

回転磁界による鉄損について

小野 訓*, 有賀 浩*

(1971年9月10日受理)

On the Iron Loss due to the Rotating Magnetic Field

Kun ONO and Hiroshi ARIGA

Abstract:— We investigated the iron loss of the following cold rolled silicon steel plates due to the three phase 50 [Hz] rotating magnetic field.

- (1) Oriented plates. (Z-10 and Z-11)
- (2) Non-oriented plates. (H-12, H-18 and H-23)
- (3) Non-oriented and non-annealed plates. (U-30)

The sample which has low iron loss under the alternating field has also low iron loss under the rotating field. The maximum iron loss under the rotating field is appeared at flux density (in the sample) 1.6~1.7 [Wb/m²].

The ratio of iron loss at 1, 1.5 and 1.7 [Wb/m²] under the rotating field to ditto under the alternating field is about 1.6~3.1.

1. ま え が き

けい素鋼板の鉄損は一般にエプスタイン法により交番磁界における値が採用されている。しかし誘導機などの鉄心の大部分は回転磁界を受けるので磁束密度の観念が単純でなく、エプスタイン法のように簡単に試験ができない。^{(1),(2),(3),(4)}したがって回転磁界内の鉄損はエプスタイン法による鉄損の値に係数をかけて求めている。筆者のひとり⁽⁵⁾はさきに3相回転磁界によるトルクを鉄損に換算する一測定法ならびにその結果を発表したが、今回トルク⁽⁶⁾の測定法その他に若干の改良を加え、それによって最近のけい素鋼板数種について鉄損の測定を行なったので報告する。

2. 測定方法

2-1 回転磁界

回転磁界の発生には図1に示すような 0.4 [kW], 200 [V], 3相, 2極, 50/60 [Hz]

* 茨城大学工業短期大学部電気工学科

誘導電動機の固定子を用いた。(固定子内径は68[mm])これに3相交流を供給すれば固定子に回転磁界を発生する。固定子のスロット数は24であり、2極機であるから毎相毎極のスロット数は4である。電源周波数は50[Hz]である。この磁界による磁束の波形はサーチコイルを用いてその誘導起電力をブラウン管で観察するとほぼ正弦波である。ただしこの固定子の中に回転子のかわりに試料を入れると試料内の磁気飽和現象によりその波形がいくぶんひずんでくる。これは試料の特性によるものと考えられる。

2-2 試料

測定に使用したけい素鋼板は6種類で、いずれも新日本製鉄会社の製品であり、その特性を表1に示す。表に示す値は試料に添付された試験成績表記載の保証値である。ただしNo.6(U-30)はひずみ取り焼鈍を施してない。これらの中心部に直径6[mm]の孔をあけ、旋盤により直径65[mm]の円板状に加工した。その際表面皮膜の破損、切削時の摩擦による温度上昇、機械的ひずみに充分注意した。これらの試料を厚さ0.35[mm]のものは11枚、0.5[mm]のものは8枚とし、それぞれ試料円板相互間にトレーシングペーパーを挿入

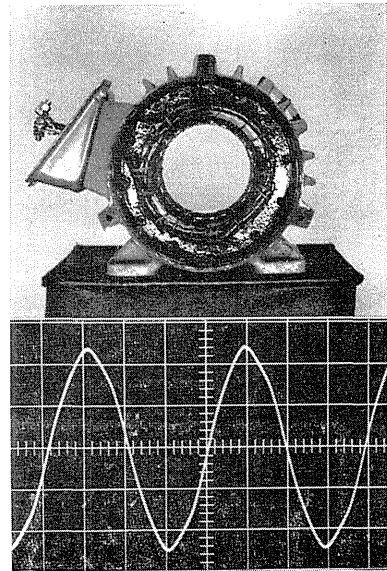


図1 0.4kw, 200V, 2極三相誘導電動機の固定子および固定子内に試料を入れたときのエアギャップ磁束の波形

表1 試料の特性

	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6	
名称	方向性けい素鋼帯 (オリेंटコア)				無方向性けい素鋼帯 (ハイライトコア)							
略号	Z-10		Z-11		H-12		H-18		H-23		U-30	
厚さ(mm)	0.35		0.35		0.35		0.5		0.5		0.5	
エプスタイン試験値	W 15/50	W 17/50	W 15/50	W 17/50	W 10/50	W 15/50	W 10/50	W 15/50	W 10/50	W 15/50	W 10/50	W 15/50
鉄損(W/kg)	0.98	1.41	1.14	1.65	1.13	2.74	1.66	3.64	2.11	4.55	3.7	8.00
備考	W10/50, W15/50, W17/50 は周波数50[Hz] 磁束密度1.0, 1.5, 1.7[Wb/m ²]における鉄損											

表2 測定試料

試料	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
略号	Z-10	Z-11	H-12	H-18	H-23	U-30
かさね枚数(枚)	11	11	11	8	8	8
重量(g)	95.1	94.2	94.8	103.2	104.5	103.5
備考	測定試料はいずれも中心部(6mm)φ孔, 外径65(mm)である					

し, かつロールの方向に重ね合せ, その周囲を接着剤とセロテープではりつけた。

2-3 測定試料の支持方法

固定子の両側のエンドブラケットを取りはずし, 中央に内径4[mm]のボールベアリングを取りつけたところのベークライト板を固定子の片側に取りつけた。反対側には巾20[mm]長さ約68[mm]の長方形ベークライト板の中央にやはり内径4[mm]のボールベアリングを取りつけ, 固定子内に自由に出し入れできるようにした。(ベークライトの厚さはいずれも4[mm]) 測定試料はアルミニウム製シャフト(直径4[mm], 長さ150[mm], ただし, その中央部には直径6[mm], 長さ20[mm]にわたりネジを切った。)に両側よりナットでしめつけ固定した。なお試料とシャフトの接触部はセロテープで絶縁した。こ

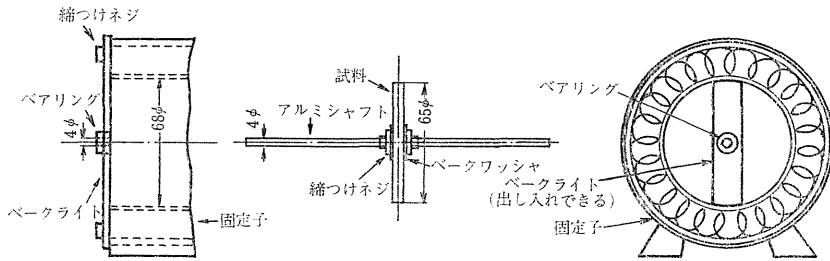


図2 試料の支持方法

の試料を固定子の中央部にあるように挿入し, 両側を前述のボールベアリングで支えた。これらの装置を図2に示す。前回はエアギャップを5[mm]にしたが, 今回はこれを1.5[mm]に縮小した。

2-4 トルクの測定

試料を挿入したまま固定子に3相交流を供給すると回転磁界により試料にトルクが発生し, 試料は回転磁界の方向に偏角しようとする。このトルクをシャフトの一端に取りつけた長さ45[mm], 直径0.6[mm]の鋼針により図3のように天びんを用いて測定する。いまトルク T で回転しようとするとき天びんをバランスさせると

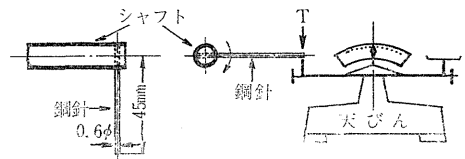


図3 トルクの測定

$$T = mgl \text{ [N}\cdot\text{m]} \dots\dots\dots(1)$$

ただし, $l=0.045\text{[m]}$

これよりトルクを求めることができる。ただし試料の中心が固定子内側円形の中心に一致するようにセットすることが重要であり, 少しでも偏心するとエアギャップの磁束密度分布が一様でなくなり, したがってトルクも変わってくる。測定に際してはこの点を十分に注意した。なお試料を固定子に対し120°ずつずらせて測定しその平均値をとった。

2-5 磁束密度の測定

固定子と試料間のエアギャップの磁束密度(概略値)は図4(b)に示すサーチコイルを用い, 固定子と試料の中央にいずれにも片よらぬよう配置し, 試料の周囲60°毎に6箇所について次式により測定し, その平均値をとった。

$$Bg \doteq \frac{V}{4.44fNS} [Wb/m^2] \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 N ＝サーチコイル巻数 (20)
 S ＝サーチコイル断面積 ($18 \times 10^{-6} [m^2]$)
 $f=50 [Hz]$

つぎに固定子内に配置した試料内の磁束密度は試料の各部によって異なる。2極の固定子であるから試料の直径部、さらに図4(a)に示すように全体で6箇所巻線を施し、回転磁界による起電力 V を測定し同じく(2)式によって、その磁束密度の概略値を求めた。これも固定子に対して試料を120°ずつ3回位置をかえて測定し、その平均をとった。

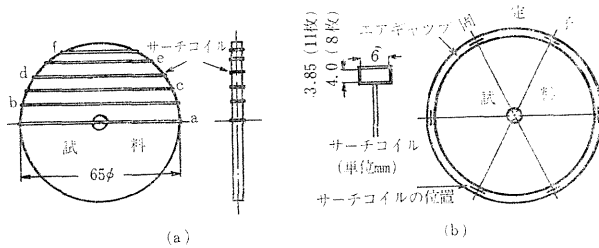


図4 磁束の測定法

表3 試料内磁束密度測定用サーチコイル

位 置	中心からの距離	サーチコイル断面積	サーチコイル断面積
a	0 (mm)	25.0 (mm ²)	26.0 (mm ²)
b	8.5	22.7	23.6
c	15.0	21.1	22.0
d	21.5	17.7	18.4
e	28.5	13.5	14.0
f	31.0	8.1	8.4
備 考	図4(a)参照	11枚かさねのとき	8枚かさねのとき

2-6 トルクの換算

回転磁界による鉄損が試料内に生ずると磁界の回転方向にトルク T を発生する。もし試料を回転させないように保持すれば、機械的出力は零となり、磁界から試料に与えられた全入力¹⁾は試料内の全損失すなわち全鉄損 W に等しくなり W と T との間にはつぎの関係が成立する。

$$W = \frac{4\pi f}{P} T [W] \dots\dots\dots(3)$$

ただし f ＝電源周波数 [Hz]
 P ＝固定子の磁極数
 T ＝トルク [N-m]

したがって(1)式より静止状態(天びんがバランスした状態)のトルクを求め、これを用いて(3)式より試料中の全損失すなわち全鉄損を求めることができる。

3. 実験結果および検討

固定子電流 I [A] をパラメータにとった場合試料内磁束の分布を図5, 6, 7に示す。図には試料 No. 1, 3, 6 (Z-10, H-12, U-30) を示したが、他の試料も同一固定子電流に対して試料直径部 a より b, c, d e, f (図4 (a) 参照) と遠ざかるにしたがい磁束密度

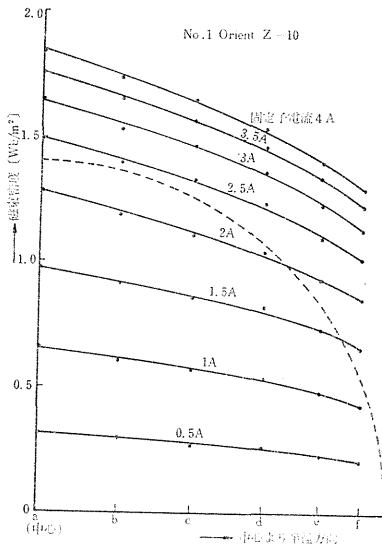


図5 試料内の磁束分布

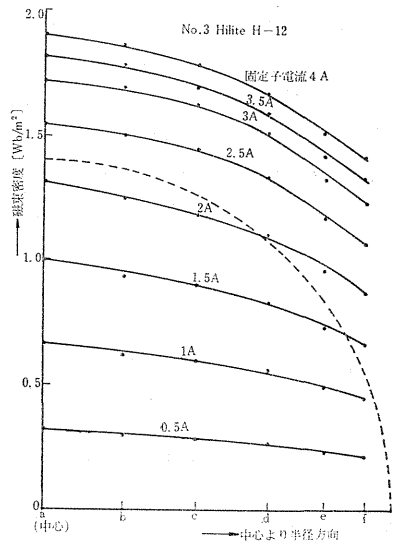


図6 試料内の磁束分布

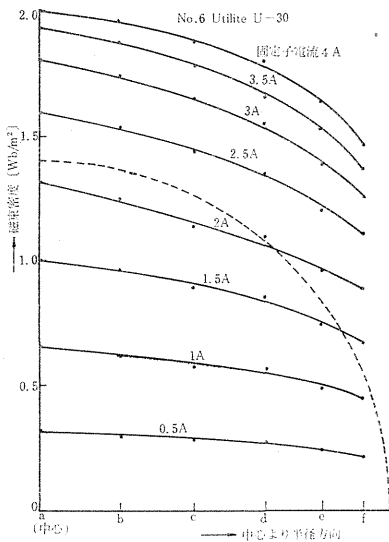


図7 試料内の磁束分布

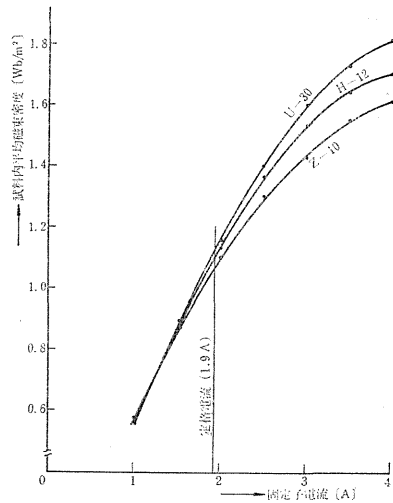


図8 固定子電流と試料内磁束との関係

は小さくなる。また固定子電流の増加にともない垂下特性もいちじるしくなる。これは磁束密度が小さいときは試料円板の外周部に磁束が集まるが、磁束が増加するにしたがい試料の中心部の磁束密度が増加するものと考えられる。つぎに固定子電流 I [A] と試料内平均磁束密度 B [Wb/m²] との関係を図8に示す。試料内の磁束は固定子電流 I [A] の増加とともに次第に増し飽和の傾向を現わす。使用した誘導電動機の定格電流は 1.9 [A] であるからこのときの試料内平均磁束密度は約 1.0~1.1 [Wb/m²] で、(試料によって異なる) 電流が定格の2倍付近では磁束はいちじるしく飽和してくる。さらに試料内平均磁束密度 B と、固定子と試料間のエアギャップ磁束密度 B_g との関係を図9に示す。

両者はほぼ比例関係にありその比は表4のとおりである。定格電流 1.9 [A] におけるエアギャップ磁束密度 B_g は約 0.45~0.55 [Wb/m²] で(試料により異なる)設計値 0.53 [Wb/m²] に近い値である。つぎに試料内平均磁束密度 B [Wb/m²] と回転磁界による鉄損 W_R [W/kg] との関係を図10に示す。い

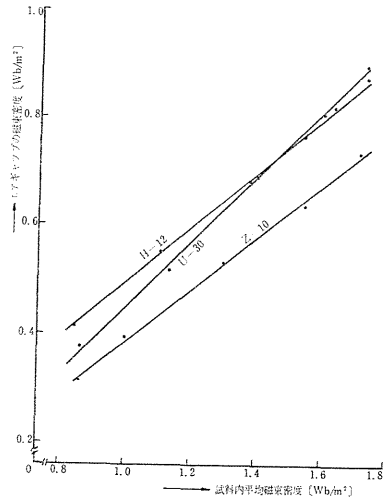


図9 試料内とエアギャップの磁束の関係

表4 試料内平均磁束密度 (B) とエアギャップ磁束密度 (Bg) の比

試料	No. 1 (Z-10)	No. 2 (Z-11)	No. 3 (H-12)	No. 4 (H-18)	No. 5 (H-23)	No. 6 (U-30)
$\frac{B}{B_g}$	1.98	1.97	1.96	1.94	1.92	1.92

れの試料についても $B=1.5$ [Wb/m²] 付近において曲線の勾配が急になる。⁽²⁾ 試料 No. 1, 2 [Z-10, Z-11] は 1.6 [Wb/m²] で最大鉄損に達し, No. 3, 4, 5 (H-12, H-18, H-23) は 1.7 [Wb/m²] 付近で最大となる。ただし試料 No. 6 (U-30) は磁束密度に対する鉄損が非常に急勾配であり 1.7 [Wb/m²] で最大鉄損となる。これはセミプロセスのため未焼鈍による影響が現われたものと思うが、最大鉄損を示した後は^{(2), (8)} いずれの試料も鉄損が減少する。このことは磁区理論からも説明される。^{(2), (8)} 交番磁界の場合のエプスタイン法による鉄損 W_A [W/kg] (メーカーの保証値) と回転磁界において測定した鉄損 W_R [W/kg] とを同一周波数, 同一磁束密度 B [Wb/m²] について比較した。これを表5に示す。表5より明らかなように交番磁界において鉄損の少ないものは回転磁界における鉄損も少ない。 $B=1, 1.5, 1.7$ [Wb/m²] において鉄損を比較すると⁽⁵⁾ $\frac{W_R}{W_A}=1.6\sim 3.1$ である。一般に鉄心材料の場合にヒステリシス損のみについて比較すると、実際の使用磁束密度範囲内では⁽⁵⁾ 回転磁界の場合には交番磁界の場合の1.4~1.8倍のようである。よって試料 No. 1, 2, (Z-10, Z-11) の $\frac{W_R}{W_A}=3, 3.1$ (1.5 [Wb/m²]) は少し大きな値となり、材質によるものか測定誤差によるものか判断しがたい。しかし他の試料と比較検討した場合(測定上についても)

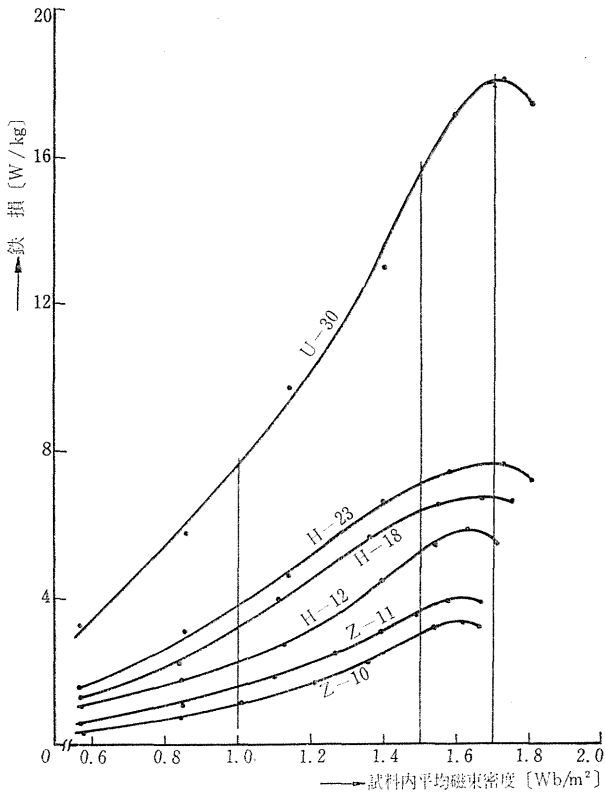


図 10 磁束密度と鉄損の関係

表 5 鉄損の比較表

試料	No. 1 (Z-10)		No. 2 (Z-11)		No. 3 (H-12)	No. 4 (H-18)	No. 5 (H-23)	No. 6 (U-30)	
	W15/50	W17/50	W15/50	W17/50	W15/50	W15/50	W15/50	W10/50	W15/50
磁束密度 (Wb/m ²)									
W_A (W/kg) (交番磁界鉄損)	0.98	1.41	1.14	1.65	2.74	3.64	4.55	3.7	8.0
W_R (W/kg) (回転磁界鉄損)	2.9		3.5		5.2	6.3	7.1	7.1	15.5
$\frac{W_R}{W_A}$	3		3.1		1.9	1.7	1.6	1.9	1.9
平均	3		3.1		1.9	1.7	1.6	1.9	
備考								未焼鈍	

損も少ない。

(2) 磁束密度は試料内で一般に異なるが平均磁束密度で論ずれば上記の鉄損値 W_R [W/kg] はおよそ平均磁束密度 $B=1.6\sim 1.7$ [Wb/m²] で最大となることがわかる。

測定誤差による影響は少ないように思われる。試料中同一厚さ (0.35, 0.5[mm]) のものについては鉄損をそれぞれ直接比較できる。

4. むすび

回転磁界による鉄損の一測定法として, 3相, 2極, 50 [Hz] によるトルク測定から換算する方法を述べた。回転磁界においては磁束密度の概念が交番磁界に比べやや明確を欠くために測定法によって結果も異なると考えられるが, 本報の場合には厚さ0.35 [mm] のもの11枚, 厚さ 0.5 [mm] のもの8枚の円板試料を用い比較的新しい材料について調べた結果,

(1) 表5に示すように交番磁界による鉄損の少ないものは回転磁界による鉄

(3) 試料内の平均磁束密度 $B=1, 1.5, 1.7$ [Wb/m^2] における回転磁界による鉄損 W_R [W/kg] と交番磁界による鉄損 W_A [W/kg] の比 $\frac{W_R}{W_A}$ は1.6~3.1程度である。

今後さらに、試料内の正確な磁束分布状態、および各試料の磁化曲線と鉄損との関係などについても調べることにしたい。

終りに試料の入手について御尽力、御配慮下された本学工学部、長坂秀雄教授、新日本製鉄 K. K. 基礎研究所元室長、松田祥三氏、ならびに試料の加工に御協力下された本学部佐藤順久教官に深謝する。

参 考 文 献

- (1) F. Brailsford: J. I. E. E. 83 (1938) 399
- (2) F. Brailsford: J. I. E. E. 83 (1938) 566
- (3) 八百, 矢野, 池田: 安川電機 34—131 (1970) 128
- (4) 池田, 白浜 : 誘導電動機のヨーク部の鉄損について, 電気四学会九州支連大 (S. 44.)
- (5) 電気学会 : 電気工学ハンドブック, S42版 737
- (6) 今尾, 有賀 : 回転磁界における鉄損の一試験法, 電気学会東京支連大 (S. 27. 10.)
- (7) 新日本製鉄 K K : 試験成績表 (1970. 11)
- (8) M. G. Say (高崎勲訳): 磁性合金とフェライト, (日刊工業新聞社) . (S. 31) 13