

# アモルファス磁性合金薄帯用磁気ひずみ計測法の開発

遠藤 恭<sup>1</sup>, 島田 寛<sup>2</sup>, 川邊 泰之<sup>1</sup>, 方 冰川<sup>1</sup>, 森 修<sup>2</sup>, 佐藤 茂行<sup>2</sup>, 内海 良一<sup>2</sup>  
 (<sup>1</sup> 東北大, <sup>2</sup> (株)東栄科学産業)

Development of New Measurement Method for Magnetostriction of Magnetic Amorphous Alloy Ribbon

Y. Endo<sup>1</sup>, Y. Shimada<sup>2</sup>, Y. Kawabe<sup>1</sup>, B. Fang<sup>1</sup>, O. Mori<sup>2</sup>, S. Sato<sup>2</sup>, R. Utsumi<sup>2</sup>  
 (<sup>1</sup> Tohoku Univ., <sup>2</sup> Toei Scientific Industrial Co.,Ltd)

## はじめに

近年、アモルファス磁性合金薄帯は低損失電力用変圧器の実用化により環境負荷軽減型デバイスを構成する材料の一つとして注目されている。この薄帯は低保磁力、高透磁率、低高周波損失、低磁気ひずみなどの優れた磁気特性を有している。薄帯の磁気ひずみ評価に関しては、従来の容量変化法、ひずみゲージ等の計測法では、薄帯に電磁気的な変化を印加して機械的な変化を引き起こして、物理的な変化を検出することにより磁気ひずみ定数を算出する<sup>1)</sup>。これらの計測法では、薄帯を何枚も重ねた試料の作製や試料サイズが大きといった欠点がある。したがって、従来の計測法とは異なるより簡便な磁気ひずみ計測法の開発が急務となっている。本研究では、アモルファス磁性合金薄帯として市販の薄帯を選択して、その薄帯に異なる応力を付与してインダクタンスの磁界変化を検出し、応力の違いによる磁界変化量から薄帯の磁気ひずみを評価できる計測法を開発した。

## 実験方法

磁気ひずみ計測に用いたアモルファス磁性合金薄帯はFe系アモルファス薄帯である。薄帯の新規磁気ひずみ計測は次の通りである。信号検出にはコイルを用いた。薄帯の一端を固定して、その中央部分をコイル内部に挿入する。もう一方の端部に荷重(応力)を付与すると、薄帯内部の異方性が変化する。したがって、異なる応力( $\sigma_{//1}$ ,  $\sigma_{//2}$ )を薄帯に付与した状態で薄帯の幅方向に直流磁界( $H_{dc}$ )を印加する。このときの応力負荷された薄帯が挿入されたコイルのインダクタンス( $L$ )を検出し、応力の違いによるインダクタンスの逆数( $1/(L-L_0)$ )と $H_{dc}$ の関係を得る(なお、 $L_0$ は空心コイルのインダクタンスである)。得られた結果をもとにして、同じの $1/(L-L_0)$ 値に対する直流磁界の応力の違いによる変化量( $\Delta H = H_{dc1} - H_{dc2}$ )を求めて、

$$\Delta H = \frac{3\lambda_s}{M_s} (\sigma_{//1} - \sigma_{//2}) \quad (1)$$

にあてはめて薄帯の磁気ひずみ( $\lambda_s$ )を評価する。ここで、 $M_s$ は薄帯の飽和磁化である。

## 結果および考察

図1は、異なる応力を付与したときのFe系アモルファス薄帯における $1/(L-L_0)$ と $H_{dc}$ の関係である。応力の大きさに関係なく、1000 Oe以上の $H_{dc}$ では、いずれの $1/(L-L_0)$ も直線的に増加している。また、応力の増加にとともに、同じ $1/(L-L_0)$ 値に対して直流磁界が増加している。したがって、この直流磁界の変化分(増加分)とそのときの応力の変化量を、(1)式にあてはめてFe系アモルファス薄帯の $\lambda_s$ を算出した。300 g以下の荷重領域では、 $\lambda_s$ の値は27~32 ppmとなった。これらの値はほぼ薄帯の公称値と一致している。一方、300 g以上の応力領域では、 $\lambda_s$ の値はおよそ63 ppmとなり、公称値に比べて大きくなった。この原因は、応力を強くした場合、材料の機械特性に何らかの変化が生じる、あるいは、測定システムに残る誤差の可能性を考えている。当日、今回開発した測定法の原理等の詳細を報告する。

**謝辞** 本研究の一部は、東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センターの支援のものと行われた。

## 参考文献

1) 荒井賢一, 津屋昇, 日本応用磁気学会 2, 5 (1978).

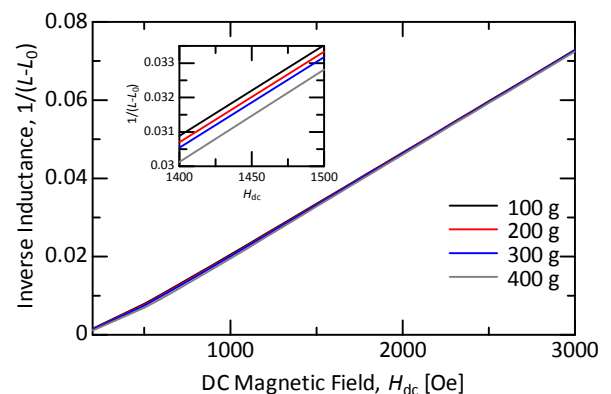


Fig.1 Relationship between inverse inductance and DC magnetic field for an Fe-system amorphous ribbon.

# 回転磁場を用いたバルクハウゼンノイズ計測による応力評価

小野 拓也、中島 悠也  
(富士電機)

Stress evaluation by Barkhausen noise measurement under rotating magnetic field

Takuya Ono and Yuya Nakashima  
(Fuji Electric Co., Ltd.)

## はじめに

近年、インフラ関連製品の劣化診断技術のニーズが高まっている。なかでも、鋼材への表面処理などで発生する残留応力は、応力腐食割れ(SCC)などの損傷の要因となるので、製作時・出荷前に検査する必要がある。磁気バルクハウゼンノイズ(MBN)による応力評価法は、非破壊かつ短時間の残留応力測定が可能な方法として開発が進められ、一部、製品適用も行われている。しかし、MBNに影響する因子としては、応力のほかに、結晶粒径・析出物等があり、応力を精度よく評価する手法の開発が求められる。本研究では、回転磁場下でのMBN計測を行い、MBN強度の磁場角度依存性に基づいて応力評価精度の向上を図った。

## 方法

マルテンサイト系13Crステンレス鋼に、一軸引張試験機を用いて引張応力を印加した。MBN測定は、励磁コイルを巻いた軟磁性ヨークとセンサコイルを評価鋼材に接近させ、評価鋼材表面に長手方向の磁場を印加しながら、センサコイルによって評価鋼材からの漏れ磁束を計測して行った。鋼材表面内で磁場方向を回転させ、MBNの磁場角度依存性を取得した。MBNは出力電圧の二乗平均平方根(RMS)として算出し、さらに励磁電流依存性の移動平均処理による平滑化を経て、MBNプロファイルを得た。MBN積分強度は、MBNプロファイルからバックグラウンドを差し引いたうえで算出した。

## 結果

Fig. 1に引張応力(413 MPa)の下で測定したMBNプロファイルの磁場角度依存性を示す。磁場角度増加に伴いMBN強度の単調減少が見られ、両者の強い相関性を示唆する。一軸の磁気異方性を持つ磁性材料では、MBN強度は $\alpha \cos^2 \theta_m + \beta$ のような角度依存性を有する( $\theta_m$ : 磁化容易軸を基準とする磁場角度)<sup>1)</sup>。逆磁歪エネルギーは $-(3/2)\lambda\sigma(\cos^2\phi - 1/3)$ で表され( $\phi$ : 応力方向を表す角度)、磁気異方性エネルギーと同形式の角度依存性を有するので、一軸応力下のMBNの角度依存性は、一軸磁気異方性下のそれと同様と推定される。Fig. 2にMBN積分強度( $I_{MBN}$ )の $\cos^2\theta$ 依存性を示す( $\theta$ : 応力方向を基準とする磁場角度)。 $I_{MBN}$ は $\cos^2\theta$ に対し線形変化しており、上記の推察が正しいことを示唆する。さらに、Fig. 3に示すように、応力と、関係式 $I_{MBN} = \alpha \cos^2\theta + \beta$ から求めた傾き( $\alpha$ )に強い相関が見られ、MBNの磁場角度依存性から応力が評価できることが示された。

**参考文献** 1) T. W. Krause, L. Clapham, and D. L. Atherton, J. Appl. Phys. **75**, 7983 (1994).

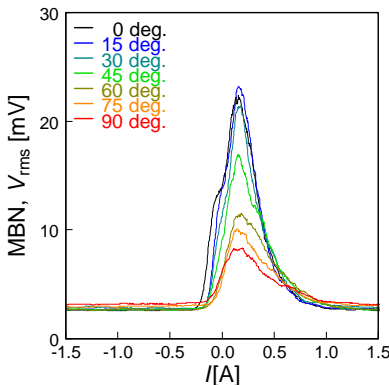


Fig. 1 MBN profiles under the various magnetic field angles and tensile stress of 413 MPa.

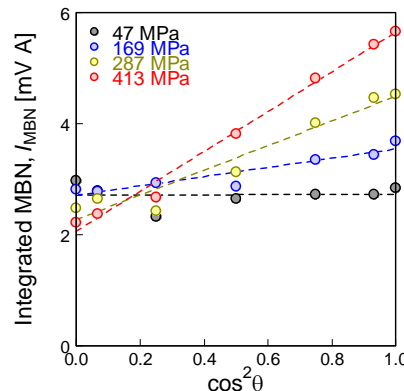


Fig. 2  $\cos^2\theta$  dependences of the integrated MBN,  $I_{MBN}$ , under the various stresses.

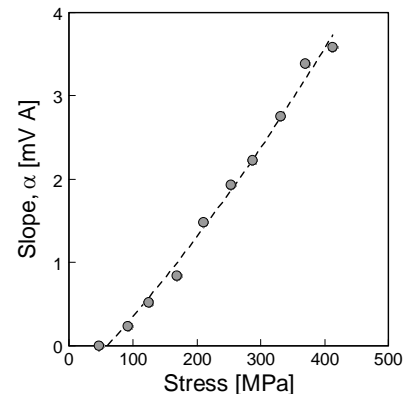


Fig. 3 stress dependence of the slopes,  $\alpha$ , of the  $I_{MBN}$ - $\cos^2\theta$  relations.

# マイケルソン光干渉法による磁歪測定装置の作製

佐藤睦規、吉田悠人、鈴木貴彦、高橋豊、小池邦博、稲葉信幸  
(山形大学大学院理工学研究科)

Magnetostriction measurement system of magnetic thin films with Michelson interference

M.Sato, Y. Yoshida, T. Suzuki, Y. Takahashi, K. Koike, N. Inaba  
(Yamagata Univ. Graduate School of Science and Engineering)

**はじめに** Ni-Fe系合金では、ダンピング定数  $\alpha$  と磁歪との間に相関があることが報告<sup>1)</sup>されており、薄膜での磁歪を知ることは HDD や MRAM 応用の観点から重要である。また、磁歪により磁気異方性が誘起されることから、ナノコンポジット磁性材料の特性向上においても薄膜での磁歪を知ることは有用である。MgO 単結晶基板上に成長させた磁性単結晶薄膜の磁歪を測定しようとする、MgO 基板のヤング率がガラス基板に比べ3倍以上大きく、磁歪による試料のたわみ量が 100 nm 程度で、従来の光てこ法では測定が困難である。このため、本研究では光学系を用いた高分解能な変位測定法として知られているマイケルソン干渉計を応用した磁歪測定装置を製作したので報告する。

**装置構成** 装置の概略図を Fig.1 に、作製した装置の写真を Fig.2 に示す。光源から出た光は、ハーフミラーにより固定ミラー側と可動ミラーの2光路に分けられ、両者からの反射光を再度合成することで検出器に干渉縞が結像される。図のように片持ち固定した短冊状の試料に磁界を印加すると、磁歪により試料がたわみ、反射光の光路長が変化する。このとき、反射光の位相が変化し、干渉縞が移動する。例えば、たわみ量が光源の光の波長/2 に相当する場合は干渉縞の位相が1周期変化することとなる。本測定装置では、光源に He-Ne レーザー(波長  $\lambda = 633$  nm)を用いた。また、デジタルカメラの撮像素子(CCD)上に直接結像し、干渉縞を検出している。得られた干渉縞画像は画像解析ソフト ImageJ<sup>2)</sup>で解析を行い、干渉縞の移動量からたわみ量を算出した。

**実験結果** 0.2 mm 厚の MgO(100)単結晶基板上にスパッタリング法を用いてエピタキシャル成長させた膜厚 300 nm の Fe(001)単結晶薄膜試料を準備した。短冊状試料の長辺方向が Fe[110]であり、この方向に磁界を印加して試料のたわみ量の磁界依存性の測定を行った。Fig.3 にたわみ量の磁界依存性を示す。  $H = \pm 2$  kOe 以上で一定(平均値  $d = 54$  nm)となり、式(1)を用いて Fe[110]方向の磁歪定数を算出<sup>3)</sup>すると、  $\lambda = -21 \times 10^{-6}$  となった。これは bulk の磁歪定数と比べ、2 倍ほど大きい値である。

$$\lambda = \frac{t_s^2 E_s (1 + \nu_f)}{3t_f l^2 E_f (1 - \nu_s)} d \quad (1)$$

ここで、 $t_s$  は基板厚、 $E_s$  は基板のヤング率、 $\nu_s$  は基板のポアソン比、 $t_f$  は膜厚、 $E_f$  は薄膜のヤング率、 $\nu_f$  は薄膜のポアソン比、 $l$  はレーザースポット位置、 $d$  はたわみ量である。

1) Y.Endo et al. *J. Appl. Phys.*, **109**, pp.07D336 (2011).

2) W.S.Rasband, ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997 -2012.

3) A.C.Tam et al. *IEEE Trans. Magn.*, **25** NO.3 (1989).

**謝辞** 本研究の一部は科研費 B(No.16H0448)の補助を受けています。

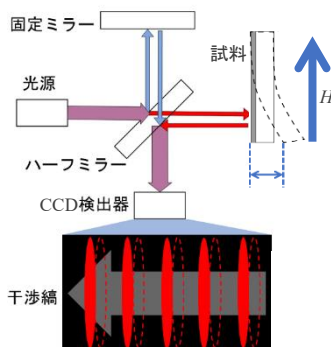


Fig.1 Schematic picture of measurement system with Michelson interferometer

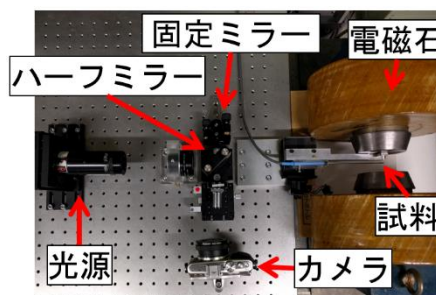


Fig.2 Picture of the magnetostriction measurement system

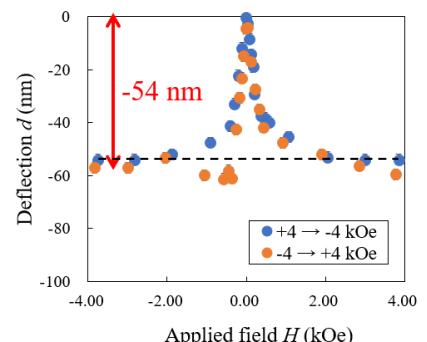


Fig.3 Variation of deflection for the Fe single crystal in magnetic field

# 巻線応力が環状試料の直流磁気特性に及ぼす影響

馬場康壽

(神奈川県立産業技術総合研究所)

Effect of Winding Stress on DC Magnetic Properties of Ring Sample

Y.Baba

(Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology)

## はじめに

磁性材料は発電機や電磁弁の鉄心など磁気回路の構成に広く使用されており、高性能化するためには用途に適した材料を選択する必要がある。磁性材料の特性を測定する方法の一つとして、環状試料を用いた積分方式直流 B-H 測定方法があるが、この方法は試料に一次コイルと二次コイルを巻きつけるので、試料に締め付ける力が加わる。そのため、多くの磁性材料には磁歪現象があることから、手巻き程度の応力でも逆磁歪効果によって、測定した磁化特性が本来の磁化特性とは異なることが懸念される。そこで、本研究では積分方式直流 B-H 測定方法において、手巻き程度の強さの巻線応力が磁化特性に与える影響について調べた。

## 実験方法

環状試料には正磁歪の大きいパーメンジュール (FeCoV) を用いて、樹脂ケースに入れてから巻線をした試料に応力が加わらない場合と試料にコイルと絶縁用テープを直接巻いて応力を加えた場合について磁化特性を比較した。環状試料は外径 45mm、内径 37.5mm、高さ 3mm とし、巻線は一次コイルに 50 ターン、二次コイルに 161 ターンを手巻きした。また、理研電子(株)製の B-H カーブトレーサ BHU-60 を用いて、最大磁界強度  $H_m=10\sim 1000\text{A/m}$  の範囲で直流 B-H 特性を測定した。測定には同一の環状試料を用いて、先に応力を加えない場合を測定して、この後に応力を加えた場合を測定した。ただし、試料をケースに入れたときの測定結果については二次コイルと試料間の空隙の磁束を補正した。

## 測定結果

$H_m=150\text{A/m}$  の時の B-H 曲線を Fig.1 に示す。コイルを直接巻いて環状試料に巻線応力を与えたときは B-H 曲線が磁化容易に変化した。環状試料の磁化方向は円周方向であり、コイルや絶縁テープが締め付ける力は環状試料の円周を伸ばすように作用することから、この結果は逆磁歪現象と合致している。また、各 B-H 曲線において磁束密度から磁気分極  $J$  を算出してそれぞれの J-H ループを求めた。これから最大磁気分極  $J_m$  を変化させた時の残留磁気分極  $J_r$  と J-H ループの面積  $S_h$  の特性を求めた (Fig.2)。試料に巻線応力が加わると  $J_r$  は大きくなったが、 $S_h$  には大きな差異が見られなかった。したがって、手巻き程度の巻線応力の有無において J-H ループのヒステリシス損失はあまり変わらない。

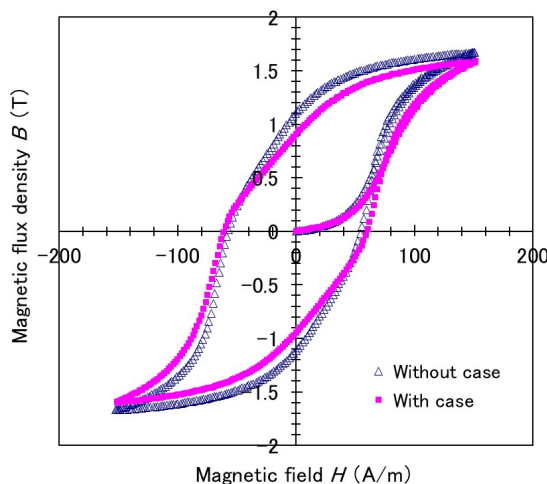


Fig.1 B-H loops (■) with and (△) without polymer case.

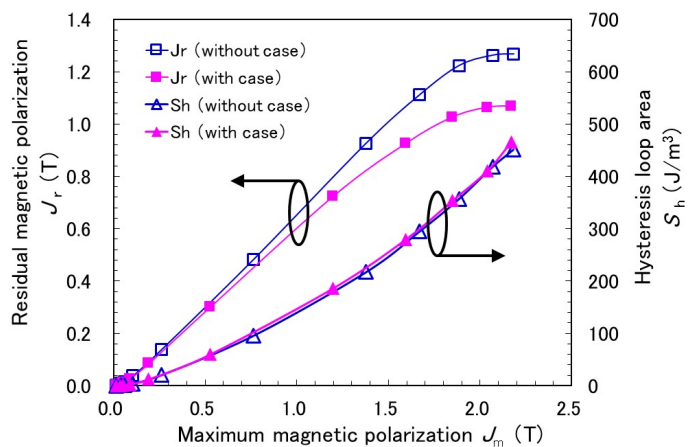


Fig.2 Characteristics of residual magnetic polarization and J-H hysteresis loop area with varied maximum magnetic polarization.

## ローラー型永久磁石式磁場源の設計

佐久間洋志, 菊地敏明\*

(宇都宮大, \*ハヤマ)

Design of mangle type magnetic field source using permanent magnets

H. Sakuma, T. Kikuchi\*

(Utsunomiya Univ., \*Hayama)

## はじめに

Halbach シリンダー[1,2]はその内部に強力な均一な磁場を発生させることが可能であり、2つのシリンダーを組み合わせると、磁場強度を変化させることも可能である。しかしながら Halbach シリンダーは特殊なくさび型の永久磁石を必要とし、また強力な磁力に逆らって組み立てる必要があり、これらのことがコストを増大させる要因となっている。本研究では、円柱型の小型ネオジウム磁石を用いて、低コスト、小型・軽量、省エネ・冷却不要の永久磁石式磁場源を開発することを目的とする。本講演では、磁石の大きさや位置が磁場強度や均一性、磁石自体に働くトルクに及ぼす影響について検討する。

## 構造と計算方法

Fig. 1 に示すように、径方向に着磁した6本の円柱型ネオジウム磁石を正六角形に配置したローラー型磁場源を考える。各磁石の角度を Fig. 1(a)のように設定すると、磁石で囲まれた空間に最大の磁場が生じる。一方、磁石の角度が Fig. 1(b)のとき、内部の磁場はゼロとなる[3]。様々な磁石の大きさや距離、角度において磁石周辺の磁場と永久磁石に働くトルクを2次元有限要素法 (Field Precision, TriComp) により計算した。磁石の磁束密度は1.1 Tとした。また、減磁特性は理想的な傾き-1の直線と仮定した。

## 計算結果

Fig. 2 に示すように、磁石の直径を20 mmに固定して、磁石(の中心)間距離を近づけていくと、最大磁場は強くなるが、磁場の均一性は低くなる。また、当然ながら試料や測定器具を設置する空間は狭くなる。さらに、磁石を回転させるためのトルクも大きくなるため、用途に応じて最適な設計をする必要がある。一般的なホール効果測定や磁気光学効果測定において、最大磁束密度0.5 Tが一つの目安となるだろう。計算結果から、直径20 mmのネオジウム磁石を用いて、0.5 Tの磁束密度を得る場合、直径30 mm程度の空間を確保できることがわかる。また、最大トルクは30 Nm/m程度であり、小型のモーターとギアを用いて回転させることが可能である。講演では、試作機を製作し、計算と比較した結果も紹介する予定である。

## 参考文献

- 1) K. Halbach, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-26, 3882 (1979)
- 2) M. Kumada *et al.*, *CERN Courier* 41, 9 (2001)
- 3) R. Bjørk *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* 322, 3664 (2010)

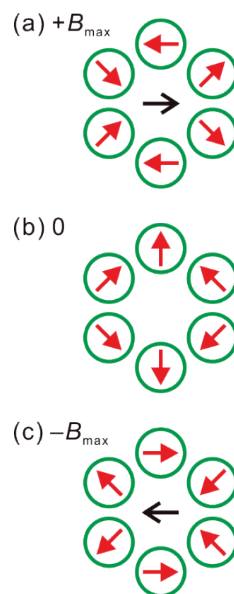


Fig. 1 Magnetic field produced by mangle type magnetic field source.

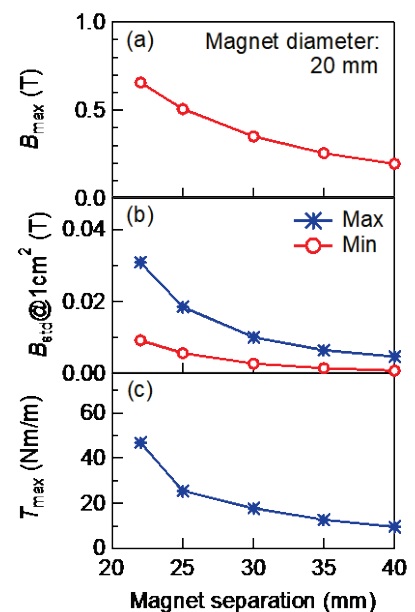


Fig. 2 Maximum flux density, standard deviation of flux density, and maximum torque as functions of magnet separation.