

(技術資料)

圧粉磁心の強度および磁気特性の向上

Improvement of Strength and Magnetic Properties in Dust Cores



三谷宏幸*
Hiroyuki Mitani



北条啓文**
Hirofumi Houjou



藤沢和久***
Kazuhisa Fujisawa

Dust cores offer unique design possibilities for motor cores. For such applications, demand for increased strength, density and electrical resistance is growing. Die wall lubrication increases strength without additional lubrication. A small amount of resin coating on the iron powder enhances both density and electrical resistance. The newly developed dust cores are several times stronger than conventional ones and are characterized by a 10% increment in flux density at the same electrical resistance.

まえがき = 圧粉磁心は、鉄粉などの金属磁性粉末に樹脂コンパウンドを混合し圧縮成形したもので、ノイズフィルタやリアクトルなどの電源部品に用いられている^{1)~4)}。最近ではこれらの用途に加え、圧粉磁心の形状自由度に着目して、モータのステータやロータへの適用が提案されている^{5)~7)}。

モータのステータやロータといったコアは、通常、電磁鋼板などを積層させたものが使用されている。このような積層磁心はコアの厚さが一定であるのに対して、圧粉磁心は金型により粉末を圧縮成形したもので、コアの厚さを部位によって変えることが可能である。また、圧粉磁心は磁氣的に等方性を有するため、磁気回路を考慮したコア形状の設計自由度が高く、積層磁心よりも効率的なコア形状が得られる。その結果、圧粉磁心のコアを用いたモータは、積層磁心を用いたモータよりも小型化・軽量化が可能になり、これらのニーズの高い自動車用のモータとして開発が進んでいる⁸⁾。

圧粉磁心をモータのコアとして適用するためには、磁気特性のほか回転部材としての強度が必要であり、成形体には高密度化(高磁束密度)、高電気抵抗化(低渦電流損失)、高強度化が要求されている。

筆者らは、高強度樹脂を被覆した鉄粉を開発し、さらに型潤滑成形法を採用することにより、圧粉磁心の強度と磁気特性を向上させた。本稿では、これらの圧粉磁心の強度および磁気特性について報告する。

1. 開発課題と特性向上の考え方

圧粉磁心は、鉄粉などの金属磁性粉末と樹脂や潤滑剤などの添加剤で構成されている。樹脂は、金属磁性粉末粒子間を電氣的に絶縁して交流磁界における渦電流損失の抑制と、粉末同士を接着して強度を発現することを目的としている。潤滑剤は、成形時における成形体と金型

との焼付き防止を目的としている。

樹脂の添加量を多くすると、高強度化や高電気抵抗化は可能であるが、成形体の密度は低下し磁束密度は低下する。一方、樹脂の添加量を少なくすると、磁束密度は向上するが強度は低下し、粒子間の電氣的絶縁が不十分になり渦電流損失が増加する。従って、粒子間の電氣的絶縁を確保しつつ、高強度化と高密度化を両立させることが、モータのコア用圧粉磁心材の開発課題である。

1.1 強度の向上

圧粉磁心の強度を向上するためには、樹脂そのものの高強度化と、成形体の高密度化が重要である。成形体の密度を高くすることにより、樹脂と粉末の接触面積の増加に加え、粉末同士のからみ効果による強度向上が期待できる。

樹脂の接着作用に対して、潤滑剤は高強度化と高密度化の阻害要因になる。そこで、圧粉磁心原料に潤滑剤を添加することなく金型との焼付きを防止するプロセスが必要となる。

最近では、金型壁面に潤滑剤を塗布する型潤滑成形法(Die Wall Lubrication Process : DWL)が提案されており⁹⁾、原料内部に潤滑剤を添加する従来成形法(Conventional Compaction Process : CCP)よりも、高密度化・高強度化が可能なプロセスとして期待できる。

筆者らは、潤滑剤を混合することなく純鉄粉に高強度樹脂を混合し、型潤滑成形法により成形した高強度圧粉磁心を開発した^{10), 11)}。図1に示すとおり、型潤滑成形法による成形体の抗折強度は、従来成形法と比較して数倍高い強度を示し、圧粉磁心の高強度化には有効なプロセスといえる。

1.2 磁気特性の向上

圧粉磁心の磁気特性向上には、金属磁性粉末粒子間の電氣的絶縁を確保しつつ、高密度に成形することが不可

*技術開発本部 材料研究所 **鉄鋼部門 鉄粉本部 鉄粉工場 ***技術開発本部 化学環境研究所

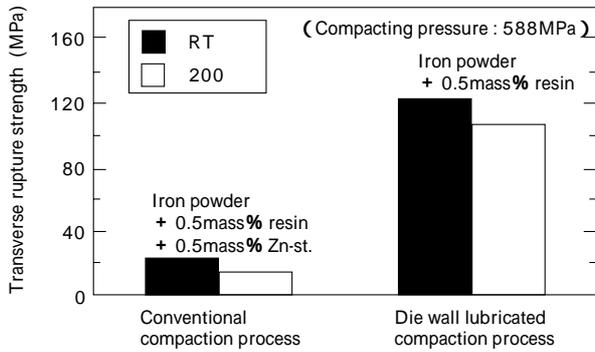


図1 従来成形法と型潤滑成形法による抗折強度

Fig. 1 Transverse rupture strength of specimens made by conventional compaction process and die wall lubrication process (Iron powder : 300NH)

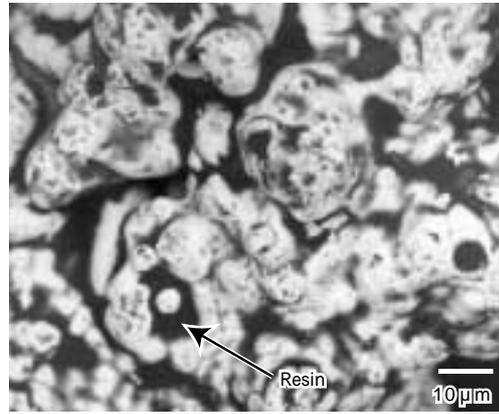


写真1 樹脂被覆鉄粉表面のSEM写真

Photo 1 SEM photograph showing surface of 0.5mass% resin coated iron powder

欠である¹²⁾。粉末への樹脂被覆は、粉末表面における樹脂面積が大きくなるため、樹脂添加量を低減しつつ電気的絶縁を確保し、機械的強度の向上が期待できるため、前節で使用した高強度樹脂の被覆を試みた。

2. 実験方法

2.1 原料鉄粉

原料鉄粉として当社製高純度鉄粉アトメル300NH(以後、鉄粉と記す)、高強度樹脂としてフェノール樹脂(以後、樹脂と記す)を使用した。また、有機溶媒に樹脂を溶解させたのち、鉄粉と混合後有機溶媒を揮発させることにより、鉄粉に樹脂を被覆した。

被覆する樹脂量は0.2, 0.3, 0.5mass%として、比較材には、樹脂を粉末で0.5mass%混合した原料(型潤滑成形法用)と、樹脂を0.5mass%および潤滑剤ステアリン酸亜鉛を0.5mass%を混合した原料(従来成形法用)を用いた。

2.2 成形

型潤滑成形法における金型壁面への潤滑剤塗布は、アルコールに懸濁したステアリン酸亜鉛をはけで塗り乾燥させて行った。成形体密度、成形体比抵抗および強度評価用の試料として、12.7 × 31.75 × 5 mmの短冊状試料、磁気特性評価用として外径36 × 内径24 × 5 mmのリング状試料を作製した。成形は室温にて、成形圧490, 588, 784MPaで行った。

樹脂硬化のために、大気中で230 × 1時間の熱処理を行った。

2.3 評価

原料鉄粉の樹脂被覆状態をSEMにて観察した。成形体密度は、成形体の質量と寸法測定により計算した体積から算出した。強度は3点曲げ試験により抗折強度を測定し、比抵抗は4端子法(端子間距離7mm)にて測定した。磁気特性は直流磁気特性(磁束密度)をB・Hカーブトレーサ、交流磁気特性(透磁率)をB・Hアナライザにより測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 樹脂の被覆状態

樹脂を0.5mass%被覆した鉄粉について、SEMにより

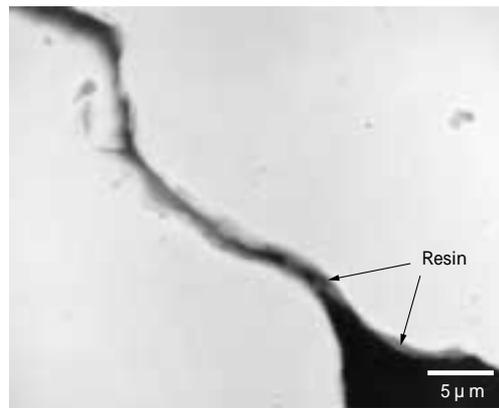


写真2 樹脂被覆鉄粉断面のSEM写真

Photo 2 SEM photograph showing cross-sectional surface of 0.5mass% resin coated iron powder

表面および断面を観察した結果を、写真1および写真2に示す。写真1において、鉄粉表面の黒い部分が樹脂であり、均一な被覆ではないことがわかる。写真2は被覆状態の平均的な場所を観察したもので、樹脂の厚さは0.5 ~ 1µmである。この厚さは、樹脂の比重(1.23g/cm³)と鉄粉の表面積(0.06m²/g)から計算した樹脂の平均被覆厚さ0.68µmと比較して、妥当な厚さである。SEMによる表面観察では、樹脂厚さの薄い領域で電子線が樹脂を透過して下地の鉄粉表面を観察している可能性があり、写真1よりも広い範囲で樹脂が被覆されていると思われる。

3.2 樹脂被覆と型潤滑成形法の効果

3.2.1 高密度化

図2に、各種圧粉成形体における密度と成形圧力の関係を示す。0.5mass%の樹脂量で比較すると、樹脂被覆の方が粉末で樹脂混合するよりも、同じ成形圧力でも成形体密度は高くなる。従って、樹脂被覆は粉末の圧縮性を向上させる効果がある。ただし、低い成形圧力では、従来成形法は潤滑剤が添加されているにもかかわらず、型潤滑成形よりも成形体密度が高くなる。これは、成形体密度が低い領域での緻密化挙動は、鉄粉粒子間の摩擦による抵抗が支配的であり、潤滑剤が鉄粉粒子間の摩擦を低減する効果によると考えられる。成形圧力が高くなるに従い空隙が減り、添加剤が高密度化の阻害要因にな

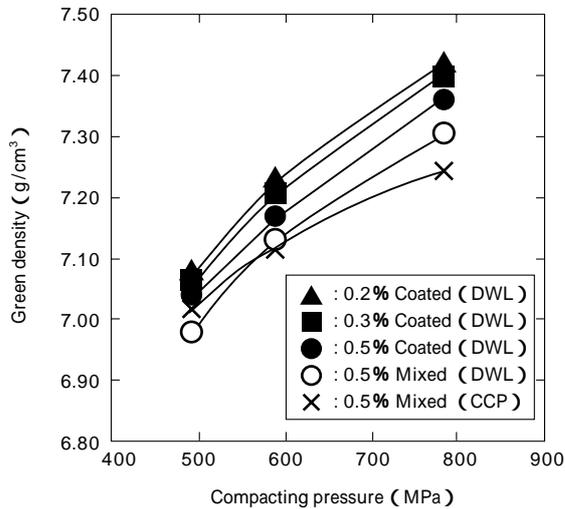


図2 従来成形法と型潤滑成形法による各種圧粉成形体の密度と成形圧力

Fig. 2 Effect of compacting pressure on density of various materials compacted by conventional compaction process and die wall lubrication process

るため、添加剤量に相関した成形体密度になると推測される。これらから、型潤滑成形法は高密度化に効果のあるプロセスであるといえる。

3.2.2 高強度化

図3に、各種圧粉成形体における密度と抗折強度の関係を示す。図1と同様に、圧粉成形体の抗折強度は、型潤滑成形法を用いることにより、従来成形法よりも格段に向上できる。また、従来成形法では高密度化による高強度化は見られないが、型潤滑成形法では成形体密度が高くなるに従い強度が向上する傾向が見られる。これらから、型潤滑成形法は強度向上に有効なプロセスであるといえる。成形体密度を高くすると、樹脂量や添加方法にかかわらずほぼ同じ強度を示す。さらに0.5mass%と

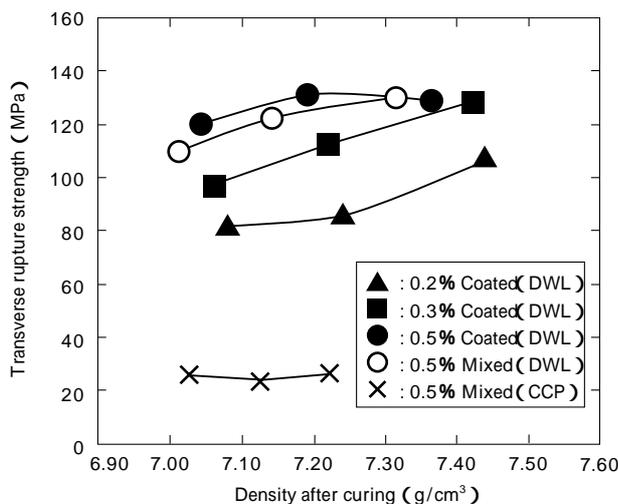


図3 従来成形法と型潤滑成形法による各種圧粉成形体の熱硬化後の密度と抗折強度

Fig. 3 Transverse rupture strength of various materials compacted by conventional compaction process and die wall lubrication process as a function of density after curing

0.3mass%の樹脂量と樹脂被覆鉄粉は、0.5mass%の樹脂量とほぼ同等の強度を示しており、樹脂被覆は樹脂量を低減しても高強度化が可能であるといえる。

3.2.3 高電気抵抗化

図4に、各種圧粉成形体における密度と比抵抗の関係を示す。樹脂被覆することにより、同じ0.5mass%樹脂量でも比抵抗は1桁程度向上するため、樹脂被覆は電気抵抗の向上に効果がある。従来成形法による試料は総量で1mass%添加剤が混合されており、樹脂と潤滑剤の比重はほぼ等しい¹³⁾ことから、被覆の効果により樹脂量を半分以下にしても電気抵抗を維持できると推測される。

3.2.4 高磁気特性化

図5に、784MPaで成形した各種成形体における透磁

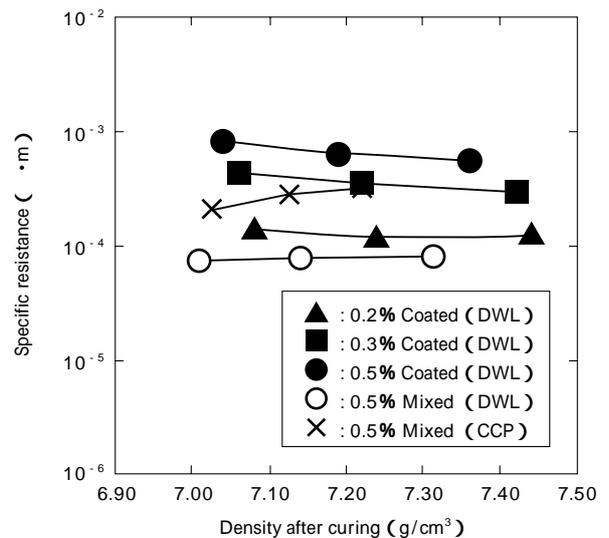


図4 従来成形法と型潤滑成形法による各種圧粉成形体の熱硬化後の密度と比抵抗

Fig. 4 Specific resistance of various materials compacted by conventional compaction process and die wall lubrication process as a function of density after curing

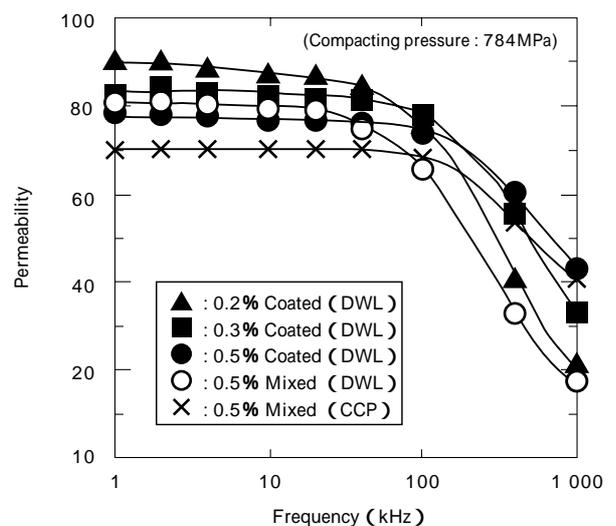


図5 従来成形法と型潤滑成形法による各種圧粉成形体の励磁磁場8A/mにおける透磁率の周波数特性

Fig. 5 Permeability of various materials compacted by conventional compaction process and die wall lubrication process at 8A/m as a function of frequency

率の周波数特性を示す。0.2mass%の型潤滑成形法による成形体と0.5mass%の従来成形法による成形体は、ほかの成形体よりも低い周波数で透磁率の低下が始まり、周波数安定性が劣ることがわかる。これは、周波数安定性が劣る成形体はほかの材料に比べて比抵抗が低く(図4)、粒子間の電氣的絶縁が不十分なためである。

図6に各種成形体における密度と磁束密度の関係を示す。成形体密度と磁束密度はほぼ比例関係にある。ここで、樹脂量0.5mass%で比較すると、樹脂混合鉄粉の成形体は樹脂被覆鉄粉を用いた成形体よりも、同じ成形体密度で磁束密度は高くなる。これは、図7に示す初磁化曲線のとおり、樹脂混合鉄粉による成形体の方が樹脂被覆鉄粉による成形体よりも透磁率が高いためである。

強磁性粉末の集合体の直流透磁率を表す理論式であるOllendorfの式によれば、鉄粉の充填率、鉄粉粒子の有効反磁界係数 N 、鉄粉粒子固有の透磁率 μ_t 、真空の透磁率 μ_0 として式(1)で与えられる¹⁴⁾。

率 μ_0 として式(1)で与えられる¹⁴⁾。

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

樹脂混合した成形体と樹脂被覆鉄粉の成形体では、同じ原料鉄粉であるため μ_t は同じであり、同じ成形体密度であれば μ_0 は等しい。 μ_0 は定数であり、透磁率が異なる要因としては有効反磁界係数 N であるため、樹脂混合した成形体の透磁率が高いということは、樹脂混合した成形体の有効反磁界 N が小さいことになる。反磁界係数は磁性粒子の形状により決定される係数であるため、樹脂混合と樹脂被覆では成形体内部の見かけ上の粒子形状が異なっていることを示唆する。

見かけ上の粒子形状の変化は、樹脂被覆した鉄粉は成形体内部でも樹脂により孤立しているが、樹脂混合した鉄粉では成形体内部で鉄粉同士が部分的に接触しているためと考えられる。

今回、樹脂被覆と型潤滑成形法による特性向上を期待して実験した各種成形体について、各種特性をまとめた結果を表1に示す。評価した条件では、0.3mass%樹脂を被覆した鉄粉を型潤滑成形法により作製した成形体が、最も強度および磁気特性のバランスが良く、強度は数倍、電気抵抗を維持して約10%磁束密度の向上を達成した。

むすび= モータ用磁心に適用するための圧粉磁心用材料およびプロセスを検討した結果、以下の結論を得た。

材料の観点では、内部潤滑剤の添加は圧粉磁心の成形体強度、密度および磁気特性の向上を阻害するため、潤滑剤を内在しないことが必要である。樹脂被覆は電気抵抗の低下を招くことなく高密度化が可能であるため、潤滑剤を含まず樹脂を適量被覆した材料が圧粉磁心原料として望ましい。

プロセスの観点では、従来成形法では潤滑剤を添加することが必須であるため、圧粉磁心の強度および磁気特性の向上は困難である。従って、潤滑剤を添加することなく成形可能な型潤滑成形法が、圧粉磁心の特性向上には不可欠である。

樹脂被覆鉄粉で型潤滑成形法を用いることにより、従来成形法による圧粉磁心では困難な、高電気抵抗・高密度化・高強度化を同時に達成した。今後、モータの形状設計技術や型潤滑成形など的高密度化プロセスの高度化、さらなる高電気抵抗・高密度が可能な材料の開発により、圧粉磁心がモータの小型化・軽量化に大きな発展をもたらすことが期待される。

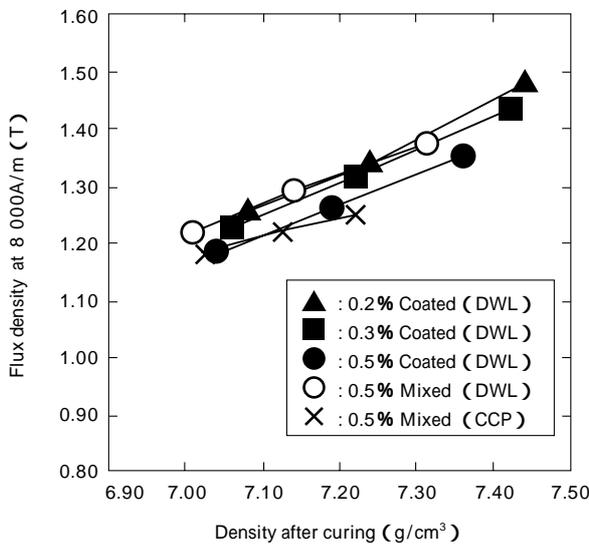


図6 従来成形法と型潤滑成形法による各種圧粉成形体の成形体密度と励磁磁場8 000A/mにおける磁束密度
Fig. 6 Flux density of various materials compacted by conventional compaction process and die wall lubrication process at 8 000A/m as a function of density after curing

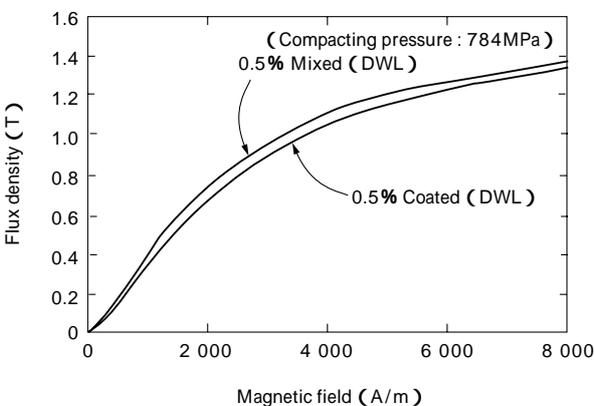


図7 型潤滑成形法を用いた純鉄粉のみによる成形体と樹脂混合した純鉄粉の成形体のB-Hカーブ
Fig. 7 B-H curve of specimens made from pure iron powder and 0.5mass% resin mixed pure iron powder compacted by die wall lubrication process

表 1 各種成形体の機械的特性と磁気特性

Table 1 Mechanical properties and magnetic properties of various materials

Resin amount (mass%)	Lubricant amount (mass%)	Additional process	Compaction process	GD (g/cm ³)	GS (MPa)		SR ($\cdot m$)	B (T)	μ
					RT	200			
0.5	0.5	mixed	CCP	7.24	25	11	3.1×10^{-2}	1.25	70
0.5	-	mixed	DWL	7.31	130	91	8.4×10^{-3}	1.38	80
0.5	-	coated	DWL	7.36	129	75	5.8×10^{-2}	1.36	77
0.3	-	coated	DWL	7.40	128	118	3.1×10^{-2}	1.43	82
0.2	-	coated	DWL	7.42	106	102	1.3×10^{-2}	1.47	86

GD : Green density

GS : Transverse rupture strength

SR : Specific resistance

B : Flux density at 8 000A/m

μ : Permeability at 8A/m, 10kHz

参 考 文 献

- 1) 本間克彦ほか:R&D 神戸製鋼技報, Vol.24, No.2(1974), p.40.
- 2) K. S. Narasimhan : Soft Magnetic Materials 96, Assessing the Business Opportunities, Markets and Technologies for Soft Magnetic Materials 96, (1996)
- 3) 堀江宏道ほか:日本金属学会誌, 第50巻, 第2号(1986), p.127.
- 4) 石原千生ほか:日立粉末冶金テクニカルレポート, No.1(2002), p.32.
- 5) 福井清ほか:東芝レビュー, 第28巻, 第2号(1973), p.228.
- 6) A. Jack :1998 Powder Metallurgy World Congress and Exhibition, Special Interest Seminar, Magnetic and Functional Materials, (1998)
- 7) S. Minett et al. : Metal Powder Report, Special Supplement (2003), p.4.
- 8) L. Hultsman : Proceedings of the 2002 World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials sponsored by the Metal Powder Industries Federation (2002), p.14 - 26.
- 9) P. Lemieux et al. : Advances in Powder Metallurgy & Particulate Material - 2001, part 3 (2001) p.3 - 1.
- 10) 北条啓文ほか:平成14年度春季大会, 粉体粉末冶金協会, 講演概要集(2002), p.245.
- 11) 三谷宏幸ほか:平成14年度春季大会, 粉体粉末冶金協会, 講演概要集(2002), p.67.
- 12) B. Weglinski : Reviews on P/M Physical Ceramics, vol.4, No.2 (1990) p.79.
- 13) 三浦秀士:粉末冶金の科学,(1996), p.200. 内田老鶴圃.
- 14) 高城重彰ほか:粉体および粉末冶金, 第32巻, 第7号(1985), p.259.