粉末焼結体の変形抵抗に対するひずみ速度の影響*

詹 福 賜^{*1}, 山口 克 彦^{*2}
高 倉 章 雄^{*2}, 今 谷 勝 次^{*2}

Effect of Strain Rate on Flow Stress of Sintered Metal Powder Preforms

Fu Shi JAN, Katsuhiko YAMAGUCHI,
Norio TAKAKURA and Shoji IMATANI

Upsetting tests of sintered aluminium and iron powder preforms are carried out using a computer-controlled high-speed press which can generate a constant strain rate throughout an upsetting process. The effect of strain rate on the flow stress and the density change of these sintered metals are experimentally examined under various constant strain rates from 0.001 to 50/s. The effect of strain rate on the material constants N , a and b which are included in the plasticity theory of porous materials presented by Oyane and Shima is also discussed. Experimental results show that the strain rate hardly affects either the density change or the material constants in the Oyane and Shima plasticity theory, but that the flow stress of sintered metal increases with increasing strain rate. Such strain-rate dependence of the flow stress of sintered metals is estimated to result from that of the matrix itself, i. e., the strain rate sensitivity of pore-free aluminium and iron.

Key Words: Sintered Materials, Material Testing, Powder Metallurgy, Sinter Forging, Upsetting Test, Flow Stress, Density Change, Strain Rate Sensitivity

1. 結 言

粉末成形と塑性加工の手法を組合せた加工法の一つとして粉末鍛造法がある。これは、粉末焼結体に熱間または冷間鍛造を施して密度を高め、溶製材に匹敵する強度をもった種々の機械部品を得ようとする加工法である。

粉末鍛造の形式としては、最終製品の形状・寸法に近い焼結体(プリフォーム)を密閉形で鍛造するものと、単純な形状のプリフォームを半密閉形で鍛造して高密度化とサイジングを図る方式とがある。これらの粉末鍛造においては、鍛造速度は低速のものから高速のものまでさまざまである。

粉末鍛造に要する荷重や鍛造中の密度、温度上昇などを予測するためには、粉末焼結体の変形抵抗や密度変化が、ひずみ速度によってどのように変化するかといった基礎的データをできるだけ正確に把握しておくことが必要である。

従来、溶製材の場合には、変形抵抗に対するひずみ

速度や温度の影響について多くの研究^{(1)~(13)}がなされている。また、粉体の場合でも、圧粉体の成形特性に対するひずみ速度の影響については、いくつかの報告^{(14)~(18)}がなされている。しかし、焼結体の場合には、変形抵抗や密度変化⁽¹⁹⁾に対するひずみ速度の影響についての詳細な報告はほとんど見当たらない。

そこで本研究では、アルミニウムおよび鉄粉末焼結体を対象にして単軸圧縮試験を行い、変形抵抗と密度変化に対するひずみ速度の影響を調べた。また、大矢根・島ら⁽²⁰⁾が提案した多孔質体の塑性構成式に含まれている材料定数のひずみ速度依存性について検討した。

2. 実 験 方 法

2・1 供試粉末 実験には噴霧アルミニウム粉末および還元鉄粉を使用した。ふるい分析法によって測定したこれら粉末の粒度分布を表1に示す。

2・2 試験片 これらの粉末を両押し法によって圧縮し、密度が異なる円柱状の圧粉体を作製した。得られた圧粉体を真空焼結したものを圧縮試験片(高さ20 mm, 直径20 mm)とした。焼結条件および得られた焼結体の初期相対密度 ρ_0 を表2に示す。初期相対密度 ρ_0 は、アルキメデス法によって測定した焼結体の密度を溶製材の真密度($\text{Al}=2.71 \text{ g/cm}^3$, $\text{Fe}=7.86$

* 原稿受付 平成5年6月25日。

^{*1} 正員, 京都工芸繊維大学大学院 (〒606 京都市左京区松ヶ崎)。^{*2} 京都工芸繊維大学工学部。

g/cm³) で除した値である。

2・3 実験装置 圧縮実験には、加圧工具の速度をコンピュータ制御できる高速油圧プレス [鷺宮製作所(株), 動的最大加圧力: 500 kN, 最大加圧速度: 1 m/s] を使用した。

いま、高さ H の円柱試験片の一端が V の速度で圧縮され、微小時間 dt の間に dH だけ変位したとすると、軸方向のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ は

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{dH}{Hdt} = \frac{V}{H} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。上式から明らかなように、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ を一定に保った状態で圧縮試験を行うためには、変形の進行に伴って工具速度 V を徐々に小さくする必要がある。本実験では、試験片高さ H を自動計測しつつコンピュータ制御によって工具速度 V の調節を行い、種々の一定ひずみ速度のもとで圧縮試験を行った。ひずみ速度としては、油圧プレスや機械プレスを使用した鍛造を対象にし、 $\dot{\epsilon}_z$ を 0.001~50/s の範囲で数とおりに変化させた。

2・4 繰返し潤滑圧縮 圧縮試験では、工具-試験片端面の摩擦をできるだけ小さくするために、潤滑剤としてテフロンシート(厚さ 0.05 mm)を使用した。また、変形に伴う試験片の発熱の影響をできるだけ小さくするために、軸方向の圧縮ひずみ約 0.05 ごとに除荷した(試験片の変形に対する除荷の影響はほとんどない)。そして、テフロンシートを新しいものに取り換

えた後、再び圧縮を行うという操作を繰返した。

このような繰返し潤滑圧縮における焼結体の変形状態を図 1 に示す。比較のために、無潤滑で圧縮した場合の試験片形状も示してある。図から、繰返し潤滑圧縮では、試験片側面におけるたる形変形はほとんど見られず、ほぼ一様な単軸圧縮状態になっていることがわかる。なお、テフロンシート潤滑の場合、大きなひずみまで 1 回圧縮を行うと、変形の途中でテフロンシートが破れてしまうため、潤滑状態が劣化してたる形変形(バレルリング)が生じた。

図 2 に、一段階の圧縮における軸方向ひずみ ϵ_z -時間 t 曲線の一例を示す。加圧工具が一定距離助走した後(A)から(B)までの範囲で試験片の圧縮が行われる。その間、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ はほぼ一定に保たれていることがわかる。ただし、圧縮速度が大きい場合には、加圧工具を所定の位置で急停止することが困難になるため、圧縮の終了直前においてひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ が低下する領域が存在する。本実験では、変形抵抗に対するひずみ速度の影響をできるだけ正確に把握するために、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ がほぼ一定に保たれている範囲(図中の直線部分)のみを実験データとして採用した。

以上のような方法により、ひずみ速度一定の状態では繰返し潤滑圧縮試験を行った。得られた圧縮荷重-ひずみ曲線の一例を図 3 に示す。ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ が 1/s より小さい場合には、ほぼ連続した荷重-ひずみ曲線が得られた。しかし、ひずみ速度がこれ以上の場合には、上述のような理由により実験データが不連続なものとなる。そこで、これらの実験データを最小二乗近似し、得られた曲線を圧縮荷重-ひずみ曲線とした。なお、繰返し圧縮実験では、各圧縮終了ごとに試験片を取り外し、高さ、外径および密度(アルキメデス法)を測定した。

表 1 アルミニウムおよび鉄粉末の粒度分布

Powder	Particle size					
	(μ m)	~ 38 ~	~ 45 ~	~ 53 ~	~ 63 ~	~
Al	(%)	54.6	16.7	8.8	13.6	6.3
Iron	(μ m)	~ 45 ~	~ 75 ~	~ 106 ~	~ 150 ~	~
	(%)	19.3	30.6	30.9	18.7	0.5

表 2 焼結条件および圧縮試験片の初期相対密度

Powder	Sintering conditions	Initial relative density ρ_0		
Al	883 K, 120 min	0.75,	0.83,	0.91
Iron	1373 K, 90 min	0.76,	0.83,	0.89

図 1 繰返し潤滑圧縮した焼結体試験片の変形状態

図 2 一段階の圧縮における軸方向ひずみ ϵ_z と時間 t の関係

3. 焼結体の密度変化, 変形抵抗に対するひずみ速度の影響

3.1 密度変化に対するひずみ速度の影響 粉末焼結体の場合, 変形の進行に伴って密度が変化する。図4は, 初期相対密度 ρ_0 が異なるアルミニウムおよび鉄粉末焼結体を種々のひずみ速度で圧縮し, 変形

図3 繰返し潤滑圧縮における荷重-ひずみ曲線

図4 圧縮変形の進行に伴う相対密度 ρ の変化

の進行に伴う相対密度 ρ の変化を測定した例である。密度の増加割合は初期相対密度 ρ_0 によって異なったものとなるが, 密度増加に対するひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響はほとんどないことがわかる。

3.2 軸方向ひずみ ϵ_z と断面積の関係 圧縮荷重の測定結果から変形抵抗(軸方向応力 σ_z)を算出するためには, 変形中の試験片の断面積を知ることが必要になる。しかし上で述べたように, 粉末焼結体の場合には変形中に密度変化が生じるので, 溶製材の場合のように体積一定条件から軸方向ひずみ ϵ_z と断面積 A の関係を求めることはできない。

すなわち, 焼結体の初期断面積, 高さおよび相対密度をそれぞれ A_0 , H_0 , ρ_0 , 変形中のそれらを A , H , ρ とすると, 軸方向ひずみ ϵ_z と断面積 A の関係は次のように表される。

$$\frac{A}{A_0} = \exp(-\epsilon_z) \frac{\rho_0}{\rho} \quad (2)$$

溶製材の場合には $\rho_0 = \rho = 1$ であるから, 軸方向ひずみ ϵ_z を測定しておけば上式から断面積 A を算出することができる。しかし粉末焼結体の場合には密度 ρ が含まれているので, 軸方向ひずみ ϵ_z から断面積 A を求めることはできない。

そこで本実験では, 繰返し潤滑を行う(テフロンシートを交換する)際に試験片の直径を直接測定して断面積を求めた。このようにして求めた断面積 A と軸方向ひずみ ϵ_z の関係を図5に示す。図中のプロット点は実験結果, 太線は溶製材に対する計算結果である。図から明らかなように, 変形の進行に伴う断面積の増加は初期相対密度 ρ_0 が大きい場合ほど大きくなる。しかし ρ_0 が同じ場合には, ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ にかかわらずほぼ1本の曲線で表されており, 断面積の増加に対する

図5 圧縮試験片の断面積増加に対する初期密度 ρ_0 とひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響はほとんどないことがわかる。

3.3 変形抵抗に対するひずみ速度の影響 断面積の実測値 A を用いて圧縮荷重データから軸方向応力 σ_z を算出した。このようにして求めたアルミニウムおよび鉄粉末焼結体の軸方向応力 σ_z -ひずみ ϵ_z 曲線の例を図6に示す。図より、粉末焼結体の変形抵抗は初期相対密度 ρ_0 が大きいほど、またひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ が大きいほど大きくなることがわかる。

図7は、図6に示した σ_z - ϵ_z 曲線から $\epsilon_z=0.67$ における σ_z を取り出し、これを両対数グラフ上にプロットし直して軸方向応力 σ_z に対するひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響を見たものである。図中の直線の傾きすなわちひずみ速度感受性指数 (m 値) は、初期相対密度やひずみの大きさによらずほぼ一定であり、その値はアルミニウムおよび鉄粉末焼結体いずれの場合にも $m=0.02$ 程度である。

4. 多孔質体の塑性構成式に含まれている 材料定数のひずみ速度依存性

4.1 多孔質体の塑性構成式 3章では、焼結体の

図6 変形抵抗に対する初期相対密度 ρ_0 とひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響

変形抵抗として軸方向の圧縮応力 σ_z に注目し、これに対するひずみ速度の影響を検討した。ここでは、大矢根・島ら⁽²⁰⁾が提案した多孔質体の塑性構成式をもとにして、焼結体(実質部材料)の変形抵抗に対するひずみ速度の影響を考察する。

大矢根・島らの式を単軸圧縮の場合に適用すると、焼結体の相対密度 ρ 、軸方向の圧縮応力 σ_z 、ひずみ増分 $d\epsilon_z$ と実質部材料の相当応力 $\bar{\sigma}$ 、相当ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}$ の関係は次のように表される。

$$\bar{\sigma} = \rho^{-N} \sqrt{1 + \frac{1}{9f^2} \sigma_z} \dots \dots \dots (3)$$

$$d\bar{\epsilon} = \rho^{N-1} \frac{d\epsilon_z}{\sqrt{1 + \frac{1}{9f^2}}} \dots \dots \dots (4)$$

$$d\rho = \frac{3\rho}{9f^2 + 1} d\epsilon_z \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 f は相対密度 ρ の関数

$$f = \frac{1}{a(1-\rho)^b} \dots \dots \dots (6)$$

であり、 N , a , b は材料定数である。

4.2 材料定数 a , b のひずみ速度依存性 図4に示した実験結果から、圧縮変形中の焼結体の相対密度 ρ および密度増加率 $d\rho/d\epsilon_z$ を求め、式(5)より f の値を算出した。このようにして求めた f と $(1-\rho)$ の関係を両対数グラフ上にプロットすると図8のようになる。 f の値にはいくぶんばらつきが見られるが、

図7 軸方向応力 σ_z に対するひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響

初期相対密度 ρ_0 やひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響はほとんどなく、 f と $(1-\rho)$ の関係はほぼ1本の直線で表すことができる。

いま、直線の傾きおよび直線を $(1-\rho)=1$ まで外挿したときの f の値から、式(6)中の材料定数 b , a を求めると、アルミニウムおよび鉄粉末焼結体に対してそれぞれ表3のような値になった。表より、 a , b の値は粉末材料によらずほぼ一定であるとみなすことができる。

4.3 材料定数 N のひずみ速度依存性 式(3)において $\bar{\sigma}$ は焼結体の実質部材料が相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ を受けたときの相当応力である。したがって、相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ の関係は、相対密度 ρ のいかんにかかわらず1本の曲線になるはずである。そこで、上で決定した a , b の値、および図6に示した軸方向応力 σ_z -ひずみ ϵ_z の測定結果を用いて式(3), (4)から相当応力 $\bar{\sigma}$, 相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ を求め、 $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$ 曲線が初期相対密度 ρ_0 によらず1本の曲線になるように定数 N の値を決定した。

表3 アルミニウムおよび鉄粉末焼結体の材料定数

Material constants	a	b	N
Al	2.44	0.51	2.21
Iron	2.38	0.55	2.51

図8 f 値と $(1-\rho)$ の関係

このような方法によって求めた N の値と軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の関係を図9に示す。図より、 N の値はひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ にはほとんど依存せずほぼ一定であることがわかる。ただし、表3に示すように N の値は粉末の種類によって多少異なったものとなる。

5. 結果の考察

5.1 軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ と相当ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ の関係 以上の検討では、ひずみ速度として軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ を使用してきた。溶製材 ($\rho_0=1$) の単軸圧縮では軸方向のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ と相当ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ とは等しくなるが、粉末焼結体の場合には内部に空孔が存在しているので両者は一致しない。

いま、式(4), (5)を連立微分方程式として軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ と相当ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ の関係を求めると図10のようになる。図より、相当ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ は軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ よりもつねに小さいことがわかる。焼結体の場合、軸方向ひずみには実質部材料の変形のほかに空孔の押しつぶし量も含まれているため、軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ は実質部材料の相当ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ よりも大きくなるわけである。両者の差は初期相対密度 ρ_0 が小さい場合ほど大きくなる。

5.2 相当応力-相当ひずみ曲線に対するひずみ速度の影響 上で述べたような軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ と

図9 N 値に対する軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の影響

図10 相当ひずみ速度 $\dot{\bar{\epsilon}}$ と軸方向ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_z$ の関係

図 11 相当応力 $\bar{\sigma}$ -相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ 曲線に対するひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の影響

相当ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を考慮し、実質部材料の相当ひずみ速度が変形中一定になるように加圧速度を調節して圧縮実験を行った。実験によって求めた軸方向の応力 σ_z とひずみ ϵ_z をそれぞれ式(3)、(4)に代入し相当応力 $\bar{\sigma}$ 、相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ を求めた。このようにして得られた等相当ひずみ速度条件下における相当応力 $\bar{\sigma}$ -相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ 曲線を図 11 に示す。図から、ひずみ速度が大きくなるにつれて相当応力が增大することがわかる。なお、ここでの相当応力は焼結体の実質部材料の変形抵抗であるから、当然、初期相対密度 ρ_0 には依存しない。

図 12 は、軸方向応力 σ_z と相当応力 $\bar{\sigma}$ のひずみ速度依存性を比較した一例である。図において、 σ_z - ϵ_z および $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$ の直線がほぼ平行 ($m=0.02$) であることから、粉末焼結体の変形抵抗に対するひずみ速度の影響は、実質部材料(溶製材)のひずみ速度依存性がそのまま現れたものであると言える。

6. 結 言

アルミニウムおよび鉄粉末焼結体の単軸圧縮試験(繰返し潤滑圧縮)を行い、変形抵抗と密度増加に対するひずみ速度の影響を検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 圧縮変形の進行に伴う密度増加に対しては、ひずみ速度の影響はほとんどない。

(2) 焼結体の変形抵抗(軸方向応力 σ_z)は初期相対

図 12 軸方向応力 σ_z と相当応力 $\bar{\sigma}$ のひずみ速度依存性 ($\epsilon_z=0.67$)

密度 ρ_0 が大きいほど、またひずみ速度が大きいほど大きくなる。このような変形抵抗に対するひずみ速度の影響は、焼結体の実質部材料のひずみ速度依存性がそのまま表れたものであると言える。

(3) 大矢根・島らが提案した多孔質体の塑性構成式に含まれている材料定数 (a, b, N) は、ひずみ速度にかかわらずほぼ一定である。

終わりに、実験に協力された当時の卒研生・川西孝二[現・新日本製鐵(株)]、小西正之[現・コマツ]の両君、ならびに加圧工具を製作していただいた本学機械工場の片岡啓、大角和重、川崎晃技官に謝意を表す。

文 献

- (1) 橋爪, 塑性と加工, 6-49(1965), 71.
- (2) 剣持, 塑性と加工, 8-72(1967), 43.
- (3) 志田, 塑性と加工, 9-85(1968), 127.
- (4) 五弓・木原, 塑性と加工, 9-94(1968), 777.
- (5) 岡村・中西, 塑性と加工, 14-147(1973), 307.
- (6) Osakada, K., Kawasaki, T. and Mori, K., *Annals CIRP*, 30(1981), 135.
- (7) 酒井・ほか2名, 塑性と加工, 26-299(1985), 1203.
- (8) 加藤, 塑性と加工, 30-337(1989), 152.
- (9) Alden, T. H., *Acta Metall.*, 37-6(1989), 1683.
- (10) 戸澤, 塑性と加工, 30-343(1989), 1127.
- (11) Yamaguchi, K., ほか3名, *Mechanical Behaviour of Materials-VI*, 3(1991), 805.
- (12) 井上・酒井, 金属学会誌, 55-3(1991), 286.
- (13) Nakkalil, R., ほか2名, *Mater. Sci. Eng., A*, 141-2(1991), 247.
- (14) 大矢根・ほか2名, 粉体粉末冶金, 15-5(1968), 245.
- (15) Davies, R. and Elwakil, S., *Proc. 17th Int. Mach. Tool Des. & Res. Conf.*, (1976), 483.
- (16) 佐野, 塑性と加工, 18-195(1977), 250.
- (17) 白樫・白井, 塑性と加工, 27-310(1986), 1268.
- (18) 佐藤・ほか3名, 塑性と加工, 30-337(1989), 270.
- (19) 高倉・ほか2名, 機論, 56-521, C(1990), 228.
- (20) 大矢根・ほか2名, 機論, 39-317(1973), 86.