

(技術資料)

# 低鉄損圧粉磁心用新鉄粉「マグメル™ ML25D」

北条啓文\*・谷口祐司・上條友綱・三谷宏幸

## Newly Developed Iron Powder "MAGMEL™ ML25D" for Low Loss Dust Core

Hirofumi HOJO・Yuji TANIGUCHI・Tomotsuna KAMIJO・Hiroyuki MITANI

### 要旨

絶縁コーティングされた鉄粉を圧縮成形して製造される圧粉磁心は、形状自由度が高く部品の小型化が期待されるが、エネルギーロスすなわち鉄損特性が問題であった。鉄損特性を改善するため、介在物に着目した調査を行った。調査の結果、鉄粉中に存在する介在物の大きさは純鉄の磁壁の厚さとほぼ同じで、磁壁のピンニング効果が大きいことが示唆された。それら介在物量が鉄損、とくにヒステリシス損へ及ぼす効果を定量化した。これらの調査結果に基づいて当社は、新たな低鉄損圧粉磁心用鉄粉「マグメル™ ML25D」を開発した。本粉末は従来比約10%の鉄損改善を達成し、圧粉磁心の適用拡大が期待される。

### Abstract

Dust cores, which are manufactured by compressing iron powder coated with insulation in dies, have a high degree of freedom in shaping and are expected to reduce the size of parts; however, they have suffered from energy loss, or an iron-loss characteristic. Hence, a study focusing on inclusions has been conducted to improve the iron loss characteristic.

The results suggest that the inclusions present in the iron powder have almost the same size as the thickness of the domain wall of pure iron and have a great pinning effect on the domain wall. The effects of these inclusions on iron loss, especially on hysteresis loss, have been quantified. On the basis of the results of the study, Kobe Steel has developed a new iron powder for low iron-loss dust cores, MAGMEL™ ML25D. This powder has achieved an improvement in iron loss of approximately 10% compared with conventional powders and is expected to expand the application of dust cores.

### キーワード

鉄粉, 圧粉磁心, ダストコア, SMC, 軟磁性, 鉄損, モータ, 粉末冶金

まえがき = モータをはじめとする電磁気機器は、省エネルギー・低環境負荷の観点から、小型化・高効率化が推進されている。電磁気機器に使用される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。しかしながら電磁鋼板は、積層構造由来の異方性を持つことから、磁気回路を形成する形状に制約があり、さらなる小型化は困難になりつつある。

いっぽう、近年研究開発が進んでいる圧粉磁心は、粉末を圧縮成形して製造するため異方性がない。さらに、積層構造の電磁鋼板と比べて形状の制約も少ない。このため圧粉磁心は、電磁気部品の小型化に貢献できる材料として注目されている。実際に、圧粉磁心を用いた自動車用補機モータや産業用モータのほか、ハイブリッド車の昇圧リアクトルや太陽光発電の昇圧回路リアクトルなどへの実用化が進んでいる<sup>1)</sup>。とくにモータの小型化については、3次元磁路構造となるアキシシャルギャップモータが注目され、純鉄粉を用いた圧粉磁心の適用を目指した研究がなされている<sup>2), 3)</sup>。

圧粉磁心の原料となる軟磁性粉末には主として鉄基金属粉末が用いられている。鉄基金属粉末のなかでも純鉄粉は、合金粉と比較して粒子が柔らかいため圧縮性が高

く、飽和磁束密度が大きい。すなわち、部品の小型化に有利な特徴を持つといえる。さらに粒子同士が絡みやすく成形性も良いため、コア製造工程において扱いやすいというメリットもある。しかしながらそのいっぽうで、鉄損すなわちエネルギーロスが大きいことが問題であった。

当社はこれまでに、純鉄系圧粉磁心の鉄損を低減させるため、鉄粉の粒子径や結晶粒径と鉄損との関係を明らかにしてきた。さらに、圧粉体のひずみを除去するために必要な熱処理温度を定量化し、ひずみ除去を可能にする高耐熱絶縁被膜を開発し、低鉄損圧粉磁心用粉末「マグメル<sup>注1)</sup> ML28D」を上市した<sup>4)</sup>。

さらなる低鉄損を達成するため当社は、鉄粉粒子内の介在物が磁気特性に及ぼす影響を調査し、それらを制御することによって鉄損を約10%低減した「マグメル ML25D」を開発した。本稿ではマグメル ML25Dの特性を紹介する。

### 1. 圧粉磁心における鉄損の支配因子

軟磁性材料一般に求められる特性は、高磁束密度およ

脚注1) マグメルは当社の登録商標 (第4669506号) である。

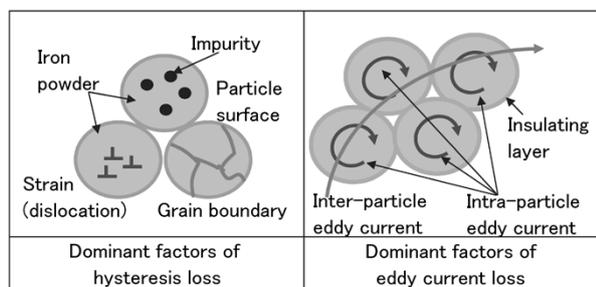


図1 鉄損支配因子  
Fig.1 Dominant factors of iron loss

び低鉄損であり、圧粉磁心に対しても同様の特性が求められる。純鉄は、他の鉄基磁性材料に比べて飽和磁束密度は大きく適しているが、もう一つの要求特性である鉄損が大きいたことが問題である。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。渦電流損は外部磁界の変化に伴って磁心内に誘起される渦電流によって生じるジュール熱である。いっぽうヒステリシス損は磁化に必要なエネルギーであり、ヒステリシス曲線が囲む面積がこれに相当する<sup>5), 6)</sup>。図1にそれぞれの支配因子を示す。

渦電流損低減のために、鉄粉の粒子表面に絶縁被膜をコーティングすることによって圧粉磁心全体に流れる粒子間渦電流を抑制している。また、一つの粒子内に流れる渦電流に対しては流れる範囲を制限することによって、すなわち粒子径を小さくすることによって抑制が可能である。いっぽうヒステリシス損低減のためには、ヒステリシス曲線を狭くすること、すなわち保磁力を小さくすることが必要である。保磁力の低減には磁壁の移動を妨げる因子を低減することが効果的であり、不純物や析出物・介在物のほか、結晶粒界、粉末表面、転位（ひずみ）などを低減させることが重要である<sup>5), 6)</sup>。

本稿においては、これらの因子のうちでも鉄粉粒子内に存在する介在物に着目し、介在物量が圧粉磁心の鉄損、とくにヒステリシス損に及ぼす影響を調査した。なお、本稿では介在物と析出物とは区別せず、それらを合わせて介在物と呼ぶこととした。

## 2. 調査方法

当社の水アトマイズ鉄粉製造プロセス条件を調整し、介在物量の異なる4種の純鉄粉a, b, c, dを準備した。各鉄粉の断面を鏡面研磨し、任意の10視野に対して反射電子像によるSEM観察を実施した。さらに、断面をナイタールによって腐食し、光学顕微鏡を用いて結晶粒を観察した。同一の粒度となるよう、各鉄粉はふるい分けによって75~250 $\mu\text{m}$ の粒子サイズに調整した。これらの鉄粉に対してりん酸を主成分とする処理液を用いて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って無機—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。

つづいて、403 Kに加熱したコーティング鉄粉と金型を用い、1,176 MPaの圧力で外径 $\phi$ 45 mm、内径 $\phi$ 33 mm、高さ6 mmのリング状の試験片を成形した。成形には、アルコールに分散させた潤滑剤を金型に塗布する金型潤

滑成形法を用いた。得られた試験片は、窒素雰囲気中で873 K、1.8 ks保持して熱処理を行った。この試験片に対して、50回の1次巻き線に加えて10回の2次巻き線を施した鉄損測定用試験体、および400回の1次巻き線と25回の2次巻き線を施したヒステリシス曲線測定用試験体を準備した。磁気測定にはメトロン技研製自動磁化測定器 (MTR-2248) を用い、ヒステリシス曲線は励磁磁場10 kA/m、鉄損は励磁磁束密度を1.0 Tとして周波数50~1 kHzの間で測定した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 粉末の特性

純鉄粉a, b, c, dのSEMによる介在物観察結果を図2に示す。介在物量の変化が目視で分かるよう、それぞれ10視野中の2視野を示している。

水アトマイズ法で製造された鉄粉には酸化物と推定される微細な介在物が存在する。そこで本稿では、図2に示したSEM観察結果に基づいて画像解析を行い、1 $\mu\text{m}^2$ あたりの個数として介在物量を定量化した。その結果、粉末aは0.11, bは0.09, cは0.05, dは0.02個/ $\mu\text{m}^2$ となった。また、介在物の大きさ（相当円の直径）は最も大きいもので約1 $\mu\text{m}$ 、多くは100 nm程度（50~150 nm）であった。介在物の数を表1に、全視野において観察された介在物の大きさを表すヒストグラムを図3に示す。

光学顕微鏡による粉末断面の組織写真を図4に示す。また、この写真から求められた平均結晶粒径（相当円の直径）を表2に示す。絶縁コーティング後の鉄粉の化

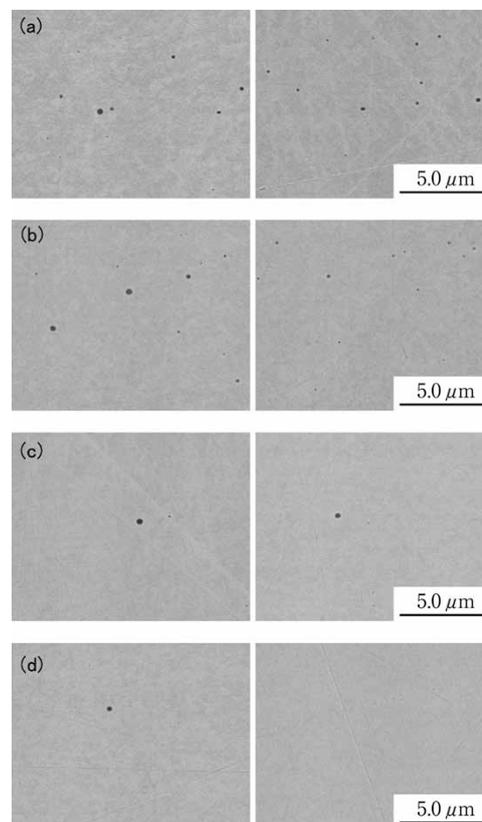


図2 粉末断面のSEM写真  
Fig.2 Cross sectional SEM images of powders

表1 各鉄粉に含まれる介在物数  
Table 1 Amount of inclusions in powders

Powder ID	Amount of inclusions (pieces/ $\mu\text{m}^2$ )
a	0.11
b	0.09
c	0.05
d	0.02

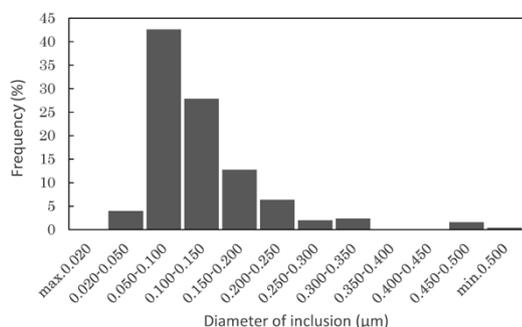


図3 介在物サイズのヒストグラム  
Fig.3 Histogram of inclusion size

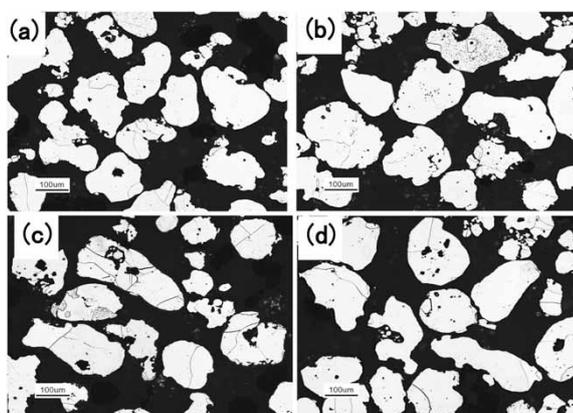


図4 粉末断面の組織写真  
Fig.4 Cross-sectional micrograph of powders

表2 各鉄粉の平均結晶粒径  
Table 2 Average crystal grain size of powders

Powder ID	Average size of crystal grain ( $\mu\text{m}$ )
a	127
b	145
c	127
d	130

表3 絶縁コーティング後の鉄粉の化学成分  
Table 3 Chemical compositions of powders after insulation coating (mass%)

Powder ID	C	Si	Mn	P	S	O
a	0.02	0.01	0.09	0.043	0.005	0.16
b	0.02	0.01	0.09	0.043	0.004	0.15
c	0.02	0.01	0.09	0.043	0.004	0.15
d	0.02	0.01	0.09	0.042	0.004	0.14

表4 絶縁コーティング前の粒度分布  
Table 4 Particle size distribution of powders before insulation coating (mass%)

Powder ID	+250 $\mu\text{m}$	+180 $\mu\text{m}$	+150 $\mu\text{m}$	+106 $\mu\text{m}$	+75 $\mu\text{m}$	-75 $\mu\text{m}$
a	0.0	31.1	50.8	8.4	9.2	0.5
b	0.0	29.5	54.8	9.4	5.8	0.5
c	0.0	29.6	51.8	8.3	10.0	0.3
d	0.0	33.7	49.7	6.8	9.3	0.5

学成分分析結果を表3に、絶縁コーティング前の粒度分布を表4に示す。

図3および表2～表4から、本試験で用いた鉄粉のヒステリシス損に影響を与える介在物以外の因子(不純物、結晶粒界、粉末表面)<sup>1), 4)</sup>はほぼ同じであることが確認できた。

### 3.2 圧粉体の磁気特性

本節では、介在物量の異なる4種の粉末を用いて調べた圧粉体の磁気特性について述べる。まず、励磁磁場10 kA/mにおける磁束密度と介在物量との関係、および最大比透磁率と介在物量との関係を調べた。それぞれの結果を図5、図6に示す。図5、図6から分かるように、介在物量と磁束密度および最大比透磁率との間には明確な関連は見られなかった。つぎに、保磁力と介在物量の関係を調べたところ、介在物の減少に伴って保磁力が低下することが分かった(図7)。

バルクの磁性材料においては、保磁力の低下に伴って比透磁率も増加するのが一般的な挙動である。しかしながら本調査では比透磁率に変化はなく、保磁力のみが変

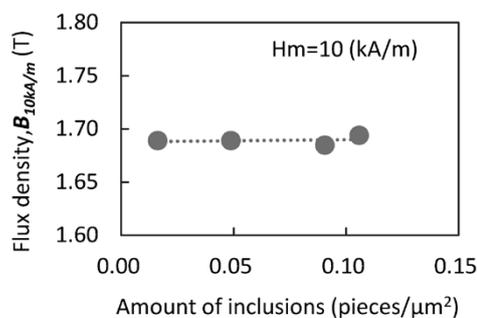


図5 介在物量と磁束密度の関係  
Fig.5 Relationship between amount of inclusions and flux density

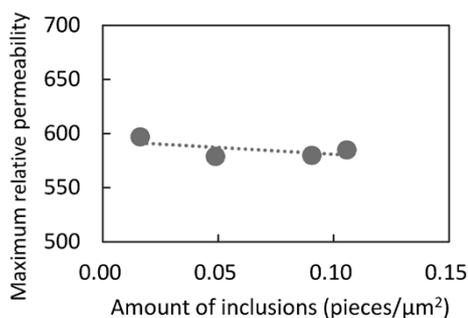


図6 介在物量と最大比透磁率の関係  
Fig.6 Relationship between inclusions and maximum relative permeability

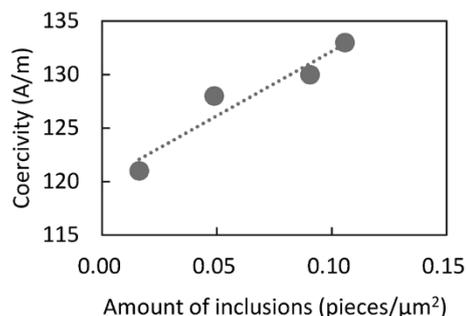


図7 介在物量と保磁力の関係  
Fig.7 Relationship between amount of inclusions and coercivity

化する結果となった。圧粉磁心は粉末を圧縮成形したものであり、各粒子は磁気的につながっておらず、粒子間の小さなギャップによって磁路が分断されている。したがって、磁気回路としてはギャップによる磁気抵抗が分散した状態であるため、純鉄バルクの透磁率値である数千<sup>7)</sup>と比べて最大比透磁率は1桁低くなっている。

ヒステリシス曲線において磁化曲線が急激に立ち上がり、最大比透磁率が観察される領域では磁心全体に及ぶ大きな磁壁移動が支配的であり<sup>5)</sup>、粒子間のギャップは比透磁率に対して非常に大きな影響を及ぼす。すなわち、介在物による鉄粉粒子内の磁気抵抗よりも粒子間のギャップによる磁気抵抗の影響が大きい。このため、介在物量の変化による圧粉磁心全体としての磁気抵抗の変化が微小であり、最大比透磁率として表れなかったと考えられる。介在物量に対して最大比透磁率が変化しなかったのはこうした理由によるものと考えられる。

いっぽうで保磁力は、残留磁化を0とするために必要な逆向きの磁場であり、ギャップを介した磁壁の移動ではなく粒子内のみの磁壁の移動の影響が大きい。このため、粒子内に存在する介在物の影響を顕著に反映したものであると思われる。介在物が磁壁をピンニングした効果<sup>5), 8)</sup>が保磁力の変化として観察されたともいえる。

つぎに、鉄損と介在物量の関係を調べたところ、介在物量の減少に伴って鉄損が低下していることが分かった(図8)。鉄損がヒステリシス損と渦電流損のみからなると仮定すると式(1)で表すことができる<sup>5)</sup>。

$$W = W_h + W_e = k_h \cdot f + k_e \cdot f^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、W：鉄損、 $W_h$ ：ヒステリシス損、 $W_e$ ：渦電流損、 $f$ ：周波数、 $k_h$ ：ヒステリシス損係数、 $k_e$ ：渦電流損係数である。鉄損の周波数依存性結果を式(1)によって回帰し、 $k_h$ および $k_e$ を求め、400 Hzにおけるヒステリシス損、渦電流損に分離した結果を図9に示す。鉄損分離の結果から、鉄損低下はヒステリシス損の低下によるものであり、渦電流損には変化がないことも分かった。ヒステリシス損は、ヒステリシス曲線の面積で表され、保磁力に比例する<sup>9)</sup>ことから、図7に示す保磁力の結果からも、介在物量の減少に伴ってヒステリシス損が低下することは妥当であるといえる。

介在物は磁壁の移動の妨げに寄与する因子と分類され、結晶粒界や表面弾性エネルギーの影響を考慮しない理想状態の場合、磁壁の厚さ $\delta$ は式(2)で与えられる。

$$\delta = \pi \sqrt{\frac{A}{K}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $A$ は交換定数、 $K$ は磁気異方性定数であり、純鉄

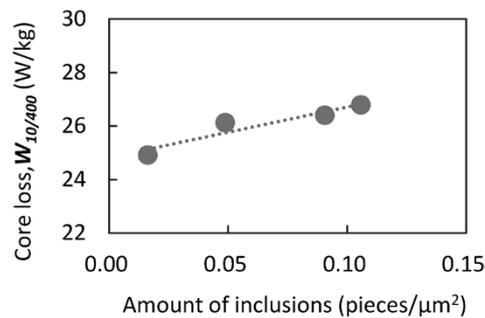


図8 介在物量と鉄損の関係  
Fig.8 Relationship between amount of inclusions and core loss

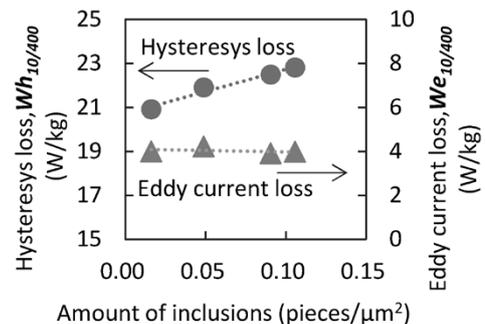


図9 介在物量と鉄損の関係  
Fig.9 Relationship between amount of inclusions and core loss

の物性値を代入すると、磁壁の厚さは約80 nmと計算される<sup>6)</sup>。また、磁壁の幅および磁壁のエネルギーについての詳細な計算によると<sup>10)</sup>、鉄の90°壁の幅はおおよそ40~50 nm、磁気ひずみを考慮した180°壁の幅はおおよそ70~140 nmであり、本稿で観察された介在物のサイズ約100 nmと近い値になることが分かった。磁壁の幅とピンニングサイトとなる介在物のサイズがほぼ同じになる場合が最もピンニング効果が大きい<sup>8)</sup>。したがって、本稿で観察された介在物は、保磁力やヒステリシス損に十分影響を与えるサイズであると考えられる。本試験においては、保磁力に大きく影響を及ぼすサイズを有する介在物の量が変化したため、介在物量の変化が保磁力の変化として大きく反映されたものと考えられる。

#### 4. 従来材との比較

本稿で述べた介在物低減の効果を取り入れて開発した磁性鉄粉「マグメルML25D」と、従来の磁性鉄粉「マグメルML28D」とを比較した結果を表5に示す。ML25Dの磁束密度や透磁率はML28Dとほぼ同等である。そのいっぽうで、保磁力が低減した結果、ML25Dは鉄損が約10%改善した材料となっていることが分かる。電磁鋼板(JIS 35A360)と磁性鉄粉との比較を図10に示す。従来材のML28Dは励磁周波数約600~

表5 開発した鉄粉と従来鉄粉とのコア特性の比較  
Table 5 Comparison of core properties of developed and conventional powder

Powder	Density (g/cm³)	Flux density $B_{10kA/m}$ (T)	Coercivity $H_c$ (A/m)	Maximum permeability	Core loss			Transverse rupture strength (MPa)
					$W_{10/400}$ (W/kg)	$W_{10/800}$ (W/kg)	$W_{10/1k}$ (W/kg)	
Conventional ML28D	7.72	1.67	129	545	28.7	68	91	66
Developed ML25D	7.71	1.70	113	517	25.6	59	77	69

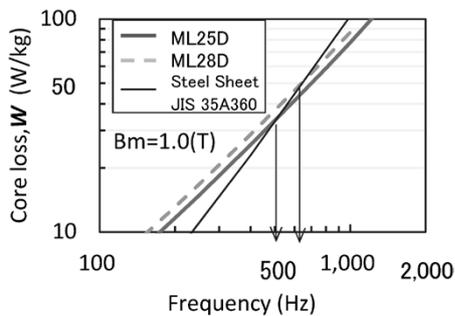


図10 電磁鋼板と圧粉磁心との鉄損比較

Fig.10 Comparison of core loss between silicon steel sheet and dust cores

700 Hzで電磁鋼板と同等の鉄損となる。これに対して、開発材 ML25Dは約500 Hzで同等となり、低鉄損が得られる高周波数領域が拡大している。磁心励磁周波数が500 Hzを超えるような高速モータなどへの適用による効率改善や、3次元磁気回路構造をもつアキシアルギャップモータなどの小型・効率化が期待できる材料を開発することができた。

**むすび** = 鉄粉中に存在する多くの介在物は約100 nmの大きさであることが分かった。これら介在物の大きさは、純鉄の磁壁の厚さとほぼ同じと推定され、磁壁のピンニング効果が大きいことが示唆された。このような大きさの介在物を低減することにより、鉄損改善となることを定量的に明らかにし、従来と比べて低鉄損となる圧粉磁心用鉄粉を開発した。本開発材料は、電磁気部品の小型化・効率化に貢献し、圧粉磁心の適用範囲を拡大させることが期待される。

参考文献

- 1) 北条啓文ほか. R&D神戸製鋼技報. 2016, Vol.66, No.1, p.68-71.
- 2) T.Arakawa et al. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, Vol.47, No.10, p.3602-3605.
- 3) T.Takahashi et al. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, Vol.53, No.4, p.3927-3935.
- 4) 北条啓文ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.2, p.79-83.
- 5) 加藤哲男. 技術者のための磁気・磁性材料. 日刊工業新聞社, 1991, 255p.
- 6) 太田恵造. 磁気工学の基礎 II. 一磁気の応用一. 共立出版, 1973, 232p.
- 7) R.M.Bozorth. Ferromagnetism. D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC., 1951, p.59.
- 8) 金子英雄ほか. 磁性材料(金属工学シリーズ (8)). 日本金属学会, 1977, p.101.
- 9) 高城重彰. 鉄系圧粉および焼結磁心材料の磁気特性解析と製造に関する研究. 東北大学博士論文. 1987, p.14-26.
- 10) B.A.Lilley. Phil. Mag., 1950, Vol.41, p.792-813.



北条啓文  
素形材事業部門  
鉄粉ユニット



谷口祐司  
素形材事業部門  
鉄粉ユニット 鉄粉工場



上條友綱  
素形材事業部門  
鉄粉ユニット 鉄粉工場



三谷宏幸  
素形材事業部門  
鉄粉ユニット 鉄粉工場