直流バイアス差動方式磁界センサの高分解能化と励振条件

正員 園田 敏勝 (近畿大学九州工学部)
 非会員 東 秀樹 (九州工業大学)
 正員 松尾 壮志 (日立製作所)

Enhanced Resolution and Excitation Parameters for DC Biased-Type Differential Magnetic Field Sensor

Toshikatsu Sonoda, Member (Kinki University in Kyushu), Hideki Azuma, Non-member (Kyushu Institute of Technology), Takeshi Matsuo, Member (Hitachi, Ltd)

The highest detection resolution of a magnetic field sensor using a magnetic core is dependent on the noise of the magnetic core and the electronic circuits. Sensor sensitivity cannot be discussed without attention to these points. This paper describes the optimum excitation parameters for improvement of the dc biased-type differential magnetic field sensor resolution. Investigation of optimum excitation conditions, so that the ratio of magnetic core noise to detection sensitivity is minimum, showed that the resolution can be improved by operating at a deeper bias with a higher excitation frequency. It was possible to reduce the sensor noise level to $1 \times 10^{-13} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$.

キーワード：直流バイアス差動方式磁界センサ，励振条件，分解能，磁心雑音，電子回路雑音

1. まえがき

直流バイアス差動方式磁界センサの最高検出分解能は、センサに用いる磁心の雑音と電子回路雑音とによって規定され、両者の低雑音化が問題になる。筆者らは先に、コバルト基のアモルファスリボンをを用いた場合、磁心雑音の方が電子回路雑音より 10 倍程度大きく、磁心雑音の低減化は、直接高分解能化につながることを示した⁽¹⁾。

このセンサの検出動作に基づく理論的な検出感度は、被検出磁界の変化に対する増分透磁率の変化の割合（磁心感度）で定まる。従って、従来はセンサを高感度化するため、磁心に施した巻線の分布容量と増分透磁率の大きさに依存して定まる巻線のインダクタンスとが共振するバイアス磁界近傍を動作点としてきた⁽¹⁾。一方、磁心雑音は、励振周波数を高くし、バイアス磁界を深くすればする程小さくなる傾向にある⁽²⁻⁴⁾。センサの分解能は、感度と雑音の両者によって定まるため、最高の分解能が得られる励振条件（ここではこれを最適励振条件と呼ぶことにする）を明らかにする必要がある。

本論文では、上記のことを確認するため、100 ~ 250 kHz の励振周波数について、動作磁界レベルに対する磁心雑音と検出感度との関係を調べた。その結果、従来と同様だが、各励振周波数に対して磁心感度が最大となる動作点近傍で最適励振が得られた。これら最適励振条件を比較すると、より深くバイアスし、より高い周波数で励振したときの方が、より高分解能化することが明らかになった。

また、電子回路の低雑音化については、増幅器の並列接続、同調増幅器の適用、同期整流回路の構成法等について検討してきた。その結果、現時におけるセンサの雑音レベルは、 $1 \times 10^{-13} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ になった。

2. センサの検出原理と検出分解能

図 1 は、直流バイアス差動方式磁界センサの基本構成を示し、図 2 はその検出原理を被検出磁界 H_x が零および正の場合について示したものである。同一サイズで同じ磁化特性を有する二個の棒状磁心 Core P と Core N のそれぞれに励磁巻線 N_{1p} と N_{1n} ($N_{1p} = N_{1n} \equiv N_{ex}$) を施し、図 2 に示すように動作磁界レベル $\pm H_{dc}$ を直流励磁電流 I_{dc} で与える。そして、その上に高周波の補助励振磁界 h_{ex} を互いに逆位相で重畳しているが、 h_{ex} を与える励磁電流 i_{ex} は交流電源 e_{ex} (周波数 f_{ex}) を用いて流している。 R_{ex} は、両励磁巻線の直流抵抗とこの回路につないだ外付け抵抗との和である。

いま、 I_{dc} に対して i_{ex} は十分に小さく、 $h_{ex} \propto i_{ex}$ とすると、 $H_x = 0$ の場合には、図 2 (a) に示すように、両磁心の対称性により各磁心に施した探りコイル N_{2p} と N_{2n} ($N_{2p} = N_{2n} \equiv N_{sch}$) に誘起する電圧の和 e_{sch} は互いに相殺して零となる。

$$e_{sch} = 0 \quad (H_x = 0 \text{ のとき}) \quad (1)$$

これに対して、両磁心に正の H_x を印加し、各動作点が ΔH_{dc} だけシフトすると、図 2 (b) に示すように Core P は H_{dc} より更に深くバイアスされ、逆に Core N は浅くなる。各動作点のシフト分に伴う h_{ex} に対する増分透磁率 μ_{Δ} の変化分を $\Delta \mu_{\Delta}$ とすると、Core P と Core N それぞれの磁心

図1 センサの基本構成
Fig. 1. Fundamental configuration.

図2 検出原理
Fig. 2. Detection principle.

感度 K_p , K_n は (2) 式で表される (5)。

$$K_p = \Delta \mu \Delta p / \Delta H_{dc} \quad (2)$$

$$K_n = \Delta \mu \Delta n / \Delta H_{dc}$$

ここで, $\Delta H_{dc} \ll H_{dc}$ とすると, 磁心感度は (3) 式で示すことができ, このとき e_{sch} は (4) 式となる。

$$-K_p = K_n \equiv K \quad (3)$$

$$e_{sch} = e_{2p} + e_{2n} = -2A_s H_x \cos \omega_{ex} t \quad (4)$$

$$A_s = N_{sch} S K \mu_0 \omega_{ex} H_{ex} \quad (5)$$

ここで, N_{sch} : 探りコイルの巻回数, S : 磁心の等価断面積, $\omega_{ex} = 2\pi f_{ex}$, H_{ex} : h_{ex} の最大値

$H_x < 0$ の場合は (4) 式とは逆位相の e_{sch} になることから, これを i_{ex} に関して同期整流すれば H_x の検出が可能となる。

センサを高感度化するには, (5) 式の各項それぞれが大きくなるように励振条件を定めればよい。その最も簡単な方法は, K の大きい, つまり角形特性の優れた磁心を用い, N_{sch} を多くすることであろう。ところが, N_{sch} を単純に多くすると分布容量の増加に伴い, f_{ex} の低いところで共振してしまい, 高い f_{ex} で大きな K が得られなくなる。磁心枚数を複数にして S を大きくすると, 磁心間の極めて僅かな機械的な振動によって磁心全体の増分透磁率が変化し, 探りコイル電圧には揺らぎが生じて分解能を低下させることになる。 H_{ex} を大きくすると, 鉄損つまり, ヒステリシス損と渦電流損とが増加し, 急峻な共振特性が得られず, 大きな K は望めない等の種々の問題が生じて簡単でない。

また, 検出分解能を考えると, 上記磁心感度の他に磁心雑音も考慮しなければならない。

図3は, センサ回路の構成図を示したものである。 H_x の変化によって生じる (4) 式の電圧は微小 ($K = 273$ で 1×10^{-13} T 検出時に 20 nV(rms) 程度) (6) であるため, これを低雑音の増幅器 A_1 を用いて増幅している。 A_1 の出力 $A_1 e_{sch}$ を e_{ex} に関して同期整流した H_{d1} を低域フィルタを通して f_{ex} 成分を除去すると H_x は H_{d2} として検出される。ここで, 60, 180 Hz のフィルタは検出信号に含まれる商用電源成分を除去するために用いる。また, アクティブフィルタは, 任意の周波数の除去あるいは抽出に用いる。なお, A_1 は低雑音化するため, 10 個の演算増幅器を抵抗を介して並列接続した同調増幅器であり, その帯域幅は電子回路雑音を減らすために被検出磁界の周波数帯域を勘案して定めている。実験に用いた増幅器の雑音レベルは $1.5 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ のものである (7)。なお, ここでは示さないが, 実際のセンサ回路は, Core P と Core N に印加される地磁気等の直流成分が常に零になるように両磁心を逆励磁して動作する地磁気フリー形にしている (6)。

ここで, センサの検出分解能を SN 比が 1 となる磁界の大きさで表すものとする, その評価には磁心感度と共に

図3 センサ回路の構成図
Fig. 3. Block diagram of the sensor.

雑音の測定が必要となる。図3の H_{d2} において測定した雑音電圧を E_n [V]、感度を S_B [V/T]とすると、センサの等価入力換算雑音磁束密度 B_n [T]は(6)式で与えられ、この B_n の大きさが分解能を表すことになる。

$$B_n = E_n / S_B \text{ [T]} \quad (6)$$

E_n には磁心雑音と電子回路雑音とが含まれるが、後者は前者の1/10程度であり⁽¹⁾、従って磁心雑音の評価が重要となる。

3. 励振条件と磁心雑音

磁心雑音は、動作磁界レベル、励振周波数、励振振幅等に依存し、その振舞いは簡単でない。さらに、直流バイアス方式磁界センサにおける励振周波数は数百kHzと高く、このように高い周波数領域で、かつバイアス磁界を与えた状態での磁心雑音測定は非常に困難である。以下に示す測定結果は低周波における磁心雑音であるが、磁心雑音の励振周波数あるいはバイアス磁界に対する依存性を知る上での参考データとなる。

図4は、アライド社製の2種のアモルファスリボン(2826MB, 2705M)をトロイダル状にし、励振振幅を一定とした上で、励振周波数を変化した場合の磁心雑音を調べたものである⁽³⁾。ここでは、保磁力近傍における探りコイル電圧の変動分を励振周波数の100周期分にわたって積分した値を ν とし、これを2826MBを100Hzで励振した場合での値 ν_0 で規格化して示している。つまり、図4は、保磁力近傍における磁心雑音の材質による違いと励振周波数依存性を調べたものである。また、図5は、図4と同じ磁心を三角波の電流源で励磁した場合の各印加磁界レベルに対する雑音を測定したものである⁽⁴⁾。図5に示す μ_{dm} は B - H ループ上で微分透磁率が最大になる印加磁界レベル(保磁力近傍)を示しており、ここで雑音も最大になっている。図4と図5から判断すると、磁心を最適励振するには、励振周波数を高くし、深くバイアスした点が動作磁界となるように励振パラメータを定めるべきであると言える。

センサとして考えた場合の雑音は、センサが2個の磁心

図4 励振周波数に対する磁心雑音

Fig. 4. Magnetic core noise versus excitation frequency.

図5 印加磁界に対する磁心雑音

Fig. 5. Magnetic core noise versus impressed magnetic field.

を差動構成にしたものであるため、それぞれの磁心で生じた雑音が合成された結果として現れる。しかし、2個の磁心が同一の雑音特性を有しているという確証はなく、両磁心の磁化特性も完全に対称とはなっていない。このため、合成された磁心雑音の振舞いは、1個の場合のそれと比べてより複雑なものになっていると推測される。従って、まず1個の磁心の高周波における雑音特性を知ることができれば、センサとしての雑音の特性もより明確にできるものと考えられる。しかし前述のように、現段階では、バイアス磁界を印加し、かつ高周波で励振した場合の磁心雑音測定法が確立されていないので、次章で最適励振条件を検討する場合、 E_n は(電子回路雑音を無視すると)そのまま磁心雑音の特性を表しているものとして取扱う。

4. 最適励振条件に対する実験的検討

磁界センサの入力換算雑音 B_n は、励振周波数やバイアス磁界の大きさによって変化する。ここでは、 B_n が最小となる最適励振条件を実験的に検討する。

まず、磁心雑音に対応する E_n を求めるには、 $H_x = 0$ としなければならない。これに対し、実験室には、 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ T程度の商用電源に基づく雑音磁界が存在している⁽⁶⁾。従って、センサ部を60 Hz、 1.63×10^{-7} Tの雑音磁界に対して、 3.5×10^3 以上の遮蔽度 S_{60} を有する4重のパーマロイパイプで構成した磁気シールド装置内に配置した。しかしながら、シールド装置内には、 10^{-11} T程度かそれ以下の60 Hz雑音が侵入していると思われるので、 E_n の計測に対する侵入雑音の影響は、検出波形から判断することにする。

図6は、実験に用いたセンサ(文献(1)で用いたSensor

図6 実験に用いたセンサ

Fig. 6. Magnetic field sensor under study.

(1)で、コバルト基のアモルファスリボンに $N_{ex}=300$, $N_{sch}=600$ の巻線を施している。 N_{sch} は、分布容量の影響を考慮し、図6の断面図に示すように一層目の巻き終わりを再度巻き始め側に戻して二層目を施している。図に示すE.S.P.は、探りコイルの最外巻線の上に施した静電シールド板である。

図7は、 h_{ex} を与えたときの探りコイル電圧の大きさから求めた等価増分透磁率 μ_{eq} のバイアス磁界依存性を示している。バイアス磁界 H_{dc} に対する μ_{eq} の変化の割合は、磁心感度 K の大きさを表している。なお、ここでは μ_{eq} と μ_{Δ} との等価性を考慮し、 H_{dc} の上に重畳する h_{ex} は H_{dc} に対して十分小さいと考えられる $1/\sqrt{2}$ A/m (rms) としている。同図から、 $f_{ex}=150, 200, 250$ kHz の場合、 μ_{eq} にピークが見られる。これは、磁心に施した巻線の分布容量とバイアス磁界の大きさに依存して定まる巻線のインダクタンスとが共振を起こすためであると考えられる。このような励振周波数においては、 μ_{eq} が非常に大きく変化するバイアス磁界範囲が存在し、動作磁界をそのような範囲に設定すれば磁心感度を高くすることができる。また、センサの検出原理から(5)式を参照)、より高い周波数で鋭い共振特性が

図7 動作磁界レベルに対する等価増分透磁率
Fig. 7. Characteristic of effective permeability versus bias level.

(a) $f_{ex}=150$ kHz, $H_{dc}=33.75$ A/m とした場合 (左: $H_x=2.45 \times 10^{-4}$ A/m, 右: $H_x=0$)

(b) $f_{ex}=200$ kHz, $H_{dc}=37.50$ A/m とした場合 (左: $H_x=2.45 \times 10^{-4}$ A/m, 右: $H_x=0$)

図8 シールド装置内にセンサを配置した場合の検出特性
Fig. 8. Detection characteristics when the sensor is put in the magnetic shield system.

図9 動作磁界レベルに対する等価入力雑音磁束密度
Fig. 9. Input magnetic flux noise versus bias level.

得られれば、さらに高感度化が期待できる。従って、磁心損失と励振条件との関係や最適な巻線回数について今後検討する必要がある。

次に、(6) 式の磁心感度 に相当する S_B は、図 3 のセンサ回路の検出帯域幅を 100 Hz として求めた。

図 8 は、前述の 4 重のパーマロイパイプで構成した磁気シールド装置内に H_x を発生させるソレノイドとセンサ部とを挿入し、10 Hz、 $H_x = 2.45 \times 10^{-4}$ A/m (rms) ($\rightarrow 3.08 \times 10^{-10}$ T (rms)) を検出した場合と $H_x = 0$ とした場合のセンサ出力 H_{d2} の一例を示したものである。 $H_x = 0$ における検出波形（これは E_n に相当する）には、60 Hz 以下の揺らぎが認められることから、磁気シールド装置の効果が認められ、実験室に存在する 60 Hz 雑音の影響は無視できるものとして E_n を求めることにする。

各励振周波数 (100, 150, 200, 250 kHz) に対し、(6) 式の B_n を求めると図 9 が得られる。センサの検出感度は、(5) 式の K つまり、 $\Delta\mu_d / \Delta H_{dc}$ に比例することから、例えば $f_{ex} = 150$ kHz で $H_{dc} = 28$ A/m 近傍では、 K の絶対値が小さ

表 1 最適励振条件
Table 1. Optimum exciting condition.

励振周波数 f_{ex} [kHz]	バイアス磁界 H_{dc} [A/m]	等価入力雑音磁束密度 B_{n0} [T]
100	33.75	1.2×10^{-11}
150	33.75	1.3×10^{-11}
200	37.50	5.7×10^{-12}
250	41.25	5.8×10^{-12}

くなるために、 B_n の値が極端に大きくなっている。なお、250 kHz の場合のみ図 7 の H_{dc} に対する μ_{eq} と図 9 の B_n との関係が 7 ~ 8 A/m 程度ずれているのは、 f_{ex} を高くすることによって生じる Core P と Core N の対称性の問題と考えられる。

図 9 から各励振周波数に対する最適励振条件を求めると表 1 が得られる。ここで、 B_{n0} は B_n の最小値、 H_{dc} はそれに対応するバイアス磁界である。 $f_{ex} = 200$ kHz、 $H_{dc} = 37.5$

A/m では, $B_{n0} = 5.7 \times 10^{-12}$ T(p-p) であり, この雑音が正規分布であると仮定すると, センサの帯域幅が 100 Hz なので雑音レベルは 1×10^{-13} T/ $\sqrt{\text{Hz}}$ になる。

5. むすび

センサの高分解能と励振条件について検討した結果, センサの最小雑音レベルは, 5.7×10^{-12} T(p-p) が得られた。

今後は, センサの更なる低雑音化を目指すと同時に検出下限(磁心雑音)の理論限界についても検討する予定である⁽⁸⁾。用いる磁心としては, 高周波励振時でも角形特性に優れ, 鉄損の少ないものが得られれば, シャープな共振特性が期待できる。従って, アモルファスリボンのように数 10 μm 厚以下で有限長板の磁心損失を計測するための単板磁気試験法の詳細についても検討する必要があると考えている。また, 最適巻線法も大きな問題である。

本研究を進めるにあたり, 本学卒業研究生, 吉原秀政氏にご協力頂いた。ここに謝意を表します。

本研究の一部は, 科学研究費基盤研究 (C)(2) 課題番号 08650500 の援助を受けた。

(平成10年10月02日受付, 平成11年08月20日再受付)

文献

- (1) 園田, 上田: 「直流バイアス形磁界センサの高感度化に関する一検討」, 電気学会マグネティックス研資, MAG-92-179 (1992)
- (2) 白江: 「交流励磁における磁心雑音の測定」, *Trans. IEEJ*, Vol. 92-B, No. 6, pp. 333-341 (1972)
- (3) T. Sonoda, R. Ueda, K. Takayama, "Measurement of Fluctuations Magnetized Loop in Amorphous Cores" *IEEE Trans. on Magnetism*, Vol. MAG-22, No. 5, pp. 547-549, Sept. 1986
- (4) T. Sonoda, R. Ueda, "Behaviors of Magnetic Noise as a Function of Magnetizing Level in Hysteresis Loop of Amorphous Ribbon" *IEEE Trans. on Magnetism*, Vol. MAG-23, No. 5, pp. 3599-3601, Sept. 1987
- (5) 園田, 上田: 「高感度磁界センサ」, 電学論 C, Vol. 110-C, No. 9, pp. 554-559 (平 2-9)
- (6) 園田, 上田, 池本: 「地磁気フリー高感度磁界センサ」, 電学論 C, Vol. 111-C, No. 7, pp. 279-286 (平 3-7)
- (7) 東, 原田, 園田: 「磁気シールドを施した前置増幅器を用いた微小電圧計測」, 電学論 C, Vol. 118-C, No. 11, pp. 1663-1669 (平 10-11)
- (8) 松葉: 「強磁性体センサーの内部雑音と感度限界の考察」, 電気学会マグネティックス研資, MAG-98-105 (1998)

園田 敏勝

(正員) 1944 年 3 月 7 日生。66 年 9 月東海大学短期大学部(二部)電気工学科 2 年中退。66 年 8 月九州大学工学部技官, 71 年 4 月九州工業大学工学部技官, 76 年 5 月同大助手, 99 年 4 月近畿大学九州工学部助教授, 現在に至る。可変速ドライブシステム, 検出器および電子計測に関する研究に従事。90 年 IEEE/IAS 論文賞受賞。日本非破壊検査協会, 日本応用磁気学会, IEEE 会員。工学博士(九州大学), 技術士(電気・電子)。

東 秀樹

(非会員) 1969 年 8 月 28 日生。94 年 3 月九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了, 同年 4 月後期課程入学, 現在に至る。電子計測に関する研究に従事。

松尾 壮志

(正員) 1973 年 8 月 14 日生。96 年 3 月九州工業大学工学部電気工学科卒業。99 年 3 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了, その間 97 年 3 月より 1 年間シドニー工科大学工学部電気工学科に留学。99 年 4 月日立製作所(株)入社, 現在に至る。