

# GdFe 系合金薄膜を用いたホール素子作製への検討

森 敦司<sup>1</sup>, 笠谷 雄一<sup>2,3</sup>, 塚本 新<sup>2</sup>

(1 日本大学大学院理工学研究科, 2 日本大学理工学部, 3 日本学術振興会特別研究員-PD)

## Examination of Hall element fabrication using GdFe alloy thin film

Atsushi Mori<sup>1</sup>, Yuichi Kasatani<sup>2, 3</sup>, Arata Tsukamoto<sup>2</sup>

(1 Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., 2 College of Science and Technology, Nihon Univ., 3JSPS Research Fellow)

**はじめに** 現在センサとして活用されている大部分のホール素子には半導体のホール効果が用いられている。金属磁性体において異常ホール効果が確認されているが、その大きさは半導体ホール効果に比べ極めて小さいと考えられてきた。一方、我々は希土類遷移金属フェリ磁性体である GdFe 合金薄膜において、単体 Fe 薄膜の約 70 倍の異常ホール効果が発現し得ることを報告している<sup>1)</sup>。また、磁性合金薄膜を用いた場合、製膜と配線のみで素子作製が可能であると考えられ、従来の半導体の作製プロセス数の約 1/3 の工程に減らせる可能性があり、従来のホール素子が用いられている、マグネットスイッチや近接スイッチなどの S/N 比向上、および、素子の簡略化が期待される。そこで、本研究では希土類遷移金属合金薄膜の磁気センサ利用の提案とともに広範囲の分野での普及を目指し、ホール素子の柔軟性・性能向上に向けた検討を行う。

**実験方法** 試料は、厚さ 0.5 mm の Si 基板上及び、厚さ 0.1 mm の Resin 基板 (旭硝子カーボグラスフィルム) 上に SiN (5 nm) / Gd<sub>20</sub>Fe<sub>70</sub>Co<sub>10</sub> (200 nm) / SiN (5 nm), Si 基板上に SiN (5 nm) / Gd<sub>20</sub>Fe<sub>80</sub> (20 nm) / SiN (5 nm) をマグネトロンスパッタリング法により作製した。室温において膜面垂直方向に外部磁場を印加し、膜面内方向に 0.1 mA の電流を印加した際の電流に対し面内垂直方向に生じる電圧を測定した。

**実験結果** Fig. 1(a)に Si 基板上, Fig. 1(b) に Resin 基板上に SiN (5 nm) / Gd<sub>20</sub>Fe<sub>70</sub>Co<sub>10</sub> (200 nm) / SiN (5 nm) を製膜した試料におけるホール電圧の外部磁場依存性を示す。残留ホール電圧, 飽和磁界値等, Resin 基板上に製膜した試料においても Si 基板上製膜試料とほぼ同等の特性が得られる事を示した。

Fig. 2 に SiN (5 nm) / Gd<sub>20</sub>Fe<sub>80</sub> (20 nm) / SiN (5 nm) / Si sub. におけるホール電圧の外部磁場依存性を示す。膜厚を 1/10 とすることでスイッチング領域におけるホール電圧値は約 10 倍の 0.53 mV が得られ、線形応答領域における外部磁場に対する電圧比は約 3.1 mV/T となった。外部磁場に対する電圧比は、InSb 半導体ホール素子 (旭化成電子 HW-101A) と比較し 1/10 程度であるがホール素子として用いるには十分な信号値の水準であると考えられる。また、外部磁場が印加されていない場合に発生するホール電圧が 0.0003 mV と InSb 半導体ホール素子の不平衡電圧に比べ約 10<sup>-5</sup> である。これは、より微小な磁場範囲においてノイズレスにホール電圧が発現することを示唆している。さらに、消費電力は、1.2×10<sup>-6</sup> W と InSb 半導体ホール素子の 1/4 となった。以上のことより希土類遷移金属フェリ磁性体である GdFe 合金薄膜を用いることにより、低消費電力で微小な磁場を検出するのに十分なホール電圧を発現するホール素子を作製することが可能であると考えられる。

**謝辞** Resin 基板を提供いただいた日本大学理工学部芦沢好人准教授に感謝する。

**参考文献** 1) Hirose, Hachisuka *et al.*, Journal of the Magnetics Society of Japan, 14aC-1 (2018).

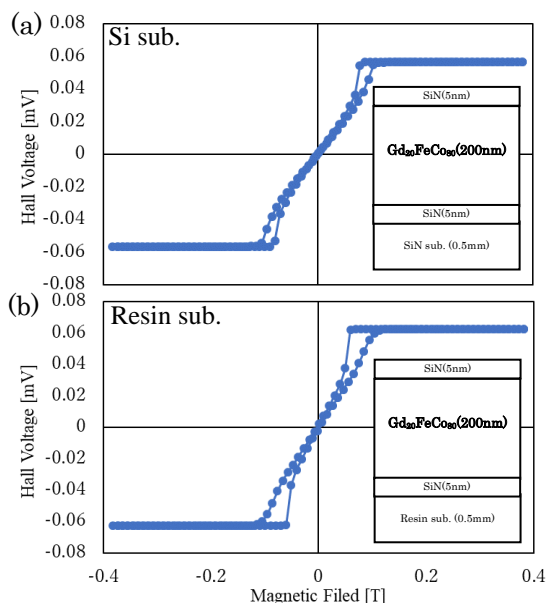


Fig. 1 Magnetic field dependence of hall voltage. (a) on Si sub. (b) on Resin sub.

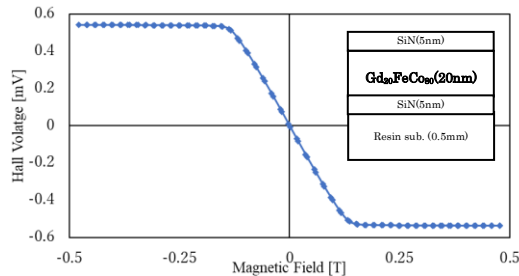


Fig. 2 Magnetic field dependence of hall voltage of Gd<sub>30</sub>Fe<sub>70</sub> (20 nm)

## Controlling nonlinearity for magnetic tunnel junction based sensors by second order magnetic anisotropy of CoFeB

Takahiro Ogasawara<sup>1</sup>, Mikihiro Oogane<sup>1,2,3</sup>, Masakiyo Tsunoda<sup>3,4</sup>, and Yasuo Ando<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

<sup>2</sup>Center for Science and Innovation in Spintronics (Core Research Cluster) Organization for Advanced Studies, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

<sup>3</sup>Center for Spintronics Research Network, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

<sup>4</sup>Department of Electronic Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

An achievement of high tunnel magnetoresistance (TMR) ratio [1] has enabled to develop highly sensitive magnetic sensors using magnetic tunnel junctions (MTJs) [2]. On their electric vehicle applications for current monitoring, the linear output, *i.e.* low nonlinearity should be achieved for safe operations. However, previously, sensitivity and nonlinearity were reported to be in the trade-off relationship as a function of effective anisotropy field,  $H_k^{\text{eff}}$ , and it thus results in a lack of either of them by controlling  $H_k^{\text{eff}}$  [3]. Therefore, in order to break this restricted relationship, we focused on second order anisotropy field,  $H_{k2}$  and established a new approach for decreasing nonlinearity while achieving a high sensitivity simultaneously.

The MTJs with Ta/Ru/Pt/[Co/Pt]/Ru/[Co/Pt]/CoFeB(1)/MgO(2)/CoFeB(1.5-2.0)/Ta/Ru (thickness in nm) were deposited on SiO<sub>2</sub> substrate by dc/rf sputtering at room temperature. After patterning them into the circular junctions and post annealing at 300°C, TMR curves were measured by four-probe-method at 50 - 400 K using probe station and PPMS. For the magnetic characterization of the free CoFeB layer, Ta/MgO/CoFeB/Ta films were prepared separately by the same method. The effective and second anisotropy field,  $H_k^{\text{eff}}$ ,  $H_{k2}$  and saturation magnetization,  $M_s$  were measured by angular-dependent FMR and SQUID, respectively.

Fig. 1 shows conductance ratio curve for the MTJ with 1.5-nm-thick CoFeB. The jump of the curve at  $\pm 4$  kOe corresponds to the large antiferromagnetic coupling field of [Co/Pt] via Ru. The linear output within  $\pm 2$  kOe is due to the rotation of in-plane magnetized free layer CoFeB, where its  $H_k^{\text{eff}}$  and  $H_{k2}$  were measured to be -1.7 kOe and 0.4 kOe, respectively by FMR. The nonlinearity was evaluated by the equation of  $(G_{\text{exp}} - G_{\text{fit}})/(G_{\text{exp}}^{\text{max}} - G_{\text{exp}}^{\text{min}}) \times 100$  (%), which quantifies the normalized differences between experimental and linear-fitted conductance,  $G_{\text{exp}}$  and  $G_{\text{fit}}$ . As shown in Fig. 2 summarizing the maximum nonlinearity against  $H_{k2}/H_k^{\text{eff}}$ , the experimental results coincide very well with the calculations using simultaneous rotation and Slonczewski's TMR model. Therefore, we succeeded in establishing the new approach to describe the nonlinearity quantitatively with second order magnetic anisotropy, which is greatly useful for diminishing nonlinearity of MTJ sensors.

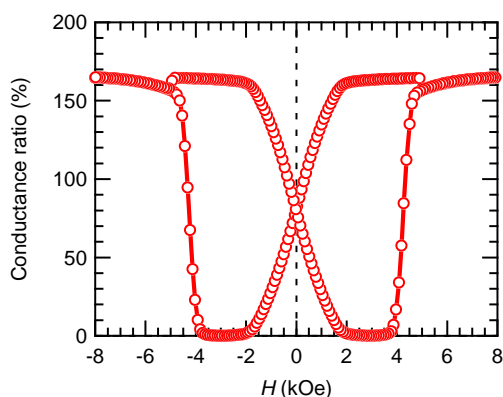


Fig. 1 Out-of-plane conductance ratio curve for MTJ with 1.5nm-thick-CoFeB free layer

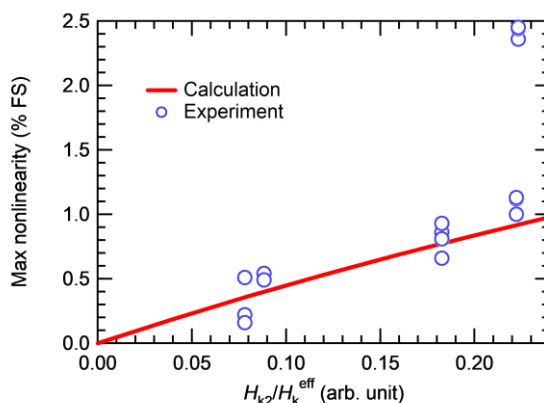


Fig. 2 Maximum nonlinearity dependence on  $H_{k2}/H_k^{\text{eff}}$

### Reference

[1] S. Yuasa, et al, Nat. Mater. 3, 868 (2004). [2] K. Fujiwara, M. Oogane, Y. Ando et al., Appl. Phys. Express 11 023001 (2018). [3] T. Nakano, M. Oogane, T. Furuichi, and Y. Ando. Appl. Phys. Lett. 110, 012401 (2017)

# 直流バイアス励磁法による平行フラックスゲートセンサの高感度化

小山大介<sup>1</sup>, 足立善昭<sup>1</sup>, 宮本政和<sup>1</sup>, 小野長幸<sup>2</sup>, 今村瑛<sup>2</sup>, 渡邊大輔<sup>2</sup>

(1:金沢工業大学, 2:NEC ネットワーク・センサ株式会社)

Improvement of Sensitivity of a Parallel Fluxgate Sensor by DC-Biased Excitation

D.Oyama<sup>1</sup>, Y. Adachi<sup>1</sup>, M. Miyamoto<sup>1</sup>, N. Ono<sup>2</sup>, A. Imamura<sup>2</sup>, and D. Watanabe<sup>2</sup>

(1:Kanazawa Institute of Technology, 2: NEC Network and Sensor Systems, Ltd.)

## はじめに

フラックスゲート磁力計は直流から数 kHz までの周波数帯域において高感度な磁気計測が可能な磁気センサであり、地磁気計測や、電流センサなどの工業用途に広く用いられている。フラックスゲート磁力計には大きく分けて「直交型」と「平行型」があり、前者は笹田らによって基本波直交フラックスゲート磁力計が開発され、心磁図計測ができるほどに高感度化されてきたり。一方、平行型についても賀戸により直流バイアスを加えた励磁電流と基本波検波によるフラックスゲート磁力計の高感度化が提案され<sup>2)</sup>、著者らもこれまでに本手法による高感度化を試みてきたが<sup>3)</sup>、原理実証や有効性の確認、駆動条件の最適化までは実現できていなかった。そこで本研究では、市販の平行型フラックスゲート磁力計のセンサヘッドに対して直流バイアスを加えた励磁と基本波検波を適用し、高感度化に関する有効性を明らかにする。

## 方法

市販の平行型フラックスゲート磁力計として、APS520A(Applied Physics Systems 社)を実験に用いることにした。Fig.1 に試作した駆動回路のブロック図を示す。なお、実験では3軸分のセンサを構成したが、スペースの都合により、1チャンネル分しか描いていない。駆動回路の構成は直交型フラックスゲート磁力計と概ね同じである。励磁電流印加部は正弦波発振回路と直流バイアス回路から構成される。計測部はプリアンプと検波回路、積分回路、フィードバック用電圧-電流変換回路から構成される。発振回路の周波数は100 kHzとし、励磁と検波回路に使用した。励磁電流の振幅及びバイアス量はそれぞれ16.7 mA, 18.3 mA とした。

実験ではAPS520Aを2台用意し、片方のセンサプローブは従来どおり市販品の駆動回路を接続し、もう片方のセンサプローブには試作回路を接続した。双方のセンサプローブを磁気シールドルーム内に並べて置き、1時間の連続計測を実施した。なお、各信号は200 Hzのlow-pass filterを通して収録した。

## 結果及び結論

Fig. 2 に計測した周波数スペクトルを示す。交流パルス電流を用いた従来法の駆動回路では25.5 pT/Hz<sup>0.5</sup> (10Hz, 3軸平均)であったが、製作した回路では6.0 pT/Hz<sup>0.5</sup> (同)となり、約1/4にノイズを低減することができた。直流バイアス励磁と基本波検波による駆動は、平行型フラックスゲートにおいても有効であることを明らかにした。

## 参考文献

- 1) H. Karo, I. Sasada, "Magnetocardiogram measured by fundamental mode orthogonal fluxgate array", J. Appl. Phys., 117, 17B322 (2015).
- 2) 賀戸久, 磁気測定方法及び装置, 特許第3651268, 2005年3月4日登録
- 3) D. Oyama, et. al., "Magnetic Marker Localization System Using a Super-Low-Frequency Signal", IEEE Trans. Magn., 50, 5101604 (2014).

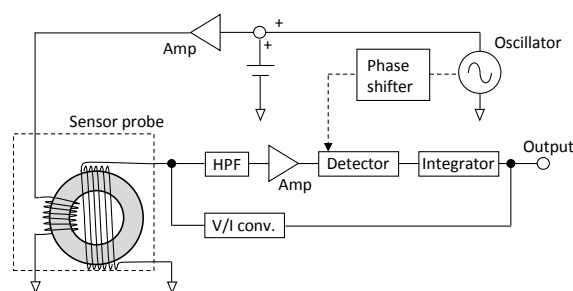


Fig. 1 Block diagram of a parallel fluxgate magnetometer with dc-biased excitation current.

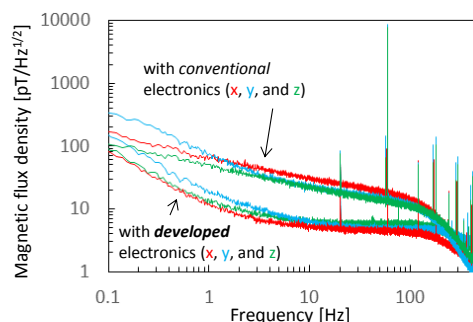


Fig. 2 Noise spectra measured with conventional and developed electronics

# 高温超伝導コイルとインダクタンス変調方式 を用いた磁気センサの開発(II)

山下 重弥\*, 松尾 政明, 笹山 瑛由, 吉田 敬, 円福 敬二  
九州大学システム情報科学研究所

Magnetometer Based on Inductance Modulation in Coils Made of High-T<sub>c</sub> Superconductor (II)  
Shigeya Yamashita, Masaaki Matsuo, Teruyoshi Sasayama, Takashi Yoshida, Keiji Enpuku  
Kyushu Univ.

磁気センサは医療・バイオ検査、非破壊検査、材料物性解析などの幅広い分野で応用されている。しかしながら、励起磁場中での動作が可能であり、かつ、1 Hz 程度の低周波磁界を高感度に計測する磁気センサはこれまでほとんど開発されていない。本研究では、高温超伝導コイルとインダクタンス変調方式を用いることにより、これらの要求を満たす磁気センサの開発に取り組んでいる。

Fig. 1 にその等価回路を示す。検出コイル( $L_p$ )と変調コイル( $L_m$ )は高温超伝導体で作製し、低抵抗( $R_c$ )で接続することにより、閉ループを形成している。信号磁束 $\Phi_s$ が検出コイルに鎖交した場合には、閉ループに電流 $I_s$ が流れ磁束が変調コイルに伝達される。変調コイルに伝達された磁束はインダクタンス変調方式を用いることで、端子PQ間に発生する電圧信号 $V_s$ に変換される。この閉ループの時定数は $\tau = (L_p + L_m)/R_c$ で与えられる。今回、接続抵抗 $R_c$ の値を計測し、この閉ループが伝達できる信号周波数の下限を調べた。

Fig. 2 に、高温超伝導テープ線材(SuperPower 社 SF2050)を接続した時の接続抵抗 $R_c$ の測定回路を示す。二つのテープ線材はハンダ付けにより接合した。ハンダ接合部は幅 2 mm、長さ 1 cm である。Fig. 2 においてバイアス電流 $I_B$ を流し、液体窒素中の接合部に電圧 $V_c$ が発生すると、室温に配置した検出コイル( $L_i=8.8 \mu\text{H}$ ,  $R_i=75 \text{ m}\Omega$ , 内径 9 mm、長さ 30 mm、巻数 52)に電流 $I_i = V_c/R_i$ が流れ、この電流が作る磁界をフラックスゲートセンサ(Bartington 社 Mag-03)で測定する構成となっている。

計測した電流 $I_i$ からハンダ接合部にかかる電圧 $V_c (= I_i \times R_i)$ が得られる。ハンダ接合部に流れる電流 $I_c (= I_B - I_i)$ と電圧 $V_c$ を用いて接続抵抗を測定した結果を Fig. 3 に示す。図から $R_c = 325 \text{ n}\Omega$ であることが分かった。これにより、閉ループの時定数は $L_p + L_m = 115 \mu\text{H}$ の場合には $\tau = 354 \text{ s}$ となり、3 mHz 程度の低周波磁束を伝達できることが示された。

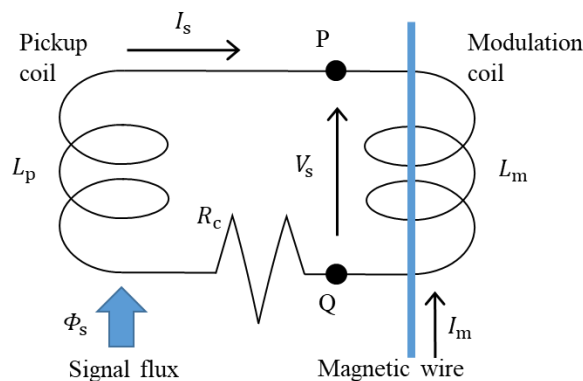


Fig.1 Equivalent circuit of the magnetometer

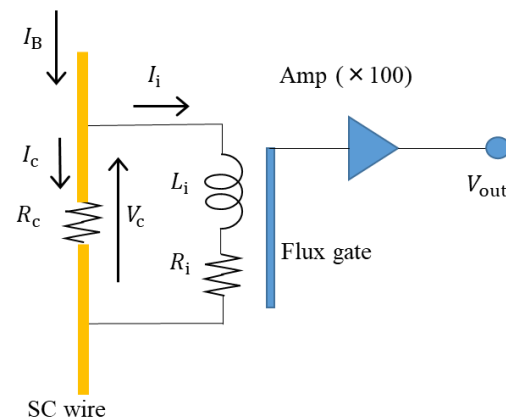


Fig.2 Measurement circuit for contact resistance

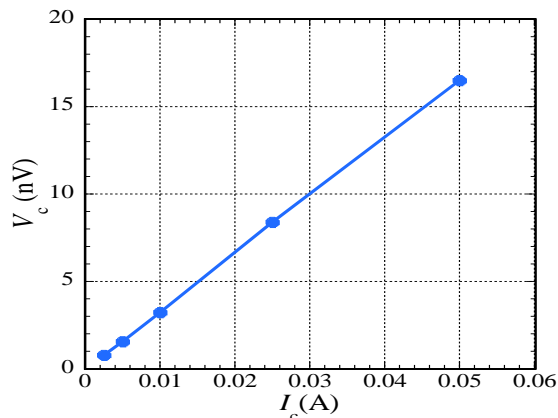


Fig.3 Current-voltage characteristic of contact resistance

# 勾配磁界センサによる異物検出におけるローパスフィルタのカットオフ周波数の検討

笹田一郎  
(笹田磁気計測研究所)

Cutoff frequency of the low-pass filter in detecting traveling magnetic particle by using a gradiometer  
Ichiro Sasada  
(Sasada Magnetics and Sensors Laboratory)

## はじめに

勾配磁界センサは一樣な磁界入力に対しては不感であるので、微小なサイズの異物検出に適している[1]。異物は勾配磁界センサの直下に置かれたシート上の物に付着していると、勾配磁界センサに対し相対速度 $v$ でFig. 1に示す方向に移動する。センサは信号と同時に雑音を持つので、出力に低域カットおよび高域カットのフィルタで不要な雑音を除去するが、信号帯域をどのように設定するかが重要である。本稿ではセンサの雑音を白色雑音として高域遮断周波数の決定法について検討した。

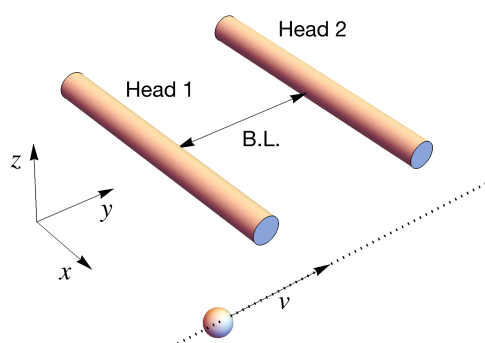


Fig. 1 Parallel gradiometer and magnetic particle traveling below it.

## 異物からの鎖交磁束

まずFig. 1に示す平行配置の勾配磁界センサに対して $z$ 方向に帯磁した異物の磁界がその移動と共にどのような鎖交磁束を引き起こすのかを有限要素法(COMSOL)によって計算した。異物は直径 $50\ \mu\text{m}$ の球でその磁化は $\mu_0 M = 1\ \text{mT}$ とし、センサコアは直径 $120\ \mu\text{m}$ 、長さ $30\ \text{mm}$ 、比透磁率 $10,000$ 、センサヘッド間の離隔距離(B.L.)を $16\ \text{mm}$ 、その $2\ \text{mm}$ 下をコアの先端から $x$ 軸方向 $-5\ \text{mm}$ の所を異物球が図示のように通過する。結果をFig. 2に示す。検出コイルがNターンであれば、鎖交磁束はN倍にする。勾配磁界センサは励磁による変調を用いた磁束応答型であるので出力波形もFig. 2に相似になる。

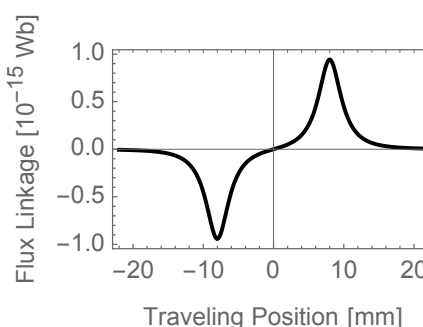


Fig. 2 Magnetic flux linkage to the sensor head cores when magnetic particle travels beneath cores.

## 検討および結果

Fig. 2の波形に相似な出力電圧波形を仮定する。波形の時間軸は異物の移動速度を与えると決定する。 $v=1\ \text{m/s}$ として解析した。球がB.L.距離を通過する時間 $\Delta t$ の2倍を周期とする周波数を特性周波数とする。まず特性周波数の1/5でハイパスフィルタし、ローパスフィルタのカットオフを特性周波数の2~7倍の間で変化させ、波形のpeak-peak値を通過帯域幅 $\Delta f$ の平方根で除して(雑音として白色雑音を仮定)SN比の指標とする。結果をFig. 3に示す。これからカットオフ周波数の最適値は特性周波数の3~4倍、好ましくは3.5倍である。

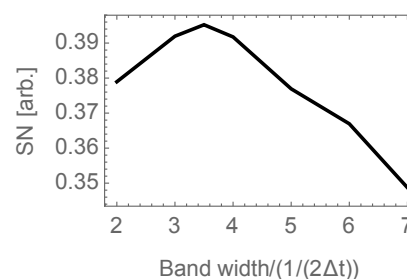


Fig. 3 SN ratio (arbitrary scale) vs. band width determined by the low-pass filter.

## 参考文献

1. Ahmed L. Elrefai, Ichiro Sasada, J. Appl. Phys. 117, 17C114 (2015); DOI: 10.1063/1.4913720

# USBパワーで動作する可搬型FM-OFGマグネトメータ

笹田一郎

(笹田磁気計測研究所)

USB power operated portable FM-OFG magnetometer

Ichiro Sasada

(Sasada Magnetics and Sensors Laboratory)

## はじめに

著者が2001年に本学会で発表した「基本波型直交フラックスゲート(Fundamental-mode orthogonal fluxgate=FM-OFG)」は、これまで多くの協力者に恵まれその低雑音化と応用展開が進められてきた。今回取り扱いが容易になるよう、6~7.5VのacアダプターやUSBパワーで動作するコンパクトなプロトタイプを開発した。本稿ではこのプロトタイプの概要と分解能および安定性について簡単に述べる。

## 1chFM-OFGシステム

Fig. 1にプロトタイプシステムの構成を示す。回路は入力磁界をキャンセルするフィードバック方式で動作する。単一の電源入力から回路内で $\pm 5V$ を生成する。基本波モードでセンサヘッドを駆動するための交流励磁電流と直流バイアス電流はArduino<sup>2)</sup>で生成した32kHz矩形波でトランジスタをドライブして生成する。同期整流には低電圧から動作するスイッチトキャパシタ回路を用いている。出力は増幅率1の直流結合、100倍および1000倍の交流結合出力を備えている。前者は地磁気などの環境磁界計測に、後者は生体磁気や異物の検出のために、変動磁界成分のみを高感度に計測するためである。消費電力は約0.5Wである。簡易的な波形の観測にはArduinoに実装されている10ビット~12ビットのAD変換結果をリアル送信してPC上で見ることができる。

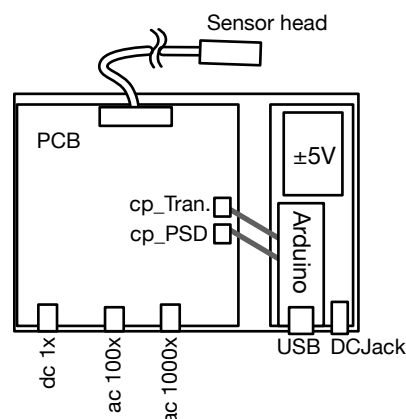


Fig. 1 Functional blocks in the portable FM-OFG magnetometer system.

## 基本性能

センサヘッドには長さ30mm、幅0.5mmのアモルファスリボンコアを用いている。ダイナミックレンジと感度は帰還抵抗 $R_f$ とフィードバック巻線の巻線密度で決まるが、本システムでは $R_f=2\text{ k}\Omega$ とすることで、 $\pm 1\text{ mT}$ が計測でき、1000倍したときの感度は $55\text{ V}/\mu\text{T}$ である。センサヘッドを磁気シールド内に設置し、0.16Hz以上の変動分のみを取り出し1000倍したときの雑音スペクトル密度をFig. 2に示す。A)は6Vacアダプターで、B)はUSBで電力供給しているが、A)の方が雑音は少ない。ただ、B)の方でも大きな雑音増加は見られない。センサヘッドを磁気シールドに入れて、室温状態で4,000秒連続動作させたときのオフセットのドリフトは $1\text{ nT}$ 程度であった。

## 参考文献

- 1) 笹田一郎, 電気学会論文誌 A(基礎・材料・共通部門誌) IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials Vol.137 No.8 pp.448-453 (2017) DOI: 10.1541/ieejfms.137.448
- 2) <https://www.arduino.cc>

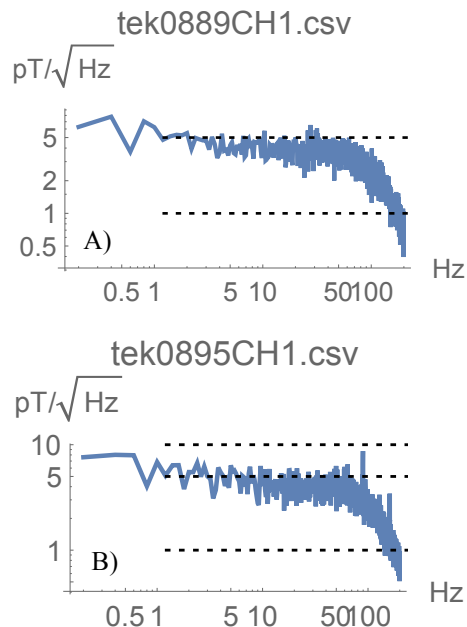


Fig. 2 Noise spectrum density: A) powered by ac adaptor, B) powered by USB from MacBookPro.