

## 励磁コイル・磁気センサ間を 300mm とする 金属・磁性体の高感度検出

田中 絢菜<sup>1</sup>、Suko Bagus Trisnanto<sup>1</sup>、笠島多聞<sup>2</sup>、澁谷朝彦<sup>2</sup>、竹村泰司<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>横浜国立大学、<sup>2</sup>TDK 株式会社)

Detection of metal and magnetic material using high sensitive magnetoresistive sensor located 300 mm from excitation coil

Ayana Tanaka<sup>1</sup>, Suko Bagus Trisnanto<sup>1</sup>, Tamon Kasajima<sup>2</sup>, Tomohiko Shibuya<sup>2</sup>,

Yasushi Takemura<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>TDK Corporation)

### はじめに

交流磁界を印加した物質内に発生する渦電流等を検出する非破壊検査<sup>1)</sup>や磁気粒子イメージング (magnetic particle imaging, MPI)<sup>2,3)</sup>では、励磁コイルと検出対象、検出対象と検出コイル・センサの間隔が一定以上の距離がある条件下で動作させる必要がある。私たちは、高感度な磁気抵抗効果 (MR) センサ<sup>4)</sup>を用いて、人体を対象とする磁気粒子イメージングを想定した磁気粒子の検出などの測定結果を報告してきた<sup>5)</sup>。今回、励磁コイルと MR センサ間に一定以上の距離を確保した配置において、金属試料や磁性体試料などの検出を行ったので報告する。

### 実験方法と結果

Fig. 1 に検出システムを示す。励磁コイルによって試料に交流磁界を印加し、それによって生じた磁気信号を心磁界などの生体磁気計測に用いられている TDK Nivio xMR センサ<sup>4)</sup>を用いて検出した。励磁コイルや地磁気などの外部要因による磁界を相殺して、試料に生じる渦電流や磁化の変化に起因する磁界信号のみを検出するために、同一軸上に 2 台の MR センサを差動配置した。

Fig. 2 に印加磁界強度に依存する検出磁界の測定結果を示す。試料はステンレス小片である。横軸は試料に印加される磁界強度、縦軸は MR センサで測定する磁束密度である。励磁コイルと MR センサ間を 300 mm、励磁コイルと試料間は可変で、Fig. 2 では 280 mm とした。励磁周波数は 10 kHz とした。実験条件並びに得られた結果の詳細は当日発表する。

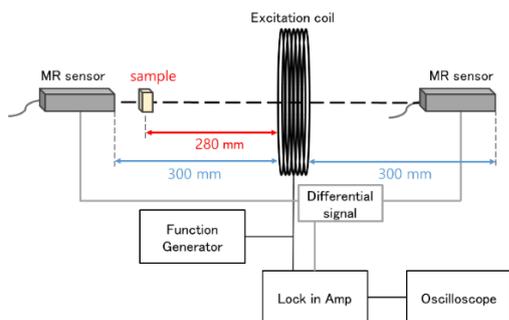


Fig. 1. Detection system using AC field excitation coil and magnetoresistive sensor

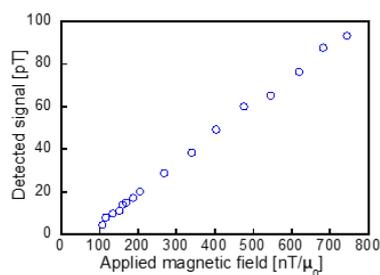


Fig. 2. Detected magnetic field depending on the magnetic field intensity applied to the samples

### 参考文献

- 1) 山田、日本磁気学会 まぐね, 10(2), 84, 2015.
- 2) B. Gleich, J. Weizenecker, *Nature*, **435**, 1214, 2005.
- 2) 吉田、日本磁気学会 まぐね, **13**(4), 161, 2018.
- 4) 寺園、澁谷、大川、日本磁気学会 まぐね, **14**(4), 211, 2019.
- 5) S. B. Trisnanto, Y. Takemura, *Phys. Rev. Applied* **14**, 064065, 2020.

# 高感度 MR センサを用いる 非破壊検査における検出磁界強度とその周波数依存

河野佑太<sup>1</sup>、Suko Bagus Trisnanto<sup>1</sup>、笠島多聞<sup>2</sup>、澁谷朝彦<sup>2</sup>、竹村泰司<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>横浜国立大学、<sup>2</sup>TDK 株式会社)

Detected magnetic field intensity and its frequency dependence in nondestructive inspection  
using high sensitivity magneto resistive sensors

Yuta Kono<sup>1</sup>, Suko Bagus Trisnanto<sup>1</sup>, Tamon Kasajima<sup>2</sup>, Tomohiko Shibuya<sup>2</sup>,  
Yasushi Takemura<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>TDK Corporation)

## はじめに

非破壊検査に磁気センサを用いる研究が報告されている<sup>1,2)</sup>。磁気センサアレーを利用する方法や、高感度磁気センサとして巨大磁気抵抗効果 (GMR) センサの応用、さらには SQUID を用いた微小金属異物検出<sup>3)</sup>など、新しい提案、並びにそれらの検証がなされている。

本研究では、交流励磁コイルと2つの磁気抵抗効果 (MR) センサを用いた検出システム、及びそれを用いた測定結果を報告する。この検出システムは、磁気粒子イメージング等のバイオ医療応用にも使用可能と考えている<sup>4-7)</sup>。

## 実験方法と結果

今回用いた検出システムは、励磁コイルによって検出対象とする試料に交流磁場を印加し、それによって生じる磁気信号を TDK 製 Nivio xMR センサ<sup>8)</sup>によって検出する。差動配置した2つの MR センサを使用し、それらの出力の差分をロックインアンプで増幅した信号強度として計測した。

試料としてアルミ箔を用い、印加磁界強度を変化させながら、検出磁界強度を測定した (Fig. 1)。また、アルミニウム及びフェライトについて、励磁コイルに接続された電源電圧が一定の条件下で、周波数を変化させながら検出磁界強度を測定した。得られた検出磁界強度を印加磁界強度で除することで、周波数変化に起因する印加磁界強度の変化を補正し、周波数特性  $g(f)$  とした (Fig. 2)。実験方法・結果の詳細は当日報告する。

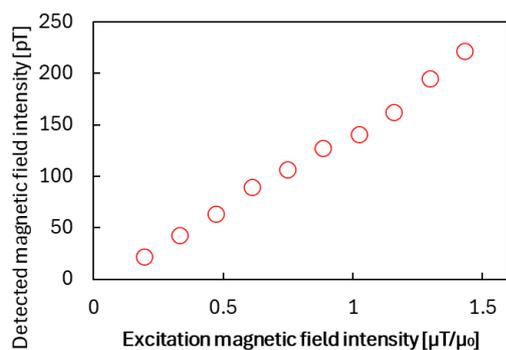


Fig. 1 Dependence of detected magnetic field intensity on excitation magnetic field intensity (Aluminum)

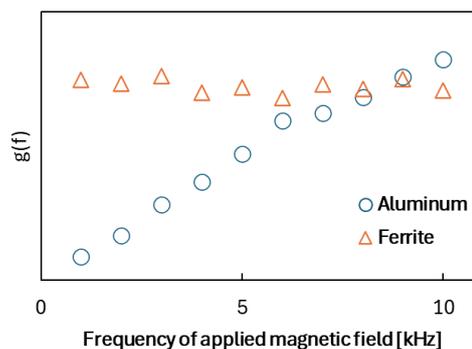


Fig. 2 Frequency dependence of detected magnetic field intensity

## 参考文献

- 1) 森田他、電気学会全国大会, 2-118, 2015.
- 2) 山田、日本磁気学会 まぐね, 10(2), 84, 2015.
- 3) 田中、日本AEM学会誌, 22(4), 453, 2014.
- 4) B. Gleich, J. Weizenecker, Nature, 435, 1214, 2005.
- 5) 吉田、日本磁気学会 まぐね, 13(4), 161, 2018.
- 6) Ahn他、電気学会全国大会, 2024.
- 7) 野口、吉田、圓福、日本磁気学会学術講演会, 8pE-1, 2015年.
- 8) <https://product.tdk.com/ja/techlibrary/developing/bio-sensor/nivio-xmr-sensor.html>

## 7 連微小コイルで検出する Wiegand ワイヤのパルス出力特性

鈴木丈士<sup>1</sup>, 直江正幸<sup>2</sup>, 竹村泰司<sup>1</sup> (横浜国立大学<sup>1</sup>, 電磁材料研究所<sup>2</sup>)

Pulse voltage of Wiegand wire detected by seven series detection coils

Hiroto Suzuki<sup>1</sup>, Masayuki Naoe<sup>2</sup>, Yasushi Takemura<sup>1</sup>

(Yokohama National University<sup>1</sup>, Research Institute for Electromagnetic Materials<sup>2</sup>)

### はじめに

FeCoV 合金などを原材料とする Wiegand ワイヤとして知られる磁性線は磁氣的二層構造を有するとされており、外部磁界の印加により保磁力の低い層では大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる急峻な磁化反転が生じる<sup>1)</sup>。ワイヤ周囲に検出コイルを取り付けることでパルス電圧を得ることができ、センサや小型発電素子として使用されている<sup>2-5)</sup>。本稿ではひねり処理を施した FeCoV ワイヤのパルス出力特性を考察した。

### 実験方法

ひねり処理を施した 0.5 mm 径の Fe<sub>41</sub>Co<sub>50</sub>V<sub>9</sub> (wt.%) ワイヤの外周に Fig. 1 に示す 100 turn の検出コイルを 7 つ、1 mm 間隔で設置した。このワイヤに 15 mT/μ<sub>0</sub>、40 Hz の交流磁界を印加した。1,000 周期のパルス電圧を測定し、各検出コイルでのパルス波形、その波高値と半値幅、これらの 7 つの検出コイルでの比較などを検討した。

### 実験結果

得られたパルス波形の一例を Fig. 2 に示す。各コイルの波高値は 250 から 340 mV 程度、半値幅は 13 から 18 μs 程度であった。この半値幅や、検出コイルが 100 turn であることを考慮すると、得られたパルス電圧は Wiegand パルスと呼ばれる高速な磁化反転に伴う誘導電圧であると考えている。測定方法、結果の詳細は当日、報告する。

### 参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, (1974).
- 2) Products Wiegand sensor, POSITAL:  
[https://www.posital.com/jp/produkte/wiegand\\_sensors/Wiegand\\_Sensors.php](https://www.posital.com/jp/produkte/wiegand_sensors/Wiegand_Sensors.php)
- 3) S. Saggini, F. Ongaro, L. Corradini, A. Affanni, IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron., 3, 766, 2015.
- 4) Y. Takemura, N. Fujinaga, A. Takebuchi, and T. Yamada, IEEE Trans. Magn., 53, 4002706, 2017.
- 5) 内山、後藤、田代、脇若、直江、日本 AEM 学会誌、29(2), 297, 2021.

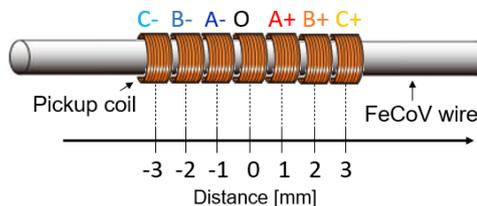


Fig. 1 FeCoV wire and pickup coils.

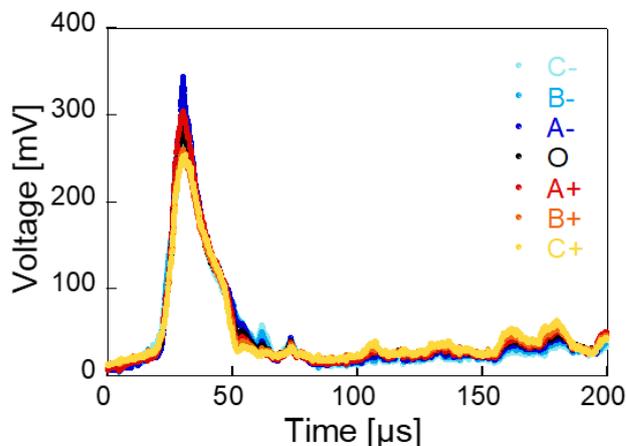


Fig. 2 Waveform of pulse voltage induce in each coil.

## 小型高感度磁気センサ nT メータの開発

都筑 裕汰郎<sup>1)</sup>、疋島 充<sup>2)</sup>、本蔵 晋平<sup>2)</sup>、本蔵 義信<sup>2)</sup>

( 1) 株式会社マグネア 2) マグネデザイン株式会社 )

Development of magnetic sensor nT meter with compact and high-sensitivity

Y.Tsuzuki<sup>1)</sup>, M.Hikishima<sup>2)</sup>, S.Honkura<sup>2)</sup>, Y. Honkura<sup>2)</sup>

( 1) Magnaire Co., LTD, 2) Magnedesign corporation )

### はじめに

アモルファスワイヤをベースにした高感度磁気センサとして、FG センサ、MI センサから GSR センサ<sup>1,2)</sup>の開発が行われて来たが、その開発の過程で、励磁周波数を KHz、MHz、GHz と増加を図ることで小型高感度化が実現されてきた。GSR センサは、零磁歪のアモルファスワイヤを磁心として、そこにコイルピッチ 3 $\mu$ m のマイクロコイルを取り付けた素子を用いて、励磁周波数を GHz 帯域として、磁壁の移動を抑制し表面磁区内のスピンの超高速回転現象を活用することで、高感度、良好な直線性、およびヒスリシスヒスレスを実現している。

近年、生体から発する微小磁界検出や Li 電池・食料品などに混入する金属微粒子の異物検出、がん細胞等を検知する磁気ナノ粒子の検出など、nT レベル以下の微小磁界を検知する nT センサの研究が活発化している。しかしこれまでのセンサはセンサ素子が大きく、マイクロサイズの磁性体検出が困難であった。著者らは上記課題を解決するため、GSR センサを利用して、素子長 2mm 程度で nT レベルの微小磁界を検出可能な nT メータを開発<sup>3)</sup>したので報告する。

### 実験方法

実験に用いた GSR 素子を Fig.1 に示す。FeCoSiB 組成のアモルファス零磁歪磁性ワイヤに、3 $\mu$ m ピッチのマイクロコイルを 586 回巻き付けたものである。アモルファスワイヤ中心から左右方向へパルス電流を通電することにより、コイルから発生するオフセット信号をキャンセルする構造としている。研究用の信号処理回路を作製し、励磁パルス周波数は 1-4GHz、電流強度は 40-100mA、パルス幅 10-50ns など励磁パラメータの影響を調べた。nT メータの評価は、感度、ノイズ、磁気換算ノイズ、直線性などについて評価した。

### 実験結果

励磁パルス電流の周波数帯域、電流強度、パルス幅、パルス周期等各種励磁パラメータの影響を調べた。発表では詳細な報告を行う。一例として、Fig.2 にパルス電流の周波数帯域の影響を示す。3GHz 以上で磁気ノイズが改善することが分かる。素子(ワイヤ直径 10 $\mu$ m、ワイヤ長 2mm)と回路を最適化することで、 $\sigma$ ノイズ 0.3nT の実現に成功した。また、20 $\mu$ m 程度の磁気微粒子を測定した場合、同程度の磁界感度を持つ FG センサの 20 倍程度の検出力を有することを確認した。nT メータの特徴として、小型素子のため励磁電圧 5V、励磁電流 100mA と消費電力が小さく、USB ケーブルによる簡便な通信・電力供給、ハンディなサイズの仕様となっている。

### 参考文献

- 1) Honkura, Yoshinobu, and Shinpei Honkura. "The development of ASIC type GSR sensor driven by GHz pulse current." *Sensors* 20.4 (2020): 1023.
- 2) Honkura, Yoshinobu, and Shinpei Honkura. "The development of a micro-coil-on-ASIC type GSR sensor driven by GHz pulse current." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 513 (2020): 167240.
- 3) 2024 年版マグネデザイン会社概要 p5

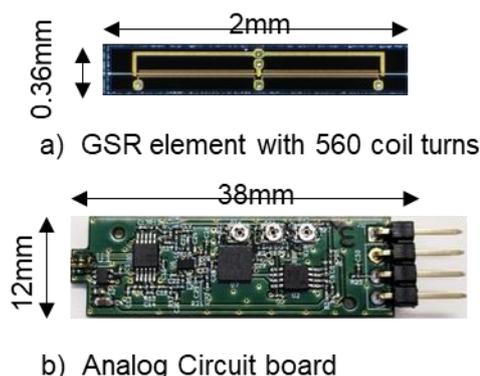


Fig.1 GSR element and Circuit board

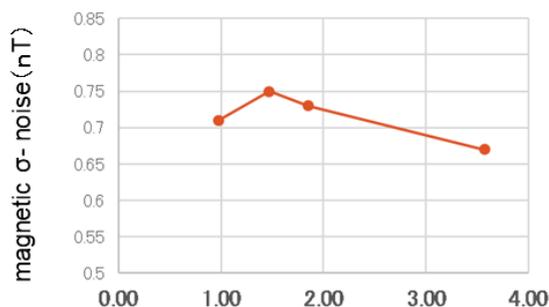


Fig.2 Pulse frequency vs magnetic  $\sigma$ -noise

# 磁気センサ nT meter による微小磁場源の検知

疋島 充, 本蔵 晋平, 本蔵 義信  
(マグネデザイン株式会社)

Detection of micro magnetic field sources with the magnetic sensor nT meter

M. Hikishima, S. Honkura, Y. Honkura  
(Magnedesign corporation)

## はじめに

磁気微粒子は、細胞の生育観察における細胞活動の把握や、Li 電池内に残存する異物検知など、さまざまな分野で利用されている。しかし、磁気微粒子は数十マイクロメートルと微小なサイズであるため、微小空間での磁場検知には小型かつ高感度の磁気センサが必要である。

当社では、小型かつ高感度の磁気センサである nT meter を開発した[1]。nT meter は、アモルファスワイヤに GHz のパルス電流を流すことで磁場変化を検知する GSR (Gigahertz Spin Rotation)効果を利用している[2, 3]。nT meter のヘッドサイズはΦ10 μm×2mm と微小なものであり、これはアモルファスワイヤにフォトリソグラフィ技術を用いてマイクロコイルを巻いている。また、nT meter はハンディサイズで、USB ケーブルで PC に接続して容易に利用できる。

nT meter を用いた微小磁場源の測定では、微小サイズのセンサヘッドが有効であることが示された。さらに、距離と検出磁束密度の関係から、磁場源の磁気モーメントの測定も可能であることが分かった。

## 実験方法

磁場源からの発生磁場の検知能をフラックスゲートセンサと比較した。Table 1 に、nT meter とフラックスゲートセンサのヘッドサイズとノイズレベルの比較を示す。nT meter のヘッドサイズは、フラックスゲートセンサの 1/1500 万分の 1 である。さらに、フラックスゲートセンサのノイズ密度は、nT meter と比較して 1Hz において約 10 倍小さい性能を有している。

	nT meter	Fluxgate
Sensor head size	Φ10um x 2mm	Φ10mm x 30mm
σ noise	0.36nT/σ (0.1-10Hz)	0.7nT <sub>rms</sub> (0.1-200Hz)
Noise density(@1Hz)	0.22nT/√Hz	0.02nT/√Hz

Table 1 Comparison of nT meter and fluxgate sensor

磁場源として、直径 0.45mm のステンレス SUS304 の伸線を長さ 0.45mm に切断し、端面に研磨を施して円筒形とした。その後、磁化させるために軸方向に 4T でパルス着磁を行った。この磁化した SUS304 の軸上において、磁気センサの先端から磁場源までの距離を変化させながら、両センサの検出出力の比較を行った。

## 実験結果

Fig 1 は、磁場源(SUS304)と磁気センサとの距離と検出磁束密度の関係を示している。nT meter とフラックスゲートセンサの両方において、磁場源からの距離が離れるにつれて検出する磁束密度が小さくなり、磁場源からの距離による磁場の減衰を示している。センサと磁場源が最も接近している点でみると、nT meter の検出磁束密度はフラックスゲートセンサの 18 倍の大きさであることが分かった。報告では、nT meter の微小磁場の検出力について報告する予定である。

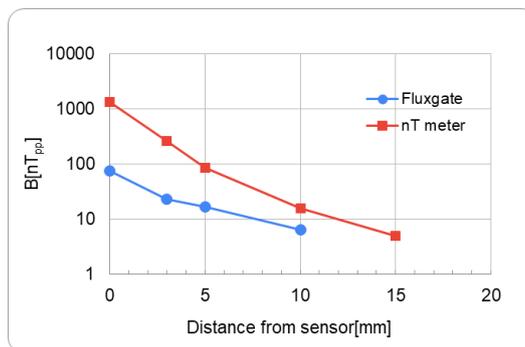


Fig. 1 Detected magnetic field at the distance between magnetic field source and sensor

## 参考文献

- 2024 年版マグネデザイン会社概要 p5
- Honkura, Yoshinobu, and Shinpei Honkura. "The development of a micro-coil-on-ASIC type GSR sensor driven by GHz pulse current." Journal of Magnetism and Magnetic Materials 513 (2020): 167240.
- Honkura, Yoshinobu, and Shinpei Honkura. "The development of ASIC type GSR sensor driven by GHz pulse current." Sensors 20.4 (2020): 1023.

# 基本波型直交フラックスゲートによる磁気傾度計の揺動出力評価

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

Response of a long baseline gradiometer to rotation and swing motion under the earth's magnetic field

Ichiro Sasada

(Sasada magnetics and sensors laboratory)

## 1. まえがき

国内での不発弾探査のほとんどは誘導コイル2個を差動にした、いわゆる、両コイル型磁気傾度計[1]によって行われている。ボーリング孔で地下を垂直探査する場合は、外径が25mmφ程度のパイプに収まる誘導コイルが使用されているが感度が十分ではない。また、不発弾が発する磁界は地磁気に対して2~3桁小さいので、地表でのスキャンやボーリング孔内でのスキャンに際して揺動や軸周りの回転に対して偽信号（本稿では揺動出力）ができるだけ小さくなるよう、磁気傾度計には高い感度と共に高い平衡度が求められる。これに対し、著者は基本波型直交フラックスゲート磁界センサを適用して開発を進めている[2,3]。本稿では機械加工によって芯出しした25 mmφ真鍮パイプ（南島原市新田鉄工所による設計・製作）を用い、ベースラインを1 mとして試作した磁気傾度計の揺動出力を評価したので報告する。

## 2. センサの構成

基本波型直交フラックスゲートのセンサヘッドには2組の検出コイルが巻かれている。1組はマグネトメータ用（和動結線）で、もう1組はグラディオメータ用（差動結線）である。励磁電流は直流バイアスされた正弦波で、波形ひずみが生じないのでケーブル長を30~50 m程度にできる。2つのセンサヘッドの感度軸を合わせる事が最も重要で、感度軸側方からの磁界を選択的に遮蔽する磁気シールドが組み込まれている。一方、2つのセンサに感度差があると、その差成分はマグネトメータの出力に相似になり、組み込まれているマグネトメータの出力の加算で補正される。センサの重量は2.4 kgで、USB駆動である。

## 3. 実験結果

Fig. 1に軸周りの回転に対する揺動出力を示す。この実験は実験室内で行った。センサの軸はほぼ垂直に立て、下端と上部を位置決めして手で時計回り、反時計回りに各1回転させた。回転時に多少傾く（スイング動作）動きがあったが、 $\pm 30$  nT (peak-peak=54 nT) 以内の揺動である。福岡では地磁気水平成分は31700 nT程度であるので1/1000以上の平衡度がある。Fig. 2には、野外でセンサを垂直に振り上げ北に向かって水平に振り下ろしたときの揺動を示す。(a)はマグネトメータ出力、(b)はグラディオメータの出力、(c)は(a)の出力を1/185倍して(b)から減算した補正結果である。マグネトメータ出力の振れ幅は平均で80  $\mu$ Tであるが、補正結果の振れ幅は平均67 nTで、一様磁界（地磁気）から勾配磁界への漏れは1/1190程度と小さい。

## 参考文献

- 1) たとえば、<https://n-buturi.co.jp/service/burying/gradiometer.html> (2023.1.4)
- 2) Ichiro Sasada, IEEE Trans. on Magn. (2023), DOI: 10.1109/TMAG.2023.3283263
- 3) 笹田, 電気学会全国大会, 2-116, 徳島, (2024)

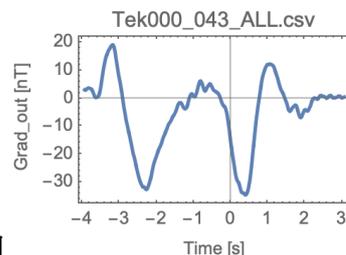


Fig. 1 Output due to CW and CCW one-turn rotation.

Fig. 2には、野外でセンサを垂直に振り上げ北に向かって水平に振り下ろしたときの揺動を示す。(a)はマグネトメータ出力、(b)はグラディオメータの出力、(c)は(a)の出力を1/185倍して(b)から減算した補正結果である。マグネトメータ出力の振れ幅は平均で80  $\mu$ Tであるが、補正結果の振れ幅は平均67 nTで、一様磁界（地磁気）から勾配磁界への漏れは1/1190程度と小さい。

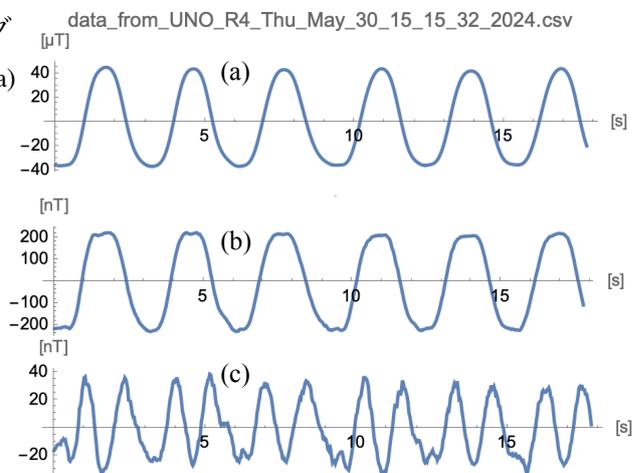


Fig. 2 Compensation result: (a) output of the magnetometer part (b) that of the gradiometer part and (c) compensation applied to (b).

# 磁性膜の MEMS 応用に向けた TMR センサによる磁気振動計測

伊藤淳、中野貴文、大兼幹彦  
(東北大学大学院工学研究科)

Magnetic Vibration Measurement by TMR Sensor for MEMS Application of a Magnetic Film

Jun Ito, Takafumi Nakano, and Mikihiko Oogane  
(Graduate School of Engineering, Tohoku University)

## はじめに

近年のロボットやドローンによるインフラ点検や農業、物流などの自動化に合わせて、MEMS センサによる慣性計測装置(IMU)の需要が高まっている。IMU の更なる測定精度向上に向けて、最近ではトンネル磁気抵抗型磁気センサ(TMR センサ)と MEMS センサの融合が始まった。TMR センサは微小磁場を高感度かつ低ノイズで測定できる点で、MEMS センサ性能を飛躍的に向上できる可能性がある<sup>1,2)</sup>。本研究では、MEMS ジャイロ스코ープの振動子(プルーフマス)に磁性膜を用いるデザインを提案した。本デザインは、MEMS と TMR センサがともにシリコンウエハから作製可能な点で親和性が高く、製造コストを下げるのに非常に有効であると考えられる。本研究の目的は、TMR センサの MEMS ジャイロ스코ープへの応用を検討するために、磁性膜を圧電素子によって振動させ、磁気振動特性を評価することにした。

## 実験方法

実験セットアップを図 1 に示す。磁性膜は CoFe(20 nm)/IrMn(10 nm)の面内磁化膜を用いた。磁性膜を圧電素子に取り付け、1 kHz で振動させた。素子の単位駆動電圧あたりの振動量は約  $4.1 \mu\text{m}$  である。磁気振動測定はスピンセンシングファクトリー社製の TMR センサを使用した。実験装置はシールドボックス内に設置した。磁性膜の振動量を角速度に換算するために、MEMS ジャイロセンサ<sup>2)</sup>のスケールファクタ(SF)を有限要素シミュレーション(ANSYS)により計算した。

## 実験結果

図 2 は TMR センサ出力の時間波形である。圧電素子により磁性膜が振動し、揺動した磁場を観測できていることを確認した。図 3 に TMR センサ出力と圧電素子の動作振幅の関係を示す。素子振幅が  $10 \mu\text{m}$  を下回ると、取得磁場が  $1 \text{ nT}_{\text{p-p}}$  を下回るものの、十分な SN 比(15 dB)で計測できることを実証した。本実験結果とシミュレーション結果は、遅い角速度も高精度に検出できる可能性を示唆している。

## 謝辞

本研究は東北大学先端スピントロニクス研究開発センター、スピントロニクス学術連携研究教育センター、AIE 卓越大学院プログラム、および JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム(JPMJSP2114)の支援を受けて行われた。また、TMR センサはスピンセンシングファクトリー株式会社より提供を受けた。

## 参考文献

- 1) Gao L, Chen F, Yao Y, Xu D. High-Precision Acceleration Measurement System Based on Tunnel Magneto-Resistance Effect. *Sensors*. 2020; 20(4):1117
- 2) Li C, Yang B, Guo X, Chen X. Design, Analysis and Simulation of a MEMS-Based Gyroscope with Differential Tunneling Magnetoresistance Sensing Structure. *Sensors*. 2020; 20(17):4919.

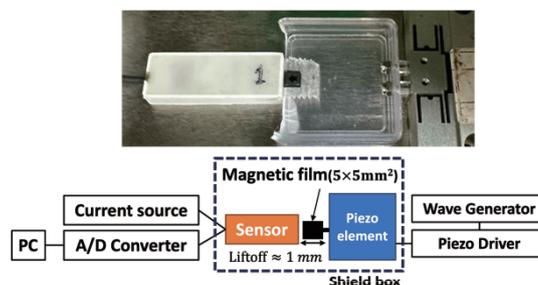


図 1 実験装置の構成

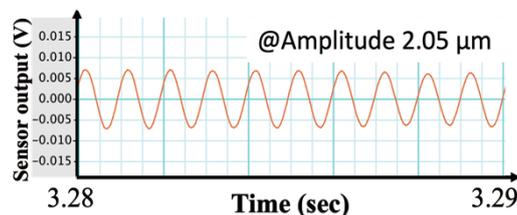


図 2 TMR センサ出力の時間波形

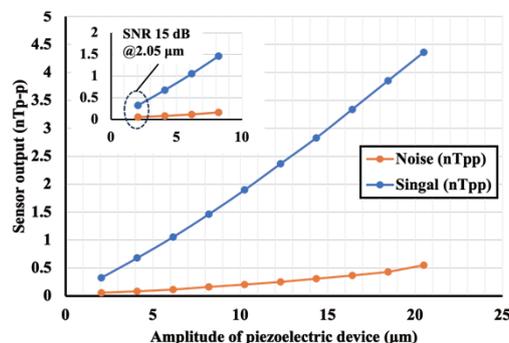


図 3 圧電素子振幅とセンサ出力の関係