

# プリント基板上のコイルを用いたコアレス電流センサの開発

栗原晋、山内芳准、小泉和裕、原山滋章\*  
(富士電機(株)、\*富士電機メーター(株))

Development of coreless current sensor using coil on printed circuit board

S. Kuribara, H. Yamauchi, K. Koizumi, S. Harayama  
(Fuji Electric Corp., \*Fuji Electric Meter Corp.)

## はじめに

近年、電流センサは様々な分野で利用されているが、高精度で耐ノイズ性能の優れた電流センサを実現する場合、磁性体コアによりセンサが大型化するため、小型化の実現が課題である。そこで我々は、プリント基板上の配線パターンで形成したコイル(以下パターンコイル)を用いて、磁性体コアの小型化を検討した<sup>1)</sup>。今回、更なる小型化のため、コアレス電流センサの検討を行ったので報告する。

## センサ構成

Fig.1に示すように、検出電流が往復するように平行に配置した電流線と、4つのパターンコイルを配置したプリント基板とを、電流線の平行部分に設けた2つの貫通穴に配置する構成を考案した。本構成にて、電流によって電流線の周囲に生じる磁束の変化をパターンコイルでの誘導電圧として取り出すことで電流を検出する。

本構成では、外部磁場の影響低減のため、測定電流の通電方向に対して左右に2つのパターンコイルを配置し、測定電流により生じる誘導電圧が左右のコイルで加算されるよう直列に接続している。この配置により、基板垂直方向の外部磁場の影響を左右のコイルで相殺し低減できる。さらに、電流の往路・復路に対して2組のパターンコイルを配置し、4つのコイルを直列に接続することで、電流検出感度を向上している。

また基板の位置ずれにより生じる電流検出感度の変動低減のため、電流線の中央に貫通穴を設け、貫通穴の中央に基板を配置し、基板と貫通穴の上下の電流線との距離が等しくなるような構成としている。これにより、基板がFig.1のY方向にずれた場合、貫通穴上下の電流線に対して、一方は近づき、もう一方は遠ざかるため、基板位置ずれによる磁界の変化を相殺でき、電流検出感度の変動を抑えることができる。

## 設計検証

電力量計への適用を想定して上記センサの設計検証を行った。電流検出範囲0.5A~250Aにて、磁界解析を用いてコイルの誘導電圧から計算した各性能の検証結果をFig.2~4に示す。電流検出感度は0.12mV/Aでリニアな特性が得られ(Fig.2)、基板位置ずれ時(±0.1mm)の感度変動率は最大0.016%(Fig.3)、外部磁場(0.125mT@50Hz)による出力誤差は最大0.015%であり(Fig.4)、電流センサとして十分な性能が得られることを確認した。

## 参考文献

- 1) S. Kuribara et al., Proceedings of The 2022 Annual Meeting IEE of Japan (1-040)

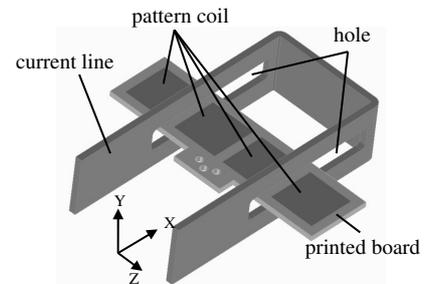


Fig.1 Sensor Configuration

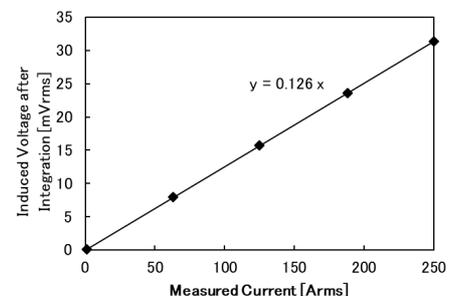


Fig.2 Sensor output characteristics

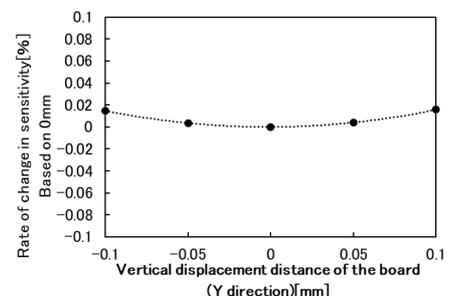


Fig.3 Rate of change in sensitivity when the board position shifts

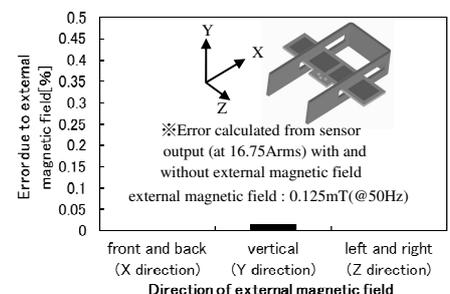


Fig.4. Output error due to external magnetic field

# 高感度光プローブ式電流センサ用 磁気ヨーク埋込型センサヘッドの検討

村上 拓也<sup>1</sup>, 曾根原 誠<sup>1</sup>, 佐藤 敏郎<sup>1</sup>, 須江 聡<sup>2,1</sup>, 久保 利哉<sup>2</sup>, 宮本 光教<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>信州大学, <sup>2</sup>シチズンファインデバイス)

Investigation of magnetic yoke with embedded sensor head for optical probe current sensor with high sensitivity

T. Murakami<sup>1</sup>, M. Sonehara<sup>1</sup>, T. Sato<sup>1</sup>, S. Sue<sup>2,1</sup>, T. Kubo<sup>2</sup>, M. Miyamoto<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Shinshu University, <sup>2</sup>Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

## はじめに

現在、電流センサにはシャント抵抗器やCT (Current Transformer), ロゴスキーコイルなどが利用されているが、劣悪な電磁ノイズ環境下では、信号伝送経路上の電気信号に電磁ノイズが重畳することが危惧され、使用可能な環境が限定される問題がある。

筆者らは電磁ノイズの影響を受けない電流センサとして光を検出信号に用いたグラニューレー磁性薄膜の Faraday 効果を利用する光プローブ式電流センサの開発を進めている<sup>1)</sup>。現在、小電流計測におけるセンサ出力が低く、ノイズに埋もれてしまうことが問題となっている。そのため、電流測定領域を小電流範囲に拡張することを目的として、センサヘッド部に扁平磁性微粒子複合材料を用いた開磁路型磁気ヨークを付与することで印加磁界をエンハンスし、単位磁界あたりのセンサ出力を増大させる検討を進めてきた<sup>2)</sup>。

本稿では、電流センサの更なる高感度化を目的に、センサヘッド部に付与する磁気ヨーク形状を再検討し、センサヘッドを磁気ヨークでサンドイッチした場合の効果について検討したので報告する。

## 磁気ヨーク形状の構造と解析結果

これまで検討されてきた磁気ヨーク形状および磁気ヨークを付与した Faraday 素子センサヘッドを Fig. 1 に示す。素子センサヘッドを台形状磁気ヨーク（短辺 1 mm, 長辺 5 mm, 長さ 5 mm, 厚さ 1 mm, ヨーク間ギャップ 0.2 mm）で覆い被せた構造になっていて、センサヘッドの下側にはヨークは無い<sup>2)</sup>。本稿では、センサヘッドの下側にも厚さ 0.1 mm でヨーク間ギャップ 0.1 mm の台形状磁気ヨークを装荷し、センサヘッド上下の台形状磁気ヨークの総厚さを 1 mm とし、JMAG-Studio を用いて電磁界解析した。

解析結果を Fig. 2 に示す。 $H_0$  は磁気ヨークが無い場合の磁界強度である。下部磁気ヨークの有無で比較すると、下部磁気ヨークを用いるとそれが無い場合に比べて、感度が約 1.5 倍高くなり、磁気ヨーク自体を用いない場合よりも約 15 倍高くなった。詳細は磁束密度分布の解析結果などを含め当日説明する。

## 参考文献

- 1) 宮本 光教, 他: 第41回日本磁気学会講演概要集, 21aB-1 (2017).
- 2) 寺岡 佑恭, 他: 電気学会全国大会, 2-C-p2-5 (2021).

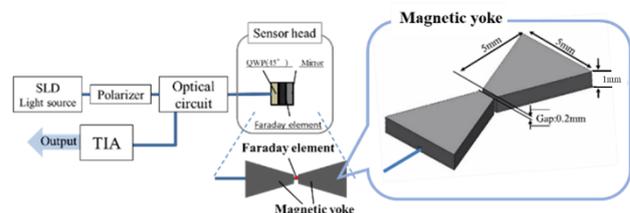


Fig.1. Faraday-effect optical sensor head with magnetic-yoke (long side: 5 mm, short side: 1 mm, length: 5 mm, thickness: 1.0 mm).

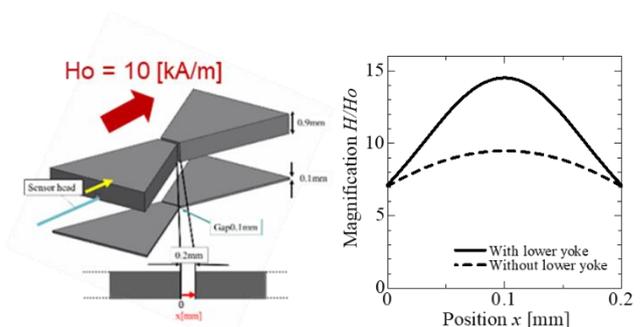


Fig.2. Analysis results of magnetic field magnification  $H/H_0$  vs. position  $x$  in magnetic-yoke.

# AC 磁界変調高感度 GMR センサの磁場顕微鏡応用と空間分解能

喜々津哲、東祥弘、黒崎義成、白鳥聡志、\*長塚雄大、\*鈴木一博、\*照井裕二  
(株)東芝、\*東芝ナノアナリシス(株)

## Application of High Sensitive AC Field Modulation GMR Sensor to a Magnetic Field Microscope and its Spatial Resolution

A. Kikitsu, Y. Higashi, Y. Kurosaki, S. Shirotori, \*T. Nagatsuka, \*K. Suzuki, \*Y. Terui  
(Toshiba Corp., \*Toshiba Nanoanalysis Corp.)

### はじめに

偶関数 GMR を AC 磁界変調する高感度磁界センサを開発した<sup>1)</sup>。1/f ノイズが支配的な GMR 素子でも低周波数領域の微弱磁界を高感度に検出できるのが特徴である。このような高感度磁界センサの用途として、半導体チップなどにおける微弱な欠陥電流を磁界で可視化する磁場顕微鏡<sup>2)</sup>があるが、課題は測定時の実効的な感度と空間分解能になる。今回、試作したセンサ素子を磁場顕微鏡システムに適用し、Cu プリント配線が発生する磁界検出を行い、感度と空間分解能に関して考察を行ったので報告する。

### 実験方法

Fig.1 に磁場顕微鏡と磁界センサユニットの模式図を示す<sup>3)</sup>。線状の GMR 素子は 10 kHz の AC 磁界で変調される。変調の位相で差動検出するフルブリッジをセンサユニットとし、各 GMR 素子の両側に 1 mm 角の NiFe の MFC (Magnetic Field Concentrator) を設けた。MR 特性上の感度は約 5%/Oe、ノイズレベルは 13 pT/√Hz@100Hz であった。Cu 配線サンプルに 100 Hz の交流電流を印可し、センサユニット出力を再度ロックインアンプで検波する。センサ面を距離 1 mm でサンプルと対向させて 0.1s/pixel (16 μm×10 μm/pixel) で走査した。磁場像が確認できなくなるサンプル電流値で感度を評価し、有限要素法で求めた磁界分布と比較することで空間分解能を評価した。結果は、MI センサ(5 pT/√Hz@100Hz)と比較した。測定は、磁気シールドされていない環境下で行った。

### 結果および検討

ノイズレベルに差があるにもかかわらず、MI センサと GMR センサで検出限界は同じであった。約 10 nT の環境磁界ノイズのためであり、このノイズは 2 個のセンサユニットによる差動検出で低減できることを確認した。Fig.2 に 4.5 mA<sub>pp</sub> を印加したときの磁場像と磁界プロファイルを示す。クランク型の Cu 配線形状が概ね再現でき、MI センサよりも高い空間分解能が得られた。測定プロファイルは磁界分布の計算値から半値幅で約 3 mm 広がっており、MFC を含めたセンサユニットの幅の 3/4 程度が検出窓のサイズとなっている。

### 参考文献

- 1) S. Shirotori et. al.: *IEEE Trans. Magn.*, **57**, 4000305 (2021)
- 2) K. Kimura et al.: *Electro. Packaging Technol.*, **28**, 16 (2012)
- 3) A. Kikitsu et al.: *Abstract book of 2022 Joint MMM-Intermag*, IOF-07 (2022)

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).

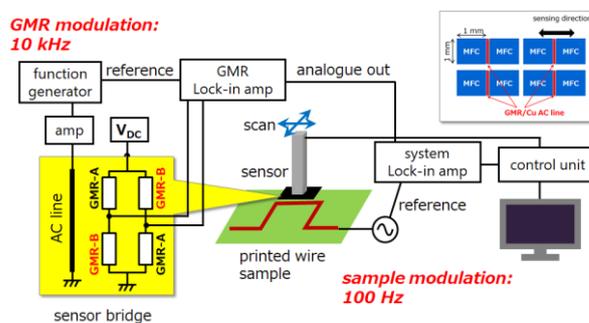


Fig.1 Schematic view of magnetic microscope and GMR sensor unit

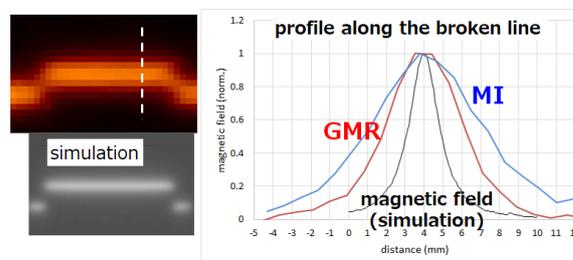


Fig.2 Magnetic field images of GMR sensor. Profiles along the broken line are also shown.

## スリットを有するマイクロストリップ型プローブによる透磁率評価

渡辺佳是, 益子朝日, 坂本雅弥, 佐久間勝美, 沖田和彦, 藪上信  
(東北大)

## Evaluation of Permeability using Microstrip line slitted Probe

Y. Watanabe, A. Mashiko, M. Sakamoto, K. Sakuma, K. Okita, S. Yabukami  
(Tohoku Univ.)

## はじめに

移動体通信システム 5G, 6G と続く高速大容量通信時代においては, 通信エラーの発生は致命的となる為, 通信エラーの抑制技術が必要不可欠となってくる. この背景の下新しい電磁波吸収体の開発が活発に行われている<sup>1)</sup>. 本発表は, これらの電磁波吸収体の透磁率という評価指標を簡単に高帯域で評価する手法を提案し, それを用いた測定結果について述べる.

## 新マイクロストリップ型プローブの提案

50 ~ 100  $\mu\text{m}$  程度の比較的厚い磁性体を従来型のマイクロストリップライン (以降 MSL) で測定すると, 反磁界の影響で, 強磁性共鳴周波数が, 高周波側にシフトする事が報告されている<sup>2)</sup>. この現象の対策を想定し, 線幅の広い MSL を設計, 磁界の発生をサンプル全体へ広がる事を目論んだ. また GHz 帯において顕著となる表皮効果の影響で, 高周波電流は MSL の線幅方向の両端に集中する. この対策案として, Fig. 1 に示す様に, MSL の中央部に横方向のスリットを 8 本配置し, 仮定の端部を作り電流密度の均一化を目論んだ.

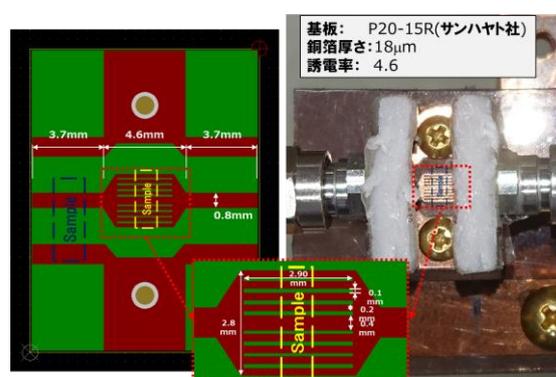


Fig. 1 Configuration of MSL slitted Probe

## 実験結果

提案した MSL 型プローブを使い NiZn ferrite サンプルの高磁場環境下と無磁場環境下の  $S_{21}$  の値をネットワークアナライザーで測定し, その差分から複素比透磁率を導出した. Fig. 2 にその複素比透磁率測定結果を示す. 黒の実線・破線は, レファレンスとなる Nicolson-Ross-Weir 法<sup>3)</sup>での測定結果であり, 本測定方法で導出した赤と青のドットと比較し, ほぼ対応しているのが分かる. この結果, 本報告書で提案するスリットを有する MSL 法は, 反磁界の測定誤差を低減できる手法と言える.

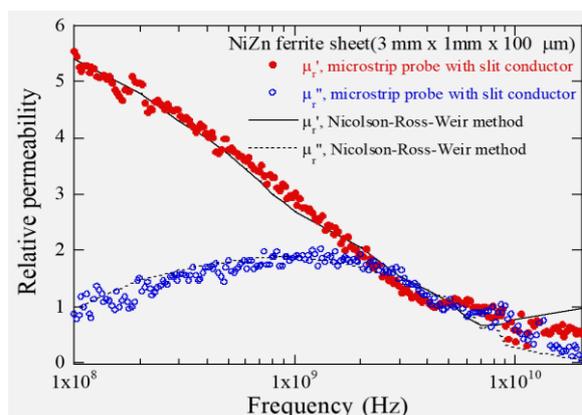


Fig. 2 Comparison of NRW method and MSL slitted probe

**参考文献:** 1) S. Ajia et.al, *J. Alloys Compd*, **903**, 163920(2022). 2) Yabukami et.al, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 58, No. 2, p. 1-5 (2022). 3) W. B. WEIR: *Proc IEEE*, vol. 62, 33 (1975).

**謝辞:** 本研究は総務省「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」(JPJ000254), NEDO Entrepreneurs Program(0349006), AMED(22ym0126802j001)の支援を受けた.