

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247064

研究課題名(和文)トポロジカル相におけるバルク・エッジ対応の普遍性：固体物理から冷却原子まで

研究課題名(英文)Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to cold atoms

研究代表者

初貝 安弘 (HATSUGAI, Yasuhiro)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：80218495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,900,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル相とは既存の対称性による相の分類が上手く適用できない物質相で、その多くは励起エネルギー有限のため微小摂動に反応しないが、系に境界や不純物があるとき、特徴的な局在状態(エッジ状態)を持つ。このエッジ状態は境界がない系のバルクのトポロジカルな特性を反映し、この相互関係をバルクエッジ対応とよぶ。本基盤研究では実験-理論の独創的な連携の下、冷却原子系における世界初のトポロジカルポンピングの実証をバルクエッジ対応の観点で理論的に解明し、また放射光ARPES実験による磁場下のトポロジカル絶縁体の実験に触発されて理論的に新しいトポロジカル数を提案する等、バルクエッジ対応に関して重要な成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Absence of characteristic symmetry breaking is a fundamental aspect of the topological phase. It is mostly gapped and does not respond to an infinitesimal perturbation. However, if the system is with boundaries, there exist unique localized edge states, which reflect non-trivial topology of the bulk. This relation is the bulk-edge correspondence. In this project, two experimental groups (cold atom group realizing ultimate quantum systems and the ARPES group observing surface states of topological insulators and related) are working together with theoretical group sharing a common interest in the bulk-edge correspondence. Some of the achievements of the project are as follows. We clarified the role of edge states in topological pumping, which has been never realized for the 30 years and first done by our cold atom group. Also motivated by the studies of magnetic topological insulators by ARPES group, a new topological number as an entanglement Chern number is theoretically proposed.

研究分野：物性理論(トポロジカル相の理論)

キーワード：バルク・エッジ対応 トポロジカル相 冷却原子 放射光ARPES実験 エッジ状態 トポロジカルポンプ  
トポロジカル絶縁体

## 1. 研究開始当初の背景

対称性とその自発的破れはランダウにはじまる相の理論において本質的な役割を果たしてきた。しかし量子ホール効果の発見により、対称性の破れとは無関係に特徴的で物理的に重要な相が多数あることが認識され広くトポロジカル相とされた。近年多くの興味をもたれている量子スピンホール相ならびにトポロジカル絶縁体もその一つである。これらのトポロジカル相の多くではバルクな系には励起ギャップがあり、微小摂動に対して応答せず特徴を持たない。その一方系に境界があるときには広義のエッジ状態としての特徴的な低エネルギーモードが現れ、その存在がトポロジカル相の特徴である。この相互関係が「バルク・エッジ対応」であり代表者が1990年代初頭に量子ホール相において見いだしたものである。関連して代表者は本基盤研究の理論の分担者とグラフェン等の関連物質に関して広く、この「バルク・エッジ対応」に関して研究を行ってきた。

近年のトポロジカル相の研究の爆発的進展のきっかけはトポロジカル絶縁体に対する放射光 ARPES 実験による表面ディラックコーン(エッジ状態)の直接観測である。分担者の木村(広島大学)はこの放射光 ARPES 実験の世界屈指の専門家であり高い技術をもち広島大学の放射光設備を用いてトポロジカル絶縁体の表面状態の観測に関して先駆的で重要な研究成果をあげていた。

また、冷却原子系は他に類のない操作可能な極限量子系として大きな注目を集めていたが、分担者の高橋(京都大学)はこの冷却原子実験の世界随一の技術と実績をもつ専門家であり、フェルミ原子系やリープ格子系などトポロジカル相の舞台となる系を世界に先駆けて実現していた。

本基盤研究はこの一見異なる3分野の専門性の高い研究者がバルク・エッジ対応という新しい概念を共通する興味として連携し、議論、共同作業することで新しい概念的ステップアップ、ブレークスルーを目指すものであり、研究開始当初は正に時期を得た状況にあった。

## 2. 研究の目的

対称性の破れを伴わない量子液体相は、近年「トポロジカル相」として広く研究の対象となったが、その最大の特徴は、バルクには励起ギャップが開き、低エネルギーに特徴ある励起が存在しない一方で、系の境界・表面には安定なエッジ状態が存在し、それが逆にバルクの非自明な物質相を反映することにある。これが「バルク・エッジ対応」という量子相一般に広く存在する新しい概念である。本基盤研究では、トポロジカル絶縁体ならびに極限量子相である冷却原子系に関する最先端の技術と実績を持つ実験家とトポロジカル相に関する先駆的な技術と最新の知識を持つ複数の理論家とが、「バルク・エッジ対応」を共通のキーワードとして、共同研究することで、量子液体相、トポロジカル相の物理に関する新しい展開ならびに全体像の理解に到ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究代表者が先駆的に20年来提案してきた「バルク・エッジ対応」、「端をみて中身を理解する」の概念を実験-理論の連携の下で、固体物理系から冷却原子系までの多様な物質相に適用し、量子液体相の全体像に迫る。具体的にはトポロジカル相に対してバルクのベリー接続の理論を数値的研究を併用しつつ発展、展開し、系に境界や不純物等の幾何学的摂動があるときに生まれるエッジ状態との関連を多様な物質相において具体的に明らかとする。その一方、十分な実績と高度の技術を持つ実験家の分担者が新規物質探索を行いつつ、トポロジカル絶縁体ならびに量子極限にある冷却原子系に対して表面 Dirac Fermion、マヨラナ局在状態などのエッジ状態に関して、実験的研究、観測を行い、理論との整合性を確認する。このような理論-実験の相互作用、連携により双方のブレークスルーを模索し、トポロジカル相における「バルク・エッジ対応」の有効性と各論を越えた物理的普遍性を確立する。

## 4. 研究成果

(1)平成26年度は研究所年度であるため、理論班と2つの実験班での各グループの研究を鋭意進めるとともにインフォーマルな研究交流集会を持ち意見交換することでブレーンストーミングを行い次年度以降の展開の基礎を作った。各班の研究成果は -1:特異分散の例である質量ゼロのディラック電子系に関してバルクのベリー位相とエッジ状態の関係をバルク・エッジ対応の観点から電子占有率が1/4である場合に拡張することに成功した。 -2:ディラックコーンが傾いた場合のランダウ準位の理論を一般化したカイラル対称性を使い構成した。 -3:もう一つの特異分散である平坦バンドの一般論をシリセンに適用した。 -4:二量体化した八二カム構造の電子系における点欠陥近傍の電子状態でバルク・エッジ対応の観点から整理した。 -5:エンタングルメントチャーン数という新規概念を提案し、その有効性をバルク・エッジ対応等の視点から明らかとした。冷却 Yb 原子を高安定なレーザーにより共鳴励起することによりスピン軌道相互作用を誘起し磁気フェッシュバツハ共鳴を組み合わせることで、高効率な分子生成に成功しトポロジカル超流動に向けて大きく前進した。また、動的な超光格子技術を駆使して、冷却原子について初めてトポロジカルホッピングを実現した。 -1:広島大学の高分解能3次元スピン角度分解光電子分光装置に大口径3軸マニピュレーターを新規導入しテスト実験を行った。 -2:量子異常ホール効果を示す  $Sb_{2-x}V_xTe_3$  等の強磁性トポロジカル絶縁体に対し、内殻吸収磁気円二色性分光実験を SPring-8 にてを行い、Sb 5p や Te 5p といった母体のキャリアが媒介となり系の強磁性が安定化していることを明らかにした。 -3: $Sb_2Te_3$  や  $Sb_{2-x}V_xTe_3$  等について、ポンプ・プローブ法を用いた時間角度分解光電子分光を東京大学物性研究所の深紫外レーザー装置を用いてを行い、非占有表面状態の観測および表面状態の非平衡ダイナミクスを確認した。

(2)平成27年度は初年度の相互交流の下

に理論-実験の連携のもとに幾つかの具体的な成果が得られた。冷却原子系実験に関しては、-1: サウレスのトポロジカルチャージポンピング(TP)を世界で初めて実験班が実証し、特に、有限温度の効果明らかにした。-2: 内部自由度を利用したスピンプ(SP)に向けて、準安定励起状態の寿命測定を行うとともに、基底バンドと励起バンドをスピンプ自由度とみなす SP の実験を行った。

-3: ランダムポテンシャルを導入するための光源の準備を行った。-4: トポロジカルポンプに関しては、相互交流のもと理論班がこの現象におけるエッジ状態の意味を世界的にも歴史的にも初めて明らかとし、チャージはバルクが運ぶがその量子化は断熱近似のもとでエッジ状態により規定されることを明らかとした。また、SP に関する基礎的な理論も構築した。ARPES 実験に関しては、

-1: キャリアを制御可能なトポロジカル絶縁体( $Sb_{1-x}Bi_x$ )<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>の非平衡ダイナミクスを調べ、絶縁性が高い試料において、フェルミレベルより上の表面ディラックコーン(DC)に励起された電子は非常に長い持続時間を示すことを示した。-2: トポロジカル絶縁体PbBi<sub>4</sub>Te<sub>4</sub>S<sub>3</sub>では終端面の異なる2種類のDCのスピンプ偏極状態を調べた。うち1つの状態は終端面に埋もれ外界から保護されていることを明らかにした。-3: 量子異常ホール効果を示す磁性トポロジカル絶縁体CrおよびVドープ( $Sb_{1-x}Bi_x$ )<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>について内殻吸収磁気円二色性を調べ、磁性元素だけではなくSb 5pやTe 5p電子も、強磁性発現に重要な役割をすることがわかった。-4: 放射光 ARPES で観測される固体のエッジ状態に関して、理論的観点からエンタングルメントチャーン数という新しいトポロジカルな量子数を定義することでトポロジカル絶縁体における時間反転対称性の破れに関する研究を行い2次元トポロジカル絶縁体の典型モデルであるKane-Meleモデルに関して磁場下の新しい相を発見した。力学系におけるバルク・エッジ対応をメカニカルグラフエンとよぶハニカム格子上的バネ-質点系のモデルを用いて確立した。バルク・エッジ対応をキーワードとする国際ワークショップ“Physics of bulk-edge correspondence and its universality: From solid state physics to cold atoms 2015”を東京都文京区筑波大学文京校舎(放送大学)にて開催し、国際的な研究交流ならびに情報交換を行い将来の展開の基礎を作った。

(3) 平成28年度は2年間の共同作業のもとに「バルク・エッジ対応」の普遍性を明らかとするための多様な研究を遂行した。

-1: 量子以外の系でのバルク・エッジ対応に関して、古典電磁場の系であるフォトニック結晶に関して局在基底を用いたトポロジカル数の計算手法を構築した。これを3次元に対して適用して、フォトニック結晶におけるワイル点の存在をセクションチャーン数の計算することで示し、更にエッジ状態との関係を解明した。-2: 力学系におけるバルク・エッジ対応の研究に関して質点を3次元のダイヤモンド格子にバネで結合した系を考え、この系のエッジ状態とベリー位相の関係を明らかとした。-1: トポロジカルポンピング現象について、引力および斥力相互作用

するフェルミ粒子を用いた測定によりその堅牢性を確認し、さらに準周期ポテンシャルを形成することで、ある程度の乱れポテンシャル深さまでの堅牢性を確認した。-2: 幾何学ポンピングのためのブロッホ振動の観測やスピンプポンピングのための光格子の導入などを進めた。-1: H26年度に導入した3軸マニピュレーターを備えたレーザーおよび放射光スピンプ分解角度分解光電子分光を用いて、ワイル半金属TaIrTe<sub>4</sub>のエッジ状態の表面フェルミアークとそのテクスチャーの観測を行なった。-2: ノンシンモルフィックな空間群に属するCuTiSやLaSnTeについても測定を行ない表面やバルクバンドの観測を行った。今後一連の系のバルク・エッジ対応について考察する。-3: 時間角度分解光電子分光を用いてバルク絶縁性の高いトポロジカル絶縁体の表面起電力シフトがあることを発見し、今後のスピンプ制御の可能性を見いだした。分野横断の国際ワークショップ“Physics of bulk-edge correspondence and its universality: From solid state physics to cold atoms 2016”を京都大学基礎物理学研究所国際ワークショップとして開催し研究成果を広く周知するとともに分野の国際化に努めた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計57件)全て査読あり

- [1] Y. Hatsugai, and T. Fukui, “Bulk-edge correspondence in topological pumping”, Phys. Rev. B 94, 041102(R) (5) (2016), doi:10.1103/PhysRevB.94.041102
- [2] Y. Takahashi, T. Kariyado, and Y. Hatsugai, “Edge states of mechanical diamond and its topological origin”, New J. Phys. 19, 035003(9) (2017), doi:10.1088/1367-2630/aa5edb
- [3] T. Fukui and Y. Hatsugai, “A Spin Pump Characterized by Entanglement Chern Numbers”, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 083703 (5) (2016), doi: 10.7566/JPSJ.85.083703
- [4] T. Kawarabayashi, H. Aoki and Y. Hatsugai, “Lattice realization of the generalized chiral symmetry in two dimensions”, Phys. Rev. B 94, 235307(10) (2016), doi:10.1103/PhysRevB.94.235307
- [5] S. Oono, T. Kariyado and Y. Hatsugai, “Section Chern number for a three-dimensional photonic crystal and the bulk-edge correspondence”, Phys. Rev. B 94, 125125(10) (2016), doi:10.1103/PhysRevB.94.125125
- [6] H. Ozawa, Y. Takahashi et al., “Interaction-driven shift and distortion of a flat band in an optical Lieb lattice”, Phys. Rev. Lett. 118, 175301(5) (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.118.175301
- [7] H. Konishi, Y. Takahashi et al., “Collisional stability of localized Yb(3P2) atoms immersed in a Fermi sea of Li”, New J. of Phys. 18, 103009(8) (2016), doi:10.1088/1367-2630/18/10/103009
- [8] S. Kato, Y. Takahashi et al., “Laser spectroscopic probing of coexisting superfluid and insulating states of an atomic Bose-Hubbard

- system”, *Nature Communications* 7, 11341(8) (2016), doi: 10.1038/ncomms11341
- [9]A. M. Shikin, A. Kimura et al., “Anomalously large gap and induced out-of-plane spin polarization in magnetically doped 2D Rashba system: V-doped BiTeI”, *2D Materials* 4, 025055(9) (2017), doi:10.1088/2053-1583/aa65bd
- [10]K. Kuroda, A. Kimura et al., “Ultrafast energy- and momentum-resolved surface Dirac photocurrents in the topological insulator Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>”, *Physical Review B* 95, 081103(5) (2017), doi: 10.1103/PhysRevB.95.081103
- [11]T. Warashina, A. Kimura et al., “Hidden Rashba spin-split states in a quasi-one-dimensional Au atomic chain on ferromagnetic Ni(110)”, *Physical Review B* 94, 241109(R)(5) (2016), doi: 10.1103/PhysRevB.94.241109
- [12]R. Takabe, A. Kimura et al., “Evaluation of band offset at amorphous-Si/BaSi<sub>2</sub> interfaces by hard x-ray photoelectron spectroscopy”, *Journal of Applied Physics* 119, 165304(6) (2016), doi:10.1063/1.4947501
- [13]K. Miyamoto, A. Kimura et al., “Orbital-symmetry-selective spin characterization of Dirac-cone-like state on W(110)”, *Physical Review B* 93, 161403(R)(5) (2016) doi:10.1103/PhysRevB.93.161403
- [14]R. Takabe, A. Kimura et al., “Measurement of valence-band offset at native oxide/BaSi<sub>2</sub> interfaces by hard x-ray photoelectron spectroscopy”, *Journal of Applied Physics* 119, 025306(5) (2016), doi: 10.1063/1.4939614
- [15]T. Fukui et al., “Streda formula for the Hofstadter-Wilson-Dirac model in two and four dimensions”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 124709(5) (2016), doi:10.7566/JPSJ.85.124709
- [16]K. Kobayashi, H. Aoki et al. “Superconductivity in repulsively interacting fermions on a diamond chain”, *Phys. Rev. B* 94, 214501(2016),doi:10.1103/PhysRevB.94.214501
- [17]M. Koshino and H. Aoki, “Dirac electrons on three-dimensional graphitic zeolites --- a scalable mass gap”, *Phys. Rev. B* 93, 041412(R) (2016), doi:10.1103/PhysRevB.93.041412
- [18]M. G. Yamada, H. Aoki, et al. “First-principles design of a half-filled flat band of the Kagome lattice in two-dimensional metal-organic frameworks”, *Phys. Rev. B* 94, 081102(R) (2016), doi:10.1103/PhysRevB.94.081102
- [19]Y. Tanabe, H. Aoki et al., “Electric properties of Dirac fermions captured into 3D nanoporous graphene networks”, *Advanced Materials* 28, 10304(2016), doi:10.1002/adma.201601067
- [20]T. Mikami, S. Kitamura, K. Yasuda, N. Tsuji, T. Oka and H. Aoki, “Brillouin-Wigner theory for high-frequency expansion in periodically driven systems --- Application to Floquet topological insulators”, *Phys. Rev. B* 93, 144307(2016),doi:10.1103/PhysRevB.93.144307
- [21]T. Kariyado, and Y. Hatsugai, “Manipulation of Dirac Cones in Mechanical Graphene”, *Scientific Reports* 5, 18107(8) (2015), doi: 10.1038/srep18107
- [22]H. Araki, T. Kariyado, T. Fukui, Y. Hatsugai, “Entanglement Chern Number of the Kane-Mele Model with Ferromagnetism”, *J. Phys. Soc. Jpn.*(Selected as Editors' Choice), 85, 043706(4) (2016). doi: 10.7566/JPSJ.85.043706
- [23]T. Kariyado, and Y. Hatsugai, “Hannay Angle: Yet Another Symmetry- Protected Topological Order Parameter in Classical Mechanics”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 043001(4) (2016). doi: 10.7566/JPSJ.85.043001
- [24]T. Kariyado, and Y. Hatsugai, “Topological order parameters of the spin-1/ 2 dimerized Heisenberg ladder in magnetic field”, *Phys. Rev. B* 91,214410(10) (2015) doi: 10.1103/ PhysRevB.91.214410
- [25]M. Koshino and H. Aoki, “Dirac electrons on three-dimensional graphitic zeolites: A scalable mass gap”, *Phys. Rev. B (R)* 93, 041412(5) (2016). doi: 10.1103/ PhysRevB.93.041412
- [26]S. Kitamura, H. Aoki, et al., “Interaction-Driven Topological Insulator in Fermionic Cold Atoms on an Optical Lattice: A Design with a Density Functional Formalism”, *Phys. Rev. Lett.* 115, 045304(5) (2015) doi: 10.1103/ PhysRevLett.115.045304
- [27]M. Watanabe, H. Aoki et al., “Electronic structure of helicoidal graphene: Massless Dirac particles on a curved surface with a screwsymmetry”, *Phys. Rev. B* 92, 205425(9) (2015)doi: 10.1103/ PhysRevB.92.205425
- [28]A. V. Stier, H. Aoki et al, “Terahertz Dynamics of a Topologically Protected State: Quantum Hall Effect Plateaus near the Cyclotron Resonance of a Two-Dimensional Electron Gas”, *Phys. Rev. Lett.* 115, 247401(5) (2015) doi: 10.1103/ PhysRevLett.115.247401
- [29]R. Yamamoto, Y. Takahashi et al, “An ytterbium quantum gas microscope with narrow-line laser cooling”, *New J. Phys.* 18, 023016(10) (2016). doi: 10.1088/ 1367- 2630/ 18/ 2/ 023016
- [30]S. Taie, Y. Takahashi et al, “Feshbach-Resonance- Enhanced Coherent Atom- Molecule Conversion with Ultranarrow Photoassociation Resonance”, *Phys. Rev. Lett.* 116, 043202(5) (2016). doi: 10.1103/ PhysRevLett.116.043202
- [31]S. Nakajima, Y. Takahashi et al, “Topological Thouless pumping of ultracold fermions”, *Nature Physics* 12, 296-300 (2016). doi: 10.1038/ nphys3622
- [32]S. Taie, Y. Takahashi et al “Coherent driving and freezing of bosonic matter wave in an optical Lieb lattice”, *Science Advances* 1, e1500854 (2015) doi: 10.1126/ sciadv.1500854
- [33]K. Miyamoto, A. Kimura et al , “Orbital-symmetry- selective spin characterization of Dirac- cone- like state on W(110)”, *Phys. Rev. B (R)* 93 (5), 161403(5) (2016). doi: 10.1103/ PhysRevB.93.161403
- [34]M. Ye, A. Kimura et al, “Carrier- mediated ferromagnetism in the magnetic topological insulator Cr- doped (Sb,Bi)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>”, *Nature*

Communications 6, 8913(7) (2015). doi: 10.1038/ncomms9913

[35]H. Wortelen, A. Kimura et al., "Spin-orbit influence on  $d_{z^2}$ -type surface state at Ta(110)", Phys. Rev. B (R) 92,161408(5) (2015). doi: 10.1103/PhysRevB.92.161408

[36]S. Zhu, A. Kimura et al "Ultrafast electron dynamics at the Dirac node of the topological insulator Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>", Scientific Reports 5, 13213(6) (2015). doi: 10.1038/srep13213

[37]G. Eguchi, A. Kimura et al., "Precise determination of two-carrier transport properties in the topological insulator TlBiSe<sub>2</sub>", Phys. Rev. B 91,235117(5) (2015). doi: 10.1103/PhysRevB.91.235117

[38]K. Kuroda, A. Kimura et al., "Tunable spin current regime due to bulk insulating property in novel topological insulator Tl<sub>1-x</sub>Bi<sub>1+x</sub>Se<sub>2-δ</sub>", Phys. Rev. B 91, 205306(7) (2015). doi: 10.1103/PhysRevB.91.205306

[39]Y. Yoshimura, K.-I. Imura, T. Fukui, and Y. Hatsugai, "Characterizing the weak topological properties: Berry phase point of view", Phys. Rev. B 90, 155443(13) (2014), doi: 10.1103/PhysRevB.90.155443

[40]T. Fukui and Y. Hatsugai, "Entanglement Chern number for an extensive partition of a topological ground state", J. Phys. Soc. Jpn. 83, 113705(4), (2014),doi:10.7566/JPSJ.83.113705

[41]T. Fukui and Y. Hatsugai, "Disentangled topological numbers by a purification of entangled mixed states for non-interacting fermion systems", J. Phys. Soc. Jpn. 84, 043703(5), (2015), doi:10.7566/JPSJ.84.043703

[42]Y. Hatsugai, T. Kawarabayashi, and H. Aoki, "Survival of sharp  $n = 0$  Landau levels in massive tilted Dirac fermions: Role of the generalized chiral operator", Phys. Rev. B 91, 085112(12), (2015), doi:10.1103/PhysRevB.91.085112

[43]Y. Hatsugai, K. Shiraishi and H. Aoki, "Flat bands in the Weaire-Thorpe model and silicene", New J. Phys. 17, 025009(10), (2015),doi:10.1088/1367-2630/17/2/025009

[44]H. Aoki and Y. Hatsugai, "Polarization as a topological quantum number in graphene", Phys. Rev. B 90, 045206(6), (2014), doi:10.1103/PhysRevB.90.045206

[45]T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Fractionally Quantized Berry Phase, Adiabatic Continuation, and Edge States", Phys. Rev. B 90, 085132(6), (2014), doi:10.1103/PhysRevB.90.085132

[46]G. Eguchi, A. Kimura et al. "Surface Shubnikov-de Hass oscillations and non-zero Berry phases of the topological hole conduction in Tl<sub>1-x</sub>Bi<sub>1+x</sub>Se<sub>2</sub>", Phys. Rev. B 90(4), 201307(R)(4), (2014), doi:10.1103/PhysRevB.90.201307

[47]T. Okuda, A. Kimura et al. "Double VLEED spin detectors for high-resolution three dimensional spin vectorial analysis of anisotropic Rashba spin splitting", J. Elec. Spectrosc. Relat. Phenom. 201, 23(7) (2015), doi:10.1016/j.elspec.2014.10.010

[48]K. Miyamoto, A. Kimura et al. "Spin polarization of surface states on W(110):

Combined influence of spin-orbit interaction and hybridization", J. Elec. Spectrosc. Relat. Phenom. 201, 53(7) (2015), doi:10.1016/j.elspec.2014.09.013

[49]K. Sakamoto, A. Kimura et al. "Symmetry induced peculiar Rashba effect on thallium adsorbed Si(111) surfaces", J. Elec. Spectrosc. Relat. Phenom. 201, 88(4) (2015), doi:10.1016/j.elspec.2014.09.008

[50]H. W. Yeom, A. Kimura et al. "Direct observation of the spin polarization in Au atomic wires on Si(553)", New J. Phys. 16, 093030(11), (2014), doi:10.1088/1367-2630/16/6/065016

[51]K. Miyamoto, A. Kimura et al. "Gigantic Rashba effect of surface state energetically buried in topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se", New J. Phys. 16, 065016(10), (2014), doi:10.1088/1367-2630/16/6/065016

〔学会発表〕(計 342 件,うち招待講演 91 件)

[1]Y. Hatsugai, "Roles of edge states in topological pumping", Trends in Theory of Correlated Materials, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland, 2016年05月22日 ~ 2016年05月25日

[2]Y. Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in topological pumping", Symmetry, Topology, and Quantum Phases of Matter: From Tensor Networks to Physical Realizations, KITP, Santa Barbara, California, USA, 2016年10月14日 ~ 2016年10月14日

[3]Y. Hatsugai, "Bulk-edge correspondence in Thouless pumping and mechanical diamond", Topological metamaterials and beyond Aspen Center for Physics, Winter Conference 2017 January 2-8, 2017, Aspen center for physics, Colorado, USA, 2017年01月02日 ~ 2017年01月08日

[4]Y. Takahashi, "A quantum gas microscope for ytterbium atoms", 47th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, Rhode Island Convention Center, Providence, Rhode Island, USA, 2016年05月25日 ~ 2016年05月25日

[5]A. Kimura, "Non-equilibrium Surface Dirac Fermion Dynamics of Topological Insulators", New Trends in Topological Insulators 2017 (NTTI2017), Congressi Stefano Franscini, Monte Verita, TI, Switzerland, 2017年07月16日 ~ 2017年07月21日

[6]A. Kimura, "Probing non-equilibrated Dirac fermions on surface of topological insulators", 16th Int. Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-16), Hannover, Germany, 2017年07月02日 ~ 2017年07月07日

[7]A. Kimura, "Non-equilibrium Surface Dirac Fermion Dynamics of Topological Insulators Probed By Time Resolved ARPES", Int. Conf. on Quantum Physics in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism and Ferroelectricity (Superstripes 2017), Ischia, Naples, Italy, 2017年06月04日 ~ 2017年06月10日

[8]A. Kimura, "Non-equilibrium Surface Dirac Fermion Dynamics of Topological Insulators",

The 13th Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures ACSIN 2016 (ACSIN-13), Rome, Italy, 2016年10月09日 ~ 2016年10月15日

[9]A. Kimura, "Non-equilibrium Surface Dirac Fermion Dynamics of Topological Insulators", Int. Conf. on Solid Films and Surfaces (ICSFS18), Chemnitz, Germany, 2016年08月28日 ~ 2016年09月02日

[10]A. Kimura, "Surface Dirac Fermion Dynamics of Topological Insulators", Int. Union of Materials Research Societies-Int. Conf. on Electronic Materials (IUMRS-ICEM2016), Singapore, Singapore, 2016年07月04日 ~ 2016年07月08日

[11]Y. Hatsugai, "Entanglement Chern numbers for randomness systems", The APCTP Workshop on "Delocalization Transitions in Disordered Systems", POSTECH, Pohang, Korea, 2015年07月31日

[12]Y. Takahashi, "Localization and Delocalization of Ultracold Atoms in a Non-standard Optical Lattice", 2015 Taiwan Int. Symp. Contemporary Atomic and Optical Physics, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, 2015年07月10日

[13]Y. Takahashi, "Quantum simulation using ultracold atoms in a non-standard optical lattice", Colloquium of Max Planck Institute of Quantum Optics (ドイツ, Garching), 2015年06月09日

[14]A. Kimura, "Dirac electron dynamics and spin polarizations of topological insulators", The 13th Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures ACSIN 2016 (ACSIN-13), Rome, Italy, 2016年10月09日 ~ 2016年10月15日

[15]A. Kimura, "Disentangling spin-orbital textures of 2D materials by ARPES", Workshop on the Progresses in Electron Spectroscopy, Pohang, South-Korea, 2016年01月25日

[16]A. Kimura, "Surface Dirac fermion dynamics of non-magnetic and magnetic topological insulators", New Trends in Topological Insulators 2015 Donostia-San Sebastian, Spain, 2015年07月06日 ~ 2015年07月10日

[17]Y. Hatsugai, "Geometric aspects of graphene: chiral symmetry and polarization", Geometric Aspects of Quantum States in Condensed Matter, Natal, Brazil, 2014年08月26日 ~ 2014年08月26日

[18]Y. Hatsugai, "Symmetry protection and Berry connections in condensed matter systems", Geometric Aspects of Quantum States in Condensed Matter, Natal, Brazil, 2014年08月27日 ~ 2014年08月27日

[19]A. Kimura, "Surface Dirac fermion dynamics of non-magnetic and magnetic topological insulators", New Trends in Topological Insulators 2015 (NTTI2015), Donostia-San Sebastian, Spain, 2015年07月06日 ~ 2015年07月10日

[20]Y. Takahashi, "Quantum simulation using ultracold ytterbium atoms", The 24th Int. Conf. on Atomic Physics, Washington, D.C., U.S.A., 2014年08月05日 ~ 2014年08月05日

[21]Y. Takahashi, "Ytterbium Quantum Gases in an Optical Lattice", Quantum Gases 2014 (Synthetic Gauge Field and Large Spin System), Beijing, China, 2014年08月26日 ~ 2014年08月26日

〔図書〕(計4件)

[1]初貝 安弘「2016年ノーベル物理学賞について/物質中に普遍的に存在するトポロジカルな構造」数学セミナー第56巻第4号, 36-41 (2017)

〔その他〕

ホームページ

[http://rhodia.ph.tsukuba.ac.jp/~hatsugai/modules/pico/index.php?content\\_id=276](http://rhodia.ph.tsukuba.ac.jp/~hatsugai/modules/pico/index.php?content_id=276)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

初貝 安弘 (HATSUGAI YASUHIRO)  
筑波大学・数理物質系・教授  
研究者番号: 80218495

(2) 研究分担者

高橋 義朗 (TAKAHASHI YOSHIRO)  
京都大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 40226907

木村 昭夫 (KIMURA AKIO)  
広島大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 90251488

福井 隆裕 (FUKUI TAKAHIRO)  
茨城大学・理学部・教授  
研究者番号: 10322009

河原林 透 (KAWARABAYASHI TOHRU)  
東邦大学・理学部・教授  
研究者番号: 90251488

青木 秀夫 (AOKI HIDEO)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・  
電子光技術研究部門・研究員  
研究者番号: 50114351

(3) 連携研究者

岡 隆史 (OKA TAKASHI)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号: 50421847  
2015年7月まで、2015年8月よりマックスプランク研究所(ドレスデン)へ移動

井村 健一郎 (IMURA KENICHIROU)  
広島大学・先端物質科学研究科・助教  
研究者番号: 90391870

苅宿 俊風 (KARIYADO TOSHIKAZE)  
国立研究開発法人物質材料研究機構・  
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・  
研究員  
研究者番号: 60711281

丸山 勲 (MARUYAMA ISAO)  
福岡工業大学・情報工学部・准教授  
研究者番号: 20422339