

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 14 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651122

研究課題名(和文) 接合制御ジョセフソン素子を用いた低温量子伝導現象の研究

研究課題名(英文) Quantum transport properties at mechanically controllable Josephson junctions

研究代表者

辻井 宏之 (TSUJII, HIROYUKI)

金沢大学・学校教育系・准教授

研究者番号：10392036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：様々な物質を挟み込んだ新奇ジョセフソン接合の低温量子伝導現象を探索することを目的として、ブレイクジャンクションによる超伝導接合を用いた研究を行った。ジャンクションにヘリウム原子を吸着させた測定では、接合サイズを小さくしたとき、ヘリウム原子がトンネル状態での電子輸送に影響を及ぼすことが明らかになった。ニオブ細線を使った超伝導ジャンクションの実験と合わせて、様々な物質を挟みこんだジョセフソン接合の研究を確立できる目処が立った。

研究成果の概要(英文)：We have carried out experiments to explore anomalous phenomena in various Josephson junctions with a mechanically controllable break junction technique. The tunnel conductance between two metallic gold electrodes is found to be influenced by absorbed helium atoms. In niobium superconducting junctions, anomalous behavior of difference conductance has been observed. We pursue the research of Josephson devices with molecules following these results.

研究分野：低温物理学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：破断接合 ジョセフソン接合 量子化コンダクタンス トンネル現象

### 1. 研究開始当初の背景

メカニカル・ブレイクジャンクションは、破断された細線間の距離をナノスケール以下の精度でコントロールする実験技術であり、低温に冷却することで新奇な量子現象の観測が期待できる。破断する試料として様々な物質を用いることで、電気伝導度の振舞いからその物質特有の物性を知ることが可能である。さらに、間隔を制御できる微小電極として接合間に微小な物質を挟みこみ、ナノスケール導体の伝導現象を観測することも可能である。

近年、量子計算を目指した超伝導接合の研究が盛んに行われているが、ブレイクジャンクションを利用することで、新たな超伝導素子の研究が可能である。ブレイクジャンクションでは、様々な超伝導物質を利用できるので、ジョセフソン・ジャンクションを形成する物質を変化させることで超伝導ギャップの大きさによる効果や、超伝導転移温度の違いから現れる温度の影響なども、詳細に議論することが可能である。さらに、様々な超伝導物質を利用できることに加えて、接合の距離を自由に変化させることができることは、様々な性質やサイズのナノ物質を架橋したジョセフソン素子を開発するのに非常に適している。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ブレイクジャンクションを用いて超伝導接合を制御し、電極間に様々な物質を挟み込むことで、新奇ジョセフソン・ジャンクションの低温量子伝導現象を探索することにある。強磁性ナノコロイドを用いた強磁性ジョセフソン・ジャンクションでは、超伝導体界面におけるクーパー対の反射が、電子の持つスピン自由度によってどのように影響を受けるのか、ジャンクションやナノコロイド粒子のサイズを制御して明らかにする。また、ジョセフソン・ジャンクションにヘリウム原子を挟みこむことで、2種の同位体原子の違いから、ヘリウム単一スピンによるジョセフソン素子の振舞いを探索する。これらの実験を通して、新奇超伝導素子の基礎研究とする。

### 3. 研究の方法

ブレイクジャンクションの測定を低温で行うための冷凍機は、冷却および昇温が速やかに行なうことができ、試料となる金属細線の取替えが短時間で可能となるように、液体ヘリウムベッセルに直接挿入するトップロード型とした。高真空容器中に置いた基板にサンプルとなる金属細線を取り付け低温にした後、低温においたマイクロメータヘッドを室温部から制御し基板をたわませ、細線を破断できるようにした。ジャンクションの距

離はピエゾ素子を用いて基板の曲がり調節することによりコントロールした。

ジャンクションに微小な物質を挟み込む方法は、次の通りである。まず、清浄な接合部を形成するために低温で初めの破断を行い、接合部の距離を変えて電気伝導の特性を調べ、ジャンクションの状態を確認した。気体分子を挟み込むときには、断熱真空部への気体導入路から、圧力をコントロールしながら気体を送り込んだ。ナノコロイドなどを挟み込む場合、あらかじめジャンクション付近に付着させ、低温で固化した溶媒をジャンクション形成後に融解させ導入を試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) ヘリウム原子のトンネル電流への影響

ブレイクジャンクションの装置が接点の制御に使用できることを確認するため、4.2 Kまでの低温で、金や銅などの細線を破断したポイントコンタクトの測定を行った。接点の距離を制御した電気伝導度の測定において、量子コンダクタンスの整数倍のところにステップを持つコンダクタンスの量子化を観測することに成功した。

次に、超伝導の微小接合を用いた実験の前段階として、コンダクタンスの量子化が最も明瞭に観測された金を用いて、ブレイクジャンクションで作製した接合部に物質を挟んだ場合にどのような変化が現れるのかを検証した。真空中では接合の距離に対して指数関数的なコンダクタンスの振舞いをするのに対して、ジャンクションにヘリウム原子を吸着させたとき、真空中での振舞いから逸脱し、コンダクタンスの減少が観測された。ヘリウム原子がトンネル状態での電子輸送に影響を及ぼしていることを示唆している。過去の報告ではヘリウム原子サイズ程度の接合距離で異常が現れたのに対して、それよりも短い距離でも観測されており、ヘリウムの圧力などを変えた詳細な実験により原子吸着による電気伝導への影響を解明することが新たな課題となった。

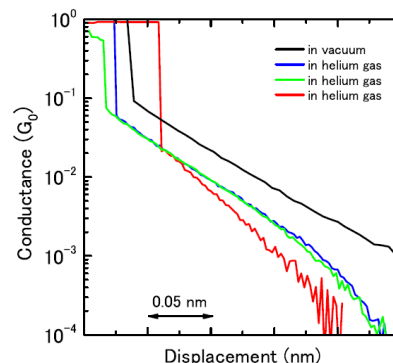


図 1. 真空中およびヘリウムガス中の金接合のコンダクタンス。

## (2) ジョセフソン接合のサイズ依存性

Nb ワイヤを用いた超伝導での実験では、ジャンクションの距離を変えながら電流電圧特性を測定した。ジャンクションの直径が大きいときには、サイズに応じた臨界電流を観測した。しかし、コンダクタンスが小さくなるにつれて、臨界電流がはっきりと観測できなくなり、それに変わって微分コンダクタンスに 0 V におけるブロードなピークが出現した。Nb のナノサイズ化が臨界電流に何らかの影響を与えていると考えられる。

ゼロバイアスでのピークを解明するため時間を要したので、ジョセフソン接合に微小な物質を挟み込んだ実験までには至らなかった。しかし、常伝導でのヘリウム吸着原子の影響の観測や、超伝導での臨界電流の実験を通して、様々な物質を挟みこんだジョセフソン接合の研究を確立できる目処が立った。

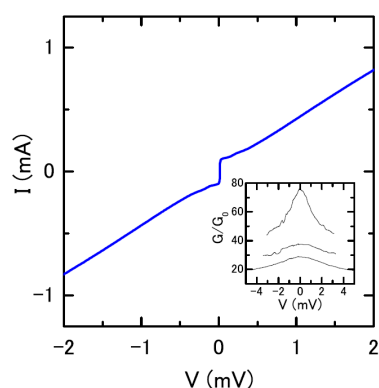


図 2. Nb ジャンクションの電流電圧特性に見られる臨界電流と微小な接合における微分コンダクタンス。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

K. Ienaga, T. Yokota, N. Nakashima, Y. Inagaki, T. Kawae and H. Tsujii, “Electron tunneling measurements in atomic scale gap filled with liquid  $^4\text{He}$  below 4.2K”, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 400, 042019 (2012). 査読有.  
doi:10.1088/1742-6596/400/4/042019

S. Abe, F. Sasaki, T. Oonishi, D. Inoue, J. Yoshida, D. Takahashi, H. Tsujii, H. Suzuki, K. Matsumoto, “A compact capacitive dilatometer for thermal expansion and magnetostriction measurements at millikelvin temperatures”, *Cryogenics*, Vol. 52, Issue 10, 452-456 (2012). 査読有.  
DOI: 10.1016/j.cryogenics.2012.04.008

K. Ienaga, N. Nakashima, Y. Inagaki, H. Tsujii, T. Kimura, and T. Kawae, “Study of ferromagnetic transition in Pd nanometer-scale constrictions using a mechanically controllable break junction technique”, *Applied Physics Letters* 101, 123114 (2012) 4pp. 査読有.  
doi:10.1063/1.4754565

K. Ienaga, N. Nakashima, Y. Inagaki, H. Tsujii, S. Honda, T. Kimura, and T. Kawae, “Zero-bias anomaly in ferromagnetic Ni nanoconstrictions”, *Physical Review B* 86, 064404 (2012) 4pp. 査読有.  
DOI:10.1103/PhysRevB.86.064404

〔学会発表〕(計 12 件)

家永統一郎, 大西雄貴, 高田弘樹, 稲垣裕次, 辻井宏之, 河江達也, Pd への水素吸蔵における水素原子トンネル機構の寄与, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 30 日, 東海大学(神奈川県)

家永統一郎, 大西雄貴, 高田弘樹, 稲垣裕次, 河江達也, 辻井宏之, 非弾性電子スペクトル測定を用いた Pd への液体水素吸蔵過程の研究, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学(神奈川県)

高田弘樹, 家永統一郎, 大西雄貴, 稲垣裕次, 辻井宏之, 河江達也, バナジウムナノコンタクトにおけるジョセフソン電流と近藤効果の競合, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学(神奈川県)

家永統一郎, 大西雄貴, 高田弘樹, 稲垣裕次, 辻井宏之, 河江達也, 量子トンネルによる Pd への水素吸蔵の研究, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 28 日, 徳島大学(徳島県)

高田弘樹, 家永統一郎, 大西雄貴, 稲垣裕次, 辻井宏之, 河江達也, ナノコンタクト型ジョセフソン接合における微分伝導特性のサイズ変化, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 27 日, 徳島大学(徳島県)

大西雄貴, 家永統一郎, 高田弘樹, 稲垣裕次, 辻井宏之, 河江達也, 液体水素温度における Pd の水素吸蔵, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 27 日, 徳島大学(徳島県)

家永統一郎, 高田弘樹, 大西雄貴, 稲垣裕次, 辻井宏之, 木村崇, 河江達也, 磁

気抵抗測定を用いた Pd ナノワイヤの強磁性の研究, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 29 日, 広島大学(広島県)

高田弘樹, 家永紘一郎, 大西雄貴, 稲垣祐次, 辻井宏之, 河江達也, 超伝導ナノコンタクト(Sn,Pb)の電気伝導特性におけるサイズ変化の効果, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学(広島県)

大西雄貴, 家永紘一郎, 高田弘樹, 稲垣祐次, 辻井宏之, 河江達也, 電気伝導測定を用いた液体水素中 Pd ナノワイヤの水素吸蔵過程の探求, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学(広島県)

岩上欧史, 辻井宏之, 三原信吾, 阿部聡, 鈴木治彦, 松本宏一, Aerogel 中の液体  $^3\text{He}$  の超音波測定, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 20 日, 横浜国立大学(神奈川県)

大西雄貴, 家永紘一郎, 横田智彦, 稲垣祐次, 辻井宏之, 河江達也, 液体水素中における Pd ナノワイヤの電気伝導測定, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 20 日, 横浜国立大学(神奈川県)

家永紘一郎, 中島尚也, 大西雄貴, 稲垣裕次, 辻井宏之, 木村崇, 河江達也, Pd 原子サイズワイヤにおけるゼロバイアス異常, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18 日, 横浜国立大学(神奈川県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻井 宏之 (TSUJII, Hiroyuki)  
金沢大学・学校教育系・准教授  
研究者番号: 10392036

### (2) 研究分担者

神原 浩 (KAMBARA, Hiroshi)  
信州大学・教育学部・准教授  
研究者番号: 00313198