

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03866

研究課題名（和文）熱スピン注入による磁歪制御とナノスピナクチュエータの開発

研究課題名（英文）Control of magnetostriction based on thermal spin injection and its development for nano-spin actuator

研究代表者

木村 崇（Kimura, Takashi）

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：80360535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、これまでバルク材料、及び磁場駆動でのみ利用されていた磁歪効果を、スピントロニクス技術の発展により開発された高品質薄膜制御技術を用いて、磁歪材料の薄膜化を行い、フレキシブル気シート上および誘電体基板上に磁歪薄膜を作成し、磁気異方性の制御を実証した。更に、スピントロニクス分野で確立されたスピン注入技術を用いて、磁場を用いない磁歪制御技術の確立を目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

誘電体に電場を加えた際に変位が生じる圧電効果と同様、磁性体に磁場を加えると変位が生じる磁歪効果がある。この磁歪効果は、磁場駆動のため用途が限られていたが、大きな変位を示す材料の発見やアモルファス金属による等方的な磁歪形成など、圧電体にはない数多くの利点を持つ。そこで本研究では、スピントロニクス分野で確立されたスピン注入技術を用いて、磁場を用いない磁歪制御技術を確認し、磁気エネルギーを効果的に力学的エネルギーに変換する技術の開発を目指す。

研究成果の概要（英文）：In the present study, we focus on magneto-striction effect. So far, the magneto-striction is mainly studied in bulk-material system and is controlled by the external magnetic field. Here, we aim to develop a novel control method of the magneto striction based on spintronic technology. To do so, we have developed the thin-film preparation technique for the magneto-striction materials and demonstrated the control of the magnetic anisotropy. In addition, we have tried to control the magneto-striction by spin injection.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁歪 磁気異方性 アクチュエータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

デジタル技術発展による情報量の爆発的増大、少子高齢化や国際化に備えた多様なニーズなどの観点から、各種センサーやマイクロ/ナノマシン等を活用した防犯・医療・介護技術の開発の必要性が高まっている。これらの今後需要が増大する業界において、スピントロニクス利用は殆ど検討されておらず、半導体や圧電体で構成される MEMS が主流となっている。一方で、磁気と動力に関連する研究は、磁歪やモーター等の研究は以前から行われているが、スピントロニクスに立脚した研究は殆どない。スピントロニクスとは、電子が持つスピン角運動量の性質を積極的に活用して、超低消費電力駆動のエレクトロニクスデバイスの実現を目指す分野であり、そこでは、電流のスピン版となるスピン流が主役となり、様々なデバイス提案がなされている。しかし、これまでのスピントロニクスデバイスの提案は、既存の技術をスピンで置き換えようとする発想のものが多く、更に、近年、スピン流と熱流の相互作用に着目したスピントロニクスなる分野が誕生し、電荷型エレクトロニクスでは成し得なかったスピンでしか実現できない革新的デバイスの誕生が期待されている。代表者らは、CoFeAl 合金を用いることで、熱スピン注入効率を、従来の NiFe 合金に比べて 100 倍程度に向上させ、世界最高性能の熱スピン注入を実現することに成功しており、更に、強磁性共鳴の励起による強磁性体の効果的な加熱法を見出し、その加熱法を熱スピン注入に適用することで、ワイヤレスで選択制御を有するスピン注入技術も提案している。このワイヤレス熱スピン注入技術は革新的なスピン制御技術として大きな可能性を持っている。これらに加えて、代表者は、三次元スピン注入やスピン量子化軸の電氣的制御など、数多くの革新的スピン流制御技術を開発しており、それらを用いて磁歪材料への高効率スピン注入を試みる。

2. 研究の目的

スピン流を動力応用に活用しようとする研究は世界的に見ても非常に少なく、その研究においてカギを握るのは、磁歪材料である。これまでスピントロニクス研究において、磁歪材料は活用されておらず、むしろ歪がもたらすナノ構造へのストレス的な観点から、スピントロニクスとの相性が悪いと考えられている。一方、近年、マイクロマシンや磁歪材料をナノサイズで三次元微細加工する難しさであるが、更に、それにスピン流を注入するための電極などを取り付ける必要があるため、極めて難しい。我々は、純スピン流の生成・制御・検出などにおいて、世界トップレベルの技術を有しており、本研究の目標であるスピン流による磁歪制御を世界に先駆けて確立すれば、ワイヤレス・スピン流生成を利用したウェアラブルデバイスや自律型ナノマシンなど、様々な技術への応用が期待できる。そこで本研究では、選択的なスピン流注入技術を用いて、磁気エネルギーを微小領域に集中して注入し、伝導電子スピンと局在スピンの効果的な相互作用を用いて、効率的に動力エネルギーを伝搬・形成する技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、ナノサイズの磁歪材料へのスピン注入による磁歪制御を行う。これまでの磁歪材料の研究は、もっぱらバルク材料を用いた磁場応答の研究ばかりであり、最近になって、薄膜の研究は行われつつあるが、面内方向も微細加工した系における磁歪の研究は極めて稀である。加えて、電気抵抗率が高い磁歪材料へのスピン注入などは相性が悪いとされていたが、本研究では、代表者が有する純スピン流の制御技術を最大限活用して、微小領域の磁歪を効果的に制御法を確立し、革新的なスピン・アクチュエータの開発を目指す。以下に研究の具体的な研究方法について記載する。

(a) 高品質ナノ磁歪薄膜の作成

本研究では、薄膜作成が比較的容易で、大きな磁歪定数を有するアモルファス FeSiB 合金に着目する。マグネトロンスパッタ法を用いて、高品質の薄膜を作成し、その静的・動的磁化特性、より具体的には磁気異方性や磁気ダンピング定数を評価する。

(b) フレキシブル基板、及び圧電基板上への磁歪薄膜の作成

前項で確立した FeSiB 薄膜を、フレキシブル基板、及び単結晶強誘電体 Pb(Mg 1/3Nb2/3)O3PbTiO3 (PMN-PT) 基板上に作成し、基板を介して FeSiB 薄膜に歪を加えた際の磁気異方性やダンピングの変化を評価する。

(c) 高効率熱スピン注入技術の開発とスピン・アクチュエータの開発。

磁性体にマイクロ波を照射することで強磁性共鳴を励起し、強磁性共鳴発熱効果を誘引することで、ワイヤレスでの熱スピン注入技術を開発する。既に豊富な実績のある純スピン流によるスピン吸収効果を用いて、スピン注入効率の評価し、それによる磁歪特性の制御を試みる。

4. 研究成果

(a) FZ-Si 基板上的 FeSiB 薄膜の静的・動的磁気特性の評価

図 4-1 に、スパッタ法により、FZ-Si 基板上に作成した厚さ 10nm の FeSiB において、容易軸方向に磁場を印加した際の磁化曲線、及び磁気異方性評価のための残留磁化の角度依存性を示す。図に示されるように、FeSiB は一軸異方性を示しているが、これは、スパッタ時の基板とスパッタカソードの配向に関係しており、マグネトロンスパッタにより発生する磁場によって誘引された一軸異方性によるものであることが判明している。同様の誘導磁気異方性は、FeSiB に限らず、他の磁性薄膜でも観測されている。一方で困難軸方向に印加際の飽和磁場も非常に小さいことから、付加されている磁気異方性は非常に小さいと判断できる。

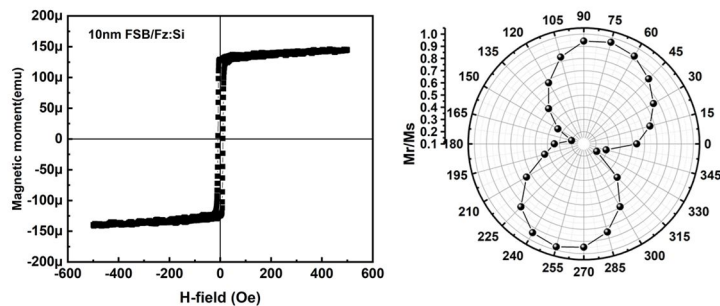


図 4-1 . FZ-Si 上に作成した FeSiB スパッタ薄膜の静的磁化特性

次に、同薄膜の強磁性共鳴特性を評価した結果を図 4-2 に示す。様々な膜厚での結果を示しているが、どの膜厚においても、明瞭な強磁性共鳴のピークが観測されている。これらのスペクトルを解析し、各膜厚における磁気ダンピング定数も見積もった。膜厚の増加と共に、ダンピング定数の増大が観測されたが、これは膜厚増大により、磁性層の導電性が増したため、渦

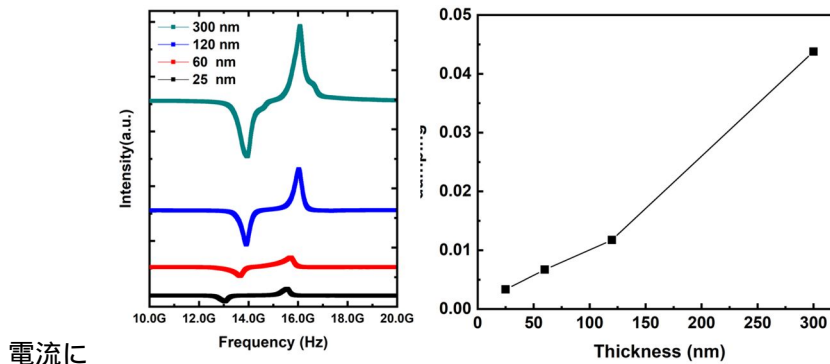


図 4-2 FZ-Si 上に作成した FeSiB スパッタ薄膜の動的磁化特性

よりスペクトル幅が増大したものと考えている。特筆すべきは、膜厚が 25 nm 以下の薄い薄膜におけるダンピング定数が 0.003 と非常に小さい点であり、このことは、今回作成した FeSiB 薄膜が極めて高品質であることを示している。

(b) ポリイミド基板への FeSiB 薄膜の作成と磁気異方性の制御

次に、アクチュエータへの応用を目指すべく、フレキシブル基板の代表格であるポリイミドシート上に、ほぼ同様の条件にて、FeSiB 薄膜を作成した。スパッタ中に基板温度が上昇しないよう、また、結晶粒サイズが大きくならないよう最適化を行った結果、比較的良好な FeSiB 薄膜の作成に成功した。図 4-3 は、ポリイミド上、及び FZ-Si 上にスパッタした FeSiB 薄膜の走査顕微鏡像である。ポリイミド基板上の薄膜の方が、結晶粒サイズがやや大きくなっているが、これは、Si 基板上の FeSiB が異常に表面ラフネスが低減されているためである、従来の磁性薄膜の結晶粒サイズに比べると同等以下の水準である。この試料において、磁気異方性を評価したところ、先に見られた誘導磁気異方性はほぼ消失した。これは、僅かなラフネスの増大によるものと考えられる。

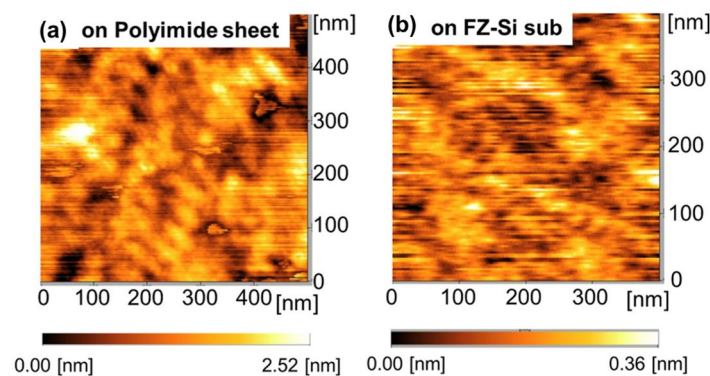


図 4-3 ポリイミドシート、及び FZ-Si 基板上の FeSiB 薄膜表面の操作プローブ顕微鏡像

次に、図 4-4 のようにポリイミドシートを曲げた状態でスパッタし、磁性薄膜に歪を加えた状態での磁化測定を行った。図のように、歪を加えることで、明瞭な磁気異方性が観測された。更に、その強度は、成膜時のシートの曲率に依存し、引っ張り歪から応力歪に変化することで、異方性定数の符号まで変化することが分かった。また、付加された磁気異方性は、最大でと、非常に大きな値を得ることに成功した。また、保磁力に関しても、同様の相関が得られており、磁歪材料として効果的に機能していることが分かった。

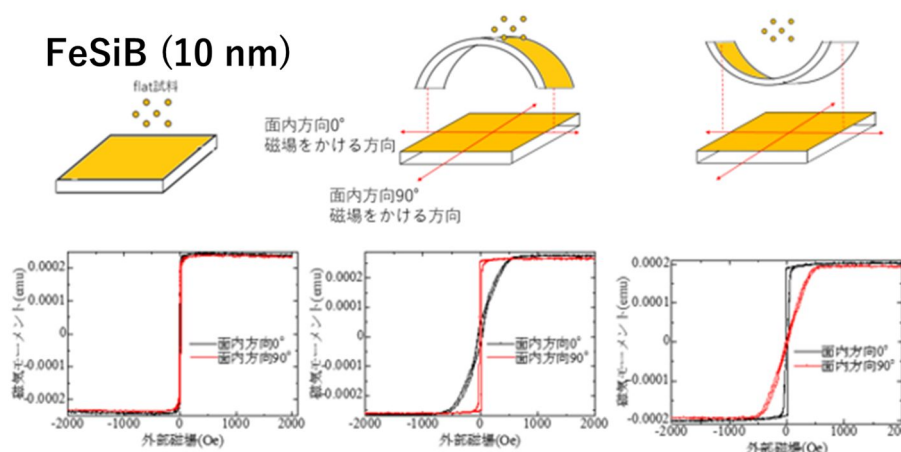


図 4-4 ポリイミドシート上の FeSiB 薄膜の磁化特性、および曲率による磁化特性の制御例

次に、本薄膜の強磁性共鳴特性を評価し、ダンピング定数の見積もりを行った。図 4-5 に示すように、明瞭な強磁性共鳴信号を観測することに成功しており、殆どの試料において、ダンピン

グ定数の見積もりにも成功している。得られたダンピング定数に関しては、FZ-Si 上の薄膜に比べて、やや大きくなっており、結晶性の低下が影響していることが確認できる。一方で、曲率の増加によるダンピング定数の増大は、磁気異方性の増加に伴うものであると考えられ、静的特性の結果と同様である。

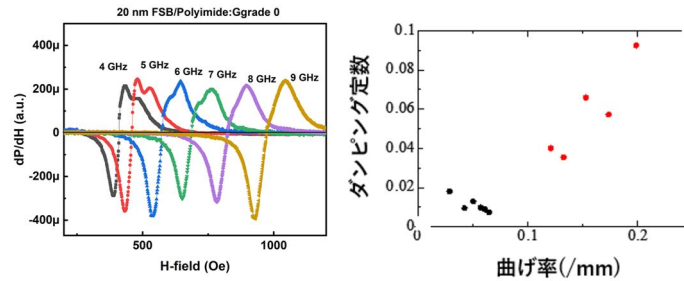


図 4-5 . ポリイミドシート上の FeSiB 薄膜の動的磁化特性と曲率による特性制御

(c) 強誘電体基板上への FeSiB 薄膜の作成と磁気異方性の制御

ここでは、強誘電体広く知られている PMN-PT を基板として用いて、その表面に FeSiB をスパッタし、電界印加による磁気異方性変化を調べた。ここで、膜厚の異なる試料を複数作成し、基板歪の影響がどの程度の膜厚にまで有効に作用するかを調べた。図 4-6 に示すように、FeSiB 薄膜の膜厚が比較的厚い試料においては、ポリイミドシートと同様、磁気異方性の変化が観測されているが、膜厚の薄い試料に関しては、電界の印加により、保磁力が増大する現象が観測された。磁気異方性の変化は、強誘電体分極の回転に伴う歪の変化で理解できるが、保磁力増大に関しては、強誘電体と強磁性体界面特有の現象と考えられ、より詳しい分析を行うべく、X線電子分光を行った結果、界面に誘導された Pb イオンと FeSiB 中の Fe が結合し、その層が電界により構造変化したためと考えている。ダンピング定数に関しては、ポリイミドシートに比べ、低下したが傾向は同様となった。

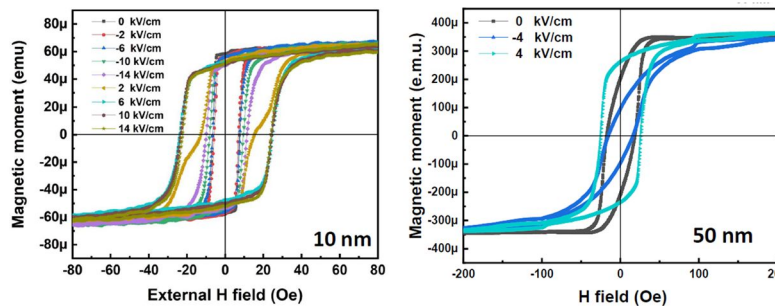


図 4-6 PMN-PT 上の FeSiB 薄膜の磁化特性の膜厚依存性、および電界による制御例

(d) 磁歪材料を用いたアクチュエータへの応用

これまでに最適化した FeSiB 薄膜に関して、アクチュエータ動作を試みた。前述の結果から、Si 基板上の FeSiB が最も高い磁気特性が得られたため、市販の走査プローブ顕微鏡のカンチレバーに FeSiB をスパッタし、磁場を印加した際の磁歪による、先端の曲がりを利用して検出を試みた。レーザー光のディテクター位置の磁場依存性から磁歪定数を見積もったところ、-200 ppm とこれまでに報告されている値と同程度になり、本手法の有効性が確認できると共に、本研究で開発した FeSiB 薄膜が高品質であることを示している。更に、同手法を高度化して、磁場に変えて、電気的スピン注入、及び熱的スピン注入による磁歪の誘起を試みたが、スピン注入時に必要な電流により発生する磁場の影響が回避できず、スピン注入の効果を明瞭に示すことができなかった。現状、熱スピン注入は、電流によるジュール熱で実施しているため、今後は、電流を用いない発熱体を用いて実施するのが必要となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9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 Obinata Sora, Ohnishi Kohei, Kimura Takashi	4. 巻 118
2. 論文標題 Significant suppression of galvanomagnetic signal under dynamical spin injection in CoFeB/Pt bilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 152401 ~ 152401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0046601	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 Po-Chun Chang, Venkata Ramana Mudinepalli, Shi-Yu Liu, Hung-Lin Lin, Chuan-Che Hsu, Yu-Tso Liao, Sora Obinata, Takashi Kimura, Ming-Yau Chern, Fang-Yuh Lo, and Wen-Chin Lin	4. 巻 -
2. 論文標題 Interfacial exchange coupling modulated magnetism in the insulating heterostructure of CoOx/yttrium iron garnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds.	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） なし	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 Nagarjuna Asam, Kazuto Yamanoi, Kohei Ohnishi, Takashi Kimura	4. 巻 1
2. 論文標題 Thermal Spin-Valve Effect in Magnetic Multi-layered Nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Superconductivity and Novel Magnetism	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10948-019-5016-5	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 Hu Shaojie, Zhao Jingyan, Wang Lei, Cui Xiaomin, Ohnishi Kohei, Ariki Taisei, Min Tai, Xia Ke, Kimura Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 Substantial enhancement of thermal spin polarization in Py/Cu interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104403
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.2.104403	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 Obinata S., Iimori R., Ohnishi K., Kimura T.	4. 巻 58
2. 論文標題 Quantitative Evaluation of Heating Effect on Dynamical Spin Injection Using CoFeB/Pt/CoFeB Trilayered Film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetism	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3087797	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 Iwahori T., Mizokami K., Matsuda R., Ohnishi K., Kimura T.	4. 巻 58
2. 論文標題 Relaxation Process of Spin-Polarized Quasiparticles in a Superconducting Nb Wire	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetism	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3083059	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 Yafuso Minoru, Miyazaki Keishi, Takayama Yusei, Obinata Sora, Kimura Takashi	4. 巻 34
2. 論文標題 Nonlinear power dependence of ferromagnetic resonance in NiFe/Pt/CoFeB trilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 045801 ~ 045801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ac26f8	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 Kamruzzaman Md, Hu Shaojie, Ohnishi Kohei, Kimura Takashi	4. 巻 14
2. 論文標題 Temperature profile of nanospintronic device analyzed by spin-dependent Seebeck effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 073004 ~ 073004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac0b05	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, Yafuso Minoru, Miyazaki Keishi, Kimura Takashi	4. 巻 3
2. 論文標題 Signature of spin-dependent Seebeck effect in dynamical spin injection of metallic bilayer structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Materials	6. 最初と最後の頁 014005 ~ 014005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2515-7639/ab45cc	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7件(うち招待講演 4件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 大日方初良, 公田悠樹, 榎本浩克, 大西紘平, 木村崇
2. 発表標題 動的スピン注入における FMR 加熱効果の影響
3. 学会等名 第25回 半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯森陸, 大日方初良, 光田暁弘, 木村崇
2. 発表標題 CoFeB/Ag/Bi三層膜における磁気抵抗効果とその圧力依存性
3. 学会等名 第25回 半導体におけるスピン工学の基礎と応用 (PASPS-25)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村崇
2. 発表標題 強磁性細線における異方性ゼーベック効果の温度依存性
3. 学会等名 「熱-スピン流・スピン波」研究会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Obinata, K. Miyazaki, K. Ohnishi, and T. Kimura
2. 発表標題 Influence of Ferromagnetic-Layer Thickness on Dynamical Spin Injection
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 Takashi Kimura
2. 発表標題 Dynamical Spin Injection Based on Heating Effect due to Ferromagnetic Resonance
3. 学会等名 SPIE conference (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Kimura
2. 発表標題 Diffusive spin transports in metallic nanostructures
3. 学会等名 Mainz Summer School (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Kimura
2. 発表標題 "Surface superconducting property probed by pure spin current "
3. 学会等名 Royal Society Meeting (招待講演)
4. 発表年 2019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	山田 和正 (Yamada Kazumasa) (30380562)	九州大学・理学研究院・助教 (17102)	
研究 分担者	大西 紘平 (Ohnishi Kohei) (30722293)	九州大学・理学研究院・助教 (17102)	

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