

整理番号	H28-J-116	報告者氏名	蓑輪 陽介
------	-----------	-------	-------

研究課題名 微粒子の光による冷却

<代表研究者> 機関名： 大阪大学 職名： 助教 氏名：蓑輪 陽介

<共同研究者> 機関名： 職名： 氏名：  
機関名： 職名： 氏名：  
機関名： 職名： 氏名：  
機関名： 職名： 氏名：

<研究内容・成果等の要約>

ペルティエ素子に替わる、光を用いた新たな冷却手法として、アンチストークス発光過程に着目した光冷却現象について研究を行った。光冷却については、まだ効率が低く実用には至っていないのが現状である。さらなる効率向上のためには、詳細なメカニズムの解明やキーとなる因子の同定などが可能となる精密な実験が求められる。そこで本研究では特に、光による冷却の原理的限界の検証を目指し、真空下で熱の流入を抑制した状況での、微粒子の光冷却実験の実施に取り組んだ。そのために、光トラップという技術を用いて非接触に微粒子を真空中に捕捉することを狙った。さらに、実際に使用する微粒子の作製も行った。

まず、真空チャンバー中に光トラップ実験系の構築を行った。実験系設計にあたり、通常光トラップでよく用いられる対物レンズは、本研究に使用できないことが明らかとなったため、非球面レンズを採用した。その結果、実際に0.6 torr という低真空下で微粒子を光トラップさせることに成功した。この真空度では、十分に空気分子の密度が低く断熱効率が高いため、想定される光冷却の実験においては空気分子による熱の移動は無視できることがわかった。

次に、使用する微粒子材料の選定を行い、実際に微粒子作製を行った。材料としては、加工の容易さや光冷却効率の高さを元に半導体である硫化カドミウムを用いることとした。微粒子を光トラップ中へ導入しやすい手法としてレーザーアブレーションに着目し、微粒子作製に取り組んだ。実際に大気圧下でのレーザーアブレーションにより作製された微粒子を電子顕微鏡によって評価した結果、発光特性を保持した高品質微粒子が作製可能であることが明らかとなった。このようにして作製された硫化カドミウム微粒子を真空中で光トラップすることで、実際に精密な光冷却実験が可能であると期待される。

## &lt;研究発表（口頭、ポスター、誌上別）&gt;

## 口頭

1. Yosuke Minowa, Yuya Oguni, Masaaki Ashida,  
"Fabrication of semiconductor microspheres with laser ablation in superfluid helium,"  
The 4th Optical Manipulation Conference (OMC'17) (Yokohama), 19-21th April, 2017
2. Masaaki Ashida, Yosuke Minowa, Mitsutaka Kumakura, Yuta Takahashi, Fusakazu Matsushima, and Yoshiki Moriwaki,  
"Fabrication of Superconducting Micro Particles by Laser Ablation in Superfluid Helium,"  
CLEO 2017 (San Jose Convention Center, USA), 14-19th May, 2017

## ポスター

1. 微粒子の表面イオントラップ  
袁翰陽介, 芦田昌明,  
日本物理学会 2017 年秋季大会(岩手大学) 2017 年 9 月 21-24 日
2. 微粒子の光冷却に向けた光トラップ系の構築  
二階堂新也, 袁翰陽介, 芦田昌明,  
日本物理学会第 72 回年次大会(大阪大学豊中キャンパス)2017 年 3 月 17-20 日
3. 超流動ヘリウム中レーザーアブレーションによる微粒子作製とそのダイナミクス  
鈴木達朗, 袁翰陽介, 芦田昌明,  
日本物理学会第 72 回年次大会(大阪大学豊中キャンパス)2017 年 3 月 17-20 日
4. 超流動ヘリウム中でのレーザーアブレーションにより作製した微小球光共振器の光学特性と結晶性の評価  
小國友也, 袁翰陽介, 芦田昌明  
第 27 回光物性研究会(神戸大学) 2016 年 12 月 2-3 日

## 論文

1. Y. Minowa, Y. Toyota, and M. Ashida,  
"In situ tuning of whispering gallery modes of levitated silica microspheres,"  
Journal of the Optical Society of America B, **34**, 6, C20-C24 (2017).  
<https://www.osapublishing.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-34-6-C20>
2. Y. Minowa, Y. Oguni, and M. Ashida,  
"Inner structure of ZnO microspheres fabricated via laser ablation in superfluid helium,"  
Optics Express, **25**, 9, 10449-10455 (2017).

<研究の目的、経過、結果、考察（5000字程度、中間報告は2000字程度）>

## 研究の目的

通常、冷媒を用いた冷却が困難な状況ではペルティエ効果を用いた熱電素子ベースの冷却が行われることが多い。コンプレッサーなどの機械的可動部が必要ない、冷媒の漏洩の問題点を克服できる、などの利点のためである。しかし、ペルティエ素子自身の冷却が必要であるという大きな欠点をもつ。

そこで本研究では、ペルティエ素子に替わる、光を用いた新たな冷却手法・材料の研究・開発を行う。後述のように冷媒を用いない、かつ可動部がない手法であるとともに、光エネルギーという形で熱を取り去るため、材料自身の冷却が必要ない。また、光を通じて冷却することから、材料に直接給電する必要が無いため、給電の困難な状況・対象であっても冷却できるという利点をもつ。したがって、宇宙空間における機器の冷却など、極限環境下かつ安定稼働が求められる状況に対応できる。また、超伝導材料を用いた機器の小型化・軽量化などの応用も期待される。

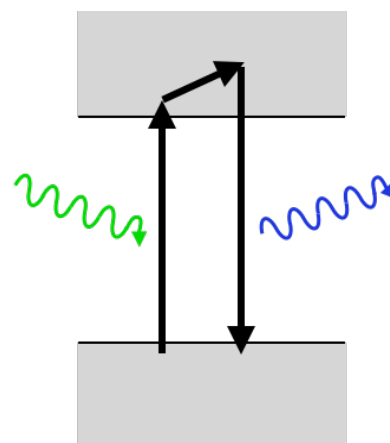
本研究では特に、光による冷却の原理的限界の検証・高効率化にとりくむ。すなわち、無駄な熱負荷を可能な限り取り除いた環境下で冷却能力を測定し、材料本来のもつ冷却特性を明らかにする。メカニズム・効率の検証を行うことで、冷却の高効率化の指針を探る。

本研究では、光を用いた冷却（以下、光冷却と呼ぶ）という機能を発現させる。励起光の光子エネルギーよりも発光の光子エネルギーが大きい過程（アンチストークス発光過程）を利用する機能である（図1）。本来、絶対零度ではこのような過程は存在し得ないのだが、有限の温度では結晶格子をなす原子の振動（フォノン）が存在するため、アンチストークス発光過程が許される。この過程を通じて、フォノンがエネルギーを失うため、対象物質の内部エネルギーが低下し、冷却される。この機能の発現のためには、対象物質の特徴として

- ✓ 発光効率が高いこと
  - ✓ 発光が、試料によって再吸収される可能性が低いこと
  - ✓ 非輻射発光過程が抑えられていること
- などが要求される。

一般に、高い発光効率と低い再吸収確率は両立しないことが多い。両者とも、光と物質の相互作用が強いことに起因するためである。しかし、微粒子という形状を利用することで、再吸収される前に発光が外部に出るという状況を作り出すことができる。

そこで、本研究では高発光効率微粒子をベースとして光冷却の機能発現を目指す。熱負荷を可能な限り排除することで、微粒子の温度を室温から低下させることを目標とする。



フォノンの消失による  
励起光と発光のエネルギー差  
を利用して内部温度を低減

図1：光による冷却の模式図

## 研究の経過と結果

本研究目的達成のためには、微粒子の光冷却を妨げる不要な熱負荷を極限まで抑制することが有効である。そこで、本研究では、光トラップの手法を利用することとした。光トラップとは光の運動量を利用して、微粒子を自由空間に補足する技術である（図2）。支持物なしに微粒子を固定することができるため、伝導による熱の流入が存在しない。さらに、チャンバ内を真空にすることで熱負荷を限りなく抑制することができる。このような環境から切り離された状態に準備された微粒子に対して、適切な波長の光を照射することで微粒子中の電子を励起する。その後、アンチストークス発光過程を経て、微粒子が冷却される。

従って、本研究ではまず、光冷却に適切な材料選定、真空中での光トラップが可能となる実験系の構築と、高品質微粒子の作製にとりくんだ。

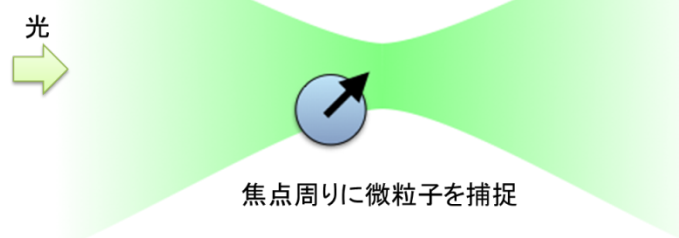


図2：光トラップによる微粒子浮遊の模式図。

前述のように光冷却機能の発現のためには、高い発光効率などいくつかの特性が要求される。そのため、これまでに実際に光冷却が報告されている材料は限られている。先行研究において、バルクとして光冷却が報告されている物質の中から、耐性に優れ、作製が比較的容易である硫化カドミウムを材料として選定した。硫化カドミウムは、発光材料としても優れており様々な応用研究がなされている対象である。

材料の硫化カドミウムは半導体試料であるため、光トラップに用いる光源としてバンドギャップエネルギーを超えない光子エネルギーのものを利用する必要がある。バンドギャップエネルギーを超える光子エネルギーを持つ光源を使用した場合、強い光吸収が生じ、光冷却を阻害するだけでなく、試料劣化の可能性が生じるためである。本研究ではさらに2光子吸収過程の抑制も念頭に入れた。本試料のバンドギャップエネルギーはおおよそ 2.42 eV であるため、波長 1.5  $\mu\text{m}$  のファイバーレーザー（光子エネルギーはおおよそ 0.8 eV）を利用することとした。

微粒子を光トラップし光冷却を行った後、特性評価を行うには微粒子からの発光を測定・解析する必要がある。そのため本研究では、図3のように光トラップと発光測定系を結合した実験系の構築を目指した。実験系の検討を行ったところ、この実験系において、発光検出の光路の確保のために、光トラップ用のレンズとして作動距離の長いものが必要があることがわかった。そこで、長作動距離かつ、高いNAを持つレンズとして成形非球面レンズを用いることとした。通常の光トラップでは、顕微鏡用対物レンズを用いることが多いが、作動距離が短くなるため、本研究では用いない。

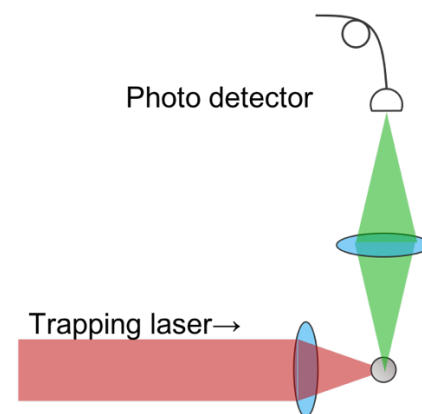


図2：光トラップ実験系と光検出系の結合。

実際に真空チャンバー中に光トラップ実験系を構築し、低真空中での光トラップの実証実験を行った。光冷却の実験のためには、光トラップを行う環境が高い断熱効率を持つ必要がある。予想される冷却パワーを考えると、数十 torr まで減圧すれば十分であることがわかった。そこで、真空下での光トラップの実証のために直径 100 nm の球形状のシリカを試料として、実験を行った。図 3 に、実際に 0.6 torr でシリカの微粒子の光トラップに成功した様子を示す。微粒子の可視化のために、トラップレーザーと同軸に HeNe レーザーを導入した。この可視化レーザーの散乱光によって生じる輝点から、たしかにシリカ微粒子がトラップされていることがわかった。

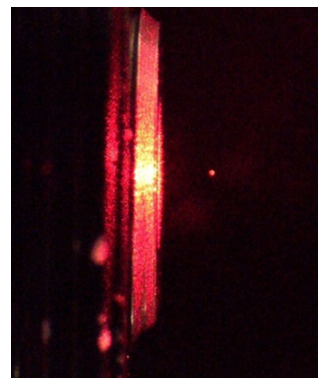


図 3：シリカ微粒子の光トラップの様子。画像右の輝点がトラップされたシリカ微粒子に対応。

次に、高品質微粒子の作製に取り組んだ。微粒子作製の手法として、レーザーアブレーション法に着目した。この手法では、光トラップするその場で微粒子作製を行えるという大きな利点がある。代表研究者はこれまでに、レーザーアブレーションにより種々の微粒子を作製することに成功している。これまでの研究では、主に超流動ヘリウムという極限環境で実験を行ってきたが、本研究では大気圧化でのレーザーアブレーションによる微粒子作製を行った。高純度単結晶硫化カドミウム基板をターゲットとして用意しナノ秒レーザーを照射、微粒子を作製した後、微粒子の特性を評価した。図 4 に微粒子の走査電子顕微鏡像を示す。サブマイクロメートル程度の微粒子が実際に作製されていることがわかった。この作製された微粒子からの電子線励起蛍光スペクトルを図 5 に示す。おおよそ 520 nm 付近を中心とする発光ピークが観測された。これは硫化カドミウムのバンド間遷移に対応する波長であり、大気中のレーザーアブレーションにより、発光特性を保持した高品質微粒子作製が可能であることが示された。

### 考察と展望

本研究により、実際に真空下での微粒子の光トラップが可能であることが示された。また、レーザーアブレーションにより、その場で高品質微粒子が作製できることも実証された。この 2 つの技術を組み合わせることで、光トラップされた微粒子の光冷却の実証とさらなる研究が実現可能であると考えられる。

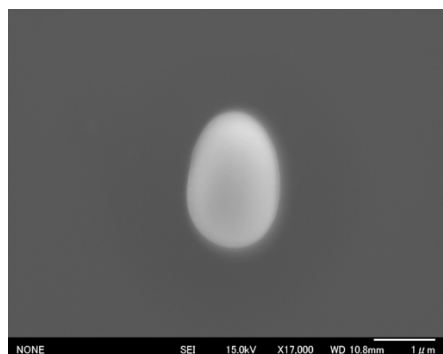


図 4：レーザーアブレーションによって作製された微粒子の電子顕微鏡写真

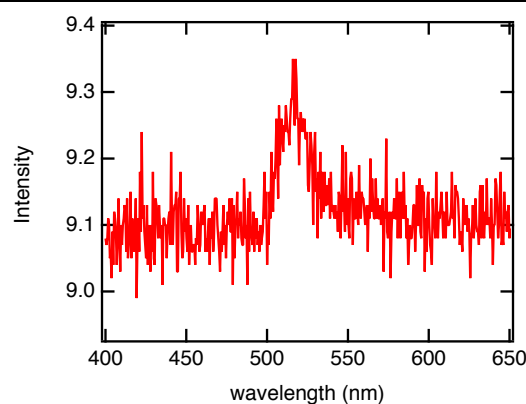


図 5：図 4 の微粒子からの電子線励起蛍光スペクトル。