

MI 効果を用いたファイバ型磁気センサのピーク分離能評価

竹中一馬、野口直記

(横河電機株式会社 マーケティング本部 イノベーションセンター 研究開発部)

Peak Resolution using Magnetic Fiber Sensing by Magneto-Impedance Effect

Kazuma Takenaka, Naoki Noguchi

(Yokogawa Electric Corporation)

はじめに

MI (Magneto-Impedance) 効果と TDR (Time Domain Reflectometry) を利用して、センサケーブルに加わる磁場の位置と強度を同時に検出するファイバ型磁気センサについて提案した¹⁾。本技術は非破壊検査において欠陥のマルチポイントモニタリングが可能であり、従来のシングルポイントでの検査と比べて大幅な検査効率の改善が期待される。センサケーブル上の複数のピーク信号の分離に際し、ピーク分解能は重要なパラメータである。本研究では、ファイバ型磁気センサのピーク分解能について検討した。

実験方法

Fig. 1 にファイバ型磁気センサの特性を評価する実験構成を示す。センサ部となる磁気同軸ケーブルは、内部導体として 78 パーマロイワイヤ ($\phi 0.09$ mm) を用いた同軸構造である。磁気同軸ケーブルの軸方向に磁場を印加すると、MI 効果により特性インピーダンスの不整合領域が生じ、ステップ波の通過時に反射波が生じる。本研究では、急峻な磁場分布を持つ小型コイルにより磁場を印加し、立ち上がり時間の速い入力ステップ波 ($t_r = 60$ ps) を用いて、反射波信号の立ち上がり・立ち下り時間からピーク分離能について評価した。

実験結果

Fig. 2 (a) に磁気同軸ケーブル ($L = 100$ mm) に対して、小型コイル ($L = 12$ mm) を 10 mm から 80 mm まで移動させて磁界を印加した際に、各反射波のピーク位置が変化する様子を示す。また Fig. 2 (b) に、各ピーク値により正規化し、同一のピーク位置にシフトした反射波と、小型コイルの磁界分布を示す。10 mm から 80 mm の位置の反射波はほぼ相似形となった。また反射波の立ち上がり時間 (230 ps) は入力ステップ波 (60 ps) と小型コイルの磁気分布 (145 ps) の合計と同程度となった。距離換算では、小型コイル (ピーク幅 34.5 mm) を用いた際のピーク分離能は 82 mm となった。

参考文献

- 1) K. Takenaka, "Magnetic Fiber Sensing by Magneto-Impedance Effect with Time-Domain-Reflectometry", Transducers 2019, Berlin, Germany, June 23-27, 2019

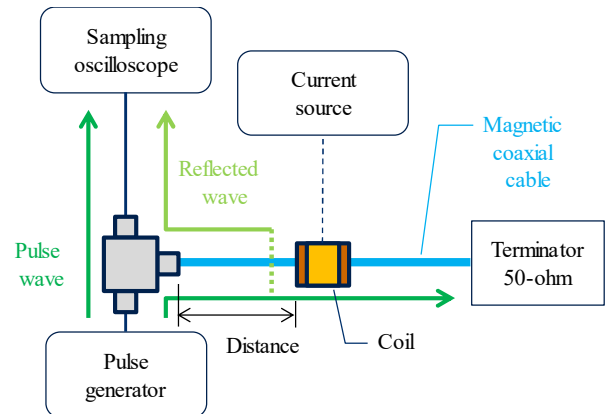


Fig. 1 Schematic view of magnetic fiber sensing.

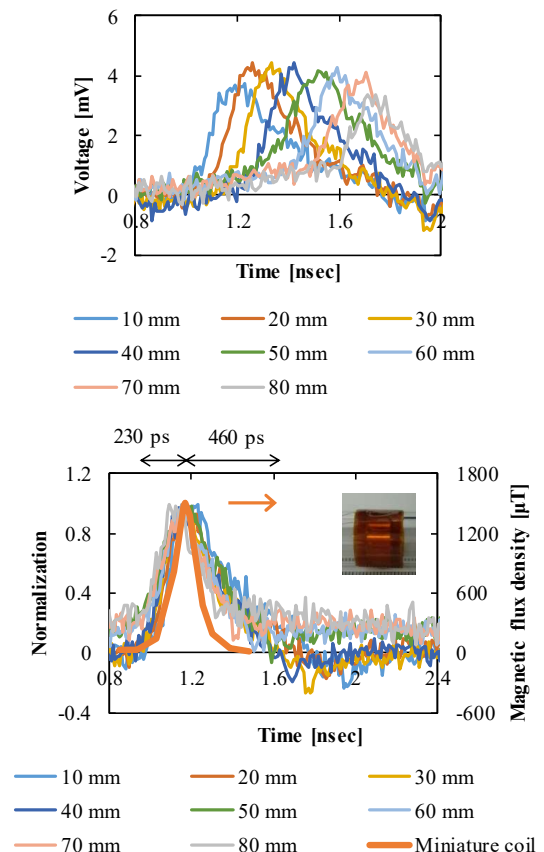


Fig. 2 (a) Reflected wave from characteristic impedance unmatching region. (b) Normalized and overlayed reflected wave at the position and the magnetic field distribution by a miniature coil.

偶関数 GMR と逆位相ブリッジを用いた超高感度磁界センサ

白鳥聡志, 喜々津哲, 東祥弘, 黒崎義成, 岩崎仁志
(株) 東芝

High sensitive symmetric response MR sensor using antiphase AC modulation bridge

S. Shirotori, A. Kikitsu, Y. Higashi, Y. Kurosaki, H. Iwasaki
(Toshiba Corp.)

はじめに

超高感度磁界センサは, Li イオン電池の欠陥検査や生体磁気検出などの応用を目指して盛んに検討されている. IoT などの幅広い用途を想定すると, 高密度実装や集積化が容易な磁気抵抗 (MR) 素子が有利であり, TMR センサで数 10 pT レベルの感度が報告されている¹⁾. しかし, MR 素子は $1/f$ ノイズの影響が大きいので, 低周波域で高い感度を実現するのが課題である. $1/f$ ノイズを低減する手法としては検出信号の交流変調が一般的であるが, 微弱な検出信号に大きな変調信号が重畳するため, アンプの限られたダイナミックレンジではそれほど小さい信号は検出できない. そこで本研究では, 偶関数特製を持つ GMR 素子を外部交流磁界で変調し, かつ逆位相の変調を組み合わせたフルブリッジを用いることで, 変調信号の影響を除いて微弱な信号を検出できる新しい超高感度磁界センサを開発した. このコンセプトと動作検証実験の結果を報告する.

コンセプト及び実験方法

Fig. 1 に磁界センサのコンセプトを示す. 矩形に加工した GMR 素子で偶関数を実現し, 上部に設置した AC 線から周波数 f の交流変調磁界を印加する (a). 出力において, 検出磁界 (H_m) 成分は周波数 f , 変調磁界成分 (H_{ac}) は $2f$ となるので (b), 周波数分離が可能になる²⁾. さらに, 交流磁界の位相が逆の素子 (GMR-A/GMR-B) でフルブリッジを構成することで (c), 差動出力から変調磁界成分 $2f$ を除くことができる.

GMR 素子は, NiFeCr (7.0)/IrMn (7.0)/CoFe (2)/Ru (0.9)/CoFe (2)/Cu (3.4)/CoFe (3.0)/Cu (3.4)/CoFe (2.0)/Ru (0.9)/CoFe (2.0)/IrMn (7.0) (in nm) の Dual spin-valve 構成で作製した. GMR 素子形状は $5\ \mu\text{m} \times 1\ \text{mm}$ で, SiO_2 絶縁層を介して Au を積層して AC 線とした. MR 比は 5%, 感度は $0.06\%/Oe$ であった. 30 kHz の交流磁界で変調し, ブリッジ電圧 V_{dc} は 5 V, 交流電圧 V_{ac} は 0.1 V, 2 V とした.

結果および検討

Fig. 2 に, 地磁気を含む環境磁界が印加されている状態でのブリッジ出力の周波数スペクトルを示す. コンセプトどおりに $2f$ 成分 (60 kHz) が大きく減衰しているのがわかる. 挿入図に $f, 2f$ 成分の外部磁界依存性を示す. f 成分は非常に良い直線性を示す. $V_{dc} = 12\ \text{V}$, $V_{ac} = 2\ \text{V}$ の条件で $0.08\ \text{V}/Oe$ の検出感度が得られており, 30 kHz 近傍のノイズレベルから sub-nT の感度が期待される. なお, $V_{ac} = 2\ \text{V}$ の場合, 数 100 Hz あたりからノイズが増加し $1/f$ ノイズからのずれが見られる. 磁区形成の影響が想定されるが, 詳細は今後解明していく予定である.

参考文献

- 1) K. Fujiwara et. al., *Appl. Phys. Express* **11**, 023001 (2018)
- 2) K. Tsukada et. al., *AIP Advances* **7**, 056670 (2017)

This work was supported by the Cabinet Office (CAO), Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP), "Intelligent Processing Infrastructure of Cyber and Physical Systems" (funding agency: NEDO).

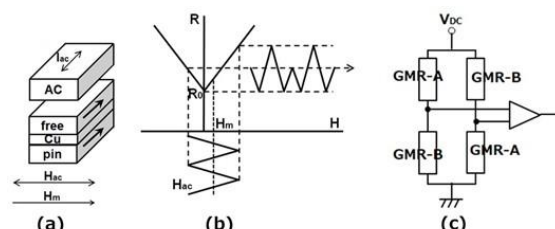


Fig. 1 Concept of high-sensitive magnetic sensor

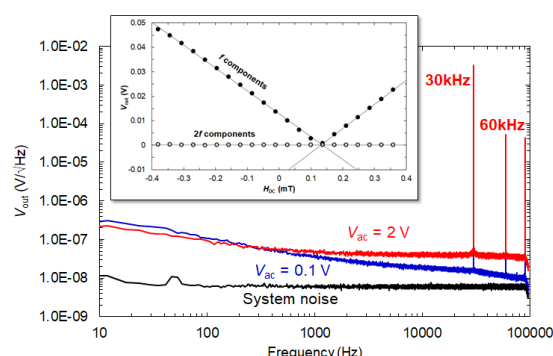


Fig. 2 Output signal spectrum and external field response of f - and $2f$ -component

リング干渉方式光プローブ電流センサの 広帯域ランダム振動試験による耐振性能評価

古屋 一輝¹, 寺岡 佑恭¹, 曾根原 誠¹, 佐藤 敏郎¹, 久保 俊哉², 宮本 光教²
(¹信州大学, ²シチズンファインデバイス)

Fundamental study on ring interferometric optical probe current sensor with high temperature stability
K. Furuya¹, Y. Teraoka¹, M. Sonehara¹, T. Sato¹, T. Kubo², M. Miyamoto²
(¹Shinshu University, ²Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

はじめに

自動車や航空機などのモビリティの電動化が進んでおり、高出力のモータや高密度のバッテリー、小型・高効率な電力変換装置など開発は急務である¹⁾。加えて、モータのトルク測定やバッテリーの充放電測定、電力変換装置の電流測定など、大電流に対応しかつ高 S/N の電流センサの開発も必要不可欠である²⁾。筆者らは、モビリティ用電流センサとしても期待されている Faraday 効果を用いた光プローブ電流センサの研究・開発を進めている。本稿では、光プローブ電流センサの耐振性について検討し JIS 規格で定められている航空機や宇宙船、地上車両などの使用環境下において生じるランダム振動に基づく広帯域ランダム振動試験 (JIS C 60068-2-64:2011, 環境試験方法 -電気・電子- 第 2-64 部) による本電流センサの耐振性能を評価した結果について述べる。

実験方法

Fig. 1 に Faraday 効果型光プローブ電流センサの光学系を示す。本電流センサは直線偏光を磁性膜に入射し、反射光を P 偏光と S 偏光に分光させ、これらの光強度差 ΔP [W] を電流値として換算する³⁾。広帯域ランダム振動試験には、複合環境振動試験装置 (EMIC; F-16000BDH/LA16AW, VC-102DMAXS(32S)P3T, 長野県工業技術総合センター所有) を用いて、上下方向に振動する小型治具に、円筒状のセンサヘッド部を取り付け径方向と軸方向の耐振性能を評価した。

測定結果

Fig. 2 に本電流センサの(a)径方向および(b)軸方向の耐振性能評価結果を示す。縦軸はセンサ出力の最大変化量 $\Delta P_{\max}$ に対するランダム振動を加えた場合のセンサ出力 ΔP の比 $\Delta P/\Delta P_{\max}$ であり、横軸は経過時間 (1 h) である。理想的には $\Delta P/\Delta P_{\max} = 0$ が望ましいが、約 5% の変化が見られた。これは Fig. 1 のセンサヘッドにおける 1/4 波長板の接着に不具合があったためなどが考えられ、耐振性に優れたセンサヘッドの設計を検討する。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 19H02152 および長野県航空機システム研究開発費補助金などの支援および助成を受けたもので、ここに深謝する。

参考文献

- 1) 田島 克文: 令和元年電気学会 A 部門大会, 3-F-a1-1, 2019.
- 2) M. Sonehara, et. al.: *IEEE Sensors 2009 Conference*, pp.1232-1237, 2009.
- 3) M. Miyamoto, et. al.: *IEEE Trans. Magn.*, **54**, 11, #2501205, 2018.

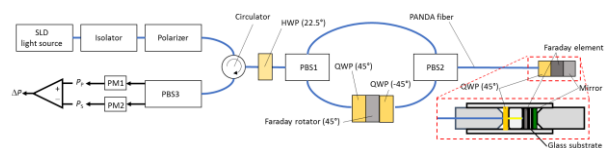
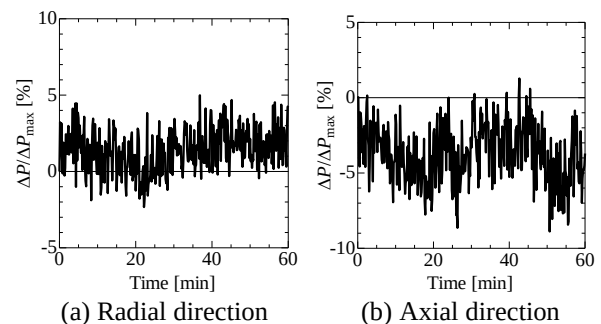


Fig. 1. Schematic view of ring interferometric type optical probe sensor system.



(a) Radial direction (b) Axial direction
Fig. 2. Measurement results of relation between change ratio of sensor output $\Delta P/\Delta P_{\max}$ and elapsed time in ring interferometric type optical probe current sensor by broadband random vibration test.

フィゾー光干渉法による磁歪測定装置の作製

梅津勝平, 高橋豊, 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 Fizeau Interferometer
S.Umetsu, Y.Takahashi, and N.Inaba
(Yamagata Univ., Graduate School of Science and Engineering)

はじめに

Fe-Ni 系多結晶合金においてダンピング定数と磁歪 λ の値に相関があることが報告¹⁾されたり、振動発電デバイスやセンサー応用として Fe-Ga 薄膜などの磁歪材料が注目されている。磁歪の結晶方位依存性を測定するためには単結晶薄膜試料を用いて測定を行う必要があるが、ヤング率の大きい MgO、GaAs 基板上に作成した単結晶薄膜試料では磁歪による変位量が小さく従来の装置では測定が困難であった。このため、Fig.1 に示すようなマイケルソン干渉計を用いた磁歪測定装置を製作し、数 10 nm の変位が測定可能であることを報告²⁾してきた。この装置では試料のたわみ量を参照光と測定光の位相差により生じる干渉縞の変位として観測する。本方式では、参照光と測定光の 2 つの光路が別であるため、どちらかに外乱が混入するだけで干渉縞が変化することとなり、これ以上の分解能の向上が困難であった。そこで、本研究では同軸型干渉計 (フィゾー干渉計) に着目した高分解能の磁歪測定装置を製作したので報告する。

装置構成

Fig.2 に示すように、フィゾー干渉計では検出器と試料を結ぶ光路にハーフミラーを置くことで参照光が測定光と同軸上を通過する。このため、外乱が位相に影響を与える光路がハーフミラー B と試料の間のみとなり、また、その光路長を 90 cm から 30 cm に短縮できた。磁歪の測定は、片持梁となるように固定した短冊状の試料が磁歪によりたわみ、ハーフミラー B と試料の距離が変化することで干渉縞の移動が生じることを用いている。干渉縞の検出は、デジタルカメラの撮像素子 (CCD) 上に直接結像する方法を用いた。本測定装置では、光源に He-Ne レーザー (波長 $\lambda = 633 \text{ nm}$) を使用した。得られた干渉縞画像から、干渉縞の周波数より高い周波数成分をフーリエ変換によるローパスフィルタを通過させることで除去した後、干渉縞の移動量からたわみ量を算出した。

実験結果

0.3 mm 厚で短冊形状の GaAs(001) 単結晶基板上に RF マグネトロン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 70 nm の Fe(001) 単結晶薄膜試料を準備した。試料の長辺方向を $\text{Fe}[1\bar{1}0]$ とし、膜面内で $[1\bar{1}0]$ 軸に対し平行方向 ($[1\bar{1}0] \parallel$)、および、垂直方向 ($[1\bar{1}0] \perp$) に磁界を印加し、たわみ量の磁界依存性を測定した。Fig.3 に $[1\bar{1}0] \perp$ 方向で測定したたわみ量の磁界依存性を示す。平均のたわみ量は 3.9 nm であり、そのたわみ量から文献 3 の換算式を用いて磁歪定数を算出すると、 $\lambda_{1\bar{1}0\perp} = 22 \times 10^{-6}$ であった。垂直、平行方向のたわみ量と算出した λ の値をまとめると Table.1 となる。Fe 単結晶試料の λ_{100} と λ_{111} を $\lambda_{100} = 2(\lambda_{1\bar{1}0\parallel} + \lambda_{1\bar{1}0\perp})$ と $\lambda_{111} = \frac{2}{3}(\lambda_{1\bar{1}0\parallel} - \lambda_{1\bar{1}0\perp})$ の式を用いて算出すると、 $\lambda_{100} = 20 \times 10^{-6}$ 、 $\lambda_{111} = -23 \times 10^{-6}$ となり、bulk の磁歪定数に近い値が得られた。これにより nm オーダーのたわみ量を持つ試料の磁歪定数の測定が可能となった。

謝辞

装置作製に協力いただいた、本学鈴木貴彦技術職員に感謝する。

References

- 1) Y.Endo et al. *J.Appl. Phys.*, **109**, pp.07D336 (2011).
- 2) M.Sato et al. *T. Magn. Soc. Jpn.(Special Issues)*, **3**, 39-42 (2019).
- 3) A.C.Tam et al. *IEEE Trans. Magn.*, **25**, NO.3 (1989).

Table 1 Deflection and Magnetostriction of Fe sample

Direction	Deflection d [nm]	Magnetostriction λ
$[1\bar{1}0] \perp$	3.9	22×10^{-6}
$[1\bar{1}0] \parallel$	-4.5	-12×10^{-6}

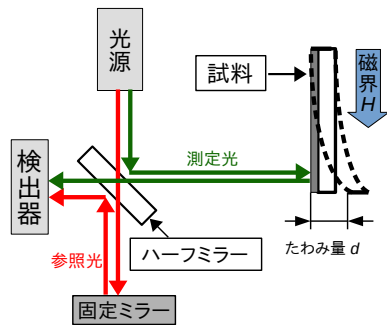


Fig. 1 Schematic picture of measurement system with Michelson interferometer

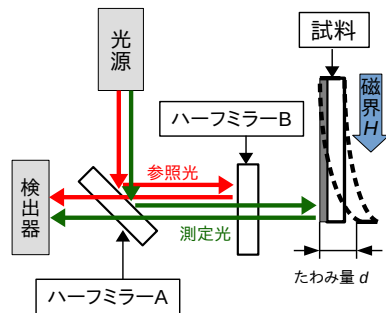


Fig. 2 Schematic picture of measurement system with Fizeau interferometer

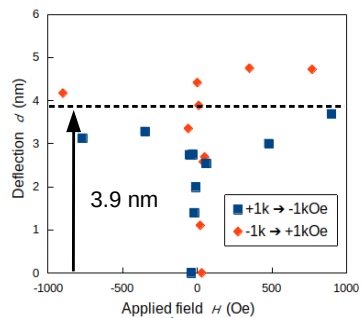


Fig. 3 Variation of deflection for the Fe sample in magnetic field applied parallel to $\text{Fe}[1\bar{1}0]_{\perp}$ direction

新規磁性薄帯用磁気ひずみ評価法の開発

遠藤 恭¹, 島田 寛², 森 修², 佐藤 茂行², 内海 良一²

(¹ 東北大, ² (株)東栄科学産業)

Development of Measurement Technique for Magnetostriction of Magnetics Alloy Ribbons

Y. Endo¹, Y. Shimada², O. Mori², S. Sato², R. Utsumi²

(¹ Tohoku Univ., ² Toei Scientific Industrial Co.,Ltd)

はじめに 従来、容量変化法やひずみゲージといった評価法が、磁性合金薄帯の磁気ひずみ評価法として幅広く利用されている。これらの評価法は薄帯に電磁気的な変化を誘導して機械的な変化を引き起こし、物理的な変化を検出することによって磁気ひずみ定数を算出する簡便な方法である¹⁾。その一方で、薄帯を何枚も重ねた試料の作製や試料サイズを大きくする必要があるなどの欠点も抱えている。そのため、従来の評価法とは異なる新たな磁気ひずみ評価法の構築が求められている。我々は、磁性合金薄帯に異なる応力を付与し、そのときのインダクタンスの外部磁界依存性（電磁気的な変化）をコイルにより検出することによって薄帯の磁気ひずみを評価することのできる新たな方法を提案した。本研究では、この新規磁性薄帯用磁気ひずみ評価法を用いて市販のFe系およびCo系アモルファス薄帯の磁気ひずみを評価した。

実験方法 本評価法では、幅 5~10 mm の細長い薄帯の中央部を検出コイル内部に挿入して薄帯の両端を治具で固定した状態で電磁石のギャップ部に設置する。固定した薄帯両端のうちの一端にロードセルを具備して薄帯の長手方向に荷重（応力）を付与する。このとき、薄帯内部の異方性磁界が変化する。したがって、薄帯に一定の応力（ $\sigma_{//}$ ）を付与しながら薄帯幅方向に 0~400 mT の直流磁界（ H_{dc} ）を印加し、薄帯が挿入された検出コイルのインダクタンス（ L ）を LCR メータにより測定する。得られたるインダクタンスの逆数（ $1/(L-L_0)$ ）（ L_0 : 空心コイルのインダクタンス）と H_{dc} との関係性を、さまざまな応力に対してまとめる。得られた結果をもとにして、同じ $1/(L-L_0)$ 値において、 H_{dc} の応力の違いによる変化量（ $\Delta H = H_{dc1} - H_{dc2}$ ）を導出して、 $\Delta H = 3\lambda_s(\sigma_{//1} - \sigma_{//2}) / M$ （ M : 薄帯の磁化）(*)にあてはめて薄帯の磁気ひずみ（ λ_s ）を評価する。

結果および考察 図1は異なる応力を付与したときのFe系およびCo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。Fe系アモルファス薄帯の場合には、応力の大きさに関係なく 50 mT 以上の H_{dc} では、いずれの $1/(L-L_0)$ も直線的に増加した。また、応力の増加にともない、同じ $1/(L-L_0)$ 値に対して H_{dc} が増加した。このときの ΔH と応力の変化量を、(*)式にあてはめてFe系アモルファス薄帯の λ_s を算出した。その結果、 λ_s 値はおよそ 27 ppm となった。また、Co系アモルファス薄帯の場合には、応力の大きさに関係なく 60 mT 以上の H_{dc} では、いずれの $1/(L-L_0)$ も直線的に増加した。また、応力の増加にともない、同じ $1/(L-L_0)$ 値に対して H_{dc} が減少した。このときのわずかな ΔH と応力の変化量を、(*)式にあてはめてCo系アモルファス薄帯の λ_s を算出した。その結果、 λ_s 値はおよそ -0.4 ppm となった。Fe系およびCo系アモルファス薄帯の λ_s 値はほぼ薄帯の公称値と一致した。なお、複数の試料による評価では、公称値よりわずかにずれる場合もあり、材料の機械特性の変化によるものと考えられる。

謝辞 本研究の一部は、東北大学 CSRN の支援のもので行われた。

参考文献 1) 荒井賢一, 津屋昇, 日本応用磁気学会 2, 5 (1978).

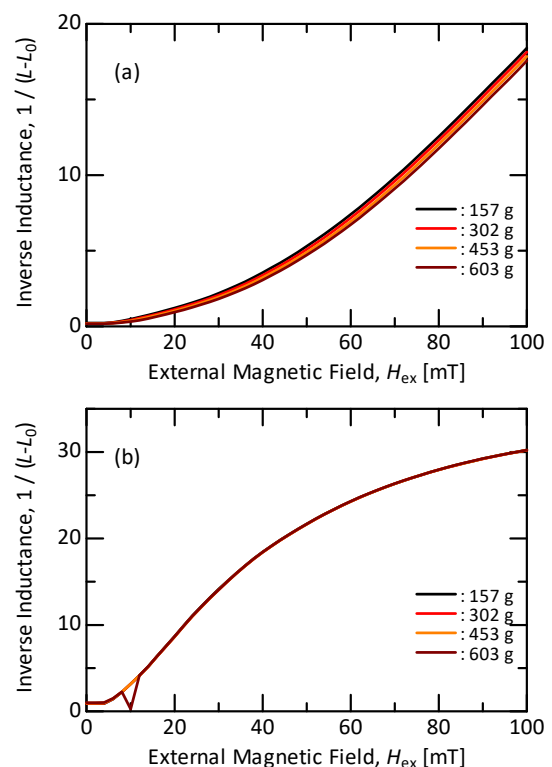


Fig.1 Relationship between inverse inductance and DC magnetic field for (a) an Fe-system and (b) a Co-system amorphous ribbons.

磁気 Kerr 効果を用いた 磁歪式トルクセンサの軸表面磁歪膜特性評価

石橋 和之^{*1,2}, 曾根原 誠², 古平 健之¹, 佐々木 貴広¹, 佐藤 敏郎²
(¹多摩川精機株式会社, ²信州大学)

Characterization of magnetostrictive film on shaft surface in magnetostrictive torque sensor using Kerr effect
Kazuyuki Ishibashi^{*1,2}, Makoto Sonehara², Takeyuki Kodaira¹, Takahiro Sasaki¹, Toshiro Sato²
(¹Tamagawa Seiki Co.,Ltd., ²Shinshu University)

はじめに

磁歪材料の特性評価は、磁気 Kerr 効果顕微鏡を用いた動的な磁区観察¹⁾、あるいは磁気特性 (B-H カーブ など) の評価が挙げられる。一般的な磁区観察では平面の磁歪材料を観察するが、本研究の磁歪式トルクセンサ²⁾の場合、磁歪材料は円柱状の軸表面に成膜されるため、センサ特性の精確な評価には、曲面上でかつトルクが印加された状態の磁区観察が必要になる。本発表では、新たに開発した磁気 Kerr 効果顕微鏡を用いて軸表面の磁歪材料の動的な磁区観察手法および結果について述べる。

実験方法

Fig. 1 に磁気 Kerr 効果顕微鏡 (ネオアーク ; BH-753-TSC) の概要を示す。磁区観察中に磁界を土約 24 kA/m (±300 Oe) の範囲で印加でき、かつ軸にトルクを±100 Nm まで印加できる。磁区観察用試料には、磁歪式トルクセンサで使用することを検討している箔帯状の磁歪試料 (Fe-Si-B 系アモルファス金属リボン材, 日立金属 ; Metaglas®2605SA1, 厚さ 25 μm) を用いて、φ40 mm のステンレス軸材に貼付けたものを使用した。磁区観察および磁区像のコントラスト比による磁化曲線を印加トルク毎に確認した。

実験結果と考察

Fig. 2 にトルクを軸に印加した状態での動的な磁区像のコントラスト比より見積った磁化曲線を示す。同図より、トルクの印加方向 (引張方向) と磁界方向が一致する -50 Nm 印加時の磁化曲線の傾きが急峻に高くなり、これは透磁率の増加を示す。また逆に 50 Nm 時には傾きは緩やかになる結果が得られた。これはトルクセンサの動作と合致する。したがって、本手法を用いてトルクセンサに適した磁歪材料を材料段階で評価することに期待できる。

謝辞 この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) H. J. Williams, F. G. Foster and E.A. Wood: "Observation of Magnetic Domains by the Kerr Effect", *Phys. Rev.*, **82**, pp.119-120 (1951)
- 2) 水野 正, 小島 勝洋: 「磁歪式トルクセンサの開発」, *電気製鋼*, **62**, 3, pp.167-174 (1991)

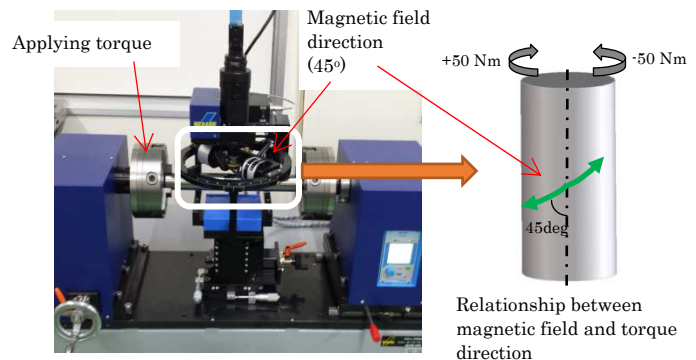


Fig. 1 External photograph of magnetic Kerr effect microscope

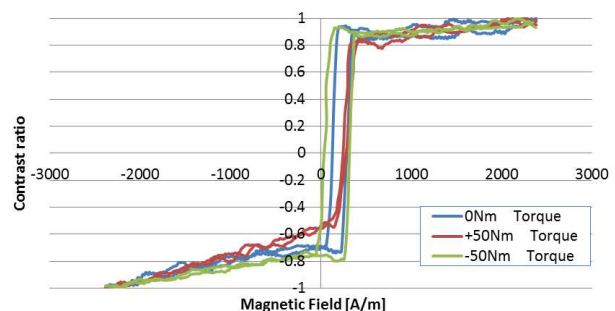


Fig.2 Magnetization curve estimated from the contrast ratio