

領域略称名：トポロジカル量子
領域番号：2202

平成27年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」

(領域設定期間)

平成22年度～平成26年度

平成27年6月

領域代表者 (京都大学・大学院理学研究科・教授・前野 悦輝)

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究領域の設定目的の達成度	8
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	13
4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況	14
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	16
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	21
7. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	28
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	30
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	34
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	35
11. 総括班評価者による評価	37

研究組織

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	22103001 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象の総括	平成 22 年度～ 平成 26 年度	前野 悦輝	京都大学・大学院理学研究科・教授	10
A01 計	22103002 時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象	平成 22 年度～ 平成 26 年度	前野 悦輝	京都大学・大学院理学研究科・教授	11
B01 計	22103003 スピン三重項超流動体の新奇界面現象	平成 22 年度～ 平成 26 年度	石川 修六	大阪市立大学・大学院理学研究科・教授	10
C01 計	22103004 空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象	平成 22 年度～ 平成 26 年度	鄭 国慶	岡山大学・大学院自然科学研究科・教授	12
D01 計	22103005 トポロジカル凝縮系の理論	平成 22 年度～ 平成 26 年度	田仲 由喜夫	名古屋大学・大学院工学研究科・教授	8
計画研究 計 5 件					
A01 公	23103503 グラフェンでできた超伝導／強磁性／超伝導接合における磁性と超伝導の競合	平成 23 年度～ 平成 24 年度	神田 晶申	筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授	1
A01 公	23103508 一軸応力下比熱・磁歪測定によるスピン三重項超伝導二段転移の解明	平成 23 年度～ 平成 24 年度	天谷 健一	信州大学・教育学部・准教授	1
A01 公	23103512 ジョセフソン効果による時間反転対称性の破れた超伝導状態の検証	平成 23 年度～ 平成 24 年度	住山 昭彦	兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・教授	1
A01 公	25103704 量子ホール系カイラルエッジ状態の空間分解分光研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	野村 晋太郎	筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授	1
A01 公	25103708 スピン三重項超伝導体 UPt ₃ の準粒子低エネルギー励起構造の解明	平成 25 年度～ 平成 26 年度	井澤 公一	東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授	2
A01 公	25103717 ルテニウム酸化物超伝導体のバルク・表面における電子・スピン状態の解明	平成 25 年度～ 平成 26 年度	岩澤 英明	広島大学・放射光科学研究センター・助教	1
A01 公	25103719 トンネル現象を用いた重い電子系の多重超伝導相の研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	住山 昭彦	兵庫県立大学・大学院物質理学研究科・教授	1

A01 公	25103721 カイラル P 波 S 波超伝導ハイブリッド SQUID によるカイラル超伝導位相状態の 研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	石黒 亮輔	理化学研究所・創発物 性科学研究センター・ 協力研究員	2
B01 公	23103506 不均一超流動ヘリウム 3 における奇周波 数状態のもたらす磁氣的性質の研究	平成 23 年度～ 平成 24 年度	松本 宏一	金沢大学・理工研究域 数物科学系・教授	1
B01 公	23103509 超流動ヘリウム 3 中のトポロジカルオブジ ェクトの検出と制御	平成 23 年度～ 平成 24 年度	佐々木 豊	京都大学・低温物質科 学研究センター・教授	1
B01 公	23103510 2次元光格子中の冷却イッテルビウム原子 におけるゲージ場創生の新技術	平成 23 年度～ 平成 24 年度	吉川 豊	京都大学・大学院理学 研究科・助教	1
B01 公	23103514 微小磁場中スピノルボーズ凝縮体を用いた 新奇量子渦の実現	平成 23 年度～ 平成 24 年度	東條 賢	中央大学・理工学部・ 准教授	1
B01 公	23103517 イオンを用いた超流動ヘリウム 3 自由表面 新奇現象の研究	平成 23 年度～ 平成 24 年度	池上 弘樹	理化学研究所・基幹研 究所・専任研究員	1
B01 公	25103712 超流動ヘリウム 3 中のトポロジカルオブジ ェクトの制御と創出	平成 25 年度～ 平成 26 年度	佐々木 豊	京都大学・低温物質科 学研究センター・教授	1
C01 公	23103501 高分解能スピン分解 ARPES によるトポロ ジカル絶縁体における微細電子構造の研究	平成 23 年度～ 平成 24 年度	佐藤 宇史	東北大学・大学院理学 研究科・准教授	1
C01 公	23103513 p、f 電子系トポロジカル超伝導の探索	平成 23 年度～ 平成 24 年度	村中 隆弘	電気通信大学・情報理 工学研究科・准教授	1
C01 公	23103518 イリジウム酸化物薄膜を舞台としたトポロジ カル絶縁体の物質開発	平成 23 年度～ 平成 24 年度	松野 丈夫	理化学研究所・基幹研 究所・専任研究員	1
C01 公	23103519 分光イメージング走査型トンネル顕微鏡に よるトポロジカル絶縁体の研究	平成 23 年度～ 平成 24 年度	花栗 哲郎	理化学研究所・基幹研 究所・専任研究員	1
C01 公	25103701 トポロジカル絶縁体および関連物質のスピ ン分解 ARPES	平成 25 年度～ 平成 26 年度	佐藤 宇史	東北大学・大学院理学 研究科・准教授	1
C01 公	25103702 スピンプンプによるトポロジカル絶縁体へ のスピンプンプと逆スピントラップ効果	平成 25 年度～ 平成 26 年度	塩見 雄毅	東北大学・金属材料研 究所・助教	1

C01 公	25103713 空間反転対称性の破れを人工的に制御した重い電子系超伝導体の物性研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	芝内 孝禎	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	1
C01 公	25103715 原子層制御技術による 3 次元トポロジカル絶縁体のスピン機能創出	平成 25 年度～ 平成 26 年度	安藤 裕一郎	京都大学・大学院工学研究科・助教	1
C01 公	25103722 量子ホール系におけるエッジ状態とトポロジカル励起の研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	福田 昭	兵庫医科大学・医学部・准教授	3
C01 公	25103710 多重極限下の電子・熱物性測定と結晶構造解析による圧力誘起トポロジカル超伝導の研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	大村 彩子	新潟大学・研究推進機構超域学院・助教	1
C01 公	25103724 超格子バンドエンジニアリングによるトポロジカル絶縁体の実現	平成 25 年度～ 平成 26 年度	松野 丈夫	理化学研究所・創発物性科学研究センター・専任研究員	1
D02 公	23103502 トポロジカルな欠陥に局在するマヨラナ・ゼロモードと指数定理	平成 23 年度～ 平成 24 年度	福井 隆裕	茨城大学・理学部・教授	1
D02 公	23103520 対称性の破れた磁性体・超伝導体ナノ接合系における量子輸送理論	平成 23 年度～ 平成 24 年度	川畑 史郎	産業技術総合研究所・電子光研究部門・主任研究員	1
D02 公	25103709 強磁性体/超伝導体接合におけるスピントロニクス	平成 25 年度～ 平成 26 年度	横山 毅人	東京工業大学・大学院理工学研究科・助教	1
D02 公	25103723 トポロジカル超伝導マヨラナ準粒子励起の操作と新奇機能の理論探索	平成 25 年度～ 平成 26 年度	胡 暁	物質・材料研究機構・MANA・主任研究員	1
D03 公	23103507 超流動ヘリウム 3 の境界と渦における新奇な状態の探索と同定	平成 23 年度～ 平成 24 年度	高木 丈夫	福井大学・大学院工学研究科・教授	1
D03 公	23103515 素粒子論的手法によるトポロジカル励起の研究	平成 23 年度～ 平成 24 年度	新田 宗土	慶應義塾大学・商学部・准教授	1
D03 公	25103706 カイラル p 波超流動体の固有角運動量とエッジ流の解明	平成 25 年度～ 平成 26 年度	押川 正毅	東京大学・物性研究所・教授	1
D03 公	25103716 スピン三重項超流動体 ^3He 並びに UPt_3 のトポロジカル励起の理論研究	平成 25 年度～ 平成 26 年度	町田 一成	岡山大学・大学院自然科学研究科・教授	1

D03 公	25103720 トポロジカル励起とトポロジカル量子計算	平成 25 年度～ 平成 26 年度	新田 宗土	慶應義塾大学・商学 部・准教授	1
D04 公	23103505 空間反転対称性の破れた超伝導体の渦 糸状態におけるトポロジカル量子現象	平成 23 年度～ 平成 24 年度	横山 毅人	東京工業大学・大学院 理工学研究科・助教	1
D04 公	23103511 トポロジカル絶縁体／超伝導におけるメゾ スコピック効果の理論	平成 23 年度～ 平成 24 年度	井村 健一郎	広島大学・大学院先端 物質科学研究科・助教	1
D04 公	23103516 トポロジカル場の理論による凝縮系の新規 量子現象の探索	平成 23 年度～ 平成 24 年度	田中 秋広	物質・材料研究機構・ 先端的共通技術部門・ 主幹研究員	1
D04 公	25103703 トポロジカル凝縮相における量子交差相 関現象	平成 25 年度～ 平成 26 年度	野村 健太郎	東北大学・金属材料研 究所・准教授	1
D04 公	25103711 多軌道モデルに基づくパリティがない超伝 導の微視的理論	平成 25 年度～ 平成 26 年度	柳瀬 陽一	新潟大学・教育研究院 自然科学系・准教授	1
D04 公	25103714 空間反転対称性の破れた電子系のトポロ ジカル相とマヨラナ・フェルミオン	平成 25 年度～ 平成 26 年度	藤本 聡	大阪大学・大学院基礎 工学研究科・教授	1
公募研究 計 40 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

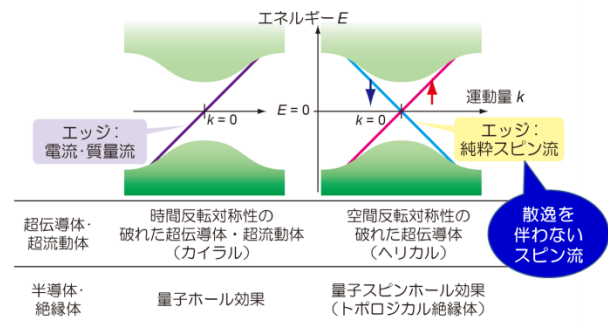
研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

【1. 開始当初の学術的背景】

現在の物性物理学研究の顕著な潮流の一つは、磁束やホール伝導度の量子化など、トポロジカルに特徴づけられる状態が起源となり発現する新奇現象の発見・解明である。古くは超伝導体・超流動体の渦量子化、Aharonov-Bohm 効果に始まり、量子ホール効果、スピンホール効果など、トポロジーが物理の理解に根底的役割を果たす量子現象が、近年の物性物理学におけるひとつのフロンティアを拓いて来た。

この潮流に2007年以降、大きな新展開が生まれつつあった。2次元半導体でのトポロジカル現象の本質が、3次元絶縁体にも「トポロジカル絶縁体」として拡張できることが提唱された。すなわち、内部はエネルギーギャップを持つ絶縁体であるが、波動関数の位相のねじれに伴うトポロジカルな性質のために、表面はギャップレスの特異な金属状態になっている新しい物質である。本新学術領域発足の前夜といえる2008・2009年以降、実際の物質での実証も出始め、研究が本格化しつつあった。新学術領域形成の可能性につながる要因として、半導体や絶縁体に加えて、超伝導体・超流動体でも同様の量子現象が認識され、またさらに新奇な現象の予測とそれを実証する機運が盛り上がっていた。これらの量子現象は「対称性の破れた量子凝縮系」でしばしば発現するため、新しい学術領域の生成に向けてそれらの系を、分野横断的に研究することで、普遍性を引き出し、さらなる新展開につなげる研究の環境が必要になっていた。そこで我々は「トポロジカル量子現象 (Topological Quantum Phenomena)」という新しい言葉を創って、そのもとでの研究組織化に向けて動き出した。

トポロジカル物質の普遍的性質として、内部(バルク)のトポロジーを反映した特異な表面・界面状態(エッジ状態)が現れると予想されていた。この「バルク・エッジ対応」に基づく表面状態として、当初は2種類の状態が認識されていた。すなわち、時間反転対称性の破れた「カイラル」状態と、空間反転対称性に保護された「ヘリカル」状態である。電子系を例にとると、カイラル状態では角運動量が特定の方向を向き、ヘリカル状態では上下反対向きスピンの電子がそれぞれ左右反対向きに流れて純粋スピン流を生じる。カイラル状態は半導体での量子ホール効果として、またヘリカル状態はトポロジカル絶縁体表面効果などとして実現する。超伝導体・超流動体にもその対応現象が存在すると考えられ、「半導体・絶縁体」と「超伝導体・超流動体」はトポロジカル量子現象の研究対象として相補的な舞台を提供する。



多様なトポロジカル量子状態に伴う2種のエッジ流

このような顕著な対応関係は、多体凝縮系におけるトポロジカル量子現象の背後に深い統一原理が存在することを示唆する。しかしながら、それまで個別の分野での興味深い発見にもかかわらず、物質系の違いを超えた統合的なプロジェクト研究は世界的にもほとんど始まっていなかった。

【2. 目的】

本新学術領域「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年度)の目的は、超伝導体、超流動体、絶縁体などの量子凝縮系でしばしば発現する、トポロジカルに特徴付けられる量子現象を分野横断的に研究することで、「トポロジカル量子現象」としての普遍概念を創出し、「トポロジカル量子物理学」という新たな学術領域の形成を目指すことにある。

本領域の研究対象は、凝縮体のかたまり「バルク」そのものの対称性破れに物理学の重要課題を含む超伝導体や超流動体、絶縁体、冷却原子系など、そしてトポロジカルな新奇現象が発現する舞台として「エッジ」と名付けられるそれらの表面・界面である。「エッジ」でのトポロジカル量子現象の理解には、「バルク」で創発する量子現象の徹底的な理解が第一ステップとなる。

トポロジカル量子現象の物理は、異分野交流・連携によって真のシナジー効果が最大限に発揮できる

フェイズにある。幸いなことに、我が国は超伝導や超流動の研究分野で、世界的に独自性の高い成果を挙げてきた。本領域では当該の各分野で世界をリードする研究者を結集し、異分野連携を格段に強化することで新学術分野を一気に構築する。この研究プロジェクトは、異なる物質系を自在に行き来する概念共有によって分野融合を図るといふ、独自の発想を軸にしている。このため、世界的に機が熟し始めた時期を追い風に、いち早く組織的研究を展開することで、「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」の形成に貢献できるはずである。トポロジカル量子現象の物理は、純粋にアカデミックな研究対象としての価値に留まらず、スピントロニクスや量子コンピュータなど、将来の高度な応用科学にとっても重要な基礎となると期待される。

【3. 全体構想】

領域組織の主構成は、**研究対象の物質系に即した 3 つの計画研究**(A01:時間反転対称性を破る超伝導体; B01:スピン三重項超流動体; C01:空間反転対称性を破る電子流体)と、それらに太い横糸を通す形で**普遍概念を統合する理論班**(D:トポロジカル凝縮体の理論)からなる。そして、公募研究と合わせて、それぞれ研究項目 A-D を構成する。

公募研究 (A01, B01, C01; D02, D03, D04) として、各計画研究のテーマに沿って相補的な手法で活動する研究者や、計画研究には含まれないテーマでトポロジカル量子現象を開拓する研究者を取り込む。公募の理論研究者は D02, D03, D04 として計画研究 D01 と研究項目を構成する。それと同時に、それぞれ D02=A01, D02=B01, D03=C01 と物質系に即した計画研究とも関連付けた領域活動を行う。

また、評価班として国内 3 名、海外 3 名のアドバイザーを委嘱して、研究内容や領域運営についての助言を頂く。



4 つの研究項目からなる研究組織

研究項目間の分野横断的連携によるシナジー効果を最大限に引き出すため、アナロジーの追求に重点を置く。時間反転対称性の破れた超伝導体・超流動体の研究では、エッジ流や量子渦に関して電子系現象と原子系現象の対応性が良く、分野横断型の研究による相乗効果がすでに生まれている。**超伝導における電流と³He における質量流はアナロジーが明確**である。さらに、これらの系でのカイラル・エッジ流と対応付けられるのが、トポロジカル絶縁体表面に存在すると考えられるヘリカル・エッジスピン流である。これらの比較分析は、相互の物理の相乗的發展をもたらすと期待できる。また空間反転対称性の破れた結晶構造の超伝導体 **NonCentroSymmetric superconductors, NCS 超伝導体** の中にはスピン三重項超伝導性を示すものも現れ、 Sr_2RuO_4 の超伝導との比較が有効である。**マヨラナ粒子型の分散関係を持つ準粒子励起**の存在は、超流動 ^3He の表面・界面だけでなく、ディラック準粒子としてトポロジカル絶縁体でも期待され、さらに超伝導体・超流動体・冷却原子系での半量子渦・分数量子渦とも密接に関係している。このように**トポロジカル量子現象にかかわる共通概念を多彩な物質系に自由自在に適用**することで、大きな相乗効果を生み出そうとするのが本新学術領域の特徴である。

新学術領域研究ならではの分野横断研究の推進、また若手人材育成の方策として、特に以下の取り組みを行う。

(1) 連携による分野横断研究とアナロジーの追求

「トポロジカル量子現象」の共通視点のもと、鍵となる物理概念について、テーマを絞った小規模「集中連携研究会」を開催する。毎年の「領域研究会」(H24, H26 年度は国際会議)は公開で開催し、分野横断的研究成果を最大限に反映できるセッション立てで行う。

(2) 新学術領域を担う若手人材育成を通じた研究融合

「若手相互滞在プログラム」や「若手国際会議」等による若手研究者間での直接的な深い交流を通じて、異分野間の研究融合を触発する。そして分野横断型の研究視点と国際性をもった付加価値の高い人材を育成する。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究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、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の達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

【1. 領域全体としての目標と達成度】

【領域全体の研究期間内の達成目標】

2010年3月の申請書に記載した、領域全体の達成目標は以下の通りである。

本新学術領域研究の目的は、対称性の破れた量子凝縮系でしばしば発現する、トポロジカルに特徴付けられる量子現象を分野横断的に研究することで、「トポロジカル量子現象」としての普遍概念を創出し、新たな学術領域を形成することである。

- (1) 対称性の破れた量子凝縮体の「バルク」(表面や接合界面ではない凝縮体そのもの)の性質の理解を極める。これにはスピン三重項超伝導体のベクトル秩序変数の方向の確証や、スピン三重項超流動体の固有軌道角運動量の大きさの決定などの、重要課題が含まれる。また新奇なトポロジカル量子現象として、様々な系での半量子渦 (Half Quantum Vortex; HQV) の存在の有無を明らかにする。
- (2) 対称性の破れた量子凝縮体の表面・界面、すなわち「エッジ」における多彩なトポロジカル量子現象を開拓・実証する。例として、異なる対称性の破れによってエッジに自発する、電荷、質量、スピンなどの流れの観測が挙げられる。
- (3) トポロジカル量子現象の系統的理解を深め、それらが内包する普遍的な数理構造を解明する。特に、界面・表面状態に特有の準粒子励起や散逸のない特異な「エッジ流」の実証を通じて、トポロジカル量子現象の典型例に対する普遍概念を構築する。

【領域全体としての達成度】

設定目的の中心である、「トポロジカル量子現象」という新学術領域を形成することに関しては、当初の予想を超えたレベルまで達成できたと考えられる。これには、この分野の研究が2010年以降、世界的にも研究当事者の予想を超える大きな展開・発展を遂げたことも幸いしている。本領域3年度目の2012年11月号でのNature PhysicsのNews & views記事“The Great Topological Expansion”では、「面白い性質を持つトポロジカル物質は、当初考えられていたよりはるかに数多くあるということがはっきりしてきた」と記されている。

その中で、我が国の新学術領域研究プロジェクトが、研究成果とともに十分にその存在感をアピールできた。これにはスタート時期に恵まれたことに加え、本テーマの遂行に「新学術領域研究」の制度の趣旨が合致したことが要因と考える。すなわち、絶縁体や超伝導の分野だけでなく、超流動や冷却原子の分野でトポロジカル量子現象の開拓に取り組む意欲と実力を備えた研究者が我が国には多く、その研究者達を本プロジェクトに取り込めたことで、新概念を共有し、既存分野の融合を図る新学術領域研究が着々と進んだ。

(1)に関しては、超流動 ^3He の長年の未解決問題であった「固有軌道角運動量問題」に解決を見た。また、HQVに関してはルテニウム酸化物超伝導体で最初の観測成果をScience誌で発表した。現在は、マヨラナ準粒子を伴うとされるHQVを制御できるように、より一般的な測定方法での検証実験を進めている。超流動 ^3He での初めてのHQV観測への研究努力も進めている最中である。

バルクの性質に関しては、トポロジカル絶縁体の性質を検証・利用するに堪える「理想的」トポロジカル絶縁体物質の開発と良質の単結晶や薄膜作製で、瀬川・安藤グループが世界的成果を連発したことが、本領域の目的達成に本質的貢献を成した。

(2)に関しては、超伝導体・超流動体でのトポロジカル・エッジ状態の状態密度を観測・確立することができ、トポロジカル量子現象の基本的検証を果たした。エッジ状態に伴う「エッジ流」の観測では、トポロジカル絶縁体へのスピン流注入で一定の成果が上がっている。しかしながら、トポロジカル超伝導体のエッジ電流、超流動体のエッジ質量流の初観測に関しては、研究努力にもかかわらず発見に至っていない。「エッジ流」の大きさがトポロジカルに保護された量子化量ではないことや、界面での散乱・減衰がおそらく決定的に大きいことが観測を妨げているのかもしれない。

エッジ状態に関して、超流動 $^3\text{He-A}$ 相の表面近傍のカイラリティの局所符号の観測に成功したことは、予想を上回る成果である。また、奇周波数ベアリング状態、アンドレーエフ束縛状態、近接効果などが、トポロジカル・エッジ状態と実は表裏一体のものであるとの認識が深まり、いくつかの厳密な関係式の導

出まで出来たことも予想を上回る成果といえる。

(3)に関しては、絶縁体・超伝導体・超流動体にわたり、**普遍的なトポロジカル・エッジ状態**を実証できた。特に $^3\text{He-B}$ 相の**ヘリカル・エッジ状態に伴う表面マヨラナ準粒子モード**の詳細な解明は、**独自性の高い世界的な成果**である。エッジ流観測の研究現状については上で述べた。

トポロジカル量子現象が当初予想を超える分野“Expansion”に至った最大の契機は、結晶格子の点群対称性、特に鏡映対称性に由来する新奇な**「トポロジカル結晶絶縁体」**の発見（予言はそれぞれ Fu (2011), Hsieh (2012)) であろう。予言を受けて、本領域ではいち早く SnTe でこれを実証した (Nature Physics, Sep. 2012; 公募研究の佐藤^キと計画研究の瀬川・安藤の共同研究成果)。当初の「トポロジカル物質の周期表」には結晶対称性は考慮されていなかったため、トポロジカル超伝導や超流動の分類にも同様の概念を適用することで、トポロジカル量子現象の適用範囲が一気に拡大した。この発展にも佐藤^昌をはじめとする本領域の理論家が世界的な貢献を果たした。

本領域の課題名にある**「対称性の破れとトポロジカル現象」**については、新学術開始時の認識では、「**時間反転対称性の破れ**」の有無により、量子ホール状態と量子スピンホール状態・トポロジカル絶縁体の2つの異なったトポロジカル状態が可能であること、更に超伝導・超流動状態も「時間反転対称性の破れ」の有無により、2つの種類のトポロジカル超伝導体・超流体に分類できることが知られていた。また、「**空間反転対称性**」の有無が、これらトポロジカル状態実現の指針を与えることが知られていた。本領域推進期間中に、様々な物質系でこれらの実証を成し遂げた。それとともに重要な新展開として、鏡映対称性など物質の結晶構造に起因する**「結晶群の対称性」**の有無が、新しいトポロジカル状態**「トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体」**を作り出すことが本領域の寄与も含めて予言・検証された。そして、より物質に即した形で、トポロジカル物質の理解が大きく進展した。

【2. 新学術領域としての運営面での目標と達成度】

【運営面での達成目標】

当初の計画は以下の通りであった:

総括班は領域代表者を中心に、各計画研究の代表者、および副代表者格の研究分担者から組織する。メンバーは**「総括班会議」**を毎年3回は開催するとともに、電子メール等で日常的に連絡を取り合う。

総括班の活動の軸として毎年の研究成果を報告する**「領域研究会」**を開催する。特にH24、H26年度には全体規模の**「学際的国際会議」**として開催する。さらにH23、H25年度には、若手研究者主体の小規模国際会議として**「若手国際会議」**を開催する。H25年度には韓国での開催を予定している。

本新学術領域の形成を強力に推進するための重要な方策として、分野横断的テーマについて、**「集中連携研究会」**を毎年数回以上開催する。これには公募研究の関連メンバーにも参加を要請する。

また独自の取り組みとして、**「若手相互滞在プログラム」**を運営する。これは大学院生や若手研究者が、領域に属する他大学の研究室に1-2週間滞在して、その分野の研究の日常を体験して広い視野を養うものである。領域の研究活動の広報誌として**「ニュースレター」**を冊子体で発行し、**「WEB 広報」**も行うと共に、領域メンバーにメールレターを配信して領域活動の情報交換を深める。

【領域運営面での達成度】

個々の研究の推進だけではなく、「新学術領域創成」のための連携を推進する取り組みは、ほぼ当初の計画通り忠実に行った。それらの取り組みは5年間を通じて、勢いが減衰することなく、むしろ加速的に実施できた。

(1) 総括班会議は16回、集中連携研究会は17回開催した。

(2) 東日本大震災に伴う様々な対応を行ったが、これについては「3」で述べる。

(3) 若手国際会議は第1回(H23年度)の運営経験を踏まえ、第2回(H25年度)は当初予定の韓国ではなく、沖縄で開催した。両方ともアジア太平洋物理学研究センター (APCTP 韓国) からの補助を得て共催した。

(4) 若手相互滞在プログラムは18件実施した。「10」でも述べるが、トポロジカル物質の周期表を拡張する画期的な研究成果も、この若手相互滞在プログラムから生まれた(「6」の論文 D③)。また、当初予定にはなかったが、海外プロジェクトとの連携が進んだため、カナダでの2回の国際研究会には、領域メンバーに加え、大学院生も合計7名派遣して、領域成果の海外発信に努めた。

(5) 公募研究と計画研究との連携を密にするため、当初予定では明確でなかった取り組みを実施した。前期は、公募研究者の計画発表会と成果発表会を総括班メンバーと合同で行った。後期は、各研究項目で開催の集中連携研究会にて、後期スタート時から領域の目的を共有できるようにした。成果発表については、毎年

の領域研究会での発表を必ず行ってもらったようにした。

(6) 領域 HP を充実させ、研究成果や様々なプログラムの実施報告も HP に掲載した。ニュースレターは計画通り、冊子体で 5 号まで毎回約 400 部印刷し、領域内外の研究者に郵送するとともに、HP にも PDF ファイルを掲載した。また、領域メンバーとの連絡は、各種のメールリスト宛てに頻繁に行った。この結果、当初計画していた定期的「メールレター」は不要になった。

【3. 計画項目ごとの目標と達成度】

以下に計画研究の項目ごとの研究の進展状況を記す。各成果の詳細は「5. 主な研究成果」で述べる。

【A01 の目標と達成度：時間反転対称性を破る超伝導体】

1. 計画していたこと

A01 班では、主に、カイラル p 波のスピント重項超伝導体としての実験的証拠の揃ったルテニウム酸化物とその共晶、および従来型 s 波超伝導体と強磁性体とのハイブリッド構造体を対象とした研究計画を立てた。特に、それらにおける (a) ベクトル秩序変数の方向、(b) 表面でのカイラル・エッジ電流、(c) 接合界面でのアンドレーエフ束縛状態、(d) 奇周波数超伝導状態と逆近接効果、をはじめとする新奇現象の基礎物性を解明し、他の物理系での現象とのアナロジーを追及することを目指した。より具体的には、以下のような計画があった。

- (1) Sr_2RuO_4 の単結晶を用いて、バルクの「カイラル超伝導状態」の理解を極める
- (2) Sr_2RuO_4 の微小結晶で、増強された表面「エッジ」効果によるトポロジカル量子現象を開拓する。
- (3) Sr_2RuO_4 と Ru 金属の共晶体などの接合系で、界面効果によるトポロジカル量子現象を開拓する。
- (4) 強磁性半導体を含む超伝導接合系で、奇周波数超伝導状態と逆近接効果の詳細を明らかにする。

2-1. 計画通り進んだこと

- (1) Sr_2RuO_4 の微小単結晶リングで半整数の量子磁束を観測した。
- (2) Sr_2RuO_4 の単結晶を用いた準粒子トンネル接合で、カイラル・エッジ状態を観測・確立した。(A 班内連係、D 班とも連携)
- (2) 奇周波数ペアリング状態とトポロジカル超伝導・超流動の密接な関係を理論的に明確にした。その結果、トポロジカル超伝導に伴う常磁性マイスナー効果の観測方法を提案した。
- (3) 共晶結晶体で、Ru 金属析出体とそれを取り囲む Sr_2RuO_4 との間で、カイラル超伝導特有の振舞を観測し、「トポロジカル接合」と名付けた。また、共晶の微細加工系で、時間反転対称性の破れを検証するいくつかの実験を行った。(A01 計画研究と公募研究の連携)
- (4) 従来型超伝導体 Nb と強磁性半導体 $p\text{-(In, Mn)As}$ との接合素子で、奇周波数対 (スピント重項 s 波) の近接効果で予想されるゼロバイアス・コンダクタンスピークを観測した。

2-2. 現在進行中、または方向転換したこと

- (1) Sr_2RuO_4 微小リング素子で HQV の再現と制御を進めている。(A 班内連携)
- (1) Sr_2RuO_4 のスピント重項超伝導性の証拠を強固にするスピント重項特有の現象を観測した。(B 班と連携) その一方で、磁場中での対破壊機構は未解明であるが、解明に向けての本質的実験事実が集積してきた (D 班公募研究と連携)
- (1) 超伝導の時間反転対称性の破れを観測するための低温での磁気光学カー効果の測定実験は、予算交付充足率との兼ね合いでスタートを断念した。

3. 予想を超えて進んだこと

- (1) UPt_3 の超伝導対称性が長年の解釈とは異なるという実験事実について、国際的コンセンサスを得るための検証を進めた。(A 班公募研究間および D 班計画研究・公募研究との連携)
- (4) Sr_2RuO_4 結晶の劈開面に、強磁性金属 SrRuO_3 のエピタキシャル薄膜が育成できた。この二層系接合で新奇なトポロジカル超伝導現象の研究を進めている。(A 班内及び A 公募研究との連携)

【B01 の目標と達成度：スピント重項超流体】

1. 計画していたこと

B01 の目的は、内部自由度を持つスピント重項 p 波超流動 ^3He の表面や界面における新奇量子現象の探求することである。主な研究の狙いは以下のとおりである。

- (1) カイラル超流動 $^3\text{He-A}$ 相の巨視的な「固有軌道角運動量」を決定する。

- (2) 超流動 ^3He -B 相の界面束縛状態とマヨラナ型準粒子励起を解明する。
- (3) エアロジェル界面で奇周波数クーパー対状態を生成し、観測する。
- (4) 超流動体でのアンドレーエフ表面束縛状態の理解を深める。また、バルク物質中での奇周波数超伝導の安定性の理論研究を進める。
- (5) 狭い平行平板間での新奇超流動相とエッジ質量流を実証する。
- (6) 狭い平行平板間のカイラル超流動 ^3He -A 相が示す半整数量子渦を探索する。

2-1. 計画通り進んだこと

- (1) について、公募研究(高木)との共同研究により超流動 ^3He -A 中の巨視的な「固有軌道角運動量」の存在を世界で初めて示し、超流動 ^3He 状態の発見以来の基本問題を解決した。(B 班内関係)
- (2) について、時間反転対称性が保たれている B 相表面でマヨラナコーンと呼ばれる分散関係を確立した。理論的に提唱されていた「バルク-エッジ対応」を示すトポロジカル超流動体であることが確定した。また、磁場下では時間反転対称性が破られてトポロジカルに保護されているマヨラナ励起状態が消失すると予想されており、その検証実験を進めている。(B 班内、及び D 班との連携)
- (3) について、スピン三重項 p 波超流体の近接効果領域でも奇周波数クーパー対が出現すると D 班から予想していた。新たに、B 相に接するエアロジェル界面にも奇周波数クーパー対が出現して帯磁率異常が起こると理論的に示された。実際、理論予想の温度域で帯磁率異常を観測し、超流動奇周波数クーパー対の存在を初めて示唆する結果を得た。(B 班内、および D 班との連携)
- (4) について、表面状態密度と奇周波数クーパー対振幅との厳密な関係を理論的に導いた。また、バルク物質にもマイスナー効果を示す奇周波数超伝導体が存在しうることを理論的に導いた。

2-2. 現在進行中、または方向転換したこと

- (5) について、エッジ質量流の検出方法ならびに平行平板間のシングルカイラルドメインの制御方法を検討したが、実験研究には至らなかった。継続して研究中である。
- (6) について、公募研究(中原、高木)の理論研究が進展し、狭い平行平板間の A 相での半整数量子渦の安定領域(磁場、回転)の存在と半整数量子渦対格子の形成、その場合の観測方法を示した。 ^3He での半整数量子渦の初観測に向けて実験を継続している。

3. 予想を超えて進んだこと

- (1) の研究体制として東大物性研究所の超低温回転実験装置をフル稼働できた。その結果、細い円筒容器内の量子渦状態を回転、磁場、温度で完全に制御できるようになり、量子渦状態が 3 種だけ存在することを明らかにした。この結果は理論計算とは定性的にも定量的にも一致せず、新しい知見を生んだ。(B 班内関係)
- (1) ^3He -A 相のクーパー対軌道角運動量による局所的カイラリティを、向きを含めて初めて観測した。また、佐々木(B 班公募)は、新しい磁気共鳴イメージングの方法で超流動 ^3He のテクスチャ構造を可視化した。

【C01 の目標と達成度: 空間反転対称性を破る量子流体】

1. 計画していたこと

C01 班では空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用 (SOI) が織り成す新奇なトポロジカル量子現象を、(a)空間反転対称性の破れた (Noncentrosymmetric, NCS) 超伝導体、(b)電場誘起表面超伝導体、(c)トポロジカル絶縁体、において以下について探究することを計画していた。

- (1) 空間反転対称性の破れた超伝導体の中で、特に $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$ の試料純良化と単結晶化を進め、NMR や比熱からスピン三重項秩序変数の決定に向けての基礎データを収集する。
- (2) 電気二重層によるキャリア注入の技術をさらに高め、 SrTiO_3 の電場誘起表面超伝導と酸素欠損ドーピングによるバルク超伝導との相違を浮き彫りにする。
- (3) $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ や Bi_2Se_3 のトポロジカル絶縁体としての物理特性を検証すると共に、それらの表面に超伝導を誘起する試みを進める。トポロジカル絶縁体と超伝導体・磁性体との接合素子の作製を行う。
- (4) 界面や接合を用いた実験により、トポロジカル絶縁体についての定量的な理解を進め、電場誘起スピン偏極反転など新奇なトポロジカル量子現象を実証する。
- (5) トポロジカル絶縁体の表面超伝導状態や NCS 超伝導体の量子渦芯の電子状態を測定し、マヨラナ型素励起を検証する。

2-1. 計画通り進んだこと

- (1) 空間反転対称性の破れた超伝導体でトポロジカル超伝導性を実証した。(C 班内、A 班との連携)

- (2) 上部臨界磁場の精密な磁場方向依存性が測定できるようになり、電場誘起表面超伝導の2次元性を検証した。また、新奇電場誘起超伝導体 KTaO_3 を発見した。(C 班内、および A 班との連携)
- (3) 初めて高バルク絶縁性をもつトポロジカル絶縁体である $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ の開発に成功した。
- (3) トポロジカル絶縁体を超伝導化した $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ が、トポロジカル超伝導性をもつことを発見した。(C 班と D 班との連携)
- (4) トポロジカル絶縁体の表面にスピンを注入して、ヘリカル・エッジ状態に由来するスピン-電流変換現象を観測した。(C 班計画研究と公募研究の連携)

2-2. 現在進行中、または方向転換したこと

- (1) 反転対称性のない超伝導体の良質単結晶育成は、世界的に困難に直面している。単結晶化できる例が少なく、詳しい物性解明を妨げている。本領域で導入した試料合成装置で探求を継続している。
- (5) 超伝導化したトポロジカル絶縁体の表面状態のマヨラナ準粒子の検証には至っていない。

3. 予想を超えて進んだこと

- (3) 「トポロジカル結晶絶縁体」が理論提唱されるや否や、 SnTe でそれを実証した。(C 班内連携)
- (3) トポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体をもとにした新超伝導体をいくつか発見し、さらに、それらのトポロジカル超伝導性を実験・理論両面から吟味した。(C 班内、および D 班との連携)
- (3) トポロジカル絶縁体の表面ディラック準粒子の新奇メカニズムによる質量獲得(ギャップ化)を発見した。(C 班内連携)

【D01-D04 の目標と達成度：トポロジカル凝縮系の理論】

1. 計画していたこと

非自明なエッジ・表面状態を持つ、超伝導・超流動系、ボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)、トポロジカル絶縁体の研究を通じて、異なる物理系に普遍的な物理を探求し、トポロジカル量子現象に関する凝縮系物理学の新概念の構築を目指す。対象とする主な系と研究の狙いは以下のとおりである。

- (1) 時間反転(空間反転)対称性の破れた超伝導体のエッジ状態と量子現象を解明する。
- (2) トポロジカル絶縁体やトポロジカル接合系における新奇現象を探求する。
- (3) 内部(スピン)自由度を持った BEC におけるトポロジカル励起、および、結び目や非可換量子渦のダイナミクスとその物性理解を深める。
- (4) 超流動における非自明な量子渦、マヨラナ型準粒子励起の研究を進める。
- (5) トポロジカル量子現象に内在する普遍的概念を構築し、その数理構造を解明する。

2-1. 計画通り進んだこと

- (2) 高温超伝導体や NCS 超伝導体には、カイラル、ヘリカルに次ぐ第三のエッジ状態である、「フラットバンド・エッジ状態」が表面に現れることを予言した。
- (3) BEC において、スピン 3 の系の新量子状態の分類、また複数のトポロジカル励起が存在する際の分類に成功した。
- (5) トポロジカル超流動体・超伝導体表面のアンドレーエフ束縛状態の数理構造を明らかにした。
- (5) マヨラナ・フェルミオンと奇周波数クーパーペアとの関係を明確にした。(A 班と連携) 奇周波数ペアの理解は深まり B 班の理論研究にも波及した。

2-2. 現在進行中、または方向転換したこと

- (1) 奇周波数ペアとトポロジカル超伝導の関係性をさらに明確にする過程である。
- (2) ワイル半金属の輸送現象・異常電磁応答現象に関する理論を模索している。

3. 予想を超えて進んだこと

- (1) 「トポロジカル結晶超伝導体」を提唱した。そして、A 班での実験に関わる Sr_2RuO_4 や UPt_3 への適用を明らかにした。
- (2) 超伝導トポロジカル絶縁体の超伝導状態に関する理論を展開した。(D 班内、及び C 班との連携)
- (2) 近藤絶縁体である SmB_6 が、実はトポロジカル絶縁体であるという指摘を受け理論計算を進めた。
- (4) 磁場中の $^3\text{He-B}$ 相は、磁場の大きさや方向によっては「対称性で保護されたトポロジカル相」となることを明らかにした。これにより、新しいタイプのトポロジカル量子相転移を予言した。
- (5) 結晶対称性を考慮したトポロジカル分類を進め、トポロジカル物質・トポロジカル量子現象への拡張に先鞭をつけた。トポロジカル物質の周期表の拡張という観点で目覚ましい成果である。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

【震災対応】

期間中の最大の不測の事態は、初年度の H23 年 3 月に起こった東日本大震災である。本領域では新学術の研究ミッションの成果を期限内に滞りなく進めるために、すぐに組織をあげて被災地の研究者に対して研究環境の復興支援を行った。A01 班からは、班を超えた共同研究を行っていた C 班の東北大メンバー（野島・上野）に対して、研究遂行に支障が出ぬよう、破損装置を買い替える補助を H22 年度予算で緊急的に行った。また A01 班内では京大の実験装置を使用するためにつくばの産総研から領域雇用の PD 研究者の滞在を受け入れた。B01 班の研究遂行の主力装置である東大物性研の回転超低温冷凍機は、機械的にしっかりしていたためか、幸いなことに被害がほとんどなかった。C01 班では被災した班員（野島）に対して、破損した装置を修理するために、H23 年度の配分額を当初予定より 170 万円増額した。D01 班では分担者佐藤（東大物性研）を名大に何度か招聘し共同研究を促進した。

震災に伴い、多くの学会・研究会の開催予定が変更になった。H22 年度には H23 年 3 月の物理学会（新潟大学）が中止になった。これに伴い同会期中に開催予定であった総括班会議は H23 年度になってから 4 月中旬に京大で開催した。5 月に東京で開催予定の「公募研究キックオフ研究会」も中止にせざるを得なかったが、これは 9 月の日本物理学会の会期前日に富山市で開催し、学術調査官にも臨席いただいて、公募代表者ほぼ全員による研究計画の発表会を行い、引き続き総括班会議も行った。H23 年度の「若手国際会議」は当初、関東地方で開催の予定であったが、海外からの交通や電力事情の見通しが不透明であったので、早期の段階で関西地方の開催に変更した。

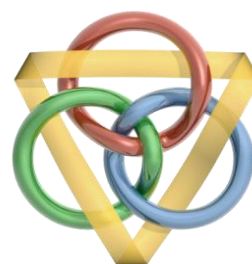
予算的には H23 年度の第一次交付金が 70% という緊急事態が発生した。人件費の確保のため、実験系では物品費が執行できなくなった例も多く発生した。これらに対しては、第 2 次で交付が復活した後、迅速に必要な物品を購入する等して対応できた。また特に理論系では大学院生の研究補助に対する謝金の縮小や、海外渡航・海外招へいの計画のキャンセルをせざるを得なかった。H24 年度になっていくつかの計画を復活実施したが、資金繰りに苦労した。なお上記の若手国際会議の開催はアジア太平洋物理学研究センター（APCTP 韓国）との共催で資金の追加確保ができていたために、最小限の影響で済んだ。

【新学術領域のゆるぎない構築のために】

発足時には、まだ萌芽的要素もあった「トポロジカル量子現象」を体系的に研究するのはかなり野心的な側面もあった。幸いなことに、我々の予見をも超えたその後の世界的な研究発展によって、当該テーマは現在の物理学研究において重要な課題と認識されるまでに成長した。その中で世界に先駆けて新学術領域開拓の視点で始動した本プロジェクトは、我が国の得意とするユニークな分野も取り込んだ独自性も発揮して、国際的にも一目置かれる先導的成果を挙げることができた（後述「11」のアドバイザーコメント）。

しかしその後、海外でも同様のプロジェクトが潤沢な予算措置のもとで展開されている。先発した本プロジェクトの成果を「新学術領域開拓」からさらに飛躍的發展につなげて、「確立」までゆるぎないものにするには、我が国のプロジェクトが世界に先駆けて解散してしまっただけでは問題である。

中間評価時の報告書では、制度上の改善策として、期限を迎える新学術領域研究の中から特に継続の有効性が認められるプロジェクトには 3 年間程度の継続予算を認めるような制度改革を切望する旨を記載した。実際、H26 年度から我々の切望を上回るような新学術領域研究の制度改訂が行われたことは、研究コミュニティーの一員として大変喜ばしい。この新制度の運用が実効化されることで、「新学術領域研究」の仕組みが我が国の学術の発展にさらに貢献できることを願ってやまない。



領域ロゴの意味するもの

三つの輪はそれぞれ計画研究 A, B, C を表し、異なる物質系での研究の連携を表現している。このボロメアの輪（ボロメアの輪、Borromean rings）を貫く 3 回ひねりのメビウスの帯（Möbius band）は計画研究 D を表し、個々の物質系を超えた概念の融合や普遍法則の探求を表現している。

4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ程度）

審査結果の所見及び中間評価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。

<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>

【審査結果の所見】

本研究領域は、量子位相の空間構造変化や時間変化に関連した物理現象の分野横断的研究から、その統一原理構築と新奇現象の発見・解明を目指すものである。例えば、量子ホール効果や、領域代表者自らが先導したスピン三重項超伝導をはじめとする多様な系の中で、個別的には量子位相の重要性が認識され始めている。まさに、時宜を得た研究領域の提案であり、我が国オリジナルのきわめて価値の高い研究成果が期待される。独立した理論系の計画研究とは別に、3つの実験系の計画研究を設け、それぞれに理論の専門家を配置するなど、強力なメンバーが、領域代表者の強いリーダーシップのもと、ダイナミックな相互作用を誘起しうる形で組織されている。若手の積極的な登用や相互滞在プログラムなど若手研究者の育成にも工夫がなされており、当該分野を担う次世代研究者の育成にも強い意志が感じられる。新しい着想による統一的な自然観が新規に構築される意義があり、まさに新学術領域研究にふさわしい。しかしながら、限られた個々の研究の集合から普遍概念を抽出し、愛昧な概念を具体化するための道筋は、現時点で必ずしも明確であるとは言い難い。5年という限定された研究期間内で、これを実現するにはメンバーが単に定期に集うだけでなく、領域代表者の強いリーダーシップのもと、学術的な目的意識を共有することが鍵となるので、そのための運営上の工夫を望む。

【指摘に対する対応】

個々の現象に現れるトポロジカル量子現象に横たわる普遍性は、確かに領域発足時の2010年時点ではあいまいな要素が大きかった。しかし幸いなことにこの5年間で、トポロジカル量子現象をめぐる学理は実に飛躍的に発展・深化した。そして、トポロジカル不変量の計算方法や、トポロジカル物質の分類と現実物質との対応付けにも具体化が進んだ。さらに、「トポロジカル結晶絶縁体」という新概念と実証を契機として、結晶構造の対称性に保護されたトポロジカルな超伝導・超流動状態の概念も生まれた。これらの学理形成と実証においても、本領域メンバーが多くの世界的成果を挙げた。

本領域では年次報告の「領域研究会」で集うだけでなく、「集中連携研究会」で複数の研究項目や物質系にまたがる共通のトポロジー概念に焦点を絞ってのテーマ研究会を10回近く開催した。これらの小研究会では、発表時間と質問時間を同じ程度設けることを基本とした。また、初年度の班内戦略会議数回を除いて、領域代表は全回出席し、各計画班代表者もほとんどに出席した。この取り組みによって、領域全体としての目的意識、そしてそれぞれの時点での最新成果と重要課題を共有することができた。また、毎年「領域研究会(うち2回は国際会議)」のプログラムでは、同様のトポロジカル量子現象(エッジ状態、半整数量子渦、奇周波数ペアリング、など)を扱う異なる系(超伝導と超流動など)に関する講演を意図的に同じセッションに組み込んで、概念融合が自然に進むように工夫した。このようなセッション構成は5年間、すべての会議や研究会で心がけた。その結果、領域メンバーの中で、概念融合型の学術領域を開拓する姿勢が強く根付いたと実感できた。

<中間評価で指摘を受けた事項への対応状況>

【中間評価：A+】

総合所見：当初計画を超えた全体的に内容のある成果が得られつつあり、計画研究、公募研究ともに極めて順調に進展している。共同研究についても着実な成果が認められ、広報や若手育成にも積極的に取り組むなど、意欲的な領域運営は高く評価できる。今後、他分野との連携を進め、本研究領域の成果の波及に努めることが期待される。更に「トポロジカル量子現象」としての普遍的概念の創出の捉え方、他分野への波及効果などに対する具体的なアプローチやゴールをより明確にしていくことが強く望まれる。

(a) 研究の進展状況：…。一方、「当該領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」としては、現時点ではまだ他領域への大きな波及効果を認めるにはいたっておらず、今後の進展に期待する。

(b) 研究成果：「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指す」としては、トポロジカル量子現象を中心概念とする新しい視点や手法が生まれてきていると評価することができ、今後この点のさらなる進展に期待する。一方で、「当該領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」としては、現時点では十分とは言えず、本研究領域の内容自

体がさらに大きく発展し、他領域にも大きな波及効果を及ぼすために、現実の生活に役立つようなデバイスあるいは物質材料を生み出すことに繋がり得る筋道をいくつか示すことも重要だと思われる。今後これまでの研究成果をさらに進展させ、広い領域でより大きなインパクトを持つ成果として結実させることが期待される。

(e) 今後の研究領域の推進方策： また「当該領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」としては、他の分野への波及、連携、領域全体としての方向性を一層意識し、専門外の人間にも分かるような具体性を示すことが望まれる。

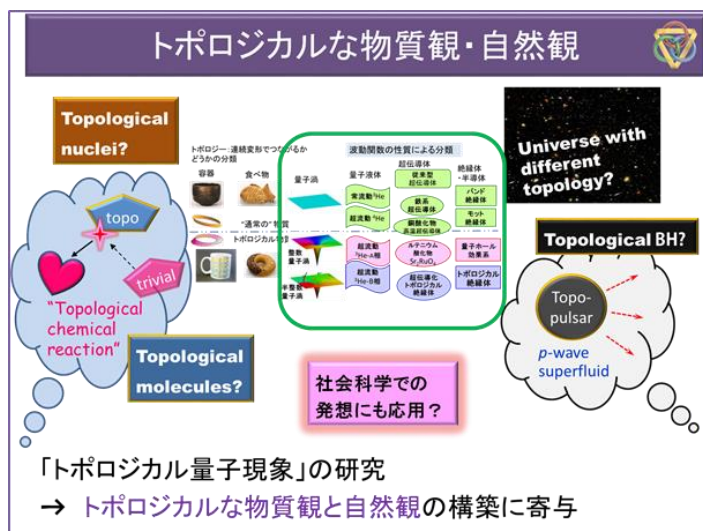
【指摘に対する対応】

高い評価をいただいた一方で、指摘の点はいずれも他分野の波及効果に関するものであった。

(a) 「他領域への波及効果」について、いくつかの例が出始めているといえる。「9」でも後述するが、超流動ヘリウムの渦に局在したギャップ状態と南部ゴールドストーンモードとの対応や、物性分野では珍しい3次元のスキルミオンを冷却原子系に導入するなど、素粒子分野での概念とトポロジカル量子現象の接続の試みがなされている。また、中性子星(パルサー)内部では、中性子のスピン三重項超流動が実現していると以前から予想されてきたが、実は中性子のトポロジカル超流動状態である可能性が高いことがわかった。すると、内核あるいはスピン一重項超流動の殻との界面に、これまで考慮されてこなかった「トポロジカル・エッジ状態」が存在するはずで、それに伴う冷却機構などの理解にも新たな展開が生まれる可能性が出てきた。これらの成果には、本領域公募D03研究代表者の新田の貢献が目覚ましい。

(b) 「デバイスとの関連」では、すでに携帯電話などで商品化もされている「相変化メモリー(iPCM)」の素子材料が、実はトポロジカル絶縁体と通常絶縁体の積層構造であることがわかった。応用上適した電気抵抗変化にトポロジカル界面状態が関係しているのかどうかは、まだ十分明らかではない。しかしながら、本領域の成果として瀬川・安藤のグループが同様の絶縁体積層構造の物質合成に成功しており、今後の研究展開に期待できる段階に到達した。

(c) 「他の分野への波及、連携」などに関しては、日本物理学会年次大会で物性領域と素粒子論領域との合同シンポジウムとして2012年の「多様な物質に現れる量子渦のダイナミクス」や2013年の「情報・量子物理・幾何の絡み合い」は新田らが企画提案したほか、前野(領域代表)は2013年の総合講演「トポロジカル物質」でトポロジカル量子現象を詳しく紹介した。また、2014年の第62回応用物理学会春季学術講演会のシンポジウム講演では前野(領域代表)と瀬川(C01分担者)が「トポロジカル量子現象の視点とトポロジカル超伝導」などについての講演を行い、トポロジカル量子現象について具体的に解説した。さらに前野は、第42回日本磁気共鳴医学会大会でも基調講演でトポロジカル量子現象について紹介した。



日本物理学会(2013)の総合講演や応用物理学会(2014)のシンポジウム講演で領域代表者が提唱した、「トポロジカル量子現象」のアプローチを物性物理学だけでなく、他分野にも広く適用できないか、という説明の概念図。

5. 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 ページ程度）

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。

新学術領域研究ならではの分野横断型・新分野開拓型の新領域創成研究活動を、総括班を中心に5年にわたってたゆまず活発に行った。本領域が新しい言葉を導入して提唱した「トポロジカル量子現象」は、その内容の実体がこの5年間で世界的にも広く認知されるものとなった。その中で、超伝導体・絶縁体だけでなく超流動体・冷却原子系も含めて、トポロジカル物質・現象を包括的に研究する比類のないプロジェクトを、世界に先駆けて推進した。

本新学術領域研究では当初の予想を超える成果も含む様々な研究成果を通じて、トポロジカル量子現象という新学術分野の開拓と発展に寄与した。成果の主な例を挙げると：

- 内部絶縁性の高いトポロジカル絶縁体の開発とトポロジカル表面状態の存在・特性の実証・確立
- 結晶対称性を取り入れてのトポロジカル物質の分類に関する理論展開と学理の深化；トポロジカル結晶絶縁体の実証
- トポロジカル超伝導・超流動体の表面状態の実証
- トポロジカル絶縁体に基づく超伝導体のトポロジカル超伝導性の実証
- 半整数磁束量子や奇周波数超伝導などトポロジカル超伝導・超流動に特有の新現象の発見と予言
- 空間反転対称性の破れた超伝導体でのパリティ混合や電場誘起表面超伝導など関連現象の研究推進
- 冷却原子系でのトポロジカル分類

などである。これらの成果の多くは、絶縁体、超伝導体、超流動体、冷却原子系などの既存分野を超えての、研究者間の活発な研究交流と概念クロスオーバーからもたらされた。

【研究項目 A01: 時間反転対称性を破る超伝導体】

前野・米澤・石田らはルテニウム酸化物のスピントリプル項カイラル超伝導状態を吟味する総説論文[A⑦]を発表した。これは既に100回以上引用されている。また柏谷・柏谷_裕はD班の田仲らと共同で、トポロジカル超伝導のトンネル分光の詳説論文を発表した[A④]。

他の計画研究との連携では、近接効果による奇周波数超伝導誘起のアナロジーで、B班では超流動³Heでの探求を行った。また、A班の低温実験技術を軸に、C班のテーマである電場誘起表面超伝導や反転対称性の破れた超伝導などでの共同研究で実績を挙げた。

(1) 超伝導接合でのトポロジカル表面状態の観測：

（柏谷、前野；田仲(D01代表)；柏谷_裕；齋藤(PD)）

トポロジカル超伝導性を検証する準粒子トンネル効果とジョセフソン効果の系統的理論を構築した。

Sr₂RuO₄ 単結晶と金とのトンネル接合作製技術を飛躍的に向上させ、準粒子トンネルスペクトルから、超伝導ギャップ内に広く分布するコンダクタンス・ピークの存在を確定的にした[A⑧]。これはカイラルエッジ状態の状態密度と解釈できる。

また、Nb とのジョセフソン接合素子では、クーパ対の軌道角運動量の向きの揃った「カイラルドメイン」の存在とその大きさが数ミクロン程度であることを明らかにした。

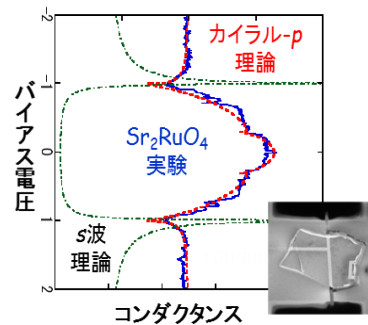


図 1: Sr₂RuO₄ と金の間でのトンネル接合によるカイラルエッジ状態に伴うギャップ内状態密度の観測[A⑧]。

(2) 半整数磁束量子の観測：

（前野；米澤、寺嶋、Anwar(PD)）

微小結晶リングの磁化測定から、電子対がスピンの内部自由度を持つときに可能となる半整数フラクソイド (HQF) を観測した[A⑨] (図 2)。HQF に伴う非可換統計性を検証するためのステップとして、HQF の制御が重要になる。そこで電流・電圧特性から HQF を生成・制御するための微小結晶リング素子の開発も進めた。

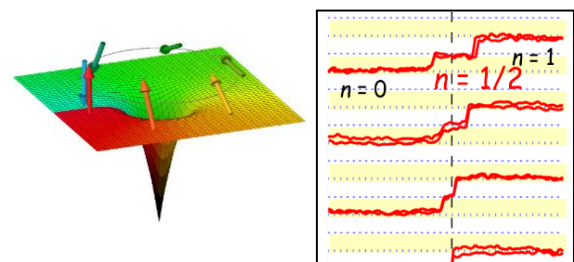


図 2: 半整数磁束量子の模式図と磁化測定による Sr₂RuO₄ 微小単結晶リングでの発見[A⑨]。

(3) Sr₂RuO₄ のバルク超伝導

（前野；石田、米澤；三宅(B01)）

NMR ナイトシフト[B②]や一軸性圧力効果など、スピン三重項ペアリングとトポロジカル超伝導性を決定づける新たな成果が生まれた。新機能ピエゾ装置で Sr₂RuO₄ の超伝導転移温度が、伸張・圧縮の両方で顕著に上昇する振舞を見出した[A③]。これは縮退 2 成分秩序変数の「カイラル超伝導」で説明出来る。その一方で、現在のシナリオでは説明できない問題点

の焦点を絞り込む研究深化も遂げた。RuO₂面に正確に平行な磁場の下での超伝導一次相転移を発見し[A⑥]、それに伴う熱力学量変化の定量化が進んだ。

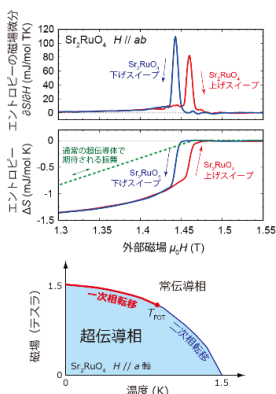


図 3: Sr₂RuO₄ の磁場が伝導面に平行な場合の超伝導-常伝導転移におけるエントロピー変化[A⑥]。エントロピーが臨界磁場において不連続な飛びを示す一次相転移が明らかになった。下図は本研究で明らかになった Sr₂RuO₄ の超伝導相図。

(4) トポロジカル超伝導に伴う常磁性マイスナー効果 (浅野)

奇周波数超伝導状態ではペア振幅が負になるため、マイスナー効果が正になるという基本的なパラドックスがあった。理論的にこれが正しいことを解明し、その効果を直接的に観測するための提案も行った。

また、トポロジカル超伝導に伴う奇周波数状態の常磁性応答に伴い、*d*波や*p*波超伝導体の微小円板では、低温で正味のマイスナー効果が正となることを予言した[A②]。Sr₂RuO₄ などでの実証が急がれる。

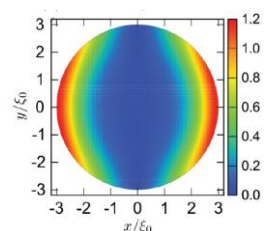


図 4: スピン三重項 *p* 波超伝導体の微小円板の両端に発現すると予想される奇周波数超伝導状態[A②]

(5) UPt₃ の超伝導対関数の再検討

(井澤(A01 公募)、水島(D01)、町田(D03 公募))

混合状態における熱伝導テンソル等の測定結果に基づき UPt₃ の超伝導対関数を再検討した。その結果、UPt₃ の超伝導が、これまで長らく支持されてきた E_{2u} 表現ではなく、E_{1u} 表現に属する *f* 波対であること、さらにこの対称性により四半世紀以上未解決であったいくつかの問題を自然に説明できることを見出した[A⑩]。また、この超伝導状態において、トポロジカル超伝導に特徴的なエッジ状態等を予言した。

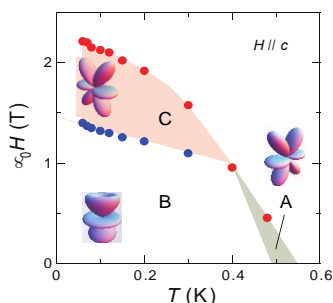


図 5: 熱伝導度測定によって明らかになった、スピン三重項超伝導体 UPt₃ の相図および超伝導波動関数[A⑩]。

【研究項目 B01: スピン三重項超流動体】

実験と理論との共同研究により、³He-B 相のマヨラナ型準粒子励起状態の存在を確固たるものにし[B④⑨]、A 相の「固有軌道角運動量」の存在の実証や局所カイラリティ観測の成功[B⑥]など、³He のトポロジカル物質としての基本問題を数多く解決した。

他の班との連携では、D01 班での奇周波数超伝導状態の理論研究に触発され、超流動 ³He の近接効果としての奇周波数対状態による帯磁率異常、および界面奇周波数対振幅と界面束縛状態の強い関連性を研究した[B⑤⑦⑧]。また A01 班での Sr₂RuO₄ での半整数フラクソイドの観測に誘発され、未発見の超流動 ³He の半整数量子渦を探索している[B③]。

(1) ³He-A 相での「固有軌道角運動量(IAM)」の観測

(石川、高木; 小原; 國松(PD))

超流動 ³He-A 相はすべてのクーパー対の軌道角運動量が同じ状態にある。軌道角運動量の大きさはクーパー対あたりプランク定数程度の微量であるが、全クーパー対(*N*/2 個)の角運動量が巨視的量となるかどうかは超流動 ³He に残された基礎的未解決問題「固有角運動量問題」である。石川らは、界面が重要となる細い円筒容器内に Mermin-Ho 型テクスチャーを安定に創出[B①]し、核磁気共鳴周波数の回転応答を調べた。その観測結果は、IAM があると仮定した場合の計算結果と良い一致を示した。これは巨視的軌道角運動量の存在を強く示す結果であり、積年の問題に終止符を打つものである(論文準備中)。



図 6: スピン波の共鳴周波数の回転角速度依存。丸は観測データ、青線は IAM の存在を仮定した数値計算結果。赤線は存在しないと仮定した計算結果。

(2) 超流動 ³He-B 相での表面マヨラナ型準粒子励起状態の実証とその磁気効果

(野村; 水島(D01))

野村らは超流動 ³He-B 相の横波音響インピーダンスに低エネルギーピークを観測した(下図の矢印)。詳細な研究から、超流動 ³He-B 相が真にトポロジカル超流動体であることを示す、表面マヨラナコーンの存在を実験的に確立した[B④⑨]。この成果は、トポロジカル超流動体の重要な性質であるバルク・エッジ対応を初めて示すものである。

また、音響インピーダンスの虚部が 0.13 T 以上の高磁場で、ある温度を境に低温側で急激に落ち込む

ことを見出した。これは理論で予言（以下 D(4)）されているように、磁場下で時間反転対称性が破れてトポロジカルに保護された表面マヨラナモードが消失し、その結果ゼロエネルギーギャップが出現するトポロジカル相転移現象と関連すると考えている。

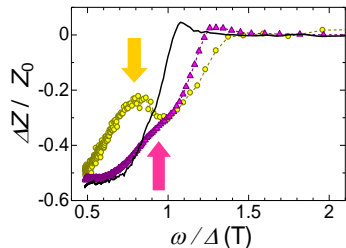


図 7: $^3\text{He-B}$ での音響インピーダンスのエネルギー依存性。実線・三角・丸印の順で壁の鏡面度が大きくなるにつれ、低エネルギーにピークが成長する。理論との比較から、このピークはマヨナラコーンに起因すると同定できる[B(4)]。

(3) 超流動 ^3He の表面アンドレーエフ束縛状態と奇周波数対状態

(石川、東谷、三宅；松尾(PD))

東谷らは、ゼロエネルギー状態密度と奇周波数対振幅との密接な対応関係を厳密に導いた。この関係は奇周波数対状態の「負の超流動密度」に起因する。一方、石川らは実験的に ^3He 表面での帯磁率の上昇を観測し、奇周波数対の存在を示した。

バルクで奇周波数超伝導が実現するには、遅延効果をもつペアリング相互作用を取り入れることが必要となる。三宅らは、ラグランジアンに基づくファイマンの経路積分の方法を用いることでマイスナー効果を示すバルク奇周波数超伝導体が存在できることを理論的に確立した。

(4) 超流動 $^3\text{He-A}$ 相カイラリティの局所符号の直接観測 (池上)

カイラル p 波超流動 $^3\text{He-A}$ 相において、電子バブルの軌道がクーパー対の軌道角運動量の向きに対し垂直方向に曲がるという性質を利用し、電子バブルによる電気伝導性の左右の非対称性から、液面近傍の A 相カイラリティの局所符号を初めて直接観測した[B(6)]。この実験は、固有角運動量の実験で調べられる「全体の大きさ」ではなく、固有角運動量の局所的な「正負符号」が直接得られる実験である。これはクーパー対の内部自由度を局所的に直接観測した画期的成果である。

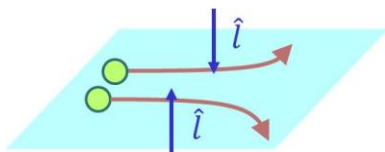


図 8: クーパー対の回転(青矢印は軌道角運動量)に起因するマグナス効果によって曲がる電子バブルの軌道(赤曲線)[B(6)]。

【研究項目 C01: 空間反転対称性を破る量子流体】

トポロジカル絶縁体の現状を網羅した安藤による

総説[C(4)]は発表後好評を博し、すでに 120 回程度引用されている。

公募研究者(佐藤_幸、安藤_裕、塩見)らと瀬川・安藤らとの共同研究により、トポロジカル絶縁体の物性解明[C(14)(15)]やスピン注入[C(12)(13)]などで高い実績を挙げた。空間反転対称性の破れた超伝導体の研究では、A 班(前野)及び D 班(小口)との連携により成果を上げた。また、電場誘起表面超伝導に関して、 KTaO_3 で新たに超伝導を発見し[C(11)]、 SrTiO_3 では A 班(前野)と共同で二次元超伝導性を実証した[C(2)]。

(1) ドープしたトポロジカル絶縁体で実現するトポロジカル超伝導

(瀬川、鄭；安藤；田仲(D01)、佐藤(D01)、水島(D01)；山影(PD))

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 に Cu を挿入した $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の超伝導状態で、トンネル分光実験からエッジ状態の存在を明らかにした[C(8)]。この結果は、トポロジカル超伝導性を強く示唆する。また、この物質の NMR 測定でスピン磁化率の異方性を発見し、クーパー対がスピン三重項状態にあることを明らかにした。また、D01 班の田仲・佐藤・水島・山影(PD)は瀬川・安藤らの協力のもと、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ がエッジ状態をもつトポロジカル超伝導体であることを理論的に示した[D(8)](下図)。

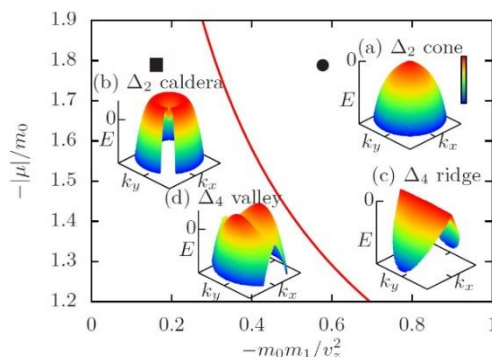


図 9: 超伝導トポロジカル絶縁体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ における新たなアンドレーエフ束縛状態[D(8)]

(2) 高バルク絶縁性の理想的トポロジカル絶縁体の開発 (瀬川；安藤陽；佐藤_幸(公募))

バルクの絶縁性が高く、導電性が表面状態で支配される「理想的トポロジカル絶縁体」として扱える物質 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ の開発に世界に先駆けて成功し[C(10)]、佐藤_幸らの共同研究により、表面状態によるスピン分極の観測に成功した。さらに、 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の系統的組成調整によって表面状態の抽出観測に適したトポロジカル絶縁体を開発した[C(10)]。

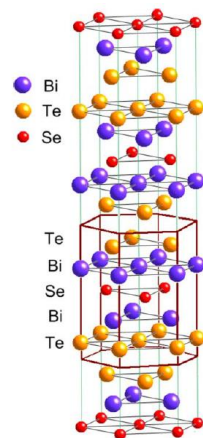
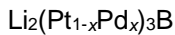


図 10: $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ の結晶構造[C(10)]。

また、佐藤^幸らは瀬川・安藤らとの共同研究で、種々のトポロジカル絶縁体とその関連物質における高分解能スピン分解角度分解光電子分光 (ARPES) 実験によってフェルミ準位近傍の電子構造を決定し、新型トポロジカル物質の発見やディラックコーン表面状態の制御に成功した。とりわけ $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ では、 $x = 0.5$ におけるトポロジカル量子相転移を見出し、トポロジカル相において、これまでの常識を覆して、時間反転対称性を明示的に破らなくてもディラック電子が質量を獲得することを初めて明らかにした[C15]。

(3) 空間反転対称性の破れた(NCS) 超伝導体



(鄭、稲田; 俣野; 前野(A01)、米澤(A01))

表題物質系においてNMR測定(下図)、結晶構造解析及びバンド計算から、 $x > 0.8$ ではPt(Pd)B₆八面体の歪みが急激に増大した結果、スピン軌道相互作用が急激に増大することを見出した[C5]。これにより、結晶の歪みが反対称スピン軌道相互作用を最も効果的に制御するという知見が得られ、BiPd, LaPtSiなど他のNCS超伝導体の特性も説明できた[C4]。また、A01班との共同研究も行った。さらに、空間反転対称性の破れが報告されていた LaPt_2Ge_2 の結晶構造や電子状態を小口(D01連携)らと明らかにし、超伝導転移温度を約4倍上昇させることに成功した。

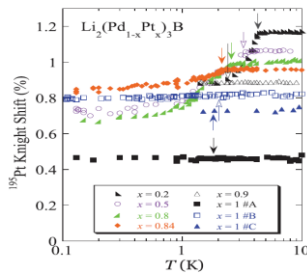


図 11: $\text{Li}_2(\text{Pt}_{1-x}\text{Pd}_x)_3\text{B}$ におけるナイトシフトの温度依存性。矢印は超伝導転移温度を示す[C5]。

(4) トポロジカル結晶絶縁体の発見

(佐藤^幸(C01公募)、安藤、瀬川)

40年以上前から研究されている半導体 SnTe が、時間反転対称性によって保護された表面状態をもつ通常のトポロジカル絶縁体とは異なり、結晶の鏡映対称性によって保護された表面状態(図)をもつ新しい種類のトポロジカル物質「トポロジカル結晶絶縁体」であることを世界に先駆けて明らかにした[C14]。

さらに、ドーピングによって超伝導が発現し、トポ

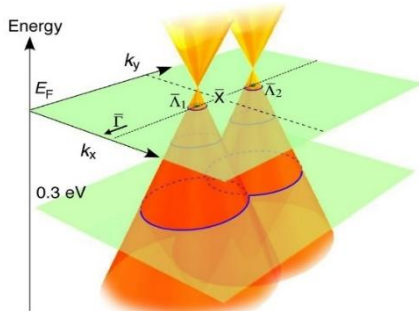


図 12: ARPES で決定したトポロジカル結晶絶縁体 SnTe の二重ディラックコーン[C14]。

ロジカル超伝導性を示すことを明らかにした[C7]。

(5) トポロジカル絶縁体の表面状態

MBE装置で Bi_2Se_3 の純良超薄膜試料を作製し、表面状態ではトポロジカルな起源によって伝導チャンネルが保護されていることを示す現象を観測した[C7](下図)。その後、表面状態の移動度低下を避けるため、ゲーティングによって電子状態を制御する技術の開発に成功している[C1]。

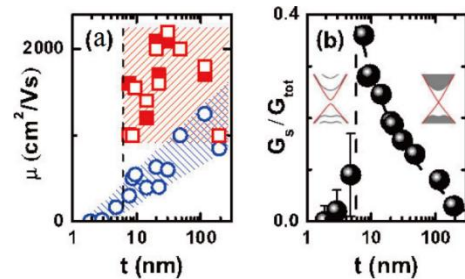


図 13: Bi_2Se_3 薄膜の(a)易動度、(b)表面伝導度、の膜厚依存性[C7]。

(6) トポロジカル絶縁体へのスピン流注入

(塩見(C01公募)、安藤^裕(C01公募)、瀬川、安藤、野村^健(D04公募);Yang(PD))

トポロジカル絶縁体表面状態のスピン트로ニクス応用を目指し、強磁性体を接合したトポロジカル絶縁体において、スピントロニクスの観点からトポロジカル絶縁体表面状態のスピン流物理の研究を行った。スピンポンピングと呼ばれる強磁性共鳴を利用した手法を用い、強磁性体からトポロジカル絶縁体にスピンを注入することで、表面状態のスピン-軌道ロッキングに由来するスピン-電流変換現象を観測した[C12]。また、電気的手法を用いて表面状態のスピン流を検出・制御することにも成功した[C13]。

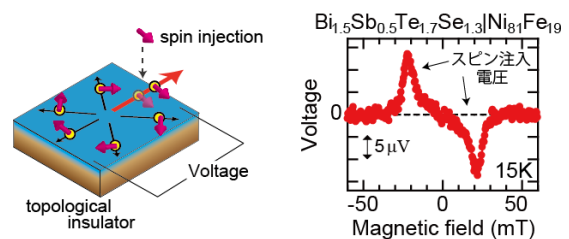


図 14: スピン注入(左)によってトポロジカル絶縁体表面に生じるスピン注入電圧の観測(右) [C12]。

【D01-D04:トポロジカル凝縮系の理論】

奇周波数超伝導とアンドレーエフ束縛状態、トポロジカル超伝導については田仲、佐藤^昌、永長が 2012 年に総説記事を發表したが、すでに 100 件以上引用されている[D9]。トポロジカル相の分類に関しては、佐藤^昌らが従来の周期表を拡張して位数 2 の結晶対称性によって守られたトポロジカル相の分類が完全に与えられることを明らかにした[D7]。

他の計画研究との連携の例をあげると、C 班とはドーブしたトポロジカル絶縁体で発現する超伝導について、A 班とは奇周波数電子対・カイラル超伝導体についての共同研究を行った。公募研究 D02-D04 は、トポロジカル量子現象全般にわたり A、B、C 班と連携を取りながら遂行した。成果の例として、ボーズ・アインシュタイン凝縮体 (BEC) における 3 次元スキルミオンの研究 (B 班との連携)、局所的反転対称性の破れた系のパリティ混成効果の超伝導の理論研究 (C 班との連携) などがあげられる。

(1) フラットバンド・エッジ状態

(佐藤^昌、田仲)

銅酸化物超伝導体や反転対称性の破れた超伝導体で現れる零エネルギー・アンドレーエフ束縛状態が、トポロジカル不変量と結び付く「フラットバンド・エッジ状態」であることを明らかにした[D⑫]。これにより、よく知られていたカイラル、ヘリカルに加えて、フラットバンドという第 3 番目のエッジ状態が明確に定義できた。また、「非従来型超伝導」の多くは「トポロジカル超伝導」に分類できるという可能性が開けた[D⑫⑬]。

(2) トポロジカル結晶超伝導体の理論

(佐藤^昌、田仲、水島)

エネルギーギャップ関数の鏡面変換の性質によって、エッジのギャップレス状態がマヨラナ・フェルミオンになるか、ディラック・フェルミオンになるかを識別できることを示し、この理論を Sr₂RuO₄ や UPt₃ へ応用した[D④⑤]。

(3) トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類理論

(佐藤^昌)

結晶対称性によって守られたトポロジカル相であるトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の研究を進め、鏡映対称性、2 回回転対称性、空間反転対称性など 2 回の操作で元に戻る位数 2 の結晶対称性によって守られたトポロジカル相の分類を完全に与えることに成功した[D③]。これにより、トポロジカル物質の周期表を拡張することができた。

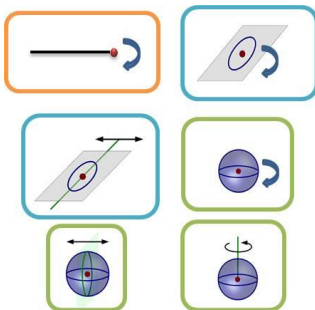


図 15: 位数 2 の結晶対称性をもつトポロジカル物質の分類[D③]。

(4) 超流動ヘリウム 3 のトポロジカル量子相転移

(水島・佐藤^昌)

³He-B 相に磁場が存在するとき、その方向によって

「対称性によって守られたトポロジカル相」が存在することを明らかにした (下図)。また、対称性の自発的破れとトポロジカル相転移が同時に起こる臨界磁場の存在を定量的に示した。

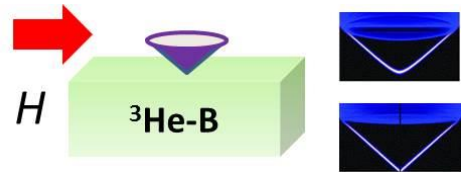


図 16: ³He-B 表面アンドレーエフ束縛状態の磁場制御による量子相転移。

(5) 奇周波数クーパーペアとトポロジカル超伝導

(田仲、浅野(A01))

田仲、浅野 (A01 班) は、s 波超伝導体の上に乗せたナノワイヤーの両端に、近接効果によってマヨラナ型準粒子励起が存在するときには、奇周波数クーパー対が必ず存在することを明らかにした[D⑥]。これはスピン三重項 p 波超伝導体接合で 10 年前から知られている異常近接効果と本質は同一である。

(6) スピノール・ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) とトポロジー

(上田; 川口)

上田、川口は、BEC の基底状態、定常状態をマヨラナ表示と対称性を用いることで系統的に求めた[D⑪]。この方法によりスピン 3 の BEC に新量子状態が存在することを明らかにした。また、複数のトポロジカル励起が共存した場合の分類も行なった[D⑩]。図書④の第 12 章でも総説を発表した。

(7) BEC における 3 次元スキルミオンの実現

(新田 (D01 公募)、水島、町田 (D01 公募))

スキルミオンは、素粒子論において陽子や中性子などの核子を記述するモデルとして提案された。新田、水島、町田のグループは、2 成分の冷却原子気体 BEC において、SU(2) の非可換ゲージ場を入れると、3 次元スキルミオンが基底状態として安定に実現されることを見出した[D⑦]。その後、ごく最近になって十倉らによって、磁性体でも 3 次元スキルミオンが見つかったので、BEC のスキルミオンとの比較をすることで、スキルミオンの物理が発展することが期待される。

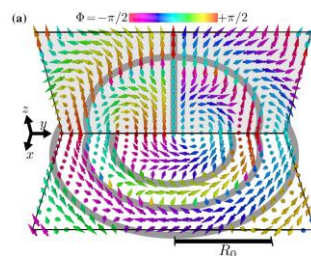


図 17: 3 次元スキルミオンのテクスチャー構造。色は波動関数の位相を表し、矢印はスピンを表す。[D⑦]

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

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。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。また、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。また、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。

(1) 研究成果の公表(雑誌論文・学会発表・図書)

〔雑誌論文〕(計 451 件) *すべて査読あり
被引用数は 2015 年 6 月 14 日 Web of Science より。
査読公表論文の全リストは HP に掲載：
<http://www.topological-qp.jp/achievements/index.html>

【A01】(計画研究)

- ① "Ferromagnetic SrRuO₃ thin-film deposition on a spin-triplet superconductor Sr₂RuO₄ with a highly conducting interface", *M. S. Anwar, Y. J. Shin, S. R. Lee, S. J. Kang, Y. Sugimoto, S. Yonezawa, T. W. Noh, Y. Maeno, Applied Physics Express **8**, 015502-1-5 (Dec. 2014), DOI: 10.7567/APEX.8.015502 【Sr₂RuO₄・強磁性体接合の高品質界面の作成】
- ② "Paramagnetic instability of small topological superconductors", S. Suzuki, Y. Asano, Physical Review B **89**, 184508-1-7 (May. 2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.89.184508 【トポロジカル超伝導・奇周波数ペアによる常磁性不安定性の理論】
- ③ "Strong Increase of T_c of Sr₂RuO₄ Under Both Tensile and Compressive Strain", *C. W. Hicks, D. O. Brodsky, E. A. Yelland, A. S. Gibbs, J. A. N. Bruin, M. E. Barber, S. D. Edkins, K. Nishimura, S. Yonezawa, Y. Maeno, *Andrew P. Mackenzie, Science **344**, 283-286 (Apr. 2014), DOI: 10.1126/science.1248292 【一軸ひずみによる Sr₂RuO₄ 超伝導転移温度上昇効果の実験】
- ④ "Tunneling spectroscopy of topological superconductors", *S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, K. Saitoh, Y. Mawatari, Y. Tanaka, Physica E **55**, 25-29 (Jan. 2014), DOI: 10.1016/j.physe.2013.07.016 【トポロジカル超伝導体のトンネル効果に関する詳細報告】
- ⑤ "Anomalous switching in Nb/Ru/Sr₂RuO₄ topological junctions by chiral domain wall motion", *M. S. Anwar, T. Nakamura, S. Yonezawa, M. Yakabe, R. Ishiguro, H. Takayanagi, & Y. Maeno, Scientific Reports **3**, 2480-1-6 (Aug. 2013), DOI: 10.1038/srep02480 【カイラルドメイン操作によるトポロジカル接合の制御】
- ⑥ "First-Order Superconducting Transition of Sr₂RuO₄", S. Yonezawa, T. Kajikawa, Y. Maeno, Physical Review Letters **110**, 077003-1-5 (Feb. 2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.077003 【Sr₂RuO₄ の磁場下一次相転移の発見。被引用数 22】
- ⑦ "Evaluation of Spin-Triplet Superconductivity in Sr₂RuO₄", *Y. Maeno, S. Kittaka, T. Nomura, S.

Yonezawa, K. Ishida, Journal of the Physical Society of Japan **81**, 011009-1-29 (Jan. 2012), DOI:

10.1143/JPSJ.81.011009 【2003 年以降の Sr₂RuO₄ の研究成果を網羅するレビュー論文。被引用数 105】

- ⑧ "Edge States of Sr₂RuO₄ Detected by In-Plane Tunneling Spectroscopy", S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, H. Kambara, T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, Y. Maeno, Physical Review Letters **107**, 077003-1-4 (Aug. 2011), DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.077003 【Sr₂RuO₄ のエッジをトンネル分光により観察し、カイラル・エッジ状態の形成、およびトポロジカル超伝導性を確認した。被引用数 54】
- ⑨ "Observation of half-height magnetization steps in Sr₂RuO₄", J. Jang, D.G. Ferguson, V. Vakaryuk, *R. Budakian, S.B. Chung, P.M. Goldbart, Y. Maeno, Science **311**, 186-188 (Jan. 2011), DOI: 10.1126/science.1193839 【Sr₂RuO₄ における半整数磁束状態を実験的に確定し、トポロジカル超伝導性を確認した。被引用数 67】

(公募研究)

- ⑩ "Pairing Symmetry of UPt₃ Probed by Thermal Transport Tensors", *K. Izawa, Y. Machida, A. Itoh, Y. So, K. Ota, Y. Haga, E. Yamamoto, N. Kimura, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, K. Machida, Journal of Physical Society of Japan **83**, 061013-1-8 (May. 2014), DOI: 10.7566/JPSJ.83.061013 【熱伝導の実験により UPt₃ のトポロジカル超伝導性を確認した】

【B01】(計画研究)

- ① "Manipulating textures of rotating superfluid ³He-A phase in a single narrow cylinder", *T. Kunimatsu, H. Nema, R. Ishiguro, M. Kubota, T. Takagi, Y. Sasaki, and O. Ishikawa, Physical Review B **90**, 214525-1-6 (Dec. 2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.90.214525 【細い円筒容器内の A 相量子渦状態を確定した実験】
- ② "Theory of Pairing Assisted Spin Polarization in Spin-Triplet Equal Spin Pairing: Origin of Extra Magnetization in Sr₂RuO₄ in Superconducting State" *K. Miyake, Journal of Physical Society of Japan **83**, 053701-1-4 (May. 2014), DOI: 10.7566/JPSJ.83.053701 【Sr₂RuO₄ の超伝導相内での磁化増大をスピン三重項特有の現象として説明した理論】
- ③ "Multiple half-quantum vortices in rotating superfluid ³He", *M. Nakahara and T. Ohmi, Physical Review B

89, 104515-1-5 (Mar. 2014), DOI:

10.1103/PhysRevB.89.104515 【トポロジカル超流動³Heの半整数量子渦格子の理論】

- ④ "Surface Majorana Cone of the Topological Superfluid ³He B phase", *[R. Nomura](#), S. Murakawa, M. Wasai, K. Akiyama, T. Nakao, and Y. Okuda, *Physica E* **55**, 42-47 (Jan. 2014), DOI: 10.1016/j.physe.2013.06.006 【超流動³He-B相がトポロジカル超流動であることを示した実験】
- ⑤ "Magnetic Response of Odd-Frequency s-Wave Cooper Pairs in a Superfluid Proximity System", [S. Higashitani](#), [H. Takeuchi](#), S. Matsuo, Y. Nagato, and K. Nagai, *Physical Review Letters* **110**, 175301-1-5 (Apr. 2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.175301 【近接効果としての奇周波数クーパー対の磁気応答の理論。被引用数9】
- ⑥ "Chiral symmetry breaking in superfluid ³He-A", *[H. Ikegami](#), Y. Tsutsumi, and K. Kono, *Science* **341**, 59-62 (Jul. 2013) DOI: 10.1126/science.1236509 【³He-A相の局所的カイラリティを初めて実験的に示した。被引用数9】
- ⑦ "Enhancement of magnetization in liquid ³He at aerogel interface", A. Fukui, K. Kondo, C. Kato, [K. Obara](#), H. Yano, [O. Ishikawa](#) and T. Hata, *Journal of Low Temperature Physics* **171**, 245-250 (Jun. 2013), DOI: 10.1007/s10909-012-0838-6 【帯磁率測定により奇周波数クーパー対の存在を示す結果を得た】
- ⑧ "Odd-frequency Cooper pairs and zero-energy surface bound states in superfluid ³He", [S. Higashitani](#), S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, S. Murakawa, [R. Nomura](#), and Y. Okuda, *Physical Review B* **85**, 024524-1-5 (Jan. 2012), DOI: 10.1103/PhysRevB.85.024524 【超流動³Heの表面束縛状態密度と奇周波数対振幅との同等性を明らかにした。被引用数15】
- ⑨ "Surface Andreev bound states of Superfluid ³He-B phase", *[R. Nomura](#), S. Murakawa, Y. Wada, Y. Tamura, M. Wasai, K. Akiyama, M. Saito, Y. Aoki, Y. Okuda, *Physica E* **43** 718-721 (Jan. 2011), DOI: 10.1016/j.physe.2010.07.037 【超流動³He-B相の表面束縛状態の存在を示した実験】

【C01】(計画研究)

- ① "Top gating of epitaxial (Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃ topological insulator thin films", F. Yang, A. A. Taskin, S. Sasaki, [K. Segawa](#), Y. Ohno, K. Matsumoto and *[Y. Ando](#), *Applied Physics Letters* **104**, 161614 (Apr. 2014), DOI: 10.1063/1.4873397 【トポロジカル絶縁体薄膜のトップゲート制御】
- ② "Effective thickness of two-dimensional superconductivity in a tunable triangular quantum well of SrTiO₃", *[K. Ueno](#), [T. Nojima](#), [S. Yonezawa](#), M. Kawasaki, [Y. Iwasa](#), [Y. Maeno](#), *Physical Review B* **89**, 020508-1-5, (Jan. 2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.89.020508 【電場誘起表面超伝導

体の厚みの評価】

- ③ "Topological Insulator Materials", *[Y. Ando](#), *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 102001-1-32 (Sep. 2013), DOI: 10.7566/JPSJ.82.102001 【トポロジカル絶縁体の現状を網羅した標準的総説。被引用数121】
- ④ "NMR and NQR Studies on Non-centrosymmetric Superconductors Re₇B₃, LaBiPt, and BiPd", *[K. Matano](#), S. Maeda, H. Sawaoka, Y. Muro, T. Takabatake, B. Joshi, S. Ramakrishnan, K. Kawashima, J. Akimitsu, [G-q. Zheng](#), *Journal of the Physical Society of Japan* **82**, 084711-1-5, (Jul. 2013), DOI: 10.7566/JPSJ.82.084711 【新規に発見された空間反転対称性の破れた超伝導体の物性解明】
- ⑤ "Abrupt enhancement of noncentrosymmetry and appearance of a spin-triplet superconducting state in Li₂(Pd_{1-x}Pt_x)₃B beyond x=0.8", S. Harada, J. J. Zhou, Y. *G. Yao, [Y. Inada](#), *[G-q. Zheng](#), *Physical Review B* **86**, 220502(R)-1-5, (Dec. 2012), DOI: 10.1103/PhysRevB.86.220502 【反対称スピン軌道相互作用の増強方策の発見及び空間反転対称性の破れた物質におけるスピン三重項超伝導出現条件の解明】
- ⑥ "Odd-Parity Pairing and Topological Superconductivity in a Strongly Spin-Orbit Coupled Semiconductor", S. Sasaki, Z. Ren, A. A. Taskin, [K. Segawa](#), *L. Fu, *[Y. Ando](#), *Physical Review Letters*, **109**, 217004-1-5, (Oct. 2012), DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.217004 【超伝導トポロジカル結晶絶縁体が奇パリティであることを示した実験。被引用数34】
- ⑦ "Manifestation of Topological Protection in Transport Properties of Epitaxial Bi₂Se₃ Thin Films", A. A. Taskin, S. Sasaki, [K. Segawa](#), *[Y. Ando](#), *Physical Review Letters* **109**, 066803-1-5, (Aug. 2012), DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.066803 【トポロジカル絶縁体薄膜における表面伝導の実験。被引用数107】
- ⑧ "Topological Superconductivity in Cu_xBi₂Se₃", S. Sasaki, M. Kriener, [K. Segawa](#), K. Yada, [Y. Tanaka](#), [M. Sato](#), *[Y. Ando](#), *Physical Review Letters* **107**, 217001-1-5, (Nov. 2011), DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.217001 【3次元トポロジカル超伝導体の発見。被引用数167】
- ⑨ "Optimizing Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y solid solutions to approach the intrinsic topological insulator regime", Z. Ren, A.A. Taskin, S. Sasaki, [K. Segawa](#), [Y. Ando](#), *Physical Review B* **84**, 165311-1-6, (Oct. 2011), DOI: 10.1103/PhysRevB.84.165311 【バルク絶縁性の高いトポロジカル絶縁体の作成。被引用回数74】
- ⑩ "Discovery of superconductivity in KTaO₃ by electrostatic carrier doping", [K. Ueno](#), S. Nakamura, H. Shimotani, H. T. Yuan, N. Kimura, [T. Nojima](#), H. Aoki, [Y. Iwasa](#), *M. Kawasaki, *Nature Nanotechnology* **6**, 408-412, (Jul. 2011), DOI: 10.1038/nnano.2011.78 【電場誘起キャリアドーピングで初めて誘起されるKTaO₃での超伝導の発見。被引用回数91】
- ⑪ "Large Bulk Resistivity and Surface Quantum Oscillations in the Topological Insulator Bi₂Te₂Se" Z.

Ren, A.A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa and *[Y. Ando](#), Physical Review B **82**, 241306-1-4 (Dec. 2010), DOI: 10.1103/PhysRevB.82.241306 【バルク絶縁性を持つ最初のトポロジカル絶縁体の発見を報告した記念碑的論文。Editors' suggestion, 米国物理学会のオンライン雑誌 Physics で紹介される。被引用回数 202】

(公募研究)

⑫◎"Spin-Electricity Conversion Induced by Spin Injection into Topological Insulators" [Y. Shiomi](#), K. Nomura, Y. Kajiwara, K. Eto, M. Novak, [K. Segawa](#), [Y. Ando](#), E. Saitoh, Physical Review Letters **113**, 196601-1-5 (Nov. 2014), DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.196601 【トポロジカル絶縁体表面 Dirac 電子のみを使ったスピン注入の実現】

⑬◎"Electrical Detection of the Spin Polarization Due to Charge Flow in the Surface State of the Topological Insulator $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ " *[Y. Ando](#), T. Hamasaki, T. Kurokawa, K. Ichiba, F. Yang, M. Novak, S. Sasaki, [K. Segawa](#), *[Y. Ando](#), *M. Shiraiishi, Nano Letters **14**, 6226-6230 (Oct. 2014), DOI: 10.1021/nl502546c 【トポロジカル絶縁体表面でのスピン分極の検出】

⑭" Experimental realization of a topological crystalline insulator in SnTe " [Y. Tanaka](#), Z. Ren, *[T. Sato](#), K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, [K. Segawa](#), *[Y. Ando](#), Nature Physics **8**, 800–803 (Sep. 2012), DOI:10.1038/nphys2442 【トポロジカル結晶絶縁体のはじめての実証。被引用数 139】

⑮"Unexpected Mass Acquisition of Dirac Fermions at the Quantum Phase Transition of a Topological Insulator" *[T. Sato](#), [K. Segawa](#), K. Kosaka, S. Souma, K. Nakayama, K. Eto, T. Minami, *[Y. Ando](#) and T. Takahashi, Nature Physics **7**, 840-844 (Aug. 2011), DOI: 10.1038/nphys2058 【トポロジカル絶縁体表面のディラック電子の未知のメカニズムによる質量獲得の発見。画像が Nature Physics 誌の表紙に採用される。科学新聞にて紹介される。被引用回数 65】

【D01-04】(計画研究)

①"Crossed surface flat bands of Weyl semimetal superconductors", Bo Lu, K. Yada, [M. Sato](#), and [Y. Tanaka](#), Physical Review Letters **114**, 096804-1-5 (Mar. 2015), DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.096804 【クロス型アンドレーエフ束縛状態の予言】

②"Dirac-fermion-induced parity mixing in superconducting topological insulators", [T. Mizushima](#), A. Yamakage, [M. Sato](#) and [Y. Tanaka](#), Physical Review B **90**, 184516-1-11 (Nov. 2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.90.184516 【トポロジカル絶縁体表面状態によるパリティ混成効果と異常な近接効果の理論】

③"Topology of crystalline insulators and superconductors", K. Shiozaki and [M. Sato](#), Physical Review B **90**, 165114-1-41 (Oct. 2014), DOI: 10.1103/PhysRevB.90.165114 【位数 2 の点群によるト

ポロジカル物質の分類の理論。被引用数 14】

④"UPT₃ as a Topological Crystalline Superconductor", *[Y. Tsutsumi](#), M. Ishikawa, T. Kawakami, [T. Mizushima](#), [M. Sato](#), M. Ichioka, and [K. Machida](#), Journal of the Physical Society of Japan **82**, 113707-1-5 (Oct. 2013), DOI: 10.7566/JPSJ.82.113707 【トポロジカル結晶超伝導体としての UPT₃ の理論】

⑤"Symmetry-Protected Majorana Fermions in Topological Crystalline Superconductors: Theory and Application to Sr_2RuO_4 ", [Y. Ueno](#), A. Yamakage, [Y. Tanaka](#) and *[M. Sato](#), Physical Review Letters **111**, 087002-1-6, (Jul. 2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.087002 【結晶のもつ鏡映対称性によるトポロジカル超伝導の理論。被引用数 29】

⑥"Majorana fermions and odd-frequency Cooper pairs in a normal-metal nanowireproximity-coupled to a topological superconductor", [Y. Asano](#), and [Y. Tanaka](#), Physical Review B **87**, 104513-1-10 (Mar. 2013), DOI: 10.1103/PhysRevB.87.104513 【マヨラナフェルミオンと奇周波数ペアの関係を示した理論。被引用数 21】

⑦"Stable Skyrmions in SU(2) Gauged Bose-Einstein Condensates", T. Kawakami, [T. Mizushima](#), [M. Nitta](#), K. Machida, Physical Review Letters **109**, 015301-1-5 (Jul. 2012), DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.015301 【素粒子で提案された 3 次元スキルミオンの安定性を 2 次元ボースアインシュタイン凝縮体で安定であることを確認した。被引用数 48】

⑧"Theory of tunneling conductance and surface-state transition in superconducting topological insulators", A. Yamakage, K. Yada, [M. Sato](#), and [Y. Tanaka](#), Physical Review B **85**, 180509-1-5, (May 2012), DOI: 10.1103/PhysRevB.85.180509 【トポロジカル超伝導体における新しいトンネル分光の理論を提案。被引用数 54】

⑨"Symmetry and Topology in Superconductors – Odd-Frequency Pairing and Edge States", *[Y. Tanaka](#), [M. Sato](#), [N. Nagaosa](#), Journal of the Physical Society of Japan **81**, 011013-1-34, (Dec. 2011), DOI: 10.1143/JPSJ.81.011013 【奇周波数ペアリングとトポロジカル超伝導体に関するレビュー。被引用数 118】

⑩"Abe homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices", *[S. Kobayashi](#), M. Kobayashi, [Y. Kawaguchi](#), [M. Nitta](#), [M. Ueda](#), Nuclear Physics B **856**, 577-606 (Dec. 2011), DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2011.11.003 【トポロジカル励起間の非自明な影響の問題を数学的に解決】

⑪"Symmetry classification of spinor Bose-Einstein condensates", [Y. Kawaguchi](#), [M. Ueda](#), Physical Review A **84**, 053616-1-19, (Nov. 2011), DOI: 10.1103/PhysRevA.84.053616 【スピノール BEC の対称性をマヨラナ表示を使って分類した理論】

⑫"Topology of Andreev bound states with flat dispersion", [M. Sato](#), [Y. Tanaka](#), K. Yada, T. Yokoyama, Physical Review B **83**, 224511-1-22 (Jun. 2011), DOI:

10.1103/PhysRevB.83.224511 【高温超伝導体や空間反転対称性の破れた超伝導体に現れる平坦なエネルギー分散を持つエッジ状態の理論。被引用数 79】

- ⑬"Surface density of states and topological edge states in noncentrosymmetric superconductors", K. Yada, [M. Sato](#), [Y. Tanaka](#), T. Yokoyama, Physical Review B **83**, 064505-1-9 (Feb. 2011), DOI: 10.1103/PhysRevB.83.064505 【空間反転対称性の破れた超伝導体に現れる平坦な分散をもつエッジ状態の理論。被引用数 44】
- ⑭"Existence of Majorana Fermions and Topological Order in Nodal Superconductors with Spin-Orbit Interactions in External Magnetic Fields" *[M. Sato](#), S. Fujimoto, Physical Review Letters **105**, 217001-1-4 (Nov. 2010). DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.217001【ノードのある超伝導体におけるマヨラナフェルミオンの実現可能性をはじめて指摘。被引用数 42】
- (公募研究)
- ⑮"Parity-mixed Superconductivity in Locally Non-centrosymmetric System" T. Yoshida, M. Sigrist, [Y. Yanase](#), Journal of the Physical Society of Japan **83**, 013703-1-5 (Dec. 2013). DOI: 10.7566/JPSJ.83.013703 【局所的に反転対称性の破れた超伝導体におけるパリティが混成した超伝導の理論】
- ⑯"Non-Abelian quasigapless modes localized on mass vortices in superfluid $^3\text{He-B}$ " [M. Nitta](#), M. Shifman, W. Vinci, Physical Review D **87**, 081702-1-7 (Apr. 2013). DOI: 10.1103/PhysRevD.87.081702 【超流動ヘリウムでの特異な渦状態の存在を、素粒子分野でよく知られた南部ゴールドストーンモードとの対応で予言する理論】

[学会発表] (計 242 件) *すべて招待講演
講演の全リストは HP に掲載:

<http://www.topological-qp.jp/achievements/index.html>

【A01】(計画研究)

- ① [Y. Maeno](#), 「トポロジカル量子現象の視点とポロジカル超伝導」, 第 62 回応用物理学会 春季学術講演会 シンポジウム講演, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市), 2015 年 3 月 12 日
- ② [Y. Maeno](#), "Overview of Current Issues in Sr_2RuO_4 ", Joint CIFAR & Max Planck Institute for Solid State Research Workshop, Stuttgart (Germany), 2014 年 10 月 17 日
- ③ [Y. Maeno](#), 「超伝導の夢 —発見からトポロジカル量子現象へ—」, 第 42 回日本磁気共鳴医学会大会, ホテルグランヴィア京都(京都府・京都市), 2014 年 9 月 18 日,
- ④ [Y. Maeno](#), "Superconductivity of Sr_2RuO_4 : Current Developments and Key Issues", American Physical Society, March Meeting, Denver (USA), 2014 年 5 月 5 日

- ⑤ [Y. Maeno](#), 「トポロジカル量子現象及びトポロジカル超伝導体」, 日本応用物理学会東海支部 上田記念講演会「みらいデバイス創生のフロンティア」, 名古屋ガーデンパレス(愛知県・名古屋市), 2014 年 1 月 9 日
- ⑥ [Y. Asano](#), "Majorana fermions and Odd-frequency Cooper Pairs", 9th International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials, Roma (Italy), 2012/Sep/17
- ⑦ [Y. Asano](#), "Odd-frequency Cooper Pairs in ferromagnetic junctions", 8th International Workshop on Nanomagnetism & Superconductivity, Coma-Ruga (Spain), 2012 年 6 月 1-5 日
- ⑧ [Y. Maeno](#), "Topological Aspects of Superconductivity in Sr_2RuO_4 ", Gordon Research Conference, South Hadley (USA), 2012 年 6 月 25 日
- ⑨ [Y. Maeno](#), 「超伝導発見から 100 年」, 仁科記念講演, 東北大学(宮城県・仙台市), 2011 年 11 月 30 日
- ⑩ [Y. Maeno](#), "Topological Aspects of Superconductivity in Sr_2RuO_4 ", The 2011 Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2011), Cambridge (UK), 2011/Aug/30 【基調講演】
- ⑪ [Y. Maeno](#), "Spin-Triplet Superconductivity", 100th Anniversary of Superconductivity: Hot Topics and Future Directions, Leiden (the Netherlands), 2011 年 4 月 5 日

【B01】(計画研究)

- ① [R. Nomura](#), "Magnetic field effects on surface Majorana fermions of superfluid $^3\text{He-B}$ ", 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), Buenos Aires (Argentina), 2014 年 8 月 12 日
- ② [R. Nomura](#), "Surface Majorana cone of the topological superfluid $^3\text{He B}$ phase", American Physics Society March Meeting, Invited Session: Superfluids under Nanoscale Confinement, Baltimore (USA), 2013 年 5 月 18-22 日
- ③ [O. Ishikawa](#), "Proximity effect at the interface between $^3\text{He-B}$ and aerogel of 97.5% porosity", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing (China), 2011 年 8 月 10-17 日

【C01】(計画研究)

- ① [K. Segawa](#), 「カルコゲナイド系トポロジカル絶縁体の実験研究」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 東海大学, 2015 年 3 月 11-14 日
- ② [G-q. Zheng](#), "NMR Results on topological superconductors", Quantum Materials Symposium 2015, Muju (Korea), 2015 年 2 月 9 日
- ③ [Y. Ando](#), "Searching for possible topological superconductors with time-reversal invariance", Gordon Research Conference on Superconductivity, Les Diablerets (Switzerland), 2013 年 5 月 15 日

- ④ [G-q.Zheng](#), "NMR study of spin-triplet superconductivity in non-centrosymmetric superconductors", International Conference on Materials and Mechanism of Superconductivity (M2S 2012), Washington DC (USA), 2012年7月29日-8月3日

【D01】(計画研究)

- ① [Y. Tanaka](#), "Exotic Andreev bound states in topological superconductors" International Workshop "Novel Quantum States in Condensed Matter 2014" (NQS2014) Kyoto, 2014年11月4日-12月2日
- ② [M. Sato](#) "Topological superconductors" Summer School on Topological Materials: New Physics and Gateway to New Critical Technologies (ITAP, Turunc, Marmaris (Turkey), 2013年7月20日
- ③ [M. Ueda](#), "Topological Excitations in Ultracold Atoms" Quantum Technologies Conference III, Warsaw (Poland), 2012年9月9-15日 **【基調講演】**
- ④ [M. Ueda](#), "Topological Aspects in Ultracold Atoms", 34th International Workshop on Condensed Matter Theories (CMT34), Pohang (Korea), 2011年11月7-11日
- ⑤ [M. Ueda](#), "Topological aspects of spinor Bose gases", Quantum Magnetism in Ultracold Atoms, Haifa (Israel), 2011年5月15-19日
- ⑥ [Y. Tanaka](#), "Interplay between superconductivity and ferromagnetism on a topological insulator", Superconductivity and Magnetism: Hybrid proximity nanostructures and intrinsic phenomena Paestum (Italy), 2010年9月5-11日

(公募研究)

- ⑦ [M. Oshikawa](#), "Entanglement in Quantum Many-Body Problem and Geometry" 量子多体系におけるエンタングルメントと幾何学, The 69th Annual Meeting (2014) of Physical Society of Japan 日本物理学会第69回年次大会領域11,素粒子論領域,領域1 合同シンポジウム「情報・量子物理・幾何の絡み合い」, 2014年3月27日

[図書](計10件)

- ① "トポロジカル絶縁体入門", [安藤陽一](#), 講談社, 2014, 242頁
- ② "物性物理学ハンドブック", [上田正仁](#)・[前野悦輝](#)・[三宅和正](#)・[田仲由喜夫](#)・[押川正毅](#)・[永長真人](#)・[岩佐義宏](#), 朝倉書店, 2012, 676頁, 上田は4人の編集者の一人、担当は前野が15頁等
- ③ "100 Years of Superconductivity", [Y. Maeno](#), CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, 830頁, 担当6頁
- ④ "Fundamentals and New Frontiers of Bose-Einstein Condensation", [M. Ueda](#), World Scientific, July 2010, 368 pages

(2)「国民との科学・技術対話」について

本領域のメンバーはそれぞれが多くのアウトリーチ啓発活動に関わっているため、それに加えての本領域主催の特別な市民向けイベントは開催していない。しかし、それぞれの講演等で「トポロジーとは何か」「トポロジカルな自然観とはどのようなものか」などについてわかりやすく説明するようメンバーに伝えており、市民講座等で使うための講演スライドのひな形もHPのメンバー専用ページからダウンロードできる。また領域独自のイベント開催の代わりに、最近の情報伝達的手段として親しみ・有効性が急速に増しているウェブサイトを利用した広報活動にも力を入れている。以下、これらを順に紹介する。

【活動実施内容】

1. 高校生・中学生など対象のアウトリーチ活動

高校や中学への出張授業や大学・研究機関での特別講義などにメンバーが積極的に取り組んであり、トポロジカル量子現象について平易に紹介することも多い。平成26年度の例を中心にいくつか挙げる。

- ① **科学オリンピックへの道セミナー「物性物理の世界 磁性と超伝導」**(2014年12月27日@岡山大学)。講師：稲田佳彦、対象：高校生。岡山県下の選抜高校生への講義。磁性と超伝導を中心に物性物理の解説と実験を行い、最先端の研究として「トポロジカル量子物理」を紹介した。
- ② **「大学訪問授業」倉敷市立倉敷北中学校**(2014年12月9日@岡山大学)。講師：稲田佳彦、対象：中学生約20人。
- ③ **進路講演会(模擬講義)「超低温の世界で起こる不思議な自然現象:超伝導と自発的対称性の破れ」**(2014年10月9日@大阪府立高津高等学校)。講師：竹内宏光、対象：高校1年生。
- ④ **「科学研究論文の書き方」**(2014年9月24日@岡山県立倉敷天城高等学校)。講師：稲田佳彦、対象：スーパーサイエンスハイスクール(SSH)の高校生。科学研究論文の書き方を講義した。
- ⑤ **出前授業**(2014年9月12日@岩手県水沢高校)。講師：佐藤宇史、対象：高校生。電子の不思議な振る舞いと超伝導とは何かについて、液体窒素を使ったデモ実験を含めた講義を行った。
- ⑥ **青森県立黒石高等学校・金属材料研究所見学**(2014年7月30日@金属材料研究所)。講師：野島勉、対象：高校生。低温を用いた物質・材料研究の重要性紹介と、ヘリウム液化システムの見学や液体ヘリウム・窒素を用いた超伝導をはじめとする低温実験のデモンストレーション。
- ⑦ **「夏期特別授業:立命館守山高等学校」**(2014年7月25日@京都大学)。講師：前野悦輝・米澤進吾、対象：高校2年生25人。超伝導の講義と元素の新しい周期表の製作指導、超伝導の演示実験・実験指導と研究室ツアー。「トポロジカルな新しい物質観」についても紹介した。
- ⑧ **宮城県工業高校金属材料研究所訪問**(2013年8月

29日@東北大学金属材料研究所)。講師：野島勉。
対象：高校生約40名。

- ⑨「電子の世界 超伝導と固体電子材料」(2012年11月21日@四日市高等学校)。講師：田仲由喜夫、対象：高校1年生約60名。
- ⑩宮城一高金属材料研究所見学会・低温物質科学実験室(2012年10月17日@東北大学金属材料研究所)。講師：野島勉。進路意識を高めることを目的とした理数科クラスの見学会。
- ⑪科学オリンピックへの道セミナー「相転移の科学」(2012年1月6日@岡山大学)。講師：稲田佳彦。
- ⑫金属材料研究所職場訪問(2011年12月3日@東北大学金属材料研究所)。講師：野島勉、対象：中学生。
- ⑬金属材料研究所職場訪問(2011年11月19日@東北大学金属材料研究所)。講師：野島勉、対象：中学1年生。職場訪問学習の一環。
- ⑭「物理学への招待」(2011年11月7日@私立聖光学院中学校・高等学校)。講師：安藤陽一、対象：中高生約300名。
- ⑮「東大理学部で考える女子中高生の未来」および「絶対零度で流れる液体：超流動」(2011年10月2日@東京大学小柴ホール)。講師：川口由紀、対象：中高生女子。超伝導や超流動などの話題を含めて、自然の不思議かつ美しい姿、科学の奥深さや自然科学研究の魅力を伝えた。
- ⑯鶴岡南高校理数科進学予定者・東北大学研修(金属材料研究所研修)(2011年3月22日@東北大学金属材料研究所)。講師：野島勉。

2. 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

以下の例を含め6件実施した。

- ①教員免許状更新講習「目に見えない理的事象を子どもたちに伝える工夫」(2013年8月22,23日@岡山大学)。講師：稲田佳彦。光、熱、電気、磁性現象を中心に、目に見えない事象を自然科学はどのように扱っているのかを実験を交えながら解説し、小中学校の理科ではそれをどのように扱うのかのヒントを講義した。
- ②コアサイエンスティチャー現職教員対象理科研修講座「磁石の性質、電流の働き」(2011年10月1日@信州大学教育学部附属松本中学校)。講師：天谷健一、対象：小中高等学校教員。
- ③「目に見えない理的事象を子供たちに伝える工夫(電気、光、音、放射線と粒子概念を中心に)」(2011年8月24日@岡山大学教育学部)講師：稲田佳彦、対象：小中高等学校教員、20人。

3. 一般の方々にも開かれた講演会

市民向けの講演会では、自然科学における最先端研究の平易な解説から、その意義、社会生活への波及効果を示し、いま社会が抱える科学技術の諸問題をあぶり出す内容でも講演した。以下にいくつかの例

を挙げる。

- ①サイエンスカフェ・オンザエッジ・ネクスト9「最近時々聞く「トポロジカル絶縁体」って何？」(2012年12月4日@京阪電車なにわ橋駅アートエリア)。講師：安藤陽一。「これまで世の中の物質は、電気を通すもの(金属または半導体)と通さないもの(絶縁体)の2つに分けられると考えられてきました。しかし最近、そのどちらにも属さない物質『トポロジカル絶縁体』が発見され、話題を集めています。中は電気を流さない絶縁体なのに、どこを切ってもその表面が必ず電気を通す金属になるという不思議な性質をもっています。しかもその背景には、トポロジーと言う数学的概念によって理解できる深遠な原理が潜んでいます。この不思議な物質の面白さとそこから広がる新しいサイエンスについてわかりやすくお話しします。」
- ②湯川記念講演会「超伝導の発見から100年」(2012年10月7日@大阪大学中之島センター)。講師：前野悦輝。「金属を冷やすと電気抵抗が突然完全に消えてしまう場合があり、それを超伝導と呼びます。超伝導は約100年前の1911年(明治44年)にオランダで発見されました。この講演会では、最近解説された発見当日の実験ノートの新事実から、最先端の研究の現状まで、研究者を魅了し続けるこの不思議な現象をめぐる100年の歩みについて話します。」
- ③金属材料研究所夏期講習会「目で見る絶対0度近傍までの電気伝導精密測定」(2012年7月27日@東北大学金属材料研究所)。講師：野島勉。
- ④西宮湯川記念科学セミナー「超伝導の発見と100年の歩み」(2011年12月3日@西宮市フレンテホール)。講師：前野悦輝。
- ⑤「材料科学が拓く東北の未来」(2011年12月3日@東北大学金属材料研究所)。講師：野島勉。
- ⑥日本物理学会2010年度公開講座「超伝導からみる科学技術の最先端」(2010年11月6日@東京大学本郷キャンパス)。講師：前野。

【アンケート調査】

アウトリーチ活動の質をより向上するため、以下の例をはじめ多くの講演会で講演会終了後にアンケート調査を実施した。詳細はここでは記述しないが、いずれの講演会でも、「興味深かった」「有意義だった」「わかりやすかった」という肯定的なコメントが多くえられた。また、自由記述欄に「トポロジーがたいへんおもしろかった」「トポロジーの発想で理論的解明しようとの試み、今後の更なる発展を期待しています」といった回答も多く得られ、トポロジーをもとにした物質観に一般の方々も興味を持った様子がうかがえた。(この他、研究者コミュニティに公開の「領域研究会・領域国際会議」・「若手国際会議」で合計7回、共催した「物性科学領域横断研究会」で5回のアンケートを実施した。)

- ①「夏期特別授業：立命館守山高等学校」(2014年7月25日@京都大学)

- ②「アンソニー・レグット教授 京大特別講演」(2013年5月14日@京都大学)
- ③「電子の世界 超伝導と固体電子材料」(2012年11月21日@四日市高等学校)
- ④湯川記念講演会「超伝導の発見から100年」(2012年10月7日@大阪中之島センター)
- ⑤京大アカデミックデイ「エレメンタリ」(2012年3月10日@京都大学百周年時計台記念館)
- ⑥西宮湯川科学セミナー(2011年12月3日@西宮フレンドホール)

【ホームページの利用：市民とサイエンス】

http://www.topological-qp.jp/event_public/index.html

領域 Web に「市民とサイエンス」というページ(下図)を作成し、アウトリーチ活動に活用した。



領域 Web の「市民とサイエンス」ページ。

その構成は：

1. **トポロジカルってなに?**：本領域の目的についてごく簡単に解説。
2. **サイエンス広場**（生徒の皆さん向けのイベント情報）：高校出前授業などの実施情報を掲載。
3. **サイエンスカフェとレクチャー**（一般の方向けのイベント情報）：講演録ダウンロードもできる。
4. **WEBでサイエンス**（リンクやダウンロード）：領域メンバーが作成した、科学動画（YouTube）、講義ノート、プレゼンテーション資料を紹介。
5. **ニュースになったサイエンス**：領域メンバーの活動の新聞報道等を報告。以下を含む20件を掲載。
 - ①「77年前に予言の素粒子 存在する?」(2014年9月20日、日本経済新聞:前野、安藤)
 - ②「東大、超伝導体の「軌道角運動量パラドックス」を解明」(2015年5月18日、財経新聞、押川(D01 公募))
 - ③「伸張と圧縮歪みの両方で Sr_2RuO_4 の超伝導転移温

度が大きく上昇」(2014年4月18日、サイエンス:前野、米澤)

- ④「春の褒章 思い新たに 紫綬」(2013年4月28日京都新聞:前野)
- ⑤「超省エネの切り札か「トポロジカル物質」に注目」(2012年1月3日、日本経済新聞電子版:前野、安藤、永長)
- ⑥「トポロジカル絶縁体の新性質 ディラック電子に質量を付与」(2011年11月25日科学新聞:安藤、佐藤(C01 公募)、瀬川)
- ⑦「スパコン超え 若者と(ひと)人抄」(2011年9月17日、読売新聞:中原)
- ⑧「絶縁体から新超伝導材料」(2011年6月6日朝日新聞 [科学]:上野、野島、岩佐(C01 連携)ら)
- ⑨「注目集めるトポロジカル絶縁体 電子スピンを直接観察」(2011年5月27日科学新聞:安藤、佐藤(C01 公募)、瀬川)
- ⑩「トポロジカル絶縁体電子スピンの動作解明」(2011年5月18日、日刊工業新聞:佐藤(C01 公募)、瀬川、安藤)
- ⑪「マヨラナフェルミ粒子 超流動ヘリウム3表面で実現」(2011年1月21日、科学新聞:野村)
- ⑫「最大のバンドギャップを持つ トポロジカル絶縁体」(2010年10月1日科学新聞:安藤)

【課題と提言】

アウトリーチ活動を通してあぶり出された課題と領域からの提言をまとめる。課題としては、講演会やホームページ上のサイエンスコンテンツへ一般市民の関心をどのように喚起するか、また、恒常的なサイエンス・コミュニケーションへどのように発展させるか、が挙げられる。

前者に対しては、サイエンスコンテンツを提供するホームページが一覧検索できるハブとなるページの公的開設も有効であろうが、YouTube などへの動画提供の優位性が急速に増している。市民講座やサイエンスカフェへのアクセスが容易でない地域の市民にもスマホで見られる動画が、今後は研究成果広報媒体の一翼を担うかもしれない。

後者については、サイエンス・コミュニケーション活動を財政的に支える制度の整備、学務・研究業務で多忙の研究者や大学院生がさらに週末に活動するためのインセンティブ提供、学位取得者が教員やサイエンス・コミュニケーターとなるための道筋の確保などの施策が必要だと考えている。

7. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

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、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、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。

(1)総括班会議: 領域研究会・領域国際会議の開催時と日本物理学会(春・秋)の会期に合わせて、合計 16 回開催し、研究と運営の方針を協議した。うち 5 回は評価班メンバーの出席による「アドバイザー会議」との合同で行った。さらにその内 2 回は国際会議に合わせて、国際アドバイザーや海外からの招待講演者数名など、海外からの有識者同席の下で行った。また総括班会議の多くは、文科省学術調査官にも同席いただき、領域活動を知っていただくとともに主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: 年次報告会をかねて公開で行い、本領域の成果を発信し、先端研究成果を共有すると共に、今後の方向性に対する共通認識を深めた。ポスター講演は公開で領域外からも自由に募った。また特に若手研究者のためにポスタープレビュー講演も行い、ポスター賞に加えて「ポスタープレビュー賞」も新たに設けて、プレビュー講演の質の向上を図った。

	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	2010 年 12 月 18-20 日	京都大学	36 / 70	149
第 2 回	領域研究会	2011 年 12 月 17-19 日	岡山大学	39 / 53	109
第 3 回	領域研究会 国際会議 TQP2012	2012 年 5 月 16-20 日	名古屋大学	33 / 104	163 (14)
第 4 回	領域研究会	2014 年 12 月 19-21 日	名古屋大学	35 / 98	126
第 5 回	領域研究会 国際会議 TQP2014	2014 年 12 月 16-20 日	京都大学	33 / 104	174 (24)

(3)集中連携研究会: トポロジカル量子現象の最新成果を共有するためのテーマを絞った戦略的研究会を合計 17 回開催した。その内 8 回は A-D の各班内の連携に焦点を当て、研究戦略の相談と最新情報の共有を行った。2010 年度は領域発足後のなるべく早い時期に、各計画班メンバーだけで行った。また 2013 年度には対応する公募研究代表者も含めて、各研究項目の目的意識を共有するために開催した。

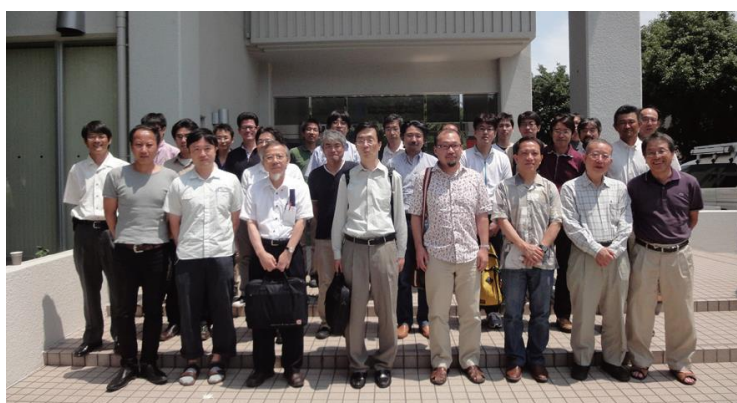
これらすべての集中連携研究会では、連携研究者が積極的に参加しやすいように、連携研究者の旅費は総括班予算から支払うことで、各計画班予算への負担にならないように工夫した。

集中連携研究会	名称	開催日時	場所	人数
第 1 回	「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」	2010 年 7 月 10 日	京都大学 東京オフィス	12
第 2 回	「トポロジカル電子流体の新奇現象」	2010 年 7 月 27 日	岡山大学	25
第 3 回	「トポロジカル凝縮系の理論」	2010 年 9 月 4 日	名古屋大学	14
第 4 回	「トポロジカル超流体の新奇界面現象」	2010 年 9 月 13 日	大阪市立大学	4
第 11 回	「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」	2013 年 6 月 7 日	京都大学	20
第 13 回	「トポロジカル電子流体の新奇現象」	2013 年 6 月 14 日-15 日	岡山大学	16
第 14 回	「トポロジカル凝縮系の理論」	2013 年 6 月 22 日-23 日	名古屋大学	44
第 15 回	「トポロジカル超流体の新奇界面現象」	2013 年 6 月 29 日	大阪市立大学	22

残りの 9 回は班間連携を図る目的で、概ね 30-50 人規模の参加者で行った。これらの中で、第 6 回は新学術領域「重い電子系」と合同で開催し、共通テーマである「空間反転対称性の破れた超伝導体」について、異なる視点から最新成果について議論した。また、第 16 回は、プロジェクトの最終年度の早い時期に、領域活動の総括と最終年度の実効的研究計画について認識を共有するための合宿形式での集中討論を御嶽山にも近い下呂温泉で行った。

これら集中連携研究会を通じて、絶縁体、超伝導、超流動、冷却原子などの既存の研究分野を超えて、自由に概念の交換や提案を行うカルチャーが、メンバーの間で確実に育ったとの実感を得た。

集中連携研究会	名称	開催日時	場所	人数
第5回	「スピン三重項超流体の秩序変数」	2011年7月1日-2日	大阪市	36
第6回	「空間反転対称性の破れた超伝導体」 (新学術領域「重い電子系」と合同開催)	2011年7月25日-26日	大阪大学	30
第7回	「奇周波数クーパ対」	2011年9月8日-10日	名古屋大学	33
第8回	「冷却原子とトポロジー」	2012年6月4日-5日	東京大学本郷	36
第9回	「異方的超流体でのトポロジカル量子渦」	2012年9月1日	大阪市立大	29
第10回	「トポロジカル超伝導・超流動」	2012年12月13日-14日	大阪大学産研	36
第12回	「 Sr_2RuO_4 の超伝導対称性とトポロジカル超伝導」	2013年6月8日	京都大学	30
第16回	「トポロジカル量子現象」	2014年6月14日-16日	下呂温泉	26
第17回	「トポロジカル絶縁体」	2014年7月22日-23日	大阪大学産研	41



新学術領域「重い電子系」と合同で開催した
第6回集中連携研究会(大阪大学)



「昭和時代風」の合宿形式で行った
第16回集中連携研究会(下呂温泉)

(4) 公募研究計画・成果発表会

前期(H23・24年度)は19件、後期(H25・26年度)は21件が採択された。公募研究と計画研究の連携を図るため、総括班会議の開催に合わせて公募研究の計画や成果を発表する機会を設けた。第1回目は「公募研究キックオフミーティング」(2011年9月20日、富山市)として、公募研究代表者17名と総括班メンバー9名全員、そして学術調査官の陪席の下で開催した。第2回目は前期公募研究終了前に「公募研究最終年度報告会」(2012年12月15日、大阪市)として、公募代表者18名、総括班メンバー全員、そして学術調査官陪席で開催した。

後期採択の公募研究については、合同のキックオフミーティングに替えて、2013年6月に開催の各班の「集中連携研究会」で行い、計画研究分担者との連携関係の構築を促した。4名の計画研究代表者はこれらの研究会のほとんど全部に出席した。

(5) 若手相互滞在プログラム: 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、合計18件行った。若手の項に主に記載するが、若手研究者の滞在を通じて双方の研究室の間での研究連携が確実に進展する効果があったことを述べておきたい。

(6) ニュースレター: 各年度界の合計5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、若手相互滞在プログラム等の報告記事などを掲載した。アクセス数は約81,000回、英語版のサイトも約16,000回(2015年6月現在)に上った。(中間評価報告書作成時の2012年6月には、それぞれ約25,000回、5,000回であった。)

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

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。

【特徴ある研究装置：ベクトルマグネットシステム】

2 軸ベクトルマグネットに容器の回転を組み合わせた精密磁場方位制御システムは京大（A01 班）で開発してきた。本領域ではこのノウハウの拡大を目指し、C01 班の東北大でも導入（「ベクトルマグネット回転システム」、H22 年度）して電場誘起表面超伝導のコヒーレンス長の自己制御現象の発見を生んだ。3 軸のベクトルマグネットシステム「ベクターローテートマグネットシステム」は A01 班の NTT 基礎研で H23 年度に計画通り導入して 2 次元電子系を用いた超伝導接合の研究に活用している。さらに京大（A01 班）では超伝導接合素子測定用に小型「3 軸ベクトルマグネット」（H23 年度、次ページリストには無し）を導入した。これらの装置を用いれば、試料表面や接合界面に対する磁場の方向をきわめて正確に制御できる。このように、トポロジカル量子現象の解明に必須の装備を、領域内連携を活かして全国的・組織的に着実に整備し、成果につなげた。

【大型装置の導入計画と実際】

- A01 班で購入の「冷却 CCD 型背面反射ラウエカメラシステム」（京大）は、当初計画のイメージングプレート式に代わる、新たな X 線 CCD カメラ画像方式の装置で、単結晶試料の方位を迅速に決定でき、測定の質の画期的向上につながった。若手相互滞在プログラムでも積極的に活用した。「全自動多目的 X 線回折装置」（京大）は、新超伝導物質の分析と構造解析等に活躍している。当初 H23 年度に産総研に導入予定だった「劈開機能付きコンパクトスパッタ装置」は研究展開を受けて H22 年度に購入し、トポロジカル超伝導性の証拠となるカイラルエッジ状態の観測につながった。当初計画のマイクロ波システムは予算不足で購入を見送ったが、代替装置を産総研内で借りて研究を遂行した。当初 H22 年度に購入予定だった「ソープションポンプ型無冷媒 ^3He 冷凍機」は上述の変更や大震災の影響などから、H24 年度に購入した。交付充足率との関係で、京大で導入予定だった光学実験対応 ^3He 冷凍機は購入を断念したので、低温磁気光学カー効果のテーマは行わなかった。しかしながら「デジタルマイクロスコープ」（京大、H22 年度）・「エポキシダイボンダー」（京大、H23 年度）を駆使した単結晶試料と微細加工技術を融合した研究が予想以上に進展している。また「ウルトラマイクロ天秤」（京大、H24 年度）は Sr_2RuO_4 などの微小結晶の正確な質量測定に使用し、この物質の超伝導一次相転移の発見などに大きく貢献した。
- B01 班では領域発足後、主要装置である超伝導マグネットが破損したために急遽、「核断熱消磁 8T 超伝導マグネット」（東工大）を購入した。また ^3He -B の表面束縛状態の磁場異方性を調べる緊急性が生じたので、H23 年度には「補償コイル付 3T 高均一度マグネット」（東工大）を新規購入した。H22 に導入した「形状測定レーザーマイクロスコープ」（大阪市大）は、超流動ヘリウム実験での試料セルの表面状態の分析や、奇周波数状態検出に用いるエアロジェルの分析に欠かせないものである。他にも、ポンプやヘリウム容器といったヘリウム実験に不可欠な比較的少額の備品を順次購入し、実験環境を充実させて多くの成果につなげた。
- C01 班で購入の「小型 MBE 法単結晶薄膜作製装置」（阪大、H22 年度）はトポロジカル絶縁体薄膜の作製に活用している。この装置で世界最高レベルの表面電子易動度の Bi_2Se_3 薄膜の作製に成功し、トポロジカル絶縁体超薄膜における高易動度表面状態の存在条件を明らかにした。この装置は比較的安価にもかかわらず大きな成果の源となっており、中間評価でも「大型装置 (MBE) 費用も最小限に絞られており、効率的に運用されている」と評価いただいた。空間反転対称性の破れた (NCS) 超伝導体に関しては、上部臨界磁場が低い超伝導体に対応する必要が生じたため、低周波数測定用の「NMR 分光計」（岡大、H22 年度）を急遽導入した。新奇 NCS 超伝導体の発見に対応するために導入した「NMR 用希釈冷凍機システム」（岡大、H24 年度）で、新 NCS 超伝導体 LaPt_2Ge_3 （転移温度 0.7 K）の非従来型超伝導状態を明らかにできた。本領域 NCS 超伝導の主研究対象の Li-Pt-B 系の良質試料・単結晶試料を得る重要性が高く、H24 年度には当初計画の薄膜接合作成装置に替えて「グローブボックス」（岡大）を導入した。これらの計画変更に伴い、H23 年度導入予定の EB 蒸着装置とエッチング装置は購入を断念した。
- D01 班では震災後の状況で H23 年度に計画していた海外出張や国際招へいにキャンセルが生じたので、その資金は繰り越して H24 年度に計画実施を復活させて、資金の有効活用を図った。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細(計画研究において購入した主要な物品(設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。)について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価(円)	金額(円)	設置(使用)研究機関
22	小型 MBE 法単結晶薄膜製法装置	(株)エイコー・エンジニアリング製 EW-3SA	1式	22,995,000	22,995,000	大阪大学
	ベクトルマグネット回転システム	クライオマグネティックス社製 VSC-3070-BL020123	1式	16,406,250	16,406,250	東北大学
	冷却 CCD 型背面反射ラウエカメラシステム一式	X線発生部、防X線カバー部、冷却 CCDX線検出部、制御・解析部、送水装置部	1式	13,650,000	13,650,000	京都大学
	劈開機能付きコンバクトスパッタ装置	到達真空 1×10^{-6} Pa 以下	1台	10,185,000	10,185,000	産業技術総合研究所
	核断熱消磁8T超伝導マグネット	仁木工芸株式会社 8T磁場発生	1式	7,455,000	7,455,000	東京工業大学
	形状測定レーザーマイクロスコープ	キーエンス VK8700/8710	1式	6,531,000	6,531,000	大阪市立大学
	NMR 分光計	PROT II 4100MRSS	1式	5,055,750	5,055,750	岡山大学
	デジタルマイクロスコープ一式	コントローラ、レンズ、フリーアングル観察システム付	1式	4,935,000	4,935,000	京都大学
23	NMR 用希釈冷凍機システム	仏国クライオコンセプト社 DR-JT-S-100NMR	1式	24,990,000	24,990,000	岡山大学
	全自動多目的X線回折装置	3kW X線発生装置	1式	11,999,400	11,999,400	京都大学
	ベクターローテートマグネットシステム	9T/1T/1T マグネットサポートおよびデューワー付	1式	7,999,950	7,999,950	NTT 物性科学基礎研究所
	補償コイル付 3T高均一度マグネット	仁木工芸(株) 搬入・調整含む	1式	4,483,500	4,483,500	東京工業大学
	モリシリ縦型管状炉(坩堝昇降機構付)	クリスタルシステム VFK-1800-BR-VII-0	1式	4,452,840	4,452,840	岡山大学
	エポキシダイボンダー	モデル 7200CR 荷重圧着方式	1式	3,276,000	3,276,000	京都大学
24	ソープションポンプ無冷媒 ³ He冷凍機	仁木工芸社・マグネット付き	1式	19,162,500	19,162,500	産業技術総合研究所
	温度可変インサート	仁木工芸社・回転機構付	1式	4,368,000	4,368,000	NTT 先端技術総合基礎研究所
	グローブボックス	UNICO社製 UN-650L	1式	3,613,680	3,613,680	岡山大学
	ウルトラマイクロ天秤	ザルトリウス社製・MSE2.7S	1式	1,861,650	1,861,650	京都大学
25						
26						

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

分担金も含めた計画研究予算総額をカバーできる以下のような分類にしました。またスペースの制約上、明らかな必要理由の場合は記載省略しました。

【平成 22 年度】

・旅費（計画研究 総額： 9,726,726 円）

- (1) D01: 4,419,585 円 ①国際会議発表・国際共同研究(延 5 人) 1,797,535 円、②国内共同研究・国内研究者招聘(延 20 人) 769,740 円、③海外研究者招聘(延 3 人) 757,420 円: Golubov, Fominov ら
(2) C01: 1,713,765 円 ①領域研究会(京都大)・集中連携研究会(岡山大・大阪市大)(延 20 人) 808,990 円、
②国際会議(アメリカ物理学会)(1 人) 414,750 円

・人件費・謝金（計画研究 総額： 8,035,543 円）PD 給与は保険料等を含む、以下同じ。

- (1) B01: 2,076,082 円 ①PD 給与(1 名、4.5 月)(広島大) 1,596,427 円
(2) C01: 2,026,941 円 ①PD 給与(1 名、6 月)(岡山大) 2,026,941 円

・その他（計画研究 総額： 8,459,803 円）

- (1) A01: 4,626,117 円 ①米国カンタム・デザイン社製 MPMS 修理一式(京都大) 1,978,305 円、②液体ヘリウム(学内移算制度のため)(京都大) 1,741,838 円(京大では H24 年度より学内移算制度は終了; 以後は物品費(消耗品)として計上。)
(2) X01: 2,532,481 円
①領域 Web 992,325 円 [Web 製作費・サーバー契約料] 領域の紹介・成果の発信・領域内連携の加速のために、Web 製作を専門会社に外注した。また、汎用の会議登録システムも外注したが、このシステムは 5 年間で多くの研究会・国際会議で使用され領域事務の軽減に貢献した。
②第 1 回領域研究会(京都大) 834,528 円 [会議費・会場費・概要集印刷費など] 初年度ということで、最新の研究成果の共有だけでなく、共同研究の推進や研究の方向性の共有にも大きな役割を果たした。

【平成 23 年度】

・旅費（計画研究総額 22,961,913 円）

- (1) D01: 6,876,428 円 ①国内共同研究・国内研究者招聘(延 53 人) 2,025,490 円: レビュー論文執筆のための招聘など ②国内学会・会議発表(延 30 人(1,471,270)) ③国際会議発表・国際共同研究(延 5 人) 1,051,790 円
(2) A01: 4,936,853 円 ①国際会議(延 4 人) 781,465 円、②PD 着任旅費(家族込) 662,898 円、③海外若手研究者招聘(延 2 人) 556,900 円

・人件費・謝金（計画研究総額 31,803,488 円）

- (1) B01: 9,215,876 円 ①PD 給与(1 名)(大阪市大) 4,261,704 円、②PD 給与(1 名)(広島大) 4,048,104 円
(2) D01: 7,320,367 円 ①PD 給与(1 名)(名古屋大) 3,451,945 円、②PD 給与(1 名 9 月)(東京大) 3,513,846 円

・その他（計画研究総額 8,606,651 円）

- (1) A01: 4,591,042 円 ①液体ヘリウム(学内移算制度のため)(京都大) 1,595,831 円、②スパッタ装置改造費 867,300 円、③劈開機能付きコンパクトスパッタ装置改造作業 585,900 円
(2) X01: 2,532,481 円 ①第 2 回領域研究会(岡山大) 1,090,478 円 [会議費・会場費・概要集印刷費など] 最新の研究成果を共有し、公募研究も含めた領域全体の連携強化を図った。総括班会議もあわせて開催。
②第 2 回若手国際会議(滋賀県守山市) 541,095 円 [会議費・会場費・概要集印刷費など] 会議企画・運営段階から若手研究者が行い、合宿形式で開催。海外の主要若手研究者との密な議論・交流ができた。
③ニュースレター 307,565 円 [印刷代・郵送費] 領域の研究トピックスの紹介、領域 PD の紹介などを通じて、より一層の連携強化を図った。
④領域 Web 拡張 262,500 円 [Web プログラム外注費] 領域 Web の機能を拡張し、使いやすさを向上した。

【平成 24 年度】

・旅費（計画研究総額 26,817,977 円）

- (1) D01: 8,463,797 円 ①国際会議・国際共同研究(延 12 人) 5,225,214 円、②海外招聘(延 6 人) 1,525,860 円
(2) X01: 5,195,836 円 ①国際会議 TQP2012 海外招聘(6 人) 1,560,106 円、②国際会議 TQP2012 連携研究者・国内招聘者旅費(12 人) 618,280 円、③カナダ CIFAR 国際会議若手研究者・大学院生派遣(4 人) 551,870 円、④若手相互滞在(4 人) 421,400 円

・人件費・謝金（計画研究総額 32,664,823 円）

(1) A01: 10,060,271 円①PD 給与(1 人)(京都大) 4,758,733 円 ②PD 給与(1 人 11 月)(産総研)4,387,198 円
(2) B01: 9,090,708 円 ①PD 給与(1 名)(大阪市大)4,236,566 円 ②PD 給与(1 名)(広島大)4,064,985 円

・その他(計画研究総額 4,486,542 円)

(1) X01: 2,864,260 円 ①第 1 回領域国際会議 TQP2012(兼 第 3 回領域研究会)(名古屋大) 1,671,868 円
[会議費・会場費・概要集印刷費など] 国内外の著名研究者を招いての国際会議を開催し、本領域の取り組みと成果を国際的に発信し、領域運営に関しても多くの意見を得た。
②第 8 回～10 回集中連携研究会 376,824 円 [会議費・会場代等] トピックを絞った小規模の研究会で、濃密な議論が行えた。
③ニュースレター第 3 号 329,280 円 [印刷代・郵送費] 公募研究の特集なども含めて、前号に比べて大幅にページ数が増えた。計画班・公募班あわせた連携の推進に効果があった。

【平成 25 年度】

・旅費(計画研究総額 26,817,977 円)

(1) D01: 9,298,382 円 ①国際会議・国際共同研究(延 12 人)6,383,108 円、②海外招聘(延 4 人)478,420 円
(2) X00: 5,195,836 円 ①第 2 回若手国際会議(沖縄) 海外・国内招へい(20 人)1,636,030 円、②第 4 回領域研究会(名古屋大)国内招へい(18 名)904,920 円、③集中連携研究会国内旅費(延 17 人)443,200 円

・人件費・謝金(計画研究総額 27,533,294 円)

(1) A01: 8,847,586 円 ①PD 給与(1 名)(京都大) 5,401,100 円
(2) B01: 5,892,048 円 ①PD 給与(1 名)(大阪市大) 4,224,419 円

・その他(計画研究総額 6,759,288 円)

(1) X01: 2,864,260 円 ①第 2 回若手国際会議(沖縄)667,281 円 [会議費・会場費・概要集印刷費など] 会議企画・運営段階から若手研究者が行った。海外の主要若手研究者との議論・交流ができた。
②第 4 回領域会議(名古屋大) 631,604 円 [会議費・会場費・概要集印刷費など] 後期の公募研究が加わって一層の連携強化を図るとともに、物性物理以外の研究者も招待し広い分野への波及効果を狙った。
③第 11 回～15 回集中連携研究会 373,266 円 [会議費・会場費等] 後期の公募研究を交えて小規模の研究会を複数開催し、残り 2 年間での更なる研究の発展の基礎となった。
④ニュースレター第 4 号 338,200 円 [印刷代・郵送費] 計画班・公募班あわせた連携の推進に効果があった。

【平成 26 年度】

・旅費(計画研究総額 25,522,184 円)

(1) D01: 10,055,392 円 ①国際会議・国際共同研究(延 14 人)6,486,604 円、②海外招聘(延 3 人)567,135 円
(2) X01: 5,849,934 円 ①国際会議 TQP2014 海外招聘(10 人)2,864,000 円、②国際会議 TQP2014 連携研究者旅費(10 人)633,450 円、③カナダ CIFAR 国際会議大学院生派遣(3 人)494,980 円、④国際会議 TQP2014 国内招聘(8 人)460,990 円

・人件費・謝金(計画研究総額 23,635,838 円)

(1) A01: 9,114,969 円①PD 給与(1 人 8 月)(京都大)3,651,052 円、②PD 給与(1 人 10 月)(産総研)4,199,546 円
(2) C01: 5,041,222 円 ①PD 給与(1 名)(大阪大)4,628,645 円

・その他(計画研究総額 11,182,213 円)

(1) B01: 4,705,900 円 ①液体ヘリウム(東工大) 2,378,275 円、②メカニカルブラスターポンプ修理(大阪市大) 2 件、750,470 円、③ヘリウムリークディテクター修理(大阪市大) 2 件、520,560 円
(2) X01: 2,051,711 円 ①第 2 回領域国際会議 TQP2014(兼 第 5 回領域会議)(京都大) 1,351,038 円 [会議費・会場費・概要集印刷費など]領域活動の総まとめの国際会議。国内外の著名研究者を招いて領域の成果を発信した。
②ニュースレター第 5 号 396,190 円 [印刷代・郵送費] 領域活動の総括となるニュースレターを発行し、領域内外に配布して、5 年間の成果を広く発信した。
③第 16 回～第 17 回集中連携研究会 250,909 円 [会議費・会場費等] トピックを絞った小規模の研究会に加えて、領域最終年度の研究の方向性も議論した。

(3) 最終年度(平成 26 年度)の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

該当なし

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

(1) 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記す。

- ・紫綬褒章(前野悦輝, 2013)、
- ・仁科記念賞(前野悦輝, 2010)、
- ・井上科学賞(安藤陽一, 2014)、
- ・超伝導科学技術賞(佐藤昌利、藤本聡、瀬川耕司、安藤陽一, 2013)、
- ・超伝導科学技術賞(岩佐義宏 (C01), 上野和紀 (C01), 2011)、
- ・日本物理学会論文賞(野村竜司, 東谷 誠二, 2013)、
- ・大阪科学賞(安藤陽一, 2014)

「日本物理学会若手奨励賞8件 (2010-2014)」などで高く評価された若手研究者の受賞については、以下「1

0. 研究に参画した若手研究者の成長の状況」で表にまとめる。

(2) 世界のトポロジカル量子現象研究プロジェクト

トポロジカル量子現象の研究発展を受け、世界的にも関連プロジェクトが多数展開されている。しかし本新学術領域発足の 2010 年 7 月の時点では、多くの大学や研究所を組織的にまとめた関連分野プロジェクトとしては、日本の新学術プロジェクト以外には、カナダ高等研究機構(CIFAR)の量子物質プログラムが主なものであった。2011 年にはイギリスの TOPNESS (13 億円)とイタリアの CNR-SPIN などがプロジェクトを立ち上げた。そして 2013 年には、CIFAR プロジェクトが 5 年間の継続を果たし、また中国では本領域の海外アドバイザーでもある Leggett 教授をリーダーとする上海交通大学中心のプロジェクト(SCCP)が新たに参入した。さらに 2014 年には、ロシアで「超伝導トポロジカル量子現象研究所」が設立された。続いてアメリカでは Moore 財団がトポロジカル物質分野を多く含む物質合成・実験・理論の研究者 31 人に 65 億円という大きな予算のプロジェクト EPIQS を立ち上げた。EPIQS の予算受給期間の多くは 2014.11 - 2019.10 であり、その中には本領域の国際アドバイザーの S.C. Zhang 教授(スタンフォード大)が含まれる。

これらのプロジェクトの中で、CIFAR, TOPNESS, ロシアの研究所の代表者は、本領域の 5 名の国際共同研究者の中に含まれる。これらの世界的研究動向の中で、本領域は先導的プロジェクトの一つとして、その存在と研究成果が十分に高く評価されている(評価者のコメント)。

(3) 波及効果

他分野への波及効果をどのように生み出していくのかは、「4. 審査結果の所見及び中間評価で指摘を受けた事項への対応状況」でも述べた。

- (a) 「素粒子や天体分野との関連」では、超流動ヘリウムの渦に局在したギャップ状態と南部ゴールドストーンモードとの対応や、物性分野では珍しい3次元のスキルミオンを冷却原子系に導入するなど、素粒子分野での概念とトポロジカル量子現象の接続の試みがなされている。また、中性子星(パルサー)内部での中性子のトポロジカル超流動状態に関して、これまで考慮されてこなかった「トポロジカル・エッジ状態」の研究展開が生まれる可能性が出てきた。これらの成果には、本領域公募D03研究代表者の新田の貢献が目覚ましい。
- (b) 「デバイスとの関連」では、すでに携帯電話などで商品化もされている「相変化メモリー(iPCM)」の素子材料が、実はトポロジカル絶縁体と通常絶縁体の積層構造であることがわかった。本領域の成果として瀬川・安藤 陽一のグループが同様の絶縁体積層構造の物質合成に成功しており、今後の研究展開に期待できる段階に到達した。
- (c) 「他の分野への波及、連携」などに関しては、日本物理学会年次大会で物性領域と素粒子論領域との合同シンポジウムとして2012年の「多様な物質に現れる量子渦のダイナミクス」や2013年の「情報・量子物理・幾何の絡み合い」は新田らが企画提案したほか、前野(領域代表)は2013年の総合講演「トポロジカル物質」でトポロジカル量子現象を詳しく紹介した。また、2014年の第62回応用物理学会春季学術講演会のシンポジウム講演では前野(領域代表)と瀬川(C01分担者)が「トポロジカル量子現象の視点とトポロジカル超伝導」などについての講演を行い、トポロジカル量子現象について具体的に解説した。さらに前野は第42回日本磁気共鳴医学会大会でも基調講演でトポロジカル量子現象について紹介した。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

(1) 若手研究者育成の取組

① 若手国際会議

若手研究者だけによる組織委員会が運営し、参加者も国内外の若手の公開の国際会議で、以下の 2 回開催した。トポロジカル量子現象を開拓する諸外国のプロジェクトも立ち上がってきており、この領域での若手国際会議への資金投入は、国際感覚を身に着けた若手研究者育成のために特に効果的であったといえる。

第 1 回: 2011 年 11 月 1-5 日 (ラフォーレ琵琶湖)、参加者数 67 (海外 10、口頭講演 30、ポスター 35)

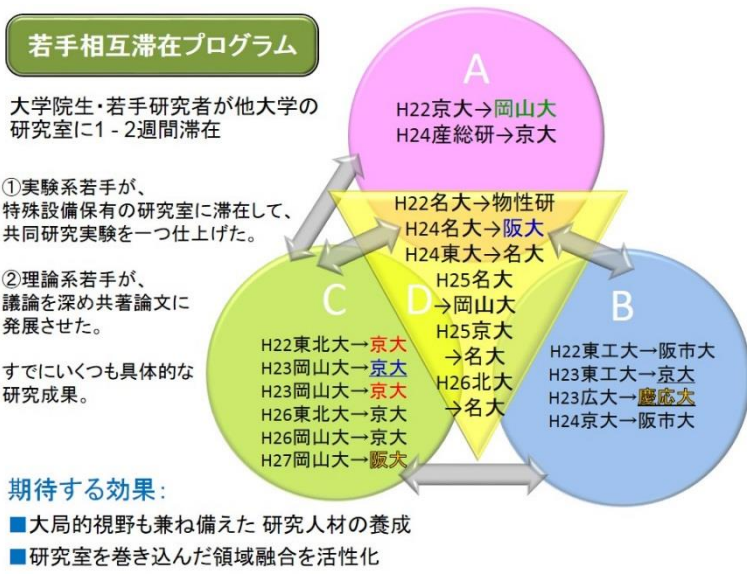
第 2 回: 2013 年 10 月 22-26 日 (沖縄カルチャーリゾート・フェストーネ)、参加者数 87 (海外 12、口頭講演 28、ポスター 55)



第 2 回若手国際会議 (沖縄カルチャーリゾート・フェストーネ)

② 「若手相互滞在プログラム」では、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ることをねらっている。18 件の実施例には以下が含まれる：超伝導体や磁性体の固体 NMR 専門家が、超流動ヘリウムの NMR の公募研究グループに滞在して、手法の相違や MRI 測定の実際を学んだ (C 班→B 班)；女性大学院生が、他大学の低温装置を用いての測定を行った。滞在中には幼児のデイケア施設も手配し、育児中の女性研究者の活動範囲の拡大に貢献した (C 班→A 班)；理論専攻の大学院生が実験研究室に滞在し、対応する超伝導トポロジカル絶縁体の試料作製を体験した (D 班→C 班)。この活動を契機に発展した研究が論文化に至った例も複数ある[論文 D③など]。

海外のトポロジカル量子現象研究組織との連携推進活動として、カナダ高等研究機構(CIFAR)の量子物質プログラムの研究会にメンバー及び大学院生を派遣した。H25 年 5 月の研究会には大学院生 2 名を含む 6 名が出席、H26 年 5 月の研究会にも 5 名の大学院生を含む 6 名が出席して、当新学術領域の成果を発表した。



③ 博士研究員雇用

博士研究員は外国人 2 名を含め 9 名雇用した。領域 HP (日本語版・英語版) や学会メーリングリスト配信での公募も行った。審査は第 1 - 第 3 次におわたる過程で厳正に行った。任期終了後の動向は以下(3)で述べる。

④ 新学術連携による若手研究者の育成

若手研究者が既存分野の枠を超えて活躍する例が目立ち始めており、「若手国際会議」の組織・運営を通じて培ったメンバー間の研究交流も着実に育んでいる。領域の目的とする「分野横断型の研究視点と国際性をもった人材の育成」が順調に進んでいる。具体例として、D 班の研究分担者水島は、もともと冷却原子系理論の専門家だが、新学術領域の活動から B 班や A 班に密接に関連したトポロジカル超流動・超伝導の分野で顕著な研究成果を挙げている。また B 班の PD の竹内も、もともと冷却原

子系の流体力学理論が専門であるが、超流動体の奇周波数ペアリング状態理解の基礎となる、エアロジェル中の常流動 ^3He の超音波減衰理論を展開し、Physical Review Letters 誌に論文掲載された。

⑤国際会議や領域研究会での若手支援の工夫

国際会議・領域研究会・若手国際会議では、ポスター賞を若干名選出し表彰することで、若手の発表意欲や自信をより高める工夫をした。また、国際会議や領域研究会では、ポスター発表者には1分程度のポスタープレビュー発表をする機会を設けて多人数の前で発表する経験を積ませるとともに、ポスタープレビュー賞も設けて印象に残ったプレビュー講演者も表彰して、努力した若手を幅広く顕彰した。

(2)若手研究者の受賞

「メンバーの受賞リスト等を見ると、領域代表、研究代表者から、若手メンバーまで各種の表彰を受けており、研究の質の高さや若手人材の成長ぶりが窺える。」(アドバイザーコメント)

氏名	班	名称		日時
水島 健	D01	第9回凝縮系科学賞	「トポロジカル超流動・超伝導の理論的研究」	2014年11月
岩澤 英明	A01	第8回日本物理学会若手奨励賞	「高分解能角度分解光電子分光による強相関電子系の多体相互作用の研究」	2013年11月
山影 相	D01	第8回日本物理学会若手奨励賞	「トポロジカル絶縁体の輸送理論における先駆的研究」	2013年11月
古川 俊輔	D01	第7回日本物理学会若手奨励賞	「量子多体系におけるエンタングル・エントロピーの研究」	2012年12月
水島 健	D01	第7回日本物理学会若手奨励賞	「超流動 ^3He および冷却原子気体におけるマヨラナ状態の理論的研究」	2012年12月
村川 智	B01	第6回日本物理学会若手奨励賞	「超流動ヘリウム3の表面状態、特にマヨナラ準粒子状態の解明」	2012年3月
吉川 豊	B01	第6回日本物理学会若手奨励賞	「超放射ラマン散乱を用いた物質波のコヒーレント制御」	2012年3月
川口 由紀	D01	第4回井上リサーチアワード	「スピノール BEC における量子多体効果の研究」	2012年2月
上野 和紀	C01	第21回トキン科学技術振興財団研究奨励賞	“New material development method by electric field-effect”	2011年6月
横山 毅人	D04	第5回日本物理学会若手奨励賞	「強磁性体/超伝導体接合における近接効果」	2010年11月
沙川 貴大	D01	第5回日本物理学会若手奨励賞	「フィードバック制御がある系の情報と熱力学の展開」	2010年11月

(3)若手研究者の研究期間中、および終了後の動向等

本領域の若手研究者の活躍は上に記載した受賞リストにも反映され(アドバイザーコメント)、以下のように領域発足後の昇任人事の例も多い:

- 計画研究: 上野 (東北大・助教→東大・准教授)、
 佐藤昌 (東大物性研・助教→名大・准教授→京大基礎物理学研究所・教授)、
 俣野 (領域雇用岡山大・特任助教(PD)→岡山大・助教)、
 公募研究: 東條 (学習院大・助教→中央大・准教授)、
 村中 (青学大・助教→電通大・准教授)。
 なお総括班メンバーでは田仲 (名大) が准教授から教授に昇格した。

また、領域で雇用した博士研究員9名のうち、1名は大学講師、3名が大学助教、1名は学振外国人特別研究員、2名が他のプロジェクトの博士研究員、2名が企業就職等している。

11. 総括班評価者による評価（2 ページ程度）

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 6 名（国内アドバイザー 3 名、海外アドバイザー 3 名）に評価者を担当いただいた。

- 安藤恒也氏（東京工業大学理工学研究所 教授、Journal of the Physical Society of Japan 誌 元編集長、トポロジカル量子現象の先駆けである量子ホール効果の理論に関する世界的権威、1982 年仁科記念賞）
- 家泰弘氏（東京大学物性研究所 前所長・教授、日本物理学会元会長、メゾスコピック物理学の世界的権威）
- 福山寛氏（東京大学理学系研究科 教授、トポロジカル量子現象の舞台となる液体ヘリウム実験の第一人者）
- J. Aarts 氏（Leiden University 教授、強磁性と超伝導に関する研究分野で世界を牽引）
- A.J. Leggett 氏（The Univ. of Illinois, Urbana-Champaign 教授、超流動・超伝導の理論の世界的指導者。³He のスピントリプル超流動の理論で 2003 年ノーベル物理学賞受賞）
- S.C. Zhang 氏（Stanford University 教授、トポロジカル絶縁体理論の創始者の一人、DARPA によるトポロニクスプロジェクトリーダー、2014 年 Thomson 社によるノーベル賞候補に挙げられる）

国内アドバイザーには毎年、海外アドバイザーには国際会議を開催した 2012 年と 2014 年に、それぞれ評価をいただいた（述ベ 11 件）。以下に、その評価を引用する。なお、海外アドバイザーの評価の日本語訳は領域事務局による。

【安藤恒也氏】H22 成果に関する評価（2011 年 3 月）

1. **研究に関して:** 実験的研究と理論グループが「トポロジカル」をキーワードとした新しい現象の発見を目指すとともに、普遍概念を創出することを目的としている。異分野の連携・融合により、国際的に優れた新しい研究が発展する可能性を秘めており、この試みが成功することを期待する。
2. **領域運営に関して:** 若手相互滞在プログラムは領域内の異分野間の交流と共同研究、若手育成の面で大いに役立つと期待される。さらに、若手国際会議も新しい試みで、若手研究者が幅広い視点で将来の研究方向性を決めることを可能とするなど、育成面で重要な役割を果たすものと考えられる。
3. **その他:** この領域では異分野間の共同研究が推進されるような運営が行われており、第一回領域研究会での議論もこの危惧を感じさせないものであった。

【家泰弘氏】H22 成果に関する評価（2011 年 3 月）

1. **研究に関して:** 領域発足当初とは思えないほど、数多くの優れた成果が既に出ていると見受けられました。新学術領域としては個々の研究グループの足し算以上の成果が期待されるので、そのあたりを意識しつつ 5 年間の活動を推進されることを望みます。
2. **領域運営に関して:** 領域申請に際してたいへんに良く練られたことがうかがえる組織になっており、相互滞在プログラムなど、若手の活動を重視した領域運営は評価されるでしょう。

【安藤恒也氏】H23 成果に関する評価（2012 年 3 月）

1. **研究に関して:** 実験と理論グループが「トポロジカル」をキーワードとした新しい現象の発見を目指すとともに、普遍概念を創出することを目的としている。（中略）それにより新しい現象を生み出す、あるいはそのための新物質を開発するための指針としての役割は大いに期待できる。
2. **領域運営に関して:** 若手相互滞在プログラム、若手国際会議は領域内の異分野間の交流と共同研究、若手育成の面で大いに役立つことが期待される。領域のホームページも充実しており、研究成果その他が随時更新されるのでグループ内の研究活性化に大いに有用であろう。トポロジカル超伝導に関しては、（中略）超伝導研究の重要な潮流となっている。
3. **その他:** 「トポロジカル量子物理学」が一般に認識されるためには、より新しい現象や普遍的物理概念が生まれてくることに加えて、現実の生活に役立つようなデバイスあるいは物質材料などが生まれてくることも不可欠であろう。

【家泰弘氏】H23 成果に関する評価（2012 年 3 月）

1. **研究に関して:** 本領域を構成するメンバーから多くの優れた成果が生み出されている。メンバーの受賞リスト等を見ると、領域代表、研究代表者から、若手メンバーまで各種の表彰を受けており、研究の質の高さや若手人材の成長ぶりが窺える。世界を先導する研究が展開されており、今後の更なる発展が楽しみである。
2. **領域運営に関して:** 研究班間の連携や、他の新学術領域研究との連携にも務めており、総括班のコアメ

ンバーの役割分担もうまく機能しているように思われる。パブリック・アウトリーチ活動も適切に行われている。新学術領域のお手本となるような研究成果、領域運営であると言える。

【J. Aarts 氏】国際会議 TQP2012 開催時の評価(2012 年 5 月)

1. 研究に関して: 本プロジェクトの開始時期は極めて有効であった。この2年間で、トポロジカル量子現象は世界的に主要な研究テーマとなったが、本プロジェクトにより領域メンバーはこの分野の最先端で活躍する役割を担うことができている。TQP2012 ではこの利点が最大限に活かされ、重要な研究成果が多数報告された。(中略) 分野横断による相互涵養の効果が最大限に得られるよう、異なる分野から核となるテーマを巧みに取り込んでいる。また、プロジェクトの規模もすこぶる適切といえる。組織編成の面では、公募研究を組み入れていることを特に評価したい。公募は、領域外の重要な研究成果を取り込み、新奇な技術を活用し、将来有望な若手研究者に機会を与えるのに有力な手段である。

2. 運営に関して: 集中連携研究会や若手相互滞在プログラムは、(中略) 結局思ったほどは活用されずに終わりがちである。(中略) しかし全体的に本領域研究では、そのような事が起らぬように、プロジェクトならではの相乗的成果を生み出すために有効と考えられるあらゆる方策が実施されている。

3. その他: アウトリーチ活動の重要な設問は、対象をどの層に絞るかということだろう。対象となるグループを例えば高校生や教員に絞り、ウェブサイトもこれに対応した内容で構成し、関連機関に領域のウェブサイトへリンクを張ってもらうのがより効果的かもしれない。(後略)



領域国際会議 TQP2012 (名大) の会期中に開催したアドバイザリーミーティング。左から(敬称略): S. Zhang、安藤恒也、J. Aarts、福山寛、A.J. Leggett。

【A.J. Leggett 氏】国際会議 TQP2012 開催時の評価(2012 年 5 月)

1. 研究に関して: 本領域は、急展開するトポロジカル量子現象の研究分野において、日本の物理学界特有の強みを、理論および実験の両面において巧く発展させている。なかでも印象的なのは、もしこのプロジェクトが実現していなければさらさらのままだったと思われる各研究分野間に「共通の文化」を築くのに成功したことである。世界的に見ても固有のまたはそれに近い専門知識に関する分野(例えば、 Sr_2RuO_4 、回転容器中の超流動 ^3He 、奇周波ペアリングなど)に引き続き焦点を合わせるのが賢明と思われる。方策としてだが、「奇周波ペアリングの普遍的出現の確立」は「～の出現範囲の研究」などとして、進行中の研究が結論ありきのものと思われさぬような表現にするのも一考に値すると思われる。

2. 運営に関して: 現在までの活動を見る限り、非常に成功していると評価できる。「重い電子系」研究と連携した研究会の実施は、特に興味深い活動である。国際会議に関しては、最近名古屋大学で開催された TQP2012 は、非常によくまとまっており、有意義であった。唯一の疑問をいえば、院生・PD を対象とした「若手相互滞在プログラム」の滞在期間が 1-2 週間というは短すぎる。

【S.C. Zhang 氏】国際会議 TQP2012 開催時の評価(2012 年 5 月)

1. 研究に関して: トポロジーが研究対象としては比較的あいまいだった時期から始動した本プロジェクトは、先見性と展望に満ちているといえる。(中略) 固体物理の異なる分野にわたる共通のテーマをまとめ、研究連携すべく独自に編成されている。国際会議 TQP2012 で講演された研究結果が著しく優れているだけでなく、ポスター発表も若い世代の素晴らしい活気にあふれたものである。

2. 運営に関して: 近年、数多くのトポロジカル物理の国際会議に出席しているが、本領域の TQP2012 は、トップレベルの内容というべきである。本会議で講演されたテーマはすべて、この分野における最先端の研究である。また、ポスター発表の質の高さも非常に印象的であった。

【Jan Aarts 氏】国際会議 TQP2014 開催時の評価(2014 年 12 月)

1. 研究組織と研究活動について: 2012年時の報告においては、私は本プロジェクトの開始時期が極めて有効であったと述べた。(中略) 2014年末においても研究速度は衰えることはなく、よっていくつものプロジェクトが実を結んだ。TQP2014国際会議では、欧米の一流の専門家たちが招待され、より広い観点からも本プロジェクトの成果が世界的であるということを明確にした。

この成果において非常に重要なのは、研究対象とした現象の多くがトポロジカル物質と呼ばれる一つの塊から派生したものであり、そのため異分野交流やプロジェクト内の様々なネットワークにおいて新しい研究成果が迅速かつ定期的に議論される体制を作ることによって更なる価値が生まれる、と早期に認識できたことである。(中略)

略)異なるタイプのワークショップや会議を開催することは一見すると負担である様だが、研究者の孤立を回避し、個人の課題だけに留まらぬようにするための、最良の手段なのである。

私が特に感心し、同時にリーダーシップが評価されるべきだと感じた二つの成功した活動例は、例えば若手研究者だけの会議の開催・運営をさせるなど、若手研究者を巻き込む努力と、公募研究である。関係する外部の発展を取り込み、また、有望な若手研究者に必要な機会を与えるという仕組みをもつことは、重要である。

最後に、2014年の会議において本プロジェクトがその勢いを全く失っていないことが示された。今後は、このプロジェクトの主要なネットワークが継続され、組織的な成果が失われないための道が開けることを望んでいる。



領域国際会議 TQP2014 (京大) の会期中に開催したアドバイザリーミーティング。常任のアドバイザリー (6名中4名出席) に加え、海外からの主だった招待講演者にも出席・議論をいただいた。左から (敬称略) : C. Kallin, H. Halperin, A. Golubov, G. Volovik、福山寛、家泰弘、安藤恒、J. Aarts。

2. 領域運営に関して: これらの様々な活動の効果的な活用については先に述べたとおりである。更に挙げるとすれば、若手相互滞在プログラムについてだろう。(中略) 今回の議論によって、このスキームにより作られた機会は有効活用され、やはり特に若手研究者にとって有益だったことがわかる。

前回のレポートで私が述べたことに特に変更すべきことはない。すなわち、TQPプログラムはあらゆる賢明な手段により、このようなプロジェクトが本来生み出すべき価値を、実際に見出しているといえる。

3. その他: 特にないが、このプロジェクトで発展した素晴らしい活動手法が失われないよう注意すべきである。アドバイザリー会議では、この様な強力なプロジェクトは国際的な役割も担い、例えば3月のアメリカ物理学会でのセッションの開催を主導してもよいのではないかと、という意見も出された。(後略)

【安藤恒也氏】 H26 年度、領域終了直前の評価(2015 年 1 月)

1. 研究に関して: 当新学術領域は、(中略) 「トポロジー」あるいは「トポロジカル」をキーワードとした新しい現象の発見を目指すとともに、普遍概念を創出することを目的として数年前に発足し、本年度で終了となる。発足時には、理論的に予言されたようにトポロジカル絶縁体に特有の表面状態が存在することが実験的に示され、その重要性が一般的に認識され、研究が盛んになりはじめていた。(中略) ちょうどこのような時期にこの新学術領域を開始することができたのは、本学術領域の研究発展のために幸運であった。実際、世界をリードする多くの研究成果が生まれた。例えば、固体内部をほぼ完全絶縁化したトポロジカル絶縁体物質を実現し、トポロジカル結晶絶縁体などの新しい物質を世界に先駆けて実現することができた。また、スピン三重項超伝導体である Sr_2RuO_4 における対称性特有の磁束糸や表面状態の観測、超流動ヘリウム 3 におけるマヨラナ表面状態の理解の深化、トポロジカル物質を特徴づける周期表の導出、・・・なども特筆すべき成果と思われる。

2. 領域運営に関して: 領域運営に関しては、今後他の新学術領域の参考となるような新しい試みが行われた。領域全体の研究会は当然のこと、2 回の大きな国際会議を開催し、世界の関連分野の発展に寄与するとともに、領域の研究成果の国際発信を行った。また、これまで 17 回の集中連携研究会を開催し、若手主導の国際会議の 2 度の開催や若手相互滞在プログラムにより、分野間の交流・情報交換に努めた。また、若手研究者の海外派遣や、海外の研究グループとの共同研究や研究協力なども活発に行われたようである。(中略) 上記のようなさまざまな取り組みの結果、領域内のほどよい連携を保ちながら、当新学術領域全体の活力を高めることに成功したと思われる。

3. その他: これまでに、領域に所属する研究者が多数の著名な賞を受賞している。特に、日本物理学会若手奨励賞の受賞が多いのは特筆に値する。若手研究者の昇任や、就職状況からもこの領域のすぐれた研究成果が分かる。この領域のニュースレターは非常に内容が濃く、優れたものである。急速に発展する研究を先導しながら、編集にかけた時間と努力に敬意を表したい。なお、世界への研究成果発信の面からは英文のニュースレターという可能性もあったかも知れない。

【家泰弘氏】 H26 年度、領域終了直前の評価(2015 年 1 月)

1. 研究に関して: 本領域は、超伝導体、超流動体、絶縁体などの量子凝縮系において対称性の破れに起因して生じるトポロジカルに非自明な系を対象として、新奇な量子現象を研究・開拓することを掲げている。(中略) 多様な系の専門家たちが分野横断的に研究することによるシナジー効果が出ているものと評価できる。

本領域メンバーにより質・量ともに優れた成果が生み出されていることは、論文リストやその被引用度数、また、

若手も含むメンバーの数々の受賞に反映されている。

理論家と実験家との連携により、新たなトポロジカル系の可能性が開拓され、それらの系統的分類表である「トポロジカル周期表」が拡大充実していることも本領域の活動の大きな貢献と言える。

2. 領域運営に関して: 17 回におよぶ集中連携研究会の開催や、若手の短期滞在プログラムを実施して、領域メンバーの研鑽、および、アイデアや技術ノウハウの交換に努めているなど、新領域の運営の手本となるような工夫と実践的な取組みが行われている。

カナダの CIFAR との連携をはじめ海外研究グループとの連携協力による、若手研究者の海外派遣や海外からの受け入れも有効に機能していると思受けられる。H26 年 12 月に開催した領域主催の国際会議には、海外からもアクティブな研究者が集まり活発な議論が行われるなど、本領域の海外での認知度も高い。

ニューズレターやホームページも充実しており、当該分野の基礎概念についての領域メンバーによる解説など、領域外の初学者の参考になるような情報も掲載されている。

3. その他: 本領域メンバーによる、中高校生や市民向けの講演会など、アウトリーチ活動も活発に行われており、評価できる。(ただし、本評価者は、競争的資金の受給とアウトリーチ活動の義務化をリンクするような制度指針自体には大いに疑問を抱いている。)

【福山寛氏】 H26 年度、領域終了直前の評価 (2015 年 2 月)

1. 研究に関して: 本領域は、系の対称性をトポロジカルな観点から分類整理する物質科学の新しい概念(見方)を超伝導や超流動という低温特有の量子現象に適応することで新たな展開を図った意欲的な研究である。対象によって(1)時間反転対称性が破れたカイラル超伝導体と期待される Sr_2RuO_4 およびその接合系、(2)クーパー対の対称性が p 波スピン三重項状態と確定している超流動ヘリウム 3、(3)空間反転対称性の破れた多彩な超伝導物質群、を研究する 3 班を設け、これに(4)幅広い観点からの理論研究を加えた、4 班構成で実施された。

主要な研究成果として、(1)では、異常な磁気相図の観測やカイラルエッジ電流の不検出など新たな謎が提起された一方、半整数量子渦の検出に初めて成功するなど、新奇超伝導体の対称性確定にトポロジカルな視点が不可欠であることを国内外に浸透させた功績が大きい。(2)では、表面マヨラナ準粒子の検出、表面カイラリティの直接観測、巨視的角運動量の観測など重要な成果が得られた。系のバルクの対称性がすでに確定しているために、これらは、トポロジカル概念の有効性を実験的に検証したという点でも高く評価できる。(3)では、トポロジカル絶縁体を出発点にしたトポロジカル超伝導体を創成し、カイラル表面超伝導状態の新たな候補物質を見出す重要な成果が得られた。奇周波数クーパー対の理論研究も進化した。総じて実験と理論の協調も大変上手く機能したと評価できる。

本領域研究は、トポロジカル絶縁体の発見を契機に世界の物質科学研究が系のトポロジーに注目しつつあったタイムリーな時期に実施され、上記のように大きな成果をあげたことで、我が国をトポロジカル超伝導・超流動研究の最先進国に押し上げたと考える。

2. 領域運営に関して: 卓越した領域運営がなされたと考える。特筆すべきは、領域内の分野や研究班を超えた「若手相互滞在プログラム」の実施である。大学院生を中心に若手研究者が他研究室に 1~2 週間短期間滞在学习して、異なる実験手法を肌で吸収したり研究議論できるこのシステムは、若手育成と領域内融合の促進という二重の意味で効果が大きかったと思われる。

次に、従来の新学術領域研究でも見られた若手だけによる研究集会の企画運営を、国際会議にまで規模を拡大した「若手国際会議」を二度開催したことも、若手育成の質を一段と充実させたものとして評価できる。(中略)様々な年齢層が領域運営に能動的に関与できることで、トップダウンだけでない学術的な活力を生む手法として、他の新学術領域でも有効な活動である。

「集中連携研究会」は、内外の最新の研究成果をいち早く領域メンバー内で共有し、領域研究の方向性を確認するために、領域研究を学術面で一番支えたシステムであろう。これを全17回実施したという事実は、本領域の充実をよく示している。

総括班メンバーを中心とした事務分担体制も、領域代表者のリーダーシップのもと、よく機能していたと感ずる。

3. その他: 本領域研究は、当該の基礎学問分野を格段に進展させるという新学術領域研究のミッションを十全に果たした。これに係わった全ての研究者に対し、その成功を祝福し、敬意を表したい。そして、公募研究も含めあらゆる領域内研究に学問的な好奇心を抱き、領域テーマに照らしたそれぞれの価値を引き出そうとする領域代表者の真摯かつ不断の姿勢が、この領域研究を成功に導いた最大の要因であったと感じている。