

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2022

課題番号：18KK0387

研究課題名（和文）ハイブリッドトラップされた微粒子の光冷却

研究課題名（英文）Optical cooling of nanoparticles in hybrid trap

研究代表者

衰輪 陽介（Minowa, Yosuke）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：50609691

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,400,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：光や電場などを用いて、真空中に捕捉され浮遊した状態にある微粒子に基づくシステムは、支持物のない理想的な機械振動子の一つとして注目されている。このような浮遊した微粒子を対象として、その重心運動を測定し、その測定結果をフィードバックすることで、運動を制御する事が可能となる。本研究では、汎用かつシンプルな新たな運動の測定手法を提案・実証した。さらにこの測定手法を用いることで、重心運動の冷却が実際に可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界的に立ち上がりつつある、真空中の浮遊微粒子システムにおいて、トラップするための手法によらずに適用可能な、重心運動測定技術を提案した。この測定技術はシンプルでありながら、リアルタイム性が確保されており、実際に重心運動の冷却にも利用可能である。また、この手法はCMOSカメラによる画像取得とマイクロコントローラによる画像解析に基づくものであり、顕微鏡システムなど、別の技術への応用も可能であると期待される。

研究成果の概要（英文）：Systems based on nano/microparticles trapped and levitated in a vacuum using light or electric fields are attracting attention as one of the ideal mechanical oscillators without clamping. By targeting such levitated systems, it is possible to control their motion by measuring the motion of their center of mass and providing feedback based on the measurement results. In this study, we proposed and demonstrated a new, versatile, and simple method for measuring the center-of-mass motion. Furthermore, we showed that it is actually possible to cool the center-of-mass motion using the proposed measurement method.

研究分野：光物理・量子エレクトロニクス

キーワード：ナノ粒子 浮揚オプトメカニクス フィードバック冷却

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

機械的な振動子の運動を観測し、制御することは、力や加速度の精密な検出を可能とする最も基本的な手法の一つである。最近では、振動を量子力学的基底状態まで冷却し、機械的な運動の量子状態を作る・操る研究も進んできている。一方で、一般的な機械振動子システムにおいては、振動子を支持する構造を通じたエネルギー散逸が必ず存在する。そこで、支持物のない浮遊した微粒子の真空中での重心運動に着目した研究が世界的に立ち上がりつつある。従来、最も使われてきた手法は、光の運動量を用いて微粒子を捕捉する光トラップと、交流電場を用いて帯電微粒子を捕捉する Paul トラップの 2 つである。両者は、微粒子の感じるポテンシャル形状の観点から、対照的な関係にあり、光トラップは急峻で狭いポテンシャルを、Paul トラップは緩やかで深いポテンシャルを作る。また、通常の光トラップでは高強度のレーザー光を用いるため、対象の微粒子を損傷してしまう恐れもある。そこで、これら 2 つの手法を相補的に用いることができるのではないかとこの本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、光トラップと Paul トラップという 2 つの手法を相補的に組み合わせたハイブリッドトラップという手法でナノメートル・マイクロメートルサイズの微粒子を真空中に浮遊・捕捉することを目指す。さらに、どちらのトラップ手法にも適用可能な微粒子の重心運動の測定手法を提案・確立し、重心運動の制御・冷却を目指す。

3. 研究の方法

英国ユニバーシティ・カレッジ・ロンドンの Peter Barker 教授のもとで滞在研究を行い、その実施成果を日本に導入・発展させる形で研究を行った。現地での Peter Barker 教授との議論を踏まえ、本研究を以下の 3 つのプロジェクトに分割し、最後に統合するという方向で進めることとした。(1).ナノメートルあるいはマイクロメートルサイズの微小球を、光によって捕捉・浮遊させるための実験系の構築。(2).帯電したナノメートルあるいはマイクロメートルサイズの微小球を、直流・交流電場によって捕捉・浮遊させるための実験系の構築。(3). 捕捉・浮遊した状態のナノメートルあるいはマイクロメートルサイズの微小球の重心運動状態を測定するための実験系の構築。

(1). 光トラップ実験系の構築

主に英国滞在中に実験を行う。光トラップに必要なレーザー光源の作製を行い、動作・性能を評価する。回折格子を用いた外部共振器を構築し、波長可変レーザー光源とする。この自作光源と増幅器を用いた垂直型の光トラップ実験系の構築を行う。すなわち、重力に抗する向きに光を照射し、重力と光圧をバランスさせる。

(2). Paul トラップ実験系の構築

英国滞在中の実験・議論をベースとして、その後もリモートで議論を行いつつ、主に大阪大学で実験を行う。ナノメートルサイズの微小球を帯電させるための手法を確立し、帯電したナノメートルサイズの微小球を、真空中チャンバー中に設置した 4 本のロッド電極によって捕捉・浮遊させる (図 1)。

(3). 浮遊した微小球の運動状態測定

光トラップにも Paul トラップにも適用可能な汎用的な微粒子の運動状態測定手法を実証する。特に、リアルタイムに浮遊した微小球の位置を測定するための手法に、CMOS カメラとマイクロコントローラを組み合わせた手法を提案・実証する。

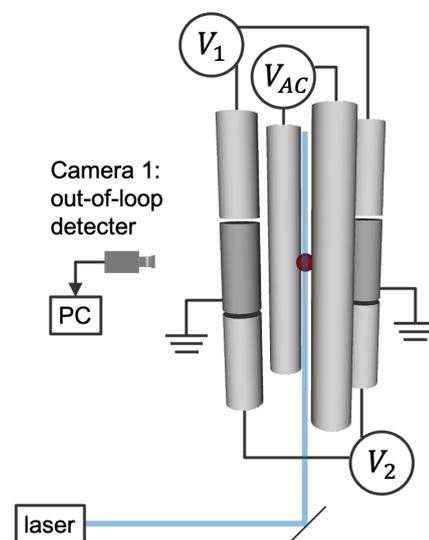


図 1 : Paul トラップ実験系の概要。

4. 研究成果

当初計画していた研究項目(1)-(3)について、以下に詳述するように一定の成果を上げることができた。最終的な実験系の統合までは至らなかったものの、研究の過程で、項目(3)で実証した手法が重心運動の冷却にそのまま利用可能であることが明らかとなった。そこで、実際に Paul トラップ中に浮遊したシリカナノ微小球を対象とした重心運動の冷却に取り組んだ(研究項目(4)として記述)。

(1). 光トラップ実験系の構築

外部共振器型半導体レーザーを作製し、その性能を評価した。図2にレーザーダイオード電流と、レーザー出力の対応を、図3に波長安定性の測定結果を示す。室温が安定している状況下では、100 mW をこえる出力かつ、モードホップのない動作が可能であることが示された。この自作レーザーと増幅器を組み合わせることで、光トラップに十分な強度かつ安定性をもつ光源を用意することができた。この光源を用いることで、実際に重力と光圧をバランスさせる光トラップ系を構築した。結果として、サイズ $20\ \mu\text{m}$ のシリカマイクロ球を光によって安定的に捕捉可能であることを実証した。

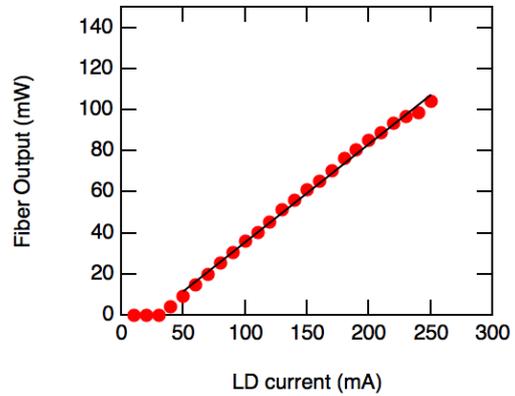


図2：自作レーザーの電流出力曲線。

(2). Paul トラップ実験系の構築

シリカのナノ微小球を帯電させるための手法として、エレクトロスプレー法を実装した。ナノ微小球を含んだ液体に高電圧を印加しつつ、噴霧する手法である。蒸発とクーロン反発の効果により、最終的に帯電したナノ微小球を Paul トラップ内に導入することが出来る。ロッド型電極を用いた Paul トラップ(図1)を構築し、エレクトロスプレーと組み合わせたところ、大気圧下で帯電したナノ微小球を捕捉することに成功した。さらにこの状態から真空チャンバーを排気することで、真空下でも捕捉が可能であることを実証した。

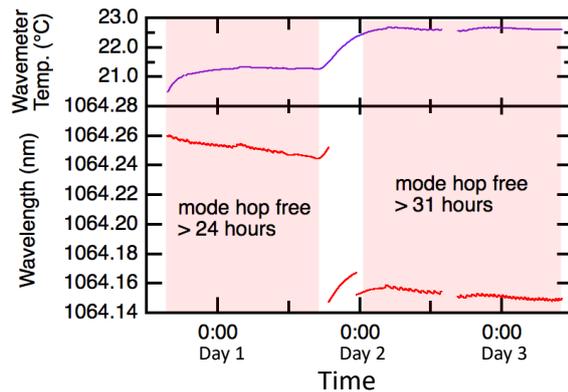


図3：自作レーザーの波長安定性の評価。

(3). 浮遊した微小球の運動状態測定

真空中に浮遊したナノ微小球の位置をリアルタイムに測定するために、超解像技術の一種である局在化法に基づく手法を実装した。通常、光の回折限界よりも小さな微粒子を結像すると、像は実際の大きさ以上に広がってしまう。そこで、この広がった像から実際の微粒子の位置を決定する必要がある。通常、この位置の決定には2次元ガウス関数を用いたフィッティングを用いる。しかし、フィッティングに基づく方法は遅く、かつ計算時間は事前に予測できない、すなわちリアルタイム性にかけるという欠点を持つ。そこで、本研究では画像の「明るさの重心」を求める Centroid 法を実装した。その結果、高速かつリアルタイム性の保証された計算アルゴリズムに基づい

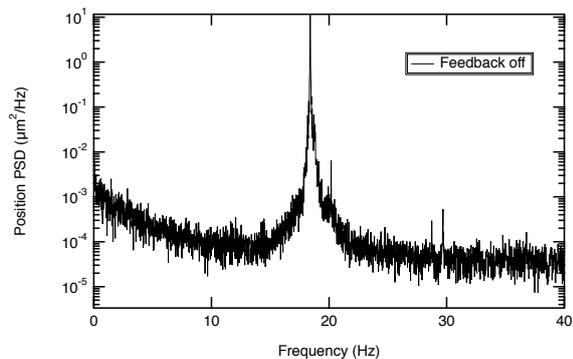


図4：Paul トラップ中の微粒子の位置のパワースペクトル密度の一例。 10^{-4}mbar の真空中。

て、ガウス関数のフィッティングによる手法と同等の SN 比で、微粒子の位置を決定することに成功した。位置座標の時間変化をもとに求めた微粒子位置（トラップ軸に平行な方向の位置）のパワースペクトル密度の典型的な結果を図 4 に示す。

(4). 浮遊した微粒子の重心運動のコールドダンピング

Paul トラップを用いて真空中に捕捉したシリカナノ微粒子について、前項の手法に基づいて位置を測定した後に、位相を 90 度ずらすことで、微粒子の速度に比例した信号を得る（図 5）。この速度に比例した信号を Paul トラップのキャップ電極にフィードバックし印加することで実効的なダンピングを与え、重心運動（トラップ軸に平行な方向の運動）を冷却することが出来る。実際に、フィードバックによって冷却した際の典型的なパワースペクトル密度を図 6 に示す。フィードバックが無い場合に比べて、4 桁程度、温度を下げる事ができたことがわかる。

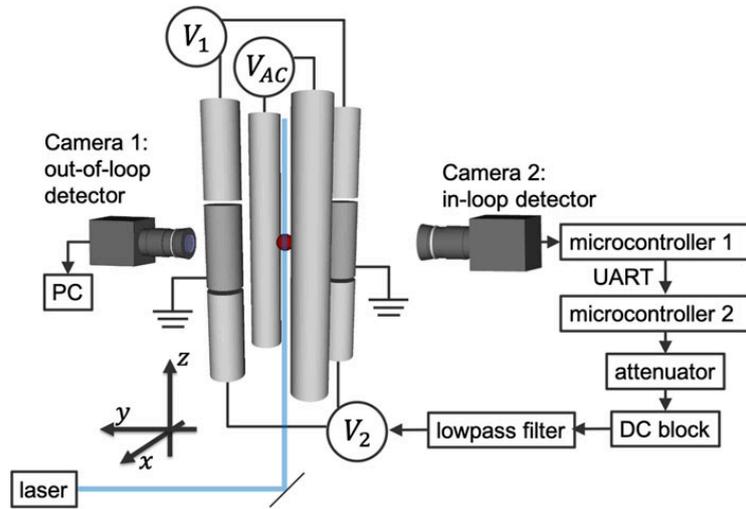


図 5：コールドダンピングによる重心運動冷却実験系の概要[1]。

冷却によって到達した温度の絶対値を評価するには、温度の校正が必要となる。そこで、真空度を変えながら冷却の実験を行った。その結果を図 7 にまとめる。真空度が高い場合には、フィードバック冷却の効果がはっきりと現れているが、真空度が低い極限ではフィードバックの有無による違いがなくなり、一定の温度に漸近することがわかる。これは、真空度が低い極限では、浮遊微粒子のまわりに空気分子が密に存在するため、衝突を通じて、空気分子の重心運動と微粒子の重心運動が平衡状態に近づくためである。そこで、この漸近する温度を室温と等しいとすることで、温度の校正を行った。この結果、 10^{-4} mbar におけるコールドダンピングによって数ケルビンまで温度を下げる事ができたことが明らかとなった。図 7 を見ると、フィードバックがない場合には、高真空においてむしろ温度が上がってしまっていることから、意図しない原因によって運動が加熱されていることがわかる。これは、例えば、冷却している方向とは垂直な向きの運動とのクロストークや、印加する交流電圧に起因するマイクロモーションとの結合、実験系全体の振動などの可能性が考えられる。これらの要因を取り除くことができれば、より低温への冷却が期待される。

以上のように、当初計画とは異なるものの、真空中に浮遊したナノ微粒子について、Paul トラップにも光トラップにも適用可能な簡便な位置測定手法を提案し、実証することができた。また、この手法に基づいてコールドダンピングを実装することで、実際に重心運動の冷却が可能で

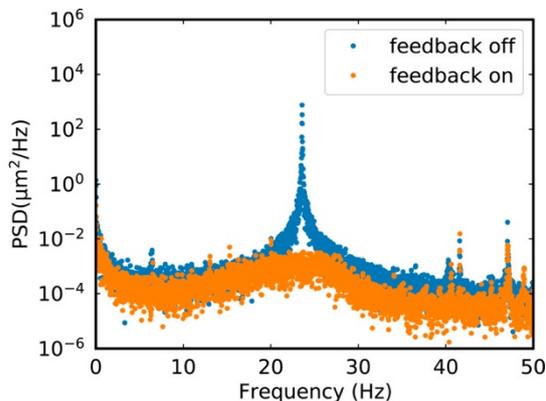


図 6：フィードバック冷却による重心運動の冷却時のパワースペクトル密度の典型例[1]。

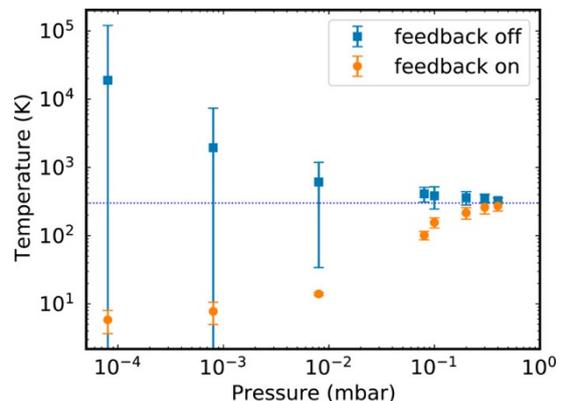


図 7：冷却による到達温度の真空度依存性[1]。

あることを示すことができた。現状では、まだ冷却によって到達した温度には限界があるものの、加熱につながると思われる要因を取り除くことで、さらなる低温の達成が期待できる。これらの発展的研究について、本研究の共同研究者である **Peter Barker** 教授と国際共同研究を継続中である。また、本研究の過程で判明した新たな研究の方向性についても、**Peter Barker** 教授を含む共同研究体制で研究を進める予定である。

[1] Y. Minowa, K. Kato, S. Ueno, T. W. Penny, A. Pontin, M. Ashida, P. F. Barker, “Imaging based feedback cooling of a levitated nanoparticle,” *Review of Scientific Instruments* 93, 075109 (2022). <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0 095614>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Minowa Yosuke, Geng Xi, Kokado Keisuke, Sato Kentaro, Kameyama Tatsuya, Torimoto Tsukasa, Ashida Masaaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Optical trapping of nanoparticles in superfluid helium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 139 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTICA.447557	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Minowa Y., Kato K., Ueno S., Penny T. W., Pontin A., Ashida M., Barker P. F.	4. 巻 93
2. 論文標題 Imaging-based feedback cooling of a levitated nanoparticle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 075109 ~ 075109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0095614	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Minowa Yosuke, Aoyagi Shota, Inui Sosuke, Nakagawa Tomo, Asaka Gamu, Tsubota Makoto, Ashida Masaaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Visualization of quantized vortex reconnection enabled by laser ablation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabn1143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abn1143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 加藤慶祐, 袁輪陽介, Peter Barker 芦田昌明
2. 発表標題 Paulトラップ中に浮遊した帯電ナノ粒子のフィードバック冷却
3. 学会等名 第32回光物性研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤慶祐, 袁輪陽介, Peter Barker, 芦田昌明
2. 発表標題 イオントラップされたナノ微粒子の冷却に向けたリアルタイム画像処理
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 Yosuke Minowa
2. 発表標題 Feedback cooling and cryogenic optical trapping
3. 学会等名 1st Levinet conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosuke Minowa
2. 発表標題 Cryogenic optical tweezers and more
3. 学会等名 Macroscopic Quantum Machines (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江口晃平, 袁輪陽介, 芦田昌明
2. 発表標題 真空下でPaulトラップにより捕捉されたシリカマイクロ微小球の運動解析
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾松浩太郎, 蓑輪陽介, 芦田昌明
2. 発表標題 孤立したSiO ₂ マイクロ微小球の光学的・弾性的性質の評価
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	パーカー ピーター (Barker Peter)	ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン・Department of Physics and Astronomy・Professor	

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		
英国	ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン		