慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	CNT上ナノワイヤー成長技術構築と低次元超伝導特性・量子情報素子応用
Sub Title	Nanowire growth on a CNT and low-dimensional superconducting properties for quantum devices
Author	牧, 英之(Maki, Hideyuki)
Publisher	
Publication year	2022
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2021.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究では、架橋した一本のカーボンナノチューブをテンプレートとした新しい微細加工技術法の構築、それにより作製した超極細超伝導ナノワイヤーで発現が期待される低次元超伝導体における量子輸送現象探索とその量子情報デバイス応用を行った。汎用的で高品質なナノワイヤー成長法を確立するとともに、低次元化した超伝導における新規単一磁束量子制御技術構築とその量子情報デバイス応用という新たな超伝導技術を開拓した。 We studied about the development of the microfabrication technique with a suspended carbon nanotube and the investigation of the quantum transport in the low-dimensional superconductor with a thin superconducting nanowire.
Notes	研究種目：挑戦的研究 (萌芽) 研究期間：2018～2021 課題番号：18K19025 研究分野：ナノデバイス
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18K19025seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ５ 月 ２７ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2018～2021
課題番号：１８Ｋ１９０２５

研究課題名（和文）ＣＮＴ上ナノワイヤー成長技術構築と低次元超伝導特性・量子情報素子応用

研究課題名（英文）Nanowire growth on a CNT and low-dimensional superconducting properties for quantum devices

研究代表者

牧　英之（MAKI, Hideyuki）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：１０３３９７１５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、架橋した一本のカーボンナノチューブをテンプレートとした新しい微細加工技術法の構築、それにより作製した超極細超伝導ナノワイヤーで発現が期待される低次元超伝導体における量子輸送現象探索とその量子情報デバイス応用を行った。汎用的で高品質なナノワイヤー成長法を確立するとともに、低次元化した超伝導における新規単一磁束量子制御技術構築とその量子情報デバイス応用という新たな超伝導技術を開拓した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ナノカーボン材料のみに依存した低次元量子物性探索は、カーボン系材料の持つ物性の枠を超えることはできないためいずれ限界を迎えることが問題であったが、超伝導ナノワイヤーによって、高品質ナノワイヤーを実現すること可能となり、次世代の量子デバイス開発に応用可能である。

研究成果の概要（英文）：We studied about the development of the microfabrication technique with a suspended carbon nanotube and the investigation of the quantum transport in the low-dimensional superconductor with a thin superconducting nanowire.

研究分野：ナノデバイス

キーワード：カーボンナノチューブ　超電導ナノワイヤ

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

カーボンナノチューブを用いた電子、光、量子デバイス開発では、カーボンナノチューブの特有の低次元物性・量子効果に基づいた物性・機能探索であった。しかし、ナノカーボン材料のみに依存した低次元量子物性探索は、カーボン系材料の持つ物性の枠を超えることはできないためいずれ限界を迎えることが明らかなことから、新たな材料系において、カーボンナノチューブに匹敵する高品質ナノワイヤーを実現することが、次世代の量子デバイス開発で必要となると考えた。本研究では、特に、超伝導体に着目し、その低次元物性解明や量子デバイス応用に関する研究を提案する。超伝導自体が巨視的な量子現象を利用したものであるが、近年はそのナノサイズ化によって、あらに新しい超伝導物性を探索することが注目されている。本研究では、架橋カーボンナノチューブを用いた高品質超伝導ナノワイヤー成長技術を提案し、従来の微細加工技術では困難であった nm オーダーの超伝導ナノワイヤーを実現する。

２．研究の目的

本研究では、架橋した一本のカーボンナノチューブをテンプレートとした新しい微細加工技術法の構築、それにより作製した超極細超伝導ナノワイヤーで発現が期待される低次元超伝導体における単一磁束量子輸送現象探索とその量子情報デバイス応用を行った。ここでは、カーボンナノチューブの低表面エネルギーとフレキシビリティーを利用したカーボンナノチューブ上結晶成長による高品質ナノワイヤー結晶成長技術の構築およびそれを用いた量子輸送観測を行った。ここでは、従来の微細加工では実現できない高品質ワイヤーを用いて磁束量子のトンネル現象（量子位相スリップ）を自由に制御する量子位相スリップ制御技術構築や量子情報デバイス応用を目指して研究を進めた。この研究により、汎用的で高品質なナノワイヤー成長法を確立するとともに、低次元化した超伝導における新規単一磁束量子制御技術構築とその量子情報デバイス応用という新たな超伝導技術を開拓することを目指した。

３．研究の方法

本研究では、マグネトロンスパッタによる NbN 成長方法の探索を行っており、様々なターゲット材料や雰囲気制御を行うことで、どのような NbN 材料が成長可能であるかの成長法の探索を進めた。成長方法によって、超伝導材料の結晶品質や抵抗特性に違いが現れることから、X 線回折や電気伝導特性によって、それらの品質や特性を評価した。また、実際にカーボンナノチューブをテンプレートとした超伝導ナノワイヤーデバイスを作製し、その電気特性を測定して超伝導特性を明らかとするとともに、磁場中やマイクロ波照射下での特性も測定した。これにより、位相スリップなどのメカニズム解明を進めるとともに、サンプルの構造等による特性制御に関しても調べた。

４．研究成果

マグネトロンスパッタによる NbN 成長を行い、様々なターゲット材料や雰囲気制御を行うことで、どのような NbN 材料が成長可能であるかの成長法の探索を進めた。得られた薄膜に対して、XRD による結晶構造解析と低温での電気測定による超伝導測定を行い、特性を評価した。その結果、現在のところ、ターゲット材料としては、Nb 金属からの反応性スパッタリングで最も良好な超伝導特性が得られることが明らかとなった。これより、本条件で NbN ナノワイヤーを作製することとした。また、量子輸送測定系では、現在、新たな超伝導ナノワイヤー系での量子輸送観測を目指し、測定系の構築を進めた。その結果、新たなクライオスタットを用いた測定系を構築することで、新たな輸送測定を実現する電気測定系の構築に成功した。本装置を用いた超伝導測定の実験を進めた。

また、本研究では、架橋した一本のカーボンナノチューブをテンプレートとした新しい微細加工技術法の構築、それにより作製した超極細超伝導ナノワイヤーで発現が期待される低次元超伝導体における単一磁束量子輸送現象探索とその量子情報デバイス応用を目指して研究を進めた。量子輸送特性に関しては、一次元超伝導ナノワイヤーで生じる位相スリップに関して、ナノワイヤーの長さによる量子輸送特性の変化を観測し、位相スリップの発現条件やその特性とメカニズムの解明を試みた。その結果、超伝導ナノワイヤーの長さによって位相スリップの発現条件が制御が可能であることを示した。また、超伝導ナノワイヤーにマイクロ波を照射する実験を行い、超伝導と癖の制御を試みた。そのえっか、マイクロ波照射によって位相スリップの単一制御が可能であることを示した。さらに、これらのメカニズムの解明を進めた結果、従来の温度制御よりもより精密に位相スリップを単一で制御可能であることが明らかとなった。新たな量子制御技術となることを示した。本技術は、論文に投稿を行い、サイエンティフィックレポート誌

に掲載された。

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　0件／うちオープンアクセス　10件）

１．著者名 Naoto Higuchi, Hiroto Niiyama, Kenta Nakagawa, and Hideyuki Maki	４．巻 3
２．論文標題 Efficient and Narrow-Linewidth Photoluminescence Devices Based on Single-Walled Carbon Nanotubes and Silicon Photonics	５．発行年 2020年
３．雑誌名 ACS Applied Nano Materials	６．最初と最後の頁 7678-7684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsanm.0c01296	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 Hidenori Takahashi, Yuji Suzuki, Norito Yoshida, Kenta Nakagawa, and Hideyuki Maki	４．巻 127
２．論文標題 High-speed electroluminescence from semiconducting carbon nanotube films	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Journal of Applied Physics	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0002092	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 Kota Kato, Tasuku Takagi, Takasumi Tanabe, Satoshi Moriyama, Yoshifumi Morita & Hideyuki Maki	４．巻 10
２．論文標題 Manipulation of phase slips in carbon-nanotube-templated niobium-nitride superconducting nanowires under microwave radiation	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Scientific Reports	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-71218-0	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 Hidenori Takahashi、Yuji Suzuki、Norito Yoshida、Kenta Nakagawa and Hideyuki Maki	４．巻 127
２．論文標題 High-speed Electroluminescence from Semiconducting Carbon Nanotube Films	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Journal of Applied Physics	６．最初と最後の頁 164301-1～7
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Kawabe Rintaro、Takaki Hiroshi、Ibi Takayuki、Maeda Yutaka、Nakagawa Kenta、Maki Hideyuki	4．巻 3
2．論文標題 Pure and Efficient Single-Photon Sources by Shortening and Functionalizing Air-Suspended Carbon Nanotubes	5．発行年 2019年
3．雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6．最初と最後の頁 682～690
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsanm.9b02209	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 Nakagawa Kenta、Takahashi Hidenori、Shimura Yui、Maki Hideyuki	4．巻 9
2．論文標題 A light emitter based on practicable and mass-producible polycrystalline graphene patterned directly on silicon substrates from a solid-state carbon source	5．発行年 2019年
3．雑誌名 RSC Advances	6．最初と最後の頁 37906～37910
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/C9RA07294B	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 Moriyama Satoshi、Morita Yoshifumi、Yoshihira Masanori、Kura Hiroaki、Ogawa Tomoyuki、Maki Hideyuki	4．巻 126
2．論文標題 Discrete quantum levels and Zeeman splitting in ultra-thin gold-nanowire quantum dots	5．発行年 2019年
3．雑誌名 Journal of Applied Physics	6．最初と最後の頁 044303～044303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5085230	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 牧 英之	4．巻 54
2．論文標題 ナノカーボン発光素子の開発とその応用展開	5．発行年 2019年
3．雑誌名 固体物理	6．最初と最後の頁 315-324
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 Yamada K、Yamada M、Maki H、Itoh K M	4．巻 29
2．論文標題 Fabrication of arrays of tapered silicon micro-/nano-pillars by metal-assisted chemical etching and anisotropic wet etching	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Nanotechnology	6．最初と最後の頁 28LT01～28LT01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6528/aac04b	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 An Hongyu、Haku Satoshi、Kanno Yusuke、Nakayama Hiroyasu、Maki Hideyuki、Shi Ji、Ando Kazuya	4．巻 9
2．論文標題 Manipulation of Spin-Torque Generation Using Ultrathin Au	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Physical Review Applied	6．最初と最後の頁 064016-1(7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.9.064016	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 Kumagai Tsutaru、Hirota Naoya、Sato Katsuya、Namiki Koki、Maki Hideyuki、Tanabe Takasumi	4．巻 123
2．論文標題 Saturable absorption by carbon nanotubes on silica microtoroids	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Journal of Applied Physics	6．最初と最後の頁 233104～233104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5025885	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 －

〔学会発表〕　計33件（うち招待講演　11件／うち国際学会　11件）

1．発表者名 下村 健太，今井 要，川合 暁，橋本 和樹，井手口 拓郎，中川 鉄馬，牧 英之
2．発表標題 非対称構造グラフェン光検出器開発とマクロ可視・赤外光検出
3．学会等名 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
樋口 直人，新山 央人，中川 鉄馬，牧 英之

２．発表標題
高効率・狭線幅カーボンナノチューブPL発光素子

３．学会等名
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
Hideyuki Maki

２．発表標題
Nanocarbon-based optoelectronic devices on silicon chips

３．学会等名
The 7th International Symposium toward the Future of Advanced Researches in Shizuoka University (ISFAR-SU2021)（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
牧 英之

２．発表標題
ナノカーボン材料によるチップ上光電子デバイス開発

３．学会等名
グラフェンコンソーシアム（招待講演）

４．発表年
2020年

１．発表者名
牧 英之

２．発表標題
ナノカーボン材料を用いた光電子デバイス開発

３．学会等名
第５回ＣＰＣ研究会（招待講演）

４．発表年
2020年

１．発表者名
牧 英之

２．発表標題
ナノカーボン材料を用いたチップ上光電子デバイス

３．学会等名
Pre-KEIO TECHNO-MALL 2020セミナーシリーズ（第3回）（招待講演）

４．発表年
2020年

１．発表者名
牧 英之

２．発表標題
シリコンチップ上でのナノカーボン光・電子デバイス開発

３．学会等名
第81回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）

４．発表年
2020年

１．発表者名
中川 鉄馬，高橋 英統，志村 惟，牧 英之

２．発表標題
多結晶グラフェンを固体炭素源からシリコン基板上に直接パターニング成長させる方法の開発とその発光素子化

３．学会等名
第81回応用物理学会秋季学術講演会

４．発表年
2020年

１．発表者名
チップ上ナノカーボン光電子デバイス開発

２．発表標題
牧 英之

３．学会等名
阪大CSRN 第二回異分野研究交流会 「半導体・ナノカーボン系」（招待講演）

４．発表年
2020年

１．発表者名
Kenta Nakagawa, Hidenori Takahashi, Yui Shimura and Hideyuki Maki

２．発表標題
A light emitter based on polycrystalline graphene patterned directly on silicon substrates from a solid-state carbon source

３．学会等名
2020 International Conference on Solid State Devices and Materials（国際学会）

４．発表年
2020年

１．発表者名
加藤浩太、高木将、田邉孝純、森山悟士、守田佳史、牧英之

２．発表標題
マイクロ波照射下の架橋カーボンナノチューブ上の超伝導NbNナノワイヤにおける位相スリップの制御

３．学会等名
日本物理学会第75回年次大会

４．発表年
2020年

１．発表者名
牧英之

２．発表標題
ナノカーボン材料を用いたチップ上光電子デバイス開発

３．学会等名
第67回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）

４．発表年
2020年

１．発表者名
牧英之

２．発表標題
ナノカーボン材料を用いた光電子デバイス開発

３．学会等名
「原子層物質活用高性能量子デバイス開発」プラズマアグリコンソーシアム研究会（招待講演）

４．発表年
2020年

１．発表者名
牧英之

２．発表標題
低次元材料成長を用いた量子デバイス開発

３．学会等名
スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点報告会（招待講演）

４．発表年
2019年

１．発表者名
河部倫太郎、加藤浩太、中川鉄馬、牧英之

２．発表標題
ナノカーボン材料による量子デバイス開発

３．学会等名
スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク

４．発表年
2019年

１．発表者名
志村唯、中川鉄馬、高橋英統、牧英之

２．発表標題
量子熱輸送を用いたナノカーボン発光素子開発

３．学会等名
スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク

４．発表年
2019年

１．発表者名
牧英之

２．発表標題
ナノカーボン材料を用いたシリコンチップ上高集積光源開発

３．学会等名
第46回炭素材料学会年会

４．発表年
2019年

１．発表者名
Hideyuki Maki

２．発表標題
Nanocarbon-based optoelectronic devices on silicon chips

３．学会等名
The 4th Graphene Flagship EU-Japan Workshop on Graphene and related 2D materials（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
中川鉄馬、高橋英統、志村惟、牧英之

２．発表標題
シリコン上グラフェン黒体放射発光素子の発光特性

３．学会等名
第80回応用物理学会秋季学術講演会

４．発表年
2019年

１．発表者名
T. S. L. Prugger Suzuki、Shun Fujii、Rammaru Ishida、Riku Imamura、Mizuki Ito、Hideyuki Maki、Lan Yang、Sze Yun Set and Takasumi Tanabe

２．発表標題
Towards mode-locking of an active Whispering-Gallery-Mode microresonator

３．学会等名
The 41st PIERS PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
牧英之

２．発表標題
ナノカーボン光電子デバイス開発

３．学会等名
二次元材料に関する第3回KOINEミーティング（招待講演）

４．発表年
2019年

１．発表者名
高橋英統、鈴木裕司、吉田識人、中川鉄馬、牧英之

２．発表標題
トリオン発光によるカーボンナノチューブ薄膜高速EL素子

３．学会等名
第66回応用物理学会春季学術講演会

４．発表年
2019年

１．発表者名
今村陸、鈴木智生、石田蘭丸、鈴木良、藤井瞬、伊藤瑞生、牧英之、ヤン リャン、田邉孝純

２．発表標題
小型モード同期レーザに向けたエルビウム添加微小光共振器の作製

３．学会等名
第66回応用物理学会春季学術講演会

４．発表年
2019年

１．発表者名
中川鉄馬，深澤祐介、三好勇輔、天坂裕也、レックマン ロビン、横井智哉、河原憲治、吾郷浩樹、 牧英之

２．発表標題
超高速Siチップ上のグラフェン黒体放射発光

３．学会等名
第56回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム

４．発表年
2019年

１．発表者名
牧英之

２．発表標題
ナノカーボン材料による高速・オンチップ光源開発

３．学会等名
神奈川ものづくり技術交流会

４．発表年
2018年

１．発表者名
深澤祐介、三好勇輔、天坂裕也、レックマン ロビン、横井智哉、河原憲治、吾郷浩樹、牧英之

２．発表標題
Siチップ上での高速・高集積グラフェン黒体放射発光素子

３．学会等名
第79回応用物理学会秋季学術講演会

４．発表年
2018年

１．発表者名
Kaiki Yo, Hideyuki Maki

２．発表標題
Electronic Property of the Composite of Carbon Nanotube and Carbon Nanobelt

３．学会等名
19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and low-dimensional materials(NT18)（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Kota Kato, Tasuku Takagi , Kohei Masuda , Satoshi Moriyama, Yoshifumi Morita, Takasumi Tanabe, Hideyuki Maki

２．発表標題
Anti-proximity effect in superconducting NbN nanowires based on suspended carbon nanotubes

３．学会等名
19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and low-dimensional materials(NT18)（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Hideyuki Maki, Yusuke Fukazawa

２．発表標題
High-Speed and on-Chip Blackbody Emitters based on nanocarbon materials

３．学会等名
19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and low-dimensional materials(NT18)（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Rintaro Kawabe, Takumi Endo, Hiroshi Takaki, Junko Ishi-Hayase, Hisashi Sumikura, Hideyuki Maki

２．発表標題
Photon antibunching in single-walled carbon nanotubes at telecommunication wavelengths and room temperature

３．学会等名
19th International Conference on the Science and Application of Nanotubes and low-dimensional materials(NT18) (国際学会)

４．発表年
2018年

１．発表者名
Yusuke Fukazawa, Yusuke Miyoshi, Yuya Amasaka, Robin Reckmann, Tomoya Yokoi, Kazuki Ishida, Kenji Kawahara, Hiroki Ago and Hideyuki Maki

２．発表標題
High-Speed and integrated graphene blackbody emitters

３．学会等名
7th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy (国際学会)

４．発表年
2018年

１．発表者名
Rintaro Kawabe, Takumi Endo, Hiroshi Takaki, Junko Ishi-Hayase and Hideyuki Maki

２．発表標題
Photon antibunching in single-walled carbon nanotubes at telecommunication wavelengths and room temperature

３．学会等名
7th Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy (国際学会)

４．発表年
2018年

１．発表者名
Hideyuki Maki

２．発表標題
Nanocarbon-based optoelectronic devices

３．学会等名
JSPS-DFG Bilateral Meeting on Carbon Nanotube Optics and Nanospectroscopy (国際学会)

４．発表年
2018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