

## GMR ラインセンサの渦電流探傷試験プローブへの応用

## Application of GMR Line Sensor to Eddy Current Testing Probe

片岡康浩・脇若弘之・篠浦 治\*

信州大学, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

\*TDK 株式会社, 千葉県市川市東大和田 2 丁目 15 番 7 号 (〒272-8558)

Y. Kataoka, H. Wakiwaka and O. Shinoura\*

Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi, Nagano 380-8553

\*TDK Corporation, 2-15-7 Higashi-Ohwada, Ichikawa-shi, Chiba 272-8558

A GMR line sensor is a magnetic sensor for visualizing a magnetic field distribution using only a single scan. This sensor is composed of many GMR elements on a line of polyimide film. A multilayer NiFeCo/Cu GMR element with the shape of five multi-arcs is used. Therefore, this sensor has an omnidirectional magnetic sensitivity in plane. The GMR line sensor can detect a horizontal element of the magnetic field. This paper discusses detection of a change of magnetic flux in eddy current testing, using the GMR line sensor. The GMR line sensor can visualize the position of the slit in only a single scan, without depending on its direction.

**Key words:** GMR line sensor, eddy current testing, multilayer, multi-arc, MR ratio, directional magnetic sensitivity, slit, nonmagnetic material

## 1. はじめに

巨大磁気抵抗効果素子 (Giant magnetoresistive element, 以下 GMR 素子と略す) は, 磁気記録分野において磁気ヘッドとして多用されており, 高周波での駆動が可能な磁気センサである. GMR 素子は, ホール素子やサーチコイル等の他の磁気センサと比較して, 小形, 構造がシンプル, 低消費電力, 周波数特性が平坦である, 温度特性が安定している, 安価という多くの長所を有する<sup>1),2)</sup>. 近年, このような優れた特徴を持つ GMR 素子を工業計測分野へ応用するための研究・開発が進められている.

本研究では, 複数の GMR 素子をライン状のポリイミドフィルムに規則的に配置した GMR ラインセンサを開発している. 本センサは, 1 軸方向の走査のみで 2 次元の磁界分布を検出することを可能とする磁気センサである. 従来のラスタスキャンによる方法と比較して, GMR ラインセンサを用いることにより短時間での走査が可能となり, 作業効率を向上させることが可能である. GMR ラインセンサを非破壊検査試験の 1 つの手法である漏洩磁束探傷試験において検出プローブとして応用し, 1 軸方向の走査のみで欠陥の形状を推定することが可能であることを提案している<sup>3)</sup>.

本論文では, GMR ラインセンサを渦電流探傷試験における渦電流検出プローブへ応用することを検討する. 本センサを 1 軸方向に走査させて, 非磁性体に加工されたスリットの検出が可能であることを示す. なお, 本 GMR ラインセンサに内蔵される GMR 素子は, 多層膜構造による GMR 素子とし, 形状にマルチアーク形を採用している. 本 GMR 素子は, 面内方向に磁界感度が高く, 面内方向において全方向の磁界を検出することができる. このた

め, センサ本体を回転させる必要がなく, スリットの方向に依存しないで位置および形状の検出が可能となることが期待できる.

## 2. 渦電流探傷試験用検出プローブの構成

## 2.1 検出プローブの構成

Fig. 1 に渦電流検出プローブの構成を示した. 本プローブは, GMR ラインセンサと励磁コイルの 2 点より構成される. 本プローブでは, 励磁コイルに正弦波電圧を印加して,  $z$  軸方向に磁束を発生させて試料内部に渦電流を発生させている.  $z$  軸方向は, GMR ラインセンサに内蔵されるマルチアーク形 GMR 素子の膜厚方向である. 本論文では, 8 本のマルチアーク形 GMR 素子を 500  $\mu\text{m}$  の間隔に配置して, GMR ラインセンサを構成した. 本プローブを  $x$  軸方向に走査させることにより, スリット付近で渦電流の変化により発生する磁束変化の分布を検出する. 本論文では, 励磁周波数を 1 kHz とし, 励磁電流の振幅は 700 mA<sub>0p</sub> とした. 励磁コイルの巻き数は, 60 回巻とした.

Fig. 2 にマルチアーク形 GMR 素子の形状を, Table 1 に多層膜 GMR 素子の仕様を示した. GMR ラインセンサに内蔵される GMR 素子は, [NiFeCo/Cu] の多層膜 GMR 素子を使用した. GMR 素子の形状は 5 個の円弧を連続させたマルチアーク形状とした. また, GMR 素子は柔軟性の高いポリイミドフィルム上に作成されている. マルチアーク形状の GMR 素子は, 外形幅が 100  $\mu\text{m}$  と小さいため素子の間隔を狭くすることが可能であり, GMR ラインセンサの分解能を向上させることが可能である.

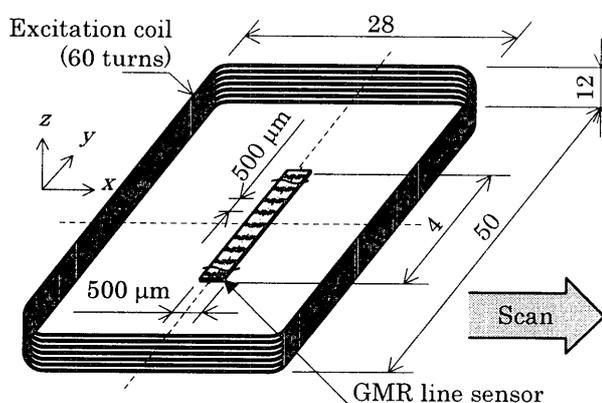


Fig. 1 Composition of a detecting probe using the GMR line sensor (units in mm).

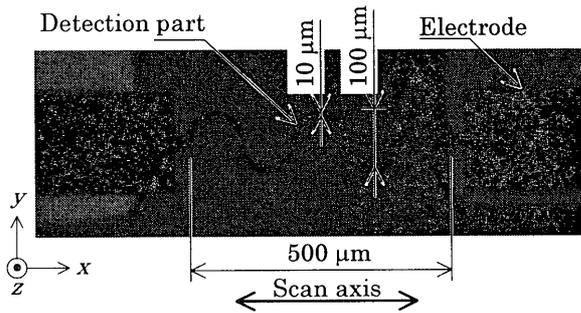


Fig. 2 Shape of multi-arc GMR element.

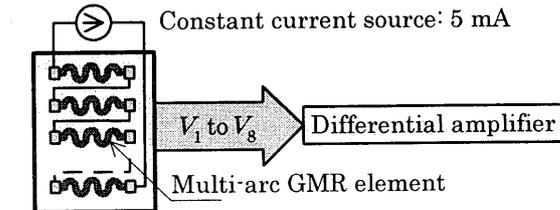
Table 1 Specifications of the multilayer GMR element.

Item	Specifications
Thickness of GMR element	820 Å
Structure of GMR element	NiFeCo(50 Å)/[Cu(20 Å)/NiFeCo(15 Å)] <sub>20</sub> /Cu(20 Å)
Thickness of Titanium	50 Å
Thickness of polyimide film	75 μm
Mean value of resistances	202.8 Ω

### 2.2 信号処理システムの構成

Fig. 3 に GMR ラインセンサの駆動回路を示した。GMR ラインセンサにおいて隣接する GMR 素子を直列に接続して、5 mA の定電流で動作させた。出力電圧は、各素子の差動出力電圧とした。

Fig. 4 に信号処理ブロックを示した。本論文では、GMR 素子より得られた出力信号を、位相検波回路を用いて処理した。このとき、バンドパスフィルタの中心周波数および位相検波における参照信号の周波数は、2 kHz とした。本論文で使用した多層膜 GMR 素子の磁界-抵抗変化率特性が偶関数であるため、励磁周波数に対して 2 倍の周波数となる出力信号が得られるためである。



GMR line sensor

Fig. 3 Drive circuit for GMR line sensor.

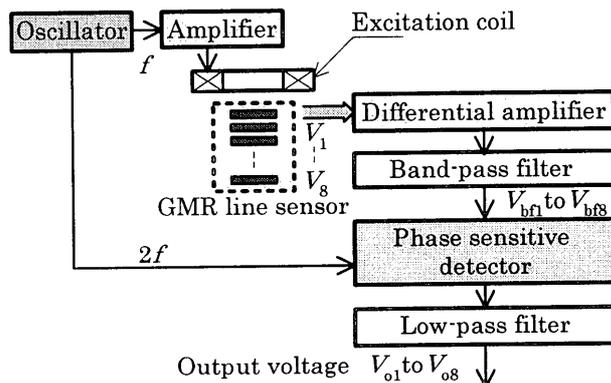


Fig. 4 Signal processing diagram.

### 3. マルチアーク形 GMR 素子の磁界感度

#### 3.1 磁界感度

Fig. 5 にマルチアーク形 GMR 素子の磁界-抵抗変化率特性を示した。本多層膜 GMR 素子は、素子の長さ方向 ( $x$  方向) より印加される磁界 ( $H_x$ ) および素子の幅方向 ( $y$  方向) より印加される磁界 ( $H_y$ ) に対して、磁界感度が高くなった。20 kA/m の磁界が印加されたときに、最大で 5.6 % と素子の抵抗値が減少した。しかし、素子の膜厚方向 ( $z$  方向) より印加される磁界 ( $H_z$ ) に対しては磁界感度が低く、20 kA/m の磁界が印加されたときにおいても、最大で 0.2 % しか抵抗値が変化しなかった。したがって、本多層膜 GMR 素子は、面内方向に磁界感度が高く、主に磁界の水平成分を検出するといえる。

#### 3.2 磁界感度の指向性

Fig. 6 にマルチアーク形 GMR 素子における面内方向の磁界感度指向性を、Fig. 7 にマルチアーク形 GMR 素子における  $xz$  平面における磁界感度指向性を示した。マルチアーク形 GMR 素子は、面内方向に無指向性の磁界感度であることがわかる。つまり、予測が困難である欠陥の方向や大きさに依存せずに、欠陥付近で様々な方向より発生する磁束の変化を検出することが可能であるといえる。

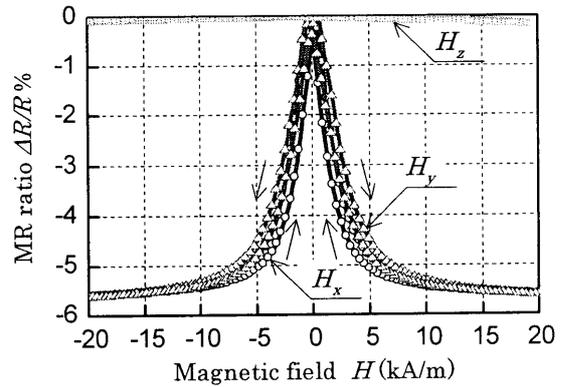


Fig. 5 MR ratio of multi-arc GMR element (drive current: 6 mA).

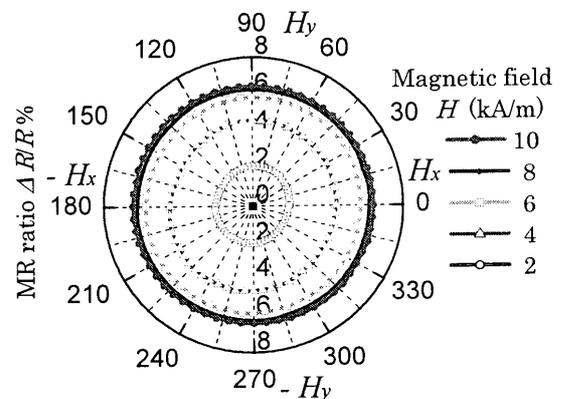


Fig. 6 Directional magnetic sensitivity of multi-arc GMR element in  $xy$  plane (drive current: 6 mA).

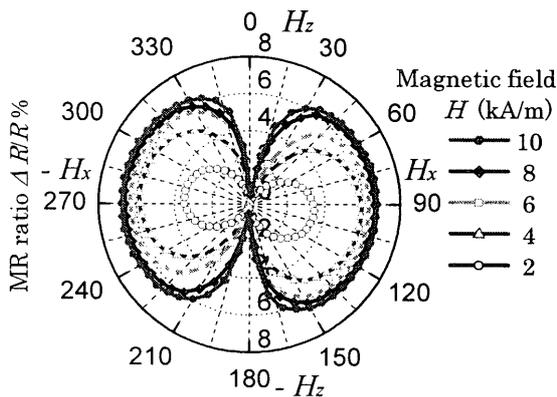


Fig. 7 Directional magnetic sensitivity of multi-arc GMR element in  $x$ - $z$  plane (drive current: 6 mA).

3.3 周波数特性

Fig. 8 に多層膜 GMR 素子の周波数特性を示した。外部磁界の周波数が 5 Hz より 50 kHz の間において、抵抗変化率の変化分は 0.1 % と安定していた。市販されている GMR 素子の形状はつづら折れ形であるが、抵抗変化率の変化分は 0.2 % であった。

4. 渦電流探傷試験における磁束変化の検出

Fig. 9 にスリットの形状を示した。本論文では、幅 0.2 mm、深さ 6 mm (板の厚さの 50 %) のスリット上を GMR ラインセンサを応用した検出プローブを用いて走査した。スリットの位置を中心として、 $\pm 20$  mm の範囲を  $x$  軸方向に走査させた。試料の材質は、アルミニウムである。

出力信号として、バンドパスフィルタを通過した後の出力電圧波形を評価した。バンドパスフィルタ後の出力電圧波形の周波数は、2 kHz であった。Fig. 10 にバンドパスフィルタ後における出力電圧の振幅を示した。スリットの左右では、渦電流の変化により磁束の水平方向成分が発生した。GMR ラインセンサでは磁束の水平成分を検出するため、スリットの左右においてバンドパスフィルタ後の出力電圧の振幅が 1.7 mV まで増加した。しかし、スリ

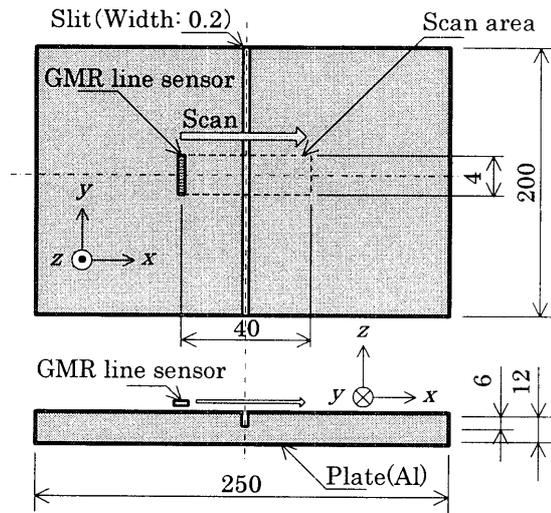


Fig. 9 Size of slit on aluminum (units in mm).

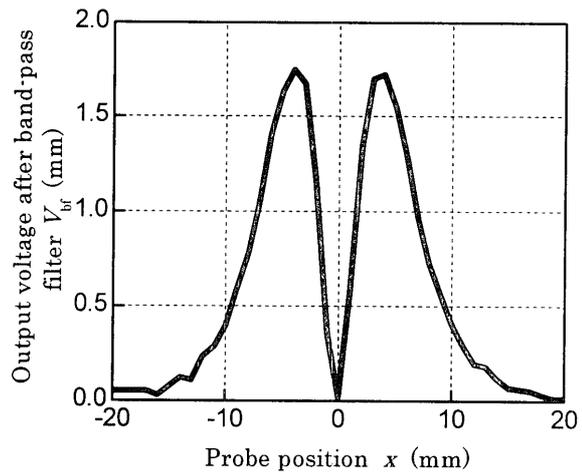


Fig. 10 Amplitude of output voltage after band-pass filter (lift off: 0.4 mm).

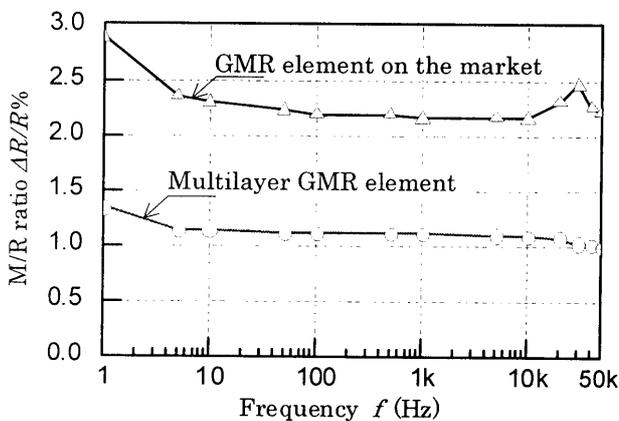


Fig. 8 Frequency characteristics of multilayer GMR element (drive current: 6 mA).

ットの上部では振幅が 0.1 mV 以下まで減少した。スリット左右における渦電流は逆の向きに流れるため、磁束の水平方向成分は逆極性となる。したがって、センサが配置された位置がスリットの上部になったとき、磁束の水平方向成分は平衡し、ゼロとなるためと考えられる。

Fig. 11 にリフトオフの影響を示した。Fig. 10 より GMR ラインセンサの位置が  $x = 4$  mm のとき出力電圧の振幅が最大となる。このため、 $x = 4$  mm において、リフトオフに対する出力電圧の振幅を測定した。リフトオフが 1.2 mm のとき 1.03 mV の出力電圧が確認できた。

## 5. あとがき

本論文では、GMR ラインセンサを渦電流探傷試験における欠陥検出プローブとして応用した。本プローブは、GMR ラインセンサと励磁コイルより構成した。本プローブを用いてアルミ板上に加工されたスリットを走査することにより、スリットの前後において渦電流の変化による磁束の変化を検出することが可能であった。また、GMR ラインセンサに内蔵される多層膜 GMR 素子の形状をマルチアーク形とすることによって、面内方向に無指向性の磁界感度となる検出プローブを作成することができた。マルチアーク形の GMR ラインセンサを応用することにより、1軸方向の走査のみでスリットを検出することが可能であった。よって、GMR ラインセンサにより渦電流探傷試験が可能であるといえる。

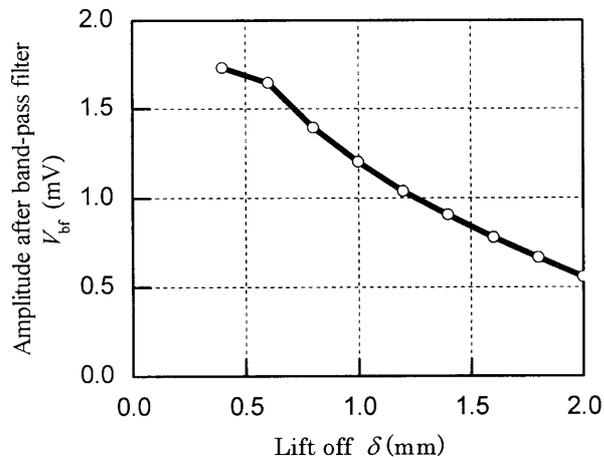


Fig. 11 Characteristic of lift off ( $x = 4$  mm).

Fig. 12 に渦電流探傷試験におけるスリットの検出結果を示した。スリットの前後において渦電流の変化により発生する磁束の変化を検出して、出力電圧が変化した。GMR ラインセンサを応用した本プローブを用いることで、 $x$ 軸方向の走査のみで2次元の磁束変化の分布を検出することが可能であった。

## 文 献

- 1) Wang, D., J. Anderson, and J. M. Daughton, IEEE, Trans. Magn., Vol. 33, pp.3520-3522, (1997).
- 2) T. Miyazaki, Journal of the magnetic society of Japan, Vol. 16, No. 4, pp.615-622, (1992).
- 3) Hiroyuki Wakiwaka, Yasuhiro Kataoka, Osamu Shinoura, Proceedings of International Conference Material Testing and Research, (MAT2001), AMA Service GmbH, P.4.2, pp.353-358, (2001).

2002年10月7日受理, 2003年1月17日採録

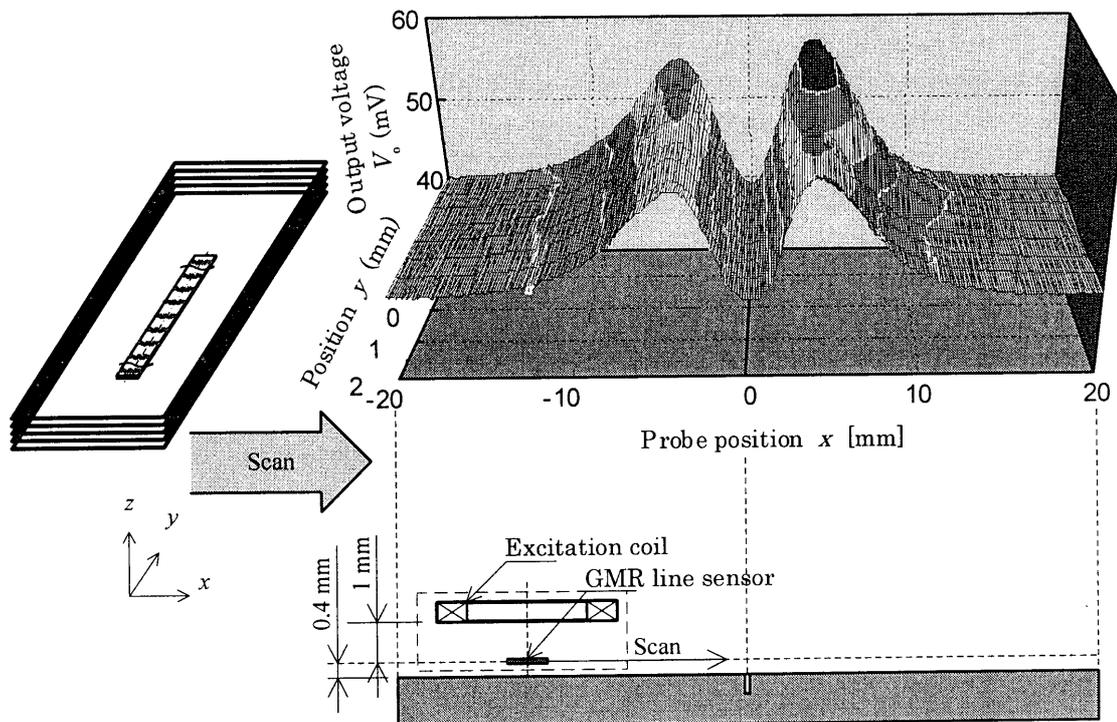


Fig. 12 Output voltage scanning in an axis orthogonal in slit.