

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540376

研究課題名(和文) 乱れたトポロジカル絶縁体相ともなう量子輸送現象の研究

研究課題名(英文) Quantum transport in disordered topological insulators

研究代表者

大槻 東巳(OHTSUKI, Tomi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：50201976

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、2次元、及び3次元のトポロジカル絶縁体における伝導度、金属絶縁体転移、金属半金属転移を研究した。初めに、2次元における量子ホール転移、量子スピンホール転移の臨界指数を高精度で評価した。その後、乱れを含んだ3次元トポロジカル絶縁体の相図を決定した。また相境界で現れるDirac半金属が示す、半金属-金属転移の様子を状態密度のスケーリングという新しい概念で解析した。

研究成果の概要(英文)：We have studied the disordered topological insulators in two and three dimensions. We first estimated the critical exponents in two dimensional quantum Hall and quantum spin Hall transitions with high accuracy. We then determined the phase diagram of disordered three dimensional topological insulators. In addition, we have analyzed the semi-metal to metal transition of Dirac semi-metals that appear on the phase boundary via the scaling of density of states.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル絶縁体 Dirac半金属 ワイル半金属 状態密度 スケーリング 臨界指数 相図

### 1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体は新しい固体の相としてここ数年、大きな注目を浴びている。トポロジカル絶縁体は系に乱れがない場合に定義されるが、実際の物質においては不純物・格子欠陥などの乱れが必ず含まれる。本研究では、トポロジカル絶縁相への乱れの効果を考察する。

### 2. 研究の目的

本研究では、乱れた系における量子(スピン)ホール相とその相へのアンダーソン転移を理論的に研究する。量子ホール効果の発見後、次々と新奇な量子輸送現象が見つかっている。特に絶縁体相はトポロジカル絶縁体相ととらえられ、近年注目を浴びている。こうした転移の定量的な理解は未だに十分ではない。本研究では異なるトポロジカル絶縁体相間の転移(量子ホール転移)、および金属相からトポロジカル絶縁相への転移(量子スピンホール転移)を詳細に解析し、その臨界特性を決定する。また、ポイントコンタクトコンダクタンスなどの量子輸送特性を研究する。こうした研究からトポロジカル絶縁体相にもなう新奇な輸送現象を予言する。

### 3. 研究の方法

本研究では、物質の詳細にはよらない普遍的な性質を解明する。そのため構造が単純で大規模数値計算に適している量子ネットワークモデルを主に用いる。まず、有限サイズスケール理論によりトポロジカル絶縁体相への転移を解析し、臨界指数を精密に決定し、臨界点におけるコンダクタンスの分布の性質や共形不変性を明らかにする。さらに、量子ホール系・量子スピンホール系を3次元的に積みあげることで形成される表面状態をネットワークモデルで記述し、その輸送特性を調べる。こうしたネットワークモデルによる計算と平行して、Wilson-Dirac型のタイトバインディングモデルを用いた計算を行い、結果の普遍性を確認する。特に状態密度、電子状態の計算は新たにカーネルポリノミアル法、MKL/feast疎行列対角化を用いた。

### 4. 研究成果

本研究課題では乱れたトポロジカル絶縁体を研究した。はじめに、よく知られた2次元Z型トポロジカル絶縁体、すなわち量子ホール効果における臨界指数を決定した[11]。また、Z2型トポロジカル絶縁体における臨界指数を2次のリヤプノフ指数の解析により評価した[10]。

こうして2次元のトポロジカル絶縁体の研究を進めた後、2012年後半から3次元トポロジカル絶縁体の研究を始めた。はじめに、有限サイズ系におけるギャップのサイズ依存性を明らかにした[9]。ギャップのサイズ依存性は、系の形状、強いトポロジカル絶縁体が弱いトポロジカル絶縁体かで大きく異な

ることを示した。次に、ランダムネスが入った系における相図を、コンダクタンス、リヤプノフ指数から決定した[8]。この研究を進めて、トポロジカル相転移が起こる相境界において状態密度が新奇なスケールリング則に従うことを明らかにした[5]。同様の現象がトポロジカル絶縁体の2次元表面にも見られることを指摘した[3]。

これらと平行して、実験データの解析を実験グループと共同して行った。これによりトポロジカル絶縁体における位相緩和長の定量的評価が可能となった[7]。またトポロジカル絶縁体界面をどのようにデバイスとして利用できるかを議論した[4]。

以上の研究に加えて、乱れた電子系における普遍的な性質を解説し、より精度の高い臨界指数の評価を行った[6]。

なお、[5],[6]はWeb of Science Highly Cited Articlesに選ばれ、また[6]はNew Journal of Physics 2014 highlightにも選ばれた。[3]はeditor's suggestionに選ばれている。

本研究で発見した状態密度スケールリングはその後、高次元、低次元の系でも実現することが別の研究グループによって発見され注目を浴びている。それを受け、本研究は最終年度をまたずに終了し、あらたに「トポロジカル絶縁体のスケールリング理論」という研究をスタートした。

### 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11件)

1. Effect of disorder in a three dimensional layered Chern insulator S. Liu, T. Ohtsuki, R. Shindou, Physical Review Letters 116, 066401 (2016)(査読有)
2. Dimensional crossover of transport characteristics in topological insulator nanofilms, K. Kobayashi, Y. Yoshimura, K.-I. Imura, T. Ohtsuki, Physical Review B 92, 235407(2015) (査読有)
3. Modification and Control of Topological Insulator Surface States Using Surface Disorder, V. Sacksteder, T. Ohtsuki, K. Kobayashi, Physical Review Applied 3, 064006 (2015).(selected as Editor's suggestion) (査読有)
4. Engineering Dirac electrons emergent on the surface of a topological insulator, Yukinori Yoshimura<sup>1</sup>, Koji Kobayashi, Tomi Ohtsuki, Ken-Ichiro Imura, Science and Technology of Advanced Materials 16, 014403 (2015),

- doi:10.1088/1468-6996/16/1/014403( 査読有)
5. Density of States Scaling at the Semimetal to Metal Transition in Three Dimensional Topological Insulators, K. Kobayashi, T. Ohtsuki, K.-I. Imura, I. Herbut, Physical Review Letters 112, 016402 (2014). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.016402>(査読有)
  6. Critical exponent for the Anderson transition in the three-dimensional orthogonal universality class, K. Slevin, T. Ohtsuki, New Journal of Physics 16, 015012 (2014) doi:10.1088/1367-2630/16/1/015012( 査読有)
  7. Experimental proof of universal conductance fluctuation in quasi-one-dimensional epitaxial Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> wires, S. Matsuo, K. Chida, D. Chiba, T. Ono, K. Slevin, K. Kobayashi, T. Ohtsuki, et al., Physical Review B 88, 155438 (2013) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.88.155438>(査読有)
  8. Disordered weak and strong topological insulators, K. Kobayashi, T. Ohtsuki, K.-I. Imura, Physical Review Letters 110, 236803 (2013) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.236803>(査読有)
  9. Finite-size energy gap in weak and strong topological insulators, K.-I. Imura, M. Okamoto, Y. Yoshimura, Y. Takane, T. Ohtsuki, Physical Review B 86, 245436 (2012) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.245436>(査読有)
  10. CRITICAL EXPONENT FOR THE QUANTUM SPIN HALL TRANSITION IN  $\mathbb{Z}_2$  NETWORK MODEL, K. Kobayashi, T. Ohtsuki, K. Slevin, International Journal of Modern Physics: Conference Series 11, 114-119 (2012) DOI: 10.1142/S2010194512005995(査読有)
  11. Finite size scaling of the Chalker-Coddington model, K. Slevin, T. Ohtsuki, International Journal of Modern Physics: Conference Series 11, 60-69 (2012), doi: 10.1142/S2010194512006162(査読有)

[学会発表](計6件)

1. Distinctive features of transport in topological insulators: effects of surface disorder, T. Ohtsuki, K. Kobayashi, V. Sacksteder, Q. Wu, 日本物理学会年次大

- 会(2015年3月21日)早稲田大学(東京都・新宿区)
2. Phase diagrams of disordered 3D topological insulators and superconductors, T. Ohtsuki, K. Kobayashi, K.-I. Imura, K. Nomura, 米国物理学会, 2015年3月4日(San Antonio, USA)
  3. Density of states and conductance in disordered topological insulator surfaces, T. Ohtsuki, ランダム作用素のスペクトルと関連する話題, 2015年1月9日, 京都大学数理解析研究所, Kyoto, Japan.(招待講演) 京都大学(京都府・左京区)
  4. Density of states scaling in disordered 3D topological insulators, T. Ohtsuki, International Workshop on "Recent Progress and Perspectives in Scaling, Multifractality, Interactions, and Topological Effects Near Anderson Transitions" 2014年3月13日(招待講演) Max Planck Institute, Dresden (Germany)
  5. Density of states scaling in disordered topological insulators, T. Ohtsuki, "International Workshop on 'Spectra of Random Operators and Related Topics'", 2013年12月5日(招待講演) 京都大学(京都府・左京区)
  6. Finite-size energy gap in weak and strong topological insulators, T. Ohtsuki, Workshop on Disordered and Topological Systems (March 18, 2013)(招待講演) Zhejiang University, Hangzhou (China)

[図書](計0件)

[産業財産権]  
出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.ph.sophia.ac.jp/~tomi>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大槻 東巳 (OHTSUKI, Tomi)  
上智大学・理工学部・教授  
研究者番号：50201976

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

スレヴィン, キース (SLEVIN, Keith)  
大阪大学大学院・理学系研究科・准教授  
研究者番号：90294149

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

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