

(技術資料)

高周波用圧粉磁心の低鉄損化

Dust Core with Low Core-loss for High-frequency Applications



北条啓文*1
Hirofumi HOJO



上條友綱*1
Tomotsuna KAMIJO



谷口祐司*1
Yuji TANIGUCHI



赤城宣明*1
Nobuaki AKAGI



三谷宏幸*2
Hiroyuki MITANI

Dust cores produced by compacting insulation-coated powder allow a high degree of freedom in shaping and are expected to be useful for the downsizing of parts; however, they have issues of energy loss, or core loss. A study has been conducted on reactors and choke coils, which are used at relatively high frequencies, to improve their core-loss characteristics by focusing on the particle size of the powder. As a result, "MAGMEL MH20D" powder was developed by designing powder, taking into account, not only the magnetic characteristics, but also power characteristics, and by combining conventional techniques of heat-resistant coating and grain coarsening. The newly developed powder has improved the core loss, reducing it to 30% of that achieved by conventional products, and has been adopted for the reactors of solar-power systems.

まえがき = 電磁気部品に対しては、省エネルギー・低環境負荷の観点から高効率化、そして省スペースの観点から小型化が求められている。電磁気部品の鉄心には従来、電磁鋼板を積層したコアが用いられているが、積層構造のため異方性を持つこと、および形状に制約があることから小型化には限界があった。

一方で、粉末を固めて製造する圧粉磁心には異方性がないうえに、形状の制約も少ないことから小型化が期待されている。実際、ハイブリッド車の昇圧リアクトルにはFe-Si系合金粉末の圧粉磁心が採用された¹⁾。さらに、再生可能エネルギー普及促進政策の一環で太陽光発電に対する助成制度が開始されたことに伴い、太陽光発電システムの需要増とともに、発電システムに用いられる部品の小型・高効率化を目的とする圧粉磁心の実用化が進んでいる。

圧粉磁心原料として用いられる純鉄粉は、合金粉と比べて圧縮性が高く、飽和磁束密度が大きいため、さらなる部品小型化の可能性がある。また、粒子が柔らかく成形性が良いため、コア製造工程において扱いやすい特長を持つ。しかしその一方で、鉄損すなわちエネルギーロス を低減することが課題であった。

そこで、純鉄系圧粉磁心の鉄損を低減することを目的に、粉末粒子径が鉄損に及ぼす影響について調査した。それらの調査を通じて得られた知見やこれまでに開発した被膜技術、結晶粒制御技術を活用することにより、従来の純鉄粉と比較して鉄損を約30%改善し、Fe-Si系合金粉末の一部に匹敵する鉄損特性となる「マグメルMH20D」を開発した。マグメルMH20Dは太陽光発電のパワーコンディショナ用リアクトル原料として採用された。

1. 純鉄系圧粉磁心の課題と開発のアプローチ

磁心材料に求められる特性は、高磁束密度および低鉄損である。前述のとおり、純鉄粉による圧粉磁心は、合金粉末と比較して磁束密度は高いものの、鉄損が大きいことがデメリットである。鉄損は、主として渦電流損とヒステリシス損から構成される。渦電流損は磁化の変動によって発生する渦電流によるジュール損失であり、ヒステリシス損は磁性体を磁化させる際に生じるエネルギー損失である。図1にそれぞれの支配因子を示す。圧粉磁心は、粒子表面にコーティングされた絶縁被膜により、部品全体に流れる粒子間渦電流を抑制できる。しかし高周波域においては、渦電流損失全体の割合が増加するため、粒子間だけでなく粒子内に流れる渦電流も抑制する必要が生じる。合金粉末は、添加元素によって電気抵抗を大きくすることによって粒子内渦電流を抑制している。一方、純鉄粉の場合は、成分元素によって電気抵抗を制御することは困難である。このため、粒子径を小さくし、渦電流の流れる範囲を小さくすることによって

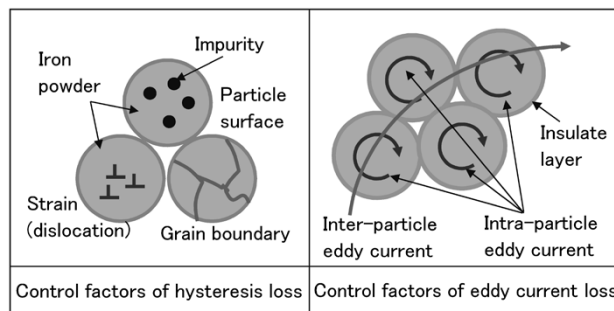


図1 鉄損支配因子
Fig. 1 Control factors of iron loss

*1 鉄鋼事業部門 鉄粉本部 鉄粉工場 *2 技術開発本部 開発企画部

粒子内渦電流を抑制することになる。しかし、粒子径の減少は、ヒステリシス損増加の原因となる表面積の増加を招くため、両者の影響の調査に基づく最適な粒径を得ることが重要である。

そこで、鉄粉粒子径が鉄損特性および粉体特性に及ぼす影響を調査することによって高周波数域においても低鉄損を実現する最適な粒度について検討した。次章以降では、その検討結果に基づいて高周波用途として開発した「マグメルMH20D」の特性を紹介する。

2. 調査方法

アトマイズ法による当社製純鉄粉をふるい分けによって粗粒子を除去し、平均粒径（ふるい分けにより測定された粒度分布における積算値50%での粒径（D50））約30～85 μm の原料鉄粉を準備した。りん酸を主成分とする処理液を用いてこれらの鉄粉の粒子表面に無機被膜を形成させた後、シリコン樹脂をコーティングすることにより、無機-有機被膜による2層の絶縁コーティング鉄粉を作製した²⁾。粉末潤滑剤を塗布した金型にコーティング処理した鉄粉を充填し、金型および粉末を303Kに加熱し、1,176MPaの圧力でリング形状（外形 ϕ 45mm、内径 ϕ 33mm、高さ6mm）に成形した。さらにこの成形体を窒素雰囲気中で873K、1.8ks保持して熱処理した。熱処理後の試験片に対し、鉄損を測定するために50回の1次巻線と10回の2次巻線を、また、BHカーブを測定するために400回の1次巻線と25回の2次巻き線を行った。

コーティング処理した粉末の流動度は、JIS Z 2502：2012金属粉-流動度測定方法に従って測定した。リング試験片のBHカーブは最大励磁磁場10kA/mにて測定し、鉄損は励磁磁束密度を0.1Tとし、1k～100kHzの間で周波数を変えて測定した。

3. 結果および考察

3.1 鉄粉粒子径が磁気特性に及ぼす影響

圧粉磁心の渦電流損は、部品全体を流れる渦電流による粒子間渦電流損と、構成する粒子内を流れる粒子内渦電流損から構成される（図1）。粒子間渦電流損は鉄粉粒子を絶縁コーティングすることで抑制できる。一方、粒子内渦電流損は、粒子の大きさ、すなわち電流の流れる領域を変えることで制御できるが、同時に粒子の表面積を変化させることになる。粒子表面積はヒステリシス損に影響する因子の一つであるため、粒子径の影響は、渦電流損とヒステリシス損の両方を考慮する必要がある。

平均粒子径と鉄損の関係を調査した結果を図2(a)に示す。粒子径が小さくなるほど鉄損が減少することが明らかになった。また、高周波になるほどその傾向は顕著であった。鉄損の周波数依存性から渦電流損とヒステリシス損に分離した結果をそれぞれ図2(b)、(c)に示す。渦電流損は鉄損と同様、粒子径が小さくなるにつれ小さくなる一方で、ヒステリシス損は粒子径に対する変化が小さいことから、鉄損の減少は渦電流損の減少によ

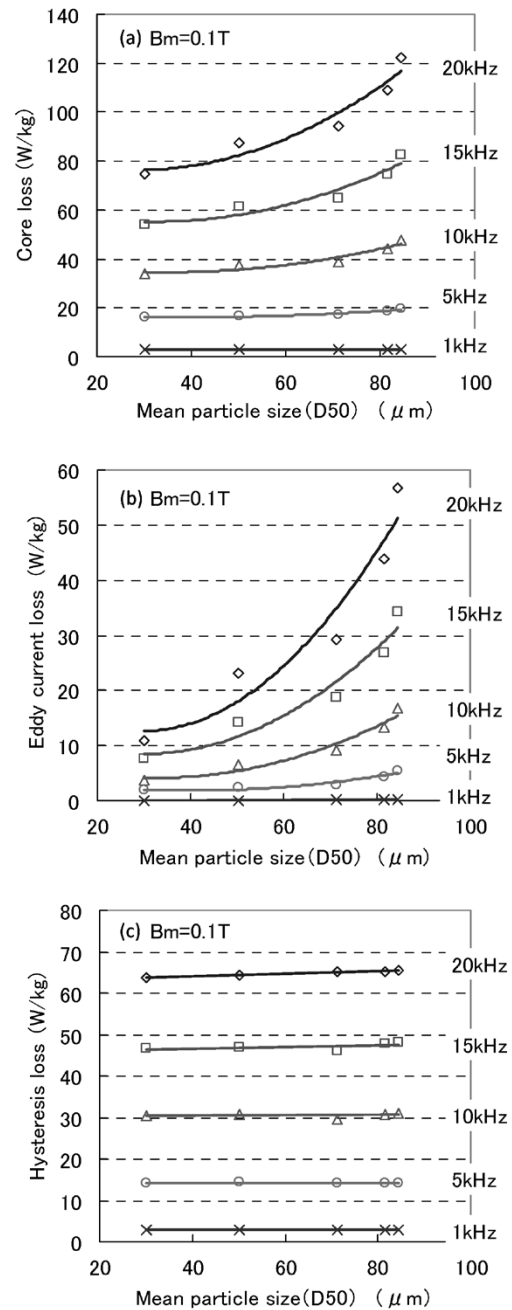


図2 粒子径と鉄損の関係
a) 鉄損, b) 渦電流損, c) ヒステリシス損
Fig. 2 Relationship between particle size and core loss
a) Core loss, b) Eddy current loss, c) hysteresis loss

るものが支配的であることが分かった。

つぎに、粒子径に対する保磁力の依存性を図3に示す。保磁力は粒子径の減少とともに増加しており、粒子径の減少、すなわち、粒子表面積の増加は磁壁移動を妨げる要因となっていることが分かる。

一般に、保磁力はヒステリシス損に比例することが知られているが、図2で得られたヒステリシス損の粒子径依存性と、図3で得られた保磁力の粒子径依存性の間には矛盾が生じている。これは、各特性測定時の励磁条件を考慮することで説明できる。鉄損測定における励磁条件は、励磁磁束密度が0.1Tである。一方で保磁力測定すなわち直流磁気測定においては、励磁磁場10kA/mである。これらの励磁条件を図4にBHカーブ上に示す。保磁力測定における磁束密度は約1.4Tであり、鉄損測定

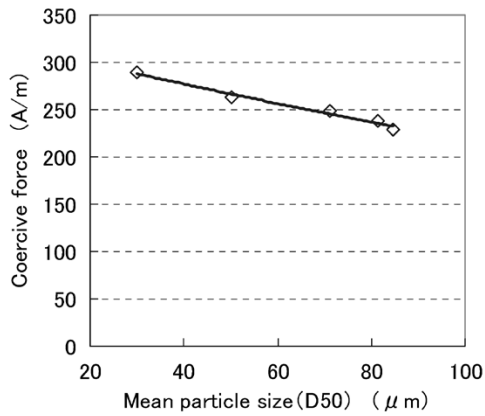


図3 粒子径と保磁力の関係

Fig. 3 Relationship between particle size and coersivity

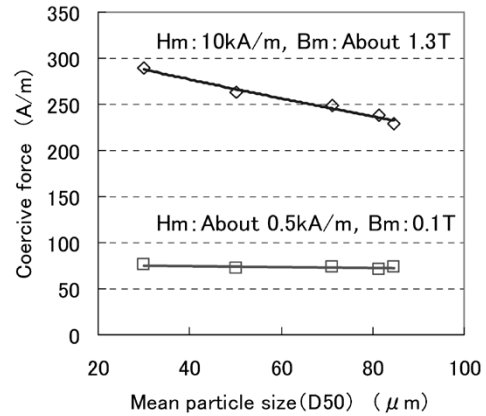


図5 粒子径と保磁力の関係

Fig. 5 Relationship between particle size and coersivity

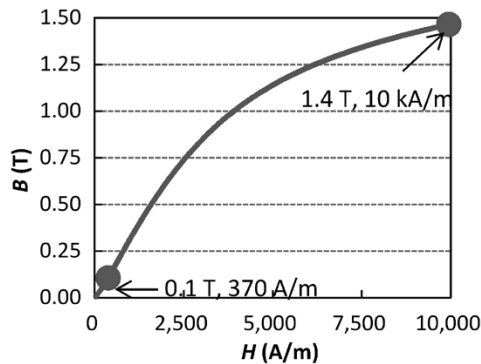


図4 BHカーブと励磁条件

Fig. 4 Excitation conditon

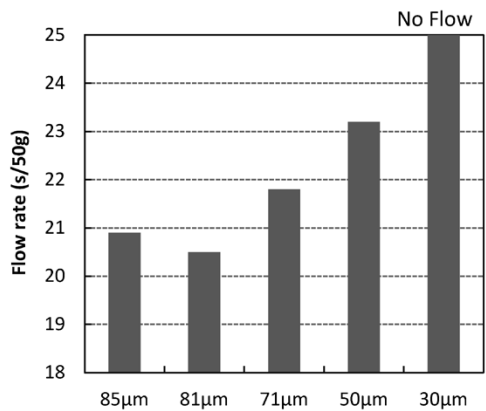


図6 粒子径と流動度の関係

Fig. 6 Relationship between particle size and flow rate

磁束密度とは大きく異なる。これは、磁壁の移動が異なることを意味し、鉄損測定時には磁壁はあまり移動しないが、保磁力測定時には飽和近くまで磁化するため、磁壁は大きく移動する。磁壁移動が小さい場合、粒子内部に存在する磁壁移動の妨げになる因子の影響が大きいと考えられ、磁壁移動が大きくなるにつれ、表面の影響が大きくなると考えられる。図5に異なる励磁条件における保磁力の粒子径依存性を示すとおり、励磁磁束密度0.1Tの低い励磁条件においては、保磁力の粒子径依存性は観察されなかった。

以上のことから、対象としている励磁条件(0.1T程度)においては、粒子径減少によるヒステリシス損の増加は見られず、渦電流損低減の効果のみ観察されたと考えられる。

3.2 鉄粉粒子径が粉体特性へ及ぼす影響

粉末を扱ううえで流動性は、粉体の貯蔵やハンドリング、金型への充填など、部品製造時の生産性に影響を及ぼす重要な特性の一つである。一般的に、微粉ほど表面

積の割合が大きく付着凝集性が増し、流動性は悪化する。したがって、前節における渦電流損とのトレードオフの関係となる。ふるい分けにより粒子径を変化させ、粒子径と流動性の関係を調査した結果を図6に示す。流動度は粒子径が小さくなるとともに大きく(悪く)なり、平均粒径30μmにおいては流動しなくなった。そこで実用上、流動度計を流れる最小粒度として約50μmを採用し、渦電流損と流動性の両立を図った。

4. まとめ

高周波・低磁束密度領域を対象に、純鉄粉の圧粉磁心に適した粒子径を検討した。この検討結果を基に、従来技術である高耐熱絶縁被膜技術²⁾および粉末の結晶粒粗大化技術³⁾を活用することによって「マグメルMH20D」を開発した。表1に熱処理体の特性、図7にマグメルMH20DとFe-Si系合金粉末⁴⁾との特性比較を示す。これらの複合技術により、純鉄粉の長所である高磁束密度を

表1 「MH20D」を用いたコアの特性

Table 1 Properties of 'MH20D' core

Grade	Density (Mg/m ³)	DC Magnetic properties			AC Magnetic Properties			Mechanical Properties
		Flux Density $B_{10kA/m}$ (T)	Maximum Permeability	Coercive force (A/m)	Core Loss $W_{1/10k}$ (W/kg)	Hysteresis Loss $Wh_{1/10k}$ (W/kg)	Eddy current Loss $We_{1/10k}$ (W/kg)	Transverse Rupture Strength (MPa)
MH20D	7.44	1.46	224	224	20.1	15.2	4.9	77

* Compaction: 1,176MPa with DWL compaction method at 403K
Heat treatment: 873K for 1.8ks in N₂

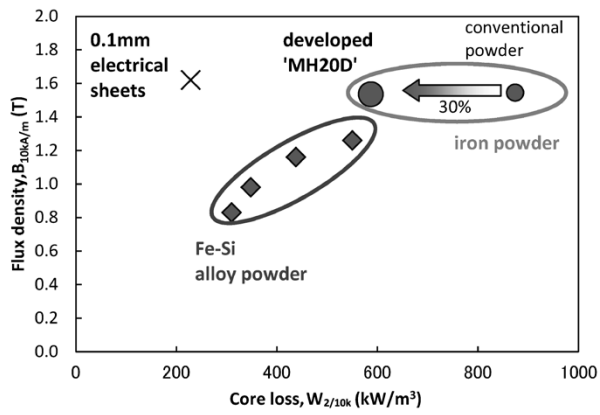


図7 各材料の特性比較
Fig. 7 Characteristic comparison of each material

維持したまま、課題であった鉄損を約30%低減し、Fe-Si系合金粉末の一部に匹敵する鉄損特性を得ることができた。本粉末は、太陽光発電のパワーコンディショナ用リアクトルに採用された。

むすび = 従来、電磁鋼板が使用されていた用途に対して、本材料によって純鉄粉の適用範囲を広げられることが確かめられた。積層コアと比較すると、圧粉コアは打抜き残材がないため歩留りが高く、低コスト・省資源に貢献できる。また、合金粉末と比較すると圧縮性が高いため、コア成形圧力を約20~50%低減させることができ、エネルギーコスト削減にもなる。現状では太陽光発電システムへの適用であるが、今後は、同様の昇圧回路が使用されているインバータ（汎用、車載用）などへの展開が期待される。

参考文献

- 1) 杉山昌揮ほか. 素形材2010, Vol.51, No.12, p.24-29.
- 2) 神戸製鋼所. 高周波用圧粉磁心およびその製造方法. 特許第4044591. 2006-09-11.
- 3) H. Hojo et al. PM2010 POWDER METALLURGY World Congress & Exhibition. 2010.
- 4) 武本 聡. 電機製鋼2011, Vol.82, No.1, p.57-65.