

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01865

研究課題名(和文)力学回転とスピンの相互変換

研究課題名(英文)Conversion Mechanism of Spin and Mechanical Rotation

研究代表者

前川 禎通 (Maekawa, Sadamichi)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・客員主管研究員

研究者番号：60005973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：角運動量保存則を用いて、力学回転の角運動量と物質中の様々な角運動量(スピン)との相互変換機構を明らかにし、「スピメカトロニクス」分野を構築することを目的とした。本研究では、表面弾性波の渦運動と磁性体中のミクロな角運動量(スピン)との相互作用に注目した。表面弾性波とスピンとの相互作用を利用して様々な磁性体のマグノンを検出できる。我々はこの手法を用いて、層状反強磁性体、CrCl₃のマグノン及びNiを用いた蜂の巣ナノ構造磁性体のマグノンを初めて捉えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究の目的は、角運動量保存則に基づき、自然界にある様々な角運動量(力学回転や電子スピンなど)の相互変換を明らかにし、「スピメカトロニクス」と呼ぶ学問分野を構築することである。特に、磁性体の研究に利用されている表面弾性波の回転運動と磁性体のスピン波(マグノン)との相互作用に注目し、最近注目されている層状反強磁性体、CrCl₃、と微細加工で得られたNiを用いた蜂の巣格子磁性体のスピン波を捉えるのに成功した。これらは、「スピメカトロニクス」に重要な発展の一歩である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to examine the interconversion between mechanical angular momenta and a variety of the angular moment including electron spin in materials based on the angular momentum conservation law and to develop the "spin mechatronics" field. Here, we focused on the interaction between the vortex motion of surface acoustic waves and electron spins in magnetic materials. Surface acoustic waves detect magnons (spin waves) in magnets. Using this method, we have, for the first time, detected magnons in the layered antiferromagnet, CrCl₃, and those in the nano-structured honeycomb lattice in Ni.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：表面弾性波 スピン波 層状磁性体 角運動量保存則 蜂の巣格子 力学回転 スピン格子相互作用

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自然界には結晶の格子振動に伴う回転運動や流体の流れの渦(局所回転)など、様々な力学回転が存在する。1915年にアインシュタイン達は力学回転と磁気モーメントの結合を見出し、電子の角運動量が磁気の起源であることを明らかにした。電子のスピン角運動量は角運動量保存則を通して様々な角運動量と相互作用することから、格子の回転運動や流体の渦(局所回転)等と電子スピンの結合により、力学運動を磁性に取り込んだ研究、「スピนมカトロニクス」の構築が可能である。また、「スピนมカトロニクス」は様々なデバイスへの応用も考えられる。

2. 研究の目的

角運動量保存則を用いて、力学回転の角運動量と物質中の様々な角運動量(スピン)との相互変換機構を明らかにし、「スピนมカトロニクス」分野を構築する。1915年にアインシュタイン達は磁性と回転運動との等価性を明らかにした。これは力学回転と電子の持つ角運動量(スピン)が角運動量保存則で繋がっていることを証明するものである。物質の持つ角運動量の間には、角運動量保存則を介して相互変換が可能である。本研究では、物質の巨視的な回転に加えて、流れに現れる渦運動(局所回転)など、様々な力学回転と物質中のミクロな角運動量(スピン)との相互変換による新たな分野「スピนมカトロニクス」を構築する。この研究は、物性物理、原子核物理、流体工学、量子情報等の分野にまたがる研究であり、理化学研究所(理研)と日本原子力研究開発機構(原研)の持つ特徴を活かした組織横断の共同研究により初めて可能になる研究である。

3. 研究の方法

磁化(スピン)の回転は「バーネット磁場」に加えて、「スピンベリ-位相」を生み出す。この「回転運動は非慣性系におけるゲージ場である」との認識は、種々の角運動量とエネルギーの相互変換に新たな視点を与える。当研究では、1915年にアインシュタイン達が提案した磁性体の磁化と力学回転との結合の研究を、現代の理論と実験技術を駆使して、現代的な角運動量相互変換という視点から再構築し発展させるものである。特に、固体表面を伝播する表面弾性波の回転運動と磁性の結合、電子流体中の渦と磁性の結合に着目する。

4. 研究成果

(1) 表面弾性波による磁気共鳴:

表面弾性波は物質の表面を伝播する音波であり、格子の回転運動を伴っている。そのため、磁性体を表面弾性波が伝播する場合には、磁化の容易軸からのずれを伴うため、磁気異方性を通して表面弾性波と磁化との相互作用が現れる。この相互作用は、表面弾性波の回転運動と磁化の角運動量保存則により現れるものである。本研究では、表面弾性波(phonon)と磁性薄膜のスピン波(magnon)との相互作用に着目し、表面弾性波による磁気共鳴現象の非相反性を調べた。音波が一方向にのみ伝播し反対方向には伝播しない現象を非相反性という。表面弾性波はその伝播方向によって角運動量が違う。一方、スピンの歳差運動(回転運動)は磁化の方向で決まっている。そのため、磁化の方向を決めると磁化の歳差運動と共鳴する表面弾性波はその伝播方向に依存する。実験では、FeCoB 薄膜で表面弾性波の磁気共鳴により100%の相反性を得た。これは応用上も大変魅力的な結果であると言える。また、FeNi 薄膜では表面弾性波の相反性がNiが80%の領域で符号を変えることを見出した。これはFeNi 強磁性の磁歪が組成に敏感であることを示しており、それが表面弾性波による磁気共鳴の非相反性を用いて調べられることを示している。FeNiは応用上大変重要な磁性体である。今回の我々の非相反性に関する研究は、磁性研究にも新たな手法を提供していると言える。さらに、Van der Waals 反強磁性体、CrCl₃、や meta-material honeycomb superlattice Ni 強磁性体においても表面弾性波による磁気共鳴を見出した。

(2) 電流渦による磁気構造制御:

磁性金属薄膜に様々な形状を導入することにより、電流の流れが制限を受け、電流渦が発生

する。我々はこの電流渦の角運動量と磁性体との相互作用に注目した。電流渦の角運動量は磁性体に有効磁場を与えることから、電流渦により磁気スキルミオンが生成されることを見出した。この結果は、最近、理化学研究所の FeGe 薄膜での実験で見出されている磁気スキルミオンの試料形状依存性を説明するものである。電流に対する流体力学的な数値シミュレーションと磁気ダイナミクスに対する数値シミュレーションを組み合わせ、スキルミオンの制御に有効な磁性薄膜の形状を探索する手法を提出した。この研究はスキルミオンを用いた磁気メモリーの応用にも寄与するものと期待される。さらに、電流渦を介して磁性イオン間に反対称交換相互作用 (Dzyaloshinski-Moriya 相互作用) が現れることも明らかにした。これにより、電流渦の磁性体への新たな応用も期待される。

引用論文

- [1] S. Maekawa and M. Tachiki; AIP Conf. Proc. 29, 542 (1976),
- [2] K. Yamamoto, W. Yu, T. Yu, J. Puebla, M. Xu, S. Maekawa, and G. Bauer: J. Phys. Soc. Jpn. 89, 113702 (2020).
- [3] M. Xu, K. Yamamoto, J. Puebla, K. Baumgaertl, B. Rana, K. Miura, H. Takahashi, D. Grundler, S. Maekawa, and Y. Otani: Sci. Adv. 6, eabb1724 (2020),
- [4] T. P. Lyons, J. Puebla, K. Yamamoto, R. Deaxon, Y. Huang, K. Ishibashi, S. Maekawa, and Y. Otani: Phys. Rev. Lett. 131, 196701 (2023),
- [5] L. Liao, J. Puebla, K. Yamamoto, J. Kim, S. Maekawa, Y. Huang, Y. Ba, and Y. Otani: Phys. Rev. Lett. 131, 176701 (2023),
- [6] J. Fujimoto, W. Koshibae, M. Matsuo, and S. Maekawa: Phys. Rev. B103, L220402 (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 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kei Yamamoto, Mingran Xu, Jorge Puebla, Yoshichika Otani, Sadamichi Maekawa	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
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 J. Puebla, Y. Hwang, S. Maekawa, Y. Otani	4. 巻 120
2. 論文標題 Perspectives on spintronics with surface acoustic waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 220502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 Sadamichi Maekawa, Takashi Kikkawa, Hiroyuki Chudo, Jun'ichi Ieda, Eiji Saitoh	4. 巻 133
2. 論文標題 Spin and spin current; From fundamentals to recent progress	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 20902
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Jilei Chen, Kei Yamamoto, Jianyu Zhang, Ji Ma, Hanchen Wang, Yuanwei Sun, Mingfeng Chen, Jing Ma, Song Liu, Peng Gao, Dapeng Yu, Jean-Philippe Ansermet, Ce-Wen Nan, Sadamichi Maekawa, Haiming Yu	4. 巻 19
2. 論文標題 Hybridized Propagation of Spin Waves and Surface Acoustic Waves in a Multiferroic-Ferromagnetic Heterostructure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied 19(2) 2023年2月16日	6. 最初と最後の頁 24046
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 Junji Fujimoto, Hiroshi Funaki, Wataru Koshibae, Mamoru Matsuo, Sadamichi Maekawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Skyrmion Creation and Annihilation by Electric Current Vorticity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Junji Fujimoto, Wataru Koshibae, Mamoru Matsuo, Sadamichi Maekawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Zeeman coupling and Dzyaloshinskii-Moriya interaction driven by electric current vorticity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B 103(22) 2021年6月1日	6. 最初と最後の頁 L220402-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 Spin current in Superconductor/Ferromagnet Heterostructures
3. 学会等名 12th International Conference on Magnetic and Superconducting Materials (MSM22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 Hydrodynamic Effects in Electron Fluids on Spintronics
3. 学会等名 2nd Global Summit on Condensed Matter Physics (CONMAT2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 Nonreciprocity in Spin Transport.
3. 学会等名 2022 Gordon Godfrey Workshop on Spins, Topology and Strong Electron Correlations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 Nonreciprocity in spin transport
3. 学会等名 2022 Workshop on Nanoscale Innovative Devices and Systems (WINDS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 Hydrodynamic Effects in Electron Fluids on Spintronics
3. 学会等名 2nd Global Summit on Condensed Matter Physics (CONMAT2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川禎通
2. 発表標題 Hydrodynamic Effects in Electron Fluids on Spintronics
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	中堂 博之 (Chudo Hiroaki) (30455282)	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・研究副主幹 (82110)	
研究分担者	大谷 義近 (Otani YoshiChika) (60245610)	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー (82401)	
研究分担者	Puebla Jorge (Puebla Jorge) (60753647)	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員 (82401)	

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
---------	---------