

令和 4 年 4 月 26 日現在

機関番号：32612
研究種目：基盤研究(A) (一般)
研究期間：2019～2021
課題番号：19H00864
研究課題名(和文) 金属酸化物スピン軌道エレクトロニクス

研究課題名(英文) Metal-oxide spin-orbit electronics

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) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用によるスピン流生成は、スピン軌道トルクによる磁化制御をはじめとする多彩な物性・機能を生み出し、近年のスピンエレクトロニクスの基盤となっている。本研究では、スピンエレクトロニクス素子の酸化レベル制御を中心とした独自のアプローチにより、界面・バルクスピン軌道相互作用に起因するスピン流・スピン分極生成とスピン軌道トルク物性を開拓した。これにより、界面・バルクスピン軌道トルクの制御手法が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン軌道相互作用を中心とした近年のスピンエレクトロニクスにおいて、スピン軌道トルクの物性開拓は、固体素子におけるスピン物性の本質的理解に重要な知見を与えるだけでなく、不揮発記憶素子、高周波発振素子、ニューロモルフィック素子といった様々なスピン素子構築の鍵である。今回の研究により明らかとなったスピン軌道トルクの制御原理は、界面・バルクスピン軌道相互作用に起因するスピン流・スピン分極生成に関する重要な知見を与え、スピン軌道相互作用を中心とした電子スピン物理・工学の発展に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：The generation of spin currents using spin-orbit coupling has been the foundation of modern spintronics. The spin-current generation provides novel phenomena and functionalities, such as electrical manipulation of magnetization through spin-orbit torque. This study explored the spin-orbit torques originating from spin currents and spin polarization due to interfacial and bulk spin-orbit coupling based on the oxidation level control of spintronics devices. Our results provide insights for controlling the interfacial and bulk spin-orbit torques.

研究分野：スピンエレクトロニクス

キーワード：スピン流 スピン軌道トルク

1. 研究開始当初の背景

近年のスピン트로ニクスにおいて重要な役割を担うものにスピン軌道相互作用がある。スピン軌道相互作用が駆動するスピンホール効果やラシュバエデルシュタイン効果はスピン流・スピン分極を生成し、多彩なスピン物性の源となる。特に、強磁性体を含むスピン트로ニクス素子において、スピン軌道相互作用により生成されるスピン流・スピン分極は、スピン軌道トルクと呼ばれる磁化に作用する電流誘起トルクを生み出し、自在な磁化制御を可能とする。スピン軌道トルクによる磁化の制御は、電子スピン及びスピン流に基づく不揮発記録素子やマイクロ波発振素子、ニューロモルフィック素子などの基盤である。このような重要性から、スピン軌道トルクに関する膨大な研究がこれまでに行われてきたが、スピン軌道相互作用に起因する現象であることから、そのターゲットは強いスピン軌道相互作用が期待される重金属ヘテロ構造に集中していた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スピン트로ニクス素子の酸化レベル制御を中心とする独自のアプローチにより、界面・バルクスピン軌道相互作用に起因するスピン流・スピン分極生成とスピン軌道トルク物性を開拓することである。金属の酸化は電子物性に著しい影響を与えることから、スピン트로ニクス素子の酸化レベル制御は、バルクスピン軌道相互作用に起因するスピンホール効果と界面スピン軌道相互作用に起因するラシュバエデルシュタイン効果のいずれに対しても顕著な効果を与えることが期待される。さらに、軽元素に注目したスピン트로ニクス現象の開拓により、重金属に集中してきた近年のスピン트로ニクス研究に新たな潮流を生み出すことを狙う。

3. 研究の方法

界面及びバルクスピン軌道相互作用に起因するスピン軌道トルクは、強磁性金属の強磁性共鳴と整流効果を組み合わせたスピントルク強磁性共鳴により定量可能である。スピントルク強磁性共鳴の測定では、試料に GHz 帯の電流を印加しながら外部磁場を掃引し、試料に生じる直流電圧を測定する。試料に印加された電流によりスピン軌道トルクが生成されると、強磁性共鳴条件を満たす磁場強度において磁化の歳差運動が駆動される。このとき、強磁性体中の異方性磁気抵抗効果により、試料の電気抵抗は印加電流と同周波数で振動する。したがって、同周波数で振動する電流と抵抗のミキシングにより、スピン軌道トルクにより強磁性共鳴が駆動されると試料には直流電圧が現れる。この電圧の磁場依存性からスピン軌道トルクを定量した。

4. 研究成果

本研究により得られた主要な成果は以下の4点である。

(1) 界面スピン軌道トルクの精密制御

強磁性金属/金属酸化物ヘテロ構造における界面スピン軌道トルクの重要性が近年明らかになってきたが、ラシュバ型スピン軌道相互作用に起因するこのスピン軌道トルクの生成効率を最大化する手法は明らかではなかった。本研究では、強磁性金属/Cu ヘテロ構造における界面酸化レベルの精密な制御により、界面スピン軌道トルク効率が最大化されることを見出した。

スピントルク強磁性共鳴を用いることで、強磁性金属/Cu ヘテロ構造におけるスピン軌道トルクの Cu 酸化レベル依存性を定量した。この結果、Cu 中の酸素量をわずかに数%変化させただけの非常に限られた条件において、スピン軌道トルクの生成効率が最大化されることが明らかになった (図 1)。ヘテロ界面におけるラシュバ型スピン軌道相互作用は、界面付近の原子スピン軌道相互作用と原子核近傍の電子密度分布の非対称性により現れる。これは、強いラシュバ型スピン軌道相互作用を実現するためには、スピン軌道相互作用の強い元素を用いることだけでなく、軌道混成により波動関数の非対称性を制御することが有効であることを示している。酸素の原子スピン軌道相互作用は弱い、強磁性金属/Cu 界面近傍への酸素導入は軌道混成によって強磁性金属原子と Cu 原子近傍の電子分布を変化させる。したがって、界面の酸化レベル制御の役割は界面近傍の電子分布の変化をもたらしたことにあり、これによって界面のラシュバ型スピン軌道相互作用が変化したことで、スピ

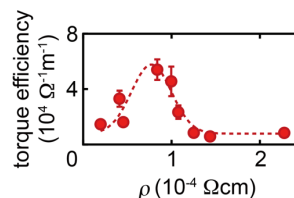


図 1. NiFe/CuO_x ヘテロ構造におけるスピン軌道トルク効率と CuO_x 層の抵抗率 ρ の関係。CuO_x 層の抵抗率は Cu の酸化レベルの指標である。

ン軌道トルクが最大化されたといえる。以上の結果は、スピントロニクス素子性能を最大限引き出すためには、強いスピン軌道相互作用に注目した物質選択だけでなく、素子内部の電子密度分布に注目した設計が重要となることを明らかにしたものである。

(2) バルク・界面効果によるスピン軌道トルク生成強磁性金属/金属酸化物ヘテロ構造では界面スピン軌道相互作用に起因するスピン軌道トルクが特に顕在化するのに対し、典型的なスピントロニクス素子である強磁性金属/重金属ヘテロ構造ではバルクスピン軌道相互作用に起因するスピン軌道トルクが強く現れる。スピン軌道相互作用を中心としたスピントロニクス素子において、バルク効果と界面効果は一般に共存し、代表的なスピン軌道トルク源である Pt をベースとした素子でさえ、スピン軌道トルクの支配的メカニズムはこれまでの研究において統一的には理解されていなかった。特に、スピン軌道トルクの中でもフィールドライクトルクに関しては大きさのみならず符号さえこれまで報告されている結果には整合性が見られず、この一つの解釈として強磁性層の電子構造に敏感な界面効果の寄与が重要であるためと考えられてきた。本研究では、スピントルク強磁性共鳴を用いて Pt/Fe 及び Pt/Ni 薄膜のスピン軌道トルクを定量した結果 (図 2)、界面スピン軌道トルクだけでなく、重金属のスピンホール効果に起因するスピン軌道トルクも強磁性層の電子構造に強く依存することを明らかにした。

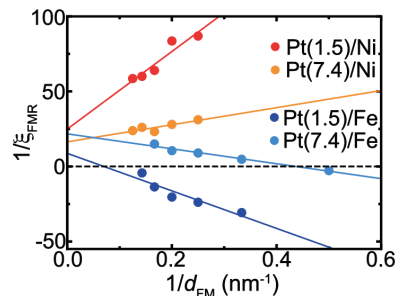


図 2. Pt/Ni 及び Pt/Fe 薄膜における FMR スピントルク効率 ξ_{FMR} と強磁性層膜厚 d_{M} の関係。括弧内の数字は nm 単位の膜厚を表す。

スピントルク強磁性共鳴の測定結果は、ダンピングライクトルクは Ni/Pt と Fe/Pt において同程度であり、いずれにおいても Pt 膜厚に依存することを示した。一方、フィールドライクトルクは強磁性層の選択に強く依存し、Ni/Pt と Ni/Fe において逆符号であることが明らかになった。界面スピン透過率の解析から、Ni/Pt においてはバルクスピンホール効果に起因するダンピングライクトルクが支配的である一方、Fe/Pt においては強い界面スピン軌道相互作用のため、バルク効果は抑制され、無視できない寄与の界面スピン軌道トルクが存在していることが見出された。また、フィールドライクトルクに関しても Fe/Pt においては界面効果は無視できないことが明らかになった。スピン透過率を考慮したモデルからバルク効果に起因するフィールドライクトルク成分を見積もった結果、Pt/Fe と Pt/Ni において Pt のスピンホール効果の符号は同じであるにも関わらず、Pt のスピンホール効果に起因するフィールドライクトルクは Pt/Fe と Pt/Ni で逆符号であることが明らかになった。この結果は、Pt/Fe と Pt/Ni において界面スピンミキシングコンダクタンスの虚数部が逆符号であることに起因するものであり、バルクスピンホール効果によるフィールドライクトルクの生成において、強磁性層の電子構造が重要な役割を果たすことを示すものである。

(3) スピンホール効果におけるスケーリング則の観測

スピン流生成の基本的な現象であるスピンホール効果はスピン軌道相互作用に起因する現象であり、古くから膨大な実験データが構築されてきた強磁性体中の異常ホール効果と共通のメカニズムを背景とする。異常ホール効果に関しては、電気伝導度に対する異常ホール伝導度の物質に依らないスケーリング則が明らかとなっており、これはスピン依存伝導の本質的理解に大きく貢献してきた。本研究では、スピンホール伝導度が電気伝導度に対して異常ホール伝導度と同様スケーリング則に従うことを明らかにした。

リアクティブスパッタリングにより酸化レベルを制御した Pd を用い、スピントルク強磁性共鳴測定により強磁性金属/Pd 酸化物ヘテロ構造におけるスピン軌道トルクを定量した (図 3(a), (b))。こ

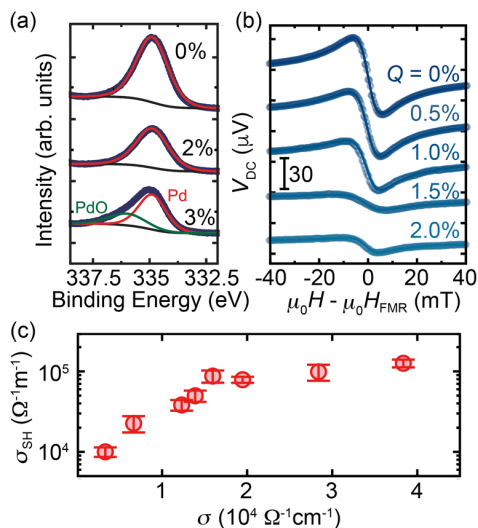


図 3. (a) リアクティブスパッタリングにより成膜した Pd 薄膜の X 線光電子分光測定結果。(b) NiFe/Pd 薄膜におけるスピントルク強磁性共鳴信号 V_{DC} の外部磁場 H 依存性。 H_{MR} は強磁性共鳴磁場を表す。 Q はリアクティブスパッタリング次の Ar に対する O_2 ガスの流量比。(c) 酸化レベルを制御した Pd 層の電気抵抗率 σ とスピンホール伝導度 σ_{SH} の関係。

の結果、強磁性金属/Pd 酸化物ヘテロ構造において、界面スピン軌道トルクの寄与は小さく、Pd 酸化物中のスピンホール効果に起因するスピン軌道トルクが支配的であることを見出した。これにより、酸化により電気伝導度を制御したPdのスピンホール効果を定量することが可能となった。スピントルク強磁性共鳴の測定結果から強磁性金属/Pd 酸化物ヘテロ構造におけるスピン軌道トルクは、Pdの酸化レベルに対して系統的に変化することが明らかとなり、有効スピンミキシングコンダクタンスから見積もった界面スピン透過率を用いることで、電気伝導度とスピンホール伝導度の関係を得た(図3(c))。電気伝導度とスピンホール伝導度の関係は、電気伝導度が高い領域では、酸化により電気伝導度を低下させてもスピンホール伝導度はほとんど変化しないことを示している。この結果は、バンド構造に起因する内因性スピンホール効果が支配的となる moderately dirty 領域から予想された振る舞いと一致する。一方、酸化レベルの制御によりさらに電気伝導度を低下させた dirty 領域では、スピンホール伝導度は急激に減少している。この結果は、電子の散乱により内因性スピンホール効果の起源であるバンド間遷移が抑制されることにより発現するものである。以上の結果は、電気伝導度に対する異常ホール伝導度のスケールリングと共通するものであり、バンド構造に起因する内因性スピンホール効果の振る舞いを明らかにしたものである。

(4) スピン軌道トルクの可逆的制御

スピントロニクス素子の酸化がスピン軌道トルクに著しい影響を与えることが明らかになったことで軽元素に注目した研究をさらに展開し、スピントロニクス素子の新たな制御原理として、ガス吸収によるスピン軌道トルクの変調を実現した。

強いスピン軌道相互作用と高い水素ガス吸着効率を示すことが知られているPdをターゲットとし、強磁性金属/Pdヘテロ構造におけるスピントルク強磁性共鳴を測定した。この結果、スピントルク強磁性共鳴スペクトルは、強磁性金属/Pd素子を水素ガス雰囲気下に置くことで明瞭な変化を示した(図4(a))。水素ガスと窒素ガスを置換する操作を繰り返した結果、Pd層の電気抵抗は可逆的な変化を示し(図4(b))、これに対応してスピントルク強磁性共鳴スペクトル線幅とスピン軌道トルク効率も可逆的に変化することを明らかにした(図4(c), (d))。電気抵抗の可逆的変化は水素吸脱着に伴う典型的振る舞いであり、これは観測されたスピン軌道トルクの可逆変化もPd層における水素吸脱着が起源であることを示している。

同時に観測されたスピントルク強磁性共鳴スペクトル線幅の変化は、水素吸脱着が強磁性金属/Pd界面におけるスピン透過率の変化をもたらしたことを示している。スピン拡散模型に基づく解析の結果、観測された水素ガスによるスピン軌道トルクの変化は、スピンホール効果の変化ではなく、Pdのスピン拡散長の変化に伴う界面スピン透過率の変化が支配的であることが明らかになった。また、Pdは、水素吸脱着に伴う電気抵抗変化によって高い水素検出能力を示すが、この電気抵抗の変化と比較しても、スピン軌道トルク生成効率の変化は一桁程度も大きいことが見出された。以上の結果は、スピン軌道トルクの新たな外部制御手法を明らかにしたものである。

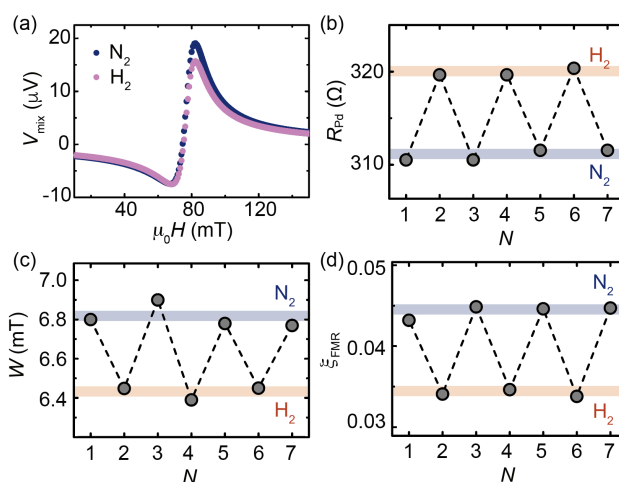


図4. H_2 及び N_2 雰囲気酸化において、NiFe/Pd 試料について測定したスピントルク強磁性共鳴スペクトル。 H_2 ガスと N_2 ガスの交互置換回数 N と (b) Pd 層の電気抵抗 R_{Pd} 、(c) スピントルク強磁性共鳴スペクトル線幅 W 、(d) FMR スピントルク効率 ξ_{FMR} の関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 6件）

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 Musha Akira, Soya Nozomi, Gao Tenghua, Harumoto Takashi, Ando Kazuya	4. 巻 118
2. 論文標題 Tunable spin-orbit torques and perpendicular magnetic anisotropy at oxidized Al/Co interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 052410 ~ 052410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038931	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, 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Wan Fuxing, Wang Qianwen, Harumoto Takashi, Gao Tenghua, Ando Kazuya, Nakamura Yoshio, Shi Ji	4. 巻 30
2. 論文標題 Truly Electroforming Free Memristor Based on TiO2 CoO Phase Separated Oxides with Extremely High Uniformity and Low Power Consumption	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2007101 ~ 2007101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202007101	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 Iwamoto Wataru, Yamamoto Takashi, Tsuchii Kaname, Tazaki Yuya, Asami Akio, Hayashi Hiroki, Einaga Yasuaki, Ando Kazuya	4. 巻 2
2. 論文標題 Weak Antilocalization and Spin Hall Effect in Pt Films Doped with Molecular Spin	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2098 ~ 2103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00330	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 An Hongyu, Haku Satoshi, Kageyama Yuito, Musha Akira, Tazaki Yuya, Ando Kazuya	4. 巻 30
2. 論文標題 Spin Torque Manipulation for Hydrogen Sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2002897 ~ 2002897
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202002897	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 Sakimura Hiroto, Suzuki Masahiko, Yamauchi Yasushi, Gao Ying, Harumoto Takashi, Nakamura Yoshio, Ando Kazuya, Shi Ji	4. 巻 526
2. 論文標題 Characteristic magnetic domain size in Fe with exchange-coupled antiferromagnetic NiO underlayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 146515 ~ 146515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2020.146515	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, Ishikawa Atsushi, Musha Akira, Nakayama Hiroyasu, Yamamoto Takashi, Ando Kazuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Surface Rashba-Edelstein Spin-Orbit Torque Revealed by Molecular Self-Assembly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 044069-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.044069	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 Suzuki Ryuki, Haku Satoshi, Hayashi Hiroki, Ando Kazuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Spin-torque ferromagnetic resonance in electrochemically etched metallic device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 043007 ~ 043007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab8347	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

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 Kageyama Yuito, Tazaki Yuya, An Hongyu, Harumoto Takashi, Gao Tenghua, Shi Ji, Ando Kazuya	4. 巻 5
2. 論文標題 Spin-orbit torque manipulated by fine-tuning of oxygen-induced orbital hybridization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaax4278_1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aax4278	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 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 Sakimura Hiroto, Asami Akio, Hayashi Hiroki, Harumoto Takashi, Nakamura Yoshio, Shi Ji, Ando Kazuya	4. 巻 1
2. 論文標題 Intrinsic spin decay length in an antiferromagnetic insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013013_1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.013013	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 Wenchang, Harumoto Takashi, Nakamura Yoshio, Shi Ji	4. 巻 538
2. 論文標題 Primitive exchange coupling in CoPt/MnN layered structures: Exchange coupling established during deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 168331 ~ 168331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2021.168331	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 Li Wenchang, Tanaka Ren, Usami Takeru, Gao Tenghua, Harumoto Takashi, Nakamura Yoshio, Shi Ji	4. 巻 311
2. 論文標題 Growth of Mn4N film with enhanced perpendicular magnetization on glass substrate using MnO seed layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 131615 ~ 131615
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matlet.2021.131615	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 Eto Rintaro, Mochizuki Masahito	4. 巻 104
2. 論文標題 Dynamical switching of magnetic topology in microwave-driven itinerant magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104425_1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.104425	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 Moriya Hiroyuki, Musha Akira, Ando Kazuya	4. 巻 14
2. 論文標題 Interfacial spin-orbit torque and spin transparency in Co/Pt bilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 063001 ~ 063001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abfeb6	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 Soya Nozomi, Hayashi Hiroki, Harumoto Takashi, Gao Tenghua, Haku Satoshi, Ando Kazuya	4. 巻 103
2. 論文標題 Crossover of the intrinsic spin Hall effect in the presence of lattice expansion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174427_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.174427	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, Moriya Hiroyuki, An Hongyu, Musha Akira, Ando Kazuya	4. 巻 104
2. 論文標題 Coherent-incoherent crossover of the intrinsic spin Hall effect in Pd	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174403_1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.174403	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 Ye Zhixiang, Chen Zhiren, Chen Zehan, Jia Wei, Gao Tenghua, Liu Lin, Zheng Hongnan, Zeng Qi, Wang Qiuning, Wang Ning, Xiang Boyuan, Lin Tao, Qiu Mingxia, Li Shunpu, Shi Ji, Hou Zhipeng, Ando Kazuya, An Hongyu	4. 巻 8
2. 論文標題 Spin Orbit Torque and Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya Interaction in Heavy Metal/Ferrimagnetic Insulator Deposited by Magnetron Sputtering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2100590 ~ 2100590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.202100590	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 ANDO Kazuya	4. 巻 97
2. 論文標題 Generation and manipulation of current-induced spin-orbit torques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Japan Academy, Series B	6. 最初と最後の頁 499 ~ 519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2183/pjab.97.025	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 Moriya Hiroyuki, Musha Akira, Haku Satoshi, Ando Kazuya	4. 巻 5
2. 論文標題 Observation of the crossover between metallic and insulating regimes of the spin Hall effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 12_1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00791-1	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 Nomura Akiyo, Gao Tenghua, Haku Satoshi, Ando Kazuya	4. 巻 12
2. 論文標題 Additive Dzyaloshinskii-Moriya interaction in Pt/Co/Re films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015215 ~ 015215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077683	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16件(うち招待講演 6件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 林宏樹, 武者輝, 崎村広人, 安藤和也
2. 発表標題 強磁性金属/Pt構造におけるスピン軌道トルクの起源
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤和也
2. 発表標題 スピントロニクス素子における電流誘起トルク
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuya Ando
2. 発表標題 Current-induced torques generated by metal oxides
3. 学会等名 SPIE(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuya Ando
2. 発表標題 Spin-orbit torques in metal-based heterostructures
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤和也
2. 発表標題 金属ヘテロ構造におけるスピン軌道トルク
3. 学会等名 応用物理学会スピントロニクス研究会・磁気学会スピントロニクス研究会 共催研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Ando
2. 発表標題 Spin-orbitronics in metal-based heterostructures
3. 学会等名 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Ando
2. 発表標題 Metal-oxide spin-orbitronics
3. 学会等名 SPIE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tenghua Gao and Kazuya Ando
2. 発表標題 Semi-metallic bulk generated spin-orbit torque in disordered topological insulator
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 Haku, Akira Musha, Hiroyasu Nakayama, and Kazuya Ando
2. 発表標題 Surface Rashba-Edelstein spin-orbit torque tuned by organic monolayer
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

1. 発表者名 Akiyo Nomura, Tenghua Gao, Satoshi Haku, and Kazuya Ando
2. 発表標題 Dzyaloshinskii-Moriya interaction in Pt/Co/Re films
3. 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wataru Iwamoto and Kazuya Ando
2. 発表標題 Spin-orbit torque measurement based on magneto-optical Kerr effect and spin torque ferromagnetic resonance in heavy-metal/ferromagnetic-metal bilayers
3. 学会等名 Sino-Japan Young Scholar Forum on Advanced Materials and Related Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nozomi Soya, Takayoshi Katase, and Kazuya Ando
2. 発表標題 Spin transport in AlO _x /SrTiO ₃ heterostructure
3. 学会等名 Sino-Japan Young Scholar Forum on Advanced Materials and Related Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Moriya, Akira Mushi, Satoshi Haku, and Kazuya Ando
2. 発表標題 Observation of the crossover between metallic and insulating regimes of the spin Hall effect
3. 学会等名 Sino-Japan Young Scholar Forum on Advanced Materials and Related Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白怜士, 林宏樹, 安藤和也
2. 発表標題 希土類金属中のスピン軌道トルク生成効率の温度依存性
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 林宏樹, 安藤和也
2. 発表標題 強磁性金属/酸化物界面における異常ホール効果
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 曾家希美, 片瀬貴義, 安藤和也
2. 発表標題 Ni81Fe19/AlOx/SrTiO3積層構造におけるスピン輸送の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022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	史 蹟 (Shi Ji) (70293123)	東京工業大学・物質理工学院・教授 (12608)	
研究分担者	望月 維人 (Mochizuki Masahito) (80450419)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

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