

保磁力発現機構定量化による圧粉磁心の低鉄損化指針提案

Suggestion of Guidelines for Reducing Core Loss of Soft Magnetic Composite Cores by Quantitative Analysis of Factors Affecting Coercive Field

高下 拓也 TAKASHITA Takuya JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼・鉄粉研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
平谷多津彦 HIRATANI Tatsuhiko JFE スチール スチール研究所 サステナブルマテリアル研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
中村 尚道 NAKAMURA Naomichi JFE 精密 取締役・博士 (工学)

要旨

圧粉磁心適用拡大の上で課題となっているヒステリシス損について、微視組織因子と関連付けた定量解析を行うことで、さらなる低減のための指針を提案した。試作した圧粉磁心の鉄損に対しモデル式を用いて解析し、結晶粒粗大化が低鉄損化に有効であることを提案した。さらに、モデル式を用いて粒子径 76 μm の鉄粉を用いた圧粉磁心の結晶粒を最大まで粗大化させた際の鉄損を試算、 $B=1.0\text{ T}$, $f=1\text{ kHz}$ の条件において、圧粉磁心の鉄損は板厚 0.2 mm の電磁鋼板と同等レベルまで低減可能であることを示した。

Abstract:

Suggestion of guidelines for reducing core loss of soft magnetic composite (SMC) core was investigated by the quantitative analysis of hysteresis loss related microstructural factors for expanding the application of soft magnetic composite cores. The analysis of core loss of SMC cores by the quantitative analysis model revealed that crystal grain coarsening is effective approach for reduction of core loss. The core loss of SMC core (made from the iron powder with a particle size of 75 μm) with $B=1.0\text{ T}$, $f=1\text{ kHz}$ when the crystal grains were coarsened to the maximum was calculated by the analysis model, and the loss could be reduced to the same as the core loss of the electrical steel thickness of 0.2 mm.

1. はじめに

絶縁被覆を施した鉄粉等の軟磁性金属粉末を加圧成形して製造される圧粉磁心の特長として、一般に以下の3点が挙げられる。

- ①フェライト等の酸化物系焼結磁心と比較した場合の高い飽和磁束密度
- ②電磁鋼板等の積層磁心と比較した低い渦電流損
- ③三次元的に等方的な磁気特性と、ニアネットシェイプ加工の容易性

特に①および②の特長を活かした用途として、従来からインダクタやリアクトル¹⁾への適用事例が多く報告されてきた。また、近年では③の特長を活用し、アキシシャルギャップモータへ圧粉磁心を適用した事例が多く報告されており、一部では実用化が始まっている²⁾。

上記のようなメリットを活用した適用事例が増えている一方で、磁気特性の面での課題も存在する。その1つがヒステリシス損である。一般に、鉄損は以下のようにヒステリシス損 W_h と渦電流損 W_e の和によって表される。

$$W=W_h+W_e \dots\dots\dots (1)$$

ここで、ヒステリシス損は周波数に比例し、渦電流損は周波数の二乗に比例することが知られており³⁾、モータ鉄心のような 1 kHz 以下の励磁周波数が低い領域では鉄損に及ぼすヒステリシス損の影響が大きい。圧粉磁心は電磁鋼板と比較してヒステリシス損が高い⁴⁾ ため、圧粉磁心をモータ鉄心として使用した場合、鉄損増加によりモータ効率が低下する可能性があるため、ヒステリシス損の低減が求められている。

以上のような背景から、これまでも圧粉磁心の適用範囲拡大を目的とした、ヒステリシス損低減に関するいろいろな検討がされてきた^{5,6)}。しかし、ヒステリシス損の低減メカニズムに関しては、推定のみもしくは複数の要因が複合的に作用している検討が多く、定量的な議論がほとんどなされていない。今後、圧粉磁心のさらなる低ヒステリシス損化を指向する上では、ヒステリシス損増加因子の定量的な切り分けと、個々の因子に対する対策が不可欠である。

そこで、本研究では圧粉磁心のヒステリシス損低減指針を明確化することを目的として、ヒステリシス損と強い相関

2023 年 3 月 14 日受付

のある保磁力に及ぼす微視組織因子に関する従来知見を整理しヒステリシス損へ拡張した。さらに、圧粉磁心のヒステリシス損に及ぼす各微視組織因子の影響を定量化し、圧粉磁心の鉄損に最も大きな影響を及ぼす微視組織因子を明らかにすることで、圧粉磁心のヒステリシス損低減指針を提案した。

2. 保磁力発現機構

2.1 ヒステリシス損と保磁力

高城ら⁷⁾は、焼結鉄心を用いた検討でヒステリシス損を下式のように一般化した。

$$W_h = (4 \cdot c_h \cdot B \cdot f \cdot H_c) / \rho_c \quad (2)$$

ここで、 B は励磁磁束密度、 f は励磁周波数、 ρ_c は磁心の密度、 c_h はヒステリシスループの形状によって決まる定数、そして H_c は保磁力である。 B や f は測定条件により変化する。また、 ρ_c と c_h は鉄心の密度や、使用する組成により変化する。保磁力 H_c 以外の因子を定数とした場合、ヒステリシス損は保磁力と比例関係となる。

圧粉磁心の微視組織の模式図を図1に示す。保磁力の増加因子は主として微視組織中の磁壁のピンニングサイトであり、圧粉磁心の場合、結晶粒界、粒子表面、粒子間の気孔、転位および第二相粒子（析出物や介在物）がそれに該当する。圧粉磁心の保磁力に対するこれらの因子の寄与を個々に求めた研究例は少ないが、銅板やバルク体を用いた検討は多く報告されている。我々はこれまでに種々の微視組織因子について、保磁力に及ぼす影響の定量化を試みてきた⁸⁻¹¹⁾。以下では、特に保磁力への寄与が大きい結晶粒界と塑性ひずみ（転位）が保磁力へ及ぼす影響について述べる。

2.2 結晶粒界の影響

結晶粒界が保磁力に及ぼす影響については、Mager¹²⁾が結晶粒径の逆数に比例するモデル式を提案している。また、Pfeiferら¹³⁾、Herzerら¹⁴⁾およびYuら¹⁵⁾はFe-Ni、Fe-Co、

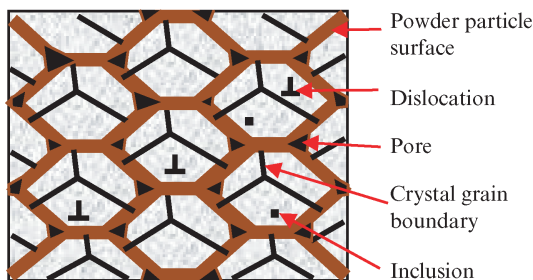


図1 圧粉磁心の微視組織模式図

Fig. 1 Schematics of microstructure of SMC (Soft Magnetic Composite) cores

Fe-Si および Fe-Ni-Mo-Cu を用いた検討により、本モデルによる計算値が実験結果と良い一致を示すことを報告している。以下に Pfeifer らによって SI 単位系に整理された Mager のモデル式を示す。

$$H_{c,k} = (3 \cdot \gamma) / (I_s \cdot d_k) \quad (3)$$

ここで $H_{c,k}$ は結晶粒界に起因する保磁力、 I_s は磁性材料の飽和磁化、 d_k は結晶粒径、 γ は磁壁エネルギーである。磁壁エネルギー γ についてはさらに下式のように表すことができる¹⁶⁾。

$$\gamma = a (A \cdot K)^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 a は磁壁の種類によって決まる定数であり 180° 磁壁の場合2、 90° 磁壁の場合1となる。また A は交換スティフネス定数、 K は結晶磁気異方性である。式(4)を式(3)へ代入すると、

$$H_{c,k} = (3 \cdot a (A \cdot K)^{1/2}) / (I_s \cdot d_k) \quad (5)$$

となる。純鉄の場合、それぞれ $I_s = 2.16 \text{ T}^{17)}$ 、 $A = 1.49 \cdot 10^{-11} \text{ J m}^{-1} \text{ }^{18)}$ 、 $K = 4.72 \cdot 10^4 \text{ J m}^{-3} \text{ }^{19)}$ となる。

純鉄の物性値を式(5)へ代入し、 $H_{c,k}$ を結晶粒径の逆数で整理して図2に示す。磁壁の種類によって結晶粒径に対する依存性は異なり、 90° 磁壁の方が結晶粒径に依存した変化量が大きかった。また、直線の傾きは 180° 磁壁が $1.2 \cdot 10^3$ 、 90° 磁壁が $2.3 \cdot 10^3$ であった。純鉄の保磁力が結晶粒界起因で変化している場合、図2のように整理するとプロットは直線状で整理でき、傾きが前記範囲内になると考えられる。

2.3 転位の影響

保磁力に及ぼす転位の影響については、Kronmüllerら²⁰⁾

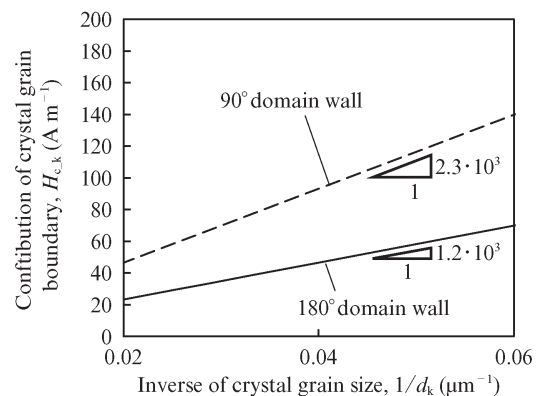


図2 結晶粒径の逆数と $H_{c,k}$ の関係

Fig. 2 Relationship between inverse of crystal grain size and $H_{c,k}$

が転位周りの応力場に起因した磁気モーメントの変化について検討し、Träuble²¹⁾がこれを磁壁と転位の相互作用へと拡張、保磁力との関係を以下のように導出した。

$$H_{c_dis} = \gamma_{dis} \cdot \rho_d^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 H_{c_dis} は転位に起因する保磁力、 ρ_d は転位密度、 γ_{dis} は磁歪、磁壁および転位の分布状態によって決まる係数である。転位や磁壁の分布状態を詳細に定量化するのは困難であるが、仮に γ_{dis} を定数とした場合、保磁力は転位密度の平方根に比例することが分かる。八重樫ら²²⁾は種々の引張変形が施された純鉄と実用鋼について、転位密度と保磁力の関係を実験的に求めており、いずれの鋼種においても式(6)のとおり保磁力は転位密度の平方根に比例することを報告している。

2.4 各因子とヒステリシス損の関係

Pfeiferら²³⁾は保磁力がそれぞれの寄与の和によって表せるとした保磁力の寄与に関する加算則を提案している。Adlerら²⁴⁾は本モデル式を用いて実験結果を矛盾なく説明できることを示している。本研究ではPfeiferらのモデルを採用し、前節までで説明してきた寄与に加算則が成立すると仮定して以下の式を提案する。

$$H_c = H_{c_k} + H_{c_dis} + H_{c_ex} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 H_{c_ex} は本章で説明した寄与以外の保磁力増加因子の和である。

上記の式(7)をさらに式(2)に代入することで、ヒステリシス損と微視組織因子を直接的に関連付けたモデル式が導出される。

$$\begin{aligned} W_h &= (4 \cdot c_h \cdot B \cdot f) \cdot (H_{c_k} + H_{c_dis} + H_{c_ex}) / \rho_c \\ &= W_{h_k} + W_{h_dis} + W_{h_ex} \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ここで、 W_{h_k} は結晶粒界に起因したヒステリシス損、 W_{h_dis} は転位に起因したヒステリシス損、 W_{h_ex} はその他に起因したヒステリシス損である。次章では本式を用いて圧粉磁

心のヒステリシス損の分離を行う。

3. モデル式を用いた実試料の解析

3.1 圧粉磁心の鉄損と製造条件

圧粉磁心の製造工程を図3に示す。製造工程中に鉄損に影響を及ぼす因子は複数存在するが、原料粉の粒子径および成形後の熱処理条件は特に影響が大きく、適正化のための種々の検討が行われている^{5,6)}。これらの因子はヒステリシス損と渦電流損の両方への寄与が明らかになっている。一方、ヒステリシス損と微視組織の関係を関連付けた定量的な議論は少ない。本章では原料粉の粒子径および熱処理温度の異なる圧粉磁心を作製のうえ、前章のモデル式を用いてヒステリシス損を解析し、その低減指針を提案する。

3.2 実験方法

水アトマイズ鉄粉を篩分けした、4種類の原料鉄粉A~Dを用いた。見掛密度、レーザー回折法により測定した平均粒子径 $d_{p,50}$ および化学組成を表1に示す。見掛密度はすべて $3.5 \pm 0.1 \text{ Mg m}^{-3}$ の範囲内であった。また、C、S、OおよびN以外の不純物(Al, Si, P, CrおよびMn)はすべて0.01 mass%未満であった。原料鉄粉に対して樹脂固形分が0.20 mass%となるようにシリコーン樹脂(東レダウコーニング社製, SR2400)により絶縁被覆した。次に絶縁被覆鉄

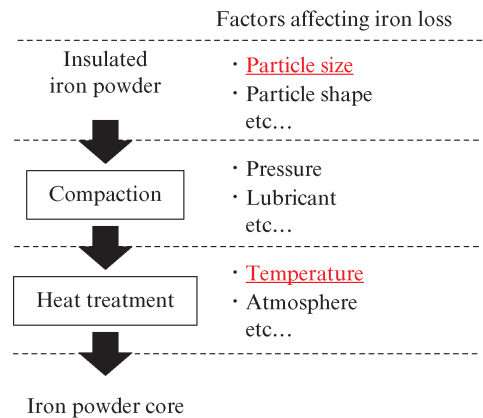


図3 圧粉磁心の製造工程

Fig. 3 Production process of SMC cores

表1 原料鉄粉の特性

Table 1 Powder properties of raw material iron powders

PowderID	Apparent density (Mg m ⁻³)	Average particle size diameter (mm)	Chemical composition (mass%)			
			C	S	O	N
A	3.53	187.3	0.002	0.001	0.032	<0.001
B	3.47	147.9	0.003	0.001	0.027	
C	3.43	107.5	0.002	0.001	0.024	
D	3.50	75.8	0.003	0.001	0.027	

粉を室温で外径 38 mm, 内径 25 mm, 高さ 6 mm のリング状に圧縮成形し, 圧粉磁心~D'を得た。この時, 成形体の密度が 7.6 Mg m^{-3} となるように成形圧力を 1150~1470 MPa の範囲内で調整した。圧粉磁心に対し, 窒素雰囲気中で 2.7 ks の熱処理を施した。均熱温度は 873 K とした。また, D' についてはさらに 673 K, 773 K および 973 K での熱処理を実施した。熱処理後の圧粉磁心には熱処理温度ごとに枝記号 -673, -773, -873 および -973 を付与した。

すべての圧粉磁心について, 直流磁化測定機 (メトロン技研製, SK-110 型) により保磁力およびヒステリシス損を測定した。巻線は 1 次側 100 ターン, 2 次側 20 ターンとし, 励磁磁束密度は 1.0 T とした。ヒステリシス損については, B-H ループ面積から一周分の損失を算出, 周波数倍することにより任意の周波数のヒステリシス損を求めた。また, 高周波鉄損測定装置 (メトロン技研製, SK200 型) を用いた鉄損の評価も併せて行った。励磁磁束密度は 1.0 T とし, 周波数 1 kHz とした。式 (1) より, 鉄損とヒステリシス損の差分を渦電流損として算出した。

磁気測定後のすべての圧粉磁心はリングの円周方向断面が観察面となるように埋込み, ナイタルエッチングを施して結晶粒界を現出させた後に光学顕微鏡により組織観察した。得られた組織写真から切断法²⁵⁾により結晶粒径を測定した。また, 組織観察を行った試料に対して, 中島ら²⁶⁾の手法に準じた X 線回折により転位密度を測定した。

3.3 結果と考察

3.3.1 ヒステリシスループの角型比

本研究で作製した圧粉磁心の組織観察結果および磁気測定結果をまとめて表 2 に示す。前章で提案したモデル式を適用し, ヒステリシス損の分離を行うにあたり, 式 (2) におけるヒステリシスループの角型比 c_h を求める必要がある。本研究において, 左辺の W_h は既知の値である。また, B および f はそれぞれ 1.0 T および 1 kHz, さらに保磁力 H_c および成形体密度 ρ_c についても表 2 のとおり, 本研究では既知

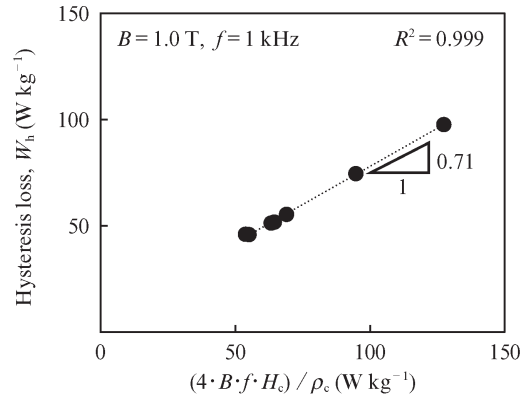


図 4 $(4 \cdot B \cdot f \cdot H_c) / \rho_c$ とヒステリシス損の関係

Fig. 4 Relationship between $(4 \cdot B \cdot f \cdot H_c) / \rho_c$ and hysteresis loss

の値となる。したがって W_h と, 右辺の c_h を除いた $(4 \cdot B \cdot f \cdot H_c) / \rho_c$ の関係を整理することで c_h が求まる。今回作製したすべての圧粉磁心について, 前述の整理を行った結果を図 4 に示す。プロットは相関度の高い直線関係にあり, 最小二乗法により得た近似曲線から角型比 $c_h = 0.71$ が求められた。これは, 高城らが焼結鉄心で得た値 0.85 と比較して小さい。圧粉磁心は焼結鉄心と異なり鉄粉粒子間にギャップが存在するため, これによる反磁界が影響を及ぼしたと推定される。

3.3.2 保磁力と結晶粒径の関係

我々の過去の検討⁸⁾では 973 K の熱処理で再結晶が完了し, 転位の寄与が小さくなり, その際の転位密度は $1.2 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-2}$ であった。本研究で作製した圧粉磁心の転位密度 (表 2) は, 873 K 以上で熱処理した 5 種の圧粉磁心で上記の値以下となっていた。そこで, これらについて, 保磁力に及ぼす転位密度の影響は同等レベルであると仮定し, 式 (2) の関係に基づき H_c を結晶粒径の逆数 d_k^{-1} で整理した結果を図 5 に示す。プロットは直線関係で整理でき, その傾きは $1.7 \cdot 10^3$ であった。これは, 図 2 に示した純鉄の 90° 磁壁および 180° 磁壁の直線の傾きの中間に位置する値

表 2 圧粉磁心の特性評価結果一覧

Table 2 Properties of SMC cores

CoreID	Iron loss (1.0 T, 1 kHz) (W kg^{-1})		Coercive field, H_c (A m^{-1})	Core density, ρ_c (Mg m^{-3})	Crystal grain size, d_k (μm)	Dislocation density, ρ_d (m^{-2})
	Hysteresis, W_h	Eddy, W_e				
A' -873	46.0	42.1	102.8	7.64	31.3	$3.8 \cdot 10^{12}$
B' -873	45.9	31.8	104.9	7.61	27.8	$3.0 \cdot 10^{13}$
B' -973	44.8	398.9	105.7	7.64	32.7	$4.2 \cdot 10^{12}$
C' -873	51.3	18.5	120.8	7.62	24.1	$1.6 \cdot 10^{12}$
D' -673	97.7	7.9	242.9	7.62	25.9	$3.7 \cdot 10^{14}$
D' -773	74.6	6.9	181.2	7.64	22.6	$8.2 \cdot 10^{13}$
D' -873	55.4	11.2	131.8	7.63	20.3	$2.4 \cdot 10^{12}$
D' -973	51.8	545.1	123.6	7.66	22.0	$4.7 \cdot 10^{11}$

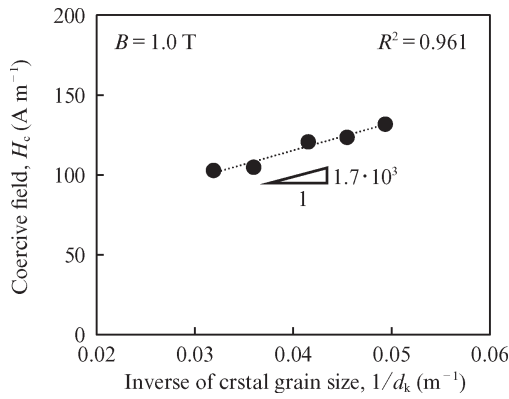


図5 結晶粒径の逆数と $H_{c,k}$ の関係

Fig. 5 Relationship between inverse of crystal grain size and $H_{c,k}$

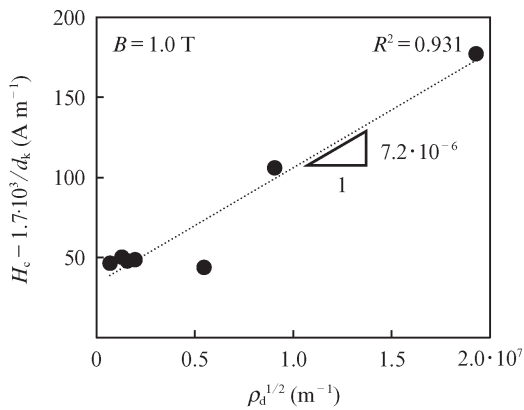


図6 $\rho_d^{1/2}$ と $H_c - 1.7 \cdot 10^3 / d_k$ の関係

Fig. 6 Relationship between $\rho_d^{1/2}$ and $H_c - 1.7 \cdot 10^3 / d_k$

となることから図5は圧粉磁心における結晶粒界の保磁力への寄与を示していると示唆される。したがって、本研究において保磁力に及ぼす結晶粒径の寄与 $H_{c,k}$ は実験的に下式で示される。

$$H_{c,k} = 1.7 \cdot 10^3 / d_k \quad \dots \quad (9)$$

次項では本式を用いてさらに転位密度の寄与を定量化する。

3.3.3 保磁力と転位密度の関係

2.4節で示した式(7)に式(6)および式(9)を代入、整理することで、式(10)が得られる。

$$H_c - 1.7 \cdot 10^3 / d_k = \gamma_{dis} \cdot \rho_d^{1/2} + H_{c,ex} \quad \dots \quad (10)$$

ここで、左辺はすべて既知の値であり、実験結果より算出可能である。また、本研究では結晶粒径および転位密度のみを変化させた試料を作製しているため、右辺第2項の $H_{c,ex}$ は定数であるとみなせば、左辺と $\rho_d^{1/2}$ の関係から、 γ_{dis} を求められる。整理した結果を図6に示す。直線関係にあるプロットの傾きより、 $\gamma_{dis} = 7.2 \cdot 10^{-6}$ が得られる。この値は八

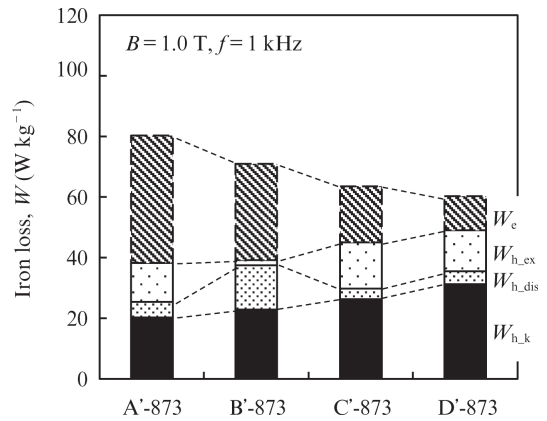


図7 原料粉粒子径が各鉄損成分に及ぼす影響

Fig. 7 Effect of raw iron powder particle size on W_e , $W_{h,ex}$, $W_{h,dis}$ and $W_{h,k}$

重樫ら²⁴⁾が過去に検討した値 $6.5 \cdot 10^{-6}$ (八重樫らの検討値をCGS単位系からSI単位系に換算)とおおむね一致しており、本解析が妥当であることを示唆している。

3.3.4 モデル式を用いたヒステリシス損の分離と解析

前項までの検討結果を式(8)へ代入することで式(11)が得られる。

$$W_h = W_{h,k} + W_{h,dis} + W_{h,ex} \\ \left\{ \begin{aligned} W_{h,k} &= (4 \cdot c_h \cdot B \cdot f) \cdot (1.7 \cdot 10^3) / (d_k \cdot \rho_c) \\ W_{h,dis} &= (4 \cdot c_h \cdot B \cdot f) \cdot (6.8 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_d^{1/2}) / \rho_c \end{aligned} \right. \quad \dots \quad (11)$$

式(1)および本式を用いることで鉄損を渦電流損および微視組織因子ごとのヒステリシス損に分離して解析できる。

873 Kで熱処理した圧粉磁心について、鉄損の分離を行った結果を図7に示す。鉄損は原料鉄粉の平均粒子径が最も小さいD'-873で最小となっていた。D'-873の鉄損の内訳をみると、結晶粒界起因のヒステリシス損 $W_{h,k}$ が半分を占めていることが分かる。このことから、D'-873のさらなる低鉄損化のためには $W_{h,k}$ の低減、すなわち結晶粒の粗大化が有効であることが示唆される。図7から分かるように、原料鉄粉の粗大化により、結晶粒が粗大化し、 $W_{h,k}$ は低減している。その一方で、渦電流損が増加しており、 $W_{h,k}$ 低減の効果を相殺、結果として鉄損は増加している。このことから、原料鉄粉の粗大化は $W_{h,k}$ 低減効果あるものの、鉄損の低減手法としては不適切であることが分かる。なお、B'-873における $W_{h,dis}$ が他の試料と比較して数倍高い値となっているが、これは転位密度測定時の測定誤差に起因するものと推定される。

次に、原料鉄粉Dを原料とする圧粉磁心について、鉄損とその内訳を熱処理温度で整理して図8に示す。熱処理温度673~873 Kでは、熱処理温度上昇により主として $W_{h,dis}$ が急激に減少、結果として鉄損は低減している。一方で、

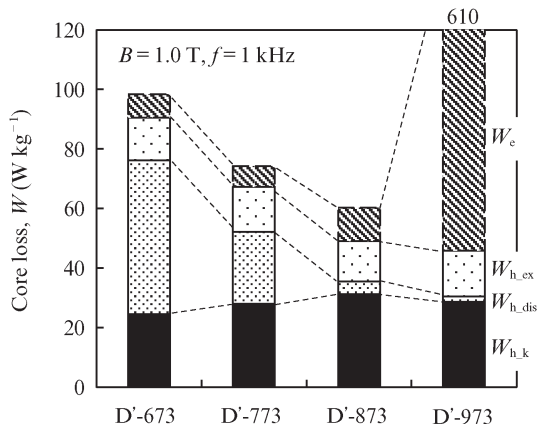


図8 熱処理温度が各鉄損成分に及ぼす影響

Fig. 8 Effect of raw heat treatment temperature on $W_{h,k}$, $W_{h,ex}$, $W_{h,dis}$ and $W_{h,k}$

$W_{h,k}$ に着目すると、熱処理温度上昇に伴い増加している。また、熱処理温度 873~973 K では $W_{h,dis}$ はほとんど変化せず、 $W_{h,k}$ がわずかに低減している。前記の原料鉄粉粒子径の影響と同様に、D'-873 を基準と考えた場合、熱処理温度を低下させても上昇させても $W_{h,k}$ は減少するが、熱処理温度を低下させた場合は $W_{h,dis}$ が増加し、熱処理温度を増加させた場合は渦電流損 W_c が急激に増加するため、本研究の範囲内では D'-873 の鉄損が最小となっている。

上記のような鉄損の解析に加え、本モデル式を活用することで鉄損の理論的な限界値を見積もることも可能である。前述のように、D'-873 を更に低鉄損化するには結晶粒の粗大化が必要である。圧粉磁心の場合、結晶粒は鉄粉の粒子径を超えて粗大化できないため、結晶粒径の最大値は鉄粉が単結晶となった場合、すなわち D'-873 においては原料鉄粉の平均粒子径と同じ、75.6 μm となる。式 (11) を用いて、D'-873 を基準とし、結晶粒径を最大化した際の鉄損試算値を図9に示す。結晶粒粗大化により鉄損は 37.3 W kg^{-1} となる。これは板厚 0.2 mm の電磁鋼板と同等である。このように、圧粉磁心には低鉄損化の余地が十分に残されており、今後の材料開発進展による、さらなる低鉄損化が期待される。

4. おわりに

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ヒステリシス損と微視組織因子を関連付けた定量解析を行うモデル式を提案した。
- 本モデル式を用いた実試料解析を行い、圧粉磁心の今後の低鉄損化（低ヒステリシス損化）指針として、圧粉磁心の結晶粒径粗大化を提案した。
- 平均粒子径 75 μm の鉄粉を用いた圧粉磁心の結晶粒径を最大まで粗大化させた場合、 $B=1.0 \text{ T}$, $f=1 \text{ kHz}$ における鉄損値はモデル式より 37.3 W kg^{-1} と予測され、板厚

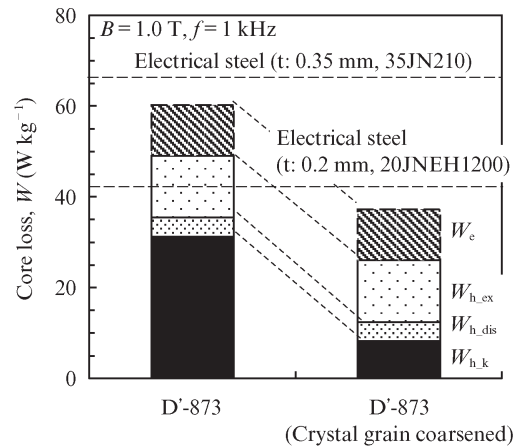


図9 結晶粒粗大化による鉄損低減の可能性

Fig. 9 Possibility of reduction of core loss of SMC cores by crystal grain coarsened

0.2 mm の電磁鋼板に匹敵する。

今後、結晶粒粗大化に関する組織制御技術が進展することで、圧粉磁心のさらなる低鉄損化と適用拡大が期待される。

謝辞

九州大学大学院材料工学部門 尾崎由紀子教授には本研究に関し多大なご指導を頂きました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 杉山昌揮, 山口登志也, 大河内智, 岸本秀史, 服部毅, 齋藤貴伸. 車載リアクトルコア用高密度・低損失圧粉磁心の開発. 素形材. 2010, no. 51, p. 24-29.
- 2) 齋藤達哉, 榎園勇太, 東大地, 伊志嶺朝之, 上野友之, 中村悠一, 奥野麗子. 高性能なアキシシャルギャップモータ実現に貢献する圧粉磁心の高機能化. 住友電工テクニカルレビュー. 2021, no. 198, p. 41-46.
- 3) 加藤哲男. 技術者のための磁気・磁性材料. 日刊工業新聞社. 1991, 255p. (p. 67)
- 4) 高下拓也. EVを支える磁性材料・磁石技術の現在と可能性 圧粉磁心の製造技術～磁気特性に及ぼす原料鉄粉特性の影響～. 月刊工業材料. 2021, vol. 69, no. 1, p. 33-37.
- 5) 北条啓文, 赤木宣明, 澤山哲也, 三谷宏幸. 素形材 低鉄損圧粉磁心用粉末. R&D 神戸製鋼技報. 2010, vol. 60, no. 2, p. 79-83.
- 6) 齋藤貴伸, 武本聡. Fe-Si系圧粉磁心の粉末粒径および結晶粒径と磁心損失との関係. 電気製鋼. 2006, vol. 77, no. 4, p. 285-291.
- 7) 高城重彰. 鉄系圧粉および焼結磁心材料の磁気特性解析と製造に関する研究. 学位論文. 1987, 東北大学.
- 8) 高下拓也, 中村尚道. 純鉄圧粉磁心の保磁力に及ぼす微視組織の影響. 粉体および粉末冶金. 2017, vol. 64, no. 8, p. 428-435.
- 9) 高下拓也, 尾崎由紀子. 純鉄圧粉磁心の保磁力増大因子の定量的解析—気孔率の影響. 粉体および粉末冶金. 2021, vol. 68, no. 1, p. 20-27.
- 10) Takashita, T.; Ozaki, Y. Quantitative analysis of factors increasing coercive field of iron powder cores — Influence of inclusions. J. Magn. Mater. 2021, vol. 535, p. 167992.
- 11) 高下拓也. 保磁力発現機構解明による純鉄圧粉磁心低鉄損化に関する研究. 学位論文. 2021, 九州大学.
- 12) Mager, A. Über den Einfluß der Korngröße auf die Koerzitivkraft. Annalen der physik. 1952, vol. 6, p. 15-16.
- 13) Pfeifer, F.; Radeloff, C. Soft magnetic Ni-Fe and Co-Fe alloys - some physical and metallurgical aspects. J. of Magn. Mater. 1980, vol. 19, p. 190-207.
- 14) Herzer, G. Grain size dependence of coercivity and permeability in

- nanocrystalline ferromagnets. IEEE Trans. Magn. 1990, vol. 26, p. 1397-1402.
- 15) Yu, R. H.; Basu, S.; Zhang, Y.; Parvizi-Majidi, A.; Xiao, John Q. Pinning effect of the grain boundaries on magnetic domain wall in FeCo-based magnetic alloys. J. App. Phys. 1999, vol. 85, p. 6655-6659.
- 16) 太田恵造. 磁気工学の基礎Ⅱ. 共立出版. 1973, 435p. (p. 272-273.)
- 17) Bozorth, R. M. Ferromagnetism. D. Van Nostrand Company. 1951, 986p. (p. 54.)
- 18) 近角聰信. 強磁性体の物理 (下). 裳華房. 1984, 422p. (p. 175.)
- 19) 近角聰信. 強磁性体の物理 (下). 裳華房. 1984, 422p. (p. 4.)
- 20) Kronmüller, H.; Fähnle, M. Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids. Cambridge University Press. 2003, 450p.
- 21) Trüble, H. Magnetism and Metallurgy. Acad. Press. 1969, 621p.
- 22) 八重樫光. 引張変形した実用鋼における磁気特性の転位密度依存性. 鉄と鋼. 2005, vol. 91, p. 655-661.
- 23) Pfeifer, F.; Kunz, W. Bedeutung von kornstruktur und fremdkörpereinschlüssen für die magnetisierungseigenschaften hochpermeabler Ni-Fe-legierungen. J. Magn. Magn. Mater. 1977, vol. 4, p. 214-219.
- 24) Adler, E.; Pfeiffer, H. The influence of grain size and impurities on the magnetic properties of the soft magnetic alloy 47.5% NiFe. IEEE Trans. Magn. 1974, vol. 10, p. 172-174.
- 25) 牧島邦夫 監訳. 計量形態学. 内田老鶴圃. 1972, 459p. (p. 282.)
- 26) 中島孝一, 二村裕一, 飛鷹秀幸, 飛鷹秀幸, 土山聡宏, 高木節雄. X線回折を利用した転位密度の評価法. 材料とプロセス. 2004, vol.17, p. 396-399.