

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00299

研究課題名（和文）強磁性規則合金内のスピン変換を利用した高効率磁化制御

研究課題名（英文）Highly efficient magnetization manipulation by spin conversion in ferromagnetic ordered alloys

研究代表者

関 剛斎（SEKI, Takeshi）

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：40579611

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 36,000,000円

研究成果の概要（和文）：スピン軌道相互作用を起源として電流とスピン角運動量の流れであるスピン流を変換（スピン変換）する現象が注目を集めている。本研究課題では、強磁性規則合金におけるスピン変換に着目し、強磁性スピン変換のメカニズムを理解することで、高効率な磁化方向の制御の実現を目指した。その結果、自己誘導的スピン軌道トルクの観測と定量評価、Co<sub>2</sub>MnGaホイスラー規則合金における高いスピン変換効率とスピン軌道トルク磁化反転の実証、L10型規則合金におけるスピン異常ホール効果の第一原理計算と材料設計の指針の提示、さらに強磁性相転移によるスピン変換効率の増大などの成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強磁性規則合金を基軸として様々な強磁性金属を研究の舞台とし、電流とスピン流を変換できるスピン変換にまつわる様々な研究を行った結果、自己誘導的スピン軌道トルクの機構といった物理の深化から、ホイスラー合金における高いスピン変換効率の実証、さらに強磁性相転移がスピン変換に与える影響を解明するなど、多岐にわたる成果を上げてきた。スピントロニクス分野のみに留まらず、材料科学、物理学などの複数の分野にインパクトを与えるため、学術的価値は高い。また、本研究成果は低消費電力動作や高速かつ大容量の情報処理を可能とするスピントロニクス素子の基盤技術となることから、社会的にも意義深い。

研究成果の概要（英文）：This research project focused on the spin conversion phenomena in ferromagnetic ordered alloy systems, where the charge current and the spin current can be converted via spin-orbit interaction. We observed the self-induced spin orbit torque in the ferromagnet and qualitatively evaluated its magnitude, found the high spin conversion efficiency in the Co<sub>2</sub>MnGa Heusler ordered alloy and demonstrated spin orbit torque switching with Co<sub>2</sub>MnGa, proposed the guiding principles to fabricate the L10-ordered alloys exhibiting the high spin conversion efficiency, and enhanced the spin conversion efficiency via the ferromagnetic phase transition.

研究分野：磁性材料学

キーワード：スピントロニクス スピンオービトロニクス スピン変換 規則合金 強磁性体

## 1. 研究開始当初の背景

1988年の巨大磁気抵抗(GMR)効果の発見を機として飛躍的な発展を遂げてきたスピントロニクスは、現在新たな転換期を迎えている。転換期の土台となっているのが、軌道の自由度を取り入れスピン軌道相互作用を積極的に活用するスピンオービトロニクスである。スピン軌道トルクと呼ばれる量子力学的トルクなどのスピン軌道相互作用を起源とする基礎的な物理現象に限らず、超高速かつ低エラーレートを実現可能な3端子スピントロニクス素子の開発など応用を見据えた研究も盛んに進められている。スピンオービトロニクスは、材料物性学、物理学さらには電子工学といった広範な分野を取り込んだ新しい研究コミュニティを形成しており、現在のスピントロニクスにおいて最重要研究領域の一つとして位置付けられている。

スピン軌道相互作用を利用した現象の一つが、スピンホール効果である。スピン軌道相互作用の強い非磁性物質に電流を流すと、上向きスピンと下向きスピンの逆方向に散乱されることにより、電流に対して横方向にスピン角運動量の流れであるスピン流が生じる。つまり、電流-スピン流間の変換(本研究課題では「スピン変換」と呼ぶ)が生じることを意味する。非磁性物質のスピンホール効果を評価するためにキーとなる構造が、Co/PtやCoFeB/Taなどの強磁性金属/非磁性金属の接合である。注目すべきは金属系の積層膜では非磁性金属層のみならず強磁性金属層にも電流の経路があるという点であり、「では、強磁性金属層中でのスピン変換(電流に対して横方向に生じるスピン流)はどうか?」という疑問がうまれる。また、スピン分極の観点からは、「強磁性金属層のスピン変換効率は非磁性金属と比較してどの程度であるのか?」という問いも出てくる。

研究代表者の関は、本研究課題の開始以前に、磁化の方向に依存するスピン異常ホール効果が高効率なスピン変換の機構となり、スピン異常ホール効果を起源としたスピン流を用いて磁化反転できることを実験的に報告した(T. Seki *et al.*, *Phys. Rev. B* **100**, 144427 (2019).)。加えて、これまでの複数の研究報告より、強磁性体内では様々なスピン変換の機構が存在すると認識されている。重要な点は、これら強磁性金属のスピン変換が新たな可能性を切り拓いていることにある。例えば、強磁性体中において生成されたスピン流が自身の磁化に作用する「自己誘導的なスピン軌道トルク」が存在することが実験的に示唆されており、自己誘導的なスピン軌道トルクを使いこなすことができれば、単一強磁性体のみで構成される新しい概念のスピントロニクス素子も夢ではない。一方で、強磁性金属におけるスピン変換のメカニズムは系統立って理解されておらず、効果を大きくする指針もない。つまり、強磁性金属におけるスピン変換を活用していくためには、メカニズムを理解し、変換効率を向上できる強磁性金属材料の創製が不可欠である。

では、どのような材料が強磁性金属のスピン変換を研究する舞台として適しているであろうか?本研究課題では、原子が規則的に空間配列した規則合金という強磁性金属に着目した。強磁性規則合金の中には、横方向の伝導度の大きな材料やスピン分極率の高い材料など、従来材料には無い特徴を有するものが数多くある。それらを上手く活用することで、強磁性金属中のスピン変換の全容に近づき、機構の理解に基づいた変換効率の高い材料の創製や高効率な磁化制御技術の実現が見えてくる。

## 2. 研究の目的

「強磁性金属スピン変換」をキーワードとし、「強磁性規則合金」を基軸として多様な強磁性材料の輸送特性を研究対象とすることで、

- 強磁性金属内におけるスピン変換の全容の究明
- 自己誘導的なスピン軌道トルクの機構の理解とその制御
- 高いスピン変換効率を有する強磁性規則合金の創製

に取り組む。強磁性金属中のスピン変換の理解とそれに基づく新材料創製を行い、高い変換効率を有する強磁性規則合金を利用した磁化制御の高効率化、そして新しいコンセプトで動作する革新的スピントロニクス素子の実現へと繋がる知見を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 強磁性金属内におけるスピン変換の全容の究明: スピン変換の機構の理解に必要なパラメータは、「スピン変換効率(スピンホール角などに対応)」「スピン分極率」「縦伝導度」および「横伝導度」である。当該研究項目では、これらパラメータを基本物理量とし、温度依存性、磁場角度依存性、膜厚依存性などを詳細に且つ系統的に調べることで、スピン流と磁化との相対関係(対称性)や支配的となる散乱機構を検討し、バルクおよび界面におけるスピン変換を切り分け、さらには理論計算から電子状態を調べ、スピン変換の理解に繋げることにある。強磁性スピン変換層(FM1)/非磁性層(NM)/強磁性検出層(FM2)のGMR積層膜を基本構造とし、FM1のスピン変換で生成されたスピン流をFM2により検出することでスピン変換を調べる。スピン変換

換効率の定量評価およびスピン変換の対称性の研究には、FM2 の磁化ダイナミクスを起源とする磁気共鳴スペクトルの形状が FM1 からのスピン流で変調されることを観測する「スピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法」を主に利用する。

(2) 自己誘導的スピン軌道トルクの機構の理解とその制御：強磁性金属単層を絶縁性基板上に作製し、強磁性金属中で生成したスピン流が自身の磁化に作用するトルクを評価する。自己誘導型スピン軌道トルクの定量評価には、ST-FMR の手法と異常ホール電圧の高調波測定的手法を併用して相補的に評価する。単層の強磁性金属薄膜を微細加工によってコプレーナ導波路素子およびホール素子へと加工する。高調波ホール測定では、ホール素子に交流のバイアス電圧を印加することで、磁性体の磁化に作用するトルクを縦方向トルクと横方向トルクに分けて検出する。自己誘導的スピン軌道トルクの存在を示し、トルクの大きさを定量評価し外部から磁化を制御するための磁場条件などを明らかにする。その後、単一磁性層に電流を通電させるだけで磁化をスイッチングあるいは自励発振できるかどうかの検討を行う。

(3) 高いスピン変換効率を有する強磁性規則合金の創製：(1)および(2)の実験と第一原理計算とを比較することにより、スピン変換の微視的機構および自己誘導的スピン軌道トルクが作用するプロセスを理解する。その結果を基にして、スピン変換効率を向上できる強磁性規則合金を理論予測し、材料創製のための指針を得る。

#### 4. 研究成果

##### (1) 単一強磁性層におけるスピン軌道トルクと界面効果

自己誘導的なスピン軌道トルクが存在するか否か、存在するとすれば起源はどこにあるのか、また定量的にどの程度のトルクが作用するのかを明らかにすることを目的とし、実験を遂行した。スピン流の源である非磁性層を設けずに、Ni-Fe 合金（パーマロイ、以下 Py と記す）の単一強磁性層から成る薄膜試料を作製し、ST-FMR 測定および高調波ホール測定を用いて SOT を定量評価した。この実験では、Al-O / Py / Al-O の対称構造の試料、および Si-O / Py / Al-O の非対称構造の試料の結果を比較した。非対称構造を有する Py の ST-FMR スペクトルには DL トルクの存在を示唆するローレンツ関数の成分が明瞭に現れており（図 1）、層厚の減少に伴ってスピン軌道トルクの DL 項の寄与が増加することが明らかになった。一方で、Al-O / Py / Al-O の対称構造の試料では、DL トルクの成分が顕著ではないことがわかった。これらの実験結果を理解するために、スピン流を生成する界面層の存在を仮定したモデルを新たに構築して解析計算を行ったところ、実験で観測された膜厚依存性を上手く説明することができ、界面層の寄与を無視できないことが確認された。また、その際のスピン軌道トルクの大きさを定量評価したところ、電流に対して生成されるスピン流は 0.006%程度と極めて小さく、この低い効率では自己誘導的スピン軌道トルクによって自励発振などの現象を実現することは難しいことが明らかとなった。一方で、界面など磁気構造や磁気特性が不均一になる箇所を起源としてスピン軌道トルクが発生することが明らかになったことから、人為的に不均一をもたらすデバイス構造を採用することが、単一磁性層で動作するスピントロニクス素子を実現するためのキーとなることが示された。これらの知見は、当該研究課題の目的とした自己誘導的スピン軌道トルクの解明と制御に繋がる成果である。[Phys. Rev. B **104**, 094430 (2021)]

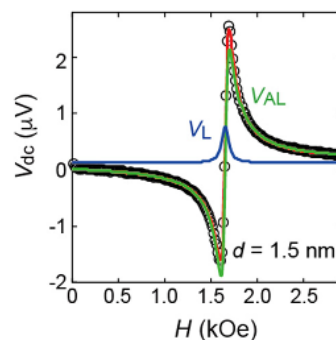


図1 Si-O / Py / Al-O の非対称構造を有する試料の ST-FMR スペクトル。

##### (2) Co<sub>2</sub>MnGa ホイスラー規則合金におけるスピン変換効率とスピン軌道トルク磁化反転

Co<sub>2</sub>MnGa ホイスラー規則合金は、磁性ワイル半金属の一つとして注目を集めており、大きな異常ホール効果を示すことで有名な強磁性材料である。本研究課題では、この Co<sub>2</sub>MnGa のスピン変換について調べるため、高品位な Co<sub>2</sub>MnGa エピタキシャル薄膜を MgO 単結晶基板上に成長し、高調波ホール測定を用いて SOT を定量評価した。用いた薄膜の積層構造は MgO 基板 /

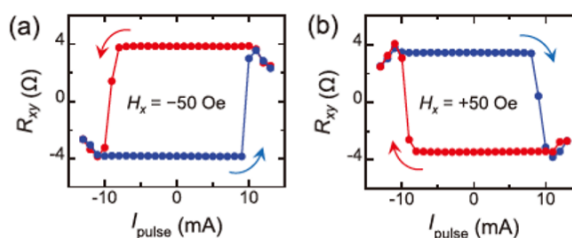


図2 Co<sub>2</sub>MnGa / Ti / CoFeB におけるスピン軌道トルク磁化反転。横抵抗の DC 電流依存性を(a)外部面内磁場が- 50 Oe および(b)+50 Oe の条件で測定している。

Co<sub>2</sub>MnGa / Ti / CoFeB / キャップ層であり、Co<sub>2</sub>MnGa は面内磁化、CoFeB 層は垂直磁化を有した FM1 / NM / FM2 となっている。ホール電圧の高調波測定よりスピン変換効率を見積もったところ、-7.8%という高い変換効率を得られた。次に、このスピン変換プロセスを利用して、CoFeB の磁化反転を試みた。図 2 に、ホール抵抗の印加 DC 電流依存性をプロットした結果を示す。DC 電流によってホール抵抗が変化しており、電流スイープに対して抵抗値がヒステリシスを示した。外部面内磁場の符号を反転させると、ヒステリシスの極性も反転することから、この抵抗変化は Co<sub>2</sub>MnGa 中のスピン変換によって生成されたスピン流が CoFeB の磁化にスピン軌道トルクを作用させ、磁化反転が誘起された結果として理解できる。したがって本研究課題では、Co<sub>2</sub>MnGa ホイスラー規則合金中の高いスピン変換効率と、それによる磁化反転の実証に成功した。[*Appl. Phys. Lett.* **118**, 062402 (2021)]

### (3) 第一原理計算による強磁性金属におけるスピン異常ホール効果の機構解明

L1<sub>0</sub>型規則合金のスピン異常ホール効果について第一原理計算を用いて検討した。本研究課題では、XPt (X=Fe, Co, Ni) を対象とし、密度汎関数理論と線形応答理論に基づいて計算を進めた。図 3 に異常ホール伝導度とスピン異常ホール伝導度の価電子数依存性を示す。FePt では異常ホール伝導度と比べてスピン異常ホール伝導度が小さくなるため、その比率は 0.1 程度になってしまうのに対し、CoPt および NiPt ではスピン異常ホール伝導度の増大が見られ、異常ホール伝導度に対する比率も高い値となった。より詳細に機構を調べたところ、CoPt や NiPt におけるスピン異常ホール伝導度の増大のメカニズムは大きな負の spin-down-down 成分に起因している。以上の計算結果は、L1<sub>0</sub>型規則合金の中では CoPt や NiPt が大きなスピン異常ホール効果を出す強磁性規則合金として有望であることを示唆するものであり、高スピン変換材料を設計する際に重要な指針を与える成果である。[*Phys. Rev. Mater.* **5**, L101402 (2021)]

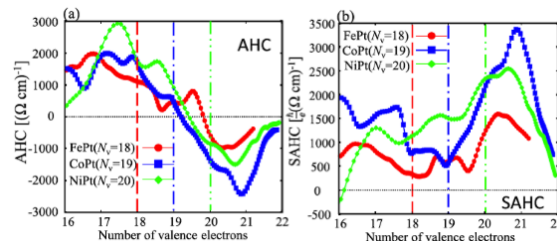


図 3 (a)異常ホール伝導度と(b)スピン異常ホール伝導度の価電子数依存性。

### (4) 温度可変の ST-FMR 測定システムの構築

強磁性体におけるスピン変換の支配的機構を理解するためには、スピン変換効率の温度依存性を調べるのが重要なステップとなる。FM1 / NM / FM2 の三層構造に対しては、ホール電圧の高調波測定よりも ST-FMR の方が重複して現れる変換機構を切り分けることができ、スピン変換効率を精度よく定量評価できるため、様々な温度において ST-FMR を測定できる系の構築に取り組んだ。技術的な要求事項は、測定温度を低温から室温まで変化できること、磁場を印加できること、素子（電流の印加方向）に対する磁場方位を面内で回転できること、および GHz 帯域の高周波電流に対応した高周波ケーブルおよび高周波プローブを接続できることである。本研究課題で構築した測定系では、液体 He を導入することでサンプルステージを 10 K まで冷却でき、真空を保持したままサンプルステージを回転させて磁場方向を変化させることが可能である。面内に最大 6 kOe の磁場を印加でき、高周波プローブによる高周波電流を素子に印加できる。この測定系を活用して、次項に示すスピン変換の温度依存性を詳細に調べた。

### (5) 強磁性転移に伴うスピン変換効率の増大の観測

強磁性転移に伴いスピン変換効率がどのように変化するかを調べ、強磁性相において支配的になるスピン変換の機構を明らかにすることを目指した。本研究課題では、室温以下に強磁性転移温度が存在し、かつ大きな異常ホール効果を示す特異な電子状態を持つ材料として、カゴメ格子を持つシャンダイト化合物である Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub> (CSS) に注目した。CSS は磁性ワイル半金属の一つとして期待され、およそ 175 K の強磁性転移温度 ( $T_c$ ) 以下で高いスピン分極率と巨大な異常ホール効果を示す強磁性体になる。

RF マグネトロンスパッタ法を用いて Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) 基板上に CSS 層および Si-O キャップ層を 400°C で成膜した後、800°C でアニール処理した。その後、Si-O キャップ層を Ar イオンミリングで除去し、イオンビームスパッタ法により Cu 層、Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub> (CoFeB) 層および Al-O キャップ層を成膜した。この CSS (10 nm) / Cu (1.8 nm) / CoFeB (2 nm) / Al-O の積層膜を、ホールバー形状およびコプレーナ導波路形状へと微細加工

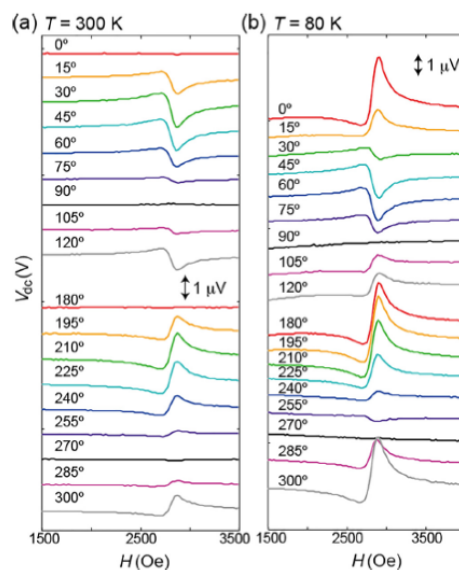


図 4 Co<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>S<sub>2</sub> / Cu / CoFeB 積層を有する素子において (a) 300 K および (b) 80 K で測定した ST-FMR スペクトルの磁場角度依存性。

し、電気伝導特性および ST-FMR スペクトルを測定した。

図 4 に 300 K および 80 K で測定した ST-FMR スペクトルの磁場角度依存性を示す。300 K において CSS は常磁性相であり、常磁性 CSS のスピントルクにより創出されたスピントルクが CoFeB の磁化にトルクを加え、CoFeB の磁化ダイナミクスが共鳴スペクトルとして検出されている。この角度依存性はこれまでに他の材料で報告しているものと類似であり、従来のスピントルクの考え方の枠組み内で理解することができる。一方で、 $T_c$  以下の 80 K では CSS は強磁性相となり、ST-FMR スペクトルの角度依存性も 300 K のそれらとは大きく違っている。CSS の強磁性転移に伴い CSS / Cu / CoFeB 三層構造での GMR 効果も発現するため、 $T < T_c$  における ST-FMR スペクトルの起源を説明するためには、CoFeB の AMR 効果のみならず CSS / Cu / CoFeB の GMR 効果の寄与も考慮する必要があることがわかった。そして、GMR 起源の抵抗変化や様々な対称性のスピントルクを考慮しながら解析モデルを新たに構築し、スピントルクの温度依存性を調べた。図 5 に、300 K の値で規格化したスピントルクの温度依存性をプロットした。低温になるにつれて変換効率が增大する傾向が見られるが、特に  $T_c$  を境に顕著な増大が観測され、強磁性金属に転移することでスピントルクが増強されることが実験的に示された。以上の結果は、強磁性金属への相転移がスピントルクを増大させる上で有効であることを示した重要な成果であり、本研究課題における学術的な問いに対する答えを得ることに成功した。[*Phys. Rev. Research* **5**, 013222 (2023).]

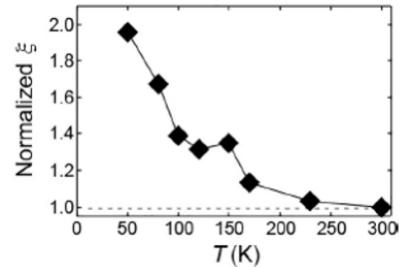


図 5 300 K の値で規格化したスピントルクの温度依存性。

まとめると本研究課題の遂行により以下の成果を得た。まず、強磁性金属内における自己誘導的スピントルクを観測し、その定量評価に成功した。次に、 $\text{Co}_2\text{MnGa}$  ホイスラー規則合金が高いスピントルクを示す材料であることを見出し、そのスピントルクを利用して磁化反転を実証した。並行して、 $\text{L1}_0$  型規則合金におけるスピントルクの第一原理計算に取り組み、大きなスピントルクを示す強磁性規則合金の設計指針を得た。さらに、CSS 薄膜を用いて強磁性金属への相転移がスピントルクを増大させる上で有効であることを示した。これらの主要な成果に加え、Pt 系合金におけるスピントルクの結晶構造依存性[*APL Mater.* **9**, 081113 (2021)]や、新規材料として B20 型 CoSi 合金のスピントルクを評価し[*Phys. Rev. Research* **3**, 033101 (2021)]、さらには CoSi 合金に対して元素ドーピングによる電子状態変調および界面効果が SOT に与える影響[*Adv. Mater. Interfaces* **9**, 2201332 (2022)]を調べ、スピントルクの機構を理解する上で役に立つ多くの知見が得られた。以上に記した成果は、強磁性金属内におけるスピントルクという物理現象の理解、そして新材料創製において有用であり、スピントルクの発展に大きく寄与するものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 K. Dutta, S. N. Panda, T. Seki, S. Pan, K. Takanashi, A. Barman	4. 巻 5
2. 論文標題 All-Optical Detection of Spin Pumping and Giant Interfacial Spin Transparency in Co <sub>2</sub> Fe <sub>0.4</sub> Mn <sub>0.6</sub> Si/Pt Heterostructure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Quantum Technologies	6. 最初と最後の頁 2200033/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/qute.202200033	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 H. Masuda, T. Seki, Y. Yamane, R. Modak, K. Uchida, J. Ieda, Y.-C. Lau, S. Fukami, K. Takanashi	4. 巻 17
2. 論文標題 Large Antisymmetric Interlayer Exchange Coupling Enabling Perpendicular Magnetization Switching by an In-Plane Magnetic Field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 054036/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.17.054036	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. Yamazaki, T. Seki, R. Modak, K. Nakagawara, T. Hirai, K. Ito, K. Uchida, K. Takanashi	4. 巻 105
2. 論文標題 Thickness dependence of anomalous Hall and Nernst effects in Ni-Fe thin films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214416/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.214416	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 Ke Tang, Zhenchao Wen, Takeshi Seki, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani	4. 巻 9
2. 論文標題 Elemental Doping and Interface Effects on Spin_Orbit Torques in CoSi-Based Topological Semimetal Thin Films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2201332/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202201332	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 関 剛斎	4. 巻 62
2. 論文標題 電流-スピン流-熱流変換材料の現状と課題	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 まてりあ	6. 最初と最後の頁 85-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.62.85	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 Takeshi Seki, Yong-Chang Lau, Junya Ikeda, Kohei Fujiwara, Akihiro Ozawa, Satoshi Iihama, Kentaro Nomura, and Atsushi Tsukazaki	4. 巻 5
2. 論文標題 Enhancement of spin-charge conversion efficiency for Co <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>2</sub> across transition from paramagnetic to ferromagnetic phase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 013222/1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.013222	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 Y. Miura and J. Okabayashi	4. 巻 34
2. 論文標題 Understanding magnetocrystalline anisotropy based on orbital and quadrupole moments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 473001/1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ac943f	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 O. M. Chumak, A. Pacewicz, A. Lynnyk, B. Salski, T. Yamamoto, T. Seki, J. Z. Domagala, H. Glowinski, K. Takanashi, L. T. Baczewski, H. Szymczak & A. Nabialek	4. 巻 11
2. 論文標題 Magnetoelastic interactions and magnetic damping in Co <sub>2</sub> Fe <sub>0.4</sub> Mn <sub>0.6</sub> Si and Co <sub>2</sub> FeGa <sub>0.5</sub> Ge <sub>0.5</sub> Heusler alloys thin films for spintronic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 7608/1/12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-87205-y	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 W. Frost, T. Seki, T. Kubota, R. Ramos, E. Saitoh, K. Takanashi, A. Hirohata	4. 巻 118
2. 論文標題 Evaluation of edge domains in giant magnetoresistive junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 172405/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0049315	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 J. Wang, T. Seki, Y-C. Lau, Y. K. Takahashi, K. Takanashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Origin of magnetic anisotropy, role of induced magnetic moment, and all-optical magnetization switching for Co100-xGdx/Pt multilayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 061110/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0050985	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 K. Tang, Y-C. Lau, K. Nawa, Z. Wen, Q. Xiang, H. Sukegawa, T. Seki, Y. Miura, K. Takanashi, S. Mitani	4. 巻 3
2. 論文標題 Spin Hall effect in a spin-1 chiral semimetal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW RESEARCH	6. 最初と最後の頁 033101/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033101	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-C. Lau, Takeshi Seki, and Koki Takanashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Highly fcc-textured Pt-Al alloy films grown on MgO(001) showing enhanced spin Hall efficiency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 081113/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0052544	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 H. Masuda, R. Modak, T. Seki, K. Uchida, Y-C. Lau, J. Nitta, K. Takanashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Spin Hall effect in a non-equilibrium Cu76Ir24 alloy measured at various temperatures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 095221/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0065253	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. Seki, Y-C. Lau, S. Iihama, K. Takanashi	4. 巻 104
2. 論文標題 Spin-orbit torque in a Ni-Fe single layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 094430/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.094430	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 A. Miyashita, M. Maekawa, C. Suzuki, S. Yamamoto, A. Kawasuso, J. Wang, T. Seki, R. Y. Umetsu, K. Takanashi	4. 巻 130
2. 論文標題 Effect of disorder and vacancy defects on electrical transport properties of Co2MnGa thin films grown by magnetron sputtering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 225301/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0071807	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 Yoshio Miura and Keisuke Masuda	4. 巻 5
2. 論文標題 First-principles calculations on the spin anomalous Hall effect of ferromagnetic alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 L101402/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevmaterials.5.1101402	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 Santanu Pan, Takeshi Seki, Koki Takanashi and Anjan Barman	4. 巻 101
2. 論文標題 Ultrafast demagnetization mechanism in half-metallic Heusler alloy thin films controlled by the Fermi level	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 224412/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.224412	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 Hiroyuki Masuda, Rajkumar Modak, Takeshi Seki, Ken-ichi Uchida, Yong-Chang Lau, Yuya Sakuraba, Ryo Iguchi & Koki Takanashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Large spin-Hall effect in non-equilibrium binary copper alloys beyond the solubility limit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 75/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-00076-0	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 Ke Tang, Zhenchao Wen, Yong-Chang Lau, Hiroaki Sukegawa, Takeshi Seki, and Seiji Mitani	4. 巻 118
2. 論文標題 Magnetization switching induced by spin-orbit torque from Co <sub>2</sub> MnGa magnetic Weyl semimetal thin films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 062402/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037178	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 Braj Bhusan Singh, Koustuv Roy, Pushpendra Gupta, Takeshi Seki, Koki Takanashi and Subhankar Bedanta	4. 巻 13
2. 論文標題 High spin mixing conductance and spin interface transparency at the interface of a Co <sub>2</sub> Fe <sub>0.4</sub> Mn <sub>0.6</sub> Si Heusler alloy and Pt	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 NPG Asia Materials	6. 最初と最後の頁 9/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41427-020-00268-7	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

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 関 剛斎
2. 発表標題 強磁性転移に伴うスピン変換効率の増大
3. 学会等名 令和4年 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 「固体中のスピン・軌道ダイナミクスとその制御」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田啓人、山根結太、関剛斎、ラブクラウス、土肥昂堯、モダックラージクマール、内田健一、家田淳一、クラウイマティアス、高梨弘毅
2. 発表標題 人工反強磁性体における電流誘起磁化反転プロセスの磁区構造イメージング
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 関剛斎、ラウヨンチャン、池田絢哉、藤原宏平、飯浜賢志、小沢耀弘、野村健太郎、塚崎敦
2. 発表標題 Co <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>2</sub> 化合物における強磁性転移によるスピン変換効率の増大
3. 学会等名 第47回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関剛斎、増田啓人、高梨弘毅
2. 発表標題 人工反強磁性体における反対称層間交換結合
3. 学会等名 令和4年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Masuda, Y. Yamane, T. Seki, K. Raab, T. Dohi, R. Modak, K. Uchida, J. Ieda, M. Klaui, and K. Takanashi
2 . 発表標題 Domain structure imaging of current-induced magnetization switching process in a synthetic antiferromagnet
3 . 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Masuda, T. Seki, Y. Yamane, R. Modak, K. Uchida, J. Ieda, Y.-C. Lau, S. Fukami, K. Takanashi
2 . 発表標題 Large antisymmetric interlayer exchange coupling enabling perpendicular magnetization switching by an in-plane magnetic field
3 . 学会等名 The 67th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Seki
2 . 発表標題 Antisymmetric interlayer exchange coupling in synthetic antiferromagnet
3 . 学会等名 York-Tohoku-Kaiserslautern-Leeds-Manchester-Spintech Symposium (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 H. Masuda, Y. Yamane, T. Seki, T. Dohi, T. Yamazaki, R. Modak, K. Uchida, J. Ieda, M. Klaui, K. Takanashi
2 . 発表標題 Current-induced domain-wall motion in a synthetic antiferromagnet with antisymmetric interlayer exchange coupling
3 . 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Seki, Y.-C. Lau, J. Ikeda, K. Fujiwara, A. Ozawa, S. Iihama, K. Nomura, A. Tsukazaki
2. 発表標題 Temperature Dependence of Spin-Charge Conversion Efficiency for Co <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>2</sub> Thin Film
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関剛斎、増田啓人、高梨弘毅
2. 発表標題 人工反強磁性体におけるスピン軌道トルク
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 / Spin-RNJ 2022年度報告会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三浦良雄, 白井正文
2. 発表標題 スピン・軌道・多極子がもたらす新規界面物性の開拓
3. 学会等名 令和4年度 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関剛斎, ラウ・ヨンチャン, 飯浜賢志, 高梨弘毅
2. 発表標題 Ni-Fe単層膜におけるスピン軌道トルク
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Tang, Z. Wen, Y. Lau, H. Sukegawa, T. Seki, and S. Mitani
2. 発表標題 Magnetization switching driven by spin-orbit torque from a Co <sub>2</sub> MnGa magnetic Weyl semimetal thin film
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Seki, Y.-C. Lau, S. Iihama, K. Takanashi
2. 発表標題 Spin-orbit torque in a Ni-Fe single layer
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Seki, J. Wang, Y.-C. Lau, Y. K. Takahashi, and K. Takanashi
2. 発表標題 Origin and Optical Switching of Perpendicular Magnetization for Co <sub>100-x</sub> Gdx/Pt Multilayers
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Seki, H. Masuda, K. Takanashi
2. 発表標題 Development of Cu-based spin Hall materials
3. 学会等名 SPIE. OPTICS+PHOTONICS, Spintronics XIV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Seki
2. 発表標題 Spin-Charge Conversion in Ferromagnetic Materials
3. 学会等名 Symposium on magnetism and spintronics (SMS-1) 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関剛斎
2. 発表標題 電流 - スピン流 - 熱流変換のための材料創製
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三浦良雄, 増田啓介
2. 発表標題 強磁性金属合金のスピン異常ホール効果に関する第一原理計算
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Seki, S. Iihama, T. Taniguchi and K. Takanashi
2. 発表標題 Large Spin Anomalous Hall Effect in L10-FePt.
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi SEKI
2. 発表標題 Large spin anomalous Hall effect in L10-FePt
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics Digital Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yong-Chang Lau, Junya Ikeda, Kohei Fujiwara, Takeshi Seki, Atsushi Tsukazaki, Koki Takanashi
2. 発表標題 Spin Hall effect in paramagnetic kagome-lattice topological semimetal Co <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>2</sub>
3. 学会等名 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yong-Chang Lau, Junya Ikeda, Kohei Fujiwara, Takeshi Seki, Atsushi Tsukazaki, Koki Takanashi
2. 発表標題 Spin Hall effect in paramagnetic kagome-lattice semimetal Co <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>2</sub> (CSS)
3. 学会等名 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 唐 柯, Yong-Chang Lau, 名和 憲嗣, 温 振超, 向 清懿, 介川 裕章, 関 剛斎, 三浦 良雄, 高梨 弘毅, 三谷 誠司
2. 発表標題 Topological Weyl semimetal CoSi thin films with spin Hall effect enhanced by d-p orbital hybridization
3. 学会等名 第44回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 三浦良雄
2. 発表標題 スピン軌道相互作用が起源となる磁気物性の第一原理計算
3. 学会等名 NIMSナノシミュレーションワークショップ,2021,2021,1,0(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ <a href="http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp/">http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp/</a>
--

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	温 振超  (WEN Zhenchao)  (40784773)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員    (82108)	
研究分担者	三浦 良雄  (MIURA Yoshio)  (10361198)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・グループリーダー    (82108)	

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