

## 二層成形した磁性複合材の界面層の誘電率・透磁率推定

三橋敏史, 三浦健司, 長田洋, 関野登, 小林正彦, 木口実, 大友祐晋  
(岩手大, 森林総研, エア・ウォーター・エコロッカ株式会社)

Estimation of permittivity and permeability of interlayer for double-layered magnetic composites

T. Mitsuhashi, K. Miura, H. Osada, N. Sekino, M. Kobayashi, M. Kiguchi, Y. Ohtomo  
(Iwate University, Forestry and Forest Products Research Institute, Air Water Ecoroca Inc.)

### はじめに

再生プラスチック・磁性粉・木粉等を混練することで電波吸収するための磁気・誘電損失を付与した混練型 WPC (Wood Plastic Composites) が提案されている<sup>1)</sup>。混練型 WPC 製造過程で用いられているプラスチック多層成形技術は、電波吸収体の広帯域性や、整合の容易さ、意匠性の付加等においても有効な技術であると考えられるが、二層成形時において生じる界面凹凸の電磁特性に対する影響が懸念される。本研究では、簡易的に作製した磁性複合材二層成形体の界面凹凸部分の誘電率・透磁率を S パラメータ解析によって推定することを試みた。

### 試料作製と透磁率・誘電率推定手法

母材がポリプロピレン、混合媒質が Mn-Zn フェライト磁性粉の複合材料において、圧密前の磁性粉体積割合が 5% (M5) と 40% (M40) の二種類の平板型成形体を準備し、それらを重ねて熱圧縮することで平板二層型成形体を作製した。外観から、M5 層と M40 層の厚さ (平均値) はそれぞれ、4.16 mm, 3.15 mm であったが、界面の凹凸が認められた。その凹凸部を界面層としたとき、外観写真からその界面層厚さはおよそ 0.28 mm と見積もられた。二層型成形体と M5, M40 単層の複素比誘電率と複素比透磁率は、VNA で同軸管法を用いて測定した S パラメータに Nicolson-Ross 法を適用することで求められた。界面層の S パラメータは、二層型成形体の S パラメータから界面層以外の M5 層, M40 層部分の成分を取り除くディエンベディング (De-embedding) 手法により推定された。具体的には、二層成形体の S 行列を T 行列に変換し、T 行列の両側から M5 の T の逆行列と M40 の T の逆行列を乗ずることにより、界面層の T 行列を求めた。その後、S 行列に再度変換し、均質材料と同様に Nicolson-Ross 法を適用した。

### 実験結果

Fig. 1 には、本手法により求めた界面層の誘電率実部を示す。算出された界面層の誘電率実部は M5 層, M40 層の誘電率実部より高い値を示した。他の定数 (透磁率実部, 誘電率虚部, および透磁率虚部) は誘電率実部のような大きな違いは見られなかった。測定精度に関してまだ改善の必要があると考えられるが、この手法による結果から、界面層における誘電率実部は二層のものより相当大きな結果であったため、界面の凹凸による電界の擾乱の発生などの電磁的な現象が関わっていると考えられる。

### 参考文献

- 1) 三浦他, 第 63 回日本木材学会大会研究発表要旨集, I28-P-AM04 (2013) .

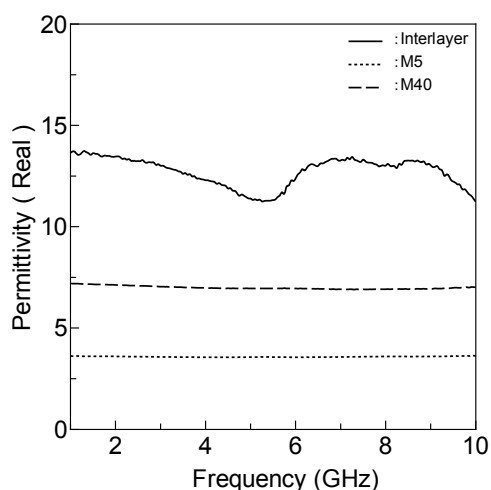


Fig. 1 M5, M40 とディエンベディング法により求められた界面層の誘電率実部

## マイクロストリップ型プローブによる極薄膜透磁率評価

楠 洗介, 藪上 信\*, 小澤哲也\*, 植竹宏明\*, 山田 洋, 宮澤 安範\*\*, 内海 良一\*\*, 島田 寛\*\*\*  
(仙台高等専門学校, \*東北学院大学, \*\*東栄科学産業, \*\*\*東北大学)

Permeability measurement of magnetic thin film by microstrip probe

K. Kusunoki, S. Yabukami\*, T. Ozawa\*, H. Uetake\*, H. Yamada, Y. Miyazawa\*\*, R Utsumi\*\*, Y. Shimada\*\*\*  
(Sendai National Collage of Technology, \*Tohoku Gakuin University, \*\*Toei Scientific Industrial co., ltd, \*\*\*Tohoku University)

**1 はじめに** インピーダンス整合を考慮したマイクロストリップ型プローブを磁性膜に近接させることで、非破壊に数 nm 程度の極薄膜の透磁率計測を試みた。

**2 計測方法** Fig. 1 は計測システムの構成、及び磁性薄膜の配置を模式的に示した図である。プローブは2本のセミリジットケーブルと直線マイクロストリップ線路で構成されている。磁性薄膜にレジスト(厚さ約 4 μm)を塗布し、マイクロストリップ導体を磁性薄膜に近接配置することで透磁率を評価する。直線マイクロストリップ線路に流れる高周波電流は線路の幅方向に高周波磁界を励磁することになるため、困難軸方向の透磁率が高周波インピーダンスに対応する。プローブは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 8722ES)に接続し、薄膜の容易軸方向へ約 1147 Oe の直流磁界を印加し、飽和させた状態でネットワークアナライザをキャリブレーションする。その後、直流磁界を解除して透過係数( $S_{21}$ )を測定する。その透過係数を用いて、(1)式よりインピーダンスを算出する。線路に高周波電流が流れると、渦電流が表皮効果によって磁性膜の膜厚方向へ一次元的に偏ること、インピーダンス  $Z_s$  が決定されることを仮定し、(2)、(3)式を用いて Newton-Raphson 法により、複素透磁率を最適化する<sup>1)</sup>。

$$Z_s = 50(1 - S_{21})/S_{21} \quad (1)$$

$$Z_s = \frac{k_s \rho l}{2w} \coth\left(\frac{k_s t}{2}\right) \quad (2)$$

$$k_s = \frac{(1+j)}{\sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}}} \quad (3)$$

ただし、 $\rho$ は抵抗率、 $l$ は試料長さ、 $w$ は試料幅、 $t$ は膜厚、 $f$ は周波数、 $\mu_r$ は複素比透磁率である。

**3 計測結果** Fig. 2 に CoNbZr 薄膜(25 mm × 25 mm, 厚さ 5 nm) にレジスト(約 4 μm 厚)を塗布した状態で透過係数を測定し、透磁率へ換算した結果を示す。CoNbZr 薄膜は RF スパッタ法により成膜した。磁化容易軸へ約 100 Oe の直流磁界を印加して、

透過係数の測定を行った。●○は最適化法により求めた測定値であり、点線、及び破線は LLG 方程式と渦電流を考慮した理論値<sup>2)</sup>である。強磁性共鳴の周波数付近を含めて、理論値及び測定値は約 7 GHz まで概ね一致し、極薄膜の透磁率を測定出来ていることが確認できる。

**謝辞** 本研究の一部は JST 復興促進プログラムの成果である。

**参考文献** 1) T. Kimura, S. Yabukami, T. Ozawa, Y. Miyazawa, H. Kenju, and Y. Shimada, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, **38**, 87 (2014).  
2) Y. Shimada, J. Numazawa, Y. Yoneda and A. Hosono, *J. Magn. Soc. Jpn.* **15**, 327 (1991).

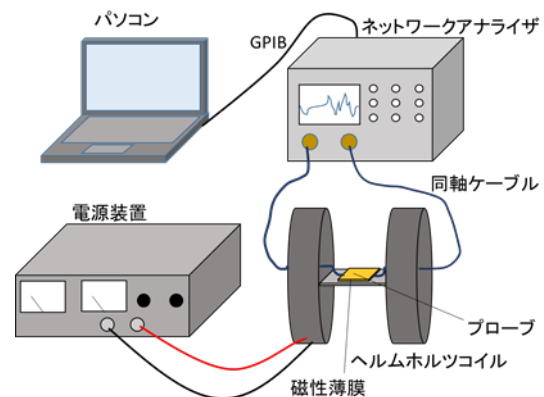


Fig. 1 Schematic of measurement system.

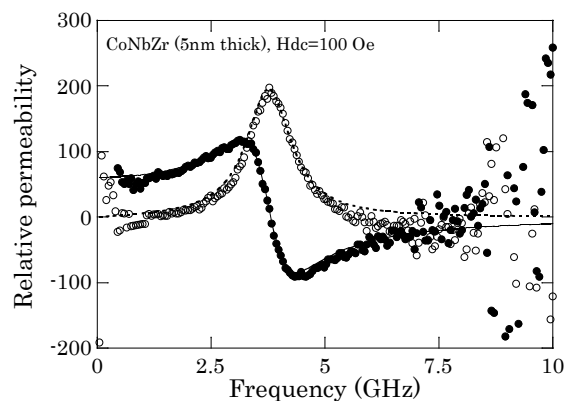


Fig. 2 Permeability of CoZrNb film(25 mm × 25 mm, 5nm thick).

# 基板の誘電率を考慮した短絡MSLによる磁性薄膜の透磁率測定

武田 茂, 発知富夫\*, 本村貞美\*, 鈴木洋介\*  
(有) Magnotech, \*キーコム 株

Permeability measurement of magnetic thin film by the shielded short-circuited MSL considering the substrate permittivity

S. Takeda, T. Hotchi\*, S. Motomura\*, and H. Suzuki\*  
(Magnotech, Ltd., \*KEYCOM Corp.)

**はじめに** 短絡MSL(Micro Strip Line)を用いて磁性薄膜の透磁率を測定する方法はよく知られている<sup>1)</sup>。この場合、基板の誘電率の影響を無視できない。今回、この影響を積極的に取り入れた解析方法を開発した。

**実験方法** Fig.1 に測定治具の断面図を示す。ここで、図中の諸元は、 $h_1=0.6\text{mm}$ ,  $h_2=3.7\text{mm}$ ,  $l=5\text{mm}$ ,  $d=0.5\text{mm}$  である。 $t$ は膜厚である。磁性薄膜の面は地導体に接している。感度を上げるためには、 $h_1$ を $d$ にできるだけ近づける必要がある。結果として、コネクターから見たアドミタンスは基板の誘電率の影響を強く受ける。まず、試料無し状態でVNAによりコネクターからの反射パラメータ  $S_{11o}$  を測定する。次に、試料を装荷し、静磁界(5kOe)を紙面に垂直方向に印加して、 $S_{11o}$  を測定する。そして、静磁界を取り除き、 $S_{11s}$  を測定する。

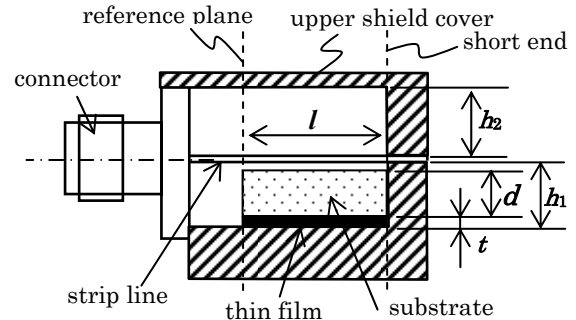


Fig.1 Cross sectional drawing of shielded short-circuited microstrip line with magnetic thin film,

**解析方法** 解析の基本的手法は集中定数近似に従う<sup>2)</sup>。 $S_{11o}$ と $S_{11s}$ から試料が置かれている部分 $l$ の実効誘電率 $\epsilon_{\text{eff}}$ を導き出す。次に、 $\epsilon_{\text{eff}}$ を考慮して、 $S_{11o}$ と $S_{11s}$ から実効透磁率 $\mu_{\text{eff}}$ を求める。磁性薄膜の $l$ 部分に対する結合係数を $\eta$ とすると<sup>3)</sup>、薄膜の複素透磁率 $\mu=\mu'-j\mu''$ は、 $\mu'=(\mu'_{\text{eff}}-1)/\eta+1$ ,  $\mu''=\mu''_{\text{eff}}/\eta$ である。最後に、 $\beta l=2\pi/\lambda=2\pi(\epsilon_{\text{eff}}\mu_{\text{eff}})^{1/2}l/\lambda$ ,  $<1.4$  を用いて、測定結果が集中定数近似内にあるかどうかの判定を行う<sup>2)</sup>。この範囲内にある場合は、測定結果は $\pm 5\%$ の誤差内にある。1.4を超えても、誤差は増えるが測定結果の定性的な議論はある程度可能である。

**実験結果** Fig.2 に実効誘電率 $\epsilon_{\text{eff}}$ と実効透磁率 $\mu_{\text{eff}}$ の測定結果及び判定結果 $\beta l$ を示す。 $\beta l$ は 10GHzまで 1.4以下であり集中定数近似が成立している。Fig.3 に実際の磁性薄膜の透磁率の測定結果を示す。

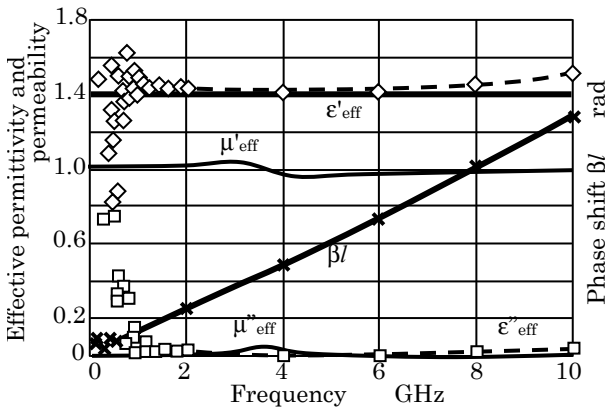


Fig.2 The measurement results of  $\epsilon_{\text{eff}}$ ,  $\mu_{\text{eff}}$ , and  $\beta l$  of test fixture with the magnetic thin film on 5mm square glass substrate of 500 $\mu\text{m}$  thickness,

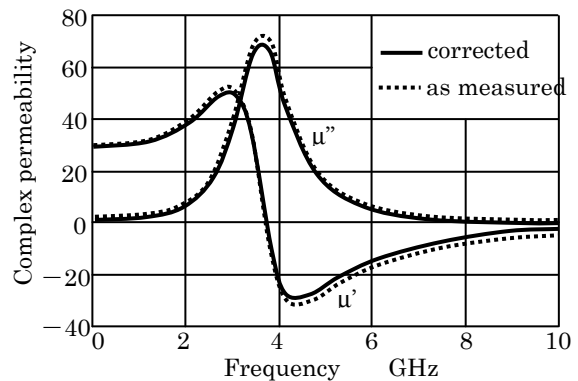


Fig.3 The measured complex permeability of magnetic thin film with 1.45 $\mu\text{m}$  thickness on 5mm square glass substrate with 500 $\mu\text{m}$  thickness (prepared by H.Kijima).

最後に、興味深い磁気特性を有する磁性薄膜を提供いただきました東北大学 青木(旧姓木島)英恵博士、電磁材料研究所 直江正幸博士、中央大学 川井哲郎研究員に感謝申し上げます。

**参考文献**

- 1) D.Pain, M.Ledieu, O.Acher, L.Adenot, and F.Fuerverger, *J. Appl. Phys.*, **85**, 5151 (1999),
- 2) S. Takeda, S. Motomura, T. Hotch, and H. Suzuki, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 116-120(2015),
- 3) S. Takeda, S. Motomura, T. Hotch, and H. Suzuki, *J. Jpn. Soc. of Powder and Powder Metallurgy*, Vol.61, (2014), No.S1, pp.S303-S307,

## Measurement of complex permeability of Co- and Ti-substituted Sr-M by short-circuited coaxial transmission line method

Ranjit Sai,<sup>1</sup> Shigeru Takeda,<sup>2</sup> Yasushi Endo,<sup>1</sup> Hanae Aoki<sup>1</sup> and Masahiro Yamaguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Tohoku University, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan.

<sup>2</sup>Magnontech Ltd., □787-16 Juroken, Kumagawa, saitama, 360-0846, Japan

The recent trend of mobile communication technology directs the usage of X-band (8-12 GHz) frequencies in near future. As a result, the study of various hexaferrite materials, owing to their moderate permeability and very low loss, has surged up over the last few years,<sup>1</sup> while the challenging task of accurate measurement of magnetic characteristics beyond 10 GHz has also attracted a lot of interest. Among various measurement techniques, non-resonant type measurement with the help of simple transmission line offers easy, accurate and broadband measurement. In this report, high frequency (up to 30 GHz) magnetic characterization of Co- and Ti- substituted Sr-based M-type hexaferrite particles (SrCoTiFe<sub>10</sub>O<sub>19</sub>, will be called SrCoTiM hereafter) is demonstrated by adopting coaxial transmission line based measurement technique. Instead of the usual lumped element approximation that induce large model errors in case of measurements beyond a few GHz, the new lumped element expression of short-circuited transmission line is used to restrict the model error within permissible limit.<sup>2</sup>

SrCoTiM powder was procured and mixed with epoxy resin (at 5:1 volume ratio in favor of ferrite) to make a semi solid paste, which was then used to form a thin layer of ~200 μm. A toroid-shaped sample with inner and outer diameter of 3 mm and 7 mm respectively was punched out from that thin sheet of ferrite. Frequency dispersion of complex relative permeability of the sample was estimated by analyzing reflection coefficients ( $s_{11}$ ) obtained by placing the sample at the short-end of the transmission line fixture. It is to be noted that the distributed element expression for the input impedance of short-circuited transmission line was judiciously approximated by considering only the first two terms of its Taylor series expansion. This slight modification in the analysis increases the range of measurable frequencies and accuracy. Magnetic hysteresis of SrCoTiM, measured by room temperature VSM, shows saturation magnetization of ~200 emu/cc and coercivity of ~330 Oe (Fig. 1b). Moreover, it is found that the saturation is attained gradually over a wide span of fields. The saturation field, which can be viewed as the anisotropy field of well-formed ferrite particles, is believed to be around 7000 Oe. The measured FMR, found to be ~20.6 GHz as shown in Fig 1c. More than one FMR peaks can be attributed to the presence of particles with wide size distribution (Fig. 1a). The loss ( $\mu''$ ) profile is found to be negligible up to 15 GHz, while  $\mu'$  is independent of frequency up to 12 GHz, which in turn, indicates that the material could be well suited for various application such as inductors for X-band and electromagnetic noise suppressor for Ku-band. However, the measurement above 26 GHz requires further investigation.

In essence, high frequency magnetic characterization up to 26 GHz of an important class of hexaferrite is demonstrated by using a simple short-circuited coaxial transmission line equipped with a slightly modified analysis technique.

### Reference

<sup>1</sup> V.G. Harris, IEEE Trans. Magn. **48**, 1075 (2012).

<sup>2</sup> S. Takeda, T. Hotchi, S. Motomura, and H. Suzuki, J. Magn. Soc. Japan **39**, 116 (2015).

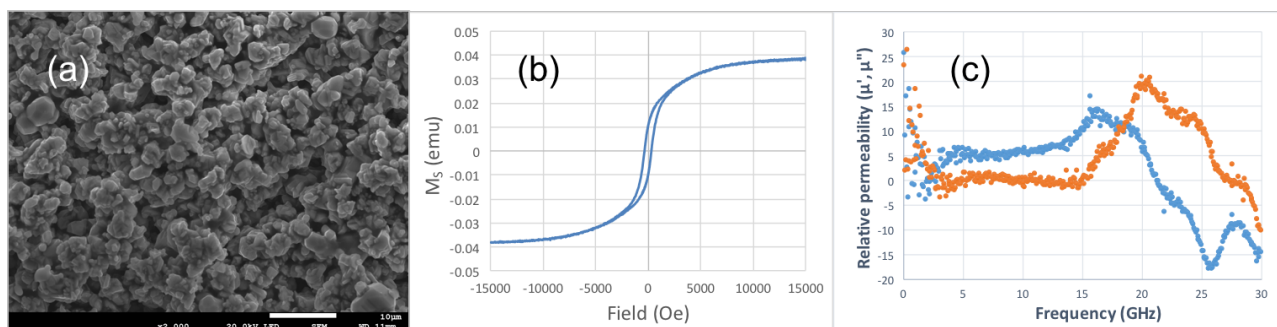


Fig. 1: (a) SEM image, (b) Hysteresis plot and (c) complex permeability spectra of SrCoTi-M+epoxy mixture

# うず電流検査法による導電性・磁性マーカの計測に関する研究

南谷 保, 山田 外史  
(金沢大学)

Research on detection of conductive and magnetic markers using eddy-current testing approach  
Tamotsu Minamitani, Sotoshi Yamada  
(Kanazawa University)

## はじめに

うず電流検査法(ECT)は非破壊検査の一種で主に非磁性導体の表面キズの探傷, PCBのパターン欠損, 金属粒の検出などに利用されており, 筆者らは, GMR (Giant Magneto-Resistance) 素子を用いて, 導電性インクの検出に関する研究を行ってきた<sup>1),2)</sup>. 現在, 紙幣などの有価証券はセキュリティ対策として磁性マーカが印刷されている. 上記の手法を用い導電性と磁性マーカを同時に読み取り, マーカの種別が可能になるとセキュリティ向上が期待できる. そこで, 筆者らは GMR 素子を用いた ECT 技術により, 導電性と磁性マーカの種別の可能性を検討したので報告する.

## うず電流検査法によるインク検出の原理

Fig.1 に示す ECT プローブは, GMR 素子とミアンダコイルで構成されており, GMR 素子は x 方向の磁界の検出, 励磁コイルは励磁電流により z 方向に高周波交流磁界を発生する. マーカが x 方向に移動すると, 導電性マーカの場合はうず電流により生じる磁界の x 成分, 磁性マーカの場合は磁束の収束による生じる磁界の x 成分を GMR 素子で検出する.

Fig.2 は有限要素法 (2次元) による, z 方向に均一な高周波磁界中 (5MHz, 1mT) におけるマーカ (2×0.05 mm) の 0.3mm 上部の磁束密度の x 成分のシミュレーション結果である. (a)が導電性マーカ ( $\sigma = 6 \times 10^7 \text{ S/m}$ ), (b)が磁性マーカ ( $\mu^* = 10$ ) を示す. これより, マーカの両端で磁束密度がピークを示し, 導電性マーカと磁性マーカでは波形が反転することがわかる.

## 導電性・磁性マーカの測定結果

Fig.3(a)は導電性マーカ (2×20×0.035 mm, 銅箔), Fig.3(b)が磁性マーカ (2×20×0.05 mm, 磁性インク) の出力の測定結果である. 計測条件は励磁周波数 5MHz, 励磁電流 200mA で, GMR 素子とマーカの間隔は 0.2mm である. これより, マーカの両端のピーク, 波形の反転がシミュレーションと同様な結果を得た. これは, 出力波形により, 導電性マーカと磁性マーカの識別の可能性を示している.

研究の一部は, 科学研究補助金基盤研究(C)(課題番号 26420384)により行われた.

## 参考文献

- 1) T.Minamitani,S.Uraoka,Y.Ikehata, S.Yamada , Digest of 2015 JIEE Annual Conference, 2-115 , 2015.
- 2) T.Minamitani,S.Uraoka,Y.Ikehata, S.Yamada , JIEE Technical paper of Magnetic meeting, MAG-14-139, pp.1-4 , 2015.

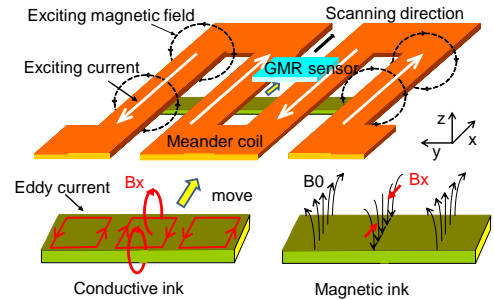
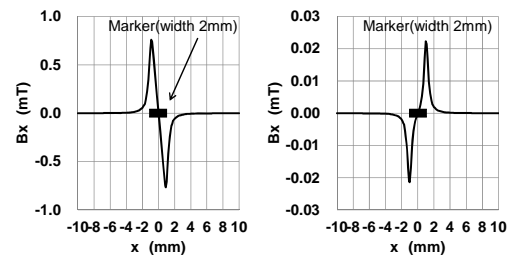
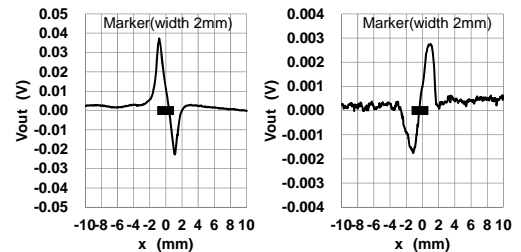


Fig. 1 Principle of ECT inspection of maker.



(a) Conductive marker (b) Magneteic marker

Fig. 2 Simulation by FEM analysis.



(a) Conductive marker (b) Magneteic marker

Fig. 3 Difference of detected signals among conductive and magnetic markers.

## 複合扁平磁性微粒子コンポジットを用いた マイクロインダクタの電気特性評価

遠藤恭<sup>1</sup>, 佐藤寛之<sup>1</sup>, エルデネバットウヌボルド<sup>1</sup>, 宮崎孝道<sup>1</sup>, 山口正洋<sup>1</sup>, 鎌田博<sup>2</sup>, 高橋正仁<sup>2</sup>,  
坂元真彦<sup>2</sup>, 米田茂<sup>2</sup>, 加藤直也<sup>2</sup>, 萬恭明<sup>3</sup>, 安井隆<sup>3</sup> (<sup>1</sup>東北大工, <sup>2</sup>光電子(株), <sup>3</sup>(株)リコー)

Study on the electric performance of micro-inductors with magnetically soft spheres and flakes composite

Y. Endo<sup>1</sup>, H. Sato<sup>1</sup>, U. Erdenebat<sup>1</sup>, T. Miyazaki<sup>1</sup>, M. Yamaguchi<sup>1</sup>, H. Kamada<sup>2</sup>, M. Takahashi<sup>2</sup>,  
M. Sakamoto<sup>2</sup>, S. Maita<sup>2</sup>, N. Kato<sup>2</sup>, Y. Yorozu<sup>3</sup>, T. Yasui<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>Tohoku Univ., <sup>2</sup>Hikaridenshi Co., LTD, <sup>3</sup>Ricoh Co., Ltd)

**はじめに** 近年, 小型携帯端末において多機能化が進み, また内蔵されている LSI の低電圧・大電流駆動化にともなうて, 電子機器内の電源回路における消費電力は増大している. そのため, 電池の使用時間の向上と電源-配線間での損失を減少させる方法の一つとして, DC-DC コンバータのワンチップ化が提案されている<sup>1)</sup>. しかしながら, この方法では DC-DC コンバータの高さが増加することが予想され, 半導体素子と比べて寸法が大きくエネルギー密度の低いインダクタの小形・低背化が課題である. したがって, 高いインダクタンス密度が必要であり, 高飽和磁化を有する磁心材料を用いることが進められている. 本研究では, 高飽和磁化を有する複合扁平磁性微粒子コンポジットを用いたマイクロインダクタを試作し, その電気特性を評価した結果を報告する.

**実験方法** マイクロインダクタの設計指針として, スイッチング周波数 6 MHz で 5 W 級のバックコンバータへの適用を想定した. 電気特性に関しては, 定格電流 1 A においてインダクタンス 0.5  $\mu\text{H}$  以上, 直流および交流抵抗 0.1 および 2  $\Omega$  以下とし, また寸法に関しては高さ 0.5 mm 以内および外径 3.0 mm 以内とした. マイクロインダクタの設計・試作を行うにあたり, インダクタの素線にはコイル単体の直流抵抗を抑制するために丸線を, また, 複合微粒子としては, サブミクロン径の Fe-Cr-B-Si-C 球形微粒子と, 平均粒径 50  $\mu\text{m}$ , 厚さ 3  $\mu\text{m}$  の Fe-B-Si-C 扁平微粒子を選択した. なお, 扁平微粒子については, 球形状から扁平形状への加工時に発生する応力の緩和を図り, 良好な軟磁気特性と表面の絶縁性を保持するため, Ar ガス加圧下で 350 $^{\circ}\text{C}$ , 1 時間熱処理を施した<sup>2)</sup>.

インダクタの試作に関しては球形および扁平微粒子とエポキシ系樹脂のコンポジットを治具に滴下し, コイルを埋め込み, 圧力配列<sup>2)</sup>によりコイルから発生する磁束の方向に沿って扁平微粒子を一様に並べた上で, 熱硬化させて成形した. 試作したインダクタの寸法は高さ 0.52 mm, 外径 3.0 mm とおよそ設計指針を満足している. インダクタの電気特性はインピーダンスアナライザ(4294A, Agilent Co.)による実測をもとに周波数 110 MHz まで評価した.

**結果** 試作したマイクロインダクタにおける電気特性の周波数依存性を図 1 に示す. インダクタンス  $L$  は周波数の増加にともなわずかに減少した. 周波数 6 MHz での  $L$  の値は 0.53  $\mu\text{H}$  であり, 空心コイルの場合 ( $L=0.072 \mu\text{H}$ ) と比較して 7 倍程度高くなった. また, 直流抵抗  $R_{\text{DC}}$  は約 0.05  $\Omega$  となり, 抵抗  $R_{\text{AC}}$  は周波数の増加とともに増大した. 周波数 6 MHz での  $R_{\text{AC}}$  は 1.4  $\Omega$  となった. この  $R_{\text{AC}}$  の挙動は Fe-B-Si-C 扁平微粒子内の磁気損失および巻線の表皮効果によると考えられる. また,  $Q$  値は周波数 3 MHz 付近で最大となり, その値は 17.2 であった. さらに, 周波数 1 MHz における直流重畳特性測定からインダクタンスの変化率を検討した. 変化率はおよそ 20%程度であり, Fe-B-Si-C 扁平微粒子だけを用いた場合<sup>2)</sup>とほぼ同等であった. 以上の結果は, 複合微粒子コンポジットを用いたインダクタが定格電流 1 A の設計指針を満足していることを示している.

**謝辞** 本研究の一部は, JST 復興促進プログラム(マッチング促進)「次世代個人情報端末に有用な超小型電源の開発」による支援を受けて行われた.

**参考文献** 1)S.C.O' Mathuna *et al.*, *IEEE Trans. Power Electron.*, **38**, 585 (2005).. 2)Y. Endo *et al.*, IINTERMAG 2015 Abstract DH-08 (2015).

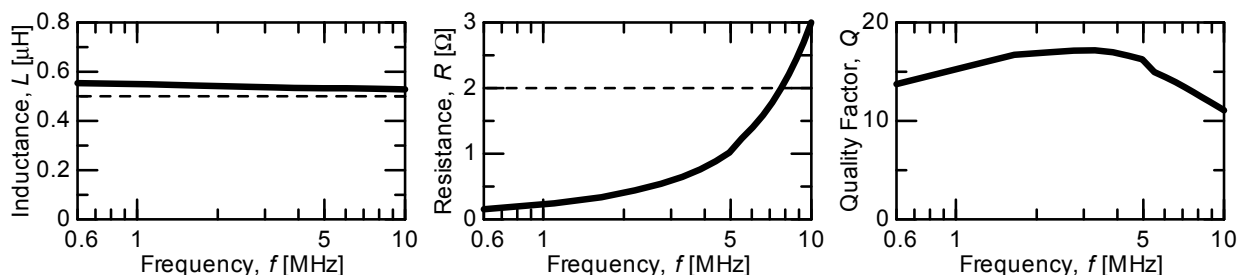


Fig. 1 Frequency dependence of electric performances in the micro-inductor with magnetically soft spheres and flakes composite.