

静磁結合した磁気渦鎖のダイナミクス

物質系専攻 47_096031 杉本 聡志

指導教員：大谷 義近 教授

キーワード：スピントロニクス、人工ナノ磁性体、スピントランスファートルク、磁気共鳴、磁気伝導測定

1988年の巨大磁気抵抗効果^{1,2} (Giant Magneto Resistance effect : GMR) の発見を契機として、電気伝導現象において、電子のspin状態を反映させるスピントロニクスが注目を集めるようになった。その中でも、微小な磁性体構造の磁化状態（磁区構造）の研究は、高密度の磁気記録素子や発振子への発展が期待される、基礎物理、応用の両面で興味深い分野のひとつである。

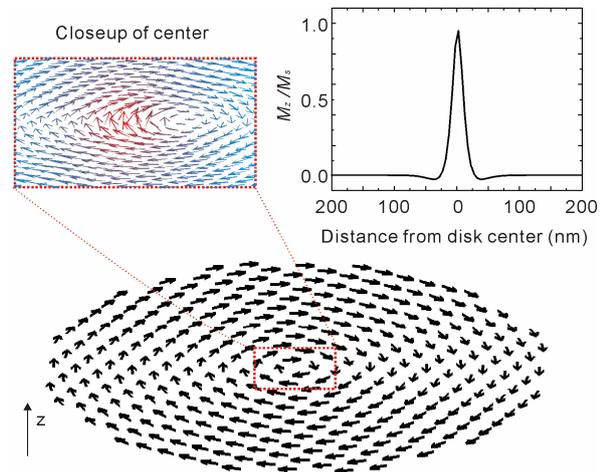


図1：マイクロマグネティクス法により算出した磁気渦構造

種々の磁区構造が知られているが、その中でも図1に示す磁気渦構造^{3,4}は、静的及び動的的特性共に興味深い特徴を示す。その磁化状態は、面内磁化の回旋方向（カイラリティ）と渦芯の面直磁化方向（ポラリティ）で特徴付けられ、室温において安定である。そのダイナミクスは、

一般的な静磁モードに加え、低周波帯域に、磁気渦コアの回転振動で記述されるような集合モードを持つ。このモードにおけるコアの挙動は、簡単な回転調和振動子として近似される。加えて、コアの回旋方向はポラリティの符号により決定される。このように極めて制御性のよい磁化ダイナミクスを伴う。同モードの励起時には、対称性の破れにより、磁気渦を内包する強磁性円盤側面部に表面磁極が現れる。このため異なる磁気渦間に静磁的な相互作用が期待される。先行の理論研究⁵では、この静磁的相互作用を媒介して結合した2次元磁気渦格子系では、固有モードの分散関係がバンド構造を形成し、マグノン媒体とした人工格子系⁶として機能することが示されている。しかし、磁気渦の静磁結合に関する詳細な実験は殆ど行われていない⁷。そこで、われわれは隣接する磁気渦対を電流により励起することで、低周波モードにおけるカップリングの効果を検証した。

本研究における微細加工は、全て電子線リソグラフィとフォトリソグラフィを用いたリフトオフ法により行われた。磁気渦構造を内包する強磁性体として、円盤状に加工されたPy(Ni₈₁Fe₁₉)が採用された。低周波モードは、spin偏極電流により励起され^{8,9}、スピントルク・ダイオード効果¹⁰により検出された。このときの測定回路を図2に示す。隣接

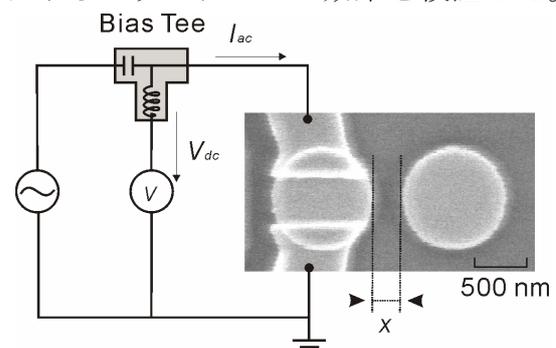


図2：部分励起実験における回路図。

磁気渦対の内、片方の磁気渦のみ部分励起され、もう一方の磁気渦は隣接磁気渦の表面磁極の効果のみをコアの駆動力とする。この配置では、電流誘導磁場の影響は、殆ど無視できる。

図3(a)に、単一磁気渦、磁気渦対のそれぞれの場合での、DC電圧の周波数、励起電流依存性を示す。更に、磁気渦対については、コアのポラリティが平行配置 ($p_1p_2=1$) と、反平行配置 ($p_1p_2=-1$) のふたつの組み合わせについて表示している。ポラリティの状態は、磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscopy : MFM) により確認された。Py円盤は共に直径 $1\mu\text{m}$ 、厚さ 30nm とし、円盤間距離は 75nm である。単一磁気渦については、 230MHz 付近に、電流にほぼ依存しない明瞭なディップが確認される。これは、励起電流の周波数が磁気渦の固有周波数と一致し、低周波モードを共鳴励起したことに対応する。図2の回路では、磁化のダイナミクスを時間積算して異方性磁気抵抗効果 (Anisotropic Magneto Resistance Effect : AMR) により検出する。共鳴励起時には、回転半径が極端に増加するため、抵抗スペクトルにおけるピーク/ディップとして観測することができる^{11,12}。図3(a)では、抵抗変化は高々数 $\text{m}\Omega$ となり、試料抵抗のおよそ2,3% となり AMR 信号として妥当である。また、共鳴周波数値は、マイクロマグネティックス法を用いた数値計算結果とよく一致する。一方で隣接磁気渦対の励起結果では、いず

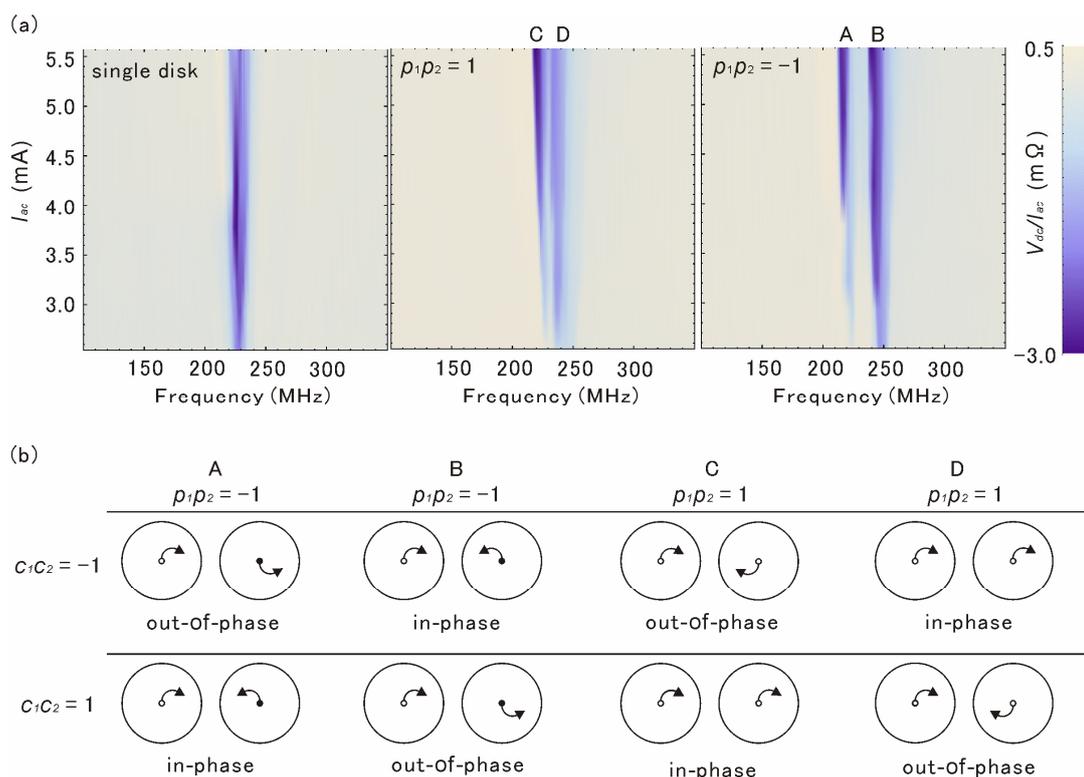


図3 : (a)単一磁気渦と磁気渦対でのDCスペクトルの励起強度依存性。(b)各モードでのコアの回転方向と位相差の概要図。

れのポラリティ配置においても、異なる二つの共鳴ディップが検出された。これらは、単一の共鳴モードに対し、低周波側と高周波側に、ほぼ対称に励起されている。また、この共鳴モードのスプリットの大きさは、ポラリティが反平行時 ($p_1p_2=-1$) に、明確に増加していることがわかる。尚、これらのモードは、円盤間距離

150 nm 以上で、単一の共鳴モードに縮退することが確認された。

また数値計算と比較すると、予想通りカップリングした4つの共鳴モード(A~D)は、コアの回転方向と、その位相差により、同定できることが分かった。各モードに対応するコアの運動を、図3(b)にまとめる。位相差と励起周波数の関係は、円盤側面部に出現する表面磁極の符号を、幾何的に取り扱うことで容易に理解できる。今、二つの磁気渦が同じカイラリティを持つ場合を仮定する。低周波側のモード(A or C)においては、コアは同位相で回転し、高周波モード(B or D)では、ほぼ反位相の回転が励起される。この場合での同位相モードでは、円盤間に磁気双極子が形成され、磁気渦が引き合い、より安定な連成振動となる。反対に反位相モードでは、磁気渦間に斥力が生じ反発するため、準安定的な集合モードが励起される。これらは、2分子結合の結合性軌道と反結合性軌道と類似性を持つ。また、この対応はカイラリティが反対方向の場合では逆転する。これは、コアが同方向に変位したときの表面磁極の符号が反転するためである。数値計算では、カップリングは表面磁極の分布のみに依存するため、同カイラリティの同位相モードと、異カイラリティの反位相モードの共鳴スペクトルは、ほぼ同一となることが確認された。逆の場合も然りである。

本研究では、静磁結合した磁気渦対を電流により局所的に励起することにより、4つの異なる低周波モードを励起することに成功した。各モードは、ポラリティにより決定されるコアの回転方向と、回転位相差で特定され、後者はカイラリティにより反転する。この結果は、カップリングした磁気渦において、その自由度により動的特性が変調されることを検証したものであり、磁気渦構造を用いた磁気人工格子系の実現の可能性を示唆するものである。

- [1] M. N. Baibich *et al.*, Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 21.
- [2] G. Binasch *et al.*, Phys. Rev. B **39** (2002) 577.
- [3] T. Shinjo *et al.*, Science **289** (2000) 930.
- [4] A. Wachowiak *et al.*, Science **298** (2002) 577.
- [5] J. Shibata, and Y. Otani, Phys. Rev. B **70** (2004) 012404.
- [6] V.V. Kruglyak, and A.N. Kuchko, Physica B **339** (2003) 130.
- [7] A. Vogel *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 037201.
- [8] J. Shibata *et al.*, Phys. Rev. B **73** (2006) 020403(R).
- [9] M. Bolte *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 176601.
- [10] A.A. Tulapurkar *et al.*, Nature **438** (2005) 339.
- [11] S. Kasai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 107204.
- [12] R. Moriya *et al.*, Nature Phys. **4** (2008) 368.

【論文・学会発表】

1. S. Sugimoto *et al.*, arXiv:condmat/1009.3363.(submitted)
2. 杉本聡志、福岡康裕、大谷義近、日本物理学会 第65回年次大会、「電流誘起された磁気渦対の低周波モードの検出」、岡山大学、2010年3月。
3. S. Sugimoto¹, Y. Fukuma, and Y. Otani, The IEEE 7th International Symposium on Metallic Multilayers, “Current excitation of translational modes in magnetostatically coupled magnetic vortices”, California, America, September 2010.