

## X線磁気円偏光発光顕微鏡を用いた方向性電磁鋼板の transverse 磁区の観察

稲見俊哉、菅原健人、中田崇寛\*、阪口友唯\*、高橋真\*  
 量研放射光、\*JFE テクノリサーチ)

Observation of transverse domains in grain-oriented electrical steel by means of  
 X-ray magnetic circularly polarized emission microscopy

T. Inami, K. Sugawara, T. Nakada\*, Y. Sakaguchi\*, and S. Takahashi\*  
 (QST, \*JFE-TEC)

## 1 はじめに

方向性電磁鋼板は変圧器の鉄心に用いられる軟磁性材料で、エネルギー損失(鉄損)と磁歪の改善が産業上の重要課題である。厚さ 300  $\mu\text{m}$  程度の鋼板で、圧延と再結晶化処理により、圧延方向が [001] 軸、表面が (110) 面という、非常に方向のそろった単結晶粒から構成される。また、この異方的な結晶構造を反映し、[001] 軸に平行に交互に磁化したストライプ状の磁区が、基本となる磁区構造である。

一方、実際の方向性電磁鋼板では、[001] 軸は表面と完全に平行ではなく、数度の傾きを持っている。この角度を  $\beta$  角といい、有限の  $\beta$  角では、表面磁荷による静磁エネルギーを低減するため、Fig. 1 に示すような、補助磁区と呼ばれる特徴的な構造が現れる。補助磁区は表面の lancet 磁区とこれをつなぐ内部の transverse 磁区から形成され、特に transverse 磁区は [100] または [010] 方向に磁化していると考えられており、方向性電磁鋼板の磁歪の原因となっている。

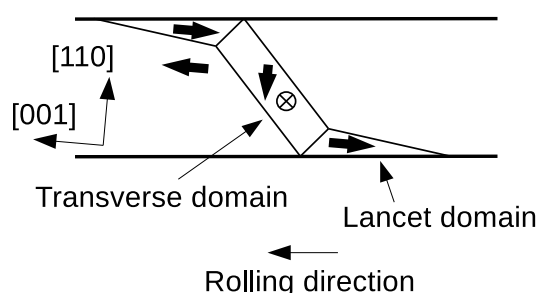
しかしながら、この transverse 磁区は、磁性体内部に存在する埋もれた磁区であり、表面の磁区を観察する磁気光学 Kerr 効果顕微鏡等では直接観測することはできない。最近、我々は、物質透過能の高い硬 X 線領域で 3d 遷移金属元素の磁性に感度の高い磁気光学効果、X 線磁気円偏光発光 (XMCPE) を利用した磁気顕微鏡の開発を行った<sup>1,2)</sup>。今回、この顕微鏡を用い、方向性電磁鋼板の磁区像を取得し、transverse 磁区の観察に成功したので報告する<sup>3)</sup>。

## 2 結果および考察

実験は大型放射光施設 SPring-8 の量研専用ビームライン BL11XU で実施した。入射 X 線のエネルギーを 26 keV とし、単色化した放射光 X 線を屈折レンズで 10  $\mu\text{m}$  角に集光し、試料(市販の方向性電磁鋼板)に照射した。試料から放出される特性 X 線 ( $\text{FeK}\alpha$  線)は、ミラーで受光、平行化し、下流の円偏光解析器で円偏光度を評価した。得られた円偏光度から発光領域の磁化を見積もり、さらに試料を走査し、2次元の磁区像を取得した。

今回の実験の特徴としては、出射 X 線方向に着目して測定したことがあげられる。XMCPE では出射 X 線方向に射影した磁化を検出する。そこで、試料表面と入射 X 線、および試料表面と出射 X 線のなす角を入射角  $\theta_{in}$  および出射角  $\theta_{ex}$  と定義し、 $(\theta_{in}, \theta_{ex}) = (90^\circ, 70^\circ)$ 、 $(70^\circ, 90^\circ)$ 、 $(50^\circ, 110^\circ)$  の 3 つの条件で、lancet 磁区の根本近傍を測定した。 $\theta_{ex}$  を  $90^\circ$  近傍にすることにより、試料表面に垂直な磁化成分を持つ transverse 磁区に対する感度を高めることが目的である。特に、 $\theta_{ex} = 90^\circ$  では、ストライプ状の磁区や lancet 磁区とのコントラストを大きくとれるため、transverse 磁区を強調した磁区像を得ることが出来た。

講演では、得られた 2次元磁区像を示すとともに、今回観測できた transverse 磁区の特徴について述べる。また、簡単な磁区モデルを計算で得られた装置分解能で畳み込んだ結果と比較し、補助磁区についてある程度定量的な議論を行う予定である。



**Fig. 1** Side view of a supplementary domain. The basic slab domain and the lancet domains are magnetized along the [001] direction, whereas the transverse domain is magnetized along the [100] direction.

## References

- 1) T. Inami: *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 137203 (2017).
- 2) K. Sugawara *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **130**, 113901 (2021).
- 3) T. Inami *et al.*: *J. Appl. Phys.*, submitted.

# 光周波数コムのフェムト秒レーザーパルスを用いた Kerr 効果顕微鏡

目黒 栄, 齊藤 伸  
(ネオアーク株式会社, 東北大)

Kerr Effect Microscope using Femtosecond Laser Pulses of Optical Frequency Comb

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

## はじめに

レーザー光は直進性に優れ出力が大きいという特長を有するが、観察用光源に用いた場合、光学素子端面の反射光による干渉縞や散乱光の干渉によるスペックルノイズが発生して観察像の偏光情報を乱すという問題があった。これらはコヒーレンシーの問題であり、レーザー光が空間・時間的に重なり合うことにより生じる。我々は Kerr 効果顕微鏡の光源にフェムト秒レーザーである光周波数コムを用いることで光の重なりを時間的に回避し干渉縞やスペックルノイズを低減した磁区像の取得に成功したので報告する。

## 原理

Fig. 1 に一般的なイメージセンサーの構造を示す。イメージセンサーには撮像素子を保護するための窓ガラスが取り付けられており、入射した光 (①) は窓ガラスのセンサー側の面で反射され (②)、さらに入射側の面で再び反射されて (③)、撮像素子に入射する。窓ガラスの両面はほぼ平行なことから入射光①と窓ガラスの反射光③が干渉することにより干渉縞が生じる。ここで窓ガラスの厚みを 1 mm、屈折率を 1.5 とすると反射光③は入射光①に対して 10 psec.遅れてセンサーに入射することになる。Fig. 2 は干渉縞低減の原理を説明したタイミングチャートである。(a) のように連続発振レーザー (CW) では入射光①と反射光③が常に重なり合うため干渉が生ずる。一方、パルス幅が前述の遅延時間 10 psec.より短い 0.1 psec. = 100 fsec. の光源を用いれば時間的な重なりを無くすることができるためコヒーレント光源であっても干渉縞は生じないことになる。

## 実験結果

Fig. 3 に YIG 単結晶の極 Kerr 効果による磁区像を示す。(a) は波長 1550 nm の分布帰還型半導体レーザーを CW 駆動した場合の観察像である。磁区像に横方向の干渉縞が重畳していることがわかる。また、視野外の周辺部に散乱光によるスペックルノイズが多数生じている。(b) は波長 1550 nm の光周波数コムを用いた場合の磁区像である。干渉縞の重畳は見られず、スペックルノイズも低減されていることがわかる。

## 今後の展望

光周波数コムを用いればコヒーレント光源であっても空間・時間的な光の重なりを抑制でき、干渉縞やスペックルノイズを低減した磁区像を取得できることを示した。本手法では、外部からの電気信号に同期させてフェムト秒レーザーを発振させられるため、光源側でのストロボ法が適用できる。今後 GHz~THz 動作素子のストロボ磁区観察を行なう予定である。また、波長変換による 775 nm, 517 nm 光による磁区観察も計画している。

## 参考文献

- 1) 齊藤 伸, 目黒 栄 他, 第 30 回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 11pB-1 (2006).

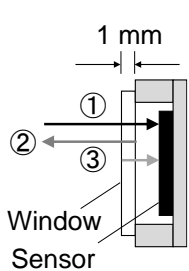


Fig. 1 Structure of image sensor.

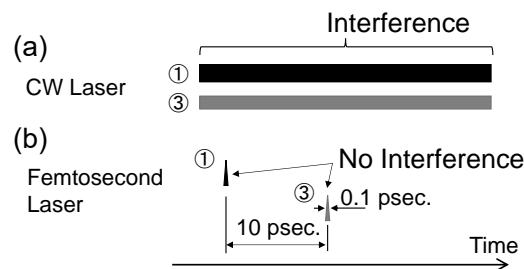


Fig. 2 Timing chart of light incident on sensor with (a) CW Laser, (b) Femtosecond Laser.

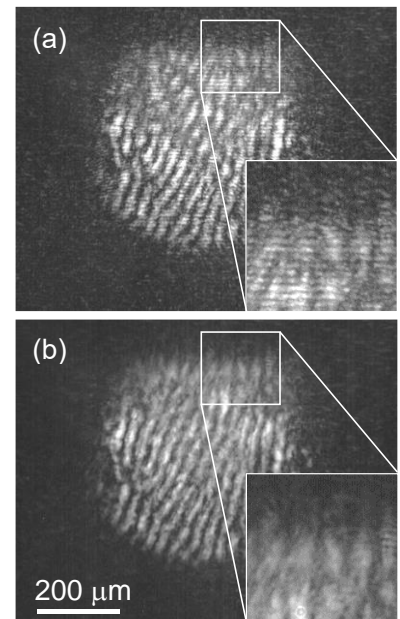


Fig. 3 Magnetic domain image of YIG single crystal with (a) DFB laser, (b) optical comb.

# 磁気光学イメージングプレートを用いた 絶縁被覆された方向性電磁鋼板の磁区観察

坂口穂貴、目黒 栄\*、齊藤 準\*\*、石橋隆幸  
(長岡技科大、\*ネオアーク株式会社、\*\*秋田大)

Magnetic domain observation of grain-oriented electrical steel with insulation coating  
using magneto-optical imaging plate

H. Sakaguchi, S. Meguro, H. Saito, T. Ishibashi  
(Nagaoka Univ. of Tech., \*Neoark Corp., \*\*Akita Univ.)

## 1. はじめに

主に変圧器などの静止機器に使用される方向性電磁鋼板は、腐食防止や渦電流低減のため表面に絶縁被膜を形成している。この被膜は鋼板への応力付与による磁区構造の制御も行っており鉄損特性の改善に寄与している。しかし、一般に用いられている Kerr 効果顕微鏡では、絶縁被膜の除去や表面研磨が必要であり、これら処理の影響で本来の磁気特性とは異なることが懸念されている。一方、磁気光学イメージングプレート(MOIP)を用いた MO イメージング<sup>1)</sup>では、絶縁被膜がある状態や無研磨の状態でも磁区観察が可能である。さらに、我々が開発した漏洩磁場の 3 次元分布計測技術も利用可能である<sup>2)</sup>。今回は、表面未処理の電磁鋼板について、絶縁被膜の上から磁区観察を行った結果について報告する。

## 2. 実験方法

Fig. 1 に実験に用いた光学系を示す。光源に赤色 LED を用い、MOIP に直線偏光を入射した。MOIP はガラス基板上に有機金属分解法により Bi 置換磁性ガーネット薄膜を作製し、さらに反射膜を形成したものをを用いた。測定対象には、絶縁被膜に覆われた表面未処理の厚み 0.23 mm の方向性電磁鋼板 (JFE Steel Corp., 23JGH095) を用い、MOIP と密着させて固定した。2 倍の対物レンズ (Mitutoyo, M Plan Apo 2 $\times$ ) を用い、シングルショットで定量測定が可能な偏光カメラ (Baumer, VCXU-50MP) で撮影した。試料の面内方向に磁場を印加し、露光時間 10 ms、積算回数 500 回で撮影した。得られた偏光方位角の画像は、消磁状態で撮影した画像と差分を取得した。

## 3. 結果と考察

印加磁場 299 Oe で撮影した方向性電磁鋼板の MO 像を Fig. 2 に示す。絶縁被膜に覆われた試料でも幅 0.2 mm 程度のストライプ磁区が明瞭に観察され、磁場の減少に伴う磁区の移動や細分化も確認できた。これらのコントラストは、各磁区の磁化が試料表面に対して傾いていることで生じる漏洩磁場の影響だと考えられる。このように、Kerr 効果顕微鏡では不可能な絶縁被膜に覆われた試料の磁区観察が MO イメージングでは可能である。

### 参考文献

- 1) T. Ishibashi, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 44, 108-116 (2020).
- 2) H. Sakaguchi, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 46, 2, 2203R002 (2022).

謝辞 本研究の一部は、JSPS 二国間交流事業 (JPJSBP 120208805)、名古屋大学未来材料・システム研究所共同研究の支援を受けて実施された。

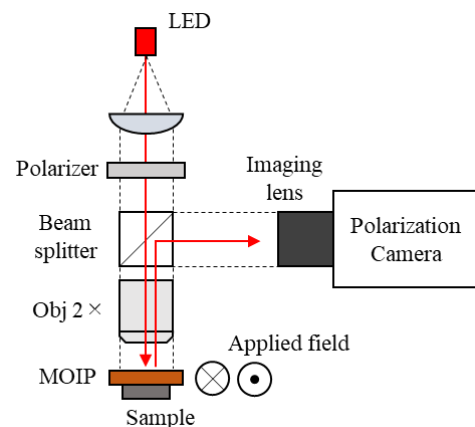


Fig. 1 Optical setup for MO imaging using MOIP.

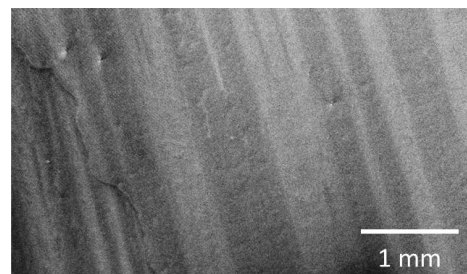


Fig. 2 MO image of a grain-oriented electrical steel with an insulation coating.

## DPC-STEM 法による磁壁幅の直接計測

村上善樹<sup>1</sup>、関岳人<sup>1,2</sup>、木下昭人<sup>3</sup>、庄司哲也<sup>3</sup>、幾原雄一<sup>1,4</sup>、柴田直哉<sup>1,4</sup>

(<sup>1</sup>東京大学大学院工学系研究科総合研究機構, <sup>2</sup>JST さきがけ, <sup>3</sup>トヨタ自動車東富士研究所先端材料技術部, <sup>4</sup>ファインセラミックスセンターナノ構造研究所)

Direct measurement of magnetic domain wall width by DPC-STEM

Y. O. Murakami, T. Seki, A. Kinoshita, T. Shoji, Y. Ikuhara, N. Shibata

<sup>1</sup>Institute of Engineering Innovation, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, <sup>2</sup>JST presto,

<sup>3</sup>Advanced Material Engineering Division, Toyota Motor Corporation, Susono, Shizuoka, Japan,

<sup>4</sup>Nanostructures Research Laboratory, Japan Fine Ceramics Center, Atsuta-ku, Nagoya, Japan

**はじめに**：走査透過型電子顕微鏡法(Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM)は材料の局所構造・組成分布を高い空間分解能で観察できる手法である。さらに Fig.1 に示す分割型検出器を STEM に導入することにより、試料中の磁場分布を実空間で可視化する微分位相コントラスト(differential phase contrast: DPC) 法[1]を利用することができる。DPC 法と近年開発された無磁場環境原子分解能 STEM[2]を組み合わせることで、原子磁場の直接観察までが可能になった[3]。また、従来 DPC 像には電子回折に起因する電磁場以外のコントラストが重畳する問題があったが、電子線を試料に対してわずかに傾斜させ、さまざまな回折条件の DPC 像を平均化することで精度の高い磁場計測が可能となった[4,5]。さらに DPC 法による磁場観察は、他の STEM 法による構造観察を同時あるいは同一視野で行えるため、磁性材料中の磁気構造と微細組織の相互作用の解明への寄与が期待される。そこで、本研究では DPC-STEM 法による磁気構造観察と、STEM-EELS による組成分布観察を組み合わせ、組成に依存して変化する磁壁幅の直接計測を行った。

**実験方法**：Nd-Fe-B 系異方性磁石に La を浸透させ主相結晶粒内に Nd の濃度勾配を施した La 置換型試料と、La 浸透のない従来型試料に対し、それぞれ収束イオンビーム(FIB)装置を用いて TEM 試料を作製した。La 置換型試料では、DPC 観察と EELS 観察により同一結晶粒内の Nd-rich 領域と Nd-poor 領域をまたぐ 1 本の磁壁を特定し、それぞれの領域で高倍率の DPC 像を取得した。従来型試料で観察された磁壁に対しても同様に高倍率 DPC 像を取得した。

**実験結果**：Fig.2 に La 置換のない従来型試料で取得した磁壁の高倍率 DPC 像を示す。Nd の濃度の異なる計 3 つの領域で同様の像を取得し、それぞれ磁壁に沿った平均化により得たプロファイルに対して磁壁の解析解  $y = \tanh(x/d)$  でフィッティングを行った。回折コントラストの影響やフィッティング領域の影響も考慮し誤差を算出した。計測された磁壁幅  $w = \pi d$  と、連続体モデル  $d = \sqrt{A/K}$  で交換定数が一定と仮定して算出した結晶磁気異方性の相対値を Table.1 に示す。磁壁幅が Nd の濃度変化に応じて有意に変化することが明らかとなり、組成変化に伴う磁気異方性の局所変化を捉えることに成功した。詳細は講演にて述べる。

**参考文献**：1) N. Shibata *et al.*, Acc. Chem. Res., (2017).

2) N. Shibata *et al.*, Nat. Commun. (2019)

3) Y. Kohno *et al.*, Nature, (2022).

4) Y. O. Murakami *et al.*, Microscopy, (2020)

5) S. Toyama *et al.*, Ultramicroscopy, (2022)

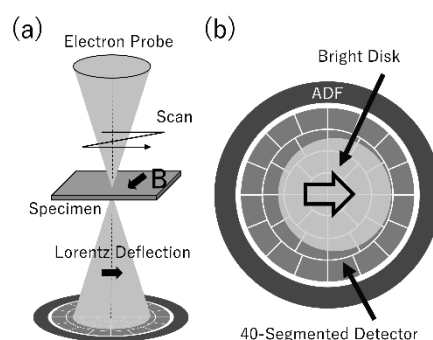


Fig. 1 (a) DPC STEM の概略図。 (b) 40 分割の分割型検出器と ADF 検出器の概略図。中心の白いディスクは透過電子ディスクを表す。

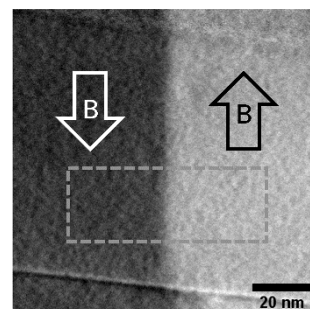


Fig. 2 磁壁計測のため取得した高倍率 DPC 像。矢印は磁場の方向を、点線枠はフィッティングに用いた ROI の一例を示す。

Table 1. 磁壁幅計測値と算出された結晶磁気異方性

試料		磁壁幅 計測値(nm)	結晶磁気異 方性相対値
従来型試料		$8.01 \pm 0.6$	1
La 置換 試料	Nd-rich 領域	$10.3 \pm 0.7$	0.62
	Nd-poor 領域	$11.1 \pm 0.6$	0.54

# 疎サンプリング像復元を応用した スピン SEM による高速磁区イメージング

今井悠太<sup>1</sup>、孝橋照生<sup>1</sup>、小林光俊<sup>1</sup>、藪修平<sup>2</sup>、片根純一<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>株式会社日立製作所、<sup>2</sup>株式会社日立ハイテク)

Application of compressed sensing to high-throughput magnetic domain imaging by spin-SEM  
Yuta Imai<sup>1</sup>, Teruo Kohashi<sup>1</sup>, Mitsutoshi Kobayashi<sup>1</sup>, Shuhei Yabu<sup>2</sup> and Junichi Katane<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup> Hitachi, Ltd. R&D group, <sup>2</sup> Hitachi High-Tech Corporation)

## 背景と目的

スピン偏極走査電子顕微鏡 (スピン SEM) は、走査電子顕微鏡を用いて強磁性体試料表面をプローブ電子線で走査し2次電子のスピン偏極度をマッピングすることで、磁区像を得ることのできる装置である[1,2]。我々はスピン SEM の課題である像 S/N の向上および撮像スループットの改善を目的に、疎サンプリング撮像と圧縮センシングの概念を応用した画像復元技術の適用を試みた。

## 実験方法

Motto 検出器を備えたスピン SEM において、観察領域の限られた画素のみにプローブ電子線が照射されるようにスキャンを設定して像取得を行い、疎サンプリング像を得た。得られた疎サンプリング像に対して、畳み込みニューラルネットワークを用いた深層学習ベースのアルゴリズムを用いて画像復元を行った。

## 結果

Fig.1 に鉄単結晶(001)面のスピン SEM による磁区像観察に本手法を適用した結果を示す。(a)および(d)は通常撮像の X 方向、Y 方向の磁区像であり、鉄単結晶の磁気異方性に準じたコントラストが現れていることが分かる。(b)および(e)は試料の同じ領域で、観察領域全体の 1/10 の画素のみに電子線照射取得した疎サンプリング像であり、通常撮像の 1/10 の撮像時間で取得したものである。これらの疎サンプリング像(b,e)を基に計算機処理した復元像を(c)および(f)にそれぞれ示す。結果として、復元像(c,f)においても通常撮像画像(a,d)にみられるような磁区コントラストが良く再現されていることが確認できる。また、通常撮像画像(a,d)から導出した磁化方向のベクトルマップを(g)に、疎サンプリング復元像(c,f)から導出したベクトルマップを(h)に示す。復元像から導出したベクトルマップ(h)においても、通常撮像(g)と比較し、同様の領域、角度が推定できていることが確認できた。また、復元像からの導出結果はノイズ低減され同一磁区での磁化ベクトルの揺らぎが小さい画像が得られている。

このように本手法を用いることで、通常撮像の 1/10 の撮像時間で、試料の磁化方向判別に十分な像が得られることが分かった。本手法は材料内の磁化の大きさ、相判別にも適用可能なことが示唆される。

## 参考文献

- 1) Koike et al., Jpn. J. Appl. Phys. 23. 3., L187-188. (1984).
- 2) Koike et al., Microscopy 62. 1., 177-191. (2013).

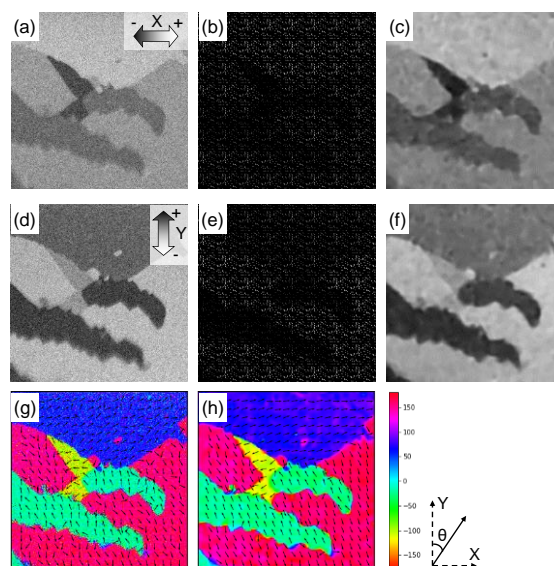


Fig 1. Reconstruction of magnetic domain image with 10% available pixels of Fe single crystal by spin-SEM: (a, d) original image of X- and Y-direction; (b,e) 2D sparse image (10% sampling); (c,f) reconstructed image from (b) and (e); (g,h) vector map from the original and reconstructed images.

# 超常磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による 垂直磁気記録ヘッドの広帯域・高周波磁場イメージング

鈴木 魁智、M. Makarova、園部 博、松村 透、齊藤 準  
(秋田大理工)

Wideband high-frequency magnetic field imaging of perpendicular magnetic recording head  
by alternating magnetic force microscopy with superparamagnetic tip

K. Suzuki, M. Makarova, H. Sonobe, T. Matsumura, H. Saito  
(Akita Univ.)

## はじめに

ハードディスクドライブの高密度化には、主要部品である磁気記録ヘッドの動作時の高周波磁場を高空間分解能で観察することが有効となる。このため我々は、試料表面近傍の交流磁場を高空間分解能で観察可能な、交番磁気力顕微鏡(Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM)を開発し、加えて探針磁化が印加される磁場に比例する超常磁性探針を用いて、磁場より近距離的な力となる磁場エネルギーを検出することで高い空間分解能を実現している<sup>1)</sup>。本報告では、超常磁性探針において高い周波数までの磁場応答性および異なる磁場周波数での磁場応答の重ね合わせが可能であることに着目して、垂直磁気記録ヘッドについて、100 kHz から磁気記録ヘッドの動作周波数付近の 1 GHz までの交流磁場イメージングを行った結果を述べる。

## 実験方法

探針には Co-GdO<sub>x</sub> 系超常磁性探針(磁性膜厚 100nm)を用い、垂直磁気記録ヘッドを観察した。磁気記録ヘッドの高周波磁場を A-MFM が検出できる周波数に変換するために、磁気ヘッドには高周波数  $\omega_H$  の電流を低い周波数  $\omega_L$  で振幅変調した電流を印加して、振幅変調磁場  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0^{ac} (1 + \alpha \cos(\omega_L t)) \cos(\omega_H t)$  を発生させた。ここで  $\omega_H$  はキャリア周波数、 $\omega_L$  は変調周波数、 $\alpha$  は振幅変調率である。探針磁化  $\mathbf{m}^{tip}$  は探針に印加される磁場に比例するので ( $\mathbf{m}^{tip} = \chi \mathbf{H}$ )、磁気力勾配  $F'_z = \partial^2 (\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) / \partial z^2$  の  $\omega$  成分は、 $F'_z(\omega_L) = \alpha \chi (\partial^2 (\mathbf{H}_0^{ac})^2 / \partial z^2) \cos(\omega_L t)$  となり、交流磁場の 2 乗の勾配になることから交流磁場エネルギーの勾配による交番磁気力が発生する。この交番磁気力を振動した探針に加えることで発生する探針振動の周波数変調信号を、復調後にロックイン検出することで高周波磁場のイメージングを行った。観察では、 $\omega_H$  を 100 kHz から 1 GHz まで変化させ、 $\omega_L$  は 89 Hz、 $\alpha$  は 0.9 で一定とした。

## 実験結果

Fig. 1(a), (b), (c)に各々、交流磁場周波数  $\omega_H$  が 100 kHz, 10 MHz, 1 GHz の場合の主磁極付近の A-MFM 像 (Lock-in X 像) を示す。図中の破線は垂直磁気記録ヘッドの主磁極の輪郭を示している。全ての周波数で主磁極から発生する交流磁場が明瞭に観察できることがわかる。像の明暗コントラストは交流磁場エネルギーの周期的な時間変化の方向が逆であることを示しており、明部で磁場エネルギーが増加しているときには、暗部で磁場エネルギーが減少している。主磁極付近の明部と左右の暗部は隣り合っていることから、主磁極表面から発生した磁場エネルギーが左右の主磁極の側断面に吸い込まれている<sup>2)</sup> ことがわかる。講演ではこれらの詳細について述べる。

## 参考文献

- 1) 今, 齊藤 他, 第 44 回日本磁気学会学術講演概要集, 15pD-1, 125 (2020).
- 2) P. Kumar, H. Saito et al., J. Appl. Phys, 123(2018) 214503

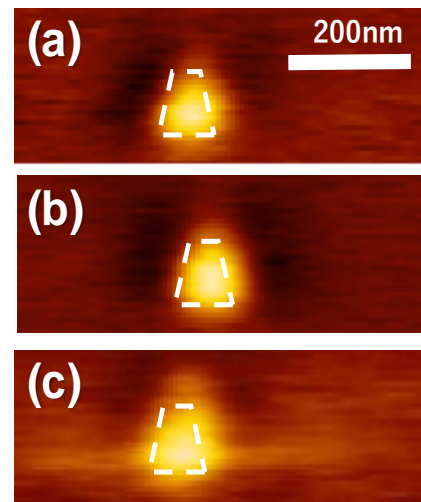


Fig. 1 A-MFM images of perpendicular magnetic recording head by using a Co-GdO<sub>x</sub> superparamagnetic tip. [(a) 100 kHz, (b) 10 MHz, and (c) 1 GHz]

# 交番磁気力顕微鏡を用いた高周波磁場イメージングに向けた マイクロ波磁場照射機構の開発

梅田 尚優希、M. Makarova、園部 博、松村 透、齊藤 準  
(秋田大理工)

Development of microwave radiation system for high frequency magnetic field imaging  
by using alternating magnetic force microscopy

N. Umeda, M. Makarova, H. Sonobe, T. Matsumura, H. Saito  
(Akita Univ.)

**はじめに** 近年、磁気記録におけるマイクロ波アシスト方式や高周波無線通信技術の進展等により、マイクロ波領域における磁性材料の微視的な強磁性共鳴現象や電磁波吸収特性等の理解が重要になってきている。このため我々は、これまでに開発した、交流磁場を試料表面で単独検出可能な高空間分解能を有する交番磁気力顕微鏡において、高周波磁場イメージング技術の開発を進めている。高周波磁場イメージングを種々の磁性材料に応用するには、観察試料にマイクロ波磁場を照射する機構を交番磁気力顕微鏡に組み込む必要がある。このため我々はこれまで導波管スリットアンテナに着目して周波数特性のよい進行波型アンテナを目指してきたが、導波管内の定在波をなくすることができず照射マイクロ波強度の増大に課題があった<sup>1)</sup>。

本研究では、新たに、電磁波の導波管の一端を開放した開口型アンテナに金属反射板を付加することで、試料台の背面からマイクロ波を照射できる機構を開発したのでその結果を報告する。

**結果** Fig. 1 に試作したマイクロ波磁場照射機構の模式図を示す。マイクロ波増幅器からの出力を、一端を開放した導波管(WRJ220)に同軸導波管変換器を用いて接続した。導波管は TE<sub>10</sub> モードで使用し、その周波数帯域は 17.6~26.7 GHz である。導波管を反射波のない進行波アンテナとするため、インピーダンス整合用のスリットを広壁の中央に設け、スリット部にマイクロメータに固定した金属針を接触させた状態で、マイクロ波増幅器の出力端子に接続した方向性結合器の反射電力が最小になるように、金属針挿入位置と挿入深さを調整してインピーダンス整合を行った。

Fig. 2 に導入電力に対する進行波電力の比率の周波数依存性を示す。この比率は方向性結合器で投入電力と反射波電力を測定して求めた。全ての周波数で進行波電力の比率を 99.9% 以上に調整できることがわかった。

このインピーダンス整合された導波管アンテナから放射されるマイクロ波を、図のように金属薄膜を用いた反射板に 45° 入射させることで、反射したマイクロ波を試料台の背面から照射する機構を試作した。マイクロ波の電場と磁場の方向は図の通りであり、垂直磁化膜および面内配向磁化膜については、強磁性共鳴に必要な、磁化容易方向と直交方向からマイクロ波磁場を印加することができる。

現在、このマイクロ波磁場照射機構の交番磁気力顕微鏡への組み込みを進めており、振幅変調マイクロ波を用いることで、試料台上で電磁場を検出できることを確認できている。開発したマイクロ波照射源は微視的な強磁性共鳴や電磁波吸収等のイメージングに資するものと考えている。学会では、本機構の詳細と共に、試料台に種々の磁性薄膜を設置した場合の電磁波強度の計測結果についても報告する予定である。

## 参考文献

- 1) 佐藤 駿介, 齊藤 準, 他, 第 45 回日本磁気学会学術講演概要集, 02aA-2, 141 (2021)

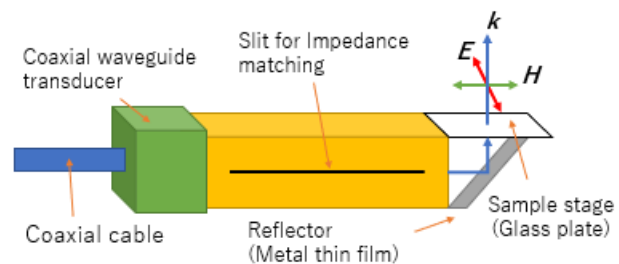


Fig. 1 Schematic figure of present microwave radiation system.

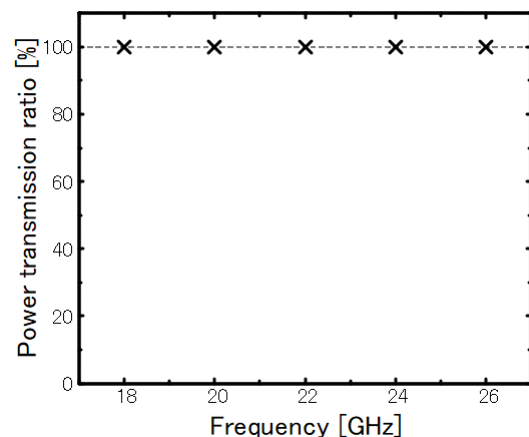


Fig. 2 Frequency response of Power transmission ratio.

# 超常磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による 永久磁石の直流磁場の定量イメージング

江原 廉、三浦 健太、松村 透、齊藤 準

(秋田大理工)

Quantitative magnetic field imaging by using alternating magnetic force microscopy with  
superparamagnetic tip

R. Ehara, K. Miura, T. Matsumura, H. Saito

(Akita Univ.)

**はじめに** 磁気力顕微鏡は磁場勾配を検出しているため、空間分解能は優れるものの測定量の定量性に劣ることが課題であった。我々は昨年、試料表面の磁気力を高空間分解能で単独検出できる交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM) に、超常磁性探針 (探針磁化が磁場印加により磁場方向に印加磁場強度に比例して発生) と、交流磁場を発生する空芯コイル (磁場の空間分布が既知) により超常磁性探針を励磁することで、直流磁場の定量イメージング法を提案した。また、永久磁石を観察試料として、一様な外部直流磁場を印加することで、磁場値の校正の可能性を示した。本報告では、永久磁石試料の A-MFM 像から抽出した磁場像について、上記の手法を用いて、等高線図を重ねることで磁場の定量イメージングを試みた結果を述べる。

**実験方法** 観察試料として表面磁場強度が 2.3[kOe]程度の市販の NdFeB 磁石を用いた。超常磁性探針は Si 探針母材に Co-GdOx 超常磁性薄膜を 100 nm 成膜して作製した。超常磁性探針の励磁には 2 層の空芯コイル (内径、外径等) を使い、試料の観察面が空芯コイルの高さの中央になるように設置し、試料面に垂直方向の交流磁場  $H_z^{ac} \cos(\omega t)$  を前記の探針に印加した。ここで、探針にかかる磁場  $H$  は試料から発生する直流磁場を  $H^{dc}$  とすると、

$H = H^{dc} + H_z^{ac} \cos(\omega t) e_z$  になるため、探針磁化  $m^{tip}$  は磁場に比例する ( $m^{tip} = \chi H$ )。そこで、A-MFM が検出する磁気力勾配  $F_z' = \partial^2 (m^{tip} \cdot H) / \partial z^2$  の  $\omega$  成分は、 $F_z'(\omega t) = 2\chi(\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2) \cos(\omega t)$  となる。前式を展開することで現れる空芯コイルの  $H_z^{ac}$ ,  $\partial H_z^{ac} / \partial z$ ,  $\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2$  の値は既知であるため、これらを定数として、磁場に係わる試料の  $H_z^{dc}$  像、 $\partial H_z^{dc} / \partial z$  像、 $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$  像を、探針伝達関数に基づく空間周波数フィルター処理を行うことにより抽出した (参考文献)。試料の  $H_z^{dc}$  像の磁場値の校正は、空芯コイルの下に設置した電磁石による一様な直流磁場より求められた  $H_z^{dc}$  像の信号強度の変化量を用いて行なわれた。

**実験結果** Fig1(a) に外部直流磁場がゼロの時の試料の A-MFM 像 ( $\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2$  像) を、Fig1(b) に Fig1(a) から抽出した試料の磁場像 ( $H_z^{dc}$  像) を示す。なお、探針試料間距離は 200 nm である。図 (b) の  $H_z^{dc}$  像には、校正された磁場値の等高線をあわせて示している。この磁場値の校正は、外部直流磁場 (-300[Oe]) を印加して測定した A-MFM 像から抽出した  $H_z^{dc}$  像の等高線において、ゼロ値線での磁場値を 300[Oe] として、元の像信号を磁場値に変換することにより行われた。-300[Oe] 印加においては、測定した  $\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2$  像が磁場印加前後で変化しないことから、試料の磁化状態は直流磁場印加で変化していないことを確認している。なお、A-MFM 像から抽出した  $H_z^{dc}$  像から空間周波数フィルター処理により  $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$  像を求めると、外部直流磁場の有無によらず同様であり観察した A-MFM 像と区別がつかないことから、A-MFM 像は  $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$  像と見なすことができることがわかった。これらの詳細は学会で述べる。

参考文献

1) 齊藤 準、三浦 健太、他：第 45 回日本磁気学会学術講演概要集 02aA-1, 140 (2021)

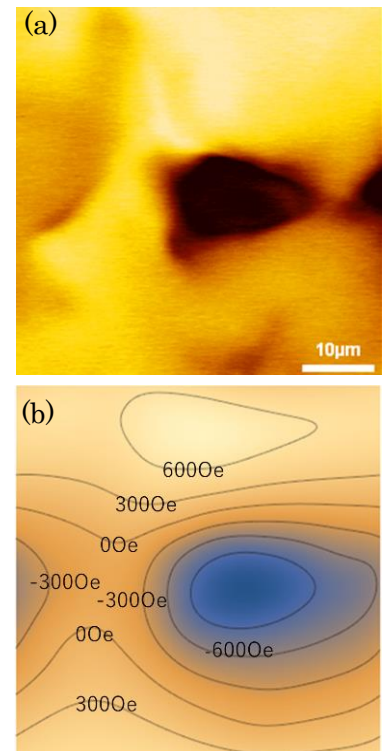


Fig1 A-MFM image and contour of extracted magnetic field imaged



# 交番磁気力顕微鏡における超常磁性探針の 高機能磁気イメージングへの応用

齊藤 準  
(秋田大理工)

Application of superparamagnetic tip to advanced magnetic imaging  
on alternating magnetic force microscopy

H. Saito  
(Akita Univ.)

**はじめに** 筆者により提案された交番磁気力顕微鏡 (Alternating Magnetic Force Microscopy; A-MFM) は、振動させた磁性探針にその共振周波数と異なる非共振の交番磁気力を印加することで発生する探針振動の周波数変調現象を利用した磁気力顕微鏡であり、試料表面近傍の磁気力を単独検出できることから高空間分解能が得られ、探針に用いる磁性体を選択することで磁気記録媒体や永久磁石材料の直流磁場、および磁気記録ヘッド等からの交流磁場を観察することができる<sup>1)</sup>。

本稿の超常磁性探針は、A-MFM で強磁性探針を用いた場合に磁気ヒステリシスや磁気飽和により発生する不具合の解決のために開発を進めたものであり、高磁化 Co-GdO<sub>x</sub> 探針 (グラニューラー型超常磁性合金中の Co 粒子の体積分率が 44 vol% 程度) の開発に成功している<sup>2)</sup>。超常磁性探針は、1) 磁気ヒステリシスがなく探針磁化が印加磁場に比例して印加磁場方向に可逆的に発生し、2) 探針磁化が GHz 以上の高い周波数でも磁場に応答し、また異なる周波数の磁場応答の重ね合わせが可能である特徴を有する。本報告では、強磁性探針には見られないこれらの超常磁性探針の特徴を利用することで可能になる高機能磁気イメージングについて紹介する。

**直流磁場の定量イメージング** 磁気力顕微鏡は磁場勾配を検出しているため、空間分解能は優れるものの測定量の定量性に劣ることが課題とされてきた。本手法では、超常磁性探針の交流磁化方向を外部交流磁場方向に揃えることができること (計測磁場方向を外部交流磁場方向に固定)、および超常磁性探針の直流磁化が試料からの直流磁場に比例することを利用する。試料面に垂直方向の交流磁場  $H_z^{ac} \cos(\omega t)$  を探針に印加した場合、探針にかかる磁場  $\mathbf{H}$  は、試料から発生する直流磁場を  $\mathbf{H}^{dc}$  とすると、 $\mathbf{H} = \mathbf{H}^{dc} + H_z^{ac} \cos(\omega t) \mathbf{e}_z$  となる。探針磁化を  $\mathbf{m}^{tip}$  は、磁場に比例する ( $\mathbf{m}^{tip} = \chi \mathbf{H}$ ) ので、A-MFM が検出する磁気力勾配  $F_z' = \partial^2 (\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) / \partial z^2$  の  $\omega$  成分 (探針振動の周波数変調を引き起こす交番磁気力) は、 $F_z'(\omega t) = 2\chi (\partial^2 (H_z^{dc} H_z^{ac}) / \partial z^2) \cos(\omega t)$  となる。

ここで交流磁場源に空芯コイルを用いることで、前式の展開により現れる  $H_z^{ac}$ ,  $\partial H_z^{ac} / \partial z$ ,  $\partial^2 H_z^{ac} / \partial z^2$  が既知となるのでこれらを定数として、試料からの磁場に係わる  $H_z^{dc}$ ,  $\partial H_z^{dc} / \partial z$ ,  $\partial^2 H_z^{dc} / \partial z^2$  を、探針伝達関数に基づく空間周波数フィルター処理を行うことにより抽出できる。磁場値の校正は、試料に一樣な外部直流磁場を印加した際に抽出される  $H_z^{dc}$  信号の変化を利用する。以上により磁場の定量イメージングが可能になる。

**交流磁場の高周波イメージング** 磁気力顕微鏡では、高い周波数の交流磁場の計測が困難であることが課題とされてきた。本手法では、超常磁性探針が GHz 以上の高い周波数で磁場に応答し、異なる周波数での磁場応答の重ね合わせが可能であることを利用する。高周波数の交流磁場を A-MFM が検出できる周波数で検出するために、高周波磁場を低周波数で強度変調 (振幅変調) する。 ( $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0^{ac} (1 + \alpha \cos(\omega_L t)) \cos(\omega_H t)$ )

探針磁化  $\mathbf{m}^{tip}$  は磁場に比例するので ( $\mathbf{m}^{tip} = \chi \mathbf{H}$ )、磁気力勾配  $F_z' = \partial^2 (\mathbf{m}^{tip} \cdot \mathbf{H}) / \partial z^2$  の  $\omega$  成分は、 $F_z'(\omega_L) = \alpha m (\partial^2 (H_0^{ac})^2 / \partial z^2) \cos(\omega_L t)$  となる。この交番磁気力を、振動した探針に加えることにより探針振動に周波数変調が発生し、GHz 以上の高周波磁場の計測が可能になる。

超常磁性探針を使用することで新たに実現できる高機能磁気イメージングの詳細は学会で報告する。

## 参考文献

- 1) H. Saito, まぐね/Magnetics Jpn., Vol.11, No.4, 214-220, 2016
- 2) Y. Cao, H. Saito, *et al.*, J. Magn. Magn. Mater., Vol.462, 119-126, 2018

# プリント基板上のコイルを用いたコアレス電流センサの開発

栗原晋、山内芳准、小泉和裕、原山滋章\*  
(富士電機(株)、\*富士電機メーター(株))

Development of coreless current sensor using coil on printed circuit board

S. Kuribara, H. Yamauchi, K. Koizumi, S. Harayama  
(Fuji Electric Corp., \*Fuji Electric Meter Corp.)

## はじめに

近年、電流センサは様々な分野で利用されているが、高精度で耐ノイズ性能の優れた電流センサを実現する場合、磁性体コアによりセンサが大型化するため、小型化の実現が課題である。そこで我々は、プリント基板上の配線パターンで形成したコイル(以下パターンコイル)を用いて、磁性体コアの小型化を検討した<sup>1)</sup>。今回、更なる小型化のため、コアレス電流センサの検討を行ったので報告する。

## センサ構成

Fig.1に示すように、検出電流が往復するように平行に配置した電流線と、4つのパターンコイルを配置したプリント基板とを、電流線の平行部分に設けた2つの貫通穴に配置する構成を考案した。本構成にて、電流によって電流線の周囲に生じる磁束の変化をパターンコイルでの誘導電圧として取り出すことで電流を検出する。

本構成では、外部磁場の影響低減のため、測定電流の通電方向に対して左右に2つのパターンコイルを配置し、測定電流により生じる誘導電圧が左右のコイルで加算されるよう直列に接続している。この配置により、基板垂直方向の外部磁場の影響を左右のコイルで相殺し低減できる。さらに、電流の往路・復路に対して2組のパターンコイルを配置し、4つのコイルを直列に接続することで、電流検出感度を向上している。

また基板の位置ずれにより生じる電流検出感度の変動低減のため、電流線の中央に貫通穴を設け、貫通穴の中央に基板を配置し、基板と貫通穴の上下の電流線との距離が等しくなるような構成としている。これにより、基板がFig.1のY方向にずれた場合、貫通穴上下の電流線に対して、一方は近づき、もう一方は遠ざかるため、基板位置ずれによる磁界の変化を相殺でき、電流検出感度の変動を抑えることができる。

## 設計検証

電力量計への適用を想定して上記センサの設計検証を行った。電流検出範囲0.5A~250Aにて、磁界解析を用いてコイルの誘導電圧から計算した各性能の検証結果をFig.2~4に示す。電流検出感度は0.12mV/Aでリニアな特性が得られ(Fig.2)、基板位置ずれ時(±0.1mm)の感度変動率は最大0.016%(Fig.3)、外部磁場(0.125mT@50Hz)による出力誤差は最大0.015%であり(Fig.4)、電流センサとして十分な性能が得られることを確認した。

## 参考文献

- 1) S. Kuribara et al., Proceedings of The 2022 Annual Meeting IEE of Japan (1-040)

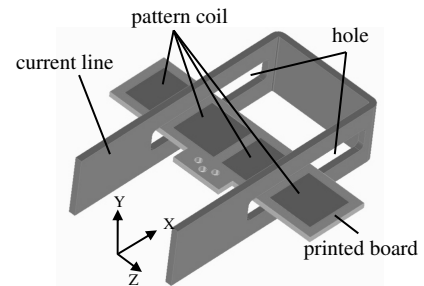


Fig.1 Sensor Configuration

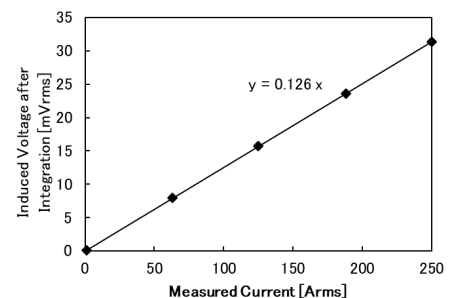


Fig.2 Sensor output characteristics

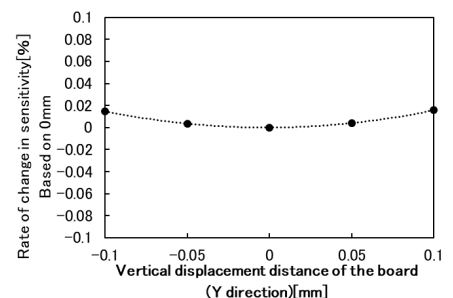


Fig.3 Rate of change in sensitivity when the board position shifts

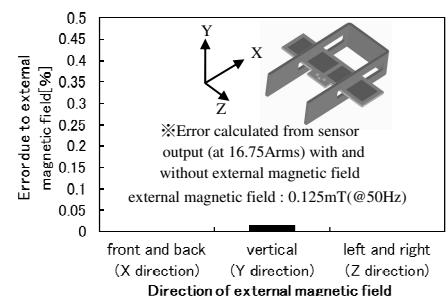


Fig.4. Output error due to external magnetic field

# 高感度光プローブ式電流センサ用 磁気ヨーク埋込型センサヘッドの検討

村上 拓也<sup>1</sup>, 曾根原 誠<sup>1</sup>, 佐藤 敏郎<sup>1</sup>, 須江 聡<sup>2,1</sup>, 久保 利哉<sup>2</sup>, 宮本 光教<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>信州大学, <sup>2</sup>シチズンファインデバイス)

Investigation of magnetic yoke with embedded sensor head for optical probe current sensor with high sensitivity  
T. Murakami<sup>1</sup>, M. Sonehara<sup>1</sup>, T. Sato<sup>1</sup>, S. Sue<sup>2,1</sup>, T. Kubo<sup>2</sup>, M. Miyamoto<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Shinshu University, <sup>2</sup>Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

## はじめに

現在、電流センサにはシャント抵抗器やCT (Current Transformer), ロゴスキーコイルなどが利用されているが、劣悪な電磁ノイズ環境下では、信号伝送経路上の電気信号に電磁ノイズが重畳することが危惧され、使用可能な環境が限定される問題がある。

筆者らは電磁ノイズの影響を受けない電流センサとして光を検出信号に用いたグラニューレー磁性薄膜のFaraday効果を利用する光プローブ式電流センサの開発を進めている<sup>1)</sup>。現在、小電流計測におけるセンサ出力が低く、ノイズに埋もれてしまうことが問題となっている。そのため、電流測定領域を小電流範囲に拡張することを目的として、センサヘッド部に扁平磁性微粒子複合材料を用いた開磁路型磁気ヨークを付与することで印加磁界をエンハンスし、単位磁界あたりのセンサ出力を増大させる検討を進めてきた<sup>2)</sup>。

本稿では、電流センサの更なる高感度化を目的に、センサヘッド部に付与する磁気ヨーク形状を再検討し、センサヘッドを磁気ヨークでサンドイッチした場合の効果について検討したので報告する。

## 磁気ヨーク形状の構造と解析結果

これまで検討されてきた磁気ヨーク形状および磁気ヨークを付与したFaraday素子センサヘッドをFig. 1に示す。素子センサヘッドを台形状磁気ヨーク（短辺1 mm, 長辺5 mm, 長さ5 mm, 厚さ1 mm, ヨーク間ギャップ0.2 mm）で覆い被せた構造になっていて、センサヘッドの下側にはヨークは無い<sup>2)</sup>。本稿では、センサヘッドの下側にも厚さ0.1 mmでヨーク間ギャップ0.1 mmの台形状磁気ヨークを装荷し、センサヘッド上下の台形状磁気ヨークの総厚さを1 mmとし、JMAG-Studioを用いて電磁界解析した。

解析結果をFig. 2に示す。 $H_0$ は磁気ヨークが無い場合の磁界強度である。下部磁気ヨークの有無で比較すると、下部磁気ヨークを用いるとそれが無い場合に比べて、感度が約1.5倍高くなり、磁気ヨーク自体を用いない場合よりも約15倍高くなった。詳細は磁束密度分布の解析結果などを含め当日説明する。

## 参考文献

- 1) 宮本 光教, 他: 第41回日本磁気学会講演概要集, 21aB-1 (2017).
- 2) 寺岡 佑恭, 他: 電気学会全国大会, 2-C-p2-5 (2021).

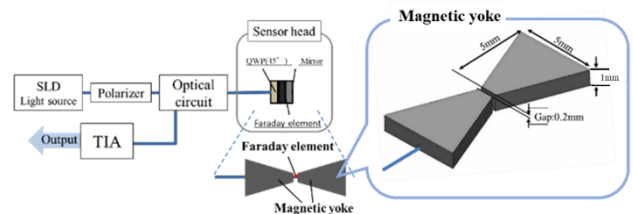


Fig.1. Faraday-effect optical sensor head with magnetic-yoke (long side: 5 mm, short side: 1 mm, length: 5 mm, thickness: 1.0 mm).

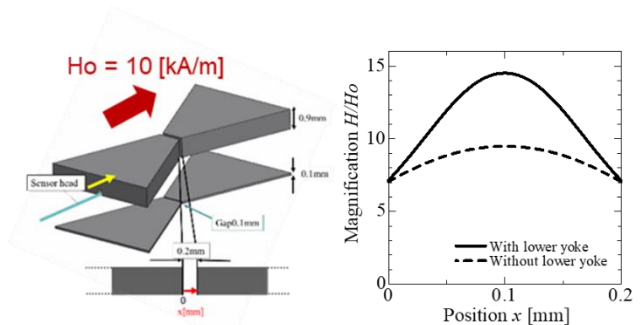


Fig.2. Analysis results of magnetic field magnification  $H/H_0$  vs. position  $x$  in magnetic-yoke.

# AC 磁界変調高感度 GMR センサの磁場顕微鏡応用と空間分解能

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

## Application of High Sensitive AC Field Modulation GMR Sensor to a Magnetic Field Microscope and its Spatial Resolution

A. Kikitsu, Y. Higashi, Y. Kurosaki, S. Shirotori, \*T. Nagatsuka, \*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た<sup>1)</sup>。1/f ノイズが支配的な GMR 素子でも低周波数領域の微弱磁界を高感度に検出できるのが特徴である。このような高感度磁界センサの用途として、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<sup>2)</sup>があるが、課題は測定時の実効的な感度と空間分解能になる。今回、試作したセンサ素子を磁場顕微鏡システムに適用し、Cu プリント配線が発生する磁界検出を行い、感度と空間分解能に関して考察を行ったので報告する。

### 実験方法

Fig.1 に磁場顕微鏡と磁界センサユニットの模式図を示す<sup>3)</sup>。線状の GMR 素子は 10 kHz の AC 磁界で変調される。変調の位相で差動検出するフルブリッジをセンサユニットとし、各 GMR 素子の両側に 1 mm 角の NiFe の MFC (Magnetic Field Concentrator) を設けた。MR 特性上の感度は約 5%/Oe、ノイズレベルは 13 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @100Hz であった。Cu 配線サンプルに 100 Hz の交流電流を印可し、センサユニット出力を再度ロックインアンプで検波する。センサ面を距離 1 mm でサンプルと対向させて 0.1s/pixel (16  $\mu\text{m}$ ×10  $\mu\text{m}$ /pixel) で走査した。磁場像が確認できなくなるサンプル電流値で感度を評価し、有限要素法で求めた磁界分布と比較することで空間分解能を評価した。結果は、MI センサ(5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @100Hz)と比較した。測定は、磁気シールドされていない環境下で行った。

### 結果および検討

ノイズレベルに差があるにもかかわらず、MI センサと GMR センサで検出限界は同じであった。約 10 nT の環境磁界ノイズのためであり、このノイズは 2 個のセンサユニットによる差動検出で低減できることを確認した。Fig.2 に 4.5 mA<sub>pp</sub> を印加したときの磁場像と磁界プロファイルを示す。クランク型の Cu 配線形状が概ね再現でき、MI センサよりも高い空間分解能が得られた。測定プロファイルは磁界分布の計算値から半値幅で約 3 mm 広がっており、MFC を含めたセンサユニットの幅の 3/4 程度が検出窓のサイズとなっている。

### 参考文献

- 1) S. Shirotori et. al.: *IEEE Trans. Magn.*, **57**, 4000305 (2021)
- 2) K. Kimura et al.: *Electro. Packaging Technol.*, **28**, 16 (2012)
- 3) A. Kikitsu et al.: *Abstract book of 2022 Joint MMM-Intermag*, IOF-07 (2022)

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).

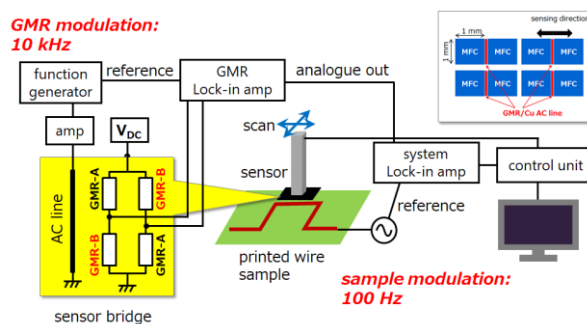


Fig.1 Schematic view of magnetic microscope and GMR sensor unit

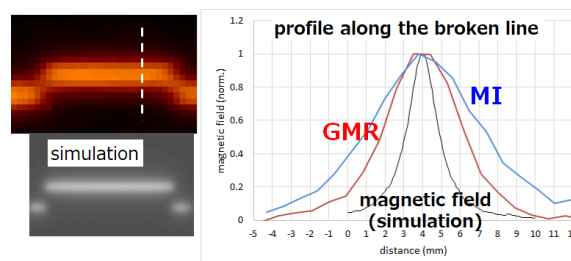


Fig.2 Magnetic field images of GMR sensor. Profiles along the broken line are also shown.

## スリットを有するマイクロストリップ型プローブによる透磁率評価

渡辺佳是, 益子朝日, 坂本雅弥, 佐久間勝美, 沖田和彦, 藪上信  
(東北大)

## Evaluation of Permeability using Microstrip line slitted Probe

Y. Watanabe, A. Mashiko, M. Sakamoto, K. Sakuma, K. Okita, S. Yabukami  
(Tohoku Univ.)

## はじめに

移動体通信システム 5G, 6G と続く高速大容量通信時代においては, 通信エラーの発生は致命的となる為, 通信エラーの抑制技術が必要不可欠となってくる. この背景の下新しい電磁波吸収体の開発が活発に行われている<sup>1)</sup>. 本発表は, これらの電磁波吸収体の透磁率という評価指標を簡単に高帯域で評価する手法を提案し, それを用いた測定結果について述べる.

## 新マイクロストリップ型プローブの提案

50 ~ 100  $\mu\text{m}$  程度の比較的厚い磁性体を従来型のマイクロストリップライン (以降 MSL) で測定すると, 反磁界の影響で, 強磁性共鳴周波数が, 高周波側にシフトする事が報告されている<sup>2)</sup>. この現象の対策を想定し, 線幅の広い MSL を設計, 磁界の発生をサンプル全体へ広がる事を目論んだ. また GHz 帯において顕著となる表皮効果の影響で, 高周波電流は MSL の線幅方向の両端に集中する. この対策案として, Fig. 1 に示す様に, MSL の中央部に横方向のスリットを 8 本配置し, 仮定の端部を作り電流密度の均一化を目論んだ.

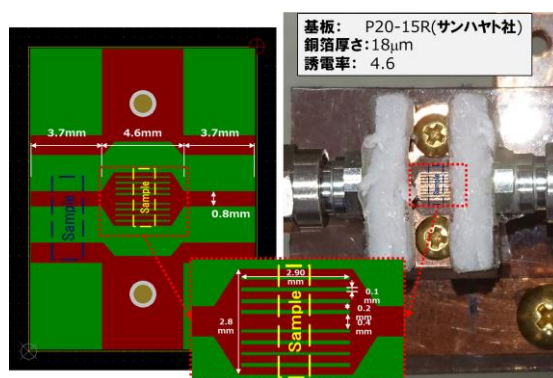


Fig. 1 Configuration of MSL slitted Probe

## 実験結果

提案したMSL型プローブを使い NiZn ferrite サンプルの高磁場環境下と無磁場環境下の  $S_{21}$  の値をネットワークアナライザーで測定し, その差分から複素比透磁率を導出した. Fig. 2 にその複素比透磁率測定結果を示す. 黒の実線・破線は, レファレンスとなる Nicolson-Ross-Weir 法<sup>3)</sup>での測定結果であり, 本測定方法で導出した赤と青のドットと比較し, ほぼ対応しているのが分かる. この結果, 本報告書で提案するスリットを有する MSL 法は, 反磁界の測定誤差を低減できる手法と言える.

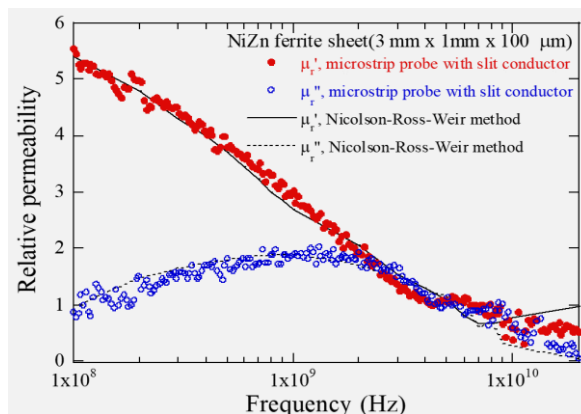


Fig. 2 Comparison of NRW method and MSL slitted probe

**参考文献:** 1) S. Ajia et.al, *J. Alloys Compd*, **903**, 163920(2022). 2) Yabukami et.al, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 58, No. 2, p. 1-5 (2022). 3) W. B. WEIR: *Proc IEEE*, vol. 62, 33 (1975).

**謝辞:** 本研究は総務省「電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」(JPJ000254), NEDO Entrepreneurs Program(0349006), AMED(22ym0126802j001)の支援を受けた.

# フェライト薄膜を磁心とした高周波インダクタの GHz帯における電磁気特性向上

中野拓真、宮崎翔太、尾崎由美子、小池邦二、井ノ口大輔  
(TDK株式会社)

Improvement of Electromagnetic Properties in GHz Frequency of Ferrite Thin Film Integrated RF Inductor  
Takuma Nakano, Shota Miyazaki, Yumiko Ozaki, Kuniji Koike, Daisuke Inokuchi  
(TDK Corporation)

## はじめに

5Gの導入に伴い、高周波インダクタ(RFI)に対して、さらなる小型化とQ値の向上の必要性が増してきた。市販のRFIでは主に空芯タイプのインダクタが採用されている。磁性体をコアにすることで、コイルの断面積や巻き数を減らすことが出来るため、これらの要求を達成することが期待されるが、GHz帯では磁性体のうず電流損失や強磁性共鳴の高周波数化などが課題となっている。フェライトは金属と比較して高い電気抵抗を持ち、高周波でのうず電流損失を低減できることが知られている。また、磁性体を薄膜化することで、より大きな形状磁気異方性を利用でき、広い周波数帯において透磁率実部を利用できる可能性がある。本報告では、NiZnおよびCoフェライト薄膜を内蔵したRFIを作製し、その高周波特性について検討する。

## 実験方法

フェライト薄膜を磁心としたソレノイドコイルを用いたRFIの外観と断面図をFig.1に示す。RFIは下部配線、フェライト薄膜、上部配線から構成され、上下配線はビアにより電氣的に接続されている。コイル部分はCuの電解めっきにより形成した。比較として空芯タイプのRFIについても作製した。フェライト薄膜はフェライトめっき法<sup>1)</sup>により成膜し、組成は $\text{Ni}_{0.16}\text{Zn}_{0.20}\text{Fe}_{2.63}\text{O}_{4+\delta}$ もしくは $\text{Co}_{0.11}\text{Fe}_{2.89}\text{O}_{4+\delta}$ とした。

RFIの高周波特性はRF同軸GSプローブを接続したネットワークアナライザを用いて評価した。

## 実験結果

作製したRFIのインダクタンスおよびQ値の周波数特性をFig.2に示す。空芯タイプのRFIと比較して、NiZnフェライトを磁心とした場合は1GHz程度まで、Coフェライトを磁心とした場合は2GHzまで、インダクタンス、Q値とも向上することが確認された。フェライト薄膜の利用により、5G周波数帯域においても優れた高周波特性を持つRFIが得られることが分かった。当日はフェライト薄膜の高周波透磁率など、その他磁気特性も併せて報告する。

## 謝辞

NiZnフェライト薄膜のサンプルをご提供いただきました東京工業大学 松下伸広教授、高周波磁気特性を測定していただきましたTohoku-TMIT 藪上信教授、遠藤恭准教授、沖田和彦研究員に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) N. Matsushita, et. al., J. Surface Finishing Society Jpn., 61, 425 (2010).

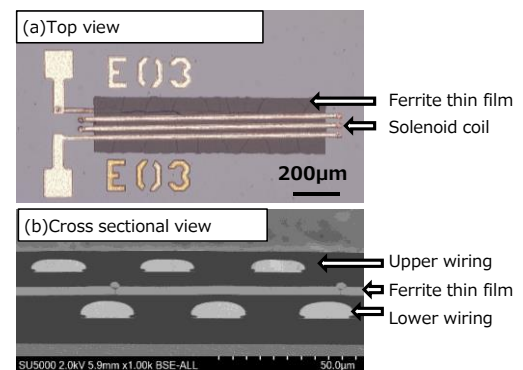


Fig. 1 (a) Top view and (b) cross sectional view of ferrite thin film integrated RFI

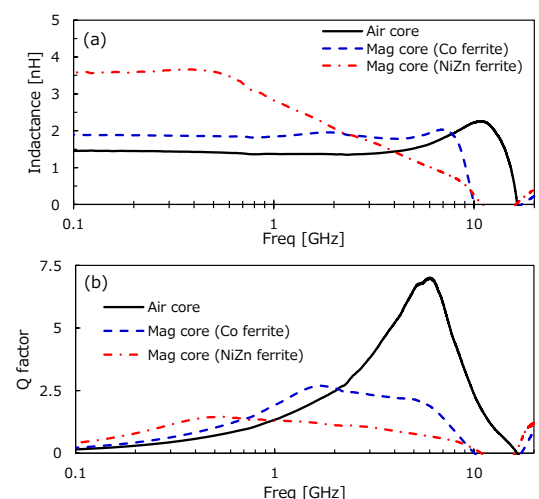


Fig. 2 Frequency dependence of (a) inductance and (b) Q factor of ferrite thin film integrated RFI

## 電子機器の実回路に適応可能な高周波近傍磁界測定手法の提案

荻田健徳<sup>1,2\*</sup>, 石田竜太<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)

Proposal of a High Frequency Near Magnetic Field Measurement Method Applicable to Actual Circuits in Electronic Devices

T.Karita<sup>1,2\*</sup>, R.Ishida<sup>1,2</sup>, T.Goto<sup>2</sup>, K.Ishiyama<sup>2</sup>

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

### はじめに

高周波近傍磁界計測用プローブとして一般的にループコイルが用いられている<sup>1)</sup>が、金属製のため本来の磁界分布を乱してしまう<sup>2)</sup>。そのため本研究では、磁気光学結晶のガーネットとパルスレーザを利用し、さらにストロボ法により交流磁界の位相情報を含めて低侵襲に測定可能な高周波近傍磁界計測システム<sup>3)</sup>について検討を行っている。ストロボ法を使う上ではレーザのパルス発振と被測定信号の同期が必要である。先行研究では測定対象から基準となる同期信号を取り出し、それを用いて

被測定磁界とレーザ発振を同期させていた。しかし、GHz級の信号を取り出すことは、測定対象へノイズを与え本来の磁界分布を乱す可能性があり、容易ではない。

そこで本研究では、PLLを用いて基本クロックから高周波信号を生成する電子機器の基本的な構成に着目し、同期信号を測定対象回路の測定位置における駆動信号ではなく、基本クロック源から取得することで、測定対象への影響を低減した磁界測定法を提案する。測定対象回路の水晶発振器から取り出した基本クロック信号(10MHz)をPLLによって逡倍し、トリガ信号をレーザ発振周波数帯まで引き上げることで同期を実現する。これにより、本測定システムを実際の電子機器へ対応可能となり、より効率的な電子機器のEMI対策を行うことができると考える。

### 実験方法

Fig.1に本研究における磁界計測システムの概略を示す。測定対象のマイクロストリップ線路(MSL)に配置したガーネットにレーザ光を垂直に照射し反射光を検出する。反射光はガーネットの磁気光学効果により、垂直磁界強度に依存した偏光状態の変化が起こるため、それを検出することで垂直方向成分の磁界強度が測定できる。今回は検証として測定回路の基本クロック信号源(水晶発振器)としてファンクションジェネレータ(FG)を用いる。FGからPLLに参照信号として10MHzの信号を入力し、3.2GHzの信号を生成する。分周器を用いて1/32分周し、後段の回路を用いてレーザトリガ信号を生成する。FGより10MHzの参照信号によって同期しているシグナルジェネレータ(SG)を測定回路内のPLLに模し、MSLへの投入電力を17dBmとして、900MHz, 1200MHz, 2400MHzの3つ正弦波信号についてそれぞれ磁界測定を行った。

### 実験結果

MSLの磁界分布計測結果をFig.2に示す。MSLの両端部に位相情報を含めた出力が確認でき、設置したガーネットに対して面直方向の発生磁界が精度よく取得できていることが伺える。また、FGの参照信号を基にSGで生成した複数の周波数の磁界についても磁界計測が可能であり、提案した手法によって、同期信号として水晶発振器の基本クロック信号を用いた磁界計測が可能であることを示すことができた。製品化された電子回路を用いた測定結果については講演会で発表する。

### 参考文献

- 1) R. Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility 2nd edition, pp. 10-11, John Wiley, New York (2006).
- 2) M. Takahashi, K. Kawasaki, H. Ohba, T. Ikenaga, H. Ota, T. Orikasa, N. Adachi, K. Ishiyama and K. I. Arai J. Appl. Phys. 107, 09E711 (2010).
- 3) 立岡大青, 梶修一郎, 石山和志, パルスレーザを用いた高周波近傍電磁界計測における新しい同期手法の提案, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 4, No. 1, pp. 37-40 (2020年4月)

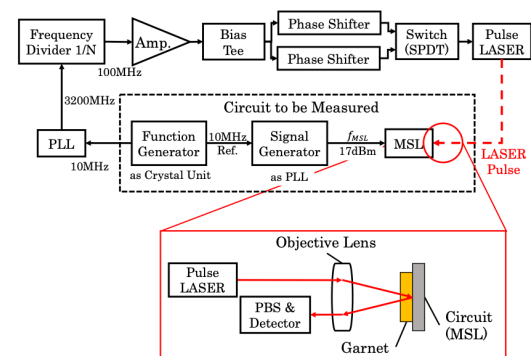


Fig. 1 Schematic of the magnetic field measurement system

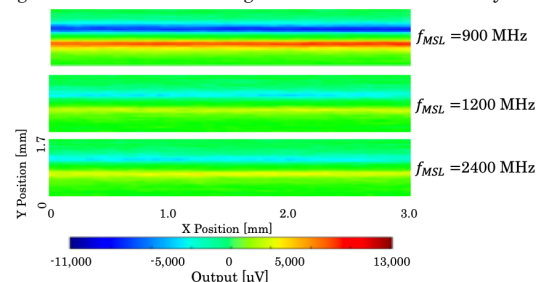


Fig. 2 Measured magnetic field distribution near MSL

# 低周波 Wiegand パルスによる MI センサの駆動に関する研究

姚睿軒<sup>1, 2</sup>, 竹村泰司<sup>2</sup>, 内山剛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>横浜国立大学)

Study on Driving MI Sensor Using Low Frequency Wiegand Pulse

R. Yao<sup>1, 2</sup>, Y. Takemura<sup>2</sup>, T. Uchiyama<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Nagoya Univ., <sup>2</sup>Yokohama National Univ.)

## はじめに

アモルファスワイヤなどの軟磁性体に高周波電流又はパルス電流を通電すると、表皮効果によってそのインピーダンスは外部磁界による巨大変化を示す。これを磁気-インピーダンス効果 (Magneto-impedance effect, MI 効果) を呼ぶ。MI センサの駆動には、従来は MHz 以上の高周波交流電流やパルス電流が使われることが多く<sup>1)</sup>、低周波信号を使った駆動に関する研究は少ない。Wiegand センサの特徴は、低速で変化する磁界に対してその変化速度にほぼ無依存なパルスを出力することであり、バッテリーレス IoT 設備の開発に有用なものである<sup>2)</sup>。本研究は、低周波パルス電流駆動による MI センサの出力特性を検討した結果に基づいて、パルス高速整形駆動回路を開発し、10Hz の Wiegand パルスで MI センサの駆動に成功したので報告する。

## 実験方法

ファンクションジェネレータからのパルス電流を MI センサに通電して、立ち上がり時間  $t_r$ 、繰り返す周波数  $f_{osc}$ 、励磁電流  $i_w$  を調整し、MI センサの出力電圧  $E_w$  を測定した。Wiegand センサ (Wiegand ワイヤ:  $\phi$ : 0.25 mm, length: 11 mm, 検出コイル: 3000turn) の長手方向に  $f = 10\text{Hz}$ 、500e の交流磁界を印加し、Wiegand パルスを高速整形駆動回路から MI センサに通電し、MI センサの出力電圧  $E_w$  を測定した。

## 実験結果

Fig. 1 に示すように、500kHz 以下のパルス電流を入れた時、MI センサの出力特性は繰り返す周波数  $f_{osc}$  に依存せず、出力電圧はほぼ同じである。MI センサの出力電圧は励磁電流  $i_w$  と立ち上がり時間  $t_r$  にのみ依存し、 $i_w$  と  $t_r$  が小さいほど MI 効果は顕著になる。高速整形回路によって、パルス幅  $20\mu\text{s}$  の Wiegand パルスを立ち上がり時間  $t_r$  が 100ns 以下のときに大きな MI 効果が観測できた。整形回路の外部電圧  $V_{cc}$  を変化すると、MI センサの入力電圧も変化する。Fig. 2 に示すように、最小  $V_{cc}=1.31\text{V}$  で、MI センサ出力の良い直線性を維持することも可能である。この場合の MI センサの消費電力は約  $2\mu\text{W}$  である。

## 参考文献

- 1) K. Mohri and Y. Honkura, *Sensor Letters* Vol.5, pp. 267-270, 2007.
- 2) Takahashi et al., *J. Mag. Soc. Jpn.* 42, 49, 2018.

## 謝辞

本研究の一部は、名古屋大学卓越大学院未来エレクトロニクス創成加速 DII 協働大学院プログラム、JST 及び名古屋大学融合フロンティアフェローシップの支援を受けたものである。この場を借りて御礼申し上げます。

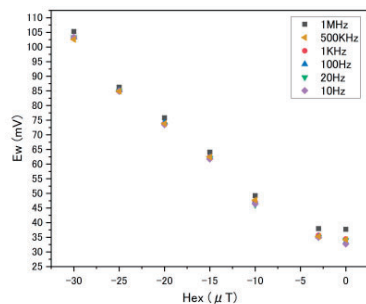


Fig 1. Characteristics of pulse driven MI effect depending on different frequency of pulse.

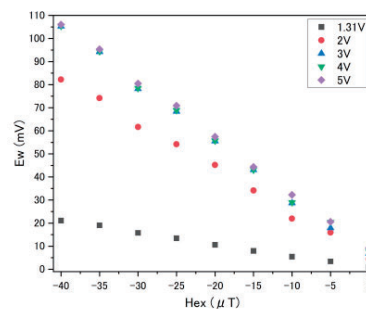


Fig 2.  $E_w$ - $H_{ex}$  characteristics at different pulse input  $V_{cc}$ .



# 非破壊検査応用に向けた TMR センサによる鉄板の固有振動計測

伊藤 淳, 金珍虎, 大兼 幹彦  
(東北大学大学院工学研究科)

Natural Vibration Measurement of Steel Plates by TMR Sensor for Nondestructive Testing Application

Jun Ito, Jin Zhenhu, Mikihiko Oogane

(Graduate School of Engineering, Tohoku University)

## はじめに

従来のインフラ点検法では、地下埋設配管の内部の傷や腐食を遠方から評価することは難しく、検査対象物を破壊せず、遠方から調査可能な非破壊検査の実現が期待されている。高感度かつ省エネルギーで効率的な非破壊検査が求められている中で、トンネル磁気抵抗型磁気センサ (TMR センサ) はその高い性能要求を満たす可能性を有している。本研究では TMR センサを高感度なインフラ非破壊検査へ応用するため、鉄鋼材料を打撃して生じた固有振動から得られる磁気信号を TMR センサで取得する打磁試験を考案した。本研究の目的は、打磁試験法の非破壊検査への応用可能性を検討するため、寸法の異なる複数の鉄板試験体を用いて、試験体の固有振動特性を評価することにした。

## 実験方法

試験体には、奥行き、幅及び厚さがそれぞれ異なる鉄板(SS400)を用いた。標準試験体には、奥行き 99 mm、および、100 mm、幅 200 mm、厚さ 6 mm の鉄板を用いた。打撃装置はピエゾ素子を用いており、図 1 のような構成で本検査方法を実施した。振動により生じる磁場の測定には、スピンセンシングファクトリー社製の非破壊検査用 TMR センサを用いた<sup>2)</sup>。

## 実験結果

奥行きが 99 mm と 100 mm の試験体に対して本試験を実施し、得られた磁気信号を周波数解析して得られたスペクトルを図 2 に示す。図から分かる通り、打撃周波数(617 Hz)に由来したシャープなピークと、試験体の固有振動(3200Hz 及び 3800Hz 近傍)に由来したブロードなピークが観測された。固有振動に由来するピークに注目すると、99 mm の奥行きをもつ試験体は、100 mm の試験体と比較して、周波数が高い側にシフトする結果が得られた。この結果は、試験体の固有振動の微小な変化を TMR センサによって検出可能であることを示している。これは、境界条件による固有振動数の変化を説明する数式モデルから定性的に説明できる<sup>3)</sup>。

## 謝辞

本研究は、東北大学先端スピントロニクス研究開発センター、スピントロニクス学術連携研究教育センター、および、東北大学 AIE 卓越大学院プログラムの支援を受けて行われた。また、TMR センサはスピンセンシングファクトリー株式会社より提供を受けた。

## 参考文献

- 1) N. Gucunski et al., National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration. Washington, DC: The National Academies Press (2012)
- 2) M. Oogane, K. Fujiwara, A. Kanno, T. Nakano, H. Wagatsuma, T. Arimoto, S. Mizukami, S. Kumagai, H. Matsuzaki, N. Nakasato, and Y. Ando, Appl. Phys. Express **14**, 123002 (2021)
- 3) P. Dumond, D. Monette, F. Alladkani, J. Akl, I. Chikhaoui, MethodsX, **6**, pp. 2106-2117 (2019)

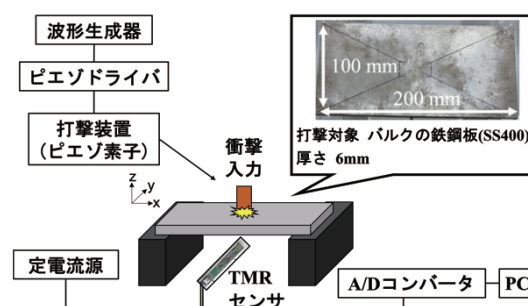


図 1 実験装置の構成

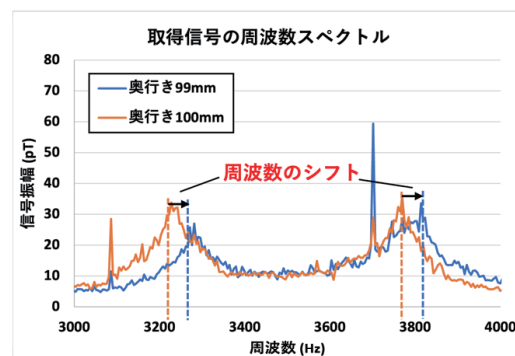


図 2 打磁周波数スペクトルの比較

# 偶関数型 GMR の AC 変調下における出力解析

東 祥弘, 喜々津 哲, 黒崎 義成, 白鳥 聡志

(株式会社東芝 研究開発センター)

Investigation of output signal in symmetric response GMR under AC modulation  
Yoshihiro HIGASHI, Akira KIKITSU, Yoshinari KUROSAKI and Satoshi SHIROTORI  
Corporate Research and Development Center, Toshiba Corporation

## はじめに

超高感度磁気センサは、2次電池や半導体回路のリーク電流検査、鋼材の微細欠陥検査などの応用に期待され、特に磁気抵抗効果 (MR) 素子は高密度実装や集積化が容易なため、高感度化の研究がなされている<sup>(1)</sup>。さらなる高感度化のために、AC 変調が注目されており、偶関数形状の磁場-抵抗 (R-H) 特性をもつ GMR 素子に、近接して配置した銅配線より構成される磁場発生部から磁場を発生させ、AC 変調を行う小型化・低消費電力の磁気センサを作製した<sup>(2)(3)</sup>。本発表では、偶関数を用いた AC 変調動作把握のため、変調下での R-H 特性から求めた実験式の出力信号と、実測の出力信号を比較した。

## 変調信号の実験式と実測の比較

変調出力信号の実験式は、式 (1) の測定磁場  $H_m$  (角速度  $\omega_m$ )、変調用 AC 磁場  $H_{ac}$  (各速度  $\omega_{ac}$ ) とバイアス磁場  $H_b$  からなる磁場  $H$  が、式 (2) の偶関数形状の GMR 素子に印可された場合、側帯波  $\omega_{ac} \pm \omega_m$  において式 (3) で表せる。

$$H = H_m * e^{-j\omega_m t} + H_{ac} * e^{-j\omega_{ac} t} + H_b \quad (1)$$

$$R(H) = C + a_4 H^4 + a_3 H^3 + a_2 H^2 + a_1 H \quad (2)$$

$$S = 2H_m H_{ac} \left\{ 6a_4 \left( H_b + \frac{a_3}{4a_4} \right)^2 + a_2 - \left( \frac{a_3}{4a_4} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

ここで、偶関数形状は実測の R-H 特性に近い 4 次関数を用いた。Fig. 1 に示した測定ブロック図により実測の出力信号を求めた。実験式の出力電圧は、変調用 AC 信号と出力電圧より R-H 特性を実測し、4 次関数でフィッティングを行い、各係数を求め、式 (3) を用いて算出した。

## 結果および検討

Fig.2(b)に出力電圧の  $H_b$  依存性を示す。  $H_{ac} = 30.7$  A/m (青) では、計算値と実測値はよい一致が見られた。  $H_{ac} = 62.3$  A/m (赤) では、計算値と実測値では異なり、  $H_b$  に応じて出力が減少している。この結果は、式 (3) の 4 次関数の係数の符号が反転していることで得られる。偶関数を用いた AC 変調では、R-H 特性が大きく出力電圧に影響することが分かった。

## 参考文献

- (1) K. Fujiwara et. al.: Appl. Phys. Express, vol. 11, no. 2, Feb. 2018, Art. no. 023001.
- (2) S. Shirotori et. al.: IEEE Trans. Magn., Vol.57, Iss.2, Part1, 4000305, 2021
- (3) Y. Higashi et. al.: Abstract of MSJ 2021

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)

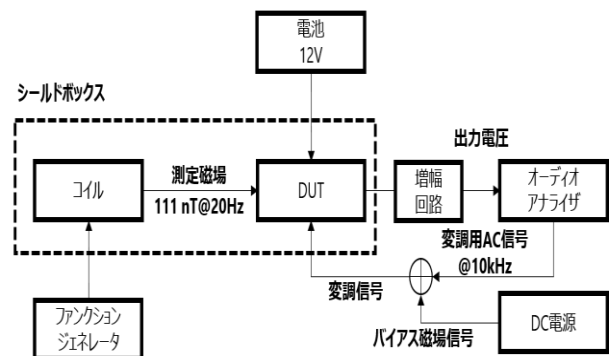


Fig.1 測定ブロック図

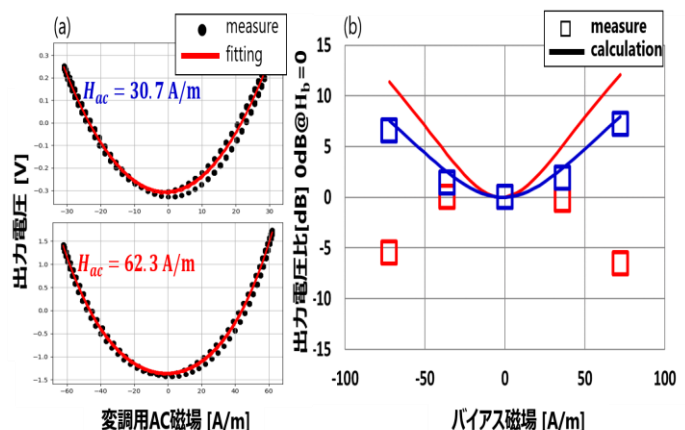


Fig.2 (a) 実測した RH 特性

(b) 出力電圧のバイアス磁場依存性

# 逆位相で磁化変調したフィードバック型 GMR センサの作製

小室虎祐, 大島大輝, 加藤剛志  
(名古屋大学)

Fabrication of feedback-type GMR sensors using antiphase magnetization modulation

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、低価格化が実現可能なセンサデバイスとして期待されている。これまでに筆者らの研究グループでは、磁化変調フィードバック型 GMR センサを提案しており<sup>1)</sup>、数 nT 程度の最小検出感度を達成できることを確認している。また、本方式を用いることで、ヒステリシスの影響や GMR 素子抵抗ドリフトの影響を受けなくなり、磁性層のヒステリシスの影響を受けず、高い線形性が担保されると考えられる。近年、偶関数 GMR を逆位相で接続することで GMR センサの高感度化が報告されている<sup>2)</sup>。そこで、磁化変調フィードバック型 GMR センサの高感度化を目的に、2つの GMR 素子を逆位相で接続した磁化変調フィードバック型 GMR を試作し、その基礎特性を調べた。

## 実験手法

微細加工により、GMR 素子上にフィードバック磁界および変調磁界  $H_{ac}$  (周波数  $f$ ) 印加用のアルミワイヤを配置し、**図 1** に示す回路に挿入した。本回路では、ブリッジ回路中の 2つの GMR 素子に、それぞれの素子の磁化を逆位相に変調されるよう  $H_{ac}$  を印加し、ブリッジ出力に  $2f$  成分が重畳しないようにする。次に、ブリッジ回路の中間端子間における電圧の差分を計装アンプで増幅させ、 $f$  成分の信号をロックインアンプで検出する。また、ロックインアンプ出力に比例した信号を Al ワイヤに流すことで、外部磁場  $H_{ext}$  に対しフィードバックをかける。これにより外部磁場  $H_{ext}$  に比例した出力電圧  $V_{out}$  が得られる。なお、この比例定数は GMR 素子抵抗に依存しないため、温度ドリフトの影響を抑制できる。

## 実験結果

10 Hz の検出磁場  $H_{ext} = 1.5 \mu\text{T}_{rms}$  を印加した際の、フィードバック型および開ループ型の任意の時間における出力波形をそれぞれ**図 2**、**図 3** に示す。なお、開ループ型の測定は、**図 1** のロックインアンプの出力波形を観察しており、フィードバック電流供給用のオペアンプとは切断されている。**図 2** においては、波形の直流成分が大きく変化していることがわかる。これは、開ループ型の出力は GMR 素子の抵抗値に大きく依存し、ブリッジ回路のバランスが崩れたことによって出現したものと考えられる。一方、**図 3** の波形の直流成分はオフセットである  $3 \mu\text{T}$  を維持しており、フィードバックによるドリフト抑制の効果が得られたと考えられる。

## 参考文献

- 1) G A Wang *et al.*: J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 235003 (2011).
- 2) S. Shirotori *et al.*: IEEE Trans. Magn., **57**, 400305 (2021).

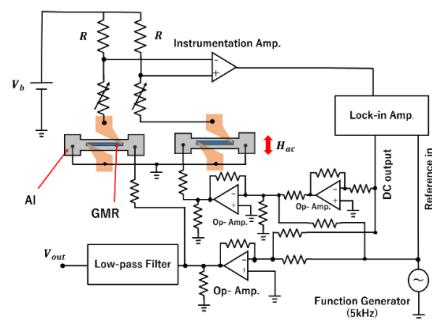


図 1. 検討中の回路

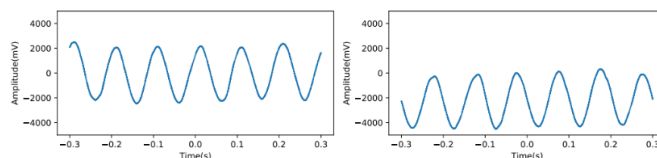


図 3. 開ループ型の出力波形

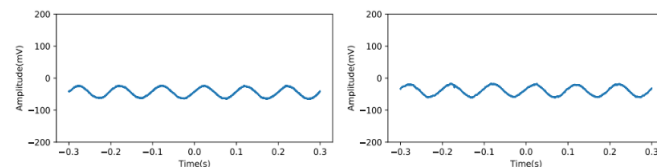


図 2. フィードバック型の出力波形

# 局所異方性測定による歪センサの動作解析

豊田恵伍<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)

Analysis of strain sensor operation by local anisotropy measurement

K. Toyoda<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

磁性膜と導体膜の積層構造からなる逆磁歪効果を用いた歪センサを高感度化するための手法として、異方性の均一化が挙げられる<sup>1)</sup>。そこで、カー効果を利用して局所BHループを取得することにより、磁性膜の局所の異方性を測定して均一性を評価した。その際、センサに歪を与えることで逆磁歪効果による局所的な異方性の変化を測定し、センサの動作状態を詳細に見積もるとともに、感度特性への影響について検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法

本研究において作製したセンサ素子の寸法は Fig.1に示す通りで、厚さ $150\mu\text{m}$ のカバーガラス上に1ターンミランダ形状に成膜したMo膜の導体層の上下に、短冊状の $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ 磁性膜を配置し3層積層構造となっている。このセンサを、Fig.1におけるB-C間を治具上に固定したカンチレバーとして、自由端をマイクロメータヘッドで変位させる。この際に、カー効果を用いて磁界をセンサ長手方向に印加した際の磁区コントラスト画像の平均輝度を局所的に測定した。横軸に印加磁界、縦軸に輝度をプロットすることで得られる局所BHループの、磁化が飽和に達する磁界強度を異方性磁界 $H_k$ として場所ごとに求めた。また、同様にしてセンサを治具に固定して歪を加えたときの歪-インピーダンス特性をネットワークアナライザにより測定した。

## 3. 実験結果

歪-インピーダンス特性の結果を Fig.2 に示す。Fig.3は横軸に Fig.1における薄膜の先端AからB方向への距離、縦軸にその位置における異方性磁界 $H_k$ を自由端変位ごとに示している。測定位置は Fig.1の太い矢印で示した部分である。自由端変位が $+200\mu\text{m}$ のとき、センサは長手方向に圧縮応力を受けており、いずれの位置でも幅方向を容易軸とする均一な異方性を持つことが分かる。また、 $-200\mu\text{m}$ でセンサ長手方向に引張応力を与えると、容易軸は長手方向となった。しかし、 $0\mu\text{m}$ 付近においては異方性に分布があり、歪印加による急峻な異方性変化が得られていないことが明らかとなった。以上のように、センサの感度特性を決める歪と局所異方性の関係を明確化することが可能となった。今後は、この測定を利用したセンサの高感度化に向けた検討を行う。

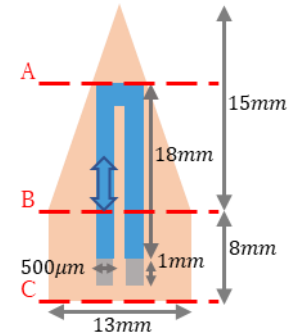


Fig. 1. Diagram of the sensor element

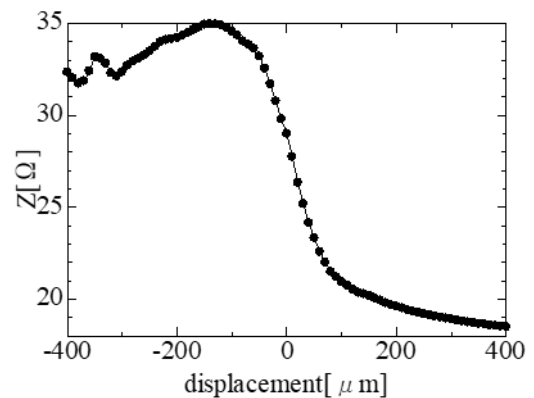


Fig. 2. Optical micrograph of Fe-Mn-Al-Ni alloy

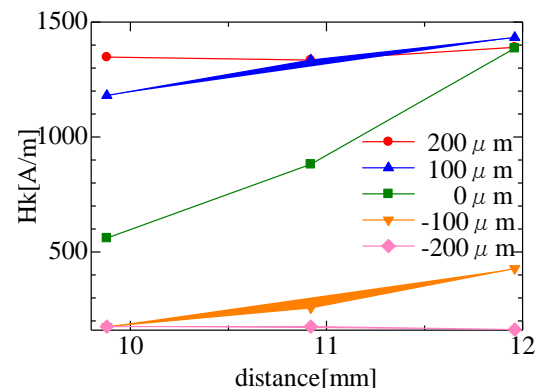


Fig. 3. Variation of  $H_k$  by distance

## 参考文献

- 1) 曾良, 柊, 石山, 日本磁気学会論文特集号, **4**, 41 (2020).

# 磁石と直接通電による簡便な磁性薄膜素子の異方性制御

上野明統, 谷井雅, 菊池弘昭  
(岩手大学)

Magnetic anisotropy control using permanent magnets and applying direct current

A. Ueno, M. Tanii, H. Kikuchi  
(Iwate Univ.)

## 1. はじめに

薄膜磁気デバイスにおいて異方性の制御が重要となる場合も多い。磁気異方性は成膜時に誘導する、もしくは、Co基アモルファス材料では、成膜後に磁界中熱処理により異方性制御できる。ただし、いずれの場合も基板における一方向への制御であり、磁界中熱処理では真空系を有する大型炉が必要となり、消費電力も大きく、長時間を要する。ここでは、リボンやワイヤにおいて主に作製時に導入された応力の緩和を目的として利用されるジュール加熱<sup>1), 2)</sup>の薄膜への適用性を検討するとともに、永久磁石と組み合わせて簡便な方法により磁気異方性制御を試みたので報告する。

## 2. 実験方法

異方性制御は薄膜の磁気インピーダンス素子を例に行った。磁気インピーダンス素子は高感度磁界センサに利用されるが、高感度にするには素子の幅方向に異方性を制御する必要がある。Co<sub>85</sub>Nb<sub>12</sub>Zr<sub>3</sub>アモルファス薄膜を用いてスパッタ・リフトオフ法により矩形素子を作製し、NdFeB磁石により磁界を印加しながら、直流電流を素子に直接通電し大気中で加熱を行った。その後、素子インピーダンスの外部磁界依存性をネットワークアナライザ、ヘルムホルツコイルを用いて測定した。

## 3. 実験結果

Fig. 1は幅40 μm、厚さ2 μm、長さ1 mmの素子におけるインピーダンスの外部磁界依存性を示した図である。素子作製後と120 mAでジュール加熱を行った後の結果を示している。通電時間は60秒とし、インピーダンスの測定周波数は100 MHzとした。素子作製後の場合、磁界0でインピーダンスは最大となりその後低下する変化を示している。これは、素子長手方向に磁界容易軸を有する場合の典型的な変化である。一方、120 mAの通電後には、ダブルピーク特性を示した。ダブルピーク特性は幅方向に容易軸を持つ場合の典型的な特性であり、磁区観察の結果からも幅方向に容易軸が誘導されていることも確認した。

Fig. 2は、120 mAと電流値は一定として、通電時間を変化させた場合のインピーダンス変化を示した図であり、時間は総加熱時間である。インピーダンス変化は最大印加磁界のインピーダンスとの差分で示しており、測定周波数は100 MHzである。1秒の加熱ですでにダブルピークを示しているが、異方性制御は不完全であるが、60秒の印加で幅方向に異方性は制御できているものと考えられる。

## 参考文献

- 1) T. Yanai, et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 320, e833-e836, 2008.
- 2) R. Dost, et al., *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 499, Art no. 166276, 2020.

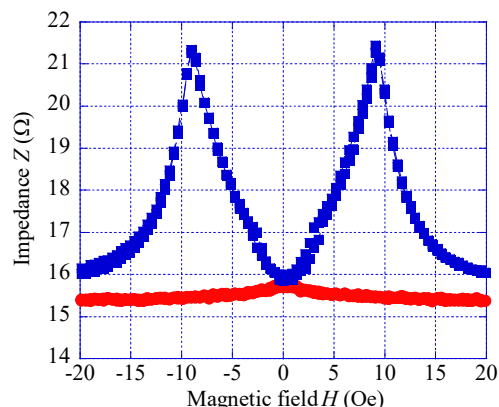


Fig. 1 Field dependence of impedance  $Z$  before and after Joule heating with magnets.

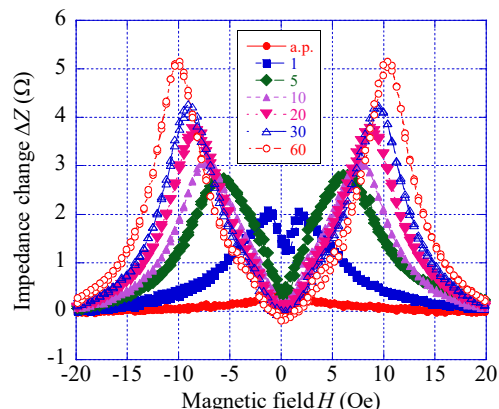


Fig. 2 Field dependence of impedance change  $\Delta Z$  when heating time changes.

## 高周波駆動薄膜センサにおける磁性薄膜スリットの最適幅に関する検討

坂本 雅弥 鈴木 椋太 石原 知弥 本多 順一 藪上 信  
(東北大学)

Considerations on Appropriate Slit Width of Line Type Thin Film Magnetic Field Sensor  
Masaya Sakamoto, Ryota Suzuki, Tomoya Ishihara, Junichi Honda, Shin Yabukami  
(Tohoku University)

**はじめに** これまで磁性薄膜を用いた直線コプレーナ線路を構成し, GHz 帯において表皮効果や強磁性共鳴を利用したセンサについて検討してきたが, 強磁性共鳴周波数におけるセンサシステムの感度が悪化することが課題であった. この原因はインピーダンス不整合による反射損失であることが示され<sup>(1)</sup>, 磁性薄膜にスリットを設けることでインピーダンス整合が実現できることを予測した. 本稿では磁性薄膜のスリット幅を有するセンサ素子を作製し, 各スリット幅における磁界に対する透過係数の測定値から最適なスリット幅について考察したので報告する.

**センサの動作原理及び実験方法** 本センサは薄膜の幅方向を磁化容易軸となるように磁気異方性を制御した磁性薄膜と誘電薄膜を介して成膜された直線コプレーナ線路によって構成されている. Fig. 1 に示すように磁性薄膜スリット幅がそれぞれ 6.0, 10, 26, 36, 50  $\mu\text{m}$  であるセンサ素子をガラス基板上に作製し, 電磁石を使用して -20 Oe ~ +20 Oe までの直流磁界を線路の長手方向(磁化困難軸)へ印加したときの透過係数( $S_{21}$ )の振幅及び位相をネットワークアナライザ(Advantest 社, R3767CG)を用いて測定した.

**実験結果** Fig. 2 に印加磁界に対する透過係数の振幅の測定結果を示すが, スリット幅が狭いほど磁界に対する振幅の変化が大きい傾向が確認でき, これは位相についてもおおむね同様であった. センサ素子の感度は(1)式より磁界に対する振幅及び位相の変化の割合と高周波キャリアの振幅の積に比例する<sup>(2)</sup>と仮定して求めた.

$$|V_o(\omega_c \pm \omega_s)| = \frac{JS(Z_b + R_o)R_o h_{ac}}{2\{Z_b + R_o + R_i\}^2} \left( \frac{\Delta Z}{\Delta H} \right) \quad (1)$$

ただし,  $\omega_c$ ,  $\omega_s$  はキャリア及び側波帯の角周波数,  $J$  はセンサに流れる電流密度,  $S$  は素子断面積,  $Z_b, R_o, R_i$  は素子の特性インピーダンスおよび測定器の入出力抵抗,  $\Delta Z/\Delta H$  は外部磁界に対するインピーダンスの変化率である. Fig. 3 は測定値より求めた振幅および位相の磁界に対する最大の変化の割合から導出したスリット幅に対するセンサ感度を示している. 同図より振幅及び位相感度はスリット幅 10  $\mu\text{m}$  付近で最大値であることから, この高周波駆動薄膜センサにおける磁性薄膜スリットの最適幅は 10  $\mu\text{m}$  付近となった.

**参考文献** (1) T. Ishihara et al, *Journal of Magnetic of Japan*, vol. 6 (2022). (2) N. Horikoshi et al, *Journal of Magnetic of Japan*, vol. 29, pp. 472 (2005).

**謝辞** 本研究は総務省「電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」(JPJ000254), NEDO Entrepreneurs Program (0329006), AMED (22ym0126802j0001)の支援を受けた.

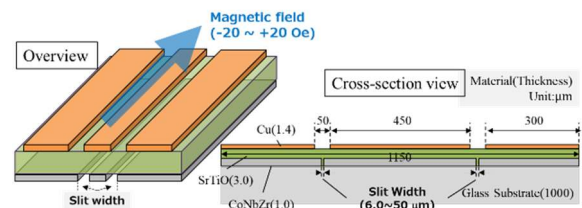


Fig. 1 Structure of proposed sensor.

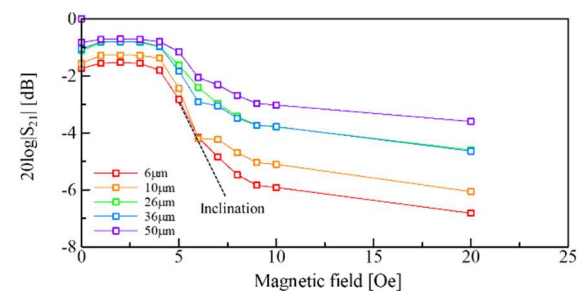


Fig. 2 Amplitude of transition coefficient versus magnetic field.

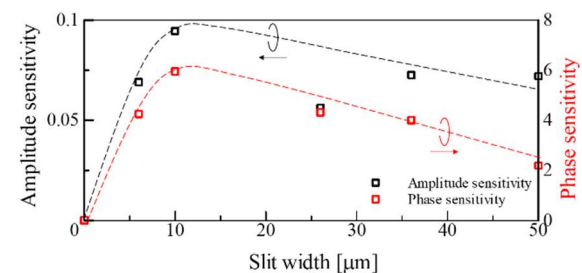


Fig. 3 Calculated amplitude and phase sensitivities.