

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	奥野 堯也
論文題目	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)		
(論文内容の要旨)			
フェリ磁性体は、異なる元素（あるいはイオン）の磁化が反強磁性的に交換結合するため、正味の自発磁化を有する。なかでも、希土類・3d遷移金属合金は、希土類と遷移金属の磁化が反強磁性的に交換結合してフェリ磁性を示すが、それぞれの磁化（および角運動量）のベクトル和である正味磁化（および正味角運動量）が温度に依存して顕著に変化する。特に、正味磁化が消失する温度を磁化補償温度、正味角運動量が消失する温度を角運動量補償温度と呼ぶ。興味深いのは、希土類元素と遷移金属元素のg因子がわずかに異なるため、磁化補償温度と角運動量補償温度が異なるという点である。これにより、角運動量補償温度では正味磁化がゼロでなく、磁場によって磁化ダイナミクスを誘起することが可能である。2017年にKimらは、フェリ磁性合金ガドリニウム・鉄・コバルト(GdFeCo)の角運動量補償温度において、磁場誘起の磁壁移動速度が著しく増大することを報告した。これは、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。この報告を皮切りに、フェリ磁性体の特色である「磁場誘起の反強磁性的な磁化ダイナミクス」が基礎と応用の両面から注目を集め、フェリ磁性体の磁化ダイナミクスに関する研究が数多くなされるようになった。本研究では、フェリ磁性合金 GdFeCo における磁壁移動現象と磁気共鳴現象の温度依存性をそれぞれ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。 本学位論文の1つ目の研究課題は「フェリ磁性体における磁壁移動に対するスピン移行トルク効果」である。スピン移行トルクは、磁性金属に電流を印加した際に、交換結合に起因して伝導電子から局在磁化へと角運動量が移行される際に働くトルクである。従来、スピン移行トルクの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、フェリ磁性体の磁壁に働くスピン移行トルクの温度依存性を理論および実験の両面から調査し、スピン移行トルクの断熱成分と非断熱成分を定量的に分離することに成功した。さらに、GdFeCoの角運動量補償温度においてスピン移行トルクの非断熱性定数が有効に働くことを示したが、これは反強磁性体において非断熱スピン移行トルクが有効に作用することを示唆するものである。 2つ目の研究課題は「磁壁移動現象から得られたフェリ磁性体の磁気ダンピング定数」である。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際のエネルギー散逸速度を表しており、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。従来、フェリ磁性体の磁化ダイナミクスは、反強磁性的に交換結合した2種類の磁化のダイナミクスが、正味角運動量 $\delta_s = s_1 - s_2$ という1つの自由度を用いることで強磁性体の磁化ダイナミクスと同様に記述できる、として理解されてきた。このモデルにおいては、エネルギー散逸もまた δ_s に比例するとされ、磁気ダンピング定数は有効的に角運動量補償温度で無限大に発散する。しかしながら、エネルギー散逸は反強磁性的に交換結合した2種類の磁化の両方から生じるはずである。こ			

のモデルの場合、エネルギー散逸は角運動量の総和 $s = s_1 + s_2$ に比例すると考えられ、磁気ダンピング定数は温度（正味角運動量）に依存しない。そこで、後者のモデルが正しいことを実証するため、フェリ磁性体の磁気ダンピング定数の温度依存性を調査した。本研究では、後者のモデルに基づくLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に基づいて磁壁移動速度の理論式を導出し、1つ目の研究課題において測定した磁壁移動速度の実験値を理論式に代入することで磁気ダンピング定数を計算した。その結果、角運動量補償温度を含む広い温度領域で磁気ダンピング定数が顕著な温度依存性を示さないことが明らかになった。これは、エネルギー散逸が角運動量の総和 s に比例するとするモデルの妥当性を支持するものである。

3つ目の研究課題は「磁気共鳴から得られたフェリ磁性体の磁気ダンピング定数」である。磁気共鳴法は、磁気ダンピング定数の定量的な評価方法として古くから利用されてきた。そこで、磁壁移動実験とは別の手法から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。（エネルギー散逸が δ_s に比例するモデルに基づく）従来のLLG方程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、温度が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、エネルギー散逸が s に比例するモデルに基づくLLG方程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。このことは、2つ目の研究課題と同様に、エネルギー散逸が角運動量の総和 s に比例するとするモデルの妥当性を裏付けるものである。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本学位論文は「フェリ磁性体における磁壁移動に対するスピン移行トルク効果」、「磁壁移動現象から得られたフェリ磁性体の磁気ダンピング定数」、および「磁気共鳴から得られたフェリ磁性体の磁気ダンピング定数」の3つの内容で構成されている。

「フェリ磁性体における磁壁移動に対するスピン移行トルク効果」では、フェリ磁性体の磁壁に働くスピン移行トルクの温度依存性を理論および実験の両面から調査し、スピン移行トルクの断熱成分と非断熱成分を定量的に分離することに成功した。さらに、 GdFeCo の角運動量補償温度においてスピン移行トルクの非断熱性定数が有効に働くことを示した。これは、反強磁性体において非断熱スピン移行トルクが有効に作用することを示唆したものであり、反強磁性体における磁壁移動への足掛かりとなる重要な結果である。

「磁壁移動現象から得られたフェリ磁性体の磁気ダンピング定数」では、磁場による磁壁移動速度から磁気ダンピング定数を計算した結果、角運動量補償温度を含む広い温度領域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を明らかにした。また、「磁気共鳴から得られたフェリ磁性体の磁気ダンピング定数」では、磁気共鳴のスペクトル線幅からフェリ磁性体の磁気ダンピング定数を求めた結果、角運動量補償温度から充分離れた温度領域ではあるが、磁気ダンピング定数が温度に依存しないことを実証した。以上の結果は、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の知見を改め、「フェリ磁性体の磁化ダイナミクスでは、反強磁性的に交換結合した2種類の磁化の両方からエネルギーが散逸する」とするモデルを裏付ける実験的証拠である。これらの結果は、フェリ磁性体における磁化ダイナミクスのエネルギー散逸機構に関して正しい理解が得られたという基礎物理の観点から意義があるだけでなく、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。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降