

超伝導量子素子内で発生する新たなタイプの正孔伝導現象を観測

超伝導体内に侵入した水素の量子性の解明にも期待

ポイント

- ① 超伝導体内に侵入した水素原子核（プロトン）の量子的挙動はほとんど解明されていなかった
- ② ジョセフソン接合内(※1)に存在するプロトンのトンネル運動(※2)により、正孔の伝導現象が促進されることを初めて観測
- ③ 量子コンピュータをはじめとした量子素子のノイズ源の解明やプロトンの量子性を利用した新たな素子開発につながると期待

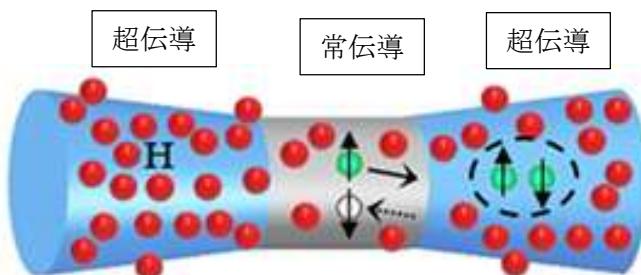
概要

金属内に侵入した水素は、熱運動が凍結するような低温環境下においても、トンネル運動によって拡散します。その結果、母金属の性能を低下させることが知られています。このため、金属中における水素の量子的挙動の解明に向けて、多くの研究が行われてきました。特に、金属が超伝導転移すると電子状態が大きく変化するため、それに伴って水素の量子的な振る舞いも変化し、超伝導特性に影響を及ぼすと予想されています。しかし、その詳細についてはほとんど明らかになっていません。とりわけ、微視的視点からの特性変化の理解は、長年の課題となっていました。

九州大学大学院工学研究院の河江達也准教授、大学院工学府博士課程3年の太子周大学院生、志賀雅亘元助教（現・高知大学准教授）、および大学院総合理工学研究院の橋爪健一准教授からなる研究グループは、約マイナス269°Cの条件下で、ニオブ製のジョセフソン接合に水素を導入しながら電流－電圧特性を詳細に調べました。さらに、あらかじめ微量の水素を添加したジョセフソン接合についても、電流－電圧特性の温度依存性を測定し、両者の比較を行いました。その結果、ジョセフソン接合の常伝導領域において生じる正孔の多重アンドレエフ伝導(※3)が、正電荷を持つ水素原子核（プロトン）のトンネル運動によって促進され、その結果として電気伝導が増加することを初めて明らかにしました。

本研究の結果は、超伝導転移に伴ってプロトンのトンネル確率が大きく増加する可能性を示唆しています。これは、超伝導量子素子における量子状態の破壊を引き起こすノイズや、超伝導磁石に侵入した水素による臨界電流の低下といった問題の起源解明につながるものと期待されます。

本研究成果は米国物理学協会発行の学術誌「Journal of Applied Physics」のオンライン版に2026年4月1日付で公開され、その重要性から「Featured Article（注目論文）」にも選出されています。



（図1）プロトンが侵入したニオブ超伝導－常伝導－超伝導ジョセフソン接合。ジョセフソン接合内にプロトンが侵入すると接合間の多重アンドレエフによる電流－電圧特性はプロトンのトンネル確率の上昇により大きく変化する。

研究者からひとこと：

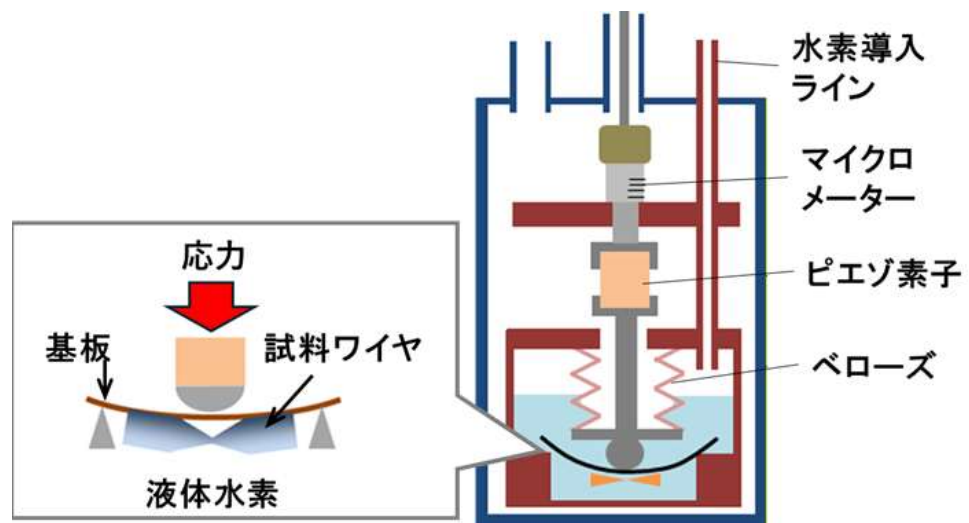
本研究より、超伝導体内に侵入した水素原子核（プロトン）のトンネル確率が、常伝導状態と比べて大きく増加することが明らかになりました。水素は、エネルギー関連研究から機能性水素化物材料の開発に至るまで、極めて幅広い分野で注目されています。このような水素の多彩な性質を理解するためには、その強い量子力学的性質の理解が不可欠であることを、本研究を通してあらためて認識しました。（河江達也）

【研究の背景と経緯】 水素は最も質量の小さい元素であり、強い量子性を示すことが知られています。例えば、金属中に侵入した水素原子核（プロトン）は、低温ではトンネル運動によって金属内を拡散します。特に、母金属が超伝導転移するとフェルミ面にエネルギーギャップが形成されるため、プロトンが周囲の電子系から受ける相互作用は大きく低減し、そのトンネル確率は温度の低下とともに指数関数的に増大すると理論的に指摘されてきました。しかし、超伝導転移に伴って電気抵抗がゼロになるなどの物性変化に隠れてしまい、この効果を実験的に検証することは難しく、これまで直接的な実証は得られていませんでした。一方で、水素が関与する超伝導研究は多岐にわたります。例えば、超伝導量子素子における量子状態の破壊を引き起こすノイズや、超伝導磁石に侵入した水素による臨界電流の低下といった問題の起源解明につながるものが期待されています。

【研究の内容と成果】 約マイナス 269°Cという極低温において、水素で覆われたニオブワイヤを引き延ばして作製したジョセフソン接合に電圧を印加し、水素を侵入させながら電流－電圧特性を直接観測できる実験装置（参考図）を独自に開発しました。この装置により、水素不純物を含むジョセフソン接合の電流－電圧特性を、水素濃度の増加に伴う変化として詳細に測定することが可能となりました。さらに、あらかじめ微量の水素を添加したニオブワイヤから作製したジョセフソン接合についても、電流－電圧特性の温度依存性を測定し、両者の比較を行いました。その結果、水素の侵入により電流－電圧特性が大きく変化し、多重アンドレエフ伝導で説明される新たな信号が出現することを初めて明らかにしました。これらの結果は、ジョセフソン接合内においてプロトンのトンネル確率が増大し、それによって正孔の運動が促進されることを強く示唆しています。本研究は、超伝導体中に侵入した水素の多彩な量子特性の解明に寄与するだけでなく、高性能な超伝導量子素子の実現に向けた重要な一歩となるものが期待されます。

【今後の展開】 常伝導金属中における水素の量子現象については、これまで数多くの研究が行われてきましたが、超伝導体中に侵入した水素が示す量子性については、十分には解明されていません。一方、近年では超高压下で形成される高濃度水素化物が高温超伝導を示すことが発見され、大きな注目を集めています。このような背景のもと、本研究の成果は、超伝導状態において水素が誘起する多彩な量子物性の解明に寄与するものと期待されます。

【参考図】



実験装置の模式図。断熱管が二重構造になっている。これにより試料が設置されている内部断熱管を水素雰囲気にした状態で、ジョセフソン接合のサイズを制御しながら測定を行うことができる。

【用語解説】

(※1) ジョセフソン接合

2つの超伝導体の間に nm (ナノメートル) 程度の絶縁体や金属を挟んだ構造です。このような構造では、超伝導電子対がトンネル効果により絶縁層を通り抜け、電流が流れる現象 (ジョセフソン効果) を示します。またジョセフソン接合ではゼロ電圧でも電流が流れる「直流ジョセフソン効果」などの特徴的な現象が見られるため、量子コンピュータの基本素子 (超伝導量子ビット) や超高感度の磁気センサー (SQUID) としても利用されています。

(※2) トンネル効果

量子力学では、電子や水素などの粒子は波としての性質 (波動性) を持つため、古典力学では乗り越えられないエネルギー障壁であっても、一定の確率でそれを通り抜けることが可能です。これをトンネル効果と呼びます。トンネル効果は原子スケールの極めて微小な領域で顕著に現れる現象であり、トンネルダイオードなどの半導体デバイスや、走査型トンネル顕微鏡 (STM) といった技術に広く応用されています。また、ジョセフソン効果は、絶縁体や金属を挟んだ2つの超伝導体の間の巨視的波動関数がトンネル効果によって結合する現象として理解されます。

(※3) 多重アンドレエフ伝導

多重アンドレエフ伝導は、超伝導体と常伝導体の接合界面において生じる特徴的な電気伝導現象です。超伝導体中では、電子が2個対を形成したクーパー対として存在しており、超伝導ギャップよりも低いエネルギーを持つ単一電子は、そのままでは超伝導体内に入ることができません。このため、常伝導体側から低エネルギーの電子が入射すると、その電子は超伝導体に取り込まれる代わりに、もう1つの電子と対を形成する過程を経て、反対向きに正孔として反射されます。この過程により、実質的には2個の電子がクーパー対として超伝導体内に流れ込み、電荷が輸送されます。これがアンドレエフ反射と呼ばれる現象です。さらに、この反射過程が接合内で繰り返し起こることで、多重アンドレエフ伝導が生じます。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (課題番号: JP23K17763, JP21H01605)、池谷科学技術振興財団、日本板硝子材料工学助成会、村田学術振興財団の支援を受けました。

【論文情報】

掲載誌: Journal of Applied Physics

タイトル: Conductance anomalies in constriction-type superconducting Josephson junctions induced by hydrogen impurities

著者名: 太子周、宮川一慶、高田弘樹、志賀雅亘、橋爪健一、河江達也

DOI: 10.1063/5.0320043

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院工学研究院 准教授 河江達也 (カワエタツヤ)

TEL: 092-802-3521 FAX: 092-802-3501

Mail: kawae.tatsuya.122@m.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

Kyushu
University **VISION 2030**
総合知で社会変革を牽引する大学へ