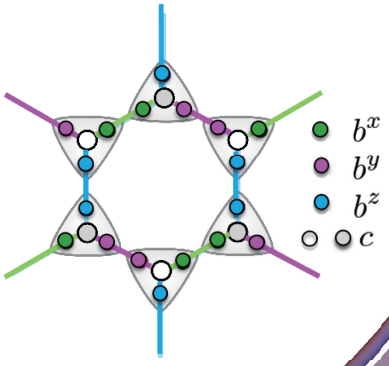
文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 H27(2015)-H31(2019) 年度

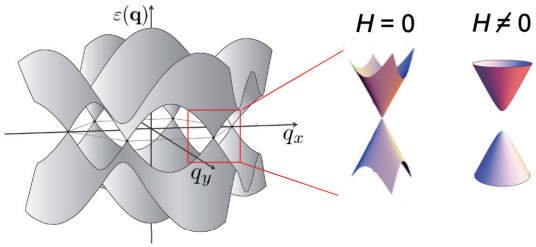
トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア

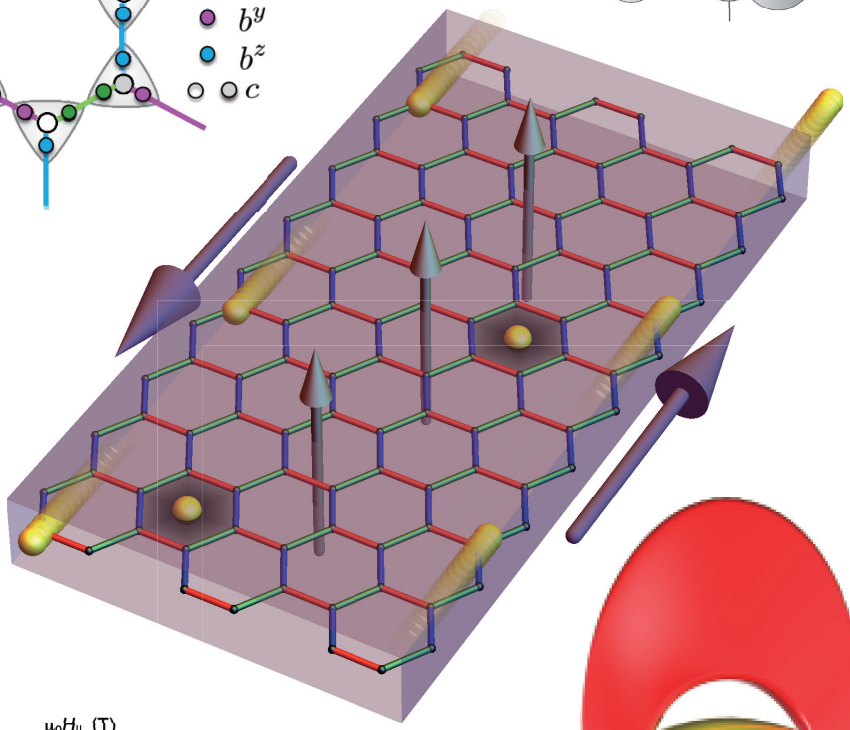
Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas, MEXT, Japan Topological Materials Science

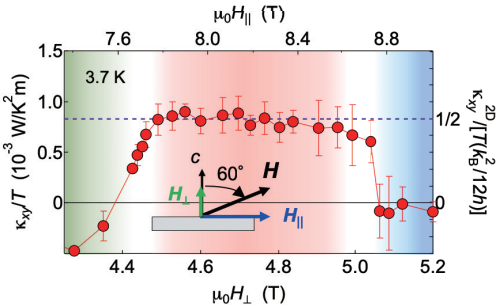
NEWSLETTER

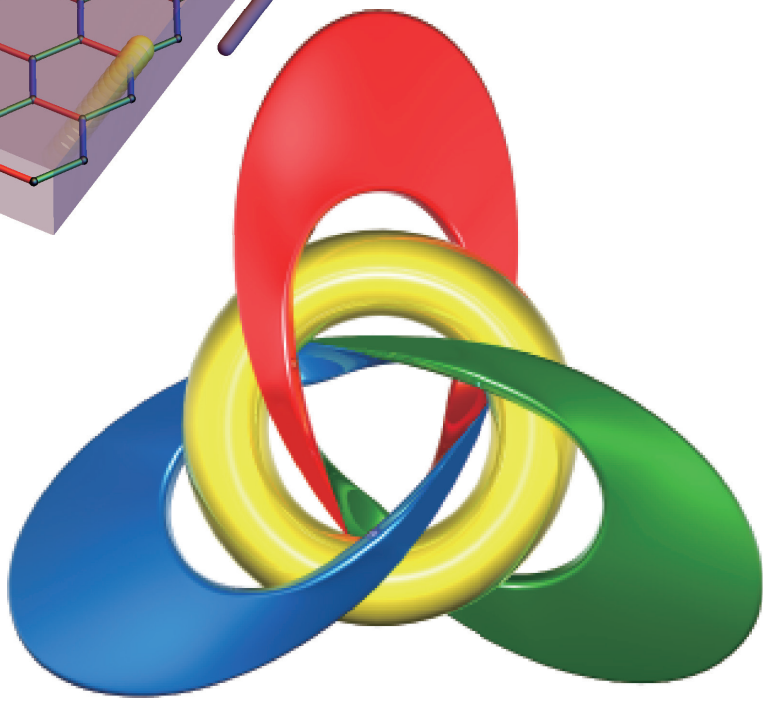
No. 4











February 2019

「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」

NEWSLETTER No.4

目 次

CONTENTS

2 巻 頭 言

好奇心と探究心 / 川上 則雄 (京都大学)
トポロジカル物質科学 --- plus ultra / 青木 秀夫 (産業技術総合研究所)

【追悼】Shoucheng Zhang 教授を悼む / 鄭 国慶 (岡山大学)

7 今年度の計画研究トピックス

計画研究 A01、B01、C01、D01

24 受賞ニュース

平成 30 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 / 好田 誠 (東北大学)
平成 30 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 / 橋坂 昌幸 (NTT 物性科学基礎研究所)
平成 30 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 / 那須 譲治 (横浜国立大学)
カマリンーオンネス賞 / 松田 祐司 (京都大学)
平成 30 年春の紫綬褒章 / 永長 直人 (東京大学)

29 トピックス

キタエフ量子スピン液体におけるマヨラナ・フェルミオンと非可換エニオン / 松田 祐司・笠原 裕一 (京都大学)
バンド理論のトポロジーと Atiyah-Hirzebruch スペクトル系列 / 塩崎 謙 (京都大学)

【お祝い】Leggett 教授の傘寿を祝う研究会に参加して

/ 前野 悦輝 (京都大学)・高木 伸 (元東北大学)・上田 正仁 (東京大学)

40 HOT TOPICS COOL NEWS 2018

41 公募研究紹介

58 若手励起プログラム

小野 清志郎 (東京大学)、山本 和樹 (京都大学)、川畑 幸平 (東京大学)

61 REP 招聘報告

Arnab Sen (Indian Association for the Cultivation of Science)、
Alexander Golubov (トゥウェンテ大学（モスクワ物理工学校）)

65 JREP プログラム 報告

東川 翔 (東京大学)、村山 陽奈子 (京都大学)、大湊 友也 (東北大学)、
Jake Bobowski(ブリティッシュ・コロンビア大学)、高三 和晃 (京都大学)、
若村 太郎 (パリ南大学 固体物理学研究所)、池田 敦俊 (京都大学)

73 PD 紹介

羽部 哲朗 (北海道大学)、橋本 樹 (京都大学)

75 2018 年度研究会報告

第 4 回 TMS 領域研究会、公募研究キックオフ研究会、
第 10 回トポロジー連携研究会、第 12 回物性科学領域横断研究会、
TMS-SPIN(CNR) 2nd AW with Superstripes-onlus (TMS 第 7 回アライアンス研究会)、
2nd TMS-PKU AW (TMS 第 8 回アライアンス研究会)

87 TMS セミナー報告

88 コラム

機械学習によるトポロジカル相転移の検出 / 赤城 裕 (東京大学)

90 今年度以降の会議、論文等での Acknowledgments について、編集後記

巻頭言

好奇心と探求心

川上 則雄 / 京都大学 大学院理学研究科 教授 (研究代表者)

本新学術領域研究も 4 年目をほぼ終了し、残すところ約 1 年となりました。今年度から第 2 期の公募研究に 18 名の方々が参加され、充実した体制で研究を進めています。

● 2018 年ノーベル賞●

2018 年 10 月にうれしいニュースが飛び込んできました。ノーベル医学生理学賞を、この分野で世界を牽引する医学者である本庶佑先生（京都大学特別教授）が受賞されました。免疫チェックポイント阻害因子の発見とがん治療への応用、が受賞理由です。専門的な内容は分かりませんが、この研究が基礎研究としても人類の将来にとっても重要であるということが理解できました。

本庶先生のインタビューで、私が常日頃から感じており共感できることがいくつかありました。その一つ「1 万個の種をまいてもおいしい実をつけるものは少しだけ」は、オリジナルな研究の難しさと同時に、それを達成したときの喜びの大きさを端的に表している言葉だと思います。もう一つが、「研究を支えているのは好奇心と既存のものをすぐには信じない探究心」です。これらは、私たち研究者が座右の銘としたい言葉であり、シンプルですが、研究の本質をついたものと思います。

●新学術領域●

海外の研究者と話す機会がよくあり、最近は新学術領域研究が話題に上ることもあります。新学術領域は全国規模のプロジェクトであるので、これを紹介する際に "a big project including many researchers in Japan …" のような感じで紹介します。その際、参加研究者の多さとテーマの幅広さに感心される一方で、一人当たりの予算があまり多くないことに違和感を持たれることがあります。米国、ヨーロッパ、中国などでの大型プロジェクトには新学術領域に比べ一桁大きな予算が投入されていることが多いからだと思います。予算額としてそれ程大きくない全国規模のプロジェクトにおいて、どのようにモチベーションを保って研究を進めているのか興味あるのではないでしょうか。

●好奇心と探究心●

このような限られた予算の枠内で、多くの研究者が連携を保ち未開拓の分野にチャレンジする、という新学術領域研究は、かなり特色あるプロジェクトのように思えます。個人的には、新学術領域がうまく機能している理由はなんとなくわかるような気がしています。このような研究の礎になっているのは、我が国の土壌で長年培われてきた「好奇心」と「あくなき探究心」ではないかと感じています。これは、今回のノーベル賞受賞の際に本庶先生がふれられたことに他なりません。

もちろん、高いレベルの研究を成し遂げるためには潤沢な予算が必要であることは言うまでもありません。しかしながら、新しい分野を開拓していくためには、これに加えて探求心を持ち続けることが重要のように思います。新学術領域を支えているものは個々の研究者の探求心なんだろうなと、ノーベル賞受賞会見を見て思った次第です。

現在、学部 3 年次の授業で量子統計力学を教えています。講義の後で、トポロジカル物質について自主ゼミを行っている学生たちが集まってきて、あれこれと質問をします。たいへんよい気分になり、たくさん答えます。面白いことを知りたいという純粋な好奇心が伝わってきます。このような心を持ち続け、これを研究者としての探究心につなげていってほしいと感じる今日この頃です。

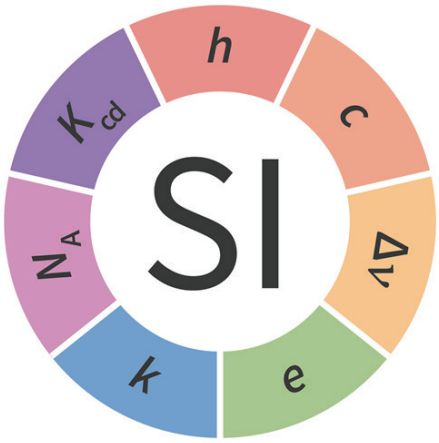
哀悼の言葉：本新学術領域の国際アドバイザーとしてお世話になっていましたスタンフォード大学の S. C. Zhang 教授が急逝されました。こころより哀悼の意を表したいと思います。

トポロジカル物質科学 --- plus ultra

青木秀夫 / 産業技術総合研究所 招聘研究員

● 2019 年頭に●

早いもので、この新学術領域が始まってから足掛け 4 年目を迎える。丁度この巻頭言を書いているとき（2018 年クリスマス期）に、受け取ったクリスマスカードの中に Stuttgart のマックス・プランク研究所の Klaus von Klitzing からのがあり、その図柄が何やら大変物理的である（図）。これは、



「2019 年は特別な年であり、物理量の国際単位系 (SI) が改まる年」、ということで、これを表象した BIPM(国際度量衡局) のロゴは、SI という言葉の周りに h, c, e, k, N_A 等が並ぶ。特に、重さ (kg) の標準が、キログラム原器という古色蒼然とした人工物から、量子ホール効果（歴史的に最初のトポロジカル系）における von Klitzing 定数も含んだ解析的な式を通してプランク定数から定義し直され、2019 年 5 月 20 日に発効する [1]。「量子ホール効果がトポロジカルな量なので、こういうことが可能になったんだよ」と妻に言うと、「凄いわね、不滅に残るということね」という。思えば、1980 年に von Klitzing 等により発見された現象が、約 40 年を経て、国際単位系まで影響するものに成長した [2]。彼の Phys. Rev. Lett. の初報の表題は「微細構造定数の高精度決定」というもので、何故こんな計測的な題にしたのか、と私は当時おもったが、今にしてみれば慧眼だったことになる。発見の地であるアルプスのふもとの Grenoble の強磁場研究所（当時はここにマックス・プランク研究所があった）に最近訪れたが、グラフェンなど最先端のことが研究されている。量子ホール効果発見の後、Laughlin, TKNN, Haldane 等によりトポロジカル物理が発展したことは言うまでもない。例えば Haldane が 2016 年 6 月（彼の Nobel 賞受賞の数ヶ月前）に東京での国際シンポジウムで行った講演は、複合粒子や非可換空間についてのもので、発展の一環を示している。本稿では、Plus ultra（進歩のさらに彼方に）という副題でとりとめない私見を記してみたい。

●トポロジカル科学の様々な発展●

精密科学化

これは数学化も含む。量子ホール効果のときも C* 代数、W∞ 代数などが援用されたが、そもそもトポロジカル系は物理において holonomy, homotopy の概念を導入する良い機会ともなった。Universality class については、昔は数種類で牧歌的だったが、今や何十種類。特に、crystalline topological 系まで考慮すると膨大な数となる。これは完璧を期するには勿論重要なことだが、多様な中の統一に向えるかが一つの将来課題となろう。物質開発という点でも、database から自動的にトポロジカル系を同定する（典型的に 20 万種から 6 千種の " 優良 " トポロジカル系）ことも最近ではなされている [3]。

量子力学でも古典論でも

トポロジカル系は一見量子力学的効果とおもえるが、古典系でも存在することは最近認識され始めている。

Bulk-edge 対応／高次のトポロジカル状態

トポロジカル端状態の存在は、トポロジカル系と切っても切れない。最近では、高次のトポロジカル系という概念も作られ、その端状態の解明や古典系での実物実験も行われている。

トポロジカル超伝導体

これも精密化しており、物質探索などさらに期待される。

平衡でも非平衡 (含 non-hermitian) でも

最近の別の発展は、非平衡状態でもトポロジカル状態が存在し、平衡よりさらに多彩な可能性を与える。この分類学も行われている。トポロジカルでない系に円偏光を当てるとトポロジカル絶縁体が誘起されるという Floquet topological insulator(FTI) は、理論予言の後、冷却原子系、3 次元トポロジカル絶縁体の表面状態、光学結晶、そして最近ではグラフェンにおいて実験観測されている。ETH Zurich の Tilman Esslinger（冷却原子の実験）からもクリスマスカードがきて、デザインはカクテルがグラスからこぼれんばかりに擾乱されていて、説明をみると "The Floquet bar" となっていて FTI などを象徴しているようである。複数のクリスマスカードがトポロジーと関連しているとは、それだけ物理に浸透ということか。

●展望●

このように、トポロジカル系の物理は色々な発展性を秘めている。また、日本でもトポロジカル系に関する CREST や科研費基盤 S も立ち上がっており、さらに強固な体制になりつつある。一つコメントすれば、現代は情報があふれ過ぎていて、情報に流される面がある。しかし、本当に面白い発展は、現在の外挿ではなく非連結な領域にあるのではなかろうか。特に若い方々に、大胆な Plus ultra 精神で行ってほしいとおもう。

[1] これが決定された CGPM の歴史的ヴェルサイユ会議 (2018 年 11 月) の模様は https://www.bipm.org/en/news/full-stories/2018-12-cgpm-outcomes.html で見ることができる。上記ロゴも BIPM site から引用。

[2] 我が国からも、産総研が大きく貢献し（藤井賢一、日本物理学会誌 **69**, 604 (2014) 参照）、物構研のフォトンファクトリーも寄与。

[3] E. Gibney, Nature **560**, 151 (2018).

Shoucheng Zhang 教授を悼む

鄭 国慶 / 岡山大学 大学院自然科学研究科 教授

本新学術領域の国際アドバイザーであるShoucheng Zhang 教授が 2018 年 12 月 1 日に急逝されました。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現象」（代表：前野悦輝教授、2010-2014 年度）の国際アドバイザーも務めて頂いたので、多くの方にとって衝撃だったと思います。私は 12 月 6 日に SNS でこの悲報に接したときは、フェイクニュースであってほしいと願いました。その後の二日間は仕事が手に付きませんでした。氏の研究業績については皆さんのほうがむしろ詳しく、スタンフォード大学のＨＰで見ることもできますので、ここでは、Shoucheng との二十数年来の交流について少し書かせていただきたいと思います。

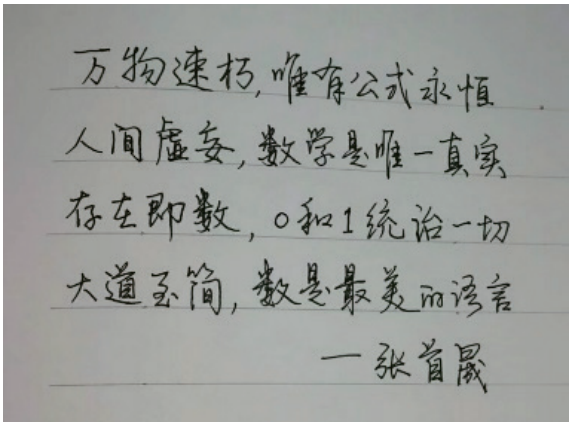
今から 8 年ほど前に、前野先生から Shoucheng に国際アドバイザーを引き受けてくれないか打診をしてほしいとのご依頼を受けて、ある日曜日の昼に食卓からメールを出しました。昼食が終わらないうちに快諾のメールが返ってきたのが昨日のことように思い出されます。以来、Shoucheng は前野新学術領域の国際会議に二回、川上新学術領域の中間評価前の国際会議（東工大）に参加され、米国におけるトポロジカル物理学研究の進展やファンディング状況、国際共同研究等について総括班と意見交換をされました。これらの会議で、Shoucheng による計三回の講演を聞いた方も多いと思います。特に、東工大でのマヨナラ粒子（励起）の理論と実験的な検出に関する講演は多くの方の記憶に新しいことでしょう。実験のほうは UCLA の同僚との共同研究の成果で、会議の直後に Science 誌に論文として出版されました。その後は、彼らが見つけた粒子（励起）のことを Shoucheng は「天使粒子」と呼ぶようになりました。自然界や人間の社会では、陰と陽、粒子と反粒子、天使と悪魔、のように対をなしている事柄が多いのに、マヨナラ粒子だけは反対の相棒がいない理想的な世界という意味で「天使粒子」と命名したと聞きました。

Shoucheng Zhang（1963.2-2018.12）

私にとって、Shoucheng は常に遠い存在で、一方で非常に近い存在でした。年齢はこちらが数か月上ですが、中国の大学の学年でいうと彼の方が一学年上でした。「文化大革命」という社会の大混乱が収束した直後、毎年 200 名の大学一年生が海外に留学できる奨学制度（1980-1982 年の三年間だけ続いた）が中国でスタートしました。Shoucheng が一期生でドイツに行きましたが、私も二期生として日本に留学する機会に恵まれました。後年、初めてお会いしたときに、お互いに「時代の幸運児」と言い合って、親しみを感じました。また、それがきっかけで、国際会議等で会う度に議論をさせてもらいました。2002 年にスタンフォード大学の研究室を訪問した際、たまたま大きな階段教室で開催されていたノーベル賞受賞者が複数人出席するコロキウムに連れて行ってくれて、熱い議論の雰囲気を体感する貴重な経験をさせてもらいました。

普段の会話から、Shoucheng は好奇心の塊だと感じたものです。ある小規模国際ワークショップのボーズアインシュタイン凝縮に関するセッションが終わった後の雑談で、私が「始皇帝の兵馬俑に塗っている塗料もボーズアインシュタイン凝縮を起こしますよ」と切り出しました。それには Shoucheng が深い興味を示してくれて、話を続けながらディナー会場行きのバスに一緒に乗り込みました。バスの中でも、塗料の歴史的エピソードやそれに関する最新の実験結果について矢継ぎ早に質問をしてきました。因みに、塗料は鉱石ではなく人工合成物です。うちの一種は $BaCuSi_2O_6$ で、現在 Han Purple (漢紫) と呼ばれており、もう一種は $BaCuSi_4O_{10}$ で、Han Blue (漢青) と呼ばれています。バスを降りたあと、Shoucheng はディナー会場のレストランには向わずすぐにタクシーを拾って、来た道を辿るように行ってしまいました。今から考えると、漢紫などのことが知りたいがためにわざわざバスに同乗してくれたような気がします。

近年、Shoucheng は一般聴衆向けの講演を多数こなしていました。トポロジカル絶縁体、マヨナラ粒子や量子計算などの話題を、わかりやすい例え話も交えながら熱く伝えていました。これらの講演の映像は今もインターネットで見ることができます。その中からキーワードをピックアップすると、数学、簡潔、美、統一、などの単語が高い頻度で出てきます。特に、数学に対する執着と愛情はなみなみならぬものがあります。実際、教え子らに贈ったメッセージ（下図）にもそのような思いが溢れ出ています。



J.P.Hu 氏のご厚意による

ワークショップのエキスカージョンにて

また、多彩な趣味の持ち主でした。歴史から哲学、美術、詩歌まで、多くのことに造詣が深い方でした。Shoucheng に直接伝えることはありませんでしたが、私も詩が好きで、近頃は習作もしています。次の五言絶句を奉げ、ご冥福をお祈りします。

意尊三巨匠，心愛五方程。[1)]
拓撲糾纏態，当傳君笑声。[2)]

（日本語訳：君は三人の巨匠を心から尊敬し、五つの方程式をこよなく愛した。電子の波がトポロジカルに絡み合い、遠くに行ってしまった君の朗らかな笑い声を届けてくれるだろう。）

注：

1）生前は度々、最も尊敬する物理学者は P. Dirac, A. Einstein, C.N. Yang の三人と語り、Yang-Mills 方程式、Dirac 方程式、Einstein の $E=mc^2$ 方程式 , 楕円方程式 $y^2=x^3+ax+b$, エントロピー増加の式、の 5 つ方程式に最も心酔したと吐露していました。

2）拓撲：topology（topological）の中国語訳；糾纏：中国語で entangled, entanglement の意；態：電子状態；当：きっと、必ず。

計画研究
トピックス
（A01）

強相関物質のトポロジカル相

前野 悦輝 / 京都大学 大学院理学研究科 教授

計画研究 A01「強相関物質のトポロジカル相」の目的は、電子間の相互作用が強い物質（強相関物質）での、トポロジカルに非自明な量子凝縮状態や量子相転移の研究を格段に深化・発展させることです。本研究では、遷移金属酸化物や重い電子系化合物を主な舞台として、人工超格子や微細加工・接合系も含めて、特にトポロジカル相の出現や物性制御における、電子相関の有効性を明らかにしてきました。

研究テーマとして、主にトポロジカル超伝導体、トポロジカル半金属、トポロジカル磁性体（絶縁体）の 3 つの軸に沿って進めています（図 1）。昨年度から今年度にかけては、トポロジカル磁性体（絶縁体）で以下 (3-1) にご紹介する、キタエフ量子スピン液体でのマヨラナ・フェルミオン観測に関して、世界的に注目される顕著な成果を挙げました。

以下では今年度の主な成果をテーマごとにご紹介します。なお、文末の引用文献リストで、[a-d] は H29(2017) 年度 2 月以降、[1-33] は H30 (2018) 年度の研究項目 A01（計画研究と公募研究）の発表論文を発表順に並べたものです。

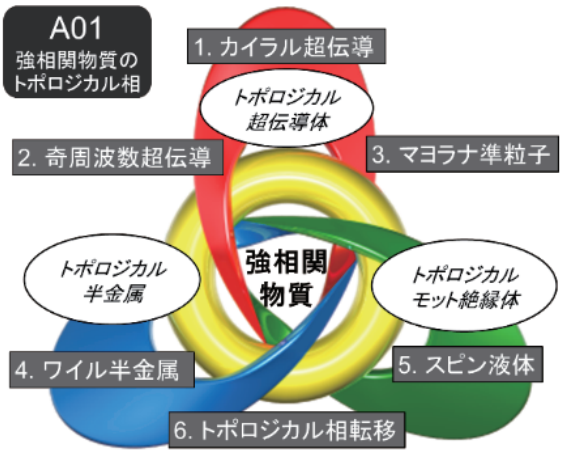


図 1 : 計画研究 A01 で扱う主な物質と物性。

【1. トポロジカル超伝導体】

トポロジカル超伝導の研究が世界的に展開される中で、本新学術領域の特徴として、ルテニウム酸化物・重い電子系化合物を含むバルク系での研究成果があげられます。また、薄膜、微細構造、人工超格子系でも独自性の高い成果を挙げています。

(1-1) ルテニウム酸化物のスピン三重項超伝導

Sr_2RuO_4 については、一軸性圧力印加による超伝導性の顕著な変化や微細加工・接合系での新現象で進展があり、その多くはまだ論文発表に至っていないものの、トポロジカル超伝導現象を引き出すための活発な研究を展開中です。常伝導相のスピン揺らぎについては、前野 (A01) らのドイツとの国際共同研究による、全波数領域をカバーした定量的な中性子データから、スピン三重項超伝導のメカニズムにはスピン揺らぎだけでは不十分というこれまでの認識が検証されました [33]。浅野 (A01)・田仲 (B01)・前野らは、ロシアとの国際共同研究で、Sr_2RuO_4 の表面インピーダンスの測定を行い、その結果をカイラル p 波超伝導の理論に基づいて解釈しました [21]。また前野・米澤 (A01) らは、JREP 制度で招へいした Bobowski 博士とともに、純良単結晶育成法のさらなる改良にも取り組みました [29]。

浅野らは、多軌道 / 多バンド超伝導のうち、s 波スピン一重項超伝導は不純物散乱に対して強いこと [14]、また s 波でも $Cu_xBi_2Se_3$ や $Sr_{3-x}SnO$ で議論されているスピン三重項かつ軌道の交換に対して反対称な超伝導は、不純物散乱の下で脆弱であることを示しました [1]。さらに、異常近接効果を示すスピン三重項 p 波超伝導と等価な超伝導状態を実現する必要条件を明らかにしました [3,7]。

前野・柏谷（B01）らは、析出した Ru 金属片 1 個を取り巻く Sr_2RuO_4 微小結晶で、Ru 金属の超伝導転移 (0.5 K) 温度以下での、超伝導競合効果を明らかにしました [2]。この成果については、本誌計画研究 B01 の記事をご覧ください。

また、米澤・前野・田仲 (B01) らは、Sr_2RuO_4 と強磁性体 Sr_2RuO_3 との接合系での、クーパー対の強磁性体への侵入現象の実験結果を理解するための、スピン三重項超伝導理論を展開しました [16]。

(1-2) ネマチック超伝導

超伝導秩序変数が結晶の回転対称性を自発的に破る「ネマチック超伝導」状態については、キャリアドープしたトポロジカル絶縁体 $Cu_xBi_2Se_3$ での

超伝導を中心に米澤がレヴュー論文で解説しました[26]。米澤・前野らは、ネマチック超伝導性の制御や Sr_2RuO_4 の電子状態制御に有効な、一軸性圧力印加装置の改良にも取り組みました[31]。

(1-3) アンチペロブスカイト酸化物の超伝導

アンチペロブスカイト酸化物は、3 次元ディラック電子を持つトポロジカル結晶絶縁体の候補です。前野・米澤・佐藤昌（D01）らはキャリアドープした $Sr_{3-x}SnO$ でアンチペロブスカイト酸化物では初めての超伝導を発見しましたが、今年度は、試料合成法の改良により超伝導転移温度と Sr 欠損量との関係を明らかにしました[32]。

(1-4) 重い電子系化合物および超格子における超伝導と磁性

土師 (Topo-Q PD)・笠原 (A01)・寺嶋 (A01)・松田 (A01) らは、世界に類を見ない希土類薄膜作製装置、および走査型トンネル顕微鏡の複合装置を用いて、重い電子系化合物の薄膜や人工超格子の研究を展開しています。準 2 次元ラインノードをもち、広義にはトポロジカル超伝導体と分類される $CeCoIn_5$ において、非磁性不純物効果が銅酸化物高温超伝導体とは本質的に異なること[b]、また、姉妹物質である $CeRhIn_5$ の磁気秩序状態おいて、*f* 電子がフェルミ面形成に寄与することを明らかにしました[30]。$CeCoIn_5$ と $CeRhIn_5$ を用いた超格子では、隣接する $CeRhIn_5$ 磁性層の磁気揺らぎにより $CeCoIn_5$ 超伝導層の超伝導対相互作用が増強されるという、これまでにない方法で超伝導状態が制御できることを明らかにしました[11]。

(1-5) その他のトポロジカル超伝導

近藤 (公募研究 A01) らは、角度分解光電子分光法 (ARPES) によって、鉄系超伝導体 $FeTe_{1-x}Se_x$ (x= 0.45) の表面状態の電子分散と超伝導ギャップを観測し、トポロジカル超伝導性を明らかにしました[6]。

空間反転対称性のない超伝導体 $PbTaSe_2$ はトポロジカル超伝導体の候補の一つであり、最近盛んに研究されています。俣野 (A01)・鄭 (A01) らは、その超伝導対称性を NMR 法を用いて研究し、フルギャップのスピン一重項超伝導体であることを明らかにしました[8]。

藤本 (A01)・水島 (D01) らは、ワイル超伝導・ディラック超伝導において、格子変形由来のカイラル電磁場によって誘起される新奇現象の理論研究を発展させ、擬似的カイラル磁場が、それと平行な方向に超伝導流を発生させることを見出しました[4]。これはワイル半金属で予言されているカイラル磁気効果の超伝導版のような効果といえます。ワイル半金属のカイラル磁気効果は、現実の物質では実現しないことが知られていますが、超伝導の場合は、無散逸な超伝導流であるので、実現可能です。

また、藤本・水島らは、ワイル半金属におけるカイラル異常現象の重要な例である負の磁気抵抗に類似した現象が、ワイル超伝導において擬似的磁場によって実現可能であることを示し、負の磁気熱抵抗として実験的に観測可能であることを明らかにしました[25]。

【2. トポロジカル半金属等】

(2-1) アンチペロブスカイト酸化物のディラック電子

米澤・前野らは、超伝導体 $Sr_{3-x}SnO$ 及び母物質 Sr_3SnO の NMR 測定から、母物質でディラック電子系を特徴づける状態密度を明らかにしました[18]。また、北川 (A01)・高木（A01）らは、アンチペロブスカイト構造酸化物 Sr_3PbO が理論計算通りの 3 次元ディラック電子を持つことを、量子振動とホール伝導から明らかにしました[19]。

打田 (公募研究 A01) らは、ディラック半金属 $(Cd_{1-x}Zn_x)_3As_2$ の高品質の薄膜化に成功し、組成制御によるトポロジカルディラック半金属から自明な絶縁体へのトポロジカル相転移や、ゲート制御による量子ホール状態を実現しました[13, 15]。

(2-2) トポロジカル近藤絶縁体

トポロジカル近藤絶縁体は強相関トポロジカル相の典型例のひとつです。松田・笠原らはトポロジカル近藤絶縁体の候補物質である YbB_{12} において、磁化および電気抵抗の量子振動を観測し、さらに量子振動の起源が試料内部の絶縁体状態に由来するものであることを明らかにしました[24]。量子振動は金属の「顔」とも言うべきフェルミ面の存在を示す直接的な証拠を与え、フェルミ面を持たない絶縁体では通常観測は期待されません。本研究における「絶縁体の量子振動」の観測は前例がなく、従来の常識を覆すものです[24]。

【3. トポロジカル磁性体】

(3-1) キタエフ・ハニカム格子でのスピン液体

マヨラナ・フェルミオンが実現しうる系である、キタエフ量子スピン液体に関する研究を著しく進展させました。強いスピン軌道相互作用に起因する有効磁気モーメントJ_{eff}=1/2 のイオンが、ハニカム(ハチの巣)格子上にある場合、キタエフ・ハイゼンベルグ模型に必要な異方的相互作用（キタエフ型相互作用）が主要になると考えられています。理論の美しさと、現実物質で実現できる可能性があるため、非常に魅力的なテーマです。$(Li,Na)_2IrO_3$ や α-$RuCl_3$ などが有力な候補物質ですが、いずれも低温で磁気秩序化してスピン液体性を失います。

しかし、北川・高木らは、イリジウム酸化物で極低温まで磁気転移しない、キタエフ不候補物質初のスピン一軌道液体物質 $H_3LiIr_2O_6$ を発見しました [c]。マヨラナ粒子に関係があると思われる奇妙な磁場依存フェルミ統計が、比熱・磁化・NMR で観測されており、現実のキタエフ物質マヨラナ研究の進展が期待されます。

また、笠原・松田・那須（D02）らは、α-$RuCl_3$ の磁気転移が磁場で抑制されることを利用して、低温までスピン液体性を維持することに成功し、熱ホール伝導度が量子化することを明らかにしました [12, 17]。その量子化値は量子ホール効果状態で期待される値の 1/2 倍であり、「半整数熱量子ホール効果」の観測に世界で初めて成功しました。このような半整数量子化はマヨラナ・フェルミオンおよび非可換エニオンの直接的な証拠を与えるものです（図 2）。詳細は本誌のトピックスを御覧ください。

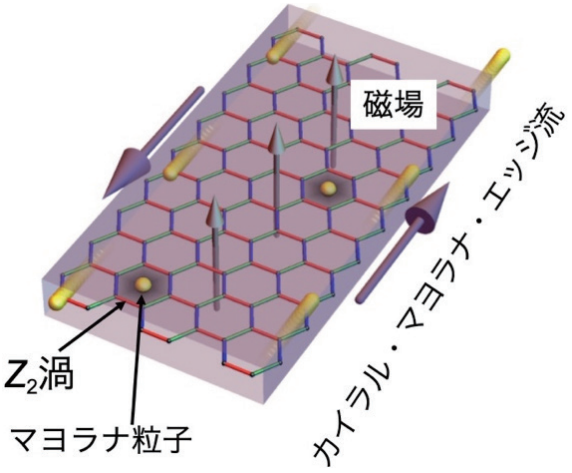


図 2: 半整数熱量子ホール効果状態の概念図 [17]。試料の端にはカイラル・マヨラナ・エッジ流、試料内部にはマヨラナ・フェルミオンと Z_2 渦の複合粒子である非可換エニオンが生ずる。

また、宇田川 (A01) らはキタエフ模型の厳密解を拡張し、動的相関関数の厳密な解析的表式を導きました。解析解に基づいてダイナミクスを網羅的に調べた結果、不純物周りで、キタエフスピン液体特有の励起である Vison に起因するゼロエネルギー共鳴という現象を見出しました [27]。この共鳴現象は NMR を用いて検出することが可能であり、スピン液体相とその素励起の同定に用いることができます。

(3-2) パイロクロア格子酸化物等

松田・笠原らは、パイロクロア酸化物 $Pr_2Zr_2O_7$ について、量子スピン液体状態における低エネルギースピン励起を熱輸送測定により調べ、磁気モノポール、トポロジカル欠陥である電気モノポール、ギャップレスなフォトン励起などの創発準粒子の存在を明らかにしました [10]。

また、宇田川らはパイロクロア磁性体の磁気構造因子に現れる半月構造 (図 3) の起源を明らかにしました [22]。この半月構造は、スピン液体の一つの形態であるクーロン相に近いことを示すと解釈できます。この特徴を示す系に外部的な摂動を与えることにより、スピン液体相を実現できる可能性があります。この解釈に基づき、スピネル磁性体 AB_2O_4(A=Zn, Hg, Mg; B=Cr, Fe) の中性子回折像の構造を議論しました。

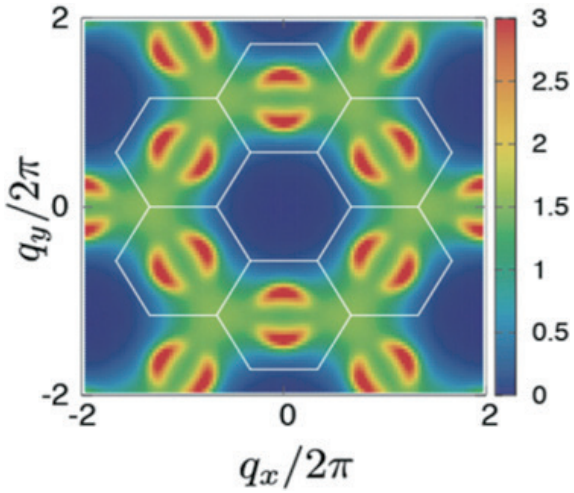


図 3: パイロクロア磁性体の磁気構造因子と半月構造 [22]。

以上述べたように、本計画研究 A01 は、《研究項目 A：トポロジーと強相関》の柱として、公募研究 A01（4 件）・D02（4 件）との連携や他の研究項目との間での共同研究で様々な成果を挙げました。さらに、国際共同研究の展開も含め、強相関系でのト

TOPICS

ポロジカル物質科学の分野で世界を先導する研究成果を発信しています。

● H29(2017) 年度 2 月以降の計画研究 A01 発表論文

[a] "Structural characterisation of high-mobility Cd_3As_2 films crystallised on $SrTiO_3$", Y. Nakazawa, M. Uchida, S. Nishihaya, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, M. Kawasaki, Sci. Rep. **8**, 2244-1-6 (Feb. 2018).

[b] "In Situ STM Observation of Nonmagnetic Impurity Effect in MBE-grown $CeCoIn_5$ Films", M. Haze, Y. Torii, R.Peters, S. Kasahara, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, J. Phys. Soc. Jpn **87**, 034702-1-6 (Feb. 2018).

[c] "A spin–orbital-entangled quantum liquid on a honeycomb lattice", K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, A. Kato, R. Takano, Y. Kishimoto, S. Bette, R. Dinnebier, G. Jackeli, H. Takagi, Nature **554**, 341–345 (Feb. 2018).

[d] "Topological properties and functionalities in oxide thin films and interfaces", M. Uchida, M. Kawasaki, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 143001-1-12 (Mar. 2018).

● H30(2018) 年度の研究項目 A01 発表論文（発表順）

[1] "Dirty two-band superconductivity with interband pairing order", Y. Asano, A. Sasaki, A. A. Golubov, New J. Phys. **20**, 043020-1-10 (Apr. 2018).

[2] "Magnetization measurements of Sr_2RuO_4-Ru eutectic microplates using dc-SQUIDs", Y. Nago, D. Sakuma, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, H. Takayanagi, J. Phys: Conf. Series **969**, 012040-1-5 (Apr. 2018).

[3] "Index theorem for the flat Andreev bound states at a dirty surface of a nodal superconductor", S. Ikegaya, Y. Asano, J. Phys.: Conf. Series **969**, 012079-1-6 (Apr. 2018).

[4] "Charge/spin supercurrent and the Fulde-Ferrell state induced by crystal deformation in Weyl/Dirac superconductors", Taiki Matsushita, T. Liu, T. Mizushima, S. Fujimoto, Phys. Rev. B**97**, 134519-1-11 (Apr. 2018).

[5] "Minimal Conductance Quantization in a Normal-Metal/Unconventional-Superconductor Junction", S. Ikegaya, Y. Asano, J. Low Temp. Phys. **191**, 96–104 (Apr. 2018).

[6] "Observation of topological superconductivity on the surface of an iron-based superconductor", P. Zhang, K. Yaji, T. Hashimoto, Y. Ota, T. Kondo, K. Okazaki, Z. Wang, J. Wen, G. D. Gu, H. Ding, S. Shin, Science **360**, 182-186 (Apr. 2018).

[7] "Symmetry conditions of a nodal superconductor for generating robust flat-band Andreev bound states at its dirty surface", S. Ikegaya, S. Kobayashi, Y. Asano, Phys. Rev. B **97**, 174501-1-9 (May. 2018).

[8] "Fully gapped spin-singlet superconductivity in noncentrosymmetric $PbTaSe_2$: ^{207}Pb nuclear magnetic resonance study", S. Maeda, K. Matano, G.Q. Zheng, Phys. Rev. B **97**, 184510-1-5 (May 2018).

[9] "Charge disproportionation of mixed-valent Cr triggered by Bi lone-pair effect in the A-site-ordered perovskite $BiCu_3Cr_4O_{12}$", M. Etter, M. Isobe, H. Sakurai, A. Yaresko, R.E. Dinnebier, H. Takagi, Phys. Rev. B **97**, 195111-1-7 (May 2018).

[10] "Discovery of Emergent Photon and Monopoles in a Quantum Spin Liquid", Y. Tokiwa, T.Yamashita, D.Terazawa, K. Kimura, Y. Kasahara, T. Onishi, Y. Kato, M. Halim, P. Gegenwart, T. Shibauchi, S. Nakatsuji, E-G Moon, Y. Matsuda, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 064702-1-5 (May 2018).

[11] "Tuning the Pairing Interaction in a d-Wave Superconductor by Paramagnons Injected through Interfaces", M. Naritsuka, P.F.S. Rosa, Yongkang Luo, Y. Kasahara, Y. Tokiwa, T. Ishii, S. Miyake, T. Terashima, T. Shibauchi, F. Ronning, J.D. Thompson, Y. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **120**, 187002-1-6 (May 2018).

[12] "Unusual Thermal Hall Effect in a Kitaev Spin Liquid Candidate α-$RuCl_3$", Y. Kasahara, K. Sugii, T. Ohnishi, M. Shimozawa, M. Yamashita, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **120**, 217205-1-6 (May 2018).

[13] "Gate-tuned quantum Hall states in Dirac semimetal $(Cd_{1-x}Zn_x)_3As_2$", S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, M. Kawasaki, Science Advances **18,** eaar5668-1-26 (May 2018).

[14] "Green's-function theory of dirty two-band superconductivity", Y. Asano, A. A. Golubov, Phys. Rev. B **97**, 214508-1-15 (Jun. 2018).

[15] "Negative magnetoresistance suppressed

through a topological phase transition in $(Cd_{1-x}Zn_x)_3As_2$", S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, K. Akiba, M. Kriener, Y. Kozuka, A. Miyake, Y. Taguchi, M. Tokunaga, M. Kawasaki, Phys. Rev. B **97**, 245103-1-13 (Jun. 2018).

[16] "Theory of tunneling spectroscopy of normal metal/ferromagnet/spin-triplet superconductor junctions", L. A. B. Olde Olthof, S.-I. Suzuki, A. A. Golubov, M. Kunieda, S. Yonezawa, Y. Maeno, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **98**, 014508-1-11 (Jul. 2018).

[17] "Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid", Y. Kasahara, T. Ohnishi, Y. Mizukami, O. Tanaka, Sixiao Ma, K. Sugii, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi, Y. Matsuda, Nature **559**, 227–231 (Jul. 2018).

[18] "Normal-state properties of the antiperovskite oxide $Sr_{3-x}SnO$ revealed by ^{119}Sn-NMR", S. Kitagawa, K. Ishida, M. Oudah, J. N. Hausmann, A. Ikeda, S. Yonezawa, Y. Maeno, Phys. Rev. B **98**, 100503(R)-1-5 (Sep. 2018).

[19] "Magnetotransport in Sr_3PbO antiperovskite", S. Suetsugu, K. Hayama, A. W. Rost, J. Nuss, C. Mühle, J. Kim, K. Kitagawa, H. Takagi, Phys. Rev. B **98**, 115203-1-6 (Sep. 2018).

[20] "Infrared phonon spectra of quasi-one-dimensional Ta_2NiSe_5 and Ta_2NiS_5", T. I. Larkin, R. D. Dawson, M. Höppner, T. Takayama, M. Isobe, Y.-L. Mathis, H. Takagi, B. Keimer, A. V. Boris, Phys. Rev. B **98**, 125113-1-9 (Sep. 2018).

[21] "Local impedance on a rough surface of a chiral *p*-wave superconductor", S. V. Bakurskiy, Ya. V. Fominov, A. F. Shevchun, Y. Asano, Y. Tanaka, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, M. R. Trunin, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, Y. Maeno, Phys. Rev. B **98**, 134508-1-16 (Oct. 2018).

[22] "Magnetic clustering, half-moons, and shadow pinch points as signals of a proximate Coulomb phase in frustrated Heisenberg magnets", T. Mizoguchi, L.D.C. Jaubert, R. Moessner, M. Udagawa, Phys. Rev. B **98**, 144446-1-22 (Oct. 2018).

[23] "Orbital-selective metal-insulator transition lifting the t2g band hybridization in the Hund metal $Sr_3(Ru_{1-x}Mn_x)_2O_7$", M. Nakayama, T. Kondo, K. Kuroda, C. Bareille, M. D. Watson, S. Kunisada, R. Noguchi, T. K. Kim, M. Hoesch, Y. Yoshida, S. Shin, Phys. Rev. B **98**, 161102(R)-1-5 (Oct. 2018).

[24] "Quantum oscillations of electrical resistivity in an insulator", Z. Xiang, Y. Kasahara, T. Asaba, B. Lawson, C. Tinsman, L. Chen, K. Sugimoto, S. Kawaguchi, Y. Sato, G. Li, S. Yao, Y. L. Chen, F. Iga, John Singleton, Y. Matsuda, Lu Li, Science **362**, 65–69 (Oct. 2018).

[25] "Negative Thermal Magnetoresistivity as a Signature of a Chiral Anomaly in Weyl Superconductors", T. Kobayashi, T. Matsushita, T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto, Phys. Rev. Lett. **121**, 207002-1-6 (Nov. 2018).

[26] "Nematic Superconductivity in Doped Bi_2Se_3 Topological Superconductors", S. Yonezawa, Condensed Matter **4**, 4010002-1-20 (Dec. 2018).

[27] "Vison-Majorana complex zero-energy resonance in the Kitaev spin liquid", M. Udagawa, Phys. Rev. B **98**, 220404(R)-1-5 (Dec. 2018).

[28] "Monoclinic $SrIrO_3$-a Dirac semimetal produced by non-symmorphic symmetry and spin–orbit coupling", T. Takayama, A. N. Yaresko, H. Takagi, J. Phys.: Cond. Matter **31**, 074001-1-7 (Dec. 2018).

[29] "Improved Single-Crystal Growth of Sr_2RuO_4", J. S. Bobowski, N. Kikugawa, T. Miyoshi, H. Suwa, H-S. Xu, S. Yonezawa, D.A. Sokolov, A.P. Mackenzie, Y. Maeno, Condens. Matter **4**, 4010006-1-11 (Jan. 2019).

[30] "Direct Evidence for the Existence of Heavy Quasiparticles in the Magnetically Ordered Phase of $CeRhIn_5$", M. Haze, R. Peters, Y. Torii, T. Suematsu, D. Sano, M. Naritsuka, Y. Kasahara, T. Shibauchi, T. Terashima, Y. Matsuda, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 014706-1-4 (Jan. 2019).

[31] "Piezoelectric-based uniaxial strain cell with high strain throughput and homogeneity", I. Kostylev, S. Yonezawa, Y. Maeno, J. Appl. Phys. **125**, 082535-1-10 (Jan. 2019).

[32] "Evolution of Superconductivity with Sr-Deficiency in Antiperovskite Oxide $Sr_{3-x}SnO$", M. Oudah, J.N. Hausmann, S. Kitao, A. Ikeda, S. Yonezawa, M. Seto, and Y. Maeno, Sci. Rep. **9** 1831 (Feb. 2019).

[33] " Spin fluctuations in Sr_2RuO_4 from polarized neutron scattering: Implications for superconductivity", P. Steffens, Y. Sidis, J. Kulda, Z.Q. Mao, Y. Maeno, I. I. Mazin, and M. Braden, Phys. Rev. Lett. **122**, 047004-1-6 (Feb. 2019).

対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求

佐藤 宇史 / 東北大学大学院理学研究科 教授

計画研究 B01「対称性に基づいた新奇なトポロジカル相の探求」では、対称性とスピン軌道相互作用を起源とする新しい種類のトポロジカル物質を探索するとともに、トポロジカル物質が発現する新奇量子現象やエキゾチック準粒子の性質を解明することを目的としています。なかでも、ディラック電子・ワイル電子などのエキゾチック準粒子がもたらす新奇物性に重点を置いた研究を推進しています。今年度は、新しいトポロジカル半金属・超伝導物質の探索・実証、トポロジカル絶縁体の表面・界面ディラック電子制御、奇周波数クーパー対の理論において進展がありました。これらの成果は、薄膜作製や先端分光などの緊密なネットワークを生かした B01 ならではの連携研究に基づくものです。以下では、今年度の主な成果を紹介します。

1. トポロジカル超伝導

トポロジカル超伝導体中に現れるマヨラナ束縛状態はトポロジカル量子計算などへの応用から注目されており、これまでドープしたトポロジカル絶縁体、ルテニウム酸化物、BCS 超伝導体と半導体ナノワイヤとの接合系などがトポロジカル超伝導体候補として盛んに研究されています。しかしながら、マヨラナ束縛状態の確固たる実験的証拠はまだ得られていません。これまで発見されてきたトポロジカル超伝導候補は超伝導転移温度 (T_c) が低く、より安定したマヨラナ束縛状態の実現のためには、「高温」トポロジカル超伝導体の探索が重要になります。佐藤 (B01 代表者), 相馬 (B01 研究協力者) らは、分子線エピタキシー (MBE) 法によって、銅酸化物高温超伝導体 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (Bi2212; T_c = 85 K) 上にラシュバ金属である Bi(110) の超薄膜を作製し , 超伝導近接効果によって Bi の電子状態に巨大なエネルギーギャップを誘起することに成功しました（図 1 ）。さらに、このギャップが 85 K 程度まで残ることも明らかにし、Bi の電子状態が、高温におけるトポロジカル超伝導発現に適していることを見出しました。今後、磁場下におけるマヨラナ束縛状態の検出が期待されます。関連して、佐藤 , 瀬川 (B01 分担者), 相馬 , 安藤 (B01 研究協力者) らは、トポロジカル絶縁体上に超伝導単結晶薄膜を作製することに成功し、トポロジカル界面状態に誘起されたエネルギーギャップの観測とトポロジカル超伝導性の検証を進めています。

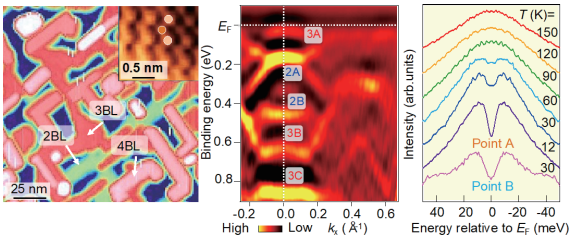


図 1: Bi(110)/Bi2212 の (左)STM 像 , (中央) バンド構造 , および (右) 超伝導近接効果によるエネルギーギャップ [6]

柏谷 (B01 分担者), 田仲 (B01 分担者) らは、トポロジカル超伝導体の候補物質である Sr_2RuO_4 について、表面インピーダンスに基づくカイラリティと奇周電子対による近接効果の観測を目的に、極低温マイクロ波キャビティ測定を行い、奇周波電子対の効果も考慮した準古典理論との対応を検証しました。その結果、観測された表面インピーダンスは、 s 波超伝導体である Al とは顕著に異なる性質を有し、T_c 以下で虚部が増加するという結果を得ました（図 2）。準古典理論に基づく解析と比較し、カイラル p 波対称性とは矛盾しない結果を与えることを確認しました [9]。また DC-SQUID 上にマイクロ結晶を載せ、自発磁化を測定する実験を進めましたが、現状では自発磁化を観測するには至っていません [24]。またダイヤモンドを用いた局所磁化測定の観測手法の開発 [15] や、WTe_2 の結晶において磁気抵抗・磁気振動の観測などを進め [25]、トポロジカル物質の微小結晶の特性解析を行う準備を進めています。

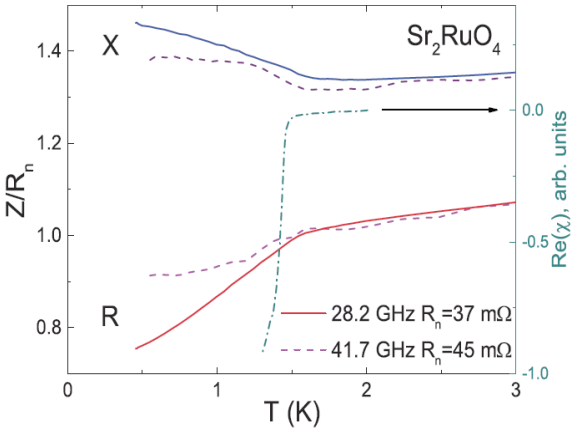


図 2：Sr_2RuO_4 の表面インピーダンス (Z=R-iX) の温度依存性 . 縦軸はノーマル状態の抵抗値で規格化した . T_c 以下で X の増加が低温まで続く [9].

2. トポロジカル半金属

よく知られたトポロジカル半金属の一種であるディラック半金属やワイル半金属は波数空間における縮退が「点」で起こるのに対して、その縮退が 1 次元的な線上で起こる「線ノード半金属」が最近注目され、候補物質の探索が精力的に進められています。佐藤 , 相馬 , 安藤らは、Ta_3SiTe_6 という三元化合物物質が、結晶格子の持つ映進対称性によって保護された 2 種類の異なる線ノードを持つことを見出しました (図 3)。また、フェルミ準位近傍では、スピン軌道相互作用によりアワーグラスフェルミオン型の特殊なバンド構造が現れることも明らかにしました。今回の実験結果は、結晶の持つノンシンモルフィックな対称性が、トポロジカル半金属の探索において重要であることを示したものです。

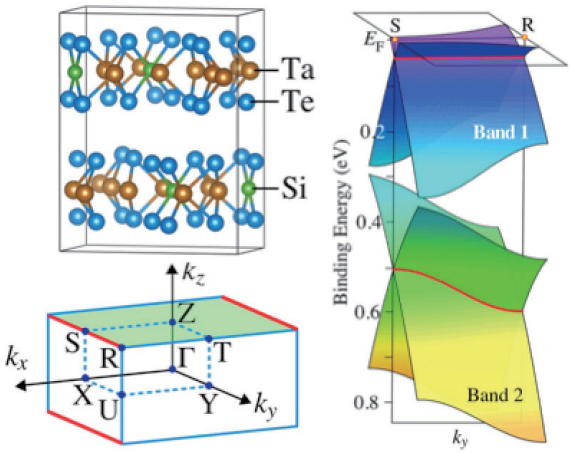


図 3: Ta_3SiTe_6 の結晶構造とブリルアンゾーン . SR 軸上に映進対称性によって保護された線ノードが観測される [11]

また、佐藤 , 相馬らは、ホウ素の蜂の巣格子ネットワークを有し、よく知られた超伝導体 MgB_2 (T_c = 39 K) と同一結晶構造を持つ AlB_2 に着目し、放射光を用いたバルク敏感 ARPES によって、その 3 次元的な電子構造を決定しました [14]。その結果、ディラック粒子の特徴である X 字型バンド分散を明確に観測することに成功し、さらにこのバンドが線ノードを形成することを見出しました (図 4)。これは、AlB_2 の蜂の巣格子がグラフェンと同様のカイラル対称性を持ち、かつその積層パターンが AA 型であることに起因しています。今後、$(Mg,Al)B_2$ において超伝導と線ノードとの関連を明らかにする研究の進展が期待されます。

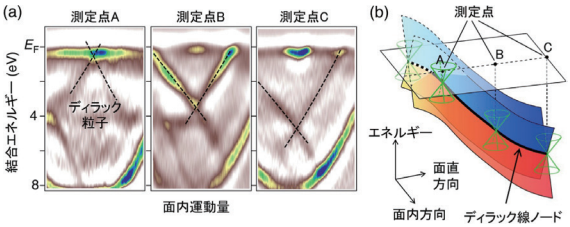


図 4: AlB_2 における (a) ディラック電子分散の k_z 依存性 [14] と ,(b) 線ノードの模式図

3. トポロジカル絶縁体薄膜素子

塚﨑 (B01 分担者) と佐藤らは、MBE と ARPES を活用して、$(Bi,Sb)_2Se_3$ 混晶 (BSS) 薄膜の電子構造理解と物性評価を進めてきました。その BSS 薄膜をチャネルに用いた電界効果型トランジスタの膜厚依存性を詳細に検証して、E_F 制御を実証しました。特に、試料面直方向に形成された pn 接合の寄与を明らかにし、バルク中の残留電子と残留正孔の空乏層形成をバルク絶縁化に利用できることを示しました [13]。こうした素子動作原理の理解は、BSS 薄膜を用いたトポロジカル表面状態の伝導特性理解に欠かせません。今回、断面構造の素子（図 5(a)）の BSS 層の厚さ d (nm) を変えて、FET 動作を測定しました。図 5(b) に示すとおり、明瞭な ambipolar 動作を示すピーク構造を R_{xx} に観測しました。この R_{xx} ピークは、電荷中性点の最小状態密度を反映した高抵抗化によるものです。また、8 nm からの膜厚増加に伴って、ピークを示すゲート電圧が負から正にシフトすることがわかります。したがって、この V_G シフトは、上部の p 型 BSS 層の膜厚変化によって、下部層

の n 型 Bi_2Se_3 との界面に形成される空乏層が電荷中性点を制御するための外部ゲート電圧 V_G に影響していることを示しています。この結果から、およそ 12 nm 程度の時に、バルク中の残留電荷量が最小となり、E_F が電荷中性点に制御されたと結論できます。

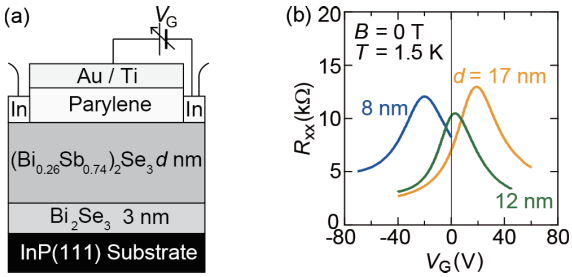


図 5: $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Se_3$ をチャネルとする電界効果トランジスタの断面構造図 (a) と膜厚 (d = 8, 12, 17nm) の素子における縦抵抗のゲート電圧依存性 (b)

塚﨑らは、この素子構造に磁性不純物として Fe を選択して電気伝導特性評価を行ってきましたが、これまでにヒステリシスを伴う強磁性の発現は観測されていません。一方で、E_F 制御を確立できたことから、Fe 添加試料の伝導特性を詳細に検証することができるようになりました。Fe 組成と Bi/Sb 比を調整した上で、さらに膜厚を変化させて比較しました。図 6(a) には、d = 30 nm のバンド分散を示しており、表面状態が維持されていることがわかります。図 6(b) で抵抗の温度依存性を比較すると、d = 14 nm の試料が絶縁体的な振る舞いを示し、Fe 不添加試料や厚い d = 30 nm 試料と大きく異なることを見出しました。この試料に面直磁場を印加すると (図 6(c,d))、大きな負の磁気抵抗とともに、正の大きなホール抵抗を観測しました。この結果は、Fe 添加と磁場印加を合わせることで、電子状態に大きな変化が生じることを示唆しています。これらの (b)-(d) の結果は、磁場誘起によるトポロジカル相転移に起因すると考えられます。今後、この現象の起源を探るべく、ゼロ磁場での絶縁化と磁場印加による電子構造変化を検討していきます。

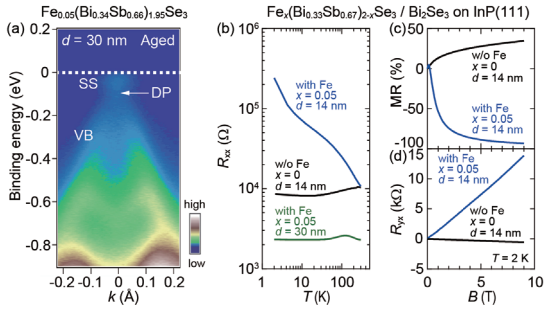


図 6: (a),Fe 添加 $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Se_3$(d = 30nm) のバンド分散 . 表面状態が観測される . (b)-(d) Fe 添加 $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Se_3$(d = 30nm と 14nm) と Fe 不添加膜の抵抗の温度依存性と 2 K での磁気抵抗及びホール抵抗。

4. 奇周波数クーパー対の理論

4-1. 新しいバルクーエッジ対応の理論

田仲 (B01 分担者), 田村 (B01 PD) らは、 エッジ状態として誘起される奇周波数クーパー対とバルクのグリーン関数の間にスペクトラル・バルクエッジ対応と呼ばれる関係式が成り立つことを提案しました [1]。通常のバルク・エッジ対応は、バルクにおける巻きつき数とエッジ状態の数との関係を与えます。一方で本研究は、バルクの巻きつき数をグリーン関数で記述することで有限周波数に拡張したものが、端における奇周波数ペア振幅と、任意の複素周波数において一致することを明らかにしました [1]。また奇周波数クーパー対の低エネルギー構造を解析しました。低周波数極限では奇周波数クーパー対のペア振幅は $F(z) = W/z + \chi z + O(z^3)$ のように書けます (z は複素周波数)。第一項の発散的な振る舞い (~1/z) をする奇周波数ペアの係数 W は巻き付き数であり、トポロジカル相を特徴づける整数であることが明らかになりました。一方、特異性をもたない第 2 項 (~z) の係数 χ はトポロジカル量子転移点に向かって発散し、トポロジカル相転移への不安定性を示すことを明らかにしました [4]。カイラル対称性を持つ 1 次元系の典型例であるキタエフ p 波超伝導モデルや近接効果で結合したナノワイヤのモデルの臨界性は量子イジングモデルと同じ性質を示すことが知られていますが、さらに多様な臨界性があることが明らかになりました。

4-2. 異常近接効果

田村と田仲は、奇周波数スピン 3 重項ペアが作り出す異常近接効果の研究を行いました。奇周波数クーパー対の示す顕著な現象の中に、異常近接効果と呼ばれるものがあります。拡散伝導領域の金属（DN）とスピン 3 重項超伝導体の接合においては、近接効果により DN 領域に奇周波数ス

ピン 3 重項 s 波のペアが浸入して準粒子状態密度が零エネルギーでピークを持つ異常近接効果が表れます。これは、DN 中の準粒子状態の零エネルギーにおいてギャップを持つ従来型の近接効果（スピン 1 重項 *s* 波によるもの）とは顕著に異なり異常近接効果と呼ばれています。超伝導体界面に形成される零エネルギーアンドレーエフ束縛状態（ZESABS）によって奇周波数スピン 3 重項 *s* 波クーパー対が界面で増幅されて、近接効果として DN 領域に浸入することに対応しています。これに対してスピン 1 重項の *d* 波超伝導体においては、ZESABS は界面に存在しますが、奇周波数クーパー対の対称性がスピン 1 重項 *p* 波であるために、DN 中への近接効果は起こらないことが知られていました。今回超伝導体領域にスピン軌道相互作用がある場合についての研究を行った結果 (図 7)、基板上に存在するスピン 1 重項 *d* 波超伝導体接合系においては、ラシュバスピン軌道相互作用が十分に大きくなると、スピン 3 重項 s 波のクーパー対が作り出されるために、DN 上に浸入することができるようになり、異常近接効果が現れることが明らかになりました [2]。

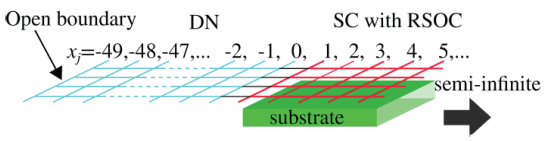


図 7: ラシュバスピン軌道相互作用の効果を取り入れて異常近接効果を計算したモデル [2]

[1] "Odd-frequency pairs in chiral symmetric systems: spectral bulk-boundary correspondence and topological criticality", S. Tamura, S. Hoshino, Y. Tanaka, arXiv:1809.05687.

[2] "Theory of proximity effect in two-dimensional unconventional superconductor with Rashba spin-orbit interaction", S. Tamura, Y. Tanaka, arXiv:1804.04018.

[3] "Current-driven magnetization switching in ferromagnetic bulk Rashba semiconductor (Ge,Mn)Te" R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura, Science Advances **4**, eaat9989 (Dec. 2018).

[4] "Pulsed-laser deposition of InSe thin films for the detection of thickness-dependent bandgap modification" D. Zheng, J. Shiogai, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, Applied Physics Letters **113**, 253501-1-4 (Dec. 2018).

[5] "Emergence of interfacial conduction and ferromagnetism in MnTe/InP" R. Watanabe, R. Yoshimi, M. Shirai, T. Tanigaki, M. Kawamura, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, R. Arita, M. Kawasaki, Y. Tokura, Applied Physics Letters **113**, 181602-1-4 (Nov. 2018).

[6] "Ultrathin bismuth film on high-temperature cuprate superconductor $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ as a candidate of topological superconductor" N. Shimamura, K. Sugawara, S. Sucharitakul, S. Souma, K. Iwaya, K. Nakayama, C. X. Trang, K. Yamauchi, T. Oguchi, K. Kudo, T. Noji, Y. Koike, T. Takahashi, T. Hanaguri, T. Sato, ACS Nano **12**, 10977-10983 (Oct. 2018).

[7] "Observation of Dirac-like energy band and unusual spectral line shape in quasi-one-dimensional superconductor $Tl_2Mo_6Se_6$" K. Nakayama, Z. Wang, C. X. Trang, S. Souma, E. D. L. Rienks, T. Takahashi, Y. Ando, T. Sato, Physical Review B **98**, 140502(R)-1-5 (Oct. 2018).

[8] "Topological quantum phase transition in magnetic topological insulator upon magnetization rotation" M. Kawamura, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura, Physical Review B **98**, 140404(R)-1-5 (Oct. 2018).

[9] "Local impedance on a rough surface of a chiral p-wave superconductor" S. V. Bakurskiy, Y. V. Fominov, A. F. Shevchun, Y. Asano, Y. Tanaka, M. Y. Kupriyanov, A. A. Golubov, M. R. Trunin, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, Y. Maeno, Physical Review B **98**, 134508-1-16 (Oct. 2018).

[10] "Pseudogap, Fermi arc, and Peierls-insulating phase induced by 3D–2D crossover in monolayer VSe_2" Y. Umemoto, K. Sugawara, Y. Nakata, T. Takahashi, T. Sato, Nano Research 2018, 12274-1-5 (Sep. 2018).

[11] "Observation of band crossings protected by nonsymmorphic symmetry in the layered ternary telluride Ta_3SiTe_6" T. Sato, Z. Wang, K. Nakayama, S. Souma, D. Takane, Y. Nakata, H. Iwasawa, C. Cacho, T. Kim, T. Takahashi, Y. Ando, Physical Review B **98**, 121111(R)-1-6 (Sep. 2018).

[12] "Ferromagnetic insulator $Cr_2Ge_2Te_6$ thin films with perpendicular remanence" M. Mogi, A. Tsukazaki, Y. Kaneko, R. Yoshimi, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, Y. Tokura APL Materials **6**, 091104-1-8 (Sep. 2018).

[13] "Effect of the depletion region in topological insulator heterostructures for ambipolar field-effect transistor" Y. Satake, J. Shiogai, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, Physical Review B **98**, 125415-1-7 (Sep. 2018).

[14] "Observation of a Dirac nodal line in AlB_2" D. Takane, S. Souma, K. Nakayama, T. Nakamura, H. Oinuma, K. Hori, K. Horiba, H. Kumigashira, N. Kimura, T. Takahashi, T. Sato, Physical Review B **98**, 041105(R)-1-5 (Jul. 2018).

[15] "Influence of dynamical decoupling sequences with finite-width pulses on quantum sensing for AC magnetometry" T. Ishikawa, A. Yoshizawa, Y. Mawatari, H. Watanabe, S. Kashiwaya, Physical Review Applied, **10**, 054059-1-8 (Jul. 2018)

[16] "Theory of tunneling spectroscopy of normal metal/ferromagnet/spin-triplet superconductor junctions" L. A. B. Olde Olthof, S.-I. Suzuki, A. A. Golubov, M. Kunieda, S. Yonezawa, Y. Maeno, Y. Tanaka, Physical Review B **98**, 014508-1-11 (Jul. 2018).

[17] "Electromagnetic effects induced by a time-dependent axion field" K. Taguchi, T. Imaeda, T. Hajiri, T. Shiraishi, Y. Tanaka, N. Kitajima, T. Naka, Physical Review B **97**, 214409-1-6 (Jun. 2018).

[18] "Spontaneous modulation of superconducting phase in Kitaev ladder" S. Nakosai, Y. Tanaka, T. K. Ng, N. Nagaosa, Journal of the Physical Society of Japan **87**, 083702-1-5 (Jun. 2018).

[19] "Study on Green's function on topological insulator surface" B. Lu, Y. Tanaka, Philosophical Transactions of the Royal Society A **376**, 20150246-1-17 (Jun. 2018).

[20] "Anisotropic band splitting in monolayer $NbSe_2$: implications for superconductivity and charge density wave" Y. Nakata, K. Sugawara, S. Ichinokura, Y. Okada, T. Hitosugi, T. Koretsune, K. Ueno, S. Hasegawa, T. Takahashi, T. Sato, npj 2D Materials and Applications **2**, 12-1-6 (May 2018).

[21] "Interorbital topological superconductivity in spin-orbit coupled superconductors with inversion symmetry breaking" Y. Fukaya, S. Tamura, K. Yada, Y. Tanaka, P. Gentile, M. Cuoco, Physical Review B **97**, 174522-1-17 (May 2018).

[22] "Ultrathin bismuth film on 1T-TaS_2: structural transition and charge-density-wave proximity effect" K. Yamada, S. Souma, K. Yamauchi, N. Shimamura, K. Sugawara, C. X. Trang, T. Oguchi, K. Ueno, T. Takahashi, T. Sato, Nano Letters **18**, 3235–3240 (Apr. 2018).

[23] "Local density of states in two-dimensional topological superconductors under a magnetic field: Signature of an exterior Majorana bound state" S. Suzuki, Y. Kawaguchi, Y. Tanaka, Physical Review B **97**, 144516-1-14 (Apr. 2018).

[24] "Magnetization measurements of Sr_2RuO_4-Ru eutectic microplates using dc-SQUIDs" Y. Nago, Y, D. Sakuma, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, H. Takayanagi, Journal of Physics Conference Series **969**, UNSP 012040 (Apr. 2018).

[25] "Extremely large magnetoresistance in a high-quality WTe_2 grown by flux method" K. Tsumura, R. Yano, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, S. Masubuchi, T. Machida, H. Namiki, T. Sasagawa, S. Kashiwaya, Journal of Physics Conference Series **969**, UNSP 012134 (Apr. 2018).

トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象

藤澤利正 / 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

本計画研究では、半導体ヘテロ構造・低次元ナノ構造や超伝導体・強磁性体のハイブリッド構造をベースとした人工的な「トポロジカル物質ナノ構造」の輸送現象に注目しています。個々のバルク母材料にはない新奇なトポロジカル量子現象を引き出し、トポロジカル系に特有なエキゾチックな準粒子の振る舞いを明らかにすることや、準粒子を用いた新しいトポロジカル物質ナノ構造デバイスの基礎原理を提案し原理実証を行うことを目的としています。下記で、最近のトピックスを紹介します。

1. 量子ホール朝永ラッティンジャー流体の非平衡準安定状態の観測

藤澤（C01 代表）、橋坂（C01 連携研究者）、村木（C01 分担者）らは、量子ホールエッジチャネルによるカイラル朝永ラッティンジャー流体における非平衡準安定状態の観測に成功しました[1]。これは、カイラル 1 次元系の特徴を生かして、可積分系である朝永ラッティンジャー流体の非平衡状態が長く安定に留まる現象を実験的に検証したものです。図 1 (a) は実験系の模式図を示しており、ランダウ占有率 2 の整数量子ホール状態において、スピンアップとダウンの 2 つのチャネル ($C_{\uparrow}$, $C_{\downarrow}$) が相互作用している系を用意します。まず、量子ポイント接合 (QPC) から透過率 D でスピンアップの電子を注入することで、図 1(b) の (i) または (ii) のような階段状のエネルギー分布関数をもつ初期状態の用意ができます。しかし、わずかに 0.5 μm 程度の距離を伝搬すると、クーロン相互作用に起因するスピン電荷分離によって、(i′) または (ii′) のような分布関数をもつ準安定状態に達します。特に、透過率が非常に小さい場合には、熱平衡状態 (フェルミ分布関数) と明らかに異なる arctan 型の分布関数 (ii′) に至ることを明らかにしました。この非平衡状態は比較的長く (20μm 程度) 維持されることから、準安定状態とみなすことができ、一次元電子系の興味深い現象を示しています。

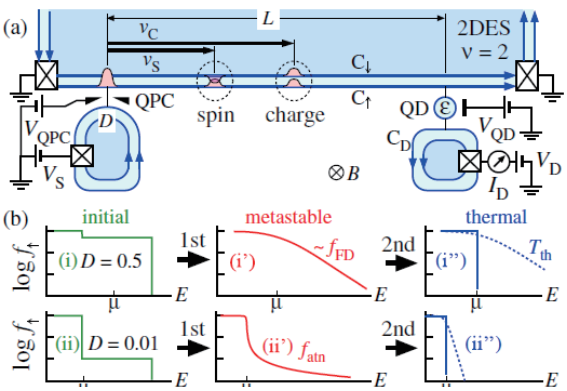


図 1. 量子ホール朝永ラッティンジャー流体の非平衡準安定状態の観測。(a) 実験の模式図。(b) 各スピンのエネルギー分布関数の変化（模式図）。 [1]。スピン電荷分離で非平衡準安定状態に達し (1st)、外界との結合により安定な熱平衡状態に近づく (2nd)。

2. InAs/InGaSb 2 次元トポロジカル絶縁体におけるゼロ磁場スピン分裂の観測

入江（C01 連携研究者）、秋保（C01 連携研究者）、村木らは、2 次元トポロジカル絶縁体である InAs/InGaSb 複合量子井戸のキャパシタンス測定により、バルク状態のゼロ磁場スピン分裂の観測に成功しました。量子井戸 - 表面ゲート間のキャパシタンスは 2 次元の状態密度を反映し、図 2 のように電荷中性点でフェルミ準位がギャップをよぎる際に dip を示します。注目すべき点は、

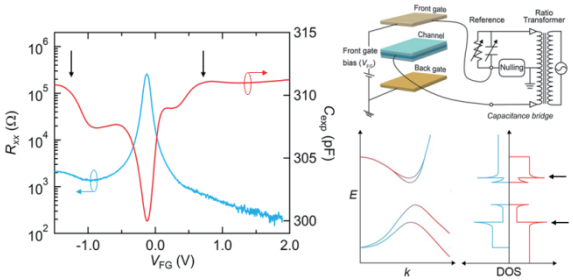


図 2. 左：InAs/InGaSb 量子井戸の縦抵抗（R_{xx}）とキャパシタンス (C_{exp}) のゲート電圧依存性。右上：測定配置。右下：バルクのエネルギー分散と対応する状態密度の模式図。

その両側でキャパシタンスが階段状に変化していることです。これは、ヘテロ構造が空間反転対称性を持たないため、スピン軌道相互作用によってゼロ磁場においてもバンドがスピン分裂し、バンド端で状態密度が大きく変化するため生じるものです。特に伝導帯側で観測されたスピン分裂は $k\cdot p$ 計算から予想される値よりも 1 桁ほど大きく、従来の理論には含まれない強いスピン軌道相互作用が存在することを示しています。さらにこのスピン軌道相互作用によってトポロジカル相転移の性質が質的に変化することも明らかになりました。

3. スピン軌道ロッキングを用いた電子スピン制御

好田 (C01 分担者) らは、2 次元 Rashba 系やトポロジカル絶縁体に存在するスピン軌道ロッキングを用いた、新たなスピン制御法を実現しました [2]。半導体におけるスピン軌道相互作用は、電子スピンに対し有効磁場を与えます。よって、これまでスピン歳差運動制御が実現されてきました。スピン軌道ロッキングを用いる場合、電子軌道とスピン方向が結合するため、電子軌道の精密制御により、歳差運動とは全く異なる原理で、スピン方向制御が可能となります。Rashba スピン軌道相互作用の強い InGaAs 2 次元電子ガスを用いて、量子ポイントコンタクト (QPC) が並列に接続された磁気フォーカシング素子を作製し (図 3)、低温におけるスピン依存伝導度を評価しました。弱い面直磁場 (B_{op}) により電子が半円軌道を描くと、エミッタ QPC を出た電子スピンが 180 度回転してコレクタ QPC に到着することを実験的に見出しました。理論計算とも良い一致を示し、スピン軌道ロッキングによりスピン方向制御が実現できたことを意味します。このスピン制御法は、常にスピン方向が有効磁場と平行であることから、Dephasing を抑制した効率的なスピン制御手法になり得ます。

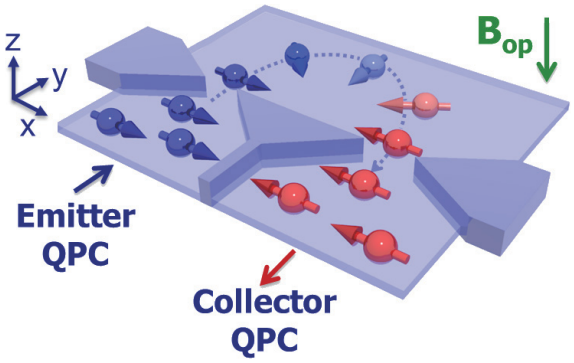


図 3. スピン軌道ロッキングによるスピン制御を行う磁気フォーカシング素子の概略図 [2]。

4. 磁性ワイル半金属中のスピンテクスチャー

野村（C01 分担者）らは、磁性ワイル半金属中のスピンテクスチャーによる新規現象を探索しました。図 4 のような磁壁の近傍に電荷が蓄積すること [3]、磁壁の運動によって電流が発生すること [4] を明らかにしました。さらに磁壁を貫く電流に対する磁気抵抗効果が通常の強磁性金属に比べて堅牢であり、乱れに対してヘリシティによって守られることを明らかにしました [5]。またトポロジカル半金属の磁化率がスピン軌道相互作用によって増強されること [6]、さらにトポロジカルディラック半金属ではスピン軌道交差磁化率が波数空間のトポロジーによって決まることを明らかにしました [7]。

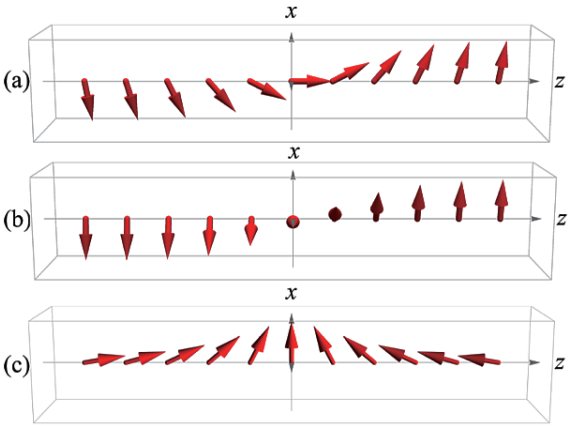


図 4. 磁性ワイル半金属中の (a) Neel 型磁壁、(b) Bloch 型磁壁、(c)head-to-head 型磁壁。

5 . 高次トポロジカル絶縁体の物理

江澤（C01 分担者）は、高次トポロジカル絶縁体の研究を行いました。高次トポロジカル絶縁体はトポロジカル絶縁体の拡張であり、面やエッジではなく、コーナーやヒンジにトポロジカル境界状態が現れることが特徴です。特に図 5(b) に示してある Breathing カゴメ格子と Breathing パイロクロア格子では SSH 模型を拡張した高次トポロジカル絶縁体が実現していることを予言しまし

た [8]。この系では図 5(e) に示すワニエ中心が量子化し、トポロジカル数になります。これは音響システムやマイクロ波導波路で実験的にのちに実証されました。また、図 5(h) にあるような LC 回路でこれらが実装できることを理論的に示しました [9]。この系ではコンデンサーがホッピング、コイルがオンサイトポテンシャルに対応しています。特にコーナー状態がインピーダンス共鳴を用いて測定できることを示しました。可変コンデンサーを調整することでトポロジカル相転移を観測可能です。

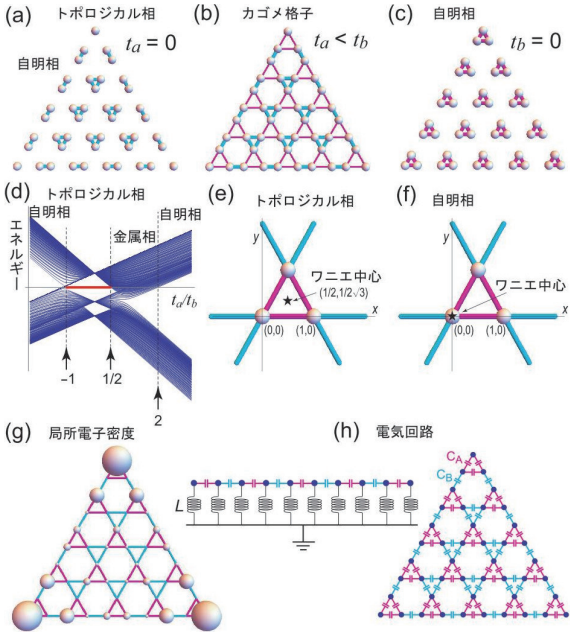


図 5. 高次トポロジカル絶縁体のモデル。

6. アンドレーフ近藤状態における非平衡ゆらぎ

小林研介（C01 連携研究者）らは超伝導体に接続された量子ドットにおけるアンドレーフ近藤効果について研究しました [10]。量子多体系特有のスピン一重項状態である近藤状態とクーパー対が共存しているときに、非平衡ゆらぎが異常に増大することを明らかにしました。

この他、トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象に関する実験・理論研究を進めました [11-23]。

[1] "Signatures of a Nonthermal Metastable State in Copropagating Quantum Hall Edge Channels", Kosuke Itoh, Ryo Nakazawa, Tomoaki Ota, Masayuki Hashisaka, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, Phys. Rev. Lett. **120**, 197701 (2018).

[2] "Spin-momentum locked spin manipulation in a two-dimensional Rashba system", M. Kohda, T. Okayasu, J. Nitta, Scientific Reports volume **9**, 1909 (2019).

[3] "Localized charge in various configurations of magnetic domain wall in Weyl semimetal", Y. Araki, A. Yoshida, K. Nomura, Phys. Rev. B **98**, 045302 (2018).

[4] "Charge pumping induced by magnetic texture dynamics in Weyl semimetals", Y. Araki, K. Nomura, Phys. Rev. Applied **10**, 014007 (2018).

[5] "Helicity-protected domain-wall magnetoresistance in ferromagnetic Weyl semimetal", K. Kobayashi, Y. Ominato, K. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 073707 (2018).

[6] "Spin susceptibility of three-dimensional Dirac semimetals", Y. Ominato, K. Nomura, Phys. Rev. B **97**, 245207 (2018).

[7] "Spin-orbit crossed susceptibility in topological Dirac semimetals", Y. Ominato, S. Tatsumi, K. Nomura, arXiv:1809.10852.

[8] "Higher-order topological insulators and semimetals on the breathing Kagome and pyrochlore lattices", M. Ezawa, Phys. Rev. Lett. **120**, 026801 (2018).

[9] "Higher-order topological electric circuits and topological corner resonance on the breathing Kagome and pyrochlore lattices", M. Ezawa, Phys. Rev. B **98**, 201402(R) (2018).

[10] "Enhanced Shot Noise of Multiple Andreev Reflections in a Carbon Nanotube Quantum Dot in SU(2) and SU(4) Kondo regimes", T. Hata, R. Delagrange, T. Arakawa, S. Lee, R. Deblock, H. Bouchiat, K. Kobayashi and M. Ferrier, Phys. Rev. Lett. **121**, 247703-1-5 (2018).

[11]"Electronic energy spectroscopy of monochromatic edge magnetoplasmons in the quantum Hall regime", T. Ota, M. Hashisaka, K. Muraki and T. Fujisawa, J. Phys. Cond. Mat. **30** 345301 (2018).

[12]"Tomonaga–Luttinger-liquid nature of edge excitations in integer quantum Hall edge channels", Masayuki Hashisaka and Toshimasa Fujisawa, Reviews in Physics **3**, 32 (2018).

[13]"Generation and detection of edge magnetoplasmons in a quantum Hall system using a photoconductive switch", C. J. Lin, K. Morita, K. Muraki, and T. Fujisawa, Japan. J. Appl. Phys. **57**, 04FK02 (2018).

[14]"Coupling between quantum Hall edge channels on opposite sides of a Hall bar", N. H. Tu, M. Hashisaka, T. Ota, Y. Sekine, K. Muraki, T. Fujisawa, N. Kumada, Solid State Commun. **283**, 32-36 (2018).

[15]"Weak localization in bilayer graphene with Li-intercalation/desorption", Y. Endo, S. Ichinokura, R. Akiyama, A. Takayama, K. Sugawara, K. Nomura, T. Takahashi, S. Hasegawa, J. Phys.: Condens. Matter **30**, 305701 – 1-7 (2018).

[16]"Topological switch between second-order topological insulators and topological crystalline insulators", M. Ezawa, Phys. Rev. Lett. **121**, 116801 (2018).

[17]"Strong and weak second-order topological insulators with hexagonal symmetry and Z_3 index", M. Ezawa, Phys. Rev. B **97**, 241402(R) (2018).

[18]"Minimal model for higher-order topological insulators and phosphorene", M. Ezawa, Phys. Rev. B **98**, 045125 (2018).

[19]"Magnetic second-order topological insulators and semimetals", M. Ezawa, Phys. Rev. B **97**, 155305 (2018).

[20]"Topological quantum quench dynamics carrying arbitrary Hopf and second-Chern numbers", M. Ezawa, Phys. Rev. B **98**, 205406 (2018).

[21]"Dynamics of a magnetic skyrmionium driven by spin waves", Sai Li, Jing Xia, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Wang Kang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Weisheng Zhao, Appl. Phys. Lett. **112**, 142404 (2018).

[22]"Dynamics of Antiferromagnetic Skyrmion Induced by a Magnetic Anisotropy Gradient ", Laichuan Shen, Jing Xia, Guoping Zhao, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Oleg A. Tretiakov, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Phys. Rev. B **98**, 134448 (2018).

[23]"Fano effect in the transport of an artificial molecule", S. Norimoto, S. Nakamura, Y. Okazaki, T. Arakawa, K. Asano, K. Onomitsu, K. Kobayashi and N.-h. Kaneko, Physical Review B **97**, 195313-1-8 (2018).

トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

川上 則雄 / 京都大学 大学院理学研究科 教授

計画研究 D01「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」は、トポロジカル量子相とそこに発現するエキゾチック準粒子の基本的性質を理論的に解明し、さらにそれらの普遍的な物理現象と法則を探究することを目的としています。特に、既存の枠組みを超えた発想と分野を越えた概念の融合により、より広い観点から基礎学理の構築を目指しています。以下に本年度得られた成果をまとめます。

【強相関および非平衡系におけるトポロジカル現象】（川上）

川上らは、強相関電子系におけるトポロジカル相転移の理論研究を行いました。特に、強相関効果がトポロジカルな性質を決定的に変える現象として、相互作用による冷却フェルミ原子系でのトポロジカル Z 分類のブレークダウン [1]、サウレスポンプのブレークダウン [2] を明らかにしました。さらに、強相関系の新たなトポロジカルな性質として重い電子系の非エルミート性に着目した性質を明らかにしました（図 1）[3]。これは Liang Fu らの最近の指摘に刺激されたもので、今後、大きく研究が進展していくテーマであると思います。また、非平衡系で初めて実現する時間結晶に新たな実現方法を提案しました [4]。

【非エルミートハミルトニアン系のトポロジカル相の分類と非エルミート近藤問題】（上田）

上田らは、非平衡開放系を記述する有効モデルである非エルミートハミルトニアンが発現するトポロジカル相の分類を行いました。有効ハミルトニアンが非エルミートな系はパリティー時間対称な系、ボース・アインシュタイン凝縮系、エキシトン－ポラリトン系など多くの例が知られていますが、トポロジカル相の系統的な分類はこれまでなされていませんでした。我々は、非エルミート系におけるエネルギーギャップやトポロジカル相の概念を明確化し、それに基づいて非エルミート系のトポロジカル相の分類を行い、さらにバルクーエッジ対応について議論しました [5]。 非エルミート系ではエネルギーが複素数になるために時間反転対称性と粒子―正孔対称性がトポロジカルに統一されるという著しい性質があり、非エルミート系に特有のトポロジカル相を生みます [6]。

アルカリ原子を使った近藤系は非弾性散乱が重要になると予想され、非エルミート系の近藤ハミルトニアンで記述されます。この系では、繰り込み群フローが出発点に戻るという g 定理を破る特異な振る舞いをすることを見出しました [7]（図 2、川上らとの共同研究）。

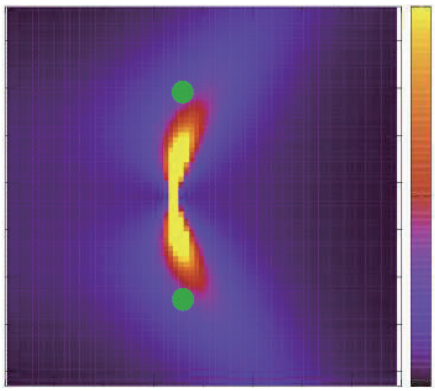


図 1: 近藤格子模型における非エルミート由来のフェルミアークと例外点。文献 [3] より転載。

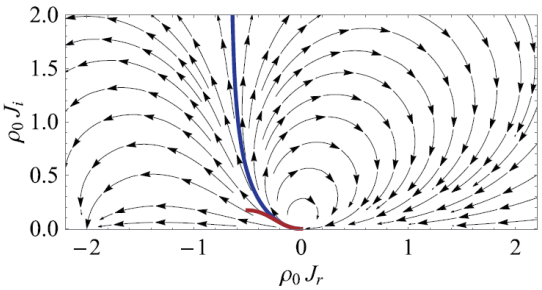


図 2: 非エルミート近藤模型の繰り込み群フローを 2 ループオーダーで計算したもの。青（赤）の曲線は繰り込み群方程式の解析解（ベーテ仮設解）から得られた臨界曲線。 文献 [7] の図 1 より転載。

【トポロジカル超伝導の研究】（佐藤）

トポロジカル物質のような強いスピン軌道相互作用をもつ系では、電子の軌道角運動量とスピンの混成が生じ、そのために通常のスピン 1/2 電子でなく、スピン 3/2 のような高次スピンを持つ電子が存在します。佐藤らは、トポロジカル相を実現する新しい物質系として、高次スピンをもつ系を考え、そのトポロジカル絶縁体およびトポロジカル超伝導体の理論を展開しました（図 3）[8,9]。特に、A01 の前野らによるアンチペロブスカイト構造をもつ酸化物超伝導体 $Sr_{3-x}SnO$ の発見に動機を得て、スピン 3/2 電子のトポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体の理論を構築し、これらの系では高次スピンに由来する高次のトポロジカル数をもつ超伝導体が実現されることを見出しました。さらに $Sr_{3-x}SnO$ がトポロジカル量子相転移近傍にあり，そのため特異なノード構造をもつことを明らかにしました。また、ディラック半金属のトポロジカル超伝導体の理論を鉄系超伝導体 FeSe に応用し、FeSe が複数のトポロジカル超伝導相を同時に持ちうることを提案しました [10]。また，D02 の柳瀬との共同で、非共形型結晶対称性によって守られた超伝導体ノード構造のトポロジカルな構造を解析しました [11]。

【ワイル超伝導における異常な輸送現象】（水島）

水島らは、ワイル超伝導体におけるトンネル現象や熱輸送現象についての研究を行いました。重い電子系 $U_{1-x}Th_xBe_{13}$ の非ユニタリー超伝導状態において、その非自明なチャーン数や巻きつき数と表面フェルミアークの関係性を議論し、これらの特徴がトンネル伝導度の測定を通して観測可能であることを示しました（D01 新田との共同研究）[12]。また、A01 の藤本らと共同でワイル超伝導体におけるカイラル電磁場応答や熱輸送現象についての研究を行いました [13,14]。特に、従来の超伝導の輸送現象研究において用いられる準古典 Keldysh 理論へ torsion 磁場や Berry 曲率の効果を取り入れました。この拡張された理論を用いて、ワイル超伝導体において一般に負の熱磁気抵抗が存在することを明らかにしました。

【超伝導体と素粒子模型におけるヒッグスモード】（新田）

超伝導体におけるヒッグスモードが現れる条件を対称性の観点から明らかにしました [15]。素粒子の標準模型を越える模型の一つの 2 ヒッグスダブレット模型において、トポロジカルに安定な非アーベリアン渦が存在し、ドメイン壁に接合していることを示し現象論的制限を議論しました（図 4）[16]。さらに、その渦の構造を詳しく解析しました [17]。

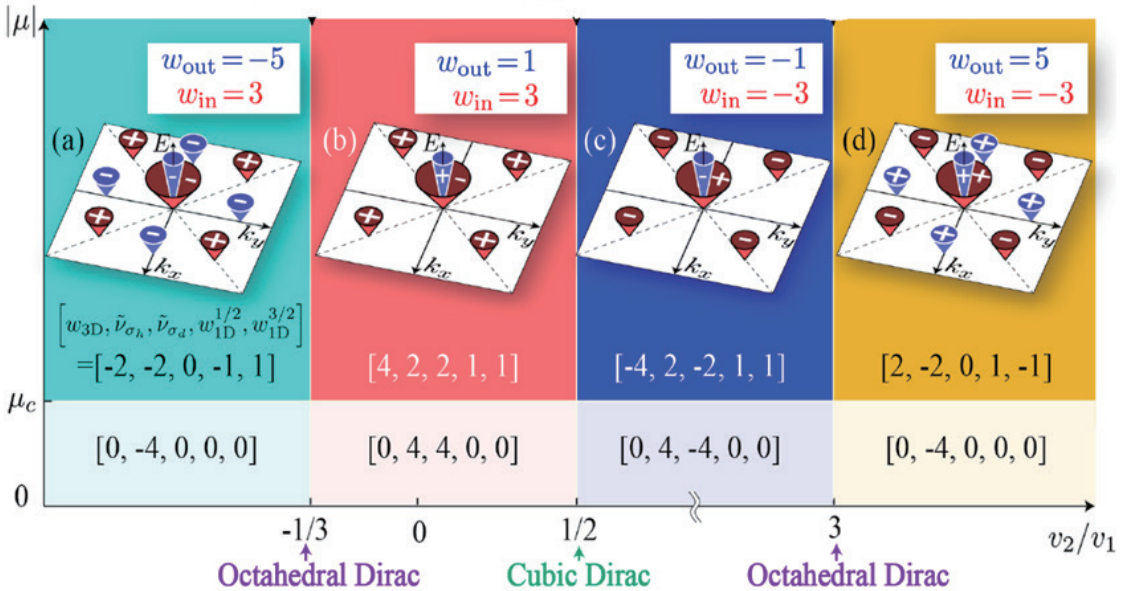


図 3：ドープしたスピン 3/2 トポロジカル絶縁体のトポロジカル超伝導相。 文献 [8] より転載。

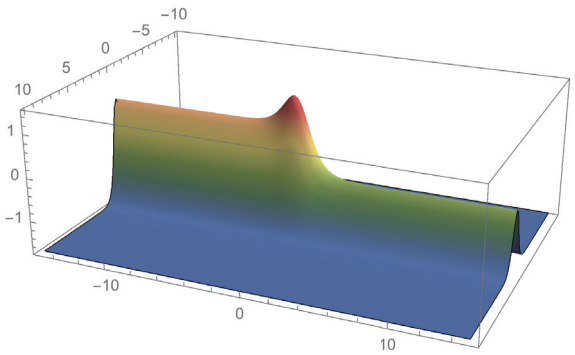


図 4：素粒子の 2 ヒッグス模型における非アーベリアン渦とドメイン壁の接合。 文献 [16] より転載

【3＋1 次元におけるボソン・フェルミオン間の双対性】（西田）

西田らは、ボソン・フェルミオン間の双対性に関する理論研究を行いました。特に、3+1 次元において、自由なディラックフェルミオンと真空角 $\theta = \pi$ を伴うスカラー QED が双対であること、フェルミオン側におけるトポロジカル相転移がボソン側におけるヒッグス・閉じ込め相転移に対応していること、前者におけるディラックフェルミオンは後者におけるスカラーボソンとダイオン対の複合粒子として実現されていること、などを新たに提唱しました [18]。また、散乱長が時間空間的に変化する場合の流体力学に関する理論研究も行いました。その結果、散乱長の変化が流体の膨張収縮と対応するように体積粘性を伴って応力テンソルに現れることを見出しました [19]。現在、この理論的成果に基づいて体積粘性を測定するための実験が進行中です。

[1] T. Yoshida, I. Danshita, R. Peters and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **121**, 025301 (2018).
[2] M. Nakagawa, T. Yoshida, R.Peters, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **98**, 115147 (2018).
[3] T. Yoshida, R. Peters and N. Kawakami, Phys. Rev. B **98**, 035141 (2018).
[4] K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **121**, 093001 (2018).
[5] Z. Gong, Y. Ashida, K. Kawabata, K. Takasan, S. Higashikawa, and M. Ueda, Phys. Rev. X **8**, 031079 (2018).
[6] K. Kawabata, S. Higashikawa, Z. Gong, Y. Ashida, and M. Ueda, Nat. Commun. **10**, 297 (2019).
[7] M. Nakagawa, N. Kawakami, and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **121**, 203001 (2018).
[8] T. Kawakami, T. Okamura, S. Kobayashi, and M. Sato, Phys. Rev. X **8**, 041026 (2018).
[9] I. Kuzmenko, T. Kuzmenko, Y. Avishai, and M. Sato, Phys. Rev. B **98**, 165139 (2018).
[10] Z. Peng et al, Nature Physics **15**, 41 (2019).
[11] S. Kobayashi, S. Sumita, Y. Yanase, and M. Sato, Phys. Rev. B **97**, 180504(R) (2018).
[12] T. Mizushima and M. Nitta, Phys. Rev. B **97**, 024506 (2018).
[13] T. Matsushita, T. Liu, T. Mizushima, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **97**, 134519 (2018).
[14] T. Kobayashi, T. Matsushita, T. Mizushima, A. Tsuruta, and S. Fujimoto, Phys. Rev. Lett. **121**, 207002 (2018).
[15] S. Tsuchiya, D. Yamamoto, R. Yoshii and M. Nitta, Phys. Rev. B **98**, 094503 (2018).
[16] M. Eto, M. Kurachi and M. Nitta, Phys.Lett. B **785**, 447 (2018).
[17] M. Eto, M. Kurachi and M. Nitta, JHEP **1808**, 195 (2018).
[18] T. Furusawa and Y. Nishida, arXiv:1810.11808.
[19] K. Fujii and Y. Nishida, Phys. Rev. A **98**, 063634 (2018).

平成 30 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞

●受賞理由
スピン軌道相互作用を用いたスピン生成とスピン輸送の研究

好田 誠 / 東北大学 大学院工学研究科 准教授 (計画研究 C01)

このたび、スピン軌道相互作用を用いた電気的スピン生成と長距離スピン輸送に対して、文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞しました。本賞は、萌芽的な研究・独創的視点に立った研究等、高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績をあげた 40 歳未満の若手研究者を対象とするもので、2018 年 4 月 17 日に文部科学省にて表彰式が開催されました。

受賞対象となった研究について、簡単にご紹介させてい頂きます。スピン軌道相互作用とは電子スピンに対し有効的に磁場を与える相互作用で、外部磁場や強磁性体を用いずに、スピン機能を誘起できる利点を有します。特に半導体ヘテロ構造では、この有効磁場をゲート電圧制御できるため、スピン歳差運動の電気的制御が実現されてきました。私は、有効磁場そのものを利用するのではなく、有効磁場の「空間変調」という概念を適用することで現れる新奇スピン物性に興味を持ってこれまで研究を進めてきました。磁場の空間変調を利用した例と言えば、1922 年にシュテルンとゲルラッハが行った銀原子のスピン分離が有名で、スピン角運動量を実証した重要な実験でした。当時は数メートル規模の実験装置を必要としていました。一方スピン軌道相互作用が生み出す有効磁場は、局所的に 10T 以上の強い磁場を生み出すことができるため、スピン依存力をナノ構造中に作り込むことができます。この利点を生かし、量子ポイントコンタクト (QPC) と呼ばれるナノ狭窄構造の中に有効磁場の空間勾配を生み出し、スピン偏極した電流を生成できることを明らかにしました (図 1(a)) [1]。QPC を流れる電流の伝導度がスピン偏極を示す 0.5($2e^2/h$) に量子化されることを確認すると共に、小林研介先生 (大阪大) と共にショット雑音測定からスピン偏極率の定量評価を行いました。得られたスピン偏極率は Fe や Co など強磁性金属のスピン偏極率 (40 - 60%) よりも高い値を示し (70%)、半導体のみを用いた効率的スピン生成が可能であることを明らかにしてきました。現在は、この QPC 構造をもとにして、スピン軌道ロッキングを用いたスピン制御法にも取り組んでいます [2]。QPC を用いたスピン生成は、実空間で有効磁場に空間変調を生み出すものでしたが、運動量空間に有効磁場の空間変調を適用するとスピン緩和を抑制することが可能になります。通常有効磁場の向きは、電子の運動方向に依存するため、スピン緩和を生み出す起源となります。しかし、半導体量子構造に存在する 2 種類の有効磁場 (ラシュバおよびドレッセルハウススピン軌道相互作用) を等しくすると、有効磁場は運動方向に依存せず SU(2) 対称性を有します。その結果、ランダムな散乱が起きてもスピン位相が保存される「永久スピン旋回状態」を実現することができます (図 1(b))。ラシュバスピン軌道相互作用をゲート電圧により精密制御することで永久スピン旋回状態を実現し [3]、100μm 以上もの長距離スピン輸送が可能であることを NTT 物性研と共に示し、永久スピン旋回状態が物理的にもデバイス応用としても重要であることを明らかにしてきました [4]。このように、有効磁場に空間変調を導入することで半導体における新奇スピン物性を生み出すことができます。今後は半導体以外の物質におけるスピン軌道相互作用にも着目し、磁化反転や量子情報の基礎物性を探索していきたいと思います。

以上の研究は、東北大学大学院工学研究科の新田先生を始めとするさまざまな研究者の方々との共同研究によるものです。この場を借りて感謝申し上げると共に、TMS 領域での異なるバックグラウンドを持った研究者の方との議論や様々なサポートに御礼申し上げます。

[1] M. Kohda et al., Nat. Cmmun. **3**, 1082 (2012).
[2] M. Kohda et al., Sci. Rep. accepted (2019).
[3] M. Kohda et al., Phy. Rev. B **86**, 081306(R) (2012).
[4] Y. Kunihashi et al., Nat. Commun. **7**, 10722 (2016).

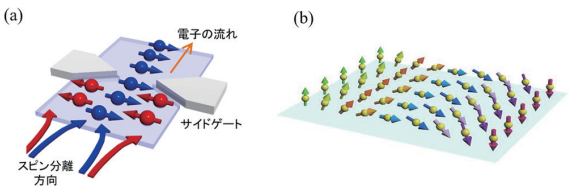


図 1(a) 有効磁場の空間勾配を用いたスピン分離および (b) 永久スピン旋回状態における電子スピンの空間伝搬の模式図

平成 30 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞

●受賞理由
量子ホール系における電子ダイナミクスの実験研究

橋坂 昌幸 / NTT 物性科学基礎研究所 主任研究員（計画研究 C01）

このたび、「量子ホール系における電子ダイナミクスの実験研究」で、平成 30 年度　科学技術分野の文部科学大臣表彰　若手科学者賞を受賞いたしました。本賞は「高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績をあげた若手研究者」に対して与えられるものです。授賞式は 2018 年 4 月 17 日に文部科学省にて行われました。

受賞対象となった研究は、分数量子ホール（QH）系における準粒子トンネル現象の観測実験 [1]、および整数 QH エッジ状態におけるスピン電荷分離現象の観測実験 [2] です。

分数 QH 系は量子多体系であり、そこでの素励起（準粒子）は分数電荷を持つことが知られています。分数電荷準粒子は 1997 年にトンネル電流のゆらぎ測定実験で確かめられ、その実験が分数 QH 効果のノーベル賞受賞の契機となりました。この実験が行われてから既に 20 年が経過しましたが、最近になって分数電荷準粒子を用いたトポロジカル量子計算が提案されるなど、今なお物性物理学の重要なトピックとして盛んに研究が行われています。我々の実験では、整数 QH 系中に局所的に形成された分数 QH 系における準粒子生成を観測しました。局所分数 QH 系が整数 QH 系を流れる電流に対するトンネル障壁として働くとき、トンネル過程において分数電荷準粒子が生成され、電流を運ぶことを明らかにしました。この成果の発展として、異なる QH 系を組み合わせた新しい準粒子ダイナミクス観測・制御デバイスが考えられます。

また、QH 系の試料端に生じるカイラルエッジ状態は、典型的な 1 次元電子系として知られています。エッジ状態上の電子ダイナミクスは、1 次元系を記述する朝永 - ラッティンジャー液体論に従います。これまでに、ソース・ドレイン電圧や温度に対するエッジ状態へのトンネル電流の冪的振る舞いが観測され、実験結果と朝永 - ラッティンジャー液体論との対応が議論されてきました。我々は、より直接的にエッジ状態の朝永 - ラッティンジャー液体性を確認することを目指し、この理論を象徴するスピン電荷分離現象を直接的に観測することを試みました。スピン自由度を持つ整数 QH 系エッジ状態を準備し、高速エレクトロニクスを用いて、電荷励起とスピン励起が時間経過とともに分離していく様子を観測することに成功しました。この成果の価値は、QH エッジ状態の朝永 - ラッティンジャー液体性を確認したことにとどまらず、他の材料も含めた一般の 1 次元電子系において、初めてスピン電荷分離を明瞭に観測したということです。この成果は、1 次元電子系を利用した電荷・スピン信号伝送の研究につながるものと考えています。

本研究の成果は、私が東京工業大学に助教として在籍していた際に得られたものです。ご指導いただいた藤澤利正教授をはじめ、共同研究者の皆様に、この場をお借りして感謝申し上げます。

[1] M. Hashisaka et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 056802 (2015).
[2] M. Hashisaka et al., Nat. Phys. **13**, 559 (2017).

NEWS

平成 30 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞

●受賞理由
量子スピン液体の熱的性質と磁気ダイナミクスの研究

那須 譲治 / 横浜国立大学大学院工学研究院 准教授 [受賞時・東京工業大学理学院 助教]（公募研究 D02）

このたび、量子スピン液体の熱的性質と磁気ダイナミクスに関する理論研究で、平成 30 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰における若手科学者賞を受賞しました。授賞式は 2018 年 4 月 17 日に文部科学省 3 階講堂にて行われました。今年度の受賞者数は 99 名ですが、その中で、本新学術領域から私も含めて 3 名が受賞しました。

受賞対象となった研究は、絶縁磁性体を対象とする量子スピン系に関するものです。電子の持つ電荷移動の自由度が凍結したこの系は、固体中の電子の持つスピン自由度の量子効果と集団的な性質を理解するための最も基礎的な舞台のひとつとなっています。特に、格子に局在した電子スピンの協力現象によって現れる磁気秩序は、相転移現象を理解する上で誰もが学んできたものだと思います。一方で、量子ゆらぎは秩序を抑制するものであるため、極低温まで磁気秩序を示さなければ、それは量子多体効果によって現れた新しい状態であると考えられます。P. W. Anderson によって提案されたこの状態は量子スピン液体と呼ばれ、多くの研究者を惹き付け、有機・無機化合物でその候補物質が発見されてきました。実験結果と比較しながらその微視的機構を明らかにするためには、有限温度における熱力学的・動的性質の理論計算が必要ですが、量子スピン液体を基底状態に持つと期待されるハイゼンベルグ模型などの基礎的模型でそれを実行するのは非常に困難でした。

私たちが行った研究では、それを打開するため、基底状態が量子スピン液体であることが既にわかっているキタエフ模型と呼ばれる量子スピン模型から出発しました。この模型がスピン軌道相互作用の強いある種の絶縁磁性体の磁気状態を記述する可能性が指摘されて数年が経過していましたが、私たちの前にキタエフ模型の有限温度の計算に取り組んでいる理論研究グループがいなかったのは大変幸運でした。私たちは数値計算によって比熱やラマンスペクトル、熱伝導度の温度変化などに、電子スピンが量子多体効果によってそれが分裂した準粒子のように振る舞う分数化現象が現れることを発見しました [1-5]。これら理論計算と比較できる物理量が候補物質で測定されていることから [6-8 など]、今後、量子スピン液体の分数化現象に関して理解が深まっていくものと期待されます。

今回、このような名誉ある賞を頂くことができたのは、これまでご指導いただいた先生方や共同研究者の方々のご支援の賜物です。この場をお借りして感謝申し上げます。

[1] JN, M. Udagawa, and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **113**, 197205 (2014).
[2] JN, M. Udagawa, and Y. Motome, Phys. Rev. B **92**, 115122 (2015).
[3] JN, J. Knolle, D. L. Kovrizhin, Y. Motome, R. Moessner, Nat. Phys. **12**, 912 (2016).
[4] J. Yoshitake, JN, and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **117**, 157203 (2016).
[5] JN, J. Yoshitake, and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. **119**, 127204 (2017).
[6] S.-H. Do, S.-Y. Park, J. Yoshitake, JN, Y. Motome, Y. S. Kwon, D. T. Adroja, D. J. Voneshen, K. Kim, T.-H. Jang, J.-H. Park, K.-Y. Choi, and S. Ji, Nat. Phys. **13**, 1079 (2017).
[7] Y. Kasahara, K. Sugii, T. Ohnishi, M. Shimozawa, M. Yamashita, N. Kurita, H. Tanaka, JN, Y. Motome, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **120**, 217205 (2018).
[8] Y. Kasahara, T. Ohnishi, Y. Mizukami, O. Tanaka, Sixiao Ma, K. Sugii, N. Kurita, H. Tanaka, JN, Y. Motome, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, Nature **559**, 227 (2018).

東京工業大学理学院物理学系関係者とともに。
左から橋坂昌幸氏 (NTT 基礎研)、私、竹内一将氏 (東大理物)

2018 年カマリンーオンネス賞

●受賞理由
磁気輸送測定とマイクロ波による非従来型超伝導体の先駆的実験研究

松田 祐司 / 京都大学 理学研究科 教授（計画研究 A01）

京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の松田祐司教授が 2018 年カマリンーオンネス賞 (2018 Heike Kamerlingh Onnes Prize) を受賞されました。超伝導現象の発見者の名前を冠したこの賞は、超伝導の物性実験研究に関する特に顕著な業績に対して与えられます。同賞は 3 年に一度、超伝導国際会議 (M^2S-HTSC) で発表され、2018 年北京で開催された第 12 回会議にて、松田先生とカナダの Prof. Louis Taillefer (Université de Sherbrooke and CIFAR) の 2 名の受賞式が行われました。なお、前回 2015 年の受賞者は、イギリスの Prof. Gilbert Lonzarich (University of Cambridge) で、この賞は過去に日本人では、高木英典先生 (Max Planck and 東京大学) と内田慎一先生 (東京大学名誉教授) が 2006 年に受賞されています。

松田祐司先生の受賞となったご業績は、「磁気輸送測定とマイクロ波による非従来型超伝導体の先駆的実験研究」(For pioneering magneto-transport and microwave experiments on exotic superconductors) に関するものです。マイクロ波を用いた研究ではビスマス系高温超伝導体におけるジョセフソン・プラズマ共鳴の発見が有名です。これにより層状超伝導体における磁場中でのジョセフソン接合の強度を直接測定できるようになり、渦糸状態の解明が大きく進みました。また、重い電子系化合物、有機超伝導体、銅酸化物高温超伝導体、鉄系高温超伝導体などの強相関超伝導体では、磁気的相互作用などの非従来型機構により電子対形成が起こると考えられますが、松田先生は、井澤公一先生 (現大阪大学教授) らとともに、熱伝導と比熱を様々な磁場方向で測定し、準粒子のドップラー効果の角度依存性を調べることにより、このような非従来型超伝導体の超伝導ギャップ構造を決定する新しい方法を開発しました。このほかにも、芝内 (東大) らとともに、鉄系超伝導体では、磁場侵入長測定によるギャップ構造や超伝導ドーム中の量子臨界点の解明、磁気トルク法による電子ネマティック相の研究、そして最近では超伝導体で初めての BCS-BEC クロスオーバーの発見、さらに銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ相での回転対称性の破れの解明、など多岐にわたる研究をされております。

松田祐司先生のご研究は、いずれもオリジナリティが高く、アイディアに富んでおり、競争の熾烈な超伝導研究の分野において、大きなプレゼンスを示すものであります。松田先生の人間味あふれるお人柄の魅力にファンになってしまう方も多いと思いますが、その「人間力」の高さが、次々と素晴らしい結果を生み出す一助になっているのではないでしょうか。今回、わが国の基礎研究レベルもまだまだ捨てたものではないということを世界に発信できたという点で、この受章の喜びを皆様と共有したいと思います。

(文責、芝内 孝禎)

NEWS

平成 30 年春の紫綬褒章

永長 直人 / 東京大学 大学院工学系研究科 教授（計画研究 B01）

当新学術領域の連携研究者である永長直人教授が平成３０年春の紫綬褒章を受章されました。紫綬褒章は「科学技術分野における発明・発見や、学術及びスポーツ・芸術文化分野における優れた業績を挙げた方（内閣府）」に与えられる褒章とされております。永長先生は、物性理論、特に電子間の強い相互作用によってもたらされる強相関効果、およびベリー位相などの波動関数の幾何学に起因するトポロジカル物性の研究と教育に従事し、数多くの世界をリードする先駆的な業績を挙げるとともに、国内外で指導的な役割を果たしておられます。永長先生の研究業績は高温超伝導、異常ホール効果、スピンホール効果、磁気スキルミオン等多岐に渡ります。とりわけ、ゲージ理論を用いた高温超伝導体の研究や、スピン流などの散逸を伴わないトポロジカル・カレントの予言など物性物理学の新しい分野を切り拓かれました。これらの成果は、近年、物理学および材料科学の分野で世界的に注目を集め、活発な研究が進められているトポロジカル物質研究へと発展しました。この研究分野では、最近もアクシオンやマヨラナ粒子などの新発見が相次いでおり、今後の更なる発展が予想されます。また、従来の物質とは異なる性質を応用した次世代型エレクトロニクスなどへの新たな展開が期待されます。

紫綬褒章は社会的影響力が大きく、受賞の直後には都内のホテルなどから多くの方が式典の営業に来られるなど、普段とは少し違う雰囲気となりました。物理工学専攻で行ったお祝いの会には、多忙な中、多くの方々に参加していただき、とても賑やかなものとなりました。また、東京大学総長も祝辞に駆けつけて下さり永長先生との思い出についてお話しされるなど、永長先生の研究上のつながりの広さを改めて認識しました。この会には永長先生の学生時代から付き合いがある先生方が多く参加されており、永長先生の若いころのエピソードが多数披露されるなど和やかな雰囲気のお祝いとなりました。特に実験家の先生からも多くの話を聞けたことは、理論だけでなく常に実験にも目を向けて行われてきた永長先生の研究における視野の広さを感じました。また、永長先生の同期・同年代の方々がお忙しい中多く駆けつけられたのも、永長先生のお人柄ゆえのものと思います。永長先生の今後のますますのご活躍を祈念しております。

（文責：石塚 大晃・江澤 雅彦）

トピックス

キタエフ量子スピン液体における マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオン

松田 祐司 / 京都大学 大学院理学研究科 教授 (研究分担 A01)
笠原 裕一 / 京都大学 大学院理学研究科 准教授 (連携研究 A01)

キタエフ・スピン液体

トポロジーという現代物理学の最も重要で基本的な概念を含む量子ホール効果は、凝縮系物理学における最も劇的な現象の一つである。特に分数量子ホール効果状態では、分数電荷の粒子や分数統計のエニオンなどの様々なエキゾチックな創発準粒子が現実に観測される。ここでは、トピックスとしてキタエフ・スピン液体とよばれる絶縁体スピン系を取り上げたい。我々は最近キタエフ・スピン液体の候補物質で、熱ホール効果が電子系の量子ホール効果で観測される値の半分の値に量子化されることを実験で示すことができた。このことは、マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオンの存在の直接的な証拠となる。これらの準粒子は、電子スピンの分裂 (Fractionalization) によって生じたもので、分数量子ホール効果状態における電子電荷の分数化現象との類似点と相違点が興味深い。

量子スピン液体とは、量子ゆらぎのためにスピンが絶対零度まで秩序化しない系である。量子スピン液体では、並進対称性などの単純な対称性の破れは起こらず、トポロジカル秩序や様々なエキゾチックな準粒子励起が提案されている。量子スピン液体は、以前は理論家の創造物であったが、ここ 10 年来まだまだ数えるほどであるが現実の物質で発見され、急速にその研究が発展している分野である。ここで議論するキタエフ・スピン液体は、２次元ハニカム格子上で実現されるスピン 1/2 の系であり、各スピンは x 軸、y 軸、z 軸に沿ってボンドに依存したイジング型の相互作用を持つ（図 1a）。このとき各スピンはそれぞれの軸に垂直方向に揃おうとするためにフラストレーションの効果が現れ、絶対零度まで秩序化しない。キタエフは各スピンを４つのマヨラナ・フェルミオン (b_x, b_y, b_z, c) で記述することにより、このスピン系の基底状態を厳密に解くことができることを示した（図 1b）。この系の素励起は、遍歴するマヨラナ・フェルミオン (c) と、局在したマヨラナ・フェルミオン (b_x, b_y, b_z) により構成される Z_2 渦 (バイゾン)、の２種類で特徴づけられる (図 1c)。Z_2 渦は有限のギャップを持つため極低温では励起されない。詳しくは [1,2] を参照されたい。

マヨラナ・チャーン絶縁体と非可換エニオン

キタエフ・スピン液体では、ゼロ磁場で遍歴マヨラナ・フェルミオンはディラック型の分散を持ち、極低温では遍歴マヨラナ・フェルミオンが動き回る「マヨラナ半金属」状態が実現する。磁場に対する応答はさらに興味深い。磁場をかけると、

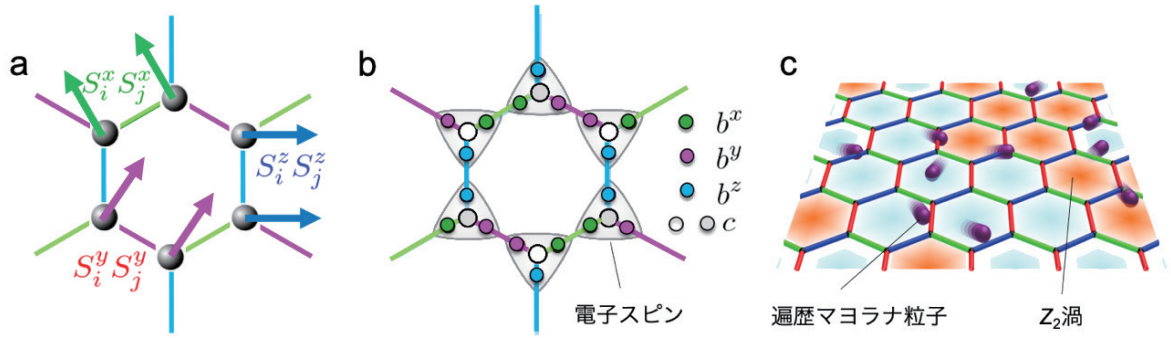


図 1：a, キタエフ模型の模式図。 b, 電子スピンのマヨラナ粒子への分裂の概念図 。c, 分数化によって現れる遍歴するマヨラナ・フェルミオンと Z_2 渦の概念図。

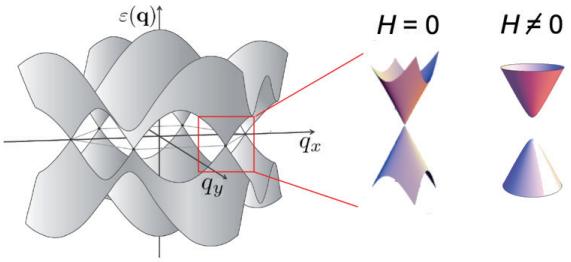


図２：遍歴するマヨラナ・フェルミオンのエネルギー分散。

遍歴マヨラナ・フェルミオンにはギャップが開く（図２）。このときチャーン数は磁場の方向により１か -1 となり、トポロジカルに非自明な「マヨラナ・チャーン絶縁体」状態が実現する。この状態では試料の端（エッジ）は、ギャップレスとなり、遍歴マヨラナ・フェルミオンによる無散逸のエッジ熱流（カイラル・マヨラナ・エッジ流）が流れる（図３）。このような、マヨラナ・チャーン絶縁体状態を最も直接検出する方法は、熱ホール効果を測定することである。整数量子ホール状態では、電気ホール伝導度が、$\sigma_{xy}^{2D}=\nu(e^2/h)(\nu=1,2,3\cdots)$ で量子化されるだけでなく、熱ホール伝導度も $k_{xy}^{2D}/T=\nu K$ となり $K=k_B^2/12h$ の単位で量子化されている。キタエフ・スピン液体状態では、熱ホール伝導度は

$$K_{xy}^{2D}/T=\tfrac{1}{2}K$$

となり、$\nu=1$ の整数量子ホール効果状態の値のちょうど半分となる。これはマヨラナ・フェルミオンの自由度が従来のフェルミオンの半分であることに由来する。この 1/2 量子熱ホール効果状態では、試料のバルクに存在する Z_2 渦は、常に遍歴マヨラナ・フェルミオンをトラップし、マヨラナ・ゼロモード状態が生じていることが示されている（図３）。この Z_2 渦とマヨラナ・フェルミオンの複合粒子は、非可換統計にしたがうエニオンとなる。つまり、この複合粒子二つを入れ換えても元の状態には戻らない。奇数分母をもつ通常の分数量子ホール効果状態では、エニオンは可換統計に従う。なお 1/2 状態における非可換エニオンの存在は、共形場理論から一般に示されるらしい。逆に言うと、もし 1/2 量子熱ホール効果を実験で検出すれば、マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオンの存在を決定づけるものとなる。

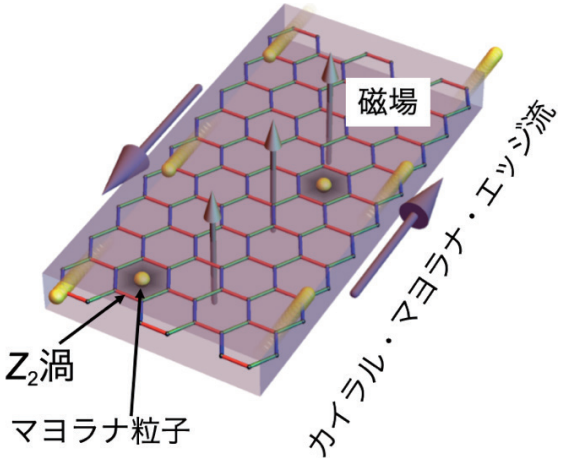


図３：マヨラナ・チャーン絶縁体状態（1/2 量子熱ホール効果状態）の概念図。

キタエフ物質

キタエフ・スピン液体も当初は理論家の創造物であった。その後、Ir や Ru 原子などのスピン軌道相互作用の強い t_{2g} 電子系で、原子を取り囲む負イオンの八面体が辺共有で結合した蜂の巣格子を形成している時に、超交換相互作用はキタエフ模型に帰着することが示された。特に層状化合物である α-$RuCl_3$ は 7 K で反強磁性秩序を示すが、転移温度以上で通常の磁性体で観測されるボゾン励起とは異なるフェルミオン的な励起が観測され、キタエフ・スピン液体の特徴をとらえていることが指摘された [2]。さらに α-$RuCl_3$ では、平行磁場により反強磁性秩序が抑制され量子スピン液体状態が実現している可能性も報告されていた。

そこで我々は α-$RuCl_3$ に対し熱ホール効果の測定を行った [3,4]。特に磁気秩序の抑制により現れる量子スピン液体状態で測定を行うため、磁場を面に斜め方向にかけて実験を行った。図４に磁場を c 軸から 60 度傾けて測定した熱ホール効果を示す。低磁場の反強磁性状態（緑）では、熱ホール効果は非常に小さいが、スピン液体状態に入ったとたんに大きな熱ホール効果が観測される。α-$RuCl_3$ で観測された熱ホール伝導度の値は磁場に対して一定値（プラトー）をとる。この熱ホール伝導度を 2 次元層あたりの値に直すと、ちょうど量子化単位の半分の値 ($K/2$) になっている。つまり 1/2 量子熱ホール効果が観測されている（ピンク）。系は絶縁体であるためこれは中性粒子の応答であり、従来のフェルミオンの示す量子化値の半分の値を示すことは、マヨラナ・フェルミオンによる量子化が起こっている決定的な証拠を与えている。さらに磁場をあげると、熱ホール効果

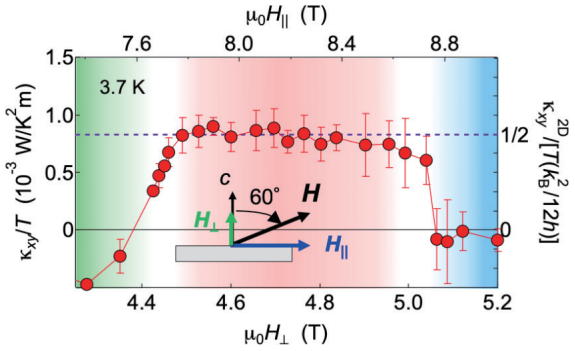


図４：α-$RuCl_3$ における熱ホール伝導度の磁場依存性。

は消失してしまう（青）。これは、トポロジカルに非自明な状態から自明な状態への転移が起こったことを意味する。高磁場相がどのような相であるのか、ほとんどわかっておらずその解明は今後の課題である。

今後の展望

観測された 1/2 量子熱ホール効果を、２次元電子の整数および分数量子ホール効果と比較してみよう。３つの共通点は、言うまでもなくトポロジカルに非自明な状態であり、試料の境界をカイラル・エッジ流が流れるということである。相違点は、整数量子ホール効果は電子のエッジ流により、分数量子ホール効果は電子電荷の分裂による分数電荷のエッジ流により生じる。これに対しキタエフ・スピン液体では、電子スピンの分裂により生じた電気的中性のマヨラナ粒子のエッジ流により量子化が起こる。さらに、量子ホール効果では、エッジ流の起源は古典的にはローレンツ力によりエッジに沿って進む電子のスキッピング運動であったが、絶縁体であるキタエフ・スピン液体ではスピンのゼーマン効果がその起源となる。また、整数および通常の奇数分母の分数量子ホール効果の両者では、熱ホール伝導度は K の整数倍 (K, $2K$, $3K$…) になるのに対し、キタエフ・スピン液体では半分 ($K/2$) になる。以上の点で本質的な違いがある。

最後に、

1. 量子スピン液体自体が分数量子ホール効果並みの面白さを持つかもしれない。
2. 非可換エニオンは環境雑音に強いトポロジカル量子計算を可能にすると期待されており、キタエフ・スピン液体の非可換エニオンは、直接可視化できる可能性がある。
3. キタエフ・スピン液体にキャリアをドープすれば、非従来型超伝導が生じるかもしれない。

という恐ろしく楽観的な展望を述べさせていただきたい。

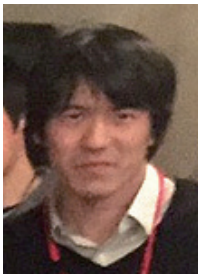
本研究は、大西隆史、馬斯嘯（京都大学）、杉井かおり、水上雄太、田中桜平、下澤雅明、山下譲、求幸年、芝内孝禎（東京大学）、那須譲治（横浜国立大学）、栗田伸之、田中秀数（東京工業大学）の各氏との共同研究です。この場を借りて深く感謝いたします。

[1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2-111 (2006).
[2] 求幸年、那須譲治、固体物理 **53**, 305-316 (2018).
[3] Y. Kasahara, K. Sugii et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 217205 (2018).
[4] Y. Kasahara et al., Nature **559**, 227-231 (2018).

著者紹介

まつだ ゆうじ
松田 祐司

1987 年 東京大学大学院理学研究科物理学専門課程博士号取得、東京大学教養学部基礎科学科助手、1993 年プリンストン大学博士研究員、1994 年北海道大学理学部物理学教室助教授、1997 年東京大学物性研究所助教授、2004 より現職。



かさはら ゆういち
笠原 裕一

神奈川県逗子市出身。2003 年東京理科大卒。2008 年、京都大理学研究科博士課程修了（理学博士）。東北大助教、東京大助教を経て 2014 年より現職。

バンド理論のトポロジーと Atiyah-Hirzebruch スペクトル系列

塩崎 謙 / 京都大学基礎物理学研究所助教（連携研究 D01）

1. はじめに

最近、SPT(Symmetry Protected Topological) 相と呼ばれる基底状態に縮退の存在しないトポロジカル相において、空間群のような空間的に非局所な対称性と系のトポロジカルな性質を同時に扱うことが可能な枠組みとして、アティヤ＝ヒルツェブルフ・スペクトル系列（Atiyah-Hirzebruch spectral sequence。以下、AHSS と略す。）[1] と呼ばれる数学的ツールが有効であることがわかってきた [2,3]。本稿ではバンド理論のトポロジーを調べる上で AHSS がどのように定式化されるか [2] について簡単に紹介したい。

2. 占有状態数の変化とフェルミ面

占有状態数の変化とそれに伴うフェルミ面の生成は、トポロジカル不変量の変化と生成とみなすことができる。 AHSS はこの観点の、考え得る限り最大限の一般化なので、まずはこの簡単な例をトポロジーの観点から再考しよう。

波数空間内のある 1 点 "A" に注目しよう。この点における占有状態の数を N_A と書こう。N_A は何らかの整数値に値を取り、Bloch 状態がエネルギーのゼロ点を横切らない限り変化しないので、バンド理論におけるトポロジカル不変量の一種である。点 A における占有状態の数が $N_A \mapsto N_A+1$ のように 1 だけ変化したとき、点 A の近傍では何が起こるだろうか。バンドは連続的に繋がっているので、点 A の近傍で新たに 1 枚のフェルミ面が生じる（図 1 [a]）。

この単純な過程は、点 A におけるトポロジカル不変量を 1 だけ " 消費 " して、点 A 近傍における " フェルミ面 " というトポロジカル電荷を 1 だけ " 増大 " させる過程とみることができる。

3. トポロジカルに安定なギャップレス点

上ではフェルミ面がトポロジカル電荷を持つことを前提にして話を進めた。実際、フェルミ面はスペクトル流と呼ばれる、（Weyl 点のような）トポロジカルなギャップレス点の一種である。この点について詳しく述べよう。話を具体的にするために、空間 1 次元系を考えよう。 1 次元波数空間のある部分区間 $[k_1, k_2]$ に注目する。端点 k_1,k_2 においては、有限のエネルギーギャップを仮定する。スペクトル流は、区間 $[k_1, k_2]$ 点において (正の向きに E=0 を横切る回数) - (負の向きに E=0 を横切る回数) として定義される。図 2 参照。スペクトル流は点 k_1,k_2 におけるエネルギーギャップが保たれている限り不変であり、この意味において整数に値を取るトポロジカル不変量である。＋ 1 のスペクトル流は、エネルギーギャップが閉じる点近傍において

$$H(k_x)=k_x$$

のように書くことができることができる。これは Dirac 型のハミルトニアンである。

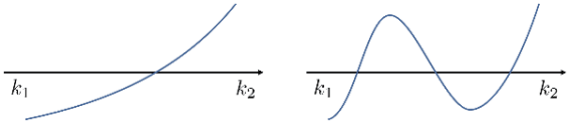


図 2: スペクトル流の例。いずれもスペクトル流＝＋ 1 を持つ。

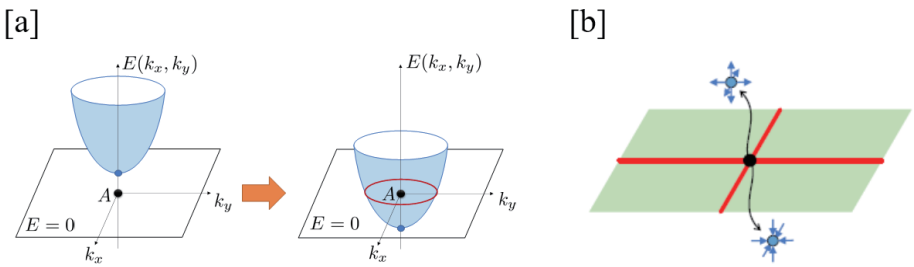


図 1：[a] 点 A における占有状態数が 1 だけ増加すると、その近傍においてフェルミ面（赤線）の数が 1 だけ増加する。[b] 空間反転対称性が存在する場合、反転中心におけるバンド反転に伴い Weyl 点が対生成される。

一般に、波数空間内のある部分 p セル（p 次元円板のこと）D^p に注目し、その境界 ∂D^p において有限のエネルギーギャップを仮定したときに、内部のギャップレス点のトポロジカル電荷を定義できる。p=2,3 の例を見よう。

波数空間内の部分 2 セル D^2（2 次元円板）に注目する。境界 $\partial D^2 \cong S^1$ においてエネルギーギャップを仮定する。対称性が存在しなければ D^2 内部において安定なギャップレス点は存在しない。しかし、カイラル対称性 $\{H(k_x,k_y), \Gamma\}=0$ が存在すれば、整数値に値を取る巻き付き数によって特徴づけられる安定なギャップレス点が存在する。ギャップレス点近傍のハミルトニアンは

$$H(k_x,k_y)=k_x\sigma_x+k_y\sigma_y, \quad \Gamma=\sigma_z$$

によって与えられる。ここで、σ_μ (μ =x,y,z) はパウリ行列である。カイラル対称性のため、質量項 $m\sigma_z$ が禁止される。グラフェンなどでよく知られた "Dirac 点 " である。

同様に、波数空間内の 3 セル D^3(3 次元円板) 内においては Weyl 点が安定なギャップレス点となり、Dirac 型のハミルトニアン

$$H(k_x,k_y,k_z)=k_x\sigma_x+k_y\sigma_y+k_z\sigma_z$$

によって記述される。トポロジカル電荷は整数の値をとる Chern 数によって与えられる。

4. " 局所的 " なギャップフル・ハミルトニアンの分類

2 節で、波数空間内のある 1 点における占有状態の数はトポロジカル不変量の 1 種であることに注意した。これは、0 セル（つまり、 1 点）におけるギャップフル・ハミルトニアンの分類の例である。より一般の p セル D^p に対しても、以下のようにして「p セル内のギャップフル・ハミルトニアンの分類」が定義できる。

波数空間内の部分 p セル D^p を考えよう。p セル上のギャップフル・ハミルトニアンの分類を考えたい。しかし p セル D^p は 1 点に可縮なのでこのままでは意味のある分類は得られない。「*p* セル内のギャップフル・ハミルトニアンの分類」は、p セルの境界 $\partial D^p \cong S^{p-1}$ においてハミルトニアン $H(k_1,\cdots,k_p)$ をある自明なハミルトニアン H_0 に固定したときの、p セル内部のギャップフル・ハミルトニアンの分類、と定義される。

例えば、対称性が存在しない場合に、2 セル D^2 内のギャップフル・ハミルトニアンの分類は Z で与えられ、整数 Z は Chern 数によって特徴づけられる。Z を生成する模型はやはり Dirac 型であり、2 セルの境界を 1 点コンパクト化した

$$H(k_x,k_y)=k_x\sigma_x+k_y\sigma_y+(m-k_x^2-k_y^2)\sigma_z$$

によって与えられる。ここで m>0 は質量項である。

5. トポロジカルな特異点

スペクトル系列の構造を理解するためには、さらに、" トポロジカルな特異点 " を導入する必要がある。

例として、フェルミ・アークの端の特異点がある。波数空間のある 2 次元曲面におけるフェルミ線を考えよう。フェルミ線はスペクトル流＝±1 を持つギャップレス点である。仮にスペクトル流がフェルミ線の途中で 1 から 0 に変化するとバンド構造はその点で特異的となる。

ここでの特異性の意味は、複素関数 log(z) における z=0 の特異性を一般化したものである。ここでは単に、「ギャップレス点のトポロジカル電荷が変化する点」をバンド構造の特異点と定義しよう。すると、特異点はギャップレス点のトポロジカル電荷の変化量によって特徴づけられるので、バンド構造の連続的変化に対して不変であり、トポロジカルな分類を持つ。特異点近傍は Dirac 型の標準的な表式

$$H(k_1,\ldots,k_p) = \mathrm{Im\,Ln}\left[k_p + i\sum_{\mu=1}^{p-1} k_\mu \gamma_\mu\right]$$

で記述することができる。ここで γ_μ は Γ 行列である。

6. Atiyah-Hirzebruch スペクトル系列（AHSS）

3、4、5 節では、バンド理論における（部分 p セル D^p 上という意味で）局所的なトポロジーの情報として、以下の 3 つを定義した：

n=0:　ギャップフル・ハミルトニアンのトポロジー
n=1:　ギャップレス点のトポロジー
n=2:　特異点のトポロジー

ここで、考えているトポロジーの種類に応じて、n=0,1,2 と " トポロジーの次数 " を導入した。これらは互いに無関係ではなく、**n 次のトポロジーが変化するとき (n+1) 次のトポロジカル電荷が生じる**、という関係がある。

次数の異なるトポロジー間の関係を用いて、一般コホモロジー理論におけるスペクトル系列の 1 種である AHSS を構成することができる。AHSS とは以下の一連の手続きのことを指す。

ステップ 1 ：波数空間のセル分割

対称性を保ちつつ波数空間を分割する。例えば、2 次元トーラスの波数空間において 4 回回転対称性が存在する場合は図 3 のように分割される。

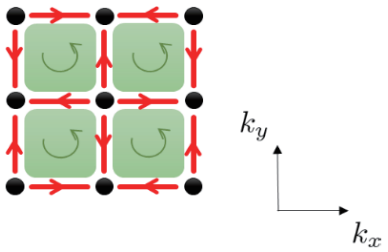


図 3： 2 次元波数空間の 4 回回転対称なセル分割．黒点は 0 セル，赤矢印は 1 セル，緑面は 2 セルである．

ステップ 2 ：E_1 ページ

各 p セルにおける n 次のトポロジー、つまり、ギャップフル・ハミルトニアン、ギャップレス点、特異点のトポロジカルな分類 (Z, Z_2 など) を計算し、これを $E_1^{p,-p+n}$ とする。この可換群 $E_1^{p,-p+n}$ たちをまとめた表を E_1 ページと呼ぶ。図 4 参照。E_1 ページは Wigner criterion によって機械的に計算される。

ステップ 3：第 1 微分と E_2 ページ

E_1 ページのトポロジーの情報は、各 p セルにおける局所的なトポロジーの情報であり、波数空間全体の大域的な情報ではない。E_1 ページのトポロジーの情報を大域的なものとすべく、各 p セルにおけるトポロジーの情報を隣接する (p+1) セルに拡張する。これを系統的に計算する手続きがスペクトル系列の第 1 微分

$$d_1^{p,-p+n}:E_1^{p,-p+n} \rightarrow E_1^{p+1,-p+n}$$

である。$d_1^{p,-p+n}$ は可換群の間の準同型写像である。例えば、第 1 微分 $d_1^{p,-p}$（図 4 の青矢印）は、p セルにおけるギャップフル・ハミルトニアンのトポロジカル不変量の変化に伴い、隣接する (p+1) セルにギャップレス点のトポロジカル電荷を放出する過程である。

同様に、第 1 微分 $d_1^{p,-p+1}$（図 4 の赤矢印）は、p セルにおけるトポロジカル・ギャップレス点の生成に伴い、隣接する (p+1) セルにおいて特異点を放出する過程である。（例えば、フェルミ・アークを生成すると必ずその両端に特異点を持つが、これが $d_1^{1,0}$ である。）

準同型 $d_1=(d_1^{p,-p+n})$ は微分作用素である。つまり、2 回続けて実行すると恒等的にゼロ写像、$d_1^{p+1,-p+n}d_1^{p,-p+n}=0$、であることを示すことができる。よって d_1 のコホモロジーを取ることができ、これを E_2 ページと定義する：

$$E_2^{p,-p+n} = \mathrm{Ker}\left[d_1^{p,-p+n}\right]/\mathrm{Im}\left[d_1^{p-1,-p+n}\right]$$

E_2 ページは、E_1 ページに比べるとより大域的なトポロジーの情報を持っている。

この点を理解するために、$E_1^{p,-p+1}$ と $E_2^{p,-p+1}=\mathrm{Ker}[d_1^{p,-p+1}]/\mathrm{Im}[d_1^{p-1,-p+1}]$ とを比較しよう。$E_1^{p,-p+1}$ は各 p セルにおける局所的なギャップレス点の分類を与える。$E_1^{p,-p+1}$ の部分群である $d_1^{p,-p+1}$ の核 (kernel) を取る点は、各 p セルにおけるギャップレス点が隣接する (p+1) セルに特異点なしに拡張できることを意味する。さらに $d_1^{p-1,-p+1}$ の像 (image) で割る点は、隣接する (p-1) セル上のギャップフル・ハミルトニアンのトポロジカル転移によって生成できるような " 自明な " ギャップレス点を除去することを意味する。

なお、第 1 微分は波数空間における小群の既約表現の指標を用いて機械的に計算可能である。

ステップ 4：高次微分と E_∞ページ

E_2 ページでは次元が 1 だけ異なるセル間のトポロジーを適切に " くっつけた "。実はこれでは不十分であり、波数空間全体の大域的トポロジーの情報を得るためには、任意の隣接セル間において局所的なトポロジーの情報を適切に " くっつける " 必要がある。この手続きが AHSS における高次微分 $d_r^{p,-p+n}$ (r≥2) である。

例えば、第 3 微分 $d_3^{0,0}$（図 4 緑矢印）は、0 セル（対称点）におけるバンド反転に伴い隣接する 3 セルへ Weyl 点を放出する過程（図 1 [b]）である。実際、空間反転対称性が存在するときはこの過程が非自明に残る。

E_2 ページと同様に、第 r 微分のコホモロジーとして E_{r+1} ページが定義される。空間 3 次元であれば、この一連の手続きは第 3 微分で止まる。最終ページを E_∞ページと呼ぶ。

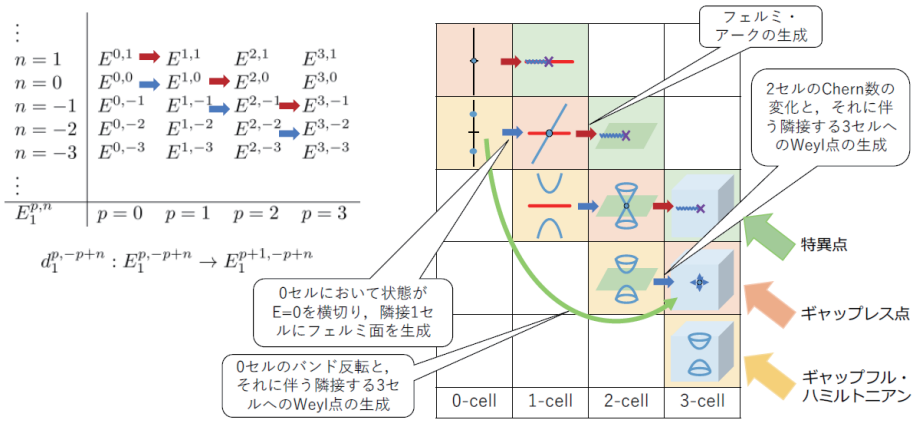


図 4：E_1 ページ（左図）と対応する局所的なバンド・トポロジー（右図）。表中の赤矢印と青矢印はそれぞれ第 1 微分 $d_1^{p,-p}$,$d_1^{p,-p+1}$ を表す。表中の緑矢印は第 3 微分 d_3^{00} を表す。

ステップ 5：バンド・トポロジーへ

詳しくは述べないが、E_∞ページそのものが波数空間全体の大域的トポロジーの分類を与えるわけではない。E_∞ページは、近似を与える。例えば、$\{ E_\infty^{\{p,-p\}} \}_{\{p=0,1,2,3\}}$ は波数空間全体のギャップフル・ハミルトニアンのトポロジーを近似する。近似である理由であるが、E_∞ページは E_1 ページの部分群であるので、例えば、1 セル直上の Weyl 点、といった「低次元セル直上に出現する高次元のトポロジカル電荷」が考慮されていないからである。

しかし、E_∞ページが、可換群の群構造だけに注目すると、近似でなく厳密になる場合もあり、そのような場合は AHSS により（少なくとも K 理論の範囲内で）トポロジカル絶縁体の分類が完全に決定される。例えば、Altland-Zirnbauer の対称性クラス A に何らかの空間群対称性を課す場合がこの場合に相当する。

7. 空間群とバンド・トポロジー

我々は、Altland-Zirnbauer の対称性クラス A,AIII において空間群 230 通りに対する E_∞ページの計算を行った [2]。その結果、空間群が存在する場合は、Z_2,Z_3,Z_4,Z_6 に値を取る数多のトポロジカル不変量が存在することがわかった。例えば、クラス A において空間群 F222 が Z_2 不変量を持つことが新たにわかった。また、クラス AIII（カイラル対称性が存在する場合）においては、驚くほど多くの未知のトポロジカル不変量が存在することがわかった。どうやら我々は、バンド理論のトポロジカル不変量について、ほとんど何も知らないようである。新たに見つかったトポロジカル不変量と物理現象との関係の解明など、まだまだ課題があるだろう。

本稿は佐藤昌利氏（京都大学・研究分担 D01）及び五味清紀氏（信州大学）との共同研究に基づく。

[1] M. F. Atiyah, F. Hirzebruch, Proc. Sympos. Pure Math., Vol. III pp. 7–38 American Mathematical Society, Providence, R.I.(1961).
[2] K. Shiozaki, M. Sato, K. Gomi, arXiv:1802.06694.
[3] K. Shiozaki, C. Z. Xiong, K. Gomi, arXiv:1810.00801.

著者紹介

しおざき　けん

1987 年生まれ。2010 年京都大学理学部卒業。2015 年京都大学大学院理学研究科博士課程修了。日本学術振興会海外特別研究員（受入先：イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校），理化学研究所基礎科学特別研究員を経て 2018 年 9 月より現職。

Leggett 教授の傘寿を祝う研究会に参加して

前野 悦輝 / A01 代表：京都大学 理学研究科
高木 伸　/ 元東北大学 理学研究科
上田 正仁 / D01 研究分担：東京大学 理学系研究科

本領域の国際アドバイザーのおひとりである Anthony J. Leggett 教授の傘寿を祝う研究会 "AJL@80: Challenges in Quantum Foundations, Condensed Matter Physics and Beyond" が 2018 年 3 月末に Illinois 大学 Urbana-Champaign 校（UIUC）で開催され、日本からも交流のある多くの研究者が参加した。以下でご紹介する講演のスライドや YouTube ビデオも公開されている [1]。なお本稿は、日本物理学会誌「談話室」に掲載される内容 [2] に加筆したものである。

Leggett 教授の経歴についてはこれまで、本誌でも詳しく紹介されている [3]。ロンドン近郊生れで、Oxford 大学にて Ter Haar 教授の指導の下で博士号取得の後、1964-66 年には UIUC と京都大学でポスドクをされた。京大では松原武生教授がホストであった。その後、Sussex 大学を経て、1983 年からは UIUC の教授に着任され現在に至っている。その間、1973 年 12 月から和田靖教授の招きで東京大学に 8 か月間滞在され、計 8 回の特別講義を日本語でされた [4]。スピン三重項超流動の理論で 2003 年のノーベル物理学賞を受賞された超流動ヘリウムはもちろん、マクロな量子系でのトンネル効果やコヒーレンス、非晶質物質の低温でのユニバーサルな性質、冷却原子のボース - アインシュタイン凝縮等で、いずれも分野を先導する業績を挙げてこられた。

今回の祝賀行事は 3 月 29 日のウェルカムレセプション（図 1）から始まり、30 日・31 日には以下のセッションからなる研究会が行われた。

Session 1: Tony's impact in Urbana
Session 2: Superfluids
Session 3: Superconductivity
Session 4: Macroscopic Quantum Phenomena
Session 5: Glasses and Fluids
Session 6: More Quantum Physics
Session 7: Global Impact
Session 8: Social Issues

最初のセッションは専攻主任の Van Harlingen 教授（以下、敬称略）の開会挨拶から始まり、UIUC でこれまで Leggett 教授とかかわりの深かった研究者、Gordon Baym, David Campbell, Eduardo Fradkin 各氏らの講演があった。高温超伝導体の d 波ペアリングを証明するための DC-SQUID（超伝導量子干渉素子）の理論的提案と、専攻内の Van Harlingen グループよる実験 [5] とのコラボ、Cold fusion の発生条件の上限を与える Leggett-Baym 共著論文 [6] など、また物理学専攻のイベントとして始まった "Physical *Revue*" の様子なども写真ともに紹介された。Fradkin は "Ultra-Cold Gases as a Quantum Mechanics Lab" というタイトルで上田がイリノイ大学に滞在中に Leggett 教授と共同研究を行った引力相互作用するボース・アインシュタイン凝縮の巨視的量子トンネリングの仕事 [7] を紹介した。

Mermin は "My Life with Leggett" の題目の講演で、液体 ^{3}He のゼロ音波や、量子力学の基礎的問題に取り組み始めたころの話をされた。超流動ヘリウムの集団励起を "Boojum" と名付けた際、複数形を "Booja" としたところ、Leggett 教授から言語学的には "Boojums" が正しいと指摘を受けた

逸話も披露された [8]。Leggett 教授はいつも小さな声で早口で話されるので、英語母国語の人たちにすら聞き取りにくいことが多いようである。シシリー島のエリチェの会議で訪れたギリシア円形劇場の遺跡で、Leggett 教授が音響効果を調べるためステージから発声されたときのことは、"I've never seen Tony speaking so loudly, slowly, and clearly." であったと、観衆から爆笑を引き出した。

超流動体のセッションでは、Jim Sauls（Northwestern 大学）が ^{3}He-A 相のカイラル超流動状態の研究の現状について、その固有軌道角運動量の大きさを決定するための実験の提案、池上らによる電子バブルを用いたカイラルドメインの観測 [7] などを含む詳しい解説があった。Jim Eisenstein（Caltech）は 2 次元電子系の 2 層系を用いてエキシトンの流れを発生・観測する実験の紹介があった。

超伝導のセッションでは、Mike Norman（Argonne 国立研究所）、Dirk Van der Marel（Geneva 大学）が、銅酸化物高温超伝導に関して Leggett 教授が提唱している層間結合や運動エネルギーの役割についての実験的検証の紹介があった。

2 日目のセッションではスピン三重項超流動の理論と並ぶ Leggett 教授の大きな業績である量子力学の基礎付け、特に巨視的量子コヒーレンスについての講演が続いた。Irfan Siddigi（UCB）は巨視的量子コヒーレンス証明に関しての講演で、SQUID を用いた理論提案と実験を解説した。Andrew Briggs と Lay Laflamme（Waterloo 大学）は、"Is the Moon really there when nobody looks?"、Leggett-Gang 不等式 [9] とその証明の現状を紹介した。

3 日目の午前のセッションでは、非晶質物質におけるグラス転移やグラスの低温での振舞について Clare Yu（UC Irvine）ら 3 名の講演があった。特に低温での比熱や熱伝導率が示す温度のべき乗則のユニバーサリティーの機構解明については、古くから 2 準位系（Two-Level Systems: TLS）での量子トンネル効果に基づく理論が展開され、核四重極モーメントの役割や分子形状の異方性など様々な要素も考慮されてきたが、現在も基本的に未解決の問題が残されているとの印象を持った。

これに続き、Nigel Goldenfeld は生物学におけるユニバーサリティー、Daniel Loss（Basel 大学）はトポロジカル超伝導体での Majorana Fermion 実証の現状、また、Phillip Stamp（UBC）は "Quantum gravity in the lab" の題目で、マクロな系での量子コヒーレンス検証実験での重力の役割について議論した。

午後のセッションでは、Ying Liu（Pennsylvania 州立大学、上海交通大学）が Leggett 教授と中国の大学・研究者との交流について紹介した。次に、Laura Greene（Florida 州立大学）がアメリカ物理学会の前会長の立場から、Leggett 教授がこれまでいかに世界の研究者の人権保護にかかわってこられたかを紹介した。特に、科学・工学・医学のアメリカ学術会議の人権委員会で、Leggett 教授が 14 名の委員の一人として、世界の科学者の人権問題の解決にいかに取り組んでこられたかの紹介があった。

引き続き前野が "Leggett's Tree" と題して、Leggett 教授の日本とのかかわりを紹介した [1]。1965 年の京都大学滞在中の成果である、多バンド金属の超伝導体でのバンド間位相の振動を伴う集団励起モードの理論 [10] は、40 年後に MgB_2 の超伝導 [11]、50 年後に Sr_2RuO_4 の超伝導 [12] にも適用されている。1974 年東京大学での特別講義の際は、^{3}He-A における磁化の上昇を予言した当時大学院生の高木伸に論文発表 [13] を勧めたこと、高木を Sussex 大学にポスドクとして招へいし、^{3}He の超流動相での NMR 共鳴線の周波数シフトだけでなく、その線幅を理解する方程式を導いたこと [14] などを紹介した。スピン三重項ペアリングで起こり得るこの磁化の上昇は、最近、石田らによる Sr_2RuO_4 の超伝導相での NMR ナイトシフトで実際に観測され [15]、三宅によって理論的説明がなされている [16]。Leggett 教授は東大の名誉博士号も授与されており、特定領域研究「スーパークリーン物質における量子現象」、新学術領域研究

「トポロジカル量子現象」、同「トポロジカル物質科学」のアドバイザーとして、日本人研究者との交流を継続されてきた。「Leggett の樹」は、京都大学滞在時代に基礎物理学研究所にて、Progress of Theoretical Physics に日本人が投稿する論文の英文添削をされていた経験を通じて、日本と西欧の論文・講演等での論理の流れを樹の枝ぶりに例えて比較したものである（図 2）。日本物理学会誌での記事 [17] は翻訳もされている [18]。木下是雄氏の「理科系の作文技術」[19] で紹介された効果もあってか、英語教育者や工学・医科学の分野でも広く知られるようになり、Web でも多彩なヴァージョンの「Leggett の樹」が紹介されている。しかし、日本以外ではその必要性が無いせいか、UIUC のスタッフにも全く知られていかったようである。前野の講演は意図的に日本流の枝ぶり（逆茂木）になるような話の構成で行い、講演の最終部分まで Leggett's Tree とは何のことかわからないようにした。

2 日目の夕方には、一般市民も招いてのイベントが開催された。まず物理学専攻のスタッフや大学院生らによる演劇 "Quantum Voyages" が上演された。Smitha Vishveshwara 准教授が演劇専攻のスタッフと共同で脚本・振り付けを担当し、Van Harlingen 教授や Leggett 教授も長いセリフ付きの重要な役柄を演じた。次に Matthew Fisher 教授によるパブリックレクチャー "Are We Quantum Computers, or Merely Clever Robots?" では、医薬品の元素同位体効果の可能性についての話があった。そのあと一般市民も参加しての晩さん会が行われた。Haruko 夫人からのメッセージは、Sussex 大学で知り合った当時を振り返るエピソードで、娘さんが代読披露された。最後に Leggett 教授が、物理学の研究者、特に若手研究者や学生を励ます以下のメッセージで、催しを締めくくられた：

"One need not be ashamed of having spent a lot of time in physics, because I feel that the activity of physics provides a sort of standard for accuracy and truthfulness, which is badly lacking right now in the society as a whole. So please go ahead and practice and enjoy physics."

後日、本稿のもとになった原稿が物理学会誌に掲載されると Leggett 教授にご報告した際、" Leggett's Tree" の tree は単数形か複数形かどちらにすべきか伺ったところ、以下の寛容なご回答をいただいた。

[Maeno]
"I wondered about the precise definition of the Leggett's Tree; whether it refers to Fig. 2 (B) only, or to the concept expressed by Fig. 2(A) AND (B). In the latter case, it may be called the "Leggett's Trees". I made this point vague since in Japanese the word「レゲットの樹」may mean either singular or plural."
[Leggett 教授]
"Yes, the question of "tree" versus "trees" has I think not been resolved in 50m years, so you were wise to finesse it! Very best wishes, Tony"

最後に本稿執筆に際して情報提供いただいた A. J. Leggett、福山寛の両氏にお礼申し上げるとともに、Leggett 教授には今後も益々ご活躍いただけるようお祈りいたします。

[1] https://publish.illinois.edu/leggettcelebration/
[2] 前野悦輝 , 日本物学会誌 (2019)3 月号掲載予定。
[3] 例えば　A. J. Leggett, 日本物理学会誌 **70**, 641-642 (2015).
[4] A. J. Leggett, 物性研究 , **22**, 276-291 (1974).
[5] D. A. Wollman, D. J. Van Harlingen, W. C. Lee, D.M. Ginsberg, and A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. **71**, 2134-2137 (1993).
[6] A.J. Leggett and G. Baym, Phys. Rev. Lett. **63**, 191-194 (1989).
[7] M. Ueda and A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. **80**, 1576 (1998).
[8] N.D. Mermin on Boojum (Wikipedia によると Lewis Carroll のアリスでは複数形は Boojums.)
[9] A. J. Leggett and Anupam Garg, Phys. Rev. Lett. **54**, 857 (1985).
[10] A. J. Leggett, Prog. Theor. Phys. **36**, 901-930 (1966).

[11] G. Blumberg et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 227002 (2007).
[12] W. Huang et al., Phys. Rev. B **94**, 064508 (2016).
[13] S. Takagi, Prog. Theo. Phys. **51**, 1998-2000 (1974).
[14] A. J. Leggett and S. Takagi, Phys. Rev. Lett. **34**, 1424-1427 (1975).
[15] K. Ishida et al., Phys. Rev. B **92**, 100502(R) (2015).
[16] K. Miyake, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 053701 (2014).
[17] A. J. Leggett, 日本物理学会誌 **21**, 790-805 (1966).
[18] 日本物理学会編 ,『科学英語論文のすべて』, 第 2 版 (丸善 , 1999), 第 4 章.
[19] 木下是雄 ,『理系の作文技術』(中央公論新社 , 1981).

図 1. （左より）上田正仁、Anthony J. Leggett、高木伸、前野悦輝

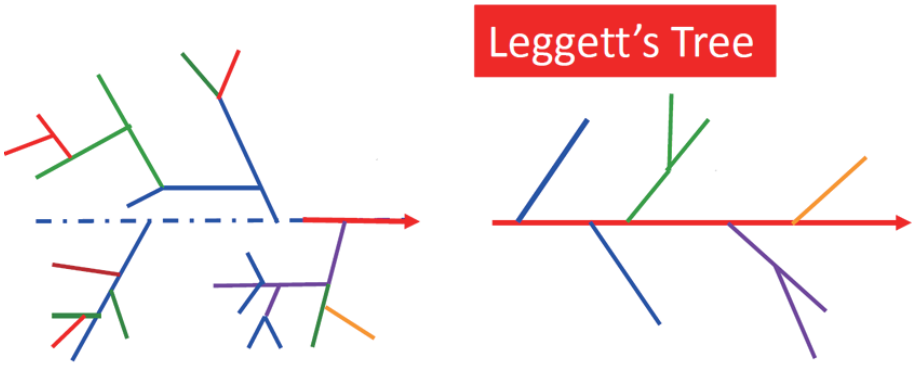


図 2. Leggett の樹. [18](A) 逆茂木型の日本人の論文や講演での論理や話の流れ . (B) 茂木型の科学論文等で用いるべき西欧式の論理の流れ.

HOT TOPICS COOL NEWS 2018

領域ウェブサイト トピックス欄から
この 1 年の領域の活動をピックアップしてご紹介します

2018/Jan/01

ミラー対称性による新型トポロジカル絶縁体 CaAgAs の発見を報告する佐藤 (B01) らの論文が、npj Quantum Materials に掲載されました。

2018/Feb/09

3 層グラフェンにおける積層パターンの作り分けによるディラック電子制御についての佐藤 (B01) らの論文が、NPG Asia Materials に掲載されました。

2018/Feb/15

スピン軌道擬スピン 1/2 系化合物 $H_3LiIr2O_6$ を初のハニカム格子量子液体として報告する論文がネイチャー誌に発表されました。著者は高木 (A01)、北川 (A01) らです。また、この成果については、東京大学 HP や日本経済新聞で紹介されました。

2018/Mar/06

服部 (名大・博士 2 年)、佐藤 (D01)、田仲 (B01) らの論文 "Edge states of hydrogen terminated monolayer materials: silicene, germanene and stanene ribbons" が、Journal of Physics: Condensed Matter 誌の 2017 年ハイライト論文に選ばれました。

2018/Apr/17

好田 (C01)、橋坂 (C01)、那須 (D02) が平成 30 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞者に選ばれました。

2018/May/01

永長 (B01) が、平成 30 年春の「紫綬褒章」を受賞しました。

2018/May/09

機械学習による乱れたトポロジカル超伝導体の相判定に関する吉岡 (東大・博士 2 年)、赤城 (D02)、桂 (H28-H29 年度 D02) らの論文が、Phys. Rev. B 誌の Editors' Suggestion に選ばれました。

2018/May/14

橋坂 (C01)、村木 (C01)、藤澤 (C01) らの論文 " Signatures of a Nonthermal Metastable State in Copropagating Quantum Hall Edge Channels" が、Phys. Rev. Lett. 誌 の Editors' Suggestion に選ばれました。

2018/Jul/12

蜂の巣格子磁性体 $RuCl_3$ の量子スピン液体状態において半整数熱量子ホール効果を世界で初めて観測し、マヨラナ粒子の存在を実証したことを報告する論文がネイチャー誌に発表されました。著者は松田 (A01)、笠原 (A01)、那須 (D02) らです。また、この成果については、京都大学 HP、東京大学 HP、東京工業大学 HP、朝日新聞、京都新聞、産経新聞、日刊工業新聞、日本経済新聞、毎日新聞、読売新聞で紹介されました。

2018/Aug/21

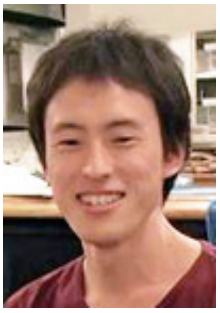
松田 (A01) が、2018 年度、カマリン オンネス賞を受賞しました。

公募研究
紹介
（A01）

鉄カルコゲナイド超伝導体と その関連物質におけるトポロジカル相の探索

鍋島 冬樹 / 東京大学 大学院総合文化研究科 助教

2008 年に発見された鉄系超伝導体の 1 つである、鉄カルコゲナイド超伝導体 $FeSe_{1-x}Te_x$ は、フェルミエネルギー、超伝導ギャップ及びスピン軌道相互作用の、3 つのエネルギースケールが同程度であるという稀有な性質を持っており、これまでにない全く新しい超伝導状態が実現している可能性があります。特に近年では、鉄カルコゲナイドやその関連物質のトポロジカルな側面に注目が集まってきています。例えば、$FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ では、角度分解光電子分光の実験から、トポロジカルに非自明な超伝導（トポロジカル超伝導）が実現している可能性が指摘されています [1]。トポロジカル超伝導体ではマヨラナ粒子と呼ばれる特殊な粒子の出現が予言されており、量子コンピュータへの応用が期待されています。



なべしま・ふゆき

1987 年高知県生まれ。2015 年 東京大学大学院博士課程修了。日本学術振興会 特別研究員（東京大学）を経て、2016 年より現職。上京以来, 駒場キャンパスに通い続けています。

鉄カルコゲナイド超伝導体は、$FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ という組成ではトポロジカルに非自明な量子状態を持つことが報告されている一方で、FeSe では通常の超伝導が実現していることが理論的に指摘されています。すなわち、FeSe と $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ の間の組成でトポロジカルに自明 / 非自明な状態の相転移が起きると考えられます。しかしながら、この組成領域は、相分離のためバルクの結晶は合成することができませんでした。我々はパルスレーザー堆積法により相分離を抑制し、全組成領域の単結晶薄膜試料を得ることに成功しました [2]。この薄膜試料を用いて組成を連続的に変化させたときに、トポロジカル相転移によるマヨラナ粒子の出現 / 消失に由来する信号の変化を観測できれば、マヨラナ粒子の存在の強い証拠になるのではないかと期待しています。現状は、この薄膜試料の超伝導の性質を明らかにするために、複素電気伝導度測定を行いつつ、共同研究の可能性を模索しています。

[1] P. Zhang et al., Science **360**, 182 (2018).
[2] Y. Imai et al., PNAS **112**, 1937 (2015).

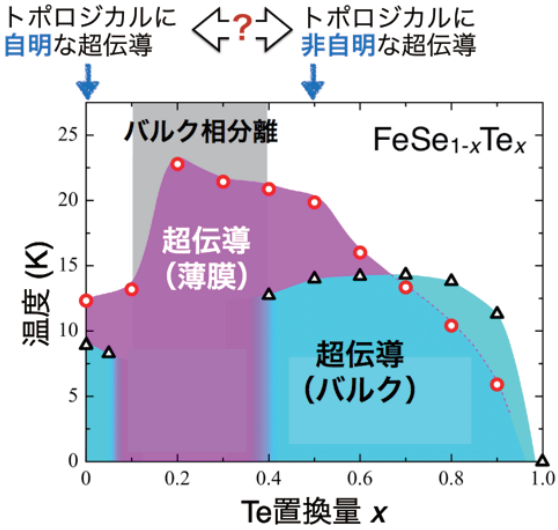


図 1 ：鉄カルコゲナイド超伝導体 Fe(Se,Te) の相図 [2]。

RESEARCH A01

走査型磁気顕微鏡による遍歴軌道磁化の直接観測

下澤 雅明 / 東京大学 物性研究所 助教

トポロジーに起因した「ベリー位相」は、異常ホール効果を含む様々な物理現象と密接に関係していることが分かってきています。そのような中、2005 年頃には磁化という基本物理量にベリー位相がもたらす効果が理論的に研究され始めました[1,2]。膨大な理論研究の結果、ベリー曲率に起因したエッジ電流が軌道磁化を生み出すことが提唱されましたが、実際に観測した報告例は存在していません。この遍歴的な軌道磁化を観測するためには時間反転対称性の破れた系が必要ですが、通常の強磁性体では、スピン磁化成分が圧倒的に大きいため、エッジ電流による軌道磁化を直接観測することは困難でした。

最近我々は、走査型ホール素子顕微鏡を用いてベリー曲率に起因した表面電流（遍歴軌道磁化）がカイラル反強磁性体 Mn_3Sn [3] に存在することを観測することに成功しました。本研究のポイントは、(i) Mn_3Sn の磁化の大きさが 10^{-3} μ_B 程度と強磁性体に比べて桁違いに小さいにも関わらず、ベリー曲率に起因した異常ホール効果の大きさが強磁性体と同程度であることと、(ii) 遍歴的な軌道磁化とスピン磁化が異なる空間分布を示すこと、の２つです。図に、Mn_3Sn および通常の強磁性体であるコバルトの表面上を微小ホールセンサで走査し、試料表面に対して垂直な磁場成分を１次元スキャンした結果を示します。Mn_3Sn の場合、コバルトの磁化分布とは大きく異なっており、試料中心付近で磁場勾配が逆転する傾向が観測されました。この結果は、軌道磁化とスピン磁化が互いに逆方向を向いていることを示しており、第一原理計算による理論と一致しています。また、先行研究から予想されていた通り、軌道磁化成分が低温で急激に増大することも確認できました。さらに、磁場依存性、磁化異方性、試料形状依存性などを測定した結果、軌道磁化が存在すると考えた場合と矛盾しない結果が得られています。これらの結果は、ベリー位相由来の（遍歴的な）軌道磁化の存在を直接的に示すもので、「トポロジカル」と「磁性」という応用分野で重要な２つのキーワードを繋げる大きな手がかりになっていると考えております。今後は、このような遍歴軌道磁化が超伝導に及ぼす影響を解明することを目指します。

しもざわ・まさあき

1985 年長野県生まれ。2014 年 京都大学大学院博士後期課程修了。2014 年より現職。

[1] D Xiao et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 137204 (2005).
[2] T. Thonhauser et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 137205 (2005).
[3] S. Nakatsuji et al., Nature **527**, 212 (2015).

WEB 非公開

図 : (a) 実験配置の概略。試料表面上で微小ホールセンサを走査し、表面に垂直な磁場成分について１次元スキャンを行います。(b) Mn_3Sn の１次元スキャンの結果。通常期待される磁場分布とは異なり、試料中心付近の勾配が逆向き（負）になっています。(c) 強磁性体のコバルト（参照試料）の結果。通常のスピン磁化から期待される通り、中心付近の勾配は正となっています。

イリジウム酸化物におけるワイル電子による異常電磁気応答の開拓

藤岡 淳 / 筑波大学 数理物質系 准教授

強相関トポロジカル半金属の新しい量子物性を探索することをテーマとして研究を行っております。パイロクロア型やペロブスカイト型構造のイリジウム酸化物を対象として、超高圧合成法やフラックス法を用いた物質開発、磁気伝導測定、赤外ー紫外精密分光などを主な手法として研究を進めています。

トポロジカル半金属の特徴のひとつはランダウ量子化やベリー位相に由来した磁気輸送特性 (磁気抵抗、異常ホール効果等) にその物質に固有のトポロジーの構造が現れる点です。既にカイラル異常による磁気抵抗効果やベリー位相による異常ホール効果が数多く報告されています。一方で強相関電子系の特徴の一つはクーロン相互作用による電子の局在化 (モット転移) が見られる点です。特にモット転移の近傍では、電子状態が広いエネルギースケールで大幅に変化し、電荷・軌道秩序や超伝導など一電子モデルでは説明できない多様な対称性の電子相が現れることが知られています。それではトポロジカル半金属は電子相関効果が強くなった場合に、一電子モデルからは予測できないトポロジー構造に変化するのか、あるいはモット転移近傍でも元の構造を保持したままなのかという疑問が湧いてきます。私自身は電子相関でトポロジカルな構造が変化する (あるいは変化しない) ことがどのような電子物性として現れるのかという事に興味を持ち、モット転移系のイリジウム酸化物で磁気ワイル半金属やディラック半金属の研究を行っています。

最近のトピックとしては、磁気ワイル半金属の候補になっているパイロクロア型イリジウム酸化物でモット転移の転移温度近傍で異常ホール効果が生じる事を見出しました [1]。理論計算と合わせると反強磁性の秩序変数と結合したワイル電子に起源があるらしいことが分かりました。また、ディラック半金属のペロブスカイト型 $CaIrO_3$ では、ノンシンモルフィックな対称性で保障された線ノードが強相関領域でも残存し、モット臨界性によってそのエネルギーがフェルミエネルギーに接近することで移動度が 60,000cm^2/Vs を超える高移動度電子 (バルク酸化物半導体ではほぼ最大値) を作りだしている事が明らかになりました [2]。今後も強相関トポロジカル状態ならではの量子伝導現象を探索していきたいと思っています。

ふじおか・じゅん

1982 年 大阪府生まれ。2004 年東京大学工学部物理工学科卒業。2008 年 (9 月)　東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了 (工学) 取得。その後、日本学術振興会特別研究員、科学技術振興機構 ERATO マルチフェロイクスプロジェクト研究員、2011 年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻　助教、講師を経て、2018 年 4 月より現職。科学技術振 興機構戦略的創造研究推進事業 さきがけ研究者兼務 (2015 年 12 月より)。

[1] K. Ueda et al., Nature Commun. **9**, 3032 (2018).
[2] J. Fujioka, et al., Nature Communications **10**, Article number: 362 (2019).

RESEARCH B01

空間反転対称性の破れた超伝導体における エデルシュタイン効果の観測

塩見 雄毅 / 東京大学 大学院総合文化研究科 准教授

しおみ・ゆうき

1985 年三重県生まれ。2012 年 3 月東京大学大学院博士課程修了。2012 年 4 月より東北大学助教、2017 年 11 月より東京大学工学部特任講師を経て、2018 年 10 月より現職。

トポロジーとスピン流をキーワードに、様々な研究を行ってきました。この新学術も前回からの継続で参加させて頂いており、前野先生の新学術での研究期間も合わせると随分と長い月日が流れました。まさか自分が新宿の景色を見ながらこの文章を書くことになるとは思いもよりませんでしたが、そのようなストーリーは前も書いたような気がするので今回は省略します。

さて、超伝導体における（トポロジカル）スピン流現象の観測は、取り組み始めてから随分と長い時間が経ってしまいましたが、ようやく成果が出版されるようになってきました [1, 2]。特に、古巣の齊藤研の学生さんと長い間取り組んできた超伝導ボルテックスの研究成果が出版されてホッとしています [2]。といっても、肝心の表題の研究に関してはまだ苦戦中です。まずは温度を 2 ケルビン以下に下げられるスピン流計測システムを構築するところから始まり [3]、超伝導体では電圧信号が見えないのでそれをどのように克服するか考え、あの手この手で色々とトライを続けて一歩一歩進んでいます。スピン流は保存しない量なので、超伝導体の薄膜試料を準備しないといけないのも試料選択の点で苦労しています。

私はもともと輸送現象測定が得意ですが、数か月前まで在籍した東大工学系研究科で光学測定を得意とする知り合いの研究者とも共同研究を開始し、多角的に研究を進めています。一緒にやってくれている齊藤研の学生さん（東北大）とは距離が離れてしまいましたが、今でも慕ってくれて一緒に仕事をしてくれるので大変助かっています。二週に一回議論していますが、超伝導体においては、よくスピン流研究で使う Pt などの常磁性金属と同じように実験しても全く異なる実験結果が得られるので、超伝導はすごい現象だなといつも思います。私は最近居場所がころころ変わっているのですが、気持ちは変わらずこれからも頑張りたいです。引き続き楽しんで自分のやりたい研究を続けていき、面白い成果が得られたらいいなと思っています。

[1] M. Umeda et al., Appl. Phys. Lett. **112**, 232601 (2018).
[2] J. Lustikova et al., Nat. Commun. **9**, 4922 (2018).
[3] Y. Shiomi et al., Nat. Phys. **15**, 22 (2019).

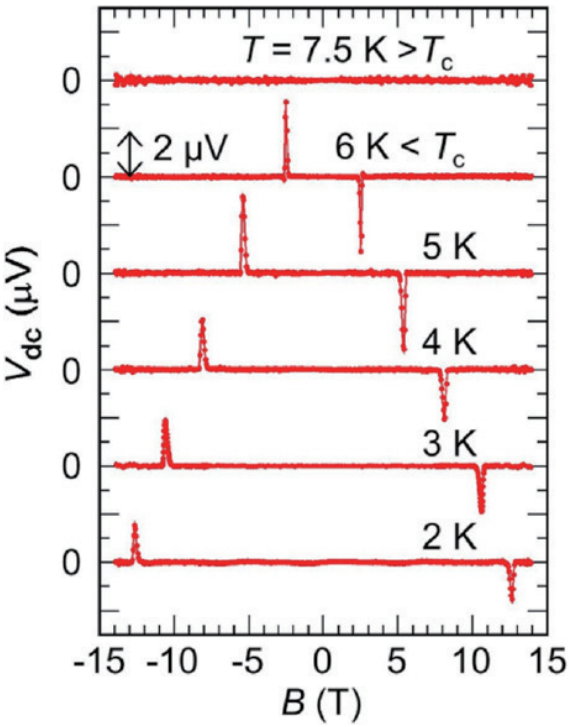


図 1 : MoGe/YIG 試料において MoGe 薄膜に生じる電圧信号 [2]。磁場を変化させると、外場を与えていないのに関わらず、渦糸液体相において環境ゆらぎによりボルテックスが駆動されて電圧信号が生じる。

RESEARCH B01

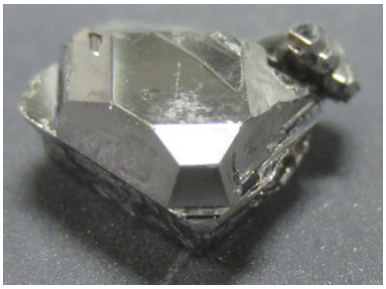
空間反転対称性の破れたバルク結晶における ワイル・ディラック物性の研究

村川 寛 / 大阪大学 理学研究科物理学専攻 助教

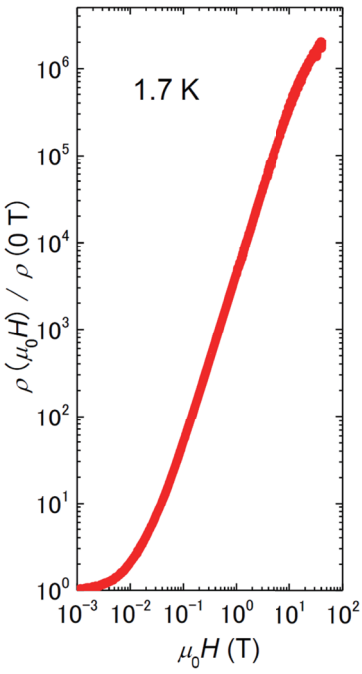
むらかわ・ひろし

山口県出身。京都大学大学院博士後期課程修了後、科学技術振興機構 ERATO 十倉マルチフェロイクスプロジェクト研究員、理化学研究所基幹研究所研究員を経て2012年10月より現職。

「運動方向によって実効的な磁場が異なる」、空間反転対称性が破れた結晶中でそのような状況にある電子集団が引き起こす現象について研究を行っています。なかでも、ワイル半金属やラシュバ型半導体などの 3 次元物質中に存在するワイル・ディラックフェルミオン等の高移動度スピン分裂キャリアによる非散逸伝導や電場磁場応答現象に興味を持っており、これらを実験的に観測することに取り組んでいます。できるだけシンプルな方法で説得力のある実験結果を得ることを目標に、花咲研究室の学生と一緒に最高品質の巨大単結晶を得るための合成技術を磨いています。大きくきれいな結晶は見て楽しめることはもちろん、本質的な電子物性を引き出すために不可欠であることから、結晶合成は私の趣味であるとともに研究者としての生命線と位置づけて重点を置いています。また、豊中キャンパス内にある阪大先端強磁場科学研究施設では 55 テスラまでのパルス磁場を用いた物性測定が可能であり、この恵まれた環境を研究に活かしています。これまでにワイル半金属等の大型単結晶を合成し、形状効果を排除した状態でワイルフェルミオンによる非散逸伝導を示唆する負の磁気抵抗効果を観測し、結晶品質を向上させることにより強磁場中で 200 万倍に達する巨大な磁気抵抗効果の実現に成功しました。さらにワイル半金属 NbAs を対象として、パルス強磁場を用いた量子振動の測定を行うことにより、ワイル点ペアを含む系におけるランダウ準位構造とベリー位相との関係について、様々な磁場方位下でこれを詳細に調べて明らかにしました。最近では磁性元素を含んだ第二種ワイル半金属単結晶を合成し、空間反転対称性のみならず時間反転対称性も破れた系における、電場磁場応答現象の研究を進めています。このように実験的な研究は概ね順調に進行していますが、結果の解釈の際に理論的なサポートが必要になる場面や、さらには全く予期していなかった興味深い（謎の）結果を得ることも少なからずありますので、トポロジカル物質を専門とする多くの研究者の方々の協力をいただいて議論を重ねながら一つ一つ着実に解決していきたいと思っております。



ワイル半金属 NbAs の大型単結晶。



純良化した半金属 $NbAs_2$ 単結晶の巨大磁気抵抗効果。

トポロジカル結晶絶縁体薄膜における電界誘起量子伝導制御

吉見 龍太郎 / 理化学研究所 創発物性科学研究センター 基礎科学特別研究員

私は学生時代から今まで分子線エピタキシー(MBE) 法という薄膜作製技術を用いてトポロジカル絶縁体について研究していました。MBE は結晶欠陥の少ない高品質な単結晶薄膜の合成を可能にする手法であり、特に表面や界面の二次元電子系が重要であるトポロジカル絶縁体に対して有効な研究手法です。私はこれまでトポロジカル絶縁体薄膜やそれらの積層構造の作製と、時間反転対称性を破ることで生じる量子ホール効果や量子異常ホール効果といった量子輸送現象の解明を行ってきました。

よしみ・りゅうたろう

1988 年東京都生まれ。2016 年東京大学大学院博士後期課程修了。2016 年より現職。

今回新学術領域のテーマとして扱っているのはトポロジカル結晶絶縁体という物理系です。これはトポロジカル絶縁体と類似していますが、トポロジカル絶縁体の表面状態が時間反転対称性によって保護されているのに対し、トポロジカル結晶絶縁体では表面状態が結晶の鏡面対称性によっても保護されているという性質があります [1]。結晶の対称性に系のトポロジカルな性質が依存することから、薄膜試料において格子歪を利用することでトポロジカル相転移を引き起こせるのではないか、というのが本研究テーマの目標です。

本研究ではトポロジカル結晶絶縁体 SnTe とバンド絶縁体 PbTe の混晶系である $Sn_xPb_{1-x}Te$ の物質系に注目しています。SnTe は p 型の金属的な伝導ですが、Pb 濃度を増やしていくことで抵抗が上昇しトポロジカル相転移と思われる金属絶縁体転移を見せます。更に、ドーピング効果として In を試みています。バルク単結晶における研究では In をドープすることで劇的に p 型キャリヤが減少することが知られており [2]、表面状態に由来する特異な輸送現象が観測されることを期待しています。

トポロジカル結晶絶縁体は、トポロジカル絶縁体に比べて実験研究として未開拓な部分が多く残されています。一方で、両者は理論的な背景が似ているだけでなく、それらが発現する実際の物質にも共通点が多く、これまでの研究で得た経験を活かせる場面が多いと考えています。トポロジカル物性の開拓に対して材料開発という点から貢献できるように、今後研究を推進していくつもりです。

[1] H. Hsieh et al., Nat. Commun. **3**, 982 (2012)
[2] T. Liang et al., Sci. Adv. **3**, e1602510 (2017).

公募研究
紹介
（CO1）

ハニカム構造をベースとした フォトニック構造のトポロジカルな性質

石原 照也 / 東北大学 大学院理学研究科 教授

いしはら・てるや

1957 年埼玉県生まれ。1984 年東京大学大学院博士後期課程中退。1984-93 年 東北大学理学部物理学科助手（この間 1990-92 米国ブラウン大学客員研究員）、1993-1999 年広島大学工学部電気系助教授、1999-2007 年理化学研究所フロンティア研究システムチームリーダー、2003 年より現職。

低次元半導体の線形・非線形光学応答 [1]、共鳴構造をもつフォトニック結晶（ポラリトニック結晶 [2]、プラズモニック結晶 [3]）、メタマテリアル [4] の実験的研究を経て、トポロジカルフォトニクスにたどり着きました。

分野を牽引している電子系のトポロジー物理にくらべ、研究人口もまだまだ少ないのですが、構造を与えれば電磁波応答は正確に知ることができるため、いかに物理的に面白い系を考案、作製し、観測にかかる 2 次の電磁場量をどのように見積もるかが本質であると考えています。

この分野について我々が最初に取り組んだのが、ハニカム型に配列させた円筒を出発点に変形させて、トポロジカルに非自明な構造を生み出す胡暁さん（物材機構）のお仕事を出発点とするものであったため、テーマタイトルが限定的なものになっていますが、最近はむしろそれ以外の可能性を探索しています。
電磁場シミュレーションによる設計、電子線リソグラフィーによる微細構造作製、角度分解線形応答による構造評価、光整流効果を中心とした 2 次の非線形光学応答の実験をサイクルさせて、新現象の探求を進めてゆく予定です。化学合成に比べて制約の少ない人工構造作製の手法を用いることで、電子系のトポロジー研究の手の届きにくいところを先回りする戦略で研究を進めてゆきたいと考えています。

図 1 は一辺 500 nm の正方形状の Si パッチを正方格子（格子定数 800 nm）で配列した誘電体導波路に s 偏光光励起した場合の角度分解透過スペクトルから求めた分散関係図です。電磁場シミュレーションを用いると、特定の（波数、周波数）を励起したときにどの程度励起されるかという情報を読み取り、必要ならばその時の電磁場の空間分布を求めることができます。特定の空間パラメタの値を変化させたとき、トポロジカルに自明な状態から非自明な状態への移りかわりを調べることで、興味深いトポロジカルな物理を明らかにしてゆきます。

[1] T.Ishihara et al., “Optical Properties due to Electronic Transitions in Two-Dimensional Semiconductors $(C_nH_{2n+1}NH_3)_2PbI_4$”, Phys. Rev. B **42**, 11099-11107 (1990).
[2] T. Fujita et al., “Tunable polariton absorption of distributed feedback microcavities at room temperature,” Phys. Rev. B **57**, 12428 (1998).
[3] X. Luo and T. Ishihara , “Surface plasmon resonant interference nanolithography technique,” Appl. Phys. Lett. **84**, 4780-4872 (2004).
[4] T. Hatano et al, “Transverse Photovoltage Induced by Circularly Polarized Light,” Phys. Rev. Lett. **103**, 103906 (2009).

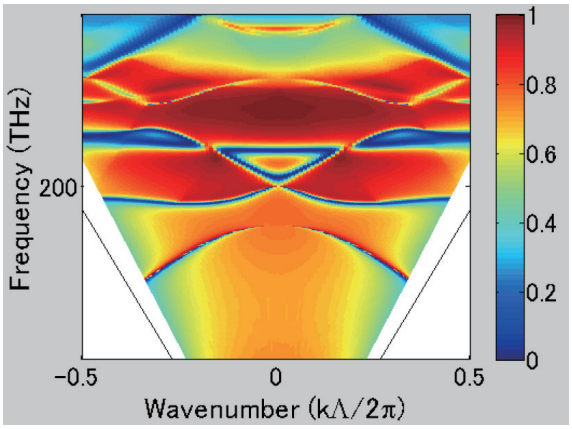


図 1 : 正方形パッチが正方配列された誘電体スラブ導波路の分散関係の一例（S 偏光）

トポロジカルファンデルワールス結晶ナノ試料における量子輸送現象開拓

井手上 敏也 / 東京大学 大学院工学系研究科 助教

いでうえ・としや

1986 年香川県生まれ。2015 年 3 月 東京大学大学院博士課程修了。2015 年 4 月より現職。

近年、炭素の二次元シートであるグラフェンの発見を契機として、擬二次元原子層シートがファンデルワールス結合によって積層した層状物質である、ファンデルワールス結晶の研究が盛んに行われています。ファンデルワールス結晶では、単層に剥離することにより、バルクとは異なるバンド構造が発現したり、2 次元シートが丸まってできるナノチューブ構造や異種ファンデルワールス結晶のヘテロ構造（図 1）をつくることによって対称性の破れを実現・制御したり出来るといった顕著な性質があります。加えて、最近ではファンデルワールス結晶のトポロジカルな電子状態に注目が集まっており、例えば、ファンデルワールス結晶である遷移金属ダイカルコゲナイドと呼ばれる物質群の一つである WTe_2 が単層では量子スピンホール絶縁体になり得るといった理論予測 [1] とその実験的検証 [2,3] やその近傍での超伝導相の発現 [4]、タイプ II 型ワイル半金属 $MoTe_2$ の発見 [5] 等に代表されるように、新しいトポロジカル相がファンデルワールス結晶において次々と発見されてきています。

このような新規トポロジカルファンデルワールス結晶の研究は、まだ始まったばかりであり、劈開性を積極的に利用した、ナノデバイスにおける詳細なトポロジカル物性の解明が望まれます。本研究では、単層ファンデルワールス結晶やナノチューブ・ナノリボンといった擬一次元ナノ構造等のファンデルワールス結晶ナノ試料における特徴的な量子伝導の探索・解明に取り組みます。さらに、我々が有するイオン液体を用いたゲート技術やファンデルワールス結晶転写技術を用いて特徴的ナノ界面を創成し、光電流効果や非相反応答 [6] といった、対称性の破れに起因した新しい物性や機能性の開拓を目指します。

[1] X. Qian, J. Liu, L. Fu, and J. Li, Science **346**, 1344 (2014).
[2] Z. Fei et al., Nat. Phys. **13**, 677 (2017).
[3] S. Wu et al., Science **359**, 76 (2018).
[4] V. Fatemi et al., Science **362**, 926 (2018).
[5] L. Huang et al., Nat. Mater. **15**, 1155 (2016).
[6] T. Ideue et al., Nat. Phys. **13**, 578 (2017).

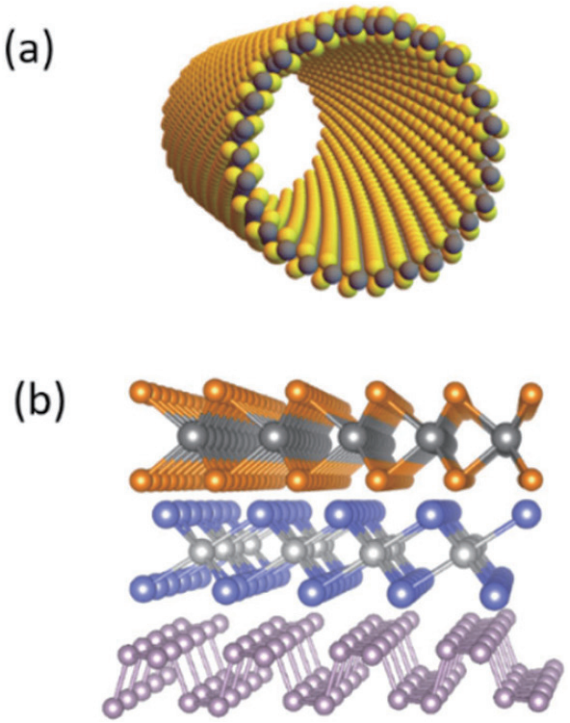


図 1 : ファンデルワールス結晶ナノ構造における対称性の破れ。(a) ナノチューブ。(b) ヘテロ構造。

半導体二次元電子系と超伝導体の接合における新奇輸送現象の探索と解明

中村 壮智 / 東京大学 物性研究所 助教

なかむら・たけとも

1983 年生まれ。大阪府出身。2012 年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。2010 年日本学術振興会特別研究員。2012 年より現職。超伝導現象やスピン輸送現象に興味を持って研究を行っています。

半導体ヘテロ構造における二次元電子系と超伝導体との接合の量子輸送現象の解明に取り組んでいます。半導体を 1 層ずつエピタキシャルに成長したヘテロ構造に生じる二次元電子系は、半導体そのものの性質に加え、構造に起因する強いスピン軌道相互作用や量子閉じ込め効果のために、スピンホール効果 [1] やスピン偏極電流 [2] といった興味深い非平衡伝導現象が期待できます。この二次元電子系と超伝導体の接合において、両者の性質が混ざり合うことで現れるトポロジカル超伝導のような新奇な超伝導現象 [3] や、超伝導相関の下での非平衡スピン伝導現象を探索、解明したいと考えています。

現在は、研究の舞台の 1 つとして InAs の二次元電子系をベースとした超伝導接合に注目し、磁場や電流、スピン流の下でのジョセフソン効果やアンドレーエフ反射といった輸送現象を調べています。磁場を二次元電子系と平行に加えると、サイクロトロン運動やアハラノフ＝ボーム位相の効果を抑え、ゼーマン効果のみを加えることができます。このときの二次元電子系はある種の強磁性状態と考えることができ、超伝導体と強磁性体の接合で見られる 0 − π 転移 [4] やスピン三重項超伝導 [5] の舞台となりえます。これと同様の効果は、二次元電子系にスピン蓄積を生じさせることでも期待できます。これらを実験的に実現するには磁場方向や試料内の電位を正確に制御することが重要ですが、公募研究に採択していただいたことでそれが可能となりました。希釈冷凍機を改造し試料回転機構を加え、さらに電磁石を 2 軸化したことで、磁場を誤差 0.1° 以下の正確さで二次元面に平行にあわせられるようになりました。実験の結果、面平行磁場とスピン流ではいずれもジョセフソン効果が抑制されるものの、その起源が異なることがわかりました。抑制のメカニズムについては現在考察中ではっきりとした結論はでていませんが、本新学術領域を通して、理論家の方々とコラボレーションすることで解明に近づければと考えています。

現在は実験をさらに進め、量子構造や磁性体を組み合わせた接合を作成し、トポロジカル超伝導やスピン三重項超伝導といった新奇超伝導現象の探索を行っています。どうぞよろしくお願いいたします。

[1] J. Sinova et al., Rev. Mod. Phys. **87**, 1213 (2015).
[2] S. Kim et al., Phys. Rev. B **94**, 125307 (2016).
[3] S. R. Elliott et al., Rev. Mod. Phys. **87**, 137 (2015).
[4] T. Kontos et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 137007 (2002).
[5] T. Nakamura et al., submitted.

公募研究
紹介
（D02）

量子スピン液体で発現する創発準粒子のトポロジカル特性の安定性とその制御

那須 譲治 / 横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授

なす・じょうじ

1983 年生まれ　山形県出身。2006 年東北大学理学部卒業。2011 年博士 (理学)(東北大学) 取得。その後、東北大学大学院理学研究科助教、日本学術振興会特別研究員、東京工業大学理学院助教を経て、2018 年 12 月より現職。

前回に引き続き、D02 班として公募研究に参加させていただいております。前回は、「量子スピン系に内在するマヨラナダイナミクスとそのトポロジー」ということで、最近注目を集めている量子スピン系であるキタエフ模型で現れるマヨラナ準粒子のトポロジカルな性質が物性に与える影響を明らかにするために、特に熱輸送特性に焦点を当てて研究を行ってきました。そこでは、キタエフ模型の縦及び横成分の熱伝導度の温度変化を数値計算によって計算し、量子スピンが分数化して生じた遍歴するマヨラナ準粒子のトポロジカルなバンド構造と局在する Z_2 ゲージ場の揺らぎが物性に与える影響を調べました。

次の段階として、磁場をはじめとした様々な外場によるマヨラナ準粒子の持つトポロジカル特性の制御や、乱れや不純物などによるその安定性を解明することが必要と考え、本研究課題に取り組むことにしました。その中で、最近得られた成果に関してご紹介いたします。

キタエフ模型は磁場を導入すると可解性が失われてしまうため、これまで磁場は摂動的に扱われてきました。最近私たちは、摂動論を超えた磁場依存性を議論するために、マヨラナ形式を用いた平均場近似などを用いて、キタエフ模型の磁化過程を調べました [1]。その結果、磁場による量子スピン液体の安定性は、強磁性的な場合と反強磁性的な場合で大きく異なり、特に後者では、量子スピン液体と強制強磁性状態の間に中間相があることを見つけました。この中でも、量子スピン液体と中間相の間では、マヨラナ準粒子のバンド構造のポロジカル転移を伴うことがわかました。最近、f 電子系を用いることで反強磁性的なキタエフ相互作用を実現できることを示唆する理論研究もあり、今後、実験的な検証も可能になるかもしれません [3]。

キタエフ模型は、2 次元蜂の巣格子上で定義されていますが、実際の物質との対応を議論する上では、3 次元性による量子スピン液体の安定性を明らかにすることも重要です。それを調べるために、キタエフ模型の層間をハイゼンベルグ相互作用で 3 次元的に接続した場合を考えましたが、この場合は、磁気秩序が実現しないことを示すことができました [2]。より詳細な解析をするために、蜂の巣格子を 2 枚重ねた系を考えると、量子スピン液体は、層間の相互作用を導入したとき Z_2 ゲージ場の励起エネルギー程度まで安定的に存在することがわかりました。

実は上記 2 つの研究は、私たちが arXiv 投稿した後に、海外の別のグループから類似した内容の研究結果が arXiv にアップされ、国際的な競争の激しさを実感しました [4,5]。今後は、新しい視点から研究に取り組み、本学術領域に寄与できるよう努めていきたいと思います。

本研究は、求幸年氏、加藤康之氏、紙屋佳知氏、古賀昌久氏、富重博之氏との共同研究によって得られたものです。この場をお借りして感謝申し上げます。

[1] JN, Y. Kato, Y. Kamiya, and Y. Motome, Phys. Rev. B **98**, 060416(R) (2018), arXiv:1805.02423.
[2] H. Tomishige, JN, and A. Koga, Phys. Rev. B **97**, 094403 (2018), arXiv:1712.09050.
[3] S.-H. Jang, R. Sano, Y. Kato, and Y. Motome, arXiv:1807.01443.
[4] U. F. P. Seifert, J. Gritsch, E. Wagner, D. G. Joshi, W. Brenig, M. Vojta, and K. P. Schmidt, Phys. Rev. B **98**, 155101 (2018), arXiv:1806.01852.
[5] S. Liang, M.-H. Jiang, W. Chen, J.-X. Li, and Q.-H. Wang, Phys. Rev. B **98**, 054433 (2018), arXiv:1806.04184.

異方的超伝導体の対称性とトポロジー

柳瀬陽一 / 京都大学 理学研究科 准教授

やなせ・よういち

1973 年福岡県生まれ。2000 年京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻博士課程中退。2001 年論文博士（理学）。2000 年より東京大学理学系研究科助手、2007 年より同助教、2009 年新潟大学理学部准教授を経て、2015 年より現職。かつての趣味は、オリエンテーリング、自転車、トレイルランニング、沢登りなど。現在は子育てを趣味とする日々。

強相関電子系、特に高温超伝導体や重い電子系超伝導体で発見された異方的超伝導の研究は 40 年近い歴史を刻んできました。私自身はその後半約 20 年の間なんらかの形でその分野に関わってきました。その間に幾つかのブレークスルーがあり、20 年前には想像できなかった形で発展しているように思います。私自身の印象について最近雑文 [1] を寄稿しましたのでご興味がある方はどうぞご笑覧ください。

超伝導研究のブレークスルーの一つがトポロジカル超伝導であったことは疑いありません。スピン三重項超伝導体をはじめ異方的超伝導体はトポロジカル超伝導体の有力な候補です。それだけでなく、トポロジカル超伝導の研究は異方的超伝導体の性質を見直す重要な契機にもなりました。トポロジカル周期表からも明らかなように、系の対称性とトポロジーの間には非自明な関係があり、両者の相補的な理解が重要です。私達は超伝導体の対称性とトポロジーに関する幾つかの研究を行っています。

(1) 非共型空間群に守られたメビウス型トポロジカル超伝導

非共型空間群に属する結晶では波数空間にメビウス的な構造が現れるため、通常とは異なるトポロジカル相が可能になります [2]。そのようなメビウス型トポロジカル絶縁体の候補として KHgSb と CeNiSn が提案されており、KHgSb に対しては実験的証拠も得られています。一方、メビウス型トポロジカル超伝導体に関しては、具体例が知られていませんでした。私達は UPt_3[3] と UCoGe[4] がそれぞれ Z_2, Z_4 メビウス型トポロジカル超伝導体であることを示しました。

(2) ギャップレス超伝導体の対称性とトポロジー

異方的超伝導体のギャップ構造に関する理論として所謂 Sigrist-Ueda 流の群論的分類学が長く採用されてきました。しかしこの枠組みは厳密でないため、対称性とトポロジーに基づいて超伝導ギャップ構造を精密に理解する試みが各地で進められています。私達は非共型空間群対称性に守られた線ノードの分類 [5,6] と対称線上の点・線・面ノードの分類 [6] を行いました。既知のノードの安定性を示す多くの結果に加えて、未知のギャップ構造であったブロッホ状態の角運動量に依存する点ノードを発見しました [6]。それが実現する物質として UPt_3 や UBe_{13} などを提案しました。

[1] 柳瀬陽一，数理科学 2019 年 1 月号.
[2] K. Shiozaki, M. Sato, and K. Gomi, Phys. Rev. B **93**, 195413 (2016).
[3] Youichi Yanase and Ken Shiozaki, Phys. Rev. B **95**, 224514 (2017).
[4] Akito Daido, Tsuneya Yoshida, Youichi Yanase, arXiv:1803.07786.
[5] S. Kobayashi et al, Phys. Rev. B **94**, 134512 (2016); S. Sumita et al, Phys. Rev. Lett. **119**, 027001 (2017).
[6] S. Sumita and Y. Yanase, Phys. Rev. B **97**, 134512 (2018); S. Sumita et al, arXiv:1811.08627.

RESEARCH 002

トポロジカルフェルミアーク：有限温度での特異な準粒子励起の研究

永井 佑紀 / 日本原子力研究開発機構 研究員

ながい・ゆうき

1982 年北海道生まれ。2010 年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。2007 年理化学研究所ジュニアリサーチアソシエイト、2008 年日本学術振興会特別研究員 (DC2) を経て、2010 年より現職。また、2016 年 11 月より 1 年間マサチューセッツ工科大学客員研究員。2018 年 8 月より理化学研究所革新知能統合研究センター客員研究員を兼務。

2016 年 -2017 年には本新学術領域の公募研究の研究代表者として参加させていただき、三次元トポロジカル超伝導体候補物質 $Cu_xBi_2Se_3$ の物性を理論的に調べました。その際には、トポロジカル超伝導体のバルクに着目することで、不純物効果や比熱、核磁気緩和率等に他の超伝導体は見られない特異な振る舞いが現れることを指摘しました [1,2]。2018 年 -2019 年に採択していただきました新しい公募研究では、有限温度に着目して準粒子励起の研究を行います。

私は、2016 年 10 月から 1 年間、米国マサチューセッツ工科大学の Liang Fu 教授のグループに客員研究員として滞在し、彼の提唱した強相関電子系における非エルミートトポロジカル理論に関する共同研究を始めました。この非エルミートトポロジカル理論では、1 粒子ハミルトニアンに自己エネルギーを足したものを新しく " ハミルトニアン " と定義することで、そのハミルトニアンの非エルミート性が作るトポロジカルな性質を議論します。そして、系は開放系ではなく、バルクの固体の系を考えます。例えば、ディラックハミルトニアンにバンドごとに異なる準粒子寿命（自己エネルギー）を導入すると、ディラック点が二つの例外点に分裂し、バルクにフェルミアークが現れます [3]。私が対象としているのは、重い電子系等の強相関電子系です。電子相関に由来する自己エネルギーは絶対零度では消えてしまいますので、必然的にこの理論は有限温度を対象としています。つまり、これまでトポロジカルと思われてこなかった様々な物質において、これまで知られていなかった新しい現象が有限温度で生じる可能性があります。

私は、近藤半金属に着目し、波数依存した混成を持つ周期的アンダーソン模型において、電子間相互作用に起因するフェルミアークがバルクに現れることを動的平均場理論で明らかにしました [4]。現在、このバルクフェルミアークに加えて、非エルミート系のトポロジーに起因する新しい現象を見いだしつつあり、引き続き研究を遂行するつもりです。

[1] S. Yonezawa, et al, Nat. Phys. **13**, 123–126 (2017).
[2] YN, Y. Ota, Phys. Rev. B **94** 134516 (2016).
[3] V. Kozii and L. Fu, arXiv:1708.05841.
[4] YN, Y. Qi, H. Isobe, V. Kozii, and L. Fu in preparation.

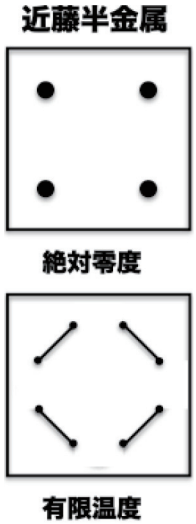
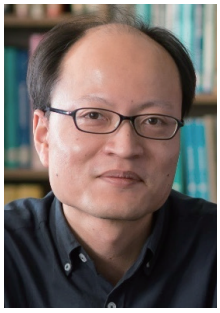


図 1 : 近藤半金属における有限温度バルクフェルミアークの模式図

公募研究
紹介
（D03）

ラインノード半金属および その超伝導物質の理論的探索

山影 相 / 名古屋大学 大学院理学研究科 助教



やまかげ・あい

1983 年福島県生まれ。2011 年 東北大学大学院博士課程後期修了。2011 年名古屋大学大学院工学研究科研究員。2014 年より名古屋大学大学院工学研究科特任助教・名古屋大学高等研究院特任助教。2017 年より現職。

公募班として表題のテーマに取り組みます。以前（2011-2014）は本領域の前身に当たる新学術領域「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」の研究員としてお世話になっていました。引き続き、本領域でもよろしくお願いいたします。

本研究の対象であるラインノード半金属は特にこの３年で急激に理解が進んだ系です [1]。ラインノードというのは伝導帯と価電子帯がブリルアン域の線上で交差しているギャップレスな電子系のことであり（図 1）、ディラック・ワイル半金属（＝ポイントノード）の自然な派生の一つとなっています。多くの研究により、ラインノードを保護する対称性やトポロジカル不変量などの基本的な性質は解明されつつあります。また、候補物質の予測も盛んに行われ、実験研究も加速度的に進展しています。

我々は低エネルギーのラインノードが一つだけ存在するという理想的なラインノード半金属物質 CaAg*X* (*X* = P,As) を予言しました [2]。同時に、共同研究者の岡本佳比古氏（名大工）らによって当物質が合成され [3]、さらに、本領域計画班 B の佐藤宇史氏らの角度分解光電子分光により線ノードに由来するトーラス状のフェルミ面が観測されています [4]。今後はラインノードに固有の興味深い量子現象を理論・実験により明らかにしていくことが重要な課題です。例えば、ラインノード半金属における電気分極は電場に対して顕著な非線形性を示すことを計画班 C の野村健太郎氏らと研究しています [5]。

もう一つの発展の方向性として、ラインノード半金属にキャリアドープを行い超伝導化させることを考えています。トポロジカル絶縁体 [6] やディラック半金属 [7] といったトポロジカル物質にキャリアを注入し超伝導状態になると、トポロジカル超伝導体になることが期待されています。CaAg*X* においてもトポロジカルな超伝導状態の可能性が示唆されています [8]。この系も含め、さらにラインノード半金属における超伝導物質候補とトポロジカル超伝導状態についての研究を進めていきます。

[1] レビュー：M. Hirayama et al., J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 041002 (2018).
[2] AY et al., J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 013708 (2016).
[3] Y. Okamoto, AY, et al., J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 123701 (2016).
[4] D. Takane, AY, et al., npj Quantum Materials **3**, 1 (2018).
[5] Y. Ominato, AY, and K. Nomura, Condens. Matter **3**, 43 (2018).
[6] S. Sasaki et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 217001 (2011); K. Matano et al., Nat. Phys. **12**, 852 (2016); S. Yonezawa et al., Nat. Phys. **13**, 123 (2017).
[7] M. Oudah et al., Nat. Commun. **7**, 13617 (2016).

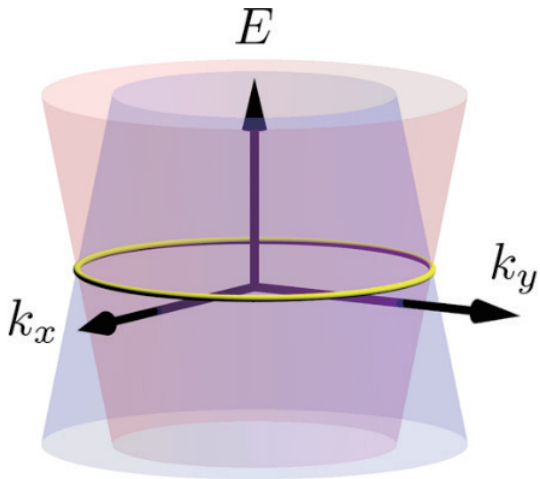


図 1：ラインノード半金属のバンド構造（k_z=0）。伝導帯と価電子帯が（黄）円上で交差（＝ラインノード）している。

第一原理計算を用いたトポロジカル物性の機構解明と新物質設計

山内 邦彦 / 大阪大学 産業科学研究所 助教

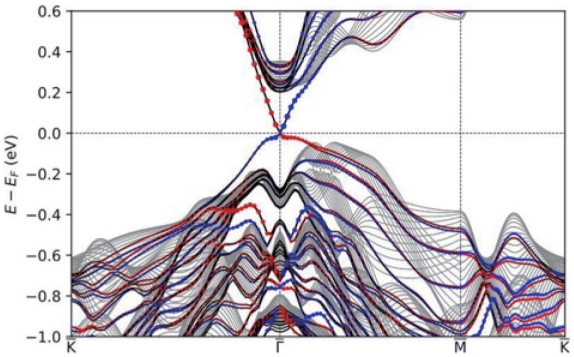
やまうち・くにひこ

1977 年奈良県生まれ。大阪大学理学研究科博士後期課程修了、現在は大阪大学産業科学研究所小口多美夫研究室助教。2006 年から 4 年間ポスドクとしてイタリアに研究滞在した。現地での研究生活が気に入り、今も年 2 回程度イタリアを訪れている。

第一原理電子状態計算（いわゆる“バンド計算”）を専門にしています。本新学術領域では、B01 佐藤宇史 角度分解光電子分光 (ARPES) 実験班との共同研究を密に行っており、ワイル半金属・ディラック半金属・人工多層膜など新しいタイプのトポロジカル物質における電子状態のバンド計算を進めています。ARPES 測定で得られた電子構造とバンド計算結果を比較することにより、フェルミ準位近傍の電子構造のもつ原子軌道成分が明らかになり、トポロジカル物性の微視的起源について議論することができます。最近では、カイラル結晶構造をもつワイル半金属 Te の電子構造 [1] や、Bi 薄膜の原子構造に依存したバンド構造の変化 [2] などについて、ARPES 実験結果をよく再現する結果が得られました。引き続き、共同研究を進めて、様々なトポロジカル物質についての知見を深めたいと思います。

一方で、実験に先駆けた理論先行の新物質設計も手がけています。これまでに、遷移金属酸化物の様々な結晶歪みを利用したトポロジカル物質設計を試みたところ、強誘電歪みでトポロジカル転移を生じる酸化物ヘテロ構造の組み合わせを発見しました [3]。また、Bi_2Se_3 や Bi_2Te_3 などの典型的なトポロジカル絶縁体を組み合わせた人工多層膜を設計し、積層構造を調整することによってトポロジカル絶縁体の表面状態を制御しようと試みています [4]。各物質のバルクの仕事関数、バンドギャップの違いをもとに、図のように理想的な表面バンド構造を示す人工多層膜を設計しました。将来、このような理論予測が実験グループによって実証されることを目指しています。

[1] K. Nakayama, et al., Phys. Rev. B **95**, 125204 (2017).
[2] K. Yamada et al., Nano Lett. **18**, 3235 (2018).
[3] K. Yamauchi et al., Phys. Rev. B **95**, 035146 (2017).
[4] T. Kosaka et al., in preparation.



図：Bi_2Se_3-Bi_2Te_3 多層膜のバンド構造。スピン分極した表面バンドがギャップ中に現れている。

RESEARCH 03

第一原理計算による反強磁性体の電子構造トポロジーとマクロ物性の研究

鈴木 通人 / 東北大学 金属材料研究所 准教授

すずき・みちと

1979 年埼玉県生まれ。2007 年神戸大学大学院博士後期課程修了。2007 年 神戸大学博士研究員。同年 ウプサラ大学(スウェーデン）博士研究員。2010 年より日本原子力研究開発機構 研究員。2014 年より理化学研究所研究員。2017 年より　科学技術振興機構さきがけ研究員（兼任)。2018 年より現職。

強磁性体では異常ホール効果や異常ネルンスト効果、磁気光学 Kerr 効果などが起こることが知られていますが、近年、Mn_3Sn, Mn_3Ge の磁化のほとんどない非線形磁気構造が秩序した（広義の）反強磁性秩序相において、非常に大きな異常ホール効果やネルンスト効果、磁気光学 Kerr 効果が観測され注目を集めています [1-3]。私達はこれら Mn_3Z (Z=Sn, Ge) の反強磁性秩序相で観測された大きな異常ホール効果が、特有の反強磁性構造によって引き起こされていることを明らかにしています [4]。具体的には、強磁性を特徴付ける磁気双極子の自然な拡張として反強磁性を特徴付ける高次磁気多極子による秩序パラメータを提案し、Mn_3Z の反強磁性構造が磁気双極子と同じ対称性に属する磁気八極子で特徴付けられることを示しました (図 1(a))。この研究で提案した新しい秩序パラメータ群（クラスター多極子）は、結晶中の一般の磁気秩序に伴う対称性の破れを定量化するため、反強磁性秩序に伴う対称性の破れとマクロ物性の相関やトポロジーとの関係を調べる上で有用な理論ツールになると考えています。

私のこれまでの研究では、第一原理計算によって物質中の様々な秩序形成下の電子構造とそれらが物性に与える影響を調べてきましたが、この異常ホール効果の研究を機に、本プロジェクトの研究協力者である東北大の是常氏とともに、ベリー曲率やワイル点を特徴付けるモノポール電荷の分布を計算するプログラムやマクロ物性の計算プログラムを開発したことで、磁性状態に対してより豊富な情報を引き出すことが可能になっています [2-6]。上記 Mn_3Z の反強磁性秩序相の異常ホール効果の研究では、これらのプログラムと磁気空間群理論による解析を併用することで、ベリー曲率とワイル点の分布の解析に取り組んでおり、Mn_3Z の反強磁性金属においては、占有バンドに広がったベリー曲率が異常ホール伝導度に支配的に寄与することも明らかにしています (図 1 (b))。本研究プロジェクトを通して、このような解析を様々な磁性体に対して行っていくことで、新しいトポロジカル物質の発見につなげたいと考えています。

[1] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212 (2015).
[2] M. Ikhlas et al., Nat. Phys. **13**, 1085 (2017).
[3] T. Higo et al., Nat. Photon. **12**, 73 (2018).
[4] M.-T. Suzuki, T. Koretsune, M. Ochi, R. Arita, Phys. Rev. B **95**, 094406 (2017).
[5] K. Kuroda et al., Nat. Mater. **16**, 1090 (2017).
[6] L. Huang et al., Nat. Mater. **15**, 1155 (2016).

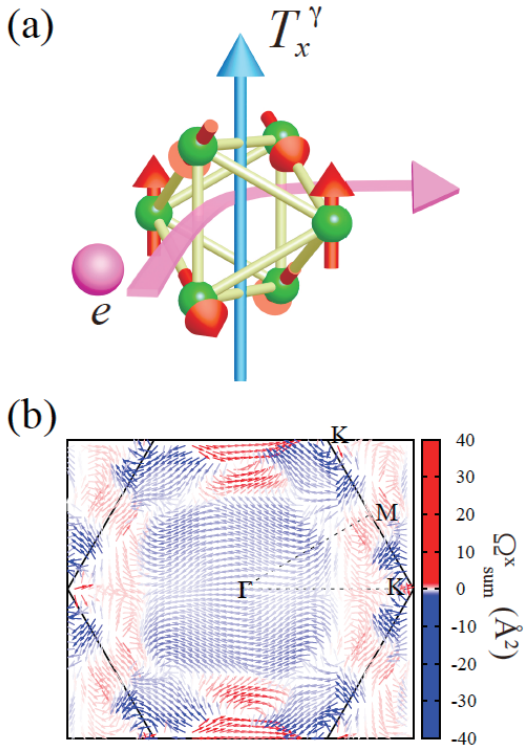
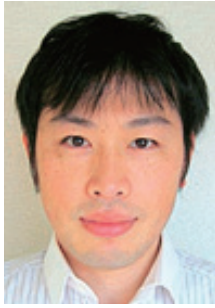


図 1 :(a) 磁気八極子 (T_x^γ) によって特徴付けられる Mn_3Z の磁気構造と異常ホール効果の概念図。(b)Mn_3Z のベリー曲率の分布 (AHC に寄与する成分によって色付け)。

トポロジカル相を活用した光の時空間ダイナミクスの制御手法の開拓

小布施 秀明 / 北海道大学 工学研究院 助教

前回から引き続き本新学術研究の公募研究として、光学系に備わるトポロジカル相を活用することにより、古典光及び光子のダイナミクスを時空間で制御するための手法の開拓を目指した研究を行います。どうぞよろしくお願いいたします。



おぶせ・ひであき

1977 年生まれ。長野県生まれ。2005 年北海道大学大学院 工学研究科 量子物理工学専攻 博士後期課程修了。理化学研究所古崎物性理論研究室（基礎科学特別研究員）、京都大学大学院理学研究科 凝縮系理論グループ（学振特別研究員）、ドイツ・カールスルーエ工科大学ナノテクノロジー研究所（学振海外特別研究員）にて、トポロジカル絶縁体、アンダーソン転移、量子ウォークなどの理論研究に従事。2012 年 11 月より現職。

前回の公募研究においては、光学系における古典光や光子の流出効果に着目することにより、「開放系におけるトポロジカル相」の研究を重点的に研究いたしました。粒子やエネルギーの流出入がある開放系において、空間 - 時間反転対称性 (Parity – Time-reversal symmetry; 以下、P T 対称性) がある場合、ある種の確率保存が成立したり、開放系特有の特異な現象が起こることが知られています。現在、古典光学系における実験が盛んに行われていますが、開放量子系においては、流出入効果の制御が困難であることから、PT 対称性に関する実証実験が無い状況が続いておりました。この問題に対し、量子ウォークと呼ばれる人工量子系に対する PT 対称性やトポロジカル相を調べることにより、この系のエッジ状態のみが PT 対称性を破ることを反映した特異な現象が起こることを理論的に示しました [1,2,3]、さらに、量子光学系において PT 対称な量子ウォークを実装することにより、実証実験に成功しました [4]。また、2 次元系における量子ウォークのトポロジカル相に由来するカイラルなエッジ状態に関する研究も行いました [5]。

今回の公募研究では、前回の公募研究で行った、開放系における PT 対称性や高次元系におけるトポロジカル相の研究をさらに発展させることに加え、トポロジカル相を動的に変化させることにより、エッジ状態を動的制御する手法に関する研究を行います。本年度は、開放系における PT 対称性の発展研究として、以前の実験系 [4] に僅かな変更を加えるだけで、高次のトポロジカル数を有する系に拡張が可能なことが可能であることが分かり、その実証実験を行いました。

[1] K. Mochizuki, D. Kim, and H. Obuse, Phys. Rev. A **93**, 062116 (2016).
[2] K. Mochizuki and H. Obuse, Interdisciplinary Information Sciences **23**, 95 (2017).
[3] D. Kim, K. Mochizuki, K. Kawakami, and H. Obuse, arXiv:1609.09650.
[4] L. Xiao, X. Zhan, Z.H. Bian, K.K. Wang, X.Zhang, X.P.Wang, J.Li, K. Mochizuki, D. Kim, N. Kawakami, W. Yi, H. Obuse, B.C. Sanders, and P. Xue, Nature Physics, **13**, 1117 (2017).
[5] T. Endo, N. Konno, H. Obuse, and E. Segawa, J. Phys. A **50**, 455302 (2017).

熱的に揺らぐ磁気モーメントのカイラリティによる異常ホール効果

石塚 大晃 / 東京大学 工学系研究科 助教

いしづか・ひろあき

1986 年静岡県生まれ。2013 年東京大学大学院博士後期課程修了。2013 年 日本学術振興会 特別研究員 (カリフォルニア大学サンタバーバラ校 所属)。2015 年より現職。

スキルミオンや非共面的（non-coplanar）磁気秩序に由来する異常ホール効果（トポロジカル・ホール効果）は、従来型の異常ホール効果とは異なる性質を示すことから、近年世界中で盛んに研究が行われています。この機構によるホール効果は、パイロクロア酸化物やカイラル磁性体の異常ホール効果に寄与していると考えられており、実験的にも多くの研究があります。さらに、これらの実験では磁気転移点近傍における異常ホール伝導度の増大や符号反転 [1] など、熱揺らぎの効果が寄与していると思われる振る舞いも知られておりました。一方で、これまでの理論研究は基底状態など磁気秩序が十分に発達した系に対する研究が多く、磁気モーメントの熱揺らぎが大きい場合における異常ホール効果の理論的研究は限られていました。

こうした磁気モーメントが熱的に揺らぐ系における異常ホール効果の振る舞いの理論的解析から、最近、熱揺らぎに由来する skew 散乱が生じることを発見しました [2]。この skew 散乱による異常ホール効果はトポロジカル・ホール効果とは異なる機構として理解できる為、転移点近傍における異常ホール伝導度の符号反転 [2] や増大 [3] を説明できる可能性があります。さらに、類似の skew 散乱は磁気モーメントのベクトル・カイラリティに比例するホール効果を生じることも確認しました [4]。この機構によるホール効果は、最近 $SrCoO_3$ で観測された異常ホール効果のスケーリング則を説明できます [5]。

揺らいだ磁気モーメントに由来する skew 散乱は複数の散乱体を介した電子の多重散乱によるものであり、我々の理論研究は、こうした効果が磁性体の輸送現象に重要な役割を果たす可能性を示唆しています。また、ベクトル・カイラリティに由来する skew 散乱の様に、類似の多重散乱が他の微視的な機構によって生じる可能性があります。

[1] N. Kanazawa et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 156608 (2010).
[2] H. Ishizuka and N. Nagaosa, Sci. Adv. **4**, eaap9662 (2018).
[3] Y. Kato and H. Ishizuka, preprint (arXiv:1812.09805) (2018).
[4] H. Ishizuka and N. Nagaosa, New. J. Phys. **20**, 123027 (2018).
[5] D. Zhang et al., Phys. Rev. B **97**, 184433 (2018).

若手励起
プログラム
報告

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、トポロジカル物質科学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。

小野 清志郎

東京大学 理学系研究科 修士課程 1 年

指導教員　：東京大学 物性研究所 押川 正毅 教授
受入研究者：京都大学 理学研究科 柳瀬 陽一 准教授 (D02)
受入期間　：2018 年 8 月 28 日（月）～9 月 7 日（金）

私は物性物理の中に現れるトポロジーと対称性の関係について研究を行っています。内部対称性や結晶の空間群の空間対称性によって守られたトポロジカル (結晶) 絶縁体・超伝導体を探索することは物性物理学のみならず、材料科学の観点からも非常に重要な課題です。

2007 年に Fu 氏と Kane 氏によって Fu-Kane 公式というものが提案されました。それは空間反転対称性があるトポロジカル絶縁体の Z_2 指標を空間反転対称性の固有値から簡単に計算できるというものであり、これが空間の情報から系のトポロジーを特定する最初の方法です。それ以降も、対称性の情報から系のトポロジーを特徴付ける量を容易に計算する手法が個別に提案されてきました。そこで 2017 年に東大物理工学専攻の渡辺氏、MIT の Po 氏らにより「対称性の表現に基づく指標」という全ての空間群に適用できる手法が提案され、近年トポロジカル (結晶) 絶縁体が多数提案されています。一方で、いまだにトポロジカル超伝導体を系統的に探索する方法は提案されておらず、現在私はその領域に興味を持っています。

今年の夏に物性若手夏の学校で講師としていらした柳瀬先生と議論をする中で共同研究が始まり、本プログラムでの滞在を提案していただきました。滞在中には、柳瀬先生だけでなく、凝縮系理論グループの大同さん、角田さん、石塚さん、トポロジカル超伝導のパイオニアでもある基礎物理学研究所の佐藤昌利先生に興味を持っていただき、議論することができたのは大変嬉しかったです。そのおかげで、トポロジカル (結晶) 超伝導体の基本的な知識を得ることができ、探索に向けた方法論も確立することができました。

また、京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻凝縮系理論グループ主催でセミナーをする機会を頂き、多くの先生方、学生に私の現在の研究を聴いて頂く事ができました。これが研究室以外で英語の口頭発表を行う初めての機会であり、緊張してしまい思うようにはいかなかったものの、先生方からのご指摘、ご質問には考えさせられる点も多く、非常に貴重な経験となりました。

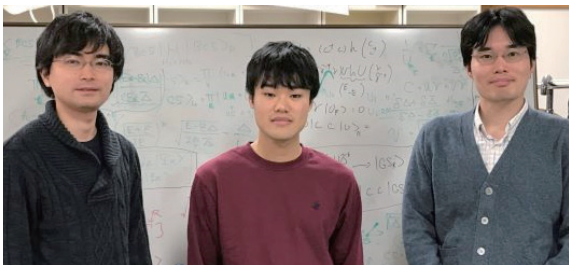
京都大学の大学院入試と日程が重なり忙しい中滞在を快諾してくださり、時間を取って議論してくださった柳瀬先生、知り合いの誰もいない私を毎日昼食に誘ってくださり、交流や議論をしてくださった凝縮系理論グループの皆様にこの場をお借りして深く感謝を申し上げます。最後に、この様な有意義な経験の機会を与えてくださった本プログラムに感謝いたします。

左から 5 人目が筆者、7 人目が柳瀬准教授。

若手励起プログラム報告

山本 和樹

京都大学 大学院理学研究科 修士課程１年



左から D3 の蘆田さん、筆者、助教の古川さん。

指導教員　：京都大学 大学院 理学研究科 川上 則雄 教授 (D01)
受入研究者：東京大学 大学院 理学系研究科 上田 正仁 教授 (D01)
受入期間　：2018 年 12 月 6 日（木）～ 12 日（水）

近年、トポロジカル相における非エルミートな性質に注目が集まり様々な研究が行われてきました。非エルミート性は系に散逸が入ることによって実現されますが、最近では特に Orbital Feshbach Resonance を用いて超流動を実現する実験が盛んに行われています。そういった背景から、私はその中でもトポロジカル超伝導における非エルミートな性質に注目し、非エルミートトポロジカル相の研究における最先端の研究室である東京大学上田研究室で研究を行い、知識を広げることができました。具体的にはトポロジカル相の非エルミート系における分類や準粒子の性質について議論を行い、それを自分の研究に応用することができました。

近年トポロジカル相における非エルミートな性質に注目が集まり実験と理論の両面から盛んに研究が行われてきました [1,2]。非エルミート性は系に散逸が入ることによって実現されますが、その中でも特に冷却原子系に粒子の散逸（非弾性散乱など）を導入することで非エルミート量子系を実現することが可能になってきています。私はその中でもトポロジカル超伝導における非エルミートな性質に注目し研究を行ってきました。

その理由として最近特に Orbital Feshbach Resonance を用いて超流動を実現する実験が盛んに行われていることが挙げられます [3,4]。Feshbach Resonance は粒子の相互作用を制御する方法として用いられていますが、アルカリ冷却土類型の原子では基底状態に磁気モーメントがないため通常の Feshbach Resonance が使えないという問題がありました。そこで励起状態と基底状態の間で Feshbach Resonance を起こす Orbital Feshbach Resonance が用いられたのですが、この２状態間で非弾性散乱が生じてしまうという問題が生じます。これは相互作用が複素になることによって記述され、系に非エルミート性が入ることになります。こういったことからも非エルミートトポロジカル超伝導の理論的な構築を行うことは重要であると考えています。
私はその中でトポロジカル相、及び冷却原子についての知識を深めたいと考え、自身の見聞を広める上でもその専門家と議論を行うことは重要であると考えました。東京大学上田研究室は冷却原子系の専門の研究室であることに加え、非エルミートトポロジカル相の研究における最先端の研究室でもあるため、最適な環境であると考え今回の滞在に至りました。

滞在中はまず上田先生、理研の中川さんと非エルミートトポロジカル超伝導についての議論を行いました。上田先生と中川さんにはトポロジカル相の基本的な性質から超伝導においてのトポロジカル相の分類に至るまで幅広く教えていただき、今後の研究に大幅な進展をもたらすこととなりました。さらに蘆田さん、古川さんを始めとした上田研メンバーの方々に自身の研究を説明する機会を与えていただき、幅広い視野に基づいたコメントをいただきました。その中でも特にトポロジカル超伝導における準粒子の性質について非常に有用なコメントをいただきました。総じて非常に有意義な滞在となりました。

最後になりますがこのような機会を与えていただいた本プログラム実行委員の方々、及び受け入れていただいた上田先生、上田研メンバーの方々に感謝いたします。ありがとうございました。

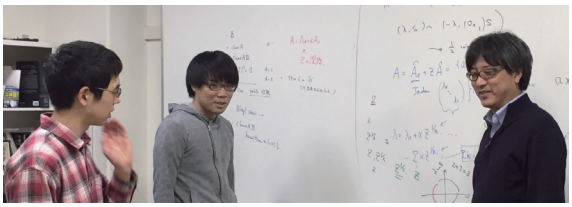
[1] Zongping Gong, Yuto Ashida, et al. Phys. Rev. X, **8**, 031079 (2018).
[2] Kohei Kawabata, Yuto Ashida, et al. Phys. Rev. B, **98**, 085116 (2018).
[3] M. Höffer, et al. Phys. Rev. Lett. **115**, 265302 (2015).
[4] G.Cappellini et al. arXiv:1810.09980.

DOMESTIC JUNIOR RESEARCHER EXCHANGE PROGRAM

若手励起プログラム報告

川畑 幸平

東京大学 大学院理学系研究科 修士課程２年



左から、別所さん、筆者、佐藤先生。

指導教員　：東京大学 大学院 理学系研究科 上田 正仁 教授 (D01)
受入研究者：京都大学 基礎物理学研究所 佐藤 昌利 教授 (D01)
受入期間　：2018 年 11 月 26 日（月）～ 2018 年 12 月 5 日（水）

2 月に引き続き、ふたたびの若手励起プログラムでの派遣となりました。以前の報告書では、「非エルミート系の研究は国内では多くの研究者が取り組んでいるわけではありません」と書いたものの、幸いなことにその後の半年間で多くの方々が興味をもち、いまでは取り組んでいる国内の研究者は少なくはありません。同時に、非エルミート系におけるバルク・エッジ対応やギャップレス相を中心に、国際的な関心も加速しています。そのめざましい進展のなかで、私も非エルミートなトポロジカル系の研究を続けてきました。前回の京都大学理学研究科での滞在と同時期に、当時は理研のポスドクだった塩崎謙氏（現：京大基研助教）との議論が始まり、非エルミートな Chern 絶縁体のバルク・エッジ対応に関する研究を行いました [1]。また、前回の滞在およびその後のインドでの非エルミート系の国際会議での佐藤昌利先生との議論を契機として、非エルミートなトポロジカル絶縁体・超伝導体の分類理論を構築しました [2]。得られた分類理論は、エルミート系の 10 個の Altland-Zirnbauer 対称性クラスが 38 個に分岐する点と、自然な複素エネルギーギャップの定義が２種類になる点が特徴であり、非エルミートなトポロジカル相を記述する包括的な理論となっています。

今回の滞在では、上記の研究 [2] のギャップレスな対応物に相当する、非エルミートなトポロジカル半金属の分類理論の構築を目指しました。一般に、非エルミート系では、固有値だけではなく固有関数も合流する例外点と呼ばれる特異な縮退が現れ、エルミート系には対応物をもたない、非エルミート系に特有のギャップレス構造が生まれることが報告されています。たとえば、対称性のないエルミートな３次元系に現れる Weyl 点に非エルミート性を加えると、Weyl 点が例外点から成る輪（例外線）に変化します [3]。対称性の存在下では、さらに豊かなギャップレス構造が現れ、２次元においても例外線が現れることが明らかになってきました [4-6]。エルミートな場合の知見を踏まえると、ギャップの開いた場合の結果 [2] とパラレルな議論から例外点の分類理論が得られることが予想されたので、今回の滞在で集中的に取り組み、実際に構築することができました。得られた分類理論は、上記の先行研究 [3-6] を包括的に記述し、またこれまで知られていなかった新たなギャップレス構造を予言することも確認しました。これらの結果は、東京に戻ってから論文にまとめています。

また、滞在中には、基研で第 10 回連携研究会「非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象」が開かれました。非エルミート系を含む非平衡系に関する幅広い講演を受けると同時に、自身の研究 [2] についても講演を行いました。非エルミート系の研究を自分が始めた２年前は、同じ分野の研究者は国内にはほとんどいなかったため、「非エルミート」という語が入った研究会が開かれることに個人的な感慨がありました。

今回の滞在においては、京都大学基礎物理学研究所凝縮系物理グループのみなさまにたいへんお世話になりました。そのなかでもとくに、佐藤先生、塩崎さん、および大学院生の別所拓実さんは、多くの議論をしてくださり、実りある共同研究をすることができました。また、同時期に滞在していた理研の小澤知己さんとも有意義な議論ができました。さらに、連携研究会の参加者の方々とも充実した交流ができました。今回の滞在を有意義に送ることができたのは、上記のみなさまのおかげであり、心より感謝申し上げます。最後に、一連の研究を行うきっかけを与えてくださった、若手励起プログラムにもかさねて感謝いたします。

[1] K. Kawabata, K. Shiozaki, and M. Ueda, Phys. Rev. B **98**, 165148 (2018).
[2] K. Kawabata, K. Shiozaki, M. Ueda, and M. Sato, arXiv: 1812.09133.
[3] Y. Xu, S.-T. Wang, and L.-M. Duan, Phys. Rev. Lett. **118**, 045701 (2017).
[4] J. C. Budich, J. Carlström, F. K. Kunst, and E. J. Bergholtz, arXiv: 1810.00914.
[5] R. Okugawa and T. Yokoyama, arXiv: 1810.03376.
[6] T. Yoshida, R. Peters, N. Kawakami, and Y. Hatsugai, arXiv: 1810.06297.

REP 招聘
報 告

Arnab Sen 准教授

Indian Association for the Cultivation of Science

報告者：学習院大学 理学部物理学科 宇田川 将文 (A01)
期間　：2018 年 10 月 15 日（月）～ 10 月 27 日（土）

REP プログラムを利用して、2018 年 10 月 15 日から 2 週間、Arnab Sen 准教授に学習院大学を中心に滞在していただきました。Sen 氏とは 2011 年に Dresden の Max Planck 研究所 (MPI PKS) に一年間滞在してからの縁です。以来、来日と訪印を一度ずつ行ない、研究上の交流を深めて参りました。今回、共通した興味をもつ問題が複数あることから、共同研究を立ち上げる良い機会と思い、滞在していただくことになりました。本人より感想を含む詳細な報告をいただきました。

My visit of the Topological Material Science (TMS) Program started on October 15, 2018 by meeting Prof. Masafumi Udagawa at Gakushuin University who was my main host. He suggested this program to me a couple of months back and invited me to visit Gakushuin University for academic discussions with him and other researchers in Japan and to deliver some seminars. I summarize my academic activities during my two weeks in Japan below.

With Prof. Udagawa, I discussed various problems in quantum magnetism during my stay at Gakushuin University since we share common research interests in this field. Some new research problems were identified as a result of these intense discussions. One problem is to identify an appropriate operator for electric monopole excitations and to subsequently calculate the dispersion of these excitations for the three-dimensional quantum spin liquid called quantum spin ice that provides a spin model whose low-energy physics is described by a U(1) quantum electrodynamics. This is a fundamental problem as the electric monopoles are genuinely quantum excitations and are not present if one goes to the classical version of this spin liquid, the classical spin ice. We also discussed computing the dimer-dimer correlations for the three-dimensional Rokhsar-Kivelson model in imaginary time using classical Monte Carlo simulations by using a mapping discovered by Henley and then calculating the resulting dynamical structure factor by doing an analytic continuation. The dynamical structure factor should contain interesting signatures of this electric monopole excitation and also has the advantage of being an experimentally accessible quantity. The problem of doping a quantum spin liquid with non-magnetic impurities was also discussed and it was decided to first understand this non-trivial issue in a tractable model of the two-dimensional Kitaev model where even the dynamical correlations may be calculated exactly in the presence of disorder.

During my stay at Gakushuin University, I was visited by Dr. Daisuke Yamamoto (Aoyama-Gakuin University) on 18 October, 2018 and we discussed the application of coherent anomaly method for extracting non-mean field exponents from a cluster mean-field analysis of certain one dimensional and two dimensional spin models that harbor quantum phase transitions. I was also visited by Prof. Sei Suzuki (Saitama Medical University) on 23 October, 2018 and we had an intense discussion on various aspects of dynamics in closed and open many-body quantum systems and their possible non-equilibrium steady states. In particular, the use of DMRG methods to study the periodically driven XXZ spin chain (an example of a Bethe integrable model) and many-body localized spin systems in one dimension was discussed.

On 19 October, 2018, I gave a seminar titled "Understanding disorder-induced phases in dipolar

spin ice" at the Yukawa Institute of Theoretical Physics and had discussions with Prof. Keisuke Totsuka (YITP) and Prof. Ippei Danshita (Kindai University) after my research seminar. In particular, several aspects of periodically and quasiperiodically driven integrable systems were discussed with Prof. Danshita. On October 25, 2018, I gave a seminar titled "Aperiodically driven Integrable Systems and their emergent steady states" at the Department of Physics, The University of Tokyo where I was kindly hosted by Prof. Masahito Ueda and Dr. Shunsuke Furukawa. I particularly enjoyed giving my seminar here since there were several interesting questions from the audience and nice discussions afterwards.

Overall, I really enjoyed my academic visit to Japan since I had several very good discussions with the researchers here. Some of these discussions have resulted in research projects which we hope to pursue actively. I would in particular thank Prof. Masafumi Udagawa who invited me through this program for his kind hospitality and his efforts in coordinating the visits of Dr. Yamamoto and Prof. Suzuki and the seminars at YITP and the University of Tokyo. I would also like to thank Prof. Hal Tasaki (Gakushuin University) for the nice discussions we had during my stay there. Finally, I would thank Prof. Norio Kawakami (Kyoto University) for the financial support of my visit and Ms. K. Akino (TMS Secretary, Kyoto University) for her help with the logistics of my visit.

Sen 氏とは、量子スピン液体の素励起と、その微視的な性質の導出について、集中した議論を重ねました。特に、U(1) 量子スピン液体の重要な候補物質である量子スピンアイスについて、存在が予言されている``electric monopole" という素励起の性質をどのように理論的に記述するか？という問題が主な議論の対象です。Electric monopole の性質に関する問いは 2016 年にタヒチで行なわれた EPiQS-TMS Trans-Pacific Conference でも提起されたましたが、トポロジカル秩序系の素励起の性質を調べるという意味で、トポロジカル物性の基本的な課題と位置づけられる重要な問いと考えています。

学習院において充実した議論を重ねた他、Sen 氏には東京大学の上田研究室 (D01 分担) および京都大学においては段下氏 (D01 連携) をホストとしてセミナーをしていただき、領域内外のメンバーと多くの交流を重ねました。Sen 氏の研究領域はスピンアイスを中心とするフラストレート磁性から、量子ダイナミクス、量子カオスにまで広汎な範囲に及びます。東京大学における Sen 氏のセミナーの直後に催された、上田研究室の研究室セミナーにも飛び入りで参加し、鋭いコメントや議論を多数重ねて、日本の大学の研究室セミナーの雰囲気を大いに楽しんでいたようです。

今回、来日には夫人を伴われ、科学的な活動の他に、観光や日本の食事も十分に楽しまれたようです。東京では明治神宮や浅草、原宿の街並を、京都には 1 泊して、銀閣や伏見稲荷などを巡られたとのことです。また、インドの食事と言えばカレーを真っ先に想像しますが、Sen 氏によるとインドのカレーはひとつひとつが異なる料理であり、いわゆる「カレー」という食べ物は存在しないとのことでした。学習院のキャンパスにある洋食屋で「この食べ物は初めて食べた」と言いながらカレーライスを美味しそうに食べる様子はとても印象的でした。

Sen 氏とは 12 月にバンガロールで開かれる国際会議で再会の予定です。REP のプログラムをきっかけに生まれたいくつものアイデアを共同研究の成果として結実すべく、これからも議論を重ねて行きたいと思います。

上田正仁教授 (A01) の研究員、森 貴司氏との議論の様子。

Researcher Exchange Program

REP 招聘報告

Alexander Golubov 准教授

トゥウェンテ大学（モスクワ物理工学校）

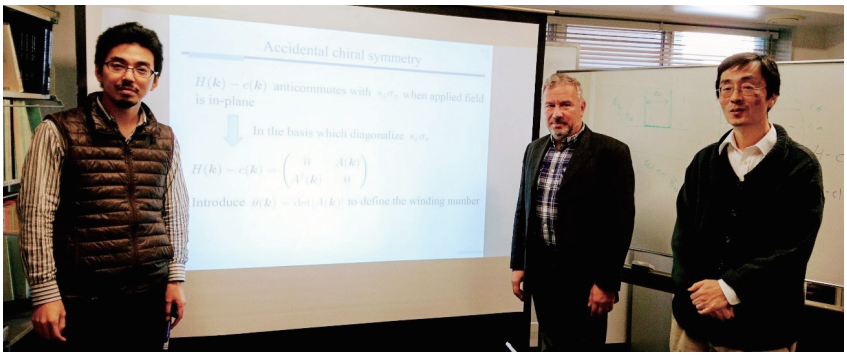
報告者：名古屋大学 大学院工学研究科 柏谷 聡 (B01)
期間　：2018 年 11 月 29 日 (木) ～ 12 月 4 日 (火)

2018 年 11 月 29 日から 12 月 4 日までの 6 日間、Twente 大学（モスクワ物理工学校）Alexander Golubov 准教授（教授）が本新学術領域の REP プログラムで、名古屋大学および京都大学に滞在され、トポロジカル超伝導、奇周波数クーパー対、スピン 3 重項超伝導接合に関して柏谷（B 班分担）、田仲（B 班分担）、前野（A 班代表）と有意義な議論が行われました。また京都大学では TMS セミナーを実施しました。

名大滞在中には柏谷研究室にて、今後の共同研究に関する打ち合わせを行いました。トポロジカル絶縁体に磁性をドープした系に超伝導体を積層した系でジョセフソン接合の実験が始まっていますが、そこでマヨラナフェルミオンあるいは奇周波数クーパー対に起因した電流電圧特性が観測されています。この実験結果についての議論、PD の矢野氏とモスクワ物理工学校の装置を用いた実験の計画について相談が行われました。また超伝導体・常伝導体接合における磁束が存在するもとでの状態密度に関する最近の Golubov 氏の計算について議論を行いました。

田仲研究室では、主に超伝導近接効果の研究について議論を行い。かつて浅野氏（A 班分担）が計算した T 字型接合を拡張した 2 つのアームを持つタイプの接合で、近接効果が超伝導体の位相にどのように制御されるかについて Usadel 方程式の具体的な計算の方法について議論を行いました。Twente 大学で実験が行わている Dirac 半金属を介したジョセフソン接合系で、AC ジョセフソン電流に 4 π 周期が見られる実験についての議論も行いました。

京都大学では TMS セミナーで Golubov 氏は発表を行い、Direct Evidence of Proximity Induced Abrikosov Vortex Core in a Nonsuperconducting Metal　と題する発表をしました。磁束の物理についての創始者であり Golubov 氏の指導者でもあった Abrikosov 氏の有名な論文発表に至る経緯について興味深いお話しをされました。また Usadel 方程式をどうやって 3 次元的構造の系で数値的に解くのか詳しく話されました。午後は同じ日に開催された Zhang 氏のセミナーに出席されて質問をされました。そのあと前野研究室で、Sr_2RuO_4・強磁性接合の実験について議論を行いました。この系に関しては最近、Golubov 氏のグループと京大・名大で理論計算の論文を出版しており今後実験との比較がより進むことで Sr_2RuO_4 のバルクのスピン 3 重項性、さらには近接効果領域に誘起される奇周波数 s 波ペアの存在などが確立するものと思われます。



From left: Keiji Yada, Alexander Golubov, Yukio Tanaka

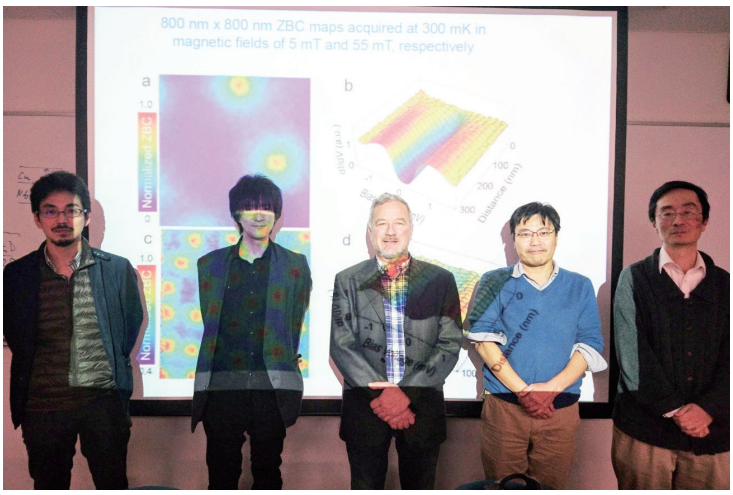
Landscape of TMS seminar at Kyoto University

The scientific program started on November 29, 2018 from the visit to Nagoya University and discussions with Prof. Tanaka and the members of his group on various problems including odd-frequency pairing in superconducting structures, topological superconductivity and application of the Keldysh-Usadel approach to ac Josephson effect in proximity effect structures.

On November 30 I had a meeting with Prof. Kashiwaya and the members of his group and we had discussions of their recent experiments in topological superconducting junctions. The same day I gave a seminar at Nagoya University, where I have presented the results of recent theoretical and experimental studies of tunneling spectroscopy of Abrikosov vortices in hybrid superconducting structures performed in Twente University and in Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) in Russia. Afterwards we have discussed collaboration plans between MIPT, Nagoya University and Twente University (Netherlands).

During my stay in Nagoya on November 29-December 4 I had a number of discussions with Prof. Tanaka, Dr. Yada and Dr. Suzuki on problems related to extension of the circuit theory in unconventional superconducting junctions. The manuscript is currently in preparation.

During my stay in Nagoya I visited Kyoto University on December 3, where I had discussions with Prof. Maeno and members of his group about their recent experimental results on detection of spin-triplet superconductivity in mesoscopic structures Au/ferromagnetic $SrRuO_3$/ superconducting Sr_2RuO_4. We have discussed interpretations of these in terms of spin-triplet proximity superconductivity in these junctions. During my stay in Kyoto University I gave a talk entitled "Direct Evidence of Proximity Induced Abrikosov Vortex Core in a Nonsuperconducting Metal". After the seminar I had further discussions with Prof. Maeno and members of his group.



From left: Keiji Yada, Rikizo Yano, Alexander Golubov, Satoshi Kashiwaya, Yukio Tanaka

CIFAR Quantum Materials Summer School 2018 and the Main Meeting

2018 年 5 月 28 日 - 6 月 2 日 (Montreal, Canada)

東川、村山、大湊は、5 月 28 日 -6 月 2 日にモントリオールにて開催された CIFAR Quantum Materials のサマースクール (5 月 28 日 -30 日) と国際会議 (5 月 31 日 -6 月 2 日) に参加しました。本稿では、会議の様子について参加した各人の視点からご報告します。

東川 翔

東京大学 上田研究室
博士課程３年

発表内容：
周期駆動系における単一ワイルフェルミオンとカイラル磁気効果

私は CIFAR Quantum Material のサマースクールと本会議では、銅酸化物高温超伝導体やスピン液体などの強相関電子系を中心として、機械学習、相互作用のあるトポロジカル系などの幅広い分野の講演を聞くことができました。CIFAR Quantum Material のメンバーとアドバイザリーボードが幅広い分野の教授陣から構成されているためか、講演は丁寧な導入がつけられており、分野の概観を把握するのに役立ちました。印象的だった講演は E. Kim 教授 (Cornel 大学) と R. Melko 教授 (Waterloo 大学) による機械学習の物理への応用です。深層学習による STM 画像の解析やボルツマン機械による量子トモグラフィデータから量子状態の再構成など、機械学習が物理の実験データの解析において着実に成果をあげている様子が印象的でした。一方で、Interpretability については多くの参加者から疑問や批判的なコメントが出ました。これは物理においても難しい問題であり、機械学習が物理で浸透するにはまだ時間がかかるように感じました。また、本会議での P. J-Herrero 教授 (MIT) による魔法角２層グラフェンにおけるモット絶縁体相、超伝導相についての発表は大変エキサイティングなものでした。arXiv に公開されてからわずか３ヶ月で２０本程度の理論の論文が出るなど、この分野のスピード感と活気を感じさせるものでした。セッションの間には３０分から１時間程度の長時間のコーヒーブレークが設けられており、ポスターの前でコーヒーを片手に学生が教授に研究内容を説明している姿が印象的でした。

サマースクールで積極的に質問をしていたためか、多くの参加者に顔を覚えていただけたようで、サマースクールのポスターセッションでは多くの参加者に自分の研究を話すことができました。また、本会議のポスター発表では、フロケトポロジカル相でも先駆的な業績を挙げておられる L. Fu 教授 (MIT) とワイル半金属の提唱者の一人である A. Vishwanath 教授 (Harvard 大学) と長い時間議論することができました。お二人との議論を通して、我々の研究において non-symmorphic な対称性が本質的な役割を果たしていることが分かり、大変有意義な発表となりました。

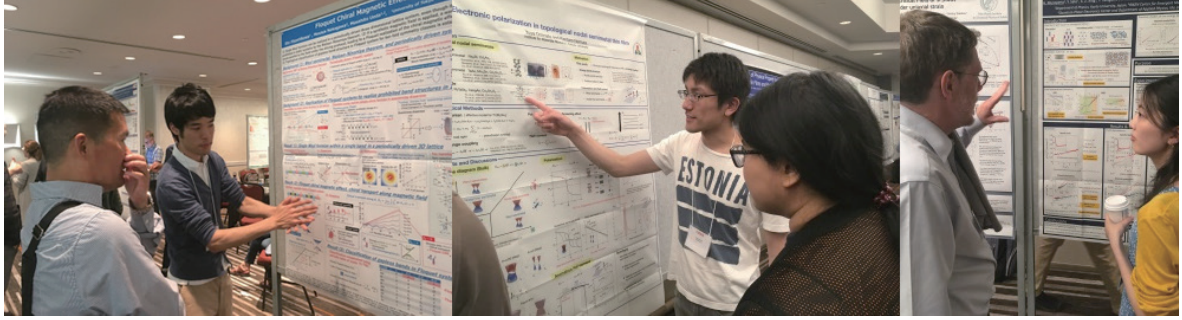
最後に、参加の補助をしていただいた新学術領域および CIFAR の皆様、日本からの一緒に参加した大湊さんと村山さんに、この場を借りてお礼申し上げます。

村山 陽奈子

京都大学 量子凝縮物性研究室
修士課程２年

発表内容：
1T-TaS_2 のスピン液体状態における局在的および遍歴的ギャップレススピン励起の共存

サマースクールと本会議では強相関電子系およびスピン系について様々な講演を聞き、ポスターセッションにおいては自分の研究とその関連分野について、他の学生や研究者の方々とたくさんの議論をしました。個人的に強い関心をもった講演は、J. Hoffman 教授 (Harvard 大学) と S. Davis 教授 (Cornell 大学) による銅酸化物の STM 測定についての話でした。新しいアイディアと測定手法により、銅酸化物の発現機構や相図への理解が大きく進歩していることがわかりました。ま



た、機械学習や TensorFlow などあまり馴染みのない研究手法についても、非常にわかりやすい講演があり、興味を持ちました。

このプログラムに参加して一番驚いたことは、招待講演者には若い女性研究者も多く、参加している学生も 1/3 程度が女性だったことです。女性研究者がほとんどいない、日本の物理学会や大学とは対照的でした。今回の会議に参加されていた研究者の中には、家族同伴で滞在している方や子供を連れてプログラムの食事に参加している方もいて、プライベートも大切にして働いている姿が印象的でした。しかし、結婚や出産で職場を離れる可能性が高いという理由から、カナダやアメリカでも女性研究者が任期のないポストを得るのは男性と比べると難しいそうです。

最後に、参加の補助をしていただいた新学術領域および CIFAR の皆様、日本から一緒に参加した大湊さんと東川さんに、この場を借りてお礼申し上げます。

大湊 友也

東北大学金属材料研究所
バウアー研究室 博士研究員

発表内容：
トポロジカルノーダル半金属薄膜における電気分極

CIFAR QUANTUM MATERIALS のサマースクールと本会議に参加し、研究成果のポスター発表と海外の研究者との交流をしてきました。今回の会議ではトポロジカル物質科学を専門としていない研究者も多く、異分野交流をする機会を多く持つことができました。そこでの議論を通じて、我々の研究成果にも大変興味を持ってもらうことができ、研究成果を異分野も含めて広く発信することの重要性を再認識しました。また、私の発表内容で着目している、磁性トポロジカル絶縁体、ワイル半金属、ノーダルライン半金属といった物質群の STM や ARPES を用いた実験を行なっている研究者と議論する機会もありました。トポロジカル応答の実験的観測のために、どのようなことが課題となるかを知ることができたのは大きな収穫となりました。このような交流を通じて、参加者の方々に日本でトポロジカル物質科学が非常に精力的に研究されていることを知っていただけたのではないかと考えております。

講演では普段あまり聞く機会のない話題に触れることができました。具体的には機械学習、銅酸化物超伝導、フラストレート磁性体に関する多くの講演を聞くことができ、サマースクールにおいて詳しく導入部分を説明していただけたので、最近の話題まで興味深く聞くことができました。また、ねじれた二層グラフェンにおける超伝導に関する講演もありました。この系は私が学生の時に同じ研究室の方が研究していた系で、興味を持って聞くと共に学生時代を思い出し感慨深いものがありました。

今回のサマースクールと本会議を通じて、非常に多くの海外の研究者と交流することができ、多彩な物理の話題に触れることができました。旅費の補助をしてくださった新学術領域と CIFAR の皆様には感謝申し上げます。また、同じく日本から参加し、会議中に行動を共にしてくださった東川さんと村山さんに感謝申し上げます。

Junior Researcher Exchange Program

JREP 報告

Jake Bobowski

ブリティッシュ・コロンビア大学 Senior Instructor

受入研究者：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 教授 (A01)
受入期間　：2018 年 6 月 17 日 (日) ～ 8 月 18 日 (土)

In 2007, I visited the Quantum Materials Laboratory at Kyoto University as a JSPS summer exchange student. While working in Prof. Yoshiteru Maeno's lab, I learned how to grow high-purity single crystals of the exotic superconductor Sr_2RuO_4 using the floating-zone technique in an image furnace. The time that I spent at Kyoto University was one of the highlights of my PhD degree, so I was very excited when Prof. Maeno gave me the opportunity to return to the Quantum Materials Lab via the Junior Researcher Exchange Program (JREP) of the Topological Materials Science (TMS) project.

My two-month visit to Kyoto University (June 18 – August 18, 2018) was both productive and stimulating. I was able to attend many excellent talks from visitors and local students and faculty. In particular, I very much enjoyed the visit of Dr. Clifford Hicks from the Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids. Dr. Hicks presented the most-recent results from the experiments on Sr_2RuO_4 while under uniaxial stress. I was also kindly given the opportunity to present some of my work at a Quantum Materials Colloquium. I discussed the use of loop-gap resonators to measure the temperature dependence of the magnetic penetration depth in superconductors and some of our recent efforts to adapt the loop-gap resonator so that it can be used to probe the electromagnetic properties of a wide variety of other materials [1].

The research goal of my visit to Kyoto was to produce pristine single-crystal samples of Sr_2RuO_4 for the next generation of experiments designed to address the remaining questions regarding the symmetry of its superconducting order parameter, thereby clarifying its topological superconductivity [2, 3]. At the beginning of my visit, graduate student Takuto Miyoshi showed me the Sr_2RuO_4 growth procedures currently used by the Quantum Materials Lab. In early July, Jinkwon Kim, a graduate student from Seoul National University, visited the Kyoto lab for a period of three weeks. I had the pleasure of showing Mr. Kim the floating-zone growth technique and then working with him on the growth of Sr_2RuO_4.

The left-hand image of Fig. 1 shows a photograph of the Cannon Machinery (Former NEC Machinery) Type-E image furnace that we used for our crystal growths. The right-hand image in the figure shows a polycrystalline Sr_2RuO_4 feed rod being transformed into a single crystal by the floating-zone technique. After growth, the superconducting transition of the crystals were characterized by ac susceptibility measurements in a Quantum Design, Inc. Physical Property Measurement System (PPMS) with an Adiabatic Demagnetization Refrigerator (ADR) option which allows one to reach a base temperature of 140 mK [4].

Figure 2 shows the real and imaginary parts of the ac susceptibility of one of the best crystals produced during my time in the Quantum Materials Lab. The real part of the susceptibility shows the diamagnetic response of the superconducting state and the imaginary part characterizes out-of-phase losses. The onset of superconductivity in this sample occurs at 1.46 K which close to the optimal T_c of 1.51 K [5]. The width of the superconducting transition is very narrow (18 mK) which indicates that the sample is homogeneous and of high-purity [6]. The best samples grown during my stay at Quantum Materials Lab will be used in important experiments that aim to clarify the nature of the topological superconducting state in Sr_2RuO_4. These experiments will be conducted at Kyoto University and at the institutions of distinguished collaborators.

Finally, I would like to take this opportunity to thank Prof. Maeno and the rest of the Quantum Materials Laboratory for being such amazing hosts during my stay at Kyoto University. It was a truly wonderful opportunity for me to work on an important research project in a world-class laboratory. It was great to see some familiar faces and to interact with the current students and post docs. Everyone was very gracious and eager to provide help when needed which made my stay enjoyable and productive. ありがとうございました。

[1] J. Bobowski and A. P. Clements, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **65**, 2132 (2017).
[2] Y. Maeno *et al*., J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 011009 (2012).
[3] A. P. Mackenzie et al., NPJ Quantum Mater. **2**, 40 (2017).
[4] S. Yonezawa *et al*., Rev. Sci. Instrum. **86**, 093903 (2015).
[5] Z. Q. Mao *et al*., Mater. Res. Bull. **35**, 1813 (2000).
[6] J. Bobowski *et al*., Condens. Matter **2019**, 4, 6.

Bobowski 博士は約 10 年前に文科省のプログラムで大学院生として当研究室に滞在され、超伝導酸化物の単結晶育成で大いに才能を発揮されました。最近、カナダでの共同研究に当時彼の育成した単結晶を使いたいという連絡を受けて交流が再開し、今回の招へいに至りました。

Sr_2RuO_4 の超伝導性対称性についてはスピン三重項カイラル *p* 波のトポロジカル超伝導状態を示す強い実験的証拠があるものの、それでは説明できない顕著な実験結果もあり、超伝導性の完全解明に向けての努力が続いています。数年前から、新しいタイプのピエゾ素子一軸圧装置の開発によるフェルミ面と超伝導性の制御、微細加工試料やトンネル効果の実験の進展などにより、研究は明らかに新しい局面を迎えて活性化しています。これらの研究の遂行に必須となるのは、究極の高品質で、なおかつ大型の Sr_2RuO_4 の超伝導単結晶です。そこで Bobowski 博士に再来日いただき、2 か月間集中して、単結晶育成法のさらなる改良に取り組んでいただきました。

彼の職人技ともいうべき単結晶育成のおかげで成果は目覚ましく、今回育成の単結晶試料は、今後の多くの研究に使用されることになります。このような目的・事情もあり、彼のセミナーは最近の成果である誘電率測定の新しい装置についてしていただきました。また、滞在中の成果についての発表もしていただきました。さらに Bobowski 博士には、関連の新超伝導体探索にも取り組んでいただきました。近いうちに是非、再来日していただければ、と期待しています。

Figure 1: (Left) Photograph of the image furnace used for the floating-zone growth of Sr_2RuO_4. (Right) Growth of single-crystal Sr_2RuO_4. The top of the image shows a polycrystal feed rod, the middle is the molten region within the focus of the furnace at approximately 2200 K, and the bottom is the single crystal. The width of the intervals on the scale bar is 2 mm.

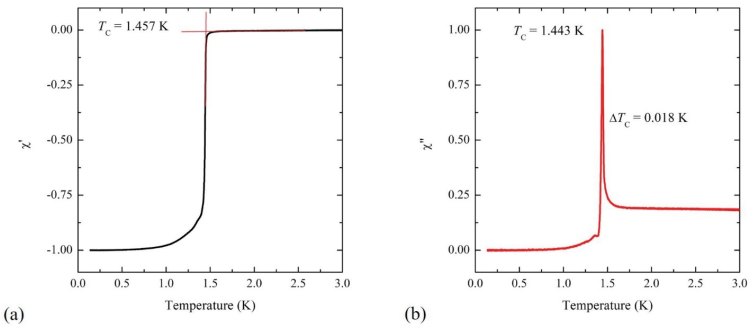


Figure 2: (a) The real and (b) imaginary parts of the ac susceptibility of a high-quality single crystal of Sr_2RuO_4 measured as a function of temperature from 140 mK to 3 K[6].

Junior Researcher Exchange Program

JREP 報告

高三 和晃

京都大学 理学研究科 博士課程３年

指導教員：京都大学 大学院理学研究科 川上 則雄 教授 (D01)
受入研究者：カリフォルニア大学 Berkeley 校 Joel Moore 教授
受入期間：2018 年 7 月 1 日 (日) ～ 7 月 20 日 (金)

この度 JREP を利用して、2018 年 7 月 1 日から 7 月 20 日の間、カリフォルニア大学 Berkeley 校の Joel Moore 教授のグループに滞在し、最終週には近隣のサンフランシスコで開催された国際会議 International Conference on Magnetism に参加しましたので、これについてご報告します。

私は京都大学凝縮系理論グループに所属し、主に、物質に強いレーザー光や電場を印加して生じる非平衡現象、及びそれを利用した物性制御に関心を持って研究しています。物質中の非平衡現象研究は、実験技術の発達と理論手法の深化に支えられ現在世界中で精力的に進められています。近年急速に発展するトピックのうち、私が特に注目しているものに「非線形光学現象」と「電子系の流体力学」があります。これらについてご紹介します。

非線形光学現象とは、強い光を照射された物質が、電場 (E) について非線形な (E^2, E^3 などを含む) 電流や分極を示す現象です。この現象は様々な光学デバイスや線形分光を超えた " 非線形分光 " にすでに応用されてきましたが、実は近年大きな進展がありました。それは、ワイル半金属として知られる TaAs における巨大な第二次高調波発生 (SHG) の発見です [1]。TaAs が示す SHG は、これまで発見されている物質の中で最大であり、その起源は波動関数のトポロジーに起因していることが理論的に示唆されています。電場によって極端に駆動された非平衡状態の応答に、トポロジカル物性が顔を出すのは興味深く、物質の非平衡現象を探る糸口となることが期待されます。

電子系の流体力学とは、読んで字の如く、相互作用する電子系を粗視化して得られる流体力学です。流体力学は、流れを伴う非平衡状態を直接扱うことに成功している稀有な理論手法であり、これが固体電子物性に応用できるならば、物質中の非平衡現象の理解に大変有用であると考えられます。しかし、これまで物質中の電子系には、不純物などの散逸源が多数存在するため、多くの場合、流体力学は適用できないと考えられてきました。しかし、近年の実験技術の進歩によりクリーンな固体系が実現され、流体力学で記述される " 粘性効果 "(例えば、系の端に近づくほど " 壁 " に擦れて流れが遅くなる等) が実験的に観測され、複数の実験グループによって報告されています [2]。このような実験に刺激され、理論研究も盛んに行われています [3]。

この双方のトピックで、世界をリードする成果を挙げているのが、カリフォルニア大学バークレー校の Joel Moore 教授グループです。Moore 教授は「トポロジカル絶縁体」という名前を付けることになった論文 [4] でも有名ですが、最近は非平衡現象にも興味を持たれています。私は、彼らの最新の成果を教わり、それを習得し、自身も「非線形光学現象」・「電子系の流体力学」の研究を行いたい、特にトポロジカル物質との関係を議論したいと考え、JREP プログラムを利用して彼らのグループに 2 週間ほど滞在させてもらいました。

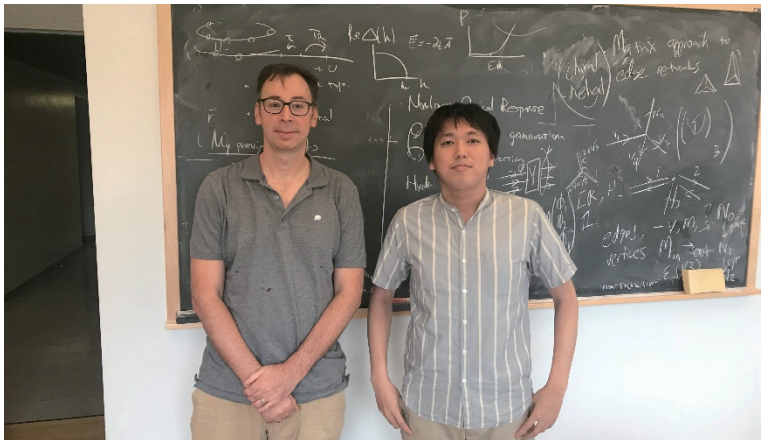
生憎、京都の蒸し暑い夏とは大違いのバークレーの気候に適応出来ず、滞在序盤に体調を崩してしまいましたが、非線形光学・流体力学それぞれに関して成果の得られる滞在になりました。まず滞

在初日に Moore 教授と議論して取り組めそうな問題を検討し、以後 PD の森本高裕さんや Thomas Scaffidi さんと議論を重ねました。議論によって、研究に出来そうなアイデアが複数得られたので、帰国した現在も計算・議論を継続している所です。共同研究自体は、Skype 等のお陰で離れていても出来ますが、やはり研究のスタートを切るには会って議論するのが一番だと改めて感じました。また、滞在後半で自身の最近の研究内容についてセミナーをさせていただいた他、Moore 教授のグループ以外にも Norman Yao 氏と時間結晶に関する最近の我々の研究 [5] に関しても議論することが出来て、大変充実した滞在になりました。

また滞在の最終週には、近郊で開催された International Conference on Magnetism (ICM) に参加して、最近の研究成果 [6] について口頭発表を行った他、多くの研究者と議論を行いました。例えば、理論家の F. C. Zhang 氏と、氏が最近取り組んでいる相互作用のある Kitaev 鎖に関して量子可積分系との関連を、実験家の Jingbo Qi 氏と自身のレーザー誘起トポロジカル超伝導 [7] の実験実現の可能性を議論することが出来ました。ICM のような大きな国際会議では、トークを聞く以上に、新たな知り合いを作り共同研究の芽を育むことが大事だということを再認識しました。トークも非常に興味深いものが多く、2 層積層した 2 次元磁性体 CrI_3 の磁性が電場効果 (≠キャリア・ドープ効果) でスイッチされるという実験 [8] の話や、トポロジカル近藤絶縁体として知られる SmB_6 の表面状態のバンド構造が量子振動などで得られているバルクのバンド構造が整合しているという ARPES の結果の報告 [9] が印象に残りました。特に SmB_6 及び、類似した物質である YbB_{12} における、量子振動などの「近藤 " 絶縁体 " における " フェルミ面 " 効果」に関するさまざまな結果は、全てを整合的に理解するのが大変難しく、理論・実験双方で多くの議論を呼んでおり今後の展開が非常に気になる状況であると感じました。

最後に、受け入れて頂いた Moore 教授をはじめとするカリフォルニア大学バークレー校物性理論グループの皆さまにお礼申し上げます。そして、本滞在のための多大なサポートをしていただいた若手研究者派遣・招聘プログラムに感謝いたします。

[1] L. Wu et al., Nat. Phys. **13**, 350 (2017).
[2] 例えば , P. J. W. Moll et al., Science **351**, 1061 (2016).
[3] T. Scaffidi et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 226601 (2017).
[4] J. E. Moore and L. Balents, Phys. Rev. B **75**, 121306(R) (2007).
[5] K. Mizuta, K. Takasan, M. Nakagawa, and N. Kawakami, Phys. Rev. Lett. **121**, 093001 (2018).
[6] K. Takasan and M. Sato, arXiv:1802.04311.
[7] K. Takasan, A. Daido, N. Kawakami, and Y. Yanase, Phys. Rev. B **95**, 134508 (2017).
[8] B. Huang et al., Nat. Nano. **13**, 544–548 (2018)
[9] Y. Ohtsubo et al., arXiv:1803.09433.



Moore 教授と議論後の黒板前にて。

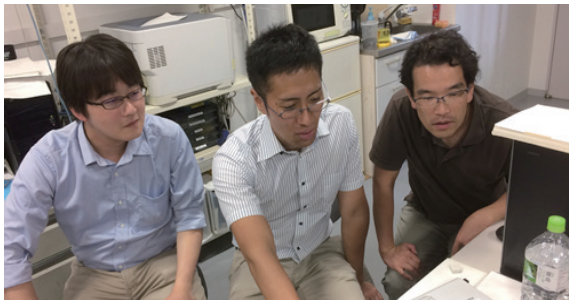
Junior Researcher Exchange Program

JREP 報告

若村 太郎

日本学術振興会 海外特別研究員

所属　　：パリ南大学 固体物理学研究所
受入研究者：村木 康二 グループリーダ
　　NTT 物性科学基礎研究所 (C01)
受入期間　：2018 年 8 月 18 日（土）～8 月 24 日（金）



Discussion in Tohoku University with
Prof. Kohda (right), Dr. Karube (left) and me (center).

Fortunately I had a great opportunity to stay in Japan financially supported by this Topological Material Science grant. During my stay I visited to three groups including Prof. Nitta and Prof. Kohda group in Tohoku University, Quantum solid state physics group in the NTT basic research lab led by Dr. Muraki and Prof. Fujisawa group in Tokyo Institute of Technology. There I had a chance to give a seminar about my recent research results on spin-orbit interaction (SOI) induced in graphene by transition-metal dichalcogenides (TMDs). In all three groups we had very exciting discussions: In Tohoku, Prof. Nitta and Prof. Kohda are specialists of SOI. We intensively discussed a new type of SOI induced in graphene on TMDs, and also differences in SOI in conventional two-dimensional electron gas and in graphene. Through the discussions I recognized again potentialities of graphene and these discussions gave strong motivations for future work. Dr. Karube then introduced to me his recent experimental results about spin-transfer-torque (STT) ferromagnetic resonance (FMR) driven by nitridized Copper. The data are really interesting and I had a fruitful time to exchange our idea about the topic.

In the NTT lab, I have benefitted from discussions with many experienced researchers working on different topics. They have great expertise and experimental skills in each field, and I learned a lot of new things from the discussions with them. Dr. Hashisaka (Hashisaka-san) carefully arranged my schedule, and I could visit the big cleanrooms and experimental rooms. A huge number of experimental equipments for fabrication and measurements are absolutely incredible, and it was lucky to me that I could find the rich research environment in the NTT basic research lab.

Visit to Prof. Fujisawa group was an impressive experience for me. After giving a seminar in the morning, all students in the group explained about their work to me one by one. From their attitude I could easily realize their strong enthusiasm toward research. Their explanations were overall clear and easily understandable. The relaxed atmosphere was also an important point to describe the group, which is given by Prof. Fujisawa and Dr. Hata. The university campus is located in the downtown, so I enjoyed nice lunch in the restaurant.

I should also note that after discussions in the lab I really enjoyed going drinking with my colleagues. In Tohoku, not only Prof. Nitta, Prof. Kohda and Dr. Karube, some of my colleagues who worked in Paris also joined the drinking party. In NTT, people in the Quantum solid state physics group got together and we had amazing time in a nice Izakaya in Atsugi. I really thank people in the groups for giving me warm welcome.

Finally I am very grateful to Dr. Hashisaka (Hashisaka-san) and Dr. Muraki (Muraki-san) for giving me a good chance to visit many groups in Japan, and to learn new topics that I did not know through the discussions. This stay in Japan is a memorable experience, and I would like to keep a good relationships with people that I met for the future. I also sincerely acknowledge this Junior Researcher Exchange program for financial support.

Junior Researcher Exchange Program
JREP 報告

池田 敦俊

京都大学 大学院理学研究科 博士課程 2 年

指導教員　：京都大学 大学院理学研究科 前野 悦輝 教授 (A01)
受入研究者：Hubertus Luetkens グループリーダー、ポール・シェラー研究所、
Manfred Sigrist 教授、スイス連邦工科大学チューリッヒ校

受入期間　：2018 年 10 月 28 日（日）～ 11 月 01 日（木）、
2018 年 11 月 01 日（木）～ 11 月 05 日（月）

ポール・シェラー研究所のバルク μSR グループと共同で、平成 30 年 10 月 28 日から 11 月 1 日までの 5 日間「逆ペロブスカイト酸化物超伝導体 $Sr_{3-x}SnO$ のミューオンスピン回転測定」を行いました。その後 5 日までチューリッヒ工科大学にある Manfred Sigrist 教授の研究室を訪ねて議論を交わしました。2 日には研究発表をさせていただき、$Sr_{3-x}SnO$ について理論と実験の両面から理解を深めました。

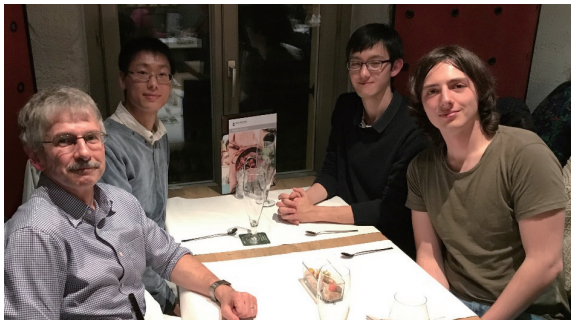
$Sr_{3-x}SnO$ は私たちが 2016 年に発見した新しい超伝導体です。理論的にはトポロジカル超伝導の可能性が指摘されており、これからの実験による詳しい検証が待たれています。この滞在では、$Sr_{3-x}SnO$ の超伝導状態をミューオンスピン回転という手法を用いて初めて測定しました。

試料は京都で合成し、プラスチックの袋と石英管に封入してポール・シェラー研究所に持っていきました。磁化測定によると試料の中で超伝導になる体積分率は 10% 程度と見積もられていましたが、ミューオンスピン回転実験ではバルク超伝導を示す大きな転移が観測でき、この測定手法の強力さを思い知りました。試料の取り付けや測定シーケンスの構成などのあらゆる場面で研究所の Zurab Guguchia さんにご協力いただきました。わずか数日の実験でしたが、興味深い結果が次々と出てくる実り多い滞在でした。

実験後はチューリッヒ工科大学を訪ね、セミナーという形で $Sr_{3-x}SnO$ について発表しました。理論を研究している方々が主に聞きに来られましたが、理論的背景だけでなく実験面についてもいくつか質問をいただき、この物質に興味を持ってもらえたようで安心しました。光栄にも Sigrist 先生の先生にも聞いていただけました。セミナー以外の時間は、Jose Lado さんに案内してもらいながら、ほかの方たちの研究について個人的に聞かせていただきました。「ひとりにつき一度は良い質問ができるよう頑張ろう」という気持ちで臨み、皆さんの研究をそれなりに理解できたのではないかと思います。

最後に、授業や博士論文公聴会でお忙しい中セミナーの機会を与えてくださった Sigrist 先生に感謝いたします。研究を紹介してくださった多くの人や、その方々との議論の場を設けてくださった Lado さんのお力で有意義な滞在となりました。今回共同実験を行った Guguchia さんをはじめとする Luetkens 先生のグループとはこれからも実験や議論を続けるつもりです。この滞在を補助してくださった若手研究者派遣・招聘プログラムにお礼申し上げます。

京都で一緒に $Sr_{3-x}SnO$ の超伝導を発見した Mohamed Oudah さん（左）、共同実験をしてくださった Zurab Guguchia さん（中央）と私（右）。



チューリッヒ工科大学でお世話になった Manfred Sigrist 先生（左手前）、私（左奥）、学生のケビンさん（右奥）と研究員の Jose Lado さん（右手前）。

トポロジカル物質界面における特異現象

A01 羽部 哲朗

北海道大学 工学研究科

受入研究者：A01 浅野 泰寛

トポロジカル物質が共通してもつ特徴のひとつに、バルクーエッジ対応があります。トポロジカル物質は、物質内部にある電子の量子力学的な状態がトポロジカル数と呼ばれる整数によって特徴付けられます。シリコンなどよく知られた半導体ではトポロジカル数は０となりますが、トポロジカル物質では０でない値を取ります。これがトポロジカル数のバルク（内部）の特徴です。一方、トポロジカル物質は物質表面やほかの物質との接合界面に特別な電子状態をもちます。この電子状態の数は、トポロジカル数と対応しておりトポロジカル数が変わらない限り変化しません。この関係は、バルクーエッジ対応と呼ばれています。

バルクーエッジ対応はトポロジカル物質の基本的な性質である一方、応用上も重要です。トポロジカル物資を応用する際には、電極や基盤など様々な物質との界面を考える必要があります。

トポロジカル物質は新しく発見された物質群であり、現在も新奇なトポロジカル物質に関する理論的提案や実験的な確認が続けられています。本新学術領域において、これらのトポロジカル物質と他の物質の界面で生じる新奇現象を理論的に研究していく予定です。

また、受け入れ研究者である浅野准教授はトポロジカル超伝導体を含め、超伝導に関して多くの研究実績を有しています。したがって、特にトポロジカル超伝導に関して協力を得ながら研究を進めていきたいと考えています。

はべ・てつろう

２０１４年北海道大学大学院後期博士課程修了 博士（工学）。２０１８年４月より北海道大学（工学研究科）ポスドク研究員。

受入研究者からひとこと：

羽部さんは、トポロジカル物質だけでなく、層状物資に関する第一原理計算などの研究経験があります。それらの知見を本領域での研究に生かして、活躍してほしいと考えています。

PD Introduction

PD 紹介

D01 橋本 樹

京都大学 基礎物理学研究所

受入研究者：D01 佐藤 昌利

はしもと・たつき

1990 年滋賀県生まれ。2018 年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士（工学）、トゥエンテ大学 PhD コース修了 PhD。オランダ留学中の下宿先に猫がよく遊びに来ていた。そこで猫に目覚めるが、いまだに飼うことを決断できていない。尊敬する人は本領域ポスドクの田村駿。

大学院生時代には本新学術領域研究の前身にあたる新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系における量子現象」において、若手相互滞在や CIFAR への派遣等、様々な機会を与えていただきました。また、後述の通り、これまでの私の研究は本新学術領域研究や前身の同研究と共同で行ったものが多くあります。短期間ではありますが、ポスドクとしてこの新学術領域研究に再び関わることができ、とてもうれしく思っています。

2012 年の研究室配属以来、トポロジカル物質における超伝導について理論的な研究を行ってきました。研究を始めたころは、トポロジカル絶縁体に電子ドープした系である $Cu_xBi_2Se_3$ のポイントコンタクトの実験が行われ、この物質が非従来型超伝導体の候補物質として注目され始めたころでした。この $Cu_xBi_2Se_3$ の超伝導を理解したいと思ったのが「トポロジカル物質」の研究を始めるきっかけです。具体的には、結晶の対称性から許される超伝導状態を議論し、そのバルク電子特性（電子比熱とスピン帯磁率の温度依存性）を数値計算により明らかにしました。$Cu_xBi_2Se_3$ は現在、ネマティック超伝導状態という、非従来型超伝導状態であることが複数の実験で指摘されています。我々のスピン帯磁率の計算結果は本新学術領域研究の鄭先生と安藤先生のグループの核磁気共鳴の実験結果とも比較され、$Cu_xBi_2Se_3$ がネマティック超伝導であることを示す証拠の一つになっています。

その後、大学院生時代を通してトポロジカル結晶絶縁体、ディラック半金属などの新しいトポロジカル物質の超伝導状態についても議論してきました。我々の研究でわかってきたより一般的なことは、トポロジカル物質特有のスピンや軌道の構造が「ある条件」の下で非従来型超伝導状態を安定化させるということです。これはつまり、トポロジカル物質は非従来型超伝導物質を探す上でのよい指針となるということを意味します。実際、これまで 30 近くのトポロジカル物質が超伝導転移することがわかっており、これらのうちいくつかの物質では非従来型超伝導状態を示唆する実験結果が報告されています。しかし、実は「ある条件」とは、電子がクーパー対を組む際、異なる軌道に属する電子間の引力が同じ軌道に属する電子間の引力に勝っているということです。この条件がどれほど現実的か、また、これまで実験で観測されているトポロジカル物質における非従来型超伝導とどれだけ関連があるのか、はっきりしたことはわかっていません。本新学術領域研究を通してこの点を少しずつでも明らかにしていければと思っています。

受入研究者からひとこと：

橋本さんは、トポロジカル絶縁体やワイル・ディラック半金属などのトポロジカル物質がどのようなトポロジカル超伝導性を示すかという問題に学生の頃から取り組んできました。即戦力としての活躍も期待していますが、異なる分野の理論家が集まる場所で新しい刺激を受けてもらえればと思います。

2018 年度開催▽研究会報告

● 領域研究会 / 公募キックオフ研究会　● 集中連携研究会　●アライアンス WS

●第 4 回 TMS 領域研究会 / The Fourth Annual Meeting(TMS2019)

2019 年 1 月 22 日 -24 日（名古屋大学 坂田・平田ホール）

2019 年 1 月 22 日から 24 日、第 4 回領域研究会が名古屋大学理学南館・坂田平田ホールにおいて開催された。国内外から約 150 名の参加者のもと、3 日間にわたり活発な議論が行われた。プログラムはオーラル 42 件、ポスター 79 件であり、本学術領域研究内部のアクティビティに加えて、領域外からも数名の招待講演を含めた会議であった。

1 日目冒頭に矢田（名大）から研究会全般的な注意事項などの説明が行われ、午前 10 時半からスタートした。最初に川上（領域代表）より領域の説明と最新の成果報告のまとめがなされた。A 班の最近の成果として Kitaev-Honeycomb 格子の実験に関する成果が紹介された。B 班からは Dirac コーンの制御による異常ホール効果関する成果が紹介された。また新しいノーダル半金属の成果、トポロジカル超伝導の実験などが紹介された。C 班の成果としては量子ホール系のカイラルエッジ状態の実験、量子スポンホール系のヘリカルエッジ状態の実験が紹介された。D 班の成果としては、高スピン状態のトポロジカル超伝導、重い電子系からできる超格子の超伝導に関する成果などが紹介された。また宇宙物理との融合研究、非エルミート系の研究も紹介された。さらに採択されている公募研究についても紹介された。領域の様々な活動が紹介されて、12 月 4-7 日に国際会議が京大で開催されることもアナウンスされた。

1 日目午前のセッションはトポロジカル超伝導に関するもので、佐藤（D01 分担）が高スピントポロジカル超伝導の理論を発表した。高エネルギー物理に登場するローレンツ普遍性を持つマヨラナフェルミオンと超伝導に現れるマヨラナフェルミオンの持つ根本的な違いが紹介された。マヨラナフェルミオンの異方的磁気応答と結晶の対称性が紹介され、高スピンの超伝導での Octupole 磁気応答が期待される候補物質として、ハーフホイスラー超伝導体が紹介された。米澤（A01 京大）はドープしたトポロジカル絶縁体のこれまでの研究を紹介した後、ネマティック超伝導の観点から Sr_2RuO_4 超伝導の回転磁場下応答を報告し、中間の磁場領域でネマティック超伝導の可能性を示唆した。Sr_2RuO_4 は研究の歴史が長い超伝導体であるだけにこの物質の奥深さがうかがえる。

1 日目午後前半は、トポロジカル系の基礎理論に関する発表が 4 件あった。赤城（D02 公募）は、機械学習について説明した後、厳密対角化による 1 次元量子スピン系への応用を報告した。塩崎（D01 連携）は Dirac ハミルトニアンの点群（一般）による分類とトポロジカルな構造について報告した。手塚（D01 連携）は Sachdev-Ye-Kitaev モデルを紹介し、マヨラナフェルミオンの多体系のモデルで、量子カオス的スペクトルが現れることを紹介した。小布施（D04 公募）は PT 対称性を持つ非エルミート系の量子 walk に関する発表を行い、量子光学系の実験についても紹介した。

1 日目午後・後半のセッションは、トポロジカル超伝導に関するもので、4 件の発表があった。浅野（A01 分担）は、拡散伝導領域と異方的超伝導体の異常近接効果について説明し、表面アンドレーエフ束縛状態と指数定理について議論した。また異常近接効果の担い手である奇周波数クーパー対の示す性質について説明した。藤本（A01 分担）は、スピン軌道相互作用の強い奇パリティ超伝導体において、フェルミ面の変化によるネマティック状態からカイラル状態への超伝導転移の解析に基づき、カイラル・ヒッグズモードの存在を指摘した。候補物質としては $U_{1-x}ThBe_{13}$ が紹介された。近藤（物性研）は、鉄系超伝導 $FeTe_{1-x}Se_x$ におけるトポロジカル超伝導探索の実験を報告した。レーザースピン光電子分光によりディラックコーンの存在、表面に局在したトポロジカル超伝導の可能性を示した。中村（C01 公募）は 2 次元電子ガス・超伝導体接合において、スピン注入の実験で電流の減少と、スピンホール効果によるスピン蓄積効果の存在を指摘した。

1 日目午後の最後はポスター Preview と Poster 発表が行われ、39 件の発表 (理論 25 件実験 14 件) がされた。大学院生を含む多くの若手研究者の発表が活発になされた。

2 日目午前前半のセッションはトポロジカル半金属に関するものであった。相馬（B01 連携）はトポロジカル半金属の光電子分光の成果を紹介した。Double ワイルフェルミオンともよばれる CoSi で、カイラルフェルミオンが存在して Chern 数が 2 になっていることが報告された。また表面状態の観測も報告された。村川（B01 公募）は、ワイル半金属 NbAs の磁場下での量子振動の実験を報告した。2 つのワイル点の距離が短いことに起因する干渉効果が磁気振動に現れることを示した。また山影（D03 公募）は、線状ノードのあるトポロジカル半金属に関する理論の現状を紹介した。またスピン軌道相互作用によりトポロジカル絶縁体が誘起される場合があることを指摘した。鈴木（D03 公募）は、反強磁性体の異常ホール効果の理論を発表した。Mn_3Sn における多くのワイル点が異常ホール効果にどのように寄与するのかが示された。また Mn_3GaN などの物質での Octupole による異常ホール効果を報告した。岡本（名大）はノーダルライン半金属候補物質の合成と物性（CaAgP,CaAgAs）に関する実験の現状を紹介した。CaAgAs におけるトーラス状のフェルミ面、Ta_4SiTe_4 における高い熱電特性を報告し、1 次元ディラック半金属が熱電材料として有望であることが指摘された。

2 日目午前後半のセッションは様々な分野からのトポロジカル量子現象と関連した融合分野の講演が行われた。関（理研）は、3 次元磁性体におけるスカーミオン構造がひも状の構造になり、励起の伝搬特性に非相反性が現れることを紹介した。また励起の伝搬距離が長距離におよぶことを実験的に明らかにした。石原（C01 公募）は、2 次元誘電体フォトニック結晶によるトポロジカル状態についての実験の報告を行い、誘電体多層膜におけるシミュレーション結果について紹介した。中（名大）は高エネルギー物理の実験研究者であり、QCD と CP 対称性、宇宙物理にアクシオンがダークマターを共通テーマとした素粒子 - 物質 - 宇宙をまたぐ連携研究の現状を紹介した。アクシオ観測を目指したジョセフソン接合の実験も紹介された。

2 日目午後前半の講演は量子スピン系におけるトポロジカル量子状態に関するセッションであった。Kitaev モデルに基づく量子スピン系のスピン液体状態の研究は、特に進展の著しい分野である。松田 (A01 分担) は、キタエフ量子スピン液体におけるマヨラナ・フェルミオンと半整数量子熱ホール効果についての報告を行った。半整数量子熱ホール効果はマヨラナ・フェルミオンのもつ特徴をとらえたもので画期的な実験成果である。高木（A01 分担）は、スピン・軌道がエンタングルした量子液体の実現可能性が指摘されている $H_3LiIr_2O_6$ での実験の現状を報告した。宇田川（A01 分担）は、Kitaev スピン液体における Vison 励起と動的磁気相関関数の厳密解について発表した。那須（D02 公募）は、キタエフ模型における磁場効果について発表した。

2 日目午後後半は、トポロジカル系の理論あるいは物質設計に関する発表が 3 件行われた。初貝（筑波大）はバルク・エッジ対応に関する理論の発表を行った。エッジ状態をもつ様々な量子系を紹介し、量子ホール系から始まった概念が量子系だけでなく古典系にまで発展しているという興味深い内容であった。山内（D03 公募）は第一原理計算に基づいた機能性トポロジカル絶縁体多層膜の人工設計について発表した。表面に形成されるバンドの Dirac 点がバンドギャップに入る条件について紹介された。井手上 (C01 公募) は、遷移金属ダイカルコゲナイドのナノ構造体を対象としたファンデアワールス結晶における光電流効果ついての実験を報告した。

この後、ポスタープレビューとポスター発表が行われ、38 件の発表（理論 24 件実験 14 件）がなされた。昨日と同様に多くの若手研究者の発表が活発になされた。

2 日目の夕方は情報交換会が名大内のレストラン花の木で開催された。情報交換会には 120 名ほどが参加し、参加者の間ではトポロジカル物質・量子現象の研究に関する活発な情報交換・交流が行われたことに加え、各種賞の受賞者の紹介、およびポスタープレビュー賞、ポスター賞の授賞式が行われた。ポスター及びプレビューの賞の審査は 8 名で行い 好田 (C01 分担)、水島（D01 分担）、新田（D01 分担）の 3 名による　集計・および最終決定を行った。ベストポスタープレビュー賞は、高根 大地（東北大）、ポスタープレビュー賞は、渡邉 育子 (東北大)、藤本 和也 (東大)、濱本 敬大 (東大) が受賞した。ポスター賞金賞は、藤代 有絵子 (東大)、銀賞は、山田 林介 (東大)、川畑 幸平（東大）、銅賞は道下 佳寛 (京大)， Chandrasekhar CHATTERJEE（慶応大）, Chaojing LIN(東工大) となった。

3 日目午前前半のセッションは超伝導に関するものであり、田仲（B01 分担）は、スピン 3 重項奇周波数ペアによる異常近接効果に与えるスピン軌道相互作用の理論を発表し、スピン 1 重項 d 波超伝導体に基づく異常近接効果が提案した。星野（埼玉大）は奇周波数クーパー対がトポロジカル超伝導を特徴づけるものであることを拡張したバルク・エッジ (スペクトラルバルクエッジ対応) から示した。さらに奇周波数ペアに特徴づけられる量子臨界性も示された。高三 (京大) は、レーザー

や直流電場によるトポロジカル相の制御（量子ホール系）の理論、特に光を用いた光誘起超伝導（d 波）など興味ある結果を紹介した。池田（京大）は、最近発見された逆ペロブスカイト酸化物超伝導体に対するミューオンスピン回転実験を報告した。時間反転対称性の破れが存在しないことが確認された。

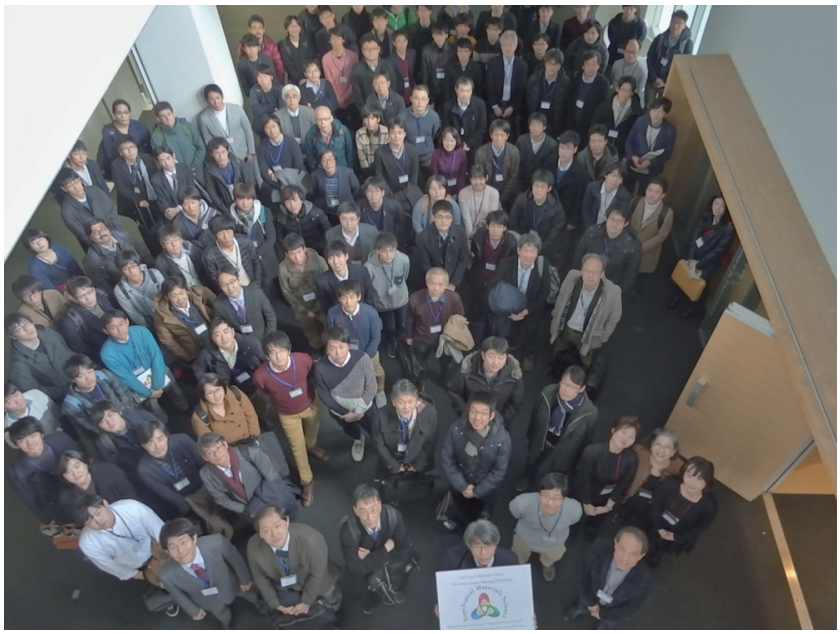
3 日目午前後半のセッションはトポロジカル絶縁体の実験に関するものであった。塚崎（B01 分担）は Fe をドープしたトポロジカル絶縁体 $(Bi,Sb)_2Se_3$ における磁場誘起トポロジカル相転移の実験の報告し、電場誘起の相転移が実現できる可能性を指摘した。吉見（B01 公募）は、トポロジカル結晶絶縁体 $Pb_{1-x}Sn_xTe$ 薄膜の合成と輸送特性について発表した。入江（C01 連携）は、2 次元トポロジカル絶縁体 InAs/GaSb 複合量子井戸における電場誘起相転移について報告した。藤澤（C01 代表）は、非平衡の量子ホール系の実験として、エアブリッジ型ゲートによる量子ホール領域の量子アンチドットの実験に関して報告を行った。好田（C01 分担）は Rashba　2 次元系におけるスピン軌道ロッキングを用いた磁場下の実験及びスピン偏極制御に関する実験の報告を行った。

3 日目午後前半のセッションはトポロジカル系の基礎に関するものであった。西田（D01 分担）は 4 次元時空 [(3+1) 次元空間] におけるボゾンとフェルミオンの双対性に関する議論をおこなった。ディラックフェルミオンがスカラーボゾンとダイオンのペアに対応するということが報告された。新田（D01 分担）は中性子性におけるトポロカル相を議論して、スピン 3 重項超伝流動状態の渦構造に関する理論を発表した。古川（東大）は多成分ボース気体の量子ホール状態に実空間エンタングルメント・スペクトルについて報告し、エッジ状態がスピンと電荷モードに分離することを指摘した。江澤（C01 分担）からは、非エルミート高次トポロジカル系を電気回路により実現するという全く新しい提案がなされた。

この研究会最後のセッションである 3 日目午後後半はトポロジカル超伝導に関するセッションであった。柏谷（B01 分担）は、磁性ドープしたトポロジカル絶縁体上のジョセフソン接合の実験について報告した。マイクロ波印加のもとでのシャピロステップの測定結果が示された。花栗（理研）はトポロジカル超伝導体 Fe(Se,Te) におけるゼロエネルギー渦糸束縛状態を STS で観測した実験を報告した。渦糸に束縛された零エネルギー状態が高分解能の STS で詳細に観測され、マヨラナフェルミオンとの関係が議論された。永長（B01 連携）は、反転対称性の破れた超伝導体における Edelstein 効果と超伝導スピン流の理論について発表を行った。また 2 本の Kitaev チェイン超伝導モデルにおけるソリトン励起、異常量子ホール・超伝導体接合におけるカイラルマヨラナフェルミオンによる輸送現象の理論を紹介した。最後に川上（領域代表）が研究会全体を総括し、会議のセッションはすべて完了した。

1 月半ばの寒さに加えて、極めて多忙な時期での研究会ではあったが、研究会の最後まで多くの出席者が参加し、活発な議論を行い、当該領域の研究 Activity の高さを感じさせる有意義な会であった。個人的な印象としては、量子スピン系のマヨラナ・フェルミオン、非エルミート系、トポロジカル超伝導などが、特に今後の新展開を期待させる報告内容であった。運営に携わっていただいた名古屋大関係者、京大関係者に深く感謝いたします。

(文責：田仲 由喜夫、柏谷 聡)



口頭発表プログラム

2019 年 1 月 22 日 (火)

10:30 -10:40 Opening

10:40 22AM-1 **領域成果** **川上 則雄** (30)

11:10 -12:00 トポロジカル超伝導 I [座長 : 柏谷]

11:10 22AM-2 High spin topological superconductivity **佐藤 昌利** (30)

11:40 22AM-3 Nematic superconducting phenomena in topological superconductors **米澤 進吾** (20)

14:00-15:00 トポロジカル系の基礎理論 I [座長 : 山影]

14:00 22PM-1 Detection of Phase Transitions inQuantum Spin Chains via Unsupervised Machine Learning **赤城 裕** (15)

14:15 22PM-2 Dirac Hamiltonian and point group symmetry **塩崎 謙** (15)

14:30 22PM-3 The Sachdev-Ye-Kitaev model, topological phases and quantum Lyapunov spectrum **手塚 真樹** (15)

14:45 22PM-4 Topological Phases on Non-Hermitian systems with PT symmetry: Quantum Walk Approach **小布施 秀明** (15)

15:30-16:40 トポロジカル超伝導 II [座長 : 川上]

15:30 22PM-5 Flat Andreev bound states andodd-frequency Cooper pairs **浅野 泰寛** (20)

15:50 22PM-6 Chiral Higgs Mode in Nematic Superconductors **藤本 聡** (20)

16:10 22PM-7 Observation of Topological Superconductivity in Iron-based Superconductor **近藤 猛** (15)

16:25 22PM-8 Superconductivity in 2D electron systems under magnetic fields and spin accumulation **中村 壮智** (15)

16:40-17:20 ポスタープレヴュー A (40)

17:20-18:40 ポスターセッション A (80)

2019 年 1 月 23 日 (水)

09:00-10:30 トポロジカル半金属 [座長 : 藤澤]

09:00 23AM-1 ARPES Observation of Various Types of New Topological Semimetals **相馬 清吾** (20)

09:20 23AM-2 Angular dependent non-trivial phase in qunatum oscillations in Weyl semimetal NbAs **村川 寛** (15)

09:35 23AM-3 Nodal-Line Semimetals and Topological Insulators **山影 相** (15)

09:50 23AM-4 Systematic study of anomalous Hall effect in antiferromagnet **鈴木 通人** (15)

10:05 23AM-5 ノーダルライン半金属候補物質の合成と物性 **岡本 佳比古** (25)

11:00 -12:00 異分野融合 [座長 : 川口]

11:00 23AM-6 Coherent signal transfer along skyrmion strings **関 真一郎** (25)

11:25 23AM-7 Topological States in 1D and 2D photonic crystals **石原 照也** (15)

11:40 23AM-7 Collaboration between particles, materials and the universe connected by topology **中 竜大** (20)

13:50-15:10 量子スピン系 [座長 : 前野]

13:50 23PM-1 Majorana fermions and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev quantum spin liquid **松田 祐司** (25)

14:15 23PM-2 Spin-Orbital Entangled Quantum liquid in $H_3LiIr_2O_6$ **高木 英典** (25)

14:40 23PM-3 Zero-energy Majorana in Kitaev spin liquid **宇田川 将文** (15)

14:55 23PM-4 Magnetic field effect in the Kitaev model **那須 譲治** (15)

15:40-16:35 トポロジカル物質設計・トポロジカル系の理論 [座長 : 田仲]

15:40 23PM-5 Variety of bulk-edge correspondence **初貝 安弘** (25)

16:05 23PM-6 First-Principles Design of Functional Topological Multilayers **山内 邦彦** (15)

16:20 23PM-7 Nonlinear transport in engineered van der Waals crystals **井手上 敏也** (15)

16:35-17:15 ポスタープレヴュー B (40)

17:15-18:35 ポスターセッション B (80)

2019 年 1 月 24 日 (木)

09:00 -10:10 エキゾチック超伝導 [座長 : 柏谷]

09:00 24AM-1 Anomalous proximity effect by spin-triplet odd-frequency pairing **田仲 由喜夫** (20)

09:20 24AM-2 Odd-frequency pairs in chiral-symmetric uperconductors and their quantum criticality **星野 晋太郎** (20)

09:40 24AM-3 Control of Topological Phases with Laser Light and DC Electric Fields: Topological Superconductivity and Quantum Spin Liquid **高三 和晃** (15)

09:55 24AM-4 μSR study on the inverse perovskite oxide superconductor $Sr_{3-x}SnO$ **池田 敦俊** (15)

10:40 -12:00 トポロジカル絶縁体 [座長 : 佐藤宇]

10:40 24AM-5 Magnetic-field-induced topological phase transition in Fe-doped $(Bi,Sb)_2Se_3$ **塚崎 敦** (20)

11:00 24AM-6 Electronic transport properties of topological crystalline insulator $Pb_{1-x}Sn_xTe$ thin films **吉見 龍太郎** (15)

11:15 24AM-7 Electric field driven topological transition in InAs/(In,Ga)Sb composite quantum wells **入江 宏** (15)

11:30 24AM-8 Quantum anti-dot formed with an airbridge gate in the quantum Hall regime **藤澤 利正** (15)

11:45 24AM-9 Spin-momentum locked spin manipulation in a Rashba two-dimensional system **好田 誠** (15)

13:50 -15:00 トポロジカル系の基礎理論 II [座長 : 川口]

13:50 24PM-1 Boson-fermion duality in fourdimensions **西田 祐介** (20)

14:10 24PM-2 Recent Progress in $^3P_2$ Superfluids in Neutron Stars **新田 宗土** (20)

14:30 24PM-3 多成分ボース気体の量子ホール物理：対称性による保護と富化 **古川 俊輔** (15)

14:45 24PM-4 Non-Hermitian higher-order topological phases and electric circuits realization **江澤 雅彦** (15)

15:30 -16:45 トポロジカル超伝導 III [座長 : 田仲]

15:30 24PM-5 Josephson junction on magnetically doped topological insulator **柏谷 聡** (20)

15:50 24PM-6 Zero-energy vortex bound states inthe topological superconductor Fe(Se,Te) **花栗 哲郎** (25)

16:15 24PM-7 Edelstein effect and super spincurrent in noncentrosymmetric uperconductors **永長 直人** (30)

16:45-16:55 Closing remarks 川上 則雄

ポスター講演

ポスターセッション A

PA-1 Search for Dark Matter Axions by using Josephson Junctions **山本 將裕**

PA-2 Novel property of non-Hermitian superconductivity **山本 和樹**

PA-3 Theory of antiferro quadrupole phase in CeB_6 **田財 里奈**

PA-4 Electromagnetic Interaction of Collective Modes in Topological Insulator **山崎 友裕**

PA-5 Non-hermitian properties in non-centrosymmetric f-electron materials **道下 佳寛**

PA-6 Effective model of ferromagnetic Weyl semimetal on stacked Kagome lattice **小沢 耀弘**

PA-7 Fabrication and Transport Measurements of MoS2/ s-wave Superconductor Junctions **津村 公平**

PA-8 Proximity effect on the Magnetic 3D Topological insulator/ Superconductor Junctions **矢野 力三**

PA-9 Hydrodynamic Description of Nonlinear Optical Responses in Ultrapure Metals **兎子尾 理貴**

PA-10 Diamagnetism and excitation in Bi-based topological insulators $Bi_{1-x}Sb_x$ and Bi_2Te_3 **渡邊 幸裕**

PA-11 Axisymmetric vortices in $^3P_2$ superfluid **正木 祐輔**

PA-12 Transport properties of two dimensional quantum spin Hall insulators with magnetic impurities **辰己 智子**

PA-13 Continuous Phase Transition without Gap Closing in a Non-Hermitian Toric-Code Model **松本 徳文**

PA-14 Cross-correlated electron-magnon transport phenomena on the surface of magnetic topological insulators **今井 悠介**

PA-15 Itinerant orbital magnetization in topological antiferromagnetic state **下澤 雅明**

PA-16 Thin-film growth of Thallium-based ternary topological insulators **瀬川 耕司**

PA-17 Topological classification via adiabatic pumping for nodal-line semimetals **羽部 哲朗**

PA-18 NMR in quantum Hall state of Dirac semimetal EuMnBi2 **熊崎 将司**

PA-19 Dielectric Breakdown of Strongly Correlated Insulators in One-dimension: Universal Formula from non-Hermitian Sine-Gordon Theory **高三 和晃**

PA-20 Enhancement of ferromagnetic correlation and emergence of d+ip-wave at (1,1) edge of d-wave superconductor **松原 舜**

PA-21 Scaling Theory of Quantum Ratchet Effect in Low Temperature Limit **濱本 敬大**

PA-22 Theory of unconventional density wave in cuprates and iridates **川口 功起**

PA-23 Effect of randomness on the quantum spin liquid state of 1T-TaS_2 **村山 陽奈子**

PA-24 Collective modes of vortex lattices in two-component Bose-Einstein condensates under synthetic gauge fields **吉野 匠**

PA-25 Electronic property of magnetically-doped topological insulator **津田 大貴**

PA-26 Quark-hadron continuity under rotation: vortex continuity or boojum? **Chandrasekhar Chatterjee**

PA-27 Theory of the tunneling effect in one-dimentional Superconducting Quantum Anomalous Hall system **大橋 良伊**

PA-28 Effects of Dzyaloshinskii-Moriya interactions in volborthite: magnetic orders and thermal Hall effect **古川 俊輔**

PA-29 Chirality polarizations and spectral bulk-boundary correspondence **大同 暁人**

PA-30 NMR studies on non-centrosymmetric superconductor $PbTaSe_2$ **俣野 和明**

PA-31 Mössbauer spectroscopy on the antiperovskite oxide superconductor $Sr_{3-x}SnO$ **鯉渕 駿**

PA-32 Sr_2RuO_4 Josephson device by a constriction **安井 勇気**

PA-33 High-Resolution ARPES Study of Bi_2Te_3/FeTe **大和田 健太**

PA-34 Universal thermalization dynamics and a non-thermal fixed point in a one-dimensional antiferromagnetic spinor Bose gas **藤本 和也**

PA-35 Magnetic topological insulator in heavy-fermion systems **木村 和博**

PA-36 Numerical study of topological spin textures in 3D spin-charge coupled systems **奥村 駿**

PA-37 High-Resolution ARPES Study of Bi(111) Thin Films on Topological Insulator TlBiSe2 **渡邉 育子**

PA-38 Counter-flowing edge channels at an integer-fractional quantum Hall interface **橋坂 昌幸**

PA-39 Dynamical Response of Surface Andreev Bound States in Superfluid ^{3}He-B **森 渉**

ポスターセッション B

PB-1 Synthesis and chemical substitution effect on a candidate nodal-line semimetal CaAgP **三枝 一茂**

PB-2 Substitution effects on one-dimensional tellurides Ta_4SiTe_4 and Nb_4SiTe_4 with high thermoelectric performance at low temperature **吉川 侑磨**

PB-3 Topological non-Hermitian gapless phases with parity-time and parity-particle-hole symmetries **奥川 亮**

PB-4 Thermal transport in the vortex lattice state of Kitaev Spin Liquid **藤本 大仁**

PB-5 Electronic States of Magnetic Topological Insulator $(Cr_xSb_{1-x})_2Te_3$ Studied by High-Resolution ARPES **堀 健太郎**

PB-6 Topological-Insulator Heterostructure Based on Bi_2Se_3 and Bi_2Te_3 Studied by ARPES **佐藤 匠**

PB-7 Spectral Bulk-Boundary Correspondence for Chiral Symmetric Systems **田村 駿**

PB-8 Z_2 topological invariant in topological crystalline superconductors and magnetic response of Majorana Kramers pairs **山崎 勇樹**

PB-9 Dynamical chiral electromagnetic response in Weyl superconductors **松下 太樹**

PB-10 Enhanced Majorana gap and Magnetic-Field-Induced Fermi surface in Kitaev spin liquid with Γ ′ term **瀧川 大地**

PB-11 Super-current induced Edelstein effect **池田 侑平**

PB-12 Electron Correlation Effect in Organic Dirac Electron System under Magnetic Field **谷 雄大**

PB-13 Observation of Bulk Topological Fermionic excitations with Chern Number ± 2 in CoSi **高根 大地**

PB-14 Theory of odd-frequency pairing in Rashba nanowire junction **髙木 大治郎**

PB-15 Microfabrication and properties of junctions with Sr_2RuO_4 and spin-singlet superconductors **三好 拓人**

PB-16 Tuning of LO phonon emission in a quantum Hall edge channel with a double gate **秋山 竣哉**

PB-17 Correlation-induced highly mobile electrons in Dirac semimetal of perovskite $CaIrO_3$ **藤岡 淳**

PB-18 Pressure effect on magnetic transport properties in strongly correlated Dirac semimetal $CaIrO_3$ **山田 林介**

PB-19 Topological classification of non-Hermitian insulators and superconductors **川畑 幸平**

PB-20 Topological Superconducting Proximity Effect in a Hybrid of Lead and Topological Insulator $TlBiSe_2$ **Xuan Chi Trang**

PB-21 Majorana braiding dynamics in two-dimensional topological superconductors **三野 巧**

PB-22 Topological classification of time-evolution operators in periodically driven systems **中川 大也**

PB-23 Charge equilibration in integer and fractional quantum Hall edge channels in a generalized Hall-bar device **CHAOJING LIN**

PB-24 Anomalous Nonlocal Conductance as a Fingerprint of Chiral p-wave Superconductivity **池谷 聡**

PB-25 Transformation of hedgehog-lattice and emergent magnetic phenomena in MnGe single crystal **北折 暁**

PB-26 Formulation of Floquet prethermalization and Applications: Time crystals and Floquet engineering **水田 郁**

PB-27 Transitions between skyrmion- and hedgehog-lattice states in cubic chiral magnets $MnSi_{1-x}Ge_x$ **藤代 有絵子**

PB-28 Deformation of skyrmion crystal under a transverse magnetic field **中島 拓朗**

PB-29 Interorbital topological superconductivity in spin-orbit coupled superconductors with inversion symmetry breaking **深谷 優梨**

PB-30 Extension of symmetry indicators and application to superconductors **小野 清志郎**

PB-31 Spectral function of heavy fermion systems: non-Hermitian topology meets DMFT **永井 佑紀**

PB-32 Classification of nodal superconducting gap by symmetry and topology **柳瀬 陽一**

PB-33 Classification of topological crystalline superconducting nodes on high-symmetry line **角田 峻太郎**

PB-34 Detecting Weyl superconductivity in UCoGe via a shift in spin polarisation, induced by the torsional chiral magnetic effect **James de Lisle**

PB-35 Topological rectification effect in a magnetic insulator|superconducting vortex system **塩見 雄毅**

PB-36 Large anomalous Hall effect in topological insulators with proximitized ferromagnetic insulators **茂木 将孝**

PB-37 Anomaly-related magnetoresistance in solids with Weyl nodes **石塚 大晃**

PB-38 Strain-induced nonlinear spin Hall effect in topological Dirac semimetal **荒木 康史**

PB-39 Phase diagram of neutron P-wave superfluidity in strong magnetic field **安井 繁宏**

PB-40 Symmetry constraints on a winding number in topological phase of Bose-Einstein condensate **大橋 輝道**

●公募研究キックオフ研究会

2018 年 6 月 23 日（京都大学 基礎物理学研究所）

公募研究キックオフミーティングが 2018 年 6 月 23 日（土）に京都大学基礎物理学研究所で開催されました。出席者は合計 29 名で、公募研究者 18 名のうち 17 名が出席しました（1 名は病欠）。午前 10:30~ 午後 6:00 まで、発表・質疑応答を行いました。まず、第一セッションでは、領域概要、計画研究 A01~D01 の概要が説明されました。第 2 セッションでは公募研究 (C01+D04) の講演が行われました。C01 は実験 , D04 は理論であり、これらを同一セッションにいれ、実験と理論の融合を目的としました。昼食をはさんで、第 3 セッションで (B01+D03)、第 4 セッション (A01+D02) と同様のやり方で講演を行いました。午後の休憩時間は 45 分とって、出席者の間での議論が十分できるようにしました。これにより、お互いの研究内容・興味への理解が深まり、今後の共同研究を開始する絶好の機会になったと思います。

（文責：川上 則雄）

セッション 1 ：計画研究の概要

10:30 – 11:30 ［座長:川上］

10:30 – 10:50 **川上 則雄**（京大理）
領域概要、公募研究者紹介

10:50 – 11:00 **前野 悦輝**（京大理） 計画研究 A01

11:00 – 11:10 **佐藤 宇史**（東北大理 計画研究 B01

11:10 – 11:20 **藤澤 利正**（東工大理 計画研究 C01

11:20 – 11:30 **川上 則雄**（京大理 ） 計画研究 D01

セッション 2 : 公募研究 (C01+D04)

11:30 – 12:45 ［座長:藤澤］

11:30 **井手上 敏也**（東大工 , C01）
トポロジカルファンデルワールス結晶ナノ試料における量子輸送現象開拓

11:45 **小布施 秀明**（北大工 , D04）
トポロジカル相を活用した光の時空間ダイナミクスの制御手法の開拓

12:00 **石原 照也**（東北大理 , C01）
ハニカム構造をベースにしたフォトニック結晶スラブのトポロジカルな性質

12:15 **石塚 大晃**（東大工 , D04）
非共面磁気秩序による輸送現象におけるスピン揺らぎと乱れの効果

12:30 **中村 壮智**（東大物性研 , C01）
半導体二次元電子系と超伝導体の接合における新奇輸送現象の探索と解明

セッション 3 : 公募研究 (B01+D03)

13:45 – 15:30 ［座長:佐藤宇］

13:45 **藤岡 淳**（筑波大数物 , B01）
イリジウム酸化物におけるワイル電子による異常電磁気応答の探索

14:00 **山影 相**（名大理 , D03）
ラインノード半金属およびその超伝導物質の理論的探索

14:15 **塩見 雄毅**（東大工 , B01）
空間反転対称性の破れた超伝導体におけるエデルシュタイン効果の観測

14:30 **山内 邦彦**（阪大産研 , D03）
第一原理計算を用いたトポロジカル物性の機構解明と新物質設計

14:45 **村川 寛**（阪大理 , B01）
空間反転対称性の破れたバルク結晶におけるワイル・ディラック物性の研究

15:00 **鈴木 通人**（東北大金研 , D03）
第一原理計算による反強磁性体の電子構造トポロジーとマクロ物性の研究

15:15 **吉見 龍太郎**（理研 , B01）
トポロジカル結晶絶縁体薄膜における電界誘起量子伝導制御

セッション 4 : 公募研究 (A01+D02)

16:15 – 18:00 ［座長:前野］

16:15 **柳瀬 陽一**（京大理 , D02）
強相関異方的超伝導体におけるトポロジカル相の理論研究

16:30 **鍋島 冬樹**（東大総合文化 , A01）
鉄カルコゲナイド超伝導体とその関連物質におけるトポロジカル相の探索

16:45 **那須 譲治**（東工大理 , D02）
量子スピン液体で発現する創発準粒子のトポロジカル特性の安定性とその制御

17:00 **下澤 雅明**（東大物性研 , A01）
ワイル超伝導体における自発磁化の可視化

17:15 **永井 佑紀**（原研 , D02）
トポロジカルフェルミアーク : 有限温度での特異な準粒子励起の研究

17:30 **赤城 裕**（東大理 , D02）
機械学習を用いた多体系トポロジカル相の探求

17:45 おわりに **川上 則雄**（京大理）

●第 10 回トポロジー連携研究会「非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象」

2018 年 11 月 30 日 - 12 月 1 日（京都大学基礎物理学研究所）

11 月 30 日、12 月 1 日の 2 日間、京都大学基礎物理学研究所において「非平衡系・非エルミート系の新奇量子現象」を開催した。新学術領域「トポロジカル物質」と基礎物理学研究所の共催ということで、新学術領域からは A01 班および C01 班の研究代表、各班の研究分担者・連携研究者、および領域外の招待講演者を含む参加者数は 42 名であった。冒頭で主催者（佐藤）から研究会の趣旨について説明があり、その後、各研究者から最新の研究報告やレビュー講演があった。テーマに関しては、理論は非エルミート系の研究を中心に、実験は量子ホール系、液晶系、磁気スキルミオン・超伝導体、強相関系に関する多様な非平衡現象が報告された。

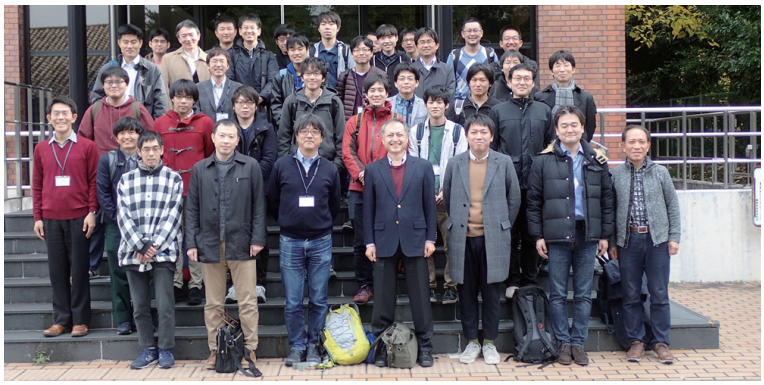
非エルミート現象に関しては、羽田野氏 (東大・生産研) により非エルミート模型の代表例である Hatano-Nelson 模型のレビューがなされ、非エルミート系特有の局所化現象の説明がなされた。また、小澤氏 (理研) により非エルミート系トポロジカル相を用いたトポロジカルレーザの話が、小布施氏 (北大) から非エルミート系量子ウォーク研究の最先端の話が報告された。また、永井氏 (原研)、吉田 (恒) 氏 (筑波大) により、強相関・有限温度効果により生じる非エルミート現象の話題が提供された。さらに、Gong 氏 (東大) から SPT 相に関する最新の話題とともに非エルミート系固有のギャップ構造に由来する新しいトポロジカル相の存在が報告された。また、川畑氏 (東大) によって、非エルミート系特有の対称性の存在と、それに基づく非エルミートトポロジカル相の分類理論が報告された。

非エルミート系以外では、周期的時間変動に伴い生じるフロケ・トポロジカル相が盛んに研究されている。本研究会でも、中川氏 (理研) により、フロケ・トポロジカル相固有のギャップレス状態とそれのトポロジカルな分類理論が議論された。

実験に関しては、藤澤氏 (東工大) により、量子ホール状態のエッジ状態のスピン・電荷分離に伴い生じる非平衡分布の実験報告があった。また、遊佐氏 (東北大) により、量子ホール状態の非平衡状態の実空間観測が、竹内氏 (東大) により液晶状態に現れる非平衡状態の実空間観測がそれぞれ報告された。さらに、賀川氏 (東大) により光パルスによる相構造スイッチの話題が、吉田（鉄）氏 (京大) により電場印加光電子分光の話題が提供された。これ以外にも 8 件のポスター講演がなされ、活発な議論が繰り広げられた。また、研究会の最後に行われた上田 (東大)、岡 (MPI) の両氏による議論のセッションでは、今後の展開に関して、狭い意味での非平衡・非エルミートの物理にとらわれないより大きな視点からの議論がなされ、大いに盛りあがった。

非エルミート系・非平衡系のトポロジカル相の研究は最近急速に進展しており、それを反映して、M2, D1 の大学院生による招待講演を含め、若手研究者による講演がそのほとんどであった。10 年ほど前にトポロジカル相の研究が始まった当時も同じような雰囲気であり、その後若手研究者がこの分野の発展に寄与してきた。この歴史を考えても、この分野の若手をさらにサポートしていく環境を作っていくことの必要性を確認することになった研究会でもあった。

（文責：佐藤 昌利）



●第 12 回物性科学領域横断研究会

2018 年 11 月 30 日ー 12 月 1 日（奈良先端科学技術大学院大学）

毎年恒例となった物性科学に関する領域横断研究会（凝縮系科学の最前線）が 2018 年 11 月 30 日（金）～ 12 月 1 日（土）の日程で、奈良先端科学技術大学院大学で開催されました。今回で既に 12 回目となります。研究会運営は、「3D 活性サイト科学」領域代表の大門寛氏（奈良先端大）が中心となって行われました。

ホームページ

http://www.org.kobe-u.ac.jp/ryoikioudan/link.html

参加者は 130 名程度で昨年の 160 名（物性研）より減少したものの、活発な議論が行われ研究会は成功裏に終了しました。 1 昨年から 2 日間の開催となり、1 領域あたりの講演時間は 1 時間で、その内容は各領域に任されました。新たに「ハイドロジェノミクス：高次水素機能による革新的材料・デバイス・反応プロセスの創成」（折茂慎一代表、東北大学）が加わり全部で 8 領域の参加となりました。他領域からのゲスト講演が 1 件ありました。

講演の内容は多岐にわたり、数理物質科学から、化学、応用物性までカバーされました。トポ物質科学から以下の 3 人が口頭発表を行いました：

◇川上 則雄（京大：領域代表）
「トポ物質科学」の紹介 10 分
◇宇田川 将文（学習院：A01）
「量子スピン液体の素励起」25 分
◇塚﨑 敦（東北大：B01）
「トポロジカル物質群の薄膜研究：これまでとこれから」25 分

初日に凝縮系科学賞の授賞式が行われ、水口佳一氏：「層状ビスマス硫化物超伝導体の発見」、川﨑猛史氏：「過冷却液体の構造とダイナミクスに関する理論的研究」に関する受賞講演を行いました。

ポスター申し込み数（79 件）は例年より少し減少しましたが、ポスター会場には活気がありました。6 名がポスター賞を受賞しました。この賞は若手（特に大学院生）にとって励みになっているようなので、続けることができればと思います。

領域研究会の運営面での役割分担として「トポ物質科学」は本年度も広報を担当し、物理学会誌、Web、メーリングリストに研究会の情報を流しました。

来年度の領域横断研究会は本領域「トポ物質科学」が担当で、東京大学小柴ホールで行われる予定です（2019 年 11 月 27 日、28 日）。

(文責：川上 則雄)

●第 7 回アライアンス研究会
TMS-SPIN(CNR) 2nd Alliance Workshop with Superstripes-onlus: “Majorana Fermions and Topological Materials Science” 報告

2018 年 7 月 21 日 - 27 日（エリチェ）

シチリア島のエリチェにある "Ettore Majorana Centre for Scientific Culture" は、マヨラナ粒子探索をはじめとするトポロジカル物質科学の研究者にとっての聖地であり、そこでの研究会参加は夢ともいえます。

1938 年、シチリア島生まれで当時 31 歳のナポリ大学教授 Ettore Majorana は、ナポリから船でシチリア島に渡ったきり失踪したのです。その島のエリチェの町に科学研究センターの活動が始まったのは 1963 年のことです。今回の研究会では教会内部を改築した一番大きな会議室 Paul A.M. Dirac Lecture Hall を使うことができました。

実は本プロジェクト「トポロジカル物質科学 (TMS)」の前身の「トポロジカル量子現象」(2010-2015) のときから、エリチェでの研究会開催を目指して CNR-SPIN(サレルノ大学) の共同研究者と計画を練っていました。今回、ローマ大学の Bianconi 教授のご協力を得て、遂に遂に実現に至りました。したがって今回のアライアンス研究会は、本 TMS のアライアンスパートナーであるサレルノ大学 CNR SPIN に加えて、ローマ大学の RICMASS との 3 者共催となりました。

参加者は TMS からの 17 名を含む 44 名で、Welcome Reception を含めて 6 日間にわたるプログラム構成でした。朝のセッションは 9 時から始まり、昼食の 2 時間半を挟んで夕方 6 時半まで。またポスターセッションやテーマごとの Breakout Discussion Sessions も行われました。

エリチェでの研究会には他にはない、いくつかの際立った特徴があります。まずはそのロケーション。地図でイタリア本土のブーツのつま先にあるようなシチリア島の、その北西端の山頂にある一周 1.5 km くらいの小さな町がエリチェです。この「陸の孤島」は観光地としても大変にぎわっています。古い教会を改造した会議場から下界を見下ろす眺めは息をのむような絶景！

次の特徴は、イタリアでは人生において特に重要な位置を占めるマンジャーレ、食事です。昼食と夕食は町にあるレストランのうち 8 軒のどれに行ってもよく、ワイン以外の料金は参加費に含まれているので、座って食べてそのまま帰ってくるという趣向です。昼食休憩も 2 時間半あるので、会議参加者同士の議論も深まる場となりました。

夕食の後は、多くの参加者が宿泊した建物の 1 階にある「マルサラ部屋」で 2 種類の樽から名物マルサラ酒を注いで自由に呑み語る場があります。ここには古いピアノとギター、それに各国の名歌の歌詞冊子が置いてあります。私が出席した 1993 年の高温超伝導の会議のときは、ここで Schlesinger さんのギターを囲んで、皆で PPM や Bob Dylan などを歌いました。オープニングで前野が当時の写真を紹介したところ、今回講演者の Hizhyyakov 教授が真ん中に写っていることを本人から指摘いただきました。

研究会に関連して MDPI Condensed Matter 誌に特集号が組まれ、TMS メンバーからも 4 編の論文が出版されました [2]。総括班からは 4 名の若手研究者に旅費を補助しました。しかし、他の国際会議との関係もあり、今回、若手研究者・大学院生の多くにエリチェ会議を体験いただけなかったのは大変残念でした。

ポスター・コーヒーブレイク会場からの眺め。

セッションの初日は、ハニカム格子スピン液体でのマヨラナ準粒子について、2019 年 1 月の京都での米国 EPiQS とのアライアンス研究会には参加されなかった Mandrus の基調講演で始まり、笠原 (計画研究 A01)、高山 (MPI 高木 group) がハニカム格子系での反強磁性抑制と熱ホール効果の量子化の研究現状を紹介しました。

2 日目はトポロジカル超伝導に関して、米澤（A01）がネマティック超伝導、藤本 (A01) がワイル / ディラック超伝導体に歪で誘起されるカイラル超伝導流を議論しました。

3 日目は Shoucheng Zhang が、磁性トポロジカル絶縁体の量子異常ホール系と超伝導体とのヘテロ接合系でのカイラルマヨラナ粒子研究の現状をレヴューしました。そして Molenkamp と村木 (B01) による 2 次元量子ホール系（量子スピンホール系）の講演が続きました。Molenkamp は、HgTe/Nb でのシャピロステップからのマヨラナ粒子存在の検証実験を解説しました。村木は、InAs/GaSb 量子井戸で両物質のエネルギーギャップの差と、フロント・バックゲートを巧みに制御してキャパシタンス測定からトポロジカル状態の生成を制御する実験結果を報告しました。

4 日目は Jason Alicea の "Symmetry Enrichted Majorana Fermions" で始まりました。その後、角度分解光電子分光 (ARPES) の講演が 4 件続きました。イタリアからの推薦に ARPES 関係者が多かったのですが、様々なトポロジカル物質の電子状態が網羅できました。磁性体ワイルフェルミオン（近藤 A01）、非磁性ワイルフェルミオン（Borisenko）、超伝導体 MgB_2 関連物質のトポロジカル性吟味と線状ノード半金属の表面状態（相馬 B01）、銅酸化物高温超伝導体（Lanzara）などが議論されました。また午後には野村 (B01) が、ワイル半金属を使った様々なデバイス応用のアイデア "Topological Spintronics" について、Ortix がトポロジカル物質を空間的に変形させて得られる新奇現象について披露しました。

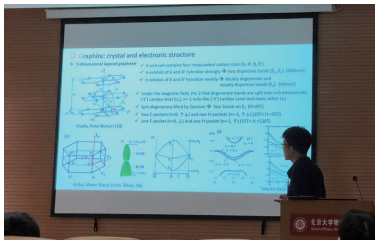
最終日には Agterberg が、マルチバンド超伝導体でのトポロジカルに保護された Bogoliubov フェルミ面、Eschrig が、反転対称性を破る系でのトポロジカル超伝導、佐藤昌 (D01) が、トポロジカル結晶超伝導体のマヨラナフェルミオンについての理論を解説しました。

この会議で特に盛り上がったのは、各 90 分間にわたる二つの Breakout discussion sessions でしょう。4 日目には Mandrus・松田の司会で、トポロジカル・スピン液体について、また野村の司会で磁性ワイル半金属について、掘り下げた議論が繰り広げられました。5 日目には佐藤昌の司会で、超伝導体でのマヨラナ粒子探索の現状と、バルク・トポロジカル超伝導体をさらに発見する方向性について議論が展開されました。いずれも司会者が現地でとてもよく準備され、皆さんからの問題点を掘り下げた質問に、世界の主な研究当事者からすぐに回答が得られるという、貴重な機会でした。なお、以前のエリチェ会議での Leggett 教授のエピソードについては、本号の前野・高木伸・上田の記事をご覧ください。

[1] https://www.superstripes.net/conferences/erice-workshop-2018
[2] https://www.mdpi.com/journal/condensedmatter/special_issues/MFTMS

(文責：前野 悦輝)

多くの参加者が宿泊した建物。半地下階にはマルサラ部屋がある。前列右から G. Benedek (director)、A. Bianconi（RICMASS）、筆者、M. Cuoco（CNR-SPIN）。



●第 8 回アライアンス研究会 “2nd TMS-PKU alliance workshop: Topological materials and quantum materials” 報告

2018 年 9 月 25 日 - 28 日（北京大学）

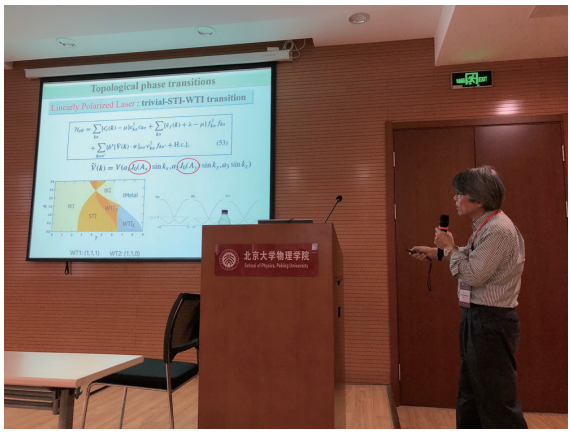
TMS と北京大学による合同ワークショップが 2018 年 9 月 25 日から 28 日の 4 日間に渡って、北京大学 ICQM (International Center for Quantum Materials) において開催されました。このワークショップは 2017 年 2 月 13 日 -18 日に京都大学基礎物理学研究所で開催された、YITP-PKU-TMS International School and Workshop に続く第 2 回目のものです。北京大と京都大学が中心となった国際会議ですが、日本と中国以外にも、米国、イスラエル、韓国からも参加者があり、京都大学、北京大学以外からも学生、ポストドク、スタッフも含めた大勢の参加者がありました。

初日は、凝縮系物理学におけるトポロジカル相のセッションから始まり、主として超伝導体と量子磁性体におけるマヨラナ粒子やトポロジカル相の非平衡状態に関する議論がありました。午後は、ワイルとディラック半金属のセッションがあり、新しい物質探索や光応答に関する発表がありました。２日目に入り、午前中はスピントロニクスのセッションがあり、スピンの超流動性、トポロジカルなスピン流などが議論されました。午後は、強磁場中の半導体や半金属のセッションがあり、グラフェンやビスマスの強磁場応答や、対数スケールで振動する量子振動の発見等が報告されました。３日目に入り、午前中は新奇な非平衡現象に関するセッションがあり、電流励起の巨大反磁性、１次元光学格子、Floquet トポロジカル相等の議論がありました。午後は、強相関電子系におけるエキゾチック秩序のセッションがあり、多極子揺らぎによるトポロジカル超伝導や高温超伝導体における光誘起超伝導などの議論がありました。４日目は午前で終わり、エキゾチックな量子磁性と量子スピントロニクスのセッションがあり、そこでは銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ相や量子スピン液体に関する発表等がありました。

このように、非常に広い分野をカバーしたワークショップで、最新の研究成果が報告され、様々な分野の現状が把握できました。また、議論の時間も十分に取られ、ゆっくりと議論することができました。会議では北京大学や清華大学の大学院生やポストドクとも話ができ、彼らの積極性には感心しました。特に Rui Rui Do 教授を所長とする北京大学 ICQM の研究スタッフは、年齢的にも若く極めてアクティブに研究を行っていることがわかりました。ちなみに、清華大学からの参加者も多く、酒の席で「北京大学と清華大学の学生はどちらが優秀か」とふざけて聞いたら、なぜか彼らの間で盛り上がって大議論になってしまいました。

最後に、ワークショップの運営でお世話になった本領域関係者および北京大学の方、特に北京大学との連絡先となりスクール開催にご尽力いただいた北京大学の進藤龍一氏に感謝したいと思います。

（文責：松田 祐司）



トポロジカル物質科学セミナー（Topological Materials Science Seminar）活動紹介

2017/Mar/21(THU)
Topological Materials Science Seminar (59)
Sebastiano PEOTTA, Kyoto Univ.

2018/Apr/18(WED)
Topological Materials Science Seminar (60)
Aron Beekman, Keio Univ.

2018/May/11(FRI)
Topological Materials Science Seminar (61)
Gaku Eguchi, Kyoto Univ.

2018/Jul/02(MON)
Topological Materials Science Seminar (62)
Minoru Yamashita, The Univ. of Tokyo.

2018/Jul/03(TUE)
Topological Materials Science Seminar (63)
Vudtiwat Ngampruetikorn, Osaka University.

2018/Jul/05(THU)
Topological Materials Science Seminar (64)
Wave Ngampruetikorn, Nagoya Univ.

2018/Jul/12(THU)
Topological Materials Science Seminar (65)
Yoichi Ando, The Univ. of Tokyo.

2018/Jul/19(THU)
Topological Materials Science Seminar (66)
Ryuichi Shindou, The Univ. of Tokyo.

2018/Jul/23(MON)
Topological Materials Science Seminar (67)
Joseph Checkelsky, Tohoku University.

2018/Jul/30(MON)
Topological Materials Science Seminar (68)
Clifford Hicks, Kyoto Univ.

2018/Jul/30(MON)
Topological Materials Science Seminar (69)
Masafumi Udagawa, Nagoya Univ.

2018/Aug/03(FRI)
Topological Materials Science Seminar (70)
Nir Navon, The Univ. of Tokyo.

2018/Aug/07(TUE)
Topological Materials Science Seminar (71)
Eun-Gook Moon, Gakushuin Univ.

2018/Aug/08(WED)
Topological Materials Science Seminar (72)
Joji Nasu, Nagoya Univ.

2018/Aug/10(FRI)
Topological Materials Science Seminar (73)
Paola Gentile, Hokkaido Univ.

2018/Aug/20(MON)
Topological Materials Science Seminar (74)
Taro WAKAMURA, Tohoku Univ.

2018/Aug/24(FRI)
Topological Materials Science Seminar (75)
Taro WAKAMURA, Tokyo Tech.

2018/Sep/18(TUE)
Topological Materials Science Seminar (76)
Jorge Cayao, Nagoya Univ.

2018/Oct/05(FRI)
Topological Materials Science Seminar (77)
Thomas Schmidt, Kyoto Univ.

2018/Oct/23(TUE)
Topological Materials Science Seminar (78)
Peter Armitage, Kyoto Univ.

2018/Oct/26(FRI)
Topological Materials Science Seminar (79)
Emilia Morosan, Kyoto Univ.

2018/Oct/29(MON)
Topological Materials Science Seminar (80)
Akito Daido, Nagoya Univ.

2018/Nov/12(MON)
Topological Materials Science Seminar (81)
Sadashige Matsuo, Nagoya Univ.

2018/Dec/03(MON)
Topological Materials Science Seminar (82)
Alexander Golubov, Kyoto Univ.

2018/Dec/03(MON)
Topological Materials Science Seminar (83)
Fu-Chun Zhang, Kyoto Univ.

2018/Dec/17(MON)
Topological Materials Science Seminar (84)
Takehito Yokoyama, Nagoya Univ.

2018/Dec/19(WED)
Topological Materials Science Seminar (85)
Ludovic D. C. Jaubert, Nagoya Univ.

2019/Jan/16(WED)
Topological Materials Science Seminar (86)
Noriaki Hanasaki, GakushuinUniv.

2019/Jan/21(MON)
Topological Materials Science Seminar (87)
Takeshi Kondo, Nagoya Univ.

2019/Feb/13(WED)
Topological Materials Science Seminar (88)
Yayu Wang, Kyoto Univ.

2019/Feb/14(THU)
Topological Materials Science Seminar (89)
Mario Cuoco, Nagoya Univ.

2019/Feb/18(MON)
Topological Materials Science Seminar (90)
Masaki Tezuka, Nagoya Univ.

2019/Feb/18(MON)
Topological Materials Science Seminar (91)
Ken Mochizuki, Kyoto Univ.

コラム

機械学習による トポロジカル相転移の検出

赤城 裕 / 東京大学 大学院理学系研究科 助教

人工知能、AI、機械 (深層) 学習。最近では日常生活の中でこれらの単語を耳にしているのではないでしょうか。機械学習とは、与えられたデータから反復的に学習するアルゴリズムによって、そこに潜むパターンを見つけ出し、未知なるデータに関して予測をする技術です。その応用の幅は実に広く、世界的な動画ストリーミングサービスである Netflix の recommendation engine [1] や最近登場し始めたリアル「ほんやくコンニャク」[2] と思えるような通訳機などにも機械学習が使われており、本質的な役割を果たしています。また、Google 傘下の DeepMind 社が機械学習をベースとして作り上げた囲碁プログラム「アルファ碁」が世界トップクラスの囲碁棋士イ・セドルを破ったことは、新しい時代の幕開けを感じさせる一つの事件でした。

これほどの機械学習の発展の背景には、コンピュータの処理能力の向上に加え、深層学習 (ディープラーニング) の学習アルゴリズムに関するブレイクスルーがあります。深層学習で用いられるニューラルネットワークでは、隠れ層と呼ばれる、非線形な特徴量抽出を処理する部分が、多重に繰り返されます。この非線形性と「深層化」が、データの分離性を高め、識別能力の劇的な向上を可能とさせています。

最近では、物性物理の分野における機械学習の有用性が認知され始めており、相転移検出・相の同定 [3,4] やモンテカルロ法の加速 [5,6] 等、その適用範囲は多岐にわたります。我々も機械学習との親和性の高さに刺激を受け、ニューラルネットワークの一つの形態であるボルツマン機械を用いることで、n 体相互作用を含むような一般化イジング模型のモンテカルロ・シミュレーションを高速化できることを実証しました [7]。また、乱れのない極限のみで学習したニューラルネットワークを用いて、乱れのあるトポロジカル超伝導体を含む相を同定する手法 [8] を開発しました。この手法で作成された相図は、乱れがある場合にも適用可能な非可換 Z_2 指数の計算 [9,10] によって作成した相図とも良い一致を示しました。

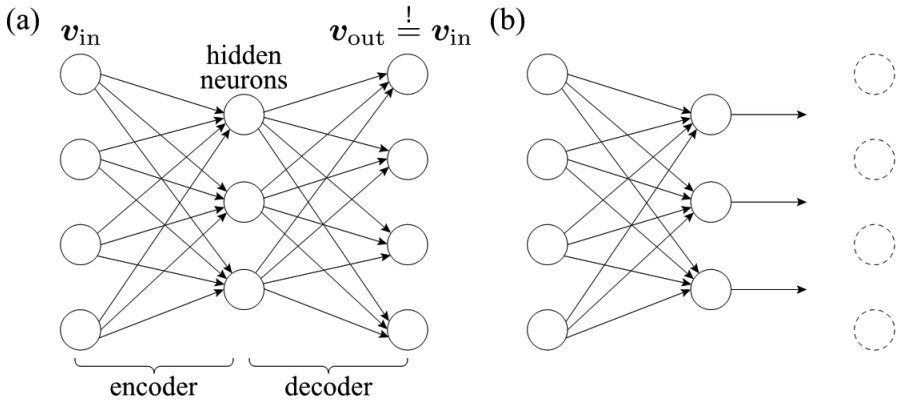


図 1: オートエンコーダ (自己符号化器) で用いるニューラルネットワーク。(a) 砂時計型ニューラルネットワーク。出力データ v_{out} が入力データ v_{in} に近づくようにこのニューラルネットワークの学習を行います。(b) 学習後に (a) の出力層を取り除いたニューラルネットワーク。入力データの特徴量を出力します。

一方、[機械学習×物性物理] の研究の多くが、他手法により確立した結果に立脚し、そのデータ (の一部) を学習用のデータとした教師あり学習によるものであり、教師なし学習を応用した先例はあまりありません。そこで我々は、教師なし学習の一手法であるオートエンコーダ (図 1) を用いて、様々な量子スピン鎖の量子相を判定しました。

オートエンコーダにおける入力データは厳密対角化により得られた波動関数そのものです。ただし、ここでは入力データがどういった相のものであるかという情報は与えず (そのため、教師なし学習と呼ばれます)、出力データが入力データに近づくように図 1(a) の砂時計型ニューラルネットワークを学習させます。すると、ニューロンの数が少ない中間層 (隠れ層) までが情報の圧縮 (符号化)、中間層から出力層までが情報の復元の役割を担うニューラルネットワークが得られることになります。そして、図 1(b) のように出力層を取り除くことで、中間層から入力データの特徴量が直接抽出できます。

この手法を、AKLT Hamiltonian と large-D 相を与える Hamiltonian を 1 パラメタでつないだ模型に対し適用しました。すると図 2 に示したように、symmetry-protected topological 相である Haldane 相と trivial 相である large-D 相のデータ間に分離が見られ、トポロジカル相転移の検出に成功しました。すなわち、深い知識がなくとも利用することが可能なトポロジカル相転移の検出器ができたことになります。さらに、局所的な秩序変数では特徴付けられない両相ですが、入力データとして 4 サイト程度までの相関関数を用いても同様に相転移の検出に成功しました。

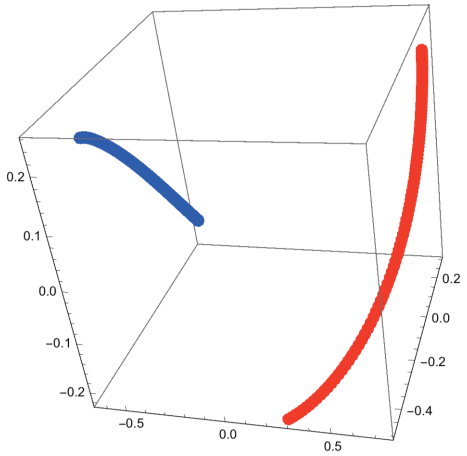


図 2: 図 1(b) の特徴量の主成分のうちの最も主要な 3 次元への射影。赤が large-D 相、青が Haldane 相に対応。

欧米諸国では AI がすでに産業の一部となっています。一方、日本は随分と後手に回っていると言われています。実際、AI 技能ランキング (トップ 20 位) [11] を見ると、上位 3 カ国は、アメリカ、中国、インドとなっており、日本はランク外となっています。既に生活の一部に溶け込んでいる AI は、我々の生き方を激変させるほどのポテンシャルを持っています。今後日本は AI に対しどのように向き合っていくのでしょうか。

[1] 最大の特徴は、ユーザーの視聴履歴に基づいた、高精度な提案システムにあります。今までは、検索することで求める情報に辿り着く時代でしたが、検索されるより先にユーザーのニーズを汲み取り、情報を提案する時代の到来を思わせるサービスです。
[2] 藤子・F・不二雄の漫画「ドラえもん」に登場するひみつ道具の一つ。これを食べるとあらゆる言語のやり取りが可能になります。
[3] J. Carrasquilla and R. G. Melko, Nat. Phys. **13**, 431 (2017).
[4] T. Ohtsuki and T. Ohtsuki, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 044708 (2017).
[5] J. Liu, Y. Qi, Z. Y. Meng, and L. Fu, Phys. Rev. B **95**, 041101(R) (2017).
[6] L. Huang and L. Wang, Phys. Rev. B **95**, 035105 (2017).
[7] N. Yoshioka, Y. Akagi, and H. Katsura, Preprint, arXiv: 1812.05269.
[8] N. Yoshioka, Y. Akagi, and H. Katsura, Phys. Rev. B **97**, 205110 (2018).
[9] Y. Akagi, H. Katsura, and T. Koma, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 123710 (2017).
[10] H. Katsura and T. Koma, J. Math. Phys. **59**, 031903 (2018).
[11] https://economicgraph.linkedin.com/blog/how-artificial-intelligence-is-already-impacting-todays-jobs

今年度以降の会議

年度	領域研究会 / 国際会議	トポロジー連携研究会	国際アライアンス ワークショップ
H27 年度 (2015-16)	2015/12/11-13 第 1 回 京都大学【終了】	2015/08/18 第 1 回【終了】 2015/08/20 第 2 回【終了】 2015/08/27 第 3 回【終了】 2015/09/05 第 4 回【終了】 2015/11/06-07 第 5 回【終了】 2016/02/09-11 第 6 回【終了】	
H28 年度 (2016-17)	2016/12/16-18 第 2 回 東北大学【終了】	2016/11/17-18 第 7 回【終了】 2016/01/06-07 第 8 回【終了】	2016/09/19-21 第 1 回 "TOPO MAT Meeting" MPI, Stuttgart, Germany【終了】 2016/12/03-08 第 2 回 "EPiQS-TMS Trans-Pacific Conference on Topological Quantum Materials" Gump Station (UC Berkeley), Moorea【終了】 2017/2/13-18 第 3 回 "YITP-PKU-TMS International School and Workshop" (with ICQM- 北京大学) 京都大学【終了】
H29 年度 (2017-18)	2017/05/09-13 第 3 回 東京工業大学 ＊国際会議 TopoMat2017 【終了】	2017/12/18-19 第 9 回【終了】	2017/04/25-28 第 4 回 "TOP-SPIN and TMS International Workshop" (with TOP-SPIN-Italy) IFW Dresden, Germany 【終了】 2017/10/02-03 第 5 回 "Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms" 東京大学【終了】 2018/01/11-14 第 6 回 "TMS-EPiQS 2nd Alliance Workshop" 京都大学【終了】
H30 年度 (2018-19)	2019/01/22-24 第 4 回 名古屋大学 【終了】	2018/11/30-2018/12/01 第 10 回【終了】	2018/07/21-27 第 7 回 "Erice Workshop 2018" (with SPIN-Italy) Ettore Majorana Centre, Erice, Italy【終了】 2018/09/24-28 第 8 回 "ICQM-TMS 2nd Alliance Workshop"(with ICQM-PKU) Peking Univ., Beijing, China 【終了】
H31 年度 (2019-20)	2019/12/04-07 第 5 回 京都大学 ＊国際会議 TopoMat2019	未定	2019/10 第 9 回 "TMS-EPiQS 3rd Alliance Workshop" Santa Barbara, USA

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謝辞をお願いいたします。
計画研究 A01: JP15H05852, B01: JP15H05853, C01: JP15H05854, D01: JP15H05855。
公募研究 : JP16H009**, JP18H042**(** は http://topo-mat-sci.jp/contact/ で確認ください)。
また 総括班 X00: JP15H05851,
国際共著論文は全て : JP15K21717,
国際活動支援班 (Topo-Q) の支援（REP,JREP, Topo-Q PD, etc.) を受けた成果 : JP15K21717。
※ 8 ケタの課題番号の前に【 JP 】を追加してください。

(1)This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas "Topological Materials Science" (KAKENHI Grant No. JP 課題番号) from JSPS of Japan.
(2)This work was supported by the "Topological Materials Science" (No. JP 課題番号) KAKENHI on Innovative Areas from JSPS of Japan.
(3)This work was supported by the JSPS KAKENHI (No. JP 課題番号).

編集後記

1 月の下旬、第 4 回領域研究会が、組織委員・学生アルバイトの方々の尽力で滞りなく開催されました。この 3 年あまり、領域発足時には想定もできなかった問いも含め、さまざまな問題に関して領域内外で得られてきた多くの成果が発表されました。とくに、領域発足以降に学生として研究を開始した人たちが、めざましい成果を得ていることを実感した研究会でした。

新しい成果による常識の変化の積み重ねは指数関数的であるように思われます。Topo-Q の連携プロジェクトの 1 つである CIFAR-QM は銅酸化物高温超伝導体発見の翌年の 1987 年発足ということですが、この 30 年あまりの物質科学の発展と、新たな材料の利用により可能となった技術の影響も含む、社会の急速な変化とは、その間に生まれた人たちも、多くの媒体を通して知っているものと思います。

より一般に、世の中の変化が指数関数的であるならば一面では恐ろしいことで、小さなごまかしが、何年かの後には大きな問題として返ってくる可能性をもちます。何気ない言動が思いのほか大きな影響をもたらした、という体験は、多くの人にあるのではないでしょうか。多様な立場の人々からなる社会の構成員として、良い方向への変化につながる存在でありたいものです。

平和で自由な社会を守り育て、享受し続けるためには、新しい技術により可能になったものを含め、多様な生き方の可能性が、構成員に知られ、開かれていることが必要です。とくに物理学･物質科学の知識が社会に広がり、他分野の知見と統合されて生かされることは、疑似科学や迷信に基づく誤った判断を避け、差別や偏見、社会的意義を失った制度をなくしていくためにも有効でしょう。

物理帝国主義を唱えるわけではありませんが、これだけ社会に影響を与えてきた物理学・物質科学が、「理系」以外の専攻、進路を選ぶ人たちを含め、より多くの人たちに着実に伝えられるようになり、それに見合った数の研究・教育の職が継続的に確保されていくよう願っています。Science, Technology, Engineering, Mathematics を統合的に教育する "STEM" に、Art も加えた "STEAM" という言葉をよく見るようになってきました。芸術分野との協力関係が有効かもしれません。

（文責：手塚 真樹）