金属圧粉体の降伏条件*

武 川 淳二郎**, 増 田 良 道**

Junjiro Takekawa and Yoshimichi Masuda: Determination of Yield Criteria for Metal Powder Compacts

The yield criteria for green compacts of iron and copper powders were determined by means of the uniaxial compression and the triaxial compression tests. In the triaxial test under the condition, preventing the increase in the density of the compacts by the hydrostatic confining pressure, the decrease in the apparent Young's modulus and a large plastic deformation of the compacts with the increase in the confined pressure were observed. The yield-loci for the compacts are of a type in which the second invariant of the stress deviator decreases with the increase in the mean stress, and which is consistent with the compressive behavior of metal powder compacts.

The experimentally determined yield-loci for the copper compacts agreed very closely with those theoretically calculated by R. J. Green.
(Received June 23, 1980)

I 緒 言

金属圧粉体や焼結体のような多孔質材料の弾塑性的挙動は溶解、鑄造で得られた通常の金属材料とは大きく異なっている。多孔質材料は変形の際に大きな体積変化を伴い、また一定の静水圧の拘束下で試料の軸方向に差圧を付加する三軸圧縮応力状態では、その降伏や変形挙動は通常の金属材料とは異なり、拘束静水圧に大きく依存する。

これまで三軸圧縮試験法によって金属圧粉体の降伏条件を求めた例としては、Schwartz¹⁾ 増田、酒井²⁾、著者³⁾らの報告があるが、これらはいずれも静水圧の拘束による圧粉体の体積減少を降伏とは考えず、圧粉体にある大きさの差圧 ($\sigma_1 - \sigma_3$) が作用して、はじめて降伏するという考えに基づいている。すなわち、金属圧粉体の場合についても、Mohr-Coulomb の降伏条件が成立つとされている岩石や土、砂と同様に、圧粉体内部のすべり面に作用する垂直応力とせん断応力の関係として降伏条件を求めている。しかし、これらの降伏条件を塑性ポテンシャルと考えると、いずれの場合も、応力状態がその降伏条件に達して変形が開始する際、その変形は体積膨張を伴うことになり、実際の金属圧粉体の圧縮挙動とは全く逆の結果になるので、これらの降伏条件は不適当である。

そのため、これに対して、多孔質体の体積が静水圧のみで変化する場合に、その変化し始めた点を降伏点と考えて、多孔質体の降伏条件を求める試みが、最近、Suh⁴⁾、

Green⁵⁾、大矢根、島⁶⁾らによって行なわれた。

Suh⁴⁾ は金属圧粉体の降伏条件を Rendulic 応力面上^{***}で表わした曲線が、双葉曲線の形になることを示し、また Green⁵⁾ と大矢根、島⁶⁾ は多孔質体の降伏曲線が、この応力面上で楕円状の曲線になることを示している。

さらに沖本、大矢根^{7,8)}らは実際に銅圧粉体を種々の成形法で加圧し、その体積減少が始まる点での応力を Rendulic 応力面上にプロットすると楕円状の曲線になることを示している。このように沖本らは圧粉体の圧密を主な研究対象としているが、本研究は静水圧拘束下での圧粉体の降伏現象を実際に観察し、Rendulic 応力面上の降伏曲線を求めることを主な目的としている。したがって、広範囲の拘束静水圧中での圧粉体の降伏点を求める必要があり、そのためには三軸圧縮試験法がより適した方法と考えられる。なお本研究においても、静水圧の拘束により圧粉体の体積が減少する場合も「降伏」を考える立場をとっているので、静水圧の拘束のみでは圧粉体の体積減少が起らないような、すなわち、圧粉体密度一定の条件で三軸圧縮試験を行ない、各静水圧拘束下において圧粉体にかかる軸方向差圧と変位の関係より降伏点を求めた。

また、拘束静水圧や圧粉体の初期密度によって圧粉体

* 昭和54年5月 本協会春季大会にて発表、昭和55年6月23日受理

** 東北大学工学部、〒980 仙台市荒巻字青葉

*** $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の主応力軸に対して同じ傾きをもつ等方応力軸、 σ_m と一つの主応力 σ_1 軸を含む平面

Table 1 Conditions of preparation of specimens.

Powder	Particle size (mesh)	Reduction	Compacting pressure (isostatic) (MPa)	Green density of compact (% T.D.)	Specimen's Number
Reduced Fe-powder	-100+150	550°C, 1 h in dry H ₂	300	81.7	①
			500	87.3	②
Electrolytic Cu-powder	-150+200	280°C, 1 h in dry H ₂	200	87.1	③
			300	91.4	④
			500	95.6	⑤

の降伏挙動がどのように変化するかを調べ、さらにこれらの実験結果を、理論的に求められている降伏条件と比較、検討した。

II 実験方法

II-1 試料の調製

Table 1 に実験に用いた金属粉の粒度、還元条件、圧粉体試料の成形圧力、相対密度等を示した。

試料粉は別報³⁾で示したように、ゴムスリーブ中に充填し、それを三軸圧縮試験用の高圧容器中で各静水圧を負荷して圧縮成形することにより直径約 11~12 mm の円柱状圧粉体試料とした。

成形した圧粉体は直径と高さの比が約 1.8 になるようにその両端を切断し、これをさらに成形静水圧と等しい静水圧中で再加圧した。このときの各圧粉体の体積収縮量は 1.0% 以内で、無視できる程度のものであった。

II-2 単軸および三軸圧縮試験

II-2-1 単軸圧縮試験

Rendulic 応力面上に降伏曲線を表示するには降伏曲線が σ_1 軸を切る点を求める必要があるため、Table 1 に示した各圧粉体試験についてまず単軸圧縮試験を行なった。

なお、この単軸圧縮試験は、球座で支持した 2 枚の平行な板の間に試料を置いて圧縮荷重をかける開放型のすえ込み法で行なった。また、試料端面の摩擦を減少させるために、その両端に厚さ 0.05 mm のテフロンシートをはさんだ状態で圧縮を行なった。ひずみ速度は 0.8 mm/

min に保ち、圧縮荷重と試験機のラム変位の関係を X-Y 記録計で記録した。

II-2-2 三軸圧縮試験

Table 1 に示した各圧粉体試料については、静水圧の負荷によってその体積が減少しないように、それぞれの圧粉体を成形したときに負荷した静水圧力よりも低い静水圧で拘束して三軸圧縮試験を行なった。各試料についての拘束静水圧力の値は Table 2 に示した。なお、三軸圧縮試験の方法、操作等は別報³⁾で述べたので省略する。

III 結果および考察

III-1 圧粉体の単軸および三軸圧縮

III-1-1 圧粉体の単軸圧縮による応力-ひずみの関係

Table 1 に示した鉄および銅圧粉体について測定した応力-ひずみ曲線を Fig. 1 に示した。図の縦軸は公称応力 P/A_0 、横軸はひずみ $\varepsilon = (h_0 - h)/h_0$ である。なお、 P は荷重、 A_0 、 h_0 はそれぞれの試料の最初の断面積と高

Fig. 1 Stress-strain curves of green compacts of iron and copper powders for uniaxial compressing test.

Table 2 Confining pressures in triaxial compressing tests of green compacts of metal powders.

Specimen	Compacting pressure (isostatic) (MPa)	Isostatic confining pressure (MPa)
Fe-green compacts	300	50, 100, 150, 200, 250, 275
	500	50, 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 475
Cu-green compacts	200	30, 50, 100, 125, 150, 175
	300	30, 50, 100, 150, 200, 250
	500	100, 200, 300, 400, 450

さであり、 h は圧縮後の高さである。

各試料の降伏点は、Fig. 1 に示した応力-ひずみの関係が直線からずれる点と定め、矢印で示した。

Fig. 1 にみられるように、応力はひずみの増加に対し始め急激に上昇するが、降伏後この上昇は次第にゆるやかになり、その値が最大になった直後、圧粉体の破壊により急激に降下する。また、いずれの試料においても降伏点は試料の密度が大きいほど高い値を示した。

さらに Fig. 1 の曲線において、降伏点にいたるまでの直線部分の傾きと、降伏後、破壊するまでの応力の上昇の程度は銅圧粉体よりも鉄圧粉体の方が大きい。なお、圧粉体が破壊するまでの全ひずみ量はその密度には

Fig. 2 Stress difference-axial strain curves for triaxial compressing test.

(a) Fe green compact
(b) Cu green compact

あまり依存せず、銅圧粉体では0.03以下、また鉄圧粉体では0.05以下であった。

III-1-2 圧粉体の三軸圧縮による差圧-ひずみの関係

Fig. 2 (a), (b) に、圧粉体を各静水圧で拘束し、三軸圧縮試験を行なった際の差圧-ひずみ曲線の一例を示した。

この三軸圧縮試験の場合も各拘束静水圧下における圧粉体の降伏点は単軸圧縮試験の場合と同じ方法で定め矢印で示した。

Fig. 2 (a), (b) にみられるように、三軸圧縮試験では、拘束静水圧が高くなり、その試料の成形静水圧に近づくほど、圧粉体試料の降伏点は低くなった。また圧粉体が降伏を開始するまでのひずみ量は拘束静水圧の高さに依らずほぼ同程度であるため、拘束静水圧の増加とともに降伏点までの直線部分の傾き、すなわち、みかけのヤング率も減少し、降伏点も不明瞭になった。また、差圧-ひずみ曲線の形状は圧粉体の種類には、ほとんど依存せず、降伏を起すまでのひずみ量は約0.015以下であった。したがって、この程度のひずみならば降伏点にいたるまでに各試料に生ずる体積変化は1%以内であり、無視できると考えられる。

III-2 Green の理論降伏曲線の検討

Green⁹⁾ は次の2つの考えに基づいて、多孔質の降伏条件式(1)を求めている。

1) 単純引張り試験の際、ネックが形成されると、その部分が三軸応力状態になり、相当応力、 σ_{eq} が低下するのと同様な理由で、多孔質体では空隙周辺の実質部の相当応力が低下する。

2) 多孔質体に対して、中空厚肉球モデルを適用し、外圧によるその降伏を考える。

$$\frac{3}{2} \left\{ \frac{(3-2\nu^{1/4})}{3(1-\nu^{1/3})} \right\}^2 + \frac{f_1^2}{4} (\ln \nu)^2 = Y^2 \quad \dots\dots(1)$$

ν : 気孔率, Y : 実質部の降伏応力, f_1 : 応力の第1不変量, f_2 : 偏差応力の第2不変量。

(1)式によると、試料の気孔率、 ν と、その試料の材料の降伏応力、 Y がわかれば Rendulic 応力面上での降伏曲線が求まることになる。なお本実験に用いた各圧粉体試料について Green の理論降伏曲線を求めるには各試料の実質部の材料の降伏応力、 Y の値が必要であるが、この値は次のようにして求めた。

(1)式で示される Green の降伏曲線は Rendulic 応力面の $\sqrt{3} \sigma_m$ 軸を切る点では

$$\frac{f_1^2}{4} (\ln \nu)^2 = Y^2 \quad (1')$$

となり、この点では静水圧力 $\sigma_3 (=f_1/3)$ のみで試料の体積減少、すなわち降伏が開始することを示しているが、本実験ではこの σ_3 が圧粉体試料を成形したときの静水圧に一致するものと考えて(1')式より Y の値を計算した。

このようにして求めた Y の値を Table 3 に示した。

なお、Table 3 にはこの Y 値との比較のため、これらの試料の実質部について測定したマイクロビッカース硬さの値を示した。この硬さの値から、圧粉体の実質部は成形静水圧により、かなり加工硬化していることがわかる。この Y の値を文献⁹⁾ 等による鉄、銅の降伏応力の値と比較し、また一般に多くの金属材料において降伏強度が硬さに、ほぼ比例するという事実を考慮すると、Table 3 に示した試料の実質部の Y の値はほぼ妥当であると思われる。

そこで、これらの Y の値を用い(1)式により各圧粉体試料について降伏曲線を求め、Fig. 3 に示した。

Fig. 3 にみられるように、Green の降伏曲線は楕円形を示し、また鉄圧粉体は銅圧粉体にくらべて密度が小さいにもかかわらず、その降伏曲線を示す楕円は大きく、銅圧粉体よりも降伏しにくいことを示している。

III-3 実測した降伏曲線の検討

Fig. 4(a), (b) は、鉄圧粉体と銅圧粉体について各拘束静水圧下での降伏応力の値を Rendulic 応力面上にプロ

Table 3 Calculated yield strength, Y and measured micro-hardness of metal matrix in green compacts of iron and copper powders.

Specimen	Compacting pressure (isostatic) (MPa)	Yield strength, Y (MPa)	Micro-hardness of matrix (Hv)
Fe-green ①	300	256	111
compacts ②	500	363	139
Cu-green ③	200	146	65
compacts ④	300	184	90
⑤	500	240	105

ットした降伏曲線である。比較のため Green の式より求めた理論降伏曲線を図中に破線で示した。

銅圧粉体の場合、成形静水圧 500 MPa の降伏曲線は Fig. 4(b) にみられるように Green の理論曲線に極めて近い形状を示している。また成形静水圧 200 および 300 MPa の試料についても、それらの降伏曲線は σ_1 軸付近を除き、ほぼ理論曲線に近い形状を示している。

一方、Fig. 4(a) に示した鉄圧粉体の降伏曲線は、理論

Fig. 3 Green's theoretical yield loci in Rendulic stress plane calculated for the specimens used in this work.

Fig. 4 Representation of yield conditions of the green compacts in Rendulic stress plane. Green's theoretical curves are shown by broken lines.

- (a) Fe-green compacts.
- (b) Cu-green compacts.

降伏曲線に比較すると、 $\sqrt{3} \sigma_m$ の増加にともなう $\sqrt{2} f_2'$ の減少が、始めはゆるやかであるが、その圧粉体の成形静水圧に近づくとき急速になるような形状を示している。

また Fig. 4(a), (b) より、本実験における σ_1 軸上の点、すなわち単軸圧縮の際の降伏応力の値は、いずれの圧粉体についても、理論曲線の σ_1 軸上の切点に比べて低いことが示された。

以上、本実験で得られた降伏曲線は全体的にみて、 σ_1 軸に近い部分を除くと Rendulic 応力面上で右下りの楕円形を示した。このことは降伏条件を塑性ポテンシャルとすれば、ひずみ増分ベクトルの x 成分が正の方向（本報では圧縮方向）を向くことになり、試料の変形はその体積減少を伴うことになるから、実際の圧粉体の変形挙動と一致する。しかし、 σ_1 軸の近傍で降伏曲線が右上りの形状を示していることは、圧粉体を単軸圧縮したり、あるいは極めて小さい静水圧で拘束して圧縮する場合には、密度の減少を伴う変形が起り得ることを示唆している。なお、単軸圧縮により圧粉体の密度が減少することは、すでに沖本⁸⁾ らによって報告されているが、ごく小さい静水圧で拘束して圧縮したとき圧粉体の密度が、どのように変化するかについては、今後なお検討する必要があると思われる。

IV 結 言

鉄および銅の圧粉体について単軸および三軸圧縮試験を行ない、それらの降伏条件を調べ、次の結果を得た。

- 1) 鉄、銅いずれの圧粉体も密度が増加しない条件下で三軸圧縮すると、静水圧による拘束が大きい程、見かけのヤング率が低下し、塑性的に変形しやすい傾向を示した。
- 2) 金属圧粉体の降伏曲線は、Rendulic 応力面上において、 σ_1 軸近傍以外では、平均応力 σ_m の増加に伴い f_2' が減少するような形状を示したが、これは実際の圧粉体の圧縮挙動と一致した。
- 3) 銅圧粉体について実験的に求めた降伏曲線は Green の理論曲線にほぼ近い形状を示した。

文 献

- 1) E. G. Schwartz and A. R. Holland: Intern. J. of Powder Met., **5** (1969), 79.
- 2) 増田, 酒井: 粉体および粉末冶金, **19** (1972), 1.
- 3) 武川, 増田: 粉体および粉末冶金, **24** (1977), 6.
- 4) N. P. Suh: Intern. J. of Powder Met., **5** (1969), 69.
- 5) R. J. Green: Intern. J. of Mech. Sci., **14** (1972), 215.
- 6) 大矢根, 島, 鴻野: 日本機械学会論文集, **39** (昭48), 86.
- 7) 沖本, 大矢根, 島: 粉体および粉末冶金, **22** (1975), 177.
- 8) 嶋, 井上, 大矢根, 沖本: 粉体および粉末冶金, **22** (1976), 257.
- 9) 日本金属学会編: 金属便覧, (1960) 318, 868.

会 告

第26回人工鉱物討論会

主 催: 日本化学会

共 催: 粉体粉末冶金協会ほか

日 時: 昭和56年10月1日(木)～2日(金)

会 場: 高知大学理学部(高知市曙町2-5-1)

討論主題: 1) 人工鉱物の合成と単結晶の育成, 2) 生成結晶の観察と評価, 3) 水溶液からの単結晶の合成と育成(特別セッション)

講演申込締切: 6月30日(火)

A 4版の用紙に1)題目, 2)発表者氏名(講演者○印), 3)所属, 4)講演の概要(合成法を明記し200字程度), 5)希望討論主題番号, 6)連絡先(郵便番号, 電話番号を付記), 7)返信用住所(5×10cmの枠内, 縦書き)を記入して, 下記申込先あてお申し込み下さい。

講演要旨原稿締切: 7月31日(金)

講演申込受付次第, 所定の原稿用紙を送付しますので, 図表, 写真等を含めて所定用紙2枚に黒インキで書いて下さい。要旨はオフセット

印刷します。

参加申込締切: 8月31日(月)

参加希望の方は下記参加費を, 親睦会出席の方はその会費も添えて現金書留でお申し込み下さい。

参加費: 予約 一般 3,500円, 学生 2,500円

当日 一般 4,000円, 学生 3,000円

(いずれも要旨集代を含む)

親睦会: 10月1日(木)18時

会費 一般 4,500円, 学生 3,500円

申込先: 〒780 高知市曙町2-5-1 高知大学理学部

第26回人工鉱物討論会実行委員長 松岡 清
(電話(0888)44-0111代, 内線590(化学事務室), 650(研究室))

宿泊・交通関係: 観光シーズンでもあり, また航空便は平常でも利用率が極めて高いのでご注意ください。なお, 宿泊施設と飛行機の座席をそれぞれ多数手配してありますので, ご希望の方は早目に直接下記あてお申し込み下さい。

〒780 高知市本町5-6-48 深田ビル4F

株式会社土佐旅行(電話(0888)22-2000, 22-2888)