

令和 2 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：2017～2019

課題番号：17K05598

研究課題名(和文)超伝導微粒子の空間捕捉 - 物性測定への展開 -

研究課題名(英文) Trapping of superconducting micro-particle -- development to the measurement of physical properties---

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム中でレーザーアブレーションする手法により、ほぼ真球の微粒子を生成することができる。超伝導状態の微粒子では、磁場を用いて微粒子を空間捕捉することができる。このように微粒子を生成し、単独で空間捕捉し、検出・測定する手法を開発するのが本研究の目的である。捕捉した超伝導インジウム微粒子にレーザー光を照射することにより平衡位置から移動させた後、自由運動させてその運動の様子から微粒子の形状と超流動ヘリウムとの相互作用についての情報が得られることが分かった。また、微粒子によるレーザー光の散乱の角度依存性が詳細に観察できるようになり、超伝導微粒子の光学的物性を評価することができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超流動ヘリウム中で微粒子がレーザー照射によって力を受けることは、我々が初めて発見した現象であり、その機構を明らかにすることは重要である他、この力を用いて超流動ヘリウム中の微粒子の運動制御への応用、ヘリウムの物性、微粒子の物性、サイズなどに関する情報が得られると考えられる。超伝導体物質による光散乱(ミー散乱)は我々の調べた範囲では存在しないため、今回初めて測定に成功し、光物性に関する情報を導き出したことに意義がある。また、本手法で生成したレニウム微粒子の超伝導転移温度の大幅な上昇は、これまでの他の手法によるものに匹敵、あるいは上回っており、その機構を解明することは物理的に重要である。

研究成果の概要(英文)：Superconducting microparticles are produced by laser ablation of bulk material in a superfluid helium, and one of them is trapped in a space using magnetic field. The target of this study is to clarify the physical properties of this isolated single microparticle. (i) Indium microparticle can be pushed away from the center of the trap by the irradiation of a laser and on stopping the irradiation the particle moves in the trap potential. Analyzing the time evolution of the trace, the shape of the particle or the viscosity of helium were deduced. (ii) Although the scattering light intensity by a single microparticle is very small, we can measure the angle dependence of the scattering light by trapping the particle stably and prolonging the integration time of the observation. Analyzing the angle dependence, we obtained the particle size, and the optical properties of superconducting indium particle at the laser wavelength. These are new information for the indium as long as we know.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：超伝導 微粒子 磁気トラップ 超伝導転移温度 レーザーアブレーション 超流動ヘリウム 光散乱  
ミー散乱

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

原子・分子の空間捕捉の技術は急速に発展してきており、遷移周波数の精密測定、低温衝突、準位の寿命等や、ボース凝縮やフェルミ縮退等の量子統計に関わる物理現象が解明されつつある。一方、粒子に関しては誘電体球や金属球が強いレーザー光による分散力によって空間捕捉されている。我々は低温で現れる超伝導性に着目し、磁場を利用して微粒子を空間捕捉することを提案し実現した(図 1,2)[1]。超伝導物質は、磁場との相互作用により完全反磁性を呈するため、不均一磁場中で強度が極小となる領域に空間捕捉することが可能である(low field seeker)。一方、超伝導物質の温度が上昇し超伝導臨界温度  $T_c$  を超えると超伝導性が破れ閉じ込めから解放され粒子は失われる。このような空間捕捉を用いて「閉じ込めが出来ているかどうか」を超伝導性の「現れ」(センサとして物性を調べることが可能となる。ナノ領域までスケールの範囲を広げることにより、低次元系での超伝導転移温度  $T_c$  のサイズ依存などを測定し超伝導揺らぎなどの物理を明らかにしていくことが期待される[2]。

一方、微粒子の生成方法としてレーザーアブレーション法は極めて有力である。真空状態、低温環境など様々な状況下に配置された試料から微粒子等を生成することが可能である。「超流動ヘリウム」中という特別な環境下でレーザーアブレーションする微粒子生成法は、基本的にどのような母材試料に対しても適用でき、不純物のないきれいな環境で生成でき、微粒子がほぼ真球の形状をもつ等の特徴がある[3]。しかし、アブレーションにより微粒子が生成される過程は分かっておらず、ある程度の分布幅を持った様々な大きさの微粒子が形成され、微粒子の大きさを制御することは未だ出来ていない。微粒子の大きさを測定すること、また、必要な大きさの微粒子を形成することが課題である。

ヘリウムクライオスタット中で捕捉されている微粒子の大きさを光学顕微鏡像から測定するのは困難がある。図 2 は空間捕捉されたインジウム微粒子の光学顕微鏡像であるが、像はぼやけて実際の微粒子の大きさに比べて 10 倍程度大きく見えている。実際の大きさとはクライオスタットから微粒子を取り出して電子顕微鏡で測定した大きさである。捕捉された状態で(捕捉状態を「非破壊」で)微粒子の大きさを測定するには、レーザーの散乱光強度やその分布を、微粒子の真球性を取り入れたミー散乱モデルにより解析することが考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、ミクロな超伝導粒子を空間捕捉し、その物性を調べる研究手法を確立する。具体的には以下のことを明らかにする：

- (1) 超流動ヘリウムの中でのレーザーアブレーションにより超伝導微粒子を作成し、その大きさを制御する方法を開発する。
- (2) 作製した微粒子の超伝導転移温度を磁場による空間捕捉法により測定しそのサイズ依存性を明らかにする。
- (3) 作成した微粒子の構造について、X 線回折・電子顕微鏡により結晶構造や形状を明らかにする。

### 3. 研究の方法

超流動ヘリウム中にインジウム、レニウムなどの母材金属を設置しレーザーアブレーションにより微粒子を生成し、永久磁石の同極を対向させて生成した四重極磁場中に捕捉する。トラップの中心部分に弱いレーザー光を照射し微粒子からの散乱光を望遠鏡レンズと CMOS カメラを用いた光学系で観察する。レーザー光 1 パルスでほぼ 1 つの微粒子が捕捉できる。また、微粒子の超伝導転移温度は、液体ヘリウムの温度を高めていき、微粒子がトラップから解放される温度から決定できる。こうしてトラップから解放された微粒子をトラップ下で回収し、クライオスタットから取り出した後に電子顕微鏡などにより形状や組成などを測定する。レーザーアブレーションの手法と温度制御により、微粒子径がサブ  $\mu\text{m}$  から数  $\mu\text{m}$  程度の大きさの微粒子を生成することが可能となっている。これらのデータと下に記述する、トラップしたまま行う光学的な測定により微粒子の物性を明らかにする。

トラップした超伝導インジウム微粒子にレーザー光を照射することにより微粒子を捕捉の平衡位置から移動させることが可能である。その後レーザー光を遮断することによりこの微粒子はトラップポテンシャル中で運動する。この運動には磁場と超流動ヘリウムから受ける力が作用しており、微粒子の超伝導物性や形状、大きさを反映している。そこで、微粒子の位置の時間発展を測定する手法を開発し、その測定を行った。

いくつかの大きさの異なる微粒子について 1.1 ~ 2.1 K の様々な超流動ヘリウム温度でこの運

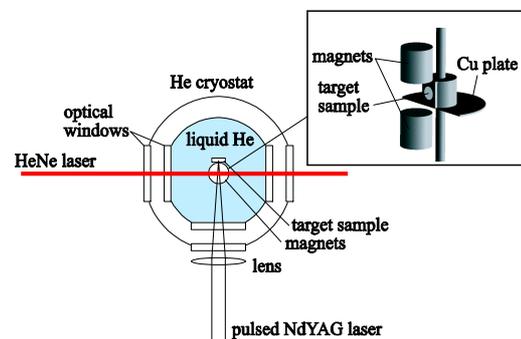


図 1 四重極磁場を用いた超伝導微粒子の閉じ込め実験装置



図 2 空間捕捉された In 微粒子の光学顕微鏡像

動の時間発展を実験的に測定し、その様子を球形反磁性微粒子を仮定したモデルにより解析した。超流動ヘリウムの粘性について既存のデータを用いて微粒子径が求められた。また、実験終了後に回収した微粒子を電子顕微鏡により観察しその形状や大きさを測定した。2つの測定値がほぼ一致する事から、モデルの妥当性が検証されたと考えている。この手法により、微粒子のサイズをその場で非接触に測定することが可能となった。またレーザー照射により微粒子に作用する力は、所謂光子の運動量に基づく光圧に比較して桁違いに大きく、レーザー光を微粒子が吸収することにより生じた熱による効果であると考えられる。この力に関しては、レーザー強度やレーザー波長との関係性などを調べている。この力を用いて超流動ヘリウム中の微粒子の運動を光により制御する技術へと発展できると考える。

マイクロメートルサイズの単一微粒子からの光散乱に関する研究を進めた。微粒子に照射するレーザー強度を高めると微粒子に力が作用しその位置が変位するため、散乱光測定のレーザー強度は微弱にする必要がある。その一方で、微粒子からの散乱光の強度はそのサイズにしたがって小さくなるため、散乱光強度分布の測定には光強度の積分時間が必要である。そのため、実験系の振動除去や光強度の角度分布を測定するための機械的回転系等を整備し、長時間にわたり微粒子からの散乱光を測定できるように実験系を組んだ。このような実験系を用いて、単一微粒子による複数波長のレーザー光の散乱実験を行った。

複数波長での散乱光強度角度分布の測定が可能となり、同一の単一インジウム微粒子について、4波長での散乱光測定を行った。そのうち長波長側の2つの波長については、既存のバルクでの光物性定数を用いて、ミー散乱により強度分布を説明でき、その結果、微粒子径を非接触な手法で決定できた。残りの2波長領域には既存の光物性定数がないが、今回測定した散乱光強度角度にミー散乱モデルをフィッティングすることにより、光物性定数を新たに決定することに成功した。このように、単一の微粒子からの散乱光強度測定により、新たに光物性定数を決定することが可能となった。

また、空間捕捉して光学的に測定した微粒子を回収して取り出し、電子顕微鏡による観察によってもその形状や大きさを調べることができる。光学的な微粒子の大きさの測定は、磁気トラップポテンシャル中での変位の自由減衰を測定する方法と、光散乱強度角度分布測定との2つの方法が実現できている。これらの光学的な測定方法と、電子顕微鏡による大きさ測定で初期的にはほぼよい一致と考えていたが、データの増加に伴い系統的なずれがあることが分かってきた。このずれは、測定温度の違いでは説明できない。3種類の大きさ測定はそれぞれ異なる原理を用いた測定であり、今後の検討課題である。

#### 4. 研究成果

超流動ヘリウム中で微粒子に作用する光による力は、我々の研究であきらかとなった現象であり、その機構を明らかにすること自体が重要である他、この方法を用いることにより、超流動ヘリウム中の物質の光学的な運動制御への応用や、逆に超流動ヘリウムの物性の測定、微粒子と超流動ヘリウムの相互作用などについての知見が得られる可能性がある。

超伝導体の光ミー散乱の実測データは我々の調べた範囲では存在しないため、初めての測定を可能にしたとの意義がある。単一の微粒子を長時間にわたり安定に空間捕捉することが可能であるため、今後様々な物質への展開することが可能である。インジウムとしての物性の特性に関しては、その他の超伝導物質に関しても研究を進めることにより明らかになるであろう。

本手法で生成されたレニウム微粒子の超伝導転移温度の大幅な上昇は、これまでの他の手法によるものに匹敵、あるいは上回っており、その機構を解明することは物理的に重要な今後の課題である。

さらにレーザーアブレーションにより微粒子を生成する本手法は様々な化合物についても適用可能であり、生成された物質の中で超伝導性を持つもののみが空間捕捉できることを利用して新奇な化合物の生成にも応用できると考える。

[1] Y. Takahashi et al. Appl. Phys. Express **10**, 022701 (2017).

[2] K. Yu. Arutyunov et al. Physics Report **464**, 1 (2008).

[3] S. Okamoto et al. Mat. Res. Soc. Proc. **1635**, 103 (2013).

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）

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Jun Naoi, Yuta Takahashi, Mitsutaka Kumakura, Masaaki Ashida, Fusakazu Matsushima, Yoshiki Moriwaki
2. 発表標題 Property of magnetic trapping of superconducting sub-micron particles
3. 学会等名 Optical Manipulation and Structured Materials Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 直井惇, 高宗雅人, 松島房和, 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VII
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 直井惇, 高宗雅人, 佐々木照太, 松島房和, 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VIII
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 2018年

1. 発表者名 直井惇, 高橋佑太, 松島房和, 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IV
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 直井惇, 高橋佑太, 高宗雅人, 中村吉成, 松島房和, 熊倉光孝A, 芦田昌明B, 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V
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 2017年

1. 発表者名 高宗雅人, 高橋佑太, 直井惇, 中村吉成, 松島房和, 熊倉光孝A, 芦田昌明B, 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VI
3. 学会等名 日本物理学会第73回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuta Takahashi, J. Naoi, K. Yamaguchi, Mitsutaka Kumakura, Masaaki Ashida, Fusakazu Matsushima, Yoshiki Moriwaki
2. 発表標題 Property of magnetic trapping of superconducting sub-micron particles
3. 学会等名 Optical Manipulation Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaaki Ashida, Yosuke Minowa, Mitsutaka Kumakura, Yuta Takahashi, Fusakazu Matsushima, Yoshiki Moriwaki
2. 発表標題 Fabrication of Superconducting Micro Particles by Laser Ablation in Superfluid Helium
3. 学会等名 CLEO (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高宗雅人, 佐々木照太, 熊倉光孝, 芦田昌明, 松島房和, 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
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019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X
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 2019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	松島 房和  (Matsushima Fusakazu)  (40142236)	富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授   (13201)	