

## スピン三重項超伝導体におけるスピンカロリトロニクス

京大理<sup>A</sup>, 京大基研<sup>B</sup>, 阪大院基礎工<sup>C</sup>, 東北大院工応物<sup>D</sup>, ルイジアナ州立大<sup>E</sup>

松下太樹<sup>A,B</sup>, 水島健<sup>C</sup>, 安藤慈英<sup>C</sup>, 正木祐輔<sup>D</sup>, 藤本聡<sup>C</sup>, Ilya Vekhter<sup>E</sup>

スピン三重項超伝導におけるクーパー対のスピンは、トポロジカル超伝導や非ユニタリ超伝導などのエキゾチックな超伝導の起源となる。具体的には、

- 時間反転対称なトポロジカル超伝導体は、クーパー対のスピンカイラリティ ( $\langle S_\mu L_\nu \rangle$ )、
- 非ユニタリ超伝導体は、クーパー対のスピン分極 ( $\langle S_\mu \rangle$ ) により実現する。

しかし、これらのクーパー対のスピン構造を捉える物理現象は明らかにされておらず、そのことが、物質におけるトポロジカル超伝導や非ユニタリ超伝導の立証を妨げていた。本発表では、時間反転対称なトポロジカル超伝導体と非ユニタリ超伝導体において、温度勾配により誘起されるスピン伝導を観測することにより、クーパー対のスピンカイラリティやスピン分極を検出できることを示す。具体的には、

- 時間反転対称なトポロジカル超伝導体においては、クーパー対のスピンカイラリティがスピネルンスト効果(温度勾配に垂直な方向のスピン伝導)[1]、
- 非ユニタリ超伝導体においては、クーパー対のスピン分極がスピンゼーベック効果(温度勾配に沿ったスピン伝導)を引き起こすことを示す[2]。

これらの温度勾配によるスピン伝導は、クーパー対のスピンにより引き起こされるため、超伝導転移温度以下で増大する。そのため、スピネルンスト伝導率やスピンゼーベック伝導率が、超伝導転移温度以下で増大する振る舞いを観測することにより、クーパー対のスピンカイラリティやスピン分極を立証できる。

## 引用文献

[1] T. Matsushita, J. Ando, Y. Masaki, T. Mizushima, S. Fujimoto, and I. Vekhter Phys. Rev. Lett. **128**, 097001(2022).

[2] T. Matsushita, T. Mizushima, Y. Masaki, S. Fujimoto, and I. Vekhter arXiv: 2404.02633 (2024).

## All-in-one evaluation method for transverse thermoelectric properties of a single magnetic thin film device

IMR, Tohoku Univ.<sup>1</sup>, CSIS, Tohoku Univ.<sup>2</sup>

<sup>○</sup>Takumi Yamazaki<sup>1</sup>, Norihiko L. Okamoto<sup>1</sup>, Tetsu Ichitsubo<sup>1</sup>, and Takeshi Seki<sup>1,2</sup>

E-mail: takumi.yamazaki.d5@tohoku.ac.jp

Transverse thermoelectric conversion, in which a temperature gradient leads to a transverse electric field, is a promising phenomenon for realizing the next-generation energy harvesting technology [1]. The anomalous Nernst effect (ANE) is a representative transverse thermoelectric effect in magnetic materials. The performance of transverse thermoelectric conversion for the ANE is characterized using the figure of merit  $z_T T (= S_T^2 \sigma_{yy} T / \kappa_{xx})$ , where  $S_T$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\kappa_{xx}$  and  $T$  denote the transverse thermoelectric coefficient, electrical conductivity, thermal conductivity, and temperature, respectively. Although thin film forms offer advantages from the viewpoint of practical thermoelectric applications, the precise evaluation of their thermoelectric figure of merit is quite challenging. Recently, we have demonstrated that  $z_T T$  in thin films can be precisely quantified by the combined use of heat-flux method, time-domain thermoreflectance, and four-terminal method [2]. However, the samples specialized for each evaluation method are required, which slows down the throughput speed and prevents the rapid materials development.

In this study, we propose an all-in-one method to evaluate  $S_T$ ,  $\sigma_{yy}$ , and  $\kappa_{xx}$  of thin films. The device features a multilayer structure comprising of substrate/magnetic film sample/insulator/transducer. The device structure was fabricated by photolithography and Ar ion milling, enabling the simultaneous measurement of these three parameters with a single device. Herein,  $\kappa_{xx}$  is determined by fitting the temperature response of Joule heating to a theoretical curve derived from a one-dimensional heat conduction model, known as the  $2\omega$  method [3].  $S_T$  is obtained from the relation of  $S_T = \kappa_{xx} \Delta T_{AEE} / (d j_c T)$  [4], where  $d$  and  $j_c$  represent the sample thickness and applied charge current density, respectively.  $\Delta T_{AEE}$  denotes the temperature change induced by the anomalous Ettingshausen effect (AEE), which is the reciprocal phenomenon of the ANE.  $\sigma_{yy}$  is measured using the four-terminal method. To detect the temperature response induced by Joule heating and  $\Delta T_{AEE}$ , the lock-in thermoreflectance is employed, which is an optical thermometry based on the temperature dependence of reflectivity [5]. To verify the accuracy of the developed  $2\omega$  method,  $\kappa_{xx}$  of an Al-O insulating film was measured, yielding a value of  $1.15 \pm 0.22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , which is consistent with values reported in the previous study [6]. Subsequently, the magnetic field dependence of  $\Delta T_{AEE}$  of CoFeB film was measured. The obtained response reflects the magnetization curve of the CoFeB film, successfully evaluating the AEE. In the presentation, the details of each measurement method will be explained.

[1] K. Uchida and J. P. Heremans, *Joule* **6**, 2240 (2022). [2] T. Yamazaki *et al.*, *Phys. Rev. Applied* **21**, 024039 (2024). [3] Y. Nakamura *et al.*, *Nano Energy* **12**, 845 (2015). [4] A. Miura *et al.*, *Appl Phys. Lett.* **115**, 222403 (2019). [5] T. Yamazaki *et al.*, *Phys. Rev. B* **101**, 020415(R) (2019). [6] S.-M. Lee *et al.*, *Int. J. Thermophys.* **38**, 176 (2017).

## 局所熱流注入による磁気イメージング

一色弘成、Nico Budai、Zheng Zhu、小林鮎子、上杉良太、肥後友也<sup>A</sup>、中辻知<sup>A</sup>、大谷義近<sup>B</sup>  
(東大物性研、<sup>A</sup>東大理、<sup>B</sup>理研 CEMS)

### Magnetic imaging by local heat injection

H. Isshiki, N. Budai, Z. Shu, A. Kobayashi, R. Uesugi, T. Higo<sup>A</sup>, S. Nakatsuji<sup>A</sup>, Y. Otani<sup>B</sup>  
(ISSP, <sup>A</sup>Univ. of Tokyo, <sup>B</sup>RIKEN)

### はじめに

近年、新しい磁性トポロジカル材料が続々と発見されており、それらをスピントロニクスデバイスに組み込んで高機能化を目指す研究が盛んに行われている。そのため、微細加工された磁性トポロジカル材料に対する磁気イメージングがますます重要になっている。本発表では、従来の強磁性体のみならず、反強磁性 Weyl 半金属のナノ細線に対しても有効な、空間分解能約 80 nm の新しい磁気イメージング手法を報告する。

### 実験方法

磁性体内の磁気分極と温度勾配の外積方向に電圧を生じる異常ネルンスト効果に着目した。原子間力顕微鏡の探針を、ヒーターで加熱した試料細線に接触させることで局所的な面直温度勾配を作る。Fig.1 に示すように、探針を接触モードでスキャンし試料細線両端に生じる異常ネルンスト電圧をマッピングすることにより磁気像を得る<sup>1)</sup>。本稿では、反強磁性体であるにも関わらずその特異なバンド構造によって異常ネルンスト効果を示す、反強磁性 Weyl 半金属  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  多結晶のナノ細線に対する測定結果を示す。測定は大気・室温の環境で行った。

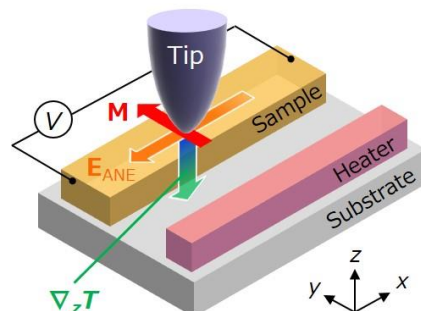


Fig.1 Concept of the experiment.

### 実験結果

$\text{Mn}_3\text{Sn}$  ナノ細線の凹凸像と、対応する磁場印加前後の異常ネルンスト電圧マッピング像を Fig.2a,b,c にそれぞれ示す。Fig.2b,c の正(負)の電圧は、その領域のクラスター磁気八極子( $\text{Mn}_3\text{Sn}$  の磁気分極)が+y(-y)方向を向いていることを示している。初期状態の Fig.2b では、異常ネルンスト電圧の符号が異なる数百ナノメートル程度の大きさの領域が複数存在しており、結晶粒に閉じ込められた磁気八極子のドメインがランダムに分布していることがわかる。一方、外部磁場により細線短手方向(+y 方向)に磁気八極子を飽和させた後、ゼロ磁場で同じ領域をマッピングした Fig.2c では、全体的に磁気八極子が+y 方向を向いていることがわかる。形状磁気異方性のない  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  では、細線の短手方向に、残留磁気分極が生じていることが可視化された。Fig.2c の電圧信号が一様でないことは、多結晶で一部の結晶粒が異常ネルンスト効果を発現していないことを示している。このように、本手法によって、多結晶  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  ナノ細線の磁気的な構造について新しい知見を得ることができた<sup>2)</sup>。

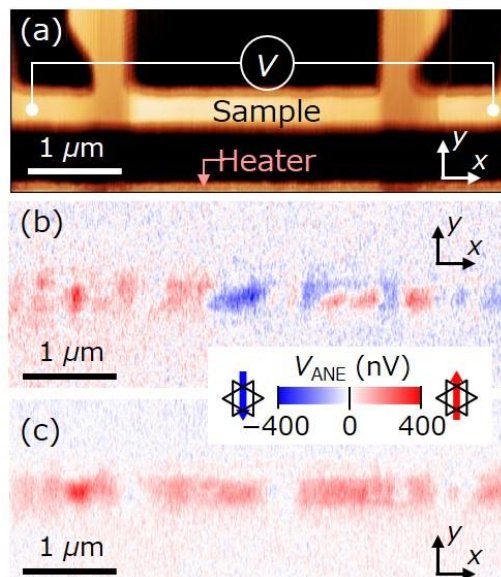


Fig. 2 (a) Topography of the  $\text{Mn}_3\text{Sn}$  wire. (b), (c) Local anomalous Nernst voltages before and after applying an external magnetic field. The Seebeck signals have been removed.

### 参考文献:

- 1) N. Budai et al. Appl. Phys. Lett. 122, 102401 (2023)
- 2) H. Isshiki et al. Phys. Rev. Lett. 132, 216702 (2024)

# GdFeCo フェリ磁性薄膜における熱電発電の負荷抵抗依存性

小林祐希<sup>1</sup>, 笠谷雄一<sup>2</sup>, 吉川大貴<sup>2</sup>, 塚本新<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 日本大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup> 日本大学理工学部)

Load resistance dependence of thermoelectric generation in GdFeCo ferrimagnetic thin film

Yuki Kobayashi<sup>1</sup>, Yuichi Kasatani<sup>2</sup>, Hiroki Yoshikawa<sup>2</sup>, Arata Tsukamoto<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Graduate school of Science and Technology, Nihon Univ.,

<sup>2</sup> College of Science and Technology, Nihon Univ.)

## はじめに

温度勾配と磁化と共に直交する方向に電界が生じる異常ネルンスト効果(ANE)は、熱を直接電気エネルギーに変換する Thermoelectric generator(TEG)への応用が期待されている。我々はこれまでに、電力抽出用負荷抵抗を接続した GdFeCo フェリ磁性薄膜における ANE に根差した熱電発電量の負荷特性が、理想電流源と内部抵抗が並列接続した等価電源回路のような特性を示すことを報告してきた<sup>1)-3)</sup>。等価電源回路の各素子値と各種物理現象との対応付けにより、熱電効果の等価回路は TEG の負荷特性制御・動作解析の指標となり得るが、先行研究<sup>1)-3)</sup>では等価内部抵抗と薄膜物性との対応付けは未検討であった。本報告では、GdFeCo 薄膜における熱電発電の等価電源回路における内部抵抗値と薄膜物性の対応付けに向けた計測検討を行った。

## 実験方法

垂直磁化膜となるように設計した SiN(60 nm) / Gd<sub>22</sub>Fe<sub>68</sub>Co<sub>10</sub>(20 nm) / SiN(5 nm)を Si 基板上にマグネトロンスパッタ法で作成した。対象薄膜における熱電発電値(負荷抵抗電圧  $V_{LT}$ )の負荷抵抗  $R_L$  に対する変動を検討するため、Fig. 1 のように薄膜に種々の負荷抵抗  $R_{LT}$  を接続した。薄膜に対して膜面垂直(z)方向に外部磁界  $H$  を印加し、膜面内(x)方向に温度勾配  $\nabla_x T$  を与え、 $V_{LT}$  を測定した。また、負荷抵抗を接続せずに薄膜素子の端子間抵抗  $R_{pin}$  の計測も行った。

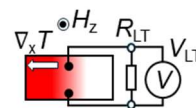


Fig.1 schematic picture of the experimental setup.

## 実験結果と考察

種々の負荷抵抗  $R_{LT}$  における異常ネルンスト効果に起因する負荷電圧  $V_{LT}$  を Fig. 2 に示す。  $V_{LT}$  は  $R_{LT}$  の増加に伴い連続的に増加し、  $R_{LT}$  の増加と共に一定値に漸近する。この  $V_{LT}$  の負荷抵抗依存性につき電子回路理論に基づいて評価する。理想電流源  $I$  と内部抵抗  $r_{int}$  および負荷抵抗  $R_L$  の並列回路で構成される等価回路における負荷電圧  $V_L$  は

$$V_L = I r_{int} R_L / (r_{int} + R_L) \quad (1)$$

で算出できる。この集中定数回路では、  $r_{int}$  と  $R_L$  が等しい場合、  $V_L$  は開放電圧の半値となる。ここで、有限の負荷抵抗 ( $R_{LT} \leq 200 \text{ k}\Omega$ ) における実測値  $V_{LT}$  の近似線から  $V_{LT}(R_{LT}) = V_{LT}(200 \text{ k}\Omega)/2$  となる実効的内部抵抗  $r_{int-eff}$  を見積もった。(1)式に  $r_{int-eff}$  を代入し算出した等価回路(Fig. 2 挿入図)における  $V_{LT}$  を Fig. 2 に破線で示す。実測値(plot)と算出値(破線)は  $R_{LT}$  に対し同様の変化を示す。一方で、端子間抵抗  $R_{pin}$  は  $80 \text{ }\Omega$  であり、  $r_{int-eff}$  ( $=360 \text{ }\Omega$ ) に比べ比較的小さな値を示し、起電力を表す電圧源および端子間抵抗に加え、付加的直列抵抗成分で示されるエネルギー損失機構の存在を示唆する結果となった。

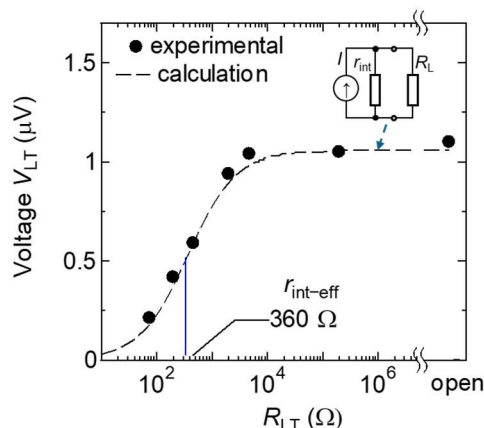


Fig.2 Load resistance  $R_{LT}$  dependence of load voltage  $V_{LT}$  of GdFeCo thin film.

## 参考文献

- 1) Y. Kobayashi *et al.*, 第 47 回 日本磁気学会学術講演会概要集. 28aB-6 (2023).
- 2) Y. Kobayashi *et al.*, 2023 年マグネティックス研究会(IEE-MAG), MAG23-089 (2023).
- 3) Y. Kobayashi *et al.*, MORIS2024, Th-P-14 (2024).

## CoFe/Cu 多層膜の磁気熱抵抗効果による巨大熱伝導率変化

牧野楓也<sup>1,2,4</sup>, 平井孝昌<sup>2</sup>, 志賀拓磨<sup>3</sup>, 首藤浩文<sup>2</sup>, 藤久裕司<sup>3</sup>, 大柳洸一<sup>4</sup>, 小林悟<sup>4</sup>,  
佐々木泰祐<sup>2</sup>, 八木貴志<sup>3</sup>, 内田健一<sup>1,2,5</sup>, 桜庭裕弥<sup>1,2</sup>  
(筑波大<sup>1</sup>, NIMS<sup>2</sup>, 産総研<sup>3</sup>, 岩手大<sup>4</sup>, 東大<sup>5</sup>)

Huge changes in thermal conductivity by magneto-thermal resistance effect in CoFe/Cu multilayer  
Fuya Makino<sup>1,2</sup>, Takamasa Hirai<sup>2</sup>, Takuma Shiga<sup>3</sup>, Hirofumi Suto<sup>2</sup>, Hiroshi Fujihisa<sup>3</sup>, Koichi Oyanagi<sup>4</sup>,  
Satoru Kobayashi<sup>4</sup>, Taisuke Sasaki<sup>2</sup>, Takashi Yagi<sup>3</sup>, Ken-ichi Uchida<sup>1,2,5</sup>, Yuya Sakuraba<sup>1,2</sup>  
(Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, NIMS<sup>2</sup>, AIST<sup>3</sup>, Iwate Univ.<sup>4</sup>, Univ. of Tokyo<sup>5</sup>)

### はじめに

巨大磁気抵抗効果 (GMR) は磁性多層膜において隣り合う強磁性層の磁化配置に依存して電気伝導率が大きく変化する現象である。巨大磁気熱抵抗効果 (Giant magneto-thermal resistance effect: GMTR) は、磁性多層膜の磁化配置に依存し熱伝導率  $\kappa$  が変化する現象であり、非接触かつ能動的な伝熱制御技術の動作原理として期待されている。近年、中山らによって、全層が bcc 構造を有する  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ (CoFe)/Cu エピタキシャル多層膜系における、膜面直方向の熱伝導率が磁化配置に依存して大きく変化することが報告された<sup>1)</sup>。観測された熱伝導率変化量  $\Delta\kappa$  と磁気熱抵抗比 (MTR 比) はそれぞれ  $24.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  と 150% であり、MTR 比は室温で磁気抵抗比 (MR 比) 60% の 2 倍以上に及ぶ値を示した。この結果は熱キャリアとして電子とフォノンの寄与だけでは説明できないため、非従来の熱輸送原理が存在することが示唆されている。この起源を明らかにするためには、各層膜厚や材料組成等を変えた系統的な実験と理論的アプローチが必要と考えられる。本研究ではその第一段階とし、CoFe 膜厚の異なる試料を作製し、GMTR を評価するとともに、熱伝導率に対する電子及びフォノン成分を理論的に解析した。

### 実験方法

先行研究の CoFe 3 nm<sup>1)</sup> より強磁性膜厚の厚い CoFe(6 nm)/Cu 多層膜を MgO 基板(001) 上にマグネトロンスパッタリング法により作製し、膜面直方向の熱伝導率計測には、時間領域サーモリフレクタンス (Time-domain thermoreflectance: TDTR) 法を使用した<sup>2)</sup>。得られた温度応答を一次元熱伝導方程式でモデル化し、解析を行うことで試料の熱伝導率を決定した。

### 実験結果

作製した CoFe(6 nm)/Cu 多層膜の TDTR 測定を行った結果、Fig.1 (a) に示す通り、平行状態と反平行状態の明瞭な温度応答の変化を観測した。モデル解析により得られた熱伝導率  $\kappa$  は平行状態( $69.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) から反平行状態( $34.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) まで変化し、 $\Delta\kappa$  は  $34.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  と先行研究の約 1.4 倍に及ぶ非常に大きな変化量を示した。電子のスピン自由度を取り入れた、2 流体モデル (Valet-Fert モデル)<sup>3)</sup> を用いて膜面直方向の MR 比を計算し MTR 比と比較した結果、MTR 比が MR 比を上回った。大きな  $\Delta\kappa$  の要因を調べるため、熱伝導率の電子成分を Valet-Fert モデルにより得られた電気抵抗率をヴィーデマン・フランツ則に基づき算出し、フォノン成分を TEM (Fig.1 (b)) によるナノ構造解析結果に基づき非平衡分子動力学法から見積もった。その結果、平行配置においては、電子とフォノン以外の未解明な熱キャリア成分が全体の熱伝導率の 4 割近くにも及び、 $\Delta\kappa$  への寄与も大きいことが示唆された。

### 参考文献

- 1) H. Nakayama et al., Appl. Phys. Lett. **118**, 042409 (2021).
- 2) D. G. Cahill, Rev. Sci. Instrum. **75**, 5119 (2004).
- 3) T. Valet et al., Phys. Rev. B **48**, 7099 (1993).

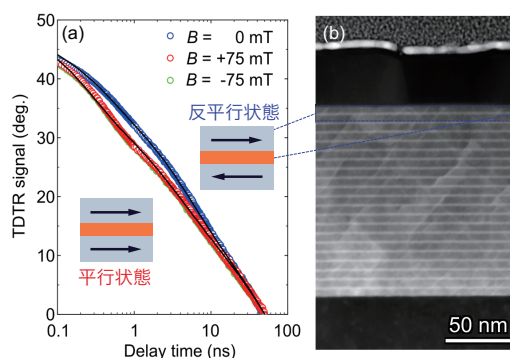


Fig.1 (a) 各磁場値の TDTR 測定結果、黒線はモデル解析結果、(b) TEM 画像

# 異なる磁性材料と非磁性層が積層した多層膜における マグノンドラック効果の数値的研究

庄子瑛章, 水口将輝\*, 大江純一郎

(東邦大, 名大\*)

Numerical study on the magnon drag effect in magnetic multilayers

T. Shoji, M. Mizuguchi\*, J. Ohe

(Toho Univ., \*Nagoya Univ.)

## はじめに

熱とスピンドYNAMICSの相関効果を扱うスピントロニクス分野において、温度勾配に対して垂直方向に電圧が生じる異常ネルンスト効果に注目が集まっている。磁性体中の熱電効果では、通常の電子系の熱起電力に加えて、スピン波の運ぶ電流（マグノンドラック効果）も重要な役割を果たしており、実験と理論の両面から調べられている[1, 2]。電子系の熱起電力を増強する方法はバンドエンジニアリングなどによって提案されているが、マグノンドラック効果を増強する方法については明らかになっていない。本研究では、このマグノンドラック効果を増強する系として磁性多層膜に注目し、数値的な解析を行った。

## 解析方法

Fig. 1のような多層膜について、温度勾配下での磁化のダイナミクスを数値的に解いた。特に、層内や層間の強磁性結合定数が異なる場合の指向性スピン波励起に注目した。有限温度の効果は、揺動散逸定理から求められるランダム磁場としてLLG方程式に取り入れた。

## 解析結果

計算によって、温度勾配を印加することで勾配方向に進行するスピン波振幅の増大を確認した。また、層間結合によってスピン波バンドの分裂が起こり、磁性層間に反強磁性結合があるときに、マグノンドラック効果がより大きくなることが明らかになった。これは反強磁性結合によるスピン波振幅の増大を意味している。また、異なる磁性材料を用いた多層膜では、下層内の交換相互作用が弱いほど上層でのマグノンドラック効果が大きくなることが明らかとなった。

本研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究 (S) (Grant No. 21H05016)、(B) (Grant No. 23K21077)の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] T. Yamaguchi and H. Kohno, Phys. Rev. B **99**, 094425 (2019).
- [2] G. E. W. Bauer, E. Saitoh and J. van Wees, Nature Materials **11**, 391 (2012).

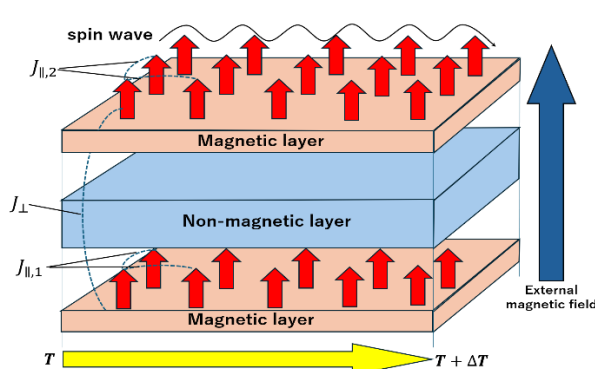


Fig.1 Thermal induced spin waves in magnetic multilayers.

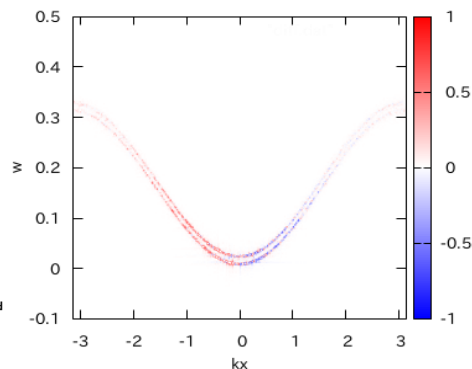


Fig.2 Dispersion of the spin wave in magnetic multilayers. Color represents the magnification of the spin wave amplitude

# 不規則構造 Fe-Ga 合金薄膜の単結晶及び多結晶構造における異常ホール効果の起源解析

中川 碧<sup>1</sup>, 遠山 諒<sup>2</sup>, Simalaotao Kodchakorn<sup>3,2</sup>, 増田 啓介<sup>2</sup>,  
三浦 良雄<sup>4,2</sup>, 首藤 浩文<sup>2</sup>, 桜庭 裕弥<sup>2,3</sup>, 神田 哲典<sup>1</sup>  
(大島商船高専<sup>1</sup>, NIMS<sup>2</sup>, 筑波大<sup>3</sup>, 京工繊大<sup>4</sup>)

Analysis of Origin of Anomalous Hall Effect in

Single Crystal and Polycrystalline of Fe-Ga Disordered Alloys Thin Films

A.Nakagawa<sup>1</sup>, R.Toyama<sup>2</sup>, K.Simalaotao<sup>3,2</sup>, K.Masuda<sup>2</sup>, Y.Miura<sup>4,2</sup>, H.Suto<sup>2</sup>, Y.Sakuraba<sup>2,3</sup>, T.Koda<sup>1</sup>  
(NIT, Oshima Col.<sup>1</sup>, NIMS<sup>2</sup>, Tsukuba Univ.<sup>3</sup>, Kyoto Inst. of Tech.<sup>4</sup>)

## はじめに

近年, Society 5.0 の実現が進む中, 環境やインフラ等の様々な情報を高速・高感度かつ低消費電力で取得する革新的なセンサ実現の需要が高まっている. 省エネルギー社会の実現に期待される熱流センサは, 熱エネルギーの流れを直接的に検知することが可能だが, 汎用的な熱流センサは未だに実現されていない. 磁性体で発生する異常ネルンスト効果 (ANE) は熱流と磁化に垂直な方向に電場が生じる熱電効果である. ANE モジュールはシンプルな面内接続構造を実現できるため, 耐久性, フレキシビリティに優れる<sup>1)</sup>. しかし, 材料単体で得られる熱起電力は低く, 高い熱起電力を示す磁性材料の探索が進められている. 不規則構造 Fe-Ga 合金薄膜の ANE は高い熱起電力を示すことが報告されているが, その起源はまだ明確には解明されていない<sup>2)</sup>. 本研究は, 系統的に組成を変化させた Fe<sub>100-x</sub>Ga<sub>x</sub> 合金薄膜の単結晶及び多結晶薄膜を作製し, ANE と大きな相関がある異常ホール効果 (AHE) について検討した.

## 実験方法

Fe<sub>100-x</sub>Ga<sub>x</sub> の単結晶及び多結晶薄膜は MgO(100)単結晶基板, 熱酸化膜付き Si 基板上にコスパッタ法でそれぞれ作製された. 組成分析, 結晶構造解析, 磁化特性はそれぞれ蛍光 X 線分析装置, X 線回折装置, 振動試料型磁力計で評価された. 更に物理特性測定装置により, 電気抵抗率 $\rho_{xx}$ 及びホール抵抗率 $\rho_{yx}$ を 15 K から 300 K の間で測定し, AHE の輸送特性についてスケーリング解析 ( $\rho_{yx}^A = a\rho_{xx0} + b\rho_{xx}^2$ ) を行った<sup>3)</sup>. ここで $\rho_{xx0}$ は残留抵抗率を表している.  $\rho_{yx}^A$ は正常ホール効果を分離するために, 飽和磁場より高磁場側における $\rho_{yx}$ の磁場依存性を線形近似することで得た切片値を採用している.

## 実験結果

Fig. 1(a), (b)に単結晶及び多結晶薄膜における $\rho_{yx}^A$ と $\rho_{xx}^2$ の関係をそれぞれ示す. この関係をスケーリング解析式に基づいて線形近似を実行すると, 外因性のパラメータ $a$ と内因性のパラメータ $b$ が得られる.

Fig. 1(c), (d)に単結晶及び多結晶薄膜における内因性, 外因性寄与の Ga 組成依存性をそれぞれ示す. 単結晶及び多結晶薄膜ともに Ga 濃度が増加するにつれ, 外因性項 $a\rho_{xx0}$ が増加する. 特に, 多結晶薄膜における AHE の輸送特性は, 外因性が支配的であることがわかる. スケーリング解析式の $a\rho_{xx0}$ はスキュー散乱を意味するが, その他に結晶粒界起源の散乱も AHE に寄与することが示唆される.

本研究は, NIMS インターンシップ制度及び NIMS 連携拠点推進制度の支援により遂行されました.

1) Yuya Sakuraba et al., Appl. Phys. Express **6**, 033003 (2013)

2) Hiroyasu Nakayama, Keisuke Masuda, and Yuya Sakuraba et al., Phys. Rev. Mat.**3**, 114412 (2019)

3) Yuan Tian, Li Ye, and Xiaofeng Jin, Phys. Rev. Lett. **103**, 087206 (2009)

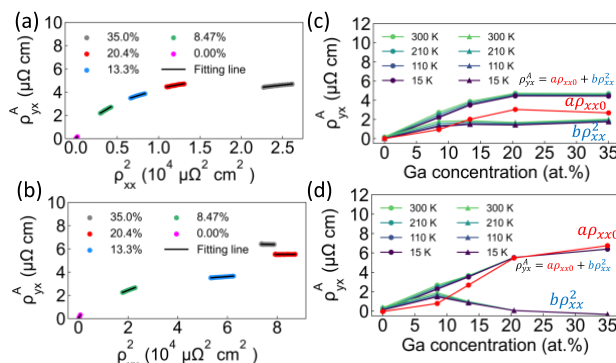


Fig. 1. The scaling analysis of the anomalous Hall effect in (a) single crystal and (b) polycrystalline. The composition dependence of the extrinsic contribution and the intrinsic contribution in (c) single crystal and (d) polycrystalline.

# Ir 添加による Fe<sub>3</sub>Co 単結晶薄膜における 異常ホール効果・異常ネルンスト効果に対する外因性の寄与

遠山 諒, 周 偉男, 桜庭 裕弥  
(物質・材料研究機構)

Extrinsic contribution to the anomalous Hall effect and Nernst effect in  
Fe<sub>3</sub>Co single-crystal thin films by Ir doping  
R. Toyama, W. Zhou, and Y. Sakuraba  
(National Institute for Materials Science)

## はじめに

磁性体における熱電輸送特性として、異常ネルンスト効果 (ANE) が挙げられる。ANE とは、磁性体に温度勾配 ( $\nabla T$ ) を印加したとき、 $\nabla T$  と磁化の単位ベクトル ( $\mathbf{m}$ ) に垂直な方向に異常ネルンスト電界 ( $\mathbf{E}_{\text{ANE}}$ ) が生じる現象である [1]。  $\mathbf{E}_{\text{ANE}}$  は、異常ネルンスト係数 ( $S_{\text{ANE}}$ ) を用いて  $\mathbf{E}_{\text{ANE}} = S_{\text{ANE}} (\nabla T \times \mathbf{m})$  と表される。一方、 $\nabla T$  を電流に変えた場合は、印加電流と磁化に垂直な方向に異常ホール電圧が生じる異常ホール効果 (AHE) が観測される。  $S_{\text{ANE}}$  は、異常ネルンスト伝導度 ( $\alpha_{xy}$ ) を介した  $\nabla T$  の横方向電流への直接変換による内因性の寄与と、AHE とゼーバック効果の掛け合わせの寄与の和で表される。内因性起因の ANE については、モットの関係式より、 $\alpha_{xy}$  は内因性異常ホール伝導度 ( $\sigma_{xy}$ ) のエネルギー微分として表されるため、内因性 AHE と密接に関わっている。ベリー曲率の積分として  $\sigma_{xy}$  を計算することにより、内因性  $\alpha_{xy}$  を理論的に計算することが可能である。実験的にも、ワイル半金属 Co<sub>2</sub>MnGa に代表されるように、特異な電子構造に由来して、大きな内因性  $\alpha_{xy}$  が得られることが報告されている [2]。一方、ANE に対する外因性の寄与については、AHE にはスキュー散乱やサイドジャンプといった外因性の寄与が知られていることから、ANE に対しても外因性 AHE の寄与が関係することが考えられる。しかしながら、理論計算の適用の難しさから、あまり深く研究されてきていない。実験的に AHE の支配的起源を変化させた例として、強いスピン軌道相互作用を持つ重元素を試料に添加する方法が報告されている [3]。そこで本研究では、単純な 3d 遷移金属である Fe<sub>3</sub>Co に重元素である Ir を添加した組成傾斜薄膜を作製し、AHE に対する外因性の寄与の割合を系統的に変化させることで、ANE に対する外因性の寄与について、輸送特性測定から実験的に考察することを試みる。

## 実験方法

コンビナトリアルスパッタ装置を用いて、(Fe<sub>3</sub>Co)<sub>100-x</sub>Ir<sub>x</sub> ( $x \leq 12\%$ ) 組成傾斜膜を MgO(100)基板上に成膜した。組成傾斜膜の結晶構造を X 線回折 (XRD) により評価した。その後、フォトリソグラフィと Ar イオンミリングにより、組成傾斜膜をホールバー素子に加工した。PPMS 等を用いて、加工したデバイスの AHE、ANE、縦抵抗率、ゼーバック効果の Ir 組成依存性を評価した。

## 実験結果

XRD 測定結果より、(Fe<sub>3</sub>Co)<sub>100-x</sub>Ir<sub>x</sub> 組成傾斜膜は MgO(100)基板上にエピタキシャル成長しており、 $x = 7.3\%$  から B2 規則構造 [4] を有することが確認された。AHE 測定結果より、Ir 添加により、300 K において  $x = 12\%$  で  $\sim 9.2$  倍という異常ホール抵抗率の増大が観測された。AHE のスケーリング解析を行った結果、Ir 低濃度領域では Ir 添加直後に外因性寄与が急激に増加し、高濃度領域では内因性寄与が支配的になることがわかった。一方、ANE は、AHE とは異なり、顕著な組成依存性を示さなかった。これらの輸送特性結果より、 $S_{\text{ANE}}$  に対しては、AHE とゼーバック効果に関係した寄与が支配的であることがわかった。また、 $\alpha_{xy}$  は、Ir 添加直後に正から負の値へと急激に変化し、 $x \approx 1\%$  で負の最大値を示し、 $x = 12\%$  ではほぼゼロまで減少することがわかった。以上の実験結果から、Ir 添加直後に急激に値・符号が変化する  $\alpha_{xy}$  と、Ir 添加直後に増加する AHE の外因性寄与の関連性を実験的に示唆した [5]。

## 参考文献

- 1) K. Uchida *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 140504 (2021).
- 2) K. Sumida *et al.*, *Commun. Mater.* **1**, 89 (2020).
- 3) S. Jamaluddin *et al.*, *Phys. Rev. B* **106**, 184424 (2022).
- 4) R. Toyama *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **7**, 084401 (2023).
- 5) R. Toyama, W. Zhou, and Y. Sakuraba, *Phys. Rev. B* **109**, 054415 (2024).

## スキルミオン強磁性体 $\text{Fe}_{2-x}\text{Pd}_x\text{Mo}_3\text{N}$ 薄膜におけるネルンスト効果

山本 完地<sup>1</sup>、強 博文<sup>1</sup>、浅野 秀文<sup>2</sup>、宮町 俊生<sup>1</sup>、水口 将輝<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>名古屋大学、<sup>2</sup>名古屋産業科学研究所)

Nernst effect in ferromagnetic  $\text{Fe}_{2-x}\text{Pd}_x\text{Mo}_3\text{N}$  thin films with skyrmions

K. Yamamoto<sup>1</sup>, B.W. Qiang<sup>1</sup>, H. Asano<sup>2</sup>, T. Miyamachi<sup>1</sup>, M. Mizuguchi<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Nagoya Univ, <sup>2</sup>Nagoya Industrial Science Institute)

### 【はじめに】

スキルミオンは、ナノスケールの渦状の磁気構造であり、次世代の高密度不揮発性メモリやロジックデバイスへの応用が期待されている<sup>[1]</sup>。そのため、室温で安定的に駆動可能なスキルミオンの生成が必要不可欠となる。ネルンスト効果は、スピン軌道相互作用に起因する電気伝導と熱伝導のクロスオーバー現象であり、スキルミオンの生成・制御に深く関与していると考えられる。しかしながら、およそ  $30 \text{ nV/K}^2$  のネルンストシグナルが観測されている  $\text{Gd}_2\text{PdSi}_3$  においても、そのキュリー温度は室温には及ばない<sup>[2]</sup>。本研究では、室温でスキルミオンが形成されることが確認されている  $\text{Fe}_{2-x}\text{Pd}_x\text{Mo}_3\text{N}$  (FPMN) 薄膜におけるネルンスト効果を調べた<sup>[3]</sup>。

### 【実験方法】

マグネトロンスパッタにより FPMN 薄膜材料をサファイア(001)基板上に作製した。6.4 Pa の窒素雰囲気下、基板温度  $580^\circ\text{C}$  で成膜を行い、スパッタ時間 90 min で約 50 nm の薄膜試料を作製した。EDX により試料の組成分析を行った。また、PPMS により室温で 1.5 K 程度の温度差を付与してネルンスト効果の測定を行った。

### 【結果】

EDX による組成分析の結果、Pd の組成 ( $x$ ) が  $x=0.1$ 、0.3、0.7 の三つの組成の試料が作製されたことが分かった。試料のネルンスト効果の測定を行った結果、Pd の組成に依存してネルンスト効果の大きさが変化し、 $x=0.3$  の試料においておよそ  $30 \text{ nV/K}^2$  の大きさのネルンストシグナルが観測され、本試料は従来の強磁性体と比較して最大レベルの大きさのネルンスト効果を室温で発現することがわかった。また、スキルミオンを生成しない Pd 組成 ( $x=0.1$ ) では、異常ネルンスト効果のみが観測され、トポロジカルネルンスト効果が発現しないことも分かった。講演では、理論的考察と実験的検証を交えながら、スキルミオン磁性体におけるネルンスト効果の重要性について議論する。

### 参考文献

- [1] 望月維人, 日本磁気学会報「まぐね」, **10**, 192 (2015).
- [2] M. Hirschberger *et al.*, Phys. Rev. Lett., **125**, 076602 (2020).
- [3] B. W. Qiang *et al.*, Appl. Phys. Lett., **117**, 142401 (2020).

## CoPt 組成傾斜薄膜における $L1_0$ 規則化 CoPt の大きな異常ネルンスト伝導度

遠山 諒<sup>1</sup>, 増田 啓介<sup>1</sup>, Kodchakorn Simalaotao<sup>1,2</sup>, 周 偉男<sup>1</sup>, Varun K. Kushwaha<sup>1</sup>,  
Nattamon Suwannaharn<sup>1</sup>, 佐々木 泰祐<sup>1</sup>, 桜庭 裕弥<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup> 物質・材料研究機構, <sup>2</sup> 筑波大学)

Large anomalous Nernst conductivity of  $L1_0$ -ordered CoPt in CoPt composition-spread thin films  
R. Toyama<sup>1</sup>, K. Masuda<sup>1</sup>, K. Simalaotao<sup>1,2</sup>, W. Zhou<sup>1</sup>, V. K. Kushwaha<sup>1</sup>,  
N. Suwannaharn<sup>1</sup>, T. T. Sasaki<sup>1</sup>, and Y. Sakuraba<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup> National Institute for Materials Science, <sup>2</sup> Univ. of Tsukuba)

### はじめに

異常ネルンスト効果 (ANE) は、磁性体において温度勾配 ( $\nabla T$ ) と磁化の単位ベクトルの外積方向に電界が発生する現象である [1]。ANE は、 $\nabla T$  に対して電界が横方向に発生する横型熱電変換であるため、デバイス構造を単純化できることから、次世代の熱電デバイスや熱流センサへの応用が期待されている [2]。異常ネルンスト係数 ( $S_{ANE}$ ) は、二つの異なる起源の和で表される。一つは、異常ネルンスト伝導度 ( $\alpha_{xy}$ ) を介して  $\nabla T$  を横方向電流に直接変換するものであり、もう一つは異常ホール効果 (AHE) によるゼーベック効果誘起電流の変換である [1]。特に、前者は  $\alpha_{xy}$  が関わる内因性の起源であり、大きな  $\alpha_{xy}$  を示す材料が探索されている。大きな  $\alpha_{xy}$  を示す強磁性材料の候補として、Fe-Ga [3] や  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  [4] 合金などが報告されている。しかし、これらは結晶磁気異方性 ( $K_u$ ) の小さなソフトな材料であり、保磁力 ( $H_c$ ) も小さいことから、デバイスへの実応用にはあまり適していない。FePt や FePd などの  $L1_0$  規則合金は、高い  $K_u$  と大きな  $H_c$  を持ちつつ、大きな  $\alpha_{xy}$  を示すことから、有力な候補として考えられている [5, 6]。CoPt も  $L1_0$  規則相を示すため、FePt 等と同様に大きな  $\alpha_{xy}$  が期待されるが、 $L1_0$ -CoPt の ANE に関する実験はこれまでなされていない。そこで本研究では、CoPt 組成傾斜薄膜を作製し、広い Pt 組成領域における  $L1_0$ -CoPt の  $\alpha_{xy}$  を系統的に評価することを目的とする。

### 実験方法

コンビナトリアルスパッタ装置を用いて、 $\text{Co}_{100-x}\text{Pt}_x$  組成傾斜薄膜を基板温度 500 °C で MgO(100) 基板上に成膜した。また、参照膜として、 $\text{Co}_{48}\text{Pt}_{52}$  均一膜を室温成膜し、600 °C でポストアニールした試料も作製した。作製した薄膜の結晶構造と微細組織を X 線回折 (XRD) と透過型電子顕微鏡 (TEM) により評価した。フォトリソグラフィと Ar イオンミリングにより、作製した薄膜をホールバー素子に加工した。PPMS 等を用いて、加工したデバイスの ANE、AHE、縦抵抗率、ゼーベック効果を測定した。また、第一原理計算により、エネルギー依存  $\alpha_{xy}$  と、 $L1_0$ -CoPt の状態密度の Pt 組成依存性を得た。

### 実験結果

XRD 測定結果より、組成傾斜膜の Pt 濃度が増加するにしたがって、結晶構造が fcc Co, A1 不規則相 CoPt,  $L1_0$ -CoPt, A1-CoPt, fcc Pt へと変化することが確認された。 $L1_0$  規則化した領域のうち、Pt-rich 組成の  $\text{Co}_{30}\text{Pt}_{70}$  において、 $\alpha_{xy}$  は  $2.52 \text{ A m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  の最大値を示した。この値は、 $L1_0$ - $\text{Co}_{48}\text{Pt}_{52}$  参照膜の  $1.72 \text{ A m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  よりも大きかった。また、これらの値は、過去に報告されている  $L1_0$ -FePt ( $0.783 \text{ A m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) と  $L1_0$ -FePd ( $0.321 \text{ A m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) の  $\alpha_{xy}$  の値よりも大きかった [6]。以上の測定結果より、CoPt 組成傾斜膜において、 $L1_0$ -CoPt の大きな  $\alpha_{xy}$  を実験的に観測した [7]。当日は、第一原理計算により得られたエネルギー依存  $\alpha_{xy}$  と、 $L1_0$ -CoPt の状態密度の Pt 組成依存性をもとに、Pt-rich 領域で  $\alpha_{xy}$  の最大値が得られた理由について、その可能性を議論する。

### 参考文献

- 1) K. Uchida *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 140504 (2021).
- 2) W. Zhou and Y. Sakuraba, *Appl. Phys. Express* **13**, 043001 (2020).
- 3) H. Nakayama *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 114412 (2019).
- 4) K. Sumida *et al.*, *Commun. Mater.* **1**, 89 (2020).
- 5) K. Hasegawa *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 252405 (2015).
- 6) Z. Shi *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 054044 (2020).
- 7) R. Toyama, K. Masuda, K. Simalaotao, W. Zhou, V. K. Kushwaha, N. Suwannaharn, T. T. Sasaki, and Y. Sakuraba, *accepted in J. Phys. D: Appl. Phys.*

# 重金属元素置換 Fe<sub>4</sub>N 薄膜における異常ネルンスト効果

伊藤啓太<sup>1</sup>、関剛斎<sup>1,2</sup>

(東北大金研<sup>1</sup>、東北大先端スピ研究<sup>2</sup>)

Anomalous Nernst effect in Fe<sub>4</sub>N films substituted by heavy metal elements

Keita Ito<sup>1</sup>, Takeshi Seki<sup>1,2</sup>

(IMR, Tohoku Univ.<sup>1</sup>, CSIS, Tohoku Univ.<sup>2</sup>)

## 【背景】

新たなエネルギーハーベスト技術として、強磁性体における異常ネルンスト効果(ANE)を利用した横型熱電変換が注目されている。しかし、半導体におけるゼーベック効果(SE)を利用した熱電変換素子にエネルギー変換効率が大幅に及ばない点が課題となっており、大きな異常ネルンスト係数( $S_{ANE}$ )を示す新たな強磁性材料の開発が求められている。Fe<sub>4</sub>Nは資源が豊富な元素から構成されるユビキタス強磁性材料であり、比較的大きな  $S_{ANE}$  (1.4 ~ 2.2  $\mu\text{V/K}$ )を示す<sup>1,2)</sup>。加えて、Fe<sub>4</sub>NのFe原子を他の金属で置換することで、電子構造や磁気特性を大幅に変調することが可能であり<sup>3)</sup>、元素の組み合わせによっては  $S_{ANE}$ が増大する可能性について第一原理計算から予測されている<sup>4,5)</sup>。本研究では、大きなスピン軌道相互作用を有する重金属元素によってFe原子を置換する効果を調べるために、過去に合成された報告例がある Fe<sub>4-x</sub>Ru<sub>x</sub>N<sup>6)</sup>および Fe<sub>4-y</sub>Pt<sub>y</sub>N<sup>7)</sup>の薄膜を作製し、 $S_{ANE}$ を評価した。

## 【実験方法】

分子線エピタキシー法により MgO(001)基板上に膜厚が 21 nm 程度の Fe<sub>4</sub>N、Fe<sub>4-x</sub>Ru<sub>x</sub>N ( $x = 0.02, 0.10$ )、Fe<sub>4-y</sub>Pt<sub>y</sub>N ( $y = 0.04, 0.13$ )薄膜を 450 °C で作製した。電子線蒸着銃により Fe、Ru、Pt、高周波ラジカル源により N を同時供給することで窒化物薄膜を成膜した。試料の構造は X 線回折(XRD)法により評価した。作製した薄膜をホールバー素子に加工し、300 K において ANE、SE、異常ホール効果を測定した。熱電効果の測定では熱勾配( $\nabla T$ )を窒化物膜面内の[100]方向に印加し、外部磁場を膜面垂直方向に印加した。 $\nabla T$ の測定には、素子上に形成した Pt オンチップ温度計を使用した<sup>2)</sup>。

## 【結果】

XRD 測定の結果から、すべての試料について MgO(001)基板上へのエピタキシャル成長を確認した。 $S_{ANE}$ の値は Fe<sub>4</sub>N、Fe<sub>3.98</sub>Ru<sub>0.02</sub>N、Fe<sub>3.90</sub>Ru<sub>0.10</sub>N、Fe<sub>3.96</sub>Pt<sub>0.04</sub>N、および Fe<sub>3.87</sub>Pt<sub>0.13</sub>N 薄膜で、それぞれ 1.33、1.28、1.09、1.36、および 1.54  $\mu\text{V/K}$  となった。 $S_{ANE}$ は Ru 置換により減少した一方で、Pt 置換量の増大に伴いわずかに増加したことから、Pt 置換が Fe<sub>4</sub>N の  $S_{ANE}$  の増大に有効であることが示唆された。 $S_{ANE}$ は  $\rho_{xx}$ を縦抵抗率、 $\alpha_{xy}$ を横熱電係数、 $S_{SE}$ をゼーベック係数、 $\theta_{AHE}$ を異常ホール角とすると、 $S_{ANE} = \rho_{xx}\alpha_{xy} - S_{SE}\tan\theta_{AHE}$ で表される。実験で得られた  $S_{ANE}$ 、 $\rho_{xx}$ 、 $S_{SE}$ 、 $\tan\theta_{AHE}$ の値を用いて、 $\alpha_{xy}$ を見積もった。 $\alpha_{xy}$ の値は Fe<sub>4</sub>N、Fe<sub>3.98</sub>Ru<sub>0.02</sub>N、Fe<sub>3.90</sub>Ru<sub>0.10</sub>N、Fe<sub>3.96</sub>Pt<sub>0.04</sub>N、および Fe<sub>3.87</sub>Pt<sub>0.13</sub>N 薄膜で、それぞれ 1.02、0.99、1.02、1.12、および 1.31 A/K・m となった。この結果より、Fe<sub>4-y</sub>Pt<sub>y</sub>N 薄膜における  $S_{ANE}$  の増大は主に  $\alpha_{xy}$  の増大に起因することが明らかになった。講演では Fe<sub>4-z</sub>Pd<sub>z</sub>N 薄膜における  $S_{ANE}$  についても述べる。

## 参考文献

1) S. Isogami *et al.*, Appl. Phys. Express **10**, 073005 (2017). 2) K. Ito *et al.*, J. Appl. Phys. **132**, 133904 (2022). 3) K. Ito *et al.*, Nanotechnology **33**, 062001 (2022). 4) Y. Tsubowa *et al.*, JSAP Spring Meeting 23a-E205-5 (2022). 5) H. K. Singh *et al.*, Phys. Rev. Materials **6**, 045402 (2022). 5) D. Andriamandroso *et al.*, IEEE Trans. Magn. **29**, 2 (1993). 6) W. George *et al.*, J. Metals **7**, 360 (1955).

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費(JP21K04859)、東北大学金属材料研究所先端エネルギー材料理工共創研究センター、東北大学電気通信研究所共同プロジェクトの支援を受けた。

## Co ポーラス薄膜における異常ネルンスト効果の変調

辻本卓哉, 宮町俊生, 水口将輝

(名古屋大学)

### Anomalous Nernst effect in Co porous thin films

Tsujimoto Takuya, Toshio Miyamachi, Masaki Mizuguchi

(Nagoya Univ.)

**はじめに** 新規熱電変換デバイスへの応用として異常ネルンスト効果 (anomalous Nernst effect: ANE) に注目が集まっている<sup>[1]</sup>。一般的に ANE は温度勾配と磁化の外積方向に電圧が生じるため、従来のゼーベック効果よりも自由度の高いデバイス設計が可能となる。一方で、ANE はその変換効率の低さが問題となっており、一般的な強磁性体である Fe や Co でのネルンスト係数 ( $S_{xy}$ ) は  $0.3 \mu\text{V/K}$  程度である。熱電変換などのデバイス化に向けてはおよそ  $20 \mu\text{V/K}$  以上の変換効率が必要とされており、近年では  $S_{xy}$  の大きな材料の探索や、ナノ構造の導入による低次元化や熱伝導率の低下を実現し、ANE の実用化を目指す研究が盛んに行われている。我々はこれまでに Co に MgO をドーブしたグラニューラー薄膜<sup>[2]</sup>や Co に Ge をドーブしたコラムナー薄膜<sup>[3]</sup>において、ANE の増大を報告した。そこで本研究では、新たにポーラス構造に注目し、ポーラス構造における ANE の変調を明らかにした。

**実験方法** 気相脱合金法を用いてポーラス薄膜を作製した。

MgO(001)基板上にマグネトロンスパッタにより組成の異なる  $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x$  薄膜を作製し、得られた薄膜を赤外線真空炉により適切な条件で瞬間加熱することにより薄膜中の Zn を選択的に脱合金化させ、Co ポーラス薄膜を得た。その後、走査型電子顕微鏡によりポーラス構造を観察し、物理特性測定システム (PPMS) を用いて ANE を含む磁気輸送特性を測定した。

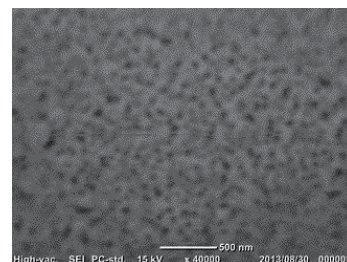


Fig.1. SEM image of Co porous thin film.

**実験結果** ポーラス化による構造変化の傾向として、加熱温度や加熱時間の増加に伴いポーラス孔が大きくなることが分かった。

$650^\circ\text{C}$ 、10 秒間加熱して作製した試料のポーラス孔は、図 1 に示すように約 50 nm であったが、 $650^\circ\text{C}$ 、2 分間加熱して作製した試料では 80 nm 以上となった。これらの試料について ANE の測定を行ったところ、ポーラス化により ANE は増大し、その変換効率は  $0.7 \mu\text{V/K}$  程度まで増大した (図 2)。特にポーラス孔が小さい系で大きな ANE が生じた。今後、さらにポーラス孔の小さい試料を設計することでより大きな ANE の増大が期待できる。

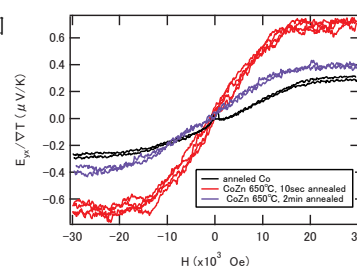


Fig.2. ANE of Co porous thin films with different annealing conditions.

### 参考文献

- [1] H. Sharma, M. Mizuguchi *et al.*, Sci. Rep., **13**, 4425 (2023).
- [2] P. Sheng, M. Mizuguchi *et al.*, Appl. Phys. Lett., **116**, 142403 (2020).
- [3] T. Tsujimoto, M. Mizuguchi, 11<sup>th</sup> International Symposium on Metallic Multilayers, (2023).

# Fe を添加した SnSe 薄膜における異常ネルンスト効果

和田和己<sup>1</sup>、藤田武志<sup>2</sup>、宮町俊生<sup>1</sup>、水口将輝<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>名古屋大、<sup>2</sup>高知工科大)

Anomalous Nernst effect of Fe-doped SnSe thin films  
Kazuki Wada<sup>1</sup>, Takeshi Fujita<sup>2</sup>, Toshio Miyamachi<sup>1</sup>, Masaki Mizuguchi<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Nagoya Univ., <sup>2</sup>Kochi Univ. Tech.)

## はじめに

異常ネルンスト効果 (ANE) は熱磁気効果の一つであり、起電力発生方向が熱流方向に垂直であるという特徴をもつ。そのため、素子設計を工夫することにより、高性能な熱電発電素子への応用が期待されている<sup>[1]</sup>。しかしながら、実用的な応用に結実した研究例はほとんど報告されていないため、新たなネルンスト材料の開発が求められている。そこで本研究では、半導体である SnSe に磁性元素である Fe を添加した薄膜を作製し、その ANE を調べた。SnSe の大きなゼーベック効果による電荷流が Fe によるスピン軌道相互作用や不純物散乱などによって横方向に散乱されることにより、大きな ANE 電圧が生じることをねらいとした。

## 実験方法

スパッタリング法により、酸化被膜付き Si 基板上に Fe 元素を添加した SnSe 薄膜を成膜した。Fe は DC マグネトロン方式で、SnSe は RF マグネトロン方式で共スパッタを行い、成膜後にアニール処理を施した。また、それぞれのカソード電力を調整することにより、Fe の含有比率が 0 ~ 31.2at.% と異なる SnSe 薄膜を作製した。X 線回折 (XRD) により各試料の結晶構造を、振動試料型磁力計 (VSM) により磁気特性を測定した。物理特性測定システム (PPMS) により各試料のホール効果、ゼーベック効果、ネルンスト効果の測定を室温で行った。

## 実験結果

150°C で 1 時間アニール処理を施した試料においてネルンスト効果の測定を行ったところ、Fe の含有比率が 19 ~ 23.5% の条件で作製した試料において ANE の増大が見られた。そこで、Fe の含有比率 23.5% の試料の断面の TEM・EDX マッピングを行ったところ、Fe が薄膜内で層状に局在していることがわかった。続いて Fe の含有比率が 23.5% の条件で異なるアニール時間の試料を作製した。XRD 測定の結果を図 1 に示す。アニール処理時間に依存して SnSe ピークの明確なシフトが見られた。これらの結果より、SnSe 結晶に侵入していた Fe 原子がアニール処理によって拡散移動し、層状構造を形成したことが示唆された。また、作製した薄膜の電子状態がアニール条件によって大きく異なり、ANE にも強く影響を与えることが考えられる。講演では、アニール条件と ANE の関係についても詳しく議論する。

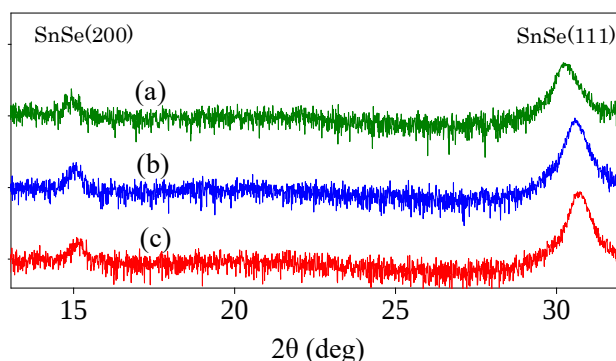


Fig.1 XRD patterns of  $\text{Fe}_{23.5}(\text{SnSe})_{74.5}$  films with: (a) non-annealing, (b) 150°C, 1 hour annealing and (c) 150°C, 5 hour annealing.

## 参考文献

- 1) M. Mizuguchi and S. Nakatsuji, Sci. Technol. Adv. Mater., **20**, 262 (2019).

# 電圧駆動 MRAM の反転電圧における形状磁気異方性の効果に関するシミュレーション研究

宮崎 柊弥<sup>1,2</sup>, 荒井 礼子<sup>2</sup>, 今村 裕志<sup>2,1</sup>, 安川 雪子<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>千葉工業大学, <sup>2</sup>産業技術総合研究所)

Simulation study on the effect of shape anisotropy on switching voltage of voltage-controlled MRAM

Shuya Miyazaki<sup>1,2</sup>, Hiroko Arai<sup>2</sup>, Hiroshi Imamura<sup>2</sup>, Yukiko Yasukawa<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Chiba Institute of Technology, <sup>2</sup>AIST)

## はじめに

現在製品開発されている MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) は電流制御によって情報の書き込みが行われるため、既存の揮発性メモリと比較して書き込み電力が大きいという問題を抱えている。この問題を克服するために、電圧制御で書き込みを行う電圧駆動 MRAM (Voltage-controlled MRAM) が研究されている。VC-MRAM ではパルス電圧印加によって記憶層の磁気異方性を小さくすることで磁化を反転させ情報の書き込みを行う。従来の研究では反転電圧に対する形状磁気異方性の効果はあまり考慮されていなかったが、素子サイズを小さくすると記憶層のアスペクト比が小さくなり形状磁気異方性の効果が重要になると考えられる。本研究ではマイクロマグネティクスシミュレーションを用いて素子の直径と反転電圧との関係を調べたのでその結果について報告する。

## 研究方法と結果

マイクロマグネティクスシミュレーションは mumax3 [1] を用いて行なった。記憶層は円板形状とし、厚さは 2 nm, 直径は 20 nm ~ 80 nm とした (Fig. 1)。飽和磁化  $M_s$  を 1 MA/m, ダンピング定数  $\alpha$  を 0.05, 交換定数  $A$  を 20 pJ/m とし, 外部磁場  $H_{\text{ext}}$  0.04 T を  $x$  軸方向に印加する [2]。初期状態を  $z$  軸方向とし, 異方性定数  $K_u$  が 0.4 MJ/m<sup>3</sup> ~ 0.8 MJ/m<sup>3</sup> である場合の安定磁化状態を求め,  $K_u$  に対する  $m_z$  の変化を調べた。結果を Fig. 2 に示す。 $m_z$  が 0 の時は磁化は面内方向を, 1 の時は面直方向を向いていることを表している。素子の直径が小さくなるにつれて, 磁化状態が面内方向から面直方向へ変わる  $K_u$  が小さくなっていることがわかる。これは素子の直径が小さくなるにつれて  $z$  軸方向の反磁場が小さくなるためであると考えられる。

次に, 初期状態の  $K_u$  を 2 MJ/m<sup>3</sup> とし磁気構造を緩和させたのち, パルス電圧印加による変化を想定して  $K_u$  を 0.4 ~ 0.7 MJ/m<sup>3</sup> の範囲で変えて磁化ダイナミクスの計算を行い, 磁化反転が起こるか確認した。磁化反転は Fig. 2 中の星で示す  $K_u (= K_u^{\text{sw}})$  より小さい場合に起こることがわかった。初期状態の  $K_u$  から  $K_u^{\text{sw}}$  を引いた値が磁化反転に必要な異方性定数の変化 ( $\Delta K_u$ ) であり, 素子の直径に対するプロットを Fig. 3 に示す。素子の直径が小さくなるにつれて  $\Delta K_u$  が大きくなる。このことから, 素子の直径を小さくすると大きな反転電圧が必要になることがわかる。

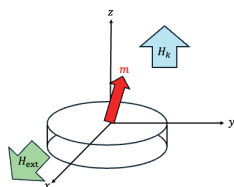


Fig. 1 Schematic illustration of the free layer of a VC-MRAM.

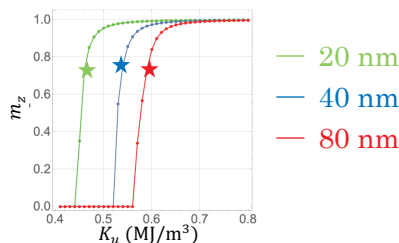


Fig. 2 Z-component of equilibrium averaged magnetization unit vector for different diameters. Stars indicate  $K_u^{\text{sw}}$ .

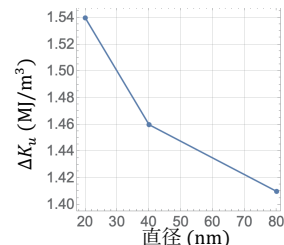


Fig. 3 Change in anisotropy constant required for magnetization switching.

## 参考文献

- 1) Arne Vansteenkiste, et al., AIP Advances, **4**, 107133, (2014).
- 2) R. Matsumoto, S. Yuasa, and H. Imamura, Phys. Rev. Appl. **18**, 054069 (2022).

# 極薄 Ir キャップ層導入による電圧磁気異方性制御効率の改善

野崎隆行, 一ノ瀬智浩, 山本竜也, 葉師寺啓, 湯浅新治  
(産総研)

Improvement of efficiency in voltage-controlled magnetic anisotropy effect  
by an introduction of an ultrathin Ir capping layer

T. Nozaki, T. Ichinose, T. Yamamoto, K. Yakushiji, and S. Yuasa  
(AIST)

## 1 はじめに

強磁性超薄膜における電圧磁気異方性制御(VCMA: Voltage-controlled magnetic anisotropy)は従来の電流駆動と比較して超省電力なスピン制御を可能とする基盤技術として注目を集めており、電圧駆動型(Voltage-controlled)-MRAM などへの適用が期待されている。VC-MRAM のスケーラビリティ実証および低電圧書き込みに向けては、多結晶磁気トンネル接合(MTJ)素子における VCMA 効率の増大が求められている。我々はこれまでに低温ステージを有する量産スパッタ成膜装置(EXIM: 東京エレクトロン株式会社製)を用いて高品質な MgO/CoFeB 界面の形成を試み、垂直磁気異方性(PMA)やトンネル磁気抵抗効果(TMR)、VCMA 効率の改善効果について報告してきた<sup>1-3)</sup>。本研究では MgO/CoFeB/極薄キャップ層 X/MgO をトップフリー層の基本構造とする MTJ 素子において、様々な極薄キャップ層材料の導入が PMA、TMR、VCMA 特性に与える影響を系統的に調べた。

## 2 実験方法と結果

熱酸化膜付き  $\Phi 300\text{mmSi}$  ウェハ上にて Ta(5 nm)/Pt(5 nm)/Ru(3 nm)/Ta<sub>50</sub>B<sub>50</sub>(5 nm)/Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>(3 nm)/MgO(2.1 nm)/CoFeB(1 nm)/極薄キャップ層 X(0.2 nm)/MgO(1 nm)/Ru(2 nm)/Ta(3 nm)/Ru(10 nm)構造を作製した。面内磁界印加下での TMR 測定から PMA および VCMA 特性評価を行うため、下部 CoFeB 層は面内磁化参照層、上部 CoFeB 層は面直磁化フリー層の 90 度磁化配置型 MTJ となっている。各 CoFeB 層は 100K での低温成長で形成した。極薄キャップ層 X(0.2 nm)として Ir, Mo, TaB, Mg, Cr, Ti, Ta を導入した。ポストアニールは温度範囲 200~350°C において無磁界下で行った。

図 1 に各ポストアニール温度における VCMA 効率の極薄キャップ材料依存性を示す。極薄キャップ層無し(MgO/CoFeB/MgO, 57 fJ/Vm)と比較してほとんどのキャップ材料は同等もしくは低い VCMA 効率を示すのに対して、Ir キャップ層を用いた場合は明瞭な増大が見られ、300°Cアニール条件下にてキャップ層無しの約 1.8 倍の VCMA 効率(105 fJ/Vm)を示した。同条件下において、PMA 値も約 1.7 倍に増大した。ポストアニール温度の上昇とともに増大する傾向から、極薄キャップ層から MgO/CoFeB 界面への低濃度 Ir 拡散が PMA、VCMA 効率増大の起源であると考えられる。

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP16007)、および JSPS 科研費(JP20H05666)助成の結果得られたものである。

- 1) T. Ichinose *et al.* *ACS Appl. Electron. Mater.* **5**, 2178 (2023).
- 2) A. Sugihara *et al.* *Appl. Phys. Exp.* **16**, 023003 (2023).
- 3) T. Nozaki *et al.* *APL Mater.* **11**, 121106 (2023).

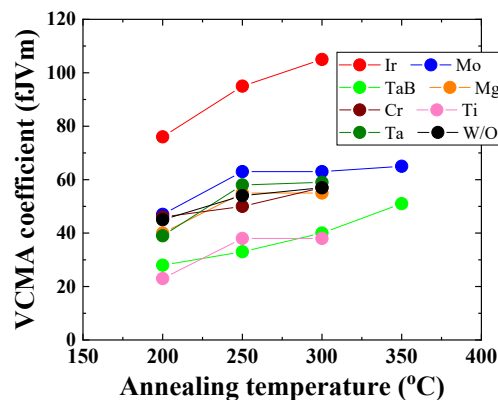


図 1 各ポストアニール温度条件下における VCMA 効率の極薄 Ir キャップ層材料依存性

# Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 薄膜における反強磁性スピンの高効率変調と双方向反転

村山 希<sup>1</sup>、鮫島寛生<sup>1</sup>、氏本 翔<sup>1</sup>、豊木研太郎<sup>1,2,3</sup>、中谷亮一<sup>1,2,3</sup>、白土 優<sup>1,2,3</sup>

(1 大阪大学大学院工学研究科、2 大阪大学先導的学際研究機構、3 大阪大学 CSRN)

High efficiency modulation and bipolar switching of antiferromagnetic spin in Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt epitaxial films

Nozomi Murayama<sup>1</sup>, H. Sameshima<sup>1</sup>, K. Ujimoto<sup>1</sup>, K. Toyoki<sup>1,2,3</sup>, R. Nakatani<sup>1,2,3</sup>, and Y. Shiratsuchi<sup>1,2,3</sup>

(1 Grad. Sch. Eng., Osaka univ., 2 OTRI, Osaka univ., 3 CSRN, Osaka univ.)

**はじめに** 反強磁性体は、漏洩磁場がなく磁気共鳴周波数が THz 帯にあることから超高密度・超高速通信デバイスへの応用が期待される。しかしながら、自発磁化を示さないため、磁気モーメントの検出・制御が困難である。我々は、反強磁性材料として、電気磁気効果を示す Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて界面反強磁性スピンの検出・制御を進めており、ゲート電圧により界面スピンの反転磁場を変調できることを示してきた[1]。さらに、その変調効率が 4 T・nm/V 以上の極めて大きくなることを報告してきた。また、この高い変調効率には、界面構造が強く影響するものと考えられている。本研究では、下地層として Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と同じコランダム構造をもつ V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて、Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 積層膜における反強磁性スピン反転について調査し、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バッファ層の反強磁性スピン反転磁場の変調効率への影響について検討した。

**実験方法** Pt(2 nm)/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(20 nm)/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(20 nm)/Pt(20 nm)積層膜を  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)基板上に製膜した。製膜には、DC マグネトロンスパッタリング法を用いた。反射高速電子回折法 (RHEED)、逆格子マッピングを用いて、作製した薄膜の成長方位を評価し、いずれの層もエピタキシャル成長していることを確認した。ホール効果測定に際して、幅 5  $\mu$ m・長さ 25  $\mu$ m のホールデバイスを作製した。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。磁場と電場の印加方向は、いずれも、膜面直方向とした。

**実験結果** Fig. 1 に、Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt エピタキシャル薄膜のホール効果曲線を示す。角型性の良いヒステリシスが観測され、磁場により界面反強磁性スピンの反転していることが分かる。また、ゲート電圧によりスピン反転磁場が変調することが分かる。ゼロ電圧付近でのスピン反転磁場の変調効率は 67.38 T・nm/V となり、強磁性材料の VCMA による変調効率と比較して約 1000 倍[2]となる。Fig. 2 に、ゲート電圧に対するスピン反転磁場の変化を示す。強磁性材料では困難な電場による双方向反転観測され、電気磁気効果による反強磁性スピンの超高効率かつ 4 象限アクセスを達成した。

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B) (課題番号 22H01757) および 文部科学省「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点(Spin-RNJ)」の支援を受けて行われました。

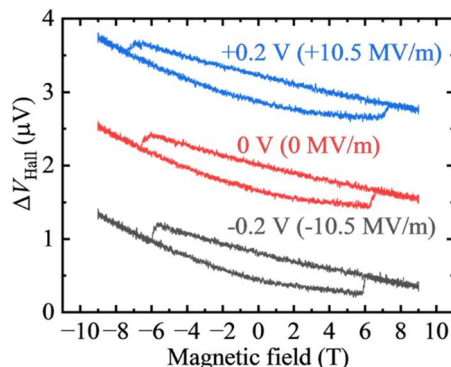


Fig. 1 異常ホール効果曲線

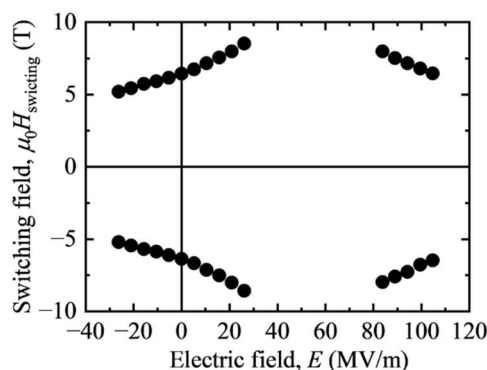


Fig. 2 スピン反転磁場

[1] K. Ujimoto, Y. Shiratsuchi *et al.*, NPG Asia Mater. 16, 20 (2024). [2] T. Nozaki *et al.*, Sci. Rep. 11, 21448 (2021).

# Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ir エピタキシャル薄膜における反強磁性スピン反転磁場の 電場変調と電圧誘起双方向反転

鯨島寛生<sup>1</sup>, 村山 希<sup>1</sup>, 氏本 翔<sup>1</sup>, 豊木研太郎<sup>1,2,3</sup>, 中谷亮一<sup>1,2,3</sup>, 白土 優<sup>1,2,3</sup>  
(1 大阪大学大学院工学研究科, 2 大阪大学先導的学際研究機構, 3 大阪大学 CSRN)

E-field modulation of AFM spin reversal field and bipolar switching in Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ir epitaxial thin film  
Hiroki Sameshima<sup>1</sup>, Nozomi Murayama<sup>1</sup>, Kakeru Ujimoto<sup>1</sup>, Kentaro Toyoki<sup>1,2,3</sup>,  
Ryoichi Nakatani<sup>1,2,3</sup>, and Yu Shiratsuchi<sup>1,2,3</sup>  
(1 Grad. Sch. Eng., Osaka Univ. 2 OTRI, Osaka Univ., 3 CSRN, Osaka Univ.)

**はじめに** 反強磁性体は、漏洩磁場がなく磁気共鳴周波数が THz 領域にあることから 超高密度・超高速駆動デバイスへの応用が期待される。しかしながら、反強磁性体はスピンの内部で補償されているため、スピンの検出と制御において強磁性体とは異なるアプローチが必要とされている。これまでに我々は、電気磁気効果を示す反強磁性体 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて、Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pt 積層膜における反強磁性スピン反転とスピン反転磁場の電場変調について報告してきた[1]。また、バルクとは異なる界面の電気磁気効果が発現することを示したが、この結果は、非磁性重金属材料の選択による界面構造の最適化により更なる高効率化が可能であることを示唆する。本研究では、Pt/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ir 3 層膜における電場による反強磁性スピンの反転について報告する。

**実験方法** 試料作製には DC マグネトロンスパッタリング法を用い、Pt(2 nm)/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(15 nm)/Ir(20 nm)/α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) 薄膜を製膜した。構造評価には、反射高速電子線回折法及び X 線回折法を用いた。磁気特性評価には、ゲート電圧を印加しながら異常ホール効果を測定する手法を用いた。測定のために、作製した薄膜はフォトリソグラフィ法及び Ar イオンミリング法を用いて、幅 5 μm、長さ 25 μm のホール素子に微細加工した。測定時のゲート電圧及び磁場の印加方向は、膜面直方向とした。

**実験結果** 図 1 に、275 K で測定したホール電圧のゲート電圧依存性を示す。磁場は±0.5 T で固定し、電圧を 0 ~ -0.9 V で掃引している。角形の明確なヒステリシスが観測され、両ヒステリシスにおいて、-0.15 V 及び -0.80 V 付近で反強磁性スピンの反転しており、正負の磁場によりヒステリシスの向きが反転していることが分かる。図 2 に、各磁場（電場）を固定して電場（磁場）を掃引したときの反強磁性スピンの反転する電場（磁場）のプロットを示す。電場・磁場のどちらを掃引した際も双方向の反転が観測された。この 4 象限のプロットは、反強磁性スピンの電場による変調が電気磁気効果由来であることを示唆している。

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B) (課題番号 22H01757) および文部科学省「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点(Spin-RNJ)」の支援を受けて行われました。

[1]. K. Ujimoto, Y. Shiratsuchi et al., NPG Asia Mater. 16, 20 (2024).

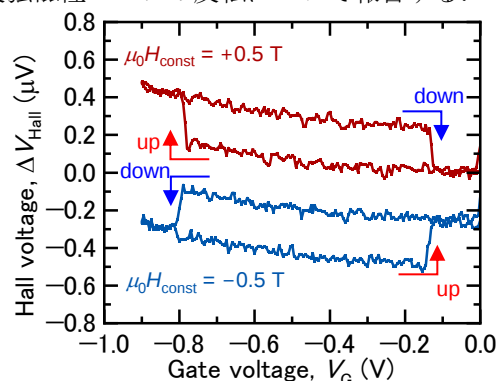


図 1 固定磁場下でのホール電圧のゲート電圧依存性

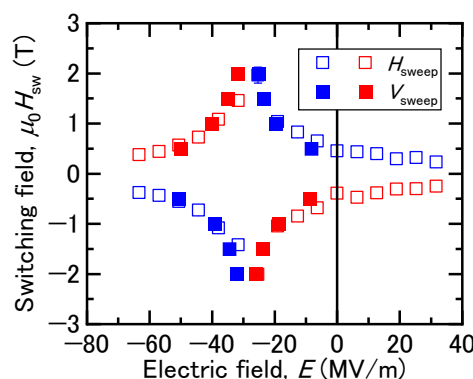


図 2 界面反強磁性スピン反転電場及び磁場

# W/CoFeB 界面への Gd-CoFeB 合金挿入による ダンピングライクトルクの向上

○(M2)徳永 和彦<sup>1</sup>, 黒川 雄一郎<sup>1</sup>, 湯浅 裕美<sup>1</sup>  
(九州大学<sup>1</sup>)

Improvement of dumping-like torque by inserting Gd-CoFeB alloy at the W/CoFeB interface

○Kazuhiko Tokunaga<sup>1</sup>, Yuichiro Kurokawa<sup>1</sup>, Hiromi Yuasa<sup>1</sup>  
(Kyushu Univ.<sup>1</sup>)

## 背景

重金属/強磁性体界面で発生するスピンオービットトルク (SOT) は、電流による磁化制御方法として MRAM や磁壁、スキルミオンデバイスなどに応用が可能であり、注目されている。この SOT は、大きなスピン軌道相互作用 (SOC) に由来するスピンホール効果 (SHE) によって誘起される。さらに近年、SOC の大きさによらず軌道角運動量が偏極する軌道ホール効果 (OHE) が次世代の磁化制御方法として注目されてきた。しかし、OHE に基づく軌道流は強磁性体に直接トルクを与えることが難しいため、軌道流からスピン流への変換過程が必要となる<sup>1</sup>。本研究では、SOC の大きいと予想される Gd を磁性層 CoFeB と合金化し、重金属と強磁性体の界面に挿入することによって軌道流をスピン流に変換する。重金属での SHE によるスピン流と、Gd-CoFeB で OHE から変換されたスピン流の足し合わせでトルクの増強を目指し、ダンピングライクトルクの測定を行った。

## 実験方法

熱酸化 Si 基板上に、W (5 nm)/Gd<sub>50</sub>(Co<sub>20</sub>Fe<sub>60</sub>B<sub>20</sub>)<sub>50</sub> ( $t_{\text{Gd-CFB}}$  nm)/CoFeB (1.0 nm)/MgO (1.5 nm)/Ta (3 nm) ( $t_{\text{Gd-CFB}}=0, 0.3, 0.6$ ) の多層膜をスパッタリングにより成膜した。今回、スピン流と軌道流の注入源として W を使用した。CoFeB に垂直磁気異方性を持たせるために、試料を 270°C で熱処理した。試料はフォトリソグラフィによりホールバー状に加工した。ダンピングライクトルクは高調波ホール電圧測定によって求めた。印加した交流電流と同方向に面内磁場を印加し、基本波および第二高調波を測定した。それらのフィッティング結果からダンピングライクトルクによって生じる有効磁場を見積もり、実効ダンピングライクトルク係数 ( $\xi_{\text{DL}}$ ) を計算した<sup>2</sup>。

## 実験結果

Fig.1 は高調波ホール電圧測定より求めた  $\xi_{\text{DL}}$  を示している。結果として、Gd-CoFeB を挿入することによって  $\xi_{\text{DL}}$  が向上した。挿入層の膜厚の増加に対して  $\xi_{\text{DL}}$  は線形に増加することが分かった。これは、W から流れ込むスピン流が Gd-CoFeB 中で減衰する可能性も考えられるが、それに対して、W から流れ込む軌道流が Gd-CoFeB 中の Gd によってスピン流へと変換される効果が支配的であることを示唆する。その結果、最終的に Gd-CoFeB の挿入と厚膜化により、CoFeB の磁化に働くトルクが増大したと考えられる。この結果は磁化制御効率をさらに向上させる道筋を示すものである。

## 参考文献

- 1) G. Sala and P. Gambardella Phys. Rev. Research 4, 033037 (2022)
- 2) M. Hayashi, J. Kim, M. Yamanouchi, and H. Ohno Phys. Rev. B 89, 144425 (2014)

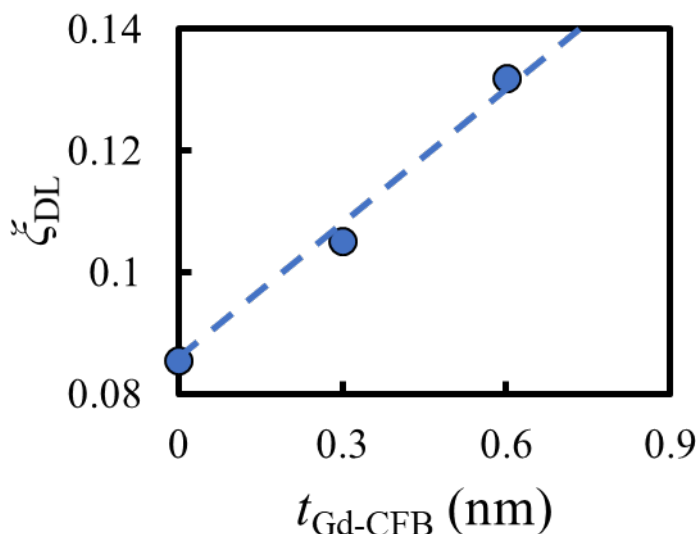


Fig.1 Dependence of effective damped-like torque efficiency ( $\xi_{\text{DL}}$ ) on insertion layer thickness

# 垂直磁化 W/CoFeB/MgO における電流駆動磁壁移動機構の解析

梅津信之, カンサミカエル, 橋本進, 近藤剛, 門昌輝

(キオクシア株式会社 先端技術研究所)

Analysis of current induced domain wall motion in perpendicularly magnetized W/CoFeB/MgO systems

N. Umetsu, M. A. Quinsat, S. Hashimoto, T. Kondo, M. Kado

(Frontier Technology Research and Development Institute, Kioxia Corporation)

## はじめに

Racetrack memory<sup>1)</sup> に代表される電流駆動磁壁移動現象を利用するデバイスの実現には、磁壁移動層の磁気特性の調整による磁壁ダイナミクスの制御が要求される。垂直磁気異方性を有する W/CoFeB/MgO は spin orbit torque (SOT) 駆動の磁壁移動が生じる代表的な積層膜であるが、磁壁移動挙動の磁気特性依存性は十分に調査されていない。我々はこの積層膜において、先行研究と一致する電流方向の磁壁移動だけでなく<sup>2)</sup>、電子流方向の磁壁移動も観測した。後者は Spin Hall angle と Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) の符号組合せ<sup>3)</sup> から予想される結果と矛盾しており、機構解明のためには実際の磁壁移動層の磁気特性を反映したモデル構築が望まれる。本研究では、電流駆動磁壁移動に関与する磁気特性を系統的に評価した結果、およびこれに基づいて磁壁移動特性をモデル計算した結果について報告する。

## 解析方法

飽和磁化、垂直磁気異方性は vibrating sample magnetometry 測定、DMI 磁場とデピニング磁場は磁区バブル拡大実験<sup>4,5)</sup>、SOT 効率は harmonic Hall 電圧測定<sup>6)</sup> により評価した。磁壁移動方向と磁壁移動しきい値電流密度は、2 $\mu\text{m}$  幅の磁性細線に 20ns のパルスを印加する電流駆動磁壁移動実験において、磁壁位置変化を磁気光学顕微鏡により測定することで取得した。磁壁移動特性の計算は磁壁ダイナミクスを磁壁位置と磁壁磁化角度の 2 変数の時間発展で記述する 1 次元モデル<sup>7,8)</sup> を用いて実施した。数値計算には磁気特性の評価結果を反映したパラメータを用いた。ただし、直接的な測定手法が確立していない外因性ピンニング磁場にはデピニング磁場を代用した。

## 結果

Fig.1 に 5 つのサンプルの磁壁移動しきい値電流密度の実験結果と計算結果の比較を示す (符号は磁壁移動方向を表す)。成膜アニール温度 300 (400)  $^{\circ}\text{C}$  のサンプルにおいて磁壁移動方向が電子流 (電流) 方向となる実験結果をモデル計算によって再現することに成功した。モデル解析により磁壁速度と磁壁移動しきい値電流密度の磁気特性依存性を定式化し、SOT, DMI の他に STT や外因性ピンニングも磁壁移動方向の決定因子であることを見出した。

## 参考文献

- 1) S. S. P. Parkin et al., Science **320**, 190 (2008).
- 2) J. Torrejon et al., Nat. Commun. **5**, 4655 (2014).
- 3) M. Kim et al., J. Magn. Magn. Mater. **563**, 169857 (2022).
- 4) R. Soucaille et al., Phys. Rev. B **94**, 104431 (2016).
- 5) V. Jeudy et al., Phys. Rev. B **98**, 054406 (2018).
- 6) M. Hayashi et al., Phys. Rev. B **89**, 144425 (2014).
- 7) G. Tatara et al., Phys. Rep. **468**, 213 (2008).
- 8) E. Martinez et al., J. Appl. Phys. **116**, 023909 (2014).

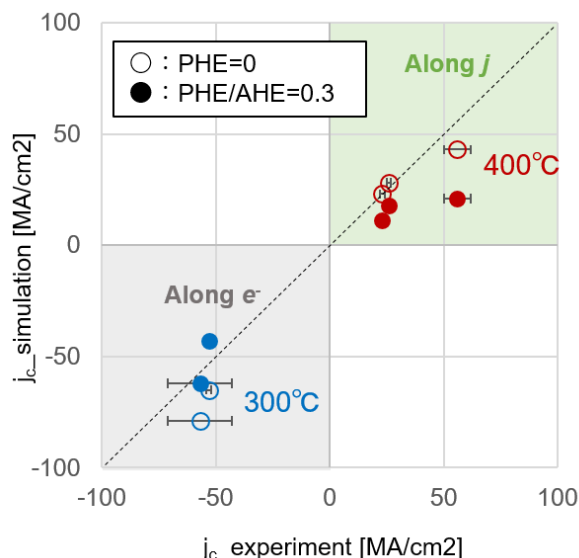


Fig.1 Comparison of experiments and simulations on the threshold current density of domain wall motion (PHE: planar Hall effect, AHE: anomalous Hall effect)