

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05851

研究課題名（和文）トポロジジーが紡ぐ物質科学のフロンティアの総括

研究課題名（英文）Administration of Topological Materials Science

研究代表者

川上 則雄（Kawakami, Norio）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10169683

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 69,000,000 円

研究成果の概要（和文）：「トポ物質科学」の領域目的を達成するため、領域全体の研究方針の策定を行うとともに、計画研究同士、および計画研究と公募研究との間の連携を促進した。このため、領域研究会、国際会議、トポロジジー連携研究会、アライアンス・ワークショップ、若手励起プログラムを主催・実行し、分野横断型の新学術領域の創成を牽引した。特に、この研究を通して次世代の物質科学を担える若手研究者の育成を行い、さらにトポロジカル物質科学の国際的な研究ネットワークの基盤を構築することに重点を置いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

総括班の主導の下に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の創成を強く推進した。特に、トポロジカル物質科学の新たな局面を切り拓くために必須と考えられる強相関科学やナノサイエンスの最先端技術を駆使した連携研究を促進した。連携研究会、若手励起プログラム、アライアンスワークショップなどの本領域独自のプログラムを実践することで異分野交流を進めるとともに、将来の科学を担う若手研究者を育成し国際的視野を培った。本領域研究を推進することで、トポロジカル量子現象の基礎を構築するとともに、数学なども含む広い学術分野へ波及効果をもたらした。

研究成果の概要（英文）：To accomplish the purpose of Topological Materials Science project, we have made a concrete research plan, thereby activating the collaboration among the core projects and also the solicitation projects. To this end, we have held the annual meetings, the international conferences, the topology interactive meetings and the alliance workshops, and have conducted the young researchers programs to establish an interdisciplinary innovative research field. Through these activities, we have put particular emphasis on nurturing young researchers and establishing an international network of collaborations.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジジー 物質科学 強相関 対称性 ナノサイエンス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル量子現象の研究における近年の急速な進展には目を見張るものがある。これは2005年のトポロジカル絶縁体の理論的予言[Kane-Mele]、さらには2007年のHgTe/CdTeの2次元量子井戸におけるトポロジカル絶縁体の実現[M. Koenig et al.]を契機とするが、この重要性が認知され始めた当初、日本の研究は大きく立ち遅れていた。その後、トポロジカル量子現象の研究が急速に進む中で、本提案の前身にあたる新学術領域研究「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)の先駆的研究が果たした役割は大きい。本新学術領域を開始する前の4年ほどの間に、トポロジカル物質の包括的なプロジェクト研究が世界各国で立ち上がり、互いにしのぎを削って研究を推進してきた。我が国の学術を向上・強化するためにも、この先駆的研究をより一層加速・推進する必要がある。

このように世界的潮流になってきたトポロジカル量子現象の研究であるが、物質科学の基盤概念として真に根付くには、本質的に未開拓の部分が残されている。特に、現実の物質に多様性と機能性を与える電子間相互作用、すなわち「強相関効果」の役割の解明が重要である。さらには、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、新たな物質開発だけでなく学理構築の鍵となる。我が国の学術研究としてトポロジカル物質科学という新学術領域を強化・加速するためには、これらの点に重点を置いた本格的なプロジェクトを立ち上げ、諸外国の勢いに勝って研究を推進する必要がある。

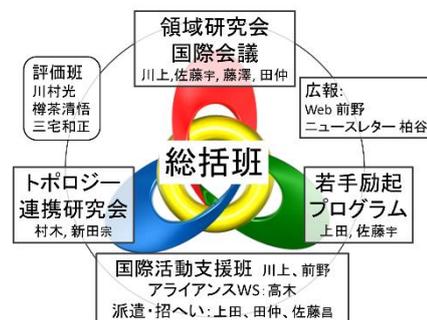
2. 研究の目的

本新学術領域は、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を目的とする。本領域は、

- 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

の計画研究と、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互いの連携を緊密に保つ。

「総括班」の目的は、領域全体の研究方針の策定を行うとともに、計画研究同士、および計画研究と公募研究との間の連絡調整を行い、相互啓発と連携を促進することで、本新学術領域の研究目的を達成させることにある。右図に示す領域研究会、国際会議、トポロジー連携研究会、アライアンス・ワークショップ、若手励起プログラムの企画・運営を主導することで、分野横断型の新学術領域の創成を牽引する。この研究を通して次世代の物質科学を担える若手研究者の育成を行う。



【期間内の達成目標: 領域内の有機的な結合による新たな研究展開・若手育成】

トポロジーと「強相関」、「対称性」、「ナノサイエンス」を融合することにより、新奇トポロジカル物質の探索および新概念の創成を目標とする。総括班の主導の下に、この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・共同研究を推進し国際的に活躍できる若手人材を育成する。特にトポロジーの概念を基軸とした物質科学の融合を推し進め、研究項目間の連携によるシナジー効果を最大限に引き出す。

(1) トポロジーを基軸とした物質科学の融合: 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。これを推進するために、上に記した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。

◆総括班の役割: 総括班は、上記の目標を達成するため組織・運営の中核を担う。研究項目間での緊密な連携を図る方策として、テーマを絞った「トポロジー連携研究会」を企画・支援する。この研究会は毎年度複数回開催し、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」を毎年(H29・H31年度は「国際会議」として)開催し、領域内での交流を促進する。さらに、国際的アライアンス・ワークショップを開催し、領域内だけでなく領域外・国外との連携も強化する。領域研究が計画通り遂行されているかどうか毎年チェックし、当初計画が達成されていない場合は、打開策を協議する。

(2) 若手研究者の育成を通じた研究融合: 新しい学術領域研究を強く推進するためには、若手研究者の育成が必須である。本領域独自の「若手励起プログラム」による支援により、分野横

断型の研究視点と資質を育成し、国際的視野の醸成を促進する。具体的には、領域内外の研究室内に若手を相互に派遣し、若手の育成を目指すだけでなく連携の地盤を固める。さらに、若手を海外の研究機関にも派遣し、シナジー効果が見えるような共同研究を行うことで国際的な視点を育む。

3. 研究の方法

総括班は、計画研究と公募研究の活動を把握し、これらの間の連携を促進すると共に、領域全体としての分野横断型の研究活動を推進する。総括班は、各計画研究班の代表者と選ばれたメンバーから構成する。以下に各プログラムの担当者の表を示す。

領域研究会・国際会議開催	川上則雄、佐藤宇史 藤澤利正、田仲由喜夫	トポロジー連携研究会	村木康二（領域内） 新田宗土（領域外）
事務担当	藤澤利正	若手励起プログラム	上田正仁、佐藤宇史
アライアンス WS	高木英典、安藤陽一*	PD 審査委員会	川上則雄、藤澤利正
ニュースレター WEB 広報	柏谷聡 前野悦輝	国際活動支援班	川上、前野、上田、 田仲、佐藤昌利

注釈 *)2016 年度まで

(1)「総括班会議」：毎年開催する領域研究会と秋および春の日本物理学会の会期中に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。研究の進展に問題が生じた研究項目がある場合、その打開策を検討する。

(2)「領域研究会」：初年度は、京都において「キックオフミーティング」として領域研究会を行い、本新学術領域の目指す目標についてメンバー全員の共通意識を高める。H28 年度以降も、領域研究会を毎年開催し、研究計画・成果の報告を行う。その内 2 回は国際会議とする。

(3)「トポロジー連携研究会」：研究項目内の連携を強化する研究会を、焦点を絞った共通テーマについて数か月に一度の頻度で開催する。初年度は、各計画研究内の連携を強化するための研究会の他に、計画研究間の連携を強化するための以下の共通テーマ研究会も開催する。1. ワイルド半金属とその候補物質 (A01, B01, C01, D01 連携); 2. 人工系のトポロジカル現象 (B01, C01, D01 連携)。これに引き続き毎年度、連携研究会を数回開催し共同研究を促進する。

(4)「若手励起プログラム」：若手研究者の育成を行うため、領域内外の研究室内に若手を相互に派遣し、集中的な議論を主体とした“他流試合”を行い若手の意識・力量を“励起”する。同様に、若手を海外の研究機関に 1~2 週間程度以上派遣し、理論や実験に関する共同研究を行う（例えば、実験に関しては日本で作ったサンプルを利用した海外での測定などが効果的である）。後者の国際プログラムは国際支援班 Y00 が採択されたため、Y00 の活動として実行する。

(5)「アライアンス・ワークショップ」：本領域独自の取り組みである「アライアンス・ワークショップ」を毎年、複数回開催する。なお、国際支援班「Topo-Q ネットワークの構築」が採択されたため、このプログラムも国際支援班が中心となり実行する。

(6)「WEB 広報」：領域ウェブサイトを開設・管理する。領域研究者にメールレターの配信を頻繁に行う。

(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。

(8)「公募研究」：各計画研究と密接に連携し領域の活性化を図る公募研究(第 1 期 H28・29 年度分、第 2 期 H30・R1 年度分)の募集を行う。計画研究と公募研究の連携を促進する。

(9)「国内アドバイザー(評価班)」：研究会をはじめとする活動に外部評価委員として参加し、領域運営や研究推進に関する助言を行う。

4. 研究成果

総括班は、領域全体の研究方針を策定し、計画研究同士および計画研究と公募研究との間の連絡調整を行うことで領域活動全体を活性化した。また、若手研究者の育成、領域の国際化に取り組んだ。

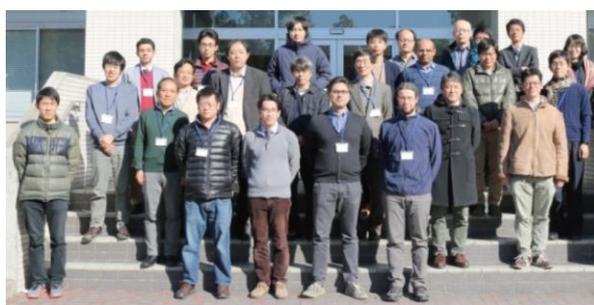
(1) 総括班会議：領域の方針を策定し運営を円滑に行うための核となるのが総括班会議である。5 回の領域研究会（京都、仙台、東京、名古屋、京都）、9 回の日本物理学会（関西大学、東北学院大学、金沢大学、大阪大学、岩手大学、東京理科大学、同志社大学、九州大学、岐阜大学）の会期中に総括班会議を開催し、それまでの成果の評価を行うとともにその後の研究計画の策定を行った。そのうち、2 回の領域研究会には評価班が出席し、領域研究・運営に関するレポートを提出した。また、学術調査官にも参加頂き、新学術領域として目指すべきことに関して重要なコメントを頂いた。総括班会議には、毎回、数十ページにわたる資料を用意し、領域研究・運営が計画通り遂行されているかどうかチェックした。特に連携研究の重要性、アウトリーチ活動の重要性を毎回確認し徹底した。

(2) 領域研究会：H27 年度のキックオフ研究会として領域研究会（京都）を開催し、本新学術領域の目指す目標についてメンバー全員の共通意識を高めた。これを含め、以下の表に示す

ように合計で5回の領域研究会を開催し、本新学術領域の成果を発表するとともに、最新の話題に関する研究討論を行った。H29年とR1年には国際会議として領域会議を開催した。

	名称	開催期間	場所	口頭講演 /ポスター	参加総数 (海外)
第1回	領域研究会	2015年12/11-13	京都大学	37/66	128
第2回	領域研究会	2016年12/6-18	東北大学	44/68	175
第3回	領域研究会(国際) TopoMat2017	2017年5/9-13	東京工業大学	36/96	199(25)
第4回	領域研究会	2018年6/22-24	名古屋大学	42/79	150
第5回	領域研究会(国際) TopoMat2019	2019年12/3-7	京都大学	32/116	179(20)

(3) トポロジー連携研究会: 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。5年間で合計12回の研究会を開催した。まず初年度、研究項目内の連携を強化する研究会を4回、さらに計画研究間の連携を強化するための焦点を絞った共通テーマとして「ワイル・ディラック半金属」と「人工量子系」を開催した。H28年度、計画研究・公募研究間の連携を強化するための「Inter disciplinary topics」(慶應義塾大学)と「奇周波クーパー対の物理」(名古屋大学)を開催した。第9回以降、マヨラナ準粒子、トポロジカル半金属、非エルミート系などの話題に関する研究会を開催し集中的な議論を行った。連携研究会の開催により、専門の異なる研究者の間に意思疎通を図ることができた。また当初計画にはなかったTMSセミナーを113回開催し、最先端の話題を共有した。



分野横断型研究会「奇周波クーパーペアの物理」
(第8回トポロジー連携研究会、H29年1月)

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8/18	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8/20	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8/21	東京工業大学	11
第4回	A01「強相関物質のトポ相」研究戦略	2015年9/6	京都大学	16
第5回	ワイル半金属・超伝導	2015年11/6-7	東北大学	50
第6回	人工量子系におけるトポロジー	2016年2/9-10	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11/17-18	慶應義塾大学	100
第8回	奇周波数クーパー対の物理	2017年1/6-7	名古屋大学	24
第9回	ナノ構造・エッジ伝導・マヨラナモード	2017年12/18-19	京大東京 Office	25
第10回	非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象	2018年11/30	京都大学	42
第11回	トポロジカル半金属	2019年8/2-3	名古屋大学	30
第12回	マヨラナ励起の実証にむけて	2019年11/14-15	東京工業大学	50

(4) 若手励起プログラム: 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」した。5年間で約24名の若手がこのプログラムを利用し、滞在先で集中的な議論を行った。滞在報告書の内容からも派遣された学生の満足度は非常に高く、確かに若手を「励起」することに成功した。

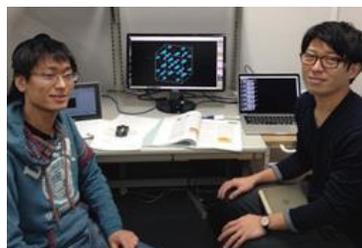
このプログラムは、既存領域を超えた将来の研究の担い手を育むきっかけを提供すると同時に、領域グループ間の交流の契機ともなった。実施例の主なものは実験から実験、理論から理論グループへの派遣であり、結晶成長、測定技術、理論手法などを滞在先で習得した。このような中で、実験から理論、逆に理論から実験への派遣を行い、本領域ならではのユニークな若手育成の場を提供できた。具体的には:

①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た。

②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専門とする大学院生が、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。

③共同研究の開始例 (D01→D01) さらに、この若手励起プログラムを活用することで研究室間の連携研究が開始された例が多くある。典型的なものとして、京都大学・川上研究室 (D01 代表) の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。その後、共同研究を続け、現在は上田研究室の助教として京大・東大・理研の共同研究で中心的役割を果たしている。



若手励起の例：実験(京都大学 A01)→理論(名古屋大学 B01)

(5) 領域の国際化への取り組み：本領域独自の取り組みである「国際アライアンス・ワークショップ」を開催した。国際活動支援班 Y00 が採択されたので、Y00 が中心となり国際化に取り組んでいるが、領域の国際化は総括班の主活動の一つである。H28 年度に開催したマックスプランク研究所を始めとし、EPIQS (米国)、北京大学、SPIN 機構 (イタリア) 等と計 11 回アライアンス会議を共催した。国際化の一環として、若手研究者の派遣・招へい (JREP) を 38 件、研究者の派遣・招へい (REP) を 24 件実施した。本活動の詳細は国際支援班報告書にまとめた。

(6) WEB 広報・ニュースレター：領域ウェブサイトを開設し、領域の目的・内容や研究成果のページを充実させた。領域の計画・成果、研究動向などについて、ニュースレターを毎年 1 回、合計 5 回、冊子体で発行した。主に、領域の研究成果、各メンバーの紹介、最近の研究トピックスなどを盛り込んだ。領域に新たに加わった公募班メンバーの紹介なども行った。

(7) アウトリーチ活動：領域成果を社会に還元すべく、高校への出張授業、市民講座、プレスリリースなど、多くのアウトリーチ活動を行った。一例として、H28 年 2 月に行ったノーベル物理学賞のベドノルツ博士を招いて京都大学で開催した「高校生向け講演会」がある。この講演会では、本領域メンバーによる超伝導・トポロジーの講義、超伝導の実演、その後ベドノルツ博士の講演と続いた。この講演は前野 (A01) により通訳され、高校生のみならず保護者にも感銘を与えた。



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。

(8) 公募研究：第 1 期 (H28・29 年度) には 19 名、第 2 期 (H30・R1 年度) には 18 名の公募研究者が加わった。公募研究キックオフミーティングおよび連携研究会を活用して計画研究グループとの共同研究を促進した。

(9) 領域活動の評価：評価班 4 名が領域研究会・総括班会議に参加し、領域運営や研究推進に関する助言を領域に提出した。このコメントは領域の高いアクティビティに言及するものであった。また、第 1 回領域国際会議 (TopoMat2017) には、海外アドバイザー 4 名が参加し、領域活動に関するアドバイスを提出した。これらの領域運営・連携研究に関する助言を取り入れ、計画の策定を行った。

その他：【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た。例として、東京工業大学 (H28 年 12 月 20 日) 「トポロジカル絶縁体・超伝導体の基礎と応用」講師：安藤陽一 (ケルン大) に京都大学の院生・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

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田仲 由喜夫 (Tanaka Yukio) (40212039)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	上田 正仁 (Ueda Masahito) (70271070)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	藤澤 利正 (Fujisawa Toshimasa) (20212186)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	
研究分担者	村木 康二 (Muraki Koji) (90393769)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・上席特別研究員 (92704)	
研究分担者	佐藤 宇史 (Sato Takafumi) (10361065)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	新田 宗土 (Nitta Muneto) (60433736)	慶應義塾大学・商学部(日吉)・准教授 (32612)	