

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2020

課題番号：15K05118

研究課題名(和文)メゾスコピック一次元電子相関

研究課題名(英文) Mesoscopic one-dimensional electron correlation

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) 3,700,000円

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ゾスコピック一次元物質の低エネルギー領域の電子状態を明らかにすることが本研究の目的であった。本研究に先立って応募者らが開発した有効一次元格子モデルを用いて、有限長ナノチューブに対する理論計算を実行した。これにより、一次元方向に閉じ込められた電子の量子準位の形成に対する谷自由度の役割を示すと同時に、端付近にトポロジカルな状態が現れることを発見した。さらに、国際共同研究を展開し、超伝導相関のもとマヨラナ準粒子が現れることや、電子相関によりトポロジカルな端状態に局在したスピンが生じること及びスピン間の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。だが、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効果だけでなく、トポロジカルな状態が出現することや、超伝導相関、電子相関によって多彩な量子効果が現れることが、本研究によって初めて明らかにされた。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もなる。これらが、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 electronic states in mesoscopic one-dimensional such as carbon nanotubes. We had performed theoretical calculation for finite-length carbon nanotubes by using the effective one-dimensional lattice model which have been developed by us. We have shown the role of valley degrees of freedom on the formation of quantum levels of electrons confined in one dimension. And we have discovered that topological states appear at the edges. Furthermore, by joint international researches, we have shown the Majorana quasiparticles appear under the superconducting correlation, the localized spin moments on the topological states by electron correlation and the details of the interaction between the spins.

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

半導体微細加工によるメゾスコピック低次元構造は、一次元電子系の低エネルギー状態を調べる事のできる系である。そのような中、試料の高純度化などにより、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を提供する。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のである。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、メゾスコピック系の有限サイズ効果を調べるのに適した有効一次元格子モデル(図1)を構築していた。このモデルは、電子相関効果の解析にも適している。

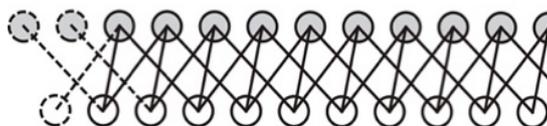
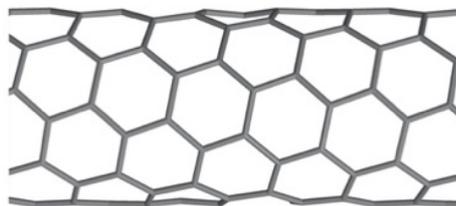


図1 ナノチューブとその有効一次元格子モデル

### 2. 研究の目的

カーボンナノチューブに代表されるメゾスコピック一次元物質に対する従来の理論では、固体電子論で頻りに用いられる周期的境界条件が仮定されている、一次元量子状態を単一の量子準位に置き換えた量子ドットモデルの単純な拡張など、現実の状況に対して単純化しすぎている。このため、量子伝導領域における現象を正しく理解できていない。この問題を克服するために、低エネルギーにおける一粒子状態および電子相関を、有限サイズ効果などを含めて定量的に理論的に調べることを本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究の目的のために、研究代表者が開発した有効一次元格子モデルを用いて、解析的および数値的計算手法により研究を行うこととした。これを可能にするため、数値計算プログラムの開発を行い、さらに数値計算機やソフトウェアなどを導入し、これらにより計算を実行した。また、理論および実験グループとの研究討論のための出張を随時行い、問題点の整理や計算手法の検討等を行った。

### 4. 研究成果

現実のナノチューブは有限の長さであるため、そこに閉じ込められる電子は量子準位を形成する。どのような量子準位が形成されるかを数値的及び解析的手法により理論的に調べた。その際、ナノチューブの電子状態はチューブ軸周りの角運動量によって分類できることを見だし、この性質を用いた。これにより、量子準位の形成における谷と呼ばれるバンド自由度の寄与を明らかとした。ナノチューブの螺旋構造や終端構造によって、量子準位において谷がよく分離する場合と、2つの谷が強く結合する場合がある。

有限長の効果を調べる過程において、半導体型のナノチューブにおいてはエネルギーギャップ中にナノチューブ端付近に局在する電子状態(端状態)が現れることが明らかとなった。この端状態を、盛んに研究が行われているトポロジカル物質と同様にトポロジーの観点から解析した。これによって、バンド描像において与えられるトポロジカル不変量と端状態の数との間に一対一対応があること(バルク端対応)を明らかとした。

低エネルギーの電子状態の詳細を調べるため、曲率によって誘起される金属型ナノチューブにおけるエネルギーギャップやスピン軌道相互作用を取り込んだ有効一次元格子モデルを構築した。これにより、金属型と分類されるナノチューブにおいても微小ギャップが形成される状況を調べることを可能とした。微小ギャップ中に形成される端状態を調べ、外部磁場によりトポロジカル相転移が引き起こされることや、アームチェア型およびそれに近い螺旋構造以外のナノチューブではトポロジカルな端状態がエネルギーギャップ中に現れることの詳細を明らかとした。

研究期間の途中、本研究を基課題とした国際共同研究加速基金による助成を受けることができた。これにより、レーゲンスブルグ大学（ドイツ）のグリフォニ氏の研究グループに滞在し、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共同研究を行った。レーゲンスブルグ大学に滞在中に、本研究課題に関連したテーマに関するワークショップ“Boundary effects and correlations in one-dimensional systems”をグリフォニ氏らと開催した。このワークショップにおいてモカ氏、ザーランド氏（ブダペスト工科経済大学（ハンガリー））らと研究交流を持つことができ、以降、共同研究を行った。

グリフォニ氏らとの共同研究により、典型的な電子相関の一つである超伝導相関が近接効果によりナノチューブに誘起される場合を調べた。同様の状況として、スピン軌道相互作用を有する半導体ナノワイヤを超伝導体に近接させた系が知られており、ナノワイヤ終端にマヨラナ準粒子とも呼ばれるトポロジカルな端状態が出現することが期待されている。マヨラナ準粒子の探求は、国内外の実験グループにより精力的に行われているが、ナノチューブではほとんど調べられてこなかった。そこでナノチューブに超伝導相関が誘起される場合を調べた。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示した。この端状態をトポロジーの観点から解析し、トポロジカルな状態であり、これが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現れることを明らかとした。また、半導体ナノワイヤと同様に、ナノチューブにおいてもスピン軌道相互作用によってヘリカル状態が存在する状況において、端付近にマヨラナ粒子が現れることとその詳細を数値的及び解析的手法により示した。

さらに、モカ氏、ザーランド氏らとの共同研究により、カーボンナノチューブの電子相関に関して密度行列繰り込み群を用いた数値解析に関する共同研究を行った。特に、トポロジカルな端状態における電子相関の結果、左右の端付近に局在したスピンの現れることを見いだした（図2）。スピン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とした。

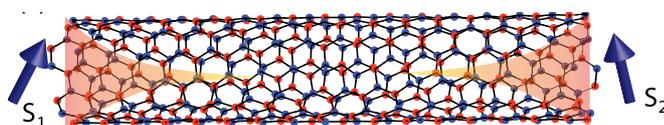


図2 電子相関効果によりナノチューブ両端に局在したスピンの現れる

研究開始当初には、ナノチューブにおいてトポロジカルな状態が現れることはまったく知られていなかった。本研究によってナノチューブのトポロジカルな性質が見いだされ、その詳細が明らかとなった。

さらに、量子ドットが直列に並んだ系に対して、これまでの研究で開発を行っていた数値解析ソフトウェアを用いて、量子伝導現象を共同研究により詳しく解析した。量子ドットのスピン状態および電気伝導を様々な温度で調べることにより、高温領域においても高スピン状態が熱エネルギーによって誘起されることが示された。従来のスピンプロケード現象の研究に関して低温領域が詳しく調べられていたが、スピンプロケード現象は温度上昇によっても誘起されうることを見いだした。

本研究により、カーボンナノチューブや半導体微細加工によるメゾスコピック次元電子系において、ナノチューブの結晶格子構造や電子相関に由来するトポロジカルな性質やスピン物性などに未知の諸現象が存在することが明らかとされた。本研究で明らかとなったこれらの性質は、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も繋がる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 1件）

|                                                                                                          |                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Catalin Pascu Moca, Wataru Izumida, Balazs Dora, Ors Legeza, Janos K. Asboth, Gergely Zarand   | 4. 巻<br>125                |
| 2. 論文標題<br>Topologically Protected Correlated End Spin Formation in Carbon Nanotubes                     | 5. 発行年<br>2020年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters                                                                        | 6. 最初と最後の頁<br>056401-1-6   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevLett.125.056401                                                | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する               |
| 1. 著者名<br>Milz Lars, Izumida Wataru, Grifoni Milena, Marganska Magdalena                                 | 4. 巻<br>100                |
| 2. 論文標題<br>Transverse profile and three-dimensional spin canting of a Majorana state in carbon nanotubes | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B                                                                              | 6. 最初と最後の頁<br>155417-1-13  |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevB.100.155417                                                   | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する               |
| 1. 著者名<br>Rin Okuyama, Wataru Izumida, Mikio Eto                                                         | 4. 巻<br>969                |
| 2. 論文標題<br>Topology in single-wall carbon nanotube of zigzag and armchair type                           | 5. 発行年<br>2018年            |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physics: Conference Series                                                          | 6. 最初と最後の頁<br>012137-1-6   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1088/1742-6596/969/1/012137                                                | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |
| 1. 著者名<br>Rin Okuyama, Wataru Izumida, Mikio Eto                                                         | 4. 巻<br>99                 |
| 2. 論文標題<br>Topological classification of single-wall carbon nanotube                                     | 5. 発行年<br>2019年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B                                                                              | 6. 最初と最後の頁<br>115409-01-10 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevB.99.115409                                                    | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|                                                                                                  |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>W. Izumida, L. Milz, M. Marganska, M. Grifoni                                          | 4. 巻<br>96                |
| 2. 論文標題<br>Topology and zero energy edge states in carbon nanotubes with superconducting pairing | 5. 発行年<br>2017年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B                                                                      | 6. 最初と最後の頁<br>125414-1-16 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.96.125414                                           | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|                                                                       |                            |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1. 著者名<br>M. Marganska, L. Milz, W. Izumida, C. Strunk, M. Grifoni    | 4. 巻<br>97                 |
| 2. 論文標題<br>Majorana quasiparticles in semiconducting carbon nanotubes | 5. 発行年<br>2018年            |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B                                           | 6. 最初と最後の頁<br>075141-01-17 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.97.075141                | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する               |

|                                                                                         |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>W. Izumida, R. Okuyama, A. Yamakage, R. Saito                                 | 4. 巻<br>93                |
| 2. 論文標題<br>Angular momentum and topology in semiconducting single-wall carbon nanotubes | 5. 発行年<br>2016年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>195442-1-18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.93.195442                                  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| 1. 著者名<br>泉田 渉                         | 4. 巻<br>51            |
| 2. 論文標題<br>カーボンナノチューブの離散準位             | 5. 発行年<br>2016年       |
| 3. 雑誌名<br>固体物理                         | 6. 最初と最後の頁<br>815-823 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|                                                                                 |                          |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. 著者名<br>R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto                                        | 4. 巻<br>86               |
| 2. 論文標題<br>Topological Phase Transition in Metallic Single-Wall Carbon Nanotube | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Physical Society of Japan                              | 6. 最初と最後の頁<br>013702-1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSJ.86.013702                              | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

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

|                                                                                   |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>W. Izumida, R. Okuyama, R. Saito                                        | 4. 巻<br>91                |
| 2. 論文標題<br>Valley coupling in finite-length metallic single-wall carbon nanotubes | 5. 発行年<br>2015年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B                                                       | 6. 最初と最後の頁<br>235442-1-18 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.91.235442                            | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

〔学会発表〕 計46件(うち招待講演 1件/うち国際学会 28件)

|                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>W. Izumida, R. Okuyama, K. Sato, M. Matsuo, T. Kato           |
| 2. 発表標題<br>Nanorotor driven by spin injection                            |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                                                          |

|                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Rin Okuyama, Wataru Izumida, Mikio Eto                                    |
| 2. 発表標題<br>Analytic Expression for Topological Number in Single-Wall Carbon Nanotube |
| 3. 学会等名<br>APPC 2019 14TH ASIA-PACIFIC PHYSICS CONFERENCE (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2019年                                                                      |

|                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Gergely Zarand, Pascu Moca, Wataru Izumida, Balazs Dora, Ors Legeza |
| 2. 発表標題<br>Topologically Protected Giant End Spins in Carbon Nanotubes         |
| 3. 学会等名<br>DPG Fall Meeting (国際学会)                                             |
| 4. 発表年<br>2019年                                                                |

|                                               |
|-----------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>御代田 宗佑, 田中 翼汰, 田中 惣基, 泉田 涉, 羽田野 剛司 |
| 2. 発表標題<br>カーボンナノチューブにおけるトポロジカルな特性の研究         |
| 3. 学会等名<br>第62回日本大学工学部学術研究報告会                 |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|                                                            |
|------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>安中 大樹, 小綿 新, 秋葉 圭一郎, 長瀬 勝美, 平山 祥郎, 泉田 涉, 羽田野 剛司 |
| 2. 発表標題<br>カーボンナノチューブにおけるバリスティック伝導特性                       |
| 3. 学会等名<br>第62回日本大学工学部学術研究報告会                              |
| 4. 発表年<br>2019年                                            |

|                                                            |
|------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>安中 大樹, 小綿 新, 泉田 渉, 長瀬 勝美, 平山 祥郎, 秋葉 圭一郎, 羽田野 剛司 |
| 2. 発表標題<br>カーボンナノチューブ FET における弾道輸送の伝導特性                    |
| 3. 学会等名<br>2019年(令和元年)応用物理学会東北支部 第 74 回学術講演会               |
| 4. 発表年<br>2019年                                            |

|                                               |
|-----------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>御代田 宗佑, 田中 翼汰, 田中 惣基, 泉田 渉, 羽田野 剛司 |
| 2. 発表標題<br>カーボンナノチューブにおけるトポロジカルな性質の研究         |
| 3. 学会等名<br>2019年(令和元年)応用物理学会東北支部 第 74 回学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

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

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

|                                                    |
|----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>応用物理学会東北支部第73回学術講演会                     |
| 4. 発表年<br>2018年                                    |

|                                                    |
|----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>第61回日本大学工学部学術研究報告会                      |
| 4. 発表年<br>2018年                                    |

|                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>第61回日本大学工学部学術研究報告会                                              |
| 4. 発表年<br>2018年                                                            |

|                                                              |
|--------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>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<br>2019年                                              |

|                                         |
|-----------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>近藤 皆斗, 泉田 渉, 天羽 真一, 羽田野 剛司   |
| 2. 発表標題<br>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ケード |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2019年年次大会              |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

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

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

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

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

|                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto                                         |
| 2. 発表標題<br>Topology in single-wall carbon nanotube of zigzag and armchair type    |
| 3. 学会等名<br>28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2017年                                                                   |

|                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto                                       |
| 2. 発表標題<br>Properties of Single-Wall Carbon Nanotube as a Topological Insulator |
| 3. 学会等名<br>Mesoscopic Transport and Quantum Coherence 2017 (国際学会)               |
| 4. 発表年<br>2017年                                                                 |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>奥山 倫, 泉田 渉, 江藤幹雄          |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会2017年秋季大会           |
| 4. 発表年<br>2017年                      |

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

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

|                                                     |
|-----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>第60回日本大学工学部学術研究報告会                       |
| 4. 発表年<br>2017年                                     |

|                                                        |
|--------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>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<br>2018年                                        |

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

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

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

|                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>泉田 渉, Lars Milz, Magdalena Marganska, Milena Grifoni |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会2018年年次大会                                      |
| 4. 発表年<br>2018年                                                 |

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

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

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

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

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

|                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Wataru Izumida, Rin Okuyama, Ai Yamakage, Riichiro Saito                                         |
| 2. 発表標題<br>Angular momenta of two valleys and valley coupling in finite-length single-wall carbon nanotubes |
| 3. 学会等名<br>Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop (国際学会)                                       |
| 4. 発表年<br>2016年                                                                                             |

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

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

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>泉田 渉, 奥山 倫, 山影 相, 齋藤 理一郎 |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会2016年秋季大会          |
| 4. 発表年<br>2016年                     |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>奥山 倫, 泉田 渉, 江藤幹雄        |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会第72回年次大会          |
| 4. 発表年<br>2017年                    |

|                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Wataru Izumida, Rin Okuyama, Riichiro Saito                                                               |
| 2. 発表標題<br>Valley coupling in finite-length single-wall carbon nanotubes and effective one-dimensional lattice model |
| 3. 学会等名<br>International Workshop : Quantum Nanostructures and Electron-Nuclear Spin Interactions (国際学会)             |
| 4. 発表年<br>2015年                                                                                                      |

|                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Wataru Izumida, Rin Okuyama, Riichiro Saito                                                                                                                                                                    |
| 2. 発表標題<br>Degeneracy lift of energy levels in finite-length metallic single-wall carbon nanotubes                                                                                                                        |
| 3. 学会等名<br>Joint Conference: The 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) and the 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-17) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2015年                                                                                                                                                                                                           |

|                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>R. Okuyama, S. Amaha, T. Hatano, W. Izumida, S. Tarucha, M. Eto                                                                                                                                                |
| 2. 発表標題<br>Coherent Tunneling in Double Quantum Dot with LO-Phonon Emission                                                                                                                                               |
| 3. 学会等名<br>Joint Conference: The 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) and the 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-17) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2015年                                                                                                                                                                                                           |

|                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Wataru Izumida, Rin Okuyama, Riichiro Saito                                                 |
| 2. 発表標題<br>Valley coupling in finite-length metallic single-wall carbon nanotubes                      |
| 3. 学会等名<br>The 16th International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT15) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2015年                                                                                        |

|                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Wataru Izumida, Rin Okuyama, Riichiro Saito                                                                                      |
| 2. 発表標題<br>Valley coupling, spin-orbit interaction and vernier-scale-like spectrum in finite-length metallic single-wall carbon nanotubes   |
| 3. 学会等名<br>The ninth of the annual ISSP International symposium on New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2015年                                                                                                                             |

|                                                     |
|-----------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>泉田 渉, 奥山 倫, 齋藤 理一郎                       |
| 2. 発表標題<br>有限長金属型カーボンナノチューブにおける谷間結合と有効一次元格子モデルによる解析 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2015年秋季大会                          |
| 4. 発表年<br>2015年                                     |

|                                                |
|------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>奥山 倫, 天羽真一, 羽田野剛司, 泉田 渉, 樽茶清悟, 江藤幹雄 |
| 2. 発表標題<br>二重量子ドットにおけるコヒーレントな光学フォノン支援伝導        |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2015年秋季大会                     |
| 4. 発表年<br>2015年                                |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://www.cmp.tohoku.ac.jp/~izumida/index.html>

| 6. 研究組織 | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
|         |                           |                       |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

|                                                                        |                    |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 国際研究集会<br>Boundary effects and correlations in one-dimensional systems | 開催年<br>2017年～2017年 |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関     |  |  |  |
|---------|-------------|--|--|--|
| ドイツ     | レーゲンスブルグ大学  |  |  |  |
| ハンガリー   | ブダペスト工科経済大学 |  |  |  |
| ルーマニア   | オラデア大学      |  |  |  |