

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21540389

研究課題名（和文） 完全透過チャネルを有する乱れた量子細線系における電気伝導

研究課題名（英文） Electron transport in disordered quantum wires  
with a perfectly conducting channel

## 研究代表者

高根 美武（TAKANE YOSITAKE）

広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40254388

## 研究成果の概要（和文）：

ジグザグ端グラフェン・ナノリボンでは、不純物等による乱れがあっても後方散乱無しで電子を完全透過させる完全透過チャネルが発現するためアンダーソン局在が生じない。このような特徴を持つナノリボン系における電気伝導の性質を明らかにすることを目的として研究を進めた。結果として、電気伝導の統計的な振る舞いはチャネル数が非対称なユニタリ普遍クラスによって記述されることを明らかにした。また、ナノリボン系における完全伝導チャネルは位相緩和に対して極めて頑健であることを示した。

## 研究成果の概要（英文）：

It has been pointed out that electrons in a disordered graphene nanoribbon with zigzag edges are free from Anderson localization due to the presence of a perfectly conducting channel without backward scattering. The purpose of this research is to clarify characteristic features of electron transport in this peculiar system. It is shown that the statistical aspect of the electron transport properties can be understood within the framework of the unitary universality class with channel-number imbalance. It is also shown that a perfectly conducting channel in a disordered graphene nanoribbon is remarkably robust against dephasing.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：完全透過チャネル，アンダーソン局在，量子細線

## 1. 研究開始当初の背景

当研究代表者は、若林克法氏と M. Sigrist 氏とともに、ジグザグ端グラフェン・ナノリ

ボン (zGNR) では不純物等による乱れがあっても完全透過チャネルが発現するためアンダーソン局在が生じないことを理論的に指

摘した。完全透過チャンネルとは不純物が存在するにもかかわらず後方散乱無しで電子を完全透過させる伝導チャンネルのことである。従来、金属カーボンナノチューブ(CNT)において完全伝導チャンネルの発現が指摘されていたが、その発現機構は zGNR とは本質的に異なる。従って、乱れを含む zGNR は通常の量子細線やCNTとは全く異なる、新奇な電気伝導特性を示すと期待される。

ランダム系の統計力学の枠組みにおいて、CNTは奇数チャンネル数のシンプレクティック普遍クラスに分類され、その特異な電気伝導特性は既に詳しく調べられている。一方、zGNRはチャンネル数の非対称なユニタリ普遍クラスに属すると考えられるが、その詳細な振る舞いは未解明であった。一般に、量子細線系の電気伝導は各チャンネルに対する透過確率分布によって記述されるが、その振る舞いは普遍クラスによって大きく異なることが知られている。当研究代表者らは、非対称ユニタリ普遍クラスに対してランダム行列理論を適用して透過確率分布関数が従うFokker-Planck方程式を導出し、それより無次元コンダクタンス  $g$  の平均値と揺らぎの長さ  $L$  に対するスケーリング則を導いた。しかし、得られたスケーリング側の正当性は未検証のままであった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は(zGNRに代表される)非対称ユニタリ普遍クラスに分類される量子細線系における電気伝導特性の特徴を明らかにすることである。特に、当該普遍クラスに対するスケーリング則をランダム行列理論とは独立な理論手法によって検証し、その正当性を明らかにすることを主たる目的とした。また、他の普遍クラス、特にCNTが属する奇数シンプレクティック普遍クラス、との類似点および差異にも注目する。具体的には、無次元コンダクタンスの振る舞いを、格子モデルを用いた数値シミュレーションおよびネットワークモデルに基づいた解析的な計算によって検討することを目指した。

## 3. 研究の方法

非対称ユニタリ普遍クラスの振る舞いを記述するスケーリング則はランダム行列理論に基づいて導出されたものである。その正当性を検証するために、以下の二つの課題について研究した。

- (1) 乱れを含む zGNR と等価な格子モデルを導入し、大規模数値シミュレーションによって無次元コンダクタンス  $g$  の平均値と揺らぎの長さ  $L$  に対する依存性を評価する。その結果と、Fokker-Planck 方程式から導いたスケーリング則との整合性を検証する。
- (2) 完全透過チャンネルを持つ簡単なネット

ワークモデルを導入し、 $g$  の平均値と揺らぎを解析的に計算する。その結果とスケーリング則との整合性を検証する。

後で述べるように、これらの課題に関しては予想外に早く決定的な成果が得られたので、さらに主題と深く関連する発展的な課題に手を広げた。具体的なテーマは以下の通り。

- (3) CNT との差異を明確にするために、zGNR におけるコンダクタンスの振る舞いに対する位相緩和の影響を検討する。
- (4) 完全透過チャンネルを持つ zGNR に対する超伝導近接効果について検討する。
- (5) CNT と類似点を持つトポロジカル絶縁体表面のディラック電子系の基礎的な電子物性について検討する。
- (6) zGNR において完全透過チャンネルの原因となるジグザグ端に局在した電子状態の性質を、より一般的な形状において検討する。

## 4. 研究成果

得られた成果を列挙する。カッコ内の番号は「3. 研究の方法」と一対一で対応する。

(1) 大規模数値シミュレーションによって無次元コンダクタンス  $g$  の平均値と揺らぎ等を詳細に計算し、長さ  $L$  に対する依存性を定量的に明らかにした。また、その結果がスケーリング則と高い数値精度で一致することを確認した。

(2) 任意個数の完全透過チャンネルを持つ単純なネットワークモデルを提案し、 $g$  の平均値と揺らぎを  $L$  の関数として解析的に評価することに成功した。また、その振る舞いがスケーリング則と完全に一致することを確認した。

これらの成果によりスケーリング則の正当性は明らかとなり、当初の主たる目標を達成することができた。そこで、以降は発展的な課題に取り組んだ。

(3) ボルツマン方程式および数値シミュレーションによって zGNR でのコンダクタンスに対する位相緩和の影響を検討した。その結果、強い位相緩和が存在しても完全透過チャンネルは保持されることが分かった。この結果は、CNT における完全透過チャンネルが位相緩和に対して脆弱であることと対照的であり、zGNR の顕著な特徴と見なすことができる。

(4) zGNR における超伝導近接効果の解明を目指したが、その途上で、そもそもグラフェン系に対する近接効果を取り扱う理論的な手法が確立されていないことに気付いた。そこで、近接効果を自己エネルギーで表したうえで準古典グリーン関数を適用する手法を開発し、グラフェン系におけるジョセフソン効果の解析に応用した。その結果、グラフェンと超伝導体のトンネル結合が弱い領域において、ジョセフソン電流の温度依存性に異常な振る舞いが現れることを見出した。

(5) トポロジカル絶縁体の表面には、CNT やグラフェンと同様に線形エネルギー分散を持つディラック電子が現れる。このようなトポロジカル絶縁体中に線欠陥を導入すると、その周りにCNT の場合とほぼ等価な完全透過チャンネルが出現することが知られていたが、その発現機構をベリー位相と有限サイズ効果に基づいて解明することに成功した。また、トポロジカル絶縁体におけるベリー位相を微視的なモデルに基づいて導出し、それが有限サイズ・ギャップを引き起こすこと、そのため低エネルギーの電気伝導特性に大きな影響を与えることを示した。

(6) グラフェンのジグザグ端にけるエッジ局在状態の安定性を様々な角度のコーナーエッジに関して検討し、120 度の場合にのみコーナー近傍でエッジ状態が局所的に消失することを示した。

## 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 13 件)

1. Perfectly conducting channel and its robustness in disordered carbon nanostructures, Y. Ashitani, K.-I. Imura, and Y. Takane: Int. J. Mod. Phys.: Conf. Ser. 11 (2012) 掲載決定, 査読有。

2. Electronic states and local density of states near graphene corner edge, Y. Shimomura, Y. Takane, and K. Wakabayashi: Int. J. Mod. Phys.: Conf. Ser. 11 (2012) 掲載決定, 査読有。

3. Spin Berry phase in the Fermi-arc states, K.-I. Imura and Y. Takane: Phys. Rev. B 84 (2011) 245415 (1-9) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.84.245415.

4. Spin Berry phase in anisotropic topological insulators, K.-I. Imura, Y. Takane, and A. Tanaka: Phys. Rev. B 84 (2011) 195406 (1-8) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.84.195406.

5. Weak topological insulator with protected gapless helical states, K.-I. Imura, Y. Takane, and A. Tanaka: Phys. Rev. B 84 (2011) 035443 (1-8) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevB.84.035443.

6. Electronic states and local density of states in graphene with a corner edge structure, Y. Shimomura, Y. Takane, and

K. Wakabayashi: J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 054710 (1-9) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.80.054710.

7. Josephson effect in a planar junction of graphene, Y. Takane and K.-I. Imura: J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 043702 (1-4) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.80.043702.

8. Tunneling density of states in multilayer graphene deposited on a superconductor, Y. Takane: J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 124706 (1-6) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.79.124706.

9. Nonuniversal shot noise in disordered quantum wires with channel-number imbalance, Y. Takane: J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 104706 (1-4) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.79.104706.

10. Electronic transport properties and perfectly conducting channel of the disordered graphene nanoribbons, K. Wakabayashi, Y. Takane, and M. Sigrist: AIP Conf. Proc. 1199 (2010) 539-540 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3295545>.

11. Anomalous enhancement of the Boltzmann conductivity in disordered zigzag graphene nanoribbons, Y. Takane: J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 024711 (1-5) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.79.024711.

12. Electronic transport properties of graphene nanoribbons, K. Wakabayashi, Y. Takane, M. Yamamoto, and M. Sigrist: New J. Phys. 11 (2009) 095016 (1-21) 査読有, DOI: 10.1088/1367-2630/11/9/095016.

13. Average and second moment of the conductance of randomly coupled chiral channels, Y. Takane: J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 094703 (1-9) 査読有, DOI: 10.1143/JPSJ.78.094703.

[学会発表] (計 11 件)

1. 下村祐司, 高根美武, 若林克法, グラフェンコーナーエッジ上における電子状態, 日本物理学会年次大会 (2012 年 3 月 27 日), 関西学院大。

2. 芦谷祐紀, 井村健一郎, 高根美武, 完全伝導チャンネルに対する位相緩和の影響, 日本物理学会年次大会 (2012 年 3 月 27 日), 関

西学院大.

3. 井村健一郎, 高根美武, ワイル半金属におけるフェルミアーキ状態とスピン Berry 位相, 日本物理学会年次大会 (2012年3月24日), 関西学院大.

4. 井村健一郎, 高根美武, 田中秋広, トポロジカル絶縁体における螺旋/刃状転位と有限サイズ効果, 日本物理学会秋季大会 (2011年9月24日), 富山大.

5. 下村祐司, 高根美武, 若林克法, グラフエンの  $120^\circ$  コーナーエッジにおける電子状態, 日本物理学会秋季大会 (2011年9月24日), 富山大.

6. 高根美武, 井村健一郎, グラフエン平面接合におけるジョセフソン効果, 日本物理学会秋季大会 (2011年9月22日), 富山大.

7. Y. Takane and K.-I. Imura, Stationary Josephson effect in ballistic graphene junctions: effects of inhomogeneous carrier density, The 26th Int. Conf. on Low Tem. Phys. (2011年8月16日) Beijing, China.

8. K.-I. Imura, Y. Takane, and A. Tanaka, Topological insulator with dislocation lines, The 26th Int. Conf. on Low Tem. Phys. (2011年8月15日) Beijing, China.

9. Y. Takane, Influence of dephasing on electron transport in disordered graphene nanoribbons, Localisation 2011 (2011年8月6日) Pohang, South Korea.

10. Y. Shimomura, Y. Takane, and K. Wakabayashi, Electronic states and local density of states near graphene corner edge, Localisation 2011 (2011年8月6日) Pohang, South Korea.

11. 高根美武, インコヒーレント領域におけるジグザグ・グラフエンナノリボンの電気伝導度, 日本物理学会年次大会, (2010年3月20日) 岡山大.

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高根 美武 (TAKANE YOSITAKE)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授

研究者番号: 40254388

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

井村 健一郎 (IMURA KEN-ICHIRO)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教

研究者番号: 90391870