金属粉末の静水圧下圧密構成式の検討

王 雨 勃 松 木 一 弘 柳 沢 平

広島大学大学院工学研究科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 4 (2002), pp. 393-399
© 2002 The Japan Institute of Metals

Constitutive Equation for Cold Isostatic Compaction of Metal Powders

Yubo Wang, Kazuhiro Matsugi and Osamu Yanagisawa

Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8527

For application of “particle contact theory” proposed by several investigators for compaction using mono-sized spherical powder particles to that for powders of general shape and of general size distribution, metallographical method was carried out to obtain the constitutive equation for isostatic compaction of metallic powders. Comparing the obtained equation with experimental results, the approximated constitutive equation to represent the isostatic pressure, P , to densify powder aggregate from the initial relative density, D_0 , to the achieved relative density, D , is finally conducted as

$$P = (3/4) \sigma_{eq} (D/D_0)^{1/3} (D - D_0) / (1 - D),$$

where σ_{eq} is equivalent stress at the contact surface having the value close to 0.2% proof yield stress of powder material. By mixing a lubricant in powder aggregate, the isostatic pressure to obtain the same relative density is smaller compared with that represented by the above equation.

(Received November 19, 2001; Accepted February 8, 2002)

Keywords: metal powder, isostatic pressure, compaction, constitutive equation

1. 緒 言

金属粉末の圧密構成式は古くから検討され、種々の実験式が提唱されている¹⁾。Fischmeister の静水圧下圧密における等粒径球形粒子の接触面積の測定と計算^{2,3)}以降、ミクロ的な粒子の接触面積と接触圧力からマクロ的な相対密度と外力の関係を導く方法⁴⁻⁶⁾が検討されてきた(「粒子接触理論」と呼ぶ)。この方法は一般的な 3 軸応力場への拡張まで試みられている^{7,8)}が、等粒径球形粒子の粒子接触の理論から誘導された計算式が一般形状の非等粒径粒子に対しても適用できるという暗黙の仮定を前提としている。

また Mises 型の降伏条件式を圧密過程に適用するため、古くからこの式の形と係数の相対密度依存性が多く提案されているが⁹⁻¹³⁾(「Mises 型降伏理論」と呼ぶ)、これらは必ずしも上記のアプローチと結びついていない。

上記「粒子接触理論」と「Mises 型降伏理論」の両者を直接的に比較できるのは、部分的ではあるが静水圧下圧密である。しかし両者の関係をみても必ずしもよい一致はみられない。そこで、本研究では従来の等粒径球形粒子に対して求められた粒子接触理論が、一般粒子形状の非等粒径粒子でも適用できるような金属組織学的なアプローチを試み、得られた結論と実験結果の比較を試みた。

2. 実 験 方 法

4 種類の純銅粉、純アルミニウム粉および 3 種類の 7075 アルミニウム合金粉を実験に供した。7075 アルミニウム合金粉の化学組成を Table 1、全ての粒子の大きさおよびみかけ密度を Table 2 に示す。7075 合金粉の場合、同じアトマイズ粉を篩分けして 3 種類の粉末サイズとした。これらの走査電子顕微鏡(SEM)像を Fig. 1 に示す。 $\phi 17.5 \text{ mm} \times \text{L}32 \text{ mm}$ のシリコンゴム・カプセルの中に粉末を詰め、冷間静水圧縮(CIP)した。等粒径銅粉の場合、上記の方法で圧密することが出来なかったため、放電焼結機を利用して、約 10^{-2} Torr (10 Pa) の真空中で無加圧で予備焼結を行った。300 s 間で 1173 K まで昇温し、300 s 保持した後 323 K までを 1200 s かけて冷却した。予備焼結後の相対密度は 0.64 であった。

粉末粒子相互の滑りが圧密に必要な圧力におよぼす影響を調べるために、各種銅粉に液体パラフィン を 1.0 vol% 添加して、同様の方法で冷間静水圧縮した。この時のみかけ密度を Table 2 の括弧中に示した。

静水圧縮後の圧粉体の表面をアクリル・スプレーでコーティングし、密度測定に供した。真密度材料の測定によって、このコーティングでもたらされる測定誤差は、銅の場合 0.5%、アルミニウムの場合 1% であった。

Table 1 Compositions of 7075 Al-Zn-Mg-Cu alloy (mass%).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr+Ti	Other		Al
									each	total	
<0.4	<0.5	1.2~2.0	<0.3	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	<0.2	<0.25	<0.05	<0.15	bal.

Table 2 Particle size and apparent density.

Kind of powder	Symbol in this paper	Particles size ($m \times 10^{-6}$)	D_0
Fine electrolytic Cu	FECu	<50	0.18 (0.17)
Coarse electrolytic Cu	CECu	45~180	0.24 (0.29)
Water atomized Cu	ATCu	<45	0.39 (0.27)
Mono-size spherical Cu	SPCu	180~250	0.58
Fine 7075 alloy Al	7075F	<45	0.34
Middle 7075 alloy Al	7075M	45~180	0.36
Coarse 7075 alloy Al	7075C	180~300	0.38
Atomized pure Al	pure Al	45~180	0.42

(D_0 in bracket: with liquid paraffin as a lubricant)

3. 塑性変形による圧密における幾何学的関係

3.1 モデル

Fig. 2 に示すように粉末粒子集合体の圧粉を(a)粒子間の接近, (b)粒子のオーバーラップおよび(c)オーバーラップ部の体積の空隙部への移動の3過程からなると考える. 初期空隙部(体積率: $1-D_0$)に対して KJMA¹⁴⁾ (Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami)式を適用すると式(1)が得られる.

$$(1-D)/(1-D_0) = \exp \{-\delta_{\text{ex}}/(1-D_0)\} \quad (1)$$

ここで古くから相変態の問題で, 変態相の体積率を計算する方法として用いられている KJMA 式は, オーバーラップを許した析出相の体積率を V_{ex} とした時, 実体積率 V が式(2)で表されるというもので, 式(1)は単位体積中の初期空隙($1-D_0$)のみに着目して, 上記(a), (b)と(c)の過程でオーバーラップを許して初期空隙を部分的に埋めた拡張体積率(単位体積を基準)を δ_{ex} としている(Fig. 3).

$$V = 1 - \exp(-V_{\text{ex}}) \quad (2)$$

式(1)を δ_{ex} で微分すると式(3)が得られる.

$$dD/d\delta_{\text{ex}} = (1-D)/(1-D_0) \quad (3)$$

圧粉過程を上記のような3過程からなると考えれば, 粒子間の接近によって自由表面が空隙内部に移動し, これによってまず空隙部の体積が減少し, さらにオーバーラップ部の体積が空隙部の一部を埋めることによって相対密度が増加すると考えられる. 粒子間の微小圧縮変位を dl , 粒子1個あたりの接触面積を Σa とし, 圧縮体積 Σadl と dD あるいは $d\delta_{\text{ex}}$ との関係がわかれば, 式(3)を用いて Σadl と相対密度との関係を求めることができる. 考えている1つの粒子の体積を v_0 とすれば Volonoi cell 体積⁵⁾は (v_0/D) であるから, 圧縮率増分は $\Sigma adl/(v_0/D)$ と表される. 圧密開始においては, 粒子接触面積にくらべて自由表面面積が非常に大きいので, dD や $d\delta_{\text{ex}}$ は自由表面の移動だけで決定されるが, 圧密

が進むと dD や $d\delta_{\text{ex}}$ が自由表面の移動だけではなく圧縮率増分の影響が強くなる. しかしその関数関係は幾何学的関係からだけでは直ちには求まらない. いま, 圧縮率増分がオーバーラップ体積の増分($d\delta_{\text{ex}} - dD$)に比例するとすれば, 比例定数 k を用いて式(4)が成立する.

$$\Sigma adl/(v_0/D) = k(d\delta_{\text{ex}} - dD) \quad (4)$$

自由表面面積 s_f と接触面面積 s_c の和を s として, $\Sigma a/s (= A)$ は式(4)を用いて式(5)のように表される.

$$A = \Sigma a/s = k(v_0/s_0) \{ (d\delta_{\text{ex}}/dD) - 1 \} (1/D) (dD/dl) \quad (5)$$

変形をしていない初期粒子の平均カリパス径を l_0 , 粒子接触面の法線方向のカリパス径を l とすれば, 静水圧縮の場合には $l/l_0 = (D_0/D)^{1/3}$ であるから, 式(6)が成立する.

$$dl = (1/3) D_0^{1/3} l_0 D^{-4/3} dD \quad (6)$$

式(3), および式(6)を用いて, 式(5)は式(7)のように整理される.

$$A = 3k(v_0/s_0 l_0) (D/D_0)^{1/3} (D-D_0)/(1-D) \quad (7)$$

上式において, D が1に近づくとき A は無限大の値をとる. これは式(1)の仮定からくるものである. Arzt らの粒子接触理論による接触面積率⁴⁾を繰り返し計算によって厳密に求めると式(7)と同様に, D が1に近づくとき無限大の値になる.

3.2 実接触面積

いま式(7)で表される1つの粒子表面積中の接触面積率 A が Fig. 4 に示すように接触面の接触と交差を許した拡張面積率と考えれば, 再び KJMA 式を用いて, 実接触面積率 A_t ($A_t = \Sigma a_t/s$, a_t : 実接触面積)は式(7)を用いて式(8)のように表される.

$$\begin{aligned} A_t &= 1 - \exp(-A) \\ &= 1 - \exp[-3k\{v_0/(s_0 l_0)\} (D/D_0)^{1/3} (D-D_0)/(1-D)] \end{aligned} \quad (8)$$

3.3 $v_0/(s_0 l_0)$ の値

式(7)と式(8)中の $v_0/(s_0 l_0)$ の値は粉末粒子の形状に依存する. 圧密前の変形していない球形粉末粒子の場合, 粒子表面積 s を s_0 に置き換えると $v_0 = \pi l_0^3/6$, $s_0 = \pi l_0^2$ であるから $v_0/(s_0 l_0) = 1/6$ である. 長さ l_c , 半径 r の円柱の両端に直径 l_c の半球を持った粒子を原点のまわりに3次元的に回転させ, x 軸方向のカリパス径を計って平均すると, 平均カリパス径 l_0 は式(9)で表される.

$$l_0 = l_c/2 + 2r \quad (9)$$

これを用いて粒子のアスペクト比の関数として $v_0/(s_0 l_0)$ を表すと Fig. 5 が得られた. 本図からもわかるように, アスペクト比が1のとき $v_0/(s_0 l_0)$ の値は0.166であるが, アスペクト比が3程度にまで大きくなると, $v_0/(s_0 l_0)$ の値は約0.133(約16%の変化)まで小さくなる. しかしこの影響があ

Fig. 1 SEM image of powders showing (a) FECu, (b) CECu, (c) ATCu, (d) SPCu, (e) F7075, (f) M7075, (g) C7075 and (h) Pure Al.

Fig. 2 Schematic drawing of compaction of plastic powder under isostatic pressure condition by three processes, (a) powder approaching, (b) overlapping, (c) filling the overlapped part in void space.

ったとしても、特に圧密がある程度進んだ段階でそれほど大きいものとは考えられない。

3.4 静水圧下圧密関数

Molerus¹⁵⁾ によって提唱され、Fischmeister と Arzt³⁾, Larsson ら⁶⁾ によって使用されてきた面積比 A と接触面に働く垂直応力 σ_n の関係は式(10)で表される。

$$sP = D \Sigma a \sigma_n \implies P = DA \sigma_n \quad (10)$$

ここで σ_n として、Fischmeister ら³⁾, Arzt⁴⁾, Helle⁵⁾ によって使われた $\sigma_n = 3\sigma_{eq}$ (σ_{eq} は粉末材料の相当応力あるいは降伏応力) の関係を用いている。式(7)と式(10)を用いて P を表すと式(11)が得られる。

$$P = 9kD\sigma_{eq}(v_0/s_0l_0)(D/D_0)^{1/3}(D-D_0)/(1-D) \quad (11)$$

式(11)において、接触面積率として実面積率 A_t を使わず

Fig. 3 Geometric relation in the initial void space, δ_{ex} is extended volume fraction, $(1-D)$ is void fraction at D ; dD , $d\delta_{ex}$ and dl are increments of relative density, extended relative density and compressive displacement at contact surface respectively.

に拡張面積率 A を使っているので、 D が 1 に近づくとき P は無限大の値になる。

4. 実験結果との比較

4.1 等粒径球形銅粉末

Fig. 6(a) に本実験で得られた全ての銅粉末、同図(b) に純アルミニウム粉末およびアルミニウム合金粉末の相対密度 D と圧力 P との関係を示す。

塑性変形する等粒径球形粒子粉末を静水圧縮して相対密度

Fig. 4 True contact area, A_t , and extended contact area, A . Fig. 5 Variation of shape factor, $v_0/(s_0 l_0)$, due to the change of aspect ratio, $(l_c + 2r)/(2r)$.

1に近い値まで圧密したとすれば粒子形状はほぼテトラカイデカヘドロンになると考えられている⁴⁾。この場合のテトラカイデカヘドロンの表面積は圧密前の初期粒子表面積 s_0 の約 1.1 倍程度と計算されるので¹⁶⁾, $s(s = s_f + s_c$: 自由表面面積, s_c : 接触面面積)を s_0 として A , A_t あるいは P を計算したとしても, 影響は無視できる程度に小さい。いま s が近似的に s_0 に等しいとすれば, 等粒径球形粉末粒子の場合, $v_0 = \pi l_0^3/6$, $s_0 = \pi l_0^2$ であるから $v_0/(s_0 l_0) = 1/6$ となり, 式(7), 式(8)と式(11)はそれぞれ式(12), 式(13)と式(14)に書き換えられる。また A の代わりに A_t (式(13))を用いた場合の圧力を P_t とすれば式(15)が得られる。

$$A = (k/2) (D/D_0)^{1/3} (D - D_0) / (1 - D) \quad (12)$$

$$A_t = 1 - \exp(-A) \\ = 1 - \exp\left\{- (k/2) (D/D_0)^{1/3} (D - D_0) / (1 - D)\right\} \quad (13)$$

$$P = (3k/2) \sigma_{eq} D (D/D_0)^{1/3} (D - D_0) / (1 - D) \quad (14)$$

$$P_t = 3\sigma_{eq} D [1 - \exp\left\{- (k/2) (D/D_0)^{1/3} (D - D_0) / (1 - D)\right\}] \quad (15)$$

Fig. 6(a)中の等粒径銅粉の実験結果は James の実験結果¹⁷⁾とよく一致した。 $k=1$ として横軸に $D[1 - \exp\left\{-(1/2)(D/D_0)^{1/3}(D - D_0)/(1 - D)\right\}]$ を縦軸に実験による P をとって整理すると Fig. 7(a)が得られた。また横軸に $D(D/D_0)^{1/3}(D - D_0)/(1 - D)$ を、縦軸に実験による P をとって整理すると Fig. 7(b)が得られた。

Fig. 6 Experimental results of isostatic pressure, P , to obtain relative density, D , for (a) pure Cu and (b) pure Al and 7075 aluminum alloy.

$D_0)^{1/3}(D - D_0)/(1 - D)$ を、縦軸に実験による P をとって整理すると Fig. 7(b)が得られた。

Fig. 7(a)において圧密初期の勾配 ($3\sigma_{eq}$ に相当する)は約 308 であり, σ_{eq} の値は 103 MPa と計算される。これは同じ粉末から放電焼結(黒鉛型内単軸圧縮: 1273 K, 10 MPa, 300 s)によって作製した焼結体(相対密度: 0.999 以上)の引張り試験結果から求めた 0.2% 耐力の値(100~110 MPa)とほぼ一致する。しかしこの場合, 圧密が進むに従って勾配は大きくなって直線からずれる。

Fig. 7(b)において圧密初期の段階の勾配 ($(3k/2)\sigma_{eq}$ に相当する)は約 130 で, 圧密が進むに従って勾配は小さくなることが認められる。これは本実験に供した全ての粉末で認められた傾向である。

式(14)中の k は $D=D_0$ において 1 に近い値で, 相対密度が大きくなるに従って小さくなると考えられるので, k を D の関数として式(16)のように仮定すると式(14)は式(14-1)のように書き換えられる。

$$k = k' (D_0/D) \quad (16)$$

$$P = (3k'/2) \sigma_{eq} D_0 (D/D_0)^{1/3} (D - D_0) / (1 - D) \quad (14-1)$$

式(14-1)に従って横軸に $(D/D_0)^{1/3}(D - D_0)/(1 - D)$ を、縦軸に実験結果の P をとって整理すると Fig. 8(a)が得られた。これは非常によい直線関係を示し, この勾配と $\sigma_{eq} = 105$ MPa および $D_0 = 0.58$ を使って k' を求めると 0.84 が得られた。

式(11), (14)あるいは(14-1)において, D が 1 に近づくと, P は無限大になる。実際の圧密の場合, 相対密度が大きくなると, 粒子接触部同士が粒子表面上で接触し始め, 接触面の

Fig. 7 Relation between isostatic pressure by experiment, P , and the functions of relative density, D , in (a) equation (15) and (b) equation (14-1).

横方向圧縮応力が増加し、静水圧応力が増加する³⁾。そのため D が 1 に近づくに従って圧力 P が急激に増加する。式 (11), (14) あるいは (14-1) の意味は P の実際の変化の理由とは異なるが、圧密後期においても、これらの式が実際の P の変化を表すと仮定する。

4.2 非等粒径非球形粉末

一般の金属・合金粉末(非等粒径非球形)の例として、各種純銅粉の静水圧縮における実験結果と式 (14-1) の比較を Fig. 8(b)~(d) に示す。ここで、純銅粉末材料の圧粉時における接触面の相当応力がほぼ等しいとして、Fig. 8 の勾配 k' の値を求めると Table 3 が得られた。電解銅粉とアトマイズ粉の k' の値は等粒径球形銅粉のそれよりも大きい値になっている。また D_0 が小さいほど k' の値は大きな値になる。その結果、初期相対密度 D_0 がどのような値であっても、 $k'D_0$ は 1/2 に近い値になっている。そこで、 $k'D_0 \cong 1/2$ とすれば式 (14-1) は近似式 (14-2) と書き改められる。

$$P = (3/4) \sigma_{eq} (D/D_0)^{1/3} (D - D_0) / (1 - D) \quad (14-2)$$

式 (14-2) は Morerus¹⁵⁾ による式 (10) の代わりに、接触部にかかる圧力の総和が粒子表面全体に外力(静水圧力)がかかるのと等価とした式 (17) を用いた場合に相当する。

$$sP = \Sigma a \sigma_n \implies P = A \sigma_n = 3A \sigma_{eq} \quad (17)$$

従来の粒子接触理論で代表的な Helle ら⁵⁾ の式と比較するために、再び等粒径球形粒子について、式 (14-2) および実表面積を用いた式 (15) による計算例と実験結果の比較を Fig. 9 に示す。相対密度が 0.85 以下ではどの式を用いても結果は変わらず実験結果とよく一致する。式 (15) と Helle らの式を比較してもそれらの結果にそれほど大きな違いはなく、相対密度が 0.85 以上では両者ともに実験結果とは一致

Fig. 8 The linear relation in equation (14-1) using some copper powders, (a) SPCu, (b) FECu and FECu+paraffin, (c) CECu and CECu+paraffin, (d) ATCu and ATCu+paraffin.

Table 3 Parameters in equation (14-1).

	D_0	$1.5 k' D_0 \sigma_{eq}$ MPa	$k' D_0$	k'	σ_{eq} MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa
FE Cu	0.18 (0.17)	72 (53)	0.46 (0.34)	2.60 (2.06)	105*	
CE Cu	0.24 (0.29)	66 (55)	0.42 (0.35)	1.79 (1.27)	105*	100~110**
AT Cu	0.39 (0.27)	79 (47)	0.51 (0.30)	1.31 (1.14)	105*	
SP Cu	0.58	73	0.47	0.84	105*	
7075F	0.34	101	0.5*		134	
7075M	0.36	89	0.5*		120	120**
7075C	0.38	106	0.5*		140	
Pure Al	0.42	18	0.5*		23	$\geq 20^{(20)}$
Pure Fe ^{(17)†}	0.38	107	0.5*		143	
Pure Ni ^{(17)†}	0.49	242	0.5*		322	
Stainless steel ^{(17)†}	0.29	175	0.5*		233	

Values in bracket: with liquid paraffin as a lubricant.

*: assumed

**: measured

†: referred

Fig. 9 Comparing the experimental result with the functions of the particles contact theory.

しない。これに対して式(14-2)は実験結果とよく一致している。

液体パラフィンに 1.0 vol% 添加して、粒子間の潤滑を促した場合の結果を Fig. 8 と Table 3 に併せて示している。アトマイズ粉の $k' D_0$ の値は粒子間の摩擦を軽減することによって 0.5 から 0.3 に低下した。また、粗い電解銅粉の場合で 0.42 から 0.35 に、細かい電解銅粉の場合で 0.46 から 0.34 に低下した。いずれの場合も、液体パラフィンの 1.0 vol% 添加によって $k' D_0$ の値は小さい値になっている。潤滑剤の添加によって、あまり大きな塑性変形を伴わずに再配列¹⁸⁾が進み、これによって相対密度の増加が起こるので、粒子接触面積が余り広がらないで圧密が可能になるものと考えられる。 $k' D_0$ はこの影響を受けて小さくなったと推察される。すなわち、 $k' D_0$ の値はパラフィンを添加しない場合より小さくなり、0.6~0.8 倍の値になっている。以上の結果より、 k' の値は再配列と塑性変形の寄与率¹⁹⁾の影響を受

Fig. 10 The linear relation in equation (14-1) and experimental pressure for pure aluminum and aluminum alloy powders.

Fig. 11 The linear relation in equation (14-2) for the experimental results by James⁽¹⁷⁾.

けているものと考えられる。

純アルミニウム粉と合金粉の実験結果と式(14-1)との比較を Fig. 10 に示す。この場合にも、静水圧力は $(D/D_0)^{1/3} (D-D_0)/(1-D)$ に対して良好な直線関係を示している。7075 合金粉の勾配は明らかに純アルミニウム粉の場合の勾配より大きい。これは式(14-1)における相当応力 σ_{eq} の違いによるものである。Fig. 10 の勾配から σ_{eq} の値を求めると、純アルミニウム粉の σ_{eq} として 23 MPa が得られた。これは工業用純アルミニウムの 0.2% 耐力 (1050: ≥ 20 MPa²⁰⁾) に近い値である。同様に 7075 合金粉の場合の σ_{eq} の値を求めると細粉で 134 MPa、中粉で 120 MPa、粗粉で 140 MPa が得られた。これらの値は同じ粉末を放電焼結(黒鉛型内単軸圧縮: 873 K, 20 MPa, 1200 s)した直後に型ごと水焼き入れた材料(相対密度: 0.99 以上)の引張り試験結果から求めた 0.2% 耐力 120 MPa に近い値である。

いくつかの文献データの静水圧下圧密における圧力 P を式(14-2)で整理して Fig. 11 と Table 3 に示す。これより従来報告された実験データの P も圧密時の粒子接触部の変形応力 σ_{eq} を用いて、第 1 近似として式(14-2)で表される。

Fig. 12 Curves according to equation (14-2) and several equations in the previous reports.

4.3 従来の構成式との比較

圧粉体の Mises 型降伏理論によれば構成式は式(18)の形で表される.

$$A(D)J_2 + B(D)J_1^2 = Y(D)\sigma_{eq}^2 = \Sigma_{eq}^2 \quad (18)$$

ここで, J_2 と J_1 は巨視的主応力 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ を用いてそれぞれ $(1/6)[(\Sigma_1 - \Sigma_2)^2 + (\Sigma_2 - \Sigma_3)^2 + (\Sigma_3 - \Sigma_1)^2]$ および $\Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3$ で表される. $A(D), B(D)$ および $Y(D)$ は D の関数で, それぞれ構成式のなかでの, J_2, J_1^2 および σ_{eq}^2 の寄与を表す係数である. 静水圧下圧密の場合 J_2 は 0 であり, $P = (\Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3)/3$ であるから, 圧力 P は式(19)で表される.

$$P = (1/3)[Y(D)/B(D)]^{1/2}\sigma_{eq} \quad (19)$$

従来の研究で報告されている $B(D)$ と $Y(D)$ を用いて $D_0 = 0.4$ の場合の比較を Fig. 12 に示す. ここで, Lee ら¹²⁾ の式の D_0 は臨界相対密度(タップ密度に近い値)である. 本図からもわかるように, Helle の曲線以外は本実験結果と同じように, 相対密度が 1 に近づくとき無限大になるような変化をしている. すなわち, 本研究で提案された圧密式の大まかな変化の傾向は Gurson¹⁰⁾ や Lee らのそれに近いものである.

5. 結 言

静水圧縮下の圧密構成式を考察し, 得られた結果と実験結果を比較した. 結論は次のように要約される.

実験的に求められた圧力 P -相対密度 D の曲線は, D が 1 に近づくとき P が非常に大きくなるような変化を示す. これは実際には, 粉末粒子に対して圧密に寄与しない静水圧弾性応力が増大するためと考えられるが, この効果を粉末のみかけの粒子接触面積(拡張接触面積)が大きくなることで表すことによって, 次式で示される P - D の関係が求められる.

$$P = (3k'/2)\sigma_{eq}D_0(D/D_0)^{1/3}(D-D_0)/(1-D)$$

ここで, σ_{eq} は相当応力で 0.2% 耐力に近い値であり, D_0 は初期相対密度である. k' は粒子再配列の起こりやすさと, 再配列に伴って変形がどの程度起こるかを表す定数で, 潤滑剤を添加しない金属粉末の場合には $k'D_0$ は 0.5 に近い値をとり, 潤滑剤として液体パラフィン 0.1% を添加した場合には約 0.3~0.4 に低下する. すなわち, 潤滑剤を添加しない金属粉末の場合には上式は次式で近似される. 潤滑剤を使用すると, 圧力は本式で計算される値よりもいくらか小さくなる.

$$P = (3/4)\sigma_{eq}(D/D_0)^{1/3}(D-D_0)/(1-D)$$

本式による P の D による変化は, 粒子接触理論による Helle の式よりもむしろ Gurson や Lee の式に近いものである.

本研究を行うに当たり, 7075 合金および純アルミニウム粉末を提供してくださった東洋アルミニウム㈱, 菊川氏に感謝致します. また, 圧密実験で多大な協力をしていただいた広島県西部工業技術センター 筒本氏, 新田氏, 広島市工業技術センター 隠岐氏に心から感謝致します.

文 献

- 1) 例えば, K. Kawakita and K.-H. Lude: Powder Technol. **4**(1970/71) 61-68.
- 2) H. F. Fishmeister, E. Arzt and L. R. Olsson: Powder Metallurgy. **21**(1978) 179-186.
- 3) H. F. Fishmeister and E. Arzt: Powder Metallurgy **26**(1983) 82-88.
- 4) E. Arzt: Acta Metal. **30**(1982) 1883-1890.
- 5) A. S. Helle, K. E. Easterling and M. F. Ashby: Acta Metal. **33**(1985) 2163-2174.
- 6) P.-L. Larsson, S. Biwa and B. Strakers: Acta Mater. **44**(1996) 3655-3666.
- 7) L. Kuhn, J. Xu and R. McMeeking: Computational & Numerical Techniques in Powder Metallurgy, ed. D. S. Madan, (TMS, 1992) 123-138.
- 8) S. D. Mesarovic and N. A. Fleck: Solid and Structures **37**(2000) 7071-7091.
- 9) S. Shima and M. Oyane: J. Mechanical Science. **18**(1976) 285-291.
- 10) A. L. Gurson: Trans ASME. **99**(1977) 2-15.
- 11) S. M. Doraivelu, H. L. Gegel, J. S. Gunasekera, J. C. Malas, J. T. Morgan and J. F. Thomas Jr.: J. Mechanical Science **26**(1984) 527-535.
- 12) D. N. Lee and H. S. Kim: Powder Metallurgy **35**(1992) 275-279.
- 13) S. J. Park, H. N. Han, K. H. Oh and D. N. Lee: J. Mechanical Science **41**(1999) 121-141.
- 14) M. Koiwa: Bulletin Japan Inst. Metals **25**(1986) 640-648.
- 15) O. Molerus: Powder Technol. **12**(1975) 259-275.
- 16) L. J. Gibson and M. F. Ashby: Cellular solids, (Cambridge University Press, 1998) 28.
- 17) P. J. James: Powder Metallurgy **7**(1977) 199-204.
- 18) K. Kondoh, R. Watanabe and H. Hashimoto: J. Japan Society of Powder and Powder Metallurgy **47**(2000) 853-859.
- 19) T. Itoh and Y. Wanibe: J. Japan Soc. Powder & Powder Metallurgy. **46**(1999) 16-21.
- 20) Japan Inst. Metals: Kinzoku Data Handbook, (Maruzen, 1993) 184.