

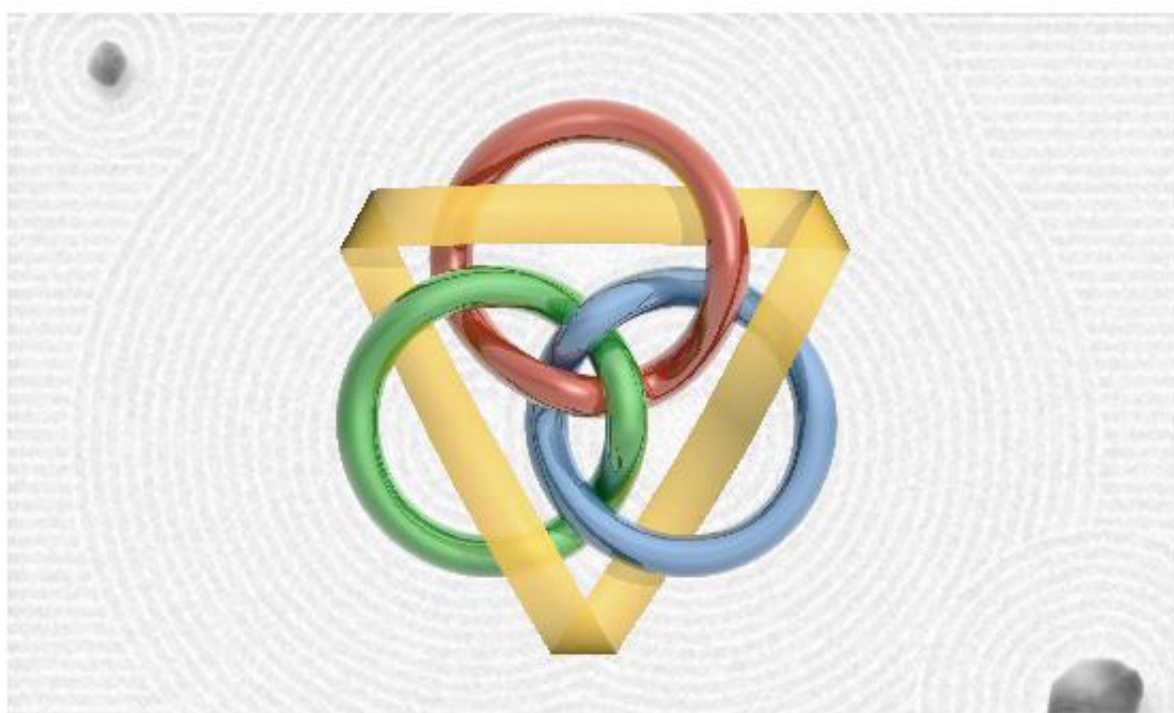
文部科学省 科学研究費補助金 新学術領域研究（平成 22 年度 -26 年度）

# 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象

TOPOLOGICAL QUANTUM PHENOMENA IN CONDENSED MATTER WITH BROKEN SYMMETRIES

## *NEWSLETTER* No. 1

ニュースレター / 第 1 号



FEBRUARY 2011

領域代表者からのメッセージ

研究概要紹介

ニュース

▲前野悦輝氏、仁科記念賞受賞▽トポロジカル絶縁体の新物質発見

トピックス

▼「トポロジカル絶縁体」って何がトポロジーなの？▼ SrTiO<sub>3</sub> 電場誘起超伝導体

△トポロジカル超伝導体の物理

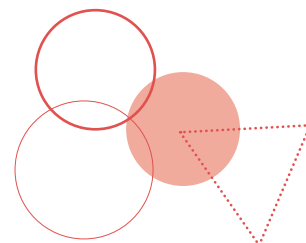
若手相互滞在プログラム報告

新メンバー紹介

2010 年研究会報告

# NEWSLETTER No.1

## CONTENTS



- 3 巻頭言  
領域代表者からのメッセージ
- 4 研究概要の紹介  
計画研究班 A01、B01、C01、D01
- 8 領域メンバー紹介
- 9 ニュース  
前野 悦輝氏仁科記念賞受賞！  
トポロジカル絶縁体の新物質発見（安藤 陽一）
- 11 トピックス  
「トポロジカル絶縁体」って何がトポロジーなの？（安藤 陽一）  
SrTiO<sub>3</sub> 電場誘起超伝導体（上野 和紀）  
トポロジカル超伝導体の物理（佐藤 昌利）
- 19 若手相互滞在プログラム報告  
上野 和紀（東北大学）  
江口 学（京都大学）
- 21 新規採用研究者の紹介  
俣野 和明（岡山大学）  
松尾 繁政（広島大学）
- 23 2010 年研究会報告  
第1回～4回集中連携研究会、総括班会議、第1回領域研究会
- 29 今後の会議のお知らせ

領域代表者からのメッセージ

## 「トポロジカル量子物理学」の理解に向かって

前野 悦輝／京都大学大学院理学研究科

トポロジーとは「連続的に変形することで互いに共通とみなせるかどうかを分類する概念・手法」です。このような数学的な概念を現代物理学の新現象に広く導入することで、現象の理解と整理を深めるだけでなく、異なる物質系での一見全く異なる現象を結び付けて現代物理学のさらなる展開を図るべく、本新学術領域研究が発足しました。この領域の研究では連続的に変形する形とは、量子力学の波動関数のもつ対称性や位相などに基づく「形」です。

トポロジカルに特徴づけられる量子現象としては、これまでに超伝導体・超流動体の渦量子化、Aharonov-Bohm 効果に始まり、量子ホール効果、分数量子ホール効果、スピンホール効果などがあげられます。このようにトポロジーが物理の理解に根源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きました。この潮流が最近大きな展開を見せています。半導体や常伝導金属に加えて、超伝導体・超流動体・絶縁体の界面での現象にもトポロジカル量子現象として、互いに相補的に分類付けられるものがあると認識されるようになり、これらを実証しようとする機運が盛り上がっています。

超伝導は電子の超流動状態ですから、超流動ヘリウムや冷却原子気体と対応づけて研究することの有効性は明らかです。しかしこれまで世界的に見ても特に実験グループが同一組織で強く連携して研究を進めることはまれでした。また電子のスピンと軌道運動の結合の強い物質系で、なおかつ空間反転の対称性の破れた舞台では、スピン三重項超伝導体やトポロジカル絶縁体といった新しい物質状態が注目されていますが、実はこれら一見全く異なる現象の間にも対応関係が示唆されています。

本領域メンバーが世界を先導して、これら物質系の違いを超えた統合的な研究を推進するという強い意気込みで、5年後には「トポロジカル量子物理学」という新たな認識が生まれ育っているこ

とを目指して研究を進めてまいります。

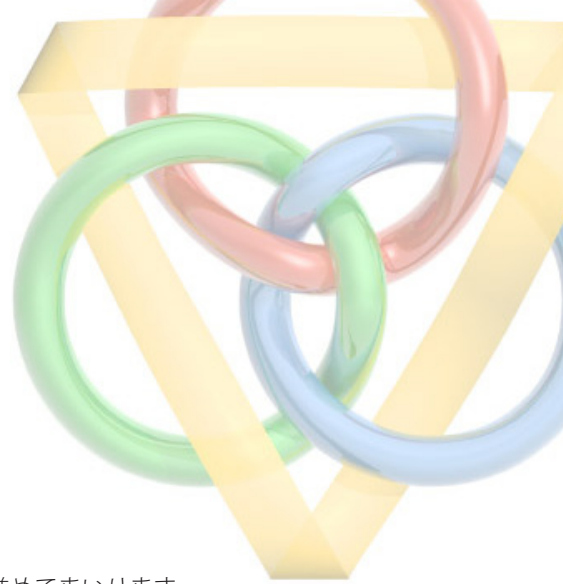
### ●●理念と目的●●

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において、様々な対称性の破れに基づくトポロジカルに特徴付けられる新奇な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ります。

その研究対象は、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、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・界面です。「バルク」で創発する対称性の破れた量子現象に対する徹底的な理解は、「エッジ」での量子現象の本質をトポロジーの観点から理解するための第一ステップといえます。

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、異分野連携を格段と強化することでトポロジカル量子現象の新学術分野を一気に拡大します。これらの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ことが期待されます。

本領域で対象にする主な物質系は、(A) 時間反転対称性の破れた超伝導体、(B) スピン三重項超流動体、(C) 空間反転対称性の破れた超伝導体・絶縁体で、それらに太い横糸を通す形で (D) トポロジカル凝縮体の量子現象の理論を展開します。このために計画研究 A01, B01, C01, D01 の各班を設けるとともに、公募研究によって研究の一層の進展を目指します。



## 計画研究 A01

## 時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

前野 悦輝 / 京都大学大学院理学研究科 教授

本研究計画「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」の目的は、電子のスピンや軌道角運動量の活性によって時間反転対称性が破れた超伝導体のバルク物性の理解を極め、その界面や表面で顕在化する新奇な量子現象を開拓することである。具体的には研究代表者らが発見し、スピン三重項超伝導体の実験的証拠の揃ったルテニウム酸化物を舞台とする研究、また従来型の超伝導体と強磁性体とのハイブリッド構造体を舞台とする研究を展開する。

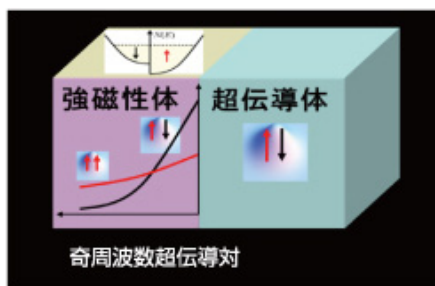
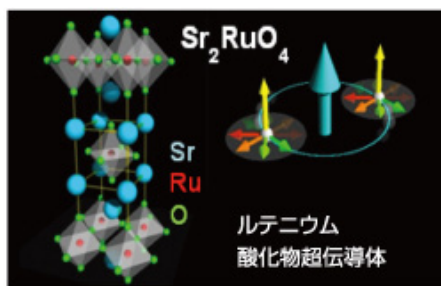
前者では  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  自体の時間反転対称性の破れた「カイラル超伝導状態」を活用し、微細加工技術を駆使して、常伝導金属や通常の超伝導体との接合界面、常磁性や強磁性金属との共晶界面、微小結晶表面などに現れるスピン三重項超伝導特有の現象を探求する。また後者では、強磁性半導体を用いて、微細加工技術や強磁性の高制御性を生かし、強磁性体中に誘起される超伝導位相の空間変調や、強磁性体の時間反転対称性の破れを反映した超伝導状態を探索する。また、これらに共通するスピン三重項電子対の界面現象を理論的に解析する。連携研究者は、微細加工の技術、超伝導 / 強磁性接合の理論、核磁気共鳴 (NMR) による研究をとおして計画研究に寄与する。

これらの新奇現象の多くは、トポロジカルに特徴づけられた状態に起因し、本領域の研究者がその学理構築に寄与してきた、スピン超流動、奇周波数ペアリング、カイラルエッジ流などの新概念 (D01) と深く関わっている。これらの概念は、多様な系の多彩な現象にも共通するため、電荷をもたないスピン三重項超流体 (B01 班)、空間の反転対称性を破る系での超伝導 (C01 班) との研究連携も密接に行ない、トポロジカル量子現象の新学術領域構築に寄与する。



まえの・よしてる

1957年京都市出身。79年京都大学理学部卒業、84年カリフォルニア大学サンディエゴ校大学院博士課程修了。京都大学国際融合創造センター教授などを経て現職。88年-89年には、スイス連邦IBMチューリッヒ研究所においてノーベル受賞者ベルノルド博士のもとで高温超伝導を研究。低温物理学を専門とし、ルテニウム酸化物における超伝導の発見とスピン三重項状態の研究など、新たな研究分野の発展に取り組む。



計画研究 B01

## スピン三重項超流動体の新奇界面現象

石川 修六 / 大阪市立大学大学院理学研究科 教授

本研究計画「スピン三重項超流動体の新奇界面現象」の目的は、内部自由度の大きなスピン三重項  $p$  波超流動  $^3\text{He}$  の表面や界面における新奇量子現象の探求およびその実証にある。

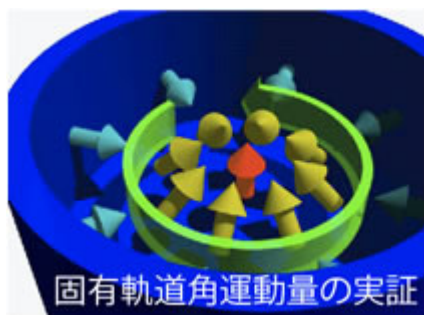
まず超流動  $^3\text{He}$ -A 相において、主に回転冷凍機中での NMR により、細い円筒容器内の折り目構造（テクスチャ）の決定とその応答から、長年の未解決課題である固有軌道角運動量有無の決着を図る。同時にその理論的意義を考察し、トポロジカル量子現象としての関連性を明らかにする。また、超流動  $^3\text{He}$ -B 相において、横波超音波分光法によって、マヨラナ型励起であることを示した界面アンドレーエフ束縛状態の特異な物性を、実験的及び理論的に明らかにする。さらに、狭い隙間を持つ平行平板内部空間での磁気相図の決定とエッジ流の探索を行う。

制限空間内での超流動  $^3\text{He}$  の表面状態は、A01 班のカイラル超伝導のエッジ状態、C01 班の空間反転対称性の破れた超伝導体やトポロジカル絶縁体の表面状態と類似した数理構造を持つことが知られる。したがって、これらの班との連携およびトポロジカル凝縮体としての理論展開を含めて研究を推進する。さらに D01 班で予言された半整数量子渦や、特異渦の芯に局在すると予想されるマヨラナ型準粒子、またエアロジェル中での奇周波数超流動状態を、相補的な実験方法である核磁気共鳴 (NMR) や音波を用いて検証する。



いしかわ・おさむ

1957 年山梨県生まれ。80 年京都大学理学部卒業、86 年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。86 年大阪市立大学理学部に助手として採用され、2009 年から現職。1996 年～1999 年にはアメリカ・カリフォルニア大学バークレー校でバックワード教授と回転する超流動  $^3\text{He}$  の共同研究を行う。超低温物理学を専門として主にヘリウム系の超流動などを研究してきたが、電子系（超伝導）との研究の携進を進め、トポロジカル凝縮現象の理解を深めたい。



計画研究 C01

空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象

鄭 国慶／岡山大学大学院自然科学研究科 教授

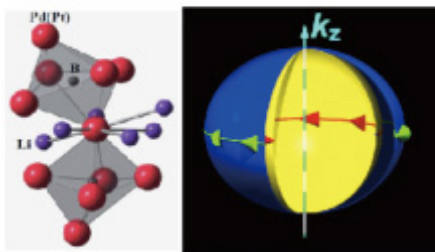
本研究計画「空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象」の目的は、空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用(SOI)が織り成す新奇なトポジカル量子現象を、(1)空間反転対称性の破れた(Noncentrosymmetric, NCS)超伝導体、(2)電場誘起表面超伝導体、(3)トポジカル絶縁体、において探究することである。研究のアプローチとしては、連続的にSOIを制御したNCS超伝導体や、SOIの異なる電場誘起表面超伝導体、及び高品質なトポジカル絶縁体を作製し、基礎物性を明らかにしながら新奇現象を開拓する。新規物質の詳細を明らかにするため、量子振動などの実験法にバンド計算を組み合わせてフェルミ面を決定するなど、実験と理論が強い連携を図りながら、3つの物質系に共通する普遍的な概念の創出を目指す。

さらに「界面」に注目し、A01班、B01班との連携を深めて、スピン三重項超伝導体を含む接合における特異な量子状態の実証や、トポジカル絶縁体と強磁性体・超伝導体との接合で予想されるマヨラナ型準粒子などエキゾチックな素励起の実証を行う。

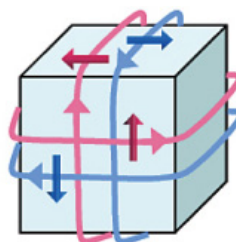


てい・こくけい

1962年中国福建省生まれ。1985年神戸大学理学部卒業、1990年大阪大学基礎工学研究科博士課程修了。大阪大学助手、助教授をへて、2004年より岡山大学教授。核磁気共鳴(NMR)法を用いて、超伝導や磁性の研究を進めてきた。特に、低温、高圧、強磁場(パルス磁場を含む)などの極限環境下測定技術の開発に力を注ぎ、超伝導薄膜や多結晶バルク試料の作製も行ってきた。銅酸化物高温超伝導、鉄ヒ素系高温超伝導、巨大磁気抵抗効果、コバルト酸化物超伝導体、重い電子系超伝導体、空間反転対称性の破れた超伝導体などの研究を楽しんできた。



$\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  NCS 超伝導体



表面スピン流

計画研究 D01

トポロジカル凝縮系の理論

田中 由喜夫 / 名古屋大学大学院工学研究科 准教授

本計画研究「トポロジカル凝縮系の理論」の目的は、非自明なエッジ（表面・界面）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、トポロジカル絶縁体の研究を行うことである。さらに、これらの異なった物質系に共通した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ことである。本理論班の研究対象は、幅広い物質群における多様なトポロジカル物理現象である。以下のようなテーマを計画している。

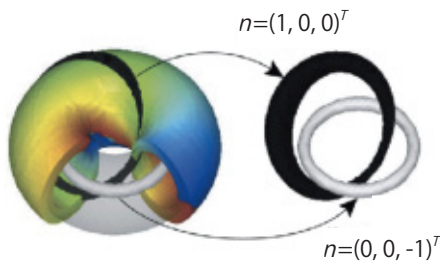
- ・時間反転（空間反転）対称性の破れた超伝導体のエッジ状態の研究・量子現象の解明
- ・新奇なクーパ対（奇周波数クーパ対）の理論
- ・トポロジカル絶縁体の電子構造、エッジ（表面）状態の物性の解明
- ・トポロジカル絶縁体接合系における新奇現象の探求
- ・内部（スピン）自由度を持ったボーズ・アインシュタイン凝縮体（BEC）におけるトポロジカル励起の研究
- ・BECにおける非可換量子渦のダイナミクスとその物性の研究
- ・超流動体における非自明な量子渦の研究
- ・トポロジカル量子現象に内在する普遍的概念、数理構造の解明

本理論班は、実験を主体とする他班との研究交流を密接に行いながら、新物理概念構築の中心を担うことにより本新学術領域の飛躍的發展を目指す。

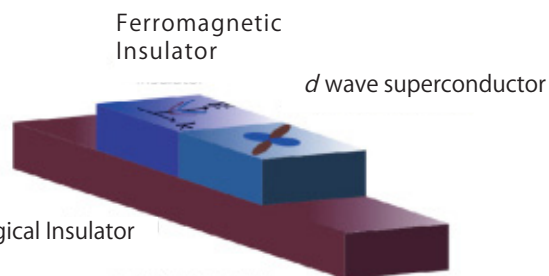


たなか・ゆきお

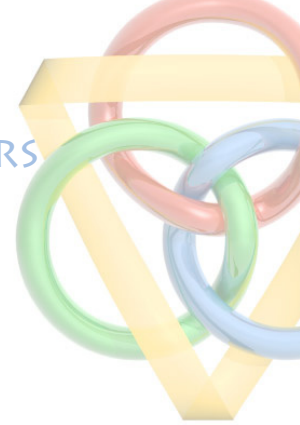
1962年生まれ。1990年東京大学大学院理学系研究科、物理学専攻博士課程修了、同年新潟大学理学部・助手、1996年新潟大学理学部・助教授、1998年より名古屋大学大学院工学研究科・助（准）教授。専門は物性物理学理論、低温物理理論。これまで、超伝導の理論研究を中心に幅広く研究活動を行ってきた。超伝導現象の研究としては、トンネル効果、ジョセフソン効果、近接効果といった現象の解明を行い、特にアンドレーエフ束縛状態の研究で多くの成果を挙げた。また様々な強相関超伝導体の発現機構の理論の研究にも携わってきた。本新学術領域では、奇周波数電子対、マヨラナ型準粒子励起といった新奇な概念の確立を目指したいと考えている。



ノット構造をもつ励起



マヨラナ励起の創造



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

領域メンバー紹介

●○アドバイザー

国内	安藤 恒也 福山 寛 家 泰弘	東京工業大学 大学院理工学研究科 東京大学 大学院理学系研究科 東京大学 物性研究所
国際	Jan Aarts Anthony J. Leggett Shoucheng Zhang	Leiden University, Kamerlingh Onnes Laboratory The University of Illinois at Urbana-Champaign Stanford University

○▼計画研究 メンバー

AO1： 時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象

研究代表者	前野 悦輝	京都大学 大学院理学研究科
研究分担者	柏谷 聡 赤崎 達志 浅野 泰寛	産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 NTT 物性科学基礎研究所 量子電子物性研究部 北海道大学 大学院工学研究院
連携研究者	寺嶋 孝仁 米澤 進吾 石田 憲二 前川 禎通	京都大学 低温物質科学研究センター 京都大学 大学院理学研究科 京都大学 大学院理学研究科 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター

BO1： スピン三重項超流動体の新奇界面現象

研究代表者	石川 修六	大阪市立大学 大学院理学研究科
研究分担者	野村 竜司 東谷 誠二 三宅 和正	東京工業大学 大学院理工学研究科 広島大学 総合科学研究科 大阪大学 大学院基礎工学研究科
連携研究者	小原 顕 久保田 実 中原 幹夫	大阪市立大学 大学院理学研究科 東京大学 物性研究所 近畿大学 理工学部

CO1： 空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象

研究代表者	鄭 国慶	岡山大学 大学院自然科学研究科
研究分担者	安藤 陽一 稲田 佳彦 野島 勉 上野 和紀 獅子堂 達也	大阪大学 産業科学研究所 岡山大学 大学院教育学研究科 東北大学 金属材料研究所 東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 広島大学 大学院先端物質科学研究科
連携研究者	岩佐 義宏 横谷 尚睦 永長 直人	東京大学 大学院工学系研究科 岡山大学 大学院自然科学研究科 東京大学 大学院工学系研究科

DO1： トポロジカル凝縮系の理論

研究代表者	田仲 由喜夫	名古屋大学 大学院工学研究科
研究分担者	上田 正仁 水島 健 佐藤 昌利	東京大学 大学院理学系研究科 岡山大学 大学院自然科学研究科 東京大学 物性研究所
連携研究者	押川 正毅 小口 多美夫 川口 由紀	東京大学 物性研究所 大阪大学 産業科学研究所 東京大学 大学院理学系研究科



## 前野悦輝 氏 2010年仁科記念賞を受賞！

**本** 新領域研究代表の前野悦輝氏が、2010年度仁科記念賞を受賞しました。受賞対象業績は「スピン三重項超伝導体、ルテニウム酸化物の発見」です。前野氏は、1994年、銅酸化物と同じ二次元構造を持つ層状ルテニウム酸化物  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  が超伝導を示すことを発見しました。前野氏は、この物質の研究を進める中で、従来の超伝導にはみられない強い不純物依存性という特徴的な性質を明らかにし、この物質がスピン三重項超伝導の可能性のあることを指摘しました。一方、純良な単結晶の育成手法を継続的に発展させ、高品質な結晶の低温比熱の測定から超伝導ギャップの構造を明らかにし、さらに、超伝導転移温度の同位体効果、上部臨界磁場の抑制効果等を明らかにしました。

前野氏は、共同研究者とともに多くの実験を行い、この系が極めて珍しいスピン三重項超伝導であることを直接的に示す多くの結果を得ました。例えば、時間反転対称性の破れをミュオンスピン緩和法ならびに磁気光学カー効果で示し、さらにクーパ対の奇パリティ性ならびに時間反転対称性の破れを超伝導接合素子等を用いて示しました。これらはいずれもこの系がカイラル p 波対称性を有するスピン三重項超伝導であるという大変興味深い性質を示しています。さらに混晶系  $(\text{Sr,Ca})_2\text{RuO}_4$  の電子相図を研究し、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  がモット絶縁体に近い強相関物質であることを実証し、モット絶縁体がバンド幅制御による金属化によって超伝導を発現するという新しいルートを実現しました。

以上のように、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  において三重項超伝導という新しいタイプの超伝導を発見して、その現象と

物質の両面から電子状態の解明に尽力し、著しい成果を積み重ねることによって、超伝導の研究の舞台に新しい局面を開いてきました。

本新学術領域研究では前野氏のこれまでの成果をさらに発展させ、スピン三重項超伝導体のみならず、強磁性/超伝導系、超流動ヘリウム、空間反転対称性を破る超伝導体、トポロジカル絶縁体などに、トポロジカル電子現象としての共通な側面への展開を図ります。

前野氏のこれらの研究は、超伝導の基本的な理解に大きなインパクトを与え、国内外の多数の理論および実験研究者に大きな影響を与えて続けており、当該分野における前野氏の指導的立場を示しています。今後のより一層のご活躍を期待いたします。

(文責 柏谷 聡)

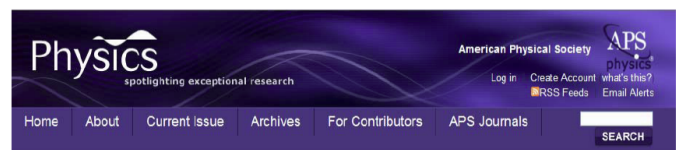


仁科記念賞授賞式にて前野悦輝氏（左）と超伝導発見時の大学院生だった橋本博明氏（現衆議院議員）

## トポロジカル絶縁体の新物質発見

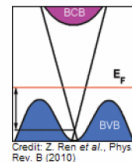
安藤 陽一／大阪大学産業科学研究所 教授

トポロジカル絶縁体とは本来、バルク絶縁体の表面にトポロジカルな金属状態が生じている物質のことです（本ニュースレターの中の「トピックス」のページに簡単な解説があります）。しかし現実には、バルクが本当に絶縁体になっている（つまりバルクには電気が流れない）ような材料はこれまでに得られていません。このため、トポロジカル絶縁体に特有の金属的表面に流れる電流の特性を実際に調べることは非常に困難でした。計画研究C班の分担者である大阪大学の安藤グループでは最近、これまでに発見されたとのトポロジカル絶縁体物質よりも格段にバルク絶縁性の高いトポロジカル絶縁体の新物質を発見しました。さらにそのバルク絶縁性の高さを利用して、トポロジカルな表面状態の電気伝導率が強磁場で量子振動現象を示す様子を明確に観測することにも成功しました。この成果は、物理学研究上の重要なトピックスを伝える米国物理学会のオンライン雑誌 *Physics* で紹介されました。



APS » Journals » Physics » Synopses » Insulating behavior in topological insulators

### Insulating behavior in topological insulators



Credit: Z. Ren et al., Phys. Rev. B (2010)

#### Large bulk resistivity and surface quantum oscillations in the topological insulator $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$

Zhi Ren, A. A. Taskin, Satoshi Sasaki, Kouji Segawa, and Yoichi Ando  
Phys. Rev. B 82, 241306 (Published December 9, 2010)

• Semiconductor Physics • Mesoscopics

3D topological insulators represent a unique quantum state for matter that is supposed to show insulating behavior in the bulk and spin-dependent metallic conduction on the surface. In practice, the best-known exemplars of materials that show a topologically protected metallic surface state, such as  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , are also conducting in the bulk due to the presence of vacancies. Significant efforts in trying to find a topological insulator that is truly insulating in the bulk have met with little success.

Presenting their results as a Rapid Communication in *Physical Review B*, Zhi Ren and colleagues from Osaka University, Japan, have synthesized a new topological insulator,  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ , that approaches insulating behavior in the bulk with a high resistivity. Ren *et al.* demonstrate variable-range hopping that is the hallmark of an insulator in high-quality single crystals of  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  and Shubnikov-de Haas oscillations coming from the 2D surface metallic state. Surface contribution to the total conductance of the crystal at 6% is the largest ever achieved in a topological insulator. From a detailed study of the Hall effect, the authors also determine the transport mechanism in the bulk that reveals an impurity band in the band gap along with hopping conduction of localized electrons. These results pave the way for exploiting the unique surface conduction properties of topological insulators. – *Sarma Kancharia*

米国物理学会 "Physics" 掲載ページより

## 「トポロジカル絶縁体」って、何がトポロジーなの？

安藤 陽一／大阪大学産業科学研究所 教授

トポロジカル絶縁体とは、一言でいえば、バルクにはエネルギーギャップを持つ絶縁体なのに、その“エッジ”（2次元系なら端、3次元系なら表面）にギャップレスの金属状態が生じている物質のことです。高移動度を持つ2次元半導体が強磁場中で量子ホール効果を示すときの電子状態でも似たような状況が生じていますが、トポロジカル絶縁体の場合は、磁場などなくてもこのような特殊な状態が存在しているのです。つまり、金属でも絶縁体でもない「新しい種類の固体物質」を実現しているのがトポロジカル絶縁体、とすることができます。

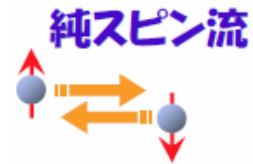
トポロジカル絶縁体を持つこのような性質は、その中の電子状態を記述する波動関数のパリティ、つまり、空間反転操作に対して波動関数の符号が変わるか否か（符号が変わればパリティは奇、変わらなければ偶）に関係しています。位相幾何学で出てくるトポロジカル不変量とは、ある空間上の「曲面」（いまの場合はヒルベルト空間上の波動関数）を連続的に変形しても変化しない量のことですが、量子状態を持つパリティの偶奇性は、波動関数を連続変形しても保存されるので、これをトポロジカル不変量とみなすことができます。数学では整数群を $Z$ で表し、それを偶数と奇数に分けた商群を $Z_2$ と表記するので、何らかの性質の偶奇性にもとづく位相幾何学的分類を $Z_2$ トポロジーと呼んでいます。普通の絶縁体（真空を含む）の量子状態は偶パリティを持つので、その属する $Z_2$ トポロジカルクラスは「偶」ですが、トポロジカル絶縁体では何らかの理由で（たいていは強いスピン軌道相互作用に起因するバンド反転のために） $Z_2$ トポロジーに関して「奇」である量子状態が実現しています。

トポロジーの異なる絶縁体波動関数の間では、一方から他方へ連続的に遷移することはできないので、普通の絶縁体とトポロジカル絶縁体をくっつけるとその界面で一度ギャップが閉じ、“絶縁体以外の状態”、つまり金属状態が現れることとなります。これがトポロ

ジカル絶縁体のエッジに金属的な状態が現れる理由です。

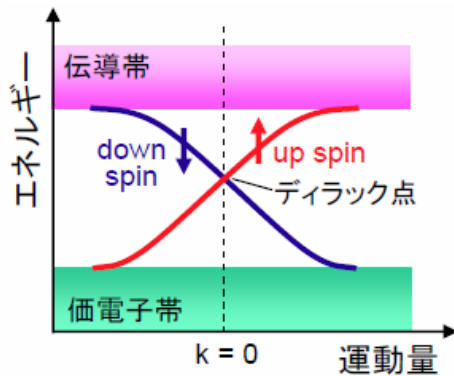
このような $Z_2$ トポロジーの原理で生じるエッジ状態の中では、右へ進む電子と左へ進む電子が時間反転対称性の要請のためにそれぞれアップとダウンの異なるスピン状態を取ります。このような、電子の運動方向とスピンの向きが絡み合った状態は、「ヘリカルなスピン偏極を持っている」といいます。

このようなヘリカルにスピン偏極したエッジ状態は、平衡状態において無散逸の純スピン流を運んでいると考えることができま



す。その平衡を破って電流を流すと、無散逸スピン流のバランスが崩れて電流と垂直な方向にスピン偏極が現れ、これがスピンホール効果として観測されることが期待されます。ヘリカルな1次元エッジ状態においては、その中の電子は、スピンの向きが反転するような散乱を受けない限り一方向にしか進めないで伝導はバリスティック（弾道的）になり、スピンホール伝導度は量子化されます。歴史的には、このような量子スピンホール効果を示すバルク絶縁体として量子スピンホール絶縁体がまず理論的に提案され、それが後にトポロジカル絶縁体と呼ばれるようになった、という経緯があります。

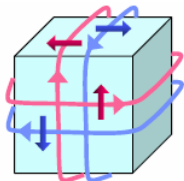
ヘリカルなスピン偏極をしたエッジ状態においては、一般の運動量 $k$ においてスピンの自由度に関する縮退が解け、アップかダウンのいずれか一方のスピン状態しか取れません。運動量 $-k$ にはもう一方のスピン状態が対応します。また $k=0$ においては、クラマーズの定理によって、アップとダウンのスピン状態が縮退しています。これはつまり、 $+k$ と $-k$ に分かれていたアップスピンとダウンスピンの2本の分散は、 $k=0$ では必ず交わる（次ページ図参照）ことを意味します。 $k=0$ の十分近くではそれぞれの分散を直線で近似で



### トポロジカル絶縁体の " エッジ " に現れるディラック電子系のエネルギー分散とスピン偏極

きるので、これは  $k = 0$  に電荷中性点（ディラック点）を持つディラック電子系と見ることができます。このように、トポロジカル絶縁体における時間反転対称性は、ディラック電子系の出現を保証します。なおこのような原理によるディラック電子系の出現は、 $k = 0$  の他にも、ブリルアン域の境界で  $+k$  と  $-k$  が等価になる点（このような点を時間反転不変運動量と呼びます）を表面状態の分散が通るときにも起こります。従って、ヘリカルにスピン偏極したディラック錐がブリルアン域の中で時間反転不変運動量を囲むように存在するのが、トポロジカル絶縁体の大きな特徴です。なお、昨年のノーベル物理学賞の対象になったグラフェンにおけるディラック電子系はスピン縮退していますが、トポロジカル絶縁体のディラック電子系においてはスピンの「自由度」はなくなっており、スピンの向きが  $k$  によって自動的に決まってしまうところが重要な違いです。

**絶**縁体波動関数の  $Z_2$  トポロジと、それによって出現するトポロジカル絶縁体は、まず2次元系において量子スピンホール絶縁体として発見されましたが、その後、非自明な  $Z_2$  トポロジは2次元系に限らず3次元系でも考えられることが認識され、3次元トポロジカル絶縁体の存在が予言・検証されるに至りました。3次元系の場合、その“エッジ”状態である金属的表面状態は、2次元の場合のエッジ状態と同様、



3次元トポロジカル絶縁体におけるヘリカルにスピン偏極した表面状態

ヘリカルなスピン偏極をしたディラック電子系になっており、そこには無散逸の純スピン流が存在しています。

普通の金属や半導体でも、超高真空下の清浄表面にギャップレスの金属的表面状態が現れることがあります（例えば金やビスマスの表面に現れる Rashba 分裂したスピン偏極表面状態が最近注目を集めています）が、このような表面状態は、分子の吸着など周期ポテンシャルを乱す要因があると容易に局在してしまいます。これに対してトポロジカル絶縁体の表面状態は、上記のようなトポロジカルな原理によってその存在が保証されているため、“連続変形”に対応するような摂動によって消失または局在することはありません。そのためこれは「トポロジカルな表面状態」と呼ばれます。

このトポロジカルな表面状態の中では、電子の散乱は ( $k \rightarrow -k$  の後方散乱以外は) 禁止されないため、量子スピンホール効果は起きません。その代わり3次元トポロジカル絶縁体は、ヘリカル・ディラック電子性という顕著な特徴に加えて、量子化された電気磁気効果や、超伝導体との接合におけるマヨラナ粒子の出現など、非常に興味深い物理を示すことが理論的に予想されていて、いわば「新奇な量子現象の金鉱脈」として、いま世界的に大きな研究ブームが起きています。本新学術領域では、トポロジカル絶縁体におけるこのような新奇なトポロジカル量子現象を検証・解明することを重要な目標の一つとしています。

### 著者紹介



#### あんどう・よういち

1964年東京都出身、87年東京大学理学部卒業、89年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、94年博士（理学）。（財）電力中央研究所上席研究員などを経て2007年から現職。物性物理学（特に極低温実験）と応用化学（特に単結晶育成）が専門。

## SrTiO<sub>3</sub> 電場誘起超伝導

上野 和紀／東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助教

### 1. はじめに

銅酸化物超伝導を始めとする多くの超伝導体が絶縁体母材料への化学ドーピングによって開発されてきた。化学ドーピングでは母材料の構成元素の一つを価数の異なる不純物元素で置き換え、電気を流す電子やホールといったキャリアを材料へ供給する。図1に示すように多くの半導体・絶縁体がキャリア濃度の上昇とともに超伝導を示す。その中でも、SrTiO<sub>3</sub>は $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>以下という最も低キャリア濃度で超伝導を示す材料である [1]。

さて、絶縁体(半導体)にキャリア濃度を誘起するもう一つの方法が電界効果を用いた電気的なキャリアドーピングである。シリコンなどの半導体の上に絶縁体、金属膜を積層した構造を作成し、金属と半導体の間に外部から電圧をかけると、この構造はコンデンサとして働き、半導体表面には電荷が蓄積する。この原理を応用した電界効果トランジスタ(FET)は低消費電力のスイッチング素子として情報産業を支える基本素子となっている。このFETを用いて超伝導材料の特性を変調させようとする研究は50年にも及ぶ長い研究の歴史がある [2,3]。しかし、絶縁体に電場誘起のみによってキャリアドーピングし、超伝導を作り出すことは今まで誰にもできなかった。FETで蓄積可能なキャリア濃度は絶縁層の絶縁破壊によって制限されるが、超伝導を誘起するには図1にあるように $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>程度のキャリア濃度が必要である。これほど膨大な量のキャリア蓄積に耐える絶縁膜は知られておらず、電場誘起超伝導は不可能だと考えられてきた。10年ほど前に起きたBell研究所 Schonによる研究捏造事件では特殊なアルミナを絶縁膜とすることで高濃度のキャリア蓄積が実現できると報告されたが、最終的には全ての結果が捏造であったという結論となった [4]。

私の電場誘起超伝導の研究は、実はそのBell研の報

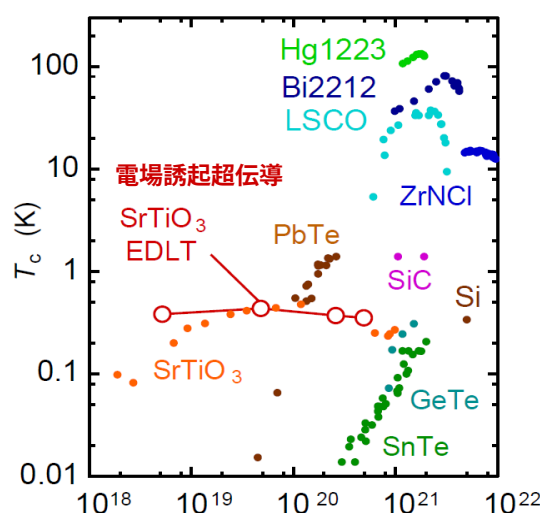


図1 化学ドーピングで得られる様々な超伝導体とSrTiO<sub>3</sub>での電場誘起超伝導。超伝導転移温度とキャリア濃度との関係を示す。

告を受けて開始したものである。後追いで始めた有機半導体にアルミナ絶縁膜で超伝導を目指す研究は当然うまくいかなかった。そこで、新たにFETで蓄積可能なキャリア濃度の範囲で超伝導が実現できる材料としてSrTiO<sub>3</sub>でのFET研究を開始した。

私自身は室温でのデバイス動作までしか実現できなかったが [5]、その後の東大高木研、リップマー研などでの研究によって低温でのデバイス動作が報告された [6,7]。一方、私は電気二重層トランジスタという従来のFETとは全く異なるコンセプトに基づくデバイスをSrTiO<sub>3</sub>へ応用する研究を開始した。FET開発で培われた半導体デバイス作成技術を取り入れながらデバイス開発を進めた結果、従来のFETでは到達不可能だったシートキャリア濃度にして $10^{14}$  cm<sup>-2</sup>(体積キャリア濃度 $10^{21}$  cm<sup>-3</sup>)もの高濃度キャリア蓄積を実現、完全な絶縁体のSrTiO<sub>3</sub>表面で始めて電場誘起超伝導を実現した [8]。

## 2. 電場誘起超伝導

電場誘起超伝導の実現の鍵となったのが、液体にイオンの溶けこんだ電解液を絶縁層として用いる電気二重層トランジスタの酸化物への応用である。図 2(a),(b) に示す半導体、電解液、金属がつながった構造を作り電圧を印加することで、電解液と半導体、金属の界面には正負のイオンが集まり、1 nm 程度の厚さを持つ電気二重層を形成する。電解液はイオン伝導性の物質であるため、電解液に電流が流れるためには電気二重層で電気化学反応が起き、イオンと電極の間で電子を授受する必要がある。そこで電解液として有機電解液のような電気化学的に安定な材料を用いると、電気二重層は固体絶縁層では不可能な 50 MV/cm を越える強電界まで電気化学反応（絶縁破壊）を起こさない [9,10]。その結果、半導体表面には FET と同様の原理で非常に高キャリア濃度の二次元電子ガス (2DEG) が生じ、図 2(c) に示すように電圧印加とともに伝導度が上昇する FET 動作が得られる。トポロジカル量子現象ではトポロジカル性の異なる界面で興味深い現象がおきるが、本研究はまず、電気二重層という古典的な固液界面に隠れていた新しい物理の種を見つけ出し、応用したものである。

SrTiO<sub>3</sub> 単結晶はキャリアドーピングしない状態ではシート抵抗 10 GΩ を越える完全な絶縁体である。こ

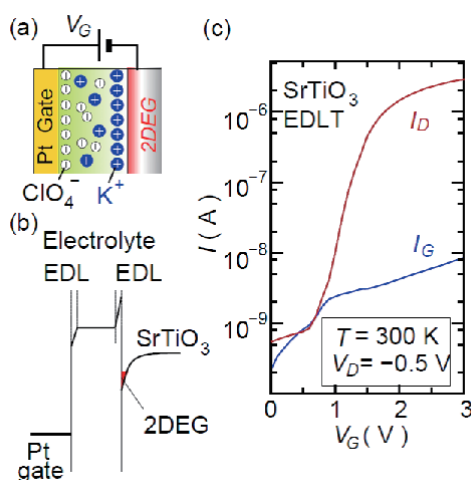


図 2 (a) 電気二重層の模式図

(b) バンドダイアグラム

(c) SrTiO<sub>3</sub> 電気二重層トランジスタの室温デバイス特性

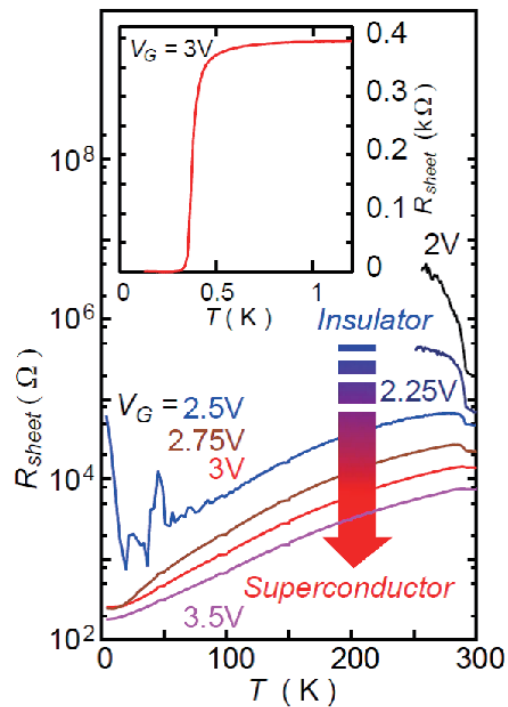


図 3 電場誘起による絶縁体・金属転移。  
挿入図：ゲート電圧 3 V での超伝導転移。

の SrTiO<sub>3</sub> を半導体として電気二重層トランジスタを作成すると、ゲート電圧によって表面に電荷が誘起される。図 3 に示すようにゲート電圧  $V_G$  の小さい領域では抵抗が温度とともに上昇する絶縁体的な振る舞いだが、電圧を十分に上げると低温まで抵抗が減少する金属的な振る舞いへと変化した。また、低温でホール係数からキャリア濃度を見積もると  $V_G$  に対しほぼ線形にキャリア蓄積がおき、 $V_G = 3.5$  V で  $1 \times 10^{14}$  cm<sup>-2</sup>、と一般的な Si MOSFET の 10 倍ものキャリア濃度が得られた。

このトランジスタをゲート電圧を印加した状態で希釈冷凍機により 0.02 K まで冷却することで、図 3 挿入図に示すようにゼロ抵抗への超伝導転移を観測した。さらに、磁場や電流の印加によりゼロ抵抗からノーマル抵抗に戻ることも確認された。これらの挙動は超伝導の特徴であり、SrTiO<sub>3</sub> 表面が電場誘起キャリアにより超伝導状態になっていると考えられる。

### 3. 電場誘起超伝導の二次元性評価

二次元超伝導の研究は Nb や Bi など金属薄膜で主に行われてきた。一方、電場誘起超伝導は絶縁体表面に電場によって閉じ込められた二次元電子ガスが超伝導を示す。電場によって反転対称性を破ることで初めて超伝導になるという点、二次元電子ガスが深さ方向に濃度勾配を持つなどの点で金属薄膜の二次元超伝導とは本質的に異なる。

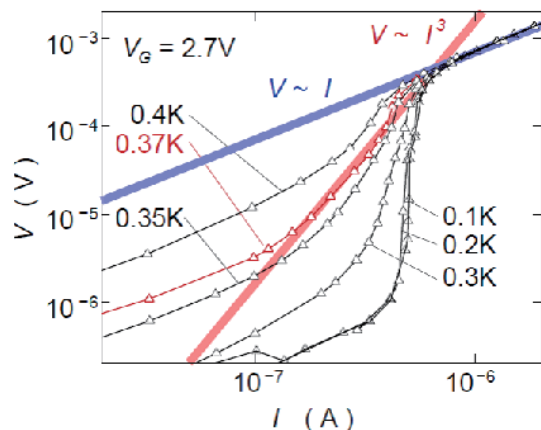


図4 電場誘起超伝導の BKT 転移。0.37K 付近で  $V \sim I^3$  の臨界特性を示す。

現在のところ、電場誘起超伝導は二次元超伝導体の理論に非常によく一致した振る舞いを示す。一例として、二次元超伝導に特有の Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移の結果を示す。二次元超伝導体に電流を流すと、 $T_c$  直下ではボルテックスフローフロー（磁束量子の渦系の流れ）による有限の抵抗が生じる。その結果、 $T_c$  付近で  $I$ - $V$  特性は  $V \sim I^\alpha$  のような非線形の振る舞いを示し、BKT 転移温度で  $\alpha = 3$  となる。図4に示すように  $V_G = 2.7$  V での  $I$ - $V$  特性からは温度を下げるとともに徐々に  $\alpha$  が増加していく様子が観察され、0.37 K で  $\alpha = 3$  になった。従って、この系の超伝導転移 0.37 K の臨界温度を持つ BKT 転移であると言える。

電場誘起超伝導の二次元性などの超伝導物性は本新学術領域の重要な課題であり、すでに若手相互滞在プログラムを利用して磁気輸送特性の詳細な評価を行っている。今後、電場誘起超伝導に隠れている新しい超伝導の物理を本学術領域の研究で見つけ出したいと考えている。

本研究は青木晴善、岩佐義宏、大友明、中村慎太郎、川崎雅司、木村憲彰、下谷秀和、野島勉、H. T. Yuan の各氏と

の共同研究である。

- [1] J. F. Schooley, W. R. Hosler, E. Ambler, J. H. Becker, M. L. Cohen and C. S. Koonce, *Phys. Rev. Lett.* **14**, 305 (1965).
- [2] R. E. Glover, III and M. D. Sherrill, *Phys. Rev. Lett.* **5**, 248 (1960).
- [3] C. H. Ahn, J.-M. Triscone, J. Mannhart, *Nature* **424**, 1015 (2003).
- [4] G. Brumfiel, *Nature* **419**, 419 (2002). 村松秀「論文捏造」中央新書ラクレ (2006) など。現在も読める当時のニュースとして  
<http://wiredvision.jp/archives/200209/2002092702.html> (Wired Vision 日本語版)
- [5] K. Ueno, I. H. Inoue, H. Akoh, M. Kawasaki, Y. Tokura, and H. Takagi, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 1755 (2003).
- [6] K. Shibuya *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 212116 (2006).
- [7] H. Nakamura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 133504 (2006).
- [8] K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, A. Ohtomo, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa and M. Kawasaki, *Nature Mater.* **7**, 855 (2008).
- [9] H. Shimotani, H. Asanuma, J. Takeya, and Y. Iwasa, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 203501 (2006).
- [10] K. Ueno, H. Shimotani, Y. Iwasa, and M. Kawasaki, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 252107 (2010).

#### 著者紹介



#### うえの・かずのり

1976年千葉県出身。99年東京大学工学部卒業、2004年東京大学新領域創成科学研究科博士課程修了。東北大学金属材料研究所博士研究員を経て現職。酸化物の薄膜作成、半導体デバイスが専門。現在は新たな超伝導体の発見を目指して研究している。

## トポロジカル超伝導体の物理

佐藤 昌利／東京大学物性研究所 助教

**超**伝導体において、本質的にトポロジーと関係している物理現象としては、超伝導渦の磁束量子化が古くから知られている。最近になり、異方的超伝導の表面に現れるアンドレーエフ束縛状態も超伝導のトポロジーが本質的に関係していると考えられるようになり、「トポロジカル超伝導体」の標語の下、活発に研究されている。本記事では、「トポロジカル超伝導体」とは何か、どのような事が話題になっているか、私自身の仕事の中から紹介したい [1]。

まず、アンドレーエフ束縛状態について、ごく簡単に復習しておこう。アンドレーエフ束縛状態とは、異方的超伝導体の表面に現れるギャップレス状態である。田仲・柏谷両氏の研究により、高温超伝導体の [110] 面に現れるフラットな分散を持つゼロエネルギーアンドレーエフ束縛状態の存在は実験的にも理論的にも確立しており [2]、また、 $^3\text{He}$ -B 相の表面に現れる 2 次元的な線形分散を持つアンドレーエフ束縛状態の存在も、野村氏、東谷氏らの音響インピーダンスの測定の理論・実験により検証されている [3]。 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の端に現れると考えられている 1 次元的な線形分散を持つアンドレーエフ束縛状態に関しては、実験的困難から長い間その存在は明らかでなかったが、最近の柏谷氏らの報告によると、その存在を示唆する実験結果が得られるようになってきているようである [4]。これら、アンドレーエフ束縛状態を研究することは、超伝導状態の対称性を明らかにする上で重要なだけでなく、アンドレーエフ束縛状態を利用した新しい超伝導体素子を作成する上でも重要である。

	量子ホール状態	超伝導状態
バルク	ギャップ有 (ランダウ準位)	ギャップ有 (超伝導ギャップ)
エッジ	エッジ状態	アンドレーエフ 束縛状態

表 1：量子ホール状態と超伝導状態の準粒子スペクトルの類似性

**最**近の理論的進展の一つは、アンドレーエフ束縛状態が、量子ホール状態特有のエッジ状態とのアナロジーを使って、見通し良く理解できるようになったことである。超伝導現象はクーパー対の生成に伴いゼロ抵抗が実現される現象であり、量子ホール効果はホール伝導度が量子化される現象であるので、物理現象としては、両者は全く別物である、しかし、表 1 にまとめるように、これらの系の準粒子のエネルギースペクトルのみに着目すると、非常に似通っていることがわかる。両者ともバルクにはエネルギーギャップがあるため、励起状態をつくるには、有限のエネルギーが必要なのに対して、試料の境界（つまり端）であるエッジにはギャップレスな状態が現れ、非常に小さいエネルギーで準粒子を励起することが可能となっている。この類似性に注目して、超伝導体の性質、特にその表面に現れるアンドレーエフ束縛状態を研究しようというのが、超伝導体を「トポロジカル超伝導体」としてとらえる見方である。

この様な見方が、何故「トポロジカル超伝導体」と呼ばれるかを理解するために、量子ホール状態とトポロジーの関係を整理しておこう。まず、端のない系を考えると、そのホール係数は、準粒子の波動関数から計算される整数値しか取れない量 - 「トポロジカル不変量」 - であらわすことができ、ホール係数の量子化は、トポロジカル不変量が整数値しか取れないという性質から理解することができる。一方、端のある系では、エッジにギャップレスモードができ、それがホール電流を運ぶことにより、ホール効果は説明される。つまり、この場合には、ギャップレスモードの個数が量子化されていることがホール係数の量子化の起源となっている。このように端のない系とある系とでは、ホール係数の量子化の機構は、見かけ上異なっているが、両者とも同じ量子ホール状態であるためには、トポロジカル不変量とエッジ状態の数が同じでなければならないことが要請される。この端のない系、つまりバルクのトポロジカル不変量と、端のある系のエッジ状態の個数の間の対応は、「バルク・エッジ対応」と呼ばれている。



「バルク・エッジ対応」の示唆することは、一般に、なんらかのトポロジカル不変量が計算でき、それがゼロでない整数値をとる場合、その系に端をつくと、ギャップレスのエッジ状態がトポロジカル不変量の数だけ現れるということである。特に、最近、新しいトポロジカル不変量である  $Z_2$  トポロジカル不変量がゼロでない絶縁体、いわゆる「トポロジカル絶縁体」が提唱されるに至り、この「バルク・エッジ対応」は、量子ホール系に限らず一般的に成り立つと考えられるようになった。量子ホール系と異なり、トポロジカル絶縁体でホール係数に対応する観測量であるスピンホール係数は、一般には、整数値に量子化されない。しかしながら、バルクのトポロジカル不変量に対応するエッジ状態が存在することが理論・実験の両面で明らかになったからである。現在では、「バルク・エッジ対応」は、ギャップある系であれば、かなり広く一般に成り立つと認識されている。

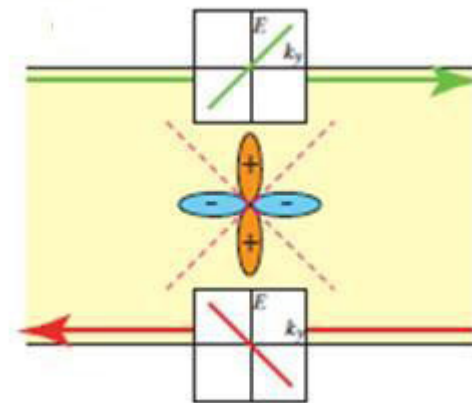
ここで、超伝導状態と量子ホール状態のアナロジーに戻って、この「バルク・エッジ対応」を考えてみよう。すると、それは、超伝導状態のギャップレスアンドレーエフ束縛状態にも、何らかの対応するトポロジカル不変量が存在するということを意味している。実際、この見方は正しく、現在では、様々なアンドレーエフ束縛状態に、対応するトポロジカル不変量が存在することが明らかになっている。この時、ギャップレスアンドレーエフ束縛状態を持つ超伝導体は、バルクのトポロジカル不変量によって特徴づけられることになり、その意味で「トポロジカル超伝導体」と呼ばれている。

「トポロジカル超伝導体」の見方から、アンドレーエフ束縛状態を研究するメリットの一つは、かなり複雑な系であっても、アンドレーエフ束縛状態の有無を、比較的簡単にしかも系統的に調べることが可能になることである。伝統的な研究手法では、アンドレーエフ束縛状態は、ボゴリューボフ・ドジャン方程式を適当な境界条件の下で、実際に解くことにより調べられている。複雑な系を調べるには、複雑な連立微分方程式を解く必要があり、そのため、どうしても実際上は数値的計算に頼らざるを得ず、系統的にアンドレーエフ束縛状態を調べることはかなり繁雑である。一方、「トポロジカル超伝導体」の見方でアンドレーエフ束縛状態を研究する場合には、アンドレーエフ束縛状態の有無は、トポロジカル不変量を調べるだけでわかってしまう。トポロジカル不変量は、バルクのギャップが閉じない限り値が変わらないので、いくつかの特別な場

合のトポロジカル不変量を計算するだけで、系統的にアンドレーエフ束縛状態を調べることが可能になる。

のような系統的な研究により、新しく明らかになった結果の一例として、ここでは、スピン3重項超伝導体のアンドレーエフ束縛状態とフェルミ面の関係を紹介する [5, 6]。高温超伝導体の例からわかるように、アンドレーエフ束縛状態は、超伝導ギャップの対称性に関する重要な情報を与える。ここで明らかになったことは、超伝導状態がスピン3重項超伝導状態、もっと正確にいうと、奇パリティ超伝導状態であれば、常伝導状態のフェルミ面の様子だけから、アンドレーエフ束縛状態の有無が予言できるということである。とりわけ、スピン3重項超伝導体であれば、フェルミ面の構造とアンドレーエフ束縛状態の分散関係とが、一定の関係で結びついていなければならないことがわかる。一方、スピン1重項超伝導体であれば、そのような関係はない。したがって、バンド理論やdHvA効果によって、フェルミ面の構造を明らかにし、それをアンドレーエフ束縛状態と比較することによって、スピン3重項超伝導体であるかを判別することが可能である。残念ながら、現時点ではアンドレーエフ束縛状態の分散関係を実験で調べることは容易でないようだが、将来的には、この原理に基づき、ギャップ関数の具体形など特定の理論的仮定に依存しないで、スピン3重項超伝導状態を同定することが可能となるのではないかと期待している。

「トポロジカル超伝導体」の別の興味深い応用としては、新しい量子計算であるトポロジカル量子コンピュータがある。トポロジカル量子コンピュータというのは、非可換統計に従う励起（非可換エニオン）を使って、量子計算を行おうというものである。超伝導



図：ノードのある超伝導体中のマヨラナ型エッジ状態

体でいうと、カイラル  $p$  波超伝導体に、そのような非可換エニオンが励起として存在することが知られている。カイラル  $p$  波超伝導体の渦には、マヨラナ型とよばれる実の演算子であらわされるゼロエネルギーアンドレーエフ束縛状態が存在し、そのため渦自体が非可換エニオンとなるからである。非可換エニオンでは、その交換操作によって、元の状態と全く異なる新しい状態を作り出すことが可能であり、それを使って量子計算を行うのがトポロジカル量子コンピュータである。トポロジカル量子コンピュータでは、交換操作のような非局所的な操作によってのみ状態が変化するので、熱揺らぎなど通常の量子計算の障害となっている局所的なデコヒーレンスに対しては、原理的に安定である。

このトポロジカル量子コンピュータの研究における最近の重要な進展は、カイラル  $p$  波超伝導体でなく、他の超伝導状態であっても、トポロジカル量子コンピュータが可能であることが明らかになったことである。 $s$  波超伝導状態でも、非可換エニオンが可能であることは、(私の知る限り)[7]の論文で初めて議論された。この論文は、直接、物性物理を扱ったものではなかったが、最近、Fu-Kane によってトポロジカル絶縁体と  $s$  波超伝導体の接合系で、本質的に同じメカニズムによって非可換エニオンがあらわれることが、([7]の論文とは独立に)示された [8]。また、トポロジカル絶縁体と  $d$  波超伝導体の接合系でも同様の非可換エニオンが可能であることが、田仲氏らによって示されている [9]。更に、我々の研究により、トポロジカル絶縁体を用意しなくても、強いスピン軌道相互作用の下では、 $s$  波超伝導体、空間反転対称性の破れた超伝導体、高温超伝導体のようなノードのある超伝導体など、従来トポロジカル量子コンピュータには使えないと考えられていた超伝導体でも、非可換エニオンが可能であることが明らかになり、非可換エニオンの登場舞台は広がってきている [10-13]。これらの研究においても、「バルク・エッジ対応」は重要な役割を果たしている。超伝導体渦は、超伝導中の穴と考えることができ、そのため、渦に束縛されたアンドレーエフ束縛状態を、穴の部分のエッジ状態とみなすことができるからである。

現時点では、「トポロジカル超伝導体」の研究は、理論研究が先行しており、実験的研究はこれからという段階である。しかし、先ほど挙げた柏谷氏らの実験や、また、前野氏らのグループにより非可換エニオンと考えられている半量子渦が作成できたとの報告もあ

り [14]、今後は、「トポロジカル超伝導体」として非常にエキサイティングな実験結果、知的刺激があるのではないかと考えている。今後、領域内の連携の深まりとともに、「トポロジカル超伝導体・超流動体」の理解も深くなっていくと期待している。

- [1] トポロジカル不変量とアンドレーエフ束縛状態の関係については、例えば、以下の記事を見てほしい。「トポロジカル超伝導体入門」佐藤昌利、物性研究 94, 311 (2010).
- [2] S.Kashiwaya and Y. Tanaka, Rep. Prog. Phys. 63, 1641 (2000).
- [3] S.Murakawa *et al.*, J.Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 013692.
- [4] 柏谷聡, 第 1 回領域研究会における講演.
- [5] M.Sato, Phys. Rev. B 79, 214526 (2009).
- [6] M.Sato, Phys. Rev. B 81, 220504(R) (2010).
- [7] M.Sato, Phys. Lett. B 575, 126 (2003).
- [8] L. Fu and C. Kane, Phys. Rev. Lett. 100, 096407 (2008).
- [9] J.Lindner *et al.*, Phys. Rev. Lett. 104, 067001 (2010).
- [10] M.Sato and S. Fujimoto, Phys. Rev. B 79, 094504 (2009).
- [11] M.Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto, Phys. Rev. Lett. 103, 020401 (2009).
- [12] M.Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B 82, 134521 (2010).
- [13] M.Sato and S.Fujimoto, Phys. Rev. Lett. 105, 217001 (2010).
- [14] J.Jang *et al.*, Science 331, 186 (2011).

## 著者紹介



### さとう・まさとし

1967年島根県出身。91年京都大学理学部卒業、96年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。京都大学基礎物理学研究所湯川奨学生、日本学術振興会特別研究員等を経て現職。場の理論の手法を使い、トポロジカル相の研究をおこなっている。

## 上野 和紀

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 助教

滞在先：京都大学大学院理学研究科

(受入研究者：前野 悦輝)

CO1 → AO1

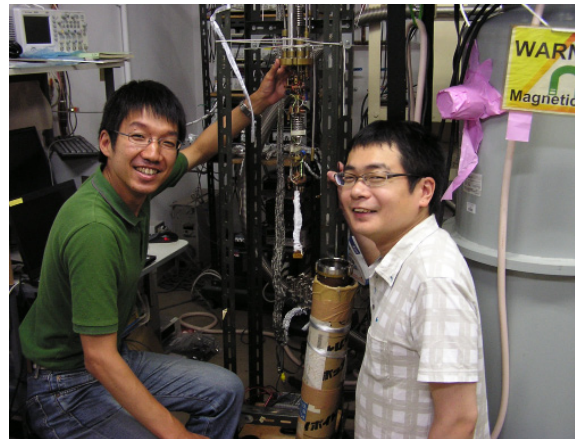
我々は最近、電界効果により絶縁体に超伝導を誘起することに成功した。本系は空間反転対称性の破れにより界面に生成した二次元電子ガスが超伝導を示すものであり、トポロジカル量子現象という観点からも興味深い。またゲート電圧という外場によりキャリア濃度が制御できるという点でも、本系はユニークなものである。そこで本研究では臨界磁場の方位依存性評価を通して超伝導の二次元性を評価し、超伝導層の厚さ評価を行った。京都大学で稼働中のベクトル・マグネット回転装置と希釈冷凍機を用いて測定を行うことで、わずか3週間という短い研究期間でキャリア濃度を系統的に変化させながらの二次元性評価、特性評価を実現した。

東北大学でSrTiO<sub>3</sub> (100) 単結晶上に電気二重層トランジスタデバイスを作成 [1]、アルゴンガス中で試料をパッキングした上で京都大学へ搬送した。京都大学で試料を試料ホルダーへ配線、希釈冷凍機へ取り付けした。測定は前野研のロックインアンプ (SR830) を用いて行った。なお、キャリア濃度変化の際は希釈冷凍機全体を 300 K まで上昇させ、ゲート電圧変化後に再冷却を行った。まず、前半1週間半をかけてシートキャリア濃度 10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup> での超伝導評価を行った。温度下降とともに 0.4 K で急激な抵抗ドロップを示し、0.3 K 以下でゼロ抵抗を示した。臨界磁場は垂直方位で約 0.1 T、水平方位で約 1.4 T と二次元系特有の大きな方位依存性を示した。また、臨界磁場の温度依存性はゲート電圧にかかわらず  $T_c$  から  $T_c/2$  の温度範囲で垂直方向では  $H_c \sim (1-T/T_c)$ 、水平方向では  $H_c \sim (1-T/T_c)^{0.5}$  と GL 理論に従い、精度良く  $H_c(0)$  の決定ができた。さらに磁場印加方向を試料面に水平方向から垂直方向へ変化させたとき、 $H_c$  は極めて急激な落ちを示した。この  $H_c$  の方位依存性を 0.1 度刻みで測定したところ、GL 方程式の二次元での解として導かれる Tinkham の関係式に完全に一致しており、本系が理想的な二次元系として振舞うことが確認された。

続いてキャリア濃度を  $5 \times 10^{13}$  cm<sup>-2</sup>,  $3 \times 10^{13}$  cm<sup>-2</sup> と順次下げながら超伝導特性の評価を行った。 $H_c$  の温度依存性、方位依存性はやはり GL 理論に非常によく一致しており、キャリア濃度にかかわらず理想的な二次元系としての振る舞いが確認された。一方、GL のコヒーレンス長  $\xi_{GL}$  は 50 nm 程度、超伝導層厚さ  $d$  は 10 nm 程度であり、ほとんどキャリア濃度に依存しなかった。一般に半導体中の二次元電子ガスではキャリア濃度の減少とともに電子の閉じ込めポテンシャルが減少、電子侵入深さが増加することが知られている。したがってこの結果はノーマル状態と超伝導状態で電子の侵入深さが変化していることを示唆しており、今後の理論的な研究が期待される。

なお、本研究は東北大学グループの野島准教授、京大グループの前野教授、米澤助教との共同研究である。8月半ばというお盆休みを挟んだ大変暑い期間にもかかわらず、ほとんど休み無しに指導を賜り、また非常に精力的かつ楽しく共同研究をさせていただいたことに感謝したい。

[1] K. Ueno *et al.*, Nature Materials 7, 855 (2008).



前野研米澤助教 (左) と筆者 (右)。後ろは希釈冷凍機本体とベクトルマグネット

## 江口 学

京都大学大学院理学研究科 博士課程 1 年

滞在先：岡山大学大学院自然科学研究科

(受入研究者：鄭 國慶)

AO1 → CO1

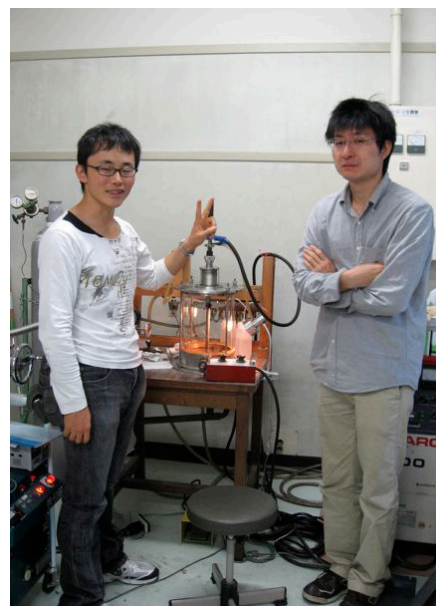
**空**間反転対称性の破れた超伝導体  $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)_3\text{B}$  は、Pd-Pt 元素置換によりスピン重項から三重項状態へ変化することが分かっており、スピン軌道相互作用が超伝導状態へ及ぼす影響を調べることは大変興味深い。私は本プログラムにより、試料提供者である岡山大学大学院鄭研究室に滞在し、比熱測定に用いる試料の作製と評価を行った。

はじめに4個の試料を作製し、粉末X線回折により結晶の解析を行ったところ、いずれも単相の回折ピークのみを示した。ところが超伝導転移に伴う磁気遮蔽は試料によって大きく異なっていた。特にPtの含有量が多い試料でこの傾向が強く、超伝導状態の不安定性を示唆する結果である。この結果を踏まえ、磁気遮蔽の大きい良質試料を作ることを目指してさらに6個試料作製を行った。これらの試料については装置の都合で1日延泊して試料評価を行った。続きは私の所属研究機関で行う。

既に十分良質な試料が幾つか得られており、これによりかねてから詳細な解析が必要と考えていた試料組成のうち、少なくとも2種類を新たに加えることに成功した。今後は詳細な解析を行うと同時に試料の純良化を

進め、論文の執筆を目指す。

この試料は扱いが難しいリチウムを用いるのが特徴である。本滞在での試料作製を通して、申請者はリチウムの基本的な扱い方及びホウ素含有金属合金の作製法を習得し、さらにアーク炉による試料作製技術の向上を図ることが出来た。また滞在期間中、試料の比熱の振舞に関する議論および純良試料育成に関する議論を鄭、稲田両教授と行い、また理論的、歴史的側面と意義についてご教示を頂いた。さらに学生同士での議論も大変刺激になり、今後の研究方針を考える上でも非常に有意義な滞在であった。



鄭研究室 D2 の原田さん (右) と私。  
いい研究ができました。PEACE :-)

## 若手相互滞在プログラム

本プログラムは、本領域に属する研究室の大学院生や若手研究者が、領域に属する他機関の研究室に2週間程度滞在し、その分野の研究の日常を体験することで、自身の視野を広げると同時に、受入研究室の同世代の研究者に刺激を与えることを目的とする制度です。

若手研究者間の直接的な交流によって、異分野の研究融合を触発し、領域に属する研究室の中に、トポロジカル量子現象の追求という学際的視野を醸成する効果が期待されています。

## 俣野 和明

岡山大学大学院自然科学研究科

(受入研究者：C01 鄭 国慶)

**研**究計画 C01「空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象」において研究を担当することとなり、2010年10月より研究を開始しています。

本学術領域より以前は、遷移金属化合物超伝導体の物性について核磁気共鳴／核四重極共鳴(NMR/NQR)法を用いて研究を進めてきました。コバルト酸化物超伝導体の研究では超伝導ギャップの対称性及び磁気関連の詳細を世界に先駆けて解明しました。鉄系超伝導では超伝導がスピン1重項の対称性をもつこと明らかにし、多重ギャップをもつことを見出しました。

新学術領域では、空間反転対称性の破れた超伝導体の物性をNMR/NQR法を用いて解明していきます。超伝導の対称性及び常伝導状態の特性より、空間反転対称性の破れやスピン軌道相互作用の効果について研究していきます。

NQR/NMRを用いた超伝導体の研究と同時に、様々な手法を用い新たな空間反転対称性破れた超伝導体の探索も行います。

これまで関わってきた研究とは内容が異なりますが大変面白いような領域ですのでこれまでの経験・知識を生かしつつ新しいことにも挑戦し、実りある研究にしたいと思います。



またの・かずあき

2007年 日本学術振興会特別研究員(DC1)、2009年岡山大学大学院自然科学研究科修士(理学)、2009年日本電気株式会社入社、2010年岡山大学大学院自然科学研究科助教、現在に至る。

休みの日はPCをいじったりしています。

### 受入研究者からひとこと

核磁気共鳴分野では“ベテラン”の域に入りつつある研究者で、本領域では研究及び運営の両面における活躍を期待しています。

## 松尾 繁政

広島大学大学院総合研究科

(受入研究者：B01 東谷 誠二)

Fulde-Ferrell- Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 状態を研究していた当時、恩師や諸先輩方が超流動 $^3\text{He}$ を研究している様子を傍らで見えておりました。私はFFLO状態の研究で単一の秩序パラメータ（右上図はFFLOの秩序パラメータの場所依存性の図）を自己無撞着に解きながら、諸先輩方が超流動 $^3\text{He}$ の研究で複数の秩序パラメータ解く様子を眺めて、私には超流動 $^3\text{He}$ の研究は無理かなと思っていました。複数の秩序パラメータと表面散乱の自己エネルギーを同時に自己無撞着に決めることは、複雑で私の力では困難そうに思っていました。

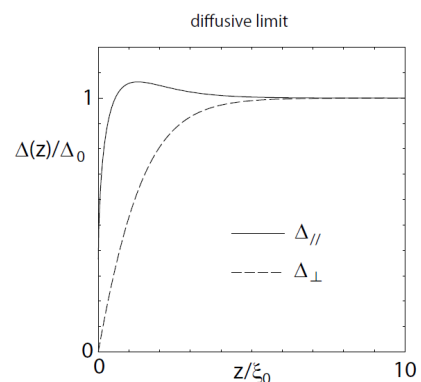
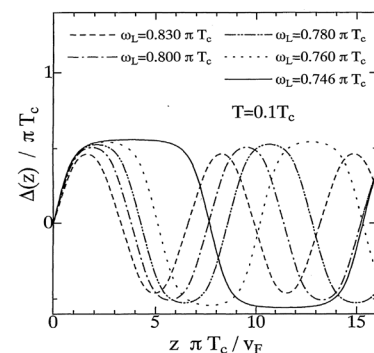
この4・5年は他分野の研究に移っていましたが、昨年秋に東谷先生から超流動 $^3\text{He}$ の研究にお誘いを受けて、この分野に挑戦することにしました。昨今のパソコンの性能向上で、境界散乱効果を考慮した超流動 $^3\text{He}$ の計算が私にも可能になりました。現在、ランダム・S-マトリックス理論を使い、また、準古典的グリーン関数法で、B相の表面付近に現れる偶周波数・奇周波数共存状態の研究を進めています。4・5年のブランクがありましたが、右上図を実際に描いて観て、以前の感覚が戻り、超流動 $^3\text{He}$ の研究を進めることができると安堵しています。（右下図は超流動 $^3\text{He}$ の散乱極限における秩序パラメータの場所依存性を示しています。）面白い成果を皆様の前で報告できるように努力して参ります。皆様からの暖かいご支援と厳しいご助言に応えるように頑張ってお参ります。

### 受入研究者からひとこと

本領域B01班の研究者として松尾さんがメンバーに加わって下さいました。現在、超流動 $^3\text{He}$ -B相の表面付近に現れる偶周波数・奇周波数共存状態の研究を松尾さんと進めています。奇周波数状態の表面散乱効果や局所状態密度と奇周波数クーパー対振幅との関係など、面白い結果が出てきています。

まつお・しげまさ

1965年生れ・岡山県出身。1990年山口大学卒、1992年岡山大学大学院理学研究科修士課程修了、1995年広島大学大学院生物圏科学研究科博士課程後期修了。広島大学総合科学部非常勤講師、広島大学総合科学部物質科学講座助手、広島大学教育学部研究補助職員などを経て、2010年より現職の広島大学研究員。専門分野は低温物性理論。趣味は金魚飼育・植物栽培と山中の散歩です。それと、自作の和竿で瀬戸内の小魚を釣ること。魚が掛っても、折れない竿を目指しています。



## 2010年度開催▽研究会報告

● 集中連携研究会 ● 若手国際会議 ● 領域研究会・国際会議

### ● 第1回集中連携研究会

2010年7月10日（京都大学東京オフィス）

A班の参加メンバーを中心に、品川の京都大学東京オフィスに集合した。参加者は12名で、暑い夏に負けない熱い議論が交わされた。最初に前野代表から新領域研究の全体説明があり、その後A班の趣旨説明が行われた。引き続き、各担当者による研究方針の説明と最新の成果報告がなされた。トピックは $Sr_2RuO_4$ の接合系（柏谷）、ヘリカルマヨラナ励起を介したトンネル現象（浅野）、Nb/*p*-InMnAs接合の輸送特性（赤崎）、強磁性ジョセフソン共鳴、超伝導へのスピン注入（前川）、Pb/Ru/ $Sr_2RuO_4$ の量子干渉効果、半磁束量子の話題（前野）であった。初顔合わせではあったが、質問も多くあったため、各々の理解を深めるために非常に役に立った研究会であった。

（文責 柏谷 聡）



### ● 第2回集中連携研究会

2010年7月27日（岡山大学）

「スピン軌道相互作用」と題した計画研究班Cの第一回集中連携研究会が2010年7月27日13:00～21:00に岡山大学コラボレーション棟403室にて行われた。計画班員およびその研究協力者、関係する大学院生ら計約25名の参加を得た。

研究会では、各テーマ間・異なる物質系に共通したキーワードである「スピン軌道相互作用」について活発に議論が交わされ、さっそく班員間でいくつかの具体的な連携がその場で決定された。研究会の後半には、メンバー間の親睦を兼ねた討議が続けられ、研究に関する情報交換が盛んに行われた。一見ダイバーズに見えるC班ですが、メンバー（その研究協力者を含めて）間に「隠れた」

共通ルーツがあることが指摘されたりして、熱い物理の議論に和やかさも加わった。この研究会を通じて、班員間で今後目指すべき物理や問題点を共有することができて、有意義なスタートアップの会議となった。

（文責 鄭 国慶）

### ● 第3回集中連携研究会

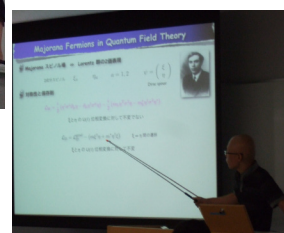
2010年9月4日（名古屋大学）

2010年9月4日名古屋大学においてD班の集中連携研究会を開催した。研究会では、本計画研究班の目的である「トポロジカル凝縮系の理論」の研究について議論を行った。最初に、代表者田仲が、領域全体の説明とD01班の位置づけを話した。そのあと、代表者、分担者のグループでどのような研究計画を目指しているのかについての発表があった。さらに、連携研究者による研究発表が行われた。

発表は、時間反転（空間反転）対称性の破れた超伝導体、トポロジカル絶縁体、ポーズ・アインシュタイン凝縮体、超流動ヘリウム3にわたる多岐なものであった。中でも、空間反転対称性の破れた超伝導体エッジ状態のマヨラナフェルミオン、原子気体におけるスピン3状態のトポロジジーに基づく分類、制限された空間における超流動ヘリウム3における非自明な量子渦とエッジ状態、半導体・超伝導体接合で期待されるマヨラナフェルミオン、スピン軌道相互作用とバンド構造、エンタングルメントスペクトルとトポロジカル秩序といった新規な問題が紹介された。

また、領域研究会、若手相互滞在、ニュースレター、情報交換について話し合いが行われた。短い時間ではあったが、熱心に議論が行われ、若手研究者からの発言もいくつかあり、極めて有意義であった。（写真は発表中の川口東京大助教と（左）と水島岡山大助教。）

（文責 田仲 由喜夫）



## ●第4回集中連携研究会

2010年9月13日（大阪市立大学）

大阪市立大学文化交流センター（梅田）においてB班の集中連携研究会を開催した。最初に計画班代表者の石川が、本計画研究の概要、領域全体との関係などの説明をした後で、代表者（石川）、分担者（野村、東谷、三宅（代理：石川））が以下に示すように、それぞれの研究の現状、今後の計画とについて報告した。

石川は、超流動 $^3\text{He}$ -A相の固有軌道角運動量の検証、平行平板中の超流動 $^3\text{He}$ -A相のテクスチャーと質量流、奇周波数スピン三重項 $s$ 波超流動相の検証、について。野村は、これまでの超流動ヘリウム3の表面束縛状態の磁気効果について。東谷は、超流動 $^3\text{He}$ -B相の表面帯磁率、超流動 $^3\text{He}$ -B相/エアロジェル系の近接効果、超流動 $^3\text{He}$ 表面の質量流とスピン波、について。三宅（代理：石川）は、カイラル超伝導状態での固有角運動量・固有磁気モーメントの大きさ、奇周波数超伝導状態の理論の展開、 $\text{Sr}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ のネマティック相の理論、について。後半では最近の話題として、若手の研究者による発表があった。鶴田氏（大阪大学助教）の「カイラル超伝導体における自発磁化の理論」と加藤氏（大阪市立院生D3）の「平行平板中の超流動 $^3\text{He}$ 」である。

研究会を通して活発な議論があり、計画班としての取り組みに対する意識の向上があったことは間違いない。来年度の集中研究会への提案なども非常に有意義であった。（文責 石川 修六）

## ●第1回総括班会議・研究会

2010年9月22日（大阪市立大学）

総括班全体の会議として第1回の会議が大阪市大にて行われた。参加者全員の顔合わせとしては最初の機会であり、領域研究の参加者30名弱が集合した。まず参加者全員を前に、領域代表の前野氏から領域の全体の説明が行われた。トポロジカルという言葉だけでは物性において何をイメージするかの自由度が大きいため、本領域で意図しているトポロジカル量子現象とは何かについての説明が行われた。その後各班の代表者から説明が行われた。A班前野氏は $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ および超伝導/強磁性体の物理、B班石川氏は超流動ヘリウムから期待されるトポロジカル量子現象、C班鄭氏は中心対称性の破れた超伝導およびトポロジカル絶縁体に関する新展開、D班田仲氏は電子系におけるマヨラナフェルミオン、奇周波数超伝導、冷却原子基体の物理などを説明した。

その後各班から具体的な研究に関する最新の成果発表が行われた。A班柏谷は $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ のエッジ状態、B班野村氏は超流動ヘリウムのエッジに形成される束縛状態およびマヨラナ準粒子について、C班上野氏は電界誘起超伝導について、C班安藤氏はトポロジカル絶縁体の新物質合成に関する最新の成果について、D班水島氏はマヨラナフェルミオンの新しい物理に関する発表を行った。若手からの質問も多く出されて、非常に活発な議論が続き、質問のために時間が足りなくなる発表が見受けられた。

（文責 柏谷 聡）



第1回総括班会議・研究会（大阪市立大学学術情報総合センター）



● 第1回領域研究会

2010年12月18日-12月20日 京都大学百周年時計台記念館



時間反転対称性の破れた超伝導体、トポロジカル絶縁体、中心対称性の破れた超伝導、奇周波数電子対、超流動ヘリウム3、マヨラナ準粒子、アンドレーエフ束縛状態、冷却原子気体、非可換量子渦、ラッシュバ効果、超伝導／強磁性接合系、電場誘起超伝導、量子エンタングルメントなど、極めて多岐にわたっている。それにもかかわらず議論が発散してしまうことが無かったのは、凝縮系におけるトポロジーに関わる類似の物理現象が、様々な系に広く遍在することを示している。たとえばエッジ状態、マヨラナ準粒子、スピнкаレント、固有角運動量など、類似の起源を有する現象が多種の系において出現する。

本領域研究は7月から活動が開始されたため、領域会議として今回が第1回目の開催であり、冬としては穏やかに暖かい天気が続く京都にて、3日間にわたって活発な議論が行われた。領域研究の全メンバーおよび一般からの公募も含めて、参加者は149名であり、そのうち若手が87名と過半数を占め、この分野が新開拓分野であることと、今後の大なる発展を感じさせる雰囲気の中で始まった。

参加研究者の多くは、自分が専門とする領域以外の発表にも、自分の分野と類似の問題を見いだすことができる。これにより問題意識の共有がなされ、各現象の共通性、個別性について、理論、実験の両面から熱い議論が続いた。このような分野横断的な議論は、トポロジカル量子現象という新しい研究分野の発展を大いに期待させる。

会議の開始冒頭では、領域アドバイザーである東京大学福山寛教授より、領域研究への期待の言葉が述べられた。その後本領域会議の設立の趣旨に関して前野領域代表からの領域全体の趣旨説明、続いて、A班（前野氏）、B班（石川氏）C班（鄭氏）、D班（田仲氏）により、各班の研究の趣旨に関する説明が行われた。引き続き参加者による発表が行われ、1件あたり15分から30分の口頭講演が36件（そのうち領域メンバー以外の招待講演が15件）、ポスター発表70件について活発な議論が行われた。ポスター発表に関しては、短時間でポスター講演の全貌を把握するために、1人1分間のプレビュー講演が行われた。実質活動期間が半年程度にもかかわらず、高いアクティビティと質の高い口頭講演、ポスター講演が多く、各発表に対する質疑応答にも力が入っていた。

ポスター発表に引き続いて行われたバンケットでは、領域アドバイザーの安藤恒也教授、家泰弘教授より新しい学術領域への期待が述べられたのに加えて、領域代表の前野悦輝氏の仁科記念賞受賞を記念した花束贈呈が行われるなど、和やかな雰囲気で行われた。会議を細やかな気遣いで円滑に運営していただいた前野研究室関係者の皆様、プログラムの編成の責任者である田仲氏に感謝いたします。

（文責 柏谷 聡）



議論されたテーマのキーワードのみ列挙すると、

第1回領域研究会 プログラム

●▼ 2010年12月18日(土) ●○

- 10:30 Opening
- 10:40 アドバイザー挨拶 福山 寛
- 10:50 18AM-1 領域趣旨説明 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象 前野 悦輝 (20分)
- 11:10 18AM-2 A01 班研究計画: 時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象 前野 悦輝 (20分)
- 11:30 18AM-3 B01 班研究計画: スピン三重項超流動体の新奇界面現象 石川 修六 (20分)
- 11:50 18AM-4 C01 班研究計画: 空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象 鄭 国慶 (20分)
- 12:10 18AM-5 D01 班研究計画: トポロジカル凝縮系の理論 田仲 由喜夫 (20分)
- 13:40 18PM-1 トンネル分光による  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  のエッジ状態の検出 柏谷 聡 (30分)
- 14:10 18PM-2 スピン三重項超伝導体の最近の話題 石田 憲二 (20分)
- 14:30 18PM-3 トポロジカル絶縁体とトポロジカル超伝導体の分類理論 古崎 昭 (30分)
- 15:30 18PM-4 Microscopic analysis of the surface states in non-centrosymmetric superconductors VEKHTER, Ilya (30分)
- 16:00 18PM-5 エキゾチック超伝導体の光電子分光 横谷 尚睦 (20分)
- 16:20 18PM-6 非アーベリアン・マヨラナ・フェルミオンと渦の新しい非可換統計 新田 宗土 (15分)
- 16:35 18PM-7 MRI Study of Topological Objects in Superfluid  $^3\text{He}$  佐々木 豊 (15分)

○● 2010年12月19日(日) ▲●

- 09:20 19AM-1 冷却原子気体における対称性の破れとトポロジカル励起 上田 正仁 (30分)
- 09:50 19AM-2 アルカリ金属原子の BEC における渦のトポロジカル生成 中原 幹夫 (30分)
- 10:20 19AM-3 スピン軌道相互作用を持つトポロジカル超伝導体 佐藤 昌利 (20分)
- 11:10 19AM-4 トポロジカル絶縁体における完全伝導チャンネルと輸送現象 村上 修一 (30分)
- 11:40 19AM-5 トポロジカル絶縁体とトポロジカル超伝導体の実験研究 安藤 陽一 (30分)
- 12:10 19AM-6 STM/STS によるトポロジカル絶縁体の研究 花栗 哲郎 (15分)
- 12:25 19AM-7 新型トポロジカル絶縁体  $\text{TlBiSe}_2$  の角度分解光電子分光 佐藤 宇史 (15分)

- 14:10 19PM-1 不均一空間内でのスピン三重項  $s$  波超流動状態 石川 修六 (30分)
- 14:40 19PM-2 超流動ヘリウム 3 の表面アンドレーエフ束縛状態とマヨラナフェルミ粒子 野村 竜司 (20分)
- 15:00 19PM-3  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  におけるトポロジカル超伝導現象 前野 悦輝 (30分)
- 15:30 19PM-4 カイラル超流動・超伝導状態での固有角運動量・固有磁気モーメント 三宅 和正 (20分)

△● 2010年12月20日(月) ●○

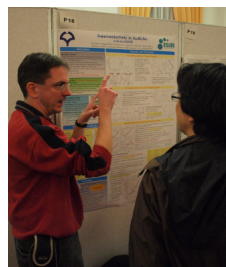
- 09:20 20AM-1 Majorana Fermions in Spin-Triplet Superfluids 水島 健 (20分)
- 09:40 20AM-2 Tunneling between Two Helical Superconductors via Majorana Edge Channel 浅野 泰寛 (20分)
- 10:00 20AM-3 トポロジカル絶縁体表面における超伝導とマヨラナフェルミオン 横山 毅人 (20分)
- 10:50 20AM-4  $\text{SrTiO}_3$  電場誘起超伝導の二次元性評価 上野 和紀 (30分)
- 11:20 20AM-5  $\text{Li}_2\text{Pt}_3\text{B}$  と  $\text{Li}_2\text{Pd}_3\text{B}$  の第一原理電子状態計算 獅子堂 達也 (20分)
- 11:40 20AM-6 空間反転対称性の破れた超伝導体の NMR による研究 鄭 国慶 (30分)
- 12:10 20AM-7 スピン軌道相互作用と表面ラッシュバ効果 小口 多美夫 (20分)
- 13:30 20PM-1 強磁性超伝導接合における強磁性ジョセフソン共鳴 高橋 二郎 (20分)
- 13:50 20PM-2 強磁性  $p$ - $\text{InMnAs}$  上に形成した  $\text{Nb}/n$ - $\text{InAs}/\text{Nb}$  接合 赤崎 達志 (20分)
- 14:10 20PM-3 超伝導における奇周波数電子対 田仲 由喜夫 (30分)
- 14:40 20PM-4  $p$  波超流動・超伝導状態の表面効果 東谷 誠二 (20分)
- 15:30 20PM-5 トポロジカル相と量子エンタングルメント 押川 正毅 (30分)
- 16:00 20PM-6 2層系量子ホール効果におけるトポロジカル励起 福田 昭 (15分)
- 16:15 20PM-7 スピノルボース凝縮体を用いた新奇量子渦生成へ向けて 東條 賢 (15分)
- 16:30 20PM-8 表面電荷を用いた超流動  $^3\text{He}$  自由表面における表面現象の研究 池上 弘樹 (15分)
- 16:45 20PM-9 Controlling the topological electronic states of  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  by guest atoms intercalation 木村 昭夫 (15分)
- 17:00 20PM-10 空間反転対称性を欠く系  $\text{LaNiC}_2$  の超伝導 片野 進 (15分)
- 17:15 20PM-11 カイラル  $p$  波超伝導体での渦格子状態 市岡 優典 (15分)
- 17:30 Closing

## ▼ポスター講演▲

全ポスター 3 日間掲示。ポスターレビューは奇数講演番号が 12 月 18 日、偶数講演番号が 12 月 19 日に行われた。

- |     |  |          |     |   |             |
|-----|--|----------|-----|---|-------------|
| P1  | Basic characterization of noncentrosymmetric tetragonal superconductors  | 江口 学     | P20 | Pt 系ニクタイトの超伝導   | 工藤 一貴       |
| P2  | トポロジカル絶縁体候補物質 Pb 系三元カルコゲナイドの単結晶作製と輸送特性評価   | 江藤 数馬    | P21 | 空間反転対称性が破れた系における電荷揺らぎによる超伝導   | 栗原 駿        |
| P3  | Meissner effect in the quantized spin Hall phase of correlated electrons                                       | 御領 潤     | P22 | Helical edge modes near transition to topological insulator with indirect gap   | Shijun MAO  |
| P4  | Valley spin sum rule of Dirac fermions: Topological argument   | 御領 潤     | P23 | 空間反転対称性の破れた超伝導体 LaPtBi の NQR  | 俣野 和明       |
| P5  | Field-Angle Dependence of the Quasi-particle Scattering inside a Vortex Core in Unconventional Superconductors | 東 陽一     | P24 | マグノンの軌道角運動量と熱ホール効果  | 松本 遼        |
| P6  | 単層カーボンナノチューブにおける $^{13}\text{C}$ NMR 測定  | 井原 慶彦    | P25 | 強いスピン・軌道相互作用を持つ Ir 酸化物薄膜の物質開拓   | 松野 丈夫       |
| P7  | トポロジカル超伝導体における状態密度の計算  | 伊井 彰宏    | P26 | 超流動ヘリウム 3 の表面奇周波数状態   | 松尾 繁政       |
| P8  | From topological band insulator to topological Anderson insulator  | 井村 健一郎   | P27 | ナノ細孔が変える吸着 $^4\text{He}$ 超流動のトポロジカル転移   | 松下 琢        |
| P9  | $\pi$ junction transition in InAs self-assembled quantum dot coupled with SQUID                                | 石黒 亮輔    | P28 | トポロジカル絶縁体表面における電流誘起スピンの偏極   | 三澤 哲郎       |
| P10 | Observation of metal-insulator transition in $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ under in-plane uniaxial pressure        | 石川 諒     | P29 | NMR study at the boundary between bulk $^3\text{He}$ and Aerogel  | 森 亮彦        |
| P11 | $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ マイクロブリッジのブレイク接合における局所輸送特性  | 神原 浩     | P30 | $p_x+ip_y$ 超流動における乱雑な境界効果   | 長登 康        |
| P12 | Novel Josephson effect in graphene SFS junctions   | 神田 晶申    | P31 | モット絶縁体 $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$ に圧力・電場で誘起される新奇量子現象   | 中村 文彦       |
| P13 | 平行平板に閉じ込めた超流動 $^3\text{He}$ 中の第 4 音波共鳴   | 加藤 千秋    | P32 | $p$ -波超伝導体中の一対の渦糸と半整数量子磁束周りの準粒子構造   | 丹羽 祐平       |
| P14 | 強磁性絶縁体 / 超伝導接合における原子スケール $0-\pi$ 転移の理論   | 川畑 史郎    | P33 | Edge States of Topological Phases for Quantum Walks in Random Environments  | 小布施 秀明      |
| P15 | Textures of Spin-Orbit Coupled Spin-2 Bose Einstein Condensates  | 川上 拓人    | P34 | $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ の高圧結晶相における圧力誘起超伝導転移  | 大村 彩子       |
| P16 | Classification of topological excitation under influence of vortices   | 小林 伸吾    | P35 | Pressure-induced superconductivity in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  | 大村 彩子       |
| P17 | スピン渦誘起ループ電流  | 小泉 裕康    | P36 | half-quantum vortices in a chiral p-wave superconducting state based on a lattice model   | 大山 雄一       |
| P18 | Superconductivity in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$   | M. クリーナー | P37 | Tunneling conductance in the chiral superconductivity based on a lattice model  | 大成 誠一郎      |
| P19 | GL theory for coexistent state of superconductivity and magnetism  | 久保木 一浩   | 38  | Substitution-Dependence of the Noncentrosymmetric Superconductor $\text{Li}_2(\text{Pd}_{1-x}\text{Pt}_x)\text{B}$ 's $H$ - $T$ Phase Diagram | D. C. Peets |
|     |  |          | P39 | Competition between superconductivity and bond ordering in Pt-doped $\text{IrTe}_2$   | 下 舜生        |

- P40 Surface quantum oscillations in the topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  Zhi Ren
- P41 Development of Tunnel Junction Micro-SQUID Magnetometer for Investigation of Edge Spin Magnetization Induced by Spin Hall Effect 齋藤 政通
- P42 Electric-field induced Mott transition in  $\text{Ca}_2\text{RuO}_4$  坂木 麻里子
- P43 トポロジカル絶縁体のデバイス研究 佐々木 聡
- P44 半導体  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  ヘテロ界面における格子歪みの直接観察 佐々木 進
- P45 Transport properties in single crystals of TI-based ternary chalcogenides 瀬川 耕司
- P46 Pairing Symmetry in the Superconducting State Coexisting with Antiferromagnetism 重田 啓介
- P47 トポロジカル超伝導体界面における磁性不純物の物性 進藤 龍一
- P48 Josephson Effect of Noncentrosymmetric Superconductors:  $\text{CePt}_3\text{Si}$  and  $\text{LaPt}_3\text{Si}$  住山 昭彦
- P49 Exotic states of superfluid  $^3\text{He}$  near the boundary 高木 丈夫
- P50 Modulated Vortices appearing in Bose-Einstein Condensates with Finite-Range Interactions 高橋 雅裕
- P51 トポロジカル絶縁体における電子干渉と屈折 高橋 隆志
- P52 冷却原子気体ボース・アインシュタイン凝縮におけるタキオン凝縮 竹内 宏光
- P53 トポロジカル場の理論が予測する新規量子効果 田中 秋広
- P54 Kondo effect in edge states of quantum spin Hall systems 田中 洋一
- P55 Surface Dirac Fermions in Cd-doped  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  Alexy Taskin
- P56 Decaying process of long-lived NMR signal in superfluid  $^3\text{He-B}$  at ultra low temperature 戸田 亮
- P57 Variational study on Mott transition and spin correlations in the two-dimensional  $S=1$  Bose-Hubbard model 梶 裕太
- P58 Theoretical study of the spontaneous magnetic moment in the chiral superconducting state 鶴田 篤史
- P59 非一様なスピン軌道結合によって生じる微視的なスピニングおよびスピソース 筒井 一尋
- P60 Edge current related with Majorana Fermions for the superfluid  $^3\text{He}$  堤 康雅
- P61 BECにおける擬-南部-ゴールドストーンモードのトポロジー 内野 瞬
- P62 外部磁場下におけるトポロジカル絶縁体の表面状態 和田 真樹
- P63 Surface Majorana Cone of the Superfluid  $^3\text{He B}$  Phase 和才 将大
- P64 空間反転対称性の破れた超伝導体におけるトポロジカルなエッジ状態 矢田 圭司
- P65 Temperature dependence of the critical current of  $\text{Pb}/\text{Ru}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  topological junctions 山岸 達哉
- P66 Magnetic domain wall propagation in a giantmagnetoresistance-type wire with space inversion symmetry 山口 明啓
- P67 2次元の  $Z_2$  トポロジカル絶縁体における乱れの効果 山影 相
- P68 Leggett Modes in Multi-Component Superconductors 柳澤 孝
- P69 擬一次元有機超伝導体  $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$  の比熱測定による超伝導秩序変数の解明 米澤 進吾
- P70 Creation of gauge fields for ultracold ytterbium atoms in a two-dimensional optical lattice 吉川 豊
- P71 強磁性物質と超伝導物質との接合系における近接効果の理論 吉崎 大裕
- P72 A More ideal Dirac cone realized in ternary topological insulator  $\text{TlBiSe}_2$  木村 昭夫



ポスター会場。70組以上の展示があり、連日白熱の議論が展開された

## 今後の会議予定

## ● International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries

会場：ラフォーレ修善寺

日時：2011年11月1日－11月5日

連絡先：東工大 野村 竜司、岡山大 水島 健

## ●今後の領域研究会の予定

詳細は決定次第、ウェブサイト上で告知します。

2011年 12月 岡山大学

2013年 12月 東京大学

2015年 3月 京都大学

## ● International Conference of Topological Quantum Phenomena

会場：名古屋大学

日時：2012年5月18日－5月21日（予定）

名古屋大学シンポジオン（予定）

連絡先：名古屋大学 田仲 由喜夫

## 論文等での Acknowledgment について

本領域の研究費によって得られた成果を出版される際には、以下の例文にありますような記載をお願いいたします。

- (1) This work was supported by the "Topological Quantum Phenomena" Grant-in Aid for Scientific Research on Innovative Areas from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan.
- (2) This work was supported by the "Topological Quantum Phenomena" Grant-in Aid for Scientific Research on Innovative Areas from MEXT of Japan.
- (3) This work was supported by the "Topological Quantum Phenomena" KAKENHI on Innovative Areas from MEXT.

## 編集

## 後記

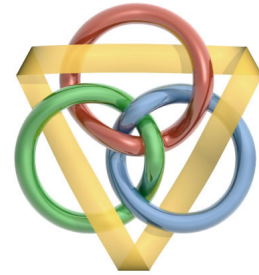
本学術領域がスタートしておよそ半年が経過したが、その短い期間中に、本研究領域代表である前野悦輝氏が仁科記念賞を受賞されたことはまことに喜ばしいことであり、また本領域研究にとっても極めて理想的なスタートが切れたことを意味する。トポロジーという概念は物性研究者にとっては少し敷居の高いイメージを持つが、トポロジーを導入することで、異なる凝

縮系に共通の物理現象を見いだすことができた。本ニュースレターのトピックスの佐藤氏の記事にも紹介されているとおり、従来の説明が難しかった表面アンドレーエフ状態の起源が容易に説明できるなど、極めて強力な手段となりうる。今後4年間の研究期間内に、トポロジカル量子現象の新概念の創出と、理解の深化に努めて行きたい。（柏谷 聡）

# NEWSLETTER No.1

- 3 巻頭言  
領域代表者からのメッセージ
- 4 研究概要の紹介  
計画研究班 A01、B01、C01、D01
- 8 領域メンバー紹介
- 9 ニュース  
前野 悦輝氏仁科記念賞受賞！  
トポロジカル絶縁体の新物質発見（安藤 陽一）
- 11 トピックス  
「トポロジカル絶縁体」って何がトポロジーなの？（安藤 陽一）  
SrTiO<sub>3</sub> 電場誘起超伝導体（上野 和紀）  
トポロジカル超伝導体の物理（佐藤 昌利）
- 19 若手相互滞在プログラム報告  
上野 和紀（東北大学）  
江口 学（京都大学）
- 21 新規採用研究者の紹介  
俣野 和明（岡山大学）  
松尾 繁政（広島大学）
- 23 2010年研究会報告  
第1回～4回集中連携研究会、総括班会議、第1回領域研究会
- 29 今後の会議のお知らせ／編集後記

## 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ます。このボロメの輪（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ます。

本領域ウェブサイトでは、研究の詳細、研究会情報、市民向け科学講座ページなどを紹介しています。ぜひご来訪ください。

## 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」 ニュースレター第1号

発行日：2011年2月25日

発行：「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」総括班

領域事務局：〒602-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学 大学院理学研究科 物理学第一教室 固体量子物性研究室内

TEL/FAX: 075-753-3783

Email: topology-office@scphys.kyoto-u.ac.jp

領域ウェブサイト <http://www.topological-qp.jp/>