法政大学学術機関リポジトリ HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-06-01

エプスタイン試験器による磁気特性測定装置 の開発:単板磁気試験器との性能比較

大倉, 寛ノ介 / OKURA, Hironosuke

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要.理工学研究科編
(巻 / Volume)
63
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
6
(発行年 / Year)
2022-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00025322

エプスタイン試験器による磁気特性測定装置の開発 一単板磁気試験器との性能比較一

DEVELOPMENT OF MAGNETIC PROPERTY MEASUREMENT EQUIPMENT USING EPSTEIN FRAME –PERFORMANCE COMPARISON WITH SINGLE SHEET TESTER–

大倉 寛ノ介 Hironosuke OKURA 指導教員 岡本 吉史

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

The Epstein frame is one of the very effective magnetic testers for measuring the magnetic properties of electromagnetic steel sheets used as the main iron core material of motors. There is no need to use yokes to measure magnetic properties with the Epstein tester. Therefore, it is possible to measure in the state of a single magnetic material. In addition, the method for measuring magnetism in the audible frequency range has been standardized by JIS. However, in Japan, single sheet tester, which are easy to automate, simple in structure, and inexpensive, are more commonly used. In this paper, we compared the measurement performance of Epstein frame with that of single sheet tester. The excitation current method was adopted as the calculation of the magnetic field in each magnetic tester. In addition, distortion of the magnetic flux density waveform occurs in the high magnetic flux density region. Therefore, in order to unify the measurement conditions, waveform control was performed so that the magnetic flux density waveform would be sinusoidal. In order to compare the performance of the magnetic measurements of the Epstein frame and single sheet tester at varying frequencies, the DC hysteresis characteristics were derived using the dual frequency method. As a result, it was confirmed that the measurement results of the Epstein frame were more consistent and less affected by the frequency change than those of the single sheet tester.

Key Words : magnetizing current method, Epstein frame, single sheet tester, dual frequency method

1. はじめに

近年,地球温暖化による気候変動が世界的な問題となっ ている.その対策としてパリ協定^[1]が結ばれ,日本では脱 炭素運動が活発に行われている.特に自動車業界では,ガ ソリン車から電気自動車やハイブリッド車への転向が進 んでいる.この産業界の動きに伴い,高効率な車載用モー タの開発が要求^[2]されている.高効率なモータの開発には 有限要素法^[3]を礎とした磁界解析が主に用いられており, 実測されたモータの鉄芯材料として使用される電磁鋼板 (磁性材料^{[4]~[5]})の磁気特性データが活用されている.そ のため,電磁鋼板の磁気特性を高精度に測定が可能な磁気 試験器は,高効率なモータの設計開発に必要不可欠となっ ている. 磁気試験器には,エプスタイン試験器^[6]や単板磁気試験 器^[7],リング状試験器^{[8]~[9]}がある.これらのうち,電磁 鋼板の商取引上での標準測定法として世界的に広まって いるものがエプスタイン試験器である.エプスタイン試験 器は電磁鋼板を井形に重ねて閉磁路を形成しているので, 単板磁気試験器の様にヨークを用いる必要が無い.よって, エプスタイン試験器は単板磁気試験器と比べ,測定試験器 内に磁性材料が電磁鋼板のみでの磁気特性測定が可能で ある.このことから,エプスタイン試験器は単板磁気試験 器の様にヨークの影響を考慮する必要が無い.

しかし,国内の磁気試験器には単板磁気試験器の方が多 く採用されている.単板試験器は測定の自動化が容易で, 構造が簡単で安価である利点がある反面,測定法が商用周 波数のみでしか JIS 規格化されていないことに加えて、ヨ ーク損失の補正を執り行う基準は明確に定められておら ず、不透明なところがある.そのため、励磁電流法による 測定条件の統一性が、商用周波数やその他の可聴周波数帯 域での測定においてエプスタイン試験器よりも低くなる.

そこで本論文では、エプスタイン試験器と単板磁気試験 器の様々な条件下での測定結果を比較することで、ヨーク が測定結果に及ぼす影響を明確化することを目的とする. 測定には計測器制御に特化した機能を持つ NI 社の LabVIEW^[10]を採用した独自の自動制御システムを用い、 測定手法は励磁電流法を採用した.また、比較する試験器 はどちらも JIS 規格に基づき自作した試験器である.なお、 比較検討したデータは、測定されたヒステリシスループ^[11] と二周波法^[12]により推定した直流ヒステリシスや性であ る.二周波法は、周波数の違うヒステリシスループを用い て直流ヒステリシス特性を得る方法であり、測定結果の精 度・安定性が推定結果に影響し易い.そのため、今回の比 較に適していると考えられる.各試験器から得られた結果 を比較し、性能評価を行ったので、その仔細を報告する. 2.磁気特性測定手法

(1) 励磁電流法

本論文では, 励磁電流法によって磁界を導出した. 一次 側における磁界測定は Ampere の周回積分を用いる. 磁界 の強さ Hの算出式を(1)式に示す.

$$H = \frac{N_1}{l} i_1(t) \tag{1}$$

ここで, N_iは一次側コイル (励磁コイル)の巻き数, i_i(*t*)は 一次側電流, *l* は平均磁路長である.

(2) 磁束密度算出法

励磁枠に巻いた B コイルから得られる誘導起電力 vB から磁束密度 B へと導出する式を(2)式に示す.

$$B(t) = -\frac{1}{N_2 S} \int v_B(t) dt$$
⁽²⁾

ここで, *N*₂は二次側コイル (B コイル)の巻き数, *S* は試 料の断面積である.

(3) フーリエ級数展開

ー次側電流波形及び二次側誘起電圧波形には、コイルと 測定試料との空隙や測定機器内部の電気回路の影響でノ イズが発生する.そのため、精確な磁気ヒステリシスルー プを測定することが出来ない場合がある.よって、測定結 果にはフーリエ級数展開を行う.その式を(3)式に示す.

$$y(t) = b_0 + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos k \omega t + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin k \omega t$$

= $b_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(k \omega t + \theta_k)$ (3)

ここで、y(t)は一次側電流または二次側誘起電圧の合計値、 b_0 は直流成分、 a_k 、 b_k は奇関数と偶関数成分のフーリエ係 数、kはフーリエの次数、 c_k は a_k と b_k の合成波のフーリエ 係数、 θ_k は位相角である。それぞれの式を(3)式に示す。

$$\begin{cases} b_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \\ a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin k \omega t \quad \theta_k = \tan^{-1} \frac{b_k}{a_k} \\ b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos k \omega t \quad c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \end{cases}$$
(3)

ここで、**T**は一周期の時間を示す.なお実験では、近似波 形が対称波であるため、偶数調波は無視できる.

(4) 波形制御法

高磁束密度領域では磁束密度波形が歪む傾向にある.こ れは非線形特性を有する励磁巻線の励磁インダクタンス が漏れインダクタンスや抵抗の影響を無視できないため である.そのため,波形制御^{[13]~[15]}を行った.(4)式に波 形制御法の方程式を示す.

$$v_{c}^{(j+1)} = v_{c}^{(j)} - K \frac{V_{c1}^{(j)}}{V_{B1}^{(j)}} (v_{B}^{(j)} - v_{Br})$$

$$(4)$$

 ここで、v_c、v_Bは D/A 変換器(任意波形発生装置)の発生
 電圧及び B コイルの誘起電圧、v_Brは目標電圧(波形は正弦 波)、V_{c1}、V_{B1}は v_c及び v_Bの基本波成分、K はフィードバ ック係数、j はフィードバック回数を表す。

(5) 波形制御における収束判定パラメータ

a)目標磁束密度波形との誤差率

目標磁東密度 B_{target} に対して、測定された磁東密度 $B \geq$ の誤差率 B_{FF} を(5)式に示す.

$$B_{\rm FF} = \frac{B - B_{\rm target}}{B_{\rm target}} \times 100[\%]$$
(5)

b)波形誤差率

波形率 *FF*^[20]は, B コイルにて測定された波形を平均値 に対する実効値の比として,(6)式に示す.

$$FF = \frac{v_{\text{rms}}}{v_{\text{av}}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_B(t)^2 dt} / \frac{1}{T} \int_0^T |v_B(t)| dt$$
(6)

ここで, *v*_{rms}, *v*_{av}は *v*_Bの実効値と平均値である.正弦波に おける波形率 *FF*_{sin}は 1.111 となる. *FF*_{sin}と *v*_Bの波形率 *FF* との相対誤差率を *ε*_{FF} とし, (7) 式で算出した.

$$\varepsilon_{\rm FF} = \frac{FF - FF_{\rm sin}}{FF_{\rm sin}} \times 100[\%] \tag{7}$$

(6) 鉄損算出方法

鉄損 Wは,磁気ヒステリシスループに囲まれた領域の面積から算出できる^[16].算出には台形積分を用いた.その式を(8)式に示す.

$$W = \frac{f}{\rho} \int_{n_0}^{n_0 + n_r} H dB = \frac{f}{2\rho} \sum_{m=n_0}^{n_0 + n_r} \left(B_{m+1} - B_m \right) \left(H_{m+1} + H_m \right)$$
(8)

ここで, *m* は測定点, *f* は周波数, *ρ* は測定試料の密度である.

(7) 直流ヒステリシス特性の推定

直流ヒステリシス特性を測定するのは非常に困難であ る.そこで、いくつかの周波数の測定データを用いること で直流ヒステリシス特性を推定することができる.図1に その推定方法の例を示す.図1(a)中の■印、◆印および ●印は、それぞれ磁束密度1.0Tにおける、50Hz、100Hz、 および200Hzの磁界Hの値である.この3点を、周波数f を横軸に、磁界Hを縦軸にプロットしたものが図1(b)の ようになる.そこで、3点を二次近似して、周波数が0Hz の点(図1(b)中の▲印)を確定する.なお、二次近似に 使用する周波数の数が2つのものを二周波法、それ以上の 周波数の数を用いるものを多周波法といい、本論文では50 Hzと100Hzのヒステリシス特性から二周波法を用いて直 流ヒステリシス特性を推定した.



(a) Hysteresis characteristics



(b) Frequency characteristics of H

Fig. 1. Estimation method of DC hysteresis characteristics.

3. 測定回路

(1) エプスタイン試験器

図2にエプスタイン試験器の測定回路系を示す. D/A 変換器から発生させた励磁電圧波形を電圧増幅器と変圧器 を介して、単板磁気試験器に励磁する. LabVIEW による自動制御は、D/A 変換器と A/D 変換器の計測制御に使用する. 図3にエプスタイン試験器を示す. 励磁巻線は、直径2mm のポリエステル銅線を各辺それぞれ 4 層で 350 turn、合計 で 1400 turn 巻いてある. B コイルは直径1mm のポリエス テル銅線を、各辺の励磁枠に1 層で 175 turn、合計で 700 turn 巻いてある. 測定試料は、無方向性電磁鋼鈑 35A300

(RD) を各辺に6枚,合計24枚使用した.測定試料の寸 法は全て幅30mm× 長さ282mmである.磁界の測定方 法は励磁電流法を採用し,一次側電流は抵抗値1Ωのシャ ント抵抗器にて測定した.また,磁束密度が大きくなるに つれて,試験片が磁歪によって振動することで,試験片が 一定の位置にとどまらず,測定結果の統一性が損なわれる. そこで,試験片端の交互積層部分に非磁性ステンレス製の 重さ1Nの分銅をそれぞれ配置した.



Fig. 2. Measuring system of Epstein frame.



(a) Actual Epstein frame



(b) Cross-sectional view of frame

Fig. 3. Epstein frame.

(2) 単板磁気試験器

図4に単板磁気試験器の測定回路系を示す.測定原理・ 方法は前節で述べた通りである.図5に単板磁気試験器を 示す.励磁巻線は,直径1mmのポリエステル銅線を,1層 当たり162 turnで10層の1620 turn巻いてある.測定試料 は,エプスタイン試験器で用いたものと同じ無方向性電磁 鋼鈑35A300 (RD)である.試料の寸法は,幅70mm × 長 さ264 mmである.Bコイルは,直径0.1 mmのポリウレタ ン銅線を,測定試料中央部に40 turn 直巻きした.



Fig. 4. Measuring system of single sheet tester.



(a) Actual single sheet tester



(b) Cross-sectional view of frameFig. 5. Single sheet tester.

4. 測定結果

(1) エプスタイン試験器と単板磁気試験器の測定結果 a)磁気ヒステリシスループ

図6にエプスタイン試験器を用いた,周波数50Hzと100 Hz,それぞれの磁束密度0.1Tから1.5Tまでのヒステリシ スループを0.1T刻みで示す.測定条件は波形誤差率 ε_{FF} を 0.1%以内, B_{FF} (最大磁束密度の目標値に対する差)が 0.05%以内に収まるように測定を行った.また,一次側電 流で考慮するフーリエ係数をk = 21,二次側誘起電圧で考 慮するフーリエ係数をk = 51として,それ以上の高調波成 分は除去した.図6より,他の研究機関(type M)との測 定結果と比べても,遜色ないことから,自作したエプスタ イン試験器が高い測定精度を有していることが分かる.

図7に周波数50 Hz と100 Hz, それぞれの磁束密度0.1 Tから1.5 Tまでのエプスタイン試験器と単板磁気試験器 の測定結果を比較したものを示す.図7より,エプスタイ ン試験器の方が単板磁気試験器よりも残留磁束密度値が 小さく,磁界が大きい傾向にあることが見て取れる.これ は,磁路長内での均一磁界領域の割合が,エプスタイン試 験器の方が,試験片端の交互積層部分が有ることにより少 ないためだと考えられる.

表1にエプスタイン試験器と単板磁気試験器の周波数50 Hz と 100 Hz それぞれのヒステリシスループから算出した 鉄損値を示す.表1より単板磁気試験器の方がエプスタイ ン試験器よりも鉄損値が小さいことが見て取れる.通常, 励磁電流法でヨークの補正を行っていない場合は,鉄損値 がエプスタイン試験器よりも単板磁気試験器の方が大き くなる傾向がある.だが,今回の結果はそうなっていない. このことに関して,どちらの測定結果とも信頼できる他の 研究機関に委託測定した結果と比べて,遜色ない測定精度 を有していることが確認出来ていることから,同じ磁性材 料の種類を測定しているが,得られる磁気特性が同じでは ないことが分かる.



(a) Measurement results at 50 Hz



(b) Measurement results at 100 Hz

Fig. 6. Comparison result with other research institutions.



⁽a) Measurement results at 50 Hz



(b) Measurement results at 100 Hz

Fig. 7. Measurement result of each magnetic tester.

FABLE I IRON LOSS OF EACH MAGNETIC TESTER						
	Iron loss [W/kg]					
	B [T]	Epstein frame		Single sheet tester		
		50 Hz	100 Hz	50 Hz	100 Hz	
	0.1	0.01	0.03	0.01	0.03	
	0.2	0.06	0.13	0.05	0.14	
	0.3	0.14	0.31	0.12	0.26	
	0.4	0.23	0.52	0.20	0.46	
	0.5	0.33	0.80	0.27	0.65	
	0.6	0.46	1.08	0.37	0.85	
	0.7	0.59	1.41	0.47	1.11	
	0.8	0.75	1.79	0.59	1.36	
	0.9	0.94	2.21	0.71	1.68	
	1.0	1.13	2.67	0.85	2.00	
	1.1	1.36	3.19	1.02	2.46	
	1.2	1.60	3.74	1.19	2.86	
	1.3	1.87	4.26	1.41	3.38	
	1.4	2.19	4.96	1.64	4.06	
	1.5	2.46	5.66	1.93	4.65	

b) 直流ヒステリシス特性推定の比較結果

エプスタイン試験器と単板磁気試験器の性能をより詳 しく比較するために、二周波法を用いて直流ヒステリシス 特性の推定を行った.図8に磁束密度0.5 T,1.0 T,1.5 T における直流ヒステリシスループで比較した結果を示す. また、図9と表2に得られた直流ヒステリシス特性から導 出した、ヒステリシス損係数をそれぞれ示す.図8より、 エプスタイン試験器を用いた直流ヒステリシスループの 方が、単板磁気試験器を用いて得られた直流ヒステリシス ループに比べて、磁束密度1.5 Tのループに他のループが 収まるようになっており、連続性が見られる.また、この ことは図9と表2からも見て取れる.これは、周波数が違 う交流電圧を励磁して測定を行っても、エプスタイン試験 器は一貫して安定した測定が行えることが分かる.



(a) DC hysteresis characteristics of Epstein frame







Fig. 9. Hysteresis loss coefficient for each magnetic tester.

TABLE II HYSTERESIS LOSS COEFFICIENT OF EACH MAGNETIC TESTER

ILJIEK						
Hysteresis loss coefficient [K _h ×10^-3]						
Epstein frame	Single sheet tester					
0.18	0.18					
1.01	1.01					
2.39	2.06					
3.93	3.42					
5.48	4.84					
7.18	6.10					
9.66	7.74					
12.31	9.72					
14.59	11.59					
18.29	13.84					
21.84	15.90					
25.86	18.76					
29.75	22.71					
35.04	24.82					
39.31	28.41					
	Hysteresis loss c Epstein frame 0.18 1.01 2.39 3.93 5.48 7.18 9.66 12.31 14.59 18.29 21.84 25.86 29.75 35.04 39.31					

謝辞

本稿で述べた磁気特性測定のエッセンスをご教授頂い た同志社大学 石原好之 名誉教授及び,同大 藤原耕二 教 授へ拝謝いたします.

参考文献

- [1]外務省:「日本の排出削減目標」
 https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html, 令和4年1月11日(最終閲覧日:2022年2月3日)
- [2] 自動車用モータの技術動向調査委員会:「自動車用モータの 技術動向」,電気学会技術報告, no. 1394 (2017)
- [3] 中田高義・高橋則雄:「電気工学の有限要素法(第2版)」, 森北出版(1986)
- [4] 島田寛・山田興治:「磁性材料―物性・工学的特性と測定法」,講談社 (1999)
- [5] 大田恵造:「磁気工学の基礎」,共立全書(2007)
- [6] 日本工業規格:「電磁鋼帯試験法―第1部:エプスタイン試 験器による電磁鋼帯の磁気特性の試験方法」,C2550-1(2011)
- [7] 日本工業標準調査会:「電磁鋼帯試験方法 一第1部:単板 試験器による電磁鋼帯の磁気特性の測定方法」,JIS C 2556 (2015)
- [8]山口次郎,前田憲一,平井平八郎:「電気電子計測」,オー ム社
- [9] 大木義路,奥村次徳,石原好之,山野芳昭:「電気電子材料 -基礎から試験法まで-」,電気学会(2006)
- [10] 堀桂太郎:「図解 LabVIEW 実習」,森北出版(2006)
- [11] 中田高義,河瀬順洋,中野正典:「単板磁気試験器の磁界測 定精度」,電気学会論文誌 A, vol. 106, no. 12, pp. 565-572(1986)
- [12] 北尾純士・橋本和茂・高橋康人・藤原耕二・石原好之・阿波 根明・松尾哲司:「プレイモデルのヒステリシス磁界解析へ の適用に関する検討」IEEEJapan, SA-12-16, RM-12-16, pp.89-94 (2012)
- [13] 中瀬和哉・中野正典・藤原耕二・高橋則雄:「単板磁気試験 器を用いたデジタル磁気特性測定システムにおける波形制 御法」, 電学論 A. vol. no. 7. pp.1019-1025 (1999)
- [14] 藤原耕二:「磁気特性の利用テクニック」,電気学会第17 回電磁界数値解析に関するセミナー(2008)
- [15] K.Yammoto, S.Hanba, "Waveform Control for Magnetic Testers Using a Quasi-Newton Method," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol.302,pp.539-541 (2008)
- [16] 小塚洋司:「電気磁気学[新装版] その物理像と評論—」, 森北出版(2012)