



岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 2 年 1 月 10 日

岡 山 大 学

エネルギーギャップが完全に開くトポロジカル超伝導体の発見 —量子コンピューターへの応用が期待—

◆発表のポイント

- ・トポロジカル絶縁体・超伝導体と呼ばれる物質は、従来の導電体に比べてエネルギーロスが少ないことや、量子コンピューター（注1）などへの応用が可能であることから注目を集めています。
- ・その産業応用に必要とされる、エネルギーギャップ（注2）が完全に開いた状態のトポロジカル超伝導体は、世界中で研究が進められているものの、いまだ発見されていませんでした。
- ・3年前に発見したトポロジカル超伝導体に改良を加えて合成した物質 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($x>0.46$)（注3）において、エネルギーギャップが完全に開くことを発見しました。
- ・量子コンピューターなどの次世代デバイスへの応用が期待されます。

岡山大学大学院自然科学研究科（理）の鄭国慶（テイ コクケイ）教授、俣野和明（マタノ カズアキ）助教、神戸高志（カンベ タカシ）准教授らの研究グループは、エネルギーギャップを持つトポロジカル超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ($x>0.46$) を発見しました。本研究成果は1月13日、英国の科学雑誌「*Nature Communications*」に掲載されました。

トポロジカル超伝導体は従来の超伝導体（注4）とは異なり、波動関数に「ひねり」があり、特にエネルギーギャップが完全に開くと特徴的な表面状態が現れます。その表面状態が、次世代のコンピューターとされる量子コンピューターへ応用されることが期待されています。本研究成果は基礎研究だけでなく、超伝導の新たな産業応用に道を開くものとして注目されています。

◆研究者からのひとこと

本研究では、若い大学院生たちが大いに活躍しました。この研究分野は近年急成長したものの、まだ多くの課題が残っています。若い方々の参入や産業界の方々との共同研究を期待しています。



鄭教授



PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

近年、トポロジー（注5）という数学的概念を用いて物理現象を理解する新しい試みが注目を集めています。従来の導電体は、表面と内部のトポロジーが同じで、表面も内部も同様に電気を流します。しかし、トポロジカル絶縁体と呼ばれる物質は、電子を記述する波動関数に「ひねり」があり、内部では電気が流れないが表面は電気を流すという性質を持っています。これは、エネルギーギャップが完全に開き、かつ「ひねり」がある内部が、真空（「ひねり」がない）と接続するためにはギャップのない表面状態を作らなければならないためです。トポロジカル絶縁体の表面に流れる電流は従来の導電体に比べてエネルギーロスが少ないなどの特性があり、産業への応用面でも注目を集めています。同様に、完全にギャップが開いたトポロジカル超伝導体でも特徴的な表面状態が現れます。この表面状態は「マヨラナ粒子」（注6）状態と呼ばれ、量子コンピューターなどの次世代デバイスへの応用が期待されています。

<研究成果の内容>

岡山大学大学院自然科学研究科（理）の鄭国慶教授、俣野和明助教と神戸高志准教授らの研究グループは、トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 の Se の層間に、高濃度の銅(Cu)を挿入することによって、特異な超伝導体を合成することに成功しました。鄭教授らは2016年にCuを30%程度挿入した $\text{Cu}_{0.3}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ において、トポロジカル超伝導状態が実現することを世界で初めて証明しました（*Nature Physics* 誌に掲載）が、その物質はギャップが完全には開いていませんでした。これまで、ギャップが完全に開くトポロジカル超伝導体の開発に世界中の研究者がしのぎを削ってきましたが、本研究グループは今回初めてその作製と証明に成功しました。

研究グループは電気化学法によって単結晶を合成し、ミクロな状態を測定できる核磁気共鳴（注7）や磁化測定・電気測定を駆使して研究しました。この物質はSeまたはBi原子が六角形の構造をしており、SeまたはBi原子が作る面内では三回対称性（注8）を持っています。本研究グループは核磁気共鳴法を用いて、超伝導を担う電子対がスピンを平行にして対を作る「スピン三重項超伝導状態」を証明し、トポロジカル性を確立させました。研究グループはさらに、「上部臨界磁場」（注9）などの物理量がCu濃度とともに劇的に変わることを発見しました。具体的には、Cu濃度が40%以下だと、物理量が二回対称性を示すが、40%以上だと物理量が方向に依らなくなる（等方性）を見出しました。二回対称性はエネルギーギャップの開かない場所があることを意味し、等方性は全（運動量）方向にギャップが開くことを意味します。

<社会的な意義>

トポロジカル絶縁体・超伝導体は物理学の新しい研究分野として注目されているだけでなく、次世代の材料・デバイスとしても大いに期待されています。本研究成果はトポロジカル超伝導研究を大きく前進させるとともに、量子コンピューターへの応用に道筋を付けたものです。



PRESS RELEASE

■論文情報

論文名 : Direction and symmetry transition of the vector order parameter in topological superconductors of $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

掲載紙 : *Nature Communications*

著者 : 河合哲大, C.G. Wang, 神鳥吉史, 厚朴優樹, 俣野和明, 神戸高志, 鄭国慶

DOI : 10.1038/s41467-019-14126-w

発表論文はこちらからご確認いただけます。

<https://www.nature.com/ncomms/>

■研究資金

本研究は、科研費の支援を受けて実施しました（新学術領域研究：JP15H05852, 基盤研究 A: JP16H04016）

■補足・用語説明

注1：量子コンピューター

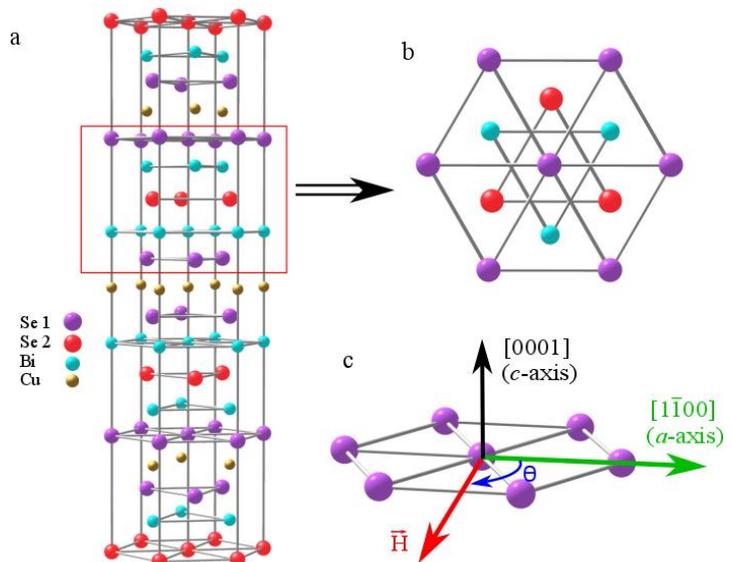
量子のもつ「重ね合わせ」や「量子もつれ」といった振る舞いを利用し、超高速の演算を行うコンピューター。次世代のコンピューターとして期待されている。

注2：エネルギーギャップ

物質はさまざまな状態を取り得るが、状態のエネルギーが低いほど安定である。超伝導転移が起こるのは、超伝導状態の方がエネルギーが低いからである。異なる状態（例えば超伝導状態と常伝導状態）間のエネルギー差をエネルギーギャップという。

注3： $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の層間に銅原子を挿入することで超伝導を発現させることに成功した物質。右図のような結晶構造を持つ。





PRESS RELEASE

注 4：超伝導

物質が臨界温度を超えて冷却されたときに起こる、電氣的な抵抗がゼロになる現象。超伝導を起こす物質を超伝導体と呼ぶ。この状態にあるときは、電気がエネルギーを失わずに物質の中を流れる。長距離送電線やリニアモーターカーにすでに応用されている。

注 5：トポロジー（位相幾何学）

数学の分野の一つであり、形が連続するか否かを議論する。例えばトポロジーの考えではドーナツとコーヒーカップは同一と考えられるが、ボールは違うものとされる。これはドーナツとコーヒーカップは穴が1つ空いており連続的に変形することが可能であるが、ボールとドーナツは穴を開ける動作が必要になるため異なるとされる。

注 6：マヨナラ粒子

自然界に粒子と反粒子が対となって存在し、一般に粒子と反粒子が異なるものである。粒子と反粒子が同一になる特殊な場合があり、その粒子のことをマヨナラ粒子と呼ぶ。イタリアの天才物理学者 E. マヨナラにちなんだもの。

注 7：核磁気共鳴

磁場中に置かれた原子核に特定の周波数を持つ電磁場を与えると、共鳴吸収が起きることを利用した測定手法。原子核周辺のミクロな構造に関する知見を得ることができる。同様の原理を用いた医療機器に MRI などがある。

注 8：回転対称性

ある図形をある回転角で回転したときに、もとの図形に重なる性質のこと。n を 2 以上の整数とし、ある中心（2次元図形の場合）または軸（3次元図形の場合）の周りを $(360/n)^\circ$ 回転させると自らと重なる性質を、n 回対称性と呼ぶ。

注 9：上部臨界磁場

ある閾値以上の磁場を外部から加えると、超伝導状態が破壊される。この閾値を上部臨界磁場という。



<お問い合わせ>

岡山大学大学院自然科学研究科（理）

教授 鄭 国慶

（電話番号）086-251-7813

（FAX番号）086-251-7830



岡山大学は、国連の「持続可能な開発目標（SDGs）」を支援しています。