

磁性流体磁気ブリッジを用いた電流センサの開発

忠津 孝^{*1†}・笹田 一郎^{*2}

(平成 22 年 2 月 10 日受理)

Development of a Current Sensor Based on a Magnetic Fluid Magnetic Bridge

Takashi TADATSU, Ichiro SASADA

[†]E-mail of corresponding author : t.-tadatsu@loyalport.com

Demands for the dc current sensor have been increasing recently. We have developed a hysteresis free current sensor based on a magnetic bridge by using a magnetic fluid as a core material which is superparamagnetic and has on magnetic hysteresis. In the experiment, the core size is 42mm in outer diameter, 28mm in inner diameter, 3.5mm in height. The sensor gets saturated at ± 200 A input current, but hysteresis was not observed in the whole measurement range. In the measurement range of ± 20 A, the sensitivity was 0.603 mV/A, the linearity error was $\pm 0.7\%$, and the temperature error characteristic was $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ at from 0°C to 30°C . This hysteresis free current sensor would be useful in energy efficient power systems for accurate current monitoring, especially dc power distribution systems.

Key words: *magnetic bridge, current sensor, hysteresis, magnetic fluid.*

1. はじめに

化石燃料の大量消費による気象や環境への影響は、昨今人々の平和な生活を脅かすまでになってしまい対策は緊急を要している。その対策の一つとして、最近様々なエネルギーを電気エネルギーに変換して使用することが増えてきた。

このような背景から、太陽電池、燃料電池、直流配電、電気自動車などに象徴されるいわゆるエコエネルギーの技術が急速に向上して、すでに普及も始まっている。そして、これらに共通した直流電力技術は今後益々重要になってくるものと思われる。

電力を効率よく安全に使うためには電流・電圧の計測と制御が重要であり、正確な情報で細かく制御することが高効率化につながる。この分野で広く使われているホール素子方式の電流センサは軟磁性材で環状のコアを作り、その一部に設けたギャップにホール素子を挟み込んでいる。軟磁性材には磁気ヒステリシスがあり、これによりセンサの出力にも厄介なヒステリシスが生じ零点の不確かさの問題があった。

高度な制御が求められる最近の太陽光発電設備や電気自動車などに組み込まれる電流計測では、この零点の不確かさが装置全体の性能を左右する大きな障害と

なっている。例えば電気自動車の二次電池では、充電量を充放電電流の時間積分で求めているが、この際センサのオフセットは累積されて誤差を拡大する。充電量の誤差が大きくなると適切な管理ができず電池の劣化を招いたり、電力不足で走行不能に落ちたりする危険性がある。

著者らはこのような背景を踏まえて、根本的にヒステリシスが発生しない非接触直流電流センサの開発を目標に研究をして来た。そして磁性流体には原理的にヒステリシスがないことに着目し、これをコアとしてヒステリシスが極めて小さいか、あるいは無い磁気ブリッジ方式の電流センサを開発した。本稿ではその原理と構造および実験結果について報告する。この実験の目標値は現在市販されている同レンジ程度の大電流センサの値を負帰還や補正無しで越えることである。

2. 原 理

2.1 磁性流体

磁性流体は 10 nm 程度のマグネタイト (Fe_3O_4) などの磁性体微粒子の表面に、オレイン酸などの長鎖不飽和脂肪酸の界面活性剤吸着層を設け、水や油などの分散液に混濁させたコロイド分散液である。磁性流体は界面活性剤の働きによって磁気力やファンデルワールス力による凝集が起らず、重力や永久磁石程度の吸引力では沈殿することもなく非常に安定した流体である。磁性流

* 1 量子プロセス理工学専攻博士課程

* 2 融合創造理工学部門

体の磁化は磁性体粒子内部の磁化軸の回転と粒子の機械的回転および粒子の配列等が複合的に作用していると考えられている¹⁾。

磁性流体の定性的な B - H 特性と、 μ - H 特性を Fig. 1 に示す。固体軟磁性材に比べて特徴的なところは、磁性流体の透磁率は初透磁率が最も大きく磁界が大きくなるに連れて単調に減少する点と、磁気ヒステリシスが無い点である。磁性流体に分散している微粒子は固体軟磁性材であり、各々磁気ヒステリシスがあるが、微粒子はブラウン運動により常に攪拌や回転が起きているので、磁化の向きは不特定になりマクロ的にはヒステリシスが現れない。但し、磁性流体の粘性や磁性体微粒子の濃度などによってはヒステリシスが生じるものもある。またマグネタイトでできた磁性流体の比透磁率はせいぜい 10 ~ 20 程度で、パーマロイや珪素鋼板の数千から数万に比べると遥かに小さい。

理想的な磁性流体は超常磁性体で磁化特性はランジュバン関数で表すことができる²⁾。Fig. 1 はこれに基づいて画いている。

2.2 磁気ブリッジ

磁気ブリッジは磁気コアを用いて、Fig. 2 (a) に示すホイートストンブリッジを構成したものである^{3), 4)}。この巻線構造を同図 (b) に示す。検出機能は磁性体の透磁率が磁束密度によって変化することを利用している。この特性は磁性流体でも同様で Fig. 1 に示す通である。この特性を利用するとブリッジの素子の磁気抵抗を電流による磁界によって変化させることができ、磁気ブリッジに平衡状態や非平衡状態を作り出し外部磁界を検出する機能を持たせることができる。

電流センサとするために磁気ブリッジの構造図 Fig. 2 (b) において、左右の端面 End face 1 と End face 2 は磁気的に結合して、コア中央の結合のあり様としては、磁性材による磁路の他に空芯コイルによるものでも良い。

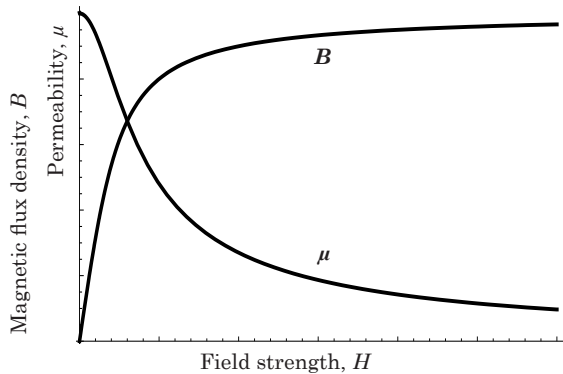


Fig. 1 Dependences of the magnetic flux density B and the permeability μ of a magnetic fluid on the applied magnetic field H .

その結果 Fig. 3 に示す構造が出来上がり、このリングを貫通する電流の磁界を検出できるようになる。

2.3 電流検出機能

磁気抵抗を Rm で表すと、Fig. 2 に示す磁気ブリッジの平衡条件は次の通りである。

$$Rm_1 \times Rm_4 = Rm_2 \times Rm_3 \quad (1)$$

本稿では解析を簡素化するために全ての磁気抵抗の特性が同一であるとすると、よって磁化されていない状態では、

$$Rm_1 = Rm_2 = Rm_3 = Rm_4 \quad (2)$$

である。

このようにすると、Fig. 2 (b) に示す磁気ブリッジは励磁コイルを基準にして上下も左右も対称になる。従ってここでは左側半分について解析する。

まず Fig. 2 (b) において、検出コイルにおける磁束は X 方向を正とする。そして励磁磁界は励磁コイルの内部で Y 方向を正とする。これを Fig. 3 にも適用して、励磁磁界を基準にした検出コイルから見た Rm_1 と Rm_2 の B - H 特性を説明する。励磁磁界 H_e と被検出電流による磁界 H_x の正の向きを Fig. 3 のように定める。またコアの磁束密度の正の向きも H_x の正の向きとする。まず平衡状態すなわち被計測電流 I_x による磁界 H_x が 0 のとき、 Rm_2 の B - H 特性は、Fig. 4 (a) の曲線 B_2 になる。一方 Rm_1 においては励磁磁束の方向が反対になるので、 B - H 特性は同図の曲線 B_1 になる。

検出コイルは Rm_1 と Rm_2 の両方に一括して一様に巻いてあるので検出コイルを貫く磁束は Rm_1 の磁束と

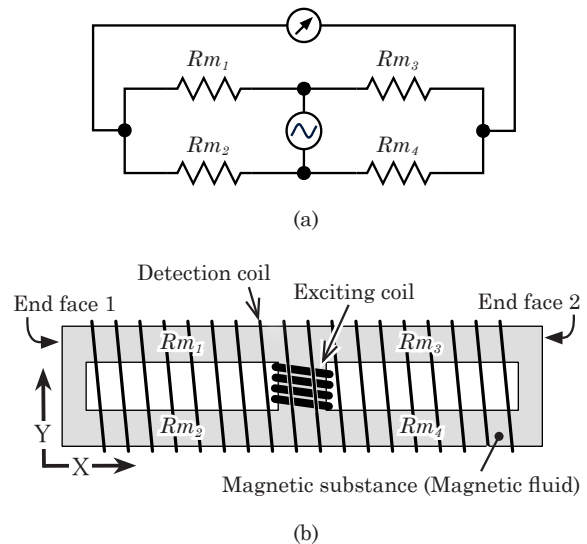


Fig. 2 Wheatstone bridge circuit representation of a magnetic bridge (a) and a basic structure of a magnetic bridge (b), in which $Rm_1 \sim Rm_4$ are magnetic reluctance on the each branch.

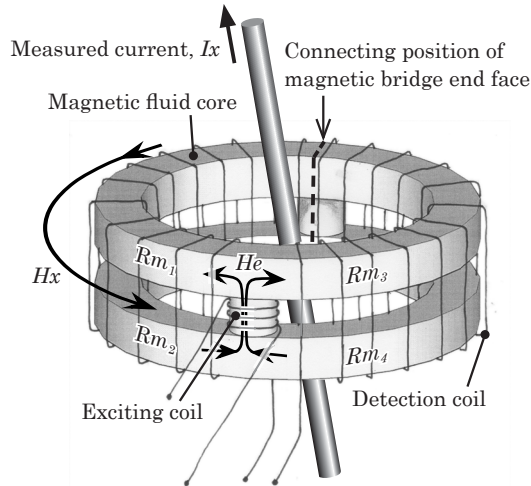


Fig. 3 Basic form of a current sense. A magnetic bridge consists of a ring shaped plastic case in which magnetic fluid is filled. Vertical segments have a hole inside where magnetic fluid is filled too. An excitation coil is wound on a vertical segment and a sensing coil is wound toroidally on the ring.

Rm_2 の磁束の和になるが、式 2 が成り立っていれば B_1 と B_2 の絶対値は等しく、その和は H の値に関わりなく常に 0 であり合成した $B-H$ 特性は Fig. 4 (a) の $B_{COMP} = 0$ で与えられる。したがって、検出コイルに励起電圧は生じない。このように平衡状態では何も出力に現れないのが磁気ブリッジ方式の特徴である。

次に被計測電流 I_x が Fig. 3 に示したように上向きに流れた場合について説明する。 I_x による磁界 H_x は Fig. 2 (b) に示す X 方向の磁界である。したがって Rm_2 を通る磁束は H_e と向きは同じになり、 H_x は H_e に加算的になり B_2 の動作点は H_x 分だけ左の方向にずれる。

一方 Rm_1 では H_x は H_e と反対向きになり、 B_1 の動作点は H_x 分だけ右の方向にずれる。このようにしてずれた B_1 と B_2 を Fig. 4 (b) に示す。そして Fig. 4 (b) の B_1 と B_2 を合成した B_{COMP} は、 $H = 0$ で最大になる突起状の特性になる。

任意の I_x に対して B_{COMP} を H_e に対して重ねて画いたのが Fig. 5 である。 B_{COMP} の突起の高さは I_x の大きさに比例する。図中の各 I_x の相互関係は、 $I_{x1} > I_{x2} > 0 > I_{x3} > I_{x4}$ である。また、同図の (1) から (4) の波形は磁束密度 B の時間軸上の変化であり励磁磁界 H_e によるものである。これは I_x による磁束密度を中心にして、励磁信号の 2 倍の周波数で変化する磁束密度成分である。

この成分による検出コイルの誘起電圧を、 H_e の 2 倍の周期に同期して同期検波する。この検波出力は、Fig. 5 からも解る通り、大きさは I_x の大きさに比例し、極性は I_x の向きに依存する。従って、磁気ブリッジで

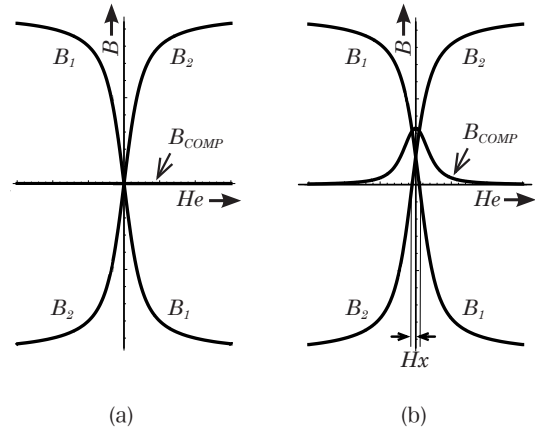


Fig. 4 Model of magnetic flux density response of the each branch of a magnetic bridge. No input current in (a) and an input current causing H_x field present in (b). Addition of B_1 and B_2 gives a signal.

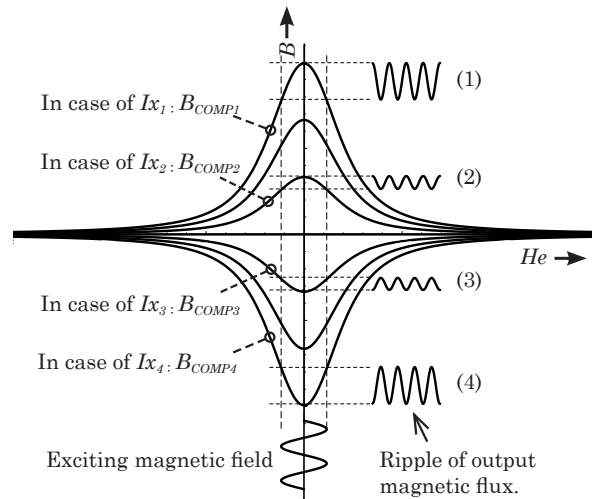


Fig. 5 B_{COMP} vs H_e curves (transfer curves) of the current sensor. The exciting magnetic field produces the second harmonic component of the magnetic flux to the sensing coil. The phase of the second harmonic component is reversed when the sign of the current is reversed.

は大きさだけでなくその符号も計測できる。ただし、計測できる周波数の上限は励磁周波数の 1/2 で、実用的には 1/10 以下である。

3. 実験

3.1 試作

始めに磁気コアを製作した。コアに使用する磁性流体は液状なので容器が必要である。そこで内部の空洞の形状が Fig. 3 に示したコアの形状になるようなプラスチック容器を作った。Fig. 6 (a) に容器を形成する部品の図

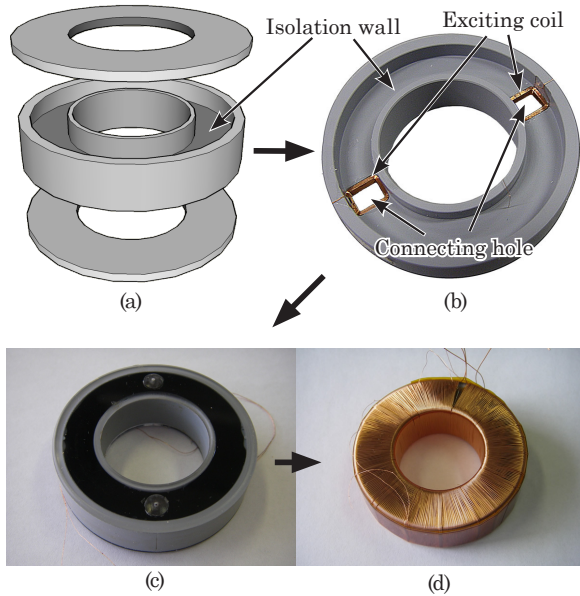


Fig. 6 Structure of a ring-shape plastic case used as a container of magnetic fluid. (a) shows a central section, and top and bottom cover. (b) shows a detail of the central section. (c) shows magnetic fluid. (d) sensing coil is wound.

を示す。図において中央の部品は、内側と外側の二つの円筒の高さの中心部を円盤状の隔離壁で接続した構造になっている。つまりリングの断面では“H”状の形状をしている。

この隔離壁には真反対の位置に貫通穴を設けた。二つの貫通穴は Fig. 3 では励磁コイル部と端面の接合部に相当する。Fig. 3 において励磁コイル部を通過する磁束と端面の接合部を通過する磁束は、向きが反対で大きさは同じである。ただしこれが成り立つのは漏れ磁束の無い理想的な場合であって実際には漏れ磁束があり Fig. 3 の様な片側だけの励磁では、双方の貫通孔で対称性がない。そこで試作品では双方の貫通孔に同一の励磁コイルを磁束の方向が反対向きになるように配置し、これを直列結線して同じ電流で駆動した。このようにすることで双方の貫通孔の磁束は同じ大きさになり、漏れ磁束があっても対称性を確保することができる。励磁コイルは内寸が $5\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ の矩形にして、線径 0.1 mm を 200 回巻いた。隔離壁およびコイルの厚さは何れも 2 mm である。

次に Fig. 6 (a) の上下に示した蓋を上記のリングに接着して容器にした。隔離壁と蓋とで形成された空洞は Fig. 3 の磁気ブリッジの Rm_1 から Rm_4 を形成する部分で、空洞の寸法は内径 28 mm 、外径 42 mm 、厚さ 3.5 mm である。従って空洞の断面の寸法は $7\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ である。これは Rm の磁路の断面でもある。

この容器の外側面には予め直径 1.5 mm 程度の穴を

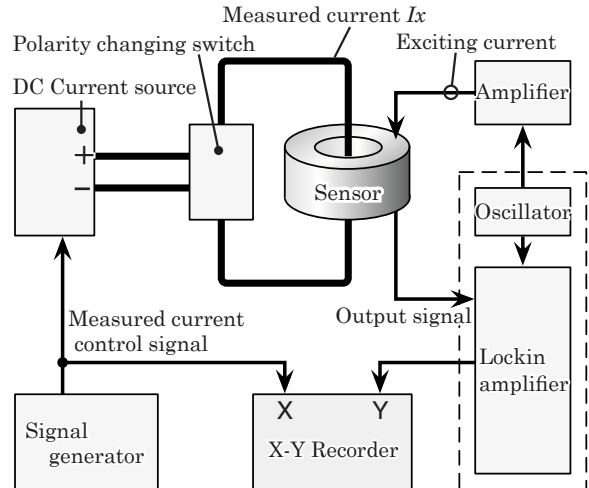


Fig. 7 Experimental set-up.

設けておいて、そこから磁性流体を充填した。充填方法はデシケータ内で真空引きして空気と磁性流体を置換した。充填した穴はプラスチック製のねじと接着剤で密閉した。充填した磁性流体は約 5.51 cc である。このコアの断面積は 24.5 mm^2 で、断面の中心の磁路長は 110 mm である。磁性流体を充填したコアの写真を Fig. 6 (c) に示す。写真では試作の蓋が透明であるため、内部の磁性材が黒く見えている。この写真で黒い部分の手前と奥の方に丸く見えるのは、ケースと磁性流体の膨張率の違いによる、大気圧との圧力差を下げ、ケースの破損を防ぐための構造である。これは各 Rm 上の中央部に位置している。

このコアに線径 0.2 mm で 670 回の検出コイルをトロイダル状に巻いた。その写真を Fig. 6 (d) に示す。

3.2 入出力特性測定

3.2.1 実験方法

実験回路を Fig. 7 に示す。被計測電流源には外部信号で電流量を制御できる電流発生器を用い、信号発生器で作った制御信号の電圧で電流量の掃引を行った。実験では正負の電流が必要だが、実験に用いた電流発生器は単極性なので、電流方向の切換えは外部のスイッチで行った。

励磁信号は 40 kHz の正弦波とし、 $I_x = 0\text{ A}$ の時に $20.0\text{ mA}_{\text{RMS}}$ になるように励磁電流を設定した。その後はその出力電圧のままで定電圧駆動にした。検出コイルの出力は入力抵抗が $10\text{ M}\Omega$ のロックインアンプに接続し、励磁信号に同期して且つその 2 倍の周波数である 80 kHz の信号で同期検波した。

ヒステリシスの実験は、 I_x を $\pm 200\text{ A}$ にしてそれぞれの値から I_x の回路を開放して 0 A の状態にし、その時のロックインアンプのデジタルの出力表示を記録した。

Table 1 Measurement result of hysteresis.

Sequence	1 (6)	2 (7)	3 (8)	4 (9)	5 (10)
I_x [A]	0	+200	0	-200	0
Output voltage [mV]	0.00	48.85	0.00	49.09	0.00

直線性の実験では、被計測電流源の制御信号とロックインアンプの出力をそれぞれ X 軸と Y 軸に入力した X-Y レコーダで記録した。これにより、X 軸が入力で Y 軸が出力のグラフを画くことができる。

この実験方法では電流発生器の制御電圧を被計測電流値とみなしているため、実験結果の入力電流値の精度は低い。従って、この実験では精度については評価しない。ただし、ヒステリシス特性の実験の 0 A はスイッチをオフにして被計測電流回路を開いているので正確である。この実験は約 27 °C の実験室の木製の卓上にセンサを置いて行った。

3.2.2 実験結果と評価

(1) ヒステリシス ヒステリシスの確認はこの開発で最も重要である。実験の結果を Table 1 に示す。この実験は同じ操作を 2 回繰り返したが結果は同じ数値であった。 $I_x = 0$ A は回路を開放しているため精度が高いが、 ± 200 A は実測した値ではなく、信号発生器の出力電圧で電流発生器に設定した値なので精度が低い。電流発生器の電流出力精度は仕様書によると 0.5 % (23°C) で、これを制御する信号発生器の出力の DC オフセットの保証は 1 % である。実験結果の ± 200 A のときの、センサの出力の絶対値の差は、0.24 mV で全出力幅 97.94 mV の約 0.49 % である。この値は I_x 電流発生系の保証精度より良いので、出力信号処理系の誤差がないとしても、この誤差の原因が計測系なのかセンサなのかの判断はできない。しかし、0 A のときの値は回路が開放されていて I_x 電流発生系が関与していないので信頼性が高い。

0 A のときのヒステリシスは計測限界値 0.01 mV 未満なので、200 A のときの値に対して約 0.02 % 未満であると言える。この値は高性能に属する市販のホールセンサ型磁気平衡式電流センサの ± 0.4 % を凌ぐ値である⁵⁾。

(2) 直線性 ± 200 A の入出力特性を Fig. 8 に示す。このグラフは I_x を 0 A からスタートして ± 200 A を経由して、再び 0 A に戻る一往復を記録している。このグラフでは直線性が 100 A 付近から飽和傾向になっている。

使用した磁性流体は、メーカーの資料によると磁化 M が飽和磁化 M_s の 50 % になる磁界強度が 20 kA/m 程度である。これに対して、このセンサが受けるおおよその磁界の強さは、励磁による磁界が 73 A/m で、 I_x による磁界が $I_x = 200$ A のときに 1.82 kA/m である。この

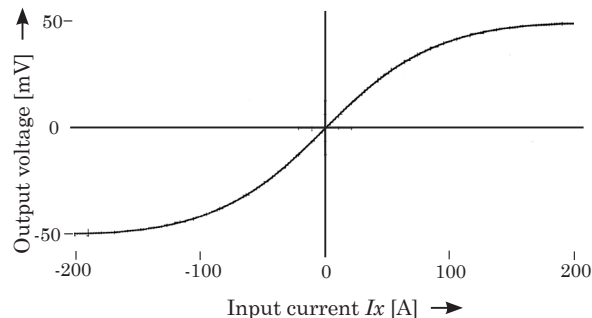


Fig. 8 Input output characteristics for a large input current.

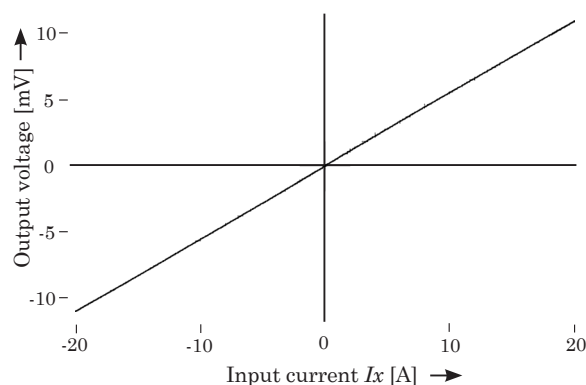


Fig. 9 Input output characteristics of practical range.

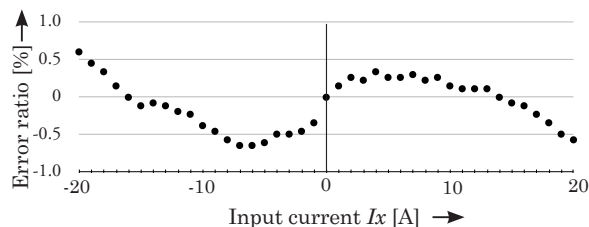


Fig. 10 Linearity error which is calculated from the data in Fig. 9. Full scale is 20 A in this evaluation.

双方が加わっても 2 kA/m 程度である。従ってこの入出力特性の飽和は磁性材の磁気飽和が原因ではなく、透磁率の特性やブリッジの原理的特性など、他の原因が考えられる。

Fig. 9 に ± 20 A を一往復したときの入出力特性を示す。そしてこのグラフを読み取って数値化したデータをもとに算出した誤差率を Fig. 10 に示す。この誤差率は入力が 20 A の時の出力値を 100 % として、感度を +14 A で正規化している。Fig. 9 では一見直線に見えるが、正確には Fig. 10 に示した直線性誤差がある。この誤差率の曲線は Fig. 8 の結果と似ており、このセンサの入出力特性は全範囲に渡り Fig. 8 で見られるような曲線の特性を持っていると考えられる。そうであれば前記した飽和特性の支配的原因を明らかにすることにより、この

直線性誤差も改善できると考えられる。

Fig. 10 の直線性誤差のグラフについて、0 A と -1 A のところで大きなずれが生じているが、これはセンサの特性ではなく、ヒステリシス特性の項目でも触れた I_x の精度が原因と思われる。また、グラフが滑らかでないのは X-Y レコーダの記録から数値化する際の読み取り誤差と考えられる。読み取り方法は、グラフをスキャナでコンピュータに取り込み拡大表示して、グラフの線のほぼ中央を数値化した。ちなみに、グラフの線幅は 20 A の出力値に対しておおよそ 0.5 % 相当ある。

(3) 感度 入出力特性が Fig.8 の通りの曲線になっているので入力値により感度が違う。そこで、比較的直線性のよい 20 A 入力ときの感度を見ると、おおよそ 0.59 mV / A である。感度はもう少し高い方が扱いやすいが、このセンサの感度は、検出コイルの巻数に比例し、励磁電流の大きさの 2 乗に比例することが判っている。さらに磁性流体の透磁率にも比例し高透磁率では高感度になることが確認されている。従って用途に応じた設計で最適化ができる。

また、零位法と呼ばれる負帰還をする方式を採用した場合には、センサは I_x の大きさに関わらず入力電流がほぼ 0 A の状態で動作するので、 I_x が 20 A 以上でもほぼ一定のこの感度で動作する。従って直線性も改善されることになる。

3.3 温度特性の測定

3.3.1 実験方法

実験回路は Fig. 7 と同じにした。そしてセンサとこれに接続している導線および I_x を流す導線の一部を恒温恒湿槽に入れた。湿度設定は 40 % にした。そして -20 °C から 10 °C ステップで +70 °C まで実験した。この温度範囲については、試作の容器の材料が硬質塩化ビニールなので、高温側はこの程度が限界であり、低温側は使用した恒温槽の能力の限界である。

計測は恒温恒湿槽が各設定値に安定してから 10 分以上放置して、その後 10 A から 60 A までを 10 A ステップで計測した。計測値は検出コイルの出力電圧をロックインアンプの表示値で読んだ。この実験では負方向の電流は計測しなかった。また励磁は 0 °C の時の $I_x = 0$ A で、入出力特性の実験と同様に行い以後は調整しなかった。従って励磁電流は I_x や温度の設定変更によって変化する可能性があり、実際に変化した。

3.3.2 実験結果と評価

センサは固体のプラスチックのケースの中に液体の磁性流体を入れて気体が入らないように密閉しているのので、プラスチックと磁性流体の膨張率の違いにより内部の圧力が大きく変化する。従って対策をとらなければケースが破損する恐れがある。そこでケースには圧力変化を押

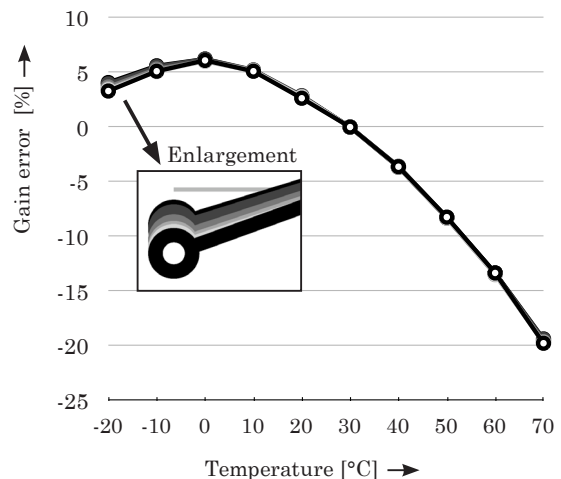


Fig. 11 Temperature dependence of the sensitivity error. The sensitivity error is percentage deviation from the sensitivity at 30 degree C. Six cases (10, 20, 30, 40, 50, 60 A input) are plotted, as shown in the inset.

さえるための構造的工夫も施している。温度試験にはこの機能の有効性の確認も含まれているが、-20 °C から +70 °C の範囲で壊れることなく動作した。

Fig. 11 に感度の温度特性を示す。このグラフは 30 °C の時の出力値を基準にして、各設定温度における出力の基準からのずれをパーセントで示した。同図は 10 A から 60 A までの 10 A ステップのデータを示しているが、誤差率は全ての I_x で近い値になりグラフが重なったところが多い。グラフは最も手前が 10 A で最も奥が 60 A の順番になっていて、-20 °C では順番にずれている。

この実験結果では丁度 0 °C で最高の感度になり、他では感度が下がっている。実際には -10 °C から +10 °C の間に最も高感度などところがあると思われる。このセンサでは磁性流体の透磁率が感度に大きく影響し、透磁率が下がると感度が落ちる。これは透磁率の違う磁性流体で実験をして判っている。従って感度が落ちる所では透磁率が下がっている可能性がある。それを思わせる現象として、感度が落ちる所では励磁電流が大きくなる。つまり、-20 °C では約 0.3 mA ほど、+70 °C では約 3 mA ほど 0 °C の時に比べてそれぞれ励磁電流が大きくなった。これは、透磁率が下がり励磁コイルのインダクタンスが下がったためと考えられる。励磁電流が大きくなるだけなら感度は上がるが、それが透磁率が下がったためであれば感度は上がらない。つまり、この磁性流体の透磁率は 0 °C 付近に最高点があるのではないかとと思われる。

実験に使用した磁性流体の磁性材はマグネタイト

(Fe_3O_4)で、温度が上がると透磁率が下がる。またこの磁性流体の分散液の粘度は温度の低下と共に指数関数的に上がることが解っていて、粘度が上がれば磁性材粒子が動き難くなり交流励磁では透磁率が下がる。このように磁性流体の透磁率は温度上昇で下がる要因と、温度低下で下がる要因があり、これらの相互作用で Fig.11 のような温度特性になるのではないかと考えられる。そうであれば、磁性材の密度や寸法および分散液の選択によって温度特性を制御できると考えられる。

これらの推測については今後の実験で確かめる必要がある。

一方で、室温付近では温度特性は I_x に無関係なことがわかる。しかし -10°C 以下や $+70^\circ\text{C}$ 近くでは出力が温度と I_x に依存していて、 I_x が大きい程温度の影響が小さくなっている。

3.4 地磁気の影響

地磁気による影響を簡易に調べた。方法は Fig. 7 に示した実験回路から被計測電流回路を取り除き、センサを様々な方向に向け最大出力と最小出力の差を求めた。その結果 $0.026\text{ mV}_{\text{RMS}}$ が得られた。この出力を 20 A のときの感度 0.59 mV/A を用いて I_x の値に換算すると約 44 mA に相当することがわかった。地磁気の影響は他の電流センサでもよく課題になるが、磁気ブリッジ方式の場合は磁性材の透磁率とセンサの形状が地磁気の影響の大小を左右する。具体的には磁性流体の透磁率を上げ、形状と寸法の調整で、漏れ磁束をより小さくすることが有効である。

さらに、センサを磁気シールドケースに入れて地磁気の影響を少なくして微弱電流の計測も試みた。その結果この試作品では、地磁気の影響は電流換算で少なくとも 10 mA 以上になることが確認できた。分解能が 10 mA にとどまるのは信号に含まれるノイズのためであるが、ノイズの発生源はまだ解明していない。可能性としては、環境磁気ノイズや磁性流体のブラウン運動などによるノイズが考えられる。その他の電界ノイズや計測回路のノイズなどはセンサを外したときの値によって、十分に小さいことを確かめた。

4. まとめ

ホール素子方式の電流センサについて、コアの磁気ヒステリシスが零点の不確かさを大きくしていると述べたが、本開発で最も重要な「ヒステリシスの解消」については、市販の同程度のレンジの電流センサの 10 分の 1 以下の、実験で用いた計測器では測定できない値にまで

達した。そして当初の目標を十分に達成した。

入出力特性では、十分に実用的な感度を確認できた。一方で、特性の曲線の原因を明らかにして、直線性の改善をすることは今後の課題である。

温度特性では、温度変化により感度が著しく変化することがわかった。その原因は磁性材や分散液の温度特性にあるものと思われるが、今後の確認が必要である。

従来の用途の磁性流体には、スピーカのボイスコイルに充填するものや真空シール用のものがあり、これらは大気に曝される用途であるため、気化や酸化しないことに特に注意が払われていて、飽和磁束密度はおおよそ $10 \sim 40\text{ mT}$ 程度である。

しかし、この電流センサでは磁性流体を密閉して使うので、気化や酸化への配慮を低減して、磁性材や分散液の特性をこのセンサに最適化しやすい。この際配慮したい特性は粘性と耐熱性である。因みに車載用などでは、 -40°C から $+120^\circ\text{C}$ 程度の耐熱性が求められている。最近窒化鉄を用いた磁性流体で飽和磁束密度が 117 mT で比初透磁率が 182 が報告されている⁶⁾が、たとえばこのような磁性材を用い、合わせて分散液の粘性なども最適化すれば、この電流センサの性能は数段向上すると思われる。

この磁性流体磁気ブリッジを用いた電流センサは、改良の余地はあるものの、実用的にはヒステリシスがなかったり十分な感度があること、また、再現性がよく解析しやすい特性を示すことから、今度の直流電流センサとしての実用化が期待できる。特に、ヒステリシスが障害となっている直流電力分野では、この電流センサの特性が十分に発揮できるものと期待している。

謝辞

試作作業についてご協力下さったアイショー電子の明石治様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 稲葉信幸, 宮島英紀, 武富荒, 近角聡信, 日本応用磁気学会誌, 13, pp.245-248, 1989.
- 2) 太田恵造, “造磁気工学の基礎1”, 共立全書(1973) pp.137.
- 3) 忠津孝, 笹田一郎, 電気学会研究資料, マグネティックス研究会, 2004(53).
- 4) 忠津孝, 笹田一郎, 磁気学会, 31(5), pp.421-426, 2007.
- 5) TDK 株式会社カタログ, ハイブリッドカー・電気自動車用高精度電流センサ SAA series, 2008.
- 6) 中谷功, Japan Nanonet Bulletin, (第94号), 2005.