

# TMR効果を利用した最先端磁気センシング

## TMR: A New Frontier for Magnetic Sensing

Christophe DURET\*  
上野 新太郎\* Shintarou UENO



トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果を利用した新たな線形磁気センサ技術を紹介する。TMR 効果の原理は、2007年に初めてノーベル物理学賞で認められた新たな研究分野であるスピントロニクスに基づいている。電子を電荷として扱う従来の電子工学とは対照的に、磁気トンネル接合 (MTJ) 素子は、電子の量子スピン状態も利用する。NTN-SNRは2005年から2010年までフランス国立研究機構のCAMELプロジェクトに参画し、センサ用途のMTJ素子を開発、広い動作距離、高い設計自由度、厳しい環境に対するロバスト性、コストパフォーマンスなど、既存技術と比較して優れた性能を確認した。本稿では、TMR効果を利用したセンサの優れた特性を解説すると共に、新たな磁気センシングの可能性について述べる。

We present here a new linear magnetic sensing technology, based on Tunnel Magneto Resistance (TMR). The TMR principle derives from Spintronics, a new branch of Physics which received the 2007 Nobel Prize in Physics. Contrary to “traditional” electronics, a Magnetic Tunnel Junction (MTJ) uses not only the electric charge of the electron, but also its quantum spin value.

During the CAMEL project, we have designed MTJs for sensor applications, i.e. for having, compared to other existing technologies, greater performances, extended working ranges and design capabilities, the robustness needed for harsh mounting and working conditions and of course a cost compatible with a market introduction. The fascinating properties of the TMR sensing elements we have developed open the door to many new possibilities of magnetic sensing.

### 1. NTN-SNRの磁気センシング技術

#### 1.1 アクティブセンサ付軸受ASB®

NTN-SNRは、自動車のアンチロック・ブレーキ・システム (ABS) や横滑り防止装置 (ESP) に使用される車輪速の検出技術として、図1に示すアクティブセンサ付軸受ASB®を開発した。重量やスペースの削減、厳しい環境に対するロバスト性やゼロ速検出機能などを改善し、ASB®は自動車産業における車輪速の検出の事実上の世界標準技術となっている。以下にASB®の構成について示す。

- ターゲット磁石

軸受シールに一体化した多極リング磁石。車輪の回転速度に比例した周波数の交番磁界を発生する。

- 検出素子

磁気抵抗効果またはホール効果を利用した検出素

子。ターゲット磁石が発生する交番磁界を非接触で測定し、ABSやESPで利用する車輪回転速度を算出する。



図1 ASB®の構成例  
Example of ASB integration in a roller bearing unit

\*NTN-SNR ROULEMENTS Research & Innovation Mechatronics

## 1.2 高分解能回転センサMPS40Sの開発と応用

ASB®開発後、ステアリングの操舵角や電動モータの制御用に回転角度を高精度に検出する低コストなセンサの研究を継続し、**図2**に示すホール素子と信号処理回路を内蔵した特定用途向け集積回路MPS40S<sup>1)</sup>を開発した。MPS40Sは、高分解能パルス信号や、原点位置信号を出力する機能に加え、広範囲の磁極幅に適用可能な汎用性も備え<sup>2)</sup>、自動車用途向け電子部品としての品質規格AEC-Q100も満足する。

サーボモータの回転制御など、産業機械へのMPS40Sの展開も図っている。**図3**にMPS40Sと軸受をユニット化し、機器への組み付け性を向上させた「原点信号出力タイプ高分解能回転センサ付軸受<sup>3)</sup>」を示す。

MPS40Sを応用した事例として、**図4**にバーニヤ原理により絶対角度を検出する高精度磁気式角度センサ<sup>4)</sup>を紹介する。本センサは、既存の軸端配置のセンサでは難しかった中空軸への対応が可能である。軸受の回転輪に多極リング磁石を一体化し、固定輪に信号処理回路を内蔵した検出部を配置することで、組み込

み時の軸方向スキマ調整を不要とした。専用多極リング磁石には内側と外側で磁極数が異なる同心円状の2列の磁気パターンを着磁してパターンの相対位置ずれ量を磁気センサ信号から算出することで、高速回転中でも高精度に絶対角度を演算できる。

## 2. 各種磁気センサの特徴

幅広いアプリケーションに磁気センシング技術を適用するためには、出力精度・周波数帯域・消費電力などの磁気検出センサの基本性能、エアギャップ・温度に対する動作範囲、センサ寸法、取り付け公差、ロバスト性、コストなどを考慮する必要がある。自動車や産業機械用途の厳しい使用環境下では、ホール素子、異方性磁気抵抗 (AMR) 素子、巨大磁気抵抗 (GMR) 素子が代表的な磁界検出手段としてセンサに使用される<sup>5)</sup>。以下にそれぞれの特徴を示す。

### ●ホール素子

直線性が非常に良く安価である。一方、感度が限られており、消費電力およびオフセットドリフトが大きい。

### ●AMR素子

感度がホール素子より高くヒステリシスも少ない。更に、バーバーポール構造と呼ばれる特殊なセンサ



図2 MPS40S外観  
Appearance of MPS40S

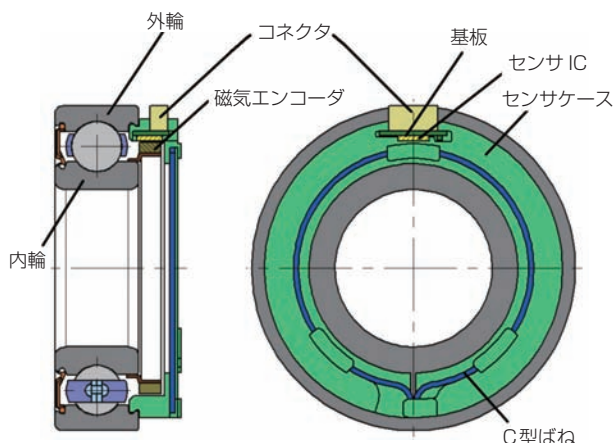


図3 高分解能回転センサ付軸受  
High resolution sensor bearing



図4 高精度磁気式角度センサ  
High precision magnetic angle sensor

構造やフリップ駆動方法、安定化用磁石を配することにより、直線性・オフセットフリー・高磁界検出の実現が可能。一方、高温環境下では感度低下・直線性の微小な劣化が見られる。

#### ● GMR素子

3つの素子の中で最も感度が高く、入力磁界強度の許容範囲も広い。ただし直線性などの性能は、温度や入力磁界強度が動作領域を超えた途端、著しく劣化する。

### 3. トンネル磁気抵抗(TMR)効果

MTJ素子\*1の基礎理論は、既存の電子工学に基づく電子の電気的性質に加え、電子の量子スピン状態を活用したスピントロニクスに基づいている。2007年にPr. A. FertとPr. P. Grünbergがノーベル物理学賞を受賞したことにより、スピントロニクスは一気に注目を集めた。

図5に示すように、MTJ素子は、一般的に酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) や酸化マグネシウム ( $\text{MgO}$ ) で形成した絶縁体の薄膜層を、2つの強磁性体層で挟み込んだ構造であり、GMR素子と非常に似た積層構造を持っている。MTJ素子は、これらの層に対して垂直な方向に電流が流れ、一方の強磁性体層内の電子が

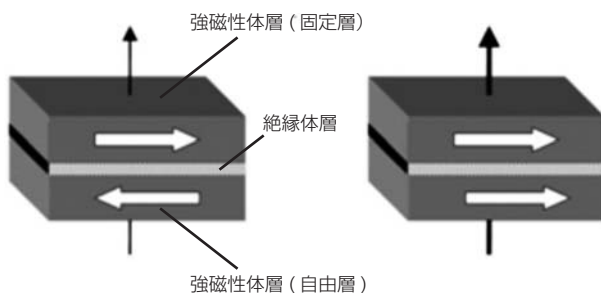


図5 異なる磁化方向の関係にあるMTJ素子  
(左：磁化方向が反平行，右：平行。  
黒矢印：電流の向き，白矢印：磁化方向)

Representation of a MTJ in an antiparallel magnetization configuration (left) and in a parallel magnetization configuration (right). The black arrow represents the current going through the junction

量子力学的効果によって絶縁体層を通過し、トンネル効果でもう一方の強磁性体層内に注入される。その際、2つの強磁性体層の磁化方向の相対角度差に応じ通過する電流に対する電気抵抗値が大きく変わり、2層の磁化方向が反平行の場合は高抵抗、平行の場合は低抵抗、つまり、2層の磁化方向の相対角度に応じて抵抗値が変化する。このような現象をトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果\*2という。この効果を利用して外部磁界を検出するためには、外部磁界に対し一方の強磁性体層(固定層、ピン層とも呼ばれる)の磁化方向が固定されたままで、他方の強磁性体層(自由層、フリー層と呼ばれる)の磁化方向が外部磁界に応じて変化するよう構成する。

低温でのTMR効果は1975年に発見されたが<sup>6)</sup>、応用が困難として当時はほとんど注目されなかった。しかし、1995年、室温・低磁界で20%近い磁気抵抗変化(当時の最高値)を実現し、TMR効果は一躍脚光を浴びることになった<sup>7) 8)</sup>。

近年の研究では、絶縁体層の材料としてアモルファスの $\text{Al}_2\text{O}_3$ に代えて結晶性の $\text{MgO}$  (100) を用い、室温で約600%<sup>9)</sup> という非常に高い磁気抵抗変化を実現できることが報告されている<sup>10) 11)</sup>。TMR効果は、近年ハードディスクの読み込みヘッドに利用されているが、0と1の量子情報を読み書きする磁気抵抗メモリ(MRAM<sup>12)</sup>)や磁気センサとしての用途開発は始まったばかりである<sup>13) 14)</sup>。また、MTJ素子を磁気センサに適用するには、MRAMやハードディスクヘッドとは異なり、外部磁界の強さや方向に比例して抵抗値を変化させる必要がある。

### 4. CAMELプロジェクト

NTN-SNRは、2000年以降TMR効果の研究開発に注力し<sup>15) 16) 17)</sup>、MTJ素子の積層構造やセンサ構成など基礎的な研究成果の特許を出願している。また、2005年から2010年までCAMELプロジェクト(“CApteur Magnétique à effet tunnEL”の略)で技術開発・実用化の加速を図った。本プロジェクトは、フランス国立研究機構(ANR)の支援を受け、NTN-SNR社(エンドユーザー・プロジェクトリーダー)、Sensitec社(MTJ素子の作製)、および2つの公的研究機関の産学連携で進められた。

本プロジェクトは、センサ用途をターゲットとしたMTJ素子および線形磁気センシング技術の確立、

\*1 MTJ素子：Magnetic Tunnel Junction element。  
バリア層、トンネル障壁とも呼ばれる厚さ数nmの絶縁体層の両側を、強磁性金属極である2つの強磁性体層で挟み込んだ素子。

\*2 TMR効果：Tunnel Magnetoresistance Effect。  
MTJ素子によって抵抗変化が起こる現象。

Sensitec社が保有するAMR・GMR素子の既存製造ラインを活用した生産、量産への適応性を評価している<sup>18)</sup>。TMR効果を活用した線形磁気センシングの例は図6の右のグラフに示すように、測定結果は直線近似とほぼ一致し、ヒステリシスも十分小さいことが確かめられた。

なお、本プロジェクトは、優れた基礎技術を発展させ実用化に導いた功績が認められ、2010年フランス物理学会からイブ・ロカール賞（Yves Rocard）が授与された。

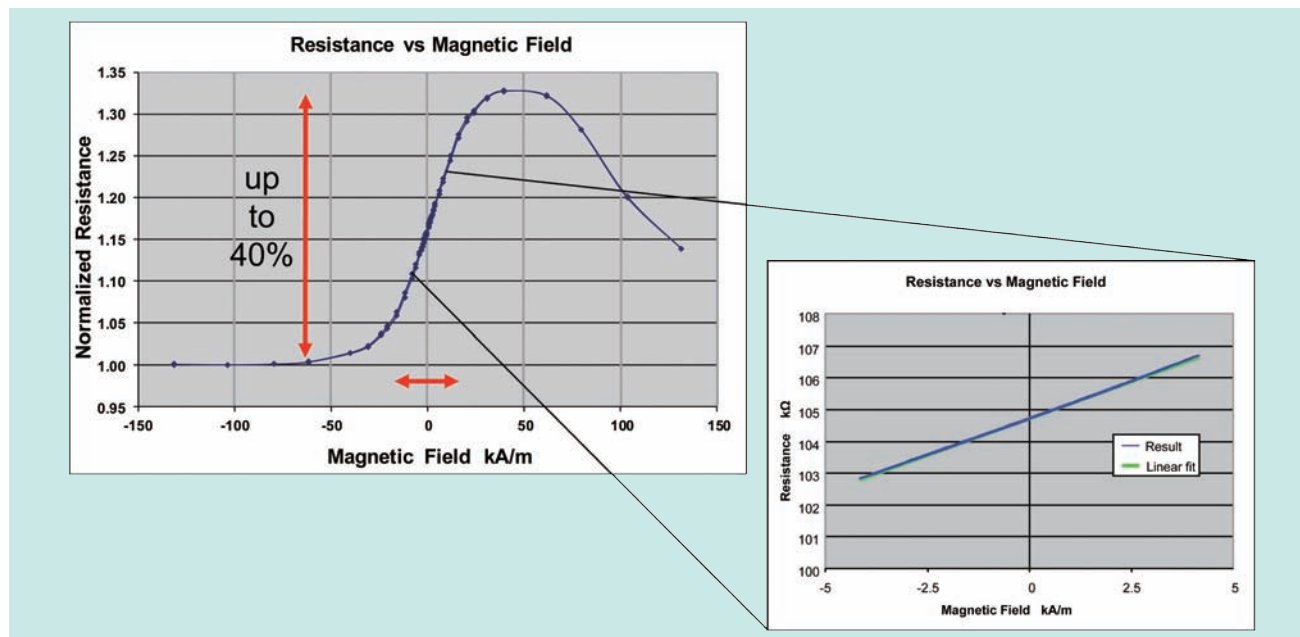


図6 TMR効果を活用した線形磁気センシングの例  
Example of transfer curve for a MTJ with the following structure

## 5. TMR効果の最先端磁気センシング 技術への適用

開発したTMR効果を利用したセンサ（以下、TMRセンサ）の重要な特性について述べる。TMRセンサの構造、実験結果の詳細については本稿では割愛する。詳しくは参考文献<sup>17)</sup> <sup>18)</sup> <sup>19)</sup>を参照されたい。

### 5.1 基本性能

#### 1) 低消費電力

MTJ素子は内部抵抗が高いため、TMRセンサの消費電力はAMRセンサの1/100、ホールセンサの1/1000程度である<sup>19)</sup>。周辺の信号処理回路を考慮しても消費電力は十分小さく、小型のバッテリーや環境発電素子でシステムの製品寿命を超える期間、動作させることが可能で、自律型ワイヤレスセンサへの展開が期待できる。一例として6ヶ月間の連続使用に必要なボタン電池数の比較イメージを図7に示す。

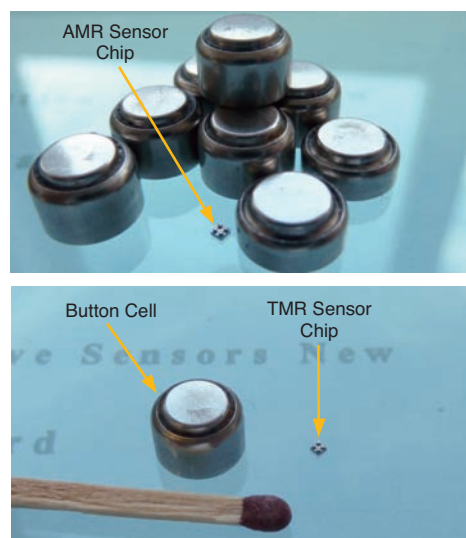


図7 低消費電力・コストパフォーマンスにおけるTMRセンサの優位性  
(6ヶ月連続使用に必要なボタン電池数の比較)  
Power and Cost comparison of an AMR and a TMR sensor after 6 months of continuous use

## 2) 高検出精度

センサの検出精度は、直線性・ヒステリシス特性・感度・SN比の組み合わせで評価される。開発したTMRセンサを既存のAMR・GMR・ホール素子を用いたセンサと比較すると以下のような特徴がある。

高磁界検出用ホールセンサの直線性や、低磁界検出用AMR・GMRセンサのヒステリシス特性は、どちらも極めて優れているが、一長一短があり全ての特性について優れているわけではない。一方、TMRセンサは他のセンサと比べ、あらゆる特性で高いレベルの性能を示しており、低磁界から高磁界まで広い範囲での検出用途として期待できる。なお、次章で紹介する評価キットにより位置検出精度の検証が可能である。

また、AMRセンサを絶対角度検出に用いた場合、外部磁界の角度に対して180度までの範囲しか検出できないが、TMRセンサの場合360度（1回転）を検出することが可能である。TMRセンサが持つ広範囲の入力磁界強度、優れた直線性、低ヒステリシスの特性を活用することで、軸端配置の角度検出アプリケーションへ応用できる。

磁気検出感度に関してはSQUID<sup>\*3</sup>の性能が優れているものの、MTJ素子の1/fノイズや熱雑音が1nT/Hz<sup>1/2</sup>レベルに抑えられることが実証されており、医療や非破壊検査用途として空間分解能の高度化、低コスト化を実現できることが示唆されている<sup>20)</sup>。

## 5.2 動作範囲

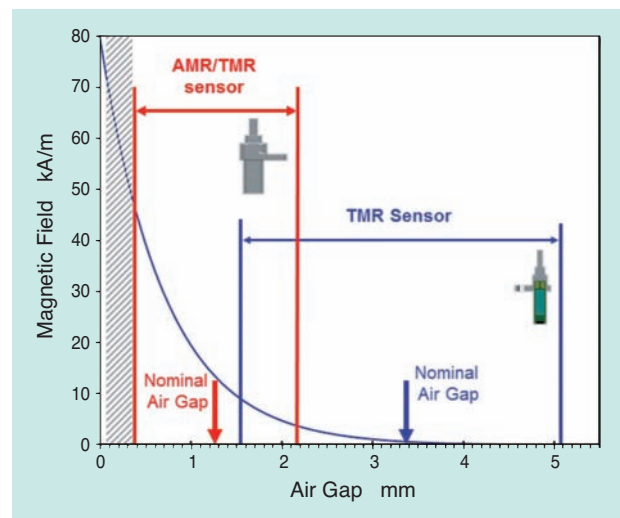
### 1) 広動作温度範囲

高温動作寿命試験では、150℃を超える高温状態においてもMTJ素子内の原子の拡散が起こらないことが確認されている。また、他のセンサとは異なり、温度上昇に伴い感度が増加するよう設計することで、温度上昇に伴う磁力の減少を補償することが可能である。したがって、高温領域でも、室温動作と同等のエアギャップ量での検出が可能である。

### 2) 広範囲エアギャップ<sup>\*4</sup>

ABSなどの車輪速の検出に用いられるAMRセンサでは、エアギャップの設定値は一般に2mm程度であり、特に、高分解能や高精度が要求される場合は1mm以下に設定する場合もある。

TMRセンサの感度はAMRセンサの10倍、GMRセンサの3倍程度で、地磁気のような $\mu$ Tオーダーの磁界測定にも対応できるほど内部ノイズが少ない。このため、**図8**に示すとおり最大5mmのエアギャップでの検出も可能であり、設計の自由度が飛躍的に向上する。例えば、防塵・耐油・耐熱特性の向上を目的として、センサとリング磁石の間にステンレス、アルミニウム、プラスチックなどの別の非磁性体壁を設ける構造が実現可能である。



**図8** TMRセンサのエアギャップ設定値  
Magnetic field generated by an elastoferrite pole ring as a function of the air gap

## 5.3 設計自由度

### 1) 小型サイズ

AMR素子やGMR素子とは異なり、MTJ素子は素子を構成する積層された各層に対し垂直方向に電流が流れるため、エッチング加工性能やサイドエッチング性能などの製造工程を工夫することで、センサの面積を非常に小さくすることが可能である。記録密度が最も重要なパラメータであるMRAMでは、MTJ素子1つ当たりの面積は $1\mu\text{m}^2$ 以下で構成可能である。一方、センサ用途では、ボンディングパッドに最低限の大きさを確保し、動作を保証する必要があるが、AMRセンサ比約30%減程度のサイズで実現可能である。

### 2) 取り付け公差の拡大

速度や位置検出用途の磁気センサは、センサおよび磁石の取り付け精度による影響を受けやすく、取り付けが適切でない場合、信号の検出ができないことや検出精度が劣化することがある。

<sup>\*3</sup> SQUID：超伝導量子干渉素子

<sup>\*4</sup> エアギャップ：センサと磁石ターゲット間の距離

一方、TMRセンサは、[図6](#)に示したように-0.5~0.5kA/mの低磁界から-15~15kA/mの高磁界まで広範囲で動作するため、用途に応じて最適設計がしやすく、取り付け公差を拡大することが可能である。

## 5.4 ロバスト性

### 1) 静電気放電 (ESD) 耐性

MTJ素子は、非常に薄いナノメートルスケールの絶縁体が挟み込まれたキャパシタと見なされ、絶縁破壊のリスクが高いが、以下によりリスクを軽減している。

- 絶縁体層の品質を向上し、絶縁耐圧を高める。
- 複数のMTJ素子を直列接続し、MTJ素子1つあたりのESD電圧を分散させる。
- ESDはセンサのパッケージ工程で発生する機会が多いため、TMRセンサと信号処理回路の接続工程を管理し、作業を速やかに行うことでリスクを軽減する。

上記対策を含め、プリント基板実装後のマシンモデルに基づいた試験では、絶縁破壊リスクが改善された。

### 2) 高磁界に対する耐性

[図6](#)に示すようにTMRの抵抗値は外部磁界に対し可逆特性を持つので、希土類磁石のような強い磁界をTMRセンサに与えても破壊することはない。

## 5.5 コスト

### 1) 設備投資コスト

先に述べたように、MTJ素子はSensitec社が現在保有するAMR・GMR素子の製造設備をそのまま利用して製作している。つまりTMRセンサの製造は、GMR素子の製造とほぼ同じプロセス・材料が使用され、量産のための特別な設備投資が不要である。

### 2) TMRセンサによるコスト削減効果

以下に、コスト削減効果を示す。

- センサチップの小型化が可能で、一枚のウェハからより多くのチップを製造可能。
- 極低磁界の検出が可能のため、高価な希土類磁石でなく、安価なフェライト磁石などの使用が可能。
- 素子自体の抵抗値が高いため増幅回路が不要で信号処理回路の簡素化による低消費電力駆動が可能。

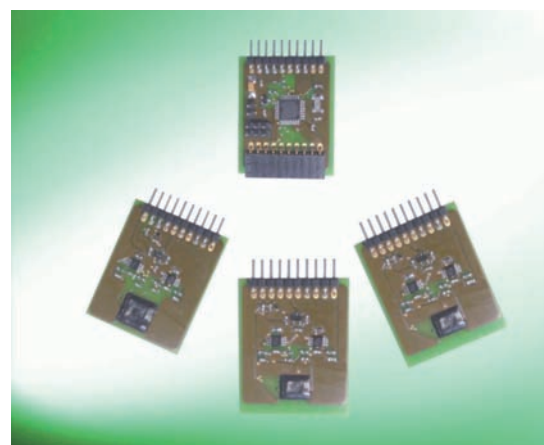
### 3) システム全体としてのコスト低減

電動モータやABSなどの用途では、センシング機能だけでなく、周辺部品を含んだシステムの構成を考慮し、製造や取り付け方法への配慮が求められる。

TMRセンサのように、エアギャップおよび取り付け公差が広いほど加工・取り付けへの要求が緩和されるとともに、組立工程の簡略化により最終的な製造コスト低減につながる。

## 6. TMRセンサ評価キット

NTN-SNRとSensitec社は、TMRセンサ技術の普及を図るため、3種類の回転・位置検出用評価キットを製作し、ユーザーへ提供している ([図9](#), [図10](#))。評価キットの構成を以下に示す。



**図9** TMRセンサ付きサンプル基板  
TMR Evaluation PCB



**図10** TMRセンサ評価キット  
The three TMR Evaluation Kits

## キット①

## 低消費電力駆動 デモセット

- ・軸端配置による360度の角度検出が可能な、TMRセンサ付きサンプル基板
- ・低消費電力マイコンによるSPI通信
- ・ソーラーセル
- ・軸端配置用磁石

## キット②

## アクティブセンシング\*5 デモセット

- ・TMRセンサ付きサンプル基板
- ・高分解能パルス出力 (AB相)
- ・アナログ出力
- ・多極磁石 (リニアおよびリング磁石)

## キット③

## パッシブセンシング\*6 デモセット

- ・TMRセンサ付きサンプル基板+バイアス磁石
- ・高分解能パルス出力 (AB相)
- ・アナログ出力
- ・リニアおよびリングギア

## 7. あとがき

TMRセンサは下記の極めて優れた特性を有しており、自動車や産業機械用の次世代磁気センサとして高い潜在能力を備えている。

- 基本性能 (低消費電力・高出力精度・高感度)
- 動作範囲 (高温対応・広範囲エアギャップ・360度の角度検出・極低磁界検出)
- 設計自由度 (センササイズの小型化・取り付け公差の拡大)
- ロバスト性 (ESD対策, 高磁界強度対応)
- 低コスト

上記を活用して、速度センサ・位置センサだけでなく、電子コンパス・スイッチ・非破壊検査・電流センサ・画像装置・医療分野など数多くの用途展開が期待できる。

NTN-SNRを含めたNTNグループでは、TMRセンサのさらなる改良と、新たな市場展開を積極的に図る所存である。

## 参考文献

- 1) P. Desbiolles, A. Friz: Development of High Resolution Sensor Element MPS40S and Dual Track Magnetic Encoder for Rotational Speed and Position Measurement, NTN TECHNICAL REVIEW, 75 (2007) 36-41.
- 2) [http://www.ntn-snr.com/industry/fr/en-en/file.cfm/MPS40S\\_datasheet\\_rev0.pdf?contentID=4826](http://www.ntn-snr.com/industry/fr/en-en/file.cfm/MPS40S_datasheet_rev0.pdf?contentID=4826)
- 3) H. Ito, T. Takahashi, P. Desbiolles, C. Peterschmitt, S. Ueno: High resolution sensor bearing with an index signal, NTN TECHNICAL REVIEW, 78 (2010)
- 4) [http://www.ntn.co.jp/english/news/news\\_files/new\\_products/news201000026.html](http://www.ntn.co.jp/english/news/news_files/new_products/news201000026.html)
- 5) C.P.O. Treutler: Magnetic sensors for automotive applications, Sensors and Actuators A91, 2-6 (2001)
- 6) M. Jullière: Tunneling between ferromagnetic films, Physics Letters, vol 54A, p225-226, 1975.
- 7) T. Miyazaki, N. Tezuka: Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe junction, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 139, L231-L234 (1995)
- 8) J.S. Moodera, L.R. Kinder, T.M. Wong and R. Meservey: Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions, Physical Review Letters, vol. 74, p. 3273-3276, 1995.
- 9) S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa, Y. M. Lee, K. Miura, H. Hasegawa, M. Tsunoda, F. Matsukura, H. Ohno: Tunnel magnetoresistance of 604% at 300K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature, Applied Physics Letters, 93, 082508 (2008)
- 10) S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, K. Ando: Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, Nature Materials, 3, p868-871, (2004)
- 11) S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, S-H Yang: Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers, Nature Materials,3, p862-867 (2004)
- 12) B. N. Engel and al.: A4-Mb Toggle MRAM Based on a Novel Bit and Switching Method, IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 41, NO. 1, p132-136, JANUARY 2005
- 13) [www.nve.com/Downloads/AAT001.pdf](http://www.nve.com/Downloads/AAT001.pdf)
- 14) [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MAG3110.pdf?pspll=1](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MAG3110.pdf?pspll=1)
- 15) G. Malinowski, M. Hehn, S. Robert, O. Lenoble, and A. Schuhl: Magnetic origin of enhanced top exchange biasing in Py/IrMn/Py multilayers, Phys. Rev. B 68, 184404, 2003

\*5 アクティブセンシング：多極磁石を検出ターゲットとした検出方法

\*6 パッシブセンシング：センサの背面に磁石を配置し、磁性体の通過による磁気抵抗の変化を検出する方法

- 16) G. Malinowski, M. Hehn, F. Montaigne, E. Jouguelet, and A. Schuhl: Intrinsic thermally compensated field sensor based on single magnetic tunnel junctions, *Applied Physics Letters*, 84, 1204, 2004
- 17) G. Malinowski, M. Hehn, F. Montaigne, A. Schuhl, C. Duret, R. Nantua, G. Chaumontet: Angular magnetic field sensor for automotive applications based on magnetic tunnel junctions using a current loop layout configuration, *Sensors and Actuators A*, 144, p263–266 (2008)
- 18) B. Negulescu, M. Hehn, A. Gerken, J. Paul, C. Duret: Magnetic tunnel junction linear field sensor for industrial applications, *Proc. of 10th MR Symposium*, Wetzlar, 2009
- 19) J. Paul, R. Lehndorff and C. Duret: Ressourceneffizienz am Beispiel magnetoresistiver Sensoren, *Proc. of MikroSystemTechnik Kongress*, 2011
- 20) R. Guerrero, M. Pannetier-Lecoeur, C. Fermon, S. Cardoso, R. Ferreira and P.P. Freitas: Low frequency noise in arrays of magnetic tunnel junctions connected in series and parallel, *Journal of Applied Physics*, 105, 113922 (2009)

## 執筆者近影



**Christophe DURET**  
NTN-SNR  
Research & Innovation  
Mechatronics



**上野 新太郎**  
NTN-SNR  
Research & Innovation  
Mechatronics