

## 軟磁性薄帯材料の時間分解ベクトル磁区観察

小笠原 剛、田丸 慎吾、岡本 聡\*

(産業技術総合研究所、\*東北大学)

Time-resolved vector domain observation of soft magnetic ribbons

Takeshi Ogasawara, Shingo Tamaru, Satoshi Okamoto\*

(AIST, \*Tohoku Univ.)

電源回路やモーターの性能向上のために、軟磁性材料の低損失化・高速化が求められている。ベクトル場としての磁区の運動は磁化の応答や損失の発生に直接関係しているため、これを観察することは材料やデバイスの開発においても重要であるが、これまで技術的な困難から動的なベクトル磁区観察はあまりおこなわれてこなかった。今回、磁気光学顕微鏡にパルス半導体レーザー光源を組み合わせることによって、ベクトル磁区の運動を比較的容易に観察可能となったので報告する。

本研究で用いた磁気光学顕微鏡は独自開発の技術により、従来より高空間分解能であり、磁化をベクトル観察可能となっている[1]。時間分解観察にはストロボスコープ法を用い、光源としてパルス半導体レーザーを用いることにより繰返しとパルス幅を任意に設定可能となり、dc から 10 GHz 程度までの広い帯域での測定が可能となっている[2]。試料は、アモルファスおよびナノ結晶磁性体の薄帯を幅 1~2 mm、長さ 10~15 mm 程度の概長形状に切り出したものを用い、プリント基板上に接着固定したうえで両側に励磁用と磁化検出用のコイルをそれぞれ 16 ターン巻いた (Fig. 1)。交流磁場は 100 - 100 kHz の範囲で測定を行った。

Fig. 2 にアモルファス薄帯試料を 10 kHz, 500 mA (peak) で励磁した際の磁区の変化を示す。画像中の矢印は面内の磁化方向を表し、右上のプロットは磁化曲線上の対応する位置を示す。磁壁の移動により磁化が反転する様子が明瞭に観察されている。また、試料表面のキズや凹みの周辺で磁壁の運動が制限され、性能低下の原因となっていることもわかる。このほか、周波数を上げると磁区の細分化が発生する様子や、ナノ結晶薄帯では主に磁化回転によって磁化の変化が起こる様子などが観察された。

本手法は、大型の設備等の必要がなく、通常の実験室において簡便に測定が可能であり、軟磁性材料やデバイスの開発において強力な評価手法となると考えられる。

本研究は、文部科学省「革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業」および「データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業」の助成により行われた。

[1] Takeshi Ogasawara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56** 108002 (2017).

[2] Takeshi Ogasawara and Akinobu Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **61** 018001 (2022).

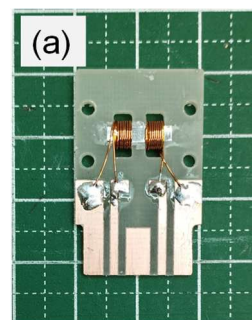


Fig. 1: Image of sample.

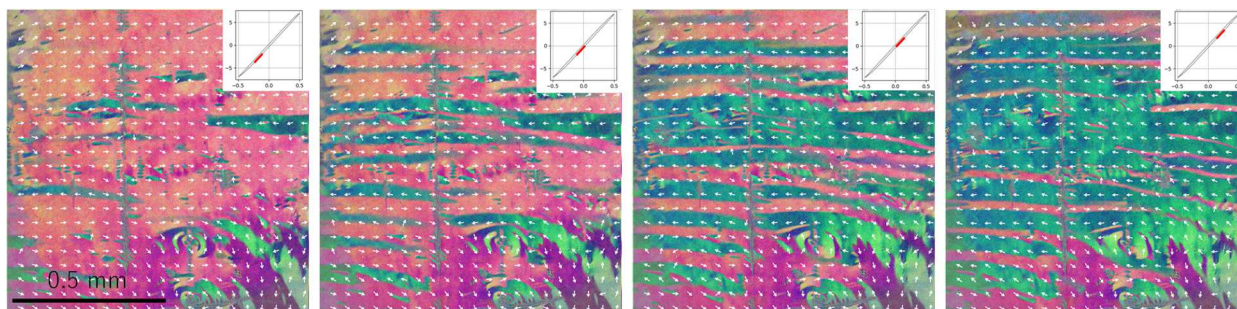


Fig. 2: Magnetic domain motion in an amorphous ribbon excited by a 10 kHz AC magnetic field.

# 16 bit 偏光カメラを用いた偏光角検出による磁区観察

目黒 栄、齊藤 伸  
(ネオアーク株式会社、東北大)

Magnetic Domain Observation by Polarization Angle Detection Using a 16-bit Polarization Camera

Sakae Meguro, Shin Saito  
(NEOARK Corp., Tohoku University)

## はじめに

磁気光学 Kerr 効果を用いた磁区観察では輝度分解能の低いカメラでもコントラストの良い磁区像が得られることからクロスニコルに近い偏光子/検光子配置で観察が行われてきた<sup>1)</sup>。しかしながら光の利用効率が低い、光源の光量変動の影響が大きいという難点があった。そこで我々はカメラのアナログビデオ信号を差動増幅する偏光差動方式を開発した<sup>2)</sup>。さらに特定の条件下では偏光差動方式の直交偏光像から偏光角検出可能なことに着目し 16 bit 輝度分解能の偏光カメラを開発し、偏光角検出による高品位磁区像の取得に成功したので報告する。

## 偏光カメラの原理

Fig. 1 に入射光として方位 0°の直線偏光を入射した場合の偏光子角度に対する偏光子透過光強度を示す。偏光子角度 0°、45°、90°、135°の透過光強度をそれぞれ  $I_0$ 、 $I_{45}$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{135}$  とするとストークスパラメータは  $S_0 = I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135}$ 、 $S_1 = I_0 - I_{90}$ 、 $S_2 = I_{45} - I_{135}$  と表され、偏光角  $\theta$  は  $\theta = \tan^{-1}(S_2/S_1)$  と表される。 $I_{90}$  はほぼ 0 となるため、 $S_1 \approx I_0$  であり  $S_0 = I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135}$  から  $S_1 \approx I_{45} + I_{135}$  となる。したがって、偏光子角度 45°、135°の 2 つの偏光像から偏光角を求めることが可能である。偏光角分解能は輝度分解能 12 bit の場合 0.024°、16 bit の場合 0.0015°となる。16 bit の場合の偏光角誤差は  $\pm 4^\circ$  の範囲で 1%以内となる。

## 実験結果

Fig. 2 に開発した 16 bit 偏光カメラの構成を示す。結像レンズの出射光を PBS で直交した偏光に分離し 2 台のカメラにそれぞれ結像させることにより直交偏光像を得る。得られた偏光像からストークスパラメータを演算し偏光角を得る。Fig. 3 に市販の偏光カメラと開発した 16 bit 偏光カメラを用いた GdFeCo 薄膜の磁区像(a)、(b)と輝度ヒストグラム(c)、(d)を示す。市販の偏光カメラは 12 bit で  $2 \times 2$  画素に 0°、45°、90°、135°の偏光子を集積しており  $2 \times 2$  画素単位の演算で空間分解能が低下し、12 bit 輝度分解能に起因して輝度分散が大きくなっているのに対し、開発した 16 bit 偏光カメラでは 1 画素単位で演算しており空間分解能が損なわれることなく輝度分散の小さい高品位な磁区像が得られていることがわかる。

## まとめ

直交 2 方向の偏光像のみで偏光角を検出する 16 bit 偏光カメラを開発し、偏光角検出による高品位磁区像を得た。今後は曲面の磁区観察に応用する予定である。

## 参考文献

- 1) S. Meguro and K. Akahane, S. Saito, M. Naka, and M. Takahashi: Ann. Conf. Magn. Soc. Jpn., 24aF-9, (2004).
- 2) S. Meguro and S. Saito, Ann. Conf. Magn. Soc. Jpn., 6pc-3 (2016)

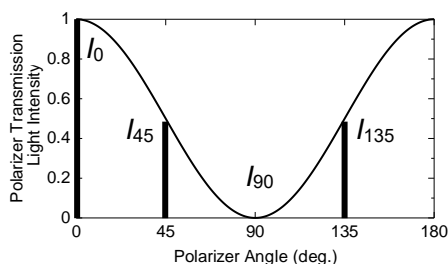


Fig.1 Relationship between polarizer angle and amount of transmitted light for 0-degree linear polarization incident light.

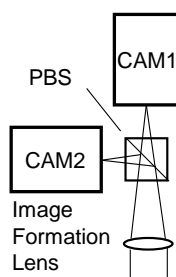


Fig.2 Schematic of 16-bit polarization camera.

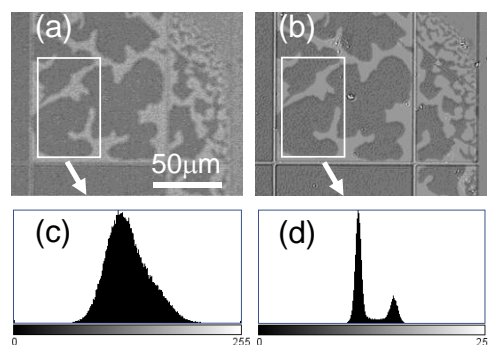


Fig.3 Magnetic domain image and brightness histogram of GdFeCo thin film by polarization camera. (a) and (b) magnetic domain images and (c) and (d) luminance histograms from a commercial polarization camera and a 16-bit polarization camera, respectively.

# 狭ピッチ磁壁移動型空間光変調器の開発と駆動率改善

川那真弓、東田諒、青島賢一、船橋信彦

Improvement of complete domain expansion ratio for spatial light modulator driven by current-induced domain wall motion

M. Kawana, R. Higashida, K. Aoshima, N. Funabashi

(NHK Science & Technology Research Labs.)

## はじめに

広視域な電子ホログラフィーの実現に向けて、電流誘起磁壁移動と磁気光学カー効果を組み合わせた磁壁移動型空間光変調器 (SLM : Spatial Light Modulator) の研究を進めている<sup>1)</sup>。これまでに、アクティブマトリクス駆動方式を用いて、10k×5k画素 (画素ピッチ : 水平 1 μm、垂直 4 μm) の光変調磁壁素子を全面駆動し、水平視域 30° のホログラフィー表示と再生像の書き換えを実現した<sup>2)</sup>。この SLM は、電流印加方向で磁壁の移動方向を制御できるが、一方向の磁壁駆動と磁界消去により書き換えていた。今回、ごく微小なアシスト磁界を利用することによって素子の駆動率を改善し、両方向の磁壁駆動による 2D パターン表示書き換えを実現したので報告する。

## 実験方法および結果

試作した SLM の模式図と磁壁光変調素子の拡大図を図 1 に示す。光変調層 (Gd-Fe) とその両端に埋め込まれた磁化固定層 (NM : Co/Pd 多層膜) で画素が構成され、2つの NM は異なる長さで設計して保磁力差を設けた<sup>1)</sup>。NM1 と NM2 を反平行磁化状態にした後に、NM1 からの漏れ磁界によって光変調層の NM1 端部に初期磁区 (磁壁) を生成した。この状態で、画素選択トランジスターに電圧 (3V) 印加することで、磁壁素子へパルス電流を供給し、NM1 側の磁壁を駆動した。トランジスターの特性上、磁壁が NM1→NM2 移動する場合 (順方向) と、逆方向では供給可能な電流量が異なり、3V 印加時には NM1、NM2 側の磁壁にはそれぞれ約 1.2 mA、0.8 mA の電流が印加される。電流パルスを印加して、磁壁素子の駆動率 (1,200 画素中、初期磁壁位置から反対側の磁壁位置まで駆動した割合) を調べた結果、順方向の磁壁は電流パルス長 0.1 ms で約 80% の駆動率が得られるのに対し、逆方向は電流パルス長を 100 ms とした場合でも約 50% であった。逆方向の駆動率が低い原因は電流不足と考えられるため、NM2 側の磁壁移動をアシストする磁化方向 (磁化上向き) にごく微小な磁界を印加することを検討した。図 2 に電流パルス長 100 ms の条件でアシスト磁界を変えた場合の順方向と逆方向の駆動率を示す。アシスト磁界を増加すると、順方向の駆動率は減少するが、逆方向の駆動率は大幅に増加した。アシスト磁界を 12 Oe 印加した場合には、順方向/逆方向ともに 70% 程度の素子が駆動できた。図 3 に、上向きのアシスト磁界 12 Oe を印加しながら 80,000 画素分を電流駆動した後の偏光顕微鏡による磁気光学像を示す。順方向 (1) で “NHK” (図中白表示) が表示でき、逆方向 (2) においても “20×20 格子パターン” (黒) を表示できた。微弱なアシスト磁界を用いて駆動率を改善することで、電流誘起磁壁駆動 (両方向) による 2D パターン表示の書き換えが可能であることを確認した。

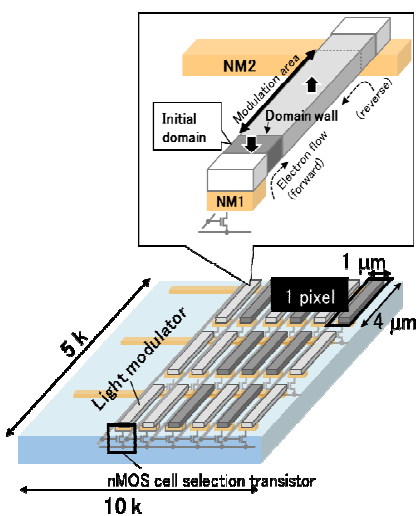


Fig. 1 MOSLM (10k x 5k) with pixel pitch of 1 μm and schematic illustration of light modulator.

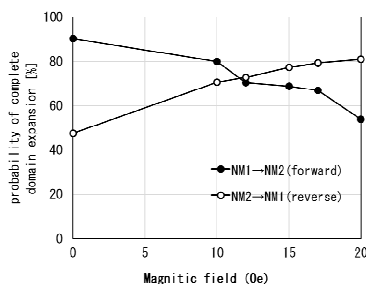


Fig. 2 Probability of complete domain expansion versus magnetic field.

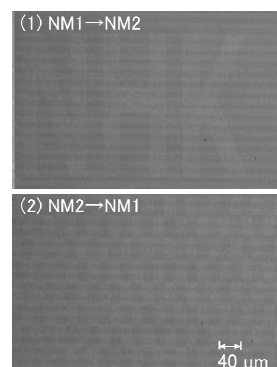


Fig. 3 Magneto-optical micrograph of the SLM device after writing data for 500 × 160 pixels.

## 参考文献

- 1) R. Higashida et al., Jpn. J. Appl. Phys. 59, 053001 (2020).
- 2) K. Aoshima, et al., Optics Express 31 (13), 21330-21339 (2023)

## GSR センサ用磁性アモルファスワイヤの磁区構造

常藤 颯太, 竹澤 昌晃, 本蔵 義信, 本蔵 晋平  
(九工大, \*マグネデザイン)

Magnetic domain structure of amorphous magnetic wires for GSR sensors

S. Tsuneto, M. Takezawa, Y. Honkura\*, S. Honkura\*  
(Kyushu Inst. Tech., \*Magnedesign Co.)

### はじめに

高感度マイクロ磁気センサである GSR センサのコアには、直径が  $10\ \mu\text{m}$  程度の磁性アモルファスワイヤが用いられている。GSR センサのノイズの発生原因を明らかにするためにはワイヤの磁区観察が有効であると考えられるが、直径  $10\ \mu\text{m}$  程度の細いワイヤの磁区観察例はほとんどない<sup>2)</sup>。そこで本研究では、GSR センサの磁気ノイズの発生原因を解明することを目的として、直径  $10\ \mu\text{m}$  の Co-Fe 基磁性アモルファスワイヤの磁区観察を行った。

### 実験方法

磁性アモルファスワイヤの磁区観察は、Kerr 効果顕微鏡を用いて行った。観察面を鏡面状態にするために、エポキシ樹脂にワイヤを埋め込み研磨した。最も深く研磨した箇所での研磨深さは  $2.8\ \mu\text{m}$  程度であった。作製した試料にヘルムホルツコイルを用いて  $\pm 15\ \text{Oe}$  の外部磁界を印加した際の、ワイヤ研磨断面の磁区構造の変化を観察した。

### 実験結果

Fig. 1 に研磨深さ  $1.7\ \mu\text{m}$  の視野において、外部磁界を印加した際の磁区観察結果を示す。図中で明暗の磁区コントラストはワイヤ半径方向の磁化成分を示している。残留磁化状態において半径方向に交互に磁化するバンブー状の磁区構造が確認できる。このバンブー状磁区構造は、正方向に磁界を印加すると消失して磁気飽和に至る。負方向に磁界を印加すると、 $-6\ \text{Oe}$  から  $-12\ \text{Oe}$  の間で不規則で急激な磁区模様の変化が起こっていることが確認できる。

Fig. 2 は研磨深さ  $2.8\ \mu\text{m}$  の視野における磁区観察結果である。残留磁化状態ではワイヤ半径方向の一方向に磁化しており、バンブー状磁区構造は確認できない。負方向に磁界を印加すると、 $-5\ \text{Oe}$  から  $-6\ \text{Oe}$  にかけて磁区コントラストが反転していることが確認できる。

これらの低磁場における急激な磁化の変化が、GSR センサに発生する磁気ノイズの原因の一つだと考えられる。今後は、ワイヤに電流を通電した状態での磁区構造変化の観察を行うことで、GSR センサ駆動時のワイヤの磁化過程の知見を得る必要がある。

### 参考文献

- 1) Y. Honkura, and S. Honkura, *J. Magn. Magn. Mater.*, **513**, 167240 (2020)..
- 2) K. Richter, O. Vahovsky, and R. Varga, *IEEE Trans. Magn.*, **58**(2), #6500505 (2022)..

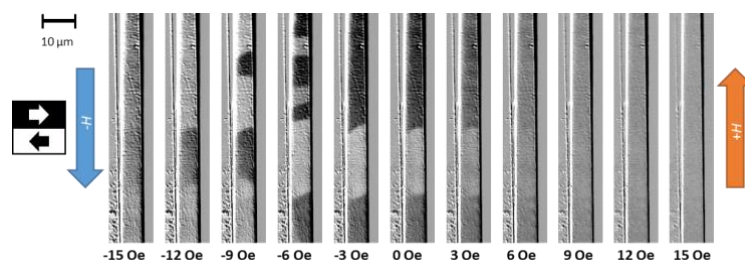


Fig.1 Magnetic domain images at polishing depth of  $1.7\ \mu\text{m}$ .

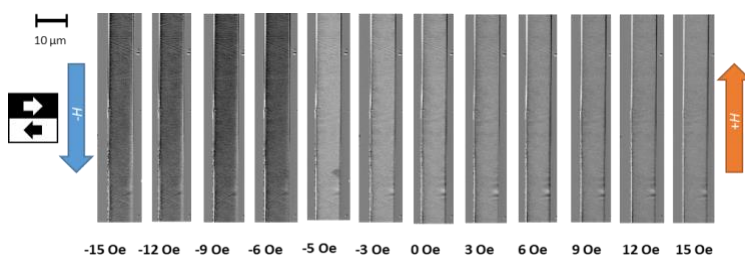


Fig.2 Magnetic domain images at polishing depth of  $2.8\ \mu\text{m}$ .

# 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も、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。

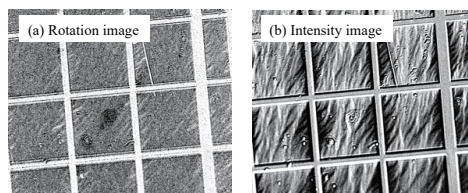


Fig.1 (a) Rotation image and (b) intensity image measured with P-polarized light.

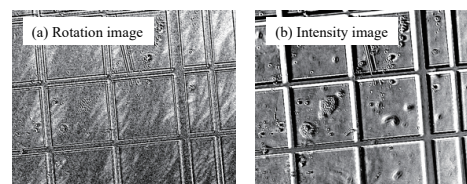


Fig.2 (a) Rotation image and (b) intensity image measured with S-polarized light.

# 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.

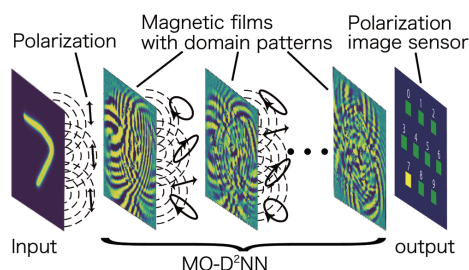


Fig. 1 A schematic drawing of MO-D<sup>2</sup>NN.

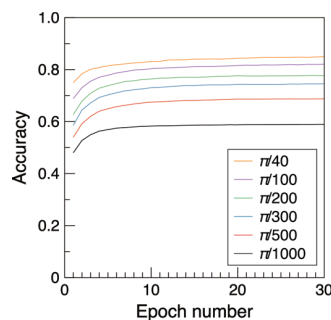


Fig.2 Accuracies of handwritten digits recognition by MO-D<sup>2</sup>NN trained for output signals of rotation angle of polarization plane.

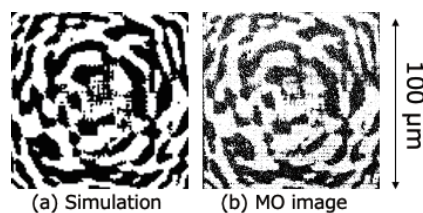


Fig. 3 Magnetic domain patterns for (a) a hidden layer obtained by a simulation and (b) MO image of magnetic domain pattern recorded in a Bi-substituted iron garnet film.

## 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.

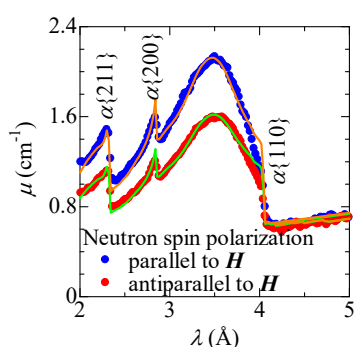


Fig. 1. Attenuation coefficient for polarized neutron through the ultra-fine-grained carbon steel [1].

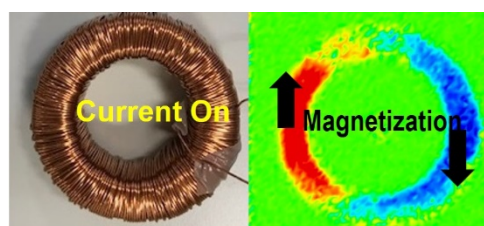


Fig. 2. Contour map of the difference in transmission between upward and downward polarized neutron for an operating ferrite inductor [2].

### 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.

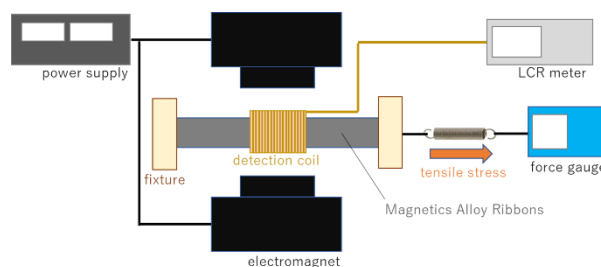


Fig.1 Measurement system for magnetostriction

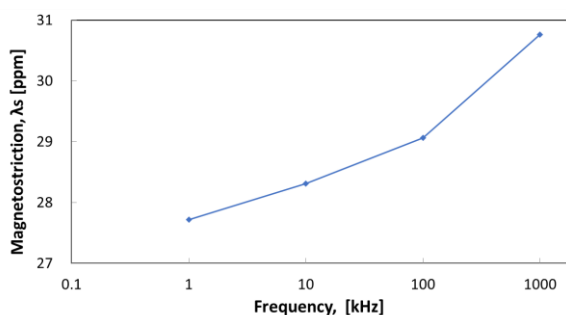


Fig.2 Frequency response of magnetostriction



## 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

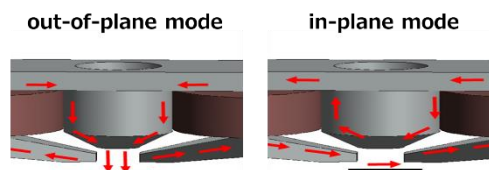


Fig.1: Schematic of the electrically switchable electromagnet

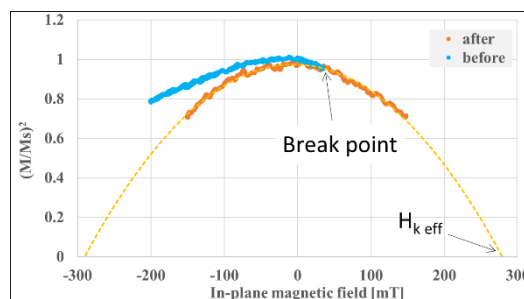


Fig.2 Polar magnetization response to the IP field

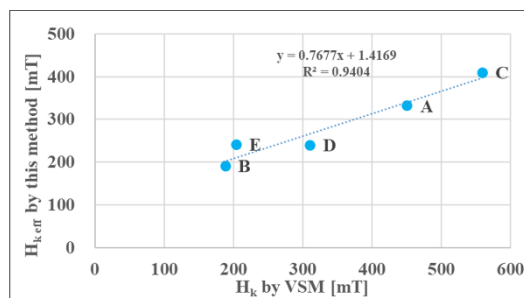


Fig.3: Correlation with VSM results for five test samples

# 閉ループ化した磁壁位置変調型 GMR センサの基礎特性

小室虎祐, 大島大輝, 加藤剛志  
(名古屋大学)

Fundamental properties of domain wall displacement GMR sensors with closed loop operation

K. Komuro, D. Oshima, T. Kato  
(Nagoya Univ.)

## はじめに

GMR (Giant Magnetic Resistance) センサは作製プロセスが比較的簡単であり、高感度かつ室温動作、集積化、低価格化が可能なセンサデバイスとして期待されている。これまで我々の研究グループでは、電流磁界フィードバックを用いた逆位相磁化変調型 GMR センサを提案しており、GMR センサの課題であった線形性、温度ドリフトが改善されることを示した。しかし、本方式は磁化困難軸方向の磁場を検出するため、GMR 素子の出力電圧が小さく、pT レベルの磁場検出には不利と考えられる。本研究ではセンサの高感度化を目的に、過去に我々の研究グループで検討した磁壁位置変調型センサ<sup>2)</sup>に対し、電流磁界フィードバック機構を組み合わせたことを検討した。磁壁位置変調型センサは磁化容易軸方向の磁場を検出することから、逆位相磁化変調型センサより1桁以上出力を上げることができ、文献<sup>2)</sup>では数 nT 程度の磁場検出を実証している。しかし、抵抗値の変化から磁場を検出するため、ヒステリシスの影響が大きく線形性の確保が課題であった。これに対し今回我々は、電流磁界フィードバックを導入することで出力のヒステリシス抑制に成功したので報告する。

## 実験手法

微細加工により、GMR 素子上にフィードバック磁場 $H_f$ および変調磁界 $H_{mod}$ 印加用のアルミワイヤを配置し、Fig. 1 に示す回路に挿入した。 $H_{mod}$ は検出磁場 $H_{det}$ の周波数に比べて十分高く、 $H_{det}$ と共に磁化容易軸方向に印加される。したがって、ブリッジ回路の中間端子間で出力される信号には、 $H_{det}$ のほか $H_{mod}$ による高周波成分が重畳する。これを計装アンプで増幅させ、後段のローパスフィルタ(Low pass filter: LPF)で高周波成分をカットする。また、LPF 出力に比例した信号を Al ワイヤに流すことで $H_{det}$ を $H_f$ で補償する。これにより磁壁の状態を常に零点に保つことができ、ヒステリシスを抑制できる。

## 結果

提案した閉ループ磁壁位置変調型センサおよび、電流磁界フィードバックを用いない開ループ磁壁位置変調型センサに対し、周波数 1 Hz、振幅が  $100 \mu\text{T}_{\text{rms}}$  の $H_{det}$ を印加した。なお、 $H_{mod}$ は周波数 100 kHz、振幅  $94.0 \mu\text{T}_{\text{rms}}$  であり、開ループの場合、センサ出力 $V_{out}$ と Al ワイヤ間を切断している。Fig. 2 に、各モードにおける $H_{det}$ - $V_{out}$ のリサージュ図形(青)ならびにその線形近似直線(オレンジ)を示す。(a)に示す従来型(開ループ)では非線形性が 7.8%であるのに対し、閉ループでは 1.2%と大幅な線形性向上に成功した。なお発表では、変調磁場の周波数および振幅と線形性の関係についても報告する。

## 参考文献

- 1) K. Komuro, D. Oshima, T. Kato, IEEE Trans. Magn. (2023), DOI: 10.1109/TMAG.2023.3284398.
- 2) G. A. Wang *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 235003 (2011).

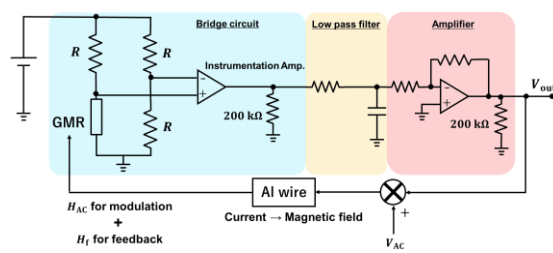


Fig. 1. 検討した GMR センサ回路.

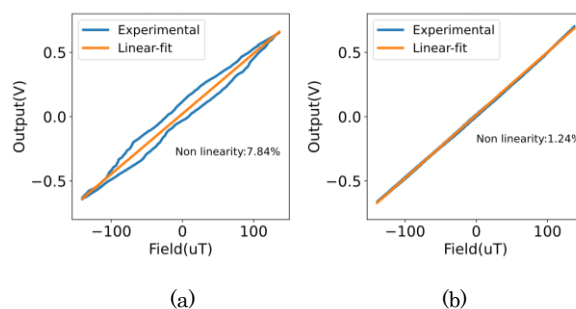


Fig. 2. (a) 開ループおよび (b) 閉ループ動作での  $H_{det}$ - $V_{out}$  のリサージュ図形.

# 高対称な偶関数抵抗-磁界特性を示すトンネル磁気抵抗センサ

中谷友也, 岩崎仁志  
(物質・材料研究機構)

Tunnel magnetoresistive sensors exhibiting highly symmetric resistance-magnetic field response  
Tomoya Nakatani, Hitoshi Iwasaki  
(National Institute for Materials Science)

多くのトンネル磁気抵抗 (TMR) を用いた磁気センサは, 素子抵抗 ( $R$ ) が磁界 ( $H$ ) に対して線形に変化する, 奇関数  $R$ - $H$  特性を利用する. その一方, 素子抵抗が磁界の符号に対して対称に変化する偶関数  $R$ - $H$  特性も, 位置・回転センサ (エンコーダ) や高感度磁界センサとして重要である. 巨大磁気抵抗 (GMR) 素子の場合, 非磁性スペーサー層を介した強磁性層間の磁気結合を利用して, 偶関数  $R$ - $H$  特性が容易に得られる. それに対して, TMR 素子において偶関数  $R$ - $H$  特性を得るためには, 図 1(a) のように自由層の磁化に弱い一方方向磁気異方性を付与した, ソフトピン構造が必要である[1]. しかし, 図 1(a) のようなシングルソフトピン構造では, 自由層と参照層の直交磁化配列時が最小抵抗となり, TMR 比をロスすること, および印加磁界方向が自由層の困難軸からずれると  $R$ - $H$  曲線が非対称になることが欠点である. そこで図 1(b) のように, MgO バリアの上下にソフトピン自由層をもつ, デュアルソフトピン構造を考案した[2].

## 実験方法

マグネトロンスパッタリングにより, 図 1(b) のデュアルソフトピン TMR 構造を作製した. ソフトピン自由層は軟磁性に優れた CoFeBTa と CoFeB との積層であり, スペーサー層は Ag<sub>90</sub>Sn<sub>10</sub>, 固定層と参照層は Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> を用いた (組成は at. %). 積層構造の詳細は文献[2]を参照されたい. フォトリソグラフィと Ar イオンミリングによる TMR 素子の微細加工後に, 300 °C にて 1 h の磁界中熱処理をおこなった.

## 結果

図 2(a) にデュアルソフトピン TMR 素子の  $R$ - $H$  曲線を示す. 容易軸に対しては台形の  $R$ - $H$  曲線を示し,  $H$  の正負領域における抵抗変化はそれぞれソフトピン自由層 1 および 2 の磁化反転による. 困難軸に対しては, 両方のソフトピン自由層の磁化が回転し, 偶関数  $R$ - $H$  曲線を示す. 図 2(b) は,  $H$  の印加方向を困難軸から  $\phi = 20^\circ$  ずらした場合の  $R$ - $H$  曲線である. デュアルソフトピン素子は依然, 対称性のよい  $R$ - $H$  曲線を示す. その一方, シングルソフトピン素子の  $R$ - $H$  曲線は,  $H$  の正負に対し著しく非対称となる. この違いは, Stoner-Wohlfarth モデルによる磁化角度の計算から, デュアルソフトピン素子の自由層磁化の相対角度が  $\phi$  に大きくは依存しないためであることがわかった. これは磁気センサとしての実装時に利点となる特性である.

文献 [1] Nakatani *et al.* Appl. Phys. Lett. **121**, 192406 (2022). [2] Nakatani & Iwasaki, J. Appl. Phys. **132**, 223904 (2022).

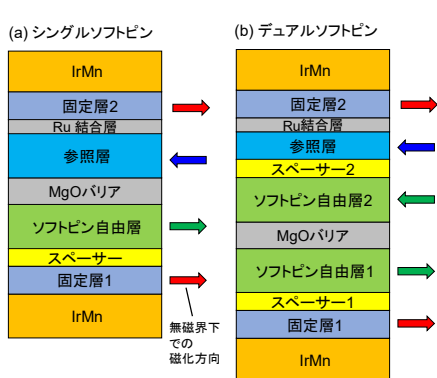


図 1 (a) シングルおよび, (b) デュアルソフトピン TMR 構造.

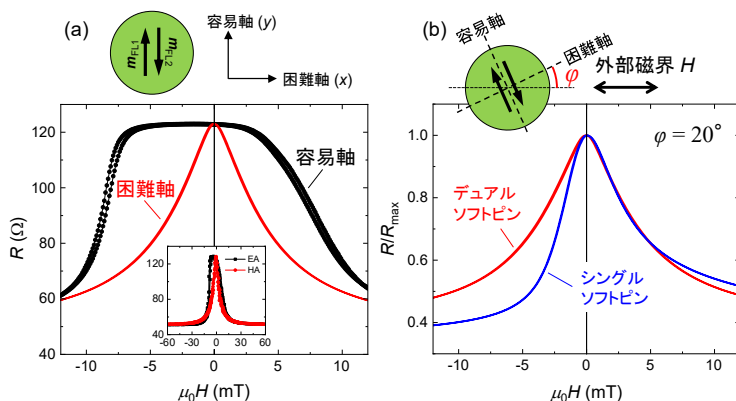


図 2 (a) デュアルソフトピン TMR センサの  $R$ - $H$  曲線, (b) 磁界方向が困難軸から  $20^\circ$  ずれた場合の  $R$ - $H$  曲線.

# 高感度 GMR センサの磁場顕微鏡応用時の MFC ゲイン

喜々津哲、東祥弘、黒崎義成、白鳥聡志、\*鈴木一博、\*照井裕二  
(株)東芝、\*東芝ナノアナリシス(株)

MFC Gain of High-Sensitive GMR Sensor Used for a Magnetic Field Microscope

A. Kikitsu, Y. Higashi, Y. Kurosaki, S. Shirotori, \*K. Suzuki, \*Y. Terui  
(Toshiba Corp., \*Toshiba Nanoanalysis Corp.)

## はじめに

偶関数 GMR を AC 磁界変調する高感度磁界センサを開発し、半導体チップなどにおける微弱な欠陥電流を磁界で可視化する磁場顕微鏡への適用を検討している<sup>2)</sup>。センサは GMR ラインの両端に矩形 MFC (Magnetic Field Concentrator) を設けたものを 4 組用いたフルブリッジ構成である。感度分布関数解析により、空間分解能は感度方向の 2 つの GMR ラインの間隔程度になることがわかった<sup>3)</sup>。サンプルからの磁界が MFC に均一に印加されないためであるが、そのような状況における MFC ゲインについても挙動を解析し、空間分解能を含めて実験との比較を行ったので報告する。

## 実験方法

解析手法はこれまでのもの<sup>3)</sup>と同様である。相反定理に基づき GMR の位置から発生する磁界を有限要素法によって計算し、磁界分布を感度分布とした。感度分布のピーク値をセンサ感度とみなし、MFC がある場合とない場合との感度比を MFC ゲインとした。Fig.1 に示す種々の MFC 形状に対して解析を行った。

## 結果および検討

Fig.1 に、均一磁界下での値で規格化した MFC ゲインを示す。MFC 形状によらずサンプルセンサ間距離と共に MFC ゲインは減少し、距離 1 mm では半分程度になることがわかる。サンプルを Cu 配線とし、そこから発生する電流磁界の MFC 直上 (0.1 mm) での分布を有限要素法で計算した結果を Fig.2 に示す。MFC 形状は Fig.1 の ref とした。サンプルセンサ間距離(z)が 1 mm の場合、磁界が MFC の全幅の 1/4 ほどに集中しているが、5 mm では半分ほどまでに広がっている。この磁界集中により MFC がフルに機能せずゲインが低下すると思われる。

これらの解析結果の確認のために、Cu 配線からの磁界を可視化する実験も行った。空間分解能や MFC ゲインの z 依存性は、上記の解析結果と定性的に同じであり、MFC 形状依存性も概ね再現することを確認した。

This work was supported by the Cabinet Office (CAO), Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), "Intelligent Processing Infrastructure of Cyber and Physical Systems" (funding agency: NEDO).

## 参考文献

- 1) S. Shirotori et. al.: *IEEE Trans. Magn.*, **57**, 4000305 (2021)
- 2) A. Kikitsu et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 62, SB 1007, (2023)
- 3) 喜々津 他: 第 46 回日本磁気学会学術講演会 06pD-3 (2022), A. Kikitsu et al.: *Intermag 2023*, POC-08 (2023)

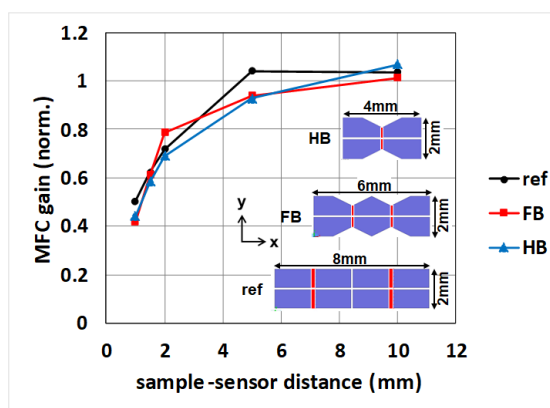


Fig.1 Normalized MFC gain as a function of sensor to sample distance, x.

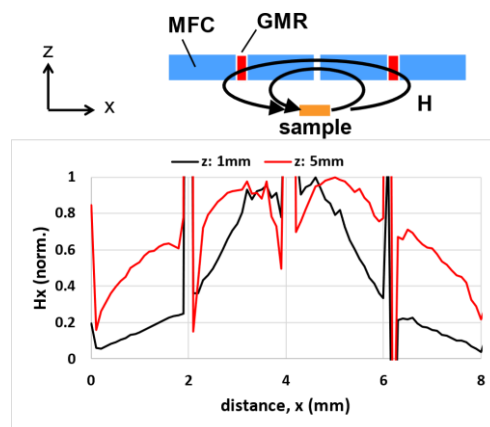


Fig.2 Distribution of magnetic field from a sample at the surface of MFCs.

## Enhancing Leaked Magnetic Field Measurement with Thin Film Magnetic Field Sensor

Loi Tonthat<sup>1</sup>, Ryota Suzuki<sup>1</sup>, Junichi Honda<sup>1</sup>, Kazuhiko Okita<sup>1</sup>, Jerdvisanop Chakarothai<sup>2</sup>, Katsumi Fujii<sup>2</sup>,  
Shin Yabukami<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tohoku University, Miyagi 980-8579, Japan

<sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo 184-8795, Japan

The leaked magnetic field generated by wireless charging systems and RFID card readers has presented significant challenges in ensuring the reliable operation of sensitive electronic devices and systems across various industrial and residential environments. Accurate measurement and characterization of leaked magnetic field sources are crucial for devising effective mitigation strategies. While conventional evaluation methods utilizing antennas, such as loop antennas, have been employed in previous studies <sup>(1)</sup>, they suffer from limitations in terms of frequency bandwidth and spatial resolution. In response, this study introduces a novel approach by utilizing the potential of thin film magnetic field sensors to overcome these limitations. Our high-frequency-driven thin film magnetic field sensors offer superior capabilities in detecting magnetic fields in the pT range while achieving spatial resolutions below a few millimeters at room temperature <sup>(2)</sup>. To validate the effectiveness of this approach, we constructed an experimental setup specifically designed for measuring leaked magnetic fields from wireless charging devices. The setup comprises a thin film magnetic field sensor, a signal generator, and a spectrum analyzer. Figure 1(a) depicts a circuit configuration where the leaked magnetic field is detected and analyzed in the spectrum analyzer. The AC magnetic field signal emitted by the wireless charging device is applied to the sensor, resulting in an AC modulated signal due to the change in sensor impedance. In this circuit, the sensor element is electrically connected to a microstrip line with a characteristic impedance of 50 ohms. Figure 1(b) illustrates an AM spectrum, where  $f_c$  represents the carrier frequency and  $f_s$  denotes the signal frequency. The intensity of the sideband is directly proportional to the impedance change of the sensor. Figure 1(c) shows preliminary experimental results, demonstrating a measured spectrum for a wireless charging device in the presence of a varying DC bias field applied along the longitudinal axis of the sensor. The internal noise floor was approximately -107 dBm, while the signal at a frequency of around 109 kHz reached a maximum value of approximately -83 dBm, corresponding to a DC bias field of 10 Oe. The outcomes show the efficacy of thin film magnetic field sensors in accurately capturing and analyzing leaked magnetic field. We are currently conducting detailed experiments to compare the results obtained with conventional antennas.

(1) Fujii, K., “Basic characteristics of magnetic field antenna factor of loop antennas for EMI measurements”, *IEICE Communications Express*, 11(10), pp.643-648 (2022).

(2) 村山芳隆, 小澤哲也, 藪上信, 石山和志, 荒井賢一, “10-13T 台の磁界検出分解能を有する高周波伝送線路型薄膜磁界センサ”, *日本応用磁気学会誌*, 31(1), pp.17-22 (2007).

**Acknowledgements:** This research was supported by Matching Research Support Project 2023 of Tohoku University and National Institute of Information and Communications Technology.

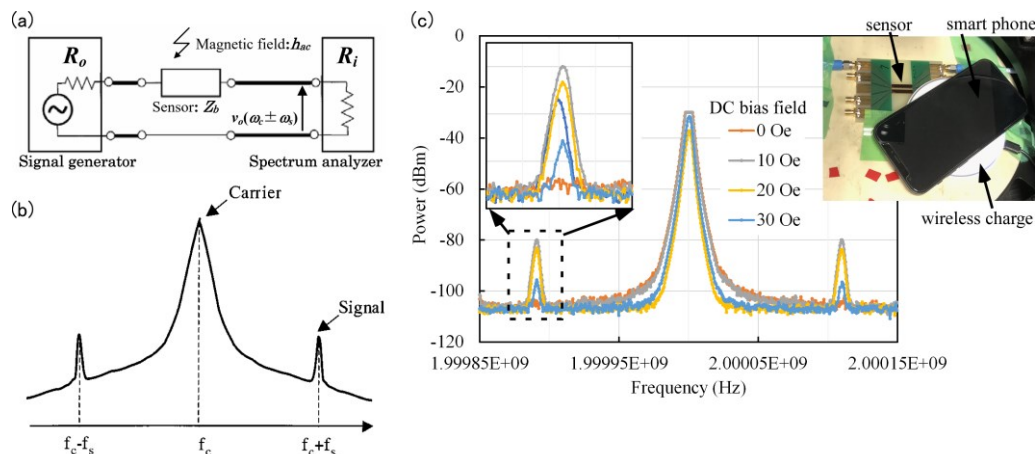


Fig. 1. (a) Equivalent circuit, (b) amplitude modulation spectrum, and (c) power spectrum for wireless charge.

# 直交フラックスゲート型歪センサの特性評価

千田健太<sup>1,2</sup>, 後藤太一<sup>2</sup>, 石山和志<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>東北大学大学院 工学研究科, <sup>2</sup>東北大学 電気通信研究所)

Evaluating characteristics of orthogonal fluxgate strain sensor

K. Chida<sup>1,2</sup>, T. Goto<sup>2</sup>, K. Ishiyama<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku University, <sup>2</sup>RIEC, Tohoku University)

## 1. はじめに

近年、橋梁の老朽化は深刻な問題<sup>1)</sup>であり、その健全性診断を目的として逆磁歪効果を用いた高感度歪センサの研究が行われている<sup>2)</sup>。本研究では僅かな歪に対して大きな磁束変化量を得るために断面積が大きなバルク材に着目し、直交フラックスゲート磁界センサに着想を得た新しい方式<sup>3)</sup>を提案してきた。直交フラックスゲート磁界センサは高周波電流を通電した磁性材料に磁界を印加する事で、磁気モーメントの方向が変化し、通電方向の磁化変化が生じる事を利用している。そこで、磁界の代わりに歪印加による逆磁歪効果を利用して磁気モーメントの方向を変化させ、出力を得るものである。

本報告では、直交フラックスゲート型歪センサの高感度化に向け、特性評価を行った結果を述べる。

## 2. 実験方法

アルミ基板(13 mm×26 mm×0.4 mm)上に幅方向異方性を誘導したアモルファスリボン(日立金属製 2605SA1、1 mm×26 mm×25 μm)を貼り付け、片側を固定し、カンチレバーを構成した。Fig.1には歪印加装置の構成を示す。自由端から5 mmの位置をマイクロメータで変位させ、逆磁歪効果により磁気モーメントの方向を変化させた。また、

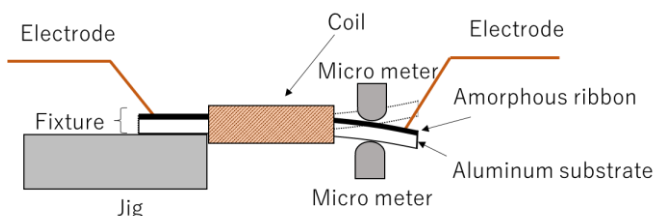


Fig.1. Configuration of strain applying device

アモルファスリボン中の磁気モーメントを長手方向に揃えるために、約 2 Oe のバイアス磁界を印加した。アモルファスリボンに高周波電流を通電する事で幅方向交流磁界を与えた際の磁化変化をセンサ素子に巻かれたコイル(300 ターン) で電圧として検出した。この際、幅方向交流磁界 1 周期の間に長手方向の磁化変化が 2 度生じるため、倍周期成分を測定した。高周波電流は正弦波(0.2 Arms)とし、周波数を 100、200、250、300、400、500 kHz と変化させて測定を行った。

## 3. 実験結果

Fig.2 にはセンサ素子に引張 266 ppm から圧縮 266 ppm まで 26.6 ppm 間隔で変形させた際のセンサ出力結果を示す。出力には周波数特性があり、250 kHz 付近で最大となった。出力電圧はファラデーの電磁誘導により磁化変化を時間微分しているため、250 kHz 以下では、周波数が増えるにつれ出力、変化量が増加したのに対し、250 kHz 以上では、コイルの浮遊容量に起因する共振により低下したと考えられる。250 kHz における最大の出力変化量は 6.72 mV/ppm であり、金属歪ゲージ(ゲージ率:2)の 6720 倍と極めて大きな値となった。今後は周波数以外の動作条件から高感度化に向けて検討する。

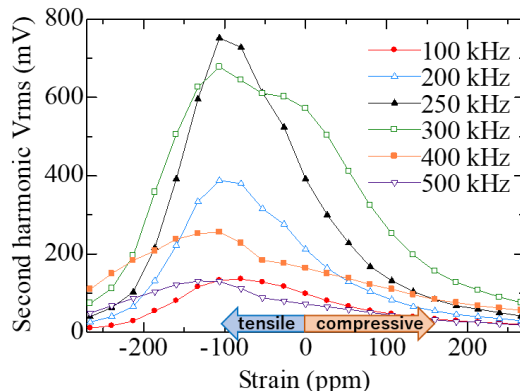


Fig.2. Result of static characteristics

## 参考文献

- 1) 国土交通省, 「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」(2014)
- 2) 曾良, 栢, 石山, 日本磁気学会論文特集号, 4, 41(2020)
- 3) 千田, 後藤, 石山, 令和 5 年電気学会全国大会 2-099(2023)

## 2軸MIセンサを用いた交通監視用車両計測装置に関する研究

姚 睿軒, 内山 剛  
(名古屋大学)

Vehicle Detection Device Using 2-Axis Magneto-Impedance Sensors for Traffic Monitoring

R. Yao, T. Uchiyama  
(Nagoya Univ.)

### はじめに

2021年12月時点で、日本の自動車の保有台数は8000万台を超えました。道路の監視と管理において、主要道路や高速道路などには多くのCCTVカメラや道路センサなどが設置されていますが、一般道路の監視装置の設置はまだ不十分です。理想的な道路監視装置は、設置が容易で、メンテナンスが簡単で、コストが低く、耐久性が高く、安定性が良いことが必要です。本研究では、~~2~~2軸の磁気インピーダンス(MI)センサを路脇に設置し、道路上を通行する車両による磁場の変動を計測しました。計測により得られたデータを適切なアルゴリズムによって処理し、リアルタイムで走行速度、車種、車長、道路の混雑状況などの情報を推定することを目的としました。センサ設置の高さ、センサから車体までの距離、通行車両の種類などが検知精度に与える影響についても検討しました。

### 実験方法

路脇設置型の検知方式において、車両の進行方向および垂直方向の磁場を測定するために、2軸のMIセンサを使用しました。一定間隔で配置された2組の2軸MIセンサを使用して、車速測定および道路の渋滞検知を行いました。日本の一般道路で一般的な3種類の車両(軽自動車、乗用車、ワゴン)について測定を行いました。異なるセンサの設置高さ、間隔、車体からの距離、走行状況(通常走行、追い越し、対向走行)における検知状況などのパラメータが実験結果に与える影響について検討し、最適な検知条件を確立しました。

### 実験結果

計測された車両による磁場波形の最大値と最小値の差(磁場変動量)、最大値と最小値の間の時間間隔(ピーク間時間: Time peak to peak)、2つのセンサ間で同じ波形の最大値を取るまでの時間間隔( $\Delta t$ )、および車両通過時の信号スペクトルを分析しました。センサの設置高さは、検出信号の磁場変動量に主な影響を与えます。時速50kmで走行している乗用車

の場合、センサを高さ66cmに設置すると、水平方向の磁場変動量は $12.97 \mu\text{T}$ 、垂直方向では $23.27 \mu\text{T}$ となります。一方、センサを高さ110cmに設置すると、水平方向の磁場変動量は $9.71 \mu\text{T}$ 、垂直方向では $15.05 \mu\text{T}$ に減衰します。ただし、センサの設置高さはピーク間時間には大きく影響していません。最小の設置高さ22cmから最大の設置高さ110cmまで、車両の長さが3.94m時速50kmで走行する乗用車の場合、ピーク間時間(Time peak to peak)の最大変化はわずか3msです(平均値: 236ms)。車体とセンサの距離は、磁場の変化量とピーク間時間の両方に影響を与えます。障害物を避けるとき車体とセンサの距離は約2.4mであり、対向車の場合は5mです。これにより、磁場の変化量はそれぞれ正常な走行時の17.19%、0.09%になります。また、ピーク間時間も約17.93%増加します。しかし、5mの距離ではピーク値を検出することはできなくなります。2つのセンサの最大値の時間差を利用して速度を計算しました。Fig.1に示す通り、センサの間隔が80cmの場合、同一の車両の速度推定精度は $\pm 3\text{km/h}$ の範囲で81.67%、 $\pm 5\text{km/h}$ の範囲で98.33%に達しました。

### 参考文献

- 1) S. Taghvaeyan et al., "Portable Roadside Sensors for Vehicle Counting, Classification, and Speed Measurement,"

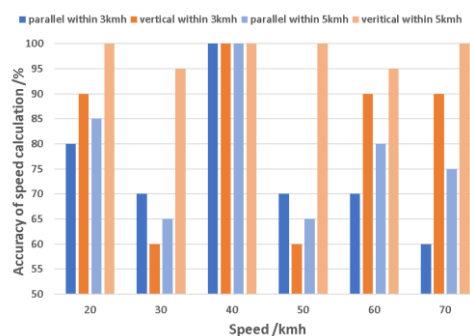


Fig.1 Accuracy of speed measurement at different speeds.

# シングルコイルフィードバック MI センサのダイナミックレンジ拡張効果の評価

井立聖二、内山剛  
(名古屋大学)

Evaluation of Dynamic Range Enhancement Effects through Single-Coil Feedback

S. Idachi, T. Uchiyama  
(Nagoya University)

## はじめに

磁気インピーダンス効果を利用した Magneto-Impedance (MI) センサは、磁気シールドルームを使用しない、生体磁気計測手法として期待されるセンサである。MI センサの磁場感度とダイナミックレンジはトレードオフの関係にあるため、生体磁気計測可能な磁場感度と磁気シールドルーム外における安定動作の両立が難しいという課題がある。その問題の解決手法として、MI センサ周りにフィードバックコイルを設置することによりバイアス磁場を発生させ、地磁気を打ち消す磁気フィードバックなどが存在する<sup>[1]</sup>。MI センサのピックアップコイルとフィードバックコイルを兼用し、シングルコイルによる磁気フィードバックを行う手法も報告されているが、低周波ノイズが増加してしまうという問題がある<sup>[2]</sup>。本報告では、パルス電流励磁方式 MI センサにシングルコイルフィードバック技術を適用することで、ダイナミックレンジの拡張を目指す。

## 実験方法

Fig. 1 にシングルコイルフィードバック MI センサの回路ブロック図を示す。センサヘッドは 400 ターンの 1 cm 長ソレノイドコイルに  $\phi 30 \mu\text{m}$  の FeCoSiB アモルファスワイヤを通すことで構成される。MI センサは -80 dB の磁気シールドボックス内で動作する。

還送差  $F=1+\alpha\beta$  を変化させた時の MI センサの磁場感度、及び磁気ノイズスペクトル密度を計測する。磁気ノイズスペクトル密度は、MI センサ出力電圧をバンドパスフィルタ (0.1 Hz ~ 1 kHz)、10 倍増幅器を介して FFT Analyzer により計測される。

## 実験結果

Fig. 2 では、還送差  $F$  の変化による、シングルコイルフィードバック MI センサの磁気特性の変化を示す。磁気フィードバックにより、磁気特性の線形範囲が拡張されていることが確認できる。Fig. 3 に MI センサの磁気ノイズスペクトル密度を示す。ノイズフロアは  $30 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (at 10 Hz) となり、磁気フィードバックの前後で変化しないことがわかった。これらの結果より、シングルコイルフィードバックによってダイナミックレンジを 120dB 以上に拡張することができ、ノイズの増加をなくすことができた。

## 参考文献

- 1) Han et al., Virtual Reality & Intelligent Hardware, 4(1), 38-54, 2022
- 2) Gudoshnikov et al., Phys. Status Solidi A, 211(5), 2014

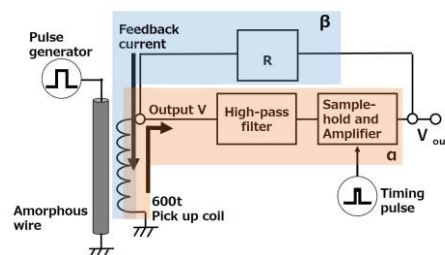


Fig.1 Block Diagram of Single Coil Feedback MI Sensor

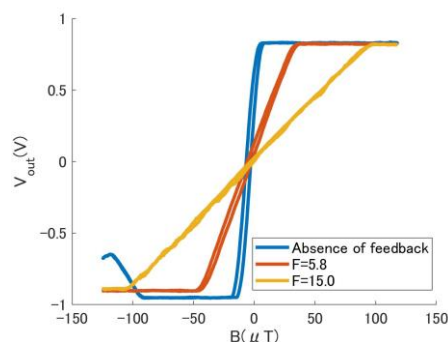


Fig.2 Change in the Magnetic Properties of a Single-Coil Feedback MI Sensor Due to the Feedback

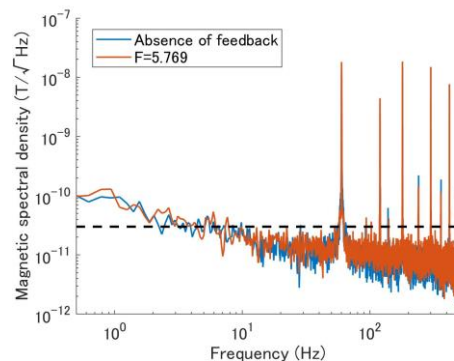


Fig.3 Comparison of magnetic noise spectral density for absence of feedback and  $F=5.8$ .



# Wiegand ワイヤの励磁・検出位置とパルス出力特性

鈴木丈士, 竹村泰司 (横浜国立大学)

Pulse voltage of Wiegand wire depending on positions of excitation and detection

Hiroto Suzuki, Yasushi Takemura

(Yokohama National University)

## はじめに

磁氣的二層構造を形成している Wiegand ワイヤは、外部磁界の印加により保磁力の低いソフト層を反転させた際に大バルクハウゼンジャンプという急峻な磁化反転が生じる<sup>1)</sup>。周りに検出コイルを取り付けることで一定電圧のパルス出力を得ることができ、小型発電素子への応用が期待されている<sup>2,4)</sup>。本稿では出力特性として磁壁発生位置や、パルス波高値、面積などの、Wiegand ワイヤの位置依存を考察した。

## 実験方法

Fig. 1 に示すように 1 mm 長、100 turn の検出コイルが 7 つ連続したものを作製し、0.25 mm 径、15.5 mm 長の Wiegand ワイヤの外周に設置した<sup>5)</sup>。ワイヤの両端にはフェライトビーズを装着した。そして 10 mm 径、2 mm 幅の小型円形の NdFeB 磁石を回転させ、ワイヤに交番磁界を印加した。この状態でパルスを 1000 回観測し、磁壁発生位置、波高値、半値幅、パルス面積を考察した。

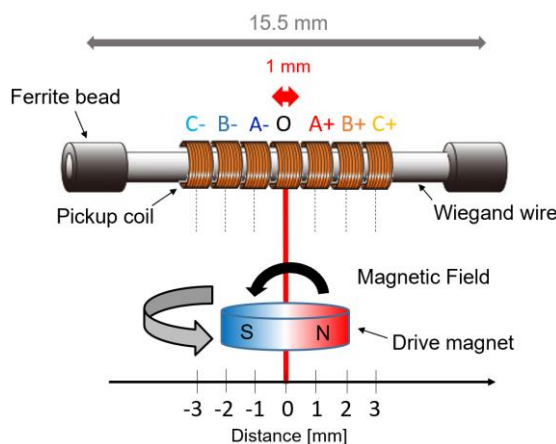


Fig. 1 Measurement setup.

## 実験結果

ワイヤの中心に磁界を印加したときの磁壁発生位置の分布を Fig. 2 に示す。中心のコイル O 付近で磁壁が多く発生していることが分かる。

また、各コイルのパルス面積の分布を Fig. 3 に示す。中心のコイル O 付近のパルス面積が大きい傾向にあることが分かる。

当日は、磁壁発生位置と波高値や面積の相関関係や、励磁条件を中心から変えた場合の測定結果など、より詳細な内容を報告する。

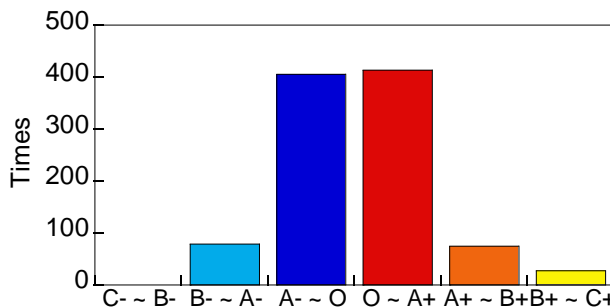


Fig. 2 Coils detecting the first pulse.

## 参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, (1974).
- 2) Products Wiegand sensor, POSITAL: [https://www.posital.com/jp/produkte/wiegand\\_sensors/Wiegand\\_Sensors.php](https://www.posital.com/jp/produkte/wiegand_sensors/Wiegand_Sensors.php)
- 3) S. Saggini, F. Ongaro, L. Corradini, A. Affanni, IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron., 3, 766, 2015.
- 4) Y. Takemura, N. Fujinaga, A. Takebuchi, and T. Yamada, IEEE Trans. Magn., 53, 4002706, 2017.
- 5) 鈴木, 梶原, 竹村, 令和 5 年 電気学会全国大会, 2-098, 2023 年 3 月.

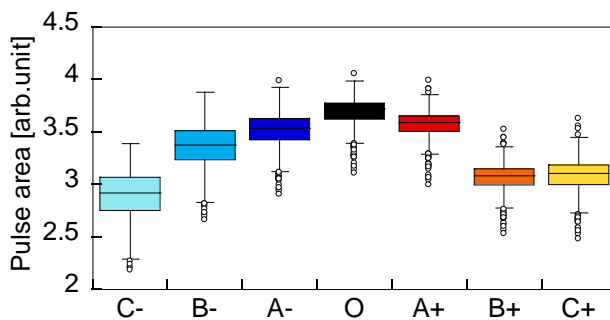


Fig. 3. Area of Wiegand pulse.