

Title	マルチスケール角運動量変換の学理構築と電子スピンによる力学的回転の生成
Sub Title	Study on multi-scale angular momentum conversion and generation of mechanical rotation from electron spin
Author	能崎, 幸雄(Nozaki, Yukio) 松尾, 衛(Matsuo, Mamoru)
Publisher	
Publication year	2024
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2023.)
JaLC DOI	
Abstract	力学とスピン輸送が交差したスピンメカトロニクス現象が注目を集めている。そこでミクロな系とマクロな系のマルチスケール角運動量変換の物理解明に挑戦した。まず、磁性体を伝搬する表面弾性波の位相シフトから、格子回転と電子スピンの角運動量変換効率の定量に成功した。また、回転-電子スピン変換の高効率化に向けた強磁性絶縁膜の高品質エピタキシャル成長に成功した。さらに、格子回転や電子の渦度と電子スピンの結合がスピン軌道相互作用(SOI)の符号に依存しないことを発見し、回転する力学系に依らない磁気回転効果の普遍性を確かめた。 The phenomenon of spin-mechatronics, where mechanics and spin transport intersect, is garnering significant attention. We aimed to elucidate the physics of multiscale angular momentum conversion between microscopic and macroscopic systems. First, we successfully quantified the efficiency of angular momentum conversion between lattice rotation and electron spin by analyzing the phase shift of surface acoustic waves propagating through magnetic materials. We also achieved high-quality epitaxial growth of ferromagnetic insulating films, enhancing the efficiency of rotation-to-electron spin conversion. Moreover, we discovered that the coupling between lattice rotation, electron vorticity, and electron spin is independent of the sign of spin-orbit interaction (SOI), confirming the universality of gyromagnetic effects regardless of the dynamical systems.
Notes	研究種目：基盤研究 (A) (一般) 研究期間：2021～2023 課題番号：21H04565 研究分野：磁性物理学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21H04565seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04565

研究課題名（和文）マルチスケール角運動量変換の学理構築と電子スピンによる力学的回転の生成

研究課題名（英文）Study on multi-scale angular momentum conversion and generation of mechanical rotation from electron spin

研究代表者

能崎 幸雄（Nozaki, Yukio）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：30304760

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,400,000 円

研究成果の概要（和文）：力学とスピン輸送が交差したスピンメカトロニクス現象が注目を集めている。そこでミクロな系とマクロな系のマルチスケール角運動量変換の物理解明に挑戦した。まず、磁性体を伝搬する表面弾性波の位相シフトから、格子回転と電子スピンの角運動量変換効率の定量化に成功した。また、回転—電子スピン変換の高効率化に向けた強磁性絶縁膜の高品質エピタキシャル成長に成功した。さらに、格子回転や電子の渦度と電子スピンの結合がスピン軌道相互作用(SOI)の符号に依存しないことを発見し、回転する力学系に依らない磁気回転効果の普遍性を確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気回転効果による表面弾性波の位相シフト現象は、力学的回転から磁気、磁気から力学的回転が重畳した二次相互作用であり、本研究により位相シフト量を定量化することにより、これまで実証が難しかった磁気から力学的回転への変換とその効率を初めて明らかにすることができた。また、ミクロな系とマクロな系のマルチスケール角運動量変換がSOIにロバストであることを確かめたことは、磁気回転効果が様々な材料で発現することを示唆している。このように磁気回転効果のデバイス実装を現実的にした意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The phenomenon of spin-mechatronics, where mechanics and spin transport intersect, is garnering significant attention. We aimed to elucidate the physics of multiscale angular momentum conversion between microscopic and macroscopic systems. First, we successfully quantified the efficiency of angular momentum conversion between lattice rotation and electron spin by analyzing the phase shift of surface acoustic waves propagating through magnetic materials. We also achieved high-quality epitaxial growth of ferromagnetic insulating films, enhancing the efficiency of rotation-to-electron spin conversion. Moreover, we discovered that the coupling between lattice rotation, electron vorticity, and electron spin is independent of the sign of spin-orbit interaction (SOI), confirming the universality of gyromagnetic effects regardless of the dynamical systems.

研究分野：磁性物理学

キーワード：磁気回転効果 スピントロニクス 角運動量変換 表面弾性波

1. 研究開始当初の背景

ミクロな電子スピンのマクロな力学的回転と相互変換できることは、約 100 年前にアインシュタインらにより実験検証された。この磁気回転効果は、「磁性の起源＝電子の角運動量」を追求する根源的な問いから見つかった基礎物理学的に重要な効果として知られる。高速回転させるほど効果は増大するが、機械的に実現できる回転(～毎秒 1 万回転)では地磁気程度の効果しか得られず、その応用研究は皆無だった。しかし、2013 年に松尾(分担者)らが非磁性体内の局所回転運動の電子スピンに対する磁気回転効果を理論予言[Matsuo et al., Phys. Rev. B 87, 180402(R) (2013)]したことを契機に、物質中の電子スピンをデバイス応用するスピントロニクスにおいて、磁気と力学的回転の相互作用が再び注目を集めている。実際、東北大グループが円柱管を流れる水銀の渦[Takahashi et al., Nature Phys. 12, 52 (2016)]、慶大・能崎(研究代表者)らが電気伝導度をナノスケールで傾斜させた銅薄膜内の電流渦[Okano, YN et al., Phys. Rev. Lett. 122, 217701 (2019)]から、電子スピンの流れ(スピン流)を生成することに成功した。さらに研究代表者らは、渦状の弾性変形が伝搬する音波(レイリー波)を非磁性銅と強磁性ニッケル鉄合金に注入し、それぞれスピン流とスピン波の生成[Kobayashi, YN et al., Phys. Rev. Lett. 119, 077202 (2017), Kurimune, YN et al., Phys. Rev. Lett. 124, 217205 (2020)]に成功した。これらは、基礎物理探求から発見された磁気回転効果が応用面にも直結しうる物理現象であることの証左である。また、特定希少物質に頼らずありふれた材料に回転運動を与えるだけでスピン流を生成できるため、スピントロニクスデバイスにおいて材料設計自由度が飛躍的に向上する夢の技術として期待されている。

このように「巨視系(力学的回転)」から「微視系(電子スピン)」への角運動量変換が実証されている一方、固体デバイス応用に不可欠な薄膜試料において「微視系」から「巨視系」への逆変換は実現されていない。薄膜試料のスピン流やスピン波から力学回転を生み出す技術は、極小なモーター・アクチュエータを開発・実装するマイクロメカトロニクスに大変革をもたらすだけでなく、系が複雑で太刀打ちできなかったマルチスケール相互作用の理解に大きく貢献する。したがって、「微視系」から「巨視系」への角運動量の逆変換を定量的に調べることができる物理系と測定原理、実験手法の確立が渴望されている。

2. 研究の目的

磁気回転効果のデバイス化に不可欠な薄膜試料において、巨視系と微視系の角運動量変換を決定するファクターを実験により調べ、それを裏付ける理論モデルを構築する。そのため、研究代表者らが世界で初めて成功した薄膜試料で磁気回転効果を発現するプラットフォームである「角運動量を持つ音波からスピン流やスピン波を生成する物理系」を利用する。具体的には、薄膜試料を伝搬する音波の振幅変化と位相シフトから、音波と電子スピンの順方向と逆方向変換効果を分離抽出し、その物質依存性を明らかにする。音波は、回転周波数(回転運動のエネルギースケール)をナノテクノロジーにより系統的かつ広範囲に変調できるため、角運動量変換の素過程のモデル化に最適である。

3. 研究の方法

前記の研究目的に対する具体的な研究方法(1)～(5)を示す。

(1) 音波の強度・位相シフト測定による角運動量逆変換の定量評価

磁気回転効果由来の音波の振幅・位相シフトの高 S/N 測定を実現するため、まず測定装置の立ち上げを行った。具体的には、産総研の田丸らが開発した干渉 FMR 測定法[Tamaru et al., IEEE Magn. Lett. 5, 3700304 (2014)]を参考に、直流磁場発生電磁石と微弱な交流磁場発生用ヘルムホルツコイルを組み合わせ、磁場発生部にマイクロ波プローブ針を備えた全天回転型試料ホルダーを配置させた装置を作製した。本装置の性能を評価するため、ベクトルネットワークアナライザを用いた音波由来スピン波の検出実験を行ったところ、交流磁場変調を行わない従来法よりも高い S/N 比でスピン波の振幅と位相を測定できることを確かめた。

(2) 磁気回転効果の高感度電気検出法の開発

磁気回転効果の微視的メカニズム解明に向けて、磁気回転効果により生成されたスピン流の電氣的検出を高感度・高精度化する必要がある。そこで、スピン流の電氣的検出に用いられる一方向性スピンホール磁気抵抗(USMR)を増加させる材料条件を調べた。USMR とは、強磁性金属(FM)と非磁性金属(NM)を接合した 2 層膜において、電流に直交する磁化成分の反転により磁気抵抗が変化する現象である。この磁気抵抗の起源として、NM のスピンホール効果により生成されたスピン流が FM に非平衡なスピン蓄積を引き起こしたり、FM にスピン波を励起することにより、FM の電気抵抗が変化するメカニズムが提案されている。前者はスピン依存(SD-) USMR 効果、後者はスピン揺動(SF-) USMR 効果と呼ばれている。本研究ではこれまでほとんど報告のない USMR 効果の FM 依存性について詳しく調べた。

(3) 高効率な磁気回転効果発現に向けた磁性絶縁体のエピタキシャル成長技術の開発

伝導電子スピンと局在電子スピンを介した磁気回転効果の効率の差異を調べるため、絶縁性の強磁性体（フェリ磁性体イットリウム鉄ガーネット（YIG））への SAW 注入実験に着手した。バルクと同等の磁化特性を薄膜 YIG で実現するためには、結晶性の向上が不可欠である。一方、レイリー型 SAW を優先励起できる圧電体単結晶基板（LN 基板）は、原子配置の対称性が低いいためエピタキシャル成長を実現することが難しく、実現例がほとんど報告されていない。今回、成膜後の熱処理条件（基板温度、雰囲気）により、YIG を LN 基板上にエピタキシャル成長させることを目指した。

(4) 電子の運動に付随する渦度と電子スピンを結合させる材料の開発と磁気回転効果の評価

磁気回転効果の普遍的な性質を調べるため、固体中の伝導電子の運動に付随する渦度と電子スピンが結合する系を作製し、原子の運動に付随する渦度を有する表面弾性波の磁気回転効果と比較した。両者とも角運動量保存則に基づき力学的な回転運動がマクロな磁化やミクロな電子スピンに創発磁場を与えるが、創発磁場を生み出す微視的メカニズムを与える微視的相互作用に違いがあると予想される。そこで、電気伝導度をナノスケールで変調させた傾斜材料を作製し、傾斜面に電場を印加して生成した電流の渦度によるスピントルク強磁性共鳴法により測定した。

(5) 反強磁性スピンメカトロニクスの実証に向けた基礎検討

本研究課題では、強磁性体において順方向と逆方向の磁気回転効果、常磁性体において順方向の磁気回転効果をそれぞれ実証した。一方で、反強磁性体のスピントロニクス応用に関する研究が最近注目されており、高いスピントルク生成効率やスピン波の長距離伝搬などの優れた特性が報告されている。そこで、反強磁性体における磁気回転効果を系統的に調べるため、温度上昇に伴い強磁性(FM)から反強磁性(AFM)、常磁性(PM)に磁気相転移することが知られているジスプロシウム(Dy)に着目し、薄膜でもこれらの磁気相転移を実現するための成膜条件を調べた。

4. 研究成果

(1) 音波の強度・位相シフト測定による角運動量逆変換の定量評価【文献①】

強磁性 NiFe 薄膜中を伝搬する音波の強度と位相シフトを測定することにより、音波に含まれる格子回転運動と磁気（電子のスピン角運動量）の間の角運動量変換の効率について調べた。この測定系では、格子回転運動から電子スピンへの角運動量変換と同時に、その逆変換も生じるため、これが音波の位相シフト（アインシュタイン・ドハース(EdH)位相シフト）の変化として現れる。そこで、順方向と逆方向の角運動量変換に伴うこれらの変化を定量化するために必要な計算モデルを構築し、角運動量変換の相反性について調べた。その結果、測定された音波の位相シフト量と、順方向・逆方向の角運動量変換が完全に相反的であると仮定して計算した位相シフト量がよく一致することが分かった（図 1）。この結果は、強磁性体の磁化から格子回転運動を生み出せる、つまり本研究の目的である「薄膜試料の磁気から音波を生み出す逆変換が実現できる」ことを示唆する重要な知見である。

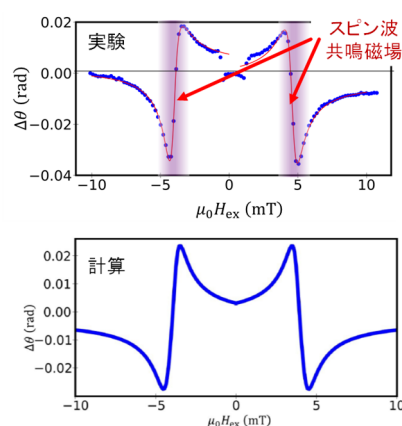


図 1 磁気回転効果による表面弾性波の EdH 位相シフト：(上)実験(下)理論

(2) 磁気回転効果の高感度電気検出法の開発【文献②】

本研究では、強磁性体のキュリー温度 (T_c) を下げることで、室温での USMR 効果が向上することを実証した。Pt を含む 2 層膜の室温 USMR 効果の大きさは、Fe/Pt を除くすべての 2 層膜において T_c で規格化した温度の 3/2 に比例することを発見した（図 2）。この関係は、室温 USMR 効果が非コヒーレントなマグノン励起の量に依存することを示唆しており、 T_c と非コヒーレントマグノンの相関を与えるスピン波理論によって説明できる。したがって、室温における USMR 効果の強度は、熱的に励起されたマグノンの割合の T_c 依存性を反映する。fcc 構造 FM と Pt の 2 層膜に見られた USMR 効果と比較して、bcc 構造を有する Fe と Pt の 2 層膜の最大 USMR 比は大幅に低かった（図 2）。fcc 構造と bcc 構造の FM 間の USMR 効果の不一致は、スピン依存 USMR (SD-USMR) 効果の大きさの違いに起因すると考えられる。なぜならば、スピンサブバンドの状態密度が SD 散乱の強度を決定するため、FM 層の結晶構造によって USMR 効果が異なるためである。これらの発見は、スピントルク駆動型デバイスにおける電子輸送の理解を深めるだけでなく、表面弾性波の磁気回転効果の電氣的検出の高感度化につながる成果である。

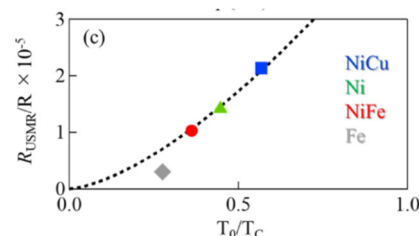


図 2 FM/Pt 2 層膜における USMR 効果のキュリー温度依存性

(3) 高効率な磁気回転効果発現に向けた磁性絶縁体のエピタキシャル成長技術の開発【文献③】

$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) は、高速かつ低消費電力のスピンロニクスデバイスを実現するための磁性絶縁体の有力候補の一つとして広く研究されている。しかし、従来のスパッタリングプロセスでは結晶性が低く、高品質 YIG 膜を作製するのが困難であり、それがギルバート減衰定数の深刻な増大につながる問題があった。さらに、YIG の結晶性を向上させるためには、格子定数が良く一致する単結晶 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 基板が一般的には不可欠である。本研究では、表面弾性波デバイスに広く利用されている単結晶 128° Y-X LiNbO_3 基板上に、マグネトロンスパッタリング法を用いて 30nm 厚の YIG 膜をエピタキシャル成長させる条件を明らかにした。図 3 の X 線回折の極点図を見ると、成膜後にアニール処理した 128° Y-X LiNbO_3 基板上で YIG (400) の斜方エピタキシャル成長が観察された。飽和磁化は $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 基板上的の高品質エピタキシャル YIG 膜の値と同等であり、有効ギルバート減衰定数も比較的低い (0.0039) ことなど、YIG 膜の高い結晶性を示す特性が得られた。今回開発した成長技術は、YIG 膜の表面弾性波デバイスへの応用と磁気回転効果の高効率化につながる成果といえる。

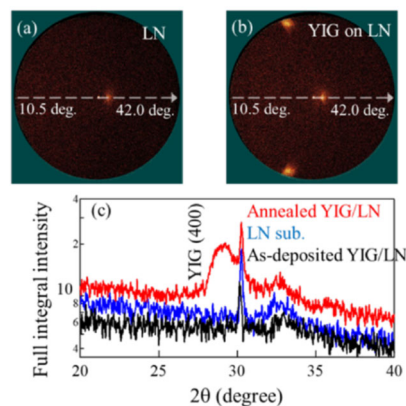


図 3 (a) LN 基板、および (b) LN 基板上に成長した YIG 膜について観察した X 線回折の極点図、(c) X 線回線強度の角度依存性

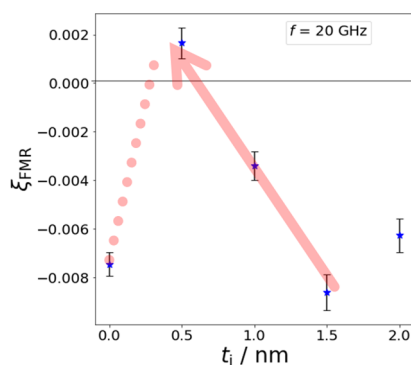


図 4 Ti/W 傾斜材料のスピントルク効率 ξ_{FMR} の傾斜幅 t_1 依存性

(4) 電子の運動に付随する渦度と電子スピンを結合させる材料の開発と磁気回転効果の評価【文献④】

電流の運動に付随する渦度と電子スピンの結合にスピン軌道相互作用 (SOI) が寄与しているかどうかを明らかにするため、正の SOI を持つ Si/Al 傾斜材料と負の SOI を持つ Ti/W 傾斜材料を作製し、スピントルク効率の符号を比較した。電気伝導度の勾配方向が同じであれば電流の渦度の極性が等しくなる。もし、電流の渦度の極性だけでなく SOI の極性も生成されるスピン流の極性を決定するファクターになるのであれば、両者は異なる符号のスピントルク効率を示すと考えられる。一方で、原子の運動に付随する格子運動の渦度が重要な役割を果たす表面弾性波の磁気回転効果のように、スピン流生成効率が SOI にロバストであれば、同一符号のスピントルク効率が予想される。図 4 は、Ti/W 傾斜材料のスピントルク効率の傾斜幅依存性である。負の SOI を持つ α -W のバルクのスピンホール効果により、Ti/W 傾斜材料のスピントルク効率は負の値を示している。しかし、Si/Al 傾斜材料と同様に傾斜幅が小さくなるにしたがって、スピントルク効率が正の方向に増加し、挿入層なしの条件では急激に減少した。この結果は、磁気回転効果による電流渦と電子スピンの結合が SOI の符号に依存しないことを示唆しており、渦度を与える力学系が異なっても磁気回転効果は SOI に依らない普遍的な効果であることが初めて確かめられた。

(5) 反強磁性スピンメカトロニクスの実証に向けた基礎検討【文献⑤】

Dy の AFM は hcp 構造の c 軸方向で磁化ベクトルがねじれたらせん磁性であるため、高品質な hcp 構造を実現することが重要である。Si (001) 基板を任意の温度で加熱しながら DC マグネトロンスパッタ法により Ta (2 nm) 下地として Dy (50 nm) を成膜し、結晶構造を X 線回折により解析した結果、623 K 以上に基板を加熱すると hcp (002) が法線方向に優先配向した良質な Dy 薄膜を

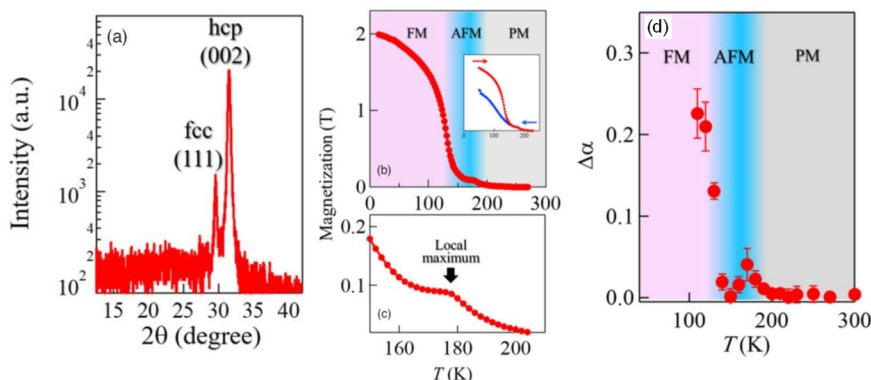


図 5 基板加熱 (623 K) によりスパッタ成膜した Dy 薄膜の (a) X 線回折プロファイル、(b)、(c) 磁化の温度依存性、および (d) スピンポンピング効果の温度依存性

得ることに成功した (図 5(a)). また、磁化の温度依存性を調べた結果、図 5(b, c)に示すように 130 K から 176 K の温度領域で AFM が出現することが確かめられた。さらに、Dy/NiFe 薄膜におけるスピンプンピング効果 (図 5(d) の $\Delta \alpha$) が磁気相転移により大きく変調されることを発見した。130 K の AFM から FM への秩序-秩序磁気相転移における $\Delta \alpha$ の急激な増加は、熱的スピントラッキング効果によるスピン混合コンダクタンスの増加に起因するとは考えにくい。この特徴的なスピンプンピングの温度変化は、磁気相転移がマグノン励起の容易さだけでなく、Dy のスピン拡散長も変化させることを示している。

参考文献

- ① S. Tateno, Y. Kurimune, M. Matsuo, K. Yamanoi, and Y. Nozaki, “Einstein-de Haas phase shifts in surface acoustic waves”, *Phys. Rev. B* **104**, L020404 (5 pages) (2021).
- ② K. Yamanoi, H. Semizu, and Y. Nozaki, “Enhancement of room-temperature unidirectional spin Hall magnetoresistance by using a ferromagnetic metal with a low Curie temperature”, *Phys. Rev. B* **106**, L140401 (5 pages) (2022).
- ③ K. Yamanoi, K. Hase, S. Komori, T. Taniyama, and Y. Nozaki, “Y3Fe5O12 film with multi-domain epitaxy on single-crystalline LiNbO3 substrate”, *APL Mater.* **12**, 021130 (5 pages) (2024).
- ④ H. Nakayama, T. Horaguchi, H. Sukegawa, T. Ohkubo, S. Mitani, K. Yamanoi, and Y. Nozaki, “Spin-torque generation using a compositional gradient at the interface between titanium and tungsten thin films”, *Phys. Rev. B* **107**, 174416 (9 pages) (2023).
- ⑤ K. Yamanoi, Y. Sakakibara, J. Fujimoto, M. Matsuo, and Y. Nozaki, “A large modulation of spin pumping using magnetic phase transition in single crystalline dysprosium”, *Appl. Phys. Express* **16**, 063004 (6 pages) (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamanoi Kazuto, Semizu Hikari, Nozaki Yukio	4. 巻 106
2. 論文標題 Enhancement of room-temperature unidirectional spin Hall magnetoresistance by using a ferromagnetic metal with a low Curie temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L140401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.106.L140401	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 Tateno Shoma, Kurimune Yuki, Matsuo Mamoru, Yamanoi Kazuto, Nozaki Yukio	4. 巻 104
2. 論文標題 Einstein-de Haas phase shifts in surface acoustic waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L020404 (1-5)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.L020404	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 山野井一人, 鳥羽竜生, 能崎幸雄	4. 巻 35-39
2. 論文標題 NiFe薄膜中の表面弾性波により励起されたスピン波強度の温度依存性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 MAG-21-142 1-6
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 無
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 榊原祐貴, 黒川雄一郎, 洞口泰輔, 山野井一人, 湯浅裕美, 能崎幸雄	4. 巻 35-39
2. 論文標題 斜めスパッタ成膜法を用いたスピン軌道トルクの変調に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 MAG-21-143 1-6
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 無
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 深見 周平, 山野井 一人, 能崎 幸雄	4. 巻 25-30
2. 論文標題 表面酸化させたCu/NiFe二層膜における一方向性スピンホール磁気抵抗効果の温度依存性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 MAG-21-086 1-6
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 無
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 Yamanoi Kazuto, Hase Kenta, Komori Sachio, Taniyama Tomoyasu, Nozaki Yukio	4. 巻 12
2. 論文標題 Y3Fe5O12 film with multi-domain epitaxy on single-crystalline LiNbO3 substrate	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 021130(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0189760	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 Nakayama Hayato, Horaguchi Taisuke, He Cong, Sukegawa Hiroaki, Ohkubo Tadakatsu, Mitani Seiji, Yamanoi Kazuto, Nozaki Yukio	4. 巻 107
2. 論文標題 Spin-torque generation using a compositional gradient at the interface between titanium and tungsten thin films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174416(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.174416	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 Yamanoi Kazuto, Sakakibara Yuri, Fujimoto Junji, Matsuo Mamoru, Nozaki Yukio	4. 巻 16
2. 論文標題 A large modulation of spin pumping using magnetic phase transitions in single crystalline dysprosium	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 063004(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acde67	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25件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 15件）

1 . 発表者名 R. Shinozaki, R. Toba, K. Yamanoi, Y. Nozaki
2 . 発表標題 Thickness Dependence of Alternating Spin Current Generation Produced by Gyromagnetic Effect in Surface Acoustic Waves
3 . 学会等名 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Yamanoi, K. Hase, Y. Nozaki
2 . 発表標題 Study on Epitaxial growth of Y3Fe5O12 FILM on 128 ° Y-X LiNbO3 substrate
3 . 学会等名 Magnetics and optics research international symposium 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Yamanoi, H. Semizu, Y. Nozaki
2 . 発表標題 Curie temperature dependence of unidirectional spin Hall magnetoresistance in metallic bilayers
3 . 学会等名 Joint-MMM intermag conference 2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 R. Shinozaki, R. Toba, K. Yamanoi, Y. Nozaki
2 . 発表標題 Film thickness dependence of alternating spin current generated via gyromagnetic effect of surface acoustic waves
3 . 学会等名 7th International Conference on Advances in Functional Materials (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1．発表者名 能崎幸雄
2．発表標題 非一様系の局所角運動量に由来する磁気回転効果を用いたスピントロニクス
3．学会等名 2022年 第83回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 能崎幸雄
2．発表標題 ナノスケール傾斜材料を用いた巨大スピン流生成
3．学会等名 2022年電気学会A部門大会（招待講演）
4．発表年 2022年

1．発表者名 篠崎 諒，山野井一人，能崎幸雄
2．発表標題 NiFe/Pt 二層膜を伝播する表面弾性波の非相反的な減衰効果
3．学会等名 第46回 日本磁気学会学術講演会
4．発表年 2022年

1．発表者名 K. Yamanoi, H. Semizu, Y. Nozaki
2．発表標題 Curie temperature dependence of unidirectional spin Hall magnetoresistance in metallic bilayers
3．学会等名 Joint-MMM intermag conference 2022（国際学会）
4．発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Tateno, Y. Kurimune, M. Matsuo, K. Yamono, Y. Nozaki
2 . 発表標題 Velocity Modulation of Surface Acoustic Waves via Einstein-de Haas Effect
3 . 学会等名 IEEE International Magnetism Conference (Intermag2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Nozaki
2 . 発表標題 Spin current generation using vorticity in solids
3 . 学会等名 Trends in MAGnetism - 2021 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Nozaki
2 . 発表標題 Spin current generation using a gradient of emergent field due to a gyromagnetic effect
3 . 学会等名 The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and the 4th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Nozaki
2 . 発表標題 Spin Current Generation using Macroscopic Angular Momentum in Solids
3 . 学会等名 Material Research Meeting (MRM 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1．発表者名 能崎 幸雄
2．発表標題 磁気回転効果を用いたスピン流生成
3．学会等名 「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク（Spin-RNJ）」シンポジウム
4．発表年 2022年

1．発表者名 山野井一人，鳥羽竜生，能崎幸雄
2．発表標題 NiFe薄膜中の表面弾性波により励起されたスピン波強度の温度依存性
3．学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4．発表年 2021年

1．発表者名 榊原祐貴，黒川雄一郎，洞口泰輔，山野井一人，湯浅裕美，能崎幸雄
2．発表標題 斜めスパッタ成膜法を用いたスピン軌道トルクの変調に関する研究
3．学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4．発表年 2021年

1．発表者名 能崎 幸雄
2．発表標題 ナノスケール傾斜材料の作成とそのスピントルク生成
3．学会等名 第21回 九州・山口・沖縄磁気セミナー
4．発表年 2021年

1. 発表者名 深見 周平, 山野井 一人, 能崎 幸雄
2. 発表標題 表面酸化させたCu/NiFe二層膜における一方向性スピンホール磁気抵抗効果の温度依存性
3. 学会等名 電気学会マグネティクス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yukio Nozaki
2. 発表標題 Giant gyromagnetic effect in thin film devices
3. 学会等名 NanoScientific Symposium Japan 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yukio Nozaki
2. 発表標題 Spin current generation using mechanical rotation
3. 学会等名 EU-Japan Workshop on Spintronics and Quantum Transformation (Spin-QX 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yukio Nozaki
2. 発表標題 "GYRO-spintronics" ~mechanical rotation for spintronics~
3. 学会等名 Technical Meeting on Nanomagnetism, MSJ (国際学会)
4. 発表年 2023年

1．発表者名 Yukio Nozaki
2．発表標題 Spin current generation using macroscopic rotational motion
3．学会等名 Spintronics workshop 2023（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2023年

1．発表者名 能崎幸雄
2．発表標題 Spintronics applications of gyromagnetic effect
3．学会等名 第47回 日本磁気学会学術講演会（国際学会）
4．発表年 2023年

1．発表者名 能崎幸雄
2．発表標題 磁気回転効果のスピン트로ニクス応用
3．学会等名 岩手スピン若手会2023（国際学会）
4．発表年 2023年

1．発表者名 山野井一人，鳥羽竜生，能崎幸雄
2．発表標題 NiFe/Pt 2層膜の音響スピン注入の温度依存性
3．学会等名 マグネティックス研究会
4．発表年 2023年

1．発表者名 山野井一人，能崎幸雄
2．発表標題 高次表面弾性波を用いた音響スピン波強度の周波数依存性
3．学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4．発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

能崎研究室ホームページ
<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/nozaki/index.html>

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	松尾 衛 (Matsuo Mamoru) (80581090)	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・客員研究員 (82110)	

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			
中国	中国科学院大学カブリ理論科学研究所			