

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05131

研究課題名(和文)トポロジカル量子相とその階層構造，不純物に対する頑強性の理論的研究

研究課題名(英文)Hierarchy of topological phases and their robustness against disorder

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：研究前半ではトポロジカル絶縁体ナノ薄膜のスペクトル及び伝導特性に焦点を当てた。その層数依存性にトポロジカル相の階層構造を垣間見た。トポロジカルな分類は系の次元性に強く依存する。本研究では、ナノ薄膜のトポロジカル特性の層数依存性からトポロジカルな性質の次元間クロスオーバーを見た。またトポロジカル絶縁体薄膜とワイル半金属薄膜のトポロジカル特性について、その類似性を明らかにし、比較検証した。非エルミート・トポロジカル絶縁体では、バルクエッジ対応が自明には成り立たないという大きな問題があった。本研究の成果によりこの問題が克服され、非エルミート・トポロジカル絶縁体がきちんとした意味で定義された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル絶縁体ナノ薄膜の問題は、トポロジカルな分類の次元性というトポロジカル量子物理学の基本的なパラダイムに直結している。本研究ではこの問題に正面からアプローチし、トポロジカル絶縁体とワイル半金属の大域的な相図について、次元間クロスオーバーという観点からその類似性を明らかにした。このような比較研究は過去に例がなく、トポロジカル量子物理学の研究に新しい視点をもたらしたと言える。

非エルミート・トポロジカル絶縁体は研究中盤から後半にかけて非常に注目されるようになった。バルクエッジ対応はトポロジカル絶縁体という概念の根幹に関わる問題で、本研究ではこれに関して重要な指摘ができたことは意義深い。

研究成果の概要(英文)：The first target of the project was topological insulator thin films. We focused on the systematic evolution of their topological properties as a function of the thickness of the film. Topological classification depends on the dimensionality of the system. We have highlighted this dimensional crossover through spectral and transport properties of topological insulator and Weyl semimetal thin films.

Toward the end of the project we have also considered non-Hermitian topological insulators. Our work, resolving the issues on the bulk-edge correspondence in this system, gave a proper foundation to a non-Hermitian version of the topological insulator.

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 薄膜 バルクエッジ対応 非エルミート系

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体はその表面に現れるディラック錐の数が奇数か偶数かによって「強い」あるいは「弱い」と呼ばれる。

- 奇数個の場合：強いトポロジカル絶縁体 (STI: strong topological insulator)

孤立したディラック錐は後方散乱の影響を実質的に受けないため、不純物に対して頑強。表面の電子状態は乱れがあっても非局在。

- 偶数個の場合：弱いトポロジカル絶縁体 (WTI: weak topological insulator)

偶数個のディラック錐は相対的に不純物に弱く、表面の電子状態は(条件次第で)局在傾向。

STI はいわゆる強い指数で特徴付けられる。WTI は強い指数による分類では通常の絶縁体と区別されない。しかし、強い指数による分類をトポロジカルな分類の上部構造とするなら、その下部構造にあたる弱い指数による分類が存在して、これにより WTI が規定される。本研究ではトポロジカルな分類のこのような階層構造に着目する。

トポロジカルな分類は系の次元性にも依存する。上の STI/WTI という分類は空間 3 次元の系に特有のものである。また、トポロジカルな性質は有限サイズや形状効果を受けて発現したり、消失したりもする。例えば、トポロジカル絶縁体ナノ薄膜の系では、層数を変えることでギャップレスの表面状態をスイッチオン・オフ、つまり、トポロジカルな性質を変化させることができる。

2. 研究の目的

トポロジカル絶縁体ナノ薄膜の問題を考えて、STI と WTI の比較を行う。より一般的な見地として、トポロジカル絶縁体薄膜とワイル半金属薄膜の比較研究という視点もあり得る。論文[1]では、実際このような視点からトポロジカル絶縁体ナノ薄膜の問題を議論した。

バルクの系の場合、STI では、ギャップレスの表面状態が全て面に現れ、バルクの絶縁体を覆い尽くす。これに対し、WTI は異方性が強く、注目する表面の向きとこの異方性の兼合いで表面状態が現れたり、現れなかったりする。面の向きや境界条件に応じて、ギャップレスの表面状態を出したり、引っ込めたりできる WTI は、STI より制御性が高いとも言える。本研究では、このような STI と WTI の性質がトポロジカル絶縁体薄膜の伝導特性を決めるのにどのような役割を果たすか調べた。

3. 研究の方法

トポロジカル絶縁体の記述には、Wilson-Dirac 型の有効模型を用いたモデル計算が有効である。数値的なシミュレーションでは、これを tight-binding 近似の形で格子模型にしたものを用いる。格子模型による記述は薄膜やワイヤー状の系で有限サイズ効果を調べる上でも有用である。

本研究においては、系の次元性も重要な役割を演じる。本研究では、適宜 Wilson-Dirac 模型の 1, 2, 3 次元版、あるいはその変形版等を使い分け、とりわけ、ナノリボン、ナノ薄膜といった系を考えることで、異なる次元間でのトポロジカルな性質のクロスオーバーに焦点を当てる。

研究計画後半では、非エルミート・トポロジカル絶縁体について調べた。非エルミート・トポロジカル絶縁体では、バルクエッジ対応が自明には成り立たないという大きな問題があった。論文[3]ではこの点に焦点を当てて研究を行った。

4. 研究成果

論文[2]では、弱いトポロジカル絶縁体 WTI (0;001)の(001)面を扱っていた。WTI は 2 次元トポロジカル絶縁体のスタッキングとみなせるため、層数の偶奇に依存してエッジチャンネルが現れたり消えたりするのはある意味予想がつくが、STI の場合、それとは少し状況が違う。

STI 薄膜が 2 次元的な TI になるかどうかは、系を擬 2 次元系として見たとき、それがトポロジカルに自明か、非自明かによって決まることになる。そして、これは薄膜の上下の面に現れる表面状態の混成ギャップが、自明か、非自明かによって決まる。一般に、上下の面に現れる表面状態の波動関数は振動しながらバルクに染み込んでいく(減衰振動)が、この振動のノードのところに、たまたま反対の表面があると、その厚さでは、混成ギャップ E_g が偶発的にゼロになり、また E_g を厚さ x の関数 $E_g(x)$ と見ると、 E_g はここで符号を変える。すなわち、トポロジカルな性質がここで変化する。

研究計画後半では、非エルミート・トポロジカル絶縁体について調べ、これについて論文[3]にまとめた。本研究において、我々は非エルミート・トポロジカル系のバルクエッジ対応を議論するには、修正された周期境界条件を使うのが良いことを提案した。この境界条件を使うと、エルミートな系で確立された笠-初貝流のバルクエッジ対応が、非エルミートな系にもほぼそのま

まの形で適応できる。ひとつ違うのは、システムを規定するパラメーター空間の次元が1つ大きくなること。最初に、非エルミートな系が境界条件に敏感なことを指摘したが、より正確に言えば、非エルミート量子系は「境界条件を指定して」初めて規定される。我々の提案する修正された周期境界条件は、非エルミート表皮効果を境界条件に取り込むための実パラメーター b を定義の中を含んでいる。そこで、非エルミート・トポロジカル系のバルクエッジ対応は、 b を含んだ一般化されたモデル・パラメーターの空間で笠-初貝の議論を展開することになる。その意味で、非エルミート・トポロジカル系におけるバルクエッジ対応は一般化されている。本定式化により、トポロジカル絶縁体の概念が自然な形で、非エルミート系に拡張された。

[1] Y. Yoshimura, W. Onishi, K. Kobayashi, T. Ohtsuki and K.-I. Imura, “Comparative study of Weyl semimetal, topological and Chern insulators: from the viewpoint of thin-film construction,” *Phys. Rev. B*. 94, 235414 (2016).

[2] Y. Yoshimura, A. Matsumoto, Y. Takane and K.-I. Imura, “Perfectly conducting channel on the dark surface of weak topological insulators,” *Phys. Rev. B* 88, 045408 (2013).

[3] Ken-Ichiro Imura, Yositake Takane, “Generalized bulk-edge correspondence for non-Hermitian topological systems,” *Phys. Rev. B* 100, 165430 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K.-I. Imura, Y. Takane	4. 巻 100
2. 論文標題 Generalized bulk-edge correspondence for non-Hermitian topological systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 165430, 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.165430	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Imura Ken-Ichiro, Yoshimura Yukinori, Fukui Takahiro, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 969
2. 論文標題 Bulk-edge correspondence in topological transport and pumping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012133 ~ 012133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 J. Park, J. H. Lee, G.-H. Lee, Y. Takane, K.-I. Imura, T. Taniguchi, K. Watanabe, and H.-J. Lee	4. 巻 120
2. 論文標題 Short Ballistic Josephson Coupling in Planar Graphene Junctions with Inhomogeneous Carrier Doping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 077701 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.077701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yukinori Yoshimura, Wataru Onishi, Koji Kobayashi, Tomi Ohtsuki, and Ken-Ichiro Imura	4. 巻 94
2. 論文標題 Comparative study of Weyl semimetal and topological/Chern insulators: Thin-film point of view	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 235414 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.235414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Kobayashi, K.-I. Imura, Y. Yoshimura and T. Ohtsuki	4. 巻 92
2. 論文標題 Dimensional crossover of transport characteristics in topological insulator nanofilms	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 235407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.92.235407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Matsumoto, T. Arita, Y. Takane, Y. Yoshimura and K.-I. Imura	4. 巻 92
2. 論文標題 Manipulating quantum channels in weak topological insulator nano-architectures	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 195424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.92.195424	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Yoshimura, K. Kobayashi, T. Ohtsuki, K.-I. Imura	4. 巻 16
2. 論文標題 Engineering Dirac electrons emergent on the surface of a topological insulator	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Sci. Technol. Adv. Mater.	6. 最初と最後の頁 14403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1468-6996/16/1/014403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Bloch band theory for non-Hermitian bulk-edge correspondence
3. 学会等名 BE/BC2020F (Bulk-Edge/Boundary Correspondence) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Generalized bulk-edge correspondence for non-Hermitian topological systems
3. 学会等名 IIS-Chiba Workshop NH2019TD (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Generalized bulk-edge correspondence for non-Hermitian topological systems
3. 学会等名 IIS-Chiba Workshop NH2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura, Yositake Takane
2. 発表標題 Generalized bulk-edge correspondence for non-hermitian topological systems
3. 学会等名 NTTI 2019 and BEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.-I. Imura, Y. Yoshimura, T. Fukui and Y. Hatsugai
2. 発表標題 Bulk-edge correspondence in topological transport and pumping
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井村健一郎, 田中新
2. 発表標題 非共型(メビウス)トポロジカル絶縁体の表面状態に関する理論的考察
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会, 領域4, 24aB32-4
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井村健一郎, 桐木達也, 林晋, 吉村幸徳, 中西毅
2. 発表標題 多極子トポロジカル絶縁体・ポンプ系とコーナー状態/不変量
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会, 領域4, 22pB101-2
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Kiriki, Ken-Ichiro Imura, Yukinori Yoshimura, Shin Hayashi, Takeshi Nakanishi
2. 発表標題 Multipole topological insulators and pumping: from the viewpoint of bulk-edge and corner correspondence
3. 学会等名 BEC2018: Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases - From solid state physics to transdisciplinary concepts (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Comparative study of Dirac/Weyl semimetals and topological/Chern insulators: thin-film point of view
3. 学会等名 Interactions and topology in Dirac systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Comparative study of topological insulators vs. Weyl and Dirac type semimetals: bulk-edge correspondence and robustness against disorder
3. 学会等名 BEC2016: Physics of bulk-edge correspondence and universality - From solid state physics to cold atoms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Topological insulators and semimetals: surface states, bulk-edge correspondence and disorder effects
3. 学会等名 2016 Xmas Theoretical Physics Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Characterizing the Weyl semimetal thin films: chiral vs. non-chiral types
3. 学会等名 Theory of Correlated Topological Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Comparative study of Weyl semimetal and topological/Chern insulators: bulk-edge correspondence and disorder effects
3. 学会等名 APS March Meeting 2017 (Session H44: Dirac and Weyl Semimetals: Theory II) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉村幸徳, 尾西渉, 小林浩二, 大槻東巳, 井村健一郎
2. 発表標題 ワイル半金属とトポロジカル絶縁体の比較研究: 薄膜・次元間クロスオーバーとバルクエッジ対応の観点から
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会, 領域4, 16aBH-7
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉村幸徳, 井村健一郎, 初貝安弘, 福井隆裕
2. 発表標題 トポロジカル量子ポンプにおけるバルクエッジ対応
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会, 領域4, 20aB12-6
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井村健一郎, 吉村幸徳, 尾西渉, 桐木達也, 小林浩二, 大槻東巳
2. 発表標題 ワイル半金属の表面状態に関する研究: 薄膜系におけるバルクエッジ対応と不純物に対する応答
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会, 領域4, 20aB12-7
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井村 健一郎
2. 発表標題 ワイル半金属とトポロジカル絶縁体の比較研究: バルクエッジ対応と不純物効果
3. 学会等名 第6回 強相関電子系理論の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井村 健一郎
2. 発表標題 ワイル半金属薄膜の不純物存在下における輸送特性:カイラル型vs.非カイラル型
3. 学会等名 科研費基盤研究A (26247064) <<トポロジカル相におけるバルクエッジ対応の物理とその普遍性: 固体物理から冷却原子まで>>第5回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Thin film topological insulators: bulk-edge correspondence, dimensional crossover and superlattice generalization
3. 学会等名 Physics of bulk-edge correspondence and its universality: from solid state physics to cold atoms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Ken-Ichiro Imura
2. 発表標題 Delocalization in disordered topological insulators and related systems
3. 学会等名 Delocalization transitions in disordered systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Ken- Ichiro Imura
2. 発表標題 Density of States Scaling in disordered Dirac and Weyl semimetals
3. 学会等名 Topological & Correlated Matter (Gordon Research Conference) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 井村 健一郎
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体のZ2性再考
3. 学会等名 <<トポロジカル相におけるバルクエッジ対応の物理とその普遍性：固体物理から冷却原子まで>>第4回研究会（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 井村 健一郎
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体再考，そして状態密度スケーリングへ
3. 学会等名 CMSI <<トポロジカル物性と計算物質科学が創出する新物質科学に関する研究会>>（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉村幸徳，井村健一郎，小林浩二，大槻東巳
2. 発表標題 トポロジカル/チャーン絶縁体-ディラック/ワイル電子系における創発的トポロジカル特性（21pBA-1）
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉村幸徳，小林浩二，大槻東巳，井村健一郎
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体ナノワイヤー表面状態の頑強性：不純物存在下における局在 / 非局在の問題（21pBA-4）
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉村幸徳, 井村健一郎
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体超格子系におけるトポロジカルな性質の次元間クロスオーバー (18aAG-5)
3. 学会等名 日本物理学会2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 小林浩二, 大槻東巳, 井村健一郎, 野村健太郎
2. 発表標題 乱れのあるワイル/ディラック半金属における臨界点の性質 (19aAG-1)
3. 学会等名 日本物理学会2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Koji Kobayashi, Tomi Ohtsuki, and K.-I. Imura	4. 発行年 2019年
2. 出版社 WILEY-Scrivener Publishing LLC	5. 総ページ数 414
3. 書名 Advanced Topological Insulator	

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://home.hiroshima-u.ac.jp/imura/ Ken Imura's web site http://home.hiroshima-u.ac.jp/imura/ 井村 健一郎(大学院先端物質科学研究科) - 広島大学 http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.66bc1344d4bf8caa520e17560c007669.html Ken Imura's web site http://home.hiroshima-u.ac.jp/imura/ 井村健一郎 (大学院先端物質科学研究科) http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.66bc1344d4bf8caa520e17560c007669.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	大槻 東巳 (Ohtsuki Tomi) (50201976)	上智大学・理工学部・教授 (32621)	
連携研究者	高根 美武 (Takane Yositate) (40254388)	広島大学・先端物質科学研究科・教授 (15401)	