研 究

金型潤滑温間成形法により作製した高密度圧粉磁心 (HDMC) の特性

田島 伸^{★1}, 服部 毅^{★1}, 堀田 昇次^{★1}, 近藤 幹夫^{★1}, 岡島 博司^{★2}, 東山 潔^{★2}, 岸本 秀史^{★2}

★1(株)豊田中央研究所, 〒480-1192 愛知県長久手町.

★2トヨタ自動車(株), 〒471-8571 豊田市トヨタ町.

Properties of High Density Magnetic Composite (HDMC) by Warm Compaction Using Die Wall Lubrication

Shin Tajima^{★1}, Takeshi Hattori^{★1}, Shoji Hotta^{★1}, Mikio Kondoh^{★1}, Hiroshi Okajima^{★2}, Kiyoshi Higashiyama^{★2} and Hidefumi Kishimoto^{★2}

★1Toyota Central R&D, Inc., Nagakute-Cho, Aichi 480-1192.

★2Toyota Motor Corporation, Toyota-Cho, Toyota 471-8571.

Received April 16, 2003

SYNOPSIS

Powder magnetic cores (or dust cores and soft magnetic composites (SMC)) are candidate materials for new type motor cores, because they have good points as follows; isotropic magnetic properties, high electric resistivity and easy recycling. However, the materials are hardly used for motors, because both their magnetic flux density and their strength are smaller than those of laminated steel. The small magnetic flux density and strength were caused by small green density. In order to increase the green density, it needs reduction the admixed lubricant and high-pressure compaction. We developed a new warm compaction using die wall lubrication with lithium stearate. According to the method, very high-density compact could be fabricated without scoring. In this instance a raw material was Somaloy500 without resin, the powder magnetic core compacted at 1176 MPa with heat treatment at 673 K had properties as follows; $d=7.77 \text{ Mg/m}^3$, $\mu_m=1000$, $B_{2k}=1.41 \text{ T}$, $B_{5k}=1.61 \text{ T}$, $B_{10k}=1.80 \text{ T}$, $H_c=300 \text{ A/m}$, $\rho=4 \mu\Omega\text{m}$, $\text{TRS}=210 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max}=150 \text{ MPa}$, and in case of $B_m=1 \text{ T}$ and $f=400 \text{ Hz}$, $P_c=900 \text{ kW/m}^3$, $P_h=350 \text{ kW/m}^3$, $P_e=550 \text{ kW/m}^3$.

KEY WORDS

powder magnetic core, warm compaction, die wall lubrication, magnetic properties, high density

1 緒 言

粉末冶金製品の性能を高めるためには密度の向上が不可欠である。著者らは金型面の潤滑剤としてステアリン酸リチウムを用いた温間成形を行い、高圧成形において抜出力が低下するという、極めて特異な現象を見出した。その結果、2000 MPa までの超高圧成形が可能となり、純鉄粉の成形体では密度 7.85 Mg/m^3 が得られることを報告した¹⁾。

近年、粉末冶金製品の一つとして、圧粉磁心が注目されている。この材料は、表面を絶縁層でコーティングした磁性粉末、もしくは磁性粉と絶縁材料の混合粉末を成形して作製されている。それゆえ、(1)等方的な磁気特性を有し、3次元的な磁気回路の設計が可能となる²⁻⁶⁾、(2)電気抵抗率が高いため高周波領域で低損失である⁷⁻¹¹⁾、(3)破砕が容易でリサイクル性が良好である^{2,12)}、といった特徴を有する。これまでの圧粉磁心は、優れた高周波特性を活かして、電子機器用のチョー

クコイルへの応用が盛んであった⁹⁻¹¹⁾。

最近では、圧粉磁心の等方的な磁気特性を利用したモータコアの小型化への応用が検討されており、一部では既に実用化の段階にある^{2,12)}。特に自動車用部品は、環境対策のために、小型モータの軽量化やリサイクル率の向上が期待されており、圧粉磁心の特長が活用できる用途である。しかしながら、現状の圧粉磁心は鉄板や珪素鋼板などに比べ、磁束密度や強度が低いなどの問題がある。圧粉磁心の磁束密度および強度向上には、高密度化が必要であり、その点の検討がなされている¹³⁻¹⁵⁾。

現状の圧粉磁心には、絶縁性の確保と同時に成形時の潤滑性のために、特殊な樹脂が添加されている。さらに、一般的には樹脂の添加が強度向上に有効であるとも考えられている^{13,14)}。樹脂を添加することにより、見掛け上粉末粒子間の接合を良好にし、強度を向上させる効果はあるものの、樹脂の強度以

上に強化することはできない。一方で、この樹脂の添加が高密度化を妨げ、さらに圧粉磁心の熱処理条件を制限している。従って、樹脂添加の廃止が、圧粉磁心の特性向上のカギであるといえる。

金型潤滑成形を利用すれば、樹脂無添加の高密度な圧粉磁心を作製することができるはずである。圧粉磁心のモータ・アクチュエータへの応用を考慮すると、密度と特性の関係を解明することは、工業的・学術的にも極めて重要である。本研究では、樹脂を添加しない絶縁被覆鉄粉のみを用いて、金型潤滑温間成形法により作製した高密度圧粉磁心材料の強度および磁気特性について報告する。なお、我々は今回の高密度圧粉磁心を **High Density Magnetic Composite (HDMC)** と呼ぶことにした。

2 実験方法

Fig.1 に、実験手順を示す。原料磁性粉には、ヘガネス社製の絶縁被覆鉄粉 Somaloy500²⁾ を用いた。この粉末の SEM および TEM 写真を Fig.2 に示す。各粒子は水アトマイズ特有の形状を有していた。表面に約 10 nm の非晶質な皮膜が観察され、その皮膜からオージェ分光分析により Fe, P, O が検出された。なお、Somaloy500 の表面絶縁層の詳細は、ヘガネス社より発

Fig.1 Experimental procedure.

Fig.2 SEM photograph of Somaloy500 and TEM photograph of insulator on surface of Somaloy500.

表されていない。また、比較材として、潤滑剤 Kenolube を Somaloy500 に 0.5% 添加した粉末および純鉄粉の ABC100.30 も使用した。

この原料磁性粉末からステアリン酸リチウムを用いた金型潤滑温間成形 (Warm Compaction-Die Wall Lubrication: WC-DWL)¹⁾ により試料を作製した。粉末および金型の加熱温度は 423 K とし、成形圧力は 392~1960 MPa と変えて成形した。なお、Kenolube を添加した粉末は、通常の室温成形である。試料の形状は、円柱形状 $\phi 17 \times t 17$ mm (密度測定用)、リング形状 $\phi 39 - \phi 30 \times t 5$ mm (磁気特性測定用)、角型 $10 \times 10 \times 55$ mm (比抵抗および強度測定用) とした。成形後、673 K で 1.8 ks の大気中の熱処理を行った。得られた試料について以下の評価試験を行った。

密度はアルキメデス法で測定した。なお、Somaloy500 の場合、絶縁皮膜は非常に薄いため理論密度は、純鉄と同じ (7.86 Mg/m^3) とした。

抗折力 (TRS) および疲労強度は、三点曲げで評価し、支点間距離は 40 mm、応力の負荷面は金型面とした。疲労試験には、19.6 kN の東京衡機製共振式の試験機を用いた。試験速度は 90 Hz、応力比は $R=0.1$ の条件で行った。

電気抵抗率 (ρ) は、アドバンテスト社製のマイクロオームメータを用い、4 端子法で測定した。本材料系のような複合材料では、 ρ の測定方法、定義が明確ではないが、上記装置の 4 端子法で測定した値をそのまま材料の ρ とみなした。

静磁場特性の測定にはリング試料に、 $\phi 0.5$ mm の被覆銅線を、検出 90 ターン、励磁 250 ターン巻いて測定試料とした。測定装置は東英工業製の直流自記磁束計 TRF-5 を使用した。ヒステリシス損 (Ph) は、静磁場でのヒステリシス曲線の面積から求めた。また、保磁力 (B_H) は、最大磁場 2 kA/m で描いたヒステリシスループから求めた値とした。なお、本文中で B_{sk} は、X kA/m での磁束密度を示す。

交流磁場特性の測定には前述のリング試料を用い、岩崎通信機製 SY-8232 を使用した。渦電流損 (Pe) は、残留損がないと仮定して、交流での鉄損 (Pc) から上記の静磁場で求めたヒステリシス損 (Ph) を差し引いて求めた。なお、圧粉磁心では、形状や測定条件が統一されておらず、交流磁場特性での各因子などが十分検討されていないため、周波数を変えて解析的に Ph と Pe を求めることは行わなかった。

3 実験結果および考察

3.1 金型潤滑温間成形法による Somaloy500 の成形挙動

Fig.3 に、金型潤滑法と内部潤滑剤添加の場合の成形圧力と成形体密度の関係を示す。内部潤滑剤が存在すると理論密度が低くなり、成形圧力を増加させても、成形体密度は 7.5 Mg/m^3 程度で飽和し、それ以上には増加しなかった。一方、金型潤滑法では、成形体密度は成形圧力とともに増加し、1960 MPa 成形で 7.84 Mg/m^3 、すなわち相対密度 99.8% の成形体が得られることがわかった。このような高密度圧粉磁心の作製は初めて報告されるものと考えている。

Fig. 3 Relationship between green density and compacting pressure (◆: this method (WC-DWL), ■: conventional method).

Fig. 4 Relationship between ejection force and compacting pressure (◆: this method (WC-DWL), ■: conventional method).

Fig.4に、成形圧力と抜出力の関係を示す。内部潤滑剤を添加した粉末の室温成形の場合には、成形圧力の増加とともに抜出力も大きく増加した。そして、800MPa以上で成形した試料の表面にはかじりも観察された。これに対して、金型潤滑法では純鉄粉と同様に800MPa以上の成形圧力になると、抜出力が著しく減少するという特異な現象が確認された。その抜出力は、5MPa程度であり、まったくかじりを生ずることもなく、1960MPaまでの高密度圧粉磁心(HDMC)が容易に作製できることがわかった。

3.2 機械的強度と成形体密度の関係

Fig.5に、Somaloy500を用いた場合のHDMCの抗折力(TRS)と成形体密度の関係を示す。TRSは成形体密度とともに増加し、さらに7.6Mg/m³付近から急激に増加して100MPa以上となり、従来の内部潤滑剤添加試料^{14,15)}では得られなかった非常に高強度の成形体を作製できることがわかった。さらに、673Kの熱処理により、TRSは約30~50%増加し、1176MPa成形試料($d=7.77\text{Mg/m}^3$)で200MPa以上の値を示した。これらは、樹脂を添加して作製した試料よりも高い値であることから、圧粉磁心の強度向上には、樹脂添加が必須なのではなく、密度の向上が不可欠であることを明らかにした。また、熱

Fig. 5 Effect of green density on TRS of HDMC (●: as compacted, ○: heat treatment at 673 K).

Fig. 6 Relationship between bending fatigue strength and TRS of HDMC (dot: as compacted, open: heat treatment at 673 K).

処理による強度向上の機構は不明であるが、粉末同士が著しく接近しているため、部分的な焼結が生じた可能性もあると考える。

前述の抗折試験片を用いて3点曲げ疲労試験を行ったところ、通常の焼結材のように10⁷回繰り返し応力を付与しても破壊しない疲労限が観察された。Fig.6に、1176MPaで成形したHDMCの曲げ疲労強度(最大応力 $\sigma_{\max}$)とTRSとの関係を示す。なお、参考までに純鉄粉成形体のデータも併記した。疲労強度は、 $\sigma_{\max}=0.75 \cdot \text{TRS}$ の関係にあることが分かった。

3.3 磁束密度と成形体密度の関係

Fig.7に、HDMCの磁束密度 B_{10k} と成形体密度の関係を示す。 B_{10k} は、成形体密度とともに直線的に増加し、10kA/mのような高磁場での磁束密度は、成形体密度によりほぼ決定されることがわかった。データは省略したが673Kで熱処理を行っても、 B_{10k} が変化しなかったことも、成形体密度が B_{10k} にとっての主要因であることを示している。1960MPa成形した密度7.84Mg/m³の試料の B_{10k} は、1.84Tであった。この値は電磁軟鉄に匹敵しており、成形体密度から考えても、鉄系圧粉磁心の限界値を示していると考えている。

Fig.7 Effect of green density on B_{10k} of HDMC without heat treatment.

Fig.8 Effect of green density on B_{2k} of HDMC (●: as compacted, ○: heat treatment at 673 K).

Fig.8に、より低磁場側である B_{2k} と成形体密度の関係を示す。 B_{2k} も、成形体密度の増加とともに増加している。しかも、密度が 7.6 Mg/m^3 以上では、その増加の傾きが大きくなっていることがわかった。 7.6 Mg/m^3 以上では、鉄粉同士がかなり接近し、磁気的な相互作用が強まり、透磁率が向上したためと考えている。 2 kA/m のような低磁場下の磁束密度は、透磁率の影響を大きく受けるためである。また、 673 K 熱処理により、 7.0 Mg/m^3 以下では B_{2k} の向上は認められなかったが、より高密度の場合は B_{2k} が増加することがわかった。これらの磁束密度と成形体密度の関係および3.2の強度と成形体密度の関係は、 7.6 Mg/m^3 以上に成形することが鉄系圧粉磁心の高性能化の鍵であることを示している。

Fig.9に、 1176 MPa 成形、熱処理有無のHDMCの初磁化曲線を示す。最大透磁率(μ_m)は、熱処理前で700、熱処理後には1000となった。磁束密度は、 5 kA/m 以上で熱処理の有無にか

Fig.9 Initial magnetization curves of HDMC compacted at 1176 MPa (●: as compacted, ○: heat treatment at 673 K).

Fig.10 OP and TEM photographs of HDMC compacted at 1176 MPa with heat treatment at 673 K .

かわらずほぼ同じ値であった。熱処理後の B_{2k} は 1.41 T 、 B_{5k} は 1.61 T であった。 5 kA/m 以上では溶製材並みの値を有しており、高磁界での使用では溶製材と同等の磁束密度が期待できることがわかった。Fig.10に、Fig.9熱処理試料の光学顕微鏡組織およびTEM写真を示す。ほとんど気孔のない緻密な組織であり、高磁束密度と対応している。また、TEMより粒界に厚さ約 10 nm の絶縁皮膜が観察された。本実験による高圧成形、熱処理後も絶縁皮膜は形態を保っており、開発した金型潤滑間成形法がSomaloy500に適用可能であることがわかった。

3.4 鉄損と成形体密度の関係

Fig.11に、HDMCの1サイクルでのヒステリシス損(Ph, 最大磁束密度 $B_m=1 \text{ T}$)と成形体密度の関係を示す。Phは成形体密度の増加とともに低下した。高密度化により透磁率が増加し、 1 T 発生に必要な印加磁場が少なくなった結果と考えている。この結果も、高密度成形が圧粉磁心の高性能化に重要であることを示している。この成形体密度向上によるPh低減も今まで報告されていない新規な現象であった。 673 K 熱処理により、Phが10%程度減少することもわかった。熱処理による歪取り効果により、透磁率が向上し、保磁力が低減したためと考えている。しかしながら、これらのPhは、珪素鋼鉄など

Fig.11 Effect of green density on hysteresis loss per one cycle of HDMC (● : as compacted, ○ : heat treatment at 673 K).

Fig.12 Effect of green density on resistivity of HDMC (● : as compacted, ○ : heat treatment at 673 K).

に比べ数倍大きい値であった。なお、最大磁場 2kA/m での保磁力は、成形体密度にそれほど影響されず、成形のままで、約 360 A/m、熱処理後では約 300 A/m であった。

Fig.12に、HDMCの電気抵抗率(ρ)と成形体密度の関係を示す。HDMCの ρ は、樹脂が添加されていないためそれほど高くなく、成形のままで 20 から 10 $\mu\Omega\text{m}$ であり¹⁵⁾、成形体密度の増加とともに減少した。また、673 Kでの熱処理により ρ は約半分となった。特に、成形のままの試料では 7.7 Mg/m^3 、熱処理試料では 7.5 Mg/m^3 あたりで ρ が急激に減少した。密度が高くなるほど未被覆部分の接触や絶縁層の剥離が生じるためと考えている。

今までの結果から、HDMCの強度および磁気特性は、密度の増加とともに向上することがわかった。一方、密度自体は成形圧力 1200 MPa 以上で、約 7.8 Mg/m^3 となり、ほぼ飽和傾向にあるため、HDMCの特性も成形圧力 1200 MPa 以上ではほぼ飽和した。さらに、1200 MPa 以上の成形は、金型寿命などを考慮すると好ましくない。そこで、密度 7.77 Mg/m^3 となる 1176

Fig.13 Relationship between iron loss per one cycle of HDMC at 1176 MPa and frequency (● : as compacted, ○ : heat treatment at 673 K).

Fig.14 Hysteresis loops of HDMC; $B_m=1\text{ T}$ (Compacting pressure: 1176 MPa, Heat treatment: 673 K).

MPa 成形試料について詳細に検討することにした。

Fig.13に、そのHDMCの $B_m=1\text{ T}$ 時の1サイクル当りの鉄損(P_c)と周波数の関係を示す。Y軸の切片は、 Ph (直流磁化曲線から求めた値)を表し、それ以上の部分が渦電流損(Pe)に相当する。周波数とともに、1サイクル当りの P_c が一次関数的に増加していることがわかる。この結果は、本試料の P_c と周波数の関係が、1 kHz 以下では、

$$P_c/f = Rh/f = Pe/f = \alpha + \beta f \quad (\alpha, \beta: \text{定数}) \quad (1)$$

に対応していることを示している。また、熱処理をした試料では ρ が低いため、高い周波数での損失が大きく、特に 400 Hz 以上では P_c の主体が Pe であることがわかった。

Fig.14に、1176 MPaで成形し、673 K熱処理した圧粉磁心の 50 Hzと 400 Hzの交流磁場ヒステリシスループを示す($B_m=1\text{ T}$)。50 Hzでは、静磁場的なヒステリシスループであったが、400 Hzでは Pe が増加してラウンド化していることがわかる。本試料の

400 Hz での P_c は, 900 kW/m^3 であり, その内訳は, P_h が 350 kW/m^3 , P_e は 550 kW/m^3 であった.

3.5 考察

得られた HDMC の磁束密度は, 5 kA/m 以上では溶製材や鉄鉱並みであり, 電磁部品として静磁場的には同等の吸引力やトルクが期待できることがわかった. 応用に関して, もうひとつ重要な点は, 使用可能な周波数範囲であるため, その点について考察する.

例えば, 今回作製した HDMC は, $t=5 \text{ mm}$ の試料で, 1176 MPa 成形の場合, $\mu_m=700 \sim 1000$, $B_{5k}=1.6 \text{ T}$, $B_{10k}=1.8 \text{ T}$, $\rho=4 \sim 11 \mu\Omega\text{m}$ の特性を示す. 一方, 自動車用小型モータのコア (たとえば厚さ数~十数 mm の場合を考える) には, 厚さ 1 mm 程度の冷間圧延鋼板がよく使用されており, これらは $\rho=0.1 \mu\Omega\text{m}$, $B_{10k}=1.8 \text{ T}$ 程度の特性を有している. これらのモータの使用周波数は, その種類にも依存するが, 数百 Hz 程度である.

HDMC と鋼板について比較検討するために, P_e について考える. P_e は, 磁束密度と周波数が一定の場合, ρ と形状の影響を受ける. たとえば,

$$P_e \propto B_m^2 \cdot f^2 \cdot d^2 / \rho \quad (2)$$

(ここで, B_m : 最大磁束密度, f : 周波数, d : 板厚, ρ : 電気抵抗率) の関係が良く知られており, P_e は, ρ に反比例し, d の 2 乗に比例する. 鋼板の場合, ρ が低いので d を薄くして積層し, P_e を減少させる. 一方, 圧粉磁心の場合, 鋼板に比べて大きな形状で使用するため d の項が大きくなり, P_e を低減させるには高比抵抗が必要となる. 今回の HDMC の場合, 厚さ 1 mm 程度の冷間圧延鋼板とくらべると, ρ が数十~100 倍程度大であるが, コア形状から, d の項が数~十数倍大きいことになる. つまり, 式 (2) から, d と ρ の効果がほぼ相殺されるため, 両材料の P_e は同等レベルと考えることができる. 以上の考察から今回報告した HDMC は, 数~十数 mm 程度の形状の場合, 冷間圧延鋼板と同等レベルの数百 Hz 程度の周波数まで使用可能と考えている.

結果として, HDMC は, 従来の圧粉磁心を凌駕する高強度であり, 溶製材とくらべて 5 kA/m 以上で同等の磁束密度, 一桁高い電気抵抗率を有することがわかった.

4 ま と め

金型潤滑温間成形法により, Somaloy500 を原料粉として高密度圧粉磁心 (HDMC) を作製し, その機械的強度および磁気特性を調べ, 以下の結論を得た.

- (1) HDMC の抗折力, 磁束密度, ヒステリシス損は, 成形体密度の増加とともに向上することがわかった. 特に, 密度 7.6 Mg/cm^3 以上での特性向上が顕著であることも見出した.
- (2) 抗折力は, 密度の増加に伴い増加し, さらに 673 K 熱処理後に 200 MPa 以上と非常に高い値となった. さらに, 圧粉磁心では始めて曲げ疲労強度を測定し, $\sigma_{\max}=0.75 \cdot \text{TRS}$ の関係があることを見出した.
- (3) HDMC の磁束密度は, 5 kA/m 以上では鉄系の溶製材や鋼

鉄並みであった.

- (4) HDMC の電気抵抗率は, $3 \sim 20 \mu\Omega\text{m}$ であり, 樹脂添加圧粉磁心にくらべて低く, 高周波領域では渦電流損が急激に増加した.
- (5) 成形圧力: 1176 MPa , 熱処理条件: 673 K , 1.8 ks , 大気中で得られた HDMC は, $d=7.77 \text{ Mg/m}^3$, $\mu_m=1000$, $B_{2k}=1.41 \text{ T}$, $B_{5k}=1.61 \text{ T}$, $B_{10k}=1.80 \text{ T}$, $bH_c=300 \text{ A/m}$, $\rho=4 \mu\Omega\text{m}$, $\text{TRS}=210 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max}=150 \text{ MPa}$, そして, $B_m=1 \text{ T}$, $f=400 \text{ Hz}$ での損失: $P_c=900 \text{ kW/m}^3$, $P_h=350 \text{ kW/m}^3$, $P_e=550 \text{ kW/m}^3$ の特性を有していた.

文 献

- 1) M.Kondoh and H.Okajima: "High density powder compaction using die wall lubrication", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (2002)3-47-3-54.
- 2) L.Hultman and Z.Ye: "Soft magnetic composites properties and application", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (2002)14-1-14-16.
- 3) C.H.Sellers, T.A.Hyde and D.E.Gay: "Soft Magnetic Composites for Applications in AC Electrical Components", *Industrial Heating*, May(1998)45-49.
- 4) H.R.Kodal, J.H.Bularzik and R.F.Krause: "High-Density Pressed Soft Magnetic Components for AC and DC Applications", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (1997) 1-61-1-76.
- 5) S.Pelletier, L.-P.Lefebvre and C.Gelinas: "Resin impregnation of soft magnetic materials for low frequency applications", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (1997) 1-27-1-36.
- 6) C.Gelinas, F.Chagnon, S.Pelletier and L.-P.Lefebvre: "Iron-resin composites for high frequency AC magnetic application", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (1997) 1-37-1-45.
- 7) M.Yamamoto, H.Tsuchiya and S.Nakaura: "Development of electric power steering torque sensor using insulated iron powders", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (2002)14-80-14-85.
- 8) 石原千生, 浅香一夫, 浦尾亮一: "圧粉末磁心の鉄損低減方法の研究", 粉体および粉末冶金, 49(2001)14-18.
- 9) 尾崎由紀子, 藤長政志: "ノイズフィルタ用高透磁率鉄粉「KIP MG270H」の磁気特性", 川崎製鉄技報, 31(1999)130-134.
- 10) 三谷宏幸, 花木敦司, 家口浩, 関義和: "絶縁処理鉄粉製圧粉末磁心の磁気特性", 神戸製鋼技報, 48(1998)25-28.
- 11) 斉藤貴伸, 矢萩慎一郎: "Fe-Si-Al 系噴霧粉を用いた圧粉磁心の電磁気特性", 電気製鋼, 69(1998)181-187.
- 12) 鈴木将生, 中元徳也: 自動車技術会 2002 年度秋季大会前刷集, (2002)20025412.
- 13) 石原千生, 石井礼, 浅香一夫: "使用周波数領域に応じた

圧粉磁心の磁気・電気・機械的特性に及ぼす樹脂、絶縁処理および鉄粉の影響", 日立粉末冶金テクニカルレポート, 1(2002)32-38.

- 14) Y.Shimada, H.Oyama, T.Nishioka and A.Yamakawa: "Development of a High-Magnetic Performance P/M Soft

Magnetic Material", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Material*, (2002)14-39-14-52.

- 15) O.Andersson: "High velocity compaction of soft magnetic composites", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (2002)14-60-14-72.