研 究

磁性粉末の球形化による圧粉磁心の直流重畳特性への影響とモデル化

繁田 進, 大島 泰雄, 赤岩 功太

(株)タムラ製作所, 〒350-0214 坂戸市千代田 5-5-30.

Effects of Powder Sphericalization on DC Biased Properties of Powder Cores and Modeling

Susumu Handa, Yasuo Oshima and Kouta Akaiwa

Tamura Corporation, 5-5-30 Chiyoda, Sakado 350-0214, Japan.

Received February 1, 2010

SYNOPSIS

Effects of powder sphericalization on DC biased properties of powder cores have been investigated and simulated using a nonmagnetic grain boundary (NMGB) model. Water atomized iron powder and Fe-6.5 mass % Si powder have been sphericalized by a powder surface modification system. Aspect ratio has got smaller depending on rotational speed. Aspect ratio of the former at rotational speed 8000rpm and 180 sec have gotten as 1.29 equivalent to gas atomized iron powder and DC biased property has been improved. They have been compared with values calculated by the NMGB model. The relative inaccuracy has been within 4.23 %. Aspect ratio of the latter (Fe-6.5 mass % Si powder) has had smaller with higher rotational speed, while DC biased property has not been improved. They have been compared with values calculated by the NMGB model. The relative inaccuracy has been within 4.68 %. The gap width distribution has been compared between calculated and measured values. The relative inaccuracy of the average gap width has been 5.17 % on the iron powder core and 78.3 % on the Fe-6.5 mass % Si powder core.

KEY WORDS

powder core, magnetic property, DC biased property, permeability, aspect ratio

1 緒 言

近年, 地球温暖化防止のため, グリーン家電や電気自動車および再生可能エネルギー製品として太陽光発電システム等が注目されている. これらの機器に用いられるリアクトルは, 駆動周波数が20kHzまでの用途において, 磁心として電磁鋼板が用いられている¹⁾. これらの用途においては, 大電流においても磁気飽和しないことが重要であり, 磁路の一部にエアギャップを設けている. このため, ギャップ部近傍における漏れ磁束のために損失が増大する.

圧粉磁心は電磁鋼板を用いた磁心と比較し, 形状が自由であること・磁氣的に等方性であること・高周波数においても損失が小さいこと等により, これらの用途にも用いられるようになってきた²⁾. また, 圧粉磁心は粉末に絶縁被膜を作製し成形・焼鈍を行なうため, 粉末間にギャップが存在し, それが磁心としての分散ギャップの効果を果たしている. このため, その粒子間ギャップを制御することにより, エア

ギャップを無くすことやその幅を小さくすることができ, 漏れ磁束の低減により損失の低減がはかれる. しかしながら, 圧粉磁心は電磁鋼板を用いた磁心と比較して, 磁心のバルク体と比較した相対密度の低下による飽和磁化の低下や, ギャップの不均一性等による直流重畳特性の低下等があり, 省電力化から低損失, 小型・低コスト化から高直流重畳特性が要望されている.

圧粉磁心の直流重畳特性は, 粉末固有の透磁率や飽和磁化, 磁心のバルク体と比較した相対密度に依存する磁心としての飽和磁化, 磁心を構成する粉末間のギャップ幅の大きさと分布等に依存する. ギャップ幅は粒子形状や粒子径分布, バインダー等の粒子間介在物, 成形条件による磁心のバルク体と比較した相対密度等に依存する. これらの物理的因子と直流重畳特性の関係を明確にすることにより, 磁心設計の指針を得ることができる. この結果, 磁心の特性改善や開発の時間短縮等が容易になる.

これまでに、Fe-9.5 mass % Si-5.5 mass % Al 粉末を用いた圧粉磁心に対し、粉末の作製方法を調整してアスペクト比を変えた試料を作製し、アスペクト比が直流重畳特性に及ぼす影響を検討している³⁾。この直流重畳特性にたいして、指数関数近似⁴⁾をもちいたモデルから計算した結果と比較し誤差1%以内での一致を得た。しかし、指数関数式で用いている定数 k_1 , k_2 , k_3 の物理的な意味が明確ではない。また、Fe-3 mass % Si 粉末による圧粉磁心に対し、個々の粉末粒子はその形状や粒径に分布を有すること、粒子間ギャップ幅に分布を有することを考慮して、反磁界に分布をもたせて初磁化曲線を検討している⁵⁾。しかしながら、これらの方法では物理的因子と直流重畳特性の相関が明確ではない。このような問題を解決する方法として、微結晶粉末を用いた圧粉磁心に対し、非磁性結晶粒界(Non Magnetic Grain Boundary: NMGB)モデル⁶⁾を直流重畳特性に適用した研究がある⁷⁾。この研究では、印加磁界は反磁界と等しいとする近似を用いており、低磁界において誤差が大きい。この誤差の原因として、近似方法・粒度分布として用いた個数基準による粒度分布が考えられる。

本研究では、NMGBモデルをもとに、印加磁界は反磁界と等しいとする近似を用いずに直流重畳特性を求めるモデルを検討した。純鉄粉とFe-6.5 mass % Si 粉について、水アトマイズ粉に対し球形化処理を行なうことによる直流重畳特性への影響を評価した。また、各組成におけるガスアトマイズ粉末についても評価した。これらの試料について、粒子間のギャップ幅に分布をもたせたNMGBモデルを適用して直流重畳特性値を計算し実測値と比較した。さらに、本モデルにより計算されたギャップ幅分布について、SEM写真による実測値との比較を行ない、モデルの妥当性を検討した。

2 試料および実験方法

粉末は、純鉄粉末とFe-6.5 mass % Si 粉末を用いた。一般に、粒度分布は対数正規分布で近似できる。実測値の累積粒度分布から、最小二乗法により質量での幾何平均径 $D_{gave} (= \exp(D_{ave}))$ と幾何標準偏差 $\sigma_g (= \exp(\sigma_x))$ を求めた。ここで D_{ave} , σ_x は粒子径 $\ln D$ の平均値、 $\ln D$ の標準偏差であり D_{ave} はサンプル数を規格化するとメジアン径 D_{50} となる。前者は、粒径 $150 \mu\text{m}$ 以下で幾何平均径 $D_{gave} = 84.6 \mu\text{m}$ (幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.49 \mu\text{m}$) の水アトマイズ粉と、比較のため粒径 $150 \mu\text{m}$ 以下で幾何平均径 $D_{gave} = 57.8 \mu\text{m}$ (幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.62 \mu\text{m}$) のガスアトマイズ粉を用いた。後者は、粒径 $75 \mu\text{m}$ 以下で幾何平均径 $D_{gave} = 48.6 \mu\text{m}$ (幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.55 \mu\text{m}$) の水アトマイズ粉と、粒径 $75 \mu\text{m}$ 以下で幾何平均径 $D_{gave} = 38.3 \mu\text{m}$ (幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.52 \mu\text{m}$) のガスアトマイズ粉を用いた。各水アトマイズ粉末に対して表面改質装置であるハイブリダイザー: NHS-1型(株奈良機械製作所)により球形化処理をおこなった。処理量を 120 g 、処理時間を 3 min に固定した。Fig.1, Fig.2は純鉄粉末とFe-6.5 mass % Si 粉末を用いた場合について、回転数を 4800 (b, g) , 6400 (c, h) , 8000 (d, i) rpm とした粉末のSEM写真を示す。(a, f)は処理なし、(e, j)は処理無しのガスアトマイズ粉末のSEM写真である。これらの粉末に対し、粉末単独の熱処理における融着防止のためシランカップリング剤による表面コーティングを行い、還元雰囲気中で温度 $1127 \sim 1173 \text{ K}$ 、保持時間 7.2 ks の熱処理をおこなった。この粉末にシランカップリング剤とシリコーン樹脂を添加し造粒機により造粒をおこない、乾燥後目開き $500 \mu\text{m}$ の篩により解砕した。さらに、潤滑材を $0.35 \text{ mass \%}$ 添加し成形用粉末とした。成形は、1軸の油圧プレス機によるフローティングダイ法で、成形圧力 $970 \sim$

Fig.1 SEM photographs of water atomized (a), sphericalized powder (b, c, d) and gas atomized (e) iron powder.

Fig.2 SEM photograph of water atomized (f), sphericalized powder (g, h, i) and gas atomized (j) Fe-6.5 mass % Si powder.

1950 MPaでおこない、外形16 mm、内径8 mm、高さ5 mmのトロイダル磁心を作製した。この成形体を還元雰囲気中で温度673～973 K、保持時間1.8～7.2 ksで熱処理（焼鈍）をおこなった。この磁心に1次、2次巻線を施し磁気特性を測定した。Table 1は球形化処理条件と圧粉磁心の作製条件をまとめたものである。

表面観察はSEM（日本電子製：JMS-6390LA）、レーザー顕微鏡（オリンパス社製：LEXT OLS3500）を用いた。磁心の直流磁化特性はB-Hアナライザー（電子磁気工業製：BH-5501）により測定した。

3 実験結果および考察

3.1 表面形状と磁気特性

Fig.3, 4は焼鈍を行なった圧粉磁心を樹脂に埋め込み、成形面と垂直方向の面を鏡面研磨をおこない観察したレーザー顕微鏡写真である。(a)から(j)の試料はFig.1, 2と同一である。Fig.3は純鉄粉、Fig.4はFe-6.5 mass Si粉末を用いた結果である。黒い部分は研磨中に粉末が脱落した箇所であり、ギャップ幅測定からの除外した。Fig.3(a)で顕著な様に、成形方向に対し垂直方向の長楕円形状になっていることがわかる。Fig.3, 4において縦280×横330 μm^2 の範囲における全粒

Table 1 Process conditions of the samples.

Sample	Powder		Sphericalization		P. heat tr.		Pressure GPa	Green density Mg/m ³	Anneal	
	Composition	Method	Yes	Rotation	Temp	Time			Temp	Time
			No	rpm	K	ks			K	ks
a	100%Fe	Water	Y	N	1173	7.2	0.97	7.27	773	7.2
b				4800				7.07		
c				6400				7.38		
d				8000				7.42		
e		Gas		N	1123			7.43	873	1.8
f	Fe-6.5% Si	Water	Y	N	—	—	1.95	6.89	673	1.8
g				4800	1173	7.2		6.74		
h				6400	—	—	—	—	—	—
i				8000	—	—	—	—	—	—
j		Gas		N	—	—	1.49	6.67	973	7.2

Fig.3 Cross sectional SEM photographs of the cores made of iron powder (a, b, c, d, e).

Fig.4 Cross sectional SEM photographs of the cores made of Fe-6.5 mass % Si powder (f, g, e).

子について、長径と短径を測定してアスペクト比を計算した。Fig.5は、各粉末についての表面改質装置の回転数とアスペクト比の関係を示す。回転数が大きくなるほどアスペクト比が低下する、すなわち球形に近づいている。純鉄粉の場合、回転数8000rpmにおいてアスペクト比が1.29であり、ガスアトマイズ粉末では1.32となる。

これらの磁心に1次巻線180ターン、2次巻線10ターンを巻き回し、最大磁界10kA/mとして直流初磁化曲線を測定し

Fig.5 Aspect ratio with rotation speed of a powder modification machine.

Fig.6 Initial DC B-H loops of the cores made of iron powder (a, b, c, d, e).

Fig.7 Initial DC B-H loops of the cores made of Fe-6.5 mass % Si powder (f, g, j).

た。Fig.6, 7は純鉄粉およびFe-6.5mass % Si粉末を用いた圧粉磁心の直流初磁化曲線である。Fig.8, 9はその曲線から磁界幅を約150 A/mにして微分透磁率を計算した直流重畳特性を示す。

純鉄粉においては、球形化処理の回転数を上げるほど磁界1 kA/m~2 kA/mの範囲において微分透磁率が一定となる領域が広がり、その値も小さくなることからわかる。ただし、回転数4800と6400 rpmでは大きな違いはない。微分透磁率が小さくなる原因は、成形密度とアスペクト比が考えられる。成形密度に関しては、回転数4800と6400 rpmの成形密度が7.07と7.38 Mg/m³と違うのにも関わらず微分透磁率に大きな違いはない。この結果、成形密度の影響よりもFig.5からわかるようにアスペクト比が小さくなり反磁界係数が大きくなることによる影響が大きいと考えられる。Fe-6.5 mass % Si粉末においては、純鉄粉と同様球形化処理により磁界1 kA/m近傍における最大の微分透磁率が小さくなる。

3.2 NMGB モデルによる直流重畳特性の理論式⁶⁾

圧粉磁心を構成する粉末は、高さe、幅D、奥行きeの直方体であるとし、各粉末は、粒子間にギャップδを有しており、体心立方構造で配置していると仮定する。ただし、Dとeはアスペクト比pにより $p = D/e$ に関連づけられていると仮定す

Fig.8 DC biased magnetic property of the cores made of iron powder (a, b, c, d, e).

Fig.9 DC biased magnetic property of the cores made of Fe-6.5 mass % Si powder (f, g, j).

る。Fig.10はこのモデルをx-y平面で示す。Fig.11はx-z平面と等価回路で示す。Fig.11からわかるように、体心立方構造配置の場合、単位セルにおいて上下4個ずつ計8個の粒子と接している。Fig.12は、磁束が上下8個の粒子も貫くとした場合の等価回路を示す。

3.2.1 粒子径が一定の場合

まず、粒子径が一定の場合における単位セルの比透磁率 μ_{uc} (δ, p, D)を求める。単位セルは断面積が $(e+2\times\delta/2)^2$ で磁路長が $(e+2\times\delta/2)$ であるから、比透磁率 $\mu_{uc}(\delta, e, D)$ は次式で表せる。

$$\mu_{uc}(\delta, e, D) = \frac{D+\delta}{(e+\delta)^2} \times \frac{1}{\mu_0(\mathfrak{R}_p + \mathfrak{R}_{gx} \parallel \mathfrak{R}_{gz})} \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率であり、 $\mathfrak{R}_p$ は粒子の磁気抵抗、

Fig.10 Unit cell sketch of body-centered rectangular packing in x-y plane.

Fig.11 Unit cell sketch of body-centered rectangular packing in x-z plane and equivalent circuit.

Fig.12 Equivalent circuit of the unit cell.

$\mathfrak{R}_{gx} \parallel \mathfrak{R}_{gz}$ はx, z方向が並列回路とした場合の磁気抵抗である。これらはx, z方向のギャップの磁気抵抗 $\mathfrak{R}_{gx}, \mathfrak{R}_{gz}$ を用い次式で表せる。

$$\mathfrak{R}_p = \frac{D}{\mu_0 \mu_p e^2} \quad (2)$$

$$\mathfrak{R}_{gx} \parallel \mathfrak{R}_{gz} = \frac{\mathfrak{R}_{gx} \mathfrak{R}_{gz}}{\mathfrak{R}_{gx} + \mathfrak{R}_{gz}} \quad (3)$$

$$\mathfrak{R}_{gx} = \frac{\delta}{\mu_0 e^2}, \quad \mathfrak{R}_{gz} = \frac{2\delta}{\mu_0 (D-\delta)(e-\delta)} + \frac{D}{\mu_0 \mu_p e(e-\delta)} \quad (4)$$

ここでは、単位セルと接する上下の粒子の厚さを $e/2$ としている。 μ_p は粒子固有の比透磁率である。磁束密度Bと磁化Mの関係は磁化率 χ を用いて表すことができる。

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 H + M \quad (5)$$

磁化が飽和したときの磁束密度を飽和磁束密度Bsとすると、そのときの飽和磁界Hsは相対密度RDを用いて表すことができる。

$$H_s = \frac{B_s \cdot RD}{\mu_0 \mu_{uc}}, \quad RD = \frac{De^2}{(D+\delta)(e+\delta)^2} \quad (6)$$

3.2.2 粒子径が分布を有する場合

粒子径が分布を有する場合における圧粉磁心の比透磁率を求める。これまで粒子は一定の粒子径Dとして取り扱ったが、粒子径は分布を持っているので粒子に番号jをつけその粒子径を D_j とする。単位セルの比透磁率 $\mu_{uc}(\delta, e_j, D_j)$ から粒子径 D_j からなる圧粉磁心の比透磁率 $\mu_{jc}(\delta, e_j, D_j)$ を計算する。Fig.13は粒子径 D_j を持つ圧粉磁心のモデルを示す。

磁気抵抗 $\mathfrak{R}_{uj}$ を有する単位セル(幅 e_3 、高さ e_2 、長さ e_1) N_j 個により幅 w_j 、高さE、長さLのブロックを形成し、 L/e_1 個の直列回路(磁気抵抗を $\mathfrak{R}_{jn}$ とする)と $(E/e_2) \times (w_j/e_3)$ 個の並列回路からなるとする。そのブロックの磁気抵抗を $\mathfrak{R}_j$ として、比透磁率 μ_{jc} は単位セルのそれ μ_{ujc} を用い次式で表すことができる。

Fig.13 Stacking model of the unit cells.

$$LEw_j = N_j e_1 e_2 e_3 \quad (7)$$

$$\text{直列回路: } \mathfrak{R}_{jn} = \frac{L}{e_1} \mathfrak{R}_{wj} \quad (8)$$

$$\text{並列回路: } \frac{1}{\mathfrak{R}_j} = \frac{Ew_j}{e_2 e_3} \times \frac{1}{\mathfrak{R}_{jn}} \quad (9)$$

$$\mu_{je}(\delta, e_j, D_j) = \mu_{we}(\delta, e_j, D_j) \quad (9)$$

次に、粒子径分布をもつ場合について圧粉磁心の比透磁率 $\mu_{me}(\delta)$ を求める。Fig.14 はそのモデルを示す。圧粉磁心は幅 W 、高さ E 、長さ L を有し、各粒子径 D_j からなる比透磁率 μ_{je} を持つ並列回路からなると仮定する。さらに、圧粉磁心は反磁界を生じない構造を有するものとし、磁界方向の長さ L は、無限大あるいは閉磁路における磁路長を意味する。閉磁路の場合、内径と外径は同一であると近似した。

その場合磁気抵抗は次式で表すことができる。

$$\frac{1}{\mathfrak{R}} = \frac{(\mu_0 \mu_{me} WE)}{L} = \sum_j \frac{1}{\mathfrak{R}_j} = \left(\sum_j \frac{(\mu_0 \mu_{je} w_j E)}{L} \right) \quad (10)$$

この結果、比透磁率 $\mu_{me}(\delta)$ は

$$\begin{aligned} \mu_{me}(\delta) &= \sum_j \frac{w_j}{W} \mu_{je}(\delta, e_j, D_j) \\ &= \sum_j f(D_j) \mu_{je}(\delta, e_j, D_j) = \sum_j f(D_j) \mu_{we}(\delta, e_j, D_j) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sum_j f(D_j) = 1 \quad (12)$$

となる。ここで、 w_j/W は粒子径 D_j の確率密度関数 $f(D_j)$ に等しい。

3.2.3 粒子間ギャップ幅に分布を有する場合

粒子間ギャップ幅が分布を有する場合における圧粉磁心の比透磁率 μ_{me} を求める。ギャップ幅は分布を有するとし、 k 番目のギャップ幅を δ_k 、確率密度 $g(\delta_k)$ 、比透磁率を $\mu_{kme}(\delta_k)$ とする。これを等価回路で考えると、直列接続と並列接続が考えられるが、ここでは簡略化するために並列接続のみを考えた。比透磁率 μ_{me} は (8) 式と同様に下記式で求められる。

Fig.14 Blocking model of the blocks with each particle size.

$$\mu_{me} = \sum_k g(\delta_k) \mu_{kme}(\delta_k) \quad \sum_k g(\delta_k) = 1 \quad (13)$$

$$B = \mu_0 \mu_{me} (H < H_s) H \quad (14)$$

$\mu_{me}(H < H_s)$ は、各粒子径 D_j について H_s 以上の H については B に寄与しないとして μ_{me} を計算したことを意味する。式(14)から、各磁界における微分透磁率の実測値と計算値の相対誤差が最小となるギャップ幅 δ と確率密度 g を求めた。これを、実測した直流初磁化曲線から各 H に対して B と H の比から微分透磁率を計算して得た直流重畳特性と比較し近似の妥当性を評価した。低磁界における微分透磁率の低下は、強磁性体の磁化過程モデルである Jiles-Atherton モデルにより説明されている⁸⁾。そのモデルによると、磁化過程は可逆的な磁壁移動、不可逆的な磁壁移動および回転磁化から構成されており、低磁界における振る舞いは可逆的な磁壁移動によるものとされている。本モデルにおいては、この効果は考慮しておらず、低磁界での微分透磁率は一定とした。

3.3 NMGB モデルを計算するための粒子径の確率密度と磁気定数

一般に、粒度分布は対数正規分布で近似できる。実測値の累積粒度分布から、最小二乗法により質量での幾何平均径 D_{gave} と幾何標準偏差 σ_g を求め、粒子径の確率密度を計算した。飽和磁束密度 B_s は、振動試料型磁力計 (VSM: Vibrating Sample Magnetometer) による粉末磁化の測定から求めた。純鉄粉については、磁界 1.19 MA/m において単位質量あたりの磁化 213 emu/g から飽和磁束密度 B_s として 2.10 T を得た。Fe-6.5 mass % Si 粉末については、磁界 1.19 MA/m での単位質量あたりの磁化 191 emu/g から飽和磁束密度 B_s として 1.80 T を得た。粒子固有の比透磁率 μ_p は、純鉄粉については文献値⁹⁾ からバルクの値を用い 1500 とした。Fe-6.5 mass % Si 粉末については、傾斜型 Fe-6.5 mass % Si である電磁鋼板の値 4100 を用いた¹⁾。アスペクト比 p は実測値 Fig.5 を適用した。粒度分布の粒子径は、直径 e を持つ球としてのデータであるため、モデルでは一辺 e' 、 e' 、 pe' を持つ直方体として下記式により e' を計算して用いた。

$$e' = (\pi/6p)^{1/3} \times e \quad (15)$$

3.4 NMGB モデルによる直流重畳特性近似

Fig.15 は純鉄粉について、水アトマイズ粉末の各球形化条件およびガスアトマイズ粉末における微分透磁率の測定値と計算結果を示す。Fig.16 は、各磁界における微分透磁率の相対誤差を示す。計算においては、ギャップ幅に分布を持たせたモデルによる式 (13) を用いた。Table 2 はその結果を示す。ギャップ幅分布においては、相対誤差が最小となるようにギャップ数 k として 4~6 を用いた。ギャップ幅分布について、対数正規分布に従うと仮定して幾何平均値・幾何標準偏差を計算した⁵⁾。水アトマイズ粉において、 a から d と球形化することによりギャップ幅の幾何平均値は $0.61 \mu\text{m}$ から $0.66 \mu\text{m}$ とわずかに大きくなり、幾何標準偏差は $1.77 \mu\text{m}$ から $1.62 \mu\text{m}$ と

Fig.15 Measured and calculated DC biased magnetic property of the cores made of iron powder (a, b, c, d, e).

Fig.17 Measured and calculated DC biased magnetic property of the cores made of Fe-6.5mass% Si powder (f, g, j).

Fig.16 Relative inaccuracy between calculated and measured permeability of the cores made of iron powder (a, b, c, d, e).

小さくなった。また、相対誤差もaで-3.34~3.44%, dで-1.95~2.80%と小さくなった。ガスアトマイズ粉末については、ギャップ幅幾何平均値、幾何標準偏差とも最小となった。

Fig.17にFe-6.5mass% Si粉末について、水アトマイズ粉末の各球形化条件およびガスアトマイズ粉末における微分透磁率の測定値と計算結果を示す。Fig.18は、各磁界における微分透磁率の相対誤差を示す。計算は純鉄粉と同様におこなった。Table 3はその結果を示す。ギャップ幅分布においてはギャップ数 k として4~5を用いた。水アトマイズ粉において、fからgと球形化されるほどギャップ幅の平均値は $0.72\mu\text{m}$ から $0.87\mu\text{m}$ と大きくなり、標準偏差も $1.77\mu\text{m}$ から $1.92\mu\text{m}$ と大きくなった。また、相対誤差はfで-4.68~4.37%, gで-2.73~3.20%と小さくなった。ガスアトマイズ粉末については、ギャップ幅幾何平均値、幾何標準偏差とも最大となった。

Table 2 Calculated gap width distribution and inaccuracy of differential permeability on the cores made of iron powder.

Rotation	a (Non treat.)		b (4800rpm)		c (6400rpm)		d (8000rpm)		e (Gas atomization)	
Gap	Probabilit		Probabilit		Probabilit		Probabilit		Probabilit	
	Width / μm	y density/ %	Width / μm	y density/ %	Width / μm	y density/ %	Width / μm	y density/ %	Width / μm	y density/ %
Simulated	1.900	46.1	1.850	42.0	1.900	40.5	1.580	42.8	1.530	40.5
	0.450	28.0	0.450	34.0	0.460	34.0	0.470	36.0	0.400	25.0
	0.184	17.1	0.200	19.0	0.210	20.0	0.230	18.0	0.170	25.0
	0.078	5.8	0.080	5.0	0.090	5.5	0.110	3.2	0.065	7.5
	0.025	2.0							0.025	2.0
	0.006	1.0								
Average gap width	0.61(※※0.58)		0.64		0.64(0.65)		0.66(0.68)		0.46(0.47)	
Standard deviation	1.77(2.38)		1.67		1.66(1.72)		1.62(2.85)		1.57(1.60)	
※%)	-3.34	3.44	-3.82	4.23	-3.85	4.30	-1.95	2.80	-3.78	3.65
Hdata(k A/m)	0.57	9.91	0.91	9.74	0.82	9.75	0.93	9.83	0.45	9.80

※: Inaccuracy between mesured and calculated differntil permeability, ※※: Measured value

Fig.18 Relative inaccuracy between calculated and measured permeability of the cores made of Fe-6.5mass% Si powder (f, g, j).

上記2種類の粉末において、球形化することによりギャップ幅の幾何平均値が大きくなる。一方、幾何標準偏差は純鉄粉では小さくなり、Fe-6.5mass% Si 粉末では大きくなった。この原因は、Table 1からわかるように成形密度の違いが考えられる。前者では、球形化するに従い成形密度が大きくなり空隙が少なることにより幾何標準偏差が小さくなったと考えられる。幾何平均値は0.61μmから0.66μmとほぼ変化していないので、成形密度が大きくなった効果は、空隙の減少にのみ寄与したものと考えられる。一方、後者では、球形化するに従い成形密度が小さくなり、空間ができることにより

Table 3 Calculated gap width distribution and inaccuracy of differential permeability on the cores made of Fe-6.5mass% Si powder.

Rotation	f (Non treat.)		g (4800rpm)		j (Gas atomization)	
	Width /μm	Probabilit y density/	Width /μm	Probabilit y density/	Width /μm	Probabilit y density/
Simulated	1.640	52.0	1.800	58.4	2.530	54.3
	0.450	29.0	0.490	25.0	0.720	28.0
	0.185	15.0	0.210	12.0	0.350	15.0
	0.080	4.0	0.085	3.5	0.150	2.7
			0.037	1.1		
Average gap width	0.72(※※0.42)		0.87(0.62)		1.23(0.69)	
Standard deviation	1.77(2.25)		1.95(2.76)		2.17(2.44)	
※%)	-4.68	4.37	-2.73	3.20	-1.61	4.27
Hdata(k A/m)	0.66	9.89	0.66	9.91	0.26	9.92

※ : Inaccuracy between measured and calculated differential permeability,
※※ : Measured value

ギャップ幅の分布が大きくなることが考えられる。この組成による違いは、ビッカース硬度は前者では約50後者では約350とおおきくなることによる成形性の違いによるものと考えられる¹⁰⁾。

3.5 NMGB モデルによるギャップ幅分布

Table 2,3においてモデルから推定されたギャップ幅分布について、実測値との比較による検証をおこなった。Fig19, 20

Fig.19 Cross sectional SEM photographs of the cores made of iron powder (a, b, c, d, e).

Fig.20 Cross sectional SEM photographs of the cores made of Fe-6.5mass% Si powder (f, g, e).

は純鉄粉による試料 a~e, Fe-6.5mass%Si 粉末による試料 f~j についての断面研磨写真を示す。この写真において、縦・横を $20\mu\text{m}$ 間隔に区切り $60\times 60\mu\text{m}^2$ の領域において、区切り線と交差するギャップ幅を測定した。測定においては、研磨において、粒子の脱落によると考えられる大きなギャップについては除外した。実測値は計算値と同様に、対数正規分布に従うと仮定して幾何平均値と幾何標準偏差を計算した。Table 2,3においてその結果を示した。幾何平均値と幾何標準偏差値を Average gap width と Standard deviation の括弧で示した。Fig.21は、各粉末における球形化条件とギャップ幅幾何平均値の計算値と測定結果を示す。誤差は純鉄粉の場合、a: 5.17%, c: -1.54%, d: -2.94%, e: -2.12% と 5.17% 以下であった。Fe-6.5mass%Si 粉末の場合は、f: 71.4%, g: 40.3%, j: 78.3% と大きかった。幾何標準偏差が $2.25\sim 2.76\mu\text{m}$ であることを考慮すると、ばらつきが大きい。すなわち、今回の測定条件である縦・横を $20\mu\text{m}$ 間隔に区切り $60\times 60\mu\text{m}^2$ の領域における測定では粗すぎる可能性がある。

4 ま と め

水アトマイズ粉を表面改質装置により球形化処理を行い、直流重畳特性への影響を検討した。また、ガスアトマイズ粉も評価した。これらの試料について直流重畳特性を測定し、これに NMGB モデルを適用し計算値と実測値の比較を行ない、モデルの妥当性を評価した。このモデルより得られたギャップ幅分布を実測値と比較した。

水アトマイズによる純鉄粉を球形化することによりアスペクト比の改善が可能であり、8000rpm 180sec の処理においてガスアトマイズ粉と同等のアスペクト比 1.29 を得ることができた。球形化を行なうことにより直流重畳特性の改善がはかれた。これらの試料に NMGB モデルを適用し、各磁界における微分透磁率の相対誤差 $\pm 4.23\%$ 以下を得た。

水アトマイズによる Fe-6.5mass%Si 粉末を球形化することによりアスペクト比の改善が可能であることが確認できたが、直流重畳特性の改善ははかれなかった。これらの試料に NMGB モデルを適用し相対誤差 $\pm 4.68\%$ 以下得た。このモデルから得られたギャップ幅分布を実測値と比較した。純鉄粉末では誤差は 5.17% 以下となった。Fe-6.5mass%Si 粉末では、78.3% 以下となったが、幾何標準偏差値が $2.25\sim 2.76\mu\text{m}$ とばらつきが大きいことが原因であると考えられる。

この結果より、このモデルはギャップ幅に分布を仮定することにより、直流重畳特性におよぼす物理的要因との相関が容易になると考えられる。

文 献

1) M. Misao, H. Ninomiya, and T. Yamaji: "High Silicon Steel

Fig.21 Rotation speed dependency of measured and calculated gap width.

Sheets Realizing Excellent High Frequency Reactor Performance", JFE Technical Report, No. 6, (2005)12-17.

- 2) T. Maeda, H. Toyoda, et al.: "Development of Low-Iron-Loss Sintered Magnetic Material", SEI Technical Review, No. 166, (2005)1-6.
- 3) T. Saito and S. Takemoto: "Effects of Density and Particle Shape on the Permeability of Fe-Si-Al Compressed Core", J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, 52(2005)571-575.
- 4) N. Shimatani and H. Fujita: "Approximation of magnetization curves by Exponential Series", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, A101(1981)463-470.
- 5) T. Saito, Y. Fujita, and S. Takemoto: "Initial Magnetization Curves for Powder Cores Taking into Account Distribution of Demagnetizing Field", J. Magn. Soc. Jpn., 33(2009)434-440.
- 6) F. Mazaleyrat, V. Valerie, et al.: "Permeability of Soft Magnetic Composites From Flakes of Nanocrystalline Ribbon", IEEE Transactions on Magnetics, 38(2002)3132-3134.
- 7) H. Hamakake, K. Kageyama, et al.: "Magnetic Properties of Dust Cores Made of Nanocrystalline FeSiCuNbCrB Powders", Advanced in Powder Metallurgy & Particulate Materials., 3(10) (2004)179-193.
- 8) D.C. Jiles and D.L. Atherton: "Theory of Ferromagnetic Hysteresis", J. Magn. & Magn. Mater., 61(1986)48-46.
- 9) T. Kato and T. Tomioka: "On the Free-Cutting Magnetic Pure Iron", Electric Furnace Steel, 38(1967)2-8.
- 10) K. Arai, T. Takeuchi, et al.: "Effect of Quenching on Order-Disorder Phase Transformation and Magnetic Anisotropy in High Silicon Iron Alloys", Grant-in-Aid for Scientific Research (A), (1987-1988)8.