

1. 氏名	不破 麻里亜
2. 所属機関	学習院大学理学部
3. 研究題目	磁場の量子計測に向けた低散逸軟磁性振動系の作製と実証

4. 研究の目的:

本研究では、重力波分野で蓄積した技術を活かして、磁性体の機械振動を用いた磁力計を開発する。具体的には、軟磁性体球を懸架線で吊したねじれ振り子を作製し、磁気異方性によって軟磁性体が磁場の方向に回転するときの回転角度を量子レベルで計測することを目指す。新しく提案する磁気異方性読み出し法は、回転磁気異方性によって、強磁性共鳴周波数が回転角度に比例してシフトすることを利用する。これより、外部磁場の方向と変動を計測することができる。本手法はマイクロ波を用いた読み出しであるため、光を用いた従来の光てこ法と比較して、低温でも導入しやすい利点がある。これより系の熱雑音を落とし、量子レベルの磁性スピン信号を計測可能である。このように、機械振動子のスピンという材料特性を活かした回転の量子計測を実現し、マテリアル量子オプトメカニクスの基盤創生を目指す。



図1：軟磁性体磁力計の完成系

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):

本研究の1年間の目標は、磁気異方性回転の読み出し方法を用いて、磁気-機械相互作用のダイナミクスを読み出せることを示すことである。これを用いて、環境磁場の変動をモニターすることが可能となる。具体的手順は下記の通りである。

(1) イットリウム鉄ガーネット(YIG)球のねじれ振り子の作製

直径  $\phi=0.5$  mm、重さ 0.3 mg の YIG 球を光ファイバの先端に接着したねじれ振り子を作製する。ここでは、線径 150  $\mu$ m、長さ 8 mm のファイバを用い、共振周波数  $f_0 \sim 1200$  Hz、振動を励起してから止まるまでの平均振動回数  $Q \sim 10^6$  を目指した。この際、磁気異方性が最大となる結晶軸に合わせて YIG 球をファイバに接着することで、回転に対する強磁性共鳴周波数シフトを最大化した。

(2) 磁気異方性法を用いた磁気-機械相互作用の読み出し実証

(1)で作製したねじれ振り子に YIG の飽和磁化以上の 240 mT 程度の静磁場を印加し、マイクロ波小型コイルを用いて強磁性共鳴周波数を計測する。磁気-機械相互作用によって生じる剛体回転を、申請者が提案する磁気異方性回転読み出し法を用いて検出できることを実験実証する。そこで印加する静磁場に直交する磁場を印加する磁気回路を小型コイルによって作成し、1 mT 程度の直交静磁場を印加することで振り子の回転運動を励起する。回転運動に伴う強磁性共鳴周波数の変化を減衰振動として観測することで、ねじれ振り子の共振周波数と回転周波数を評価した。

## 6. 研究の成果と結論、今後の課題:

イットリウム鉄ガーネット(YIG)の集団スピン励起と同じエネルギーを持つマイクロ波を印加することで、マイクロ波が吸収されて集団スピン励起が励起される強磁性共鳴が起きる。このとき吸収されるマイクロ波の周波数を、強磁性共鳴周波数と呼ぶ。そこで作製したねじれ振りに 240 mT の静磁場を印加した上で、回転しながら強磁性共鳴周波数の変化を計測した(図 1)。YIGには、結晶の対称性に由来する磁気異方性があるため、静磁場を印加する角度に依存した強磁性共鳴周波数に変化することが分かる。この回転磁気異方性の大きさから、正しくねじれ振子を作製することに成功したと言える。

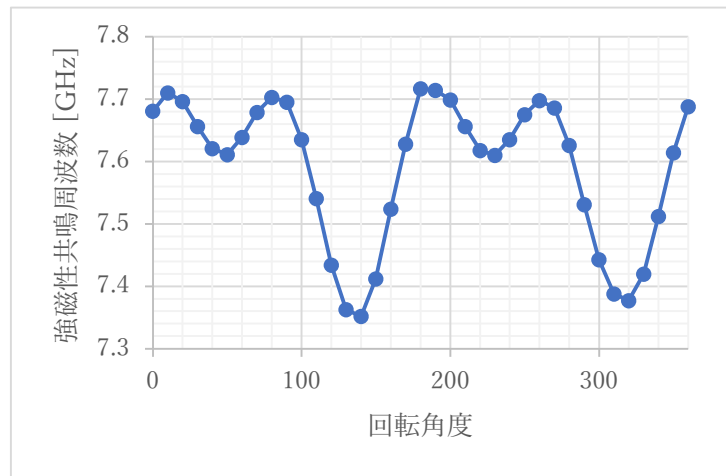


図 1: 回転角度に依存した強磁性共鳴周波数の変化

続いて、回転に対する強磁性共鳴周波数の変化が最大となる角度(図 1 で  $110^\circ$ )に静磁場を印加した上で、自作した磁気回路を用いて 1 mT の静磁場を印加することで、磁気異方性によってねじれ振子を回転させた。これはコンパスが地磁気によって回転する現象と同じである。このときの強磁性共鳴周波数の変化から、回転運動を減衰振動として観測した(図 2)。この減衰振動の振動周期から、ねじれ振子の共振周波数は  $f_0 = 1184$  Hz, 平均振動回数は  $Q \sim 20$  であることが分かった。これより世界で初めて、磁気異方性を用いた磁気-機械相互作用の読み出しに成功したと言える。今後は振子を懸架するシリカ線を細くし、接着部分における機械振動エネルギー散逸を減らすことで、高感度な磁力計を実験的に実証したい。

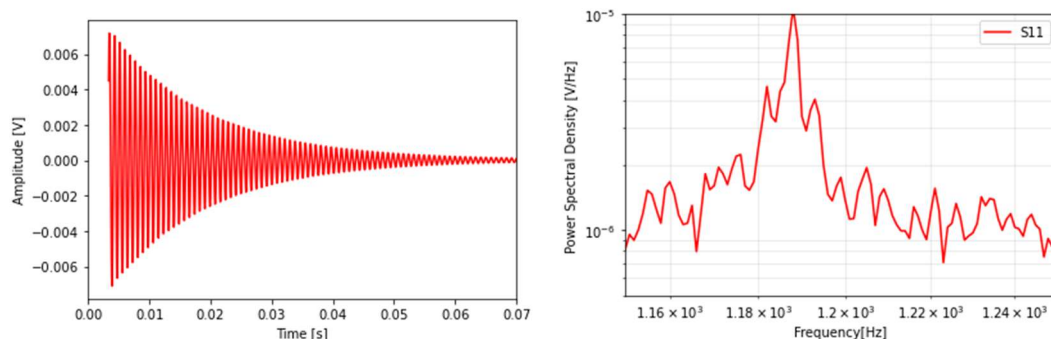


図 2: (左)減衰振動測定結果、(右)減衰振動から求めたパワースペクトル密度

## 7. 成果の価値

### 7.1\_学術的価値:

1915年にアインシュタインとデハースは、強磁性体に交流磁場を印加すると、交流磁場によって強磁性体内の電子スピンの反転し、各電子スピンの持っている  $\hbar$  分の角運動量が結晶格子へと緩和し、角運動量保存則によって最終的には剛体が回転することを予言した(Einstein de Haas 効果)。その角運動量遷移を追うことで、結晶格子から剛体回転へとフォノンの角運動量が遷移する原理を解明し、物性科学の謎を解明する。

### 7.2\_社会的価値:

ジャイロスコープの感度と安定性を向上させることができれば、GPS に依存せずに自己位置を推定する非GPS 航法を実用化することができる。実用化を目指す原子干渉計は、原子の物質波の干渉を利用しており、その感度は質量  $m$  に比例する。そこで浮上型機械振動子の回転運動を用いた強靱な量子性を活かし、質量  $20 \mu\text{g}$  の YIG 球の物質波を利用した干渉計を作ることができれば、原子干渉計より  $10^{16}$  桁高い感度を得ることができ、破壊的なイノベーションを創出できることが期待される。

### 7.3\_研究成果:

・「研究論文(原著)」

○Maria Fuwa, Ryosuke Sakagami, and Tsuyoshi Tamegai, “Ferromagnetic levitation and harmonic trapping of a milligram-scale yttrium iron garnet sphere”, Physical Review A volume 108, page 063511 (2023).