

スピントリプで超高感度を実現：

磁気センサーの“異端児”がウェアラブルを変える (1/5)

超高感度磁気センサーの開発を手掛けるマグネデザインが、まったく新しい原理を採用した磁気センサー「GSR (GHz-Spin-Rotation) センサー」を開発した。現在最も普及している半導体センサーに比べて50倍の感度を実現している。

[村尾麻悠子, EE Times Japan]

印刷/PDF ツイート いいね! 5 3 | 6+1 0 1 メールで送信
類似記事の掲載をメールで通知

磁気センサーは“第3世代”に

磁気センサーは、方位を測定するセンサーとして、今やほとんどのスマートフォン/タブレット端末に搭載されている。愛知製鋼の元専務で、現在はマグネデザインの社長を務める本蔵義信氏は、「磁気センサーは第3世代に入っている」と話す。「第1世代は、コイルを巻いた古典的なもの。第2世代は、半導体薄膜を利用したもので、磁性材料に磁気が印加されると、電圧が発生したり抵抗が変化したりする性質を応用したもの。ホールセンサーやMR（磁気抵抗）センサーがこれにあたり、現在の磁気センサー市場の主流となっている。そして第3世代の磁気センサーは、電子スピントリプ（以下、スピントリプ）を制御して、磁気をセンシングするものだ。今まさに、こうした第3世代の磁気センサーの開発競争が始まりつつある」（同氏）。



マグネデザインの本蔵義信氏

第3世代の磁気センサーとしては、GMR（巨大磁気抵抗）センサーやTMR（トンネル磁気抵抗）センサー、MI（磁気インピーダンス）センサーなどがある。

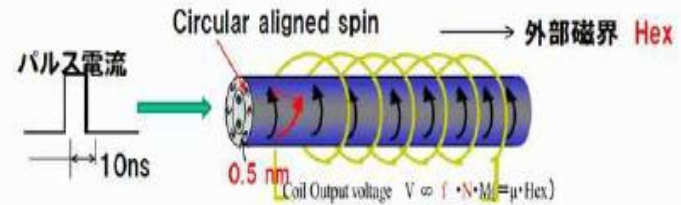
そして、ここに加わるのが、マグネデザインと名古屋大学、豊田工業大学が共同開発した、まったく新しい原理を採用した「GSR (GHz-Spin-Rotation) センサー」だ。

GSRセンサーは、電圧検出用のコイルを巻いた直径10μmのアモルファスワイヤ^{*}を使う。磁気を検出する仕組みはこうだ。

- アモルファスワイヤの表面には、円周方向を向いたスピントリプが並んでいて、外部磁界が加わると、外部磁界がかけられた方向にスピントリプの向きが傾く
- アモルファスワイヤに1GHzのパルス電流を通電すると、表面から0.1μm程の範囲において、スピントリプの向きが円周方向に戻ろうとして回転する
- それに伴って磁化が変化し、誘導電圧が発生するので、それをコイルでピックアップし、電圧値から磁気に換算する

「GHz」のパルス電流で「Spin（スピントリプ）」を「Rotate（回転）」させるので、「GSRセンサー」と名付けられた。

*）鉄やコバルトから成る合金ワイヤで、特殊な製法により、結晶構造を持たないアモルファス状態を持つもの。



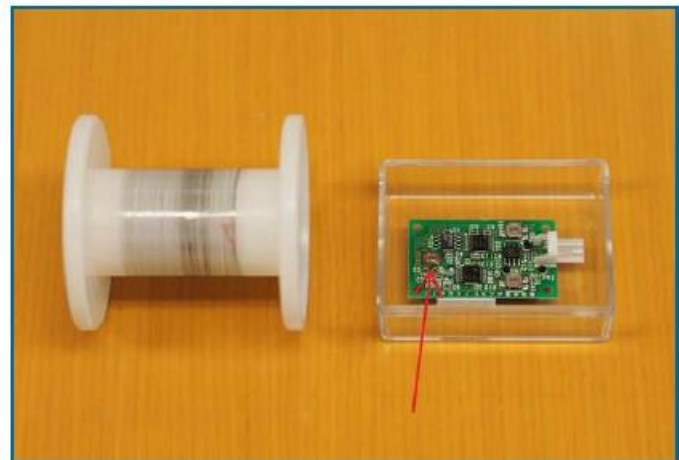
「GSRセンサー」の原理。1GHzという極めて急峻なパルス電流（立ち上がり時間が0.5ナノ秒、通電時間が10ナノ秒）を流すことで、外部磁界の方向に傾いていたスピントリプの向きが円周方向に回転し、それによって発生した誘導電圧をコイルでピックアップする 出典：マグネデザイン

感度は半導体センサーの約50倍

「ワイヤ表面のスピントリプのみを回転させる」という新しい原理を用いたGSRセンサーの感度は、極めて高い。スマートフォンなどの電子コンパスに採用されているホールセンサーのノイズレベルは10mG（ミリガウス）だが、GSRセンサーは0.2mGだ。約50倍の感度を実現している。

これほどの感度になると、地磁気はもちろん、生体磁気も極めて高精度に検知できる。高感度なので同等レベルの性能のセンサーに比べて小型化も可能だ。本蔵氏は、ワイヤに巻くコイルを小型化し、GSR素子を実装する回路の設計を最適化したことで、小型化を実現した。同氏によると、外形寸法が1.2×1.2×0.6mmのGSRセンサーを2016年9月までに実現できるメドが立ったという。

GSRセンサーのサンプル出荷は既に開始している。サンプル価格は要問い合わせ。2017年の量産開始を目指す。



アモルファスワイヤ（左）とGSRセンサーの評価基板。赤い矢印のところにGSRセンサー素子が載る。（クリックで拡大）

ハンドヘルドの脳磁図計が実現可能に？

小型で超高感度という特長を生かしてGSRセンサーが主に狙うのは、スマートフォンの他、ウェアラブル機器と自動車、医療の分野である。

スマートフォンなどに搭載されている磁気センサーは、それほど高性能である必要はない。「高性能なソフトウェアとスマートフォンの処理能力で、いくらでも補正が効くからだ」（本蔵氏）。そのため、スマートフォンメーカーは、性能よりもコストを重視して磁気センサーを選んできた。

だが、ここ数年で普及しているウェアラブル機器では、高い性能が要求される。特にフィットネスやヘルスケア向けのウェアラブル機器では、ユーザーが走ったり激しい運動をしたりしても、微弱な生体磁気を正確に計測できる高感度なセンサーが必要になるからだ。本蔵氏は、こうした要件がGSRセンサーの普及を後押しすると見込んでいる。自動車では、各メーカーが研究開発を進めている自動運転技術に生かすことができると、本蔵氏は述べる。

さらに期待できるのが医療分野だ。本蔵氏は、「GSRセンサーは外形寸法が1.2mm角なので、医療用カテーテル（内径1.3mm）の中に搭載できる。これによってカテーテルの場所を正確に検知できるようになる」と述べる。もう1つ、超伝導を利用した磁気センサーであるSQUID（Superconducting QUantum Interference Device）の置き換えも狙う。SQUIDは、フェムトテスラオーダーを検出できるほどの感度を持ち、脳や心臓に流れる電流で発生する極めて微弱な磁場を計測する装置（脳磁図計／心磁図計）に使われている。だが、高価で、極低温に保つ装置や、環境磁気雑音を遮断するための磁気シールドルームといった大型の周辺機器が必要になる。本蔵氏は、SQUIDをGSRセンサーで置き換えることで、ハンドヘルド型の脳磁図計／心磁図計を安価に実現できると見込んでいる。

「MIセンサー」が基礎に

GSRセンサーのベースになったのは、本蔵氏が愛知製鋼時代から開発と販売に携わっていた「MIセンサー」である。

MIセンサーは、名前の通り磁気インピーダンス効果を利用するものだ。磁気インピーダンス効果とは、アモルファスワイヤなどのアモルファス磁性体のインピーダンスが、外部磁界の変化に伴って変化する現象を指す。アモルファスワイヤに20MHzほどの高周波電流を供給し、インピーダンスの変化から磁気を換算する仕組みだ。

本蔵氏が愛知製鋼で手掛けていたのは、このMIセンサーを改良した、より高感度な「MIセンサー^{*}」だ。外部磁場がかかっているアモルファスワイヤに100MHzのパルス電流を通電し、ワイヤ内の磁壁を振動させて動かすことで磁化を回転させ、それによって生じた誘導電圧をコイルでピックアップして、磁気に換算する仕組みになっている。

^{*} 愛知製鋼が開発したMIセンサーは、一般的なMIセンサーとは、検出の仕組みがやや異なるため、本記事では「愛知製鋼の「MIセンサー」」とする。

愛知製鋼の「MIセンサー」は、2mGのノイズレベルを実現した。ホールセンサーの10mGに比べると十分に高感度で、Googleの「Nexus 7」をはじめ、LG ElectronicsやHTCのハイエンドスマートフォンの電子コンパス向けに、大量に採用された時期もあった。だが、ホールセンサーなどの半導体センサーに比べてコストが高い点がデメリットとなり、安価なホールセンサーと高性能なソフトウェアで構成される電子コンパスには勝てなかった。

だが前述したように、ウェアラブル機器の台頭による磁気センサーの要件の変化が、転機となった。愛知製鋼の「MIセンサー」は性能面では十分だが、やはりコストの問題はついて回る。そこで、「何とかして小型化し、一度に製造できる量を増やして低コスト化に結び付ける打開策を探っていた」（本蔵氏）。

1GHzのパルス電流で感度を上げる

小型化するには、感度を上げる、つまりセンサーの出力を上げる（＝コイルの電圧を上げる）が必要になる。出力はパルス電流の周波数に比例する^{*}）ので、単純に考えれば、周波数を上げれば感度は上がることになる。だが、むやみに周波数を上げればよいというわけではない。磁壁を動かすためには、ある程度のエネルギーが必要になる。ギガヘルツのパルス電流では、電流が流れる時間が短すぎてエネルギーが足りず、磁壁を振動させることができないのだ。そのため、愛知製鋼の「MIセンサー」では20MHzが限界だった。

^{*} 正確には、周波数の平方根（ \sqrt{f} ）に比例する。

だが本蔵氏は、「1GHzのパルス電流を通電すれば、ワイヤの表面にしか電流が流れなくなり、表面に存在するスピンのみが回転するのではないか」という仮説を立てた。その後、丹念に磁界シミュレーションを繰り返し、仮説を立証したのである。

マイクロコイルの開発で小型化

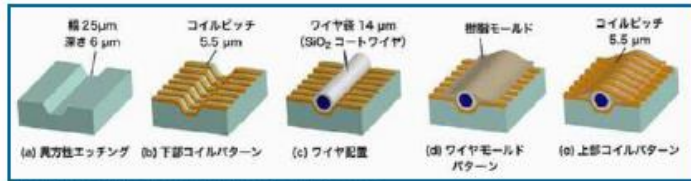
1GHzのパルス電流とともに、GSRセンサーの小型化の鍵を握っているのが、コイルと、GSRセンサーの周辺回路だ。

アモルファスワイヤの直径は10 μ mだ。毛髪1本の直径は約150 μ mなので、その15分の1と非常に細い。通常使われるコイルを巻くとなると、ワイヤとコイルの距離があり過ぎて、電圧を取り出せなくなる。

そのため、本蔵氏らは特殊な方法でコイルを形成する方法を開発した。

まずシリコン基板上に、幅25 μ m、深さ6 μ mのV字型の溝を掘る。その溝に垂直になるように銅か金を等間隔に蒸着させ、「下部コイル」を形成する。次に、V字溝に沿ってアモルファスワイヤを配置する。最後に、その上から、また垂直方向に金属を蒸着させ「上部コイル」を形成するのである。「ワイヤにコイルを巻く」のではなく、「ワイヤをコイルで挟む」イメージだ。マグネテザインは、これを「マイクロコイル」と呼ぶ。マイクロコイルの開発によって、コイルとワイヤの距離を、2mmから20 μ mまで縮めることができたという。

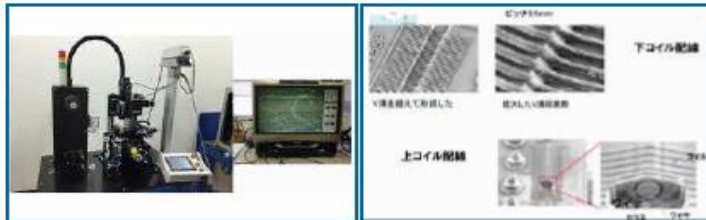
足かけ20年でようやく量産にメド



コイルの形成方法（クリックで拡大） 出典：マグネデザイン

上記の工程で特殊なのは「(c) ワイヤ配置」だ。ここ以外は、通常の半導体製造装置を利用できる。本蔵氏は「アモルファスワイヤ整列装置」という専用の装置を開発し、これで(c)の工程を行う。作業者が電子顕微鏡をのぞきながら、ワイヤを配置する位置を合わせる。位置合わせ後は、自動でワイヤが配置されていく。

同氏は、アモルファスワイヤ整列装置について特許を取得した。なにせ幅25µmの溝に、直径10µmのワイヤを置くのである。許容される“回転ずれ”は、わずか0.01°だ。“横ずれ”も1µmしか許されない。本蔵氏は、「この装置がなくては、GSRセンサーは作れない」と強調する。ワイヤの長さは、必要な感度/コストに合わせて0.1~2.0mmで調整できる。長いほど、感度もコストも高い。



左＝「アモルファスワイヤ整列装置」/右＝溝の構造部の電子顕微鏡写真（クリックで拡大） 出典：マグネデザイン

さらに、マイクロコイルを駆動するためのバッファ回路と、1GHzのパルス電流に対応できる高速スイッチも必要だった。「通常のピックアップコイルであれば抵抗は5Ωくらいだが、マイクロコイルは断面が極めて小さいため、抵抗が200Ω~2kΩに一気に高くなってしまふ。抵抗が高いコイルでも駆動できるバッファ回路が必要だった」（本蔵氏）。

なお、通電するパルス電流は、1GHz~2GHzが最適だと本蔵氏は考えている。これ以上周波数を上げると、スイッチやバッファ回路など、周辺回路の扱いが極めて難しくなってしまうからだ。

マグネデザインは、名古屋市のインキュベーションオフィスである「nabi/白金（ナビしらかね）」に2016年3月1日から入居し、クリーンルームなどの試作センターを建設している。本蔵氏によると、現時点で、月500万個の規模でGSRセンサーを製造できるといふ。量産拠点はnabi/白金以外の場所に構える計画だ。

並行して米国シリコンバレーにも事業所を設立すべく準備を進めている。本蔵氏は米国の医療機器メーカーにGSRセンサーの試作品を持ち込むなど、積極的に交渉を始めている。

本蔵氏は、「MIセンサー」の研究開発も含めれば、約20年をかけてGSRセンサーを開発した。これまでにない、まったく新しい原理を用いた超高感度のGSRセンサーは、磁気センサー界の“異端児”といえるかもしれない。本蔵氏は、ようやく量産のメドが立ったGSRセンサーを、日米を拠点にして、満を持して市場に投入することになる。2025年には、売上高2000億円超を目指す。

IoT時代の日本の役割

IoTでは、膨大な数のセンサーが使われると予測されている。磁気センサーも、スマートフォンからウェアラブル機器、自動車、医療機器と幅広い分野でこれまで以上に採用が進むとみられている。

本格的なIoT時代に入突する中、本蔵氏は「IoTにおける日本の役割はセンサー技術ではないか。ソフトウェアはやはり米国が強だろう」と語る。ただ、磁気センサーでいえば、安価で性能が安定している半導体センサーが普及したまま、飛躍的な性能の向上を実現する新しいセンサーの開発については、やや“足踏み状態”が続いていた。現時点で最も高感度が高いといえるMIセンサーを小型化して低コスト化し、半導体センサーに追い付くには、ギガヘルツクラスのパルス電流や新しい磁性材料が必要だったと本蔵氏は話す。同氏は、「日本は磁性材料にも極めて強い。今後、磁気センサーは間違いなくスピン制御を用いる第3世代のセンサーが主流になっていく」と続け、IoT時代の日本の勝機はセンサー技術にあると強調した。