



|                  |                                                                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 低雑音化を対象としたフラックスゲート形磁力計の最適磁心形状                                                     |
| Author(s)        | 和田, 龍彦                                                                            |
| Citation         | 北海道大学医療技術短期大学部紀要, 4, 23-31                                                        |
| Issue Date       | 1991-12                                                                           |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/37533">https://hdl.handle.net/2115/37533</a> |
| Type             | departmental bulletin paper                                                       |
| File Information | 4_23-32.pdf                                                                       |



# 低雑音化を対象としたフラックスゲート形 磁力計の最適磁心形状

和田 龍彦

## Optimum Core-Shape for Noise Reduction of Fluxgate Magnetometer.

Tatsuhiko Wada

### Abstract

The fluxgate magnetometer has been widely used due to its high sensitivity, low noise performance ( $-10^{-5}$  A/m), simple construction, high reliability and directly measuring the vector component of magnetic field.

Recently, there has been an increasing interest in the measurement of biomagnetic information such as magneto-cardiogram. For such a measurement, the magnetometer with extremely high sensitivity is required SQUID magnetometer which is commonly used with the ultra low noise level of  $10^{-8}$  A/m. It extended the lower bound of detectable field considerably. However, since it requires special equipments such as a liquid helium system, its application is limited to special purposes.

There are other types of magnetometers, but some of them cannot measure the vector components of magnetic field, and some of them are not as sensitive as the fluxgate magnetometer. Therefore, we intended to develop the fluxgate magnetometer which enables us to obtain biomagnetic information and others. For this purpose, further sensitivity is required and magnetic-core noise has to be minimized.

In this paper we present a optimum core-shape for noise reduction of fluxgate magnetometer which was based on the second-harmonic type of magnetic modulator. Troidal type, rectangular type and square type were selected as the core-shapes.

### 要 旨

フラックスゲート形磁力計は、常温使用の磁力計として高感度かつ低雑音の特徴を有し、また高信頼性やベクトル成分の検出が出来ることから、磁気計測を対象とした各分野で広く用いられている。その一つが心磁図や肺磁図など、

最近各所で研究されつつある生体情報計測である。これらは、主として近年開発された SQUID (超伝導微小磁界測定素子) を用いて計測されているが、この SQUID 法は液体ヘリウムによる極超低温を必要とするので、経済性や可搬性に問題点を残している。さらに、ホール素子形などの他の磁力計もあるが、フラックスゲート形

に比べて低感度であり、また磁界のベクトル検出が出来ないなどの問題もあり、現状ではフラックスゲート形磁力計のより低雑音化が望まれる。本報では、上記内容を考慮し、フラックスゲート形磁力計の感度ならびに雑音両面に関連する各種磁心形状について詳細なる検討を行った。

## 1. はじめに

フラックスゲート形磁力計（外部入力形磁気変調器）は、直流からの磁気センサとして高感度かつ低雑音の特徴を有しており、その利用範囲は広く、地球物理、応用計測工学ならびに生体工学など各分野で用いられている。一方、ジョセフソン素子を利用した SQUID（超伝導微小磁界測定素子）形磁力計の出現により、磁界の測定下限界は  $10^{-8} \text{Am}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ （磁束密度換算  $10^{-14}$  テスラ）以下<sup>1)</sup>にまで改善された。しかし、この SQUID 形磁力計は液体ヘリウムを用いた超伝導を利用するもので、経済性や可搬性など実用面に対する問題点を残している。従って、郊外や宇宙など無人無保守を前提とする磁気測定を行う場合には、簡易かつ常温使用のフラックスゲート形磁力計が有利となる。

さて、筆者らは以前より心磁図<sup>2)</sup>や肺磁図<sup>3)</sup>などの磁気的生体計測、さらには応用計測としての微小変位計<sup>4)</sup>など、フラックスゲート形磁力計による新情報の検出や応用分野拡大を対象としたいいくつかの検討を行ってきた。さらに、この磁力計の分解能を極力 SQUID 形に近づけるため、最も本質的雑音たる磁心雑音の低減策を、使用材質や巻線構成面<sup>5)</sup>から検討してきた。しかし、強磁性体の利用ならびに外部入力形ゆえの問題となる反磁界<sup>6)</sup>や磁心形状に関しては、その検討例も数少なく、中でも筆者らによる強磁性体導磁路利用策<sup>7)</sup>が実用的報告例とされている。

本報では、フラックスゲート形磁力計の最適磁心形状を見出すために、同種材質による各種

形状の磁心を用いて、励振振幅および励振インピーダンスをパラメータとした感度および雑音に関する実験的検討を行った。その結果、感度面から細長長方形形状環状磁心が、また雑音面からトロイダル磁心が比較的有利になるなど、いくつかの新しい諸結果を得た。本報ではこれらの実験的諸結果とその検討内容について報告する。

## 2. 磁心形状に関連するフラックスゲート形磁力計の感度と磁心雑音

### 2-1 感度に関して

フラックスゲート形磁力計の動作原理は、変調波の倍周波成分を出力信号とする倍周波形磁気変調法<sup>8)</sup>に基づいており、高分解能かつ高弁別比の特徴を有している。一方、倍周波形磁気変調法の応用としては、入力巻線に微小電流を入力し、磁界変換後に変調を行う電流検出器などがあげられる。なお、専門分野においてはその入力方法の相違から、フラックスゲート形磁力計を外部入力形、また入力巻線による変調器を内部入力形と称している。

さて、フラックスゲート形磁力計で特に問題となるのは用いる磁心が強磁性体のために、汎用形のホール素子法や超高感度形の SQUID 法と異なり、外部入力信号磁界  $H_0$  を低減する方向に反磁界  $H'$  が発生することである。従って磁心内部の実効的入力磁界  $\delta H$  は、

$$\begin{aligned}\delta H &= H_0 - H' \\ &= H_0 / \{1 + K(\mu - 1)\}\end{aligned}\quad (1)$$

となる。ここで、 $K$  は磁心形状より決まる反磁界係数を、 $\mu$  は磁心の比透磁率を表す。

一方、磁気変調器においては多大入力によるメモリー効果を避けるために、励振磁界  $\hat{H}$  を磁心の飽和磁界強度  $H_s$  に比べて十分大きくするのが一般的である。そのために(1)式に示した  $\mu$  は磁化 ( $B-H$ ) 特性曲線上の微分透磁率  $\mu(t)$  として、反磁界  $H'$  とともに時間的に変化する量となる。従ってフラックスゲート形磁力計の  $\delta H$

は、

$$\delta H = H_0 / [1 + K \{ \mu(t) - 1 \}] \quad (2)$$

となる。なお、 $\mu(t)$ は $\hat{H}$ や励振周波数 $f$ などの各条件によって異なり、その結果 $\delta H$ が変化して入力感度も各励振状態で変化することとなる。

さて、内部入力形磁気変調器の感度 $S_{int}$ は磁心断面積 $S_c$ などの固定量以外に、磁心の最大透磁率 $\mu_m$ が関連し、すでに次式で与えられている<sup>8)</sup>。

$$\begin{aligned} S_{int} &= V_2 / \delta H \\ &= -8 N_d \cdot S_c \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_m \cdot (2 H_s / \hat{H}) \\ &\quad \times \{ 1 - (2 H_s / \hat{H})^2 \}^{1/2} \cdot \sin 2 \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $V_2$ は検出巻線(巻線数を $N_d$ )に誘導される倍周波成分電圧を、また $\mu_0$ は真空中の比透磁率を表す。

次に外部入力形すなわちフラックスゲート形磁力計の感度 $S_{ext}$ は、

$$\begin{aligned} S_{ext} &= V_2 / H_0 \\ &= 4 \omega \cdot N_d \cdot S_c \cdot \mu_a^{(2)} \end{aligned} \quad (4)$$

となり<sup>9)</sup>、 $\omega = 2\pi f$ で、 $\mu_a^{(2)}$ は反磁界を考慮した磁心の磁化特性と励振波形から算出するフーリエ係数を示す。なお、 $\mu_a^{(2)}$ 中に存在する反磁界係数 $K = 0$ とおけば、(4)式は(3)式の結果と一致することを付記しておく。

以上から、感度決定項目としては検出巻線数 $N_d$ 、磁心断面積 $S_c$ 、励振周波数 $f$ の他に、本来の励振条件たる励振振幅や励振インピーダンス、さらには磁心形状より決まる反磁界係数 $K$ などがあげられる。従って各種励振条件をパラメータとした感度に関する検討が必要となる。

## 2-2 雑音に関して

フラックスゲート形磁力計の測定下限界を決める主要因は、バルクハウゼン雑音やゆらぎ雑音<sup>10)</sup>などによる磁心雑音である。図1に示す実用形入力構成において磁心雑音を低減するためには、検出巻線 $N_1$ と $N_2$ の不均衡度 $\gamma$ を極力低減しなければならない。すなわち単一磁心差

動構成における磁心雑音の低減率 $\eta$ は、上下磁心脚( $N_1$ ,  $N_2$ 下の磁心部)の相関を決める結合係数を $\alpha$ として、

$$\eta = \{ (1 - \alpha)^2 + 2 \alpha \gamma^2 \}^{1/2} \quad (5)$$

となる。ただし、 $\gamma = \delta N / N$ で、 $N_1 = N + \delta N$ 、 $N_2 = N - \delta N$ とする。なお、これらの詳細は既報論文<sup>5)</sup>を参照されたい。

低雑音化に対しては、上記のごとく検出巻線の平衡度を改善するとともに、単一磁心内で発生する本来の磁心雑音を極力低減しなければならない。そのためには容易に対称構成にでき、かつ漏れ磁束の少ないトロイダル形や、入力増大による感度増加が期待できる細長形など、各種磁心形状に対する実験的な比較検討を必要とする。さらに磁心断面積変化に関する検討などでは、感度同様に磁心雑音についても励振条件が大きな影響を及ぼすので、これらの総合的検討を行わねばならない。

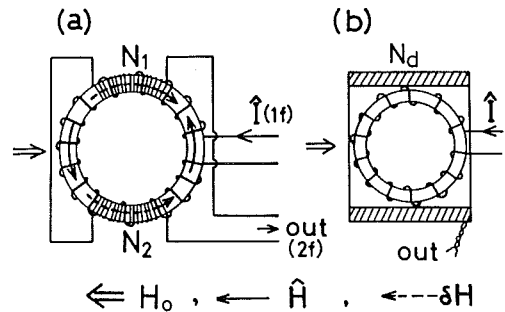


図1 フラックスゲート形磁力計の入力部構成例 (a) 2巻線形、(b) 1巻線形

## 3. 各種磁心形状に関する実験

### 3-1 測定構成について

本実験に対するフラックスゲート形磁力計の測定構成例を図2に示す。同図(a)は外部入力時の感度測定構成で、外部入力磁界 $H_0$ は巻線数225回・直径6 cm・長さ30 cmのソレノイドコイルで与え、被測定磁心はこのコイルの中央部に設置する。なお測定時に問題となる地磁気

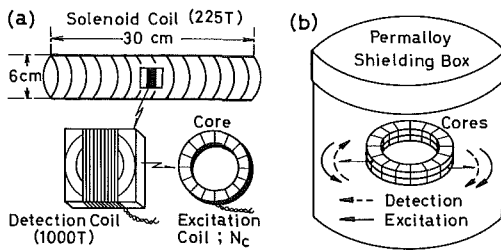


図2 感度および磁心雑音の測定構成例  
(a)感度測定の構成、(b)磁心雑音の測定

(水平成分約 30 A/m)などは、予めコイルに電流を流して打ち消し、その後実際の  $H_0$  を与えるものとする。

次に磁心雑音測定に関しては、図2 (b)の磁心対構成で磁心1個当りの出力雑音値を得、これを先に測定した感度で入力磁界換算値に等価変換することとした。本報では、この換算値に関係する前述検出巻線の不平衡度  $\gamma$  は予め測定した値(いずれも最大-50 dB以下)に余裕度を持たせて、便宜上-40 dB一定とした。また地磁気の変動など雑音測定に支障のある磁界を除くために、-60 dB程度の磁気シールド効果を持つ二重パーマロイ箱の中に設置した。

検出巻線からの出力はFFTによる低雑音高入力形の緩衝増幅器(Buffer Amp.)に入力され、その後信号成分すなわち倍周波(2f)成分のみを得るための選択増幅器(励振波:1f, 3倍周波:3fのフィルタを含む)を通して、同期整流のためのLock-in-Amp.(時定数0.3 sec)に

入力される<sup>5)</sup>。また、外部入力形すなわちフラックスゲート形の検出巻線  $N_d$  は全て1,000回として、内部入力形すなわち巻線入力形の場合のみ100回とした。励振巻線数  $N_c$  は磁心断面積変化に対する条件をそろえるために、各磁心で励振磁束が一定となるよう変化させたが、中空長方形など磁心形状の比較時にはその断面積  $S_c$  が一定ゆえ、 $N_c=100$  回に統一した。なお、励振周波数は一般に良く用いられる1 kHzとした。

### 3-2 実験結果

#### (A) 各種磁心形状変化について

本実験用磁心材は、材質による変化を除くために同一ロットで製作した10000 H フェライト材とした。初めに外部入力形における各種磁心形状変化の測定結果例として、図3に感度、図4に磁心雑音を、またこれらの被測定磁心構成を表1に示す。なお同図中の横軸は励振磁界  $\hat{H}$  とし、cとdの磁心は断面積  $S_c$  が他の磁心に比べて2倍に、さらに“中空長方形(角なし)”とは磁心四すみの角部を取除いて一様の  $S_c$  としたものである。この測定結果、感度の面では反磁界の少ない中空長方形が有利となるが、実用上の測定下限界を表す  $\sqrt{Hz}$  当りの入力磁界雑音換算値  $H_{np-p}$  は、磁心内部雑音の少ないトロイダル形が有利となる。また中空正方形の磁心における  $H_{np-p}$  は、同種数個の磁心とも  $H \geq 200$  A/m で横ばいの傾向を示し、さらにこの値も再現性の無い状態であった。

表1 測定用各種磁心形状の構成

| 磁 心 形 状 |        | 磁 心 構 成   |     |     |     |
|---------|--------|-----------|-----|-----|-----|
| 記号・図面印  | 名 称    | 入力磁路長     | 磁心幅 | 磁心厚 | 断面積 |
| a    ×  | 中空正方形  | 15.5mm    | 2mm | 2mm | 4mm |
| b    ●  | 中空長方形  | 20.5      | 2   | 2   | 4   |
| c       | 〃      | 20.5      | 2   | 4   | 8   |
| d    ◎  | 〃      | 20.5      | 4   | 2   | 8   |
| e    ○  | 〃（角無し） | 20.5      | 2   | 2   | 4   |
| f    △  | トロイダル形 | 内径18、外径22 |     | 2   | 4   |

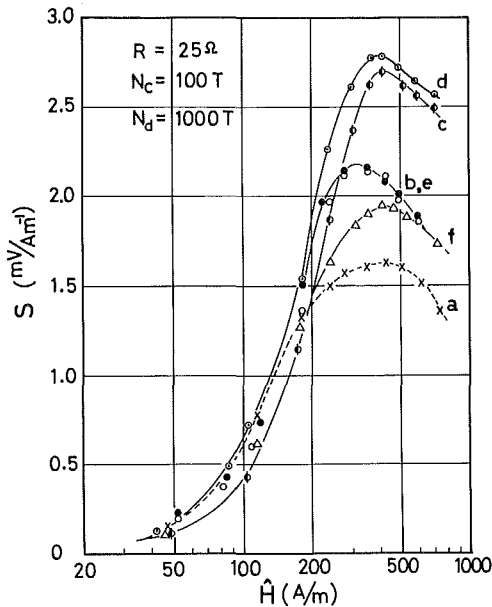


図3 各種磁心形状による感度測定結果

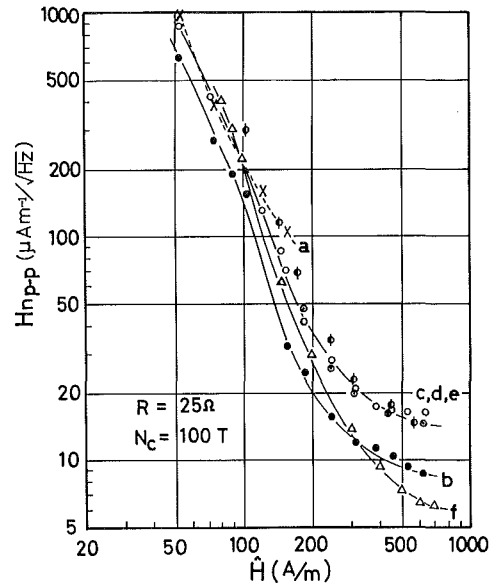


図4 各種磁心形状による磁心雑音測定結果

### (B) 励振インピーダンスおよび磁心断面積変化について

本実験使用の各種磁心寸法ならびに断面積については、表2に示す4種のトロイダル磁心を用い、その材質としては(A)項で前述したと同様に10000 H フェライト材を利用することとした。資料番号1番、 $S_c = 4 \text{ mm}^2$ の磁心による外部入力時の感度測定結果を、励振インピーダンス  $R$  をパラメータとして図5に示す。また同一励振インピーダンス時の磁心断面積変化に対する最大感度を、表2の資料番号順に表3に示す。次に巻線入力形と比較した場合の感度ならびに磁心雑音を図6と図7に示すが、この測定では励振条件をそろえるため、励振巻線数  $N_c = 200$  回が  $S_c = 16 \text{ mm}^2$  に、また  $N_c = 50$  回が  $S_c = 4 \text{ mm}^2$  に相当する。励振インピーダンス変化に対する巻線入力形ならびに外部入力形の磁心雑音測定結果を、図8 ( $S_c = 4 \text{ mm}^2$ ) と図9 ( $S_c = 16 \text{ mm}^2$ ) に示す。

次に磁心断面積をパラメータとした感度および雑音の測定結果を図10と図11に示す。この

表2 測定用トロイダル形磁心の構造

| 資料番号 | 内 径  | 外 径  | 磁心厚 | 断面積 |
|------|------|------|-----|-----|
| 1    | 18mm | 22mm | 2mm | 4mm |
| 2    | 18   | 22   | 4   | 8   |
| 3    | 16   | 24   | 2   | 8   |
| 4    | 16   | 24   | 4   | 16  |

表3 磁心断面積変化に最大感度の実測値

| 測定磁心 |     | 最大感度 (mV / A·m⁻¹) |        |
|------|-----|-------------------|--------|
| 資料番号 | 断面積 | R = 25            | R = 50 |
| 1    | 4mm | 1.95              | 1.82   |
| 2    | 8   | 2.42              | 2.18   |
| 3    | 8   | 2.51              | 2.25   |
| 4    | 16  | 3.05              | 2.76   |

実験に際しては、磁心断面積変化により生ずる変調器インピーダンス変動を励振巻線および  $R$  の変化で補い、常に励振条件が一定となるようにした。なお同一断面積 ( $S_c = 8 \text{ mm}^2$ ) で、磁心厚と磁心幅に相違のある資料番号2と3の磁心については、感度・磁心雑音とも同様値の得ら

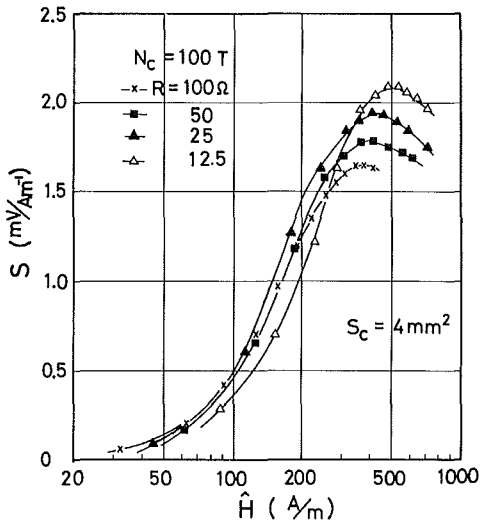


図5 励振インピーダンス変化に対する感度測定結果 (磁心断面積  $S_c = 4 \text{ mm}^2$ )

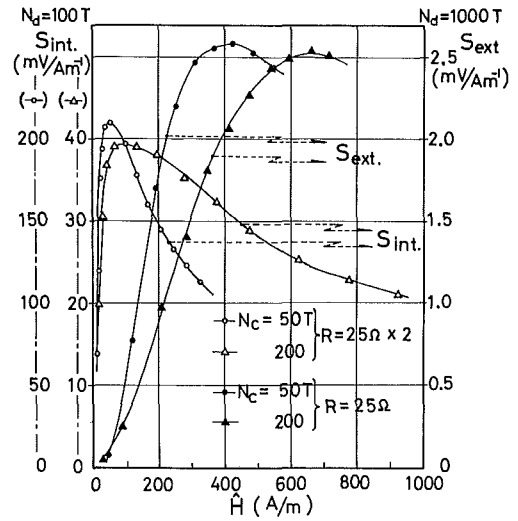


図6 巻線入力形との感度比較

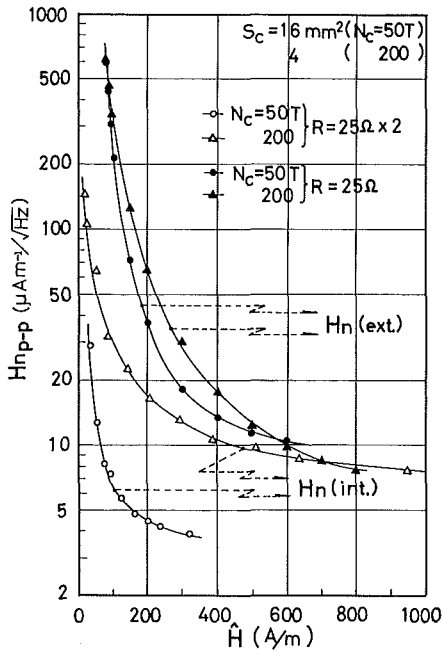


図7 巻線入力線との磁心雑音比較

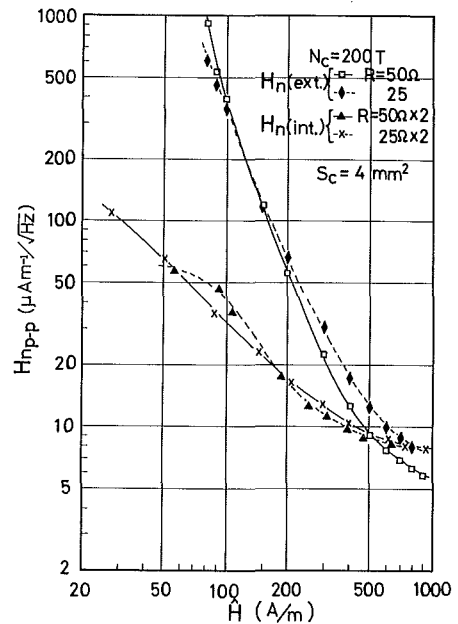


図8 フラックスゲート形と巻線入力形の磁心雑音 (磁心断面積  $S_c = 4 \text{ mm}^2$ )

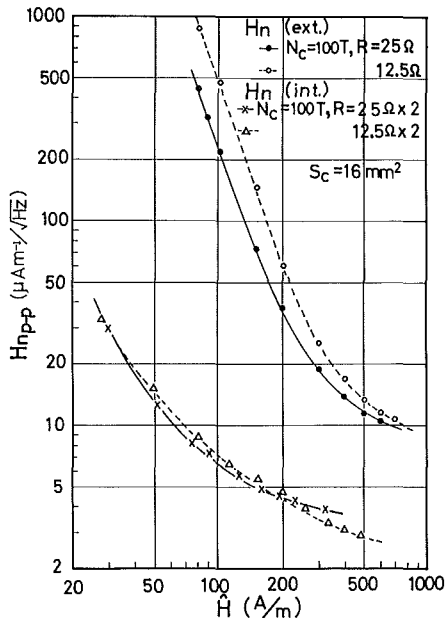


図9 フラックスゲート形と巻線入力形の磁心雑音 (磁心断面積  $S_c=16\text{mm}^2$ )

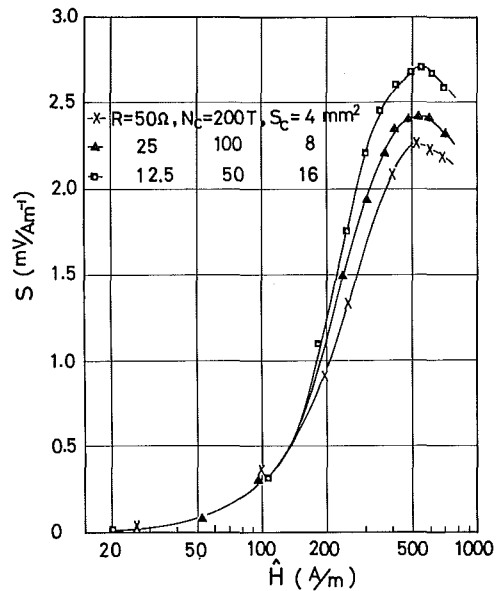


図10 トロイダル形磁心の磁心断面積変化による感度測定結果

れたことを付記する。

#### 4. 検 討

各種磁心形状を対象として、フラックスゲート形磁力計に関連する感度ならびに雑音の実験的検討を行った。その結果、同一磁心断面積 ( $S_c = 4 \text{ mm}^2$ ) 同一磁路長 ( $l = 6.2 \text{ cm}$ ) の各種形状においては、中空長方形 (角なしを含む) が約  $2.2 \text{ mV}/A \cdot m^{-1}$  ( $S_c = 16 \text{ mm}^2$  では約  $2.7 \text{ mV}/A \cdot m^{-1}$ ) の最高感度となったが、入力磁界換算雑音値  $H_{np-p}$  では、トロイダル形が  $6 \times 10^{-6} A \cdot m^{-1}/\sqrt{Hz}$  の最低値を得た。従って極力大きな出力を得る場合には、低反磁界で磁心内部入力磁界の増加され得る細長磁心が有利となるが、実用に際しては測定下限界を決める  $H_{np-p}$  の点から、励振磁束が比較的一様で磁心内に乱流の生じ難いトロイダル形が有利となる。しかし低雑音かつ高感度形を目的とする場合は、2-2項で前述した検出巻線の平衡度分だけ磁心雑音電圧が相殺出力されるので、入力電圧換

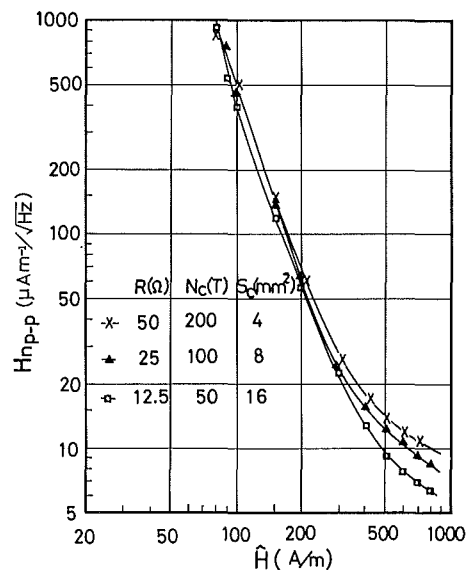


図11 トロイダル形磁心断面積変化による磁心雑音測定結果

算雑音値が数～数  $10 \times 10^{-9} V/\sqrt{Hz}$  (検出巻線数  $N_d=1,000$  回, 検出巻線不平衡度  $\gamma=-40 \sim -60 \text{ dB}$  として) になる。それゆえ実際設計

に関しては、磁心形状の選択以外に検出回路の低雑音化や、検出巻線数の増加策を検討しなければならない。なお中空正方形磁心に関しては、約  $8 \times 10^{-5} \text{ Am}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下に磁心雑音が低下せず、しかも再現性の乏しい結果となった。当初、この原因は磁心角部のメモリー効果と考えて熱消磁 (120℃で5時間) を行ったが、他の磁心とは異なり、良好な結果は得られなかった。従って若干の構造的非対称性など、磁心製造時に関連することが原因と考えられる。

次に励振インピーダンス  $R$  の変化に対するフラックスゲート形磁力計の感度は、図5ならびに表3の結果から、 $R$  が小さいほど増加の傾向を示した。これは巻線入力形と同様に、電圧励振の方が電流励振に比べて高感度となる<sup>9)</sup> の結果と一致する。また  $R$  変化に対する  $H_{np-p}$  の測定結果を図8、図9に示したが、これに関してはほぼ同程度の結果で、感度のような顕著な変化は見られなかった。しかし感度増加の点から、十分電圧励振と見なしうるよう、また励振源の電力増幅器に多大な負荷を与えぬよう、さらに励振磁界を制御しうる範囲まで  $R$  は低減すべきと考える。

巻線入力形との比較に関しては図6～図9に測定結果を示した。感度については反磁界の影響が2～3桁の差をもたらすが、 $H_{np-p}$  については検出巻線平衡度のためにほぼ同程度となる。ここで  $H_{np-p}$  の測定結果に対する検出巻線の不平衡度  $\gamma$  は3～1項に前述したごとく-40 dB一定としたが、実際には-50 dB以下にできうることから外部入力形すなわちフラックスゲート形の  $H_{np-p}$  はさらに1桁程度低減でき、結果的には巻線入力形に優ることとなる。以上の検討結果から、フラックスゲート形磁力計の測定下限界は  $10^{-7} \text{ A/m}$  の桁となろう。

次に、磁路長を一定とした場合の磁心断面積  $S_c$  の変化に対する感度ならびに  $H_{np-p}$  は、図10、図11に示したごとく、若干断面積の大きいほど有利となる。感度に関しては、第2章前述

の反磁界係数  $K$  が実効的入力磁界に影響を及ぼし、この  $K$  は磁心の平均磁路長および断面積による磁心半径をそれぞれ  $l$ 、 $d$  とすると、 $K = (l/d)^{-0.72}$  なる関係がある。従って断面積の大きいほど反磁界が減少するので、感度もそれに伴い増加することとなる。また磁心雑音に関しては、感度の増加率以上に減少しているが、これは断面積増加に伴う磁壁の増加および内外壁の距離増加により、磁心内部で発生している雑音がランダムになったことと考えられる。

以上を総合的に検討すると、フラックスゲート形磁力計の最適磁心形状はトロイダル磁心もしくはこれに近い楕円状磁心で、感度増加の点から断面積は大きく、さらに反磁界の点から磁路長の長い方が望ましい。しかし実用に際しては極力小形化が望まれ、その場合は検出巻線数を増すと同時に、その高平衡度による雑音低減策を押し進めるべきであろう。なお、内外入力形で最大感度を得る励振磁界  $\hat{H}$  が1桁以上異なるのは、磁心内部入力を決める一要因たる透磁率  $\mu$  が磁化特性の各位置で変化するためである。

## 5. おわりに

本報ではフラックスゲート形磁力計を主対象として、そのS/N改善に対する最適磁心形状に関して、磁心の形状および磁心断面積変化、さらにはこれらに関連する励振条件などの検討を行った。その結果、各種磁心形状における励振動作や、感度・雑音などに関する新たな知見を得、外部入力形磁気変調器すなわちフラックスゲート形磁力計に対する最適設計の見通しを得た。

なお、本報で得られた主な結果は下記諸点である。

(1) 同一励振条件下 (励振周波数; 1 kHz, 励振インピーダンス; 25  $\Omega$ , 検出巻線数; 1000回) での磁心形状変化による感度は、中空長方形、トロイダル形、中空正方形、の順で、それ

ぞれ 2.2, 1.9, 1.65 mV/Am<sup>-1</sup> を得た。なお、被測定磁心の断面積は 4 mm<sup>2</sup> 磁路長は 6.2 cm に統一した。

(2) 励振インピーダンス変化に対する測定結果、電圧励振に近いほど感度は上昇し、断面積 4 mm<sup>2</sup> の 10000 H トロイダル磁心 (変調器入力インピーダンス約 10 Ω) では、励振インピーダンス 12.5 Ω, 検出巻線数 100 回の場合に、最高感度約 2.2 mV/Am<sup>-1</sup> を得た。なお、断面積 16 mm<sup>2</sup> では 3.2 mV/Am<sup>-1</sup> になることを付記しておく。

(3) 同一磁路長トロイダル磁心による磁心断面積変化に関しては、4 ~ 16 mm<sup>2</sup> の範囲で測定を行ったが、断面積減少で反磁界を減らしても変調器本来の感度が減少することとなり、かえって外部入力形すなわちフラックスゲート形磁力計では感度・雑音の両面から磁心断面積を増加したほうが有利となる。

(4) 外部入力形での入力換算雑音値  $H_{np-p}$  は、検出巻線の不平衡度  $\gamma$  を -40 dB として、いずれの場合も  $\text{数} \times 10^{-6} \text{ Am}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度となったが、 $\gamma$  の値は別種実験から -50 dB 以下とできうるので、実際の超低雑音フラックスゲート形磁力計の測定下限界は  $10^{-7} \text{ A/m}$  の桁となる。

#### 参考文献

- 1) W. W. Webb : Superconducting Quantum Magnetometer., IEEE trans. Magnetism, Vol. MAG-8, No. 1, pp 51-60, 1972.
- 2) 和田 : 生体情報検出用高感度フラックスゲート形磁力計の検討, 電気学会マグ研資, Vol. MAG-82-16, pp 77-85, 1986.
- 3) 藤巻, 小谷, 千代谷, 他 : 肺磁図測定における逆問題, 電気学会マグ研資, Vol. MAG-82-16, pp 67-75, 1982.
- 4) T. Wada, J. Nakazoe, Z. Abe : A Novel Displacement Transducer Using The Second-Harmonic Type of Magnetic Modulator., IEEE trans. Instrum. & Meas., Vol. Im-26, No. 4, pp 377-383, 1977.
- 5) 和田, 阿部 : 単一磁心による磁気変調器の磁心雑音低減化, 電気学会論文誌, Vol. 98-C, No. 10, pp 327-333, 1978.
- 6) 山田 : 電磁気学「電気学会大学講座」電気学会発刊, pp 224-228, など
- 7) 小椋, 和田, 神谷 : 外部入力形磁気変調器における最適入力用導磁路構成の検討, 電気学会マグ研資, Vol. MAG-82-128, pp 51-59, 1982.
- 8) F. C. Williams, S. W. Noble : The Fundamental Limitation of Second-Harmonic Type of Magnetic Modulator., Proc. IEE Vol. 97, pt. II, pp 445-459, 1950.
- 9) 和田 : 高感度フラックスゲート形磁力計, 電気学会マグ研資, Vol. MAG-87-28, pp 35-44, 1987.
- 10) 中添, 和田, 阿部 : フェライト磁心による倍周波形磁気変調器のドリフトの検討, 電気学会論文誌, Vol. 97-C, No. 7, pp 133-138, 1977.