

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¹、Suko Bagus Trisnanto¹、笠島多聞²、澁谷朝彦²、竹村泰司¹
(¹横浜国立大学、²TDK 株式会社)

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

Ayana Tanaka¹, Suko Bagus Trisnanto¹, Tamon Kasajima², Tomohiko Shibuya²,
Yasushi Takemura¹
(¹Yokohama National University, ²TDK 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¹⁾や磁気粒子イメージング (magnetic particle imaging, MPI)^{2,3)}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⁴⁾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⁵⁾。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⁴⁾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。

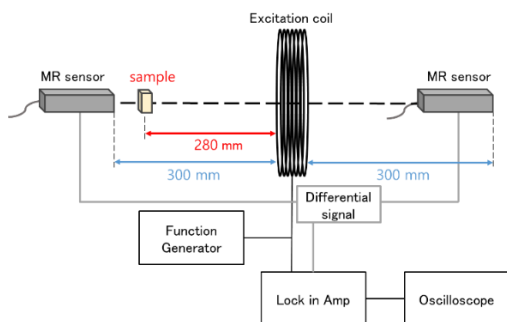


Fig. 1. Detection system using AC field excitation coil and magnetoresistive sensor

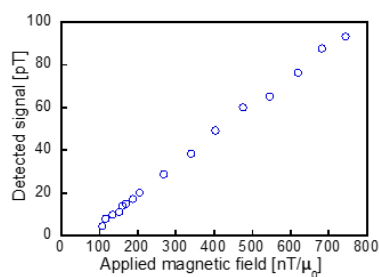


Fig. 2. Detected magnetic field depending on the magnetic field intensity applied to the samples

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¹、Suko Bagus Trisnanto¹、笠島多聞²、澁谷朝彦²、竹村泰司¹
(¹横浜国立大学、²TDK 株式会社)

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

Yuta Kono¹, Suko Bagus Trisnanto¹, Tamon Kasajima², Tomohiko Shibuya²,
Yasushi Takemura¹
(¹Yokohama National University, ²TDK 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^{1,2)}。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³⁾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⁴⁻⁷⁾。

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⁸⁾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。

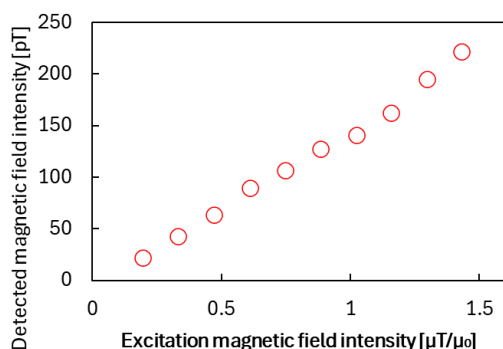


Fig. 1 Dependence of detected magnetic field intensity on excitation magnetic field intensity (Aluminum)

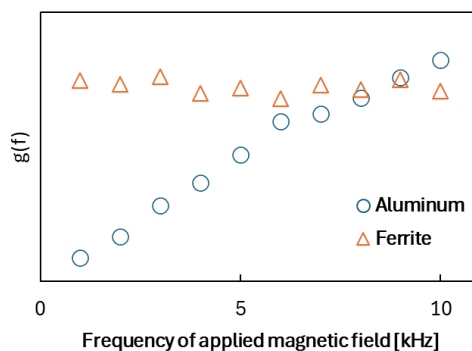


Fig. 2 Frequency dependence of detected magnetic field intensity

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¹, 直江正幸², 竹村泰司¹ (横浜国立大学¹, 電磁材料研究所²)

Pulse voltage of Wiegand wire detected by seven series detection coils

Hiroto Suzuki¹, Masayuki Naoe², Yasushi Takemura¹

(Yokohama National University¹, Research Institute for Electromagnetic Materials²)

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¹⁾。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²⁻⁵⁾。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 Fe₄₁Co₅₀V₉ (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_0 、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 μ s 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。

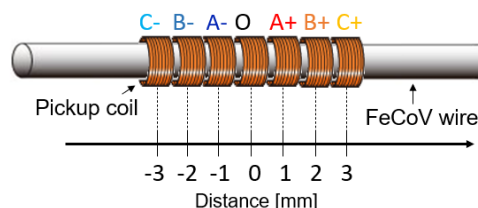


Fig. 1 FeCoV wire and pickup coils.

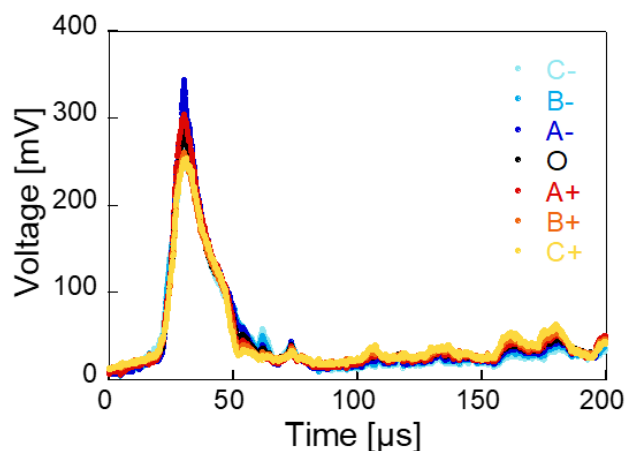


Fig. 2 Waveform of pulse voltage induce in each coil.

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
- 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.

小型高感度磁気センサ nT メータの開発

都筑 裕汰郎¹⁾、疋島 充²⁾、本蔵 晋平²⁾、本蔵 義信²⁾

(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.Tsuzuki¹⁾, M.Hikishima²⁾, S.Honkura²⁾, Y. Honkura²⁾

(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^{1,2)}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 μ 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的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³⁾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 μ 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 μ m、ワイヤ長 2mm)と回路を最適化することで、 σ ノイズ 0.3nT の実現に成功した。また、20 μ 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

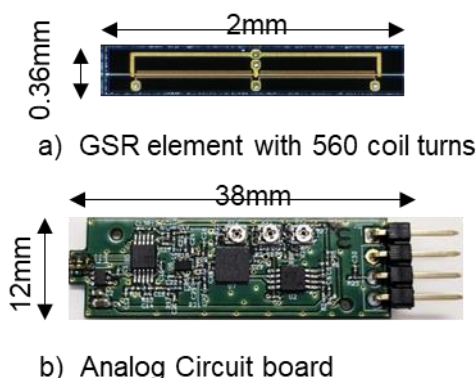


Fig.1 GSR element and Circuit board

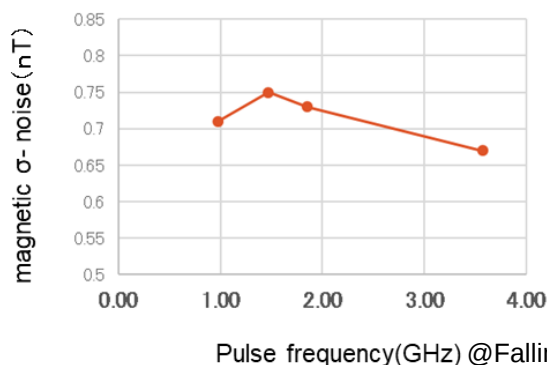


Fig.2 Pulse frequency vs magnetic σ -noise

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
(Magnetdesign 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。

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。

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

Table 1 Comparison of nT meter and fluxgate sensor

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。

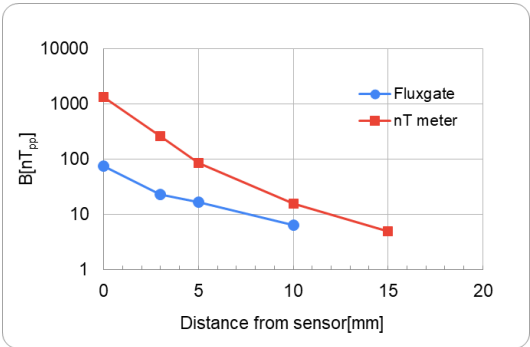


Fig. 1 Detected magnetic field at the distance between magnetic field source and sensor

参考文献

- 1) 2024 年版マグネデザイン会社概要 p5
- 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) 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ことが最も重要で、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動で時計回り、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、 ± 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 μ 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。

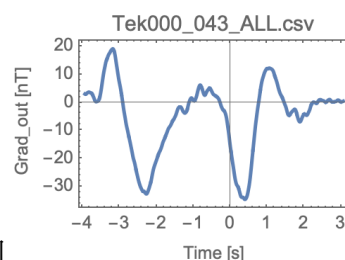


Fig. 1 Output due to CW and CCW one-turn rotation.

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 μ 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。

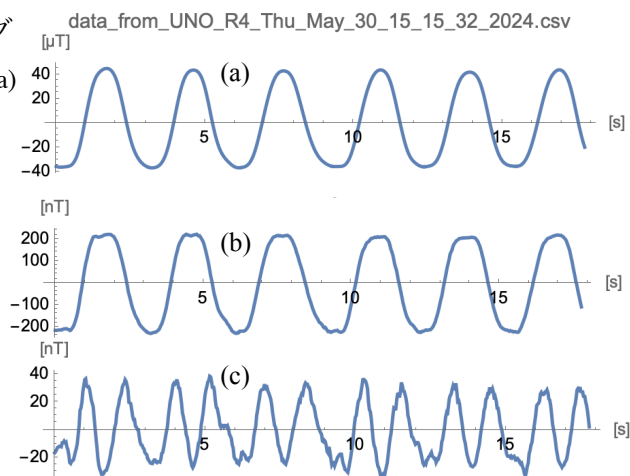


Fig. 2 Compensation result: (a) output of the magnetometer part (b) that of the gradiometer part and (c) compensation applied to (b).

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)

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 Mikihiro 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^{1,2)}。本研究では、MEMS ジャイロ스코プの振動子(ブルーフマス)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²⁾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 nT_{pp} 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 Magnetoresistance 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.

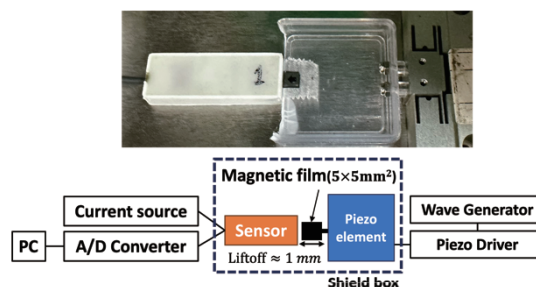


図 1 実験装置の構成

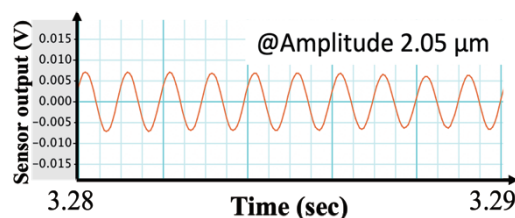


図 2 TMR センサ出力の時間波形

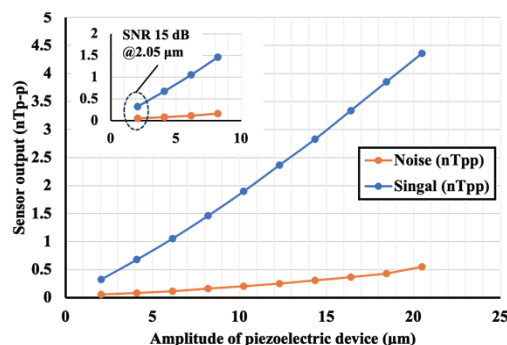


図 3 圧電素子振幅とセンサ出力の関係

GdFeCo フェリ磁性合金薄膜における 異常ホール電圧の機械的変形による可逆応答

藤井優樹¹, 小林祐希¹, 吉川大貴², 笠谷雄一², 塚本新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

Reversible response of anomalous Hall voltage in mechanical
deformed GdFeCo ferrimagnetic alloy thin film

Yuki Fujii¹, Yuki Kobayashi¹, Hiroki Yoshikawa², Yuichi Kasatani², Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.,

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに フレキシブルエレクトロニクスでは、薄膜素子の形状変化に伴う電気伝導特性が重要とされる。一方、材料に磁性体を用いることで磁化状態と結びついた電気応答特性である異常ホール効果により高機能化や新機能の発現が期待される。そこで単結晶の半導体材料に比べ靱性に富む金属材料かつ、磁気特性を制御可能^[1]な希土類遷移金属合金薄膜である GdFe 系合金薄膜を用いることで、薄膜に加えられた機械的変形を異常ホール効果により電気的に検出することが可能になると考えられる。本報告では、フレキシブル基板上 GdFeCo フェリ磁性合金薄膜における異常ホール電圧の機械的変形に対する応答特性につき検討した。

実験方法 マグネトロンスパッタリング法により SiN (5 nm) / Gd_{28.0}Fe_{63.0}Co_{9.0} (20 nm) / SiN (5 nm) / A:Kapton or B:Si sub. を作製した。これら試料に対して膜面垂直方向 (z) に ± 5 kOe の外部磁場を掃引し、膜面内方向 (x) に印加した直流電流 0.1 mA に対して膜面内で直交する方向 (y) の電圧 (V_y) を四端子計測により異常ホール電圧を測定した。また、カプトン基板上的試料 A を高さ 1.5 mm の樹脂製半楕円柱土台を用いた湾曲保持形状 (Bend), 土台を用いない扁平保持形状 (Flat) の 2 形状を Flat 0 $\rightarrow$ Bend 1st $\rightarrow$ Flat 1st $\rightarrow$ Bend 2nd $\rightarrow$ Flat 2nd の順に機械的変形を行い、各保持形状における異常ホール電圧の外部磁場応答の遷移を計測・評価した。

実験結果 Fig. 1 に両基板における異常ホール電圧の外部磁場依存性を示す。Flat 0 にて Si 基板上試料 B と同様の膜面垂直磁化膜が示す異常ホール電圧の外部磁場依存性が得られ、Kapton 基板上に良好な膜面垂直磁化膜が製膜されたことを確認した。次に Fig. 2 に機械的変形に対する異常ホール電圧の外部磁場依存性の推移を示す。まず Bend (1st, 2nd) 形状において Flat 形状とは異なる異常ホール電圧の外部磁場応答が得られ、Flat 形状に比べ符号反転は緩やかになり、零磁場における V_y は約 70 % 減少した。一方、変形を経験した Flat (1st, 2nd) 形状において飽和領域の V_y は 0.7 mV を示し、Flat 0 形状と同等のホール電圧特性に回復し、よって機械的変形を加えても異常ホール電圧の外部磁場依存性は可逆的に応答しうることが確かめられた。本外部磁場依存性から、機械的変形により垂直磁気異方性が変化したためであると考えられる。以上より、機械的変形を異常ホール効果により可逆的に大きな電圧変化を伴う検出が可能であることを示した。

参考文献

- [1] H. Hachisuka *et al.*, 第 42 回日本磁気学会学術講演会, 14aC-1 (2018)

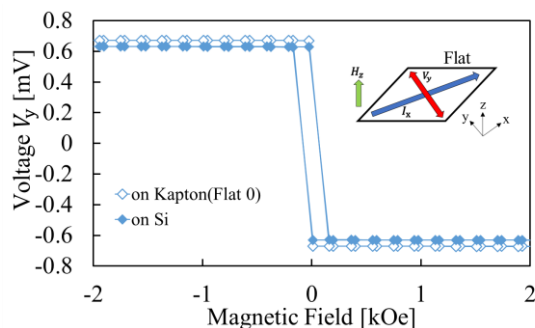


Fig. 1 Magnetic field dependence of voltage V_y with different substrate

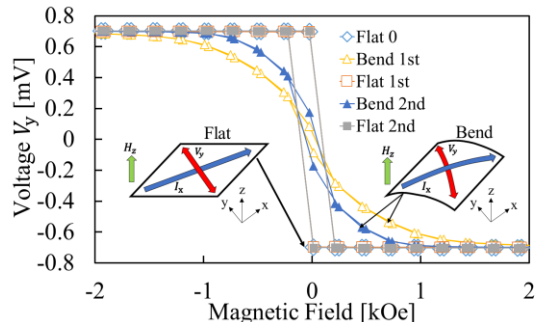


Fig. 2 V-H curve change depending on deformation

Noise Characterization of STT-based Magnetic Tunnel Junction Sensor

K. Komuro¹, H. Nicolas², B. Dieny³, D. Oshima¹, T. Kato¹, R. C. Sousa³

¹ Nagoya University, Japan

² Université de Strasbourg, France

³ SPINTEC, Grenoble Alpes Univ., CEA, CNRS Grenoble, France

In this study, we examined the signal-to-noise ratio (SNR) of magnetic field sensors based on spin transfer torque (STT) tunnel junctions (MTJs), commonly used as random-access memories (MRAMs). In MRAM technology, STT is used to set magnetization direction of the memory layer. By applying a bias voltage to the MTJ, the magnetization of the memory layer can be switched through the spin torque of spin-polarized electrons tunneling from the reference layer. The switching voltage is dependent on the applied field perpendicular to the surface of the MTJ. The STT-based MTJ sensor detects the applied field by measuring the switching voltage. The basic properties of the STT-based MTJ sensor have been demonstrated in Ref. [1], and reported a noise level of $21.8 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$. To understand the origin of noise in the STT-based MTJ sensor, we have analyzed the STT switching behavior of the thermally activated memory layer under applied pulse or continuous bias voltage and an external field. We investigated certain MTJ characteristics that affect the sensor's SNR by examining the bias voltage dependence of the STT switching probability and evaluated the findings using the following methods. First, MTJ samples were fabricated with the perpendicular anisotropy stack, having a SAF reference layer and a FeCoB 1/W 0.2/FeCoB 0.75nm free layer, structured to pillar diameters of 50-100 nm with lithography techniques. The voltage dependence of the switching probability of MTJs with different pillar diameters was determined from at least 1000 pulse switching trials under varying external fields. The duration of the applied voltage pulses was 1 μs . The observed switching probabilities were modeled using the following equation:

$$\epsilon_r = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0} \exp\left(-\Delta\left(1 - \frac{V}{V_c(H)}\right)\right)\right)$$

which represents the switching probability at room temperature, with each parameter in the equation obtained by fitting the experimental data. V_c and Δ stand for the critical voltage at 0 K and the energy barrier of the switching, respectively. The SNR of the STT-based MTJ sensors was defined as the square of the voltage-signal at a 50% switching probability, normalized by its variance. Solid circles in Fig. 1 show the experimental SNR obtained from different samples as a function of Δ where no external field was applied. It is important to note that MTJs have a finite switching voltage even in the absence of an external field, resulting in a finite SNR at zero external field. According to the data, the SNR increases monotonously for higher Δ increases, which can be qualitatively described as follows. As Δ increases, a higher switching voltage is needed, and the stochastic magnetization reversal is reduced because the thermal activation energy becomes relatively insignificant compared to Δ . Thus, by adjusting Δ of the STT-MTJ sensor, it is possible to simultaneously achieve signal enhancement and reduction of stochastic noise. The dashed line in Fig. 1 shows the theoretical SNR for arbitrary values of Δ , defining the noise as $d\epsilon_r/dV$. The theoretical results agree well with the experimental data and the SNR is confirmed to be proportional to Δ^2 .

Reference

- 1) H. Nicolas *et al.*, IEEE Sensors Journal, **23**, pp. 5670-5680 (2023).

This work was partially supported by the European Research Council via grant reference ERC-2022-PoC2 (NANONSENSE No. 101100599).

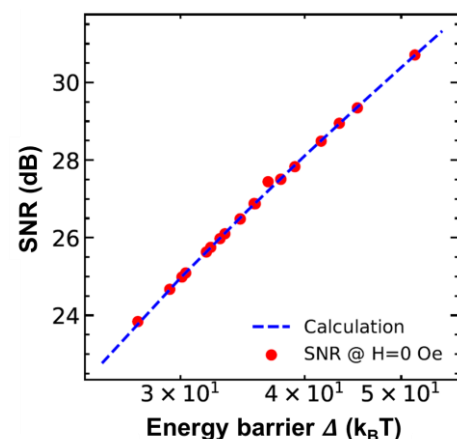


Fig. 1. SNR of STT-based MTJ sensors under zero applied field. The dashed line illustrates the theoretical dependence proportional to Δ^2 .

ノンコリニア層間交換結合を利用したトンネル磁気抵抗センサ

Prabhanjan D. Kulkarni, 中谷 友也

(物質・材料研究機構)

Tunnel magnetoresistive sensors using noncollinear interlayer exchange coupling

Prabhanjan D. Kulkarni, and Tomoya Nakatani

(National Institute for Materials Science)

背景

トンネル磁気抵抗 (TMR) センサは、自由層に磁気異方性を与え、その困難軸方向に測定対象磁場が印加されるように設計される。これを実現するために、磁場中熱処理による一軸磁気異方性や、IrMn 等反強磁性体の交換バイアス (一方向磁気異方性) を用いる方法が知られている。これらの方法には以下の課題がある。一軸磁気異方性のみをもつ自由層は、無磁場下では多磁区状態となり、磁壁の移動による磁化挙動を示す。そのため、抵抗-磁界 (R - H) 曲線はヒステリシスを示し、磁気センサの誤差やノイズとなる[1]。また、一方向磁気異方性をもつ自由層は単磁区となるため、ヒステリシスを低減できるものの、ブロッキング温度の異なる反強磁性体層が2層必要であり、2度の磁場中熱処理が必要となることが実用上の課題である。

2020年に報告された RuFe スペーサーによるノンコリニア (非共線的) 層間交換結合 (IEC) [2]は、磁気センサ・メモリの設計の自由度を拡張する。本研究では、交換バイアス、ノンコリニア IEC、および強磁性 orange-peel 結合を利用し、比較的単純な構造・プロセスで磁気ヒステリシスの小さい磁気センサ素子を開発した。

実験

図 1(a)の積層構造の TMR 素子を作製した。各強磁性体の磁化 ($\mathbf{m}_{\text{○○}}$ と表す) の配列を膜面上から見た図を (b)に示す。2枚の固定層 (PL) の磁化 $\mathbf{m}_{\text{PL1}}$ および $\mathbf{m}_{\text{PL3}}$ は、IrMn の交換バイアスにより、 $+x$ 方向にピンされる。また、RuFe スペーサーを介したノンコリニア IEC により、 $\mathbf{m}_{\text{PL2}}$ は $\mathbf{m}_{\text{PL1}}$ と角度 θ_{ud} の方向にピンされる。 θ_{ud} の値は RuFe の組成によって調整できる[2]。 $\mathbf{m}_{\text{PL2}}$ と自由層磁化 $\mathbf{m}_{\text{FL}}$ の間には AgSn スペーサーを介した弱い orange-peel 強磁性結合がはたらき、 $\mathbf{m}_{\text{FL}}$ は θ_{ud} 方向に一方向磁気異方性を受け、 x 軸方向に印加された外部磁場によって $\mathbf{m}_{\text{FL}}$ が回転することにより、この TMR 素子は磁気センサとして機能する。

図 1(c)に Ru₄₀Fe₆₀ (1 nm)を PL1 と PL2 の間のスペーサーに用いた素子の TMR 曲線と、それを数値微分した感度曲線($dR/dH \cdot 1/R$)を示す。この場合、 $\theta_{\text{ud}} \sim 130^\circ$ であった。メジャーループにおいてもヒステリシスは非常に小さく、ノンコリニア IEC と orange-peel 結合を介した一方向磁気異方性によって、自由層において単磁区状態の磁化回転が実現できていると考えられる。感度はゼロ磁場付近で最大 20 %/mT を示した。

文献 [1] D. Wang, et al., J. Appl. Phys. **99**, 08H703 (2006). [2] Z.R. Nunn et al., Sci. Adv. **6**, eabd8861 (2020).

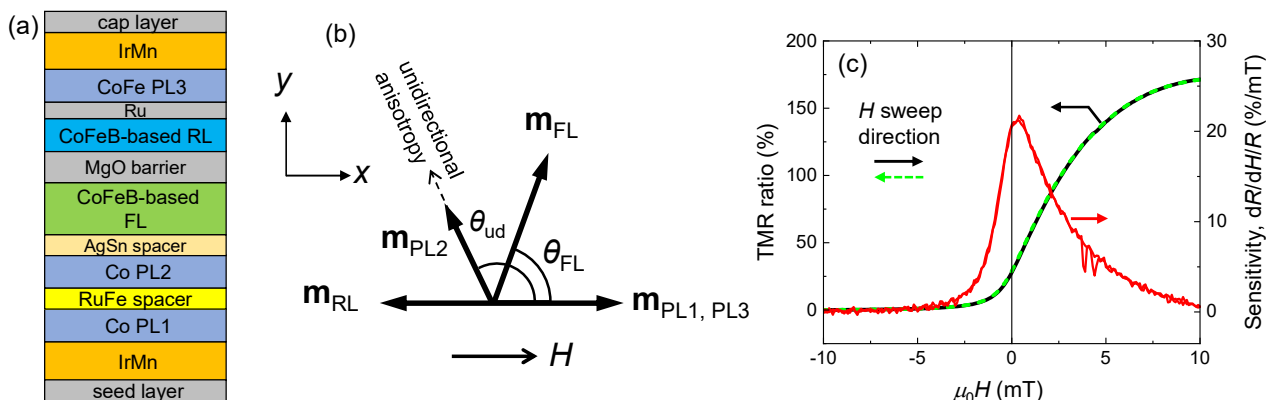


図 1(a) TMR センサ構造, (b) 磁化配列, (c)素子の TMR および感度曲線

磁気抵抗効果を利用した水素検出の検討

大島 大輝, 加藤 剛志, 岩田 聡*

(名古屋大学, 名古屋産業科学研究所*)

Study of hydrogen detection using magnetoresistive effect

Daiki Oshima, Takeshi Kato, Satoshi Iwata*

(Nagoya Univ., NISRI*)

はじめに

クリーンなエネルギー源として水素が注目されているが, 社会実装のためには併せて水素の漏洩検知技術が求められる。種々の水素センサーが研究されているが¹⁾, 一般的にコストは高い。貴金属である Pd は水素を吸蔵しその際に体積が膨張することが知られており, この Pd の膨張を磁気抵抗素子で検出できれば比較的 low コストで水素センサーを提供できると考えられる。本研究では, 逆磁歪効果および巨大磁気抵抗効果 (GMR) を利用することで水素検出が可能か検討を行なった。

実験方法

マグネトロンスパッタ法により sub. / NiFe(5) / MnIr(10) / Co₉₀Fe₁₀(3) / Cu(3) / Co₉₀Fe₁₀(1.5) / FeSiB(20) / Ta(2) / Pd(0 or 20) の膜構成で GMR 膜を作製した。ここで, ()内の数字は膜厚を示し単位は nm である。基板には熱酸化膜付き Si 基板および 0.1 mm 厚のポリエチレンナフタレート (PEN) を使用した。水素吸蔵による Pd の変化を磁歪効果で検出することを想定し, GMR 膜の磁化自由層には大きな磁歪効果を持つ FeSiB 層を用いた。フォトリソグラフィおよび Ar イオンミリングを用いて GMR 膜を長さ 400 μm の細線状に加工した。作製した GMR 素子を 0.1 MPa の水素に曝露し, 磁気抵抗曲線の測定を行なった。

実験結果

PEN 基板上に作製した幅 80 μm の GMR 素子の磁気抵抗曲線を調べた。Fig. 1 に(a)水素曝露前および(b)水素曝露後の困難軸方向の磁気抵抗曲線を示す。水素曝露前は磁気抵抗曲線の極大値が 100 Oe 付近に存在するが, 水素曝露後では極大値が 160 Oe 付近に存在することがわかる。この変化は Pd なしの GMR 素子では見られなかったことから, Pd の水素吸蔵が磁気抵抗効果に影響を与えていることがわかる。また, Pd ありの GMR 素子でも Si 基板上に作製したものでは変化が見られなかったことから, PEN 基板上に作製することが重要であることもわかった。磁気抵抗曲線から異方性磁界を算出するのが困難であったため, 異方性磁界の代わりに磁気抵抗曲線が極大値を示す磁界 H_m を検証した。Fig. 2 に H_m の細線幅依存性を示す。水素曝露前の値に対し, 水素曝露後では必ず H_m が上昇していることがわかる。水素曝露前後において交換バイアス磁界や層間結合磁界には変化がなく, H_m の変化は CoFe/FeSiB 層の異方性磁界によるものであると考えられる。これは磁気抵抗効果で水素検出できる可能性を示す結果と考えられる。

参考文献

- 1) Jia *et.al.*, Appl. Sci. vol. 13, p. 6869 (2023).

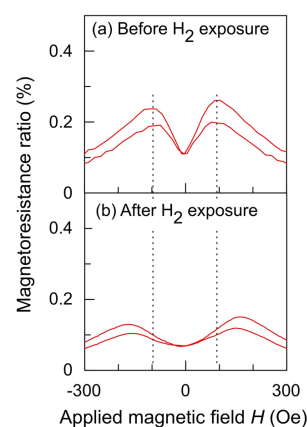


Fig. 1 Magnetoresistance curves of a 80 μm wide GMR element (a) before and (b) after H₂ exposure.

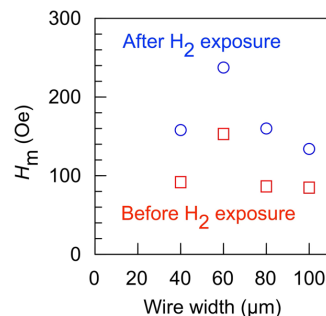


Fig. 2 Wire width dependence of H_m before and after H₂ exposure.

水素脆化したステンレスの磁気特性

今田正啓、佐藤麻基、高瀬つぎ子、山口克彦
(福島大学)

Magnetic Properties of Hydrogen Embrittlement of Stainless Steel

M.Konta,A.sato,T.Takase,K.Yamaguchi
(Fukushima Univ.)

はじめに

水素脆化とは水素が金属中に侵入することで延性や展性が低下してしまう現象で、部材がたわむ前に破断してしまう遅れ破壊を引き起こす原因になっている。近年、水素社会の実現に向けて水素エネルギーの導入が進められている。水素を管理する上で貯蔵するタンクは必須であるが、タンクやそれに連なるバルブは水素脆化による突発的な破壊というリスクを伴う。従来、バルブなどの金属部品の亀裂など非破壊で検査する場合、超音波探傷試験法が用いられてきたが、超音波探傷試験法の分解能は3mm程度であり、水素脆化による初期劣化を検出することは困難であった。これまで、当研究室ではステンレスなどの応力ひずみわれの初期過程にともなう局所的な磁化の変化に注目し、マイクロカー効果顕微鏡などを用いて評価・検討を行ってきた。本研究では、前述の局所的磁化の評価方法を用いて、水素脆化の初期過程をとらえることを試みた。実際には、水素チャージ試料を作成し、バルクの磁気特性からチャージによる磁性の変化を確認後にカー効果顕微鏡による磁区観察と局所的磁気特性の測定を通して水素によって発生する欠陥による磁性の変化を測定することで磁性と水素脆化の関係を検証した。

実験方法・結果

試料は厚さ3mm、長さ85mmのSUS304試験片を用意した。水素チャージは陰極チャージ法を用いる。Fig.1に実験装置の構成を示す。アクリル製の治具に試料を挟んだクリップを固定し、治具の回りにPt線を巻き付けた。NH₄SCN (3g/L)を含む3%のNaCl水溶液中(水温:60℃)でSUS304試料の電気分解(陰極:Pt線, 陰極:試料片、電流:30mA, 72時間)を行い、試料表面に水素を発生させることにより水素チャージを実行した。試料のバルクの磁気特性は振動試料型磁力計(VSM)を用いて測定した。水素チャージ前後のSUS304試料の磁気特性をFig.2に示す(最大印加磁場3000Oe)。水素チャージを行うことにより試料の飽和磁化が増大していることが明らかになった。バルクの磁気特性評価後のSUS304試料の局所的磁気特性の評価を行うことにより、水素脆性の初期過程に関する新たな知見が得られると考えられる。

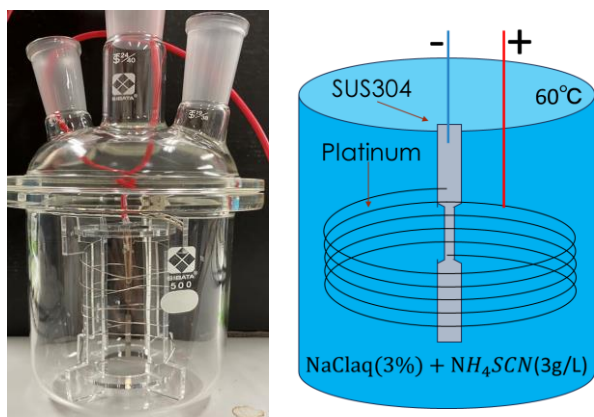


Fig.1 Diagram of hydrogen charging device

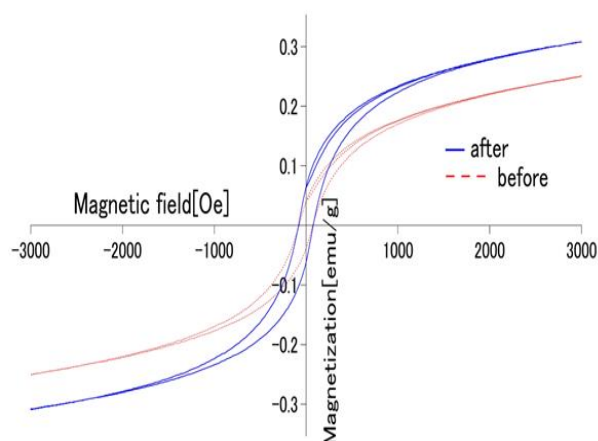


Fig.2 Effect of hydrogen charging on the magnetic properties of SUS304 samples

参考文献 石渡真 鈴木健司 高瀬つぎ子 山口克彦, 第38回日本磁気学会学術講演概要集, 251 (2014)