

技術論文



Technical Paper

Fe-Si アトマイズ粉を用いた圧粉磁心のコアロス特性に及ぼす粉末粒径, 結晶粒径の影響

武本 聡*, 齊藤貴伸*

Influence of Particle Size and Crystal Grain Size on Core Loss Properties of Powder Cores by Fe-Si Atomized Powders

Satoshi Takemoto and Takanobu Saito

Synopsis

Soft magnetic powder cores have been widely used for choke coils and reactors of switching regulators and DC-DC converters of power supplies. Recently, Fe-Si powder cores have been applied to inverter systems of hybrid cars. One of the demands for powder core is low cores loss regarding of the need of high efficiency of the electric devices. In this paper the authors have studied the magnetic properties of Fe-3 mass%Si powder cores to explore the influence of particle size and crystal grain size. And we concluded as follows.

1) The particle size that gives minimum core loss decreases with increase of frequency.

For example, the optimum particle size of $B_m=0.1$ T is:

At 3 kHz: 69 μm , at 10 kHz: 54 μm , at 100 kHz: 23 μm

2) It is considered that the optimum particle size is determined by the frequency dependency on hysteresis loss, classical eddy current loss and excess loss regarding which loss is dominant.

3) As crystal grain size increases, domain width increases. It causes the increase of excess loss, P_{exc} .

1. 緒 言

圧粉磁心は表面に電氣的絶縁処理を施した軟磁性金属粉末をプレス成形した磁心である。軟磁性材料が Fe-Si-Al 系や Fe-Si 系などの金属材料であることにより、フェライトコアよりも磁気飽和しにくいいため磁心の小型化が可能なこと、その高い電気抵抗率により高周波動作での損失が低いことから、従来より出力が～数百 W 程度で、スイッチング周波数がおおよそ 50 kHz～1 MHz のスイッチング電源や DC-DC コンバータのチョークコイル用の

磁心として用いられてきた。

一方、出力が kW 以上のリアクトルには従来高 Si 珪素鋼板を積層した磁心が用いられていたが、スイッチング周波数が 10～20 kHz 程度と高周波化が進んでおり、渦電流損失の小さい圧粉磁心が有利であるということなどにより、Fe-Si アトマイズ粉末を用いた圧粉磁心の検討や適用が広がっている^{1)～3)}。

近年、自動車用途として、ハイブリッドカーのバッテリー電圧を昇圧するインバーター回路に圧粉磁心が採用され、注目が集まっている。軽量、小型化のためスイッ

2010 年 11 月 18 日受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

チング周波数の高周波化や燃費改善のため回路の高効率化のニーズがあり、圧粉磁心の磁気特性の中で、コアロス低減の要求は強い。また、モーター用途など、制御回路のスイッチング周波数が1 kHz程度以下の領域では、いまだ圧粉磁心の損失は珪素鋼板の積層磁心よりも大きく、適用が進んでいない。圧粉磁心のコアロス低減が図れば、自動車用の駆動モーターなどへの更なる適用は広がると期待される。

本研究では、アトマイズ法で作製したFe-Si系圧粉磁心のコアロス特性に及ぼす粉末粒径および結晶粒径の影響を調査し、下記を明らかにすることを目的とした。

- ①各周波数におけるコアロスが最小となる粉末粒径について
- ②ヒステリシス損、古典的渦電流損、異常渦電流損に及ぼす粉末粒径および結晶粒径の影響について
- ③磁区構造の観察および損失との相関について

2. 実験方法

2. 1 試験材

粉末の成分組成はFe-3 mass%Siとし、改良型水アトマイズ法³⁾を用いて粉末を作製した。粉末は水素雰囲気中で1223 Kで10.8 ksの熱処理を施した。磁気特性に及ぼす粉末粒径の影響を調査する目的で、粉末は-150 μm/+106 μm (平均約128 μm), -75 μm/+63 μm (平均約69 μm), -63 μm/+45 μm (平均約54 μm), 45 μm以下 (平均約23 μm)に分級した。SEM観察による粉末の外観はいずれの粒径でも球形に近い形状となっている。

2. 2 圧粉磁心の作製

試験粉末にバインダーおよび粉末間の電氣的絶縁のために、溶媒に溶かしたシリコン樹脂を粉末に対して0.5 mass%の割合で添加、混合し、溶媒を揮発させた後、1000 μm以下に篩った。その粉末を用いて、油圧プレス機にて常温、成形圧1960 MPaで外径28 mm×内径20 mm×高さ4 mmのトロイダル形状の圧粉磁心を成形した。磁心の歪み除去のため、Ar雰囲気中で1023 Kで3.6 ksの熱処理を実施した。

2. 3 特性評価

コアロスの測定は、交流BHアナライザー(岩通計測製:SY-8232)を用いて、最大励磁磁束密度Bを0.1 Tと一定にし、周波数fを100 Hz~100 kHzの範囲内で

変化させて測定した。また、コアロスP_cにおけるヒステリシス損失P_hと渦電流損失P_eの分離を以下のように行った。式(1)、式(2)に示すように、コアロスを周波数で割った値P_c/fの周波数依存性から、このP_c/fを0 Hzに外挿した値を1周期あたりのヒステリシス損失係数(K_h=P_h/f)とし、ここから各周波数でのヒステリシス損失P_hを計算した。渦電流損失P_eはP_cからP_hを差し引いた残りとした。

$$P_c = P_h + P_e = K_h \cdot f + K_e \cdot f^n \dots \dots \dots (1)$$

$$P_c / f = K_h + K_e \cdot f^{n-1} \dots \dots \dots (2)$$

渦電流損失は以下のような解析を加えた。渦電流損失P_eは古典的渦電流損P_{cl}と交流磁化過程における磁壁運動によって生じる異常渦電流損P_{exc}の和で表されるとし、それぞれの分離を以下のように行った。古典的渦電流損P_{cl}は理論式(3)によって計算し、異常渦電流損P_{exc}は式(4)のように、式(1)(2)で求められたトータルの渦電流損P_eから古典的渦電流損P_{cl}を差し引いて導出した。

$$P_{cl} / f = (\pi D B)^2 \cdot f / 20 / \rho \dots \dots \dots (3)$$

$$P_{exc} / f = P_e / f - P_{cl} / f = K_e \cdot f^{n-1} - (\pi D B)^2 \cdot f / 20 / \rho \dots \dots \dots (4)$$

ここで、D:粉末粒径(μm)、B:励磁磁束密度(T)、ρ:粉末内の電気抵抗率(Ωm)である。

2. 4 顕微鏡組織観察

上記2.2で作製した圧粉磁心の外周面を下面にして樹脂埋め込みし、鏡面研磨後にナイタール液により腐食させ、光学顕微鏡で組織を観察した。また、線分法により平均結晶粒径を測定した。

2. 5 磁区観察

改良型水アトマイズ法により作製したFe-3 mass%粉末を水素雰囲気中で950℃-10.8 ksの粉末熱処理を実施後、150 μm以下に分級した粉末を用いて、エポキシ樹脂に埋め込み、鏡面研磨して観察用サンプルを作製した。磁区観察はネオアーク株式会社製のカー効果顕微鏡を用い実施した。サンプルへの印加磁界がゼロの時の撮影画像より、結晶粒径およびその結晶粒内に存在する磁区の幅を測定し、平均値をとった。

3. 実験結果および考察

3. 1 コアロスに及ぼす粉末粒径の影響

Fig.1に最大励磁磁束密度が0.1 Tで粉末粒径を変化させた場合の、コアロスの周波数依存性を示す。両対数

軸で表すと、コアロスはほぼ周波数に対して直線的に増加している。周波数が 3 kHz の場合は粉末粒径が $75 \mu\text{m} + 63 \mu\text{m}$ (平均約 $69 \mu\text{m}$) と粗い場合に最もコアロスが小さく、周波数が 10 kHz の場合は粉末粒径が $63 \mu\text{m} + 45 \mu\text{m}$ (平均約 $54 \mu\text{m}$)、周波数が 100 kHz の場合は、粉末粒径が $45 \mu\text{m}$ (平均約 $23 \mu\text{m}$) と細かい場合に最もコアロスが小さくなっている。粉末の粒径が小さいほど周波数が変化した場合のコアロスの増加も小さいと

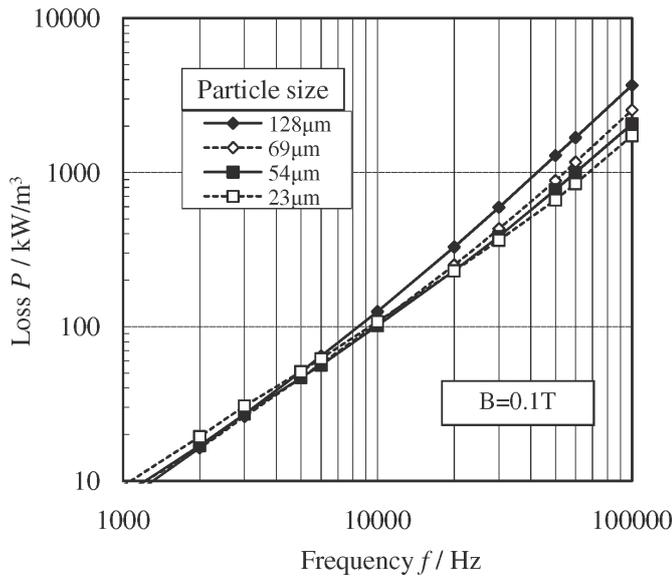


Fig.1. Core loss characteristics at different particle size and frequencies.

いえる。

コアロスの周波数依存性が粒径によって異なる原因を調べるため、コアロスをヒステリシス損、古典的渦電流損および異常渦電流損に分離して解析を実施した。Fig.2, Fig.3, Fig.4 にそれぞれ最大励磁磁束密度 0.1 T で周波数を 3 kHz, 10 kHz, 100 kHz とした場合におけるコアロスおよび各損失の粉末粒径依存性を示す。周波数が 3 kHz の場合、粉末粒径が $69 \mu\text{m}$ でコアロスが最

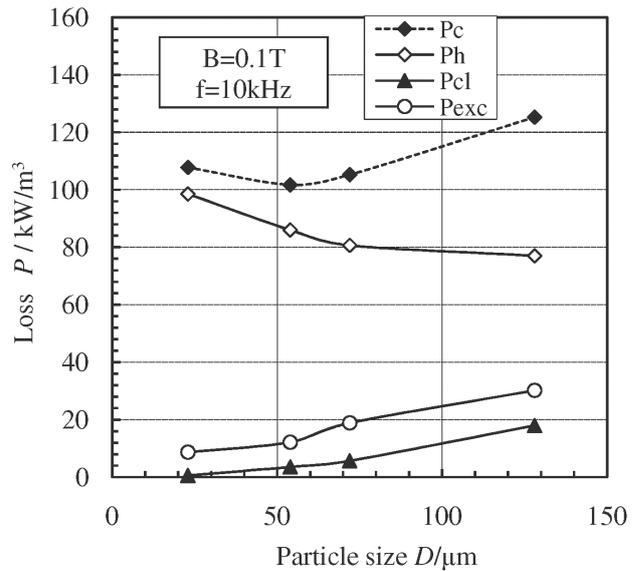


Fig.3. Particle size dependency of core loss at 10 kHz.

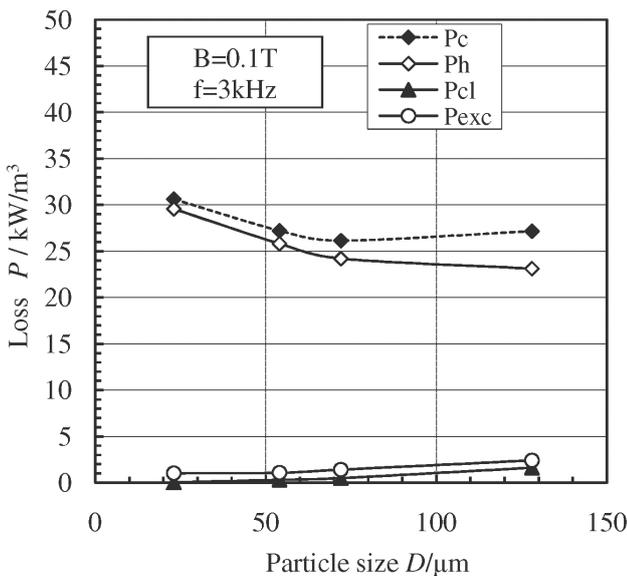


Fig.2. Particle size dependency of core loss at 3 kHz.

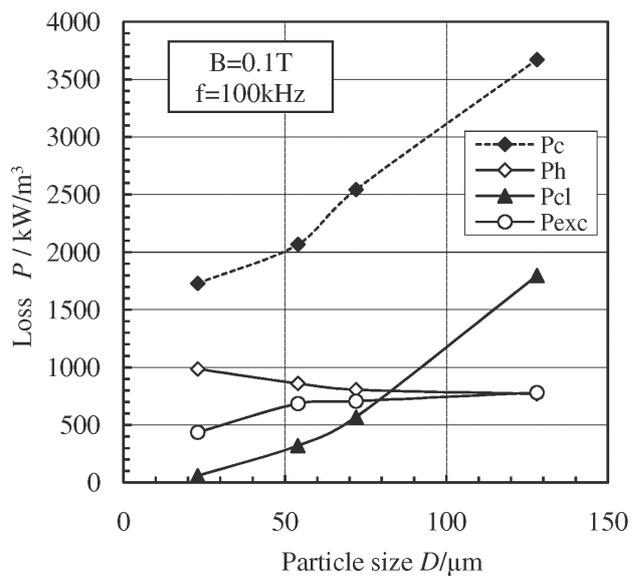


Fig.4. Particle size dependency of core loss at 100 kHz.

小を示し、周波数が 10 kHz の場合は、粉末粒径が 54 μm でコアロスが最小を示している。一方、周波数が 100 kHz の場合、粉末粒径が大きくなるほどコアロスは増加する。つまり、周波数が増加すると、コアロスが最小を示す最適の粉末粒径も変化し、小さくする必要があることが分かる。

Fig.2 ~ 4 に、合わせて示した各損失について考察した。いずれの周波数においても粉末粒径が増加すれば、古典的渦電流損および異常渦電流損は増加し、ヒステリシス損は減少している。また、各周波数における各損失の寄与度は変化する傾向が見られる。

3 kHz においてはヒステリシス損が大半の損失を占め、100 kHz においてはヒステリシス損より古典的渦電流損と異常渦電流損を足した渦電流損の影響が支配的になっている。一方、10 kHz においてはヒステリシス損、渦電流損のいずれの影響も大きい。最適粉末粒径の周波数依存性は、ヒステリシス損および渦電流損いずれが支配的かによって決まると考えられる。

3. 2. 1 コアロスに及ぼす結晶粒径の影響

2.3 節で示したように、古典的渦電流損は粉末粒径に依存する。一方、ヒステリシス損は結晶粒径の影響を大きく受けるとされ、また異常渦電流損は磁壁の運動により発生し磁区構造の影響を大きく受けるため、いずれの損失も組織の影響があるのではと考えられる。

そこで、ここでは組織の影響を受けると考えられるヒステリシス損と異常渦電流損に及ぼす結晶粒径の影響についてのみ解析を行った。Fig.5 に各粉末粒径における圧粉磁心の断面組織観察写真を、Fig.6 に各粉末粒径で結晶粒径を測定した結果を示す。粉末粒径が大きくなる

に従い、結晶粒径も粗大化する傾向が見られる。Fig.7 にヒステリシス損と異常渦電流損に及ぼす結晶粒径の影響を示す。ヒステリシス損も異常渦電流損もいずれの粉末粒径においても、結晶粒径と直線的な関係が得られた。結晶粒径が増加するとヒステリシス損は減少し、異常渦電流損は増加する傾向が見られる。ヒステリシス損に関しては多くの文献で報告されている関係式

$$P_h = (C_1 + C_2/D) B^n f \dots\dots\dots (5)$$

D: 結晶粒径, n: 定数(本試験では 1.6) と良い一致を示した。粉末粒径が大きくなると結果的に結晶粒径が大きくなるため、ヒステリシス損が減少し、渦電流損が増加すると考えられる。

3. 2. 2 磁区観察結果

異常渦電流損に影響を与える磁区構造は、組織の影響を受けると考えられ、珪素鋼板では多く磁区構造を観察した例が報告され、磁区幅と結晶粒径および異常渦電流損の間に相関があるとされている^{4), 5)}。そこで、圧粉磁心においても同様の傾向が見られるか検討を行った。Fig.8 に磁区観察の写真例を示す。写真中には結晶粒界を点線で書き入れた。無方向性珪素鋼板で報告されている観察例⁶⁾と同様に、結晶粒内に縞状の磁区構造が観察される。

Fig.9 に結晶粒径と磁区幅の関係について測定した結果を示す。また、珪素鋼板で報告されている理論式⁽⁶⁾で計算した値も同時に図中に曲線で示す。

$$L = (8 \gamma r \mu_0 / N_d I_s^2)^{0.5} \dots\dots\dots (6)$$

L: 磁区幅, γ: 磁壁エネルギー, r: 結晶粒径, N_d: 反磁界係数

結晶粒径が大きくなるに従い磁区幅の増加する傾向が

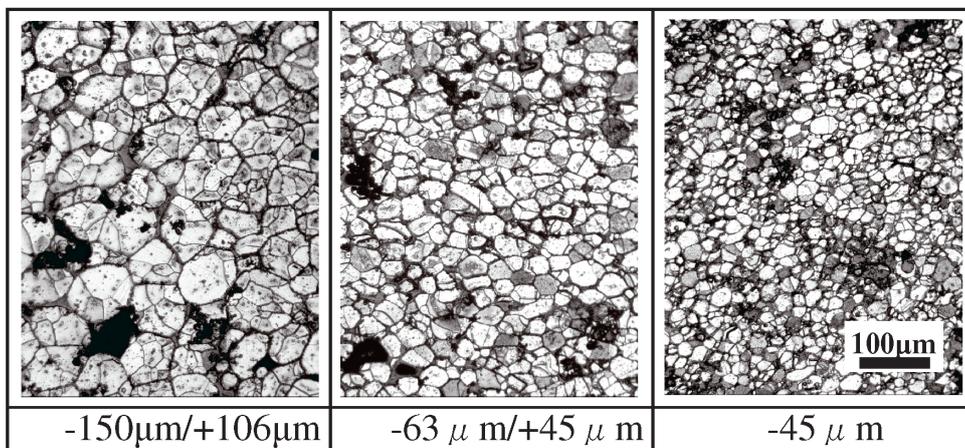


Fig.5. Microstructures of cross section of powder cores.

見られた。この傾向より、結晶粒径が増加すると同時に磁区幅も増加するため、結果的に異常渦電流損が増加すると考えられる。これらの結果や考察は、理論式 (6) や方向性珪素鋼板で報告されている結果⁴⁾に傾向的には一致している。

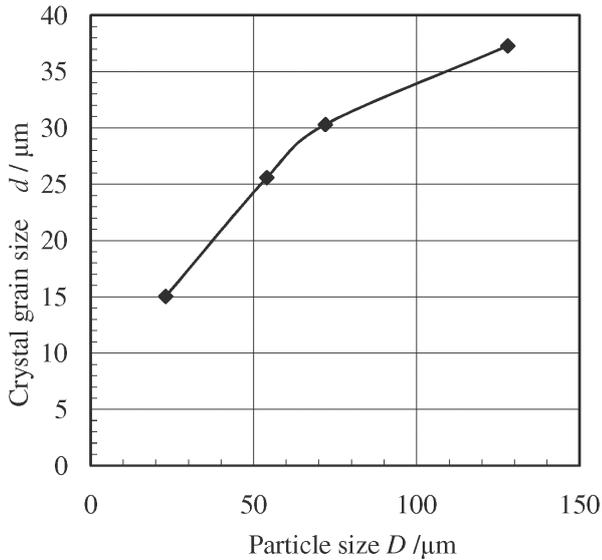


Fig.6. Influence of particle size on crystal grain size.

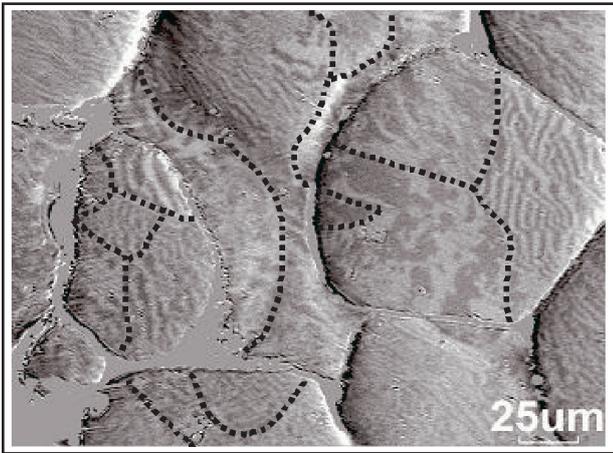


Fig.8. Domain pattern of powder core by Kerr effect microscope.

4. 結 論

改良型水アトマイズ法により作製した Fe-3 mass%Si 合金粉末で圧粉磁心を試作し、コアロスに及ぼす粉末粒径および結晶粒径の影響を明らかにし、以下の結論を得た。

- (1) 最小のコアロスが得られる粉末粒径は、周波数が高

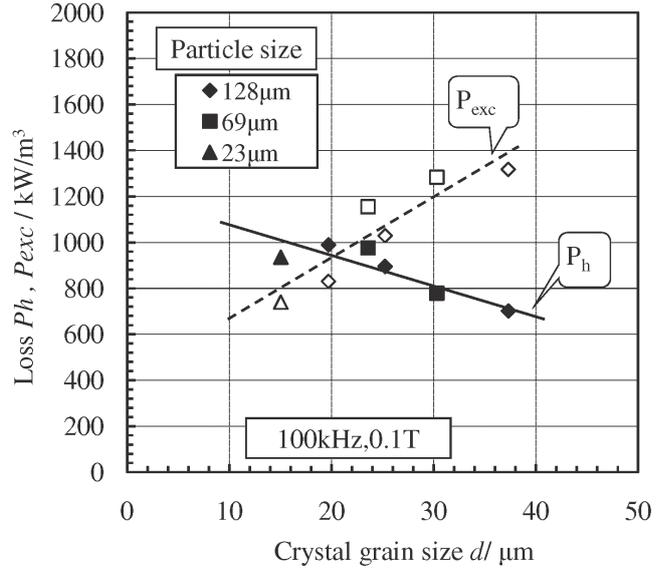


Fig.7. Correlation between crystal grain size and both hysteresis loss and excess loss.

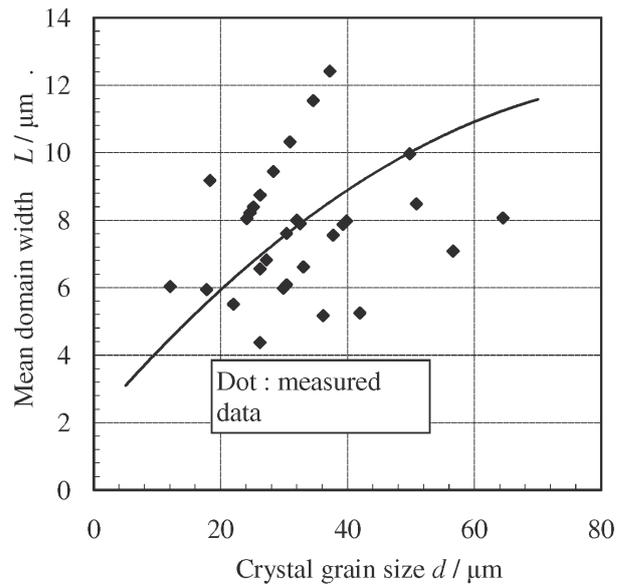


Fig.9. Correlation between crystal grain size and domain width.

くなるに従い減少する。

- (2)最適粒径は、3 kHz: $-75 \mu\text{m}/+63 \mu\text{m}$ (平均約 $69 \mu\text{m}$)、10 kHz: $-63 \mu\text{m}/+45 \mu\text{m}$ (平均約 $54 \mu\text{m}$)、100 kHz: $-45 \mu\text{m}$ (平均約 $23 \mu\text{m}$)の結果が得られた。
- (3)最適粒径が変化する原因は、周波数によってヒステリシス損、古典渦電流損および異常渦電流損の寄与度が変化するためと考えられる。
- (4)カー効果顕微鏡による観察で、結晶粒径が大きくなると磁区幅が広がる傾向が見られた。このため、結晶粒が粗大化すると異常渦電流損が増加すると考えられる。

5. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、一連の評価測定、試作に協力いただいた大同特殊鋼株式会社研究開発本部電磁材料研究所の中尾好孝氏、伊神力氏に感謝いたします。原料粉の各種アトマイズ粉の試作に協力いただいた大同特殊鋼株式会社高機能部材事業部粉末部材部粉末工場の方々にお礼申し上げます。

(文 献)

- 1) S. Takemoto and T. Saito: Materials Science Forum, (2007), 534-536, 1313.
- 2) S. Takemoto and T. Saito: Proceedings of the 2004 WORLD CONGRESS OF POWDER METALLURGY & PARTICULATE MATERIALS, (2004).
- 3) 齊藤貴伸, 武本聡: 電気製鋼, 77(2006), 285.
- 4) R. H. Pry and C. P. Bean: Journal of Applied Physics, 29, (1958), 3, 532.
- 5) H. Shishido, S. Goto, T. Kan and Y. Ito: IEEJ Technical Committee on Magnetics, MAG-85-13, (1985), 13.
- 6) M. Takezawa, J. Yamasaki, T. Honda and C. Kaido, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 254-255, (2003), 167.