

回転振子による回転ヒステリシス損の測定

西堀 博* 片木 劍三郎**

Rotational Hysteresis Loss Measurements by Rotation Pendulum

By Hiroshi Nishibori, D.S.E., and Kenzaburō Katagi,
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

The hysteresis loss caused in large size rotary machines presents, because of its seriousness by comparison, a problem that cannot be overlooked, and asks for due analysis.

The phenomenon of hysteresis, however, takes extremely complicated character when it occurs, so it is a general practice when studying it to classify it in two, i.e. alternating hysteresis and the rotation hysteresis. The article is devoted to the latter, discussing the newly developed method of its measurement and the results.

The principle for the measurement in discussion is, while turning a rotation pendulum which contains five disks, to seek the loss by measuring the attenuation of its vibration cause by counter torque arising from the magnetization of the disks during rotation.

The writers, using this device, measured the rotation hysteresis loss of several materials and the results have proved to agree with the experiment results given out by F. Brailsford and other scientists.

〔I〕 緒 言

回転機の回転磁場により生ずる磁束は場所により異り、歯の部分では交番磁束、鉄心背部の一部では円回転磁束、またその他の部分では交番磁束と円回転磁束との混合した楕円回転磁束を生ずる。これらの磁束により生ずるヒステリシス損はそれぞれ交番ヒステリシス損、円回転ヒステリシス損及び楕円回転ヒステリシス損であつて、そのヒステリシス現象は非常に複雑である。殊にこの損失は大型機になると比較的大きくなるため設計上看過できぬ問題となり、従来種々の測定が試みられたが、この複雑な磁束変化では十分な結果が得難いので、一般に回転ヒステリシス損を円板磁性体が直径に平行な一様磁場に於て一回転した時消費されるエネルギーで定義し⁽¹⁾、これと交番ヒステリシス損とに分けて考えている。

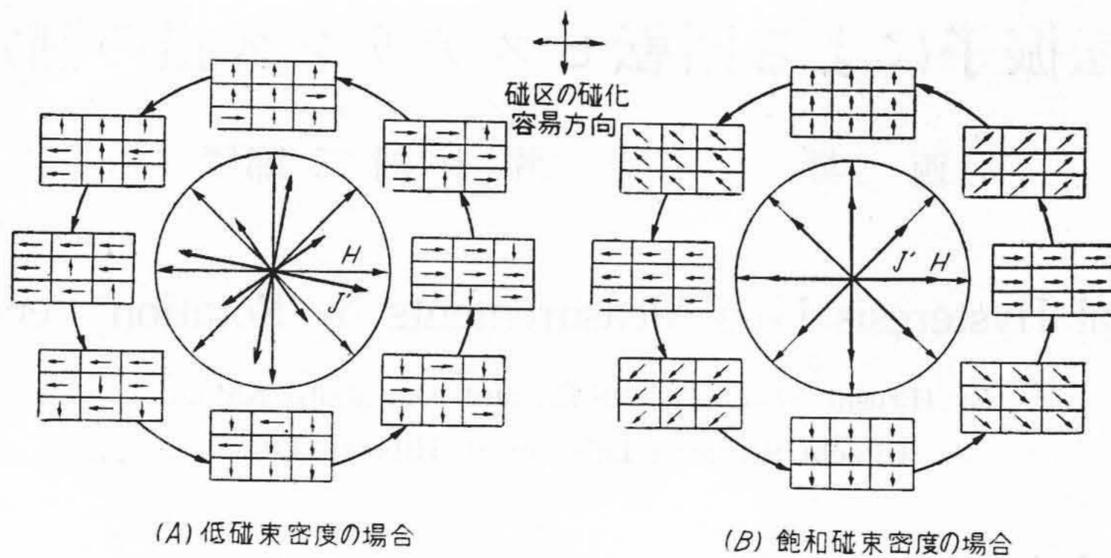
* 日立製作所日立研究所 工博

** 日立製作所日立研究所

この回転ヒステリシス損の問題に就いては宮崎、清山両氏の論文⁽²⁾、並びに F. Brailsford の論文⁽³⁾⁽⁴⁾が著名であるが、それらの装置は複雑であるので、実測に便利な新測定法を検討し、元日立製作所所員今堀氏の考案された回転振子による測定装置に改良を加え、種々の材料に就いて実測したのでその結果⁽⁵⁾を発表する。

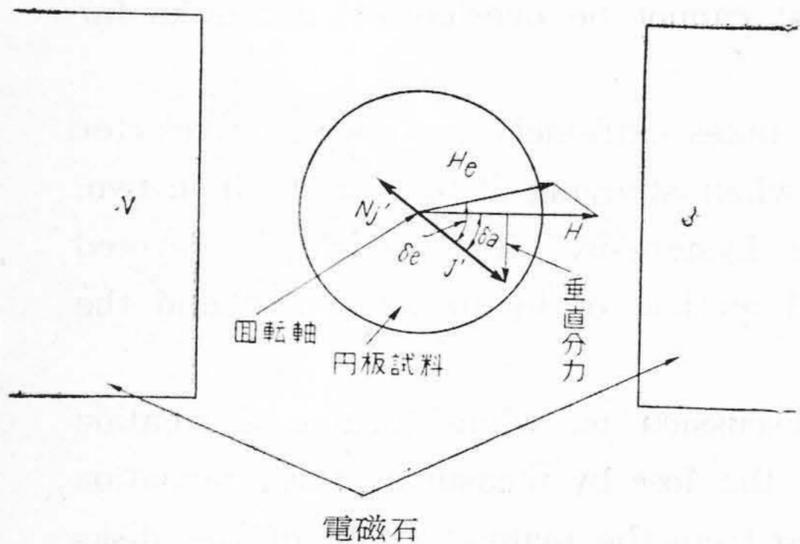
〔II〕 回転ヒステリシス損の原理

上述の回転ヒステリシス損はトルクによる仕事として定義されているが、これを磁区説から考えると第1図(次頁参照)(A)及び(B)となる。即ち、磁場の弱い間の磁区は(A)の如く大部分90°の飛躍磁化を行い、極く少数のものが180°の飛躍磁化を行うから、磁化の強さ J の方向は磁場 H より遅れて第2図(次頁参照)の如く垂直分力を生じ、これと磁場との間にトルクができる。磁場が十分強くなると(B)の如く全磁区が磁場の方向に向き磁場と共に連続回転を行い垂直分力を生じないから



第 1 図 回 転 磁 化 の 機 構

Fig. 1. Mechanism of Rotational Magnetization



第 2 図 磁 場 と 磁 化 と の 関 係

Fig. 2. Relation between Magnetic Field and Magnetization

トルクは零である。

いま、このトルクを T とすれば次式となる。

$$T = -HeJ' \sin \delta_e = -HJ' \sin \delta_a \dots \dots \dots (1)$$

但し He : 実効磁場 H : 外部磁場 J' : 磁化の強さ
 δ_e, δ_a : それぞれ J' と He 及び J' と H とのなす角

これから回転ヒステリシス損 $Wr^{(1)}$ を求めると、

$$Wr = \int_0^{2\pi} HeJ' \sin \delta_e d\delta_e = H \int_0^{2\pi} J' \sin \delta_a d\delta_a \quad (2)$$

となるが、この式で J', δ_a は磁気異方性等により一回転中に種々変化するからこの平均値を考え、これで表わすと

$$Wr = 2\pi HJ \sin \delta \dots \dots \dots (3)$$

但し J : J' の平均値

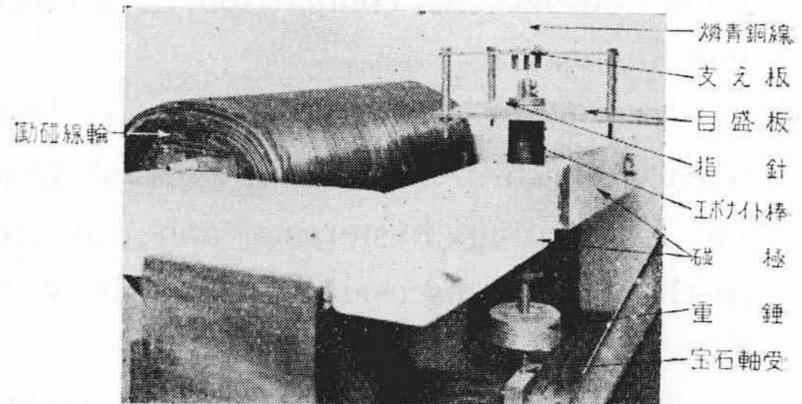
δ : 回転ヒステリシスの遅れ角

磁場が十分強い場合は上述の如く、 $\delta=0$ となるから

$$Wr = 0 \dots \dots \dots (4)$$

となり、回転ヒステリシス損は零である。

一方、この仕事は熱エネルギーに変換されて試料の温度上昇ともなる。



第 3 図 回 転 ヒ ス テ リ シ ス 損 測 定 装 置

Fig. 3. Measuring Apparatus of Rotational Hysteresis Loss

〔III〕 回 転 ヒ ス テ リ シ ス 損 の 測 定 法

上述の原理から種々の測定法が考えられるが、減衰振幅法は強磁性体の円板を一様磁界中で回転振動させ、これに働くトルク、即ち $-HJ \sin \delta$ を測定して (3) 式から Wr を求めるものである。この場合のトルクは明らかに逆回転力となり回転速度に無関係であるから、回転円板に対して摩擦力率と同じ作用をする。

第 3 図に示す如く強磁場の中に重い回転振子を燐青銅線 (直径 0.45 mm, 長さ 1,000 mm) で吊り、振子に試料を装置する。

振子はエポナイト棒に鉛製の重錘 (1,250 g) を附したもので、エポナイト棒の中央部を削りて試料を収めてある。

振子の金属部分 (非磁性の金属を使用す) は電磁石の両極よりできるだけ離し、渦流の影響を除くようにした。

試料は厚さ 0.35 mm, 直径 21 mm の円板に打ち抜きこれを焼鈍して 5 枚重ね合わせて一組とした。しかして磁気異方性の影響を打消すためにこの 5 枚の試料の圧延方向が全円周を 5 等分するように重ねた。電磁石は 60 mm x 60 mm の鉄心に直径 1.6 mm のエナメル線を 3,200 回巻き、磁極間隔を 40 mm にした。

振子を最初静止の位置より1回転振つた後、回転振動させ、振幅の減衰を測定する。試料の磁束密度は試料中央に直接サーチコイルを10回巻き弾動検流計で測つた。振動周期は7.65 sec, 最大回転速度は0.68 rev/secであるから渦流損は殆ど問題にならない。

この場合回転振子の運動の方程式は

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + k \frac{d\theta}{dt} + \rho^2\theta \pm R = 0 \dots\dots\dots(5)$$

但し、 I = 振子の慣性能率

k = 振子の空気抵抗

ρ^2 = 吊線の振り能率

R = 試料より受ける逆回転力

(5) 式で $\frac{d\theta}{dt} > 0$ に対しては $-R$, $\frac{d\theta}{dt} < 0$ に対しては $+R$ となり、試料の体積を V とすれば

$$-R = -HJV \sin \delta$$

この減衰運動方程式を初期条件 $t=0$ で $\theta=\theta_0$, $\frac{d\theta}{dt}=0$ の下に解けば、 m 周期目の振幅 θ_m は

$$\theta_m = \frac{-R}{\rho^2} \frac{(1 + e^{-\frac{kT}{4I}})(1 - e^{-\frac{mkT}{2I}})}{1 - e^{-\frac{kT}{4I}}} + \theta_0 e^{-\frac{mkT}{2I}} \dots\dots\dots(7)$$

試料を磁化していない時の m 周期目の振幅 θ'_m は、

$$\theta'_m = \theta_0 e^{-\frac{mkT}{2I}} \dots\dots\dots(8)$$

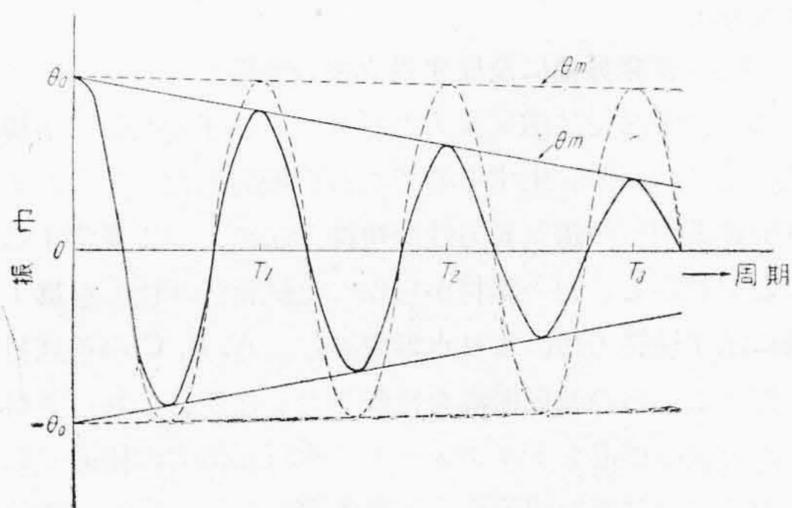
(7) 及び (8) 式より

$$R = (\theta'_m - \theta_m) \rho^2 \frac{1 - e^{-\frac{kT}{4I}}}{(1 + e^{-\frac{kT}{4I}})(1 - e^{-\frac{mkT}{2I}})} \dots\dots\dots(9)$$

この解を定性的に示せば第4図となる。

θ'_m , θ_m 及び T は実測より求まり I , k , 及び ρ は次の如くして求まる。今慣性能率 I_0 が簡単に算出できる振子、例えば円筒形の振子の場合の周期を T_0 とすれば

$$\rho = \frac{2\pi\sqrt{I_0}}{T_0} \dots\dots\dots(10)$$



第4図 (9) 式の追跡曲線
Fig. 4. Tracing Curve of Equation (9)

$$I = I_0 \frac{T^2}{T_0^2} \dots\dots\dots(11)$$

である。又試料が磁化していない時は純粋な減衰振動をするからこの振動の p 周期目及び q 周期目の振幅の θ'_p , θ'_q を測定すると ($q > p$)

$$\theta'_p = \theta_0 e^{-p \frac{kT}{2I}} \quad \theta'_q = \theta_0 e^{-q \frac{kT}{2I}}$$

$$k = \frac{2I}{T} \frac{\log \theta'_p - \log \theta'_q}{q - p} \dots\dots\dots(12)$$

となる。かくして R を実験的に求め得る。

したがって、試料 1 kg 当り 50 回の回転ヒステリシス損 ($Wr50$) は次式によつて求められる。

$$Wr50 = 2\pi \times \frac{10^3}{M} \times 50 \times 10^7 \times R \quad (W/kg) \dots\dots(13)$$

但し M は試料の重量 (g) とす。

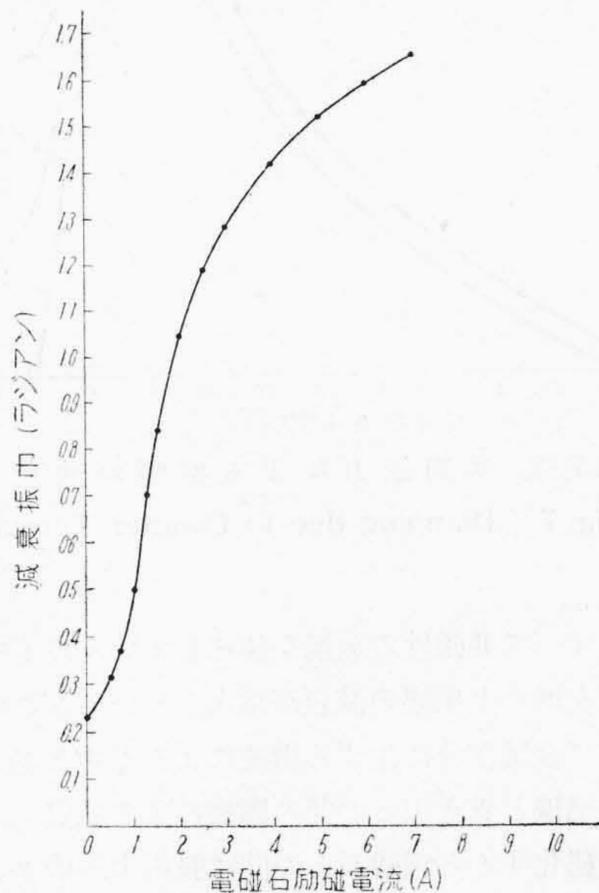
[IV] 試験方法の検討

(1) 減衰振幅の検討

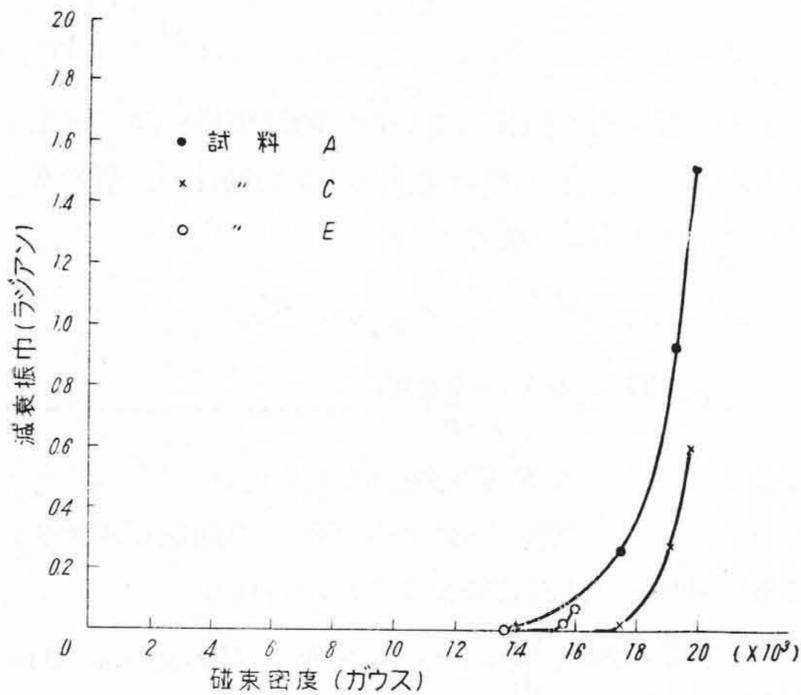
回転振子の振幅の減衰する主因は試料に付く逆回転力にあるが、この他に吊線と支え板との間の摩擦や、回転振子自身 (試料を取付けない場合) による減衰も無視できない。以下これらの影響を分離して調べた。

(A) 回転振子自身による振幅の減衰

回転振子に試料を取付けずに回転振子のみを振動させ、電磁石を励磁し、その励磁電流の大きさを変えて振幅の減衰を求めると第5図の如くなる。図は一例として振動周期が第4番目の結果を示してある。回転振子の金

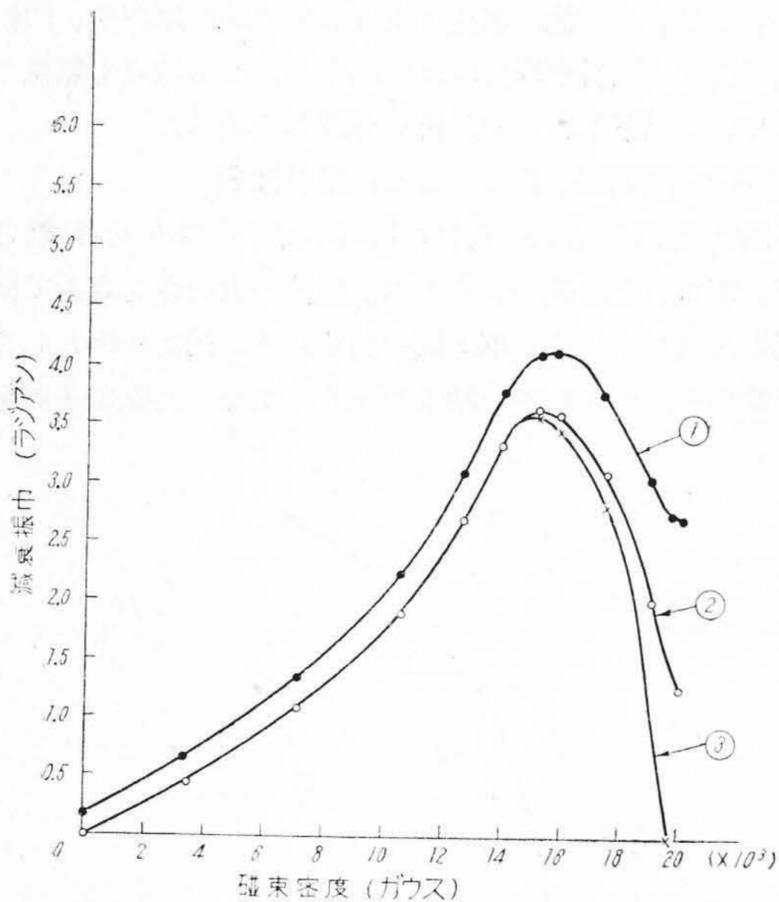


第5図 回転振子自身による振幅の減衰
Fig. 5. Damping due to Rotation Pendulum



第 6 図 吊線と支え板との間の摩擦による振幅の減衰

Fig. 6. Damping due to Friction between Suspension Wire and Supporting Plate



第 7 図 逆回転力による振幅の減衰

Fig. 7. Damping due to Counter Torque

属部分はすべて非磁性の金属を使用しているにも拘らず励磁電流を増すと振幅の減衰が増大している。この原因は主として金属部分に生ずる渦流によるものとする。

(B) 吊線と支え板との間の摩擦による減衰

試料を磁化すると電磁石との間に吸引力が働き、このため吊線と支え板との間の摩擦による減衰が生ずる。これによる振幅の減衰を測定するにはまず支え板を取除き、試料をある磁束密度まで磁化して吊線の変位を求め、

第 1 表 供 試 材 料

Table 1. Various Testing Materials

試料番号	品 名	焼鈍方法
A	熱圧延B級珪素鋼板	特殊焼鈍 1,050°C (20分保持)→ 850°C 3 回繰返す。
B	同 上	普通焼鈍 850°C 2 時間
C	同 上	焼鈍せず
D	弱冷圧延珪素鋼板	1,100°C 2 時間
E	パーマロイ B (Ni45%)	1,100°C 2 時間
F	パーマロイ C (Ni78%)	1,100°C 2 時間

次にこの位置まで支え板を移動して回転振動させた場合の振幅の減衰を求めてこれをこの時の値とした。

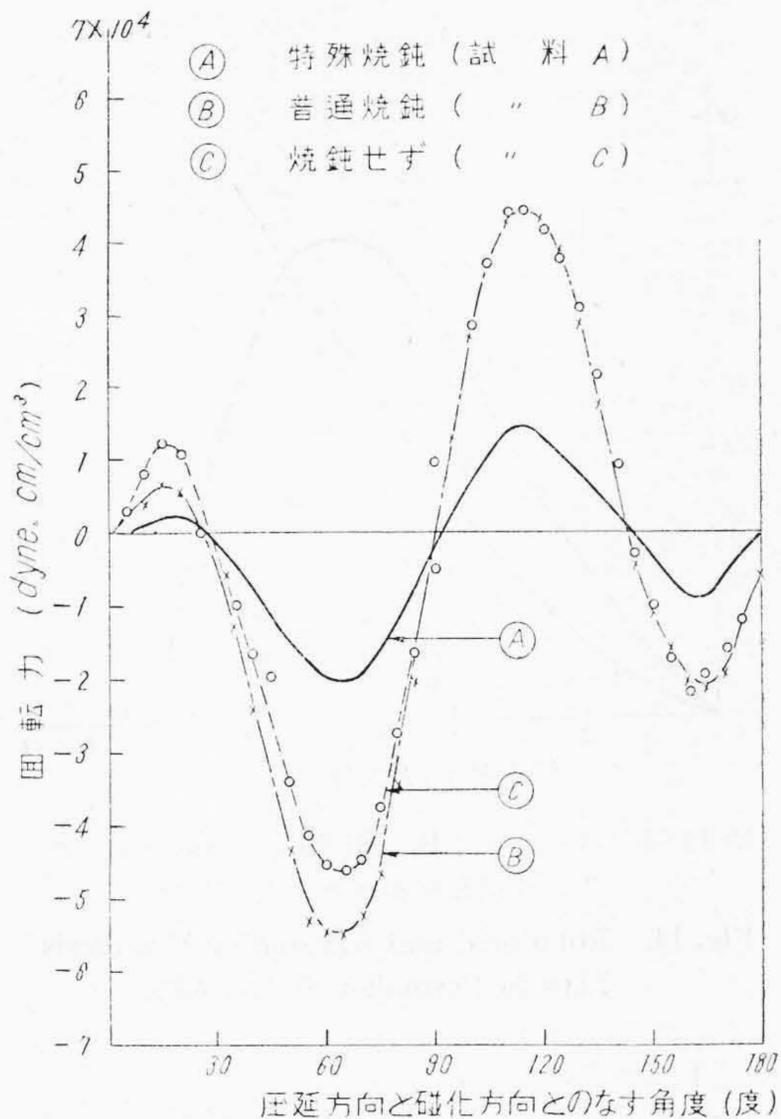
この方法から求めた振幅の減衰の結果を示すと第 6 図となる。この図から吊線と支え板との間の摩擦が振幅の減衰に及ぼす影響は低磁束密度では極めて小さいが、高磁束密度では相当大きいことがわかる。

(C) 逆回転振子による減衰

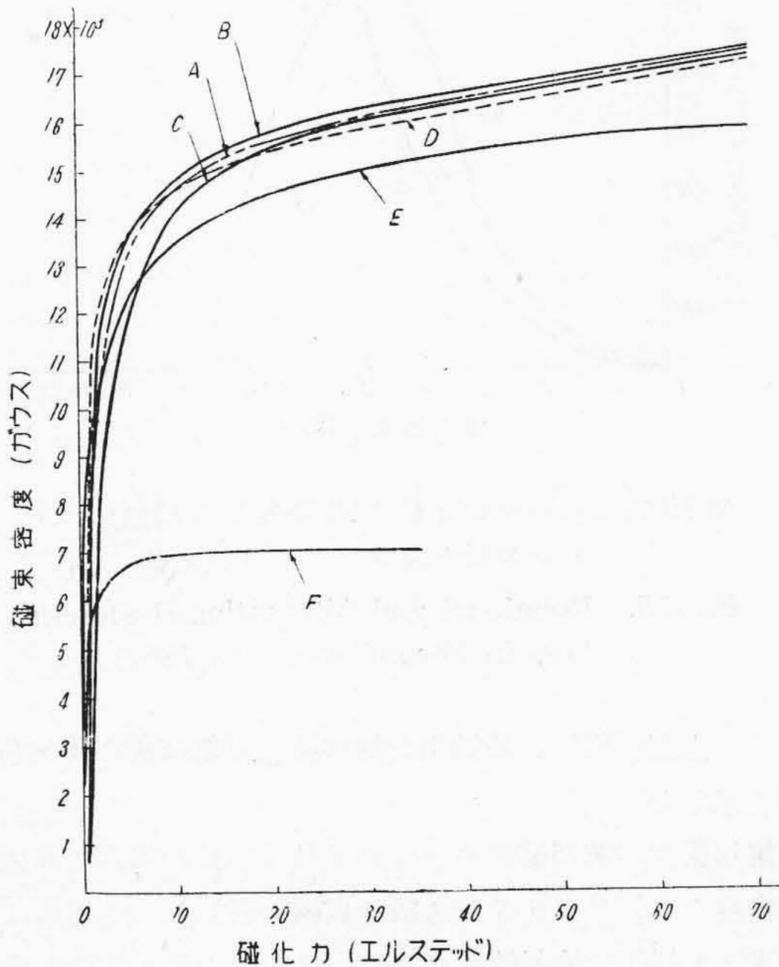
回転振子に試料を取付け磁界の中でこれを回転すれば振幅は前項 (A) 及び (B) 項による減衰に加えて回転ヒステリシス損に基因する減衰を生ずる。したがって、この回転ヒステリシス損に当る振幅の減衰は全減衰から (A), (B) 項の減衰を差引いたものとなる。第 7 図には第 1 表の試料 (A) を用いて磁場の強さを変えた場合の振幅の減衰状態 (測定周期は第 4 周期目) を示した。図の曲線①は上記 (A), (B) 項及び本項によつて合計された全減衰を示し、曲線②は (B) 項と本項との減衰を、又曲線③は本項のみによる減衰を示すものである。曲線③に就いてみると振幅の減衰は試料の磁束密度が増加するにしたがい増大し磁束密度 15,500 ガウス附近でその極大に達し、更に高磁束密度では逆に減少して遂に零になる。かような振幅の減衰形式は他の試料に就いても同様である。

(2) 減衰振幅に及ぼす異方性の影響

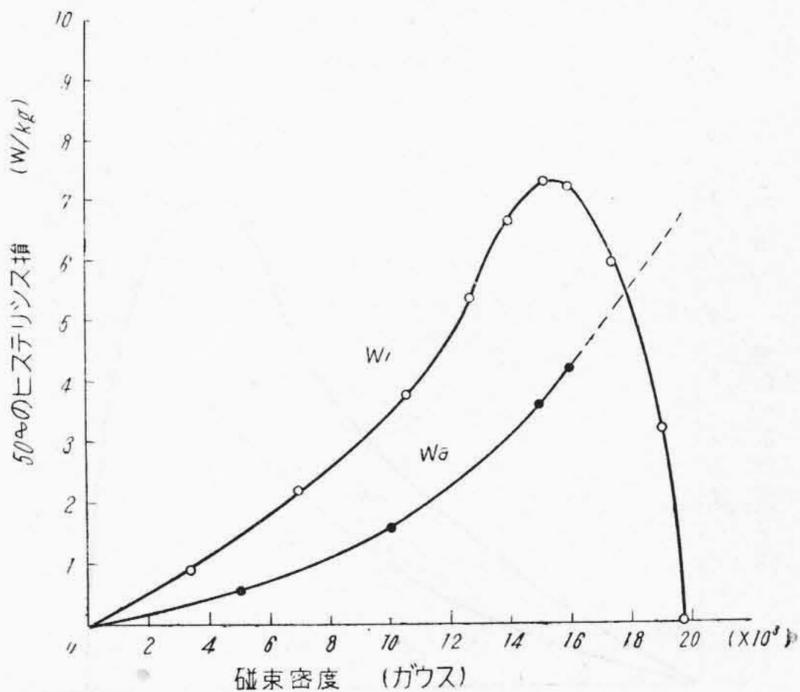
この測定法では磁気異方性が強いと振子の回転が不規則になり、誤差を生ずるのでこれを検討した。このため B 級珪素鋼板の磁気異方性が焼鈍方法によつて変化することを利用し、同一素材から作った試料 (30 枚) を第 1 表に示す焼鈍方法により水素焼鈍し、A, B, C の各試料を作りこれらの減衰振幅を比較した。なお、これら試料の異方性の相違をトルクメータで磁気回転力の相違として測定した結果を図示すると第 8 図となる。図から磁気異方性は焼鈍を行わない場合と普通焼鈍の場合とでは大差ないが、特殊焼鈍のものはこれらより遙かに小さくな



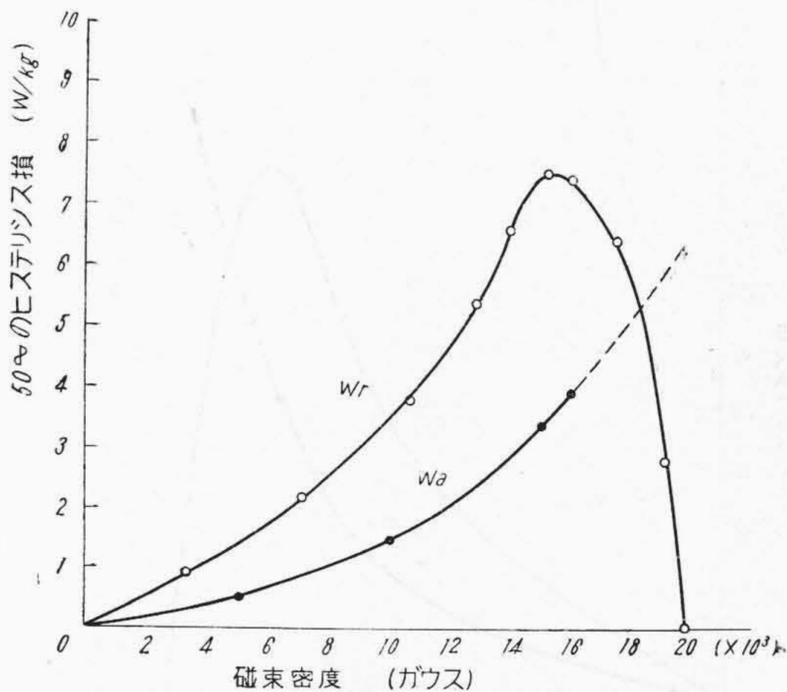
第8図 供試珪素鋼板の回転力曲線
Fig. 8. Torque Curve for Silicon-Iron Sheet Samples



第9図 供試材料の磁化曲線
Fig. 9. Magnetization Curves for Various Samples

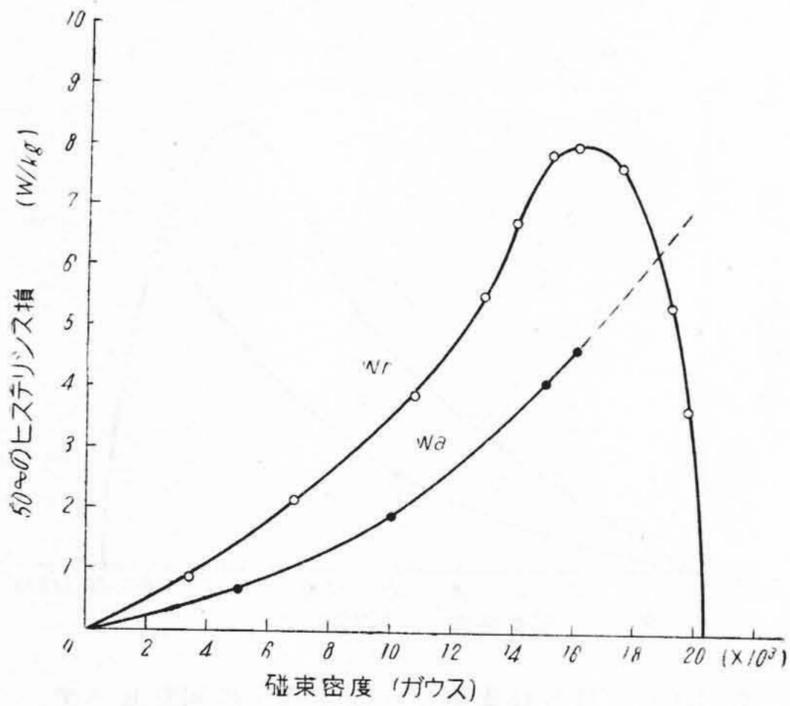


第10図 B級珪素鋼板(試料A)の回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損
Fig. 10. Rotational and Alternating Hysteresis Loss in B-Class Silicon-Iron Sheet (Sample A)

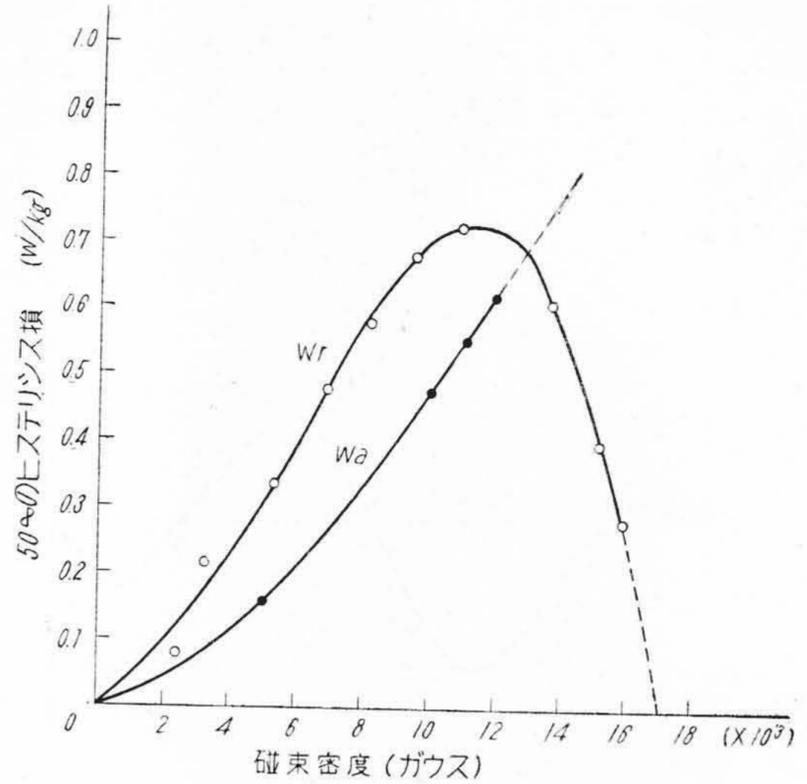


第11図 B級珪素鋼板(試料B)の回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損
Fig. 11. Rotational and Alternating Hysteresis Loss in B-Class Silicon-Iron Sheet (Sample B)

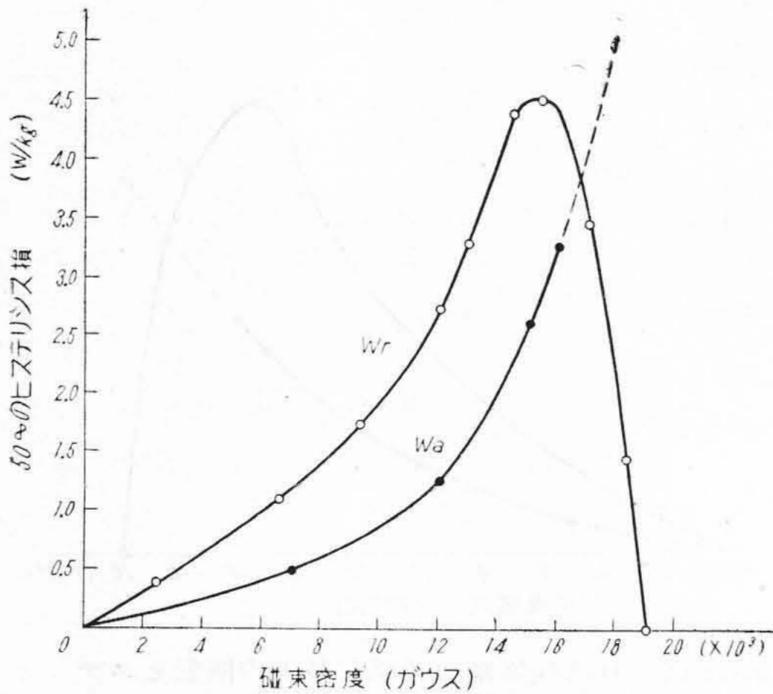
つてることがわかる。したがって、これらの試料によって予め実験の再現性を確かめ、次に試料間のばらつきを検討した。このため、同一符号の試料のうちからその圧延方向が全円周を5等分するように重ねた5枚1組の試料を4組選んでその減衰振幅を測定した。この結果、減衰振幅のばらつきはこれを減衰の最大部と比較するとA試料では±1%、B試料では±5.1%、C試料では±3.2%となり、磁気異方性が強いもの程このばらつきが大きい。しかし、これらの結果から異方性のある試料でも測



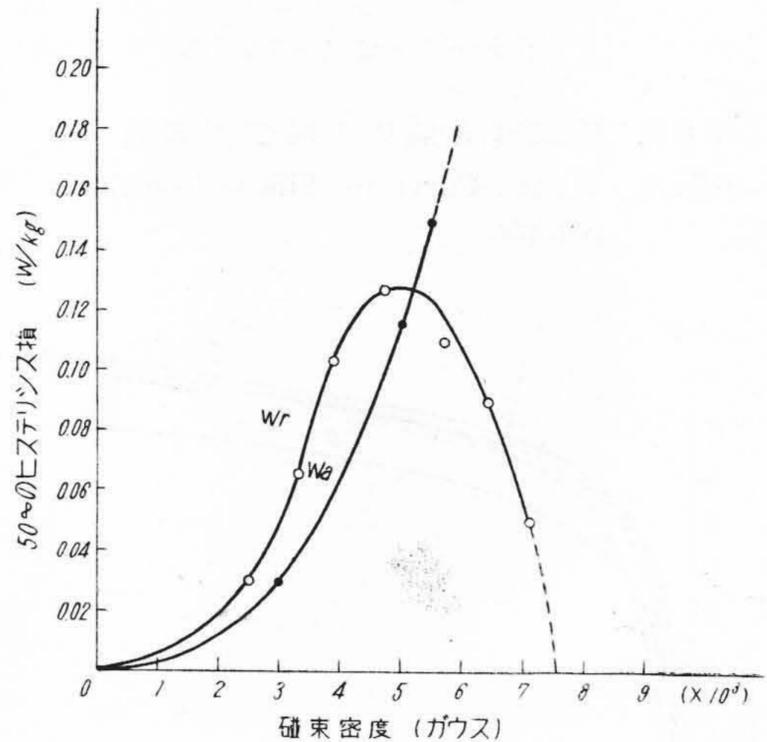
第 12 図 B級珪素鋼板 (試料C) の回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損
 Fig. 12. Rotational and Alternating Hysteresis Loss in B-Class Silicon-Iron Sheet (Sample C)



第 14 図 パーマロイ B (Ni 45%) の回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損
 Fig. 14. Rotational and Alternating Hysteresis Loss in Permalloy B (Ni 45%)



第 13 図 弱冷圧延珪素鋼板の回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損
 Fig. 13. Rotational and Alternating Hysteresis Loss in Light Cold Rolled Silicon-Iron Sheet



第 15 図 パーマロイ C (Ni 78%) の回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損
 Fig. 15. Rotational and Alternating Hysteresis Loss in Permalloy C (Ni 78%)

定回数を増加してばらつきの平均値を採れば回転ヒステリシス損は測定できることを知った。

〔V〕 供試材料の回転ヒステリシス損

第 1 表に示す 6 種類の試料に就いて回転ヒステリシス損を求めた。なお、この試料の磁化曲線を示すと第 9 図となる。回転ヒステリシス損は上述の逆回転力のみによる減衰を求めて (9) 及び (13) 式から計算したもので

ある。上記試料による結果を第 10 図乃至第 15 図に W_r 曲線で示した。

第 14 図及び第 15 図のパーマロイ B 及び C の場合に高磁束密度の回転ヒステリシス損を点線で表わしているのは両者とも損失の絶対値が非常に小さいので測定装置の感度よりみて正確に求められなかつたためである。いずれの試料もその回転ヒステリシス損の傾向は同じで、磁束密度とともに増大し極大値を経て急減し、高磁束密度で

零になつている。また、この極大値は飽和磁束密度、即ち回転ヒステリシス損が零になつた時の磁束密度の約80%のところに存在している。これらの結果は F. Brailsford の結果⁽³⁾とよく一致している。

〔VI〕 回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損との関係

F. Brailsford は種々の材料に対する両ヒステリシス損の関係を求めているので、筆者達も同様にこれを求めた。たゞし F. Brailsford⁽⁴⁾ は交番ヒステリシス損を同一試料を用いてトルク法で測定しているのに対し、筆者達は同一試料の他の部分から環状試料（外径 45mm, 内径 33mm のもの 12 枚使用）を作り弾動検流計法によりヒステリシス環線を求め、この面積から算出した。この方法により測定した結果を回転ヒステリシス損と同じ図面で W_r で表わしている。なお、点線は測定器の都合で未測定の部分を示す。

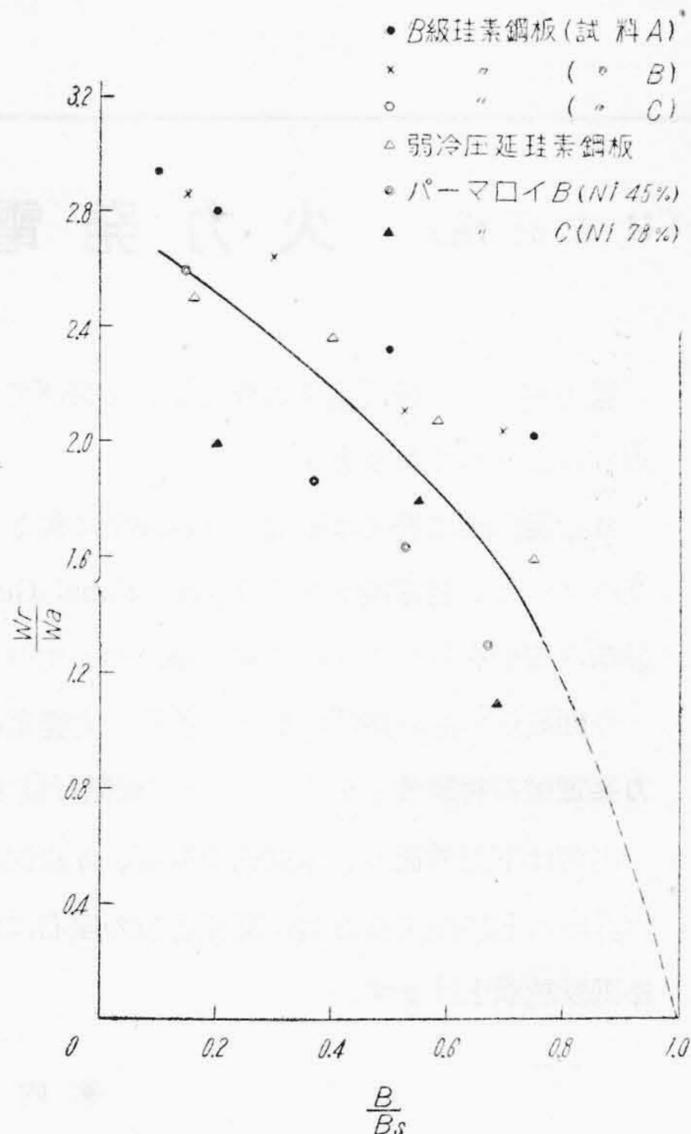
次に、縦軸を交番ヒステリシス損に対する回転ヒステリシス損の比 $\left(\frac{W_r}{W_a}\right)$ 、横軸を飽和磁束密度に対する磁束密度の比 $\left(\frac{B}{B_s}\right)$ で表わせば両者の関係は第16図の如くなり、F. Brailsford の結果と同様に材料にかゝらない一定の関係曲線が得られる。

この結果から低磁束密度に於て回転ヒステリシス損の値は交番ヒステリシス損の値の2倍より大きいことがわかる。

〔VII〕 結 言

この回転ヒステリシス損の測定法は従来のものより簡単であるが、その結果は F. Brailsford 等の結果とよく一致する。なお、上述の実験結果を要約すると次の如くである。

- (1) 回転ヒステリシス損は磁束密度とともに増大し、その極大値に達したる後急減して、高磁束密度で零となる。
- (2) 回転ヒステリシス損の極大は飽和磁束密度の約80%のところに存在する。
- (3) 低磁束密度に於ては回転ヒステリシス損の値は交番ヒステリシス損の2倍よりも大きい。



第16図 各種供試材料に於ける回転ヒステリシス損と交番ヒステリシス損との比
Fig. 16. Ratio of Rotational to Alternating Hysteresis Loss in Various Materials

終りに本研究に対して終始御指導、御鞭撻を賜つた日立製作所馬場桑夫博士、三浦倫義博士、及び実験に協力された石崎幸君に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) Bozorth: Ferromagnetism P. 514 (1951)
- (2) 宮崎、清山: 九州帝国大学工学彙報 5, P. 194~206 (昭5)
- (3) F. Brailsford: J.I.E.E. 83, P. 566~575 (1938)
- (4) F. Brailsford: J.I.E.E. 84, P. 399~407 (1939)
- (5) 西堀、片木: 電気三学会連合大会予稿 48 (昭28)

『日立評論』 火力発電機器特集号 別冊 No. 4



電力源として最近益々重要な使命を帯びて来た火力発電所の建設は電力会社及び自家給電用として着々建設されております。

日立製作所に於ては戦前よりの技術に加えボイラは英国 Babcock & Wilcox, Ltd. と、タービン及びタービン発電機は米国 International General Electric Co. とそれぞれ技術提携を致しまして、最新の技術を以つてその成果を挙げつゝあります。

今回最新の海外事情に加え、各種火力発電機器の成果を集め、「日立評論」別冊 No. 4 として「火力発電機器特集号」を来る 11 月中旬発行致すことになりました。

内容は下記の通り、本文約 160 頁、写真図版約 400 版を収録した集大成で、一読して火力発電設備の詳細に通曉出来ると共に関係各位の座右において絶好の参考書であることゝ信じます。何卒本誌同様御愛読願上げます。

◆ 内 容 ◆

- ◎ 巻頭言「火力発電技術の発達に期待する」.....東京電力株式会社社長 高井亮太郎
- ◎ 我国火力発電所最近の趨勢.....公益事業局・火力課長 三田村正二郎
- ◎ 最近の火力発電所ボイラ、タービンの傾向.....日立製作所・日立工場 {守田 紀力
綿 森 力
- ◎ 最近の B & W ボイラに就いて.....バブコック・日立株式会社 {E. J. Hulland
村山三郎
- ◎ 最近の日立大容量発電用蒸気タービン.....日立製作所・日立工場 佐藤博治
- ◎ 最近のターボ発電機.....日立製作所・日立工場 {後藤 恒夫
菊地 弥十郎
- ◎ 発電所用ガスタービン.....日立製作所・日立工場 佐々木精治
- ◎ 新しい発電所補機（復水、蒸気、加熱装置）に就いて....日立製作所・日立工場 浦田 星
- ◎ 最近の火力発電所用高温高圧
ボイラ給水ポンプに就いて.....日立製作所 {亀有工場 {寺田 進雄
日立工場 {矢野 忠泰
桜井 泰男
- ◎ 最近の火力発電所用ボイラーファンに就いて..日立製作所 {川崎工場 河田直幸
日立工場 平川克巳
- ◎ 合理化された火力発電所の制御装置.....日立製作所・日立国分分工場 森山 一夫
- ◎ 日立自動燃焼制御装置.....日立製作所 {日立工場 泉 千吉
多賀工場 北川 栄
- ◎ 火力発電所に於ける工業計器と特殊計器.....日立製作所・多賀工場 辻田正一
- ◎ 最近の火力発電所運炭設備.....日立製作所 {亀有工場 村田敏雄
日立工場 平川克巳
- ◎ 火力発電所用主幹ケーブルの電流不平衡.....日立製作所 {日立電線工場 橋本博治
日立研究所 加子 泰彦

東京都千代田区丸の内1の4
(新丸ビル 7階)

日立評論社

誌代特集号1冊 ¥100 円16
(振替口座東京 71824 番)