測・評価技術の創出の3分野を本研究領域の対象とした。

- ① 「トポロジカルな特性を利用した新規物質・材料開発および機能創出」においては、物質のトポロジカルな性質を最大限に引き出した新規材料開発および機能創出をめざす研究提案を募集し、将来的な応用展開につながる革新的な機能創出が見込まれる物質開拓・材料開発であれば、材料系の種類は不問とする。また、トポロジカル材料を利用した革新的なデバイス創出にかかる野心的な提案を歓迎するものとした。提案に当たっては、提案する材料系が、応用が見込まれる材料分野での課題解決にどのように貢献するかを、当該分野の基礎科学的・工学的立ち位置を踏まえて明示することを求めた。
- ② 「トポロジカル材料科学の構築のための理論・計算」においては、実材料への展開に貢献する工学的な視点を含めた理論・計算によるアプローチを歓迎するとともに、各材料分野における理論・計算的な提案にかぎらず、分野横断的な理論の提示や新手法の開発を可能とする数学分野・素粒子物理学分野などからの提案を歓迎するものとした(材料科学とのかかわりは必須)。例としては、i) トポロジカルな性質を利用した新現象の予測や新規物質の予測を可能とする理論・計算、ii) 実材料を見据えた温和な環境での機能発現など既知のトポロジカル物質の特性向上を可能とする材料設計指針の提示、iii) トポロジカル材料群を貫く普遍的な理論体系・学理構築を挙げている。
- ③ 「トポロジカル材料の計測・評価技術の創出」においては、トポロジカル物質群の特異な現象や物性を評価する計測手法の開発や高度化に関する研究提案を募集し、表面形状や界面形状の制限を緩和する分光学的手法の開発、物質中の未知準粒子の決定的な観測手法など、提案する分野での計測技術上の課題にブレイクスルーを与えるような提案を期待しているとした。

選考全体に係わる研究総括の方針として、研究者自身の提案する“トポロジー”とは何か、そこから得られる革新的な機能や学理としての普遍性とは何か、という問いについて徹底的に考え抜かれた、独創的で革新的なアイデアや概念の提示を強く期待することとした。材料創出にかかる研究提案については、既存の枠組みを超えた質的に新しい着想に基づく新規材料開発・機能創出の研究に期待し、材料科学の諸分野(電子材料、磁性材料、光学材料、メタマテリアル、高分子材料、分子性材料等)にまたがる分野横断的な提案も歓迎することにした。理論・計算にかかる研究提案に関しては、既存の分野内で知見を一步二歩先に進めるような研究ではなく、質的に新しい要素を組み込んだ研究、新たな分野の開拓や分野横断的な成果へとつながる研究に期待するとともに、提案内容がどのようにトポロジカル物質・

材料研究につながるかの明確な説明を求めた。計測・評価にかかる研究提案に関しては、トポロジカル材料に関わる新規計測手法の開発や高度化を通じて、トポロジカル材料の新規機能発現につながるような革新的提案を期待するものであった。

さらに、科研費（若手研究、基盤研究等）とは全く違う3年半の研究期間を使った野心的な計画を強く求め、新分野開拓、分野横断的な研究計画を歓迎し、実績よりも計画の新規性・革新性を重視することを表明した。質的な新規性を持つ研究を期待し、ただし現時点での実現可能性の綿密な検討も求めた。同時に、他分野の人にも計画の重要性・革新性がわかるように、学術的重要性や波及効果を分野外の人にもわかりやすく説明できることも求めた。

(2) 1 期生（2018 年度）選考結果・総評

2018 年度は 120 件の応募があり、企業からの 3 名を含む 11 名の領域アドバイザーおよび 2 名の外部評価者の協力を得て書類選考を進め、23 件の面接選考を経て、最終的に 10 件の研究提案を採択した。なお、選考にあたっては利害関係にある領域アドバイザーの関与を避け、厳正な評価を行った。

初回の選考においては、本研究領域の目標を着実に達成するため、以下の 3 点を重視した。

- (1) 新たな材料創出に関する研究提案では、既存の枠組みを超えた質的に新しい着想に基づく新規材料開発・機能創出が期待できるか。
- (2) 理論・計算に関する研究提案では、質的な新要素により、トポロジカル物質・材料研究につながる新分野の開拓や分野横断的な成果が期待できるか。
- (3) 計測・評価に関する研究提案では、新規計測手法の開発や高度化を通じて、トポロジカル材料の新規機能発現が期待できるか。

加えて、さきがけ事業としての差別化も考慮し、以下 2 点も重要視した。

- (4) 従来の研究から飛躍し、3 年半の研究期間を使った野心的な計画となっているか。
- (5) 他分野の人と同じ領域に参画することを踏まえ、計画の重要性・革新性はもちろんのこと、学術的重要性や波及効果を分野外の人にもわかりやすく説明出来ているか。

この結果、電子材料と磁性材料を中心に、光学材料、ソフトマターなどの幅広い分野にわたって、挑戦的な研究提案を採択することができた。領域内の研究者間で活発な議論を行い、さきがけ研究を野心的に進めてくれることが期待できる人選ができた。

2018 年度募集では質の高い独創的な研究提案が多く集まった一方、残念ながらトポロジカル材料科学との関係性が希薄であるもの、またはさきがけ趣旨に沿わないような既存研究の単なる延長線上にある内容の提案も多く見られた。

	数学	物理学	工学	化学
弾性材料・誘電材料				
光学材料		森竹勇斗 メタ原子		
電子材料		松尾貞茂 マヨラナ粒子	中山耕輔 表面物性測定	
磁性材料	塩崎謙 コモホロジー理論	渡邊悠樹 材料探索	打田正輝 薄膜	関真一郎 巨大創発電磁場
分子性材料		竹内一将 トポロジカル乱流		葛西伸哉 磁気スキルミオン
高分子材料				青木大輔 高分子構造材料

図 3.1 2018 年度採択課題のポートフォリオ

(3) 2019 年度研究課題の選考方針

前年度に引き続き、本研究領域の目標を着実に達成するため、選考の観点として以下の 3 点を重視した。

- (1) 新たな材料創出に関する研究提案では、既存の枠組みを超えた質的に新しい着想に基づく新規材料開発・機能創出が期待できるか。
- (2) 理論・計算に関する研究提案では、質的な新要素により、トポロジカル物質・材料研究につながる新分野の開拓や分野横断的な成果が期待できるか。
- (3) 計測・評価に関する研究提案では、新規計測手法の開発や高度化を通じて、トポロジカル材料の新規機能発現が期待できるか。

加えて、さきがけ事業としての差別化も考慮し、以下 2 点も引き続き重要視した。

- (4) 従来の研究から飛躍し、3 年半の研究期間を使った野心的な計画となっているか。
- (5) 他分野の人も同じ領域に参画することを踏まえ、計画の重要性・革新性はもちろんのこと、学術的重要性や波及効果を分野外の人にもわかりやすく説明出来ているか。

(4) 2 期生 (2019 年度) 選考結果・総評

2019 年度は 73 件の応募があり、企業からの 3 名を含む 11 名の領域アドバイザーおよび

1名の外部評価者の協力を得て書類選考を進め、22件の面接選考を経て、最終的に11件の研究提案を採択した。なお、選考にあたっては利害関係にある領域アドバイザーの関与を避け、厳正な評価を行った。

結果として、磁性材料や電子材料、高分子材料など広範な分野の研究提案を採択することができた。正面から新規材料開拓を目指す意欲的な提案の他、数学者としての視点に基づく提案や「理論と実験の融合」を掲げた提案などが加わったことから、前年度採択された研究者も含め、領域内で更なる活発な議論を行い、個々のさきがけ研究の進展と、新たな相互連携が生まれることが期待される採択結果であった。

2回目となる本年度募集では、初年度以上に本研究領域の柱である「トポロジカル材料科学」の視点を明確にした研究提案が多く集まった。領域趣旨がより理解され、質の高い研究提案が集まったことは喜ばしい反面、研究手法や将来展望の検討が不足している提案が多く見受けられた。加えて提案者自身が優れた研究実績や能力を有しているにも関わらず、他の既存研究や提案者自身のこれまでの研究から大きく飛躍した「さきがけらしさ」に不足した提案も見受けられた。

	数学	物理学	工学	化学
弾性材料・誘電材料		新居陽一 フォノン	横田綾子 非破壊3次元可視法	
光学材料	小澤知己 人工量子系			
電子材料		町田理 マヨナラ粒子 森本高裕 非線形・非平衡	井手上敏也 ファンデルワールス結晶	
磁性材料	林晋 指数理論	那須譲治 準粒子励起	Le DucAnh 強磁性半導体	
分子性材料				谷口耕治 有機・無機ハイブリッドスピン材料
高分子材料			小門憲太 ネットワーク高分子材料	

図 3.2 2019 年度採択課題のポートフォリオ

(5) 2020 年度研究課題の選考方針

前年度に引き続き、本研究領域の目標を着実に達成するため、選考の観点として以下の3点を重視した。

- (1) 新たな材料創出に関する研究提案では、既存の枠組みを超えた質的に新しい着想に基づく新規材料開発・機能創出が期待できるか。
- (2) 理論・計算に関する研究提案では、質的な新要素により、トポロジカル物質・材料研究につながる新分野の開拓や分野横断的な成果が期待できるか。
- (3) 計測・評価に関する研究提案では、新規計測手法の開発や高度化を通じて、トポロジカル材料の新規機能発現が期待できるか。

加えて、さきがけ事業としての差別化も考慮し、以下2点も引き続き重要視した。

- (4) 従来の研究から飛躍し、3年半の研究期間を使った野心的な計画となっているか。
- (5) 他分野の人も同じ領域に参画することを踏まえ、計画の重要性・革新性はもちろんのこと、学術的重要性や波及効果を分野外の人にもわかりやすく説明出来ているか。

(6)3期生(2020年度)選考結果・総評

3回目の最後の募集は42件の応募があり、11名の領域アドバイザーの協力を得て書類選考を進め、17件の面接選考を経て、最終的に11件の研究提案を採択した。なお、選考にあたっては利害関係にある領域アドバイザーの関与を避け、厳正な評価を行った。

最後の募集においても、磁性材料や電子材料、光学材料、メタマテリアル、分子性材料など多岐にわたる材料分野の研究提案を採択することができた。正面から新規材料開拓を目指す意欲的な提案の他、新現象や新規物質の探索を目指す理論・計算の提案や、多くのトポロジカル材料研究への適用が期待される新しい計測・評価技術の提案などが加わったことから、個々のさきがけ研究の進展のみならず、領域内での相互連携が促進されることを期待できる採択結果であった。3回の募集を通じて、本研究領域の柱である「トポロジカル材料科学」の視点を明確にした質の高い研究提案が多く集まった。特に募集最終年度は、従来にも増して優れた研究提案が寄せられ、極めて困難な選考となった。一方、提案者自身が優れた研究実績や能力を有しているにも関わらず、他の既存研究や提案者自身のこれまでの研究から逸脱した「さきがけらしさ」が不足した提案や、将来展望の検討が不足している提案も見受けられた。

	数学	物理学	工学	化学
弾性材料・誘電材料		山本 慧 非相反性		
光学材料		中田陽介 メタマテリアル 松永隆佑 テラヘルツ 北村恭子 フォトニック結晶		
電子材料		鎌田 大 高周波量子輸送 翁 鏡春 走査ノイズ顕微鏡	張 奕動 ファンデルワールスヘテロ構造	
磁性材料		野本拓也 第一原理計算 速水 賢 らせん構造		
分子性材料			広部大地 スピン偏極電流	草本哲郎 ラジカル配位高分子
高分子材料				

図 3.3 2020 年度採択課題のポートフォリオ

(7) 採択課題全体のポートフォリオ

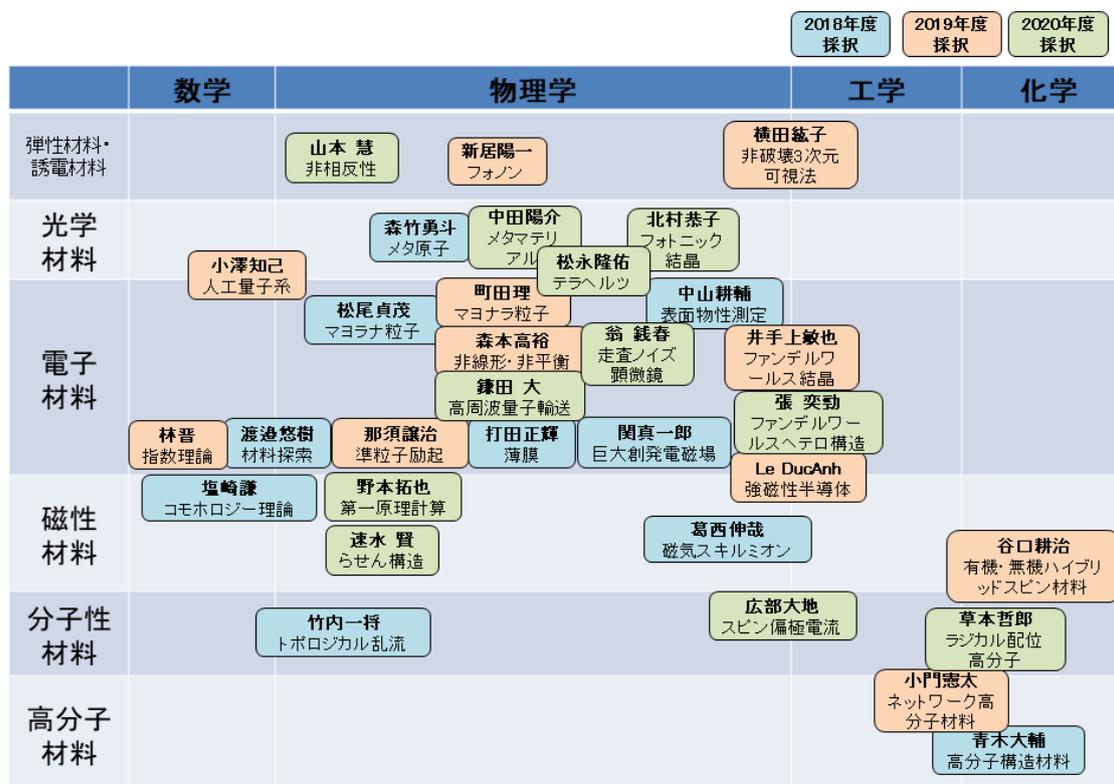


図 3.4 採択課題全体のポートフォリオ

ポートフォリオ全体を通してみると、研究領域として、数学、エレクトロニクス、スピントロニクス、フォトニクス、有機分子系など幅広い領域をカバーする人材を確保することができた。また、数学・理論と実験の研究者もバランス良く集めることができ、選考として適切になされたものと考えられる。

4. 領域アドバイザーについて

本研究領域では、トポロジーと物性に関する理論物理、実験物理、情報、数学、化学など複数の分野が関与しており、異分野間での研究者ネットワークを推進するため、日本のトポロジカル物性研究を牽引する大学や企業の研究者 11 名に領域アドバイザーを委嘱した。

表 4.1 領域アドバイザー一覧表

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 ¹ (現所属)	役職	任期
石坂 香子 (物性物理実験、光物性)	東京大学 大学院工学系研究科	教授	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
石原 照也 (光物性・メタマテリアル)	東北大学 大学院理学研究科 (香港大学 理学部)	教授 (訪問教授)	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
大淵 真理 (第一原理計算、ナノシミュレーション)	(株)富士通研究所 デジタルアニーラ プロジェクト (富士通(株) 富士通研究所)	シニアマネ ージャー (特任研究員)	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
齊藤 英治 (物性物理学)	東京大学 大学院工学系研究科	教授	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
笹川 崇男 (物質科学、固体物理化学)	東京工業大学 科学技術創成研究院	准教授	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
佐藤 昌利 (物性理論・場の量子論)	京都大学 基礎物理学研究所	教授	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
高田 十志和 (高分子科学、有機化学、 超分子科学)	東京工業大学 物質理工学院 (広島大学 大学院先進理工系科学 研究科)	教授 (研究科長)	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
坪井 俊 (数学、位相幾何学、多様体)	東京大学 大学院数理科学研究科 (武蔵野大学 工学部)	教授 (特任教授)	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
眞子 隆志 (固体物理、固体化学、電気 化学)	日本電気(株) システムプラット フォーム研究所 (科学技術振興機構 研究開発戦略 センター)	技術主幹 (フェロー)	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
村木 康二 (半導体量子電子物性・分子 線エピタキシー・量子ホール 効果・トポロジカル絶縁体)	日本電信電話(株) 物性科学基礎 研究所	主幹研究員 (上席特別 研究員)	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月
求 幸年 (物性理論、Kitaev液体、 スキルミオン)	東京大学 大学院工学系研究科	教授	2018 年 4 月 ～2024 年 3 月

¹変更/異動のあった場合、下段に括弧つき記載

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 運営の方針

領域運営に関する研究総括の基本方針として、個人研究者が短期的な成果に固執することなく、3年半腰を据えてじっくり独創的研究に取り組めるような環境を提供することを最も重視した。科研費等の競争的資金においては、1年ごとなど短期間での研究成果が常に求められるため、短期で結果が出る研究・確実に成果が出る研究に傾きがちで、ローリスクローリターンの研究スタイルになることが多い。一方でさきがけは、領域総括の運営次第で、3.5年という研究期間をフルに活用して、ある程度長いスパンでの研究遂行が可能である。そのため運営方針としては、失敗をおそれず高い目標に挑戦することを研究者に促すこととし、領域会議をはじめ機会があるごとにそれを研究者に呼びかけた。またそのためには、当初計画を尊重しつつも、機動的に研究内容を当初計画から刷新していくことも必要となる。そのため研究者に対しては、募集時に提出した研究計画にこだわることなく、柔軟に研究計画を刷新して、より質の高い研究に挑戦してほしいと呼びかけた。これは、研究の潮流の速い当該分野において世界をリードした研究成果を出し続けるために重要である。後述するようにこうした方針は研究者にもよく伝わり、挑戦的な目標にチャレンジして素晴らしい成果をあげた研究者も多い。また課題事後評価においても、「当初計画にはなかった研究成果」を評価項目に加えて、研究者にはこうした点を含めて発表いただいた。

新しい研究にチャレンジするための有効な方法の一つが、異分野との研究連携や研究交流である。このことを研究者にもよく説明し、さきがけ研究者は各分野のトップ研究者たちが集まっているので、この中で交流することで新しい分野への展開や分野間の融合が最も有効に図れることを説いた。その結果、領域内での研究連携がいろいろなところで生まれた。また領域として研究連携・研究交流を促進するために、異分野研究者との交流による研究の視野と人脈の拡大、同領域とのCREST研究領域等との積極的な連携、海外との共同研究や国内外の関連コミュニティとの連携等を積極的に進めることを図った。

円滑な研究展開をバックアップする体制として、領域会議（半年に1回）＋サイトビジット等の実施を行うこととし、また、その中で、研究総括、領域アドバイザー、他研究者からの率直な意見、フィードバックを提供する場の醸成を図った。意見交換の結果、計画の修正を求める場合も生じうるが、これらの意見交換が単なるダメ出しに終わらず、ポジティブな提案を含む意見が出される建設的な場とするように努めた。そうした方針は領域内でよく浸透し、領域会議等でも活発な議論が交わされるようになった。

(2) 領域会議

領域会議は合計で10回開催した。領域会議では、さきがけ研究者が各自の研究報告を行い、研究総括・領域アドバイザー・さきがけ研究者らが全員で議論し、各研究課題への相互理解を深めた。さらに、オンサイトでの領域会議では、泊まり込み形式で夕食後に意見交換

の場を設け、各自の専門分野だけでなく関連分野への視野を広げるための機会を設けた。また、さきがけ研究者の今後の成長を目的として、領域外の有識者やアドバイザーによる特別講演も設けた。2020年3月ごろからのコロナ禍突入に際しては、第3回領域会議以降、オンライン実施することを直ちに決定した。Zoom meetingを利用してオンライン会議を設定し、実際の会議進行はJST領域担当が行った。Zoomのブレイクアウトルーム機能を用い、研究者間の自由な意見交換の場を設けた。第7回領域会議以降はハイブリッド開催とし、オンライン・オンラインのいずれの参加者にも、総括・領域アドバイザーからのフィードバックにより各研究者の研究の進捗に繋げることを図った。

また、各研究者のさきがけ期間終了後も領域会議への参加を認め、継続的に議論・意見交換を進めることを促した。その一環として、各期の修了式を領域会議内で行い、各研究者の研究成果を讃え、研究完了を祝い、今後の研究活動へのエールを送ることを行った。

その他、第9回領域会議では、北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センターを訪れ、クリーンルーム内のデバイス試作関係の装置類を見学し、特に数学、理論研究者にとって、実験系の研究の一端に触れる機会を作れたことは意義深いことであった。

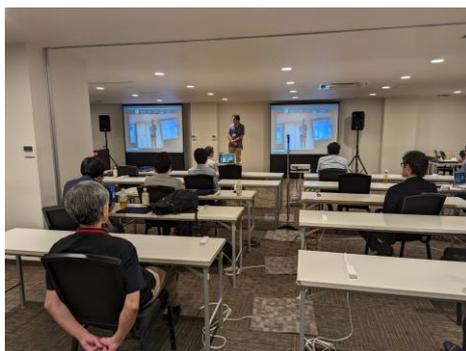


図 5.1 第9回領域会議・会場の様子

表 5.1 領域会議一覧

	開催年月日	場所	特別イベント	参加者
第1回	2019/5/13-14	ホテルアソシア静岡	1期生発表 意見交換会	1期生
第2回	2019/11/25-26	ホテルマイステイズ 名古屋栄	1期生、2期生発表 意見交換会	1期生 2期生
第3回	2020/6/12	Zoom meeting	1期生、2期生発表 意見交換会	1期生 2期生
第4回	2020/12/2 2020/12/9	Zoom meeting	1期生、2期生、3期生発表 意見交換会	1期生 2期生 3期生
第5回	2021/5/12 2021/5/19 2021/5/29	Zoom meeting	1期生、2期生、3期生発表 意見交換会	1期生 2期生 3期生
第6回	2022/1/5-7	Zoom meeting	1期生、2期生、3期生発表 意見交換会	1期生 2期生 3期生

第7回	2022/8/29-31	L stay&grow 南砂町 (ハイブリッド)	2期生、3期生発表 意見交換会 招待講演(近藤浩太、岡崎雄馬、 小林研介) 1期生修了式	1期生 2期生 3期生
第8回	2023/1/23-25	AP 大阪淀屋橋 (ハイブリッド)	2期生、3期生発表 領域アドバイザー講演(高田十 志和、石坂香子、大淵真理) 1期生講演(渡邊悠樹) 知的財産講習(JST 知財サポー ター説明)	2期生 3期生
第9回	2023/7/28-29	TKP ガーデンシティ 札幌駅前 (ハイブリッド)	2期生、3期生発表 領域アドバイザー講演(眞子隆 志、坪井俊、佐藤昌利) 2期生修了式 北大・量子集積エレクトロニク ス研究センター見学	2期生 3期生
第10回	2023/12/18-19	L stay&grow 南砂町 (ハイブリッド)	3期生発表 総括・領域アドバイザー講演 (村上修一、求幸年、村木康二) 3期生修了式	1期生 2期生 3期生

(3) サイトビジット

領域会議に加え、さきがけ研究者の初年度および異動時には適宜サイトビジットを開催し、研究環境の確認、さきがけ研究がスムーズに進むための上司やメンターへの協力依頼、研究の進捗把握や研究計画へのヒアリング、相談などを実施した。特に研究体制に不安のある研究者には優先順位を上げて対応した。なお、コロナ禍においては入構規制や出社規制があったためオンラインにて実施した。その後コロナ禍が一段落した段階で、オンラインでサイトビジットを実施した研究者全員に対して、あらためてオンサイトでサイトビジットを行った。これにより全研究者に対してオンサイトでサイトビジットを実施することができ、研究環境をよりよく把握することができて、研究の進展のための予算措置などに有益であった。

表 5.2 サイトビジット一覧

年度	開催形式	さきがけ研究者
2018	オンサイト 4箇所/1期生 10名	竹内、渡邊、塩崎、葛西、関、松尾、打田、中山、森竹、青木
2019	オンサイト 1箇所/1期生 1名	松尾 (2回目、理研異動のため)
	オンサイト 7箇所/2期生 10名	井手上、森本、谷口、林、新居、横田、小門、町田、那須、小澤 (2回目、東北大異動のため。JSTで実施)
2020	オンライン/2期生 1名	アイン
	オンライン/3期生 11名	翁、山本、北村、張、野本、速水、鎌田、中田、松永、草本、広部

2022	オンサイト2箇所/2期生2名	林(2回目、東北大異動のため)、那須(2回目、東北大異動のため)
	オンサイト9箇所/3期生11名	広部、速水、中田、北村、鎌田、草本、張、野本、松永、翁、山本(東工大田町で実施)

(4) インフォーマルミーティング

新型コロナ対策により、領域会議で気軽に対面で話す機会が作ることができない状況となった。このため、研究者同士の「自由な雑談の場」として、2020年10月からインフォーマルミーティングを開始した。主目的としては、研究者が話したいことをじっくり議論し、さきがけ研究者間の連携を促進することにある。

開催方針としては、①研究者がミーティングを企画・運営(総括・領域担当は適宜相談に乗るだけ)、②企画者は、総括・領域担当で相談して指名、③企画者・発表者の事前了解のもと、ミーティングを録画し、Box上で期間限定共有すること、が挙げられる。企画者は2人組とし、その2名は研究分野が多少異なる人を指名するようにして、企画者同士の交流も促進するような仕組みとした。さらに、領域内での研究者があまり多くない高分子分野については、CRESTトポロジー領域との合同開催も行った。これにより、研究会企画の議論を通じて、その企画者間の交流の深化を目指しており、ある程度その目的は達成されたと考えている。

表 5.3 インフォーマルミーティング一覧

	開催年月日	企画者	タイトル
第1回	2020/10/14	小門・谷口	トポロジカル物質はどう開発すればよいのか?
第2回	2020/11/12	塩崎・林	高次トポロジカル相の理論的側面について
第3回	2021/2/15	町田・翁	走査プローブ顕微鏡を用いたトポロジカル物性開拓
第4回	2021/3/30	関・竹内・横田	実空間のトポロジカル欠陥
第5回	2021/5/24	松尾・アイン	固体中のマヨラナ粒子の研究について
第6回	2021/9/30	井手上・張	電子系の幾何学・トポロジーと非線形伝導
第7回	2021/10/11	小澤・北村	光とトポロジー
さきがけ/CRESTトポロジー合同	2021/12/6	青木(さきがけ)・出口(CREST)	高分子が拓くトポロジカル科学
第8回	2022/1/26	打田・鎌田	電子系トポロジカル物質とエッジ状態

(5) 国際強化活動

国際強化活動として、下記のとおり国際ワークショップ開催を実施し、参画研究者と海外コミュニティとの国際的な連携・共同研究の推進を図った。2020年～2022年の間は新型コロナウイルス感染拡大のため、企画をしたものの実現はしなかった。

- ◆JST-プリンストン大学共催ワークショップ「The Future of Topological Materials」
(2019年10月2日～5日) @プリンストン大学 (米国)

さきがけ「トポロジー」領域から7名、その他、さきがけ「熱制御」領域、CREST「二次元」「熱制御」領域から合わせて7名、計14名が講演、海外(米、欧、中国、イスラエル)19名が講演を行った。本シンポジウムはPCTS (Princeton Center for Theoretical Physics) との共催である。2016年ノーベル物理学賞受賞のダンカン・ホールデン教授(プリンストン大学)等、ワークショップ期間中に100名を超える聴講者が参加し大盛況であった。

- ◆さきがけ「トポロジー」領域国際ワークショップ
「Trends in Topological Materials Science and beyond」
(2023年3月14日～16日) @Vila Lanna (チェコ・プラハ)

さきがけ「トポロジー」10名、海外(ドイツ、チェコなど)10名が講演。若手研究者同士が非公開で議論し、次の展開への足がかりの機会とすることを目的に開催した。海外参加者は、さきがけ研究者による推薦や、企画側がマッチングを考慮して選定を行った。密な議論によって、満足度の高い会合となった。

- ◆さきがけ「トポロジー」領域国際ワークショップ
「Japan-Germany Workshop on Trends in Quantum Materials and beyond」
(2024年2月26日～28日) @ヴュルツブルグ大学 (ドイツ・ヴュルツブルグ)

さきがけ「量子協奏」領域、およびドイツの研究コンソーシアム CT. QMAT との共催。さきがけ「トポロジー」6名、「量子協奏」6名、ドイツ12名が講演した。講演者はみな若手研究者であり、研究成果の発信および今後の研究交流や共同研究を目標として、その目的にあう研究者を講演者として選定している。

(6) 研究課題間や他の研究領域、国内外の他の研究機関との連携・協力の推進

先述の項目 5(1)の通り、本研究領域では新規性の高い研究に挑戦していただくことを重視しており、その一つ的手段として異分野研究者間の交流が重要であると、研究者に呼びかけてきた。その結果、さきがけ研究者間で自然発生的にさまざまな交流や共同研究が生まれた。例えば井手上研究者(実験)と森本研究者(理論)は、緊密に連携して、ファンデルワールス結晶でのバルク光起電力効果について顕著な業績を挙げた。また研究期間が終了した後もまだ進行中の共同研究が数多くあり、今後のますますの発展が期待できる。

また個人レベルでは国内外の他研究機関との連携研究は数多くあるが、領域全体としてこうした連携を推進するために、領域の研究成果発信を積極的に進めた。国内の学会等で以下のようなシンポジウムを開催して、研究成果を周知し、今後の研究連携・協力へのきっかけとした。また前項に述べたとおり、プリンストン大学やヴュルツブルグ大学でのワークシ

ヨップは、さきがけや CREST の他領域、および国外の研究機関やコンソーシアムとの共同開催であり、こうしたイベントを通して連携・協力を推進している。

- ◆日本物理学会第 74 回年次大会共催シンポジウム
(2019 年 3 月 14 日) @九州大学
・ さきがけ研究者 9 名が講演。約 200 名が参加。
- ◆MRS-J30 周年記念国際会議 (MRM2019) 共催シンポジウム
(2019 年 12 月 11 日) @横浜シンポジア
・ 村上総括、領域 AD 2 名、さきがけ研究者 5 名他が講演。
- ◆CREST/さきがけ「トポロジー」連携公開シンポジウム「トポロジカル科学の現在と未来」
(2021 年 9 月 28 日) @オンライン
・ CREST 「トポロジー」5 名、さきがけ「トポロジー」5 名が講演。約 370 名が参加。
- ◆応用物理学会共催シンポジウム「トポロジカル材料科学の拓く新機能・新物性」
(2022 年 3 月 23 日) @青山学院大学 (ハイブリッド)
・ さきがけ「トポロジー」1 期生 10 名が講演。約 120 名が参加。
- ◆CREST/さきがけ「トポロジー」連携公開シンポジウム「トポロジカルデバイスの現在と未来」(2023 年 10 月 2 日～3 日) @オンライン
・ CREST 「トポロジー」8 名、さきがけ「トポロジー」12 名が講演。参加者総数 375 名。



図 5.2 CREST/さきがけ連携公開シンポジウム (第 1 回、第 2 回) ポスター

- ◆日本物理学会 2004 年春季大会共催シンポジウム
(2024 年 3 月 19 日) @オンライン
・ さきがけ「トポロジー」研究者 10 名が講演。

(7) 研究費配分上の工夫

研究費の増額状況について、下表に示す。増額により、効果的な研究促進と共に、若い研究者への基盤固めのための費用を、適時、適材適所でサポートすることを図った。

表 5.4 研究費の増額リスト

(千円)

採択年度	研究者	年	内容	金額
2018年度	青木 大輔	2019年	原子間力顕微鏡購入	9,000
		2020年	UV照射器購入	1,000
		2021年	引張り式動的粘弾性測定装置購入	13,300
	打田 正輝	2019年	高温用エフュージョンセル導入	3,800
			海外派遣旅費（国際強化）	300
			設備改修費	4,500
		2020年	ディープアクセスワイヤボンダ購入	3,800
			異動に伴う機器購入（真空保管庫購入含む）	12,810
			エフュージョンセル購入	4,200
		2021年	ピュアオゾンジェネレータ購入	4,500
			サーモグラフィーカメラ購入	2,500
			ピエゾリークバルブ改造	700
	葛西 伸哉	2019年	海外派遣旅費（国際強化）	300
設備改修費			5,000	
関 真一郎		2019年	異動に伴う機器購入	5,500
			海外派遣旅費（国際強化）	300
		2020年	原料試薬（スキルミオン）、ターボポンプ購入	3,000
2021年		ロックインアンプ・ターボ真空ポンプ購入	3,000	
2019年		竹内 一将	クリーンブース設置費	1,400
2019年	中山 耕輔	海外派遣旅費（国際強化）	300	
		2021年	液体ヘリウム購入	1,000
2019年	松尾 貞茂	海外派遣旅費（国際強化）	300	
		液体ヘリウム購入	2,000	
		2020年	ターボポンプ排気ユニット故障に伴う購入	1,000
2021年	ワイヤーボンダ購入	4,000		
2019年度	2022年	井手上 敏也	異動に伴う機器移設	3,520
	2020年	小門 憲太	異動に伴う機器購入	9,561
			2022年	異動に伴う備品類購入
	2022年	谷口 耕治	異動に伴う機器移設・購入	10,250
	2021年	那須 譲治	異動に伴う移設経費のサポート	1,518
	2021年	新居 陽一	マイクロ波顕微鏡制御ユニット類購入	810
2022年			ロックインアンプ装置の購入	1,300
2021年	町田 理	超高真空イオンポンプの修理	1,550	

	森本 高裕	2022 年	海外派遣旅費	600	
	横田 紘子	2021 年	高感度 2 次元検出器の購入	5,000	
	Le Duc Anh	2021 年 2022 年	スパッターカソードの増設 異動に伴う機器移設	3,658 8,250	
2020 年度	翁 銭春	2021 年 2022 年	長焦点顕微鏡の購入 海外派遣旅費（国際強化）	3,360 1,456	
	鎌田 大	2023 年	海外派遣旅費（国際強化）	550	
	北村 恭子	2021 年 2021 年 2023 年	レーザー構造作製装置の移設費 レーザー構造作製装置の移設費 異動に伴う機器移設	3,000 2,000 9,055	
	草本 哲郎	2021 年 2022 年 2023 年 2023 年	スーパーコンティニウム光源購入 りん光寿命測定装置の購入 異動に伴う実験環境整備 粉末 XRD 用オートサンプルチェンジャ購入	5,100 3,000 8,972 1,000	
	張 奕勁	2021 年 2022 年 2023 年	高感度検出器／分光器等購入 空気ばね式除振台の購入 クライオスタット配管用除振設備購入 低温磁場対応対物レンズ購入 ピエゾステージ購入 電動ステージ等購入 チラー購入 海外派遣旅費（国際強化）	9,000 1,000 1,700 3,000 2,000 700 1,300 550	
	中田 陽介	2023 年	オートコリレータ購入	1,000	
	野本 拓也	2023 年	海外派遣旅費（国際強化）	550	
	速水 賢	2022 年	異動に伴う機器購入	4,182	
	広部 大地	2022 年 2023 年	超純水製造装置の購入 異動に伴う機器購入 ホットマグネットスターラー購入 電子ビーム蒸着用ライナー購入 海外派遣旅費（国際強化）	548 9,400 180 190 550	
	松永 隆佑	2021 年 2022 年 2023 年	光学測定用クライオスタットシステム購入 トランスファーチューブ、ダイヤモンド窓購入 レーザー冷却用チラーの購入 レーザー光フィードバック制御システム購入 海外派遣旅費（国際強化）	4,000 2,480 764 838 550	
	山本 慧	2023 年	海外派遣旅費（国際強化） 海外派遣旅費（国際強化）	1,000 550	
				合計	231,652

(8) 研究領域としての人材の輩出・成長の状況について

本研究領域の若手研究者の本研究期間中の成長も目覚ましく 32 名中半数以上の 23 名が異動・昇進している。内訳は 5 名が教授、9 名が准教授、8 名がその他役職への昇進となっている。

具体的には以下の通りとなっている。

表 5.5 異動・昇進リスト

氏名	採択時所属・役職	現所属・役職 (2023年12月1日現在)
青木 大輔	東京工業大学 物質理工学院 助教	千葉大学 大学院工学研究科 准教授*
打田 正輝	東京大学 大学院工学系研究科 講師	東京工業大学 理学院 准教授
葛西 伸哉	物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス 材料研究拠点 主幹研究員	物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス 材料研究拠点 グループリーダー
塩崎 謙	理化学研究所 開拓研究本部 基礎科学特別研究員	京都大学 基礎物理学研究所 助教
関 真一郎	理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
松尾 貞茂	東京大学 大学院工学系研究科 助教	理化学研究所 創発物性科学研究センター 基礎科学特別研究員
渡邊 悠樹	東京大学 大学院工学系研究科 講師	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
井手上 敏也	東京大学 大学院工学系研究科 助教	東京大学 物性研究所 准教授
小澤 知己	理化学研究所 数理創造プログラム 上級研究員	東北大学 材料科学高等研究所 准教授
小門 憲太	北海道大学 大学院理学研究院 助教	豊田工業大学 工学部 教授
谷口 耕治	東北大学 金属材料研究所 准教授	東京工業大学 理学院 教授
那須 譲治	横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授	東北大学 大学院理学研究科 准教授
新居 陽一	東北大学 金属材料研究所 助教	東北大学 金属材料研究所 准教授
林 晋	産業技術総合研究所 数理先端材料 モデリングオープンイノベーション ラボラトリ 産総研特別研究員	青山学院大学 理工学部 助教*
町田 理	理化学研究所 創発物性科学研究センター 研究員	理化学研究所 創発物性科学研究センター 上級研究員
横田 紘子	千葉大学 大学院理学研究院 准教授	東京工業大学 物質理工学院 教授*
Le Duc Anh	東京大学 大学院工学系研究科 助教	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
北村 恭子	京都工芸繊維大学 電気電子工学系 講師	東北大学 大学院工学研究科 教授
草本 哲郎	自然科学研究機構 分子科学研究所 准教授	大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
野本 拓也	東京大学 大学院工学系研究科 助教	東京大学 先端科学技術研究センター 講師
速水 賢	東京大学 大学院工学系研究科 講師	北海道大学 大学院理学研究院 准教授
広部 大地	自然科学研究機構 分子科学研究所 助教	静岡大学 理学部 助教
山本 慧	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 任期付研究員	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 副主任研究員

*さきがけ研究終了後の異動。

(9) 研究成果によってもたらされた国内外の顕彰・受賞等について

本研究領域の研究成果によって、科学技術分野の文部科学大臣表彰若手技術者賞を 5 名の研究者が受賞し、その他にも、凝縮系科学に従事する優れた若手研究者を奨励する「凝縮系科学賞」、若手理論物理学者の中で登竜門として位置づけられる「西宮湯川記念賞」など国内での著名な賞や、New Horizons in Physics Prize、英国王立化学会からの受賞など、以下の通り多くの受賞があった。

表 5.6 さきがけ研究期間での受賞リスト (2023 年 12 月 1 日現在)

氏名	受賞名	表彰団体名	受賞日
打田 正輝	文部科学大臣表彰 若手科学者賞	文部科学省	2021 年 4 月
小澤 知己			2021 年 4 月
井手上 敏也			2021 年 4 月
青木 大輔			2022 年 4 月
森本 高裕			2022 年 4 月
青木 大輔	Soft Matter Emerging Investigators	英国王立化学会	2021 年 1 月
中山 耕輔	APS Outstanding Referees Award	米国物理学会	2020 年 1 月
塩崎 謙	西宮湯川記念賞	西宮市	2020 年 12 月
関 真一郎	船井学術賞	船井情報科学振興財団	2022 年 4 月
松尾 貞茂	船井情報科学振興財団研究奨励賞	船井情報科学振興財団	2019 年 4 月
	安藤博記念学術奨励賞	安藤研究所	2020 年 9 月
渡邊 悠樹	New Horizons in Physics Prize	Fundamental Physics Prize Foundation	2021 年 9 月
打田 正輝	日本物理学会若手奨励賞	日本物理学会	2020 年 3 月
	凝縮系科学賞	凝縮系科学賞選考委員会	2021 年 11 月
	本多記念研究奨励賞	本多記念会	2022 年 2 月
井手上 敏也	日本物理学会若手奨励賞	日本物理学会	2020 年 3 月
	船井学術賞	船井情報科学振興財団	2023 年 4 月
小澤 知己	日本物理学会若手奨励賞	日本物理学会	2021 年 3 月
横田 紘子	米沢富美子記念賞	日本物理学会	2021 年 3 月
那須 譲治	凝縮系科学賞	凝縮系科学賞選考委員会	2020 年 12 月
翁 銭春	花王科学奨励賞	花王芸術・科学財団	2022 年 6 月
張 奕勁	高柳健次郎財団研究奨励賞	高柳健次郎財団	2021 年 1 月
	井上リサーチアワード	井上科学振興財団	2021 年 2 月
速水 賢	日本物理学会論文賞	日本物理学会	2022 年 2 月
	凝縮系科学賞	凝縮系科学賞選考委員会	2023 年 11 月

数多くのプレス発表も行い研究の成果をアピールした。所属機関と JST との共同プレスリリースも 43 件あった。以下にその共同プレスリリースを記す。

表 5.7 JST との共同プレスリリース

発表者	プレス件名	掲載論文誌	プレス発表日
打田 正輝	ワイル粒子がつなぐ量子化された伝導を観測	Nature Communications	2019/6/12
松尾 貞茂	初めてクーパー対を 2 本の細線に弾道的に分離 ～1 次元電子系を用いた量子情報処理技術の新展開～	Science Advances	2019/10/5
青木 大輔	加熱だけで分子の形を環状に変換する手法を開発 ～環状構造の量産化とそれを利用した材料創製に貢献～	Angewandte Chemie International Edition	2020/1/14
関 真一郎	スキルミオンとアンチスキルミオンの相互変換に成功 ～トポロジカルスピン構造の量子情報ビットへの応用研究を加速～	Nature Nanotechnology	2020/1/21
渡邊 悠樹	対称性に基づいた超伝導体のトポロジーの判定法の確立 ～トポロジカル超伝導体の候補物質探索における指針として期待～	Science Advances	2020/5/2
関 真一郎	新機構が生み出す過去最小の磁気渦粒子を発見 ～超高密度な次世代情報担体としての活用に期待～	Nature Nanotechnology	2020/5/19
那須 譲治	マヨラナ粒子が媒介するスピン輸送現象の発見 ～物質内部で磁化変動を伴わない奇妙なスピン励起の伝達～	Physical Review Letters	2020/7/28
関 真一郎	微小な磁気渦の内部変形が引き起こす渦の配列変化	Nature Communications	2020/11/11
野本 拓也	理論計算による高効率な磁気構造予測手法の開発に成功	Physical Review X	2021/2/18
草本 哲郎	三角形ラジカルを使って二次元ハニカムスピン格子構造を組み立てる	Journal of the American Chemical Society	2021/3/16
谷口 耕治	結晶のキラリティ制御で向きが反転する光電流を発見 ～光スピントロニクスへの応用に期待～	Advanced Materials	2021/3/24
井手上 敏也 森本 高裕	電気的な偏りのない 2 次元結晶を重ねるだけで面内に電荷の偏りと光発電機能を実現 ～2 次元物質界面における新たな機能性の開拓～	Science	2021/4/2
打田 正輝	離れていてもつながった電子の軌道運動の実証 ～ワイル粒子による特異な非局所量子性を観測～	Nature Communications	2021/5/7

新居 陽一	音波による磁石の向きの制御に世界で初めて成功 ～携帯電話などに用いる弾性波デバイスの高度化に期待～	Nature Communications	2021/5/10
Le Duc Anh	磁性元素を配列した強磁性超格子構造の作製と巨大磁気抵抗の実現 ～究極の原子層結晶成長法を駆使したスピントロニクス機能の実現へ新たな道～	Nature Communications	2021/7/7
Le Duc Anh	世界最高品質の単元素トポロジカル・ディラック半金属を実現 ～新しいトポロジカル電子材料と量子デバイス技術のプラットフォーム形成に道～	Advanced Materials	2021/10/15
青木 大輔	プラスチックを肥料に変換するリサイクルシステムを開発 ～プラスチックの廃棄問題と食料問題の同時解決に向けて～	Green Chemistry	2021/10/28
関 真一郎	磁石の中の竜巻（スキルミオンひも）の三次元形状の可視化に成功 ～新しい磁気情報処理手法の開拓に期待～	Nature Materials	2021/11/12
速水 賢	トポロジカルスピン結晶の新しい制御法を発見 ～スピンの波の位相変化による新しい磁気渦結晶と伝導特性の開拓～	Nature Communications	2021/12/1
打田 正輝	巨大な磁場応答を示す三角格子磁性半導体 ～3拍子そろった稀有な磁性材料の発見～	Science Advances	2021/12/23
渡邊 悠樹	塩の結晶の角が分数電荷を持つことを理論的に解明 ～身近な結晶に潜むトポロジカルな性質の発見～	Physical Review X	2022/1/5
野本 拓也	カゴメ格子に由来する磁気熱電効果の増大機構の発見 ～高機能磁気熱電変換材料の新たな物質設計指針へ～	Science Advances	2022/1/15
井手上 敏也	結晶の対称性を反映した新しい原理の超伝導整流現象を発見 ～エネルギー損失の極めて小さい電子回路の実現に向けた新たな可能性～	Nature Communications	2022/3/29
関 真一郎 速水 賢	超高密度な磁気渦を示すシンプルな2元合金物質を発見 ～次世代磁気メモリーへの応用に期待～	Nature Communications	2022/3/30
松尾 貞茂	磁場による超伝導電流増幅の機構を解明 ～超伝導デバイスの高性能化に貢献～	Physical Review Letters (Editor's Suggestion)	2022/5/23
渡邊 悠樹	網羅的なトポロジカル超伝導物質探索へ向けた新データベースの構築	Physical Review Letters (Editor's Suggestion)	2022/7/7
野本 拓也	反強磁性体における垂直2値状態の電流制御に成功 ～不揮発性メモリーの超高速化・超低消費電力化への大きな一歩～	Nature	2022/7/21

松尾 貞茂	素子間の結合による超伝導電流の非局所制御に成功 ～将来的な超伝導量子計算への応用に期待～	Communications Physics	2022/9/13
竹内 一将	液晶中に生じるトポロジカルな「ひも」の3次元的な動きを捉えることに成功 ～トポロジーが結ぶ分野横断的なメカニズムの提案へ～	Proceedings of the National Academy of Sciences	2022/10/5
Le Duc Anh	非磁性／強磁性半導体ヘテロ接合において磁場の向きを変えると符号が変わる巨大な磁気抵抗効果を発見 ～物質中の「対称性の破れ」による特異な電子伝導現象、次世代量子デバイスの可能性～	Nature Communications	2022/11/9
松永 隆佑	赤外光を照射した半金属における巨大屈折率分散の発見と機構解明 ～金属系物質による室温スローライト生成の道筋を開拓～	Physical Review Letters	2022/11/11
中山 耕輔	カゴメ格子超伝導を担う電子軌道を解明 ～放射光を用いた先端電子計測で照らし出す～	Physical Review Letters	2022/11/14
井手上 敏也 森本 高裕	電氣的な偏りのない層状結晶にひずみを加えて面内に電荷の偏りと光起電力効果を実現 ～ひずみによる2次元物質の機能開拓へ新しい可能性～	Nature Nanotechnology	2022/11/25
竹内 一将	トポロジカルな点が細菌を引き寄せ、コロニーの3次元成長を促進する	PNAS Nexus	2022/12/21
新居 陽一	数学の原理で高周波の新型音響導波路を開発 ～超低エネルギー損失な次世代高周波フィルターやセンサーへの応用目指す～	Physical Review Applied	2023/1/4
広部 大地	磁石で右と左を区別することに成功 ～鏡と電子スピンの不思議な関係～	Nature	2023/1/19
松永 隆佑	異常ホール効果の超高速変化を10兆分の1秒の時間で観測することに成功 ～マイクロなメカニズムを解明する新手法を開拓～	Physical Review Letters	2023/3/22
関 真一郎 野本 拓也	反強磁性体におけるトポロジカルホール効果の実証に成功 ～磁気情報の新しい読み出し手法としての活用に期待～	Nature Physics	2023/4/21
草本 哲郎	磁場で発光色が変わる特性をジラジカル1分子で実現	Journal of the American Chemical Society	2023/6/14
井手上 敏也	異なる2次元結晶を重ねた界面でスピン偏極した光電流が流れることを発見 ～2次元物質界面における新しい光スピントロニクス機能の開拓～	Nature Nanotechnology	2023/6/19
北村 恭子	フォトニック結晶で一般相対性理論に基づく疑似重力効果を実現 ～次世代6G通信の電磁波制御用基盤技術として期待～	Physical Review A	2023/9/29

山本 慧	磁石によるうろこ模様で回る音波を制御 ～人工格子デザインで「左回り」「右回り」の読み出しに成功～	Physical Review Letters	2023/10/26
山本 慧	隠された磁気を超音波で診断 ～高速磁気メモリー開発に向けた材料研究の新手法～	Physical Review Letters	2023/11/9

6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

(1) 研究成果の達成状況

32名の研究者はそれぞれの分野において当初研究目標の達成を目指して研究を行い、顕著な業績をあげた。当初の研究目標をほぼ達成できた研究者もある一方で、研究の結果、当初目標の達成が困難であることが判明したり、また新型コロナウイルス感染拡大や装置の故障など外的な要因で研究目標の達成が困難になったりした研究者もあった。そのように当初目標には多少届かなかつた研究者も全員、「研究計画を機動的に刷新して新しく高い目標にチャレンジしてほしい」という領域運営方針にそって、必要に応じて機動的に新しい目標を設定しなおして素晴らしい研究成果をあげたと考えている。

以下、個々の研究者の成果について概要を記載する。

【1 期生】

1. 青木研究者

「環状高分子」というキーワードのもと、動的共有結合を用いたトポロジー制御など当初の目標はほぼ達成された。トポロジー変換を利用した自己修復性を持つ高分子、トポロジー変換反応のライブラリー構築、高分子のトポロジー変換技術を利用した分解可能なプラスチック（ポリカーボネート）など、いずれも科学技術や社会への波及効果が高い成果を次々と出しており、今後ますますその重要性が高まっていくと期待できる。研究においては緻密な計算による物性予測を行っており、それが実験の効率と成功確率の向上に大きく寄与していることも評価できる。残った課題（環状高分子でのトポロジーの可視化）についても、モデル系で実現の目途を立てることができており、今後の達成が期待される。

また、高分子のトポロジー変換技術を利用した分解可能なプラスチック（ポリカーボネート）の開発は当初計画になかった大きな成果であり、そのリサイクル特性やその分解物の肥料への応用は、環境問題への寄与も期待され波及効果が大きい¹。今後トポロジー変換との組み合わせにより、さらに機能化・強靱化を進められる見込みがあり、今後の発展を期待できる。

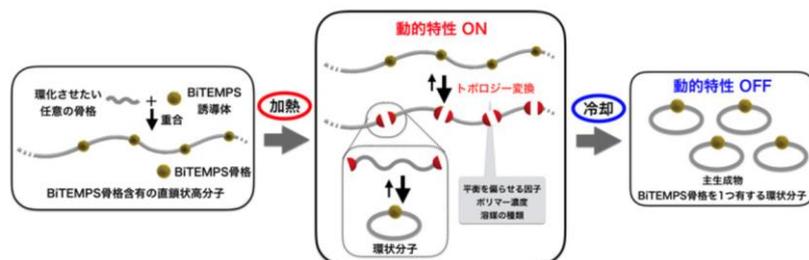


図 6.1 加熱による直鎖状高分子から環状高分子構造へのトポロジー変換²

¹ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211028/index.html>

² <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200114-3/index.html>

2. 打田研究者

国際的に論争があったトポロジカル半金属の輸送現象について、高品質薄膜の作製と緻密で系統的な輸送測定により美しい結果を得るとともに、新しいEu系の磁性トポロジカル物質を次々と合成しその物性について発表するなど、当初目標は十分に達成された。特に、さきがけ第3年次には、異動・昇進・独立があり、研究室を一から立ち上げることになったが、速やかに研究実施環境を整えて研究を遂行できたことは評価したい。

現在の国内外での研究動向では、トポロジカル物質系の実験結果には相反するものも多く、これは物質の質や測定の正確さにばらつきがあるためである。また、新物質を発見するのは一般に難しく競争も激しい。そうした状況の中、打田氏がそれを達成できたのは、世界をリードする高品質な薄膜作製技術と緻密な測定・検討による成果であり、これらはトポロジカル物質の物性を確立する上で重要なもので、学術への貢献は高いと言える。さらに、これらの新しく発見した物質は、物性を考える上で理想的なバンド構造を持つものもあり、今後の関連研究への発展性も期待できる。

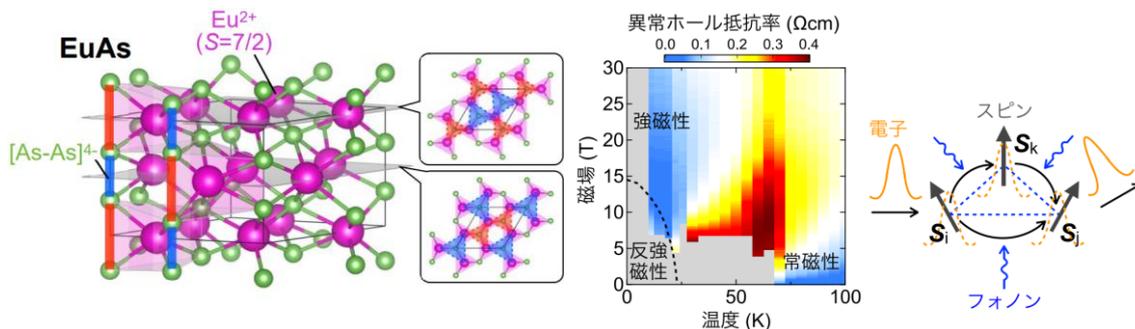


図 6.2 巨大な磁場応答を示す三角格子磁性半導体の開発³

3. 葛西研究者

目標に掲げたスキルミオン素子構築については、応用に近いために試行錯誤がかなり必要であることなど難しい点もあり、スキルミオン薄膜の実現におけるヘテロ接合形成や多端子化については課題が残る。一方でその目標を目指した研究を通じて、精密に制御されたヘテロ接合の作製やスキルミオンの駆動現象の精密観測など難しい課題を克服して、スキルミオンのダイナミクスに関する新現象を次々と発見したことには大きな意義がある。スキルミオンの実現できる材料やその物性について種々の成果を得ており、当初の目標は概ね達成されたとと言える。

特にスキルミオンの物性について、材料や膜厚を細かく系統的に変化させて信頼できる実験結果を得ており、スキルミオンのスピントロニクス応用に向けて重要な成果となっている。また、スキルミオンの自励発振、マルチモード形成、THz 発振などは当初予定していなかった副産物であり、スキルミオンの物性と応用について波及効果が期待できる。

³ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211223/index.html>

4. 塩崎研究者

一般コホモロジー理論の数理物理学的整備と物理現象の提案を目的として、一般コホモロジー理論によるトポロジカル相の記述について最先端の成果を出している。また キタエフの Omega スペクトル予想に関して断熱ポンプの一般論を構築するなど、数理物理分野で一般性が高く波及効果の大きな成果を挙げた。対称性によって保護されたトポロジカル相 (Symmetry Protected Topological phases : SPT 相) を記述する一般コホモロジー理論の構築に際して、断熱ポンプの一般論を展開することができたことにより、量子情報分野への波及効果も期待できる。スペクトル系列の計算手法の開発については計算上の困難から予定より時間を要したため課題として残ったものの、今後の進展を期待したい。理論研究としての性質上、計画通りに進まない点があることも自然であり、研究成果全体としてはトポロジカル材料科学に資する理論研究が進んだことは間違いない。

当初予定されていなかった非エルミート・トポロジカル相、超伝導における対称性指標の研究についても、大きな成果を挙げることができた。特に非エルミート系については、古典系やアクティブマターの物理への応用も興味を持たれ、今後の共同研究による進展が期待できる。

5. 関研究者

高対称性を持つ結晶における新しい設計指針に基づく小さなスキルミオンを初めて観測する⁴など、本分野の全く新しい展開を生み出している。具体的には、遍歴電子由来のフラストレーションに起因した新しいスキルミオン物質をいくつか見出し、そのスキルミオン物質の新しい物性、特に多彩なスキルミオン相の出現とその起源を明らかにした。またスキルミオンひもの 3 次元直接観察などの美しい結果や、新規物質の発見とそこでの精密な物性測定は、関連研究者に大きな影響を与えたと言える。さらに、特異な反強磁性体の伝導現象なども明らかにし、CoTa₃S₆ の非相反電気伝導の観測は、反強磁性ドメインの新しい読み出し手法として期待される⁵。以上から、当初目標は十分達成されており、学術への貢献が大きいと考えられる。

特にスキルミオンひもの観測などは当初計画にはなかったが、美しくかつ意義の大きい研究成果を出すことができ、またその振動モードの非相反伝搬をも明らかにするなど、ユニークな研究展開を生み出しており、今後の進展を期待したい。

また、関氏はさきがけ第 1 年次に、異動・昇進・独立に伴い新たに研究室を立ち上げることになったが、研究費を有効に活用してスムーズに研究実施体制を整え、順調に成果をあげることができたことも併せて評価したい。

⁴ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200519/index.html>

⁵ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230421/index.html>

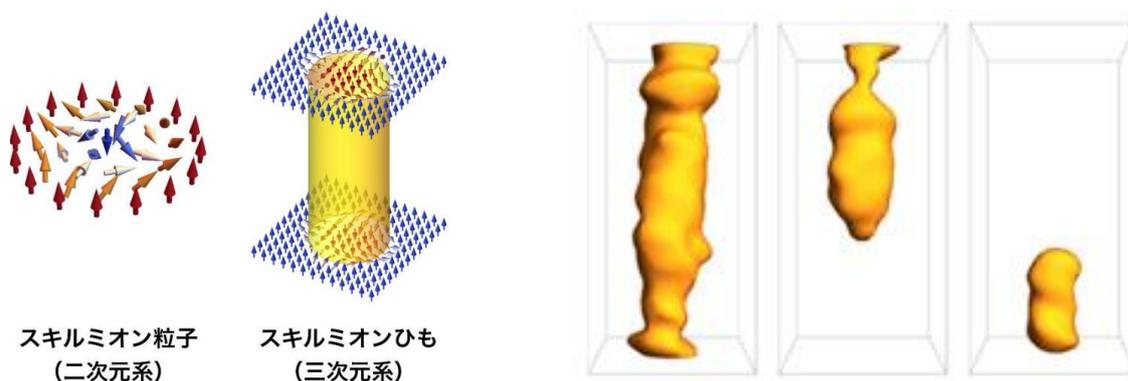


図 6.3 スキルミオンひも（電子スピンの竜巻構造）の 3 次元形状の可視化⁶

6. 竹内研究者

従来難しかった液晶の 3 次元欠陥ダイナミクスの可視化について、さきがけで導入した共焦点顕微鏡等の装置により、計画したトポロジカル乱流の共焦点観察を着実に進めて美しい成果をあげ、当初の目標を達成できている。また、欠陥のダイナミクス観測により、例えば 2 次元の欠陥と 3 次元の欠陥とのトポロジカルな性質の違いがダイナミクスにも影響を与えていることを実証しており、普遍的な概念の確立に寄与した。負粘性の実験は課題として残ったものの、研究方針の見通しは立っており、今後の進展が望まれる。

さらにトポロジカル乱流からの緩和過程や、パターン配向によるエキゾチックな欠陥など新たな研究成果を挙げる事ができており、例えば、特異・非特異欠陥については今後の発展性が期待される。その他、当初計画にはなかった、液晶とは全く異なるバクテリア集団におけるトポロジカル欠陥の役割の発見⁷など、異なる物理系へと観測手法や解析手法を発展させており、他分野への波及効果が期待できる。

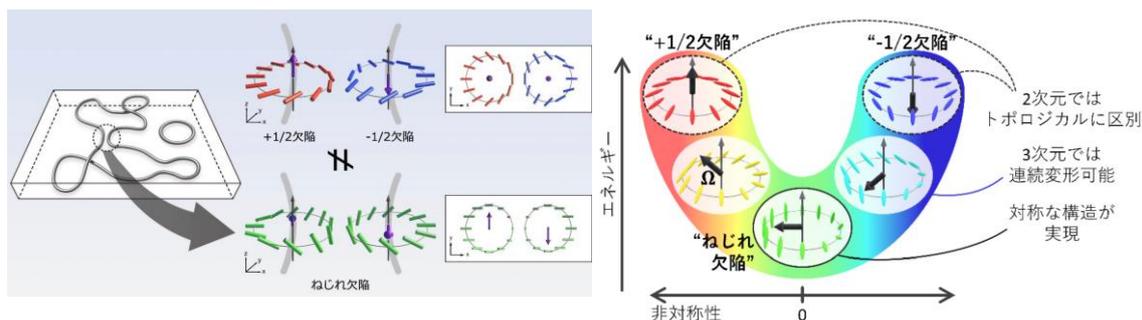


図 6.4 液晶中のトポロジカルな「ひも」である線欠陥の直接観測と特徴的な運動メカニズム⁸

7. 中山研究者

劈開ができる表面に限られていた角度分解光電子分光を、ガスクラスターイオンビーム (Gas Cluster Ion Beam: GCIB) による表面平坦化によって劈開できない表面へと広げる

⁶ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211112/index.html>

⁷ <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2022/8200/>

⁸ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20221005/index.html>

計画であり、さきがけの予算で、GCIB 装置等を整備して高強度ビーム・高真空での装置開発をし、ビームのクラスター化、大ビーム電流、安定動作など計画した性能を着実に達成した。また平坦化の効果・安定動作も検証できており、当初目標は十分達成されている。

既存の角度分解光電子分光 (Angle-resolved Photoemission Spectroscopy: ARPES) 装置でも、トポロジカル半金属や超伝導体での電子状態測定について成果を挙げる^{9,10}と共に、Te(0001)や Bi(1-10)など劈開で得られない結晶方位の ARPES にも成功している。ARPES の立場から電子状態について多くの知見を得ることができたことは高く評価できる。

装置が計画通りの性能で構築できたため、装置開発と表面作成手法の活用により、今後さまざまな物質表面の評価・作製への応用が期待できる。またさきがけ研究者との共同研究も複数開始しており、新しいトポロジー材料の研究において ARPES の力が発揮されることを期待したい。

8. 松尾研究者

世界的に重要な課題となっているマヨラナゼロモードの観測を目指して、非局所超伝導関連の電氣的制御とシャピロ階段の観測を計画しており、半整数シャピロ階段の観測など多くの成果をあげた。

精密な加工・測定が必要な難しい実験であり、こうした実験ができる研究室は世界でも限られているが、松尾氏は希釈冷凍機をはじめとしてさきがけで導入した装置により有効かつ強力に研究を進めることができた。研究上の困難を解消するため、海外との共同研究を進めるなど、実行に向けて最大限の努力はなされたものの、結果としてマヨラナゼロモードの観測には至らなかったが、この点は世界的にもほぼ同様の状況にある。今後のマヨラナゼロモード検出のための要素となる物理や高度な技術を確立できた点では、当初目的を達成できたと言え、今後の研究の展開が期待される。

また、非局所ジョセフソン効果の実証¹¹や、非相反輸送の観測、異常ジョセフソン効果の非局所制御など、当初計画になかった研究成果を多くあげており、今までにない新たな研究展開を生み出し続けることを期待している。

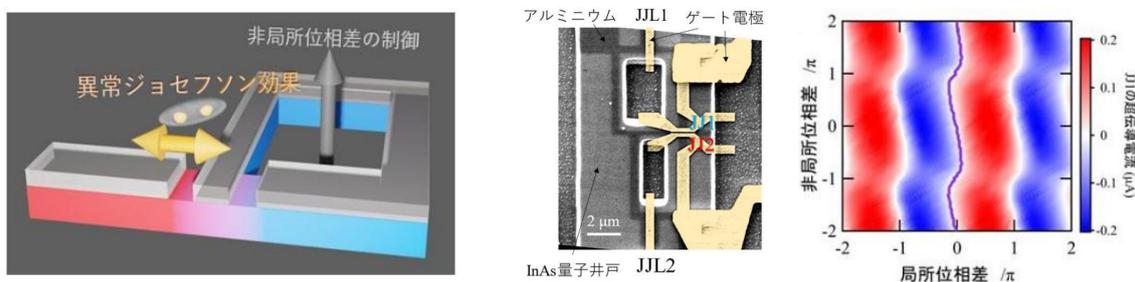


図 6.5 素子間の結合で異常ジョセフソン効果を創発¹²

⁹ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20221114/index.html>

¹⁰ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200109-3/index.html>

¹¹ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220913/index.html>

¹² <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20231214/index.html>

9. 森竹研究者

メタ原子の導入によるトポロジカルエッジ状態の実現についてはほぼ達成し、また準周期系の導入による拡張についてもかなりの進展を見せている。意欲的な当初目標の中には達成できなかったものもあるが、試行錯誤や工夫をして目標の達成に努め、また研究の進展に伴い新たな研究項目を加えるなどして、研究計画を大きく進化させており、全体として新奇な光トポロジカルエッジ状態の開拓の目標は達成されている。

トポロジカルフォトンクス分野は国際的にも研究が盛んになってきており、その中で森竹氏の研究は、トポロジカル相転移の動的制御や非エルミートフォニックバンドの観測など、全く新しい研究の方向性を提示しており、今後大きな発展や波及効果が見込まれる。このように当初計画になかった方向に新しく研究を展開して、これらの美しく興味深い結果を得たことは高く評価できる。またバレープラズモニック系や2次元物質など領域内の新しい共同研究もスタートしており、今後の展開が期待される。

10. 渡邊研究者

トポロジカル超伝導体探索や電気多極子絶縁体の理論について計画通り幅広く理論を展開し、さらにその成果の発信を広く範囲かつ非常にアクティブに行っており、当初の目標を十分達成している。

トポロジカル超伝導物質探索については、対称性指標に基づく統一的な理論を構築し、物質のデータベースと結合させてツールをオンライン公開している。理論構築だけにとどまらず、成果発信として今後多くの人々が利用可能なものとして世界へ提供した波及効果は大きく、将来の分野発展の基盤となることが期待される。また、電気多極子絶縁体の理論構築では、具体的な物質として食塩(NaCl)が、その結晶角に分数電荷を持つと示すことができている¹³、この点は高く評価したい。

平衡電流・高次応答についての理論研究は全く新しい展開で、渡邊氏の研究によって大きく分野が展開し、しかも面白い性質が次々判明してきており、今後の理論発展が期待できる。

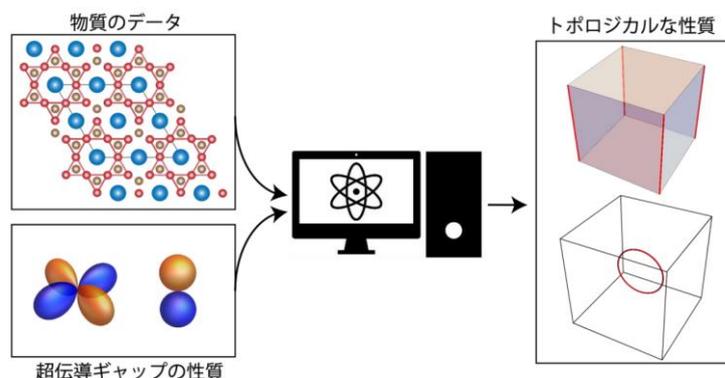


図 6.6 網羅的なトポロジカル超伝導物質探索へ向けた新データベースの構築¹⁴

¹³ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220105/index.html>

¹⁴ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220707-2/index.html>

【2期生】

11. 井手上研究者

研究計画は、原子層膜の人工的な積層であるファンデルワールス結晶について、物質や積層の仕方を制御しながら非相反伝導と光起電力を測定するものである。多様なファンデルワールス結晶で多くのハイレベルな成果が得られ、目標は十分に達成されている。発表論文の質、数、分野での認知度など、申し分ない成果と判断される。さらに当初の計画にはなかった、2.5次元対称性制御やひずみによる制御など多様な展開を進め、これにより制御の自由度や扱える系の範囲を格段に広げることができたことも高く評価できる。本研究において、理論研究者含む多くの研究者との共同研究を上手に遂行できたことも、多くの顕著な成果を挙げられた理由である。なお研究期間内に異動・昇進・独立があったが、その際もさきかけの予算等を活用して研究室の立ち上げをスムーズに行うことができた。

本研究成果はさまざまな波及効果がある。まず関連学理の構築自身が非自明で、社会への貢献となる。さらに、研究に用いている2次元系は比較的簡単な構造であるため、本研究成果の多くは他の物質系へと簡単に応用でき、今後多様な研究展開が可能であり大きな波及効果が見込まれる。また非相反現象や光起電力は、原理検証という意義に加え、応用への展開可能性においても意義が大きい。

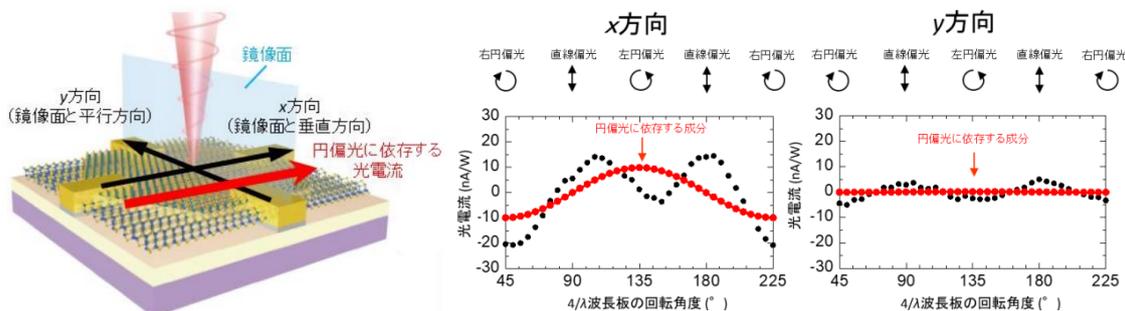


図 6.7 WSe₂/SiP 界面における円偏光に依存する光電流¹⁵

12. 小澤研究者

人工量子系のトポロジカル現象（量子計量や人工次元）、非エルミート系でのトポロジカル現象などについては多様な研究分野で多くの顕著な業績を挙げており、想定以上に目標が達成されている。量子計量とチャーン数の間の不等式の等号成立条件を明らかにした研究や、非エルミート系に関する一連の基礎研究は高く評価される。

また独自性の高い理論を開拓し、それが実験研究者を刺激することで実験との密接な協働を実現し、顕著な業績を挙げている。シリコンフォトニクスやトポロジカルレーザーについて、将来の応用にもつながる重要な成果を実験研究者とともに出しており、今後の波及効果が期待できる。さらに新たな共同研究として、ダイヤモンド NV 中心、シリコンフォトニ

¹⁵ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230619/index.html>

クス、アクティブマターなど新しく多様な分野で計画になかった新しい研究展開をしている点も評価が高い。さらにレビュー論文の執筆などにも熱心である。

全体を通じて発表論文の数は申し分なく、その中にはオリジナルな提案や分野横断的な研究も多く分野内で独特の存在感を発揮しており、今後も世界中の実験・理論の共同研究者との共同研究による目覚ましい活躍が期待される。

13. 小門研究者

3次元のネットワーク高分子のトポロジー制御に関して、異方膨潤性を持つゲルの作成、新しい性質を持つ3次元的高分子の作成を達成するなど十分な成果が得られ、金属有機構造体(MOF)を用いた架橋によるネットワークトポロジーの制御という目標は達成されている。また、合成に成功した物質の様々な応用を見据えた研究も進めている点も評価でき、今後の展開が期待される。

反応率が低いなどまだ改善の余地はあるものの、不飽和結合を利用した頑強な架橋構造を構成することができ、高分子、特に2次元、3次元高分子の合成の一つの方法論を提示できたことは、この分野における自身の存在をかなり高めたものと思われ、大きな波及効果を期待させる。今後さらに、架橋剤のデザインなど、材料面のバリエーションを増やしていくことで、高分子材料としての可能性を広げていける余地が大きい。

なお研究期間内に2度の異動・昇進・独立があったが、さきがけ研究費を有効に用いて研究を切れ目なく遂行した手腕も評価できる。

14. 谷口研究者

有機無機ハイブリッド系の研究として、多様なキラル有機分子と無機磁性体を網羅的に組み合わせキラル磁性体を合成することに成功し、その磁性の測定と同定を行った。トポロジカルなスピン秩序は出なかったものの、強磁性相互作用とジャロシンスキー・守谷相互作用(DM相互作用)の競合による多彩な相図が系統的に得られるなど、この系での物性について系統的・網羅的な成果が得られた。中でもキラルな系での円偏光ガルバノ効果の初めでの観測や、強磁性+強トロイダル秩序を持つ有機無機ハイブリッド系の実現と観測など、想定していなかったような成果も多く出ており、これらは新しいトロイダル物質群の提案に向けた発展の余地もある重要な結果である。さらに有機無機ハイブリッド系のスピントロニクス応用の可能性を開拓する研究という点でも、今後の波及効果が期待できる。独自性の高い物質合成に基づき、有機無機ハイブリッド系で望みの物性・機能を発現させていくための新たな方法論を確立していて、世界的に顕著な成果を挙げたと評価する。

なお研究期間中に異動・昇進・独立があったが、さきがけの経費等で研究を切れ目なく遂行することができ、顕著な業績を挙げている。

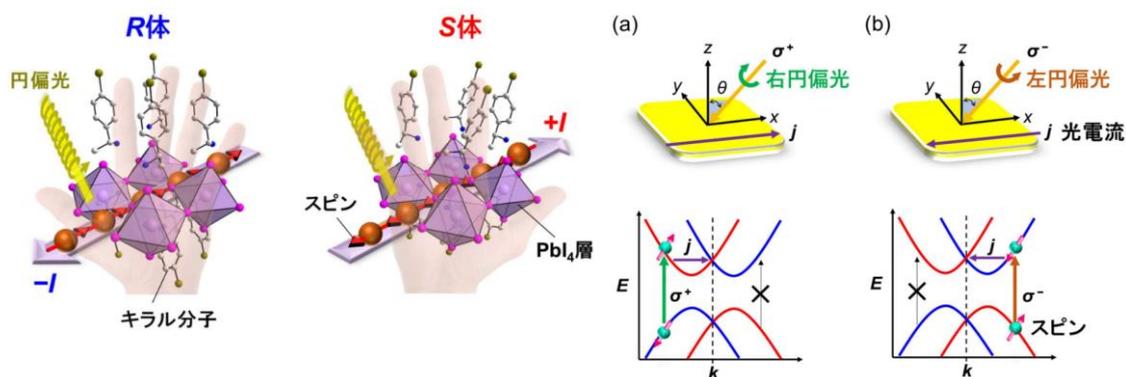


図 6.8 結晶のキラリティ制御で向きが反転する光電流の発見¹⁶

15. 那須研究者

トポロジカル準粒子の輸送特性や散乱、マヨラナ準粒子の時空間制御などメインの目標については十分に達成され、マヨラナ粒子の伝搬やバイゾンの局所制御などを示すことができた。さらに輸送現象や励起スペクトルに適用できる手法を開発した点も含め、高く評価される。トポロジカル材料探索など一部達成できなかった部分もあるが、全体としては目標をほぼ達成したといえる。なお、研究期間内に異動があったが、さきがけ研究費を有効に用いて計算機の移設をするなどして、研究を切れ目なく遂行することができた。

本研究成果は、この分野で目覚ましく進展している実験を念頭においた実モデルでの理論展開として、国際的にも注目されるタイムリーな理論提案となっている。また時空間シミュレーションは実験研究者にも分かりやすい。今後のマヨラナ粒子の物性検証や、将来的な量子計算の応用に向けて、こうした計算機を用いた検証は最も重要で強力な手段であり、今後の実験に向けて今回の成果は重要な意義を持つと考えられる。トポロジカル準粒子についてはまだ研究の余地が大きく、また領域内の共同研究や、実験手法の発展に伴う実験との協業については今後の発展が期待できる。

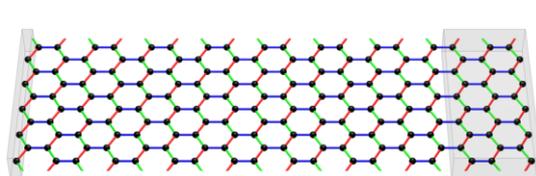


図 1. キタエフ模型が定義されたハニカム格子。黒い球の上に電子スピンの存在している。左端の灰色の領域にパルス磁場を印加し、右端の灰色の領域には弱い静磁場を印加している。

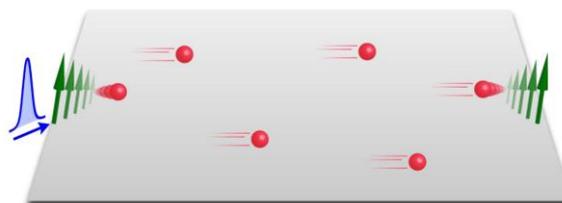


図 3. スピンの時間変動がマヨラナ粒子の動きに変換されて物質中を伝わり、右端でスピン動起が誘起される様子を示した模式図。

図 6.9 マヨラナ粒子が媒介するスピン輸送現象の発見¹⁷

¹⁶ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210324-2/index.html>

¹⁷ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200728/index.html>

16. 新居研究者

マイクロ波顕微鏡の開発と、それを用いた GHz 領域でのトポロジカル導波路での表面弾性波の観測や、THz での熱フォノンの角運動量の物理などに関して目標以上の成果が得られた。熱物性に関しては構想になかった困難さが見つかって進展させることができなかったものの、それを補う形でフォノンに関する研究、フォノン非相反現象や磁化制御で顕著な成果を挙げた。計画を柔軟に変更することで、成果の見込まれる部分に注力した対応は評価される。この成果によりスピン軌道相互作用、ラシュバ効果、磁化制御など、電子系での知見に対応する効果がフォノンにおいて実証されたことは意義が大きく、他の現象への展開が期待できる。

GHz 領域の音響導波路の研究はまだ始まったばかりで、これを人工ピラー構造のトポロジカルな性質を利用して実証した点には発展性が感じられる。また競合相手の少ないマイクロ波顕微鏡という実験手法を確立した点は高く評価でき、今後様々な方向性への応用が可能で、今後の研究展開でも強みになる。また音波の磁化制御なども今度の発展が期待できる。研究人口の少ないトポロジカルフォノンクスを開拓しつつある先駆的研究であり、トポロジカル音響導波路については材料的な探索も含めて今後の展開が期待できる。

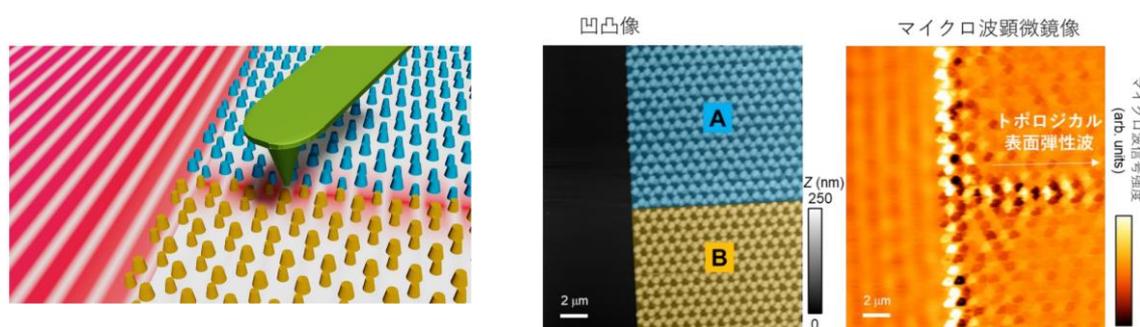


図 6.10 トポロジーの原理を応用した超低エネルギー損失の新型音響導波路¹⁸

17. 林研究者

従来研究の、次元と対称性によるトポロジーの理解について、形状による新たなトポロジーを普遍的・体系的に理解するという目標であり、それに関してある程度の成果は得られており、絶縁的なエッジに関する幾何的な理解に基づいた角状態の個数の公式などが得られた。検討の結果、研究期間内に達成できなかったものもあるが、今後の展開へのきっかけを作ることはできている。特に角状態の個数が 3 次元球面上の回転数と一致するという定理は当初想定していなかった展開であり、おそらく物性物理の分野でも知られていない成果であるので、他の場合への応用や物性物理の文脈への翻訳により新たな展開が期待できる。

トポロジーの根幹をなす分類学において、数理的な理論構築を進め解析的理解と幾何的理解の双方が大きく進展した。特に高次のトポロジカル絶縁体における現象の数学的な理解に大きく寄与した。数学的な分類や定義、解析が進んだ一方で、物性研究とのつながりの

¹⁸ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230104/index.html>

十分な解明にはまだ時間が必要であり、今後の物性研究者との連携にも期待したい。

18. 町田研究者

マヨラナゼロモードの検出という当初の目標は、様々な観測の結果、研究期間内には達成が難しいことが分かったが、そもそもこの目標自体が非常に難しいことなのでやむを得ないと判断される。一方でこの研究を通じて、マヨラナ粒子制御に向けた様々な知見が得られた点で、有意義な研究成果が得られたといえる。例えば単層の Pb、Tl でのリフシツ転移とそれに伴う超伝導対称性の変化などは今後研究が進展していく可能性がある興味深い結果である。また本研究成果で確立した、Yu-Shiba-Russibov 状態を利用した高精度スピン偏極分光などは今後の利用なども期待できる。コロナの影響で装置の導入の遅れなどがあったが、その中でも既存の装置で工夫した実験を実施できた点は評価される。

本研究において町田氏は、世界のトップレベルの STM 装置開発と、それを利用したトポロジカル超伝導状態の局所プローブ計測の両方において、顕著な成果を継続的に挙げている。今後、薄膜や人工構造なども対象にした、超高精度な STM 計測技術を持つ極めて貴重な研究者として、活躍が期待される。

世界のトップレベルの STM 装置開発と、それを利用したトポロジカル超伝導状態の局所プローブ計測の両方に置いて、顕著な成果を継続的にあげている点は高く評価される。

19. 森本研究者

当初の目標にあげていた非線形超高速現象や非平衡トポロジカル相などの目標はすべて予定どおり達成でき、当初計画よりも早いテンポで研究が進んだ点は高く評価される。特に、絶縁体でポラリトン、マグノンやフォノンなどを介してシフト電流が出るという成果は予想もしなかった興味深い結果である。バルク光起電力の研究も、さきがけ内での共同研究で生まれた、当初予想していなかった展開であり、個人だけでなく領域としての良い成果につながった。全体を通じ発表論文の質、数、分野での認知度など申し分なく、さきがけ領域内の議論でも存在感を発揮している。実験とタイムリーに理論研究を展開していた点も非常に良い。

シフト電流を代表とするトポロジー現象の非線形機能は、まだ多様な研究展開の方向性があり、学理構築の面でも、また太陽電池への応用としても今後ますます重要な分野となると期待される。実験研究者との共同研究の範囲も広がり、今後、さらに飛躍が期待される。

20. 横田研究者

トポロジカル面欠陥等の可視化と制御という目標について、計画していた系のうち一部について反強誘電体の反位相境界可視化などの成果が出ている。やむを得ない装置のトラブル等で電気双極子スキルミオンの観測などには至らなかったものの、期間内で最大限に研究成果を出す努力をして顕著な成果を出したことが評価できる。開発した観測機器は

様々な場面での活用ができ、今後の観測に向けての道筋をつけることができたといえる。また本研究成果の一つであるフェロアキシシャル物質の分域観測については、当初難しいと考えられていたが、第2高調波発生(SHG)に円偏光を使うという簡便な方法で可視化しており、これは当初想定していなかった素晴らしい成果である。

誘電体を用いたフェロエレクトロニクスは常温でも機能するため応用可能性があるが、現状では研究人口は少なく、研究はあまり盛んではない。しかしトポロジカル分域やフェロアキシシャル物質などの新現象発見に伴い重要性が再認識されつつあり、本研究のような可視化の研究は今後重要性を増してくると考えられる。特に本研究の延長で電気双極子スキルミオンの観察などにつながれば、フェロエレクトロニクスの大きな発展につながると期待できる。

21. Anh 研究者

当初予定していた材料系はほぼ作製して、想定通りの現象を観察することができた。当初目標のうちトポロジカル超伝導体の実現とマヨラナフェルミオンの創生と制御は期間内に達成できなかったが、これはそもそも難しい課題であり、今後の展開に期待したい。一方で、InAs/(Ga, Fe)Sb での新規量子現象、特に奇関数磁気抵抗や分数量子ホール効果などは当初予想していなかった興味深い現象であり、これらの現象の解明に関する今後の研究の発展が期待できる。Fe 系の強磁性半導体での類似の実験はあまり他グループで行われておらず、本研究により Fe 系強磁性半導体でのスピントロニクス応用に新境地を拓くことができた。これらも含めて実験結果がかなり豊富に出ていて、活発に活動していると判断される。

またレーザー描画による α -Sn から β -Sn への転移も、当初計画になかったものであるが、デバイス作成の点でユニークかつ有用で興味深い。また α -Sn の磁気センサー応用可能性も期待できる。全体として、得意技である高品質薄膜成長を活かして、上手く研究を進めていると評価できる。

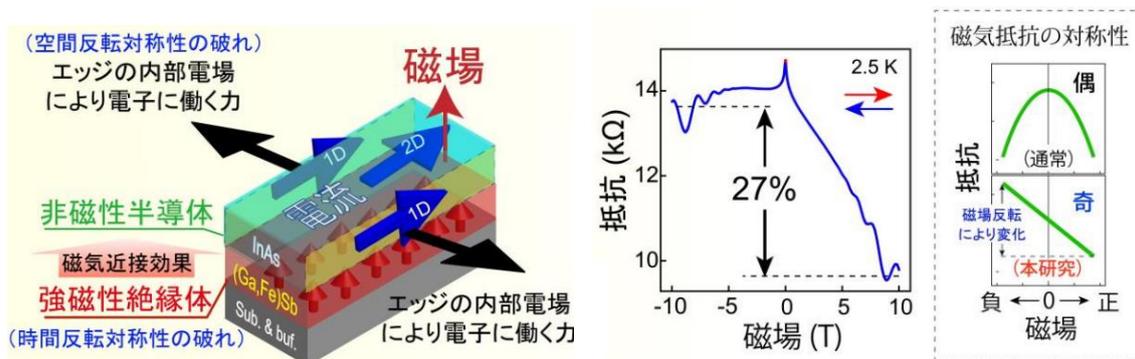


図 6.11 非磁性/強磁性半導体ヘテロ接合での磁場反転に伴い符号変化する巨大磁気抵抗効果の発見¹⁹

¹⁹ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20221109/index.html>

【3期生】

22. 翁研究者

本研究の目標は、新しい計測技術である走査ノイズ顕微鏡 (Scanning Noise Microscope: SNoiM) を開発し、トポロジカル材料における電子散乱・散逸過程を実空間で直接可視化して解明することである。当初の目標である低温の走査ノイズ顕微鏡 STM-SNoiM の開発については達成されており、今後の発展が期待できる。STM-SNoiM により、電子温度を低温ナノスケールで測定できるようになり、必要なテラヘルツ領域の光検出器を作成し十分に機能している。さらにトポロジカル物質における散逸現象の測定をいくつか行い、室温と低温との現象の違いを見出した点は評価できる。4.2K での STM-SNoiM までは行かなかったが、本成果の低温領域でも充分新しい物理現象にアプローチできる。時間的にトポロジカル物質のエネルギー散逸解明まで十分に行かなかったものの、観測技術としては確立することができたため、今後トポロジカル物質エネルギー散逸解明への道筋はつけられており、今後の展開が期待できる。また低温のナノスケール温度測定技術としても有用な結果である。またナノスケールの 2 次高調波発生 (SHG) の検出など、当初予想していなかった成果も出ている。

装置開発に関して複数の特許出願を行っている点は評価できる。特に、超高感度テラヘルツ検出技術 (特許出願済) は様々な応用が見込めそうであり、応用面で期待が大きい。

23. 鎌田研究者

スピン・電荷ダイナミクスの測定・制御として、電子と正孔の共存する 2 次元トポロジカル絶縁体でのヘリカルエッジ状態の伝搬 (量子スピンホール効果) の観測のため、プラズモン等の励起の時間分解測定を行うことで、素励起の伝播特性を実験で解明した。2 次元トポロジカル絶縁体の時間分解電気伝導測定では、ヘリカルエッジ状態の電荷ダイナミクスの測定を精度よく行うことができた。この測定結果は非常に高精度で美しいもので、ゲート電圧や磁場の変化に対して電子やホールチャンネル数がはっきり同定でき、理論の裏付けとなる非常に良い測定結果を得ている。目標を十分に達成したと認められる。

測定手法として、オンチップ時間分解測定手法を確立したことも高く評価できる。世界最先端のオンチップ時間分解測定手法はさまざまな準粒子伝導の測定に応用でき、トポロジカル物質を含む種々の系における準粒子励起ダイナミクスの解明が進むことが期待できる。その一例として、グラフェンのプラズモンの測定を既に行っており、それを現在マグノンに対して測定を試みているところである。グラフェンにおいては、プラズモン励起の観測に成功していて、さらに当初計画になかった研究内容としてマグノン励起の時間分解測定にも着手できたが、道半ばなので、今後の成果に期待したい。

24. 北村研究者

歪フォトニック結晶の学理構築に向けて、フォトニック結晶に空間的に変化する歪を導入した新しい構造について、シミュレーションと実験とを併用して、光が曲がるメカニズム

を解明している。重力とのアナロジーなども興味深い結果であるといえる。歪フォトニック結晶において、孔の位置や形状を系統的に変えた場合を精密に測定・計算しており、光の伝搬の精密制御に関して重要な知見を得ている。またテラヘルツ波での歪フォトニック結晶の実証に関しては、シミュレーションと実験との精密な比較から、技術的な課題がどこにあるかをきちんと同定しており、今後の発展に対して重要な示唆となっている。特にすべり歪の場合に、主要な単位格子の位置が元と変化していくことで光の軌道に大きなずれが期待できることを提案できた。この自由度を活用すれば、今後光の経路を操作する手段を広げられる可能性がある。

また、さきがけ最終年度の途中で異動・昇進となり、研究をまとめる上での影響は大きいと思われるが、さきがけの予算等により新しい研究環境の整備を進めており、切れ目ない推進に尽力していることも評価できる。

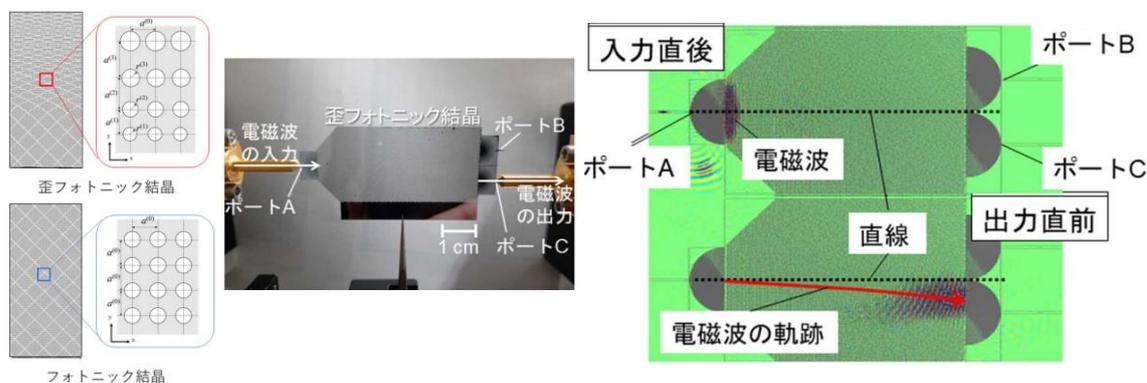


図 6.12 歪フォトニック結晶における電磁波の伝搬²⁰

25. 草本研究者

高分子のハニカム格子・カゴメ格子を持つ物質の創製とその性質の研究を目指し、磁場に対して様々な応答をする高分子のハニカム格子・カゴメ格子を持つ物質を創製し、それらの物性を細かく調べており、多くの成果を挙げている。その試みの中で、格子ではないが磁場により変化する発光現象をもつ高分子作成に大きな成果を挙げ、計画を着実に遂行できたと考えられる。磁気光相関機能物質については当初の予定になかったが、MagLum (磁場で物質の発光色が変わる現象) を示す初のラジカル性固体を発見し、さらにその関連物質を多数合成し、それらの系統的測定により、MagLum の基礎的な性質を解明し、単分子 MagLum を初めて観測するなど目覚ましい成果を挙げた。分子磁性と分子発光の分野は元来別々に研究されてきたが、本研究によりそれらの交差領域が開拓されて、スピン相関光機能の理解や制御につながる波及効果があり得る。

また、研究期間中に異動・昇進したが、さきがけの予算などを活用してスムーズに研究を継続できる環境を整えており、研究に大きな影響を与えず推進したことも評価できる。

2022年10月には、Journal of Materials Chemistry C (Royal Society of Chemistry)

²⁰ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230929-2/index.html>

のアドバイザーボードに加わるなど、さきがけ研究成果を活かし、錯体分子化学の領域で研究者としての飛躍につながった。

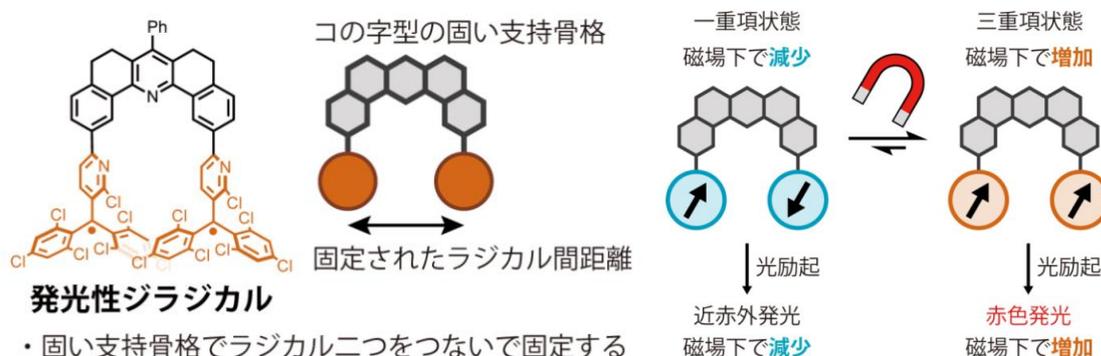


図 6.13 マグネトルミネッセンス発現手法と合成したジラジカルの構造²¹

26. 張研究者

バルク光起電力の測定の装置を立ち上げて、極性をもつ 2 次元物質のファンデルワールス積層でのバルク光起電力の測定を行った。コロナ等の要因で測定装置の完成が遅れたり、物質によっては劈開が難しかったりしたことで当初目標通り測定できないものもあったが、全体としては光起電力の測定に成功し、その物理を議論することができ、さらに今後への新しい研究の種をいろいろ見出すことができている。その一例として Janus TMD (空間反転対称性の破れた遷移金属ダイカルコゲナイド) や WTe_2 のツイスト積層など、光起電力の物理に関して新しい物質の候補を見出している。またラマン分光や、有機 2 次元物質を用いた積層作成など、今後の研究の課題となる種を見出すことができた。極性 2 次元物質の積層は、このバルク光起電力効果実現の重要な候補として注目され、今後の活躍が期待される。

さきがけの理念のもとで研究ネットワークを拡げ、また、実験手法を多様化したことは高く評価でき、さきがけとして十分な成果である。

27. 中田研究者

金属ナノ構造、表面プラズモン、テラヘルツ波などを組み合わせた独自性の高い研究を推進し、テラヘルツ領域のレーザーパターンの照射によるトポロジカル状態の実証を試み、表面プラズモンの理論と (光の吸収の観測、抵抗値の観測による) 観測に成果を挙げた。トポロジーに基づくプラズモン系の性質の理論的解明を進めており、新しい方向性が見受けられ、表面プラズモンのバルク・エッジ対応に関する知見は、トポロジーの概念をより広く適用できる可能性を示唆している。表面プラズモンのゼロモードに関する理論研究は当初は想定していなかった研究成果である。

光照射で可変なメタマテリアルパターンを作ることはまだ道半ばであるが、その基盤と

²¹ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230614-3/index.html>

なる光による基材の導電率変調までは成功している。ナノ構造による光応答の測定技術を確立し、抵抗低下を実証した。テラヘルツ系の構築もできたので、両者を組み合わせた実験成果を今後期待したい。

本研究成果の社会への還元に関しては、光照射による電気抵抗変化はかなり大きいので、パターン生成による書き換え可能なメタ表面が実現できれば、実験室レベルでは意味のあるデバイスとなり得る。

28. 野本研究者

短周期スキルミオン物質の探索と理解、磁性体の磁気構造予測の計算ツール開発に大きな進展、ホール効果や磁性体のデータベース化についても進展が見られた。さらにそれを活用した材料探索を開始し一定の成果を得ている。また、磁気構造／ドメイン制御によって磁化反転制御ができることを計算で実証した。磁性体データベースの構築、クラスター多極子を用いた磁気構造の記述や磁気構造の精密な予測は、当初予測していなかったが重要な成果である。また反強磁性 TMR の現象論も応用上重要である。

こうした一連の成果により、磁性体の磁気構造予測を精密に行うことができるようになり、スキルミオン物質やノンコリア反強磁性体の磁性の理解の進展に寄与する研究成果を挙げている。また Mn_3Sn のスピン歳差に関する研究や磁化スイッチに関する研究などは、反強磁性体を用いたスピントロニクスへの応用上大いに注目される。

様々な計算手法の開発も含め、物性探索や材料探索、実験結果の解釈など、質・量ともに最先端で第一原理の物性研究を牽引している気鋭の 1 人だと考えられる。

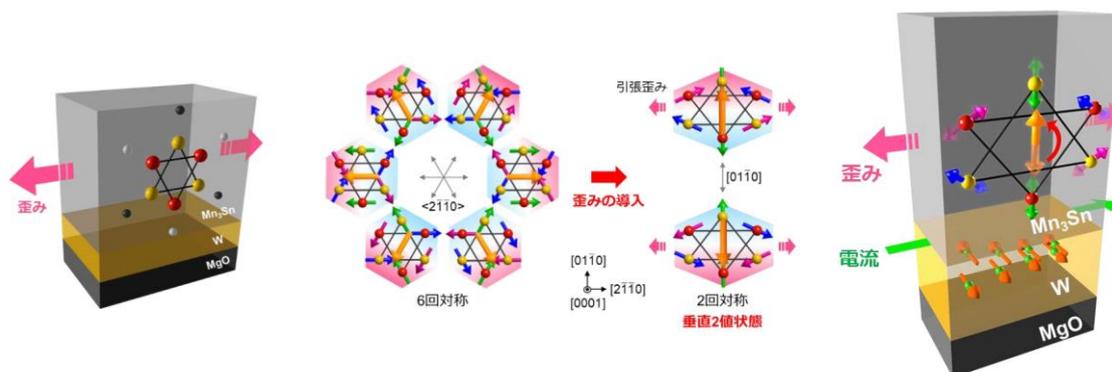


図 6.14 反強磁性体の垂直 2 値状態を電流で制御する技術を開発²²

29. 速水研究者

磁気スキルミオンの安定化機構や、磁気スキルミオンを示す物質に関する計算など実験に直結する重要な理論の成果をあげた。また模型の構築と数値シミュレーションの組み合わせにより、トポロジカル磁性物質を系統的に探索する道を拓いた。ここでは複数の螺旋構造の重ね合わせというアイデアを産みだしたことが研究のキーとなっている。系統的・効率

²² <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220721/index.html>

的な探索理論を構築したという点で高く評価される。トポロジカル磁性体については、対称性とモデル計算を用いて網羅的な研究を行っており、これはスキルミオンなどトポロジカル磁性体の物質探索に大きな進展を与えるものである。

中でもトポロジカル磁性体の新しい伝導・交差応答現象の予言や、さきがけ領域内での様々な共同研究については、今後のさらなる展開が期待できる。実験グループとの協業、理論研究者との共同研究ともに非常に有効に機能し、当初の目的、想定されていなかった展開ともに十分以上の成果を挙げており、特に発表論文の数やその中の筆頭論文の数は驚異的なものである。2023年11月には、「関連電子系に対する多極子表現論の構築と交差相関応答への適用」に対して凝縮系科学賞（注）を受賞するなど、さきがけでの研究成果を活かして、研究者としての飛躍につながっている。

（注）凝縮系科学に従事する優れた若手研究者を奨励することを願い、青山学院大学（現岡山大学特任教授）の秋光純教授と東京理科大学の福山秀敏教授が私費を投じて2006年に創設した賞。

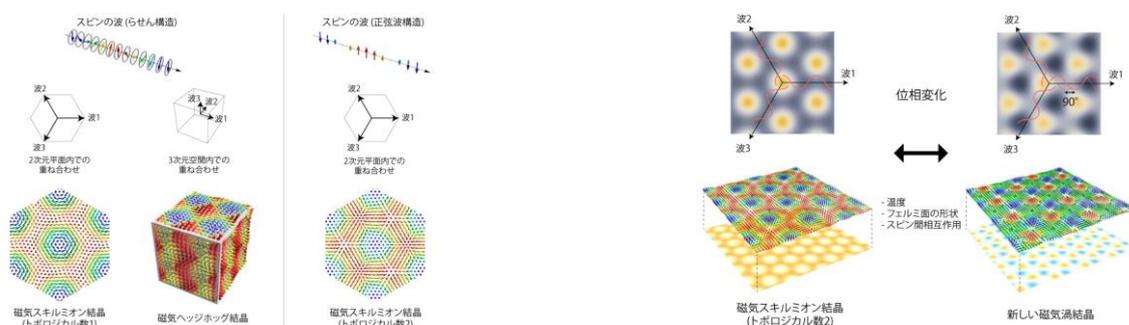


図 6.15 スピンの波の位相変化による新しい磁気渦結晶と伝導特性の開拓²³

30. 広部研究者

キラルな有機超伝導体の端に現れる反平行スピン対の存在を示すなど、キラル分子性材料によるスピン整流効果である CISS (chiral-induced spin selectivity) 効果の理解に関して大きな成果を挙げた。この CISS 機構仮説の検証は、超伝導体の CISS の基礎となる萌芽的な研究成果であるが、当初は想定していなかったもので、Nature 誌掲載に結び付けることで研究者としての大きな経験値になったものと思われる。

また独自手法の開発による Te へのドーピング技術や Te の巨大電流整流、液浸による電子ドープなど、当初の計画にはないがインパクトの大きな研究成果を挙げており高く評価できる。無機と有機にまたがってダイナミックに研究を展開していて、柔軟に研究を進め、対象とする材料の範囲を大きく広げ、そこで大きな成果を挙げていることは高く評価され、今後の飛躍が期待される。また一部の成果は特許申請につながるなど、本人にとって新しい知見や展開が得られていて、研究者としての今後の発展にプラスになっていると思われる。

²³ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211201/index.html>

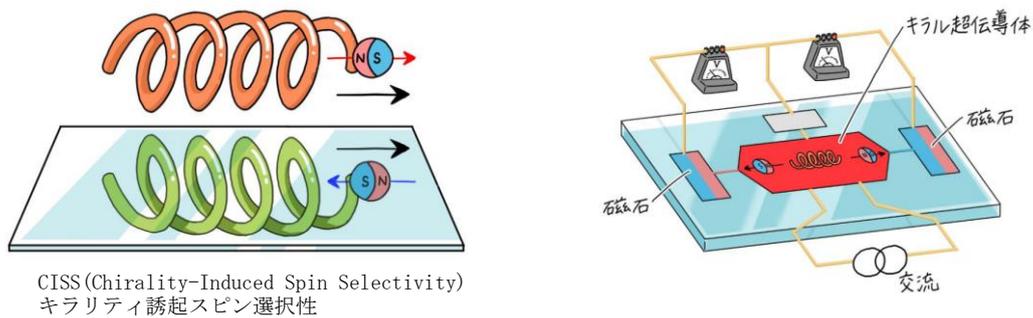


図 6.16 キラル超伝導体への交流印加によるキラリティを持つ電子スピン誘起²⁴

31. 松永研究者

3次元トポロジカル半金属に現れる線形エネルギー分散やベリー曲率に由来した特異な非線形応答及び異常応答を解明し、テラヘルツ電場での制御を実現し、室温で動作する高速エレクトロニクス・スピントロニクス素子の開発を目標としている。目標とした中ではディラック半金属での THz 誘導放出や反強磁性体の THz スピン制御など、当初の目標は充分達成されたと判断される。

また当初の目標以外に多くの十分な成果を挙げている。テラヘルツ光技術を駆使して偏光回転角の精密測定を実現し、ホール伝導度の観測などに成果を挙げている。例えば異常ホール効果の超高速ダイナミクス測定は、異常ホール効果を従来よりも3桁小さい時間スケールで測定するなどの点で重要な結果である。また高密度円偏光光励起による異常ホール効果の観測では、理論予測を超える実験結果を得たことで、トポロジカル物質に対する円偏光照射や、ディラック半金属のフロッケエンジニアリングに関する理解が進んだ。また、3回・5回回転対称なパルス光生成にも成功し、インパクトのある研究成果を生み出した。

様々な時間分解測定の結果はそれぞれにインパクトがある。例えばスピンホール効果の THz 周波数分解測定などはこの現象の基礎となる重要なデータであるが、今までに測定例はなかった。このような世界最高水準の測定により新しい物性が明らかにできる点は、大きな波及効果を生み出し得るもので高く評価できる。

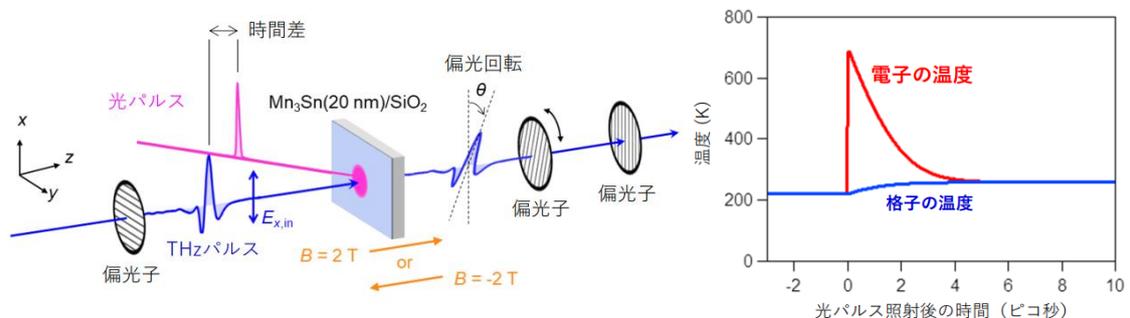


図 6.17 異常ホール効果・超高速変化の超高速観測 (10 兆分の 1 秒)²⁵

²⁴ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230119/index.html>

²⁵ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20230322-2/index.html>

32. 山本研究者

表面音波の応用研究については、実験研究者と協力してかなりの成果をあげていて、主要な学術誌に多数の論文を発表している。特に表面音波と磁気の結合についての一連の研究成果はスピントロニクス応用への可能性がある。これらの共同研究における理論構築では主要な役割を果たしており高く評価できる。一方、表面音波やプラズモンなどのトポロジーの特徴づけとアノマリーの関係については試行錯誤の結果、coarse geometry (粗幾何学) という枠組みが有効であることを見出しており、今後それに関して研究を進展させていくことが期待される。

研究期間中に粘り強く数学に取り組み、深い数学の知見に基づき、物理現象へのアプローチを行う準備を進めたことが評価できる。この研究が結実するにはもう少し研究の蓄積が必要であろうが、さきがけ研究を通じて海外研究者との活発な交流を行うことができおり、これらの交流や試行錯誤により得た知見が、今後の研究の進展につながる大きな財産になったと思われる。

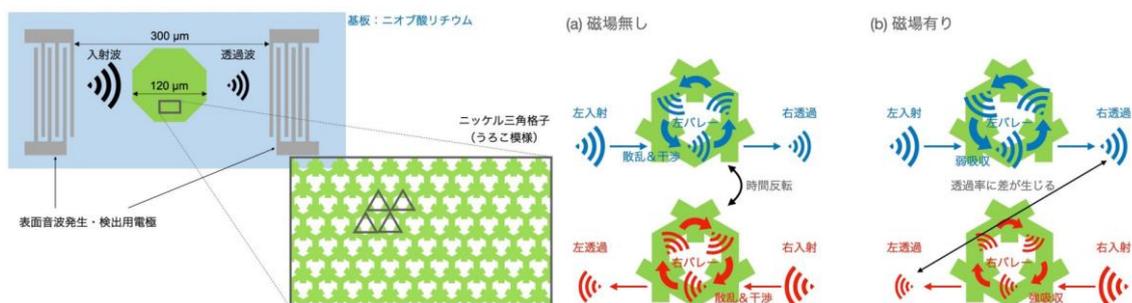


図 6.18 磁場による表面音波のバレー回転状態の制御²⁶

²⁶ <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20231026/index.html>

(2) 論文、学会発表、知財の状況

本研究領域全体の業績（論文・学会発表・知財等）は以下の通りである。

表 6.1 研究領域全体の業績

採択年度	研究者	原著論文		その他の著作物	招待講演		口頭発表		ポスター/デモ		特許出願	
		国際	国内		国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内
2018年度 (1期生)	青木 大輔	10	0	4	6	10	7	20	5	13	0	1
	打田 正輝	14	0	1	5	7	8	8	0	0	0	0
	葛西 伸哉	12	0	0	1	3	0	1	0	0	0	0
	塩崎 謙	13	0	0	7	1	0	4	0	0	0	0
	関 真一郎	24	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
	竹内 一将	0	0	1	3	2	1	3	0	0	0	0
	中山 耕輔	12	0	0	4	2	1	11	0	0	0	0
	松尾 貞茂	8	0	0	2	7	5	15	1	1	0	0
	森竹 勇斗	2	0	0	5	1	2	18	2	1	0	0
渡邊 悠樹	16	0	7	7	0	1	3	0	0	0	0	
2019年度 (2期生)	井手上敏也	10	0	5	11	11	3	3	0	0	0	0
	小澤 知己	16	0	1	11	7	1	4	1	0	0	0
	小門 憲太	13	0	2	1	3	0	27	2	14	0	0
	谷口 耕治	4	0	1	2	6	0	5	0	0	0	0
	那須 譲治	13	0	2	7	1	0	0	0	0	0	0
	新居 陽一	9	0	0	5	4	0	2	0	1	0	0
	林 晋	4	0	0	2	2	1	7	1	0	0	0
	町田 理	2	0	0	2	2	1	3	2	0	0	0
	森本 高裕	32	0	0	7	3	0	3	0	0	0	0
	横田 紘子	10	0	0	4	1	1	9	0	0	0	0
Le Duc Anh	22	0	1	5	2	34	8	2	0	0	1	
2020年度 (3期生)	翁 銭春	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
	鎌田 大	2	0	1	0	0	0	2	3	0	0	0
	北村 恭子	1	0	0	3	3	1	20	0	2	0	0
	草本 哲郎	5	1	1	6	10	0	0	0	0	0	0
	張 奕勁	8	0	2	2	3	1	13	0	2	0	0
	中田 陽介	1	0	1	0	1	3	7	0	0	0	0
	野本 拓也	14	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
	速水 賢	57	7	0	5	2	5	29	13	0	0	0
	広部 大地	5	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
	松永 隆佑	6	0	4	9	7	1	16	4	5	0	0
山本 慧	4	0	0	1	0	2	2	0	0	0	0	
研究領域全体	350	8	34	132	102	81	245	38	39	0	3	

- ・ 研究課題事後評価時点
- ・ 論文数の研究領域合計は、研究課題間の共著論文があるために各年度の単純合計とは一致しない
- ・ 特許出願数は研究者からの報告によるもので、公開前の出願も含まれる

原著論文に着目した場合、1期生では、関研究者、2期生では、森本研究者と Anh (アイン) 研究者、3期生では、速水研究者の論文数が極めて多い。特に、速水研究者は 57 報と、さきがけ研究者全体を通して突出した論文数である。本研究領域全体としては、350 報の原著論文の発表が行われた。野本研究者、広部研究者による Nature 誌への投稿、井手上研究者・森本研究者による Science 誌への投稿、Nature Communications 誌への投稿 11 報など著名学術誌への論文掲載の多さも注目される。

【代表的研究事例】

井手上研究者 (2 期生)、森本研究者 (2 期生)

T. Akamatsu, T. Ideue, L. Zhou, Y. Dong, S. Kitamura, M. Yoshii, D. Yang, M. Onga, Y. Nakagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Laurienzo, J. Huang, Z. Ye, T. Morimoto, H. Yuan, Y. Iwasa, “A van der Waals interface that creates in-plane polarization and a spontaneous photovoltaic effect”, *Science* 372, 68 (2021).

研究者らは WSe₂ および黒リンの原子層膜を重ねたファンデルワールス系を作製することで、バルク光起電力効果が発現することを実験で検証し、理論的にその測定結果を説明した。この積層では 2 つの原子層物質は格子整合しておらず結晶対称性も全く異なるが、それに関わらずそれらの物質の対称性の協奏によって空間反転対称性が破れて、バルク光起電力が出ることを示したのは非自明な結果である。またその結果の解釈を与えた理論も、通常の結晶でのバンド理論から外れた新しい理論的枠組みに基づく新規なものである。こうした顕著な研究結果は、本研究領域の実験研究者の井手上研究者、理論研究者の森本研究者らが、理論と実験との垣根を越えて緊密に連携した成果である。

関研究者 (1 期生)

S. Seki, M. Suzuki, M. Ishibashi, R. Takagi, N. D. Khanh, Y. Shiota, K. Shibata, W. Koshibae, Y. Tokura, and T. Ono, “Direct visualization of the three-dimensional shape of skyrmion strings in a noncentrosymmetric magnet”, *Nat. Mater.* 21, 181 (2022).

関研究者らは、磁性体中の電子スピンの作るトポロジカルな構造である「スキルミオンひも」の 3 次元形状可視化に世界で初めて成功した。この実験的な観測は非常に困難と考えられてきたが、本研究では X 線トモグラフィーの原理を応用し、さまざまな角度から観測した 2 次元透過像の合成により、数百ナノメートルの直径のスキルミオンひもの 3 次元形状を直接観察に成功した。この美しい研究成果は、特異な磁性体の物性の解明の上で重要な成果であるとともに、応用の可能性も期待される。

青木研究者（1期生）

T. Abe, R. Takashima, T. Kamiya, C. P. Foong, K. Numata, D. Aoki, and H. Otsuka, “Plastics to fertilizers: chemical recycling of a bio-based polycarbonate as a fertilizer source”, *Green Chem.* 23, 9030 (2021).

青木研究者らは、植物を原料としたプラスチックをアンモニア水で分解することで、尿素へと変換することに成功した。カーボネート結合からなるプラスチック（ポリカーボネート）をアンモニアで分解する過程で生成する尿素が、実際に植物の成長促進につながることを証明することで、プラスチックを肥料に変換するリサイクルシステムを実証した。本成果は「分解過程での生成化合物を植物の成長を促進する肥料として活用する」という点で新しいものであり、また簡便なプロセスで実現できるため、普及すれば産業界への波及効果も大きい。こうした成果は、青木研究者のさきがけ研究での分子のトポロジー変換技術の研究において派生的に生まれた顕著な成果であり、まさにさきがけ研究の中で、新しく挑戦的な課題に取り組んできたから生まれたものである。

渡邊研究者（1期生）

F. Tang, S. Ono, X. Wan, and Haruki Watanabe, “High-Throughput Investigations of Topological and Nodal Superconductors”, *Phys. Rev. Lett.* 129, 027001 (2022).

トポロジカル超伝導体は、盛んに研究されているが、その理論的な探索手法は確立されておらず、実験検証も困難なので、具体的な物質例は極めて少なかった。渡邊研究者らは理論の立場からその探索方法を初めて確立し、2万7千種以上の物質に対して網羅的な計算を行い、各物質の超伝導相のトポロジカルな性質をまとめた新データベースを構築した (<https://tnsc.nju.edu.cn>)。また簡便に超伝導相のトポロジカルな性質を判定できる新サービスの提供をインターネットで公開した (<http://toposupercon.t.u-tokyo.ac.jp/tms>)。これらはトポロジカル超伝導体の探索を格段に進歩させる大きな一歩であるとともに、こうしたサービスの公開によって世界中の研究者に役立つという意味でも評価される。

那須研究者（2期生）

T. Minakawa, Y. Murakami, A. Koga, and J. Nasu, “Majorana-Mediated Spin Transport in Kitaev Quantum Spin Liquids”, *Phys. Rev. Lett.* 125, 047204 (2020).

量子スピン液体という特異な物質の状態では、マヨラナ粒子という特異な粒子が現れることが実験・理論において盛んに研究されている。このマヨラナ粒子は通常の粒子にはない特異な性質を示すことから、スピントロニクスや量子コンピューティングデバイスへの応用に期待されているが、それがどのように物質中を輸送されるかはよくわかっていなかった。那須研究者らは実時間数値シミュレーションを行い、マヨラナ粒子が局所磁化の変化を伴わずに、スピン輸送を媒介することを発見した。系の一方の端にパルス磁場を導入すると、

物質内部の局所磁化はゼロを保ったままでマヨラナ粒子が伝搬し、時間経過後に他方の端のスピンの向きが逆転し始めるということを見出した。これは従来のスピン輸送と全く異なる振る舞いであり、マヨラナ粒子の物性検証に大きな進歩を与えた興味深い成果であるといえる。

新居研究者（2期生）

Y. Nii and Y. Onose, “Imaging an Acoustic Topological Edge Mode on a Patterned Substrate with Microwave Impedance Microscopy”, *Phys. Rev. Applied* 19, 014001 (2023).

物質の表面を伝わる音響波である表面弾性波とトポロジーの概念を組み合わせ、物質の表面に特殊な音波の導波路を作製し、GHz帯域において導波路として機能することを確認した。この導波路は、トポロジカル導波路、すなわちトポロジカルな性質によって音波の伝搬を制御しているものである。これは理論研究が先行しているトポロジカル音波の分野について実験的に裏付けを与える重要な結果である。さらに、GHz帯でのマイクロ波インピーダンス顕微鏡での測定を実現しており、測定手法の発展の意味でも意義が大きい。このトポロジカル音響導波路は比較的簡単な手法で作成でき、構造も単純なため、携帯電話など身近な応用例も多い表面弾性波に関する今後の応用面での発展も期待できる。

野本研究者（3期生）

T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, M. Shiga, S. Sakamoto, X. Chen, D. Nishio-Hamane, R. Arita, Y. Otani, S. Miwa, S. Nakatsuji, *Nature*, 607, 474 (2022).

反強磁性体は、強磁性体に比べるとスピンの応答速度が速く、外部との磁氣的相互作用が小さいため、磁気抵抗メモリの格段の性能向上につながると期待されているが、一方で情報の書き込み・読み出しが難しいという問題がある。本研究成果ではカイラル反強磁性体 Mn_3Sn において、従来の強磁性体と同様の垂直2値状態を実現し、この垂直2値状態の電氣的制御を実証した。野本研究者は主に数値計算を主体とした理論面でこの効果の解釈を与えることで、この実証に関する理論的なサポートを与えた重要な寄与をしている。本発見は反強磁性体を用いたメモリの実現への大きな一歩となる。

広部研究者（3期生）

R. Nakajima, D. Hirobe, G. Kawaguchi, Y. Nabei, T. Sato, T. Narushima, H. Okamoto, H. M. Yamamoto, “Giant spin polarization and a pair of antiparallel spins in a chiral superconductor”, *Nature* 613, 479 (2023).

キラリな構造を持つ物質や分子において、キラリティ誘起スピン選択性 (CISS) と呼ばれる特異な性質など、物質のキラリティに起因した磁氣的な性質には未知な部分が多く残っていて、盛んに研究されている。本成果では有機キラリ超伝導体中に発生したスピン蓄積の

観測に成功した。すなわち、結晶両端には互いに逆向きのスピン偏極があることを示す実験結果を初めて得た。これは有機物質合成の高い技術と、スピントロニクスにかかる高度な測定技術の融合により実現したものであって、キラルな系での物性に関する学術的意義の大きな研究成果である。

松永研究者（3期生）

T. Matsuda, T. Higo, T. Koretsune, N. Kanda, Y. Hirai, H. Peng, T. Matsuo, N. Yoshikawa, R. Shimano, S. Nakatsuji, and R. Matsunaga, “Ultrafast Dynamics of Intrinsic Anomalous Hall Effect in the Topological Antiferromagnet Mn_3Sn ”, *Phys. Rev. Lett.* 130, 126302 (2023)

強磁性体に電場を印加するとそれに垂直に電流が現れるという異常ホール効果は、磁性体の性質を調べる上で基本的な性質である。そこで松永研究者は Mn_3Sn における異常ホール効果の超高速変化を、テラヘルツパルスを用いて測定した。松永らは独自のテラヘルツパルスに関する高い技術を駆使して、異常ホール効果の超高速測定を行い、その物質の異常ホール効果のミクロなメカニズムについて、さまざまな知見を得たものである。これは先行研究を3桁上回る超高速時間分解測定技術で初めて可能になったものであり、高度なテラヘルツ帯実験技術の蓄積によるものである。

(3) 知財状況

知財状況の詳細については下記3件の出願が行われた。

表 6.2 特許出願状況 (2023 年 12 月 1 日現在)

青木 大輔 (1 期生)	
1	<p>出願番号：特願 2022-134403 発明の名称：尿素の製造方法、肥料組成物の製造方法、再生カーボネート樹脂の製造方法及びリサイクル方法 発明者：青木大輔、大塚英幸、阿部拓海 出願人：国立研究開発法人科学技術振興機構</p> <p>概要：ポリカーボネート樹脂のカーボネート結合を、アンモニアと反応させることにより、尿素と原料モノマー（ビスフェノールA、イソソルビド等）に分解する。尿素を含む成分はそのまま肥料として利用可能であり、ポリカ原料は、再度原料としてリサイクル使用可能。ポリカーボネート樹脂のリサイクルシステムの構築や尿素/肥料原料としての廃ポリカーボネート樹脂利用が可能となる。</p>
Le Duc Anh (レデウックアイン) (2 期生)	
1	<p>出願番号：特願 2023-001989 出願日：2023/01/10 発明の名称：回路素子およびその製造方法 発明者：レデウックアイン、石原奎太、田中雅明 出願人：東京大学</p> <p>概要：本発明ではすべてスズ (Sn) でできる超伝導/トポロジカル半金属のプレーナ型ヘテロ接合の新しい作製技術を実証する。トポロジカル半金属 Sn (α-Sn) の膜面内に集束イオンビーム描画法を用いて部分的に加熱し超伝導体である Sn (β-Sn) に相転移を起こすことによって、Sn 膜面内に nm 寸法まで超伝導/トポロジカル半金属のヘテロ構造を自由自在に形成でき、大面積化や高集積化できる量子情報デバイスの実現に適した方法である。</p>
翁 銭春 (3 期生)	
1	<p>出願番号：特願 2022-35889 出願日：2022/03/09 公開番号：特開 2023-131259 公開日：2023/09/22 発明の名称：光検出器及び光検出方法 発明者：翁銭春、小宮山進、今田裕、金有洙 出願人：国立研究開発法人理化学研究所</p> <p>概要：高い信号対雑音比を有する光検出器を提供するために、絶縁層を挟んでそれぞれ2次元方向に延在する第1電子層及び第2電子層を含む基板と、前記基板の前記第1電子層側の表面上に前記2次元方向のうちの第1方向に離間して配設され、光を受光して前記基板の厚さ方向に平行な振動電場を誘導する一对のウィングゲートと、前記基板上の、前記一对のウィングゲートの前記第1方向に交差する前記2次元方向のうちの第2方向の一侧及び他側に配置される一对のアイソレーションゲートと、前記一对のウィングゲートの少なくとも一方に印加する電位を制御するとともに前記一对のアイソレーションゲートに印加する電位を制御する制御部と、前記第2電子層に流れる電流を検出する検出部を備える構造を考案した。</p>

特に、青木研究者等により出願された特許は、従来のポリマーやプラスチックの分解／リサイクル方法と比較して、エネルギー、環境負荷、コストの各面で有利なプロセスであり、ポリカーボネート樹脂のリサイクルシステムの構築や廃ポリカーボネート樹脂利用による肥料に用いる新たな窒素源の創出という点で、大きな社会的波及効果を持つ可能性を示している。青木研究者は、CREST「分解・劣化・安定化の精密材料科学」領域において、研究課題「カーボネート結合に基づく高分子材料循環システムの構築」の研究代表者を務めており、上記研究成果の実用化に向けた研究を推進している。

さきがけ研究者の研究成果の特許化を推進する上で、JSTの知的財産マネジメント推進部とは緊密な連携をとった。領域会議には、同部の知財サポーターに傍聴のため参加してもらい、特許となる可能性がある研究成果については、研究者と直接やりとりを行ってもらった。上記特許化された以外でも、小門研究者、草本研究者、北村研究者、広部研究者とは知財に関する検討が行われ、広部研究者に関しては、特許化に向けた準備が進んでいる。

7. 総合所見

平成 30 年度（2018 年度）に発足した本研究領域は、文部科学省戦略的基礎研究の戦略目標「トポロジカル材料科学の構築による新規機能性材料及び革新的デバイスの創出」に基づいている。こうした目標が設定された背景には、21 世紀初頭の、物性物理学分野でのトポロジカル絶縁体の発見がある。その後、電子系においてトポロジカル物質が多数存在することが判明し、その特異な物性の発見が相次ぐとともに、その研究分野の裾野が広がり、今ではフォトンクス、スピントロニクスを始め多様な分野に横断的に広がっている。さらに実空間でのトポロジーにおける位相欠陥の概念も、古くは超伝導・超流動から、最近ではスキルミオンなどの磁気現象、液晶やアクティブマターなど多岐にわたる分野へと広がりを見せている。このように当初位相幾何学から出てきたトポロジーの概念は、既存の学問分野の枠を超え盛んに研究されており、この多岐にわたる分野で日本の研究者は顕著な業績を上げてきた。そうした背景で前述の戦略目標が設定され、それに基づいて本さがけ領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」領域および CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」領域が発足した。

私は研究総括として、自分自身がさがけ研究者であったときの経験を踏まえ、研究者が質の高い研究成果を生むことを助ける環境づくりこそが研究総括の任務であると考え領域運営をしてきた。まず領域の発足・募集にあたっては、慎重な検討の末、項目 2、3 で記載したような研究総括の方針を策定し、挑戦的な研究や分野横断的研究を積極的に採択する方針とした。また領域アドバイザーのメンバー選考においても、そうした方針を理解し選考に生かしてくださる先生を、JST の方々と相談の上で選考した。また募集説明会等でもこの総括方針を強調し、また選考においても、本方針を領域アドバイザーに丁寧に説明して選考に考慮していただいた。選考に際しては単に今までの研究業績の数字だけではなく、新しい分野の開拓や分野横断的研究に意欲的かどうかなども加味して評価し、電子材料、磁性材料、光学材料、メタマテリアル、高分子材料、分子性材料といった広範な分野での気鋭の若手研究者 32 名を採択した。

採択された研究者に対しては、短期での研究成果を求めずに、失敗をおそれず挑戦的な研究に取り組むことを、キックオフや領域会議など機会あるごとに呼びかけた。科研費など競争的資金の多くでは頻繁に研究成果報告を求められ、短期で研究成果が出るローリスクローリターンの研究に偏る傾向がある。そのため本さがけ領域においては、1 年や 2 年で成果が出なくてもよいので、3.5 年の研究期間とさがけでの研究資金を用いて新しい挑戦をしてほしいと要望した。また、募集時に提出した当初計画は意識しつつも、それにこだわりすぎず機動的に研究内容を刷新することも求めた。当該分野の研究の潮流は速く、募集時から研究期間の終了の約 4 年間でさえ国内外の研究情勢は著しく進展するため、それに合わせた機動的な研究方針の変更・刷新が、世界をリードした研究には必須である。こうした総括方針を繰り返し説明した結果、領域アドバイザーにも領域研究者にもよく浸透し、領域会

議やインフォーマルミーティングにおいて有益で建設的な議論が展開され、各研究者の研究の発展に大きく貢献できたと考えている。

研究の進捗管理の方針については、例えば〇〇誌に論文何本、新たな共同研究何件、などの数値目標を設けたりとか、頻繁に報告を求めて厳しく指導したりという方法もあり得るが、そうした方法とはとらなかった。そうした方法では、各研究者は短期的な研究成果を積み重ねるようになり、短期的には効果があるかもしれないが、長期的には意味がない。それよりも、本研究領域の範囲内で本当に自分がやりたいことを探索し、挑戦し、共同研究をさせることが、結局は真に革新的な研究・新規性の高い研究につながると考える。さらにそうした研究は、仮に研究期間内に全てを終えられなくても、さきがけ研究期間の終了後も残る財産となり、研究者のキャリアに長期的にはプラスになると考える。

そうした方針に研究者も最初は戸惑っていたようだが、領域会議やインフォーマルミーティングを重ねるにつれて、徐々に浸透したとを感じる。特に領域発足後1年経つ頃から、当初計画にはなかった新しい着想に基づき研究をやってみたらこんな成果が出た、という研究者からの報告が出始めた。そうした研究成果が互いに刺激になって、自分も新しいことをやってみようという機運が皆に生まれてきたように思われ、3期生が入る頃には全体に広まっていたとを感じる。領域会議においても、自分の専門分野でない分野の発表について積極的に質問をしたり議論をしたりという雰囲気が自然に生まれてきた。

ちょうど3期生の募集の時期あたりから、新型コロナウイルス感染拡大により対面での領域会議等ができなくなり、領域運営上も難しい対応を迫られた。そこで研究者間での交流を深めるため、インフォーマルミーティングと称して、2名のさきがけ研究者を主催者として指名して、講演者を集めてオンライン研究会を企画してもらうこととした。研究者間交流が目的であるため、この2名は多少異なる分野の研究者から選ぶことにして、研究会企画の打ち合わせを通じて自然な交流ができるようにした。こうした研究会も研究者間の交流にかなりプラスに働いたと感じる。

また同時に国際的な研究交流も推進した。さきがけが共催して、プリンストン大(2019年10月)、プラハ(2023年3月)、ヴェルツブルグ(2024年2月)の3回の国際ワークショップを開催することができた。本来はもう少し多く開催したかったが、新型コロナウイルスのため叶わなかった。こうした研究会の講演者やプログラムを決める際には、今後の研究交流等につながるように努めた。実際こうした研究会の後に、研究上の交流が始まった例もあり、領域の成果発信・研究の発展・研究交流の推進に寄与するとともに、領域内での親睦も深まった。

このような領域運営の下で、多くの領域研究者が顕著な業績を上げたことは、本資料で詳述してきた通りである。新規性の高い研究・質の高い研究成果を出したことにより、本研究領域ではプレスリリースも数多く、また研究期間内の昇進や顕著な賞の受賞が相次いだ。

また代表的な成果の多くが、必ずしも当初計画にはなかった新たな着想から発展した研究であり、また領域内共同研究に基づくものも多い。また、多くの研究者が最後の領域会議

で口を揃えて言っていたのは、本研究領域で新しい研究の着想をつかむことができ、(3.5年の研究期間内では全てを完了はできなかったが) 今後につながる研究テーマとなって良かった、ということである。競争的資金には3~5年程度の研究期間が決まっているが、研究それ自身はもっと長い目で行うものである。研究者としてそのような長期的なテーマを見出すことができれば、(たとえさきがけの3.5年内にそれが完了しなくても) さきがけ研究としては成功だと考える。さきがけの目的の一つは人材育成である。本研究領域の32名の研究者は、間違いなく今後の本分野の研究を国際的にリードしていく研究者であり、各自の研究の幅と深さを広げるのに、さきがけでの研究が一助となったことを確信している。

領域発足の2018年以降ほぼ6年がたち、その期間にトポロジーの関連分野の研究もかなり進展してきた。トポロジカルな物質探索や材料設計の見通しはかなり明確になってきたし、新現象の観測や新理論の構築などもあってますます分野として広く深くなってきた。さらに各分野において「トポロジー」の概念が定着してきて、現象や物質の理解に不可欠な道具となってきている。こうした研究情勢の中で、本研究領域の研究者が、研究期間内に得た着想・知識・知見や領域内での人脈などを生かし、今後大活躍されることを祈念している。

最後に、本さきがけ領域の運営にあたり JST の皆さんに大変お世話になり深く感謝申し上げます。特に領域担当の村越貴之さん、小林恵さん、小島直人さんには、領域運営全般、特に領域会議やシンポジウム等のイベントの運営から、募集・選考・評価に至るまで様々な業務でお世話になり心から感謝する。また領域アドバイザーの先生方にも、選考・評価や領域会議等で多大な時間を割いていただき、また有益なコメントをいただき感謝申し上げます。

以上