論説

Paper

噴霧粉を用いた Fe-Si-Al 系圧粉磁芯の低コアロス化

齊藤貴伸*, 武本 聡*

Core Loss Reduction of Powder Cores with Fe-Si-Al Atomized Powders

Takanobu Saito, and Satoshi Takemoto

Synopsis

Magnetic powder cores are widely used for smoothing and boost choke coils of switching regulators as well as DC-DC converters. However, in general powder cores have a disadvantage of large core loss compared to sintered soft ferrite cores, and lower core loss powder cores are strongly required.

In this study effects of particle size and microstructure on core loss of powder cores with Fe-Si-Al water-atomized and modified water-atomized powders were investigated. We concluded as follows.

(1) Both eddy current loss and hysteresis loss are small for modified water-atomized powder cores compared with water-atomized cores. (2) Eddy current loss decreases with being particle size small. (3) Modified water-atomized powder cores have low eddy current loss through higher resistivity than that of water atomized powder cores. (4) Crystal grains are large for modified water atomized powder cores, thus hysteresis loss is small. It is guessed that aluminum oxides included in water atomized powder prevent grain growth through images with electron probe micro analyzer.

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 OA 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 OA 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、昇圧チョップア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（いわゆるセンダスト）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を原料として用いることが多く、噴霧粉を用いた報告は少ない。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

の透磁率や絶縁抵抗に違いが生じることを明らかにしてきた。

また、焼結ソフトフェライトも同様な磁芯に多用されている。圧粉磁芯はフェライトと比較すると、一般的に磁束密度が高いため、磁芯の小型化には有効であるが、コアロスが大きいたことが難点である。従って、圧粉磁芯のコアロスの低減が重要な課題となっている。

そこで、本研究では噴霧粉を用いた Fe-Si-Al 系圧粉磁芯において、コアロスを低下させるために、その要因として、粉末粒径および粉末粒内の結晶粒径に着目した。噴霧方法および粉末粒径を変化させてコアロスを測定し、粉末粒径および金属組織的要因とコアロスの関係を明確にすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試験に用いた原料粉末

水噴霧と特殊水噴霧の 2 種類の方法で噴霧粉を作製した。特殊水噴霧とはガスと水の両方を用いる噴霧法であ

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

atomization method	C	Si	Al	P, S	Mn, Cu, Ni, Cr, Mo	N	O
water-atomization	0.006	9.55	5.57	each	each	0.002	0.19
modified water-atomization	0.010	9.33	5.85	max.0.003	max.0.04	0.002	0.09

Table 2. Powder characteristics of experimented Fe-Si-Al system powders.

atomization method	Particle size distribution (mass %) (mesh)						Mean diameter D ₅₀ (μm)
	+100	-100 +145	-145 +200	-200 +250	-250 +350	-350	
water-atomization	0	15.6	19.6	12.0	25.2	27.6	56
modified water-atomization	0.4	9.7	19.4	12.6	19.1	38.8	52

Fig. 1. SEM images of experimented Fe-Si-Al system powders.

る．試験に用いた原料粉末の成分を Table 1 に，粒度分布を Table 2 に示す．水噴霧粉，特殊水噴霧粉ともに成分は軟磁気特性が最も良好とされている Fe-9.6wt.%Si-5.4wt.%Al に近いものであった．また粒度分布は水噴霧粉の方が粒径の大きな粉末がやや多くあり，その結果，平均粒径もやや大きい．

2.2 粉末粒子径別の分級

前報¹⁾で，平均粒径を小さくすると渦電流損が低下することが確かめられた．これは，渦電流の流れる粒子の体

積が小さくなったことが原因と推察された．噴霧ままの 100メッシュ以下の粉末を用いて電磁気特性を調査するとともに，粉末粒子径別による電磁気特性の変化をさらに詳細に調べた．そこで，原料粉末を粒子径別に次のように篩い分けした．100 / 140 メッシュ，140 / 200 メッシュ，200 / 280 メッシュ，280 / 440 メッシュ，440 / 635 メッシュ，635 メッシュ以下の 6 種類．Fig.1 に代表して 3 種類の分級された粉末の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す．粉末粒径が大きい場合には水噴霧粉では形状が非常に

不規則な形で、特殊水噴霧粉は水噴霧粉ほど異形状ではなくピーナッツ状である。粉末粒径が小さくなるにつれ両者とも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として水ガラス 3 mass% と必要に応じ絶縁物として SiO_2 を 1 mass% 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 0.5 mass% 混合してプレス成形した。成形は室温で 13 t/cm^2 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 28 mm 内径 20 mm 高さ約 5 mm のトロイダル状とした。成形された磁芯を Ar 雰囲気中で熱処理した。熱処理温度は 700 から 900 で変化させた。保持時間は 1 時間とした。

2.4 磁気特性評価

磁気特性としてコアロスを測定した。交流 BH アナライザ(岩崎通信機製 SY-8232)を用いて、励磁磁束密度 0.1T、周波数 100 kHz までのコアロスを測定した。また電気抵抗率は磁芯の上下面に導電ペーストを塗布して電極に挟み込んで抵抗を測定し、電気抵抗率に換算した。

3. 結 果

3.1 熱処理温度による電磁気特性の変化

まず、Fig.2 に特殊水噴霧粉を用いて、噴霧ままの 100

Fig. 2. Heat treatment temperature dependence of loss at 100 kHz and 0.1T of modified water-atomized powder cores.

メッシュ以下の粉末を用いたときの励磁磁束密度 0.1T、周波数 100 kHz におけるヒステリシス損と渦電流損の磁芯熱処理温度による変化を、絶縁物としての SiO_2 の添加の有無に分けて示す。ヒステリシス損と渦電流損への分離の方法は次のようにして行った。低周波から 100 kHz まで測定したコアロス P_c を各周波数で除し、すなわち一周期あたりのロス P_c/f を求め、これを周波数 f に対してプロットす

る。これを周波数ゼロに外挿したときの切片が直流における一周期あたりの損失、すなわちヒステリシス損失係数となる。これを周波数倍して、ヒステリシス損とした。 P_c/f プロットはほぼ直線となったことから考えて、コアロスからヒステリシス損を差し引いた残りの損失はほぼ周波数の 2 乗に比例することになり、異常損の発生は認められない。従ってコアロスからヒステリシス損を差し引いたものをすべて渦電流損として扱った。

コアロスは 800 の熱処理温度で最も小さくなる。 SiO_2 を含まない場合には、850 以上の熱処理では渦電流損が非常に大きくなる。一方、ヒステリシス損は SiO_2 の有無に関係なく熱処理温度とともに低下する。

次に、電気抵抗率の熱処理温度による変化を Fig.3 に示す。電気抵抗率は熱処理温度とともに低下するが、いずれの熱処理温度においても SiO_2 を添加した方が高い電気抵抗率を示している。

Fig. 3. Heat treatment temperature dependence of resistivity of modified water-atomized powder cores.

3.2 噴霧方法と粉末粒径による電磁気特性の変化

次に各粒度に分級した粉末を用いて圧粉磁芯を作製し、磁気特性の粉末粒径依存性を調査した。磁芯熱処理温度はすべて 800 一定とした。Fig.4 および Fig.5 に水噴霧粉と特殊水噴霧粉において、各粉末粒度別の励磁磁束密度 0.1T、周波数 100 kHz におけるコアロスとコアロスをヒステリシス損と渦電流損に分離した結果を示す。

全体的に見て、特殊水噴霧粉の方が水噴霧粉よりも小さな渦電流損、ヒステリシス損を示す。粉末粒径が細くなるに従い、水噴霧粉と特殊水噴霧粉ともにコアロスは大きく低下し、特に渦電流損失の低下が大きく見られる。一方ヒステリシス損に着目すると、全体的に特殊水噴霧粉の方

Fig. 4. Particle size dependence of loss at 100 kHz and 0.1T of water-atomized powder cores.

Fig. 5. Particle size dependence of loss at 100 kHz and 0.1T of modified water-atomized powder cores.

が小さなヒステリシス損を示す。特殊水噴霧粉では粉末粒径が 140 メッシュから 280 メッシュにかけてヒステリシス損が最も小さくなるが、水噴霧粉ではほとんど変化していない。

Fig. 6. Particle size dependence of resistivity of water-atomized and modified water-atomized powder cores.

次に Fig.6 に水噴霧粉と特殊水噴霧粉の電気抵抗率の粉末粒径依存性を示す。まず全体的に見て、特殊水噴霧粉の方が高い電気抵抗率を示している。これは、Fig.1 に見られるように特殊水噴霧粉の方が球形に近いので、粉末粒子同士の接触が少なく、高絶縁が保たれているものと考えられる。次に、粉末粒径による違いでは、粉末粒径が小さくなるに従い電気抵抗率は高くなっている。これも同様な理由で、Fig.1 に見られるように、粉末粒径が小さくなると不規則形状から球形に近づくため、絶縁性が高くなるものと考えられる。

4. 考 察

4.1 電気抵抗率と渦電流損の関係

まず、3.1 で述べた特殊水噴霧粉の 100 メッシュ以下の粉末を用いて、磁芯熱処理温度を変化させたときの渦電流損と電気抵抗率の結果 (Fig.2 と Fig.3) から、両者の関係を Fig.7 に示す。電気抵抗率が約 0.03 Ωm 以下になると渦

Fig. 7. Resistivity dependence of eddy current loss at 100 kHz and 0.1T of modified water-atomized powder cores.

電流損が急激に大きくなる。この結果はバインダーにシリコン樹脂を用いた場合の結果¹⁾と一致している。また同様に、純鉄においてもある臨界の電気抵抗率より小さくなると、コアロスが急激に増大することが報告されている^{3),4)}。この臨界の電気抵抗率の物理的な意味は次のように考えられる^{1),3),5)}。すなわち、この臨界点よりも大きい電気抵抗率では渦電流はほとんどが粉末粒子内で発生し、粉末粒子間に亘っては流れないため損失はほぼ一定値を示す。電気抵抗率が小さくなると、粉末粒子間に亘って渦電流が発生するため、損失が急激に大きくなるものと考えられる。

同様に 3.2 で述べた水噴霧粉を用いて各粉末粒度別に分

級したときの渦電流損と電気抵抗率の結果 (Fig.4 と Fig.6) から、両者の関係を Fig.8 に示す。ここでも同様に電気抵抗率約 0.03 m を境に渦電流損が急激に変化している。

Fig. 8. Resistivity dependence of eddy current loss at 100 kHz and 0.1T of water-atomized powder cores.

Fig.4 および Fig.5 に示したように、同じ粉末粒度であっても、特殊水噴霧粉に比べ水噴霧粉で渦電流損が大きく異なる原因は次のように考えられる。すなわち水噴霧粉ではほとんどの粉末粒径で電気抵抗率が非常に低いため、渦電流が粉末粒子間に亘って流れ、大きな渦電流損が発生してしまう。一方、特殊水噴霧粉ではすべての粉末粒径で大きな絶縁性を保つため、渦電流は粉末粒子内だけで流れ、損失は小さい。そして粉末粒径が小さくなるほど渦電流損は減少していく^{3),6)}。特殊水噴霧粉でも、熱処理温度を高くしたり、 SiO_2 が無添加の場合には先に Fig.2 に示したように、十分な絶縁性を保つことができずに渦電流は増大する。粉末粒子間の絶縁が十分確保されている状態の635メッシュ以下の粉末を用いた場合には、水噴霧粉、特殊水噴霧粉ともにほぼ同じ渦電流損を示している。

この電気抵抗率の臨界値約 0.03 m の理論的な裏付けは、次の 4.2 でも若干言及するが、渦電流損の実測値と計算値とが必ずしも一致しないので、ここでは、これ以上の議論は不可能である。今後の課題としたい。

4.2 粉末粒径と渦電流損の関係

前述したように、特殊水噴霧粉ではすべての粉末粒径で、渦電流は粉末粒内だけに流れるものと考えられる。そこで、Fig.5 のデータを用いて、粉末粒径と渦電流損の関係を Fig.9 に示す。横軸の粉末粒径は分級した各メッシュ間の中央値を採った。粉末粒径が小さくなるに従い、渦電流損は直線的に減少することが分かる。

一般に、球状の軟磁性体が独立して存在するとき、表皮深さ s が球の直径よりも十分深いとき、渦電流損は次式で

表現される⁷⁾。

Fig. 9. Particle size dependence of eddy current loss at 100 kHz and 0.1T of modified water-atomized powder cores.

$$s = \left(\frac{\rho}{\pi f \mu \mu_0} \right)^{1/2} \quad \cdots (1)$$

$$P_e = \left(\frac{1}{2} \cdot B_m \cdot d \cdot f \right)^2 / (20 \cdot \mu) \quad \cdots (2)$$

ここで、

s : 表皮厚さ [m]、 ρ : 電気抵抗率 [m]、 f : 周波数 [Hz]、 μ : 比透磁率、 μ_0 : 真空の透磁率 $4 \times 10^{-7} [\text{H/m}]$ 、 P_e : 渦電流損 [W/m^3]、 B_m : 励磁磁束密度 [T]、 d : 粉末の直径 [m]、 μ : 磁性体の充填率

である。実測値と計算値を比較するために、 $B_m = 0.1 [\text{T}]$ 、 $f = 100 [\text{kHz}]$ 、また μ はこの Fe-Si-Al 系合金の電気抵抗率 $\rho = 80 \times 10^{-8} [\text{m}]$ を、 $\mu = 0.78$ をそれぞれ (2) 式に代入して、渦電流損 P_e の粉末粒径 d の依存性を計算した結果も併せて Fig.9 にプロットしてある。

計算値は (2) 式からも分かるように粉末粒径 d の 2 乗に比例するのに対し、実測では d に比例しており、粉末粒径に対する依存性が異なっている。その理由として、表皮厚さと粉末粒径の関係を調べるために、(1) 式にこれらの圧粉磁芯の透磁率の実測値である $\mu = 70$ を代入するとこの条件では、 $s = 159 \mu\text{m}$ となる。この値と粉末粒径とを比較すると、表皮深さが粉末粒径よりも十分厚いとは言えず、(2) 式が成立する前提条件が必ずしも成り立っていないものと考えられる。そのために、実測値と計算値は大雑把には一致するが、粒径の依存性までは一致しないものと考えられる。この不一致を解決するためには、渦電流損の近似式でなく、全体を説明できる理論的検討が必要である。

4.3 ヒステリシス損に及ぼす金属組織の違い

Fig. 10. Microstructures of water-atomized and modified water-atomized powder cores.

Fig. 11. Particle size dependence of grain size of water-atomized and modified water-atomized powder cores.

次にコアロスの内のもう一方の要因である、ヒステリシス損について検討した。Fig.4 と Fig.5 に示のようにヒステリシス損も水噴霧粉と特殊水噴霧粉とで、また、それぞれの粉末粒径においても異なっている。一般にヒステリシス損は結晶粒径と密接な関係があり、結晶粒径が大きいほどヒステリシス損が小さくなることが知られている。そこで Fig.10 および Fig.11 に電磁気特性を調査した圧粉磁芯のプレス面の光学顕微鏡組織写真およびその写真から結晶粒径を測定した結果を示す。水噴霧粉より特殊水噴霧粉の

Fig. 12. Grain size dependence of hysteresis loss at 100 kHz and 0.1T of water-atomized and modified water-atomized powder cores.

方が全体に結晶粒径が大きくなっている。粉末粒径を大きくすると、水噴霧粉、特殊水噴霧粉ともに結晶粒径は大きくなるが、特に特殊水噴霧粉でその変化が大きい。そこで、結晶粒径とヒステリシス損との関係をプロットしたものを Fig.12 に示す。特殊水噴霧粉では結晶粒径が大きくなるに従い、ヒステリシス損はほぼ単調に減少していく。一方、水噴霧粉では結晶粒径とヒステリシス損との間の相関は認められない。両者の噴霧粉で何故その挙動が異なる

Fig. 13. EPMA images of water-atomized and modified water-atomized powder.

のかは現段階では明確でなく、今後の追求が必要である。

4.4 X線マイクロアナライザー(EPMA)による結晶粒の違いの検討

前節で、水噴霧粉と特殊水噴霧粉では結晶粒の大きさが異なり、これがヒステリシス損失を左右していることが確かめられた。そこで、両者の噴霧法でなぜ結晶粒の大きさが異なるのかをX線マイクロアナライザーを用いて調査した。

Fig.13に両者の噴霧粉で100 / 140メッシュに分級した粉末の噴霧ままの状態における粉末断面の酸素とアルミニウムの濃度分布像を示す。特殊水噴霧粉では酸素はほとんど粉末表面のみに存在している。これに対し水噴霧粉では、酸素は粉末表面の他に粉末の内部に濃度の高い部分が塊状となって存在している。この酸素に対応してアルミニウムも検出される。一方、シリコンとの対応は認められなかった。これらの結果を考慮すると、 Al_2O_3 のような介在物が粉末内部に存在し、熱処理時における結晶粒の粗大化を阻止しているものと考えられる。

これは噴霧のプロセスが原因と考えられる。すなわち、水噴霧粉では水の一部が溶湯と接触した際に酸素と水素に分解する。すると溶湯の表面が急激に酸化し、 Al_2O_3 被

膜が生成される。その被膜が高压の水の力により粉末内部に巻き込まれる。従って、粉末内部に層状に折れ曲がった Al_2O_3 が観察されるものと考えられる。

5. 結 論

本研究では2種類の噴霧粉を用いて粉末粒度別に分級し、圧粉磁芯を作製して電磁気特性を評価した。そこで以下の結論を得た。

- (1) 水噴霧粉より特殊水噴霧粉の方が渦電流損は小さい。水噴霧粉で渦電流損が大きい原因は、粉末形状が異形なため電気抵抗率が非常に小さくなり、渦電流が粉末粒子間に亘って流れるためと考えられる。
- (2) 特殊水噴霧粉では粉末粒径に比例して渦電流損は変化する。しかし、一般に言われているような粉末粒径の2乗に比例する関係は認められなかった。定性的には、特殊水噴霧粉の場合、粉末粒子間の絶縁は十分であるので、粉末粒内に流れる渦電流によって渦電流損が決まるものと考えられる。
- (3) 水噴霧粉より特殊水噴霧粉の方がヒステリシス損も小さい。その原因は特殊水噴霧粉の方が粉末粒子内の結晶粒が粗大化してしているためである。

(4) 水噴霧粉は噴霧中に Al_2O_3 などの介在物を粉末粒子内に巻き込み、これが、熱処理時の結晶粒粗大化を妨げているものと考えられる。

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 電磁材料研究部 磁性材料研究チームの坂元親男氏、中尾好孝氏に感謝します。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) 斎藤 矢萩:電気製鋼 69(1998),181
- 2) 斎藤 矢萩:粉体粉末冶金協会講演概要集 平成10年度 秋季大会 (1998),164
- 3) 井上 菅谷 松谷 釘宮:National Technical Report, 40(1994),135
- 4) 浅香 石原 斎藤 馬場:電気学会 マグネティックス研究会資料(1998),MAG-98-155
- 5) 藤原 石井 大槻:粉体粉末冶金協会講演概要集 平成12年度春季大会(2000),241
- 6) 茂呂 梅原 森:日本電子材料技術協会 第32回秋期講演大会講演概要集(1995),26
- 7) R. M. Bozorth:Ferromagnetism, (1951), 769, [D. Van Nostrand Company, Inc]