

研究終了報告書

「光トラップ技術による量子流体力学の開拓」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：蓑輪 陽介

1. 研究のねらい

本研究では本研究者がこれまでに培ってきた光トラップ(光ピンセット)技術を、発展・改良した上で、超流動ヘリウム4中の量子渦という光トラップと全く関わりのなかった対象へと展開することを狙う。光は運動量を持つため、屈折や散乱・吸収を通じて、照射対象に力が加わることが知られている。例えば、マイクロメートルサイズの微粒子に急峻に集束したレーザー光を照射することで、微粒子を光の焦点付近に固定することが出来る。これが光トラップ技術である。これまで光トラップは、ほとんどが常温の水溶液中で行われてきており、極低温中での実験例はない。

この光トラップ技術を武器に、量子流体中の渦である量子渦の研究を、全く新しい視点から開拓する。生成消滅を自発的に繰り返す古典的な渦とは異なり、超流動ヘリウムや冷却原子気体のような量子流体中の渦は、非常に安定な構造であり、流れの循環の基本単位とみなせることが知られている。これは、渦を特徴づける循環が量子化されることに基づく。さらにエネルギーについての議論から、量子数2以上の渦は不安定であることがわかっている。そのため、実際の実験系では、基底状態の量子渦のみが存在する。このように量子渦を基本単位とした量子乱流の理解は、古典的な場合に比べて見通しが非常によく、要素還元的な扱いが可能となる。そのため、量子渦・量子乱流を中心に据えた量子流体力学を研究することによって、古典的な場合も含めた普遍的な乱流の科学が飛躍的に進むのではないかと期待されている。

先行研究では、量子流体の渦芯に固体水素微粒子群が捕捉され、渦芯と微粒子群が一体となって運動することが報告されている。そこで、このような微粒子の1つを光トラップによって捕捉することで、微粒子群と共に運動する量子渦を捕捉することを狙う。光トラップによって自由自在に量子渦を操作するとともに、量子渦に摂動を加え、その性質の解明に取り組む。例えば、渦芯の機械的な振動であるケルビン波の励起など、従来不可能であった研究の実現を狙う。

2. 研究成果

(1) 概要

研究テーマⅠ「極低温光トラップの確立」

世界で初めて、極低温の超流動ヘリウム中で微粒子の光トラップを実証した(主な研究成果5-(1)-1)。超流動ヘリウム中でのレーザーアブレーションによって作製した微粒子のうち一つを、急峻に集束する光ビームによって安定的に捕捉した。散乱光強度から、捕捉された微粒子のサイズは数十nmであることがわかった。

研究テーマⅡ「最適な微粒子作製・導入手法の開発」

ナノ秒レーザー光パルスによるレーザーアブレーションを用いた微粒子の導入と、その微粒子を用いた量子渦の可視化について、最適な実験条件を探索した。その結果、単結晶半導体シ

リコンをレーザーアブレーションすることで、適切なサイズの大量のシリコン微粒子を作製・導入可能であることがわかった。このシリコン微粒子群によって、数 mm 以上の長さへ渡って量子渦の可視化に成功した。さらに、この可視化された量子渦の運動を追跡することで、量子渦特有の再結合現象の観察に成功した (主な研究成果 5-(1)-2)。

研究テーマ III「冷凍機を用いた超流動 He 研究に向けた装置開発」

極低温装置開発・販売を行うロックゲート株式会社、および極低温実験の専門家である高知大学の西岡孝教授とともに、比較的安価な GM(Gifford-McMahon)冷凍機を用いた、光学実験可能な 1 K クライオスタットの開発を目指し、共同研究を開始した。当初計画には含まれていなかったものの、より効率的な超流動ヘリウム実験の実現を目指して、産学連携共同研究に取り組むこととした。現時点では、まだ開発途上段階にあるが、完成すれば希少資源であるヘリウムの使用量を最小限まで抑えた上で、1 K での光学実験が可能となる。

(2) 詳細

研究テーマ I「極低温光トラップの確立」

これまで、光トラップは常温の水溶液中で行われることがほとんどであった。これは、光トラップに急峻に集束した光が必要なためである。集束光を用意するために、通常は開口数の大きな顕微鏡用対物レンズを用いる。しかし、顕微鏡用対物レンズを極低温環境で使用することは困難である。そこで、本研究では、

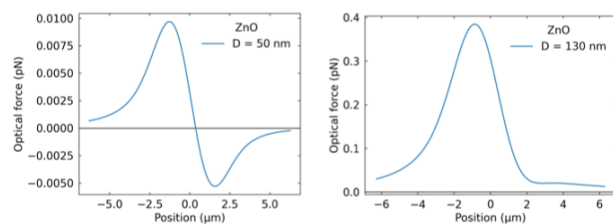


図 1：酸化亜鉛微粒子に働く輻射力の計算。微粒子が光軸上に存在する際に受ける、光軸方向の力。直径 50 nm の粒子 (左) と直径 130 nm の粒子 (右) についての計算。(主な研究成果 5-(1)-1 より)

は、一体成型非球面レンズを利用した。一体成型非球面レンズは、顕微鏡用対物レンズに比べれば、開口数は劣るものの、極低温下でもそのまま使用することができる。また、低い開口数による問題は、極低温による微粒子の運動エネルギーの小ささが補ってくれると期待される。実際に、酸化亜鉛微粒子が光軸方向にうける輻射力を計算したのが図 1 である。微粒子のサイズが小さい場合(左)には、輻射力の符号が正から負に入れ替わる点が存在することがわかる。したがって、微粒子はこの点に安定的に捕捉されると期待される。微粒子のサイズが大きくなる(右)と、輻射力のうち微粒子を押してしまう散乱力の寄与が大きくなるため、安定に捕捉される点は存在しなくなる。様々なサイズの微粒子について同様の計算を行い、輻射力を光軸方向に積分することで、有効ポテンシャルを求めた結果を図2に示す。図2(右)に、慣習的に光トラップの安定性の目安とされる、熱運動エネルギーの 10 倍の値を横実線で示す。一般にこの線よりも有効ポテンシャルが深い場合には、安定的な光トラップが期待される。すなわち、極低温では数十 nm のサイズの微粒子を光トラップ可能であると予想される。

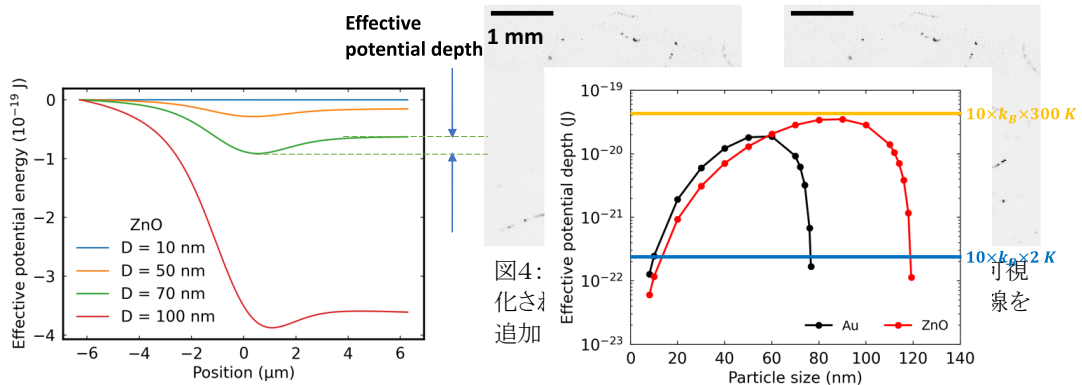


図2：微粒子の感じる有効ポテンシャル。有効ポテンシャル深さの定義（左）と、酸化亜鉛微粒子および金微粒子について、有効ポテンシャル深さのサイズ依存性を計算（右）。（主な研究成果 5-(1)-1 より）

実際に、超流動ヘリウム中でナノ秒レーザー照射によるレーザーアブレーションを行い大量の酸化亜鉛微粒子を散布し、光トラップの実験を行った。その典型的な結果を図3に示す。光トラップ用のレーザー光が強く散乱されるために、捕捉された酸化亜鉛微粒子が輝点として

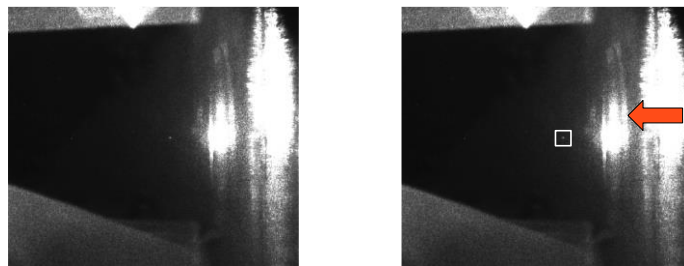


図3：超流動ヘリウム中における微粒子の光トラップの様子（左）。明瞭化のため、光路の模式図を追加（右）。（主な研究成果 5-(1)-1 より）

観察される。この散乱の強さを、ミー散乱理論と比較することで、捕捉された微粒子のサイズは数十 nm ほどと、予測と一致することがわかった。

研究テーマⅡ「最適な微粒子作製・導入手法の開発」

光トラップの安定性は、微粒子の分極率に比例する。したがって、従来量子渦の可視化に用いられてきた固体水素微粒子は、光トラップに適しておらず、前述の酸化亜鉛のような屈折率の高い材料が適している。ところが、酸化亜鉛のレーザーアブレーションによって微粒子導入をした際には、量子渦の可視化が効率的に行われず、酸化亜鉛微粒子と量子渦が一体となって運動するのかわからない結果となった。この原因として、単に微粒子の数が不足しているために量子渦の可視化が同定しにくいのか、あるいは微粒子の密度やサイズの問題で、微粒子が量子渦の渦芯に捕捉されないのか、どちらの可能性もありえる。いずれにせよ酸化亜鉛以外の、大きな分極率をもつ材料で量子渦の可視化が可能であることを実証する必要があった。

そこで、我々は金属や半導体など複数の材料について、超流動ヘリウム中のレーザーアブレーションを行い、微粒子による量子渦の可視化について検証を行った。特に、レーザーアブレーション時に別の物質に変化してしまう可能性を排除するために、単体物質を対象とした。様々な材料を試す過程で、半導体シリコンをレーザーアブレーションした際に、複数の量子渦が数 mm に渡って可視化されることがわかった。アブレーションの条件などを最適化した結果得られた、典型的な可視化の様子を図4に示す。さらに、個々の量子渦だけでなく、2本の量子渦

が交差し繋ぎ変えが起きる量子渦の再結合現象の観察にも成功した(図5)。この再結合のダイナミクスの解析を、量子流体研究の世界的権威である大阪公立大学の坪田誠教授のグループと連携して実施し、理論予測と一致することを示した。

研究テーマⅢ「冷凍機を用いた超流動 He 研究に向けた装置開発」

ヘリウムは希少資源であり、世界情勢などの影響を受けて入手が難しくなる場合がある。今後の継続的かつ効率的な研究を意図し、超流動ヘリウム実験が可能な冷凍機ベースのクライオスタットの開発を開始した。これは極低温装置を開発・販売する株式会社ロックゲートと、極低温実験を専門とする高知大学の西岡孝教授との共同研究である。西岡教授はすでに、GM 冷凍機をベースとして、窓がないクライオスタットを開発し、省ヘリウムでの 1 K 実験を実証している。

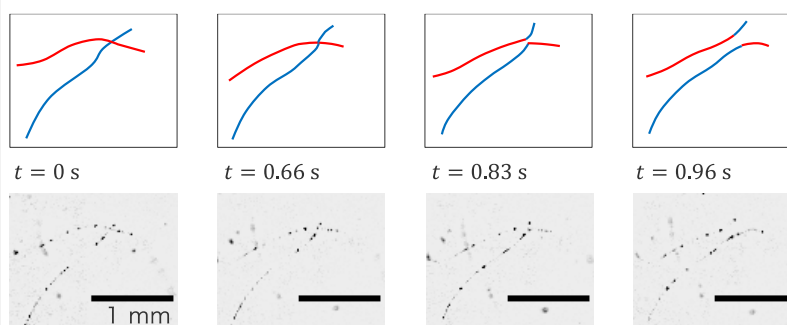


図5：可視化された量子渦の再結合。再結合した2本の量子渦は、急速に互いに離れていく。(主な研究成果 5-(1)-2 より)

我々は現在、光学実験が可能となる窓を持ち、超流動ヘリウム実験も可能であるような 1 K で安定に動作するクライオスタット装置の開発に取り組んでいる。1 K 領域での光学実験の需要は非常に大きい。

3. 今後の展開

現在、量子渦の光トラップの実現に向けて、極低温中で動作可能な直動ステージを実験系に組み込み・統合を設計中である。この統合が実現すれば、超流動ヘリウム中の一部の体積(量子渦を複数含む)を箱の中に閉じ込めた上で3次元的に自由に動かすことが可能となる。つまり、量子渦を任意の場所に運ぶことができる。量子渦を光トラップの焦点に動かすことで、量子渦の光トラップを実現し、光トラップによってケルビン波を励起するという当初目標の一つを達成する。

光トラップに限らず、光技術を用いた量子流体研究には大きな可能性が広がっている。今後も、量子流体の研究者、光科学の研究者の間をつなぎ、新たな量子流体研究の展開を切り開く。

あり得る社会実装への展開シナリオ

量子流体・量子渦の研究そのものは基礎研究に属し、その成果が社会に実装されるには数十年から百年のタイムスケールが必要である。渦は乱流の構成要素であり、量子渦の性質を明らかにすることは、量子流体に限らない、普遍的な乱流の理解につながる。乱流は自動運転のアルゴリズムから、パイプラインの設計、大気の大気ダイナミクス予測、核融合プラズマの制御まで、産業上重要な研究対象である。本研究を通じて、渦・乱流の本質の理解に迫り、広くインパクトを与えることができればと考えている。

4. 自己評価

(1) 当初、目標として掲げた「光を用いた量子渦への摂動印加、ケルビン波など量子渦の励起状態の生成」について、完遂することはできなかったが、この目標実現のために必要な要素である

- 極低温中での微粒子の光トラップの実現
- 光トラップ可能な微粒子材料を用いた量子渦の可視化
- 量子渦を光トラップの焦点まで輸送するための手法開発

に全て成功しており、今後、目的の達成は十分可能と考えている。新型コロナウイルス感染症のパンデミックなど不測の事態を乗り越えて、目標達成に肉薄するところまで到達できたと評価している。また量子渦の再結合を明確に可視化できた点は想定以上の成果であった。

(2) 研究を進める上で、領域内の研究者のアドバイスをもとに研究が大きく進展する機会を持つことができた。また、領域外の研究者である量子流体の理論的大家の坪田誠教授と共同研究をスタートさせることができ、研究推進を加速することができた。総括裁量経費によって購入できたナノ秒レーザーについては、高繰り返しという特徴を活かすことで、意図通りに大量の微粒子導入、より効率的な量子渦の可視化につなげることができた。これら与えていただいたチャンス・予算を有効活用し、研究推進に役立てることができたと考えている。

(3) 本研究そのものは基礎研究的目標を掲げており、乱流の理解を通じて、産業界を含む社会全体に幅広いインパクトを与えることができると考えている。また、当初計画にはなかったが、冷凍機を利用した省ヘリウム 1 K 実験装置開発の共同研究もスタートさせた。この点は、より直接的な社会・経済への波及効果が期待できる。

さきがけ研究実施中に、2 つの総説の執筆依頼を受けた(主な研究成果 5-(3)-5 および 6)。1 つは日本物理学会誌から、もう 1 つは日本流体力学会の学会誌からであり、さきがけ研究による成果が、物理学の観点からも流体力学の観点からも、興味を持っていただいている結果であると認識している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:4件

1. Y. Minowa, X. Geng, K. Kokado, K. Sato, T. Kameyama, T. Torimoto, M. Ashida., Optical trapping of nanoparticles in superfluid helium. *Optica*. 2022, 9, 139-144.

世界で初めて超流動ヘリウム中での微粒子の光トラップが可能であることを実証した。本さきがけ研究目標達成の基盤となる技術を実装した研究報告である。超流動ヘリウム中でのナノ秒レーザー光パルスの照射により固体微粒子を作製・分散させることに成功した。この作製・分散させた微粒子の一つを、集光ビームによって安定的に捕捉した。光散乱の強度測定により、捕捉された微粒子は数十 nm のサイズであることがわかった。

2. Y. Minowa, S. Aoyagi, S. Inui, T. Nakagawa, G. Asaka, M. Tsubota, M. Ashida. Visualization of quantized vortex reconnection enabled by laser ablation. *Science Advances*. 2022, 8, eabn1143.

半導体シリコン微粒子を用いて、超流動ヘリウム中の量子渦が可視化できることを実験的に示した。従来用いられてきた固体水素微粒子に比較して、1桁大きな分極率を持つため、安定な光トラップが可能であると期待できる。すなわち、光トラップが可能であるような微粒子が量子渦と一体となって運動することを実証した。また、量子渦の再結合現象の観測にも成功した。再結合のダイナミクスは次元解析・数値シミュレーションによる予測と一致した。

3. 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. 2022. 93, 075109.

CMOS 撮像素子を用いて、真空中に浮揚したナノ微粒子の運動を高速に撮影し、運動を解析、フィードバックし、運動制御することに成功した。超流動ヘリウム中でも適用可能な、微粒子の運動を測定するための汎用的な手法を開発するとともに、その手法をマイクロコントローラに実装した。マイクロコントローラによって保証されるリアルタイムかつ高速な画像解析の実証に成功した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数:0 件(特許公開前のもも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

1. Y. Minowa,
"Feedback cooling and cryogenic optical trapping,"
1st Levinet conference (King's College London, UK), 6-8th September, 2022
2. Y. Minowa,
"Optical tweezers in superfluid helium,"
The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (Hybrid, Yonsei University in Seoul, South Korea), 21-26th August, 2022
3. Y. Minowa,
"Cryogenic optical tweezers and more,"
Macroscopic Quantum Machines (OIST, Okinawa, Japan), 6-7th April, 2022

報道発表

4. Physics World (英国物理学会によるニュースサイト) 「Nanoparticle ‘tracers’ reveal quantized vortices in superfluid helium」
<https://physicsworld.com/a/nanoparticle-tracers-reveal-quantized-vortices-in-superfluid-helium/>

総説(依頼執筆)

5. 日本物理学会誌, 最近の研究から
養輪陽介「光を用いた量子渦・量子流体研究の新展開」

6. 学会誌「ながれ」(日本流体力学会刊行)特集記事
 袁輪陽介 「量子化された渦のレーザーアブレーションを用いた可視化」