

# 圧粉磁芯のヒステリシス損に及ぼす 原料鉄粉の粉体特性の影響

## Influence of the Iron Powder Properties on the Hysteresis Loss of the Iron Powder Core

高下 拓也 TAKASHITA Takuya JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員 (係長)  
中村 尚道 NAKAMURA Naomichi JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員 (副部長)・  
博士 (工学)  
尾崎由紀子 OZAKI Yukiko JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部長・理博

### 要旨

絶縁被覆した純鉄粉を圧縮成形して製造する圧粉磁芯中の結晶粒径は、成形後のひずみ取焼鈍時の再結晶により、原料として用いた鉄粉よりも微細化する。本研究では、圧粉磁芯のヒステリシス損低減のため、再結晶を抑制し結晶粒を粗大化する技術を検討した。その結果、原料鉄粉の粉体特性はひずみ取焼鈍時の再結晶挙動に影響を及ぼし、見掛密度や平均粒子径の増加、あるいは原料鉄粉中の結晶粒径増加により、焼鈍中の再結晶核となる成形ひずみが減少し、粗大な結晶粒を持つ圧粉磁芯が得られることが分かった。さらに、原料鉄粉の不純物量低減により、ひずみ取焼鈍時の再結晶粒成長が促進されることも確認した。これらの要因を制御し、結晶粒径を 37  $\mu\text{m}$  まで粗大化した圧粉磁芯は、800 Hz 以上で一般的な板厚 0.35 mm の電磁鋼板よりも低い鉄損を示した。

### Abstract:

The crystal grain size in an iron powder core, made from an insulation coated iron powder through a compaction process, decreases recrystallization during stress relief annealing after the compaction. In this study, the method to suppress the recrystallization is investigated to reduce the hysteresis loss of the iron powder core. The iron powder properties have an influence on the recrystallization behavior: an iron powder core with coarser crystal grain size is obtained by a decrease in the compaction strain acting as the recrystalline nucleus due to an increase in apparent density, average particle diameter, and crystal grain size of the iron powder. In addition, recrystallized grain growth is accelerated by reduction of impurity in the iron powder. The iron loss of the iron powder core with crystal grain size of 37  $\mu\text{m}$  shows an iron loss lower than that of a typical electrical steel core with a thickness of 0.35 mm.

## 1. はじめに

近年、環境負荷低減や省エネルギー化を背景に電磁部品の小型化、高効率化が志向されている。圧粉磁芯は、従来の積層鋼板に比べて形状の自由度が高いという特長を持つ。この特長を活かし、3次元磁気回路を用いたモーターの小型化に関する開発も一部で進められている<sup>1)</sup>。圧粉磁芯の原料に用いられる磁性粉末として Fe-Si 粉、Fe-Si-Al 粉、Fe-Ni 粉、純鉄粉などが知られているが、中でも純鉄粉は圧縮性が高く、磁芯の高密度化が可能のため、高磁束密度が得やすいという特長がある。

軟磁性材料に要求される特性の一つに鉄損がある。鉄損とは軟磁性材料が電気エネルギーを磁気エネルギーに変換する際に生じる損失である。鉄損は更にヒステリシス損と渦

電流損に分けることができる。圧粉磁芯は粒子一つ一つが絶縁被覆で覆われているため、積層鋼板に比べて渦電流損が低い。一方でヒステリシス損が鋼板に比べて高いため、その低減が重要となってくる。

ヒステリシス損は材料組織中のひずみ、結晶粒界、介在物などにより増加する<sup>2)</sup>。純鉄粉圧粉磁芯は原料となる鉄粉を圧縮成形した後、ひずみ取焼鈍を施して作製されるため、その原料鉄粉の粉体特性は圧粉磁芯の特性に大きな影響を持つと考えられる。そこで、本研究では原料鉄粉の見掛密度、粒度、結晶粒径および純度が圧粉磁芯のヒステリシス損に及ぼす影響について検討した。その結果、これらの要因はいずれも焼鈍後の圧粉磁芯の結晶粒径を変化させるという作用を通じてヒステリシス損を変化させることが分かった。その検討の詳細について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 原料鉄粉

本研究で用いた原料鉄粉の粉体特性を表1に示す。原料鉄粉はいずれも水アトマイズ法で作製した純鉄粉である。見掛密度はアトマイズ条件の調整により変化させ、アトマイズ後にH<sub>2</sub>雰囲気中で焼鈍し、その後篩分けにより粒度を調整した。原料D3'およびEについては、篩分け後の原料鉄粉に対してさらに結晶粒径増加を目的とした、H<sub>2</sub>中、均熱温度1323 K、均熱時間5.4 ksでの再焼鈍を行なった。

原料鉄粉A、BおよびCは篩分級法により求められる平均粒子径(D<sub>50</sub>)が同等であるが見掛密度が異なっており、Aが4.07 Mg/m<sup>3</sup>で最も高く、Cが3.19 Mg/m<sup>3</sup>で最も低い。写真1に示した粉末の断面写真に着目すると、A、BおよびCについては見掛密度が高いものほど粒子断面が円形に近づいていることがわかる。断面写真から切断法<sup>3)</sup>により測

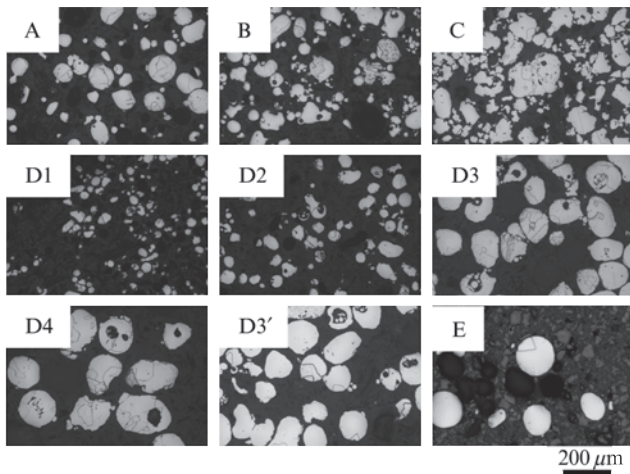


写真1 鉄粉の断面写真(ナイタルエッチ)

Photo 1 Optical micrograph of iron powders (Nital etching)

定した結晶粒径はA、BおよびCのいずれも40 μm程度である。その他の原料鉄粉についても同様にして結晶粒径を測定した結果をあわせて表1に示す。D1~3については、D<sub>50</sub>の増加に伴い結晶粒径が増加している。D4については、D3とほぼ同等の結晶粒径である。D3'はD3と同等の粒度であるが、結晶粒径は66.7 μmであり、D3に比べて16.2 μmほど大きい。

原料鉄粉Eは他の鉄粉に比べて不純物濃度が1/10となっている。ここで、不純物濃度とは水アトマイズ中に酸化し、介在物を形成してヒステリシス損を増加させると考えられるSi、Al、MnおよびCrの総量を指す。原料鉄粉の結晶粒径は66.5 μmでありD3'と同程度である。

### 2.2 圧粉磁芯の作製方法

それぞれの原料鉄粉をシリコーン樹脂(東レ・ダウコーニング(株)製、SR 2400)溶液と、樹脂比率が固形分で0.25mass%となるように混合し、室温、大気中で43.2 ks乾燥させることで、被覆処理を行なった。その後、大気中、均熱温度473 K、均熱時間7.2 ksでの硬化処理を施した。硬化処理後の被覆鉄粉を金型潤滑成形法によりリング状(外径38 mm、内径25 mm、高さ6 mm)に成形した。成形圧は7.45 Mg/m<sup>3</sup>の密度となるように調整した。潤滑剤にはエタノールにステアリン酸亜鉛を分散させた懸濁液を用い、刷毛で金型表面に塗布した。このように作製した圧粉磁芯(以後、成形まま圧粉磁芯とする)に、N<sub>2</sub>中、均熱温度973 K、均熱時間2.7 ksでのひずみ取焼鈍を施し、評価用圧粉磁芯(以後、圧粉磁芯とする)とした。

### 2.3 圧粉磁芯の評価方法

成形まま圧粉磁芯は寸法と重量より密度を算出した。圧粉磁芯はヒステリシス損を直流磁化特性試験装置(メトロン技研(株)製SK-110型)にて測定した。測定は磁束密度

表1 鉄粉の粉体特性

Table 1 Powder properties of iron powders

Based iron powder	Re-annealing for powder	Apparent density, AD (Mg/m <sup>3</sup> )	Particle size distribution (mass%)					Amount of impurity (Si, Mn, Al, Cr) (mass%)	Average particle size, D <sub>50</sub> (μm)	Crystal grain size, d (μm)
			250-180 μm	180-150 μm	150-106 μm	106-45 μm	<45 μm			
A	×	4.07	0.0	0.6	25.0	59.0	15.4	0.071	82.2	39.7
B	×	3.57	0.0	0.1	23.5	58.4	18.0	0.065	81.0	40.5
C	×	3.19	0.0	1.2	29.3	54.3	15.2	0.078	82.4	40.7
D1	×	3.72	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.088	22.5	18.9
D2	×	3.83	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.076	75.5	34.3
D3	×	3.93	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.076	128.0	50.5
D4	×	3.96	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.076	165.0	48.1
D3'	○	3.93	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.069	128.0	66.7
E	○	4.14	17.4	11.6	20.5	50.6	0.0	0.005	114.0	66.5

×: Not be carried out ○: Be carried out

表2 圧粉磁芯の密度およびヒステリシス損

Table 2 Density and hysteresis loss of iron powders cores

Iron powder core	Used powder	Density (Mg/m <sup>3</sup> )	Hysteresis loss, W <sub>h</sub> (W/kg)	Crystal grain size, D (μm)
1	A	7.40	70.7	20.8
2	B	7.38	81.5	17.1
3	C	7.44	87.0	14.1
4	D1	7.46	94.0	13.0
5	D2	7.45	72.8	18.1
6	D3	7.40	65.4	21.4
7	D4	7.49	53.4	21.1
8	D3'	7.39	66.9	27.7
9	E	7.55	41.6	36.7

B<sub>m</sub>=1.0 Tで行ない、得られたループ面積から1周期当りのヒステリシス損を算出し、1000倍することで周波数f=1 kHzでのヒステリシス損を算出した。磁気測定後の圧粉磁芯の光学顕微鏡による断面観察を行なった。成形まま圧粉磁芯の密度測定結果、圧粉磁芯のヒステリシス損測定結果および切断法による結晶粒径測定結果を表2に合わせて示す。成形まま圧粉磁芯の密度は±0.1 Mg/m<sup>3</sup>の範囲にあることが分かる。また、圧粉磁芯のヒステリシス損は最小値が圧粉磁芯9の41.6 W/kg、最大値が圧粉磁芯4の94.0 W/kg

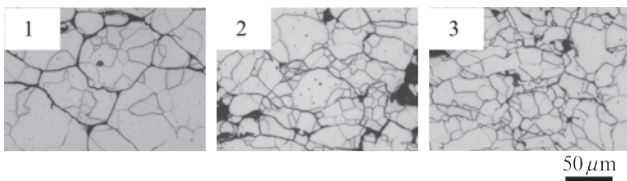


写真2 圧粉磁芯1, 2および3の断面写真(ナイトールエッチ)  
Photo 2 Optical micrographs of iron powder cores 1, 2, and 3 (Nital etching)

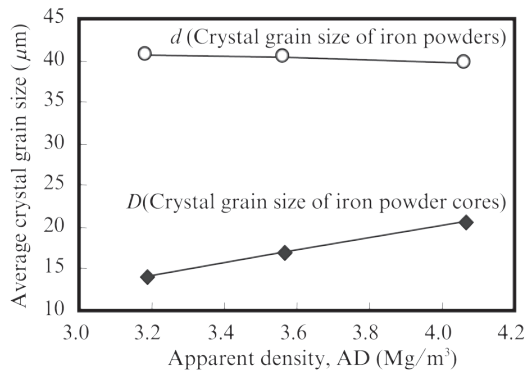


図1 鉄粉の見掛密度と鉄粉および圧粉磁芯の平均結晶粒径の関係

Fig. 1 Relationships between apparent density of iron powders and crystal grain size of iron powders and iron powder cores

であり、原料鉄粉の違いにより2倍以上変化していた。結晶粒径については最小値が圧粉磁芯4の13.0 μm、最大値が圧粉磁芯9の36.7 μmであった。

原料鉄粉A, BおよびCと、それらを原料として得た成形まま圧粉磁芯中の粒子に対してマイクロビッカース硬度測定を行なった。測定はいずれも押込荷重0.245 Nとし、圧痕が結晶粒界をまたがないように、各試料それぞれ5ヶ所測定して、最小値と最大値を除いた3ヶ所での平均値を求めた。また、成形まま圧粉磁芯と原料鉄粉の硬度差をΔHvとし、成形時に鉄粉へ蓄積される転位密度の指標とした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 圧粉磁芯の微細組織に及ぼす原料鉄粉見掛密度の影響

D<sub>50</sub>を同一とし、見掛密度を変化させた原料鉄粉A~Cからなる圧粉磁芯1~3の断面観察結果を写真2に示す。断面

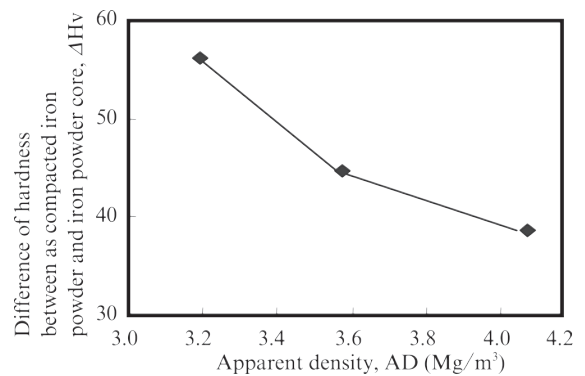


図2 鉄粉の見掛密度とΔHv(鉄粉と成形まま圧粉磁芯の硬度差)との関係

Fig. 2 Relationship between apparent density of iron powders and ΔHv (Difference between iron powder and iron powder core as compacted)

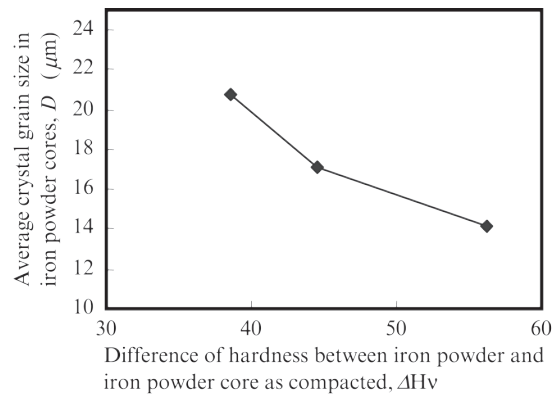


図3 ΔHv(鉄粉と成形まま圧粉磁芯の硬度差)と圧粉磁芯中の結晶粒径の関係

Fig. 3 Relationship between ΔHv (Difference between iron powder and iron powder core as compacted) and crystal grain size in iron powder cores



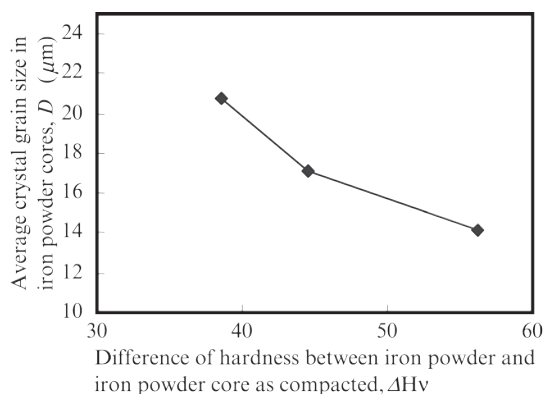


図4 見掛密度と成形による密度上昇量との関係

Fig. 4 Relationship between apparent density and an increase in density during compaction

写真を用いて切断法により測定した平均結晶粒径を原料鉄粉の結晶粒径と併せて図1に示す。いずれの圧粉磁芯においても原料鉄粉に比べて結晶粒径は小さくなっているが、原料鉄粉の見掛密度増加により圧粉磁芯の結晶粒径が増加することが分かる。さらに、成形時に鉄粉へ蓄積された転位密度の指標であるΔHvと見掛密度との関係を図2、圧粉磁芯の結晶粒径とΔHvの関係を図3に示す。これより、原料鉄粉の見掛密度増加によりΔHvが減少し、ΔHvの減少により、焼鈍後の結晶粒径が増加していることがわかる。

上記の結果は見掛密度が増加することで成形時に鉄粉へ蓄積される転位が減少し、それにより焼鈍後の結晶粒径が微細化していることを示している。このような挙動は再結晶によって説明することができる。すなわち、成形中に転位が蓄積し、その後のひずみ取焼鈍によって再結晶核生成が起こったためと考えられる。また、蓄積される転位が減少すると、焼鈍中に発生する再結晶核の量が減少し、結晶粒径が増加する<sup>4)</sup>。

次に、見掛密度増加に伴って成形時に蓄積される転位が減少するメカニズムについて考察する。図4には原料鉄粉A, BおよびCの見掛密度と、圧粉磁芯1~3の密度の差分、すなわち成形による密度上昇との関係を示す。見掛密度が高い鉄粉の方が、成形に伴う密度上昇が少ないことが分かる。このことから、同一の成形体密度に成形した場合、見掛密度が高い鉄粉の方がより少ない塑性変形量で目標の密度を達成できることが分かる。これより、原料鉄粉の見掛密度の増加に伴う結晶粒径の増加は、成形時に蓄積される転位の減少と、それによるひずみ取焼鈍時の再結晶核生成抑制により説明できる。

### 3.2 圧粉磁芯の微細組織に及ぼす鉄粉粒子径の影響

粒度が異なる原料鉄粉D1~D4, D3に対して再焼鈍を行った原料鉄粉D3'および他の原料鉄粉に比べて不純物量

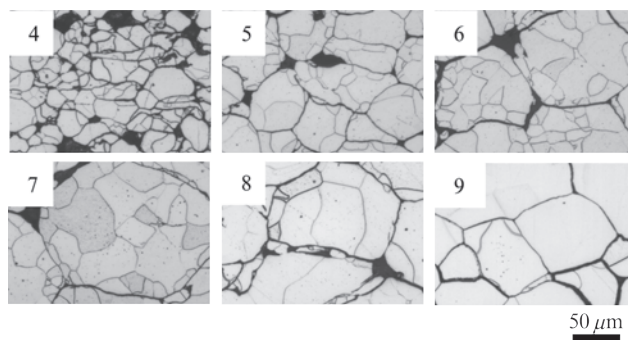


写真3 圧粉磁芯4~9の断面写真

Photo 3 Optical micrographs of iron powder cores 4~9

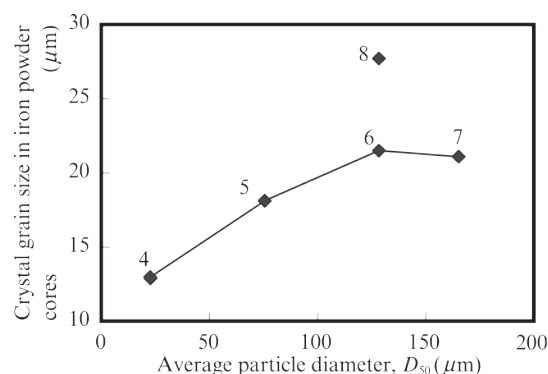


図5 鉄粉のD<sub>50</sub>(粉末平均粒子径)と圧粉磁芯結晶粒径の関係

Fig. 5 Relationship between D<sub>50</sub> of iron powders and crystal grain size in iron powder cores

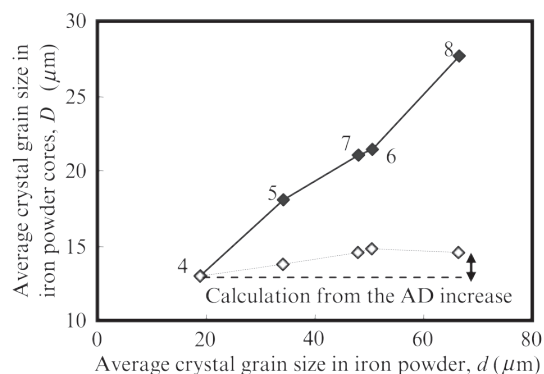


図6 鉄粉中の結晶粒径と圧粉磁芯の結晶粒径との関係

Fig. 6 Relationship between crystal grain size in iron powders and crystal grain size in iron powder cores

を低減した原料鉄粉Eからなる圧粉磁芯4~9の断面観察結果をそれぞれ写真3に示す。このうち、圧粉磁芯9の結果については3.3節で考察することとし、圧粉磁芯4~8の断面写真から測定した平均結晶粒径とD<sub>50</sub>の関係を図5に示す。圧粉磁芯4~7は原料鉄粉のD<sub>50</sub>の増加により結晶粒径が増加する傾向にある。以下では、D<sub>50</sub>の変化による圧粉磁芯の結晶粒径変化の原因について考察する。図6には圧粉

磁芯 4~8 について、原料鉄粉の結晶粒径と圧粉磁芯の結晶粒径の関係を示す。原料鉄粉の結晶粒径の増加と共に圧粉磁芯の結晶粒径が増加していることが分かる。結晶粒界は加工時に転位が蓄積しやすく、このような領域は再結晶核の生成サイトとなりやすい<sup>4)</sup>。このことから、原料鉄粉の結晶粒径が粗いほど成形時に鉄粉中に転位が蓄積しにくく、再結晶による結晶粒微細化が抑制されると考えられる。

圧粉磁芯 6 と  $D_{50}$  および見掛密度が同等で、原料鉄粉の結晶粒径が異なる圧粉磁芯 8 は、図 5 のように  $D_{50}$  で整理すると圧粉磁芯 4~7 の並びから外れた位置にプロットが存在する。しかしながら、図 6 のように原料鉄粉の結晶粒径で整理すると、圧粉磁芯 4~8 すべてプロットが直線上に並んでいる。このことから、圧粉磁芯 4~8 では原料鉄粉の結晶粒径が圧粉磁芯の結晶粒径に影響を及ぼしていることが分かる。

一方で、圧粉磁芯 4~8 は原料鉄粉の  $D_{50}$  と同時に見掛密度も変化している。そこで、以下では圧粉磁芯中の結晶粒径に対する  $D_{50}$  と見掛密度の寄与の切り分けを試みる。図 1 に示した  $D_{50}$  が同一のシリーズでは、圧粉磁芯の平均結晶粒径  $D$  は原料鉄粉の見掛密度  $AD$  に対して直線的に変化している。そこで、回帰によってその傾きを算出したところ、見掛密度が  $1 \text{ Mg/m}^3$  増加するごとに、結晶粒径が  $7.6 \mu\text{m}$  増加すると見積もられる。すなわち、

$$\Delta D = 7.6 \cdot \Delta AD \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta D$  は見掛密度増加による圧粉磁芯の結晶粒径増加量、 $\Delta AD$  は原料鉄粉の見掛密度増加量である。以下では(1)式の関係が  $D_{50}$  に関係なく成立すると仮定して考察を進める。図 6 中には圧粉磁芯 4~8 の中で最も原料鉄粉の見掛密度が小さかった圧粉磁芯 4 を基準として、見掛密度増加による結晶粒径変化を (1) 式より見積もった結果を破線で併記した。これより、圧粉磁芯 4~8 の結晶粒径増加は見掛密度増加より予測される値よりも数倍大きいことが分かる。このような実測値と (1) 式で算出した見掛密度増の寄与との差異が  $D_{50}$  の寄与と考えられる。

したがって、見掛密度の寄与を差し引いたとしても、 $D_{50}$  は原料鉄粉の結晶粒径の増加を通して圧粉磁芯の結晶粒径を増加させており、原料鉄粉の結晶粒径増加により圧粉磁芯の結晶粒径が増加すると考えられる。

### 3.3 圧粉磁芯の微細組織に及ぼす純度の影響

原料鉄粉 D3' からなる圧粉磁芯 8 と、他の原料鉄粉よりも不純物量を低減した、原料鉄粉 E からなる圧粉磁芯 9 の断面観察結果を写真 3 に併せて示す。両者はいずれも再焼鈍を行なった原料鉄粉を用いており、原料鉄粉の結晶粒径は等しい。また、これらの原料鉄粉の見掛密度差  $\Delta AD$  は  $0.21 \text{ Mg/m}^3$  であり、(1) 式より結晶粒径変化  $\Delta D$  を求める

と  $1.60 \mu\text{m}$  と見積もられる。しかし、写真より測定した圧粉磁芯 9 の結晶粒径は  $36.7 \mu\text{m}$  であり、圧粉磁芯 8 に比べて  $9.0 \mu\text{m}$  大きい。したがって、圧粉磁芯 8 と 9 の結晶粒径差は、3.2 節までで検討した原料鉄粉の見掛密度差や原料鉄粉中の結晶粒径差では説明できず、それ以外の因子の影響が示唆される。

3.2 節まで議論したように圧粉磁芯の結晶粒径は成形後の焼鈍中に起こる再結晶挙動に大きく影響を受ける。再結晶核の成長は結晶粒界の移動であるため、結晶粒界の移動を阻害する析出物、介在物および固溶元素によって成長が抑制される<sup>4)</sup>。原料鉄粉 D3' と E を比べた場合、原料鉄粉 E は Fe より酸素との親和性が高い Si, Al, Mn および Cr の総量が D3' に比べて 1/10 に低減されている。このことから、圧粉磁芯 9 の原料鉄粉 E は圧粉磁芯 8 の原料鉄粉 D3' に比べて水アトマイズ時に生成する介在物の量が少なく、焼鈍時の再結晶核成長が阻害されにくいため、圧粉磁芯の結晶粒径が増加したものと推察される。

### 3.4 圧粉磁芯のヒステリシス損に及ぼす微細組織の影響

高城ら<sup>5)</sup>によれば、圧粉磁芯のヒステリシス損  $W_h$  は以下の式で表される。

$$W_h = \frac{4c \cdot B \cdot H_c}{\rho} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $c$  はヒステリシスループの形状によって決まる定数、 $B$  は磁束密度、 $H_c$  は保磁力、 $\rho$  は成形体密度である。Pfeifer ら<sup>6)</sup>によれば、保磁力  $H_c$  は (3) 式で表される。

$$H_c = H_{ck} + H_{c_{ex}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $H_{ck}$  は結晶粒界の磁壁ピンニングに起因する保磁力、 $H_{c_{ex}}$  は介在物やひずみなどの粒内の磁壁ピンニングに起因する保磁力である。さらに、Mager ら<sup>7)</sup>は結晶粒界の磁壁ピンニングに起因する保磁力は結晶粒径の逆数に比例し、以下の式で表されるとしている。

$$H_{ck} \approx \frac{3 \cdot \gamma}{J_s \cdot D} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\gamma$  は磁壁エネルギー、 $J_s$  は飽和磁化、 $D$  は結晶粒径である。(3) および (4) 式を (2) 式に代入すると、

$$W_h = \frac{4c \cdot B}{\rho} \left( \frac{3 \cdot \gamma}{J_s \cdot D} + H_{c_{ex}} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。 $B$  は測定条件によって決まる。 $\gamma$  と  $J_s$  は材質固有の

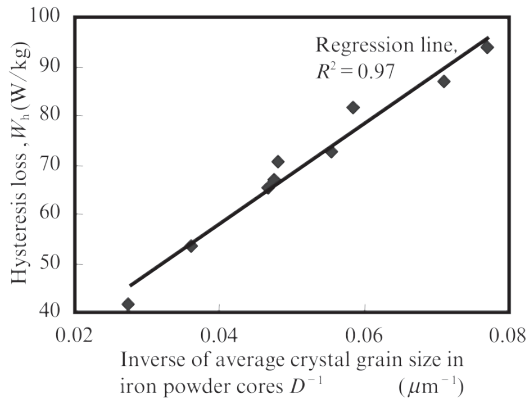


図7 圧粉磁芯の結晶粒径逆数とヒステリシス損との関係

Fig. 7 Relationship between inverse of crystal grain size in iron powder cores and hysteresis loss

値である。さらに、 $H_{c,ex}$ 、 $c$ および $\rho$ を定数であると仮定すると、ヒステリシス損は結晶粒径の逆数と直線関係となることが分かる。これまでの検討より、原料鉄粉の粉体特性、微細組織および純度は圧粉磁芯の結晶粒径に影響を及ぼすことが示唆されている。そこで、以下では圧粉磁芯の結晶粒径とヒステリシス損の関係について検討する。

図7には圧粉磁芯の結晶粒径の逆数とヒステリシス損の関係を示す。これらのプロットを用いて直線の回帰式を作成したところ、相関係数 $R^2=0.97$ という極めて高い相関関係を得た。このことから、原料鉄粉の粉体特性や微細組織は圧粉磁芯としたときの結晶粒径に影響を及ぼし、結晶粒径増加を通してヒステリシス損を低減させていることが定性的にはあるが示された。さらに、不純物の影響を調査するため、すべての圧粉磁芯の結晶粒径逆数と不純物量を変数とした重回帰を行なった。しかし、不純物量がヒステリシス損に及ぼす影響が有意であるという結果は得られず、本検討の範囲内では介在物などによる粒内ピンニングのヒステリシス損への寄与は全ての試料で一定であると考えられる。この原因については、本実験で用いた鉄粉中の不純物による粒内ピンニングサイト（介在物など）サイズが、磁壁をピンニング可能な最小サイズ（ $0.5\ \mu\text{m}$ ）<sup>8)</sup>より小さかったためと推定される。したがって、本検討の範囲内でのヒステリシス損変化は主に圧粉磁芯の結晶粒径変化によるものであると結論付けられる。

### 3.5 圧粉磁芯と電磁鋼板の鉄損比較

最後に本検討の中で最もヒステリシス損が低かった圧粉磁芯9と電磁鋼板との鉄損の比較結果を図8に示す。電磁鋼板はJIS規格35A360のものを用い、放電加工で外径38 mm、内径25 mmのリング状としたものに、巻線を施して測定を行なった。励磁磁束密度は1.0 Tとし、周波数50～3 kHzまでの測定を行なった。周波数800 Hzまでは電磁鋼板の方が鉄損は低いが、800 Hz以降は試作圧粉磁芯の方が

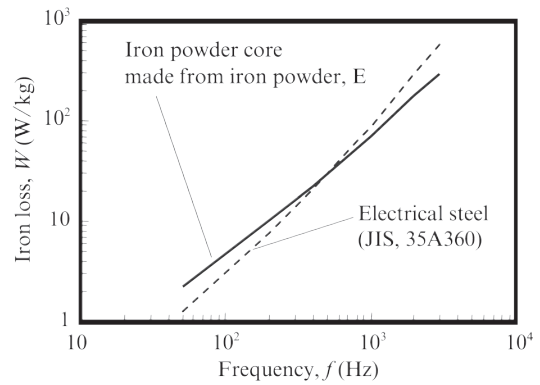


図8 圧粉磁芯9および電磁鋼板の鉄損

Fig. 8 Iron loss of the iron powder core 9 and electrical steel

鉄損は低い。このことから、原料鉄粉Eからなる圧粉磁芯は磁芯励磁周波数が800 Hz以上の高速モーターなどに使用することで、電磁鋼板使用時に比べてモーターの効率が改善することが期待される。

## 4. おわりに

本報では圧粉磁芯の微細組織およびヒステリシス損に及ぼす原料鉄粉の粉体特性の影響を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 見掛密度: 見掛密度を増加させることで、成形時の粉末の塑性変形を抑制し、成形時に蓄積される転位を低減する。これにより、焼鈍中の再結晶核発生が抑制され、圧粉磁芯の結晶粒径が増加する。
- (2) 粉末粒子径および微細組織（粉末結晶粒径）: 粉末粒子径の増加や粉末に対する焼鈍により、粉末結晶粒径が増加する。粉末結晶粒径増加により、転位が蓄積しやすい結晶粒界が減少し、成形時に蓄積される転位が低減、焼鈍中の再結晶核発生が抑制され圧粉磁芯の結晶粒径が増加する。
- (3) 純度: 粉末中の不純物量を低減することで、焼鈍中の再結晶核成長が促進され、圧粉磁芯の結晶粒径が増加する。また、(1)～(3)の検討で作製した圧粉磁芯は結晶粒径が増加することでヒステリシス損が低減する。これは、粒界ピンニングモデルで説明できる普遍的な挙動を示した。
- (4) 圧粉磁芯と積層鋼板の鉄損: 試作した圧粉磁芯の中で、結晶粒径が $36.7\ \mu\text{m}$ と最も粗大だったものは、周波数800 Hz以上で一般的な電磁鋼板よりも低鉄損となる。

今回得られた知見を基に、原料鉄粉粉体特性の適正化（見掛密度および粉末結晶粒径の増加、不純物量の低減）を行なっていくことで、圧粉磁芯の鉄損のさらなる低減が期待される。

参考文献

- 1) Hultman, Lars et al. Advances in powder metallurgy & particulate materials. 2002, p. 14-26.
- 2) 太田恵造. 磁気工学の基礎Ⅱ. 共立出版, 1973, p. 296.
- 3) Fullman, R. L. Trans. AIME. 1953, p. 197-447.
- 4) 古林英一. 再結晶と材料組織. 内田老鶴圃, 2000, p. 29-31.
- 5) 高城重彰. 1986, 博士論文.
- 6) Pfeifer, F.; Radeloff, C. Journal of magnetism and magnetic materials. 1980, vol. 19, p. 190-207.
- 7) Mager, A. Annalen der Physik. 1952, vol. 6, p. 15-16.
- 8) 原卓司ら. 日本金属学会誌. 1997, p. 553-560.



高下 拓也



中村 尚道



尾崎由紀子