第 3 節 GSR 効果を活用した超高感度マイクロ磁気センサの開発 はじめに

ビッグデータ時代を迎えてセンサの大きな革新が進行している。磁気センサにおいても、 高精度、高分解能、リアルタイム性に優れ、しかも低消費電流、ミニサイズで知能システム に適合できる高性能な超高感度マイクロ磁気センサセンサの開発が進んでいる。その中で 新しい磁気センサ原理 GHz-Spin-Rotation(以下 GSR)効果が発見され、従来の MI センサ、 TMR センサなどの高感度マイクロ磁気センサよりもさらに高感度の GSR センサの開発がすすん でいる。自動車用センサ、ウェアラブルコンピュータ用、生体磁気検出用、生体内位置検出センサ などの新しい応用が期待されている。本報告では、GSR 原理の紹介とその原理を活用した GSR センサの開発の現状と将来展望を明らかにする。

1. GSR センサの発見

1.1 アモルファス磁性材料を使った高感度磁気センサの開発経過

GSR 効果⁽¹⁾は、アモルファス磁性ワイヤに検出コイルを巻き付け、そのワイヤに GHz に 相当するパルス電流を通電し、最表面の電子スピンが超高速に円周方向に回転することによ り、想定外の大きな出力特性を生み出す現象である。アモルファスワイヤを用いた高感度磁 気センサである MI センサ(Magneto-Impedance の略)センサの改良過程で発見されたもので あるので、まず MI センサの開発とその特性について説明⁽⁷⁾⁻⁽¹³⁾する。

アモルファスワイヤは 80 年代前半に東北大教授(当時)増本教授によって発明され、理想的 な磁性材料として磁気センサへの応用研究が取り組まれた。その過程で 93 年名古屋大学の 毛利教授(当時)によって 1MHz から 100MHz の範囲の高周波電流の下で大きな磁気インピー ダンス効果(図1)を発見した。その後パルス励磁、負帰還回路、コイル検出式⁽¹³⁾など電子 回路の改良が続き、高感度で直線性に優れた MI センサの開発が開発されるに至った。97 年 には日本科学技術振興財団(略称 JST)によって MI センサコンソーシアムが組織され本技 術は広く普及していった。なお、海外の Makhotkin⁽⁶⁾らは 90 年アモルファスリボンを使っ て MI 効果を毛利らに先立って発見し MI センサを試作した。この分野の草分け的研究であ った。

2000年以降、薄膜タイプとワイヤタイプの二つの方向で開発が取り組まれた。薄膜 MI センサの製作は容易であったが、感度はワイヤタイプよりも 1/10 程度劣っていた。ワイヤタイプは、愛知製鋼が開発した小型 MI 素子と IC タイプの MI センサがスマホ用の電子コンパス に採用され、11 年には年 6000 万個以上生産された。MI センサ開発のこの成功を踏まえて、 超高感度マイクロ磁気センサのさらなる向上を目指して研究が活発化していった。





図2 GSR センサのパルス周波数依存性

1.2 MI センサの周波数依存性の研究から GSR センサの発見(2)

著者らは、コイル式の MI センサにおいてコイルの出力電圧は、100MHz でも低下しない という MI 効果の基本特性に反する事実を確認した。より高周波域の GHz パルスで励磁した 場合のワイヤ最表面に起こる電磁現象について研究⁽³⁾⁻⁽⁵⁾を始めた。その結果、1.5GHz におい てもコイル電圧は大きくなる事実(図2)を突き止めた。さらに MI センサ磁界依存性はア モルファスワイヤの磁化曲線に対応するが、GHZ 域ではコイル出力は外部磁界に対して正弦 波関数関係にある(図3)ことを発見した。



MI 効果は、図4に示すようにアモルファスワイヤの円周方向磁区⁽¹⁴⁾とコア部の軸方向磁 区の界面に存在する 90 度磁壁が交流磁界の力で振動⁽⁰⁾しコア部の磁化が円周方向に回転す る。その際に円周方向の透磁率が外部磁界に比例して大きくなり、その結果表皮効果が著し く増加してワイヤのインピーダンスが磁界に依存して著しく増加する現象である。励磁周波 数が大きすぎると磁壁の移動が渦電流によってブレーキを掛けられ MI 効果が出現しない。 その結果、MI 効果は 10MHz 周波数の励磁電流で最大値⁽¹²⁾を示す(図1)。

これに対して GHz パルスの場合、電流の通過する表皮深さが 0.2 µ m 程度と 10MHz に比 べて 1/10 となり、GSR 効果の電磁現象(図4)は GHz パルスによる最表面に存在する電子 スピンが高速回転のみに限定されるようになる。この考えに立つと、先に述べた二つの新事 実はよく説明ができる。このことからこの新しい電磁現象を GSR 効果と命名した。



図4 GSR 効果と MI 効果の電磁モデル

- 2. GSR センサの特徴と基本技術
- 2.1 GSR 素子の製造法(3次元フォトリソグラフィー技術を開発)

GSR センサの基本構造は、GSR 素子とパルス駆動の信号処理回路からなっている。GHz パルスが生み出す最表面の電子スピン回転による非常に小さな電磁現象に限られる。その小 さな信号を検知するためにマイクロコイルの製作技術の開発(図5)から始めた。

Si 基板に深さ 6µm、幅 20µmの溝を形成し、その溝底面に沿って下側コイルのパターン ニングを行う。そこに直径 10µmのガラス被覆されたアモルファスワイヤを配置し、レジス トで被覆しキュア処理をして固定する。その上に上側コイルをパターンニングしてマイクロ コイルを形成し、コイル両端をコイル端子する。次に電極部のガラスの一部を取り除いてワ イヤ端子とする。最後に各端子と素子の電極との配線を施す。下側コイルの拡大写真とマイ クロコイルの断面写真を図 6示す。3 次元フォトリソグラフィー技術による凹凸面上の微細 配線の様子がよく観察できる。

製作した GSR 素子の一例の写真(図 15(b))を示す。大きさは、コイルとワイヤの間隙は $3\mu m$ 、内径は $16\mu m$ 、コイルピッチ $5\mu m$ 、2本のワイヤ間隔は $50\mu m$ である。



図5 GSR 素子の製造プロセス



(a) 溝下部コイルの拡大写真

2,50 10µm Beams 51.2

(b) ワイヤ上部コイルの拡大写真

2.2 GSR センサの基本特性

2.2.1 周波数、コイル巻き数、磁性材料特性に対する依存性(5)

図6 3次元フォトリソ技術(拡大写真部)

GSR 素子のパルス周波数の影響について説明する。パルス発信回路で発生させた GHz パルスをワイヤに通電し、その際に生じるコイル出力を高速オシロスコープで観察した。図7は、ワイヤに通電したパルス波形とパルス電流の立上り・立下り時のコイル電圧の出力波形を示している。パルスの立上りと立下りの両時点でコイルに急峻は電圧波形が発生する。こ

の電圧の最高値と磁界強度が比例関係にある。なお、パルス周波数は立ち上がり時間 $\Delta t h$ ら f = 1/2 Δt として定義した。

外部磁界を±10G 変化させてコイル出力感度(mV/G)を測定したところ、図2に示すように 0.06GHz から 1.2GHz へと増加させると、感度が 3mV/G から 17mV/G へと 5 倍増加した。さらに 2GHz まで増加しても感度の低下は見られなかった。

次に磁気検出感度のコイルの巻き数依存性を説明する。巻き数を16回、42回、420回と 変えて試験した結果、図8に示すように、コイル巻き数に依存して増加するが、著しく多い 巻き数では感度上昇は抑制されるようである。

アモルファスワイヤの磁気特性の影響を図9に示す。透磁率が増加すると磁界感度が比例 的に増加する。また異方性磁界 Hk と感度の最大値を示す磁界 Hm とはほぼ一致する。



2.2.2 磁気感度と磁界との関係⁽²⁾

GSR センサ出力感度の磁気感度依存性は、驚くべきことに正弦波特性(図3)を示す。一 方 MI センサのそれは磁性材料の磁化過程における磁壁の移動に起因するので数学的な関係 式を示さず、大きな違いとである。

出力電圧 V は、その最大値を示す磁界 Hm、角度 $\phi = \pi H/2Hm$ とすると、V=V₀.sin ϕ (式1)となる。ここで Hm はワイヤの異方性磁界 Hk にほぼ等しい。厳密には 0・96Hk で ある。最表面の電子スピンは円周方向の異方性磁界 K_{θ}によって円周方向に整列している。そ こにワイヤ軸方向に磁界 H がかかると反磁界を考慮した内部磁界 Hin がかかると、電子ス ピンは、tan θ = Hin/Hk だけ傾く。周波数 f = 2 $\pi \omega$ のパルス電流で電子スピンが回転する と、コイル出力は軸方向の電子スピン強度 S:sin θ と軸方向向きの速さ f · cos θ に比例し、 V=V₀ · sin θ · cos θ = V₀sin 2 θ (式2)となる。

 θ は Hk の関数、 ϕ は Hm の関数であるが、HK と Hm は Hm=0.96Hk の関係が存在し、 2 $\theta = \phi$ となることが証明できる。GHz パルスによるコイル出力の正弦波特性は最表面の電 子スピンの影響のみで説明することができる。

3. GSR 現象のメカニズム

GHz パルスによるワイヤ内部の電子スピンの動きとコイル出力との関係について、LLG 方 程式を使って検討した上原らの研究⁽¹⁵⁾を紹介する。方程式は、図 10 に示すように円柱座標 系で表示した LLG 方程式と Mxwell 方程式を連成したものである。

コンピュータシュミュレーションの計算結果と実験値との適合度を調査し、計算方法の有

効性を確認した。外部磁界の強さを変えてコイル電圧を計算した。その結果、図 11 に示すように実験コイル波形と良く一致した。両者は、いずれも立ち上がりパルス出力の方が立下りのそれより高くなっている。これらのデータから磁界感度と磁界との依存性を調べたところ、正弦波関数関係にあることが確認できた。



Bessel equation applied to high frequency current passed through the wire

 $\frac{\partial^2 H_{\varphi}(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{\varphi}(r,t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_{\varphi}(r,t)}{\partial \varphi^2} = \sigma \frac{\partial B_{\varphi}(r,t)}{\partial t}$

図 10 Micro-Magnetics シュミュレーションによるワイヤ内部の磁界解析



さらに周波数依存性について調査した結果、1.5GHz で良好な感度を示し、それ以上の高周 波域では飽和傾向を示した。FG センサや MI センサは、磁壁移動とそれに伴う渦電流ブレー キのため、周波数が、FG センサは30KHz以上で、MI センサは100MHz以上で感度は低 下をする。GSR センサは電子スピン回転を本質としているため1.5GHz以上でもスピン回転 は惹起され低下傾向を示さない。以上の解析結果は、GHzパルスによるワイヤとコイルとに 惹起され電磁現象は GSR 現象であることを示唆している。

さらに GSR センサは、電子スピンの回転のみを検知すると想定すると、磁気ノイズは理論的に 0.01pT レベルと予測できる。実際の磁気センサは、コイルや電子回路のノイズに支配さ

れるが、センサの開発目標としてこの理論的示唆は重要だと思う。

- 4. GSR センサの開発の現状
- 4.1 GSR センサの基本性能⁽⁵⁾

GSR センサの電子回路(図 12)の特徴は、GHz パルス発振器と検出コイルの電圧をバッファー回路を介して信号処理する点である。実際に基板タイプ(図 13(a))と ASIC(図 13(b))を製作し、GSR センサの基本特性を調査した。使用した GSR 素子は、2本ワイヤ、コイル巻き数 42回、サイズは幅 0.20 mm、幅 0.25 mmのもの(図 6(c))である。ASIC と組み合わせた GSR センササンプルの特性は、図 14 に示すように感度は 33mV/G、測定レンジは±40G、直線性は 0.5%以下、および σ ノイズ(磁界検出力)は 1KHz バンド幅の下で 0.35mG、16ビット出力であった。MI センサ(AMI306)に比較して、磁界検出力で6倍、測定レンジで 3.3倍、素子サイズは 1/5 で、性能的には 100 倍以上凌駕していることがわかる。



図 12 GSR センサの基本回路

図 13 GSR センサの基板型回路



図 14 GSR-IC センサの磁界依存性

4.2 商品開発の現状

GSR センサは、最も有望な超高感度マイクロ磁気センサとして、無人運転自動車、ナビゲ ーション、モーションセンサ、生体磁気検出装置、生体内モバイル機器など多方面の IOT 分 野で商品開発が進められている。用途に応じて図 15 に示すような GSR 素子を試作して用途 に対応した GSR センサ開発の取り組みを行っている。



図 15 用途に応じた各種 GSR 素子

4.2.1 自動車用 GSR センサの開発

無人運転車の開発が注目を集めている。運転手の代わりに人工知能で、微妙なハンドルさ ばきやアクセル・ブレークの微妙な制御を保証するためには、磁気センサの高速化・高精度 化が必要となる。実はハンドル、ブレーキなどの回転角やモータや車輪などの回転速度およ びモータの動きを監視する電流センサなど、自動車の運動性能に関するセンサとして主に磁 気センサが使用されているからである。現在 12 ビットから 16 ビット(性能 16 倍)で、高 速測定が可能な磁気センサの開発が進められている。

マグネデザイン(株)は、図 15(a)に示す自動車用 GSR 素子を試作し、ASIC と組み合わせて その性能を評価した。素子の長さを 0.15 mmと小さくして、測定レンジを自動車用途が要求す る±80G 以上に拡大することを目指した。測定の結果、測定レンジ±90G、磁界感度 10mV/G、 σ ノイズ 2 mG @1 KH z、出力分解能 16 ビットの性能を得た。また熱サイクル試験を行 い、その結果 2000 回以上の耐久性を確認した。なお MI センサは測定レンジ⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾が±12G と低く、±80G 以上が必要な自動車用途には不向きであった。

4.2.2 3次元電子コンパスと磁気ジャイロ⁽¹⁸⁾

ウェアラブルコンピュータなど携帯端末デバイスには、電子コンパス、加速度センサ、 MEMS ジャイロセンサの3つのセンサを一体にしたモーションセンサが標準装備されてい る。MEMS ジャイロは振動や超音波で誤差が出やすいいので、振動の影響を受けない磁気ジ ャイロとの併用が望まれている。磁気ジャイロは標準装備されている電子コンパスの磁気デ ータ H₀を、磁気ジャイロ方程式により回転速度ωに変換したものである。磁気ジャイロの基 本方程式は、 $\omega = (H_0 \times \Delta H) / H_0^2 \times \Delta t$ となる。式からわかるように測定速さ $\Delta t \epsilon$ 高速に、磁界検出力 ΔH を微細にすることで計算が可能となる。具体的には 1m 秒以下で検 出力 0.5mG 以下の GSR センサの開発が目標である。

電子コンパス用の3次元素子(図15(f))の大きさは0.6 mm×0.6 mm、X 軸とY 軸に沿って4 個のGSR 素子が配置されている。基本特性は測定レンジ±36G、磁界感度33mV/G、σノイズ 0.5 mG@1 KH z であった。3 次元素子はワイヤの両端にZ パーマロイ軸方向の磁界

 $\overline{7}$

を集磁するパーマロイ部品が取り付けられて3次元磁界検出素子が試作されている、その完成が待たれる。

4.2.3 Medical 応用⁽⁵⁾

医療分野では、心電図や脳波診断に補完する心磁図、脳磁図診断法が注目されている。これは超電導技術をベースにした超高感度磁気センサ SQUID で生体磁気を検知して行う新技術である。しかし MRI 並みの大型装置であるため、室温で心電図並みに使用できるハンディ化と小型化が求められている。図 15(e)に示す pT素子が試作され、1nT レベルの磁界検出力が実現している。

また胃カメラ、カテーテル、血管内視鏡など生体内モバイル医療機器の先端に磁気センサ を内蔵し、その位置と方位を計測して装置のナビゲーション技術の開発が進んでいる。これ らの超小型機器に内蔵可能な、つまり幅 0.2 m以下、長さ 1 m以下、厚み 0.10 m以下の超小 型高感度磁気センサの開発が進んでいる。GSR センサを使った開発では、図 15(c)に示す 1 本のコイル内に 2 本のアモルファスワイヤを挿入して高感度と小型化を実現する技術開発 がすすんでいる。また図 16に示すように GSR 素子を ASIC 表面の保護被膜(7 µ m 程度) に溝を形成しそこに GSR 素子を作製し、ASIC 素子を一体化して小型化を図る技術開発も進 んでおり、カテーテル先端に内蔵可能な超小型高感度磁気センサの実現が来たされる。



図 16 ASIC 面保護被膜内に GSR 素子を形成

まとめ

GSR センサは、GHz パルスによるアモルファスワイヤの最表面の電子スピンの回転を検 出コイルで検知するものである。2015年に発見されたばかりで、3次元フォトリソグラフィ ー技術によるマイクロコイルの作製と GHz パルス回路を技術的基盤としており、その要素 技術の基礎研究は始まったばかりである。コイルの微細化は、コイルピッチは 30μ m から 5 μ m、ワイヤ整列間隔も 400μ m から 20μ m、と微細化している。将来コイルピッチは 0.5 μ m、ワイヤ整列間隔は 12μ m レベルの微細化が実現すると思われる。GSRセンサに適合 した GHz パルス回路の研究が必要と思われる。

IOT 時代を迎えて自動車分野、スマート時計などのデジタルモバイル機器、医療分野など 超高感度マイクロ磁気センサのニーズが高まっており、GSR センサを活用した画期的な磁気 センサの商品開発が期待されている。

[参考文献]

- (1) Weblio 辞書; GSR センサ
- (2) 本蔵義信;特許第5839527号(2015)
- (3) 本蔵義信;第1回 MSJ 超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会テキスト p1-9 (2015)
- (4) Y.Honkura : IWMW2015 abstracts p21 (2015)
- (5) 本蔵義信;第4回 MSJ 超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会テキスト p10-15 (2016)
- (6) V.E.Makhotkin etc; Sensor and Actuator A,27(1991)p759-762
- (7) K.Mohri, K,Kawashima, T.Kohzawa, and H.Yoshida: IEEE Trans.Magn., V29, p1245-1248(1993)
- (8) 毛利佳年雄;「磁気センサ理工学」、コロナ社(1998)
- (9) 毛利佳年雄監修:「新しい磁気センサとその応用」、トリクップス社(2013)
- (10)本蔵義信;日本テクノセンタ講習会「アモルファス MI センサの特性と応用」(2002)
- (11)本蔵義信;日本テクノセンタ講習会「MI セッチを応用した電子コンパスと携帯電話への応用」(2002)
- (12)武士田健一:学位論文(1997)
- (13) 毛利佳年雄;特許第3645116号(1999)
- (14) F.B.Humphrey, K.Morri, J.Yamasaki, H.Kawamura, R.Malmhall, Ogasawara, Proc. of Symp. on Magnetic Composition of Amorphous Metala, PP. 110-116 (1987)
- (15) 上原裕二ほか: 第1回 MSJ 超高感度マイクロ磁気センサ専門研究会テキスト p15-21 (2015)
- (16) Y.Honkura;; III Joint Magnetic Symposium(JEMS2006)
- (17) Y.Honkura; The Development of MI sensor and its Applicatins to Mobile Pone; AES2012,(2012)
- (18)本蔵義信、小川一夫; MI センサを使った磁気ジャイロの開発、MSJ 札幌大会、5pF-6 (2013)