



2016年6月1日

報道関係者各位

慶應義塾大学
 国立研究開発法人 物質・材料研究機構
 国立大学法人 群馬大学

カーボンナノチューブをテンプレートとした
 世界最小クラスの超極細超伝導ナノワイヤーを実現
 —様々な材料系で超伝導量子デバイスをシリコンチップ上で作製可能に—

慶應義塾大学理工学部の牧英之准教授らは、国立研究開発法人物質・材料研究機構の森山悟士主任研究員、国立大学法人群馬大学理工学部の守田佳史准教授と共同で、カーボンナノチューブをテンプレートとして、世界最小クラスの超極細超伝導ナノワイヤーを実現し、シリコンチップ上でのデバイス化によって、微小な超伝導体で現れる特異な超伝導現象の観測に成功しました。

超伝導は、比較的マクロなサイズで量子現象が発現し、電子デバイス、光電子デバイス、量子コンピュータ等で実用化されていますが、この超伝導体をナノメートルオーダーで微細化した場合、マクロには無い新しい超伝導現象が現れると期待されています。しかし、多くの超伝導材料は、微細化が進む半導体材料と比べて微細加工が難しく、微小な超伝導体を用いたデバイスの実現を阻む原因となっています。今回、カーボンナノチューブと超伝導体をハイブリッド化させることで、10 ナノメートルオーダーの超極細超伝導ナノワイヤーの作製に成功しました。さらに、この超伝導ナノワイヤーをデバイス化したところ、低温にするほど超伝導状態が壊れる現象（超伝導-絶縁体転移）や磁束がナノワイヤーをトンネルする現象（量子位相スリップ）など、特異な超伝導現象の観測に成功しました。今回の研究では、超伝導デバイスで実用化されている窒化ニオブ超伝導体でナノワイヤーの作製に成功したことや、シリコンチップ上で電子デバイス化にも成功していることから、量子ビットや超高感度光検出器といった新たな超伝導量子デバイス応用が期待されます。

本研究成果は、2016年5月31日（現地時間）に米国物理学会誌「Applied Physics Letters」のオンライン版で公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・直径 1nm のカーボンナノチューブをテンプレートとして、極細（10nm オーダー）の超伝導ナノワイヤーを作製する技術を開発
- ・実用上広く使われている窒化ニオブ超伝導体において、ナノワイヤーが作製可能であることを示し、実用的な多元系超伝導材料にも適用可能であることを示した
- ・本手法は、シリコンチップ上で超伝導ナノワイヤーを作製する技術であり、様々な超伝導デバイスへ応用可能
- ・高品質な超伝導ナノワイヤーのみで発現する、磁束の量子トンネル現象や絶縁体転移といった量子現象の観測に成功し、新しい量子デバイス開発へ応用可能

2. 研究背景

超伝導材料は、損失の無い送電ケーブルやリニアモーターカーでの電磁石といったメートルサイズの大規模装置だけではなく、ミリ～マイクロメートルオーダーの磁気・電子・光デバイスでも広く用いられています。また、超伝導特性自体がマクロなサイズの量子現象に由来するものであることから、マイクロメートルといった比較的大きなデバイスサイズでも量子現象が発現するため、量子コンピュ

ータなどの次世代量子デバイスにおいても超伝導は主役となっています。一方、超伝導体をさらに微細化してナノメートルオーダーとした場合、これまでのマクロな超伝導体では知られていない新しい超伝導の量子現象が現れることが近年明らかとなっており、超伝導物性の新しい物理現象の観測や、量子ビットや高感度の光検出器といった量子デバイス開発が注目されています。しかし、超伝導体として知られる多くの材料は、加熱下での成長が必要、多元素を含む多元系で組成に敏感、エッチング加工が難しいといった理由により、半導体デバイスと比べて微細化が困難となっています。そのため、量子現象が発現する 10 ナノメートルオーダーの低次元構造を容易に得られないことが、低次元ナノワイヤーを用いた量子デバイス開発を阻む障害となっています。

3. 研究内容・成果

今回、究極の一次元材料として知られている直径 1nm のカーボンナノチューブに注目し、架橋したカーボンナノチューブ^{*1}をテンプレートとして超伝導材料である窒化ニオブ (NbN) を成長し、カーボンナノチューブ上に最小で約 10nm 幅の極細超伝導ナノワイヤーを形成することに成功しました。得られた超伝導ナノワイヤーは、全長数 μm に渡り途切れることなく高品質なナノワイヤーであることが電子顕微鏡の観察より示されました。この超伝導ナノワイヤー両端に電極構造を作製して電子デバイス化して測定したところ、低温にするほど超伝導状態が壊れて抵抗が上がるという超伝導-絶縁体転移^{*2}や磁束が超伝導ナノワイヤーを横切ってトンネルするという量子位相スリップ^{*3}などの、マクロな超伝導体では現れない特異な超伝導量子現象の観測にも成功しました。今回使用した窒化ニオブ超伝導体^{*4}は、超伝導転移温度が高く実用上重要な材料として知られており、様々な超伝導電子デバイスや光検出器等に応用されています。今回、二元系である窒化ニオブにおいて超伝導ナノワイヤー作製に成功したことから、本手法は、原理上、多元系を含む様々な材料系で利用可能であることも示されました。また、今回の超伝導ナノワイヤーを用いたデバイスは、シリコンチップ上に直接形成して作製されており、今後様々な超伝導デバイスに適用可能であることも示しました。

4. 今後の展開

カーボンナノチューブをテンプレートとした本手法は、従来の超伝導デバイスで課題となっていたリソグラフィ技術の限界を超える新たなナノワイヤー作製法であることに加えて、多元系を含む様々な材料系に適用できることやシリコンチップ上でのデバイス作製も可能であることから、本手法は、超伝導量子物性探索や新たな超伝導量子デバイス開発を可能にします。特に、超伝導量子デバイス分野では、近年、量子位相スリップを用いた量子ビットが提案されるなど、今後更なる発展が期待されています。また、実用的には、超伝導ナノワイヤーは、高感度の光検出器としても現在実用化されており、今回のカーボンナノチューブ上の超伝導ナノワイヤーを用いた超高性能の光検出器といった実用的なデバイス開発も期待されます。

本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (さきがけ)、JSPS Core-to-Core プログラム、科学研究費補助金の一環として実施されました。

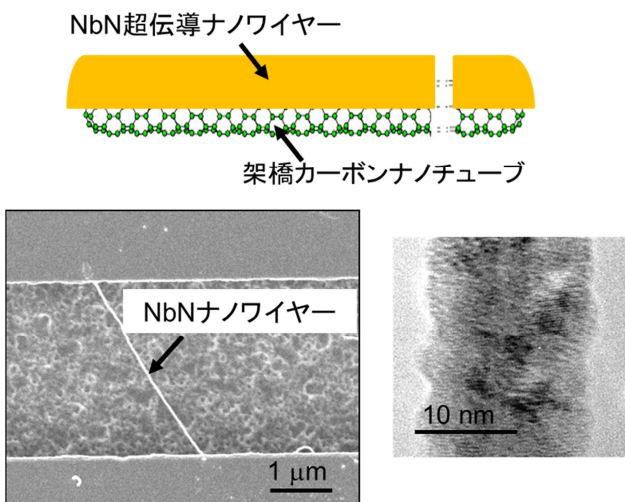


図 1. カーボンナノチューブテンプレートによる超伝導ナノワイヤー成長

上図：架橋カーボンナノチューブ上の超伝導ナノワイヤー成長の模式図。

左下図：成長した NbN 超伝導ナノワイヤーの走査型電子顕微鏡像の例。上下にある電極間に長さ数 μm のナノワイヤーが形成されている。

右下図：NbN 超伝導ナノワイヤーの透過型電子顕微鏡像 (幅 17 nm の例)。極細にもかかわらず、途切れることなく均一に NbN が成長している。

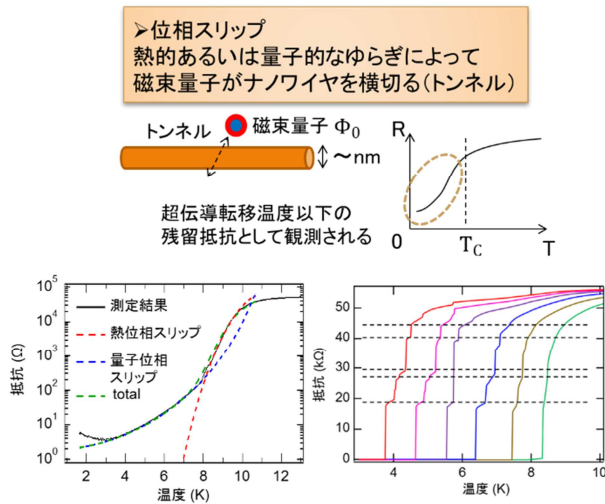


図2. 超伝導ナノワイヤーデバイスで観測される位相スリップ。

上図：位相スリップの模式図。

左下図：幅 17 nm の超伝導ナノワイヤーでの抵抗の温度依存性。点線は理論計算。熱位相スリップと量子位相スリップのクロスオーバーが観測されている。また、3 K 以下の抵抗上昇は、超伝導-絶縁体転移。

右下図：様々な電流値 (200-500 nA) における抵抗の温度依存性。階段状の抵抗変化は、量子位相スリップ中心の数の変化を表し、電流値による差が無いことから、安定した量子位相スリップ中心の存在を示している。

<原論文情報>

“Thermal and Quantum Phase Slips in Niobium-Nitride Nanowires Based on Suspended Carbon Nanotubes”

K. Masuda, S. Moriyama, Y. Morita, K. Komatsu, T. Takagi, T. Hashimoto, N. Miki, T. Tanabe, and H. Maki, Applied Physics Letters

<用語説明>

※1 カーボンナノチューブ：鉛筆の芯等の原料である層状物質グラファイトの一層であるグラフェンを筒状に巻いた物質。直径が約 1nm 程度の一次元構造を有している。

※2 超伝導-絶縁体転移：超伝導薄膜や細線では、その厚さなどを変えることによって、超伝導から絶縁体に量子相転移することが知られている。その転移点直上では抵抗が量子抵抗とよばれる普遍的な値をとる可能性が指摘され多くの研究が集中している。一方、高温超伝導体でも、類似の転移が観測されており、高温超伝導のメカニズムとの関連などから近年注目を浴びている。

※3 位相スリップ：超伝導ナノワイヤーにおいて、磁束が超伝導体を横切る現象。これには、熱的な揺らぎによるものと量子的な揺らぎによるものがあり、それぞれ熱位相スリップ、量子位相スリップと呼ぶ。量子位相スリップは、近年、量子コンピュータの基本素子である量子ビットへの応用が提案され注目を集めている。

※4 窒化ニオブ (NbN)：単体の超伝導体として最高の転移温度を示すニオブ (Nb) があるが、ニオブの合金も比較的高い転移温度を示すことが多い。窒化ニオブはニオブと比べて超伝導転移温度が高いことから、電子デバイスや光検出器等で広く実用化されている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授 牧 英之 (まき ひでゆき)

TEL : 045-566-1643 E-mail : maki@appi.keio.ac.jp HP : http://www.az.appi.keio.ac.jp/maki/

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (竹内)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640 Email : m-koho@adst.keio.ac.jp http://www.keio.ac.jp/

物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

TEL : 029-859-2026 FAX : 029-859-2017 Email : pressrelease@ml.nims.go.jp http://www.nims.go.jp/

国立大学法人群馬大学 総務部総務課広報係

TEL : 027-220-7010 FAX : 027-220-7012 E-mail : s-public@jimu.gunma-u.ac.jp