

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400366

研究課題名(和文)トポロジカル量子凝縮相における電子相関効果

研究課題名(英文)Correlation effects in topological quantum matter

研究代表者

川上 則雄(Kawakami, Norio)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10169683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、トポロジカル量子凝縮相における電子相関効果を研究し、さらに相関効果により生じる新奇なトポロジカル量子現象の理論的探索を行った。強相関電子系から冷却原子系まで幅広く研究を行った。固体系に関しては、トポロジカルモット絶縁体の生起という重要な問題に対して1次元相関電子系での正確な計算に加え、2次元での動的平均場理論の計算を通して、トポロジカルモット絶縁体とそれに付随するエッジモット状態の特長的なふるまいを明らかにした。冷却原子系に関しては、光誘起トポロジカル相転移の理論と、それを実現するプロトコルを提案した。また、準周期をもつ冷却ボソン系のトポロジカルな性質も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have theoretically studied correlation effects in topological quantum condensed phases, and explored emergent novel topological quantum phenomena. Our study has widely addressed correlated electron systems as well as cold atomic systems. Concerning solid state systems, we have performed precise calculations in one-dimensional correlated electron systems, and also dynamical mean field theory calculations in two-dimensional systems. We have thus clarified characteristic properties inherent in the topological Mott insulators and the associated edge Mott states. Concerning cold atomic systems, we have treated laser-induced topological phase transitions, and proposed a protocol for its realization. We have also elucidated topological properties of quasi-periodic interacting boson systems.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル絶縁体 電子相関 モット絶縁体 冷却原子 スピン軌道相互作用

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル量子相の研究の急速な進展

近年、トポロジカル量子凝縮相の研究が盛んである。中でも、トポロジカル絶縁体の研究が爆発的な勢いで進展している。これらの物質では電子のトポロジカルな性質が物理を支配しており、通常の絶縁体とは全く異なる特徴的な性質を示す。トポロジカル絶縁体は2005年に理論的に予言され2次元量子井戸や3次元の物質で実現されている。現在、トポロジカル絶縁体の研究は半導体(弱相関系)を中心に隆盛を極めているが、今後は、新たな切り口からの研究が不可欠である。

強相関系におけるトポロジカル相：新たな研究舞台

トポロジカル絶縁体における研究の展開として、電子相関効果に多くの興味が集まっている。この方向の研究は、主に希土類や遷移金属化合物で展開され始めている。中でもIrなどの5d遷移金属化合物が注目を集めている。5d遷移金属化合物ではスピン軌道相互作用が電子間相互作用に匹敵するほど強く、これらの効果が絡み合った新奇な物性が期待される。そこでは「トポロジカルモット絶縁体」に代表されるような新奇な量子凝縮相の発現が期待される。このようにトポロジカル絶縁体の研究は、強相関物理に自然な形で融合し、新たな物性物理の潮流を生み出しつつある。

制御可能な人工系：冷却原子系での強相関トポロジカル量子相

このような固体物理の発展と並行して、ここ数年で冷却原子系において目覚ましい研究の進展がみられている。磁場、電場、スピン軌道相互作用などの「人工的ゲージ場」を冷却原子で実現・制御することが可能となり、これによって凝縮系としての研究舞台が大きく広がってきた。冷却原子系では、もともと相互作用を自由に制御できるという大きなメリットがある上にスピン軌道相互作用なども扱えるようになったので、トポロジカル量子相における相関効果を研究する格好の研究舞台が実現されつつある。これにより、固体物理では到達できないような量子パラメタ領域に踏み込むことができる。冷却原子系の研究は、上記の固体電子系のもと相補的かつ本質的な知見を与えられられる。

2. 研究の目的

近年、半導体分野でトポロジカル絶縁体の研究が大きく進展する中、強相関電子系のトポロジカル量子凝縮相に注目が集まっている。本研究は、トポロジカル量子凝縮相における電子相関効果の理論的な解明を目的としている。特に、相関効果により生じる新奇なトポロジカル相を理論的に探索し、かつその特性を明らかにする。このような固体電子系での研究に加え、光格子中の冷却原子系におけるトポロジカル量子凝縮相に研究を展開す

る。相互作用や人工ゲージ場を自由に制御できる冷却原子系は、固体電子系で到達できない領域の研究が可能であり、固体系に相補的かつ本質的な知見を与える。固体電子、冷却原子のトポロジカル量子凝縮相における相関効果を研究の軸として、弱相関領域から強相関領域に至る新奇物性の包括的な理解を目指す。

3. 研究の方法

強相関電子系を解析するには解析的な手法では限界があるため、強力な数値計算手法が必要となる。そこで、局所揺らぎを厳密に取り入れる事の出来る動的平均場理論+連続時間量子モンテカルロ法を武器として「5d電子系におけるスピン軌道相互作用と強相関効果が織りなす新奇な物性」の解明に取り組む。

また、5d電子系には2次元物質も含まれておりそこでは空間揺らぎも重要となることが予測される。その際には適宜、空間揺らぎを取り入れる事が出来るクラスター動的平均場理論や変分モンテカルロ法を適用する。さらには、1次元相関系に対しては、密度行列繰り込み群を用いた、信頼性の高い研究を行う。

4. 研究成果

まず初年度(25年度)は、強相関固体電子系に関する研究と冷却原子系に関する研究を並行して行なった。

(1) 強相関電子系における多体効果とトポロジカル現象

強相関電子系における結晶構造(空間的トポロジー)の特殊性に起因する新奇現象の解明を行なった。強相関系の典型例として近藤格子系を扱い、磁氣的相互作用による電荷秩序相の出現を見出した。また、超格子構造に起因する「近藤しみだし効果」を見出し、これを用いて層状構造をもつ重い電子系のSTMスペクトルを説明した。さらに、準一次元トポロジカル超伝導体のMajorana端状態に対する準周期ポテンシャルの効果을明らかにした。

(2) 冷却原子系での強相関トポロジカル量子相

上記の固体系では量子パラメタの制御に限界があるが、これを補う形で冷却原子系に研究を展開した。まず、光格子で作成された通常のバンド絶縁体が光で周期的に駆動することでトポロジカル絶縁体に変化することを提案した。ここでは人工的ゲージ場によるスピン軌道相互作用に加えラビ振動が本質的な役割を担う。また、光格子系中の引力フェルミ系の超流動と乱れの効果についても考察し、乱れによって誘起される超流動転移を調べた。

26年度は、1次元電子系におけるトポロジカルモット転移と準周期を持つ冷却原子系における研究を行なった。

(3) 1次元トポロジカルモット絶縁体とエッジモット状態

トポロジカル絶縁体に相互作用を加えたとき、新奇な相が実現するかどうかという問題に大きな感心が集まっている。ここでは、1次元トポロジカル絶縁体に対してハバード相互作用を印加すると、トポロジカルモット絶縁相が実現することを、密度行列繰り込み群の計算によって示した。このトポロジカルモット絶縁相には、系のエッジ状態にのみモット絶縁体相が実現する。すなわち、エッジ状態は、電荷励起にギャップを持つ一方で、スピンはギャップレスとなっている。このエッジモット状態の存在が、トポロジカルモット絶縁体を通常のトポロジカル絶縁体と区別する。

(4) 準周期をもつ光格子ボゾン系におけるトポロジカルな性質

トポロジーに基づく考察を冷却原子系にも展開した。具体的には、準周期を持つ光格子におけるボーズ多体系のトポロジカルな性質と、それに対する相互作用効果を調べた。密度行列くりこみ群による巻き付き数の計算をもとに、相互作用の強い領域でのトポロジカルな性質を明らかにした。この他にも、光格子系中の引力フェルミ系の超流動と乱れの効果についても考察し、乱れによって誘起される超流動転移を調べた。

最終年度は、主に強相関係の秩序相におけるフェルミ面のトポロジー変化と、光励起による強相関係の相転移現象を中心に研究を行った。

(5) 強相関近藤格子系の SDW 磁気相におけるリフシツツ相転移

強相関係の典型例である重い電子系の本質は近藤格子模型で理論的に記述される。本研究では、2次元正方格子上の近藤格子模型の金属相における磁気的な性質を、空間依存動的平均場近似を用いて調べた。金属相においては常磁性相と SDW 磁気相が競合する。SDW 磁気相においては、反強磁性近藤結合が増加するにしたがって、小さいフェルミ面から大きいフェルミ面へリフシツツ型の量子相転移が生じることを示した。このようなフェルミ面トポロジーの変化を、転移の次数まで含めて詳細に調べた。

(6) 光誘起による強相関係の量子相転移

近年、冷却原子系におけるトポロジカル相転移が注目を集めている。一昨年の研究で開始した冷却原子フェルミ系の光誘起相転移の研究をさらに微視的な観点から調べた。具体的にはアルカリ土類などの原子を対象として、光で誘起される多体効果、すなわち光誘起近藤効果のメカニズムを解明した。これには、光によって誘起されるバンド間の遷移が重要な役割を果たすことを示した。Yb 原子系を対象として、このような光誘起近藤効果の実現プロトコルを提案した。この光誘起近藤効果を用いることにより、「対称性に保護されたトポロジカル相転移」が実現し得ること

を示した。1次元近藤格子系のトポロジカル相転移に関しては、今後、原著論文として発表する予定である。

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 21 件)

T. Yoshida, R. Peters and N. Kawakami, "Restoration of topological properties at finite temperatures in a heavy-fermion system", *Phys. Rev. B* **93**, 045138-1-8 (2016) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.93.045138

H. Obuse, J. K. Asboth, Y. Nishimura and N. Kawakami, "Unveiling hidden topological phases of a one-dimensional Hadamard quantum walk", *Phys. Rev. B* **92**, 045424-1-10 (2015) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.92.045424

R. Peters and N. Kawakami, "Large and small Fermi-surface spin density waves in the Kondo lattice model", *Phys. Rev. B* **92**, 075103-1-9 (2015) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.92.075103

J. Ozaki, M. Tezuka and N. Kawakami, "Drag dynamics in one-dimensional Fermi systems", *Phys. Rev. A* **92**, 023607-1-6 (2015) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevA.92.023607

M. Nakagawa and N. Kawakami, "Laser-induced Kondo effect in ultracold alkaline-earth fermions", *Phys. Rev. Lett.* **115**, 165303-1-5 (2015) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.165303

T. Yoshida, R. Peters, S. Fujimoto and N. Kawakami, "Characterization of a topological Mott insulator in one dimension", *Phys. Rev. Lett.* **112**, 196404-1-5 (2014) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.196404

R. Peters and N. Kawakami, "Spin Density Waves in the Hubbard model - A DMFT approach", *Phys. Rev. B* **89**, 155134-1-8 (2014) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.89.155134

F. Matsuda, M. Tezuka and N. Kawakami, "Topological Properties of Ultracold Bosons in 1D Quasiperiodic Optical Lattice", *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 083707-1-4 (2014) (査読あり)
DOI: 10.7566/JPSJ.83.08370

M. Sakaida and N. Kawakami, "Disorder induced charge-density-wave/superfluid transition

in SU(N)-symmetric Fermi systems", Phys. Rev. A90, 013632-1-8 (2014) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevA.90.013632

S. Ueda, N. Kawakami, M. Sigrist, "Study of interface phenomena in a topological-insulator/Mott-insulator heterostructure", JPS Conf. Proc. 3, 016014-1-6 (2014) (査読あり)
DOI: 10.7566/JSPSC.3.016014

F. Matsuda, M. Tezuka, N. Kawakami, "Topological Properties of 1D Quasicrystal Bose-Mott Insulators", JPS Conf. Proc. 3, 016013-1-5 (2014) (査読あり)
DOI: 10.7566/JSPSC.3.016013

K. Noda, T. Yoshida, R. Peters, N. Kawakami, "Partial Kondo screening in a geometrically frustrated heavy electron system", JPS Conf. Proc. 3, 014019-1-6 (2014) (査読あり)
DOI: 10.7566/JSPSC.3.014019

T. Yoshida, R. Peters, S. Fujimoto and N. Kawakami, "Topological properties of correlated insulators in one-dimension", JPS Conf. Proc. 3, 016010-1-6 (2014) (査読あり)
DOI: 10.7566/JSPSC.3.016010

M. Sakaida, K. Noda and N. Kawakami, "Superfluid-insulator transition caused by binary disorder", JPS Conf. Proc. 3, 016002-1-6 (2014) (査読あり)
DOI: 10.7566/JSPSC.3.016002

M. Nakagawa and N. Kawakami, "Dynamically Induced Topological Properties in Two-Dimensional Optical Lattices", JPS Conf. Proc. 3, 016003-1-6 (2014) (査読あり)
DOI: 10.7566/JSPSC.3.016003

M. Nakagawa and N. Kawakami, "Non-equilibrium topological phase transitions in two-dimensional optical lattices", Phys. Rev. A89, 013627-1-8 (2014) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevA.89.013627

R. Peters and N. Kawakami, "Surface density of states of layered f-electron materials", Phys. Rev. B89, 041106(R)-1-4 (2014) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.89.041106

R. Peters, S. Hoshino, N. Kawakami, J. Otsuki, and Y. Kuramoto, "Charge order in Kondo lattice systems", Phys. Rev. B87, 165133-1-6 (2013) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.165133

M. Sakaida, K. Noda and N. Kawakami, "Disorder Effects on Superfluidity in the Attractive Hubbard Model", J. Phys. Soc. Jpn. 82,

074715-1-7(2013) (査読あり)
DOI: 10.7566/JPSJ.82.074715

R. Peters, Y. Tada, N. Kawakami, "Kondo effect in f-electron superlattices", Phys. Rev. B88, 155134-1-6 (2013) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.88.155134

② M. Tezuka and N. Kawakami, "Reentrant topological transitions with Majorana end states in 1D superconductors by lattice modulation", Phys. Rev. B88, 155428-1-9 (2013) (査読あり)
DOI: 10.1103/PhysRevB.88.155428

[学会発表](計 34 件)

N. Kawakami (Invited)
"Photo-induced topological phase transitions in ultracold fermions"
International Conference on Quantum Physics and Nuclear Engineering, March 14-16, 2016 in London, UK.

N. Kawakami (Invited)
"Photo-induced quantum phase transitions in two-orbital fermionic optical lattices"
Quantum Science Symposium-2015, Sep. 21-22, 2015, Boston, USA

F. Matsuda, M. Tezuka and N. Kawakami
"Correlation Effects in One-Dimensional Quasiperiodic Anderson-Lattice Model"
International Conference on Magnetism, Barcelona, July 5-10, 2015

K. Takasan, M. Nakagawa and N. Kawakami
"Laser-induced phase transitions of topological Kondo insulators"
International Conference on Magnetism, Barcelona, July 5-10, 2015

N. Kawakami (Invited)
"Correlation effects in Kondo and Mott superlattices"
Symposium on Strongly Correlated Physics and Heavy Fermions
May 9-10, 2015, Tokyo

N. Kawakami (Invited)
"Kondo proximity effect in strongly correlated superlattices"
2015 Asia Pacific Workshop, April 13-15, 2015, Hangzhou, China

N. Kawakami (Invited)
"Kondo vs. Hubbard superlattices"
International Workshop "Novel Quantum States in Condensed Matter"
November 4-December 5, 2014, Kyoto

T. Yoshida and N. Kawakami
Mott physics on topological insulators in one-dimension
International Workshop "Novel Quantum States in Condensed Matter"
November 4-December 5, 2014, Kyoto

H. Nakagawa and N. Kawakami
Photo-induced Kondo effect in a two-orbital optical lattice
International Workshop "Novel Quantum States in Condensed Matter"
November 4-December 5, 2014, Kyoto

N. Kawakami (Invited)
"Correlation effects in artificially layered Kondo superlattices"
13th Bilateral German-Japanese Symposium: Interplay of Spin- and Orbital Degrees of Freedom in Strongly Correlated Electron Systems, Ringberg castle, Germany, July 13-16, 2014

N. Kawakami, R. Peters and Y. Tada (Invited)
"Kondo proximity effect in heavy fermion superlattices"
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2014, Grenoble, France, July7-11, 2014

R. Peters and N. Kawakami
"Spin density waves in heavy fermion systems"
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2014, Grenoble, France, July7-11, 2014

T. Yoshida, R. Peters, S. Fujimoto and N. Kawakami
"Study of one-dimensional correlated topological phases via entanglement spectrum"
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2014, Grenoble, France, July7-11, 2014

S. Ueda, N. Kawakami and M. Sigrist
"A theoretical study of interface phenomena in heterostructures of Kondo insulators"
International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2014, Grenoble, France, July7-11, 2014

M. Nakagawa and N. Kawakami
"Dissipative melting of a periodically driven Mott insulator in a two-orbital lattice"

International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2014, Grenoble, France, July7-11, 2014

N. Kawakami (Invited)
"Kondo Effect in Layered Heavy-Fermion Systems"
ISSP International Workshop on New Horizon of Strongly Correlated Physics, ISSP, Kashiwa, June 16 - July 4, 2014.

N. Kawakami (invited)
"Quantum Walk: Applications to Quantum Phenomena in Condensed Matter Physics"
Quantum Science Symposium Asia-2013: "Quantum Information to Communications & Quantum Systems to Spintronics, Semi-conductors"
November 25-26, 2013, University of Tokyo Hongo Campus, Tokyo, JAPAN

N. Kawakami (invited)
"Electron Correlations in Heavy-Fermion Superlattices"
Swiss-Kyoto Symposium, Zuerich, November 21-22, 2013

N. Kawakami (invited)
"Edge States in Correlated Topological Insulators"
FIRST-QS2C Workshop on "Emergent Phenomena of Correlated Materials"
Nov. 13-16, 2013, Tokyo, Japan

T. Yoshida, R. Peters, S. Fujimoto and N. Kawakami
"Correlation effects on edge states in an extended Su-Schrieffer-Heeger model"
International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013
Oct. 22-26, 2013, Okinawa, Japan

②M. Nakagawa and N. Kawakami
"Topological Kondo insulator in cold-atomic systems: proposal for dynamical realization"
International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013
Oct. 22-26, 2013, Okinawa, Japan

②F. Matsuda, M. Tezuka and N. Kawakami
"DMRG study of interacting bosons in optical lattices: Topological aspects of quasiperiodic systems"
International Workshop for Young Researchers on Topological Quantum

Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013

Oct. 22-26, 2013, Okinawa, Japan

⑳S. Ueda, N. Kawakami, M. Sigrist
"Study of interface phenomena in a topological-insulator/Mott-insulator heterostructure",
Strongly Correlated Electron Systems 2013,
Aug. 5-9, 2013, Tokyo, Japan

㉑F. Matsuda, M. Tezuka, N. Kawakami
"Topological Properties of 1D Quasicrystal Bose-Mott Insulators"
Strongly Correlated Electron Systems 2013,
Aug. 5-9, 2013, Tokyo, Japan

㉒T.Yoshida, R.Peters, S. Fujimoto and N. Kawakami
"Topological properties of correlated insulators in one-dimension"
Strongly Correlated Electron Systems 2013,
Aug. 5-9, 2013, Tokyo, Japan

㉓R.Peters, Y. Tada and N. Kawakami
"Artificially layered heavy fermion systems"
Strongly Correlated Electron Systems 2013,
Aug. 5-9, 2013, Tokyo, Japan

㉔M. Sakaida, K. Nada and N. Kawakami
Superfluid-insulator transition caused by binary disorder
Strongly Correlated Electron Systems 2013,
Aug. 5-9, 2013, Tokyo, Japan

㉕N. Kawakami (invited)
"Dynamical Mean Field Study of Correlated Topological Insulators"
APCTP Workshop on Bad Metal Behavior and Mott Quantum Criticality, Pohang, South Korea, July 15-19, 2013

㉖R.Peters, Y. Tada and N. Kawakami
"Strong correlation physics in f-electrons superlattices"
The New Generation in Strongly Correlated Electron Systems 2013
Sestri Levante, Italy, July 1-5, 2013

㉗N. Kawakami (invited)
"Quantum phase transitions in correlated topological insulators"
International Symposium on "Emergent Quantum Phases in Condensed Matter ---from topological to first principles approaches"
June 12-14, 2013, ISSP, Kashiwa, Japan

㉘H. Nakagawa and N. Kawakami
"Dynamical realization of topological

phases in two-dimensional cold-atomic systems"

International Workshop on "Emergent Quantum Phases in Condensed Matter---from topological to first principles approaches", June 3-21, 2013, ISSP, Kashiwa, Japan

㉙F. Matsuda, M. Tezuka and N. Kawakami
"Ground state of interacting bosons on one-dimensional quasicrystals"
International Workshop on "Emergent Quantum Phases in Condensed Matter---from topological to first principles approaches"
June 3-21, 2013, ISSP, Kashiwa, Japan

㉚T.Yoshida, R.Peters, S. Fujimoto and N. Kawakami
"Correlation effects on topological insulators"
International Workshop on "Emergent Quantum Phases in Condensed Matter---from topological to first principles approaches"
June 3-21, 2013, ISSP, Kashiwa, Japan

㉛S. Ueda, N. Kawakami, M. Sigrist
"Proximity effects in a correlated heterostructure involving a topological insulator"
International Workshop on "Emergent Quantum Phases in Condensed Matter---from topological to first principles approaches"
June 3-21, 2013, ISSP, Kashiwa, Japan

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕
ホームページ等
[http:// cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/](http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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