

機関番号：15401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19740189

研究課題名 (和文) 低次元電子系における量子輸送現象、完全計数統計と量子絡み合いの理論的研究

研究課題名 (英文) Theoretical study of quantum transport in low-dimensional electron systems, full counting statistics and quantum entanglement

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

研究成果の概要 (和文)：

トポロジカル絶縁体はバルクでは絶縁体なのに表面では金属的という一見矛盾した性質によって特徴づけられる。その中でもとりわけ Z2 トポロジカル絶縁体は時間反転対称性を破らず、量子ホール効果と同様の状況を磁場なしで実現できる。Z2 トポロジカル絶縁体を題材として、Z2 秩序の不純物に対する robustness やドーピングした状況下での局在の性質、トポロジカル絶縁体の接合面における輸送特性、また端状態のスペクトルと波動関数の局在度による特徴付け等の研究を行った。

研究成果の概要 (英文)：

Topological insulator (e.g., a quantum Hall state under a high magnetic field) has a seemingly “counterintuitive” property of being insulating in the bulk, but metallic on its surface. Its Z2 version, the Z2 topological insulator realizes such situation without magnetic field, i.e., without breaking time-reversal symmetry. I have been working on and uncovering various unexpected properties of this Z2 topological insulator, e.g., its robustness against disorder, its transport characteristics at the interface, the spectrum and localizability of its gapless surface states, etc.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	800,000	0	800,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,200,000	720,000	3,920,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：メゾスコピック系・局在

## 1. 研究開始当初の背景

単層のグラファイト (グラフェン) は、分離して量子伝導等の実験がなされるようになって以来、相対論的量子力学の実験場とし

て多くの理論的興味を集めている。(単層の) グラフェンが質量ゼロの相対論的な分散関係を持つことはよく知られているが、これが複数枚重ね合わさったグラフェンの多層系

の場合、一般には線形分散を持ったバンドとギャップレスで放物線的に立ち上がるバンドなどが共存することになる。共存の仕方は、層の枚数の偶奇や層の重なり方 (stacking) などから決まる。単層のグラフェンでは、相対論的なランダウ準位の形成とその特徴的な縮退度のために一風変わった量子ホール効果が見つかった。

## 2. 研究の目的

グラフェンが2層以上積層した系の場合、ホール伝導度の量子化の仕方は一般に変わってくると予想されるが、多層系の場合、先に述べたように stacking の仕方などによって、異なる結果が期待される。このような多層系グラフェンに対して、量子輸送特性/磁気的特性あるいは光学的特性等を理論的に調べ、グラフェンの機能デバイスとしての特性を明らかにするような実験を提案する。

トポロジカル絶縁体 (例: 強磁場下で量子ホール効果が起きている状況) はバルクでは絶縁体なのに表面では金属的という一見矛盾した性質によって特徴づけられる。一方、いわゆる Z2 トポロジカル絶縁体 (あるいはスピンホール絶縁体) は、時間反転対称性を破らず、量子ホール効果と同様の状況を磁場なしで実現でき、実験的研究/デバイス応用にとって好都合である。このような Z2 トポロジカル絶縁体の特性を明らかにしていくことは本研究分野の中心的課題である。

## 3. 研究の方法

グラフェンは K 点、K' 点というブリルアン・ゾーン内の2点で特徴的なディラック的分散関係を示す。これに内因的なスピン軌道相互作用による「トポロジカルな」質量が加わった Kane-Mele 模型は、Z2 トポロジカル絶縁体の原型と言える。我々はこの Kane-Mele 模型、および BHZ 模型 (用語解説を参照) を用いて Z2 秩序の不純物に対する robustness やドーブした状況下での局在の性質を調べた。

(用語解説) Kane-Mele 模型はベースがグラフェンである (炭素は軽い) ため、Z2 絶縁体を実現するようなスピン軌道結合の大きさは非現実的であるという批判が常にあった。実際、Z2 絶縁体の実験的検証は、グラフェンではなく水銀テルル (HgTe) の反転したギャップを利用する HgTe/HgCdTe 2次元量子井戸で行われた。A. Bernevig, T. Hughes, S. Zhang (略して BHZ) の模型はこのような水銀テルル量子井戸に対するもので、 $\Gamma$  点近傍の低エネルギー電子の実効的な振る舞いを記述する。

## 4. 研究成果

我々は、ドーブした Kane-Mele 模型が不純

物散乱の存在下で特徴的な弱局在の相図 (図1) を呈すことを見出した。とりわけ、局在のクラスが活性化された有効スピンの数  $N_s$  を数えることでわかることを指摘した。例えば、バレー間散乱はバレースピンを、ラシュバ相互作用は、実スピンを活性化するが、それぞれの状況に応じて、「実効的な時間反転操作」を同定することが肝要である。Kane-Mele 模型には、副格子、バレー、実スピンの3つがあるので、 $N_s=1,2,3$  (副格子スピンは常に活性)。質量項がない場合、 $N_s$  が偶数なら系は弱局在 (WL)、奇数なら反局在 (AL) である。質量項が実効的な時間反転対称性を破ると、系はユニタリー (弱局在補正なし) になる。

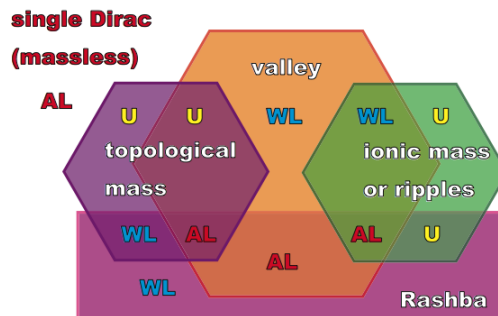


図1 Z2 トポロジカル絶縁体における弱局在の相図—WL, AL, Uはそれぞれ局在のクラス: 弱局在、反局在、ユニタリーに対応。

弱局在理論の発展には長い歴史があるが、つの局在のクラスが有効的なスピン自由度の活性/不活性化によって、次々に移り変わることができるような系は我々の知る限り過去に存在しない。また、反局在がポテンシャル散乱だけで実現されるのもグラフェン系の著しい特色である。そのような意味において、我々のアプローチは、弱局在理論の枠組みに現代的な視点を与えるものと言える。

Z2 絶縁体は当然、第一義的にはバンド絶縁体である。一方、我々の最近の研究で Z2 絶縁体の相図 (BHZ 模型を採用) を詳細に解析にした結果、”トポロジカル Anderson 絶縁体”も存在することが明らかになった。我々は転送行列法で局在長のスケールを調べることによりドーブした BHZ 模型の相図を決めた。局在の性質は系の対称性に本質的に依存しており、ランダム行列の分類から決まる3つのクラスがある。我々のデータは symplectic クラスに属する状況で Anderson 局在が Z2 絶縁体の形成に本質的に寄与していることを明らかにした点が新しい。clean limit で Z2 自明相にあたる系が局在の効果で Z2 非自明になるという意味で、我々はこれを Z2 トポロジカル Anderson 絶縁体と名付けた。

## 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 17 件)

代表的なもの (査読あり) :

- [1] A. Yamakage, Ken Nomura, K.-I. Imura and Y. Kuramoto, “Disorder-Induced Multiple Transition involving Z2 Topological Insulator”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 053703 (2011).
- [2] Yositate Takane and K.-I. Imura, “Josephson Current through a Planar Junction of Graphene”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 043702 (2011).
- [3] A. Yamakage, K.-I. Imura, J. Cayssol and Y. Kuramoto, “Interfacial charge and spin transport in Z2 topological insulators”, Phys. Rev. B 83, 125401 (2011).
- [4] S. Mao, Y. Kuramoto, K.-I. Imura and A. Yamakage, “Analytic Theory of Edge Modes in Topological Insulators”, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 124709 (2010).
- [5] K.-I. Imura, A. Yamakage, S. Mao, A. Hotta and Y. Kuramoto, “Zigzag edge modes in a Z2 topological insulator: Reentrance and completely flat spectrum”, Phys. Rev. B 82, 085118 (2010).
- [6] K.-I. Imura, Y. Kuramoto, Ken Nomura, “Anti-localization of graphene under substrate electric field”, Europhys. Lett. 89, 17009 (2010).
- [7] A. Yamakage, K.-I. Imura, J. Cayssol, Y. Kuramoto, “Spin-orbit effects in a graphene bipolar pn junction”, Europhys. Lett. 87, 47005 (2009).
- [8] K.-I. Imura, Y. Kuramoto, Ken Nomura, “Weak localization properties of doped Z2 topological insulator”, Phys. Rev. B 80, 085119 (2009).
- [9] T. Jonckheere, K.-I. Imura and Th. Martin, “Colossal spin fluctuations in a molecular quantum dot magnet with ferromagnetic electrodes”, Phys. Rev. B 78, 045316 (2008).
- [10] M. Nakamura, L. Hirasawa and K.-I. Imura, “Quantum Hall effect in bilayer and multilayer graphene with finite Fermi energy”, Phys. Rev. B 78, pp. 033403 (2008).
- [11] Y. Hamamoto, K.-I. Imura and T. Kato, “Numerical study of transport through a single impurity in a spinful Tomonaga–Luttinger liquid”, Phys. Rev. B 77, 165402 (2008).
- [12] K.-I. Imura, Y. Utsumi, Th. Martin, “Full counting statistics for transport through a molecular quantum dot magnet”, Phys. Rev. B 75, 205341 (2007).

[学会発表] (計 28 件)

代表的なもの :

- [1] K.-I. Imura, “Topological Anderson insulator”,

新学術領域研究"トポロジカル量子現象"第 1 回領域研究会, 京都大学, 2010 年 12 月 18-20 日.

- [2] K.-I. Imura, “Zigzag edge modes in graphene nano-ribbon and underlying topological order”, TNT2010, Braga, Portugal, September 5-9, 2010.
- [3] K.-I. Imura, “Zigzag edge modes of graphene and of a Z2 topological insulator”, Workshop on Principles and Design of Strongly Correlated Electronic Systems August 2-13, 2010, International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Trieste, Italy.
- [4] K.-I. Imura, “From graphene to a topological insulator – bulk and edge properties”, Correlated Phenomena in Low-Dimensional Systems, July 5-23, 2010, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany.
- [5] K.-I. Imura, “Bulk and edge of Z2 topological insulator – single vs. double valley systems”, Interactions, Disorder, and Topology in Quantum Hall Systems, June 7-11, 2010, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany.
- [6] K.-I. Imura, “From graphene to a Z2 topological insulator”, 2nd GCOE International Symposium on <<Weaving Science Web beyond Particle-Matter hierarchy>>, February 18-19, 2010, Tohoku University (Aobayama, Sendai).
- [7] 井村 健一郎, “Z2 トポロジカル絶縁体におけるバルクと端—有効理論と格子模型の比較”, 東京大学物性研究所短期研究会: 「ディラック電子系の物性—グラフェンおよび関連物質の最近の研究」, 2009 年 10 月 22-24 日, 東京大学物性研究所.
- [8] K.-I. Imura, “Spin-orbit effects in graphene p-n junction”, International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2009), September 29 - October 04, 2009, Rhodes, Greece.
- [9] K.-I. Imura, “Anti-localization of graphene under substrate electric field”, Graphene Toyko 2009, July 25-26, 2009, University of Tokyo (Hongo, Tokyo).
- [10] K.-I. Imura, “Anti-localization of graphene under substrate electric field”, 14th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Systems (NGSS-14), July 13-17, 2009, Tohoku University (Katahira, Sendai)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/imura/>

<http://seeds.hiroshima-u.ac.jp/soran/43chh79/a.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井村 健一郎 (IMURA KEN ICHIRO)

研究者番号 : 90391870

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし