

磁気フィードバック型超高感度 MI センサ (1DW 型) の開発

Development of Magnetic Feedback Type Ultra High Sensitivity MI Sensor

(Type 1DW)

河野 剛健* 立松 峻一* 下出 晃広*
Takeshi Kawano Syunichi Tatematsu Akihiro Shimode

Abstract

Our company develops and sells MI magnetic sensors, which are magnetic sensors that utilize the magneto-impedance (MI) effect. The magnetic detection range and sensitivity of the currently available MI magnetic sensors are determined by the anisotropic magnetic field H_k of the amorphous magnetic wire, which is the core material of the MI magnetic sensor. The characteristics of the MI magnetic sensor involve a design trade-off due to H_k , which has made it difficult to meet new demands. Therefore, in this development, we have developed the 1DW type MI sensor by applying magnetic feedback technology using existing MI elements. The 1DW type can improve the trade-off without changing the characteristics of the amorphous magnetic wire or the structure of the MI element, based on the MI sensors that have been sold so far, making it possible to respond to the requested areas.

1. はじめに

当社では磁気インピーダンス(MI)効果を応用した磁気センサである、MI センサの開発と販売を行っている。MI センサは 1993 年に毛利らによって発見された MI 効果を用いた磁気センサである¹⁾。MI センサは磁気検出を行うコアとなる材料がアモルファス磁性ワイヤであり、比透磁率が 10000 程度の軟磁性材料である。性能は磁気検出範囲(以下検出範囲)がミリテスラからピコテスラ(以下、pT)である。同程度の磁気検出感度(以下検出感度)を持つ磁気センサにフラックスゲート型センサ(以下 FG センサ)がある。FG センサに比べ MI センサは、小型、低コスト、省電力、高速応答(10kHz)が可能、という特徴がある。今までの応用例として、携帯可能な情報端末向け電子コンパスや、交流磁気を利用した資源探査、電柱などの建築物の鉄筋破断診断、食品や工業製品における磁性異物検出などがある。近年、地球物理学分野(地磁気観測)への応用や、磁気マーカを使用した自動運転システム等の用途で、 $100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz 以下の磁気検出感度(以下、検出感度)を持ち、 $50\mu\text{T}\sim 600\mu\text{T}$ の磁気検出範囲(以下、検出範囲)を持つ応用への対応が求められていた。しかしながら、現在販売中の MI センサ製品²⁾では、アモルファ

ス磁性ワイヤの異方性磁界 H_k が要因となる、設計トレードオフのため、要求されている検出範囲と検出感度を両立する MI センサ製品は存在しなかった(Fig. 1)。本報では、前記検出感度と検出範囲を併せ持つ MI センサ 1DW 型の開発を行った。設計トレードオフを超えた検出感度と検出範囲の両立を可能にする磁気フィードバック技術と、その技術を適用した 1DW 型 MI センサの製品特性を報告する。

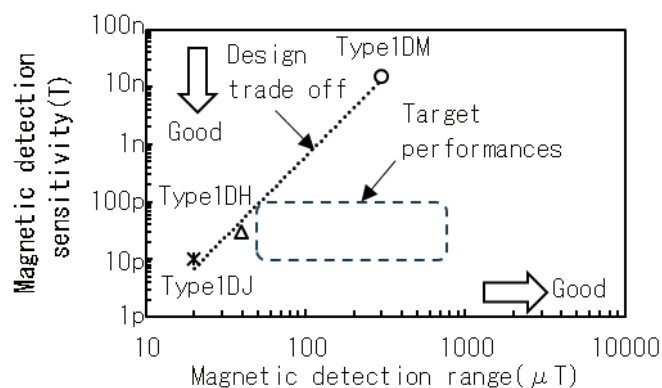


Fig. 1. Target performance and design trade-off of MI sensor products.

*未来創生開発部

2. MI センサの構成

2. 1. MI 素子

MI センサにおける磁気信号の検出は、MI 素子によって行われる。MI 素子は、磁気検出のコアとなるアモルファス磁性ワイヤ(Wire)の外周に、ピックアップコイル(Coil)が巻回された構造となっている。アモルファス磁性ワイヤにパルス発生器(PG)からパルス電流 I_p を入力すると、表皮効果によって外部磁界の大きさに応じてワイヤの透磁率が変化する。透磁率の変化に伴い、ピックアップコイル内の磁束が変化することで、ファラデーの電磁誘導の法則によりピックアップコイル両端に誘導起電力 E が生じる。これを MI 素子からの磁気出力信号として取り扱う (Fig. 2)。

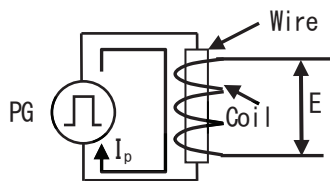


Fig. 2. Structure of MI elements and pulse current.

2. 2. 信号処理回路

MI 素子から発生する誘導起電力 E は、パルス電流周期に応じた振幅変調信号のため、復調と共に信号処理を行う必要がある。復調はサンプルホールド方式で行っており、構成はスイッチ(SW)とキャパシタ(C)である。スイッチのON/OFF制御を、パルス発生器(PG)より発生するワイヤパルス電流と同期させる。信号の振幅が最大となる時間の誘導起電力 E をキャパシタにホールドし、次のパルス発生までその信号 (V_{sh}) を保持(復調)する。復調した信号はオペアンプ(OP)を利用した増幅器にて、任意の信号に調整する (Fig. 3)。このような信号経路により、MI センサ出力である V_{out} が外部磁場入力 B_{in} に応じて出力される (Fig. 4)。

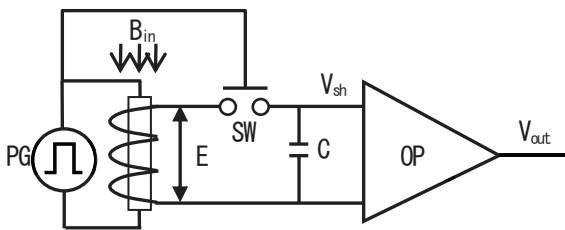


Fig. 3. Sample and hold circuit and operational amplifier.

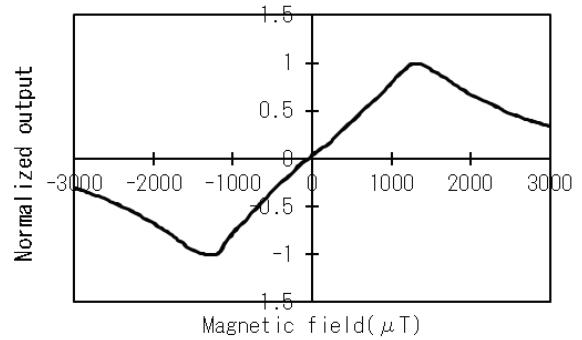


Fig. 4. Example of MI sensor response to magnetic fields.

3. アモルファス磁性ワイヤの異方性磁界 H_k と検出範囲、検出感度の関係

前項の磁気に対する MI センサ出力における検出感度と検出範囲は、アモルファス磁性ワイヤの磁気特性の影響を受ける。アモルファス磁性ワイヤの磁気特性の指標として、異方性磁界 H_k がある。本報における H_k の定義は、アモルファスワイヤの長手方向に磁場を印加した時の磁化曲線において、磁化 M が飽和磁化 M_s の 9 割となる磁場の大きさとしている (Fig. 5)。 H_k による MI センサ性能の傾向は、 H_k が小さくなると検出範囲が狭くなり (Fig. 6)、一方で、検出感度が高くなる (Fig. 7)。

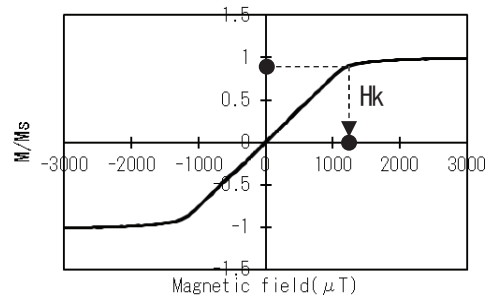


Fig. 5. Magnetization curve of wire with $H_k 1200 \mu T$ characteristic and definition of H_k .

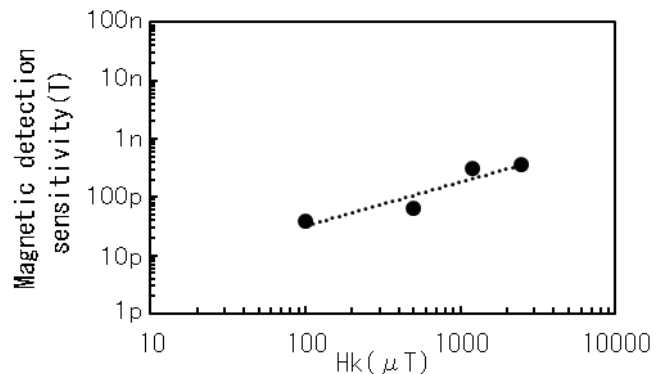


Fig. 6. H_k vs. magnetic detection range.

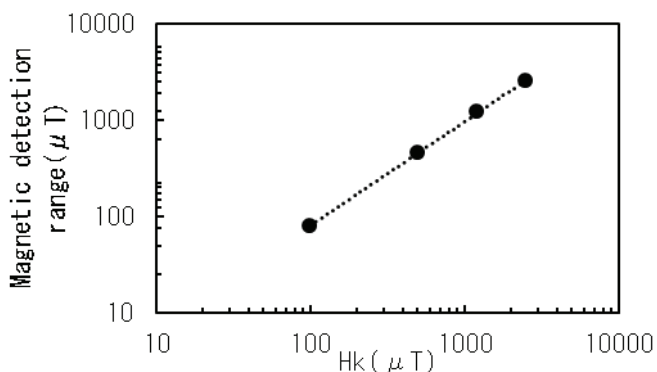


Fig. 7. Hk vs. magnetic detection sensitivity.

4. 磁気フィードバック

4. 1. 磁気フィードバック

MI センサの性能をアモルファス磁性ワイヤの Hk に依存させない方法が、磁気フィードバックである。検出した MI センサ出力 V_{out_op} を、入力磁場とは逆極性磁場に変換しアモルファス磁性ワイヤに印加する。その構成について、2.2. 項にて使用している、オペアンプ(OP)の負帰還(フィードバック)³⁾回路を応用した。フィードバックの成立条件に、バーチャルショート⁴⁾がある。一般的なオペアンプ増幅器の負帰還における出力 V_{out_op} は、バーチャルショートを成立させるための電圧(電流)制御量となる。バーチャルショートは入力電圧 V_{in} に基づく入力電流 I_{b_op} とフィードバック電流 I_{fb_op} の差がゼロになり、同時に入力端子間電圧 V_{in_op} と V_{grnd_op} が同値となる状態である。この制御をオペアンプ出力 V_{out_op} が電気抵抗 R_{fb_op} を介し、入力電流 I_{b_op} に対するフィードバック電流 I_{fb_op} を発生させている。一方、磁気フィードバックでは、アモルファス磁性ワイヤに入力される磁場と、フィードバック磁場の差がゼロになるように V_{out} が制御され、オペアンプの入力電圧と磁場のバーチャルショートと同時に成立させる。磁気フィードバックにおける V_{out} は磁場に対する出力であるが、Fig. 4. のように MI 素子が出力する信号ではなく、フィードバック磁場の電圧制御量となる。フィードバック磁場は、 V_{out} にコイルを接続することによって発生させる。Fig. 3 のように MI 素子にはコイルがあり、銅を主成分とした組成である。コイルには一定の電気抵抗 R_{coil} があり、コイルに印加することで電流 I_{fb} を発生させ、同時にフィードバック磁場 B_{fb} を発生させる。このとき、入力磁場 B_{in} に対して、逆極性磁場になるように前述の接続をすることが必須である。このようにすることで、オペアンプの入力端子が $V_{in}=V_{grnd}$ となり、一般的なオペアンプ増幅器と同様な負帰還回路を構成することができる(Fig. 8)。 V_{in} の変動が少ないと

いうことは、今まで製品において V_{out} 信号の主要因であった Hk の影響を受けにくくなることを意味する。代わりに制御を行っているオペアンプのノイズ、歪み、出力の飽和電圧など出力特性が磁場に対する応答の主要因となる。また、本報における磁気フィードバックでは、MI 素子構造の変更が不要である。MI 素子のコイルは1つとなっており、磁気検出信号とフィードバック磁場信号の発生を兼ねる。そのため、各信号において干渉が発生する恐れがあるが、入力磁場信号周波数と、MI 素子が出力する信号周波数には 1000 倍程度の差があり、各信号周波数のフィルタ機構を設けることによって、信号検出とフィードバック磁場の干渉を防ぐことができる。また、新たに磁気フィードバック用のコイルを備える必要が無いため、Fig. 2. に示す構造の素子そのまま適用でき、素子構造の変更に伴うコストを抑制することができる。

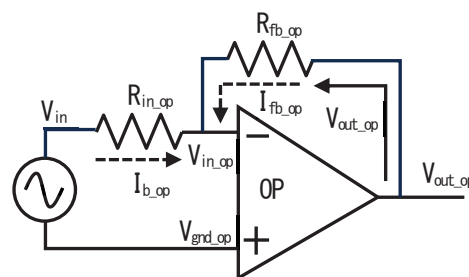


Fig. 8. Connection diagram and signal path of an amplifier using an operational amplifier (inverting amplifier).

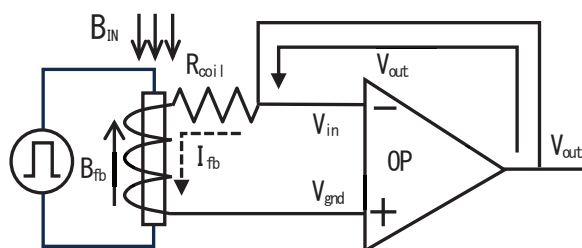


Fig. 9. Magnetic feedback configuration diagram and signal path.

4. 2. 磁気フィードバックによる出力電圧

一般的にオペアンプを用いた負帰還を行った場合の入力と出力の関係は(1)式となり、磁気フィードバックでも、(1)式による入力と出力の関係となる。

$$V_o = \frac{V_i}{1 + A\beta} \quad (1)$$

V_o : 出力電圧 [V]

V_i : 入力電圧 [V]

A : オペアンプのオープンループゲイン [dB]

β : 帰還率

(1) 式のように入力 V_i に対して出力 V_o は帰還量 $(1+A\beta)$ 分の 1 となる。オープンループゲイン A は一般的なオペアンプであれば、100dB (10^5 倍) 程度であり、磁気フィードバックでも同様の値である。帰還率 β は一般的なオペアンプの負帰還回路であれば、

$$\beta = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{fb}} \quad (2)$$

β : 帰還率

R_{in} : 入力抵抗 [Ω]

R_{fb} : フィードバック抵抗 [Ω]

となり、入力抵抗とフィードバック抵抗の比となる。磁気フィードバックでは帰還率は磁気に置き換わり、

$$\beta_{mag} = \frac{B_{in}}{B_{in} + B_{fb}} \quad (3)$$

β_{mag} : 帰還率 (磁気フィードバック)

B_{in} : 入力磁場 [T]

B_{fb} : フィードバック磁場 [T]

(3) 式のようになる。入力磁場とフィードバック磁場の比となる。入力磁場は MI 素子が検出した磁場である。フィードバック磁場 B_{fb} はオペアンプ V_o が電気抵抗を介することで電流に変換され、その電流がコイルに流れることによって発生する。このとき、 V_i は Fig. 4. のような磁気フィードバック構成ではない状態での電圧信号、さらにフィードバック経路内のすべての電圧信号が含まれる。例えば、信号処理回路で発生する磁場検出に関係のない信号 (ノイズ) も含む。また、信号経路で混入されたノイズや、信号歪みについても、帰還量分の 1 となる。

4. 3. 磁気フィードバックでの検出範囲と検出感度

検出範囲は、フィードバック磁場量の最大値に等しく、その値はアンペールの法則に基づき、以下となる。

$$B_{fb_max} = \mu_0 \frac{n}{L} I_{max} \quad (4)$$

ここで、

B_{fb_max} : 最大フィードバック磁場 [T]

μ_0 : 真空中の透磁率 [H/m]

n : コイルの巻き数 [turn]

L : コイルの長さ [m]

I_{max} : 最大電流 [A]

ここで、最大電流 (I_{max}) はオームの法則により、

$$I_{max} = \frac{V_{out_max}}{R_{coil}} \quad (5)$$

V_{out_max} : 最大オペアンプ電圧 [V]

R_{fb_mag} : 磁気フィードバック抵抗値 [Ω]

R_{coil} : コイルの電気抵抗値 [Ω]

となる。磁気フィードバックでは、アモルファス磁性ワイヤの H_k 以上の磁場を入力しても電気回路の制限 (I_{max}) を超えなければ応答する。 I_{max} の調整において、 R_{coil} はコイルの構造 (銅線長と線径) によって決定される。ここで、 I_{max} を調整する変数が V_{out_max} のみとなる。 V_{out_max} は MI センサの電気回路全体に供給する電源電圧に依存するため、任意の I_{max} を得るために電源電圧を変更する必要がある。電源電圧の変更は MI センサを構成する電気回路全てに影響を及ぼすため、回路設計と運用方法を鑑みると、電源電圧によって検出範囲を変更することは好ましくない。その対応として R_{coil} と V_{out_max} を出力するオペアンプの出力端子間に R_{fb_mag} を直列に挿入した。 R_{fb_mag} で使われる電気抵抗は定数選択幅が広く、検出範囲の任意調整に適している。

また、検出感度は 2 つの電気信号成分の比で構成される。一つが MI 素子から発生する入力磁場に応じた磁気信号成分、もう一つが磁気検出に寄与しないノイズ信号成分である。前記 2 成分は 4. 2. 項のように、どちらも帰還量分の 1 になり、検出範囲に応じて増減する。従って、理論上、検出感度は磁気フィードバック適用前後で同一の値となる。

5. 磁気フィードバック型 MI センサ (1DW 型) の設計評価

5. 1. 構成要素と設計

前記磁気フィードバック技術を用いて設計した MI センサ (製品名 : 1DW 型、以下本開発品) を Fig. 10. に示す。外形は幅 21.5mm、長さ 55mm、高さ 4.8mm である。回路構成を Fig. 11. に示す。MI 素子を構成するアモルファス磁性ワイヤの合金組成は CoFeSiB であり、直径 $25 \mu\text{m}$ 、長さは 10mm の物を用いた。異方性磁界 H_k は $100 \mu\text{T}$ に調整している。ピックアップコイルは巻き数 300 回、コイル長 7mm とした。電気回路は、Fig. 3. で示した回路に磁気フィードバック回路を付加した構成とした。また、検出範囲目標は地磁気の目安である $50 \mu\text{T}$ を超えた $80 \mu\text{T}$ とした。

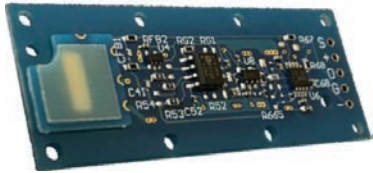


Fig. 10. Appearance of 1DW Type.

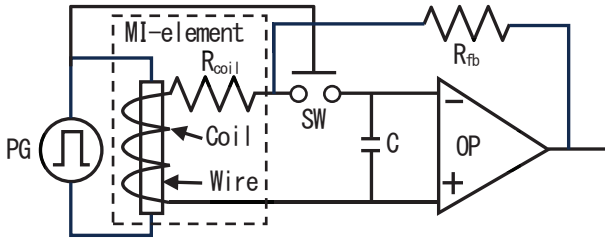


Fig. 11. Structure of 1DW Type.

5. 2. 評価環境

前項のセンサについて、性能評価を実施した。評価環境の模式図を Fig. 12. に示す。地磁気や周辺磁気環境による磁気信号が評価に影響することを防ぐため、磁気シールドボックス(自社製)を使用した。材質 PC パーマロイ、板厚 1mm、1 辺の長さ 300mm、3 重構造である。この磁気シールド内に、磁場を生成可能なヘルムホルツコイル(自社製)を設置した。電流源は直流磁場では 6166(ADCMT 社製)を用い、評価の最大磁場は $\pm 80 \mu\text{T}$ とした。交流磁場では、CF5220(小野測器社製)を用い、内蔵発振器による疑似ランダム波形生成機能を使用し、印加磁場は $\pm 5 \mu\text{T}$ とした。ヘルムホルツコイル中央部にセンサを設置し、LP5394(nF 回路設計ブロック製)にて電源供給($\pm 15\text{V}$)する。出力電圧は 7481(ADCMT 社製)にて取得。ノイズスペクトル取得のため、FFT アナライザ CF9400(小野測器社製)を使用した。

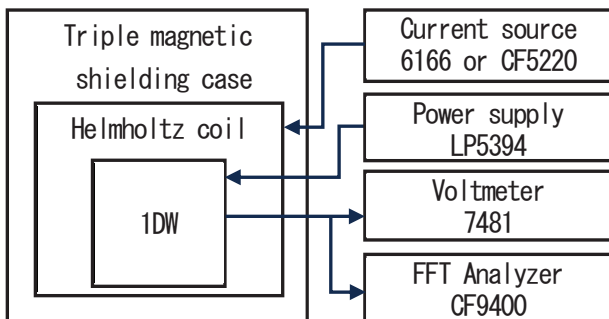


Fig. 12. Evaluation equipment connection diagram.

5. 3. 本開発品の評価結果

5. 2. に示した評価環境にて本開発品の評価を行った結果を、当社既存製品センサとの比較とともに示す(Fig. 13)。本開発品の検出感度は $15\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz、検出範囲は狙い通り、 $80 \mu\text{T}$ となった。結果から、既存製品におけるセンサ特性の設計トレードオフを超えて、特性が改善されていることが分かる。本開発品において、磁場に対する出力を評価するために、磁気フィードバック適用前後の磁場対出力を取得した。磁気フィードバック非適用では H_k の影響を受け、 $40 \mu\text{T}$ 付近で飽和する傾向があるが、磁気フィードバックを適用した本開発品では、 $40 \mu\text{T}$ を超えても直線的な応答を示している。これは磁気フィードバックによりアモルファス磁性ワイヤに印加される磁場がゼロになることによって、出力に対する H_k の影響が充分小さくなったためと思われる(Fig. 14)。加えて、その他の特性について既存製品の 1DJ と比較した結果を表 1 に示す。

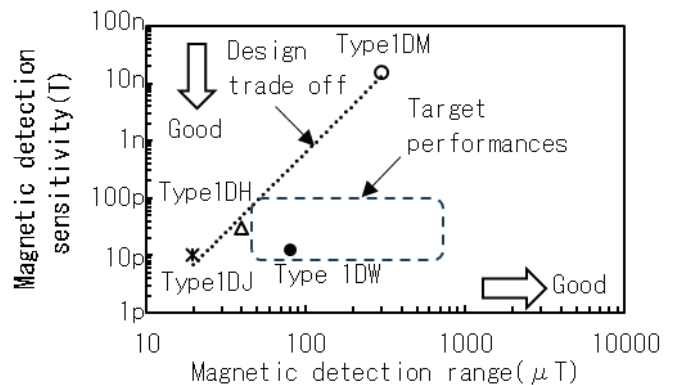


Fig. 13. Sensitivity vs Range Trade-off; Conventional design vs 1DW target and actual performance.

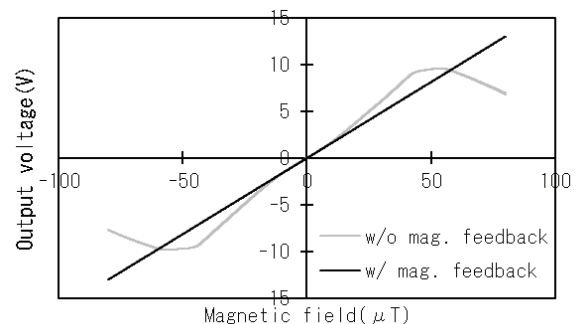


Fig. 14. Comparison of magnetic field vs. output characteristics with and without magnetic feedback.

Table 1. Comparison of type 1DW and type 1DJ.

Item.	1DW	1DJ	Unit
Size	21.5 x 55 x 4.8	13.5 x 55 x 4.8	mm
Frequency response	DC to 10k	0.1 to 10k	Hz
Linearity	0.1	2	%
Measuring range	+/-80	+/-1	μT

5. 4. 80 μT を超える検出範囲調整結果

本開発品では検出範囲を 80 μT に設定したが、要望のあった 600 μT 以上の検出範囲における検出感度の評価も行った (Fig. 15)。本開発品を基本設計とし、フィードバック抵抗にて検出範囲を調整した。いずれの検出範囲でも従来のセンサ製品と比較して、本開発品では検出感度と検出範囲におけるトレードオフ関係の改善が認められる。また、本開発品のアモルファス磁性ワイヤの H_k は 100 μT であるが、100 μT を大きく超えた 1000 μT の磁場に対しても応答することが確認されており、従来の製品設計で行っていた H_k の調整を行うことなく、検出範囲を拡大することができる。一方、4.3. でも述べた通り、磁気フィードバックを用いた回路構成では、理論的には検出範囲に依らず、一定の検出感度となることが予想されたが、Fig. 15. から検出範囲の拡大とともに検出感度が低下していることが分かる。Fig. 16. に、磁気信号とノイズそれぞれに対する検出範囲との相関を示す。検出範囲が拡大していくにつれて、磁気信号がリニアに低下するのに対し、ノイズは 300 μT 付近で一定となり、それ以上減少しなくなる。これは、オペアンプが本質的に有しているノイズが支配的になったことを示唆しており、より広い検出範囲で一定の検出感度を得るためには、オペアンプの性能改善が必要になると考えられる。

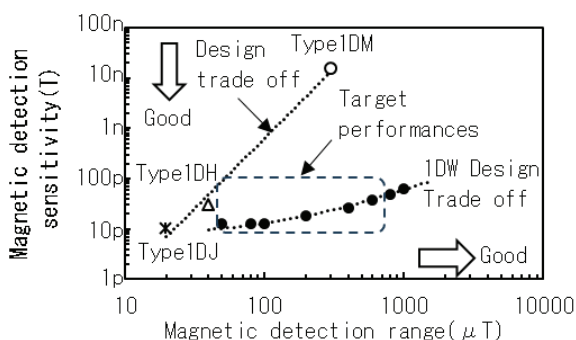


Fig. 15. Sensitivity vs. Range Tradeoff; Conventional Design vs. 1DW.

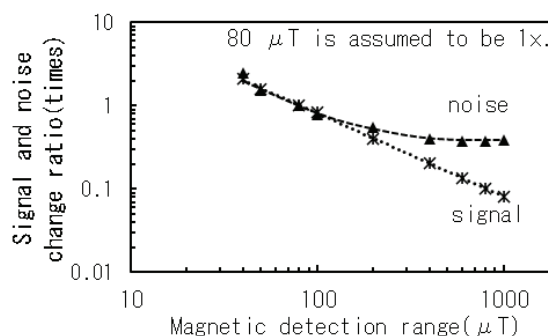


Fig. 16. Changes in magnetic signal and noise.

6. おわりに

磁気フィードバック技術を MI センサの回路構成に適用することにより、アモルファス磁性ワイヤの H_k に依存していた検出範囲を、フィードバック抵抗値で決定することができるようになった。その結果、1000 μT までの検出範囲で 100pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz 以下の検出感度を達成し、100 μT 付近の検出範囲までで約 20pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz の検出感度を実現した。また、MI 素子の設計を変えることなく特性の調整ができることから、低コストかつ短期間で性能変更の要望に応えることのできる技術でもあると言える。この技術を適用した MI センサとして 1DW 型の開発を行い、サンプル販売を開始している。本技術により、地球物理学分野やモビリティシステム等といった新たな応用範囲への適用が期待できる。

7. 謝辞

本報の磁気フィードバック技術および、信号処理回路構成に関して技術指導、助言を頂いた 当社 OB の 故 荒川英男氏、営業統括本部の山本道治氏に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) Panina, L. V., & Mohri, K., Applied Physics Letters, 65(1994), 9, 1189-1191.
- 2) 愛知製鋼株式会社, 製品情報 超高感度磁気センサと応用製品のラインナップ, <https://www.aichi-steel.co.jp/smart/mi/products/>, Jan. 13, 2025
- 3) 馬場清太郎, トランジスタ技術スペシャル OP アンプによる実用回路設計, 2007, 第4版, 51-61
- 4) 馬場清太郎, トランジスタ技術スペシャル OP アンプによる実用回路設計, 2007, 第4版, 37-41