

領域略称名：トポ物質科学
領域番号：2701

令和2年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

令和2年6月

領域代表者 京都大学・大学院理学研究科・教授・川上 則雄

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額	6
4 研究領域の目的及び概要	7
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	9
6 研究目的の達成度及び主な成果	11
7 研究発表の状況	16
8 研究組織の連携体制	21
9 研究費の使用状況	22
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11 若手研究者の育成に関する取組実績	25
12 総括班評価者による評価	26

研究組織

(令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	15H05851 トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティアの総括	平成27年度 ～ 令和元年度	川上 則雄	京都大学・理学研究科・教授	7
Y00 国	15K21717 トポロジカル物質科学国際ネットワーク Topo-Q の構築	平成27年度 ～ 令和元年度	川上 則雄	京都大学・理学研究科・教授	9
A01 計	15H05852 強相関物質のトポロジカル相	平成27年度 ～ 令和元年度	前野 悦輝	京都大学・理学研究科・教授	7
B01 計	15H05853 対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求	平成27年度 ～ 令和元年度	佐藤 宇史	東北大学・材料科学高等研究所・教授	5
C01 計	15H05854 トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象	平成27年度 ～ 令和元年度	藤澤 利正	東京工業大学・理学院・教授	5
D01 計	15H05855 トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子	平成27年度 ～ 令和元年度	川上 則雄	京都大学・理学研究科・教授	6
総括班・総括班以外の計画研究 計 6 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	16H00979 直接バンド観察で開拓する新奇強 相関トポロジカル量子相	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	近藤 猛	東京大学・物性研究所・准教授	1
A01 公	16H00980 ルテニウム酸化物薄膜を用いたト ポロジカル超伝導状態の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	打田 正輝	東京大学・工学系研究科・助教	1
A01 公	16H00986 磁場および粒子相関の制御による 超流動ヘリウム 3 のトポロジカル 量子臨界現象の探求	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	野村 竜司	東京工業大学・理学院・助教	1
A01 公	16H00994 トポロジカル超流動体の微小角運 動量検出	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	白濱 圭也	慶應義塾大学・理工学部・教授	1
B01 公	16H00977 トポロジカル超伝導体へのスピン 流注入と逆スピンホール効果	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	塩見 雄毅	東北大学・金属材料研究所・助教	1
B01 公	16H00978 先端ナノプローブ分光測定による トポロジカル物質の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	野村 晋太郎	筑波大学・数理物質・准教授	1
B01 公	16H00981 強相関ディラック・ワイル電子系 におけるトポロジカル電子相と異 常磁気伝導の開拓	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	藤岡 淳	東京大学・工学系研究科・講師	1
C01 公	16H00982 Twisted 二層グラフェンにおける 量子輸送現象	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	増渕 覚	東京大学・生産技術研究所・特任講師	1
C01 公	16H00983 単層 2 次元トポロジカル結晶絶縁 体の開発と、超伝導体との接合に よる協奏現象の探求	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	秋山 了太	東京大学・理学系研究科・助教	1
C01 公	16H00984 2 次元トポロジカル絶縁体と超伝 導体の接合におけるスピン依存伝 導	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	松尾 貞茂	東京大学・工学系研究科・助教	1
C01 公	16H00990 トポロジカルポンピング現象の 冷却原子を用いた新展開	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	高橋 義朗	京都大学・理学研究科・教授	1
D02 公	16H00985 強相関トポロジカル相のエッジ状 態・低エネルギー励起	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	桂 法称	東京大学・理学系研究科・准教授	1

D02 公	16H00987 量子スピン系に内在するマヨラナ ダイナミクスとそのトポロジー	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	那須 譲治	東京工業大学・理学院・助教	1
D02 公	16H00991 強相関電子系における非従来型ト ポロジカル超伝導理論	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	柳瀬 陽一	京都大学・理学研究科・准教 授	1
D02 公	16H00995 第一原理強束縛模型によるトポロ ジカル物質のバルク観測量提案	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	永井 佑紀	日本原子力研究機構・研究 員	1
D03 公	16H00993 第一原理計算を用いた新奇トポロ ジカル物質の探索	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	山内 邦彦	大阪大学・産業科学研究所・ 助教	1
D04 公	16H00975 トポロジカル相を活用した光ダイ ナミクスの時空間制御	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	小布施 秀明	北海道大学・工学研究科・助 教	1
D04 公	16H00988 ワイル超伝導相の探索とデバイス 提案	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	横山 毅人	東京工業大学・理学院・助教	1
D04 公	16H00989 トポロジカルバンドの自発形成と 相転移ダイナミクス	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	川口 由紀	名古屋大学・工学研究科・准 教授	1
A01 公	18H04212 鉄カルコゲナイド超伝導体とその 関連物質におけるトポロジカル相 の探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	鍋島 冬樹	東京大学・総合文化研究科・ 助教	1
A01 公	18H04213 ワイル超伝導体における自発磁化 の可視化	平成 30 年度 ～ 令和元年度	下澤 雅明	大阪大学・基礎工学研究科・ 准教授	1
B01 公	18H04214 イリジウム酸化物におけるワイル 電子による異常電磁気応答の探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	藤岡 淳	筑波大学・数理物質系・准教 授	1
B01 公	18H04215 空間反転対称性の破れた超伝導体 におけるエデルシュタイン効果の 観測	平成 30 年度 ～ 令和元年度	塩見 雄毅	東京大学・総合文化研究科・ 准教授	1
B01 公	18H04226 空間反転対称性の破れたバルク結 晶におけるワイル・ディラック物 性の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	村川 寛	大阪大学・理学研究科・助教	1
B01 公	18H04229 トポロジカル結晶絶縁体薄膜にお ける電界誘起量子伝導制御	平成 30 年度 ～ 令和元年度	吉見 龍太郎	理化学研究所・創発物性科 学研究センター・研究員	1

C01 公	18H04211 ハニカム構造をベースにしたフォ トニック結晶スラブのトポロジカ ルな性質	平成 30 年度 ～ 令和元年度	石原 照也	東北大学・理学研究科・教授	1
C01 公	18H04216 トポロジカルファンデルワールス 結晶ナノ試料における量子輸送現 象開拓	平成 30 年度 ～ 令和元年度	井手上 敏也	東京大学・工学系研究科・助 教	1
C01 公	18H04218 半導体二次元電子系と超伝導体の 接合における新奇輸送現象の探索 と解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	中村 壮智	東京大学・物性研究所・助教	1
D02 公	18H04220 機械学習を用いた多体系トポロジ カル相の探求	平成 30 年度 ～ 令和元年度	赤城 裕	東京大学・理学系研究科・助 教	1
D02 公	18H04223 量子スピン液体で発現する創発準 粒子のトポロジカル特性の安定性 とその制御	平成 30 年度 ～ 令和元年度	那須 讓治	横浜国立大学・工学研究院・ 准教授	1
D02 公	18H04225 強相関異方的超伝導体におけるト ポロジカル相の理論研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	柳瀬 陽一	京都大学・理学研究科・教授	1
D02 公	18H04228 トポロジカルフェルミアーキ:有限 温度での特異な準粒子励起の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	永井 佑紀	日本原子力研究開発機構・ 副主任研究員	1
D03 公	18H04224 ラインノード半金属およびその超 伝導物質の理論的探索	平成 30 年度 ～ 令和元年度	山影 相	名古屋大学・理学研究科・助 教	1
D03 公	18H04227 第一原理計算を用いたトポロジカ ル物性の機構解明と新物質設計	平成 30 年度 ～ 令和元年度	山内 邦彦	大阪大学・産業科学研究所・ 助教	1
D03 公	18H04230 第一原理計算による反強磁性体の 電子構造トポロジーとマクロ物性 の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	鈴木 通人	東北大学・金属材料研究所・ 准教授	1
D04 公	18H04210 トポロジカル相を活用した光の時空 間ダイナミクスの制御手法の開拓	平成 30 年度 ～ 令和元年度	小布施 秀明	北海道大学・工学研究院・助 教	1
D04 公	18H04222 非共面磁気秩序による輸送現象に おけるスピン揺らぎと乱れの効果	平成 30 年度 ～ 令和元年度	石塚 大晃	東京大学・工学系研究科・助 教	1
公募研究 計 37 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	314,210,000 円	241,700,000 円	72,510,000 円
平成 28 年度	280,930,000 円	216,100,000 円	64,830,000 円
平成 29 年度	314,600,000 円	242,000,000 円	72,600,000 円
平成 30 年度	274,430,000 円	211,100,000 円	63,330,000 円
令和元年度	226,070,000 円	173,900,000 円	52,170,000 円
合計	1,410,240,000 円	1,084,800,000 円	325,440,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

【学術的背景】

連続変形に対する不変性を記述する幾何学の概念「トポロジー」の重要性が、物質科学において広く認識されるようになってきた。特に、トポロジカルな性質に起因する現象に飛躍的な研究の進展がみられている。この分野にブレークスルーをもたらしたのは2005年の「量子スピンホール効果」の予言と、2007年の2次元量子井戸HgTe/CdTeでの実現である。これに続き3次元系でも次々と新物質が発見され、これらの物質群は「トポロジカル絶縁体」と呼ばれ、物質科学の新たな研究舞台を創り出してきた。

この驚くべき発展を遂げてきた分野で新学術領域研究「トポロジカル量子(略称)」(H22-H26, 代表:前野悦輝)が発足し、トポロジカル絶縁体の実証や、トポロジカル量子現象の共通認識を導くに至った。しかし、新奇なトポロジカル準粒子の実証を含め、その学問体系の樹立には至っていなかった。本領域は、先発した我が国の成果を新学術領域の「開拓」から「確立」までゆるぎないものにするため、前身領域に新たな分野を加えて大幅に再編成することで、世界の最前線でトポロジカルな自然観の構築を先導することを目指すものである。

【研究目的】

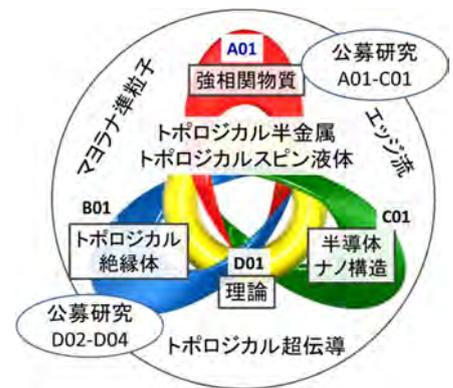
トポロジカル物質科学において新たなブレークスルーを生むためには、「強相関」による効果の理解、さらに結晶構造の「対称性」に基づくトポロジカル物質の開拓、および「ナノサイエンス」を駆使したヘテロ構造などによるトポロジカル相の人工制御が必須となる。本新学術領域の目的は、物質に内在するトポロジーを基軸として、強い電子相関・結晶対称性・半導体ナノ構造に由来する新奇物性開拓を行うとともに、トポロジカル量子相特有の準粒子を探索・実証し、その背後に横たわる量子凝縮相の物理を解明することである。これにより、強相関トポロジカル系、トポロジカル絶縁体・超伝導体、トポロジカル半金属などの研究を飛躍的に発展させるとともに、マヨラナ準粒子確証という野心的な課題にも挑戦する。これらの成果を基に分野横断型の研究領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」を開拓し、トポロジカル物質科学の基礎学理の構築と学問体系の樹立を目指す。

【研究の実施体制】

トポロジカル物質科学の基礎学理構築の鍵となるのが、上記の3つの視点からの研究戦略である。これらを強力に推進するため、以下の4つの研究項目を設定する：物質に即した3つの研究項目（「A:トポロジーと強相関」、「B:トポロジーと対称性」、「C:トポロジーとナノサイエンス」）とそれらの連携を強める横系となる研究項目「D:トポロジーと新概念」から構成される（右図参照）。各研究項目は、以下の計画研究

- A01: 強相関物質のトポロジカル相
- B01: 対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求
- C01: トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象
- D01: トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

と、これらに対応する複数の公募研究からなる。各研究項目が独自の研究を遂行するとともに、右図に示す連携を緊密に保つ。



《研究項目 A: トポロジーと強相関》計画研究 A01「強相関物質のトポロジカル相」のもとで、トポロジカル量子現象における電子多体効果の役割と重要性を明らかにし、研究の飛躍的展開と学理確立を図る。強い電子相関を起源とするトポロジカル相、特にトポロジカルに特徴づけられる超伝導相を中心に研究を推進する。主に(1)トポロジカル超伝導の探索と検証、(2)強相関人工超格子ナノ構造におけるトポロジカル相の実証、(3)スピン系の新奇トポロジカル量子相の研究、(4)強相関物質に現れるワイル半金属の研究、などを行う。

《研究項目 B: トポロジーと対称性》計画研究 B01「対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求」のもとで、対称性とトポロジーに基づく新物質・新物性探索および物性解明を推進する。主に(1)対称性とスピン軌道相互作用を起源とするトポロジカル絶縁体・トポロジカル結晶絶縁体の研究、(2)それらの物質に基づく超伝導物質の探索と輸送現象の物性解明、(3)トポロジカル量子相転移やマヨラナ準粒子の検出を、超高分解能スピン分解光電子分光やトンネル分光を駆使して行う。

《研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス》計画研究 C01「トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象」のもとで、半導体をベースとした低次元・ナノ構造を舞台とした新奇なトポロジカル現象の探索を推進する。主に(1)量子ホール及び量子スピンホールエッジチャネルを集積化したトポロジカルデバイスの構築とそのダイナミクス・非平

衡(量子)現象の解明、(2)分数量子ホールエッジに発現するトポロジカル相固有の準粒子のエニオン・非可換統計の検証、(3)量子スピンホール/超伝導接合におけるマヨラナ準粒子の検出を目指した研究を行う。

《研究項目 D: トポロジーと新概念》計画研究 D01「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」のもとで、強相関効果、対称性の役割、空間構造効果などに重点を置き、トポロジカル量子現象を理論的に解明する。A01-C01 との緊密な連携研究に加え、固体電子系に限らず統一的な枠組みとしての「トポロジーが紡ぐ物質科学」の一般理論を確立する。主に、トポロジカル相における(1)強相関の効果、(2)対称性の役割、(3)エキゾチック準粒子、特にマヨラナ準粒子の制御と検出に関わる理論研究を行う。また、(4)冷却原子気体におけるトポロジカル構造の解明と観測法の提案、さらに、(5)高エネルギー物理学などへの波及効果を目指したトポロジカル概念の一般化を行う。

《公募研究の役割》上記の各研究項目に公募研究 A01, B01, C01(実験研究)、および D02, D03, D04(理論研究)を設け、計画研究との連携を推進する。特に、実験と理論の融合を図り、共同研究を推進する。

【革新的・創造的な学術研究の発展】～新奇トポロジカル物性開拓・新概念の創出と挑戦的課題の克服～

(1) 研究期間終了時の達成目標:

トポロジーと「強相関」、「対称性」、「ナノサイエンス」の融合という新たな視点からトポロジカル物質の探索および新概念の創出を目指す。特に、これまで主として研究されてきた弱相関(半導体など)と強相関(磁性など)を融合し、物質科学全体を網羅する学問体系の構築を目指す。トポロジカル物質科学における上記 3 つの役割を解明することで、トポロジカルな概念を、物質科学の普遍的理解のための基礎学理として隅々まで浸透させ、革新的・創造的な研究の発展を目指す。

(2) 期待される成果:

上記の目標達成のため複数の分野間および国際的な連携を強力に推進することで、新たなトポロジカル絶縁体、半金属、超伝導体の物質開拓に加え、強相関の磁性体でのトポロジカル相の発見が期待される。特に挑戦的課題であるマヨラナ準粒子の実証のため、強相関や対称性を指針とした物質開発、実証のための理論提案などを総動員して、この難問に対する成果を得る。我が国が誇る強相関およびナノサイエンスの実験技術を駆使することにより、トポロジカル物質科学に新たな研究ステージをもたらすブレークスルーを起こす。

(3) 学術的意義と波及効果:

本領域発足以前は、物性物理の舞台にトポロジカル現象がどのように発現するかを探索することが研究の中心的課題であった。本研究領域では、これらの研究で芽生えてきた諸概念を統合することで、個々のトポロジカル量子現象を昇華し、新しい学術としての物質科学の幹を作り上げる。連携研究ネットワークの充実を図り、トポロジカル物質科学を強く推進する基盤を築く。さらに、トポロジカル量子現象は普遍的概念なので、関連する分野の研究者を結集して広い意味での物質科学においてトポロジーの概念を共有できるプラットフォームを構築する。本領域の発展は物質科学の学術水準の飛躍的な向上につながるのみならず、トポロジーを基軸として物質科学を超えた広い分野にもインパクトを与える。特に、最近「トポロジー」の概念が意識され始めている化学分野や工学分野も含む広い意味での材料科学の基盤を与える。さらには、トポロジーを共通概念として物質科学・材料科学にとどまらない、より広い科学への波及効果も期待される。

【連携研究の推進と人材の育成】

このような分野横断型領域における連携研究によって異なる分野の研究融合を推進し、この研究プロセスを通して新たな学問を切り拓く力を有する若手研究者を育成する。若手を国内外の研究機関に派遣し「他流試合」(研究討論)や共同研究を通して若手の研究能力を“励起”し国際的に活躍できる人材を育成する。さらに、上記のワークショップに若手中心で組織する日程を設け運営能力の強化も図る。

●**領域内連携の強化:** 研究項目間の有機的連携を図り、トポロジーを基軸とした総合的な分野形成を成し遂げるためには、領域発足の早い段階で各計画研究内での研究推進のための連携関係の構築と強化が急務である。また、公募研究と関連の計画研究との強い連携を構築する。具体的な方策として研究項目間での連携を図るため、テーマを絞った小規模研究会として「トポロジー連携研究会」を毎年度数回以上開催する。計画研究代表者は原則全ての研究会に出席して情報を収集し、各班の研究に反映させる。また、領域研究会、若手励起プログラムによる研究人材交流を活性化させる。

●**海外研究機関との連携:** マックスプランク研究所(ドイツ)や CIFAR(カナダ)などとのアライアンスワークショップなどを通じて、国外との連携を強化する。これは国際活動支援班が中心となって推進する。国際的な競争力を養い、国際共同研究を活性化するため、研究者を海外の研究機関に 1~2 週間程度以上派遣する(強い連携関係のあるドイツ・マックスプランク研究所など)。また、高木を起点としてドイツとの共同研究を図る。更にカナダ CIFAR メンバーである前野・安藤・高木を起点とし、カナダのワークショップに領域メンバーを送り込むなど、国際研究集会を通じて研究交流を図る。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

(1) 領域提案の審査結果に関して

【留意事項1】『トポロジーを基軸とする新たな観点から真に新しい物質や物理が創出されるのか、それとも既知のものに新しい解釈を加えるだけなのか、という点が理解しづらいため、この点についてより明確にすること。』

領域の取り組み: この問題に関しては、本領域の具体的な研究成果を用いて取り組んだ。例えば、トポロジカル磁性体やワイル半金属などは、量子ホール系などからは直ちには想像できないトポロジーを基軸とする新奇な現象である。A01の松田らはトポロジカル磁性体でマヨラナ準粒子を実証し、B01の佐藤らはトポロジカル半金属など新たなトポロジカル相を発見し、C01の藤澤らはナノ構造を持つ系でトポロジカルエッジの新奇な現象を明らかにした。これらの実験探索はD01の理論がサポートした。上記の新たなトポロジカル量子相は物質に内在するトポロジーに基づくことで正しく理解できるものである。

【留意事項2】『内容がやや専門的すぎて、領域の将来像や他分野への波及効果が見えにくいため、他分野の研究者にも理解できるような説明の明快さと具体例の提示など、情報発信の方法について工夫すること。』

領域の取り組み: トポロジカル現象の魅力を他分野へ普及するため、領域研究会(合計5回)に数学、原子核、素粒子などの講演者を招待し、トポロジカル物質科学の面白さを伝えた。さらに、12回開催した連携研究会でも他分野の講演者を多く招き研究内容を情報発信した。一方、非専門家に対しては、一般向け市民講座、高校への出張講義などで、トポロジカル物質に関する素朴な質問に答えた。中でも、H28年度開催のベドノルツ博士(1987年ノーベル物理学賞)を招いての高校生向けの市民講座は満足度の高いものであった。

【所見におけるコメント】『一方で、各計画研究の成果から普遍的な基礎学理を構築していく過程やトポロジーの概念を物質科学以外の他分野へ波及させる方法については、より具体的な検討が望まれる。』

領域の取り組み: このコメントには上記の留意事項2と重なる部分が多いが、具体例を追加する。H28年度に、素粒子、原子核、宇宙論が主体の慶應義塾大のトポロジープロジェクトとの連携研究会を開催した。また、H27年度の領域研究会では数学におけるトポロジーの講演を数学者に行って頂き、H29年度の国際会議では原子核分野の研究者にカイラル磁気効果について入門的講演をして頂くなど、異分野交流を深めた。研究面においては、物性と素粒子が連携することで中性子星内部のトポロジカル超流動に関する理論を構築した。

【参考意見】『理工系分野における本研究領域の認知度を向上させる取組として、トポロジーの視点から見ると、従来の様々な物性現象はどのように見え、また新たに存在が期待される何が見えてくるのかを、具体的な物質と現象を例に挙げて様々な機会に説明するよう努めてほしいとの意見があった。』

領域の取り組み: これまで様々な機会を利用してトポロジカル物質科学の面白さを伝えてきた。例えば、川上(領域代表)と佐藤(D01分担)はNHK教育テレビ番組「サイエンスZERO」の2016年ノーベル物理学賞特集の制作をサポートした。従来の物理現象をトポロジーの観点から見ることで新たな発想につながる例としては「ワイル半金属」がある。この半金属はトポロジカルな性質を持たないように見えるが、これがトポロジカル物質であることが実証された。本新学術領域でもB01による新たなトポロジカル半金属NbP、HfSiSが発見された。このような新現象の予言や発見に伴う感動を市民講座などで非専門家に伝えてきた。

(2) 国際活動支援班に関して

【留意事項】『TV会議による情報交換、若手研究者の交流において、アイデアの流出防止など、研究のプライオリティの確保に向けた検討や領域全体での効果的な運用方法等の具体化が必要である。』

領域の取り組み: メール配信、領域会議での徹底: 「国際活動支援プログラムに関する留意事項」という件名で、領域メンバー全員にアイデアの流出防止などを徹底した。さらに「必要がある場合、招聘者・派遣者・責任者の署名入りの機密保持の書類を作成する」と周知した。上記の例として、フンボルト大学の院生がJREP交換プログラムを利用して京都大学・前野研究室(A01)に滞在した際、指導教授が上記の誓約書を提出した。

【参考意見】『国際研究ネットワークの求心力を高め、そのハブとする方策については、計画の実施の中で更に工夫が必要であり、日本を中心にネットワークを組むことが、参加機関のメリットにつながることを示す必要性があるのではないか。』

領域の取り組み: 国際ネットワーク形成に関しては本支援班が起点となって“Topo-Q”ネットワークを提案した。これは、米国EPIQS、カナダCIFARなどのプロジェクトのみならず、マックスプランクなどの研究所とも連携を目指すものである。本領域の前身である「トポロジカル量子(略称)」(H22-H26, 代表: 前野悦輝)でネットワー

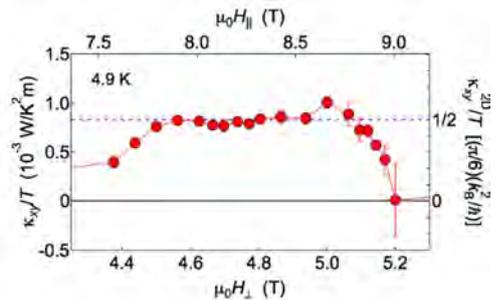
ク形成の地盤を築き、これを引き継いだ本領域は自然な流れとして“Topo-Q”の牽引役として認識されている。実際、“Topo-Q”の目玉である「国際アライアンスワークショップ」は本領域が主導して 11 回開催した。

(中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

【所見におけるコメント】『一方で、本研究領域の中心的課題である強相関トポジカル相の探索やマヨラナ準粒子の確証、挑戦的課題として標榜するナノサイエンスとの融合については、現段階で十分な成果が得られているとは言い難い。今後の展開に向けて、具体的な戦略を立てて取り組むことが必要である。』

(1) **強相関トポジカル相の探索**: これに関しては、Ir 酸化物で大きな進展が見られた。高木ら(A01)はキタエフ候補物質 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ を合成し新奇なスピン液体状態を実現することでトポジカル磁性体の新たな舞台を切り開いた[K. Kitagawa *et al.*, *Nature* **554**, 341 (2018)]。また、藤岡(公募 B01)らは $(\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x)_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ でワイル半金属由来の自発的ホール効果を観測し[K. Ueda *et al.*, *Nat. Commun.* **9**, 3032 (2018)]、新たなディラック半金属 CaIrO_3 を開拓した[J. Fujioka *et al.*, *Nat. Commun.* **10**, 362 (2019)]。

(2) **マヨラナ準粒子の実証**: 中間評価の直後に松田ら(A01 分担)がブレイクスルーを起こした。 $\alpha\text{-RuCl}_3$ における熱ホール効果の分数(1/2)量子化の世界初の実証である(右図)[Y. Kasahara *et al.*, *Nature* **559**, 227 (2018)]。欧米のマヨラナ準粒子探索が超伝導に集中する中、強相関物質(磁性体)でマヨラナ準粒子を初めて観測し、トポジカル物質研究に大きなインパクトを与えた。本領域の挑戦的課題に対する著しい成果である。



熱ホール効果の分数量子化:マヨラナ準粒子の観測に成功

(3) **ナノサイエンスとの融合**: 藤澤ら(C01 代表)は、ナノ構造とカイラルエッジ状態の融合でトポジカルな性質を反映した非平衡現象を切り開いた[K. Ito *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 197701 (2018)]。井手上(公募 C01)は WS_2 ナノチューブでトポロジーに由来した巨大光電流効果を観測[Y. J. Zhang *et al.*, *Nature* **570**, 349 (2019)]し、松尾(公募 C01)はマヨラナ準粒子制御に向けて、ナノワイヤと超伝導体の接合素子で超伝導クーパー対分離現象を観測[K. Ueda *et al.*, *Sci. Adv.* **5**, eaaw2194 (2019)]するなど、新たな潮流を育んだ。

【留意事項】『この分野において世界を先導する立場を獲得するという観点においては、現段階での成果は幾分物足りない印象があり、新奇物質探索・物性探索にかかる今後の研究計画についてより積極的かつ野心的な展開に期待したい。』上に述べた「トポジカル磁性体におけるマヨラナ準粒子の実証」は本領域独自の野心的テーマであり、中間評価後のこのブレイクスルーはトポジカル物質コミュニティに大きなインパクトを与えた。今後のトポジカル磁性体の研究の出発点ともなる重要な成果であり、この方向での研究で世界を牽引している。また、本領域 A01 で初めて発見された $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のネマチック超伝導は、その後、鉄系超伝導等にも広く波及し、昨年度よりネマチック現象をテーマとした新学術領域研究も立ち上がった。

【参考意見】

(1)『新奇物質探索・物性探索において主導的な役割を担う研究項目 A01 及び B01 の活動をより活性化する必要がある。予算の重点配分、公募研究での人材補充などの検討も含め、体制の強化を図ることが望まれる。』

A01 の物質開拓では、上記の高木らの研究で強相関物質探索が加速された。公募の藤岡らの参加により、強相関 Ir 系トポジカル物質開拓を強化できた。B01 の物質探索では、代表の佐藤らのグループが公募 D03 の山影・山内らの理論と連携し、新奇な半金属物質を見つけ出した。さらに山影が予言した線ノード半金属 CaSb_2 が超伝導体であることを前野ら(A01)が発見し、理論の佐藤ら(D01)と共著論文を発表した。

(2)『トポロジーが関係する現象・物性の本質は何か』という観点においてトポジカル物質科学の学理構築を目指すことが望まれる。』

この5年間程で、これまで個別の分野で研究されてきた半導体・超伝導体・半金属・磁性体をトポロジーの観点から融合できる段階にきた。特に、強相関のトポジカル磁性が半導体・超伝導などに融合されてきたことは特筆に値する。この意味で弱相関から強相関物質まで記述できる枠組みは構築されたと考えている。一方で、トポジカル現象は最近、非平衡系(非エルミート系)などにも大きく波及・展開され、さらには“fragile topology”という新たな概念も昨年導入された。将来的には、これらの新たな発展も包括するトポジカル物質科学の学理構築が必要である。これに関しては、現在進行中である。

(3)『他分野の研究者に向けた情報発信及び若手研究者・大学院生の育成の観点から、トポジカル物質科学の準専門書、教科書の出版が望まれる。』

教科書「トポジカル絶縁体・超伝導体」(C01 野村, 2016)や「ARPES で探る固体の電子構造～高温超伝導体からトポジカル絶縁体～」(B01 佐藤ら, 2017)は、本分野に参入する多くの学生・研究者に読まれている。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

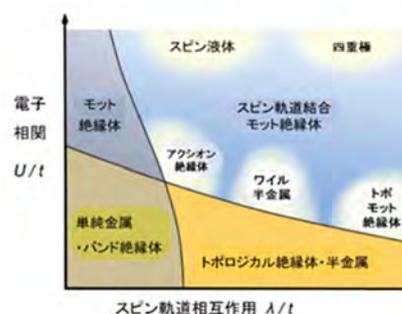
(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

本新学術領域は、物質に即した研究項目「A:トポロジーと強相関」、「B:トポロジーと対称性」、「C:トポロジーとナノサイエンス」と理論の研究項目「D:トポロジーと新概念」が連携し、新奇物性開拓を行うとともに、トポロジカル量子相特有の準粒子を探索・実証することを目的としている。以下に研究項目ごとに設定目的と達成状況をまとめる。

《研究項目 A: トポロジーと強相関》

【設定目的】 超伝導体・磁性絶縁体・半金属などの物質の中でトポロジカルな量子状態を特徴とする物質や現象を見出し、特に電子同士の相互作用が強い「強相関電子系」ならではの効果(例:下図)を理解することを目的に設定した。

【達成状況】 顕著な成果として、世界に先駆けて、電子の分数化状態であるマヨラナ準粒子の存在を確実にする観測事実を得た。これはルテニウム化合物磁性絶縁体の量子スピン液体状態で、熱ホール効果の半整数量子化を発見するという独自のアプローチによる。また、トポロジカル物質の中から、世界初のネマチック超伝導の発見、アンチペロブスカイト酸化物で世界初の超伝導の発見、線ノード半金属での超伝導体の発見などの成果を挙げた。さらに、時間反転対称性を破るトポロジカル超伝導体の研究を深化させた。これらの成果から、トポロジーの視点が、既知の現象に別の見方を付加するというだけのもではなく、新しい物質や新奇現象を生み出す強い原動力になることを明確に示した。

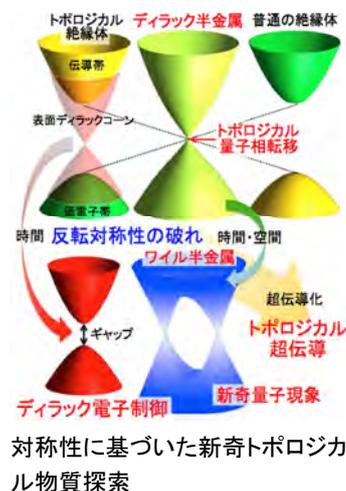


強相関系で予想されるトポロジカル相図

《研究項目 B: トポロジーと対称性》

【設定目的】 結晶の対称性を基軸として、ディラック・ワイル半金属、トポロジカル超伝導体などの新しい種類のトポロジカル物質を開拓(右図)するとともに、トポロジカル物質が発現する新奇量子現象やエキゾチック準粒子の性質を解明することを目的に設定した。

【達成状況】 対称性を基軸として新しいトポロジカル物質を開拓し、トポロジカル物質が発現する新奇量子現象やエキゾチック準粒子の性質を解明した。スピン分解 ARPES やトンネル分光などの先端分光技術と高品質単結晶・薄膜作製技術の連携により、トポロジカル絶縁体薄膜におけるディラック電子制御に成功した他、空間反転対称性を破るワイル半金属、新しい準粒子を内包するカイラル結晶など、数々の新しいトポロジカル半金属を実証した。トポロジカル超伝導体においては、超伝導接合系における超伝導対称性の実験や新型トポロジカル超伝導体候補物質の実証が進展し、奇周波数クーパ対の理論においてもトポロジーの概念の導入により新しい知見が得られた。



対称性に基づいた新奇トポロジカル物質探索

《研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス》

【設定目的】 半導体ナノ加工、半導体に超伝導体や磁性体を接合したハイブリッド構造、冷却原子など非固体素子の制御技術を用いて、個々のバルク母材料にはない新奇なトポロジカル量子現象を引き出し、トポロジカル系に特有なエキゾチックな準粒子の振る舞いを明らかにすることを目的に設定した。

【達成状況】 計画研究・公募研究により、多様なナノサイエンスによる人工トポロジカル相に関する研究を推進した。例えば、半導体ナノ構造を活用し、カイラルエッジ状態の動的現象・非平衡現象を朝永ラッティンジャー流体の物性を検証した研究では、エッジ状態に現れるカイラルプラズモンの特性が明らかになった。また、歪みバンドエンジニアリングによって量子スピンホール系の高品質化に成功し、トポロジカル-非トポロジカル相図やベリー位相の変化が明らかになった。その他、二次元系(半導体ヘテロ構造、表面状態、グラフェン、遷移金属カルコゲナイドなど)や、一次元系(ナノチューブ、ナノワイヤなど)、超伝導や磁性体とのハイブリッド系、さら

に、固体素子の枠を超えて、冷却原子や光のトポロジカル相を含めて、ナノサイエンスとの融合によって出現する多様な人工トポロジカル相の研究を推進した。

《研究項目 D: トポロジーと新概念》

【設定目的】 トポロジカル量子相とそこに発現するエキゾチック準粒子の基本的性質を理論的に解明し、さらにその背後に横たわる普遍的な物理現象と法則を探究することを目的に設定した(右図)。特に、強相関トポロジカル相、対称性によって守られたトポロジカル相、超伝導・超流動、人工量子系、さらに他分野への応用に重点を置いた。

【達成状況】 強相関トポロジカル相に関しては、分類理論の拡張、トポロジカルモット絶縁体の提案、トポロジカル磁性体のマヨラナ準粒子の解析に大きな進展がみられた。結晶対称性をフルに利用した例として 数学者と協力することで、非共形型空間対称性を持つトポロジカル絶縁体にメビウス輪状の分散をもつ新奇表面準粒子が現れることを予言し、この分野の新たな局面を切り開いた。ディラック金属の超伝導に理論を拡張し、A01 の実験と連携することでこれがトポロジカル超伝導となる可能性を指摘した。物性と素粒子の異分野連携によって初めて生み出された成果として、中性子星におけるトポロジカル超流動の理論構築がある。関連分野への波及効果の著しいものとして、非平衡トポロジカル相の先駆的な理論構築、新たな人工量子系「量子ワーク」への理論展開と実証がある。



D01 の研究テーマ

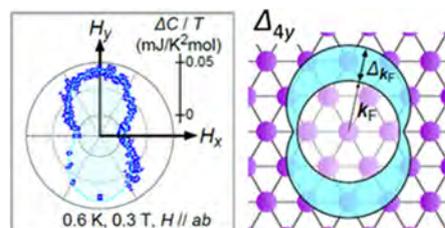
(2) 本研究領域により得られた成果

研究項目 A: トポロジーと強相関

計画研究 計画研究は以下の3つの物質分類で研究を進めた。

【1. トポロジカル超伝導体】

◆**ネマチック超伝導の発見** A01計画:前野,米澤,鄭,俣野,B01,D01,公募D03と共同研究 トポロジカル絶縁体にドーピングした $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ で、超伝導波動関数の振幅が結晶の回転対称性を自発的に破る新奇な「ネマチック超伝導」(右図)を世界に先駆けて実証した[Nature Phys. **12**, 852 (2016), Nature Phys. **13**, 123 (2016)]。



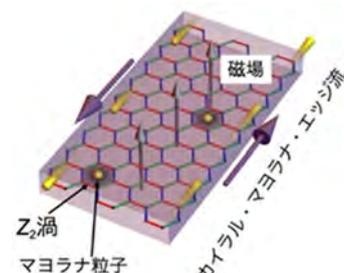
磁場中比熱が示すネマチック超伝導状態

◆**アンチペロブスカイト酸化物の超伝導発見** A01計画:前野,米澤, D01との共同研究トポロジカル結晶絶縁体の候補物質から同系酸化物で世界初の超伝導を発見し、トポロジカル超伝導性を分析した[Nature Commun. **7**, 13617 (2016)]。

◆**ルテニウム酸化物のカイラル超伝導状態** A01計画:前野,米澤, B01, D01および多くの国際共同研究 一軸性歪印加装置を開発してフェルミ面構造の制御で Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度の倍増制御を可能にした[Science **355**, 9398 (2017)]。これを契機に過去のNMR実験の技術的問題を解明し、新たな研究展開を進めた。微細加工系では、マイクロリングの量子振動から2成分超伝導状態を示した。これはミューオンスピン緩和から得られた時間反転対称性を破るカイラル超伝導性とも整合する。一方、接合系では、電流・磁場方向の同時反転から時間反転対称性の保たれた状態が得られた。また強磁性体との接合で、長距離に渡るスピン三重項超伝導の浸入を観測した[Nature Commun. **7**, 13220 (2016)]。

◆**ラインノードをもつトポロジカル物質での超伝導発見** A01計画を中心にB01,D01の理論 非共形(Nonsymmorphic)対称性に保護された線ノード半金属 CaSb_2 が超伝導体であることを発見した[Phys. Rev. Mater. **4**, 041801(R) (2020)]。

◆**その他のトポロジカル超伝導** A01計画,B01の共同研究 ワイル超伝導・ディラック超伝導に対し、格子変形が生む擬似的カイラル磁場による「超伝導カイラル磁気効果」を理論的に導いた。A01計画:松田,笠原 世界に類を見ない薄膜作製技術で重い電子系人工超格子によるトポロジカル量子相の研究を展開し、トリコロール積層での新奇高磁場超伝導相を示唆する振舞を観測した[Phys. Rev. Lett. **116**, 206401 (2016)]。



半整数熱量子ホール効果状態の概念図

【2. トポロジカルモット絶縁体・磁性体】

◆**キタエフ量子スピン液体とマヨラナ準粒子の発見** A01 計画:松田,笠原,公募D02 トポロジカル科学研究の最大のターゲットのひとつであるマヨラナ準粒子

の直接的証拠となる「半整数量子ホール効果」の観測に成功した(前頁図)。これは、ハニカム格子系 $\alpha\text{-RuCl}_3$ の磁気転移を磁場で抑制して低温でのキタエフ量子スピン液体を実現したことによる[Nature **559**, 227 (2018)]。A01 計画:高木 また、イリジウムのハニカム格子系で水素置換体 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ もキタエフ量子スピン液体性が極低温まで保たれることを示した[Nature **554**, 341 (2018)]。

◆**パイロクロア格子酸化物におけるエキゾチック準粒子** A01 計画:松田,宇田川,笠原 パイロクロア酸化物 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ や $\text{Pr}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ の量子スピン液体状態で、磁気モノポールなどスピン励起創発準粒子を明らかにした。

【3. トポロジカル半金属等】

◆**非エルミート・ハミルトニアン** A01 と公募 D03 ワイルおよびディラック半金属では、不純物が生む非エルミート性から、観測可能な特異な電子バンドの出現を予言した。

◆**トポロジカル近藤絶縁体** A01 計画:松田,笠原 トポロジカル近藤絶縁体候補物質 YbB_{12} の磁化と電気抵抗測定から、前例のない「絶縁体の量子振動」を観測した[Nature Phys. **15**, 954 (2019)]。

公募研究

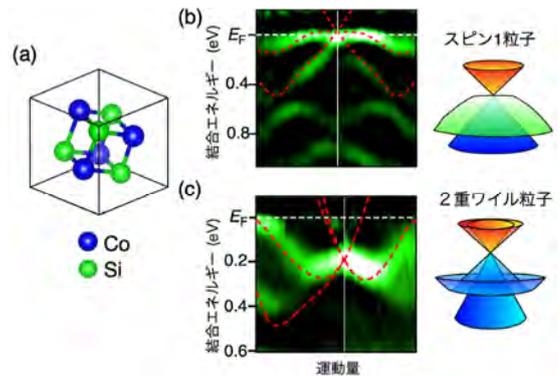
◆**ディラック半金属薄膜における量子ホール状態の実現** A01 公募:打田 ディラック半金属 Cd_3As_2 の薄膜化に成功し、量子ホール状態を初めて観測した[Nature Commun. **8**, 2274 (2017)]。

◆**イリジウム酸化物の金属・絶縁体転移とトポロジカル状態** A01 公募:近藤 ARPES によって、金属・絶縁体転移に伴い、当該物質では点状のフェルミ面をもつ金属から通常絶縁体、さらに低温でモット絶縁体に変化するために、ワイル半金属状態が生まれにくい状況を明らかにした[Phys. Rev. Lett. **117**, 056403 (2016)]。

研究項目 B: トポロジーと対称性

計画研究

◆**CoSi における新しいカイラル準粒子の実証** B01 計画:佐藤,相馬,D03 山内(公募) カイラル結晶 CoSi において、高いチャーン数を持つ新しい準粒子「スピン 1 粒子」および「2 重ワイル粒子」を発見した[Phys. Rev. Lett. **122**, 076402 (2019)](右図)。線ノード半金属など、多くの新奇トポロジカル半金属を実証した[npj Quantum Mater. **3**, 1 (2018)他]。

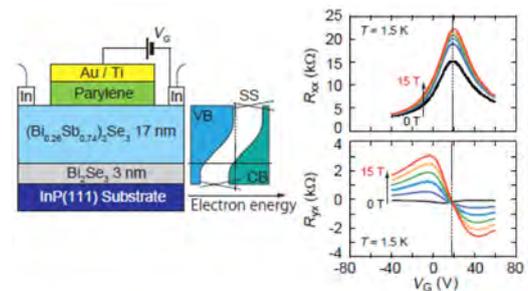


(a) CoSi の結晶構造. ARPES で決定した (b)スピン 1 粒子と(c)2 重ワイル粒子のバンド分散

◆**トポロジカル超伝導の新しい実現法を提案** B01 計画:佐藤,瀬川,相馬,安藤,D03 山内(公募) トポロジカル絶縁体上に作製した Pb 薄膜の ARPES により、トポロジカル近接効果を用いて従来型超伝導体をトポロジカル超伝導体に変換する新しい方法を提案した[Nature Commun. **94**, 121108 (2020)]。

◆**トポロジカル絶縁体薄膜素子の開発** B01 計画:塚崎,佐藤 MBE 法によって $(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Se}_3$ 薄膜を作製し、大きな課題であったフェルミ準位の制御と磁性元素ドーピングを実現した(下図)。さらに、過去に例のない磁場誘起トポロジカル転移を観測した[Phys. Rev. Mater. **4**, 044202 (2020)]。

◆**ワイル半金属薄膜素子の開発** B01 計画:塚崎 ワイル半金属の可能性が指摘された Fe_3Sn_2 の薄膜化研究を行い、大きな異常ホール効果を観測した[Sci. Rep. **9**, 3282 (2019)]。磁場検出素子として重要となるノイズ特性を評価し、1kHz 以下の低周波数まで利用できることを明らかにした[Appl. Phys. Express **12**, 123001 (2019)]。



$(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Se}_3$ をチャンネルとする電界効果トランジスタ. 縦・ホール抵抗のゲート電圧依存性

◆ **$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ で超伝導状態における対称性の破れを観測** B01 計画:瀬川,安藤,A01 前野,D02 永井(公募) $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ において結晶の対称性を破る「ネマチック超伝導」が発現していることを明らかにした[Nature Phys. **13**, 123 (2016)]。

◆ **Sr_2RuO_4 におけるカイラリティと奇周波数電子対による近接効果の観測** B01 計画:柏谷,田仲,A01 浅野,前野 Sr_2RuO_4 の極低温マイクロ波キャビティ測定を行って準古典論との対応を検証した結果、カイラル p 波対称性と矛盾しない結果を得た[Phys. Rev. B **98**, 100508 (2018)]。Nb/ Sr_2RuO_4 のジョセフソン接合において超伝導状態が数 μm のドメイン構造を有することを明らかにした [Phys. Rev. B **92**, 100504R (2015)]。

◆**奇周波数クーペー対の理論** B01 計画:田仲 エッジ状態として誘起される奇周波数クーペー対とバルクのグリーン関数の間に、スペクトル・バルクエッジ対応と呼ばれる関係式が成り立つことを示した [Phys. Rev. B, **99**, 184512 (2019)].

◆**ドーピングしたディラック半金属における超伝導理論を構築** B01 計画:田仲,D01 佐藤 ディラック電子にキャリアをドーピングしたときの超伝導理論を構築し、強いスピン軌道相互作用によって特殊な超伝導相図が現れることを明らかにした[Phys. Rev. B **94**, 014510 (2016)].

公募研究

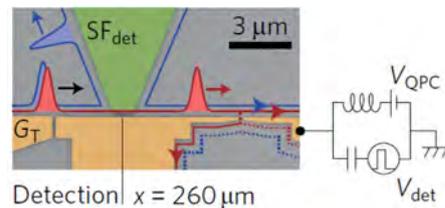
◆**トポロジカル絶縁体のスピン-電気変換におけるスケーリング則を発見** B01 公募:塩見,瀬川,安藤 スピンポンピングを用いてトポロジカル絶縁体のスピン-電気変換を観測し、電圧信号が低温において増大することから、スピン-電気変換が表面ディラック電子に起因することを確立した[Phys. Rev. B **94**, 024404 (2016)].

◆**ディラック半金属に起因した強相関ペロブスカイトにおける磁気輸送特性** B01 公募:藤岡 イリジウム系ペロブスカイト酸化物において、強相関効果によるディラック電子の生成に起因した高移動度の電子を見出した[Nature Commun. **10**, 362 (2019)].

研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス

計画研究

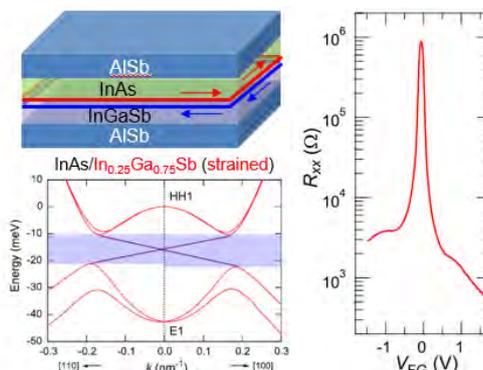
◆**カイラルエッジにおけるスピン波束と電荷波束の時間分解波形測定** C01 計画:藤澤,橋坂,村木 GaAs 系量子ホールエッジチャネルを用いたカイラル朝永ラッティンジャー流体において、スピンモードと電荷モードが異なる速度で独立に伝導するスピン電荷分離を時間分解測定により検証した[Nature Phys. **13**, 578 (2017)] (右図)。



量子ホールカイラルエッジ状態におけるスピン電荷分離の検出素子(写真に色付け)

◆**カイラル朝永ラッティンジャー流体における非平衡安定状態の観測** C01 内共同研究 カイラル朝永ラッティンジャー流体におけるスピン電荷分離に起因して、可積分系特有の非平衡準安定状態が現れることを検証した。カイラル次元系の特徴を生かして、非平衡状態が長く安定に留まる様子を、量子ドットエネルギー分光測定により明らかにしたものである[Phys. Rev. Lett. **120**, 197701 (2018)].

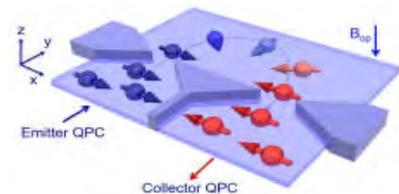
◆**歪みバンドエンジニアリングによる量子スピンホール効果の向上** C01 計画:村木,秋保,入江 InAs/InGaSb ヘテロ構造による量子スピンホール効果において、歪みバンドエンジニアリングでトポロジカル相の最適化を行い、従来の InAs/GaSb 系に比べてバルク絶縁性の 2 桁向上に成功した[Appl. Phys. Lett. **109**, 192105 (2016)] (右図)。



量子スピンホール系の歪制御によりバルクの高抵抗化を実現

◆**量子スピンホール系のトポロジカル-非トポロジカル相図** C01 計画:村木,秋保,入江 InAs/GaSb 系の量子スピンホール効果において、層厚・歪みに対するトポロジカル-非トポロジカル相図を明らかにした。GaSb 層の面内引っ張り歪みによるトポロジカル転移や、バンドギャップの閉じた半金属状態が広いパラメータ領域で現れることを見出した[Phys. Rev. B **101**, 075433 (2020)].

◆**スピン軌道ロッキングを用いた新たなスピン制御法の実証** C01 計画:好田 2次元 Rashba 系やトポロジカル絶縁体に存在するスピン軌道ロッキングを用いた、新たなスピン制御方法を実現した。InGaAs/InAlAs 量子井戸構造における磁気フォーカシングによりスピン制御を実現した(右図) [Sci. Rep. **9**, 1909 (2019)].



スピン軌道ロッキングによるスピン制御。磁気フォーカシングによりスピン生成・制御・検出を実現

◆**磁性ワイル半金属の磁気輸送・スピンドイナミクス** C01 計画:野村 磁性ワイル半金属における電磁結合を記述する有効理論を構築し、磁化ダイナミクス・異方的磁気伝導の理論解析を行った。磁性ワイル半金属のトポロジーに基づく新しい機構の磁気電荷ポンピングを提案し、ヘリシティに起因する強い磁気抵抗効果を明らかにした [Phys. Rev. Appl. **6**, 044013 (2016)].

◆**かごめ・パイロクロア格子における高次トポロジカル絶縁体の予言** C01 計画:江澤 Breathing かごめ格子と Breathing パイロクロア格子において SHH 模型を拡張した高次トポロジカル絶縁体の実現を予言した[Phys. Rev.

Lett. **120**, 026801 (2018)].

公募研究

◆**弾道的 1 次元電子系へのクーパー対分離現象の観測** C01 公募:松尾 清浄な InAs ナノ細線を二本並べた系において、超伝導電流の測定によりマヨラナ準粒子の実現に必要な高効率の弾道的なクーパー対分離の観測に初めて成功した[Science Adv. **5**, eaaw2194 (2019)].

◆**WS₂ ナノチューブにおける巨大光電流効果の観測** C01 公募:井手上 半導体 WS₂ ナノチューブにおいて、室温で巨大な光電流効果を発見した。2 次元物質を用いた結晶構造の対称性の制御が、光電変換効率の向上に有用であることを見出すと同時に、観測された光電流効果が、バンドのトポロジーや幾何学に由来した量子力学的機構で説明できる可能性があることを明らかにした[Nature **570**, 349 (2019)].

◆**強磁性半導体(In,Fe)As 中に誘起されたスピン三重項近接効果超伝導** C01 公募:中村 強磁性半導体(In,Fe)As に従来型超伝導体 Nb を接合した超伝導素子を作成し、III-V 族の希薄磁性半導体としては世界で初めて超伝導近接効果による長距離の超伝導電流を観測し、これがスピン三重項超伝導によるものであることを示した[Phys. Rev. Lett. **122**, 107001 (2019)].

研究項目 D: トポロジーと新概念

計画研究

◆**トポロジカル分類のリダクションの実験提案** D01 川上・公募 D02 柳瀬 A01 の松田らが作製に成功した重い電子超格子系 CeCoIn₅/YbCoIn₅ が強相関トポロジカル超伝導の新たなクラスの候補物質であることを初めて提案した[Phys. Rev. Lett. **118**, 147001 (2017)].

◆**中性子星におけるトポロジカル超流動理論を構築: 異分野連携・領域外への展開** D01 計画:新田,水島 超流動 ³He とのアナロジーを活用することで中性子星内部の中性子トポロジカル超流動状態の性質を明らかにすることができた。本新学術領域ならではの素粒子(新田)と物性(水島)による異分野連携研究の成功例である[Phys. Rev. B **95**, 140503 (2017)].

◆**アンチペロブスカイト物質でのトポロジカル超伝導理論** D01 計画:佐藤, A01 前野 ディラック金属のトポロジカル超伝導理論を開拓し、これを A01 の前野グループが発見した新しい超伝導体 Sr_{3-x}SnO に応用した[Nature Commun. **7**, 13617 (2016)] (右図)。

◆**非共形対称性を持つトポロジカル物質の予言** D01 計画:佐藤,数学者との共同研究 数学者と共同で映進対称性を持つトポロジカル物質にメビウス型のエキゾチック表面電子状態が現れることを予言した [Phys. Rev. B **93**, 195413 (2016)].

◆**非エルミート特有のトポロジカル相の理論的予言: 非平衡系への新たな展開** D01 計画:上田 非平衡開放系を有効的に記述する非エルミート量子系に特有のトポロジカル相の存在を予言した[Nature Commun. **10**, 297 (2019)].

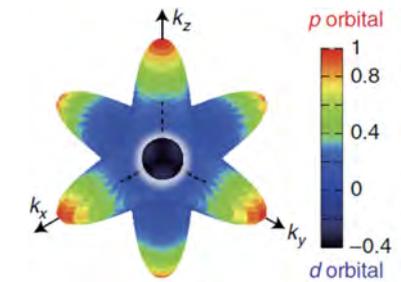
◆**ネマチック超伝導における電磁応答の理論: 国際活動支援班による滞在で開始した国際共同研究** D01 計画:水島 ネマチック超伝導でカイラル相転移が起こること、これに伴うカイラル Higgs ボソン励起のソフト化が光吸収スペクトルで観測できることを示した[Phys. Rev. Lett. **123**, 237001 (2019)] (右図)。

◆**ボソン・フェルミオン間の双対性に関する理論:トポロジカル相転移の素粒子分野への展開** D01 計画:西田 ディラックフェルミオンと真空角 $\theta = \pi$ のスカラー-QED が双対であること、フェルミオンのトポロジカル相転移がヒッグス・閉じ込め相転移に対応していることを示した[Phys. Rev. D **99**, 101701(R) (2019)].

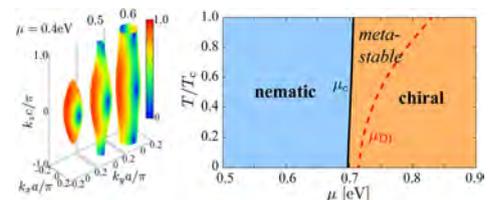
公募研究

◆**トポロジカル超伝導のマヨラナ多重極応答理論** D03 公募:山影, B01 田仲, D01 佐藤と連携 マヨラナ準粒子の磁気応答と超伝導対称性の関係を明らかにした[Phys. Rev. Lett. **123**, 097002 (2019)].

◆**粒子の流出入を含む量子ウォークのトポロジカル現象** D04 公募:小布施, D01 川上, 国際連携 散逸を含むフットニック系の量子ウォークのトポロジカルな性質の理論を構築した[Nature Phys. **13**, 1117 (2017)].



Sr_{3-x}SnO のペ어링対称性候補



フェルミ面形状変化とネマチック・カイラル相転移

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

【発表論文】 領域研究協力者(旧連携研究者・領域 PD)は点下線。被引用数は Web of Science から (2020.6.15)

《研究項目 A: トポロジと強相関》 (計 143 件、すべて査読有)

A01 (計画: 前野, 松田, 高木, 鄭, 藤本, 浅野, 宇田川)

1. *A. Ikeda, M. Kawaguchi, S. Koibuchi, T. Hashimoto, T. Kawakami, S. Yonezawa, M. Sato (D01), Y. Maeno, *Superconductivity in the nonsymmorphic line-nodal compound CaSb_2* , Phys. Rev. Mater. **4**, 041801(R)-1-6 (2020). 【非共形対称性に保護された線ノード半金属 CaSb_2 の超伝導を発見】
2. Y. Sato, Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Taniguchi, S. Kasahara, L. Chen, T. Asaba, C. Tinsman, H. Murayama, O. Tanaka, Y. Mizukami, T. Shibauchi, F. Iga, J. Singleton, *L. Li, *Y. Matsuda, *Unconventional thermal metallic state of charge-neutral fermions in an insulator*, Nature Phys. **15**, 954-959 (2019). 【トポロジカル近藤絶縁体候補物質 YbB_{12} で「絶縁体の量子振動」を観測】
3. *M. Udagawa, R. Moessner, *Spectrum of Itinerant Fractional Excitations in Quantum Spin Ice*, Phys. Rev. Lett. **122**, 117201-1-6 (2019). 【量子スピニアイスの磁気モノポール励起の運動特性: Editors' suggestion; Physics で紹介】
4. *T. Kobayashi, T. Matsushita, T. Mizushima (D01), A. Tsuruta, S. Fujimoto, *Negative Thermal Magnetoresistivity as a Signature of a Chiral Anomaly in Weyl Superconductors*, Phys. Rev. Lett. **121**, 207002-1-6 (2018). 【D01 と連携】
5. Y. Kasahara, T. Ohnishi, Y. Mizukami, O. Tanaka, S. Ma, K. Sugii, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu (D01), Y. Motome, T. Shibauchi, *Y. Matsuda, *Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid*, Nature **559**, 227-231 (2018). 【熱量子ホール効果によりマヨラナ準粒子を実証: 被引用数 129】
6. K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, A. Kato, R. Takano, Y. Kishimoto, S. Bette, R. Dinnebier, G. Jackeli, *H. Takagi, *A spin-orbital-entangled quantum liquid on a honeycomb lattice*, Nature **554**, 341-345 (2018). 【イリジウムハニカム格子物質への水素置換により量子スピン液体を創成: 被引用数 81】
7. *A. P. Mackenzie, T. Scaffidi, C. W. Hicks, Y. Maeno, *Even odder after twenty-three years: the superconducting order parameter puzzle of Sr_2RuO_4* , npj Quantum Materials **2**, 40-1-9 (2017) 【ルテニウム酸化物超伝導の最新成果のレビュー: 被引用数 69】.
8. *A. Steppke, L. Zhao, M. E. Barber, T. Scaffidi, F. Jerzembeck, H. Rosner, Al. S. Gibbs, Y. Maeno, St. H. Simon, A. P. Mackenzie, *C. W. Hicks, *Strong peak in T_c of Sr_2RuO_4 under uniaxial pressure*, Science **355**, 9398-1-5 (2017). 【一軸性歪でフェルミ面構造を制御して超伝導転移温度の倍増制御: 被引用数 77】
9. *M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato (D01), *Y. Maeno, *Superconductivity in the antiperovskite Dirac-metal oxide $\text{Sr}_{3-x}\text{Sn}_x\text{O}$* , Nature Commun. **7**, 13617-1-6 (2016) 【D01 と連携: アンチペロブスカイト酸化物で初の超伝導体発見: 被引用数 53】
10. *M. S. Anwar, S.R. Lee, R. Ishiguro, Y. Sugimoto, Y. Tano, S. J. Kang, Y. J. Shin, S. Yonezawa, D. Manske, H. Takayanagi, T. W. Noh, Y. Maeno, *Direct penetration of spin-triplet superconductivity into a ferromagnet in $\text{Au}/\text{SrRuO}_3/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ junctions*, Nature Commun. **7**, 13220-1-7 (2016). 【アライアンス相手ドイツ MPI との国際共著論文, 領域 PD が筆頭著者: 強磁性体へのスピン三重項クーパー対誘起を実証: 被引用数 33】
11. *S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai (D02), Z. Wang, K. Segawa (B01), Y. Ando (B01), Y. Maeno, *Thermodynamic evidence for nematic superconductivity in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$* , Nature Phys. **13**, 123-126 (2016). 【B01, 公募 D02 と連携: ネマチック超伝導の発見: 被引用数 98】
12. S. Ikegaya, S. Suzuki, Y. Tanaka (B01), *Y. Asano, *Quantization of conductance minimum and index theorem*, Phys. Rev. B **94**, 054512-1-6 (2016). 【B01 と連携: 超伝導接合のエッジ効果】
13. T. Ishii, R. Toda, Y. Hanaoka, Y. Tokiwa, M. Shimozawa, Y. Kasahara, R. Endo, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, T. Shibauchi, *Y. Matsuda, *Tuning the Magnetic Quantum Criticality of Artificial Kondo Superlattices $\text{CeRhIn}_5\text{-YbRhIn}_5$* , Phys. Rev. Lett. **116**, 206401-1-5 (2016). 【国際共著論文: 重い電子系人工超格子によるトポロジカル量子相転移】
14. *K. Matano, M. Kriener, K. Segawa (B01), Y. Ando (B01), G. -q. Zheng, *Spin-rotation symmetry breaking in the superconducting state of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$* , Nature Phys. **12**, 852-854 (2016). 【B01 と連携: スピン・ネマチック超伝導の発見: 被引用数 133】

A01 (公募: 近藤, 打田, 野村, 白濱, 鍋島, 下澤)

15. *M. Nakayama, T. Kondo, Z. Tian, J. J. Ishikawa, M. Halim, C. Bareille, W. Malaeb, K. Kuroda, T. Tomita, S. Ideta, K. Tanaka, M. Matsunami, S. Kimura, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, L. Balents, S. Nakatsuji, S. Shin, *Slater to Mott Crossover in the Metal to Insulator Transition of $\text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$* , Phys. Rev. Lett. **117**, 056403-1-6 (2016). 【イリジウム酸化物

パイロクロア格子物質の金属・絶縁体転移とトポロジカル状態の関係を解明】

16. M. Uchida, Y. Nakazawa, S. Nishihaya, K. Akiba, M. Kriener, Y. Kozuka, A. Miyake, Y. Taguchi, M. Tokunaga, N. Nagaosa (B01), Y. Tokura, M. Kawasaki, *Quantum Hall states observed in thin films of Dirac semimetal Cd_3As_2* , Nature Commun. **8**, 2274-1-7 (2017). 【ディラック半金属薄膜での量子ホール効果の観測: 被引用数 36】

《研究項目 B: トポロジーと対称性》 (計 153 件、すべて査読有)

B01 (計画: 佐藤, 瀬川, 柏谷, 塚崎, 田仲)

1. Y. Satake, *J. Shiogai, G. P. Mazur, S. Kimura, S. Awaji, K. Fujiwara, T. Nojima, K. Nomura (C01), S. Souma, T. Sato, T. Dietl, A. Tsukazaki, *Magnetic-field-induced topological phase transition in Fe-doped $(Bi,Sb)_2Se_3$ heterostructures*, Phys. Rev. Meter. **4**, 044202-1-8 (2020). 【B01 内連携, C01 と連携: 磁場誘起トポロジカル相転移の観測】
2. C. X. Trang, N. Shimamura, K. Nakayama, S. Souma, K. Sugawara, I. Watanabe, K. Yamauchi (D03), T. Oguchi, K. Segawa, T. Takahashi, Y. Ando, *T. Sato, *Conversion of a conventional superconductor into a topological superconductor by topological proximity effect*, Nature Commun. **11**, 159-1-6 (2020). 【公募 D03 と連携: トポロジカル超伝導実現のための新しい方法を提案】
3. *Y. Tokura, K. Yasuda, A. Tsukazaki, *Magnetic topological insulators*, Nature Rev. Phys. **1**, 126-143 (2019). 【強磁性トポロジカル絶縁体の代表的なレビュー: 被引用数 106 (Google Scholar)】
4. D. Takane, Z. Wang, S. Souma, K. Nakayama, T. Nakamura, H. Oinuma, Y. Nakata, H. Iwasawa, C. Cacho, T. Kim, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, Y. Ando, *T. Sato, *Observation of Chiral Fermions with a Large Topological Charge and Associated Fermi-Arc Surface States in $CoSi$* , Phys. Rev. Lett. **122**, 076402-1-6 (2019). 【新しいカイラルフェルミオンの発見. Editors's suggestion; Physics で紹介: 被引用数 40】
5. *S. Kashiwaya, K. Saitoh, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, M. Sato (D01), K. Yada, Y. Tanaka, Y. Maeno (A01), *Time-reversal invariant superconductivity of Sr_2RuO_4 revealed by Josephson effects*, Phys. Rev. B **100**, 094530-1-9 (2019). 【A01, D01 と連携: Sr_2RuO_4 における時間反転対称性を破らない超伝導を観測】
6. *L. A. B. Olde Olthof, S.-I. Suzuki, A. A. Golubov, M. Kunieda, S. Yonezawa (A01), Y. Maeno (A01), Y. Tanaka, *Theory of tunneling spectroscopy of normal metal/ferromagnet/spin-triplet superconductor junctions*, Phys. Rev. B **98**, 014508-1-11 (2018). 【A01 と連携: スピン三重項超伝導接合におけるトンネル分光の理論構築】
7. Y. Satake, *J. Shiogai, D. Takane, K. Yamada, K. Fujiwara, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, A. Tsukazaki, *Fermi-level tuning of the Dirac surface state in $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Se_3$ thin films*, J. Physics: Cond. Matter. **30**, 085501-1-6 (2018). 【B01 内連携: MBE と ARPES の融合研究: トポロジカル絶縁体薄膜のフェルミ準位制御を実現】
8. D. Takane, K. Nakayama, S. Souma, T. Wada, Y. Okamoto, K. Takenaka, Y. Yamakawa, A. Yamakage (D03), T. Mitsuhashi, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, *T. Sato, *Observation of Dirac-like energy band and ring-torus Fermi surface associated with the nodal line in topological insulator $CaAgAs$* , npj Quantum Materials **3**, 1-1-6 (2018). 【公募 D03 と連携: 鏡映対称性による線ノード半金属を実証】
9. D. Takane, Z. Wang, S. Souma, K. Nakayama, C. X. Trang, *T. Sato, T. Takahashi, Y. Ando, *Dirac-node arc in the topological line-node semimetal $HfSiS$* , Phys. Rev. B **94**, 121108(R)-1-5 (2016). 【線ノード半金属を発見: 被引用数 69】
10. *Y. Nago, R. Ishiguro, T. Sakurai, M. Yakabe, T. Nakamura, S. Yonezawa (A01), S. Kashiwaya, H. Takayanagi, Y. Maeno (A01), *Evolution of supercurrent path in $Nb/Ru/Sr_2RuO_4$ dc-SQUIDS*, Phys. Rev. B **94**, 054501-1-8 (2016). 【A01 と連携: Sr_2RuO_4 を含む超伝導量子干渉素子 (dc-SQUID) における超伝導電流パス測定】
11. *S. Souma, Z. Wang, H. Kotaka, T. Sato, K. Nakayama, Y. Tanaka, H. Kimizuka, T. Takahashi, K. Yamauchi (D03), T. Oguchi, K. Segawa, Y. Ando, *Direct Observation of Nonequivalent Fermi-Arc States of Opposite Surfaces in Noncentrosymmetric Weyl Semimetal NbP* , Phys. Rev. B **93**, 161112(R)-1-6 (2016). 【公募 D03 と連携: NbP がワイル半金属であることを実証, Editor's suggestion: 被引用数 60】
12. H. Honma, *T. Sato, S. Souma, K. Sugawara, Y. Tanaka, T. Takahashi, *Switching of Dirac-fermion mass at the interface of ultrathin ferromagnet and Rashba metal*, Phys. Rev. Lett. **115**, 266401-1-5 (2016). 【磁気近接効果によるディラック電子の質量制御に成功】

B01 (公募: 塩見, 藤岡, 野村, 村川, 吉見)

13. *Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase (D02), S. Ishiwata, *Observation of a Magnetopiezoelectric Effect in the Antiferromagnetic Metal $EuMnBi_2$* , Phys. Rev. Lett. **122**, 127207-1-5 (2019). 【公募 D02 と連携: 磁気圧電効果を発見】
14. *J. Fujioka, R. Yamada, M. Kawamura, S. Sakai, M. Hirayama, R. Arita, T. Okawa, D. Hashizume, M. Hoshino, *Y. Tokura, *Strong-correlation induced high-mobility electrons in Dirac semimetal of perovskite oxide*, Nature Commun. **10**, 362-1-6 (2019). 【ペロブスカイト構造のイリジウム酸化物におけるディラック電子に起因した高移動度を観測】

《研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス》 (計 128 件、すべて査読有)

C01 (計画: 藤澤, 村木, 好田, 野村, 江澤)

1. *H. Irie, T. Akiho, F. Couëdo, R. Ohana, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, *Impact of epitaxial strain on the topological-*

- nontopological phase diagram and semimetallic behavior of InAs/GaSb composite quantum wells, Phys. Rev. B **101**, 075433-1-12 (2020). 【歪制御により量子スピンホール系のトポロジカル・非トポロジカル相図を決定】
2. Y. Ominato, A. Yamakage (D03), K. Nomura, *Phase Diagram of a Magnetic Topological Nodal Semimetal: Stable Nodal Line in an Easy-Plane Ferromagnet*, J. Phys. Soc. Japan **88**, 114701-1-5 (2019). 【D01 と連携、領域 PD 連携: 磁性トポロジカル半金属におけるノーダル構造の相図を予測】
 3. *M. Kohda, T. Okayasu, J. Nitta, *Spin-momentum locked spin manipulation in a two-dimensional Rashba system*, Sci. Rep. **9**, 1909-1-9 (2019). 【スピン軌道ロッキングを用いたスピン制御方法を確立】
 4. K. Itoh, R. Nakazawa, T. Ota, M. Hashisaka, K. Muraki, *T. Fujisawa, *Signatures of a Nonthermal Metastable State in Copropagating Quantum Hall Edge Channels*, Phys. Rev. Lett. **120**, 197701-1-5 (2018). 【C01 内連携: カイラル朝永ラッティンジャー流体の非平衡準安定状態の観測に成功】
 5. *M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, T. Fujisawa, *Waveform measurement of charge- and spin-density wavepackets in a chiral Tomonaga-Luttinger liquid*, Nature Phys. **13**, 559-563 (2017). 【C01 内連携: 朝永ラッティンジャー流体のスピン電荷分離の観測に成功: 被引用数 32】
 6. *T. Ideue, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko, Y. Tokura, N. Nagaosa (B01), Y. Iwasa, *Bulk rectification effect in a polar semiconductor*, Nature Phys. **13**, 578-583 (2017). 【B01 と連携: 極性半導体におけるバルク整流効果を発見: 被引用数 30】
 7. T. Akiho, F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, *K. Muraki, *Engineering quantum spin Hall insulators by strained-layer heterostructures*, App. Phys. Lett. **109**, 192105-1-5 (2016). 【歪みバンドエンジニアリングによる量子スピンホール効果の劇的向上】
 8. *K. Nomura, D. Kurebayashi, *Charge-Induced Spin Torque in Anomalous Hall Ferromagnets*, Phys. Rev. Lett. **115**, 127201-1-5 (2015). 【ワイル半金属におけるゲートによる磁化制御を予言】

C01 (公募: 増淵, 秋山, 松尾, 高橋, 石原, 井手上, 中村)

9. *K. Ueda, S. Matsuo, H. Kamata, S. Baba, Y. Sato, Y. Takeshige, K. Li, S. Jeppesen, L. Samuelson, H. Xu, S. Tarucha, *Dominant nonlocal superconducting proximity effect due to electron-electron interaction in a ballistic double nanowire*, Science Adv. **5**, eaaw2194-1-7 (2019). 【弾道的 1 次元電子系への超伝導電子対の分離現象を観測】
10. *Y. J. Zhang, T. Ideue, M. Onga, F. Qin, R. Suzuki, A. Zak, R. Tenne, J. H. Smet, Y. Iwasa, *Enhanced intrinsic photovoltaic effect in tungsten disulfide nanotubes*, Nature **570**, 349-353 (2019). 【WS₂ ナノチューブの巨大光電流効果を発見】
11. *T. Nakamura, L. D. Anh, Y. Hashimoto, S. Ohya, M. Tanaka, S. Katsumoto, *Evidence for Spin-Triplet Electron Pairing in the Proximity-Induced Superconducting State of an Fe-Doped InAs Semiconductor*, Phys. Rev. Lett. **122**, 107001-1-6 (2019) 【近接効果によるスピン三重項超伝導の観測】
12. *Y. Takasu, Y. Fukushima, Y. Nakamura, Y. Takahashi, *Magnetoassociation of a Feshbach molecule and spin-orbit interaction between the ground and electronically excited states*, Phys. Rev. A **96**, 023602-1-9 (2017). 【冷却原子のフェツシュバツハ分子で、基底状態と準安定状態間のスピン軌道相互作用を実装。トポロジカル超流動への一歩】
13. *S. Masubuchi, M. Morimoto, S. Morikawa, M. Onodera, Y. Asakawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, *T. Machida, *Autonomous robotic searching and assembly of two-dimensional crystals to build van der Waals superlattices*, Nature Commun. **9**, 1413-1-12 (2018). 【ファンデルワールス超格子構造の自動作製技術を確立】
14. *S. Matsuo, K. Ueda, S. Baba, H. Kamata, M. Tateno, J. Shabani, C. J. Palmstrøm, *S. Tarucha, *Equal-Spin Andreev Reflection on Junctions of Spin-Resolved Quantum Hall Bulk State and Spin-Singlet Superconductor*, Sci. Rep. **8**, 3454-1-8 (2018). 【量子ホール系・超伝導接合におけるアンドレーエフ反射】

《研究項目 D: トポロジーと新概念》 (計 306 件、すべて査読有)

D01 (計画: 川上, 上田, 佐藤, 新田, 水島, 西田)

1. *S. Higashikawa, Z. Gong, Y. Ashida, M. Ueda, *Topological unification of time-reversal and particle-hole symmetries in non-Hermitian physics*, Nature Commun. **10**, 297-1-7 (2019). 【非エルミート系の新奇特ポロジカル相: 被引用数 58】
2. H. Uematsu, *T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto (A01), J. A. Sauls, *Chiral Higgs Mode in Nematic Superconductors*, Phys. Rev. Lett. **123**, 237001-1-7 (2019). 【A01 と連携: 国際支援班の派遣を用いて始めた国際共同研究】
3. *T. Furusawa and Y. Nishida, *Boson-fermion duality in four dimensions*, Phys. Rev. D **99**, 101701(R)-1-7(2019) 【トポロジカル相転移の素粒子分野への応用】
4. *Z. Gong, *Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, M. Ueda, *Topological Phases of Non-Hermitian Systems*, Phys. Rev. X **8**, 031079-1-33 (2018). 【開放系非エルミートトポロジカル相の分類理論: 被引用数 164】
5. *T. Yoshida, I. Danshita, R. Peters, N. Kawakami, *Reduction of Topological Z Classification in Cold-Atom Systems*, Phys. Rev. Lett. **121**, 025301-1-6 (2018). 【D01 内連携、領域 PD が筆頭著者: 強相関トポロジカル現象の冷却原子への応用】
6. *M. Sato, *Y. Ando (B01), *Topological superconductors: a review*, Rep. Prog. Phys. **80**, 076501-1-43 (2017). 【B01 と連携: トポロジカル超伝導体の代表的なレビュー: 被引用数 291】
7. *T. Yoshida, A. Daido, Y. Yanase (D02), N. Kawakami, *Fate of Majorana Modes in CeCoIn₅/YbCoIn₅ Superlattices: A Test Bed for the Reduction of Topological Classification*, Phys. Rev. Lett. **118**, 147001-1-6 (2017). 【D02 と連携: 領域 PD が

筆頭著者: 相関トポロジカル超伝導の新たなクラスに関する実験提案】

- *T. Mizushima, K. Masuda, M. Nitta, *³P₂ superfluids are topological*, Phys. Rev. B **95**, 140503-1-6 (2017). 【D01 内の素粒子と物性の連携: ³P₂ 超流動状態のトポロジカルな性質】
- *K. Shiozaki, M. Sato, K. Gomi, *Topology of nonsymmorphic crystalline insulators and superconductors*, Phys. Rev. B **93**, 195413-1-28 (2016). 【数学分野との連携: 非共形対称性をもつ物質におけるトポロジー】
- *K. Masuda, M. Nitta, *Magnetic Properties of Quantized Vortices in Neutron ³P₂ Superfluids in Neutron Stars*, Phys. Rev. C **93**, 035804-1-15 (2016). 【他分野への応用展開: 中性子星でのトポロジカル超流動】
- *S. Kobayashi, M. Sato, *Topological Superconductivity in Dirac Semimetals*, Phys. Rev. Lett. **115**, 187001-1-5 (2015). 【ディラック半金属におけるトポロジカル超伝導の性質の解明】

D02 (公募: 桂, 那須, 柳瀬, 永井, 赤城)

- *J. Ishizuka, S. Sumita, A. Daido, Y. Yanase, *Insulator-Metal Transition and Topological Superconductivity in UTe₂ from a First-Principles Calculation*, Phys. Rev. Lett. **123**, 217001-1-6 (2019). 【トポ超伝導候補 UTe₂ の先駆的理論】

D03 (公募: 山内, 山影, 鈴木)

- *S. Kobayashi, A. Yamakage, Y. Tanaka (B01), M. Sato (D01), *Majorana Multipole Response of Topological Superconductors*, Phys. Rev. Lett. **123**, 097002-1-6 (2019). 【B01, D01 と連携: トポ超伝導のマヨラナ多重極応答理論】

D04 (公募: 小布施, 横山, 川口, 石塚)

- L. Xiao, X. Zhan, Z. H. Bian, K. K. Wang, X. Zhang, X. P. Wang, J. Li, K. Mochizuki, D. Kim, N. Kawakami (D01), W. Yi, H. Obuse, B. C. Sanders, *P. Xue, *Observation of topological edge states in parity-time-symmetric quantum walks*, Nature Phys. **13**, 4204-1-8 (2017). 【D01 と連携, 国際共同研究: 量子ウォークの新奇トポロジカル現象: 被引用数 135】

【書籍】

- 高橋 隆, 佐藤宇史 「基本法則から読み解く物理学最前線, ARPES で探る固体の電子構造: 高温超伝導体からトポロジカル絶縁体」 共立出版 (2017).
- 野村健太郎 「トポロジカル絶縁体・超伝導体 (現代理論物理学シリーズ)」 丸善出版 (2016).

【国際学会招待講演】 (抜粋)

《研究項目 A: トポロジーと強相関》

- S. Fujimoto, *Chiral anomaly phenomena in Weyl superconductors*, Superstripes 2019 (Ischia, Italy, Oct. 27, 2019).
- Y. Matsuda, *Majorana Quantization and Half-Integer Thermal Quantum Hall Effect in a Kitaev Spin Liquid*, Gordon Research Conference on Topological and Correlated Matter (Hong Kong, Jun. 16-21, 2019).
- Y. Maeno, *Paradigm shift toward the clarification of the superconductivity in Sr₂RuO₄*, Strontium Ruthenate 25 years of a Puzzling Superconductor (SRO21+4) (Zurich, Switzerland, May 9-11, 2019).
- H. Takagi, *Quantum Liquid state of J_{eff}=1/2 isospins in complex Ir oxides*, The 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (Gothenburg, Sweden, Aug. 9-16, 2017) 《Half Plenary》.
- G.-q. Zheng, *Spin-rotation symmetry breaking and triplet superconducting state in Cu_xBi₂Se₃*, March Meeting 2017, American Physical Society (New Orleans, LA, USA, Mar. 13-17, 2017).

《研究項目 B: トポロジーと対称性》

- T. Sato, *Electronic structure of topological-superconductor candidates studied by ARPES*, Spectroscopy for Novel Superconductors 2019 (Tokyo, Japan, Jul. 20, 2019).
- A. Tsukazaki, *Thin film devices based on topological materials*, 3rd EPIQS-TMS Alliance Workshop on Topological Materials Science (Santa Barbara, USA, Oct. 21-25, 2019).
- K. Segawa, *Experimental research on topological insulators*, 12th International Nanotechnology Conference (INC12) (Leuven, Belgium, May 10-12, 2016).
- S. Kashiwaya, *Tunneling effects and edge states of topological superconductor Sr₂RuO₄*, Superconducting hybrid nanostructures: physics and application (Moscow, Russia, Sept. 19-22, 2016).
- Y. Tanaka, *Theory of Surface Andreev Bound States*, International School on Topological Science and Topological Matters (Kyoto, Japan, Feb. 13-18, 2017).

《研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス》

- T. Fujisawa, *Non-equilibrium dynamics of quantum Hall Tomonaga-Luttinger liquids*, International Conference on Topological Materials Science 2019 (Kyoto, Japan, Dec. 3-7, 2019).
- M. Kohda, *Spin-momentum locked spin manipulation in two dimensional Rashba system*, International Conference on Compound Semiconductors (Montpellier, France, Jul. 27-Aug. 4, 2018).
- K. Muraki, *Probing the spin-orbit interaction in the bulk of a two-dimensional topological insulator*, Erice Workshop 2018 “Majorana Fermions and Topological Materials Science” (Erice, Italy, Jul. 21-27, 2018).
- K. Nomura, *Chiral anomaly and Spin-electromagnetic responses in Weyl semimetals*, Theory of Correlated Topological Materials 2017 (Kashiwa, Japan, Feb. 6 – Mar. 3, 2017).
- T. Fujisawa, *Charge dynamics in quantum-Hall Tomonaga-Luttinger liquid*, China-Japan International Workshop on

Quantum Technologies (QTech2016) (Beijing, China, May 13-14, 2016).

《研究項目 D: トポロジーと新概念》

1. N. Kawakami, *Correlation effects in non-Hermitian fermionic systems: Nonequilibrium phenomena*, 3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (Santa Barbara, USA, Oct. 21-25, 2019).
2. M. Sato, *Majorana fermions in topological crystalline superconductors*, The 2nd TMS-PKU Alliance Workshop on Topological Materials and Quantum Materials (Beijing, China, Sep. 25-28, 2018).
3. M. Ueda, *Nonequilibrium thermodynamics and many-body dynamics in open quantum systems*, Conference on Quantum Measurement: Fundamentals, Twists, and Applications (Trieste, Italy, Apr. 28 - May 4, 2019).
4. M. Ueda, *Topological Quantum Phenomena in Spinor Bose-Einstein Condensates*, The 13th Joint Asia Pacific Physics Conference (Brisbane, Australia, Dec. 4-8, 2016). 《Keynote》
5. T. Mizuhima, *Topology, emergent Ising order, and spontaneous symmetry breaking in superfluid $^3\text{He-B}$* , International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016 (Prague, Czech Republic, August 11-16, 2016).
6. M. Nitta, *Vortices in Neutron Superfluids*, “Continuous Advances in QCD” (Minneapolis, USA, May 12-15, 2016).
7. Y. Nishida, *Novel few-body universality and many-body crossover physics*, “Cold Atoms meet Quantum Field Theory” (Bad Honnef, Germany, July 6-9, 2015).

【主催国際シンポジウム】(抜粋) (合計 13 件)

1. TopoMat2019: International Conference on Topological Materials Science 2019 (Kyoto, Dec. 3-7, 2019). トポロジカル分野の世界的権威が多数参加した領域国際会議。32 件の口頭講演と 116 件のポスター講演。
2. TPQM2019: 3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (Santa Barbara, USA, Oct. 21-25, 2019). 米国 EPIQS と共催のアライアンスワークショップ。参加者約 50 名。
3. TMS-PKU 2nd Alliance Workshop (Beijing, Sep. 25-28, 2018). 北京大と共催のワークショップ。38 件の口頭講演。
4. TMS-SPIN(CNR) 2nd Alliance Workshop with Superstripes-onlus, “Majorana Fermions and Topological Materials Science” (Erice, Italy, Jul. 21-27, 2018). イタリアと共催のアライアンスワークショップ。37 件の口頭講演と 7 件のポスター講演。
5. TopoMat2017: International Conference on Topological Materials Science 2017 (Tokyo, May 9-13, 2017). トポロジカル分野の世界的権威が多数参加した領域国際会議。37 件の口頭講演と 99 件のポスター講演。
6. EPIQS-TMS Trans-Pacific Conference on Topological Quantum Materials (Moorea, Dec 3-8/9, 2016) 米国の EPIQS との共催。37 件の口頭・ポスター講演。
7. Topological Materials Science TOPO MAT Meeting (Stuttgart, Germany, Sept. 19-21, 2016) ドイツ・マックスプランク研究所と共催のアライアンスワークショップ。33 件の口頭・ポスター講演。

【新聞発表】(抜粋) (合計 32 件)

1. 日刊工業新聞 (2020. 1/10) 「普通の超伝導体をトポ超伝導体に変換する手法を開発」佐藤・瀬川・相馬・安藤・山内。
2. 朝日・読売・産経・日経・毎日新聞, 他 (2018. 7/12) 「マヨラナ粒子の存在を実証」笠原・松田。
3. 日本経済新聞 (2018. 2/15) 「初のハニカム格子量子液体の実現」高木・北川。
4. 日刊工業新聞 (2017. 3/14) 「電荷・スピン信号計測 東工大など技術融合素子実現に一步」橋坂・村木・藤澤。
5. 京都新聞 (2016. 12/12) 「金属陰イオン含む化合物 新たな超電導発見」米澤・前野。
6. 科学新聞 (2016. 6/10) 「トポロジカル超伝導体を実験的に証明-量子コンピュータへ応用期待-」鄭・俣野。

【アウトリーチ活動】(抜粋) (合計 228 件)

《高校生・中学生など対象のアウトリーチ活動》

1. 「量子の世界と超伝導」(2018. 11/8@豊田西高校)。講師: 田仲。対象: 高校生約 40 名。量子の世界と超伝導について講義を行った。
2. 模擬授業「トポロジカル絶縁体」(2015. 10/5@大阪市立東高校)。講師: 瀬川。対象: 高校生約 20 名。ノーベル物理学賞発表翌日の午後に、トポロジカル絶縁体の講義を行った。

《一般の方々にも開かれた講演会》

1. 「久保記念シンポジウム」(2019. 10/17@スター研修センターお茶の水)。講師: 川上。対象: 一般約 100 名。量子系の非平衡時間発展のテーマに関して、特に時間結晶と量子ウォークに重点をおいて非専門家向けに講演を行った。
2. 「日本物理学会 市民科学講演会」(2017. 9/24@岩手大学) 講師: 前野。対象: 市民 150 名。「電子が凍る！」の題目で、トポロジカル絶縁体やモット絶縁体を含む様々な物質の紹介をした。
3. 「物理学とトポロジー: 2016 年ノーベル物理学賞のキーワード・物理学におけるトポロジーとは？」(2016. 12/21@慶應義塾大学)。講師: 新田・木村。対象: 学生・教職員・一般 50 名。2016 年ノーベル物理学賞のキーワードとなった物理学における「トポロジー」について、非専門家向けの講演を行った。
4. 「ノーベル賞受賞者ベドノルツ博士を迎えて-大学への物理学: 超伝導とトポロジー」(2016. 2/28@京都大学基礎物理学研究所)。講師: J. G. Bednorz, 前野・米澤。対象: 高校生, 同伴家族, 高校教員, 大学生, 他 76 人。ベドノルツ博士を迎えて、高校生向けのメッセージを主眼に、発見の経緯やノーベル賞受賞者としての活動などを講演した。
5. 「トポロジカル超伝導 -物質の中で電子が“分裂”し、“瞬間移動”する」(2015. 7/31@大阪大学シグマホール)。講師: 藤本。対象: 一般 186 名。超伝導の基本からトポロジカル超伝導の話題まで入門的解説を行った。

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

【公募研究を含む研究組織】

本新学術領域は右図に示す4つの研究項目A~Dよりなり、それぞれの研究項目は1つの計画研究と複数の公募研究よりなる。研究項目のうちA~Cは物質系に即している。「A: トポロジーと強相関」には計画研究A01と公募研究A01がある。「B: トポロジーと対称性」と「C: トポロジーとナノサイエンス」についても同様に計画研究B01, C01と公募研究B01, C01がある。理論の計画研究「D: トポロジーと新概念」には計画研究D01の他に、A01, B01, C01の実験系との連携を強める公募研究D02, D03, D04がある。領域運営のかじ取りは総括班X00が担い、領域の国際化は国際活動支援班Y00の“Topo-Q ネットワーク”が牽引する。



【領域内での連携に対する取り組み】

(1) 領域会議を利用した連携の促進: 全メンバーが参集する領域研究会(5回開催、その内2回は国際会議)に計画・公募研究の最先端の成果を持ち寄り、領域内連携、国際連携を開始する機会として利用した。連携の推進状況に関しては、日本物理学会(春・秋)の開催期間および領域研究会の開催時にあわせて総括班会議(全14回)を開催し、連携状況の把握とさらなる活性化に対するアドバイスをを行った。

(2) トポロジー連携研究会を利用した連携の促進:

これは計画研究間の連携、公募研究との連携を強化するために策定した本領域独自のプログラムである。合計12回の連携研究会を開催した(右表)。連携研究会での研究交流により、専門の異なる研究者の間に意思疎通をはかり、共同研究の芽を育んだ。計画研究の代表者はできる限りすべての研究会に参加し、連携を促進すると共に情報共有を図った。

	トポロジー連携研究会名称	時期	場所	人数
1-4	各計画研究の研究戦略	2015.8-9	担当の大学	計44
5	ワイル半金属・超伝導	2015.11	東北大学	50
6	人工量子系におけるトポロジー	2016.2	東京大学	52
7	物性物理と基礎物理におけるトポロジー	2016.11	慶應義塾大学	100
8	奇周波数クーバー対の物理	2017.1	名古屋大学	24
9	ナノ構造・エッジ伝導・マヨラナモード	2017.12	京大東京オフィス	25
10	非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象	2018.11	京都大学	42
11	トポロジカル半金属	2019.8	名古屋大学	30
12	マヨラナ励起の実証にむけて	2019.11	東京工業大学	50

(3) 公募研究発表会を利用した交

流: 前期(2016・2017年度)は19件、後期(2018・2019年度)は18件の公募研究が採択された。「公募研究キックオフ研究会」(前期2016年6月4日、後期2018年6月23日、ともに京都大学)を開催し、専門の近いあるいは異なる研究内容を共有することで公募・計画研究間の交流を図った。

(4) 若手励起プログラムを利用した連携: 大学院生や若手研究者が1-2週間程度「国内留学」するプログラムを24件実施した。若手の滞在を契機に研究室間の共同研究が始まり、論文成果にもつながった。例として、A01の大学院生(京大・実験)がB01(名大・理論)に滞在し始まった共同研究が論文出版された。

(5) 国際ネットワーク“Topo-Q”を用いた連携: 国際活動支援班として“Topo-Q”ネットワークを導入し、米国のEPiQSプロジェクトやドイツ マックスプランク研究所などと国際連携を活発に行なった。本領域が主導して開催した国際アライアンスワークショップ(合計11回)には、多くの計画・公募メンバーが参加し、国際協力を推進するとともに、領域内連携も強化した。また、国際研究者派遣・招聘プログラム REP (Researcher Exchange Program, 24件実施)とその若手版の JREP (Junior REP, 38件実施)により領域の国際化と若手の育成を行った。

【連携に基づく共同研究の例】

●A01, B01と公募D02との連携による $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ での初のネマチック超伝導の発見 ●B01の計画・公募の連携によるワイル半金属(NbP)、らせん・グライド対称性を持つトポロジカル半金属(HfSiS, 三方晶Te)の発見 ●C01の理論とB01の実験の連携によるトポロジカル絶縁体での磁場誘起トポロジカル転移の発見 ●D01と公募D02との連携で強相関トポロジカル候補物質 $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$ の理論提案 ●A01の実験とD01の理論の連携によるディラック金属 $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ のトポロジカル超伝導の可能性の指摘 ● $\alpha\text{-RuCl}_3$ のマヨラナ準粒子の実証にA01の実験と公募D02の理論が協力 ●C01内連携によるカイラルエッジでのスピン波束と電荷波束の時間分解波形測定 ●D01異分野(素粒子と物性)連携による中性子星におけるトポロジカル超流動の理論構築

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況、研究費の使用状況や効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

1. 設備の効果的使用 主として実験系からなる A01, B01, C01 において設備の効果的使用を行った。

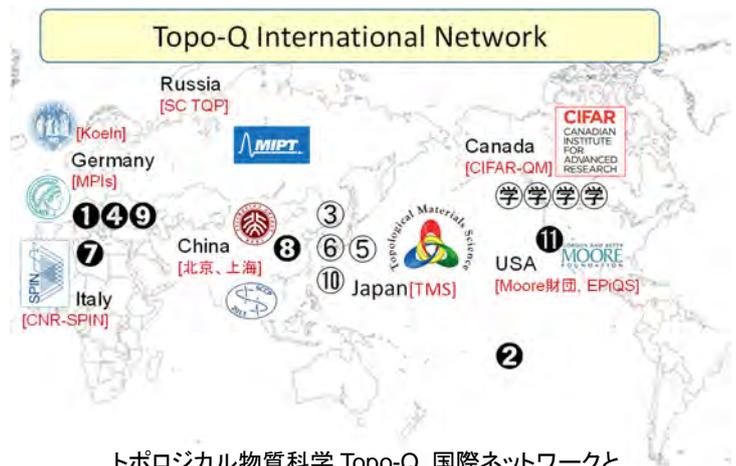
- (1) A01 計画研究: H27 年度に集束イオンビーム微細加工システムを前野(代表)と松田(分担)が共同購入し、超伝導単結晶マイクロリングでの半整数磁束量子、カイラル超伝導にかかわる超伝導ドメイン構造の観測成果につながった。これにより、国際共同研究相手のライデン大学(オランダ)との間で、壊れやすい微細加工単結晶を何度も輸送する必要がなくなり、国際共同研究の質と効率が大きいに向上した。
- (2) B01 計画研究: H27 年度にトポロジカル絶縁体薄膜作製用水冷ジャケット式 MBE 装置を塚崎(分担)が購入した。佐藤(代表)グループにおけるスピン分解 ARPES 装置に搬送する超高真空一貫搬送システムが構築でき、MBE で作製した薄膜試料の ARPES での電子状態評価が格段に効率化した。B01 の主課題であるトポロジカル量子相転移の研究とディラック・ワイル半金属の探索が加速して、主要成果論文を生んだ。
- (3) C01 計画研究: H27 年度に無冷媒希釈冷凍機を藤澤(代表)が購入し、カイラルエッジ状態の電気測定にフル稼働した。村木(分担)が MBE 成長した GaAs ヘテロ構造を用いて、極低温での電気特性観測結果を随時 MBE 成長にフィードバックすることで、結晶成長条件の最適化を図り、C01 内で有効に活用した。

2. X00 総括班研究費の効果的使用

- (1) 連携研究者の旅費補助: 領域会議への旅費に関して、各研究代表者・分担者は自身の科研費で支出を賄う一方、連携・協力研究者の旅費は総括班から支出した。これによって連携研究者の発表数が増え会議が活性化したことはもちろんであるが、専門の異なる研究者がこの場を利用し積極的に議論することで領域研究の活性化につながった。
- (2) 若手研究者へのサポート: 若手励起プログラム(国内 24 件)に旅費をサポートし、研究交流を活性化することで若手研究者の育成に努めた。特に若手研究者の滞在を通して研究室間の共同研究の起点になるなど、このプログラムを通して連携研究が進展した。
- (3) 連携研究の強化: 小規模のトポロジー連携研究会(国内)を 12 回開催し、領域内連携の強化を図った。会場費、招待講演者の旅費、連携・協力研究者の旅費などに予算を有効に使用した。

3. Y00 国際活動支援班の活動

トポロジカル物質科学の世界的な研究展開において、我が国の研究グループの存在・活動が国際的に強く認識されるだけでなく、国際共同研究展開の中心となって牽引する役割を担えるよう、国際活動支援班の予算を効果的かつ効率的に活用した。具体的には、領域申請時から各国の主要なトポロジカル物質科学研究プロジェクトや研究機関に国際ネットワーク「Topo-Q」への活動参加を呼びかけた。その結果、マックスプランク研究所 MPI(ドイツ)、ムーア財団の EPIQS(米国)、CIFAR(カナダ)、CNR-SPIN(イタリア)、北京大学 ICQM 等と特に強い連携関係で以下のような国際研究活動を進めた。



トポロジカル物質科学 Topo-Q 国際ネットワークとアライアンスワークショップ開催場所

- (1) アライアンスワークショップの開催: 上の世界地図および次頁の表に示すように、アライアンス相手と各複数回のワークショップを海外で 7 回、国内で 4 回の計 11 回開催した。これらには多くの計画・公募メンバーが参加し、国際協力を推進するとともに、領域内連携も強化した。若手研究者に旅費を支援することにより、国際会議での発表機会を増やすことができた。
- (2) 領域国際会議の開催: 上記のアライアンスワークショップと相補的なものが領域国際会議である。5 回の年次領域研究会のうち 2 回は領域国際会議として開催した。第 1 回(TopoMat2017)は東京工業大学で 2017 年 5 月 9 日~13 日に開催し、199 名(国内 174, 海外 25)の参加で、口頭 36 件、ポスター 96 件の発表があった。

特にプレナリー講演者として、本新学術の国際アドバイザーである、A. Leggett 教授、L.Molenkamp 教授、Q.K. Xue 教授、(故)S.C.Zhang 教授が登壇し、その迫力ある講演に参加者が魅了された。第 1 回の主テーマは、トポロジカル半金属とトポロジカル超伝導に関するものが多く、世界的な研究動向を反映した内容となった。

第 2 回国際会議 (TopoMat 2019) は 2019 年 12 月 3 日～7 日に京都大学で開催した。本領域最終の国際会議で、179 名 (国内 159, 海外 20) の参加者で、32 件の口頭発表、116 件のポスター発表があった。第 2 回の主要テーマにはトポロジカル絶縁体・超伝導体・半金属に加えて、強相関の磁性体、非平衡系のトポロジカル相の話題がたくさん提供された。この数年間でトポロジカル物質科学が強相関・非平衡現象などのより広い分野も含めて一つのプラットフォームに統合されつつあることを如実に反映する会議となった。計画研究分担者は分担金から参加することで、総括班予算は招待講演者および研究協力者の参加に有効に充てた。

	アライアンスワークショップ名称	時期	場所	相手	人数 (国内)
1	The First TMS-MPI Alliance Workshop	2015.9	Stuttgart, ドイツ	MPI	88(20)
2	EPIQS-TMS Trans-Pacific Conference	2016.12	Moorea, 米国	EPIQS	38(17)
3	YITP-PKU-TMS International School and WS	2017.2	京都大学	北京大学	101(49)
4	TOP-SPIN and TMS International Workshop	2017.4	Dresden, ドイツ	SPIN	50(9)
5	Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms	2017.10	東京大学	北京連合	45(32)
6	TMS-EPIQS 2nd Alliance WS: Topological magnets and topological superconductors	2018.1	京都大学	EPIQS	65(47)
7	Majorana Fermions and Topo. Materials Science	2018.7	Erice, Italy	SPIN	44(17)
8	Topological Materials and Quantum Materials	2018.9	北京大学, 中国	北京大学	70(30)
9	MPI-Peking-TMS Alliance WS on Frontiers of Quantum Materials	2019.7	Stuttgart, ドイツ	MPI	120(3)
10	The 4th Kyoto-Beijing-Tokyo WS on Ultracold Atomic Gases	2019.9-10	京都大学	北京連合	86(64)
11	3rd EPIQS-TMS Alliance WS on Topological Phenomena in Quantum Materials	2019.10	Santa Barbara, 米国	EPIQS	50(32)



第 2 回領域国際会議 (TopoMat2019) @ 京都大学

(3) REP の実施: 国際研究者派遣・招聘プログラム REP (Researcher Exchange Program) とその若手版の JREP (Junior Researchers Exchange Program); 海外派遣 27 件、海外招聘 11 件、計 38 件)により、領域の国際化と若手の育成を行った。渡航費・滞在費を全額補助することにより、国際共同研究が活性化した。JREP については「11」でより詳しく述べる。REP は、申請・審査に基づき、派遣 6 件、招聘 18 件の合計 24 件を実施した (H27 年度 5 件、H28 年度 7 件、H29 年度 4 件、H30 年度 5 件、R1 年度 3 件)。Bednorz 博士 (1987 年ノーベル物理学賞受賞者、スイス) には、2016 年 2 月に京都大学で主に高校生向けの公開講座にも参加してもらい、アウトリーチ活動に本 REP プログラムを有効に活用した例となった。



REP 招聘の Bednorz 博士による市民講座

(4) Topo-Q PD の雇用: 各計画研究で雇用の PD (10 名)に加えて、国際活動支援活動にふさわしい PD の雇用を総括班経費で行うことにし、公募・審査を経て採用した。雇用された合計 5 名 (海外から 2 名、日本人 3 名) は、アライアンス会議等の運営を含む国際連携のつなぎ役として活躍した。Topo-Q で雇用することにより、優秀な計画研究雇用 PD の継続雇用を可能にし、国際連携の活性化に寄与した。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

応募時に「②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」を選択した。

(1) 国際連携で果たした中心的役割

トポロジカル量子現象の研究発展を受け、世界的に関連プロジェクトが多数展開されている。カナダ高等研究機構(CIFAR)の量子物質プロジェクト、米国ムーア財団の EPIQS プロジェクトなどが典型例である。本領域の前身である「トポロジカル量子」(前野代表、H22-H26)はこれらのプロジェクトと国際連携の土台を築いた。本領域はこれを“**Topo-Q**”ネットワークへと飛躍的に発展させ、多くのトポロジカル物質関連の海外プロジェクトとの連携において中心的役割を果たした。中でも、Topo-Qの柱である「アライアンスワークショップ」を11回共催し、共同研究を育むプラットフォームを提供した。この国際的活動は総括班評価者からも高い評価を受けた。

(2) 新たな発見が当該分野に与えたインパクト

本領域では新たな物質・現象を多く発見した。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるネマチック超伝導、初の逆ペロブスカイト酸化物超伝導体 $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ 、新しいトポロジカル半金属 HfSiS などの発見である。中でも、中間評価後に松田らが実証した $\alpha\text{-RuCl}_3$ における熱ホール伝導率の分数(1/2)量子化(2018)は、世界初の強相関物質(磁性体)でのマヨラナ粒子の観測となり、トポロジカル物質研究全体に大きなインパクトを与えた。トポロジーの視点が、既知の現象に新解釈を付加するだけでなく、新物質や新奇現象を生む強い原動力になることを実証した。

(3) 関連学問分野に与えたインパクト

- (a) 素粒子、数学などとの異分野融合: 中性子星における超流動状態に関して超流動 ^3He の知見を活用し、そのトポロジカルな性質を明らかにした。この成果は、素粒子と物性との連携によって生み出されたものであり、異分野融合を強く推進するものである(D01の新田(素粒子)と水島(物性)の共同研究)。さらに、数学者との共同研究により、空間群によって守られたトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類理論を発展させ(D01佐藤)、非共形型空間対称性を持つトポロジカル絶縁体にメビウスの輪のようなエネルギー分散をもつエキゾチックな表面準粒子が現れることを予言した。この理論的予言は後に実験的に実証された。
- (b) 「新たな分野」での研究展開: 公募 D04 の小布施は領域代表(D01)の川上と連携し、フォトニック系を用いた「量子ウォーク」という新たな人工量子系で散逸を含むトポロジカル相の理論を構築し、中国の実験グループと連携することでこれを実現した。量子ウォークは主に数学・情報分野で発展してきたものである。中間評価のコメントの「公募研究での人材補充などの検討も含めた体制の強化」に対応するものであり、計画・公募の連携、さらに国際連携により成し遂げられた成果である。
- (c) 他分野への波及、連携へのとりくみ: 慶應義塾大学のトポロジープロジェクトと本領域との合同研究会(2016)を開催し、素粒子、原子核、宇宙に限らず、数学の研究者も交えて交流した。日本物理学会(2017)ではシンポジウム「トポロジカル物質科学の新展開」を本領域が主催し、研究の現状と将来展望を議論した。また、日本物理学会科学セミナー「トポロジーがひらく新しい科学」(2017)では、本領域メンバー(B01:永長、C01:高橋、D01:上田・新田)が講演した。久保記念シンポジウム「量子系の非平衡時間発展」(2019)では、川上(領域代表)、藤澤(C01)が非平衡系のトポロジカル相について専門外の参加者に分かりやすく説明した。

さらに、本領域での実績を基に、応用やデバイス化も視野に入れた CREST プロジェクトの研究総括に上田(D01)が就任し、松田(A01)、佐藤(B01)、塚崎(B01)が CREST 代表、打田(公募 A01)、松尾(公募 C01)、井手上(公募 C01)、那須(公募 D02)、塩崎(D01 協力)らが「さきがけ」として参加するなど、本領域で活躍した多くの研究者が、新たなステージでの研究を推進している。

(4) 受賞

本研究領域の成果が評価されたことの反映として、メンバーの受賞について代表例を記す。

○カマリンオンネス賞(松田祐司, 2018) ○クラリベイト・アナリティクス(旧トムソン・ロイター) Highly cited researchers(松田祐司, 2017) ○科学技術分野の文部科学大臣表彰(田仲由喜夫, 柏谷聡, 2020; 松田祐司, 2019) ○米沢富美子記念賞(川口由紀(公募), 2020) ○久保亮五記念賞(川口由紀(公募), 2017) ○日本物理学会論文賞(田仲由喜夫, 山影相, 柳瀬陽一, 2019)など。「日本物理学会若手奨励賞7件」などの若手研究者の受賞については、以下「若手研究者の育成に関する取組実績」にまとめる。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域の研究を推進するにあたり、のべ582人・年の若手研究者を育成した。雇用・育成したポスドク研究員（各計画研究で10名、国際活動支援班で5名）は、助教（東大・筑波大・インド工科大など）やポスドク（ケンブリッジ大など）などとして活躍している。特に、以下のプログラムを導入して若手育成に取り組んだ。

【若手励起プログラム】 領域内外の研究室に若手を相互に派遣し、集中的な議論を通して若手の意識・力量を“励起”した。5年間で24名の若手がこのプログラムを活用し、実験技術（結晶成長、測定手法）、理論手法などを習得した。実験と理論の連携派遣（実験研究室から理論研究室への派遣や、その逆）も行われ、ユニークな若手育成の場を提供できた。滞在報告書の内容からも若手の満足度がたいへん高く、複数回利用する若手がいるなど好評であった。さらに、共同研究への発展や助教などの就職に繋がった好例もある。

- 京都大学・川上研究室(D01 代表)に属する大学院生が、2016年に東京大学・上田研究室(D01 分担)に滞在し、そこで始まったトポロジカルポンプに関する共同研究を論文として出版した。さらに、この共同研究を進展させ、理研の研究員を経て、現在、上田研究室の助教として活躍している。
- 東北大学・佐藤研究室(B01 代表)に属する大学院生が、2017年に京都産業大学・瀬川研究室(B01 分担)に滞在してトポロジカル絶縁体の試料作製を行い、その後、共同研究論文や博士学位取得に至った。

【Junior Researcher Exchange Program (JREP)】 国際活動支援班のJREPプログラムを用いて27名の若手を海外へ派遣し、11名を海外から招聘した。国際連携を深めるため、アライアンス相手国の研究会等へも若手を派遣した。特にCIFAR (Canadian Institute for Advanced Research) が主催したワークショップには3名(2016年 トロント)、2名(2017年 バンクーバー)、3名(2018年 モントリオール)、4名(2019年 バンクーバー)を派遣し、現地で若手やシニア研究者との濃密な議論を行った。個々の研究室への派遣では、共同研究への発展やポスドクなどの就職に繋がった例もあり、有効的な施策となった。

- 京都大学・川上研究室(D01 代表)の大学院生が、カリフォルニア大バークレー校 Joel Moore 教授の研究室に滞在し(2018年)、非線形光学現象や電子系の流体力学に関する議論を深め、現在は Moore 研究室のポスドクとして活躍している。
- 京都大学・前野研究室(A01 代表)の大学院生が、ポール・シェラー研究所(スイス)に滞在し(2018年)、アンチペロブスカイト酸化物超伝導体のミュオンスピン緩和測定に成功し、学位取得に至った。

【アライアンスワークショップ・国際スクール】 11回開催した国際研究集会を活用して、若手研究者の育成に努めた。量子物質に関してアメリカ EPIQS の研究グループと3回、トポロジカル物質や冷却気体に関して中国北京(北京大、清華大など)の研究グループと4回、量子物質の最前線についてマックスプランク研究所と2回、マヨラナ粒子などトポロジカル物質科学に関してサレルノ大学 CNR SPIN と2回など、世界の最先端研究者との議論は、若手研究者や大学院生の活性化に繋がった。第3回の北京大学とのワークショップ(2017年、京都)では、学生がセッションの司会を務め、大学院生を対象とする国際スクールを開催し、若手の育成・活性化を促進した。

【若手研究者の受賞】(*は受賞時に39歳以下、R2.3月末時点で40歳以上)

- 科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞(若手科学者賞):4名 [2018年: *好田誠(C01), 橋坂昌幸(C01), 那須讓治(D02), 2017年: 横山毅人(D04)]
- 日本物理学会若手奨励賞:7名 [2020年: 藤岡淳(B01), 塩見雄毅(B01), 井手上敏也(C01), 打田正輝(A01), 2018年: 米澤進吾(A01), 笠原裕一(A01), 2017年: 那須讓治(D02)] ●日本物理学会論文賞:2名 [2019年: *北川健太郎(A01), 2020年: 赤城裕(D02)]
- N. F. Mott Prize: 1名 [2016年: 桂法称(D02)]



CIFAR ワークショップへの若手派遣



ミュオンスピン緩和測定(スイス)



文部科学大臣賞表彰

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本領域では、以下の世界的に著名な研究者7名に評価を担当いただいた。

- ◆ 樽茶清悟（理研・創発物性科学研究センター・グループディレクター、メゾスコピック物理学の第一人者）
- ◆ 川村 光（豊田理化学研究所・常勤フェロー、日本物理学会前会長、量子スピン系理論の世界的権威）
- ◆ 三宅和正（大阪大学先端強磁場科学研究センター・招聘教授、超伝導理論の第一人者）
- ◆ A. J. Leggett（米国 The Univ. of Illinois, Urbana-Champaign・教授、2003年ノーベル物理学賞受賞）
- ◆ Q. K. Xue（中国清華大学・教授、2013年に異常量子ホール効果を初めて実験的に観測）
- ◆ L. Molenkamp（ドイツ Würzburg University・教授、2007年トポロジカル絶縁体を初めて実現）
- ◆（故）S. C. Zhang（米国 Stanford University・教授、トポロジカル絶縁体理論の創始者の一人）

中間審査(2017年)までの評価：国内アドバイザーに領域研究会(2016年)と国際会議(2017年)に、海外アドバイザーには国際会議(2017年)に参加頂き、それぞれ評価をして頂いた。以下に、その評価を引用する。

- ◆ **樽茶清悟：** **研究** 4つの計画班でそれぞれ特徴のある優れた成果が得られており、予想を上回る進捗と言える。とくに、実験と理論の班の間での共同研究によって、トポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるネマチック超伝導の発見、逆ペロブスカイト酸化物における初の超伝導体 $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ の発見、新しいトポロジカル半金属の発見、新規トポロジカル物質における超伝導性の探究など、特筆すべき成果が得られている。 **運営** 総括班の役割分担が明確で個々に責任を持った運営がなされている。総括班が主催する会議、研究者交流などの行事を通して若い人たちが新鮮な刺激と最新の情報を得て活発に活動しているように見える。
- ◆ **川村光：** **研究** 発足以来、トポロジーを基軸とした物質科学を対象とした極めて活発な研究活動が行われてきている。“Correlation” “Symmetry” “Nanoscience” “Theory” という班構成が取られているが、これらの概念を跨ぎつつ、研究者も交差する内容になっている。今回、領域の柱(の一つ)として、本新学術領域が、“Correlation” “Interaction” を取り上げられたのは、実空間と波数空間とをつなぐ、一体問題を越えたトポロジー物質科学の創出という歴史的意義という観点からも、真に時宜を得たものと思う。 **運営** 領域代表を始めとしたコアメンバーの努力により、領域の研究活動については、極めて活発、かつ適切に運営されていると思う。これらの活動は高い評価に値しよう。
- ◆ **三宅和正：** **研究** 研究分野がやや異なる評者にとっても、本新学術領域4つの計画研究班の研究テーマのそれぞれで、世界的に見てレベルの高い研究が順調に進んでいる印象をもった。また、アライアンス国際ワークショップを4件開催するなど、世界の当該研究分野でのビジビリティの確保をめざした活動が評価でき、今後とも、世界をリードする研究を進めることが期待される。 **運営** 川上代表を中心とする総括班で領域の円滑な運営が行われている印象をもつ。領域研究を有機的に発展させることをめざした研究活動が順調に行われている。また、アライアンス国際ワークショップ、若手励起プログラム、JREPにより、研究者間のネットワーク構築へ向けた芽が出て始めているという印象をもつ。
- ◆ **A. J. Leggett:** **Research** It is clear that the quantity of research which has been partially or wholly supported by the "kakenhi" is impressive, with numerous publications in high-quality journals such as Nature journals and Physical Review Letters. From what I can judge the research output seems entirely commensurate with what one can expect from an operation of this size. **Organization** As far as I can judge the TMS program seems to have done an outstanding job here, particularly in encouraging the collaboration of younger researchers with other groups within Japan. I have the impression that in this way a "common culture" is being formed in the topological-materials area between researchers with different backgrounds, and this should certainly be encouraged.
- ◆ **Q. K. Xue:** **Research** The overall organization and operation of the project are excellent. The project has been very active in cutting-edge research. It has become a world well-recognized center in topological materials and physics. I am particularly impressed by the achievements in topological superconductivity such as Cu-doped Bi_2Se_3 , which represents one of the most important progresses in topological superconductivity. The public lectures such as the one by Dr. Bednorz would greatly promote the publicity of this emergent field. **Organization** The series activities such as alliance workshops and young research exchange etc., and organizing and participating in international workshops/conferences have been well designed and organized, which showcases the effective operation of the project.
- ◆ **L. Molenkamp:** **Research** I am very impressed by the reach of the project. Topology is a new and all-pervasive topic in condensed matter physics, and one which brings the different specializations together once again. The

research output from the consortium confirms the viability of this approach: some very important papers result from collaborations between groups with a rather different research background. **Organization** I am impressed by both the quality and the quantity of the organizational activities. One thing I could suggest, just from my own experience, is that it may be an idea to give junior collaborators (PhD students, perhaps also beginning postdocs), the opportunity to organize their own workshops.

◆S. C. Zhang: **Research** I have participated in a few international meetings organized or co-organized by this project, and had the opportunity to learn from the research work through both oral and poster presentations. Generally, I find the research work of high quality and up to international standards. I am also impressed by the contributions of the younger researchers in the field. **Organization** The meetings are very well organized, and the programs carefully planned. International leaders have been invited to give presentations about their latest breakthroughs, and the presentations by the project members are of high quality as well. I wish for the continuation of the project.

中間審査(2017年)以後の評価: 中間審査の後に評価委員より頂いた内容を以下にまとめる。これは、最終年度の国際会議TopoMat2019で開催したアドバイザー会議の後に書面で提出頂いたものである。

◆樽茶清悟: **研究** これまで期待を大きく上回る研究成果の達成と、優れた人材育成、国際ネットワークの形成に成功している。後半では、集中、連携を旨とする研究が行われ、キタエフスピン系でのマヨラナ準粒子の観測、キタエフスピン液体物質の開拓といった、インパクトの高い成果が挙げられた。このほか、新型トポロジカル半金属の発見、カイラル TLL (朝永ラッティンジャー流体) の非平衡ダイナミクスの解明、高スピントポロジカル相、非エルミート型トポロジカル相の理論といった、今後の発展が見込まれる成果が得られている。**運営** 総括班の指揮の下、各種会議(国内、国際、国際ネットワーク、連携研究会など)や派遣型研究交流が継続的に企画され、このことが領域の研究活動、人材育成の推進に役立っている。とくに、他の研究室の中で直接の共同研究をすることが若手研究者に刺激となっており、これは共同研究の推進にも役立っている。国際ネットワークに関しては、アライアンス WS、国際会議、スクールが意欲的に開催されており、世界の当該分野を先導するグループとして十分な役割を果たしている。**その他** 中間評価への回答に関して、領域を挙げて集中的な努力がなされ、キタエフスピン系物質の開発とマヨラナ粒子の観測という、非常にインパクトの高い成果として結実している。

◆川村光: **研究** 本領域では研究の進捗、国際的な評価、若手育成などの点において期待以上の達成度が認められる。当新学術領域の最大の貢献は、当初の理論が先行した状況を転換し、多数の実験研究・実験研究者を包含したものにまで一般化・普遍化し、「トポロジー」概念の適用範囲を磁性体等の強相関物質やナノ物質にまで拡張したことにある。個別のテーマにおいても、例えば、キタエフ候補物質である $\alpha\text{-RuCl}_3$ において半整数熱量子ホール効果を見出し、マヨラナ準粒子発見の実験的証拠を得たことは特筆すべき成果と言えよう。また、極低温まで磁気秩序化しないスピント軌道が「エンタングル」したキタエフ候補物質であるイリジウム酸化物 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ を見出した等、注目すべき成果を挙げた。**運営** 領域運営に関しては、領域代表、総括班のリードの下、極めて活発な活動が展開された。国際活動支援には特に力を入れておられ、「トポQ」というネットワークを立ち上げて、研究者の招聘と派遣(若手対象の JREP とそれ以外の REP) や海外とのジョイントのワークショップを企画など、着実な成果が上がってきている。

◆三宅和正: **研究** 専門分野が本研究分野とはやや異なる評者にとっても、全体として世界的レベルの研究が発展したという印象をもった。とりわけ、中間評価で指摘された、「強相関物質の開発およびマヨラナ粒子実測に対しては、まだ十分な成果がえられている」とは言い難い」というコメントに対しては、キタエフスピン系 $\alpha\text{-RuCl}_3$ におけるマヨラナ粒子系理論の予測する「半整数熱量子ホール効果」の世界初の観測、キタエフ候補物質の探索では初のスピン-軌道液体物質 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ を発見するなどの成果を上げたことは特筆すべきである。**運営** 領域研究を有機的に発展させる研究活動が活発に行われてきた。国際的ネットワーク作りをめざしたアライアンスワークショップ開催、交換プログラムの REP(シニア)、JREP(若手)の活動は、研究者間のネットワーク構築へ向けた活動として評価できる。「若手励起プログラム」により、研究者間の有効な交流が得られたと評価できる。

また、TopoMat2019 の招待講演者の中から以下の 3 名にアドバイザー会議でコメントを頂いた:

- ◆F. Pierre (CNRS, Paris-Saclay 大, ナノ実験) Wonderful time-resolved demonstration of spin-charge separation by Fujisawa, beautiful demonstration of an exotic effect (C01の成果).
- ◆X. Dai(香港科技大, 理論) Matsuda-san's achievement (A01の成果) is good, thinking about the future.
- ◆E. Kim (Cornell大, 理論) I believe over the last 5 years there have been a lot of improvements in collaboration. Matsuda's group (A01の成果): Major accomplishment changes the whole field.