高感度磁気センシング技術の開発とその応用

正 員 脇若 弘之*

Development of High Sensitive Magnetic Sensing Technologies and their Applications

Hiroyuki Wakiwaka*, Member

Sensing technologies using magnetic sensors and magnetism are kinds of an important technology to support today's information society. This paper describes a review of recent magnetic sensors with high sensitivity first. The content of the second description is a feature with the sensing technologies using magnetic sensors and magnetism. Finally, it introduces applied field and the application example of the sensing technologies using magnetic sensors and magnetism.

キーワード：磁気センサ，高感度，センシング技術

Keywords：magnetic sensor, high sensitivity, sensing technology

1. まえがき

筆者は，電気学会磁気利用センシングシステム調査専門委員会において高感度磁気センサおよびセンシング技術について調査研究してきた。磁気センサは，磁界を測定対象とするセンサと磁性体などの磁気特性変化を利用して，変位，位置，速度，力，トルクなどの力学量または何らかの情報にもとづく電気信号を出力するセンサに大別することができる。前者は，磁界センサとも呼ばれ，狭い意味での磁気センサであり，平成 14 年度には約 1000 億円の生産実績が報告されている。磁気センサは多種多様な動作原理に基づくものがあり，日常生活の身近なところから科学技術の最先端分野まで各種のセンサが使用され，今日の情報化社会を支えるキーデバイスの一つである⁽¹⁾。

磁界・磁気現象を電気信号に変換する磁気センサの原型は，磁界と電気の関係が研究され始めた 1830 年代に遡ることができ，磁気センサの歴史は古いと言えるが，年々新しい現象や効果が発見され，磁気センサに適した材料開発が進み，ニーズに対応する新しい磁気センサが開発されている。中でも最近の薄膜作成技術の進展により作成できるようになった人工格子における巨大磁気抵抗効果に基づくデバイスが注目されている⁽²⁾。

磁界センサは，ブラシレス DC モータの磁極検知や電流センサ，ハードディスクに磁気記録された情報を読み取るためのセンサ，磁気カードや切符を読み取るためのセンサ

などに使用されている。また，磁気コンパスに変わる方位センサとして小形電子コンパスが開発され，携帯電話に組み込まれている。

本稿では，高感度磁気センシング技術として主な高感度磁気センサの種類について概略を解説し，それらの最近の開発例を示した。さらに，高感度センシング技術の応用例について具体例を紹介する。

2. 高感度磁気センシング技術

〈2・1〉 磁気センサの種類 図 1 に自然環境と代表的磁気センサの適用範囲との対応を示した。計測対象となる磁界の範囲は，fT オーダから数 T の範囲であり，きわめて広い範囲にわたっている。いわゆる地磁気は 30 μ T 程度であり，モータや発電機などの電気機械は 2 T 以下の磁束密度で使用されている。生体磁気は，人間の心臓の拍動によって生じる磁界，すなわち心磁界は数 nT 程度であり，脳内の神経活動による磁界，脳磁界は pT のオーダである。磁界セン

図 1 磁界レベルと磁気センサ

Fig. 1. Magnetic field level and magnetic sensor.

* 信州大学工学部
〒380-8553 長野市若里 4-17-1
Faculty of Engineering, Shinshu University
4-17-1, Wakasato, Nagano 380-8553

サとしては電磁誘導の法則によるサーチコイルを始めとして各種の物理法則、効果が利用されている。

中でも磁界センサの代表格とも言えるホール素子は、それだけで、年間 20 億個近くが生産されている。また、磁気記録の分野においてスピバルブ GMR 素子が年間数億個磁気記録読み取りヘッドに使用されている。磁気センサとしては、これらの他に、磁気光学効果を利用した磁界センサやプロトン磁力計などがある。

さまざまな物理量に基づく磁界変化や磁気特性変化からその原因となる物理量を検知する磁気利用センシング技術は、高感度な磁気センサの開発と信号処理によってますます適用範囲が広がっている。磁気利用センシングには、それぞれに合った磁界センサが使われるが、磁界センサ同士で競い合い、取捨選択される。例えば、GPS を搭載した携帯電話に電子化された方位センサ（コンパス）が組み込まれると、位置情報と向きを組み合わせで常に画面の上と向いている方向が一致する地図のヘッディングが可能になり、パーソナルナビゲータの実用性が高まるため、地磁気を利用した方位センサ組み込みが望まれる。携帯電話に組み込み可能な小形低消費電力の方位センサとして、ホール素子、AMR 素子、GMR 素子、フラックスゲートセンサ、MI センサなどを使用した電子コンパスが各社から製作され、いくつかの方式の方位センサが携帯電話に搭載され始めている。

磁気センサの動作原理となる新しい物理現象・原理は、現在に至るまで絶え間なく発見され、それらに基づいた磁気センサ、センシング技術が年々登場している状況である。

〈2・2〉 ホール素子 ホール素子は、磁界計測用プローブとして使われてきたが、近年、ブラシレス DC モータや電流センサなどへの組み込み使用、VTR など情報機器用精密モータの回転検出や自動販売機の紙幣認識など家電・工業の分野で年間 20 億個近くが使用されている代表的な磁気センサである。

ホール効果（Hall effect）は、1879 年、H.Hall によって発見された。これは、直方体の素子に電流を流し、その電流と垂直方向に磁界を加えると、電流と磁界の方向にそれぞれ垂直方向に電圧が発生する現象である。素子に発生するホール電圧は、定電流駆動、定電圧駆動に対応して以下の式で表すことができる。

$$V_H = K_H \cdot I_c \cdot \frac{B}{d} \quad [V]$$

$$= \mu_H \cdot \frac{w}{l} \cdot V_{in} \cdot B \quad [V] \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 K_H はホール係数[Vm/AT]、 I_c は制御電流[A]、 μ_H は電子移動度、 V_{in} は印加電圧[V]である。

ホール素子は、当初、移動度の大きな InSb のバルクの単結晶を研磨して使用されていたが、1970 年代に半導体のウエハプロセスを適用し、多結晶薄膜化することによって工業的に安定な素子の生産が可能になった。

ホール素子の材料として、シリコン(Si)、ゲルマニウム

(Ge)、ガリウム・ヒ素 (GaAs)、インジウム・ヒ素 (InAs)、インジウム・アンチモン (InSb) 等の半導体が使用される。この中で、InSb は高感度であるが、ホール係数は温度係数が大きい。GaAs は、感度が低い温度係数が小さい等の特徴がある。Si は低感度であるが、同じウエハに回路を集積し、ホール IC を作成することができる。図 2 は、電子移動度の温度係数を小さくするために、Si をドープした InAs 薄膜のホール素子のチップ写真であり、 -40 から $+150^{\circ}\text{C}$ までの広い温度範囲で使用する事ができる⁽³⁾。

〈2・3〉 MI センサ MI センサは、アモルファス強磁性ワイヤや薄膜を高周波で励振したとき、表皮深さが外部磁界によって変化し、そのためにインピーダンスが変化することを利用したセンサであり、1993 年に、毛利氏が発表した現象を利用している。

使用されているアモルファスワイヤは直径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下、長さ 2 mm 程度のサイズである。これは、高感度であり、方位センサや情報分野への応用が進んでいる。MI センサは、フラックスゲートセンサに比べて磁界検出感度は同程度、ヘッド寸法は約 $1/30$ ($1\sim 2\text{ mm}$)、応答速度は 1000 倍（約

図 2 Si ドープ InSb ホール素子チップ(旭化成)
Fig. 2. Si dope Hall element chip(Asahi Kasei).

(a) MI センサヘッドの構成

(b) アモルファスワイヤの磁区構造

図 3 MI センサの基本原則

Fig. 3. Basic principle of MI sensor.

1 MHz) である。

MI センサとフラックスゲートセンサの動作原理は異なるが、動作としては高周波で励振することによって磁界に比例した高調波出力電圧を得るものである。同様な動作のセンサとして、例えば、薄膜技術による高周波キャリア形磁界センサがあげられる。これは、GHz 帯において pT オーダの交流磁界感度を有し、電磁ノイズ等の測定に適したセンサであり、プリント配線基板近傍の EMC 測定などに使用されている。

〈2・4〉 磁気抵抗素子 抵抗値が磁界によって変化する素子として、半導体形、AMR、GMR などがあるが、これらはそれぞれ動作原理が異なっている。半導体形磁気抵抗素子は、高感度なため、磁気カードの読み取りや紙幣の判別にも使用されているが温度特性等の点で用途が限られている。AMR 素子は、エンコードや VTR の位置検出に使用されている。GMR 素子は、主に磁気記録の分野で読み取りヘッドとして年間数億個が使用され、磁気記録密度の向上に重要な役割を果たしている。

〈2・4・1〉 異方性磁気抵抗 (AMR) 形素子 強磁性体中の抵抗は、電流方向と磁化方向の角度によって異方性を生じるため AMR 効果 (Anisotropic Magnetoresistive Effect : 磁気異方性効果) 素子と呼ばれる。AMR 効果は W.Thomson によって 1857 年に発見されたが、バルク材や半導体では小さく、実用的ではなかった。1970 年代に入り、薄膜作成技術により作成された素子の登場により、実用化が広まった。その抵抗率変化は次式で表される。

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2 \theta \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、 θ は薄膜の磁化 M と測定電流の間の角である。AMR 効果による磁気抵抗素子は、5kA/m で 3% 程度の抵抗変化があり、磁界変化に対する感度は 0.8%/ (kA/m) 程度である。AMR 素子は、FeNi パーマロイや FeCo 合金などの金属薄膜で、温度係数が小さく安定である。1970 年代後半に登場した金属薄膜により実用レベルの磁気抵抗素子が量産化され、磁気エンコードや磁気ヘッドへ利用された。

〈2・4・2〉 巨大磁気抵抗効果 (GMR) 素子 1988 年に巨大磁気抵抗効果 (Giant Magnetoresistive : GMR) が発見された。これは、スピンと磁気モーメントの交換相互作用によって生じる抵抗が磁界の大きさと向きとによって大きく変化する現象であり、磁気記録の面密度向上に欠かせない物となっている。当初開発された GMR 素子は、数 nm 厚さの磁性層と非磁性層が交互に積層され、層間の相互作用により伝導電子が散乱されることにより抵抗値が変化する多層形 GMR 素子であり、抵抗変化率 $\Delta R/R$ は数十% 以上のものもある。現在 HDD 読み取りヘッドに利用されている GMR 素子はスピンバルブ形 (SV) であり、より一層高密度化するため、絶縁層におけるトンネル効果を利用した TMR 素子や膜厚方向の抵抗変化を利用する CPP 形 GMR 素子が精力的に研究開発されている。最近では、図 4 に示すように、300Gbps (ギガビット/平方インチ) の読み取りのでき

図 4 磁気記録密度変遷の歴史

Fig. 4. History of magnetic recording density transition.

る TMR ヘッドも発表されている⁽⁴⁾。

〈2・5〉 超電導量子干渉素子 (SQUID) 生体磁気の様にかわめて微弱な磁界測定には、超電導量子干渉素子 (SQUID: superconducting quantum interference device) が利用されている。これは、リング状超電導体の一部をジョセフソン接合させたもので、リングを通過する磁束量子 ($2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) の検出が可能で、きわめて高感度な磁界センサとして利用されている。ジョセフソン接合は薄い絶縁膜を介して超電導体を接合したもので、ジョセフソン接合を流れるトンネル電流は以下の式で表される。

$$I = I_0 \frac{\sin kB}{kB} \quad [\text{A}] \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで、 I_0 は無磁界中の電流、 B は接合面に垂直な磁束密度、 k は定数。すなわち、接合が一つの時の電流は、接合に加わる磁束密度の周期関数になる。

SQUID には、一つまたは二つのジョセフソン接合を持つ dc-SQUID と rf-SQUID がある。dc-SQUID の分解能は抵抗の熱雑音によって決定される。SQUID は $1 \times 10^{-10} - 1 \times 10^{-12} \text{ T}$ の微弱磁界を検出できるため、心臓内の流れる血液の血流変化を心電図と同じように記録することができる。SQUID は、実用化されている磁気センサの中では最高の感度を持っているため、心臓の鼓動による磁界検出ばかりでなく脳細胞の活動による脳磁界の検出にも用いられている。

ジョセフソン効果とは、2つの超電導体が薄い絶縁膜で隔てられているとき、クーパ対のトンネル効果によって絶縁膜を通して流れる超電導電流に関連した効果であり、このような素子をジョセフソン接合という。直流ジョセフソン効果と交流ジョセフソン効果がある。

SQUID は、現在室温で使用されているフラックスゲートセンサの 1,000~5,000 倍高感度であるが、SQUID 本体の最大の感度はシステム雑音によって決定される。金属系超電導体 SQUID の磁気雑音 (SQUID のシステム雑音) は、0.5

$\sim 5 \times 10^{-6} \Phi_0 / \text{Hz}$, 高温超電導体 SQUID で $10^{-5} \sim 10^{-4} \Phi_0 / \text{Hz}$ である。ただし, $\Phi_0 = 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ である。

3. 高感度磁気センシング技術の応用例

高感度磁気センサは, 実用機器に不可欠となっている。ここではそれらの中から一部を紹介する。

〈3・1〉 自動車用途への応用 最近の自動車は, エンジン制御, 車体制御, 車両制御系すべてにおいて電子制御系が構成され, 性能・安全性・快適性が飛躍的に向上されている。これらの制御のために, 数多くのセンサが搭載されている。磁気センサは, 一般に堅牢で過酷な環境にも使用でき, 信頼性が高いため, 図 5 に示したように数多く使用されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

〈3・2〉 生体磁気計測分野への応用 病気の診断や脳機能の解明のために生体から発生する磁界測定は, 電極が不要など無侵襲であり, 心電図や脳波測定とに比べて, 生体に対する影響が少ない。また多チャンネルの測定によって活動部位の推定ができるなどの特徴がある。しかし, 生体から発生する磁界は, きわめて微弱なため高感度な磁気センサが必要とされ, SQUID 磁束計の登場によって測定が実用的になった。しかし, 図 1 に示したように, 生体からの磁界は環境磁界に比べ非常に弱いので, 測定には, 高性能なシールドルームが必要とされるが SQUID プローブコイルを工夫して環境磁界を打ち消す工夫も行われている。

生体磁気計測の分野で最近活発に研究が進められている課題として, 直径が 10nm から数百 nm 程度の磁気微粒子検出がある。これらの磁性微粒子は, DNA 検出診断や免疫検査においてキャリアーとして利用されるもので, それらの生体や液体中における密度や通過状況を把握するために磁気センサが利用される。ここに使用できる磁気センサは, 高感度であると同時に微小感磁領域のセンサであること, すなわち空間分解能に優れていることも重要である。高感度であり, 感磁領域を数 μm 角にしたセンサとして, SV-GMR, プレーナ形ホール素子などが開発研究されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

図 5 自動車用磁気センサ

Fig. 5. Magnetic sensors equipped automobile.

4. あとがき

磁気センサの歴史は古く, 電磁誘導現象が発見されて以来, 今日にいたるまで, 磁気センサに関係の深い重要な物理・効果が次々に発見され活用されている。磁気センサは高信頼性, 耐環境性, 低コストなどに優れ, 極めて多くの用途に使用されているが, さらに新しいニーズに応える様々な磁気センサが登場し, 高感度化, 小形化, 高機能化および空間分解能の高密度化が進められている。

本稿で解説・紹介したように, 測定可能な磁界の範囲も fT オーダから数 T まで実に幅広いと言えるが, 年々, 新たなセンサが開発されている。高感度磁気センサは, 空間分解能の微細化と応答周波数の拡大に向かってマイクロ化と集積化が展開されている。例えば, スピンエレクトロニクス分野の技術による巨大磁気抵抗効果による磁気顕微鏡や, 高温超電導による SQUID の生体磁気への応用, 非破壊検査への適用など期待されている分野が多い。

磁気利用センシングシステム調査専門委員会の調査内容のごく一部を紹介したが, ここで解説できなかった先端的磁気利用センシング技術調査結果は技術報告書として出版される予定である。

本稿作成にあたり, 多くの方々から最新のデータ・情報をいただいたことに感謝申し上げる。本稿により, 磁気センサへの興味と関心が今まで以上に持たれれば幸である。

(平成 18 年 3 月 20 日受付)

文 献

- (1) P. Ripka, ed.: Magnetic sensors and magnetometers, Artech House (2000)
- (2) 日本応用磁気学会: 「磁気センサ・磁気計測技術の最新動向」, 第 129 回研究会資料 (2003)
- (3) 柴崎一郎: 「InSb 単結晶薄膜の物性と磁気センサ応用」, 電学論 E, Vol.123, No.3, pp.69-78 (2003)
- (4) 猪俣浩一郎: 「21 世紀を支える磁気メモリ」, 電気と磁気の新しい交わり スピンが拓く 21 世紀のエレクトロニクス, p.153, クバプロ (2001)
- (5) 西部祐司: 「磁気センシングの ITS への応用」, 非破壊検査, Vol.52, No.9, pp.473-478 (2003)
- (6) 脇若弘之: 「自動車に使われている磁気利用センサ」, まぐね, Vol.1, No.1, pp.19-24 (2006)
- (7) J. C. Rife, et.al., "Design and performance of GMR sensors for the detection of magnetic microbeads in biosensors", Sensors and Actuators A, 107, 209-218 (2003)
- (8) A. Sandhu: "Thin-film semiconductor Hall effect bio- sensors for medical applications", IEEE Trans. SM, Vol.125, No.11, pp.444-447 (2005)

脇 若 弘 之

(正員) 1947 年 10 月生まれ。1974 年 3 月信州大学大学院修了。同年 4 月小野測器入社。1991 年 2 月信州大学工学部助教授。2002 年 4 月信州大学工学部教授。磁気センサ, 磁気を利用した変位, 力, トルクセンシング, 電磁アクチュエータ, モータなどの研究に従事。工学博士。電気学会磁気利用センシングシステム調査専門委員会委員長。