

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654124

研究課題名(和文) スピン波メタマテリアルの磁気ダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Investigation of magnetization dynamics in spin-wave metamaterials

研究代表者

富田 知志 (TOMITA, SATOSHI)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：90360594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：相互作用する磁性ナノ粒子集合体から成るスピン波メタマテリアルでの、磁気モーメントの歳差運動の解析的モデルを構築し、ギルバート減衰定数の制御が構造制御を通じて可能であることを明らかにした。またスピン波メタマテリアルでのスピントルク発振における、巨視的な減衰定数の解析的な方程式を導いた。有効減衰定数がスピン流に線形に依存する一方、スピントルク発振周波数は注入されたスピン流に影響をうけないことを明らかにした。さらに強磁性金属のマイクロサイズのカイラル構造を作製し、特徴的な電子スピン共鳴信号の観測に成功した。本研究はスピン波を介してメタマテリアルとスピントロニクスを融合させる道を拓いた。

研究成果の概要(英文)：We constructed an analytical model for precession of a magnetic moment in spin-wave metamaterials consisting of interacting magnetic nanoparticles. It is revealed that the Gilbert damping factor can be controlled by the structure of the metamaterials. Additionally, analytical equations of the macroscopic damping factor were obtained for spin-torque oscillation in the spin-wave metamaterials. The equations indicated that the effective damping factor is dependent on the spin currents whereas the frequency of spin torque oscillation is independent of the spin currents. Moreover, we have experimentally succeeded in fabricating artificial chiral structures made of ferromagnetic-metals and observing a characteristic signal in electron spin resonance spectra. The present study is bringing together metamaterials and spintronics via spin-waves.

研究分野：メタマテリアル科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：メタマテリアル 強磁性金属 スピン波 磁気共鳴 ギルバート緩和定数 スピントルク発振 カイラルイティ 応力誘起自己巻き上げ

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電磁メタマテリアルは、光やマイクロ波など電磁波の波長よりも十分小さな人工構造物を用いて、天然の物質では見られない新奇な電磁気応答を起こすことができる人工構造物質である。マクスウェル方程式で記述される物質の電磁気学において、比透磁率と比誘電率が共に負となった場合に、負の屈折率が得られるとの理論予測がなされた [Veselago, *Sov. Phys. Usp.* (1968).]。そして金属リング共振器の配列を用いて、マイクロ波領域で負の屈折率が得られたこと [Smith et al., *Science* (2001).] が、電磁メタマテリアル研究の端緒となり、大きな研究の流れが出来ていた。

通常の電磁メタマテリアルでは、リング共振器のサイズ・形状が共振周波数を決める。よって、周波数制御可能なチューナブル電磁メタマテリアルの開発が望まれた。更にそれまでのメタマテリアル研究は、物質の没個性化を図ることで、特異な電磁気応答をもたらすメタマテリアルのデザインを容易にし、発展を遂げてきた。その一方で、磁性体のような“個性的”な物質の、しかもナノ・マイクロ材料に着目したメタマテリアルの研究は着目されてこなかった。

(2) そこで研究代表者らは研究開始までに、Ni など強磁性金属のナノ粒子の集合体でのスピン波共鳴を用いて負の比透磁率を得る、チューナブルスピン波メタマテリアルの実現を目指して研究を行っていた。我々は、磁性ナノ粒子集合体でのスピン波共鳴に着目し、直径 10nm 以下の Ni ナノ粒子からなるコンポジット材料の作製及び、スピン波共鳴の測定を行った [Tomita et al., *PRB* 71, 180414 (2005).]。また実験結果を解析するために、数値的モデルを構築し、数値計算を行い、スピン波メタマテリアルでの磁気モーメントのダイナミクスと比透磁率について調べてきた [Mitsumata and Tomita, *APL* 91, 223104 (2007), Mitsumata et al., *JPCM* 22, 016005 (2010).]。

(3) 一般にスピン波共鳴の理論解析には、ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式 (LLG 方程式) を用いる。LLG 方程式には一般解が存在しないため、数値的モデルを用いた数値計算が必要である。しかし、磁性ナノ粒子集合体において粒子間相互作用まで考慮した数値的モデルは膨大な計算リソースを必要とするため、取り扱いの簡便な解析的モデルの構築が望まれていた。よって本研究で磁性ナノ粒子系の解析的モデルを構築することを試みた。

磁性材料のスピン波の歳差運動の解析 (スピンダイナミクス) は、スピントロニクス分野でも注目されていた。歳差運動の大きさを決定するギルバート減衰定数に関しては、LLG 方程式を用いた解析が一般的であったが、本

研究で得られる解析的モデルも有効であると考えられた。すなわち本研究は、電磁波に対する比透磁率のみならず、ナノ・マイクロ磁性体の他の磁気特性の設計においても、見通しの良い理論的手法を提案できると期待された。

## 2. 研究の目的

本研究では、スピン波メタマテリアルの解析的モデルの構築、その妥当性や定量性を検証するための数値計算、更にこれらを用いた物性予測に基づいて実験を行い、スピン波メタマテリアルでの特異な磁気特性の実現を目指した。

## 3. 研究の方法

(1) 解析計算：磁気モーメントの歳差運動モデルの理論構築を行った。単一粒子の LLG 方程式から出発し、それを強制振動の運動方程式に落とし込んだ。強制振動の運動方程式の平衡状態から共鳴線幅を得て、最終的にギルバート減衰定数を見積もった。更にこれを多数の粒子で構成されるスピン波メタマテリアルへと拡張した。

(2) 数値計算：多粒子からなるスピン波メタマテリアルでの双極子相互作用を取り込んで数値計算を行った。5×5×9 の単純立方格子上に、直径 10nm の強磁性粒子を並べた系を考えた。x と y 方向は鏡面境界条件を、z 方向は開放境界条件を考えることで、粒子が並んだ薄膜を再現した。粒子間の双極子相互作用を考慮に入れ、各粒子について LLG 方程式を数値的に解いた。

(3) 実験：シリコン基板に固定された、強磁性コバルトのマイクロメートルサイズのカイラル構造を、応力誘起自己巻き上げ法で作製した。SU8 フォトリソグラフィーのパターンニング、コバルト成膜、リフトオフ、N メチル 2 ピロリドンによる SU8 剥離を経て、自己組織的にコバルト膜のカイラル構造が形成された。カイラル構造は走査型電子顕微鏡で観察し、カイラリティや巻き数などを評価した。X バンド (9.8GHz) マイクロ波を用いた電子スピン共鳴 (ESR) 測定装置で、試料の強磁性共鳴を測定した。

## 4. 研究成果

(1) 相互作用する磁性ナノ粒子集合体からなるスピン波メタマテリアルでの、磁気モーメントの歳差運動モデルを構築した。磁気モーメントに対する運動方程式である LLG 方程式は、円運動の振動方程式と等価であることを示した。この等価方程式を用いて磁性ナノ粒子系の解析的モデルを構築することができた。

更に数値計算の結果、このようなスピン波メタマテリアルでは、構造によってギルバート減衰定数の制御が可能になることを明ら

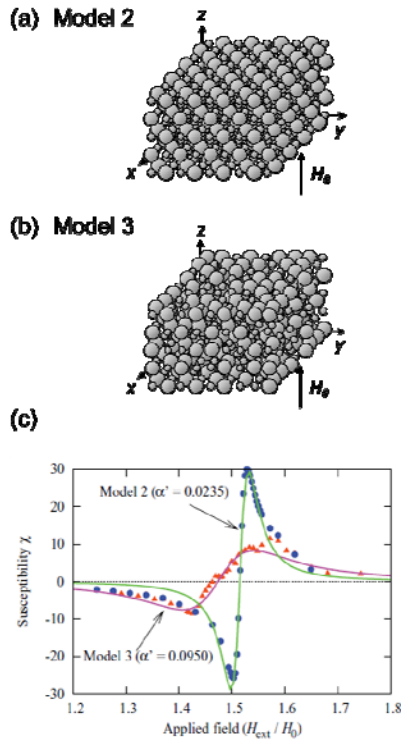


図1 (a)ナノ粒子がオーダーしたメタマテリアル、(b)ナノ粒子がランダムなメタマテリアル、(c)数値計算により得られたそれぞれのギルバート減衰定数

かにした(図1)。このことは「メタマテリアル」という考え方を、磁性体やスピン流など、新たな研究分野へ拡張する第一歩となった。

これらの成果は、Physical Review B 誌に論文発表し[Mitsumata and Tomita, PRB 84, 174421 (2011)],また日本磁気学会の第180回研究会及び第35回学術講演会で口頭発表した。

(2) これまで積み重ねた解析手法を応用し、スピントロニクスで重要な課題であるスピントルク発振による磁気共鳴状態を記述するLLG方程式を理論的に調べた(図2)。そしてスピントルク発振における、巨視的なスピンのギルバート緩和の解析的な方程式を導いた。この式は有効ギルバート緩和定数が、時間に依存しないスピン流の大きさに線形に依存することを示していた。対照的に、スピントルク発振周波数は、注入されたスピン流に影響をうけないことが明らかになった。しかしながら、時間依存で変化するスピン流、例えばスピン流パルスなどを使えばスピントルク発振の周波数を上昇できることを示した。

この結果は、メタマテリアルとスピンエレクトロニクスとの融合を加速させる成果となった。特にスピン流とメタマテリアルの融

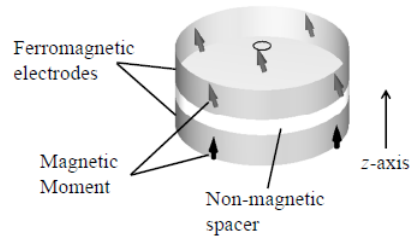


図2 スピントルク発振するスピン波メタマテリアルのモデル

合は我々が先駆けて報告した。

これらの成果は、Journal of the Magnetics Society of Japan、IEEE Transactions on Magnetics – Conferences 誌に論文発表した[Mitsumata and Tomita, JMSJ 36, 301L (2012), Mitsumata et al., IEEE Trans. Mag. – Conf. 48, 3955 (2012).]。また国際会議Metamaterials'2012(サンクトペテルブルグ・ロシア)、INTERMAG 2012(ヴァンクーバー・カナダ)において口頭発表した。

(3) これまでの理論的考察から我々は、カイラル構造を持つスピン波メタマテリアルに興味深いという結論に至り、実験を行った。強磁性金属のミクロンサイズのカイラル構造を、フォトリソグラフィとリフトオフを用

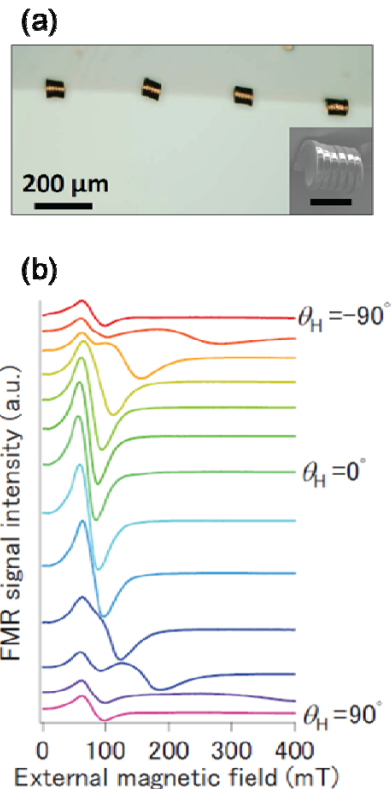


図3 (a)強磁性カイラルメタ分子、(b)角度分解電子スピン共鳴スペクトル

いて作製した。膜厚 30 ナノメートルのコバルト薄膜による、直径 50 マイクロメートルのカイラル構造の作製に成功した (図 3 a)。分光学的手法による形成メカニズムの解明を試みた。また並行して様々なプロセスを試行し、最適化を行った結果、基板に固定されたカイラル構造の安定した作製が可能になった。時計回り・反時計回りのカイラリティ制御にも成功した。

共振器型の ESR を用いて強磁性共鳴の測定を行った。直流磁場の印加方向を変化させ強磁性共鳴を測定したところ、印加磁場の方向を変化させても共鳴磁場が変化しない特徴的な共鳴信号の存在を見出した (図 3 b)。そしてこの信号は、三次元カイラル構造での Kittel モードの強磁性共鳴に起因することを明らかにした。

今後は、モデルを構築し数値シミュレーションや、伝送線路型の強磁性共鳴を用いた“一分子計測”などに展開することを予定している。

これらの成果は、日本物理学会の第 68、69 回年次大会、および日本磁気学会の第 37 回学術講演会において口頭発表した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Chiharu Mitsumata, Satoshi Tomita, Takeshi Seki, Masaki Mizuguchi, "Simple Analysis for Frequency Increase in Spin Torque Oscillation", *IEEE Transactions on Magnetics - Conferences* (Proceedings of InterMag2012), Vol. 48, No. 11, pp. 3955-3957, November 2012.  
DOI: 10.1109/TMAG.2012.2201700  
査読有
- ② Chiharu Mitsumata and Satoshi Tomita, "Analytic Solution of Landau-Lifshitz-Gilbert Equation in Magnetic Resonance due to Spin Torque Oscillation", *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 36, pp. 301-303 (Letter), June 2012.  
DOI:10.3379/msjmag.1206R004  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/msjmag/36/4/36\\_1206R004/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/msjmag/36/4/36_1206R004/_article)  
査読有
- ③ Chiharu Mitsumata and Satoshi Tomita, "Control of Gilbert damping using magnetic metamaterials", *Physical Review B*, Vol. 84, 174421 (6 pages), November 2011.  
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.174421  
<http://library.naist.jp/dspace/handle/10061/6653>  
査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 児玉俊之、冨田知志、細糸信好、柳久雄、"三次元強磁性カイラルメタ分子の作製

とスピン波共鳴"、*日本物理学会 第 69 回年次大会*、2014 年 3 月 30 日、東海大学・湘南キャンパス (神奈川県)

- ② 児玉俊之、冨田知志、細糸信好、柳久雄、"Co カイラルメタ分子の作製とスピン波共鳴"、*第 37 回 日本磁気学会学術講演会*、2013 年 9 月 6 日、北海道大学 (北海道)
- ③ 児玉俊之、冨田知志、黄晋二、上垣伸、細糸信好、三俣千春、柳久雄、"強磁性金属カイラルメタ分子の作製と磁気特性"、*日本物理学会 第 68 回年次大会*、2013 年 3 月 28 日、広島大学・東広島キャンパス (広島)
- ④ Chiharu Mitsumata and Satoshi Tomita, "Frequency control of spin torque oscillation in magnetic metamaterials for microwave generator", *Metamaterials'2012* (The 6th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics), 17-20 September 2012, St. Petersburg, Russia.
- ⑤ Chiharu Mitsumata, Satoshi Tomita, Masaki Mizuguchi, Takeshi Seki, "Simple, Analysis for Frequency Enhancement in Spin Transfer Oscillation", International, Magnetics Conference (*INTERMAG 2012*), 7-11 May 2012, Vancouver, Canada.
- ⑥ 三俣千春、"磁性ナノ粒子系におけるスピン波の制御とギルバート減衰定数の変化" (招待講演)、*日本磁気学会 第 180 回研究会*、2011 年 10 月 21 日、中央大学駿河台記念館 (東京)
- ⑦ 三俣千春、冨田知志、"メタマテリアルにおける磁気共鳴状態の制御とダンピング定数"、*第 35 回 日本磁気学会学術講演会*、2011 年 9 月 29 日、朱鷺メッセ (新潟)

[その他]

ホームページ等

[http://mswebs.naist.jp/LABs/optics/tomita/jpn/index\\_j.htm](http://mswebs.naist.jp/LABs/optics/tomita/jpn/index_j.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

冨田 知志 (TOMITA, Satoshi)  
奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教  
研究者番号：9 0 3 6 0 5 9 4

### (2) 研究分担者

三俣 千春 (MITSUMATA, Chiharu)  
物質・材料研究機構・その他部局等・その他  
研究者番号：7 0 6 0 0 5 4 2  
(平成 23 年度まで研究分担者)