

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00825

研究課題名（和文）電界制御反強磁性スピンドYNAMICS

研究課題名（英文）Electric field control of antiferromagnetic spin dynamics

研究代表者

白土 優（Shiratsuchi, Yu）

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70379121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,600,000円

研究成果の概要（和文）：磁性材料は、モーター・発電機やMRIなどの医療機器、デジタルデータの保存（ハードディスクドライブ）などの電子材料など、広く産業に利用されている重要材料である。本研究では、この内、電子デバイスの更なる高性能化を目指して、これまでは制御が出来ないとされてきた反強磁性体と呼ばれる磁石に付かない材料の特性制御について検討した。特に、従来の磁石材料を凌駕すると期待される、電界を用いた高速かつ低電力での磁性の制御を主眼とした研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者は、反強磁性体の一つであるクロム酸化物（Cr2O3）を用いることで、磁石に付かない磁気特性（反強磁性）を電界（電圧）によって制御できることを見出してきた。本研究は、この成果を発展させ、従来の磁石材料の駆動エネルギーの約1/10～1/100となる約1 kJ/m<sup>3</sup>での駆動を達成した。また、その際の駆動速度は、従来材料とほぼ同等であり、速度の劣化が生じない。さらに、制御エネルギーの障壁がどこにあるかも明らかにし、更なる低エネルギー駆動と高速化の指針を得ることに成功した。

研究成果の概要（英文）：Magnetic material is an important material which is widely used in various industry such as motor, dynamo, medical, and information technology. In this project, we investigated the control of magnetism of antiferromagnet, which has been regarded as un-controllable magnetic material, toward the further development of electric devices. In particular, we focused the fast and low-energy control of spin dynamics of antiferromagnet by using electric field, which can overcome the conventional magnetic materials.

研究分野：磁性材料、スピントロニクス

キーワード：磁性 スピントロニクス 反強磁性 電界

### 1. 研究開始当初の背景

超スマート社会においては、利用するデジタル情報の量、速度は増加し続けることが予想され、情報を超高速に格納・処理する技術はますます重要になる。また、IT 機器の消費電力の上昇が社会問題になっていることは周知の事実である。スピントロニクスは、電子の電荷とスピンを同時に利用することで電荷のみ、あるいは、スピンのみでは実現不可能な革新的デバイスの創出を可能にする。電界駆動磁化制御素子を利用した低消費電力デバイスやスピントルク発振素子によるナノ磁気センサーやナノ発振器が、その例である。これらのデバイスは、例えば、自動車の自動運転における人とモノの弁別（テラヘルツセンサ）や車体通信に使われる 140 GHz 通信での周波数フィルタ、次世代超高密度磁気記録媒体におけるマイクロ波発振磁気ヘッドなど、デバイスのサイズ・駆動周波数に応じて、いずれも革新的な機能を有するデバイスである。

一方、これまで研究対象とされてきた強磁性体の場合、強磁性共鳴周波数がギガヘルツ領域にあるため、今後必要とされる数 100 ギガヘルツ～テラヘルツ領域での動作が難しい。反強磁性体のスピン歳差運動は、高い内部磁界に起因して強磁性スピンと比較して 2~3 桁高速な数 100 ギガヘルツ～テラヘルツ領域にある。しかしながら、反強磁性体はスピンの向きが内部で補償されるため自発磁化を示さず、このため、反強磁性体のスピンドYNAMICS（歳差運動）は鉄物（バルク）に対して数 10 T 以上の強磁界を印加した場合が主であり、デバイスに必須となる薄膜化した反強磁性体に対しては、制御はもとより励起・検出もチャレンジングな課題である。

### 2. 研究の目的

反強磁性体は、上述のように磁化（N 極-S 極）の起源となる磁気モーメントが単位格子内で反平行に配列するため、材料全体として磁化を示さない。このため、従来手法では磁性の制御が不可能とされてきた。研究代表者は、電気磁気効果と呼ばれる電圧（電界）と磁性の相互作用を用いて、反強磁性体の磁性を制御できることを示してきた。これまでの研究では、磁性制御の原理実証と制御に必要なエネルギーの解釈を中心課題設定してきたが、本研究課題では、この独自技術に基づいて、反強磁性磁化制御の低エネルギー化とともに、その動的な駆動（ダイナミクス）に発展させることを最大の目的とした。特に、デバイス化に必須となる「薄膜」を用いた研究は、研究代表者を含めた世界でも数グループのみが可能な高度な技術が必要であり、また、その動的な制御（ダイナミクス）に発展させている研究グループは他に例を見ない。本研究課題での具体的な検討課題として、下記に注力した研究を行った。

- (1) パルス電界を用いた反強磁性磁化の反転速度の定量的評価
- (2) 電界による反強磁性磁化の反転エネルギー障壁の支配因子の解明と低膜厚化への指針獲得
- (3) (1)、(2) を基にしたさらなる低エネルギー・高速化指針の獲得

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料作成方法

本件研究は、反強磁性材料をデバイスへ応用を可能にすることを主眼としているため、研究に用いた試料には、デバイス化に必須となる薄膜を用いた。薄膜化の手法には、蒸着やスパッタリングなどいくつかの手法があるが、本研究では、研究代表者がこれまでに構築してきた手法であり、クロム酸化物薄膜の作製に適したスパッタリング法を用いて試料を作製した。作製した薄膜の構成は、Pt (2 nm) /Co(0.25, 0.5 nm) /Au(1.0 nm) /Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (30, 130 nm) /Pt(20 nm) および、Pt (2 nm) /Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40 nm) /Pt (20 nm) であり、次節(1)、(2) では前者を用いた研究結果を、(3) では後者を用いた研究結果を示した。それぞれの薄膜を用いた目的は、次節で説明する。なお、試料構成の

( ) 内に示した数値は、各層の膜厚を表す。薄膜作製方法の詳細は、研究代表者の過去の報告（例えば、Y. Shiratsuchi et al., J. Appl. Phys. 121, 073902 (2017).）を参照されたい。

#### (2) 構造評価方法

本研究の基本原理であるクロム酸化物 (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) の電気磁気効果は、特殊な結晶構造中で実現する効果であり、この結晶構造を薄膜において実現することが一つのキーテクノロジーとなる。このため、作製した薄膜が所望の結晶構造を有しているかどうかは、本研究の達成の重要なポイントとなる。本研究では、作製した薄膜の構造を、電子線と X 線を用いた回折測定によって検討した。前者は、反射高速電子線回折 (RHEED) と呼ばれる方法であり、薄膜作製に使用するスパッタリング装置内で、試料を大気にさらすことなく正常空間内で観察ができる。クロム酸化物 (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 薄膜に対する本観察結果の例を、図 1 に示す。図から、縦方向に直線的に伸びた回折（ストリーク）が複数観察される。

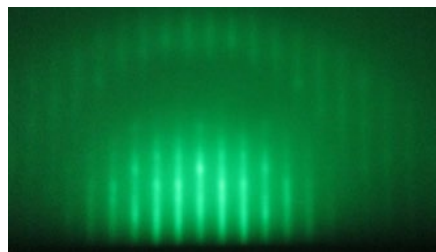


図 1 作製したクロム酸化物薄膜の反射高速電子線回折像

ストリークの生成は、薄膜の結晶方位が膜面垂直方向に配向していること、ならびに、薄膜表面が原子レベルで平坦であることを示している。また、ストリークの間隔が等間隔であることから、膜面内方向の結晶方位も配向していることを示している。RHEEDに加えて、全ての層を積層した後、X線を用いた回折実験により、上記の複数の層の界面も原子層レベルで平坦であることを確認している。また、X線回折により、作製した薄膜の結晶構造について検討した結果、本研究で必要とする結晶構造（コランダム構造）が良質に形成されていることも確認している。

### (3) 磁気特性評価方法（電界による反強磁性磁化反転を含む）

前述のように、反強磁性材料は磁化を持たないため、通常の磁性体の評価に用いる磁化測定の手法を適用することは困難である。本研究では、界面における磁性体間の相互作用を利用した手法（例えば、T. V. A. Nguyen, Y. Shiratsuchi et al., J. Appl. Phys. 122, 073905 (2017). など）、および、異常ホール効果を利用した検出手法を持ちいた。いずれも、電気抵抗測定をベースとした技術であるため、本手法の適用のために、作製した薄膜を図2に示すマイクロドット素子（あるいは、マイクロホール素子）形状に微細加工を行った。微細加工には、フォトリソグラフィ法、Ar イオンミリング法を用いた。マイクロドット素子（あるいは、マイクロホール素子）への微細加工後、電極パッド（Au/Cr）の生成にはリフトオフ法を用いた。

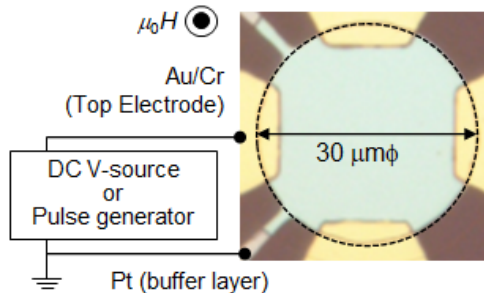


図2 作製したマイクロドット素子の光学顕微鏡像と電気回路の模式図

## 4. 研究成果

以下に、本研究で得られた主な成果例を記す。

### (1) パルス電界を用いた反強磁性磁化の反転速度の定量的評価

電気磁気効果を原理とする反強磁性磁化の反転は、磁界+電界（電圧）を駆動力とする。子の駆動力をパルス化することで、反強磁性磁化（スピン）のダイナミクスに迫ることが出来る。原理的には、磁界をパルス化することも可能であるが、技術的にはパルス磁界による高磁界の生成が困難である（数ミリ〜マイクロ秒は可能が、本研究の主眼となるナノ秒には到達困難）。一方、電圧をパルス化し、ナノ秒パルスとすることは比較的容易であるため、本研究では、静磁界+パルス電界による反強磁性磁化の動的駆動について検討した。

図3に、静磁界（固定磁界）+ナノ秒パルス電圧を印加した後の、磁区（N極-S極の空間分布）の変化を示す。変化させたパラメータは、パルス電圧の幅のみであり、静磁界の強さとパルス電圧強度は一定とした。パルス電圧の印加により、濃いグレーの領域が段階的に拡大していることがわかる。また、パルス電圧幅の増加により、拡大領域の増加幅が増大する。この変化を定量的に解析することで、反強磁性磁化の拡大速度（専門的には、磁壁の移動速度）を得ることが出来る。

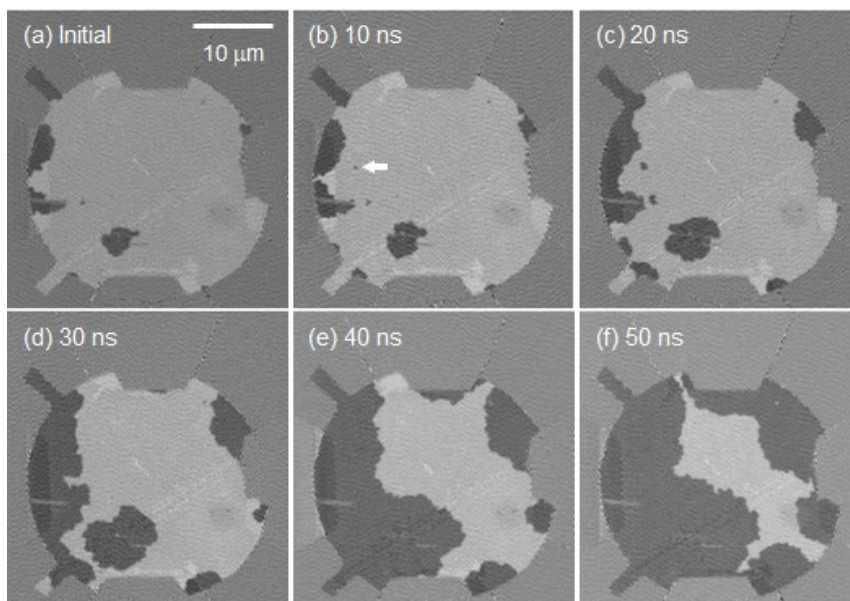


図3 電気磁気効果によって駆動した反強磁性磁区の伝搬状態を表す磁区像。

図4に、印加エネルギーに対する反強磁性磁壁移動速度の変化を示す。図には、比較のために、従来材料である強磁性材料の磁壁移動速度のエネルギー依存性も示した。従来型の強磁性材料では、3~200 kJ/m<sup>3</sup>の投入エネルギーが必要であることに対して、電気磁気効果を駆動力とする反強磁性体の磁壁移動（本研究）では、1 kJ/m<sup>3</sup>以下の低エネルギー駆動が可能である。また、その際の駆動速度は、両者で大きな違いはなく、このことから、電気磁気効果による反強磁性磁壁移動は、従来材料と比較して低エネルギーかつ高速駆動の可能性が示唆される。

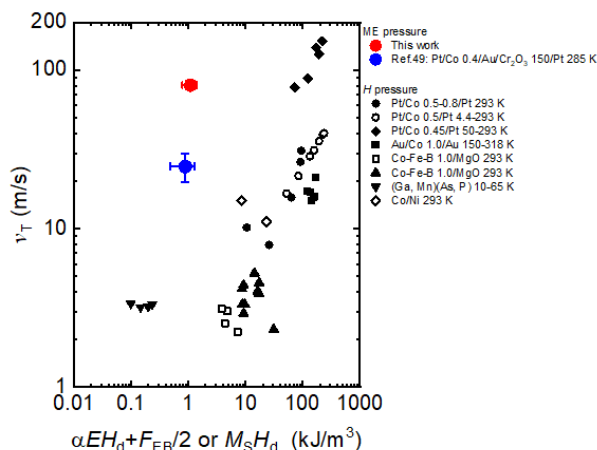


図4 磁化反転エネルギー密度と磁壁移動速度の関係

## (2) 電界による反強磁性磁化の

### 反転エネルギー障壁の支配因子の解明と低膜厚化への指針獲得

電界は電圧／膜厚で算出され、デバイス内で重要な外場は電圧であるため、低膜厚化による駆動電圧の低減は重要な課題である。一方、マルチフェロイクス材料などを用いた他のアプローチでは、格子歪が作用する。この手法では、膜膜化した際に必ず現れる下地層との格子整合によって、低膜厚化した際に、下地層によって格子が拘束され、電界による磁性制御特性が劣化する可能性があることが指摘されている。本課題は、反強磁性体の磁化の動的駆動に対しても回避すべき課題であるため、クロム酸化物層の低膜厚化に対する特性劣化の可能性について検討した。本検討のために、これまでの報告では達成されてこなかった 30 nm までの低膜厚化を実現し、本薄膜を用いて反強磁性磁化の電界誘起反転エネルギーを検討した。

図5に、クロム酸化物薄膜の膜厚に対する反転エネルギー積（この分野での指標として電界と磁界の積を用いる）を示す。図の横軸は、膜厚の逆数としている。膜厚の低下（膜厚の逆数の増加）によって、反転エネルギーが上昇し、その上昇は膜厚の逆数に比例することが明らかになった。反転エネルギーが膜厚の逆数に比例することは、反転エネルギーが界面効果によって支配されていることを意味している。この結果から、界面構造の制御（使用する材料を含む）によって、低エネルギー化が可能であることを示した。この原理に基づく低エネルギー化の指針については、下記(3)で述べる。

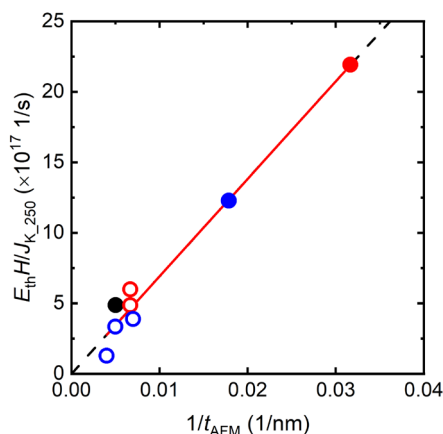


図5 反強磁性磁化反転エネルギーの反強磁性層膜厚依存性

## (3) さらに低エネルギー・高速化指針の獲得

(1)、(2)により、電界による低エネルギー・高速駆動が可能であること、ならびに、界面構造によってさらなる低エネルギー駆動が可能であることが明らかになった。この知見を基に、界面構造を制御した Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 積層構造において、さらなる低エネルギー駆動が可能であるとの指針を得ている。この積層構造における課題は、従来構造では反強磁性磁化を検出するマーカーとして強磁性層を積層していたことに対して、マーカー機能を担う層を排除したため、反強磁性磁化の検出が課題となる。本積層構造においても、Pt 層の特性（強いスピン軌道相互作用）と界面 Cr のスピンを利用することで、クロム酸化物の反強磁性秩序状態を電氣的に検出できることを見出した。(T. Moriyama, Y. Shiratsuchi et al., Phys. Rev. Appl. 13, 034052 (2020)., X. Wang, Y. Shiratsuchi et al., AIP Advances, 12, 035216 (2022).) 通常の金属や半導体では、磁場に対してホール電圧は線形に変化するが、作製した素子においては、磁場に対して明確なヒステリシスが観測された。通常、こうしたヒステリシスは強磁性金属において観測されるが、本研究では、強磁性層フリー薄膜においてヒステリシスが観測されており、界面の電子構造由来の新規な効果によることが予測される。また、ヒステリシスは、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜厚が厚い場合には観測されず、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜厚を良質な結晶性を保ちつつ、数 10 nm レベルまで低膜厚化した結果である。現在、このホール効果の微視的起源についての検討とともに、電気磁気効果を利用した低エネルギー・高速駆動についてのさらなる発展・展開を進めている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yu Shiratsuchi, Kentaro Toyoki, Ryoichi Nakatani	4. 巻 33
2. 論文標題 Magnetoelectric control of antiferromagnetic domain state in Cr203 thin film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics, Condensed Matter.	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/abf51c	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 Yu Shiratsuchi, Yiran Tao, Kentaro Toyoki, Ryoichi Nakatani	4. 巻 7
2. 論文標題 Magnetoelectric Induced Switching of Perpendicular Exchange Bias Using 30-nm-Thick Cr203 Thin Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetochemistry	6. 最初と最後の頁 36(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/magnetochemistry7030036	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 Yu Shiratsuchi, Saori Yoshida, Hiroaki Yoshida, Yoshinori Kotani, Kentaro Toyoki, Chiharu Mitsumata, Ryoichi Nakatani and Tetsuya Nakamura	4. 巻 127
2. 論文標題 Robust magnetic domain in Pt/Co/Au/Cr203/Pt stacked film with perpendicular exchange bias	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 153902(7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0002240	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 Takahiro Moriyama, Yu Shiratsuchi, Tatsuya Iino, Hikaru Aono, Motohiro Suzuki, Tetsuya Nakamura, Yoshinori Kotani, Ryoichi Nakatani, Kohji Nakamura, and Teruo Ono	4. 巻 13
2. 論文標題 Giant anomalous Hall conductivity at Pt/Cr203 interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034052(8pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.034052	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 Yu Shiratsuchi, Kentaro Toyoki, Tao Yiran, Hikaru Aono and Ryoichi Nakatani	4. 巻 13
2. 論文標題 Realization of magnetoelectric effect in 50-nm-thick Cr2O3 thin film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 043003(4pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab7bcc	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 Yu Shiratsuchi, Motohiro Suzuki, Kentaro Toyoki, Kohei Wakatsu, Takashi Nishimura, Tetsuya Nakamura and Ryoichi Nakatani	4. 巻 583
2. 論文標題 Critical behavior of perpendicular exchange bias in Pd/Co/Pt/Cr2O3/Pd stacked films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica B: Physics of Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 412052(5pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physb.2020.412053	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 Thi Van Anh Nguyen, Yu Shiratsuchi, Hideo Sato, Shoji Ikeda, Tetsuo Endoh, and Yasushi Endo	4. 巻 19
2. 論文標題 Magnetic properties of Co film in Pt/Co/Cr2O3/Pt structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015152(6pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5130439	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 Yu Shiratsuchi, Daisuke Tokunaga and Ryoichi Nakatani	4. 巻 59
2. 論文標題 Regeneration of perpendicular exchange bias in high temperature regime in Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt stacked films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SEEF02(7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab6a2a	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 Yu Shiratsuchi, Saori Yoshida, Satoshi Onoue, Chiharu Mitsumata, Nobuhito Inami, Tetsuro Ueno, Kanta Ono and Ryoichi Nakatani	4. 巻 60
2. 論文標題 Enhancement of perpendicular exchange bias by introducing twin boundary in Pt/Co/ -Cr2O3/ -V2O3 epitaxial film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 2028-2032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2019102	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 白土 優	4. 巻 24
2. 論文標題 スピントロニクスデバイスを基盤としてナノ磁気計測技術の開発と物質・材料研究への展開	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SPring-8利用者情報	6. 最初と最後の頁 98-103
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 -

1. 著者名 Y. Shiratsuchi, J. Shen, Y. Tao, K. Takahara, K. Toyoki, R. Nakatani	4. 巻 45
2. 論文標題 Structural, Magnetic, and Electric Properties of Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt Thin Film with Cr2O3 Layer below 25 nm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetism Society of Japan	6. 最初と最後の頁 101 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2107R004	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 Y. Shiratsuchi, Y. Tao, R. Tsutsumi, K. Toyoki, R. Nakatani	4. 巻 130
2. 論文標題 Temperature lag with the onset of exchange bias, superparamagnetic blocking, and antiferromagnetic ordering in ultrathin ferromagnet/antiferromagnet thin film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 193902 ~ 193902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0060606	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 J. Shen, T. Tada, K. Toyoki, Y. Kotani, R. Nakatani, Y. Shiratsuchi	4. 巻 120
2. 論文標題 Low pressure drive of the domain wall in Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt thin films by the magnetoelectric effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092404 ~ 092404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0083202	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 X. Wang, K. Toyoki, R. Nakatani, Y. Shiratsuchi	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic-field and temperature dependence of anomalous Hall effect in Pt/Cr2O3/Pt trilayer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035216 ~ 035216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000253	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48件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Kentaro Toyoki, Tao Yiran, Hikaru Aono and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magnetoelectric effect in 50-nm-thick Cr2O3 thin film
3. 学会等名 INTERMAG2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優, 豊木 研太郎, 小谷 佳範, 森山 貴広, 小野 輝男, 中村 哲也, 鈴木基寛, 中村浩次, 中谷 亮一
2. 発表標題 XMCDを用いた電気磁気Cr2O3薄膜の界面磁性研究
3. 学会等名 SPRUCナノスピントロニクス研究会2020年度 第1回研究会「ナノスピントロニクス研究と放射光利用」(招待講演)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 多田龍生, 白土 優, 豊木研太郎, 中谷亮一
2. 発表標題 Al添加Cr203薄膜における自発磁化の発現
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季第168回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白土 優, 豊木研太郎, 陶 亦然, 中谷亮一
2. 発表標題 電気磁気効果誘起交換バイアス反転エネルギーのCr203膜厚依存性
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Shiratsuchi, K. Toyoki, Y. Kotani, T. Nakamura, T.V.A. Nguyen, Y. Endo and R. Nakatani
2. 発表標題 Domain wall motion in Pt/Co/Au/Cr203/Pt film driven by magnetoelectric effec
3. 学会等名 第25回半導体スピン工学の基礎と応用 (The 25th symposium on the Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors, PASPS25)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優、豊木研太郎、陶 亦然、中谷亮一
2. 発表標題 電気磁気効果誘起交換バイアス反転におけるCr203膜厚の影響
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋季(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Dynamic control of antiferromagnetic domain state based on magnetoelectric effect
3. 学会等名 Materials Research Meeting (MRM) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Ryoichi Nakatani and Chiharu Mitsumata
2. 発表標題 High perpendicular exchange anisotropy with peculiar temperature dependence at Co/Cr2O3 interface
3. 学会等名 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec ' 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Kentaro Toyoki, Tao Yiran, Hikaru Aono and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magnetoelectric effect in 50-nm-thick Cr2O3 thin film
3. 学会等名 INTERMAG2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Toyoki, Yu Shiratsuchi, Hiroaki Yoshida, Shunsuke Watanabe, Yoshinori Kotani, Tetsuya Nakamura and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Magneto-electric driven antiferromagnetic domain reversal and domain wall dynamics
3. 学会等名 63th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2019 MMM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.V.A Nguyen, Y. Shiratsuchi, H. Sato, S. Ikeda, T. Endoh and Y. Endo
2. 発表標題 Dynamic magnetic property in Pt/Co/Cr2O3/Pt stack films with perpendicular magnetic anisotropy
3. 学会等名 63th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2019 MMM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Dynamic magnetoelectric control of Cr2O3 domain
3. 学会等名 The 13th Pasific Rim Conference of Ceramic Societies (PacRim13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Antiferromagnetic domain control by magnetoelectric effect
3. 学会等名 The 10th Pasific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Daisuke Tokunaga and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 High-temperature regeneration of perpendicular exchange bias in Pt/Co/Au/Cr2O3/Pt stacked films
3. 学会等名 Magnetisc and Optics Research International Symposium (MORIS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白土 優, 豊木研太郎, 陶 亦然, 青野 晃, 中谷亮一
2. 発表標題 電気磁気効果誘起交換バイアス反転の磁場依存性
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季(第166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優, 豊木研太郎, 陶 亦然, 青野 晃, 中谷亮一
2. 発表標題 50 nm厚Cr203薄膜を用いた電気磁気効果誘起交換バイアス反転
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 豊木研太郎, 小谷佳範, 白土 優, 広沢 哲, 中村哲也
2. 発表標題 走査型ナノXMCD顕微鏡の高磁場領域磁化反転挙動の観察
3. 学会等名 SPRUC顕微ナノ材料科学研究会 / 日本表面真空学会 放射光表面科学研究部会・プローブ顕微鏡研究部会 合同シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優, 中谷亮一
2. 発表標題 電気磁気効果を示すCr203薄膜を用いた垂直交換磁気異方性の微視的メカニズム
3. 学会等名 大阪大学ナノプラットフォーム地域セミナー(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白土 優, 吉田沙織, 尾上聡, 井波暢人, 上野哲朗, 小野寛太, 中谷亮一
2. 発表標題 反強磁性Cr203薄膜を用いた垂直交換バイアスに対する双晶粒界の影響
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋季(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白土 優
2. 発表標題 走査型軟X線MCD顕微鏡を用いた電気磁気効果誘起磁化反転プロセス
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kakeru Ujimoto, Xinrui Wang, Ion Iino, Rou Tsutsumi, Kentaro Toyoki, Yoshinori Kotani, and Ryoichi Nakatani, Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 AHE-based detection of interfacial antiferromagnetic moment in Pt/Cr203
3. 学会等名 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Shiratsuchi, Takashi Okano, Hirofumi Ekawa, Hiroki Sakurai, Kentaro Toyoki, Takeshi Kato, and Ryoichi Nakatani
2. 発表標題 Peculiar temperature dependence of magneto-optic Kerr rotation in Pt/Co/Spacer (Ir, Pt)/Cr203/Pt thin film
3. 学会等名 Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Jiaqi Shen, Kentaro Toyoki, Tatsuo Tada, Yoshinori Kotani, Ryoichi Nakatani, and Yu Shiratsuchi
2. 発表標題	Universal magnetic domain wall creep driven by magnetoelectric effect
3. 学会等名	2022 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Xinrui Wang, Kentaro Toyoki, Ryoichi Nakatani and Yu Shiratsuchi
2. 発表標題	Detection of antiferromagnetic order parameter based on Hall measurements for Pt/Cr203/Pt trilayer
3. 学会等名	2022 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Yu Shiratsuchi
2. 発表標題	Antiferromagnetic domain control by magnetoelectric effect
3. 学会等名	Asia Pasific Society for Materials Resach 2021 Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yu Shiratsuchi, Ryoichi Nakatani and Chiharu Mitsumata
2. 発表標題	High perpendicular exchange anisotropy with peculiar temperature dependence at Co/Cr203 interface
3. 学会等名	International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec ' 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Fangfei Luo, Jiaqi Shen, 豊木研太郎, 中谷亮一, 白土 優
2. 発表標題 Time-lapse observation of magnetization reversal in exchange-biased Pt/Co/Au/Cr203/Pt thin film
3. 学会等名 顕微ナノ材料科学研究会2021年度研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xunrui Wang*, 氏本 翔, 堤 朗, 豊木研太郎, 中谷亮一, 白土 優
2. 発表標題 Pt/Cr203/Pt積層膜における異常ホール効果の磁場・温度依存性
3. 学会等名 顕微ナノ材料科学研究会2021年度研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白土 優, 王 心瑞, 氏本 翔, 豊木研太郎, 小谷佳範, 中谷亮一
2. 発表標題 Pt/Cr203積層膜における異常ホール効果の磁場・温度依存性
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 櫻井皓基, 多田龍生, 市川 聡, 岸田憲明, 豊木研太郎, 中谷 亮一, 白土 優
2. 発表標題 Al添加Cr203薄膜における自発磁化生成の結晶方位および成長温度依存性
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白土 優
2. 発表標題 酸化物反強磁性体における界面磁性の電界制御
3. 学会等名 「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spin-RNJ)」シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田龍生, 白土 優, 豊木研太郎, 小谷佳範, 中谷亮一
2. 発表標題 Al添加Cr203薄膜における自発磁化と結晶構造の組成依存性
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fangfei Luo, Kentaro Toyoki, Yu Shiratsuchi, Ryoichi Nakaktani
2. 発表標題 Magnetic domain observation in Pt/Co/Cr203/Pt thin film by MOKE microscope with pulsed magnet combined with static magnetic field
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白土 優, 陶 亦然, 豊木研太郎, 中谷亮一
2. 発表標題 強磁性超薄膜 / 反強磁性薄膜における交換バイアスおよび超常磁性プロッキング温度に対する反強磁性秩序の影響
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Jiaqi Shen, Kentaro Toyoki, Tatsuo Tada <sup>1</sup> , Yoshinori Kotani, Rryoichi Nakatani, and Yu Shiratsuchi
2. 発表標題 Magnetic field dependence of antiferromagnetic domain wall velocity driven by magnetoelectric effect
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 S. Fujii, T. Usami, S. Yamada, T. Kanashima, Y. Shiratsuchi, R. Nakatani, and K. Hamaya
2. 発表標題 Crystal orientation dependence of converse magnetoelectric effect in Co <sub>2</sub> FeSi/Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> -PbTiO <sub>3</sub> multiferroic heterostructure
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 白土 優 (分担執筆)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 NTS	5. 総ページ数 600
3. 書名 スピントロニクスハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻中谷研究室ウェブサイト  <a href="http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse2/index.html?20210412">http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse2/index.html?20210412</a>  大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 表界面物性額領域ウェブサイト  <a href="http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse2/index.html">http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse2/index.html</a></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
研究分担者	遠藤 恭 (Endo Yasushi) (50335379)	東北大学・工学研究科・准教授  (11301)	
研究分担者	中谷 亮一 (Nakatani Ryoichi) (60314374)	大阪大学・工学研究科・教授  (14401)	
研究分担者	豊木 研太郎 (Toyoki Kentaro) (90780007)	大阪大学・工学研究科・助教  (14401)	

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