

# 誘電層を挿入した不平衡給電スパイラルアンテナの 小型化・高周波化の検討

青木英恵、早坂淳一\*、増本博、荒井賢一\*、山口正洋  
(東北大、\*電磁研)

Dielectric layer inserted single-feed spiral antenna for miniaturization and high frequency use  
Hanae Aoki, Jun-ichi Hayasaka, Hiroshi Masumoto, Ken-ichi Arai and Masahiro Yamaguchi  
(Tohoku Univ., \*Denjiken)

## はじめに

身の回りの移動通信機器の小型化が進み、ユビキタス電源による非接触給電・センシング技術への需要が拡大している。多機能化に対応する使用周波数帯の広帯域化により、デバイスにおける各周波数帯のアンテナ素子の占める体積率増加が問題となっている。チューニングによるアンテナ1つあたりの広帯域化が検討される一方で、4G 携帯電話システムの0.7-2.6 GHz 帯域で使用されるアンテナ素子の外形寸法は最小で数 cm との報告がある<sup>1)</sup>。スパイラル形状のアンテナは磁界型アンテナとして知られ、キャパシタを含む回路の共振を利用して数 100 MHz 帯のアンテナとして動作する。これを小型化し、インダクタンス( $L$ )やキャパシタンス( $C$ )成分が小さくなれば、GHz 帯の共振およびそれにとまなう反射損失の減少が期待される。本研究では、さらに小さい全形 4.2 mm の超小型積層スパイラルアンテナ素子を作製し、高周波電磁気特性を評価した。また、誘電挿入層  $\text{SiO}_2$  が高周波アンテナ特性に与える影響について考察した。

## 実験方法

本研究では、まず電磁界シミュレーション(HFSS, Ver.15.0)を用いて、高周波帯で放射するスパイラルアンテナの構造を設計した。スパイラルの外形、内径、線幅、線間隔、巻数をパラメーターとして 4, 17, 32 GHz の多帯域で反射損失の極小を示す、外径 1.78 mm の小型スパイラルアンテナを設計した。アンテナは、リフトオフにより 320 nm-Pt/300 nm- $\text{SiO}_2$ /320 nm-Pt/基板  $\text{SiO}_2$  の多層構造を作製した。1 GHz における挿入層の  $\text{SiO}_2$  の誘電率は、6,  $\tan \delta$  は 0.02 であった。素子の高周波電磁気特性は、VNA(Agilent, N5244A)とウェハプローブ(Cascade microtech, Infinity GS250)により 0.1-30 GHz の範囲で評価した。

## 実験結果と考察

図 1 に、(a)反射損失および(b)インピーダンスの周波数依存性を示す。(a)から、反射損失の実測値(実線)と、同じアンテナモデルでの計算値(点線)は 4, 17 GHz の極小点が一致した。このアンテナは高インピーダンスアンテナであるが、反射損失の極小値におけるインピーダンスの実部は  $50 \Omega$  付近まで減少している。アンテナ部の電界分布から、低周波側ではアンテナの  $LC$  共振、高周波側では波長共振に起因すると考えられる。アンテナの M-I-M 積層部の容量成分を減少させた結果  $t = 0.6 \mu\text{m}$  (点線)では、極小を示す周波数が  $t = 0.3 \mu\text{m}$  の結果(破線)と比較して高周波側にシフトし、その変化量は  $C$  の変化量と対応することが分かった。以上、良好な性能が得られた周波数帯について、今後磁性薄膜の効果を明らかにする予定である。

## 参考文献

- 1) J. Kumar et.al., proc. of 2014 IEEE GCWCN, (2014) 229.

## 謝辞

実験の遂行にあたりご助言をいただいた、ラナジット・サイ先生および遠藤恭先生に深く感謝申し上げます。

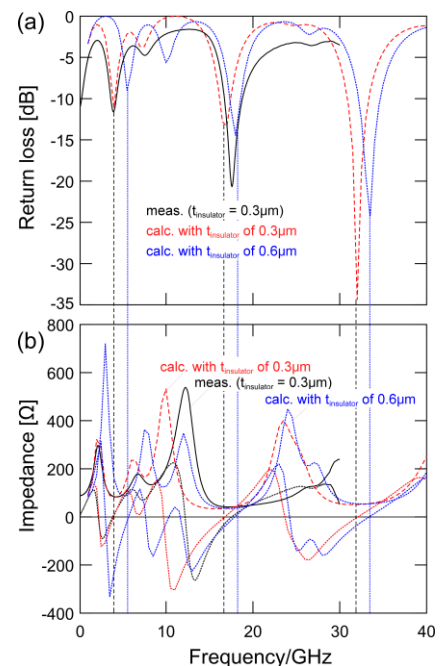


Fig.1 The frequency dependence of return loss (a) and Impedance (b).

# 二つ折り型携帯電話に内蔵可能な地上波デジタル放送受信アンテナ

米原正道, 若松孝志, 藤井重男, 栗巢普揮, 山本節夫  
(山口大)

Terrestrial digital TV broadcast reception antenna for folding type mobile phone

M. Yonehara, T. Wakamatsu, S. Fujii, H. Kurisu and S. Yamamoto  
(Yamaguchi Univ.)

## はじめに

地上波デジタル TV 放送を携帯電話端末でフルセグ受信するためのアンテナが必要とされている。受信周波数は 470 - 710 MHz と広く、比帯域(所要帯域幅を中心周波数で割った比率)は 40%にも達する。この値は通信用(約 20%)と比較して大きい。加えて、自由空間での波長は約 50 cm なので、携帯電話端末の筐体に内蔵可能なアンテナを設計することは難しく、アンテナ利得が犠牲になりがちである。そうした状況の中、フェライトの透磁率と誘電率による波長短縮効果を活用すべく、棒状フェライトの中心に電極を貫通させた「貫通電極構造」のアンテナが提案された<sup>1)</sup>。しかし、このアンテナでは高周波で磁氣的損失の低い六方晶フェライトが不可欠であったため、本研究では一般的なスピネルフェライトを使用したアンテナの実現可能性を検討した。

## アンテナの構造

アンテナの設計・解析は、三次元有限要素法に基づく高周波電磁界解析シミュレータ(HFSS, Ansoft 社)で行った。高 UHF 帯で磁氣的損失が急激に増大する特性のスピネルフェライトの使用を可能にするために、Fig.1 に示すように角棒状フェライトの側面に電極を配置した構造(上部電極構造と呼ぶ)のアンテナを考案した。電極を中心部からフェライト上部に変更する事で、電極周辺に占めるフェライトの割合を減少させることで磁氣的損失の影響を抑制しつつ、波長短縮効果を活用することを狙った構造である。

## 解析と試作の結果と考察

Ni-Zn フェライトを想定して、400 - 800 MHz においては比透磁率 8.2-10.3、比誘電率 12、磁氣損失  $\tan \delta$  0.25-0.91 として、上部電極構造のアンテナについて電磁界解析を行い、電圧定在波比(VSWR)、ミスチャート、アンテナ利得、放射パターン(指向性)を明らかにした。加えて、実際にアンテナを試作してアンテナ特性を実測した。アンテナ利得の周波数特性と放射パターンをそれぞれ Fig.2、Fig.3 に示す。上部電極構造にした結果 Ni-Zn スピネルフェライトを使用して、所望の帯域幅にわたって高利得(-5 dBi 以上)を実現できることが、シミュレーションと実測の両方で示された。

## おわりに

上部電極構造のアンテナを提案した。一般的なスピネルフェライトを使用しても、携帯電話端末内蔵型の高利得アンテナを実現できることを実証した。

## 参考文献

- 1) H. Aoyama, M. Gonda, S. Fujii, H. Sano, "Compact Chip Antenna for Terrestrial Digital TV Broadcasting," Hitachi Metals technical review, Vol.24, pp.29- 31 (2008).

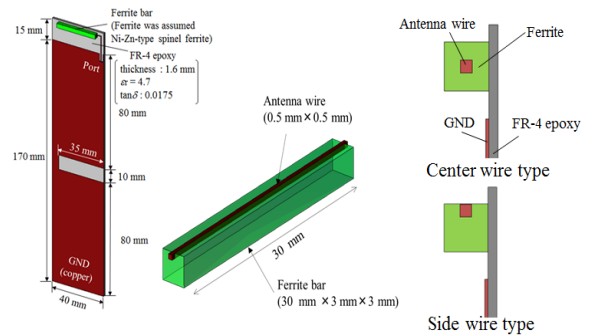


Fig.1 Structure of antenna.

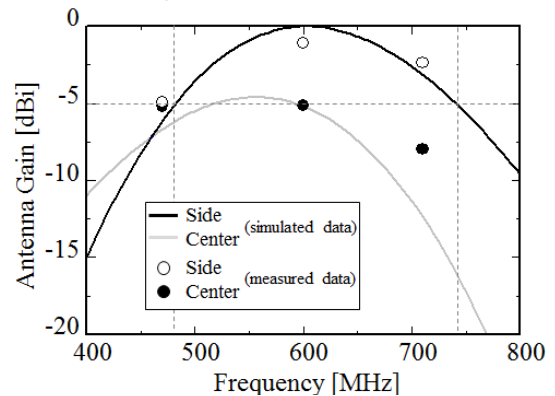


Fig.2 Frequency characteristics of antenna gain.

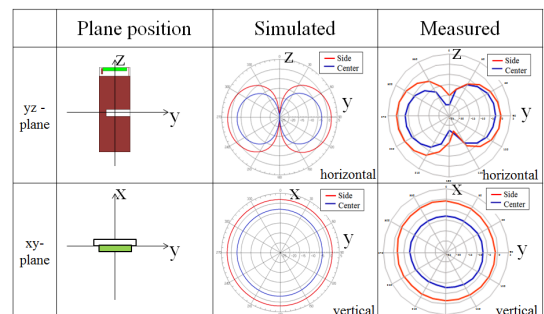


Fig.3 Radiation pattern (@ 600 MHz).

# スマートフォンに内蔵可能な地上波デジタル放送受信アンテナ

米原正道, 若松孝志, 藤井重男, 栗巢普揮, 山本節夫  
(山口大)

Terrestrial digital TV broadcast reception antenna for smartphone

M. Yonehara, T. Wakamatsu, S. Fujii, H. Kurisu and S. Yamamoto

(Yamaguchi Univ.)

## はじめに

筆者らは、二つ折り型携帯電話に内蔵可能な地上波デジタル TV 放送受信アンテナを提案し、試作し実用的な性能が得られることを実証した<sup>1)</sup>。最近、携帯電話端末の市場の主流はスマートフォンに移っている。そこで、本研究においては、スピネルフェライトを用いて、スマートフォンに内蔵可能な地上波デジタル TV 放送受信アンテナについて、有限要素法高周波電磁界解析シミュレーション(HFSS, Ansoft 社)によって検討した。

## アンテナの構造

携帯電話端末に搭載するアンテナは、アンテナエレメント部だけが単独で機能するのではなく、基板 GND も含めた全体で、ダイポールアンテナ的に動作する。スマートフォンの基板 GND 部の長さは、二つ折り型携帯電話の場合よりもさらに一段と短いため、アンテナとして動作させるための実効的な長さが不足する。大きな比帯域に対応するとともに、筐体に内蔵するためのアンテナ長への厳しい制約(40 mm 以下)に加えて、基板 GND 長がさらに短い条件の中で、実用的なアンテナ利得(-5 dBi 以上)を満たす必要がある。そこで、Fig.1 に示すように、スマートフォンの基板 GND 面に、2本のスリットを互いに逆向きに入れることによって、アンテナ給電部から見たときの基板 GND 長を確保した。

電圧定在波比(VSWR)を改善するために整合回路を用いるとそこで損失が生じてしまう恐れがある。そこで、上部電極構造において、電極を角棒状フェライトへの埋め込み量を正負にわたって微調整することによって、整合回路がなくても良好な VSWR を実現した。

## 解析結果と考察

一般的なスピネルフェライト(400 - 800 MHz において、比透磁率 8.18 - 8.66, 比誘電率 12, 磁氣的損失 0.10 - 0.28)と、比較のために高周波において低損失なスピネルフェライト<sup>1)</sup>(周波数 400 - 800 MHz において比透磁率 3 - 3.1, 比誘電率 4.6, 磁氣的損失 0.039 - 0.04, 誘電正接 0.022)を想定した。Fig.1 においてそれぞれの材料で  $x = 2.3$ ,  $x = 2.7$  とすることで、Fig.2 のようにインピーダンスマッチングすることができた。Fig.3 に示すように、設計したアンテナは 85%以上の帯域幅において-5 dBi 以上の良好なアンテナ利得を示した。

## おわりに

スマートフォンに内蔵できる、地上波デジタル TV 放送受信アンテナを提案した。フェライトによる波長短縮効果の活用、GND 面へのスリット形成によるアンテナ実効長の確保、電極とフェライトの位置調整による整合によって、良好なアンテナ利得と実用上十分な帯域を両立できた。

## 参考文献

- 1) 米原他, “二つ折り型携帯電話に内蔵可能な地上波デジタル放送受信アンテナ,” 日本磁気学会 第 39 回学術講演会 (2015). 【発表予定】

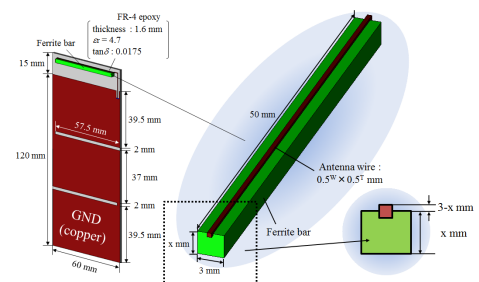


Fig.1 Structure of antenna.

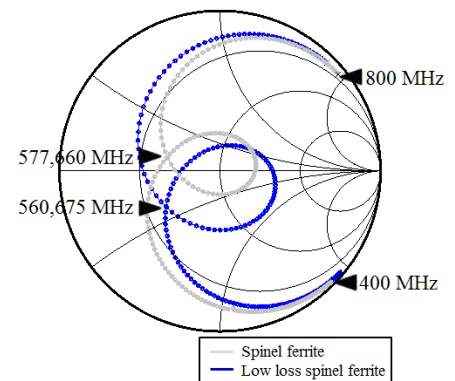


Fig.2 Smith chart.

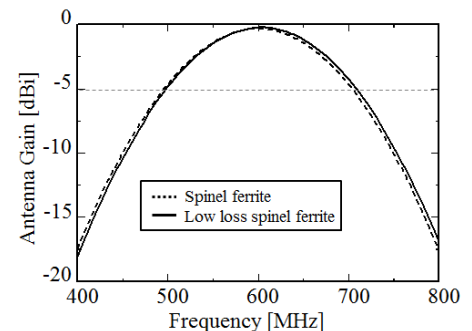


Fig.3 Frequency characteristics of antenna gain.

## 小型・低背型のトップマウント型アイソレータ

米原正道, 若松孝志, 藤井重男, 栗巢普揮, 山本節夫  
(山口大)

Miniaturized top mount type isolators

M. Yonehara, T. Wakamatsu, S. Fujii, H. Kurisu and S. Yamamoto  
(Yamaguchi Univ.)

### はじめに

通信機器内部の高密度実装に伴い、搭載電子部品の小型化・低背化が強く求められている。筆者らはフェライトにおいて正円偏波透磁率( $\mu_+$ )と負円偏波透磁率( $\mu_-$ )の差が大きく取れるので電磁波を短い進行距離で曲げることができ素子の小型化に有利な、強磁性共鳴近傍を動作点とするボトムマウント型アイソレータを提案している。<sup>1)</sup>しかし、ボトムマウント型の構造ではGND面側に突出部を設けるため、高密度実装の妨げとなる。そこで本研究では、素子の突出部を信号ライン側に設けたトップマウント型アイソレータを提案することを目的とした。

### アイソレータの構造

アイソレータの設計・解析は、三次元有限要素法に基づく高周波電磁界シミュレータ(HFSS, Ansoft社)で行った。Fig.1に、トップマウント型アイソレータの構造を示す。伝送線路はマイクロストリップ線路として、Y-Junction部に対向するGND面を丸く切り欠くとともに、基板の上面に、線路のY-Junctionを覆うように電氣的に接地したヨークを設ける。こうした構造にすれば、Fig.2に示すように、マイクロストリップ線路において誘電体基板内に集中して伝播してきた電磁波は、Y-Junction部ではフェライト内部に浸透するので電磁波の進路を曲げることができる。

### 解析結果と考察

800 MHz帯において帯域幅10 MHz以上、帯域内挿入損失0.80 dB<sub>max</sub>、帯域内アイソレーション8.0dB<sub>min</sub>とし、2 GHz帯、4 GHz帯において帯域幅60 MHz以上、挿入損失0.80dB<sub>max</sub>、アイソレーション10.0dB<sub>min</sub>の実現を目指した。ヨークの直径 $\phi$ をアイソレータの素子サイズと定義し、 $\phi$ を2から10 [mm]の間で解析を行った。2 GHz帯と4 GHz帯については $\phi=2$  mmにおいて、波長の長い800 MHz帯については $\phi=6$  mmにおいて非可逆伝送特性を実現できた。得られた伝送特性は、800 MHz帯において挿入損失0.85 dB<sub>min</sub>、15.2 dB(挿入損失最小時)、2 GHz帯において帯域幅12 MHz、挿入損失0.78 dB<sub>min</sub>、アイソレーション12.0 dB以上、4 GHz帯において帯域幅59 MHz、挿入損失0.42 dB<sub>min</sub>、アイソレーション14.1 dB以上を設計できた。

### おわりに

2 GHzと4 GHz帯については素子サイズ $\phi=2$  mm、800 MHz帯については $\phi=6$  mmで、基板からの突出部高さ0.5 mmのトップマウント型アイソレータを提案した。

### 参考文献

- 1) 山本節夫: “アイソレータの小型化,” 日本磁気学会 まぐね, Vol.5, No.10, pp.450-456 (2010).

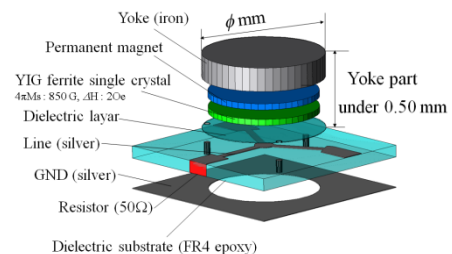


Fig. 1 Microstrip line-top mount type isolator.

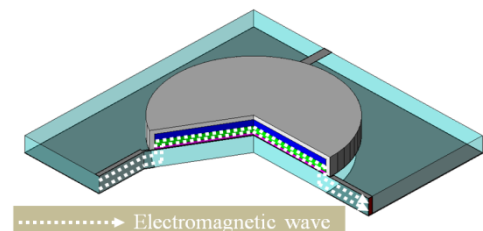


Fig. 2 electromagnetic wave propagation.

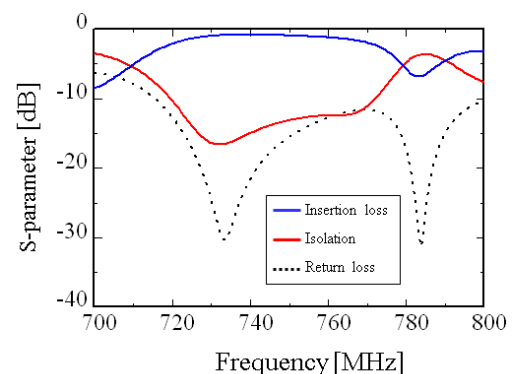


Fig. 3 Frequency characteristics of S-parameters.

# 広帯域 CPW トップマウント型アイソレータ

米原正道, 若松孝志, 藤井重男, 栗巢普揮, 山本節夫  
(山口大学)

Miniaturized CPW top mount type isolators

M. Yonehara, T. Wakamatsu, S. Fujii, H. Kurisu and S. Yamamoto  
(Yamaguchi Univ.)

## はじめに

筆者らは、小型で低背なアイソレータを実現すべく、800 MHz 帯、2 GHz 帯、4 GHz 帯で動作する、強磁性共鳴近傍を動作点とするトップマウント型アイソレータを提案している。<sup>1)</sup> これは伝送線路としてはマイクロストリップ線路を用いたものであった。800 MHz 帯、2 GHz 帯では、挿入損失の更なる低減や帯域幅の更なる拡大など、非可逆伝送特性の向上が望まれる。本研究では、コプレーナ線路(CPW)を導入することによる非可逆伝送特性の改善効果について検討した。

## アイソレータの構造

アイソレータの設計・解析は、三次元有限要素法に基づく高周波電磁界シミュレータ(HFSS, Ansoft 社)にて行った。Fig.1 に、今回提案するアイソレータの構造を示す。既に提案したマイクロストリップ線路をベースとしたトップマウント型の場合には、マイクロストリップ線路とY-Junctionとの接合箇所では電磁波の伝播経路が無理に大きく変わることが、非可逆伝送特性の制約につながっていると考えた。これに対してCPWを導入トップマウント型アイソレータの場合には、Fig.2 のように、信号線路とその傍に配置されたGND と間に電磁波が集中して基板上面を伝播してくるのでY-Junctionとの接合箇所での電磁波の伝播に無理が少ないと期待される。また線路とフェライト間に誘電体が存在しないため、特性インピーダンスの低下を防げる。

## 解析結果

ヨークの直径 $\phi$ をアイソレータの素子サイズと定義し、 $\phi$ を1.4 から10 [mm]の範囲で変化させた。800 MHz 帯におけるSパラメータの周波数特性をFig.3 に示す。CPWを用いたトップマウント型アイソレータにおいては、マイクロストリップラインを用いたもの<sup>1)</sup>よりも小さな素子サイズ $\phi=4$  mm で実用的な非可逆伝送特性を達成することができた。具体的には、帯域幅 26 MHz、挿入損失  $0.69\text{ dB}_{\text{max}}$ 、アイソレーション  $10.7\text{ dB}_{\text{min}}$  を実現できた。2 GHz 帯については、 $\phi=2$  mm で帯域幅 60 MHz、挿入損失  $0.51\text{ dB}_{\text{max}}$ 、アイソレーション  $12.2\text{ dB}_{\text{min}}$  を、そして4 GHz 帯については $\phi=1.4$  mm という小型サイズで帯域幅 73 MHz、挿入損失  $0.39\text{ dB}_{\text{max}}$ 、アイソレーション  $15.2\text{ dB}_{\text{min}}$  を実現できた。

## おわりに

強磁性共鳴近傍を動作点とするトップマウント型アイソレータにおいて、伝送線路としてCPWを導入することで、素子の小型化、非可逆伝送特性の向上、広帯域化を実現できることがわかった。

## 参考文献

- 1) 米原他, “小型・低背型のトップマウント型アイソレータ,” 日本磁気学会 第39回学術講演会 (2015). 【発表予定】

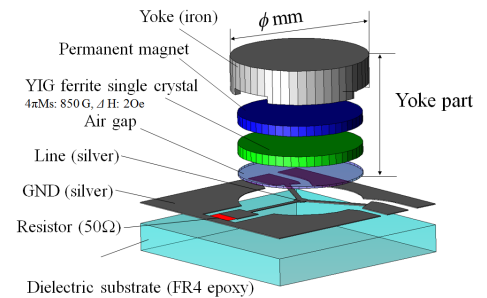


Fig.1 CPW top mount type isolator.

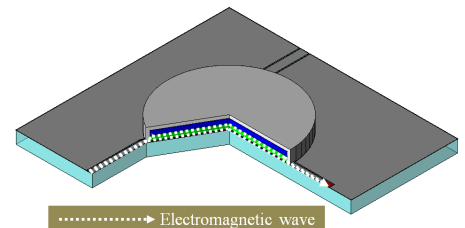


Fig.2 Electromagnetic wave propagation.

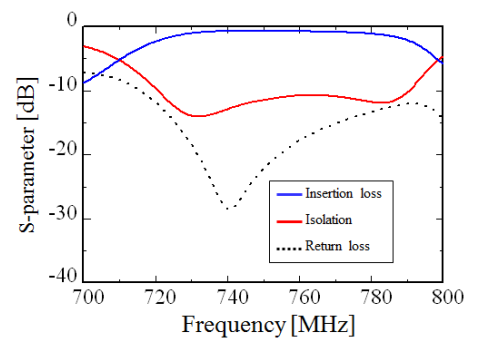


Fig.3 Frequency characteristics of S-parameters.

# 磁気光学効果測定を目的としたコリニア位相干渉光学系の設計

高木宏幸, 高木田 耕作, 橋本良介, 後藤太一, 井上光輝  
(豊橋技術科学大学)

Design of Collinear Interference Optical System for Magneto-optic Effect Measurement

H. Takagi, K. Takakida, R. Hashimoto T. Goto, M. Inoue  
(Toyohashi University of Technology)

## はじめに

磁気光学効果は磁性体の磁化方位に応じて直線偏光が回転する現象である。これは磁化状態によって左右円偏光の位相差が生じるためである。位相差を高感度で測定する手法にマイケルソン干渉計があるが、参照光と物体光が別の光路を通るため、空気の揺らぎや振動等の外乱の影響を受けやすい。本研究では、参照光と物体光を同軸とすることで外乱に対して影響を受けにくいコリニア位相干渉光学系を提案し、その原理実証としてシミュレーションを用いて磁性体の位相変調の検出を行った。

## 実験方法および結果

本研究で提案するコリニア位相干渉光学系を図1に示す。参照光と物体光が同軸上を伝搬するため、外乱に対して影響を受けにくい。参照光と物体光の生成にはフレネルゾーンプレートを用いる<sup>1)</sup>。参照光は、試験体表面(焦点距離 $f=45\ \mu\text{m}$ )の一点に集光して位相の基準値となる。物体光は、フレネルゾーンプレートで回折せずに透過し、試験体に垂直に入射する。両者の反射光は、再びフレネルゾーンプレートを通じた後、同一のベクトルを伝搬することで位相干渉を起こし、試験体表面で生じる位相変調を測定する。コリニア位相干渉光学系の原理実証として、有限要素法解析ソフト(COMSOL Multiphysics ver.4.3a RF Module)を使用して電界計算を行い、干渉光強度の変化から位相差を検出できることを検討した。シミュレーションモデルはビームスプリッター、フレネルゾーンプレート、試験体、光強度測定面から構成され、入射光として同一平面の2箇所から波長 $532\ \text{nm}$ 、幅 $4\ \mu\text{m}$ の光を平行に入射する。試験体はアルミニウムの一部を鉄に置き換えた構造とし、光源の片側の入射位置に幅 $5\ \mu\text{m}$ の鉄を設けた。磁性体の磁化の大きさは、鉄の飽和偏光面回転角である $0.34\ \text{deg}$ まで段階的に設定した。物体光と参照光の干渉光強度は、光強度測定面で測定した。鉄の磁化方向は膜厚方向上下の2通りとし干渉光強度の差分値を取得した。

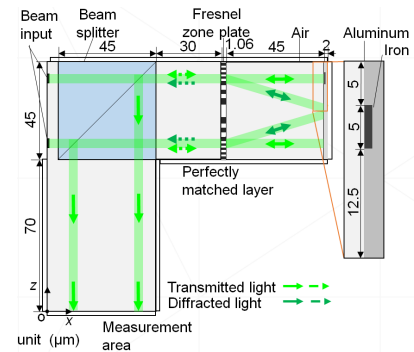


図1 コリニア位相干渉光学系

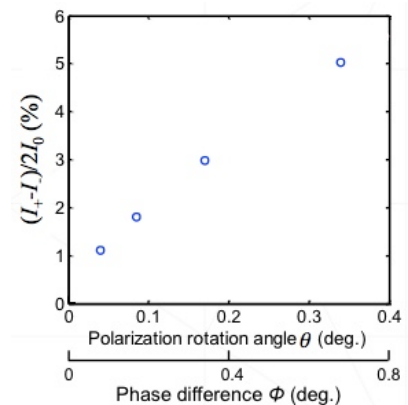


図2 位相変調検出のシミュレーション結果

磁気光学効果による位相変調のシミュレーション結果を図2に示す。図2は鉄による偏光面回転角 $\theta$ (左右円偏光の位相差 $\phi$ )に対する $(I_+ - I_-)/2I_0 \times 100$ の大きさである。ここで $I_+$ と $I_-$ は鉄の磁化が膜厚方向上下の時の干渉光強度、 $I_0$ は鉄の偏光面回転角が $0$ の時の干渉光強度である。図2より、干渉光強度は鉄の偏光面回転角によって変化しており、干渉光強度から磁性体の磁気光学効果を検出できることが示された。

以上より、本光学系を用いて数 $\mu\text{m}$ オーダかつ、 $0.3\ \text{deg}$ 程度の位相差(偏光面回転)の磁性体の磁気光学特性を測定できると考えられる。

参考文献 1) H. Tashiro, et al., JSPE, vol. 62, (1996) 393

# マルチキャビティ磁性フォトニック結晶を利用した欠陥深さ評価

橋本良介, 後藤太一, 高木宏幸, 井上光輝  
(豊橋技術科学大学)

Estimation of defect depth using multi-cavity magnetophotonic crystal

R. Hashimoto, T. Goto, H. Takagi, and M. Inoue  
(Toyohashi University of Technology)

## はじめに

現在、安全性向上のために様々な非破壊検査が行われており、構造物の修理・交換の時期を確認するために欠陥の深さを定量的に評価することが求められる。そこで、目視のように高速で検査可能な、磁気光学(MO)イメージング<sup>1)</sup>に着目した。我々は、磁区サイズが 50 nm 程度の多結晶イットリウム鉄ガーネットを磁性膜に利用することで、高空間分解能な MO イメージを取得した<sup>2)</sup>。一方、欠陥深さに応じて漏洩磁界の強度が変化することから、磁性膜の偏光面回転角が変化する。この変化は画像のコントラストとして取得できるため、欠陥深さの評価が可能である。漏洩磁界が被検体からの距離に応じて減衰するため、磁性膜を薄膜化する必要がある。我々は、薄膜で大きな偏光面回転角が得られる磁性フォトニック結晶(MPC)を用いて欠陥深さ評価を行った。しかし深さ評価に使用した MPC では、磁気飽和を回避するために印加磁界の調整が必要で検査時間を要し、MO イメージングの高速性が損なわれた。本研究では、漏洩磁界の減衰を逆に利用して、被検体から距離を離すことで、磁気飽和を回避できると考えた。つまりこの手法では、MPC を高さ方向に移動する必要がある。しかし、高速で MPC を移動させることは困難である。そこで、MPC を移動させずに欠陥深さを評価するために、MPC 中に磁性層を複数挿入したマルチキャビティ MPC を設計した。

## 実験方法・結果

有限要素法シミュレータ(COMSOL ver.4.3a)を用いて、試験体からの距離と漏洩磁界の強度の関係を調査し、磁気飽和することなく欠陥深さ 1 mm から 10 mm まで評価できる磁性層の位置を求めた。試験体には鉄を想定し、下方向から磁界を印加するための磁化器を想定した。被検体と磁化器の外側は空気とした。従来手法では、欠陥深さに応じて印加磁界を制御する必要がある。そこで、磁界制御を不要にするために、印加磁界を 220 Oe で固定し、MPC が磁気飽和しない位置を計算的に求めた。図 1 は欠陥深さと漏洩磁界強度の関係を示す。青の実線は、印加磁界を 220 Oe として、MPC を 3.1  $\mu\text{m}$  だけ被検体から離れたときの漏洩磁界強度を示す。一方、赤の実線は従来通りに印加磁界を制御した場合の漏洩磁界を示す。この結果から、被検体から距離を 3.1  $\mu\text{m}$  離すことは、印加磁界を制御し、118 Oe 印加したときと同義であることが分かる。従って、距離を離れた位置に磁性層を 2 層有する MPC を作製することで印加磁界一定で、10 mm までの欠陥深さが評価できることが示唆された。次に、このようなマルチキャビティ MPC を設計した。高さ方向に約 3.1  $\mu\text{m}$  離れた位置に光学膜厚の異なる磁性層を 2 層配置した MPC を設計し、その光学特性を、マトリックスアプローチ法を利用して求めた。設計された構造は、基板/誘電体ミラー/磁性層/誘電体ミラー/スペーサ/誘電体ミラー/磁性層/誘電体ミラーである。計算において各磁性層の設計波長に対応した波長で MPC の局在が得られた。これは光源の波長を選択することで、高さが異なる位置の磁性層で MO イメージが得られることを意味している。以上より、本 MPC は波長を選択することで、対象物からの高さが異なる位置での MO イメージを取得でき、その漏洩磁界の空間的分布の違いから欠陥深さの評価ができると考えられる。

## 参考文献

- 1) Z. Zeng, X. Liu, Y. Deng, L. Udpa, L. Xuan, W. C. L. Shih, and G. L. Fitzpatrick: *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 11 (2006).
- 2) R. Hashimoto, H. Takagi, T. Yonezawa, K. Sakaguchi and M. Inoue: *J. Appl. Phys.*, **115**, 17A931 (2014).

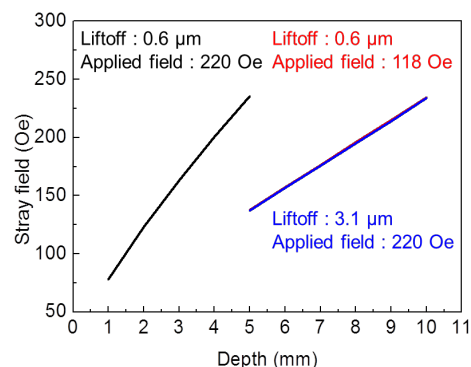


Fig. 1 The relationship between the strength of stray field and depth of defect.

# カラー用磁性フォトニック結晶の設計

工藤 慧、中村和樹、酒井将生、後藤太一、高木宏幸、林 攀梅、井上光輝  
(豊橋技術科学大学)

## Design of Magneto Photonic Crystal for RGB Colors

K. Kudo, K. Nakamura, S. Sakai, T. Goto, H. Takagi, P. B. Lim, M. Inoue  
(Toyohashi University of Technology)

### はじめに

自然な 3 次元像を再生する表示方法として電子ホログラフィが注目されている。ホログラフィは物体が存在する場合と同様の光の状態を再現するため、輻輳や焦点の調節など生理的要因に負担をかけることなく裸眼で見ることができる 3 次元像を表示できる<sup>1)</sup>。磁気光学 3 次元ディスプレイでは希土類置換型イットリウム鉄ガーネット(R:YIG)の垂直磁化膜に磁気情報としてホログラムを表示することで、3 次元像の単色再生を実現している。しかし、R:YIG 単層膜の回折効率は波長と膜厚に依存するため、カラー像の再生には波長に合わせた膜構造の設計が必要となる。本研究では磁気光学 3 次元ディスプレイの 1 枚の磁性メディアを用いたカラー化を目的として、磁性ガーネット膜の構造を設計した。

### 実験方法

赤(R)緑(G)青(B)各色にあわせた 3 枚の欠陥層を誘電体ミラーによりはさんだ反射型の磁性フォトニック結晶(magneto photonic crystal:MPC)の構造をマトリクスアプローチ法によって設計した。この構造では、各色の欠陥層に局在する光の波長を独立させることで、1 枚のメディア内で空間分割方式によるカラー像の再生を行うことができる。各層の独立性を評価するために、3 層の欠陥層中 1 層のみ磁気旋光を与えて、カー回転角および反射率の波長スペクトルを計算し回折効率を求めた。再生像の輝度は磁性膜の回折効率および参照光の強度によって決定される。参照光強度は、ISO 13406 規格で推奨されている輝度 100 cd/m<sup>2</sup> を達成するように RGB の各波長について調節を行った。各欠陥層に RGB 各波長を入射した場合の輝度値を算出し、欠陥層に対応した入射波長に対する対応していない入射波長の輝度比をクロストークとして評価した。

### 実験結果

設計した MPC の構造を Fig.1 に示す。各色の欠陥層上部の誘電体ミラーに対し、下部の誘電体ミラーのペア数を増加させることで、赤色光に比べ透過率の低い青色光や緑色光が奥の欠陥層まで到達し減衰してしまうことを防いでいる。RGB それぞれのピーク波長は R:620 nm、G:524 nm、B:440 nm となっており、その波長で 100 cd/m<sup>2</sup> を達成する参照光強度は R: 174.2 mW/cm<sup>2</sup>、G:7.0 mW/cm<sup>2</sup>、B:929.6 mW/cm<sup>2</sup> となる。Fig.2 に各欠陥層でホログラムを表示した場合の輝度を示す。例えば R は赤色用磁性層のみ磁気旋光を与えた結果である。クロストークの値は青色光のホログラムが赤色光で再生されるときが最大で 1.99 % であり、設計波長外の光による再生像の影響は非常に小さく、RGB ごとに像を再生できる結果を得た。今後、MPC を作製し、カラー像を実際に再生することを試みる。

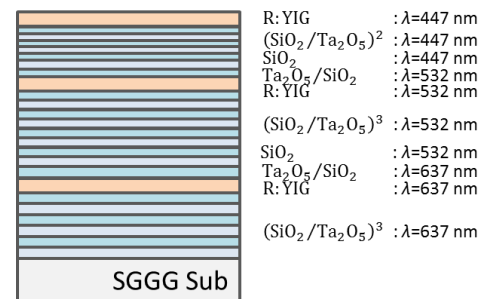


Fig.1 Structure of the MPC for RGB

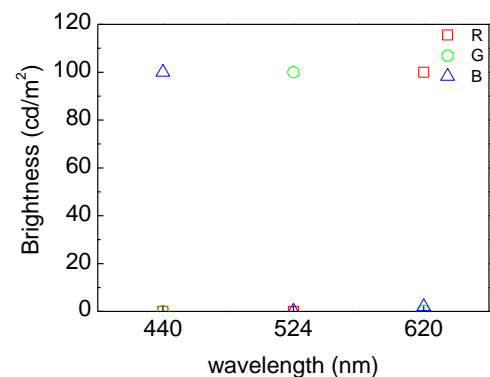


Fig.2 Wavelength dependence of brightness

**参考文献** 1) 三科智之, “立体電子ホログラフィー技術” 電子情報通信学会誌 93(6), 492-498, (2010)



## 磁性ガーネットを用いた磁気光学 Q スイッチの開発

森本凌平, 後藤太一, John Pritchard\*, 吉本拓矢, 高木宏幸, 中村雄一,  
Pang Boey Lim, Nicolaie Pavel\*\*, Mani Mina\*, 平等拓範\*\*, 井上光輝  
(豊橋技術科学大学, \*アイオワ州立大学, \*\*分子科学研究所)

Development of Magneto-optical Q-switch Using Magnetic Garnet Films

R. Morimoto, T. Goto, J. Pritchard\*, T. Yoshimoto, H. Takagi, Y. Nakamura,  
P. B. Lim, N. Pavel\*\*, M. Mina\*, T. Taira\*\*, M. Inoue

(Toyohashi University of Technology, \*Iowa State University, \*\*Institute for Molecular Science)

### はじめに

マイクロチップ固体レーザー<sup>1,2)</sup>は、レーザーダイオードとほぼ同サイズでありながら、狭線幅の単一モード発振や Q スイッチ、モードロック発振による短パルス化によって、高い時間分解能、高安定性、および高尖頭値のレーザー光が望める。特に出力パルスの繰り返し周波数やパルスパターンを制御可能な能動 Q スイッチとして、電気光学効果および音響光学効果を利用したものが報告されているが、原理的に素子サイズの小型化に限界があったり、駆動装置が大型になったりという難点があった。我々は、原理的に薄膜化が可能で<sup>3,4)</sup>、応答速度が極めて高速な磁気光学効果を利用した磁気光学能動 Q スイッチを提案している。磁気光学効果を使った Q スイッチの実証例はほとんど無いため、本研究では、透過率が高く、単位膜厚あたりの磁気光学効果の大きな磁性ガーネットを使用し、磁性ガーネット膜の面直方向にパルス磁界を印加することで磁気光学能動 Q スイッチングの実証を行った。

### 実験方法

マイクロチップ固体レーザーとは、従来は共振器長が 1 m もあるような固体レーザーを、薄片の媒質を用いることで超小型化したものを指す。ここでは基本的な動作の検証を目的として、厚み 4 mm の Nd:GdVO<sub>4</sub> 結晶と外部鏡に試作した磁気光学能動 Q スイッチ素子を配置すべく共振器長を 130 mm と比較的長くしているが、最終的には磁性ガーネット膜をレーザー材料に直接蒸着できることから超小型構成が望めるものである。能動 Q スイッチ素子には、ガーネット基板に、液相エピタキシャル成長法によって成膜された、膜厚 190 μm の単結晶磁性ガーネット膜を用いた。波長 1064 nm における透過率は 78 %, ファラデー回転角は 47 度であった。直径約 6 mm のヘルムホルツコイルを光軸に対して垂直に、磁性ガーネット膜を挟むようにレーザー共振器中に固定し、パルス磁界を膜に対して垂直方向に印加した。

### 実験結果

小型ヘルムホルツコイルに、半値幅 2.3 μs, 振幅 3 V, 繰り返し周波数 100 Hz のパルス信号を印加したところ、Fig. 1 に示すような、Q スイッチ発振出力が確認された。得られたパルス光は半値幅 50 ns, 波長 1064 nm であった。この結果により、磁性ガーネットを用いた磁気光学能動 Q スイッチングが実証された。講演会では、詳細なレーザー共振器構造および印加パルス磁界を変化した場合の発振特性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) T. Taira, et al., *Opt. Lett.*, **16**, 1955 (1991).
- 2) T. Taira, *Opt. Mater. Express*, **1**, 1040 (2011).
- 3) M. Inoue, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, R151 (2006).
- 4) T. Goto, et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **36**, 197 (2011).

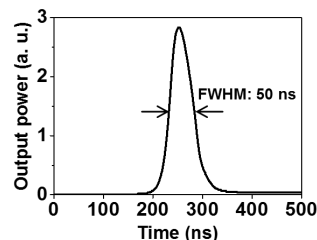


Fig. 1 Optical power of Q-switched pulse using magneto-optical garnet film. The pulse width was 50 ns at a repetition rate of 100 Hz.

## 磁気 Kerr 効果測定／変位校正機能を備えた 10<sup>-8</sup> オーダの薄膜磁歪測定装置の開発

○目黒 栄, 飯田 達矢, 旗持 純, 小田切 雄介, \*斉藤 伸 (ネオアーク, \*東北大学)

Development of 10<sup>-8</sup> order magnetostriction measuring system for thin film  
with calibration function of displacement and measuring function of Kerr signal

S. Meguro, T. Iida, J. Hatamochi, Y. Odagiri, \*S. Saito (Neoark Corp., \*Tohoku Univ.)

**はじめに** 昨今の磁気デバイス用磁性薄膜では、要求仕様の導出のために様々な材料を用いて軟磁性を誘導する必要があり、磁歪の把握とその制御技術の確立は極めて重要である。薄膜磁歪の測定は片持支持した試料を回転磁界中に設置し磁化を磁場方向に飽和させた際の試料の反りを変位測定する方法により行われている。一般に変位量の計測には光てこ法が用いられる。10<sup>-7</sup> 台以下の微小磁歪測定では、試料の磁極への吸引等のように測定変位に磁歪以外の成分が重畳する影響が無視できず、磁化の飽和領域を判定した上で磁歪成分を分離評価することが必要となる<sup>1)2)</sup>。また微小磁歪を検出する光学系にはレンズ等の光学素子が用いられ、残存収差の影響を考慮すると幾何学的配置から微小な絶対変位量を算出することは精度的難しく校正が必要となる。そこで我々は光てこ光学系と縦 Kerr 効果光学系とを一体化し試料の磁化状態を判定できる機能を設け、さらに光ヘテロダイン変位計を搭載し同時計測可能とすることでナノメートルレベルの変位量校正機能も具備した新たな薄膜磁歪測定装置を開発したので報告する。

**実験結果** Fig. 1 に開発した薄膜磁歪測定装置の構成図を示す。印加磁界は直交ヘルムホルツコイルを励磁して発生させ、回転周波数 30 Hz, 最大振幅 100 Oe とした。光てこプローブ光により縦 Kerr 効果も検出可能とするため、プローブレザ光を直線偏光とし、検出側では試料からの反射光を無偏光ビームスプリッタで分岐し、光てこ検出用 4 分割検出器と縦 Kerr 効果検出用偏光差動検出器にそれぞれ導いた。変位絶対値校正用の光ヘテロダイン変位計 (分解能 0.8nm) は試料に正対するよう配置し、試料の固定端近傍と解放端にビームを照射し反射光同士を干渉させた。Fig. 2 に厚さ 140 μm のガラス基板上に成膜した Ni<sub>80</sub>Co<sub>20</sub> 薄膜 (膜厚 20 nm) の回転磁界下での磁歪変位量および縦 Kerr 信号を示す。磁歪変位は一軸対称性を反映し、回転磁界の 2 倍の周期で変化している。回転磁界振幅を増加させるとともに磁歪変位と Kerr 信号はともに振幅が増大するとともに波形歪が小さくなり振幅が飽和することがわかる。Kerr 信号は磁歪変位とは独立に得られるため、磁歪変位が小さい場合でも飽和領域の判断が可能である。光テコ信号の校正は磁歪変位の大きい試料を用いて行った。Fig. 3 に厚さ 140 μm のガラス基板上に成膜した Ni および NiFe 薄膜 (膜厚 100 nm) の回転磁界振幅に対する磁歪変位および Kerr 信号を示す。NiFe 薄膜は 50 Oe 以上で変位および Kerr 信号が飽和しているが、Ni 薄膜ではいずれも飽和しておらず、印加磁界が不足していることがわかる。計測された Ni<sub>80</sub>Co<sub>20</sub> 薄膜の磁歪は 6.0×10<sup>-6</sup>, NiFe 薄膜の磁歪は 3.4×10<sup>-7</sup> であった。講演では 10<sup>-8</sup> オーダの磁歪測定についても報告する。

**参考文献** 1) “磁性薄膜の測定法”, トリケップス, 67 (1990). 2) T. Kawai *et al.*, *Thin Solid Films*, **519**, 8429 (2011).

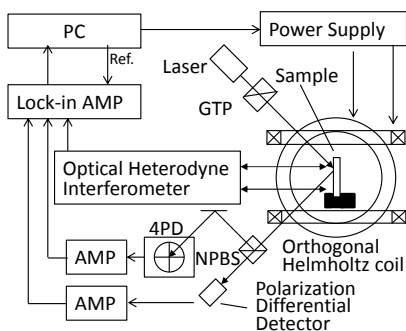


Fig.1 Diagram of the magnetostriction measuring system with calibration function of displacement and measuring function of Kerr signal.

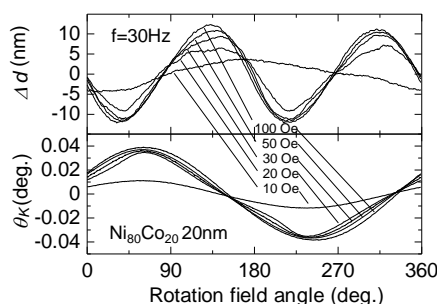


Fig.2 Relations of magnetostriction displacement  $\Delta d$  and the Kerr signal  $\theta_K$  for the angle of the rotating magnetic field in Ni<sub>80</sub>Co<sub>20</sub> film.

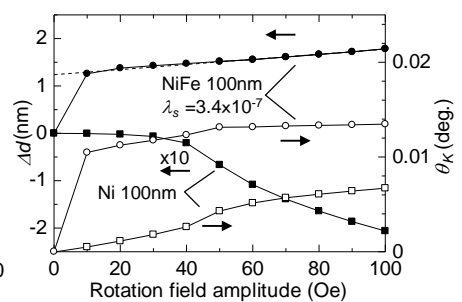


Fig.3 Relations of the magnetostriction displacement  $\Delta d$  and the Kerr signal  $\theta_K$  for the rotating magnetic field in NiFe film and Ni film.

# 超常磁性探針を用いた磁場計測方向を固定した 交番磁気力顕微鏡による永久磁石の直流磁場イメージング

中山翔太, 江川元太, 木下幸則, 吉村哲, 齊藤準  
(秋田大学)

Static magnetic field imaging of permanent magnet by alternating magnetic force  
with a fixed measuring direction of superparamagnetic tip

S. Nakayama, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura, H. Saito  
(Akita Univ.)

**はじめに** 我々は、試料表面近傍での磁場計測が可能な交番磁気力顕微鏡 (A-MFM) を開発し、ソフト磁性探針を用いて、高密度磁気記録媒体の直流磁場の高分解能観察に成功している<sup>1),2)</sup>。A-MFM は励振させた探針にその共振周波数と異なる交流磁場を印加して、探針磁化を周期的に変化させて探針試料間に非共振の交番磁気力を発生させ、この交番磁気力が誘起する探針振動の周波数変調現象を利用して、試料からの直流磁場を計測する。しかしながら、永久磁石等の極めて強い直流磁場を発生する試料の観察時には、ソフト磁性探針では、1) 強い磁気力のため表面凹凸像の取得が困難、2) 探針磁化が試料からの直流磁場により飽和し、周波数変調現象が生じない、等の問題があり、探針磁化が適切な値を持ち飽和しない探針が必要になる。これを満たす探針として超常磁性探針がある<sup>3)</sup>。超常磁性探針は残留磁化がなく、磁場印加方向のみに探針磁化が発生するので探針に印加する交流磁場の方向を磁場計測方向とした直流磁場計測が可能になる<sup>4)</sup>。本研究では高い磁化率を有するグラニューラー構造の FeCo(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)超常磁性探針を用いて、A-MFM により永久磁石の磁場イメージングを行った結果を報告する。

**方法** FeCo(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)系グラニューラー合金薄膜を、先端がピラミッド形状の Si 探針に 100 nm 成膜して超常磁性探針を作製した。A-MFM は市販の走査型プローブ顕微鏡(L-Trace II, 日立ハイテクサイエンス製)に、交流磁場源として最大印加磁場が 3 kOe の電磁石、周波数復調器、ロックインアンプ等を加えて構成した。電磁石の交流磁場は試料面に垂直方向に印加した。観察試料として市販の FeNdB 磁石板および自作した FePt 磁石厚膜(膜厚 300 nm)を用い、探針試料間距離を種々変化させて直流磁場観察を行った。探針に印加した交流磁場の周波数は 89 Hz、振幅は 300 - 3000 Oe の範囲で変化させた。

**結果** Fig. 1 に、膜面垂直方向に直流消磁した NdFeB 等方性磁石板の (a)表面凹凸像, (b)磁場強度像(ロックインアンプの振幅像), (c)磁場極性像(ロックインアンプの位相像), (d)磁場強度像のラインプロファイル, (e)磁場極性像のラインプロファイルを示す。探針に印加した交流磁場振幅は 3000 Oe、探針試料間距離は約 1500 nm である。FeNdB 磁石板は観察前に表面を研磨した。磁石板の厚さは 0.6 mm である。(c)の磁場極性像に見るように明暗の磁場の向上きと下向きに対応する消磁状態を反映した明瞭な垂直方向の磁場像が得られている。垂直磁場の強度がゼロの線(暗線)を境として位相が 180°変化する磁場極性の反転も明瞭に観察される。この暗線は、隣接する結晶粒の垂直磁化成分が反転している結晶粒界付近に表れたものと推察され、FeNdB 試料の結晶粒径は 10 μm 程度と見積もられる。結晶粒径の大きな観察試料においては、探針試料間距離を減少させると結晶粒の中央部で磁場勾配が減少するので、結晶粒界付近の磁気力信号が主となる像に変化する。なお、(e)の磁場極性像のラインプロファイルでは、位相が一定値の同極性の領域でノイズが非常に小さい。これらの結果は、ソフト磁性探針では交流磁場印加により探針磁化が回転するのと異なり、超常磁性探針では探針磁化の大きさが交流磁場の印加方向である試料面に垂直方向のみで時間変化するので、計測する直流磁場の方向が印加する交流磁場方向で決定できることを示している。講演では、永久磁石観察における汎用の磁気力顕微鏡と比較した交番磁気力顕微鏡の特徴の詳細を紹介する。

**参考文献** 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, 109, 07E330 (2011). 2) 岡安 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-5 (2014). 3) 吉村 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-6 (2014). 4) 中山 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-10 (2014).

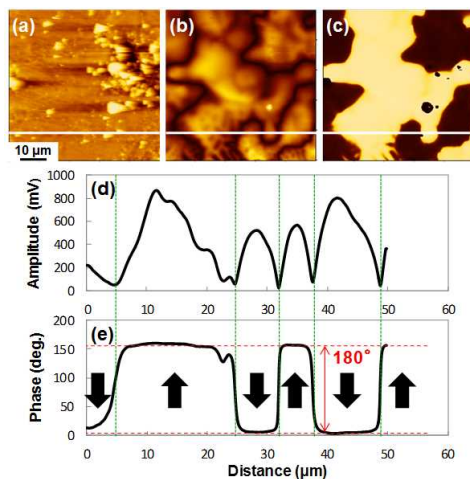


Fig.1 (a) topographic image, (b) amplitude image, (c) phase image, (d) line profile of amplitude image and (e) line profile of phase image for a NdFeB plate shaped magnet.

# 高保磁力 FePt 系探針の側面方向成膜による先端先鋭化と交番磁気力顕微鏡による磁気記録ヘッドの 5 nm 分解能・交流磁場イメージング

水谷広志, K. Srinivasa Rao, 郑 富, 吉村 哲, 江川元太, 木下幸則, 齊藤 準  
(秋田大学)

Effective directional sputtering deposition of FePt sharp end tips for 5nm resolution imaging of writing head by alternating magnetic force microscopy

H. Mizutani, K. Srinivasa Rao, F. Zheng, S. Yoshimura, G. Egawa, Y. Kinoshita, H. Saito  
(Akita University)

**はじめに** 我々はこれまで試料表面近傍での磁場観察が可能な交番磁気力磁気力顕微鏡(A-MFM)を開発し、ハード磁性探針を用いて磁気記録ヘッド等の交流磁場観察を行ってきた<sup>1),2)</sup>。A-MFMを用いた交流磁場計測は、ハード磁性探針にその共振周波数と異なる正弦波磁場を印加することで探針振動に発生する周波数変調(FM)を利用して行う。現在開発が進められている強磁場を発生する磁気記録ヘッドの交流磁場観察を高い空間分解能で行うためには、これまで開発した保磁力が 10 kOe 程度の FePt ハード探針に対して、更なる高保磁力化および先端先鋭化が必要不可欠である。昨年我々は、FePt 薄膜の高保磁力化のために、1) MgO 添加によるグラニューラー構造化、2) FePt 結晶粒の膜面内容易軸化のための低速昇温・長時間熱処理、3) 規則化促進のための成膜中 VHF プラズマ照射、を検討し、20 kOe 以上の膜面内保磁力を有する薄膜を得た<sup>3)</sup>。本研究では、先端先鋭探針を開発するために、専用の磁性探針製造装置を立ち上げ、本薄膜材料を用いて作製した探針を用いて、磁気記録ヘッドを観察し交流磁場勾配像の空間分解能を評価した。

**方法** FePt 系探針は、市販のピラミッド形状(先端径 10 nm)もしくは円錐形状(先端径 5 nm)の Si 探針に、イオンガンにより 4 nm 程度の表面酸化膜(FePt 系薄膜の規則化熱処理時の Si 探針母材との合金化を防止する拡散防止層)を形成し、大気に曝すことなく FePt と MgO の同時スパッタリング法で成膜して作製した。磁性膜厚は 15 - 30 nm, MgO 添加量は 35 vol.%, 規則化のための熱処理は、昇温速度を 0.1°C/秒, 700°Cでの保持時間を 120 分, とした。A-MFM は市販の大気中で観察可能な走査型プローブ顕微鏡(L-Trace II, 日立/テックインズ製)に、周波数復調器(PLL 回路)およびロックインアンプを追加して構成した。交流磁場計測は、最初に表面凹凸を計測した後、探針を表面凹凸に応じて 4 nm リフトさせて行った。磁気記録ヘッドの励磁電流は、30 mA, 211 Hz とした。

**結果** Fig.1 に、(a) 磁性探針製造装置の模式図、(b) 本装置を用いて Si 探針表面の酸化および 30 nm の FePt-MgO 薄膜の成膜を施した探針の SEM 像、を示す。比較の為、(c) 試料とターゲットが対向する一般的な成膜装置を用いて作製した探針の SEM 像も示す。一般的な装置を用いた場合に比べ、1) 探針母材の先端先鋭を損なうことなく磁性薄膜を成膜できること、図では示していないが、磁性薄膜を非常に薄くしても Si 探針表面の薄膜被覆率が高いことから、2) 探針母材に均一に成膜できること、が確認された。その要因は、(a)の模式図に示すように、1) 探針へのスパッタリングが全て一定角度の側面方向からであり、かつ探針が成膜中に回転していること、2) 拡散防止層形成・磁性薄膜成膜の連続プロセスが可能であること、によるものと考えられる。

Fig.2 に、磁気記録ヘッドを、本装置で作製した FePt 系探針を用いて観察した、(a) 表面形状像、(b) 磁場強度像、(c) 磁場極性像、それらのラインプロファイル(d), (e), (f)を示す。探針は、円錐形状 Si 探針に FePt-MgO 薄膜を 15 nm 成膜したのものを用いた。観察前に、探針の磁化が試料面垂直になるように着磁した。強度像から主磁極で強い交流磁場の発生が観察でき、極性像における 180°の位相変化から主磁極周辺での垂直磁場の極性変化が明瞭に観察できる。空間分解能を、主磁極付近のラインプロファイルの空間スペクトラムから磁気力信号がホワイトノイズレベルと等しくなる最小波長の半値と定義して求めると 5 nm 程度であった。

**参考文献** 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, 107, 09D309 (2010). 2) S. Yasui et al., ICAUMS2012, 4pPS-118 (2012). 3) F. Zheng 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-3 (2014).

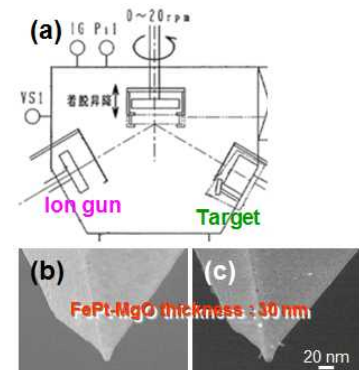


Fig. 1 (a) Schematic figure of a sputtering system for MFM tip fabrication, SEM images of FePt-MgO tips fabricated by the sputtering system (b) and typical sputtering system (c).

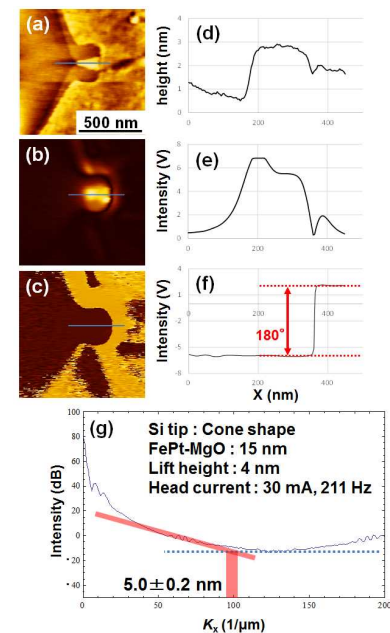


Fig. 2 Topographic image (a), amplitude image (b), and phase image (c) of the AC magnetic field, and their line profiles (d), (e), and (f). The power spectrum of amplitude image (g).

# ソフト磁性探針を用いた交番磁気力顕微鏡による 垂直磁気記録媒体の 5 nm 分解能・直流磁場イメージング

K. Srinivasa Rao, 江川元太, 木下幸則, 吉村哲, 齊藤準  
(秋田大学)

5 nm-resolution imaging of perpendicular magnetic recording media  
by alternating magnetic force with a soft magnetic tip

K. Srinivasa Rao, G. Egawa, Y. Kinoshita, S. Yoshimura, H. Saito  
(Akita Univ.)

**はじめに** 近年、磁気記録媒体の高密度化に伴い、磁気力顕微鏡 (MFM) には空間分解能の向上が強く求められている。我々は空間分解能向上に有効となる試料表面近傍の磁場計測が可能な交番磁気力顕微鏡 (Alternating magnetic force microscope : A-MFM)<sup>1)</sup>を開発し、媒体の直流磁場計測の高分解能化を進めている。A-MFM を用いた直流磁場計測では、加振させたソフト磁性探針に、探針の共振周波数と異なる周波数の交流磁場を印加することで探針試料間に発生する非共振の交番磁気力が、探針振動に周波数変調を引き起こす現象を利用する。A-MFM の高分解能化には計測感度が高く先鋭なソフト磁性探針の開発が重要となる。昨年、我々は新たに提案した交流磁場応答性による探針性能評価法<sup>2)</sup>を用いて、探針用のソフト磁性材料の探索を行い、FeCoB 系非晶質ソフト磁性探針が 100 Oe 以下の低い飽和磁場と高い計測感度を示すことを見出した<sup>3)</sup>。同時にこの探針を励磁するための小型のフェライトコアを開発した。さらに本研究では、先鋭な高分解能ソフト磁性探針の作製を、磁性膜を Si 探針母材の側面方向から均一に成膜できるスパッタリング装置を用いて検討した。この探針を用いて垂直磁気記録媒体を観察した結果、5 nm の空間分解能が安定して得られたので、その詳細を報告する。

**方法** FeCoSiB 系非晶質ソフト磁性探針を、先端形状が異なる種々の Si 探針に磁性膜を成膜して作製した。A-MFM は市販の走査型プローブ顕微鏡(L-Trace II, 日立メテックインス製)に、交流磁場源として前述のフェライトコア、周波数復調器、ロックインアンプ等を加えてプロトタイプ機を開発した。フェライトコアの交流磁場は試料面に垂直方向に印加した。観察試料として CoCrPt-SiO<sub>2</sub> 垂直磁気記録媒体を用い、探針試料間距離約 2 - 3 nm として直流磁場観察を行った。探針に印加した交流磁場の振幅は 50 - 300 Oe, 周波数は 89 - 500 Hz の範囲で変化させた。

**結果** Fig. 1 に、探針に交流磁場の周波数を 89 Hz として強度を 100 - 300 Oe の範囲で変化させて測定した、500 kfci の CoCrPt-SiO<sub>2</sub> 垂直磁気記録媒体の垂直磁場像 (フェライトコアの交流磁場信号( $H_0^{ac} \cos(\omega t)$ ))に同期させた A-MFM 像 ( $X = R \cos(\omega t)$ )), および記録ビット部分のラインプロファイル, および空間スペクトラムを示す。ラインプロファイルは 1 ラインのものであり、空間スペクトラムは 7 本のラインプロファイルの空間スペクトラムを平均して求めた。FeCoSiB 非晶質探針は先端径が 10 nm 以下の標準的な Si 探針に磁性膜をベタ膜換算で 25 nm 成膜したものを用いた。垂直磁場像では交流磁場振幅が 100 Oe においても記録ビットが明瞭に観察されている。

A-MFM では検出信号の正負から垂直磁場方向が上向きか下向きかを識別できるが、ラインプロファイルに見るように、媒体の垂直磁場の方向が上向きから下向きに交互に変化している様子がノイズに乱されることなく明瞭に観察されていることがわかる。また空間スペクトルからも高い S/N 比で磁気力信号が検出されていることがわかる。空間分解能を磁気力信号がホワイトノイズレベルと等しくなる最小波長の半値と定義して求めると 5 nm 程度であった。講演では、空間分解能に及ぼす磁性探針の先端形状依存性や磁性膜厚依存性、およびさらに高い記録密度の垂直磁気記録媒体についての観察結果についても発表する。

**参考文献** 1) H. Saito et al., *J. Appl. Phys.*, 109, 07E330 (2011). 2) H. Qi 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-12 (2014). 3) 岡安 他, 第 38 回日本磁気学会学術講演概要集, 4pA-5 (2014).

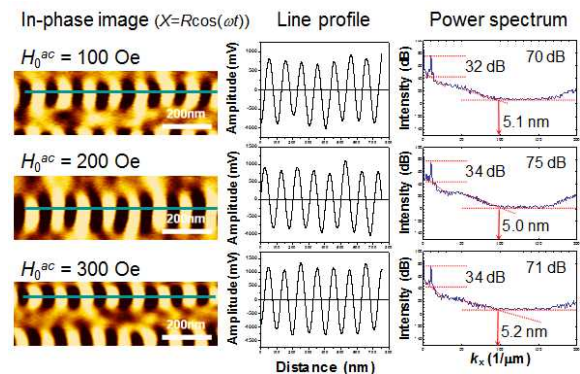


Fig. 1 In-phase image (perpendicular magnetic field image), line profile and power spectrum of a CoCrPt-SiO<sub>2</sub> perpendicular magnetic recording medium with different driven AC magnetic fields of tip.

## 磁気力顕微鏡探針の表面起伏と空間分解能の関係

香川智紀・加藤慶一・大竹充・二本正昭・桐野文良\*・稲葉信幸\*\*

(中央大, \*東京藝大, \*\*山形大)

Relationship between Surface Morphology and Spatial Resolution of Magnetic Force Microscope Tip  
Tomoki Kagawa, Keiichi Kato, Mitsuru Ohtake, Masaaki Futamoto, Fumiyoshi Kirino\*, and Nobuyuki Inaba\*\*  
(Chuo Univ., \*Tokyo Univ. Arts, \*\*Yamagata Univ.)

**はじめに** 磁気力顕微鏡 (MFM) は、磁性探針 (MFM 探針) により試料からの漏洩磁場勾配を検出し、磁化状態を観察する装置である。MFM 探針は Si などの非磁性探針に磁性膜被覆することにより作製され、観察性能に寄与する重要な要素である。高分解能化のためには、探針の先鋭化<sup>1-3)</sup>に加え、被覆磁性膜の表面起伏を低減させる必要がある<sup>4)</sup>。本研究では、形成温度や下地層材料を変えて Co 膜を Si 探針に被覆することにより MFM 探針を作製し、探針表面起伏と分解能の関係について検討を行った。

**実験方法** 膜被覆には超高真空 RF マグネトロンスパッタリング装置を用いた。先端半径が 4 nm の Si 探針に 20 nm 厚の Co 膜を室温 (RT) ~ 300 °C で被覆した。拡散防止や表面起伏制御を目的に、Si 探針と Co 膜の間に、MgO や C, W などの下地層を挿入した。被覆膜の表面粗さは探針被覆と同時に Si 基板上に形成した磁性膜を AFM 観察することにより評価した。探針形状観察には SEM を用いた。分解能評価には真空排気型 MFM 装置を用いた。

**実験結果** Fig. 1 に Si 基板上に RT および 300 °C で形成した Co 膜の AFM 像を示す。RT では粒径が 10–20 nm 程度であり、表面粗さ  $R_a$  も 0.3 nm である。形成温度を 300 °C まで上昇させると、粒径が 50–100 nm,  $R_a$  も 6.6 nm まで増加している。Fig. 2 に RT および 300 °C で形成した探針の SEM 像を示す。AFM 像に対応して、RT では平坦な探針表面が実現されているのに対して、300 °C では起伏の大きな被覆膜が観察されている。このことから、300 °C で被覆した探針では、RT 被覆探針に比べ、分解能の低下や再現性劣化が予想される。Fig. 3(a) に RT 被覆探針を用いて試作垂直磁気記録媒体を観察した結果を示す。また、Fig. 3(b) に Fig. 3(a) の点線部分の信号プロファイル、Fig. 3(c) に記録ビット像に対して高速フーリエ変換を行ったパワースペクトルを示す。1000 および 1200 kFCI のいずれの記録密度においても、明瞭に記録ビット像を識別でき、パワースペクトルにおいても記録密度に対応するピークが認められる。当日は、探針表面起伏と分解能の関係について詳細に議論する。

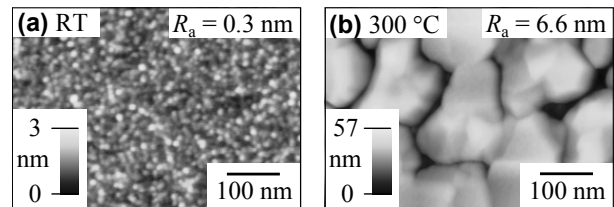


Fig. 1 AFM images observed for 20-nm-thick Co films deposited at (a) RT and (b) 300 °C.

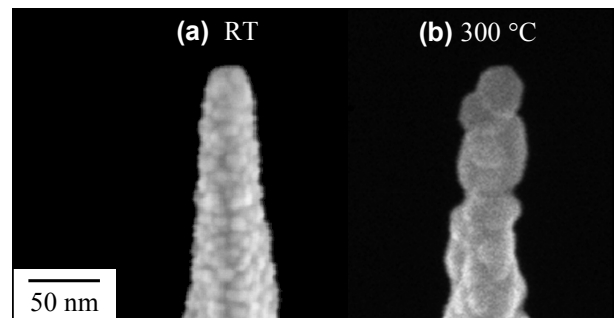


Fig. 2 SEM images observed for MFM tips coated with 20-nm-thick Co films at (a) RT and (b) 300 °C.

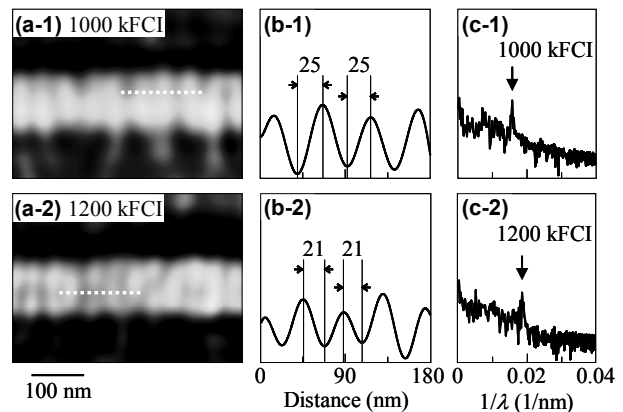


Fig. 3 (a) MFM images of a perpendicular medium recorded at (a-1) 1000 and (a-2) 1200 kFCI observed by using an MFM tip coated with 20-nm-thick Co film at RT. (b-1, b-2) Signal profiles along the dotted lines in (a-1, a-2), respectively. (c-1, c-2) Power spectra analyzed for the bit images of (a-1, a-2), respectively.

- 参考文献**
- 1) T. Yamaoka, K. Watanabe, Y. Shirakawabe, and K. Chinone: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 429 (2003).
  - 2) L. Gao, L. P. Yue, T. Yokota, R. Skomski, S.-H. Liou, H. Takahoshi, H. Saito, and S. Ishio: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2194 (2004).
  - 3) M. Futamoto, T. Hagami, S. Ishihara, K. Soneta, and M. Ohtake: *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 2748 (2013).
  - 4) M. Ohtake, K. Soneta, and M. Futamoto: *J. Appl. Phys.*, **111**, 07E339 (2012).

## 走査型透過 X 線顕微鏡の開発

井波暢人<sup>1</sup>、武市泰男<sup>1</sup>、高橋嘉夫<sup>2</sup>、小野寛太<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>高エネ研、<sup>2</sup>東京大学)

Scanning Transmission X-ray Microscope for Permanent Magnets  
Nobuhito Inami<sup>1</sup>, Yasuo Takeichi<sup>1</sup>, Yoshio Takahashi<sup>2</sup>, Kanta Ono<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>KEK, <sup>2</sup>Univ. of Tokyo)

### はじめに

永久磁石の高保磁力化に向けて、磁石結晶粒および粒界における磁性元素およびその他の構成元素が果たす役割について研究が進められている。特に、レアメタル・レアアース材料を用いる磁石材料は、それらの元素の空間分布を調べて磁気特性に与える影響を理解することが重要である。放射光による数 nm 程度の波長を持つ単色軟 X 線を用いることで、高い空間分解能を持ったイメージングを期待することができる。加えて、X 線吸収スペクトルを得ることで元素選択的に化学状態を得ることができ、また円偏光された X 線を用いることで元素選択された磁気イメージングも行うことができる。イメージング可能な X 線顕微鏡にはいくつかの方法があるが、X 線を集光して試料を走査することによりイメージを得る走査型透過 X 線顕微鏡(Scanning Transmission X-ray Microscope: STXM)は局所分析が可能であるため磁石材料の開発に向いている。<sup>1)</sup>X 線イメージング装置は磁石開発推進に有用なツールであると思われるが、コストや設置場所等の問題で、これまで国内にはほとんど導入されていなかった。海外施設にある STXM は大型装置であるため、長時間のイメージング測定において熱や振動等によるドリフトの影響が発生する。そこで我々のグループでは、そのような影響を排除するため、小型で高速な STXM の開発を行った<sup>2-4)</sup>ので報告する。

### 実装方法

図 1 に STXM 概略図を示す。X 線を集光するフレネルゾーンプレート(FZP)、高次光を選択する Order Sorting Aperture(OSA)、試料を透過した X 線を検出する PMT モジュールがハードウェアの主な構成要素である。FZP、OSA、試料、ディテクタの各ステージは、attocube 社製ポジショナーおよびスキャナーを用いることで、装置の小型化が可能となった。測定システムは、National Instruments 社製 LabVIEW を用いて構成した。試料等ステージ制御やパルスカウンタ等のリアルタイム処理、バルブ等のインターロック制御などの高速処理が必要な部分には、FPGA が搭載された NI Compact RIO を使い、LabVIEW FPGA を使用してプログラミングを行った。プログラム可能なハードウェアである FPGA を用いることで、高速処理を実現した。

### 実験結果

開発した STXM 装置の実証のため、Nd-Fe-B 焼結磁石の磁気イメージング測定を行った。測定は KEK Photon Factory のビームライン BL13A にて行った。BL13 の X 線のエネルギー範囲は、30 - 1600 eV である。偏光 X 線を発生することができるアンジュレータの更新により、円偏光の X 線を導入することが可能となった。測定した Nd M 吸収端における磁気イメージング像から、ドリフトによるノイズも見られず、明瞭な迷路磁区が得られることが分かった。本研究で開発した STXM 装置については、磁場印加や時間分解測定も開発中であり、今後の磁性材料研究に有用な実験手法となると考えられる。

### 参考文献

- 1) K. Ono, et al., IEEE Trans. Magn. 47 (2011) 2672.
- 2) Y. Takeichi, et al., J. Phys.: Conf. Ser. 502 (2014) 012009.
- 3) Y. Takeichi, et al., Chem. Lett. 43 (2014) 373.
- 4) N. Inami, et al., J. Phys.: Conf. Ser. 502 (2014) 012011.

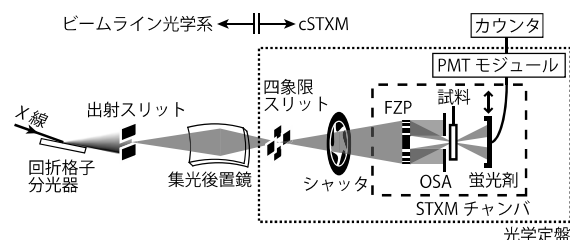


Fig. 1. Schematic image of STXM.<sup>2)</sup>

## Si ウェハ上に作製した逆磁歪効果型薄膜歪センサの特性

横井 甫, 久保 結人, 栢 修一郎, 石山 和志  
(東北大学 電気通信研究所)

Thin film strain sensor using inverse-magnetostriction effect on Si wafer

H. Yokoi, Y. Kubo, S. Hashi, K. Ishiyama  
(RIEC, Tohoku Univ.)

## はじめに

磁歪膜と導体層の積層構造からなる逆磁歪効果を利用した歪センサの検討を行ってきた<sup>1)</sup>。このセンサは、センサ素子への歪印加時の磁化変化に伴う透磁率変化を、高周波通電時の素子のインピーダンス変化として検出する。また磁歪膜の異方性の誘導方法として、熱処理時の導体層、磁歪膜、基板の3者間の熱膨張係数差から生じる熱応力を利用している。我々はこの歪センサとMEMS技術を組み合わせ、超高感度振動センサを実現することを目的とし研究を進めている。これまでSiウェハ上に歪みセンサ素子を試作し、磁歪膜に所望の異方性が誘導できることを確認した<sup>2)</sup>。本報告では、本素子の諸特性の検討結果について報告する。

## 実験方法

素子の作製にはRFスパッタ、リフトオフ法を用いた。非磁性金属層にはMo、磁性層には $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ を用いた。Fig. 1に示すようにMo、 $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ ともに同一の1ターンミアンダ形状に製膜した。Siウェハの厚みは $200\mu\text{m}$ 、Moの膜厚は $2.0\mu\text{m}$ 、 $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ の膜厚は $0.7\mu\text{m}$ とした。成膜後に $360^\circ\text{C}$ 、 $240\text{kA/m}$ の回転磁場中のみで熱処理を行い、素子長手方向に異方性を誘導した。Fig. 2に歪印加の様子を示す。素子の電極側を固定し片もち梁状にして、他端にマイクロメータヘッドを押し当て上下させることで歪を印加した。インピーダンス測定はネットワークアナライザを使用した。

## 実験結果

周波数が $120\text{MHz}$ のキャリア電流を通電したときの歪み-インピーダンス特性をFig. 3に示す。歪は圧縮方向を正とした。約 $1,000\text{ppm}$ の圧縮歪印加時のインピーダンスは $7.3\Omega$ であった。圧縮歪の減少に伴い $250\text{ppm}$ 付近からインピーダンスは急激に増大し、 $40\text{ppm}$ 付近で最大値 $9.9\Omega$ となった。その後、引張歪に変化すると減少に転じ、緩やかに減少した。この歪印加範囲におけるインピーダンスの変化量は最大で $2.6\Omega$ となり、変化率を算出したところ $36.8\%$ となった。印加歪が $40\sim 160\text{ppm}$ の範囲で最も急峻な変化を示し、線形近似した傾きより歪感度を算出したところ、ゲージ率は $1,747$ となった。Kerr効果顕微鏡による歪印加時の磁歪膜の磁区構造変化の観察、および今回のインピーダンス測定結果との比較を行い、さらなる感度向上のための素子構造を検討する。

## 謝辞

本研究の一部はJST先端計測分析技術機器開発プログラム「磁気MEMSを利用した微小振動計測システムの開発」によるものである。

## 参考文献

- 1) Y. Suwa, et al. *IEEE Trans. Magn.* 46, 666 (2010).
- 2) Y. Miwa, et al. *IEEE Trans. Magn.* 51, 2000604 (2015).

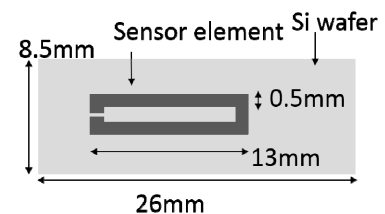


Fig. 1 Schematic diagram of the sensor element.

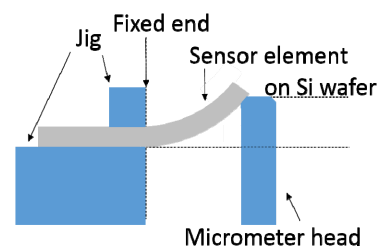


Fig. 2 Experimental setup of impedance measurement under stress.

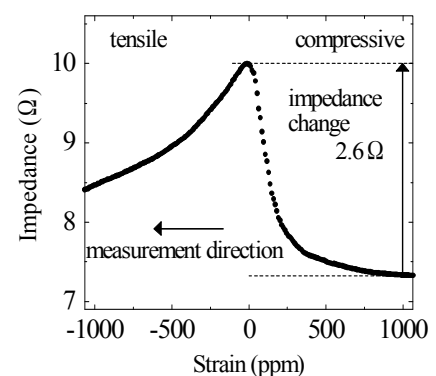


Fig. 3 Impedance change of strain sensor induced by applied strain.



## 磁性薄膜機能素子による電流の周波数解析

木佐貫 駿、辻本 浩章  
(大阪市大)

Frequency analysis of the current by magnetic thin film functional sensors

S.Kisanuki, H.Tsujimoto  
(Osaka City Univ.)

### はじめに

現在、磁気センサは広く使われており、我々は磁気抵抗効果を利用した薄膜電力センサの研究を進めてきた。薄膜電力センサは従来手法による電力計に比べ飛躍的に小型化（3mm角程度）でき、且つ小型・軽量、安価である等の特徴を有し、交流電力、直流電力共に精度よく測定することができる。また我々は同時に本素子の持つ非接触での乗算機能を利用した新しいデバイス開発を進めている。今回、非接触で電流の周波数解析が可能であることを確認したので報告する。

### 実験方法

素子はパーマロイを使用し、印加磁界による抵抗変化から、印加磁界を発生させる電流と素子を通る電流の積に比例した出力電圧を取り出すことができ、乗算を非接触で実現する。Fig.1に素子と電流の配置を示す。素子に近づけて解析対象である電流が流れる導線を配置する。素子には電流に比例した磁界が印加され、非接触で動作する。ここで解析対象の電流の成分と素子を通る電流が同周波数のとき、乗算機能によって出力電圧は直流成分と2倍周波数成分に分けられる。この直流成分はローパスフィルタによって簡単に取り出すことができる。よって素子を通る電流を周波数掃引することで、周波数解析が可能となる。また直交ミキサの技術を利用し、2つの素子に90°位相の異なる電流を流し、この2つの出力電圧を用いれば位相の影響を受けることなく周波数解析ができる。

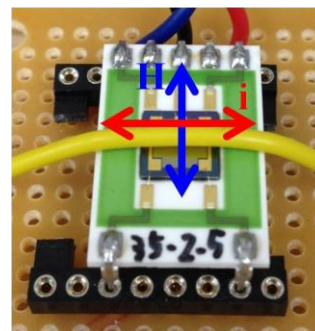


Fig.1 Magnetic thin film functional sensor

2つの素子の抵抗値は約32[kΩ]で、それぞれに0.03[A]の90°位相の異なる電流を信号発生器から流す。出力電圧を1000倍に増幅したのちにカットオフ周波数5[Hz]の7次ローパスフィルタによって直流成分をそれぞれ取り出す。このローパスフィルタの減衰特性がスペクトルの形状となる。

### 実験結果

Fig.2に解析対象電流を(300[Hz],1[A])の矩形波電流として周波数解析を行った結果を示す。矩形波のフーリエ級数展開で表されるように、300[Hz]の基本周波数成分と奇数高調波のスペクトルを得ていることがわかる。ここで基本周波数成分を基準とすると3次高調波成分は1/3、5次高調波成分は1/5、7次高調波成分は1/7であり、正しく周波数解析が行えていることを示している。解析対象の電流の成分を直流に変換するこの方式は、高周波でも直流に変換して高い分解能で解析ができることが期待される。

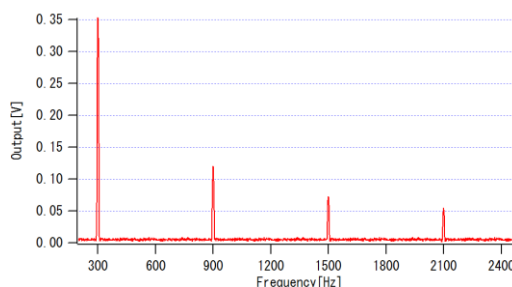


Fig.2 Frequency analysis of the square wave current (300[Hz],1[A])

### 参考文献

- 1) 辻本 浩章: 「磁性薄膜電力センサ」, 日本磁気学会 第197回研究会資料, p33-38 (2014年)
- 2) 松田 芳明: 「磁性薄膜電力センサによる電力計測とその温度補償に関する研究」, 修士論文, p63-88 (2014年)

# 電磁気的手法を利用した非接触塩分濃度計の試作と評価

Nguyen Van Toai, 曾根原 誠, 佐藤 敏郎

(信州大)

Development and characterization of non-contact salinity sensor based on electromagnetic means

N. V. Toai, M. Sonehara, T. Sato

(Shinshu Univ.)

## はじめに

人口の増加および生活レベルの向上に伴い、水の需要が更に高まっている。しかし我々が実際に利用できる淡水は限られているため、水不足の問題に直面している<sup>1)</sup>。この問題を解決するために海水淡水化プラントの建設が加速している<sup>2)</sup>。現在では、淡水化処理された水の塩分濃度を測定するためには、測定部を水中に入れるのが専らであるが、メンテナンスや安全性から非接触で測定できる手法が望ましい。そこで、著者らは電磁気的手法を利用した非接触塩分濃度計を考案した。本稿では試作および評価について報告する。

## 実験方法

Fig. 1 に試作された非接触塩分濃度計 (以下、センサ) の写真を示す。外側のコイルは励磁コイル、内側のコイルは8字型検出コイルで構成されており、Fig.2 に実験回路を示す。励磁コイルには、振幅 0.5 A、周波数 1 MHz の正弦波交流を印加した。Coil 1 内のパイプには空気、Coil 2 内のパイプに食塩水を入れた。食塩水には、塩分濃度 0.05 ~ 2 [%] を用い、また比較のため蒸留水も用いた。シャント抵抗  $R$  の両端電圧と検出コイルの誘導起電力を位相検波器 (AD8032) に入れ、出力電圧  $V_o$  を測定した。本センサの詳細な測定原理は割愛するが、Coil 2 内の食塩水の導電率  $\sigma$  に依って、食塩水に誘導電流が生じ、それによる磁界により Coil 2 と Coil 1 の各端子電圧では位相差が生じ、更に8字型コイルの特徴により位相差がエンハンスされる結果になる。僅かな導電率  $\sigma$  の変化に対するセンサとして本手法は有効である。

## 実験結果

Fig. 3 に食塩水の導電率  $\sigma$  に対する位相検波器の出力電圧  $V_o$ 、位相差  $\theta_s$  の関係を示す。なお、 $\theta_s$  は AD8032 のデータシートを用いて換算した。食塩水の導電率  $\sigma$  の増加に伴い出力電圧  $V_o$  は高くなるのが分かる。特に  $V_o$  は  $\sigma < 0.1$  [S/m] の範囲で大きく変化しており、淡水の塩分濃度をより感度良く測定できる結果が得られた。発表当日は、本センサの測定原理および実験結果を詳細に説明する。

## 参考文献

- 1) R. Clarke, J. King, T. Oki, "The Atlas of Water," Maruzen Co., Ltd., 2006.
- 2) R. Clayton, "A Review of Current Knowledge DESALINATION for WATER SUPPLY," Fondation for Water research 2011, 2011.

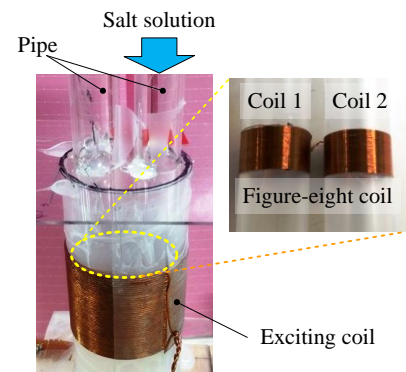


Fig. 1 Photograph of the novel non-contact water salinity sensor

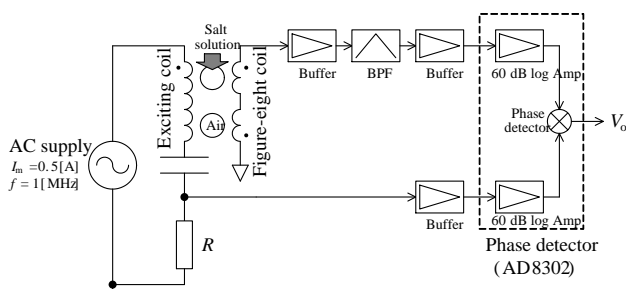


Fig. 2 Block diagram in the non-contact water salinity sensor system

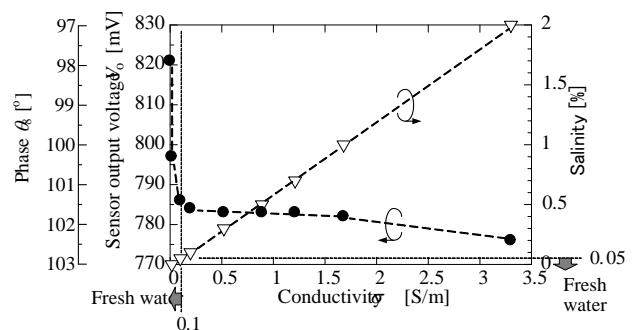


Fig. 3 Relation between sensor output voltage  $V_o$ , phase  $\theta_s$ , salinity, and conductivity  $\sigma$  in the salt solutions

# 手作業時の手指運動計測を想定したモーショキャプチャシステム

大崎祐太郎, 栢修一郎, 藪上信\*, 金高弘恭, 石山和志  
(東北大学, \*東北学院大学)

Motion capture system for tracking finger motion of hand work

Y. Osaki, S. Hashi, S. Yabukami\*, H. Kanetaka, K. Ishiyama  
(Tohoku Univ., \*Tohoku-Gakuin Univ.)

## 1. はじめに

近年, 技能継承等の目的で手作業時の手指の正確な運動計測への要望が高まっている. そのような用途において, 我々が開発してきたワイヤレスの LC 共振型磁気マーカを用いるモーショキャプチャシステム<sup>(1)</sup>は磁気式の特徴である測定対象に隠れが生じても検出が可能な点に加え, 小型軽量のワイヤレス磁気マーカを用いるにも関わらず, 数 mm 以下の精度を有することから有力な候補の 1 つであると考えられる. 手指の運動を計測するにあたり, 最低でも 300~400mm 四方の空間を確保する必要がある. 本研究では, 手指運動計測用のシステム開発のための検討を行っており, その経過を報告する.

## 2. 実験方法

Fig. 1 はモーショキャプチャシステムを模式的に表したものである. このシステムは励磁コイル, 検出コイルアレイ, LC 共振型磁気マーカから構成される. マーカは  $\phi 3 \times 15\text{mm}$  の Ni-Zn フェライトに  $\phi 0.1\text{mm}$  の銅線を 500 回巻いたコイルにチップコンデンサを直列に接続しており, 共振周波数は 116.7kHz である. マーカの質量は 1g 程度であり, 指に装着した際に運動に影響を及ぼすことは殆どないと考えられる. 上述した 300mm 四方程度の範囲の検出を行うため, 各検出コイルは 60mm 間隔で  $6 \times 6$  の 36 個の配置とし, 検出コイルアレイと励磁コイルの間隔を 425mm とすることで検出空間を確保した. 励磁コイルには任意波形発生器で生成した励磁波形を増幅して印加し, 各検出コイルの誘起電圧は電圧分解能 20bit のデジタイザで測定した. マーカから発せられる磁界をダイポール磁界と近似し, 各検出コイルでの誘起電圧を用いて逆問題の計算を解くことでマーカの位置の算出を行った.

## 3. 実験結果

$-140 \leq x \leq 140$  (20mm 間隔),  $50 \leq y \leq 200$  (10mm 間隔)の x-y 平面内で, 各マーカの設置位置で測定を 10 回行った. Fig. 2 に測定された位置の結果を示す. 測定した全ての位置において, 実際にマーカを設置した位置とのずれが 5mm 未満, 測定された 10 回の位置の標準偏差が 0.5mm 未満であった.

今回測定を行った範囲は手の動きを検出するのに最低限必要な空間であり, 今後, 更なる検出可能空間の拡張や検出精度の向上が必要である.

## 参考文献

- 1) 藪上, 栢, 徳永, 河野, 荒井, 岡崎, 日本応用磁気学会誌, **28**, 877 (2004)

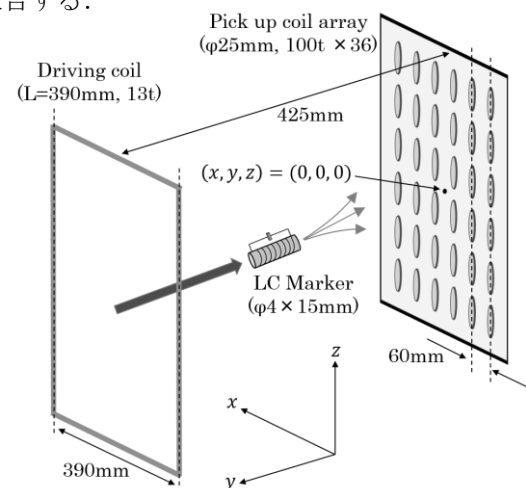


Fig. 1. A diagram of motion capture system

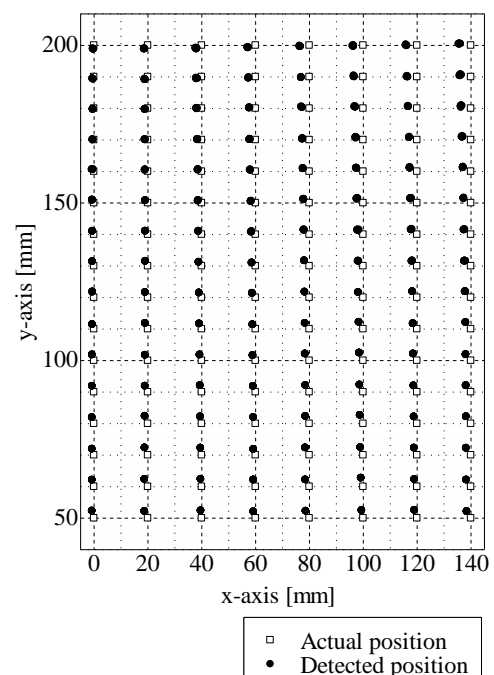


Fig. 2. Detected position in x-y plane

# 超低周波信号を利用した磁気式モーションキャプチャシステム

小山大介<sup>1</sup>, 足立善昭<sup>1</sup>, 川端茂徳<sup>2</sup>, 樋口正法<sup>1</sup>, 上原弦<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>金沢工業大学, <sup>2</sup>東京医科歯科大学)

Magnetic Motion Capture System using Super-Low-Frequency Signal

Daisuke Oyama<sup>1</sup>, Yoshiaki Adachi<sup>1</sup>, Shigenori Kawabata<sup>2</sup>, Masanori Higuchi<sup>1</sup>, and Gen Uehara<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Kanazawa Institute of Technology, <sup>2</sup>Tokyo Medical Dental University)

**はじめに** モーションキャプチャシステムの方式として光学式, 機械式, 磁気式が広く知られている. この中でも光学式は, 高い時間分解能や位置測定精度が得られるという点から, 現在では主流の方式となっている. 一方, 磁気式では光学式の短所であるカメラの死角を気にすることは無いが, 周囲に金属が存在する環境では使用する事が難しい. これは, 磁気式システムでは数十 kHz から 100 kHz 程度の交流信号を利用しており<sup>1,2)</sup>, 周囲に金属が存在すると渦電流の影響を受けて磁場分布が歪み, 位置推定の精度が低下することが原因である. そこで著者らは, 渦電流の影響が比較的小さい 100 Hz から 1 kHz 程度の超低周波磁気信号を利用した位置観測システムの試作を行い, その有効性を示した<sup>3)</sup>. 本研究では, 新たに 3 次元位置計測が可能なシステムを開発した.

**装置構成** 開発したシステムにおけるセンサアレイの構成を Fig. 1 に示す. 3 次元位置計測が可能となるよう, 3 方向の磁場を検出するセンサモジュールを, 外形 340×340 mm<sup>2</sup> の口字型基板上の 8 か所に配置した. センサモジュールは MI センサ (アイチ・マイクロ・インテリジェント社: MI-CB-1DH-M-A 及び-B) を使用して構成した. 観測領域はセンサアレイに囲まれた 200×200×200 mm<sup>3</sup> の範囲と設定した.

位置計測対象となる磁気マーカーコイルの数を 4 個とし, それぞれに対して 260, 350, 438, 500 Hz の正弦波電流を印加した. 発生した磁気信号をセンサアレイで検出し, コイルを磁気ダイポールと仮定した逆問題を解くことによってその位置を推定した. また, 4 個のマーカーコイルは, ペン形状のプロープの中に配置した. 計測したコイルの位置を基にプロープ先端の位置を導出し, リアルタイムで表示する. 本システムでは約 10 Hz の周期で位置観測を行うよう設定した.

**位置観測実験** 開発したシステムによってプロープ位置を計測できることを確認するため, 周囲に金属製品がある状況での位置計測実験をおこなった. およそ  $z = -70$  mm の高さに設置した板の上にチタン製のピンセットを置き, その横を直線状にプロービングした結果を Fig. 2 に示す. ピンセットが無い場合と同じ直線状をプロービングした結果と比べて, 良い一致を見た.

## 参考文献

- 1) E. Panerno and P. Keisar, *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 1530-1536 (2004).
- 2) R. Sato, Y. Hayasaka, S. Yabukami, T. Ozawa, H. Kanetaka, and S. Hashi, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **35**, 67-71 (2011).
- 3) D. Oyama, Y. Adachi, M. Higuchi, and G. Uehara, *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 5101604 (2014).

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費(25870850)の助成により行われた.

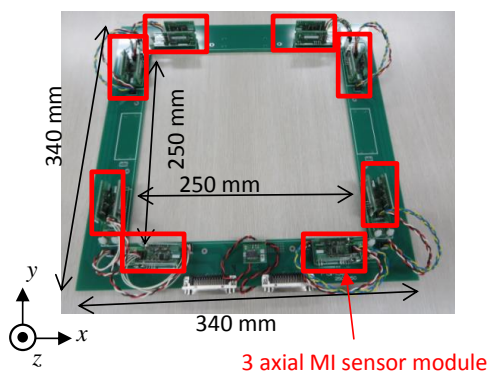


Fig. 1 Sensor array for the magnetic motion capture system.

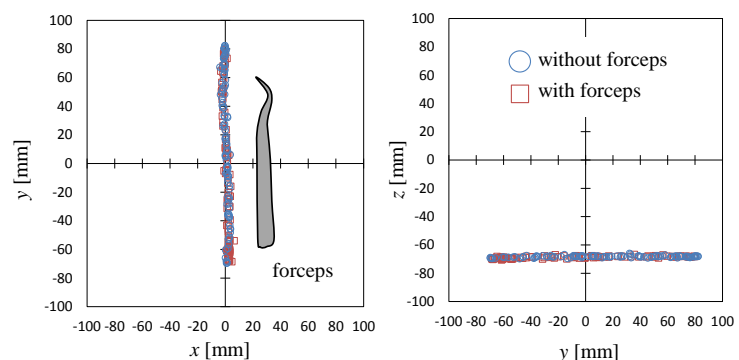


Fig.2 Results of the probing with and without a forceps made of titanium.

## FeSiB フリー層を有する GMR 素子を用いた歪みセンサ

山本直樹, 加藤剛志, 岩田 聡

(名古屋大学)

Magnetic strain sensor having FeSiB free layer using GMR element

N.Yamamoto, T.Kato, and S.Iwata

(Nagoya University)

### はじめに

巨大磁気抵抗効果(GMR)を利用した磁気センサは、磁化自由層と磁化固定層の相対角度が外部磁界に対して変化したときの磁気抵抗変化を検出する。一方、磁性材料には、歪みを加えると磁気異方性が変化する磁歪の逆効果が存在し、歪みによる磁化自由層の磁気異方性の変化を磁化固定層との角度変化に結びつけることができれば歪みを検出することができる。本研究では、歪みによる磁化自由層の磁気異方性の変化を検出する GMR センサの開発を行った。

### 実験方法

超高真空スパッタ装置により直流磁界中で、GMR 多層膜 (Ta(5nm)/FeSiB(10nm)/CoFeB(1nm)/Cu(2.2nm)/CoFe(3nm)/MnIr(10nm)/Ta(2nm)) を成膜した。基板には、湾曲可能な厚さの異なる 3 種類のガラス(70 $\mu\text{m}$ , 100 $\mu\text{m}$ , 150 $\mu\text{m}$ ) を用いた。成膜した試料を両端に電極を配置した幅 100 $\mu\text{m}$ 、長さ 1200 $\mu\text{m}$  の細線状の構造にフォトリソグラフィにより加工した。素子の磁化容易軸が細線の幅方向となるよう加工し、歪みの検出には、以下の手法を用いた。GMR 素子細線を形成したガラスを Fig.1 に示すように片持ち梁構造となるように固定し、自由端に力を加えることで GMR 細線に歪み  $\epsilon$  を与えた。Fig.1 の方向に印加した応力を正とした。GMR 素子をブリッジ回路に組み込んだ状態で GMR 素子の困難軸方向に 5~50Oe のバイアス磁界  $H_{bias}$  を加えることで、磁化自由層の磁化を固定層に対して Fig.2 のように回転させた。GMR 細線に直流電流を流した状態において、歪みを印加することで自由層の磁気異方性が変化すると、GMR 素子の抵抗値が変化してブリッジ回路のバランスが崩れて電圧が生じる。生じた電圧を計装アンプ 300 倍に増幅した信号を出力電圧  $V_{out}$  とした。

### 実験結果

Fig.3 は  $\epsilon$  に対する出力電圧  $V_{out}$  をプロットしたものである。FeSiB 層は負の磁歪定数を持つため、正の歪みを加えた場合には、磁気異方性が減少し、負の歪みを加えた場合には、磁気異方性が増加する。正負の歪み双方に対して  $H_{bias}$  が 20 Oe の場合には出力電圧がほぼ線形に変化していることがわかる。このことから、 $H_{bias}$  が 20 Oe の場合に自由層の磁化の向きは容易軸方向に対して約 45 度の傾きであると考えられる。 $H_{bias}$  が 20 Oe の場合に、歪み  $\epsilon = \pm 1.2 \times 10^{-4}$  を GMR 細線に加えたとき、 $V_{out} = \pm 400\text{mv}$  程度の出力電圧が得られた。

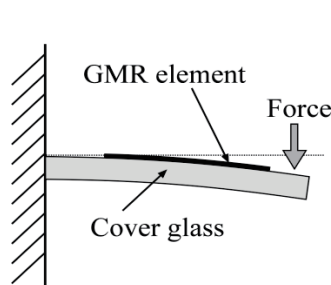


Fig.1 Schematic drawing of the experimental setup.

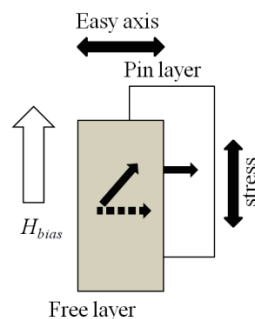


Fig.2 Top view of the GMR element showing directions of the easy axis,  $H_{bias}$ , magnetization of pin and free layer and stress.

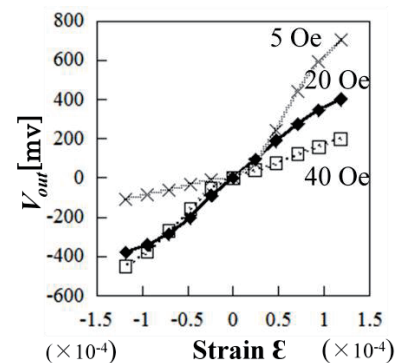


Fig.3 Output signal as the function of the strain. Cross, diamond and square symbol shows 5Oe, 20Oe, 40Oe data, respectively.

### 参考文献

1)K.Ishiyama et al. , IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 2, FEBRUARY(2010)

## ミアンダコプレーナ線路構造の薄膜磁界センサ素子

植竹宏明, 川上敏弥, 森谷健太, 藪上 信, 小澤哲也  
(東北学院大学)

Development of meandering coplanar line type thin film magnetic field sensor

H. Uetake, T. Kawakami, K. Moriya, S. Yabukami, T. Ozawa  
(Tohoku Gakuin University)

**1. はじめに** ミアンダ状コプレーナ線路とアモルファス CoNbZr 薄膜を組み合わせた伝送線路型薄膜磁界センサを試作し, 高感度化をはかった。

**2. 実験方法** Fig. 1は試作したセンサ素子の写真を示したものである。センサ素子は, Cu 薄膜によるミアンダ型コプレーナ線路, SrTiO 薄膜, アモルファス CoNbZr 薄膜から構成される。磁界を検出する CoNbZr 薄膜の寸法は  $1\text{ mm} \times 0.95\text{ mm}$  とし, 3本のコプレーナ線路をミアンダ状に配置した。センサ素子はガラス基板上にリフトオフプロセスにより積層した。CoNbZr 膜 ( $1\text{ }\mu\text{m}$  厚) は, RF スパッタを用いて  $5\text{ mTorr}$ ,  $200\text{ W}$  で成膜した。CoNbZr 薄膜の一軸磁気異方性は回転磁界中  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , 2時間, 静磁界中  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , 1時間でコプレーナ線路の幅方向へ付与した。SrTiO 薄膜 ( $0.5\text{ }\mu\text{m}$  厚) は RF スパッタ装置を用いて  $20\text{ mTorr}$ ,  $200\text{ W}$ , ヒータ部は  $160\text{ }^\circ\text{C}$  に加熱して成膜した。ミアンダ型コプレーナ線路は RF スパッタ装置を用いて,  $20\text{ mTorr}$ ,  $200\text{ W}$  で Cr を  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ , Cu を  $2\text{ }\mu\text{m}$  成膜した。ミアンダ線路の導体幅は  $110\text{ }\mu\text{m}$ , 導体間隔は  $20\text{ }\mu\text{m}$  とした。導体本数は3本とした。Cr 薄膜は SrTiO 薄膜と Cu 薄膜の密着性を高めるために成膜した。センサ素子は市販のウエハプローブ (GSG-40-150) により, 磁界を静的に変化させながら, ネットワークアナライザ (8722ES) による透過法測定 ( $S_{21}$  評価) を行い, 周波数および磁界に対するキャリアの位相変化および振幅を評価した。

**3. 実験結果** Fig. 2は静的な磁界変化に対するキャリアの位相変化を示したものである。3.15 GHz 付近で位相は急峻に変化し, 磁界に対する傾きは約  $311\text{ degree/Oe}$  となった。心磁界計測等<sup>2)</sup>への応用の目安となる  $\text{Gain} > -40\text{ dB}$  も満たした。

**参考文献** 1) H. Uetake, S. Yabukami, T. Ozawa, N. Kobayashi, and K. I. Arai, “Highly sensitive thin film sensor using coplanar line”, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 38, no. 2-2, pp. 83-86 (2014). 2) S. Yabukami, K. Kato, T. Ozawa, N. Kobayashi, K. I. Arai, “A coplanar line thin film sensor and measurement of MCG without magnetic shielding”, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 38, no. 2-1, pp. 25-28 (2014).

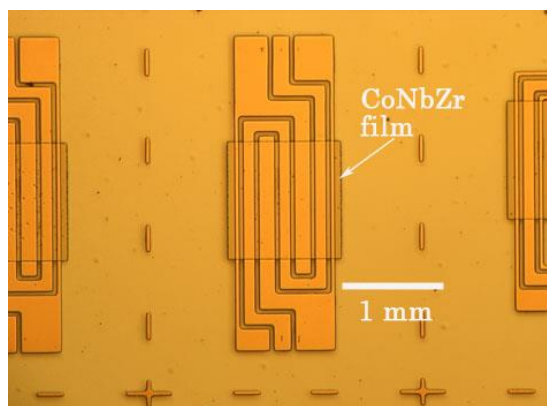


Fig. 1 Fabricated thin film sensor.

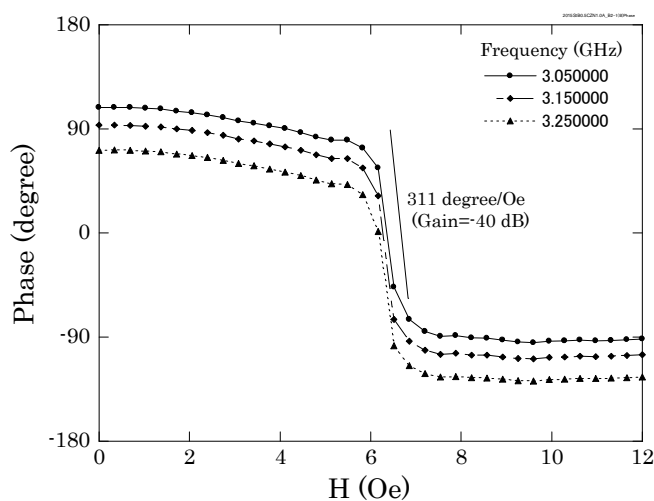


Fig. 2 Phase change.

# 誘導磁気異方性の付与によるアモルファス磁性ワイヤ直交フラックスゲートの温度ドリフト抑制

加呂光, 長谷友視, 笹田一郎  
(九州大学)

Temperature drift suppression of amorphous magnetic wire orthogonal fluxgate  
by imparting induced magnetic anisotropy

H. Karo, T. Nagatani, and I. Sasada  
(Kyushu University.)

## 1 はじめに

基本波型直交フラックスゲート (FM-OFG)<sup>(1)</sup> は、励磁振幅より大きな直流電流の恩恵によりバルクハウゼン雑音低減され、 $3\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$  以下のノイズレベルを達成できる<sup>(2)</sup> が、出力のオフセットや、温度ドリフトが大きい問題がある。通電磁場中熱処理によって磁性コアとして用いるアモルファスワイヤに、円周方向の磁気異方性を誘導することでオフセットの抑制および、低雑音化した報告がある<sup>(3)</sup>。本研究では、この通電磁場中熱処理法を簡略化した方法でアモルファスワイヤを熱処理し、温度ドリフト抑制効果を調査した。

## 2 オフセット抑制方法と温度ドリフト測定結果

Fig.1 はアモルファス磁性ワイヤに内在する磁化  $J_s$  の回転磁化モデルを表す。アモルファス磁性ワイヤに直接通電励磁電流によって励磁磁界  $H$  を与える。ワイヤ内の磁気異方性  $K_u$  を一軸性と仮定する。 $J_s$  は、 $K_u$ 、測定したい外部磁界  $H_{ex}$ 、交流磁界とそれより大きな直流バイアス磁界からなる  $H$  の作用を受け、常にこれらのエネルギーを最小とする様な方向を向く。Fig.1(a) の様に  $K_u$  の円周方向からの角度が大きい時、 $H_{ex} = 0$  でも  $J_s$  は励磁磁界  $H$  の交流成分によって振動し、大きな誘起電圧が生じる。Fig.1(b) の様に  $K_u$  の円周方向からの角度が小さい時、 $J_s$  はわずかにしか振動しないため小さな誘起電圧となる。誘起電圧は同期検波されたセンサの出力となるので、(b) の方が低オフセットなセンサとなる。磁界中熱処理により  $K_u$  を円周方向へ誘導することができればオフセットが低減可能である。

温度ドリフト測定に用いた試料は、Co 基アモルファスワイヤ (長さ 10 cm, 直径  $120\mu\text{m}$ ) であり、検出コイル (長さ 4.5 cm, 640 turn) を巻きつけた耐熱性セラミックチューブに U 字状に曲げ挿入した。同一試料で温度ドリフトを測定するため、室温から  $80\text{C}^\circ$  の範囲では、ワイヤを 40 mA 直流と  $9\text{mA}_{\text{rms}}$  交流の電流を重畳したものを直接通電し、検出コイルに現れた誘起電圧の交流実効値をセンサ出力の目安として評価をおこなった。次に、 $200\text{C}^\circ$  で、200 mA 直流を通電し、円周磁界方向を容易軸とするよう  $K_u$  を誘導する。この時ワイヤ長手方向に磁場がかからないよう、磁気シールドによって地磁気を遮断した。また、3 mA 程度の交流電流により検出コイルに現れる誘起電圧を観測し、これが最小となるように同検出コイルへ手動調節で電流を流すことでキャンセル磁界を発生させている。熱処理後は、室温まで温度が下がったセンサを再度最初の励磁条件で加熱および、室温に戻るまでの温度ドリフトを評価した。

温度ドリフト測定結果を Fig.2 に示す。それぞれの測定結果からは室温時のオフセットを引いている。 $30\text{C}^\circ$  から  $50\text{C}^\circ$  の区間で温度ドリフト抑制比 13 が得られた。また、熱処理後のワイヤの再度の加熱実験の結果では、温度ドリフトする振幅に再現性もみられた。今後は、熱処理温度、処理時間、通電電流強度等について最適な条件を探し、さらなる温度ドリフト低減を目指す。

## References

- 1) I. Sasada: *Journal of Applied Physics*, VOL. 91, NO. 10, (2002)
- 2) E. Paperno: *Sensors and Actuators*, A 116, (2004)
- 3) M. Butta et al: *Sensor Letters*, VOL 12, NO. 8, (2015)

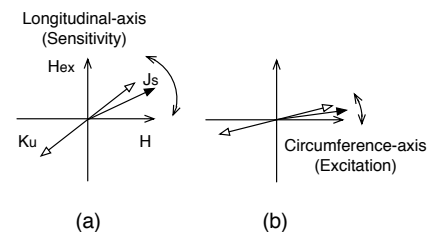


Fig. 1 Rotation magnetization model

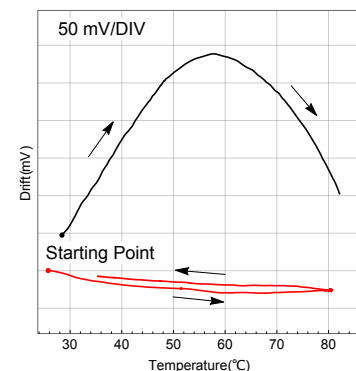


Fig. 2 Comparison of temperature drift between an as-received wire and an annealed wire. The drifts were measured by subtracting offsets measured at room-temperature. The as-received wire had 520 mV and, the annealed wire had 169 mV offset.

## Reduction of fluxgate gradiometer susceptibility to uniform magnetic fields using permalloy shielding disk

Ahmed Lotfy Elrefai, Ichiro Sasada

Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University, Kasuga 816-8580, Japan,

A new method for constructing fluxgate gradiometer has been previously introduced<sup>1</sup>. The developed gradiometer uses a pair of fluxgate sensor heads connected in counter series in order to detect the difference in magnetic field. The sensor heads are operated in the fundamental mode orthogonal fluxgate (FM-OFG) mechanism which provides very low noise measurement capability. The developed gradiometer has been proven to be efficient in detection of tiny magnetic particle contaminations down to the size of  $50 \mu\text{m}^2$ . The parasitic susceptibility of the FM-OFG gradiometer to the uniform magnetic field is, however, in need of reduction when the gradiometer is used in magnetically noisy environments. In this work, in order to reduce the parasitic susceptibility of the gradiometer to the uniform magnetic field, the efficiency of a small permalloy disk plate placed underneath the gradiometer sensor heads is investigated. The efficiency of the method is estimated numerically and confirmed experimentally.

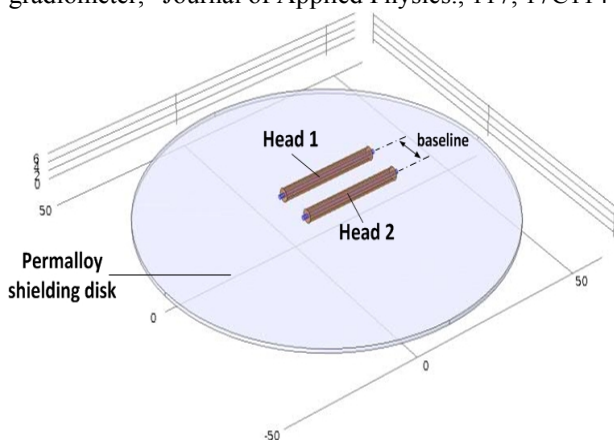
Figure 1 shows an illustration of the sensor configuration with the shielding disk. The two heads of the FM-OFG gradiometer are configured parallel to each other with a baseline separation distance between the centers of the two heads. The sensor heads are centered above the shielding disk with a separation distance of 5 mm. Experiments were conducted using two permalloy disks of thickness 1 mm having diameters of 10 cm and 12 cm. To evaluate the shielding disk effectiveness; a quasi-static uniform field is applied parallel to the sensor heads axis. It is noted that, the effect of adding the shielding disk to the sensor on the amplitude of the sensor output signal has been evaluated and found to be of minor relevance (less than 10 % reduction). The recorded experimental results are shown in Fig. 2, for the measured gradiometer susceptibility to uniform field vs. the separation baseline between the sensor heads. From the graph, we can see the gradiometer uniform field susceptibility with the shielding disk is reduced to around a fifth of its value for the individual sensor. The shielding performance is improved as the baseline separation is reduced, where the sensor heads grow closer to the center of the shielding disk.

The proposed sensor configuration achieved a significant reduction to the FM-OFG gradiometer susceptibility to uniform fields. The improved configuration has several prospective applications to be used in, such as; magnetic contaminant detection in lithium ion battery manufacturing, and magnetic nanoparticles detection for biomedical applications.

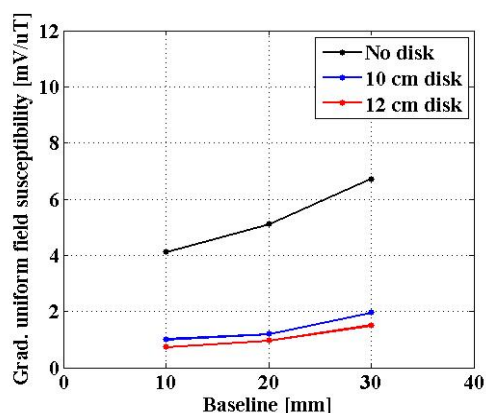
### References

<sup>1</sup> I. Sasada and S. Harada, "Fundamental mode orthogonal fluxgate gradiometer," IEEE Trans. On Magn., Vol. 50, 4007404 (2014).

<sup>2</sup> A. L. Elrefai and I. Sasada, "Magnetic particle detection in unshielded environment using orthogonal fluxgate gradiometer," Journal of Applied Physics., 117, 17C114 (2015).



**Fig. 1:** Illustration of the sensor placement over the shielding disk. The sensor heads plane is 5 mm above the shielding disk plane.



**Fig. 2:** gradiometer uniform field susceptibility [mV/μT] vs. baseline separation distance [mm] without shielding disk and with shielding disk of diameters 10 and 12 cm.



# Fe-Si-B-C アモルファス薄帯の磁区構造制御による

## フラックスゲートセンサの小型化

宮田大史<sup>\*\*\*</sup>、山本竜馬<sup>\*\*</sup>、森本祐治<sup>\*\*</sup>、竹澤昌晃<sup>\*\*</sup>  
 (\*株エムティアイ、\*\*九工大)

Miniaturization of fluxgate sensors by magnetic domain structure control of Fe-Si-B-C amorphous ribbons

H. Miyata<sup>\*\*\*</sup>, R. Yamamoto<sup>\*\*</sup>, Y. Morimoto<sup>\*\*</sup>, M. Takezawa<sup>\*\*</sup>  
 (\*MTI, \*\*Kyushu Inst. Tech.)

### 目的

我々は、フラックスゲート磁気センサの感度を、そのコア材料の磁区構造を制御することにより改善できることを報告している<sup>1)</sup>。本研究では、Fe-Si-B-C アモルファス薄帯を用いた小型センサに、応力印加による磁区構造制御を適用し、10 mm 以下に小型化したセンサでも磁区構造制御が有効であるかを調べた。また、磁性材料の磁区を観察することにより、磁性材料の端部、中心付近など場所の違いによる磁化過程の違いを調べたので報告する。

### 実験方法

Fe-Si-B-C アモルファス薄帯を用いて Fig.1 に示すフラックスゲートセンサを構成し、励磁コイルで交流励磁し、外部から 1 Oe の磁界を印加したとき検出コイルに誘導される交流電圧を電圧計を用いて直接測定した。使用したコア材料は、Metglas 社製アモルファス磁性薄帯の 2605SC である。また、小型化が磁化過程に及ぼす影響を調べるため、Kerr 効果顕微鏡を用いて、アモルファス薄帯表面の磁区を観察した。

### 結果と考察

Fig.2 にセンサ出力の周波数依存性を示す。■がセンサ長 20 mm、▲がセンサ長 10 mm で磁区構造を制御していないもの、●がセンサ長 10 mm で、15 MPa の張力を印加することで磁区構造を制御したものであり、それぞれ外部から 1 Oe の磁界を印加した場合の出力電圧の変化分をプロットしたものである。いずれのセンサにおいても励磁周波数の増加とともに、感度が上昇している。また、同じ長さで比較すると磁区構造を制御したものの方が感度が高い。長さとお出力の関係性を比べた場合、磁区構造を制御せずに長さを半分にした場合、センサ出力は 50% 程度低下していることがわかる。しかし、センサ長が 10 mm の場合でも、磁区構造を制御したものは、出力が増加しており、10 mm に小型化したセンサにおいても、磁区構造制御によるセンサ出力の改善が有効であることが分かった。

Fig.3 はアモルファス薄帯に 9 Oe の交流磁界を印加した際に磁壁移動が起こった領域を観察した結果であり、左が試料の端部、右が中心付近を観察したものである。中心付近の方が磁壁移動している面積が大きくなっており、端部よりも中心付近の方が磁壁移動しやすいことがわかる。試料の長さを短くした場合、全体の面積に占める端部の面積が相対的に大きくなるので、センサ出力の低下の原因になっているものと考えられる。今後、センサ長をさらに短くした場合のセンサ出力の変化と、磁化過程の変化を調査する予定である。

**参考文献** 1) H.Miyata et. al., *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 4005804 (2014).

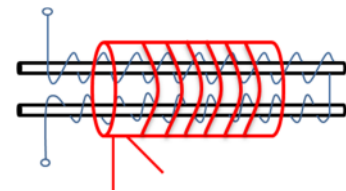


Fig.1 A schematic view of a sensor head.

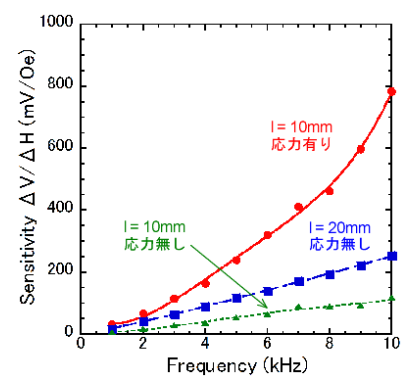


Fig.2 Frequency dependence of sensitivities.

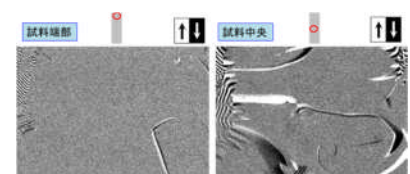


Fig.3 Area of magnetic domain change at  $H_{ac} = 9$  Oe.