

双極子相互作用を介した磁気渦の連成スピンドYNAMICS

物質系専攻 47-126040 長谷川 徳信

指導教員：大谷 義近（教授）

キーワード：磁化ダイナミクス、磁気渦、電気測定

1. 本研究の背景と目的

近年研究が盛んなスピントロニクス分野において、微小な磁化構造及びその動的性質を理解することは基礎物理、応用の両面で非常に重要である。微小強磁性体の磁化構造は、その形状に依存することが知られており、特にミクロンスケールの強磁性体円盤では図 1(a)に示すような磁気渦構造が基底状態として表れる。磁気渦構造は、面内旋回磁化(カイラリティ)と渦芯吹出し磁化(ポラリティ)の互いに独立した2つの自由度を持っており、数百 MHz 帯域にはトランスレーショナルモード(TM)と呼ばれる特徴的な低周波モードを持つ。TM とは、準粒子として見なせる渦芯が調和振動子型ポテンシャルの中で旋回運動するモードで、TM 励起時には渦芯の運動に伴い円盤端に磁極が生じる。複数の円盤を十分に隣接させた場合、その磁極を媒介とした双極子相互作用によりコアが連成振動する。このような連成振動は、磁気渦の持つ2つの自由度に依存し、磁気渦対の場合には計4つのエネルギー準位に分離することが我々の先行研究により示されている^[1]。さらに図 1(b)に示すように磁気渦構造の2次元格子系は、フォノンと類似した分散関係を持ち、その周波数特性が個々の磁気渦の自由度によって著しく変調されることが理論的に予想されている^[2]。このような磁気人工格子系の理解及び制御は応用上の観点からも非常に興味深い。本研究では、磁気渦格子系の系統的理解を目指し、先行研究で調べられた磁気渦対よりも系を拡大した3つの磁気渦鎖に注目し、研究を行った。なお本修士論文中では、新たな測定手法を用いて精度よく TM を検出した結果も報告しているが^[1]、ここでは紙面の関係上、割愛する。

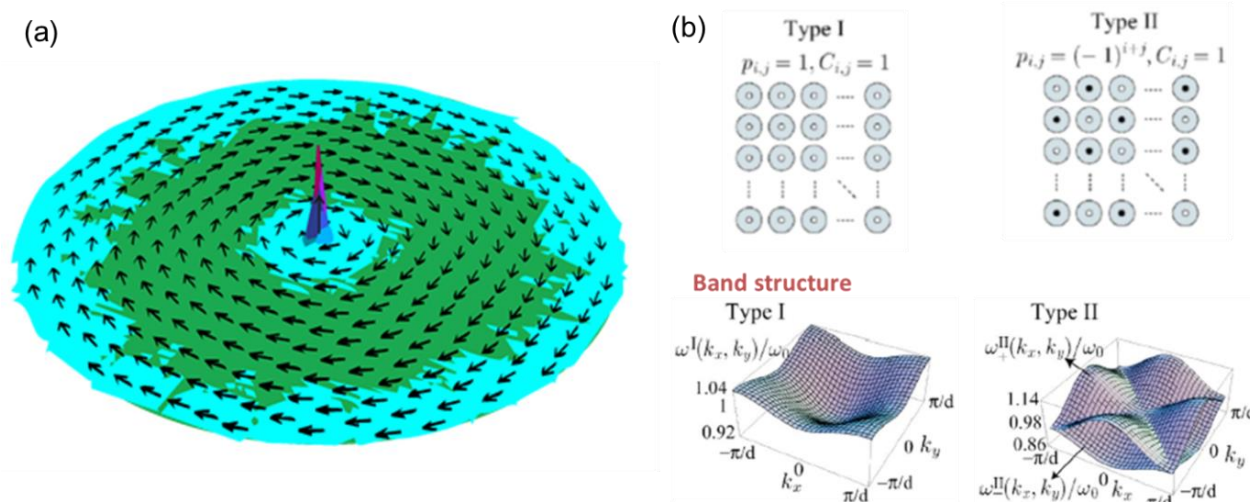


図 1：(a) 磁気渦構造の磁化分布。(b) 2 次元磁気渦格子の分散関係。ポラリティの組み合わせに依存して、バンド構造が変調される。

2. 実験方法

サンプルは熱酸化シリコン基板に3つのPy ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)円盤とCu電極を蒸着することで作成した(図2)。Py円盤の半径は500 nm、厚さは30 nm、円盤間距離は100 nmとした。TMの励起及び検出には、電気的手法を用いた。磁気渦に共鳴周波数付近のac電流を注入すると、スピントラ

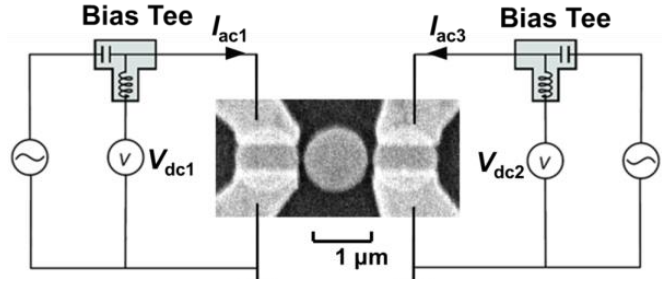


図2：測定回路概念図及びサンプルの電子顕微鏡像。

ンスファートルクによりTMが励起される。この時、コアの旋回に伴い異方性磁気抵抗効果を通じて、円盤の電気抵抗も同周波数で振動する。そのため、TMは整流されたdc電圧として検出可能である。またこの測定では、反射波をオシロスコープで観測することで、磁気渦鎖に流す2つの電流の位相差 Δ を調整できる。以下の実験では、事前にそれぞれの磁気渦のポラリティは互いに反平行、カイラリティは同方向であることを確認している。

3. 実験結果と考察

本研究ではまず、左側の磁気渦のみに励起電流(I_{ac1})を注入しTMを励起して、スペクトルを測定した。図1(a)に示すように、左側の磁気渦では3つの共鳴ピークが観測された。次に中央及び右側の磁気渦にもTMを励起しない程度の微弱な検出電流(I_{ac2} , I_{ac3})を同時に印加して、それぞれの磁気渦でdc電圧を測定した。図3(a)に示すように、中央の磁気渦では f_1 でピークが、 f_3 でディップが得られたが、 f_2 では共鳴は観測されなかった。一方右側の磁気渦では、 f_1 と f_3 でピークが、

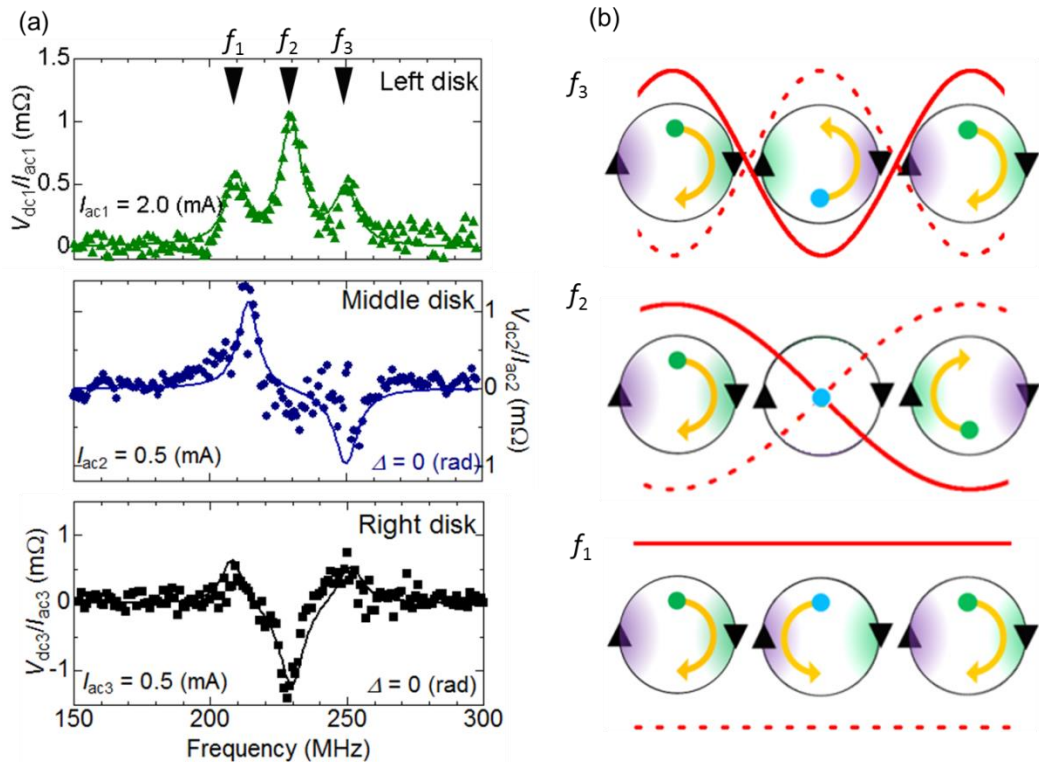


図3：(a) 左側の磁気渦を励起した時に個々の磁気渦で観測されたスペクトル。この測定では $\Delta = 0$ としている。実線は解析結果。(b) それぞれの共鳴周波数で励起される定在波モードの概念図。赤線は定在波を表す。

f_2 でディップが観測された。渦芯の旋回は、左側円盤では励起電流に同期しているためピークが観測されたことを考えれば、中央及び右側円盤でピークが観測されれば、左側と同位相で回転しており、ディップが観測されれば反位相で回転していることが分かる。そのため、共鳴周波数に対して渦芯の運動をまとめれば図 3(b) のようになり、左側から右側の磁気渦まで定在波モードが励起されていることが分かった。

次に、左側と右側に同強度の励起電流 (I_{ac1}, I_{ac3}) を注入し、スペクトルの位相差依存性を調べた。図 4(a) に $\Delta = 0$ と π のスペクトルを示す。図 3 のスペクトルと異なり、左側でも右側でも $\Delta = 0$ では f_1, f_3 に、 $\Delta = \pi$ では f_2 のみピークを観測し、これは位相差によって、固有のモードのみを選択的に励起していることを示している。さらに、位相差を連続的に変えた 3 次元プロットを図 4(b) に示す。位相差に依存して励起される準位やその強度が変調されており、また 1 次元磁気渦鎖のバンド構造と見比べると(図 4(b) 白線)、観測されたスペクトルは磁気渦鎖のバンド構造の 1 部と解釈することができる。

4. 総括

静磁的に結合した 3 つの磁気渦鎖の集団励起において、電氣的測定法を用いて各々磁気渦のダイナミクスを実験的に調べた。その結果、全体が連成振動する定在波モードが励起されることを示した。また、両端の磁気渦を励起した場合には、励起電流の位相差に依存し特定の準位を選択的に励起できることを示し、同実験結果は磁気渦 1 次元鎖のバンド構造に対応することが分かった。また、以上の結果は Thiele 方程式を用いた解析計算からも良く理解された。

[1] S. Sugimoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 197203 (2011).

[2] J. Shibata and Y. Otani, Phys. Rev. B **70**, 012404 (2004).

[発表論文]

[p1] S. Sugimoto, N. Hasegawa *et al.*, accepted for publication in App. Phys. Express.

[学会発表]

国内学会：2013 年 日本物理学会(春)、他 3 件。

国際学会：2013 年 The 58th International Conference on Magnetism and Magnetic Materials. (poster)、他 1 件。

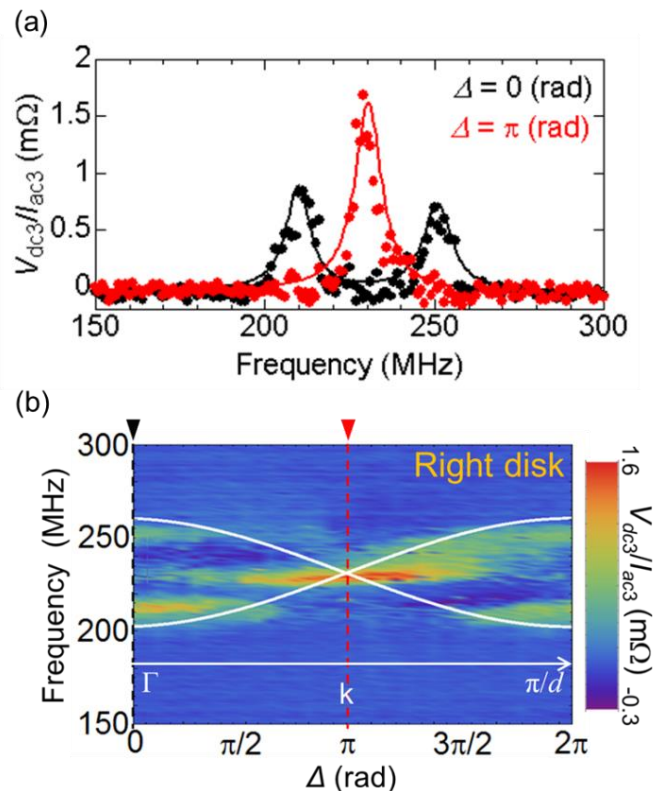


図 4 : (a) 両端を励起した場合の $\Delta = 0, \pi$ におけるスペクトル。実線は解析結果。ここでは、右側のスペクトルのみを示すが、左側でも同様のスペクトルが観測されている。(b) スペクトルの位相差依存性。白線は 1 次元磁気渦格子のバンド構造。