

(解説)

次世代磁性材料「磁性鉄粉」への期待

Expectations for Next-generation Magnetic Material "Magnetic Iron Powder"



三谷宏幸*1
Hiroyuki MITANI

Thanks to interest in the environment, energy conservation and conversion to electric power are being promoted, and there are strong demands for high power, downsizing and high efficiency in electromagnetic products—in motors and inductors, for example. Dust cores are made by compressing insulated magnetic powder, and there is a possibility that these demands can be met. The advantages of dust cores are three-dimensional design flexibility, magnetic isotropy and high efficiency in the high-frequency range; so interest is rising in dust cores as the next-generation electromagnetic material. This paper explains a development trend for the magnetic iron powder which is a raw material of dust cores and the effect dust cores have had on electromagnetic parts.

まえがき = 環境問題や省エネの観点から変圧器やモータなどの電磁気変換部品の果たす役割は大きくなっている。電磁気変換部品は主に鉄心とコイルから構成され、鉄心は出力や変換効率、サイズを決定する重要な部品である。鉄心に使用される材料としては、電磁鋼板などの鉄系合金やアモルファスなどの非晶質材料、ソフトフェライトなどの酸化物が、それぞれ周波数などの励磁条件を考慮して適用されている (図1)。

近年では、表面に絶縁皮膜を有する強磁性体粉末を圧縮成形した圧粉磁心が鉄心材料として関心を集めており、リアクトルなどの電源部品やモータの鉄心など従来電磁鋼板が使用されてきた用途へ適用が進みつつある^{1), 2)}。圧粉磁心は鉄粉のほか、Fe-Si合金粉末やアモルファスなどの強磁性体粉末が使用される。これらのうち、鉄粉は主に焼結部品用原料として発展してきたものを新たな用途の圧粉磁心に用いるため、磁気特性に着目

し磁性鉄粉として開発が進められている。本稿では、純鉄粉を対象とした圧粉磁心の特性向上、および電磁気変換部品に圧粉磁心を適用することで期待される効果について解説する。

1. 圧粉磁心の磁気特性

電磁気変換部品には高出力・高効率が求められるなか、鉄心の磁気特性としては出力や効率の指標となる磁束密度、透磁率、および鉄損が主に評価される。このため、鉄心は高磁束密度、高透磁率、低鉄損が求められる。磁気特性は図2で示される静磁界におけるヒステリシス曲線と交流磁界での鉄損が評価される。

磁化過程における磁束密度は、式(1)のように透磁率と外部磁場の積で表されるため、鉄心の高透磁率化によって高磁束密度が得られる。また、飽和磁束密度は鉄心における磁性体の量に比例するため、圧粉磁心において成形体密度を上げることが高飽和磁束密度化に有効である。

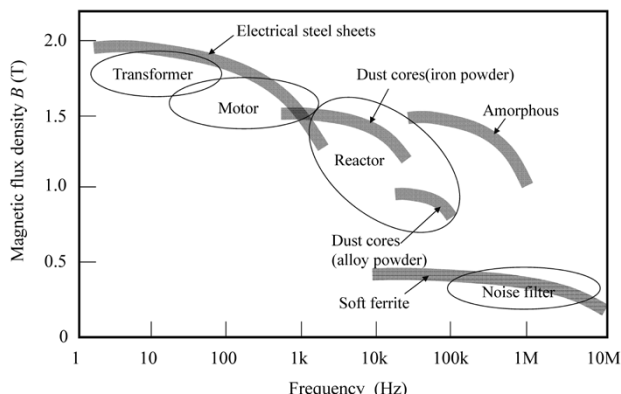


図1 各種軟磁性材料と電磁変換機器の適用領域の模式図
Fig. 1 Schematic figure of application area for various soft magnetic materials

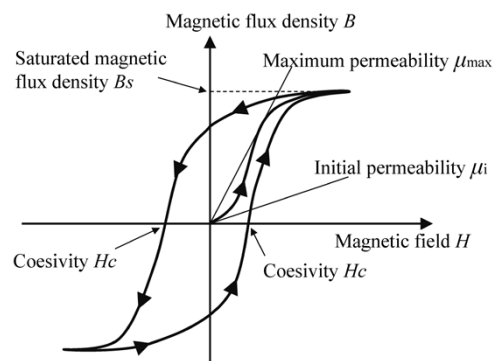


図2 ヒステリシス曲線
Fig. 2 Hysteresis curve

*1 技術開発本部 材料研究所 (現 技術開発本部 開発企画部)

表 1 磁気特性の支配因子

Table 1 Control factors of magnetic properties

Magnetic properties		Compacts	Iron powder
Magnetic flux density		Compacts density	Particle size distribution Impurity Shape of particle
Permeability		Compacts density	Shape of particle
Coercivity		Stress (dislocation)	Source of obstructing domain wall motion • grain boundary • particle surface • Stress (dislocation) • Impurity
Iron loss	Hysteresis loss	Stress (dislocation)	Electric resistance of powder material Electric insulation between the particle Heat-resistance of insulation coat
	Eddy current loss	Electric resistance of core material Surface conduction of core	

$$B = \mu H \dots\dots\dots (1)$$

B : 磁束密度, μ : 透磁率, H : 外部磁場

透磁率 (μ_{DC}) は, 式 (2) に示す強磁性粉末集合体の直流透磁率を表す理論式であるOllendorfの式で与えられる^{3), 4)}。

$$\mu_{DC} = \eta \mu_0 (\mu_t - \mu_0) / [N(1 - \eta)(\mu_t - \mu_0) + \mu_0] + \mu_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに, μ_{DC} : 直流透磁率

η : 鉄粉の充填率

N : 鉄粉の粒子の有効反磁界係数

μ_t : 鉄粉粒子固有の透磁率

式 (2) によれば, μ_0 は定数であるため, 直流透磁率 μ_{DC} は, 鉄粉の充填率 η , 鉄粉の粒子の有効反磁界係数 N , および鉄粉粒子固有の透磁率 μ_t の関数である。したがって, 磁束密度と同様に, 同一の鉄粉であれば成形体の高密度化が高透磁率化に有効である。

鉄損は主としてヒステリシス損と渦電流損により構成され, その支配因子を図 3⁵⁾ に示す。ヒステリシス損は, 図 2 で示される静磁界におけるヒステリシス曲線に囲まれた面積に相当し, 保磁力との相関が強い。保磁力は磁壁移動を阻害する因子に支配され, これらを低減することがヒステリシス損低減につながる。また, 鉄損 (W_t) は, 式 (3) で表されるように⁶⁾ ヒステリシス損 (W_h) と渦電流損 (W_e) の和である。ヒステリシス損は周波数に比例し, 渦電流損は周波数の 2 乗に比例するため, 高周波数域では渦電流損抑制が重要となる。

$$W_t = W_h + W_e \dots\dots\dots (3)$$

$$= K_1 \cdot f \cdot B_m^{1.6} + K_2 \cdot f^2 \cdot B_m^2$$

ここに, K_1, K_2 : 係数

f : 周波数

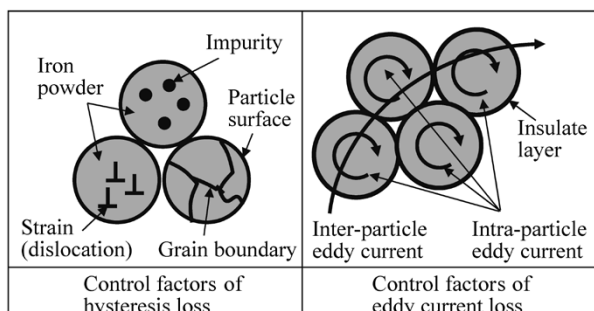


図 3 鉄損支配因子

Fig. 3 Control factors of iron loss

B_m : 最大磁束密度

渦電流損は, 交流磁界では磁束の変化を妨げるように発生する渦電流によるジュール損である。したがって, 損失低減に加えて発熱防止のためにも渦電流損を抑制することが求められる。渦電流損には粒子内渦電流損と粒子間渦電流損があることが知られている^{3), 4)}。粒子間渦電流は粒子間をまたがって大きな領域を流れ, 大きな損失となる。このため, 粒子間渦電流抑制を目的として鉄粉表面に絶縁皮膜が形成される。

圧粉磁心では, 高磁束密度化および高透磁率化に有効な高密度化が図られる。また, 渦電流損抑制のため, 鉄粉粒子表面への絶縁皮膜形成など, 鉄粉粒子間の電氣的絶縁性の付与が図られている。圧粉磁心に要求される磁気特性に影響を及ぼす因子を表 1 に示す。磁性鉄粉においては, 主に鉄粉そのものと絶縁皮膜の開発により特性向上が図られている。

2. 磁性鉄粉の開発

2.1 鉄粉の開発

鉄粉の開発においては, 粒子間が電氣的に絶縁されているという前提では, 渦電流損は鉄粉の粒子径によって支配されるため, 用途に応じて適切な粒子径が選択される。一方, ヒステリシス損 (保磁力) および透磁率については, 鉄粉の粒子径以外の支配因子による向上, すなわち結晶粒の粗大化, 磁壁移動の阻害因子である不純物 (介在物) の低減が図られている (図 4⁷⁾, 図 5⁸⁾)。また,

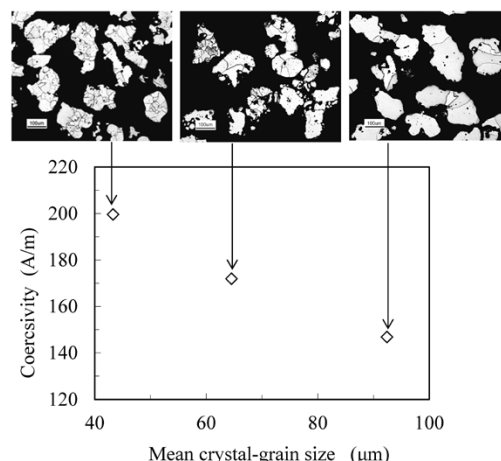


図 4 平均結晶粒径と成形体保磁力の関係

Fig. 4 Relationship between coercivity and mean crystal-grain size

結晶粒の界面も磁壁移動の阻害因子であるため、粗粒の方がヒステリシス損は小さく（図6⁵⁾）、低周波数域では粗粒が適している。その他、鉄粉をプレート状に加工した扁平鉄粉にすることで形状磁気異方性を付与した高透磁率化も報告されている⁹⁾。

2.2 絶縁皮膜の開発

交流磁界では磁束の変化を妨げるように渦電流が発生し、熱としてエネルギー消費され損失（鉄損）となる。このため、低鉄損化には鉄粉粒子間を電氣的に絶縁する必要がある。そのため、磁性鉄粉表面には絶縁皮膜が形成されているが、高磁束密度、高透磁率の観点から、絶縁材料は成形性を阻害せず少量で成形時の物理的変形に耐えられる特性が要求される。また、圧粉磁心は、圧縮成形時に導入されるひずみによりヒステリシス損が増大するため、成形後にひずみ取り焼鈍を行う。ひずみ取り焼鈍は高温ほどひずみが解放されるが、絶縁皮膜の耐熱温度を超えると絶縁破壊が生じ、粒子間渦電流損による著しい鉄損増大を引き起こす（図7⁵⁾。そのため、絶縁皮膜にはひずみ取り焼鈍に対する耐熱性のほか、鉄心

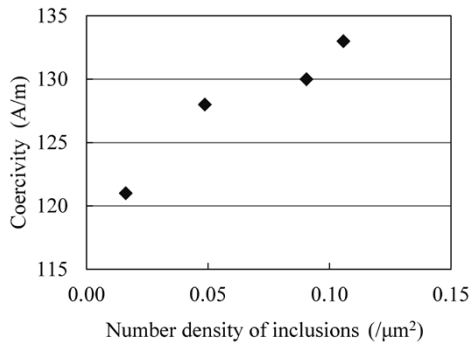


図5 介在物密度と成形体保磁力の関係

Fig. 5 Relationship between coercivity and number density of inclusions

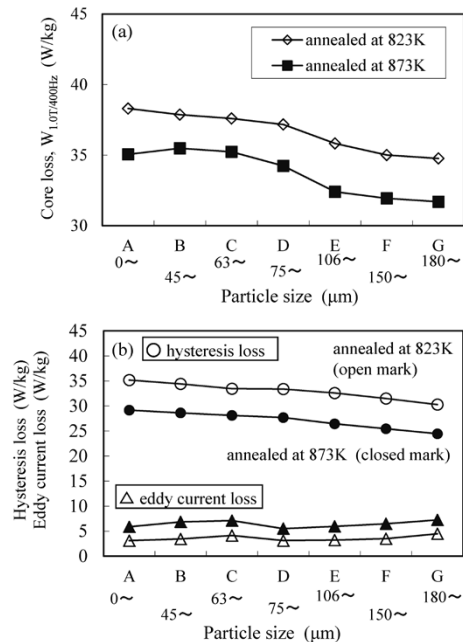


図6 (a) 粒子径と鉄損の関係、
(b) 粒子径とヒステリシス損および渦電流損の関係
Fig. 6 (a) Relationship between particle size and core loss, and
(b) relationship between particle size and hysteresis and eddy current loss

自身の発熱に対する長期の耐久性も要求される¹⁰⁾。

熱処理温度と成形体保磁力の関係を調べることにより（図8）、ひずみ取り焼鈍に対する耐熱性は927Kが目安となること、すなわち焼鈍温度が927Kを超えると再結晶による結晶粒微細化によりヒステリシス損（保磁力）の増大を引き起こす⁵⁾ことがわかった。耐熱性絶縁皮膜としては、りん酸系皮膜や耐熱樹脂皮膜、これらの複合皮膜やMgO皮膜¹¹⁾などが報告されているが、上記特性をすべて満たすことは難しく、開発が継続されている。

2.3 当社の磁性鉄粉

当社は鉄粉と絶縁皮膜に着目した検討を行い、高周波用および低周波用の磁性粉末を開発している。例えば、図9⁵⁾のように周波数が高くなると電磁鋼板より圧粉

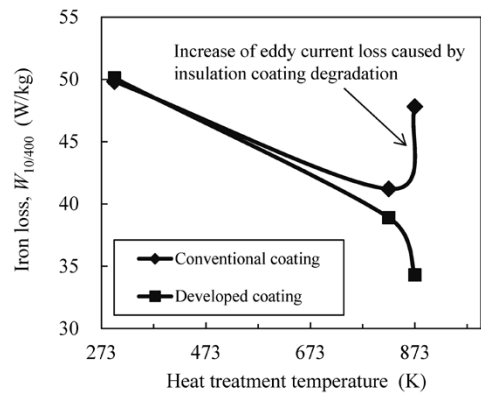


図7 熱処理温度と鉄損の関係

Fig. 7 Relationship between heat treatment temperature and iron loss

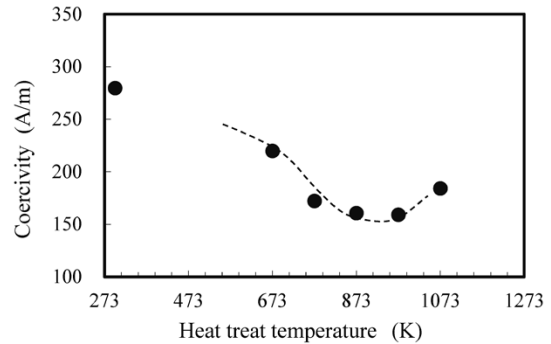


図8 熱処理温度と成形体保磁力の関係

Fig. 8 Relationship between heat treatment temperature and coercivity

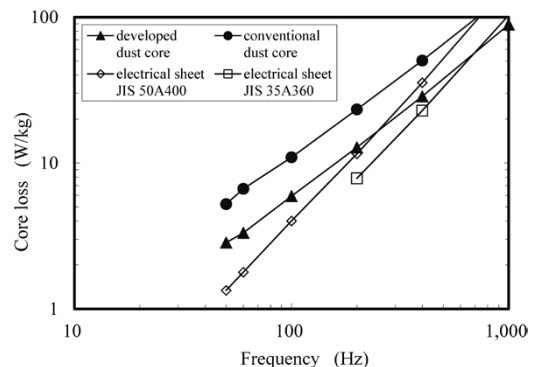


図9 開発材と他材料の鉄損比較
Fig. 9 Comparison of core loss

磁心の方が低鉄損となり、電磁鋼板代替が可能な領域まで進歩している。

3. 成形技術の開発

圧粉磁心の製造では圧縮成形は不可欠なプロセスである。1章で述べたとおり、圧粉磁心の磁気特性は成形体密度に大きく影響を受けるため、成形技術が圧粉磁心の特性向上に与える影響は大きい。そこで本章では、圧粉磁心に関わる成形技術について簡単に触れておく。

3.1 高密度化

圧粉磁心の構成要素は、磁性材料である鉄粉と絶縁材料および空隙、さらに成形時における金型との焼付きを防止するために混合される潤滑剤である。潤滑剤は非磁性な物質であるため、高磁気特性のためには混合しないことが望ましい。潤滑剤を混合しない成形方法として、金型内面に潤滑剤を塗布する型潤滑成形法が開発されており、高密度化による高磁気特性化に効果がある¹²⁾。しかしながら、成形体形状には制約があり複雑形状の成形には適さないため、複雑形状への対応などさらなる高密度化技術の発展が望まれる。

3.2 表面処理

高密度に圧縮成形された圧粉磁心は、金型との摺動(しゅうどう)により成形体表面の電気抵抗が低下することがある。これは、摺動面近傍の鉄粉粒子が変形して導通するためである。この対策として、粒子間の電気絶縁性を確保する加工方法¹³⁾のほか、渦電流経路の一部を絶縁化するレーザー処理が報告されている²⁾。

4. 用途

圧粉磁心は、数kHz程度を目安として主にモータ用コア材を対象とした低周波用と、主にリアクトル用コア材を対象とした高周波用に分けられる。いずれの用途においても、圧粉磁心を適用することにより電磁気部品にもたらす効果として、粉末冶金の特徴を生かした高出力化、小型化、高効率化が期待されている。

4.1 モータ用で期待される効果(低周波用)

モータは主に1kHz以下の低い周波数で使用されるため、材料としては渦電流損よりもヒステリシス損低減が重視され、粒度の粗い磁性鉄粉が使用される。

鉄心材料としては電磁鋼板が主流であるのが現状であるが、磁性鉄粉は、a)粉末冶金特有の高形状自由度性、b)高周波で低鉄損、c)等方的な磁気特性を生かした3次元磁気回路など、電磁鋼板にはない特長を生かして設計の自由度を高め、小型化や高効率化といった効果が期待されている(図10)。

4.2 リアクトル用で期待される効果(高周波用)

リアクトルは、電圧の変換(昇圧)リップル電流の平滑化を行う電磁気部品である。数十kHz程度で駆動するため、渦電流損低減を重視した粒度の細かい磁性鉄粉が使用される。モータ用と同様にa)~c)の効果が期待されているほか、圧粉磁心内部に存在する空隙が透磁率制御の役割を果たすため、ギャップ数の削減などの効果が期待されている(図11)。

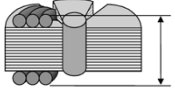
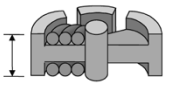
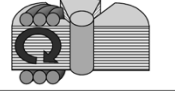
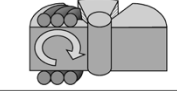
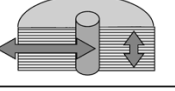
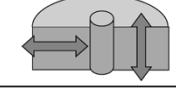
	Laminated core	Dust core
a) Three-dimensional design flexibility ⇒ Downsizing		
b) High efficiency in the high-frequency range ⇒ High power		
c) Isotropic magnetic properties ⇒ New design		

図10 モータ用鉄心として期待される効果
Fig.10 Expected merits as iron cores for motors

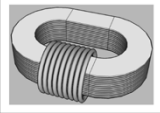
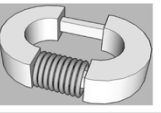
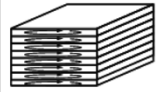
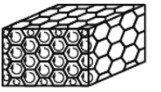
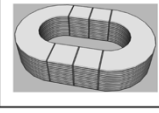
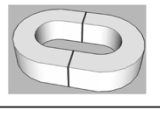
	Laminated core	Dust core
a) Three-dimensional design flexibility ⇒ Downsizing		
b) Low core loss in the high-frequency range ⇒ High efficiency		
c) Control of the permeability due to compact density ⇒ Reduction of the number of parts		

図11 リアクトル用鉄心として期待される効果
Fig.11 Expected merits as iron cores for reactors

むすび=磁性鉄粉は、鉄粉材料と絶縁皮膜の開発によって圧粉磁心の特性を向上させ、電化社会の発展とともに電磁変換機器の高出力化、小型化、高効率化を可能にする次世代の磁性材料として期待され、実用化も進んでいる。今後のさらなる圧粉磁心の適用拡大のためには、鉄粉の鉄損低減や絶縁皮膜の薄膜化、耐熱性向上などの材料開発に加え、設計技術として3次元電磁場解析技術の普及や設計思想の多様化、成形技術として成形体高密度化や生産性向上など三位一体の開発が必要である。

参考文献

- 1) 浅香一夫ほか. 日立粉末テクニカルレポート. 2005, No.4, p.5.
- 2) 五十嵐直人ほか. SEIテクニカルレビュー. 2015, 第186号, p.92.
- 3) 高城重彰ほか. 粉体および粉末冶金. 1985, Vol.32, No.7, p.259.
- 4) 高城重彰ほか. 日本金属学会報. 1990, Vol.29, No.3, p.141.
- 5) 北条啓文ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.2, p.79.
- 6) 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, p.67.
- 7) H. Hirofumi et al. World PM2010 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition Proceedings. Florence, ITALY, 10 Oct-14 Oct. The Institute of Materials, Minerals and Mining., 2010, Vol.5, p.245.
- 8) 北条啓文ほか. 平成26年度秋季大会(第114回講演大会), 講演概要集. 2014-10-29/31. 粉体粉末冶金協会, 2014, p.172.
- 9) 三谷宏幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, No.3, p.39.
- 10) 石原千生ほか. 粉体および粉末冶金. 2000, Vol.47, No.7, p.705.
- 11) 中山亮治ほか. 粉体および粉末冶金. 2006, Vol.53, No.3, p.285.
- 12) 三谷宏幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 2004, Vol.54, No.1, p.39.
- 13) 住友電気工業株式会社. 圧粉磁心およびその製造方法. 特開2012-4551.