慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	絶縁体中スピン流伝導の開拓
Sub Title	Exploration of spin transport in insulators
Author	安藤, 和也(Andō, Kazuya)
Publisher	
Publication year	2021
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2020.)
JaLC DOI	
Abstract	マグノンにより担われる磁性絶縁体中スピン伝導の理解に向けた重要な課題の一つとして、反強磁性絶縁体へのスピン流注入と反強磁性絶縁体中のスピン伝導の波数ベクトル・エネルギー依存性の解明がある。本研究では、非線形スピントロニクス現象を用いることで、磁性絶縁体/反強磁性絶縁体接合における界面スピン交換と反強磁性体中スピン伝導を精密に測定し、高波数モードのマグノンが反強磁性絶縁体への効果的なスピン注入を実現することを明らかにした。これは、界面交換バイアスの効果が反強磁性絶縁体へのスピン流注入に大きな影響を与えることを示している。 One of the important challenges to understand the spin transport in magnetic insulators is to clarify the magnon wavenumber and energy dependence of the spin injection into antiferromagnetic insulators. In this study, we measured the interfacial spin exchange and spin transport in a ferrimagnetic-insulator/antiferromagnetic-insulator junction by using a nonlinear spintronics phenomenon. We found that magnons with large wavenumbers can effectively inject spins into the antiferromagnetic insulator. This result illustrates an important role of the interfacial exchange bias in the spin current injection into antiferromagnetic insulators.
Notes	研究種目：挑戦的研究 (萌芽) 研究期間：2019～2020 課題番号：19K22131 研究分野：スピントロニクス
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_19K22131seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　 ４ 月 ２７ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2019～2020
課題番号：１９Ｋ２２１３１

研究課題名（和文）絶縁体中スピン流伝導の開拓

研究課題名（英文）Exploration of spin transport in insulators

研究代表者
安藤　和也（ANDO, KAZUYA）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：３０５７９６１０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　5,000,000円

研究成果の概要（和文）：マグノンにより担われる磁性絶縁体中スピン伝導の理解に向けた重要な課題の一つとして、反強磁性絶縁体へのスピン流注入と反強磁性絶縁体中のスピン伝導の波数ベクトル・エネルギー依存性の解明がある。本研究では、非線形スピントロニクス現象を用いることで、磁性絶縁体/反強磁性絶縁体接合における界面スピン交換と反強磁性体中スピン伝導を精密に測定し、高波数モードのマグノンが反強磁性絶縁体への効果的なスピン注入を実現することを明らかにした。これは、界面交換バイアスの効果が反強磁性絶縁体へのスピン流注入に大きな影響を与えることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義
電荷の流れである電流が金属及び半導体中のみ伝導するのに対し、スピン角運動量の流れであるスピン流は、金属・半導体だけでなく、スピン系の素励起、マグノンによって絶縁体中さえ伝導する。しかし、磁性絶縁体の一般的基底状態である反強磁性状態におけるマグノンスピン流伝導の微視的機構は明らかでなかった。今回の研究により、反強磁性絶縁体へのスピン流注入を実現する最も典型的な構造である、強磁性/反強磁性絶縁体ヘテロ構造におけるスピン注入及びスピン伝導のマグノン波数依存性が初めて明らかになった。これは、反強磁性体絶縁体ベースのスピントロニクスにおける重要な知見である。

研究成果の概要（英文）：One of the important challenges to understand the spin transport in magnetic insulators is to clarify the magnon wavenumber and energy dependence of the spin injection into antiferromagnetic insulators. In this study, we measured the interfacial spin exchange and spin transport in a ferrimagnetic-insulator/antiferromagnetic-insulator junction by using a nonlinear spintronics phenomenon. We found that magnons with large wavenumbers can effectively inject spins into the antiferromagnetic insulator. This result illustrates an important role of the interfacial exchange bias in the spin current injection into antiferromagnetic insulators.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：マグノン

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

電荷の流れである電流が金属及び半導体中のみ伝導するのに対し、スピン角運動量の流れであるスピン流は、金属・半導体だけでなく、スピン系の素励起、マグノンによって絶縁体中さえ伝導する。絶縁体中のスピン流伝導が明らかとなって以来、絶縁体中スピン流伝導の学理開拓はスピントロニクスにおける重要な課題の一つとなった。しかし、絶縁体スピントロニクスに関するこれまでの膨大な実験・理論研究にもかかわらず、磁性絶縁体の一般的基底状態である反強磁性状態におけるマグノンスピン流伝導の微視的機構は明らかでなく、絶縁体中スピン流伝導の一般物理構築において本質的問題となっていた。

２．研究の目的

マグノンにより担われる磁性絶縁体中スピン伝導の理解に向けた重要な課題の一つとして、反強磁性絶縁体へのスピン流注入と反強磁性絶縁体中のスピン伝導の波数ベクトル・エネルギー依存性の解明がある。本研究では、非線形スピントロニクス現象を用いることで、強磁性絶縁体/反強磁性絶縁体接合における界面スピン交換と反強磁性体中スピン伝導を精密に測定し、これを明らかにすることを目指した。

３．研究の方法

反強磁性絶縁体中のスピン伝導は、強磁性絶縁体/反強磁性絶縁体/重金属ヘテロ構造におけるスピンポンピングと逆スピンホール効果を用いることで定量できる。これまでの研究では、一様モードの磁化歳差運動に駆動されるスピンポンピングが用いられてきた。これに対し、本研究ではパラメトリック励起により駆動されるスピンポンピングを用いたスピン伝導測定に取り組む。パラメトリック励起とは、周波数 f_0 のマイクロ波光子から、周波数 $f_0/2$ かつゼロでない波数ベクトルを持つマグノンペアを生成する過程であり、このマグノンペアによるスピンポンピングを用いることで、特定の波数ベクトル・エネルギーを持つマグノンにのみスピン流伝導を担わせることが可能となる。パラメトリックマグノンの波数ベクトルは、外部磁場により制御可能である。このため、パラメトリックスピンポンピングを用いることで、波数ベクトル・エネルギーを制御したマグノンスピン流を生成でき、強磁性/反強磁性絶縁体界面におけるマグノンスピン流変換と反強磁性絶縁体におけるスピン流伝導のマグノン波数ベクトル・エネルギー依存性を明らかにすることが可能となる。

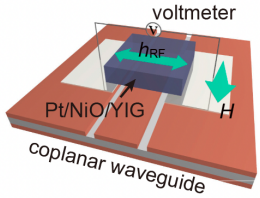

図 1. スピンポンピングと逆スピンホール効果を用いた反強磁性体中のスピン伝導測定セットアップ。

図１に実験セットアップを示した。強磁性絶縁体としては磁気ダンピングが顕著に小さく、非線形ダイナミクスを容易に励起できる $Y_3Fe_5O_{12}$(YIG)が最も適しており、逆スピンホール効果によるスピン流の検出を可能にする重金属層には強い内因性スピンホール効果を示す Pt を用いる。これにより、室温で反強磁性を示す NiO 薄膜中のスピン伝導を精密に測定した。

４．研究成果

YIG/NiO/Pt ヘテロ構造におけるパラメトリックスピンポンピングと逆スピンホール効果を組み合わせることで、反強磁性絶縁体中のスピン流伝導の強磁性マグノン波数依存性を測定した[1]。比較のため、同様の測定を NiO のない YIG/Pt 試料についても行い、この結果を図 2 に示した。図 2 は、YIG/Pt および YIG/NiO/Pt において得られたパラメトリックスピンポンピング効率（逆スピンホール電圧/印加マイクロ波）の外部磁場・マイクロ波強度依存性である。スピンポンピング効率には明確なしきい値が観測されており、このスピンポンピングがパラメトリック過程によるものであることを示している。また、Pt/NiO/YIG におけるパラメトリックに励起されたマグノンのスピンポンピング効率は Pt/YIG におけるスピンポンピング効率と比較して 1 桁程度小さい。この結果は、一様モードのマグノンにより駆動されるスピンポンピング効率の結果と同程度である。このことは、パラメトリック励起化において Pt/NiO/YIG において観測された電圧が、パラメトリックスピンポンピングによる YIG/NiO 界面におけるスピン交換と NiO 中のスピン伝導によるものであることを示している。

図 2 に示したパラメトリックスピンポンピングの結果は、大きく 2 つの領域に分けられる。一つは 10^3 から 10^4 cm^{-1} 程度の波数を持つ dipole-exchange マグノンが励起される高磁場領域であり、もう一つは 10^5 cm^{-1} 以上の波数をもつ exchange マグノンが励起される低磁場領域である。この 2 つの領域の境界を図 2 に黒点線で示した。図 2 の結果は、比較的長波長である dipole-exchange マグノンが励起される高磁場領域では、NiO の有無に関わらず、スピンポンピング効率が磁場に強く依存することを示している。これは、パラメトリックスピンポンピング効率がこの波長領域において波数に依存するためであり、これまでの研究結果とも一致する。重要な点は、スピンポンピング効率の磁場依存性が NiO の挿入によりほとんど影響を受けいていない点である。これは、この波長領域では YIG/NiO 界面におけるスピン交換と NiO 中のスピン伝導において波数依存性がほとんどないことを明らかにしたものである。

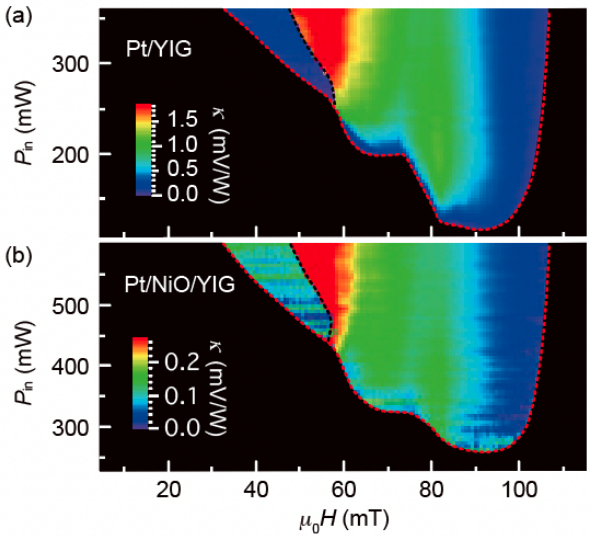

図 2. (a)Pt/YIG および(b)Pt/NiO/YIG 試料におけるスピンポンピング効率 κ の磁場 H およびマイクロ波強度 P_{in} 依存性。

dipole-exchange マグノンが駆動するスピンポンピング効率の磁場依存性は NiO の挿入による影響を受けないのに対し、図 2 の結果は、さらに低磁場領域では NiO の挿入によりスピンポンピング効率が相対的に増大することを示している。この結果は、長波長の dipole-exchange マグノンによるスピンポンピング効率に対して、短波長の exchange マグノンによるスピンポンピング効率が相対的に高いことを示している（図 3 参照）。すなわち、高波数モードのマグノンが反強磁性絶縁体への効果的なスピン注入を実現することを明らかにしたものである。このような波数依存性は、強磁性体/反強磁性絶縁体界面における交換バイアスによるランダム磁場が引き起こす 2 マグノン散乱と、同じく交換バイアスによるスピンピニングの効果によって理解できることを明らかにした。

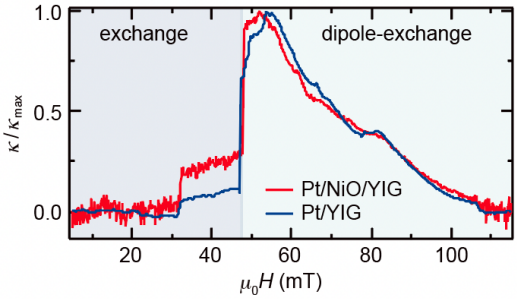

図 3. Pt/YIG および Pt/NiO/YIG 試料におけるスピンポンピング効率 κ の磁場 H 依存性。

強磁性体/反強磁性絶縁体/重金属において実現される反強磁性絶縁体中のスピン流伝導はこれまで数多くの実験データが蓄積されてきた。しかし、スピン流源としては一様モードのマグノンにこれまで限定されており、スピン注入及びスピン伝導に対するマグノン波数の知見は得られていなかった。今回の研究により、反強磁性絶縁体へのスピン流注入を実現する最も典型的な構造である、強磁性/反強磁性絶縁体ヘテロ構造におけるスピン注入及びスピン伝導の波数依存性が初めて明らかになったことで、界面交換バイアスの効果が反強磁性絶縁体へのスピン流注入に大きな影響を与えることが見出された。これは、反強磁性体絶縁体ベースのスピントロニクスにおける重要な知見である。

<引用文献>

[1] Taiki Numata, Hiroki Hayashi, Hiroto Sakimura, and Kazuya Ando, "Parametric spin pumping into an antiferromagnetic insulator," Physical Review B **100**, 144430 (2019).

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計6件（うち査読付論文　6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 Numata Taiki、Hayashi Hiroki、Sakimura Hiroto、Ando Kazuya	４．巻 100
２．論文標題 Parametric spin pumping into an antiferromagnetic insulator	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Physical Review B	６．最初と最後の頁 144430_1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.144430	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 Hayashi Hiroki、Asami Akio、Ando Kazuya	４．巻 100
２．論文標題 Anomalous Hall effect at a PtOx/Co interface	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Physical Review B	６．最初と最後の頁 214415_1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.214415	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 You Yunfeng、Sakimura Hiroto、Harumoto Takashi、Nakamura Yoshio、Shi Ji、Song Cheng、Pan Feng、Ando Kazuya	４．巻 11
２．論文標題 Study of spin mixing conductance of single oriented Pt in Pt/Ni81Fe19 heterostructure by spin pumping	５．発行年 2021年
３．雑誌名 AIP Advances	６．最初と最後の頁 035211～035211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0035912	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 Hayashi Hiroki、Musha Akira、Sakimura Hiroto、Ando Kazuya	４．巻 3
２．論文標題 Spin-orbit torques originating from the bulk and interface in Pt-based structures	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Physical Review Research	６．最初と最後の頁 013042-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.013042	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 Haku Satoshi、Musha Akira、Gao Tenghua、Ando Kazuya	4．巻 102
2．論文標題 Role of interfacial oxidation in the generation of spin-orbit torques	5．発行年 2020年
3．雑誌名 Physical Review B	6．最初と最後の頁 024405_1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.024405	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 Chen Zhiren、Pan Chunjiao、Wang Ning、Qiu Mingxia、Lin Tao、Liu Jing、Li Shunpu、Han Peigang、Shi Ji、Ando Kazuya、An Hongyu	4．巻 507
2．論文標題 Manipulation of perpendicular exchange bias and spin-orbit torques via MgO in Pt/Co/MgO films	5．発行年 2020年
3．雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6．最初と最後の頁 166822～166822
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2020.166822	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

〔学会発表〕　計1件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

1．発表者名 Hiroto Sakimura, Akio Asami, Hiroki Hayashi, Ji Shi, and Kazuya Ando
2．発表標題 Intrinsic Spin Decay Length in Antiferromagnetic Insulator
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