論説

Paper

Fe-Si-Al 系圧粉磁芯の磁気特性に及ぼす噴霧粉形状の影響

武本 聡^{*}, 斉藤貴伸^{*}

Effects of Particle Shapes on Magnetic Properties of Compressed Cores with Fe-Si-Al Atomized Powders

Satoshi Takemoto, and Takanobu Saito

Synopsis

Powder cores made with Fe-Si-Al alloys, Mo-permalloy and so on are widely used for smoothing and boost choke coils of switching regulators and DC-DC converters. High permeability at DC bias magnetic field is required to be high performance and miniaturization of these magnetic cores. In this study effects of particle shapes on magnetic properties of compressed powder cores with Fe-Si-Al modified water-atomized powders were investigated. We concluded as follows.

(1) Initial permeability and DC bias characteristics continuously change with particle shapes. Cores with elliptical shaped (large aspect ratio) powders exhibited high initial permeability but inferior DC bias characteristics. While with spherical shaped (small aspect ratio) powders, initial permeability was relatively low, but the permeability at high DC bias magnetic field was higher than that of elliptical shaped powders.

(2) Differences of initial permeability with particle shapes can be explained by the differences of effective demagnetizing factors N of the particles through the analysis using Ollendorf's equation. It is guessed that in case particles have large aspect ratios, they have small N , consequently initial permeability is high. Furthermore from the estimation of N , the core is magnetized connecting about four particles.

(3) Permeability depends on not only particle shape of powder but also relative density of core. Using of spherical shaped particles rather than elliptical and higher density result in both high initial permeability and excellent DC bias characteristics.

1. 緒 言

近年, パーソナル・コンピュータ, ワード・プロセッサ, ファクシミリなどの 0A 機器の高機能化の要求が高まっている. また, 自動車においては直噴エンジン制御や高輝度放電型のヘッドライトが普及し始めている.

これらの 0A 機器や自動車の上述の制御用電源にはスイッチング電源や DC-DC コンバーターが欠かせないものとなっている. 圧粉磁芯は軟磁性粉末に絶縁物を混合した後, 例えばトロイダル状にプレス成形したもので, これらの電源の平滑用チョークコイルや, 昇圧チョップ用チョークコイルの磁芯として多用されている.

圧粉磁芯用軟磁性粉末はその成分として主に Fe-Si-Al 系合金が用いられており, 一般的にはインゴットを機械的に粉碎した粉碎粉や噴霧粉を原料として用いることが多い.

筆者らは前報^{1),2)}で噴霧粉を用いた Fe-Si-Al 系圧粉磁芯について報告し, 噴霧方法による粉末粒子形状の違いによって, 磁芯の透磁率や抵抗率に違いが生じることを明らかにしてきた. 本研究では, 前報による粉末粒子形状が磁気特性に大きく影響を及ぼしている事実に着目し, これをさらに詳細に定量的に議論するために噴霧粉の粒子形状を連続的に変化させて初透磁率および直流重畳特性との関係を明確にすることを目的とした. 直流重畳特性とは, 直流バイアス磁界を印加させたときの透磁率の変化を指し, スイッチング電源のチョークコイルのような用途では, 磁芯の性能を決定する重要な因子である.

2. 実験方法

2.1 試験に用いた原料粉末

2002 年 8 月 13 日受付

^{*} 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of experimented Fe-Si-Al alloy powders (mass %).

C	Si	P, S	Mn, Cu, Ni, Cr	Al	N	O	Fe
max. 0.020	9.33 ~ 9.76	max. 0.004	max.0.02	5.44 ~ 5.85	max. 0.004	0.09 ~ 0.20	balance

Table 2. Particle distributions of experimented Fe-Si-Al alloy powders.

Particle size distribution (mass%) (mesh)						Mean diameter D_{50} (μm)
+100	-100 +145	-145 +200	-200 +250	-250 +350	-350	
0.02 ~ 0.08	9.7 ~ 12.1	19.4 ~ 24.3	10.4 ~ 12.9	15.1 ~ 19.1	29.6 ~ 38.8	50 ~ 60

本報告では改良型水噴霧により作製した噴霧粉を使用した。改良型水噴霧とは従来の水噴霧の操作条件を制御することにより粉末の形状をコントロールできる噴霧法である。粒子形状を連続的に変化させた5種類の原料粉末を用いた。粉末粒径はいずれも-100メッシュとし、重量平均粒径 D_{50} は50~60 μm の間であった。成分は軟磁気特性が最も良好とされているFe-9.6mass%Si-5.4mass%Alに近いものを用いた。試験に用いた原料粉末の成分および粒度分布をTable 1, Table 2に示す。

2.2 粉末粒子形状の変化

粉末の形状はアスペクト比(=長軸/短軸)で表すことにし、アスペクト比は1.3~1.8まで変化させた。アスペクト比は下で述べるような手順で作製した圧粉磁芯の縦断面を樹脂に埋め込み、断面より400個以上の粉末をランダムに選び、長軸と短軸の長さを測定してアスペクト比を求め、平均値をとった。Fig.1に代表的な3種類の圧粉磁芯の断面観察写真を示す。観察面は磁芯の縦断面で、図中の左右の方向が磁路方向になるようにした。粉末の長軸方向は磁路方向に対して必ずしも平行ではなく角度を有して分布しているが、粉末のアスペクト比を変化させてもこの平均の角度は変化しなかった。このため、本研究では粉末のアスペクト比は単に独立粉末として測定し、磁路方向に対する考慮は行わなかった。粉末のアスペクト比が大きい場合には長円形の粉末が多く見られ、アスペクト比が小さくなるに従い粉末粒子形状は球形に近づいていることが分かる。

2.3 圧粉磁芯の作製

まず、原料粉末にバインダーおよび粒子間の電氣的絶縁のためにシリコン樹脂(東レ・ダウコーニング・シリコン社製SR-2400)を1mass%混合した。乾燥後、潤滑剤としてヘガネス社製ケノループを0.5mass%混合してプレス成形した。成形は室温で1080~1960MPaの圧力で油圧プレス機を用いて行なった。磁芯のサイズは外径28mm内径20mm高さ約5mmのトロイダル状とした。成形

Fig.1. Microstructures of compressed cores with modified-water atomized powders.

された磁芯をAr雰囲気中で熱処理した。磁芯の熱処理は

973 K で保持時間は 3.6 ks(1 時間) とした。

2.4 磁気特性評価

磁気特性として初透磁率および直流重畳特性を測定した。LCR メーター (アジレント・テクノロジー製 4284A) を用いて、0 ~ 8000 A/m までの直流バイアス磁界に 0.4 A/m の振幅で周波数 20 kHz の交流磁界を重ねさせ透磁率を測定した。

3. 結果および考察

3.1 初透磁率に及ぼす粉末粒子形状の影響

Fig.2 にアスペクト比および圧粉磁芯の相対密度を変化させたときの初透磁率の変化を示す。アスペクト比が大きくなる、つまり粒子形状が長円形になるに従い初透磁率は高くなる。また、同じアスペクト比でみると、相対密度が高いほど初透磁率は高くなっている。圧粉磁芯の相対密度はプレス成形圧力を変化させることにより変化した。すなわち、初透磁率は圧粉磁芯の相対密度だけでなく、粉末粒子形状によっても影響を受けることが分かる。

そこで、Fig.2 に示したデータを用いて、初透磁率に及ぼす粉末のアスペクト比と圧粉磁芯の相対密度の影響について重回帰分析を行い、以下の式を得た。

$$\mu' = 79.4n + 510 - 450.5 \quad \dots (1)$$

ここで、

μ' : 初透磁率 n : 粉末粒子のアスペクト比

: 圧粉磁芯の相対密度

計算された重回帰係数は 0.97 と高い相関を示し、初透磁率は粉末のアスペクト比と圧粉磁芯の相対密度の両方

Fig.2. Relationship between initial permeability μ' and aspect ratio of particles. Dotted lines show calculated permeability using equation (1).

に強く影響されることが分かる。Fig.2 の破線は得られた回帰式 (1) 式を用いて計算した計算値を示している。測定値と計算値とは全体的によく一致していることがわかる。

次に初透磁率に及ぼす粉末のアスペクト比と圧粉磁芯の相対密度について、圧粉磁芯の見掛けの有効反磁界係数の考え方を取り入れ更に詳しく検討を行った。Ollendorf³⁾によれば、見掛けの有効反磁界係数を用いて透磁率を表現すると、

$$\mu' = (\mu_r - 1) / [N(1 - (\mu_r - 1) + 1) + 1] \quad \dots (2)$$

で与えられる。

ここで、

: 圧粉磁芯の相対密度 $= d / (7.1 \times 10^3)$

d : 密度 (kg/m^3) 7.1×10^3 : 本合金の真密度 (kg/m^3)

μ_r : 真の透磁率 N : 圧粉磁芯の有効反磁界係数

である。 μ_r の値は相対密度が1となったときの透磁率に相当する。ここでの計算では、以下に述べる Fig.3 に示したデータを相対密度1まで放物線で外挿した値である1000を用いた。

Fig.3 に初透磁率に及ぼす圧粉磁芯の相対密度と粉末粒子のアスペクト比の影響を示す。実線は測定値であり、破線は (2) 式を用いた計算値を示している。この計算では有効反磁界係数 N をパラメータとして変化させている。

実測値と (2) 式から計算された計算値との比較から粉末粒子のアスペクト比が大きいくほど有効反磁界係数 N が小さくなっており、それに従い初透磁率が大きくなっている

Fig.3. Relationship between initial permeability and relative density of cores with various aspect ratio of particles. Dotted lines show calculated permeability using equation (2) with various demagnetizing factors N .

Table 3. Effective demagnetizing factors calculated by equation(2) and (3).

A	B	C	D	E
Aspect Ratio of Particle	Effective Demagnetizing Factor calculated by (2)	Demagnetizing Factor calculated by (3)	Aspect Ratio calculated by (3)	
n	N	N'	n'	n'/n
1.27	0.061	0.27	4.69	3.69
1.41	0.049	0.25	5.49	3.89
1.58	0.045	0.22	5.84	3.70
1.71	0.039	0.20	6.44	3.77
1.83	0.035	0.19	6.94	3.79

ことがわかる。また圧粉磁芯の相対密度が増加すると実測値と同様に (2) 式で計算される初透磁率も増加している。初透磁率の増加の傾向は計算値と実測値はほぼ一致しており、粉末のアスペクト比が同じなら圧粉磁芯の相対密度が変化しても有効反磁界係数はほぼ一定であると考えられる。それぞれのアスペクト比をもつ粉末について有効反磁界係数を計算した結果を Table 3 の B 欄に示す。

以上の議論から粉末粒子形状により初透磁率が変化するの、圧粉磁芯の有効反磁界係数が変化することがその物理的な理由であることが確かめられた。続いて、粒子のアスペクト比と有効反磁界係数との関係について議論を進める。回転楕円体の磁性体が他の磁性体との相互作用がなく孤立して存在する場合には、反磁界係数は (3) 式で表されることが知られている⁴⁾。

$$N' = 1/(n^2 - 1) \cdot \{ [n/(n^2 - 1)^{1/2}] \cdot [\ln(n + (n^2 - 1)^{1/2}) - 1] \} \dots (3)$$

n : 粉末のアスペクト比 N' : 粉末の反磁界係数

(3) 式からそれぞれのアスペクト比の粉末で反磁界係数 N' を計算した結果を Table 3 の C 欄に示す。(2) 式から計算された有効反磁界係数 N (B 欄) と (3) 式から計算された反磁界係数 N' (C 欄) の結果を比較すると、 N' の方がかなり大きな値を示し、大きく異なっている。この理由は、(3) 式の N' は磁性体が周囲の磁性体との相互作用がなく、独立した状態での反磁界係数を表しているのに対し、現実の圧粉磁芯では粉末粒子が非常に接近して存在するため、何個かの粒子が見掛け上磁氣的に繋がった状態となり、B 欄の有効反磁界係数 N は大きく低下しているものと考えられる。

そこで、(3) 式を用い、逆に B 欄の N となるようなアスペクト比 n' を求めた結果を D 欄に示す。個々の粉末粒子は 1.3 ~ 1.8 のアスペクト比をもっているが、それを成形した圧粉磁芯では、磁氣的には見掛け上アスペクト比が 4.7 ~ 6.9 程度の連続した粒子の集合体として振る舞っているものと考えられる。E 欄には A 欄の実際の粉末のアスペクト比である n と D 欄の (3) 式から求めた見掛け上のア

スペクト比の比率を示してある。この値は、いずれの圧粉磁芯でも、平均的に約 4 個の粒子が連続して繋がった状態で磁化していることを意味している。この推定を直接実証するようなデータは今のところないが、今後の課題としてい。

3.2 直流重畳特性に及ぼす粉末粒子形状の影響

次に直流重畳特性の粉末粒子形状依存性について議論する。スイッチング電源や DC-DC コンバータの特性を決める上で、それらに使用される圧粉磁芯の直流重畳特性は重要なファクターである。つまり、例えば DC-DC コンバータのチョークコイルに大きな直流電流と交番電流とが重畳して流れる場合、その圧粉磁芯には直流磁界下で大きな透磁率が要求される。

Fig.4 に粉末粒子のアスペクト比を変化させた時の直流重畳特性を示す。この図ではプレス成形圧力をコントロールし圧粉磁芯の相対密度を変化させることにより、すべての圧粉磁芯の初透磁率を約 100 に調整した。測定を行ったすべての直流磁界においてアスペクト比の小さい粉末ほど高い透磁率を示し、直流磁界が大きくなっても透磁率の低下は小さい。初透磁率が同じなら、アスペクト比の小さい粉末を用いた方が高い重畳特性を示すことが分かる。

次に、種々のアスペクト比をもつ圧粉磁芯で、その相対密度を約 0.84 とほぼ一定としたときの直流重畳特性を Fig.5 に示す。アスペクト比の大きな長円形状の粉末を用いた圧粉磁芯の場合、初透磁率の高いものの直流磁界が大きくなるに従い透磁率は急激に低下する。それに対して、アスペクト比の小さい球形状の粉末を用いた圧粉磁芯の場合、初透磁率は比較的低いものの直流磁界が大きくなっても透磁率の低下は小さい。直流磁界が 3000 A/m 以下の範囲ではアスペクト比の大きな粉末を用いた方が透磁率が高く、逆に 3000 A/m 以上の直流磁界ではアスペクト比の小さい粉末を用いるほど透磁率が高くなっている。

Fig.4. DC bias characteristics of permeability. Initial permeability of every core is around $\mu_i=100$.

Fig.6. Relationship between initial permeability and permeability at DC bias 800 A/m.

Fig.5. DC bias characteristics of permeability. Relative density of every core is around 0.84.

Fig.7. Relationship between initial permeability and permeability at DC bias 6400 A/m.

そこで次に直流磁界が 800 A/m および 6400 A/m のときの透磁率と初透磁率の関係をそれぞれ Fig.6 および Fig.7 に示す。図中の破線は同じ圧粉磁芯の相対密度を示している。800 A/m と比較的小さい直流磁界の場合は、粉末のアスペクト比および圧粉磁芯の相対密度が増加するにつれ透磁率は増加している。それに対し、直流磁界が 6400 A/m の場合は、圧粉磁芯の相対密度は高い方がよいが、粉末のアスペクト比は逆に小さい方が透磁率は高くなっている。つまり、低磁界バイアス下で高い透磁率を得るために

は圧粉磁芯の相対密度を高め、粉末のアスペクト比も大きくして初透磁率を高くした方が良く、一方、高磁界で高い重畳特性を得るためには圧粉磁芯の相対密度を高め、粉末のアスペクト比は小さくして初透磁率を低下させた方が良くと考えられる。以上の結果より、スイッチング電源や DC-DC コンバーターのチョークコイル等に使用する場合には、その電流条件を十分考慮して、圧粉磁芯の種類（粉末の形状、圧粉磁芯の密度）を選択することが重要と考えられる。

4 . 結 論

本報告ではFe-Si-Al系合金で改良型水噴霧法によって粒子形状を連続的に変化させた5種類の粉末を用いて圧粉磁芯を作製し、透磁率とその直流バイアス磁界依存性(直流重畳特性)を評価した。そこで以下の結論を得た。

- (1) 初透磁率は粉末粒子のアスペクト比と圧粉磁芯の相対密度に影響を受け、それぞれが大きい程初透磁率は高くなる。
- (2) Ollendorf の式を用いた解析から、アスペクト比が大きくなると初透磁率が高くなる原因は、圧粉磁芯の見掛けの有効反磁界係数が小さくなるためと考えられる。
- (3) 圧粉磁芯においては、平均4個程度の粉末粒子が磁気的に連続した状態で磁化していると推定される。
- (4) 同様に直流重畳特性も粉末粒子のアスペクト比と圧粉磁芯の相対密度に影響を受ける。
- (5) 低磁界の直流バイアス下では圧粉磁芯の相対密度および粉末粒子のアスペクト比が大きいほど透磁率が高くなる。一方、高磁界の直流バイアス下では圧粉磁芯の相対密度が高く粉末粒子のアスペクト比が小さいほど透磁率は高くなる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、一連の実験の実施に協力していただいた大同特殊鋼(株)技術開発研究所管理室試作第三係の坂元親男氏に感謝します。また最後になりましたが、原料粉として各種噴霧粉を提供して頂きました大同特殊鋼(株)粉末事業部の方々にお礼を申し上げます。

(文献)

- 1) 齊藤貴伸、矢萩慎一郎: 電気製鋼, 69(1998), 181.
- 2) 齊藤貴伸、武本聡: 電気製鋼, 71(2000), 287.
- 3) 高城重彰、清田禎公: 粉体および粉末冶金, 32(1985), 259.
- 4) 太田恵造: 磁気工学の基礎I(1973), p.38 [共立出版]。