

## 垂直磁化膜の X 線磁気線二色性と四極子モーメントの導出

岡林潤<sup>1</sup>、飯田裕希<sup>2,3</sup>、Qingyi Xiang<sup>2</sup>、介川裕章<sup>2</sup>、三谷誠司<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup>東大理, <sup>2</sup>NIMS, <sup>3</sup>筑波大)

X-ray magnetic linear dichroism in perpendicular magnetized films and estimation of quadrupole moments

Jun Okabayashi<sup>1</sup>, Yuki Iida<sup>2,3</sup>, Qingyi Xiang<sup>2</sup>, Hiroaki Sukegawa<sup>2</sup>, and Seiji Mitani<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>NIMS, <sup>3</sup>University of Tsukuba

### Introduction

X 線磁気円二色性(XMCD)は、放射光の左右円偏光の差分として定義され、総和則を用いた解析からスピンと軌道磁気モーメントを導出できる有力な手法である。入射角度 $\theta$ 依存性から軌道磁気モーメントの異方性を議論できる。また、スピン磁気モーメントを正確に求めることは難しく、磁気双極子項  $m_T$  (四極子成分) が消失する  $3\cos^2\theta - 1 = 0$  となる  $54.7^\circ$  傾けた配置にてスピン磁気モーメントのみが求められる。一方、放射光の水平・垂直の直線偏光を用いた X 線磁気線二色性(XMLD)は、スペクトル解析から磁気異方性定数  $K$  及び四極子モーメント  $Q_{zz}$  を算出できる手法である。具体的には、以下の総和則により算出される[1,2]。

$$K = \frac{\xi n_h \Delta I_{L3} - 2\Delta I_{L2}}{2A \frac{I_{L3} + I_{L2}}{I_{L3} + I_{L2}}}$$

$$\langle Q_{zz} \rangle = \frac{l(2l-1)n_h \Delta I_{L3} + \Delta I_{L2}}{2 \frac{I_{L3} + I_{L2}}{I_{L3} + I_{L2}}}$$

ここで、 $I$  と  $\Delta I$  はそれぞれ XAS, XMLD 強度を表す。 $\xi$  はスピン軌道結合定数、 $n_h$  は 3d 空準位数、 $l$  は軌道角運動量を表す。 $A$  は幾何学的配置による係数である。面内磁気異方性を有する試料であれば、面内磁化と縦横直線偏光の電場ベクトルとの相互作用の有無により、XMLD シグナルが得られる。一方、垂直磁気異方性を有する場合の XMLD は今までに行われていない。そこで今回、残留磁化状態での垂直磁化試料の XMLD の計測手法を開発した。これにより、XMLD から算出した垂直磁気異方性エネルギーを評価し、四極子モーメントについて XMCD から算出される値と比較検討することを目的とする。

### Results

垂直磁気異方性を示す試料にて、ゼロ磁場にて残留磁化がおおよそ飽和磁化と同じ場合には、残留磁化状態にて  $60^\circ$  の斜入射配置にて放射光の水平方向、垂直方向の電場ベクトルでのスペクトルを測定することで XMLD シグナルが得られることが判った。これは試料と放射光の入射角を変えずに異方性エネルギーを算出できることになる。一例として、 $1.2 \text{ MJ/m}^3$  の垂直磁気異方性エネルギーを有する Fe/MgO 界面において XMLD スペクトルを計測し、総和則を用いることで異方性エネルギーを評価した。上式を用いた解析では、異方性エネルギーは  $500 \mu\text{eV}$  となり、これは Fe/MgO 界面の垂直磁気異方性に相当する。光と磁気が結合する正確な配置にはならないが、 $\sqrt{3}/2$  倍により補正される。これは角度依存 XMCD から求めた値とおおよそ一致し[3]、XMLD の有用性が示された。

磁気双極子モーメント  $m_T$  は、 $m_T = -Q_{zz} S$  の関係により四極子成分  $Q_{zz}$  と関連する。XMCD の角度依存性からも  $m_T$  を導出し、 $Q_{zz}$  について議論できる。一方、XMLD と総和則から  $Q_{zz}$  を算出し比較した。Fe/MgO 界面では、 $Q_{zz}$  は有限ではあるが値は極めて小さく、磁気異方性の起源に  $m_T$  の寄与は極めて小さく、軌道磁気モーメントの異方性から説明できることも判った。

### References

- [1] P. Carra et al., Physica B **192**, 182 (1993).
- [2] S.S. Dhesi et al, Appl. Phys. Lett. **80**, 1613 (2002).
- [3] J. Okabayashi et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 122408 (2014).

## TbCo アモルファス垂直磁化膜の磁化反転挙動の温度変化

原子秋乃、櫻井浩、劉小晰\*、馬闈\*、鈴木宏輔、星和志、辻成希\*\*、櫻井吉晴\*\*、  
安居院あかね\*\*\*

(群馬大、\*信州大、\*\*JASRI、\*\*\*QST)

Temperature dependence of the magnetization switching behavior for a TbCo amorphous perpendicular  
magnetic anisotropy film

A. Harako, H. Sakurai, X. Liu\*, C. Ma\*, K. Suzuki, K. Hoshi, N. Tsuji\*\*, Y. Sakurai\*\*,  
and A. Agui\*\*\*

(Gunma Univ, \*Shinshu Univ., \*\*JASRI, \*\*\*QST)

### はじめに

磁気抵抗メモリ(MRAM)等のスピントロニクスデバイスあるいは磁気ストレージメディアにおいて、希土類遷移金属アモルファス合金の垂直磁気異方性の利用の研究が進められており、反転磁場の制御を目的とした磁化反転挙動解明の研究が求められている。

これまで我々は磁気コンプトン散乱を利用したスピン・軌道選択磁化曲線、あるいは元素選択磁化曲線の測定法を開発し<sup>1-3)</sup>、 $Tb_xCo_{100-x}$  アモルファス垂直磁化膜の磁化反転挙動の組成依存性を報告してきた<sup>4)</sup>。その結果、スピン・軌道磁気モーメントあるいは Tb・Co 磁気モーメントの磁化反転挙動は同一であることをみいだした。そこで磁化反転挙動の温度依存性について調べることにした。

### 実験方法<sup>1-4)</sup>

$Tb_xCo_{100-x}$  ( $x=12, 14, 16, 18, 20, 22$ ) 膜を Al 基板上に DC スパッタリング法で作製した。EPMA で組成を確認した。XRD によりアモルファス構造を確認した。SQUID 磁力計を用いて全磁化曲線を求めた。Spring-8 BL08W にて磁気コンプトン散乱実験を行い、スピン選択磁化曲線 (SSMH) を求め、全磁化曲線と SSMH の差より軌道選択磁化曲線 (OSMH) を求めた。また磁気コンプトンプロファイルを解析して Tb、Co 磁気モーメントの元素選択磁化曲線を求めた。

### 実験結果

Fig.1 は全磁気モーメントの飽和磁化の組成・温度依存性を示す。全磁気モーメントでは室温で  $x=17$  近傍に磁化がゼロとなる磁気補償が観測され、磁気補償組成は温度の低下とともに Co リッチ側に移動した。元素選択磁化曲線の解析から、磁気補償組成より Co リッチ側では Co 磁気モーメントが磁場の方向を向き、Tb リッチ側では Tb 磁気モーメントが磁場の方向を向いていた。軌道磁気モーメントは Tb 磁気モーメントの挙動に対応していた。

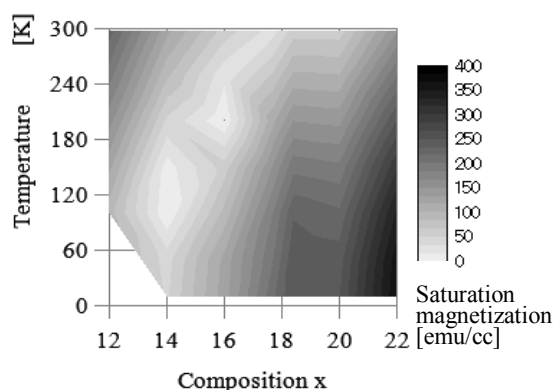


Fig.1 Temperature and composition dependence of saturation magnetization

### 参考文献

- 1) A. Agui et al., J. Synchrotron Rad. 17 (2010) 321,
- 2) A. Agui et al., APEX 4 (2011) 083002.
- 3) A. Agui et al., J. Appl. Phys., 114 (2013) 183904.
- 4) A. Agui et al., Mater. Res. Express, 4 (2017) 106108.

## フレキシブル基板上 Co 薄膜の面内二軸引張歪みによる垂直磁気異方性制御

松本啓岐<sup>1,2</sup>、太田進也<sup>1,2</sup>、小山知弘<sup>2,3</sup>、千葉大地<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>東大物工、<sup>2</sup>阪大産研、<sup>3</sup>阪大 CSRN)

Control of perpendicular magnetic anisotropy of Co thin films formed on a flexible substrate using an in-plane biaxial tensile strain technique

H. Matsumoto<sup>1,2</sup>, S. Ota<sup>1,2</sup>, T. Koyama<sup>2,3</sup>, D. Chiba<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>The Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>ISIR, Osaka Univ., <sup>3</sup>CSRN, Osaka Univ.)

### はじめに

柔らかい有機フィルム上へ製膜した強磁性体薄膜の磁化方向は%オーダーの巨大な一軸引っ張り歪みにより制御可能なことが知られている<sup>1,2</sup>。一方で、一軸引っ張り歪みを加えると、それと垂直な向きに圧縮歪みも生じる(ポアソン効果)。fcc(111)配向した Co 薄膜では、面直方向へ圧縮歪みを加えることにより垂直磁気異方性の誘起が期待される<sup>3</sup>。しかし、一軸引っ張り歪みでは面内方向へ誘起される磁気異方性の方が大きく、この効果が十分に確かめられてこなかった<sup>1,4</sup>。本研究では、面内に二軸引っ張り歪みを印加する手法を用いて面直方向にのみ圧縮歪みを加え、Co 薄膜の磁化容易軸を面内から面直方向へスイッチすることに成功した。

### 実験方法

Ta/Pd(2.0nm)/Co(0.9nm)/Pd(2.0nm)という構造をフレキシブルなポリエチレンナフタレート基板上へ直接スパッタ製膜した。フォトリソグラフィとアルゴンイオンミリングによってホールバー形状へ加工し、ホールバーが中心に来るようにして基板を十字型に切り出した。十字基板の四方をつかみ治具で押さえ、治具の間隔を自動制御することで二軸方向へ加える引っ張り歪みの量 $\varepsilon$ を調節した。こうして加えた異なる歪み量に対して、面直方向へ磁場を掃引しながら異常ホール抵抗値ループの測定を行った。

### 実験結果

Figure に、加えた二軸歪み量を $\varepsilon = 0.0\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1.0\%$ としたそれぞれの場合についての異常ホール抵抗値ループの測定結果を示した。歪みを加えていない場合( $\varepsilon = 0.0\%$ )、ループ形状は印加磁場に対して直線的であり、試料が面内容易であることを示している。 $\varepsilon = 0.5\%$ へ歪み量を増加させると面直方向への飽和磁界が減少しているのがわかる。これは、二軸引っ張り歪みが Co 薄膜へ垂直磁気異方性を誘起していることを示している。 $\varepsilon = 1.0\%$ とした場合には角型のヒステリシス曲線が得られており、二軸引っ張り歪みによって磁化容易軸が面直方向へ変化したことを表している。この面内方向から面直方向への磁化容易軸の歪みによる変化は、Co に接する二つの Pd 層の片方または両方を Pt 層へ置換した試料においても同様に観測された。

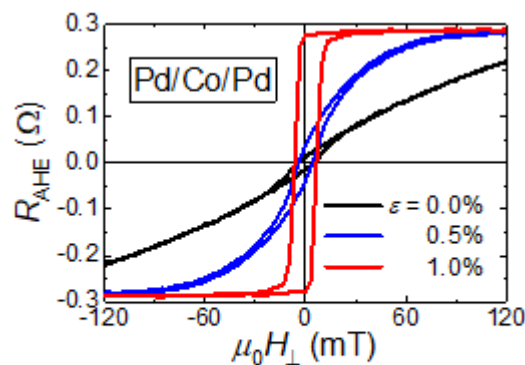


Figure: The result of anomalous Hall measurements under 0.0%, 0.5%, 1.0% biaxial tensile strain.

### 参考文献

- 1) S. Ota *et al.*, Appl. Phys. Express. **9** (2016) 043004.
- 2) R. Asai *et al.*, J. Appl. Phys. **120** (2016) 083906.
- 3) H. Takahashi *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **126** (1993) 282.
- 4) S. Ota *et al.*, Nat. Electron. **1** (2018) 124.

## ピエゾエレクトロニック磁気トンネル接合の圧力印加構造の評価

浦下 宗輝, 北川 涼太, 小野澤 隼, スタットラー 嘉也, 春本 高志\*, 史 蹟\*,  
中村 吉男\*, 高村 陽太, 中川 茂樹

(東京工業大学 工学院 電気電子系, \*東京工業大学 物質理工学院 材料系)

Characterization of the pressurized structure of piezo-electric magnetic tunnel junctions

S. Urashita, R. Kitagawa, H. Onozawa, Y. Stutler, T. Harumoto\*, J. Shi\*,

Y. Nakamura\*, Y. Takamura, S. Nakagawa

(Dept. of Electrical and Electronic Eng., Sch. of Eng., Tokyo Inst. of Tech., \*Dept. of Materials Science and Eng., Sch. of Materials and Chemical Tech., Tokyo Inst. of Tech.)

### はじめに

我々の研究グループが提案するピエゾエレクトロニック磁気トンネル接合(PE-MTJ)<sup>1,2)</sup>は、超磁歪材料でフリー層を構成した MTJ とその周囲に形成された圧電体及びリング上の電極による圧力印加構造から成る不揮発性メモリ素子である。この PE-MTJ の磁化反転時には、圧電体により MTJ に圧力を印加し磁化反転のためのエネルギーバリアを下げる応力アシストが可能であり、従来の MTJ より劇的に小さな電流密度で磁化反転が行える。この PE-MTJ を実現するためには、圧力印加構造の動作検証を行う必要があり、これまでに我々のグループでは PE-MTJ の MTJ 部分を W/SmFe<sub>2</sub>/W の単純な 3 層構造で置き換えた試料において、圧電体に電圧印加することで磁化特性の変化を確認した<sup>3)</sup>。本研究では圧電体への印加電圧と磁化特性の関係をより詳細に調べ、評価を行ったので報告する。

### 実験方法

Fig. 1 に作製した圧力印加構造を示す。試料は W/SmFe<sub>2</sub>/W の 3 層構造から成る直径 10 μm の円柱とその周りに形成した圧電体 AlN 及び AlN の上下に作製したリング上の電極から構成される。3 層構造は対向ターゲット式スパッタ法を用いて熱酸化 Si 基板上に成膜した。AlN<sup>4)</sup>は室温で反応性スパッタ法で成膜した。試料の微細加工にはフォトリソグラフィ技術やイオンミリング装置などを用いた。圧力印加時の磁化特性は振動試料型磁力計(VSM)を用いて評価した。また、この VSM の測定において十分なシグナル強度を得るために、1 試料につき円柱を約 10 万個集積した。

### 実験結果

Fig. 2 に圧力印加構造中の SmFe<sub>2</sub> 円柱の磁化特性を示す。圧電体に電圧を印加することで、僅かに磁化特性が変化した。これは、圧力印加構造から発生した圧力により逆磁歪効果を通じて SmFe<sub>2</sub> の磁気異方性が変化したことを示している。また、電圧に比例した圧力が印加されていることを確認した。以上より、PE-MTJ の実現に向けた圧力印加構造において磁化特性の変化を確認した。

### 謝辞

本研究の一部は東芝メモリ株式会社の資金援助を受けた。本研究の一部は、文部科学省のナノテクノロジープラットフォームの支援を受けて実施された。本学菅原聡准教授に感謝します。

### 参考文献

- 1) S. Sugahara, *et al.*: 2017 IEEE S3S, 1 (2017).
- 2) Y. Takamura, *et al.*: *Solid-State Electronics*, **128**, 194 (2017).
- 3) 北川 涼太他: 粉体粉末冶金協会第 123 回講演大会, 1-32A (2018).
- 4) T. Harumoto, *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **113**, 084306 (2013).

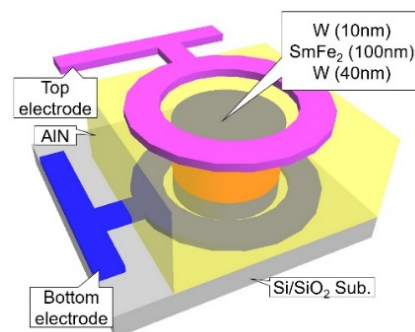


Fig. 1. Schematic of a sample structure

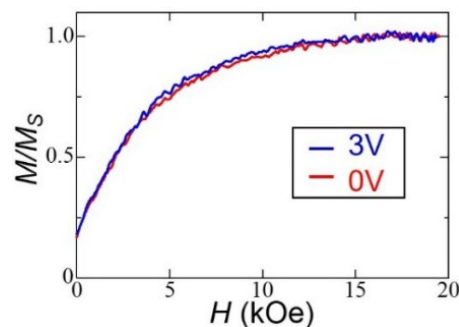


Fig. 2. Demagnetization curves for the SmFe<sub>2</sub> pillars



# Fe系二元合金薄膜における面内および面直ダンピングの比較

遠藤 恭, Nguyen Thi Van Anh, 川邊 泰之, 島田 寛 (東北大学)

Comparison Between In-plane Damping and Out-of-plane Damping in Fe Binary Alloy Thin Films

Y. Endo, T. V. A. Nguyen, Y. Kawabe, Y. Shimada (Tohoku Univ.)

## はじめに

強磁性共鳴 (Ferromagnetic Resonance: FMR) 測定は、バルクや薄膜からなる強磁性材料のダンピング定数 ( $\alpha$ ) を評価できる計測法の1つである<sup>1)</sup>。近年、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) と高周波伝送線路を組み合わせたブロードバンド強磁性共鳴 (Broadband FMR: B-FMR) 測定法が広く利用されている<sup>2-4)</sup>。FMR測定法では、試料面に対する外部磁界の印加方向によって磁化の不均一モードの発生の有無が指摘されているものの、B-FMR測定法に限ってはその詳細について幅広い材料を用いて比較検討した例はほとんどない。本研究では、Fe系二元合金 (Fe-M) を磁性薄膜材料として選択し、Fe-M薄膜における面内および面直ダンピングをB-FMR測定法により評価し、比較検討を行った。

## 実験方法

10 nm 厚の Fe-M (M=Ni, Si, Co, Ga) 薄膜を、ガラス基板上に DC マグネトロンスパッタを用いて作製した。これらの薄膜の組成分析は EDX 用いて行った。作製した薄膜の動的磁気特性に関しては、試料の膜面平行に外部磁界を印加する場合には電磁石 (最大 3 kOe) を、また試料の膜面垂直に外部磁界を印加する場合には超伝導マグネット (最大 90 kOe) を、それぞれ用いて VNA と伝送線路を組み合わせた B-FMR 測定法を用いて評価した。なお、測定はすべて室温で行った。また、これらの薄膜の他の特性の詳細は他の文献に記載済みである<sup>4,5)</sup>。

## 結果および考察

表 1 に、Fe-M (M=Ni, Si, Co, Ga) 薄膜における有効飽和磁化、面内および面直ダンピングを示す。有効飽和磁化に関しては、面内方向の場合、VSM を用いて評価した飽和磁化値 ( $4\pi M_s$ ) に比べて高くもしくは低くなった。この原因は表面磁気異方性の大きさによるものと考えられる。また、面直方向の場合、VSM による  $4\pi M_s$  とほぼ一致している。一方、ダンピングに関しては、M=Ni の場合には、試料の膜面に対する外部磁界の印加方向によらずほぼ面内ダンピングと面直ダンピングの値はほぼ同程度であり、材料固有のダンピングが観測できることを示している。一方で、M=Si, Co, Ga の場合には、膜面に対する外部磁界の印加方向に依存し、面内ダンピングが面直ダンピングに比べて 2~5 倍高くなった。この原因は、膜面平行に外部磁界を印加する場合 2-マグノン散乱もしくは異方性分散などの磁氣的な不均一性による不均一モードが発生することによるものと考えられる。以上のように、材料によって外部磁界の印加方向を慎重に選択する必要があることを示唆している。

## 謝辞

本研究の一部は、東北大学先端スピントロニクス研究開発センター、東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター、東北大学国際集積エレクトロニクス開発センターおよび情報ストレージ推進機構 (ASRC) の支援のもとで行われた。また、本研究の一部は、科研費基盤研究 (B) (No. 17H03226) の補助のもとで行われた。

**参考文献** 1) J. H. E. Griffiths, Nature 148, 670 (1946)., 2) G. Counil et al., JAP 95, 5646 (2004)., 3) M. Toda et al., JMSJ 31, 435 (2007)., 4) Y. Endo et al., JAP 109, 07D336 (2011)., 5) Y. Kawabe et al., TMSJ 3, 34 (2019) 他。

Table 1 Comparison between in-plane and out-of-plane dynamics for Fe-M binary alloy films.

Materials (Fe-M)	Fe-Ni (Fe <sub>22</sub> Ni <sub>78</sub> ) (M=Ni)	Fe-Si (Fe <sub>87</sub> Si <sub>13</sub> ) (M=Si)	Fe-Co (Fe <sub>88</sub> Co <sub>12</sub> ) (M=Co)	Fe-Ga (Fe <sub>76</sub> Ga <sub>24</sub> ) (M=Ga)
$4\pi M_{s, //}$ [kG] in case of external magnetic field // film plane	12.64	13.40	17.36	11.18
$4\pi M_{s, \perp}$ [kG] in case of external magnetic field $\perp$ film plane	10.04	15.04	23.24	13.93
$4\pi M_s$ [kG] by VSM	10.38	15.05	19.86	14.61
In-plane damping ( $\alpha_{//}$ ) in case of external magnetic field // film plane	0.00626	0.01082	0.03321	0.02600
Out-of-plane damping ( $\alpha_{\perp}$ ) in case of external magnetic field $\perp$ film plane	0.00641	0.00545	0.00722	0.00741

# MOD 法により作製した Bi:YIG/Pt 熱電変換デバイスの スピンゼーベック電圧と表面構造に及ぼす熱処理の効果

高橋優太、高瀬つぎ子、山口克彦  
(福島大)

Annealing effect of spin Seebeck voltage and surface structure of  
Bi:YIG/Pt thermoelectric conversion device made by MOD method

Y. Takahashi, T. Takase, K. Yamaguchi  
(Fukushima Univ.)

## はじめに

磁性絶縁体に生じる温度勾配によってスピン流が生成するスピンゼーベック効果(SSE)は、金属膜を介して電流に変換することができ、熱電変換として注目されている。SSE を用いた熱電変換デバイスは、面積を拡大することにより、出力が容易に増大するという特徴を有する<sup>1)</sup>。本研究では、安価かつ大面積化に应用可能な金属有機化合物分解(MOD)法を用いて、多結晶ビスマス置換イットリウム鉄ガーネット(Bi:YIG)膜を作製し、白金(Pt)膜積層後の熱処理がスピンゼーベック電圧と表面構造に対して及ぼす効果を報告する。

## 実験・結果

MOD 法を用いて、厚さ 0.45mm の石英ガラス基板上に多結晶 Bi:YIG 膜を 300~400nm 製膜した後、簡易スパッタ装置(Ar・10Pa)を用いて Pt 膜を 10nm 積層した。さらに、試料全体を大気圧下で 300℃から 700℃の範囲を 50℃刻みでそれぞれ 1hour の熱処理を行い、Pt 膜の膜質の改善を行った。Fig.1 に試料の上部と下部間の温度勾配を 3K 程度とし、各熱処理温度で作製した試料のスピンゼーベック電圧の測定結果を示す。今回測定に用いる Bi:YIG/Pt 試料のサイズは 7mm×13mm とした。また、Fig.2 に 400, 500, 600, 700℃の熱処理温度で作製した試料の表面構造を走査型電子顕微鏡 (SEM)により観察した結果を示す。

Fig.1 より熱処理温度 600℃においてスピンゼーベック電圧が最大となり、熱処理温度が低くなるにつれスピンゼーベック電圧が小さくなっていることが確認できる。また、熱処理温度 700℃においてはスピンゼーベック電圧を確認することができなかった。Fig.2 より試料表面の Pt 膜の島状構造の凝縮度合いが熱処理温度によって異なり、スピンゼーベック電圧の出力強度に影響を及ぼしているものと考えられる。

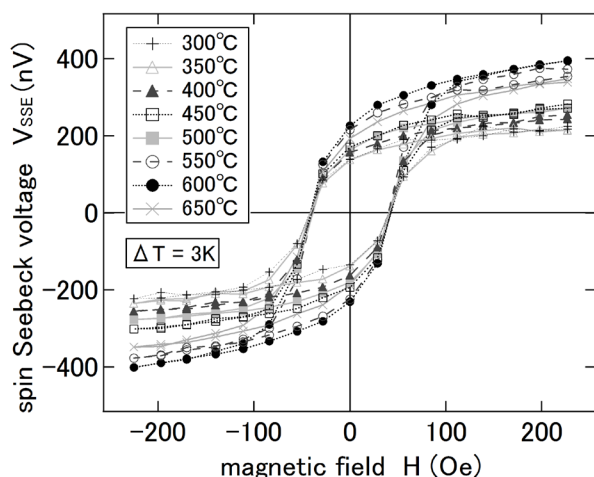


Fig.1 Spin Seebeck voltage at each annealing temperature

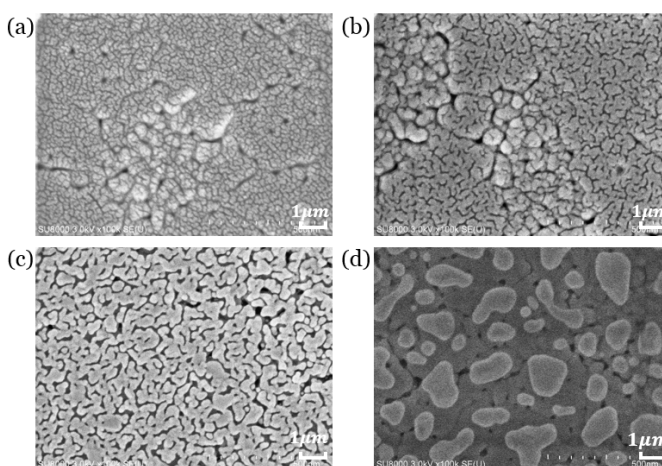


Fig.2 Surface structure of samples annealed at (a)400℃ and (b)500℃ and (c)600℃ and (d)700℃ by SEM

## 参考文献

- 1) A. Kirihaara, K. Uchida et al., Nature Materials Vol. 11, No. 8, (2012) ,686-689.

## 周波数掃引強磁性共鳴における共鳴吸収半値幅

川井哲郎・武田 茂\*・大竹 充  
(横浜国大, \*Magnontech)

Resonance absorption peak-width on frequency-sweep ferromagnetic resonance

Tetsuroh Kawai, Shigeru Takeda\*, and Mitsuru Ohtake  
(Yokohama National University, \*Magnontech, Ltd.)

**はじめに** スピントロニクス進展に伴い磁性薄膜の強磁性共鳴(FMR)の挙動が注目されている<sup>1)</sup>。従来のFMRは空洞共振を利用した磁場掃引が主流であったが、GHz帯まで測定可能なベクトルネットワークアナライザ(BNA)の普及に伴い周波数掃引FMR測定が数多く行なわれるようになった。しかし、その共鳴吸収半値幅の共鳴周波数依存性は複雑な挙動を示すことが知られている<sup>2)</sup>。本報告ではパーマロイ薄膜の周波数掃引FMR測定を行い、共鳴吸収半値幅と印加した静磁場( $H$ )および共鳴周波数( $f_r$ )依存性について解析した。

**実験方法** 厚さ200 nm (4×4 mm 角)のパーマロイ薄膜を全シールド型マイクロストリップライン治具に配置し、1 kOeまでの静磁場を膜面内に印加して周波数掃引FMR測定を行なった<sup>3)</sup>。上限の周波数は10 GHzである。共鳴吸収半値幅( $\Delta f$ )を実測し、その $H$ および $f_r$ 依存性を解析した。

**実験結果と考察** 共鳴吸収ピークの測定例をFig. 1に示す。明瞭なローレンツ型の吸収が観測された。 $\mu''$ のピーク周波数を $f_r$ 、その半値幅を $\Delta f$ とした。 $H$ を変化させて測定した $\Delta f$ をFig. 2に示す。 $H$ が小さい時 $\Delta f$ は大きく、 $H$ が大きくなると共に $\Delta f$ は低下するが、その後測定した磁場の範囲では $\Delta f$ はほとんど変化しない。一般に $H$ が小さい時に $\Delta f$ が大きいのは磁氣的不飽和のためと考えられるが、本実験では50 Oeでパーマロイ膜は充分飽和している。そこで、 $\Delta f$ を $\Delta H$ に換算し、その $f_r$ 依存性から $\Delta H_0(f_r)$ に依存しない項とGilbertダンピング定数( $\alpha$ )を求めた。求めた $\Delta H_0$ (6.2 Oe)と $\alpha$ (0.00758)を使って $\Delta f$ の $H$ 依存性を計算するとFig. 2の実線に示すように実測と良く一致した。したがって、周波数掃引FMRでは $\Delta f$ の挙動に $\Delta H_0$ が大きく影響することがわかる。すわち、磁場掃引では $\Delta H_0$ は $f_r$ に依存しない項であるが、周波数掃引では $\Delta H_0$ が $f_r$ に依存する項としても現れることが明らかになった。

**謝辞** 軟磁気特性に優れたパーマロイ薄膜をご提供頂いた東北大学名誉教授 宮崎照宣 先生、東北大学教授 水上成美 先生に厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Matter.*, **159**, L1 (1996).
- 2) B. K. Kuanr, R. E. Camley, and Z. Celinski, *J. Magn. Magn. Matter.*, **286**, 276 (2005).
- 3) S. Takeda and H. Suzuki, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 171 (2009).

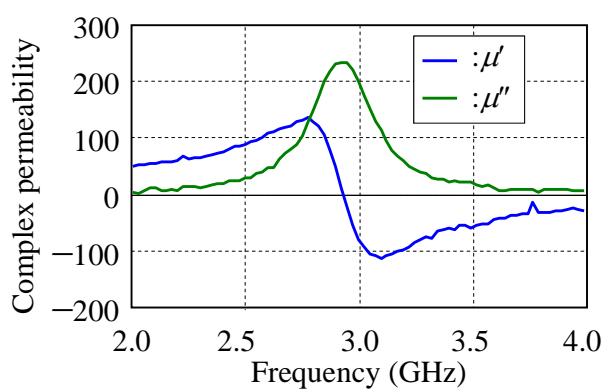


Fig. 1 Measured complex permeability for the permalloy film under  $H=103$  Oe.

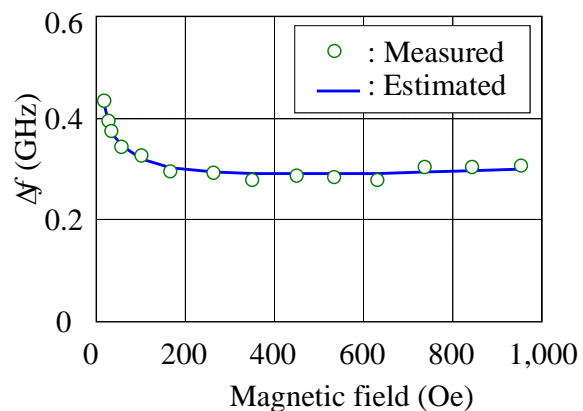


Fig. 2 Measured (circles) and estimated  $\Delta f$  for the permalloy film as a function of  $H$ .