結晶質および非晶質軟磁性材料の うず電流損失

正 員 榊 陽 (千葉大)
非会員 今 城 慎 一 (千葉大)

1. ま え が き

軟磁性材料は電気機器の主要構成要素の一つで、その磁気特性の改善は機器効率の向上につながっている。このため古くから種々の材質から成る材料が提案されてきたが、経済性と良好な動特性とを兼ね備えたものは意外と少ない。現在、結晶質材料としては大別して、ケイ素鋼、角形ヒステリシスをもつ 50% Ni-Fe および Ni が 78% 付近の高透磁率パーマロイの三系統のものが、それぞれの目的に応じて使用されている。これらの材料特性は日夜改良が重ねられているが、特に一方向性 3% ケイ素鋼の特性向上には目覚ましいものがあり、その商用周波数範囲における鉄損は実験室的には考え得る最小値に近づきつつある⁽¹⁾。

一方、近年になって開発された非晶質軟磁性材料はまだ発展途上であって、将来どのような展開を見せるか予測は難しいが、現在でも飽和磁化の大きさ、透磁率または損失において結晶質の材料に匹敵するものが見受けられる⁽²⁾⁽³⁾。また非晶質磁心を応用する立場からの研究も進められており、かなりの成果があがっている⁽⁴⁾。

このような時機にあたり、結晶質軟磁性材料と非晶質軟磁性材料の動特性を共通の基準で比較し、非晶質材料の現状における問題点を探り、特性改善の手がかりを得ようとすることは、意義のあることと考えられる。

本論文は結晶質、非晶質を問わず、軟磁性材料を使用する立場からこれらの材料特性を吟味したものであ

る。特に、うず電流損失と周波数の関係およびうず電流損失と最大磁束密度との関係を種々の組成の材料について測定し、これらの関係を統一的に解釈する手法を見いだそうとしている。このため、磁化反転中の磁壁数に比例すると考えられる一実験パラメータを導入した。このパラメータによって、すべての材料のうず電流損失の周波数依存性および磁束密度依存性を明快に説明することが可能となった。更にこのパラメータは、今後新しく材料を開発するうえにも有益な示唆を与えていることを述べている。最後に、本論文の検討結果を用いると、どの材料でも任意の周波数および最大磁束密度におけるうず電流損失を、ほぼ正確に予測することが可能になったことを示す。

2. 実験方法

図1は著者らが開発したマイクロコンピュータを用いた鉄損測定システムである。発振器の出力を電力増幅して磁心を励磁すると同時に、二次巻線に誘起した電圧を負帰還して磁束を正弦波に保っている。二次誘起電圧と一次励磁電流に比例した分流器の両端の電圧をそれぞれ増幅した後、デジタルメモリーに書き込みこれらのデータをマイクロコンピュータで処理させて単位体積あたりの鉄損 W を算出する。単位体積あたりのうず電流損失 W_E は、あらかじめ記憶させておいたヒステリシス損失のデータを基に次式で算出されデータとして表示される。

$$W_E = W - fW_{h0} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 W_{h0} : 所定の最大磁束密度 B_m のときの直流 $B-H$ 曲線の囲む面積から求めた一周あたりヒステリシス損失

次に、著者らが定義した実験パラメータ V_m/H_e のデータが、誘起電圧と励磁電流の波形を処理して表示される。ただし、 V_m は磁心のテープ一層、巻線一回

Eddy Current Losses in Polycrystalline and Amorphous Soft Magnetic Materials. By Yo Sakaki, Member & Shin-Ichi Imagi, Non-member (Department of Electrical Engineering, Chiba University).

榊 陽：正員、千葉大学工学部電気工学科

今城慎一：非会員、千葉大学工学部電気工学科〔現在、スタンレー電気(株)〕

図 1 鉄損測定システム

Fig. 1. Iron loss measuring system.

表 1 実験に用いた磁心の諸定数

Table 1. Specifications of cores used for the experiment.

番号 および 記号	材 質	板 厚 (mm)	板 幅 (mm)	内 径 (mm)	外 径 (mm)	テープ 層 数	B_m^{*1} (T)	H_e^{*1} (A/m)	処理 ^{**}	u ($B_m=0.6T$) ^{**3}	v ($B_m=0.6T$) ^{**3}	x ($f=1kHz$)	y ($f=1kHz$)
1 ○	一方向性 3% Si-Fe	0.3	10	30	36	11	1.86	7.72	A	0.35	1.67	0.42	1.61
2 △		0.1	10	30	34	17	1.90	21.0	A	0.45	1.62	0.52	1.57
3 □	角形ヒステリシス 50% Ni-Fe	0.1	10	30	32	11	1.44	11.9	A	0.58	1.42	0.93	1.16
4 ▽		0.05	10	30	32	17	1.50	7.96	A	0.56	1.44	0.84	1.25
5 ◇		0.025	10	30	32	33	1.40	6.76	A	0.63	1.36	0.86	1.2
6 ○	スーパーマロイ (5% Mo-79% Ni-16%Fe)	0.1	5	25	35	44	0.79	0.64	FA	0.37	1.62	0.26	1.8
7 ×		0.05	5	25	35	83	0.78	0.80	FA	0.51	1.5	0.41	1.66
8 +		0.025	5	25	35	146	0.78	0.96	FA	0.65	1.39	0.37	1.79
9 ●	$Fe_{4.7}Co_{70.3}Si_{11.5}B_{10}$	0.02	10	25	35	172	0.78	0.76	AQ	0.55	1.48	0.5	1.5
10 ▲	$Fe_4Co_{66}Si_{17}B_{13}$	0.02	10	25	35	174	0.44	0.36	AQ	(0.51)	(1.52)	0	2.1
11 ■	$Fe_{40}Ni_{40}P_4B_6$	0.04	12	38	45	30	0.39	3.34	AR	(0.55)	(1.48)	0.4	1.7
12 ▽	$Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$	0.038	25	38	43	23	0.50	5.90	AR	(0.47)	(1.55)	0.33	1.71
13 ◆	$Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_{11}$	0.038	25	38	43	23	0.64	6.37	AR	0.55	1.49	0.55	1.56
14 ●	$Fe_{70}Ni_{14}Si_{10}B_{12}$	0.02	5	25	35	175	1.64	0.68	A	0.56	1.48	0.5	1.5

No. 9~No. 14 は非晶質磁心。

*1: No. 1, 2 は $H_{max}=10$ Oe, No. 3~No. 8 および No. 11~No. 13 は $H_{max}=1$ Oe, No. 9, 10 および 14 は $H_{max}=0.1$ Oe で測定。

*2: A: Annealed, FA: Field Annealed, AQ: As Quenched, AR: As Rolled.

*3: 括弧内の数値は $B_m=0.3$ T の場合を示す (飽和磁束密度が低く、0.6 T まで駆動できなかった)。

あたりの正弦波誘起電圧 $V_m \sin \omega t$ のピーク値, H_e は次式により定義される。

$$H_e = H_c^{AC} - H_c^{DC} \quad (2)$$

ここで, H_c^{AC} は所定の B_m のときの交流ヒステリシス曲線の保磁力で, この測定では誘起電圧がピーク値 V_m になったときの励磁電流の値から決定される。 H_c^{DC} は交流ヒステリシス曲線と同じ B_m のときの直流 $B-H$ 曲線の保磁力である。

既に文献(7)で述べたように磁束正弦波で磁心を励磁すると, 上記に定義した H_e は通常 $B=0$ の保磁

力点に限らず, どの磁束レベルでも交流ヒステリシス曲線の磁界と直流ヒステリシス曲線の磁界との差にはほぼ等しい。この差は磁心中のうず電流によって生ずるもので, 磁化の反転に対し実効的な制動作用をする。これを保磁力点の磁界の差 H_e で代表させ, 等価実効うず電流磁界と呼んでいる。

実験に用いた試料の組成, 寸法および諸定数は表1に示すとおりである。形状はいずれも巻磁心とした。これらの試料について測定されたデータは, B_m を一定とした場合の W_E , V_m/H_e と周波数の関係 (周波

数特性) および f を一定とした場合の $W_E, V_m/H_e$ と B_m の関係(マイナーループ特性) の二とおりに整理される。

測定周波数範囲は、著者らが中間周波数領域と呼んでいる数十Hz から約10kHz の領域に限定した。この領域において、通常最も良く磁心が用いられ、かつ内部の磁区構造は周波数と共に変化するとされている。これ以下の低周波領域およびこれ以上の高周波領域については、原則として本論文の考察対象外としている。

3. 実験結果

各々の試料について、前章で述べた方法でうず電流損失 W_E およびパラメータ V_m/H_e を求め、 W_E 対 f および V_m/H_e 対 f の関係として両対数グラフ上に表示したのが図2で、 $B_m=0.6\text{T}$ の場合の例である。煩雑さを避けるため、図にはすべてのデータは示されていない。

図2に得られた周波数特性は必ずしも直線のものばかりではないが、これらを以下の実験式で近似的に表わしてみる。

$$\frac{V_m}{H_e} \propto f^u \quad (3)$$

図2 うず電流損失および V_m/H_e の周波数特性

Fig. 2. Frequency characteristics of eddy current losses and V_m/H_e .

図3 u と v の関係

Fig. 3. Plots of u and v .

$$W_E \propto f^v \quad (4)$$

各磁心について実測された u, v の値は、図2または表1に示したとおりである。これら u, v の値を、横軸を u 、縦軸を v とする直交座標上にプロットすると図3のようになり、プロットした点はほぼ

$$u + v = 2 \quad (5)$$

の直線上にあり、しかもおよそ $u=0.5, v=1.5$ の近傍に集中して分布している。図3の様子は B_m に無関係に成り立っている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

次に周波数を1kHzに保った場合の W_E 対 B_m および V_m/H_e 対 B_m の関係を両対数グラフ上にプロットすると、図4のマイナーループ特性が得られる。図2と同様に、すべてのデータは示されていない。前と同様に、図4で得られた関係を次の実験式で表示する。

$$\frac{V_m}{H_e} \propto B_m^x \quad (6)$$

$$W_E \propto B_m^y \quad (7)$$

各磁心について実測された x, y の値は図4または表1に示したとおりである。これら x, y の値を、横軸を x 、縦軸を y とする直交座標上にプロットすると図5のようになり、プロットした点はほぼ

$$x + y = 2 \quad (8)$$

の直線に沿って分布する。しかし、図3とは異なり分布の範囲は広く、しかも同じ材質でも板厚により座標が変化する。図5の様子は周波数に無関係に成り立っている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

以上の結果は、専ら W_E や V_m/H_e が周波数や磁束密度に対してどのような変化をするかという点に注目してデータを整理したものであるが、次に W_E と V_m/H_e との関係についてデータをまとめてみる。こ

図 4 うず電流損失および V_m/H_e のマイナーループ特性

Fig. 4. Minor loop characteristics of eddy current losses and V_m/H_e .

図 5 x と y の関係

Fig. 5. Plots of x and y .

のために、まず V_m/H_e を W_E と同じく単位体積あたりの値に換算し、 $(V_m/H_e)/bd$ という量を定義する。ただし、 b は材料の板幅、 d は板厚である。 W_E と $(V_m/H_e)/bd$ との関係を、 f と B_m とをパラメータとして両対数グラフ上にプロットすると図 6 の実線が得られる。図 6 によると、うず電流損失と、単位体積あたりの V_m/H_e とはほぼ完全に反比例の関係にあ

図 6 うず電流損失と単位体積あたりの V_m/H_e との関係

Fig. 6. Relationship between eddy current losses and V_m/H_e per unit volume.

り、 f と B_m とが指定されると、プロットされたとの材料の測定値も組成、処理または磁氣的性質に無関係にこう配 -1 の一直線上に並ぶ。

4. 考 察

既に報告したように、 V_m/H_e は磁化反転中の磁壁数 n に関する情報をもっており、特に磁壁が磁性材料の板面に垂直な短冊状をなしている場合には V_m/H_e の値の変化から、磁束正弦波で磁化反転中の磁心の磁壁数を推定しうることを明らかにしている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

実験に用いた磁心はすべて短冊状磁壁を形成するとは限らず、磁区構造の明らかでないものも含まれている。しかし、 V_m/H_e が磁壁数に関する何らかの情報をもっていることには変わりないので⁽⁸⁾、以下どの磁心についても次の関係があるものとして議論を進める。ただし、以下では n を等価磁壁数と呼ぶことにする。

$$n \propto \frac{V_m}{H_e} \quad (9)$$

うず電流損失については、無限幅の材料中で多数の短冊状磁壁が平板のまま幅方向に運動する場合、Pry 氏が表示式を導いている⁽⁹⁾。この表示式において磁

壁間の相互作用を無視し、有限幅 b の場合を考えると次式が得られる⁽⁷⁾。

$$W_E = \frac{8.4\sigma b d f^2 B_m^2}{n\pi} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 σ : 導電率

方向性ケイ素鋼板の場合には、 V_m/H_e から推定した磁壁数を(10)式に代入して W_E を求めると、実測したうず電流損失と良く一致する⁽⁷⁾。磁区構造の複雑な磁心や不明の材料におけるうず電流損失の計算には(10)式をそのまま適用することはできないが、磁区構造の相違は(10)式の基本的形には影響せず、単に係数の変化となって現われるだけである。本論文では、どの材質の磁心もうず電流損失は(10)式で近似できるものと仮定する。

以上、二つの仮定を基にして、得られた実験結果について考察を加えることにする。

〈4.1〉 等価磁壁数の周波数による変化 (3)式と(9)式から次の関係を得る。

$$n \propto f^u \dots\dots\dots (11)$$

図3によると、 u の値は材質や板厚に無関係にほぼ0.5となっている。これは、Haller 氏ら⁽¹⁰⁾がケイ素鋼単結晶表面において観測し、かつ磁化反転中のエネルギーが極小となる条件から求めた磁壁数と周波数の関係に一致している。従って、(11)式は磁区構造に関係なく、広く磁性材料一般に成立つ法則と思われる。ただし、(11)式で $u=0.5$ となるのは中間周波領域である。低周波領域では磁壁数は直流磁化の場合のある最小値(50% Ni-Fe では $n_{\min}=1\sim 2$)に収れんする⁽⁸⁾。一方、高周波領域では試料の表面を一様に覆う平板状磁区構造をとるか、あるいはすべての磁区の芽が磁区として形成され、磁壁数がある最大値に達するという二通りの場合が存在する⁽⁸⁾。従って、低周波領域や高周波領域では n は周波数に無関係となり、 $u=0$ 、 $v=2$ となる。このことは文献(7)のデータから容易に読み取ることができる。

〈4.2〉 等価磁壁数と最大磁束密度との関係 (6)式と(9)式から次の関係が求まる。

$$n \propto B_m^x \dots\dots\dots (12)$$

図5によると、 x は組成や処理のみならず同一材質でも板厚によって変化し、その範囲は $0 \leq x \leq 0.85$ にわたって規則性が見られない。Haller 氏ら⁽¹⁰⁾はケイ素鋼単結晶表面の観察結果から $x \approx 1$ と報告しているが、本論文の結果とは全く異なっている。おそらく、製造過程における処理の影響が複雑にからみ合っているものと思われる。これがマイナーループ損失の理解を

妨げる要因になっているのではないかと考えられる。

〈4.3〉 うず電流損失と周波数、最大磁束密度との関係 (4)、(7)、(11)式および(12)式を用いると以下の関係が得られる。

$$W_E \propto f^{u+v} B_m^{x+v} \dots\dots\dots (13)$$

図3および図5の実験結果より、 $u+v \approx 2$ 、 $x+v \approx 2$ であるから、(13)式はうず電流損失と等価磁壁数の積が $(f B_m)^2$ に比例することを示している。従来、うず電流損失は $(f B_m)^2$ に比例すると考えられていたが、磁化反転に寄与する等価磁壁数の周波数や最大磁束密度への依存性を考慮しなければ、正しく損失をはあくできないことが明らかになった。(13)式の結果は、Pry 氏らのうず電流損失表示式から求めた(10)式とも定性的に一致している。

〈4.4〉 うず電流損失と V_m/H_e の関係 板厚 d の磁性板中で n 枚の短冊磁壁が幅方向に平板のまま運動する場合、 V_m/H_e は次のように表わされる⁽⁷⁾。

$$V_m/H_e = 2 B_s d n / \beta_m \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 B_s : 飽和磁束密度

磁化反転中 n が一定と仮定すると、 β_m はうず電流に対する磁壁の制動係数 β の最小値と考えられる。しかし β の最小値を定義することは難しいので、ここでは短冊状磁壁が平板の場合の β の近似式⁽¹¹⁾、(15)式をもって β_m とみなすことにする。

$$\beta_m \approx \frac{4 B_s \sigma d}{\pi^2} \dots\dots\dots (15)$$

(14)、(15)式を(10)式に代入すると

$$\frac{W_E (V_m/H_e)}{b d} \approx 4.2 \pi f^2 B_m^2 \dots\dots\dots (16)$$

となり、単位体積あたりのうず電流損失と単位体積あたりの V_m/H_e との積は f と B_m を指定すると定数となり、材料の組成や磁気特性に無関係となることが明らかになった。(16)式の計算値を図6に破線で示すが、これらは実測値に近いことがわかる。

次に、図6のもつ意味について考えてみる。 $(V_m/H_e)/bd$ が単位体積あたりの等価磁壁数であるとすると、この値の大きいほうがある磁束量を反転する際に各磁壁の移動距離が小さく、従って移動速度が小さくすすむため損失が少なくなる。図6のもつ意味の一つはこのことであり、磁性材料としては図のより右下方に位置するものが動特性の優れた材料とすることができる。第二の要点は図6の関係が組成や磁気特性に無関係に成り立つことである。今後新しく提案される材料についても、 W_E と $(V_m/H_e)/bd$ の関係を求めれば、図6の実線上のどこかにプロットされるであろう。

図 7 うず電流損失の周波数特性
(計算例)

Fig. 7. Frequency characteristics of eddy current losses (comparison of measured and calculated values).

うことは容易に類推される。うず電流損失の少ない優れた磁心を得るためには、 $(V_m/H_e)/bd$ の値の大きいものを開発すればよいことを図 6 の結果は示唆している。

以上の論議の一例として、焼きなましによる特性改善前後の測定例について述べる。図 6 で $f=1\text{kHz}$ 、 $B_m=0.6\text{T}$ の場合、No. 13 の磁心の測定値 (◆ 印) は二つあり、矢印で結ばれている。矢印の根元の測定値は購入した素材のまま、矢印の先端の測定値は 280°C 、 20Oe のふんい気中で約 1 時間焼きなまししたものである。焼きなましにより損失が減少し特性改善の効果は見られるが、この場合単に損失が減少しただけでなく、同時に V_m/H_e が増大し、ほぼこう配 -1 の直線に沿って測定値が移動していることが認められる。

〈4.5〉 うず電流損失の推定 前節で (16) 式の計算結果が測定値とほぼ一致したことは、磁心の V_m/H_e の値が与えられれば、任意の周波数または磁束密度におけるうず電流損失を (16) 式を用いて算出しようことを示している。一例として、結晶質磁心で短冊状磁壁の存在する 3% Si-Fe (No. 1) および非晶質磁心で磁区構造の明確でない $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{13}\text{B}_{14}\text{Si}_{11}$ (No. 13) のうず電流損失を (16) 式に基づいて計算し、実測値と比較したのが図 7 の周波数特性および図 8 のマイナ

図 8 うず電流損失のマイナーループ特性
(計算例)

Fig. 8. Minor loop characteristics of eddy current losses (comparison of measured and calculated values).

ブ特性である。いずれの図にも、うず電流損失のほかに V_m/H_e の値とそれらを (14), (15) 式によって換算した等価磁壁数 n の値を示してある。うず電流損失の計算値と実測値とは変化の傾向のみならず、値そのものもかなり良く一致しており、(16) 式による推定が有効であることがわかる。

5. む す び

数十 Hz～約 10kHz の中間周波領域で、結晶質および非晶質軟磁性材料のうず電流損失の周波数依存性、ならびに磁束密度依存性を統一的に解釈する手段として、磁壁数に比例するパラメータ V_m/H_e を導入した。この結果、複雑な諸特性の相互関係が明確になり、以下に挙げる諸点が明らかになった。

(1) V_m/H_e すなわち等価磁壁数 n は、周波数の変化に対しどの材料でもほぼ $f^{0.5}$ で変化し、Haller 氏らのケイ素鋼単結晶における観察結果と一致する。

(2) V_m/H_e すなわち等価磁壁数 n は磁束密度の変化に対しても変化する。しかし、変化の仕方は材料

の組成、処理あるいは板厚で複雑に変化し、その変化を統一的に記述することは不可能であった。

(3) 従来、うず電流損失は $(fB_m)^2$ に比例すると言われていたが、正確にはうず電流損失と等価磁壁数の積が $(fB_m)^2$ に比例すると考えなければならないことが明らかになった。この結果は Pry 氏らの解析結果とも一致する。

(4) 単位体積あたりのうず電流損失と単位体積あたりの V_m/H_c との積は、周波数と最大磁束密度とを指定すると、材質に無関係にすべての磁心でほぼ一定値になることが明らかになった。これは今後、磁心の特性改善や新しい磁心材料の開発に重要な手がかりを与えることになるものと予想される。

(5) 本論文において導かれたうず電流損失と V_m/H_c の関係式を用いることにより、任意の周波数または磁束密度におけるうず電流損失を推定することが可能となった。

本研究を進めるにあたって、日ごろ御指導いただく東北大学 穴山 武教授に感謝申し上げます。本研究の一部は文部省科学研究費（一般研究 C および総合研究 A）の補助を受けたことを記し感謝の意を表する。

（昭和 56 年 3 月 27 日受付）

文 献

- (1) T. Nozawa, T. Yamamoto, Y. Matsuo & Y. Ohya: "Effects of scratching on losses in 3-percent Si-Fe single crystals with orientation near (110) [001]", *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-15**, 972 (1979)
- (2) F.E. Luborsky: Perspective on application of amorphous alloys in magnetics devices", *Amorphous magnetism II*, p. 345 (1977) Plenum Press
- (3) "Metglas", Allied Chemical 社カタログ
- (4) 村上: 「アモルファス強磁性材料の応用の可能性」, 電学誌, **100**, 719 (昭 55-8)
- (5) 神・今城・栗林・酒巻: 「非晶質及び結晶質磁心のうず電流損失の周波数・磁束密度・磁壁数への依存性」, 電気学会マグネティックス研資 **MAG-80-36** (昭 55)
- (6) Y. Sakaki & S. Imagi: "Relationship among eddy current loss, frequency, maximum flux density and a new parameter concerning the number domain walls in polycrystalline and amorphous soft magnetic materials", *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-17**, 1478 (1981)
- (7) Y. Sakaki: "An approach estimating the number of domain walls and eddy current losses in grain oriented 3 % Si-Fe tape wound cores", *ibid.*, **MAG-16**, 569 (1980)
- (8) 穴山・神: 「磁化機構を考慮した磁気増幅器用磁心の動特性」, 電学誌, **89**, 1559 (昭 44-8)
- (9) R.H. Pry & C.P. Bean: "Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using domain model", *J. Appl. Phys.*, **29**, 532 (1958)
- (10) T.R. Haller & J.J. Kramer: "Observation of dynamic domain variation in a silicon alloy", *ibid.*, **41**, 1034 (1970)
- (11) 神・石川・山岸: 「50% Ni-Fe 磁心のうず電流損失とスイッチング特性との関係」, 電学論 A, **95**, 125 (昭 50-3)