

静磁結合した磁気渦対の集団励起と相対位相の関係

物質系専攻 47116047 藤森 啓晃

指導教員：大谷 義近（教授）

キーワード：スピンドYNAMIX 磁気渦

1. 本研究の背景と目的

近年のスピントロニクスの研究分野において、ナノスケール磁性体の磁化構造及びその動的性質を理解し、制御手法を確立することは非常に重要な課題である。ナノメートルサイズの薄い強磁性体円盤では、図 1(a)に示すような磁気渦と呼ばれる構造が静磁エネルギー的に最も安定する。磁気渦構造には、面内回転磁化の「カイラリティ (C)」とコア磁化の「ポラリティ (P)」と呼ばれる二つの自由度が存在し、数百 MHz 程度の周波数領域にトランスレシヨナルモード(TM)と呼ばれる励起モードが存在する。TM 励起時の磁気渦の運動は、調和ポテンシャル中にある質点の運動で記述できることが知られており、磁気渦コアは円盤中心を軸として回転運動を続ける。このような磁気渦円盤を 2 つ近接配置させると、円盤間に表面磁極による静磁的な相互作用が働き、磁気渦のコア同士が相対位相をもって連成振動するようなモードが立つ。このような静磁結合した磁気渦対の励起は、互いの磁気渦のポラリティ、カイラリティ、コア同士の回転の位相差の組み合わせ(P_1P_2, C_1C_2, δ)によって決定することが理論計算で予測されており、また我々のグループの先行研究によって P_1P_2 に依存した四つの共鳴準位の存在が実験的に明らかになっていた (図 1(b))。しかし、理論計算によればそれぞれの準位はカイラリティの組み合わせ C_1C_2 や回転の位相差 δ に依存して 2 重に縮退しており、この縮退に関しては実験的にまだ明らかになっていない (図 1(b))。そこで本研究では、これまでの実験で明らかになっていなかった隠れた自由度、2 つの磁気渦の回転位相差に着目して、磁気渦対の全てのモードを明らかにすることを目的とした。

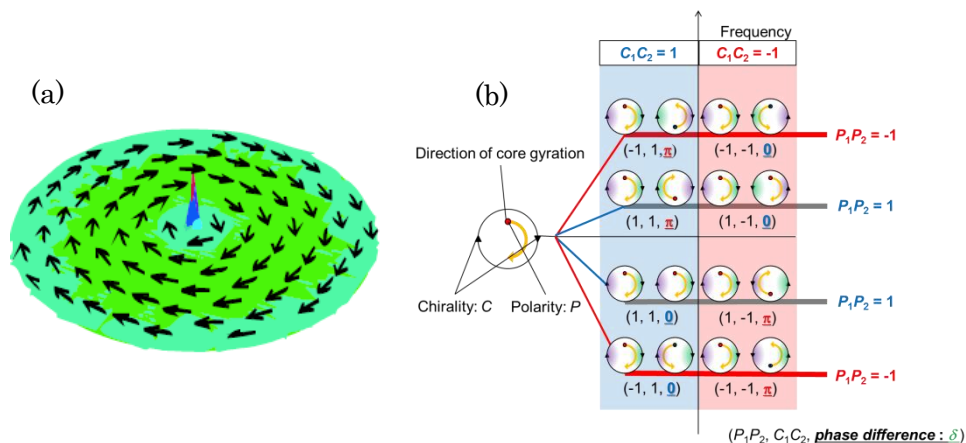


図 1 (a) : Micro-magnetic simulator によって計算された磁気渦の磁化構造。 (b) : 2 つの隣接した磁気渦対の励起モード。2 つの磁気渦のカイラリティ、ポラリティ、コア同士の回転位相差に依存する。

2. 実験方法

磁化ダイナミクスを直接検出するためには、時間分解 Kerr 効果などの光学的な測定手法も挙げられるが、本実験では各々の磁気渦に対してスピントルク・ダイオード効果を利用した

電気測定を行った(図 2(a))。強磁性体円盤では、旋回しているコアの位置に依存して抵抗の大きさが異なることが知られている(異方性磁気抵抗)。磁気円盤に **TM** を励起するような交流電流を流すと、抵抗成分と電流成分が全く同じ周波数を持つため、結果として **TM** を直流電圧として電気的に検出することができる(図 2(b))。またこの測定の利点として、それぞれの円盤に流す電流の大きさを制御できるだけでなく、反射波をオシロスコープで読み取ることによって二つの電流に任意の位相差をつけられるため、磁気渦コアの回転の位相差 δ を制御することが可能となる。磁気渦円盤及び電極は電子線リソグラフィーを用いたリフトオフ法によって作製し、電極部分には **Cu**、強磁性体円盤には **Py (Ni₈₁Fe₁₉)** をそれぞれ蒸着した。円盤半径は **500 nm**、厚さは **30 nm**、円盤のエッジ間距離は **100 nm** とした。

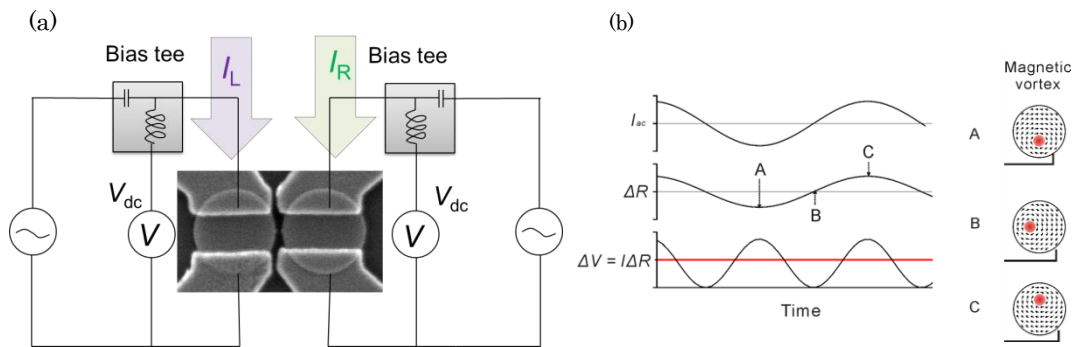


図 2(a): 磁気渦対の測定回路図及び実験に用いた試料の SEM 像。(b): 検出原理の概略図。

3. 実験結果と考察

本実験ではまず右側の強磁性円盤に交流電流(I_R)を流して、左側の円盤との双極子相互作用を励起する。この時点ですでに図 3(a)(b)の下図にあるように、先行研究で示されていた通り 2 つの共鳴ピークが明瞭に観測され、 $P_1P_2 = -1$ に対し低周波モードと高周波モードが現れる。同様のピークは $P_1P_2 = 1$ でも観測されている。さらに左側の強磁性体円盤にも磁気渦を直接励起させない程度の微弱の交流電流(I_L)を加える。このとき実験方法でも述べたように、 I_L と I_R の電流位相差($\Delta\phi$) を 0 もしくは π に固定する。この電流位相差 $\Delta\phi$ が上記のコア同士の回転の位相差 δ に対応する。図 3(a)(b)の上図に左側の磁気円盤で検出された共鳴ピークを示す。下図と異なり、左側磁気円盤では共鳴状態がピークもしくはディップとして現れる。

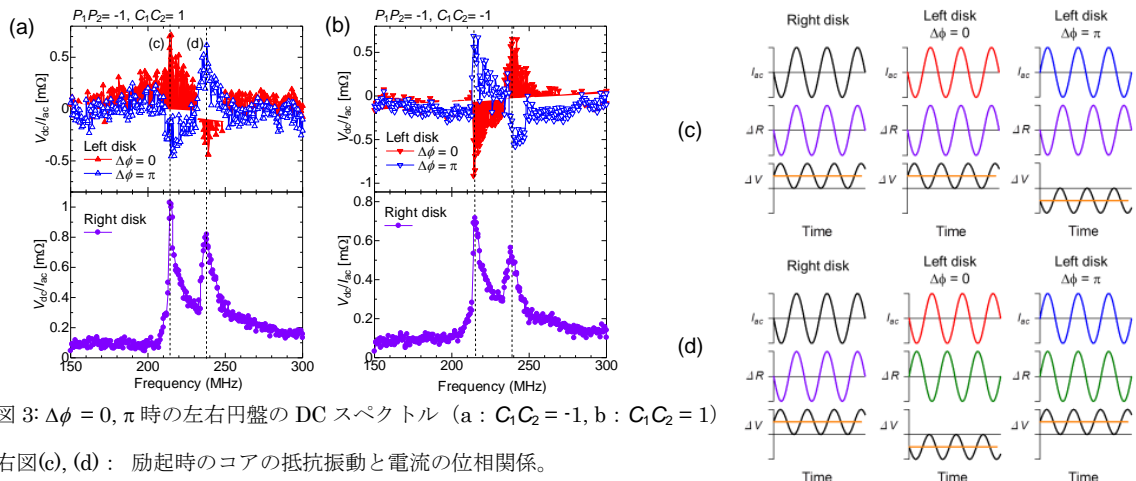


図 3: $\Delta\phi = 0, \pi$ 時の左右円盤の DC スペクトル (a: $C_1C_2 = -1$, b: $C_1C_2 = 1$)

右図(c), (d): 励起時のコアの抵抗振動と電流の位相関係。

またこの関係は、電流位相差 $\Delta\phi$ や2つの磁気渦円盤のカイラリティの組み合わせ C_1C_2 にも依存していることがわかる。カイラリティが同じ向き($C_1C_2 = 1$)場合 (つまり図 3(a))、電流位相差 $\Delta\phi$ が0であれば、同位相モードが低周波側にピークとして現れ、反位相モードがディップとして高周波側に現れる。 $\Delta\phi$ を0から π にすると、上記の関係が逆転して現れる。一方、カイラリティの向きを変えると($C_1C_2 = -1$)、さらに $C_1C_2 = 1$ のときと正反対の関係が観測された。また $P_1P_2 = 1$ のときのも同じ C_1C_2 と $\Delta\phi$ の依存性が観測された。このように、本実験によって先行研究では完全に縮退していた全部で8つのモードを全て同定することが可能であることが明らかとなった。

次に、左側と右側磁気円盤に全く同じ励起電流を流した($I_L = I_R$)結果を図 4 に示す。図 3 の $I_L < I_R$ の場合と異なり、今度は $\Delta\phi$ を0か π に選ぶことにより、どちらか一方のモードのみを選択的に励起させることに成功した(図 4(a))。また、図 3 及び図 4 に示した実験結果を、マイクロマグネティクス法による数値計算や Thiele 運動方程式を用いた DC スペクトルの数値解析の両手法で再現することができた。

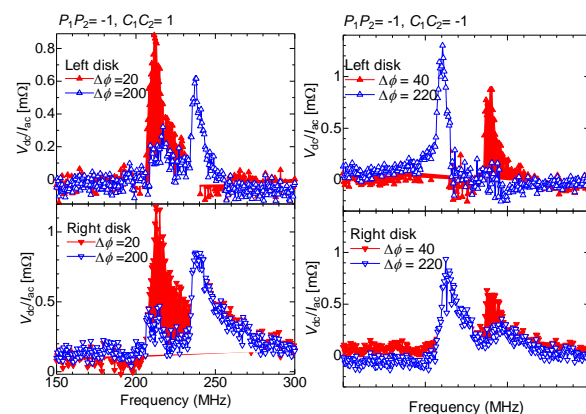


図 4 : 左右の円盤の DC スペクトル (a : $C_1C_2 = -1$, b : $C_1C_2 = 1$)。

4. まとめ

静磁的に結合した磁気渦対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観測した。集団励起ではそれぞれの磁気渦のコアが、180度の位相差をもってまわる反位相モードと、同じ位相差をもってまわる同位相モードが励起することが実験的に明らかになった。さらに同じ位相または、180度の位相差を付加した電流で一斉に TM を励起させると同位相モードか反位相モードのどちらかのみを選択できることを実験的に示した。さらに、マイクロマグネティクス法による数値解析や Thiele 運動方程式を用いた DC スペクトルの数値解析からも本研究で得られた実験結果を再現することができた。

[参考文献]

- [1] J. Shibata and Y. Otani, Phys. Rev. B. **70**, 012404 (2004).
- [2] S. Sugimoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 197203 (2011).

[学会発表]

- 2012年 日本物理学会 (秋) “静磁結合した磁気渦対の集団励起と相対位相関係 2”
- 2012年 日本物理学会 (春) “静磁結合した磁気渦対の集団励起と相対位相関係”
- 2012年 ICM2012 “Collective excitation of magnetostatically coupled two-adjacent magnetic vortices and their relative phase difference (Oral)”
- 2011年 JST-DST Workshop on Spin Physics “Collective excitation of magnetostatically coupled two-adjacent magnetic vortices and their relative phase difference (Oral)”