

研究終了報告書

「超伝導 MEMS を用いた浮遊型機械子の量子制御」

研究期間：2018年10月～2023年2月

研究者：不破 麻里亜

1. 研究のねらい

物体の機械振動を光により量子レベルで計測・制御する量子オプトメカニクスは、重力波望遠鏡から、磁力・加速度の量子センシングに至るまで、幅広い分野への応用が期待されている。しかし質量が mg 以上、大きさが μ m 以上の巨視的な物体を量子制御するに当たっては、電磁波との相互作用の小ささが問題となる。機械振動子を精密計測し、制御するためには、制御対象を外場と相互作用させて振動を読み出す必要がある。この相互作用の強さは結合強度 $g=\eta x_{zpf}$ (η : 物理系に依存した結合効率、 x_{zpf} : ゼロ点振幅) で表される。よって、ゼロ点振動の振幅 $x_{zpf}=(\hbar/2m\omega_c)^{1/2}$ (m : 質量、 ω_c : ゼロ点振動の角振動数) が大きいほど、つまり質量が小さいほど結合強度は強くなり、量子制御しやすい。ゆえに、これまで振動モードの量子状態を実現できた機械振動子は、質量が fg 以下、大きさが nm 以下の物体が主流であった。

一方、物性科学の分野では、イットリウム鉄ガーネット (YIG) という軟磁性体のスピン波とマイクロ波を強く結合させることで、スピン波の量子状態を読み出すことに近年成功した [D. Lachance-Quirion et al., *Science* **367**, 425 (2020)]。この結合の強さは、軟磁性体の体積 $V^{1/2}$ に比例する。機械振動子として軟磁性体を用い、同様に結合強度が体積に比例することを活用することで、上記課題克服の期待ができる。このことに着目し、浮上した YIG 球のスピン波とマイクロ波の結合を利用して、体積に依らずに量子基底状態まで冷却する方法が、さきかけ期間中に理論的に提案された [C. Gonzalez-Ballester et al., *PRL* **124**, 093602 (2020), A. Kani et al., *PRL* **128**, 013602 (2022)]。

磁性体を機械振動子として、その振動計測と制御を目指す分野はマグネトメカニクスと呼ばれ、物理的興味と工学的応用可能性から注目を集めている。特に永久磁石などの硬磁性体を機械振動子として、量子基底状態までの冷却と量子状態制御を目指した研究が理論と実験の両面から盛んに行われている。しかし軟磁性体を用いた研究については、スピントロニクス分野で YIG カンチレバーを作製して磁気物性を観測した研究はあるものの、その量子制御を目指した実験はいまだに報告されていない。そのため軟磁性体の機械振動の量子制御を強く意識した基礎研究を進め、実験的に量子制御可能であることを示すことが望まれる。これによって、機械振動子の物性をも生かした新たな マテリアルマグネトメカニクス分野 を切り開くことを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、「基底状態の機械振動子系」をゼロから構築することを目指して研究を進め、軟磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネットの球を浮上させることに成功した。さらに、COMSOL を用いた電磁界シミュレーションによって、浮上系のトラップ周波数と散逸を見積もり、実験結果を説明することに成功した。

研究テーマ A「軟磁性体の磁気浮上方法の提案と散逸予測」では、軟磁性体を浮上する方法を提案し、低散逸な浮上系を実現可能であることを示した。これまで実現されてきた磁気浮上系は、すべて保持力の強い硬磁性体を反磁性効果、マイスナー効果やピン止め効果を用いて浮上させるものが主流であった。これに対し、保持力をほとんど持たない軟磁性体を用いる場合は、軟磁性体を単一磁区構造として扱えるようにするために、飽和磁化以上の外部磁場を印可する必要がある。そこで、磁場勾配を持つ外部磁場を印可することで軟磁性体を鉛直方向にトラップした上で、水平方向は超伝導体との反発（マイスナー効果）によってトラップすることで、三次元的な調和振動子を実現する具体的な系を提案した。

機械振動子を光を用いて読み出し、制御する方法は重力波望遠鏡分野を中心に理論、実験の両面で成熟している。しかしながら、磁性体機械振動子を用いた場合は、その変位読み出し、基底状態まで冷却する方法や、散逸を見積もる方法に関しまだ統一的方法が確立されていない。そこで、提案した軟磁性体浮上系で支配的な散逸をもたらすと思われる渦電流とスクイーズドフィルム効果を COMSOL による電磁界解析でシミュレーションし、 $Q > 10^8$ を超える低散逸振動子を実現できることを示した。浮上系のみならず、周囲の治具による散逸を考慮した点で意義は大きい。

研究テーマ B「イットリウム鉄ガーネット球の磁気浮上の実現」では、テーマ A で提案した浮上方法の実験的実証を行い、直径 0.5 mm、質量 0.3 mg の YIG 球を浮上させることに成功した。鉛直方向のトラップ周波数は外場に比例し、50~400 Hz の間で可変である。得られた Q 値は、 $Q_{\text{exp}} = 1728 \pm 656$ であり、電磁界解析によって見積もられた渦電流損失 $Q_{\text{sim}} = 1550 \pm 799$ と同程度であったことから、超伝導コイルのボビンでの渦電流損失が支配的な散逸であることを確認できた。浮上型振動子の冷却までには至らなかったが、今後は数値シミュレーションによる散逸計算を駆使して、低散逸浮上系を実現し、その冷却と量子制御へとつなげていきたい。

(2) 詳細

研究テーマ A: 軟磁性体の磁気浮上方法の提案と散逸予測

軟磁性体浮上系の概要を図 1 に示す。軟磁性体を単一磁区にする一様外部磁場をかけるために、十分大きな超伝導コイルを用いる。この中に、半径 r_s の穴の開いた厚み h_s の超伝導体を入れ、この穴の中心に軟磁性体球を浮上させる。超伝導体は鉛直方向には磁場レンズとして働き、その中心に磁場極大を作る役割を果たす。軟磁性体は磁場極大に引き寄せられるため、超伝導体の中心に向かって引き寄せられる復元力が働き、その共鳴周波数は

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{M d^2 B_e}{\rho dz^2}}$$

で与えられる。さらに、水平方向にはマイスナー効果の反発による斥力が働く。磁気双

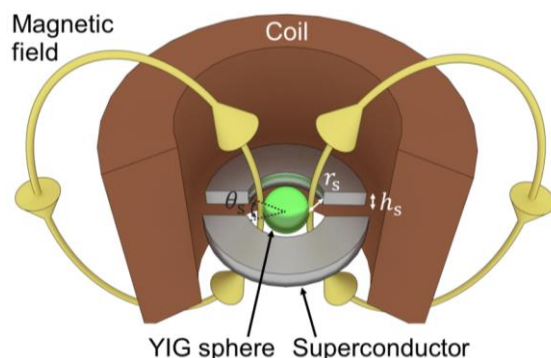


図 1：浮上系の概要

極子間の斥力は、一般的には距離 d に対して d^{-4} に比例するが、軟磁性体球の半径 a に対して r_s と h_s を適切に設定することで、有限サイズ効果を利用した復元力を実現することができる。これより、浮遊した軟磁性体球を三次元調和振動子にトラップすることができる(図 2)。この効果は、軟磁性体球の大きさに合わせて適切な寸法の超伝導体を用いることで、球の直径に依らずに実現可能である。

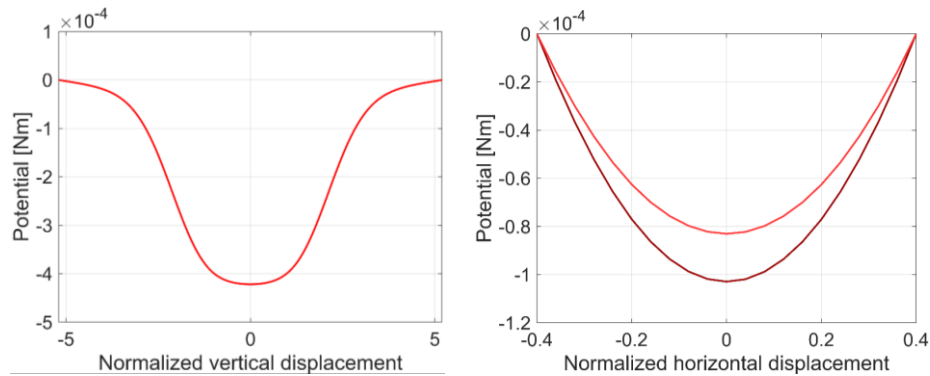


図 2 : 半径 $a=0.5$ mm の YIG 球がトラップされるポテンシャル。(左) 鉛直方向、(右) 水平方向。スリット方向の方がスリットに垂直な方向よりポテンシャルは浅い。

研究テーマ B: イットリウム鉄ガーネット球の磁気浮上の実現

研究者は本研究課題の開始(2018年10月)と同時に、東京大学先端科学技術研究センターにて実験装置の構築を開始した。2021年5月に学習院大学に異動してからは、装置の立ち上げの続きと、実験環境の再構築を行った。

浮上の様子を観測するために、532 nm のレーザー光を 12 mW 程度入射し、その反射光を望遠鏡によって集めたのちに、CCD カメラとフォトダイオードによって捉えた。18 mT(電流 60 mA)以上の磁場を印加した瞬間に YIG 球が持ち上がり、超伝導体の穴の中心に捕獲される様子を CCD カメラの映像で確かめることに成功した。

3. 今後の展開

今回は、軟磁性体球を浮上させ、その変位を光を用いて読み出し、得られた実験結果を数値計算によって説明することができた。今後は、機械振動子の低散逸化させると同時に冷却する。量子基底状態にある軟磁性体は、内部の電子スピンと機械振動の相互作用を利用して、巨視的な物体での Stern-Gerlach 実験、重心振動の重ね合わせ状態の実現や、高速磁気回転子を実現可能とすることが理論的に提案されている。本研究は、このような新しい巨視的量子状態を mg スケールの機械振動子で実現することにつながると考えられる。

このために不可欠な電子スピンを活かした冷却で課題となるのが、電子スピン密度が高いこと、強磁性共鳴の線幅の細さである。研究者が用いている YIG は強磁性体であるため、スピン密度が $10^{22}/\text{cm}^3$ と高い一方で、強磁性共鳴は 1 MHz と軟磁性体の中では最小であるものの、基底状態まで冷却するうえでは散逸が大きい欠点がある。一方、窒素空孔中心は半導体であるため、スピン密度は $10^{16}/\text{cm}^3$ と低い一方で、電子共鳴線幅は 1 kHz まで狭めることが可能であり、基底状態まで冷却するうえでは結合強度が上がりにくい欠点がある。

例えば、沖縄科学技術大学院大学の理論家 Twamley 教授らが提案した冷却方法を用い

た場合、強磁性共鳴 1 MHz の $\Phi=0.5$ mm YIG 球を 300 mT (強磁性共鳴 10 GHz、トラップ周波数 700 Hz) 浮上させ、渦電流損失を無視できる $Q\sim 10^8$ を実現できた場合、冷却可能な最低到達温度は 127 フォノン ($4.3 \mu\text{K}$) である。YIG 球の共鳴線幅を 10 kHz まで狭めることができれば、フォノン数 0.77 までの冷却が可能となる。1 kHz の線幅を持つ YIG 球を開発できれば、mg スケールの機械振動子を基底状態まで冷却できるようになる。

4. 自己評価

研究題目に掲げた「浮遊型機械振動子の基底状態までの冷却」という意味では、新しい機械振動子の浮上でとどまっておらず、実現には至らなかった。しかし磁気浮上系を立ち上げ、最大の損失をもたらす渦電流損失を電磁界解析を用いて定量的に見積もることが可能となった。これより、磁気振動子系で課題となっていた渦電流を減らしていく研究基盤を形成できた。今後は渦電流損失の少ない治具を設計することで、1 フォノン以下までの振動冷却を実現したい。さきがけ期間を通してスピンという内部自由度を活かした新しい巨視的量子状態を実現しうる軟磁性体に着目し、新しい振動子を提案、実験実証できた点は進展であり、新たな巨視的量子系の実現へ近づくことができたと考える。得られた成果については、速やかに論文にして出版したい。

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: 1件

1. 不破麻里亜, “軟磁性体浮遊の量子制御”, 信学技報 120 , 196 (2020). 本論文では、磁場勾配と超伝導体のマイスナー効果によって軟磁性体を浮遊させる方法を提案している。アンショーの定理により磁気浮上には反磁性体が不可欠である。ここでは、鉛直方向は磁場勾配で浮上させた上で、マイスナー効果を用いて水平方向の安定化を図る。これより、世界最小損失を持つ浮上系の実現を目指す。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件

(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)

【投稿中の論文】

1. M. Fuwa, “Magnetic levitation and harmonic trapping of soft ferromagnets for macroscopic quantum mechanics” arXiv:2303.17847 [quant-ph] (2023).

【国内会議(招待講演)】

1. 不破麻里亜, 招待講演「巨視的量子状態の実現に向けた軟磁性体浮上」、第 5 回サマータンチャレンジ世代間交流会、高エネルギー加速器研究機構 (2023 年 3 月 4 日)
2. M. Fuwa, “Meissner Levitation of Soft Ferromagnetic Insulators”, Macroscopic Quantum Mechanics, OIST, Okinawa (April 7, 2022)

3. 不破麻里亜、招待講演「軟磁性体浮遊の量子制御」、マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会 (MWP)、オンライン開催 (2020 年 10 月 21 日)
4. M. Fuwa, “Quantum Levitation of Macroscopic Soft Magnet”, International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology (FQST2020), National Institute of Informatics, Tokyo (Feb. 6, 2020)
5. 不破麻里亜、招待講演「巨視的ハイブリッド量子系」、第 9 回 QUATUO 研究会、崇城大学、熊本 (2020 年 1 月 11 日)