

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820368

研究課題名(和文) 巨大変形による圧粉体のポアフリーメカニズム解明と高磁気特性圧粉磁心の成形への応用

研究課題名(英文) Consolidation by severe plastic deformation in compaction of magnetic powder cores and bonded magnets

研究代表者

前野 智美 (Maeno, Tomoyoshi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80505397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：圧粉磁心やボンド磁石では粉末中に強度を確保するためのボンド剤が添加されており、磁性粉末割合が低下によって磁気特性が低下してしまう。ボンド剤の低減によって磁性粉末密度を向上することができるが、成品強度の不足や、成形体を金型から取出す際に焼付きが生じる問題がある。低いボンド剤含有量においても成品強度を確保するために、強加工によって粉末同士の結合力や密度を向上する強加工圧粉を開発した。加えて、圧粉体拔出時の摩擦を減らすために締緩め構造を持つ金型を開発した。摩擦援用押しや背圧付加押しを応用した強加工によって、圧粉体の強度が大きく向上し、ボンド剤含有量を低減することができた。

研究成果の概要(英文)：The magnetic powder cores and the bonded magnets are consolidated with a binder such as an epoxy resin after the compaction. However the magnetic performance is decreased since the proportion of the magnetic powder in a magnet is reduced by the addition of the binder. Reduction of the binder will lead to a reduction in strength of the products and an increase of the friction during ejection after compaction. To improve strength of the bonded magnets and magnetic powder cores having low percentage of the binder. A consolidation process by severe plastic deformation in compaction was developed. In addition, the friction during ejection was reduced by changing the inner diameter of a die before and after compaction using a shrinkage ring.

研究分野：塑性加工

キーワード：圧粉成形 強加工 粉末固化 焼付き抑制

1. 研究開始当初の背景

自動車の燃費向上のためにハイブリッド自動車や電気自動車が注目されており、大容量のモーターが用いられている。モーターの効率において磁心の磁気特性が重要である。一般に磁心は電磁鋼板を積層した積層型磁心が良く用いられているが、電磁鋼板は高価であり設計自由度も低い。大容量のモーターなどにおいて、最近では鉄粉末を固めた圧粉磁心が注目されている。圧粉磁心は圧粉だけでは強度が十分でなくボンド剤によって固められている。圧粉磁心の磁気性能は圧粉体の密度と形状の影響を強く受け、高密度にすることによって磁気特性を向上できる。しかしながら、ボンド剤の介在によって磁性粉末の割合が低くなってしまっている。

自動車には低容量の小型モーターも数多く使われており小型化、軽量化のために、小型モーターも効率化が望まれている。小型モーターにはボンド剤で磁性粉末を固めたボンド磁石が用いられているが、これもボンド剤の介在によって磁性粉末の割合が低下して磁気特性が低下してしまっている。

磁性粉末の密度を向上するために、ボンド剤を低減することが考えられるが、圧粉体の強度が低下するだけでなく、ボンド剤は圧粉成形時の潤滑剤の役目も担っており、圧粉成形時の金型との焼付きの発生などの問題があり簡単ではない。

アルミニウム粉末などに大きな塑性変形を加え、新生面を露現させることによって粉末同士を結合させる方法が報告されているが、磁心に使われるような鉄系粉末や延性の非常に低い磁性粉末などでの報告はほとんどされていない。

2. 研究の目的

本研究では、圧粉体の磁性粉末密度を増やすために、低ボンド含有の粉末の圧粉成形において、十分な圧粉体強度を達成するために強加工圧粉成形を行い粉末の結合力を向上させた。鉄系磁性粉末においては、粉末に大きな塑性変形を加え、ボンド剤無しに粉末を冶金的に結合する摩擦援用押出しを用いた強加工圧粉方法を開発する。また、ネオジウムボンド磁石の圧粉成形においては背圧付加押出しを用いた強加工圧粉によって、粉末を流動させ、粉末の再配置と粉末微細化によって圧粉密度と圧粉体強度を向上させる。加えて、圧粉体拔出時の潤滑剤としても作用するボンド剤を減らすために、ダイス締緩めによる拔出し荷重の低減を行う。

3. 研究の方法

潤滑剤の役目も担うボンド剤の割合を減らすために、ダイス締緩めによる圧粉体拔出時の摩擦低減方法を開発し、締緩めありとなしにおける、拔出し荷重および拔出し後の圧粉体表面性状を評価した。

鉄系磁性粉末をボンド剤なしに固化するために摩擦援用押出しを応用した強加工圧粉を行い円筒容器形状の圧粉体の成形を行った。結合を評価するために硬さ分布を測定し、断面組織について観察した。また円筒部を半径方向に潰す試験を行った。

低ボンド含有のNd-Fe-B磁性粉末を背圧を付加しながら押出し加工をする強加工圧粉を行い、円柱および円筒形状の圧粉体を成形し、単純圧粉と密度、圧縮強度、およびせん断強度を比較した。

4. 研究成果

(1) ダイス締緩めによる拔出し焼付き抑制

ダイスの締緩めによる拔出し荷重の低減方法を図1に示す。ダイスを締めリングに圧入し、ダイスの内径を小さくした状態で圧粉成形を行う。締めリングを外すとダイスは内径が戻り、圧粉体とダイス内面との接触が弱くなり拔出し時の摩擦抵抗が減る。ダイスには焼入れ焼戻しをしたSKD11、サーメット、超硬合金を用い、締めリングにはSKD11未熱処理材を用いた。締付けは、締めリングの軸方向押込み量から決まる公称締め量 $\Delta r = (\text{ダイス圧入量}) \times \tan 3^\circ$ で調整した。粉末には平均粒径 $90\mu\text{m}$ の電解鉄粉末を約 6g 用い、潤滑剤は用いずに平均成形面圧 1GPa で成形し、相対密度、高さはそれぞれ約 0.97 、約 10mm であった。

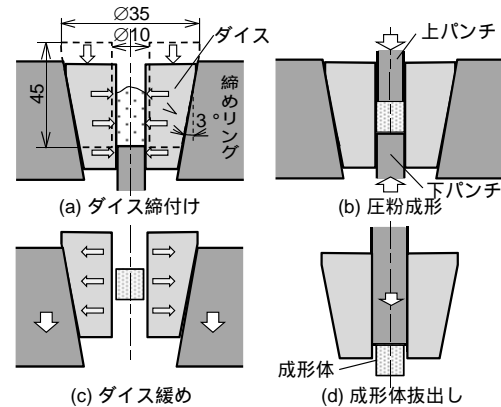


図1 ダイス締緩めによる拔出し摩擦低減方法

図2に各材質のダイスにおける締緩めなしの拔出し荷重と拔出し後の圧粉体を示す。サーメットと超硬の拔出し荷重はあまり変わらないが超硬では焼付きが生じた。また、SKD11においては激しい焼付きが生じた。

SKD11金型におけるダイス内径、圧粉体直径に及ぼす公称締め量の影響と $\Delta r = 70, 79\mu\text{m}$ で成形された圧粉体を図3に示す $\Delta r = 79\mu\text{m}$ では焼付きが生じなかった。焼付きの生じやすいSKD11金型においても、元のダイス内径よりも圧粉体直径が小さくなる程度のダイス締緩めによって焼付きを抑制することができた。

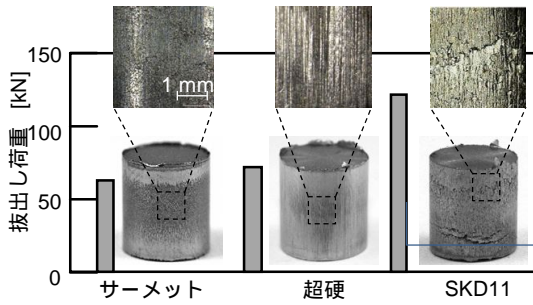


図 2 各材質のダイスにおける締緩めなしの抜き出し荷重と抜き出し後の成形体

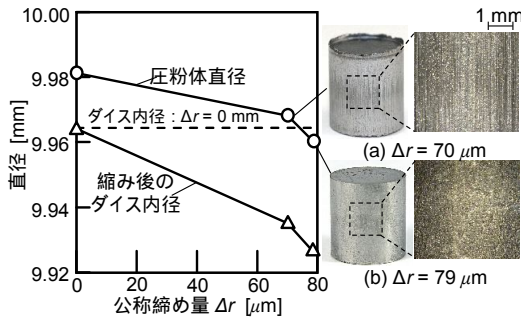


図 3 SKD11 金型におけるダイス内径と圧粉体直径に及ぼす公称締め量の影響

(2) 摩擦援用押しを用いた強加工圧粉による鉄系磁性粉末の圧粉固化

摩擦援用押しを用いた強加工圧粉による円筒容器圧粉体成形方法を図 4 に示す。ダイス内に充填した粉末を上下のパンチで圧縮してダイス内壁に高面圧で押付けた状態で下パンチを徐々に押下げる。側壁に接触している粉末はダイスとの摩擦によってせん断を受けるため比較的小さな圧力で薄肉円筒容器を成形できる。5g の電界鉄粉を平均面圧 1GPa で圧粉した後に、下パンチを下げて円筒容器を成形した。押し出し成形中の焼付きを抑制するためにダイスはサーメットダイスとし、抜き出し時の容器の焼付きと破損を防止するため $\Delta r = 43 \mu\text{m}$ のダイス締緩めを適用した。押し出し比はおよそ 5.3 であり、容器側壁高さを約 20 mm とした。

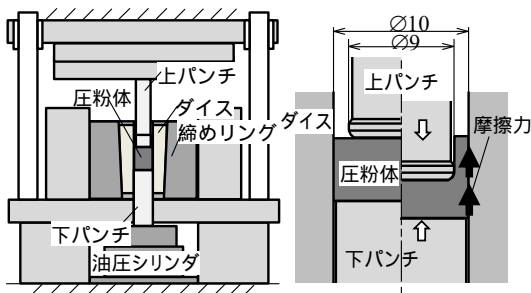


図 4 摩擦援用押しを用いた強加工圧粉による円筒容器圧粉体成形方法

ダイス締緩めありとなしで成形した円筒容器圧粉体を図 5 に示す。ダイス締緩めなしでは割れを生じており、焼付きも生じた。一方、ダイス締緩めありでは割れや焼付きは発生せずに容器の成形および抜き出しを達成することができた。

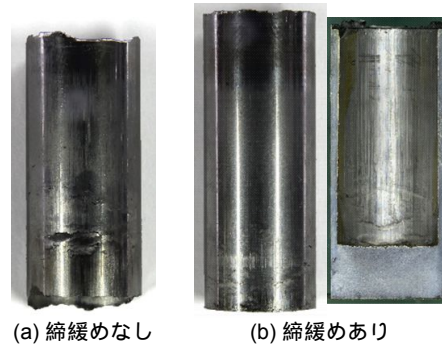


図 5 ダイス締緩めありとなしで成形した円筒容器圧粉体

ダイス締緩めありで成形された容器圧粉体の軸方向および半径方向の断面組織を図 6 に示す。(b)側壁下部の粉末は薄く扁平しており、強い塑性変形を受けている。半径方向断面において界面が部分的になくなっており冶金的な結合が見られる。また、側壁部分と底部分の相対密度はそれぞれ 0.99 および 0.98 となっており非常に高密度になっている。

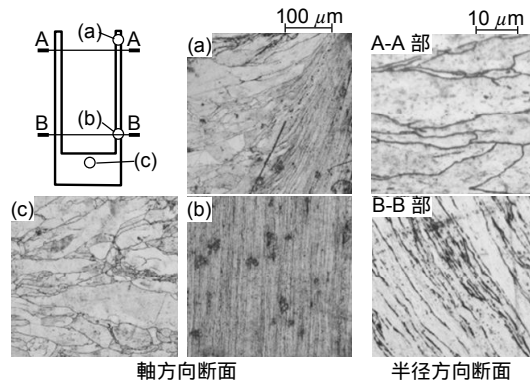


図 6 締緩めありで成形された容器圧粉体の軸方向および半径方向の断面組織

図 7 に容器圧粉体側壁部分の半径方向圧縮における荷重-ストローク曲線を示す。容器圧粉体の上部 5 - 10mm の範囲を切り出して圧縮した。比較として S10C の丸棒から切り出した円環の結果も示す。S10C を圧縮すると約 0.2kN で塑性変形した。一方、圧粉体は 0.3kN までほとんど塑性変形を示さず、急激な荷重の低下を示して割れたが S10C に比べ高い強度を有していた。

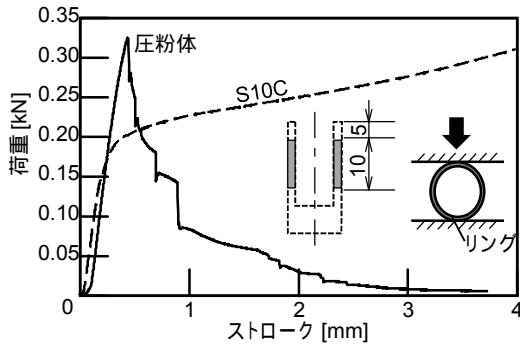


図 7 容器圧粉体側壁部分の半径方向圧縮における荷重-ストローク曲線

(3) Nd-Fe-B 磁性粉末の背圧付加押しを用いた強加工圧粉による円柱圧粉体の成形

単純圧粉および背圧付加押しによる円柱圧粉体成形方法を図 8 に示す。単純圧粉は上パンチの圧縮により圧粉成形を行う。背圧付加押し強加工圧粉では粉末を流動させて粉末の再配置および微細化させるために、面圧 1 GPa で予備圧粉後に、下パンチで一定の背圧を付加しながら上パンチを押し込み、材料を流動させる。どちらの成形方法も成形終了時の下パンチの平均面圧を P として評価を行った。

使用した Nd-Fe-B 磁性粉末を図 9 に示す。エポキシ系ボンド剤が 4 vol% 添加されている。平均粒径は 200 μm であり、各成形方法において 5 g の粉末を用いた。また、成形後には真空中で 180 $^{\circ}\text{C}$, 1h の熱硬化処理を行っており、各評価は熱硬化処理後に行った。

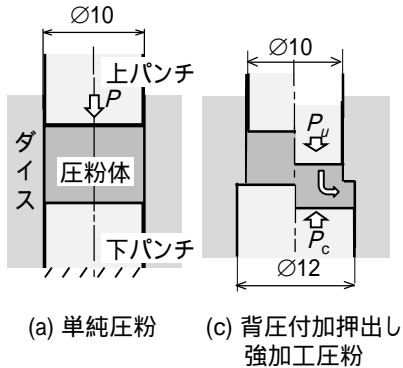


図 8 磁性粉末円柱圧粉体の成形方法

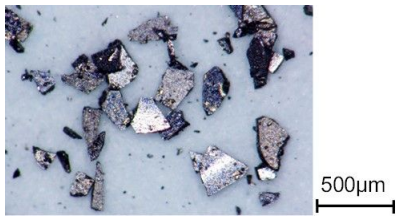


図 9 Nd-Fe-B 磁性粉末 (ボンド剤 0.5 wt%)

単純および強加工圧粉によって整形された圧粉体を図 10 に示す。強加工圧粉では、角部が未充填となった。



(a) 単純, $P = 1.2\text{GPa}$ (b) 強加工, $P = 0.7\text{GPa}$

図 10 単純および強加工圧粉された円柱圧粉体

単純および強加工圧粉された圧粉体の密度および最大せん断応力と下パンチ面圧の関係を図 11 に示す。圧粉体密度はアルキメデス法を用い、最大せん断応力は圧粉体中央を縦方向にせん断した。どちらの成形法も下パンチ面圧とともに密度が上昇している。背圧付加押しによってわずかであるが密度の向上が見られた。一方、最大せん断応力は単純圧粉に対して約 40% と大きく向上した。

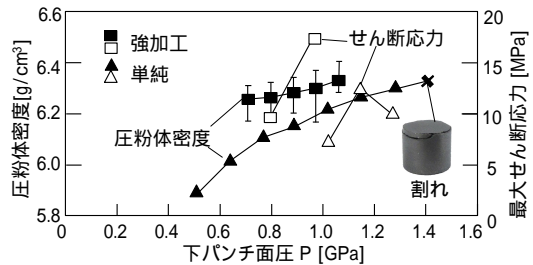
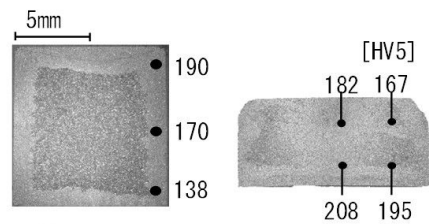


図 11 単純および強加工圧粉された圧粉体密度と下パンチ面圧 P の関係

粉末の硬さではなく、粉末同士の結合の程度を調べるために、硬さ試験を行った。圧粉体断面およびピッカース硬さを図 12 に示す。単純圧粉成形では、内側部分が粗い粉末状であり、硬さ測定が出来なかった。背圧付加押しでは金属光沢が多くの部分で生じており、その部分の硬さも単純圧粉成形に対し高くなった。



(a) 単純, $P = 1.2\text{GPa}$ (b) 強加工, $P = 0.7\text{GPa}$

図 12 圧粉体断面およびピッカース硬さ

圧粉体密度および最大せん断応力に及ぼすボンド剤含有量の影響を図 13 に示す。背圧付加押しではボンド剤を減らすことで密度を増加させることができ、最大せん断応力も単純圧粉以上を保持している。

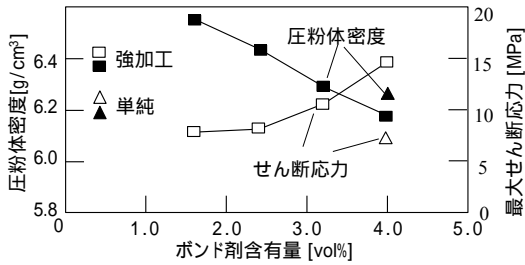


図 13 圧粉体密度および最大せん断応力に及ぼすボンド割合含有量の影響

(4) Nd-Fe-B 磁性粉末の背圧付加押し出しを用いた強加工圧粉による円筒圧粉体の成形

単純圧粉および強加工圧粉による円筒ボンド磁石成形方法を図 14 に示す。単純圧粉は、ピンを挿入した状態で上パンチの圧縮により圧粉成形を行う。強加工圧粉は、スリーブ内で面圧 1 GPa で単純圧粉した後に下パンチで一定の背圧を付加しながら押し出しを行い強加工する。強加工圧粉の押し出し比は 0.68 とした。どちらの成形方法も成形終了時の下パンチの平均面圧を p として評価を比較した。

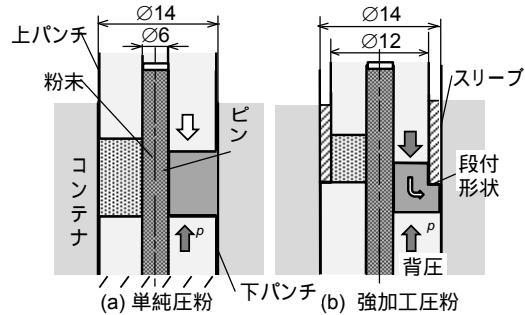


図 14 単純圧粉および強加工圧粉による円筒ボンド磁石成形方法

各成形法における円筒ボンド磁石を図 15 に示す。強加工圧粉は肩部に粉末未充填部が発生した。これは成形後期において角部への十分な粉末の供給が行われなかったためである。以降の評価は上部を精密切断して行った。

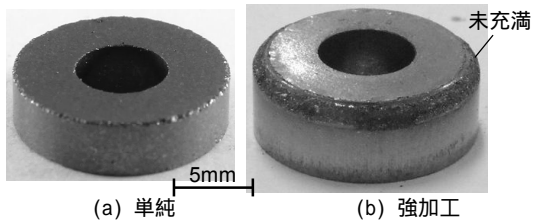


図 15 単純および強加工圧粉で成形された円筒ボンド磁石 ($p = 1.0$ GPa)

円筒ボンド磁石の密度と下パンチ面圧の関係を図 16 に示す。密度はアルキメデス法を用いて測定した。下パンチ面圧とともに密度が上昇している。強加工圧粉を行うことで

単純圧粉に比べ約 3% 密度が向上している。

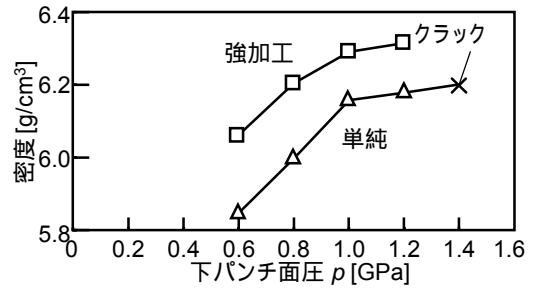


図 16 単純圧粉および背圧付加押し出しにおける円筒ボンド磁石の密度と下パンチ面圧の関係

$p = 1.0$ GPa における円筒ボンド磁石断面を図 17 に示す。円筒ボンド磁石を樹脂埋め、精密切断、研磨後の断面である。単純圧粉は目視において粉末状であり、顕微鏡観察では粒方向が揃っている。強加工圧粉は目視において金属光沢を有しており、顕微鏡観察において粒形は細かくなっており、方向も不規則になっている。

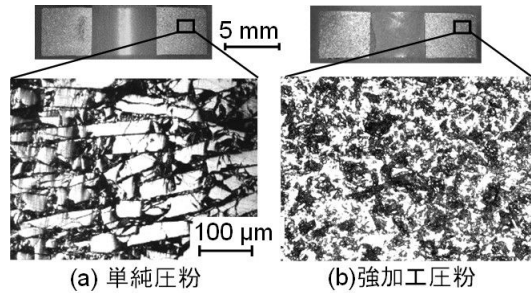


図 17 円筒ボンド磁石断面 ($p = 1.0$ GPa)

単純圧粉および強加工圧粉された円筒ボンド磁石断面のピッカース硬さを図 18 に示す。単純圧粉では全体的に 100HV5 程度となっている。強加工圧粉については、内部において 180HV5 程度まで硬さが向上している。

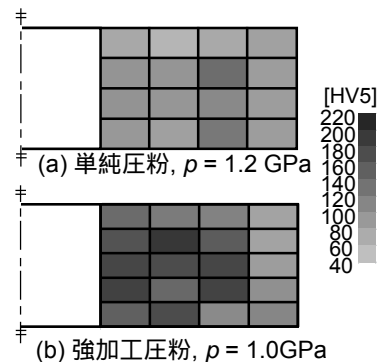


図 18 単純圧粉および強加工圧粉された円筒ボンド磁石断面のピッカース硬さ分布

成形したボンド磁石の強度評価として、JIS Z2570 に基づいた圧環試験を行い円筒ボンド磁石が破壊する際の最大荷重 F から圧環強度 K を求めた。圧環強度と下パンチ面圧の関係を図 19 に示す。どの条件も円筒ボンド磁石は塑性変形をほとんど示さずに割れを生じた。どちらの成形方法も下パンチ面圧と共に圧環強度は向上している。また、単純圧粉に比べ強加工圧粉では約 60% の向上が見られた。

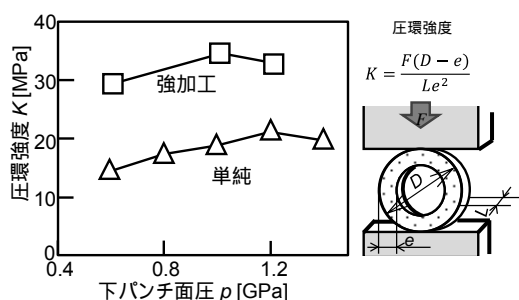


図 19 単純および強加工圧粉された円筒ボンド磁石の圧環強度と下パンチ面圧の関係

圧環試験後の破壊した円筒ボンド磁石を図 20 に示す。単純圧粉は破断面の凹凸が大きいに対し、強加工圧粉の破断面の凹凸は小さくなっている。

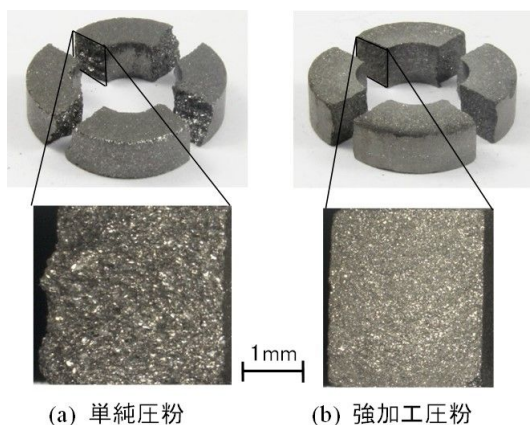


図 20 圧環試験後の円筒ボンド磁石 ($p = 1.0$ GPa)

(5) 結言

圧粉体の磁性粉末密度を増やすために、低ボンド含有の粉末の圧粉成形において、十分な圧粉体結合力を達成するために強加工圧粉成形を行い粉末の結合力の向上を試みた結果以下の知見を得た。

- 1) 強加工圧粉された鉄系磁性粉末圧粉体はボンド剤による結合なしに高い強度を持ち、粒子境界面が部分的にない冶金的な接合が得られた。
- 2) 強加工圧粉された鉄系磁性粉末圧粉体において、大きな塑性変形を受けた部分では相対密度が 0.98 - 0.99 となった。

- 3) 強加工圧粉された Nd-Fe-B ボンド磁石は、単純圧粉されたものに比べて、高強度となった。
- 4) Nd-Fe-B ボンド磁石においてボンド剤含有量を低減し、強加工圧粉を行うことによって十分な圧粉体強度と高い圧粉体密度を両立することができた。
- 5) 強加工圧粉された円筒ボンド磁石の圧環強度は、単純圧粉と比べ約 60% 程度向上した。
- 6) ダイス締緩めを用いることによって、抜き時の焼付きが防止され、薄肉の円筒形状の圧粉成形や粉末中の潤滑成分を低減に有効であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

前野智美, 平山勝也, 森謙一郎, 鉄系粉末の圧粉成形におけるダイス締緩めによる抜き焼付き抑制および摩擦援用容器押出しによる粒子結合化, 第 64 会塑性加工連合講演会, 査読無, pp.181-182.

前野智美, 谷口俊哉, 森謙一郎, 摩擦円用および背圧付加押出しによる Nd-Fe-B 磁性粉末の高結合化, 平成 26 年度塑性加工春季講演会, 査読無, pp.127-128.

前野智美, 谷口俊哉, 森謙一郎, 強加工圧粉による Nd-Fe-B 円筒ボンド磁石の強度向上, 査読無, 平成 27 年度塑性加工春季講演会, pp.201-202.

〔その他〕

ホームページ

背圧付加押出しによるボンド磁石の強度向上

<http://plast.me.tut.ac.jp/sotsuken/h26m2/14taniguchi.pdf>

円筒ボンド磁石の背圧付加押出し加工

<http://plast.me.tut.ac.jp/sotsuken/h26b4/14fujisawa.pdf>

鉄系粉末の圧粉成形におけるダイスの締緩めによる抜き焼付き抑制及び強せん断変形による粒子高結合化

<http://plast.me.tut.ac.jp/sotsuken/h24m2/12hirayama.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前野智美 (MAENO, Tomoyoshi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号: 80505397