

# FeSiB フリー層を有するスピバルブ型 GMR 歪みセンサ

橋本 侑也, 山本 直樹, 加藤 剛志, 大島 大輝, 岩田 聡

名古屋大学

Spin-Valve GMR Magnetic Strain Sensor with FeSiB Free Layer

Y. Hashimoto, N. Yamamoto, T. Kato, D. Oshima, S. Iwata

Nagoya University

## はじめに

GMR 素子は 2 端子の抵抗として扱うことができるため、磁気記録以外にも多様な磁気センサとして利用する研究が行われている。スピバルブ構造を持つ GMR 素子に対して、磁化自由層の磁化方向を歪みによって変化させると、歪みセンサとして利用することができる<sup>1)</sup>。磁性材料に歪みを加えると磁歪の逆効果により磁気異方性が変化するが、本研究ではフリー層の磁化方向を交流磁界で変調することで、この磁気異方性の変化を高感度で検出するとともに、外乱磁界に強い歪みセンサを試作した。

## 実験方法

超高真空スパッタ装置により直流磁界中で、Ta (2) / Mn<sub>80</sub>Ir<sub>20</sub> (10) / Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> (3) / Cu (2.2) / (Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>)<sub>92</sub>B<sub>8</sub> (1.5) / Fe<sub>72</sub>Si<sub>14</sub>B<sub>14</sub> (20) / Ta (5) / sub. を作製した。カッコ内の数値は膜厚 (nm) で、sub. は 0.1 mm 厚のカバーガラス基板を表している。成膜した試料をフォトリソグラフィおよび Ar イオンエッチングにより幅 100 μm、長さ 1200 μm の細線状に加工した。素子の磁化容易軸を細線の短辺方向とし、直流磁界  $H_{DC} = 10 \sim 50$  Oe により、FeSiB フリー層磁化を困難軸方向に回転させた。次に容易軸方向に実効値 0.6 Oe、1 kHz の交流磁界  $H_{AC}$  を印加し、フリー層の磁化を振動させた (Fig.2)。この振動に伴い素子の抵抗値が変化して 1 kHz の信号電圧が現れる。GMR 素子はブリッジ回路に組み込み、ブリッジバランスの崩れを計装アンプによって増幅したものを出力信号電圧  $V_{out}$  とした。Fig. 1 のような片持ち梁構造となるように固定した GMR 素子に歪みを印加すると、フリー層に歪みによる磁気異方性が誘導され、フリー層磁化の振動振幅が変化し、 $V_{out}$  の歪み依存性が得られる。

## 実験結果

Fig. 3 は  $H_{DC} = 10$  Oe のときの歪み  $\epsilon$  に対する出力電圧  $V_{out}$  をプロットしたものである。また図中に FeSiB フリー層の一軸異方性と歪み誘導異方性から、歪み  $\epsilon$  と  $H_{AC}$  印加時の出力電圧をシミュレーションした結果も示す。FeSiB の実効異方性磁界は 10 Oe 以上で  $H_{DC} = 10$  Oe ではこれを打ち消すには不十分であるが、Fe<sub>72</sub>Si<sub>14</sub>B<sub>14</sub> は正の磁歪定数 ( $\lambda = 3.0 \times 10^{-5}$ ) を示すため、 $\epsilon > 0$  の場合、歪み誘導異方性により、フリー層の異方性磁界が打ち消され、磁化振動振幅が大きくなり、出力電圧が増加する。さらに  $\epsilon$  を増すと磁化振動振幅は減少する。出力電圧が線形である範囲 ( $-0.6 \times 10^{-4} < \epsilon < 0$ ) のゲージ率  $K = (\Delta V / V) / \epsilon$  は 8.1 と得られた。これは一般的な金属歪みゲージの 4 倍である。さらに、 $H_{DC}$  の印加角度を調整することで、 $K = 46$  が得られることを確認した。

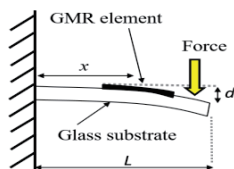


Fig.1 Schematic drawing of the experimental setup.

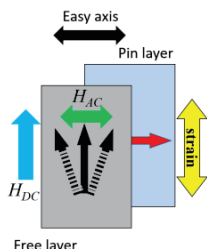


Fig.2 Top view of the GMR element showing directions of the easy axis,  $H_{DC}$ , magnetizations of pin and free layers, and applied strain.

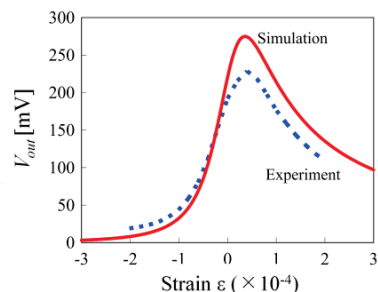


Fig.3 Experimental and simulated output voltage  $V_{out}$  as a function of the applied strain  $\epsilon$  under  $H_{DC} = 10$  Oe.

## 参考文献

- 1) S. Dokupil et al., J. Magn. Magn. Mat., 290-291, 795 (2005).

## SmCo 薄膜を用いたミアンダコプレーナ線路型薄膜センサ

藪上 信, 植竹宏明, 小野寺英彦, 小林伸聖\*, 早坂淳一\*, 荒井賢一\*  
(東北学院大学, \*電磁材料研究所)

Meandering coplanar line type thin film sensor using SmCo film  
S. Yabukami, H. Uetake, H. Onodera, N. Kobayashi\*, J. Hayasaka\*, K.I. Arai\*  
(Tohoku Gakuin University, \*Res. Inst. For Electromagnetic Materials)

**1 はじめに** SmCo 薄膜磁石により磁性薄膜へバイアスさせるコプレーナ線路型センサ素子を開発した。

**2 計測方法** Fig. 1 は SmCo 薄膜磁石の上に作製したミアンダコプレーナ型線路によるセンサ素子の写真を示したものである。これまでセンサ素子に使用する磁性薄膜へ直接バイアス電流を通电させることで、センサを駆動することを試みたが、バイアス電流が 1.2A 程度と消費電力を低減する課題があったり。そこで本報告では CoNbZr 薄膜の下に SmCo 薄膜磁石を積層して、バイアスを与えた。ミアンダコプレーナ構造のセンサ素子はガラス基板(25 mm × 25 mm, 1 mm 厚)上に SmCo 薄膜磁石(1.25 μm 厚)、SiO<sub>2</sub> 薄膜(2 μm 厚)、アモルファス CoNbZr 薄膜(1 mm × 2.95 mm, 1 μm 厚)を成膜し、SrTiO 薄膜(0.75 μm 厚)を介して Cu 薄膜によるミアンダコプレーナ線路(110 μm 幅, ギャップ 20 μm, 3.5 μm 厚)をそれぞれリフトオフにより作製した。磁性薄膜の直下には微調整バイアス用電極として Cu 薄膜を成膜した。CoNbZr 薄膜へは回転磁界中熱処理(300°C, 2 時間 0.3 T)の後、静磁界中熱処理(200°C, 1 時間)を施して、Fig. 1 の左右方向へ磁気異方性を付与した。キャリア信号はコプレーナの中心導体流れ、CoNbZr 薄膜には導通しない。バイアス磁界は CoNbZr 薄膜内には磁化困難軸方向(Fig. 1 の上下方向)へ印加させる。バイアス磁界が異方性磁界と近い値の際に、キャリアの位相変化および振幅変化が最大値となると考えられる。センサの評価には市販のウェハプローブ(GSG-40-150)とマグネットを用いてゆっくりと磁界を変化させて、ネットワークアナライザ(R3767)の透過法測定によりキャリアの位相変化を S<sub>21</sub> から求めた。周波数範囲は 300 kHz-8 GHz とし、バンド幅は 1 kHz, 平均化回数は 16 回とした。

**3 計測結果** Fig. 2 は Fig. 1 のセンサにおいて、バイアス磁界に対する、キャリアの位相変化を示したものである。キャリア周波数は 1.5 GHz ~ 3 GHz を表記した。位相変化感度は約 1 Oe で 70 degree/Oe 得られた。SmCo 磁石を着磁せずに評価した際には、位相変化感度が最大になる磁界は約 10 Oe 程度であ

り、SmCo 磁石により約 9 Oe のバイアス磁界が付与され、高感度な動作点が低磁界にシフトしたと考えられる。

**謝辞** 本研究の一部は JST COI TOHOKU プロジェクトの研究成果である。また本研究の一部は科研費(16H04378)の研究成果である。

**参考文献** 1) 藪上 信, 植竹宏明, 森谷健太, 富並剛, 小野寺英彦, “バイアス通电によるミアンダコプレーナ薄膜磁界センサの開発”, 電気学会論文誌 A, Vol. 137, No. 8 (2017, 印刷中).

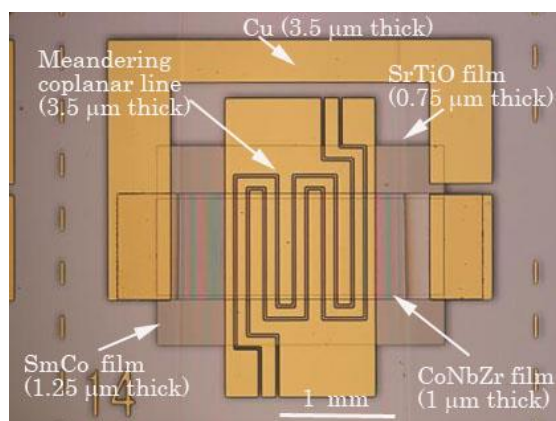


Fig. 1 Schematic view of the sensor.

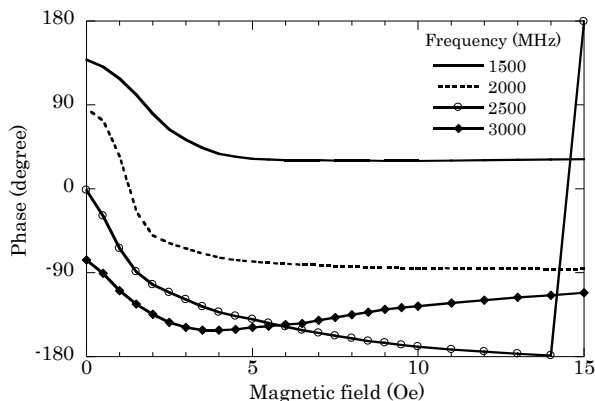


Fig. 2 Phase difference and phase change as a function of applied bias field.

## 六方晶フェライト単結晶の高周波透磁率評価

長内 史也, 薮上 信\*, 山田 洋, 内海 重宜\*\*, 安川 雪子\*\*, 吉田 栄吉\*\*\*\*, 遠藤 恭\*\*\*\*, 島田 寛\*\*\*\*  
 (仙台高等専門学校, \*東北学院大学, \*\*諏訪東京理科大学, \*\*\*千葉工業大学,  
 \*\*\*\*東北大学, \*\*\*\*\*東栄科学産業)

High frequency permeability measurement of hexagonal ferrite single crystal

F.Osanai, S. Yabukami\*, H. Yamada, S. Utsumi\*\*, Y. Yasukawa\*\*, S. Yoshida\*\*\*\*, Y. Endo\*\*\*\*, Y. Shimada\*\*\*\*  
 (National Institute of Technology Sendai College, \*Tohoku Gakuin University, \*\*Tokyo University of  
 Science Suwa, \*\*\*Chiba Institute of Technology, \*\*\*\*Tohoku University, \*\*\*\*\*Toei Scientific Industrial co., ltd.)

1 はじめに 六方晶フェライトは次世代高周波磁気素子への応用が期待され、その高周波磁気特性に関する研究が行なわれている。本研究では、六方晶フェライトとして組成調整したBaフェライトを選択し、その高周波磁気特性を検討した。具体的には、インピーダンス整合を考慮したマイクロストリップ (MSL) 型プローブをBaフェライト単結晶に近接させて透磁率計測を行い、強磁性共鳴周波数、共鳴線幅、ダンピング定数について検討した。

2 計測方法 測定対象試料は、組成および濃度が異なる10種類のBaフェライト単結晶である。なお、本概要では、試料面内 (C 面) 方向に非常に弱い容易軸を有するBa(Fe<sub>0.864</sub>Sc<sub>0.136</sub>)<sub>12</sub>O<sub>19</sub> (6 mm × 3 mm, 厚さ 1 mm) の結果について紹介する。

Fig. 1 は高周波透磁率計測システムの構成、およびMSL型プローブとBaフェライトの配置関係を模式的に示した図である。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N5227A)に接続したMSL型プローブをヘルムホルツコイル内に設置した。高周波磁界をBaフェライトの磁化困難軸方向に励起するように、ポリスチレンフィルムを介してMSL導体に試料の磁化困難軸面を近接配置させた。

はじめにDCバイアス磁界H<sub>dc</sub>を印加せず、Baフェライトをヘルムホルツコイル内に配置しない状態でSパラメータ測定を行った (バックグラウンド測定)。次に、MSLプローブとBaフェライトの配置関係を注意しながら、BaフェライトをMSLに近接配置し、DCバイアス磁界(0~1500 Oe程度)を高周波磁界と直交するように印加してSパラメータ測定を行った (メイン測定)。メイン測定とバックグラウンド測定との差分により透過係数(S<sub>21</sub>)を評価し、(1), (2)式により透磁率に換算した。

$$Z_s = 100(1 - S_{21})/S_{21} \tag{1}$$

$$\mu_r = K \frac{1}{f} (X - jR) \tag{2}$$

ここで、Z<sub>s</sub>は磁性体の等価的インピーダンス、Rは抵抗、Xはリアクタンス、fは周波数、Kは定数である。

3 計測結果 Fig. 2 に一例としてDCバイアス磁界500,1000,1500 Oe印加時のBa(Fe<sub>0.864</sub>Sc<sub>0.136</sub>)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>の透磁率 (虚数部) の周波数特性を示す。なお、絶対値

は未補正である。外部磁界の増加とともに、強磁性共鳴周波数 (f<sub>r</sub>) は 5.1 GHz から 10.95 GHz へと高周波帯域へシフトし、共鳴線幅 (Δf<sub>r</sub>) は 4.3 GHz から 0.43 GHz へと狭くなった。f<sub>r</sub>に関しては、Baフェライトの異方性磁界より求めたf<sub>r</sub>の理論値(約 4.2 GHz)と近くなった。Δf<sub>r</sub>に関しては、その挙動は外部磁界の増加にともない異方性分散が収まり磁化が一斉回転モードになっていることを表している。また、ダンピング定数に関しては、DCバイアス磁界が十分に強く一斉回転モードになる領域で、その値はおおよそ 0.02 となった。今後は他のBaフェライトについても同様の評価を行う。

参考文献 1) S. Yabukami, K. Kusunoki, H. Uetake, H. Yamada, T. Ozawa, R. Utsumi, T. Morizumi, Y. Shimada, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 41, No. 2, pp. 25-28 (2017).

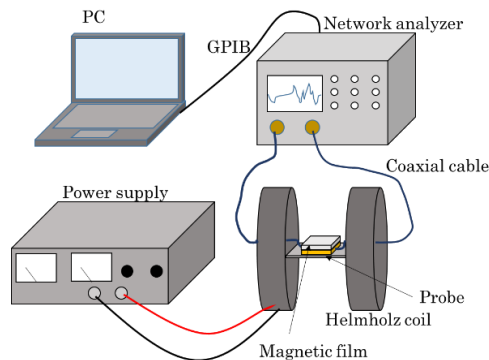


Fig. 1 Schematic diagram of measurement system.

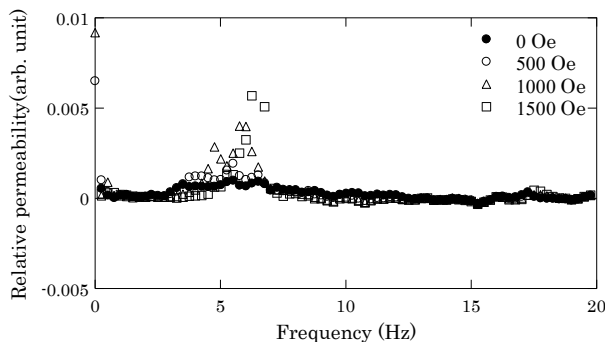


Fig. 2 Imag. permeability of Ba(Fe<sub>0.864</sub>Sc<sub>0.136</sub>)<sub>12</sub>O<sub>19</sub>

# 基本波型FGを用いる勾配磁界センサの高平衡化法

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

Balancing Method for Fundamental-Mode Orthogonal Fluxgate (FM-OFG) Gradiometer

Ichiro Sasada

(Sasada Magnetic Instruments Laboratory)

## はじめに

グラディオメータは磁界の局所的な乱れを高感度に検出する。基本波型直交フラックスゲート (FM-OFG) を用いると、グラディオメータはマグネトメータをわずかに作り変えるだけで得られる<sup>(1)</sup>。同じようにして作成したセンサヘッドを2個用いて、励磁側は直列に、検出側は差動に結線するだけで回路は全く同じものを用いることができる。グラディオメータの高性能化には、雑音特性はもとより、一様磁界に対する感度を可能な限り抑制することが重要である。FM-OFGのセンサヘッドの磁界に対する感度は直流バイアス電流を大きくすると感度が低下し、小さくすると感度が増大することを利用して、平衡度を高めることができる。補助的な電源を用いる方法はすでに参考文献で報告しているが、本稿では、受動素子のみで調整する方法を発表する。

## 調整方法

Fig. 1に調整回路を付加したグラディオメータの励磁側回路を示す。U字型をしているのがアモルファスワイヤコアである。この方法では、交流電流成分 $I_{ac}$ は2つのコアに共通に流れ、直流バイアス電流の一部がLR受動素子回路に分流する。可変抵抗で分流する直流電流の大きさを調整することで、バイアス電流の大きさを独立に調整できる。インダクタは交流電流を阻止するためのものである。

## 実験結果

実験に用いた平行グラディオメータ (ベースライン12 mm) は、Uの字に曲げたアモルファス磁性ワイヤコアと、その周囲に巻かれた1000ターンのソレノイド検出コイルからなるが、長さは共に30 mmである。センサヘッドの励磁は100 kHzで実効値12mA, 直流バイアス電流は40 mAとしている。実効値 $1.27 \mu\text{T}$ , 周波数20 Hzの一様磁界を印加した時のグラディオメータの出力波形を高平衡化調整なしと、調整ありの場合についてFig. 2に示している。マグネトメータ

( $0.25\text{V}/1 \mu\text{T}$ ) の出力に対する抑圧比は前者で168、後者で2480に達する。

## 参考文献

- 1) Ichiro Sasada and Shoumu Harada, Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate Gradiometer, IEEE Trans. Magn., Vol. 50, No. 11 (2014) 4007404

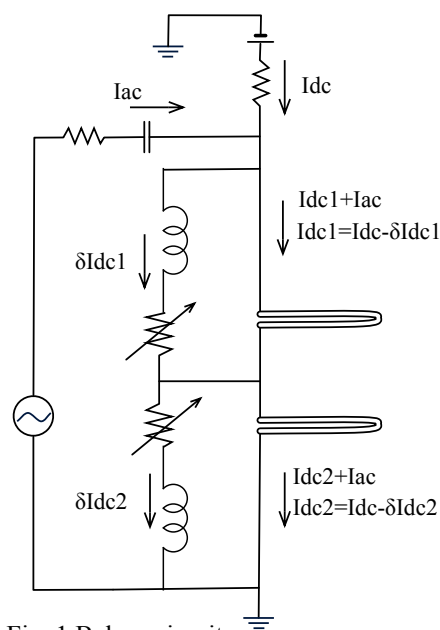


Fig. 1 Balace circuit

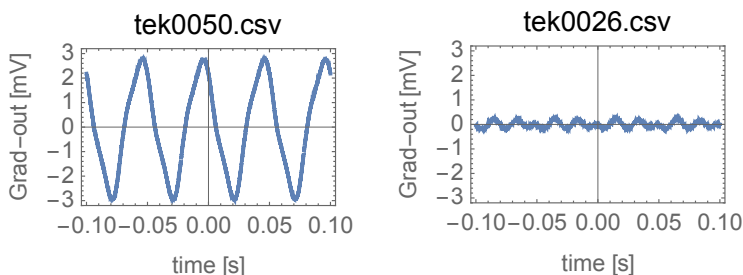


Fig. 2 Waveforms of the gradiometer no adjustment (left) and with adjustment (right).

# 張力印加した磁性コアの磁区構造制御による フラックスゲート磁気センサの小型化

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

Miniaturization of Fluxgate Sensors by Magnetic Domain Structure Control of Tensioned Core Materials

H. Miyata<sup>\*,\*\*</sup>, R. Yamamoto<sup>\*\*</sup>, Y. Morimoto<sup>\*\*</sup>, M. Takezawa<sup>\*\*</sup>

(\*MTI Co., Ltd., \*\*Kyushu Inst. of Tech)

## はじめに

我々は、フラックスゲート磁気センサの感度が、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、センサ長を 20 mm から 5 mm まで小型化した際のセンサ出力の低下を、張力印加による磁区構造制御によって抑制することを試みた。この際の磁性コアの磁区構造と、センサ出力の関係を調べたので報告する。

## 実験方法

観察試料は  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$  アモルファス薄帯で、飽和磁歪は  $35 \times 10^{-6}$ 、飽和磁束密度は 1.6 T である。この試料に 15 MPa の張力を印加した際の磁区構造を Kerr 効果顕微鏡で観察した。また、励磁コイルに 1~10kHz, 10 mA の電流を通电した際の出力電圧を測定してセンサ感度を調べた。

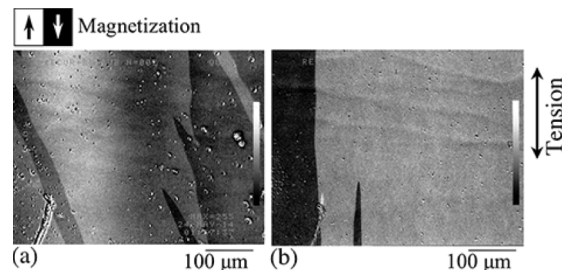


Fig. 1 Domain images (a) with and (b) without tension.

## 結果と考察

Fig.1 に Fe 基アモルファス薄帯の磁区観察結果を示す。Fig.1 より張力印加前後で磁区構造が変化していることが分かる。張力印加前は磁区コントラストが薄く灰色であり、磁化が上下ではなく斜め方向を向いているが、張力印加後は磁区コントラストが濃くなり、磁化が上下方向にそろったストライプ状の磁区構造が観察された。これは Fe 基アモルファス薄帯の磁歪が大きく、逆磁歪効果により励磁方向を磁化容易軸に誘起できた結果だと考えられる。

Fig. 2 に 10 mm と 20 mm 長のセンサの感度の周波数依存性を示す。▲で示す張力印加無しの 20 mm 長のセンサ感度と比較して、■で示す張力印加無しの 10 mm 長のセンサ感度は 60%程度に低下している。一方で、●で示す張力を印加した 10 mm 長のセンサでは、張力無しの 20 mm 長センサの 2 倍程度の感度が得られており、張力印加による磁区構造制御によって、センサの小型・高感度化を実現できたことが分かる。

Fig. 3 に 5 mm 長センサの感度の周波数依存性を示す。この場合も、張力印加によってセンサ感度を向上でき、約 3 倍になっていることが分かる。しかし、張力を印加した場合でも 10 mm 長センサと比較して感度は 3%程度に急激に低下している。これは反磁界により材料端部で磁壁移動が起きにくくなるためだと考えられるが、張力印加によってセンサ長を 5 mm まで小型化した場合でも、十分に検出可能なセンサ感度が得られることを明らかとした。

## 参考文献

- 1) H. Miyata, et al., *J. Magn. Soc. Jpn.* **38**, 169 (2014).

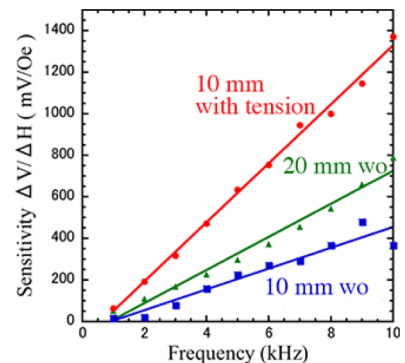


Fig. 2 Frequency dependence of sensitivity of 10- and 20-mm-long sensors.

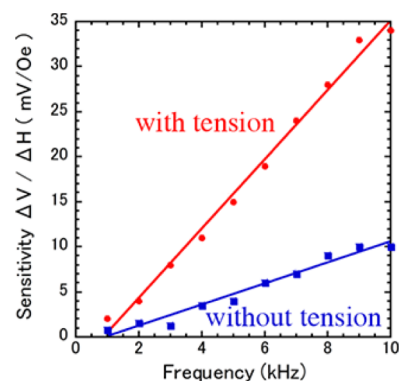


Fig. 3 Frequency dependence of sensitivity of a 5-mm-long sensor.

# イットリウム鉄ガーネットの磁化ダイナミクスを利用した高感度磁気センシングの基礎検討

神田哲典、室賀翔<sup>1</sup>、遠藤恭<sup>2</sup>、黒澤孝裕<sup>3</sup>

(大島商船高専、<sup>1</sup>豊田高専、<sup>2</sup>東北大、<sup>3</sup>秋田県産業技術センター)

Sensitive measurements of magnetization dynamics in yttrium iron garnet for magnetic sensor applications

T. Koda, S. Muroga<sup>1</sup>, Y. Endo<sup>2</sup>, T. Kurosawa<sup>3</sup>

(National Inst. of technology Oshima college, <sup>1</sup>National Inst. of technology Toyota college, <sup>2</sup>Tohoku Univ., <sup>3</sup>AIT)

## はじめに

近年、生体磁場検出等に向けて室温で動作する高感度磁気センシング技術の研究開発が活発に行われている。このような用途に向けて、本研究では、低磁気ダンピング定数のイットリウム鉄ガーネット(YIG)の強磁性共鳴近傍の条件下で外部磁場変化に伴う非線形な磁化ダイナミクス変化を利用し、磁場変化を高感度に捉えることを試みたので報告する。

## 実験方法

試料には(111)ガドリウムガリウムガーネット (GGG) 単結晶基板上に液相エピタキシャル法で成長された膜厚 10 $\mu\text{m}$  の YIG(111)単結晶膜を用いた。試料上に高周波伝送路として、フォトリソグラフィ法で非対称型のコプレナーウェイブガイド (グランド幅 175 $\mu\text{m}$ 、信号線幅 100 $\mu\text{m}$ 、信号線間隔 45 $\mu\text{m}$ ) を形成した。-10dBm の高周波電力をこの伝送路を用いて YIG 上に入力し、反射波の磁場に対する応答を評価した。磁化ダイナミクスを誘起するための高周波電力の周波数は GHz 帯域と高いため、位相変化の時間分解能を高めることが可能な Double Mixer Time Difference (DMTD) 法を用いた測定系を構築し [1]、反射波の電力と位相を RF ロックインアンプにより計測することで磁化ダイナミクスを評価した。

## 実験結果

図 1(a)には磁場掃引した際の磁化ダイナミクスの高周波周波数依存性の測定例を示す。反射電力スペクトルの形状は周波数に大きく依存し、特定の周波数において磁場掃引に対して急峻な変化を示すことがわかる。この周波数によって大きくスペクトルが変化しない原因は特定されていないが、コプレナーウェイブガイドの寸法を系統的に変えると周波数依存性も系統的に変化することから、信号線、グランド線のそれぞれにおいて励起された局所的な磁化の歳差運動によって発生するスピン波同士の干渉効果による共振が発生していると推定している。

図 1(b)には最も急峻なスペクトルを示す印加周波数 6.6 GHz での DMTD 法を用いた位相変化の測定結果を示す。磁場による位相変化は強磁性共鳴が起こる磁場近傍で顕著となり、最大で 27° /Oe の比較的大きな磁場に対する位相変化が検出された。講演では周波数依存性の原因に関する考察と、位相の磁場依存性を中心に報告する予定である。

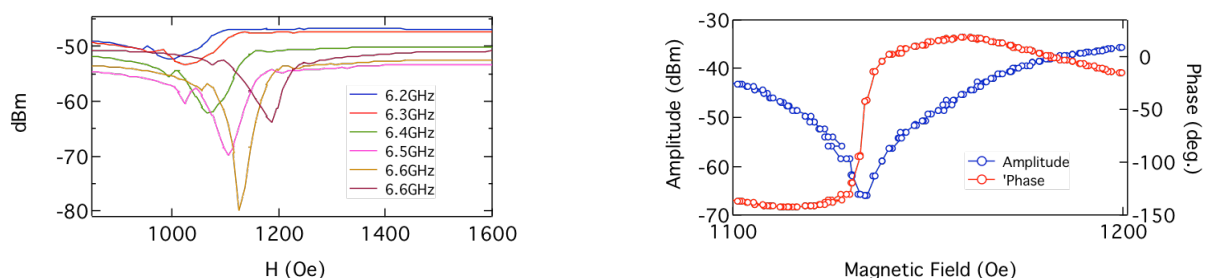


Fig. 1 (a) Magnetic field dependence of reflected wave power. (b) Magnetic field dependence of power and phase.

謝辞 本研究にあたり、株式会社グラノプトから測定試料の御協力を頂きました。ここに感謝致します。

参考文献 1) S. Yabukami *et al.*, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 38, (2014) 25.