

## 学術論文

## GMR センサを用いた衝撃センサの検討

## Consideration of Shock Sensor using GMR Sensor

上野 新太郎<sup>\*1</sup>, 児塔 典沙<sup>\*1</sup>, 脇若 弘之<sup>\*1</sup> (正員), 庄司 茂<sup>\*2</sup>

Shintarou UENO, Tsukasa KOTO, Hiroyuki WAKIWAKA(Mem.), Shigeru SHOJI

The spin valve Giant Magnetoresistive (SV-GMR) element was developed in the field of the magnetic recording. Features of SV-GMR are very small size, high magnetic field sensitivity, low power consumption, etc... Therefore, SV-GMR is noticed as a magnetic sensor in not only magnetic recording field but also general industry field. We study the application of this element. This paper describes the composition of the small shock sensor used by mounting on small hard disk. First, the operation principle of the shock sensor is explained, and next, the result of magnetic field analysis and characteristic of the SV-GMR sensor is shown. Finally, the research result on the optimum arrangement of the shock sensor is described.

**Keywords:** shock sensor, spin valve GMR, magnetic field analysis, vibration, magnetic flux density.

## 1 まえがき

最近の技術の傾向は、機械の高効率のため高速化、高精度化、高密度化、軽量化、小形化などの要求がある[1]。例えば、HDDの磁気ヘッドに関しては、1988年に巨大磁気抵抗効果(GMR効果)が発見されて以来、面記録密度が著しく向上した[2]。なかでも、スピバルブGMR(Spin-valve GMR, 以下SV-GMR)は、HDDの高記録密度化を支えるキーデバイスとして年間数億個が使用されている。GMR素子は、素子サイズが極めて小さく、かつ磁界による抵抗変化率は数十%と大きいのが特徴である。このため、磁気記録以外の分野においてもGMR素子の磁気センサとしての特性を活かした使用法の研究開発が進められている[3-5]。

一方、小形、高記録密度化の進んだHDDは、情報機器ばかりでなく、家電品、AVへの使用が一般的になりつつあり、衝撃等に対する保護が必要とされる。

従来から衝撃センサは、試験用、自動車のSRSエアバッグ用、セキュリティ用途などに使用されているが、HDDに組み込むことができるものがなかった。

そこで、我々は、HDDのような小形で精密な装置に組み込み、衝撃や振動を検出して保護を行うための衝撃センサの構成を検討している[6]。

本論文では、磁界解析を用いて衝撃センサに振動が加わった時の磁束密度の変化について検討する。また、衝撃センサに組み込むSV-GMR素子の基礎特性と最適配置について調べた。最後に、SV-GMR素子を衝撃センサに組み込んだ場合の出力例を検討した。以下に、本論文の内容を示す。

- (1) 衝撃センサの構造と動作原理
- (2) 磁界解析による振動時の磁束密度の変化
- (3) SV-GMR素子の基礎特性と最適配置

## 2 衝撃センサの構造と動作原理

## 2.1 基本構造

Fig. 1に、衝撃センサの構造を示し、Table 1に衝撃センサの仕様を示した。本センサは、小形で精密なHDDをはじめ、様々な機械・装置等に組み込むことができ、また衝撃はもちろん、例えば落下中の加速度も検出できるようにFig. 1に示す構造とした。

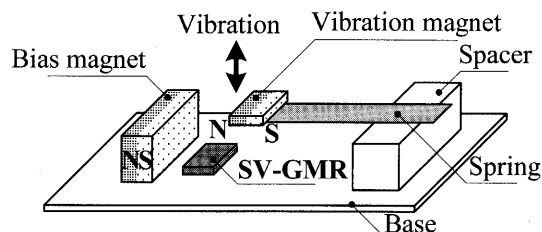


Fig. 1 Structure of shock sensor.

連絡先: 脇若 弘之, 〒380-8553 長野市若里 4-17-1,

信州大学工学部電気電子工学科,

e-mail: wakiwak@shinshu-u.ac.jp

<sup>\*1</sup>信州大学, <sup>\*2</sup>TDK(株)

SV-GMR 素子は、バイアス磁石と振動用磁石の間に配置する。バイアス磁石を用いることで、SV-GMR 素子を磁界の大きさに対する抵抗変化を飽和領域に設定して動作させることができるため、SV-GMR 素子の S/N 比や温度特性が向上する。

また、SV-GMR 素子は他の磁気センサと比較すると、素子サイズが極めて小形で、かつ抵抗変化率も数十%と大きいため、SV-GMR 素子を用いると本センサの小形化・高感度化が望める。また、SV-GMR 素子に印加する磁界方向によって抵抗変化の特性が非線形的に変化するため、これを第 4 章で詳しく記す。

## 2.2 動作原理

Fig. 1 より、本センサは、外部から衝撃が加わると、片持ちばりを構成する薄い板バネ上の振動用磁石が上下に振動する。この振動によって、バイアス磁石と振

動用磁石間の磁束密度分布に変化が起こる。この磁束密度分布の変化を、両磁石の間に配置した SV-GMR 素子が磁束ベクトルの方向変化に対応する抵抗変化として検出する。

## 2.3 衝撃センサの磁界解析モデル

Fig. 2 に磁界解析のためのモデルの寸法を示した。Fig. 2 (a)は model-1, Fig. 2 (b)は model-2 である。SV-GMR 素子(バイアス磁石と振動用磁石の間に配置)に印加されるバイアス磁界や、衝撃による磁束密度分布の変化を検討するために、2 つの解析モデルはバイアス磁石の寸法のみ変えた。なお、Fig. 2 中には原点を示した。バイアス磁石の奥行き  $z$  は 2 mm, 振動用磁石の奥行き  $z$  は 1.2 mm, 板バネの奥行き  $z$  は 1 mm それぞれ一定である。

なお、 $0 \leq x \leq 2$  mm,  $0 \leq y \leq 1.2$  mm に SV-GMR 素子を配置するため空けておく。

Table 1 Specification of shock sensor.

Item	Value
Size	
Outer size	$8 \times 1.52 \times 5$ mm <sup>3</sup>
Material	
Magnetic material	REC26 ( $B_m = 1.05$ T, $H_m = 732$ kA/m)
Spring material	SUS304 ( $\sigma = 1388889$ 1/( $\Omega \cdot m$ ))

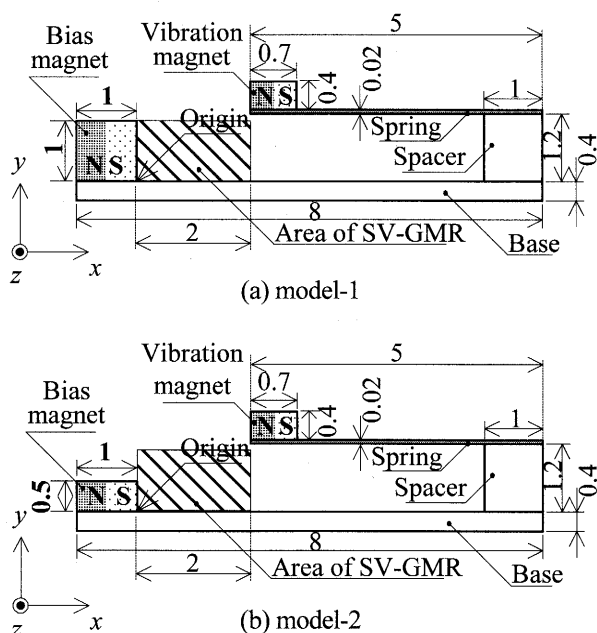


Fig. 2 Dimension of models for magnetic field analysis. (Unit: mm) (Bias magnet:  $z = 2$  mm, Vibration magnet:  $z = 1.2$  mm)

## 3 磁界解析による振動時の磁束密度の変化

### 3.1 解析条件

本センサに衝撃が加わると、板バネ上の振動用磁石が上下に振動する。本論文では、振動用磁石が平衡状態から上下に 0.1 mm 振動すると仮定して、以下の 3 状態で有限要素法による磁界解析を行った。Table 2 に解析諸元を示した。

- (1)  $Y = 0$  : 平衡状態 (衝撃を加わる前)
- (2)  $Y = +0.1$  :  $+y$  方向に 0.1 mm 振動した状態
- (3)  $Y = -0.1$  :  $-y$  方向に 0.1 mm 振動した状態

### 3.2 振動による磁束密度の変化の評価法

本センサに衝撃が加わると、振動用磁石が振動することにより、バイアス磁石と振動用磁石間の磁束密度分布が変化する。この変化を SV-GMR 素子が磁界に対する抵抗変化として検出する。

Table 2 Analytical parameter.

Item	Content
CPU	Pentium 4 2.8 GHz
Software	JMAG-Studio Ver. 7.2 ( Finite element method + Boundary element method )
Nonlinear method	Newton - Raphson's method
Coordinate system	Two dimension static analysis
Material characteristic	Nonlinear of $B-H$
Element	Quadrilateral element

Fig. 3 に振動による磁束密度の変化を示した。磁束密度はベクトル量であり、SV-GMR 素子を配置する任意の点において、 $Y=0$  (衝撃を加える前) の磁束密度分布  $B_0$  を基準とすると、振動により  $Y=\pm 0.1$  の磁束密度分布  $B_{\pm}$  となり、磁束密度の角度変化  $\theta_{\pm}$  を得る。

本論文では、SV-GMR 素子を配置する  $0 \leq x \leq 2$  mm,  $0 \leq y \leq 1.2$  mm の範囲において、衝撃を加える前の磁束密度分布と、磁束密度の角度変化について、model-1, model-2 から検討する。

### 3.3 振動による磁束密度の変化

Figs. 4, 5 に model-1, model-2 における振動による磁束密度の角度変化(Fig. 3 中の  $\theta_{\pm}$ )を示した。Figs. 4, 5 の(a)は  $\theta_+$ 特性であり、Figs. 4, 5 の(b)は  $\theta_-$ 特性である。

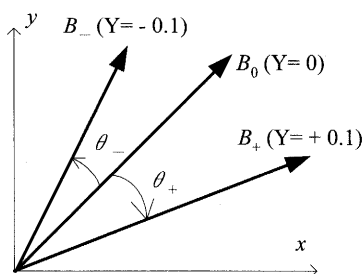
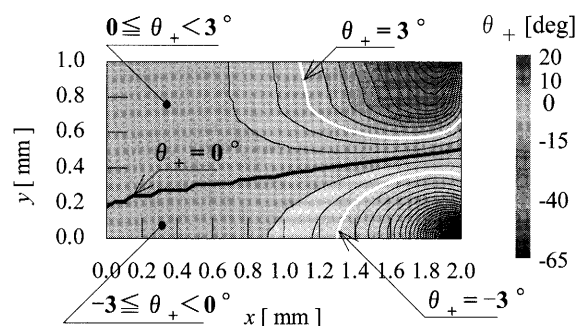
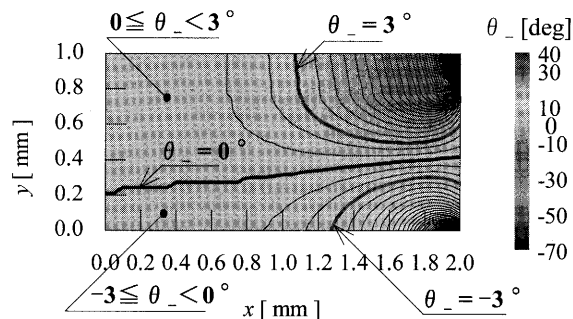


Fig. 3 Change of magnetic flux density by the vibration.



(a)  $\theta_+$ 特性



(b)  $\theta_-$ 特性

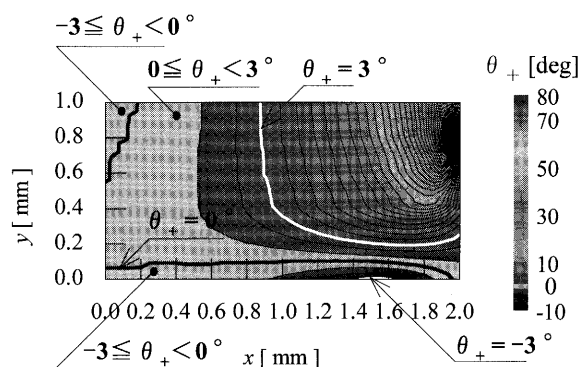
Fig. 4 Angular variation of magnetic flux density by the vibration in the model-1. ( $0 \leq x \leq 2$  mm,  $0 \leq y \leq 1.2$  mm, Contour level: 1 deg)

等高線の間隔は  $1^\circ$  とした。Figs. 4, 5 より、磁束密度の角度変化はバイアス磁石付近 ( $0 \leq x \leq 1$  mm 付近) でほとんど変化なく、 $1^\circ$  以下の角度変化であった。一方、振動用磁石付近 ( $1 \leq x \leq 2$  mm 付近) で磁束密度の角度変化の大きさは  $3^\circ$  以上であった。

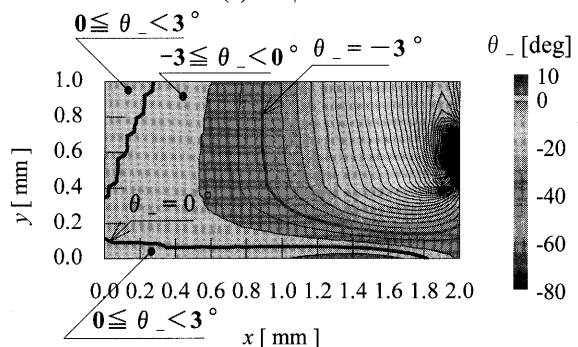
Fig. 6 に衝撃を加える前の磁束密度分布  $B_0$  を示した。等高線の間隔は 30 mT とした。また、振動を加えることによって得られた磁束密度の角度変化の大きさが  $3^\circ$  以上となる範囲 ( $|\theta_+|, |\theta_-| \geq 3^\circ$ ) を斜線で示した。

Fig. 6 より、磁束密度  $B_0$  が 30 mT 以下となる領域は、model-2 の方が狭いことが分かった。また、磁束密度の角度変化の大きさが  $3^\circ$  以上となるのは、model-1 で  $y \geq 0.6$  mm, model-2 で  $y \geq 0.3$  mm の範囲であった。

以上の解析結果から、Fig. 2 の SV-GMR 素子が配置できる範囲におけるバイアス磁界、磁束密度の角度変化が分かった。これらの解析結果を有効に利用するためには SV-GMR 素子の抵抗変化特性や指向性、つまり SV-GMR 素子の基礎特性を検討する必要がある。



(a)  $\theta_+$ 特性



(b)  $\theta_-$ 特性

Fig. 5 Angular variation of magnetic flux density by the vibration in the model-2. ( $0 \leq x \leq 2$  mm,  $0 \leq y \leq 1.2$  mm, Contour level: 1 deg)

## 4 SV-GMR 素子の基礎特性と最適配置

### 4.1 SV-GMR 素子の構造

Fig. 7 に SV-GMR の断面と素子パターンの例を示した。スピンバルブ構造は、PtMn など反強磁性薄膜、固定側磁性膜、Cu などの非磁性薄膜、自由側磁性薄膜の 4 層から構成される。自由側磁性薄膜の磁化は、わずかな外部磁界により自由に回転できる。

隣接する磁性層が平行に磁化されていると、加速された伝導電子は隣接層のスピンと同じ方向をもつため、散乱されずに高確率で隣接層に侵入する。しかし、隣接する磁性層が反平行に磁化されていると、スピンの方向が整合していないので、そのほとんどは激しく散乱される。

ゆえに、伝導電子はスピンの方向と逆方向に磁化した磁性層を通過することができないため、自由に層間を移動できず、抵抗が大きくなる[7]。

### 4.2 SV-GMR 素子の基礎特性と最適配置

衝撃センサに外部から衝撃が加わると、振動用磁石が振動し、磁束密度に変化が起こる。この磁束密度の変化を SV-GMR 素子が検出する。Fig. 8 に SV-GMR 素

子の特性を示した。Fig. 8(a)はピン層の磁化が素子パターンに直角方向になっているときの特性であり、Fig. 8(b)はピン層の磁化が素子パターンに平行方向になっているときの特性である。

ここで、SV-GMR 素子の抵抗の変化を式(1)に示した。磁界印加時の SV-GMR 素子の最小抵抗値を  $R_{\min}$  として、磁界印加時の抵抗値  $R$  の変化分を抵抗の変化  $\Delta R$  とした。また、SV-GMR 素子の抵抗変化率を式(2)に示した。

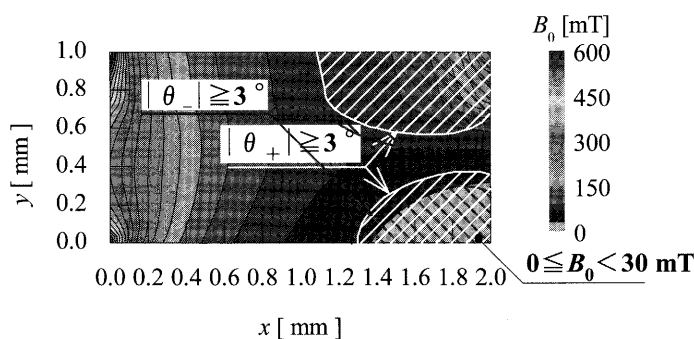
$$\Delta R = R - R_{\min} \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$\Delta R / R_{\min} = \frac{R - R_{\min}}{R_{\min}} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

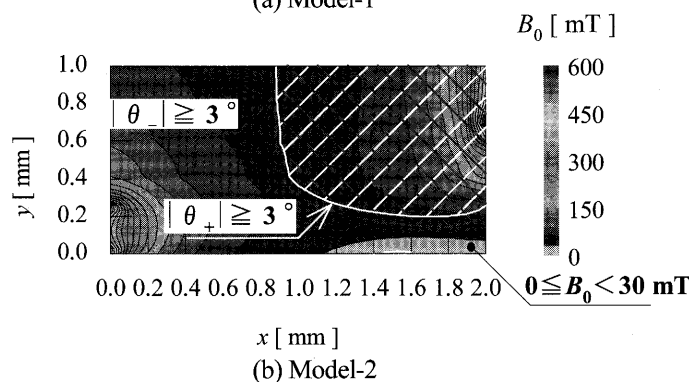
ここで、 $\Delta R / R_{\min}$ : 抵抗変化率 [%]とする。

Fig. 8 より、両者ともピン層の磁化方向と平行方向の磁界を加えると奇関数の特性であり、ピン層の磁化方向と直角の磁界を加えると偶関数の特性を示した。いずれも約 2.5 mT で飽和傾向を示した。

一方、衝撃センサに外部から衝撃が加わると、Figs. 4, 5 のように磁束密度の角度に変化が起こる。したがって、衝撃センサに SV-GMR 素子を組み込むためには、SV-GMR 素子の指向性を把握する必要がある。

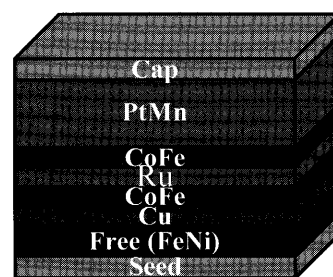


(a) Model-1

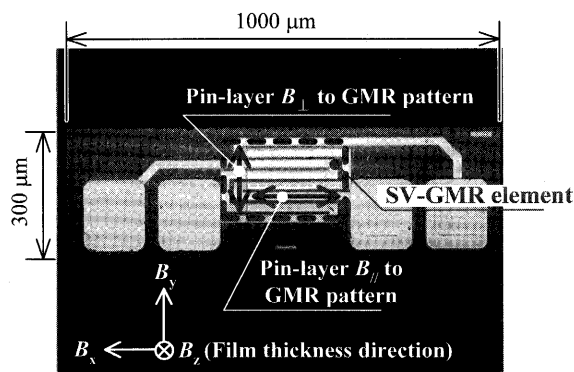


(b) Model-2

Fig. 6 Distribution of magnetic flux density  $B_0$  before the shock. ( $0 \leq x \leq 2$  mm,  $0 \leq y \leq 1.2$  mm, Contour level: 30 mT)



(a) Schematic view of SV-GMR



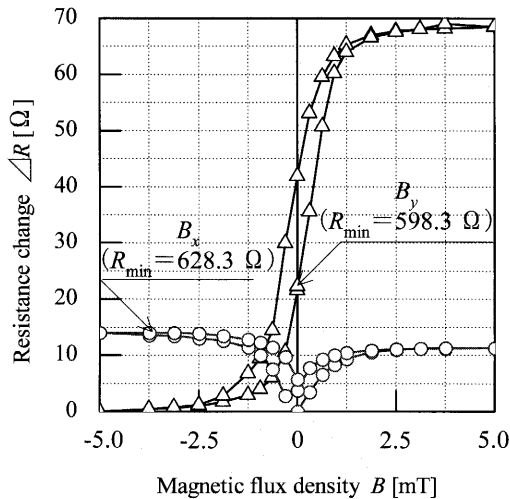
(b) Pattern of SV-GMR

Fig. 7 Example of schematic view and pattern of SV-GMR

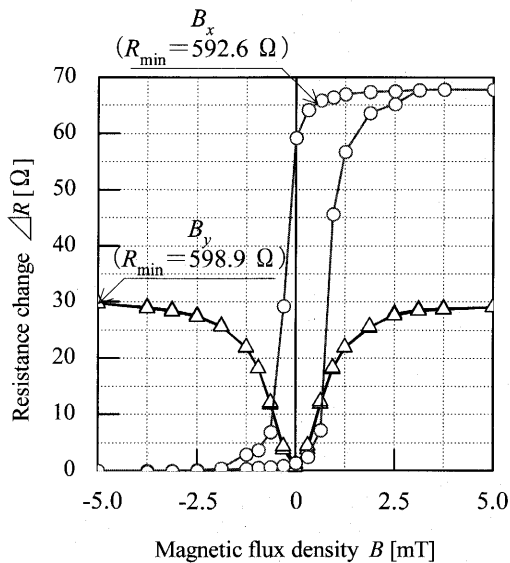
Fig. 9 に SV-GMR 素子の指向性を示した。Fig. 9(a) はピン層の磁化が素子パターンに直角方向になっているときの特性であり、Fig. 9(b)はピン層の磁化が素子パターンに平行方向になっているときの特性である。両者とも面内方向の感度である。

Fig. 9 より、両者ともピン層の磁化方向から磁界を印加すると高感度であるが、ピン層の磁化方向と反対方向から磁界を印加すると感度が極めて低くなった。

以上から、Figs. 4, 5 の振動による磁束密度の角度変化より、バイアス磁石付近 ( $0 \leq x \leq 1$  mm 付近) では衝撃時の磁束密度の角度変化はほとんどないため、ここに SV-GMR 素子を配置するには抵抗変化の特性 (Fig. 8) を考慮して検討すればよいと考えられる。



(a) Pin-layer  $B_{\perp}$  to GMR pattern



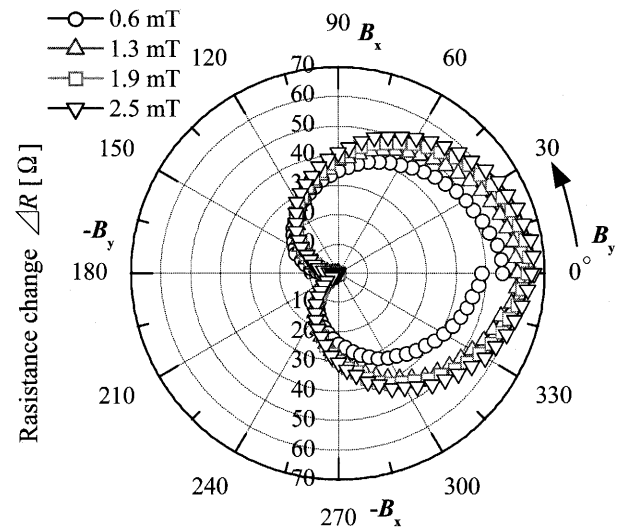
(b) Pin-layer  $B_{\parallel}$  to GMR pattern

Fig. 8 Characteristics of SV-GMR element. ( $B_y$ - $B_x$  direction)

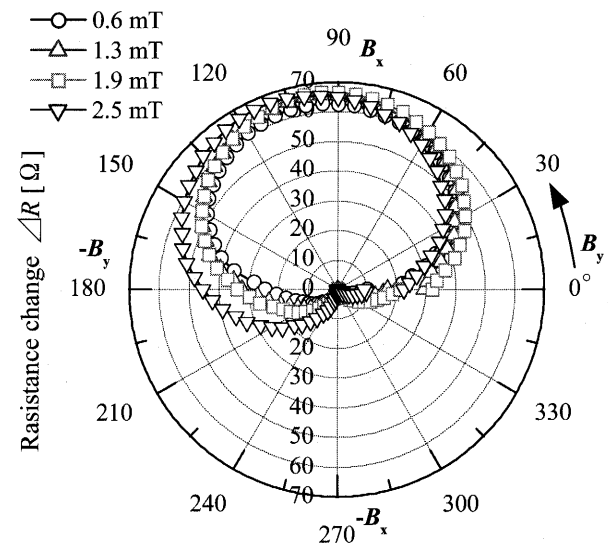
一方、振動用磁石付近 ( $1 \leq x \leq 2$  mm 付近) では衝撃時の磁束密度の角度変化が非常に大きいため、SV-GMR 素子の指向性 (Fig. 9) を利用して配置すればよいと考えられる。

#### 4.3 衝撃時における SV-GMR 素子の出力例

Fig. 10 に微小磁束密度に対する特性例を示した[8]。なお、Fig. 10 のピン層の磁化は素子パターンに直角方向であり、Fig. 8(a)および Fig. 9(a)に対応している。



(a) Pin-layer  $B_{\perp}$  to GMR pattern



(b) Pin-layer  $B_{\parallel}$  to GMR pattern

Fig. 9 Directional characteristics of SV-GMR element ( $B_y$ - $B_x$  direction)

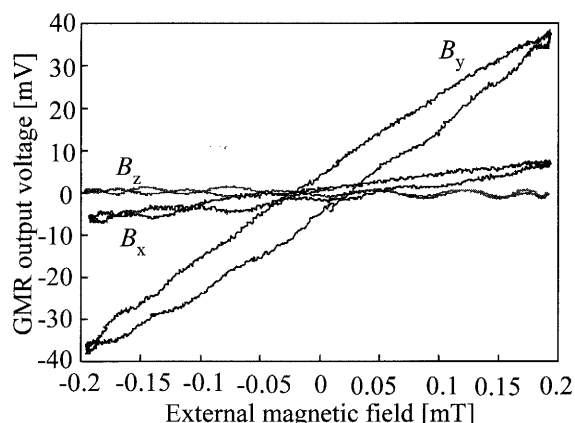


Fig. 10 Low magnetic field characteristic of spin valve GMR sensor.

これより、Fig. 6 に示した磁束密度分布が 30 mT 以上とある程度印加されており、かつ磁束密度の角度変化が大きい斜線領域に SV-GMR 素子を配置することで、SV-GMR 素子は衝撃時の磁束密度の角度変化を高感度 (Fig. 10 の  $B_y$  方向のように) に検出できる。

すなわち、SV-GMR 素子は、ピン層の磁化を素子パターンに垂直方向 (Fig. 7(b) の  $B_y$  方向) として、Fig. 6 の斜線領域に配置することが高感度に衝撃を検出できる。しかし、Fig. 10 より、磁束密度が  $B_y$  方向から印加されると、高感度な特性を示すが、ヒステリシスが大きい問題がある。

## 5 あとがき

本論文では、磁界解析を用いて衝撃センサに振動が加わった時の磁束密度の変化について検討した。また、衝撃センサに組み込む SV-GMR 素子の基礎特性と最適配置について検討した。以下に、得られた結果をまとめた。

- (1) 磁界解析を用いて、衝撃センサに外部から衝撃が加わることによる磁束密度の変化を調べた。
- (2) バイアス磁石付近では衝撃時の磁束密度の角度変化はほとんどないため、ここに SV-GMR 素子を配置するには抵抗変化の特性を考慮して検討すればよい。一方、振動用磁石付近では衝撃時の磁束密度の角度変化が非常に大きいため、SV-GMR 素子の指向性を利用して配置すればよい。
- (3) SV-GMR 素子は、ピン層の磁化を素子パターンに垂直方向として、磁束密度の角度変化が大きい領域に配置することが高感度に衝撃を検出できる。

(2005 年 5 月 5 日受付, 2005 年 10 月 14 日再受付,  
2005 年 12 月 16 日再々受付)

## 参考文献

- [1] 佐藤, 岡部, 岩田, 機械振動学, 工業調査会, p.1, 2000.
- [2] 脇若, 磁気センサ技術の変遷, 電気学会誌, Vol.124, No.1, pp.36-39, 2004.
- [3] 脇若, GMR センサの特性とその応用, 日本応用磁気学会誌, Vol.28, No.7, pp.825-833, 2004.
- [4] 片岡, 脇若, 篠浦, GMR ラインセンサを用いた漏洩磁束法による欠陥検出, 電気学会マグネティックス・リニアドライブ合同研究会資料, MAG-00-249, LD-00-114, pp.73-78, 2000.
- [5] 片岡, 脇若, 小松, 篠浦, 山岸, 山田, GMR ラインセンサによるスリットによる渦電流の検出, 電気学会マグネティックス・リニアドライブ合同研究会資料, MAG-02-133, LD-02-105, pp.11-16, 2002.
- [6] 上野, 脇若, 小松, 庄司, 大竹, 磁界解析による衝撃センサの基礎検討, 第 16 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, No.04-251, pp.401-404, 2004.
- [7] John C. Mallinson, Magneto-resistive and spin valve heads, Academic press, pp.34-44, 2002.
- [8] 福田, Chomsuwan, 山田, 岩原, 脇若, 庄司, ECT 応用を目指した SV-GMR センサの高周波数微小磁界振幅特性, 日本応用磁気学会誌, Vol.28, No.3, pp.405-408, 2004.