

戦略的創造研究推進事業
—CREST(チーム型研究)—

研究領域「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」

研究領域中間評価用資料

研究総括: 上田 正仁

2023年2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.....	3
(1) 戦略目標に対する領域設定の経緯、研究領域の位置づけと狙い	3
(2) 研究成果として目指したこと	4
(3) 科学技術の進歩への貢献や科学技術イノベーション創出に向けて	5
3. 研究課題の選考について.....	6
(1) 選考方針	6
(2) 選考結果	6
4. 領域アドバイザーについて.....	10
5. 研究領域のマネジメントについて.....	12
(1) 研究課題の進捗状況の把握と評価	12
(2) 国際ワークショップと国際連携	17
(3) 公開シンポジウム	18
(4) 人材育成	19
6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について.....	21
7. 総合所見	36

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に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」
(2018 年度発足)

(3) 研究総括

氏名 上田正仁 (東京大学大学院理学系研究科 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」

<https://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

(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
2018年度	佐藤宇史	東北大学・教授	ナノスピン ARPES によるハイブリッドトポロジカル材料創製	324
	塚崎敦	東北大学・教授	トポロジカル機能界面の創出	317
	中辻知	東京大学・教授	電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成	583
	胡暁	物質・材料研究機構・MANA 主任研究者	人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発	275
	ファム ナム ハイ	東京工業大学・准教授	トポロジカル表面状態を用いるスピン軌道トルク磁気メモリの創製	361
2019年度	岩本敏	東京大学・教授	トポロジカル集積光デバイスの創成	355
	河東泰之	東京大学・教授	物質のトポロジカル相の理論的探究	194
	島野亮	東京大学・教授	トポロジカル非線形光学の新展開	362
	出口哲生	お茶の水女子大学・教授	高分子弾性のホモロジー的トポロジー理論の構築と環状混合デバイス	318
	松田祐司	京都大学・教授	量子スピン液体におけるトポロジカル準粒子の解明と直接検出	324
2020年度	于秀珍	理化学研究所・チームリーダー	Beyond Skyrmion を目指す新しいトポロジカル磁性科学の創出	377
	江澤雅彦	東京大学・講師	電気回路によるトポロジカル量子計算方法の創生	260
	越野幹人	大阪大学・教授	トポロジカル超精密原子層物質の創成	297
	山本洋平	筑波大学・教授	自己組織化トポロジカル有機マイクロ共振器の開発	318
			総研究費	4665

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(2022年12月29日現在)²変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

課題採択の予算は上限を 350 百万円とした。研究遂行に大型真空装置等の高額設備が必要な課題に重点的に配布し、理論系の課題はある程度削減した。

中辻課題は新たな材料での展開で、まさしく研究成果のピークを目指しつつあり、採択後大きな増額支援を実施した。

2. 研究総括のねらい

(1) 戦略目標に対する領域設定の経緯、研究領域の位置づけと狙い

Society5.0 が目指す超スマート社会では、高度な自動運転制御や画像処理技術が求められており、情報通信 (ICT) 分野や人工知能 (AI) における高度な情報処理技術や高性能センサー技術への要求はとどまるところがない。一方、従来のシリコン CMOS 技術による性能向上は「Moore の法則」の終焉が認識されつつある中、限界に近づきつつある。

本研究領域ではこの限界を打破するため、トポロジカル材料に着目し、新たな機能を有する革新的デバイスを創出することで、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狙いとする。

図 2-1 に本研究領域発足に至るまでの「トポロジカル物質科学」に係る様々な研究施策を示す。新学術領域での基礎学理深耕を踏まえ、さきがけや CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」では個別のシーズ研究に展開された。

本研究領域はこれまでの個々のプロジェクトをトポロジーという概念で集約し研究を推進するものである。

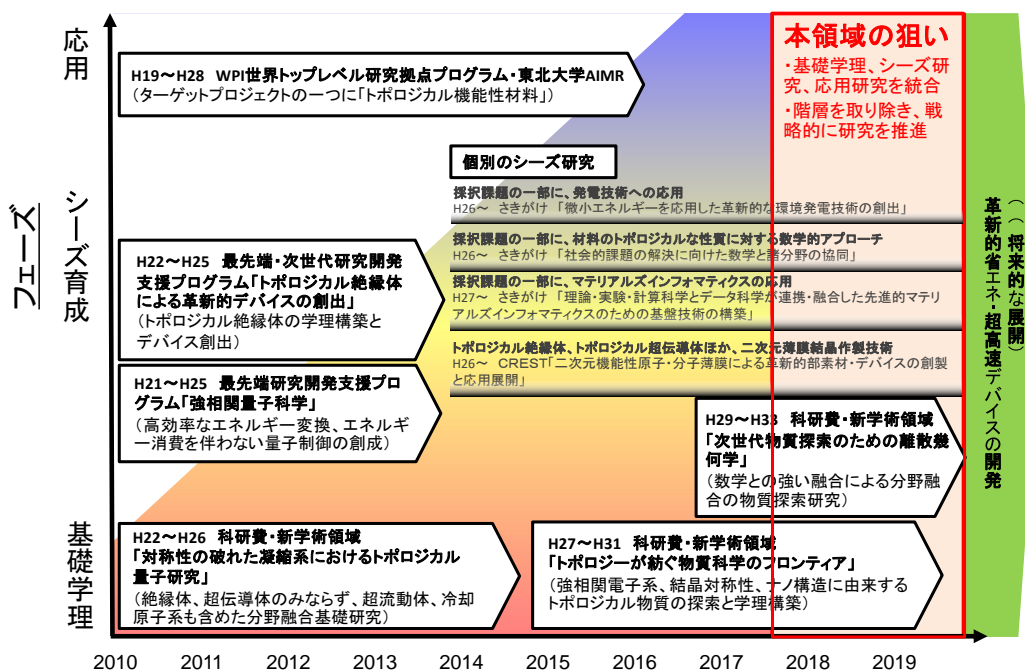


図 2-1 「トポロジカル物質科学」に係る研究・施策の推移・展開

出典：文部科学省

また図 2-2 に示すようにフォトンクスやスピンのトポロジーまでの展開に加え、超分子などの実空間への展開は新たな学術分野を創出する可能性があり、積極的に取り組むこととした。

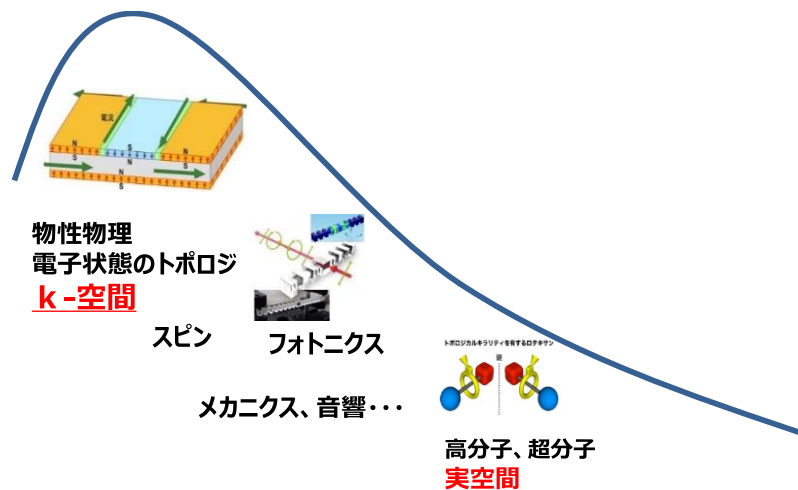


図 2-2 本研究領域の広がり

(2) 研究成果として目指したこと

具体的には以下の成果を目指した。

① トポロジカル材料の理論体系構築

新たなトポロジカル相の探索とその理論の構築、マヨラナ粒子など物質中の準粒子の発見、さらにフォトンクス材料やソフトマターへの展開も対象とする。加えて材料物性の基盤となるバンド理論、第一原理計算、分子動力学など、量子力学や相対性理論とトポロジカルな概念を融合した新たな量子物性理論の確立や、統一的な数学理論による分野融合の材料科学の構築も目指す。

② トポロジカル材料の設計、創製、計測・評価技術の創出

計測では原子レベルの分解能を有する新規分析技術・評価技術が、加工技術では原子層レベルの結晶成長、ヘテロ構造積層、原子レベル界面制御、ナノ加工・接合技術などが対象となる。トポロジカル材料の探索・創製を目的とした機械学習などのマテリアルズインフォマティクスの活用も期待した。

③ トポロジカル材料を応用した革新的デバイスの創出

トポロジカル絶縁体を用いた超低消費電力電子デバイス、トポロジカル超伝導体のマヨラナ粒子を用いた量子コンピューティング法の開発と設計など、トポロジカル量子材料に基

づく新規量子電子デバイスの創製が想定される。またスキルミオンを用いた超高密度データ記録デバイスや医療用超高感度磁気センサーなどトポロジカル磁性材料に基づく新規磁気デバイスの創製も対象である。加えてトポロジカル光学構造による単一方向伝搬光導波路、光遅延技術を用いた光メモリデバイス、低損失高速通信技術など、トポロジカル光学材料に基づく新規光学デバイスの創製、トポロジカル高分子材料による超弾性素材や新規ソフトマターなどの創製も期待する。

重要なのは①の理論体系構築と、②の材料探索、加工・計測技術を有機的に繋ぎ、③の革新的デバイス創出において、従来技術では実現できない機能を狙い、将来、社会的に貢献が期待できる成果を狙う。

(3) 科学技術の進歩への貢献や科学技術イノベーション創出に向けて

同時に発足した、さきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」では新たな現象の発現に注力頂き、戦略目標にあるデバイスの創出は本 CREST で対応することを宣言した。

本研究領域では 2014 年度発足の CREST 「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」、2016 年度発足の CREST 「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」およびさきがけ「量子の状態制御と機能化」との連携を図る。これらの取組を通じて、より効率的かつ効果的な領域運営を行い、より多くの興味深くかつ意義深い研究構想が、本研究領域で取り組まれるようにしたい。

一方、国際化も重要であり、海外との共同研究を奨励すると同時に国際ワークショップ開催など国内外の関連コミュニティとの連携を推進する。

3. 研究課題の選考について

(1) 選考方針

本研究領域は、連続変形に対する不変性に着目した新たな物質観であるトポロジーに着目し、既存の技術では実現できない革新的機能を有する材料・デバイスの創出を目的としている。

トポロジカル分野は、これまで理論が先導し、実験がそれを実証するという展開が続いてきたが、当該分野をさらに発展させるために、社会的課題に貢献する新しいデバイス応用を真剣に検討すべき段階にきていると確信している。

このような目的を達成するため、数学・物理・化学等の研究を分野横断的に推進することで、トポロジカルデバイスの実現に向けた革新的アイデアを創出していくことがきわめて重要である。このような問題意識に基づき、初年度選考では以下の点を重視した。

- ① トポロジカル材料のどのような機能を実現することで、社会的課題にどう貢献するか。
- ② 従来の研究の単純な延長線上ではない、分野横断的で革新的なアイデアとなっているか。

(2) 選考結果

3年間にわたる募集期間で74件の応募があり、14件の課題を採択した。応募件数は多いとは言えないが、これはトポロジーという先端研究テーマにもかかわらずデバイスを実現するという非常に高い目標を設定したためと考えている。実際、応募書類を確認すると全てレベルの高い内容であり、その中でも極めて高いレベルにある提案を採択することができたと考える。加えて応募に至らなかった研究チームもデバイスに資する検討を真摯に実施された研究者がいたことも想定している。

各年度の採択状況は以下の通りである。

初年度である2018年度の公募では、42件の応募があった。量子計算やメモリ等の電子デバイス応用を目指す提案が15件、光デバイス・熱電・センサー等他の応用を目指す提案が14件、物性計測や材料創成等のデバイス創成を支える提案13件であった。

選考にあたっては10名の領域アドバイザーとともに公平かつ厳正に書類選考を行い11件の面接課題に絞り込み、最終的に以下の5件を採択した。

- 佐藤 宇史（東北大学大学院理学研究科 教授）「ナノスピン ARPES によるハイブリッドトポロジカル材料創製」
- 塚崎 敦（東北大学金属材料研究所 教授）「トポロジカル機能界面の創出」
- 中辻 知（東京大学物性研究所 教授）「電子構造のトポロジーを利用した機能性磁

性材料の開発とデバイス創成」

○ 胡 暁 (物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点 MANA 主任研究者)「人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発」

○ ファム ナム ハイ (東京工業大学工学院 准教授)「トポロジカル表面状態を用いるスピン軌道トルク磁気メモリの創製」

内訳は、デバイス応用の観点から重要な提案が3件(塚崎 T, 中辻 T, ファム T)、トポロジカルデバイスの微視的構造が観測できる計測機器の開発を目指す提案が1件(佐藤 T)、トポロジカルフォトンクスを推進する観点から重要な提案が1件(胡 T)あった。このうち、中辻 T の提案はワイル反強磁性という基礎学理を推進する観点からも極めて重要な提案であると判断された。

非常に質の高い研究提案が多く集まり、優劣つけがたい状態だった。採択された提案はいずれも、革新性や独自性の高い目標設定と、それを実現可能とするエビデンスの提示、および研究体制の観点で優れていると評価されたものである。

2年目となる2019年度の公募では、更なるトポロジカルデバイスの創成に繋げるため革新的で独創的な学理の構築が必要不可欠であるという考えに基づき、以下のような方針で選考した。

- ・革新的で独創的な学理提案になっているか
- ・その提案の先に、革新的な材料・デバイス応用に繋がる道筋が描かれているか

17件の応募があり、内訳は量子計算やメモリ等の電子デバイスへの応用を目指す提案が4件、光応用・デバイスを目指す提案が3件、高分子材料等に関する提案が3件、原理検証・材料創成に関する提案が5件、理論・計算手法に関する提案が2件であった。

10名の領域アドバイザーとともに公平かつ厳正に書類選考を行い、9件の面接課題に絞り込み、最終的に以下の5件を採択した。

○ 岩本 敏 (東京大学先端科学技術研究センター 教授)「トポロジカル集積光デバイスの創成」

○ 河東 泰之 (東北大学金属材料研究所 教授)「トポロジカル機能界面の創出」

○ 島野 亮 (東京大学低温センター 教授)「トポロジカル非線形光学の新展開」

○ 出口 哲生 (お茶の水女子大学基幹研究院 教授)「高分子弾性のホモロジー的トポロジー理論の構築と環状混合デバイス」

○ 松田 祐司 (京都大学大学院理学研究科 教授)「量子スピン液体におけるトポロジカル準粒子の解明と直接検出」

内訳は、光応用・デバイスに関する提案が2件(岩本 T, 島野 T)、高分子材料に関する提

案が 1 件（出口 T）、マヨラナ量子計算に繋がる原理検証に関する提案が 1 件（松田 T）、数学・物理学協働による新理論構築に関する提案が 1 件（河東 T）であった。いずれも、独創的な学理構築とそこから発展する材料・デバイス応用への道筋が描かれている優れた提案である。また、異分野の研究者が一つのチームに集い、シナジー効果を狙うという CREST 本来の趣旨に合致した提案である。

応募最終年度となる 2020 年度はこれまでの採択でカバーできていない分野や、分野横断的で新しい視点を持つ提案等、幅広くテーマを募集した。応募総数は 15 件で、電子のトポロジーに関する提案が 6 件、高分子に関する提案が 4 件、フォトニクスに関する提案が 2 件、音響、電気回路、反応過程に関する提案が各 1 件であった。電気回路や反応過程等に関する提案は、これまでの応募では見られなかった全く新しい分野からの提案である。

10 名の領域アドバイザーとともに公平かつ厳正に書類選考を行い、7 件の面接課題に絞り込み、最終的に以下の 4 件を採択した。

○ 于 秀珍（理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー）「Beyond Skyrmion を目指す新しいトポロジカル磁性科学の創出」

○ 江澤 雅彦（東京大学大学院工学系研究科 講師）「電気回路によるトポロジカル量子計算方法の創生」

○ 越野 幹人（大阪大学大学院理学研究科 教授）「トポロジカル超精密原子層物質の創成」

○ 山本 洋平（筑波大学数理物質系 教授）「自己組織化トポロジカル有機マイクロ共振器の開発」

採択された提案は、三次元磁化構造のダイナミックスを撮像する装置を開発し、新規現象の探索を目指す提案（于 T）、物性理論学者と有機化学者が組んで新奇超精密原子層デバイスの創成を目指す提案（越野 T）、新奇トポロジカル有機マイクロ共振器の実現を目指す提案（山本 T）、電気回路によるトポロジカル量子計算の創生を目指す提案（江澤 T）、各々 1 件である。

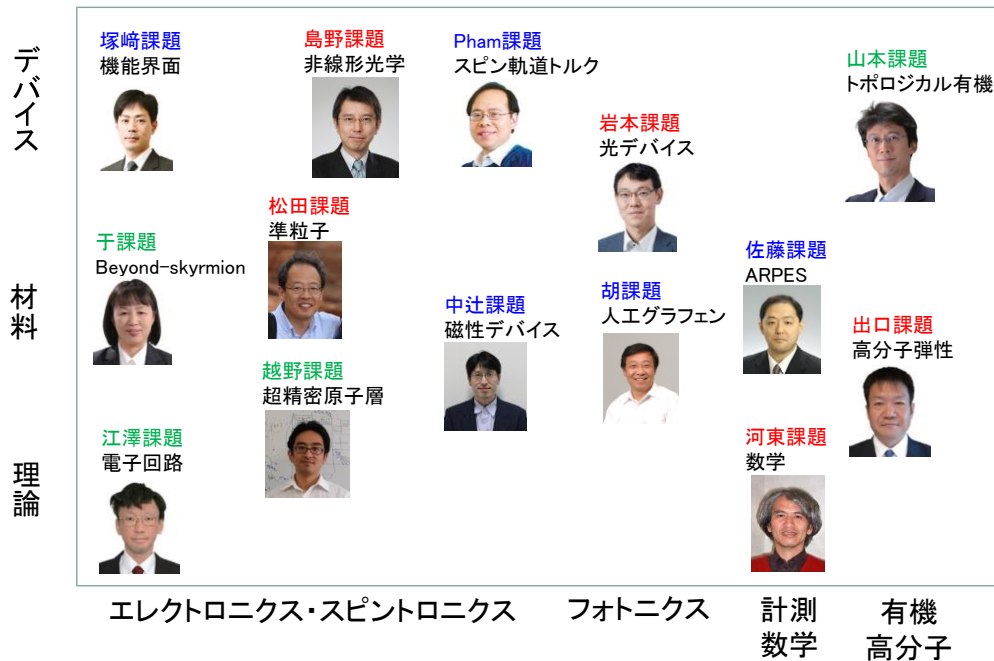


図 2-3 採択課題のポートフォリオ

採択課題のポートフォリオを図 2-3 に示す。正面からデバイスに取り組む課題が多く採用できた。材料とした課題も将来のデバイスを強く意識した課題である。またフォトンクス分野と化学分野の課題も採用できたことに加えトポロジカル物質の観測に有効な装置を開発する課題、トポロジーの理論的なベースになる数学課題も採用できたことは大きい。トポロジカル現象を電子回路で実現することを目指し新しい発想の課題も採択できた。また、年齢構成（准教授・講師クラス 2 名）、国際性（外国籍 2 名、海外出身者 1 名）、ダイバーシティ（女性研究代表者 1 名）を含めたバランスの取れたポートフォリオが構成できた。

残念ながら不採択となった提案も研究計画の立案のプロセスで、従来は理論・原理実証が主流であったトポロジー科学の研究者達が、デバイス創出に向けたシナリオを議論する過程で生まれたアイデアは、トポロジー科学の発展に必ず寄与すると思う。また、採択に至った研究チームは、チーム内での議論は勿論のこと、本研究領域内外での交流等によるシナジー効果によって、素晴らしい成果を生み、本研究領域が掲げる高い目標を達成するものと確信している。

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
安藤 陽一 (トポロジカル絶縁体、 トポロジカル超伝導)	ケルン大学物理学科	教授	2018年5月～ 2026年3月
伊藤 耕三 (トポロジカル高分子材 料)	東京大学大学院新領域創 成科学研究科	教授	2018年5月～ 2026年3月
尾松 孝茂 (量子エレクトロニク ス、非線形光学)	千葉大学大学院工学研究 院	教授	2018年5月～ 2026年3月
川崎 雅司 (トポロジカル絶縁体)	東京大学大学院工学系研 究科	教授	2018年5月～ 2026年3月
小磯 深幸 (微分幾何学、他分野連 携応用研究)	九州大学マス・フォア・ インダストリ研究 (九州大学)	教授 (名誉教授)	2018年5月～ 2026年3月
富永 淳二 (トポロジカル相転移、 超格子)	産業技術総合研究所デバ イス技術研究部門	首席研究員	2018年5月～ 2026年3月
中村 志保 (スピントロニクス、電 子デバイス)	東芝メモリ (株) (キオクシア (株) メモ リ技術研究所)	フェロー (参事)	2018年5月～ 2026年3月
前野 悦輝 (物性理論、トポロジカ ル物質)	京都大学大学院理学研究 科 (豊田理化学研究所)	教授 (フェロー)	2018年5月～ 2026年3月
村上 裕彦 (電子デバイス全般)	(株) アルバック未来技術 研究所	所長・シニア フェロー	2018年5月～ 2022年3月
萬 伸一 (電子デバイス全般)	日本電気 (株) IoT デバ イス研究所 (理化学研究所量子コン ピュータ研究センター)	所長 (副センター 長)	2018年5月～ 2026年3月

¹変更/移動のあった場合、下段に括弧つき記載

本研究領域ではトポロジカル物性物理の新たな現象発現からデバイス展開を狙っている。よって物性物理分野および電子デバイスの専門家に重点を置いた。加えて高分子材料やフォトニクス分野もスコープにしているのでそれぞれの専門家にも参画してもらった。またトポロジーは数学の概念から数学者にも参画してもらった。

物性物理 3名：安藤 AD、川崎 AD、前野 AD

電子デバイス 4名：中村 AD、富永 AD、村上 AD、萬 AD

フォトニクス 1名：尾松 AD

高分子 1名：伊藤 AD

数学分野 1名：小磯 AD

社会実装を目指すにあたっては産業界からのアドバイスも重要であり、東芝メモリ（現キオクシア）・中村アドバイザー、アルバック・村上アドバイザー（現在は退任）、日本電気・萬アドバイザー（現在は理化学研究所へ異動）が参画している。

また 2014 年発足の CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」と連携を図るため、研究代表者である川崎アドバイザー、富永アドバイザーに参画してもらった。

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

① サイトビジット

研究開始後速やかにアドバイザーも同行してサイトビジットを行い、研究の最終ゴールに向けた意識合わせを実施している。同行アドバイザーと指導、助言は以下の通りである。

(2018 年度採択課題)

佐藤課題 2019 年 2 月 14 日 東北大学片平キャンパス 富永 AD、前野 AD
物質開発も意味はあるが、本来の計測技術の高度化にフォーカスするよう指導した。
エッジ状態を初めて観測する、そのためには機械学習の導入もあるのではと助言した。

塚崎課題 2019 年 2 月 14 日 東北大学片平キャンパス 富永 AD、前野 AD
理論・数値シミュレーションと実験が一通貫で実施できるのが本チームの強みである。そ
れを生かすよう助言した。

中辻課題 2019 年 8 月 2 日 東京大学物性研究所 安藤 AD、中村 AD
チーム内の連携が機能しており、 $MnSn_3$ のデバイス化に期待したい。メモリ応用ではリテン
ションが問題になるので、早めに熱的安定性を確認してもらいたい。

胡課題 2019 年 2 月 26 日 物質・材料研究機構並木キャンパス 村上 AD
研究代表者、主たる共同研究者間のシナジー効果が明確な成果に結びつくよう密接な会話
をお願いしたい。トポロジカル機能・材料の創出がミッションであることも留意するよう指
導した。

ファム課題 2019 年 2 月 19 日 東京工業大学大岡山キャンパス 川崎 AD、萬 AD
研究代表者 G と宮本 G の連携は見えるが、小林 G との連携が見えない。目的・計画を定め積
極的に対応してほしい。

(2019 年度採択課題)

岩本課題 2020 年 3 月 9 日 東京大学生産技術研究所 尾松 AD、川崎 AD、村上 AD
研究のピーク値を最大化するため集中と選択をお願いした。スキルミオンレーザは極めて
挑戦的な提案であるが、どのような応用、あるいは学術が期待できるか、中間評価までに提
案してほしい。

河東課題 2020 年 3 月 9 日 東京大学駒場キャンパス 小磯 AD、富永 AD

数学と物理のトップチームが協力することでシナジー効果が出せるかがポイントだ。また両分野の言語を理解できる若手の育成も成否を分ける。

島野課題 2020年3月10日 東京大学本郷キャンパス 尾松 AD、川崎 AD
実験グループと理論グループが密接に共同作業することで可能となる学術的成果を期待したい。

出口課題 2020年2月25日 お茶の水女子大学人間文化創成科学研究棟
伊藤 AD、小磯 AD、村上 AD
基礎から応用まで多方面での成果が期待できる。どの順番で集中するか、チーム名で会話を深めてほしい。

松田課題 2020年2月26日 京都大学吉田キャンパス 中村 AD、前野 AD
これまでの顕著な成果を世界に認知してもらうためには、何をすべきか、チーム内で議論を深めてほしい。

(2020年度採択課題) 新型コロナウイルス感染拡大のため、On Line での開催となった。
于課題 2021年2月25日 On Line 開催 中村 AD、前野 AD、村上 AD
ローレンツ TEM による 3次元顕微技術はスキルミオンの動的観察にかかわらず多くの応用の可能性がある。解析には理論面でのサポートが重要で望月 G との連携を強化してほしい。

江澤課題 2021年3月11日 On Line 開催 安藤 AD、前野 AD、萬 AD
マヨラナ粒子の量子計算を電気回路でどこまでできて、何ができないか明確な整理をお願いしたい。それが研究のコミュニティから評価されるポイントである。

越野課題 2021年2月25日 On Line 開催 川崎 AD、小磯 AD、村上 AD
物理、化学、デバイスのシナジー効果が期待できる。分野が融合することで得られる発展性を期待したい。

山本課題 2021年3月11日 On Line 開催 伊藤 AD、尾松 AD、富永 AD
自己組織化技術を組み合わせ、さらに高性能なナノ構造を作る技術は大きな可能性を感じる。選択と集中をチーム内で議論し高い研究成果を目指してほしい。

なお上記、指導、助言はドキュメントで送付し、領域会議で対応状況を報告するサイクルを回している。各研究チームはサイトビジットでアドバイザーから得られた助言を積極的に受け止め、研究のさらなる発展に活用している。

② キックオフミーティング、領域会議

進捗確認は毎年開催する領域会議で確認している。

キックオフミーティング 2018年12月7日、8日 KKRホテル金沢

両領域間の連携を狙うため CREST 新規採択 5 課題とさきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」新規採択課題合同で開催した。

CREST 新規課題：佐藤課題、塚崎課題、中辻課題、胡課題、ファム課題
基本的には研究計画を発表し議論した。



上田総括挨拶



さきがけ村上総括

第1回領域会議 2019年11月15日 JST東京本部別館1階ホール

2019年11月16日 JST東京本部地下大会議室

CREST 新規課題：岩本課題、河東課題、島野課題、出口課題、松田課題

CREST 既存課題：佐藤課題、塚崎課題、中辻課題、胡課題、ファム課題

に加えさきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」新規採択課題合同で開催した。

新規採択課題からは研究計画を発表し議論した。

既存課題はサイトビジットでの助言をふまえ進捗を報告し議論した。

第2回領域会議 2020年11月4日、18日 On Line 開催

新型コロナウイルス感染拡大により On Line 開催となった。

CREST 新規課題：于課題、江澤課題、越野課題、山本課題

CREST 既存課題：佐藤課題、塚崎課題、中辻課題、胡課題、ファム課題

岩本課題、河東課題、島野課題、出口課題、松田課題

に加え今回もさきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」新規採択課題合同で開催

した。新規採択課題からは研究計画を、既存課題はサイトビジットでの助言をふまえ進捗を

報告し議論した。

今回からコメントメモによるフィードバックの運用を本格的に開始した。

具体的にはアドバイザーに、発表に対する助言・コメントを作成してもらい、総括確認後、研究チームにフィードバックする。研究チームは翌年度の研究計画書に反映し、研究を実施し翌年の領域会議等で報告し、総括、アドバイザーが確認するサイクルである。

第3回領域会議 2021年12月7日、10日 On Line 開催

今回も新型コロナウイルス感染拡大により On Line 開催となった。

CREST 既存課題：佐藤課題、塚崎課題、中辻課題、胡課題、ファム課題

岩本課題、河東課題、島野課題、出口課題、松田課題

于課題、江澤課題、越野課題、山本課題

今回からコメントメモによるフィードバックを活用し進捗確認を行った。

第4回領域会議 2022年12月18日 JST東京本部別館1階ホール (ハイブリッド開催)

今回は感染症対策を十分施しながら対面と On Line のハイブリッド開催で行った。

CREST 既存課題：佐藤課題、塚崎課題、中辻課題、胡課題、ファム課題

岩本課題、河東課題、島野課題、出口課題、松田課題

于課題、江澤課題、越野課題、山本課題

今回もコメントメモによるフィードバックを活用し進捗確認を行った。

③ 課題評価と委託研究費の重点配分

これまで2018年採択5課題、2019年採択5課題について課題中間評価を行った。

表 2-1 2018 年度採択課題の増額金額および内訳（単位：100 万円）

課題	採択時	現在	増額	総括裁量経費	その他
佐藤課題	320	324	4	4.0 装置	0.1 国際強化支援
塚崎課題	280	317	37	37.0 装置	0.1 国際強化支援
中辻課題	280	583	303	112.7 装置 1.0 CREST-EPIQS旅費	11.5 国際強化支援 3.0 シーズ展開 161.9 装置 12.5 コロナ研究
胡課題	260	275	15	10.0 装置 5.0 国際会議開催	0.1 国際強化支援
ファム課題	320	361	41	33.3 装置	2.7 国際強化支援 1.7 装置 3.0 シーズ展開

表 2-1 に 2018 年度採択課題の増額金額をまとめた。中辻課題は Mn₃Sn による高速磁気メモリ展開が世界的に見て注目を集めている。当然、他の研究機関からの追従も激しい。ここで一気に引き離すべく大きな増額を判断した。

表 2-2 2019 年度採択課題の増額金額および内訳（単位：100 万円）

課題	採択時	現在	増額	総括裁量経費	その他
岩本課題	320	355	35	31.5 装置	3.2 装置
河東課題	200	194	▲ 6		0.8 国際強化支援 ▲ 2.5 国際会議Virtual開催に変更 ▲ 4.0 人件費返金
島野課題	320	362	42	41.5 装置	0.1 国際強化支援 7.0 装置 ▲ 7.0 旅費人件費返金
出口課題	280	318	38	24.5 装置	0.1 国際強化支援 13.6 装置
松田課題	280	324	44	39.7 装置 1.0 CREST-EPIQS旅費	0.1 国際強化支援 3.5 装置

表 2-3 2020 年度採択課題の増額金額および内訳（単位：100 万円）

課題	採択時	現在	増額	総括裁量経費	その他
于課題	340	377	37	37.0 装置	
江澤課題	260	260	0		
越野課題	300	297	▲ 3		▲ 3.0 人件費返金
山本課題	300	318	18	15.0 装置	2.9 国際強化支援

表 2-2、2-3 に 2019 年度採択課題、2020 年度採択課題について、それぞれ増額金額をまとめた。それほど差はないが、中間課題評価で高い評価を得た課題を少し厚く増額した。なおコロナ禍で研究員の採用遅れ、国際的なイベントが On Line 開催に変更になることも多く、やや返金が目立つのもやむを得ないと考えている。

(2) 国際ワークショップと国際連携

研究推進において国際連携は非常に重要であり、研究者の招聘や派遣、さらには本格的な共同研究に発展することを期待し、国際ワークショップを開催した。

① Pan-Pacific Workshop on Topology and Correlation in Exotic Materials 開催

2022 年 10 月 24 日～27 日にフランス領ポリネシアのモーレア島で Gordon and Betty Moore 財団よりファンドを受けている EPIQS (Emergent Phenomena in Quantum Systems) とワークショップを開催した。

非公開のワークショップであり日米のトップサイエンティストが最新情報を意見交換する場という意味がある。学会と異なり、お互いの研究を向上させることに力を入れることができるなど、有意義な場となり継続する方向で進める。



Workshop 会場 左が上田総括、右が EPIQS 側代表・UCB Moore 教授



参加者集合写真

② 各課題で推進している国際連携

中辻課題では 2020 年度 John Hopkins 大学とトポロジカル磁性体の磁気構造と電子構造解析について共同研究を実施した。その成果はアメリカ物理学の Mn_3X 系シンポジウムで招待講演を行いトポロジカル物性分野で世界を先導する研究チームであるという印象付けることができた。

胡課題では 2016 年に「物質のトポロジカル相とトポロジカル相転移の理論的発見」でノーベル物理学賞を受賞したプリンストン大学のダンカン・ホールデン教授をキーノートに招き International Workshop TOPOLOGY - The New Horizon of Materials Science and Nanophotonics (国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS) 主催、JST 後援) を 2019 年 6 月 12 日、13 日に NIMS の並木キャンパスで開催した。研究代表者のほか、本研究領域からは東京大学・岩本教授、京都大学・佐藤教授が参加した。欧州、米国、中国からも招待講演者を招き非常に盛況であった。

ファム課題では 2022 年度にマイアミ大学から研究者を招聘し、トポロジカルスピントクスチャの周期的な時間変化により発生した交流スピン起電力の解析を実施した。

山本課題では 2022 年度ドイツのライプニッツ光技術研究所への研究者派遣と研究者招聘を実施し、キラル共役ポリマーからなるねじれ双極球体の表面におけるメタサーフェス構造制御に取り組んだ。

(3) 公開シンポジウム

研究成果の発信は非常に重要であると認識している。本研究領域でもコロナ禍のため On Line であるが公開シンポジウムを開催した。

① CREST/さきがけ「トポロジー」領域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 日にさきがけと合同で開催した。プログラムは、フォトニクス、スピントロニクス、エレクトロニクス、高分子、数学 (理論) の 5 つのテーマを選定し、それぞれさきがけ研究者と CREST 研究代表者が講演する形とし、さきがけ研究者の後に CREST 研究代表者が講演、さらに CREST 研究者はそれぞれにテーマにおける未来像を語る構成とした。

参加者は 365 名であったが、産業界からの参加者も 64 名あり関心の度合いが上がっている。また当日参加できなかった方のために JST Channel にて動画を公開した。

② 各課題で推進しているワークショップ

出口課題が主催し、JST 後援で出口課題研究者、さきがけ研究者および新学術領域「材料離散幾何解析」研究者による公開ワークショップ「高分子弾性のトポロジーと革新的理論の構築に向けて」を 2019 年 11 月 11 日にお茶の水女子大学にて開催した。

山本課題が中心になり 2020 年 12 月 18 日に筑波大学・物質科学セミナーを開催し、山本

課題の主たる共同研究者の他、尾松アドバイザーが講演した。

(4) 人材育成

本研究領域全般に向けて若手の育成を常にお願している。これまで以下の主たる共同研究者、研究参加メンバーが昇任している。内訳は教授昇任3名、准教授、講師昇任8名、助教採用1名である。

東北大学・野村 健太朗（塚崎課題・主たる共同研究者）准教授⇒九州大学・教授
東北大学・塩貝 純一（塚崎課題・研究参加者）助教⇒大阪大学・准教授
東京大学・肥後 友也（中辻課題・研究参加者）特任研究員⇒特任准教授
東京大学・野本 拓也（中辻課題・研究参加者）助教⇒講師
京都工芸繊維大学・高橋 駿（岩本課題・主たる共同研究者）助教⇒准教授
東京大学・中村 祥子（島野課題・研究参加者）助教⇒九州大学・准教授
お茶の水女子大学・佐藤 純（出口課題・研究参加者）研究員⇒東京工芸大学・准教授
お茶の水女子大学・上原 恵理香（出口課題・研究参加者）研究員⇒助教
北海道大学・磯野 拓也（出口課題・研究参加者）助教⇒准教授
京都大学・笠原 成（松田課題・研究参加者）助教⇒岡山大学・教授
東京大学・水上 雄太（松田課題・研究参加者）助教⇒東北大学・准教授
東京大学・三田 吉郎（江澤課題・主たる共同研究者）准教授⇒教授

また研究代表者、主たる共同研究者をはじめ、研究参加者の受賞については添付資料成果リストで確認できるが、特に顕著なものとして河東課題研究代表者である河東教授の人材育成の成果を挙げたい。一人目は研究参加者である東京大学・緒方芳子教授である。すでに数理物理学に多大な貢献をした学者を称えるポアンカレ賞 (Henri Poincaré Prize) を2013年に受賞し、国際的に高い評価を受けている研究者である。緒方氏は、量子スピンのトポロジカル相の分類に関する研究で日本数学会の最高の賞である2022年度の秋季賞も受賞した。さらに同じく河東課題の研究参加者である、京都大学・山下真由子助教も挙げたい。すでに2022年のマリア・スクウォドフスカ=キュリー賞の最優秀賞を受賞した。

一方、学生には重要な研究テーマを与え、それを活かした学会投稿の機会を与えるようお願いしている。その結果、研究のアクティビティ活性化に連動して、以下のように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。

課題	氏名 (受賞時学年)	賞の名称	授与者	受賞日
<u>佐藤課題</u>	高根 大地 (D2)	学生優秀発表賞	日本物理学会	2019/4/4
<u>塚崎課題</u>	池田 絢哉 (M2)	スピントロニクス 研究会講演奨励賞	応用物理学会	2020/3/12

<u>ファム課題</u>	Nguyen Huynh (M2) Duy Khang	スピントロニクス 研究会講演奨励賞	応用物理学会	2020/3/10
<u>岩本課題</u>	吉見 拓展 (D1)	優秀ポスター賞	応用物理学会	2020/12/20
	吉見 拓展 (D1)	発表奨励賞	応用物理学会	2020/12/23
		結晶工学研究会		
<u>松田課題</u>	横井 太一 (M1)	Poster Award	TopoMat2019	2019/12/6
		Gold Prize		

6. 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況について

図 2-3 に従い各課題の成果をまとめる。エレクトロニクス・スピントロニクスは中辻課題、ファム課題、塚崎課題、さらに江澤課題、松田課題、越野課題、于課題、島野課題が対象である。

(1) 中辻課題「電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成」

[課題概要]

次世代メモリやセンサーの開発を牽引するスピントロニクスにおいて、主構成要素を現行の強磁性体から機能性反強磁性体に置き換え、その電子構造のトポロジーを利用することで、強磁性に起因する様々な問題を一挙に解決するデバイスの創製を行う。特に、巨大な電気磁気応答を示すワイル反強磁性体の開発と、そのナノサイズの磁気ドメインの電気的制御手法の研究を通じ、トポロジカル反強磁性スピントロニクスの技術を構築する。

[研究成果]

反強磁性体である Mn_3Sn を利用し省電力・超高速駆動・超高密度な次世代メモリの展開を狙っている。すでに不揮発性メモリの動作原理を実証、巨大な異常ホール効果を見いだした。

Nature 565, pp. 627-630 (2019)

Nature 566, pp. 518-522 (2019)

Nature 580, pp. 608-613 (2020)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200421/index.html>

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210125/index.html>

また電気的に読み書き可能な信号の増強にも成功している。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210415-2/index.html>

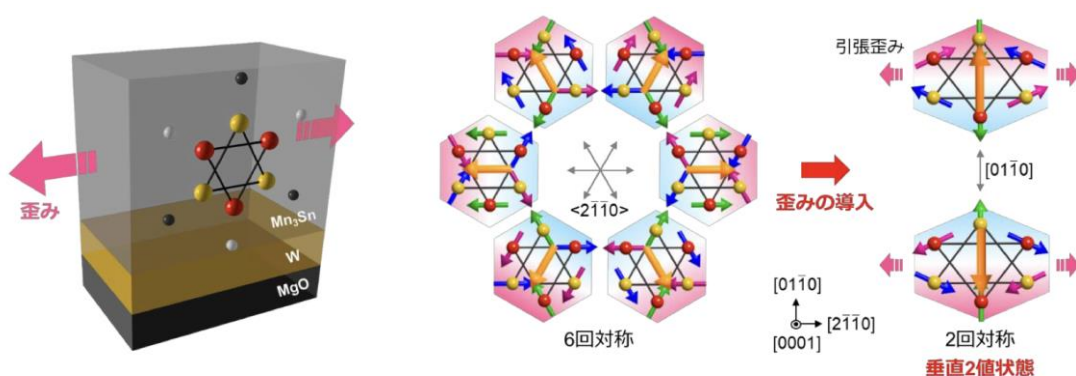


図 6-1 Mn_3Sn 多層膜の概念図

図 6-2 磁気八極子偏極

図 6-3 垂直 2 値状態

一方、 Mn_3Sn の磁気八極子偏極は図 6-2 に示すように 6 つの方向に向くという自由度を持

っているので、メモリ機能を実現するには複雑なデバイス構造となる。これに対し図 6-1 に示すような歪みを与えると図 6-3 に示すように垂直 2 値状態が実現できることを見だし、メモリデバイスの実現が非常に現実味を帯びてきている。材料物性の基礎的研究から始まり、具体的なデバイス展開が見通せるようになり、予想以上の進展を見せている。

(2) ファム課題「トポロジカル表面状態を用いるスピン軌道トルク磁気メモリの創製」

[課題概要]

トポロジカル材料を磁気メモリへ応用する研究開発を行う。量産性に優れたスパッタ法による製膜技術および垂直磁気異方性を示す磁性体との接合の作製技術を確認し、超高速、超低消費電力のスピン軌道トルク磁化反転の実証、磁性細線におけるカイラル磁壁・スキルミオンの発生、駆動、検出の基盤技術を実証する。

[研究成果]

こちらも磁気メモリへの展開を狙っているが、トポロジカル絶縁体を工業的に有効なスパッタ法で成膜することがポイントである。

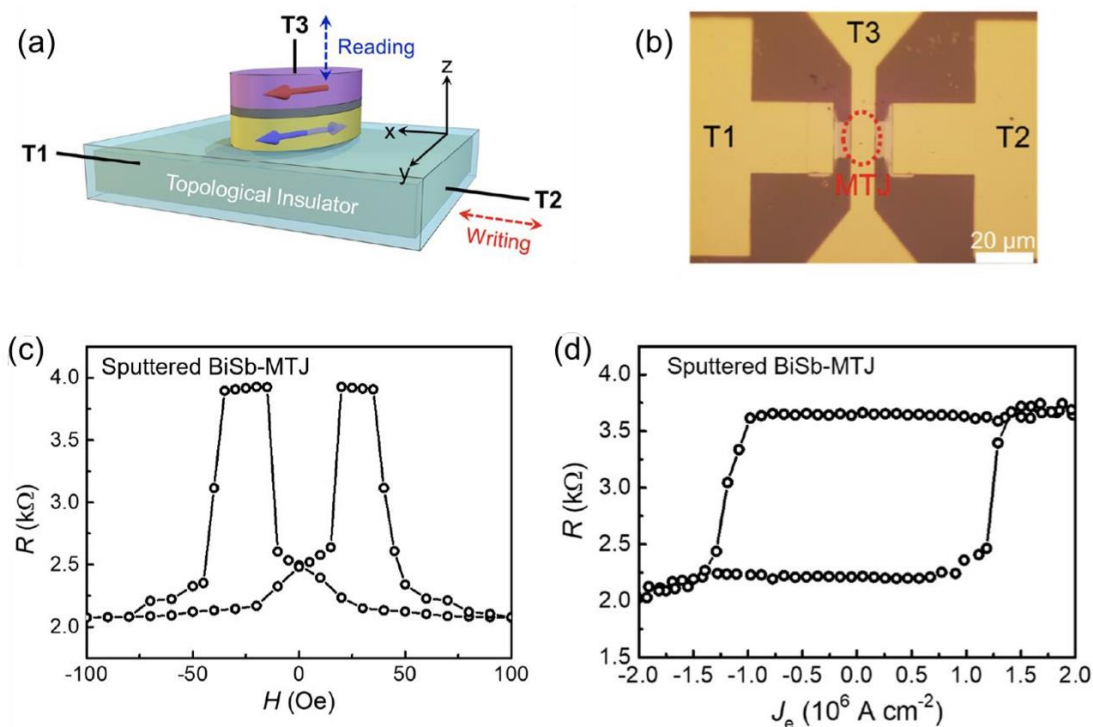


図 6-4 (a) 3 端子 SOT-MRAM 素子構造 (b) デバイスの顕微鏡写真 (c) トンネル磁気抵抗効果 (d) 書き込み特性

図 6-4(a) に示すようにトポロジカル絶縁体 (BiSb) をスパッタで成膜し Ru を中間層として磁気トンネル接合 (MTJ) CoFeB/MgO/CoFeB を成膜しスピン軌道トルク (SOT) MRAM を形成する。(c) はトンネル磁気抵抗効果だが、90%という高い抵抗変化が確認できた。また (d)

に示すように書き込み特性も確認できた。この電流密度はこれまでのスピントラnsファ・トルク (STT) 方式に比べ低電流密度であり低電力化に加え、書き込みトランジスタのサイズを小さくすることが可能で、高集積化も期待できる。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211029/index.html>

(3) 塚崎課題「トポロジカル機能界面の創出」

[課題概要]

数理的物性研究と計算機実験の連携による理論提案と実験的な検証・機能開拓を両輪に、両者の緊密なフィードバックを通じて、革新的機能デバイスを開拓する。六方晶物質群を主たる対象に、ヘテロ界面や薄膜に現れるバンドトポロジを高度に制御する技術を構築して、堅牢性や低散逸性に代表されるトポロジカル物質でなければ実現しえない機能を引き出し、高感度磁気センサーなどの先進的デバイスを創出する。

[研究成果]

優れた薄膜成長技術を有する実験グループと第一原理による電子状態の計算で先導する理論グループが強力なタッグを組んだチームである。

図 6-5 (a) に示す Fe-Sn 薄膜積層構造で (b) に示す素子を形成し、(c) に示した定義で天頂角、方位角に対する異常ホール効果、磁気抵抗効果を見たのが図 6-6 である。これは天頂角、方位角を一意に決定することが可能であることを意味しており、磁気ベクトルを3次元で検出するセンサーが実現できることを示唆している。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211004/index.html>

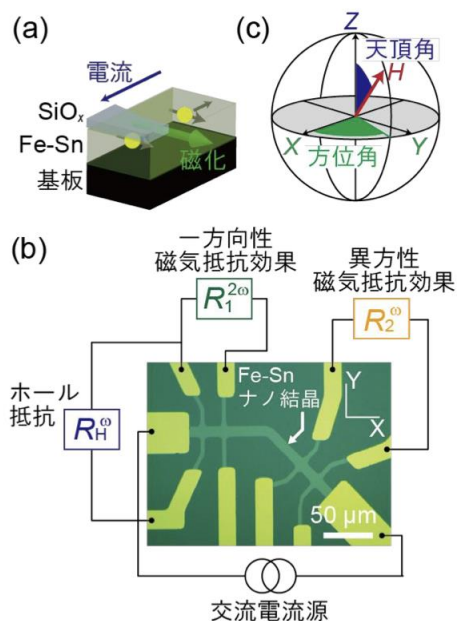


図 6-5 (a) Fe-Sn 積層構造 (b) 素子構造

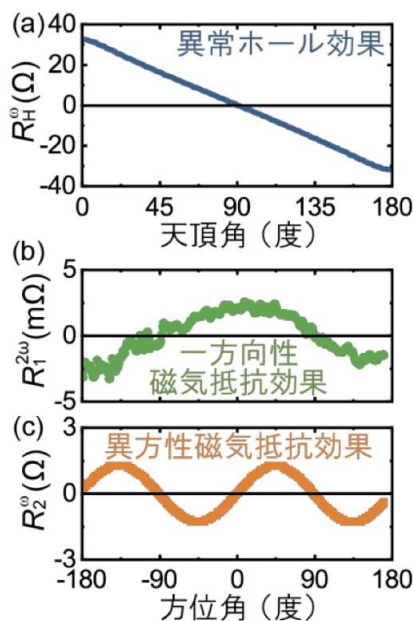


図 6-6 (a) 異常ホール効果の天頂角依存性

(c) 磁場ベクトルの模式図

(b) 一方向性磁気抵抗効果 (c) 異方性磁気抵抗効果

また磁性金属に対する大規模数値シミュレーション手法を用いた解析を行い新規な物性発現も予測している。例えばトポロジカルなスピン配列が固体中で規則的な配列をなすトポロジカルスピン結晶ではスピン波の位相で異なるトポロジカル相転移現象を理論的に発見しており新たな機能創成につながることを期待される成果である。

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

加えて $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜のトポロジカルな電子構造に注目し磁性ワイル半金属状態における表面伝導の発現を初めて捉えるとともに、その金属的性質を明らかにした。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210603-2/index.html>

表面伝導を活用した新型素子の開発に資することが期待される成果である。

(4) 江澤課題「電気回路によるトポロジカル量子計算方法の創生」

[課題概要]

電気回路でトポロジカル超伝導体モデルをシミュレートすることで、マヨラナ状態の検証を行う。更に、マヨラナ状態のブレイディングにより量子ゲートとして動作する事を実証し、次いで、電気回路を用いてトポロジカル量子計算が実行可能である事の基礎的実証実験を行う。また、実現に必要な可変電子素子・理想電子素子の開発を並行して行う。電気機械回路の知見を応用し、アナログ・デジタル集積回路などを用いて大規模実装への道筋をつける。

[研究成果]

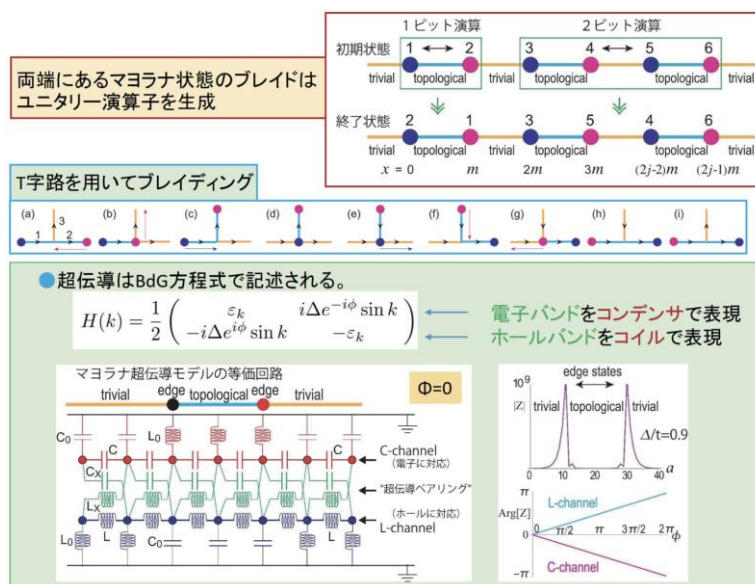


図 6-7 トポロジカル量子計算のゲート

図 6-7 に示す様に電気回路による量子計算のシミュレーションの構築を狙っている。

すでに電気回路でKitaev・トポロジカル超伝導体をシミュレートすることによりマヨラナ状態を生成できること、このマヨラナ状態をブレイドすることによりトポロジカル量子計算をシミュレートできることを示した。

またKirchhoff則がシュレーディンガー方程式の形に書き直せることから、伝送線路を用いてユニバーサル量子計算をシミュレートできることを示した。また LC 共振器の静電容量やインダクタンスを時間的に制御することによっても、ユニバーサル量子計算をシミュレートできることを示した。

Phys. Rev. B 103, 155425, 2021

(5) 松田課題「量子スピン液体におけるトポロジカル準粒子の解明と直接検出」

[課題概要]

物質の持つトポロジーに由来して創発されるマヨラナ粒子と非可換エニオンは、環境ノイズに強いトポロジカル量子計算を実現するための鍵となる準粒子である。これらの準粒子の舞台となるKitaev量子スピン液体と呼ばれる状態にある磁性体において、トポロジーに関連する性質を徹底的に解明し、これを母体とした新しい電子相を創出する。さらに創発準粒子の直接検出と可視化により、トポロジカル量子計算の基盤技術を確立する。

[研究成果]

トポロジカル準粒子の解明と直接検出を狙っている。すでにKitaev量子スピン液体の候補物質である磁性絶縁体 α - RuCl_3 の量子スピン液体状態において、熱ホール伝導度の高精度測定に成功している。

Science Vol. 366, Issue 6471, pp. 1355-1359 (2019)

Science Vol. 373, Issue 6554, pp. 568-572 (2021)

Science Vol. 373, Issue 6559, pp. 1122-1125 (2021)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210730-2/index.html>

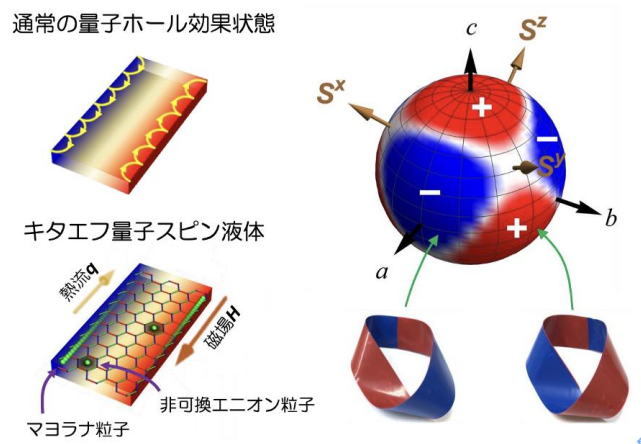


図 6-8 (左) 通常の量子ホール効果状態とキタエフ量子スピ液体における半整数熱量子ホール効果状態のイメージ図 (右) 理論模型による半整数熱量子ホール効果の符号の角度依存性

観測結果から得られた熱量子ホール効果の符号は、図 6-8 に示す理論予想とほぼ一致することが明らかになった。現実物質では理論模型では考慮されていない相互作用があると考えられるが、そのような相互作用によらずマヨラナ粒子や非可換エニオン粒子が安定して物質中に存在することを示している。

マヨラナ粒子や非可換エニオン粒子のもつトポロジーがはじめて実験的に示された。今後、これらの粒子を直接検出し操作する方法への展開が期待される。

(6) 越野課題「トポジカル超精密原子層物質の創成」

[課題概要]

原子層物質からなるナノリボン、2次元ネットワーク、3次元曲面物質等の幾何学的構造体「超精密原子層」を実現し、原子層トポジカルバンドエンジニアリングの基礎を確立する。若手物性理論学者がリーダーシップをとり、熟練した有機化学、材料工学の研究者とチームを組むことで、トポジカル物性を持つ超精密原子層を理論的に予言、多孔性金属錯体 (MOF) のナノ空間技術を用いて創成、革新的な物性を持つデバイスを実現する。

[研究成果]

研究代表者が物質設計を行い、共同研究グループが実証するチーム構成である。すでに非磁性金属に二次元金属である NbSe₂ 超薄膜、強磁性体に二次元強磁性体である V₅Se₈ 超薄膜を用いた磁性 ファンデルワールス (vdW) ヘテロ構造を作製し、NbSe₂ に強磁性を誘起することに成功している。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220915/index.html>

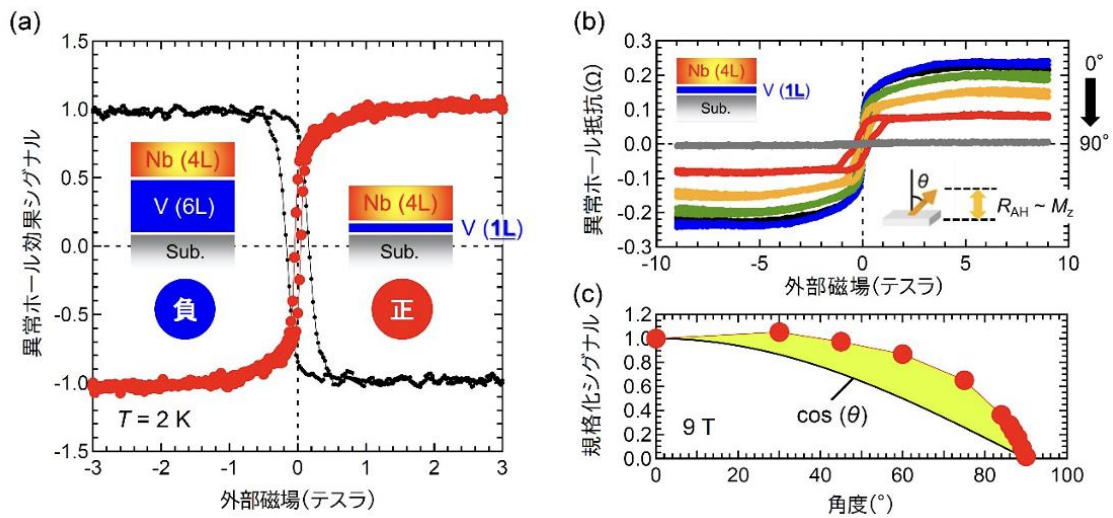


図 6-9 (a) NbSe₂/V₅Se₈ 磁性 vdW ヘテロ構造の異常ホール効果 (b) 正の異常ホール効果を示す試料に対して測定した異常ホール効果の外部磁場角度依存性 (c) 磁場 9T におけるシグナルの角度依存性

図 6-9 に示す実験と理論の比較からこのヘテロ構造の界面では NbSe₂ 中の伝導電子のスピンとバレーの両方が自発的に分極した「フェロバレー強磁性」という新しい状態が形成されていることを明らかにした。これは現在注目されているスピントロニクス・バレートロニクスの分野に新たな展開が期待されることを意味する。

(7) 予課題「Beyond Skyrmion を目指す新しいトポロジカル磁性科学の創出」

[課題概要]

3次元磁気構造を観察するための新しい電子顕微技法を開発し、スキルミオンストリングやヘッジホッグ(モノポール)、ホプフィオンなどの未知の3次元トポロジカル磁気構造の探索と観察を目指す。また、これらのトポロジカル磁気構造を発現する新物質や、それらが示す新しい物性現象や物質機能を予測・探索・検証することで、Beyond Skyrmion 時代の新しいトポロジカル磁性科学を創出する。

[研究成果]

スキルミオン結晶は、磁性体中で磁気モーメントにより形成される磁気渦(スキルミオン)が周期的に配列した磁気構造で、位相幾何学的な特徴を持つために熱揺らぎなどの外部擾乱に対して堅牢であるという性質や、通常の磁気構造よりも小さな外場刺激に対して大きな電磁応答を示すという性質を持つ。そのため、安定かつ省電力なメモリ素子やコンピューティング素子を実現するための革新的な磁気構造として注目を集めている。

これまでキラル磁性体中の単一のスキルミオンは、-150°Cの低温条件下では電流によって駆動できることが報告されていたが、本課題では室温で駆動に成功している。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211124/index.html>

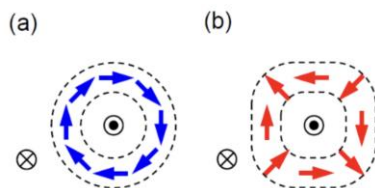


図 6-10 (a) はスキルミオン、(b) はアンチスキルミオンの模式図

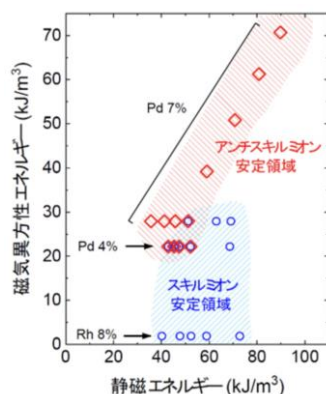


図 6-11 アンチスキルミオンとスキルミオンの安定領域

また図 6-10 に模式図を示したが、図 6-11 に示す様に物質組成を変えることで磁気異方性を自在に制御でき、室温でアンチスキルミオンを安定化させるのに優れた物質であることを明らかにした。今後のアンチスキルミオンのトポロジカル物性の研究および物質設計や室温アンチスキルミオンを用いたさまざまな高性能磁気デバイスの実現に貢献すると期待される成果である。

https://www.riken.jp/press/2022/20220125_1/index.html

加えて空間反転対称性のある系で発現する新しいタイプのスキルミオン結晶の低エネルギー励起の性質を調べるために、スーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションを行った。その結果スキルミオン結晶は 2 種類の低エネルギー励起のモードを持つことが明らかとなり、これらの励起はそれぞれ物質の「磁気的な性質」と「電気的な性質」を担う電子の「スピン」と「電荷」の自由度に由来する励起で、両者が完全に分離・独立していることを発見している。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220630-2/index.html>

(8) 島野課題「トポロジカル非線形光学の新展開」

[課題概要]

物質中の電子波動関数のトポロジカルな位相に起因する特異な光応答、特に非線形光学応答を探求する。ディラック半金属・ワイル半金属等に現れるシフト電流や円偏光起電力効果を、光学測定と静的な輸送現象測定から相補的に探求し、新原理に基づく光電変換現

象を開拓する。その基礎概念をスピン流、超伝導体、さらには強相関電子系へと拡張し、フロッケエンジニアリングに基づく光エレクトロニクス of 基盤を構築する。

[研究成果]

塚崎課題と同じく磁性ワイル半金属の中でも大きな異常ホール効果を示す $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 薄膜に注目しており、協調して推進しているが、本課題では光による制御がポイントである。

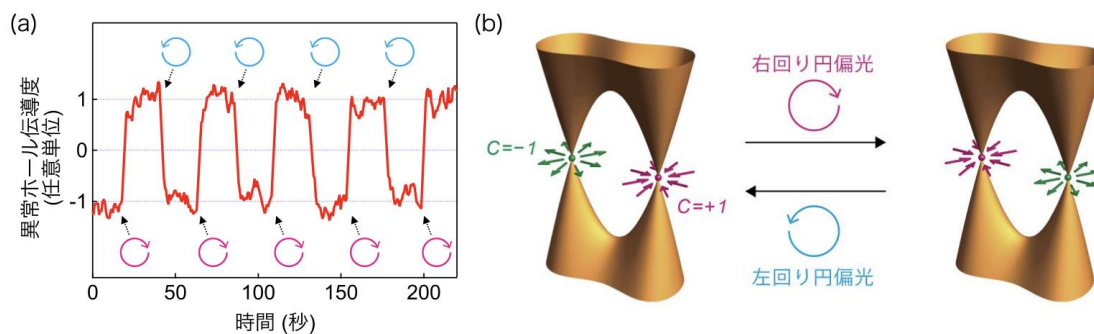


図 6-12 異常ホール効果の符号が右回り・左回りの円偏光によって不揮発に反転していることを示す結果 (a)右回り円偏光、左回り円偏光を繰り返し照射した際の異常ホール伝導度の時間変化 (b)ワイル粒子のカイラリティ反転の概念図

すでに磁性ワイル半金属中の電子が持つカイラリティと磁化を光によって反転させることに成功している。図 6-12 に示すように円偏光のヘリシティ（右回り 左回り）を交互に変えることで異常ホール伝導度の符号が繰り返し反転している。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20221220/index.html>

これは一度反転が起きた後は円偏光の光を切ってもその状態が継続する不揮発な現象であることも確認できている。外部磁場を必要とせず、光で直接、磁化、カイラリティ制御可能であり、光の情報をワイル半金属中に不揮発に書き込むといったことが実現されることが期待できる。新たな光機能実現が示唆される成果である。

フォトンクスは胡課題と岩本課題が対象である。

(9) 胡課題「人工グラフェンに基づくトポロジカル状態創成と新規特性開発」

[課題概要]

グラフェンや人工グラフェン等ディラック型分散関係を示す蜂の巣型物質から出発し、ナノテクノロジーを活用した実空間局所的制御に基づくバンドエンジニアリングを通じて、新奇トポロジカル状態を創成する。革新的フォトンクス機能を目指して、光渦多重素子やアイソレータフリーな光通信帯域・GaN系青色トポロジカルレーザを開発する。また、様々なトポロジカル特性の融合による新機能創成の探索も行う。

[研究成果]

トポロジカル特性由来のレーザー発振現象を利用し極小で指向性の優れた固体レーザー光源への展開を狙っている。

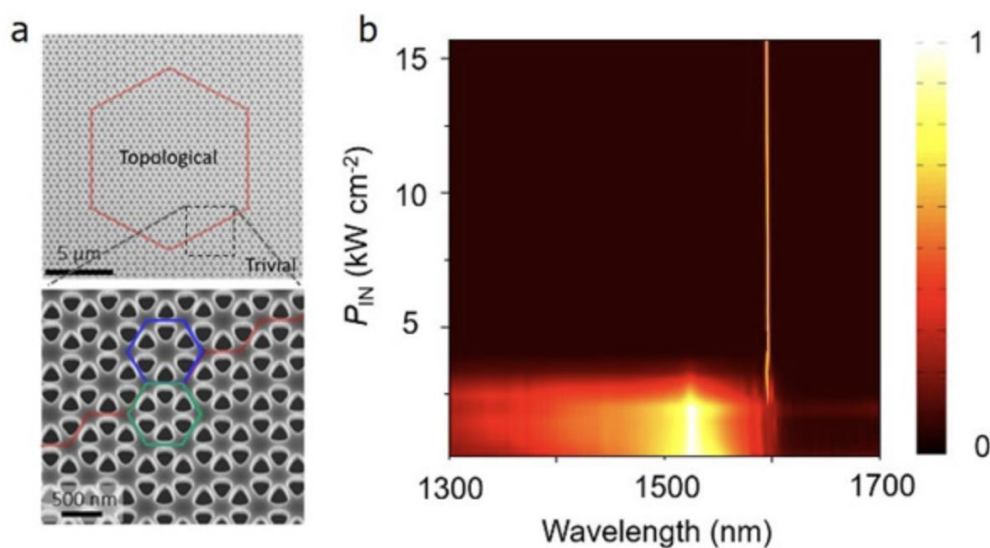


図 6-13 (a) トポロジカルフォトニック結晶共振器の SEM 像 (b) レーザースペクトルのポンピングパワー依存性

今までのレーザーにもよく用いられる発光性半導体 InGaAsP に薄膜の面内方向での結晶構造に新たな工夫を加えた。具体的には図 6-13 に示す様にハニカム構造に微調整を加えることによって得られる 2 種類のフォトニック結晶を用いて、微小なレーザーデバイスを開発した。デバイスの中心部には、トポロジカル特性を示すフォトニック結晶を配置し、トポロジカル特性を持たないフォトニック結晶でその周辺を囲み、光が中心部に閉じ込められる共振器を作製しレーザー発振に成功した。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20191217-2/index.html>

これは光現象のみならず、電子系や弾性波を含む多くの振動現象にも応用でき、幅広い新規機能探索とデバイス開発につながることを期待される。

(10) 岩本課題「トポロジカル集積光デバイスの創成」

[課題概要]

集積フォトニクス技術とトポロジーの概念を融合し、カイラルエッジ状態を利用した光通信波長帯一方向性導波路や、スキルミオンレーザ等の新奇トポロジカル集積光デバイスを実現する。また、集積フォトニクス技術を活かした様々なトポロジカル光状態を実現し、その応用可能性を探求する。これらの研究を通して、トポロジカル科学とフォトニクスの相互リンクを形成し、新たな光技術の創出とトポロジカル科学の発展に資する。

[研究成果]

胡課題が発光素子への展開を狙っているのに対し本課題は光導波路への展開を狙っている。特に一方方向にのみ光が進むことが許されたカイラルエッジ状態を用いることができれば、ゆらぎや欠陥に強い安定した光導波路を実現することが可能になる。

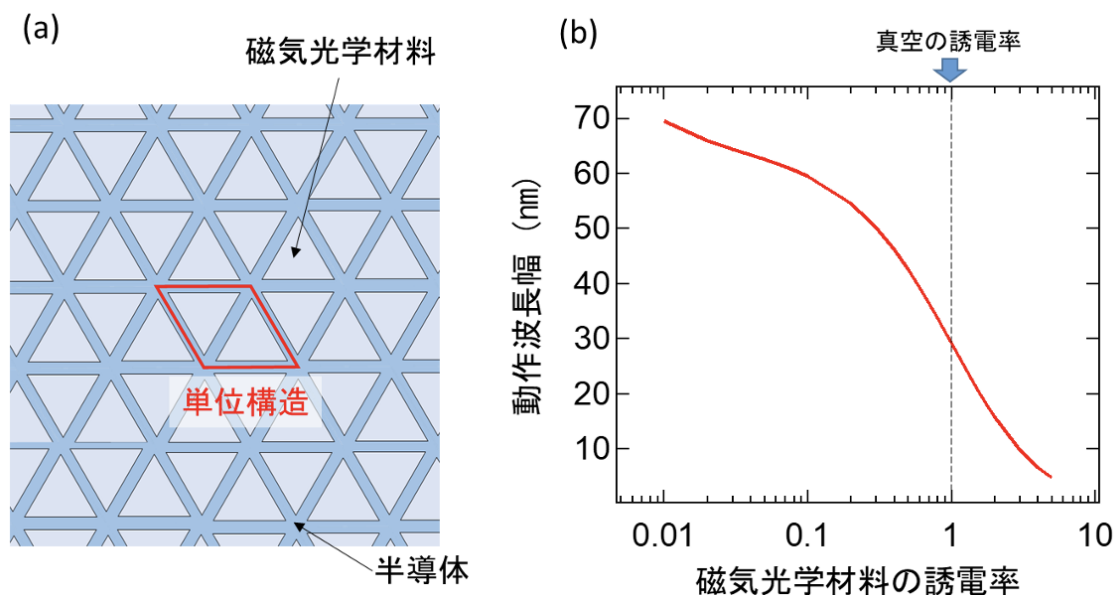


図 6-14 (a)磁気光学材料を含むフォトニック結晶の模式図 (b) 磁気光学材料の誘電率とカイラルエッジ状態を用いたトポロジカル光導波路の動作波長幅の関係

本課題では図 6-14 (a)に示す磁気光学材料と半導体からなる単位構造 (赤枠) を周期的に配列した三角格子フォトニック結晶に注目した。この構造において磁気光学材料の誘電率を変化させた場合のフォトニックバンド構造を数値解析により求めた。解析ではナノグラニューラー材料 (注 1) に相当する磁気光学効果の大きさを仮定している。その結果、図 6-14 (b)に示すように磁気光学材料の誘電率が低下するにしたがって、カイラルエッジ状態が存在し得る波長幅が大きく拡大することを見出した。誘電率 0.01 を持つ磁気光学材料の場合には、その波長幅は光通信波長 1550nm において約 70nm となることがわかり、これは過去に光通信波長で報告されている値の 1000 倍以上に相当する。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220428/index.html>

これは一方向性光導波路の実現に向けた大きな成果であり、小型高効率なアイソレータへの展開も期待できる

注 1 : 誘電体の母材のなかに、ナノサイズの微小粒子が分散した構造。鉄やコバルトなどの強磁性金属を分散させた系では磁気光学効果が発現することが知られている。

以下の佐藤課題は計測機器の開発であり、全ての物性材料に資するものである。

(11) 佐藤課題「ナノスピン ARPES によるハイブリッドトポロジカル材料創製」

[課題概要]

新しいハイブリッドトポロジカル材料の開拓とトポロジカルデバイス動作時のその場評価のために、これまでと比べて1桁以上上回る世界最高空間分解能で、電子の持つ3つの基本的な物理量「エネルギー」「運動量」「スピン」を決定できるナノスピンARPES装置を開発する。本装置によるナノ空間電子状態解析により、量子計算に使えるトポロジカル高温超伝導材料や、超低消費電力のトランジスタに利用できる二次元トポロジカル絶縁体材料を創製し、そのデバイス化への道を拓く。

[研究成果]

角度分解光電子分光 (ARPES) を世界最高空間分解能で電子の持つ3つの基本的な物理量「エネルギー」「運動量」「スピン」を決定できる装置を開発することを狙っている。サイトビジットの助言を活かし、図6-15に示す「ベイズ推定」という統計学的手法を用いて電子構造の全貌を明らかにする新しい解析方法を開発した。その結果「トポロジカル絶縁体」と呼ばれる新奇物質における相対論的ディラック電子の質量を10年越しに正確に決定することに成功した。(d)に示すように、モデルIIを仮定した場合に、バンドの交点領域付近(赤枠)において違いが顕著に現れた。ベイズ推定による評価はほぼ100%の確率でモデルIIの方が統計的に妥当であることを示した((d)右図)。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210727-4/index.html>

さらに熱や光などの刺激に強い原子層モット絶縁体の発見、カゴメ格子超伝導を担う電子軌道を解明などの重要な成果を挙げている。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20211007/index.html>

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

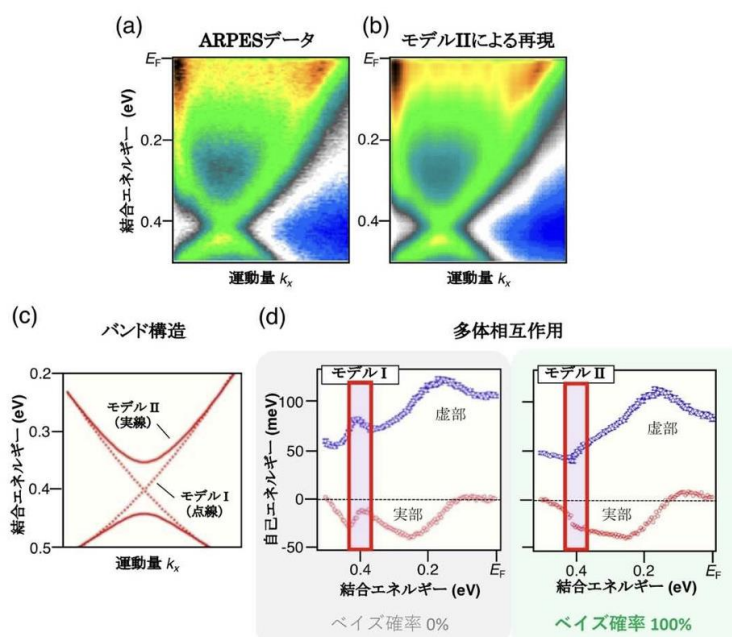


図6-15 (a)光電子強度の実験データ (b)ベイズ推定による解析結果(モデルIIの場合)
(c)バンド構造 (d)モデルI(質量無し)とモデルII(質量有り)

トポロジーは数学の概念であり、数学者が本研究領域に参加している意義は非常に大きい。

(12) 河東課題「物質のトポロジカル相の理論的探究」

[課題概要]

トポロジカル相の研究において、数的手法の有効性は明確であるが、未だにその全貌をとらえるには至っていない。広範な物質系を対象とするトポロジカル相の普遍的理論を構築し、新たな次元の材料・デバイス開発の基礎を与えるため、数学者と理論物理学者の協働を行う。この研究は、エニオンの働きによって演算を行うトポロジカル量子コンピュータの数学的、物理的な基礎理論の研究にも有効である。

[研究成果]

「最先端の数学と理論物理の協働で物質のトポロジカル相を理論的に研究し、新たな材料・デバイスの開発の理論的基礎を築くことを目的とする」という大きな課題を設定している。トポロジカル現象である非エルミート表皮効果等の新奇物理現象の発見など物性物理への貢献は大きく、量子スピン系における SPT 相の群コホモロジーによる分類についての予想を解決したことは、研究参加者である緒方氏の Henri Poincare 賞の受賞にもつながった極めて高い成果である。

CREST チュートリアル・ワークショップ「物質のトポロジカル相の理論的探究」を定期的で開催するなど、若手育成および若手間ネットワーク形成の活動を積極的に進めている。女性研究者の活躍も目覚ましく、ダイバーシティ的な観点でも評価できる。数学と物理のさらなる融合を期待するだけでなく、対象となる物理分野を他に広げることで、他チームとの領域内連携も大いに期待できる。

有機化学、高分子化学も領域の広がりを考える上で非常に重要である。

(13) 山本課題「自己組織化トポロジカル有機マイクロ共振器の開発」

[課題概要]

分子の自己組織化過程の経時変化の観察と解析により、集合構造が精密に制御されたトポロジカル有機マイクロ共振器構造を構築する。作製したトポロジカルマイクロ光共振器から、高指向性円偏光レーザー、先端光渦レーザー、有機室温ポラリトンレーザーなど、トポロジカルな特徴をもつ有機レーザーの実現を目指す。作製した共振器を用いた、外部環境変化を敏感に検知可能な高感度センシング素子の開発を行う。

[研究成果]

有機マイクロ材料をベースに光機能の展開を狙う。すでに図 6-16 に示す様に有機マイクロ球体から発生する円偏光発光の角度依存性を実証している。

Science Vol. 377, Issue 6606, pp. 673-678 (2022)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210608/index.html>

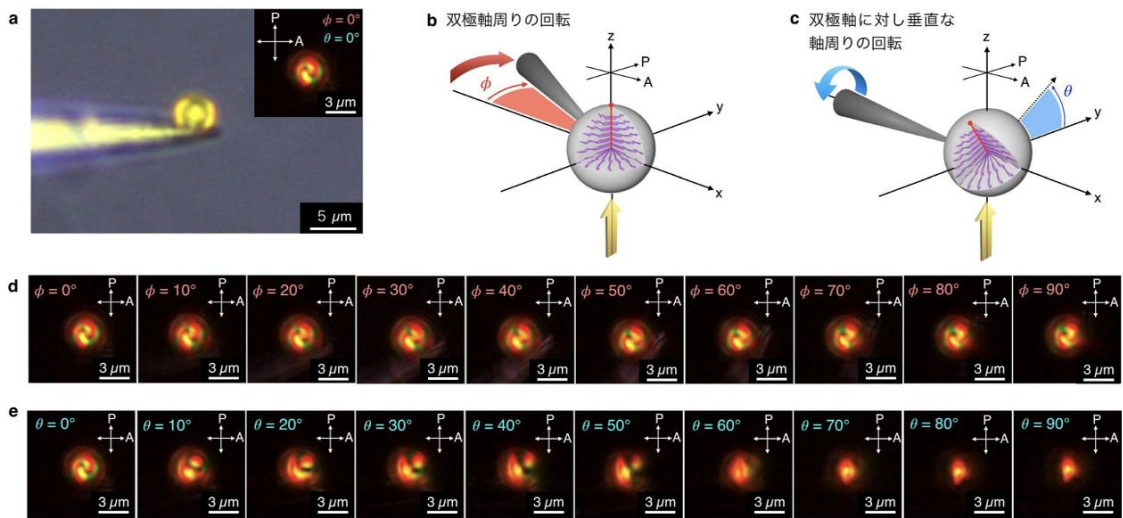


図 6-16 (a) 微細な針の先端に取り付けた μ -(S,S)-PFBT とスパイラル POM 模様 (b) (c) 球体 1 粒子の双極軸周りの回転 (ϕ) 操作と双極軸に対して垂直な軸周りの回転 (θ) 操作の模式図 (d) 双極軸周りの回転 (ϕ) に対してマイクロ球体が見せるスパイラル状 POM 画像と (e) 双極軸に対して垂直な軸周りの回転 (θ) に対する角度依存 POM 画像

異方的に巨大な円偏光を放出するマイクロメートルスケールのキラル光源として機能することから高輝度液晶ディスプレイ用光源や 3D ディスプレイなどへの応用が期待される。

(14) 出口課題「高分子弾性のホモロジー的トポロジー理論の構築と環状混合デバイス」

[課題概要]

ホモロジーを応用して高分子ネットワーク弾性の理論を革新し、任意のネットワークの弾性率を厳密に導く方法を与え、ゴムやゲルの力学特性の設計に挑戦する。環状高分子を合成し、環状鎖を用いて線形鎖を束ねる環状混合ソフトマテリアルを実現する。散乱実験、応力歪曲線測定、粘弾性測定、相分離動的構造変化の 3D 観察を行い、理論と比較しながら理学的基礎を深め、工学的な応用として新奇なエラストマーの創製を試みる。

[研究成果]

任意のネットワークの弾性率を厳密に導く方法を構築し力学特性の設計に資する課題である。フォトリソグラフィを用いて高分子ネットワークを構築することから注目されているジャイロイド相の欠陥分析を行っている (図 6-17)。ジャイロイド構造材料は、その独特の 3D ネットワーク構造により、さまざまなアプリケーションに有望だが、欠陥は材料特性に影響する。そこで構造欠陥を 3 次元透過型電子顕微鏡を使用して観察し、さまざまな点欠陥や線欠陥、転位を明確にした。多くの点欠陥が転位の近くに周期的に見られるが、転位によって引き起こされた格子歪みのために形成されたことが示唆された。この成果は材料設計に資するものである。

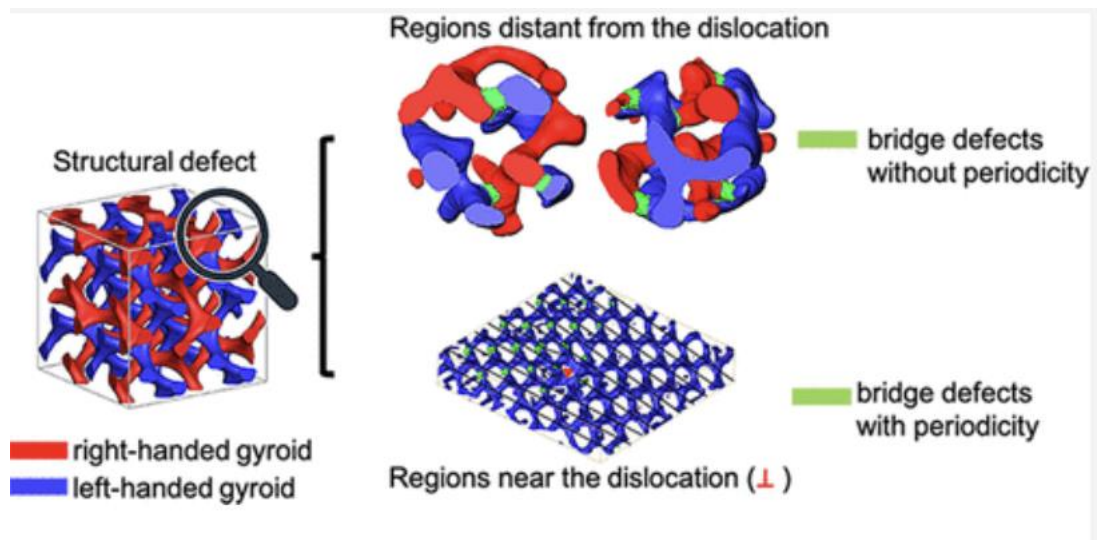


図 6-17 ジャイロイド相の模式図（左）と欠陥分布（右）

7. 総合所見

応募数は多いとは言えないが、これは領域の達成目標としてデバイス実証という高い目標を上げたためと考えている。しかし、応募された提案の内容はいずれも極めてレベルが高く、選考には大変苦慮した。その結果、精鋭チームを採択することができ、成果も順調に進展している。

まず目を見張るのが中辻課題の進展である。ワイル反強磁性材料による超高速メモリの実現が現実味を帯びている。ワイル反強磁性は基礎学理の点からも国際的注目度が高いが、基礎研究の対象となる物質が応用研究と直結しているという点で例外的に重要な研究であると判断している。ファム課題も SOT-MRAM 実現に向け力強く進展しており、産業界とも連携が開始されている。

塚越課題は実験家と理論家の連携が非常に密であり、また、領域内の他のチームとの連携にも積極的である。興味深い界面機能は 3 次元磁気センサーにとどまらず、広範な展開も期待したい。島野課題も同じ材料に注目しながら非線形光学応答を探索しており今後、課題間のシナジーに期待したい。

于課題も常温で安定なスキルミオン結晶が実現されており、発足して間もないが、今後の展開を期待している。

松田課題はマヨラナ準粒子の検出で世界をリードしている。超伝導を用いたマヨラナ準粒子の研究のいくつかは頓挫している中で、松田 T の研究がマヨラナ準粒子の決定的証拠と国際的に認知されることを期待したい。

越野課題は MOF による超精密原子層設計で重要な成果を期待したい。理論物理学者が化学の実験研究者とチームを組むという CREST ならではのシナジー効果を期待したい。

江澤課題は電子回路によりトポロジカル量子計算をシミュレートするという斬新なテーマである。実験グループとの積極的な連携を図っており、ここでもユニークなシナジー効果を期待したい。

フォトニクスでは光源の胡課題と光導波路の岩本課題という 2 つの課題を採択できた事は大きい。両研究ともトポロジカルフォトニクスの集積化に向けた研究を展開しており、将来のビヨンド 2 ナノにおいて要求される光電融合の先駆的研究成果を期待したい。

有機材料も山本課題と出口課題と 2 課題採択でき、領域として広がりを実現できた。山本 T はナノ領域で制御された構造の作製に成功しており、光との結合によりユニークな現象の発見につながるものと期待している。出口は厳密解を専門とする数理物理学者が化学合成の専門家とタッグを組むことでユニークな研究展開を期待している。

ARPES の佐藤課題はトポロジカル物質分析に資するものであり、ナノスケールでのスピン状態に感度を有する ARPES という未踏の領域での検出器の開発の成功を期待している。

河東課題は数学者と物理学者が連携することで物理、化学両分野のチームへの貢献が期待できる。若手育成にも積極的に取り組んでおり、そこで育ったハイブリッド型の研究者が

将来の科学技術の発展に寄与するものと期待している。

以上を踏まえ、今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引き続き努力していきたい。

以上