

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2019

課題番号：15KK0147

研究課題名（和文）メソスコピック一次元電子相関（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Mesoscopic one-dimensional electron correlation(Fostering Joint International Research)

研究代表者

泉田 渉 (Izumida, Wataru)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：20372287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

渡航期間：15ヶ月

研究成果の概要（和文）：カーボンナノチューブに代表されるメソスコピック一次元物質における電子相関を明らかにすることが本研究の目的であった。ナノチューブの表面曲率による微小ギャップやスピン軌道相互作用の効果を取り込んだ有効一次元格子模型を構築し、これをもとに系の電子相関を調べた。レーゲンスブルグ大学（ドイツ）との共同研究により、超伝導相関のもとマヨラナ粒子が現れることを示した。ブダペスト工科経済大学（ハンガリー）との共同研究により、トポロジカルな端状態における電子相関の結果、左右端付近に局在したスピン間に働く相互作用の詳細を明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カーボンナノチューブの研究はこれまでも盛んになされていたが、量子伝導領域にはナノチューブ表面が曲率を有することに起因した多彩な量子効果が本研究により明らかにされた。本研究で明らかにされた効果は、量子コンピュータなどの次世代電子素子としての新機能を示すことになる。このような点が、本研究成果の学術的意義・社会的意義として挙げられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to clarify the electron correlation in mesoscopic one-dimensional such as carbon nanotubes. We constructed an effective one-dimensional lattice model which incorporates the effects of small gap and curvature-induced spin-orbit interaction, and using the model, we investigated the electron correlation of the system. It was shown that Majorana quasiparticles appear under superconducting correlation in a collaboration with the University of Regensburg (Germany). Details of the interaction between spins localized near the left and right edges as a result of electron correlation in the topological edge states were clarified in a collaboration with Budapest University of Technology and Economics (Hungary).

研究分野：物性理論

キーワード：ナノチューブ

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブは、今日我々が手にすることの出来る物質の中で最も理想的な一次元電子系の舞台である。ナノチューブの量子伝導測定を通して、我々はようやく、低エネルギー領域における一次元電子系の詳細を調べる事ができるようになってきた。しかし既存の理論は、現実の物質に対して単純化されすぎているために、観測結果を正しく捕らえることができないでいた。このような問題点を克服し、現実の物質における一次元電子物性を正しく理解するため、研究代表者は、低エネルギー領域の一粒子状態を正確に捉えることの出来る理論を構築してきた。その結果、ナノチューブの表面が有限の曲率を有することに起因するスピン軌道相互作用の詳細を明らかとした。さらに、低エネルギーの一粒子状態を取り込み、かつ、メソスコピック系の有限長効果を調べるのに適した有効一次元格子モデルを構築していた。このモデルは、電子相関の解析にも適している。よって、これを受けた電子相関の有効モデルを解析することで、理論研究を推進していた。そして研究開始時点では、ナノチューブ一次元電子相関をミクロスコピックに研究する上で欠かせない拡張梯子格子モデルの導出を行っていた。

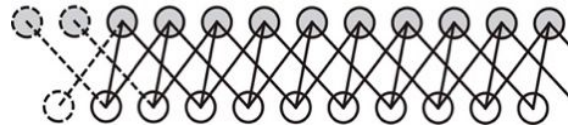
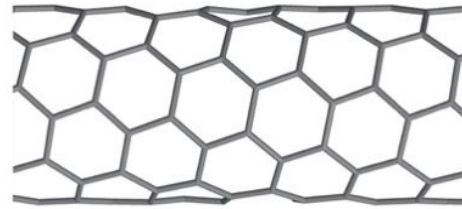


図 1 ナノチューブとその有効一次元格子モデル。
このモデルは研究代表者が開発していたが、これを用いて電子間の斥力相互作用や超伝導相関のある場合などの電子相関効果を国際共同研究により調べた。

2. 研究の目的

このような中、研究代表者がそれまでの研究により得ていた理論的な知見を基礎として、国際的な成果を挙げている量子伝導現象を研究する理論グループ、実験グループ、および、メソスコピック量子多体問題の数値的解法において先駆的な研究を行っている理論グループ、それぞれ、国際共同研究を実施することにより、本研究を飛躍的に促進させるとともに、当該研究領域を牽引することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の目的であるメソスコピック一次元電子相関を理解するために、理論および実験グループとの共同研究は不可欠である。ナノチューブ量子伝導現象の研究拠点は、オランダやドイツなどの欧州にある。一方、申請者は、量子状態に関する定量的な評価の可能な最新理論を構築していた。そこで、レーゲンスブルグ大学（ドイツ）のグリフォニ教授の研究グループに滞在して、グリフォニ氏らや同大学の同大学のストラック教授の実験グループとも共同して研究を進める。また、多くの研究者が集う機会として、2 日間のミニワークショップを開催し、メソスコピック一次元電子相関の現状と展望を共有する機会を設け、これにより新たな国際共同研究のきっかけを設ける。

4. 研究成果

レーゲンスブルグ大学（ドイツ）のグリフォニ教授の研究グループに研究代表者が滞在し、研究代表者がそれまでの研究で構築していた理論研究をもとに電子相関効果を調べた。まずは、特に、典型的な電子相関の一つである超伝導相関がナノチューブに誘起される場合に注目した。同様の研究としては、半導体ナノワイヤを超伝導体に近接させた系が盛んに調べられている。そこでは、マヨラナ粒子が出現することが理論的に指摘されており、国内外の実験グループによりマヨラナ粒子の探求が精力的に行われていた。我々はナノチューブに近接した超伝導体により超伝導相関が誘起される状況を、研究代表者の構築した有効一次元格子模型(図 1) を用い、解析的および数値的手法により調べた。これにより、超伝導ギャップ中に端に局在した状態が生じる場合のあることを、トポロジーの観点から示した。有限磁場のもとマヨラナ粒子が現れることを示した。また、ナノチューブ表面の曲率効果と超伝導相関の共存によっても、トポロジカルな端状態が現れることを明らかとした。ナノチューブ端に局在するトポロジカルなマヨラナ粒子に対する解析的な計算による研究を展開し、マヨラナ状態の起源などを明確に示した。

レーゲンスブルグ大学に長期滞在中（2016年10月～2017年9月）に、上記共同研究と並行して、本研究課題に関連したテーマに関するワークショップをグリフォニ氏らと計画した。これを受け、2017年6月1～2日に、レーゲンスブルグにおいて "Boundary effects and correlations in one-dimensional systems" と題したワークショップを開催し、15名の招待者による講演と8名のポスター発表を通じて、関連研究分野の研究者らとの研究交流を実施した（図2）。

超伝導関連の働く場合の研究に加え、通常の電子相関に着目した研究も行った。研究代表者は、研究開始当初において、様々な螺旋構造のナノチューブでトポロジカルな端状態が出現することを示していた。この端状態に着目した研究を、上記ワークショップにおける招待講演者であったモカ氏、ザーランド氏（ブダペスト工科大学（ハンガリー））らと共同研究を行った。研究代表者が構築した有効一次元格子模型に対して、モカ氏らが開発していた密度行列繰り込み群の方法を用いることで、電子相関の効果調べた。特にトポロジカルな端状態に着目した研究を進めた。電子相関の結果、左右の端付近に局在したスピ間に働く相互作用がナノチューブの長さによって強磁性的もしくは反強磁性的となることを明らかにした。

Boundary effects and correlations in one-dimensional systems
June 1-2, 2017
University of Regensburg, Germany

SCOPE
 Aim of the workshop is to bring together and stimulate in-depth discussions with leading experimentalists and theoreticians working on emerging phenomena in finite one-dimensional correlated conductors. Focus is on the interplay between topological properties and electron correlations in nanowires, carbon nanotubes, as well as on the edges of two-dimensional topological insulators (TI) and the surface states of three-dimensional TI constrictions. Despite the big interest in these systems, the investigation of the role of electron correlations in combination with topological properties is still in its infancy.

INVITED SPEAKERS

Ramón Aguado (ICMM-CSIC)	Pascu Catalin Moca (BME)
Hartmut Buhmann (Univ. Würzburg)	Jesper Nygård (Niels Bohr Institute)
Joseph Dufouleur (IFW-Dresden)	Massimo Rontani (CNR NANO)
Reinhold Egger (Univ. Düsseldorf)	Jay Sau (Univ. Maryland)
Karsten Flensberg (Niels Bohr Institute)	Björn Trauzettel (Univ. Würzburg)
Shahal Ilani (Weizmann Institute of Science)	Dieter Weiss (Univ. Regensburg)
Magdalena Marganska (Univ. Regensburg)	Michael Wimmer (TU Delft)
Nadya Mason (Univ. Illinois)	Gergely Zaránd (BME)

ORGANIZERS
Milena Grifoni (University of Regensburg)
Wataru Izumida (Tohoku University)

<http://www.physik.uni-r.de/bec1d>

CONTACT: Claudia Zange (claudia.zange@ur.de)

UR Universität Regensburg, CN, REGENSBURGER UNIVERSITÄTSSTIFTUNG HANS VIELBERTH, TOHOKU, 科研費 KAKENHI

図2 研究領域の15名の理論・実験研究者らを招待してワークショップを主催・開催した。このワークショップでは、その後の国際共同研究に発展する研究討論を設けることも出来た。

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 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Rin Okuyama, Wataru Izumida, Mikio Eto	4. 巻 969
2. 論文標題 Topology in single-wall carbon nanotube of zigzag and armchair type	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012137-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/969/1/012137	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 Rin Okuyama, Wataru Izumida, Mikio Eto	4. 巻 99
2. 論文標題 Topological classification of single-wall carbon nanotube	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115409-01-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.115409	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 W. Izumida, L. Milz, M. Marganska, M. Grifoni	4. 巻 96
2. 論文標題 Topology and zero energy edge states in carbon nanotubes with superconducting pairing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125414-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.96.125414	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 M. Marganska, L. Milz, W. Izumida, C. Strunk, M. Grifoni	4. 巻 97
2. 論文標題 Majorana quasiparticles in semiconducting carbon nanotubes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075141-01-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.97.075141	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 泉田 渉	4. 巻 51
2. 論文標題 カーボンナノチューブの離散準位	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 815-823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto	4. 巻 86
2. 論文標題 Topological Phase Transition in Metallic Single-Wall Carbon Nanotube	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 013702-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.013702	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 -

1. 著者名 R. Saito, A. R. T. Nugraha, E. H. Hasdeo, N. T. Hung, W. Izumida	4. 巻 375
2. 論文標題 Electronic and optical properties of single wall carbon nanotubes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Topics in Current Chemistry	6. 最初と最後の頁 7-1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41061-016-0095-2	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 -

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Magdalena Marganska, Lars Milz, Wataru Izumida, Christoph Strunk, Milena Grifoni
2. 発表標題 Majorana states in carbon nanotubes
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2. 発表標題 Topological properties in single-wall carbon nanotube of any possible chiralities
3. 学会等名 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤 皆斗, 磯野 巽, 三瓶 靖典, 泉田 渉, 天羽 真一, 羽田野 剛司
2. 発表標題 二重量子ドットにおける四重項スピンプロケードの温度効果と電子状態
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第73回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤 皆斗, 磯野 巽, 三瓶 靖典, 泉田 渉, 天羽 真一, 羽田野 剛司
2. 発表標題 二重量子ドットにおけるスピンプロケードの温度効果と電子状態
3. 学会等名 第61回日本大学工学部学術研究報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安中 大樹, 大和田 卓也, 岸 裕輔, 御代田 宗佑, 秋葉 圭一郎, 長瀬 勝美, 平山 祥郎, 泉田 渉, 羽田野 剛司
2. 発表標題 カーボンナノチューブを用いたトランジスタの電気伝導特性の微分負性抵抗の解析
3. 学会等名 第61回日本大学工学部学術研究報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安中 大樹, 御代田 宗佑, 羽田野 剛司, 泉田 渉, 長瀬 勝美, 平山 祥郎, 秋葉 圭一郎
2. 発表標題 カーボンナノチューブを用いたトランジスタの電気伝導特性の微分負性抵抗の解析
3. 学会等名 平成30年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 皆斗, 泉田 渉, 天羽 真一, 羽田野 剛司
2. 発表標題 直列2重量子ドットにおける熱支援四重項パウリブロックード
3. 学会等名 日本物理学会2019年年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2. 発表標題 Single-wall carbon nanotube as topological insulator: Phase transition and bulk-edge correspondence
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2. 発表標題 Topological invariant and phase transition in single-wall carbon nanotube
3. 学会等名 Majorana States in Condensed Matter: Towards Topological Quantum Computation (MAJONEXT2017 (国際学会))
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 W. Izumida, Magdalena Marganska, Lars Milz, Milena Grifoni
2 . 発表標題 Topological invariants in carbon nanotubes with superconducting pairing
3 . 学会等名 Boundary Effects and Correlations in One-Dimensional Systems (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2 . 発表標題 Topological phase transition and edge states in metallic single-wall carbon nanotube
3 . 学会等名 Boundary Effects and Correlations in One-Dimensional Systems (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2 . 発表標題 Topology in single-wall carbon nanotube of zigzag and armchair type
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 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2 . 発表標題 Properties of Single-Wall Carbon Nanotube as a Topological Insulator
3 . 学会等名 Mesoscopic Transport and Quantum Coherence 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 奥山 倫, 泉田 渉, 江藤幹雄
2. 発表標題 カーボンナノチューブにおけるトポロジカル相転移II
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 W. Izumida, M. Marganska, L. Milz and M. Grifoni
2. 発表標題 Topology of zero energy edge states in carbon nanotubes with proximity induced superconductivity
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum System 2017 (HQS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2. 発表標題 Topological properties in single-wall carbon nanotube: effective one-dimensional lattice model approach
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum System 2017 (HQS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤 皆斗, 枝松 弘樹, 小室 貴優, 泉田 渉, 天羽 真一, 羽田野 剛司
2. 発表標題 縦型2重量子ドットにおけるスピンプロケードの温度効果
3. 学会等名 第60回日本大学工学部学術研究報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤 皆斗, 枝松 弘樹, 小室 貴優, 泉田 渉, 天羽 真一, 羽田野 剛司
2. 発表標題 直列二重量子ドットの電気伝導特性の温度効果
3. 学会等名 平成30年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Magdalena Marganska, Lars Milz, Wataru Izumida, Christoph Strunk, Milena Grifoni
2. 発表標題 Majorana bound states in semiconducting carbon nanotubes - Part I (numerics)
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lars Milz, Magdalena Marganska, Wataru Izumida, Christoph Strunk, Milena Grifoni
2. 発表標題 Majorana bound states in semiconducting carbon nanotubes - Part II (analytics)
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥山 倫, 泉田 渉, 江藤 幹雄
2. 発表標題 トポロジによるカーボンナノチューブの分類
3. 学会等名 日本物理学会2018年年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉田 渉, Lars Milz, Magdalena Marganska, Milena Grifoni
2. 発表標題 超伝導相関を有するカーボンナノチューブのゼロエネルギー状態とトポロジー
3. 学会等名 日本物理学会2018年年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Izumida, Rin Okuyama, Ai Yamakage, Riichiro Saito
2. 発表標題 Valley coupling and edge modes in finite-length single-wall carbon nanotubes
3. 学会等名 22nd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Wataru Izumida
2. 発表標題 Discrete energy levels and topology in finite-length carbon nanotubes
3. 学会等名 German-Japanese Meeting on the Science of Hybrid Quantum Systems (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Rin Okuyama, Wataru Izumida, Mikio Eto
2. 発表標題 Topological phase transition in metallic single-wall carbon nanotube induced by magnetic field
3. 学会等名 APS March meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wataru Izumida, Rin Okuyama, Ai Yamakage, Mikio Eto, Riichiro Saito
2. 発表標題 Edge states and topology in finite-length single-wall carbon nanotubes
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Lars Milz, Magdalena Marganska, Wataru Izumida, Milena Grifoni
2. 発表標題 Topological invariants in carbon nanotubes with superconducting pairing
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Wataru Izumida, Rin Okuyama, Ai Yamakage, Riichiro Saito
2. 発表標題 Angular momentum and topology in finite-length single-wall carbon nanotubes
3. 学会等名 The Seventeenth International Conference on the Science and Application of Nanotubes (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto
2. 発表標題 Effective one-dimensional lattice model for single-wall carbon nanotubes with spin-orbit interaction and curvature effects
3. 学会等名 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 泉田 涉, 奥山 倫, 山影 相, 齋藤 理一郎
2. 発表標題 カーボンナノチューブの離散準位と谷状態の角運動量
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 奥山 倫, 泉田 涉, 江藤幹雄
2. 発表標題 カーボンナノチューブにおけるトポロジカル相転移
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://flex.phys.tohoku.ac.jp/~izumida/

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	グリフォニ ミレナ (Grifoni Milena)	レーゲンスブルグ大学・Institute for Theoretical Physics・Professor	