

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05855・19K21040

研究課題名（和文）磁性絶縁体中におけるスピン波誘導起電力の基礎理論

研究課題名（英文）Theory of spin-wave-induced electric polarization in magnetic insulators

研究代表者

山本 慧（Yamamoto, Kei）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職

研究者番号：10746811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,970,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では磁性体中を伝搬する磁気揺らぎの波「スピン波」の性質が、材料における空間反転対称性の破れ（鏡に映した際に元の姿と同じにならない性質）によってどのように変化するかについての理論的研究を行い、複数の新現象のメカニズムを解明した。当初計画したスピン波によって絶縁体中に電気分極を誘起する研究は未完成に終わったが、それに深く関連した強誘電基板（自発的に電気分極を持つ絶縁体）と磁性薄膜の多層系でスピン波が一方通行性を獲得したり伝播距離を大幅に向上したりする現象を新たに発見し、その理論的記述を確立する成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン波は金属だけでなく絶縁体中も伝搬し、かつ磁気的な自由度であるスピンに情報を担うことができるため、情報処理技術において従来の金属や半導体を用いたエレクトロニクスでは実現できない機能を実現させるための基礎現象として注目されている。本研究結果によって明らかにされたスピン波の一方向伝搬性や長距離伝搬性は、スピン波をマイクロ波信号処理に用いるためには不可欠となる要素であり、新しい物理現象の開拓という学術的価値と将来の技術応用に向けた機能性向上の両面で意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we studied spin waves, i.e. propagating oscillations of magnetic moments, when the magnetic medium does not possess spatial inversion symmetry. Although we were not able to complete the initially proposed study of generating electric polarisation from spin wave dynamics, we discovered several closely related phenomena and established their theoretical descriptions. Specifically, we found that when a magnetic film is attached to the surface of an electrically polar substrate, the spin waves acquire a diode-like property where they achieve practically unidirectional transmission, and they become capable of travelling spatially up to 1 mm, an improvement of orders of magnitude in comparison with bare magnetic films. These new findings might help realising information transfer devices utilising spin waves in magnetic thin films.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン波 磁性薄膜

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁性の分野において、情報担体としての磁気ダイナミクスに対して興味が高まっている。中でも磁化の揺らぎが波として伝搬する現象であるスピン波は、金属だけでなく絶縁体中も伝搬し、省エネルギー情報処理技術の基盤となり得る要素として盛んに研究されている。特に近年、熱や固体の変形自由度である弾性波とスピン波の協奏現象が新たに開拓されつつある。

一方で物質の変形を電気分極に変換する圧電効果はライターからタッチパネルまで幅広く応用されている。研究代表者はこの誘電分極とスピン波の関係を調べることに興味を持って研究を開始した。特に磁性体中のスピン波と圧電材料を組み合わせることで、弾性波を介して磁気ダイナミクスと電気分極が結合することが予測され、これまでにない形で磁気と電気の変換を実現できる可能性があると考えた。

2. 研究の目的

- (1) 磁性体と圧電材料を含む薄膜ヘテロ構造における磁気ダイナミクス、弾性波及び誘電分極の間の相互作用を理論的にモデル化し、スピン波や弾性波の伝播特性にどのような特徴が現れるかを明らかにする。特に材料系における空間反転対称性の破れに着目し、それによって現れるスピン波の非相反性が圧電材料の影響でどう変化するかを調べる。
- (2) 当該ヘテロ構造を対象にした実験における測定データを理論的に解析し、理論モデルの妥当性を検討するとともに新現象のメカニズム解明を行う。

3. 研究の方法

- (1) 理論解析においては、当初格子模型に基づいた微視的な輸送理論による解析的計算と、Micromagnetic simulation による数値計算を組み合わせることを想定して研究を開始した。しかし研究が進むにつれて、実験側で得られたデータの解析のためには現象論的アプローチがより有用であることが明確となったため、そちらの理論的枠組みの整備を優先的に行なった。
- (2) 実験手法としてはネットワークアナライザを用いたマイクロ波透過実験を主体に、圧電材料・強誘電体と強磁性体薄膜のヘテロ構造の共鳴測定を行なった。具体的な材料や測定の詳細については成果の欄で述べる。

4. 研究成果

研究を進めていった結果、強磁性体のスピン波が伝搬しかつマイクロ波分光の手法が有効な GHz 程度の周波数帯においては、誘電分極とスピン波の結合の主要部分は音波（低周波数の弾性波）とスピン波の結合と等価であることがわかった。測定においても実質的に音波に付随する電気分極が信号として検出される。そこで理論の単純化のために、現象論的にスピン波と音波の薄膜ヘテロ構造におけるダイナミクスをモデル化し、マイクロ波透過実験のデータ解析に用いることができる枠組みを構築した（文献[1,2]）。このモデルにおいては電気分極は間接的にしか理論に現れないが、以下に述べる二つの実験研究でその妥当性が実証された。

(1) 表面音波とスピン波の混成によって生じる巨大非相反応答

この実験においては、図 1(a) に示した通り圧電材料であるニオブ酸リチウムの基板上に電極と強磁性体コバルト鉄ポロンを含む多層膜を蒸着し、GHz の周波数帯においてマイクロ波信号の透過率測定を行なった。電極への入力信号は基板表面で電圧を生じ、圧電効果によって界面の変形が誘起されることで表面に局在した音波「表面音波」が励起される。出力側電極では逆効果で表面音波が電圧に変換されて測定されるため、マイクロ波透過信号は表面音波の磁性体薄膜による吸収量を測定しているものと解釈できる。その結果、図 1(b) に示したように、表面

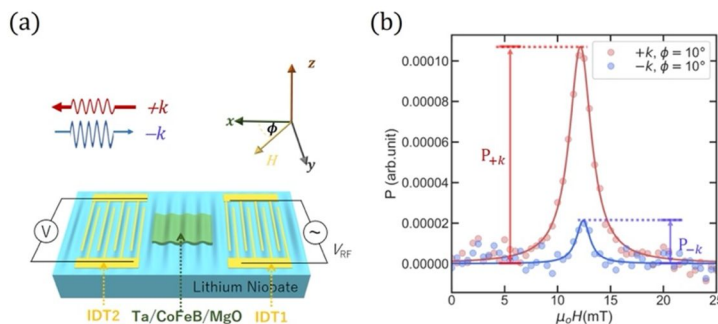


図 1 : (a) 実験セットアップの模式図、(b) 表面音波吸収量の非相反性

音波の吸収量が伝搬方向の左右によって大幅に異なる現象「非相反性」が観測された。また表面音波の吸収量と非相反性は、外部磁場の面内角度に強く依存することもわかった。

研究代表者が現象論的に導出した理論式は、図1(b)の実線で表される通り、磁場角度依存性も含めて実験結果を非常によく再現した。この現象論モデルに基づいて非相反性の起源を解釈すると図2のようになる。まず表面音波は材料界面における空間反転対称性の破れによって伝搬方向と直交した軸周りの回転運動を伴っている。この回転方向は伝搬方向を反転させるとやはり反転する。理論計算によれば、この回転運動は形状磁気異方性を通じて強磁性体の磁化に作用する有効回転磁場を生じる。有効磁場の回転方向と磁化の歳差運動の方向が一致すれば吸収が増大し、逆であれば吸収が抑制される。

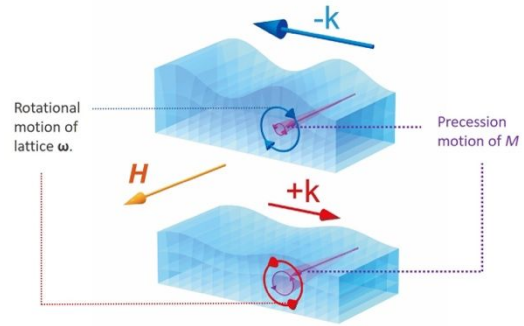


図2：非相反性が生じるメカニズム

この機構で生じる非相反性は最大 100%となり理論上は表面音波の完全な一方通行が実現できる。非相反性が大きくなるのは音波の周波数がスピン波の共鳴周波数と一致する場合のみであるため用途は限定的であるものの、マイクロ波アイソレータ等への応用可能性がある。本研究成果は Science Advances 誌に掲載された（文献[3]）。

(2) 音波との混成によるスピン波の長距離伝搬

類似のマイクロ波透過実験を、マルチフェロイック材料として知られるビスマスフェライトを含む薄膜構造に対しても行なった。ビスマスフェライトは圧電効果を示すが磁気秩序は反強磁性的である。強磁性体としてはマンガ酸ランタンストロンチウムを用い、図3のような膜構造を調べた。測定で得られたマイクロ波透過信号は、ビスマスフェライトを伝搬する電気分極を帯びた音波と、マンガ酸ランタンストロンチウムを伝搬するスピン波が混成したものであると解釈される。

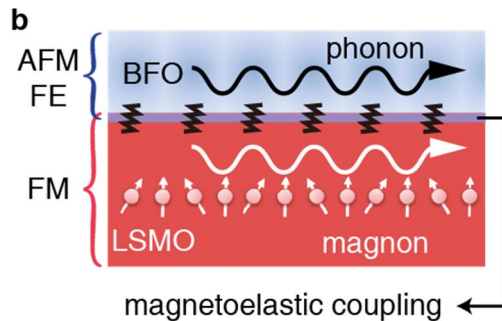


図3：ビスマスフェライトの薄膜構造

透過信号の距離依存性を示したのが図4である。音波もスピン波も外界にエネルギーを散逸するため距離によって減衰するが、減衰が速いモードと遅いモードがあることがわかる。赤で示したモードは通常のスピン波であり数十マイクロメートルしか到達しないが、黒で示した減衰の遅いモードはミリメートル単位の距離を伝搬することが示された。この伝搬距離の改善はスピン波より減衰が遅い音波との混成によるものと考えられ、研究代表者によるモデル計算は少なくとも定性的にはこの仮説を支持する。この測定データにはまだ不明な点も多いが、音波と電気分極が重要な役割を果たしているのは確実である。スピン波の伝搬距離向上はその応用における最重要課題であり、今後の研究の発展が期待される。本研究成果は Nature Communications 誌に掲載された（文献[4]）。

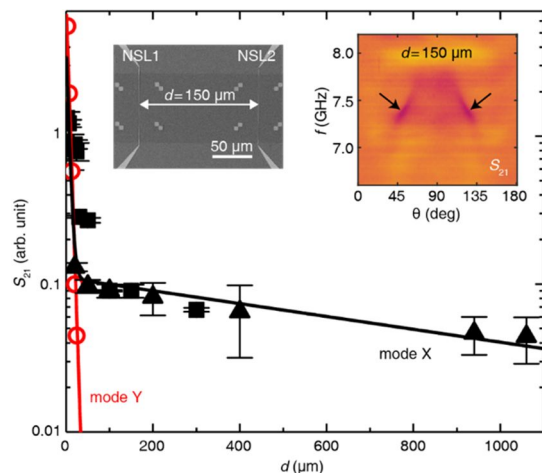


図4：スピン波音波混成モードの透過率の距離依存性

参考文献

- [1] K. Yamamoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 113702 (2020).
- [2] K. Yamamoto *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **545** (2022) 168672.
- [3] M. Xu, K. Yamamoto *et al.*, Sci. Adv. **6**, 3abb1724 (2020).
- [4] J. Zhang, K. Yamamoto *et al.*, Nat. Commun. **12**, 7258 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamamoto Kei, Xu Mingran, Puebla Jorge, Otani Yoshichika, Maekawa Sadamichi	4. 巻 545
2. 論文標題 Interaction between surface acoustic waves and spin waves in a ferromagnetic thin film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 168672 ~ 168672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2021.168672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhang Jianyu, Chen Mingfeng, Chen Jilei, Yamamoto Kei, Wang Hanchen, Hamdi Mohammad, Sun Yuanwei, Wagner Kai, He Wenqing, Zhang Yu, Ma Ji, Gao Peng, Han Xiufeng, Yu Dapeng, Maletinsky Patrick, Ansermet Jean-Philippe, Maekawa Sadamichi, Grundler Dirk, Nan Ce-Wen, Yu Haiming	4. 巻 12
2. 論文標題 Long decay length of magnon-polarons in BiFeO ₃ /La _{0.67} Sr _{0.33} MnO ₃ heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 7258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-27405-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Puebla Jorge, Xu Mingran, Rana Bivas, Yamamoto Kei, Maekawa Sadamichi, Otani Yoshichika	4. 巻 53
2. 論文標題 Acoustic ferromagnetic resonance and spin pumping induced by surface acoustic waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 264002 ~ 264002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab7efe	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Xu Mingran, Yamamoto Kei, Puebla Jorge, Baumgaertl Korbinian, Rana Bivas, Miura Katsuya, Takahashi Hiromasa, Grundler Dirk, Maekawa Sadamichi, Otani Yoshichika	4. 巻 6
2. 論文標題 Nonreciprocal surface acoustic wave propagation via magneto-rotation coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabb1724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abb1724	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Kei, Yu Weichao, Yu Tao, Puebla Jorge, Xu Mingran, Maekawa Sadamichi, Bauer Gerrit	4. 巻 89
2. 論文標題 Non-reciprocal Pumping of Surface Acoustic Waves by Spin Wave Resonance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 113702 ~ 113702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.113702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamamoto Kei, Thiang Guo Chuan, Pirro Philipp, Kim Kyoung-Whan, Everschor-Sitte Karin, Saitoh Eiji	4. 巻 122
2. 論文標題 Topological Characterization of Classical Waves: The Topological Origin of Magnetostatic Surface Spin Waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.217201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計4件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Three-magnon instability in a cavity
3. 学会等名 5th Symposium for the Core Research Clusters for Materials and Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Non-reciprocal pumping of surface acoustic waves by spin wave resonance
3. 学会等名 CEMS Topical Meeting Online on "Magnon-phonon coupling" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Topological characterization of magneto-static surface spin waves
3. 学会等名 APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop 2020 on "Highlights on condensed matter physics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 "Topological characterisation of classical waves: The topological origin of magnetostatic surface spin waves
3. 学会等名 Topomagnetism is coming: Relativity and correlations in topological magnets, Mainz (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

磁気の波とトポロジー - 「波」を抽象的数学でひも解く https://academist-cf.com/journal/?p=11723
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
スイス	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne			
ドイツ	Max Planck Institute Hamburg			
英国	University College London			
ドイツ	Technische Universitaet Kaiserslautern			
中国	Beihang University			