

令和元年5月24日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04881

研究課題名(和文) 準周期構造を利用したトポロジカルスピン波デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of topological spin-device utilizing quasi-periodic structure

研究代表者

中山 和之 (Nakayama, Kazuyuki)

福岡大学・理学部・助教

研究者番号：80602721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：準周期構造を持つマグノン結晶を用いたスピン波の伝播特性を研究した。パーマロイ・ニッケルを材料として、ストライプ・グレーティング構造についてLLG方程式を数値的に解き、バンド構造及び固有モードの解析を行った。異なる準周期配列を連結させた準周期マグノン結晶の境界面に局在状態が出現するという興味深い構造を見出した。

スピン波の特性を評価するには、CPWアンテナを用いたSパラメータ測定法について検討する必要がある。そこでスピン波検出で用いられるアンテナの構造特性について実験的・数値的研究を行った。結果としてアンテナ幅によってスピン波の非相反性が制御可能であるという興味深い知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、スピン流を利用した情報処理機能デバイスの開発や超省電力情報伝送技術の開発が活発である。特にマグノンを利用したスピン波スピン流は、電子の流れを伴わず発熱を抑えることができるため、超省エネ技術の基盤研究として注目を集めている。本研究によって強磁性膜の質や人工構造体の作製精度に対する制約の少ない、スピン波デバイスの実現に向けた基盤技術を提供し、スピントロニクス、マグノンクスなど、スピン波を利用する幅広い研究分野への波及効果を与えることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We studied the propagation characteristics of spin waves using a magnonic crystal with a quasi-periodic structure. Using permalloy or nickel as a material, the LLG equation was numerically solved for the stripe and grating structure. Band structures and eigenmodes were analyzed. We found an interesting structure in which localized states appear at the interface of quasi-periodic magnonic crystals connected with different quasi-periodic sequences.

In order to evaluate the characteristics of spin waves, it is necessary to study measurement using the S-parameter method with a coplanar waveguide antenna. Therefore, we conducted experimental and numerical studies on the characteristics of the antenna structures used in spin wave detection. As a consequence, an interesting result was obtained that the nonreciprocity of spin waves can be controlled by the antenna width.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：メタマテリアル スピン波 準周期 トポロジー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、スピン流を利用した情報処理機能デバイスの開発や超省電力情報伝送技術の開発が活発である。特に集団的な磁気モーメントの励起波であるマグノンを利用したスピン波スピン流は、電子の流れを伴わず発熱を抑えることができるため、超省エネ技術の基盤研究として注目を集めている。スピン波を用いたデバイスを実現する上で、イットリウム鉄ガーネットのような絶縁性の強磁性体の薄膜が有用である。しかしながら絶縁性の強磁性膜を作製するには、高価な GGG 結晶基板上でのエピタキシャル成長による成膜が不可欠なキーテクノロジーとなる。そのためデバイス当たりのコストが課題となる。また集積化・シリコンプロセスとの整合性を考えると、金属系の強磁性体を用いても機能するスピン波デバイスの開発も重要となってくる。

他方、微細加工技術の向上により、フォトニッククリスタル、プラズモニクス、メタマテリアルのような人工構造物質を用いた電磁相互作用の研究が活発に行われている。スピン波デバイスの開発においても、強磁性体にナノ構造を作りこむことでマグノンの伝播制御を行うマグノニック結晶の研究が盛んだが、ナノ構造体の作製精度がデバイスを生産する上でボトルネックとなる。我々はこれまで準周期構造を持つプラズモニックメタマテリアルを用いて、光と物質の相互作用を制御する研究を行ってきた [1]。近年、準周期構造と量子ホール効果が数学的に類似の構造を持つことが海外の研究グループから研究報告があった [2]。我々はこの仕事に触発され、マグノニック結晶に準周期性を導入することでトポロジカルな性質を持つスピン波を発現させ、上記の二つの課題を同時に克服する低コストかつロバストなスピン波デバイス、準周期構造を持つマグノニックメタマテリアルによるスピン波制御の着想を得、開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

準周期的な配列を持つマグノニック結晶を用いて特異な界面状態(エッジ状態)を実証・解明しロバストかつ低コストなスピン波デバイスの開発を目指す。具体的には一次元準周期配列の代表的な構造であるフィボナッチ格子を持つような人工磁気構造体、準周期マグノニック結晶を作製する。量子ホール効果と類似の数学的構造をもつことから、エッジ状態は界面のラフネスに対して、強固でロバストな性質を持つことが期待される。本研究によって強磁性膜の質や人工構造体の作製精度に対する制約の少ない、スピン波デバイスの実現が可能となり、スピントロニクス、マグノニクスなど、スピン波を利用する幅広い研究分野への波及効果を与えることが期待される。

3. 研究の方法

(1) 本研究のマグノニック結晶は準周期構造を持つため、周期性をもつ固体結晶で有効なバンド計算の手法を用いることができず、数値的なシミュレーションが主な解析法となる。そこでゲント大の研究グループが開発した有限差分法に基づくオープンソースのソルバーである MuMAX3[3]を用いて、マイクロマグネティックシミュレーションを行った。材料としては、金属強磁性体であるパーマロイ(Py)、ニッケル(Ni)などを用い、ストライプ・グレーティング構造に関する設計・検討を行った。スピン波のモードとしては静磁表面波を考えた。

(2) スピン波特性を観測する方法として、コプレーナアンテナを用いた S パラメータ測定(アンテナ法)が広く用いられている。我々の提案する準周期構造を持つマグノニック結晶に関する実験報告はほとんど無いため、アンテナの構造と検出されるスピン波の特性に関して従来よりも慎重な検討が必要となる。そこでアンテナ構造と検出されるスピン波に関する検証実験を行った。具体的には、アンテナ幅と検出される静磁表面波の相反性の関係について、実験的・数値的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 本研究で取り組んだ準周期マグノニックメタマテリアル(QMM)の構造設計とその解析結果を報告する。ここではPyとNiを材料としたストライプ構造に関する結果を示す。図1(a)に我々の考案するQMMを示す。QMMはx方向に準周期配列を持っており、 a 、 b はそれぞれFibonacci格子の二つの元に対応している。今の場合 a :Py、 b :Niであり、各ユニットの幅は生成に用いる準周期配列に応じて100 nmもしくは200 nmとなる。サンプルの全長は17.8 μm である。厚み方向(z方向)は30 nm、y方向は800 nmとしている。この構造の特徴として赤点線(左)と青破線(右)で囲まれた二つの領域は異なる準周期配列を持ち、それらを接合することでQMMを構成している点にある。二つの接合界面は準周期配列を特徴づける無理数周波数が異なる物質の界面に相当しており、量子ホール効果とのアナロジーに基づくとトポロジカル数の異なる物質の界面に対応している。そのためスピン波の局在状態が発現することが期待される。ここでy方向に100 mTの磁場を印加した際の静磁表面波について考える。磁性体中のスピン波の低エネルギー励起状態をよく記述する式としてLandau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式が知られている。我々はLLG方程式を数値的に解くことで、図2(b)で示されるような横軸波数($1/\mu\text{m}$)縦軸周波数(GHz)とした時のバンド構造を求めた。図中の9 GHz-12GHz近傍の禁制帯の中に、フラットなバンドを持つモードが確認できる。このモードを可視化したものを図の右側に示す。QMMの接合界面にスピン波の局在状態が発現していることが分かる。本研究で考察したストラ

イブ構造の QMM は電子線描画装置で十分作製できるサイズであり、スピン波の周波数帯も標準的なベクトルネットワークアナライザで十分検出可能である。今後は本研究で提案・解析した構造を作製し、実験的な観測をすすめる計画である。

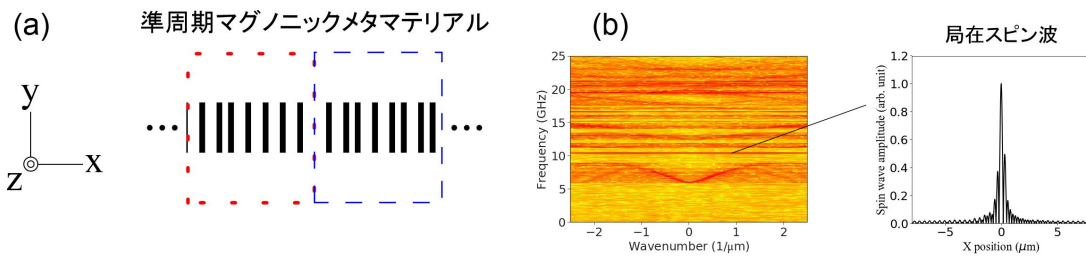


図 1 (a) 準周期メタマテリアルの構造 (b) バンド構造とスピン波の局在状態

(2) 静磁表面波がもつ非相反性とアンテナ幅の関係を実験及び数値解析によって検証した結果を報告する。結論として非相反性はアンテナの幅を変えることにより、制御可能であることが示された。静磁表面波の非相反性は印加磁場の反転に関して励起されるスピン波の強さの比で定義されるが、アンテナ幅が大きくなると非相反性は強くなる。図 2 の上図に実験結果、下図に NIST で開発された OOMMF によるマイクロマグネティックシミュレーションの計算結果を示す。アンテナ幅が大きくなると非相反性が強まるのが、実験・数値計算の両面からよく示されている。さらに非相反性の変化の起源を探るため、非相反性を示す電磁場の励起モードの計算を行った。図 3 にその解析結果を示す。上(下)図は磁場を y 軸の正(負)の方向に取った場合の励起磁化を計算したものである。磁場が正の時は、面直(hz)磁化と面内磁化(hx)の位相は揃っているが、磁場を反転した場合、位相が だけずれていることが確認できる。それ故磁場の方向によって信号の干渉の仕方が異なり、非相反性が生じる。hz と hx の振幅比は、アンテナ幅が広がるにつれより大きくなり、このため非相反性も同様に変化することが結論された。

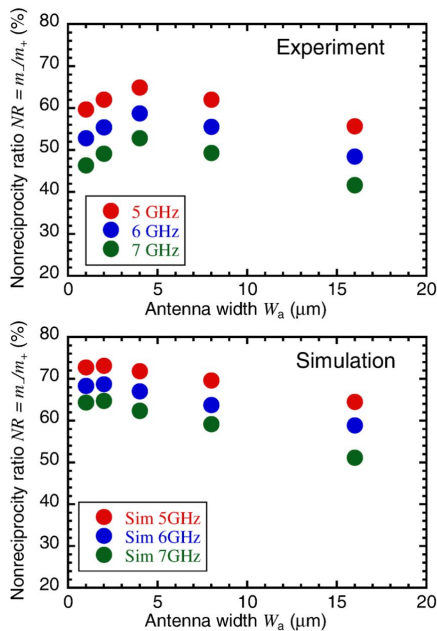


図 2 非相反性とアンテナ幅の関係

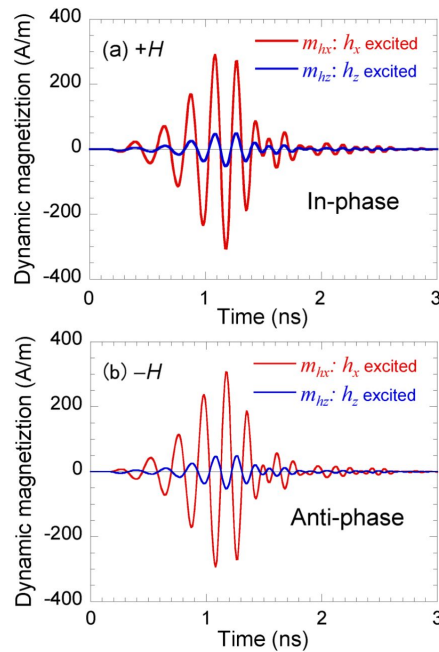


図 3 非相反性と励起磁化

本研究で明らかになったように非相反性をもつ静磁表面波を検出する際は、アンテナ幅を細くした方が QMM によって生じる信号変化の検出に適していることが判明した。この知見も合わせて、QMM によって生じる局在スピン波の実験的観測をすすめる。

[1] Y. Moritake, K. N. et al., Phys. Rev. B **90**, 075146 (2014).
 [2] Y. E. Kraus and O. Zilberberg, Phys. Rev. Lett. **109**, 106404 (2012).
 [3] A. Vansteenkiste et al., AIP Advances **4**, 107133 (2014).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Koji Shibata, Kenji Kasahara, Kazuyuki Nakayama, Volodymyr V. Kruglyak, Mustafa M. Aziz, and Takashi Manago, "Dependence of non-reciprocity in spin wave excitation on antenna configuration", Journal of Applied Physics, vol. 124, 243901 (6pages), December 2018.

DOI: 10.1063/1.5068722

Toshiyuki Kodama, Yusaku Kusanagi, Satoshi Okamoto, Nobuaki Kikuchi, Osamu Kitakami, Satoshi Tomita, Nobuyoshi Hosoi, and Hisao Yanagi, "Microwave Spectroscopy of a Single Permalloy Chiral Metamolecule on a Coplanar Waveguide", Physical Review Applied, vol. 9, 054025 (6pages), May 2018.

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.054025

Tomomi Suwa, Satoshi Tomita, Nobuyoshi Hosoi and Hisao Yanagi, "Magnetic Properties of Fibonacci-Modulated Fe-Au Multilayer Metamaterials", Materials, vol. 10, 1209 (7pages), October 2017.

DOI: 10.3390/ma10101209

[学会発表](計 7 件)

川崎連、妹尾駿一、岡本聡、菊池伸明、北上修、富田知志、細系信好、柳久雄、"コプレーナ線路を用いたPy/Ag/Bi三層膜の強磁性共鳴"、第66回 応用物理学会 春季学術講演会、2019年。

中山和之、富田知志、川崎連、笠原健司、細系信好、柳久雄、眞砂卓史、"準周期接合界面におけるマグノン状態の研究"、第79回 応用物理学会 秋季学術講演会、2018年。

Kazuyuki Nakayama, Satoshi Tomita, Ren Kawasaki, Kenji Kasahara, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, Takashi Manago, "Spin-wave Localization with Quasi-periodic Magnonic Metamaterials", The 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials'2018), Aalto University, Espoo, Finland, August 2018.

中山和之、富田知志、川崎連、笠原健司、細系信好、柳久雄、眞砂卓史、"準周期グレーティングによる静磁表面波の局在化"、日本物理学会 第73回年次大会、2018年。

川崎連、中山和之、富田知志、笠原健司、眞砂卓史、細系信好、柳久雄、"磁性体準周期グレーティング構造の作製とスピン波測定"、第65回 応用物理学会 春季学術講演会、2018年。

中山和之、富田知志、笠原健司、諏訪智巳、細系信好、柳久雄、眞砂卓史、"フィボナッチ格子を持つマグノンニック結晶のスピン波特性"、第78回 応用物理学会 秋季学術講演会、2017年。

中山和之、富田知志、笠原健司、児玉俊之、細系信好、柳久雄、眞砂卓史、"準周期構造を利用したスピン波制御"、日本物理学会 第72回年次大会、2017年。

[図書](計 1 件)

中山和之 (分担執筆)、技術情報協会、"磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術"、2018年 (第8章第4節、363-371)。

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：富田知志

ローマ字氏名：Tomita Satoshi

所属研究機関名：東北大学

部局名：理学部

職名：助教

研究者番号(8桁)：90360594

(2)研究協力者

研究協力者氏名：眞砂卓史

ローマ字氏名：Manago Takashi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。