

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03867

研究課題名(和文) 音波を用いたスピン流の高効率生成と伝導制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on efficient generation of spin current using macroscopic angular momentum

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) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：磁気を持たないありふれた金属である銅に音波を注入すると、結晶格子が毎秒10億回以上回転し、磁気の流れ(スピン流)が発生する。本研究では、音波に含まれる1兆分の1メートルオーダーの格子回転と交流スピン流を検出することに成功し、スピン流生成の微視的機構を決定することにより、スピン流生成効率が大きな材料を明らかにした。さらに、音波による直流スピン起電力生成と、電流渦による直流スピン流生成にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気の流れであるスピン流は、電荷の流れに頼っていた電子デバイスの高性能化・高機能化に大きな革新をもたらすと期待されている。しかし、これまでスピン流の生成には磁気の高い物質や電子スピンと電流が強く結合する貴金属が不可欠であった。本研究は、より普遍的な物理法則である角運動量保存則を用いた全く新しいスピン流生成法を提供するものであり、CuやAlなど地球上に豊富に存在するクラーク数の大きい元素を用いたスピンデバイス実現に繋がる。

研究成果の概要(英文)：Spin current, i.e. a flow of magnetization, can be generated in nonmagnetic Cu by applying an acoustic wave which consists of nonuniform rotation of atomic lattice with a frequency of gigahertz order. In this study, we have succeeded to measure not only a picometer order amplitude of lattice rotation but also an amplitude of acoustically generated alternating spin current which helps us to understand the microscopic mechanism of the spin current generation. From these experimental and theoretical studies, we have clarified which material is appropriate for the acoustic generation of spin current. Moreover, we have succeeded to generate both direct spin motive force and direct spin current from a lattice rotation in an acoustic wave and a vorticity of electric current, respectively.

研究分野：磁性物理学、スピントロニクス

キーワード：スピン流 表面弾性波 スピン起電力 スピン渦度結合

1. 研究開始当初の背景

物質の磁気を源である電子スピンの方位制御には、磁場との相互作用(ゼーマン効果)や、電子の軌道角運動量とのスピン軌道相互作用(SOI)、スピン同士の間量子力学的な交換相互作用を用いる方法が一般的である。一方、スピンは角運動量の次元を持ち、回転対称な系ではネーターの定理により角運動量保存則に従う。つまり、回転運動(巨視的角運動量)と電子スピン(微視的角運動量)は双方向に変換可能であり、角運動量保存則は磁気と力学を繋ぐ重要な架け橋である。実際に、強磁性体の自発磁化(電子スピンの自発的に揃った状態)について、「回転運動⇒磁化」(アインシュタイン・ドハース効果)と「磁化⇒回転運動」(バーネット効果)の変換が約 100 年前に実験検証された。しかし、微弱な効果のため、磁化や運動制御への応用はほとんど行われなかった。

一方、自発磁化に加えて、伝導電子のスピンを機能動作に利用するスピントロニクスが急速に発達しており、スピンの流れ(スピン流)の生成とその輸送制御の確立が急務となっている。従来は、自発磁化もつ強磁性体、または SOI の大きな貴金属がスピン流生成に不可欠であり、自発磁化を持たず SOI の小さな Cu や Al はスピン流生成には不向きとされてきた。一方、Cu や Al は、スピン拡散長が長く、スピン流の長距離輸送が可能である。したがって、Cu や Al がスピン流生成源として機能すれば、同一物質で生成源と配線回路を作製でき、スピンドバイスの性能劣化を引き起こす異物質界面でのスピン散乱問題を根本的に解決できる。最近、研究分担者らが加速運動を伴う非慣性系に拡張したディラック方程式を解くことにより、回転運動が巨視的な磁化を生み出すだけでなく、伝導電子のスピン整列(スピン蓄積)を引き起こすことを理論予言した。スピン流は、スピン蓄積の勾配方向に流れる非保存の拡散流である。したがって、非一様な回転運動(渦度)がスピン流を生成する。この理論予言で重要な点は、Cu や Al がスピン流生成源になり得ることである。この予言に基づき、2016 年に東北大グループが円柱管内の水銀の乱流がスピン流を生成、2017 年に研究代表者らが渦状の弾性変形が表面を伝搬する音波(SAW)を用いて Cu 薄膜にスピン流を生成することに成功した。これらは、理論、実験とも研究代表者、分担者を含む日本発の研究であり、学術誌、国際学会にて世界的に注目を集め、他の追随を許していない。Cu や Al など地球上に豊富に存在するクラーク数の大きい元素を用いたスピンドバイスの実現に繋がる重要な成果であり、これを実デバイス水準に昇華させる研究が渴望されていた。

2. 研究の目的

研究代表者らが初めて実現した音波注入によるスピン流生成を様々な材料、デバイス構造に対して系統的に研究し、巨視的回転と電子スピンの結合 (SVC:スピン渦度結合) の微視的理論の精密化と、高効率なスピン流生成に求められる条件を明らかにする。次に、SVC をスピンドバイスの実装の一例として、直流スピン起電力(SMF)生成の実証実験を行う。従来の SMF 生成法では、磁気渦や磁壁、スキルミオンなどの特殊な磁気構造が不可欠だったが、本研究では、音波が時間・空間変調した磁化ダイナミクスを励起できることを積極的に利用し、新しい SMF 発生法を実証する。さらに、申請時の研究計画を発展させ、音波以外の巨視的角運動量(電流渦)から直流スピン流を生成する世界初の実験を行う。

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) スピン流生成に用いる音波(レイリー型 SAW)の定量化

薄膜を伝搬する SAW に含まれる巨視的回転のスピン流生成効率を定量化するためには、(a) SAW 振幅の絶対値と (b) その空間分布、および (c) 生成された交流スピン流の強度を測定する実験手法を開発する必要がある。本研究では、強磁性 NiFe 薄膜に SAW を注入し、バーネット効果による誘引されるスピン波の強度を検出することにより (a) を、強磁性 Ni/半導体 Si₂ 層膜に SAW を注入し、磁気弾性効果によって誘引されるスピン波の非相反性を検出することにより (b) を、そして非磁性 Cu/強磁性 NiFe/重金属 Pt₃ 層膜に SAW を注入し、スピンポンピング効果によって発生する直流電圧を測定することにより (c) を測定した。

(2) 音波によるスピン流生成の微視的機構の決定

松尾らの理論研究によると、音波の格子回転からスピン流への変換において、周波数依存性の異なる 2 種類の微視的機構(周波数の 3 乗と 4 乗に比例)が存在することが予想されている。そのうち周波数の 3 乗に比例するスピン流の解析式には繰込み因子が含まれており、具体的な材料やデバイス構造に対してこれを具体的に決定することが難しい。そのため、解析式の比較のみからどちらのスピン流生成効率が大きいのかを判別することができなかった。そこで本研究では、波長・周波数の異なる SAW デバイスを作製し、交流スピン流強度の周波数依存性を測定することにより、どちらのスピン流生成効率が高いのかを明らかにする。

(3) 音波によるスピン流生成の物質依存性の解明と高効率化に向けた検討

格子回転によるスピン流生成の微視的機構には、巨視的回転(渦度)と電子スピンの結合強度

が SOI に依存しない松尾らの SVC 理論の他に、SOI を振動として線形応答理論により導かれる SOI 理論が提案されている。両者は全く異なる微視的機構に由来している一方、両者とも過度ベクトルとスピンベクトルが内積で結合する相互作用を生む。SVC 理論と SOI 理論のどちらのスピン流生成効率が大きいのかを調べることは、巨視的回転を用いたスピン流生成の実用化にむけてその材料設計指針を決定する極めて重要な情報を与える。そこで本研究では、強 SOI 物質の Pt と弱 SOI 物質の Cu、そして弱 SOI で Cu よりも電気伝導率の低い Ti の 3 種類について、SAW により生成されるスピン流強度を比較し、SOI と電気伝導率がスピン流生成効率にどのように寄与するのかを調べた。

(4) 音波注入による直流スピン起電力 (SMF) 生成

SMF は、単位磁化ベクトル m 、スピン偏極率 P 、プランク定数 \hbar 、素電荷 e を用いて $-(P\hbar/2e) m \cdot (\partial_t m \times \nabla m)$ で与えられることが理論予想されている。したがって、SMF 発現には、 m の時間変化 ($\partial_t m$) と空間変化 (∇m) が同時に存在することが求められる。そこで、強磁性 Ni 薄膜の一部に SAW を注入するデバイスを作製し、SAW 注入部の境界に生成される SMF を測定した。

(5) 電流渦の巨視的角運動量を用いたスピン流生成の実証

SAW により生成可能なスピン流は交流であるため、次世代不揮発メモリとして開発が進んでいる磁気ランダムアクセスメモリの情報書き込み (磁化スイッチング) に応用することが難しい。当初の研究計画では SAW を用いたスピン流生成のみに焦点を当てていたが、巨視的回転から直流スピン流を生成する新たな方法の提案とその実証実験を行った。まず、表面を酸化することにより電気伝導率を膜厚方向に変調させたのち、面内に電圧を加える。このとき、表面酸化銅にはドリフト電流が流れるが、そのドリフト速度は局所的な電気伝導率に比例する。その結果、過度ベクトルが膜面内、かつ電流と直交する方向を向く電流渦が発生し、その大きさは膜厚方向に勾配を持つ。ここで音波の場合と同様に、電流渦と伝導電子スピンの結合すれば、過度方向にスピン偏極した直流スピン流が膜厚方向に流れると考えられる。そこで、一方向性スピンホール磁気抵抗効果を用いて表面酸化銅に発生するスピン流を検出した。さらに、電流一スピン流変換が相反的なスピンホール効果との違いを明らかにするため、スピン流から電流への逆変換効率も同時に測定した。

4. 研究成果

(1) スピン流生成に用いる音波 (レイリー型 SAW) の定量化【文献①、文献②】

Ni 磁石 (厚さ 20 nm) の上に半導体 Si をのせた複合材料を SAW フィルタに貼り付けた素子を作製し (図 1)、Ni 内を伝搬するスピン波の非相反性を調べた。SAW が注入されると、Ni 格子が振動し、磁気弾性効果によりスピン波が生成される。レイリー型 SAW には、伝搬方向によって符号が変化しない縦ひずみ成分 ε_{xx} と、符号が変化するせん断ひずみ成分 ε_{xz} が含まれており、これが格子回転を引き起こす。したがって、 ε_{xx} と ε_{xz} の分布から SAW のスピン流源を定量化できる。研究代表者は、 ε_{xz} がスピン波の非相反性を生み出すこと、さらに $\varepsilon_{xz}/\varepsilon_{xx}$ 比が表面から内部に向かって大きくなることに注目した。つまり、表面から任意の深さに埋め込んだ薄膜磁石に発生するスピン波の非相反性を測定すれば、 $\varepsilon_{xz}/\varepsilon_{xx}$ 比の分布を明らかにできると考えた。図 2(a) は、SAW デバイスにおける振幅の周波数依存性の一例であり、このデバイスでは 1.85 GHz の SAW が伝搬している様子がわかる。この SAW が Ni 内のスピン波と結合すると、SAW の振幅が減衰する。そこで SAW の波

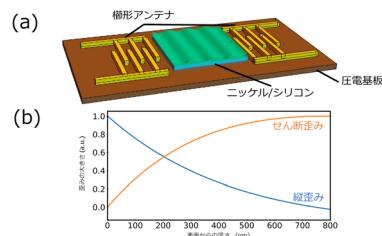


図 1 (a) SAW デバイスの模式図、(b) 縦ひずみとせん断ひずみの深さ方向分布

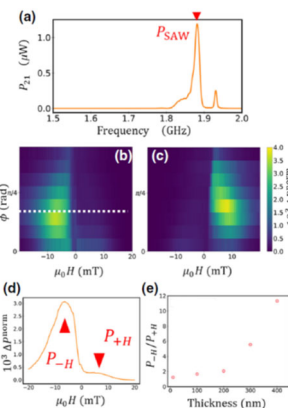


図 2 (a) SAW 透過特性、(b) 順および (c) 逆方向のスピン波強度のカラープロットと (d) その断面図、(e) 非相反性の膜厚依存性

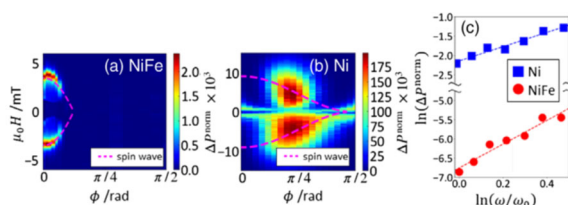


図 3 (a) NiFe 薄膜および (b) Ni 薄膜への SAW 注入によるスピン波強度のカラープロット。(c) スピン波強度の周波数依存性の両対数プロット

数ベクトルから面内 θ 方向に外部磁場 H を印加しながら、SAW の減衰を測定した。図 2 (b) と (c) は、それぞれ図 1 の SAW デバイスの左から右のアンテナに向けて SAW を伝搬させた場合と、逆向きに伝搬させた場合の H - θ パラメータ平面におけるスピン波強度のカラープロットである。図 2 (d) は、図 2 (b) の点線部の断面図だが、 H の方向 (つまり Ni の磁化方向) によってスピン波強度に大きな差異がある。さらに、図 2 (b) と 2 (c) を比較すると、磁場符号に対するスピン波強度の非対称性の向きは、SAW の伝搬方向により反転する。つまり、 H の方向を固定した場合、スピン波は一方通行、すなわち非相反性を示すことがわかる。図 2 (e) は、順方向と逆方向のスピン波の強度比 (非相反性指標) の Si 膜厚依存性である。Si 膜厚を増加させる、すなわち Ni 膜を表面から深く埋め込むと非相反性が増大し、400 nm で 1200% にも達する。この値は、従来報告を大きく上回るものである。この非相反性指標から $\epsilon_{xz}/\epsilon_{xx}$ の Si 膜厚依存性を求めた結果、SAW のスピン流源の分布を実験的に決定することに成功した。

次に、格子回転による相対論的な磁気回転効果である「バーネット効果」を用いて、SAW 振幅の絶対値評価を試みた。そのため、磁気弾性効果の小さな NiFe 薄膜に SAW を注入した。バーネット効果は、格子回転の渦度に比例するので、バーネット効果により誘引されたスピン波の強度から SAW の変位を測定できる。研究代表者は、バーネット効果と磁気弾性効果の周波数依存性が異なることを発見し、これを利用して両者を分離し、微弱なバーネット効果を高精度に測定することに成功した (図 3)。さらに、スピン波強度と SAW 振幅実効値の解析式を求め、実験結果と比較したところ、0.32 mW のマイクロ波を印加した場合、振幅 6.3 ピコメートルの SAW が励起されていることが確かめられた。

(2) 音波によるスピン流生成機構の決定【文献③】

音波が生成した交流スピン流を定量化するため、非磁性 Cu/強磁性 NiFe2 層膜に SAW を注入した際に励起されるスピン波強度の周波数依存性を測定した。レイリー型 SAW の格子回転の渦度 Ω は、周波数の 2 乗に比例し、表面から波長 (\propto 周波数) 程度の深さで減衰することが知られている。松尾らの理論では、定常的な Ω の勾配 (周波数の 3 乗に比例) がスピン流のソースとなる機構と、 Ω の時間微分の勾配 (周波数の 4 乗に比例) がソースとなる機構が予言されている。一方、バーネット磁場は Ω に比例するので、その有効磁場は周波数の 2 乗に比例し、磁気弾性効果に由来する有効磁場はひずみの周波数依存性を反映して周波数の 1 乗に比例する。磁化に作用する電子スピンと有効磁場の向きを考慮しながらスピン波強度の周波数依存性を計算した結果、定常的な Ω がソースのスピン流による場合は周波数の 8 乗、 Ω の時間微分がソースの場合は 10 乗、バーネット効果の場合は 4 乗、磁気弾性効果の場合は縦ひずみが 2 乗、せん断ひずみが 4 乗に比例することがわかった。図 4 は、スピン波強度の周波数依存性の両対数プロットであり、その傾きから周波数の何乗に比例するかを調べた。磁気弾性効果が支配的な Ni の場合、2 乗に比例する縦ひずみと、4 乗に比例するせん断ひずみの中間的な値であった。また、NiFe の場合は、バーネット効果で予想される 4 乗とよく一致した。これに対し、Cu/NiFe 2 層膜を見ると、スピン波強度が周波数の 8 乗に比例しており、「定常的な Ω 」の方が「 Ω の時間微分」よりも高効率にスピン流を生成することを発見した。

(3) 音波によるスピン流生成の物質依存性の解明と高効率化に向けた検討【文献③、文献④】

図 4 に示すように、弱 SOI 物質の Cu を強 SOI 物質の Pt に置換しても、スピン波強度の周波数依存性はほとんど SOI 強度に依存しないことが分かった。一方、電気伝導度 σ が Cu の 1/50 である Ti に置換すると、両対数プロットの傾きが 8 から 5 に減少した。SVC 理論によると、スピン流強度が σ に比例することが予言されており、実際、スピン波強度は σ が高い Cu, Pt, Ti の順

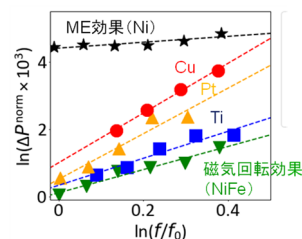


図 4 Cu, Pt, Ti の交流スピン流により励起したスピン波強度の周波数依存性の両対数プロット

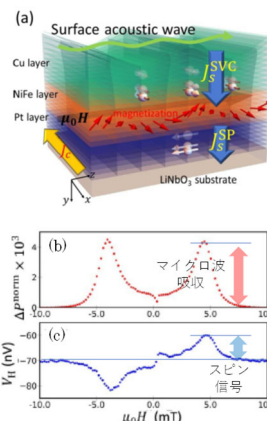


図 5 (a) スピンポンピング効果を用いた交流スピン流の検出原理、(b) スピン波励起によるマイクロ波吸収スペクトル、(c) 逆スピンホール電圧の磁場依存性

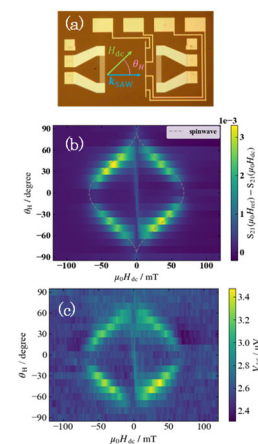


図 6 (a) 直流スピン起電力生成素子の写真、および磁場強度と印加角度に対する (b) スピン波強度と (c) 直流スピン起電力のカラープロット

になっている。このように、SAWにより生成されるスピンの大きさは、SOIではなく、 σ と正の相関があることがわかった。電気伝導度が低いTiでは、磁気回転効果によるスピン流が小さく、バーネット効果と同等程度となった結果、ベキ乗が小さくなったものと考えられる。

次に、レイリー型SAWによる交流スピン流の定量評価を行い、(1)で定量化したSAWの情報を考慮することにより、SVC理論におけるスピン流の解析式に含まれる繰込み因子 ζ を決定した。図5(a)のようにPt/NiFe/Cuからなる3層膜に音波を注入すると、磁気回転効果により交流スピン流がCu層に生成され、これがNiFe層にスピントランスファートルクを与えて、スピン波が励起される(図5(b))。この時、スピン波強度に比例する直流スピン流がPt層にポンピングされ、逆スピンホール効果の電圧として測定される(図5(c))。17 dBmのマイクロ波をSAWデバイスに入力した場合、 4×10^{11} A/m²のスピン流が生成されることが分かった。さらに、(1)の方法で求めたSAW振幅を用いて、スピン流の解析式から ζ を決定したところ、10⁶オーダーとなり、過渡がkHzオーダーの液体金属流で報告されている値より4桁以上大きかった。このように音波の高周波化が、マルチスケール角運動量変換を非線形に増大させるという重要な知見を得た。

(4) 音波注入によるスピン起電力(SMF)生成

図6(a)のように、SAWデバイスの導波路上に電圧測定端子を取り付けたNi細線を作製した。SAWを注入しながらスピン波強度を外部磁場強度と印加角度に対してカラープロットした結果が図6(b)である。図3(b)と同様に、外部磁場をSAWの波数ベクトルから $\pi/4$ 傾けた方向に印加した場合にスピン波強度が最大となっており、Niの磁気弾性効果によるスピン波励起が実現していることがわかる。図6(c)は、SAW伝搬路の内側と外側の端子間で測定した電圧のカラープロットであり、スピン波が励起される条件で直流の起電力が発生することが確認された。測定された起電力の大きさは、異方性磁気抵抗効果を用いて測定したスピン波の振幅(磁化の回転角)と周波数から見積もったSMFの理論値とオーダーが一致しており、特殊な磁気構造を用いることなく、局所的にSAWを注入することによってスピン起電力を生成することに成功した。これにより、任意形状の非磁性金属薄膜を強磁性薄膜上の任意の位置に貼り付けることにより、SAWドライブのSMF回路を設計することが可能になる。

(5) 電流渦を用いた直流スピン流生成の実証【文献⑤】

SVC理論を応用し、伝導電子の巨視的回転(電流渦)から直流スピン流を作成した。大気雰囲気中で表面を酸化させたCu薄膜(膜厚10 nm)の断面写真と化学組成解析の結果(図7(a))より、表面から6 nmの領域に酸素が傾斜分布していることが確かめられた。このような傾斜酸化膜をNiFe薄膜上に成膜し、面内に電流を流しながら磁化反転に伴う一方向性スピンホール磁気抵抗効果を測定した。その結果、電流と直交する方向にスピン偏極したスピン流が傾斜酸化膜からNiFe薄膜に向かって流れることが確かめられた。次に、同一サンプルに対して交流磁場を印加し、NiFe薄膜を強磁性共鳴させることにより、NiFe薄膜から傾斜酸化膜へスピン流を注入したが、スピン流から電流への変換(逆スピンホール効果)に由来する直流電圧はほとんど検出されなかった(図7(b))。この結果は、酸化傾斜膜の電流-スピン流変換が極めて非相対的であることを示しており、電流渦によるスピン流生成の重要な証拠と考えられる。

参考文献

- ① S. Tateno and Y. Nozaki, "Highly nonreciprocal spin waves excited by magnetoelastic coupling in a Ni/Si bilayer", Phys. Rev. Applied, **13**, 034074 (5 pages) (2020).
- ② Y. Kurimune, M. Matsuo, and Y. Nozaki, "Observation of gyromagnetic spinwave resonance in NiFe films", Phys. Rev. Lett., **124**, 217205 (6 pages) (2020).
- ③ Y. Kurimune, M. Matsuo, S. Maekawa and Y. Nozaki, "Highly nonlinear frequency-dependent spin-wave resonance excited via spin-vorticity coupling", Phys. Rev. B, **102**, 174413 (7 pages) (2020).
- ④ S. Tateno, G. Okano, M. Matsuo, and Y. Nozaki, "Electrical evaluation of the alternating spin current generated via spin-vorticity coupling", Phys. Rev. B, **102**, 104406 (9 pages) (2020).
- ⑤ G. Okano, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and Y. Nozaki, "Nonreciprocal spin current generation in surface-oxidized copper films", Phys. Rev. Lett., **122**, 217701 (6 pages) (2019).

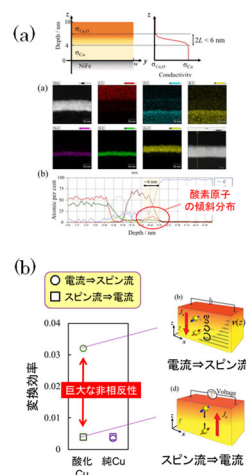


図7 (a) 表面酸化銅の断面観察と化学組成分析、および(b) その電流-スピン流変換効率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Horaguchi, M. Matsuo and Y. Nozaki	4. 巻 505
2. 論文標題 Highly Accurate Evaluation of Spin-torque Efficiency by Measuring In-plane Angular Dependence of Spin-torque Ferromagnetic Resonance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 166727 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2020.166727	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 G. Okano, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and Y. Nozaki	4. 巻 122
2. 論文標題 Nonreciprocal spin current generation in surface-oxidized copper films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217701 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.217701	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 G. Okano and Y. Nozaki	4. 巻 100
2. 論文標題 Spin waves parametrically excited via three-magnon scattering in narrow NiFe strips	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104424 (1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.104424	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 S. Tateno and Y. Nozaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Highly nonreciprocal spin waves excited by magnetoelastic coupling in a Ni/Si bilayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034074 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.034074	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 Y. Nozaki and S. Yanagisawa	4. 巻 204
2. 論文標題 Excitation of Ferromagnetic Resonance Using Surface Acoustic Waves	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 386-391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eej.23099	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 T. Horaguchi, T. Tanazawa and Y. Nozaki	4. 巻 98
2. 論文標題 Evaluating the nonadiabatic spin-transfer torque using coupled oscillation of magnetic vortices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064421 (8pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.064421	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 Kurimune Yuki, Matsuo Mamoru, Nozaki Yukio	4. 巻 124
2. 論文標題 Observation of Gyromagnetic Spin Wave Resonance in NiFe Films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217205 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.217205	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 瀬水ひかり、岡野元基、山野井一人、能崎幸雄	4. 巻 MAG-20-068
2. 論文標題 Ni/Pt2層膜における一方向性スピンホール磁気抵抗効果の測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 27-30
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 Tateno Shoma, Okano Genki, Matsuo Mamoru, Nozaki Yukio	4. 巻 102
2. 論文標題 Electrical evaluation of the alternating spin current generated via spin-vorticity coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104406 (1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.104406	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 Kurimune Yuki, Matsuo Mamoru, Maekawa Sadamichi, Nozaki Yukio	4. 巻 102
2. 論文標題 Highly nonlinear frequency-dependent spin-wave resonance excited via spin-vorticity coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174413 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.174413	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 Okano Genki, Nozaki Yukio	4. 巻 141
2. 論文標題 Experimental Method for Quantitative Evaluation of Nonlinear Magnetization Dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 99 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.99	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53件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 G. Okano, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and Y. Nozaki
2. 発表標題 Nonreciprocal conversion between charge and spin currents in naturally oxidized copper films
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCs 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	Improvement of Spin Torque Efficiency of Al/Si Bilayer with Quasi-Graded Interface T. Horaguchi, M. Matsuo, and Y. Nozaki
2. 発表標題	Improvement of Spin Torque Efficiency of Al/Si Bilayer with Quasi-Graded Interface
3. 学会等名	New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCs 2020) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	G. Okano, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, and Y. Nozaki
2. 発表標題	Nonreciprocal spin current conversion from non-uniform charge-current flow
3. 学会等名	Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Y. Nozaki
2. 発表標題	Spin-current generation using a vorticity of electron flow
3. 学会等名	The 2019 MMM Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	N. Kitajima, G. Okano, and Y. Nozaki
2. 発表標題	Transient of the growth of magnetization precession in unstable regime
3. 学会等名	Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS 2019) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 T. Horaguchi and Y. Nozaki
2. 発表標題 Influence of Perpendicular RF Fields in Spin Torque FMR Measurement
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nozaki, Y. Kurimune, T. Sasaki, M. Matsuo and S. Maekawa
2. 発表標題 Spin current generation using surface acoustic wave in metals
3. 学会等名 Magnonics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 能崎幸雄
2. 発表標題 不均一散乱効果によるスピンの生成
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会シンポジウム講演「ナノスケール磁性体を用いた材料開発と機能創製に関する動向と展望」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 能崎幸雄
2. 発表標題 渦度を利用した新しいスピントロニクス
3. 学会等名 応用物理学会北海道支部講演会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 能崎幸雄
2. 発表標題 酸化銅薄膜におけるスピンの生成
3. 学会等名 応用電子物性分科会 研究例会「スピントロニクス最前線」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 能崎幸雄, 岡野元基, 松尾衛, 前川禎通
2. 発表標題 表面酸化銅を用いた非相反スピンの生成
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拠点 (Spin Research Network of Japan; SpinRNJ) 2019年度(令和元年度)年次報告会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 能崎幸雄, 岡野元基, 松尾衛, 前川禎通
2. 発表標題 非一様な電子散乱を利用したスピンの生成
3. 学会等名 第73回スピントロニクス専門研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Tateno, G. Okano and Y. Nozaki
2. 発表標題 Electrical detection of spin-vorticity coupling using inverse spin Hall effect
3. 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 G. Okano and Y. Nozaki
2 . 発表標題 Electrical determination of magnon band structure in narrow NiFe strip using parametric magnon excitation
3 . 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Kurimune and Y. Nozaki
2 . 発表標題 Mechanical generation of spin current via spin vorticity coupling in Cu, Pt and Ti thin films
3 . 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Negami and Y. Nozaki
2 . 発表標題 Generation of spin-motive force using surface acoustic waves
3 . 学会等名 2019 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Nozaki, Y. Kurimune, M. Matsuo and S. Maekawa
2 . 発表標題 Spin current generation using a nonuniform force field generated via surface acoustic waves
3 . 学会等名 International Workshop on Sound-enabled Nanotechnologies, IWSSENT 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 G. Okano and Y. Nozaki
2. 発表標題 Demonstration of unidirectional spin Hall magnetoresistance by using naturally oxidized Cu
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Horaguchi and Y. Nozaki
2. 発表標題 Spectroscopic Evaluation of Non-Adiabatic Spin Transfer Torque Using Coupled Oscillation of Magnetic Vortices
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Tateno, Y. Nozaki
2. 発表標題 Spin pumping in Pt/NiFe/Cu trilayer film induced by surface acoustic wave injection
3. 学会等名 One-Day Symposium on Spintronic Properties of Graphene and Related 2D Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡野元基, 能崎幸雄
2. 発表標題 Electric Examination of Magnon Band Structure for Narrow Shaped NiFe Strips
3. 学会等名 平成30年度スピン変換年次報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡野元基, 能崎幸雄
2. 発表標題 サブミクロン幅NiFe細線におけるスピン波のパラメトリック励起
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木翼, 能崎幸雄
2. 発表標題 表面弾性波のスピン渦度結合によりPt薄膜に生成した交流スピン流の膜厚依存性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野さくら, 栗宗勇貴, 能崎幸雄
2. 発表標題 Ni-Cu / Cu 2層膜におけるスピン渦度結合由来の交流スピン流の周波数依存性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬水ひかり, 岡野元基, 能崎幸雄
2. 発表標題 Ni-Cu/Pt二層膜における一方向性磁気抵抗効果の測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 根上 脩, 能崎幸雄
2. 発表標題 SAW デバイスを用いたスピン起電力の生成
3. 学会等名 2018年度Spin-RNJシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Tateno, G. Okano, Y. Nozaki
2. 発表標題 Quantitative analysis of the spin current in Cu thin film generated via spin-vorticity coupling
3. 学会等名 2018年度Spin-RNJシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 能崎幸雄
2. 発表標題 固体中のGHz オーダー渦度を利用したスピン流生成
3. 学会等名 2018年度Spin-RNJシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤勇喜, 能崎幸雄
2. 発表標題 ジャロシンスキー守谷相互作用による磁気渦ダイナミクス変調の実験検証
3. 学会等名 電気学会マグネティクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木翼, 能崎幸雄
2. 発表標題 表面弾性波のスピントラップ結合によりCu薄膜に生成した交流スピントラップの膜厚依存性
3. 学会等名 電気学会マグネティクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗宗勇貴, 能崎幸雄
2. 発表標題 Cu及びPtを用いたスピントラップ結合によるスピントラップ生成
3. 学会等名 日本磁気学会第42回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 洞口泰輔, 能崎幸雄
2. 発表標題 弱スピントラップ相互作用材料の接合界面を用いたスピントラップ生成実験
3. 学会等名 日本磁気学会第42回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本晃弘, 能崎幸雄
2. 発表標題 表面弾性波の不均一スピントラップ依存散乱効果を用いたスピントラップ生成実験
3. 学会等名 日本磁気学会第42回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤勇喜, 能崎幸雄
2. 発表標題 界面ジャロシンスキー守谷相互作用による細線中に閉じ込めた磁気渦ダイナミクスの変調
3. 学会等名 日本磁気学会第42回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根上 脩, 能崎幸雄
2. 発表標題 表面弾性波を用いたスピン起電力の生成実験
3. 学会等名 日本磁気学会第42回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北島直人, 岡野元基, 能崎幸雄
2. 発表標題 サブナノ秒パルス磁場を用いた非線形磁化ダイナミクスの時間分解測定
3. 学会等名 日本磁気学会第42回学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 洞口泰輔, 能崎幸雄
2. 発表標題 Cu/Si接合膜を用いたスピン流生成実験
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡野元基, 能崎幸雄
2. 発表標題 表面酸化Cu/NiFe膜における一方向性スピンホール磁気抵抗効果
3. 学会等名 第81回ナノマグネティックス専門研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G. Okano and Y. Nozaki
2. 発表標題 Efficient Control of Magnon Population by Injecting Spin Current Generated Using Naturally-Oxidized Copper Film
3. 学会等名 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Tateno and Y. Nozaki
2. 発表標題 Nonreciprocal Propagation of Spin Waves in a Ni Film Excited Using Shear Strain Component of Rayleigh-Type Surface Acoustic Wave
3. 学会等名 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Tateno and Y. Nozaki
2. 発表標題 Giant nonreciprocity in spinwave propagation magnetoelastically excited in Ni/Si bilayer films
3. 学会等名 Intermag 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 G. Okano and Y. Nozaki
2. 発表標題 Electrical control of parametric magnon excitation via spin current generated using naturally-oxidized copper film
3. 学会等名 Intermag 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nozaki, S. Tateno, Y. Kurimune, M. Matsuo, and S. Maekawa
2. 発表標題 Spintronics using local angular momentum of surface acoustic wave
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榊原 祐貴, 山野井 一人, 能崎 幸雄
2. 発表標題 Ta/Pt二層膜の膜厚によるスピン流制御に関する研究
3. 学会等名 電気学会マグネティクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立野 翔真, 能崎 幸雄
2. 発表標題 ニッケル/シリコン複合膜での表面弾性波駆動スピン波における巨大非相反現象
3. 学会等名 日本物理学会2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥羽 竜生, 山野井 一人, 能崎 幸雄
2. 発表標題 表面弾性波を用いて強磁性NiFe膜に生成したパーネット磁場の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬水 ひかり, 岡野 元基, 山野井 一人, 能崎 幸雄
2. 発表標題 Ni/Pt 2層膜における一方向性スピンホール磁気抵抗効果の測定
3. 学会等名 電気学会マグネティクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立野 翔真, 能崎 幸雄
2. 発表標題 表面弾性波による強磁性体/半導体複合膜での巨大な非相反スピン波励起
3. 学会等名 Spin-RNJ 若手オンライン研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 洞口 泰輔, 松尾 衛, 能崎 幸雄
2. 発表標題 スピントルクFMRスペクトル解析によるSi/Al/NiCu複合膜における微小スピントルク測定
3. 学会等名 Spin-RNJ 若手オンライン研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立野翔真, 栗宗勇貴, 松尾衛, 山野井一人, 能崎幸雄
2. 発表標題 NiFe薄膜を用いた表面弾性波中のアインシュタイン・ドハース効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
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 Cu-0/NiFe二層膜における一方向性磁気抵抗効果の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 洞口泰輔, 大久保忠勝, 宝野和博, Zhenchao Wen, 三谷誠司, 介川裕章, 能崎幸雄
2. 発表標題 界面拡散させたSi/Al 2層膜に対するスピントルク効率の測定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井澤泰我, 山野井一人, 能崎幸雄
2. 発表標題 Cu-0/NiFe二層膜におけるスピン注入自励発振の検出
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 スピントロニクスデバイス、磁気メモリ及び電子機器	発明者 能崎幸雄	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/034831	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 スピントロニクスデバイス、磁気メモリ及び電子機器	発明者 能崎幸雄	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-165900	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	前川 禎通 (Maekawa Sadamichi) (60005973)	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・上級研究員 (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		
中国	中国科学院大学 カブリ理論科学研究所		