

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15430

研究課題名（和文）磁性体のスピン軌道相互作用を利用した垂直スピンを有するスピン流の評価

研究課題名（英文）The study on the spin-orbit perpendicular-spin spin current using magnetic materials

研究代表者

飯浜 賢志 (Iihama, Satoshi)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：70826073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：低消費エネルギー駆動の磁気メモリの実現のため、垂直磁化薄膜の磁化を低電流で制御するための研究が世界中で行われている。昨今研究されているスピンホール効果を利用した手法は、垂直磁化の低電流制御には適していなかった。近年、磁性体のスピン軌道相互作用を利用したスピン流生成はスピンの方向を制御できることが報告され、垂直磁化の低電流制御を実現するための一つの手法となり得ることが示された。しかし初等的な強磁性体におけるスピン生成効率や垂直磁化の磁気緩和制御の報告は皆無であった。本研究では初等的強磁性体鉄コバルト合金のスピン流生成効率を明らかにし、垂直磁化の磁気緩和制御を観測するための光学的手法の開拓をした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Society 5.0の実現のため、サイバー空間ではビッグデータのデータ解析を行う必要があり、その際に必要となる情報をエネルギー効率的に蓄え、書き換える仕組みが必要である。薄膜磁石は大容量かつ低消費エネルギーな不揮発メモリに適していると考えられている。情報を記録するためナノ磁石の方向を効率的に制御する必要があり、そのため物質中で電流から「どのくらいの効率で」また「どのように」スピン流ができるかを調べることが重要である。この研究は物性物理学に貢献するとともに、磁気メモリ研究コミュニティに対しても貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：For realization of energy-efficient magnetic memory devices, energy-efficient control of magnetization for perpendicular magnetized thin films has been widely studied. Although spin current generation using the spin-Hall effect has been reported, it is not suitable for switching of perpendicular magnetization. Recently, spin current generation using spin-orbit interaction in magnetic materials can be used to control spin-direction of spin-current, which can be one of method for energy-efficient control of perpendicular magnetization. However, efficiency of spin current generation even in elementary ferromagnets and modulation of magnetic damping in perpendicular magnetization have not been reported. In this study, we report efficiency of spin current generation using elementary ferromagnets, Iron-Cobalt binary alloy. In addition, we develop a optical method to detect modulation of magnetic dynamics in magnetic thin films.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流 磁化ダイナミクス スピン移行トルク スピン異常ホール効果

## 1. 研究開始当初の背景

Society 5.0 の世界においてサイバー空間では非常に多くの情報「ビッグデータ」を解析し、その情報を必要とする人へと供給する。そのためビッグデータを保存または読み出しができるストレージまたはメモリの大容量化が求められていると言える。垂直磁化薄膜を用いた垂直磁気記録は大容量の磁気メモリデバイスの実現に向けて必須であるが、エネルギー効率がいい磁化制御手法の開拓が必要である。スピン流を使ったスピン移行トルクによる磁化制御がスケラビリティの観点から必須となっており、近年重金属薄膜のスピンホール効果を使ったスピン流生成が高速、高エネルギー効率な磁化制御手法として注目を集めた。しかしながら非磁性重金属のスピンホール効果を使ったスピン流生成は生成されるスピンの向きが幾何学的配置の観点から薄膜面内方向に限定されてしまい、エネルギー効率のいい垂直磁化膜の磁化制御は原理的に不可能である。一方で、磁性体を使うことでそのスピンの向きを制御できることが近年報告され、「垂直スピン」を有するスピン流を作ることができれば高エネルギー効率な垂直磁化の磁化制御の実現が期待できる。しかしながら、初等的な強磁性体を使ったスピン流生成や、「垂直スピン」を使った垂直磁化の磁気緩和変調の観測は報告されていないのが現状である。これらを実現することは、磁気メモリ研究者コミュニティに貢献するとともに物性物理学の観点においても貢献すると考えられる。

## 2. 研究の目的

磁化ダイナミクス測定によるスピン流誘起磁気緩和変調を観測することで、磁性体薄膜の膜面内方向に流した電流から「どのような」また「どのくらいの効率」でスピン流が作られているかを明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

磁化ダイナミクスの計測手法として、シグナル生成器を利用した強磁性共鳴法と光パルスを利用した時間分解磁気光学カー効果を用いた。強磁性共鳴法においてはストライプ形状に加工した薄膜試料に高周波電流を印加することによって、薄膜磁化の強磁性共鳴を励起する。異方性磁気抵抗効果を介してその磁化のダイナミクスを検出することができる。ストライプ形状の試料に高周波の交流電流と直流の電流を印加することによって定常的にスピン流検出を担う磁化にスピン移行トルクを与える。スピン移行トルクは強磁性共鳴線幅を測定することで計測することができる。一方で、光パルスを利用した時間分解磁気光学カー効果は光パルスを照射することで、磁化のダイナミクスを誘起する。ストロボスコーピックなポンプ・プローブ計測によって光励起の磁化才差運動を時間分解で検出することができる。垂直磁化膜の磁化才差運動の周波数は数十～数百ギガヘルツと非常に高速になり、ポンプ・プローブ計測による磁化ダイナミクス検出が必須となる。ストライプ形状に加工した試料に電流を印加しながら測定することで、スピン移行トルクによって変調された磁化才差運動を検出する。スピン移行トルクを計測することで「どのような」また「どのくらいの効率」でスピン流が作られているかを評価することができる。

## 4. 研究成果

まず初等的な強磁性体である鉄コバルト合金が作るスピン流を評価する実験を行った。実験コンセプトを図1に示す。強磁性薄膜パーマロイ/非磁性金属チタン/強磁性薄膜鉄コバルト合金の三層膜試料を作製し、パーマロイ層の強磁性共鳴を測定することによって鉄コバルト合金が作るスピン流を評価した。鉄コバルト合金において生成されるスピン流の向きがコバルト組成を大きくすることで正から負と反転することが分かった。従来のスピンホール効果で用いられてきた元素の電子数による議論ではこのコバルト組成の変化に対する符

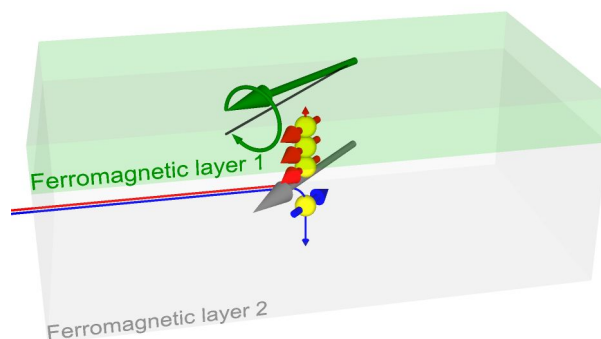


図1 パーマロイ(強磁性層1)の強磁性共鳴計測による鉄コバルト合金(強磁性層2)のスピン流生成を検出する実験コンセプト。

号変化は説明できず、電子 マグノン散乱の寄与が示唆された[1]。この結果は強磁性体におけるスピンの生成を理解する上で有用な知見となる成果である。

上記の電気的な磁化ダイナミクス計測に加え、光励起磁化ダイナミクス計測によるスピン流評価をすることにも成功した。図 2 に光励起磁化ダイナミクス計測によるスピン流検出の実験コンセプトを示す。ストライプ形状に電流を印加し、生成されるスピン流によって変調される光励起磁化ダイナミクスを検出することで、スピン流を評価する。この実験においてスピン流によって作られたスピン移行トルクによる磁化才差運動の周波数や緩和時間の変調を観測することに成功した[2]。この結果は光励起磁化ダイナミクス計測がスピン流の検出に使えることを示す重要な成果である。

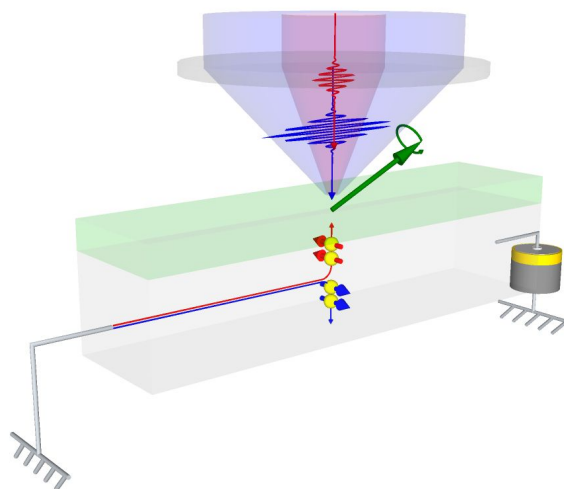


図 2 光励起磁化ダイナミクス計測によるスピン流検出を表す模式図。

一方で、従来の光パルス励起磁気異方性変化を利用した計測手法は磁化が垂直方向を向いたときは磁化才差運動を励起することができない。これは磁化の方向と光照射で発生する有効磁場の方向が平行になるためである。垂直磁化におけるスピン流誘起磁気緩和変調を評価するためには新規磁化才差運動励起手法を開拓しなければならない。本研究では円偏光を照射することによって生成する電子スピンや有効磁場に着目し、それによって励起する磁化才差運動の観測に成功した[3, 4]。強磁性体/非磁性重金属二層膜に円偏光のパルスを照射すると光の進行方向に平行な電子スピンや有効磁場が生成され、スピン移行トルクや磁場的トルクによって磁化才差運動を励起できることが分かった。この手法は原理的に光の照射方向によって生成するスピンや有効磁場の方向を制御することができるために、垂直磁化配置において磁化才差運動を励起することが可能になる。この円偏光誘起電子スピン/有効磁場を利用した垂直磁化配置における「垂直スピン」スピン流による磁気緩和変調を評価することが今後の課題である。

#### <引用文献>

- [1] Yuya Koike, Satoshi Iihama<sup>\*</sup>, Shigemi Mizukami, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 090907 (2020)
- [2] Kazuaki Ishibashi, Satoshi Iihama<sup>\*</sup>, Yutaro Takeuchi, Kaito Furuya, Shun Kanai, Shunsuke Fukami, Shigemi Mizukami, Appl. Phys. Lett. **117**, 122403 (2020) (Selected as Featured)
- [3] Satoshi Iihama<sup>\*</sup>, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami, Nanophotonics, **10**, 1169 (2021)
- [4] Satoshi Iihama<sup>\*</sup>, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami, J. Appl. Phys. **131**, 023901 (2022) (Selected as Featured)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Satoshi Iihama, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami	4. 巻 131
2. 論文標題 Photon spin angular momentum driven magnetization dynamics in ferromagnet/heavy metal bilayers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 023901, 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0073409	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 Satoshi Iihama, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami	4. 巻 10
2. 論文標題 Interface-induced field-like optical spin torque in a ferromagnet/heavy metal heterostructure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 1169-1176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2020-0571	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 Kazuaki Ishibashi, Satoshi Iihama, Yutaro Takeuchi, Kaito Furuya, Shun Kanai, Shunsuke Fukami, Shigemi Mizukami, Kaito Furuya, Shun Kanai, Shunsuke Fukami, Shigemi Mizukami	4. 巻 117
2. 論文標題 All-optical probe of magnetization precession modulated by spin-orbit torque	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 122403, 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020852	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 Yuya Koike, Satoshi Iihama, Shigemi Mizukami	4. 巻 59
2. 論文標題 Composition dependence of the spin-anomalous Hall effect in a ferromagnetic Fe-Co alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 090907, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abac40	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 Satoshi Iihama, Yuya Koike, Zhen Lu, Kentaro Watanabe, Mingwei Chen, Shigemi Mizukami	4. 巻 13
2. 論文標題 Spin-orbit torque generated by a ferromagnet/a metallic glass bilayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 053002, 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab8742	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21件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 飯浜賢志
2. 発表標題 超短光パルス照射下での磁気イメージング
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Iihama
2. 発表標題 Photon-driven magnetic phenomena
3. 学会等名 VANJ Conference 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Photo-spin driven spin-transfer torque in [Co/Pt] multilayer thin films with perpendicular magnetic anisotropy
3. 学会等名 The 5th symposium for Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯浜賢志, Quentin Remy, 五十嵐純太, Gregory Malinowski, Michel Hehn, Stephane Mangin
2. 発表標題 超短光パルスを用いたフェリ磁性金属薄膜における全光学的磁化反転
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Optical-helicity induced magnetization dynamics in [Co/Pt] multilayer thin films with perpendicular magnetic anisotropy
3. 学会等名 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 飯浜賢志
2. 発表標題 金属ヘテロ構造薄膜における超短光パルス誘起スピン流
3. 学会等名 物性物理オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Interface optical spin generation in a ferromagnet/heavy metal heterostructure
3. 学会等名 INTERMAG Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Kazuaki Ishibashi, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Optical spin torque in ferromagnet/heavy metal thin films
3. 学会等名 Tohoku-Lorraine Joint Conference 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Iihama
2. 発表標題 Optical control of magnetization in metallic heterostructure
3. 学会等名 The 4th International Symposium for the Core Research Cluster for Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯浜賢志
2. 発表標題 強磁性/重金属ヘテロ構造における円偏光誘起スピントルク
3. 学会等名 令和3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 2021年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Optical spin-torque observed in FeCo/Pt bilayer thin films
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 Satoshi Iihama, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Optical spin-torque observed in FeCo/Pt bilayers
3. 学会等名 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 Satoshi Iihama, Yuya Koike, Zhen Lu, Kentaro Watanabe, Mingwei Chen, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Charge-spin conversion in Pd-Si metallic glass detected by spin-torque ferromagnetic resonance
3. 学会等名 Spin-RNJ online meeting
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Yuya Koike, Zhen Lu, Kentaro Watanabe, Mingwei Chen, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 The study on spin-orbit torque using metallic disordered atomic structure of metallic glass
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Yuya Koike, Zhen Lu, Kentaro Watanabe, Mingwei Chen, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Spin-orbit torque generated by disordered atomic structure of metallic glass
3. 学会等名 The 3rd symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Satoshi Iihama, Yuya Koike, Zhen Lu, Kentaro Watanabe, Mingwei Chen, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Charge-spin conversion in metallic glass detected via spin-torque ferromagnetic resonance
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Kamimaki, Satoshi Iihama, Tomohiro Taniguchi, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Optical detection of magnetization dynamics and damping for synthetic antiferromagnet
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Iihama
2. 発表標題 Spin-current mediated all-optical magnetization switching
3. 学会等名 FMS NANOMATA 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Iihama, Junta Igarashi, Yong Xu, Marwan Deb, Gregory Malinowski, Michel Hehn, Jon Gorchon, Eric Fullerton, Shunsuke Fukami, Shigemi Mizukami, Stephane Mangin
2. 発表標題 All-optical single shot magnetization switching mediated by angular momentum transfer in spin-valve
3. 学会等名 2019 MMM Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Iihama
2. 発表標題 All-optical single shot magnetization switching mediated by angular momentum transfer in spin-valve
3. 学会等名 Tohoku-Lorraine Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Koike, Satoshi Iihama, Shigemi Mizukami
2. 発表標題 Spin-torque ferromagnetic resonance in CoFe / Ti / FeNi trilayers
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
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

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