

スピンバルブGMR膜を用いた回転角センサーの特性

Characteristics of Magnetic Rotation Angle Sensors with Spin-Valve GMR Films

阿部 泰典*
Yasunori Abe

小野 友樹*
Tomoki Ono

相牟田 京平**
Kyohei Aimuta

岡田 泰行**
Yasuyuki Okada

川井 哲郎***
Tetsuroh Kawai

スピンバルブGMR (Giant Magneto Resistance : 巨大磁気抵抗効果) 膜を用い、耐熱性に優れた回転角センサーを開発した。感磁膜として、ピン層 (固定層) には積層フェリ磁性交換膜を用いたシンセティック (Synthetic) 型スピンバルブGMR膜を採用した。この膜の磁気抵抗変化率は8.5 %であり、温度特性は590 Kまでほとんど変化せず、反強磁性膜を用いたスピンバルブGMR膜よりも優れていることがわかった。本回転角センサーは、それぞれのピン層の磁化方向が直交するように配置した2組のホイートストンブリッジ (Wheatstone bridge) で構成される。その角度検出精度は、ブリッジのオフセット補正後は453 Kまで±0.5度以下であった。2極着磁したNd-Fe-B磁石と組み合わせたとこ10 mT以上の磁界で角度誤差1度以下が得られた。

A magnetic rotation angle sensor fabricated using spin-valve GMR (SV-GMR) films has been developed. A synthetic-anti-ferromagnetic layer is used in the sensing film as the pinned layer without any anti-ferromagnetic materials. This film showed a flat temperature coefficient of magnetoresistance (MR) up to 590 K. The MR ratio of the film was 8.5 %, more than twice that of conventional anisotropic magnetoresistive (AMR) film. The magnetic rotation angle sensor, comprising a pair of Wheatstone bridges with pinned directions rectangular to each other, had less than a 0.5° angle error up to 453 K after the bridge offsets and output amplitudes had been compensated by applying a rotating 30 mT external magnetic field. Using with a Nd-Fe-B magnet magnetized diametrically, the sensor had an angle error of less than 1.0° when a field of 10 mT or more was applied.

●Key Word : GMR, magnetic sensor, synthetic anti-ferromagnetic film

●R&D Stage : Prototype

1. 緒 言

磁気式回転角センサーは、測定対象物の回転を非接触で測定できるため、信頼性に優れており、すでにAMR (Anisotropic Magnetoresistance: 異方性磁気抵抗) 膜を採用したものが実用化されている。この回転角センサーを広い温度範囲で使用するには、感度や温度特性の改良が求められている。

スピンバルブGMR膜 (Spin-Valve Giant Magnetoresistive film) はAMR膜よりも大きな磁気抵抗効果と小さな温度依存性を示し、現用のAMR膜を採用した回転角センサーに置き換わる可能性がある¹⁾。

D. Hammerschmidtらはすでに自動車用途のスピンバルブGMRセンサーを発表している²⁾。この例のようにピン層

に反強磁性膜を採用したセンサーの温度特性は、反強磁性膜のブロッキング温度の制約を受ける。

筆者らはより優れた温度特性を得るためには、反強磁性膜を使わないスピンバルブ膜の適用が好ましいと考え、ピン層に積層フェリ磁性交換膜を用いたシンセティック型スピンバルブGMR膜 (以下単にSV-GMR膜と記す) を採用した回転角センサーの特性について検討した。

2. SV-GMR膜を用いた回転角センサーの動作原理とその構成

SV-GMR膜を用いた回転角センサーの動作原理を図1に示す。SV-GMR膜はピン層 (固定層)、導電層、フリー層 (自由層) を積層した構造である。30 mTの回転磁界を

* 日立金属株式会社 情報部品カンパニー
** 日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所
*** 日立金属株式会社 新事業開発センター

* Information System Components Company, Hitachi Metals, Ltd.
** Advanced Electronic Research Laboratory, Hitachi Metals, Ltd.
*** New Business Development Center, Hitachi Metals, Ltd.

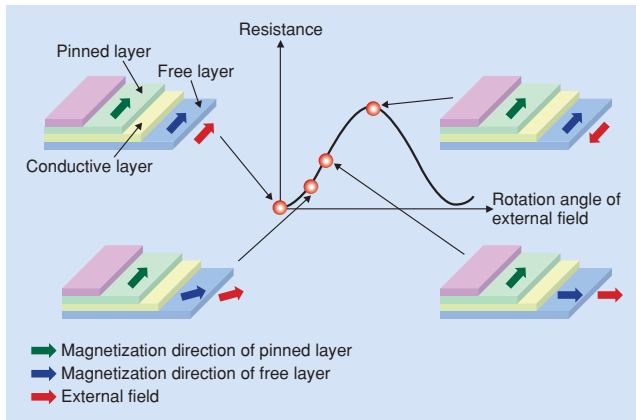


図1 SV-GMR回転角センサーの動作原理

Fig. 1 Working principle of angle sensor using SV-GMR

SV-GMR膜に印加すると、フリー層の磁化はその印加磁界の方向に回転する。したがって、ピン層とフリー層の磁化の角度がSV-GMR膜の抵抗変化を引き起こす。

すなわちこの抵抗変化は次式で記述される。

$$R(T) = R_{\min}(T) + \frac{\Delta R_m(T)}{2} [1 - \cos(\theta_f - \theta_p)] \quad (1)$$

ここで、抵抗 $R(T)$ は温度 (T) の関数であり、 $R_{\min}(T)$ はフリー層とピン層の磁化の方向が平行なときの抵抗、 $\Delta R_m(T)$ は磁気抵抗、 θ_f と θ_p はそれぞれフリー層と固定層の磁化方向の角度である。

このセンサーの特徴は(1)式に示すように、抵抗変化は印加する磁界の方向だけに依存し、磁界の強さには依存しないことである。

作製した回転角センサーのブリッジ構成を図2に示す。図に示すようにピン層の方向が互いに直交する2組のホイートストンブリッジからなり、合計8個の抵抗で構成されている³⁾。1組のブリッジがCOS信号を出力し、もう1組がSIN信号を出力する。図中の矢印はピン層の磁化の方向を

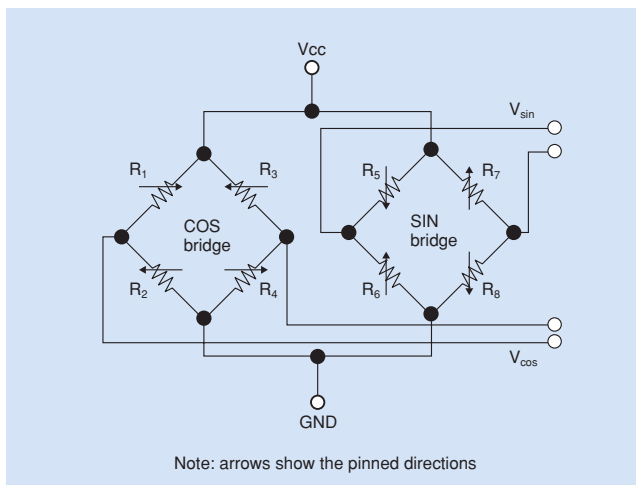


図2 SV-GMRセンサーのブリッジ構成

Fig. 2 Bridge configuration of SV-GMR sensor

示す。図2中の R_1 と R_2 、あるいは R_3 と R_4 は、ピン層の方向が互いに反平行となるように構成した。このブリッジ構成により、(2)式～(4)式に示すように、1組のブリッジ（COSブリッジ）から信号出力 $V_{\cos}$ 、もう1組のブリッジ（SINブリッジ）から信号出力 $V_{\sin}$ が得られ、それらの比を逆正接演算することにより、温度依存性の少ない回転角信号が得られる。

$$\theta_{\text{sens}} = \arctan\left(\frac{V_{\sin}}{V_{\cos}}\right) \quad (2)$$

$$V_{\cos} = V_{cc} \times \left(\frac{R_4(T)}{R_3(T) + R_4(T)} - \frac{R_2(T)}{R_1(T) + R_2(T)} \right) \quad (3)$$

$$V_{\sin} = V_{cc} \times \left(\frac{R_8(T)}{R_7(T) + R_8(T)} - \frac{R_6(T)}{R_5(T) + R_6(T)} \right) \quad (4)$$

ここで、 V_{cc} はブリッジに印加する電圧、 $R_i(T)$ ($i = 1 \sim 8$) は $i = 1 \sim 4$ がCOSブリッジ、 $i = 5 \sim 8$ がSINブリッジの抵抗であり、いずれも温度 T の関数である。 θ_{sens} が検出する回転角度である。この角度が印加した磁界の方向と等しい場合、角度誤差は発生しない。

よく知られているように、実際のブリッジではブリッジごとの抵抗のアンバランスにより多少のオフセットが生じる。そのため、精度よく回転角を検出するためには、オフセットの補正や出力の振幅補正が必要である。

オフセットは、図3に示すように信号出力の1/2の電圧と0 mVの差として得られる。

また、実用的見地からはオフセット補正を簡略化できることが望ましい。そこで、室温でいったんオフセット補正を行えば、低温でも高温でも追加のオフセット補正を行わずに角度誤差1度以下が達成できるように、ブリッジを構成するSV-GMR膜の抵抗の温度依存性を適正化した。この詳細はデータを示して後述する。

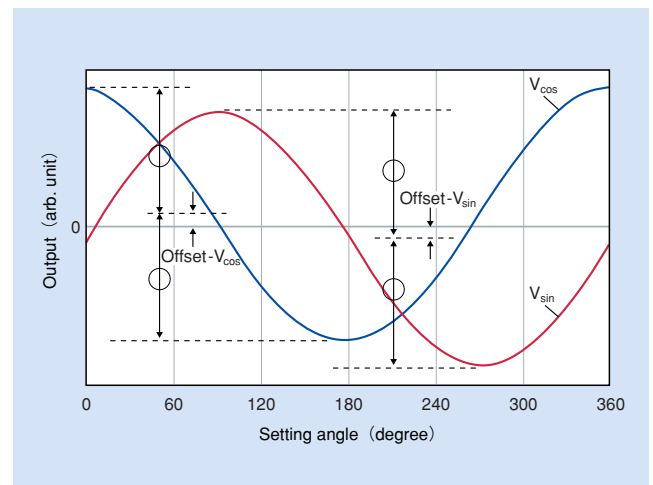


図3 オフセットの定義

Fig. 3 A definition of offset

3. 実験方法

SV-GMR膜はSi基板上にDCマグネトロンスパッタ法で作製した⁴⁾。ピン層には反強磁性膜を使用せず、Co-Fe/Ru/Co-Feの構成からなる積層フェリ磁性交換膜を用いた。SV-GMR膜の構成例を層順に記述すると、(基板)/(下地層)/Co-Fe (2.1 nm)/Ru (0.4 nm)/Co-Fe (2.0 nm)/Cu (2.2 nm)/Co-Fe (1.0 nm)/Ni-Fe (4.0 nm)/(保護層)である。ピン層の磁化の初期方向は磁場中スパッタしたCo-Fe層の磁化の方向になっている。2組のブリッジからなる回転角センサーは通常のフォトリソグラフィの方法で形成した。ここで、図2に示したようにピン層の磁化の方向は、2組のブリッジ間では互いに直交するように、ブリッジ内の2個の抵抗素子間では反平行になるように形成した。このようにブリッジを構成し、(1)～(4)式に示した演算を行うことで、優れた温度特性が得られる³⁾。

回転角の測定にあたっては互いに直交する2対のヘルムホルツコイルを使用して30 mTの回転磁界を印加し、室温から453 Kまで温度を変化させて行った。ブリッジに印加した電圧は5 Vとした。

また、実用的な応用も考慮して、2極着磁した永久磁石を用いた回転角の測定も合わせて行った。

4. 結果と考察

4.1 SV-GMR膜の特性

センサーに使用したSV-GMR膜の特性例を図4に示す。磁気抵抗変化率—印加磁界ヒステリシス (MR-hysteresis) のマイナーループは印加磁界5 kA/mでのフリー層の磁気特性を示す。精度よく回転角を検出するためには(1)式で示したようにフリー層が外部回転磁界に同期して回転する必要がある。

しかし、実際はピン層とフリー層との間に働く層間結合磁界 (H_{int})⁵⁾ やフリー層の異方性磁界 (H_k) が存在し、これらが回転角の検出精度を低下させる。そのため本実験では図4のマイナーループに示すように、フリー層の保磁力 (H_c)、誘導磁気異方性磁界 (H_k)、ピン層とフリー層との層間結合磁界 (H_{int}) が小さくなるようにSV-GMR膜を作製した。メジャーループは印加磁界240 kA/mで測定した。本測定はピン層の外部磁界に対する安定性を示している。精度よく回転角を検出するためには、外部回転磁界を印加した場合も、ピン層の方向が初期に設定した方向に保たれている必要がある。図4のメジャーループから、200 kA/m以下の磁場範囲ではピン層の向きが初期磁化の方向に保たれていることがわかる。このSV-GMR膜の磁気抵抗変化率 (MR比) は8.5 %であった。

また、図5にこのSV-GMR膜の磁気抵抗変化率の温度依存性を反強磁性膜を使ったSV-GMR膜と比較して示す。このSV-GMR膜のMR比は590 Kまでほとんど変化せず、比較としたPtMn反強磁性膜をピン層に使ったものよりも温度特性が優れている。

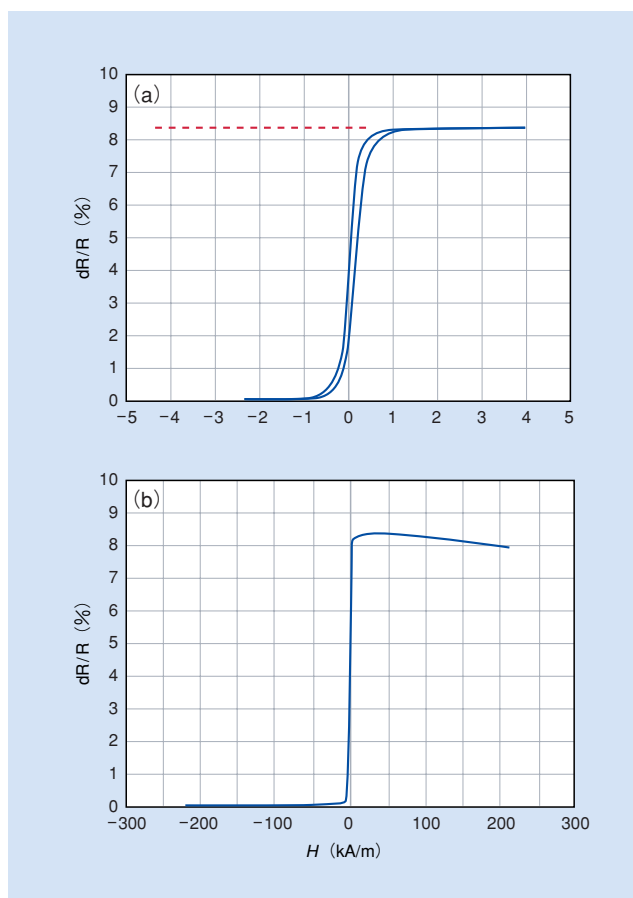


図4 SV-GMR膜のMR特性

(a) マイナーループ (b) メジャーループ

Fig. 4 MR (magnetoresistance) loop of a SV-GMR film
(a) minor loop and (b) major loop

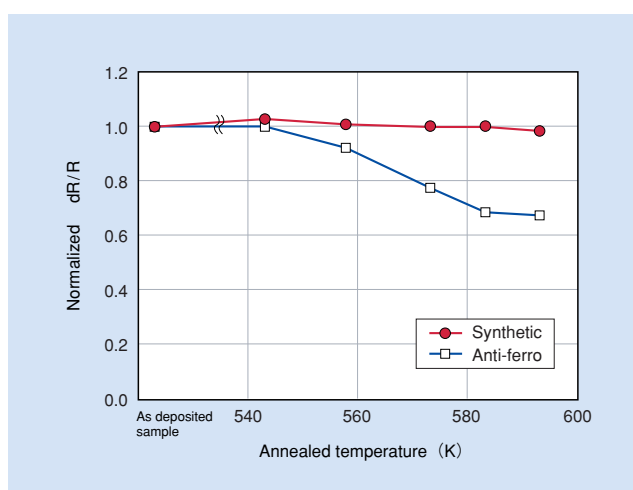


図5 磁気抵抗変化率の温度依存性

Fig. 5 Temperature dependence of magnetoresistance

4.2 回転角センサーの特性

本センサーをヘルムホルツコイルを用いた30 mTの1様回転磁界中に置き、室温と453 Kで測定した結果を図6に示す。図6にはセンサー出力 V_{cos} , V_{sin} およびそれらの出

力を理想的な正弦波曲線と比較したずれを示した。また、図 7 には、その回転角誤差、ヒステリシスに起因する誤差を示した。センサー出力 $V_{\cos}$, $V_{\sin}$ はほぼ正弦波に近く、室温、453 K ともに、その正弦波からのずれは 0.5 % 以下であった。出力の振幅は室温で 200 mV であり、453 K では出力は 125 mV まで低下した。したがって、その温度係数は -0.25 % である。オフセットと出力振幅を補正した後の角度誤差は室温、453 K ともに ± 0.5 度以下であった。このように精度よく回転角を検出できたのは、図 4 に示したように、層間結合磁界 (H_{int}) やフリー層の異方性磁界 (H_k) を低減した効果と考えられる。また、ヒステリシスに起因する誤差も室温、453 K ともに ± 0.5 度以下であった。この誤差を抑制できた一因として、図 4 に示したフリー層の保磁力 (H_c) を小さく抑えたことが挙げられる。また、角度誤差の設定角度依存性は、室温でも 453 K でも類似の波形を示しており、453 K までは回転角測定の実理に変化が生じていないことを示している。

次に 2 極着磁した NdFeB 磁石を使い、磁石とセンサー間の距離を変化させて、回転角を測定した。図 8 (a) に示すように、センサーを回転する磁石の中央に対向させて配置した。したがって、磁石の回転に対応してほぼ様な回転磁界がセンサーに印加されることになる。図 8 (b) に示すように磁石とセンサー間の距離を変えることにより、センサーに印加される磁界の強さが変わる。5 mm では

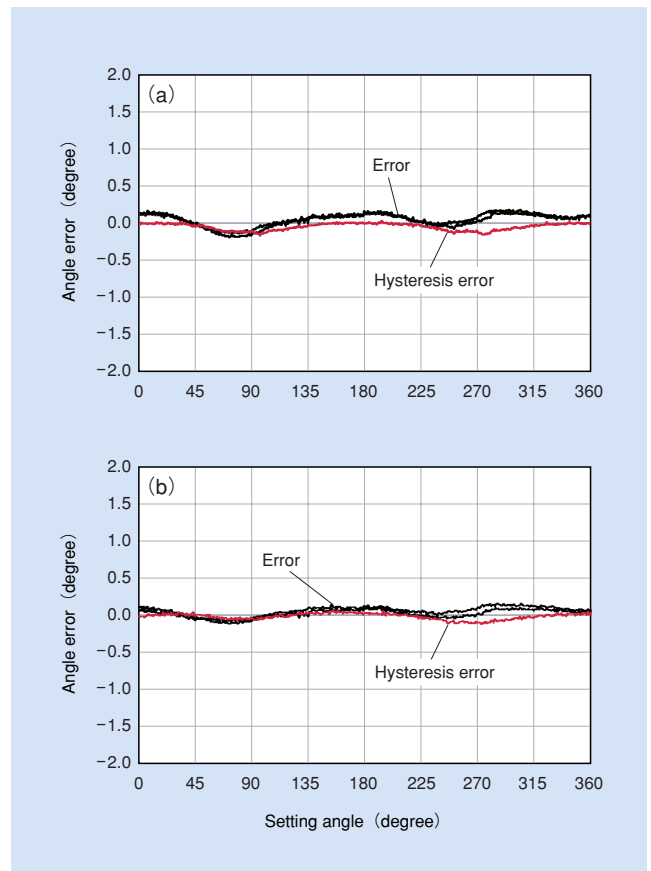


図 7 SV-GMR センサーの角度誤差 (a) 室温 (b) 453 K
Fig. 7 Angle error SV-GMR sensor operated at (a) room temperature and (b) 453 K

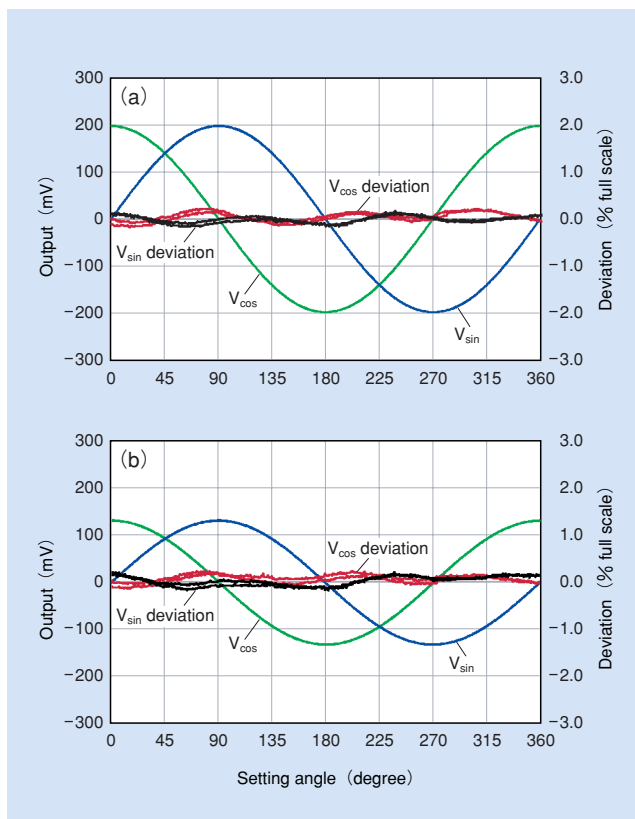


図 6 SV-GMR センサーの特性 (a) 室温 (b) 453 K
Fig. 6 SV-GMR sensor operation at (a) room temperature and (b) 453 K

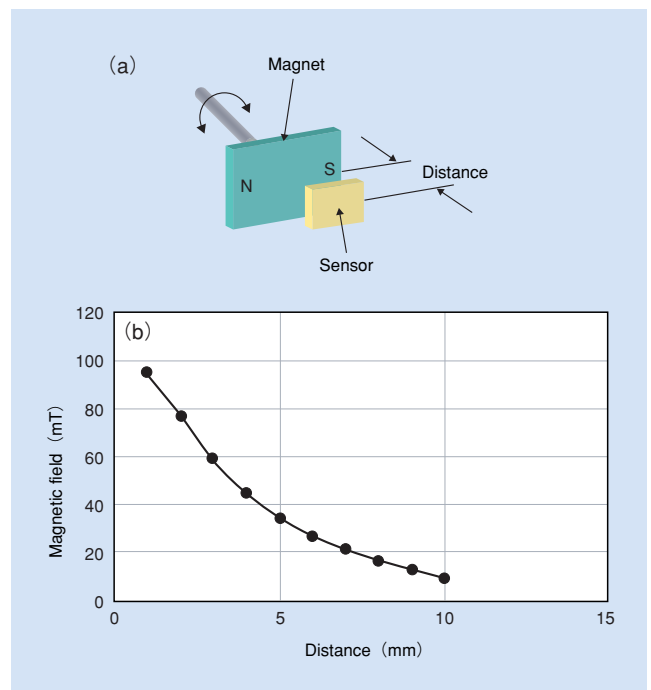


図 8 Nd-Fe-B 磁石を使った SV-GMR センサーの評価方法
(a) Nd-Fe-B 磁石と SV-GMR センサーの配置 (b) 磁界強度の距離依存性
Fig. 8 Evaluation method of SV-GMR sensor using a Nd-Fe-B magnet
(a) an arrangement of a couple of Nd-Fe-B magnet and SV-GMR sensor and (b) magnetic field intensity

35 mT, 10 mmでは10 mTである。図9には回転角誤差と印加磁界の強さとの関係を示す。印加磁界が10 mTの場合の角度誤差は±0.9度になっており、やや大きい。しかし、磁界の強さが増すにつれて精度は向上し、20 mT以上では±0.5度以下となっている。10 mTで角度誤差が±0.9度あった原因は、この強さの磁界ではフリー層が十分に飽和していなかったためと考えられる。一方、20 mT以上ではフリー層が飽和し、フリー層の磁化の方向と印加磁界の方向がほぼ一致する状態になったと考えられる。以上の測定結果から、このセンサーを使用して高精度で回転角を検出するためには20 mT以上の印加磁界が必要になることがわかる。

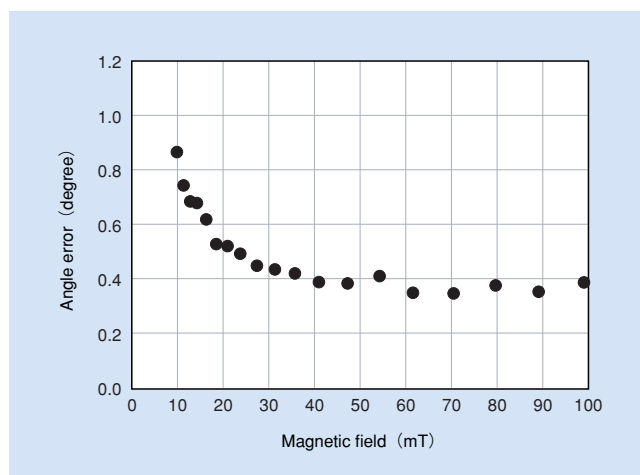


図9 SV-GMRセンサーの測定精度の磁界依存性
Fig. 9 Magnetic field dependency of angle accuracy of SV-GMR sensor

実用的な見地からは、出力の補正（オフセット補正、振幅補正）を簡略化することが望ましい。すなわち、室温でいったん補正すると、温度を変化させても補正を必要としないセンサーが求められる。

そこで、室温でブリッジ補正した場合に233 Kから423 Kの範囲でセンサーの角度精度がどのように変化するかを評価した。なお、センサーそのものの本質的な角度精度は図7に示したように±0.5度以下である。図10に測定結果を示す。室温では±0.5度以下であった角度誤差が低温側、高温側ともに大きくなった。しかし、その角度誤差は±1度以下であり、実用的な範囲内であった。また、423 Kでの角度誤差の設定角度に対する依存性は、図11 (a) に示すように1周期性であった。

温度変化させた場合に角度誤差が増加する主な原因は、ブリッジのオフセットの温度依存性と推定される。

オフセットがある場合、検出される回転角 θ は次式となる。

$$\theta = \arctan \left(\frac{V_{\sin} + V_{\text{off}}}{V_{\cos} + V_{\text{off}}} \right) \quad (5)$$

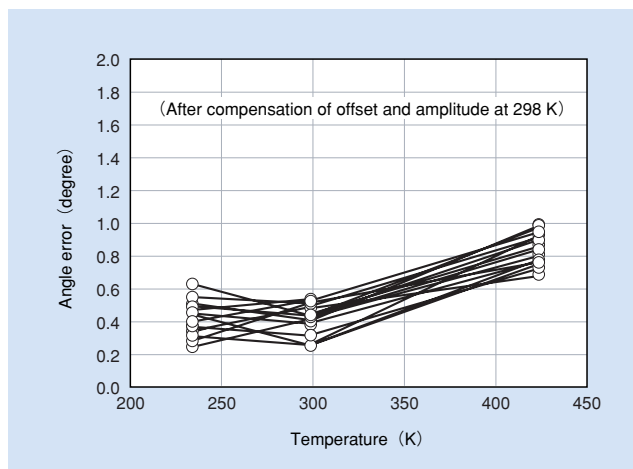


図10 SV-GMRセンサーの角度誤差の温度特性
Fig. 10 Temperature dependence of angle error of SV-GMR sensor

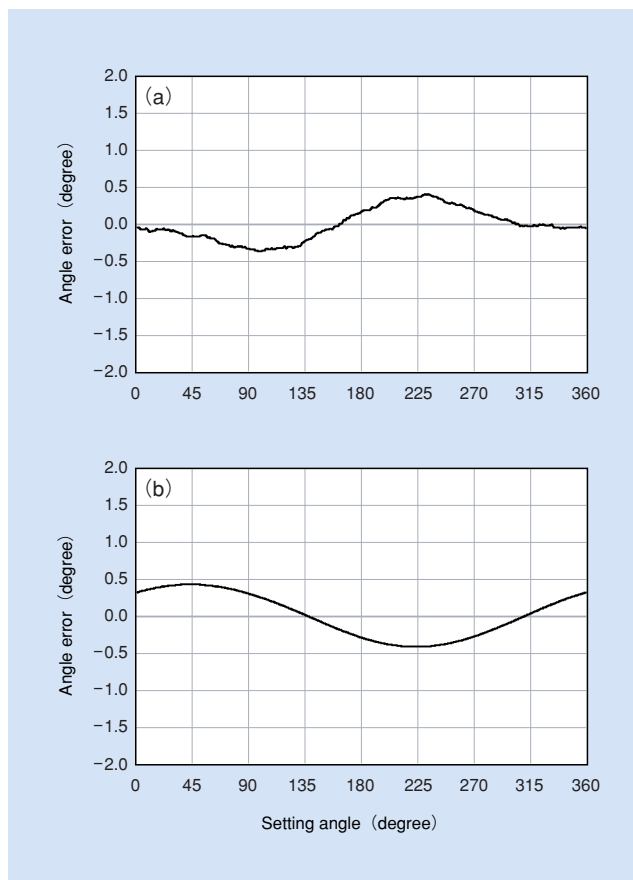


図11 角度誤差の設定角度依存性
(a) 測定値 (423 K) (b) 計算値 (出力400 mV, オフセット1 mV)
Fig. 11 Setting angle dependence of angle error
(a) experimental result at 423 K (b) calculated result under 400 mV amplitude and 1 mV offset

(5) 式を使って角度誤差の設定角度依存性を計算した。結果を図11 (b) に示す。このようにオフセットがある場合、角度誤差は1周期性となる。

したがって、実用的な見地からは、要求される温度範囲内で、オフセットの温度依存性が1 mV以下になるように、精度よくブリッジを構成する必要がある。

5. 結 言

ピン層に積層フェリ磁性交換膜を用いたシンセティック型SV-GMR膜を採用した回転角センサーの特性を評価した。

ピン層の磁化の方向が直交するように配置した2組のホイートストンブリッジからなる構成にしたところ、室温から453 Kまでの温度範囲で角度誤差 ± 0.5 度以下の回転角検出精度があることがわかった。また、2極着磁した磁石を回転させ、センサーと対向する配置にした場合、20 mT以上の磁界がセンサーに印加されていれば、角度誤差 ± 0.5 度以下が得られた。

さらに、実用的な見地から、いったん室温でブリッジ補正を行えば、追加の補正なしに233～423 Kの温度範囲で、このセンサーの角度誤差が ± 1 度以下になることを示した。このためには、ブリッジのオフセットを対象となる温度範囲で1 mV以下に抑制することを要する。

6. 謝 辞

本実験に際して、SV-GMR膜の作製方法に関してご指導いただいた、株式会社日立製作所 中央研究所 中本一広博士、星屋裕之氏、目黒賢一氏に厚く感謝いたします。

引用文献

- 1) H.Wakiwaka: J.Magn.Soc.Jpn., 28, pp.825-833 (2004).
- 2) D.Hammerschmidt et al.: SAE 2005 World Congress & Exhibition (2005-01-0462).
- 3) Japan PAT pending (2001-159542).
- 4) Y.Okada et al.: J.Magn.Soc.Jpn., 32, 285 (2008)
- 5) S.S.P.Parkin et al.: Phys.Rev.Lett., 66, 2152 (1991)



阿部 泰典

Yasunori Abe

日立金属株式会社
情報部品カンパニー



小野 友樹

Tomoki Ono

日立金属株式会社
情報部品カンパニー



相牟田 京平

Kyohei Aimuta

日立金属株式会社
先端エレクトロニクス研究所



岡田 泰行

Yasuyuki Okada

日立金属株式会社
先端エレクトロニクス研究所



川井 哲郎

Tetsuroh Kawai

日立金属株式会社
新事業開発センター