

# 福岡工業大学 機関リポジトリ

## FITREPO

Title	電磁鋼板の磁気特性評価のための簡便な構成のデジタル測定システム
Author(s)	小池勲
Citation	福岡工業大学研究論集 第39巻第1号 P115-P120
Issue Date	2006-9
URI	<a href="http://hdl.handle.net/11478/846">http://hdl.handle.net/11478/846</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

Fukuoka Institute of Technology

# 電磁鋼板の磁気特性評価のための簡便な構成の デジタル測定システム

小 池 勲 (電子情報工学科)  
酒 井 浩 樹 (大学院電気工学専攻)  
山 口 俊 尚 (電気工学科)

## Compact digital measuring system for evaluating magnetic characteristics of electrical sheet steels

Isao KOIKE (Department of Information Electronics)

Hiroki SAKAI (Graduate School of Electrical Engineering)

Toshinao YAMAGUCHI (Department of Electrical Engineering)

### Abstract

A practical magnetic measurement system for use in the research of Goss-oriented silicon-iron sheet, which is built compactly based on the interconnection of digitizing oscilloscope with personal computer, is presented. In this system, it was intended to expand the frequency range of power loss measurement down to 10 Hz keeping a good accuracy for the purpose of separating the hysteresis loss and eddy current loss, because this is necessary in researching low core loss materials. The point especially paid attention to for this purpose was the phase and amplitude errors of the integrating circuit which is used both for B-coil and H-coil outputs. It was shown that required measuring accuracy can be kept in the frequency range 10-500 Hz by adopting a suitable integrating circuit and by optimizing the circuit parameters.

Key words: *silicon-iron sheet, core loss, core loss separation, magnetic measurement, integrating circuit*

### 1. はじめに

近年の一方性珪素鋼板の低損失化は、結晶配向度の飛躍的な改善による高配向性珪素鋼板の発表に始まり、結晶粒制御、高張力皮膜、薄手化、レーザー処理その他の手法による磁区制御などのわが国を中心とする研究・技術開発によって進歩してきたが、この10年間は特性改善もやや飽和した状態となっている<sup>1)</sup>。し

かしながら最近の世界的なエネルギー資源不足の社会状況の中で鉄心材料も一層の低損失化が求められており、その打開策として更なる薄手化<sup>2)</sup>が研究されている。このような薄手材料の開発方向においては、表面状態によるヒステリシス損失の増加に対する対策、板厚減少に伴う磁区幅の拡張現象<sup>3)</sup>に対応する有効な磁区制御法の開発など新たな課題も多い。現在は方向性珪素鋼板の特性改善の飽和状況を脱却するための新しい方向に踏み出しつつある段階と言えよう。

筆者らの研究室においても、薄手化に伴う磁区、磁化過程の変化とその対策法に関する研究を進めている

が、今回はこの研究に当たって構築した簡便な構成の磁気特性測定システムを紹介する。システムの構成は次のような方針に従って決定した。

- (1) 比較的安価な汎用計測器を用いた簡便な構成とすること。
- (2) ハード・ソフト両面で、誰にでも自作できる構成にすること。
- (3) 方向性試料における Wf-f 曲線は低周波域における曲がりがかかなり顕著であるため、最小二乗法等を用いた曲線の直流への外挿による正確な鉄損分離のためには10[Hz]程度の低周波域まで実用的精度で測定できること。

試作したシステムについて、これらの目標を一応満足させ得る結果が得られたので、以下に報告する。

## 2. 測定システムの構成

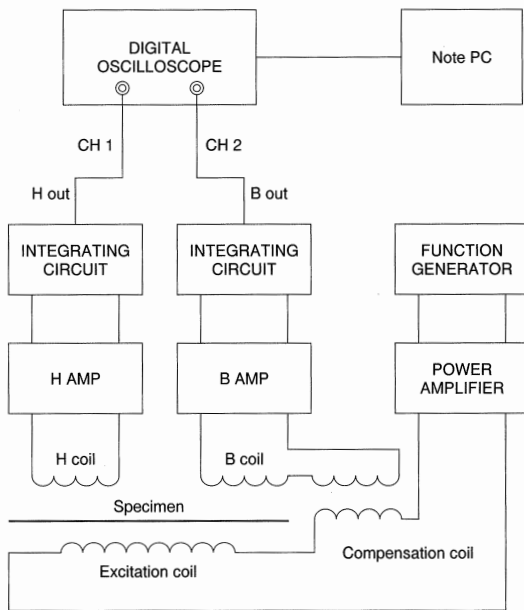


図1 測定システムの構成  
Fig.1. Configuration of the measurement system.

図1に測定システムの構成を示す。本システムの中核となるのは、Windows環境においてパソコン(PC)と接続された2ch デジタルオシロスコープである。PCにインストールした波形データ採取ソフトにより、オシロスコープ中で数値化されたH波形およびB波形を表計算ソフト EXCEL 上に取り込む。H波形およびB波形の中には試料の磁化特性の評価に必要な情報が

含まれており、これらを VBA プログラムを用いてデータ処理することによりヒステリシス曲線、磁化特性、鉄損など必要な磁気特性を得ることができる。

H及びB波形を微分波形(誘起電圧波形)の形でオシロスコープに取り込み PC で数値的に積分を行うか、あるいは積分回路により積分した後に取り込むかについては、次のような検討を行った。高透磁率材料や本研究で取り扱う単結晶試料等では粗大磁区構造を持つものが多くバルクハウゼンジャンプが顕著であるため、誘起電圧波形にもこれが反映される<sup>4)</sup>。励磁周波数が特に低い領域ではその影響を強く受けた雑音性波形となり、AD 変換のサンプリング間隔の間に存在する尖鋭なパルス電圧を取り込み損なうことがある。これは磁束密度の変化量の過小評価を生み、本システムのようにBコイル、Hコイルの誘起電圧波形をベースにした測定では低周波域での諸特性の評価にかなりの誤差につながる可能性がある。以上のような理由により、低周波域までの測定を目標とするこのシステムでは積分後にBおよびHの波形データを取り込む方式を採用した。

## 3. 磁化器

本研究では1節で述べた研究目的から単結晶等の小型試料を用いることが多いため、図2のようなカットコアを継鉄として用いたダブルヨーク縦型単板磁化器を作製した。ここで、試料の標準サイズは幅12[mm]×長さ110[mm]である。磁化コイルの中心に挿入される試料に近接して両側にHコイルを配置している。Hコイルのエリアターンは $0.0872[m^2Turn]$ で、ソレノイ

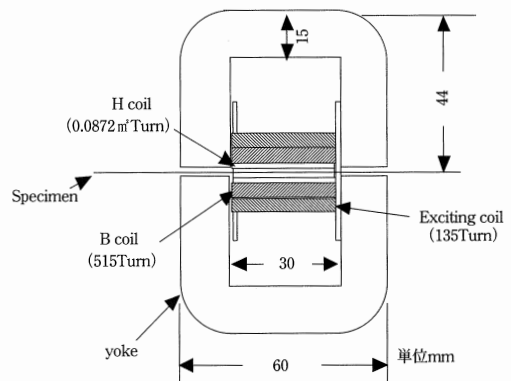


図2 磁化器の構造  
Fig.2. Structure of the magnetizing equipment.

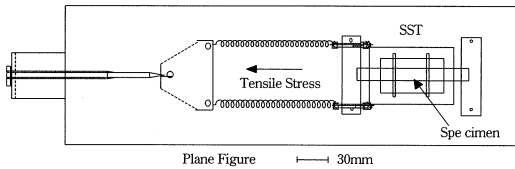


図3 磁化装置の全体構成  
Fig.3. Setup of the magnetizing system.

ドコイル中で較正している。その外側にBコイル(515 [Turn]) さらにその周りに励磁コイル (135[Turn]) が設けられている。Bコイルの空間磁束電圧は直列に接続された補償コイルにより打ち消している。

研究目的から試料に対する張力効果を調べることが多く、図3のようにバネによる張力印加装置を備えた構造としている。これにより磁化方向に0~1.5[kg/mm<sup>2</sup>]の張力を印加した状態で特性測定を行うことができる。

#### 4. 交流積分回路と積分精度

鉄損特性の測定においては本測定システム全般の中でBコイルおよびHコイルの誘起電圧積分回路の積分精度、特に位相精度が測定精度上重要となる。次に本システムで使用している積分回路についての誤差解析を行う。

図4は一般的に使用される交流積分回路である。この回路では入出力関係を表す正弦波伝達関数は次式となる。

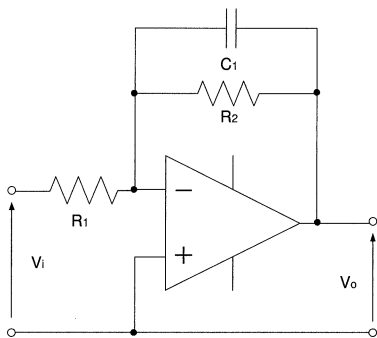


図4 一般的交流積分回路  
Fig.4. Conventional AC integrating circuit.

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{j\omega C_1 R_1} \cdot \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} e^{j\phi} \quad \dots (1)$$

ここで $\tau = C_1 R_2$ は負帰還回路の時定数であり、積分の振幅誤差 $\delta$ 、位相誤差 $\phi$ はこれから次式で表される。

$$\delta = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} - 1 \quad \dots (2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{1}{\omega\tau} \quad \dots (3)$$

図5に(3)式による位相誤差の計算結果を示す。低周波域では誤差が大きく、このままではヒステリシス曲線や鉄損の測定には適しない。時定数を大きくとれば位相誤差を下げるができるが、外乱からの回復など積分回路の動作の安定性に問題が生ずる。

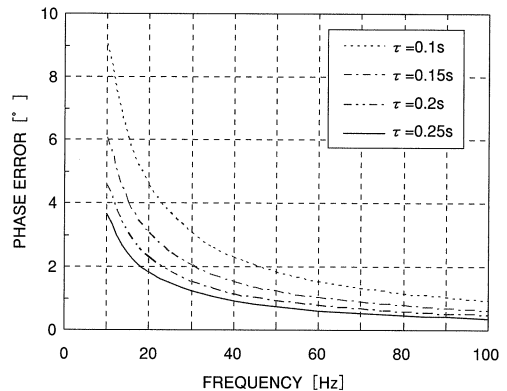


図5 一般的交流積分回路の位相誤差  
Fig.5. Phase error of the conventional integrating circuit.

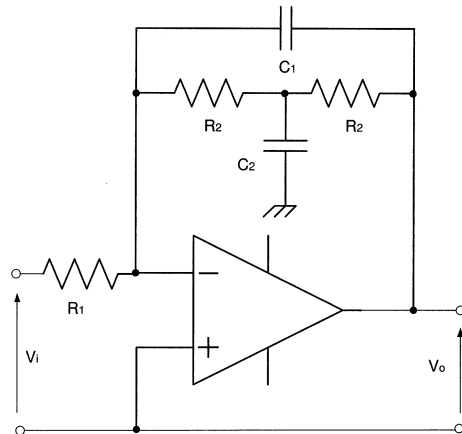


図6 本システムの積分回路  
Fig.6. Integrating circuit of the present system.

このような位相誤差に対応するため、本システムでは図6のような積分回路を用いた。この積分回路の正弦波伝達関数は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{1}{j\omega C_1 R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_2 (2 + j\omega C_2 R_2)}} \dots (4) \\ &= \frac{1}{j\omega C_1 R_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} e^{j\phi} \end{aligned}$$

ここで  $a, b$  は負帰還回路における 2 種類の定数  $\tau_1, \tau_2$  を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} a &= 1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{1}{4 + (\omega\tau_2)^2} \\ b &= \frac{2}{\omega\tau_1 [4 + (\omega\tau_2)^2]} \dots (5) \\ \tau_1 &= C_1 R_2, \tau_2 = C_2 R_2 \end{aligned}$$

これらを用いて積分の振幅誤差  $\delta$  と位相誤差  $\phi$  は次式のように表される。これを用いて計算した結果を図 7, 図 8 に示す。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} - 1 \dots (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{b}{a} \dots (7)$$

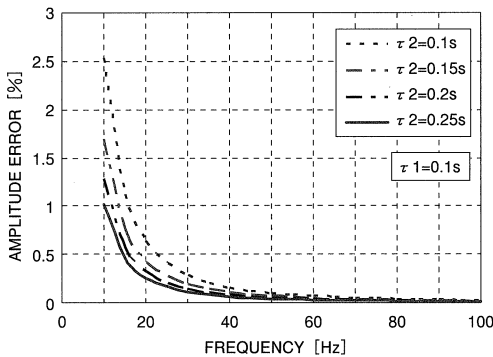


図 7 本システムの積分回路の振幅誤差  
Fig.7. Amplitude error of the present integrating circuit.

位相誤差は図 5 に比べて 2 桁程度改善されており、10[Hz] までの範囲ではほぼ 0.1[°] 以内に収まっている。これは高透磁率材料の鉄損特性をこの周波数まで測定するために十分な位相精度であると言えよう。この積分回路においても時定数を大きくとりすぎると回路動作の不安定化が生ずる。図 7, 8 の計算で設定された時定数は、動作の安定性を保持し得る範囲の値である。

振幅誤差は 20[Hz] まではあまり問題がないが、10 [Hz] では本積分回路においても 1 ~ 3 [%] となっており、この点では通常の積分回路に対して改善されて

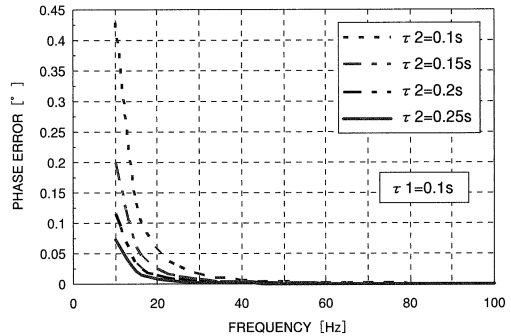


図 8 本システムの積分回路の位相誤差  
Fig.8. Phase error of the present integrating circuit

いるとは言えない。しかしながら、本システムのようにパソコンを測定システムの中に組み込んでいる場合、振幅誤差は位相誤差とは異なり、十分補正が可能である。本システムでは測定磁束密度の設定プログラムの中に(6)式に基づいた処理を組み込み、設定値を補正している。また、B コイル、H コイル電圧の積分後の数値化された波形に対して(6)式に基づいた補正処理を行うプログラムを組み込み、諸磁気特性の測定値に対する低周波域での振幅誤差の影響を除去している。

実際の積分回路においてはオペアンプの周波数特性に基づく影響も考えられるため、実測による積分回路の位相誤差および振幅誤差の周波数依存性の確認を 10 ~ 500[Hz] の範囲で行った。この結果、上記の周波数範囲で実験装置の位相差測定精度である 0.1[°] の範囲に、また振幅誤差も理論式の範囲に収まっていることが確認された。

## 5. 本システムの測定精度の要点

本システムの測定精度の要点をまとめる。

### (1) 積分回路の積分精度

本システムに採用した CR 積分回路の回路構成と回路定数を適正に選択することによって、位相誤差を実用上十分な精度に減少することができた。振幅誤差は積分回路では改善できなかったが、処理プログラム上で補正を施している。

### (2) デジタルオシロスコープのデータ精度

①AD 変換分解能は、8 ビットであり測定精度上不足の感がある。しかしながら、オシロスコープのアベレージ機能を用いて 64 回のアベレージングをおこなった状態の波形を採取することで実効分解能は上記

よりかなり向上した状態で測定している。そのため、量子化精度に起因する誤差は1 [%]程度の範囲に入っているとと思われる。

②レコード長は10,000ポイントであるがこの中から1周期分を自動的に抽出し計算を行う。従って、一般に1周期あたりのレコード長は数千ポイントとなり、鉄損のごとく1周期積分から算定する特性においては平均化効果による精度向上が期待できる。

(3) オフセットの影響

鉄損はB-H各波形から直接次式に基づいて数値積分を行っている。

$$W = \oint HdB \quad \dots (8)$$

ここで、オフセットを $\alpha$ とすると、差分(dB)には影響しないので、

$$W = \oint (H + \alpha) dB = \oint HdB + \alpha \oint dB = \oint HdB$$

となり、オフセットは影響しない。

6. 測定結果

PCに取り込まれたB, Hの波形データに基づいて、交流ヒステリシス曲線、鉄損-磁束密度特性、比透磁率-磁束密度曲線、W/f-f特性などをVBAプログラムによって算定する。

以下に(110)[001]配向のSi-Fe単結晶試料について、諸磁気特性の測定結果を示す。粗大磁区を持つ数10[ $\mu\text{m}$ ]まで薄手化された単板試料であるため、各特性にかなりの不規則性が観察されている。

図9は10[Hz]および500[Hz]励磁における交流ヒステリシス曲線である。後者では渦電流損失によってループが膨らんでいる。

図10は同様の極薄単結晶試料の50[Hz]における鉄損-磁束密度特性を示す。上述の理由による不規則性が観察される。

図11には図10と同じ試料の比透磁率-磁束密度特性を示す。図10と同様に試料の特性による不規則性が見られる。

図12には同様の単結晶試料におけるW/f-f曲線を示す。低周波域で曲線の顕著な曲がりが見られる。一般にこの曲線の曲がりの原因としては、磁区挙動(磁区幅や活動磁壁数)の周波数依存性と渦電流遮蔽効果(磁界の侵入の深さ)によるものに大別されるが、低周波域における曲がりは前者が主な役割を果たしているものと思われる。従って薄手化試料の鉄損特性の解析には、前述のように低周波域までの測定と鉄損分離が必

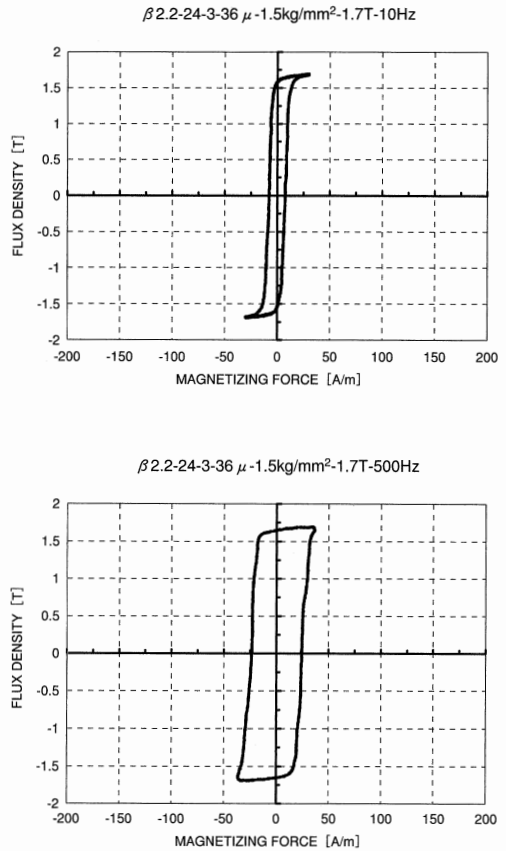


図9 (110)[001]Si-Fe 単結晶極薄試料の交流ヒステリシス曲線 (上: f=10[Hz], 下: f=500[Hz])  
Fig.9. AC hysteresis loops of thin-gauge (110)[001] Si-Fe.

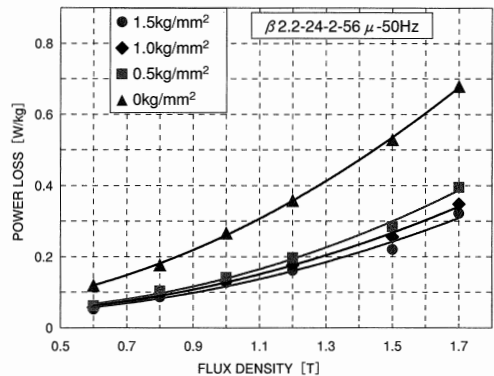


図10 (110)[001]Si-Fe 極薄単結晶の鉄損-磁束密度特性  
Fig.10. Core loss characteristics of thin-gauge Si-Fe.

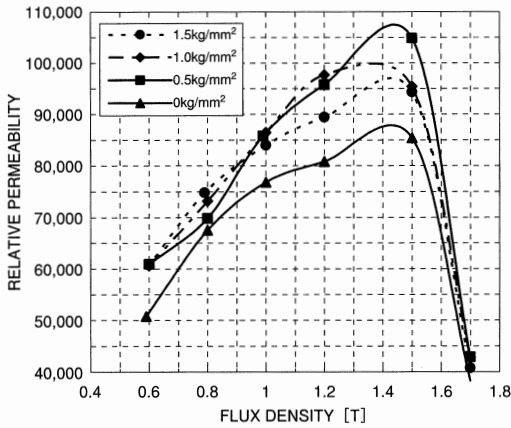


図11 (110) [001] Si-Fe 単結晶の比透磁率-磁束密度特性

Fig.11. Relative permeability-flux density curves of (110) [001] Si-Fe single crystal.

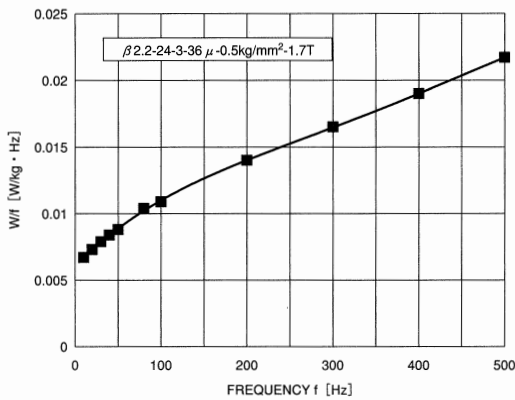


図12 薄手化単結晶試料の W/f-f 曲線

Fig.12. W/f-f curves of thin-gauge single crystal.

要となる。

鉄損分離に関しては、10[Hz]程度までの測定値があれば最小二乗法による直流への外挿が十分よい精度で可能である。いくつかの測定例によって、4次程度の低次多項式の適用が最適であることが確かめられた。

## 7. おわりに

高透磁率電磁鋼板、特に方向性珪素鋼板の磁気特性評価のために用いる目的で、安価で簡便な実用的なデジタル測定システムを構築した。その要点は、つぎのようなものである

- (1) デジタルオシロスコープ・パソコンなど数点の比較的安価な一般の機器のみで構成した。
- (2) ハード・ソフト両面において、計測システムの専門家でもなくても自作できる簡便な構成とした。
- (3) 簡単で安価に作製できる CR 積分回路を使用し、回路構成と回路定数を適正に選択することにより、10～500[Hz]の範囲で満足できる積分精度を実現できた。
- (4) 本システムによる10[Hz]程度の低周波域までの測定値により、満足できる鉄損分離が可能となった。
- (5) 自動化は、処理プログラム中で必要性を感じる程度実施している。今後、関数発生器の設定の自動化などの改善は可能であろう。

## 参 考 文 献

- 1) 電力用磁性材料とその有効利用調査専門委員会編：「電力用磁性材料とその有効利用」, 電気学会技術報告 No. 921, (2003)
- 2) Y. Ushigami et al.: "Recent development of low-loss grain-oriented silicon steel", J.M.M.M., vol.254-255, pp.307-314 (2003)
- 3) 山口：「(110) [001] 単結晶薄板における磁区構造の板厚依存性」, 日本応用磁気学会誌, vol.8, pp. 201-204 (1984)
- 4) 山口, 上田：「高透磁率材料の静ヒステリシス特性の高精度自動測定システム」, 日本応用磁気学会誌, vol.9, pp. 259-262 (1985)
- 5) JISC2556：「電磁鋼板単板磁気特性試験方法」(1992).