

異方性磁気抵抗効果素子とHall素子を用いた高精度角度センサ

High Accuracy Absolute Angle Sensor using Anisotropic Magneto Resistive Elements and Hall Elements

尾中和弘
Kazuhiro Onaka

一宮礼孝
Noritaka Ichinomiya

長部亮
Ryo Osabe

吉内茂裕
Shigehiro Yoshiuchi

藤浦英明
Hideaki Fujiura

山田清高
Kiyotaka Yamada

要 旨

自動運転システムの実現と小型化に向けて、レゾルバ（角度検出精度 $\pm 0.17^\circ$ 以下）に代わる小型の高精度角度センサのニーズが高まっている。これに応えるべく、車載環境に必要な広い磁界検出範囲を有し、強磁界下でも破壊しないNiFe膜を用いて、角度検出に最適化設計した異方性磁気抵抗効果（AMR）素子を作製し、回転角 $0^\circ \sim 180^\circ$ の領域で角度検出精度 $\pm 0.1^\circ$ 以下を確認した。さらに、AMR素子が検出不可能な極性判別を補完するHall素子と処理回路を組み合わせた高精度角度センサのモデルを作成し、回転角 $0^\circ \sim 360^\circ$ の領域で角度検出精度 $\pm 0.13^\circ$ で絶対角の検出が可能であることを確認し、次世代の自動運転システムへの対応の可能性を見いだした。

Abstract

To realize autonomous driving vehicles and achieve system miniaturization, demand has been increasing for a sensor that can be replaced with a resolver (angle detection accuracy: less than $\pm 0.17^\circ$). To respond to this, we have developed an Anisotropic Magneto Resistive (AMR) sensor using NiFe thin-film and optimized it for angle detection sensors. It is able to withstand the wide magnetic field required for the automotive market, and there is no breaking point under high magnetic fields. It has been confirmed for less than $\pm 0.1^\circ$ angle detection accuracy in the 0° to 180° rotation area. Furthermore, we have also created an absolute angle sensor combining Hall elements and a processing circuit to identify polarity discrimination. This has allowed us to confirm an angle detection accuracy of less than $\pm 0.13^\circ$ in a 0° to 360° rotation area. These results show that this sensor has the potential for use in autonomous driving systems.

1. はじめに

自動運転技術の導入は、2020年以降に一般道で導入がスタートされ、2025年には本格導入がもくろまれている。この技術を実現するためには、自動車の走る・止まる・曲がる、のすべての操作を、電子制御ユニット（ECU）を用いた電動アクチュエータ制御システムに切り替える必要がある。具体的なアプリケーションとしては、電動パワーステアリング（EPS）、シフトバイワイヤ、アクセルバイワイヤなどである。一例として自動運転技術確立のキーシステムであるEPSに関しその機能を説明する。

EPSは自動車のハンドル操作の際の操舵（そうだ）力をECUの制御を介してブラシレスDCモータ（BLDC）によってアシストすることで操作しやすくするための機構である。自動運転技術への応用例として、適正な走行ラインを走行するように制御する「レーントレース技術」[1]などがある。これらの実現にはEPSの高精度な制御が必要となり、EPS用BLDCの高精度角度検出が求められている。上記より、現在BLDCの角度検出には高精度角度検出用電磁誘導を応用したレゾルバ（角度検出精度 $\pm 0.17^\circ$ 以下）が多用されている。しかしながら、レゾルバはコイル、鉄材のステータ、回転子および処理回路から

構成されているため重量が重く、また体積も大きい。従って自動運転の実現に必須のシステム二重化を実施すると、さらに体積や重量が増大し、小型化や軽量化が実現できない。

本稿では、車載環境に必要な広い磁界検出範囲を有し電動アクチュエータから発生する強い外乱磁界でも破壊しない異方性磁気抵抗効果（AMR）素子を用いた角度センサを作成し、レゾルバ以上の高精度角度検出が可能であることを確認し、自動運転システムに有効であることを示された評価結果について報告する。

2. 高精度角度センサのコンセプト


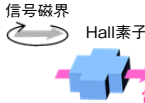
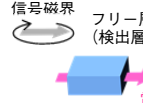
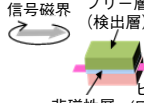
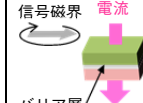
本章では、はじめに各車載用角度センサ素子を比較したうえで、 360° の絶対角度の検出を可能とするデバイスのコンセプトについて説明する。

2.1 角度センサ素子比較

第1表にEPSモータの角度検出に用いることができる磁気センサとして、レゾルバ、Hall素子、AMR素子、巨大磁気抵抗効果（GMR）素子、トンネル型磁気抵抗効果（TMR）素子を挙げ、各種デバイスの特徴の比較を示す。

第1表 各種車載用角度センサ素子の比較

Table 1 Comparison of various angle sensors

	レゾルバ	Hall素子	AMR素子	GMR素子	TMR素子
構造 (例)					
角度検出精度[°]	±0.17 : ○	±1.0 @60 mT : ×	±0.1 >@50 mT : ◎	±0.4 @40 mT : ×	±0.2 @20 mT : ○
位相差補正	---	不要 : ○	不要 : ○	必須 : ×	必須 : ×
サイズ[mm]	<φ25 : ×	□2×2 : ○			
磁界検出範囲 [mT]	---	20~80 : ×	20以上 : ○	30~80 : ×	20~80 : ×
磁気破壊値 [mT]	---	なし : ○	なし : ○	200以上 : ×	200以上 : ×
コスト	×	○	○	○	○
検出角度[°]	360 : ○	360 : ○	180 : ×	360 : ○	360 : ○

各社のカタログやデータシートを基に当社で作成

第1表に示すように、レゾルバは高精度で角度検出が可能であるが、サイズ・コスト面で不利であり、前述のとおりモータの機電一体構造による小型化への流れから、磁気センサへと移行されようとしている。

磁気センサ素子同士の比較では、AMR素子、TMR素子が角度検出精度の点で優れているが、TMR素子は強磁界(200 mT以上)で磁気破壊モードが存在する。

一方、AMR素子は破壊モードはなく、信号磁界(使用範囲: 20 mT以上)が大きいほど角度検出精度が向上するという特長があるが、一方で極性判別が不可能なため角度検出範囲が±180°までという欠点がある。

2.2 高精度角度センサの開発目標

車載環境(-40℃~150℃)での、角度検出の高精度確保、カスタマーの設計自由度(マグネットの種類、配置、他)を達成するための必要条件を以下のように設定した。

- (1) 高精度な角度検出のポテンシャルを有する
- (2) 今後車載で主に用いられる50 mT以上の磁界での検出精度を向上させ、外乱磁界による影響を抑制する
- (3) 磁気破壊モードがない
- (4) カスタマーでの位相差補正を必要としない

高精度角度センサの開発目標仕様を第2表に示す。

AMR素子に用いるAMR膜は、NiFe合金のみで構成されており、軟磁性単膜構造と面内磁気異方性を有しているため、磁界検出範囲が広く磁気破壊モードがない。ま

第2表 高精度角度センサの開発目標

Table 2 Development target of absolute angle detection sensor

検出角度	360°
角度検出精度	±0.15°, 50 mT以上
検出可能磁界範囲	20 mT~200 mT
磁気破壊モード	なし
位相差補正	なし

たパターン形状への依存度が大きく、容易に面内方向の磁界検出方向が制御できる。以上より、AMR素子を用いることとした。

一方AMR素子を実現できない極性判別は、Hall素子を搭載して補完し、360°検出を実現することとした。

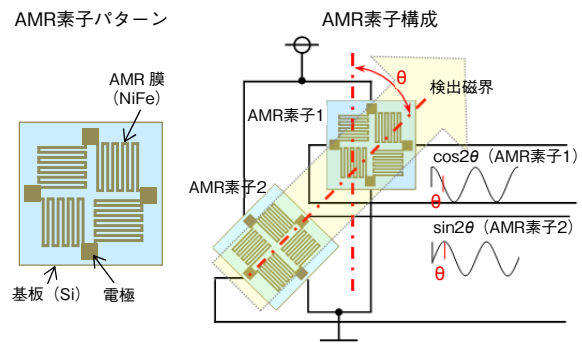
3. 角度検出に最適化したAMR素子開発

本章では、高精度角度検出を可能とするAMR素子の基本構成と要素技術に関して説明する。

3.1 AMR素子の基本構成

第1図に本稿で用いるAMR素子の構造とAMR素子を用いた磁界角度検出の原理図を示す。

第1図に示すように、AMR素子はSi(シリコン)基板上に強磁性磁気抵抗材料であるNiFe膜がミアンダ状に形成され、45°ずらして配置した2つのホイートストンブリッジ回路で構成されている。ここで使用するNiFe膜は、高精度角度検出と正逆回転での位置ずれ0°を可能とする低ヒステリシスと低磁歪(じわい)特性を併せもつNi:



第1図 AMR素子概要

Fig. 1 Overview of AMR element

83%，Fe：17%のパーマロイ膜である。このNiFe膜と同一平面内に、ミアンダ形状部のパターン幅と膜厚で定められる異方性磁界強度（Hk）以上の検出磁界が入力されたとき、抵抗値の変化は磁界の角度のみに依存し、磁界の入射角を θ とすると、 $\cos 2\theta$ にほぼ比例する関数として与えられる。このAMR素子を角度センサとして使用するために、第1図に示すとおり2つのAMR素子を45°ずらして配置することでそれぞれ $\cos 2\theta$ 、 $\sin 2\theta$ に比例した出力が得られ、これらの逆正接、すなわち、 $\arctan(\sin 2\theta/\cos 2\theta)$ とすることで最終出力 θ を得ることができる。

3.2 高精度角度検出AMR素子の開発方針

本絶対角センサの角度検出精度悪化の主要因を示す。

- (1) 出力波形の歪（ひず）みによる理想値からのずれ
- (2) 経時変化や温度変化によるオフセット電圧ドリフト
- (3) 経時変化や温度変化による出力値のドリフト

上記のうち、(2) (3) については、回路側での補正が可能であるが、(1) の項目に関しては補正が不可能なため、AMR膜の波形歪みを抑制する必要がある。

この波形歪みを抑制するには、AMR特性が磁氣的に飽和しない領域での検出を避けなければならない。

第2図にAMR特性とHkの関係を示す。

AMR特性は $\Delta\rho/\rho$ で示され、出力電圧値に寄与する。ここで ρ は比抵抗、 $\Delta\rho$ は比抵抗の磁気抵抗変化量である。

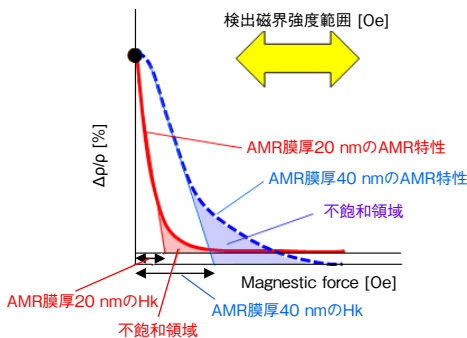
またHkは一般的に以下の式で近似される[2]。

$$Hk = a / Ms(T / W) \dots\dots\dots (1)$$

Ms：飽和磁化（NiFe：1.2 T），T：NiFe膜厚

W：ミアンダ形状のパターン幅，a：定数

第2図でわかるように、Hkを相対的に検出磁界強度より小さくすることにより波形歪みを抑制して検出角度精度向上に寄与することができる。(1) 式より、 $a \cdot Ms$ は定数であるため、Hkを小さくするにはパターンの断面積のアスペクト比（形状異方性）を意味する T/W を小さくす



第2図 AMR特性（ $\Delta\rho/\rho$ ）とHkの関係
Fig. 2 Relationship of AMR characteristics and Hk

ることが波形歪みを抑制する有効な方策であることがわかる。これよりWを大きくするかTを小さくする必要がある。このため、本開発では抵抗値増加によるチップサイズの小型化と波形歪み抑制の両立を目指して、Tを小さくしてHkを低下させ、より波形歪みを小さくする方向で検討を推進することとした。

3.3 高精度NiFe膜プロセス開発

センサの角度検出精度の目標値 $\pm 0.15^\circ$ より、処理回路分のマージンを逆算してAMR素子単体の検出角度精度は検出磁界50 mTにて $\pm 0.1^\circ$ とした。またHkをできる限り小さくするため、膜厚（T）を量産品の膜厚40 nmの1/2である20 nmとし、膜厚均一性は処理回路の抵抗値の要求仕様より ± 1 nmと設定した。またパターン幅（W）は抵抗値とチップサイズより算出して20 μm を目標とした。さらに、出力電圧値に寄与するAMR特性は、処理回路の要求仕様より2%以上と設定した。

一方、量産中の蒸着の膜厚は40 nmであり、角度検出精度は50 mTの信号磁界で $\pm 0.3^\circ$ レベルであること、また、膜厚35 nm以下ではAMR特性が1.5%~2.0%と不安定となり量産化できないことが実測にて確認されている。これは、NiFe蒸着膜の密度が低く、十分な膜厚を確保しなければ不連続の島状構造となるため、 ρ が大きくなっていることが要因と考えられる。よって、NiFe膜の密度を上げるために、成膜エネルギーを大きくして成膜後の膜内に空隙を生じるのを防止するとともに、基板に対してNiFe粒子が基板に対して垂直方向から進入する成膜プロセスが必要と考察した。

上記を実現するために、NiFe膜の成膜は蒸着膜と比較して1000倍以上の成膜エネルギーであるマグネトロンDCスパッタ（ 10^2 eV以上）にて行うこととした。マグネトロンDCスパッタは、ターゲット上の磁界強度の最大部分が最も成膜レートが大きく、NiFe粒子がターゲットに対して垂直方向に生成する。NiFe粒子の進入方向の規則性については、平均自由行程（mean free path. 以降、mfp）をターゲットと基板間の距離（T-S）より長くすることによりスパッタ粒子が基板に到達するまでのArガス分子との衝突回数を抑制し、基板には垂直方向のスパッタ粒子を支配的に成膜に寄与させることで達成できると考察した。

ここで、スパッタ粒子のmfpとスパッタガス圧との関係式を次に示す[3]。

$$\lambda = 1.33/P \dots\dots\dots (2)$$

λ ：mfp[cm]，P：ガス圧[Pa]

(2) 式より、mfpを長くするには、低ガス圧で放電させる必要がある。ここで、T-Sはターゲット上のプラズマ

からの影響を勘案して60 mm以上必要とし、mfpはT-Sの2倍以上とした。これを達成するためには0.1 Pa以下での安定したスパッタ放電が必要であるため、これを実現できるスパッタ装置の電極構造を検討した。

一般に、低ガス圧では放電しにくい。このため、以下の点に着目してスパッタ装置の開発を推進した。

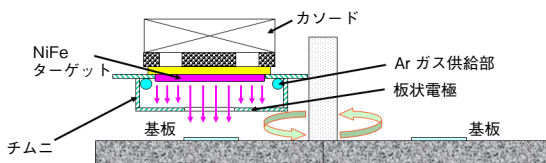
- (1) 低ガス圧でのインピーダンスの低下を抑制
- (2) 基板に対し垂直方向のNiFe粒子のみ成膜に寄与

まず上記(1)を達成するために、ターゲットに対向した板状の電極部を作り、この電極部とターゲット間の距離を小さくするとともに、ターゲットの外側に設けたArガス供給部分のさらに外側に壁を設け、前記対向の電極部と一体化して、放電部分を完全に囲ってガスの分布密度を向上させた。さらに、マグネトロン用バイアスマグネットにNdFeBを用いて、NiFeターゲット上のマグネトロン発生部分の磁界強度を80 mT以上とした。これらにより電極部のインピーダンスの低減を図った。

次に(2)を達成するために、上記マグネトロン発生部分に合致する領域に、上記対向の板状電極部の開口部を設け、その外側に板状電極部と対向して基板を設置した。さらに、マグネトロン発生部分は直線になるようにバイアスマグネットを設計し、どの領域も同一方向からNiFe粒子が基板に向かって進入するようにした。

ここで、低ガス圧対向スパッタ装置の概要を第3図に、仕様を第3表に示す。

第3図に示すとおり、本スパッタ装置は、ターゲット上のプラズマ発生部分のみを開口させた板状電極を装着し、Arガス供給部を内部に設置することにより0.06 Paレベルの低ガス圧放電が可能であることを確認した。これ



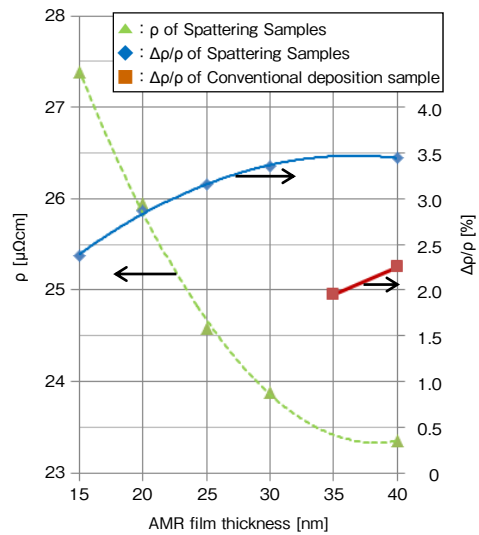
第3図 低ガス圧対向スパッタ装置概要
Fig. 3 Outline of low gas pressure facing target sputtering equipment

第3表 低ガス圧対向スパッタ装置仕様
Table 3 Specifications of low gas pressure facing target sputtering equipment

膜厚不均一	20±1 nm
到達真空度	6×10 ⁻⁶ Pa以下
基板温度	30±5℃
スパッタガス圧	0.06 Pa以上

により、スパッタ粒子のmfpがターゲットと基板の距離(T-S)の2.5倍となり、高密度のAMR膜の成膜が可能となった。

本プロセスを用いたAMR膜の特性を確認するために、AMR膜厚とAMR特性および比抵抗を確認した。その結果を第4図に示す。

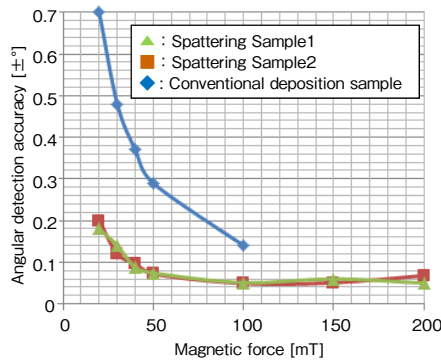


第4図 対向スパッタ装置および従来の蒸着装置を用いて作成したAMR素子のAMR膜厚と比抵抗およびΔρ/ρの関係
Fig. 4 Relationship between AMR film thickness and ρ, Δρ/ρ fabricated using low gas pressure facing target sputtering equipment and conventional deposition equipment

第4図より、スパッタ膜では15 nm以上でAMR特性が2.3 %を示し、2.0 %以上の目標値を達成していることがわかる。一方で、蒸着膜は35 nmでAMR特性が1.95 %と2.0 %を下回り、目標特性に到達していないことがわかる。

上記条件にて20 nm±1 nm成膜したAMR膜と、蒸着にて40 nm±1 nmに成膜したAMR膜にて作成したAMR素子の磁界強度と角度検出精度の関係を第5図に示す。角度検出精度測定は、ヘルムホルツコイルによる測定空間にて均一磁場(20 mT~200 mT)を印加して、その空間で磁場方向に平行の平面上で評価サンプルを回転させて、基準エンコーダと同期させてその精度を測定した。角度検出精度の定義は、車載での実使用環境から勘案して、0°~360°範囲全域において基準エンコーダに対する角度検出精度の最大値と最小値の差の1/2とした。

この結果、第5図に示すように蒸着膜は磁界強度50 mTで±0.29°であり、目標値の±0.1°に対して未達であるが、スパッタにて成膜した2個のサンプルのいずれも磁界強度20 mT~40 mTで±0.08°~0.2°、50 mT以上では目標とする±0.1°以下の角度検出精度±0.05°~±0.07°が得られた。



第5図 対向スパッタ装置と従来の蒸着装置を用いて作成したAMR素子の磁界強度と角度検出精度の関係
 Fig. 5 Relationship between magnetic field force and angular detection accuracy of AMR element fabricated using low gas pressure facing target sputtering equipment and conventional deposition equipment

4. 360°角度検出処理回路の開発

この章では、前記AMR素子を用いて360°の絶対角検出を実現するための処理回路の開発について説明する。

4.1 AMR素子+Hall素子のコンセプト

前章で述べたとおり、AMR素子を用いた角度センサは素子出力 $\cos\theta$ 、 $\sin\theta$ ではなく $\cos2\theta$ 、 $\sin2\theta$ に比例することから、逆正接をとったとき $0^\circ\sim180^\circ$ と $180^\circ\sim360^\circ$ のときでそれぞれ同じ出力となるため、原理的に検出範囲として 180° までしか得られないことになる。

そこで、AMR素子の長所である高精度角度検出の特性を活かしつつ、象限判別を補完できるAMR素子とHall素子を組み合わせたセンサ構成を提示する。

Hall素子、AMR素子と同一の面内方向の磁界の角度検出ができる縦型タイプを使用した。

4.2 360°角度検出アルゴリズム

第6図にAMR素子+Hall素子の検出の原理を示す。

以下、順を追って判別方法につき説明を行う。

(1) AMR素子出力 ①, ②

AMR素子の $\sin2\theta$ 差動出力、 $\cos2\theta$ 差動出力の振幅およびオフセットを規格化する。

(2) 角度演算 ③

①, ②で得られたAMR素子の $\sin2\theta$ 、 $\cos2\theta$ 出力に対しデジタル回路にて \arctan 演算を行い、角度成分(θ)に変換する。(角度成分の範囲は $0^\circ\sim180^\circ$)

(3) Hall素子出力 ④, ⑤

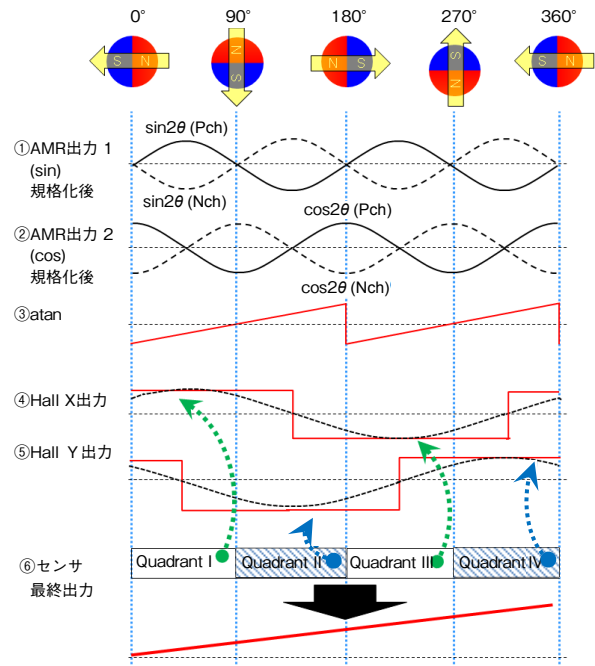
互いに 90° 位相をずらした2つのHall素子 (Hall X, Hall Y) を用いてそれぞれの角度を検出する (黒破

線)。(図はHall X: -45° , Hall Y: $+45^\circ$ の基準位置に配置)

このHall素子の出力は、素子が第1象限 ($0^\circ\sim90^\circ$) ~第4象限 ($270^\circ\sim360^\circ$) のどの象限にいるかを判別するために利用するため、コンパレータにてHi/Lowの2値に変換し、デジタル回路へ入力する (赤実線)。

(4) 象限判定 ⑥

③の角度成分に対し、④, ⑤のHi/Lowの値を用いて象限判定を行い、角度成分を $0^\circ\sim360^\circ$ へ換算する。このとき、象限判別用のHall X, Yの角度検出精度は $\pm45^\circ$ の範囲であれば判別結果には影響せず、AMRの角度検出精度を保ちながら $0^\circ\sim360^\circ$ の範囲での角度検出が実現可能となる。



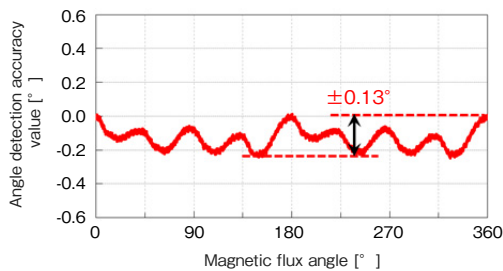
第6図 AMR素子とHall素子による360°角度検出原理
 Fig. 6 360° detection algorithm using AMR and Hall elements

5. 検証結果

第7図にAMR素子と象限判別用Hall素子を処理回路に搭載し、象限判別と角度演算を行った絶対角センサの原理検証サンプルの実測結果を示す。

X軸は測定結果の入力角度 (回転角)、Y軸は出力角度 (センサ出力) の絶対角センサの角度検出精度を示す。 $0^\circ\sim360^\circ$ の範囲にて角度検出精度は第5図で用いた同様の角度検出精度導出により $\pm0.13^\circ$ であることがわかる。

まずAMR素子は50 mT以上では角度検出精度 $\pm0.05^\circ$



第7図 原理検証サンプルの実測結果（角度検出精度50 mT）

Fig. 7 Actual measurement results of verification sample
(angle detection accuracy value: 50 mT)

～ $\pm 0.07^\circ$ と安定しており、Hkの不飽和成分が十分小さくなっていることがわかる。実測値より、評価したAMR素子のHkは約1 mTであったが、第5図より角度検出精度が安定するのは50 mT以上であるため、Hkは検出磁界の1/50以下が望ましいことがわかる。このため、30 mT以下での高精度角度検出を実現するには、15 nm以下の膜厚でのAMR膜特性の安定化とパターン幅25 μm 以上の設計が必須と考えられる。

また、50 mT以上で確認される角度検出精度の値に関しては、測定機器に用いている $\pm 0.002^\circ$ の精度の基準エンコーダの機械的誤差や電気ノイズに起因する測定精度の依存度が大きいと考えられる。このため、今後は測定誤差の直接要因を特定し、 $\pm 0.01^\circ$ 以下の検出精度を目指す。

一方、処理回路部は、AMR素子の50 mT以上での角度検出精度が $\pm 0.05^\circ \sim 0.07^\circ$ レベルであるため、処理回路と角度演算ロジックで約 $\pm 0.05^\circ$ 劣化していると予想される。この現象については、アナログ回路部やデジタル出力部のノイズ成分が寄与していると考えられ、今後は発生要因を特定して誤差発生の抑制を検討する。

6. まとめ

車載環境に必要な広い磁界検出範囲を有し、強磁界下でも破壊しないAMR素子のNiFe膜プロセスを最適化した高精度角度センサを作製し、 $\pm 0.1^\circ$ 以下の角度検出が可能であることを確認した。また、AMR素子とHall素子とを組み合わせた処理回路にて、 $0^\circ \sim 360^\circ$ をレゾルバ（角度検出精度 $\pm 0.17^\circ$ ）以上の $\pm 0.13^\circ$ の角度検出精度が可能であることを実証し、次世代の車載用の高精度角度検出に使用可能であることを示した。

現在、さらに上記高精度角度センサを実装後に処理回路の最終段にてデジタルの直線性補正技術や自動補正機能を用いて、実力値で $\pm 0.02^\circ$ を達成した。

今後は、処理回路の誤差成分の抑制や、デジタル回路

による取り付け部やマグネットの着磁精度、温度特性の補正精度を向上させて、車載の環境下で $\pm 0.1^\circ$ の角度検出精度の達成を目指す。

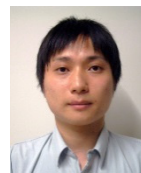
参考文献

- [1] トヨタ自動車(株), Sustainability Report 2014, 2014, pp.34-35.
- [2] J.H.J Fluitman, "The influence of sample geometry on the magnetoresistance of Ni-Fe films," Thin Solid Films, vol. 16, issue 3, 1973, pp.269-276.
- [3] 金原 繁, スパッタリング現象, 東京大学出版会, 東京, 1991, pp.151.

執筆者紹介



尾中 和弘 Kazuhiro Onaka
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 デバイスソリューション事業部
Device Solution Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



長部 亮 Ryo Osabe
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 デバイスソリューション事業部
Device Solution Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



藤浦 英明 Hideaki Fujiura
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 デバイスソリューション事業部
Device Solution Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



一宮 礼孝 Noritaka Ichinomiya
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 デバイスソリューション事業部
Device Solution Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



吉内 茂裕 Shigehiro Yoshiuchi
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 デバイスソリューション事業部
Device Solution Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



山田 清高 Kiyotaka Yamada
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 デバイスソリューション事業部
Device Solution Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company
工学博士