

磁気回路法によるフラックスゲート形電流センサの非線形解析

学生員 橋口英司, 正員 古関隆章 (東京大学)

非会員 Eric Favre, 正員 芦谷正裕, 正員 立花敏文 (LEM)

Non-linear magnetic circuit analysis of flux-gate current sensor

Eiji Hashiguchi, Student, Takafumi Koseki, Member (The university of Tokyo)

Eric Favre, Non-member, Masahiro Ashiya, Member, Toshifumi Tachibana, Member (LEM)

The authors have made fundamental modeling of a fluxgate current sensor based on magnetic circuit. The authors have applied two methods, the first one is the fourth Runge-Kutta method and the second one is the method by connecting analytic solutions. Although both numerical schemes have been derived from identical differential equations, only the results of the latter method are plausible. The authors are proposing a reliable calculation method for actual designs of fluxgate current sensors from their numerical and experimental investigations.

キーワード : フラックスゲート, 磁気回路, 非線形性, 飽和, ヒステリシス, 電流センサ

Keywords : Flux-gate, Magnetic Circuit, Non-linearity, Saturation, Hysteresis, Current sensor

1. 序論

フラックスゲートセンサ⁽¹⁾は、第2次世界大戦中には航空機による磁気探査や潜水艦探知、地磁気利用の鉱物資源探査、磁性金属探知機などに広く使用された磁界センサである。また、人工衛星に搭載され、月磁気の検出に試みられたりもした。フラックスゲートセンサは、地磁気利用の自動車用方位センサ（電子コンパス）や、人工衛星の姿勢制御用地磁気センサなどに使用されてきたものである⁽²⁾。フラックスゲート式は、冷却が必要なSQUIDを除けば最も高感度な検出方式であり、零点及び検出出力の温度依存性に優れた特長がある。

フラックスゲートセンサは、ホール素子に比べ検出磁界強度感度が高く、高い分解能を有するという特長がある。また、フラックスゲートを電流センサとして使用することもある。電流センサとして用いる場合は、ホール素子では検出不可能な数百mA～10mAの微小電流検出のために使用される。

このように微小電流の検出に優れたフラックスゲート形電流センサの設計を進める上で、実用に足るシミュレータが存在すれば非常に有利である。また、フラックスゲートに用いられる鉄心は非線形特性を有しており、その解析手法の検討は学問的にも意味のあることである。ここでは、最も単純な構成を持つ直流測定用のフラックスゲート形電流センサのシミュレータ作成を通じ、非線形特性を持つ鉄

心の解析手法の検討を進めることを目的としている。

2. フラックスゲート形電流センサの動作原理

フラックスゲートセンサは、高透磁率磁性体の透磁率が飽和磁束付近で急激に消失する非線形特性を利用した磁界センサである。次のFig.1のような円環状の鉄心に電圧を印加し、電流を流すことを考える。鉄心の中心部には、非測定電流 I_e を流す。

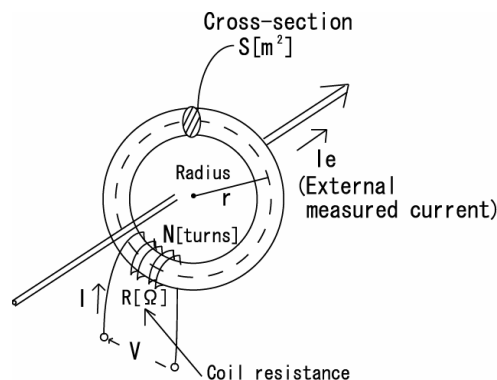


Fig.1 Structure of flux-gate current sensor

入力電圧が矩形波の場合、入力電圧、出力電流はFig.2⁽³⁾、及びFig.3⁽³⁾のようになる。なお、Fig.2は $I_e=0$ の場合、Fig.3は $I_e>0$ の場合であり、ここでは I_e はFig.1に示す向きを正としている。

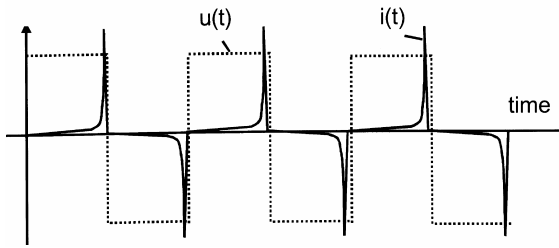


Fig.2 Voltage steps and current response ($I_e=0$)

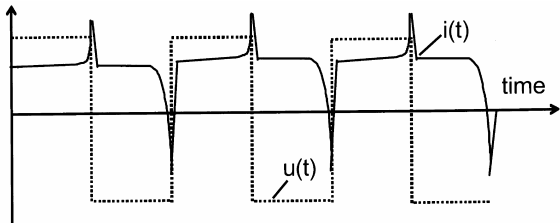


Fig.3 Voltage steps and current response ($I_e>0$)

Fig.2 ($I_e=0$)では、正負の領域において出力電流波形は対称となっている。しかし、Fig.3 ($I_e>0$)では、この対称性からずれが生じている。Fig.3の場合、 I_e により生じる磁束が正の出力電流により生じる磁束と同方向であり、それが重畳されるため、正の領域においては飽和に達する時間が早くなり、逆に負の領域では遅くなる。出力電流の閾値との交差を検知して特性を切り替える機能を矩形波の入力電圧が有している場合、 $I_e=0$ では入力電圧の正のパルス幅と負のパルス幅は等しくなるが、 $I_e>0$ であると正のパルス幅は負のパルス幅より小さくなる。また、 I_e が負の場合には、反対にパルス幅は正のものが負のものより大きくなる。可変である入力電圧の周期における正のパルス幅の割合は、外部電流 I_e に比例する。それゆえ、これを検出することにより I_e を測定することができる。これがフラックスゲート形電流センサの動作原理である。

3. 磁気回路法によるモデル化

解析を行うために、ここでは前述のFig. 1に示す磁気回路モデルを検討した。ここで、 V は入力電圧、 I は出力電流、 R はコイル抵抗($R=5319[\Omega]$)、 r は鉄心の半径($r=20.5[\text{mm}]$)、 N はコイル巻き数($N=5000[\text{turns}]$)、 S は鉄心の断面積($S=7.84[\text{mm}^2]$)、 I_e は外部電流である。

Fig. 1を用いた解析では、 t を時刻として以下の基本式(1)-(3)を解けばよいことになる。

$$V(t) = RI(t) + NS \frac{dB(t)}{dt} \quad (1)$$

$$2\pi r H(t) = NI(t) + I_e \quad (2)$$

$$H(t) = \left(\frac{dH}{dB} \right) (t) \cdot B(t) + H_0(t) \quad (3)$$

鉄心の材料はパーマロイである。鉄心は飽和とヒステリシスの非線形性を持っている。磁化曲線の近似には最初はシグモイド関数を用いたが、この近似の場合、飽和領域において透磁率が0となってしまう。本解析においては、飽和領域でも有限の小さな透磁率を設けることが物理的にも数値計算上においても重要となっており、この近似は適さない。そこで、本論文においては、折れ線により近似を行った。その非線形HB曲線をFig. 4に示す。Fig. 4, 5は磁化特性を表している。なお、上述の(3)式は、磁化特性の折れ線による近似の表式である。

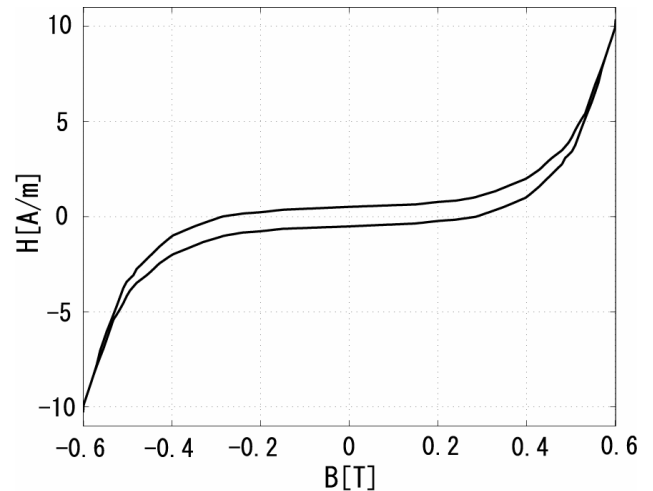


Fig.4 HB-hysteresis curve (1)

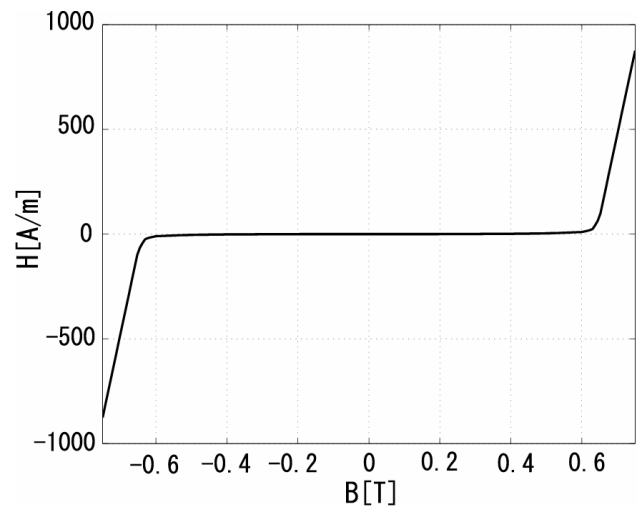


Fig.5 HB-hysteresis curve (2)

$-0.572[\text{T}]$ から $0.572[\text{T}]$ の範囲では、2本のヒステリシス曲線を、その他の範囲では単一の曲線を仮定した。

4. Simulinkを用いたルンゲ・クッタ法による解析

まず、MatlabのSimulinkを用いて、ルンゲ・クッタ法により解析を行った。Fig. 6はSimulinkで使用したブロック図である。動的な計算の整合性を保つために、ここでは仮想的なローパスフィルタを挿入してある。

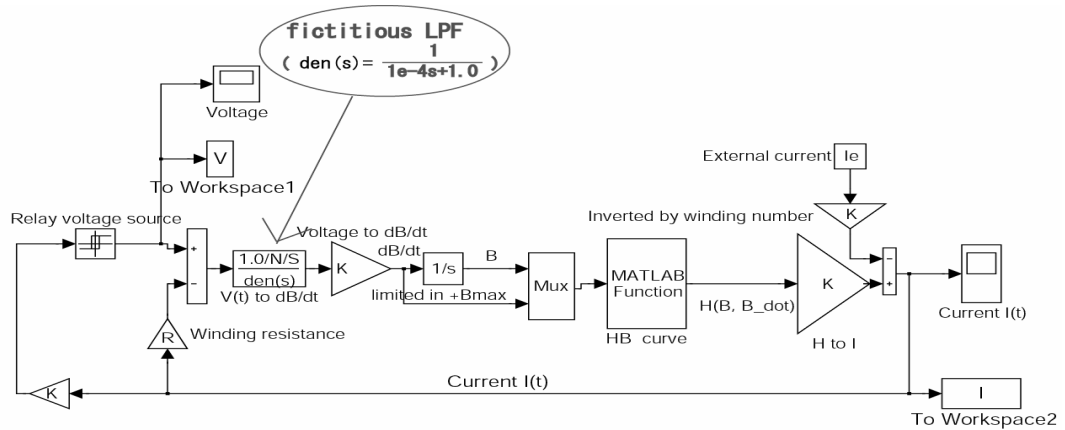


Fig.6 Block diagram using in Simulink

Fig.6では、[MATLAB Function]ブロックがHB近似曲線の関数を有している。数値積分のアルゴリズムは、4次のルンゲ・クッタ法を用いた。入力電圧は、振幅が V_0 ($V_0=5.4[V]$)の矩形波であり、Fig.6における[Relay]ブロックには、出力電流の閾値の交差を検出して入力電圧を切り替える特性がある。閾値 I_0 は $I_0=7.2 \times 10^{-4}[A]$ である。Fig.7は、このシミュレーションにおける入力電圧、及び出力電流の解析結果を示している。

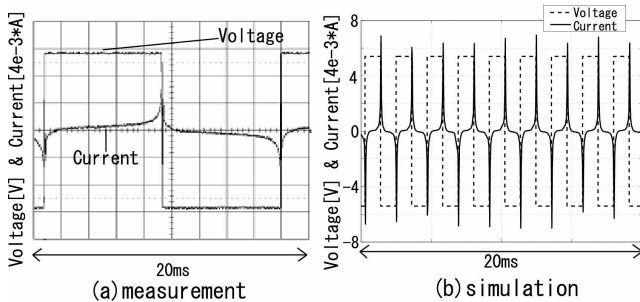


Fig.7 Input voltage and output current ($I_e=0[A]$)

Fig.7において、波形自体は類似しているが、入力電圧の周期が実験値のものと比較して遥かに小さくなってしまっていることが分かる。Fig.8に示すステップ状の入力電圧に対する応答がこの原因を表わしている。Fig.8にステップ応答を示す。

Simulinkを用いた解析におけるステップ応答では、非常に大きなオーバーシュートが見られる。このシミュレーションでは、入力電圧の切り替え点が理論解のものよりも早くなっている。その結果、入力電圧の周期が実験値のものよりも遥かに小さくなってしまふ。

本解析での磁気回路は、RL直列回路である。回路の時定数は、透磁率 μ に比例する。 $\tau=L/R$ (L :コイルのインダクタンス)で与えられる時定数は、HB曲線の飽和領域になると、 L の低下により劇的に小さくなる。ルンゲ・クッタ法は陽解法なので、原理的には1ステップ前のHB曲線の情報に基づいて積分の式を決めている。このことが入力電圧の切り替え点の算出ミスの大きな原因と考えられる。また、このシ

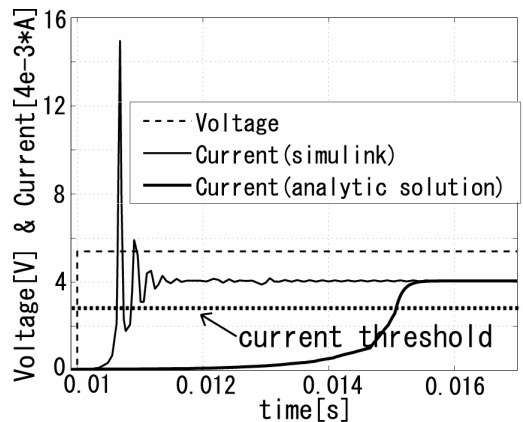


Fig.8 Step response

ミュレーションではタイムステップの影響も重要となる。これらの困難を考えると、Simulinkのようなブラックボックスであるシミュレータを安易に適用するだけでは、現実的設計を目的とする本課題のような問題の場合、満足できる結果を得ることはできない、とすることができる。

5. 厳密解のつなぎ合わせによる解析

本研究では、磁化特性の近似に折れ線を用いている。折れ線の各部分において、解くべき微分方程式は線形のものとなり、それゆえ厳密解が求まる。

前述の基本式(1),(2),(3)より、(4)に示す状態方程式、及び(5)に示す出力方程式が得られる。

$$\frac{dB(t)}{dt} = \left(-\frac{2\pi f R}{N^2 S} \frac{1}{\mu(t)} \right) \cdot B(t) + \frac{1}{NS} \left(V(t) + \frac{R}{N} I_e - \frac{2\pi r R}{N} H_0(t) \right) \quad (4)$$

$$I(t) = \frac{1}{N} (2\pi r H(t) - I_e) \quad (5)$$

(4)式、及び(5)式より、以下に示す漸化式(6)、(7)が得られる。ここで、 T_s はタイムステップであり、 nl は離散化した漸

化式におけるステップ数を表す。

$$B(n+1) = e^{A(n)T_s} \cdot B(n) + \frac{e^{A(n)T_s} - 1}{A(n)} u(n) \quad (6)$$

$$I(n) = \frac{1}{N} (2\pi r H(n) - I_e) \quad (7)$$

$A(n)$ 、及び $u(n)$ は次に示す(8)式、(9)式のものである。

$$A(n) = -\frac{2\pi r R}{N^2 S} \frac{1}{\mu(n)} \quad (8)$$

$$u(n) = \frac{1}{NS} \left(V(n) + \frac{R}{N} I_e - \frac{2\pi r R}{N} H_0(n) \right) \quad (9)$$

6. 解析結果と実験値との比較・検討

前述の厳密解のつなぎ合わせによる解法によって得られた入力電圧、及び出力電流の波形をFig.9に示す。

Fig.9より、シミュレーション結果は計測波形と類似していることが分かる。また、外部電流 I_e と時間幅の比 $t1/T$ の関係をFig.10に示す。なお、 $t1$ は入力電圧の正のパルス幅の時間であり、 T は矩形波である入力電圧の周期である。

Fig.10において、シミュレーション結果と測定結果はほぼ一致しており、また I_e と $t1/T$ の間には明確な線形性が存在することが読み取れる。この結果から、2番目の解法、厳密解のつなぎ合わせによる解法により良好なシミュレータが得られたと結論づけることができる。

7. まとめ

本論文では、フラックスゲート形電流センサを磁気回路法によりモデル化し、非線形特性である鉄心の磁化特性を折れ線により近似することで解析を行った。使用した2つの解法により得られた結果を測定結果と比較することで、次の結論を得た。

(1)最初に用いた解法、4次のルンゲ・クッタ法による解法では測定結果と比較して満足のできる結果は得られなかった。このような動作点により時定数が急速に変化する系の解析においては、陽解法による数値解析では信頼できる結果を得ることはできない。

(2)鉄心の磁化特性を折れ線で近似したことにより、厳密解が求まる。そのつなぎ合わせによる解法では、最初の解法によるものよりも良好な結果が得られた。これは、この2番目の解法では、各々のタイムステップにおいて系の本質的な性質を解析的に扱っているためであると考えられる。この解法により得られた結果は、測定結果とほぼ一致したものであるため、この後者のシミュレータは、フラックスゲート形電流センサの設計上、十分に実用に足るものであると結論づけられる。今後は、漏れ磁束のFEMによる定量評価や、特性のコイル抵抗依存性の検討などを行い、更に別のタイプのフラックスゲート形電流センサへと対象を拡

張し、その解析を行う予定である。

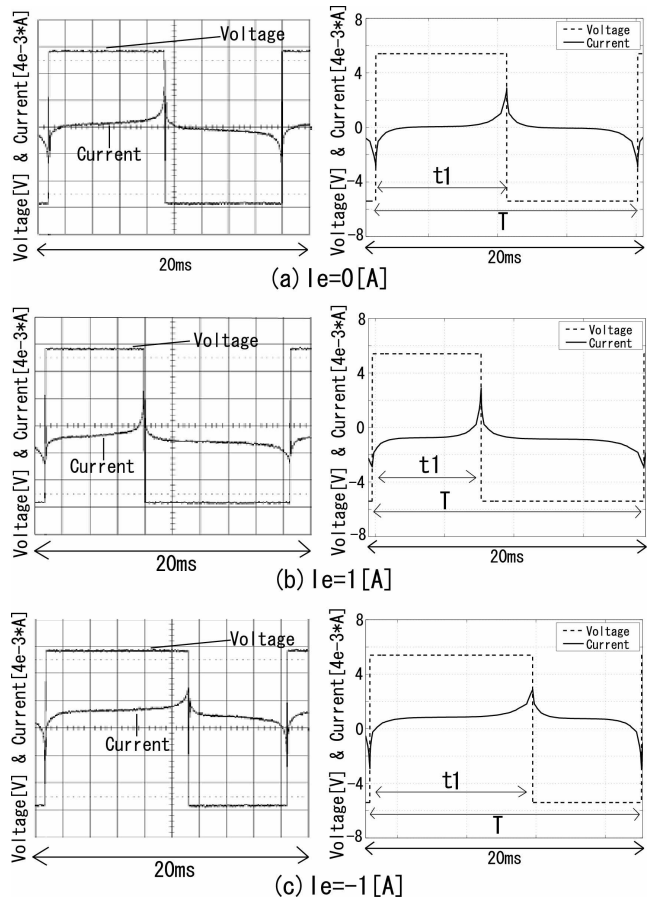


Fig.9 Input voltage and output current (Left: Measurement Right: Simulation)

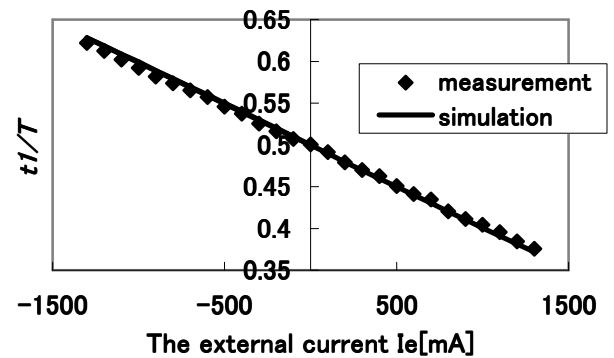


Fig.10 Relation the fraction of pulse width with the external measured current I_e

文 献

- (1) P.Ripka : 「Review of fluxgate sensors」, Sensors and Actuators, A33, 129-141 (1992)
- (2) 毛利佳年雄 : 「磁気センサ理工学」, コロナ社, (1998)
- (3) LEM : 「Isolated current and voltage transducers Characteristics-Applications-Calculations」, 3rd Edition