

令和元年6月18日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2017

課題番号：26287062

研究課題名（和文）トポロジックに基づくバンド構造制御と新奇物性探索

研究課題名（英文）Control of band structure and emergent novel phenomena based on band topology

研究代表者

村上 修一（Murakami, Shuichi）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：30282685

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではトポロジカル物質の相転移の一般論を構築した。例えば空間反転対称性の破れた絶縁体のギャップを閉じると必ずトポロジカル半金属となることを示した。またトポロジカル半金属の超格子の理論や、ワイル半金属の表面状態分散の一般論を構築した。また、高圧下テルルがワイル半金属になることや、高圧下カルシウムがノードライン半金属になること等、トポロジカル物質の提案を行った。さらに、グラフェンリボンの特異分極応答や、界面对称性の概念の提案等、トポロジカル物質の新規物性の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル物質は、その電子状態がトポロジックで特徴づけられることはわかっているが、それらの物質が固有に持っている、通常の物質と異なる物性、またどのような物質がトポロジカル物質になるかという物理的解釈はいまだ不足している。本研究結果は、その点についての一般論を構築することで、今度のトポロジカル物質の探索や実験に資する。例えばトポロジカル物質の新規提案は実験的な検証へと直結していくことが期待できる。またトポロジカル物質の相転移の理論や超格子の理論などは、広い範囲のトポロジカル物質に適用されるため、今後の本分野への波及効果も大きい。

研究成果の概要（英文）：We constructed general theories on phase transitions of topological materials. For example, we showed that a closing of a gap of an insulator without inversion symmetry always leads to a topological semimetal. We also constructed a theory on superlattices of topological semimetals, and a theory on surface-state dispersions of Weyl semimetals. We also proposed various new topological materials, such as tellurium at high pressure as a Weyl semimetal, and calcium at high pressure as a nodal-line semimetal. We also unveiled new physical phenomena of topological materials. We proposed a concept of interfacial symmetries and revealed appearance of novel interfacial states. We also showed an anomalous dielectric response of bilayer graphene ribbons by an interlayer bias voltage.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル絶縁体 ワイル半金属 トポロジック スピンエレクトロニクス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体は、バルクでは非磁性バンド絶縁体でありながらエッジ状態や表面状態がフェルミエネルギー上にありスピン流を運ぶ新しい相である。特に3次元ではディラックコーンと呼ばれる円錐状のバンド構造を持つ表面状態があることが知られている。またこの研究から派生して、3次元のバルクのバンド構造自身にディラックコーンがあるような、ワイル半金属・ディラック半金属なども盛んに研究されている。本研究代表者はトポロジカル絶縁体の研究に2005年当初より携わっており、数々の論文を発表している。例えば2006年には2原子層ビスマス薄膜がトポロジカル絶縁体となることを理論的に見出した (Murakami, Phys. Rev. Lett. 97, 236805 (2006))。この論文は、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ での3次元トポロジカル絶縁体の実験による観測への契機ともなった。さらにワイル半金属、ディラック半金属に関する研究成果 (Murakami, New. J. Phys.9, 356 (2007)等)も(「ワイル半金属」と命名される前より)世界に先駆けて出している。こうした物質系の特徴は、旧来のバンド理論から予想されない形で特異なバンド構造が出現することであり、そのバンド構造の、波数空間のトポロジーに起因してディラックコーンを持つ。本研究代表者はトポロジーに規定されたバンド構造を持つ物質群に関して世界をリードして研究を行っており、本研究課題ではこの研究をさらに一般化し、さらに実際の物質探索や物性予言を目指す。

2. 研究の目的

グラフェン、トポロジカル絶縁体、ワイル半金属などでは、そのバンド構造や物性がトポロジーに強く制約を受ける。本研究ではこうしたトポロジーによるバンド構造変化について、スピン軌道相互作用がある系、ディラックコーンを持つ系や関連する系に関して、(A)バンド構造制御、(B)特異なバンド構造による新奇物性現象の探索を行う。(A)では、次のような変化に伴う新しいバンド構造制御の可能性とその示す物性について研究を行う：(A-1)次元性制御、(A-2)対称性制御、(A-3)その他外部パラメータ変化による制御。まず、バンド構造に伴うトポロジーは次元性に敏感に依存するので、それによる2次元と3次元のクロスオーバーの振る舞いをういたバンド制御を(A-1)で扱う。同時に(A-2)として、時間反転対称性や結晶の対称性など対称性の制御について研究する。またその他外部パラメータ制御については、(A-3)で扱う。(B)では、こうしたバンド構造の変化や制御に伴う特異な物性現象を研究する。例えば、(B-1)ワイル半金属でのバンド構造制御に伴う物性制御がその代表例である。また、(B-2)トポロジカル絶縁体および関連物質(ワイル半金属等)でのスピン輸送の諸現象として、特異なスピン分裂に起因する諸現象を研究し、また(B-3)構造の対称性の低下に伴う特異な輸送(横応答、交差応答など)として、上で得られた特異なバンド構造に関連して、系の形状で対称性を壊した場合、また系の格子構造の対称性の低下による応答現象を研究する。

3. 研究の方法

全体を通じて、主に模型に基づく計算を中心に行う。第一に、注目している物理現象を表していると考えられる有効模型を構築する。ある程度解析計算ができるような単純な模型でありながら、新規現象の本質を有した模型を構築するのは、研究内容の本質にかかわる重要なステップである。第二ステップとして、その模型で、ターゲットとしている新規現象の計算をする。主に解析計算を行い、場合によっては数値計算も行いながら、その模型の本質を明らかにする。第三に、その模型の計算結果から、一般の系での物理現象の議論を行う。模型では実際の物質に存在するさまざまな詳細を捨象しているために、さまざまな特殊性を持つ場合があり、模型で予想された現象が、複雑な実際の物質で起こるかどうかが緻密な議論が必要である。第四に、第一原理計算の研究者と協力して、構築した理論が適用できる実際の物質を探索する。

4. 研究成果

(1) 空間反転対称性の破れたトポロジカル半金属の理論

テルル、セレンはそのらせん状の結晶構造から右巻き結晶と左巻き結晶の区別があり、空間反転対称性が破れており、これらについて第一原理計算を行った(文献⑩)。例えばテルルは常圧では0.3eVのギャップが開いた半導体であるが、圧力下ではギャップが小さくなり2.2GPa程度でギャップが閉じてワイル半金属になることを示した。さらに鏡映対称性や空間反転対称性が破れているために、スピンはH点まわりで放射状になることを見出した。

さらにそれを発展させて、スピン軌道相互作用のある空間反転対称性の破れた非磁性絶縁体を考えたとき、パラメータ変化によってギャップが閉じた後にどのような相が現れるかを考察した(文献④)。空間反転対称性が破れている全ての空間群に対して、全てのk点に関してギャップが閉じる場合を網羅的に調べた。その結果全ての場合について、ギャップが閉じた後ワイル半金属かノーダルライン半金属かのいずれかになることと、絶縁体からギャップが閉じてまた直ちに開くという絶縁体-絶縁体転移は起こらないことを理論的に示した。さらにこの理論を用いてトポロジカル半金属の新物質を提案することができた。

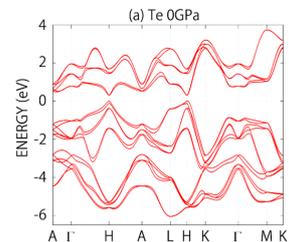


図1: テルルのバンド構造

(2) 2層グラフェンリボンでの面間バイアスによる特異な分極の振る舞いの理論

アームチェアエッジの2層グラフェンのリボン（幅が有限の系）では、リボンの形状により空間対称性が低下しているため、無限に広がった2層グラフェンでは実現されない応答が現れる可能性がある。実際、面間にバイアス電圧を印加すると、リボンに沿った方向に分極が出ることを理論的に示した（文献⑨）。ギャップの近辺のみの電子状態を再現するディラック模型での計算と、系に忠実な第一原理計算の両方でその計算を行い、その2つが定量的によく一致することを示した。現れる分極の符号はリボンの太さを3で割った余りの値で変わり、これがディラック模型での質量ギャップの符号と一致することも示した。

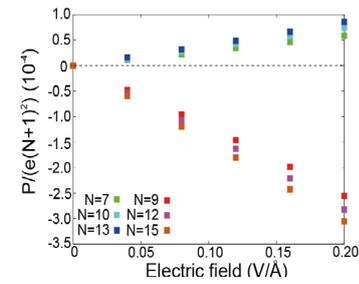


図2: 面間バイアスによる分極

(3) ワイル半金属の表面状態の一般論

ワイル半金属ではワイル点のトポロジカルな性質により、フェルミアークと呼ばれる弧状のフェルミ面が表面に現れることが知られている。このフェルミアークがどのような分散を持つかを調べるために、ワイル点の対の近傍を表す有効模型を構築し、その有効模型の固有状態を有限の厚さの膜の表面と裏面とで解くことにより、表面フェルミアークが図に示すような分散を示すことを示した（文献⑩）。表面と裏面ともに、ちょうどバルクのディラックコーンに接するような形で表面フェルミアークの分散が現れることが分かった。さらに表面と裏面とは分散が逆向きであり、これはワイル点のトポロジカルな性質に起因している。

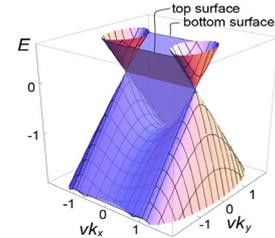


図3: 表面フェルミアークの分散

(4) 界面对称性の理論的提案と特異な表面状態

界面对称性という概念を理論的に導入して、それにより界面上に特異な分散を持つ状態が現れることを理論的に示した（文献⑪）。具体的には粒子正孔対称性ないし時間反転対称性で互いに結びつく2つの系の界面を考えると、そうした対称操作に、2つの領域を入れ替えるような空間操作を組み合わせた対称性によって全体が不変になる。そのため、それに対応するトポロジカルな構造が界面での束縛状態に現れ、界面での状態が線状にギャップが閉じるノーダルライン状の状態が現れることを一般に示して、さらに模型での数値計算でも示した。

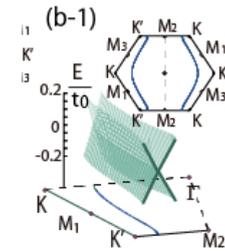


図4: 界面对称性による界面ノーダルライン

(5) 映進対称性を持つ系でのトポロジカル相転移の一般論

映進対称性を持つ系ではZ2トポロジカル不変量が定義できることが知られている。系のパラメータ変化によって、トポロジカルに自明な相と非自明な相との間を相転移させることを考えると、その間に必ずワイル半金属相が挟まることを示した（文献⑧）。これはトポロジカル不変量の定義を考えることで理論的に予想され、実際に模型での計算によって示すことができる。

(6) トポロジカル半金属と通常の半金属との超格子

ワイル半金属と通常の絶縁体との超格子で現れる相について理論的に考察した（文献①）。特にワイル点の2つあり、それらが積層方向と垂直に並んでいる場合と、積層方向に並んでいる場合について考察した。前者では、各層の厚さの比を変えると、ワイル半金属のワイル点の間隔が減少し、ワイル点同士が対消滅して通常の絶縁体となる。また後者では、層の厚さを変えるとワイル半金属と通常の絶縁体相に加え、さまざまなチャーン数を持つ量子異常ホール相が現れる。これは超格子でのブリルアンゾーンの形成に伴いワイル点の位置が移動して、場合によってワイル点の対消滅することによる。さらにノーダルライン半金属と通常の絶縁体との超格子で現れる相にも考察した（文献⑦）。ノーダルラインが平面上にある場合、その平面が積層方向と垂直な場合は、層の厚さの比によりノーダルラインの大きさが減少し、ノーダルラインが消滅して通常の絶縁体になる。またその平面が積層方向を含む場合には、ブリルアンゾーンの折り畳みが起こり、ある場合にはノーダルラインが複数出現する。またこの系が磁化をしたとき、磁化の方向が系の2回回転軸方向の場合は、系がワイル半金属となることも見出した。

(7) アルカリ土類金属におけるノーダルラインと表面電荷

アルカリ土類金属であるCaやSrにおいては、伝導帯と価電子帯とが波数空間で線状に閉じている。これがベリー位相が π に量子化されているノーダルラインであることを第一原理計算により示した（文献⑥, ③）。常圧ではキャリアポケットがありノーダルライン半金属ではないが、高圧にするとバンド分散が変

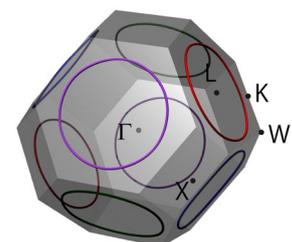


図5: Caのノーダルライン

化し、ノーダルラインのみがフェルミエネルギー上にあるノーダルライン半金属になることを理論的に見出した。さらに (111) 表面を考えると、このノーダルラインに囲まれた領域ではザック位相が π になり、そのために表面に束縛された電子数が 1/2 だけ減少していることが分かった。その現象により表面は正に帯電するがバルクキャリアにより遮蔽され、表面のポテンシャルがその分変化することも分かり、第一原理計算の結果とよく一致した。

(8) トポジカルエレクトライドの理論的提案

エレクトライド（電子化物）と呼ばれる物質群においては、電子の波動関数の中心が原子間の空隙にあり仕事関数が浅いため、バンド反転を起こしやすさまざまなトポジカル相の実現に良いという理論的提案を行った（文献②）。さまざまな物質の例を挙げてそのトポジカル相を議論した。例えば 2 次元エレクトライドである Y_2C ではノーダルライン半金属であり、そのノーダルラインは π のベリー位相で特徴づけられ、このノーダルラインを境界とするように(111)表面状態にドラムヘッド表面状態が現れる。この Y_2C においてノーダルラインを徐々に小さくして消滅させた場合が Sc_2C に相当し、バルクでギャップが空いている絶縁体であるが、(111)方向についてはザック位相が π の絶縁体となっている。そのために SSH 模型と同様の表面状態がギャップ中に現れることを示した。

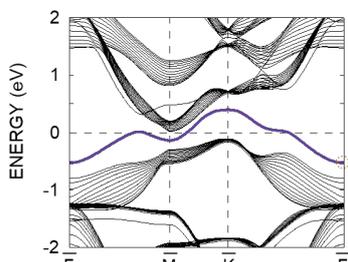


図 6: Sc_2C のバンド構造とトポジカル表面状態

(9) スピン軌道相互作用のない系でのノーダルライン半金属

スピン軌道相互作用のない系において、砂時計型のバンド構造に起因したノーダルライン半金属はどのようなものがあるかを、すべての空間群について網羅的に示した（文献⑤）。2つの交差する高対称線があり、その対称線上での鏡映固有値の具合によって、その高対称性同士の間でバンドの交差が必ず起こる必要がある場合を、空間群の表現論に基づいてすべて網羅し、それぞれの空間群で現れるノーダルラインのトポロジーを示した。

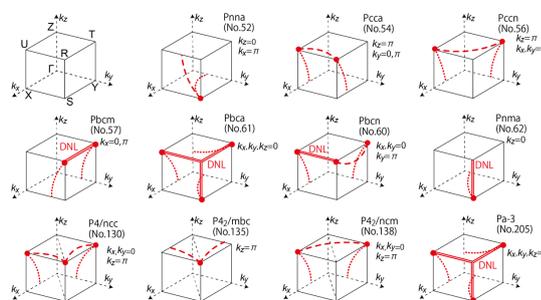


図 7: 砂時計型バンド構造によるノーダルライン。

< 引用文献 >

- ① K. Yokomizo, H. Yamada, S. Murakami, Nodal-line semimetal superlattices, Journal of Physics-Condensed Matter 30, 505301, 2018.
- ② M. Hirayama, S. Matsuishi, H. Hosono, S. Murakami, Electrides as a New Platform of Topological Materials, Phys. Rev. X 8, 031067, 2018.
- ③ M. Hirayama, R. Okugawa, S. Murakami, Topological Semimetals Studied by Ab Initio Calculations, Journal of the Physical Society of Japan 87, 041002~041002, 2018.
- ④ S. Murakami, M. Hirayama, R. Okugawa, T. Miyake, Emergence of topological semimetals in gap closing in semiconductors without inversion symmetry, Science Advances 3, e1602680, 2017.
- ⑤ R. Takahashi, M. Hirayama, S. Murakami, Spinless hourglass nodal-line semimetals, Physical Review B 96, 155206, 2017.
- ⑥ M. Hirayama, R. Okugawa, T. Miyake, S. Murakami, Topological Dirac nodal lines and surface charges in fcc alkaline earth metals, Nat. Commun., 8, 14022-1-9, 2017.
- ⑦ K. Yokomizo, S. Murakami, Topological phases in a Weyl semimetal multilayer, Phys. Rev. B 95, 155101, 2017.
- ⑧ H. Kim, S. Murakami, Emergent spinless Weyl semimetals between the topological crystalline insulator and normal insulator phases with glide symmetry, Phys. Rev. B 93, 195138, 2016.
- ⑨ R. Okugawa, J. Tanaka, T. Koretsune, S. Saito, S. Murakami, In-Plane Electric Polarization of Bilayer Graphene Nanoribbons Induced by an Interlayer Bias Voltage, Phys. Rev. Lett. 115, 156601, 2015.
- ⑩ M. Hirayama, R. Okugawa, S. Ishibashi, S. Murakami, and T. Miyake, Weyl Node and Spin Texture in Trigonal Tellurium and Selenium, Phys. Rev. Lett. 114, 206401, 2015.
- ⑪ R. Takahashi and S. Murakami, Interfacial Fermi Loops from Interfacial Symmetries, Phys. Rev. Lett. 113, 256406-1-4, 2014.
- ⑫ R. Okugawa, S. Murakami, Dispersion of Fermi arcs in Weyl semimetals and their evolutions to Dirac cones, Phys. Rev. B 89, 235315-1-8, 2014

[雑誌論文] (計 14 件)

- (1) K. Yokomizo, H. Yamada and S. Murakami, Nodal-line semimetal superlattices, *Journal of Physics-Condensed Matter*, 査読有, 30, 505301, 2018.
DOI: 10.1088/1361-648X/aaeabe
- (2) M. Hirayama, S. Matsuishi, H. Hosono, and S. Murakami, Electrifies as a New Platform of Topological Materials, 査読有, *Phys. Rev. X* 8, 031067, 2018.
DOI: 10.1103/PhysRevX.8.031067
- (3) M. Hirayama, R. Okugawa, S. Murakami, Topological Semimetals Studied by Ab Initio Calculations, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有 87, 041002~041002, 2018. DOI: 10.7566/jpsj.87.041002
- (4) S. Murakami, M. Hirayama, R. Okugawa, T. Miyake, Emergence of topological semimetals in gap closing in semiconductors without inversion symmetry, *Science Advances*, 査読有 3, e1602680, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1602680
- (5) R. Takahashi, M. Hirayama, S. Murakami, Spinless hourglass nodal-line semimetals, *Physical Review B*, 査読有, 96, 155206, 2017. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.155206
- (6) R. Okugawa, S. Murakami, Universal phase transition and band structures for spinless nodal-line and Weyl semimetals, *Physical Review B*, 査読有, 96, 115201, 2017.
DOI: 10.1103/PhysRevB.96.115201
- (7) M. Hirayama, R. Okugawa, T. Miyake, S. Murakami, Topological Dirac nodal lines and surface charges in fcc alkaline earth metals, *Nat. Commun.*, 査読有, 8, 14022-1-9, 2017. DOI: 10.1038/ncomms14022
- (8) K. Yokomizo, S. Murakami, Topological phases in a Weyl semimetal multilayer, *Phys. Rev. B*, 査読有, 95, 155101, 2017. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.155101
- (9) H. Kim, S. Murakami, Emergent spinless Weyl semimetals between the topological crystalline insulator and normal insulator phases with glide symmetry, *Phys. Rev. B*, 査読有, 93, 195138, 2016. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.195138
- (10) T. Yoda, T. Yokoyama, S. Murakami, Current-induced Orbital and Spin Magnetizations in Crystals with Helical Structure, *Sci. Rep.*, 査読有, 5, 12024, 2015.
DOI: 10.1038/srep12024
- (11) R. Okugawa, J. Tanaka, T. Koretsune, S. Saito, and S. Murakami, In-Plane Electric Polarization of Bilayer Graphene Nanoribbons Induced by an Interlayer Bias Voltage, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 115, 156601, 2015. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.156601
- (12) M. Hirayama, R. Okugawa, S. Ishibashi, S. Murakami, and Takashi Miyake, Weyl Node and Spin Texture in Trigonal Tellurium and Selenium, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 114, 206401, 2015. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.206401
- (13) R. Takahashi and S. Murakami, Interfacial Fermi Loops from Interfacial Symmetries, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 113, 256406-1-4, 2014.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.256406
- (14) R. Okugawa and S. Murakami, Dispersion of Fermi arcs in Weyl semimetals and their evolutions to Dirac cones, *Physical Review B*, 査読有, 89, 235315-1-8, 2014
DOI: 10.1103/PhysRevB.89.235315

[学会発表] (計 48 件)

- (1) Shuichi Murakami, Orbital Edelstein effect and Phonon Edelstein Effect, MRS Fall Meeting, 2018.
- (2) Shuichi Murakami, Theoretical Proposals for New Edelstein effects, International Symposium on Magnetism and Magnetic Materials 2018, 2018.
- (3) Shuichi Murakami, New variants of the Edelstein effect, SPIE Optics + Photonics, 2018.
- (4) Shuichi Murakami, Emergence of topological semimetals in topological phase transitions with crystallographic symmetries, *Topological Matter beyond the Ten-fold Way*, 2018.
- (5) Shuichi Murakami, Topology and transport in inversion-asymmetric crystals, OIST, 2018.
- (6) Shuichi Murakami, Emergence of Weyl semimetals in topological phase transitions, The 19th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications, 2018.
- (7) Shuichi Murakami, Topology and transport in inversion asymmetric crystals, FROM SOLID STATE TO BIOPHYSICS IX, 2018.
- (8) Shuichi Murakami, Topological bands and topological phase transitions in electronic and magnonic systems, Intermag 2018, 2018.
- (9) Shuichi Murakami, Topology and transport in inversion-asymmetric crystals, The 2nd Fudan Workshop on Complex Quantum Material, 2018.
- (10) Shuichi Murakami, Topology and transport in inversion-asymmetric crystals, From

Topology to Superconductivity, 2018.

- (11) 村上 修一, 空間反転対称性の破れた系でのトポロジカル相とエーデルシュタイン効果, CUPAL ワークショップ トポロジカル物質・原子層物質の新規物性, 2017.
- (12) Shuichi Murakami, Topology and transport in inversion-asymmetric crystals, CEMS Symposium on Trends in Condensed Matter Physics, 2017.
- (13) Shuichi Murakami, Symmetry, topology, and emergent phenomena in topological semimetals, Ab initio spin-orbitronics, 2017.
- (14) 村上 修一, 固体結晶でのトポロジカル相の理論, 2017 年度科学セミナー「トポロジーがひらく新しい科学」, 2017.
- (15) Shuichi Murakami, Topology and symmetry in topological semimetals, 1st Workshop on Topological Quantum Phenomena and Quantum Information Science, 2017.
- (16) Shuichi Murakami, topological phases in condensed materials (lecture), 1st Workshop on Topological Quantum Phenomena and Quantum Information Science, 2017.
- (17) Shuichi Murakami, Interplay between topology and symmetry in topological semimetals, Spin-orbit materials 2017, 2017.
- (18) Shuichi Murakami, Topology and symmetry in topological semimetals: tutorial, Spin Dynamics in the Dirac Systems, 2017.
- (19) 村上 修一, トポロジカル半金属のトポロジーと物質探索, 物性研短期研究会, 2017.
- (20) 村上 修一, ワイル電子系物質の電子構造と新規物性, 凝縮系理論勉強会, 2017.
- (21) Shuichi Murakami, Interplay between topology and symmetry in topological insulators/semimetals, EU-JAPAN Workshop on Computational Materials Design and Realization for Spintronics, Moltronics, Quantronics, Superconductivity and Topotronics, 2016.
- (22) Shuichi Murakami, Surface physics by nodal lines in alkaline earth metals, International Conference on Solid Films and Surfaces(ICSFS18), 2016.
- (23) Shuichi Murakami, topological chiral edge modes and Berry curvature of magnons, Conference on New Trends in Quantum Heat and Thermoelectrics, 2016.
- (24) Shuichi Murakami, Topological semimetals and topological phase transitions, Joint Conference of New Trends in Topological Insulators and 17th International Conference on Narrow Gap Systems (NTTI2016,NGS17), 2016.
- (25) Shuichi Murakami, Topological semimetals: topology, symmetry, and materials, The 22nd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, 2016.
- (26) Shuichi Murakami, Interplay of symmetry and topology in topological semimetals, The 2nd Conference on Condensed Matter Physics (CCMP-2016), 2016.
- (27) Shuichi Murakami, Topological phases in condensed matter, 17th iTHES Colloquium, 2016.
- (28) Shuichi Murakami, Topological phase transitions and surface states in topological semimetals, International Conference on Low-Energy Electrodynamics in Solids (LEES2016), 2016.
- (29) Shuichi Murakami, Weyl semimetals and topological phase transitions, APS March Meeting 2016, 2016.
- (30) Shuichi Murakami, Weyl semimetals and topological phase transitions, Spring Meeting of the German Physical Society, 2016.
- (31) 村上 修一, 空間反転対称性の破れたワイル半金属とトポロジカル絶縁体, 第5回トポロジー集中連携研究会「ワイル半金属・超伝導」, 2015.
- (32) Shuichi Murakami, Topological semimetal phases in spin-orbit-coupled systems, Korean Physical Society 2015 Fall Meeting, 2015.
- (33) Shuichi Murakami, Interfacial Fermi Loops from Interfacial Symmetries, Gordon Research Conference "Topological & Correlated Matter", 2015.
- (34) 村上修一, トポロジカル相の制御, CMSI 第1部会「新物質・新量子相の基礎科学」 夏の学校 2014, 2014.

[その他]

ホームページ等 <http://www.stat.phys.titech.ac.jp/murakami/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。