

S.17-1

磁心の特性と表現法

斉藤 兆古
(法政大学)

神 陽
(千葉大学)

重田 政雄
(TDK)

1. まえがき

磁性材料の高透磁率や飽和特性を利用する機器を统一的に解析する方法について、筆者等は検討を重ねて来た。本報告では、磁心の鉄損に関する評価法とその数式的表現について、現在までに得られた成果の概要を報告する。

2. 本 論

2.1. 磁心材料の評価パラメータ

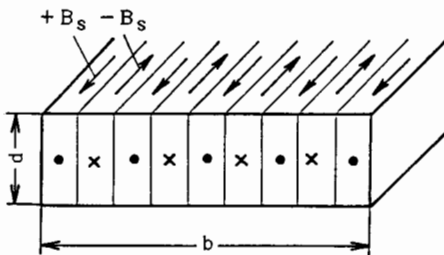
磁心材料のパラメータとして

$$s = (V_m / H_e) / bd, \quad (1)$$

を提唱する。ここで、 V_m は磁性体中の磁束変化に起因する誘起電圧の最大値、 H_e は交流保磁力と直流保磁力との差であり、誘起電圧が V_m に達したときの電流値より算出される。また、 b と d はそれぞれ板幅と板厚である。(1)式のパラメータ s [Ω/m] と渦電流損 W_e [W/m^3] の関係を第1図に示す。第1図から、パラメータ s の値が大きい程損失が少ない優れた磁性材料であることがわかる。第2図に示すような短冊状の磁壁が一齐に運動した場合、磁束変化による磁心の誘起電圧の最大値 V_m は、

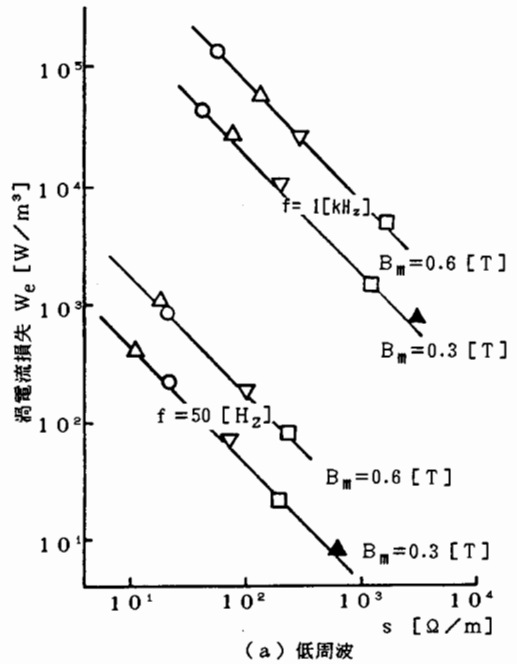
$$V_m = 2 B_s n v_m d, \quad (2)$$

で与えられる[1]。ここで、 n は磁壁数で、磁束密度が最大値 B_m に達するまで変化しないと仮定している。

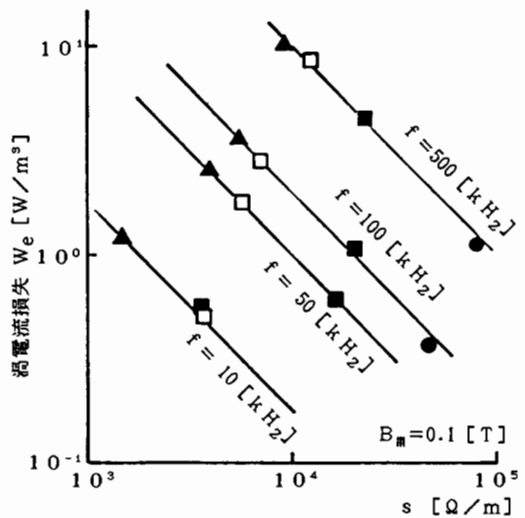


第2図 短冊状磁区モデル

- Grain oriented Si_3Fe_{97}
- △ Square loop $Ni_{50}Fe_{50}$
- ▽ Amorphous $Fe_{70}Ni_{10}Si_{10}B_{12}$
- Super malloy $Mo_{5}Ni_{79}Fe_{16}$ --- 0.025mm厚
- ▲ Amorphous $Fe_4Co_{66}Si_{1.7}B_{13}$
- Amorphous $(Fe_{0.925}Cr_{0.075})_{83}Si_5B_{12}$
- Super malloy $Mo_{5}Ni_{79}Fe_{16}$ --- 0.004mm厚



(a) 低周波



(b) 高周波

第1図 評価パラメータ s と渦電流損失 W_e の関係

さらに、 v_m は誘起電圧が V_m のときの磁壁の運動速度である。他方、(1)式の H_e と速度 v_m の関係は、 β を制動係数とすれば、

$$H_e = \beta v_m, \quad (3)$$

の関係が成り立つ[2]。(3)式の制動係数 β として、短冊状磁壁の渦電流による制動係数

$$\beta = 8.4 B_m d / \pi^3 \rho, \quad (4)$$

を採用し[3]、(1)～(4)の関係より、パラメータ s は、抵抗率 ρ 、磁壁数 n 、板幅 b および板厚 d を用いて、次式のように与えられる。

$$s = \pi^3 \rho n / 4.2 b d. \quad (5)$$

第1図の結果と(5)式から、パラメータ s の値は同一励磁条件でも、磁心によって2桁近くもばらつく。これは、抵抗率 ρ の違いよりも材料の寸法 b 、 d や磁壁数 n の差異によるものと考えられる。

2.2. 渦電流損失と周波数 f および磁束密度 B_m の関係

短冊状の磁壁が一斉に運動している場合の渦電流損失 W_e は、Pry と Bean の表示式[4]で磁壁の相互干渉を無視すれば、次式で与えられる[5]。

$$W_e = 8.4 d b f^2 B_m^2 / n \pi \rho. \quad (6)$$

(6)式と(5)式の積 $W_e s$ は、

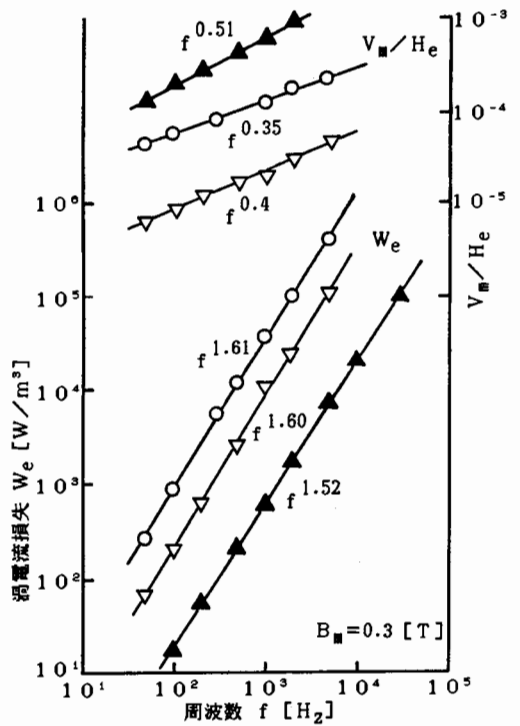
$$W_e s = 2 \pi^2 f^2 B_m^2, \quad (7)$$

となり、周波数 f と B_m の自乗に比例することになる。第3図に渦電流損失 W_e と周波数 f および磁束密度 B_m の関係を示す。第3図の結果から、

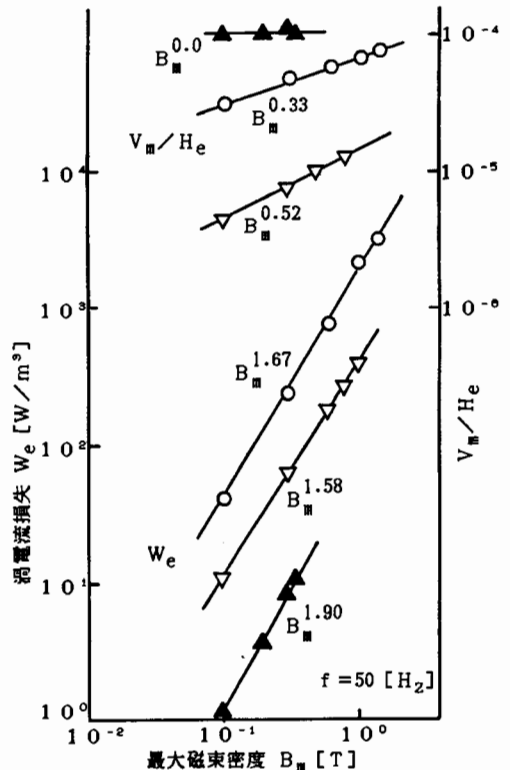
$$s \propto f^u, \quad (8a)$$

$$W_e \propto f^v, \quad (8b)$$

とすれば、 $u + v \approx 2$ が成り立つ。さらに、第3(b)図の結果から、



(a) 渦電流損失 W_e と周波数 f の関係



(b) 渦電流損失 W_e と最大磁束密度 B_m の関係

第3図 渦電流損失 W_e と周波数 f および最大磁束密度 B_m の関係

$$s \propto B_m^x, \quad (9a)$$

$$W_e \propto B_m^y, \quad (9b)$$

とすれば、 $x + y \approx 2$ が成り立つ。従って、渦電流損失 W_e とパラメータ s との積は、(7) 式の結果と一致して周波数 f と磁束密度 B_m の自乗に比例する。

2.3. 磁化特性の表現

磁束密度 B が時間に対して正弦波状に変化しているとき、磁界 H は必然的に歪波となる。この磁界 H をフーリエ級数に展開し、正弦波の項の和と余弦波の項の和から、磁界の奇関数成分 H_o と偶関数成分 H_e が分離できる。すなわち、

$$H = H_o + H_e, \quad (10)$$

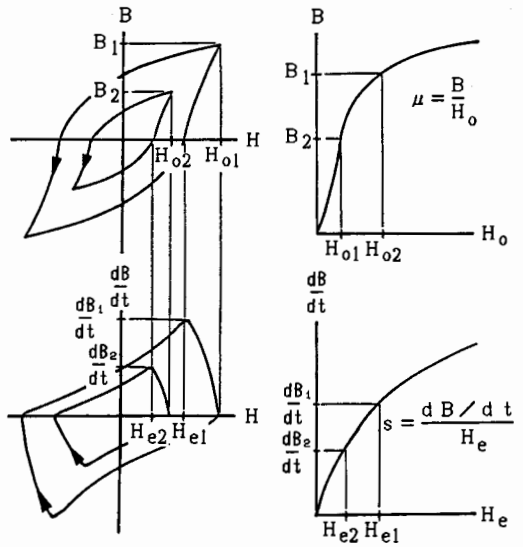
$$\text{ここで、} H_o = \sum_{n=1}^{\infty} H_n \sin(n\omega t),$$

$$H_e = \sum_{n=1}^{\infty} H_n \cos(n\omega t) \text{ である。}$$

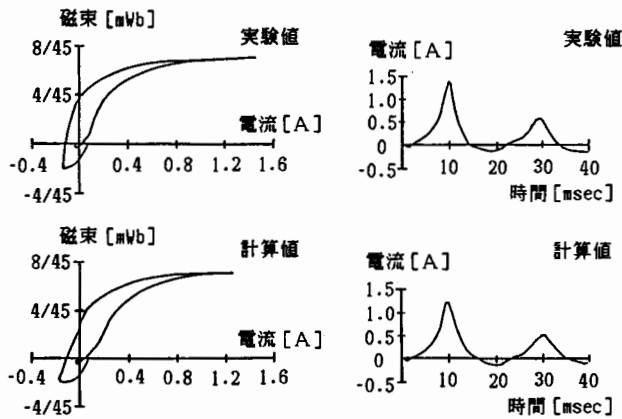
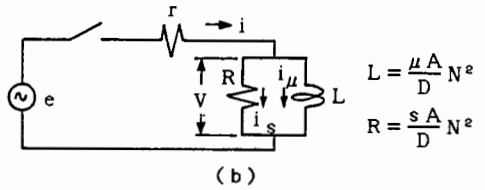
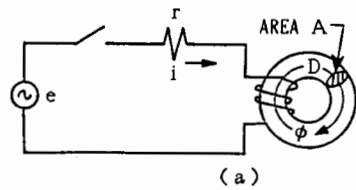
H_o と B は同相であり、さらに H_e と dB/dt は同相であるから、

$$H_o = (1/\mu) B, \quad (11a)$$

$$H_e = (1/s) dB/dt, \quad (11b)$$



第4図 磁化特性の表現



印加電圧 $e = \sqrt{2} V \sin(2\pi f t + \Psi)$, $V = 20[V]$, $f = 50[Hz]$, $\Psi = -21.4[deg.]$

(c)

第5図 リアクトルのモデルと過渡特性

と表わすことができる。(第4図参照) ここで、 μ は透磁率であり、磁気飽和のため B の一価関数として表現できる。さらに s は、直流保磁力が無視できるとすれば、(1)式の評価パラメータと一致する。この場合、 H_e と dB/dt の関係は線形でないため、(11b)式の s は dB/dt の一価関数として表現される。換言すれば、(5)式の磁壁数 n が dB/dt の関数としてあらわされることを意味する。(11a)式と(11b)式を(10)式に代入して、次式の Chua 型磁化特性モデルを得る[6-9]。

$$H = (1/\mu) B + (1/s) dB/dt. \quad (12)$$

(12)式を第5(a)図に示すリアクトルに適用すると、

$$HD = Ni \quad (13a)$$

$$i = (1/r) \{e - N(d\phi/dt)\}, \quad (13b)$$

$$HD = (D/\mu A)\phi + (D/sA)d\phi/dt, \quad (13c)$$

$$\phi = AB, \quad (13d)$$

より、次の関係を得る。

$$i = (D/N^2\mu A)\lambda + (D/N^2sA)d\lambda/dt, \quad (14a)$$

$$\lambda = N\phi. \quad (14b)$$

ここで、 e 、 i 、 ϕ 、 λ 、 r 、 N 、 A および D はそれぞれ、印加電圧、コイル電流、磁束、磁束鎖交数、コイル抵抗、コア断面積および磁路長である。

(13b)式と(14)式の関係から、第5(b)図に示す等価回路を描くことができる。

この等価回路は、鉄損を考慮した古典的なリアクトルの等価回路と全く一致する。

第5(c)図に、第5(b)図に基づくリアクトルの過渡現象を計算した例を示す。

3. む す び

- (1) 磁性材料の鉄損評価法として、新しいパラメータ $s = (V_m / H_e) / bd$ を提唱した。このパラメータは材料の抵抗率、寸法および磁壁数等の渦電流を支配する情報を含んでおり、この値の大きいものが損失の少ない優れた材料である。
- (2) s の値は同一励磁条件でも、磁心によって2桁近くもばらつく。これは、抵抗率の違いよりも磁壁数の差異によるものと考えられる。
- (3) s の値の大きい材料は、Supermalloy のような高透磁率磁心である。
- (4) 新しいパラメータ s を導入した Chua 型の磁化特性モデルを導いた。
- (5) Chua 型の磁化特性モデルから導かれる電気的等価回路は、従来の等価回路に非線形性を導入したものと全く一致することを示した。
- (6) 磁化特性を考慮した計算の一例を示し、少なくとも第一近似としては十分な精度を持つことを示した。

参考文献

- [1] Y.Sakaki et al, IEEE Trans.Magn.,MAG-18,No.6,(1982),pp.1840-1842.
- [2] H.J.Williams et al, Phys.Rev.,Vol.80,(1950),pp.1090-1094.
- [3] 神 他, 電気学会論文誌, 95-A,(1975),pp.125-132.
- [4] R.H.Pry et al, J.Appl.Phys.,Vol.29,(1958),pp.532-533.
- [5] Y.Sakaki, IEEE Trans.Magn.,MAG-16,No.4,(1980),pp.569-572.
- [6] Y.Saito et al, Comp.Meths.Appl.Mech.Engs.,Vol.38,No.2,(1983),pp.185-202.
- [7] Y.Saito et al, IEEE Trans.Magn.,MAG-20,No.5,(1984),pp.1434-1436.
- [8] Y.Saito et al, JMMM,Vol.54-57,(1986),pp.1613-1614.
- [9] Y.Saito et al, Journal of Applied Physics, to be published,(MMM'87,Invited paper).