

( 続紙 1 )

|  |                           |    |       |
|--|---------------------------|----|-------|
| 京都大学   | 博士 ( 理学 )                 | 氏名 | 永田 真己 |
| 論文題目   | フェリ磁性体マグネタイトにおけるスピン起電力の研究 |    |       |
| (論文内容の要旨)  |                           |    |       |
| <p>スピン起電力はスピントロニクス分野において近年提案された新規な起電力であり、磁壁や磁気コアなどのねじれた磁化構造が時間発展する際に発生する特徴をもっており、高周波スピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。しかし、その実験的な観測例は強磁性体に限られており、より多様な物質における観測例が待たれている。本研究の対象であるフェリ磁性体や反強磁性体は、隣り合う磁気モーメントが正反対の方向を向いているために大きな磁化のねじれが存在し、なおかつ強磁性体よりも高い共鳴周波数を持つ。この二つの性質は巨大なスピン起電力を発生する条件を満たしており、期待される巨大なスピン起電力は新規スピントロニクスデバイスへの応用が期待できる。本研究を通してスピン起電力の高周波スピントロニクスデバイスへの応用可能性を高めるとともに、反強磁性磁化と伝導電子の相互作用について明らかにし、基礎物理学的な知見を深めることを目的とし研究を行った。</p> <p>今回の実験では、フェリ磁性体であるマグネタイト (<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>) におけるスピン起電力を観測することを目的とした実験を行った。<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>は、フェリ磁性体であると共に、負のスピン偏極率をもつ物質であり、これまで主にスピン起電力が観測されてきた正のスピン偏極率をもつ強磁性体とは異なる特徴を有している。また、<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>は、高い電気伝導性を持ち、スピン起電力の実験に適している。まず、本研究ではMgO基板上に成膜した<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>のエピタキシャル薄膜を細線状に加工し、直上に高周波導波路を作製した。高周波導波路に流した高周波電流の吸収スペクトルを観測することにより、磁気共鳴のピークを観測した。さらに、磁気共鳴周波数の外部磁場依存性を調査することにより、今回測定に用いた<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>の磁気特性について明らかにした。</p> <p>実験の次の段階として、<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>の磁気共鳴に際して発生するスピン起電力を測定した。マグネタイト薄膜をくさび形形状の細線に加工することにより、非一様な磁気共鳴を誘起し、この非一様な磁気共鳴に際して発生する直流電圧の観測を行った。観測される直流電圧は、外部磁場の印加方向が細線と平行の時、スピン起電力の寄与のみから成るという理論的予想を踏まえ、外部磁場の印加方向を細線と平行に保ち、磁気共鳴に由来する直流電圧を測定した。</p> <p>その結果、<math>\text{Fe}_3\text{O}_4</math>において有限のスピン起電力が観測された。観測されたスピン起電力は、共鳴周波数に対して線形に依存しており、理論的な予想に従う結果であった。さらに、スピン偏極率正の強磁性体であるFeNiでも同様の実験を行い、両者のスピン起電力を比較すると、大きさは同程度である一方で、電圧の符号が反対であることが明らかになった。この結果は、スピン起電力のスピン偏極率依存性を示唆する結果であった。</p> |                           |    |       |

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、「フェリ磁性体マグネタイトにおける強磁性共鳴の研究」、「負のスピンの偏極率をもつマグネタイトにおけるスピン起電力の研究」の二つの内容で構成されている。

「フェリ磁性体マグネタイトにおける強磁性共鳴の研究」では、MgO(001)基板上にエピタキシャル成長した $\text{Fe}_3\text{O}_4$ を、サブミクロンスケールの細線状に加工し、絶縁体 $\text{SiO}_2$ で覆った後に、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 細線の直上に高周波導波路を作製した。高周波電流を導波路に導入することにより、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の磁気共鳴を誘起し、電磁波の吸収スペクトルを観測することにより、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の磁気異方性や磁気減衰定数等を求めた。観測された電磁波の吸収ピークは、強磁性共鳴の方程式によって説明されることがわかり、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ において誘起されている磁気共鳴が、強磁性的な共鳴であることが明らかになった。また、観測された電磁波の吸収スペクトルから、今回観測に用いた $\text{Fe}_3\text{O}_4$ が、過去に報告されているものよりも磁気減衰定数が小さく、格子欠陥や不純物濃度がより小さいということが明らかになった。さらに、磁気共鳴の際に $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の細線端子間に発生する直流電圧を計測し、観測された直流電圧の信号が、電磁波の吸収ピークと一致することを確認した。このことは、直流電圧信号が強磁性共鳴に由来し発生していることを意味する。一般に磁気共鳴に際して発生する直流電圧は、磁性細線の電気抵抗の時間的振動による高周波電流の整流作用によって説明される。しかしながら、今回観測された直流電圧は、その寄与のみでは説明できない寄与が存在した。この寄与がスピン起電力によって説明されると期待し、より正確にこの寄与について明らかにするために、続く研究を行った。本実験は、後の $\text{Fe}_3\text{O}_4$ におけるスピン起電力観測実験への最初のステップと位置づけられる。

「負のスピンの偏極率をもつマグネタイトにおけるスピン起電力の研究」では、磁気共鳴に際して発生する直流電圧にスピン起電力の寄与があることを明らかにし、その特徴を明らかにすべく研究を行った。フェリ磁性体である $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 薄膜と強磁性体であるFeNi薄膜にそれぞれ厚さ2~3nmの金を成膜し、長さ100  $\mu\text{m}$ 程度のくさび形の磁性細線に加工した。この磁性細線を高周波導波路に橋渡しし、磁性細線表面の金に流れる高周波電流により、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ およびFeNiの磁気共鳴を誘起した。高周波電流の密度がくさび形の磁性細線の幅に依存するために、誘起される磁気共鳴は非一様になる。非一様な磁気共鳴により発生する直流電圧は、表面に成膜された金からのスピンホール効果由来の寄与、高周波電流のエルステッド磁場由来の寄与、そしてスピン起電力の三者の寄与からなると考えられる。外部磁場の方向が細線長手方向の時、直流電圧はスピン起電力の寄与のみからなるという理論的予想を踏まえ、外部磁場方向に対する直流電圧の依存性を調査したところ、この直流電圧は共鳴周波数に線形に依存しており、理論的に予想されているスピン起電力の振る舞いと一致していることがわかった。さらに、FeNiと $\text{Fe}_3\text{O}_4$ において観測されたスピン起電力は同程度の大きさであるが、反対の方向に発生していることが明らかになった。FeNiと $\text{Fe}_3\text{O}_4$ はそれぞれ符号の異なるスピンの偏極率を持っており、この結果は、理論的に予想されるスピン起電力のスピンの偏極率依存性と一貫していることがわかった。本実験を除いて、スピン起電力のスピンの偏極率依存性を確認した実験例はなく、本研究はスピン起電力の理論の一般性を確かめたという点で意味を持つ。

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