

令和 7 年 5 月 26 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2024

課題番号：21K13886

研究課題名（和文）マグノニック結晶におけるスピン波非相反性に関する理論研究

研究課題名（英文）Spin wave non-reciprocity in magnonic crystals

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・原子力科学研究所 先端基礎研究センター・副主任研究員

研究者番号：10746811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：4年間の補助事業期間にわたって、微細加工技術によるスピン波の非相反性と関連現象の制御を共通テーマに、特にスピン波の非線形応答やマグノニック結晶と表面弾性波との相互作用に起因する様々な新現象を開拓して、それらの発生メカニズムを理論的に解明した。特にスピン波のスール不安定性から生じる磁気共鳴スペクトル構造の変化と緩和時間の増大とマグノニック結晶を通過することで生じる表面弾性波の非相反透過及び回折において注目を集める成果を出版することができ、国際会議での招待講演を多数行った。その過程で反強磁性材料におけるスピン波や非平衡状態における磁化ダイナミクスなど当初計画にはなかった研究にも発展した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これらの研究成果の多くは、従来知られていた現象の範囲では説明できない新しい視点をもたらす発見であり、スピン波の基礎研究とそのスピントロニクス応用に大きな影響を与える結果である。特にスピン波の非線形現象は1960年代、及び80年代に詳しく調べられたが、現代の微細加工と測定技術によってそれらの新たな側面を開拓できることが明らかになった。これらの新現象はマイクロ波を応用した電気信号制御に新たな選択肢を与える可能性がある。表面弾性波の非相反性をマグノニック結晶で制御できることを原理的に示した事は、新しい原理に基づくマイクロ波センサーやアイソレータの探求に影響を与える可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this project, we aimed at understanding non-reciprocity and related phenomena of spin wave in nano structures, with a particular focus on spin wave non-linearity and control of surface acoustic waves using magnonic crystals. Through collaborations with several experimental groups both in Japan and abroad, we were able to discover new phenomena arising from Suhl instability that qualitatively alter the spectral shapes and magnetic relaxation rates with comprehensive theoretical descriptions, and succeeded in generating non-reciprocal propagation and diffraction of surface acoustic waves by fabricating appropriate magnonic crystals. These results were published in high impact journals and let to invited talks in international workshops. Along the way, they evolved into new research topics such as non-reciprocity of antiferromagnetic spin waves and magnetisation dynamics and fluctuations far from equilibrium, which are currently under way.

研究分野：理論物理学、スピントロニクス

キーワード：磁性体 スピン波 非線形性 表面弾性波

## 1. 研究開始当初の背景

磁気共鳴の研究は長い歴史を持つが、半導体技術の発展に伴って磁性材料もナノメートルスケールで微細加工が可能になったことで新しい研究が展開されてきた。特に有限の波長を持って伝搬するスピン波を発生、制御、測定できるようになり、過去には検討されてこなかった現象が注目を集めている。磁気秩序が時間反転対称性を破ることに起因して、スピン波は電磁波や音波など他の波動現象が持たない非相反性を備えている。このような性質は高周波数における電気信号の方向制御において重要な役割を果たすため、工学的観点からも注目され近年盛んに研究されている。しかし様々な理論的提案にもかかわらず、実際の実験で測定可能な非相反性を持つスピン波は、磁気双極子相互作用によって生じる静磁スピン波表面モードに事実上限られており、研究対象の拡大が望まれている状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究の当初計画では、微細加工技術によってマグノニック結晶と呼ばれる人工周期構造を磁性体によって作ることができることに着目し、それを用いてスピン波の非相反性を発生・制御する手法を調べることを目的とした。しかし計算を行って非相反性の大きさを見積もったところ、実験的に必ず存在する周期性の乱れに大きく影響されることがわかり、現状の技術では実現困難と思われたため研究の方向を少し変更した。同様の磁性体の周期構造を用いることで、そこを通過する表面弾性波に影響を与えることができる。表面弾性波がスピン波と結合することで非相反性を獲得することは2020年ごろまでに研究代表者らによって明らかにされていたが、磁性体の周期構造でその大きさを制御したり、これまでに見つかっていない磁場方向や材料でも非相反性を実現できる可能性を考え、その理論的裏付けと実験的実証を目的に研究を行った。

## 3. 研究の方法

理論的には、磁性体の周期構造に入射した表面弾性波がどのように散乱されるかを記述する枠組みを作り、それが干渉効果によって作り出すパターンによって透過率や屈折率に非相反性が生じるメカニズムとその大きさを決める要素因子を明らかにした。計算は主に解析的な手法に基づいて、単位格子による散乱率の磁場角度依存性と、その周期構造による増幅効果で生じる分散関係の変更を導出した。

研究協力者らは、 piezoelectric substrate であるニオブ酸リチウムの基板上に一對の楕円電極を作成し、その間に強磁性体であるニッケルを用いた周期構造をパターンニングして、楕円電極によって励起された表面弾性波が磁性体によってどのような影響を受けるかを、透過率の磁場依存性を測定することで調べた。また透過側電極の上下に一定の散乱角度に対応した位置に別の楕円電極を配置し、それらに到達する表面弾性波の強度非対称性を測定することで、屈折率の非相反性を調べた。これらの表面弾性波透過・屈折測定は波の位相情報を分解できる Vector Network Analyzer を用いて行われた。また非相反屈折実験では、マイクロ波インピーダンス顕微鏡を用いた干渉パターンの直接可視化も行われた。

## 4. 研究成果

### (1) 反転対称性を破る周期構造による面直磁場下の表面弾性波透過率非相反性

図1に今回の実験で作成した表面弾性波測定デバイスとニッケルの周期構造を示す。左右の楕円電極間を表面弾性波が伝播した際、間に置かれた磁性体が空間的に一様である場合は磁場を面内で波の伝搬方向から45度傾けた際に非相反性が生じることが先行研究によって知られていた。一方磁性体が

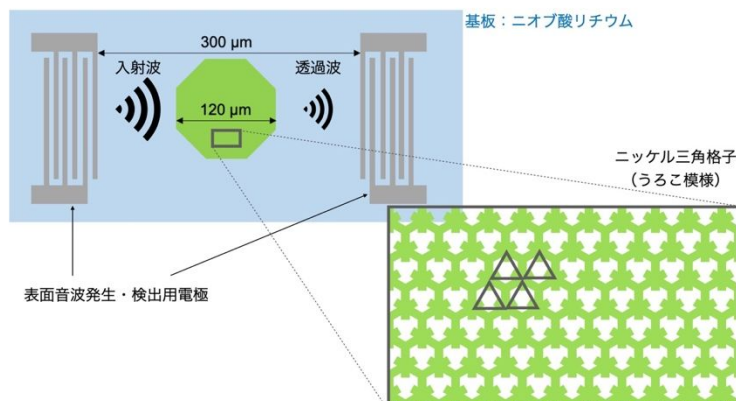


図1：楕円電極間に作られたニッケル三角格子

図に示したような三角格子状の周期構造を持つ場合、面直方向に磁場をかけた場合でも左右への透過率に差が生じて非相反性を実現できることが今回の実験で明らかになった。この現象のメカニズムを図2に示す。三角格子に左右から波が入射した場合、図2(a)に示したような三角形をそれぞれ左右方向に回る散乱のチャンネルが存在する。もし三角格子が磁性を持たなければこれら二つのチャンネルは時間反転対称性のため等価であり、よって散乱後の左右への波の透過率は等しい。しかし格子が磁性を持つ場合には時間反転対称性が破れるため図2(b)のような左右透過率の非対称性が現れる。このように周期構造によって表面弾性波の非相反性制御が出来ることはこれまで知られておらず、今回の成果ではその実証と原理の解明を同時に行うことに成功した[1]。

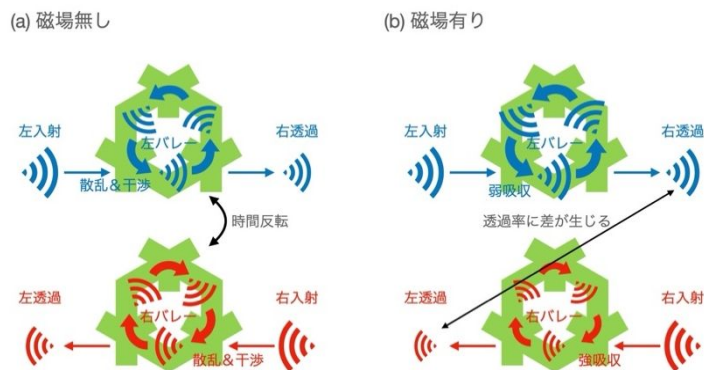


図2：磁性三角格子による非相反性のメカニズム

### (2) 磁性体を用いた回折格子による表面弾性波の非相反回折現象

非相反透過現象と関連するが発生メカニズムが異なる現象に非相反回折がある。入射方向に対して左右への回折振幅が異なるような状況を指すが、電磁波においては知られていたものの、他のタイプの波動現象では観測されたことがなかった。今回の研究成果において、このような非相反回折現象を表面弾性波において初めて実現した[2]。図3(a)にその実験セットアップを示す。上述の実験と同様に入力と出力用の楕円電極の間に磁性体でできた周期構造を配置するが、ここではスリット状の回折格子を用いる。伝播方向が上下にそれら回折波を検出するために、出力側にはさらに上下対称に二つの楕円電極を準備する。図3(b)は同じ入力に対する3つの出力の磁場依存性を示したものである。上下の電極には同じ磁場の値で出力強度の非対称性があり、それが磁場を反対に向けることで逆転することが観測された。

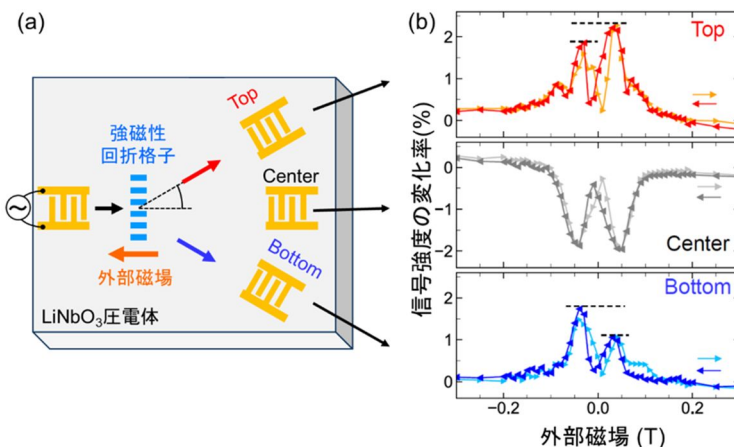


図3：表面弾性波の非相反回折実験結果

このような回折信号を磁場の方向を面内で回転させて取得し、量子力学の散乱理論に基づいた計算から得られる磁場角度依存性と比較することで、回折強度の非相反性が磁性体回折格子の磁気共鳴によるものであることが確かめられた。

### (3) スピン波の非線形不安定性による磁気共鳴スペクトルと緩和時間の制御

マグネティック結晶と非相反性に直接関連した上述の成果以外に、スピン波の非線形性に関してこれまで知られていなかった複数の新たな知見を得ることに成功した[3,4]。これらの現象はどちらも一次スール不安定性と呼ばれる磁気共鳴モードが互いに逆方向に伝播するスピン波の対と結合することに起因する非線形パラメトリック励起に基づいているが、一方ではこれが磁気共鳴と共振空洞モードの線型結合を阻害して共鳴スペクトルの磁場依存性に特徴的な変化をもたらす、他方では磁気共鳴モードがスピン波対と混成してその緩和率が一桁程度遅くなる。これらは予期されていなかった新現象の発見であり、磁気ダイナミクスの非線形現象について今後の研究の展開が待たれる。

[1] L. Liao, J. Puebla, K. Yamamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **131**, 176701 (2023).  
 [2] Y. Nii, K. Yamamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **134**, 027001 (2025).  
 [3] O. Lee, K. Yamamoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 046703 (2023).  
 [4] T. Makiuchi, T. Hioki, K. Yamamoto *et al.*, Nat. Mater. **23**, 627-632 (2024).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sheng Lutong, Duvakina Anna, Wang Hanchen, Yamamoto Kei, Yuan Rundong, Wang Jinlong, Chen Peng, He Wenqing, Yu Kanglin, Zhang Yuelin, Chen Jilei, Hu Junfeng, Song Wenjie, Liu Song, Han Xiufeng, Yu Dapeng, Ansermet Jean-Philippe, Maekawa Sadamichi, Grundler Dirk, Yu Haiming	4. 巻 -
2. 論文標題 Control of spin currents by magnon interference in a canted antiferromagnet	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-025-02819-7	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

1. 著者名 Ba You, Puebla Jorge, Yamamoto Kei, Hwang Yunyoung, Liao Liyang, Maekawa Sadamichi, Klein Olivier, Otani Yoshichika	4. 巻 111
2. 論文標題 Nonreciprocal resonant surface acoustic wave absorption in Y3Fe5O12	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.111.104401	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

1. 著者名 Nii Y., Yamamoto K., Kanno M., Maekawa S., Onose Y.	4. 巻 134
2. 論文標題 Observation of Nonreciprocal Diffraction of Surface Acoustic Wave	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 27001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.134.027001	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 Elyasi Mehrdad, Yamamoto Kei, Hioki Tomosato, Makiuchi Takahiko, Shimizu Hiroki, Saitoh Eiji, Bauer Gerrit E. W.	4. 巻 109
2. 論文標題 Nonlinear enhancement of coherent magnetization dynamics	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L180402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.109.L180402	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 Sud A., Yamamoto K., Suzuki K. Z., Mizukami S., Kurebayashi H.	4. 巻 108
2. 論文標題 Magnon-magnon coupling in synthetic ferrimagnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.104407	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

1. 著者名 Liao Liyang, Puebla Jorge, Yamamoto Kei, Kim Junyeon, Maekawa Sadamichi, Hwang Yunyoung, Ba You, Otani Yoshichika	4. 巻 131
2. 論文標題 Valley-Selective Phonon-Magnon Scattering in Magnetoelastic Superlattices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 176701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.176701	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 Lyons Thomas P., Puebla Jorge, Yamamoto Kei, Deacon Russell S., Hwang Yunyoung, Ishibashi Koji, Maekawa Sadamichi, Otani Yoshichika	4. 巻 131
2. 論文標題 Acoustically Driven Magnon-Phonon Coupling in a Layered Antiferromagnet	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 196701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.131.196701	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 Yamamoto Kei, Maekawa Sadamichi	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Magnetostatic Field Induced by Mechanical Deformations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Annalen der Physik	6. 最初と最後の頁 n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/andp.202300395	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 Makiuchi T., Hioki T., Shimizu H., Hoshi K., Elyasi M., Yamamoto K., Yokoi N., Serga A. A., Hillebrands B., Bauer G. E. W., Saitoh E.	4. 巻 n/a
2. 論文標題 Persistent magnetic coherence in magnets	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-024-01798-z	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

1. 著者名 Lee Oscar, Yamamoto Kei, Umeda Maki, Zollitsch Christoph W., Elyasi Mehrdad, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji, Bauer Gerrit E. W., Kurebayashi Hidekazu	4. 巻 130
2. 論文標題 Nonlinear Magnon Polaritons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 46703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.046703	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

1. 著者名 Chen Jilei, Yamamoto Kei, Zhang Jianyu, Ma Ji, Wang Hanchen, Sun Yuanwei, Chen Mingfeng, Ma Jing, Liu Song, Gao Peng, Yu Dapeng, Ansermet Jean-Philippe, Nan Ce-Wen, Maekawa Sadamichi, Yu Haiming	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	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) 10.1103/PhysRevApplied.19.024046	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

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 <sub>3</sub> /La <sub>0.67</sub> Sr <sub>0.33</sub> MnO <sub>3</sub> heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 7528
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 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 -

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Dynamical Stabilisation by Spin Transfer in a Nearly Isotropic Magnet
3. 学会等名 The 8th Symposium for the Core Research Clusters for Materials and Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本 慧
2. 発表標題 表面音波の回転と磁化ダイナミクス
3. 学会等名 日本磁気学会第250回研究会「次世代ナノテクノロジーを担う磁性理論・計算の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Dynamics of magnetic vortex driven by acoustic waves
3. 学会等名 Spin Mechanics 8 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Steady states of a ferromagnetic film under anti-damping torque
3. 学会等名 Spin Caloritronics XIII (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Phenomenological description of surface acoustic waves hybridized with spin waves
3. 学会等名 Samarkand International Symposium on Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Suhl instability in spintronics
3. 学会等名 Magnonics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Suhl instability in spintronics
3. 学会等名 Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated Systems 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本 慧
2. 発表標題 Topological materials without Brillouin zone
3. 学会等名 Cosmology and Gravity at Kobe 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Magnetostatic field induced by mechanical deformations
3. 学会等名 AIMR Mini Workshop on (Quantum) Magnonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Orbital angular momentum of azimuthal spin waves
3. 学会等名 Iwate Spintronics School, 2024 Winter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Surface acoustic wave rotations
3. 学会等名 German-Japanese Workshop-日独ワークショップ- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山本 慧
2. 発表標題 並進対称性を仮定しないカイラルフェルミオンの特徴付け
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会共催シンポジウム「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」(招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Non-linear control of magnon-polariton hybridisation
3. 学会等名 ICMFS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Yamamoto
2. 発表標題 Suhl instability in spintronics
3. 学会等名 Spin Cavitronics IV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本慧
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

隠された磁気を超音波で診断 - 高速磁気メモリ開発に向けた材料研究の新技术 -  
<https://www.jaea.go.jp/02/press2023/p23110901/>  
磁石によるうろこ模様で回る音波を制御 - 人工格子デザインで「左回り」「右回り」の読み出しに成功 -  
<https://www.jaea.go.jp/02/press2023/p23102601/>  
音波の新しい伝播現象を発見 一次世代の通信技術への展開に期待 -  
<https://www.jaea.go.jp/02/press2024/p25011501/>

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			
英国	University College London			
ドイツ	TU Kaiserslautern			
フランス	CEA	Universite Grenoble Alpes	CNRS	