

機関番号：14301

領域設定期間：2015～2019

領域番号：2701

研究領域名（和文） トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア

研究領域名（英文） Frontiers of materials science spun from topology

領域代表者

川上 則雄 (KAWAKAMI Norio)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10169683

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,084,800,000円

### 研究成果の概要

物質に内在するトポロジーを基軸として、強い電子相関・結晶対称性・半導体ナノ構造に由来する物理現象を調べ、トポロジカル量子相特有の準粒子を探索・実証した。これらの総合的な研究を通して、分野横断型の研究領域「トポロジカル物質科学」の開拓に貢献した。

【具体的成果】強い電子相関を持つ物質に関しては、トポロジカル磁性体でマヨラナ準粒子を初めて実証し、新たなスピン液体物質の開拓にも成功した。ネマチック超伝導、ディラック金属の超伝導など新たなトポロジカル超伝導の候補物質を発見した。グライド対称性や鏡面対称性に基づく線ノード半金属、らせん対称性に起因したワイル半金属などの多彩な新型トポロジカル半金属を発見・実証した。さらに、2次元トポロジカル絶縁体の最適化や、量子ホールエッジチャネルを用いたスピンと電荷分離の時間分解測定を実現した。理論に関しては、平衡・非平衡系のトポロジカル分類理論の開拓、新奇トポロジカル超伝導の提案、素粒子物理への応用や数学との融合研究などに大きな進展がみられた。

【連携の推進】上記の多くの成果は、計画研究間、計画研究と公募研究との連携によって生まれた。本領域独自のトポロジー連携研究会がこのような研究融合に重要な役割を果たした。国際アライアンスワークショップ、領域国際会議、研究者交換プログラムなどを利用し、本領域が核となって国際連携ネットワーク「Topo-Q」構築の基盤を築くとともに、国際性豊かな若手研究者の育成にも取り組んだ。

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジー、物質科学、強相関、対称性、ナノサイエンス

#### 1. 研究開始当初の背景

トポロジーは「連続変形に対する不変性」に関する幾何学の概念であるが、この重要性が物質科学において広く認識されるようになってきた。特に、量子状態のトポロジカルな性質に起因する現象に飛躍的な研究の進展がみられている。この分野に新たなブレークスルーをもたらしたのは2005年の「量子スピンホール効果」の理論的予言と、2007年の2次元量子井戸  $\text{HgTe/CdTe}$  での実現である。これに続き、2009年以降  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  など3次元系でも次々と新物質が発見された。これらの物質群は「トポロジカル絶縁体」と呼ばれ、物質科学の新たな研究舞台を創り出した。

この驚くべき発展を遂げてきた分野で、世界に先駆けて新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（略称：トポロジカル量子，H22-H26，代表：前野悦輝）が始動し、トポロジカル絶縁体の実証や、トポロジカル量子現象の共通認識を導くに至った。しかし、新奇なトポロジカル準粒子の実証を含め、その学問体系の樹立には至っていなかった。本領域は、先発した我が国の成果を新学術領域の「開拓」から「確立」までゆるぎないものにするため、前身領域に新たな分野を加えて大幅に再編成することで、世界の最前線でトポロジカルな自然観の構築を先導することを目指すものである。

#### 2. 研究の目的

本領域は、物質に内在するトポロジーを基軸として、電子間の相互作用、結晶のもつ対称性、さらには半導体ナノ構造に由来する新奇物性の開拓を行うとともに、トポロジカル量子現象に特有の準粒子を探索・実証し、その背後に横たわる量子凝縮相の物理を解明することを目的としている。近年、トポロジカル量子現象の研究が世界的潮流になってきたが、物質科学の基盤概念として真に根付くには、未開拓

の部分が多く残されている。特に、

- (1) 現実の物質に多様性と機能性を与える電子間相互作用の効果の解明
- (2) 結晶構造の対称性に基づくトポロジカル物質の開拓
- (3) ナノサイエンスを駆使したヘテロ構造などによるトポロジカル相の人工制御

が、新たな物質開発だけでなく学理構築の鍵となる。これらの研究を総合的に推進することで、分野横断型の研究領域を開拓する。

### 3. 研究の方法

#### 【研究推進の具体策】

本領域の研究組織は4つの研究項目から構成されている(右図)。

- A: 「トポロジーと強相関」
- B: 「トポロジーと対称性」
- C: 「トポロジーとナノサイエンス」
- D: 「トポロジーと新概念」



各研究項目は計画研究(A01-D01)と公募研究(A01-C01, D02-D04)から構成されている。この中で A-C は物質に即した研究項目であり、互いに協力関係を保ちながら、強相関トポロジカル系、半導体トポロジカル系、ナノ構造での人工トポロジカル系などの研究を推進する。これらの連携をさらに強固にする横糸の役割を担うのが理論の D で、トポロジカル量子現象に関する普遍概念の構築を目標とする。また、A-C にも実験に即した理論研究者を配置し、実験と理論のより密接な連携を図る。研究対象は、トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体などの典型物質のみならず、量子スピン系や冷却原子系でのトポロジカル相など、広い意味でのトポロジカル量子相を含む。領域運営で特に重視しているのが若手育成と国際連携である。このため、「若手励起プログラム(国内)」や「国際交換プログラム」を導入し国際的に活躍できる人材を抜擢し育成する。また、国際支援班に導入した“Topo-Q ネットワーク”を活用し「アライアンスワークショップ」などの国際会議を通して、国際的な連携・共同研究を強力に推進する。

#### 【期待される成果と意義】

本領域の特色は、物性物理の舞台に芽生えてきたトポロジカル量子現象の諸概念を統合することで、個々のトポロジカル量子現象を昇華し、新しい学術としての物質科学の研究舞台を作り上げることである。期待される成果の具体的な例としては、

- (1)トポロジカル量子相転移の確立
- (2)トポロジカル絶縁体・超伝導の統合的理解
- (3)トポロジカル半金属の実現
- (4)マヨラナ準粒子の検証

などである。これらの総合的研究を通して、これまで個々の専門分野ではカバーされていなかった課題を克服し、異分野間の連携を進める。

### 4. 研究の成果

5年間の領域研究を通して、トポロジカル物質の開拓、新たな量子現象の探索に関して確固とした研究成果が得られた。特に、計画研究の間、および計画研究と公募研究の間の連携により研究に大きな進展がみられた。中でも、挑戦的課題として掲げた「マヨラナ準粒子の検証」に関して、本領域の核のひとつである「強相関の物質」で、これを実証できたことは特筆に値する。

以下に、得られた成果の中で代表的なものを研究項目ごとにまとめる。各々の成果に対して、見出し・短い説明をつけるとともに、共同研究で得られた成果の場合は、その具体的な連携の内容についてもコメントしている。

#### 研究項目 A: 強相関とトポロジー

**計画研究** 計画研究は以下の3つの物質分類で研究を進めた。

##### 【1. トポロジカル超伝導体】

◆**ネマチック超伝導の発見** A01計画:前野,米澤,鄭,俣野,B01,D01,公募D03と共同 トポロジカル絶縁体にドーピングした $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ で、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「ネマチック超伝導」(右図)を世界に先駆けて実証した[A5, A6]。

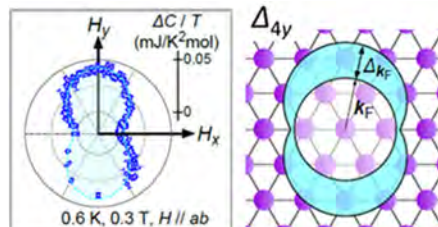


図: 磁場中比熱が示すネマチック超伝導状態。

◆**アンチペロブスカイト酸化物の超伝導発見** A01計画:前野,米澤, D01との共同研究 トポロジカル結晶絶縁体の候補物質にドーピングを行って、同系酸化物で世界初の超伝導を発見し、トポロジカル超伝導性を分析した[A4]。

◆**ルテニウム酸化物のカイラル超伝導状態** A01計画:前野,米澤, B01, D01および多くの国際共同研究 一軸性歪印加装置を開発してフェルミ面構造の制御によって $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導転移温度の倍増制御を可能にした。これを契機に過去のNMR実験の技術的問題を解明し、新たな研究展開を進めた[A3]。微細加工系では、マイクロリングの量子振動から2成分超伝導状態を示した。一方、接合系では、電流・磁場方向の同時反転から時間反転対称性の保たれた状態が得られた。Ru金属の析出した共晶

系からは低温超伝導相はカイラル超伝導に矛盾ない結果が得られた。

◆**ラインノードをもつトポロジカル物質での超伝導発見** A01計画を中心にB01,D01の理論 非共形 (Nonsymmorphic)対称性に保護された線上ノード半金属CaSb<sub>2</sub>が超伝導体であることを発見した。

## 【2. トポロジカルモット絶縁体・磁性体】

◆**キタエフ量子スピン液体とマヨラナ準粒子の発見** A01計画:松田, 笠原,公募 D02 トポロジカル科学研究の最大のターゲットのひとつであるマヨラナ準粒子の直接的証拠となる「半整数量子ホール効果」の観測に成功した[A1](右図)。これは、ハニカム格子系  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> の磁気転移を磁場で抑制して低温でのキタエフ量子スピン液体を実現したことによる。A01計画:高木 また、イリジウムのハニカム格子系で水素置換体 H<sub>3</sub>LiIr<sub>2</sub>O<sub>6</sub> もキタエフ量子スピン液体性が極低温まで保たれることを示した[A2]。

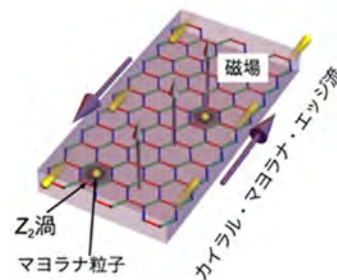


図: 半整数熱量子ホール効果状態の概念図。

◆**パイロクロア格子酸化物におけるエキゾチック準粒子** A01:松田,宇田川,笠原 パイロクロア酸化物 Yb<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>や Pr<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>の量子スピン液体状態で磁気モノポールなどのスピン励起創発準粒子の存在を明らかにした。

## 【3. トポロジカル半金属等】

◆**非エルミート・ハミルトニアン** A01 と公募 D03 ワイルおよびディラック半金属では、不純物が生む非エルミート性から、観測可能な特異な電子バンドの出現を予言した。

◆**トポロジカル近藤絶縁体** A01計画:松田,笠原 トポロジカル近藤絶縁体候補物質 YbB<sub>12</sub>の磁化と電気抵抗測定から、前例のない「絶縁体の量子振動」を観測した。

**公募研究** ◆**ディラック半金属薄膜における量子ホール状態の実現** A01公募:打田 ディラック半金属 Cd<sub>3</sub>As<sub>2</sub>の薄膜化に成功し、量子ホール状態を初めて観測した。

## 研究項目 B: 対称性とトポロジー

### ◆CoSi における新しいカイラル準粒子の実証

B01計画:佐藤,相馬,D03 山内(公募) カイラル結晶 CoSi において、ディラック・ワイル粒子を超える新しい準粒子「スピン1粒子」および「2重ワイル粒子」を発見した(右図)。また、線ノード半金属など多くの新奇トポロジカル半金属を実証した[B1他]。

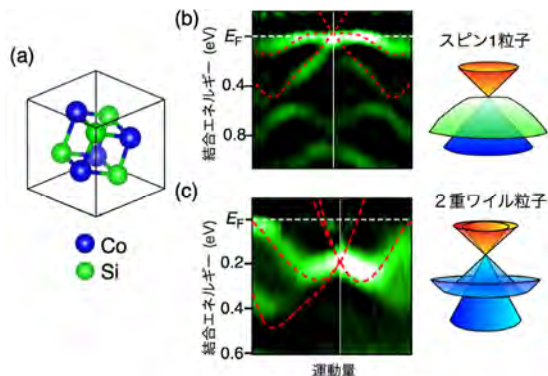


図: (a) CoSiの結晶構造. ARPESで決定した (b)スピン1粒子と(c)2重ワイル粒子のバンド分散。

### ◆トポロジカル超伝導の新しい実現法を提案

B01計画:佐藤,瀬川,相馬,安藤,D03 山内(公募) トポロジカル絶縁体上に作製した Pb 薄膜の電子状態研究により、従来型超伝導体をトポロジカル超伝導体に変換する全く新しい方法を提案した[B2]。

### ◆トポロジカル絶縁体薄膜素子の開発

B01計画:塚崎,佐藤 MBE法によって(Bi,Sb)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>薄膜を作製し、大きな課題であったフェルミ準位の制御と磁性元素ドーピングを実現した。さらに、過去に例のない磁場誘起トポロジカル転移を観測した[B3]。

◆**Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>で超伝導状態における対称性の破れを観測** B01計画:瀬川,安藤, A01前野,D02永井(公募) トポロジカル超伝導体候補物質 Cu<sub>x</sub>Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>において結晶の対称性を破る「ネマチック超伝導」が発現していることを明らかにした。

◆**Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>におけるトポロジカル超伝導性の検証** B01計画:柏谷,田仲,A01浅野,前野 Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>におけるジョセフソン効果の実験により、時間反転対称性を破らない超伝導を観測した[B4他]。

◆**奇周波数クーパ対の理論** B01計画:田仲,領域 PD エッジ状態として誘起される奇周波数クーパ対とバルクのグリーン関数の間に、スペクトル・バルクエッジ対応と呼ばれる関係式が成り立つことを示した[B5他]。

◆**ドーピングしたディラック半金属における超伝導理論を構築** B01計画:田仲,D01佐藤 ディラック電子にキャリアをドーピングしたときの超伝導理論を構築し、強いスピン軌道相互作用によって特殊な超伝導相図が現れることを明らかにした。

◆**ディラック半金属に起因した強相関ペロブスカイトにおける磁気輸送特性** B01公募:藤岡 イリジウム系ペロブスカイト酸化物において、強相関効果によるディラック電子の生成に起因した高移動度の電子を見出した。

## 研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス

◆**カイラル朝永ラッティンジャー流体におけるスピン電荷分離の時間分解波形測定** C01 計画:藤澤,橋坂,村木 GaAs 系量子ホールエッジチャネルを用いたカイラル朝永ラッティンジャー流体において、スピンモードと電荷モードが異なる速度で独立に伝導するスピン電荷分離を時間分解測定により検証した[C1 他](右図)。さらに、スピン電荷分離に起因して、可積分系特有の非平衡準安定状態が現れることを検証した。

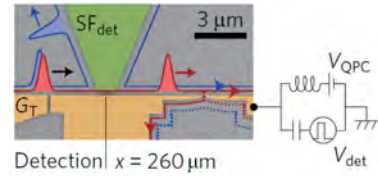


図: カイラルエッジ状態のスピン電荷分離検出素子。

◆**歪みバンドエンジニアリングによる量子スピンホール効果の向上** C01 計画:村木,秋保,入江 InAs/InGaSb ヘテロ構造による量子スピンホール効果において、歪みバンドエンジニアリングでトポジカル相の最適化を行い、バルク絶縁性が向上した[C2 他](右図)。さらに、InAs/GaSb 系の層厚・歪みに対するトポジカル-非トポジカル相図を明らかにした。

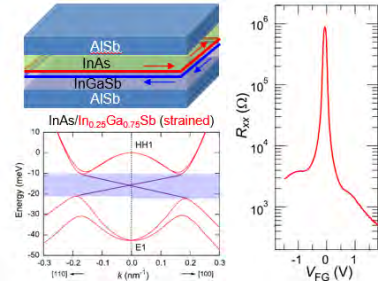


図: 歪制御による量子スピンホール系の最適化。

◆**スピン軌道ロッキングを用いた新たなスピン制御の実証** C01 計画:好田 2次元 Rashba 系やトポ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、新たなスピン制御方法を実現した。InGaAs/InAlAs 量子井戸構造における磁気フォーカシングによりスピン制御を実現した[C3]。

◆**磁性ワイル半金属の磁気輸送・スピンドイナミクス** C01 計画:野村 磁性ワイル半金属における電磁結合を記述する有効理論を構築し、磁化ダイナミクス・異方的磁気伝導の理論解析を行った。磁性ワイル半金属の磁気電荷ポンピングを提案し、ヘリシティに起因する磁気抵抗効果を予言した。

◆**弾道的 1次元電子系へのクーパー対分離現象の観測** C01 公募:松尾 清浄な InAs ナノ細線を二本並べた系における超伝導電流の測定により、マヨラナ準粒子の実現に必要な高効率の弾道的なクーパー対分離の観測に初めて成功した[C4]。

◆**強磁性半導体(In,Fe)As 中に誘起されたスピン三重項近接効果超伝導** C01 公募:中村 強磁性半導体(In,Fe)As に従来型超伝導体 Nb を接合した超伝導素子を作成し、超伝導近接効果による長距離超伝導電流を観測し、スピン三重項超伝導によるものであることを示した[C5]。

## 研究項目 D: トポロジーと新概念

◆**トポジカル分類のリダクションの実験提案** D01 川上・D02 柳瀬の連携 A01 の松田らが作製に成功した重い電子超格子系 CeCoIn<sub>5</sub>/YbCoIn<sub>5</sub> が強相関トポジカル超伝導の新たなクラスの候補物質であることを初めて提案した[D1]。

◆**中性子星におけるトポジカル超流動理論の構築**: D01 (計画:新田,水島) 超流動 <sup>3</sup>He とのアナロジーを活用することで中性子星内部の中性子トポジカル超流動状態の性質を明らかにした。本新学術領域ならではの素粒子(新田)と物性(水島)による異分野連携研究の成功例である[D2]。

◆**アンチペロブスカイト物質でのトポジカル超伝導理論** D01 計画:佐藤, A01 前野 ディラック金属のトポジカル超伝導理論を開拓し、これを A01 前野グループが発見した新しい超伝導体 Sr<sub>3-x</sub>SnO に応用した [レビューD3]。

◆**非エルミート系特有のトポジカル相の理論的予言**: D01 計画:上田 非平衡開放系を有効的に記述する非エルミート量子系に特有のトポジカル相の存在を予言した[D4]。

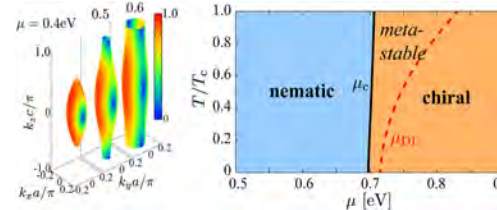


図: フェルミ面形状変化とネマチック・カイラル相転移。

◆**ネマチック超伝導における電磁応答の理論**: D01 計画:水島, A01 藤本 ネマチック超伝導でカイラル相転移が起こること、これに伴うカイラル Higgs ボソン励起のソフト化が光吸収スペクトルで観測できることを示した(右図)[D5]。

◆**ボソン・フェルミオン間の双対性に関する理論**: D01 計画:西田 ディラックフェルミオンと真空角  $\theta = \pi$  のスカラーQED が双対であること、フェルミオンのトポジカル相転移がヒッグス・閉じ込め相転移に対応していることを示した。

◆**粒子の流出入を含む量子ウォークのトポジカル現象** D04 公募:小布施, D01 川上, 国際連携 散逸を含むフォトニック系の量子ウォークのトポジカルな性質の理論を構築し、中国の実験グループと協力してこれを実現した。

## 5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

### 《研究項目 A: トポロジーと強相関》 (計 143 件、すべて査読有)

- [A1] Y. Kasahara, T. Ohnishi, Y. Mizukami, O. Tanaka, S. Ma, K. Sugii, N. Kurita, H. Tanaka, J. Nasu, Y. Motome, T. Shibauchi, \*Y. Matsuda, *Nature* **559**, 227–231 (2018).
- [A2] K. Kitagawa, T. Takayama, Y. Matsumoto, A. Kato, R. Takano, Y. Kishimoto, S. Bette, R. Dinnebier, G. Jackeli, \*H. Takagi, *Nature* **554**, 341–345 (2018).
- [A3] \*A. Steppke, L. Zhao, M. E. Barber, T. Scaffidi, F. Jerzembeck, H. Rosner, Al. S. Gibbs, Y. Maeno, St. H. Simon, A. P. Mackenzie, \*C. W. Hicks, *Science* **355**, 9398-1-5 (2017).
- [A4] \*M. Oudah, A. Ikeda, J. N. Hausmann, S. Yonezawa, T. Fukumoto, S. Kobayashi, M. Sato, \*Y. Maeno, *Nature Commun.* **7**, 13617-1-6 (2016).
- [A5] \*S. Yonezawa, K. Tajiri, S. Nakata, Y. Nagai, Z. Wang, K. Segawa, Y. Ando, Y. Maeno, *Nature Phys.* **13**, 123–126 (2016).
- [A6] \*K. Matano, M. Kriener, K. Segawa, Y. Ando, G. -q. Zheng, *Nature Phys.* **12**, 852-854 (2016).

### 《研究項目 B: トポロジーと対称性》 (計 153 件、すべて査読有)

- [B1] D. Takane, Z. Wang, S. Souma, K. Nakayama, T. Nakamura, H. Oinuma, Y. Nakata, H. Iwasawa, C. Cacho, T. Kim, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, Y. Ando, \*T. Sato, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 076402-1-6 (2019).
- [B2] C. X. Trang, N. Shimamura, K. Nakayama, S. Souma, K. Sugawara, I. Watanabe, K. Yamauchi(D03), T. Oguchi, K. Segawa, T. Takahashi, Y. Ando, \*T. Sato, *Nature Commun.* **11**, 159-1-6 (2020).
- [B3] Y. Satake, \*J. Shioyai, G. P. Mazur, S. Kimura, S. Awaji, K. Fujiwara, T. Nojima, K. Nomura(C01), S. Souma, T. Sato, T. Dietl, A. Tsukazaki, *Phys. Rev. Meter.* **4**, 044202-1-8 (2020).
- [B4] \*S. Kashiwaya, K. Saitoh, H. Kashiwaya, M. Koyanagi, M. Sato(D01), K. Yada, Y. Tanaka, Y. Maeno(A01), *Phys. Rev. B* **100**, 094530-1-9 (2019).
- [B5] \*S. Tamura, S. Hoshino, and Y. Tanaka, *Phys. Rev. B* **98**, 014508-1-11 (2018).

### 《研究項目 C: トポロジーとナノサイエンス》 (計 128 件、すべて査読有)

- [C1] \*M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, T. Fujisawa, *Nature Phys.* **13**, 559-563 (2017).
- [C2] T. Akiho, F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, \*K. Muraki, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 192105-1-5 (2016).
- [C3] \*M. Kohda, T. Okayasu, J. Nitta, *Sci. Rep.* **9**, 1909-1-9 (2019).
- [C4] \*K. Ueda, S. Matsuo, H. Kamata, S. Baba, Y. Sato, Y. Takeshige, K. Li, S. Jeppesen, L. Samuelson, H. Xu, S. Tarucha, *Science Adv.* **5**, eaaw2194 (2019).
- [C5] \*Y. J. Zhang, T. Ideue, M. Onga, F. Qin, R. Suzuki, A. Zak, R. Tenne, J. H. Smet, and Y. Iwasa, *Nature* **570**, 349-353 (2019).

### 《研究項目 D: トポロジーと新概念》 (計 306 件、すべて査読有)

- [D1] \*T. Yoshida, A. Daido, Y. Yanase, N. Kawakami, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 147001-1-6 (2017).
- [D2] \*T. Mizushima, K. Masuda and M. Nitta, *Phys. Rev. B* **95**, 140503-1-6 (2017).
- [D3] \*M. Sato, \*Y. Ando(B01), *Rep. Prog. Phys.* **80**, 076501-1-43 (2017).
- [D4] \*S. Higashikawa, Z. Gong, Y. Ashida, M. Ueda, *Nature Commun.* **10**, 297-1-7 (2019).
- [D5] H. Uematsu, \*T. Mizushima, A. Tsuruta, S. Fujimoto(A01), J. A. Sauls, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 237001-1-7 (2019).

## 受賞

**一般:** ○カマリンオンネス賞[2018:松田祐司(A01)] ○クラリベイト・アナリティクス(旧トムソン・ロイター) Highly cited researchers[2017:松田祐司(A01)] ○科学技術分野の文部科学大臣表彰 3 名[2020:田仲由喜夫(B01), 柏谷聡(B01); 2019:松田祐司(A01)] ○米沢富美子記念賞[2020:川口由紀(D04)] ○久保亮五記念賞[2017:川口由紀(D04)] ○日本物理学会論文賞 3 名[2019:田仲由喜夫(B01), 山影相(D03), 柳瀬陽一(D02)], など

**若手:** ○科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞(若手科学者賞): 4 名[2018:好田誠(C01), 橋坂昌幸(C01), 那須讓治(D02); 2017:横山毅人(D04)] ○日本物理学会若手奨励賞: 7 名[2020:藤岡淳(B01), 塩見雄毅(B01), 井手上敏也(C01), 打田正輝(A01); 2018:米澤進吾(A01), 笠原裕一(A01); 2017:那須讓治(D02)] ○日本物理学会論文賞: 2 名 [2020:赤城裕(D02), 2019:北川健太郎(A01)] ○N. F. Mott Prize[2016:桂法称(D02)], など

## ホームページ等

日本語ホームページ <http://topo-mat-sci.jp/>

英語ホームページ <http://topo-mat-sci.jp/en/>