

論文の内容の要旨

論文題目 強磁性微小円盤における磁気渦のスピンダイナミクス
(Spin dynamics of a magnetic vortex in a micro-fabricated ferromagnetic disk)

氏 名 長谷川 徳信

微細加工技術の発展を皮切りに、近年加速度的に研究が進むスピントロニクス分野において、磁化の運動に関する研究は注目を集めている。微細加工された磁性体に関する研究は、現象そのものの面白さのみならず、応用の観点からも重要性を増しており、HDDやMRAMといった記憶メディアに必須であることに加え、スピントルクオシレータ、スピン波エミッター、マイクロ波ディテクタ等の数々の応用が提案されている。こういった素子では、磁化構造や運動がその特性に強い景況を与えることが知られており、例えばオシレータでは、一般的な単磁区構造での強磁性共鳴に加え、磁気渦構造と呼ばれる磁化構造でのコアの旋回運動を用いられたものも提案され、特に複数の磁気渦が相互作用しているときには、より良い性能が得られることが報告されている。このように、ある磁化構造持つ要素が周期的に配列され、それらが相互作用する場合には、磁化の運動が結晶中を伝播するスピン波のように振る舞う。このような構造は、マグノニック結晶と呼ばれるものの1つであり、オシレータとの親和性も高い一方で、フィルターやフェイズシフターへの応用が期待されている。

磁気渦構造は、強磁性円盤にしばしば現れる磁化構造であり、面内磁化の旋回方向と円心の吹き出し磁化によって特徴づけられ、それぞれカイラリティ、ポラリティと呼ばれる。また、数GHz帯の静磁モードに加え、数百MHz帯には、コアの旋回で記述されるトランスレーショナルモード(TM)と呼ばれる励起モードを有する。特にTMにおいては、複数の磁気渦を隣接させた場合に、円盤端に生じる磁極を通じて静磁的な相互作用が働くことが知られており、これを結合力とするマグノニック結晶の実現が期待される。このような磁気渦構造を要素に持つマグノニック結晶においては、その自由度であるポラリティやカイラリティにより変調可能な分散関係を持つことが予想されている。

本研究では磁気渦構造のTMに着目し、特にそれらが隣接した場合における静磁結合の寄与、及びマグノニック結晶としての振る舞いを検証することを目的とした。そのた

め、以下の流れで実験を行った。まず、パーマロイ(Py, Fe₂₀Ni₈₀)の円盤(半径 500 nm, 厚さ 30 nm)に内包される単磁気渦のダイナミクスを検出するための方法を決定した。次に、磁気渦対に系を拡張し、ダイナミクスに対する静磁相互作用の寄与、及びポラリティ、カイラリティによる変調を調べた。最後に、3つの磁気渦が1列に並んだ系に拡張し、3つの磁気渦が相互作用しながら旋回する定在波モードを調べた。詳細を以下に示す。

はじめに、単磁気渦のダイナミクスを観測するため2種類の方法を試した。まず、スピンプンピングを用いて、ac磁場により駆動される磁化ダイナミクス電圧として観測する手法を用いたところ、外部磁場を印加することで静磁モードが電圧として観測され、その符号が励起されるモードに依存することがわかった。マイクロマグネティックス法を用いた数値計算により、スピンドイナミクスの円盤内での分布がモードごとに異なることが原因であることが分かった。一方で、TMは観測されなかった。次に、スピントルクダイオード効果(STD)と呼ばれる、磁気渦のダイナミクスに伴う異方性磁気抵抗効果により、整流された電圧として観測される手法を用いた。その結果、磁気渦のTM励起に伴うTMと同周波数の抵抗振動と、2倍の周波数の抵抗振動が確認された。これらの抵抗振動は外部磁場に対する応答が異なり、モデル計算から共にTMによるものであることが確認された。

次に、磁気渦2つを隣接させた構造において、STDを用い静磁結合に伴うダイナミクスの変調を調べた。磁気渦対の一方を励起した結果、単磁気渦ではただ1つであった共鳴周波数(f_0)が f_0 を中心に2つに分裂し、その分裂幅がポラリティの組み合わせにより変調され、計4つの共鳴準位が存在することが確認された。この分裂した2つのモードは、数値計算との比較から、磁気渦間に働く静磁相互作用が引力として働く結合モード、斥力として働く反結合モードに対応し、コアの旋回運動の位相差により特徴づけられることが確認された。続いて、静磁結合により間接的に励起された磁気渦にも微弱なac電流を印加したところ、2つの共鳴周波数で正負の異なる電圧が観測された。これは、モードによって抵抗振動、つまりコアの旋回の位相が反転していることを示し、モードの分裂がコアの位相差により特徴づけられることに対応している。また、カイラリティの組み合わせを変えることによって、検出される電圧の符号が反転することが分かった。これは、カイラリティによって漏れ磁場の方向が反転したことによって、間接的に励起された円盤での旋回位相が反転していることに対応する。次に、同様の手法を用いて非共鳴周波数帯におけるコアのダイナミクスを定量的に検証した。その結果、非共鳴周波数帯では間接的に励起されたコアの旋回が、直接励起されたコアのそれに対してより大きくなり、間接励起された側でより多くのエネルギーが蓄えられることが分かった。マイクロマグネティックス法を用いた解析から、同効果は静磁相互作用がダンピングを変調していることが原因であることが示唆された。また、同効果はポラリティの組み合わせ、すなわち結合強度に正に依存することが確認された。

最後に、磁気渦3つが1列に並んだ系へ拡張した。この場合には、共鳴準位が3つ確認され、磁気渦対の場合と同様にポラリティに依存し共鳴周波数の分裂幅がポラリティに依存

することが確認された。次に、それぞれの円盤において電圧スペクトルを測定した結果、**dc**電圧の符号及び強度から、3つの磁気渦列に全体が振動する定在波モードの様子が確認され、共鳴周波数と旋回の位相差が対応していることが確認された。続いて、両端の磁気渦に同強度の**ac**電流を注入し、その電流間の位相差を変調したところ、その位相差に対応した定在波モードが選択的に励起できることが分かった。同実験結果は、周波数と定在波の波数に対応するものと考えられ、解析計算による磁気渦1次元格子の分散関係との対応が示唆された。この分散関係はポラリティやカイラリティに依存することが予想されており、その検証が求められる一方で、より大きな系ではPyの有限のダンピング定数によるエネルギーの散逸や、磁気渦の持つ自由度の変調方法が問題になる。こういった問題が解決されたならば、磁気渦を用いたマグノニック結晶は、特殊な格子構造における物性探索のモデルケースや、周波数デザインが可能なフィルターなどへの応用が期待される。