

# 反磁界分布制御による磁性薄膜磁気センサの 小型・高感度化に関する検討

大江 駿, 菊池 弘昭, 植竹宏明, 藪上 信, 中居 倫夫, 栢 修一郎, 石山 和志  
(岩手大学, 東北学院大学, 宮城県産業技術総合センター, 東北大学)

Miniaturization of thin-film based magnetic field sensor with high sensitivity  
by controlling distribution of demagnetizing

S. Oe, H. Kikuchi, H. Uetake, S. Yabukami, T. Nakai, S. Hashi, K. Ishiyama  
(Iwate Univ., Tohoku-Gakuin Univ., ITIM, Tohoku Univ.)

## 1. 緒言

磁性体に直接高周波電流を通電し外部磁場に対するインピーダンス変化を利用した磁気インピーダンスセンサはMIセンサとも呼ばれ、高感度磁界センサとして用いられている。このセンサは外部磁界を印加した際の透磁率の変化が感度に大きく影響し、素子を小型化する場合、反磁界の低減が課題の一つである。MIセンサ素子の形状は矩形状のものが多く、その場合反磁界には分布が存在し(素子端部で強く、中央部で弱い)、センサ感度を低減することがわかっている<sup>(1)</sup>。本研究ではこの問題を改善するために反磁界分布が均一になると期待できる楕円状センサ素子を作製し、矩形状センサ素子との比較を行った。

## 2. 実験方法

素子には  $\text{Co}_{85}\text{Nb}_{12}\text{Zr}_3$  アモルファス薄膜を用い、フォトリソグラフィとスパッタリングにより成膜・加工した。作製素子の形状は矩形、楕円共に幅 50, 40, 30, 20, 10, 5  $\mu\text{m}$ 、長さ 1 mm、厚さ 2  $\mu\text{m}$  とした。素子の幅方向が磁化容易軸となるように磁界中熱処理により一軸異方性を付与した。インピーダンスの測定は素子中央部の 0.5 mm の範囲を用い、ネットワークアナライザにより行った。入力電力は -10 dBm、周波数は 100 MHz とした。測定時にはヘルムホルツコイルにより素子長手方向に磁界を印加した。

## 3. 実験結果

Fig. 1には矩形状と楕円状素子(幅 50  $\mu\text{m}$ )の外観写真を示す。素子部は 1 mm 長であるが、センシング部分(通電箇所)は 0.5 mm とした。Fig. 2 は Fig. 1 の素子に -10 dBm, 100 MHz の高周波電流を通電した場合におけるインピーダンスの直流磁界依存性を示した図である。矩形状素子より楕円状素子の方が感度 ( $dZ/dH$  値)、インピーダンス値の変化量ともに大きくなった。Fig. 3 は素子幅を 50 ~ 5  $\mu\text{m}$  まで変化させた場合の  $\Delta Z_{\text{total}}$  の推移を表した図である。 $\Delta Z_{\text{total}}$  は  $Z_m - Z_0$  で定義され、 $Z_m$  はインピーダンスの最大値、 $Z_0$  は磁界 0 でのインピーダンスを表している。インピーダンスの変化量は素子幅 20  $\mu\text{m}$  までは楕円状素子の方が高く、形状を楕円に変えたことによる改善がみられた。一方、幅 10  $\mu\text{m}$  以下では矩形状センサ素子の変化が大きいの。素子幅を狭くすることにより幅方向の反磁界が大きくなり、楕円状素子の方が容易軸の制御が困難になったことが原因と考える。解析結果についての詳細は会議で報告する。

## 文献

(1) H. Kikuchi, et al, *Sens. Acua. A*, **230**, pp. 142-149 (2015).

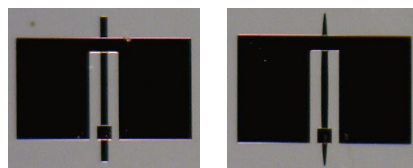


Fig. 1 Rectangle(left) and Ellipsoid(right) sensor elements.

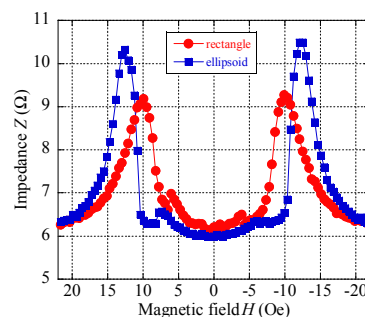


Fig. 2 Field dependence of impedance  $Z$  for 50  $\mu\text{m}$  wide elements at 100 MHz, -10dBm.

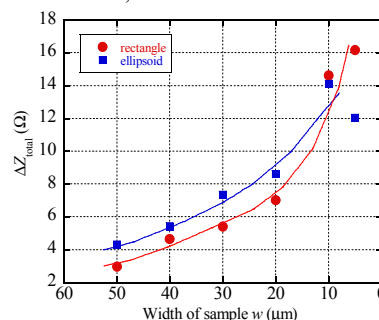


Fig. 3 Width dependence of  $\Delta Z_{\text{total}}$  at 100MHz, -10dBm.

## 高感度マルチコア MI 素子の開発

下出晃広、濱田典彦、山本道治  
(愛知製鋼)

Development of high sensitivity multi core MI element

A. Shimode, N. Hamada, M. Yamamoto  
(Aichi Steel Corporation)

### はじめに

MI センサは、MI (Magneto-Impedance, 磁気インピーダンス) 効果を利用した小型で高感度、且つ低消費電力の磁気センサであり<sup>1)</sup>、主に携帯電話やスマートフォン、タブレット向けの電子コンパスとして使用されている。その原理は、アモルファス磁性ワイヤの周りにピックアップコイルを巻き、外部磁場によるインピーダンス変化をピックアップコイルの出力電圧に変換するものである。メッキによるコイル形成方式の MI センサでは、アイチ・マイクロ・インテリジェントによって AMI306 が商品化されている<sup>2)</sup>。その磁気分解能は  $\mu\text{T}$  オーダーであるが、さらなる高感度化・低ノイズ化が求められている。一方、高感度に特化した巻線コイル方式の MI センサも商品化されている<sup>2)</sup>。この MI センサにおいては、感磁体であるアモルファス磁性ワイヤを複数本設置したマルチコア型のセンサヘッドにすることにより、感度が飛躍的に向上し、ノイズを低減できることが報告されている<sup>3)</sup>。

本研究では、前述のマルチコア型のセンサヘッドを採用した MI 素子の新設計により、大量生産に適したフォトリソ法とメッキによるコイル形成方式ながら、従来 (AMI306) と比較して飛躍的に高感度化・低ノイズ化に成功した MI 素子の開発とその特性について報告する。

### マルチコア MI 素子の設計

感磁体として、回転液中紡糸法で製造されたほぼ零磁歪の CoFeSiB 系アモルファス磁性ワイヤを使用し、その磁気特性は熱処理により調整した。また、MI 素子はフォトリソ法とメッキにより作製した。

MI 素子の高感度化・低ノイズ化のため、反磁界に及ぼすワイヤ長の影響、及び MI センサ特性に及ぼすワイヤの磁気特性、ピックアップコイルのコイルピッチの影響を調査した。さらに、マルチコア型のセンサヘッドにすることでさらなる高感度化・低ノイズ化を図った。

本研究で試作したマルチコア MI 素子の外観を Fig.1 に示す。その素子サイズは、 $1.5\text{mm} \times 1.7\text{mm} \times \text{厚} 0.5\text{mm}$  である。

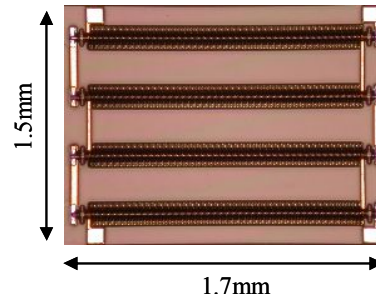


Fig.1 Appearance of developed MI element

### マルチコア MI 素子の特性評価

感磁ワイヤに通電させるパルス発生回路、及びピックアップコイルの出力を処理する信号処理回路を MI 素子に組み合わせ、MI センサを構成した。また、MI センサのノイズ密度は、3重磁気シールドボックス内のゼロ磁場雰囲気中で FFT アナライザにて測定した。測定したノイズ密度を Fig.2 に示す。開発したマルチコア MI 素子の周波数 10Hz におけるノイズ密度は、 $0.1\text{nT}$  であり、従来品 (AMI306) と比較して約 100 分の 1 となった。

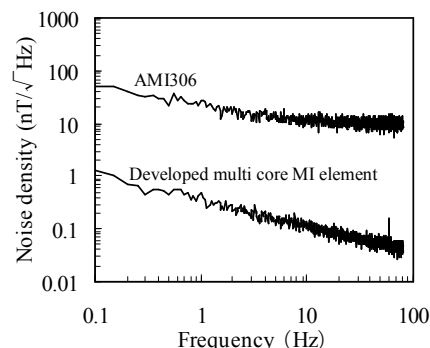


Fig.2 Noise density of developed MI element

### 参考文献

- 1) L. V. Panina and K. Mohri: Applied Physics Letter, 65(1994), 9, 1189-1191
- 2) AICHI MICRO INTELLIGENT Corporation Web site: <http://www.aichi-mi.com/>
- 3) T. Uchiyama et al, Intermag 2013, DG-05, Chicago, (2013)

# アモルファスワイヤを利用した磁界センサの高感度化

宋タンニ, 内山剛, 蔡長梅\*, 下出晃広\*

(名古屋大学, \*愛知製鋼)

High sensitivity magnetic sensor with amorphous wire

D.Song, T.Uchiyama, C.Cai\*, A.Shimode\*

(Nagoya Univ., \* Aichi Steel CORP.)

## 1. はじめに

アモルファスワイヤの磁気インピーダンス効果を利用した磁界センサ (MI センサ) は、工業用途から生体磁気計測まで、幅広い分野で応用されている。MI センサは、CMOS-IC 回路による高周波パルス電流をワイヤに励磁することにより、ワイヤに巻いたコイルに生じた誘導起電力のピークを検出し、アナログスイッチにより出力する。コイル出力型の MI センサの出力感度は、コイルの巻き数に依存して増加する。現在、生体磁気検出に求められる磁界センサの磁気分解能は pT(ピコテスラ)レベルである。

本研究では、微小磁界の検出に向けて、直径 25 $\mu$ m のアモルファスワイヤを利用し、MI センサの出力感度の向上とセンサシステムのノイズを評価することを目的として実験を行った。

## 2. 直径 25 $\mu$ m のアモルファスワイヤの磁気特性

MI 素子の高感度化 (低ノイズ化) に向けて、愛知製鋼 (株) は、ヒステリシスを低下させるため、ワイヤの軟磁気特性を改善した。また、ワイヤの直径  $D$  と長さ  $L$  の比 ( $L/D$ ) が 400 以上での場合、反磁界がほぼゼロとなり、感度を最大限に引き出すことができると考えられる。<sup>(1)</sup>

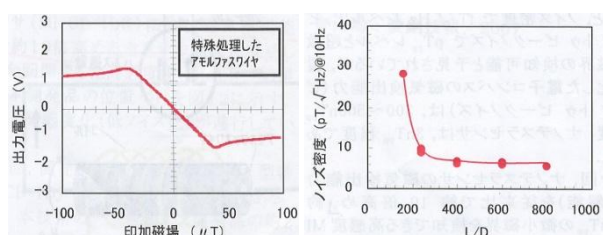


図 1. 直径 25  $\mu$ m アモルファスワイヤの磁気特性 (愛知製鋼)

## 3. 実験方法

MI 素子に印加された外部磁界を変化させ、巻き数の異なるコイルに生じた誘導起電力のピークを出力として測定し、出力電圧と外部磁界の相関よりセンサ感度を算出した。また、コイル巻き数が 800 ターンの場合の出力ノイズ

## 参考文献

- 1) 高感度 MI センサ “ナノテスラセンサ” の開発, 愛知製鋼
- 2) T. Uchiyama, A. Yamaguchi and Y. Utsumi, Magn, Soc. Jpn., 34,533(2010)

電圧波形を FFT 処理することで出力ノイズの周波数スペクトルを求めた。今回の実験で使用したアモルファスワイヤの長さは 10mm とした。

## 4. 実験結果

図 2 にコイルの巻き数が 100~800 ターンの時のセンサ感度を示す。実験によって、コイル巻き数が 400 ターン以上での場合、100kV/T の高感度な磁界検出特性が得られることが分かった。図 3 に MI センサの出力ノイズスペクトルを示す。1Hz におけるノイズレベルは 20pT/Hz<sup>1/2</sup> であり、10Hz~500Hz におけるノイズレベルは 5 pT/Hz<sup>1/2</sup> 以下であり、以前の我々の報告<sup>(2)</sup> に比べて、有意に減少したことがわかった。

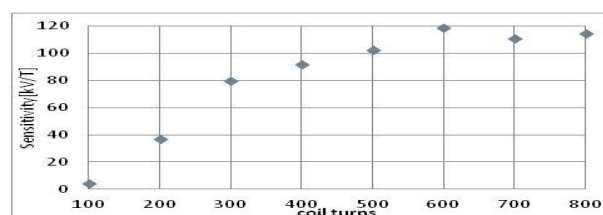


図 2. MI センサ出力感度

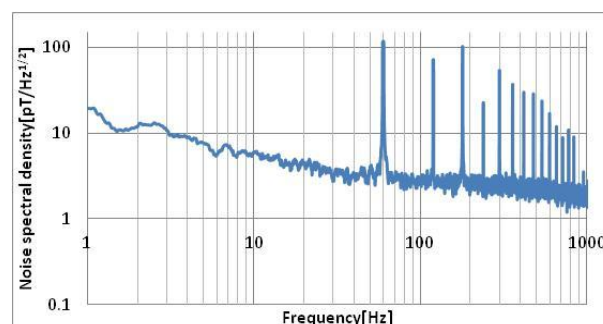


図 3. MI センサの磁気分解能

今後は、微小磁界を検出することに向けて更なる高感度化とシステムノイズの減少を目指し、センサ回路構成を検討する予定である。

# 集積化を目的とした TAD による磁気インピーダンスセンサ

呉鵬、渡辺高元\*、内山剛  
(名大、\* (株) デンソー)

Magneto-Impedance Sensor Based on TAD for Circuit Integration

P. Wu, T. Watanabe\*, and T. Uchiyama,  
(Nagoya Univ., \*DENSO CORP.)

## はじめに

近年、スマートフォンやウェアラブルデバイスを構成するために、センシングシステムは集積化され、より高性能になりつつある。磁気インピーダンスセンサ (MI センサ) は、アモルファスワイヤの磁気インピーダンス効果 (MI 効果) を利用しており、現在集積化された MI センサ (MIIC) が実現されている。最近、我々はピコテスラ ( $10^{-12}\text{T}$ ) オーダーまで測定可能な MI センサを開発し、さらに TAD (Time A/D converter)、FPGA (Field Programmable Gate Array) と組み合わせることによりセンサの高分解能及び低ノイズ化を検討している。現在研究室で試作している高感度 MI センサの駆動回路は CMOS IC、アナログ素子 (抵抗、キャパシタ、バッファおよびスイッチ) により構成されている。この回路は集積化が難しいため、高感度な MI センサの集積化に向けて TAD、FPGA により回路を構成した高分解能 MI センサの開発を目的として、本研究を行った。

## 実験方法

従来組み込まれていた CMOS インバータ、抵抗、キャパシタを FPGA に置き換え、更に、高利得アナログ増幅回路を TAD に置き換えることにより、サンプルホールド回路を取り除くことで MI センサをデジタル集積回路で構成した。TAD の出力は FPGA 内で信号処理され、パソコン (PC) へデータの送信が行われる。

## 実験結果

Fig. 1 は MI センサを 500kHz、1MHz、5MHz のクロックで駆動した時のシステムの出力である。外部磁界に対する出力は線形性を得ることができた。5MHz の場合、磁化検出分解能は 22.2pT/LSB で最大となった。

Fig. 2 は 450pT の振幅で 10Hz の正弦磁界を印加した時のパワースペクトル密度から、SN 比を求め、サンプリングホールド回路を含んだシステムと比較したものである。集積化したシステムでは、10Hz 以下のノイズを低減させることができた。

## まとめ

集積化した MI センサは 22.2pT/LSB の分解能を有し、高い SN 比が得られた。今後、FPGA 内で LPF 信号等のリアルタイム処理を実現することで、生体信号計測等様々な分野への応用が期待できる。

## 参考文献

- Shingo Tajima, et al., "High Resolution Magneto-impedance Sensor with TAD for Low Noise Signal Processing," *Proc. IEEE INTERMAG*, 2014.

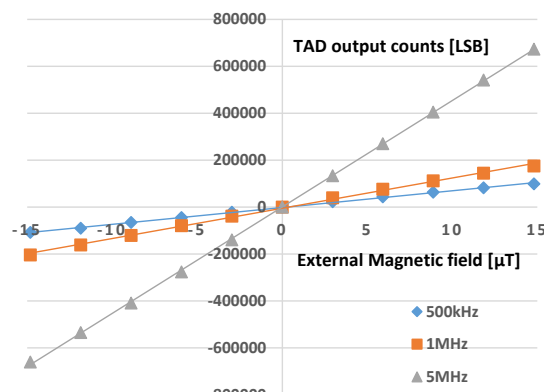


Fig. 1. Operation characteristics of the MI sensor system in different operation clock when the external magnetic field is changed.

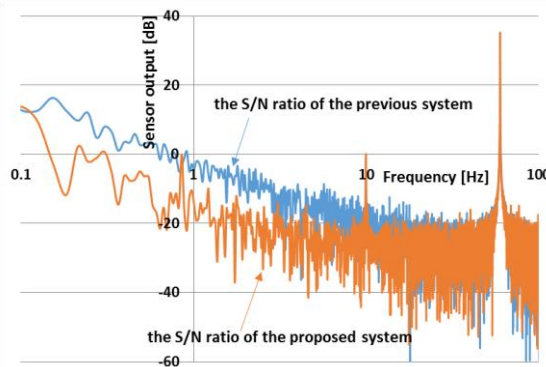


Fig. 2. The S/N ratio of the system by frequency analysis.

## 異物検知用超高感度ナノテスラセンサの開発

## Development of Super Highly-sensitive nT Sensor for Foreign Substance Detective

蔡長梅、濱田典彦、下出晃広、森正樹、山本道治

愛知製鋼株式会社

## はじめに

MI 効果とは、アモルファス磁性ワイヤに高周波電流あるいはパルスを通電すると、外部磁界によって磁性体のインピーダンスが極めて大きく変化する電磁現象である<sup>1)</sup>。この MI 効果を利用した低ノイズ MI センサ (MI-CB-1DK)<sup>2)</sup>は、10Hz で 20 pT/Hz<sup>0.5</sup> のノイズ密度を有している。2006 年に商品化されて以来、食品、アパレル製品、非磁性の工業製品などの鉄系異物検知として活用されている<sup>3)</sup>。しかし、用途によってセンサ出力が容易に地磁気の中で飽和するなどいくつかの課題があった。そこで我々は、10Hz で 10 pT/Hz<sup>0.5</sup> の低ノイズ密度を維持すると同時に地磁気で飽和しない MI センサ (MI-CB-1DH) の設計をした (Fig.1)。また、このセンサで市場ニーズである直径 0.3mm の微小鉄系の異物検出に成功した。

## ナノテスラセンサの設計

このナノテスラセンサは、1方向の磁気を検知する磁気ヘッド (MI 素子) とその MI 素子を動作させる電子回路から構成している。(1)MI 素子: 長さ 6 mm のアモルファスワイヤ (FeCoSiB) の周りに 30um の銅線で作られたピックアップコイルを巻く。コイルのターン数は 300 である。(2)電子回路設計: 低周波数側のカットオフ周波数を 0.1Hz にすることにより、地磁気などの静磁場において、移動体が発する磁場変化を高感度で検出することを実現した。

## 異物検出の検証結果

食品中の異物検出の場合には、ステンレス鋼の加工設備から出てくる鉄系金属粒子が混入することがある。直径 0.3mm の鉄球を 10mm の距離から一定の速度で移動させた時の結果を Fig.2 に示している。十分な信号が検出された。

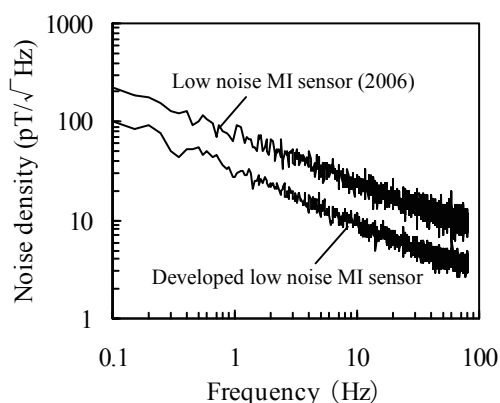


Fig.1 Noise density of developed low noise nT sensor

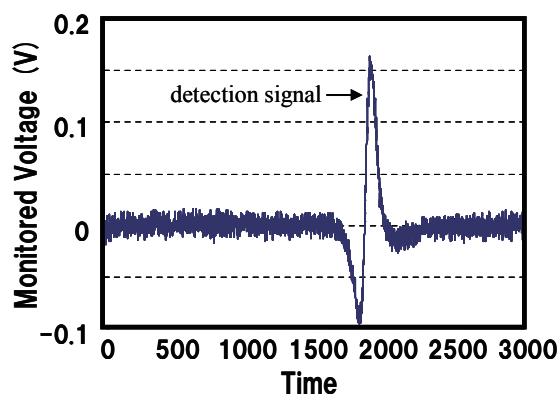


Fig.2 Detective result of a particle with a size of 0.3 mm

## 参考文献

- 1) L.V.Panina, K.Mohri, Magneto-Impedance Effect in Amorphous Wires, Appl. Phys. Lett., 65(1994)
- 2) N. Hamada et al, Intermag 2011, FF-08, Taipei, (2011)
- 3) T. Uchiyama et al, Intermag 2013, DG-05, Chicago, (2013)

# 一次グラジオメータ型 MI センサによる食品内異物検知

滝谷貴史、王可望、内山剛、青山均\*  
(名古屋大学、\*愛知製鋼)

Foreign substance detection in food by using primary gradiometer type MI sensor

T. Takiya, K. Wang, T. Uchiyama, H. Aoyama  
(Nagoya University, \*Aichi steel)

## はじめに

アモルファス磁性ワイヤに高周波正弦電流を通電した場合、外部磁界によって磁性体のインピーダンスが極めて大きく変化する MI(Magneto-Impedance)効果が発生する<sup>1)</sup>。この現象を利用した MI センサは、pT(ピコテスラ)から mT(ミリテスラ)の磁気が検出可能であり、生体磁気計測(脳磁場計測等)への応用が研究されている<sup>2)</sup>。高感度な磁界センサは外部磁界の影響を受けやすく、磁気シールドを必要とするが、MI センサは地磁気下で安定動作可能なため、空間的な磁界の差分をとるグラジオメータとすることで外乱磁界の影響を低減可能である<sup>3)</sup>。

本稿では、環境外乱磁界の影響を抑制した一次グラジオメータ型 MI センサを用いて SUS304 鋼球の磁気信号を検出し、本センサの食品内異物検知システムへの応用を検討した。

## 実験方法

$\phi = 0.3\text{mm}$  の SUS304 鋼球を回転台に乗せ、一次グラジオメータ型 MI センサを用いてヘッドから鋼球までの距離を 30 mm とした場合の磁気信号を検出した。回転台の回転速度は毎分 15 m とし、使用したセンサヘッドの MI 素子は  $\phi = 25\ \mu\text{m}$ 、長さ 10 mm で、ピックアップコイルの巻き数は 700 回とした。

## 実験結果

Fig.1 に MI センサの出力信号  $E_{\text{out}}$  を示す。鋼球がヘッドを通過した際の最大出力電圧は 19 mV<sub>p-p</sub> であり、0.689 nT の磁気信号に相当する。VSM を用いて測定した SUS304 鋼球( $\phi = 0.3\text{mm}$ )の残留磁気モーメントは 347  $\mu\text{emu}$  であるため、鋼球から 30 mm 離れた位置の磁界は 0.8 nT であり、一次グラジオメータ型 MI センサを用いて SUS304 鋼球の磁気信号を検出可能であることを明らかにした。

食品パッケージ内異物検知システムに本センサを用いる場合、例えば、一般的な冷凍食品の形状は 230×140×30 mm であるため、ベルトコンベアの上に本センサを配置することで金属異物を検知可能と考えられる。食品異物検知には X 線方式や SQUID 磁気センサ方式等があるが、X 線方式の SUS 金属球の検出下限は  $\phi = 0.4 \sim 1.0\ \text{mm}$  であるため、今回の測定結果は有意義であり、かつ X 線を照射できない食品にも使用可能である。また、SQUID 磁気センサ方式と比較した場合、磁気シールドや冷却システムを要さないためセンシング機構の小型化および低価格化が期待できる。

## 参考文献

- 1) L. V. Panina and K. Mohri : Applied Physics Letter, 65(9), pp.1189-1191, (1994)
- 2) T. Uchiyama, K. Mohri, Life Fellow, IEEE, Y. Honkura, and L.V. Panina: IEEE Trans. Magn., Vol.48, No.11, pp. 3833-3839, Nov 2012
- 3) T. Utciyama : Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection , Vol.63, pp.562-566, Nov. 2014

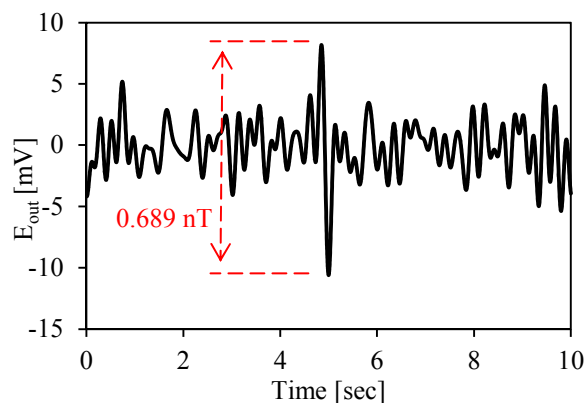


Fig. 5 Output of MI sensor

## 二層成形した磁性複合材の界面層の誘電率・透磁率推定

三橋敏史, 三浦健司, 長田洋, 関野登, 小林正彦, 木口実, 大友祐晋  
(岩手大, 森林総研, エア・ウォーター・エコロッカ株式会社)

Estimation of permittivity and permeability of interlayer for double-layered magnetic composites

T. Mitsuhashi, K. Miura, H. Osada, N. Sekino, M. Kobayashi, M. Kiguchi, Y. Ohtomo  
(Iwate University, Forestry and Forest Products Research Institute, Air Water Ecoroca Inc.)

### はじめに

再生プラスチック・磁性粉・木粉等を混練することで電波吸収するための磁気・誘電損失を付与した混練型 WPC (Wood Plastic Composites) が提案されている<sup>1)</sup>。混練型 WPC 製造過程で用いられているプラスチック多層成形技術は、電波吸収体の広帯域性や、整合の容易さ、意匠性の付加等においても有効な技術であると考えられるが、二層成形時において生じる界面凹凸の電磁特性に対する影響が懸念される。本研究では、簡易的に作製した磁性複合材二層成形体の界面凹凸部分の誘電率・透磁率を S パラメータ解析によって推定することを試みた。

### 試料作製と透磁率・誘電率推定手法

母材がポリプロピレン、混合媒質が Mn-Zn フェライト磁性粉の複合材料において、圧密前の磁性粉体積割合が 5% (M5) と 40% (M40) の二種類の平板型成形体を準備し、それらを重ねて熱圧縮することで平板二層型成形体を作製した。外観から、M5 層と M40 層の厚さ (平均値) はそれぞれ、4.16 mm, 3.15 mm であったが、界面の凹凸が認められた。その凹凸部を界面層としたとき、外観写真からその界面層厚さはおよそ 0.28 mm と見積もられた。二層型成形体と M5, M40 単層の複素比誘電率と複素比透磁率は、VNA で同軸管法を用いて測定した S パラメータに Nicolson-Ross 法を適用することで求められた。界面層の S パラメータは、二層型成形体の S パラメータから界面層以外の M5 層, M40 層部分の成分を取り除くディエンベディング (De-embedding) 手法により推定された。具体的には、二層成形体の S 行列を T 行列に変換し、T 行列の両側から M5 の T の逆行列と M40 の T の逆行列を乗ずることにより、界面層の T 行列を求めた。その後、S 行列に再度変換し、均質材料と同様に Nicolson-Ross 法を適用した。

### 実験結果

Fig. 1 には、本手法により求めた界面層の誘電率実部を示す。算出された界面層の誘電率実部は M5 層, M40 層の誘電率実部より高い値を示した。他の定数 (透磁率実部, 誘電率虚部, および透磁率虚部) は誘電率実部のような大きな違いは見られなかった。測定精度に関してまだ改善の必要があると考えられるが、この手法による結果から、界面層における誘電率実部は二層のものより相当大きな結果であったため、界面の凹凸による電界の擾乱の発生などの電磁的な現象が関わっていると考えられる。

### 参考文献

- 1) 三浦他, 第 63 回日本木材学会大会研究発表要旨集, I28-P-AM04 (2013) .

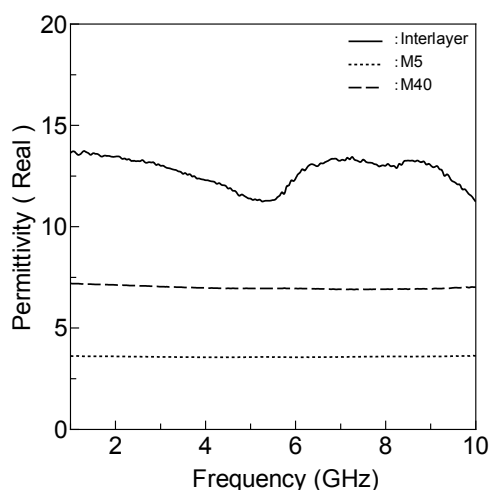


Fig. 1 M5, M40 とディエンベディング法により求められた界面層の誘電率実部

## マイクロストリップ型プローブによる極薄膜透磁率評価

楠 洗介, 藪上 信\*, 小澤哲也\*, 植竹宏明\*, 山田 洋, 宮澤 安範\*\*, 内海 良一\*\*, 島田 寛\*\*\*  
(仙台高等専門学校, \*東北学院大学, \*\*東栄科学産業, \*\*\*東北大学)

Permeability measurement of magnetic thin film by microstrip probe

K. Kusunoki, S. Yabukami\*, T. Ozawa\*, H. Uetake\*, H. Yamada, Y. Miyazawa\*\*, R Utsumi\*\*, Y. Shimada\*\*\*  
(Sendai National Collage of Technology, \*Tohoku Gakuin University, \*\*Toei Scientific Industrial co., ltd, \*\*\*Tohoku University)

**1 はじめに** インピーダンス整合を考慮したマイクロストリップ型プローブを磁性膜に近接させることで、非破壊に数 nm 程度の極薄膜の透磁率計測を試みた。

**2 計測方法** Fig. 1 は計測システムの構成、及び磁性薄膜の配置を模式的に示した図である。プローブは2本のセミリジッドケーブルと直線マイクロストリップ線路で構成されている。磁性薄膜にレジスト(厚さ約 4 μm)を塗布し、マイクロストリップ導体を磁性薄膜に近接配置することで透磁率を評価する。直線マイクロストリップ線路に流れる高周波電流は線路の幅方向に高周波磁界を励磁することになるため、困難軸方向の透磁率が高周波インピーダンスに対応する。プローブは同軸ケーブルを介してネットワークアナライザ(アジレントテクノロジー製 8722ES)に接続し、薄膜の容易軸方向へ約 1147 Oe の直流磁界を印加し、飽和させた状態でネットワークアナライザをキャリブレーションする。その後、直流磁界を解除して透過係数( $S_{21}$ )を測定する。その透過係数を用いて、(1)式よりインピーダンスを算出する。線路に高周波電流が流れると、渦電流が表皮効果によって磁性膜の膜厚方向へ一次元的に偏ること、インピーダンス  $Z_s$  が決定されることを仮定し、(2)、(3)式を用いて Newton-Raphson 法により、複素透磁率を最適化する<sup>1)</sup>。

$$Z_s = 50(1 - S_{21})/S_{21} \quad (1)$$

$$Z_s = \frac{k_s \rho l}{2w} \coth\left(\frac{k_s t}{2}\right) \quad (2)$$

$$k_s = \frac{(1+j)}{\sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}}} \quad (3)$$

ただし、 $\rho$ は抵抗率、 $l$ は試料長さ、 $w$ は試料幅、 $t$ は膜厚、 $f$ は周波数、 $\mu_r$ は複素比透磁率である。

**3 計測結果** Fig. 2 に CoNbZr 薄膜(25 mm × 25 mm, 厚さ 5 nm) にレジスト(約 4 μm 厚)を塗布した状態で透過係数を測定し、透磁率へ換算した結果を示す。CoNbZr 薄膜は RF スパッタ法により成膜した。磁化容易軸へ約 100 Oe の直流磁界を印加して、

透過係数の測定を行った。●○は最適化法により求めた測定値であり、点線、及び破線は LLG 方程式と渦電流を考慮した理論値<sup>2)</sup>である。強磁性共鳴の周波数付近を含めて、理論値及び測定値は約 7 GHz まで概ね一致し、極薄膜の透磁率を測定出来ていることが確認できる。

**謝辞** 本研究の一部は JST 復興促進プログラムの成果である。

**参考文献** 1) T. Kimura, S. Yabukami, T. Ozawa, Y. Miyazawa, H. Kenju, and Y. Shimada, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, **38**, 87 (2014).  
2) Y. Shimada, J. Numazawa, Y. Yoneda and A. Hosono, *J. Magn. Soc. Jpn.* **15**, 327 (1991).

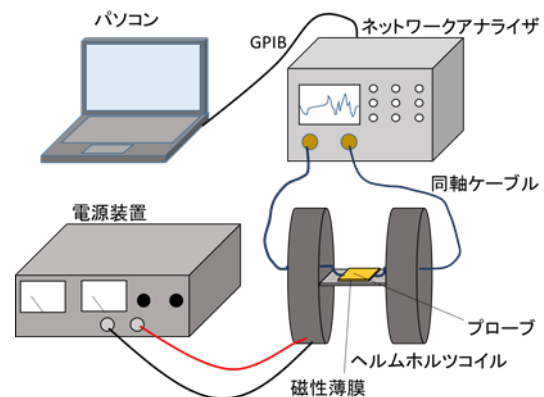


Fig. 1 Schematic of measurement system.

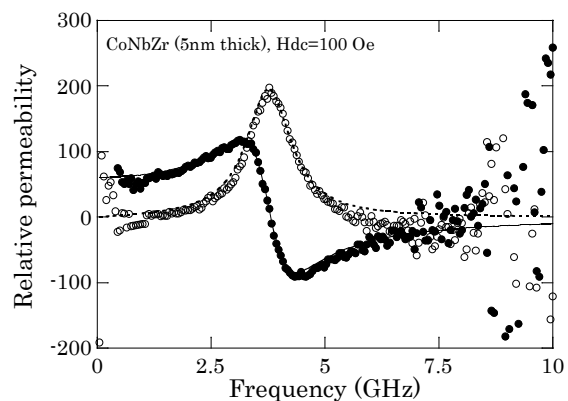


Fig. 2 Permeability of CoZrNb film(25 mm × 25 mm, 5nm thick).



# 基板の誘電率を考慮した短絡MSLによる磁性薄膜の透磁率測定

武田 茂, 発知富夫\*, 本村貞美\*, 鈴木洋介\*  
(有) Magnotech, \*キーコム 株

Permeability measurement of magnetic thin film by the shielded short-circuited MSL considering the substrate permittivity

S. Takeda, T. Hotchi\*, S. Motomura\*, and H. Suzuki\*  
(Magnotech, Ltd., \*KEYCOM Corp.)

**はじめに** 短絡MSL(Micro Strip Line)を用いて磁性薄膜の透磁率を測定する方法はよく知られている<sup>1)</sup>。この場合、基板の誘電率の影響を無視できない。今回、この影響を積極的に取り入れた解析方法を開発した。

**実験方法** Fig.1 に測定治具の断面図を示す。ここで、図中の諸元は、 $h_1=0.6\text{mm}$ ,  $h_2=3.7\text{mm}$ ,  $l=5\text{mm}$ ,  $d=0.5\text{mm}$  である。 $t$ は膜厚である。磁性薄膜の面は地導体に接している。感度を上げるためには、 $h_1$ を $d$ にできるだけ近づける必要がある。結果として、コネクタから見たアドミタンスは基板の誘電率の影響を強く受ける。まず、試料無しの状態でVNAによりコネクタからの反射パラメータ  $S_{11o}$  を測定する。次に、試料を装荷し、静磁界(5kOe)を紙面に垂直方向に印加して、 $S_{11o}$  を測定する。そして、静磁界を取り除き、 $S_{11s}$  を測定する。

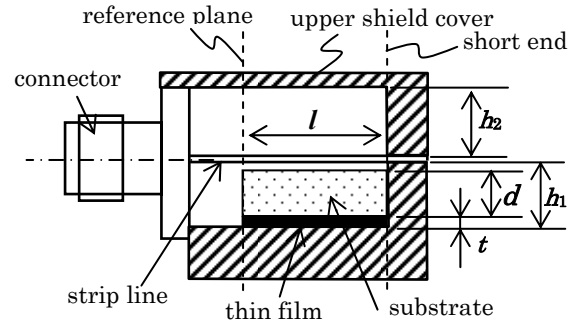


Fig.1 Cross sectional drawing of shielded short-circuited microstrip line with magnetic thin film,

**解析方法** 解析の基本的手法は集中定数近似に従う<sup>2)</sup>。 $S_{11o}$ と $S_{11s}$ から試料が置かれている部分 $l$ の実効誘電率  $\epsilon_{\text{eff}}$  を導き出す。次に、 $\epsilon_{\text{eff}}$  を考慮して、 $S_{11o}$ と $S_{11s}$ から実効透磁率  $\mu_{\text{eff}}$  を求める。磁性薄膜の $l$ 部分に対する結合係数を $\eta$ とすると<sup>3)</sup>、薄膜の複素透磁率  $\mu = \mu' - j\mu''$  は、 $\mu' = (\mu_{\text{eff}} - 1)/\eta + 1$ ,  $\mu'' = \mu''_{\text{eff}}/\eta$  である。最後に、 $\beta l = 2\pi/\lambda = 2\pi(\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}})^{1/2} l / \lambda$ ,  $< 1.4$  を用いて、測定結果が集中定数近似内にあるかどうかの判定を行う<sup>2)</sup>。この範囲内にある場合は、測定結果は $\pm 5\%$ の誤差内にある。1.4を超えても、誤差は増えるが測定結果の定性的な議論はある程度可能である。

**実験結果** Fig.2 に実効誘電率  $\epsilon_{\text{eff}}$  と実効透磁率  $\mu_{\text{eff}}$  の測定結果及び判定結果  $\beta l$  を示す。 $\beta l$ は 10GHzまで 1.4以下であり集中定数近似が成立している。Fig.3 に実際の磁性薄膜の透磁率の測定結果を示す。

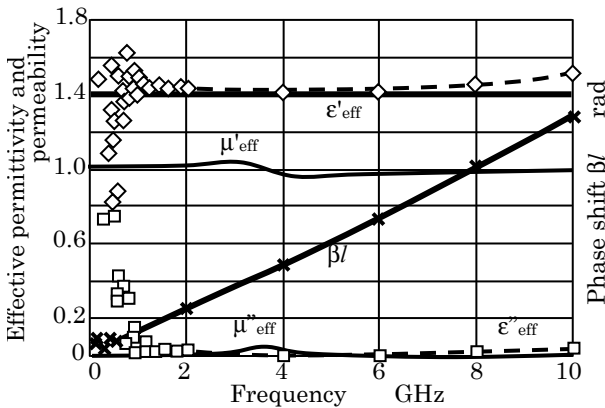


Fig.2 The measurement results of  $\epsilon_{\text{eff}}$ ,  $\mu_{\text{eff}}$ , and  $\beta l$  of test fixture with the magnetic thin film on 5mm square glass substrate of 500 $\mu\text{m}$  thickness,

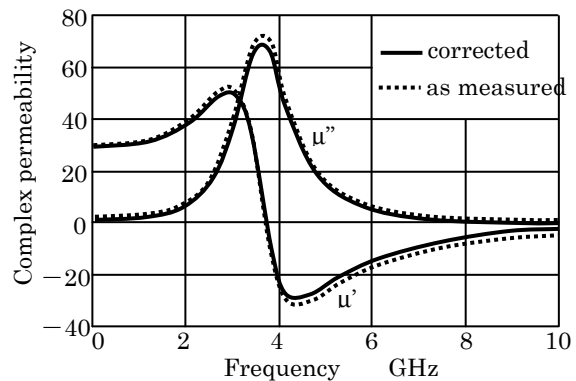


Fig.3 The measured complex permeability of magnetic thin film with 1.45 $\mu\text{m}$  thickness on 5mm square glass substrate with 500 $\mu\text{m}$  thickness (prepared by H.Kijima).

最後に、興味深い磁気特性を有する磁性薄膜を提供いただきました東北大学 青木(旧姓木島)英恵博士、電磁材料研究所 直江正幸博士、中央大学 川井哲郎研究員に感謝申し上げます。

**参考文献**

- 1) D.Pain, M.Ledieu, O.Acher, L.Adenot, and F.Fuerverger, *J. Appl. Phys.*, **85**, 5151 (1999),
- 2) S. Takeda, S. Motomura, T. Hotch, and H. Suzuki, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 116-120(2015),
- 3) S. Takeda, S. Motomura, T. Hotch, and H. Suzuki, *J. Jpn. Soc. of Powder and Powder Metallurgy*, Vol.61, (2014), No.S1, pp.S303-S307,

## Measurement of complex permeability of Co- and Ti-substituted Sr-M by short-circuited coaxial transmission line method

Ranjit Sai,<sup>1</sup> Shigeru Takeda,<sup>2</sup> Yasushi Endo,<sup>1</sup> Hanae Aoki<sup>1</sup> and Masahiro Yamaguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Tohoku University, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan.

<sup>2</sup>Magnontech Ltd., □787-16 Juroken, Kumagawa, saitama, 360-0846, Japan

The recent trend of mobile communication technology directs the usage of X-band (8-12 GHz) frequencies in near future. As a result, the study of various hexaferrite materials, owing to their moderate permeability and very low loss, has surged up over the last few years,<sup>1</sup> while the challenging task of accurate measurement of magnetic characteristics beyond 10 GHz has also attracted a lot of interest. Among various measurement techniques, non-resonant type measurement with the help of simple transmission line offers easy, accurate and broadband measurement. In this report, high frequency (up to 30 GHz) magnetic characterization of Co- and Ti- substituted Sr-based M-type hexaferrite particles (SrCoTiFe<sub>10</sub>O<sub>19</sub>, will be called SrCoTiM hereafter) is demonstrated by adopting coaxial transmission line based measurement technique. Instead of the usual lumped element approximation that induce large model errors in case of measurements beyond a few GHz, the new lumped element expression of short-circuited transmission line is used to restrict the model error within permissible limit.<sup>2</sup>

SrCoTiM powder was procured and mixed with epoxy resin (at 5:1 volume ratio in favor of ferrite) to make a semi solid paste, which was then used to form a thin layer of ~200 μm. A toroid-shaped sample with inner and outer diameter of 3 mm and 7 mm respectively was punched out from that thin sheet of ferrite. Frequency dispersion of complex relative permeability of the sample was estimated by analyzing reflection coefficients ( $s_{11}$ ) obtained by placing the sample at the short-end of the transmission line fixture. It is to be noted that the distributed element expression for the input impedance of short-circuited transmission line was judiciously approximated by considering only the first two terms of its Taylor series expansion. This slight modification in the analysis increases the range of measurable frequencies and accuracy. Magnetic hysteresis of SrCoTiM, measured by room temperature VSM, shows saturation magnetization of ~200 emu/cc and coercivity of ~330 Oe (Fig. 1b). Moreover, it is found that the saturation is attained gradually over a wide span of fields. The saturation field, which can be viewed as the anisotropy field of well-formed ferrite particles, is believed to be around 7000 Oe. The measured FMR, found to be ~20.6 GHz as shown in Fig 1c. More than one FMR peaks can be attributed to the presence of particles with wide size distribution (Fig. 1a). The loss ( $\mu''$ ) profile is found to be negligible up to 15 GHz, while  $\mu'$  is independent of frequency up to 12 GHz, which in turn, indicates that the material could be well suited for various application such as inductors for X-band and electromagnetic noise suppressor for Ku-band. However, the measurement above 26 GHz requires further investigation.

In essence, high frequency magnetic characterization up to 26 GHz of an important class of hexaferrite is demonstrated by using a simple short-circuited coaxial transmission line equipped with a slightly modified analysis technique.

### Reference

<sup>1</sup> V.G. Harris, IEEE Trans. Magn. **48**, 1075 (2012).

<sup>2</sup> S. Takeda, T. Hotchi, S. Motomura, and H. Suzuki, J. Magn. Soc. Japan **39**, 116 (2015).

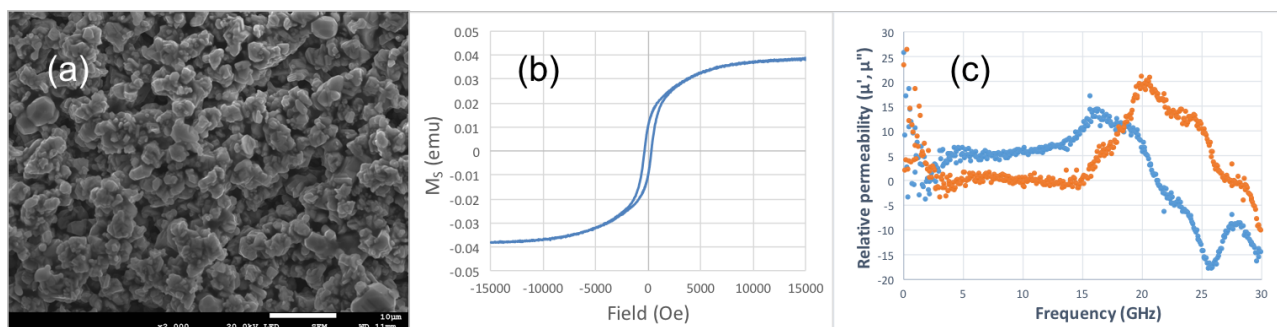


Fig. 1: (a) SEM image, (b) Hysteresis plot and (c) complex permeability spectra of SrCoTi-M+epoxy mixture

# うず電流検査法による導電性・磁性マーカの計測に関する研究

南谷 保, 山田 外史  
(金沢大学)

Research on detection of conductive and magnetic markers using eddy-current testing approach  
Tamotsu Minamitani, Sotoshi Yamada  
(Kanazawa University)

## はじめに

うず電流検査法(ECT)は非破壊検査の一種で主に非磁性導体の表面キズの探傷, PCBのパターン欠損, 金属粒の検出などに利用されており, 筆者らは, GMR (Giant Magneto-Resistance) 素子を用いて, 導電性インクの検出に関する研究を行ってきた<sup>1),2)</sup>. 現在, 紙幣などの有価証券はセキュリティ対策として磁性マーカが印刷されている. 上記の手法を用い導電性と磁性マーカを同時に読み取り, マーカの種別が可能になるとセキュリティ向上が期待できる. そこで, 筆者らは GMR 素子を用いた ECT 技術により, 導電性と磁性マーカの種別の可能性を検討したので報告する.

## うず電流検査法によるインク検出の原理

Fig.1 に示す ECT プローブは, GMR 素子とミアンダコイルで構成されており, GMR 素子は x 方向の磁界の検出, 励磁コイルは励磁電流により z 方向に高周波交流磁界を発生する. マーカが x 方向に移動すると, 導電性マーカの場合はうず電流により生じる磁界の x 成分, 磁性マーカの場合は磁束の収束による生じる磁界の x 成分を GMR 素子で検出する.

Fig.2 は有限要素法 (2次元) による, z 方向に均一な高周波磁界中 (5MHz, 1mT) におけるマーカ (2×0.05 mm) の 0.3mm 上部の磁束密度の x 成分のシミュレーション結果である. (a)が導電性マーカ ( $\sigma = 6 \times 10^7 \text{ S/m}$ ), (b)が磁性マーカ ( $\mu^* = 10$ ) を示す. これより, マーカの両端で磁束密度がピークを示し, 導電性マーカと磁性マーカでは波形が反転することがわかる.

## 導電性・磁性マーカの測定結果

Fig.3(a)は導電性マーカ (2×20×0.035 mm, 銅箔), Fig.3(b)が磁性マーカ (2×20×0.05 mm, 磁性インク) の出力の測定結果である. 計測条件は励磁周波数 5MHz, 励磁電流 200mA で, GMR 素子とマーカの間隔は 0.2mm である. これより, マーカの両端のピーク, 波形の反転がシミュレーションと同様な結果を得た. これは, 出力波形により, 導電性マーカと磁性マーカの識別の可能性を示している.

研究の一部は, 科学研究補助金基盤研究(C)(課題番号 26420384)により行われた.

## 参考文献

- 1) T.Minamitani,S.Uraoka,Y.Ikehata, S.Yamada , Digest of 2015 JIEE Annual Conference, 2-115 , 2015.
- 2) T.Minamitani,S.Uraoka,Y.Ikehata, S.Yamada , JIEE Technical paper of Magnetic meeting, MAG-14-139, pp.1-4 , 2015.

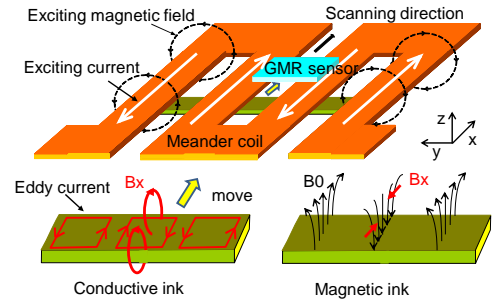
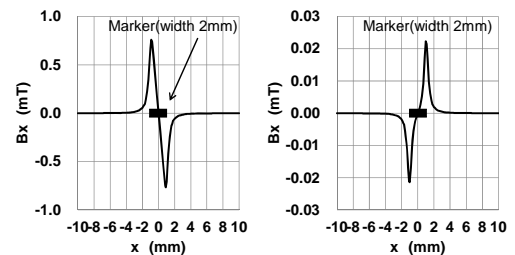
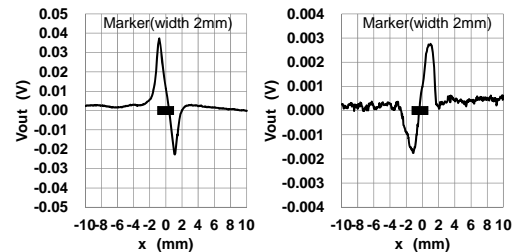


Fig. 1 Principle of ECT inspection of maker.



(a) Conductive marker (b) Magneteic marker

Fig. 2 Simulation by FEM analysis.



(a) Conductive marker (b) Magneteic marker

Fig. 3 Difference of detected signals among conductive and magnetic markers.

## 複合扁平磁性微粒子コンポジットを用いた マイクロインダクタの電気特性評価

遠藤恭<sup>1</sup>, 佐藤寛之<sup>1</sup>, エルデネバットウヌボルド<sup>1</sup>, 宮崎孝道<sup>1</sup>, 山口正洋<sup>1</sup>, 鎌田博<sup>2</sup>, 高橋正仁<sup>2</sup>,  
坂元真彦<sup>2</sup>, 米田茂<sup>2</sup>, 加藤直也<sup>2</sup>, 萬恭明<sup>3</sup>, 安井隆<sup>3</sup> (<sup>1</sup>東北大工, <sup>2</sup>光電子(株), <sup>3</sup>(株)リコー)

Study on the electric performance of micro-inductors with magnetically soft spheres and flakes composite

Y. Endo<sup>1</sup>, H. Sato<sup>1</sup>, U. Erdenebat<sup>1</sup>, T. Miyazaki<sup>1</sup>, M. Yamaguchi<sup>1</sup>, H. Kamada<sup>2</sup>, M. Takahashi<sup>2</sup>,  
M. Sakamoto<sup>2</sup>, S. Maita<sup>2</sup>, N. Kato<sup>2</sup>, Y. Yorozu<sup>3</sup>, T. Yasui<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>Tohoku Univ., <sup>2</sup>Hikaridenshi Co., LTD, <sup>3</sup>Ricoh Co., Ltd)

**はじめに** 近年, 小型携帯端末において多機能化が進み, また内蔵されている LSI の低電圧・大電流駆動化にともなうて, 電子機器内の電源回路における消費電力は増大している. そのため, 電池の使用時間の向上と電源-配線間での損失を減少させる方法の一つとして, DC-DC コンバータのワンチップ化が提案されている<sup>1)</sup>. しかしながら, この方法では DC-DC コンバータの高さが増加することが予想され, 半導体素子と比べて寸法が大きくエネルギー密度の低いインダクタの小形・低背化が課題である. したがって, 高いインダクタンス密度が必要であり, 高飽和磁化を有する磁心材料を用いることが進められている. 本研究では, 高飽和磁化を有する複合扁平磁性微粒子コンポジットを用いたマイクロインダクタを試作し, その電気特性を評価した結果を報告する.

**実験方法** マイクロインダクタの設計指針として, スイッチング周波数 6 MHz で 5 W 級のバックコンバータへの適用を想定した. 電気特性に関しては, 定格電流 1 A においてインダクタンス 0.5  $\mu\text{H}$  以上, 直流および交流抵抗 0.1 および 2  $\Omega$  以下とし, また寸法に関しては高さ 0.5 mm 以内および外径 3.0 mm 以内とした. マイクロインダクタの設計・試作を行うにあたり, インダクタの素線にはコイル単体の直流抵抗を抑制するために丸線を, また, 複合微粒子としては, サブミクロン径の Fe-Cr-B-Si-C 球形微粒子と, 平均粒径 50  $\mu\text{m}$ , 厚さ 3  $\mu\text{m}$  の Fe-B-Si-C 扁平微粒子を選択した. なお, 扁平微粒子については, 球形状から扁平形状への加工時に発生する応力の緩和を図り, 良好な軟磁気特性と表面の絶縁性を保持するため, Ar ガス加圧下で 350°C, 1 時間熱処理を施した<sup>2)</sup>.

インダクタの試作に関しては球形および扁平微粒子とエポキシ系樹脂のコンポジットを治具に滴下し, コイルを埋め込み, 圧力配列<sup>2)</sup>によりコイルから発生する磁束の方向に沿って扁平微粒子を一様に並べた上で, 熱硬化させて成形した. 試作したインダクタの寸法は高さ 0.52 mm, 外径 3.0 mm とおよそ設計指針を満足している. インダクタの電気特性はインピーダンスアナライザ(4294A, Agilent Co.)による実測をもとに周波数 110 MHz まで評価した.

**結果** 試作したマイクロインダクタにおける電気特性の周波数依存性を図 1 に示す. インダクタンス  $L$  は周波数の増加にともなわずかに減少した. 周波数 6 MHz での  $L$  の値は 0.53  $\mu\text{H}$  であり, 空心コイルの場合 ( $L=0.072 \mu\text{H}$ ) と比較して 7 倍程度高くなった. また, 直流抵抗  $R_{\text{DC}}$  は約 0.05  $\Omega$  となり, 抵抗  $R_{\text{AC}}$  は周波数の増加とともに増大した. 周波数 6 MHz での  $R_{\text{AC}}$  は 1.4  $\Omega$  となった. この  $R_{\text{AC}}$  の挙動は Fe-B-Si-C 扁平微粒子内の磁気損失および巻線の表皮効果によると考えられる. また,  $Q$  値は周波数 3 MHz 付近で最大となり, その値は 17.2 であった. さらに, 周波数 1 MHz における直流重畳特性測定からインダクタンスの変化率を検討した. 変化率はおよそ 20 %程度であり, Fe-B-Si-C 扁平微粒子だけを用いた場合<sup>2)</sup>とほぼ同等であった. 以上の結果は, 複合微粒子コンポジットを用いたインダクタが定格電流 1 A の設計指針を満足していることを示している.

**謝辞** 本研究の一部は, JST 復興促進プログラム(マッチング促進)「次世代個人情報端末に有用な超小型電源の開発」による支援を受けて行われた.

**参考文献** 1)S.C.O' Mathuna *et al.*, *IEEE Trans. Power Electron.*, **38**, 585 (2005).. 2)Y. Endo *et al.*, IINTERMAG 2015 Abstract DH-08 (2015).

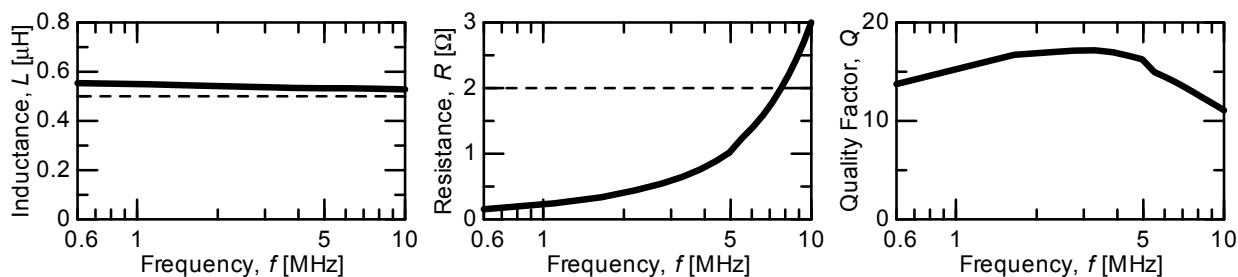


Fig. 1 Frequency dependence of electric performances in the micro-inductor with magnetically soft spheres and flakes composite.

## イットリウム鉄ガーネットを用いた 三端子スピン波位相干渉素子の開発

後藤太一, 金澤直輝, 高木宏幸, 中村雄一, ロス キャロライン\*,  
グラノフスキー アレクサンダー\*\*, 岡嶋伸吾\*\*\*, 長谷川隆\*\*\*, 関口康爾\*\*\*\*, 井上光輝  
(豊橋技科大, \*マサチューセッツ工科大, \*\*モスクワ大, \*\*\*村田製作所, \*\*\*\*慶応大)

Development of spin-wave interference logic element using yttrium iron garnet

T. Goto, N. Kanazawa, H. Takagi, Y. Nakamura, C. A. Ross\*,

A. B. Granovsky\*\*, S. Okajima\*\*\*, T. Hasegawa\*\*\*, K. Sekiguchi\*\*\*\*, M. Inoue

(Toyohashi Univ. of Tech., \*MIT, \*\*Moscow State Univ, \*\*\*Murata Mfg. Co., Ltd., \*\*\*\*Keio Univ.)

### はじめに

スピン波は、原理的に膜厚を制御することで波長を数十ナノメートルにまで短縮可能で、微細な位相干渉ロジック回路が作製可能と考えられており、これまでの CMOS を用いた演算素子のデザインルールに縛られない素子の開発が期待されている。これまでに、パーマロイ ( $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ ) 薄膜中を伝搬する静磁表面モードのスピン波を用いた、位相干渉実験が報告されており<sup>1)</sup>、スピン波の波動性を用いた演算素子が提案されている。本稿では、これをデバイスに発展することを目的に、スピン波伝播媒体にダンピング定数の小さい単結晶イットリウム鉄ガーネット (YIG,  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ) 膜を用い、さらに、大規模集積回路に適した膜面内方向の磁化均一性が高く非相反性が無い、静磁前進体積モードのスピン波を用いて、位相干渉素子を作製した。

### 実験方法

GGG (gadolinium gallium garnet) 基板上に、形成された膜厚  $16\ \mu\text{m}$  の単結晶 YIG 膜を長方形に加工しスピン波導波路を形成した。これを  $5\ \text{mm}$  間隔で誘電体基板上に形成された三本の銅製のマイクロストリップライン上に装荷した。バイアス磁界  $3\ \text{kOe}$  を膜面に対して垂直に印加し、信号発生器により入力パワー  $0\ \text{dBm}$ 、周波数  $4\ \text{GHz}$  の正弦波信号を Fig. 1 中の EX1 端子と EX2 端子に入力した。EX1 端子に入力する高周波信号の位相を、位相調整器を用いて連続的に変化した。EX2 端子の位相は固定した。オシロスコープに接続された DT 端子によって YIG 導波路中央におけるスピン波の振幅変化を測定した。同時に、当該素子を、有限要素法を用いて高周波電磁界解析を行った。

### 実験結果・まとめ

EX1 に入力する高周波信号の位相を  $0$  から  $2\pi$  まで変化した結果、EX1 端子と EX2 端子の位相差が  $0$  のとき DT 端子部分のスピン波振幅が最大、位相差が  $\pi$  のときに最小になった。これら最大値と最小値から計算した位相干渉アイソレーション値は、 $25\ \text{dB}$  であり、文献 1) と比較し約  $10\%$  向上した。高周波電磁界解析結果とよく一致し、端子間距離をより長くできること、スピン波の端面反射を抑制することで性能向上が見込めること、膜厚を薄くすることでデバイスサイズを小型化できることを示唆した。

講演会では、素子構造の詳細及び、スピン波無反射構造を導入することによる特性改善結果についても報告する。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 若手研究 (A) No. 26706009, 挑戦的萌芽研究 No. 26600043, 科研費基盤研究 (S) No. 26220902 の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- 1) N. Sato, K. Sekiguchi, and Y. Nozaki, Appl. Phys. Express, **6**, 063001 (2013).

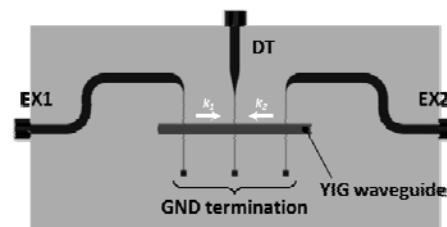


Fig. 1 Three-port spin-wave interference logic element. EX1 and EX2 ports excite spin waves, and DT port detects the spin-wave interference.

# 外部印加磁界によるパーマロイ細線中の定在スピンの制御

今村謙汰, 牙暁瑞, 大藪周平, 田中輝光, 松山公秀  
(九州大学大学院システム情報科学府)

Controlling of synthesized standing spin wave configuration in a permalloy strip with external fields

K. Imamura, X. Ya, S. Oyabu, T. Tanaka, K. Matsuyama

(Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

## はじめに

強磁性体中を伝搬するスピン波は、位相情報の利用による論理演算デバイスへの応用が提案されている<sup>[1-3]</sup>。入力電力を効率的にスピン波励起に利用できる定在スピン波は、デバイスの小型化・省電力化が期待できる。本研究では、外部印加磁界の変化に対するパーマロイ細線中の定在スピンの様態変化を、電気的出力として検出した。また、磁性体内部における磁化状態の解析をマイクロマグネティックシミュレーションにより行った。得られた実験結果より、スピン波論理演算デバイスにおける外部磁界制御機能の適用可能性を示す。

## 実験方法

作製素子と測定系の概略図を Fig. 1 (a) に、光学顕微鏡により撮影した素子を Fig. 1 (b) に示す。素子は一般的なリソグラフィ法により作製した。スピン波導波路には、蒸着法により製膜したパーマロイ(厚さ  $d = 48$  nm, 幅  $w = 50$   $\mu\text{m}$ )を使用した。Fig. 1 (a) に示すように、シグナルジェネレータより 2 本の非対称コプレーナ伝送線 (GE1, GE2) にマイクロ波電流を入力し、スピン波を励起させる。パーマロイ細線中に生じる定在スピン波は、静磁場表面波(MSSW)モードである。中央に配置したピックアップコイル (DE) により定在波からの漏れ磁束をスペクトラムアナライザにより電気的出力( $P_{\text{out}}$ )として検出した。GE1, GE2 により励起されるスピン波の位相差( $\Delta\phi$ )は、それぞれの伝送線に接続したフェーズシフタによって変化させる。

## 実験結果

Fig. 2 (a) に外部磁界スイープ測定により検出された出力強度を示す。GE1, GE2 に入力したマイクロ波電流の周波数は 5GHz である。測定は  $\Delta\phi = 0$  (実線),  $\pi$  (破線) の場合で行った。それぞれの測定で、外部磁界の変化に対して  $P_{\text{out}}$  に明確な極大点と極小点が交互に現れる周期的な強度変化が観測された。ピーク値を示す  $H_b$  では、磁性体内部で特定次数の定在スピン波が形成されていることがシミュレーションによって確認された。Fig. 2 (b) に  $\Delta\phi$  を  $0 \sim \pi$  rad の範囲で変化させた場合の  $P_{\text{out}}$  を示す。  $H_b = 156$  Oe のとき、  $\Delta\phi$  が増加すると  $P_{\text{out}}$  は連続的に増加し、  $\Delta\phi = 0, \pi$  rad 間には約 7 dBm の出力差が存在する。一方、  $H_b = 180$  Oe のとき、  $\Delta\phi$  の増加に対し  $P_{\text{out}}$  は減少し、数十 Oe のオーダーで  $P_{\text{out}}$  の  $\Delta\phi$  依存性が反転していることが分かった。これは、位相を情報媒体とするスピン波デバイスに対し、外部磁界により動作制御する機能を付加できる可能性を示した結果である。

## 参考文献

- [1] M. P. Kostylev et al., Appl. Phys. Lett., 87, 153501 (2005).
- [2] A. Khitnum et al., Superlatt. Microstruct., 38, 184 (2005).
- [3] Y. Urazuka et al., J. Appl. Phys., 115, Art. No. 17D115 (2014).

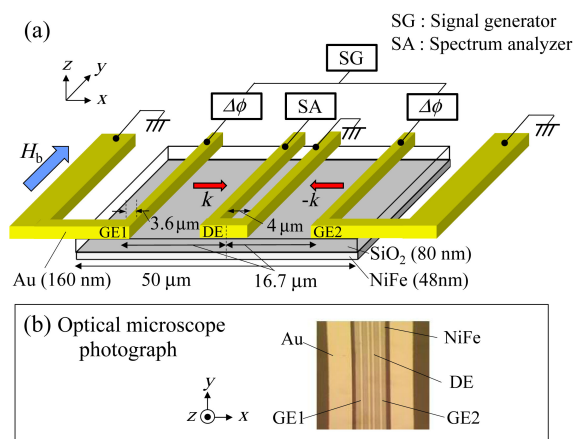


Fig. 1. (a) Schematic figure of a fabricated sample and experimental set up. The SWs are emitted from the generators and inductively picked up with an overlaid inductor. (b) Optical microscope photograph of the functional area.

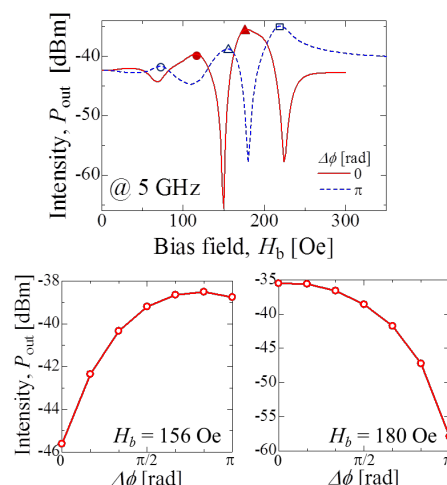


Fig. 2. (a) Measured output intensity modulation with external bias field  $H_b$ . (b) The output intensity  $P_{\text{out}}$  in varying the  $\Delta\phi$ .

# 交換結合膜細線における定在スピン波励起の計算機シミュレーション

牙暁瑞, 今村謙汰, 大藪周平, 田中輝光, 松山公秀  
(九州大学大学院 システム情報科学府)

Numerical simulation on standing spin wave excitation in exchange-coupled multilayer strips

X. Ya, K. Imamura, S. Oyabu, T. Tanaka, and K. Matsuyama

(Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

## はじめに

近年, hard / soft 交換結合膜の exchange spring 効果を利用したマイクロ磁気デバイスの動作高周波化に関する報告がなされている<sup>1)</sup>. 本研究では, 交換結合膜の層構造を変化させることにより, スピン波共鳴周波数が任意に設定できることをマイクロマグネティックシミュレーションによって示した. さらに, 数十 GHz の動作周波数域での信号処理機能への応用可能性についてシミュレーションにより検証した.

## 計算方法

2層構造の垂直磁化細線(上: soft 層, 下: hard 層)を想定したスピン波デバイスの計算モデルを Fig. 1 に示す. 磁性細線を構成する各磁性層の膜厚比および総膜厚を変えて, 定在スピン波(SSW)の共鳴周波数および出力電圧を LLG 方程式の数値計算により求めた. 2本の導体線(Generator 1, 2)によりスピン波を励起し, 中央に配置した誘導検出コイル(Detection area)により干渉波を検出する.

soft 層と hard 層の材料パラメータは, 飽和磁化  $M_s = 1000$  emu/cc (soft, hard), 垂直一軸異方性  $H_k = 13$  kOe (soft), 20 kOe (hard), soft-hard 層間の交換定数は  $A = 1.0$   $\mu\text{erg}/\text{cm}$  とした.

## 計算結果

2本の導体線に逆位相( $\Delta\phi = \pi$ )のマイクロ波交流電流を印加した場合, 電流磁界の磁性細線幅方向の分布から, 定在スピン波の2次モードが最低次の共鳴モードとなる. 2次モード共鳴周波数  $f_{\text{res}}$  の hard 層厚/総膜厚比( $t_h / t_t$ )に対する依存性を Fig. 2 (a) に示す. 総膜厚は 15 nm から 35 nm まで変えている.  $t_h / t_t$  が増大するとともに, 細線の実効的な垂直磁気異方性が大きくなり  $f_{\text{res}}$  が高くなる. 総膜厚が薄いほど  $f_{\text{res}}$  は線形的に増大するが, 膜厚が厚い場合の増加傾向は非線形となるのが分かる. これは膜厚が交換長より厚くなると, 層間の交換結合を介した実効的な磁気異方性強度の増大効果が膜厚方向全体に及ばなくためと考えられる. 出力電圧  $V_{\text{out}}$  と  $t_h / t_t$  との関係性を Fig. 2 (b) に示す.  $t_h / t_t$  が増加すると,  $V_{\text{out}}$  は低下する. これは実効的な異方性が大きくなることスピン波励起振幅が小さくなるためである.

Fig. 3 (a), (b) は  $t_t = 15$  nm,  $t_h / t_t = 0.2, 0.8$  の各場合について, 入力電流位相差  $\Delta\phi = 0, \pi$  に対する出力電圧の励起周波数依存性を示している. 励起周波数を2次モード共鳴周波数(5.2 GHz ( $t_h / t_t = 0.2$ ), 16.5 GHz ( $t_h / t_t = 0.8$ ))に設定することにより, いずれの層構成においても, 位相差に依存した 40 dB 以上の出力電圧比が得られている.

## 参考文献

1) S. Pal, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **115**, 17D105 (2014)

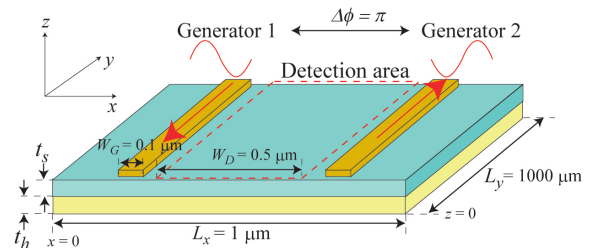


Fig. 1. Schematic of designed exchange-coupled bilayer strips, consisted of SW guide consists of magnetic strip with soft layer and hard layer, inductively coupled SW generators (width:  $W_G$ ) and detector (width:  $W_D$ ).

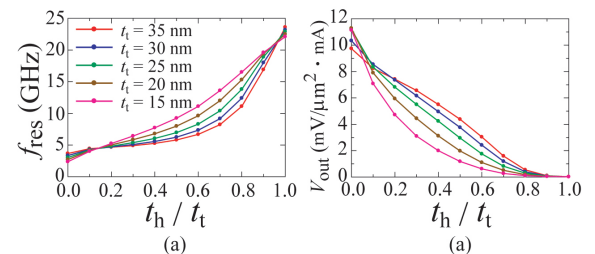


Fig. 2. The dependence of the resonance frequency  $f_{\text{res}}$  (a) and voltage value  $V_{\text{out}}$  (b) on the layer thickness ratio  $t_h / t_t$ .

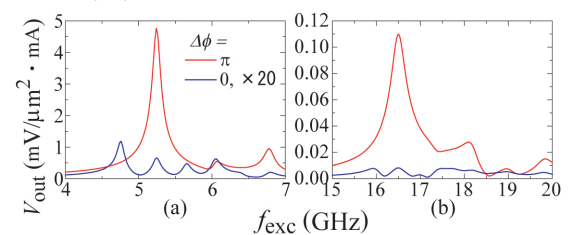


Fig. 3. The inductive output voltage comparing phase differences between two generators are 0 and  $\pi$ , when  $t_h / t_t = 0.2$  (a) and  $t_h / t_t = 0.8$  (b).

# 無電源回転センサに用いる磁気ワイヤにおける磁壁移動

竹渕哲聡<sup>1</sup> 山田 努<sup>1</sup> 小川雄一郎<sup>2</sup> 竹村泰司<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>横浜国立大学 <sup>2</sup>ニッコシ株式会社)

Magnetic domain wall movement in magnetic wires for battery-less rotation sensor

A. Takebuchi, T. Yamada, Y. Ogawa<sup>2</sup>, Y. Takemura<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>Nikkoshi Co., Ltd

## はじめに

磁気ワイヤ等における大バルクハウゼンジャンプを伴う急峻な磁化反転は、検出コイルにパルス電圧を誘起する。この電圧を出力とする磁気センサが広く研究されてきた<sup>(1-3)</sup>。ひねり処理加工した FeCoV ワイヤ（以下、複合磁気ワイヤと記述する）においても印加磁場の時間変化に無依存のパルス出力が得られ、様々な実験結果が報告されてきた<sup>(4-5)</sup>。この現象を利用する磁気センサは、外部電源が不要であること、動作温度範囲が広いことなどの特徴を有する。我々は、これらの特徴を生かして、無電源センサや振動エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギーハーベスティング素子への応用に着目している<sup>(6)</sup>。

## 実験方法・結果

本稿では、ローター等に装着した磁石による励磁条件下での、複合磁気ワイヤの出力特性及び磁壁移動を検討した結果を報告する。ひねり処理加工した FeCoV ワイヤ（線長 25 mm、線径 0.25 mm）の 2 箇所、ワイヤに直接巻きつけた幅 1 mm、巻き数 50 turn の検出コイルを設置した。その 2 つのコイルで検出した FeCoV ワイヤの磁化反転に伴うパルス出力を Fig. 1 に示す。両パルスの時間差から磁壁移動速度が求まるとともに<sup>(6)</sup>、コイル位置を変化させることにより磁化反転するワイヤの領域を特定することができる。さらに励磁用磁石として、3 mm×3 mm×5 mm の NeFeB 磁石を回転軸に磁石を取り付け、その回転に伴いワイヤ線長方向に双方向の磁場を印加するような配置 (Fig. 2) での実験結果も当日報告する。

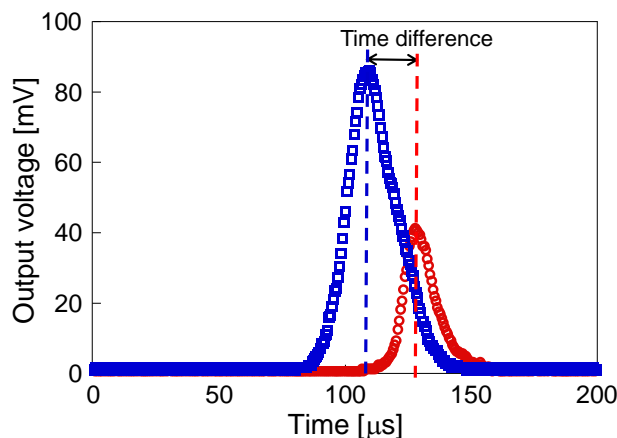


Fig.1 Waveforms of output voltages detected by two pickup coils.

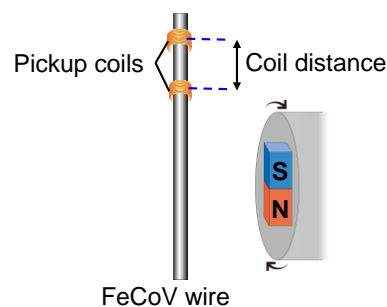


Fig. 2 Configuration for measurement of induced voltage from FeCoV wire.

## 参考文献

- 1) R. Malmhall, K. Mohri, F. B. Humphrey, T. Manabe, H. Kawamura, J. Yamasaki, I. Ogasawara, *IEEE Trans. Magn.* **23**, 3242 (1987).
- 2) M. Va'zquez, C. Go'mez-Polo, D.-X. Chen, A. Hernando, *IEEE Trans. Magn.* **30**, 907 (1994).
- 3) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, (1974).
- 4) S. Abe, A. Matsushita, and M. Naoe, *IEEE Trans. Magn.* **33**, 3916 (1997).
- 5) T. Kohara, T. Yamada, S. Abe, S. Kohno, F. Kaneko, Y. Takemura, *J. Appl. Phys.* **109**, 07E531 (2011).
- 6) 溝口健人, 芹沢諒平, 山田努, 増田純夫, 小川雄一郎, 河野志郎, 金子文夫, 竹村泰司: 第 38 回日本磁気学会学術講演会、5aD-6、横浜、2014 年 9 月。



# 磁気ワイヤを用いた振動型発電素子における励磁方法の検討

竹渕哲聡、亀田直哉、山田努、竹村泰司  
(横浜国立大学)

Examination of excitation in electric generating element of vibration type using magnetic wire  
Akitoshi Takebuchi, Naoya Kameda, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura  
(Yokohama National University)

## はじめに

熱ひねり加工を施した FeCoV 複合磁気ワイヤは、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる高速な磁壁移動によって急峻な磁化反転を生じ、検出コイルを設置することでこの磁化反転からパルス出力が得られる<sup>1),2)</sup>。この出力は無電源で得られることや外部磁界の時間変化に依存しないなどの特徴を有しており、エネルギー・ハーベスティング素子への応用が着目されている。我々は振動型発電素子への応用を背景に、励磁用磁石の位置や往復動作（以下、ストローク）の量に対する出力の依存性について測定し、磁石のストロークについて検討した。

## 実験方法

ストローク位置と出力については、FeCoV 複合磁気ワイヤに二つの検出コイルを設置し、その上を励磁用磁石がワイヤと垂直方向にストロークするように配置した。磁石のストローク位置は、ワイヤの中央もしくは端の二箇所を検討した。また、幅の広い検出コイルを巻いたワイヤの端に磁石を配置し (Fig. 1)、磁石のストローク量の変化に対する出力の依存性を測定した。

## 実験結果

中央励磁の結果、同じ大きさで逆符号の出力が観測され、端部励磁では大きさの異なる同符号の出力が得られた。これは Fig. 2 のように磁石の左右で磁化の向きが逆であることを示す。よって、中央励磁では逆相のコイルを用い、端部励磁ではワイヤ長を調整することで最適化が望める。ストローク量については Fig. 3 に示すように、正方向への半ストロークが 2 mm から出力が観測され、6 mm 付近で飽和した。これは今回用いた磁石において、2 mm の位置で大バルクハウゼンジャンプに必要な 20 Oe の磁界が印加され、6 mm の位置で最大の磁界が印加されることを示している。よって、発電量を必要とするなら 6 mm、より小型化を目的とするならば 2 mm のストロークで発電が可能であり、以上より小型振動発電素子への有用性が示された。

謝辞：FeCoV 磁性線は、ニッコーシ株式会社様のご好意により、提供いただいたものです

## 参考文献

- 1) R. Malmhall, et al., IEEE Trans. Magn., 23(5), 3242, 1987.
- 2) M. Vazquez, et al., IEEE Trans Magn., 30(2), 907, 1994.

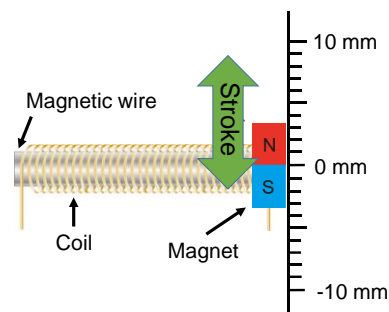


Fig. 1 Configuration of magnetic wire, magnet and detection coil

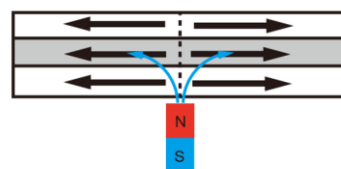


Fig. 2 State of magnetization in the magnetic wire from magnet vibration

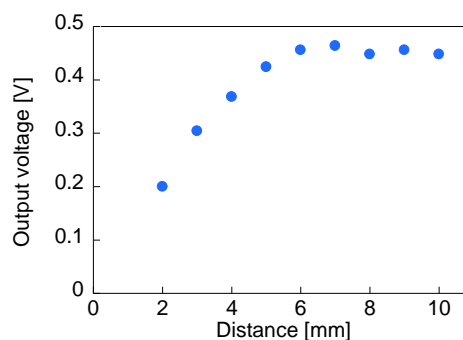


Fig. 3 The output voltage measured by detection coil

# 冷間圧延及び熱処理が変態誘起塑性鋼の磁気特性に与える影響

佐々木康至、小原遼、小林悟、北條智彦、村上武、鎌田康寛  
(岩手大工)

Effect of cold rolling and heat treatment on magnetic properties for transformation-induced plasticity steels

K.Sasaki R.Obara S.Kobayashi T.Hojo T.Murakami Y.Kamada

(Iwate University)

## 背景

近年、燃料費の高騰及び環境負荷の軽減のため自動車業界では軽量かつ安全性の高い材料が求められており、高い加工性と安全性をもつ変態誘起塑性 (TRIP) 鋼が注目されている。変態誘起塑性鋼はベイナイト中の残留オーステナイト ( $\gamma$  相) が外部からの応力を受けるとマルテンサイトに変態するが、特に、 $\gamma$  相の体積分率やその形態が TRIP 鋼の機械的特性に大きな影響を与えることが知られている。本研究では、冷間圧延および熱処理により  $\gamma$  相の体積分率や微細組織を制御した TRIP 鋼の磁気特性を詳しく調べ、TRIP 鋼の磁気的破壊評価の可能性について検討した。

## 実験方法

組成が異なる 2 つの試料 A, B ( $\gamma$  相の体積分率  $f_{\gamma_0}=21 \sim 24\%$ ) を用いた (表 1) [1, 2]。熱処理 (450°C 1h) もしくは 50%冷間圧延を行った円盤型試料について、X 線回折による構造評価及び集合組織評価、磁気ヨークもしくは試料振動型磁力計 (VSM) を用いた BH ループ測定を実施した。微細組織の異相性が磁気特性に与える影響を調べるため、特に、磁気特性の励磁方向依存性に着目した。

## 実験結果

試料 A, B ともに、熱処理もしくは冷間圧延後、飽和磁化の顕著な増大を示した。炭素量を考慮した飽和磁化計算から、大部分の残留  $\gamma$  相が強磁性相に変態したことを確認した。これは X 線回折解析結果と一致する。一方、BH 曲線から求めた保磁力は、熱処理後は減少し冷間圧延後は増加を示すが、磁気ヨークを用いた測定では、いずれの場合も保磁力の顕著な励磁方向依存性は観測されなかった。VSM を用いた詳細測定により、冷間圧延試料 (特に試料 A) で僅かに観測されたのみ (圧延方向に励磁した場合に 10%程度保磁力が増大) である。この結果は、強磁性  $\alpha$  相の集合組織 (冷間圧延により  $\{110\}\langle 111 \rangle$  から  $\{111\}\langle 110 \rangle$  へ変化) に対して転位密度の増大とともに強磁性  $\alpha$  相の集合組織の変化が磁気特性変化に影響を与えていることを示唆している。

Steel	C	Si	Mn	Al	Nb	Mo	N	T <sub>A</sub>	f <sub>γ0</sub>
A	0.40	1.47	1.50	0.04	-	-	-	400°C	21.4%
B	0.40	0.49	1.48	0.96	0.024	0.10	-	400°C	23.5%

Table1: The composition of measuring samples

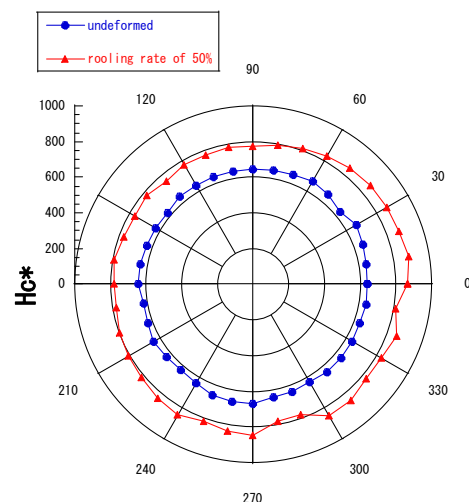


Fig1 Dependence of coercivity on excitation direction for steel A before and after cold rolling

## 参考文献

- [1] Effects of Alloying Elements on Impact Properties of Ultra High-Strength TRIP-Aided Bainitic Ferrite Steels, T. Hojo, J. Kobayashi, T. Kajiyama and K. Sugimoto, 津山工業高等専門学校紀要 第 52 号(2011) pp.9-16.
- [2] Fatigue Properties of Nitrogen Added Ultra High-Strength Low Alloy TRIP-Aided Steels, T. Hojo, J. Kobayashi, and K. Sugimoto, Materials Science & Technology 2013 Conference (MS&T'2013) Proceedings.