Co系アモルファス磁性薄帯／プレーナコイル積層型 フラックスゲート二軸センサの試作

Fabrication of a Two-Axis Planar Flux Gate Sensor with a Multilayer Structure
Composed of a Co-Based Amorphous Magnetic Ribbon and Planar Coils

佐藤敏郎・山沢清人・三浦 陽

信州大学工学部, 長野市若里 4-17-1 (〒 380-8553)

T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura

Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553.

(2000年9月22日受理, 2001年1月24日採録)

A two-axis flux gate magnetic field sensor, with a multilayer structure composed of a Co-based amorphous magnetic ribbon and planar coils, was developed. Since the two planar spiral coils for ac excitation and flux detection were located on the same plane, it was easy to fabricate by the photolithography technique. The fabricated two-axis flux gate functioned as an earth magnetic field direction sensor.

Key words: flux gate sensor, direction sensor, multilayer structure, amorphous ribbon, planar coil

1. はじめに

一般に, 平行フラックスゲートセンサは, 励磁コイルと検出コイルの両方を具備する必要があるため構造が複雑になる, 磁心損失の増大やコイル浮遊容量のために高周波化が難しく小型化が困難であるなどの欠点を有する。

これらの問題を薄膜技術を用いて解決しようとする試みが最近活発になってきており, 薄膜フラックスゲートの試作例が相次いでいる^{1)~3)}。薄膜フラックスゲートは, 磁心にコイルを巻き回すソレノイド型^{1)・2)}と磁心とプレーナコイルを積層するプレーナ型³⁾に大別される。膜堆積と加工が繰り返される薄膜プロセスでデバイスを作製するに当たっては, 工程数を少なくできるシンプルなデバイス構造が望ましい。ソレノイドコイル型は上部導体と下部導体の電氣的コンタクトを多数取る必要があるため, 作製プロセスが複雑になり, 作製歩留まりの点で不利である。これに対して, 積層プレーナ型は構造が単純であるため, 工程数を少なくできる利点がある。

本文は, 地磁気を用いた薄膜フラックスゲート方位センサの開発を最終目標に, その前段階として Co 系アモルファス薄帯と Cu プレーナコイルを用いて作製した積層プレーナ型二軸センサの拡大試作モデルについて述べるものである。試作した二軸センサは, 直交磁界を検出する2つの積層フラックスゲートが見かけ上一体化された構造を有し, 2つの積層フラックスゲートを離れた位置に直交配置する従来の二軸センサ構成²⁾に比べて, 直交二軸磁界の計測点の位置ずれが本質的に小さいといった利点を有する。

2. 積層フラックスゲートの基本構造と動作

ここでは, 簡単のために, 一軸積層フラックスゲートを例にして, その基本積層構造と非線形有限要素法解析による動作確認の結果について述べる。

2.1 コイル／磁性体／コイル積層型

Fig.1 は, 磁性体を2つの励磁コイルで挟む2層コイル構成の場合を示すものであり, 同図 (b) は断面構造と磁束の流れの模式図である。同一面上の同一軸上に配置される2つの磁性体はスパイラルコイルの相対するコイル辺に配置され, これらの磁性体の端部から漏洩する磁束を検出するように8の字コイルがスパイラルコイルの中央部に配置される。また, 上下励磁コイルに流れる電流を上下導体で逆向きになるように上下コイルを直列接続すれば, 1箇所の電氣的コンタクトを取るだけで磁性体の励磁はソレノイドコイルを用いた場合と等価となる。

8の字コイルは磁性体の漏洩磁束を検出する2つのコイルを差動接続して構成されるので, 出力には励磁周波数の偶数倍周波数成分のみを有する起電力が発生する。また, 上下の8の字コイルの和動接続により, センサ出力が増大する。8の字コイルの採用によれば, 差動接続のためのコイル間のリード線を極力短くすることができ, リード線引き回しによる不要な誘導を抑制できる。

2.2 コイル／磁性体積層型

Fig.2 に, 磁性体と単層プレーナコイルを用いたコイル／磁性体積層型センサの構造を示す。コイル／磁性体／コイル積層型に比べ, 同一の励磁電流による起磁力は半分となり, センサ出力も小さい。しかしながら, 構造が単純であり, Kawahito ら³⁾の薄膜フラックスゲートでも, この基本構造が採用されている。

2.3 動作解析

積層フラックスゲートの動作確認を目的に, Fig.1 のコイル／磁性体／コイル積層型を対象に二次元有限要素法を用いた非線形静磁界解析による検討を行った。定量的な動作解析に対しては, 本来, 交流非線形電流磁界解析によるべきであるが, 解析ツールの制約という理由のために, 静磁界解析に制限された。提案したデバイス構造でフラックスゲートの動作が可能か否かを確認す

Fig.1 Coil/magnetic-layer/coil-type sensor.

Fig.2 Coil/magnetic-layer/coil-type sensor.

る程度の意味合いでは、静磁界解析でもその目的は十分に果たされるものと考え、解析には後述する試作センサの緒元を参考にした。磁性体の非線形磁気特性は、磁性層に用いた $20\mu\text{m}$ 厚 Co 系アモルファス磁性薄帯巻磁心の直流 $B-H$ 曲線の実測値（本文では図示していない）を使用した。励磁コイルに流す直流強制電流は、実効値 I_e の正弦波電流を一定の間隔でサンプリングした瞬時値 $I(k)$ を用いている。

$$I(k) = \sqrt{2} I_e \sin(2\pi k/N), \quad k = 0 \sim N \quad (1)$$

N はサンプリング数であり、この計算では 37 とした。これらの計算を励磁電流の 1 周期に渡って行い、検出コイル鎖交磁束波形 ϕ を合成した後、フーリエ解析による調波分析を行って第 2 次高調波磁束振幅 V_{2m} を算出した。和動接続された上下 8 の字コイルの倍周波起電力振幅 V_{2m} は、角周波数を ω とし、次式を用いて計算した。

$$V_{2m} = 4 \omega \Psi_2 \quad (2)$$

Fig.3 に、励磁電流の実効値 I_e が 70mA の場合の磁性層面内磁束密度 B_x と検出コイル鎖交磁束波形 ϕ の計算値を示す。この図では、直流外部磁界 H_{ext} を種々変化した場合の B_x と ϕ の変化の様子が明確になるように重ね書きして示した。 ϕ と B_x は相似の波形形状となっており、外部磁界 H_{ext} の増大に伴って磁性層の動作点が磁化曲線の飽和領域へと移動すると、 B_x と ϕ の最大値がクリップされることが了解される。

Fig.4 は、検出コイルの倍周波起電力振幅 V_{2m} と外部磁界 H_{ext} の関係を示すものである。なお、 V_{2m} は励磁周波数を 1 MHz として (2) 式を用いて計算した。 V_{2m} は、240 A/m (3 Oe) 程度の外部磁界で最大となる。既に報告した一軸フラックスゲートの実験結果⁴⁾と比較すると、センサの周波数依存性を無視しているために定量的な不一致は大きい、出力が最大となる外部磁界の値はほぼ一致する。以上の検討は、Fig.2 で示したコイル/磁性体積層型には行っていないが、コイル/磁性体/コイル積層型の動作と本質的な相違はないものと考えている。

Fig.3 Example of the calculated waveforms of the in-plane flux density B_x in the magnetic layer, and the flux ϕ passing through the detection coil.

Fig. 4 Relationship between the external magnetic field H_{ext} and the secondary harmonic voltage amplitude V_{2m} of the detection coil (calculated value).

3. 二軸積層フラックスゲートの試作と基本特性

3.1 二軸積層フラックスゲートの構成と作製方法

Fig.5 に、コイル/磁性体積層構造を採用して試作した二軸積層フラックスゲートの構成を示す。二軸センサ構成とするために、励磁用の正方形スパイラルコイルを兼用して、 x 軸ならびに y 軸センサを直交配置した。このセンサ構成によれば、直交する二軸の磁界成分 H_x , H_y をセンサの中心点で計測でき、2つの独立したセンサを離れた位置に直交配置する場合に比べ、 H_x と H_y の計測

Fig. 5 Schematic illustration of the two-axis flux gate.

点の位置ずれが小さいといった利点がある。励磁用スパイラルコイルと2つの直交8の字コイルは、ポリイミドで裏打ちされた35 μ m厚銅箔の表面に感光性樹脂を塗布した後フォトリソグラフィによってマスクパターンを形成し、ウェットエッチングにより一括加工して製作した。さらに、4枚のCo系アモルファス短冊片をエポキシ系接着剤で接着してセンサを構成した。試作センサのスパイラルコイルの巻数は10、サイズは28mm角である。8の字コイルは巻数3の2つのスパイラルコイルを差動接続して構成した。Co系アモルファス短冊片は、厚さ20 μ m、寸法4mm $\times$ 10mmである。センサの作製は、hand-madeによる工程が多いため、薄膜センサのプロセスにはほど遠く、サイズも大型化している。その意味で、試作センサは薄膜センサの拡大モデルと位置づけている。

3.2 Co系アモルファス磁性薄帯短冊片の磁気特性

Fig.6に、4mm $\times$ 10mmサイズに切断したCo系アモルファス短冊片の磁化曲線（VSMで測定）を示す。この図では、二軸センサに必要な4枚の短冊片の磁化曲線を重ね書きしてある。4枚の短冊片の特性は必ずしも同一ではないが、その差は小さい。短冊形状による反磁界効果のために実効透磁率が低下しており、この場合の飽和磁界 H_s は240 A/m (30e)程度と見積もられた。

Fig.7に、短冊片の複素透磁率を薄膜透磁率⁵⁾で評価した結果を示す。センサへ利用する場合に問題となる磁性体損失を虚部 μ'' で評価するとすれば、周波数の上限は数MHzとなる。

3.3 二軸フラックスゲートの基礎特性

3.3.1 励磁インピーダンス

Fig.8に、センサの励磁インピーダンスの周波数特性を示す。○印は4枚のアモルファス短冊を配置した場合、●印は空心の場合である。磁性体の有無によるインピーダンス差は僅かであり、これはプレーナコイルによる磁性体の励磁が片側のみであること、プレーナコイルに対する磁性体の占有面積が小さいことによる。磁性体の有無によるインピーダンスの差が小さいことから、外部磁界の印加によって磁性体の動作点が非線形領域に移動したとしても励磁インピーダンスはほぼ一定であり、電圧源駆動の場合の励磁電流は磁界に無関係にほぼ一定となる。

3.3.2 磁界検出の基礎特性

Fig.9に、励磁周波数700 kHzの条件下でx軸方向に外部

Fig. 6 Magnetization curves of 4 mm $\times$ 10 mm Co-based amorphous ribbons.

Fig. 7 Complex permeability of 4 mm $\times$ 10 mm Co-based amorphous ribbon.

Fig. 8 Frequency characteristic of the excitation coil impedance.

Fig. 9 Electromotive force across the figure-of-8 coil and exciting current waveforms ($f = 700$ kHz, $I_e = 420$ mA).

磁界を印加して観測したx軸センサの出力波形を示す。反磁界効果による磁性薄帯の実効透磁率の低下と片側励磁によるため、磁性薄帯を飽和近くまで励磁するには大きな励磁電流が必要であった。ここでは、励磁電流420 mAの場合の例を示す。無磁界時の検出コイル起電力には励磁周波数の基本波成分が僅かに含まれるが、これは

(a) x axis sensor

(b) y axis sensor

Fig. 10 Relationship between the external field and the output signal amplitude of the two-axis flux gate.

Fig. 11 Output dc signal V_s versus external field H_{ext} .

Fig. 12 Experimental results obtained with the direction sensor for the earth magnetic field using the two-axis flux gate.

2組の磁性薄帯の特性不揃いや8の字コイルのアンバランスが原因と考えられる。外部磁界の増大に伴い、検出コイル起電力は励磁周波数の倍周波成分が支配的となる。

Fig.10は、二軸フラックスゲートのxならびy軸センサの出力電圧の振幅と外部磁界の関係を励磁電流をパラメータにして示したものである。いずれの場合も、Co系アモルファス短冊片の飽和磁界 H_s (≈ 240 A/m) に相当する外部磁界付近で出力が最大になり、前述した簡易解析の結果と概略一致する。

4. 地磁気方位センサの基礎実験

4.1 信号処理回路を付加したセンサの磁界検出特性

別途作製したバイアス磁界発生コイル⁶⁾を用いてセンサに二軸のバイアス磁界(約100 A/m)を印加し、センサの後段に増幅器と整流回路から成る2チャネルの信号処理回路⁶⁾を接続して基礎実験を行った。

Fig.11に、信号処理回路出力と外部磁界の関係を示す。周波数700 kHz、励磁電流420 mA、直流バイアス電流172 mAとして実験を行った。なお、試作センサの二軸の磁界感度が必ずしも等しくないため、それぞれの信号処理回路利得(約15倍)の微調整を行っている。図において、磁界の正負と出力の正負が反転関係にあるのは信号処理回路の最終段に反転増幅器を用いているためである。回路出力で換算される磁界感度は約3.8 mV/(A/m)であった。また、ノイズレベルから換算される磁界の検出限界は約0.24 A/m (3 mOe)であり、地磁気検出を目的とすればほぼ十分な磁界分解能を有すると考えられる。

4.2 地磁気方位センサの基礎実験

地磁気による方位検出の実験結果をFig.12に示す。地磁気に対する回転角 θ に対して、x軸とy軸の出力はほぼ $\sin \theta$, $\cos \theta$ で変化しており、地磁気による方位検出が可能であることが分かる。しかしながら、hand-madeによる作製のため、x軸とy軸のセンサの直交関係が不完全であり、現状では数度以上の方位検出誤差がある。

6. まとめ

同一面上に形成される励磁用正方形スパイラルコイルと検出用8の字コイル、Co系アモルファス短冊片を用いて積層フラックスゲート二軸センサを試作し、地磁気方位センサの基礎実験を行った。磁性短冊片の反磁界効果の影響と励磁電流による起磁力が小さいために、大きな励磁電流が必要であった。薄膜プロセスによれば、磁性層の薄層化による反磁界効果の低減とプレーナコイルの微細化による巻数増大が期待されるので、励磁電流の大幅な低減が可能になるものと考えられる。

参考文献

- 1) S. Kawahito, H. Satoh, M. Sutoh, Y. Tadokoro; Sensors and Actuators, A54, pp.612-617, 1996.
- 2) 吉見健一, 藤山陽一, 務中達也, 山田康晴, 中西博昭, 吉田多美男; 島津評論, 56, No. 1-2, 19, 1999.
- 3) S. Kawahito, C. Maier, M. Schneider, M. Zimmermann, H. Baltes; IEEE J. Solid-State Circuits, 34, 12, pp.1843-1851, 1999.
- 4) 三浦陽, 佐藤敏郎, 山沢清人; 第23回日本応用磁気学会學術講演概要集, 5pPS-2, 146, 1999.
- 5) 宮澤安範, 藪上信, 渡辺光春, 板垣篤, 安藤仁司, 山口正洋, 荒井賢一, 佐藤敏郎, 山沢清人, 佐々木義人, 畑内隆史; 電気学会マグネティックス研究会, MAG-99-92, 1999.
- 6) 佐藤敏郎, 山沢清人, 三浦陽; 電気学会マグネティックス研究会, MAG-00-135, 2000.