

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03819

研究課題名(和文) 超伝導微粒子の空間捕捉を利用した物性研究

研究課題名(英文) Study on a superconducting micro particle in a magnetic trap

研究代表者

森脇 喜紀 (Moriwaki, Yoshiki)

富山大学・学術研究部理学系・教授

研究者番号：90270470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム中でのレーザーアブレーションにより生成された超伝導微粒子は、マイスナー効果により四重極磁場中に単独で空間捕捉される。空間捕捉された超伝導微粒子を用いて以下の研究成果を得た。微粒子による光の散乱角依存性はMie散乱モデルにより説明でき、超伝導微粒子の光学定数が常伝導と同等であり、極低温での微粒子の大きさを捕捉中に測定することが可能となった。微粒子の運動解析により、レニウム超伝導微粒子における磁場侵入長が求められた。レニウムの微粒子では、これまでに報告されている中で最も高い超伝導転移温度が実現できることが示された。このような高い転移温度が生じるメカニズムを今後調べることが大切である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一超伝導微粒子の空間捕捉法により、微粒子の超伝導物性、光学物性、超流動ヘリウムの物性測定に現状でどこまで迫れるかが示された。歪などにより超伝導転移温度 $T_c$ の増強が報告されているレニウムについて、低温ヘリウム環境で作成した微粒子がこれまでで最も高い $T_c$ を実現していることが示された。また、光散乱を用いたin situでの微粒子径測定法は、対象が小さく、作動距離が大きいため光学的な顕微鏡が利用できない場合にも有効に使える点で意義がある。

研究成果の概要(英文)：A micro-particle fabricated by laser ablation in superfluid helium can be solely trapped by a quadrupole magnetic field due to the Meissner effect. Using such a single micro-particle, we obtained the results as follows: the angular dependence of the scattering light by the particle could be explained by the Mie scattering model. Due to this analysis, the optical constants of the particle were the same as those of the normal conductors, and in-situ size measurements of the particle in the low temperature condition could be conducted by the light scattering experiments. Analysis of the particle motion in the magnetic field and superfluid helium revealed the magnetic penetration depth of the rhenium superconducting particle. The superconducting critical temperature for the rhenium particle was the highest ever reported. The mechanism for that should be the next research targets.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：微粒子空間捕捉 微粒子 超伝導 レーザーアブレーション 超伝導転移温度 超流動ヘリウム レニウム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

原子分子や微粒子など様々な物質が空間捕捉され、電磁波の周波数や相互作用に関する精密測定がなされてきている。我々は、磁場を用いて超伝導微粒子を空間捕捉する方法を開発した[1]。超流動ヘリウム中でバルクの試料をレーザーアブレーションすることにより、ほぼ真球の微粒子を生成することができる。また、液体ヘリウム中でのアブレーションを行うため、不純物のない環境で微粒子が生成される。超伝導状態にある微粒子を不均一磁場のゼロ磁場に生成すると、超伝導による完全反磁性により、微粒子を空間捕捉することができる。環境温度が微粒子の超伝導転移温度  $T_c$  を越えると、超伝導状態が破れ、微粒子は捕捉状態から解放され落下する。捕捉からの解放を検出することで、微粒子の超伝導転移温度を調べることができる。また、強いレーザー光を照射して微粒子を加熱することによっても微粒子を捕捉状態から解放できることを利用して、単独の微粒子の捕捉が可能となった。長時間にわたり安定な空間捕捉ができ、微粒子の支えなどがない状態で長時間にわたる観測が可能である。

この方法で生成したレニウム微粒子の超伝導転移温度が 4.2K 以上であることが観測された。レニウムのバルク状態での超伝導転移温度は 1.7K であるので大幅な増大である。ほぼ同じ時期に他の研究グループによるレニウムの  $T_c$  の増大が報告された。Mito 等は剪断ひずみによって Re の超伝導転移温度が 3K まで高められることを報告し[2]、Pappas 等は貴金属の表面に Re を電気メッキした薄膜をさらに貴金属で挟み多層膜化した場合に  $T_c$  を 6K まで高められることを報告している[3]。これらの研究では対称性の破れによるナノ構造化が指摘されている。我々の低温ヘリウム環境でレーザーアブレーションにより作成したレニウム微粒子の  $T_c$  がいかにほどであるのか、またその状況のメカニズムは何であるか解明されるべき点である。

### 2. 研究の目的

磁場を用いて超伝導微粒子を空間捕捉し、その微粒子の物性を明らかにする。温度や微粒子のサイズを実験パラメータとして、微粒子の捕捉・脱離や光・電磁波との相互作用を調べ微粒子の超伝導転移温度、超伝導ギャップ、磁場侵入長などの超伝導物性を明らかにする。このように単独の微粒子を生成、空間捕捉し、検出・測定する手法を開発・確立し、超伝導転移機構を解明するのが本研究の目的である。

・液体ヘリウムの沸点 4.2K(1 気圧)よりも高い温度環境への温度上昇を可能にして、レニウム微粒子の超伝導転移温度を調べるなど、レニウム微粒子の空間捕捉により得られる物性研究を進める。

・空間捕捉された微粒子が、超伝導から常伝導に転移すると捕捉から外れることを利用して、超伝導ギャップの直接ミリ波吸収による測定を目指す。

### 3. 研究の方法

超流動ヘリウム中に 2 つの磁石を同極を向かい合わせに設置して四重極磁場をつくる。その側に試料母材を設置し、それをレーザーアブレーションすることにより微粒子を生成する。微粒子はまわりのヘリウムにより冷却され、超伝導となったものは四重極磁場の中心に空間捕捉される。弱いレーザー光を照射し、微粒子からの散乱光をズームレンズを通してカメラにより観測する。複数個の微粒子が捕捉された場合には強いレーザー光を照射して微粒子を加熱し超伝導状態を破壊して捕捉状態から解放する。こうして四重極磁場の中心に単独の微粒子を空間捕捉する。超流動ヘリウム中での超伝導微粒子の空間捕捉は堅牢で長時間にわたり光学的に観測することが可能である。また、ヘリウムの温度を上昇させ超伝導転移温度に達した微粒子は捕捉が破れ落下する。微粒子捕捉位置の真下に回収板を移動してその微粒子を回収する機構を設けている。

このようにヘリウム中で空間捕捉された超伝導微粒子を用いて、以下の研究を行った。

#### Mie 散乱の測定

単独で空間捕捉されたレニウム微粒子にレーザー光を照射し、散乱光をズームレンズを通してカメラで測定する。微粒子からの散乱光は微小であるが、積算時間をとることでその強度を測定することが可能である。微粒子の捕捉位置を中心とする回転系に光学測定系設置して Mie 散乱測定を行い散乱光強度の散乱角依存性を測定した。複数波長での測定結果について、それぞれ Mie 散乱モデルにより解析をおこない、角度分布は常伝導状態でのレニウムの光学定数により説明できることが示された。また、微粒子の球形からの歪みが角度依存性にもたらす効果を議論した。このモデルを用いて求められた空間捕捉状態での粒子径は、低温実験後にクライオスタットから取り出して走査電子顕微鏡により測定した粒子径とほぼ一致した。その一方で、系統的なずれがあることも示された。

磁場トラップ中での微粒子運動観測による液体ヘリウムの粘性測定と微粒子の超伝導パラメー

## タの測定

超流動ヘリウム中で空間捕捉された単独のレニウム微粒子に中程度の強度のレーザーを照射することにより、微粒子をレーザーの照射する方向へ動かすことができる。これは、レーザー照射により微粒子表面で生じた熱による効果であると考えられる。レーザー照射により微粒子は押され、磁場トラップによる中心力と釣り合う位置で止まる。そこで、レーザー照射を遮断すると、微粒子は四重極磁場によるポテンシャルと液体ヘリウムの粘性によって減衰振動して捕捉中心に戻る。この軌跡をレーザーを用いて測定し、ナビエ-ストークス方程式を用いて流体力学に解析した。測定された微粒子の大きさを用いて、複数の温度における超流動ヘリウム中の常流動ヘリウム成分の粘性定数が得られた。この値は他の方法により測定された値とよく一致した。また、微粒子に作用する磁場ポテンシャルの効果が微粒子の角振動数に現れる。角振動数が大幅な減少は、微粒子での磁場侵入長により説明できることが分かった。振動運動解析により微粒子における磁場侵入長を測定することに発展できると考える。

## 4.2K 以上での微粒子空間捕捉の実現

超流動ヘリウム中でレーザーアブレーションにより微粒子を生成する場合、液体ヘリウムの沸点 4.2K(1 気圧)が最も高い環境温度であった。レニウム微粒子では、4.2K においても空間捕捉が継続するため、その超伝導転移温度は 4.2K 以上であるとの結果で止まっていた。微粒子の環境温度を高めるには、液体ヘリウムを加圧する、あるいは、ヘリウムガスを用いる方法等がある。小さい容器を用いて液体ヘリウムを加圧する場合には、レーザーアブレーションに伴う微粒子の捕捉に問題が生じた。そこで、低温ヘリウムガス中でのレーザーアブレーションにより、レニウム微粒子の空間捕捉の手法を開発した。ヘリウムガス温度をゆっくりと上昇させ、微粒子が空間捕捉から離脱することによりレニウム微粒子の超伝導転移温度を調べた。その結果、本研究で生成した微粒子がこれまでの報告に比べ高い超伝導転移温度を持つことが明らかとなった。このように高い超伝導転移温度を生じるメカニズムを今後調べていく。

## ミリ波による超伝導ギャップの測定

微粒子の超伝導バンドギャップを調べるために、微粒子の捕捉空間にミリ波を照射するためのミリ波導波管を備えた捕捉装置を開発した。この装置をもちいて、空間捕捉された微粒子に対してミリ波を導入したが、微粒子捕捉状態が変化することはなかった。導波管から捕捉空間へのミリ波の結合が十分でない、ミリ波強度が不十分であった可能性がある。今後、導波管と捕捉空間でのミリ波の結合を改良する、あるいは空間捕捉領域へミリ波をフォーカスして導入するなどの改良を行っていくための知見が得られた。

## 4. 研究成果

レーザーアブレーションにより生成され、磁場中に捕捉された超伝導微粒子を用いて、Mie 散乱、磁場トラップ中での運動、超伝導転移温度について調べた。Mie 散乱においては、測定された複数波長の光の散乱角依存性が Mie 散乱モデルによりよく表され、超伝導状態のレニウム微粒子の光学定数が常伝導状態と同じであり、また、極低温状態での微粒子の大きさを捕捉状態のまま測定することが可能となった。この成果を論文にまとめ報告した[5]。磁場捕捉された微粒子の運動解析からは、超流動ヘリウムにおける常流動成分の粘性定数が得られるとともに、完全反磁性を仮定した理論値からの軌跡パラメータのずれが、レニウム超伝導微粒子における磁場侵入長により説明できることが示された。この測定では、微粒子の物性パラメータのみならず、超流動ヘリウムの物性も調べることが可能であることが示された。レニウム微粒子の超伝導転移温度測定においては、これまでに報告された中で最も高い温度が実現できることが示された。このような高い転移温度が生じるメカニズムを今後調べるのが大切である。これらの成果は、空間捕捉微粒子の特徴を生かした実験の結果得られた。

[1] Y. Takahashi et al., Applied Physics Express, 10, 022701 (2017).

[2] M. Mito et al., Sci. Rep., 6, 36337 (2016).

[3] D. P. Pappas et al., Appl. Phys. Lett., 112, 182601 (2018).

[4] F. N. Womack et al., Phys. Rev. B, 102, 024504 (2021).

[5] M. Takamune et al., Appl. Phys. Express, 15, 012007 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masato Takamune, Shota Sasaki, Daisei Kondo, Jun Naoi, Mitsutaka Kumakura, Masaaki Ashida, and Yoshiki Moriwaki	4. 巻 15
2. 論文標題 In situ size measurement of a magnetically trapped single superconducting microparticle by Mie scattering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 012007-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac4206	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井口貴裕, 近藤大聖, 熊倉光孝, 芦田昌明, 森脇喜紀
2. 発表標題 液体He中でアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップXIV
3. 学会等名 日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木照太, 直井惇, 高宗雅人, 近藤大聖, 熊倉光孝, 芦田昌明, 森脇喜紀
2. 発表標題 液体He中でレーザーアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップXI
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤大聖, 佐々木照太, 高宗雅人, 直井惇, 熊倉光孝, 芦田昌明, 森脇喜紀
2. 発表標題 液体He中でレーザーアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップXII
3. 学会等名 日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤大聖, 佐々木照太, 高宗雅人, 熊倉光孝, 芦田昌明, 森脇喜紀
2. 発表標題 液体He中でレーザーアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップXIII
3. 学会等名 日本物理学会2021年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Ashida, Shota Sasaki, Jun Naoi, Masato Takamune, Daisei Kondo, Yuta Takahashi, Mitsutaka Kumakura, Yoshiki Moriwaki
2. 発表標題 What will be done by optical manipulation of magnetically trapped superconducting micro-particles?
3. 学会等名 Optical Manipulation and Structured Materials Conference
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小林 かおり  (Kobayashi Kaori)  (80397166)	富山大学・学術研究部理学系・教授    (13201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------