

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解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解能は 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

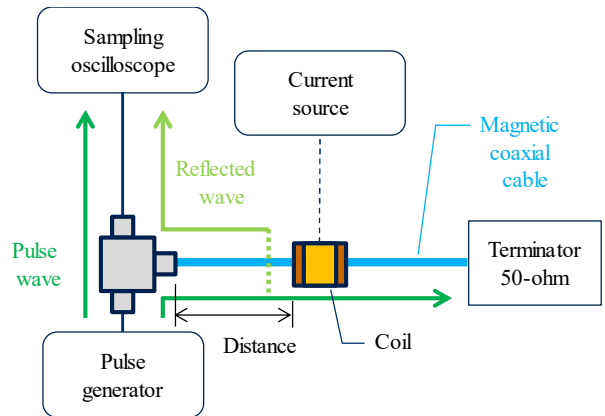


Fig. 1 Schematic view of magnetic fiber sensing.

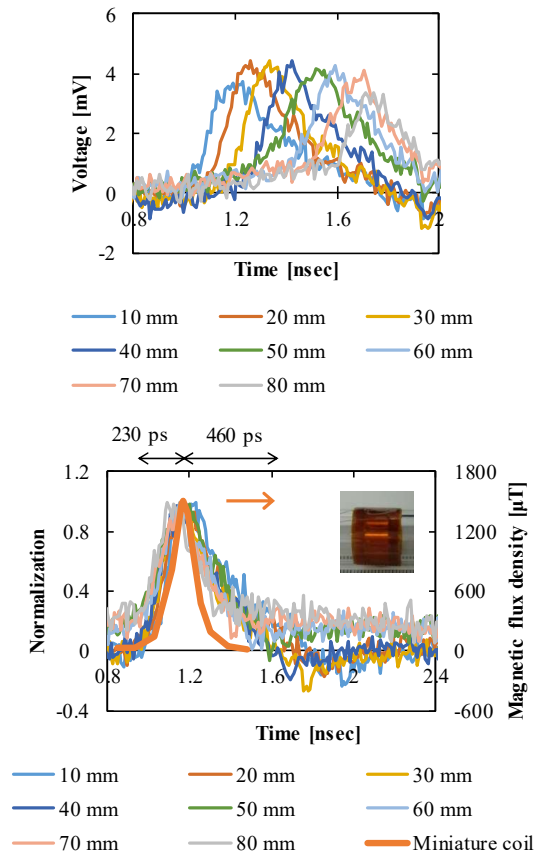


Fig. 2 (a) Reflected wave from characteristic impedance unmatching region. (b) Normalized and overlaid reflected wave at the position and the magnetic field distribution by a miniature coil.

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. 30kHz の交流磁界で変調し, ブリッジ電圧 V_{dc} は 5V , 交流電圧 V_{ac} は $0.1 \text{V}, 2 \text{V}$ 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 (60kHz) 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, 30kHz 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 100Hz 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).

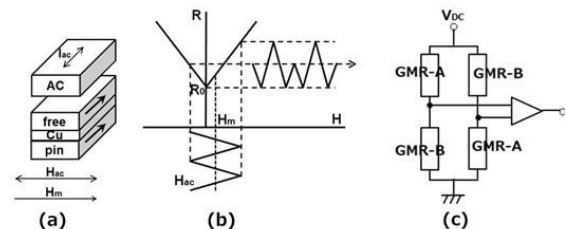


Fig. 1 Concept of high-sensitive magnetic sensor

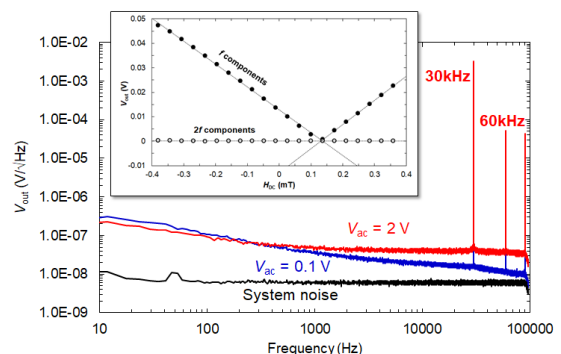


Fig. 2 Output signal spectrum and external field response of f - and $2f$ -component

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 ΔP_{\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.

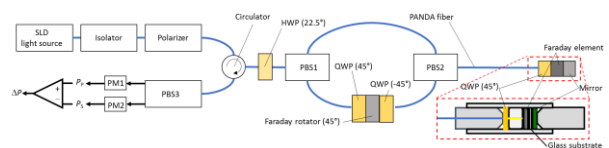
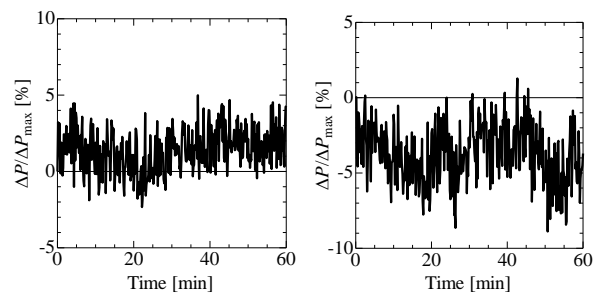


Fig. 1. Schematic view of ring interferometric type optical probe sensor system.



(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}

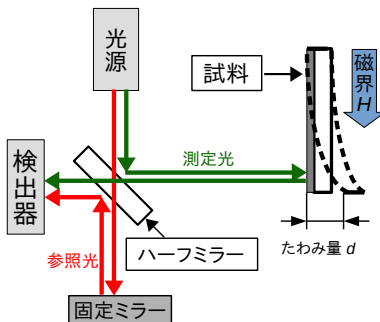


Fig. 1 Schematic picture of measurement system with Michelson interferometer

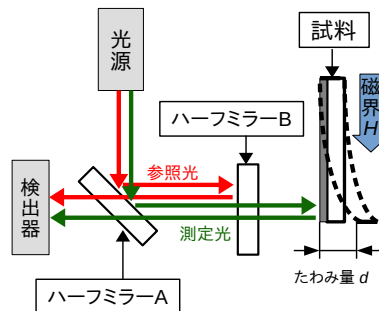


Fig. 2 Schematic picture of measurement system with Fizeau interferometer

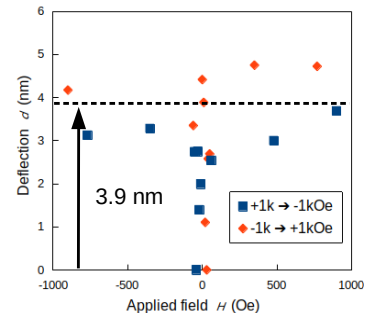


Fig. 3 Variation of deflection for the Fe sample in magnetic field applied parallel to $\text{Fe}[1\bar{1}0]_{\perp}$ direction

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的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).

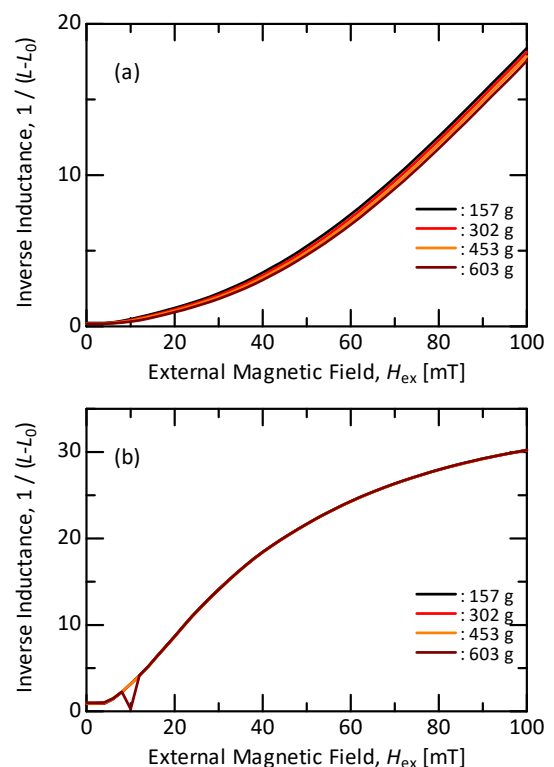


Fig.1 Relationship between inverse inductance and DC magnetic field for (a) an Fe-system and (b) a Co-system amorphous ribbons.

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)

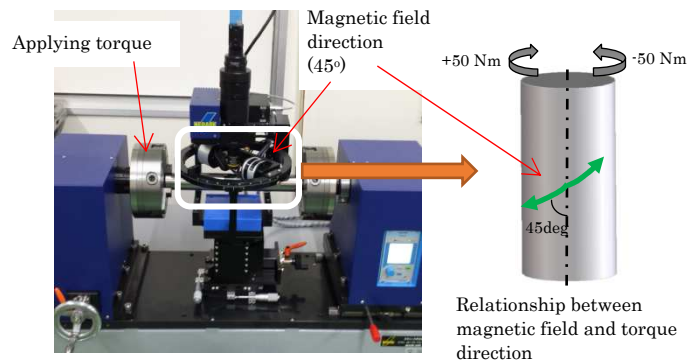


Fig. 1 External photograph of magnetic Kerr effect microscope

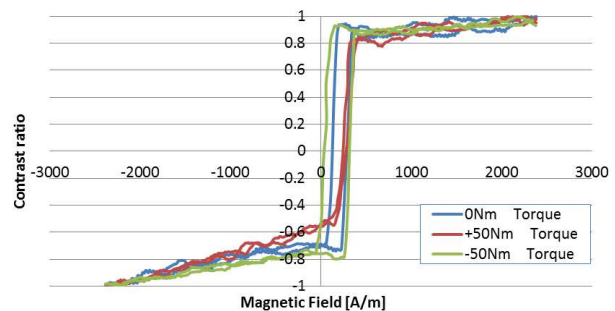


Fig.2 Magnetization curve estimated from the contrast ratio

CMA-ES による永久磁石式磁場源の回転パターン最適化

佐久間洋志
(宇都宮大)

Optimization of Rotation Patterns of Magnetic Field Source with Six Magnets using Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy

H. Sakuma
(Utsunomiya Univ.)

はじめに

円柱型の永久磁石を用いたローラー型永久磁石式磁場源による、1 方向磁場^{1,2)}およびベクトル磁場³⁾の発生が報告されている。この磁場源において、最大磁場を発生する永久磁石の角度は Halbach シリンダーに対応する角度であり、磁場の均一性に優れる。一方、プラスの最大からマイナスの最大まで連続的に中間的な磁場を発生するための磁石角度は自明ではない。本研究では、進化的計算の一種である Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES)を用いた磁石回転パターンの最適化について報告する。

構造と計算方法

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の各頂点に配置したローラー型磁場源を考える。磁石の直径は 25 mm, 磁石中心間の距離は 31 mm, 磁石の磁束密度は 1.29 T とした。目的関数を、 $f = |B_x - B_x^t| + |B_y - B_y^t| + 3B_{std}$ と設定した。ここで、 B_x, B_y は中心における磁束密度の x, y 成分、 B_x^t, B_y^t はその目標値であり、 B_{std} は中心付近の $10 \times 10 \text{ mm}^2$ の領域における磁束密度の大きさの標準偏差である。ある磁石角度の組み合わせにおける B_x, B_y, B_{std} を 2 次元有限要素法により求め、 f が最も小さくなるように 834 世代の最適化を行った。CMA-ES のアルゴリズムは文献 4 を基にした。

計算結果

Fig. 1 (a) に、 $B_x^t = B_y^t = 0$ とし、独立に 10 回の最適化を行った結果を示す (f の順に並べてある)。青い矢印は各磁石の角度を示している。これらの結果は 3 つのグループに分けられる。すなわち、放射状のパターン、平行に近いパターン、向かい合う磁石が反対を向くパターンである。 f が最も小さくなるのは放射状のパターンであり、Fig. 1 (b) に示すような無数の角度があり得ると考えられる。発表では、中間的な強度の磁場を生じる磁石角度についても報告する予定である。

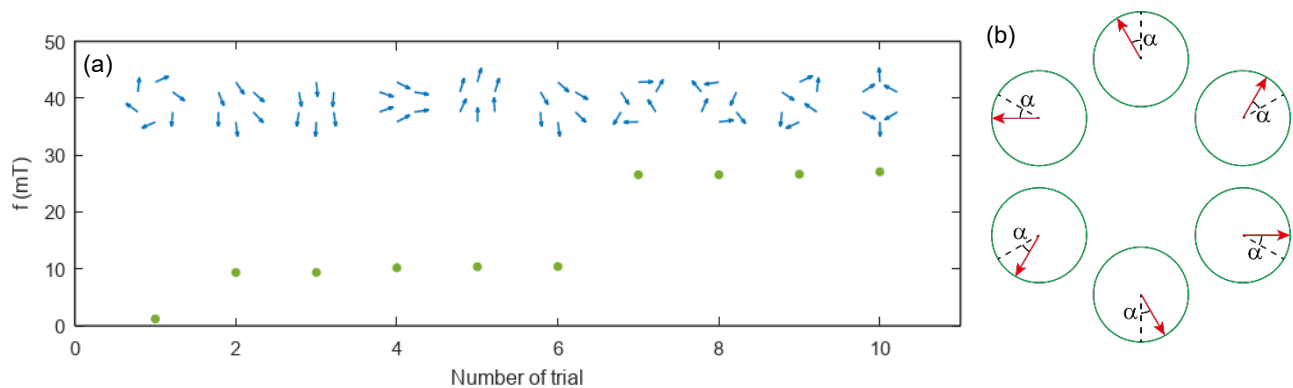


Fig. 1 (a) Results of 10 trials of optimization for $B_x^t = B_y^t = 0$. (b) Magnetization direction of magnets for the lowest f .

参考文献

- 1) R. Bjørk *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* **322**, 3664 (2010)
- 2) 佐久間洋志, 日本磁気学会論文特集号 **3**, 43 (2019)
- 3) H. Sakuma, *J. Magn. Soc. Jpn.* **44**, 21 (2020)
- 4) N. Hansen, arXiv: 1604.00772 (2016)

小型電流センサ用磁気シールドの設計

寺尾美菜子、小河晃太郎、野口直記、竹中一馬
(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)

Design of magnetic shield case for small sized AC/DC current sensor by electromagnetic simulation
Minako Terao, Koutarou Ogawa, Naoki Noguchi, Kazuma Takenaka
(Yokogawa Electric Corporation)

はじめに

ハイブリッド自動車や電気自動車の開発において、快適性向上を目指した車内空間の確保や燃費向上のため、駆動部は軽量化、小型集積化が進められ、性能評価に必要な電流センサを配置する空間の確保が難しくなっている。その一方で、燃費向上のためには、モジュール単体だけでなく組み上げた状態での詳細な評価が必要であり、狭い空間でも配置できる小型で直流から大電流が測れる電流センサへのニーズが高まっている。

狭い空間に配置できる既存の電流センサに Rogowski センサ¹⁾があるが、原理的に直流電流は測定できない。直流電流を測定できる電流センサは、信号磁場収集および雑音磁場除去のために磁気コアを使用しており、コアが測定電流に比して大きくなるため狭い空間への配置ができない²⁾。

本研究では、狭い空間でも 1000Arms 程度の大電流を直流から測定可能な小型電流センサの開発を目的とする。小型化のため磁気コアレスとし、外部磁場の影響を除くため小型磁気シールド内に磁気センサを配置する構造を採用した。大電流の測定ニーズが多く、隣接電流による雑音磁場が大きい三相交流を想定し、電流センサの磁気シールドとして必要と考える S/N 比 100 程度を確保した小型磁気シールドをシミュレーションにより設計した。実際に作製して内部の磁束密度を測定し、S/N 比 100 近くを確保出来たことを報告する。

設計

ANSYS Electronics Desktop の静電磁場ソルバ Maxwell を用い、S/N 比 100 程度を確保でき、なるべく小さい形状を検討した (Fig.1)。①信号：電流 100A による磁場、②雑音：隣接電流が測定電流と同程度の場合に生じる磁場として x, y, z 方向に各 1mT の均一磁場、を設定し計算結果から S/N 比を算出した。シールドがあることで磁束密度分布は歪むが、シールドの中心軸 (y 軸) 上は信号の磁束密度ベクトルが歪まず ($B_x, 0, 0$) となり、最も効率よく信号を測定できることから、磁気素子は y 軸上に配置することとした。シールド形状と素子の y 軸上の位置の調整により、雑音方向によらず S/N 比 100 程度を確保できる小型磁気シールドが設計できた。

実測結果

設計した小型磁気シールドを 78 パーマロイで作製し、内部に磁気素子 (AKM : EQ430L) の感磁軸が x 軸と一致するよう配置し、①信号：電流による磁場、②雑音：Helmholtz coil による x, y, z 方向それぞれの均一磁場、を印加して磁束密度を測定した。測定結果から、信号 100A と雑音 1mT での S/N 比をそれぞれ算出し、全方向の雑音に対して S/N 比 100 程度を確保した小型磁気シールドが作製できることが示された。

参考文献

- 1) <https://cdn.tmi.yokogawa.com/BU7019-30.jp.pdf> (As of Sept. 25, 2020).
- 2) W.F. Ray and R.M. Davis: EPE Journal, 3, 51(1993).

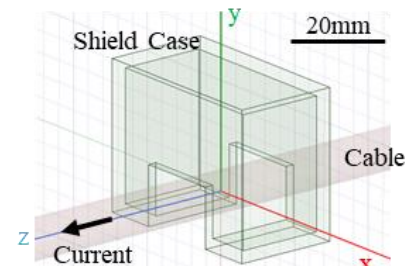


Fig.1 Simulation Model

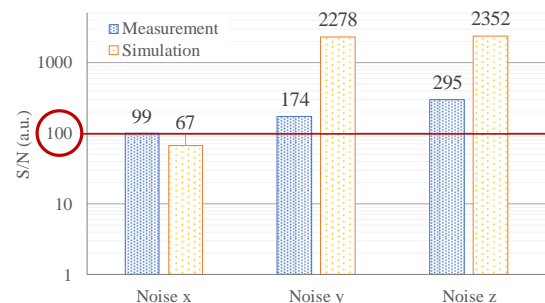


Fig.2 Comparison of simulation and measurement results

多種多様な自動車の磁気ノイズの特性評価

齊藤大介、林実、王璣、堺健司、紀和利彦、塚田啓二
(岡山大学)

Magnetic noise characteristics of a wide variety of automobiles
T.Saito, M.Hayashi, K.Sakai, T.Kiwa, K.Tsukada
(Okayama Univ.)

はじめに

現在、磁気計測技術は幅広い分野で活用されており、屋外で使用される場合も多い。このような場合、環境磁気雑音が測定に与える影響を考慮する必要がある。環境雑音の発生原因の1つとして交通機関が考えられる。そこで、代表的な外部磁場発生要因の一つである自動車が発生する磁気ノイズに着目した。前回の研究では、自動車自体が自発磁化して磁気を発していることが分かった。今回は1種類だけでなく複数の種類の自動車を用意して自動車から発生する磁気ノイズの特性を調査したので報告する。

実験方法

自動車から発せられる磁気ノイズを観測するために、高感度な磁気センサであるAMR (Anisotropic Magnetoresistive) センサを用いた。大きさや形状が異なる4種類の自動車(大型セダン、軽トラック、ミニバン、中型セダン)を用意し、その周りの磁場を測定した。また実際の道路に磁気センサを配置し、多種多様な自動車の磁気ノイズを測定した。

実験結果

Fig.1に、4種類の自動車の周りの磁気ベクトルの様子を示す。Fig.1より、磁場が自動車に入る部分と自動車から出る部分が存在する様子が確認できる。Fig.1の左上図(大型セダン)では自動車の左後輪から右前輪に向かって磁気が流れる様子が確認できる。その他の3つの図でも、それぞれ異なる方向に向かって流れる磁気の様子が確認できる。この結果より、自動車の磁化の方向は一定ではなく、個々の自動車によって異なることが分かった。また各車から発生する磁場強度は、個々の自動車により異なり、車体の大きさとも無関係であることが分かった。

Fig.2に、実際の道路で走行する自動車の磁気ノイズを観測した結果を示す。グラフ上のX、Y、Zはセンサの3軸を表しており、X軸は南向きに、Y軸は東向きに、Z軸は鉛直上向きと一致する。

Fig.2.(a)は、普通自動車と中型トラックを観測した結果である。普通自動車に比べてトラックの磁気ノイズが非常に大きいことが分かる。トラックは積み荷を積んでいる場合もあり、それらが影響を及ぼしている可能性が考えられる。Fig.2.(b)は、大型バスを観測した結果であり、X、Y成分の信号のピークが2つに分かれていることが分かる。バスのエンジンは車体の後方に設置されるのが一般的であり、運転席側とエンジン側とで2つの磁場発生源が存在したことが原因として考えられる。以上の結果より、自動車から発生する磁気ノイズの大きさは数 μT ~数十 μT であり、自動車の速度が40 km/h程度以下において、自動車からの磁気ノイズの周波数帯域は3 Hz程度以下であることがわかった。

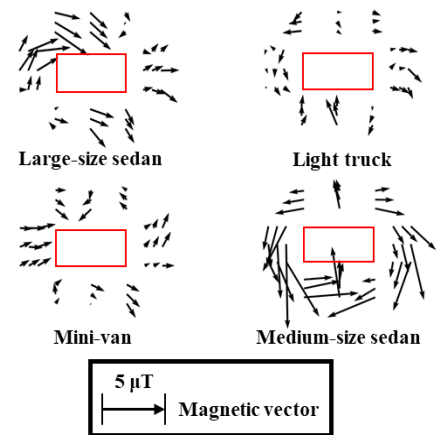


Fig.1 Magnetic field vector around the 4 automobiles

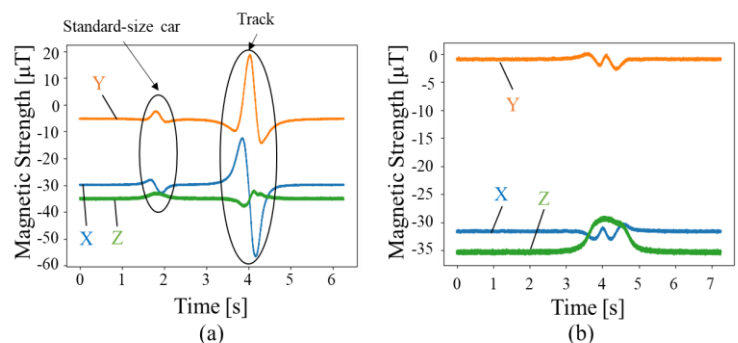


Fig.2 Magnetic noise of (a)one standard-size car and one track and (b)one bus

金属/磁性多層膜による広帯域 direct-on-chip EMI シールド膜

喜々津哲、黒崎義成、岩崎仁志、白鳥聡志、藤田篤史*、西垣寿*、松中繁樹*
((株)東芝、*芝浦メカトロニクス(株))

Wide Band Direct On-chip EMI Shielding Layer with Metallic/Magnetic Multilayer
A. Kikitsu, Y. Kurosaki, H. Iwasaki, S. Shirotori, A. Fujita, H. Nishigaki, S. Matsunaka
(Toshiba Corp., *Shibaura Mechatronics Corp.)

はじめに

半導体素子が高密度に実装された高機能モバイル機器等における電磁波干渉(EMI)の対策として、素子のモールド上に導電率の高い Cu など直接成膜する direct-on-chip EMI シールド膜が検討されている¹⁾。近年、磁性層と金属層の界面での電磁波の多重反射を利用した、磁性層/Cu の積層膜シールドが提案され²⁾、Cu 層単層より高いシールド性能が期待されることが示された²⁾。しかしながらこの原理の実験的な実証は進んでおらず、Cu 単層膜に対する得失はあまり明らかになっていない。そこで本研究では、Ta/ NiFeCuMo 積層軟磁性層を用いた多層シールド膜を検討した。その結果、総厚 1 μ m で Cu 3 μ m を凌駕するシールド性能が得られ、また、1 MHz 以下の領域でも大きなシールド効果が得られる積層構成も見出したので報告する。

実験方法

多層膜サンプルは、芝浦メカトロニクス製スパッタ装置 CCS-1300 を用いてガラス基板上に成膜した。磁性層には Ni₇₇Fe₁₄Cu₅Mo₄ (at.%) ターゲットを用いた。シールド性能は過去の文献²⁾と同様の手法を用い、磁性層の困難軸方向の電磁波に対して測定した。シールド効果 MSE(dB)を $-20\log(\text{透過パワー}/\text{投入パワー})$ で定義し、ネットワークアナライザを用いて周波数依存性を調べた。

結果および検討

Fig.1 に Cu (400 nm)/[Ta (5 nm)/NiFeCuMo (50 nm)]₄/Cu (400 nm) のシールド特性を示す。300-500 MHz の帯域において 3 μ m 厚の Cu よりも大きなシールド効果が得られた。Ta ブレーク層により NiFeCuMo 層の結晶粒が微細化して低保磁力化し、多層膜効果を有効に利用できたためであると思われる。ピーク周波数は FMR 周波数近傍である。

Fig.2 に、総厚 2 μ m の [Cu(100nm)/NiFeCuMo(100nm)]₁₀ のシールド特性を示す。広い帯域において Cu 3 μ m よりもシールド性能が高く、特に 50 MHz 近傍でその効果が顕著である。各層は 100nm 程度と薄いため多重反射のメカニズムはあまり効かず、磁壁共鳴³⁾に関係した別のメカニズムの作用が考えられる。この数 10 MHz の周波数帯は、近年注目を集めている無線給電による EMI の領域であり、本研究の多層膜は GHz からこの帯域までの広い領域に対して有効な手法である。

参考文献

- 1) M. Yamaguchi, et al.: *IEEE Trans. Magn.*, **46**, 2450 (2010)
- 2) K. Yamada et al.: 2011 IEEE International Symposium on EMC, p.432
- 3) S. Chikazumi: *Physics of Magnetism*, Wiley, New York (1995)

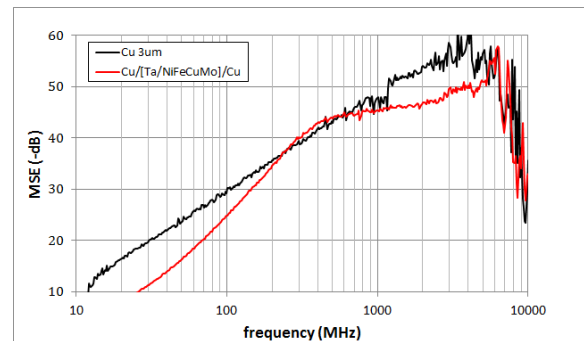


Fig.1 Shield effect of Cu (400)/[Ta (5) /NiFeCuMo (50)]₄/Cu (400) multilayer

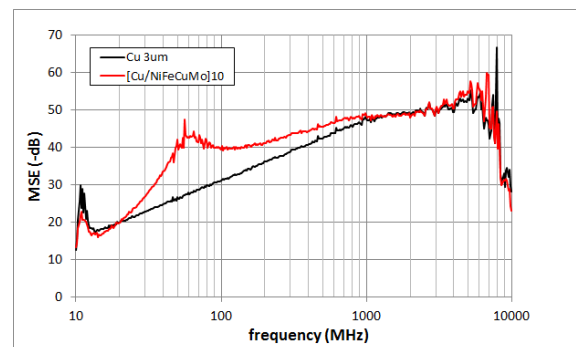


Fig.2 Shield effect of [Cu (100)/NiFeCuMo (100)]₁₀ multilayer

磁性膜を配置した MSL の磁気回路解析によるインダクタンス推定

三上 貴大、室賀 翔、田中 元志
(秋田大学大学院理工学研究科)

Inductance estimation of MSL with magnetic film using magnetic circuit analysis

Takahiro MIKAMI, Sho MURUGA, Motoshi TANAKA
(Graduate School of Engineering Science, Akita University)

1. はじめに

磁性体を用いた電磁ノイズ抑制体 (NSS) を、電子機器に実装するための設計指針の確立が求められている。筆者らは、NSS を配置したマイクロストリップ線路 (MSL) について、その断面を磁気回路解析し、等価電気回路を推定する方法を提案した^{1,2)}。しかし、磁気回路の構築のためには、MSL 断面の磁束密度分布を電磁界シミュレーションにより算出する必要があった。そこで、NSS の例として Co-Zr-Nb 膜を配置した MSL を対象とし、断面の磁束密度分布を解析的に導出して、そのインダクタンスを推定する手法を検討した。

2. 特性長の解析的導出

解析対象²⁾は、比誘電率 9.8 のアルミナ基板上に試作した平行 2 導体 MSL とした。2 本の MSL は、それぞれ線路長 10 mm、幅 95 μm であり、線路間の距離は 50 μm である。1 本の MSL をネットワークアナライザを接続して伝送特性を測定し、他方の両端は 50 Ω の抵抗で終端させた。Co-Zr-Nb 膜は、低周波で透磁率約 700、材料固有の強磁性共鳴 (FMR) 周波数約 1 GHz、抵抗率 120 $\mu\Omega\text{cm}$ である。

図 1 に Co-Zr-Nb 膜を配置した MSL の磁束経路を示す²⁾。 φ_0 は全磁束、 φ_m は磁性体内を流れる磁束を表す。また、 w_m は、磁性膜内の磁束密度の値が、信号線端部直上の磁性膜内の磁束密度の値の約 37% ($=1/e$, e はネイピア数) 以上である範囲を示し、磁気回路構築に必要である。Co-Zr-Nb 膜内の磁束密度に関する微分方程式^{3,4)}より、解析的に w_m を算出した。

$$w_m = \sqrt{\frac{g}{1/\mu_{r1}h + a/\mu_r t}} \quad (1)$$

ただし、 μ_{r1} は真空中の比透磁率、 μ_r は Co-Zr-Nb 膜の比透磁率、 g は誘電体と磁性体の距離 ($g = t_s + t_d$)、 $a = \varphi_m/\varphi_0$ である。この磁気回路を図 2 のように示せば、 a は (2) 式で表せる。

$$a = \frac{\varphi_m}{\varphi_0} = \frac{R_a R_d}{R_a R_d + R_a R_m + R_d R_m} \quad (2)$$

ここで、 R_a は w_m の関数である。(2) 式を (1) 式に代入して、 w_m を導出した。導出した w_m は、電磁界解析で求めた値とおおよそ一致した。

3. インダクタンスの推定

磁気回路解析より推定したインダクタンスを実験値と比較して図 3 に示す。推定値は実験値とおおよそ一致し、2.7 GHz 付近の実効的な FMR 周波数で低下し、極小となった後に徐々に一定値に漸近した。これは、透磁率の実部の影響と考えられる。一方、実験値は 6 GHz 付近から低下し、負の値を示すが、これは波長共振による影響と考えられる。

4. おわりに

Co-Zr-Nb 膜を配置した MSL のインダクタンスを解析的に推定可能であることを示した。今後、設計指針の構築を検討する。

謝辞 本研究の一部は、科研費 20K04497、村田学術振興財団、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究の助成を受けた。

参考文献 1) S. Muroga, *IEEE Trans. Magn.*, 54(6), #8002704, 2017. 2) 三上他, 信学技報, EMCJ2019-28, 2019.
3) R. Jones, *IEEE Trans. Magn.*, 14(5), p.509, 1978. 4) J. Ma et al., *IEEE Trans. Magn.*, 54(6), #2800404, 2018.

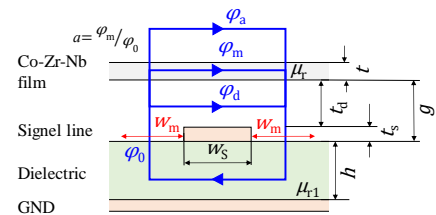


図 1 MSL 断面の磁束経路

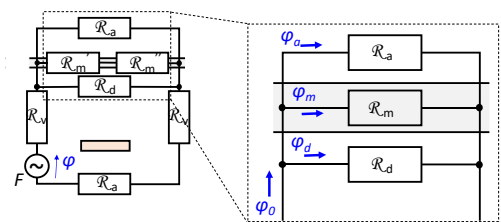


図 2 MSL 断面の磁気回路

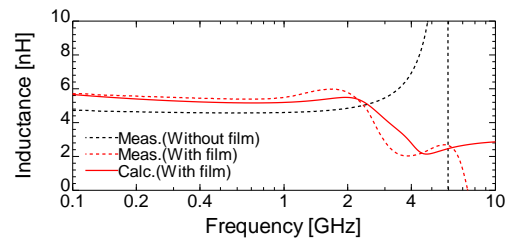


図 3 インダクタンスの推定

逆磁歪効果型歪センサの高周波振動特性測定装置の構築

高野凌、栢修一郎、石山和志 (東北大学)、星貴之 (ピクシーダストテクノロジーズ)

Construction of high frequency vibration characteristics measurement
system of inverse magnetostrictive effect type strain sensor

R. Takano, S. Hashi, K. Ishiyama (Tohoku Univ.), T. Hoshi (Pixie Dust Technologies)

はじめに

これまで我々は、振動センサとして磁歪膜と導体膜の積層構造からなる逆磁歪効果を用いた歪センサを応用する研究を行ってきた。先行研究においては2kHzまでの振動周波数を検知できるセンサとしての特性を測定したり。しかし、我々のセンサは検出回路のキャリア周波数が高く、さらに薄膜であり渦電流損が小さいことから、更に高い振動周波数帯域でも特性を損なわず数 ppm オーダーの歪を検出することが可能だと推測される。これは、応答性の良好なセンサが実現できることを意味し、繊細かつ高速で稼働する産業用機械などの制御への応用が期待される。そこで、100kHz程度までの振動検知特性を評価する装置の構築に取り組んだ。本稿では、振動源として20kHz近傍を共振周波数とするランジュバン型振動子を用いた装置について検討結果を述べる。装置は、歪センサを張り付けたカンチレバーの先端を振動子によって強制振動させる手法になっている。先行研究ではカンチレバーを自由振動させたためカンチレバーの機械的共振周波数以上での計測が困難であった。また、圧電素子を用いた方式では周波数をある程度高くすることは出来たが一軸ひずみの印加に難点があった。しかし本稿で示すようにカンチレバーの先端を振動子で振動させる手法であれば20kHz程度の周波数の歪を一軸方向に印加することが可能である。

実験方法

Fig. 1 に振動印加装置の模式図を示す。振動子を固定治具によって一定の高さに保持している。振動子にファンクションジェネレータとパワーアンプを用いて交流電圧を与えることで固定部分に対して上面が振動(変位)する。センサは接着剤でカンチレバー型振動板(Metal plate)に接着されており、振動板の自由端は振動子に接着されている。これによりセンサは振動子により作り出される振動板の歪みを計測できる。

実験結果及び考察

レーザ変位計を用いて測定した振動子単体の振動特性を Fig. 2 に示す。振動子の共振周波数近傍においてスペック通りの振幅($30\mu\text{m}_{p-p}$)が得られた。しかし、Fig. 1 のように振動板を接着すると振幅は $7\mu\text{m}_{p-p}$ 程に低下することが確認された。用いた振動板は厚さ 1mm のステンレス板であり、それが負荷

となったことが考えられるが詳細は不明である。しかし、先行研究によって求められているセンサの感度から試算するとセンサ特性評価のために十分な振動振幅が得られており、20kHz近傍でのセンサ特性が評価可能な装置が構築できたとと言える。この装置を用いたセンサ特性評価結果については、学術講演会で報告する。

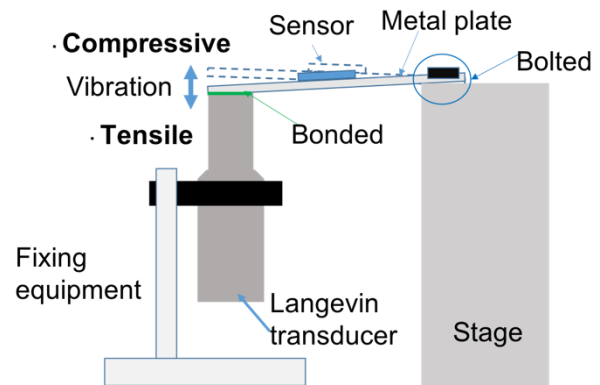


Fig. 1 Design of vibration testing equipment.

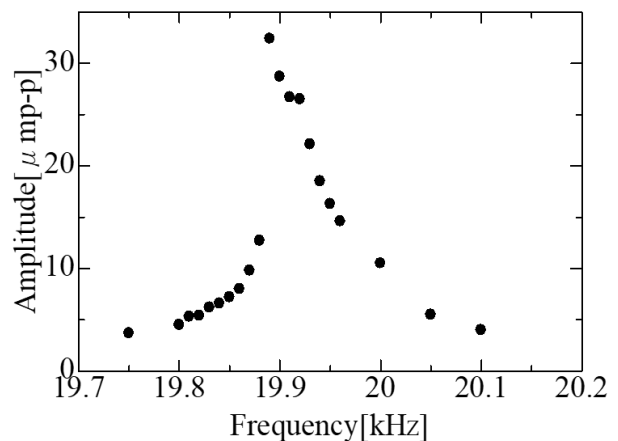


Fig. 2 Amplitude of langevin transducer.

参考文献

- 1) 曾良, 栢, 石山, 日本磁気学会論文特集号, 4, 41 (2020).

マイクロストリップ線路型プローブによる 透磁率・誘電率の同時測定

能澤昂平, 高橋翔平, 沖田和彦, トンタットロイ, 藪上信, 佐藤光晴, 杉本諭
(東北大学)

Simultaneous Measurement of Permeability and Permittivity Using a Microstrip Line-Type Probe
K. Nozawa, S. Takahashi, K. Okita, L. Tonthat, S. Yabukami, M. Sato, S. Sugimoto
(Tohoku University)

はじめに

昨今の高周波材料の応用に際し、高周波における誘電率及び透磁率を測定することは重要である。著者らはフレキシブルマイクロストリップ線路型(MSL)プローブを開発し、透磁率計測方法を報告した¹⁾。本稿では同プローブを用いた透磁率と誘電率の同時測定方法を提案する。

計測方法

Fig. 1に測定系の概要図を示す。サンプルをMSLに近接してヘルムホルツコイル内に配置する。誘電率が磁界強度に依存しないことを仮定し、強磁界(2 T)中でキャリブレーションして磁界を減じて測定することで、透磁率の寄与分のみ反映された透過係数 S_{21} を得る。次にサンプルを取り除いて測定することで誘電率の寄与分を含む S_{21} を得る。透磁率が強磁界中で低下することから、強磁界中の測定との差分を取ることで誘電率の寄与分のみ含む S_{21} を得る。

伝送線路の等価回路を用いて S_{21} をそれぞれインピーダンス $Z=2Z_0(1-S_{21})/S_{21}$ 及びアドミタンス $Y=2/Z_0(1-S_{21})/S_{21}$ に換算する。有限要素法を用いてインダクタンス $L=-jZ/\omega$ と比透磁率 μ_r' 及びキャパシタンス $C=-jY/\omega$ と比誘電率 ϵ_r' の関係を計算し、これを用いて μ_r と ϵ_r を求める。なお透磁率の算出部分は既報¹⁾と同様である。

計測結果

測定対象はFe+Fe₃O₄(50 vol%)-epoxyからなる混合粉末樹脂複合シート²⁾とした。Fig. 2, 3に透磁率及び誘電率の測定結果を示した。透磁率は二つの共鳴が確認でき、異なる層の損失が反映されていると考えられる。また高周波部分で μ_r' が負の値を取るのは、キャリブレーション時の信号が反転している為である。誘電率は透磁率との分離が出来ており、同時測定が可能であることを示唆する結果となった。

謝辞

本研究の一部はビジネス・インキュベーション・プログラムの研究成果である。本研究の一部は総務省電波資源拡大のための研究開発及び異システム間

の周波数共用技術の高度化に関する研究開発「不要電波の高分解能計測・解析技術を活用したノイズ抑制技術の研究開発」の成果である。

参考文献

- 1) S. Yabukami et al., *IEEE Trans. Mag.*, vol. 56 (2020).
- 2) M. Sato et al., *Autumn Meeting of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 1-49A(V) (2020).

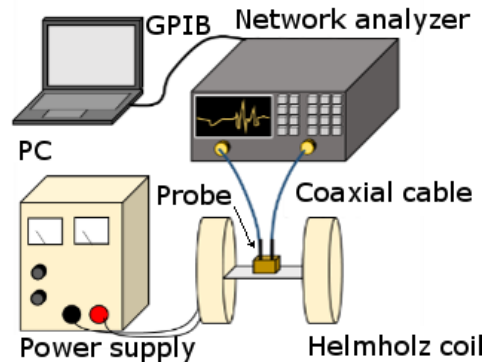


Fig. 1 Schematic of measurement system.

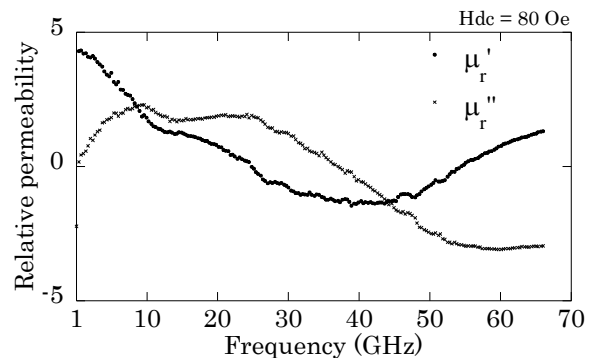


Fig. 2 Relative permeability of Fe+Fe₃O₄-epoxy.

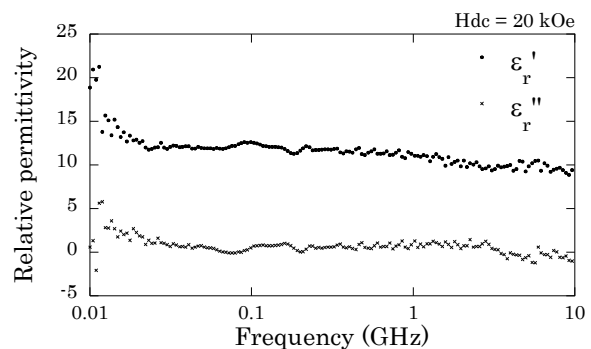


Fig. 3 Relative permittivity of Fe+Fe₃O₄-epoxy.

数 MHz の高周波磁場中での全磁化過程測定

Baptiste Vallet-Simond, 吉田宏一、萬年智介、磯部高範、○柳原英人
(筑波大学)

Full ac-hysteresis measurements in high frequency magnetic field of several MHz

Baptiste Vallet-Simond, Koichi Yoshida, Tomoyuki Mannen, Takanori Isobe, and Hideto Yanagihara
(Univ. of Tsukuba)

はじめに

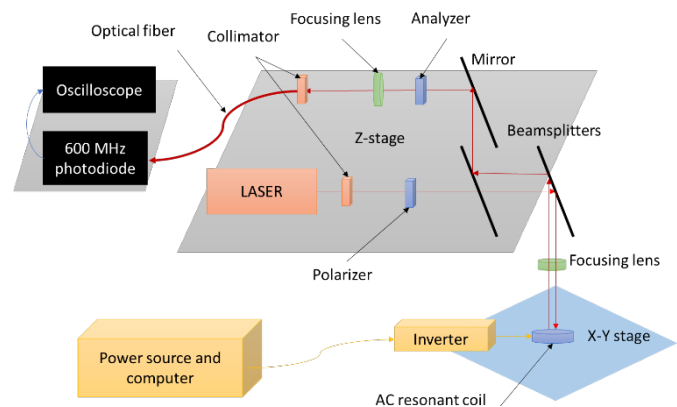
新たな半導体材料の登場によって、パワー半導体がより高い周波数で動作するようになってきている。これに伴いコンデンサやインダクタといった受動素子もより高い周波数において低損失で動作することが要請される。通常インダクタのコア材料の磁気特性評価には、BH ループトレーサやネットワークアナライザが用いられるが、数 MHz から数十 MHz の周波数領域において試験体を飽和させるのに十分なほど励磁することは難しく、全磁化過程を測定、評価することは容易ではない。そこで、この周波数領域において軟磁性体を飽和させるのに十分な磁場を発生しうる電磁石を開発¹⁾し、磁気光学効果 (MOKE) によって全磁化過程の測定を試みた。

磁場発生装置

電磁石は、多段の LC 直列回路により構成されたソレノイドコイルを 16 層プリント基板上に作製したものをを用いた。この LC 直列共振回路をインバータによって駆動することで高周波磁場を発生させた。LC 共振回路であるため、コンデンサの容量を変えることで共振周波数を変えることができる。今回は 1 MHz と 5 MHz の共振周波数を選択し、これに最大 32 A の電流を流すことで 0.23 T の磁束密度をソレノイドコイルの中心付近で発生させた。尚ソレノイドコイルの直径および長さはどちらも 2.0 mm である。

磁化過程測定 (MOKE 測定)

交流磁場下における磁化過程を測定するために、MOKE 効果が大きくかつ膜面垂直方向に磁化させやすい磁性体として、有機金属熱分解法によって GGG(001)上に成長させた厚さ約 450 nm の $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 薄膜 (オフダイアゴナル社製) を試料とした。MOKE 測定のセットアップを右図に示す。高周波磁場下での測定のため変調法は用いず、検光子を抜けてきた光の強度をデジタル・オシロスコープを用いて記録した。一方ソレノイドコイルに流れる電流を測定しこれを換算することで中心付近の磁場強度とした。



結果

振動試料型磁力計を用いて得られた磁化過程は、直流磁場下で得られた MOKE 測定による磁化過程と良い一致を示した。このとき飽和磁場 $\mu_0 H_s$ および保磁力 $\mu_0 H_c$ はそれぞれおよそ 0.15 T および 0.010 T であった。一方 1 MHz での $\mu_0 H_c$ はおよそ 0.030 T となり、さらに 5 MHz では 0.10 T に増加していることが確認された。

参考文献

- 1) 吉田宏一他、第 43 回日本磁気学会学術講演会、26aPS-33。

伝送線路中の高周波電流可視化に関する研究

石田 竜太、栢 修一郎、石山 和志
(東北大学電気通信研究所)

Research on visualization of high-frequency currents in transmission lines

R. Ishida, S. Hashi, K. Ishiyama

(Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ.)

1. はじめに

高周波近傍磁界計測プローブとして一般的にループコイルが用いられているが、コイル及びケーブルが金属製のため本来の磁界を乱してしまう欠点が存在する¹⁾。そこで本研究では、従来法と比べ磁界を乱しにくい磁気光学結晶のガーネットとパルスレーザーを利用したストロボ法を用いて、低侵襲に交流磁界の位相・強度を測定可能な計測システム²⁾について検討を行っている。本稿では位相情報を含んだ磁界測定が可能である点を利用し、伝送線路上を流れる高周波電流より発生する磁界を測定することでGHz帯の電流の可視化を試みた結果を報告する。

2. 実験方法

本研究における磁界測定装置の概略を Fig. 1 に示す。測定対象であるマイクロストリップ線路(MSL)近傍に配置したガーネットへレーザー光を垂直に照射し反射光を検出する。反射光は磁気光学効果により、ガーネットへ印加される垂直磁界強度に依存した偏向状態の変化が起こる。この偏向状態の変化を検出することで、垂直成分の磁界強度測定をおこなう。また本測定手法ではストロボ法を用いて測定磁界とパルスレーザーの発振タイミングを同期しているため、被測定交流磁界の特定位相の測定が可能となっている。これらの手法を用いて位相掃引をしつつ、交流磁界分布を測定することでMSLを流れる高周波電流の可視化をおこなう。実験条件として終端がインピーダンス整合され反射波がない状態及びオープン、ショートとの反射が起こり、定在波が存在する場合の3種類の測定をおこなった。

3. 実験結果

MSLに17 dBm, 6 GHzのRF信号を印加し、終端をインピーダンス整合した場合の各位相における磁界分布の測定結果と、そこから抽出したMSLエッジ近傍(点線部)の磁界計測結果を Fig. 2 に示す。測定対象であるMSLは灰色の線で示されており、MSLエッジ近傍に現れる磁界強度のピーク箇所が位相差に対応して移動している様子が確認できる。磁界は電流に依存するため、波長及び位相差に対応したピーク位置の変化の様子から、高周波電流の流れが可視化できている。

参考文献

- 1) M. Takahashi, K. Kawasaki, H. Ohba, T. Ikenaga, H. Ota, T. Orikasa, N. Adachi, K. Ishiyama, and K. I. Arai: *J. Appl. Phys.*, **107**, 09E711 (2010).
- 2) H. Nasuno, S. Hashi, and K. Ishiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 4011 (2011).

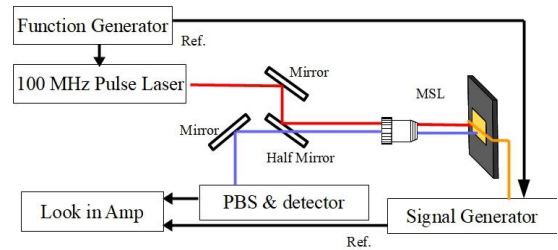


Fig. 1 Schematic of magnetic field measuring system

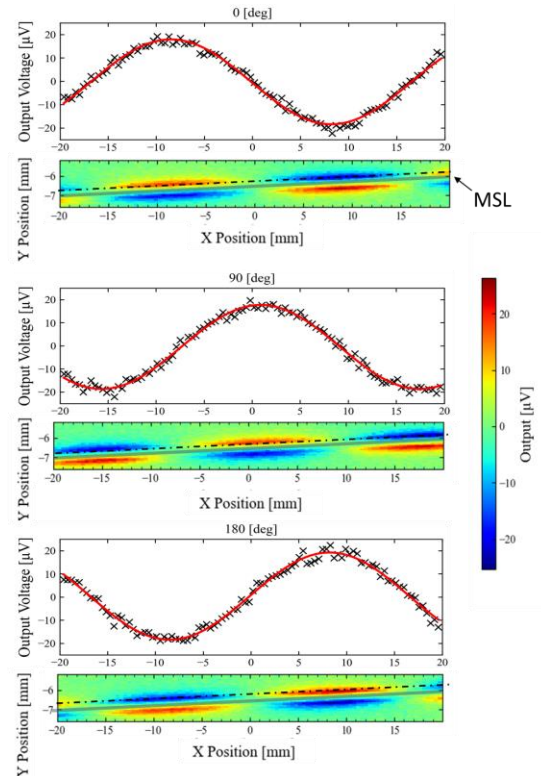


Fig. 2 Diagram of Magnetic field distribution