



物質の潜在能力を引き出す 先端微細加工が拓く超伝導研究の新地平

木俣 基 Kimata Motoi

ごく低い温度で電気がまったく抵抗なく流れる「超伝導」。電気を無駄なく使えるこの性質は、省エネ技術はもちろん、量子コンピュータのような次世代技術にもつながるとして注目されています。なかでも私たちが注目するのは、磁石のような性質もあわせ持った特別な超伝導体です。これまで見たことのない電子の性質が、そこに潜んでいると考えられています。

その謎に迫るため、私たちは特別な技術で育てられた非常にきれいな結晶を用いて髪の毛よりもずっと細い微小デバイスを作り、電子の動きを精密に観察します。こうした研究から、物質に眠る“隠れた力”を引き出すことができます。

—— 極小世界での新たな発見を未来の技術へつなげる —— それが私たちの挑戦です。

電気を流すとき、私たちはふだん「電気抵抗」というものに直面しています。これにより、通常の物質に電流が流れると熱が生じ、電気エネルギーの一部が失われてしまいます。スマートフォンのパソコンが熱を持つのは、まさにこのためです。ところが、特定の物質を非常に低い温度に冷やすと、電流が全く抵抗なく流れる「超伝導」という不思議な現象が起こることがあります。

超伝導は、電力の損失がゼロになるという夢のような性質を持つため、省エネ技術への応用が期待されるだけでなく、近年では量子コンピュータの基本素子を形作る性質としても注目されています。超伝導では二つの電子がペアとなり、「クーパー対」と呼ばれる新しい状態を作ることによって波のような性質を持つことで電気をロスなく運ぶことができます。

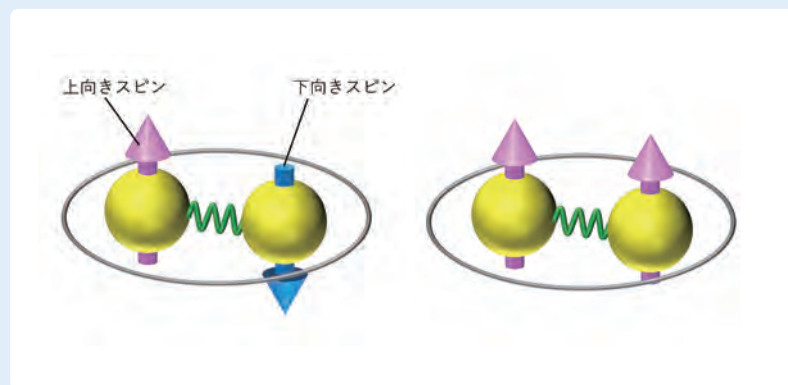


図1

図1: スピン一重項クーパー対(左)とスピン三重項クーパー対(右)の概念図。

私たちは、そうした超伝導の中でも、磁石のような性質をあわせ持つ、非常に珍しいタイプの現象に注目しています。このような性質の物質は「スピン三重項超伝導体」と呼ばれます。

これまでよく知られている通常の超伝導では、電子のスピン(電子の持つ磁石のような性質)が互いに反対方向を向いてペアを組むため、スピンは打ち消しあってしまいます。ところが特殊な超伝導体では同じ向きのスピン同士がペアを作るため、磁石の性質が残ります。このような特殊な状態が実現することで、外部からの磁場に強かったり、トポロジと呼ばれる数学で記述される性質を持つなど、“新しい超伝導”が生まれると考えられています。

このようなスピン三重項超伝導を示す物質は非常に珍しく、これまで自然界の中にほとんど知られていませんでした。ところが最近になり、ウランを含む化合物の超伝導体が、スピン三重項超伝導であることを示す新しい実験結果が次々と見つかっています。私たちはその中の一つ、 UTe_2 という物質に着目し、非常に高い純度で育てられた結晶から微小デバイスを作り、電子のふるまいを精密に観察するという研究を行っています。

この「微小デバイス」を作るために活用しているのが、FIB(Focused Ion Beam: 集束イオンビーム)と呼ばれるナノスケールの加工技術です。FIBは、非常に細いイオンビームを使い、物質の表面を高精度に削ったり切ったりすることができる装置で、微細な電子回路やセンサーをつくる最先端技術の一つ

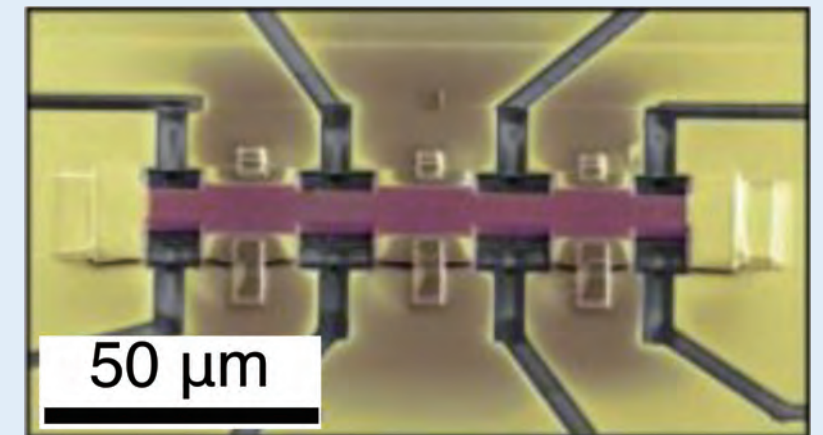


図2

です。私たちはこの技術を使って、超品質の UTe_2 の結晶から髪の毛よりもずっと細い素子を削り出し、そこを流れる電流の性質を調べています。

その結果、この物質が通常の超伝導とは異なる「スピン三重項超伝導」であることを示すさまざまな兆候が見えてきました。たとえば、非常に強い磁場をかけても超伝導が壊れない、複数の異なる超伝導状態が現れるといった現象です。さらに今後の目標は、このような特殊な超伝導体が量子コンピュータの中核になる性質(マヨラナ準粒子)を持っているのではないか? という期待の電子状態をとらえることにあります。

マヨラナ準粒子は、粒子と反粒子が同一というとても珍しい性質を持ち、これを使うとノイズに強く、エラーが起きにくい量子計算が可能になると期待され、世界中で注目されています。ただし、このマヨラナ準粒子は非常にデリケートで、人工的に作られたデバイスでは安定して存在させることが難しいとされています。しかし、

もし結晶そのものが持つ性質として自然にマヨラナ準粒子が現れているとすれば、まったく新しい道が開けます。私たちの研究は、そんな“自然が作った量子の舞台”を利用して、量子テクノロジーに革新をもたらすことを目指しています。

これまで超伝導は、電気を損失なく伝えるという側面ばかりが注目されてきました。私たちの研究は、その超伝導を異なる視点から捉え、これまで見えなかった電子の潜在能力を引き出そうとするものです。とくに、将来の量子コンピュータにつながる特性を、実際の物質の中で発見することが一つの目標です。もしこの研究が進展すれば、エネルギー利用の高効率化だけでなく、より高速かつ高精度な情報処理を可能にする新しいデバイスの開発など、未来の暮らしを支える幅広い応用が期待されます。本研究は、原子力科学の普遍性を切り拓くとともに、基礎研究が将来の技術革新を生み出す揺るぎない土台であることを示しています。

図2: FIBで作製した微細素子の電子顕微鏡像。赤い部分が UTe_2 単結晶。