

鉄損と波形率の関係について

岡 田 条 二

On the Relation Between Iron Losses and Form Factor

Kumeji OKADA

In this paper, the relation between iron losses and form factor is presented. For this purpose, the AC power source of variable form factor and variable frequency was made for trial, using an inverter, a filter and a phase-shifter.

The author has measured the iron losses of Si-steel plate (JIS-S09F) 1.83 kg by Epstein Set, changing the frequency and form factor of the output power of this equipment.

1. 実験装置

Inverter, Filter, Phase-Shifter を試作し、これ等を組み合わせて可変波形率、可変周波数の交流電源を試作したので、この電源を用いて鉄損を測定した。試験器には小型 Epstein 試験装置を用い、波形率の測定には実効値電圧計および平均値電圧計の指示の比より算出して求め、これを試験器に供給した。試料には、JIS-S09F (T-90)、熱間圧延ケイ素鋼板、厚さ 0.35(mm) のものを、3 cm × 28 cm の短冊形に切ったもの 1.83(kg) を用いた。

図-1 は電源装置を、また、図-2 は Epstein 試験装置の接続図を示したものである。

Inverter の SCR 用 gate 信号の周波数を変えて、電源周波数を制御し、また、移相器および電圧調整器によって波形率を制御したものである。

Epstein 試験装置には特に試料挿入コイルの前後に切替開閉器 S_2 , S_3 を取り付けた。その理由は従来の試験方法は電力計により回路の全消費電力を一旦測定し、つぎに、回路に接続されていた計器の内部抵抗を測定し、これより計器による電力損失を計算し、もとの回路全体の消費電力より差し引き、残りを鉄損として計算した。この方法はいちいち計器の損失を計算しなければならず実際実験してみるとなかなか面倒なことである。そこで筆者は特に切替開閉器を試料挿入コイルの前後に設け、 S_1 , S_2 を最初①側に閉じ普通と同じように回路全体の消費電力を測定し、つぎに、 S_1 , S_2 を②側に閉じ試料挿入コイルを回路より切りはなし試料以外の回路損失を再び電力計にて測定した。ただしこの時幾分実効電圧 E が上昇するので実効電圧計 V を前に測定した時の電圧に合わせるように電源

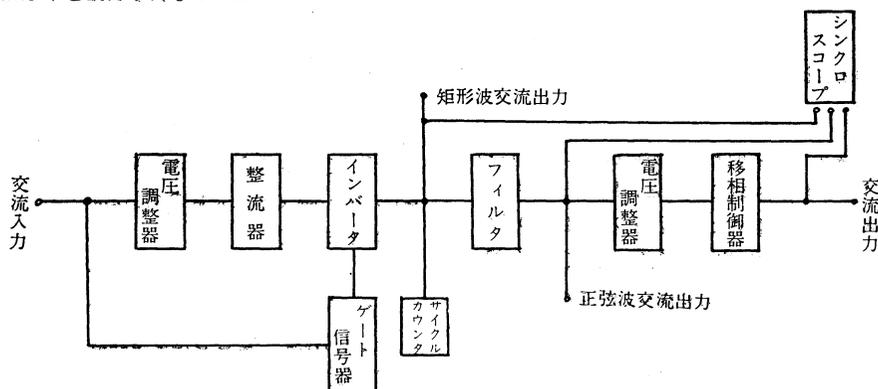
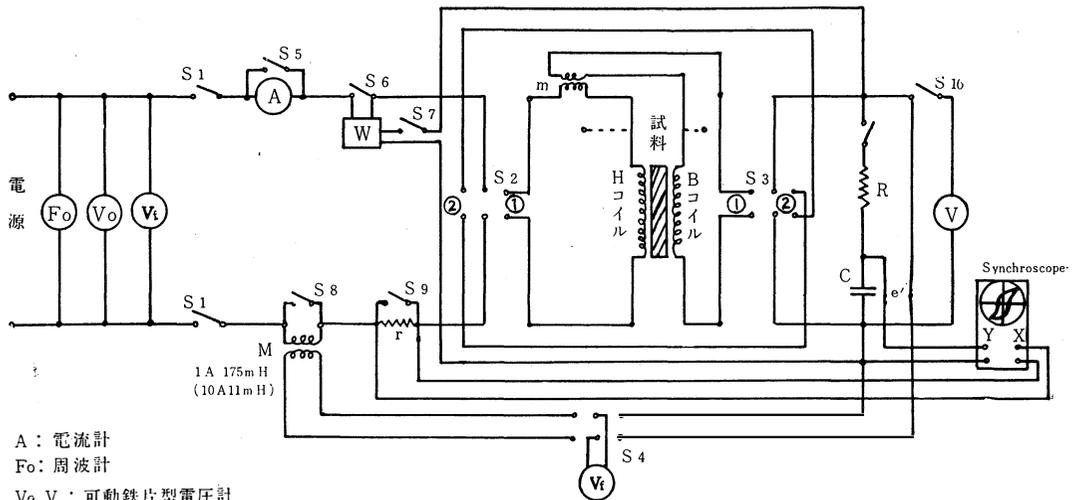


図-1 電源装置



- A : 電流計
- Fo : 周波計
- Vo V : 可動鉄片型電圧計
- Vi : 整流型電圧計
- W : 電力計
- M : 相互誘導器
- m : 補償誘導器
- S : 開閉器

図-2 Epstein 試験装置

電圧を多少調整しなければならない。このようにすればいちいち計器の損失を計算する手数がなく測定能率を上げることが出来た。しかも精度は計器損失を計算より出した値と殆んど変わらない程正確であった。

つぎに筆者は図-2のように Epstein 試験器の二次側に CR の積分回路を接続し、二次誘導起電力の積分電圧 e' をシンクロスコープの Y 軸に、また一次側には H コイルに直列に低抵抗 r を接続し、その両端子をシンクロスコープの X 軸に加えた。このようにしてシンクロスコープに履歴環線を描がかしめ、そのループ面積より鉄損を計算し、シンクロスコープによる直視法と、エプスタイン装置による電力計法とを比較したものである。

2. 鉄損分離と、磁束密度一定とした場合の鉄損測定

鉄損は、ヒステリシス損と、うず電流損とに分けられ、ヒステリシス損は材料の性質と、最大磁束密度 B_m および交流の周波数によって決まる。鉄損のうちヒステリシス損は磁束密度が、 $0.1 \sim 1.2$ [Wb/m²] ($1000 \sim 12000$ [G]) 程度の間では C. P. Steinmetz の実験式として(1)式のように表わされることは周知の通りである。

$$\text{hysteresis Loss, } W_h = KfB_m^{1.6} \dots\dots\dots(1)$$

ここに K は材料による定数、 f は周波数 [%] $B_m t$ は最大磁束密度である、(B_m が上記の範囲以外では B_m の指数は 1.6 より増し 2 に近づく)。

また、うず電流損は材料中に誘導される電圧によって生じる電流によるオーム損失であるから、最大磁束密度 B_m 、周波数 f のほかに材料の抵抗率 ρ および厚さ t に関係する。材料が十分薄い板で、表皮効果が小さい場合の、うず電流損は(2)式のように表わされる。

$$\text{eddy current Loss, } W_e = \frac{K' F^2 f^2 B_m^2 t^2}{\rho} \dots(2)$$

ここに K' は定数、 F は波形率である。鉄損は W_h と W_e の和であることは勿論である。

筆者はヒステリシス損と、うず電流損を分離するため一定磁束密度のもとに周波数を変えて、鉄損を測定し、種々な波形率に対する分離を行った。図-3、および図-4 は 5 [KG]、および 10 [KG] を一定とした場合の分離図である、図は周波数に対する試料 1 [kg] につき 1 [%] あたりのヒステリシス損と、うず電流損を [ワット] 数で示したものである。

(1), (2) 式より

$$W_h = A_1 f \dots\dots\dots(3)$$

$$W_e = A_2 F^2 f^2 \dots\dots\dots(4)$$

ただし B_m を一定としたので A_1, A_2 は定数、

(3), (4) 式より

$$\frac{W_h}{f} = A_1 \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{W_e}{f} = A_2 F^2 f \dots\dots\dots(6)$$

(5), (6)式より 1[%]当りのヒステリシス損は一定となり, また, 1[%]当りの, うず電流損は周波数に比

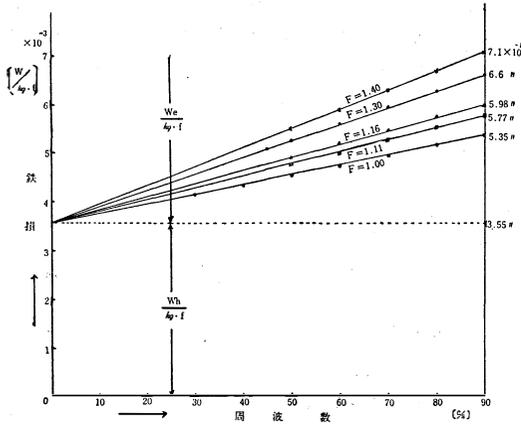


図-3 鉄損分離 (5[kg]一定)

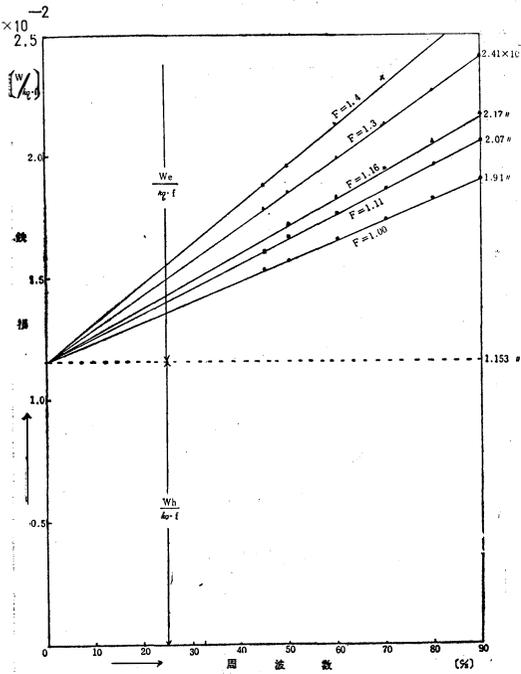


図-4 鉄損分離 (10[kg]一定)

例して増加し, その上波形率Fの自乗に比例して増加することになる。

この図からもわかるようにヒステリシス損は, 5[KG], および10[KG]一定の場合, 試料1[kg]につき, 1[%]あたりの損失はそれぞれ, 3.55×10^{-8} [W/kg·f], 1.153×10^{-2} [W/kg·f]で, 10[KG]のときは5[KG]のときのそれにくらべ約2.17 ぐらいにな

っている。

また, うず電流損の方は例えば波形率1で60[%]のとき, 5[KG], および10[KG]一定の場合, それぞれ, 1.2×10^{-8} [W/kg·f], 0.5×10^{-2} [W/kg·f]となっている。その他の波形率についての損失は, それ等の値に波形率の自乗を乗じたものになっている。このことは理論式と実験による値とよく一致している。また, その他の周波数のときでも同様である。

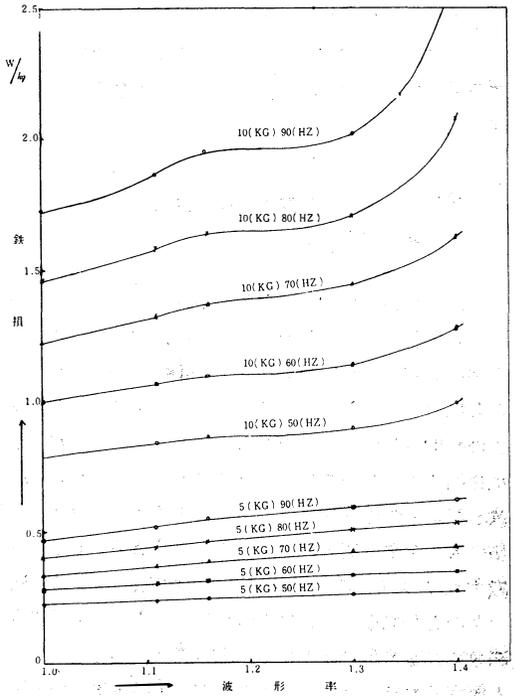


図-5 磁束密度一定の場合の鉄損

つぎに磁束密度一定とした場合の鉄損を測定すれば図-5のようになった。

図は磁束密度を5[KG], および10[KG]を一定としたときの種々な波形率Fに対する試料1[kg]につき鉄損を(ワット)で表したもので周波数をパラメータとして測定したグラフである。

表-1 試料J I S. S 0 9 F (T-90) 鉄損の比較

記号	実験結果による鉄損 (W/kg)	J I S規格による鉄損 (W/kg)
W ₅ /50	0.24	0.28 以下
W ₁₀ /50	0.84	0.90 以下
W ₅ /60	0.30	0.34 以下
W ₁₀ /60	1.07	1.15 以下

(備考. W₅/50, W₁₀/50, W₅/60, W₁₀/60はそれぞれ

周波数50〔%〕または60〔%〕, 最大磁束密度5,000〔G〕(0.5Wb/m²), 10,000〔G〕(1.0Wb/m²) のときの鉄損を示す。)

例えば, 磁束密度5〔KG〕, 10〔KG〕, 周波数50〔%〕, および60〔%〕の場合についての実験結果と, J I S規格と比較してみると表一のようになった。この表からもわかるように本試料の実験結果による測定鉄損はJ I S規格に定められた鉄損以下の良質なものであることが, うかがえる。

また, 図一5からもわかるように磁束密度10〔KG〕周波数90〔%〕, 波形率1.3以上になると急激に損失が増加する。

3. 試験器に供給する実効電圧一定とした場合の鉄損測定

2, においては試料に与える最大磁束密度を一定として鉄損を測定したものであったが, 試験器に供給する実効電圧一定とした場合には鉄損は波形率の増加とともに減少するものである。元来ヒステリシス損は鉄心の残留磁気によって生じヒステリシスループの面積に比例する。しかるに, ヒステリシスループの面積は鉄心材料と磁束密度によって定まるのでヒステリシス損の大小もまた(1)式のB_mによって定まる。いま最大磁束φ_mとコイルの誘導起電力の平均値E_aとの関係はつぎようになる。計算を簡単にするため, ひずみ波磁束には基本波のほかに第三高調波のみ含まれていると仮定すれば, コイルの巻数をN, 誘導起電力の瞬時値をeとすれば,

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_{1m} \sin \omega t + \phi_{3m} \sin 3 \omega t, \\ e &= N \frac{d\phi}{dt} = N (\omega \phi_{1m} \cos \omega t + 3 \omega \phi_{3m} \cos 3 \omega t) \\ \omega t \text{の代りに } (\omega t - \frac{\pi}{2}) \text{ とすれば} \\ e &= N \omega (\phi_{1m} \sin \omega t + 3 \phi_{3m} \sin 3 \omega t) \\ e \text{の平均値を } E_a \text{ とすれば} \\ E_a &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e d(\omega t) = \frac{2 N \omega}{\pi} (\phi_{1m} - \phi_{3m}) = \\ &= 4 N f \phi_m = 4 N f A B_m \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

ただし, φ_m: (φ_{1m} - φ_{3m}), A: 鉄心の断面積,
B_m: 最大磁束密度,

すなわち, (7)式より E_aはB_mに比例することになる。しかるに, E_aと実効値電圧Eとの関係は波形率Fによって表されるから(7)式より,

$$E = F E_a = 4 N f A B_m,$$

$$\therefore B_m = \frac{E}{4 N f A} \dots \dots \dots (8)$$

ただし, Eは二次誘導起電力の実効値,

いま, 二次誘導起電力の実効値と供給電圧の実効値がほぼ等しいと見れば(試験器のコイル巻数比は700:700), 試験器に供給する実効電圧を一定とすれば波形率Fに反比例してB_mが減少するからヒステリシス損は(1)式にしたがって減少することになる。

つぎに, うず電流損は(2)式より,

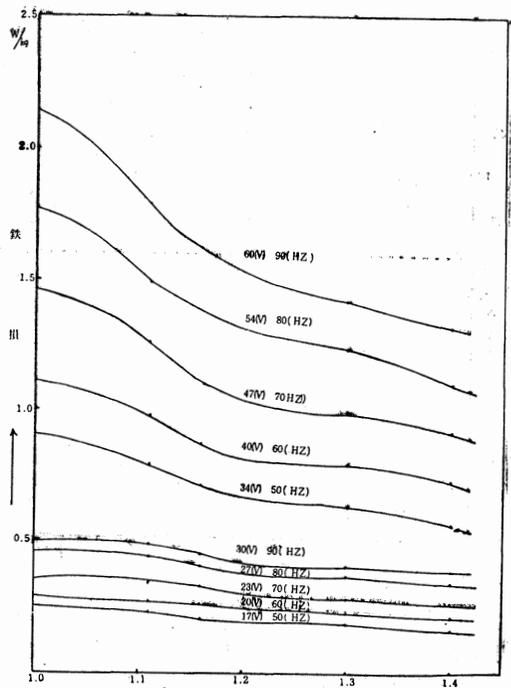
$$W_e = \frac{K' f^2 t^2 (F B_m)^2}{\rho} \quad \text{であるから}$$

(8)式を上式に代入すれば

$$\begin{aligned} W_e &= \frac{K' f^2 t^2}{\rho} \left(F \frac{E}{4 N f A} \right)^2 = \frac{K' t^2}{16 \rho N^2 A^2} E^2 \\ &= K_0 E^2 \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

ただし, K₀=定数

すなわち, うず電流損は(9)式より誘導電圧の実効値Eの自乗に比例する。ゆえに, 試験器に供給する実効電圧が一定なる場合には, うず電流損は波形率Fに関係なく一定で, ヒステリシス損は波形率Fの1.6乗に反比例して減少することになる。



図一6 実効電圧一定の場合の鉄損

図一6は, 種々な波形率に対する, 試料1〔kg〕当りの鉄損を, 周波数をパラメータとして実測したグラフである。

例えば, 60〔%〕, 実効電圧を, 40〔V〕一定とした場

合の、うず電流損を、0.26〔W/kg〕一定として、ヒステリシス損が波形率Fの1.6乗に反比例して減少するか、どうかを実測値と計算値を比較してみると表一2のようになった。

表一2 60〔%〕 E:40〔V〕一定、うず電流損:0.26〔W/kg〕一定とした、ヒステリシス損の比較。

波形率	測定値〔W/kg〕	計算値〔W/kg〕
1	0.85	0.85
1.11	0.72	0.72
1.16	0.61	0.65
1.3	0.53	0.55
1.4	0.47	0.49

この表から見ても大体ヒステリシス損は実測値と計算値が一致していることがわかる。

4. シンクロスコープによる直視法の鉄損測定と電力計法による鉄損測定の比較

筆者は更に図一2に示すように、エプスタイン試験器の二次側に、CRの積分回路を附加し、これよりシンクロスコープのY軸にB(または磁束φ)に比例した電圧を加え、また、エプスタイン試験器の一次側に低抵抗rを直列に挿入し、シンクロスコープのX軸にH(励磁電流)に比例した電圧を加えて、磁性材料の履歴環線を描かしめ、そのループ面積より鉄損を測定した。

いま、二次コイルの誘導起電力をe、二次コイルの巻数をN、鉄心断面積をA、磁束をφ、磁束密度をBとすれば、

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$\int e dt = N \int \frac{d\phi}{dt} dt = N\phi = NAB \dots\dots\dots(10)$$

(10)式よりeの積分値はBに比例することになる。

いま、エプスタイン試験器の磁束電圧計V_f(整流型電圧計)の指示より最大磁束密度B_mを知り、このときの積分電圧e'をシンクロスコープのY軸に加え、増幅度を調整して定量的に影像のY軸の寸法を定める。つぎに、H_mはエプスタイン試験器の一次側回路に挿入された相互誘導器Mの二次誘導起電力の平均値をV_fによって測定し、そのときの一次側に挿入された低抵抗rの端子電圧より、シンクロスコープのX軸の寸法を増幅度を調整してこれを定量的に定めることが出来る。

例えば、シンクロスコープの影像Y軸の寸法を、30〔mm〕を10〔KG〕とし、X軸の寸法を10〔mm〕を1〔oe〕とおけば、ループ面積の1平方〔mm〕当りの仕事量をW₀とすれば

$$W_0 = \frac{1}{4\pi} \times \frac{10000}{30} \times \frac{1}{10} = 2,653 \text{〔erg〕} \dots\dots\dots(11)$$

となり、シンクロスコープのループ面積を測定すれば直ちに仕事量がわかる。

ただし、このときの仕事量は試料1立方〔cm〕当りのもので、1〔%〕につき、その損失であることに注意されたい。

したがって、試料1〔kg〕当りの〔W〕数として計算する場合には、例えば周波数60〔%〕、試料、JIS-S09F(T-90)のケイ素鋼板、ケイ素含有量、4.0~4.5%であるから比重は7.55である。

ゆえに、次式のような計算となる。

$$W = (\text{ループ面積〔mm}^2\text{)}) \times 2.653 \times 60 \times \frac{1000}{7.55} \times 10^{-7} \text{〔W/kg〕} \dots\dots\dots(12)$$

ただし、Wは試料1〔kg〕当りの電力損失(ワット)

筆者は以上のような方法によって、60〔%〕、実効電圧40〔V〕一定とした場合の種々な波形率に対する鉄損を、シンクロスコープによる直視法のループ面積より計算し、また、同時にエプスタイン試験器による電力計法にて測定した。

それ等を、それぞれ比較してみると表一3のようになった。

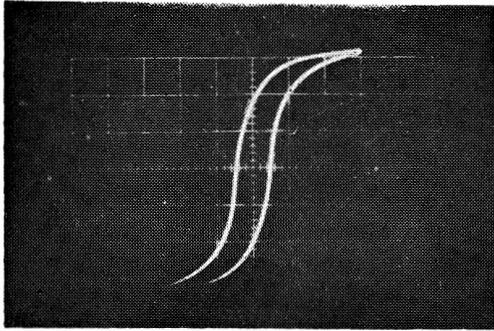
表一3 ループ面積より計算した鉄損と電力計による鉄損の比較

波形率	ループ面積〔mm ² 〕	ループより計算した鉄損〔W/kg〕	電力計による鉄損〔W/kg〕
1.00	530.8	1.11	1.11
1.11	455.6	0.96	0.98
1.16	412.4	0.87	0.86
1.30	383.7	0.81	0.80
1.40	342.1	0.72	0.73

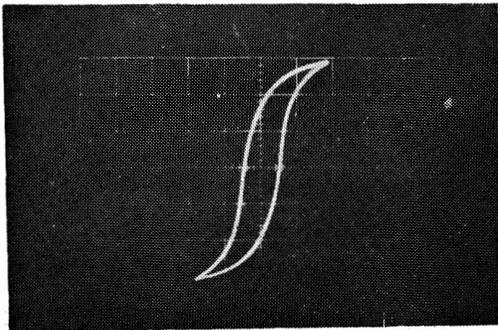
60〔%〕、E:40V一定とした場合

表一3より、わかるようにループより計算した鉄損は筆者が思ったよりも意外に精確なものであることがわかった。

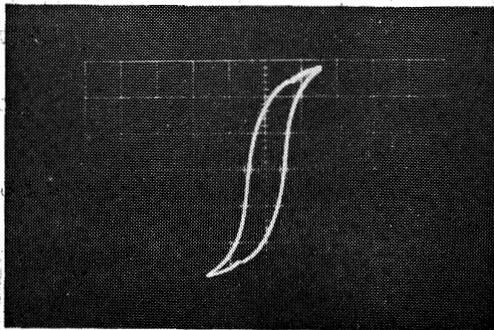
写真-1



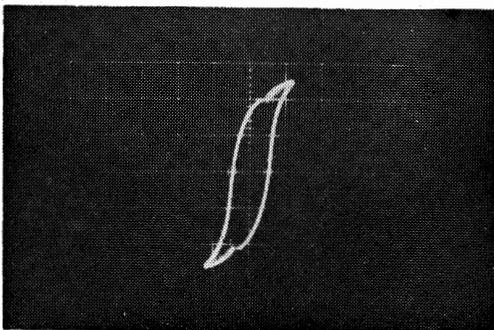
(a) 60% F=1



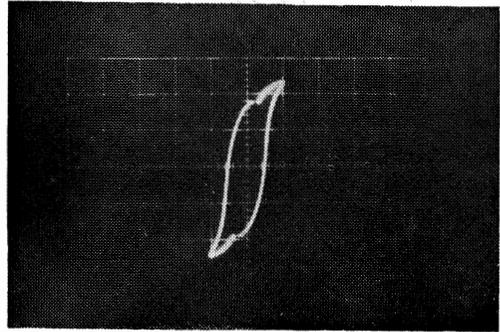
(b) 60% F=1.11



(c) 60% F=1.16



(d) 60% F=1.3



(e) 60% F=1.4

写真-2

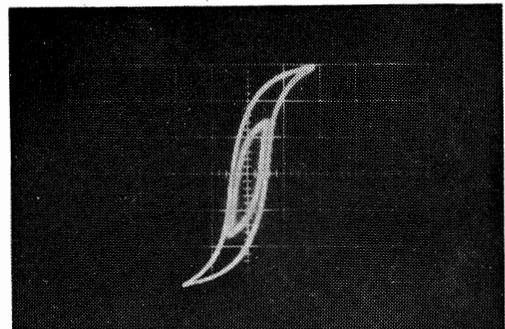
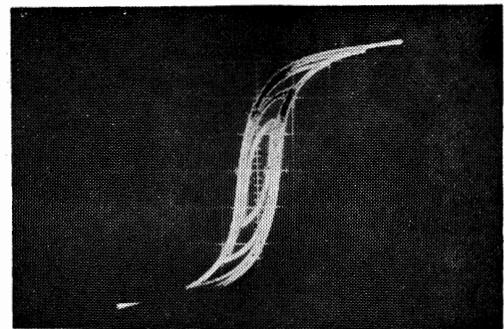
(a) 60%正弦波, $B_m = 5, 10$ [KG](b) $H_m = 0.5, 1, 2, 3, 4$ [oe]

写真-1は、周波数60[%]、供給実効電圧40[V]一定とした場合の種々な波形率に対する鉄損の変化をシンクロスコープにて履歴環線として撮影したものである。

また、写真-2の上の写真は60[%]正弦波の最大磁束密度 B_m を、5[KG]、10[KG]のときの履歴環線を一枚の写真に撮影したものであり、また、下の写真は磁界の強さ H_m を、0.5、1、2、3、4[oe]として変化したときのものを一枚の写真に撮影したものである。

写真の寸法はY軸, X軸, 共に前に述べたように30[mm]で10[KG], 10[mm]で1[oe]とした。写真一2の下の写真のH_mを変えて撮影した, 各履歴環線の尖端を結んだ軌跡を交流の普通磁化曲線と称せられることは周知の通りである。

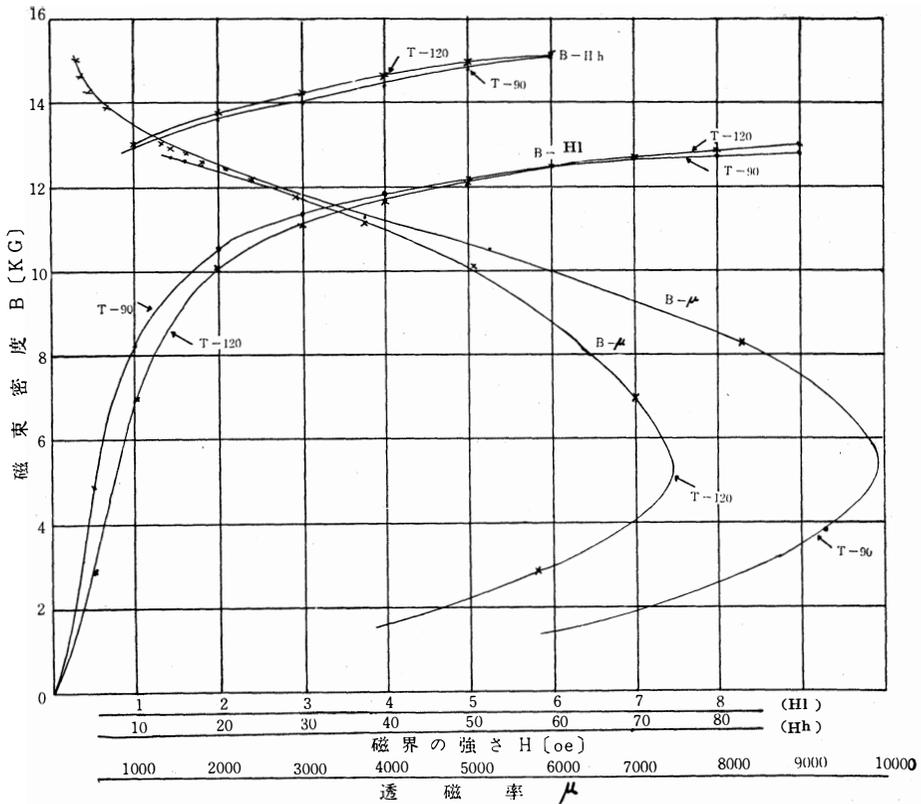
5. む す び

筆者は種々波形率を変えて鉄損を測定したのであるが, 第一鉄損を測定する場合に何を基準において測定するか, すなわち, 磁束密度を一定として測定した場合と, また, 試験器に供給する実効電圧を一定として波形率に対する鉄損を測定した場合とは大いに異なる, 前者は波形率が増加すれば鉄損は増大し, また, 後者

は波形率が増加すれば鉄損は減少するものである。

つぎに, シンクロスコープによる直視法より鉄損を測定するときは一たびY軸, X軸の寸法を定量的に決めておけば, あとはそのままの状態鉄損を能率よく測定出来るし, 大体の目安をつける場合にも一目で遠くからでもわかるので便利である。また, この方法では可成り精確に測定出来るし, 積分増幅器を用いることによって, 普通検流計を用いる測定法では到底測定できないような微小な磁化特性も測定出来る。しかも, B-H curve も一目瞭然であることも特徴の一つであると思われる。

最後に, このエプスタイン試験器にて交流磁化曲線を測定したので図一7に示した。



図一7 交流磁化曲線と透磁率曲線(T-90, T-120)60%

〔備考〕, 本実験で使用した波形率と波形についての

関係は, つぎの通りである。

- 波形率F : 1 は方形波, 1.11 は正弦波
- 1.16 は三角波, 1.31 は逆正弦波,
- 1.44 は逆円形波, に相当するものである。

$$\text{波形率} = \frac{\text{実効値}}{\text{平均値}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}}{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e dt}$$

電気4学会北陸支部連合大会 昭. 43. 10. 16発表