

Title	高強度テラヘルツ磁場を用いた非線形スピンダイナミクスの研究( Abstract_要旨 )
Author(s)	向井, 佑
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2015-03-23
URL	<a href="http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k18785">http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k18785</a>
Right	学位規則第9条第2項により要約公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	none

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	向井 佑
論文題目	高強度テラヘルツ磁場を用いた非線形スピンドYNAMIKSの研究		
(論文内容の要旨)			
<p>スピン多体系における非線形ダイナミクスは、主に強磁性スピン系において研究が進められ、基礎科学、技術応用の両面において重要な研究領域となってきた。一方、反強磁性スピン系におけるスピン多体運動 (反強磁性共鳴) は、隣接スピン間に働く強い交換相互作用のためにテラヘルツ領域の高い共鳴周波数をもつ。これまで、超短光パルスレーザーを用いたポンプ-プローブ測定によって、線形領域における動的磁気特性が詳細に調べられ、スピン間相互作用を平均場的に取り入れた理論モデルによって理解されてきた。高強度励起条件ではレーザー加熱によるスピン運動の擾乱が激しいために、非線形領域における反強磁性スピンドYNAMIKSの実験的な観測は難しく、既存の理論モデルが極端な非平衡状態にあるスピン多体運動を記述できるかは明らかになっていなかった。</p> <p>本研究では、高強度のテラヘルツ光発生技術と金属共振器構造による近接磁場増強効果を組み合わせることによって、これまでに達成されなかったテラヘルツ領域の高効率、高強度の磁気励起手法を確立し、反強磁性共鳴の強励起実験を行った。その結果、鉄酸化物反強磁性体である <math>\text{HoFeO}_3</math> において、高強度テラヘルツ磁場により駆動された非線形スピンドYNAMIKSを初めて見出した。</p> <p>まず、<math>\text{HoFeO}_3</math> 結晶表面に金属共振器を作製し、共振器のテラヘルツ近接磁場を用いた反強磁性共鳴励起により誘起される局所的な磁化振動を時間分解磁気光学顕微測定により記録した。線形領域において観測された磁気光学信号は、電磁場解析による近接場評価と現象論的な磁化運動方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に基づく数値シミュレーションから定量的に再現され、共振器構造により数十倍程度の共鳴的な磁場増強が起きていることを確認した。</p> <p>次に、この磁気励起手法を用いて <math>\text{HoFeO}_3</math> の非線形領域におけるスピンドYNAMIKSを観測した。反強磁性共鳴の強励起により、自発磁化の 40% に達する大振幅の歳差運動の誘起に成功した。磁化振動には励起強度に依存する共鳴周波数のレッドシフトが現れることを明らかにした。磁化ダイナミクスの詳細を調べるため、ヒルベルト変換をもちいた解析信号法により、磁化振動の瞬時周波数と振幅の時間変化、および両者の相関を抽出した。理論モデルや数値シミュレーションとの詳細な比較を行った結果、反強磁性共鳴周波数のシフトが磁化変化の二乗に比例することを見出し、この相関がスピン系の自由エネルギーと LLG モデルを基にした理論解析により定量的に再現できることを示した。一方で、強励起時みられる磁化振動の減衰レートの増加は、大振幅駆動されたスピン系における緩和が、線形領域において広く認められている現象論的な Gilbert 減衰項では説明できないことを明らかにした。これを説明するために、一般的な LLG 方程式に磁化変化の二乗に比例した非線形減衰項を導入することを提案し、観測された磁化ダイナミクスを再現することに成功した。このような非線形な減衰機構の可能性として、2つのゼロ波数マグノンが関与する 4 マグノン散乱過程を提案した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は反強磁性体における非線形スピンドイナミクスを実時間領域において詳細に調べた実験的研究である。強磁性体の非線形磁気現象において、磁気双極子相互作用によるスピン間の長距離力がそのダイナミクス強い影響を与えることが知られている。一方で、短距離的な交換相互作用によってピコ秒領域の高速磁気応答を示す反強磁性スピン系の非線形な動的磁気特性は、実験・理論の両面においてほとんど研究がなされていなかった。本論文では、高強度テラヘルツ磁場により反強磁性共鳴を大振幅励起し、誘起された磁化変化を超短パルス光による時間分解磁気光学測定によってサブピコ秒の時間分解能で観測した。磁性試料表面に磁気モードに共鳴する共振器構造を作製することによって、高効率のテラヘルツ磁気励起を可能にした点が本研究の最大の特長である。これにより、これまで報告されていなかったピコ秒領域での非線形スピンドイナミクスの観測にはじめて成功している。

測定対象とした傾角反強磁性体  $\text{HoFeO}_3$  は、テラヘルツ帯域の高周波反強磁性共鳴をもつ典型的な酸化物磁性体である。テラヘルツ磁気応答や交換相互作用定数を始めとする物質パラメータは既に先行研究によって決定されていることから、従来の理論モデルを越える非線形な動的磁気特性を明らかにしようとする本研究に最適な選択である。テラヘルツ励起後に測定された磁化振動の励起強度依存性と、時間領域における詳細な解析結果から、磁化振幅に依存する反強磁性共鳴周波数のレッドシフトを見出している。また、スピン系の自由エネルギーに基づく理論モデルから、非線形領域における共鳴周波数の解析的な表式を導出し、共鳴周波数の磁化振幅依存性が実験結果と定量的な一致を示すことを明らかにした。これは、平衡点から大きく駆動されたスピン系においても、スピン間相互作用の平均場的な取り扱いに基づくアプローチが適用できることを示す重要な結果である。さらに、非線形領域において、振幅に依存する磁化振動減衰レートの増加を見出した。この結果を再現するために、従来の磁化運動方程式に現象論的な非線形減衰項を加えることを提案し、そのダイナミクスが再現できることを明らかにした。減衰レートの増加の起源として4体のマグノン散乱を提案している。このような非線形な磁化振動減衰効果は本研究によりはじめて報告された非自明な非線形効果であり、高強度振動磁場励起下でのスピンドイナミクスを考える上で非常に重要な結果である。

本研究結果によって明らかとなった反強磁性スピンドイナミクスの非線形性は、非平衡状態におけるスピン多体問題を扱う基礎学問としての側面に加え、高速磁気デバイス等への技術応用を考える上でも重要である。さらに、本研究で確立したテラヘルツ近接場励起手法は  $\text{HoFeO}_3$  試料のみならず、高速スピンドイナミクスが重要となる種々の磁性体や強相関物質の物性研究において大きな役割を果たすことが期待される。以上のように、本論文は極端な非平衡状態における高速の反強磁性スピンドイナミクスを明らかにした先駆的研究であり、当該分野において大きな意義を持つものである。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、平成27年1月13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