

## 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

レーザー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。

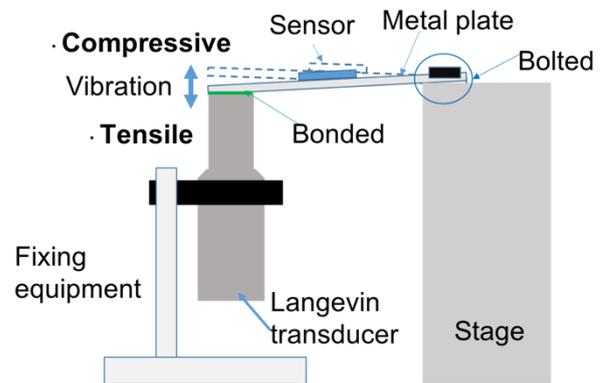


Fig. 1 Design of vibration testing equipment.

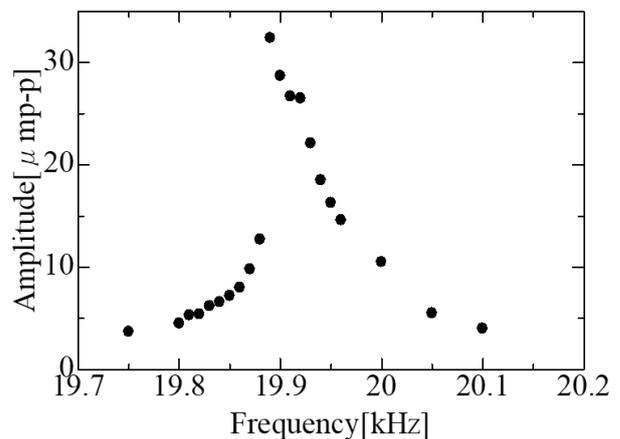


Fig. 2 Amplitude of langevin transducer.

### 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<sup>1)</sup>。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 $\mu_r'$ 及びキャパシタンス $C=-jY/\omega$ と比誘電率 $\epsilon_r'$ の関係を計算し、これを用いて $\mu_r$ と $\epsilon_r$ を求める。なお透磁率の算出部分は既報<sup>1)</sup>と同様である。

## 計測結果

測定対象はFe+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(50 vol%)-epoxyからなる混合粉末樹脂複合シート<sup>2)</sup>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 $\mu_r'$ 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).

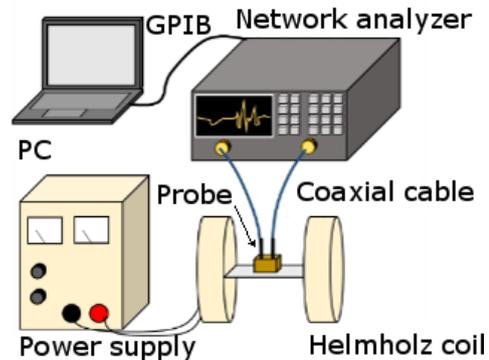


Fig. 1 Schematic of measurement system.

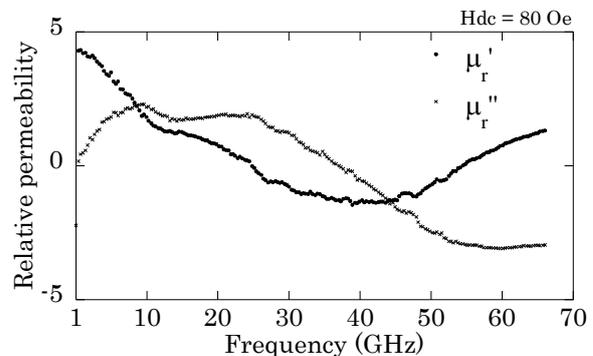


Fig. 2 Relative permeability of Fe+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-epoxy.

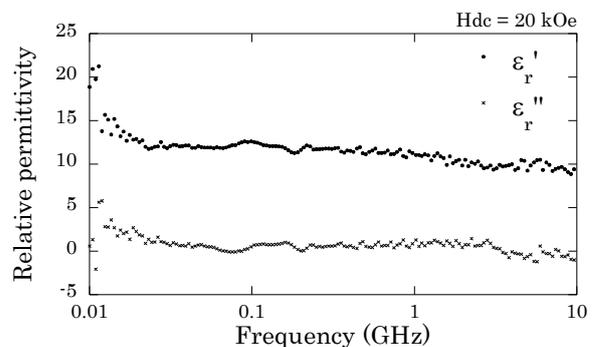


Fig. 3 Relative permittivity of Fe+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-epoxy.

## 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

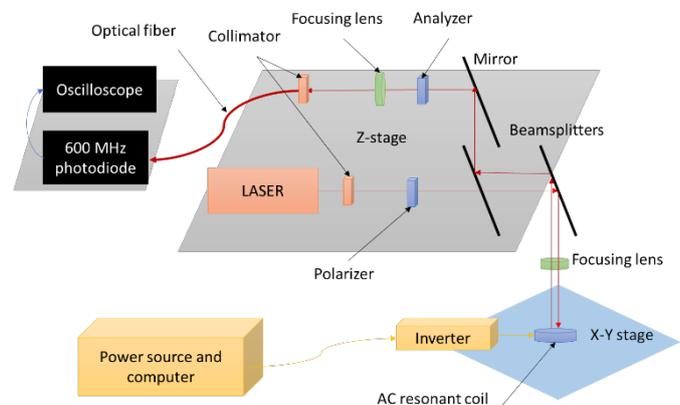
新たな半導体材料の登場によって、パワー半導体がより高い周波数で動作するようになってきている。これに伴いコンデンサやインダクタといった受動素子もより高い周波数において低損失で動作することが要請される。通常インダクタのコア材料の磁気特性評価には、BH ループトレーサやネットワークアナライザが用いられるが、数 MHz から数十 MHz の周波数領域において試験体を飽和させるのに十分なほど励磁することは難しく、全磁化過程を測定、評価することは容易ではない。そこで、この周波数領域において軟磁性体を飽和させるのに十分な磁場を発生しうる電磁石を開発<sup>1)</sup>し、磁気光学効果 (MOKE) に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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>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).

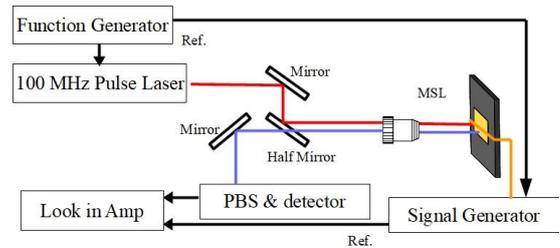


Fig. 1 Schematic of magnetic field measuring system

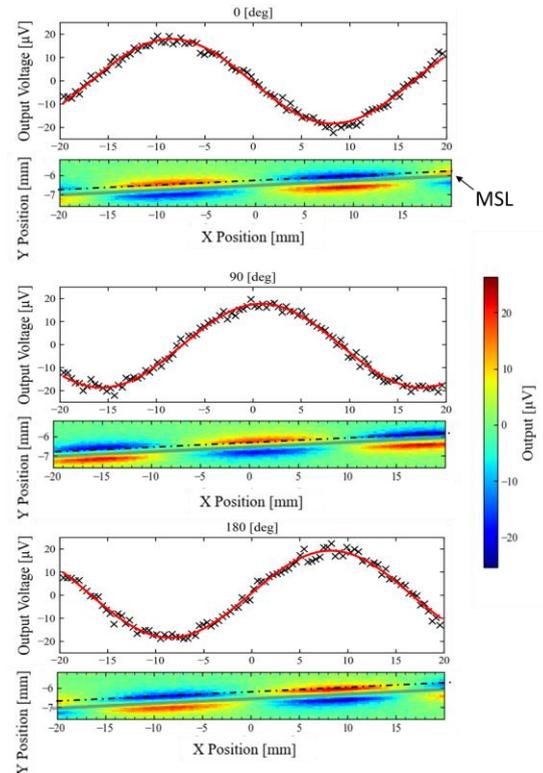


Fig. 2 Diagram of Magnetic field distribution