

# 偏光カメラを用いた縦 Kerr 像と横 Kerr 像の同時測定

石橋隆幸<sup>1</sup>、若松逸雄<sup>2</sup>、谷山智康<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>長岡技科大、<sup>2</sup>名古屋大)

Simultaneous measurement of longitudinal and transverse Kerr images using polarization camera  
Takayuki Ishibashi<sup>1</sup>, Itsuo Wakamatsu<sup>2</sup> and Tomoyasu Taniyama<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Nagaoka Univ. Tech., <sup>2</sup>Nagoya Univ.)

## はじめに

磁気光学 Kerr 効果を利用した面内方向に磁化した磁性体の磁区観察には、縦 Kerr 配置もしくは横 Kerr 配置が用いられる。面内磁化膜の場合、一般に縦 S 偏光の光を用いて Kerr 配置を用いることが多い。その場合、入射偏光面と平行な方向の磁区に対してのコントラストが得られる。そのため、入射偏光面に垂直な方向の磁区のコントラストを得るためには、光の入射方向を 90° 変えて測定した画像と合わせて評価する必要があるため、光学系が複雑になる。一方、p 偏光の光を入射して縦 Kerr 測定をすると、縦 Kerr 効果による信号に入射偏光面と平行な磁区による横 Kerr 効果による信号が重畳してしまう。もし、この両方を同時に測定できれば、面内磁化のベクトル情報を一回の測定で取得できる。本発表では、偏光カメラを用いた縦カー効果と横カー効果の磁気光学像の同時測定について報告する。

## 実験方法

縦 Kerr 顕微鏡を光学定盤上に構築し、実験を行った。光源に波長 630 nm の LED (CCS 製 HLV3-22RD-4C)、対物レンズに NIKON LU Plan Fluor 50× (NA0.8) を用いた。磁場は電磁石を用いて試料面内方向に印加した。画像の取得には、偏光カメラ (Baumer, VCXU-50MP) を用いた。試料には、Si 基板上に作製した Co 薄膜の周期パターン (大きさ: 45 μm × 45 μm、周期: 50 μm) を用いた。偏光カメラにより偏光面の角度が 0°、45°、90°、135° のときの光強度 ( $I_{0^\circ}$ 、 $I_{45^\circ}$ 、 $I_{90^\circ}$ 、 $I_{135^\circ}$ ) を同時に計測し、4 種類の偏光像を 1 回の測定で計測した。そして、測定された各偏光像の光強度から全光強度  $I$  と回転角  $\theta_K$  を次式により計算した。

$$I = \frac{1}{2}(I_{0^\circ} + I_{45^\circ} - I_{90^\circ} + I_{135^\circ}) \quad (1)$$

$$\theta_K = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{I_{45^\circ} - I_{135^\circ}}{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}} \right) \quad (2)$$

さらに、得られた光強度および回転角の値から磁化飽和状態で計測した値をバックグラウンドとして差し引いた。

## 結果および考察

Fig.1、Fig.2 に P 偏光および S 偏光の光を入射して計測した Co パターン膜の回転角像と光強度像を示す。入射光の偏光状態が P 偏光、S 偏光のどちらの場合でも、回転角の値をプロットすることによって、縦 Kerr の画像が得られる。実際に、Fig.1(a)、2(a) の両方で筋状の磁区構造が観察された。一方、横 Kerr の信号は、P 偏光入射のときに光強度の変化として計測され、S 偏光入射の場合には観察されないはずである。測定された光強度像を見てみると、P 偏光では磁区構造が観察される (Fig.1(b)) が、S 偏光では観察されず (Fig.2(b))、予想通りの結果が得られていることがわかる。以上の結果から、偏光カメラを用いることによって縦 Kerr 効果と横 Kerr 効果の両方の信号を同時に取得することができることが実験的に示された。本手法は、面内磁化のベクトル情報の取得に応用可能である。

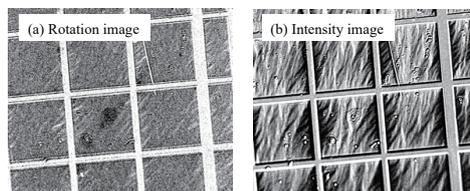


Fig.1 (a) Rotation image and (b) intensity image measured with P-polarized light.

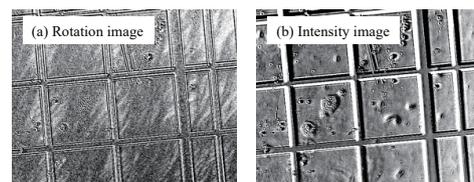


Fig.2 (a) Rotation image and (b) intensity image measured with S-polarized light.

# 磁気光学回折型ディープニューラルネットワークデバイスの開発

石橋 隆幸<sup>1</sup>, 坂口 穂貴<sup>1</sup>, 藤田 拓実<sup>1</sup>, 張 健<sup>1</sup>, F.Z.Chafi<sup>1</sup>, 野中 尋史<sup>2</sup>, 鷺見 聡<sup>3</sup>, 栗野 博之<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>長岡技科大, <sup>2</sup>愛知工大, <sup>3</sup>豊田工大)

Development of magneto-optical diffractive deep neural network device

T. Ishibashi<sup>1</sup>, H. Sakaguchi<sup>1</sup>, T. Fujita<sup>1</sup>, J. Zhang<sup>1</sup>, S. Sumi<sup>2</sup>, H. Awano<sup>2</sup>, H. Nonaka<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Nagaoka Univ. of Tech., <sup>2</sup>Aichi Inst. of Tech., <sup>3</sup>Toyota Tech. Inst.)

## はじめに

近年、Deep Neural Network (DNN)は、パターン認識、言語処理、天気予報、タンパク質の立体構造予測まで、様々な分野で応用されている。しかし、それらの計算に必要な膨大な消費電力が問題となっている。そのため、低消費電力でDNNの計算を実行できる物理デバイスの実現が切望されている。我々は、可視光で動作し、現行のイメージングデバイスとの融合が可能な、磁気光学回折型ディープニューラルネットワーク (Magneto-optical Diffractive Deep Neural Network : MO-D<sup>2</sup>NN) を提案した<sup>1)</sup> (Fig.1)。本発表では、MO-D<sup>2</sup>NNの理論計算と実験の進捗状況<sup>2)</sup>について報告する。

## 実験方法

MO-D<sup>2</sup>NNは、複数枚の隠れ層を磁区パターンで表現する (Fig.1)。波長633 nmの直線偏光の光を入射光とし、1  $\mu\text{m}$ の磁区を100 $\times$ 100並べた隠れ層を5層としたモデルを構築し、MNISTの手書き数字データセットに対する分類について計算を行った。実験では、ビスマス置換磁性ガーネット膜を用いて二層隠れ層を作製した。計算で求めた磁区パターンをビスマス置換磁性ガーネット膜上に光磁気記録技術を用いて記録した。MNISTのデータセットから抜粋した手書き数字のフォトマスクを作製し、透過光を入力信号として用いた。出力信号は、偏光カメラを用いて計測した。

## 実験結果

隠れ層に用いる磁性体のファラデー回転角 $\theta_F$ を変化させ、出力信号を偏光面の回転角として学習させたときのテスト画像に対する分類精度を Fig. 2 に示す。 $\theta_F$ が $\pi/1000$  radで55%以上、 $\pi/100$  radでは80%以上となり、小さな $\theta_F$ でも高い正解率が得られることがわかった。次に、シミュレーションで決定した磁区パターンをビスマス置換磁性ガーネット膜に書き込んだ例を Fig.3 に示す。100  $\mu\text{m}$  $\times$ 100  $\mu\text{m}$ の領域にほぼ設計通りに磁区を書き込めていることがわかる。詳細は当日報告する。

謝辞：本研究の一部はJSPS 科研費 JP23H04803 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) T. Fujita *et al.* Optical Express 30, 36889 (2022).
- 2) H. Sakaguchi *et al.* IEEE Trans. Magn. (2023). DOI 10.1109/TMAG.2023.3281842.

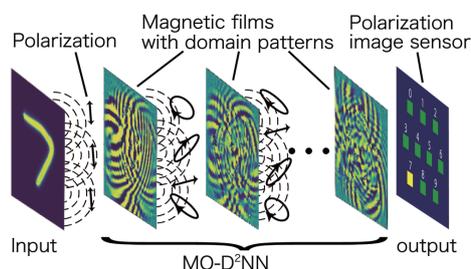


Fig. 1 A schematic drawing of MO-D<sup>2</sup>NN.

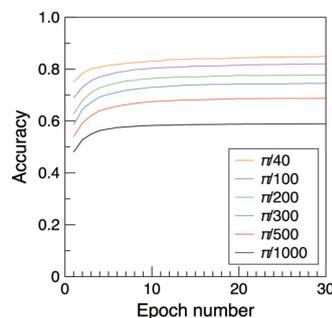


Fig.2 Accuracies of handwritten digits recognition by MO-D<sup>2</sup>NN trained for output signals of rotation angle of polarization plane.

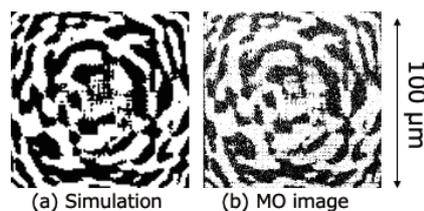


Fig. 3 Magnetic domain patterns for (a) a hidden layer obtained by a simulation and (b) MO image of magnetic domain pattern recorded in a Bi-substituted iron garnet film.

## 磁性材料/磁気デバイスの中性子透過分光イメージング

間宮 広明<sup>1\*</sup>, 大場 洋次郎<sup>2</sup>, 寺田 典樹<sup>1</sup>, 廣井 孝介<sup>3</sup>, 篠原 武尚<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>NIMS, <sup>2</sup>豊橋技科大, <sup>3</sup>原研)

Neutron transmission imaging on magnetic materials/devices

Hiroaki Mamiya<sup>1\*</sup>, Yojiro Oba<sup>2</sup>, Noriki Terada<sup>1</sup>, Kosuke Hiroi<sup>3</sup>, Takenao Shinohara<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>NIMS, <sup>2</sup>Toyohashi Univ. Tech., <sup>3</sup>JAEA)

近世の羅針盤, 近代工業社会を支えた発電機・モーター, 現代情報社会の基盤となった磁気記録は, 天然磁石, 人工合成バルク磁石, 微細に製造された磁石と違いはあっても, いずれも全てのスピンの向きが同じ方向に揃った単純な強磁性体であり, 全体の平均磁化を測るだけで評価できた. 一方, 磁性物理学の対象はスピンの複雑な配列構造の不思議な振舞に移り, 原子炉や加速器を用いた中性子回折法を利用した学理の解明が進んできた. そして, 最近, その成果をもとに, そういった複雑なスピン配列の特異な振舞を材料の機能として活用する試みが盛んとなった. しかし, この場合, 従来のように平均磁化を測ったり, デバイスの表面から漏れ磁場を測ったりするだけでは設計の検証には不十分である. そこで, 本研究では, 内部スピン配列の非破壊イメージングという新たなニーズに応える評価法として中性子透過分光法に注目し, 実際の材料・デバイスをモデルにした実証実験により, その有効性を確認した.

これまで複雑な磁性体の基礎研究を担ってきた中性子回折法では波長と回折角を測る. このため, デバイス等の全面に中性子を入射すれば, 異なる箇所異なる回折角に散乱した中性子が検出器の同じ場所に到達する. 一方, 回折が生じれば同時にその波長で透過強度が減少するが. この透過スペクトルでは, 進路上で起きた回折が重畳して減ることはあっても, 異なる波長で起きた回折が重なることはない. そこで, J-PARC のパルス中性子イメージング装置螺鈿を用いて, 巻きコア形成/歪取り熱処理後の電磁鋼板コアや, 磁気回路の炭素鋼ヨーク部, マンガン亜鉛フェライトリングコアに巻き線を行ったトロイダルインダクタなどの結晶/スピン状態イメージングを行った. その結果, 電磁鋼板コアの仕上げ後の結晶方位マップや炭素鋼ヨーク部の集合組織/磁化状態 (Fig. 1), 銅線コイル内部のトロイダルコア中のフェライトのマクロ磁化/フェリ磁性状態マップ (Fig. 2) などの情報が非破壊で得られた. 以上のような実験結果から, 残された課題は多いものの磁気デバイスの中性子透過分光イメージングは, 複雑なスピン配列/磁化状態をマルチスケールで持つ磁性材料/磁気デバイスを評価するうえで有望であると考えられた.

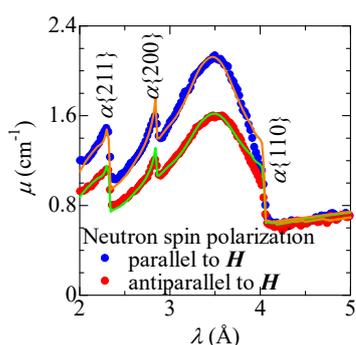


Fig. 1. Attenuation coefficient for polarized neutron through the ultra-fine-grained carbon steel [1].

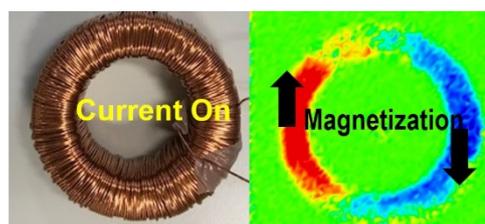


Fig. 2. Contour map of the difference in transmission between upward and downward polarized neutron for an operating ferrite inductor [2].

### 参考文献

- 1) H. Mamiya *et al.*, IEEE Trans. Magn. Submitted.
- 2) H. Mamiya *et al.*, Sci. Rep. 13, 9184 (2023)

## 磁性薄帯における磁気ひずみ周波数特性の評価

森 修, 佐藤茂行, 内海 良一, 遠藤 恭\*

(東栄科学産業, \*東北大学)

Frequency response of magnetostriction in Magnetics Alloy Ribbons

O. Mori, S. Sato, R. Utsumi, Y. Endo\*

(Toei Scientific Industrial co., Ltd, \*Tohoku University)

**はじめに** 従来、磁性合金薄帯の磁気ひずみ評価には容量変化法やひずみゲージといった評価法が幅広く利用されている。これらの評価法は薄帯に電磁気的な変化を誘導して機械的な変化を引き起こし、物理的な変化を検出することによって磁気ひずみ定数を算出する簡便な方法である<sup>1)</sup>。その一方で、薄帯を何枚も重ねた試料の作製や試料サイズを大きくする必要があるなどの欠点も抱えている。これに対して我々は磁性合金薄帯に異なる応力を付与し、そのときのインダクタンスの外部磁界依存性（電磁気的変化）をコイルにより検出することによって薄帯の磁気ひずみを評価することのできる新たな方法を検証し、報告した<sup>2)</sup>。また、この評価方法は任意の測定周波数にて磁気ひずみの測定が可能であり、磁化ダイナミクスと磁気ひずみの関係性について検証できると考えている。本研究では、この磁性薄帯用磁気ひずみ評価法を用いて市販の Fe 系アモルファス薄帯 2605SA1（日立金属）の磁気ひずみの周波数依存性を評価した。

**実験方法** Fig.1 は、本実験における測定システム図である。本評価法では、幅 8 mm の細長い薄帯の中央部を検出コイル内部に挿入して薄帯の両端を治具で固定した状態で電磁石のギャップ部に設置する。固定した薄帯両端のうち一端にフォースゲージを取り付けて薄帯の長手方向に引張応力を付与する。このとき、薄帯内部の異方性磁界が変化する。したがって、薄帯に一定の応力 ( $\sigma_{//}$ ) を付与しながら薄帯幅方向に 0~300 mT の直流磁界 ( $H_{dc}$ ) を印加し、薄帯が挿入された検出コイルのインダクタンス ( $L$ ) を LCR メータにより測定する。得られたインダクタンスの逆数 ( $1/(L-L_0)$ ) ( $L_0$ : 空心コイルのインダクタンス) と  $H_{dc}$  との関係を、300 g~700 g の応力に対してまとめる。得られた結果をもとにして、同じ  $1/(L-L_0)$  値において、 $H_{dc}$  の応力の違いによる変化量 ( $\Delta H = H_{dc1} - H_{dc2}$ ) を導出し、 $\Delta H = 3 \lambda_s (\sigma_{//1} - \sigma_{//2}) / M$  ( $M$ : 薄帯の磁化) (\*) にあてはめて薄帯の磁気ひずみ ( $\lambda_s$ ) を算出する。この測定方法で検出コイルの測定周波数を 1kHz~1MHz まで変化させ、磁気ひずみ ( $\lambda_s$ ) の周波数依存性を確認した。

**実験結果** Fig.2 は Fe 系アモルファス薄帯における磁気ひずみの測定周波数依存性を測定したものである。測定周波数の増加にともない、 $\lambda_s$  が増加していることが分かる。周波数 1kHz では  $\lambda_s$  は 27.7ppm であり、公称値の 27.0ppm と同等の値が得られた。周波数が 1MHz まで増加すると  $\lambda_s$  は 30.7ppm となり、およそ 10% 増加している。周波数が高くなるにつれて磁気ひずみが増加する傾向は、磁性材の鉄損の周波数特性と合致する。今後は磁気ひずみと鉄損の関係の妥当性について検討していく予定である。

### 参考文献

- 1) 荒井賢一, 津屋昇, 日本応用磁気学会 2, 5 (1978).
- 2) 遠藤恭, 島田寛, 森修, 佐藤茂行, 内海良一, 第 44 回日本応用磁気学会学術講演、14aD-5.

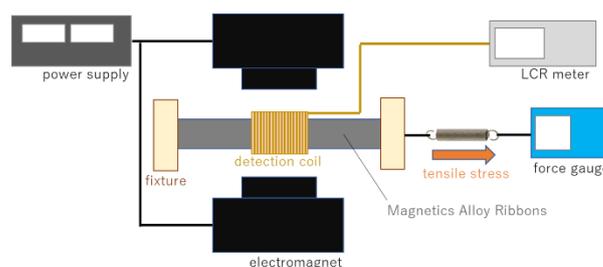


Fig.1 Measurement system for magnetostriction

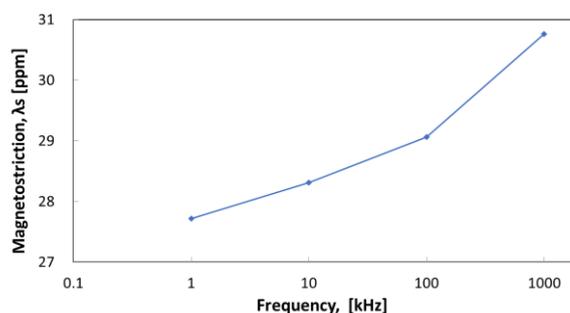


Fig.2 Frequency response of magnetostriction

## STT-MRAM 向け垂直磁気異方性膜の独創的磁気光学計測装置

小澤 謙、鈴木健司、上山真司、Jinseob Kim\*, Wookrae Kim\*, Ingi Kim\*

(日本サムスン Samsung デバイスソリューションズ研究所、\* Samsung Electronics Co., Ltd)

Novel Magneto-optical Kerr Effect Measurement System for Perpendicular Magnetic Anisotropy Films in STT-MRAM

Ken Ozawa, Kenji Suzuki, Shinji Ueyama, Jinseob Kim, Wookrae Kim, Ingi Kim

(Samsung Device Solutions R&D Japan, Samsung Japan Corporation, Japan,  
Mechatronics Research, Samsung Electronics Co., Ltd., Korea)

### はじめに

STT-MRAM は不揮発性メモリの低消費電力と言う特徴を活かし、多くのアプリケーションへの適用が期待されている。今後、IOT/MCU デバイス、車載、AI Computing などへの展開では信頼性、安定性、データ保持性が重要になる。垂直磁気異方性 (PMA) はそれらの主要な特性指標である。現状の半導体製造工程では振動型磁力計 (VSM) が主に使われているが、ウエハの状態では計測が困難であり、オンサイトで評価は困難である。今回、我々は半導体製造ラインでのインライン計測化が可能である新概念の磁気光学計測システム (MOKE) を設計、製作した。試料を用いた評価結果と合わせて報告する。

### 実験方法

Fig. 1 に示すようなウエハ計測を想定した片面からの磁場印可、且つ、電氣的に磁場方位が面内、面直で切り替え可能な電磁石を新たに設計、製作して極 Kerr MOKE システムを構築した。 $H_{k\text{eff}}$  の計測は、最初に面直磁場で試料を飽和磁化させ、ゼロ磁場に戻した後に、面内磁場を一斉磁化回転が成立する範囲内で掃引させて極 Kerr 応答を信号として検出、簡単な理論モデルを用いて  $H_{k\text{eff}}$  を Fitting、外挿から導出するというスキームである<sup>1</sup>。この手法では比較的小さな外部磁場での  $H_{k\text{eff}}$  計測が可能であり、電磁石の小型化が可能のため、半導体製造装置への実装が容易である。

### 実験結果

STT-MRAM の記録層を模した CoFeB/MgO 膜試料を用いて評価した。本手法では、fitting に用いる理論式に適合させるために、試料計測点における面内磁場方位を正確に試料面と平行にする必要がある。我々は 3 次元磁場カメラによる磁場ベクトル分布をもとに磁場方位を厳密に調整した (Fig. 2)。さらに、PMA 水準の異なる 5 種類の試料に対して同様に  $H_{k\text{eff}}$  を計測。VSM による困難軸 Loop 計測から得られた  $H_k$  と比較したところ、Fig. 3 に示すような良好な相関が得られ、本技術の有効性が確認された。

### 参考文献

1) G.Ju, et.al., J. Appl. Phys., Vol. 93, No. 10, Parts 2 & 3, 15 May 2003

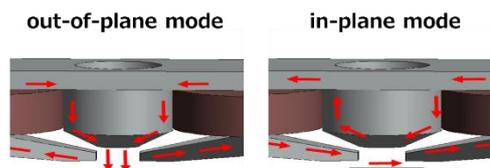


Fig.1: Schematic of the electrically switchable electromagnet

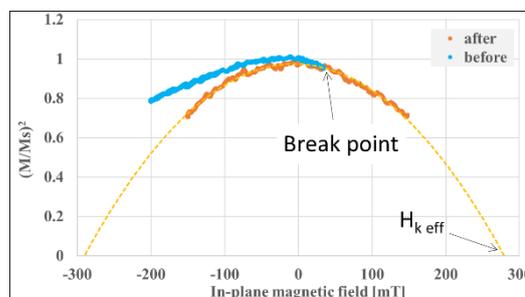


Fig.2 Polar magnetization response to the IP field

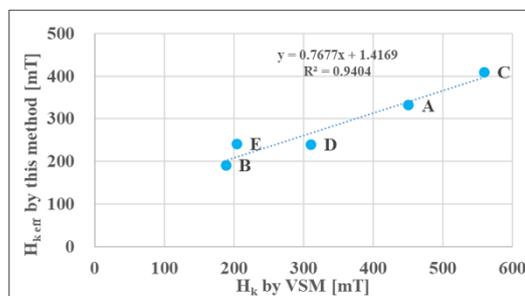


Fig.3: Correlation with VSM results for five test samples