

学位論文の要約

題目

Magnetic dynamics in antiferromagnetically-coupled ferrimagnets: The role of angular momentum

(反強磁性的な磁化結合を持つフェリ磁性体の磁化ダイナミクス: 角運動量の役割)

氏名 奥野 堯也

Introduction

反強磁性体は、隣り合う磁化がそれぞれ反対方向を向くように交換結合し、全体として正味の磁化を持たない物質である。反強磁性体は、高速な磁化ダイナミクスおよび擾乱磁場に対する安定性から、高速動作かつ情報安定性の高い磁性デバイスの材料として近年盛んに研究が進められている。しかしながら、外部磁場に対する安定性という利点は、同時に実験的にその磁化ダイナミクスを誘起することが困難であることを意味する。一方、フェリ磁性体は、反強磁性的に交換結合した副格子磁化を持ちながら、それらの大きさが異なるため正味の自発磁化を有する物質であり、正味の磁化および角運動量が温度に依存して変化する。2017年に Kim らは、フェリ磁性体の正味の角運動量がゼロになる角運動量補償温度において、磁場による磁壁移動速度が著しく増大することを報告した。これは、磁化ダイナミクスが磁化ではなく角運動量の大きさによって決定されるため、角運動量補償温度では磁化ダイナミクスが反強磁性的になることに起因する。特筆すべきは、フェリ磁性体の角運動量補償温度では正味の磁化はゼロではないので、外部磁場によって反強磁性ダイナミクスを誘起できる点である。これが、反強磁性体にはないフェリ磁性体の特色であり、このためフェリ磁性体は応用と基礎の両面から注目を集めている。本研究では、Gd と FeCo が反強磁性的に結合したフェリ磁性合金ガドリニウム・鉄・コバルト(GdFeCo) における磁壁移動現象と磁気共鳴の温度依存性を調査することによって、フェリ磁性体の磁化ダイナミクスにおいて角運動量が果たす役割を明らかにすることを目指した。

1. Spin-transfer torques for domain wall motion in antiferromagnetically-coupled ferrimagnets

スピン移行トルクは、磁性金属に電流を印加した際に、交換結合を介して伝導電子から局在磁化に角運動量が移行される際に働くトルクである。スピン移行トルクに起因する磁化ダイナミクスは、基礎と応用の両面の関心から長らく精力的に研究されてきたが、研究対象

は主に強磁性体であり、反強磁性体やフェリ磁性体に働くスピン移行トルクはほとんど解明されていなかった。

本研究では、フェリ磁性体 GdFeCo の磁壁に働くスピン移行トルクの温度依存性を調査した。正および負の電流印加下で磁場による磁壁移動速度を測定したところ、電流の符号によって磁壁速度が変化した。これは、電流が磁壁に与えたスピン移行トルクに由来する速度変化であると考えられる。ここで、電流密度 J に起因する磁壁速度変化 ΔV を $\Delta V = [V(+J) - V(-J)]/2$ によって定義し、 $\Delta V/J$ の温度依存性を調査した。その結果、 $\Delta V/J$ は角運動量補償温度の近傍で符号反転することが明らかになった。この測定結果を理論的に説明するために、フェリ磁性体での磁場による磁壁移動速度式に、電流によるスピン移行トルクを組み込んだ式を導出した。この理論式を用いて実験結果がうまくフィッティングできたことから、理論の妥当性、すなわち角運動量補償温度に関してスピン移行トルクの断熱成分が反対称、非断熱成分が対称な温度依存性を示すことが実証された。さらに、フィッティングの結果得られたスピン移行トルクの非断熱性定数が磁気ダンピング定数に比べて著しく大きいことが分かった。これは強磁性体の場合（非断熱定数 \approx 磁気ダンピング定数）とは異なっており、フェリ磁性体におけるスピン移行トルクの起源の解明を目指した研究が活発になることが期待される。

2. Gilbert damping parameter of ferrimagnets probed by domain wall motion

磁気ダンピング定数は、磁化ダイナミクスが平衡状態へと緩和する速度を表しており、磁化ダイナミクスを特徴づける重要なパラメータの一つである。フェリ磁性体の磁気ダンピング定数に関しては、これまで、強磁性体の磁気共鳴理論をフェリ磁性体に適用した結果、有効的な磁気ダンピング定数が角運動量補償温度で無限大に発散すると考えられてきた。しかしながら、2017 年の Kim らの研究によってフェリ磁性体の磁化の挙動を反強磁性ダイナミクスによって解釈する必要性が提唱された。

本研究では、1 の実験で得られた磁場による磁壁移動速度から、反強磁性ダイナミクスを取り入れたフェリ磁性体の磁壁移動速度式を用いて、磁気ダンピング定数を評価した。ここで、磁場による磁壁移動速度は、電流密度 J に起因する磁壁速度変化を取り除いた、 $V_{\text{field}} = [V(+J) + V(-J)]/2$ によって得られる。その結果、角運動量補償温度 241 K を含む広い温度領域 (200 K \sim 300 K) で磁気ダンピング定数がほとんど温度に依存しないことが明らかになった。この結果は、磁気ダンピング定数が角運動量補償温度で無限大に発散するという従来知見を改めるものであり、フェリ磁性体の反強磁性ダイナミクスを反映した正しい描像が得られたことに意義がある。

3. Gilbert damping parameter of ferrimagnets probed by magnetic resonance

磁気ダンピング定数の評価方法として磁気共鳴を利用した手法が古くから研究されてきた。そこで、2 とは別の手法からもフェリ磁性体の磁気ダンピング定数を調査するために、フェリ磁性薄膜においてスピントルク誘起の磁気共鳴を観測した。その結果、磁気共鳴ピークの半値幅が温度に依存して変化することが観察された。強磁性共鳴の式を用いて半値幅から計算した有効的な磁気ダンピング定数は、角運動量補償温度に近づくにともなって増大した。一方で、新たに導出したフェリ磁性共鳴の式を用いて半値幅から計算した磁気ダンピング定数は、温度に対してほとんど変化しないことが分かった。この結果は、磁気共鳴ピークの半値幅の温度依存性が、磁気ダンピング定数ではなく磁化ダイナミクスの温度変化に起因することを示しており、2 の結果を補完するものである。

2,3 の磁壁移動現象および磁気共鳴の研究から、フェリ磁性体において、磁化ダイナミクスの緩和速度である磁気ダンピング定数は本質的に温度に依存しないことが実証された。この結果は、基礎物理の観点からだけでなく、フェリ磁性体を用いた次世代型磁気デバイスを実現するうえでも基盤となる重要な知見である。