

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2018～2019

課題番号：18H04282

研究課題名(和文)カーボンナノチューブにおけるマヨラナ粒子

研究課題名(英文)Majorana particles in carbon nanotubes

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) 7,200,000円

研究成果の概要(和文)：マヨラナ粒子出現の舞台としてこれまで余り調べられてこなかったカーボンナノチューブに着目してマヨラナ粒子が現れる条件を理論的に明らかにすること、さらに、マヨラナ粒子状態の安定性にも関連する電子相関などにも着目し、系に内在する未開拓な物理現象の詳細を調べ低エネルギーにおけるカーボンナノチューブの物性の詳細を調べた。国際共同研究も展開することにより、曲率誘起のスピン軌道相互作用と超伝導相関の結果としてナノチューブ端にマヨラナ粒子が現れうることとその詳細を数値的及び解析的手法により示し、また、電子相関によりトポロジカルな端状態に局在したスピが生じること及びスピン間の相互作用の詳細を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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ハイブリッド量子構造において、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電子スピンに関連する物性などに未知の諸現象が存在することが明らかとなった。さらには電子スピンを用いた新たな機能素子としての可能性も明らかとなった。これらの性質は、量子コンピュータやナノ機械構造など次世代電子素子としての新機能を示すことにも繋がる。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 theoretically the conditions of appearance of Majorana quasi-particles in the carbon nanotubes, which have not been extensively investigated for the Majorana quasi-particles. We also focused on the effects such as the electron correlations which could affect on the stability of the Majorana quasi-particles. By joint international researches, we have shown the Majorana quasi-particles appear under the superconducting correlation, and 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 スピン

### 1. 研究開始当初の背景

マヨラナ粒子は、粒子がその反粒子と同じ粒子として 80 年前にマヨラナにより理論的に提案されたが、素粒子としてのマヨラナ粒子は発見されていない。一方、物質中のトポロジカルな準粒子としてマヨラナ粒子が現れると考えられている。マヨラナ粒子は擾乱に強い量子コンピュータへの応用といった観点などから、大規模な研究が世界中で活発に行われている。もっとも研究されている系は、InAs や InSb といったスピン軌道相互作用の大きな半導体ナノワイヤに超伝導体が近接したハイブリッド構造である。2012 年以降、幾つかの実験グループがマヨラナ粒子に関する研究報告をしている。だが、いまだにその存在は確認されていない。その理由の一つとして、有限長の半導体ナノワイヤの理論が実状に対して単純化されすぎており、定量的な比較が困難であることが挙げられると考えられる。

マヨラナ粒子出現の舞台として、上記のナノワイヤのほかにもカーボンナノチューブがありうる。だがこれまでカーボンナノチューブは、意外にもあまり着目されていなかった。チューブ表面が有限の曲率を有することに由来するスピン軌道相互作用が存在することに関しては、研究代表者らのそれまでの研究により知られていた。曲率により誘起されるスピン軌道相互作用によって、右に進む粒子と左に進む粒子のスピンは互いに逆向きとなる。すなわちナノチューブにも、マヨラナ粒子に不可欠なヘリカル状態と呼ばれる状態が存在するのである。さらに、超伝導体を近接したナノチューブにおいて、電子と正孔の重ね合わせ状態であるアンドレーエフ束縛状態は、カーボンナノチューブにおいても幾つかの実験グループにより観測されていた。マヨラナ粒子はアンドレーエフ束縛状態の一種であるため、カーボンナノチューブはマヨラナ粒子の舞台として有望であると考えられるのである。さらに、チューブ軸まわりの角運動量に着目することで、低エネルギーの電子状態を詳しく調べるのに適した有効一次元格子モデルが構築できることも研究代表者らの研究により知られていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、マヨラナ粒子出現の舞台としてこれまで余り調べられてこなかったカーボンナノチューブに着目した(図1)。チューブ表面の曲率により誘起されるスピン軌道相互作用と、ナノチューブ近傍の超伝導体からしみこむ超伝導相関の結果、カーボンナノチューブにマヨラナ粒子が現れる条件を理論的に明らかにすることを目的とした。

さらに、超伝導に限らず電子相関に着目し、系に内在する未開拓な物理現象の詳細を調べた。これはマヨラナ粒子状態の安定性に関連するため重要である。この観点から低エネルギーにおけるカーボンナノチューブの物性の詳細を調べることが目的とした。

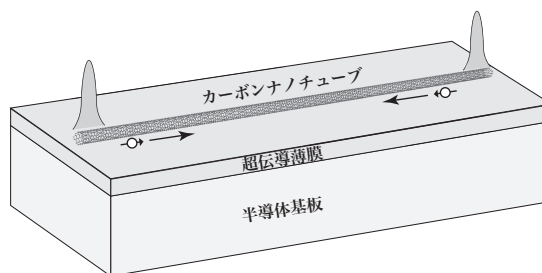


図1 ナノチューブ-超伝導体ハイブリッド構造の一例。マヨラナ粒子が端付近に現れると考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究の目的のために、研究代表者らがこれまで明らかにしてきた低エネルギーの電子状態を出発点として、超伝導相関の効果の詳細を解析的および数値的計算手法により調べた。さらに研究代表者らが構築した有効一次元格子モデル(図2)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、国内外の理論および実験グループとの研究討論を行った。そのため、電子通信的手法と併せて、研究討論のための出張を随時

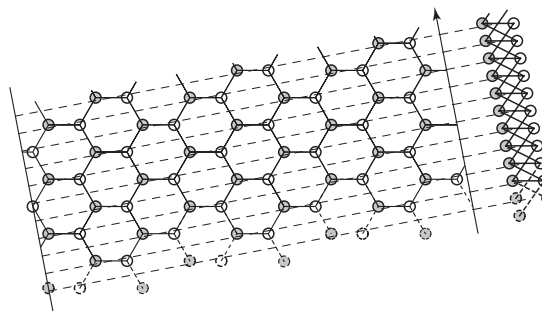


図2 (左) ナノチューブの展開図、(右) 対応する一次元格子モデル

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

国際共同研究により、カーボンナノチューブにおけるマヨラナ粒子の研究を行った。

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との共同研究として、ナノチューブ近傍の超伝導体からの近接効果による超伝導相関がナノチューブに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。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(図3)。



図3 ナノチューブに超伝導相関が誘起されるとナノチューブ両端にマヨラナ準粒子状態が現れる

超伝導相関とは異なるがやはりカーボンナノチューブに内在する重要な効果の一つである電子相関効果に関して、ブダペスト工科大学(ハンガリー)のモカ氏、ザーランド氏らと共同研究を行った。研究代表者が開発した一次元格子モデルによるカーボンナノチューブ

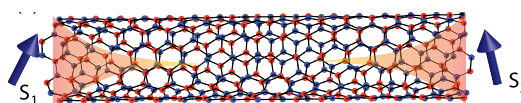


図4 電子相関効果によりナノチューブ両端に局在したスピンの現れる

の電子状態に対して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、すでに見いだされていたトポロジカルな端状態に対して、電子相関効果の結果、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4)。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。

また、これまでの研究で構築した微小ギャップやスピン軌道相互作用などの微細構造の効果を取り込んだ有効一次元格子モデルを詳しく解析することにより、アームチェア型と分類されるものの以外のほとんど全て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を明らかとした。

さらに、本研究に関連して得られる知見にも関連して、電子スピンに関連する効果として、ナノチューブ内における電子のスピンとナノチューブの機械運動との相互作用により角運動量の変換に関するミクロスコピック理論も展開することができた。これにより電子スピンによるナノチューブハイブリッド素子の可能性を示した。これも、ナノチューブに限らず、物質と電子スピンの相互作用と角運動量変換に関する機構についての現象論を超えたミクロスコピックな理論構築へと繋がることを期待される。

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ハイブリッド量子構造において、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電子スピンに関連する物性などに未知の諸現象が存在することが明らかとなった。さらには電子スピンを用いた新たな機能素子としての可能性も明らかとなった。これらの性質は、量子コンピュータやナノ機械構造など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6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0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 Milz Lars, Izumida Wataru, Grifoni Milena, Marganska Magdalena	4. 巻 100
2. 論文標題 Transverse profile and three-dimensional spin canting of a Majorana state in carbon nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155417-1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.155417	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 Catalin Paacu Moca, Wataru Izumida, Balazs Dora, Ors Legeza, Janos K. Asboth, Gergely Zarand	4. 巻 125
2. 論文標題 Topologically Protected Correlated End Spin Formation in Carbon Nanotubes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 056401-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.056401	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 Kondo M., Miyota S., Izumida W., Amaha S., Hatano T.	4. 巻 103
2. 論文標題 Thermally assisted Pauli spin blockade in double quantum dots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155414-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.155414	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 Izumida W., Okuyama R., Sato K., Kato T., Matsuo M.	4. 巻 128
2. 論文標題 Einstein?de Haas Nanorotor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 017701-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.017701	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19件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7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 涉, 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ケード
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 W. Izumida, R. Okuyama, K. Sato, M. Matsuo, T. Kato
2. 発表標題 Nanorotor driven by spin injection
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

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

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

1. 発表者名 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 カーボンナノチューブにおけるトポジカルな特性の研究
3. 学会等名 第62回日本大学工学部学術研究報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安中 大樹, 小綿 新, 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におけるパリスティック伝導特性
3. 学会等名 第62回日本大学工学部学術研究報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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 カーボンナノチューブ FET における弾道輸送的伝導特性
3. 学会等名 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 2019年

1. 発表者名 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 カーボンナノチューブにおけるトポジカルな性質の研究
3. 学会等名 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 2019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 proximitized carbon nanotubes
3. 学会等名 NT21: International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low- Dimensional Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Hatano, M. Kondo, S. Miyota, S. Amaha, W. Izumida
2. 発表標題 Thermally assisted quadruplet Pauli spin blockade in serial coupled double quantum dots
3. 学会等名 Joint Conference: The 24st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-24) and the 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-20) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 泉田 涉
2. 発表標題 トポロジカル物質としてのカーボンナノチューブ
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 御代田 宗佑, 泉田 涉, 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パウリスピンブロックード
3. 学会等名 2021年 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 御代田 宗佑, 小野田 政睦, 小室 裕一, 廣川 達也, 町田 春希, 森 敦希, 泉田 渉, 羽田野 剛司
2. 発表標題 カーボンナノチューブ量子ビットの実現に向けた研究
3. 学会等名 2020 年(令和2年) 応用物理学会東北支部 第75回学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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0件

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			