

GHz パルスによる高感度マイクロ磁気センサ “GSR センサ” の開発

本蔵義信¹, 本蔵晋平²

¹Magnedesign corporation, Nagoya, Japan

E-mail address: yoshinobu.honkura@magnedesign.co.jp

²Nanocoil incorporation, Nagoya, Japan

E-mail address: shinpei.honkura@nanocoil.co.jp

要約—著者らは、アモルファスワイヤタイプの高感度磁気センサ分野において、新電磁現象 GSR 効果を発見した。その特徴は、検出コイルの出力電圧はパルス周波数が 3 GHz まではその増加に伴って増加すること、磁界特性との関係は $V = V_0 \sin(\pi H / 2 H_m)$ で示されること、およびヒステリシスが消失しノイズも著しく低下することである。これらの特徴は、GHz パルス励起による超高速電磁現象においては、磁壁の移動は発生せず、アモルファスワイヤの表面円周方向磁区内の電子スピンの高速回転のみが生じ、その変化を検出コイルで検知するという機構で説明できる。この原理に基礎にして GSR センサを試作した結果、市販 MI センサの 100 倍以上性能を得ることができた。自動車や医療分などにおける IOT サービスへの応用が期待される。

1 はじめに

高感度マイクロ磁気センサには MI sensor⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾, tMR sensor などがあるが、IOT 時代を迎えてその性能改善が進展している。著者らは MI センサの性能改善に取り組む過程で、GSR 効果を発見し、その原理を基礎にした ASIC 仕様の高性能な GSR(GHz・Spin・Rotation)センサ⁽⁶⁾の試作に成功した。

MI sensor⁽³⁾ based は、表面近傍に存在する 90 度磁壁の移動を基礎にした効果で、その現象は 1991 年に V.E.Makhotkin⁽⁷⁾ 教授によって発見された。Prof. Mhori⁽⁸⁾ 教授は 1993 年から 1999 年にかけてアモルファスワイヤを使って、さらに MI センサ用の電子回路（パルス励起回路や負帰還回路）を工夫して高性能な MI センサを発明した。およびコイル検出型の MI センサ⁽⁹⁾を考案して、その温度特性を改善した。

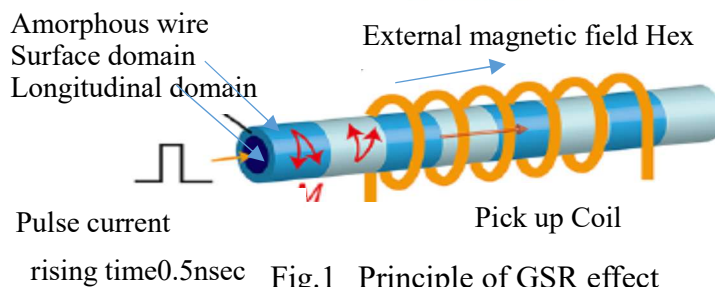
著者らは、マイクロサイズの MI 素子と ASIC 回路を組み合わせた小型 MI センサを開発した、同時にパルスアニーリング処理で負帰還回路を省略して消費電力を大幅に低減した。小型の MI センサ品番 AMI306⁽¹⁰⁾ は、優れた感度、高速測定および低消費電力などが評価されて、携帯電話市場向けの電子コンパスとして広く使用され、高い評価を得た。しかし狭い測定レンジ、直線性、ヒステリシス、ノイズおよび応力感受性などの技術問題および価格など多くの課題が浮上して、それらの問題点の解決および改善が求められた。

まず MI 効果の原理を確認すると、それは Fig.1 に示すように表面に円周方向向きの磁区、ワイヤ長さ方向向きの磁区およびその界面に存在する 90 度磁壁からなる特殊な磁気構造を持つゼロ磁歪のアモルファスワイヤ FeCoSiB 合金をベースにしたもので、そのワイヤに MHz 帯域のパルス電流を通電すると、軸方向の磁化が回転する。それにより大きな表皮効果を発生し磁界に比例したワイヤの磁気インピーダンス変化が生じる。その変化をワイヤのインピーダンス変化として検出する MI センサとワイヤに巻き付けた検出コイルの電圧変化を検出するコイル検出型 MI センサの 2 種類の MI センサが発明されている。

著者らは、GHz 帯域のパルス電流⁽⁵⁾⁽⁶⁾をワイヤに通電すると、ワイヤ最表面の電子スピンの超高速回転（磁壁の移動は生じず）、それによって検出コイル電圧は周波数の増加とともに増加するという仮説を考え、その仮説に立って MI センサの改良に着手した。さらに磁壁の移動を伴わないので磁気ノイズ、ヒステリシス、直線性などの改善も期待できた。しかしながらスピン回転による磁化の回転量は小さくなると予想されたので、コイルをマイクロ化することで検出コイルとワイヤ表面との電磁結合の強化を図ることにした。そこで 3 次元フォトリソグラフィという新技術を考案し、GSR 素子のコイルをワイヤとコイル内径との間隙 3 μm、コイルピッチ 5.5 μm と大幅に小型化した。参考までに市販の MI 素子のコイルは、間隙 20 μm、コイルピッチ 30 μm と大きなものである。

2015 年にマイクロコイル素子を使って GHz 帯域においてパルス小端数の増加に伴ったコイル電圧が増加する現象を発見した。同時に磁界とコイル電圧とに正弦波関数⁽¹⁾⁽⁶⁾関係が存在とヒステリシスの

消失という予想外な結果を見出した。GSR センサのこの特徴は GHz パルス通電に伴うスピン回転によるもので、磁壁の移動を伴わない新しい現象に起因するとものである。そこでこの現象を GSR (GHz-Spin-Rotation) 効果⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ と命名した。2015 年にスペインで開催された IWMW2015 国際会議でこの新現象を発表し、また日本特許、米国特許⁽⁶⁾を取得した。本報告では、GSR 効果の基本特性および ASIC 仕様の GSR センサを試作したので、その特性を市販の MI センサと比較して報告する。



2. 実験方法

2-1) 供試材 使用したアモルファスワイヤは、Talor-Ulitovsky で製作された直径 $10\mu\text{m}$ のガラス被覆付きのワイヤで、化学組成は $\text{Co}_{50.7}\text{Fe}_{8.1}\text{B}_{13.3}\text{Si}_{10.3}$ で、その透磁率は 1800 である。素子は Fig.2 に示す工程で製造した。第 1 ステップは、First step is to form a groove with 幅 $18\mu\text{m}$ で深さ $7\mu\text{m}$ の溝を Si 基板上にエッチングで形成した。第 2 ステップは、上記 Si 基板にレジストを塗布し、コイルピッチ $5.5\mu\text{m}$ の下側コイル配線パターンを 3 次元フォトリソ技術で製作した。第 3 ステップは、アモルファスワイヤを溝に沿って並べ、第 4 ステップは、接着性レジストでワイヤを固定し、第 5 ステップでその表面にコイルピッチ $5.5\mu\text{m}$ の上側コイル配線パターンを 3 次元フォトリソ技術で製作した。制作した素子は、長さ 0.16mm , 0.26mm , 0.45mm , 0.96mm の 4 種類で、それらはそれぞれコイル抵抗は 3Ω , 8Ω , 4.5Ω , 13Ω 、コイル巻き数は 14 回, 32 回, 66 回, 148 回 およびコイル抵抗は 80Ω , 210Ω , 360Ω , 10Ω である。

2-2) 使用した電子回路

電子回路は回路ブロック⁽¹⁾⁽²⁾⁽¹⁰⁾としてはよく知られた MI センサの回路と同とした。その上で GSR センサ用に、パルス発信回路は 1GHz から 3GHz のパルス電流が発信できるように改良した。電子ス

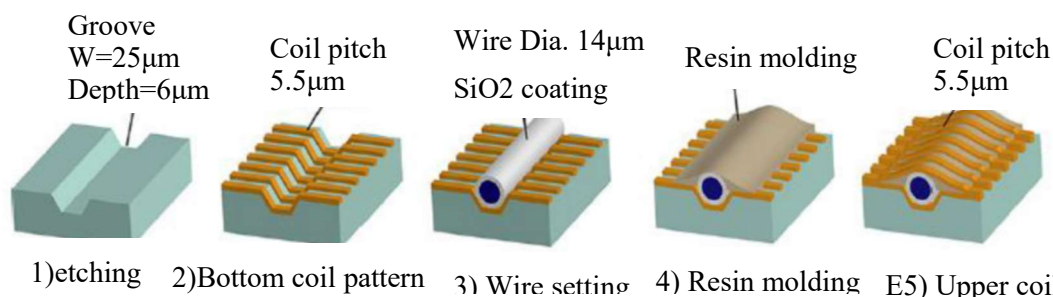


Fig.2 Production Process to produce GSR element

イッチは、オンとオフの間隔を 0.1nsec と高速にした。パルス検波タイミングを調整する回路は、0 から 400nsec まで 0.1nsec の間隔で調整可能とした。AD コンバータ 16 bits とし、通信は I2C 通信を採用した。サンプリングタイムは 5KHz とし、その時の消費電流は 0.4mA であった。

2-3) 測定方法

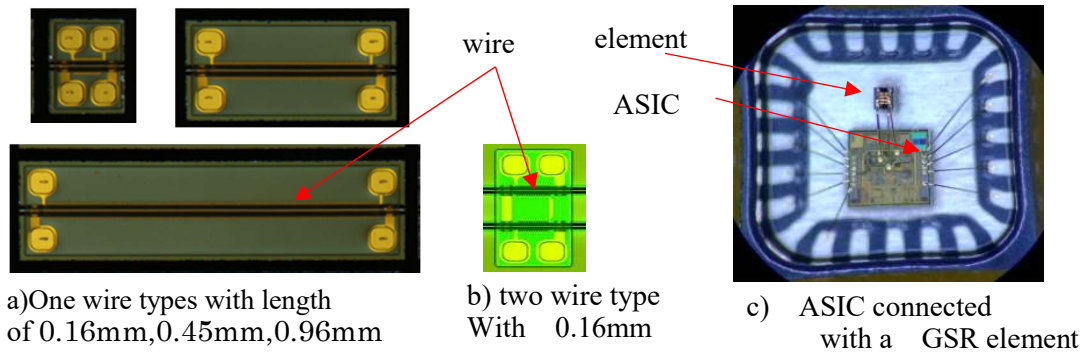


Fig.3 various types of GSR elements and ASIC used in experiments

実験は、Fig.3c に示すように、素子と ASIC とをワイヤボンディングで接続し、GSR センサの磁気特性に及ぼすパルス周波数、検波タイミング、コイル巻き数、ワイヤの有効透磁率の影響を調査した。磁気特性については、磁気感度、コイル電圧の磁界依存性、測定レンジ、直線性、 σ ノイズおよびヒステリシスの各項目について調査した。周波数の影響は、パルスの立上り／立下りに変化時間 Δt を 0.2nsec から 1 nsec まで変化させて調査した。なおパルス電流の周波数は、 $f=1/2\Delta t$ で定義した。

3. 実験結果と考察

3-1) GSR sensor⁽⁶⁾のコイル電圧の特徴について

周波数 1.5GHz として GSR sensor のコイルで波形を観察した結果を Fig.4 に示す。1 nsec 近傍で最高値を取り、その後減少する。最高値は磁界強度の増加に伴って増加するが、ある磁界 H_m (実は異方性磁界 H_k に対応する) を超えると減少する。その値は磁界の正負に依存して反対符号を取る。ここで注目すべき点は、磁界が 0 A/m の時のコイル電圧 (電気信号) が、磁界に依存して変化する電圧 (磁界感度) に比べて著しく小さいことである。ところで MI センサのそれは、磁界感度の 30%程度と大きく大きな問題であった。というのはこの電気信号はコイルの寄生容量とワイヤの印加電圧によって生じるもので、温度感受性が強い。そのため MI センサの温度依存性を損なう大きな原因となっていたからである。

コイル電圧と磁界の依存性は、パルス立下り波形で最高値を取るタイミングで検波した結果を Fig.5 に示す。驚くべきことに、両者の間に正弦波関数という数学的な関係 $V=V_0 \cdot \sin(\pi H/2H_m)$ が存在することが確認された。ここでコイル波形において最高値を取るタイミングの磁界強度を H_m とした。この H_m はワイヤの異方性磁界 H_k とほぼ同じ値であった。厳密には $H_m = 0.96H_k$ であった。

3-2) GSR sensor の磁界感度

パルス周波数の影響を、ワイヤ長さ 0.26mm タイプの GSR センサを使い、パルス周波数を 1GHz から 3GHz まで変化させて調査した。その結果 Fig.6 に示すように、磁界感度は周波数の増加とともに増加し、3GHz 以上で飽和傾向を示す。表面円周方向向きのスピンをもつ磁区内の電子スピンは、角速度 $\omega (= 2\pi f)$ で回転し、その高速回転によってワイヤ方向の磁化が変化してコイルに大きな電圧 $V(=-\Delta\phi/\Delta t)$ を生じせしめる。3GHz 以上で飽和傾向を示す理由としては、ワイヤを流れる電流の実際の周波数は渦電流作用のために抵抗を受けて減衰し 3GHz 以上に増加するのが困難であるからである。

これに対して MI センサの出力 $\Delta Z/Z_0$ ⁽³⁾ は 10MHz 近辺で最大値を取り 100MHz を超えるとゼロへと減衰する。MI 効果は、90 度磁壁の移動による表皮効果の磁界依存性を基本原理としており、磁壁の移動は渦電流作用によって大きな抵抗を受け 100 MHz を超えると移動が困難となる。その結果 $\Delta Z/Z_0$ の値がゼロへと減少する。GSR センサと MI センサの磁界感度の周波数依存性は、多くこのことになっており、これは GHz パルスを原理とするか MHz パルスを原理とするかの違いに基づくものである。

検波方法としては、立上検波と立下り検波とがあるが、両者の磁界感度を比較すると、Fig.7 に示すように立上検波⁽¹⁾⁽²⁾の方が、立下り検波に比べて 40% 以上大きい。その理由は、立上検波の場合、磁区方向に角度 θ だけ傾いて存在する電子スピンに対して、パルス電流が円周方向磁界を印加すると、電子スピンは強制的に高速で回転させられて、大きなコイル電圧を生じることになる。一方立下り検波は、パルス電流がある値以下に減少し円周方向磁界が弱くなってから、角度 0 度から角度 θ へ自発的に電子スピンの回転していく。そのため回転速度が小さくなりコイルで夏も小さくなると考えられる。したがって、立上検波を採用すること望ましいが、ノイズなど総合的に評価してどちらを採用すべきかは決定すべきである。

コイル巻き数の影響をワイヤ長さ 0.96mm の素子を使い、コイル巻き数を 16 回から 148 回まで変化させて調査した。その結果、Fig.8 に示すように、本実験の条件内では 磁界感度 (mV/G) はコイル巻き数に比例して増加することを確認した。ワイヤの透磁率の影響については、固有透磁率 1800 で、直径 $10\mu\text{m}$ のワイヤを使い、その長さを The sensitivity increases proportional to effective permeability as shown in, where wires tested with intrinsic permeability of 1800 and the diameter of $10\mu\text{m}$ has effective 0.16mm から 0.26mm と変え有効透磁率を 150 と 460 に変化させて実験した。その結果、Fig.9、に示すように、磁界感度は有効透磁率に比例することが分かった。

以上、GSR センサの磁界感度はパルス周波数、コイル巻き数、検波方法とその検波タイミング、およびワイヤの有効透磁率によって正誤されることが明らかになった。

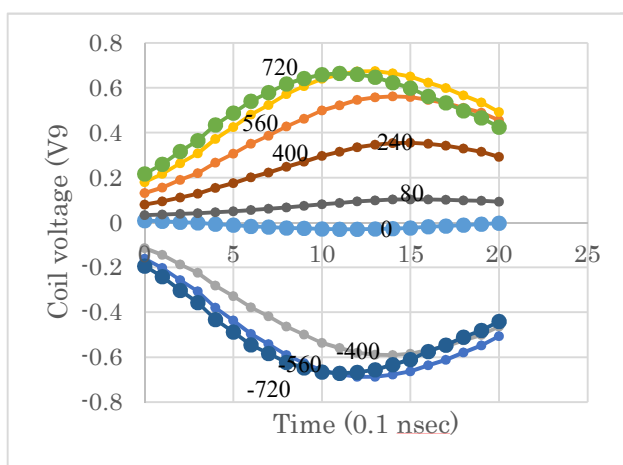


Fig.4 Coil voltage wave vs magnetic filed (A/m)

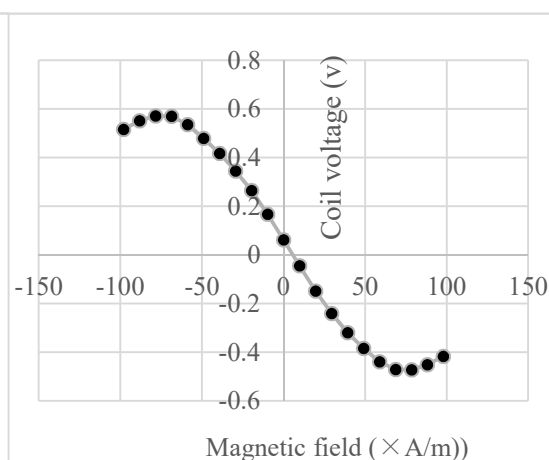


Fig.5 coil voltage vs magnetic field

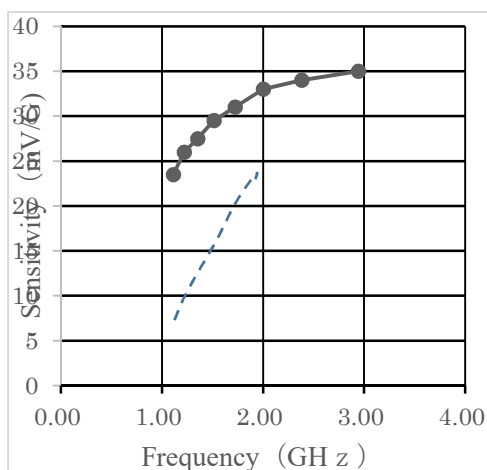


Fig. 6 Effect of frequency on Sensitivity

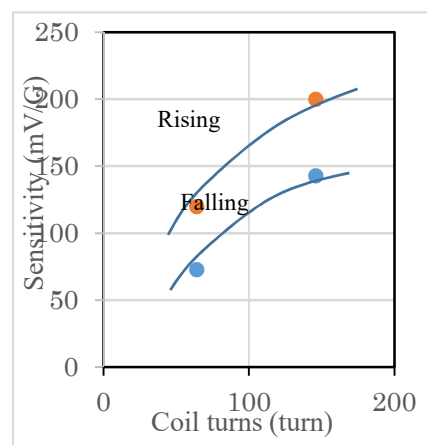


Fig.7 sensitivity of falling and rising

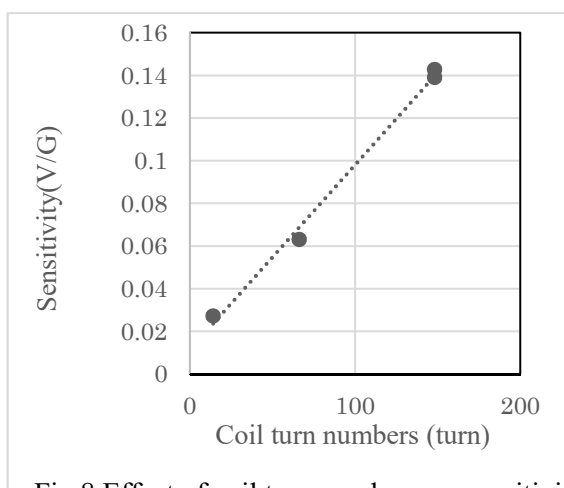


Fig.8 Effect of coil turn numbers on sensitivity

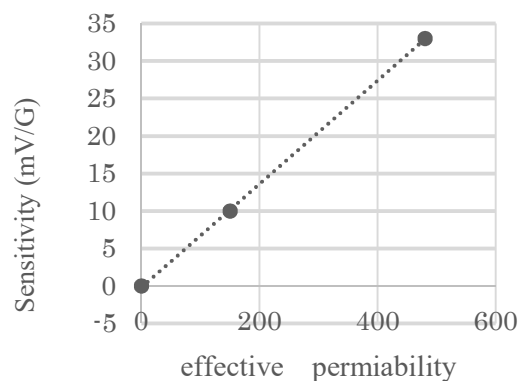


Fig.9 Effect of permeability on sensitivity

3-3) その他の磁気特性項目

コイル電圧と磁界との正弦関数関係^⑥について、電圧値を $\pi H/2H_m = \arcsin(V/V_0)$ なる関係式で逆変換したデータと、それらのデータから回帰直線と作成して両直線を比較した。その結果 Fig.10 のように両者はほぼ一致することを確認した。直線領域は測定可能な全範囲へと拡大することを確認した。フルスケールに対する 0.5% 以下の優れた直線性を得ることができた。これにより測定レンジを市販の MI センサの 960 A/m から 7200 A/m へと大幅に拡大することができた。MI センサの測定レンジについては、その出力はワイヤの BH 曲線に依存するので、コイル電圧と磁界との間には数学的關係式は存在しない。その結果、直線領域は限られたものになり測定レンジが狭いことが MI センサの大きな欠点となっている。

GSR センサの立上検波した時のヒステリシスについて Fig.11 に示す。GSR センサにおいては立下り検波はもちろん立上検波についてもヒステリシスは消失する。この結果は GSR センサでは立上検波を利用できることを示唆している。他方 MI センサでは、立ち上がり検波すると大きなヒステリシスが生じる。そのためパルスアニーリングしてヒステリシスを消去して立下り検波をする必要がある。立ち上がり検波は、1MHz 以上の高速測定センサを開発する上で極めて重要である。この意味でも GSR センサは MI センサよりもはるかにすぐれた潜在力を有している。

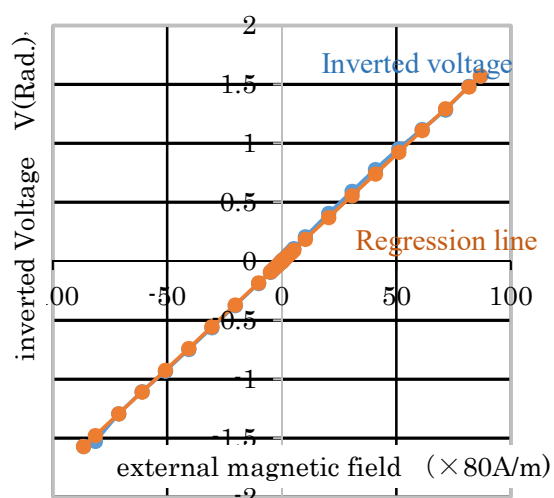


Fig.10 inverted coil voltage vs regression line

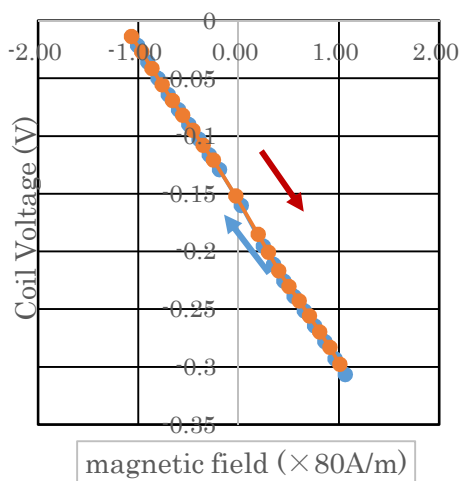


Fig.11 Hysteresis of GSR sensor under pulse rising detection

立下りのコイル電圧波形に沿って検波タイミングを変えて磁界感度と σ ノイズの関係を調査した。その結果 Fig.12 に示すように、検波タイミングをコイル電圧が最大値を取る $H=7200 \text{ A/m}$ 近辺において σ ノイズが $40\mu\text{V}$ と著しく小さくなる傾向を発見した。これは ASIC の固有のノイズは $30\mu\text{V}$ 程度なので、素子の磁気ノイズはわずか $10\mu\text{V}$ 程度であることを意味している。これは最大値を取るタイミングは、急峻に変化するパルスの遷移過程で、コイルはスピンの回転のみを検知しているためと思われる。している。他方コイル電圧が小さくなるタイミングはパルスの立ち上がり初期と最終時のパルス速度が遅くなるタイミングに対応する。そのため磁壁の移動が可能となりのノイズを増加せしめていると考えられる。またそのノイズは磁界の強さ依存し、磁界の増加とともに増加していた。

次に室温におけるワイヤ張力処理⁽¹²⁾がヒステリシス、ノイズおよびコイル電圧の磁界依存性に及ぼす影響についてを調査した。その結果を Fig.13 に示す。張力を When tension takes 1 cN (1 kg/mm^2) とすると、Fig.13a)のように立ち上がり検波においてヒステリシスが出現するようになる。Fig.13b)のように、立下り検波の正弦波関数で示される磁界依存性がその関数関係から大きく外れるようになる。さらに、張力 7 cN (76 kg/mm^2) に比べて、ノイズが著しく大きくなることが分かった。理由としては、強い張力が最表面の円周方向向き磁区を拡大し磁壁の位置をワイヤ内部に押し込むことによって、GSR 効果を助けていると考えられる

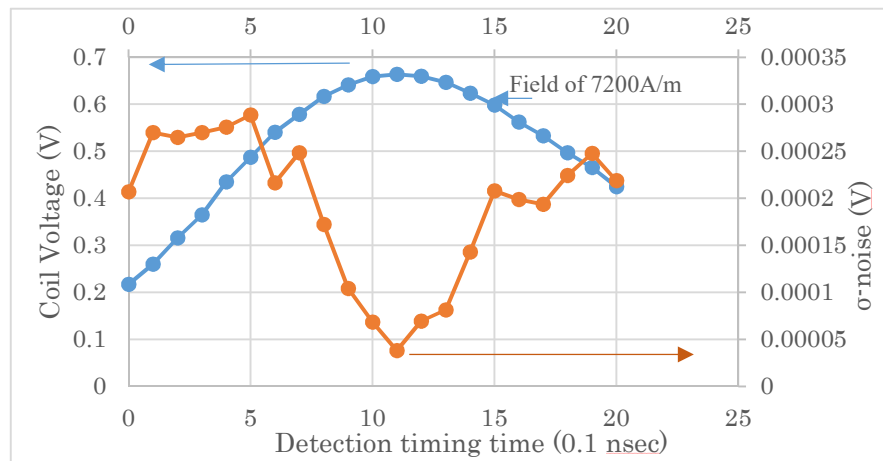


Fig.12 detection timing vs σ -noise

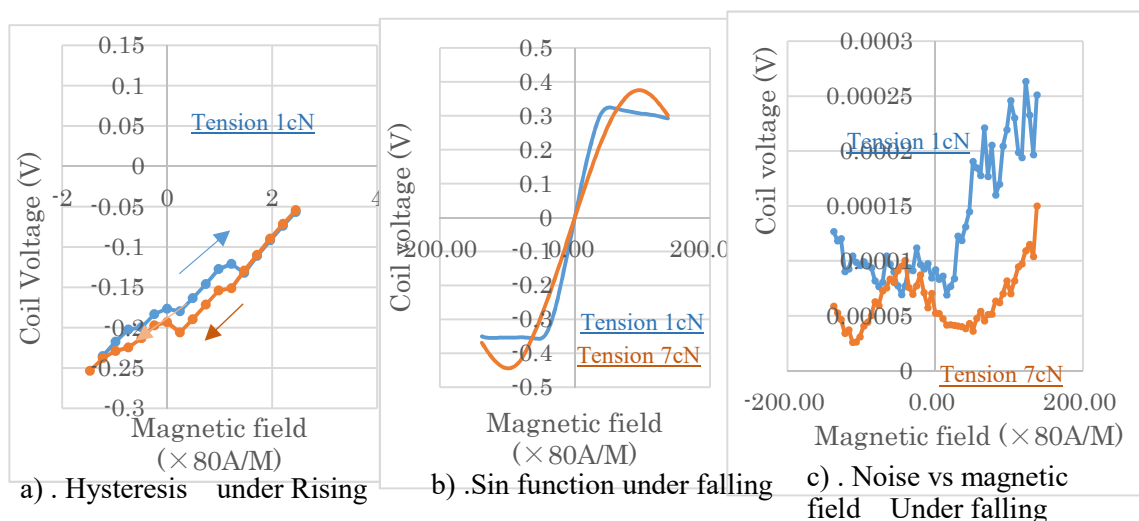


Fig. 13 Effects of tension treatment on coil voltage

3-4) GSR 効果のメカニズムに関するについて考察

Dr.Y.Uehara⁽¹³⁾ らは、直径 $10\ \mu\text{m}$ のアモルファスワイヤの磁区構造モデルを Vortex 構造と仮定して、LLG 方程式を用いてコンピュータ解析を行い、Fig.14 に示すような結果を報告している。つまり GHz パルスの場合には磁壁の移動は起こらず、電子スピンの回転のみ生じるという仮定に立って解析を行ったものである。Fig.14A は、磁界感度の周波数依存性、Fig.14B は立上りのコイル電圧と立下りのコイル電圧の比較、Fig.14C はコイル電圧の磁界依存性を示している。これらの結果は、著者らの実験結果とよく一致している。この一致は、GSR 効果の特徴はスピン回転によるものであることを示唆している。

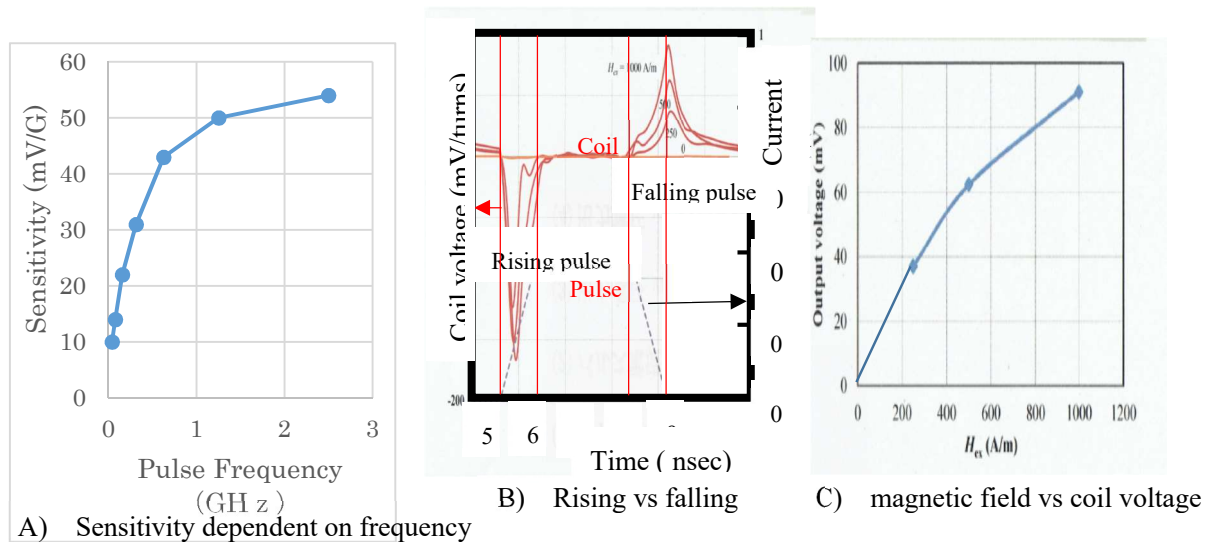


Fig. 14 Results calculated by LLG equation

4. ASIC 仕様の GSR sensor の開発

We developed four types of GSR sensors with the length of 0.16mm, 0.26mm and 0.45 respectively as shown in Table 1. Type 0.16mm has wide measuring range of 6400 A/m. It is suitable for applications in automotive use to detect strong magnetic field generated by magnet. Type 0.26mm has good balance performance of high ODR and low noise and is expected to be used for electronic compass with magnetic gyro functionality. Type 0.45mm has high sensitivity and it will be applied for magnetic positioning system.

Table 1 Performance of various ASIC type GSR sensors

Types L: length(mm) W: wire number N:coil turn numbers	Length×wid th=Element size mm×mm	Sensi tivity mV/ G	σNoise @5KHz *μV mG	S/N ratio	Measu ring range A/m	Total perfor mance index	Typical Applications futures
GSR sensor L0.45*W1*N64	0.45×0.3 (1.2)	63 (20)	* 60 1mG	1050 (22)	2400 (2.5)	66	Positioning High sensitivity
GSR sensor L0.26*W1*N36	0.26×0.3 (2)	40 (12)	* 60 1.5mG	660 (14)	3200 (3.3)	92	Gyro Compass Balance of ODR +noise
GSR sensor L0.16*W1*N14	0.16×0.24 (3)	10 (3)	* 60 6mG	167 (3.5)	6400 (7)	74	Automotive Wide range
GSR sensor L0.16*W2*N28	0.16×0.3 (3)	13 (4)	* 60 3mG	325 (6.9)	6400 (7)	145	Automotive Wide range
MI sensor L0.6*W1*N16	0.60×0.3	3.3	* 70 7mG	47	960	1	compass

Total performance index = S/N ratio × measuring range × element size () means How large better than MI sensor,

The performance of GSR sensor developed are shown in Table 1 comparing commercial type of GMI sensor. Exact comparison is difficult because the sensor performance consists of sensitivity, noise, S/N ratio, measuring range, ODR speed, element size, consumption current, cost and so on. More over a lot of parameters have trade-off relationship. We attempt to compare both sensors using “Total performance index = S/N ratio $\times$ measuring range $\times$ element size ” under similar conditions on consumption current and ODR speed. The comparison suggests that GSR sensor has 60 to 150 times better performance than GMI sensor.

Coil type GMI sensor detects the rotation of wire direction magnetism induced by movement of 90 degree magnetic wall excited by MHz pulse current. The wall movement gives to GMI output the good sensitivity but at the same time makes many disadvantages of big noise, nonlinearity, and hysteresis. On the contrary GSR sensor detects spin rotation with high speed excited by GHz pulse current not accompanied with magnetic wall movements to make good magnetic properties on sensitivity, noise, linearity, and hysteresis.

5. CONCLUSION

We found GSR effect based on the GHz speed rotation of spins existing in surface circular magnetic domain. The effect makes new futures that coil voltage increases with pulse frequency to make big sensitivity and its relationship with magnetic field and coil voltage has the sin function to extend the range of linearity as well as it gives non hysteresis and low noise. These futures are explained by spin rotation not accompanied with magnetic wall movements. We produced various ASIC type GSR sensor and made clear to have the advanced 100 better performance than that of commercial GMI sensor. GSR sensor will contribute to develop a lot of new applications.

謝辞

本研究は日本の通産省、NEDO 及び愛知県の補助事業の財政的支援および名古屋大学の岩田教授、加藤教授、および内山教授、さらには豊田工業大学の佐々木教授の技術指導を受けて行ったものである。この場を借りて感謝を申し上げる次第です。

参考文献

- (1) Y. Honkura: “chapter 5 section4: Development of high sensitive micro magnetic sensor based on GSR effect”, 「new magnetic sensors and their applications」 Technical Information Institute Co. LTD (2018)
- (2) Y. Honkura: “chapter3: Electronics compass and motion sensor using MI sensor”, 「new magnetic sensors and their applications」 Triceps Co. Ltd, (2013)
- (3) K.Mhori supervisor ; 「Science and technology on magnetic sensors”, Corona Publishing Co. LTD (1998)
- (4) K. Mhori supervisor : 「new magnetic sensors and their applications」 、Triceps Co. Ltd, (2013)
- (5) Y.Honkura ; “Update on development of super high sensitive micro magnetic sensor “GSR sensor” Text book of 4th study group meeting of MSJ on super high sensitive micro magnetic sensors”, No.4, p10-15 (2016)
- (6) Y.Honkura: “High Sensitive Micro sized Magnetometer”, United States Patent No: US 9,857,436 B2, Jan. 2, 2018
- (7) V.E.Makhotkin etc;”Magnetic Field Sensors Based on Amorphous ribbon”, Sensor and Actuator A27(1991)p759-762
- (8) K.Mohri, K.Kawashima, T.Kohzawa, and H.Yoshida: IEEE Trans.Magn., V29, p1245-1248(1993)
- (9) K.Mhori ; ”A micro magnetic sensor based on MI effect”, Japan Patent No.3645116 (1999)
- (10) Y.Honkura; “The Development of MI sensor and its Applications to Mobile Phone”; AES2012,(2012)
- (11) Y.Honkura etc. : “ magnetic sensor”, Japan patent No.3801194(2006)
- (12) Y.Honkura; “Equipment and the method to line up magnetic wires on Si wafer”, Japanese Patent No. 5839530 (2015)
- (13) Y.Uehara etc. : “Analysis on the dynamic magnetic process of amorphous wire using LLG equation” Text book of 1th study group meeting of MSJ on super high sensitive micro magnetic sensors”, No.1, p15-21 (2015)