

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05424

研究課題名(和文) スピン起電力による磁気エネルギー利用法の理論研究

研究課題名(英文) Theoretical study on the use of magnetic energy by spinmotive force

研究代表者

家田 淳一 (Ieda, Jun'ichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：20463797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、固体中の電子スピン自由度を介した磁気・電気エネルギー変換の原理「スピン起電力」の学理を追求し、その出力増大方法を提案することで革新的ナノエレクトロニクス応用への道を開くことを目指した。特に、磁性材料として反強磁性体を、ナノ磁気構造として磁気スキルミオンを、そして磁化ダイナミクスとしてスピン波励起を新たに対象とし、関連する実験グループとの共同研究を通じて出力増大に向けた要素技術の実証・確立を行った。また、10年以上未解決となっている磁性ナノ粒子によるスピン起電力の生成機構に関し、国際共同研究を実施し問題解決の糸口を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン起電力は、スピン流(電子のスピン角運動量の流れ)の生成と制御を通じて次世代エレクトロニクスの創出をはかるスピントロニクス分野の新概念である。同分野では、巨大磁気抵抗効果やスピン移行トルクといった新原理の発見に基づく新しい磁気メモリなど、既存素子の高性能化を主眼とした応用とそれに資する基礎研究が追及されており、これらは究極的な「省エネルギー」技術として広く認知されている。これに加えスピン起電力は、磁気・電気の変換原理を提供し、ナノ構造磁性体を用いたエネルギーハーベスティングなど「創エネルギー」の基本概念を導入するものであり、当該分野の今後の発展に質的転換をもたらす可能性を有している。

研究成果の概要(英文)：In this study, we pursue the theory of spinmotive force, the principle of magnetic-electric energy conversion via electron spin degrees of freedom in solids, and propose a method of increasing its power to pave the way for innovative nanoelectronics applications. In particular, we have demonstrated and established elemental technologies for enhancing the output power through joint research with related experimental groups, focusing on antiferromagnets as magnetic materials, magnetic skyrmions as magnetic nanostructures, and spin-wave excitation as magnetization dynamics. In addition, we have conducted international joint research on the generation mechanism of spinmotive force by magnetic nanoparticles, which has been unsolved for more than 10 years.

研究分野：物性理論・スピントロニクス

キーワード：スピン起電力 磁壁移動 磁気スキルミオン スピン軌道相互作用 垂直磁気異方性 反強磁性体 磁気ナノピラー 磁気ナノ粒子

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、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

電気回路を貫く磁束が時間変化すると起電力が生じる。ファラデーが1831年に発見したこの電磁誘導の法則により、モーターや発電機が生まれ、人類は電気を自由に使うことができるようになった。1984年ベリーにより磁束が電子波動関数の位相(ベリー位相)と関係づけられ[1]、電磁誘導の法則の量子力学的解釈が与えられた。代表者らは、この基礎概念に電子スピン自由度を含む拡張を行い、2006年に強磁性金属ではスピンの付随するベリー位相の時間変化が起電力を発生させることを理論的に提唱した[2]。この現象は「スピン起電力」と名付けられ、2009年に東京大学の実験グループが磁性ナノ粒子の系でその存在を実証した[3]。スピン起電力は、時間変化しない静磁場からも電圧生成が可能な点で通常の誘導起電力とは著しく異なっており、磁性体のもつ磁気エネルギーを電気エネルギーに直接変換する原理を与える(図1)。

このスピン起電力の発見は、スピン流(電子のスピン角運動量の流れ)の生成と制御を通じて次世代エレクトロニクスの創出をはかる「スピントロニクス」における新概念と位置づけられる。これまでスピントロニクスでは、1987年の巨大磁気抵抗効果や1996年のスピン移行トルクといった新原理の発見に基づく新しいメモリ、磁気ヘッド、磁気センサなど、既存のエレクトロニクス素子の高性能化を主眼とした応用とそれに資する基礎的研究が追及されてきた。これらはまた、究極的な「省エネルギー」技術の有力候補として広く認知されるようになってきている。これに加えスピン起電力は、磁気・電気エネルギーの変換原理を提供し、ナノ構造磁性体を用いたエネルギーハーベスティングや無線給電などスピントロニクスに「創エネルギー」の基本概念を導入するものであり、当該分野の今後の発展に質的転換をもたらす可能性を有している。

代表者は共同研究者とともに、このスピン起電力の基礎学理建設を行ってきた。理論面では、スピンドायナミクスに基づく理論定式化と数値計算手法の確立、内部磁気エネルギーからの電圧生成、高出力安定化のための材料探索、直流磁場から交流電圧の生成機構(磁気パワーインバータ)の提案、出力におけるノイズ等の非線形挙動の原因特定、ならびに実験グループとの共同研究では直流スピン起電力の連続発信の理論解析、磁壁や磁気渦運動によるスピン起電力の実時間観測に対する数値シミュレーションの実施など、代表者の下にスピン起電力の現象理解に関する包括的な先端知識が蓄積しており、現段階では国際的な研究競争においても大きな優位性を保持している(上記成果は総合報告[4]にまとめられている)。

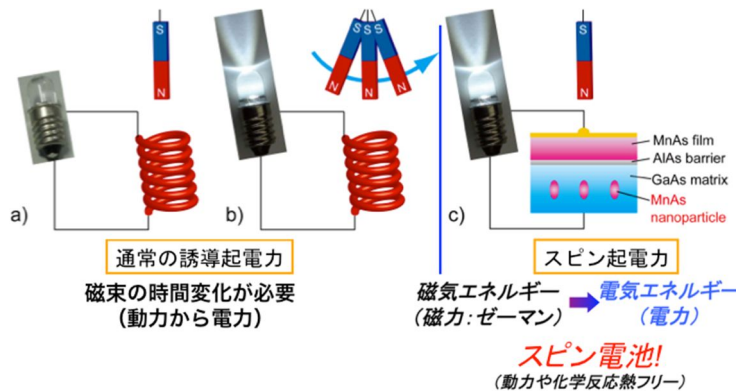


図1: 誘導起電力とスピン起電力。

2. 研究の目的

本研究では、代表者らが先導してきたスピン起電力の研究をより広範囲に展開する。特に、新しいナノエレクトロニクス技術の基盤創出をその目的に掲げる。本研究の遂行により、当該分野に我が国発の新基軸を打ち立て、世界に先駆けてスピン起電力を介した新しいスピン利用技術の基礎を築く。中心課題は、出力増大方法の提案である。電子の磁気エネルギーと電気エネルギーを単位換算すると、磁場1Tが電圧100 μ V相当となる。単一磁壁によるスピン起電力では、このエネルギー保存則の定める量子効率の上限まで磁気・電気エネルギーの変換が可能であるが実際の出力電圧は高々数 μ Vに留まっている[5]。そこで、多数の磁壁をナノスケール領域に集積・連動させるなどの方法を考案することで出力を積算できれば、将来的に全く新しいエネルギーハーベスティング技術を構築することができる。これが本研究の最大の狙いとなる。

【参考文献】

[1] M. V. Berry, "Quantum phase factors accompanying adiabatic changes," *Proc. R. Soc. London A* **392**, 45 (1984).
 [2] S. E. Barnes, J. Ieda, and S. Maekawa, "Magnetic memory and current amplification devices using moving domain walls," *Appl. Phys. Lett.* **89**, 122507 (2006).
 [3] P. N. Hai, *et al.*, "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions," *Nature* **458**, 489 (2009).
 [4] J. Ieda, Y. Yamane, and S. Maekawa, "Spinmotive force in magnetic nanostructures," *SPIN* **3**, 1330004 (2013).
 [5] M. Hayashi, J. Ieda, *et al.*, "Time-Domain Observation of the Spinmotive Force in Permalloy Nanowires," *Physical Review Letters* **108**, 147202 (2012).

3. 研究の方法

スピン起電力は空間的に非一様な磁化構造が磁化ダイナミクスにより時間変化するとき発生する。例えば、磁壁(強磁性体中の磁区境界)の運動がスピン起電力の発現する典型例である。本研究では、既存研究で得た知見に基づき、新しい磁性材料、新しい磁化構造、新しい磁化ダイナミクスの開拓を行う。具体的には、磁性材料として反強磁性体を、磁化構造として磁気スキルミオンを、そして磁化ダイナミクスとしてスピン波励起を新たに研究対象とし、関連する実験グループとの共同研究を通じて出力増大に向けた要素技術の実証を行う。また、10年以上未解決となっている磁性ナノ粒子によるスピン起電力の生成機構に関し、国際共同研究を推進する。

本研究では解析的な理論計算と共に数値シミュレーションを実施する。数値計算プログラムに関しては、代表者が過去に受け入れた科研費等で作製されたシミュレーションコードがその基礎となる。本研究の基礎となる文献は、いずれも代表者らによって報告されたものであり、研究計画の開始段階における準備状況としては研究資料・ノウハウの点で十分な蓄積がある。国内外の研究協力者らとは、緊密な連絡調整体制が確立している。

本研究の成果は、所属する先端基礎研究センターのホームページ[<http://asrc.jaea.go.jp/>]や、日本原子力研究開発機構のプレス発表[<http://www.jaea.go.jp/news/press/results.html>]を通して行う。また、所属研究センターで毎年行っている国際ワークショップや国内外の学会が主催する国際学会・研究会への参加を通じて国際的な発信も行っていく。

4. 研究成果

研究期間内に、本研究課題に関連する原著論文9報、学会報告21件(うち招待講演9件)、プレスリリース1件、特許出願2件、著書分担執筆1章、解説記事3報等の成果発表を行った。以下、そのうちの主要なものについて概説する。

(1) 反強磁性体におけるスピン起電力とスピントルク

強磁性体はマクロな磁化を持つ。このため、電流を流せばスピン分極の分だけスピン流が生成でき、その磁気構造の制御にはスピン流が有効であることはよく知られている。対して反強磁性体は、磁気モーメントの方向が原子レベルで規則的に打ち消し合う磁気秩序を示す。そのためマクロな磁化は存在せず、スピン流の生成源として期待できない。また、外部に磁場を出さず、外部の磁場に応答しにくいいため、従来の磁氣的検出・制御手段がそのままでは適用できず、その利用は大きく制限されていた。しかし、近年の研究進展に伴って、反強磁性体を持つ潜在的な応用可能性が明らかになってきている。例えば不揮発性メモリへの応用では、高集積化した際の素子間の混線や漏話が原理的に解消される、高速の(テラヘルツ=光の周波数帯)動作が可能、といった強磁性体では実現できない特性に期待が寄せられている。このように近年注目を集める「反強磁性スピントロニクス」であるが、その理論的基礎付けには未整備・未解明な部分が多く残されていた。特に、薄膜や細線における反強磁性ナノ構造の制御・検出については未だ確定的な手段がなく、理論・実験の両面で様々な可能性が模索されているが、重要な未解決課題となっていた。そこで本研究では、反強磁性ナノ構造を制御する手段としてスピン移行トルク(spin-transfer torque: STT)を、また検出方法としてスピン起電力(spinmotive force: SMF)に着目し研究を進めた。STTとSMFは強磁性体ではよく確立された現象であり、スピン流を用いたナノ磁気構造の制御手段として欠かせない技術を提供する。強磁性体に比べその制御手段が限られている反強磁性体において、これらはより重要な役割を担うと期待される。

まず、反強磁性磁気構造のダイナミクスによるスピン起電力を理論的に検討した。本研究では、先行研究において考慮されていなかった、副格子磁化の傾角性(有限の磁化成分)電子スピンと副格子磁化の交換相互作用における非断熱性、ラシュバスピン軌道相互作用の効果を取り込むことで、反強磁性体そのものから電圧生成が可能であることを理論的に示した。反強磁性磁壁の磁場駆動(図2)と反強磁性共鳴を具体的に取り上げ、その出力電圧の外場依存性を導いた。本成果は、反強磁性ダイナミクスの電氣的な検出方法を与えるものとして有益であり、スピン起電力の出力増大に向けた材料探索の可能性をより多様な物質群へと広げるものである。

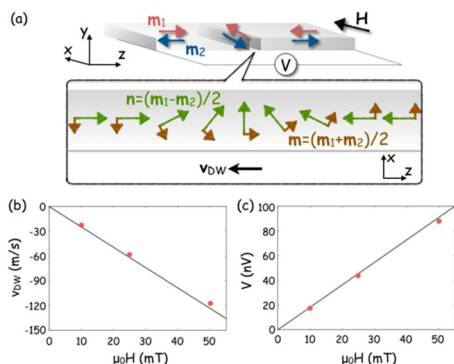


図2: ジャロシンスキー・守谷相互作用により副格子磁化 m_1 と m_2 に有限の磁化成分 $m = m_1 + m_2$ が生じている傾角反強磁性磁壁の運動によるスピン起電力生成。(a)反強磁性秩序パラメータ $n = m_1 - m_2$ の空間変化に伴い m も磁壁構造を示し外部磁場 $\mu_0 H$ で駆動される。(b)磁壁速度および(c)スピン起電力の外場依存性。[Phys. Rev. B **93**, 18408(R) (2016).]

また、同様の反強磁性磁化構造に対するスピン移行トルクについても、電子スピンと副格子磁化の交換結合エネルギー J と、副格子間ホッピングエネルギー t の競合が重要となることを指摘し、先行研究で不十分であった応答係数の微視的パラメータへの依存性を明らかにした。これにより、スピントルクの効率の定量評価が可能な表式が導出され、電流による反強磁性磁壁移動の速度や、反強磁性スピン波共鳴におけるドップラースhift (図 3) の見積もりが可能となった。

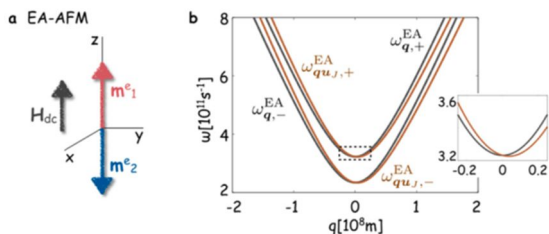


図 3 : (a)容易軸反強磁性体の模式図と(b)そのスピン波分散関係。電流存在下では正の波数 q 方向にドップラースhiftが生じる。挿入図は $q=0$ 付近の拡大図。
[Phys. Rev. B **94**, 054409 (2016).]

(2) 反強磁性体におけるラシュバ効果による磁気異方性

本研究では、強磁性体薄膜においてラシュバスピン軌道結合が磁気交換相互作用との競合により磁気異方性を生み出すメカニズムを解明した理論を、ラシュバスピン軌道結合を伴う反強磁性体に拡張した。具体的には、図 4 に示すように 2 つの副格子に反強磁性的秩序を持つ格子上の最近接間を飛び移る伝導電子スピンの、オンサイトの交換相互作用と、(a)最近接間、または(b)次近接間にそれぞれ同符号と異符号のラシュバスピン軌道結合を感じる 2 種類の格子模型を対象とする。これらはそれぞれ、反強磁性薄膜と他物質の界面に生じるラシュバ効果、および CuMnAs など代表される反転対称性が局所的に破れた反強磁性体におけるラシュバ効果の模型となっており、反強磁性スピントロニクス研究における典型例として関心が持たれる。

各模型に対して、全エネルギーの反強磁性秩序変数の角度依存性を求め、一軸磁気異方性定数の表式を導出する。(a)の模型では、ラシュバ相互作用の増大に伴い、容易面的な異方性から垂直磁気異方性に転移が生じることが示される。一方、(b)の模型では、ラシュバ相互作用は交換相互作用との競合の結果、常に垂直磁気異方性に対して有利に作用することが示された。

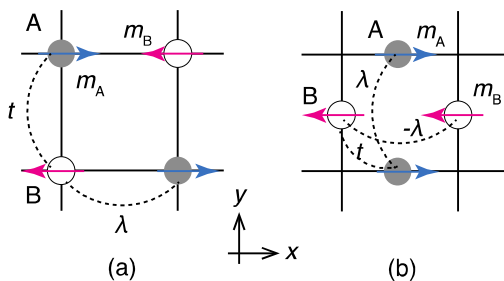


図 4 : ラシュバスピン軌道結合(λ)を伴う反強磁性体の格子模型。副格子磁化 m_A と m_B は反強磁性的に結合している。
[J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 053703 (2018).]

(3) スピン軌道結合を通じた磁気スキルミオンによるスピン起電力

本研究では、磁気スキルミオンの並進運動によって生じるスピン起電力(SMF)の解析的研究を行った。SMF は、動的な磁気構造に誘起される電圧のことである。よって、SMF を測定することでスキルミオンのダイナミクスを検出することができ、将来のスキルミオンベースの技術開発において重要な役割を果たす可能性がある。スキルミオン構造は、スピン軌道結合(SOC)に起因するジャロシンスキー・守谷相互作用が交換相互作用との競合することで安定化される。このため、SMF の見積もりには、SOC の影響を取り込んだ解析が必要である。そこで本研究では、様々なスキルミオン形状(スキルミオンか反スキルミオンか、ネール型かプロッホ型か、スキルミオンコアの極性)に対し、対応するラシュバ型とドレッセルハウス型の SOC の出力スピン起電力への影響を明らかにした。この結果は、この現象の包括的な理解とともに、与えられた実験条件でスキルミオン運動によって生じる電圧信号を推定することを可能にするものである。

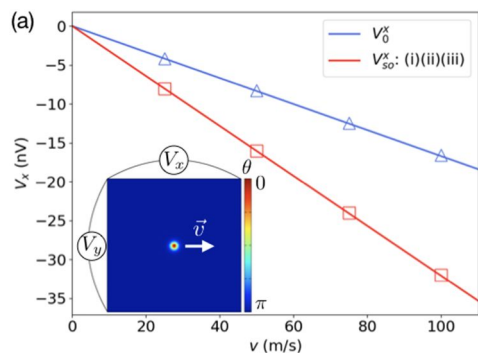


図 5 : 磁気スキルミオンによるスピン起電力 V_x の並進速度 v 依存性。スピン軌道結合がない場合(印)とある場合(印)の比較。挿入図は、磁気スキルミオンと電圧測定の配置図。
[J. Magn. Magn. Mater. **491**, 165550 (2019).]

(4) 磁気ナノピラーにおけるスピン波励起に伴うスピン起電力

これまでに実施されたスピン起電力(SMF)の実験的検証は、磁性細線中の磁壁移動など面内磁化構造のダイナミクスのみに限られていた。本研究では、膜面垂直方向に非対称性を持たせることで、SMF 発生のための要件を満たす新しいアプローチを模索した。東北大学金属材料研究所で作成された $L1_0$ -FePt/Ni₈₁Fe₁₉ 二重層素子においてスピン波が RF 磁場で励起されると、二重層素子の面外方向に連続した直流電圧信号が現れることが確認された。この電圧信号の符号とマイクロ波パワー依存性は、SMF の理論的枠組みで説明され、マイクロマグネティクスシミュレーションとの比較を行うことにより、スピン波モードとの対応関係を明らかにした。本成果は、これまでに報告されている面内構造素子に加えて、垂直構造素子を用いた SMF の生成が可能であることを示したものであり、将来的なスピン起電力素子の集積化へ道を拓くものである。

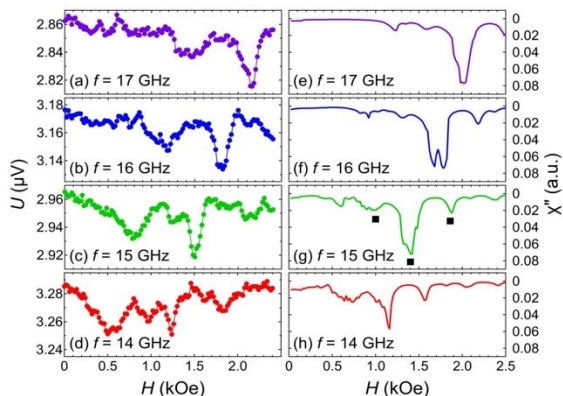


図 6 : スピン波励起に伴うスピン起電力の実測値(a)-(d)と、対応する計算データ(e)-(h)の比較。
[Phys. Rev. B **100**, 094424 (2019).]

(5) 磁気トンネル接合及び磁気ナノ粒子におけるスピン起電力の理論構築

スピン起電力が測定されている磁壁や磁気渦といった典型的な磁気ナノ構造では、磁化の空間変化のスケールが伝導電子の特性長であるフェルミ波長より十分大きく、断熱過程の近似がよく成り立つことから理論的な取り扱いが容易になる。この場合、磁化と電子スピンの間で角運動量、及びエネルギーの等価交換が行われ、磁場と電圧の変換率の理論的上限が 1T あたり約 $100\mu\text{V}$ と定まる。一方、東京大学の研究グループが行った実験では、平均粒径が約 3nm の磁気ナノ粒子を埋め込んだトンネル接合の系で、この上限を大きく超える 1T あたり 8mV ものスピン起電力が観測されている[Nature **458**, 489 (2009)]。その後、米国 MIT の研究グループより同様の実験結果が報告された [Nature Commun. **5**, 3682 (2014)]。実験は共にヘリウム温度で行われており、スピン起電力と離散準位を持つ磁気ナノ粒子を介した量子伝導が競合することで、出力電圧の大幅な増幅が可能であることを意味している。これらの報告は、磁気エネルギー変換現象として興味深い問題を提示しているものの、その物理現象の機構説明は未だなされていない。本研究では、ナノ粒子における電子相関の効果の寄与に着目し、グラニュー系におけるスピン伝導の理論を応用することでその全容解明を目指した。本課題に関する共同研究をマイアミ大学の S.E. Barnes 教授と継続中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Koyama T., Ieda J., Chiba D.	4. 巻 116
2. 論文標題 Electric field effect on the magnetic domain wall creep velocity in Pt/Co/Pd structures with different Co thicknesses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092405(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5143970	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 Kobata Masaaki, Yoshii Kenji, Fukuda Tatsuo, Kawasaki Ikuto, Okane Tetsuo, Yamagami Hiroshi, Yaita Tsuyoshi, Harii Kazuya, Ieda Jun'ichi, Okayasu Satoru, Hioki Tomosato, Kikkawa Takashi, Saitoh Eiji	4. 巻 30
2. 論文標題 Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of Pt/Y3Fe5O12	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011192(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSCP.30.011192	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 Ieda Jun'ichi	4. 巻 16
2. 論文標題 A Quantum Mechanical Theory of Pumping "Magnetic Swings"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPSJ News and Comments	6. 最初と最後の頁 12-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJNC.16.12	査読の有無 無
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 Zhou W., Seki T., Imamura H., Ieda J., Takanashi K.	4. 巻 100
2. 論文標題 Spinmotive force in the out-of-plane direction generated by spin wave excitations in an exchange-coupled bilayer element	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094424(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.094424	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 Yamane Yuta, Ieda Jun'ichi	4. 巻 491
2. 論文標題 Skyrmion-generated spinmotive forces in inversion broken ferromagnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 165550(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165550	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 家田淳一	4. 巻 146
2. 論文標題 放射線とスピントロニクス	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 放射線と産業	6. 最初と最後の頁 48-52
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 無
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 Koyama Tomohiro, Nakatani Yoshinobu, Ieda Jun'ichi, Chiba Daichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Electric field control of magnetic domain wall motion via modulation of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaav0265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aav0265	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, Oyamada Tatsuro, Sato Koichi, Ohta Hiromichi, Ieda Jun'ichi	4. 巻 55
2. 論文標題 Current-Induced Modulation of Coercive Field in the Ferromagnetic Oxide SrRuO3	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1400604(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2019.2894897	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 山根結太、家田淳一	4. 巻 13
2. 論文標題 反強磁性ナノ構造におけるスピントルクと電圧生成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 まぐね	6. 最初と最後の頁 235-241
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 J. Ieda, S.E. Barnes, S. Maekawa	4. 巻 87
2. 論文標題 Magnetic Anisotropy by Rashba Spin-Orbit Coupling in Antiferromagnetic Thin Films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053703(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.053703	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 Yuta Yamane, Jun'ichi Ieda, Jairo Sinova	4. 巻 93
2. 論文標題 Electric voltage generation by antiferromagnetic dynamics	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180408R(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.180408	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 Yuta Yamane, Jun'ichi Ieda, Jairo Sinova	4. 巻 94
2. 論文標題 Spin-transfer torques in antiferromagnetic textures: efficiency and quantification method	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054409(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.054409	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21件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Ieda Jun'ichi, Yamane Yuta, Maekawa Sadamichi
2. 発表標題 Spin-energy conversion via emergent electromagnetic fields
3. 学会等名 The 60th REIMEI WS on "New Excitations for Spintronics seen with Quantum Beams" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 反強磁性体におけるラッシュバ垂直磁気異方性
3. 学会等名 第11回「界面スピン軌道結合」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 ノンコリニアスピンダイナミクス
3. 学会等名 新世代研究所スピントロニクス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 界面ラッシュバ効果による磁気異方性の磁性膜厚依存性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会(物性)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ieda Jun'ichi、Barnes Stewart E.、Maekawa Sadamichi
2. 発表標題 Magnetic anisotropy due to Rashba interaction in antiferromagnets
3. 学会等名 9th Joint European Magnetic Symposia Conference (JEMS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ieda Jun'ichi、Yamane Yuta、Sinova Jairo
2. 発表標題 Theory of spin-transfer torques in antiferromagnetic textures
3. 学会等名 16th RIEC International Workshop on Spintronics and 8th JSPS Core-to-Core Workshop on New-Concept Spintronics Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ieda Jun'ichi、Yamane Yuta
2. 発表標題 Effects of spin-orbit couplings on emergent electric fields due to magnetic Skyrmion motion
3. 学会等名 53rd REIMEI International Workshop on New Excitations in Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Ieda
2. 発表標題 Spin controls in Rashba coupled antiferromagnets
3. 学会等名 Spin Dynamics in the Dirac Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Ieda
2. 発表標題 Rashba magnetic anisotropy in antiferromagnets
3. 学会等名 ナノスピンの変換科学平成28年度年次報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 家田淳一, 前川禎通
2. 発表標題 反強磁性体におけるラッシュバ効果による磁気異方性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Ieda
2. 発表標題 Rashba spin-orbit magnetic anisotropy in antiferromagnets
3. 学会等名 workshop on Antiferromagnetic Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Ieda
2. 発表標題 Spintronic micro-power generation
3. 学会等名 International Conference on Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 家田淳一, J. Sinova, 山根結太, 前川禎通
2. 発表標題 電子スピンを用いた反強磁性磁化制御
3. 学会等名 応用物理学会スピントロニクス研究会/日本磁気学会スピントロニクス専門研究会共同主催研究会「反強磁性スピントロニクスの新展開」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 スピン流を利用した不揮発メモリ
3. 学会等名 JST平成29年度新技術説明会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Ieda, S. Maekawa
2. 発表標題 Magnetic anisotropy in the Rashba spin-orbit coupled antiferromagnets
3. 学会等名 Reimei/Gp-Spin/ICC-IMR International Workshop on New excitations in Spintronics(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 反強磁性体のラシュバ効果と磁気異方性
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「固体中のスピンドYNAMIKSの物理と応用」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家田淳一, 前川禎通, S.E. Barnes
2. 発表標題 反強磁性薄膜におけるラシュバ効果による磁気異方性とその電界制御
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 Spin-transfer torque and spinmotive force in antiferromagnets
3. 学会等名 J-Physics平成28年度領域全体会議
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Jun'ichi Ieda
2. 発表標題 Spin transport in metallic antiferromagnetic textures: interplay of inter-sublattice mixing and s-d exchange interaction
3. 学会等名 PASPS9(9th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Solids) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 家田淳一
2. 発表標題 反強磁性ダイナミクスによるスピン起電力
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Jun'ichi Ieda
2. 発表標題 Spinmotive forces in (anti-)ferromagnetic textures
3. 学会等名 The CEMS-QPEC Symposium on ``Emergent Quantum Materials" (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 J. Ieda and S. Maekawa	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Oxford University Press	5. 総ページ数 520(内24)
3. 書名 Spin Current (2nd edition) Ch.7	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 原子力電池、原子力電池システム	発明者 岡安悟、針井一也、 家田淳一	権利者 日本原子力研究 開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-215282	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 熱電変換システム、熱電変換方法	発明者 岡安悟、針井一也、 家田淳一	権利者 日本原子力研究 開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-215283	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>個人HP https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/spinenergy/ieda/index.html 日刊工業新聞への寄稿記事（転載） https://www.jaea.go.jp/for_general/ima-korekara/10/ [プレス発表] 磁石の中を高速に伝播する " 磁気の壁 " の運動を電圧で制御することに成功 https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p18122201/ 個人HP http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/spinenergy/ieda/index.html 平成28年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞受賞 https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2016/042501/</p>
--

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
研究協力者	バーンス スチュアート エドワード (Barnes Stewart Edward)	マイアミ大学・Physics Department・Professor	
研究協力者	シノバ ハイロ (Sinova Jairo)	マインツ大学・Institute of Physics・Professor	
研究協力者	山根 結太 (Yamane Yuta)	マインツ大学・Institute of Physics・Postdoctoral Fellow	2017年、理化学研究所博士研究員。
連携研究者	深見 俊輔 (Fukami Shunsuke) (60704492)	東北大学・電気通信研究所・准教授 (11301)	