U.D.C. 621.3.017.31: 621.318.1 538.541

# 薄板パーマロイ圧延板における異常うず電流損失

Abnormal Eddy Current Loss of Ultra-thin Rolled Permalloy Tape

美\* 冨 H Sadami Tomita

# 內 容 梗 概

均一磁化とみなしうる厚板の場合とは異なって板厚が十分薄く,厚さ方向に単磁区構造をもつような薄板の 場合,Barkhausen Jump に伴う局所的なうず電流の発生が重要となり,交流磁化における異常うず電流損失 を生む。これらのことを 3~25 µ の板厚のモリブデンパーマロイ鉄心での交流ヒステリシス曲線の測定から明 らかにした。

# 1. 緒 言

強磁性体のもつ磁区の直接観察には強磁性微粉末を塗布した試料 表面に存在する粉末模様を顕微鏡的に調べる方法<sup>(1)</sup>,あるいは磁界 中を通る帯電粒子の回折像を用いた電子顕微鏡的方法(2)などがある が、これらの方法では、(1)静的磁区構造を観察できても時間的に 急速に変化する交流磁化の際の磁壁の移動状態を知ることができな い, (2) 試料表面に存在する閉鎖磁区を知ることはでき ても材料内部の磁区構造を知ることはできない, (3)磁 気異方性が小さい一般の高透磁率材料では鮮明な磁区を 電源 観察できないなどの事柄があって、実用磁性材料の交流 磁化に関する研究には、以前から磁化反転パルス(3)また は重畳交流磁化における出力パルス波形を測定し(4),そ れを解析することによった他の間接的な方法が用いられ てきている。 著者らが以前に行なった薄板パーマロイ板の Barkhausen 効果の実験<sup>(5)</sup>から板厚の減少に伴う強磁性体の 磁区構造の変化が交流磁化におけるうず電流損失に関係 するであろうということが予期されていた。これを実験 的に明らかにするために 3~25 µの板厚を有する薄板パ ーマロイ鉄心の交流ヒステリシス曲線を,測定周波数を変えて測定 した。

第1表 コアの種類および寸法

27	板厚 (μ)	コア寸法 (mm)	鉄心断面積 (cm <sup>2</sup> )	飽和磁束 (Mx)	$\begin{pmatrix} H_C \\ (Oe) \end{pmatrix}$	$B_r/B_1$ (%)
No. 1	3	$18\phi \times 5 h$	$18 \times 10^{-3}$	128	0.060	80.2
No. 2	7	$18\phi \times 5 h$	$24 \times 10^{-3}$	176	0.065	76.0
No. 3	10	$18\phi \times 5 h$	$59 \times 10^{-3}$	460	0.061	77.0
No. 4	15	$18\phi \times 5 h$	$71 \times 10^{-3}$	580	0.052	78.3
No. 5	25	$18\phi \times 5 h$	$76 \times 10^{-3}$	645	0.039	80.0

# 2. 試料および実験方法

# 2.1 試 料

薄板のテープは支台なしではトロイダルコアとして積層すること ができず,セラミックボビンにトロイダル状に巻いて用いる必要が ある。また,このボビンは測定のための巻線の際に鉄心にかかるひ ずみを防ぎ磁性の劣化から保護する役めをもつ。金属テープは層間 に絶縁層をはさんでトロイダル状に巻くので,反磁場なしで薄板の 磁性が測定できる。

第1表は実験に使用したボビンコアの寸法および直流での各磁気 特性値を示す。

# 2.2 交流ヒステリシス曲線測定法および測定装置

交流ヒステリシス曲線の測定には, 直流測定法と異なって, 鉄心 寸法, 励磁巻線数, 測定回路条件などによって得られる測定結果が





したがって鉄心を貫通する磁束  $\phi(t)$  は

二次コイル誘起電圧は積分回路により積分し,磁束に比例した電 Eをブラウン管垂直軸に印加する。同時に水平軸に励磁電流に比例 した電圧を印加することにより磁界Hの関数としての磁束φのルー ブが観測される。しかし本実験のように試料断面積の小さい鉄心の 交流測定の場合にはブラウン管直視装置の回路構成について次のよ うなことを注意しておかねばならない。すなわち,(1)方形に近い 磁束波である場合,二次コイル誘起電圧は測定周波数を基本周波数 とした高次周波数成分を含むので,増幅器の高周波帯域が不足する と誤差を生ずる。(2)測定周波数より低周波側の帯域が不十分であ るときには積分位相誤差を生ずる。このため,二次コイル誘起電圧

大幅に変化するので,材料固有値が得られるような測定方法および 測定条件が選ばれねばならない。交流ヒステリシス曲線測定のため の回路を第1図に示す。

鉄心に一次および二次巻線(巻線はそれぞれ N<sub>1</sub> および N<sub>2</sub>)を行 ない,一次コイルに交番電流を流すとき二次コイルに誘起される電 圧 e<sub>2</sub> は \* 日立製作所日立研究所 の積分および増幅に用いられる測定回路には十分に広い周波数帯域 が要求される。本実験には周波数帯域 50 c/s~3 Mc/sの回路を用い て,測定周波数 1~70 kc/s で誤差の少ない測定を行なった。 2.3 交流磁化における励磁回路条件<sup>(6)</sup> いま,巻数 N<sub>1</sub>の一次コイルに I (A)の電流を通すとき,磁束全 部が鉄心内を通り,一次コイルの全ターンを貫通するものとすれば 次式がなりたつ。

15

薄板パーマロイ圧延板における異常らず電流損失



第2図 k-factor とヒステリシス曲線の  $H_c$  との関係



ここで f は 測定周波数, p は 微分演算子である。 (4)式で示される $\frac{N_1\phi_0f}{RI_0}$ (以下これを*k*-factor と呼ぶ)を変えたときのヒステリシス曲線の Hc の 変化の様子を No.3 コアについて測定した結果を第 2図に示す。すなわち、 $\phi_0$ , f および  $I_0$  を一定にし て $N_1$ およびRを変えることによりkを $10^5 \sim 10^9$ の 範囲で変化したものである。第3図はその際の kfactor とともに変化する磁束波形, 電流波形および ヒステリシス曲線のブラウン管写真を示す。第3図 から交流磁化において測定される Hc (保磁力) は *k*-factor に関係し、さらに*k*-factor は測定周波数に も関係するのであるから、本実験のように交流磁化 での $H_c$ の周波数変化を扱うときにはk-factor をそ ろえる必要がある。すなわち、同一コアについて同 じ巻数 $N_i$ ,回路抵抗Rおよび磁化電流Iをとった場 合でも測定周波数を変化するときはk-facforが変わ るために, 測定結果が純粋な周波数変化として取り 扱いえないことが生ずる。このことからわれわれの 目的における交流磁化測定に際しては各周波数ごと に N<sub>1</sub>および R を定めて、測定周波数が異なっても k-factor が同一となるようにする必要がある。本実 験では k=10<sup>6</sup> として行なった。各コアについて,



$$E = RI + N_1 \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \quad \dots \quad (3)$$

ここでRは一次回路の全抵抗( $\Omega$ ),  $\phi$ は磁束(Mx), Eは印加電 E(V)である。(3)式からわかるように RI が  $N_1 \frac{d\phi}{dt}$ に比べて無視 できるほど小さいとき,印加電圧が正弦波ならば磁束 Ø は正弦波と なる。逆に、 $RI \stackrel{i}{\to} N_1 \frac{d\phi}{dt}$ に比べてきわめて大き

 $k=10^6$ とするための一次巻数  $N_1$ ,回路抵抗 R,磁界 振幅Hおよび測定周波数fの値を第2表に示す。

 $k = 1.2 \times 10^{6}$ 

# 3. 実験結果

第4図は交流ヒステリシス曲線の保磁力 Hc と測 定周波数fとの関係を示す。

第5図は交流磁化での $H_c$ の増加(( $H_c$ )<sub>AC</sub>-( $H_c$ )<sub>DC</sub>) を試料の板厚との関係において, 各測定周波数別に 示す。

### 4. 考 察

# 4.1 交流磁化におけるエネルギー損失

強磁性体を交流磁界  $H=H_0 \sin \omega t$  で磁化し、磁 束 ø も同じ周波数で変化する場合においても, 磁束  $\phi$ は磁界Hとは諸種の原因から同一位相になく、一 般に電力損失を伴う。交流ヒステリシス曲線とそれ に対応する磁束波形(磁束の時間的変化)および電 流波形(磁界の時間的変化)は模型的に描けば第6 図のようになり, 三つの曲線上の各点はそれぞれ対 応する。磁束がヒステリシスを描くとき電流波形が 軸を切る時刻 $T_a$ と磁束波形が軸を切る時刻 $T_c$ とは

一致しない。すなわち, 位相のずれが存在する。また, 図から容易 に知れるようにヒステリシス曲線の Hc の大小はそのまま位相のず れの量と関係する。以上のことは交流磁化における一般の損失を説 明したものであるが、このことは逆に理由のいかんを問わず磁界と

工設油	周波数	No.1 = 7		No. 2 = 7		No. 3 = 7		No. 4 = 7		No. 5 = 7	
.近夜 定進点	(kc/s)	$egin{array}{c l} N_1\ ( end{array} - end{array}) \end{array}$	$\stackrel{R}{(\Omega)}$	$egin{array}{c l} N_1 \ ( end{array} -  u) \end{array}$	$\stackrel{R}{(\Omega)}$	$egin{array}{c} N_1 \ ( earray -  u) \end{array}$	$\stackrel{R}{(\Omega)}$	$N_1 \ (\cancel{3} - \cancel{)}$	$\stackrel{R}{(\Omega)}$	$N_1 \ (\cancel{3} - \cancel{)})$	$R \\ (\Omega)$
	1	55	17	41	13	25	13	22	13	21	13
	5	17	8	18	13	11	13	10	13	9	13
	10	12	8	16	19	10	19	9	19	9	19
	20	8	8	11	19	25	261	22	261	6	19
	30	39	261	33	261	21	261	18	261	-	
	50	30	261	26	261	16	261	14	261		-
	70	25	261	22	261	13	261				

弦波となる。前者および後者の励磁回路条件を 条件および電流正弦波条件と呼ぶ。(3)式で, に対応する鉄心の磁束および磁化電流をそれぞ て上式を書き替えるならば ( $\Phi_0$ は  $H_m$ における える磁化電流),

$$\frac{E}{E_0} \left( \frac{E_0}{RI} \right) = \frac{I}{I_0} + \left( \frac{N \phi_0 f}{RI_0} \right) p \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right) \times 10^{-8} \dots \dots (4)$$

評

論

## 第 44 巻 第 11 号









の振幅が十分大きく,ほとんど飽和から飽和への磁化反転である場 合には磁気余効によるエネルギー損失は重要でないために考察から 除外できるであろう。金属磁性体を交流で磁化するとき磁化変化に 伴って電磁誘導の法則に従ったうず電流が強磁性体内に流れ、その ため磁化が制動をうける。板厚が薄く磁界の浸透がほとんど完全で



第5図 板厚とうず電流による Hc の増加との関係

磁束との間に位相差があってこれを大きくするような現象があるな らば交流ヒステリシス曲線のHcは増大することになる。すなわち 磁化の1サイクルあたりのエネルギー損失はヒステリシス曲線に囲 まれた部分の面積であり、典形的な角形ヒステリシス曲線を考える ならば

ここにWは交流磁化における1サイクル当たりのエネルギ損失を 表わし, Bは磁束密度である。一般の交流磁化においても最高磁界 H<sub>0</sub>が十分大きければ磁束密度は一定とみなすことができ、かつ、ヒ

あると考えうる場合で,かつ,試料内部が一様に磁化される場合を 仮定したときの1サイクル当たりのうず電流損失 We は理論的に次 のように求められる。

電気抵抗 $\rho$ , 板厚dなる磁性体内に生ずるうず電流をi(x)とす ると単位時間,単位体積のエネルギー損失は

で与えられる。しかるにうず電流 i(x) は磁化の時間的変化に関係 L,

であり、また正弦波磁界のもとで測定周波数をfとすると、  $\frac{dB}{dt} = \frac{dB}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} = \sqrt{2}\pi f \cdot B....(8)$ 

$$P = 2 \int_0^{d/2} \frac{2 \pi^2 f^2 B^2 x^2}{\rho} dx = \frac{\pi^2 d^2 B^2 f^2}{6 \rho} \dots (9)$$

他方, 1サイクルあたりのうず電流によるエネルギー損失 We は  $W_e = P/f$ であるから

(10)式に示されるように薄板材料の一様磁化におけるうず電流損 失は板厚dおよび磁束密度Bの2乗に比例し、周波数fと電気抵抗 ρに逆比例する。したがって、一様磁化を仮定した場合の交流磁化 における  $H_c$ の増加  $(H_c)_{AC} - (H_c)_{DC}$ は一般に次の比例関係がなり たつとされる。

$$(H_c)_{AC} - (H_c)_{DC} \propto \frac{d^2 B f}{d^2 B f} \qquad (11)$$

ステリシス曲線の図形の細部における変化を無視できるものとすれ ば交流ヒステリシス曲線の Hc は交流磁化におけるエネルギー損失 と対応して考えてよい。 4.2 うず電流損失 交流磁化におけるエネルギー損失は一般に, (1)磁化のヒステリ シス現象による項、(2)うず電流の発生による項、(3)磁気余効に よる項の三つからなる<sup>(7)</sup>。しかし、本実験におけるように交流磁界

# 4.3 実験結果の考察

----- 20 -----

磁束正弦波条件の測定では磁束の急しゅんな変化の部分で、励磁 電流はゆっくり変化をするので強磁性体内で起きる実際の磁束変化 は測定周波数よりも低次の時間的変化である。しかし、電流正弦波 条件では磁束変化の急しゅんな部分でも磁束は測定周波数にしたが った時間的変化を強制されるので、うず電流損失は磁束正弦波の場 薄板パーマロイ圧延板における異常うず電流損失

合に比べて大きい。容易に考えられるように交流磁化の理論との比較で考察の対象となるものは磁化電流が正弦波の場合である。このために、*k*-factorを電流正弦波条件となるように選び、薄板パーマロイ鉄心の交流ヒステリシス曲線を板厚および測定周波数を変えて実験した。

The .

い。

第5図に示すように測定周波数が30kc/s以上では板厚の減少と ともにうず電流損失による保磁力の増加(Hc)。は放物線状に減少す るが,測定周波数が20kc/s以下では(Hc)。と板厚の関係に異常が みられる。板厚7~10μの範囲で測定周波数 20 kc/s 以下の場合に Hcの異常増加が認められる。この結果は理論的に考察された(11) 式からは説明されず, 磁化の周波数が比較的に低く, かつ, 板厚の 薄い場合には局所的うず電流発生による異常損失を考慮しなければ 説明されないように思われる。すなわち、(11)式は磁化が磁性体内 の各部で一様に行なわれることを仮定して求めたものであるが、実 際の磁性体では磁区構造を有し,磁化は磁壁部分で局所的に起きる ためにエネルギー損失は(10)式で書かれるものより大きくなること が考えられる。個々の磁区寸法が小さい、したがって単位体積中に 磁壁の量が多く、物質中でほぼ均一的な磁化が行なわれるとみなさ れるときには一様磁化の考察を適用することができるが、板厚が薄 くなり、極端な場合で板厚方向に単磁区構造をとるようになったと き局所的磁壁移動による (H<sub>c</sub>)<sub>e</sub>の異常増加があると考えねばならな

# 5. 結 言

1691

3~25 µ の板厚を有する異方性モリブデンパーマロイ鉄心の高周 波磁化における交流ヒステリシス曲線の測定で,板厚が約7 µ 付近 で異常なうず電流損失があり,交流磁化損失が (*d*<sup>2</sup> *f*) に比例しない 場合のあることを明らかにした。この異常な損失は磁区構造が板の 厚さ方向に単磁区構造となり,局所的な磁壁移動が優越して局所的 なうず電流が増大するためであると説明される。

実験結果を要約すると次のとおりである。

(1) 薄板モリブデンパーマロイ材料における交流磁化機構は板 厚が約10µ以上では均一磁化でありうず電流損失(または角形ヒ ステリシス曲線の Hc の増加) は板厚dに関して均一磁化模型か ら導かれるような d<sup>2</sup> 則が成立する。しかるに約10µ以下の範囲 では d<sup>2</sup> 則は通用しない。

(2) 磁化の周波数が増すと薄板における異常損失がみられなく なる。この結果から薄板圧延パーマロイの磁化機構として第5図 に破線で区分したような板厚および周波数に関係した3種類の領 域が提言される。

終わりにのぞみ,本研究に対してご便宜をいただいた金属工業研 究所仁科所長およびご指導とご激励をいただいた日立研究所小野部 長, 竹内主任研究員ならびに宮崎主任に深く感謝の意を表する。

これらのことはさきに研究した薄板パーマロイ材料の Barkhausen 効果の実験結果とも一致するのであり, 圧延により作られた薄 板パーマロイのもつ磁区構造および磁化機構の特徴に関連している ものと考えられる。なお, 第5図の30kc/s以上の曲線において (*H<sub>c</sub>*)<sub>e</sub>の異常増加がみられないのは,時間的変化のゆっくりした 10kc/s 程度の交流磁化においては磁壁移動が主となっていても周 波数の増大とともに磁化機構としてエネルギー損失の少ない回転磁 化が行なわれるためと考えることができるであろう。

# 🕏 考 文 献

- (1) F. Bitter: Phys. Rev., 41, 507 (1932)
- (2) L. Marton: Phys. Rev., 73, 1475 (1948)
- (3) D. S. Rodbell and C. P. Bean: Conf. and Mag. and Mag. Mat., 219 (A. I. E. E., Oct. 1955)
- (4) J. J. Becker: J. Appl. Phys., 30, 387 (1959)
- (5) 富田:「薄板異方性パーマロイの Barkhausen 効果について」 応用物理に発表予定
- (6) 野口, 須藤: 三菱電機 30, 733 (昭 31)
- (7) V. E. Legg: Bell. Sys. Tech. Jouan., 15, 39 (1936)

<b>Vol.</b> 44	日 立	評論	No. 12
	目	次	
<ul> <li>新水車効率換算</li> <li>・王子製紙株式会社春日井工場納16,500kW抽気背ビン</li> <li>・中国電力株式会社水島火力発電所納第1号機125,6</li> </ul>	法 圧ター 000kW	<ul> <li>16 形 広 1</li> <li>EF80 形</li> <li>100kVパイ</li> <li>黒心可鍛鋳</li> </ul>	角 偏 向 テ レ ビ 受 信 機 の 諸 問 題 彡 交 直 両 用 電 気 機 関 車 プ形ガスコンプレッションケーブルの諸特性 F鉄の-200~450℃の過度範囲における機械的
<ul> <li>・火力発電所の計装器械および計器配管に対する凍</li> <li>・高速ボイラ給水ポンプ羽根車の光弾性</li> <li>・トランジスタ遠方監視制御</li> </ul>	結防止 実 験 装 置	<ul> <li>理化学機器特</li> <li>•HS-7 形</li> <li>•電子顕</li> </ul>	F集 電子顕微鏡の諸特性 微鏡用安定電源装置の改良
<ul> <li>・自動組立工場総括制</li> <li>・振動容量形直流増幅器との</li> <li>・ポンプ式しゅんせつ船用電</li> </ul>	」 御 応 用 気 品	<ul> <li>・円 偏 波 マ</li> <li>・熱 電 対</li> <li>・原 子 吸</li> </ul>	・イクロ波による電子スピン共鳴 † 形赤外検知器の改良 光における吸光特性の解析
<ul> <li>・日本放送協会納 M1KO-5 形イメージオルション 装置</li> <li>・SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Li<sub>2</sub>O 系 ガラスの結晶化とその誘電特</li> </ul>	カメラ 性に及	<ul> <li>・水 素 焔</li> <li>・超遠心分</li> <li>・KLA-2 チ</li> </ul>	A イ オ ン 化 検 田 番 の 特 性 ト 析 装 置 に よ る 応 用 測 定 に つ い て 形 日 立 ア ミ ノ 酸 分 析 計

# 発行所日立評論社東京都千代田区丸の内1丁目4番地振替口座東京71824番取次店株式会社オーム社書店東京都千代田区神田錦町3丁目1番地振替口座東京20018番

----- 21 -----