領域略称名：トポ物質科学
領 域 番 号：2701

平成２９年度科学研究費補助金「新学術領域研究（研究領域提案型）」に係る中間評価報告書

「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～平成３１年度

平成２９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

研究領域全体に係る事項

１．研究領域の目的及び概要・・・

研究組織　（総括：総括班，支援：国際活動支援班，計画：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公募：公募研究）

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	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～ 平成 31 年度	川上　則雄	京都大学・理学研究科・教授	11
Y00 支援	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～ 平成 31 年度	川上　則雄	京都大学・理学研究科・教授	7
A01 計画	15H05852 強相関物質のトポロジカル相	平成 27 年度～ 平成 31 年度	前野　悦輝	京都大学・理学研究科・教授	14
B01 計画	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～ 平成 31 年度	佐藤　宇史	東北大学・理学研究科・教授	8
C01 計画	15H05854 トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象	平成 27 年度～ 平成 31 年度	藤澤　利正	東京工業大学・理学院・教授	11
D01 計画	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～ 平成 31 年度	川上　則雄	京都大学・理学研究科・教授	11
総括・支援・計画研究　計 6 件					
A01 公募	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	3
A01 公募	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 公募	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	2
A01 公募	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	5
B01 公募	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 公募	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	2

B01 公募	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	2
C01 公募	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 公募	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	2
C01 公募	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 公募	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 公募	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	2
D02 公募	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 公募	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 公募	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 公募	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 公募	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 公募	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	2
D04 公募	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
公募研究　計 19 件					

研究領域全体に係る事項

１．　研究領域の目的及び概要（２ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

【学術的背景】

トポロジーは「連続変形に対する不変性」に関する幾何学の概念であるが、こ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、従来型の量子現象とは全く異なり、量子状態の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。この分野に新たな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」の理論的予言と、2007年の2次元量子井戸HgTe/CdTeでの実現である。これに続き、2009年以降Bi_2Se_3, $Bi_{1-x}Sb_x$など3次元系でも次々と新物質が発見された。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た。

この驚くべき発展を遂げている分野で、世界に先駆けて、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（略称:トポロジカル量子，H22-H26，代表:前野悦輝）が始動し、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い。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。

【研究目的】

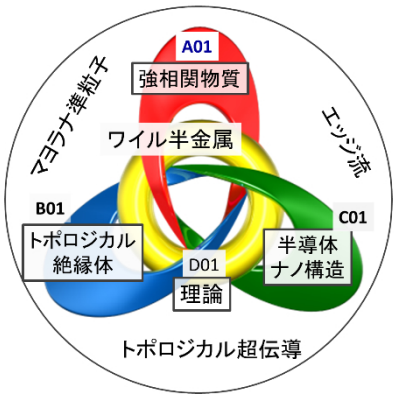
トポロジカル物質科学において新たなブレークスルーを生むためには、**「強相関」**による効果の理解、さらに結晶構造の**「対称性」**に基づくトポロジカル物質の開拓、および**「ナノサイエンス」**を駆使したヘテロ構造などによるトポロジカル相の人工制御が必須となる。本新学術領域の目的は、物質に内在するトポロジーを基軸として、強い電子相関・結晶対称性・半導体ナノ構造に由来する新奇物性開拓を行うとともに、トポロジカル量子相特有の準粒子を探索・実証し、その背後に横たわる量子凝縮相の物理を解明することである。これにより、強相関トポロジカル系、トポロジカル絶縁体・超伝導体、分数量子ホール系などの研究を飛躍的に発展させる。そして、これらを包括的に含む新たな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。このような緊密な連携を保って研究を遂行することにより、トポロジカル物質科学における我が国の国際競争力を確保し飛躍的な発展を実現させることを目指す。

【研究体制】

トポロジカル物質科学のフロンティア開拓の鍵となるのが、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糸となる研究項目「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フェルミオンの検出を、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。

【研究期間終了時の達成目標】トポロジーを基軸とした新奇物性および新概念の創出

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、マヨラナ準粒子やワイル半金属などの新奇現象の探索・検証を通して、トポロジカル物質科学の基礎学理を構築する。本領域の達成目標は、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、さらにデバイス化の道筋につなげるという大きな飛躍を遂げることである。たとえばエキゾチック準粒子の探索・実証には、強相関や対称性を指針とした物質開発、実証のためのプロトコルの理論提案、そしてプロトコルを実現するためのナノデバイス化の統合が必須となる。本領域では、このような目標を達成するための複数の分野間および国際的な連携・共同研究を強力に推進し、国際的に活躍できる若手人材を抜擢し育成する。

【学術的意義と波及効果】

これまでは、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、化学分野なども含む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。

（1）**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する。

（2）**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、国外との連携も強化する。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・マックスプランク固体研究所など）。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。

２．　研究の進展状況［設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する］（３ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

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。これまでの研究成果は200件を超える研究論文として発表した。以下に研究項目ごとに設定目的と進展状況をまとめる。

《研究項目　A: トポロジーと強相関》

超伝導体・半金属・磁性体などの電子系の単結晶・人工超格子等に、超流動ヘリウムも含めて、強相関多体系でのトポロジカル相の開拓と新奇量子現象の観測・解明を行う。

■　計画研究 A01: 強相関物質のトポロジカル相

【設定目的】

本計画研究の目的は、電子間の相互作用が強い物質（強相関物質）で発現する超伝導体・モット絶縁体・半金属などの相での、トポロジカルに非自明な量子凝縮状態や量子相転移の研究を格段に深化・発展させることである。遷移金属酸化物や重い電子系化合物を主な舞台として、人工超格子や微細加工・接合系も含め、強相関トポロジカル現象の物理を発展させる。そして、トポロジカルな超伝導体に加え、絶縁体や半金属も含めた新奇トポロジカル相の創成・制御における電子相関の有効性を明らかにする。

【進展状況】

これまでの研究成果から、《1》トポロジカル超伝導体、《2》トポロジカル半金属、《3》トポロジカル磁性体の分類でのアプローチの有効性が鮮明になってきた。《1》では、B01 と公募 D02 との共同研究から、初のネマティック超伝導状態を $Cu_xBi_2Se_3$ のトポロジカル超伝導状態で発見した。また単純構造の超伝導体/強磁性体接合では初の、長距離近接効果による強磁性体へのスピン三重項電子対の浸透を実証し、Sr_2RuO_4 のスピン三重項超伝導性に新たな確証も得た（**右図**）。微小結晶での常磁性マイスナー効果や、接合エッジでの完全導電性などの理論を構築した。《2》では、ワイル半金属でのカイラル異常に伴う負の磁気抵抗が、らせん欠陥の下で観測可能となる理論を示した。3 次元ディラック電子を持つ半金属にドープすることで、アンチペロブスカイト酸化物では初の超伝導を発見し、D01 と共同でトポロジカル超伝導性を分析した。《3》では、水素置換したハニカム格子イリジウム酸化物で遂にスピン液体状態を実現し、キタエフ・スピン液体との同定を進めている。パイロクロア格子酸化物では創発フォトンやモノポール励起などのトポロジカルな準粒子の検出に成功した。新学術領域ならではの計画研究グループ同士、および他の計画研究や公募研究との密接な共同研究が、新奇超伝導の発見など、前もって予想できない成果を生んだ。

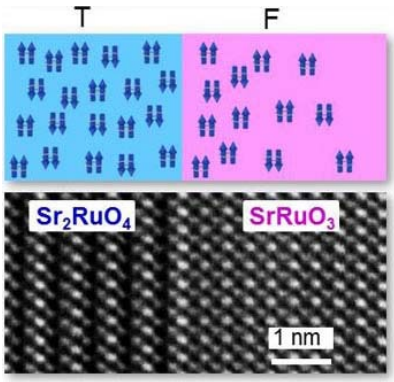


図:スピン三重項超伝導体（T）から強磁性体（F）への直接的近接効果観測に成功したルテニウム酸化物の接合素子断面の電子顕微鏡写真。

■　公募研究 A01

トポロジカル磁性体候補のパイロクロア酸化物 $Nd_2Ir_2O_7$ の金属・絶縁体転移に伴い、フェルミポイント金属からギャップの開いたスレーター絶縁体、さらに低温でモット絶縁体に移行することを角度分解型光電子分光から明らかにし、なぜトポロジカル・ワイル半金属状態が生じないかの機構を明らかにした。

《研究項目　B: トポロジーと対称性》

先端分光技術と高品質単結晶作製技術を組み合わせ、結晶の対称性を基軸として、新しいトポロジカル物質の開拓と新奇量子現象の観測・解明を行う。

■　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

【設定目的】

本計画研究の目的は、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、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探索するとともに、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である。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作製技術を駆使して、そのエッジ・表面およびバルクにおける電子構造の完全決定を目指すとともに、分子線エピタキシー(MBE)法や接合デバイス作製技術を

用いて超伝導接合などを作製することにより、エッジ流、マヨラナ準粒子、奇周波数超伝導電子対といった新奇トポロジカル量子現象の観測・解明を行う。

【進展状況】

本研究は、「トポロジカル量子相転移」「トポロジカル半金属」「ディラック電子制御」「トポロジカル超伝導」「エッジ流・奇数波数電子対・マヨラナ準粒子」を柱にして研究を進めるが、現在までに各テーマにおける研究は概ね計画通り進展している。特に、本研究の目玉である MBE と ARPES による連携が実現し、トポロジカル絶縁体$(Bi_{1-x}Sb_x)_2Se_3$ 薄膜において長年の課題であったフェルミ準位の制御に成功したこと(**右図**)は、新奇なトポロジカル量子現象の探索において大きな前進である。また、空間反転対称性を破るワイル半金属(NbP)、および、らせん対称性やグライド対称性などの非共形型対称性によって特徴付けられるトポロジカル半金属(HfSiS, 三方晶 Te など)の発見は、計画研究と公募研究の連携による成果であり、トポロジカル物質探索の新しい方向性を示すものである。さらに、トポロジカル超伝導体においては、A01・D01 との共同研究により、$Cu_xBi_2Se_3$ の特異な超伝導性(ネマティック超伝導)が明らかになってきた。

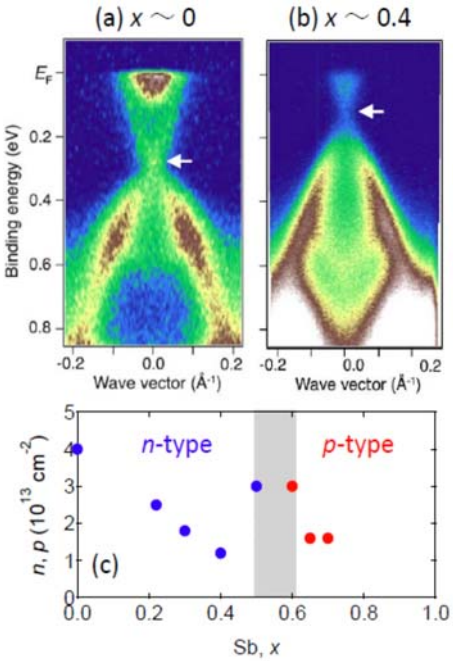


図: (a),(b) $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Se_3$ の ARPES データ. (c)Hall 効果測定で求めたキャリア濃度の Sb 濃度依存性。

■ **公募研究 B01**

公募研究では、トポロジカル絶縁体・超伝導体のデバイス応用に向けた動作原理解明や、新しいトポロジカル絶縁体・半金属における特異物性の研究を進めている。その結果、トポロジカル絶縁体 Ru_2Sn_3 における線形磁気抵抗、強相関ペロブスカイトディラック半金属 $SrIrO_3$ における異常な正の磁気抵抗を見出した。また、計画研究と連携して、エッジ電流観測のための SQUID およびダイヤモンド磁気センシングを用いた実験システムを構築し、デバイス内の電流分布のマッピングが可能なことを示した。このように、当研究項目では、新学術ならではの他の計画研究や公募研究との緊密な連携を生かすことで、期待通りの成果が得られている。

《研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス》

半導体ナノ加工や冷却原子の制御技術の進歩とトポロジーの概念を組み合わせて、これまでにない人工トポロジカル相の創成・制御を行う。

■ **計画研究 C01: トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象**

【設定目的】

本計画研究の目的は、半導体ヘテロ構造・低次元ナノ構造や超伝導体・強磁性体のハイブリッド構造をベースとした人工的な「トポロジカル物質ナノ構造」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である。カイラルエッジ状態、ヘリカルエッジ状態、狭ギャップ半導体の微小リングを主なプラットフォームとした低次元ナノ構造・ハイブリッド構造において、トポロジーに起因するエキゾチック準粒子がもたらす特異な輸送現象(エッジ流・非平衡現象・動的挙動・量子統計性・準粒子干渉・スピン干渉・スピン輸送)を明らかにすることを目指している。

【進展状況】

本研究は、「エッジ状態における動的現象・非平衡現象の解明」「ヘリカルエッジ状態の制御」「スピン幾何学位相とスピン輸送の制御」「分数電荷準粒子の物性と統計性の検証」「マヨラナ準粒子の生成と検出」「トポロジカル物質ナノ構造デバイスの提案」を柱にして研究を進めており、各テーマにおける研究は概ね計画通り進展している。特に、カイラルエッジの特徴である一方向伝導を活かした独自の時間分解測定により、朝永ラッティンジャー流体のスピン電荷分離を明快に示した実験は、大きな成果であるとともに、他のトポロジカル系への展開が期待される。また、InAs/InGaSb ヘテロ構造による量子スピンホール効果においては、歪みバンドエンジニアリングによるトポロジカル相の最適化(**次ページ最初の図**)により、バンドのトポロジーを反映したベリー位相の観測に成功し、超伝導接合によるハイブリッド系への発展性が期待される。また、上記の技術・知見から、領域研究会などを通じて他の計画研究や公募研究と議論を深め、共同研究や研究協力を進めており、新たな研究展開が生まれる可能性がある。このように、カイラルエッジやヘリカルエッジでの輸送を非平衡状態や非定常状態という新たな視点で理解し、準粒子の統計的性質やマ

ヨラナ準粒子の生成制御といった新しい物理現象を見出すことにより、学術的にも応用的にも意義の高い研究になると考えている。

■ 公募研究 C01

公募研究では、多様なナノ構造による人工トポロジカル相に関する研究を推進しており、結晶方位をツイストさせた 2 層グラフェン、単層 2 次元トポロジカル結晶絶縁体、2 次元トポロジカル絶縁体と超伝導体の接合、冷却原子を用いたトポロジカルポンピング現象などの研究を行った。特に、ゲートで制御されたグラフェン npn 接合において接合面の形状を設計・制御することによってディラック粒子の反射鏡を実現した。

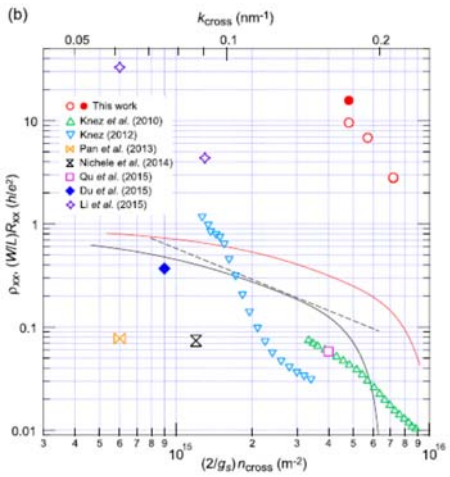


図: 歪導入 InAs/InGaSb での
バルク絶縁性ρ_{xx}の顕著な向上。

《研究項目 D: トポロジーと新概念》

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を推進する横糸の役割を担う。

■ 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

【設定目的】

本計画研究の目的は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である。特に、トポロジカル物質科学の開拓の鍵となる「強相関」、「対称性」、「ナノサイエンス」に重点を置いた理論研究を展開し、これら実験研究の連携を加速する。特に、(1)強相関物質群における新奇なトポロジカル量子相 (2)対称性によって守られたトポロジカル量子相 (3)超伝導・超流動 (4)人工量子系におけるエキゾチック準粒子 (5)高エネルギー物理学など他分野への応用に研究の重点を置く。

【進展状況】

各テーマにおける研究は概ね計画通り進展している。まず (1) 2 次元トポロジカルモット絶縁体とそのエキゾチックなエッジ状態の性質を解明し、さらに公募研究 D02 の柳瀬との共同研究で強相関によるトポロジカル分類のリダクションに対する候補物質 $CeCoIn_5/YbCoIn_5$ を初めて提案した(右図)。 (2) 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、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。これは、この分野の新たな局面を切り開く重要な成果である。 (3) A01 の実験系と協力しディラック金属の物質がトポロジカル超伝導体となる可能性を指摘した。これは A01 との連携研究による大きな成果である。(4) 冷却原子系のトポロジカル相に関する基礎理論を整備し、さらにトポロジカルポンプに対して C01 の実験との連携を進めた。C01 公募研究との協力は今後の確固とした成果につながるものである。(5) 中性子星における中性子超流動に関して超流動 ^{3}He の知見を活用し、弱極限ではネマティック相になっていることを明らかにした。この成果は、素粒子と物性との異分野連携によって初めて生み出された成果であり、他分野への波及効果にも大きく貢献するものである。

図: $CeCoIn_5/YbCoIn_5$ の構造

■ 公募研究 D02

A01 の強相関系の実験に関する理論を中心に進める。公募代表者 5 人が中心となり、強相関のトポロジカル相の研究に確固とした成果をあげた。例として柳瀬は D01 代表の川上と共同で強相関トポロジカル超伝導の発現に関する論文を 2 編発表した。

■ 公募研究 D03

対称性に基づくトポロジカル相に関して B01 との連携研究を進める。メンバーは第一原理計算が専門の山内である。計画研究 B01 代表の佐藤のグループと協力し、空間反転対称性を破るワイル半金属(NbP)、および、非共形型対称性によって特徴付けられるトポロジカル半金属(HfSiS, 三方晶 Te)を発見した。

■ 公募研究 D04

C01 のナノ量子系、人工量子系に関する研究を進める。3 名の研究者からなる。着実に研究が進んでいる。特に、小布施は「量子ウォーク」という新たな分野でのトポロジカル相に関する研究成果をあげた。

３．　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（２ページ以内）

審査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、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

（1）領域提案の審査結果に関して

【留意事項】

■『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でいる。例えば、本領域の主テーマである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 では、トポロジカル磁性体を含む強相関トポロジカル相の研究を継続しており、また B01 はワイル半金属など対称性に守られた新たなトポロジカル相を発見し、C01 はナノ構造を持つ系で新奇な人工トポロジカル量子系の作製に挑んでいる。これらのトポロジカル相の探索は D01 の理論がサポートしている。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。これらの研究を継続し、さらに新たな物質の創成に挑戦することで、上記の留意点についてさらに明確な回答を得ることを目指す。

■『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：留意事項で指摘されているとおり、トポロジカル現象の魅力を他分野の研究者、さらには一般の非専門家に説明することはかなり難しい。他分野への概念の普及に関しては、領域研究会（既に 2 回の国内会議、1 回の国際会議を開催）において、数学、原子核、素粒子などの他分野の講演者を招待するなど、トポロジカル物質科学の面白さを伝えている。さらには、小規模な連携研究会を頻繁に開催し、他分野の講演を多く招待するなどして、領域活動の普及に努めている。領域代表の川上は H29 年度の仁科記念講演を行う予定であり、これは他分野への普及の絶好の機会となる。

一方、非専門家に対しては、高校生や一般向けの講座、高校への出張講義、オープンキャンパスなどを利用し、トポロジカル物質とは何か？何が面白いのか？役に立つのか？などの素朴な質問に答えるよう努力を重ねている。中でも、H28 年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（**下の写真**）はたいへん満足度の高いものであった。さらには、H28 年のトポロジカル現象・相転移に関するノーベル物理学賞の一般向け説明会を何度も開催するなど、難解なトポロジカル物質・現象を分かり易く説明できるよう努力を重ねている。領域代表の川上は H29 年度西宮湯川記念セミナーを行い、トポロジカル物質科学に関する市民向けの講演を行う予定である。また、A01 代表の前野は、H29 年秋の日本物理学会での市民講座で講演する予定である。

写真：ベドノルツ博士を招いての市民講座（H28 年 2 月：主に高校生、その家族、学部学生を対象としたもの。ベドノルツ博士の講演は前野(A01)により通訳された。

【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と重なる部分が多いが、もう一度ポイントを整理する。物質科学以外の他分野への普及に関しては、以下のような取組を行っている。まず、「トポロジー連携研究会」を領域内の連携のみならず、他分野との交流に用いている。このような趣旨の研究会を既に 8 回開催したが、この中で素粒子、原子核、宇宙論を含む研究会を H28 年 11 月に慶應義塾大学で開催した。物質科学分野と他分野の出席者はほぼ半々であった。また、領域研究会にも数学者を招待し、数学に

おけるトポロジーの講演を行って頂いた。また、H29 年 5 月の国際会議では、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な講演をして頂き、異分野交流を深めた。また、研究面においては、物性物理と素粒子物理がうまく連携研究することにより、その成果が着実に出始めている。例えば、超流動 ^{3}He のトポロジカルな性質とのアナロジーから、中性子星内部の超流動のトポロジカルな性質に関する理論を構築できた。これは物性と素粒子の異分野協力により達成されたものである。

【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：本研究の認知度を上げるために、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るように努力している。上にも記したが、2016 年のノーベル物理学賞（トポロジカル現象・相転移に関する業績）に関して一般向けの説明を行い、トポロジカル物質科学の認知度を高める努力を行っている。また、領域代表の川上と D01 分担者の佐藤昌利は 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サポートを行った。

従来の物理現象をトポロジーの観点から見ることにより、新たな発想につながる典型例としては「ワイル半金属」がある。この半金属は絶縁体とは違い素励起にエネルギーギャップがないので、トポロジカルな性質を持ち合わさないように見える。しかし、これがトポロジカルな性質を持つことが理論的にも実験的にも証明された。本新学術研究では B01 による新たなトポロジカル半金属 NbP, HfSiS の発見がある。この半金属の概念はさらには「ワイル超伝導」という新概念も生み出し、現在実験的にその検証が行われている。この例に代表されるような新現象の予言や発見に伴う感動を、研究会、ワークショップ、市民講座などで非専門家に広く伝える努力を重ねている。

（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：

1．**メール配信、領域会議での徹底**：「国際活動に関する留意事項」という件名で、トポ物質科学メンバー全員に「国際活動支援班プログラムを利用する際アイデアの流出防止など、研究のプライオリティの確保を行うよう」、徹底した。さらに、「必要がある場合は、招へい者・派遣者ならびに担当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。また、領域研究会などの機会にもこの重要性を喚起した。

2．**具体例**： 上記の具体的な例が実際に 1 件あった。ドイツのフンボルト大学大学院生の Hausmann 氏が 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。このとき、前野研究室では新しい超伝導の探索を行っている時期であったため、Hausmann 氏の指導教授が、情報の流出・使用をしない旨の誓約書を提出した。

【参考意見】『国際活動支援班に関して・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との意見があった。』

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ている。これは、米国の EPiQS, カナダの CIFAR などのプロジェクトのみならず、ドイツのマックスプランクやイタリアの Salerno などの研究所と国際連携を目指すプログラムである。このネットワークには、各プロジェクト、各研究所が対等な立場で参加している。

一方で、本新学術研究の前身である、新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（H22-H26, 代表：前野悦輝）において、既に多くのネットワーク形成の種をまいた。これを引き継いだ本領域は、自然な流れとして“Topo-Q”ネットワークの牽引役の役割を担っている。実際に、“Topo-Q”ネットワークの目玉である「国際アライアンス・ワークショップ」を既に 4 回開催し、すべて本新学術領域が主導してきた。相手機関・プロジェクトは、①ドイツ・マックスプランク研究所、②EPiQS（米国のプロジェクト）、③北京大学、④イタリアの SPIN 機構である。H29 年度は、さらに⑤北京大学、⑥EPiQS とのアライアンスワークショップを開催予定である。このような経緯もあり、“Topo-Q”ネットワークに参加している機関・プロジェクトから本領域がこのネットワークの牽引役として認識されている。

４．主な研究成果（発明及び特許を含む）［研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する］

（３ページ以内）

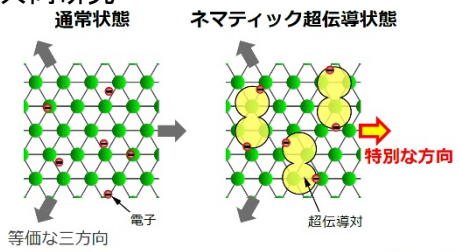
本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

研究項目 A: 強相関とトポロジー

A01（計画：前野,米澤; 鄭,俣野）

ネマティック超伝導の発見: 計画 B01(瀬川・安藤), 公募 D02（永井）との共同研究

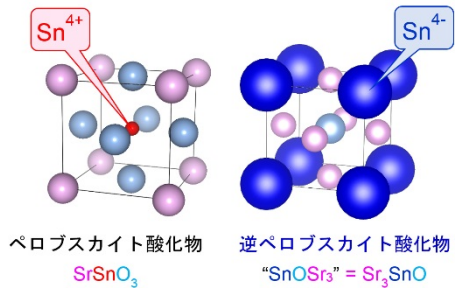
結晶の回転対称性を破るネマティック超伝導の最初の例を、ドープしたトポロジカル絶縁体 $Cu_xBi_2Se_3$ において発見した。核磁気共鳴（NMR）は電子対スピンがネマティック状態にあるスピン三重項超伝導状態を示し [Nat. Phys. **12**, 852-854 (2016)]、比熱は超伝導ギャップ振幅からネマティック超伝導であることを示す [Nat. Phys. **13**, 123-126 (2016)]。理論提案されたトポロジカル超伝導状態で説明出来る（右図）。



A01（計画：前野,米澤）

アンチペロブスカイト超伝導の発見: 計画 D01（佐藤昌）との共同研究

イオン価数が通常と反転したアンチペロブスカイト酸化物で初めての超伝導を発見した [Nat. Commun. **7**, 13617-1-6 (2016)]。トポロジカル結晶絶縁体の候補物質を金属化したもので、トポロジカル超伝導状態の可能性も理論分析した（右図）。



A01（計画：前野,米澤,寺嶋）

強磁性体へのスピン三重項超伝導電子対の誘起

単純構造の超伝導体/強磁性体接合素子では初めて、長距離近接効果による強磁性体へのスピン三重項電子対の浸透を実証し、同時に Sr_2RuO_4 のスピン三重項超伝導性に新たな確証を加えた [Nat. Commun. **7**, 13220-1-7 (2016)] 。

A01（計画：高木,北川）

キタエフ・ハニカム格子イリジウム酸化物でのスピン液体

ハニカム格子をもつイリジウム酸化物でのスピン液体状態を実現し、キタエフ・スピン液体で期待されるトポロジカル現象の観測を進めている。また、エキシトニック絶縁体転移を発見し、トポロジカル状態との関連性を吟味している [Nat. Commun. **8**, 14408-1-7 (2017)]。

A01（計画：松田,宇田川,寺嶋,笠原）

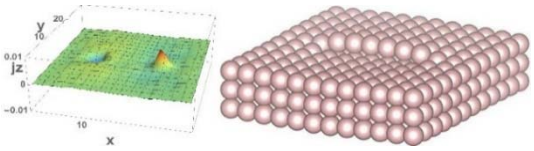
重い電子系人工超格子における磁気量子相転移の制御

重い電子系磁性金属と非磁性金属の超格子で、低次元化することで磁気量子相転移を実現した [Nat. Commun. **7**, 10807-1-6 (2016)]。類縁の超格子での超伝導体では、局所反転対称性の破れと強いスピン・軌道相互作用に伴うマヨラナ・エッジ状態の観測を進めている。またパイロクロア酸化物のスピンアイス状態での、トポロジカル準粒子の観測を熱磁気輸送現象測定によって進めている。

A01（計画：藤本）

ワイル半金属のカイラル異常の観測可能性

ワイル半金属がらせん転移を持つ場合、現実の物質で負の磁気抵抗が観測可能になることを予言した [Phys. Rev. Lett. **116**, 166601-1-6 (2016)]（右図）。



らせん転移構造を持つワイル半金属

A01（計画：浅野）

超伝導接合のトポロジカル・エッジ効果: 計画 B01(田仲)との共同研究

奇パリティー超伝導と金属との接合素子で、表面マヨラナモードが金属に侵入して完全導電性を生むことを理論的に示した [Phys. Rev. B **94**, 054512-1-6 (2016)]。

A01（公募：近藤）

パイロクロア格子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の関係解明

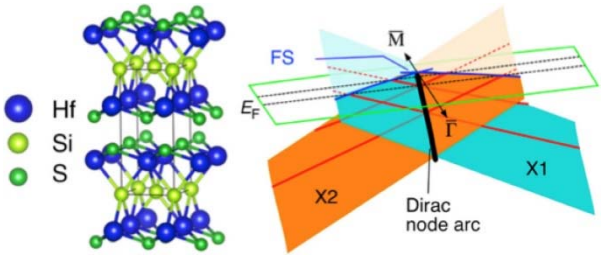
角度分解光電子分光から、金属・絶縁体転移に伴い、点状のフェルミ面をもつ金属から通常絶縁体、さらに低温でモット絶縁体に変化するためにワイル半金属状態が生まれない状況を明らかにした [Phys. Rev. Lett. **117**, 056403-1-6 (2016)]。

研究項目 B: 対称性とトポロジー

B01 (計画:佐藤)

三方晶 Te におけるワイルノードの観測: D03 山内(公募)との共同研究
カイラル結晶である三方晶テルルにおいて、らせん対称性によって保護されたワイルノードとバンドのスピン分裂をはじめて観測した[Phys. Rev. B **95**, 125204-1-5 (2017)]。

新型トポロジカル半金属の同定: 瀬川、安藤との共同研究
シリコンの正方格子からなる HfSiS が、グライド対称性に起因した線ノード半金属であり、理論計算で予想されないディラックノードアーク(右図)と呼ばれる特殊な表面状態を有することを明らかにした [Phys. Rev. B **94**, 121108R-1-5 (2016)]。



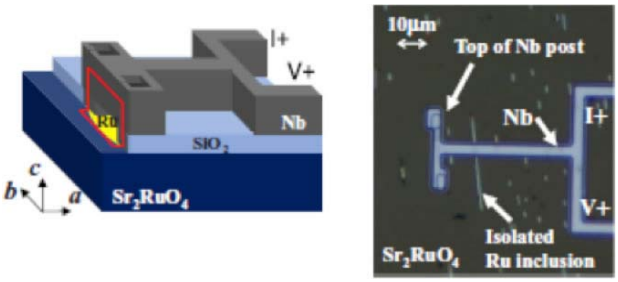
HfSiS(左)とディラックノードアーク(右)

B01 (計画:瀬川)

$Cu_xBi_2Se_3$ で超伝導状態における対称性の破れを観測: 安藤、A01 前野、D02 永井(公募)との共同研究
トポロジカル超伝導体候補物質 $Cu_xBi_2Se_3$ において結晶の対称性を破る「ネマティック超伝導」が発現していることを明らかにした[Nat. Phys. **13**, 123-126 (2016)]。

B01 (計画:柏谷)

Sr_2RuO_4 におけるカイラルドメイン壁の動きをジョセフソン電流で検知: 田仲、A01 浅野の共同研究
Nb/Sr_2RuO_4 のジョセフソン接合において臨界電流の磁場依存性がサイズに依存して変化することから、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-1-6 (2015)](右図)。



Sr_2RuO_4 と Nb のハイブリッド構造による超伝導ループとジョセフソン接合

B01 (計画:田仲)

ドープしたディラック半金属における超伝導理論を構築: D01 佐藤との共同研究
ディラック電子にキャリアをドープ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**, 014510-1-16 (2016)]。

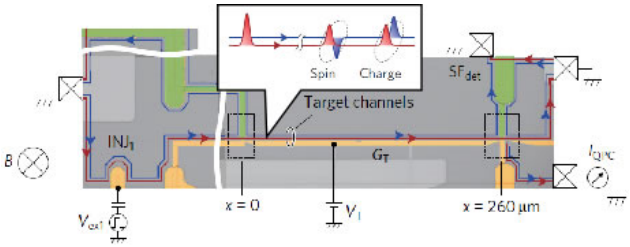
B01 (公募:塩見)

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: 瀬川、安藤との共同研究
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**, 024404-1-6(2016)]。

研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス

C01 (計画:橋坂,藤澤; 秋保,村木)

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 内の共同研究
GaAs 系の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(右図)[Nat. Phys., **13**, 578-583 (2017)]。



スピン波束・電荷波束の励起実験用量子ホール回路。挿入図は、スピン電荷分離の概念図。

C01 (計画:江澤)

極性半導体におけるバルク整流効果を発見: B01 永長との共同研究
空間反転対称性の破れた系での非線形電気伝導度を測定することにより、巨大な非相反電流が流れることを実験的に検証した[Nat. Phys. **13**, 578–583 (2017)]。

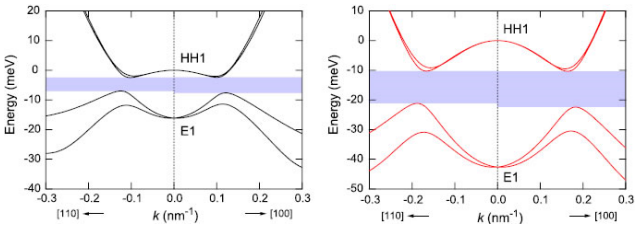
C01 (計画:野村)

磁気ドープしたディラック・ワイル接合における巨大異方的磁気輸送現象を予言: 領域 PD 大湊と共同研究
磁性ワイル半金属をディラック半金属で挟んだ接合における理論計算から、巨大な異方的磁気輸送現象を予言した [Phys. Rev. B **95**, 085308-1-6(2017)]。

C01（計画:秋保,入江,村木）

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

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（**右図**）でトポロジカル相の最適化を行ない、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**, 192105-1-6(2016)]。



歪によるバンド反転の増大（左：従来の InAs/GaSb、右：歪導入した InAs/InGaSb）

C01（公募：高橋）

光リープ格子中におけるフラットバンドの相互作用効果

光リープ格子中の冷却原子のエネルギー分散関係を調べ、フラットバンド特性が相互作用によって変化する様子を観測した[Phys. Rev. Lett. **118**, 175301-1-5 (2017)]。

研究項目 D：トポロジーと新概念

D01（計画：川上）

トポロジカル分類のリダクションの実験提案： D02 柳瀬(公募)との共同研究

A01 の松田らが作製に成功した重い電子超格子系 $CeCoIn_5/YbCoIn_5$ 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**, 147001-1-6 (2017)]。

D01（計画：水島）

^{3}He におけるトポロジカル量子現象の理論： 国際活動支援班を用いた国際共同研究

^{3}He の持つ高い対称性がマヨラナイジングスピンやワイルフェルミオンなどの豊富なトポロジカル量子現象をもたらすことを明らかにした[Phys. Rev. B **95**, 094515-1-20 (2017)]。

D01（計画：新田,水島）

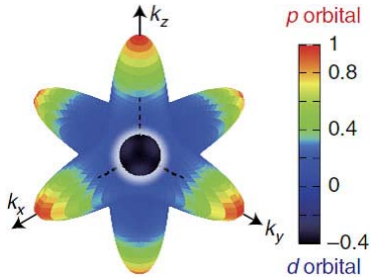
中性子星におけるトポロジカル超流動理論を構築：異分野連携・領域外への展開

超流動 ^{3}He 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**, 140503-1-6 (2017)]。

D01（計画：佐藤）

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： A01 前野との共同研究

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[Nat. Commun. **7**, 13617-1-6 (2016)]（**右図**）。



$Sr_{3-x}SnO$ のペアリング対称性候補

非共形対称性を持つトポロジカル物質の予言：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**, 195413-1-28 (2016)]。

D01（計画：上田）

***p* 波相互作用するフェルミ気体の普遍的な性質**

この相互作用を持つフェルミ気体の普遍的な性質が *p* 波のコンタクトテンソルによって特徴づけられることを示し、その測定方法を提案した [Phys. Rev. A **94**, 033611-1-5 (2016)]。

D01（計画：西田）

ディラック電子系への超臨界クーロン不純物効果

ディラック電子系であるグラフェンへの超臨界クーロン不純物の効果を解析した [Phys. Rev. B **94**, 085430-1-6 (2016)]。

D02（公募：柳瀬）

ラインノードを持つトポロジカル超伝導体の理論： D01 の佐藤との共同研究

非共形型空間群によって守られたラインノードを持つトポロジカル超伝導体の理論を発展させた[Phys. Rev. B **94**, 134512-1-11 (2016)]。

５．研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（５ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

・論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に＊印を付してください。
・別添の「（２）発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
・補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したものについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
・一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

【発表論文】

《研究項目 A: トポロジーと強相関》（計 40 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. 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).【アライアンス相手ドイツ MPI との国際共著論文】
2. ▲*M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato, *Y. Maeno, *Superconductivity in the antiperovskite Dirac-metal oxide $Sr_{3-x}Sn_xO$,* 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】
3. ▲*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 $Au/SrRuO_3/Sr_2RuO_4$ 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 との共著：強磁性体へのスピン三重項クーパー対誘起を実証】
4. ▲*S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando, Y. Maeno, *Thermodynamic evidence for nematic superconductivity in $Cu_xBi_2Se_3$,* Nature Phys. **13**, 123–126 (2016).【B01、公募 D02 と連携：ネマティック超伝導の発見】
5. ▲*M. Udagawa, E. J. Bergholtz, *Field-Selective Anomaly and Chiral Mode Reversal in Type-II Weyl Materials,* Phys. Rev. Lett. **117**, 086401-1-5 (2016).【国際共著論文】
6. ▲S. Ikegaya, S. Suzuki, Y. Tanaka, *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】
7. ▲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 $CeRhIn_5$=$YbRhIn_5$,* Phys. Rev. Lett. **116**, 206401-1-5 (2016).【国際共著論文】
8. ▲*K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, G. -q. Zheng, *Spin-rotation symmetry breaking in the superconducting state of $Cu_xBi_2Se_3$,* Nature Phys. **12**, 852-854 (2016).【B01 と連携：スピン・ネマティック超伝導の発見】
9. ▲*H. Sumiyoshi, S. Fujimoto, *Torsional Chiral Magnetic Effect in a Weyl Semimetal with a Topological Defect,* Phys. Rev. Lett. **116**, 166601-1-6 (2016).【ワイル半金属のカイラル異常観測の理論】
10. ▲*Y. Tokiwa, T. Yamashita, M. Udagawa, S. Kittaka, T Sakakibara, D. Terazawa, Y. Shimoyama, T. Terashima, Y. Yasui, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Possible observation of highly itinerant quantum magnetic monopoles in the frustrated pyrochlore $Yb_2Ti_2O_7$,* Nature Commun. **7**, 10807-1-6 (2016).【スピンアイスでの量子モノポールの観測】

A01（公募：近藤，打田，野村，白濱）

11. ▲*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 $Nd_2Ir_2O_7$,* 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】

《研究項目 B: トポロジーと対称性》（計 54 件、すべて査読有）

B01（計画：佐藤，瀬川，柏谷，塚崎，田仲）

1. ▲*K. Nakayama, M. Kuno, K. Yamauchi, S. Souma, K. Sugawara, T. Oguchi, T. Sato, T. Takahashi, *Band splitting and Weyl nodes in trigonal tellurium studied by angle-resolved photoemission spectroscopy and density functional theory*, Phys. Rev. B **95**, 125204-1-5 (2017).【公募研究 D03 と連携：らせん対称性によるワイル電子を観測】
2. ▲*Y. Xiong, A. Yamakage, S. Kobayashi, M. Sato, Y. Tanaka, *Anisotropic Magnetic Responses of Topological Crystalline Superconductors,* Crystals **7**, 00058-1-18 (2017).【D01 と連携：トポロジカル結晶絶縁体における異方的磁気応答の理論的提案】
3. ▲*S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando, Y. Maeno, *Thermodynamic evidence for*

nematic superconductivity in $Cu_xBi_2Se_3$, Nature Phys. **13**, 123-126 (2016).【A01, D01 と連携: ネマティック超伝導の発見】

4. ▲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**, 121108R-1-5 (2016).【新型ノーダル半金属を発見】
5. ▲*Y. Nago, R. Ishiguro, T. Sakurai, M. Yakabe, T. Nakamura, S. Yonezawa, S. Kashiwaya, H. Takayanagi, Y. Maeno, *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 dc-SQUID における超伝導電流パス測定】
6. ▲K. T. Yamamoto, *Y. Shiomi, K. Segawa, Y. Ando, E. Saitoh, *Universal scaling for the spin-electricity conversion on surface states of topological insulators*, Phys. Rev. B **94**, 024404-1-6 (2016).【公募研究と連携: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】
7. ▲*T. Hashimoto, S. Kobayashi, Y. Tanaka, M. Sato, *Superconductivity in doped Dirac semimetals*, Phys. Rev. B **94**, 014510-1-16 (2016).【D01 と連携:ドープしたディラック半金属における超伝導理論を構築】
8. ▲K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, and *G.-q. Zheng, *Spin-rotation symmetry breaking in the superconducting state of $Cu_xBi_2Se_3$*, Nature Phys. **12**, 42520-1-14 (2016).【A01 と連携:$Cu_xBi_2Se_3$ でスピンネマティック超伝導状態を観測】
9. ▲*S. Souma, Z. Wang, H. Kotaka, T. Sato, K. Nakayama, Y. Tanaka, H. Kimizuka, T. Takahashi, K. Yamauchi, 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,** 161112R-1-6 (2016).【公募研究 D03 と連携: NbP がワイル半金属であることを実証, Editor's suggestion】
10. ▲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】
11. ▲*T. Hashimoto, K. Yada, M. Sato, and Y. Tanaka, *Surface electronic state of superconducting topological crystalline insulator,* Phys. Rev. B **115**, 174527-1-8 (2015).【D01 と連携:トポ結晶絶縁体表面の理論】
12. ▲*K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, Y. Mawatari, Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Maeno, *Inversion symmetry of Josephson current as test of chiral domain wall motion in Sr_2RuO_4,* Phys. Rev. B **92**, 100504-1-6 (2015).【A01 と連携: Sr_2RuO_4におけるカイラルドメイン壁の動きをジョセフソン電流で検知】

B01（公募: 塩見，藤岡，野村）

13. ▲K. T. Yamamoto, *Y. Shiomi, K. Segawa, Y. Ando, E. Saitoh, *Universal scaling for the spin-electricity conversion on surface states of topological insulators*, Phys. Rev. B **94**, 024404(1-6) (2016).【計画研究と連携: 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】

《研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス》（計 44 件、すべて査読有）

C01（計画: 藤澤，村木，好田，野村，江澤）

1. ▲ R. Wakatsuki, Y. Saito, S. Hoshino, Y. M. Itahashi, T. Ideue, M. Ezawa, Y. Iwasa, *N. Nagaosa, *Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors*, Science Advances **3**, e1602390-1-9 (2017).【B01 と連携: 遷移金属ダイカルコゲナイドにおいて超伝導電流の巨大な非線形非相反性を実証】
2. ▲ *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】
3. ▲ *T. Ideue, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko, Y. Tokura, N. Nagaosa, 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】
4. ▲ Y. Ominato, K. Kobayashi, *K. Nomura, *Anisotropic magnetotransport in Dirac-Weyl magnetic junctions*, Phys. Rev. B 95, 085308-1-6 (2017).【領域 PD と共著: ドープしたディラック・ワイル接合の巨大異方的磁気輸送現象を予言】
5. ▲ 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】
6. ▲ *H. Irie, C. Todt, N. Kumada, Y. Harada, H. Sugiyama, T. Akazaki, K. Muraki, *Andreev reflection and bound state formation in a ballistic two-dimensional electron gas probed by a quantum point contact*, Phys. Rev. B **94**, 155305-1-6 (2016).【量子ポイント接合による二次元電子系でのアンドレーエフ束縛状態の観測】
7. ▲ F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, *K. Muraki, *Single-edge transport in an InAs/GaSb quantum spin Hall insulator*, Phys. Rev. B **94**, 035301-1-5 (2016).【非対称素子構造による単一エッジ輸送の実現】
8. ▲ K. Washio, R. Nakazawa, M. Hashisaka, K. Muraki, Y. Tokura, *T. Fujisawa, *Long-lived binary tunneling spectrum in the quantum Hall Tomonaga-Luttinger liquid*, Phys. Rev. B **93**, 075304-1-11 (2016).【C01 内連携: 人工的な朝永ラッティンジャー流体における長寿命非平衡状態を観測】
9. ▲ X. Zhang, *Y. Zhou, *M. Ezawa, *Magnetic bilayer-skyrmions without skyrmion Hall effect*, Nature Commun. 7,

10293-1-7 (2016).【反強磁性結合した二層系で、スキルミオンホール効果の抑制を予言】

10. ▲ *M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrange, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, *K. Kobayashi, *Universality of non-equilibrium fluctuations in strongly correlated quantum liquids*, Nature Phys. **12**, 230–235 (2015).【近藤効果のショット雑音測定から、非平衡状態にある量子液体の挙動解明】
11. ▲ *R. Wakatsuki, M. Ezawa, N. Nagaosa, *Domain wall of a ferromagnet on a three-dimensional topological insulator*, Sci. Rep. **5**, 13638-1-10 (2015).【B01 と連携: トポロジカル絶縁体上での強磁性体の磁壁の制御】
12. ▲ K. Nomura, D. Kurebayashi, *Charge-Induced Spin Torque in Anomalous Hall Ferromagnets*, Phys. Rev. Lett. **115**, 127201-1-5 (2015).【ワイル半金属で、ゲートによる磁化の制御を予言】

C01（公募: 増渕，秋山，松尾，高橋）

13. ▲ *H. Ozawa, S. Taie, T. Ichinose, Y. Takahashi, *Interaction-driven shift and distortion of a flat band in an optical Lieb lattice*, Phys. Rev. Lett **118**, 175301-1-5 (2017).【光リープ格子中におけるフラットバンドの相互作用効果】
14. ▲ S. Morikawa, Q. Wilmart, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, B. Plaçais, *T. Machida, *Dirac fermion reflector by ballistic graphene sawtooth-shaped npn junctions*, Semicond. Sci. Technol. **32**, 045010-1-7 (2017).【グラフェンの npn 接合によるディラック粒子の反射特性】

《研究項目 D: トポロジーと新概念》（計 109 件、すべて査読有）

D01（計画: 川上，上田，佐藤，新田，水島，西田）

1. ▲ *T. Yoshida, A. Daido, Y. Yanase, N. Kawakami, *Fate of Majorana Modes in $CeCoIn_5/YbCoIn_5$ 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 との共著：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】
2. ▲ *J. A. Sauls and T. Mizushima, *On the Nambu fermion-boson relations for superfluid ^{3}He-B*, Phys. Rev. **B** 95, 094515-1-20 (2017).【国際活動支援班の援助による滞在で行った国際連携研究】
3. ◎▲ *T. Mizushima, K. Masuda and M. Nitta, *$^3P_2$ superfluids are topological*, Phys. Rev. B **95**, 140503-1-6 (2017).【D01 内の素粒子と物性の連携：$^3P_2$ 超流動状態のトポロジカルな性質】
4. ▲ *S. Uchino and M. Ueda, *Anomalous Transport in the Superfluid Fluctuation Regime,* Phys. Rev. Lett. **118**, 105303-1-6 (2017).【超伝導揺らぎ領域における異常輸送】
5. ▲ M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato, *Y. Maeno, *Superconductivity in the antiperovskite Dirac-metal oxide $Sr_{3-x}SnO$*, Nature Commun. **7**, 13617-1-6 (2016).【A01 と連携：アンチペロブスカイト酸化物で初めての超伝導の発見】
6. ▲ *T. Yoshida and N. Kawakami, *Topological edge Mott insulating state in two dimensions at finite temperatures -bulk and edge analysis-,* Phys. Rev. B **94**, 085149-1-8 (2016).【トポロジカルモット絶縁体の奇妙なエッジ準粒子】
7. ▲ *Y. Nishida, *Renormalization group analysis of graphene with a supercritical Coulomb impurity,* Phys. Rev. **B** 94, 085430-1-6 (2016).【超臨界クーロン不純物を持つグラフェンの解析】
8. ▲ *S. Kobayashi, Y. Yanase, M. Sato, *Topologically stable gapless phases in nonsymmorphic superconductors*, Phys. Rev. B **94**, 134512-1-11 (2016).【D02 と連携：非共形対称性を持つ超伝導のトポロジカル相】
9. ▲ Y. Horinouchi and *M.Ueda, *Topological origin of universal few-body clusters in Efimov physics,* Phys. Rev. **A** 94, 050702(R)-1-17 (2016).【エフィモフ物理におけるトポロジカルな起源】
10. ◎▲ *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】
11. ◎▲ *K. Masuda and M. Nitta, *Magnetic Properties of Quantized Vortices in Neutron $^3P_2$ 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】
12. ▲ *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）

13. ▲*K. Takasan, A. Daido, N. Kawakami, Y. Yanase, *Laser-induced topological superconductivity in cuprate thin films*, Phys. Rev. B **95**, 134508-1-8 (2017).【D01 と連携: レーザー誘起トポロジカル超伝導】

D03（公募・山内）

14. ▲*K. Yamauchi, P. Barone, S.Picozzi, *Topological phase transition coupled with spin-valley physics in ferroelectric oxide heterostructures,* Phys. Rev. B **95**, 035146-1-7 (2017).【酸化物ヘテロ構造でのトポロジカル相転移】

D04（公募・小布施，横山，川口）

15. ▲ K. Shintani, K. Taguchi, Y. Tanaka, *Y. Kawaguchi, *Spin and charge transport induced by a twisted light beam on the surface of a topological insulator*, Phys. Rev. B **93**, 195415-1-22 (2016).【B01 との連携: トポロジカル絶縁体表面でのスピンと電荷の輸送現象】

【書籍】

1. 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).
2. 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》

1. G. –q. Zheng, *Spin-rotation symmetry breaking and triplet superconducting state in $Cu_xBi_2Se_3$*, March Meeting 2017, American Phys. Soc. (New Orleans, USA, Mar. 13-17, 2017) 《アメリカ物理学会シンポジウム招待講演》
2. Y. Asano, *Anomalous magnetic response and electric transport due to odd-frequency Cooper pair*, International Conference on Superconducting hybrid nanostructures, (Moscow, Russia, Sep. 19-23, 2016)《基調講演》
3. Y. Maeno, *Superconductivity in the Antiperovskite Dirac-Metal Oxide Sr_3SnO*, CIFAR, Quantum Materials Program Meeting (Toronto, Canada, Apr. 28-30, 2016)《アライアンス相手の開催する国際会議での招待講演》
4. S. Fujimoto, *Torsional chiral magnetic effect in a Weyl semimetal with a topological defect*, Trends in Theory of Correlated Materials 2016 (Villigen, Switzerland, May/23-25, 2016)
5. H. Takagi, *From correlated Dirac electrons to spin liquid in complex Ir oxides*, School and Workshop on Strongly Correlated Electronic Systems – Novel Materials and Novel Theories (Trieste, Italy, Aug/10-21/2015)

《研究項目 B: トポロジーと対称性》

1. T. Sato, *Dirac fermions observed with ARPES,* International Workshop on Chiral Matter from quarks to Dirac semimetals 2016, RIKEN (Wako, Japan, Dec. 5-8, 2016).《物性と素粒子を融合した国際会議での招待講演》
2. K. Segawa, *Experimental research on topological insulators*, 12th International Nanotechnology Conference (INC12), (Leuven, Belgium, May 10-12, 2016).
3. S. Kashiwaya, *Tunneling effects and edge states of topological superconductor Sr_2RuO_4*, Superconducting hybrid nanostructures: physics and application (Moscow, Russia, Sept. 19-22, 2016).
4. A. Tsukazaki, *High-T_c Superconductivity in FeSe electric-double-layer transistor,* Symposium on Quantum Materials Synthesis (NY, USA, Aug. 30 - Sep. 1, 2016).
5. 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》

1. K. Nomura, *Chiral anomaly and Spin-electromagnetic responses in Weyl semimetals,* Theory of Correlated Topological Materials 2017 (Kashiwa, Japan, Feb. 6 – Mar. 3, 2017).
2. M. Kohda, *Spin orbit interaction in metal-chalcogenide GaSe*, International symposium on revolutionary atomic-layer materials (Sendai, Japan, Oct. 22-23, 2016).
3. S. Matsuo, S. Takeshita, T. Tanaka, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, K. Kobayashi, *Edge mixing dynamics in a quantum Hall pn junction of graphene*, 9th Int. Conf. Phys. & Appl. of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9) (Kobe, Japan, Aug. 8-11, 2016).
4. T. Fujisawa, *Charge dynamics in quantum-Hall Tomonaga-Luttinger liquid*, China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (QTech2016) (Beijing, China, May 13-14, 2016)
5. K. Muraki, *NMR probing of density-modulated phases in the third Landau level*, Recent Developments in 2D systems (Okinawa, Japan, Apr. 4-8, 2016)

《研究項目 D: トポロジーと新概念》

1. M. Ueda, *Topological Quantum Phenomena in Spinor Bose-Einstein Condensates* The 13th Joint Asia Pacific Physics Conference (Brisbane, Australia, Dec. 4-8, 2016)《Keynote 講演》
2. N. Kawakami, *Correlated Edge States in Topological Mott Insulators,* "Correlations, Integrability, and Criticality in Quantum systems" (Evora, Portugal, Oct. 24-28, 2016)
3. T. Mizuhima, *Topology, emergent Ising order, and spontaneous symmetry breaking in superfluid ^{3}He-B*, International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016 (Prague, Czech Republic, August 11-16, 2016)
4. M. Nitta, *Vortices in Neutron Superfluids,* " Continuous Advances in QCD" (Minneapolis, USA, May 12-15, 2016)
5. M. Sato, *Exotic surface states in topological crystalline materials,* "Topological Phenomena in Novel Quantum Matter: Laboratory Realization of Relativistic Fermions and Spin Liquids" (Dresden, Germany, Dec. 11-15, 2015)
6. 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】

1. 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。
2. TOP-SPIN 3: Spin and Topological Phenomena in Nanostructures - Towards Topological Materials Science (Dresden, Apr. 25-28, 2017) イタリアの SPIN 機構と共催のアライアンスワークショップ。43 件の口頭講演。
3. International School on Topological Science and Topological Matters (Kyoto, Feb. 13-18, 2017) 北

京大学の国際量子物質センター（ICQM）と共催のアライアンスワークショップ。スクール形式の講師 4 名による講義と、74 件の口頭・ポスター講演。

4. EPiQS-TMS Trans-Pacific Conference on Topological Quantum Materials (Moorea, Dec 3-8/9, 2016) アメリカ Moore 財団の研究プロジェクト Emergent Phenomena in Quantum Systems (EPiQS)との共催。37 件の口頭・ポスター講演。
5. 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）

1. 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歩」, 橋坂・村木・藤澤.
2. 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.
3. 日刊工業新聞 (2016. 10/27)「磁石に浸み込む超伝導電子ペアを実現–スーパー・スピントロニクスへの布石–」, 米澤・前野.
4. 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.
5. 日経産業新聞 (2016. 5/13)「電子質量 0 に見える物質: 東北大が発見」, 佐藤宇史・瀬川・安藤.
6. 日本経済新聞 (電子版) (2016. 1/25)「超高速コンピュータへ「血の巡りが良い」新素材」, 佐藤宇史・相馬.
7. Nature Communications 著者インタビュー (2016. 1/19)「スカーミオン・ホール効果を抑制する 2 層磁気スカーミオンの可能性」, 江澤.
8. 科学新聞 (2015. 12/11)「不思議な量子液体の挙動　世界最高水準技術で解明　－阪大などの研究グループが世界初－」, 小林.

【アウトリーチ活動】（合計 70 件）

《高校生・中学生など対象のアウトリーチ活動》

1. **「物性物理学における対称性とトポロジー」** (2016. 12/17＠大阪大学大学院基礎工学研究科)。講師: 水島。対象: 高校生 7 名。物性物理学における重要なキーワード「対称性」と「トポロジー」について、高校生に向けて講義を行った。2016 年度ノーベル物理学賞との関連についても触れた。
2. **東北大学理学部キャンパスツアー「ぶらりがく」** (2016. 11/5＠東北大学理学部)。講師: 佐藤。対象: 小学生・保護者, 約 50 名。超伝導と磁石の説明や、液体窒素を用いた超伝導体の磁気浮上実験を行った。
3. **「液体窒素で物質を冷やすと科学がわかってくる！」** (2016. 7/27＠大阪市立大学理学研究科)。講師: 石川。対象: 高校生 49 名。液体窒素を用いて、常温では観測出来ない現象をいくつか実演し、科学的な考え方を説明した。
4. **模擬授業** (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当日の午後に、「トポロジカル絶縁体」の講義を行った。

《現職の教員向けに、自然科学の授業を行う際に必要な知識・知見を伝える講演会》

5. **「トポロジカルな物質と超伝導」** 京都府私立中学高等学校理科研修会(物理部会) (2016. 11/26＠京都大学理学研究科)。講師: 前野。対象: 中学・高等学校の理科教員 8 名。「2016 ノーベル物理学賞について」と「トポロジカルな物質と超伝導」についての講演、および実験室の装置見学を行った。

《一般の方々にも開かれた講演会》

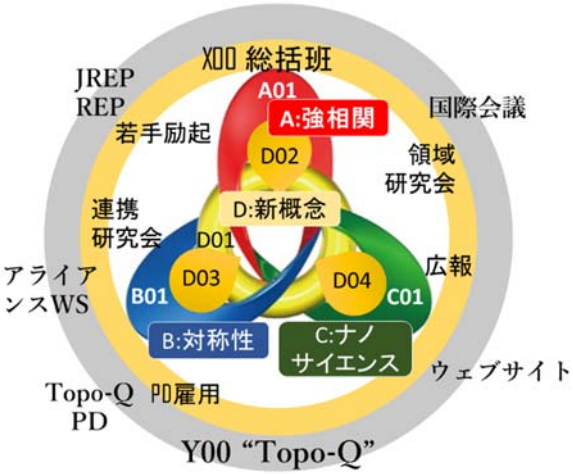
6. **「物理学とトポロジー: 2016 年ノーベル物理学賞のキーワード・物理学におけるトポロジーとは？」** (2016. 12/21＠慶應義塾大学)。講師:新田宗土・木村。対象: 学生・教職員・一般, 50 名。2016 年ノーベル物理学賞のキーワードとなった物理学における「トポロジー」について、非専門家向けの講演を行った。
7. **「今年のノーベル賞: 物理学賞について」** (2016. 10/11＠学習院大学理学部)。講師: 宇田川。対象: 一般。2016 年ノーベル物理学賞について、非専門家向けの解説を行った。
8. **「事実は小説より奇なり～量子の世界への誘い」** (2016. 10/9＠大阪大学中之島センター)。講師: 上田。対象: 高校生以上の学生及び一般, 約 200 名。物理学の成果を広く一般の方々に知っていただく機会を提供することにより、最先端の学問に触れてもらうことを目的とした講演を行った。
9. **「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ー」** (2016. 2/28＠京都大学基礎物理学研究所)。講師:前野, 米澤, J. G. Bednorz。対象: 高校生, 同伴家族, 高校教員, 大学生, 他 76 人。1987 年ノーベル物理学賞受賞者の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。前座では高温超伝導の電気抵抗測定・磁気浮上のデモ実験を披露、概要の通訳もした。前半では京都大学の教員が超伝導の入門的解説を行い、高温超伝導体を用いた演示実験をした。更に、物質科学分野で急速な発展を遂げつつあるトポロジーと超伝導の関係についても入門的な話をした。
10. **「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＠大阪大学基礎工学国際棟シグマホール)。講師: 藤本。対象: 一般, 186 名。超伝導の基本から、最新のトポロジカル超伝導の話題まで、一般向けに入門的解説を行った。

６． 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（２ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

【公募研究を含む研究組織】

冒頭でも述べたように、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。



【領域内における連携状況】

(1) **総括班会議**: 日本物理学会（春・秋）の開催期間および領域研究会・領域国際会議の開催時にあわせて総括班会議を 7 回開催し、研究と運営の方針を協議した。そのうち 3 回は評価班メンバーが出席する**「アドバイザリー会議」**との合同で行った。さらにその内 1 回は国際会議に合わせて、**国際アドバイザリー**にも出席頂いた。また総括班会議に、文科省学術調査官に 4 回同席いただき、領域活動を知っていただくとともに運営に関するアドバイスをいただいた。

(2) **領域研究会・国際会議**: 以下の表に示すように領域研究会を（第 3 回は国際会議として）開催した。すべての会議に多くの参加者があり、活気にあふれ成功裏に終了した。

	名称	開催期間	場所	口頭講演/ポスター	参加総数（海外から）
第 1 回	領域研究会	2015 年 12 月 11-13 日	京都大学	37 / 66	128
第 2 回	領域研究会	2016 年 12 月 16-18 日	東北大学	44 / 68	175
第 3 回	領域研究会 国際会議 TopoMat2017	2017 年 5 月 9-13 日	東京工業大学	36 / 96	199 (25)

(3) **トポロジー連携研究会・TMS セミナー**: トポロジカル物質科学における融合研究を推進するための連携研究会を 8 回開催した。最初の 4 回は A01-D01 の各計画研究内での連携に焦点を当て、研究戦略を練る小規模の会議とした。5 回目以降は、研究項目間や領域外との連携に重点をおいた研究会を開いた。第 5 回では最近、注目を集めている「ワイル半金属・超伝導」に関する集中的な討論を行った。

トポ連携研究会	名称	開催日時	場所	人数
第 1 回	B01「対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探索」研究戦略	2015 年 8 月 18 日	東北大学	9
第 2 回	D01「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」研究戦略	2015 年 8 月 20 日	京都大学	8
第 3 回	C01「トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象」研究戦略	2015 年 8 月 21 日	東京工業大学	11
第 4 回	A01「強相関物質のトポロジカル相」研究戦略	2015 年 9 月 6 日	京都大学	16
第 5 回	「ワイル半金属・超伝導」	2015 年 11 月 6-7 日	東北大学	50
第 6 回	「人工量子系におけるトポロジー」	2016 年 2 月 9-10 日	東京大学	52
第 7 回	「物性物理と基礎物理におけるトポロジー」	2016 年 11 月 17-18 日	慶應義塾大学	100
第 8 回	「奇周波数クーパー対の物理」	2017 年 1 月 6-7 日	名古屋大学	24

第 6 回の「人工量子系のトポロジー」のテーマは、A01～D01 まで広くカバーし、分野を超え白熱した議論が行われた。第 7 回「物性物理と基礎物理におけるトポロジー」では、素粒子・原子核・宇宙論の研究者を

講演者の半数とし残り半数を物性物理の講演とした。通常では意思疎通の難しい異分野交流の場を提供することができた。第 8 回は「奇周波数クーパー対」に関する急速な研究の進展をとりあげた。トポロジー連携研究会に関わる旅費に関して、連携研究者が積極的に参加しやすいように、連携研究者の旅費は総括班予算から支出した。

この他に、当初計画には予定していなかった**TMS セミナー**（Topological Materials Science Seminar）を開催している。既に 42 回の TMS セミナーを開いた。また、テレビ会議システムを用いた中継も行うなど最新の研究動向に関する情報交換が行われ、融合研究を推進するのに役立っている。

分野横断型研究会「人工量子系におけるトポロジー」（第 6 回トポロジー連携研究会、H28 年 2 月）

(4) **公募研究の計画発表会**
前期（H28・29 年度）は 19 件の公募研究が採択された。公募研究と計画研究の連携を図るため、公募研究の計画を発表する機会を設けた。**「公募研究キックオフミーティング」**（H28 年 6 月 4 日、京都大学）として、公募研究代表者 18 名(1 名欠席）と総括班メンバー8 名を含む 32 名で開催した。

(5) **若手励起プログラム**: 大学院生や若手研究者が 1－2 週間程度「国内留学」するプログラムで、これまでに 11 件実施した。特に実験から理論グループ、逆に理論から実験グループへの滞在があり、理論と実験の融合に貢献した。また、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。

(6) **ニュースレター**: これまでに 2 回刊行した。印刷部数は約 400 で、領域メンバーはもちろん、領域研究会への参加者や関連分野の研究者にも送付した。その内容は領域ホームページにも掲載した。

(7) **領域ホームページ**: 発表論文や招待講演などの情報、研究会のアナウンスや参加登録、そして報告記事、若手励起プログラム等の報告記事などを掲載した。アクセス数は H29 年 5 月末の時点で既に 155,000 件にのぼり、前身の新学術領域が 5 年間で約 81,000 件であったことと比較すると、本新学術領域研究のテーマがいかに注目を浴びているかが分かる。

【国際連携ネットワーク“Topo-Q”の構築】

(1) **アライアンスワークショップ**: 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，カナダの CIFAR などのプロジェクトのみならず、マックスプランク研究所（ドイツ）やスピン機構（イタリア）などと国際連携を活発に行っている。すでに本新学術領域が主導して**国際アライアンスワークショップを 4 回開催**した。相手機関・プロジェクトは、①マックスプランク研究所（ドイツ）、②EPiQS（米国）、③北京大学（中国）、④スピン機構（イタリア）である。このように、当初の予想以上にトポロジーを基軸とした国際ネットワークの構築に向けて大きく前進した。右に EPiQS とのワークショップでの集合写真を掲載した。

米国の EPiQS と合同で開催されたタヒチでのアライアンスワークショップ（H28 年 12 月）

(2) **国際交換プログラム**: 国際活動支援班におけるもう一つの目玉プログラムは国際研究者派遣・招へいプログラム REP（Researcher Exchange Program）とその若手版である JREP (Junior REP)である。これにより領域の国際化と若手の育成を行うことができた。具体的には、REP を 10 件、JREP を 12 件実施した。これら個々の派遣・招聘も領域の国際化に役立っている。特に、H28 年にカナダの大型プロジェクトである CIFAR が開催するワークショップに、本新学術領域から 3 名の大学院生を派遣した。参加した大学院生は、研究における国際交流を深めるとともに、アライアンスの相手プロジェクトのメンバーとも活発な議論を行った。

７． 若手研究者の育成に係る取組状況（１ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

若手研究者の育成に関して、以下に述べるプログラムを導入して取り組んでいる。

【若手励起プログラム】

このプログラムは、若手研究者の育成を行うため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”するものである。また、既存領域を超えた将来の研究の担い手を育むきっかけを提供すると同時に、領域グループ間の交流の契機ともなることをねらっている。これまでに 11 人の若手がこのプログラムを活用し、滞在先で集中的な研究を行った。滞在報告書の内容から、若手の満足度がたいへん高いことが分かった。

プログラムを利用した 11 件の内訳は（派遣と受入れの合計） A01: 2 件、B01 : 7 件、C01 : 2 件、D01 : 11 件である。この 11 件の実施例の主なものは実験から実験、理論から理論グループへの派遣であり、結晶成長、測定技術、理論手法などを派遣先で習得した。中でも、実験から理論、逆に理論から実験への派遣を行い、本領域ならではのユニークな若手育成の場を提供できた。具体的には:

●実験から理論グループへ (A01→B01)
京都大学・前野研究室(A01 代表)で超伝導の研究を行っている大学院生が、名古屋大学・田仲研究室(B01 分担)に 1 週間滞在し第一原理計算法を学び、その後自らの実験研究に役立てている。

●理論から実験グループへ (D01→B01)
京都大学・川上研究室(D01 代表)でワイル半金属の理論研究を行っている大学院生が、京都産業大学・瀬川研究室(B01 分担)に 1 週間滞在し、トポロジカル絶縁体の結晶成長の技術を学んだ。

ここで強調したい点は、上記の若手励起プログラムを活用することで単に若手研究者が成長しただけではなく、研究室間の連携研究が開始されたことである。典型的な例は以下のものである:

●共同研究の開始例 (D01→D01)
京都大学・川上研究室(D01 代表)に属する大学院生が東京大学上田研究室（D01 分担）に滞在し(H28 年)、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、この共同研究を発展させ、現在、理研の研究員として上田研究室と共同研究を行っている。

【Junior Researcher Exchange Program (JREP)】

国際活動支援班の JREP プログラムを用いて 10 名の若手を海外へ派遣し、2 名を海外から招へいした。派遣には個々の研究室への派遣と、国際連携を深めるためのアライアンス相手国主催の研究会等への派遣がある。特に、CIFAR(Canadian Institute for Advanced Research)が開催したワークショップに 3 名（H28 年、トロント）、2 名（H29 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。

【アライアンスワークショップ・国際スクール】

国際活動支援班のもう一つの重要なプログラムにアライアンスワークショップの開催がある。これを利用して若手研究者の育成に努めた。第 1 回のドイツのマックスプランク研究所で開催した会議(2016 年 9 月)では若手セッションを設け、日本およびヨーロッパからの若手が最新の研究成果を披露した。第 3 回の北京大学とのワークショップ(2017 年、京都)では大学院生を対象に国際スクールも開催した。また、ワークショップでは修士・博士課程の学生にすべての講演の司会を務めてもらった。これは、研究を始めたばかりの大学院生にとって貴重な経験となった。

北京大学と共催の国際スクール (H29 年 2 月)。講義のあとに多くの質問がでた。

【若手研究者の受賞】

横山 毅人 (D04) 平成 29 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞(2017 年)
那須 譲治 (D02) 第 11 回日本物理学会若手奨励賞（2017 年）
江澤 雅彦 (C01) JPSJ Most Cited Articles in 2016 from Vol. 84 (2015) [日本物理学会]（2016 年）
江澤 雅彦 (C01) 第 13 回日本表面科学会会誌賞(2016 年)
桂 法称 (D02) N. F. Mott Prize (2016 年)

８．　研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（１ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

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ので、以下にまとめる。

(1) 計画研究 A01 では、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)が購入し、超伝導単結晶マイクロ・リングでの半整数磁束量子、およびそれに伴う超伝導スピン流・マヨラナ準粒子の実証に向けた研究を進めている。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無くなり、国際共同研究の質と効率の向上に大いに役立っている。この装置はまた松田(分担)・寺嶋(連携)・笠原(連携)とも共用し、カイラル超伝導体におけるカイラルエッジ電流検出のための SQUID ループ作製と試料整形のための微細加工にも活用している。

(2) B01 計画研究では、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**を塚﨑(分担)が購入したが、佐藤(代表)グループにおける既存のスピン分解 ARPES 装置に搬送するための超高真空一貫搬送システムを構築することによって、MBE で作製した薄膜試料の ARPES による電子状態評価が格段に効率化した。これにより、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急ピッチで行えるようになった。また、瀬川（分担）の購入した**卓上型 X 線回折装置**は、総括班主導の若手励起プログラムにおいて、瀬川研究室に派遣された若手研究者が自ら作製した単結晶試料の構造評価を行う際にも有効に使用されており、B01 計画研究内におけるトポロジカル物質探索の連携研究や、B01 と C01 計画研究間のトポロジカルナノデバイス関連の共同研究においても効果的に活用されている。

(3) C01 計画研究では、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ている。この研究においては、村木（分担）で MBE 成長された GaAs ヘテロ構造を用いており、極低温での電気特性は随時 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っており、C01 内で有効に活用されている。また、B01 瀬川と藤澤とで開始した共同研究においては、C01 計画研究で購入した設備・物品を活用している。

２．研究費の効果的使用

【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。

【若手研究者へのサポート】

若手励起プログラム（国内 11 件）、JREP(Junior Researchers Exchange Program、国際 12 件)に対して派遣・滞在・招へいをサポートし、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が行われるなど、このプログラムを通して連携研究の芽も育まれた。

【連携研究の強化】

小規模のトポロジー連携研究会（国内）を 8 回、国際アライアンスワークショップを 4 回開催し、領域内での連携および国際連携の強化を図った。この目的のため、研究会の開催費、招待講演者の旅費などに予算を有効に使用した。

【テレビ会議システムの活用】

国際活動支援班の会議を行うためにテレビ会議システムを購入した。会議に利用するだけでなく、テレビ中継セミナーにも有効的に利用している。例として、

東京工業大学大岡山キャンパス　H28 年 12 月 20 日
講演題目：トポロジカル絶縁体・超伝導体の基礎と応用
講師：ケルン大学　安藤陽一

に京都大学の大学院生・スタッフもテレビ会議システムを利用して参加した。双方向の質疑応答も行い、講演会は大盛況であった。

東工大のセミナーを京都大学物理教室で聴講する風景

９． 総括班評価者による評価（２ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

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**（東京大学工学系研究科・教授、メゾスコピック物理学の世界的権威）
- ◆ **川村 光**（大阪大学理学研究科・教授、日本物理学会会長、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・招へい教授、超伝導理論の第一人者）
- ◆ A. J. Leggett（The Univ. of Illinois, Urbana-Champaign・教授、超流動・超伝導の理論の世界的指導者。^{3}He のスピン三重項超流動の理論で 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。中国版ノーベル賞と称される Future Science Prize の 2016 年受賞者）
- ◆ L. Molenkamp（Würzburg University・教授、2007 年トポロジカル絶縁体を初めて実現）
- ◆ S. C. Zhang（Stanford University・教授、トポロジカル絶縁体理論の創始者の一人、2014 年 Thomson 社によるノーベル賞候補に挙げられる）

国内アドバイザリーに領域研究会(2016 年)と国際会議(2017 年)に、海外アドバイザリーには国際会議(2017 年)に参加して頂き、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 Bi_2Se_3 におけるネマティック超伝導の発見、逆ペロブスカイト酸化物における初の超伝導体 $Sr_{3-x}SnO$ 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おり、このことは計画班の間での交流プログラムがよく機能していることを示している。前身の新学術領域によるトポロジカル物質の開発と基本的な性質の理解から始まり、現領域では、新規物質の創製と物性の探究を経て、ネマティック超伝導、トポロジカル半金属といったトポロジー概念の応用ともいえる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。これは、本領域の大きい特徴であり、世界的に研究が急速に進む中で、自分の研究の位置づけを知り、独自性を追求するうえで良い効果を与えている。

◆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、これらの区分け自体、実質的に言って、それほど截然とした区分ではない印象で、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、一体問題を超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。もちろん、この目標を具体化するのは必ずしも容易でないと思われるが、是非、チャレンジして頂きたい課題である。

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。領域前半の集大成とも位置付けられる TopoMat2017 においても、多数の興味深い成果発表と討論が行われた。この国際会議に加えて、各年度を総括する国内研究会、海外との合同コンファレンス、トピックを絞ったワークショップ、領域若手の海外への派遣プログラム等の各種研究会やプログラムを意欲的に展開されておられ、高い評価に値しよう。ノーベル物理学賞受賞者の Bednorz 氏による一般向けの公開講座を企画されるといった、アウトリーチ面での寄与も大変大きなものがある。また、領域の活動全般にわたって、大学院生や PD クラスの若手研究者の存在は特筆されよう。若手の数が多いのみならず、若手が皆、大変熱心に研究活動に従事している様が印象的であった。

◆三宅和正

研究: 昨年 12 月に東北大学片平キャンパスで開催された第 2 回領域研究会では計画研究・公募研究を推進する研究者を中心に力のこもった口頭発表が行われ、若手研究者による 68 件の活発なポスター発表があった。研究分野が本研究分野とは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。5 月 9 日から 13 日まで領域の国際会議（TopoMat2017）が開催されたが、本研究分野とは異なる評者にとっても、海外および領域内からの招待講演のレベルがとても高いことが感じられた。また、若手研究者を中心とするポスターセッションも活発であった。

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。本領域の特徴的な取り組みである、各計画班内および班間で共有するテーマについて集中的に議論する「トポロジー連携研究会」が、領域開始以来すでに 8 回開催されており、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、国際的なネットワーク作りをめざしたアライアンス国際ワークショップを4件開催した活動は有効である。若手研究者が国内の他機関の研究室に滞在して自己研鑽や共同研究を進めることをサポートする、「若手励起プログラム」の実施は円滑に行われており、総じて有効な交流が得られていることが窺われる。同じく、若手研究者の海外派遣・招聘をサポートするプログラムである JREP (Junior Researcher Exchange Program) でも、実施報告書を見ると、総じて派遣・招聘された若手研究者は伸び伸びと活動し、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. Not only does this give them a chance to build up their own networks, but it also allows them to fill any gaps in their background knowledge simply by asking the relevant speakers to explain their topic at a somewhat easier level. We have found that this is a surprisingly efficient way to get your young collaborators up to speed – and it is obviously also very motivating.

◆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.

10.　今後の研究領域の推進方策（２ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

【領域研究の推進】

トポロジカル物質科学を発展させる重要な鍵となるのが、トポロジーと「強相関」「対称性」「ナノサイエンス」の融合である。これらを融合させた研究を実施し、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行う。H29 年度以降もトポロジカル物質科学の創成にむけて、領域内での共同研究や他分野との融合研究を推進する。各研究項目に関して以下を研究重点項目に据える。

研究項目 A: トポロジーと強相関

1. ネマティック超伝導など新しいトポロジカル超伝導状態の解明
2. 半整数量子渦・ワイル超伝導体・人工超格子超伝導体などでのマヨラナ準粒子の実証
3. スピン液体状態での新奇トポロジカル準粒子励起の確立

研究項目 B: トポロジーと対称性

1. 非共形型対称性を持つ結晶系を中心とした新型トポロジカル半金属の探索
2. トポロジカル絶縁体薄膜における量子相制御と新奇伝導現象の観測
3. 新型トポロジカル超伝導体の開発とエッジ流・奇周波数ペア・マヨラナ準粒子の検証

研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス

1. カイラルエッジ・ヘリカルエッジにおける動的現象と非平衡現象の解明
2. 分数量子ホール系の分数電荷準粒子の物性と統計性の検証
3. ハイブリッド構造の素子作製とマヨラナ準粒子の生成・検出

研究項目 D: トポロジーと新概念

1. 強相関トポロジカル相での新奇なエッジ状態の研究
2. 対称性に守られたトポロジカル絶縁体・超伝導体・半金属の理論
3. 素粒子・原子核・宇宙論などの他分野との融合研究

公募研究: 各研究項目には、計画研究に加えて後期公募研究が参入する。計画研究と公募研究の密接な連携を図る。後期公募研究に対して期待する応募課題は、例として以下が考えられる：

1. 第一原理計算などに基づくトポロジカル物質の予言
2. マヨラナ粒子検出のための理論提案
3. 強相関系におけるワイル半金属・ワイル超伝導体の実験的探究

上記のテーマは各研究項目内で閉じておらず、多くのテーマに関して複数の研究項目が参加する。例えば、研究項目 B-1 のテーマ「非共形型対称性を持つ結晶系を中心とした新型トポロジカル半金属」に関してはBのみならずDの理論家もこのテーマの研究を推進する。また、A-1 のテーマである「ネマティック超伝導など新しいトポロジカル超伝導状態の解明」に関しては、研究項目 A と D に加えて、さらに研究項目 B が研究に参画する。さらに、A-2 のテーマである「超伝導リングにおける半整数渦」に対しては、C01 の「2次元電子系のスピン干渉効果」とのアナロジーによる連携が既に始まっている。

【領域運営の推進】

(1) **総括班会議**：日本物理学会、領域研究会、アライアンスワークショップの開催に合わせて総括班会議を開催し、運営方針や研究計画について協議する。もし研究が当初計画どおり進まない研究項目が生じた場合、対策を協議して必要な助言・援助を迅速に行う。

(2) **領域研究会**：H30 年 5 月に名古屋大学で領域研究会を開催し研究成果の報告を行うとともに相互連携を深める。また、H31 年 12 月に京都で領域国際会議 TopoMat2019 を開催する。TopoMat2019 では Topo-Q ネットワーク構築の集大成として、海外アライアンスメンバーにも多数参加してもらう。

(3) **トポロジー連携研究会・TMS セミナー**：

(3-1) **トポロジー連携研究会**：H29 年度は計画研究間の連携を強化するための共通テーマ研究会、「ナノ系のトポロジカル相」を東京で開催する。H30 年度は、トポロジカル超伝導に関する研究会を開催する。それ以後、ホットな話題を取り入れて連携を加速できるテーマを取り上げる。

(3-2) **若手研究会**：トポロジー連携研究会のうち 1 回は（H30 年度)、大学院生・若手研究者が主導

する研究会を開催する。これにより若手研究者間の研究交流を活性化するのみならず、運営に関する資質も培う。

(3-3) TMS **セミナー**：トポロジカル物質科学に関する最新の話題を取り上げる「TMS セミナー」を随時開催する。H27 年 5 月末までにすでに 42 回の TMS セミナーを開催した。今後とも、物性物理のみならず、素粒子・原子核・宇宙論などの領域外の講師も招いて領域を横断するようなセミナーも開催する。

(4) **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若手の意識・力量を"励起"する。理論から実験グループ（あるいは実験から理論グループ）への派遣も推奨する。本プログラムは国内での滞在を対象としている。海外への派遣、海外からの招へいは以下の国際支援班の下で実施する。

(5) **国際活動支援班による活動**

(5-1) **アライアンスワークショップ**：国際活動支援班の活動の目玉としているアライアンスワークショップを H29 年度以降も開催する。

H29 年度の予定

○H29 年 10 月に東京大学で、清華大学を中心とした中国の大学・研究所と**「冷却原子系とトポロジー」**に関するアライアンス国際会議を開催する。

○H30 年 1 月 12 日－15 日に京都大学（益川ホール）で EPiQS との第 2 回アライアンス研究会："Topological Magnets and Superconductors"を開催する予定である。この会議では近年急速に研究が進んでいるトポロジカル磁性体と超伝導体の話題を取り上げる。

H30 年度以降の予定

○H30 年 9 月に北京において北京大学 ICQM と国際ワークショップ・スクールを開催する。特に大学院生の国際化に向けたスクールに重点をおく。これ以降も、さらに米国、ドイツ、ロシア、イタリア、カナダなどとの国際連携を強化する。

(5-2) **研究者派遣・招へいプログラム**

○REP (Researcher Exchange Program)にはこれまで 10 件の実績があり、国際連携ネットワークの構築に役立っている。これまで主に外国人招へいが多かったので、今後、本領域メンバーの積極的な海外派遣を行い、国際ネットワーク構築に役立てる。特に、公募研究を含む総括班メンバー以外の研究室の利用を増やす。

○JREP (Junior REP)にもこれまで 12 件の実績があり、多くの若手研究者がこのプログラムを利用した。これまで JREP の場合には派遣が主であったので、今後、海外からの若手の招へいを増やす。また、アライアンスの相手機関であるカナダの CIFAR などが主催する研究会への参加を補助し、国際的に活躍できる若手研究者の育成を目指す。

上に記したアライアンスワークショップと REP, JREP を有効に活用して領域全体の国際化を図りトポロジーを基軸とした国際ネットワークの構築を引き続き推進する。

(6) WEB **広報**：初年度立ち上げた領域ウェブサイトを管理・運営し、コンテンツをさらに充実させる。特に英語のコンテンツを充実させる。

(7) **ニュースレター**：領域の計画・成果、研究動向などについて年 1 回、冊子体で発行する。H30 年度には第二期の公募研究が参加するので、新規メンバーの研究紹介も行い、共同研究のきっかけを作るようにする。

(8) **アウトリーチ活動**：領域活動の公開・普及に関して、高校での出前授業、プレスリリース、市民講座などを行う。この他に、トポロジカル物理学に関するノーベル賞級の研究者を招へいして学部生向けに講演を行ってもらう。H29 年 11 月には領域代表の川上が西宮湯川記念セミナー（高校生を含む一般市民向けのセミナー）で「トポロジーと物質科学」について講演し、さらに仁科記念講演会（12 月）では「電子系のトポロジー：トポロジカル絶縁体・超伝導・半金属」を講演する予定である。後者には素粒子・原子核・宇宙論を含む多くの研究者が参加するので、領域のアクティビティを分野外に浸透させる絶好の機会となる。また、A01 代表の前野は、H29 年秋の日本物理学会で開催される市民講座で非専門家にも分かり易い講演をする予定である。