高感度磁界センサ

正員 園田 敏 勝 (九州工大)

正員 上田 隆 三 (九州工大)

Magnetic Field Sensor of High Sensitivity

Toshikatsu Sonoda, Member, Ryuzo Ueda, Member (Kyushu Institute of Technology)

This paper presents a new magnetic field sensor of core type. The resolving power arrives at the order of $10^{-13}\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ at the room temperature. The sensor is composed of two bar type cores of which the B - H loop is desirable to have a high rectangularity ratio.

The detection principle is analogous to the operation on a kind of equilibrium condition in ordinary bridge circuit. Each core is previously DC-biased in the opposite direction regarding the unknown magnetic field to be detected. A high frequency excitation field is superimposed onto each of DC field in anti-phase as an auxiliary signal and resultant search coil voltage induced by the auxiliary signal is null when the unknown field is zero. When the field is impressed to each core, the equilibrium condition is broken out and the voltage appears in proportion to it. Thus, we can detect the unknown field. For reduction of the noise in electronic circuit itself, some numbers of high frequency amplifier of the same characteristics are connected in parallel and a tuning amplifier is added to the output side of these amplifiers.

By adopting the above approach, such the maximum possible resolving power can be achieved.

キーワード：直流バイアス差動方式，増分透磁率，動作磁界レベル，補助高周波励磁，最高分解能

1. ま え が き

高感度磁界センサの代表として従来コアを用いたフラックスゲート形(2倍周波方式)とジョセフソン効果を用いた SQUID とがある^{(1)~(3)}。フラックスゲート形では 10^{-12}T 程度の検出は可能とされている。また SQUID では、 $10^{-12}\sim 10^{-13}\text{T}$ での実測例⁽⁴⁾もあり、現在、最高感度をもつが、低温を必要とするなど取扱いに不便さが残る。このような現状を考慮すると、 10^{-13}T 程度の測定可能な汎用性に富んだものが開発されるならば、その応用範囲は一段と拡大するものと考えられる。

本論文はそのようなセンサの開発を目指したものである。それは、検出部に高角形磁化特性を有する棒状コア二個を被検出磁界に対してはそれらが同相に、コアの磁化状態を知るための補助高周波励磁磁界に対しては、差動になるように励磁巻線をそれぞれ施し、更

に両コアに大きさは等しいが極性の異なる直流バイアス磁界を印加した、いわゆる「直流バイアス差動方式」と呼ぶべき構成になっている⁽⁵⁾。直流バイアスを磁化特性の回転磁化範囲部分に設定し、このバイアスレベルが被検出磁界によってシフトすると、各動作点における増分透磁率の変化は互いに逆に動くので、この両者の変化を高周波励磁に対する探りコイルに誘起する電圧の変化として検出する方式である。すなわち、コアで一種のブリッジを構成し、高周波励磁に対する誘起電圧から被検出磁界の大きさと極性を知ることができる。実際、このような方式を採用したところ、 $10^{-13}\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ オーダの検出が可能になったことがわかった。

2. 提案する磁界センサの検出原理

図1は提案する磁界センサの基本構成を示し、図2はその動作原理を被検出磁界 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コア Core_P と Core_N は H_x に対して同相に磁化され、コアの磁化状態を知るための補助励磁電流 i_{ex} (周波数 f_{ex}) に対しては差動になるように励磁巻線 $N_{ex,P}$ と $N_{ex,N}$ をそれぞれ施す。センサコアを B - H ループで見た場合、その回転磁化範囲で増分透磁率 ($\mu_d = \Delta B / \Delta H$) が最も大きく変化する点を動作磁界レベルとするように Core_P には H_{dc} を Core_N には $-H_{dc}$ を直流電流 I_{dc} で与える。まず $H_x = 0$ の場合を考えると、各コアに施した探りコイル $N_{sch,P}$ と $S_{sch,N}$ にそれぞれ誘起する電圧 $e_{sch,P}$ と $e_{sch,N}$ との和 e_{sch} は相殺し合い零となる [図 2 (a), (b)]。

$$e_{sch} = e_{sch,P} + e_{sch,N} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

これに対し、 $H_x > 0$ の場合には、両コアの動作磁界レベルは図 2 (c) に示すようにともに H_x に相当する

図 1 センサ基本構成

Fig. 1. Fundamental configuration.

図 2 検出原理

Fig. 2. Detection principle.

分だけシフトする。その結果、 Core_P はより深くバイアスされ、逆に Core_N は浅くなる。従って、(d)図に示すように i_{ex} より $\pi/2$ 遅れの e_{sch} を生じ、逆に $H_x < 0$ の場合には、 $\pi/2$ 進みの電圧となる。この性質により e_{sch} を i_{ex} に関して同期整流すれば、これから H_x の大きさと極性とが検出可能となる。

以上のことを、図 3 に示す磁化特性を有するコバルト基のアモルファスリボンを用いて、同図のセンサを試作し、実験的に確認した結果を図 4 に示す。(a) ~ (c) 図は増分透磁率の、また (d) ~ (f) 図は e_{sch} の H_x に対する依存性をそれぞれ示している。ここでは、バイアス磁界を $\pm 176.6 \text{ A/m}$ とし、補助励磁電流 i_{ex} によって生じる磁界 h_{ex} の最大値 $H_{ex,m}$ を 5 A/m 、周波数 f_{ex} を 150 kHz とした。これより Core_P の増分透磁率を求めると、おおよそ次のようになる。

$$\begin{aligned} \mu_d &= 650 & \mu_d &= 566 \\ H_x &= -18 \text{ A/m} & H_x &= 0 \\ \mu_d &= 504 & & \\ H_x &= 18 \text{ A/m} & & \end{aligned}$$

ここで、 μ_d と H_x との比例性を調べると

図 3 B - H ループおよびセンサ外観

Fig. 3. B - H loop of the core and the external shape of the sensor.

図 4 H_x に対する増分透磁率と探りコイル電圧
Fig. 4. Behavior of incremental permeability according to H_x and search coil voltage.

$$\left(\frac{\mu_d}{H_x=0} = 566 - \frac{\mu_d}{H_x=-18 \text{ A/m}} = 650 \right) / \frac{\mu_d}{H_x=0} = 566 = -0.148$$

$$\left(\frac{\mu_d}{H_x=0} = 566 - \frac{\mu_d}{H_x=18 \text{ A/m}} = 504 \right) / \frac{\mu_d}{H_x=0} = 566 = 0.1095$$

となり、35%程度非線形性が現れている。これは $H_x = \pm 18 \text{ A/m}$ と大きくしたためで、実際は 10^{-3} 程度以下の磁界を対称としているので線形性は十分成立すると考えられるが、以下に e_{sch} の大きさと H_x との比例関係を調べる。その際次の仮定をおく。

(i) Core_P と Core_N とは同一の磁化特性を有する。

(ii) f_{ex} から見た場合、 H_x は直流とみなせる。

(iii) $h_{ex} = H_{ex,m} \sin \omega_{ex} t \dots \dots \dots (2)$

(iv) $| \pm H_{DC} | \gg H_x$ および
 $| \pm H_{DC} | \gg H_{ex,m} \dots \dots \dots (3)$

(v) 動作磁界近傍における増分透磁率の H_x による非線形性は無視できる。

補助励磁電流に対する各探りコイル電圧 $e_{sch,P}$, $e_{sch,N}$ は次のようになる。

(i) $H_x = 0$ の場合

$$e_{sch,P,0} = N_{sch} d\phi_{P,0} / dt$$

$$= N_{sch} S \mu_0 \mu_{d,0} dH_{P,0} / dt \dots \dots \dots (4)$$

$$H_{P,0} = H_{DC} + h_{ex} \dots \dots \dots (5)$$

$$e_{sch,N,0} = N_{sch} d\phi_{N,0} / dt$$

$$= N_{sch} S \mu_0 \mu_{d,0} dH_{N,0} / dt \dots \dots \dots (6)$$

$$H_{N,0} = -H_{DC} - h_{ex} \dots \dots \dots (7)$$

$$\therefore e_{sch,0} = e_{sch,P,0} + e_{sch,N,0} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 N_{sch} : 各コアに施した探りコイルの巻回数、 ϕ : 各探りコイルと鎖交する全磁束数、 S : 各コアの等価断面積、 $\mu_{d,0}$: 各コアの動作磁界 ($H = \pm H_{DC}$) における増分透磁率、 H : 各コアに印加される全磁界

(ii) $H_x > 0$ の場合 e_{sch} の $e_{sch,0}$ に対する変化分 $\Delta e_{sch,P}$ および $\Delta e_{sch,N}$ はそれぞれ (9), (12) 式となる。

$$\Delta e_{sch,P} = e_{sch,P} - e_{sch,P,0}$$

$$= N_{sch} S \Delta \mu_0 \mu_{d,P} dH_P / dt \dots \dots \dots (9)$$

$$\Delta \mu_{d,P} = \mu_{d,P} - \mu_{d,0}, (\mu_{d,P} < \mu_{d,0}) \dots \dots \dots (10)$$

$$H_P = H_{DC} + H_x + h_{ex} \dots \dots \dots (11)$$

$$\Delta e_{sch,N} = N_{sch} S \Delta \mu_0 \mu_{d,N} dH_N / dt \dots \dots \dots (12)$$

$$\Delta \mu_{d,N} = \mu_{d,N} - \mu_{d,0}, (\mu_{d,N} > \mu_{d,0}) \dots \dots \dots (13)$$

$$H_N = -H_{DC} + H_x - h_{ex} \dots \dots \dots (14)$$

ここで $\Delta \mu_d$ は各コアの動作磁界レベルが H_x によってシフトすることによって生じる増分透磁率の変化分である。この場合、

$$\Delta e_{sch} = \Delta e_{sch,P} + \Delta e_{sch,N}$$

$$= -N_{sch} S \mu_0 2 \Delta \mu_d(H_x) \omega_{ex} H_{ex,m}$$

$$\times \cos \omega_{ex} t \dots \dots \dots (15)$$

となり (3) 式の条件を考慮すると H_x と Δe_{sch} との間には比例性が存在し、 Δe_{sch} を i_{ex} に関して同期整流すれば H_x を検出できる。ここで、図4に示すように $H_x = 18 \text{ A/m}$ に対する e_{sch} の最大値 $E_{sch,m}$ を求めると、 $2 \Delta \mu_d(H_x) = 2 \Delta \mu_d(18) = 146$, $N_{sch} = 163$ とすると $E_{sch,m} = 10.6 \text{ mV}$ となる。

3. 回路構成

図5は、センサ回路の構成図である。被検出磁界によって生じる (15) 式の電圧は微小であるため、これを A_1 により増幅する。 A_1 の出力 $A_1 \Delta e_{sch}$ を i_{ex} に関して同期整流したものを $H_{x,det,1}$ とする。これを低域フィルタに通すことにより、 f_{ex} 成分を除去したものを $H_{x,det,2}$ と表す。ここで 60 Hz および 180 Hz のフィルタは商用電源の影響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、電子回路の低雑音化のために図6に示すように、複数並列接続したアンプの後に f_{ex} の周波数と一致した同調アンプをつないだものを A_1 とした。同調アンプの帯域幅は被測定対象に応じて定めるが、ここでは 7 kHz とした。図7は $f_{ex} = 200 \text{ kHz}$ とした場合の e_{sch} の波形を示すが、アンプの並列接続よりむしろ同調アンプのほうが有効に機能しているのが認められる。

図5 センサ回路の構成図
 Fig. 5. Block diagram of the sensor.

図 6 増幅アンプの雑音低減法
Fig. 6. A noise reduction method in electronic circuit.

図 7 雑音低減効果
Fig. 7. The noise reduction effect.

4. 励磁条件と検出感度

〈4・1〉 励磁条件と増分透磁率 センサの検出感度を上げるには、コアに対して最適な励磁条件(H_x のわずかな変化に対して大きな e_{sch} の変化を得る)を与える必要がある。そのために、 H_{DC} の大きさに対する μ_d を求め、更にこの μ_d の励磁周波数に対する依存性を実験によって求める。図 8 (a) は (16) 式で定義した実効比透磁率 μ_{eq} のバイアス磁界に対する依存性を励磁周波数をパラメータとして得たものである。なお、ここでは μ_{eq} と μ_d との等価性を考慮して励磁磁界の最大値は H_{DC} に対して十分小さいと考えられる 5 A/m とした。

$$\mu_{eq} = \frac{\sqrt{2} E_{sch}}{N_{sch} \mu_0 S \omega_{ex} H_{ex, m}} \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 $E_{sch} : e_{sch}$ の実効値

この図から判断すると、 $H_{DC} = 140 \sim 170$ A/m 程度で最大感度を与えようと考えられ、励磁周波数としては低いほうが有利といえる。しかしながら、(15) 式の ω_{ex} の項も考慮する必要がある。図 8 (b) はバイアス磁界をパラメータとして μ_{eq} の f_{ex} に対する依存性を示したものである。この図からは f_{ex} を高くしたほうが有利であることがわかる。

〈4・2〉 励磁条件と検出感度 センサの検出感度

(a) バイアス磁界に対する実効比透磁率

(b) 励磁周波数に対する実効比透磁率

図 8 励磁条件と実効比透磁率

Fig. 8. Characteristics of effective permeability.

図 9 検出感度を測定する装置

Fig. 9. A device measuring the detection sensitivity.

を校正する方法として、図 9 に示す装置を用いた。半径が r (m)、1 ターンの円形コイルに電流 i_{coll} を流した場合の中心軸上 x 地点における磁界の大きさ $H_{coll}(x)$ は次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$H_{coll}(x) = \frac{r^2 i_{coll}}{2(r^2 + x^2)^{3/2}} \dots \dots \dots (17)$$

なお、ここでは $r = 0.193$ m, $x = 0.5$ m とした。

図 10 は上記測定法で i_{coll} の周波数を 10 Hz としたうえで、センサコアの励磁条件に対する検出感度を調べた結果を示す。(a) 図はバイアス磁界に対する感度で、 $H_{DC} = 180$ A/m 近傍で最高感度になっている。ところが、図 8 (a) では 155 A/m 近傍で μ_{eq} は最大になっており、これからセンサとしては、むしろ深めにバイアスしたほうが望ましいという結果になっている。ただし、 f_{ex} としては、図 10 (b) に示すように、

(a) バイアス磁界に対する検出感度

(b) 励磁周波数に対する検出感度

図 10 励磁条件と検出感度
Fig. 10. Detection sensitivity for exciting condition.

最高感度を与える 150 kHz とした。励磁周波数と検出感度との関係であるが、ここで見られるように、周波数依存性が大きく現れている。図 8 (b)にはこのような現象はなく、コアに施した各巻線の分布容量が関与しているものと思われる。

5. 最高分解能

図 11(a)は被検出磁界の周波数を 15 Hz, その最大値 $H_{x,m}$ を 5.97×10^{-3} および 5.97×10^{-4} A/m とした場合における検出特性を示す。これから被検出磁界 $H_{x,m} = 1.2 \times 10^{-2}$ A/m (p-p) ($= 1.5 \times 10^{-8}$ T (p-p) 相当) に対し $H_{x,det,4} = 14$ V (p-p) が得られている。ここで、 $H_{x,det,4}$ は商用電源による雑音磁界の影響を除いたものである。また図 11(b)は図 5 の e_{suh} を短絡、すなわち電子回路自身の雑音レベルを示したもので、その大きさは約 1.5 mV (p-p) である。ここで雑音と検出信号との比が 1 になるレベルを最高分解能⁽¹⁾ $H_{m,p}$ とすると

図 11 検出特性
Fig. 11. Detection characteristics.

(a)

(b)

図 12 シールドを施した場合の検出特性
Fig. 12. Detection characteristics in the case where the magnetic shield is equipped.

$$H_{m,p} = \left(1.5 \times 10^{-8} \times \frac{1.5 \times 10^{-3}}{14} \right) / \sqrt{15} \\ = 4.1 \times 10^{-13} \text{ T} / \sqrt{\text{Hz}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる⁽⁷⁾。図 12 は、センサ部と H_x 発生用コイルとを図 13 に示す三重の鋼管とケイ素鋼板で構成する磁気シールド装置内に入れて、図 5 の $H_{x,det,4}$ の後に更

図 13 シールド装置
Fig. 13. Shielding device.

図 14 シールド効果
Fig. 14. Shielding effect.

に 60 Hz のフィルタと増幅器をつなぎ、20 Hz の H_x を検出した場合を示す。これから判断すると、本センサの $H_{m,p}$ は $1 \times 10^{-12} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ を超えていると考えられる。その理由は、(a) 図の $H_x = 7.5 \times 10^{-5} \text{ A/m}$ (p-p) に対する検出電圧は 3.4 V (p-p) と (b) 図の $H_x/10$ 、すなわち $7.5 \times 10^{-6} \text{ A/m}$ (p-p) 検出時の 0.24 ~ 0.74 V (p-p) とを比較すると $0.24 / (3.4/10) \sim 0.74 / (3.4/10) = 0.71 \sim 2.2$ となり (0.5 ~ 2.0) の範囲を若干超えているが、 H_x 以外の雑音磁界を考慮すれば妥当と言える。この結果と (18) 式の $H_{m,p}$ と比較すると、コアを励磁したことによる雑音はそれほど大きくないと思われる。なお、図 13 に示す装置のシールド効果を図 14 に示す。60 Hz、 $5.26 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ (p-p) の磁界がほぼ 1/20 程度になっている。

このように、直流バイアス差動方式を採用したことにより、高感度化された理由として次のことが考えられる。

- (1) 高角形磁化特性を有する磁性材料を用いた。
- (2) 増分透磁率が大きく変化する回転磁化範囲を動作点とするように、直流バイアス磁界を印加し、補助励磁周波数を高くした。
- (3) 二個のコアを差動結合することにより、被検

出磁界に基づく動作点のシフト分を補助励磁に対する探りコイル電圧の基本波の変化分としてとらえた。

- (4) 電子回路自身の低雑音化を図った。

6. む す び

高感度磁界センサとして、直流バイアス差動方式を提案し、 $10^{-13} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ オーダの分解能を有することを示した。今後は本センサの応用と更に高感度化を目指していく予定である。(平成元年 9 月 25 日受付)

文 献

- (1) 阿部・和田：「高感度磁気センサの現状」、計測と制御，17，690 (昭 53-9)
- (2) 電気学会磁気応用常置専門委員会：磁心を用いたセンサの問題点 (昭 55)
- (3) 和田：「高感度フラックスゲート形磁力計」、電気学会マグネティックス研資，MAG-87-28 (昭 62)
- (4) H. Kado, N. Kasai, M. Nakanishi, S. Kiryu & H. Miura: "DC-SQUID and Biomagnetic Measurement", Technical Digest of the 8th Sensor Symposium, p. 251 (1989)
- (5) 園田・上田：「高感度磁界センサの検出下限について」、電気学会マグネティックス研資，MAG-87-88 (昭 62)
- (6) 竹山：電磁気学現象理論 (昭 19) 丸善
- (7) T. Sonoda, R. Ueda, H. Ikemoto, K. Kudo & K. Kajiura: "Differentially DC Biased Type Magnetic Field Sensor of High Sensitivity", IEEE Trans. Magnetics, MAG-25, 3396 (1989)

園 田 敏 勝 (正員)

昭和 19 年 3 月 7 日生。41 年 8 月東海大学短期大学部 (二部) 電気工学科 2 年中退。41 年 8 月九州大学工学部技官，46 年 4 月九州工業大学工学部技官，51 年 5 月九州工業大学助手，現在に至る。可変速ドライブシステムおよび検出器に関する研究に従事。日本非破壊検査協会，日本応用磁気学会，IEEE 会員。

上 田 隆 三 (正員)

昭和 15 年 12 月 15 日生。45 年 3 月九州工業大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。60 年 4 月同第二部電気工学科教授，学部改組により電気工学科教授，現在に至る。工学博士。電力システムの安定性，誘導機駆動システムの安定性，センサなどに関する研究に従事。日本非破壊検査協会，日本応用磁気学会，IEEE 会員。