

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02174

研究課題名（和文）ワイル半金属を用いた電流誘起スピン軌道トルクの解明とそのデバイス応用

研究課題名（英文）Spin-orbit torque induced magnetization switching using Wyle semimetals and its device application

研究代表者

植村 哲也（Uemura, Tetsuya）

北海道大学・情報科学研究所・教授

研究者番号：20344476

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、磁性ワイル半金属材料において発現する強いスピン軌道相互作用を利用した強磁性体磁化制御の学理を確立し、高速性・低消費電力性に優れたスピントロクスデバイスの基盤技術確立することである。そのため、Co₂MnAlやCo₂MnGaなどの磁性ワイル半金属であることが理論的に指摘されているホイスラー合金に対して大きな異常ホール効果が発現する材料を探索するとともに、それをスピン源としたスピン軌道トルク(SOT)の特性を理論および実験により明らかにした。さらに、Co₂MnAlをスピン源とし、CoFeB垂直磁化膜の無磁場下でのSOT磁化反転を実証し、強磁性体磁化制御技術確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイル半金属はトポロジカル絶縁体とともに、物性物理学において近年大きな注目を集めているが、その研究対象はフェルミ面におけるワイル点の観測などの物性探索が主であり、デバイス応用の研究は極めて少ない。本研究の進展により、これまでに多くの研究がなされてきたスピントロクスデバイスにおいて、ワイル半金属の有効性を示すことができ、トポロジカル材料を利用したスピントロクスデバイスの創生という新たな流れを創出することに貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study are to clarify the physics of spin-orbit torque induced by a spin current generated in Wyle semimetals with strong spin orbit interaction, and to develop a basic technology to realize spintronic devices with high-speed and low power consumption. To do this, we investigated the anomalous Hall effect in Co-based Heusler alloys, such as Co₂MnAl and Co₂MnGa, which are theoretically predicted to be Wyle semimetals, and demonstrated the SOT-induced magnetization switching of perpendicularly magnetized CoFeB thin film with no external magnetic field.

研究分野：電気電子工学

キーワード：磁性ワイル半金属 スピン軌道相互作用 スピン軌道トルク 強磁性トンネル接合

1. 研究開始当初の背景

磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)や磁気センサーに代表されるスピントロニクスデバイスの多くでは、素子中の磁性体の磁化の向きを変化させることでデバイス機能が発現する。このため、低消費電力性、高速性、信頼性を兼ね備えた磁化制御手法の確立は、スピントロニクスデバイス開発における主要な研究課題の一つである。最近、スピン軌道相互作用の大きな非磁性体と強磁性体からなる二層構造に電流を流すことにより、強磁性体の磁化を反転する手法が示され、これを活用した3端子型MRAMが次世代の開発ターゲットとして注目されている[1-3]。これはスピン軌道トルク(SOT)磁化反転と呼ばれ、非磁性体中のスピンホール効果により、電流方向とスピン方向の両方に直交する方向に散乱されるスピン流(スピン方向の揃った電子の流れ)が隣接する強磁性体に注入されることで生じる(図1)。大きなスピン流を強磁性体に注入するため、非磁性体としてはTaやPtなどのスピン軌道相互作用の大きな重金属材料が広く用いられている。しかしながら、スピンホール効果によって生成できるスピン流のスピン向きは固定で常に面内方向を向くため、磁化が膜面垂直方向を向いた垂直磁化膜に対しては補助磁場を加えないと磁化反転ができないという欠点を有する。一方、強磁性体においてもそのスピン軌道相互作用により、異常ホール効果と呼ばれる同様の効果が生じる。これを利用すると、スピン流のスピン向きを強磁性体の磁化の方向で制御することができ、その結果、無磁場下でも垂直磁化膜の磁化反転が可能となる[4,5]。しかしながら、磁性体の異常ホール効果を利用したスピン流生成は十分理解されておらず、また、スピン流生成効率の高い材料も実証されていない。

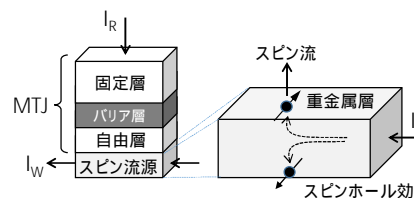


図1. SOT磁化反転を利用した3端子MTJ. スピンホール効果によるスピン流がMTJの磁化自由層に流入し、そのトルクにより磁化を制御する[1]. 書き込み電流(I_W)がMTJのトンネルバリアを流れないため、絶縁破壊が生じず、書込耐性に優れる。

Co_2YZ の化学式で表されるCo基ホイスラー合金は構成元素Y, Zの組み合わせにより多様な物性が発現することから、スピントロニクス素子や熱電素子における有用な電極材料として期待されている。例えば、 Co_2MnSi (CMS)や Co_2MnGe (CMGe)は、フェルミレベルが一方のスピンバンドのエネルギーギャップ中に位置するため、伝導電子のスピン偏極率が100%となるハーフメタル材料であることが知られている。その高いスピン偏極率を活用し、これまで申請者らのグループを筆頭に、強磁性トンネル接合(MTJ)や巨大磁気抵抗(GMR)素子において高い磁気抵抗(MR)比が実証されている[6-8]。一方で、 Co_2MnAl (CMA)や Co_2MnGa (CMGa)などのホイスラー合金は、二つのバンドがワイル点と呼ばれる一点で交わり、その周りで縮退のない線形分散を有するワイル半金属材料であることが理論的に指摘されている[9]。ワイル半金属はその特異なバンド構造から相対論的量子物理現象が発現するトポロジカル物質の一つとして物性物理学分野において近年注目を集めており、その強いスピン軌道相互作用により特異な電磁応答を示すことが期待されている。実際、同物質群において比較的大きな異常ホール効果(AHE)を示すことが実験的に示されており[10,11]、このことは高効率なスピン流生成源としても有効と考えられる。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究の目的は、ワイル半金属材料において発現する強いスピン軌道相互作用を利用した強磁性体磁化制御の学理を確立し、高速性・低消費電力性に優れたスピントロニクスデバイスを実現することである。そのため、ワイル半金属であることが理論的に指摘されているホイスラー合金をスピン源としたスピン軌道トルクの特性を明らかにするとともに、これを利用した強磁性体磁化制御を確立する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、研究期間内に以下のことを実施した。

(1) AHEの大きいホイスラー合金の探索

ホイスラー合金のCMAやCMGaは、フェルミ準位近傍にワイル点があることが理論的に示され、また実験的にも大きなAHEが観測されている[9-11]。そこで、これらの物質を第一の候補として、AHEが大きく発現する材料の探索を行った。MgO基板上に厚さ30nmのホイスラー合金の薄膜を形成し、結晶構造解析及び磁気輸送特性評価によって、薄膜の成膜条件を最適化した。異常ホール信号の大きさを評価するために、ホールパー構造に加工し、横抵抗の面直磁場依存性を測定した。ホイスラー合金の磁化が外部磁場により完全に面直方向を向いた時の電圧を異常ホール電圧とし、この値から算出した異常ホール抵抗率 ρ_{AHE} とCMAの縦抵抗率 ρ_{xx} から異常ホール効果の効率の指標となる異常ホール角 $\theta_{AHE}(= \rho_{AHE}/\rho_{xx})$ を算出した。

(2) ホイスラー合金の異常ホール効果を活用した強磁性体の磁化制御

上記(1)で比較的大きなAHEが実証されたCMAをスピン源とし、CoFeB垂直磁化膜のSOT磁

化反転特性を調べた．図 2 に本研究で作製した CMA/Ti/CoFeB 積層膜の構造を示す．MgO(001)単結晶基板上に基板を 600°C に加熱しながら 5 nm の CMA を成長させ，同温度でアニール処理を施した．その後，3 nm の Ti バッファーを堆積し，磁化自由層として 1.2 nm の CoFeB を堆積させた．成膜後はホールバー構造に加工し，磁気特性と SOT 特性をそれぞれ評価した．

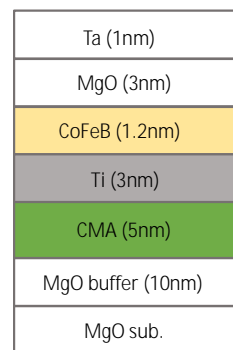


図 2. 本研究で作製した積層構造

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を項目ごとに述べる．

(1) 異常ホール効果の大きいホイスラー合金の探索

図 3 に CMA と CMGa の室温における AHE 測定結果を示す．また，比較のため，同じ結晶構造を有する CMS の結果も示す．縦軸は縦抵抗率で規格化した異常ホール抵抗率，横軸は面直磁場である．縦軸の飽和値から算出した CMA と CMGa の θ_{AHE} は CMS のそれに比べ非常に大きくなった．これは，CMA や CMGa が強いスピン軌道相互作用を発現していることを示唆している．これまで CMG 薄膜において約 11% の異常ホール角が報告されている[11]が，本研究でも同等の値が得られた．

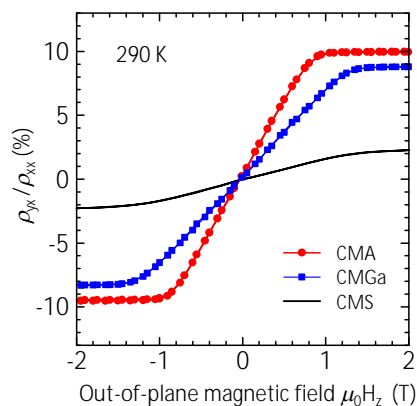


図 3. CMA, CMGa, CMS の AHE 測定結果

(2) ホイスラー合金の異常ホール効果を活用した強磁性体の磁化制御[12]

上記(1)で比較的大きい AHE が実証された CMA をスピン源とし，CoFeB 垂直磁化膜の SOT 磁化反転特性を調べた．図 4 に CMA/Ti/CoFeB ホール素子の横抵抗 R_{yx} の面直磁場 H_z 依存性を示す．CMA, CoFeB とも AHE が支配的であるため， R_{yx} は磁化の面直方向成分を反映しており，同図から積層膜の面直磁化特性が評価できる．0T 近傍での明瞭なヒステリシスループが観測されたことから，CoFeB が膜面垂直方向に磁化容易軸を有していることがわかる．同時に，磁場に対して単調に増加する成分も観測でき，このことは CMA が面内方向に磁化容易軸を有していることを示す．以上により，CMA と CoFeB は Ti 挿入層により磁気的な結合は見られず，無磁場下では，前者は面内に磁化し，後者は面直に磁化していることが確認された．

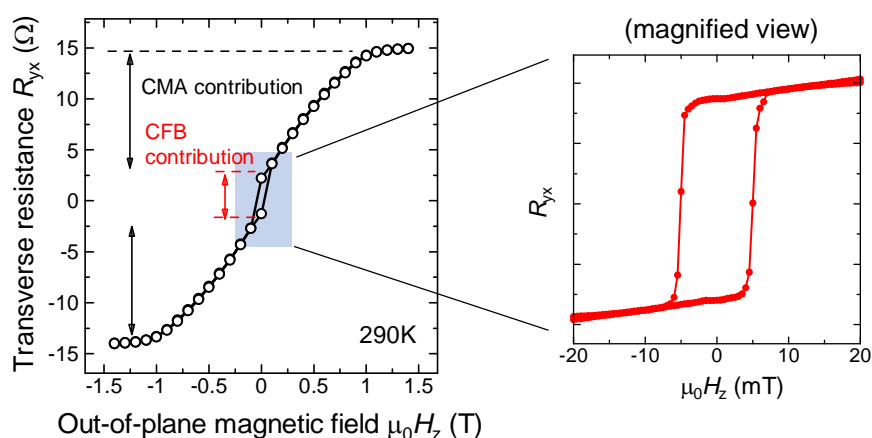


図 4. CMA/Ti/CoFeB 積層膜の AHE 測定結果[12]

図 5(a), (b)に SOT スwitchingの結果を示す．無磁場下においてチャンネルに 100 μs 幅のパルス電流 I_p を印加し，その時の CoFeB の磁化特性を R_{yx} により評価した．面内の補助磁場なしの状態でも明瞭なスitchingが観測された．また，CMA の磁化方向の極性によってスitchingの方向が反転することも観測された．CMA の磁化 M_{CMA} と I_p が平行(反平行)の場合，+z (-z) 方向に反転した．このことは，CoFeB 層に注入されるスピンの方向が CMA の磁化方向により制御できることを示している．

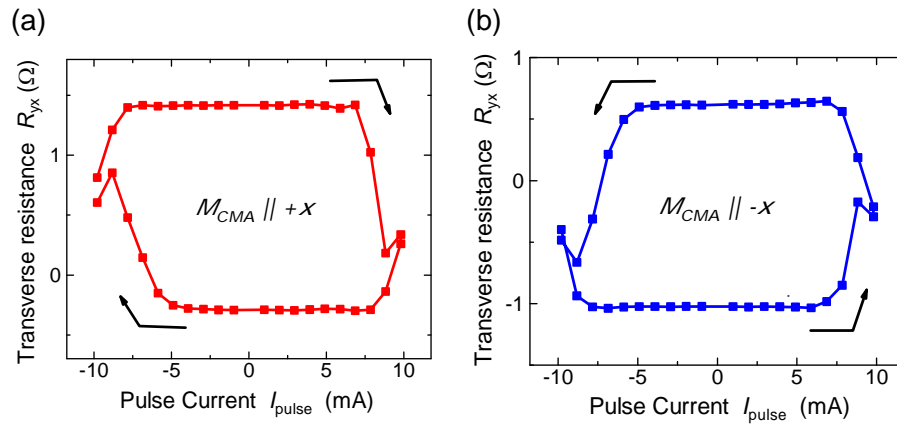


図 5. CMA/Ti/CoFeB の SOT 磁化反転特性[12]. (a) M_{CMA} が +x 軸方向のとき, (b) M_{CMA} が -x 軸方向のとき

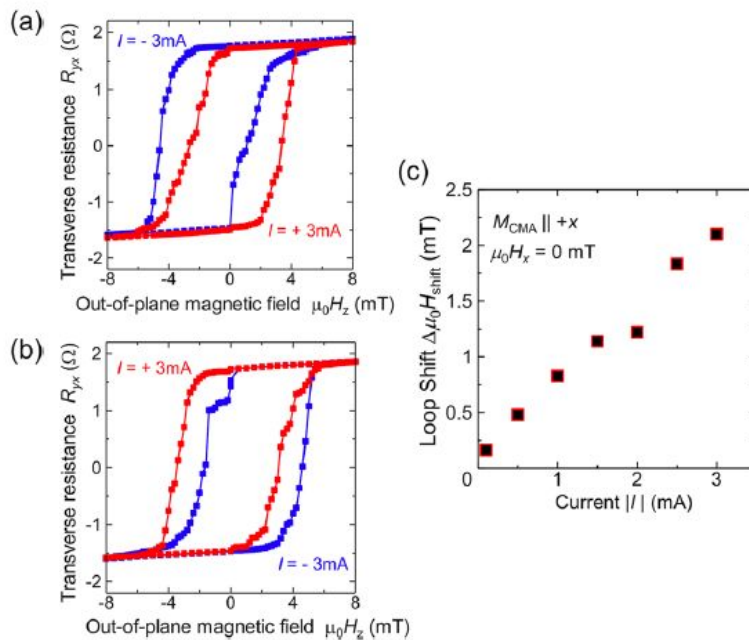


図 6. CMA/Ti/CoFeB の SOT 有効磁場測定結果[12]. (a) M_{CMA} が +x 軸方向のとき, (b) M_{CMA} が -x 軸方向のとき, (c) 有効磁場の電流依存性

上記のスイッチングの極性に関して、有効磁場の観点からも評価した。図 6(a), (b)に M_{CMA} を +x, -x 方向に初期化したときの AHE 信号のシフト結果を示す。I と M_{CMA} が平行 (反平行) の場合、ヒステリシスの中心は +z (-z) 方向にシフトした。このシフト方向から見積もられる有効磁場の方向は、図 5 に示したスイッチングの際に働くトルク方向と矛盾しない。

本研究で観測された無磁場における CoFeB 垂直磁化膜スイッチングの起源としては、主に以下の二つの可能性が考えられる。一つ目は、CMA の磁化方向(x 方向)に偏極されたスピンの CMA/Ti の界面におけるスピン軌道相互作用により z 方向スピンに変換されて CoFeB に注入される機構、二つ目は、CMA と CoFeB の磁氣的結合により CoFeB 中に x 方向の有効磁場が生じ、そこに CMA 中の SHE で生成された y 方向スピンが注入される機構である[4]。両者のどちらが支配的かを明らかにするため有効磁場の I 依存性を評価した。その結果、図 6(c)に示した通り有効磁場はほぼ I に比例することがわかり、このことから、後者の機構が支配的であることが示唆された。

以上、CMA をスピン源とすることで CoFeB/MgO 垂直磁化膜の無磁場での SOT 磁化反転を実証した。SOT やその有効磁場の方向は CMA の電流方向に加え、CMA の磁化方向にも依存することがわかった。また、有効磁場の電流依存性から、CMA により生成された面内方向スピンが磁化反転に関与していることが示された。CoFeB 垂直磁化膜は現在の MRAM の磁化自由層として広く用いられており、その無磁場での磁化反転を確立できたことは、磁性ワイル半金属による SOT 磁化反転を活用した高速性・低消費電力性に優れた新規スピントロニクスデバイスの創出につながる重要な成果である。

参考文献

- [1] I. Miron, K. Garello, G. Gaudin, P.-J. Zermatten, M. Costache, S. Auffret, S. Bandiera, B. Rodmacq, A. Schuhl, and P. Gambardella, *Nature* **476**, 189 (2011).
- [2] L. Liu, C. Pai, Y. Li, H. Tseng, D. Ralph, and R. Buhrman, *Science* **336**, 555 (2012).
- [3] S. Fukami et al., *Nature Mater.* **15**, 535 (2016).
- [4] S. Baek, V. Amin, Y. Oh, G. Go, S. Lee, G. Lee, K. Kim, M. Stiles, B. Park, and K. Lee, *Nat. Mater.* **17**, 509 (2018).
- [5] K. Tang, Z. Wen, Y. Lau, H. Sukegawa, T. Seki, and S. Mitani, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 062402 (2021).
- [6] M. Yamamoto, T. Ishikawa, T. Taira, G. Li, K. Matsuda, and T. Uemura, *J. Phys.: Condens. Matter.* **22**, 164212 (2010).
- [7] H. Liu, T. Kawami, K. Moges, T. Uemura, M. Yamamoto, F. Shi, and P. Voyles, *J. Phys. D: Applied Phys.* **48**, 164001 (2015).
- [8] Y. Chikaso, M. Inoue, T. Tanimoto, K. Kikuchi, M. Yamanouchi, T. Uemura, K. Inubushi, K. Nakada, H. Shinya and M. Shirai, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55**, 345003 (2022).
- [9] J. Kübler, and C. Felser, *EPL* **114**, 47005 (2016).
- [10] P. Li, J. Koo, W. Ning, J. Li, L. Miao, L. Min, Y. Zhu, Y. Wang, N. Alem, C. X. Liu, Z. Mao, and B. Yan, *Nat. Commun.* **11**, 3476 (2020).
- [11] Q. Wang, Z. Wen, T. Kubota, T. Seki, and K. Takanashi, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 252401 (2019).
- [12] D. Morita, T. Hara, M. Yamanouchi, and T. Uemura, *AIP Advances* **13**, 015037 (2023).

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Morita Daimu, Hara Takuya, Yamanouchi Michihiko, Uemura Tetsuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Deterministic field-free switching of perpendicular magnetization by spin-orbit torques originating from in-plane magnetized Co_2MnAl	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015037 ~ 015037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000484	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 Morishima K., Kondo K.	4. 巻 119
2. 論文標題 General formula of chiral anomaly for type-I and type-II Weyl semimetals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 131907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0059547	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 Hara Takuya, Jono Kohey, Yamanouchi Michihiko, Uemura Tetsuya	4. 巻 -
2. 論文標題 Spin-orbit Torque in Structures with Magnetization-compensated $\text{MnGa}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ bilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	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) 10.1109/TMAG.2021.3139899	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 Yamanouchi Michihiko, Araki Yasufumi, Sakai Takaki, Uemura Tetsuya, Ohta Hiromichi, Ieda Jun'ichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Observation of topological Hall torque exerted on a domain wall in the ferromagnetic oxide SrRuO_3	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabl6192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abl6192	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 Jono Kohey, Shimohashi Fumiaki, Yamanouchi Michihiko, Uemura Tetsuya	4. 巻 11
2. 論文標題 Spin-orbit torque induced magnetization switching for an ultrathin MnGa/Co ₂ MnSi bilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025205 ~ 025205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0032732	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 Li Ting, Yan Wei, Zhang Xinhui, Hu Bing, Moges Kidist, Uemura Tetsuya, Yamamoto Masafumi, Tsujikawa Masahito, Shirai Masafumi, Miura Yoshio	4. 巻 101
2. 論文標題 Off-stoichiometry effect on magnetic damping in thin films of Heusler alloy Co ₂ MnSi	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174410 ~ 174410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.174410	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 Morishima K., Kondo K.	4. 巻 129
2. 論文標題 A comparison of magnetoconductivities between type-I and type-II Weyl semimetals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 125104 ~ 125104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039554	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 Komori Shiryu, Kondo Kenji	4. 巻 4
2. 論文標題 A proposal of strong and weak phases in second-order topological insulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 125005 ~ 125005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2399-6528/abd0d4	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 -

[学会発表] 計29件(うち招待講演 0件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Theo Balland, Takeshi Seki, Takumi Yamazaki, Rie Umetsu, Mineto Ogawa, Tetsuya Uemura, and Koki Takanashi
2. 発表標題 Microfabrication and Characterization of Ferromagnetic Metal/Nonmagnetic Semiconductor Junctions for Spin Pumping-Induced Highly Efficient Spin Injection
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference 2023 (INTERMAG 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mineto Ogawa, Takuya Hara, Shun Hasebe, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura
2. 発表標題 Spin-orbit torque induced magnetization switching in perpendicularly magnetized MnGa/Fe bilayer grown on GaAs
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference 2023 (INTERMAG 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daimu Morita, Takuya Hara, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura
2. 発表標題 Field-free switching of perpendicular magnetization by spin-orbit torques originating from in-plane magnetized Co ₂ MnAl spin source
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 Takuya Hara, Kohey Jono, Michihiko Yamanouchi, Tetsuya Uemura
2. 発表標題 Spin-orbit torque in structures with magnetization-compensated MnGa/Co ₂ MnSi bilayer
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 Michihiko Yamanouchi, Yasufumi Araki, Takaki Sakai, Tetsuya Uemura, Hironichi Ohta and Jun'ichi Ieda
2. 発表標題 Nonmonotonic temperature dependence of current-induced effective magnetic field exerted on domain wall in SrRuO ₃
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 Takuya Hara, Kohey Jono, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura
2. 発表標題 Spin-orbit Torque in Synthetic Antiferromagnets Consisting of MnGa/Co ₂ MnSi Bilayer
3. 学会等名 The 5th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Morishima and K. Kondo
2. 発表標題 Positive Magnetoresistance in Weyl Semimetals Originating from Chiral Anomaly
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Naruse and K. Kondo
2. 発表標題 Reduced Velocities of Antiferromagnetic Skyrmions Induced by Fluctuations of Topological Charges
3. 学会等名 The 5th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Morishima and K. Kondo
2 . 発表標題 The Origin of Positive Magnetoresistance in Type-II Weyl Semimetals
3 . 学会等名 The 5th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Yamanouchi, K. Jono, F. Shimohashi, and T. Uemura
2 . 発表標題 MnGa/Co ₂ MnSi bilayer for spin-orbit torque magnetization switching
3 . 学会等名 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Nakada, Y. Chikaso, T. Tanimoto, M. Inoue, K. Inubushi, and T. Uemura
2 . 発表標題 Enhancement of magnetoresistance characteristics of Ge-rich Co ₂ Fe(Ga,Ge)-based current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance devices
3 . 学会等名 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Jono, F. Shimohashi, M. Yamanouchi, and T. Uemura
2 . 発表標題 Spin-orbit-torque induced magnetization switching for an ultra-thin MnGa/Co ₂ MnSi bilayer
3 . 学会等名 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Jono, T. Hara, F. Shimohashi, M. Yamanouchi and T. Uemura
2. 発表標題 Spin-orbit torque in MnGa/Co ₂ MnSi synthetic antiferromagnetic bilayers
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021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	近藤 憲治	北海道大学・電子科学研究所・准教授	
	(Kenji Kondo)		
	(50360946)	(10101)	

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