

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いきます。その際の指針の一つとなるのが、図1に示す相図[*]で、スピン軌道相互作用に伴うバンド反転等で生じるトポロジカル相が、電子相関の効果でさらに豊かなトポロジカル状態を生み出す様子を示しています。

研究テーマは、対象物質の性質によって、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つに分類できます（図2）。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H27(2015)年度2月以降の計画研究A01の発表論文、[1]-[20]はH28(2016)年度の発表論文を発表順に並べたものです。

【1. トポロジカル超伝導体】

(1-1) ネマティック超伝導の発見

米澤・前野・俣野・鄭・瀬川・安藤 (B01)、永井 (D02)

計画研究 A01 と B01、さらに公募研究 D02 を含む共同研究により、超伝導波動関数の振幅が結晶の回転対称性を自発的に破る新奇な「ネマティック超伝導」をはじめて実証しました。これはまた、理論で提案されているトポロジカル超伝導の実現をも強く示唆する成果です。

トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 に銅をインターカレートした $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ は、トポロジカル超伝導の有力候補として注目されてきました。鄭・俣野らは、瀬川・安藤 (B01) らが育成した単結晶試料について核磁気共鳴 (NMR) 実験を行い、超伝導状態のスピン磁化率の異方向性が、結晶の対称性から期待される3重回転対称性を破る2回対称性を示すことを発見しました [2]。この結果は、超伝導状態においてスピン回転対称性が破れたスピン三重項超伝導が実現していることを示しています。さらに米澤・前野らは、この物質の比熱の磁場方向依存性が、180度周期の振動を示すことを明らかにしました [13]。永井 (D02) による理論解析を含めて、このことは、超伝導波動関数の振幅が結晶（および常伝導電子状態）の回転対称性を自発的に破る、新奇な「ネマティック超伝導」が実現していることを示したものです。

これらの成果は、これまでに知られていない種類の対称性破れを伴う新奇超伝導が $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ で実現していることを初めて示しただけでなく、この物質がスピン三重項のトポロジカル超伝導体であることをバルク測定から実証したという重要な意義も持ちます。

(1-2) 強磁性金属へのスピン三重項超伝導近接効果の実証・奇周波超伝導との関連

Anwar・前野・米澤・寺嶋・浅野

トポロジカルな超伝導である、時間反転体対称性を破るスピン三重項超伝導体として有力な Sr_2RuO_4 についての研究も着々と進めました。Anwar(PD) らは、スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 (T) の単結晶を基板として、

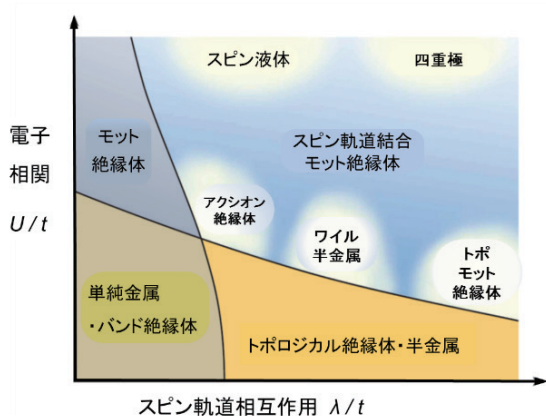


図1: 電子相関の強いトポロジカル相の相図[*]。
U: 電子間斥力、λ: スピン軌道相互作用、t: トランスファー積分。



図2: 計画研究 A01 で扱う主な物質と物性。

その劈開面に強磁性金属 SrRuO₃ (F) の単結晶薄膜を成長させた2層系を素子化し、金を蒸着した T/F/N 接合素子での超伝導近接効果を研究しました [16]。そして、アンドレーエフ反射の特徴から、スピン三重項のクーパー対が強磁性体中を F/N 界面まで侵入しており、いわゆる「長距離近接効果」が実現していることを明らかにしました。従来の s 波超伝導体を用いた場合、強磁性体金属中へのスピン三重項近接効果の実現には、不均質な磁性層の挿入を必要としていました。本研究での「直接的」長距離近接効果の実現は、Sr₂RuO₄ の超伝導のスピン三重項性の新たな検証にもなります。

また、柏谷 (B01) らとの共同研究で、単結晶 Sr₂RuO₄ の中に析出した Ru 金属を弱結合として Nb のループを蒸着した SQUID の作製にも成功し、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 [7]。その他、NMR によるスピン・スピン緩和時間 T_2 [15] や一軸方向の歪印加による "3-K" 超伝導相の誘起 [19] など、特異な超伝導性を明らかにしました。関連テーマとして、宇田川は準 2 次元カイラル超伝導体の渦糸状態に伴うワイル相を研究しました [9]。また、米澤は準 1 次元有機超伝導体の超伝導状態に関するレビュー論文を発表しました [d]。さらに浅野は、田仲 (B01) らとの共同研究で、異方性超伝導体の接合における不純物散乱 [6] や、奇周波 s 波超伝導の生成と制御を量子ドット上で理論提案もしました [4]。

関連のテーマとして、超伝導接合におけるトポロジカル超伝導に関して、浅野らは、マヨラナ・フラットバンドを介した完全伝導の量子化を理論的に明らかにしました。ギャップがノードを持つ多くの超伝導体はその表面に高い縮退度のゼロエネルギー状態を持ちます。汚れた金属と接合した場合、この縮退は解けますが、奇パリティ超伝導体表面のマヨラナ・フラットバンドは縮退が解け残り、それが金属に侵入して完全伝導を起こします。浅野らは、解け残る縮退数がアッティヤ・シンガーの指数で与えられ、図 3 に示すように、接合のコンダクタンスがこの指数に対応する整数値に量子化されることを示しました [5, 8]。これは金属中に染み出した奇周波数クーパー対の異常近接効果と深く関係した現象です。

(1-3) 微小なカイラル超伝導体のカイラルエッジ電流

浅野

浅野らは時間反転対称性を破るトポロジカル超伝導状態のエッジモードに伴うカイラル電流に対する、マイスナー遮蔽効果と表面ラフネスの効果を理論的に調べました。その結果、カイラル p 波超伝導のエッジ電流は、表面ラフネスにあまり影響されず、それが作る磁化も十分観測可能な大きな振幅を持つことを明らかにしました [14]。

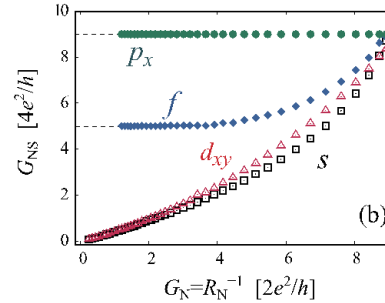
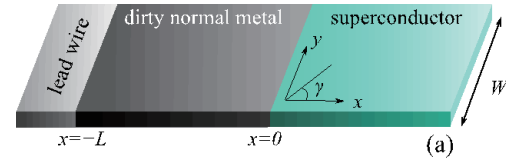


図 3: (a) NS 接合の概念図。(b) NS 接合のゼロバイアスコンダクタンスの金属部コンダクタンス依存性。p 波の指数は 9、f 波の指数は 5、s 波と d 波の場合指数は 0。

(1-4) アンチペロブスカイト酸化物で初めての超伝導の発見 米澤・前野、佐藤昌 (D01)

通常のペロブスカイト酸化物に比べて、対応するイオン価数の符号が逆転した「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物質系で、次節の「トポロジカル半金属」として重要な研究対象です。前野・米澤らはキャリアドーピングにより、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。さらに、計画研究 D01 との共同研究により、トポロジカル超伝導が起こっている可能性を指摘しました [18]。

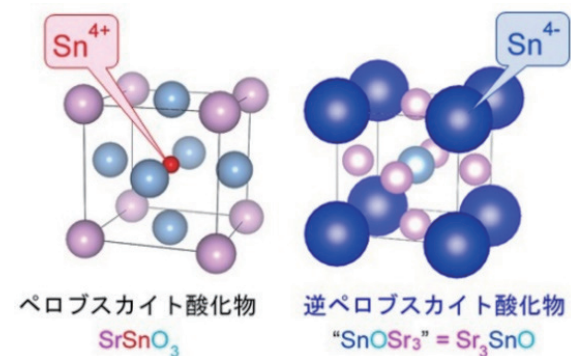


図 4: 左は通常のペロブスカイト酸化物 SrSnO₃。右はマイナス金属イオン Sn⁴⁺ を含む逆ペロブスカイト酸化物 SnOSr₃ (Sr₃SnO とも書ける)；SnOSr_{3,x} の超伝導を発見。

[2. トポロジカル半金属等]

(2-1) ワイル半金属におけるカイラル磁気効果の予言 藤本

ワイル半金属の重要な特徴であるカイラル異常は異常ホール効果、カイラル磁気効果、負の磁気抵抗等の特異な輸送現象として発現します。しかし、これまで多くの観測事例がある電流と平行な磁場のもとでの負の磁気抵抗は、電流分布の不均質性に因る場合も考えられ、ワイル半金属の決定的証拠とならないことが最近の研究で分かってきました。これに対して藤本らは

TOPICS

通常の電磁応答でなく転位等の格子欠陥が生ずる擬似的磁場によるカイラル磁気効果を理論的に提案し(図5)、現実のワイル半金属物質において観測可能なカイラル異常の直接的証拠となることを明らかにしました[1]。

なお、前野・米澤らは、ワイル半金属で期待されていたのと同様の式で表される負の磁気抵抗効果が、実は準2次元金属PdCoO₂の面間方向の磁場中での面間導電性にも現れること、そしてこれは面間方向に僅かな分散を持つ系でのランダウ量子化で説明出来ることを明らかにしました[c]。

関連テーマとして宇田川は、タイプIIワイル物質での磁気異常とカイラルモード反転について理論的に考察しました[10]。

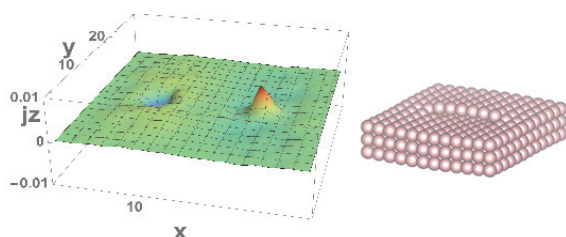


図5. カイラル磁気効果の例。左は右図のワイル半金属のらせん転位にともなう電流分布。

(2-2) ゼロギャップ半導体 高木

ゼロギャップ半導体Ta₂NiSe₅において、T_c = 328 K以下でTa 5d電子とNi 3d正孔対(励起子)が自発生成し、超格子形成を必要としないq = 0励起子絶縁体に転移することを実験的に示しました[20]。d電子特有の重い質量に加えて、電子鎖と正孔鎖の空間分離により励起子束縛エネルギーが0.2 eVと極めて大きいことが、その起源であることも明らかにしました。一電子バンドギャップをパラメータとして、ゼロギャップ付近でT_cがピークを示すドーム状の電子相図を提示しました。これは励起子絶縁体に期待される振る舞いと一致するものです。この成果は、今後のトポロジカル相の創成・制御に重要なヒントを与えるものです。

[3. トポロジカル磁性体]

(3-1) パイロクロア格子酸化物におけるエキゾチック準粒子 松田、宇田川、寺嶋

スピンの量子ゆらぎの効果により秩序化しない量子スピン液体では、トポロジカルな基底状態や特異な素励起(準粒子)の出現が予言されています。松田・宇田川・寺嶋らは強い幾何学的フラストレーションの効果によりスピン液体状態に非常に近接するパイロクロア酸化物Yb₂Ti₂O₇において、遍歴的な低エネルギー励起に敏感な手法である熱伝導率測定を行い、極低温で特異な振る舞いを観測しました[b]。その結果Yb₂Ti₂O₇では、古典的には拡散的に振る舞う磁気モノポールとよばれる素励起が、量子ゆらぎによりコヒーレントなバリスティック伝導を示すことを明らかにしました。

また、宇田川はスピンアイス系における非平衡状態

でのダイナミクスを考察しました[11]。

(3-2) ハニカム格子ルテニウム酸化物における新奇ダイマー状態 前野・米澤

トポロジカルな性質を持つキタエフ・スピン液体の実証を目指し、ハニカム格子の遷移金属酸化物、特にイリジウム酸化物の研究が活発に行われています。前野・米澤らは、関連のハニカム格子系のルテニウム酸化物Li₂RuO₃のRu-Ruダイマー転移に対する乱れの効果[a]、およびLi欠損系での特異なダイマー転移を明らかにしました[12]。

(3-3) イリジウム層状酸化物 高木

Sr₂IrO₄は電子相関とスピン軌道相互作用の協奏により生じたJ_{eff}=1/2のモーメントを有するスピン軌道モット絶縁体です(図1も参照)。通常スピン軌道相互作用の強い系では磁気異方性が顕著となりますが、Sr₂IrO₄ではスピン軌道相互作用に誘起される等方性(ハイゼンベルグ性)が出現するとされています。帯磁率の解析から、磁気相関が二次元S = 1/2ハイゼンベルグスピンとして振る舞い、高温超伝導銅酸化物との等価性を示しました[17]。低温で現れる三次元磁気秩序構造に面間の磁気結合のフラストレーションが重要な役割を果たしていることも明らかにしました。

(3-4) 重い電子系人工超格子における磁気量子相転移の制御 松田・寺嶋・笠原

世界に類を見ない薄膜作製技術を用いて重い電子系の超格子を作製することで、人工的な量子相転移制御やトポロジカル量子相の実現が期待されます。松田・寺嶋・笠原らは、スピン密度波(SDW)を示す磁性金属CeRhIn₅と非磁性金属YbRhIn₅の超格子(図6)を作製することで、SDWの低次元化による量子相転移の実現に成功しました[3]。さらに、観測された量子臨界点の異方的な磁場応答について、界面における局所的な空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用に伴うラッシュバ分裂が重要な役割を果たしていることを明らかにしました。

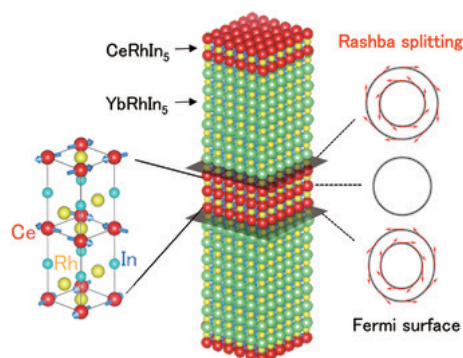


図6: CeRhIn₅/YbRhIn₅人工超格子の模式図と界面におけるラッシュバ分裂の概念図。

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、トポロジカル超流動など相補的テーマを含む公募研究 A01 (4 件)・D02 (4 件) との連携も進めています。また、研究項目間の連携では、マヨラナ準粒子の検証等で D01・C01 と、奇周波数超伝導等で B01 と、超伝導素子開発等で C01 と、それぞれ情報・アイデア・ノウハウの交換やアナロジー追及も含めて連携して相乗的な研究展開を図っています。さらに、国際共同研究の展開も含め、世界を先導する研究成果の発信を目指します。これらの研究を活発な連携を生かして進めることで、新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」の開拓と基礎学理の構築・学問体系の樹立を目指す本領域全体の目的遂行に貢献します。

[*] "Correlated Quantum Phenomena in the Strong Spin-Orbit Regime", W. Witczak-Krempa, G. Chen, Y. B. Kim, L. Balents, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **5**, 57–82 (2014).

● H27(2015) 年度 2 月以降の計画研究 A01 発表論文

[a] "Effect of disorder on the dimer transition of the honeycomb-lattice compound Li_2RuO_3 ", M. P. Jimenez-Segura, A. Ikeda, S. Yonezawa, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **93**, 075133 (Feb. 2016).

[b] "Possible observation of highly itinerant quantum magnetic monopoles in the frustrated pyrochlore $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ", Y. Tokiwa, T. Yamashita, M. Udagawa, S. Kittaka, T. Sakakibara, D. Terazawa, Y. Shimoyama, T. Terashima, Y. Yasui, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Nature Commun.* **7**, 10807 (Feb. 2016).

[c] "Interplanar coupling-dependent magnetoresistivity in high-purity layered metals", N. Kikugawa, P. Goswami, A. Kiswandhi, E. S. Choi, D. Graf, R. E. Baumbach, J. S. Brooks, K. Sugii, Y. Iida, M. Nishio, S. Uji, T. Terashima, P. M. C. Rourke, N. E. Hussey, H. Takatsu, S. Yonezawa, Y. Maeno, L. Balicas, *Nature Commun.* **7**, 10903 (Mar. 2016).

[d] "Novel superconducting phenomena in quasi-one-dimensional Bechgaard salts", D. Jerome, S. Yonezawa, *Comptes Rendus Physique* **17**, 357 (Mar. 2016).

● H28(2016) 年度の計画研究 A01 発表論文 (発表順)

[1] "Torsional Chiral Magnetic Effect in a Weyl Semimetal with a Topological Defect", H. Sumiyoshi, S. Fujimoto, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 166601 (Apr. 2016).

[2] "Spin-rotation symmetry breaking in the superconducting state of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, G-q. Zheng, *Nature Phys.* **12**, 42520 (May. 2016).

[3] "Tuning the Magnetic Quantum Criticality of Artificial Kondo Superlattices $\text{CeRhIn}_5=\text{YbRhIn}_5$ ", T. Ishii, R. Toda, Y. Hanaoka, Y. Tokiwa, M. Shimozawa, Y. Kasahara, R. Endo, T. Terashima, A. H. Nevidomskyy, T. Shibauchi, Y. Matsuda, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 206401 (May. 2016).

[4] "All-electrical generation and control of odd-frequency s-wave Cooper pairs in double quantum dots", P. Buset, B. Lu, H. Ebisu, Y. Asano, Y. Tanaka, *Phys. Rev. B* **93**, 201402(R) (May. 2016).

[5] "Degeneracy of Majorana bound states and fractional Josephson effect in a dirty SNS junction" S. Ikegaya, Y. Asano, *J. Phys: Cond. Matter.* **28**, 375702 (Jul. 2016).

[6] "Influence of the impurity scattering on charge transport in unconventional superconductor junctions", B. Lu, P. Buset, Y. Tanuma, A.A. Golubov, Y. Asano, Y. Tanaka, *Phys. Rev. B* **94**, 014504 (Jul. 2016).

[7] "Evolution of supercurrent path in Nb/Ru/ Sr_2RuO_4 dc-SQUIDS", Y. Nago, R. Ishiguro, T. Sakurai, M. Yakabe, T. Nakamura, S. Yonezawa, S. Kashiwaya, H. Takayanagi, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **94**, 054501 (Aug. 2016).

[8] "Quantization of conductance minimum and index theorem", S. Ikegaya, S. Suzuki, Y. Tanaka, Y. Asano, *Phys. Rev. B* **94**, 054512 (Aug. 2016).

[9] "Generic Weyl phase in the vortex state of quasi-two-dimensional chiral superconductors", Tomohiro Yoshida, M. Udagawa, *Phys. Rev. B* **94**, 060507R-1-4 (Aug. 2016).

[10] "Field-Selective Anomaly and Chiral Mode Reversal in Type-II Weyl Materials", M. Udagawa, E.J. Bergholtz, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 086401-1-5 (Aug. 2016).

[11] "Out-of-equilibrium dynamics and extended textures of topological defects in spin ice", M. Udagawa, L. D. C. Jaubert, C. Castelnovo, R. Moessner, *Phys. Rev. B* **94**, 104416-1-24 (Sep. 2016).

[12] "Effect of delithiation on the dimer transition of the honeycomb-lattice ruthenate $\text{Li}_{2-x}\text{RuO}_3$ ", M. Jimenez-Segura, A. Ikeda, S. A. J. Kimber, C. Giacobbe, S. Yonezawa, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **94**, 115163 (Sep. 2016).

[13] "Thermodynamic evidence for nematic superconductivity in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ", S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando, Y. Maeno, *Nature Phys.* **13**, 123-126 (Feb. 2017, Online: Oct. 2016).

[14] "Spontaneous edge current in a small chiral superconductor with a rough surface" Shu-Ichiro Suzuki, Yasuhiro Asano, *Phys. Rev. B* **94**, 155302 (Oct. 2016).

[15] "Anomalous magnetic fluctuations in superconducting Sr_2RuO_4 revealed by ^{101}Ru nuclear spin-spin relaxation", M. Manago, T. Yamanaka, K. Ishida, Z.Q. Mao, Y. Maeno, *Phys. Rev. B* **94**, 144511 (Oct. 2016).

[16] "Direct penetration of spin-triplet superconductivity into a ferromagnet in Au/ SrRuO_3 / Sr_2RuO_4 junctions", M. S. Anwar, S. R. Lee, R. Ishiguro, Y. Sugimoto, Y. Tano, S. J. Kang, Y. J. Shin, S. Yonezawa, D. Manske, H. Takayanagi, T. W. Noh, Y. Maeno, *Nature Commun.* **7**, 13220 (Oct. 2016).

[17] "Model analysis of magnetic susceptibility of Sr_2IrO_4 : A two-dimensional $J_{\text{eff}} = 1/2$ Heisenberg system with competing interlayer couplings", T. Takayama, A. Matsumoto, G. Jackeli, H. Takagi, *Phys. Rev. B* **94**, 224420 (Dec. 2016).

[18] "Superconductivity in the antiperovskite Dirac-metal oxide $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$ ", M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato, Y. Maeno, *Nature Commun.* **7**, 13617 (Dec. 2016).

[19] "Strong peak in T_c of Sr_2RuO_4 under uniaxial pressure", A. Steppke, L. Zhao, M. E. Barber, T. Scaffidi, F. Jerzembeck, H. Rosner, A. S. Gibbs, Y. Maeno, S. H. Simon, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, *Science* **355**, eaaf9398-1-5 (Jan. 2017).

[20] "Zero-gap Semiconductor to Excitonic Insulator Transition in Ta_2NiSe_5 ", Y. F. Lu, H. Kono, T. I. Larkin, A. W. Rost, T. Takayama, A. V. Boris, B. Keimer, and H. Takagi, *Nature Commun.* Accepted.