交流励磁における磁心雑音の測定

大阪大学 白江 公輔

1. ま え が き

磁気変調器は微小直流信号検出のためのすぐれた変調器であるが、その検出レベルは磁心の呈するゆらぎ雑音によって抑えられる。磁心を用いたアナログ記憶装置においても、分解能は磁心の特性の変動によって制限される。磁性薄膜を用いた磁区制御素子では磁壁移動の再現性の度合によって性能が支配される。また磁心を二値素子として用いる場合においてもスイッチングのしきい値が変動し安定な動作のためにはより大きな駆動磁界を必要とする。このように磁心を用いた装置においては、磁心の特性の変動が装置の性能を支配する要因の一つと考えられる。

磁心の特性の変動、あるいは雑音に関連した研究の中では、バルクハウゼン雑音に関する研究が有名である。⁽¹⁾⁽²⁾ しかしバルクハウゼン雑音は、磁化過程における磁化の強さの不連続な跳躍のときに生ずるパルス列であって、これが直ちに磁心の特性の変動をあらわすわけではない。各磁化過程における跳躍に再現性があれば磁心特性の変動とはならないからである。磁心を使用した装置については、磁気変調器や磁気増幅器の雑音が研究されている。⁽³⁾⁽⁴⁾

しかし磁化特性の再現性に関してはほとんどデータが見あたらない。そこで筆者は磁化特性の再現性を調べるために、交流励磁された磁心の誘起電圧に着目し誘起電圧波形の再現性に関する実験を行なった。誘起電圧は励磁の各周期ごとに変動を示す。すなわち各周期の任意時刻における誘起電圧の大きさは、ある平均値のまわりに変動する。以下この変動量を磁心雑音と呼ぶことにする。

本文ではこのような磁心雑音を種々な材料、種々な

(a) 磁心雑音測定回路

(b) 動作タイムチャート

第1図 磁心雑音測定装置

Fig. 1. Measuring device for the magnetic core noise.

条件のもとで測定した結果について述べ、磁心雑音の性質を明らかにする。

2. 磁心雑音の測定方法⁽⁵⁾

第1図に磁心雑音測定装置の原理図を示す。磁心を周波数 f (Hz) 周期 T 秒の三角波電流で励磁すると誘起電圧 $e_k(\theta)$ を生ずる。 k は各周期に付した番号、 θ は各周期のはじめよりはかった時間である。一般に $e_k(\theta)$ と $e_{k+1}(\theta)$ の差は常に零にはならず、正負に変動する。磁心雑音 $\Delta e_k(\theta)$ を次式によって定義する。

$$\Delta e_k(\theta) \triangleq e_k(\theta) - \overline{e(\theta)} \quad (1)$$

ここに $\overline{e(\theta)}$ は $e_k(\theta)$ の平均値である。

装置の動作は次のとおりである。まず各周期のはじめより θ の時刻にサンプルパルス S を発生させる。これで誘起電圧をサンプルし、一周期間その値をホールドする。ホールド電圧を $V_k(\theta)$ であらわすと

$$V_k(\theta) = G e_k(\theta) \quad (2)$$

Measurements of the Magnetic Core noise Excited by AC Field.
By K. SHIRAE, Member (Faculty of Engineering Science,
University of Osaka)
白江公輔: 正員, 大阪大学基礎工学部

第1表 試料磁心一覧表

Table 1. Materials and dimensions of the sample cores.

試料 (No.)	材 質	厚さ (μm)	直径 (mm)	幅 (mm)	層 数	H_c (D.C) (Oe)
2	4%Mo-78%Ni-Fe	4	16	3	20	0.07
11	"	10	"	"	"	0.05
13	50%Ni-Fe	"	"	"	"	0.22
15	"	4	"	"	"	0.29
16	"	25	"	5	"	0.1
19	"	4	"	"	"	0.38
40	"	10	30	3	1.3	0.25
41	"	4	"	"	"	0.44
43	"	25	"	5	"	0.13

G : 増幅率 (10^3 倍)

となる。

これを周期 T に比べてじゅうぶん長い時定数の微分回路に加えると $V_k(\theta)$ の変動分 $\Delta V_k(\theta)$ が次式のように得られる。

$$\Delta V_k(\theta) = G \Delta e_k(\theta) \dots\dots\dots (3)$$

この式の $\Delta e_k(\theta)$ は(1)式の $\Delta e_k(\theta)$ と厳密には等しくないが、実用的見地から(3)式によって(1)式の代用とした。具体的には T が $2 \sim 8 \times 10^{-3}$ 秒に対し、微分回路の時定数は 1.5 秒であるから、 $\overline{e(\theta)}$ として約 200~800 サイクルの平均値をとったことになる。

さらに $\Delta V_k(\theta)$ を二乗回路に加え、その出力 E より磁心雑音の二乗平均値 $\overline{n^2(\theta)}$ が次式で求められる。

$$\overline{n^2(\theta)} \triangleq \overline{\Delta e_k^2(\theta)} = E/G^2 \dots\dots\dots (4)$$

サンプルパルス S の発生時刻 θ (サンプル点) を 0 から $T/2$ まで変えることにより、誘起電圧波形の任意の点における磁心雑音を測定することができる。

装置の詳細、磁心雑音の同定は付録に記した。

以上の実験に用いた磁心の材質、寸法などは第1表のとおりである。

3. 時系列としてみた磁心雑音の性質

〈3・1〉 実験結果 第2図に $\Delta V_k(\theta)$ の波形を示す。第3図は $\Delta V_k(\theta)$ で示した磁心雑音の振幅密度分布特性である。第4図は磁心雑音の自己相関関数 $R(\theta, n)$ を示す。 $R(\theta, n)$ は次式に示すように n サイクル離れた磁心雑音間の相関関数であり、 $\overline{n^2(\theta)}$ で規準化してある。

$$R(\theta, n) = \overline{\Delta e_k(\theta) \Delta e_{k+n}(\theta)} / \overline{n^2(\theta)} \dots\dots (5)$$

第5図は磁心雑音のパワースペクトルである。

〈3・2〉 実験結果の考察 第2図は $\Delta V_k(\theta)$ を数 10 サイクルにわたって示したにすぎないが、さらに、長い期間の観測から、磁心雑音は周囲条件が一定である限り定常不規則性を示すことが知られた。第3図よ

(上) 誘起電圧波形 e_k (100 mV/div)
(下) ホールド電圧波形 $\Delta V_k(\theta)$ (10 V/div)
横軸: 5 ms/div

第2図 誘起電圧とホールド電圧波形

Fig. 2. Wave forms of the induced voltage and holding voltage.

第3図 磁心雑音振幅の分布

Fig. 3. Amplitude distribution of the magnetic core noise.

第4図 磁心雑音の自己相関関数

Fig. 4. Auto correlation function of the magnetic core noise.

り磁心雑音の振幅は平均値 0 の正規分布を示すことがわかる。第4図、第5図で 2.3 Oe はメジャーループ、0.45 Oe はマイナーループ動作である。メジャーループ動作のときは、数サイクル離れると相関関数はほとんど 0 になるが、マイナーループ動作のときは、数 10 サイクル離れた点でもまだ大きな相関が存在する。パワー

第5図 磁心雑音のパワースペクトル

Fig. 5. Power spectrum of the magnetic core noise.

スペクトルは、マイナーループ動作ではほぼ周波数に反比例するが、メジャーループ動作では、高い周波数領域に平坦な部分がみられる。すなわちメジャーループでは白色雑音に近い成分が存在し、これは相関関数が急速に0に収束することに対応する。マイナーループ動作のときは、各サイクルで磁化は未飽和であり、あるサイクルに生じた変動は消滅することなく次のサイクルへもちこされるため大きい相関が持続するものと考えられる。

以上の性質は任意のサンプル点において存在し、また特定の試料に限らず認められた。

得られた結果をまとめると次のようになる。

(a) 磁心雑音は一定条件のもとで定常不規則性を示し、振幅は正規分布に従う。

(b) 磁心雑音はメジャーループでは各サイクル間でほぼ独立に変化するが、マイナーループでは、数10サイクルはなれた間にも大きい相関が存在する。

(c) 磁心雑音は $1/f$ 雑音であり、メジャーループにおいては白色雑音成分が加わる。

4. 誘起電圧波形と磁心雑音の関係

サンプル点を変えて磁心雑音を求め、誘起電圧波形および磁束密度との関係を明らかにする。

〈4・1〉 実験結果 第6図(a)は誘起電圧および磁心雑音の半周期間における分布を示す。(b)図は測定時の B - H 曲線であり、(c)図は(a)図に示した磁心雑音を磁束密度に関して画いたものである。

〈4・2〉 実験結果の考察 第6図(a)よりわかるように、磁心雑音は誘起電圧の増加に伴い増加するが誘起電圧が最大になる点で最大にならず、誘起電圧が

(a) 誘起電圧および磁心雑音の分布

(b) B - H 曲線 (c) 磁束密度に対する磁心雑音の分布
試料: No. 13 励磁: 1 kHz, 1.5 Oe

第6図 磁心雑音および誘起電圧の図形

Fig. 6. Patterns of the magnetic core noise and induced voltage.

下降する点にいたって最大値に達する。すなわち磁心雑音は誘起電圧より遅れて最大値に達する。(c)図についてみれば、磁心雑音は磁束密度が $-B_s$ から0までは小さく、0から $+B_s$ の間で大きく $+B_s$ に達する直前において最大となる。マイナーループで動作している場合も、磁心雑音は、誘起電圧より遅れて最大値を示し、最大磁束密度に達する直前において最大になる。

以上のような磁心雑音の分布特性は 50% Ni-Fe のみならず、4% Mo-78% Ni-Fe, 3% Si-Fe, Mn-Zn フェライト磁心においても同様に測定された。

以上の結果より次の性質をあげることができる。

(d) 半周期内における磁心雑音の分布は誘起電圧波形より遅れた分布を示し、飽和に達する直前において最大となる。

第 7 図 励磁速度による磁心雑音および誘起電圧の変化

Fig. 7. Changes of magnetic core noise and induced voltage by the field strength.

5. 励磁条件による磁心雑音の変化⁽⁶⁾

励磁電流の振幅および周波数に対する磁心雑音の変化について述べる。本章では磁心雑音の特性量としてその最大値を選んだ。

〈5・1〉 実験結果 第 7 図は、50% Ni-Fe 磁心の厚さの異なる試料について、種々の励磁条件下での誘起電圧と磁心雑音の最大値を示す。励磁電流は各試料の $H_c(D.C.)$ の 3~30 倍の振幅とし、周波数は 0.5, 1, 2 kHz であるが、横軸は励磁速度 (三角波電流のこう配で、振幅×周波数に比例する) をとった。

〈5・2〉 実験結果の考察 同一試料については第 8 図に示すように、誘起電圧波形と磁心雑音の分布図形はほぼ相似しており、それぞれの特性量として最大値のみをとっても、励磁条件による変化の傾向を知るのに大きな誤りを生じないと考えられる。

第 7 図において、1 Oe/ms 付近で性質の異なる二つの部分にわかれている。この値以上の部分はメジャーループで動作している範囲である。この領域では誘起電圧は、励磁速度および試料の厚さに比例している。一方、磁心雑音の励磁速度に対する変化は試料の厚さによって変わり、4 μm の試料では、ほぼ励磁速度の平方根に比例して増加するが、厚さが増すほど増加率は減少し、25 μm の試料では励磁速度によらず一定である。したがって S/N 比は厚い試料ほど大きく、励磁

第 8 図 励磁条件による磁心雑音および誘起電圧波形の変化

Fig. 8. Changes of the wave forms of the magnetic core noise and induced voltage by the field strength.

速度が大きくなるに従い大きくなる。横軸は周波数を一定とすれば励磁振幅を示し、振幅を一定とすれば周波数を示すが、誘起電圧および磁心雑音はともに励磁速度に一意的に依存している。一方、マイナーループ領域では、メジャーループにおけるように規則的な性質は見いだされなかった。

以上の結果より、磁心雑音について次のような性質をあげることができる。

(e) メジャーループ動作において、誘起電圧が励磁速度に比例して増加するのに対し、磁心雑音の増加率をそれより小さく、磁心の厚さが増すほど増加率は小さくなる。

6. 磁心雑音の磁束レベル上および空間上の相関

各サイクル間の磁心雑音の相関については第 3 章に述べたが、ここでは一サイクル内で、二つのサンプル点間の相関、磁心上の異なる二点間の相関について述べる。

測定装置は第 9 図に示すように、第 1 図のサンプルホールド回路を二系列 (I), (II) 設けたものである。各系列のサンプルパルス S_1, S_2 の発生時刻を θ_1, θ_2 とすれば、相関関数 $R_B(\theta_1, \theta_2)$ は乗算回路の出力 E_2 より次式のように求められる。

$$R_B(\theta_1, \theta_2) = \frac{\Delta e_k(\theta_1) \Delta e_k(\theta_2)}{\Delta e_k^2} = E_2 / G^2 \quad (6)$$

第 9 図 磁心雑音の相関関数測定回路

Fig. 9. Measuring circuit for the correlation of the magnetic core noise.

第 10 図 空間上の相関関数測定用試料

Fig. 10. Sample for the measurement of the space correlation.

θ_1, θ_2 は二つの磁束レベル B_1, B_2 に対応するから $R_B(\theta_1, \theta_2)$ は磁束レベル上での相関を示すことになる。

空間上の相関関数の測定には第 10 図のように、二つの出力巻線をもった試料を用い、各出力巻線を第 9 図の (I), (II) へ接続すれば乗算回路出力 E_2 より空間上の相関関数 $R_p(\theta, \alpha)$ が次式のとおりに求まる。

$$R_p(\theta, \alpha) = \overline{\Delta e_{1,k}(\theta) \Delta e_{2,k}(\theta)} = E_2 / G^2 \quad (7)$$

ここで α は二つの巻線のなす中心角、 θ は両系列に共通のサンプル時刻である。

〈6・1〉 実験結果 第 11 図 (a) は誘起電圧波形、

第 11 図 磁束レベル上の相関関数

Fig. 11. Correlation function between the different flux levels.

第 12 図 空間上の相関関数

Fig. 12. Space correlation function.

雑音の二乗平均値、および相関関数 $R_B(\theta_1, \theta_2)$ を示す。これは θ_2 を $0.63 \times T/2$ に固定し、 θ_1 を変化させたものである。(b) 図は磁束密度に関して $R_B(\theta_1, \theta_2)$ を画いたもので、 θ_2 を種々の値にとった場合が示されている。

第 12 図は厚さの異なる試料について空間上の相関関数の測定結果であり、 $\alpha=0$ の値で規準化してある。 θ に関しては平均値で示した。

〈6・2〉 実験結果の考察 θ_1 における変動量からそれより遅れた点における変動量 θ_2 への寄与率を γ とすると次式の関係がある。

$$\Delta e_k(\theta_2) = \Delta e_k'(\theta_2) + \gamma \Delta e_k(\theta_1) \quad (8)$$

ここで $\Delta e_k'(\theta_2)$ は θ_1 における変動と無関係な変動量である。(6) 式に代入すれば (9) 式を得る。

$$R_B(\theta_1, \theta_2) = \gamma \overline{\Delta e_k^2(\theta_1)} \quad (\theta_2 > \theta_2) \quad (9)$$

θ_2 が θ_1 より小さい場合は、 θ_2 から θ_1 への寄与率を δ として (10) 式を得る。

$$R_B(\theta_1, \theta_2) = \delta \overline{\Delta e_k^2(\theta_2)} \quad (\theta_2 < \theta_2) \quad (10)$$

磁化が磁壁移動で行なわれるものとする、ある点での磁壁の動きの変動がその後の磁壁の運動に影響する度合いが寄与率であると考えることができる。第 11 図の相関関数より計算した寄与率の一例を第 13 図に示す。磁化過程の前半に生じた変動は、後半に負の影響を及ぼす。

すなわち後半の磁心雑音は前半に生じた変動の反作用の集積とみることができる。これに対し前半の磁心

第 13 図 変動の寄与率

Fig. 13. Contribution of the fluctuation.

雑音は個々の変動の加算として生ずる。さらに寄与率は全磁束範囲にわたって存在し波動状に分布しているから、磁壁移動の変動は一種の定在波として磁心全域に伝搬しているものと思われる。

空間上の相関関数は、第 12 図よりわかるように、規則的な性質を示し、二点間の距離の指数関数としてあらわすことができる。

$$R_p(\theta, \alpha) = R_p(\theta, 0) \exp(-\alpha\theta) \quad \dots\dots (11)$$

m は試料の厚さに反比例する定数である。用いた試料は閉磁路を形成しているから、これは漏れ磁束の存在を意味し、離れた場所では磁壁移動の障害が互に独立に変動しているものと考えられる。

以上の結果より磁心雑音について次のような性質をあげることができる。

(f) 磁化過程内のある点における磁心雑音は、それ以前の雑音の影響を受け、かつ以後の雑音にも影響を及ぼす。影響の度合(寄与率)は正負にわたる。

(g) 閉磁路を形成する磁心においても、異なる場所の磁心雑音は相異り、両者の相関は距離/厚さの指数関数に逆比例する。

7. 磁心雑音の温度特性⁽⁷⁾

試料の温度を変えたときの磁心雑音の変化について述べる。試料は巻線後エポキシ樹脂で封印した。

〈7・1〉 実験結果 -180°C から $+170^{\circ}\text{C}$ の間で実験した。第 14 図は二、三の試料の $B-H$ 曲線および磁心雑音の温度変化特性である。第 15 図は誘起電圧および磁心雑音の最大値の温度依存性を示す。試料は 50 Ni-Fe および 4% Mo-78% Ni-Fe

第 14 図 温度による $B-H$ 曲線および磁心雑音の変化Fig. 14. Temperature dependence of the $B-H$ loop and magnetic core noise.

を用いた。

〈7・2〉 実験結果の考察 第 15 図に示されるように磁心雑音は温度に対し山形に変化し、だいたい室温より低い温度で最大になる。一方、誘起電圧の温度による変化は雑音に比べてゆるやかである。キュリー点の低い (80°C) Mn-Zn フェライトの磁心雑音を測定したところ、温度の上昇に従って単調に減少し、キュリー点で消失した。この結果より推して、上記金属磁心においても、測定範囲以上の温度においてさらに減少傾向をたどるものと考えられる。

第 14 図の No. 2 試料は雑音分布が双峰性を示す。これは $B-H$ 曲線の蛇行特性に対応しており、温度の上昇とともに蛇行特性が減少し、 $+157^{\circ}\text{C}$ においては普通の $B-H$ 曲線を示すようになると雑音分布も単峰性にもどる。双峰特性の第一のピークと第 2 のピークの温度変化は第 16 図に示すように、第 2 ピークは温度により急激に変化するのに対し、第 1 ピークはほとんど変化しない。双峰特性は 4% Mo-78% Ni-Fe 磁

第 15 図 磁心雑音の温度依存性

Fig. 15. Temperature dependence of the magnetic core noise.

第 16 図 双峰性雑音の温度変化

Fig. 16. Temperature dependence of the magnetic core noise with the double peaks.

第 17 図 磁心雑音のモデル

Fig. 17. Model of the magnetic core noise.

心のいくつかに見いだされたが、50% Ni-Fe 磁心には見いだされなかった。

以上の結果より磁心雑音について、次のような性質をあげることができる。

(h) 磁心雑音は温度によって変化する。高温領域では温度上昇とともに雑音は減少する。また低温領域では温度降下とともに雑音は減少する。

(i) B - H 曲線の形の变化により雑音分布の形が変化する。

8. 磁心雑音の現象論的考察

第 17 図 (a) に示すように x なる位置に存在する磁壁の運動方程式は、次式であらわされるものとする。

$$dx/dt = g\{h - p(x)\} \quad (12)$$

ここに、 g : 磁壁のモビリティ、 $p(x)$: 磁壁に作用する復元力、 h : 印加磁界の強さ

複数の磁壁が存在する場合は i 番目の磁壁に関して

第 18 図 波動状変動モデルによる磁心雑音の解析

Fig. 18. Analysis of the magnetic core noise using the way fluctuation model.

$$dx_i/dt = g\{h - p_i(x_1, x_2, \dots, x_h)\} \quad (13)$$

が成立つ。添字は磁壁の番号をあらわし、 n 個の磁壁が存在するものとする。復元力 p_i はすべての磁壁から影響を受けるものとする。磁束密度 B は $x_1, \dots, x_n$ の和に比例するから $F(B) = \sum p_i$ を用いて

$$dB/dt = K\{h - F(B)\} \quad (14)$$

K : g に相当

を得る。

$F(B)$ は直流磁化曲線に近い形となるものと考えられるから (b) 図のように仮定する。 h が $-H_m$ から $+H_m$ まで変化するとき、 $-B_s$ から ①までは dB/dt は小さく、①をこすと $F(B)$ はほぼ一定になるので、 dB/dt は増加する。 B が ②に近づくとき $F(B)$ はふたたび増加しはじめるので dB/dt は減少し $+B_s$ にいたって 0 となる。したがって、(c) 図のように誘起電圧 e が求められる。雑音は $F(B)$ の変動によって生ずるものであってこれを $\Delta F(B)$ とすれば、(14) 式は

$$d(B + \Delta B)/dt = K\{h - [F(B + \Delta B) + \Delta F(B + \Delta B)]\} \quad (15)$$

となる。 ΔB は $\Delta F(B)$ によって生じた変動量であるが B に比べじゅうぶん小さいものとする

$$d\Delta B/dt + K\partial F/\partial B \Delta B = -K\Delta F(B) \quad (16)$$

が得られ、雑音をあらわす微分方程式となる。 $\partial F/\partial B$ は点線で示すように ①と②の間で小さく $d\Delta B/dt$ は大きい。

もし、 $\Delta F(B)$ が一様に分布するものとするれば $d\Delta B/dt$ は e より進むことになるから実験結果を説明するためには、 $\Delta F(B)$ は (b) 図の鎖線で示すように B の後半で増加するように分布しなければならない。 $F(B)$ は磁壁の復元力の関数であるから、磁化の

最初に微小な変動をうけた磁壁は、これを種にして次第に別の径路に移りながら移動をつづけるものと考えられこのようにして $\Delta F(B)$ が B の後半で増加するものと考えることができる。

次に磁心雑音の励磁速度による変化を考える。簡単のために $F(B)$ として第 18 図(a)のように折線を仮定し、磁束密度は 0 から $B_M(2B_s)$ まで変わるものとする。磁界を $h=at$ (a : 励磁速度) とすると(14)式より次式を得る。

$$dB/dt + K(B/\mu) = Kat \quad \dots\dots\dots (17)$$

これより誘起電圧 e は(18)式のように求められる。

$$e = \mu a \{1 - \exp(-Kt/\mu)\} \quad \dots\dots\dots (18)$$

雑音をあらわす微分方程式は(19)式のようになる。

$$d\Delta B/dt + K\Delta B/\mu = -K\Delta F(B) \quad \dots (19)$$

$\Delta F(B)$ として、(b)図のように正弦波状変動を仮定すると、これは次式のようにあらわせる。

$$-\Delta F(B) = M \sin(2\pi q B/B_M + \varphi) \quad \dots (20)$$

ここに、 M : 変動量、 q : 波数

B の変化は(c)図に示すようなものであるが直線とみなして $B=B_M/T_s$ とおくと、(19)式は簡単にとけて磁心雑音の実効値として(21)式を得る。

$$\sqrt{\left(\frac{d\Delta B}{dt}\right)^2} = \frac{1}{2} \frac{KM2\pi q(\mu^2 a/K B_M)}{\sqrt{1 + \{(2\pi q(\mu^2 a/K B_M)\}^2}} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 $\bar{M}$: M の平均値、 T_s : 磁化反転に要する時間

であり $T_s=B_M/\mu a$ なる関係がある。(18)式および(21)式をグラフに画くと(b)図になる。これより誘起電圧が励磁速度に比例するのに対し、磁心雑音は q 、 K あるいは μ によって異なった変化をすることがわかる。第 7 図においては試料の厚さによって磁心雑音の増加率が異なっているが、これは K が厚さに逆比例することが主な理由と考えられる。

雑音の原因として磁化特性 $F(B)$ に波動状変動を仮定したが、第 6 章で述べた寄与率の分布はその裏づけの一つになる。また、波数 q は実測されており 4~20 という値が得られている。⁶⁾

9. む す び

交流励磁における磁心雑音の性質を実験により明らかにした。主な性質は次のとおりである。(i) 時系列としてみた磁心雑音は $1/f$ 雑音に近い。(ii) 1 サイクル内での雑音の大きさの分布は誘起起電圧波形と似た形をもつが雑音の最大値は誘起電圧の最大値より遅れ飽和に近い点で生ずる。(iii) 磁心雑音は励磁速度と

ともに増加するが、厚い磁心ほど増加率は小さい。 S/N 比は厚いものほど、また励磁速度の大なるほど良くなる。(iv) 1 サイクル内で磁心雑音は異なった磁束レベル間で正負の相関を示す。(v) 磁心の温度が上昇するとともに磁心雑音は減少する。また低温域においては温度の降下とともに雑音は減少する。

磁壁移動における復元力の変動が波動的に分布すると仮定すると、磁心雑音の励磁速度特性を説明することができた。相関の存在もこの考えで理解できる。

この研究を行なうに際して、ごべん達下さった山口先生、桜井先生、種々ご教示をいただいた電気学会磁気増幅器委員会、非線形磁気応用研究会の方々に厚くお礼申し上げます。

(昭和 46 年 7 月 22 日受付、同 47 年 1 月 10 日再受付)

文 献

- (1) R. M. Bozorth: Ferromagnetism 524 (1951) D. Van Nostrand Co.
- (2) H. Bittel: IEEE Trans. Magnetics MAG-5, 3, 359 (1969)
- (3) F. C. Williams & S. W. Noble: Proc. Inst. Elect. Engrs 97, Pt II, 445 (1950)
- (4) 樋口・菊地: 電学誌 89, 331 (昭 44-2)
- (5) 白江: 非線形磁気応用研究委員会資 NM-41-12 (昭 41-10)
- (6) 白江: 非線形磁気応用研究委員会資 NM-44-7 (昭 44-5)

付 録

(I) 磁心雑音測定装置 測定装置に起因する雑音としては、(i) 増幅系統に発生する雑音、(ii) 励磁電流に含まれる雑音、(iii) サンプル点のジッタがある。この中の(i)は磁心雑音とは相関がなくかつ微少量であり無視できた。(ii)による影響は大きい。すなわち $B=f(H)$ なる $B-H$ 特性をもつ磁心の誘起電圧は

$$e \propto dB/dt = \partial B/\partial H \cdot \partial H/dt \quad \dots\dots (付 1)$$

であり、励磁 H 中に ΔH の変動があると誘起電圧の変動量は

$$\Delta e \propto \Delta H \cdot \partial^2 B/\partial H^2 \cdot dH/dt + \partial B/\partial H \cdot d\Delta H/dt \quad \dots\dots (付 2)$$

となり、 $f(H)$ のこう配の大きいものほど ΔH の影響は大きくあらわれる。また、サンプル点のジッタによる誤差出力は誘起電圧波形の時間微分に比例する。これらの雑音を除くため装置の動作は水晶発振器で制御した。

付第 1 図は装置の主要部を示す。水晶発振器からの 256 kHz の出力は所要の励磁周波数までい降され、スイッチングトランジスタで電力増幅を行ない、その出力を $C-R$ 回路で積分して三角波電流を作った。サ

付第 1 図 磁心雑音測定装置

app. Fig. 1. Measuring device for the magnetic core noise.

サンプルパルスは、各周期ごとにプリセットされるカウンタの出力より得ている。誘起電圧に含まれる変動量（磁心雑音）は数 % 以下であるから、数回にわたってレベルシフトを行ない変動量のみを増幅する。第 1 回目のレベルシフトはポテンショメータ R_p で行なう。ここで誘起電圧より適当な振幅を差し引いた電圧がサンプルに加えられる。サンプルパルスの幅は約 $2\mu\text{s}$ である。ホールド電圧 $V(\theta)$ を増幅器 A_B 、サーボモータ M を介して R_p にフィードバックし、 $V(\theta)$ の平均値が常に装置の直線領域の中央にくるように制御した。サーボモータの応答時間は 10 秒以上にとった。一方、プリセットカウンタの設定スイッチはタイマで順次切り換え、サンプル点を移動できるようにし、サーボ機構とともに測定の自動化を行なった。二乗回路、乗算回路は時分割方式で、負の半サイクルを利用して行なう。

本装置の性能の概略は次のようである。サンプルホールド回路の利得 G は 10^3 倍、入力換算雑音は $10\mu\text{V}_{\text{p-p}}$ 以下である。励磁電流の雑音は約 $2 \times 10^{-3}\%$ 、サンプルパルスのジッタは約 1 ns 程度である。

〔II〕 磁心雑音の同定 付第 2 図に同定の方法を

付第 2 図 磁心雑音の同定

app. Fig. 2. Identification of the magnetic core noise.

示す。スイッチ SW_1, SW_2 を開き、試料の誘起電圧をサンプルホールド回路に加え、サンプル点を 0 から $T/2$ まで変えて二乗平均出力を求める。これは同図 (b), (c) の実線で示されている。次に SW_1 のみを閉じ、150 Hz の交流電流 $14\mu\text{A}$ を励磁電流に重畳し同様の測定を行なう。二乗平均出力の増加分を (b) 図の点線で示す。これは励磁電流に 0.04 % の変動（主として三角波の位相の変化）があったときの影響の大きさを示す。次に SW_2 のみを閉じ直流電源に 60 Hz, 23 mV を重畳し出力の増加分を測定した結果を (c) 図の点線で示す。これは励磁電流に 0.09 % の変動（三角波のこう配の変化）があったときの影響の大きさを示す。

以上の結果よりこれらの重畳雑音は出力をほぼ倍増させたことがわかる。ところが励磁電流の雑音は加えた雑音量に比べけた以上小さい。したがって、励磁電流の雑音による出力成分は実線で示された出力の大きさの 0.01 倍よりもさらに小さいはずである。ジッタについては誘起電圧の最大こう配が $2\text{mV}/\mu\text{s}$ であったから、入力換算約 $2\mu\text{V}$ にしかならず、図示するには余りに小さすぎることがわかった。以上の結果より、 SW_1, SW_2 を開放して得られた出力は磁心雑音によるものにはほかならないことが確認される。