The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	粉末成形の力学に関する研究
Author(s)	森本, 吉春
Citation	大阪大学, 1981, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2217
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

粉末成形の力学に関する研究

昭和56年2月

森本吉春

目　　次

記号の説明---------- v

第１章　序　論---------- 1

１・１　粉末成形の目的と特徴---------- 1

１・２　粉末成形の力学の特徴---------- 3

１・３　粉末成形の力学に関する従来の研究---------- 6

１・４　本研究の目的と概要---------- 11

第２章　モアレ法による粉体の動的および準静的圧縮中の
ひずみ分布の測定---------- 15

２・１　まえがき---------- 15

２・２　実験装置および実験方法---------- 16

２・２・１　圧縮容器と試料---------- 16

２・２・２　モアレ法---------- 17

２・２・３　圧縮装置---------- 18

２・２・４　撮影装置---------- 19

２・３　実験結果と考察---------- 19

２・４　結　論---------- 23

第３章　銅粉の動的圧縮におけるポンチ速度とポンチ質量の影響------ 25

３・１　まえがき---------- 25

３・２　簡単な理論的考察---------- 25

３・２・１　単位体積当りの圧縮に要する仕事量について-------- 25

３・２・２　成形品の密度分布について---------- 27

3・3　実験装置および実験方法---------- 29
3・4　実験結果および考察---------- 30
3・5　結　論---------- 36

第4章　動的圧縮中の粉体の挙動の理論的解析
——有限要素法およびテンソルコードによる数値計算—— ---- 37
4・1　まえがき---------- 37
4・2　粉体の構成式---------- 39
4・2・1　塑性基礎式---------- 39
4・2・2　弾性基礎式---------- 43
4・2・3　三要素弾粘塑性モデル---------- 44
4・3　材料定数の決定---------- 47
4・4　一次元密閉容器内の粉体中の応力波の伝ぱ---------- 49
4・5　変断面容器内の粉体中の応力波の伝ぱ---------- 52
4・6　結　論---------- 55

第5章　変断面容器内の粉体の準静的圧縮---------- 56
5・1　まえがき---------- 56
5・2　モアレ法による実験---------- 56
5・2・1　実験装置および実験方法---------- 56
5・2・2　実験結果---------- 58
5・3　有限要素法による数値解析---------- 63
5・4　結　論---------- 68

第6章　銅粉の応力－密度関係に及ぼすひずみ速度の影響---------- 70
6・1　まえがき---------- 70
6・2　準静的圧縮実験---------- 71

6・2・1　実験方法---------- 71
6・2・2　実験結果---------- 73
6・2・3　粉体の圧縮と応力緩和のメカニズム---------- 75
6・2・4　追加実験---------- 76
6・3　動的圧縮実験---------- 78
6・3・1　実験装置および実験方法---------- 78
6・3・2　実験結果と考察---------- 80
6・4　モデルによる計算---------- 85
6・4・1　準静的圧縮時の粉体の構成式---------- 87
6・4・2　動的圧縮時の粉体の構成式---------- 90
6・4・3　Hopkinson 棒法を粉体に適用した場合の精度の検討-- 92
6・5　結　論---------- 97

第7章　前負荷の異なる銅圧粉体の降伏曲線の比較---------- 100
7・1　まえがき---------- 100
7・2　実験方法および実験装置---------- 100
7・2・1　静水圧圧縮---------- 101
7・2・2　密閉容器内圧縮---------- 101
7・2・3　予備成形---------- 102
7・2・4　単軸圧縮試験---------- 103
7・2・5　三軸圧縮試験---------- 103
7・2・6　応力経路---------- 104
7・3　実験結果および考察---------- 105
7・3・1　異方性---------- 105
7・3・2　降伏曲線---------- 105
7・4　結　論---------- 109

第8章　総　括---------- 110

参　考　文　献---------- 114

謝　辞---------- 122

記 号 の 説 明

A ---------- 容器の断面積

A_E, B_ν --- 材料の応力- ひずみ特性を表わす材料定数

a, b ------- 粉体の応力- 密度比特性を表わす材料定数

c ---------- 粉体中の応力波の伝ぱ速度

c_s --------- 一次元弾性棒中の縦波の伝ぱ速度

E ---------- 縦弾性係数

$\bar{E}$ ---------- 粉体または多孔質金属を構成する母材金属の縦弾性係数

E_c --------- 粉体を密閉容器内で圧縮した時の弾性係数

F_0 --------- 粉体に加わる外力

f ---------- 粉体を密閉容器内圧縮した時の半径方向応力と軸方向応力の関係を表わす関数

f_Y --------- 粉体の降伏応力

f^e --------- 粉体または多孔質金属の弾性体積ひずみに関係する材料定数

f^p --------- 粉体または多孔質金属の塑性体積ひずみに関係する材料定数

G ---------- 横弾性係数

g ---------- 粉体中の粒子一個が単位時間内に滑りにより移動する確率を表わす関数

H ---------- 相当応力と相当ひずみの関係を表わす関数

J_2' --------- 偏差応力テンソルの第 2 不変量

K ---------- 体積弾性係数

K_E --------- ポンチの運動エネルギ

k ---------- 粘性指数

ℓ ---------- 容器断面の周長

l_0 --------- Hopkinson 棒法の試料の初期長さ

M ---------- ポンチの質量

M_f --------- $=1/(9f^2)$

m_v --------- 粉体中の粒子一個が単位時間内に滑りにより移動する確率

P, P_1, P_2, Q, Q_1, Q_2 --- 応力テンソルとひずみテンソルの間の関係を表わす関数

p ---------- モアレ用グリッドのピッチ

T_R --------- 衝撃端に加える圧縮速度の立上り時間

t ---------- 時間

t_c --------- 応力緩和時の時間と塑性ひずみの関係を表わすパラメータ

u, v, w ----- x, y, z 方向の変位成分

V ---------- 粉体の体積

V_p --------- ポンチの速度

V_{p1} -------- 上ポンチの変位

V_{p2} -------- 下ポンチの変位

V_s --------- 粉体中の金属実質部の占める体積

v_a --------- 衝撃波が通過する前の粉体の粒子速度

v_b --------- 衝撃波が通過した後の粉体の粒子速度

W ---------- 単位体積当りの変形仕事

W_d --------- 動的圧縮時の単位体積当りの変形仕事

W_s --------- 準静的圧縮時の単位体積当りの変形仕事

x, y, z ---- 直角座標

γ_a --------- 衝撃波が通過する前の粉体の密度

γ_b --------- 衝撃波が通過した後の粉体の密度

γ_s --------- 粉体を構成する母材金属の密度

$\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$ --- せん断ひずみ（工学ひずみ）

γ^* --------- 塑性偏差応力テンソルと偏差応力テンソルの関係を表わすパラメータ

δ ---------- モアレじまのしま間隔

δ_{ij} -------- Kronecker のデルタ

ε ---------- ひずみ

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ --- 主ひずみ

$\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p, \varepsilon_3^p$ --- 塑性主ひずみ

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ --- 垂直ひずみ

ε_e --------- 弾性ひずみ

$\varepsilon_{eq}, \varepsilon_{eq}^p$ --- いずれも相当塑性ひずみ

$\overline{\varepsilon_{eq}}, \overline{\varepsilon_{eq}^p}$ --- いずれも粉体を構成する母材金属の相当塑性ひずみ

ε_{ij} -------- ひずみテンソル

ε_{ij}' ------- 偏差ひずみテンソル

$\varepsilon_{ij}^{e\prime}$ ------- 弾性偏差ひずみテンソル

$\varepsilon_{ij}^{p\prime}$ ------- 塑性偏差ひずみテンソル

ε_m--------- 平均ひずみ

ε_m^e--------- 弾性平均ひずみ

ε_m^p--------- 塑性平均ひずみ

ε_p --------- 塑性ひずみ

ε_{po} -------- 応力緩和開始時の初期塑性ひずみ

ε_v--------- 体積ひずみ

ε_v^p--------- 塑性体積ひずみ

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ --- 直角ひずみ

η ---------- 粘性係数

λ ---------- Lame の定数の λ

λ^* --------- 塑性偏差応力テンソルと塑性偏差ひずみテンソルの関係を示

すパラメータ

μ ---------- 摩擦係数

ν ---------- Poisson 比

$\bar{\nu}$ ---------- 粉体あるいは多孔質金属を構成する母材金属の Poisson 比

ξ ---------- 側圧係数（＝側応力／軸応力）

ρ ---------- 密度比（＝圧粉体の密度／その母材金属の真密度）

ρ_0 --------- 初期密度比

ρ_{max} ------- Hopkinson 棒法で解析できる最大密度比

ρ_s --------- 弾性棒の密度

σ ---------- 応力

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ --- 主応力

σ_A --------- Hopkinson 棒法の入射応力

σ_R --------- Hopkinson 棒法の反射応力

σ_T --------- Hopkinson 棒法の透過応力

σ_Y --------- 降伏応力

σ_a --------- 衝撃波が通過する前の粉体の応力

σ_b --------- 衝撃波が通過した後の粉体の応力

$\overline{\sigma_{eq}}, \overline{\sigma_{eq}^{p}}$ --- いずれも粉体を構成する母材金属の相当塑性応力

σ_{ij} -------- 応力テンソル

σ_{ij}' ------- 偏差応力テンソル

$\sigma_{ij}^{p'}$ ------- 塑性偏差応力テンソル

$\sigma_{ij}^{v'}$ ------- 粘性偏差応力テンソル

σ_m --------- 平均応力

σ_m^p --------- 塑性平均応力

σ_m^v --------- 粘性平均応力

σ_p --------- 塑性応力

σ_v --------- 粘性応力

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ --- 直角応力

$\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ --- せん断応力

第1章　序　論

1・1　粉末成形の目的と特徴[(1)～(17)]

粉末成形法は機械部品の製造法のうちの一つで金属粉末を押型の中で圧縮成形し，これを溶かすことなく加熱焼結して部品を作る方法である．この方法は紀元前 3000 年ごろエジプト人によって始められたといわれており，その起源は古いが，この手法が工業的規模で行なわれるようになったのは20世紀中ごろに入ってからであり まだ新しい．

この粉末成形法は以下のような長所を持っている．

（１）　粉末の持つ流動性・圧縮性を利用して，自動化・省力化が容易で，歩留りが良く，生産性が高い．

（２）　一度押型を作ってしまえば，歯車。カムなどの複雑な形状の部品でも，簡単な形状の部品と同程度の工程で，短時間に，寸法精度良く，大量生産できる．

（３）　粉末成形品は一般に多孔質であるので，この孔に潤滑油を含浸させれば，自己潤滑性を持たせることができ，軸受などのしゅう動部品として適している．あるいは，この孔に融点の低い金属湯を含浸させれば（例えば，鋼粉を焼結して銅を溶浸させる．）強度を上げ，両方の金属の特徴を出すことができる．また，多孔性を利用してフイルタなどを作ることもできる．

（４）　数種類の粉末を混合することにより，複合化や，焼結による合金化が可能であり，混合比も任意に選ぶことができる．特に耐摩材や電気接点材として有用である．また，高融点金属など他の方法では加工のできない製品を作ることができる．

（５）　鋳造・鍛造と比べて騒音・粉じん・高温などの労働環境や公害の面で有利である．

（６）　粉末成形では切削くずなどの材料の無だがない．さらに，最近は粉

末成形の素材として切削くずなどの再利用も研究されており，省資源の面から有利である．

以上の通り，粉末成形法は従来の加工法に比べて多くの長所を持っており将来も有望な加工法である．しかし，以下に述べるような短所もある．

（１） 原料粉末が高価である．

（２） 成形品および焼結品の中に，多数の空孔およびクラックが残存し，機械的性質が金属より劣る．特に衝撃値が低い．

（３） 金型費が高いので量産品でなければ経済的に不利である．

（４） 成形しうる部品形状に制約がある．

このように欠点もあるが，粉末成形の利用量が増え，また研究が進むにつれて，これらの欠点も少なくなり適用範囲も増えると思われる．

この粉末成形法については，以下の解説や展望がある．

粉末成形法の歴史と発展については，松山[(1)]が詳しく述べている．粉末成形法の概略説明については塑性加工研究者の立場から見た中川[(2)]の解説があり，粉末や金工業の生産量や将来性について企業の立場から見た湯河[(3)]らの解説がある．粉末成形設備については山村[(4)]らの解説がある．粉末成形部品の実用例については Dreger[(5)] や川北[(6)]らの報告があり，かなり複雑な形状の部品が粉末成形により製造されていることがわかる．この粉末成形部品の精度と欠陥については小野田[(7)]の解説がある．

また，粉末成形法の新しい手法や応用として下記の文献や解説がある．

粉末の特徴の一つは金属固体と異なって，静水圧圧力で塑性変形をすることである．これを利用した静水圧成形については Morgan ら[(8)]の研究がある．この静水圧成形を金属材料の溶融点近くの高温で行なう熱間静水圧成形（ＨＩＰ）については河合ら[(9)]の解説がある．

粉末成形したものをさらに鍛造することにより，密度を上げ強度を増すこ

とができる．この粉末鍛造あるいは焼結鍛造に関しては河合[10]の展望や中川[11]および高橋[12]の解説がある．

粉末成形装置の小形化が可能といわれている高速圧縮については大矢根[13],[14]ら，佐野[15]，Clyens[16]らの解説があり，その高速圧縮装置については Vityaz[17]の解説がある．

その他，圧延・引抜・押出・転造・接合などによる粉末成形や省資源のため切削くずを粉末原料とする粉末成形も研究されており，粉末成形法は今後大いに伸びる技術であると思われる．

1・2　粉末成形の力学の特徴

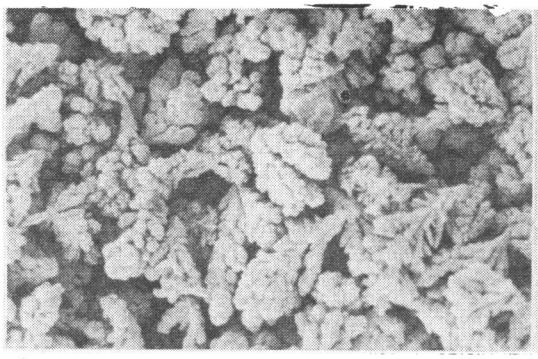
粉末成形の力学を研究するのに必要な学問の領域は，原料粉の製造から，粉末の圧縮成形，成形品の焼結，部品としての使用まで考えると，非常に広い．

すなわち，原料粉の製造に関しては 固体力学・破壊力学。や金学・化学などが関係し，粉末の輸送に関しては　流体力学が，充てん・圧縮に関しては固体力学（弾性力学・塑性力学）・レオロジーが，焼結に関してはや金学などが関係している．また，粉体は形状・大きさの異なる多数の粒子の集合体であるから，場合によっては　統計学も必要である．

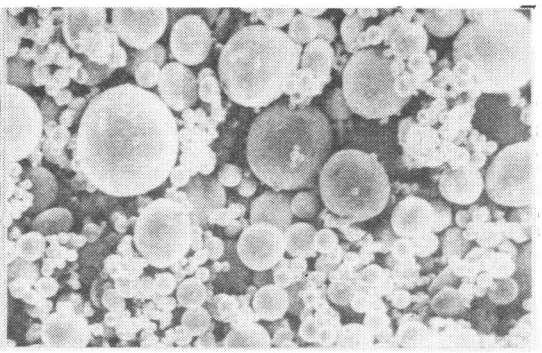
このように粉末成形を扱うには多くの学問が必要となるが，逆に粉末成形で得られた研究成果は粉粒体を扱う他の分野に対しても有用となる．

粉粒体の力学を良く扱っている分野として土質力学がある．土砂は水分を含んでいるため金属粉体ほどの圧縮性はないが，降伏条件など力学的な取り扱いはかなり共通点があり，粉末成形の力学よりも良く研究されている．

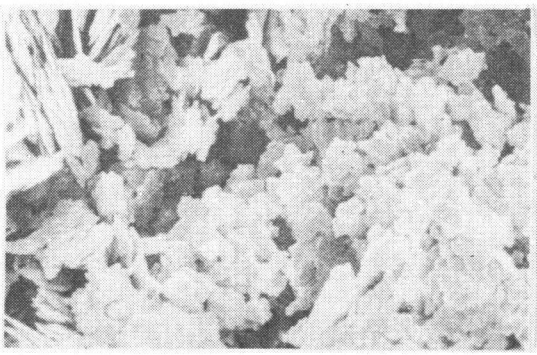
他に粉粒体を扱っている分野として，薬品・セラミック・雪などがあるが，土質力学や粉末成形の力学ほど力学的な研究は行なわれていない．



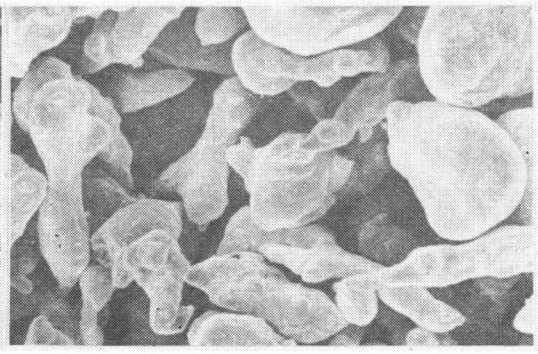
(a) Electrolytic copper powder.



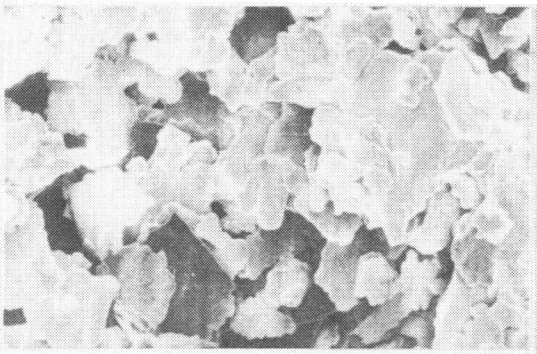
(b) Atomized copper powder.



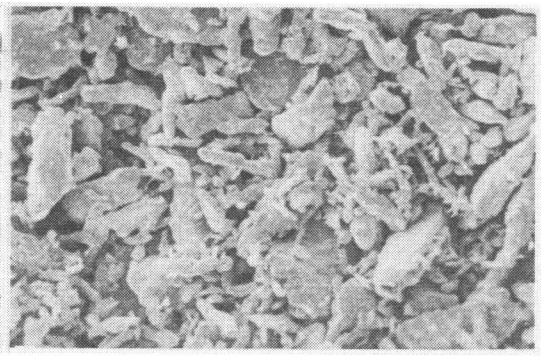
(c) Stamped copper powder.



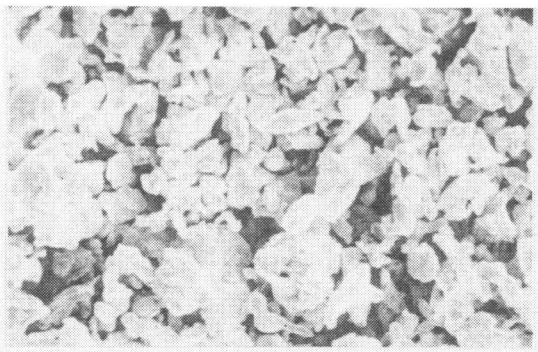
(d) Atomized aluminum powder.



(e) Stamped aluminum powder.



(f) Stamped electrolytic iron powder.



(g) Atomized stainless steel powder.

100 μm

Fig.1.1 Some examples of scanning electron microphotographs of powders.

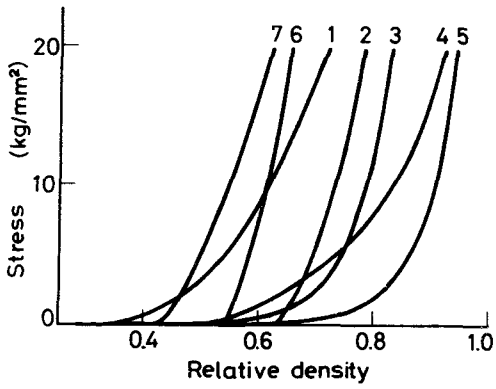
さて，粉末成形の力学を，金属の力学と比較した場合の特徴点は下記の通りである．

（１） 粉体は金属固体と空気（あるいは空間）との複合材（混合物）である．その金属固体（粉末粒子）の形状・寸法は粉末の製造法・粒子の酸化程度・ふん囲気・温度などにより異なる．そのため，粉体の構成粒子が異なれば，その集合体である圧粉体の力学的挙動も異なる．

Fig. 1・1 の写真は各種金属粉末の走査型電子顕微鏡写真の一例である．このように粉末は粉粒の集合体であり，材質・製造法により種々の形状をしている．粒子の大きさや粒度分布・比表面積などにおいても大きな相異を示している．

（２） 粉体は圧縮性が良く変形量も大きい．そのため，場合によっては大変形理論を使う必要もある．また，種々の力学的特性は大抵の場合，非線形性を示す．静水圧圧力によっても大きく塑性変形をする．密度が変ると材料定数が変る．場合によっては大きな異方性を示す．圧縮強度は強いが引張り強度は弱い．

Fig. 1・2 は各種金属粉末を密閉容器内で一軸圧縮した場合の応力－密度比（粉体の密度／粉体を構成する金属の真密度）関係の例である．このように応力－密度比関係は材質・製造法により異なり，非線形性が大きい．



1. Electrolytic copper powder.
2. Atomized copper powder.
3. Stamped copper powder.
4. Atomized aluminum powder.
5. Stamped aluminum powder.
6. Stamped electrolytic iron powder.
7. Atomized stainless steel powder.

Fig.1.2 Some examples of stress - relative density relations of powders.

（３） 粉体全体の変形はミクロに見ると多数の粒子の変形と移動（滑り）により行なわれ，粒子の変形と滑りの起る比率は，圧縮応力・圧縮速度など

により異なる．滑りを起す要因は多く，粒子の数も多いため，全体から見た個々の粒子の滑りは確率的に起ると考えられる．

（４） 粉体の圧縮は容器に入れて行なわねばならず，その力学的挙動を直接観察することが困難であり，粉体の性質上ひずみゲージをはることもできず変形量も大きいため計測が困難である．また，容器に入れるため，場合によっては，容器壁との摩擦の影響も考慮しなければならない．

以上のような性質をすべて考慮して粉体の力学的挙動を解析することは極めて困難であり，したがって，粉体の力学の研究者は，問題に応じてこれらの性質の一部を理想化し，問題の本質を失なわないように注意しながら，できるだけ簡単化して解析しているのが現状である．

１・３ 粉末成形の力学に関する従来の研究

粉末や金では，一般に金属粉末を金型容器内で圧縮成形し，さらに焼結して部品を製造する．焼結品の諸特性の大部分が，この圧縮成形時の段階で決まることが多い．特に，焼結品の形状に関する制約は ほとんど 成形工程の問題であり，また密度分布や寸法精度も成形工程と密接な関係を持っている[(2)]．このように粉末成形工程は 焼結部品製造工程の 最も重要なものといえる[(4),(5)]．

本研究では 特に この成形工程の力学について研究を行なうものであり，以下この成形工程の力学に関係する従来の研究について述べる．

粉末成形工程の力学を実験的に調べる場合に まず 問題となるのは，力学的性質の計測法である．前節でも述べたように，粉体の圧縮は容器に入れて行なわねばならず，直接観察することが難しく，また粉体の性質上ひずみゲージを はることができないなどのため計測が困難である．しかし この困難を克服するために種々の工夫が試みられている．以下にその計測に関する従

来の方法について述べる．

粉末成形品の代表的性質を表わす密度分布については次のような計測法がある．

一般に良く行なわれる方法は，粉体表面につけた標線の移動量を測定しそれより密度分布を求める方法[18]あるいは成形品を小さく切り出して重量と体積を求め それより密度分布を計算する方法[19]である．また あらかじめ圧粉体の密度とかたさの関係を求めておいて，成形品のかたさ分布より密度分布を推定する方法[20]も多く用いられている．それ以外にも，鉛のグリッドや鉛粒を試料中に埋めておき，成形後の X 線写真により その鉛の位置を求め，それより密度分布を求める方法[21],[22],成形品の X 線透過写真の濃度分布より密度分布を求める方法[23]，成形品の小さな領域に一定条件のガス圧力を加えてその時の流速より密度を求める方法[24]などがある．

しかし，これらの方法は大部分が 圧縮後の密度分布しか わからないという欠点があり，精度よくひずみ分布を求めるのも困難である．特に，粉体の動的圧縮過程中のひずみ波の伝ぱを観察するのは困難である．

粉粒体内の圧縮時における応力の測定法については以下の研究がある．

円筒容器内で圧縮中の粉体に加わる平均的な応力を求める方法として，軸方向応力については 軸荷重を断面積で割って求める方法[25],半径方向応力については ダイスのひずみより 内部の粉体の側応力を求める方法[26]～[28]がある．

円筒容器内で圧縮中の粉粒体の軸方向応力の分布を求める方法としては，円筒内の粉体の量すなわち圧粉体の高さを種々変え，その時の底面の軸荷重の分布を測定し，それを粉体内の圧力分布とみなす方法[25]がある．また，軸方向応力分布および半径方向応力分布を求める方法としては，ポンチおよびダイス壁に埋めこんだ測圧ピンを用いて求める方法[29]がある．さらには，水を封入した受圧板の圧力よりホッパー内の粉体の圧力分布を求める方法[30]，埋めこんだ土圧計により土中の応力状態を求める方法[31]，光弾性材料で粉粒体モデル

を作り その光弾性写真より応力状態を求める方法[32]などがある．しかし いずれの方法も全面の応力分布を同時に求めることはできず，また，測定器を入れることによって応力状態が乱れてしまう恐れがあるなどの欠点がある．他に，壁面と接触する粉体粒子の成形後の変形程度の分布を調べることにより圧力分布を求める方法[33]もある．

つぎに，粉末成形の力学を理論的に解析するには，まず，粉体の構成式を知ることが必要となる．しかしながら，粉体の充てん密度（容器内に静かに充てんしただけの密度）は，粉末の材質・製造法・粒度分布などの違いにより異なる[34)～(42]．この充てん密度を理論的に求めるために，球形の粒子模型を用いた観察[43]，実験[44]，計算機によるシミュレーション[45]などが行なわれている．この容器内に粉末を充てんした状態から 粉末に圧力を加えていくと，この時の圧力と密度の関係は前に Fig. 1・2 で示したように 非線形となり，当然その粉末粒子の材質などによっても異なる．これらの粉体の圧力と密度の関係を求めた構成式（圧縮式）に関する研究は数多く[46)～(54]ある．しかしながら，これらの研究においては，各研究者が異なった種類の粉体を使用しており，実験した密度の範囲も異なっている．一方，これらの圧縮式を比較した研究もかなり報告されている[例えば(55)～(57]．上述の圧縮式は 密閉容器内での一軸圧縮時の応力-密度関係であり，一次元の構成式として理論解析にも良く適用されている．

粉体は金属固体と異なり，静水圧圧縮によっても塑性変形を生じ，密度が増加するという特徴がある．この静水圧圧力と密度の関係を求めた研究も[58),(59]数多くある．また，最近では，熱間静水圧圧縮（ HIP ）も盛んに行なわれるようになり，温度をパラメータとした静水圧圧力と密度の関係も[9]求められている．

複雑な形状をした容器内での粉体の圧縮挙動を解析するためには，三次元の構成式が必要となる．本研究でとりあげる金属粉体と同じような挙動を示す材料として，土・砂・モルタル・岩石・粘土・セラミックスなどがあり，

これらの三次元構成式については以下に述べるように多くの研究がなされている．

土や粘土の挙動に関する力学は土質力学[60]として　かなり体系だてられており，粒状体の力学としては最もよく研究されている．粘土については Terzaghi や Biot の基礎理論およびこれらを発展させた多くの理論[61]がある．しかし，粘土は粒子間に水を含んでいるので金属の粉体とはかなり挙動が異なってくる．土については Mohr-Coulomb の法則[62]があり，この式が多くの解析に用いられている．Terzaghi, Biot および Mohr- Coulombの 各法則は土質力学の基礎理論ではあるが，現実の粘土や土の性質を十分に表現できない点も多いため，多くの改良がなされている[63]～[68]．しかし，まだ十分なものはなく，今後もより正確に挙動をとらえより適用範囲の広い式を考える必要があると思われる．

圧粉体を焼結した焼結金属あるいは多孔質金属も圧粉体の挙動とよく似ており，静水圧圧力で圧縮性を示す．この多孔質金属に関する構成式は，金属の構成式を発展させ，静水圧圧力による圧縮性を考慮して求められている[69]～[80]．例えば，大矢根・島ら[72]は焼結金属を金属と空間の複合材であると考え，金属の部分に金属の塑性の構成式を適用して，多孔質金属の構成式を求めている．そして，大矢根・島らに田端・真崎・沖本ら[73]～[80]が加わりこれらの式を改良発展させて焼結金属の応力解析に使用している．

金属圧粉体については島ら[77],[81]の解説があり，また，明田ら[82]，Schwartz ら[83]，Koerner ら[84],[85]および増田ら[86]～[88]は，圧粉体に Mohr- Coulomb の 法則が適用できることを実験で確めている．また，島・沖本ら[89]～[93]は 粉体の場合にも 塑性ポテンシャルの概念を導入し，焼結体に対して求めた構成式を改良して粉体に適用している．

一方，粉体の応力- ひずみ関係式を純理論的に導く試みもなされている．長尾[94]～[97]は粉体を乾いた球形に近い粒子形と考え，粒子間に相対すべりを生じる

流動域と粒子間に相対すべりが生じない非流動域が存在するとして粉体の応力- ひずみ関係式を理論的に求めている．また，北村[98]は粒状体の挙動が確率過程であるとし，マルコフ過程を適用して応力- ひずみ関係を求めている．

静的圧縮中の容器内での応力分布あるいは密度分布の理論計算については高見ら[99],[100]が水平圧力と垂直圧力を考慮して一次元計算を行なっている．二次元．三次元については 西原・郡[101]が 圧粉体を弾性体とみなして弾性理論式を用いて円筒容器内の圧粉体の応力分布を計算しており，Horne ら[102]は特性曲線法を用いて四角形容器内の二次元応力分布を計算しており，Takami[103] は 円すい容器内の圧力分布を計算している．島[104]は半実験的手法として格子線解析法により多孔質体の密閉容器内押込みにおける応力分布を求めている．また，森ら[106]は剛塑性有限要素法により多孔質金属のすえ込みおよび押込み時の密度分布および応力分布を計算している．しかし，圧粉体についての応力分布や密度分布を求めた理論計算はまだないようである．

粉体を高速で（動的に）圧縮した場合は，装置の小形化が可能であり，その他いくつかの特長を有しているといわれている[15],[107]～[110]．この粉体の動的圧縮は準静的圧縮とは圧縮のメカニズムが異なっている．すなわち，準静的圧縮は粉体の個々の粒子間の力のつり合いを保ちながら増密されるのに対して，動的圧縮は粉体中を応力波が繰返し往復することによって増密する．この動的圧縮の理論解析は Linde ら[111]，Herrmann ら[112]～[115]，Butcher[116]，Lee[117]，Handelman ら[118]，佐野ら[18],[119]～[123]，Nagayama ら[124]によって行なわれている． これらの解析はすべて一次元解析であり，二次元，三次元の解析はまだ行なわれていないようである．

粉体を動的に圧縮する場合の実験も[13]～[18],[108]～[110],[125]～[142] 野村ら，木村ら，Stein ら，明田ら，浅村ら，大矢根ら，Hagemeyer ら，Davies ら，Roman ら，Garber ら，佐野ら，Raybould，Clyens ら，Miranov，Rusnak，Johnson ら など多くの人々により行なわれており，動的圧縮成形時の挙動やその特徴についての研究や報告がなされている．この動的圧縮の装置については Vityaz らの紹介があ

る．この動的圧縮装置を分類すると，（1）高圧ガスの断熱膨張のエネルギあるいは火薬・ゴムなどのエネルギを弾丸などの速度エネルギに変え，それを粉体圧縮に利用する方法[125)～134)]，（2）爆薬による方法[135)～138)]，（3）電気衝撃による方法[139),140)]，（4）振動による方法[141)] などがある．

さらに最近は粉末の衝撃圧縮だけでなく，焼結金属を動的に圧縮する衝撃鍛造[142)]などの研究も行なわれている．この方法は，従来の金属固体の鍛造法と工程はあまり変らず，素材として粉末成形を行なった焼結品を使うため鍛造回数も少なくてよく，焼結と鍛造前の熱処理を同時に行なうこともできるなどの長所もあるため，今後ますます伸びる分野だと思われる．

1・4　本研究の目的と概要[143)～146)]

本研究の目的は，粉末成形中の粉体の力学的挙動を明らかにすることである．そのため，まず粉末成形に適用できる計測法を確立し，その計測法を用いて，圧縮容器内の粉体の挙動を実験的に調べる．つぎに圧縮容器内の挙動を有限要素法などを用いて理論的に解析する．さらに，このとき用いた粉体の構成式をより厳密なものにするため，ひずみ速度の効果および荷重履歴の影響を調べるための実験を行なう．以下，各章ごとの概要を述べる．

まず，第2章では，粉体の変形の計測法を示す．計測法には種々の方法があるが，粉体の場合には固体の場合と異なり，光弾性実験法[147)]・ひずみゲージ法・ホログラフイ法などを適用することは困難である．そこで，本研究ではモアレ法を採用し，フオトエッチングやスクリーン印刷によるグリッドおよびけい光顔料によるグリッドなどを用いて従来のモアレ法を改良することにより，この方法が粉体の変形計測に適していることを示す．このモアレ法を用いることにより，比較的複雑な形状の容器内の粉体の二次元ひずみ分布あるいは密度分布を，圧縮後のみならず，動的あるいは準静的圧縮中でもかな

り精度よく測定できることを示す．このモアレ法を用いて，第3章および第5章で，粉体の動的圧縮時および準静的圧縮時の挙動を調べる実験を行なう．

第3章では，動的圧縮時の密度分布に及ぼすポンチ速度とポンチ質量の影響を調べる．まず，理論計算により，単位体積当りの圧縮に要する仕事量は動的圧縮の方が準静的圧縮の場合より大きいことを示し，さらに，動的圧縮の方が準静的圧縮の場合より比較的均一なひずみ分布を得ることができることを示す．つぎに，実験として，前述のモアレ法を利用して動的圧縮過程中および圧縮後のひずみ分布を求め，ポンチエネルギが同じならば，圧縮過程中の初期の段階ではポンチ速度の大きいほど密度が高くなるが，圧縮後はポンチ速度の小さいほど密度が高くなっていることを示す．

第4章では，金属粉体の動的圧縮中の応力分布やひずみ分布を理論的に求める方法を示す．そのためにまず，粉体を均質な連続体でかつ等方性であると仮定し，粉体の構成式を定式化する．そして，従来から求められている多孔質金属の構成式を粉体に適用できるようにその材料定数を求め直し，さらに粘性を考慮することによって，粉体を三要素弾粘塑性モデルで表わす．応力分布の解析は二次元平面ひずみ問題として，有限要素法およびテンソルコード（差分法の一種）を用いて行なう．

第5章では，複雑形状部品の圧縮成形中の挙動と最適圧縮方法を調べる．複雑形状部品のモデルとしてT字形の変断面容器を用い，圧縮成形中の挙動をモアレ法を用いて実験的に調べる．これにより，複雑形状部品の二次元の等変位分布，ひずみ分布，密度分布，クラックの発生の様子などを調べることができることを示す．また，圧縮方法の違いによる密度分布などの比較も行なう．一方，この容器内の粉体の挙動を理論的に解析するために有限要素法を用いて数値計算を行なう．このとき，クラックや摩擦などの境界条件を考慮すると，その解は実験結果とよく一致することを示す．これらの実験および理論解析の結果，T字形密閉容器内の粉体の成形において，密度分布

を均一にするには，上と下のポンチの圧縮速度の比が 1：1 の両押し法が最も適しており，速度比を 1：1 にできない場合は大きい断面の方のポンチの速度を大きくする方が良いことを示す．

第６章・第７章では，粉体の構成式として従来無視されていたひずみ速度の影響およびひずみ履歴の影響に関する実験を行なう．

第６章では，粉体の準静的圧縮時および動的圧縮時の応力－密度関係を調べる実験を行なう．その結果 金属粉体は金属固体と異なり，準静的圧縮といわれる低速圧縮時でも，ひずみ速度により応力－密度関係が異なり，ひずみ速度が大きいほど同じ密度にするのに大きな応力が必要なことを示す．つぎにこの性質が現われるメカニズムを考え，粉体の挙動を三要素弾粘塑性モデルで表わし，その材料定数を求める方法を示す．

一方，粉体の動的圧縮中の応力－密度関係を Hopkinson 棒法を用いて調べる．この方法は，一般的には，試料中の応力が均一になっていない初期段階においては誤差が大きくなるため，粉体のように応力波の伝ぱ速度の遅いものに対しては有効に適用されないものと考えられていた．しかし，本研究では，試料長さを短かくすることによって応力の不均一による初期段階の誤差を少なくするとともに，マイクロコンピュータとデジタルメモリからなる半自動解析システムを開発して，解析中の人為的な誤差を少なくし，これを用いて数多くのデータを解析することが可能となることを示す．このシステムを用いて得られた多くの実験結果を統計的に処理することにより，全体的に精度の良い動的応力－密度関係を得ることができることを示す．この方法により得られた動的圧縮時の応力－密度関係は，準静的圧縮時の応力－密度関係と同様に，ひずみ速度が大きいほど同じ密度にする応力が大きくなることを示す．つぎに，この構成式を定式化するため，準静的な場合と同様に，粉体の動的な応力－ひずみ関係を三要素弾粘塑性モデルで表わし，その材料定数を求める方法を示す．また，Hopkinson 棒法原理を粉体に適用した場合

の精度の検討を，テンソルコードを用いた計算により行なう．

第７章では，密閉容器内で成形した圧粉体の力学的異方性を調べる実験と，さらに，静水圧圧縮あるいは密閉容器内圧縮の二つの異なる前負荷を受けた圧粉体の降伏条件を調べる実験を行なう．その二種類の前負荷を受けた圧粉体に単軸圧縮・三軸圧縮・静水圧圧縮などの再負荷を行ない，これより得られる降伏点を Rendulic 応力面上に連ねた降伏曲線は，閉曲線であり，密度の増加とともに大きくなることを示す．さらに，前負荷が異なれば降伏曲線の形も異なることを示す．すなわち，静水圧成形した圧粉体の降伏曲線は，静水圧軸（σ_m 軸）方向に長いだ円あるいはレムニスケートに近い形であり，密閉容器内成形した圧粉体の降伏曲線は，それを前負荷方向に回転させたような形となっている．このように粉体の降伏曲線は一種の移動硬化則に従うことを示す．

第2章　モアレ法による粉体の動的および準静的圧縮中のひずみ分布の測定

2・1　まえがき

粉末成形中または成形後のひずみ分布あるいは密度分布の測定については，従来は次のような方法で行なわれていた．

（1）　成形品を部分的に小さく切り出して重量と体積を測定することにより密度を求める[19]．

（2）　粉体につけた標線間隔の変化よりひずみを求める．これには粉体内部に鉛線あるいは鉛粒を埋めて変形前後の鉛線あるいは鉛粒の位置をX線写真から測定することにより密度を求める方法[21),(22]や，粉体表面に標線をつけその変化を測定してひずみを求める方法[18]などがある．

（3）　成形品を焼きなましして，そのかたさ分布を測定し，あらかじめ求めておいた焼なまし品のかたさと密度の関係より密度分布を求める[20]．

（4）　成形品のX線写真の濃度分布より密度分布を求める[23]．

（5）　成形品の小さな領域に一定条件のガス圧力を加えて，その時の流速より密度を求める[24]．

しかし，これらの方法は大部分が圧縮成形後のひずみ分布しかわからないという欠点があり，粉末成形過程の力学的解析には不十分である．特に，粉体の動的圧縮過程中のひずみ波の伝ぱとそれに伴なう圧縮の過程を実験的に求めるのは困難である．

そこで，本研究ではひずみ分布を求める方法としてモアレ法を採用した．このモアレ法は粉体表面全面の変位分布を一目で精度よく知ることができ，これから簡単にひずみ分布を求めることができる．この方法はひずみゲージをはることができないような試料にも塗料などを用いてグリッドをつけることができれば，微小変形でも大変形でもグリッドの間隔を適当に変えるこ

とにより使用できる．特に，粉末成形は変形も大きいのでグリッド間隔も粗く，グリッドの製作も楽である．また前述の X線写真やかたさ分布を調べる測定法では除荷後の解析しかできなかったが，モアレ法を用いると除荷後だけでなく，さらに静的および動的負荷過程中の解析も行なえる．このような理由からモアレ法は粉体のひずみを解析するのに適している．

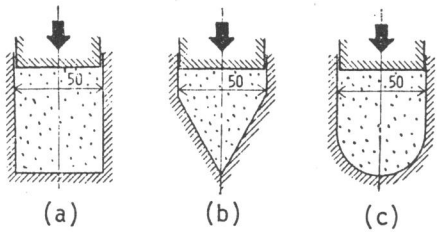
本章では，粉体の圧縮過程の解析に このモアレ法の適用を試みた．

粉体の動的圧縮については，Davies ら[(107),(126)～(130)]，Roman ら[(17),(108)] および Raybould[(109)] などにより実験的研究が進められている．また動的圧縮成形中の解析については佐野ら[(15),(18),(119)～(123)]が一次元理論解析および実験解析を行なっている．しかし以上の研究はいずれも断面形状が圧縮軸方向に変化しない容器での一軸圧縮であり，変断面容器内での粉体の動的圧縮実験は行なわれていない．ここでは 二,三の変断面容器内の粉体の準静的および動的圧縮過程をモアレ法を用いて観測した．

2・2　実験装置および実験方法

2・2・1　圧縮容器と試料

実験に用いた圧縮容器の概略形状を Fig. 2・1 に示す．これらの容器は上部では一定幅 50 mm の部分が 下部になって図の (a) では 同じ幅のままの長方形，(b) では 三角形，(c) では半円形となり，容器断面寸法が変化する．厚さはいずれも 16 mm である．圧縮は上方から下方に向けて行なう．容器の写真と側断面図を Fig. 2・2に示す．容器は側面と後面が一体の鋼



(a) Rectangular shape.
(b) Triangular shape.
(c) Semicircular shape.

Fig.2.1 Schematic figures of vessels.

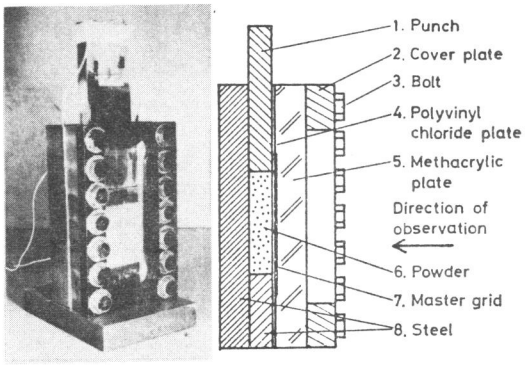


Fig.2.2 Photograph and side closs sectional schematic figure of vessel.

でできており，正面は透明な塩化ビニールの薄板4とアクリルの厚板5を鋼でできた押え板2で固定し,内部が観察できるようになっている．用いた試料粉末は電解銅粉（福田金属箔粉工業製 CE- 6 ）である．この銅粉 90g をこの容器に入れて圧縮した．

2・2・2　モアレ法

モアレ法で実験を行なうには，粉体の上に精度の良いグリッドを描く必要がある．このため Fig. 2・3 に 示すマザーモデルグリッド A を用いた.このグリッドは厚さ 0.1mm の ステンレス板を材料としてホトエッチング法により図のような形状に製作したものでグリッド部寸法は 60mm×60mm,その中に高さ 0.2mm，幅 9.5mmの細長い穴が縦方向にピッチ 0.5mmの間隔，横方向にピッチ 10mm の間隔で並んでいる．これを用いて粉体の上にグリッドを描くには，ステンレス板のマザーモデルグリッド A を 粉体試料の表面に置き，その上から微粒子のけい光顔料を塗付し，ステンレス板の穴を通して粉体試料の表面に このマザーモデルグリッド A とネガテブなモデルグリッド Cを描いた．けい光顔料を用いた理由は写真撮影時の照明光として紫外線ランプを用いると けい光顔料で 描いたグリッド C だけが 明るく浮き出して鮮明なモアレじまを得ることができるからである．なお，顔料塗付時に粉体試料が

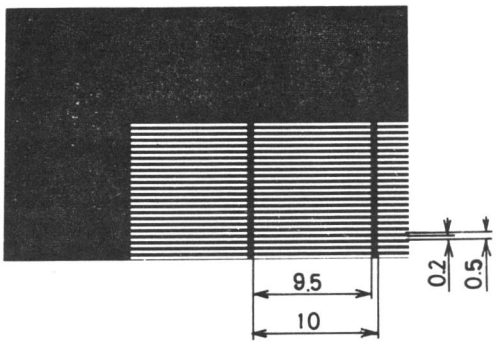


Fig.2.3 Mother model grid A.

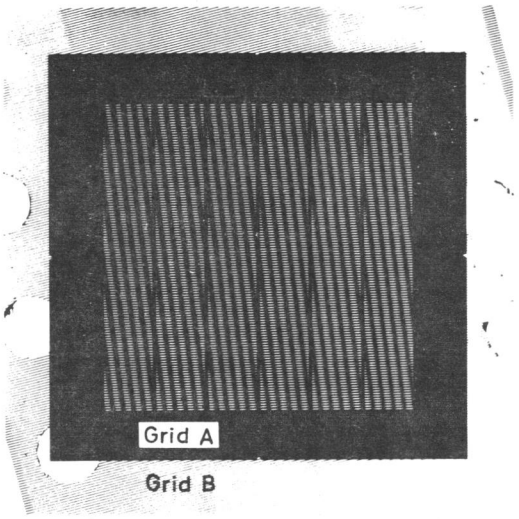


Fig.2.4 Moire fringe pattern by grid A and grid B.

くずれないようにするために粉体試料を容器に入れてからあらかじめ0.5kg／mm² の軸方向平均圧力で予備成形をしておいた．

Fig. 2・4 に示すグリッド B は,粉体の変形中のモアレじまを得るためのマスターグリッドであって，これは Fig. 2・2 の 透明なアクリル板の表面に精度の良いフライス盤を用いて，幅約 0.2mm の長い線を 0.5mm のピッチで刻んだものである．負荷過程中は このグリッドと 粉体表面に顔料で描いたグリッドとを干渉させてモアレじまを観察した．

これらのグリッドの製作精度は，平均ピッチ 500μm に対し 120 個の実測ピッチの最大誤差はグリッド A で 14μm，グリッド B で 19μmであった．Fig. 2・4 はグリッド A とグリッド B を 14° 30′ 傾けて重ね合わせた 写真であって，この時のモアレじま間隔は 2mm となり，等間隔の直線じまが得られてグリッドの精度が十分良いことを示している．

2・2・3　圧縮装置

準静的圧縮はアムスラー形万能材料試験機で圧縮した．動的圧縮は Fig. 2・5 に示す衝撃装置を用いた．図の左側は正面図，右側は側面図と高速度

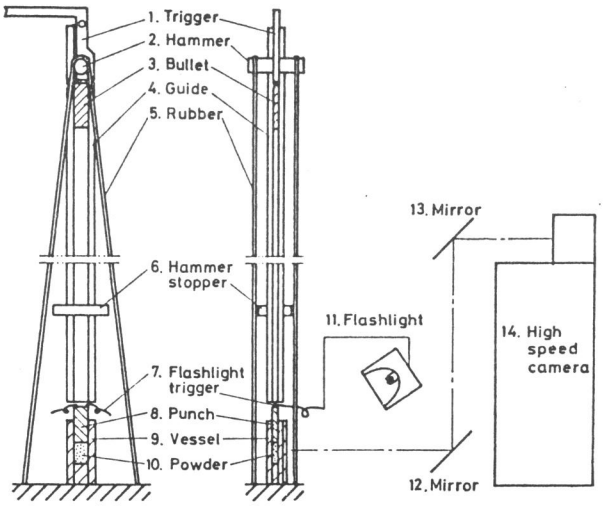


Fig.2.5 Schematic figure of dynamic compaction apparatus and high speed camera.

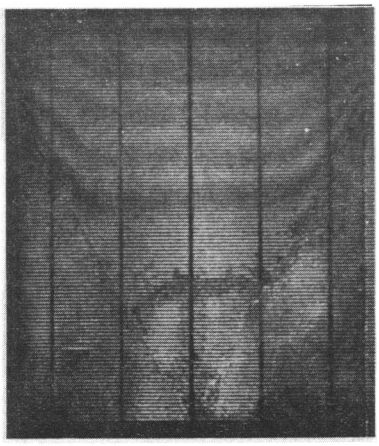


Fig.2.6 An example of photograph by microflash.

カメラの概略図である．この装置では粉体圧縮に必要なエネルギはゴムの張力エネルギを用いる．すなわち，トリガ1を開くと，ハンマ2がゴム5によって加速され，重量 1.25kg の弾丸3に衝突し，ハンマと弾丸がゴムにより加速される．弾丸が下の方まで来ると，ハンマとゴムはストッパ6で止められ,弾丸のみが自由落下し,途中高速度カメラ光源11のスイッチ7を入れ，押し棒8に衝突する．押し棒はすぐに加速され 約 10 m／s の速度になり，粉体を圧縮しながら減速する．この圧縮過程中のモアレじまをミラー12，13を通して高速度カメラ14で撮影する．

2・2・4　撮影装置

モアレじまの写真撮影の光源としては 準静的負荷過程中は フラッドランプを，動的負荷過程中はクセノンランプを用いた．なお 除荷後の写真は 塩化ビニールとアクリル板を取り除いた後，前述のステンレス板製のグリッドA をマスターグリッドとして用いて，紫外線ランプを光源として撮影した．負荷過程中に紫外線ランプを用いなかった理由は，瞬間写真を写すには紫外線光が弱いためと，アクリル板が紫外線を吸収してしまうためである．写真撮影に用いたカメラは 35 ミリ一眼レフカメラおよびニコン植村式超高速度カメラで,動的撮影は 20 万こま／s で撮影した．フイルムはトライ X を用い 2 倍程度の増感現像を行なった．

なお，この高速度カメラによる連続写真はフイルム上の像が小さくやや不鮮明となるので，鮮明な動的瞬間写真を撮るためには別にマイクロフラッシュと 35 ミリ一眼レフカメラとの組合せを用いた．このフラッシュの発光時間は約 3μs であって これによって 鮮明な写真を撮影することができた．その一例を Fig. 2・6 に示す．

2・3　実験結果と考察

長方形形状の場合の粉体の動的圧縮過程中の圧縮軸方向の等変位線を表わ

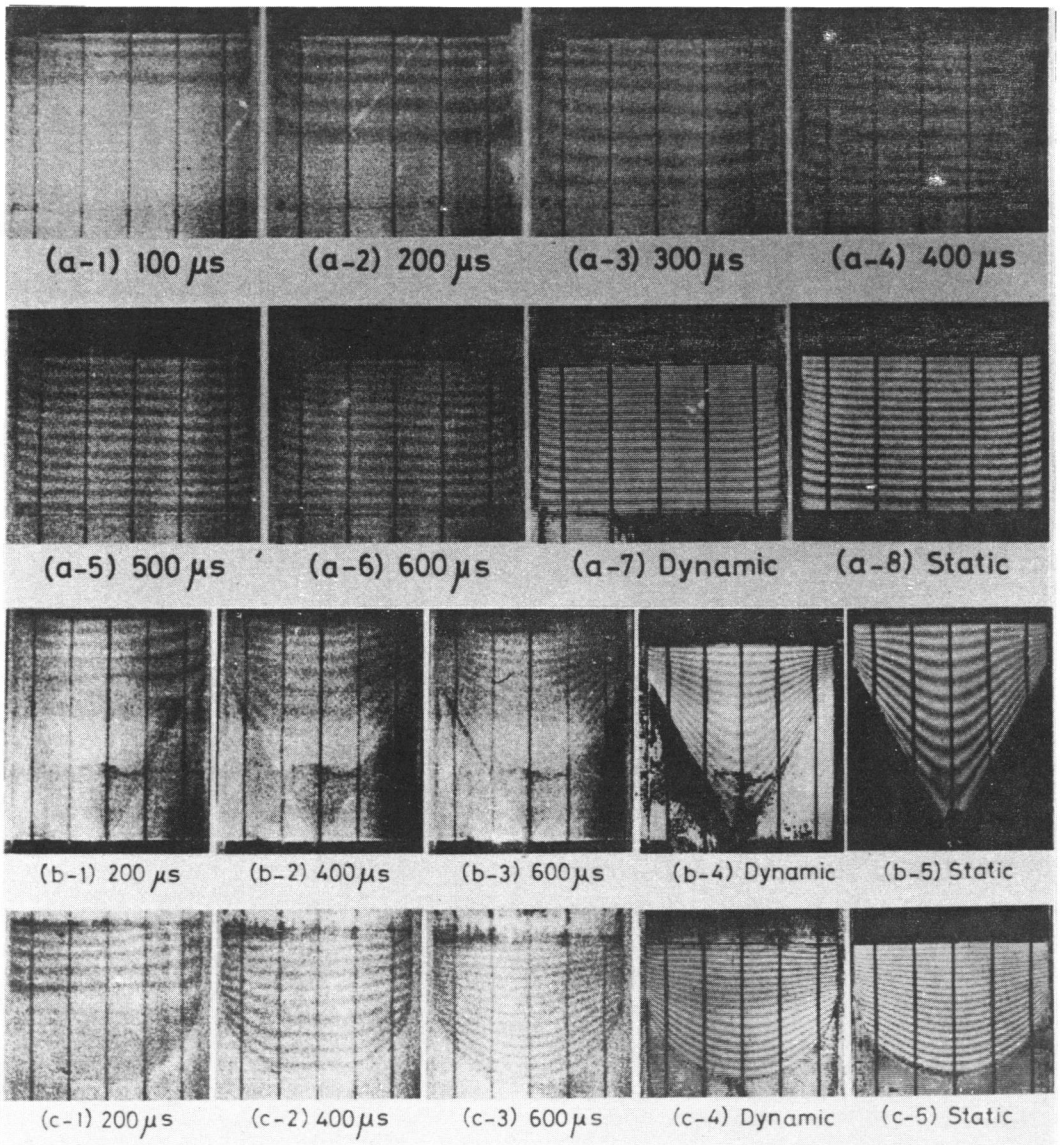


Fig.2.7 Photographs of moire fringe patterns during dynamic compaction, after dynamic compaction and after static compaction.

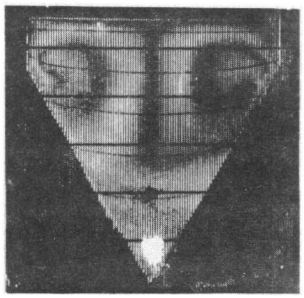


Fig.2.8 An example of moire fringe pattern of transversal displacement.

すモアレじまを Fig. 2・7 (a-) に示す．図の (a- 1) ～ (a- 6) は動的圧縮過程中の 100μs ごとのモアレじまの写真である．押し棒から出た波は粉体中を伝わり 300μs で波頭は底に当り，400μs では 波頭は底か

ら反射している．500μs で波頭が押し棒に当り，600μs ではまた押し棒から反射している．波頭は押し棒から底まで行くのに約300μsかかり，底から押し棒へもどるのに約 200μs かかっており，復路の方が往路よりも少ない時間で伝ぱしている．これは粉体中の波の伝ぱ速度は密度が高いと速いためである．動的圧縮過程では波頭が通過するごとにモアレじまの間隔が変化し，粉体圧縮の進行は波の往復伝ぱの繰返しによるものであることがわかる．また，左右の壁面付近でモアレじまが上に向って曲がっているのは，壁面摩擦の影響で流体力学の境界層に類するものが存在することがわかる．本実験では容器幅 50 mm に対し 左右の壁から各 5 mm の範囲でこの影響が明らかに認められた．図の（a－7）および（a－8）は動的圧縮後および準静的圧縮後のモアレじまである．

三角形形状および半円形形状の場合の粉体の動的圧縮過程中と圧縮後および準静的圧縮後のモアレじまを Fig. 2・7の（b－　）および（c－　）に示す．図の（b－　）は三角形形状，（c－　）は半円形形状の写真であり，（－1），（－2）および（－3）はそれぞれ 200，400および600μs 時の動的圧縮過程中，（－4）は同じ試料の動的圧縮後，（－5）は準静的圧縮後のモアレじまである．図の（b－2），（c－2）でわかるように，このような変断面容器内の圧縮でも応力波が底面に達するまでは波頭は衝撃端面に平行な直線を保って伝ぱし，これによって粉体の圧縮は進行している．

以上に示したモアレじまは すべて圧縮方向の等変位線を 表わす．これに直角な方向の等変位線を表わすモアレじまの一例として，横方向に変形の最も大きい三角形形状容器内の粉体の準静的圧縮後のモアレじまを Fig. 2・8に示す．図からわかるように圧縮軸に直角な方向のモアレじまは同じ荷重を加えても たかだか二次程度である．これは，粉体圧縮では 粒子はほぼ圧縮軸方向に移動し，壁面が圧縮軸方向に対して傾いている場合でも圧縮軸に垂

直な方向の移動量は少ないことを示している．したがって，ここでは圧縮軸方向についてのみ解析した．

Fig. 2・7 のモアレじまより求めたひずみ分布を Fig. 2・9 に 示す．形状が中心軸に対して軸対称であるので ひずみ分布は 軸より片側のみを示している．各図の左半分は 面内の等ひずみ線図，右側は中心軸に沿うひずみ分布を示している．図の記号は Fig. 2・7 の記号と対応する．モアレじまから ひずみ分布への求め方は Durelli[148] などにより多くの方法が提案されているが，ここでは モアレじまが表わす変位を図式微分する最も基本的な 方法を用いた．すなわち，グリッドのピッチを隣合うモアレじまの間隔で割って，それらのしまの中間部のひずみとした．

Fig. 2・9 (a- 2) は波頭が底面に達する前の 動的圧縮過程におけるひずみ分布を示している．この場合 佐野ら[18]の 弾丸衝突による粉体圧縮の一次元理論では，粉体の圧力- 密度曲線が上に向って凹であるために衝撃波が発

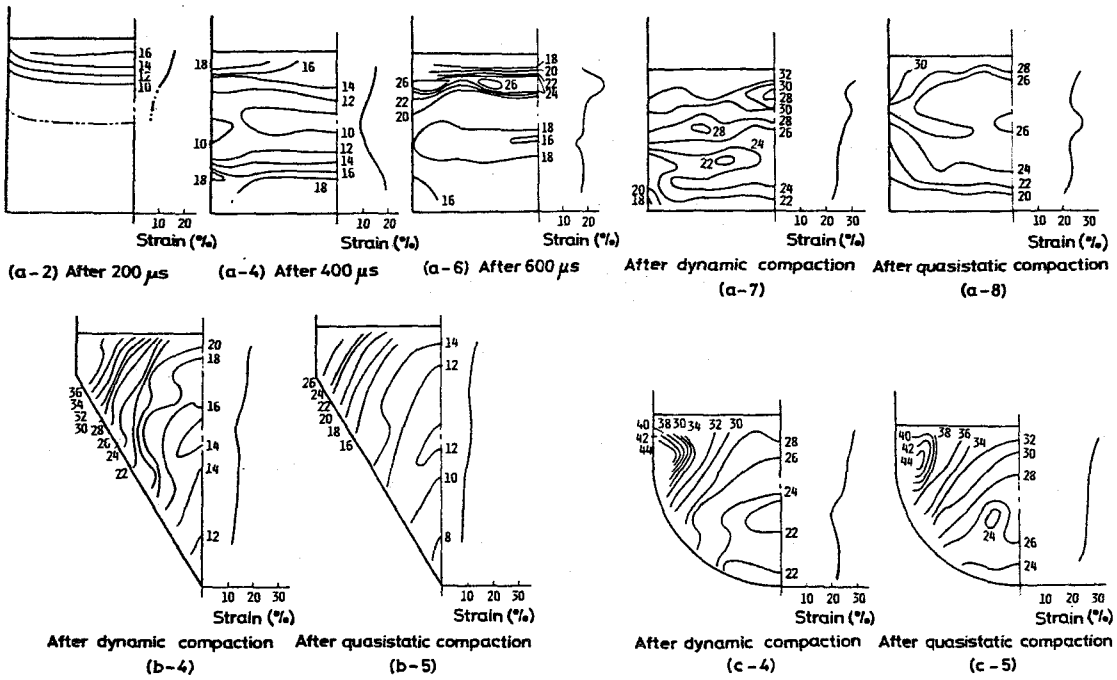


Fig.2.9 Strain distributions.

生し，波頭の部分で密度は不連続に急激に増加し，波頭の後方では，密度は衝撃端より離れるに従って単調に減少する．本実験の結果も 中心線上ではひずみは衝撃端より離れるに従って単調に減少し 佐野らの理論結果と ほぼ一致している．

Fig. 2・9（a-8）は一様断面容器内で準静的に圧縮した後の 粉体内のひずみ分布を示している．この場合は 押し棒のすみ部に ひずみの大きな領域があり，容器底側のすみ部にひずみの小さな領域ができる．これは津和ら[22]が円筒容器内で粉体圧縮の実験を行ない粉体の密度の分布を調べて得た結論と定性的に一致している．

Fig. 2・9（a-7），（a-8），（b-4），（b-5）および（c-4），（c-5）はそれぞれ一様断面，三角形形状および半円形形状容器内で粉体を動的に圧縮した場合と準静的に圧縮した場合の圧縮後のひずみの分布である．この図より 動的圧縮と準静的圧縮を比較すると，粉体の動的圧縮では衝撃棒の質量や衝撃速度によって粉体内のひずみ分布は異なるが，ここでの実験条件では粉体内の密度の分布の均一性は 動的圧縮の方が やや悪くなっている．

2・4　結論

モアレ法を用いて 粉体の動的および準静的圧縮過程を 観測した．その結果は 次の通りである．

（1）　まず，ホトエッチング法により製作したマザーモデルグリッドを用いて 粉体上にグリッドを描くことを試みた．その結果 0.5 mm ピッチの 精度の良いグリッドを粉体の上に描くことができた．

（2）　モデルグリッドを描く塗料として，けい光顔料を使用した．その結果 紫外線ランプを照明光に用いて 明りょうなモアレじまを撮影することができた．

（３） モアレ法を用いた結果，各種形状の容器に入った粉体の圧縮後の変形状態のみならず 動的圧縮過程中の変形状態も 高速度カメラで撮影することができた．

（４） 粉体の動的圧縮では，波頭が通過する時に 急激な 密度変化が起り，波の往復伝ぱによって圧縮が進行することがわかった．この時のひずみ分布はほぼ佐野らの理論と一致した．

（５） 圧縮中，粉体粒子は ほぼ圧縮軸方向に移動し，容器壁面が圧縮軸方向に対し傾いている場合でも圧縮軸に垂直な方向の移動量は少ないことがわかった．

（６） 壁面近傍では 壁面の摩擦の影響が大きく流体力学の境界層に類する現象が認められた．

第３章　　銅粉の動的圧縮におけるポンチ速度とポンチ質量の影響

３・１　まえがき

金属粉末の動的成形については 最近いくつかの研究がなされている．

動的成形の圧縮速度による影響については Davies[(126)～(130)] らや Rusnak[(132)] により実験的研究が行なわれており，佐野[(15),(18),(119)～(123)]らが一次元理論解析および実験解析を行なっている．

Davies らによると 圧縮成形後の密度（あるいはひずみ）は,圧縮ポンチのエネルギが同じならば，ポンチ速度の遅い方が大きくなると報告している．しかし，圧縮過程中については解析を行なっていない．

そこで本章では，動的圧縮の基礎研究として，ポンチ速度とポンチ質量の影響を調べるため，まず 簡単な理論計算を行なって 定性的にこれらの影響を調べた．さらに，実験として 第２章で示した方法を用いて 銅粉の動的圧縮過程中の波の伝ぱを表わすモアレじまを高速度カメラで撮影した．これより動的圧縮過程中のひずみを求め，そのひずみに及ぼすポンチ速度とポンチ質量の影響を調べ，さらに圧縮後のひずみに及ぼすこれらの影響と比較した．

３・２　簡単な理論的考察

粉体を高速で圧縮する場合，準静的に圧縮する場合と異なる点は，後者では粉体全体が同時に徐々に圧縮されるのに対して，前者では応力波頭が通過する時に，その部分が圧縮変形を受けるということである．このため次のような点で異なった現象を示すことが予想される．

３・２・１　単位体積当りの圧縮に要する仕事量について

粉体のように応力－ひずみ曲線が上に向って凹となる媒質では衝撃的な力を受けると 応力波は衝撃波となって 伝ぱする．いま，時刻 $t=t_0$ にFig.

3・1 の A 点に到着した衝撃波が δt 時間後に B′点まで 伝ぱし，この間に粉体 AB は A′B′に移動したとする．粉体の応力，密度，粒子速度を それぞれ σ, γ, v とし，衝撃波の通過する前後の量を添字 a, b で区別すると，次の運動量保存則と連続の式が成立する．

$$\sigma_b - \sigma_a = \gamma_a (C - v_a)(v_b - v_a) \quad (3 \cdot 1)$$

$$\gamma_a (C - v_a) = \gamma_b (C - v_b) \quad (3 \cdot 2)$$

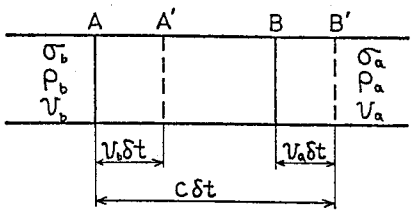


Fig.3.1 Propagation of shock wave in powders.

ここで，C は衝撃波の伝ぱ速度である．

粉体容器の断面積を A とすると，この間に応力のした仕事は $A(\sigma_b v_b - \sigma_a v_a)\delta t$ であり，運動エネルギの増加は $\gamma_a A(C - v_a)\delta t(v_b^2 - v_a^2)/2$ である．したがって変形に費された仕事は式（3・1）を考慮すると 次のようになる．

$$A(\sigma_b v_b - \sigma_a v_a)\delta t - \gamma_a A(C - v_a)(v_b^2 - v_a^2)\delta t/2 = A(\sigma_a + \sigma_b)(v_b - v_a)\delta t/2 \quad (3 \cdot 3)$$

一方，この間に 衝撃波によって圧縮された粉体の変形前の体積は $A(C - v_a)\delta t$ であるから 単位体積当りの変形に費された仕事 W_d は次式となる．

$$W_d = \frac{1}{2}(\sigma_a + \sigma_b)\frac{v_b - v_a}{C - v_a} = \frac{1}{2}(\sigma_a + \sigma_b)\frac{AB - A'B'}{AB} = \frac{1}{2}(\sigma_a + \sigma_b)\Delta\varepsilon \quad (3 \cdot 4)$$

ここで，$\Delta\varepsilon$ は衝撃波の通過による圧縮ひずみ増分である．

すなわち，Fig. 3・2 に示すような応力－ひずみ関係を持つ粉体を応力 σ_a から σ_b まで衝撃的に変化させる時の単位体積当りの仕事 W_d は図の四角形 aa′b′b の面積で表わされる． 準静的な圧縮の場合には 単位体積当りの 変形仕事 W_s は応力－ひずみ曲線より下の面積で与えられるから一般に

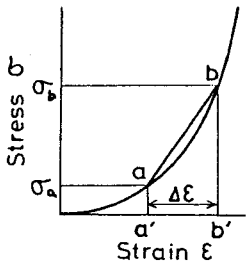


Fig.3.2 Stress - strain curve in compression of powders. Comparison between the work done by shock wave and the work done by static compression.

$$W_d > W_s \qquad (3\cdot5)$$

となる※．特に，一回の衝撃波の通過で圧縮されるひずみ量が大きいほど両者の差は大きくなり，同じエネルギで圧縮する時は，高速で圧縮する方が平均圧縮ひずみは小さくなる．しかし，何回もの衝撃波の往復によって圧縮する場合には 応力- ひずみ曲線を多数の折線で近似したことに相当し 両者の差はあまり顕著ではない．

さらに，粘性を考慮すれば 同じエネルギでも ポンチ速度が大きいほど粉体粒子間のすべり摩擦力が大きく，そのために費されるエネルギは粉体の圧縮には使われず 損失となるため，ひずみが小さくなると考えられる．

3・2・2　成形品の密度分布について

準静的な圧縮では，密度分布に大きな影響を及ぼすのは壁面などの摩擦であるのに対して，高速圧縮では応力伝ぱの挙動である．

準静的な圧縮の場合，Fig. 3・3 に示す dx 部分の力のつり合いを考えると

$$A d\sigma + \mu \sigma l dx = 0$$

$$\therefore \quad \sigma = \frac{F_0}{A} \exp\left(-\frac{\mu l x}{A}\right) \qquad (3\cdot6)$$

となる．　ここで，F_0 は粉体の圧縮荷重，μ は摩擦係数，l は容器断面の内周長で，応力状態は等方と考えた．式（3・6）は，Fig. 3・4 に示すように応力分布が荷重端より指数関数的

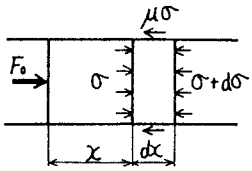


Fig.3.3 Equilibrium of stresses in quasistatic compression.

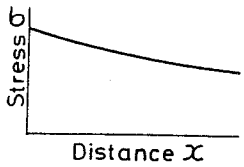
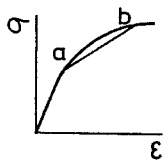


Fig.3.4 Stress distribution in quasi-static compression.

※　一般の金属材料の塑性変形のように 上に凸のσ－ε曲線の 場合には 不連続な衝撃波は発生せず，右図の直線 ab の ように変化せず，曲線 ab に沿って変化する．したがって この場合は $W_d = W_s$ となる．



に減少することを示している．

これに対して動的な圧縮では，同じエネルギでもポンチの質量と速度の組合せにより 摩擦のない場合でも 種々のひずみ分布が生じる．Fig. 3・5 は，運動方程式および構成式（弾粘塑性体と考える）

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\gamma}\frac{\partial \sigma}{\partial x}$$

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_v = f_Y + \eta \dot{\varepsilon}_p^{k}$$

などの※式を用いて，第4章および第6章で示すテンソルコード（一種の差分法）により数値計算した結果の例である．(i) は質量の大きな ポンチの場合の計算例で 比較的均一な ひずみ分布となっている．(j) は 質量の少し小さい場合で底付近で大きなひずみを生じている．(k) は さらに質量の小さい場合で，この場合は ポンチ近傍で大きなひずみが生じている．このように動的圧縮の場合には，与えられた加工エネルギに対してポンチの質量と速度の組合せを適当に選ぶことによりひずみ分布を変えることができる．また摩擦を考慮する場合は 摩擦の影響を打消すようにすることができ， 比較的均一なひずみ分布を得ることもできる．

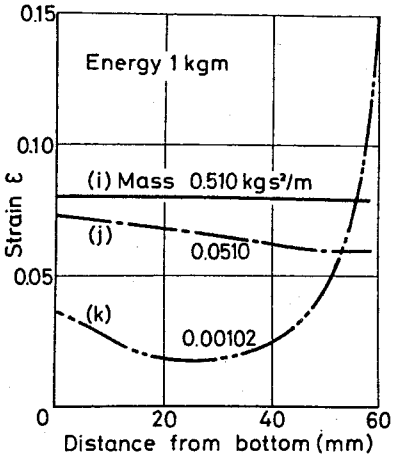


Fig.3.5 Examples of strain distribution after dynamic compaction calculated by tensor code. Different punch speed leads to different density distribution.

※ ここでは 粉体を弾粘塑性体と考え，弾性ひずみを ε_e，塑性ひずみを ε_p とすると，全ひずみ $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$，塑性応力 $\sigma_p = f_Y$，粘性応力 $\sigma_v = \eta \dot{\varepsilon}_p^{k}$，弾性応力 $\sigma = E_c \varepsilon_e$ となる．ここで f, η, k, E_c などの材料定数は 密度の関数と考えられるが，これらを正確に求めるのが困難なので とりあえず粗い近似として $f_Y = 140(\rho - 0.3)^{2.5}$，$k = 1/(10\rho)$ $\eta = \rho^{2.5}$，$E_c = 10^{4\rho} \times \rho / \rho_0$ とした．ここで ρ, ρ_0 は γ, γ_0 を金属固体の密度で割った密度比である．近似のため 計算結果は 粉体の定性的な性質を表わしている．この構成式の詳細については第4章，第6章で述べる．

3・3　実験装置および実験方法

本章で用いた装置は，第2章で用いた装置の一部を改良したものである．圧縮容器の写真を Fig. 3・6 に示す．容器は鋼製で，片面は透明な塩化ビニールとアクリル板でできており，内部の粉体が見えるようになっている．粉体部の断面寸法は 幅が 50 mm,奥行が 16 mm である．用いた粉末は電解銅粉（CE-6）で,容器内に入れ，あらかじめ密度が 2.98 g／cm^3,圧縮方向の長さが 63 mm となるように準静的に圧縮しておく．

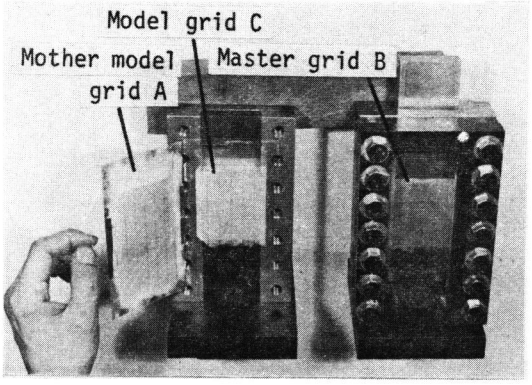


Fig 3.6 Vessels and moire grids used for dynamic compaction.

その粉体の表面に，モアレ用に ステンレス板でできたマザーモデルグリッド A を当て，けい光顔料を塗付して，0.5 mm ピッチのモデルグリッドC を描いておく．この上に，表面に やはり 0.5 mm ピッチのマスターグリッド B を描いたアクリル板を置く．Fig. 3・6 の右側の容器がこのようにして組立てたものである．この容器内の粉体を圧縮することにより，粉体の上に描いたモデルグリッド C とアクリル板表面のマスターグリッド B との干渉により 圧縮中の圧縮方向の等変位線を表わすモアレじまが現われる．

このモアレじまのしまの間隔より圧縮方向のひずみ分布を求めることができる．すなわち

$$\varepsilon = p/(\delta - p)$$

ここで，ε は圧縮方向の圧縮ひずみ，δ はしまの圧縮方向の間隔，p はグリッドのピッチである．

用いた動的圧縮装置を Fig. 3・7 に示す．左側が正面図,右側が側面図と撮影装置である．粉体の圧縮に必要なエネルギはゴムの張力エネルギにより与えられる．すなわち，引金1を開くとハンマ2がゴム5によって加速され，

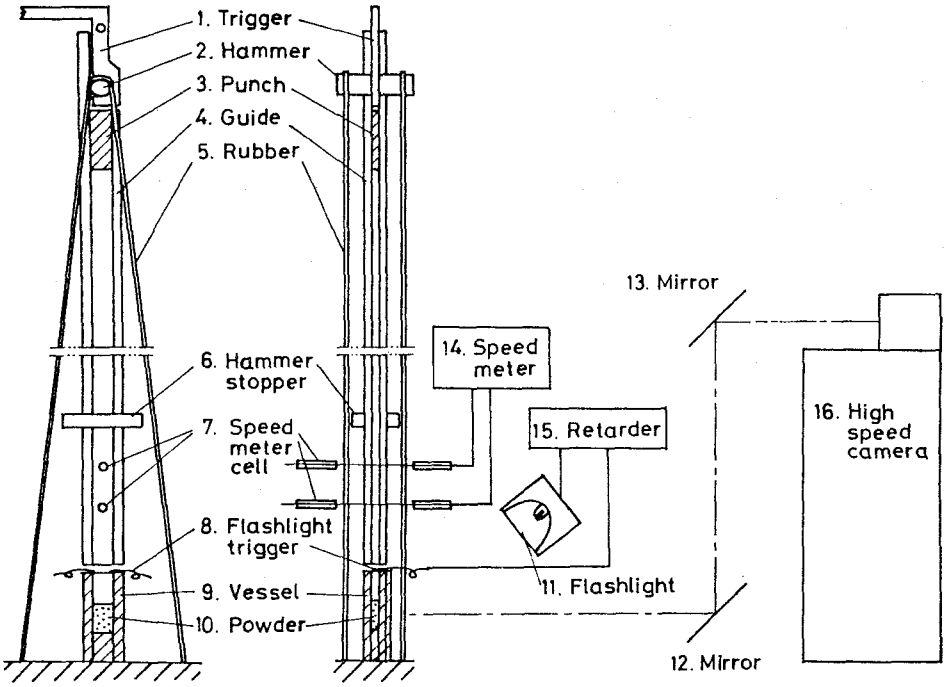


Fig.3.7 Dynamic compaction equipment using stretched rubber energy and high speed camera.

それがポンチ3に衝突しポンチを加速する．ここで用いたポンチは4種類でそれぞれの質量は 0.204，0.102，0.0512（以上鋼製），0.0255（ジュラルミン製）kgs²／m である．下の方へ来るとハンマとゴムはストッパ6により止められるが，ポンチは自由飛行をし 途中 ホトトランジスタを用いた速度測定器7，14により速度 V_P を測定され，高速度カメラ光源のトリガスイッチ8の回路を閉じて 圧縮容器9内に入り 一定時間遅延させて光源のクセノンランプを光らせる．ランプが光っている間の現象はミラー12，13 を通じて高速度カメラ16に記録される．ここでは 20 万こま／s で 200 こま 撮影した．動的圧縮後については 35 mmカメラと紫外線ランプを用いてけい光顔料を浮き上がらせモアレじまを明りょうに撮影した．

3・4　実験結果および考察

ポンチの運動エネルギ　$K_E = MV_P^2/2$ と動的圧縮成形後の粉体の全長

から求めた平均ひずみとの関係をFig. 3・8に示す．これらの実験点はほぼ一本の曲線上にのっており，同じポンチ質量ならエネルギの大きいものほどひずみは大である．しかし，このグラフをよく見るとエネルギが同じならば（例えば9kgm を見ると）ポンチ質量の大きいものほど，すなわち ポンチ速度の小さいものほどひずみ（あるいは密度）が大きくなっている．

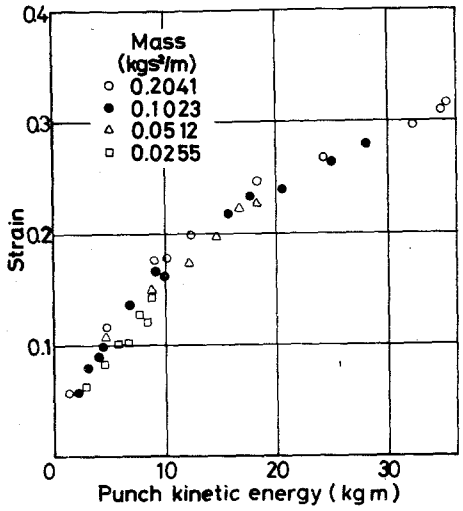


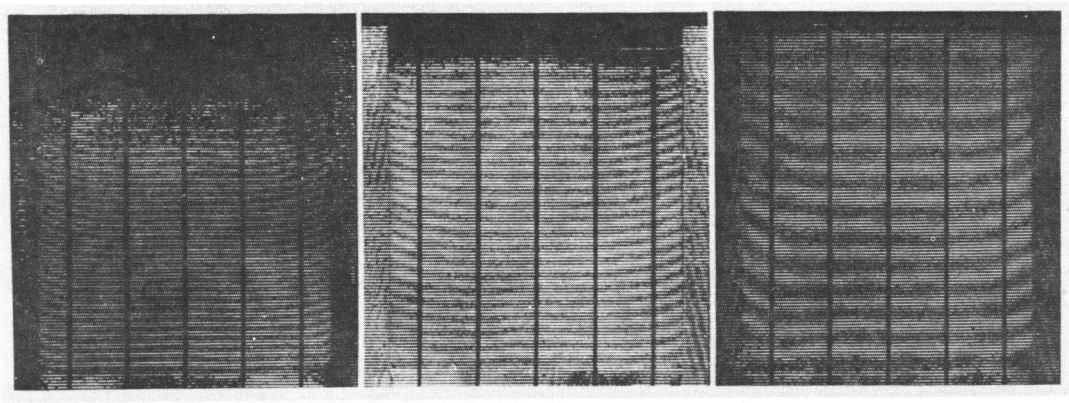
Fig.3.8 Relations between punch kinetic energy and average strain after dynamic compaction.

さて，動的圧縮過程中および圧縮後におけるひずみに及ぼすポンチ速度とポンチ質量の影響を詳しく解析するために，次の4つの場合について解析した．

(a)，(b) ポンチ速度とポンチ質量を変えてポンチの運動エネルギを等しくしたもの．（設定エネルギは，(a) の場合 18 kgm，(b) の場合 9 kgm ）

Table 3.1 Experimental conditions and results of strain.

	Test No.	Punch energy (kgm)	Punch speed (m/s)	Punch mass (kgs²/m)	Average strain after compaction	Average strain at 400 μs
(a) Energy 18 kgm	1	18.3	13.4	0.204	0.247	0.106
	2	17.6	18.6	0.102	0.233	0.140
	3	18.1	26.6	0.0512	0.228	0.170
(b) Energy 9 kgm	4	8.98	9.38	0.204	0.176	0.073
	5	9.05	13.3	0.102	0.167	0.100
	6	8.73	18.5	0.0512	0.148	0.122
	7	8.74	26.2	0.0255	0.144	0.138
(c) Punch speed 18.8 m/s	8	34.8	18.5	0.204	0.311	0.145
	2	17.6	18.6	0.102	0.233	0.140
	6	8.73	18.5	0.0512	0.148	0.122
	9	4.46	18.7	0.0255	0.084	0.102
(d) Punch mass 0.102 kgs²/m	2	17.6	18.6	0.102	0.233	0.140
	5	9.05	13.3	0.102	0.167	0.100
	10	4.25	9.11	0.102	0.087	0.062



V = 18.6m/s V = 13.3 m/s V = 9.11 m/s

Fig.3.9 Examples of moire fringes after dynamic compaction in the case of mass=0.102kgs²/m.

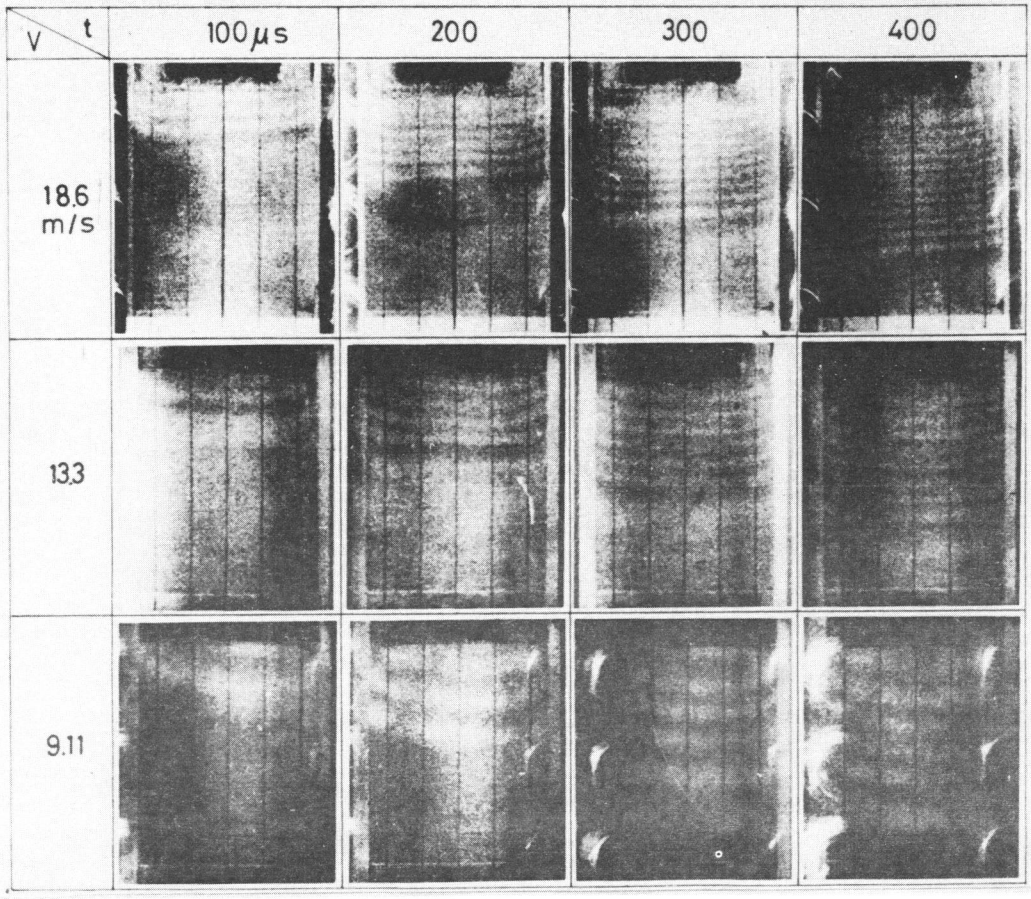


Fig.3.10 Examples of moire fringes during dynamic compaction in the case of mass=0.102kgs²/m.

(c) ポンチ速度は一定（設定速度 18.8 m／s ）でポンチ質量を変えたもの.

(d) ポンチ質量は一定（ 0.102 kgs²／m ）でポンチ速度を変えたもの.

なお，変え方はそれぞれの場合についてエネルギ比が１／２の等比級数となるように変えた．その結果を Table 3・1 に示す.

モアレじま写真の一例として (d) の場合について 動的圧縮後のものを Fig. 3・9に，高速度カメラで撮影した動的圧縮過程中のものを Fig. 3・10 に示す． Fig. 3・10 は 100μs ごとのモアレじまを示している．これを見ると 第２章でも述べたように 時間とともに波が伝ぱし波頭の通過により圧縮が行なわれている様子が良くわかる．圧縮後も圧縮過程中も，ポンチ速度が大きいほど,すなわち,ポンチの運動エネルギが大きいほどモアレじまの本数が多くなっているのがわかる．これらのモアレじまは壁面近くを除きほぼ水平であるので，以後解析は中央対称軸上で行なった.

動的圧縮後のひずみ分布を (a) ，(b) の場合について Fig. 3・11に示す．横軸は 底からの距離，縦軸は ひずみを表わす．太線がモアレじまから求めたひずみ分布である．両端の値は正確に求めることができなかったので，ここでは図の底とポンチ側の衝撃端の位置に粉体の全長から求めた平均ひずみの値をプロットし，それらと太線とを破線の直線で結んだ.

ひずみ分布を見ると，高エネルギのものは 中心部のひずみが大きい． しかし，低エネルギのものを見ると，ポンチ質量の大きいもの すなわち 低速のものはひずみは比較的均一であるが，高速のものは底部のひずみが大で，ポンチに近づくにつれて小さくなっている.

動的圧縮開始後約 400μs 時の圧縮中のひずみ分布を (a)，(b) の場合について Fig. 3・12 に示す．この図はポンチ側の衝撃端から出た波が粉体中を伝わり，底からの距離約 10 mm のところまで 波頭が伝わった時のひずみ分布である．ひずみが比較的一定な底からの距離が約 25～50 mmの間の平均ひずみをここでは早期ひずみと呼ぶことにする．この早期ひずみの値を衝撃

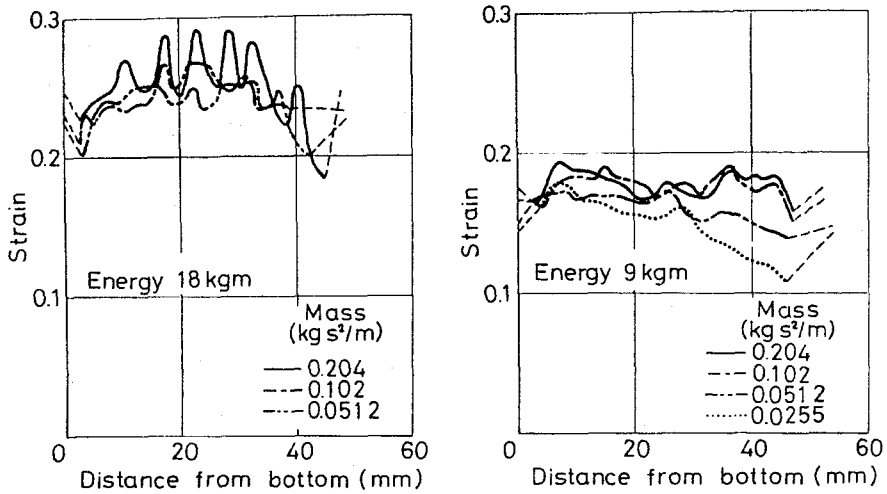


Fig.3.11 Examples of strain distributions after dynamic compaction.

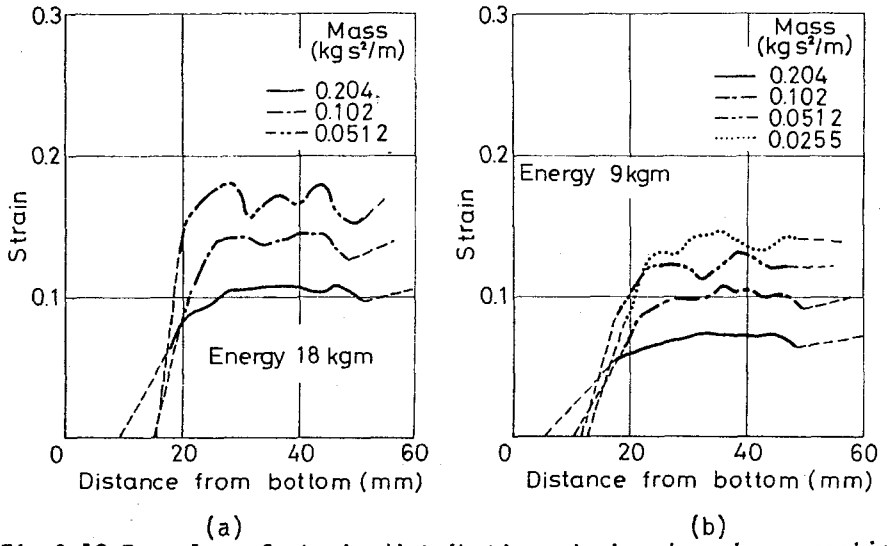


Fig.3.12 Examples of strain distributions during dynamic compaction at 400 μs after the beginning of compression.

端の位置にプロットした．これらのプロットと太線とを破線の直線で結んだ．

同じエネルギならばポンチ質量の違いにより，ひずみ分布に大きな差ができており，動的圧縮過程中は圧縮後と逆で ポンチ質量の大きいものほど ひずみが小さい．いいかえるとポンチ速度の大きいほどひずみが大きい．

以上の動的圧縮後と圧縮過程中の結果をまとめ直した図が Fig. 3・13 である．この図は，エネルギをパラメータとしてポンチ速度とひずみの関係を示している．この図より，次のことがいえる．

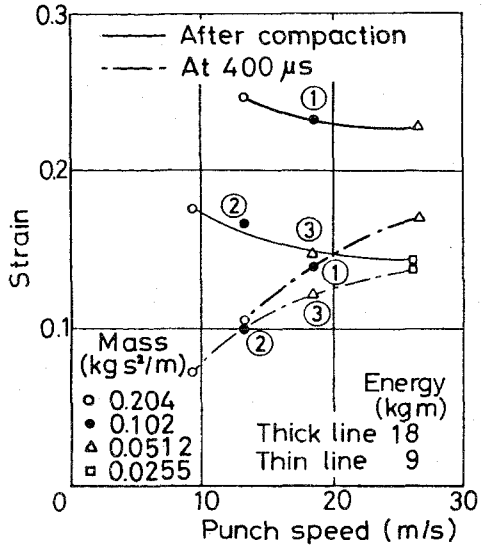


Fig.3.13 Relations between punch speed and strain after dynamic compaction and during dynamic compaction at 400 μs.

（１）圧縮後はエネルギの違いによるひずみの差は大きい．エネルギが等しい場合はポンチ速度が小さいほどひずみは大きいがポンチ速度の違いによる差は小さい．しかし，早期ひずみについてはエネルギの違いによる差は小さいが，ポンチ速度の違いによる差は大きく，ポンチ速度が大きいほどひずみが大きい．

（２）図中の①と②は質量を変えずにエネルギを 2：1 とし，①と③は速度を変えずにエネルギを 2：1 とした．これを見ると圧縮後については 速度を変えた影響よりも 質量を変えた影響の方が大きい．早期ひずみについては質量を変えた影響よりも速度を変えた影響の方が大きい．

（３）圧縮後のひずみと早期ひずみの差は速度の大きいほど小さい．特に，エネルギ 9 kgm，ポンチ速度 26 m／s の場合は 圧縮後も早期ひずみもほとんど同じ値である．この理由は，ポンチの速度が大きいと 圧縮初期に 大きなひずみとなり，その反作用の力も大きいため 質量の小さいポンチは 急激に減速させられる．その結果，圧縮波が粉体中を往復しないうちにポンチは速度を失ないすぐに圧縮が進まなくなると考えられる．Fig. 3・11 (b) のポンチ質量 0.0255 kgs²／m がこの場合の圧縮後のひずみ分布である．これを見ると 粉体中を波が底まで伝わって反射したが，その後エネルギが小さいため すぐに圧縮が進まなくなり，その結果，底部のひずみは大きいがポンチ付近のひずみが小さくなっていると考えられる．この場合は理論的に考えた Fig. 3・5 の (j) の場合に相当している．同じエネルギでも ポンチ質量

0.204や0.102 kgs²／m の場合は，ポンチ速度が小さいため 早期ひずみは小さいが，そのため反作用の力は小さく，ポンチ質量が大きいためポンチの速度はすぐには減少せず，粉体中を応力波が何度も往復し，粉体の圧縮が進むため Fig. 3・11 に示すように比較的均一になる．この場合は Fig. 3・5 の (i) の場合に相当する．

3・5　結論

以上の結果，結論として 次のことがいえる．

ポンチの運動エネルギが同じならば，圧縮過程中の初期においては ポンチ速度の大きいものほど 密度が高くなるが，圧縮後は ポンチ速度の小さいものほど密度が高くなる．この理由は，衝撃波の性質と粉体の粘性によるものと考えられる．

準静的圧縮の場合は 壁面の摩擦により ポンチ側の密度が高い密度分布ができるが，動的圧縮の場合は 摩擦がなくても ポンチ速度が変わると密度分布が異なる．すなわち ポンチの運動エネルギが同じならば，ポンチの速度が非常に大きいと ポンチ側の密度が高くなり，ポンチ速度が少し小さくなると底側の密度が高くなる．ポンチ速度が非常に小さくなると比較的均一な密度分布となる．

第4章　動的圧縮中の粉体の挙動の理論的解析

―― 有限要素法およびテンソルコードによる数値計算 ――

4・1　まえがき

粉体の圧縮中の応力あるいはひずみの解析については いくつかの研究がなされている．静的圧縮中の圧力分布については，郡・西原ら[101),(149)]が，粉体の再圧縮時の挙動は弾性的であるとして 弾性理論によって 圧力分布を求めている．島ら[105),(106)]は 多孔質金属のポンチ押込み時やすえ込み時の変形を 有限要素法を用いて求めている．動的圧縮中の挙動については，佐野ら[119)～(123)]が一次元差分計算により数値解を求めている．しかし，動的圧縮中の二次元・三次元の解析はまだ行なわれていない．そこで本章では，密閉容器内に入った粉体を動的に圧縮した場合の 圧縮中のひずみ分布を 理論的に解析した．解析は，二次元平面ひずみ問題として 有限要素法およびテンソルコードを用いて 数値計算により行なった．

理論計算に当っては，次のような仮定を用いている．

（1）　粉体を均質な連続体として取扱う．

本研究に使用した粉体は 第1章の Fig. 1・1 で示したように，粒子一個の直径が 100μm 程度以下の多数の粒子の集合体であり，1 mm^3 中に約 10^3 個以上の粒子が含まれていることになる．したがって，数 cm 以上の大きさを持つ容器内の粉体の挙動を取扱う場合には 上記の仮定は ほぼ妥当なものと考えてよい．したがって，本研究では　特に粉体の微視的挙動を問題にする場合を除いては，粉体を均質な連続体と考えて取扱うことにする．

（2）　粉体を力学的に等方性であるとして取扱う．

一般には，粉体に関するこの仮定は妥当ではない．粉体は圧縮すると顕著な異方性を示し，特に第7章の実験で示すように 圧粉体を除荷した後 異なった方向に再び荷重を加えるときは，粉体の挙動は，この異方性によって支

配される．このように荷重経路が変化する場合の挙動に対しては，ひずみ履歴の影響を無視することはできない．しかし，本章で取扱っている粉体の成形加工のように一定方向に単調に増加する荷重を加える場合には，等方硬化の仮定を用いても 粉体の挙動を良く説明することができ，後に示す本章や第5章の計算例と実験結果との比較からもわかるように 多くの場合 定量的にもほぼ実験値と一致した結果を得ることができる．この仮定を用いると計算も簡単になるので 本研究の理論解析では，粉体を等方硬化の連続体として取扱うことにする．

（3） 粉体はひずみ速度の影響を受ける弾粘塑性体と考える．

従来の構成式はひずみ速度の影響を無視していた[例えば(72)]．しかし，第6章の実験で示すように 圧粉体の変形挙動は ひずみ速度の影響を受ける．したがって，ひずみ速度の影響を考慮した構成式を用いることは，実際の粉体の挙動をより正確に取扱うことになるだけでなく，特に動的な問題を取扱う時には以下のような利点を持っている．すなわち，粉体のように下に凸の応力- ひずみ曲線を持つ材料では 粘性項を無視すると 応力波の波頭は，いわゆる衝撃波となり波頭を横切って現象は不連続となる．このため，一次元問題では Rankin- Hugoniotの式を用いて波頭の前後における跳躍条件を導き，これを用いて衝撃波のある場合の解を求めている[例えば(119)]けれども，多次元問題では数値解を求めることが極めて困難となる．これに対して，ひずみ速度の影響を考慮して構成式に粘性項を加えると 波頭を横切って現象は連続となり，数値解を求めることができる．このように粘性項を考慮することによって粉体の動的挙動の解析を多次元問題にまで拡張することができるようになる．

さて，粉体の三次元構成式については，明田ら[(82)]，Schwartz ら[(83)]，Koerner ら[(84),(85)]および増田ら[(86)～(88)]により 降伏条件式が提案されているが，これらの式は流れ法則と結びつけ難いので，複雑形状部品などの三次元応力解析が困難である．焼

結金属などの多孔質金属の場合の三次元構成式については Kuhn[69] ら，Green,[70] Kaufman[71] および大矢根[72]らにより提案されており，圧縮時のひずみ分布などの理論的解析も島[105],[106]らにより有限要素法を用いて行なわれている．

ここでは，大矢根らの導いた多孔質金属の構成式を粉体の場合に適用できるように，その材料定数を求め直し，さらに 前述のように ひずみ速度も考慮した構成式に改造した．

4・2　粉体の構成式

大矢根らは，粉末成形により製造された焼結体などの多孔質金属は，実質部金属と空げきとから成立っており,実質部金属の塑性変形は Levy- Mises の塑性力学法則に従うとの仮定から，多孔質全体の塑性法則を導いている．しかし，圧粉体の場合は 多孔質金属と異なり，粒子間の滑りがあるため より変形し易いと考えられ，さらにその滑りのためひずみ速度による粘性効果も現われる．そこで，ここでは，この大矢根らの塑性法則に含まれる実質部金属の相当応力- 相当ひずみ関係を 粉体の密閉容器内圧縮実験より 逆算して求め，滑りの影響による変形のし易さを含んだものとしてとらえた．さらに，ひずみ速度の影響による項を考慮して，塑性部分に粘性項を付加し，弾性成分も考えて，三要素弾粘塑性モデルに発展させた．以下，これらの式を導く．

4・2・1　塑性基礎式

まず，大矢根[72]らの導いた多孔質金属の塑性基礎式について述べる．ここでは弾性成分は考えない．

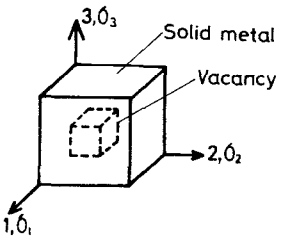


Fig.4.1 Unit cell model for powders.

多孔質体は Fig. 4・1 のような 立方体のユニットセルの集合体であると考える．ユニットセルの実質部の密度

をγ_s，その体積をV_s，見かけの密度をγ，見かけの体積（ユニットセル全体の体積）をVとする．密度比ρと体積ひずみε_vを次のように定義する．

$$\rho = \gamma / \gamma_s \qquad (4\cdot1)$$

$$\varepsilon_v = \ln(V / V_s) = -\ln(\gamma / \gamma_s) = -\ln\rho \qquad (4\cdot2)$$

上式より

$$d\varepsilon_v = dV/V = -d\gamma/\gamma = -d\rho/\rho \qquad (4\cdot3)$$

となる．Fig．4・1 に示すように主応力σ_1，σ_2，σ_3の方向に座標軸1，2，3をとる．塑性主ひずみ増分を$d\varepsilon_1$，$d\varepsilon_2$，$d\varepsilon_3$とすると

$$d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 - d\varepsilon_v = 0 \qquad (4\cdot4)$$

となる．

いま，このユニットセルの変形を考えるに当り，これを Fig．4・2 のように2成分に分け，第1成分は形状変化を伴なわない体積変化，第2成分は体積一定のままの形状変化とする．このとき，第2成分は 空げき内に 体積不変で変形抵抗のない媒体が充満しているとみなすと，一般の金属材料の均一変形と同様に考えられ，第2成分の相当塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{eq2}$ は

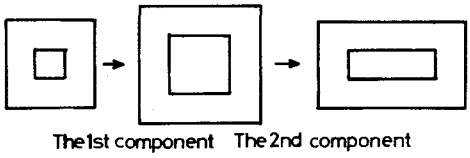


Fig.4.2 Deformation process of unit cell in this theory used for getting constitutive equations of porous metal or powders.

$$(d\varepsilon_{eq2})^2 = \frac{2}{9}\left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2\right] \qquad (4\cdot5)$$

となる．また，第1成分の相当塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{eq1}$ は体積ひずみ増分 $d\varepsilon_v$ に比例するものとして，次のように置くことができる．

$$d\varepsilon_{eq1} = f^p d\varepsilon_v \qquad (4\cdot6)$$

ここで，f^p は密度比ρのみの関数である．よって ユニットセル実質部での相当塑性ひずみ増分 $d\overline{\varepsilon_{eq}}$は

$$(d\overline{\varepsilon_{eq}})^2 = \frac{2}{9}\left[(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2\right] + (f^p d\varepsilon_v)^2 \qquad (4\cdot7)$$

と表わされる．

一方，実質部の受ける相当応力を$\overline{\sigma_{eq}}$とすると，実質部の塑性変形は Levy- Mises の法則に従うという仮定から，ユニットセル実質部では

$$\frac{d\varepsilon_1-d\varepsilon_2}{(\sigma_1-\sigma_2)/\rho}=\frac{d\varepsilon_2-d\varepsilon_3}{(\sigma_2-\sigma_3)/\rho}=\frac{d\varepsilon_3-d\varepsilon_1}{(\sigma_3-\sigma_1)/\rho}=\frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\overline{\sigma_{eq}}} \qquad (4\cdot 8)$$

が成立する．これは 実質部に作用する応力は 見かけの応力σ_1，σ_2，σ_3 に対して，平均的にσ_1/ρ，σ_2/ρ，σ_3/ρであると考えられるからである．

ユニットセルに加えられる単位体積あたりの変形仕事dWは 実質部の 変形仕事にも等しいので

$$dW=\sigma_1 d\varepsilon_1+\sigma_2 d\varepsilon_2+\sigma_3 d\varepsilon_3=\rho\overline{\sigma_{eq}}\,d\overline{\varepsilon_{eq}} \qquad (4\cdot 9)$$

となる．

式（４・８）を書き変えると

$$\frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}}}$$

$$=\frac{\frac{9}{2}d\overline{\varepsilon_{eq}}^2-(d\varepsilon_1-d\varepsilon_2)^2-(d\varepsilon_2-d\varepsilon_3)^2-(d\varepsilon_3-d\varepsilon_1)^2}{3\rho\overline{\sigma_{eq}}\,d\overline{\varepsilon_{eq}}-(\sigma_1-\sigma_2)(d\varepsilon_1-d\varepsilon_2)-(\sigma_2-\sigma_3)(d\varepsilon_2-d\varepsilon_3)-(\sigma_3-\sigma_1)(d\varepsilon_3-d\varepsilon_1)} \qquad (4\cdot 10)$$

となり，さらに式（４・７）および（４・９）より 上式は結局，次のようになる．

$$\frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}}}=\frac{\left(\frac{9}{2}\right)f^{p^2}d\varepsilon_v^2}{(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)\,d\varepsilon_v}=\frac{3}{2}\frac{f^p d\varepsilon_v}{\sigma_m/f^p} \qquad (4\cdot 11)$$

この式と式（４・８）より次式が得られる．

$$\frac{d\varepsilon_1-d\varepsilon_2}{\sigma_1-\sigma_2}=\frac{d\varepsilon_2-d\varepsilon_3}{\sigma_2-\sigma_3}=\frac{d\varepsilon_3-d\varepsilon_1}{\sigma_3-\sigma_1}=\frac{f^p d\varepsilon_v}{\frac{2}{3}(\sigma_m/f^p)}=\frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}}} \qquad (4\cdot 12)$$

この式を辺々２乗して，$f^p d\varepsilon_v$に式（４・７）を代入すると

$$\overline{\sigma_{eq}}^2=\frac{1}{\rho^2}\left[\frac{1}{2}\left\{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\right\}+\left(\frac{\sigma_m}{f^p}\right)^2\right] \qquad (4\cdot 13)$$

となる．ここで $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ である．上式は，ユニットセル実質部金属の相当応力と 見かけの応力 の関係を表わしており，見かけの応力で表わした降伏条件式となっている．この降伏条件式は，主応力空間で $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ で表わされる軸を回転軸とする回転だ円体の表面を表わしている．応力- ひずみ増分関係式は式（4・12）より

$$\left.\begin{aligned}
d\varepsilon_1 &= \frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}}}\left\{\sigma_1-\left(1-\frac{2}{9f^{p2}}\right)\sigma_m\right\}\\
d\varepsilon_2 &= \frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}}}\left\{\sigma_2-\left(1-\frac{2}{9f^{p2}}\right)\sigma_m\right\}\\
d\varepsilon_3 &= \frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}}}\left\{\sigma_3-\left(1-\frac{2}{9f^{p2}}\right)\sigma_m\right\}\\
d\varepsilon_v &= \frac{3}{2}\frac{d\overline{\varepsilon_{eq}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}}}\frac{2}{3f^{p2}}\sigma_m
\end{aligned}\right\} \qquad (4\cdot14)$$

となる．

以上の塑性基礎式を，応力およびひずみに塑性成分を表わす添字 p を右肩につけ，さらに直交座標系に関するテンソル記号 ij を用い，偏差成分と静水圧成分で表わすと次のようになる．

$$\overline{\sigma_{eq}^{p}}=\frac{1}{\rho}\sqrt{\frac{3}{2}\sigma_{ij}^{p\prime}\sigma_{ij}^{p\prime}+\left(\frac{\sigma_m^p}{f^p}\right)^2} \qquad (4\cdot15)$$

$$\overline{\dot{\varepsilon}_{eq}^{p}}=\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^{p\prime}\dot{\varepsilon}_{ij}^{p\prime}+(3f^p\dot{\varepsilon}_m^p)^2} \qquad (4\cdot16)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p\prime}=\frac{3}{2}\frac{\overline{\dot{\varepsilon}_{eq}^{p}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}^{p}}}\sigma_{ij}^{p\prime} \qquad (4\cdot17)$$

$$\dot{\varepsilon}_m^p=\frac{3}{2}\frac{\overline{\dot{\varepsilon}_{eq}^{p}}}{\rho\overline{\sigma_{eq}^{p}}}\left(\frac{2}{9f^{p2}}\sigma_m^p\right) \qquad (4\cdot18)$$

ここで，$\sigma_{ij}^{p\prime}$ は偏差応力テンソル，$\varepsilon_{ij}^{p\prime}$ は偏差ひずみテンソル，・は時間

に関する微分を表わす．また，$\sigma_m^p = \sigma_{ii}^p / 3$，$\dot{\varepsilon}_m^p = \dot{\varepsilon}_{ii}^p / 3 = \dot{\varepsilon}_v^p / 3$ である．

4・2・2　弾性基礎式

中実金属の塑性ひずみ増分理論 Levy- Mises の式は，弾性変形における応力とひずみの関係式と類似の形をしているので，島[105]らは，多孔質金属の弾性の応力- ひずみ関係が，4・2・1 節で述べた塑性ひずみ増分の式と似た形の式になるものと考えて弾性基礎式を導いた．すなわち，塑性変形に対しては，式（4・14）に示したように

$$\left.\begin{aligned} d\varepsilon_x &= \frac{1}{A_E}\left\{\sigma_x - B_\nu(\sigma_y+\sigma_z)\right\} \\ &\vdots \\ d\gamma_{yz} &= \frac{2}{A_E}(1+B_\nu)\,\tau_{yz} \\ &\vdots \end{aligned}\right\} \qquad (4\cdot 19)$$

の形で表わされ，中実金属および多孔質金属に対する A_E，B_ν の値は，Table 4・1 に示すようになる．なお，中実金属の弾性変形に対しては 式（4・19）において ひずみ増分の代りに全ひずみをとれば A_E は 縦弾性係

Table 4.1 Constants in plastic and elastic equations for pore-free and porous metals or powders.

	A_E		B_ν	
	plastic	elastic	plastic	elastic
pore-free metals	$\dfrac{\bar{\sigma}_{eq}}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$	$\bar{E}$	$\dfrac{1}{2}$	$\bar{\nu}$
porous metals or powders	$\dfrac{\rho}{1+\dfrac{1}{9f^{p2}}}\dfrac{\bar{\sigma}_{eq}}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$	$\dfrac{\rho}{1+\dfrac{1}{9f^{e2}}}\bar{E}$	$\dfrac{1-\dfrac{2}{9f^{p2}}}{1+\dfrac{1}{9f^{p2}}}\dfrac{1}{2}$	$\dfrac{1-\dfrac{2}{9f^{e2}}}{1+\dfrac{1}{9f^{e2}}}\bar{\nu}$

数$\bar{E}$，B_νは Poisson 比$\bar{\nu}$となる．Table 4・1 に 示すような類推から，多孔質金属に対する縦弾性係数E，Poisson 比νは

$$E = \frac{\rho}{1+\frac{1}{9f^{e2}}}\bar{E}, \quad \nu = \frac{1-\frac{2}{9f^{e2}}}{1+\frac{1}{9f^{e2}}}\bar{\nu} \qquad (4\cdot 20)$$

とする．ここでf^eはρのみの関数である．

式（4・19）を テンソル記号を用いて偏差成分で表わすと，弾性部分については

$$\sigma_{ij}' = 2G\,\varepsilon_{ij}^{e\prime} \qquad (4\cdot 21)$$

となる．ここで，Gはせん断弾性係数であり$G=E/\{2(1+\nu)\}$ である．

4・2・3　三要素弾粘塑性モデル

ここでは，粉体を弾粘塑性体と考え，Hohenemser[150] らが 示した三要素モデルを適用し，その弾塑性項を大矢根・島らが示した多孔質金属の構成式に置き換えて解析した．以下この構成式について説明する．

応力テンソル$[\sigma_{ij}]$ とひずみテンソル$[\varepsilon_{ij}]$との間にはある関数関係がある．P, Q をそれぞれの関数とすると，

$$P([\sigma_{ij}]) = Q([\varepsilon_{ij}]) \qquad (4\cdot 22)$$

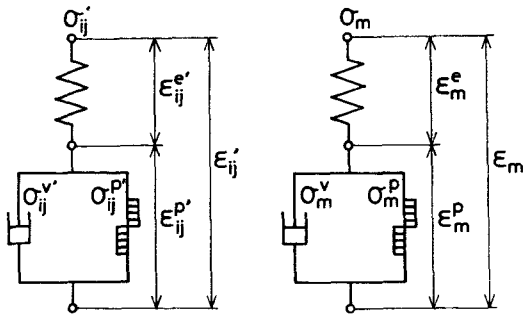
となり，これを偏差成分と等方成分に分けると

$$P([\sigma_{ij}], \sigma_m) = Q([\varepsilon_{ij}], \varepsilon_m) \qquad (4\cdot 23)$$

となる．さて，粉体の場合も，金属の場合と同様に，静水圧圧力を加えると形状を変えることなく体積が変化し，また，純粋せん断では体積変化がないとして，偏差成分と等方成分とが分離でき，お互いに独立であると考えると，P, Q はそれぞれP_1, P_2とQ_1, Q_2に分離でき

$$P_1([\sigma_{ij}']) = Q_1([\varepsilon_{ij}']), \quad P_2(\sigma_m) = Q_2(\varepsilon_m) \qquad (4\cdot 24)$$

となる．そして，この偏差成分および等方成分についてそれぞれ Fig. 4・3 に示すような Hohenemser らの示した三要素弾粘塑性モデルが適用できると



(a) Components of stress deviator.　　(b) Components of mean stress.

Fig.4.3 Model for powders. Three elements elastic visco-plastic model.

考え，この構成式の定式化を考える．

まず，偏差成分については，Fig. 4・3 の関係より

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij}^{p'} + \sigma_{ij}^{v'} \qquad (4\cdot 25)$$

$$\varepsilon_{ij}' = \varepsilon_{ij}^{e'} + \varepsilon_{ij}^{p'} \qquad (4\cdot 26)$$

となる．ここで，$\sigma_{ij}^{v'}$ は粘性偏差応力テンソル，$\sigma_{ij}^{p'}$ は（静的）塑性偏差応力テンソル，$\varepsilon_{ij}^{e'}$ は弾性偏差ひずみテンソル，$\varepsilon_{ij}^{p'}$ は塑性偏差ひずみテンソルである．

弾性要素については 式（4・21）より

$$\sigma_{ij}' = 2G\dot{\varepsilon}_{ij}^{e'} \qquad (4\cdot 27)$$

塑性要素については，式（4・17）の $\sigma_{ij}^{p'}$ と $\varepsilon_{ij}^{p'}$ の関係を書直して

$$\sigma_{ij}^{p'} = \frac{1}{2\lambda^*}\dot{\varepsilon}_{ij}^{p'} \qquad (4\cdot 28)$$

となる．ここで

$$2\lambda^* = \frac{3}{2}\frac{\overline{\dot{\varepsilon}_{eq}^{p}}}{\rho\,\overline{\sigma_{eq}^{p}}} \qquad (4\cdot 29)$$

である．粘性要素については Hohenemser らの式を用いて

$$\sigma_{ij}^{v'} = 2\eta\,\dot{\varepsilon}_{ij}^{p'} \qquad (4\cdot 30)$$

となる．ここで η は粘性係数である．

また，塑性要素の相当応力を表わす式（4・15）と 相当ひずみ速度を表わす式（4・16）の間には，母材金属の（静的）加工硬化特性を 適用すると

$$\overline{\sigma_{eq}^{p}} = H\left(\int \overline{\dot{\varepsilon}_{eq}^{p}}\,dt\right) \qquad (4\cdot 31)$$

なる関数関係がある．

さて，式（4・29）のλ^*を次のようにして$\overline{\dot{\varepsilon}_{eq}^{p}}$を消去した形で求め直すことができる．すなわち，式（4・25）に式（4・28），（4・30）を代入し整理すると

$$\sigma_{ij}^{p\prime} = \gamma^* \sigma_{ij}' \qquad (4・32)$$

となる．ここで

$$\gamma^* = 1/(4\eta\lambda^* + 1) \qquad (4・33)$$

である．式（4・32）を式（4・15）に代入すると

$$\gamma^* = \frac{\sqrt{\rho^2 \overline{\sigma_{eq}^{p}}^2 - (\sigma_m^p/f^p)^2}}{\sqrt{3J_2'}} \qquad (4・34)$$

となり，式（4・33），（4・34）より

$$\lambda^* = \frac{1}{4\eta}\left\{\frac{\sqrt{3J_2'}}{\sqrt{\rho^2 \overline{\sigma_{eq}^{p}}^2 - (\sigma_m^p/f^p)^2}} - 1\right\} \qquad (4・35)$$

となる．ここで$J_2' = \sigma_{ij}'\sigma_{ij}'/2$は偏差応力テンソルの第2不変量である．このようにしてλ^*が求められる．

式（4・26），（4・27），（4・28），（4・32）よりσ_{ij}'とε_{ij}'の関係は

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_{ij}' &= 2G\dot{\varepsilon}_{ij}^{e\prime} = 2G(\dot{\varepsilon}_{ij}' - \dot{\varepsilon}_{ij}^{p\prime}) = 2G(\dot{\varepsilon}_{ij}' - 2\lambda^*\sigma_{ij}^{p\prime}) \\ &= 2G\dot{\varepsilon}_{ij}' - 4G\lambda^*\gamma^*\sigma_{ij}'\end{aligned} \qquad (4・36)$$

となり，これが偏差応力に関する構成式となる．

つぎに，等方成分についても，Fig. 4・3 (b) のように三要素弾粘塑性モデルが成立するとし，静水圧圧縮の場合を考えると

$$\sigma_m = \sigma_m^p + \sigma_m^v \qquad (4・37)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_m^e + \varepsilon_m^p \qquad (4・38)$$

$$\sigma_m = 3K\varepsilon_m^e \qquad (4・39)$$

$$\sigma_m^p = \dot{\varepsilon}_m^p/(4\lambda^* M_f) \qquad (4・40)$$

$$\sigma_m^v = 2\eta\dot{\varepsilon}_m^p \qquad (4・41)$$

が成立する．ここで$K = \lambda + 2G/3$は体積弾性係数であり，$M_f = 1/(9f^{p2})$

である．

δ_{ij}を Kronecker のデルタとすると

$$\sigma_{ij}=\sigma_{ij}'+\sigma_m\delta_{ij}\,,\quad \varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ij}'+\varepsilon_m\delta_{ij} \qquad (4\cdot42)$$

であるから，全応力σ_{ij}と全ひずみε_{ij}との関係は式（4・42），（4・36）（4・39），（4・38），（4・40）より 次のようになる．

$$\dot{\sigma}_{ij}=\lambda\dot{\varepsilon}_{\alpha\alpha}\delta_{ij}+2G\dot{\varepsilon}_{ij}-4G\lambda^*\gamma^*\sigma_{ij}'-12\lambda^*M_f\sigma_m^p\delta_{ij} \qquad (4\cdot43)$$

この式が$\dot{\sigma}_{ij}$と$\dot{\varepsilon}_{ij}$の関係を表わす構成式である．この構成式は右辺の中にσ_{ij}'，σ_m^pが含まれており，σ_{ij}，$\dot{\sigma}_{ij}$，ε_{ij}，$\dot{\varepsilon}_{ij}$だけで表現されているわけではないが，数値計算を行なう場合は，時間増分Δtを微小として増分前の値で置き換えることができる．あるいは，繰返し計算をして逐次近似法により求めることができる．

4・3　材料定数の決定

前節で述べた粉体の構成式に含まれるf^p，f^e，E，νなどは 粉体の種類によって定まる材料定数である．これらの材料定数は厳密には密度によって変わると考えられる．そこでここでは これらの材料定数を 密度比ρの関数とし，第2章，第3章，第5章のモアレ法の実験で使用した電解銅粉（CE-6）の場合について密閉容器内準静的圧縮実験により材料定数を求めた．なお，本実験では，モアレ法による実験との関連で，粉体の密度比が 0.5以下の場合について調べた．

密閉容器内圧縮において圧縮方向が1の方向となるように直角座標1，2，3をとると，応力状態はσ_1，$\sigma_2=\sigma_3$であり，$|d\varepsilon_1^p|\gg|d\varepsilon_2^p|=|d\varepsilon_3^p|\fallingdotseq 0$と考えられるので，式（4・13），（4・14），（4・7）より

$$\xi=\frac{\sigma_2}{\sigma_1}=\frac{9f^{p^2}-2}{9f^{p^2}+4} \qquad (4\cdot44)$$

$$d\bar{\varepsilon}_{eq}^p=|d\varepsilon_1^p|\sqrt{\frac{4}{9}+f^{p^2}} \qquad (4\cdot45)$$

$$\overline{\sigma_{eq}^{p}} = |\sigma_1| \frac{3}{\rho\sqrt{4+9f^{p2}}} \qquad (4\cdot46)$$

となる．ここで ξ は側圧係数と呼ばれる．

つぎに，密度比 ρ と側圧係数 ξ の関係を密閉容器内圧縮実験より求める．密閉容器内圧縮実験の詳細は７・２・２節で述べることにし，ここではその結果である ρ と ξ の関係を Fig. 4・4 に示す． これより次式の関係を得た．

$$\xi = 0.678\rho - 0.077 \qquad (4\cdot47)$$

この式と式（４・44）より ρ と f^p の関係は

$$f^p = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\frac{0.846+1.36\rho}{1.08-0.678\rho}} \qquad (4\cdot48)$$

となる．また密閉容器内実験で求めた $\sigma_1 - \rho$ 関係を式（４・45），（４・46）と組合せることにより，$\overline{\sigma_{eq}^{p}} - \overline{\varepsilon_{eq}^{p}}$ の関係式を求めることができる．この結果を Fig. 4・5 に示す． これより近似的に

$$\overline{\sigma_{eq}^{p}} = 3.88\left(\overline{\varepsilon_{eq}^{p}} + 0.663\right)^{5.35} \quad (kg/mm^2) \qquad (4\cdot49)$$

の関係を得た．この時の初期降伏応力 σ_Y は 0.431 kg／mm² となった．

弾性基礎式における材料定数については，塑性時の f^p と弾性時の f^e とを同じとし，中実金属の Poisson 比 $\overline{\nu}$ は純銅の Poisson 比 0.32 を 使用して，式（４・20）より ν を求めた．

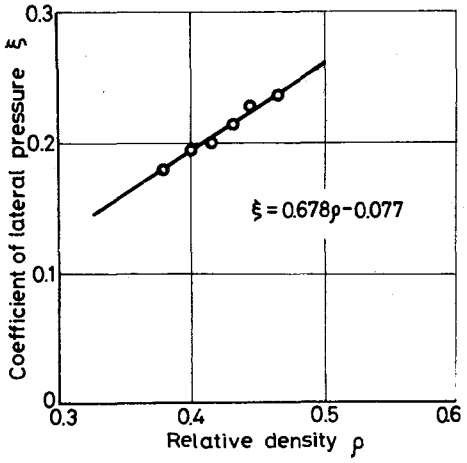


Fig.4.4 Relations between coefficient of lateral pressure and relative density.

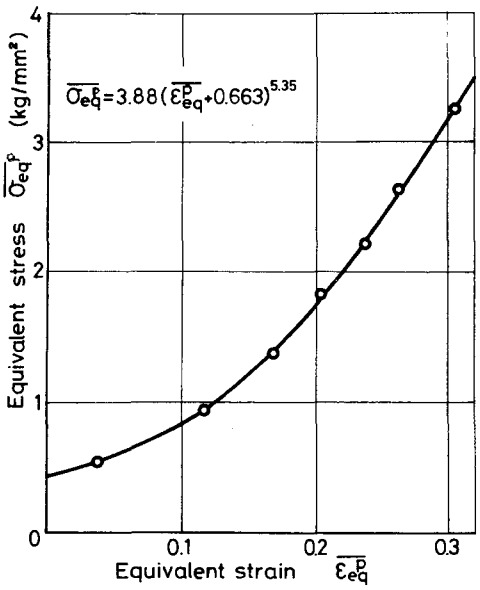


Fig.4.5 Relation between equivalent stress and equivalent strain.

縦弾性係数Eについては，圧粉体の場合，多孔質金属と異なり密度により大きく変化するため，多孔質金属の場合の式（4・20）は用いず，後で示す第6章の6・2・2節で求めた密閉容器内圧縮実験で得られる弾性係数E_cと密度比ρとの関係

$$\log E_c = 7.43\rho - 1.09 \qquad (kg/mm^2) \qquad (4\cdot 50)$$

を用いる．ただし，このE_cは密閉容器内における弾性係数を表わしており，式（4・20）の Poisson 比νを用いて縦弾性係数Eを求め直し，次式のように近似した．

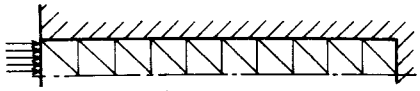
$$\log E = 7.33\rho - 1.17 \qquad (kg/mm^2) \qquad (4\cdot 51)$$

粘性係数ηについては，金属の場合でも正確には求められていないようであり，岸田ら[151]は理論計算に当って$3G/(2\eta)=0.5\times10^6\sim2\times10^6$ /s の値を採用している．圧粉体の場合も，このηを求めるのが困難なので，数値計算に当っては$G/\eta=10^6$を中心にいくつかの値を適当に決めて計算を行なってみた．

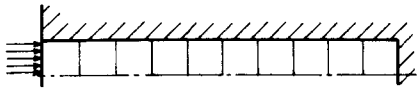
4・4　一次元密閉容器内の粉体中の応力波の伝ぱ

粉体の動的圧縮中の応力波の伝ぱの挙動を理論的に調べるため，有限要素法とテンソルコード（一種の差分法）を用いて計算を行なった．ここで用いる有限要素法は，弾粘塑性モデルで表わされる金属材料の二次元平面応力状態の動的応答解析を行なった岸田ら[151]の方法を用いた．ここで用いた方法が岸田らの方法と異なる点は，平面ひずみ問題としたこと，構成式として式（4・43）を用いたこと，時間積分として$\beta=1/6$ の Newmark のβ法[152]を用いたことなどである．また，ここで用いたテンソルコードは，軸対称円筒座標で表わされる金属材料中などの動的応答解析を行なった Maenchen ら[153]の方法を平面ひずみ問題に改造し，構成式として式（4・43）を用いた．

まず，Fig. 4・6 に示すような簡単な形状である一次元密閉容器内で動的



(a) F.E.M. (Finite element method)



(b) T.C. (Tensor code)

Fig.4.6 Element model.

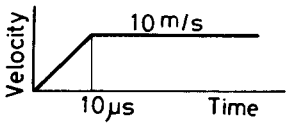


Fig.4.7 Velocity at impact end.

に圧縮される粉体内の応力波の伝ぱを調べた．要素形状は有限要素法では直角二等辺三角形，テンソルコードでは正方形である．境界条件は Fig. 4・7 に示すように，衝撃端にて直線の立上りの後 一定速度となるように圧縮し，壁面では壁に垂直な方向には変位できないとした．まず，テンソルコードを用いて解析を行なった．粉体の粘性を考慮しない場合の解析結果を Fig. 4・8 に，粉体の粘性を考慮した場合の解析結果を Fig. 4・9 に示す．この例では時間メッシュも長さメッシュも粗いので応力分布はあまり滑らかでは

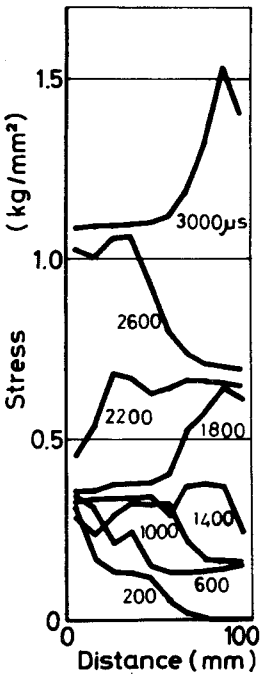


Fig.4.8 Stress distributions in powders without viscosity by T.C.

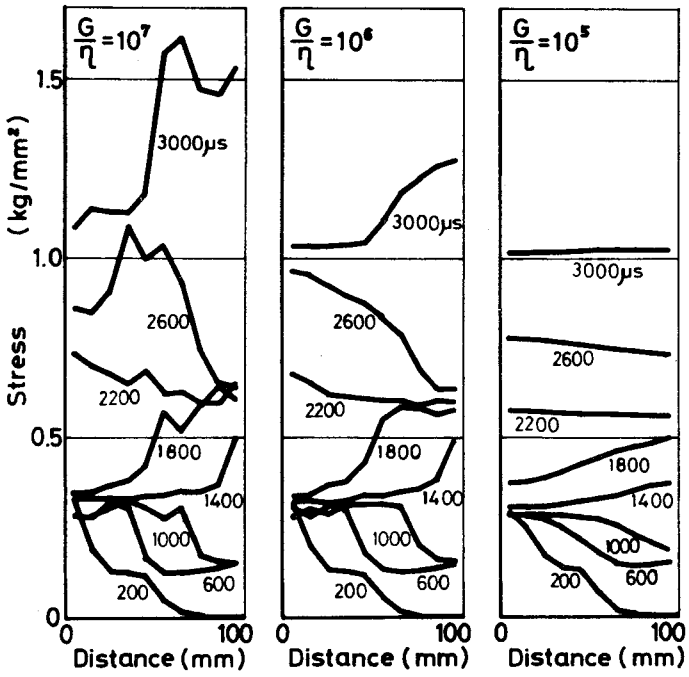


Fig.4.9 Stress distributions in powders with viscosity by T.C.

ない．しかし，粉体の粘性係数を　大きくするほど応力分布は滑らかとなっている．このように数値計算に粘性を考慮すると滑らかな解が得られる．Fig. 4・9 より，粘性を持つ粉体の挙動として，粘性係数が大きいほど 波頭の立上りが 時間とともにゆるくなることがわかる．特に，粘性係数ηの大きい $G/\eta=10^5$ の場合，反射を数回繰返した 3000μs 近くでは もう波頭の立上りがわからず 時間の増加につれ全体の応力が均一に増加するようになる．Fig. 4・10 は有限要素法で 解いた応力分布の一例である．Fig. 4・9 (b) のテンソルコードの解と比べると，波頭の立上りが少しゆるくなっており，伝ぱ速度も少し遅くなっているが，その他の点ではほぼ一致しており，粉体中の応力波の伝ぱの解析を行なうにはどちらの解法を用いても大きな差はないと思われる．この場合の計算に要した時間は，有限要素法の方がテンソルコードの方に比べて約 2.8 倍かかっており，テンソルコードの方が有利である．しかしながら，テンソルコードは 要素形状を四角形にせねばならず，有限要素法は三角形でよいため複雑な形状のものに適している．したがって，本節の簡単な形状の場合はテンソルコードで解析を行ない，次節で述べる変断面容器については有限要素法で解析を行なった．

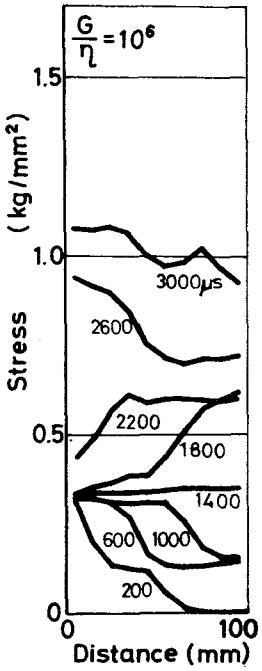
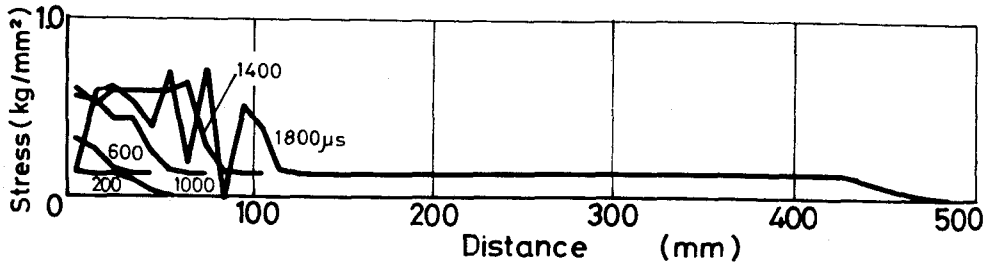
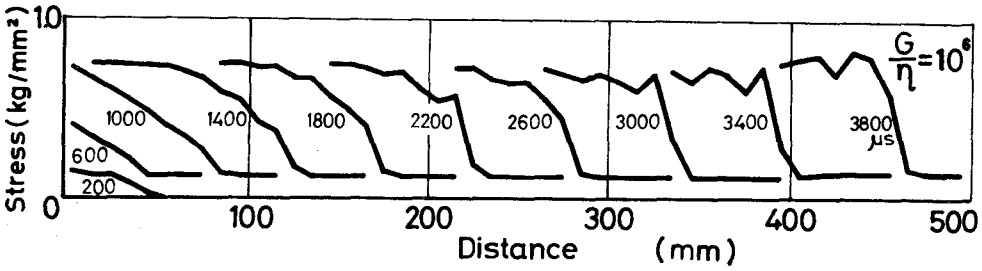


Fig.4.10 Stress distributions by F.E.M.

さて，第 3 章でも述べたように，粉体の応力- ひずみ曲線は下に凸となっているため，応力が大きいほど伝ぱ速度が大である．そのため衝撃波が発生し，解は不連続となり，二次元分布などを求めることが困難となる．しかし粉体の構成式に粘性を考慮すると，解は連続となり，簡単に求めることができる．Fig. 4・11 に解が不安定となる計算例を示す．この図は 1000μs のゆるい立上りを持つ速度 20 m／s で圧縮する場合の応力波の伝ぱを テンソ



(a) Unstable stress profiles without viscosity.



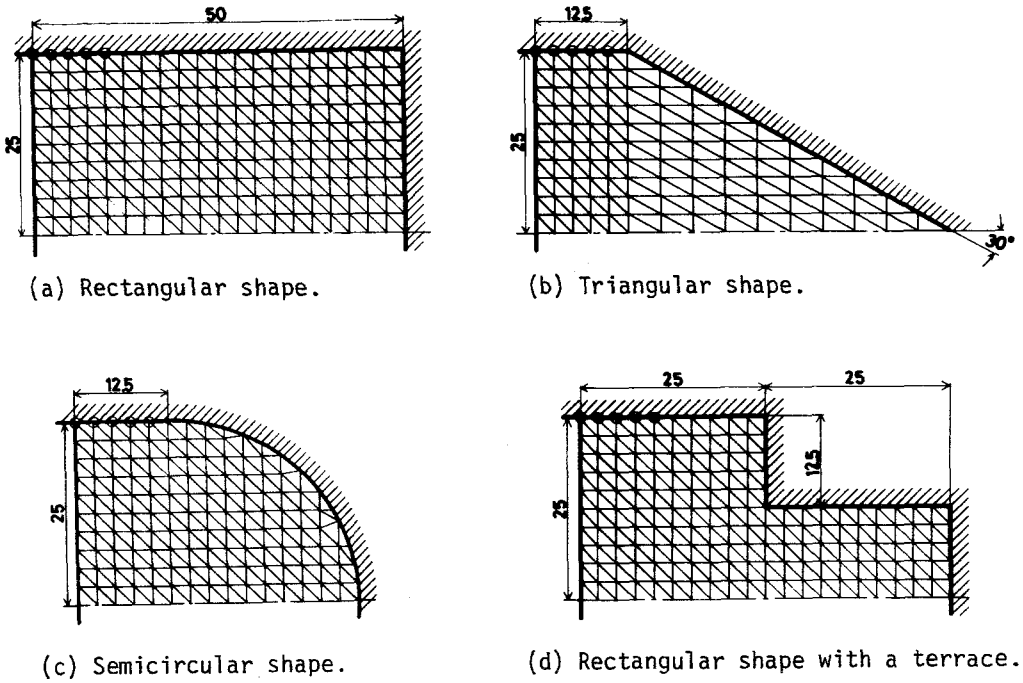
(b) Stable stress profiles with viscosity.

Fig.4.11 Stress profiles in powders with viscosity and without viscosity.

ルコードにより解析した時の応力分布の時間変化を示す．粘性を考慮しない (a) の場合は時間の経過とともに波頭の立上りは急となり，1800μs 程度で解は不安定となっている．しかし，粘性を考慮した (b) の場合は,時間とともに波頭の立上りは急となるが，解は安定している．このように粉体の構成式に粘性を考慮すると，連続して安定に解を求めることができ，また，実際の粉体の性質をも良く表わしていると思われる．したがって，次節の変断面容器の場合も，粘性を考慮し $G/\eta=10^6$ とおいて計算した．

4・5　変断面容器内の粉体中の応力波の伝ぱ

変断面容器として，第2章で用いた容器と類似の形状の場合について，有限要素法による計算を行なった．形状および要素分割を Fig. 4・12 に示す．図は軸対称形状の片側だけを示している．境界条件は前節の場合と同じで，直線の立上りを持ち その後 10 m／s の一定速度となるように図の左端を圧縮した．壁面での境界条件は，壁と垂直な方向には節点は動かず，壁と平行



(a) Rectangular shape.

(b) Triangular shape.

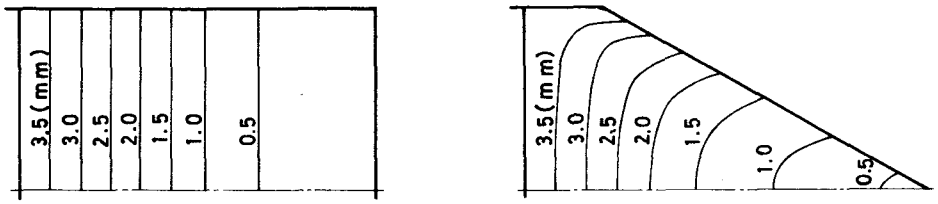
(c) Semicircular shape.

(d) Rectangular shape with a terrace.

Fig.4.12 Finite element meshes.

な方向には自由に滑るとした場合と，壁面摩擦を考慮して壁面で節点が固着するとした場合について計算した．

計算結果として，まず，壁面で滑るとした場合の長方形形状と三角形形状の場合の 400μs 時の軸方向の変位を表わす等変位線を Fig. 4・13 に示す．図中の数字は変位量である．長方形形状の場合は y 方向の 分布は均一で，



(a) Rectangular shape.

(b) Triangular shape.

Fig.4.13 Equal displacement lines (at 400μs after impact) calculated by F.E.M. neglecting wall friction.

x 方向の分布のみ変化する．三角形形状の場合は，中心部よりも壁面付近の方が前方へ大きく変位している．第２章のモアレ法の実験による等変位線を示す Fig. 2・7 は この逆で壁面付近の方が中心部より変位量が小さい．これは壁面摩擦によるものと思われる．

そこで，壁面摩擦が大きいことを考慮して 壁面で節点が固着である という境界条件で計算し直した結果が Fig. 4・14 である．ただし，衝撃端での変位量が要素の一辺の長さよりも大きいため この計算では 衝撃端近傍の節点（ Fig. 4・12 ○印節点 ）は 壁に沿って自由に滑るとしている． Fig. 4・14 の場合，等変位線は中心軸付近では中心軸に垂直であるが，壁面付近になると壁面に沿って大きく曲っており， Fig. 2・7 の実験の場合に近い．このように実際には大きな摩擦力が働いていると思われる．

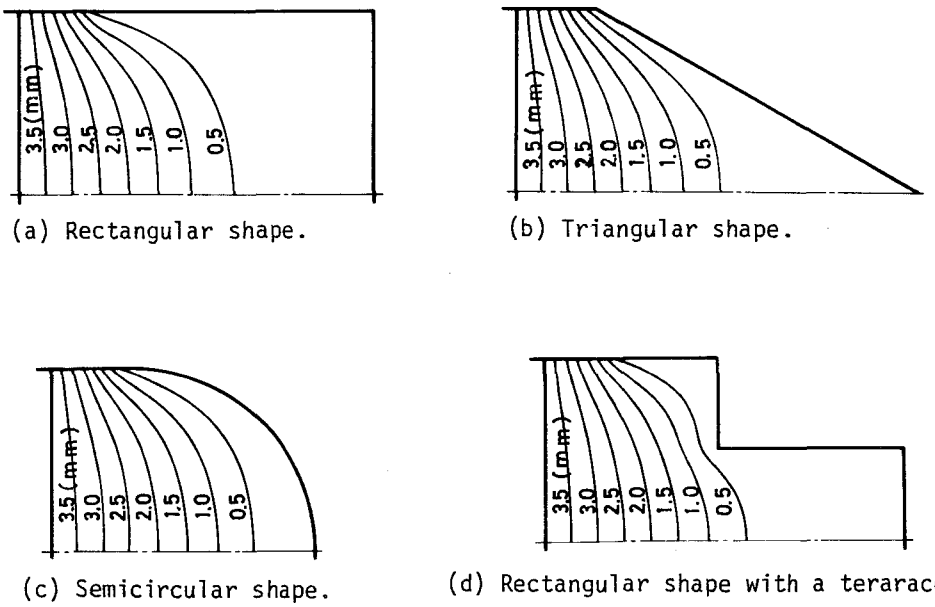


Fig.4.14 Equal displacement lines (at 400μs after impact) calculated by F.E.M. considering wall friction.

4・6　結論

（１）　大矢根らの示した多孔質金属の三次元構成式を粉体の場合に適用できるように材料定数を求め直した．

（２）　さらに，その構成式に粘性を考慮し，三次元三要素弾粘塑性モデルで粉体の構成式を表わした．

（３）　以上の構成式を用いて，テンソルコードおよび有限要素法により，平面ひずみ状態の一次元容器および二次元変断面容器内の粉体を動的に圧縮した場合の応力波の伝ぱを調べる数値計算を行なった．

（４）　その結果，次のことがわかった．

(a) 粉体に粘性を考慮した構成式を用いることにより，数値計算において安定な解を得ることができた．粘性係数が大きいほど解は安定となり，応力分布も滑らかとなる．

(b) 粘性係数が大きい場合，　応力波が両端で反射して数往復すると，応力分布は均一な分布となり 時間とともに 全体の応力が高くなって圧縮が進行する．

(c) 変断面容器内における粉体の動的圧縮実験結果と比較すると，数値解析において摩擦を考慮しない場合は，両者の等変位線分布は大きく異なっているが，摩擦を考慮して周辺を固着とした場合の計算は，実験結果に近い等変位線を示す．

（５）　以上の結果，本研究で示した方法により　粉体の動的圧縮中の応力波伝ぱの挙動を理論計算することができるようになった．

第5章　変断面容器内の粉体の準静的圧縮

5・1　まえがき

最近は粉末成形法により かなり複雑な形状をした機械部品が 作られている．しかし，これらの複雑形状部品を製造する場合には，密度が不均一になったり，き裂が入るなどの欠陥を発生することがある[(7),(154)]．これらの欠陥の原因の大部分が 圧縮成形の段階に起因することが多く，この粉末成形工程さえ上手に行なえば でき上った製品に大きな問題の生ずることは少ない といわれている．しかし，これらの問題に対しては現場での試行錯誤で対処しているのが現状であり，根本的に解決するために，今後より多くの基礎的研究を行なわねばならない．特に，粉末成形中の密度分布やひずみ分布は，焼結後の製品の品質と密接な関係があるにもかかわらず，測定上の困難さや粉体の構成式の複雑さのため，実験的にも，理論的にも，あまり調べられていない．

そこで，本研究では，複雑形状部品の一モデルとして T 字形の 変断面容器を用い，その中で圧縮成形中の粉体の力学的な挙動を 第2章で紹介したモアレ法を用いて調べ，ひずみ分布・密度分布などの解析を行なった．一方，理論解析としては，第4章で導いた粉体の構成式を用いて，有限要素法により，T 字形変断面容器内での圧縮を二次元平面ひずみ問題として数値解析を行ない，実験結果と比較検討した．また，両押し法・片押し法など圧縮方法の違いによる比較も行なった．

5・2　モアレ法による実験

5・2・1　実験装置および実験方法

実験は第2章で示したモアレ法を改良して行なった．実験装置の圧縮部の概略図を Fig. 5・1, Fig. 5・2 に示す．試料粉末としては電解銅粉 (CE-6)

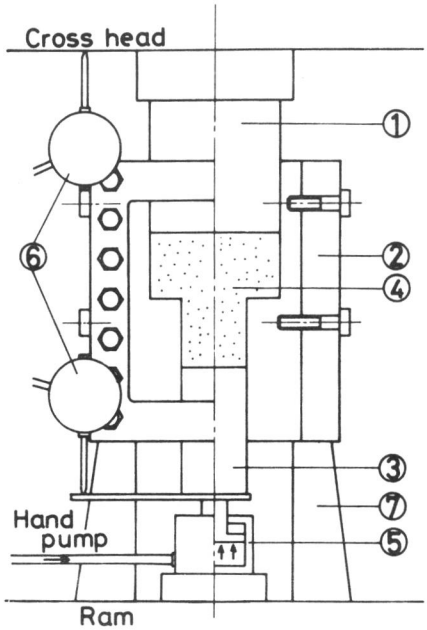


Fig.5.1 Schematic figure of apparatus for compression.

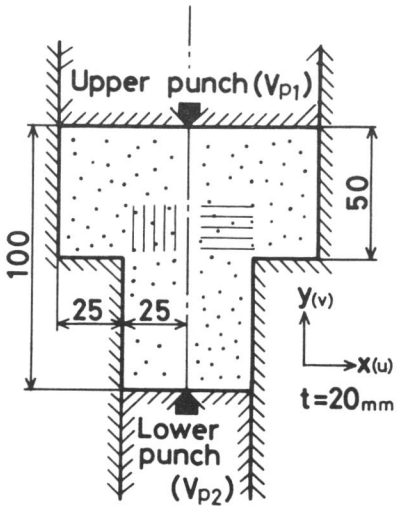


Fig.5.2 Schematic figure of vessel.

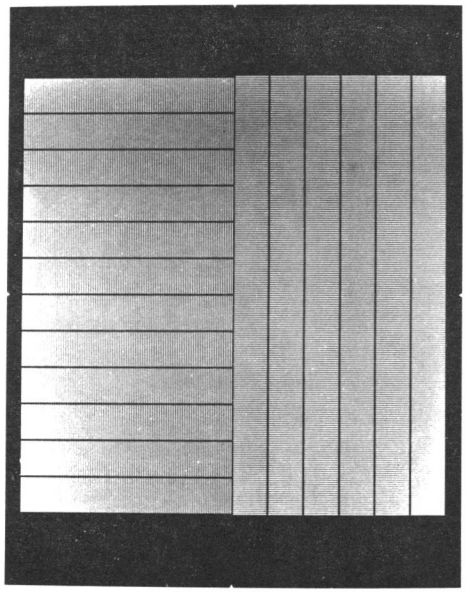


Fig.5.3 Mother model grid made of stainless steel sheet.

を用いた．まず所定の均一な密度比（ 0.332 ）となるように 金型前面より粉末を圧縮し，次に，圧粉体の表面にモアレ用の試料グリッドを描く．この圧縮容器は左右対称であるので，左半分に x 方向の変位 u を測定するグリッドを，右半分に y 方向の変位 v を測定するグリッドを描き，u,v が同時に測定できるようにする．この時，Fig. 5・3 に示すステンレス板製のマザーモデルグリッドとけい光顔料を用いる．そして，スクリーン印刷によりマスターグリッドを印刷したアクリル板（厚さ 40 mm）を金型前面に取付けた後 Fig. 5・1 に示すように，圧縮試験機のラムとクロスヘッドの間に圧縮容器を設置して，上ポンチはクロスヘ

Table 5.1 Ratios of displacement of upper punch to that of lower punch.

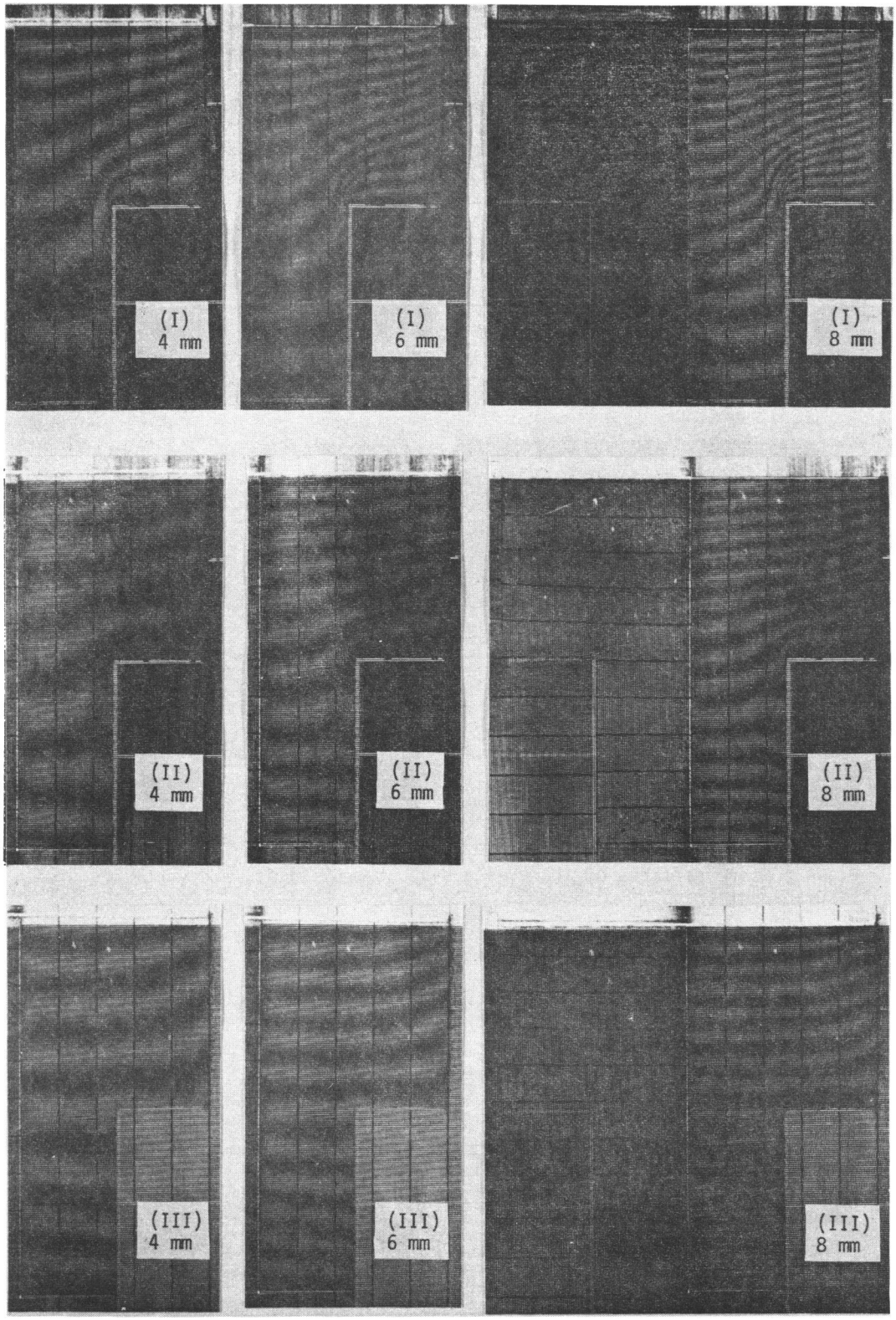
Test No.	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)
Ratio (V_{p1}/V_{p2})	∞ ($V_{p2}=0$)	2/1	1/1	1/2	0 ($V_{p1}=0$)

ッドで，下ポンチは油圧シリンダでそれぞれ圧力を加える．この時，上と下のポンチの変位量の比を一定に保つように圧縮を行ない，生じるモアレじまを写真撮影する．なお，撮影に当って，水銀ランプと黄色フイルタとミニコピーフイルムなどを使用することにより，第2章のモアレじまよりも鮮明なモアレじまを撮影することができた．潤滑法としてはステアリン酸亜鉛を用いて型潤滑を行ない，さらに摩擦の影響を少なくするためとアクリル板に印刷したマスターグリッドを保護するためにアクリル板と粉体表面の間に強化ガラス（厚さ 1.4 mm ）をはさんだ．

上ポンチの変位 V_{p1} と下ポンチの変位 V_{p2} の比率は Table 5・1 に示す圧縮方法 (I) ～ (V) の5種類とし，上ポンチと下ポンチの速度の合計が 0.5 mm／minの常に一定の速度となるように圧縮を行なった．

5・2・2　実験結果

上下のポンチの変位量 V_{p1} および V_{p2} の和が 4，6，8 mm になった時のモアレじま写真を，圧縮方法 (I) ～ (V) の場合について Fig. 5・4 に示す．各々の写真の右半分および左半分のモアレじまは，それぞれ圧縮方向の変位 u およびそれと垂直な方向の変位 v の等変位線を表わしている．ただし，変位量が 4，6 mm の場合は 垂直な方向の変位を表わす右半分の写真のみ示した．写真よりわかるように変位量が 8 mmの場合でも圧縮方向に垂直な方向の変位を表わすモアレじまのしま次数は，たかだか一次程度であって 圧縮方向のしま次数と比較してかなり小さい．これは，この形状の場合，粉末粒子がほぼ圧縮方向に移動し，それに垂直な方向の移動量が少ないことを表わしている．したがって，ここでは，圧縮軸方向の変位を表わすモアレじまに


(I)
4 mm
(I)
6 mm
(I)
8 mm
(II)
4 mm
(II)
6 mm
(II)
8 mm
(III)
4 mm
(III)
6 mm
(III)
8 mm

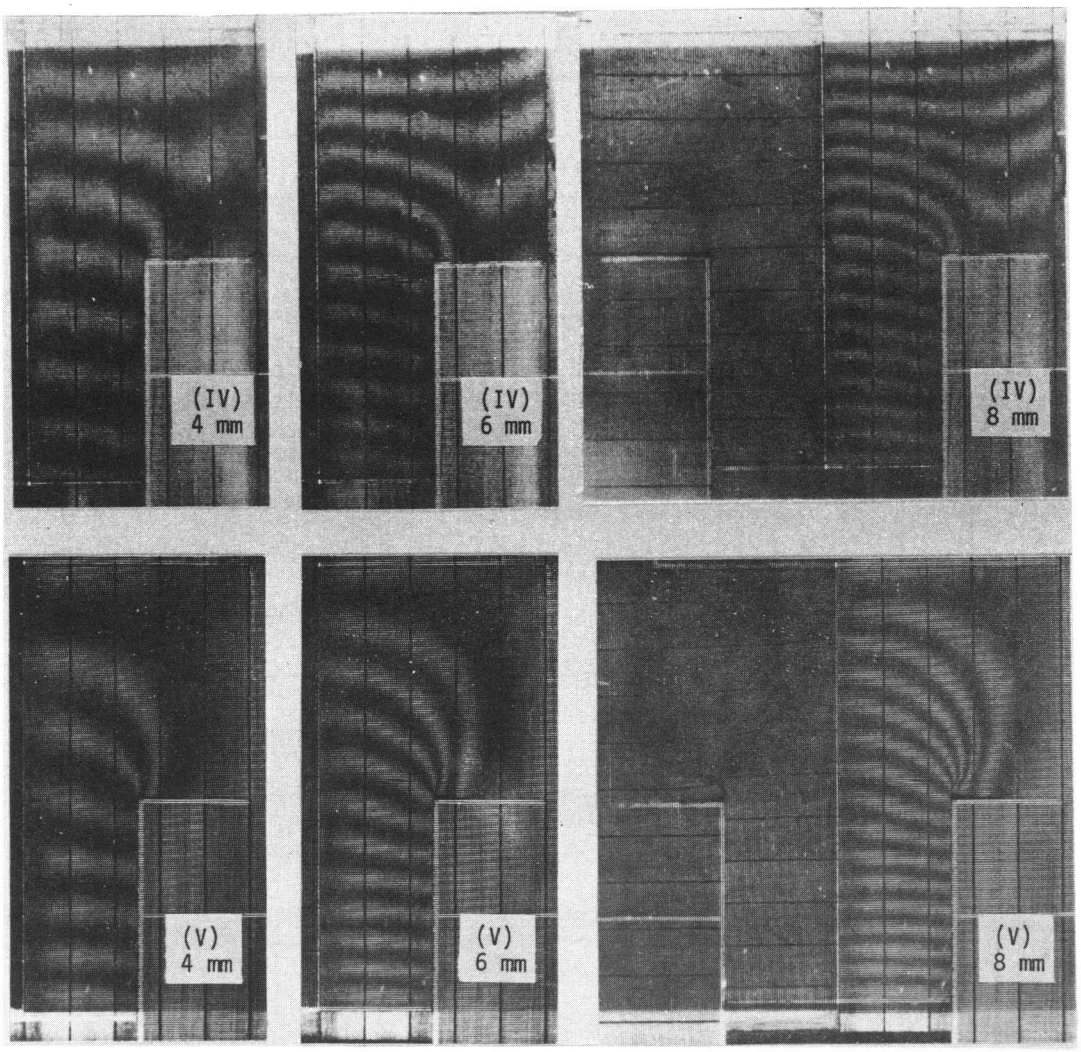


Fig.5.4 Moire patterns of transverce displacement (left) and vertical displacement (right).

ついてのみ解析した．

写真の (I) は上ポンチのみによる片押しの場合であり，(II) ～ (IV) は両押しの場合で，順に上下のポンチの圧縮速度の比率が 2：1，1：1，1：2 と減少しており，(V) は下ポンチのみによる片押しの場合である．いずれも変位量が 4，6，8 mm と増加するに従って，当然のことながらしまの数も増加している．変位量が 8 mm の場合について見ると，(I) の場合には，中心線上では上ポンチより離れるに従ってしま間隔が広くなっているが，角部付

近では逆に狭くなっており，しかも等変位線が大きく傾斜しているのがわかる．また，この部分では 等変位線が不連続になっており，角部より左上に伸びるクラックがあると思われる．しかし，(II) の場合には，(I) の 場合に比べて角部付近でのしまの傾斜はかなり小さくなっており，1：1 の 両押しの (III) の場合では ほぼ試料全体にわたって平行になっているのがわかる．また，下ポンチの圧縮量が上ポンチの圧縮量よりも大きくなると (IV)，(V) の場合に見られるようにしまの傾きは逆転し，(V) の 下ポンチのみの片押しの場合には，上部において大きな弧を描いており，角部のすぐ上側では，ほぼ直立している．また，この場合には角部において，粉体と壁との間に空げきが認められ，角部より右上に伸びるクラックも認められる．なお，(I) ～ (V) の場合において，ダイス壁付近でモアレじまが曲っているが，これは壁面と粉末粒子との摩擦の影響によるものと思われる．

Fig. 5・4のモアレじま写真より，ひずみ分布および密度比分布を求めるための解析方法を次に示す．解析に当っては，Fig. 5・5に示すように x 方向および y 方向にそれぞれ 5mm 間隔に区切った各格子点の変位の値をまず求める．つぎに，Fig. 5・5 の各直線に沿って格子点間の平均変位こう配を計算し，その分布図を描き，それより各格子点での $\partial u/\partial x$，$\partial u/\partial y$，$\partial v/\partial x$，$\partial v/\partial y$ を求める．これらの変位こう配より，次式の関係を用いて各格子点のひずみを求める．

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned}\right\} \qquad (5\cdot1)$$

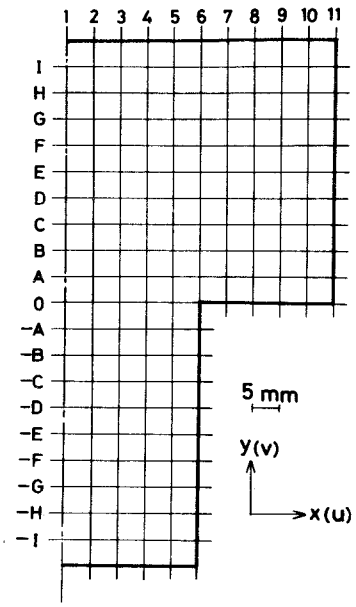


Fig.5.5 Mesh points for determing derivatives of displacement.

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

また，密度比ρはρ_0を初期密度比とすると次式の関係を用いて求められる．

$$\rho = \rho_0 (1 - \varepsilon_x - \varepsilon_y) \qquad (5 \cdot 2)$$

つぎに，これらの格子点上の値を滑らかに結ぶことにより，ひずみ分布・密度比分布を描くことができる．このようにして求めた (I) の場合の変位量 8 mmのときのひずみ分布を Fig. 5・6 に示す．ε_yは角部の右上方で大きくなっており，そこより左側においては，角部を中心にほぼ放射状に等ひずみ線が分布している．また，壁面においては，ひずみは一様とはならず上部から下部にかけて減少している．γ_{xy}については角部付近を中心にほぼ同心円状に分布している．

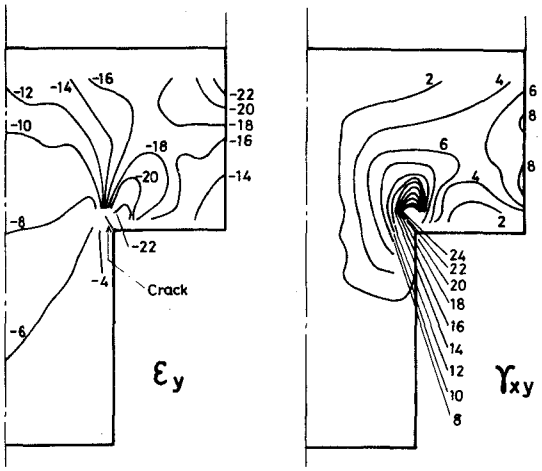


Fig.5.6 Strain distributions in the case of (I) when Vp1+Vp2=8mm (Experimental).

つぎに，(I) ～ (V) の場合の密度比分布を Fig. 5・7 に示す．1：1 の両押しである (III) の場合が最も密度比の差が少なく，それ以外の圧縮方法の場合には 角部でクラックが発生している可能性があり，角部の右上と左下とで密度比に大きな差がある．また，上下のポンチの圧縮量の比が 1 より大きい (I) および (II) の場合と，1 より小さい (IV) および (V) の場合とについて比較すると，前者の場合は 角部の右上部で，後者の場合は角部の左側で密度が最も高くなっており，全体の分布を見た場合には，後者の方が局所的に大きく変化していることがわかる．さらに (V) の場合には，初期密度比よりも低下する領域が現われ，角部に明らかな形状変化が生じてい

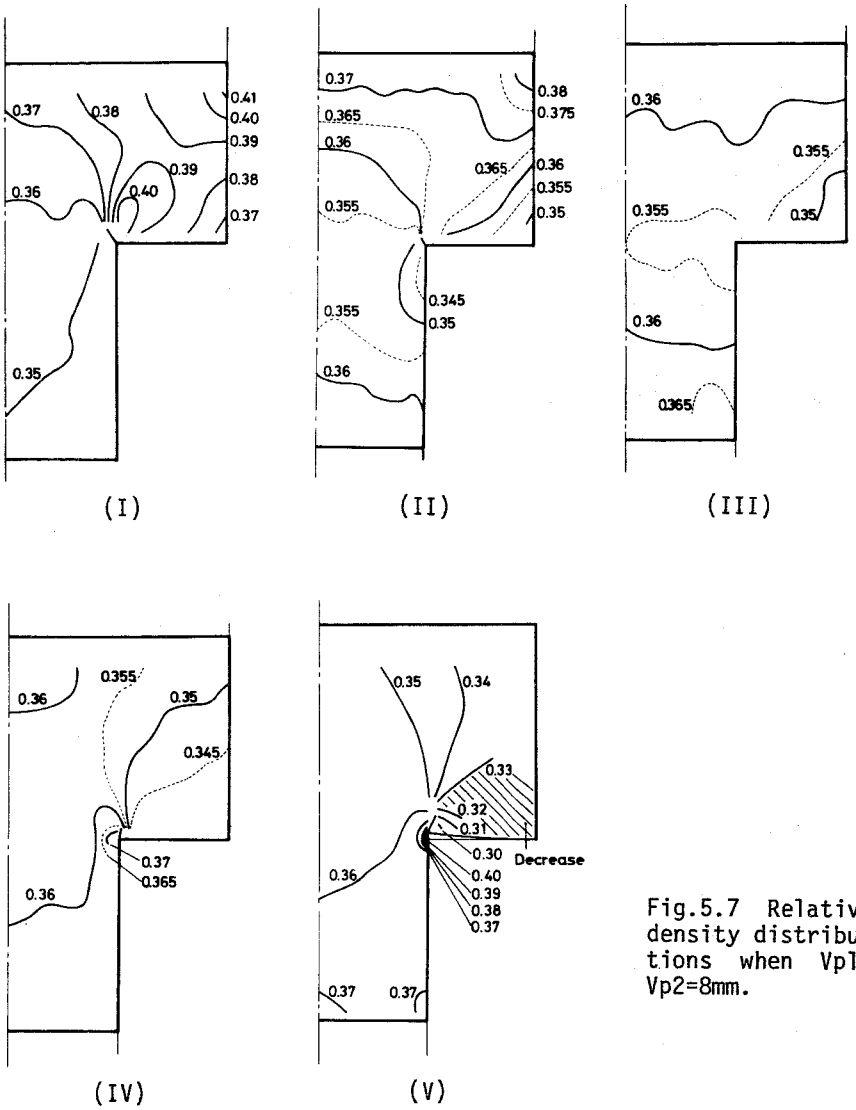


Fig.5.7 Relative density distributions when Vp1+Vp2=8mm.

る．

5・3　有限要素法による数値解析

有限要素法による計算に当っては，構成式は第４章で求めた構成式を用いた．ただし，粉体の粘性は考慮しなかった．剛性マトリックスの求め方，連立方程式の解法などは山田ら[155]の方法を用いた．要素分割に当っては，圧縮容

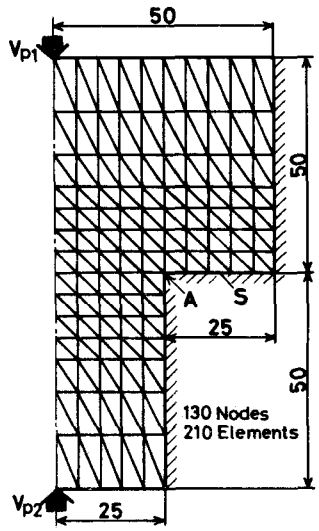


Fig.5.8 Element model for F.E.M.

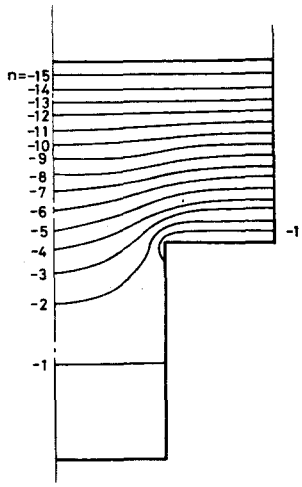


Fig.5.9 Equal displacement lines calculated by F.E.M. when Vp1+Vp2=8mm.

器の対称性を考えて全体の半分を取出し，Fig. 5・8 に示すような分割を用いた．上下のポンチ端面の境界条件については，モアレ法による実験の場合と同様に Table 5・1 のようにV_{P1}／V_{P2}を (I) ～ (V) まで5種類変えて解析した．また，Fig. 5・8 における節点 A の拘束条件は，節点 A が壁面 S より上方に移動した時は自由とし，逆の時には角部に固着とした．初期密度比はモアレ法の実験と合わせ 0.332 とした．

このようにして有限要素法により計算した結果を以下に示す．結果はすべて全変位量$V_{P1}+V_{P2}=$ 8 mm の場合についてのものである．Fig. 5・9 は (I) の圧縮方法の場合の圧縮方向の変位を表わす等変位線で,モアレじまと比較しやすいように 0.5 mm ピッチのしま次数 n で表わしている．Fig. 5・4 (I) と比較するとわかるように，実験で得られたモアレじまと違って，角部付近での等変位線は連続しており，また，容器下部の等変位線の本数も少ない．これは，Fig. 5・8 の角部節点 A の境界条件が不適切であったためで，実験では角部付近のモアレじまは不連続となっており，この部分ではクラックが生じていると考えられる．そこで，この挙動を有限要素法による計算に反映させるため，(I) と (II) の圧縮方法の場合は，Fig. 5・10 に

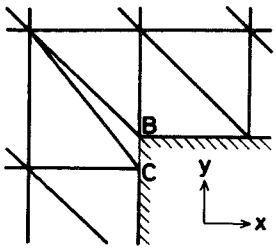


Fig.5.10 Separation of corner node considering crack.

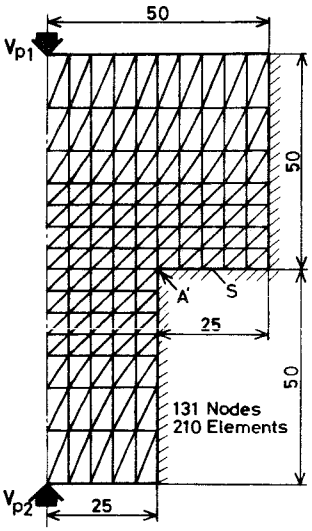


Fig.5.11 Element model considering crack in the case of (V).

示すように，節点 A より左斜め上へ伸びる辺を分離するため,節点 A を二節点 B, C に分離して節点 B は 角部に固着とし，節点 C は y 方向に自由とした．同様な理由により (V) の圧縮方法の場合について角部の右上方に伸びているクラックを考慮して Fig. 5・11 に示すような要素分割を行なった．すなわち，三角形の斜めの辺の方向を変え，節点 A′より右斜め上へ 伸びる辺を分離するため 節点 A′を二節点 B′, C′に分離して，それぞれ自由に動けるようにした．このようにして求めた等変位線分布を Fig. 5・12 に示す．Fig. 5・4 の実験結果と比較すると，いずれの場合もモアレじまの特徴を良く表わしている．すなわち,(I) の場合の角部付近でのしまの様子，(II) の場合の 角部のしまの傾斜が (I) の場合よりかなり小さくなっている様子， (III) の場合の平行なしまの出る様子， (IV)，(V) の場合， (I)，(II) の場合と異なってしまの傾斜が逆転している様子など実験より得られたモアレじまの特徴を良く表わしている．しかし，壁面付近の等変位線は，実験では傾斜しているのに対して,計算結果はほぼ水平である．これは，計算において壁面の摩擦を考慮しなかったためである．そこで，壁面の摩擦を考慮した場合の計算を行なった．

ここで用いた有限要素法においては，荷重点の変位をわずかずつ増加させながら繰返し計算をすることにより変形を進めている．いま,この繰返し計

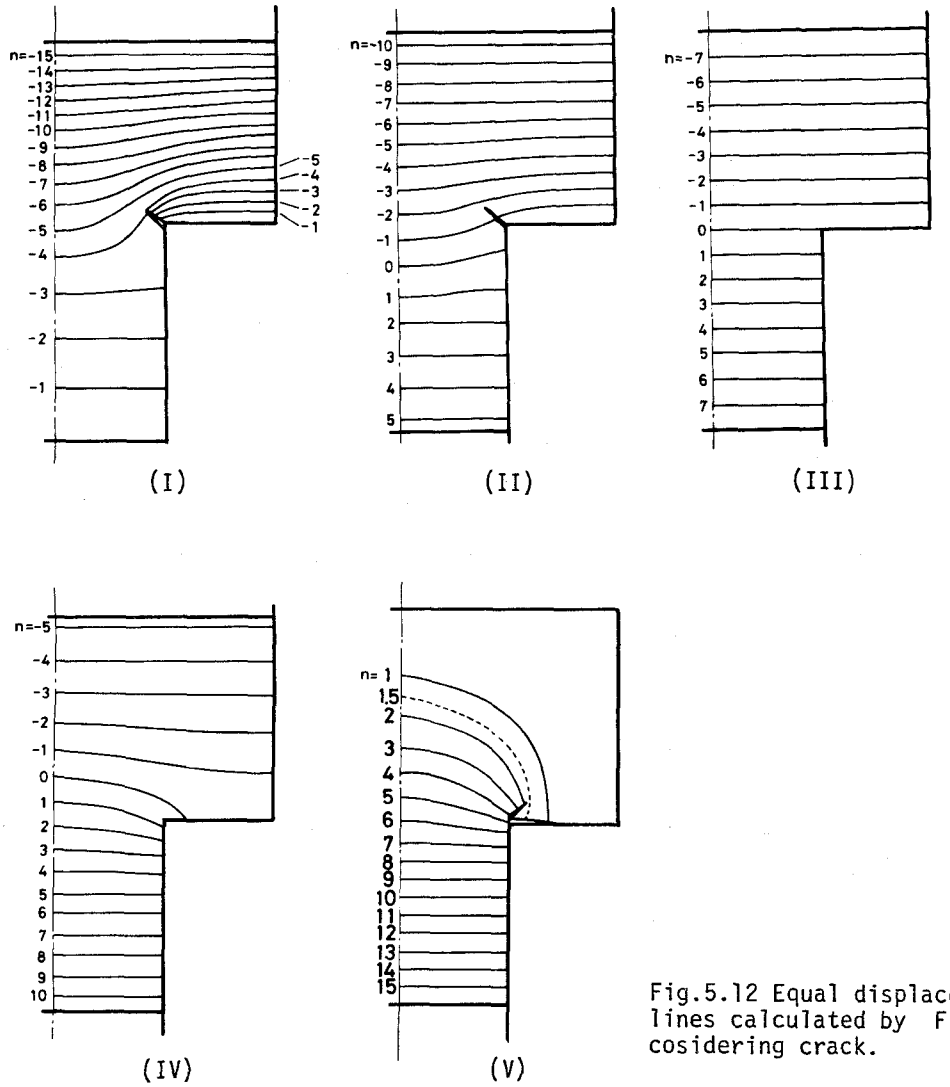


Fig.5.12 Equal displacement lines calculated by F.E.M. cosidering crack.

算の任意のある段階を考えた場合，その段階での壁に垂直な方向の節点力に摩擦係数を掛けた力を摩擦力とし，その段階の壁に平行な方向の節点力よりもこの摩擦力が小さい場合は，次の段階の変位増分および荷重増分の計算において，この摩擦力を壁に平行な方向の力として強制的に加えた．壁に平行な方向の節点力よりもこの摩擦力が大きい場合は，次の段階の計算においてその節点を固着とした．このようにして摩擦を考慮した場合の計算例として (I) と (III) の圧縮方法の場合の等変位線の分布を Fig. 5・13 に示す．

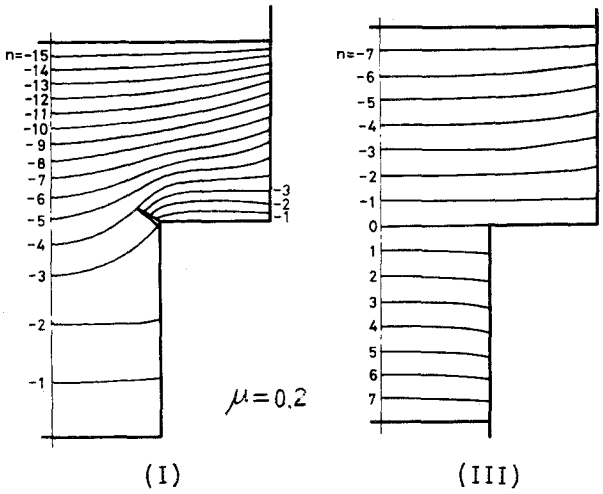


Fig.5.13 Equal displacement lines calculated by F.E.M. considering wall friction.

この図の壁面付近の等変位線の傾斜を見ると，実験で得られたモアレじまの特徴を良く表わしている．この計算方法は，摩擦の効果の特徴をよく表わしているものの，繰返し計算中の前の段階の摩擦力を用いて次の段階の強制力としたり，固着としたりしているため，誤差が大きい．特に，ひずみ分布や密度比分布については，この変位を微分するため誤差がより大きくなる．そこで，摩擦を考慮した場合としては，ここでは等変位線の例だけを示し，以下のひずみ分布や密度比分布については，摩擦を考慮しない場合の結果について説明する．

有限要素法により求めた圧縮方法（I）の場合のひずみ分布を Fig. 5・14 に示す．Fig. 5・6に示す実験から求めたひずみ分布と同様に ε_y は角部の右上方で大きくなっており，それより左側においては，角部を中心にほぼ放射状に等ひずみ線が分布している．Fig. 5・15 は 圧縮方法（I）～（V）の場合の密度比分布の計算結果である．Fig. 5・7の実験結果と同じように 1：1 の両押しである（III）の場合が最も分布の差が少ない．また，上下のポンチの圧縮量の比率が 1 より大きい（I），（II）の場

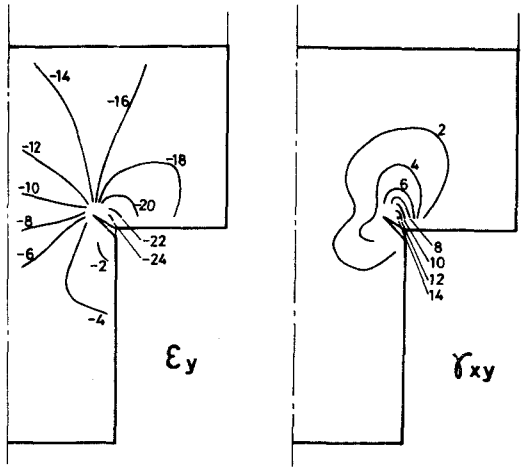


Fig.5.14 Strain distributions calculated by F.E.M. in the case of (I).

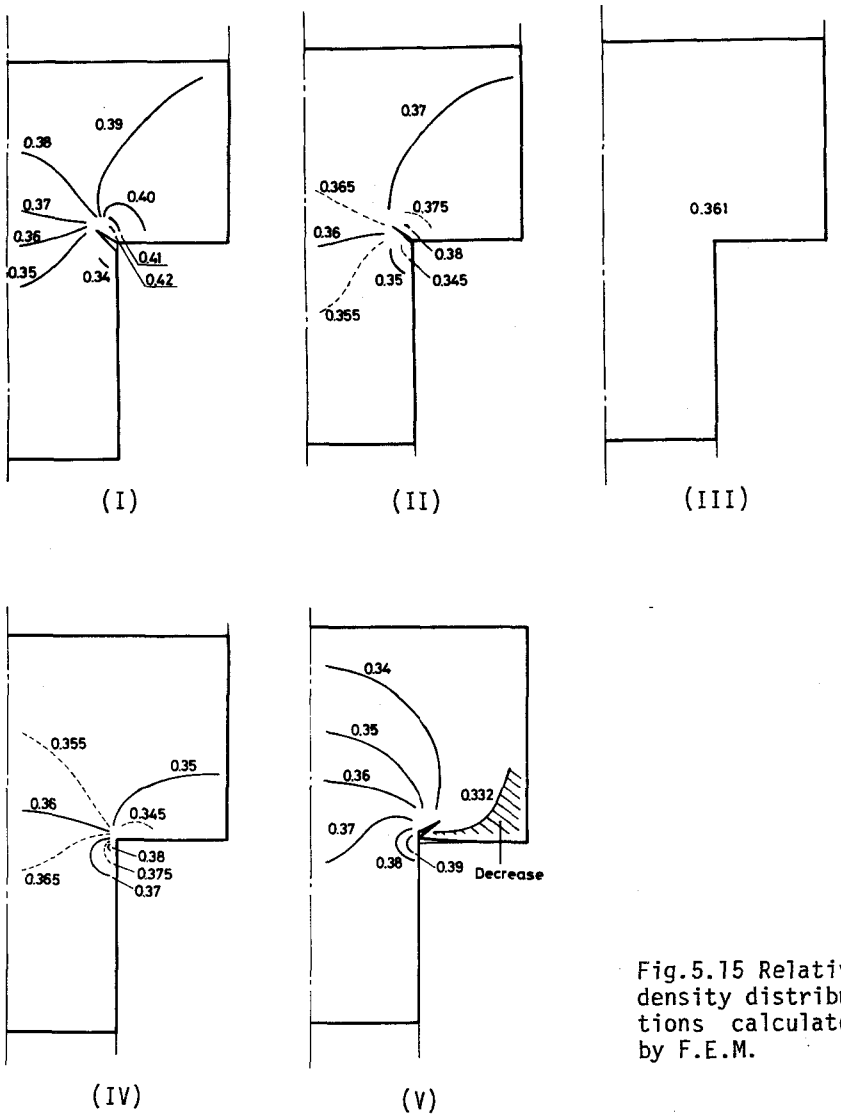


Fig.5.15 Relative density distributions calculated by F.E.M.

合と 1 より小さい (IV), (V) の場合とについて比べると，前者の場合には角部の右上部で密度が最も高くなっており，全体の分布を見た場合，後者の方が局所的に大きく変化している．さらに (V) の場合には 初期密度比より密度比の低下する領域も現われ,角部には明らかな形状変化が生じている．

5・4　結論

（１）　変断面容器内における粉体の準静的圧縮過程中の挙動をモアレ法を

用いて実験的に解析した．その結果，鮮明なモアレじま写真が撮影でき，それにより，圧粉体の二次元変位分布を一目で知ることができるようになり，ひずみ分布や密度分布も求めることができた．

（２） T 字形変断面容器内の圧縮においては，圧縮方向に垂直な方向の変位は，圧縮方向の変位に比べてはるかに小さい．また，片側からのみ圧縮した場合は角部にクラックが発生する．

（３） 多孔質金属の弾塑性基礎式を圧粉体に適用し，有限要素法を用いることにより，変断面容器内の粉体の挙動を理論的に解析した．その結果，クラックの発生を考慮しない要素分割の場合は，等変位線分布は実験結果と異なるが，角部の節点を二つに分割し，さらに 要素の三角形の分割方向を変えたりすることにより，簡単にクラックの効果を導入することができ，この場合の計算結果は実験結果をよく説明できた．

（４） 有限要素法において壁面の摩擦を考慮した計算により壁面付近で等変位線の曲がる様子が説明できた．

（５） T 字形変断面容器においては，上と下のポンチの圧縮速度の比が1：1の両押し法が，クラックがなく密度分布も均一であるため最も良く，それ以外の場合は，ポンチ断面積の小さい方からの圧縮速度が大きい場合の方が良くないことがわかった．

第6章　銅粉の応力－密度関係に及ぼすひずみ速度の影響

6・1　まえがき

粉末成形中の応力解析を理論的に行なうには，当然ながら，粉体の構成式を知る必要がある．構成式として粉体圧縮中の応力と密度（あるいはひずみ）との関係を求めた研究は 第1章1・3節で述べたように 数多くある．しかし，粉体圧縮中のひずみ速度の影響を考慮した研究は少なく，高分子材料や薬品についての報告[156)～163)]がいくつかある程度で，金属粉についての報告[164)]はほとんどない．高分子材料などは 材料そのものがひずみ速度の影響を 大きく受けるが，金属固体においては，ひずみ速度が 10^{-2}／s 程度までの いわゆる準静的な速度範囲では 応力－ひずみ関係の変化が認められない． 金属粉体においても 静的と動的とでは 応力－ひずみ関係は異なることが予想される．したがって，本研究でも 粉体の三次元応力解析を行なった際，静的圧縮の場合（第5章）は 構成式にひずみ速度の影響は考慮せず，動的圧縮の場合（第4章）は ひずみ速度の影響を考慮した．しかし その材料定数は適当に仮定した．

そこで，本章では 粉体の応力－密度関係に及ぼすひずみ速度の影響を より詳しく調べるための研究を行なった．静的圧縮と動的圧縮とで応力－密度関係がどの程度異なるかを調べるため，まず 密閉容器内一軸圧縮における静的な応力－密度関係を調べる実験を行なったところ，金属粉体においては，常温において ひずみ速度が 10^{-2}／s 程度までの いわゆる準静的な速度範囲でも 応力－密度関係が ひずみ速度により異なることがわかった．また，負荷後 変位を一定にしておくと 応力緩和が起ることがわかった． そこで，負荷時のひずみ速度が，応力－密度関係や応力緩和に どのような影響を 与えるかを 負荷を変えて調べる実験を行なった．

つぎに，一軸密閉容器内の金属粉体の動的圧縮中の応力－密度関係を調べ

る実験を行なった．金属粉体の動的圧縮中の応力- 密度関係に及ぼすひずみ速度の影響を調べた研究はあまり見当らない．その理由は計測の困難さによるものと思われる．そこで 本研究では,金属固体などの一次元の動的構成関係を求めるのに良く使われる Hopkinson 棒法[165] (Split Hopkinson pressure bar method) を用いた．この実験法を用いると,試料粉体の前後にある入力弾性棒および出力弾性棒の応力状態から試料の過渡的な平均応力，平均ひずみおよび平均ひずみ速度の関係を得ることができ，粉体のように試料に直接ひずみゲージをはることができない場合は 特に有効な方法である． しかし，この方法は 試料中の平均的な応力やひずみを用いているため，応力波の伝ぱの遅い粉体に適用すると誤差が大きくなる．そこで 試料の長さを短かくして 応力の不均一による初期段階の誤差を少なくするとともに,解析中の誤差を少なくするため マイクロコンピュータとデジタルメモリからなる解析システムを開発し，人手による誤差をなくすと同時に 解析のスピードを 向上させた．これを用いて 数多くのデータを解析し それを統計的に処理することにより 精度の良い構成関係を得ることができた．

さらに，このようにして求めた構成関係を用いて,一次元差分計算（テンソルコード）により Hopkinson棒法を粉体に適用した場合の精度の検討を行なった．

6・2　準静的圧縮実験

6・2・1　実験方法

圧縮はいわゆる密閉容器内一軸圧縮であり，粉末を容器に入れ，圧縮装置の変位速度を一定にして行ない，荷重と変位の関係を求め，所定の設定荷重に達したら装置のスイッチを切り，一定変位下での応力緩和を測定した．さらに応力緩和実験後に 緩和後の応力以下で負荷と除荷を行ない,この時の荷重- 変位曲線より容器内での弾性係数を求めた．これらの経過を Fig. 6・1

に示す．

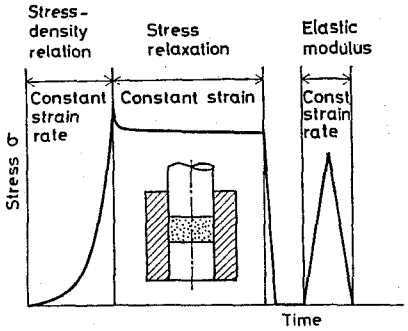


Fig.6.1 Stress - time diagram in experiments.

用いた圧縮容器は内径 18 mm，外径 36 mmの円筒金型で材質は SKD 11 である．金型壁面にはステアリン酸亜鉛 60 g を四塩化炭素 1000 ml に溶かしたものを塗付し，壁面摩擦を小さくした．試料粉体としては 電解銅粉（CE－6）を用いた．また粒子形状の差による影響を見るため 一部 噴霧銅粉（Cu－At－100）を用いた．これらの粉体の性質を Table 6・1 に示す．充てんした量は 6.84 g で，これは銅粉が完全に圧縮され 空孔がなくなった時 3 mm の厚さとなるようにした．

圧縮装置は島津製作所製オートグラフ IS－10T を 用いた．この装置はクロスヘッドの変位速度を 0.005 から 500 mm／min まで 制御できるが，ロードセルやクロスヘッドなどのたわみのため試料におけるひずみ速度が遅くな

Table 6.1 Characteristics of electrolytic copper powder and atomized copper powder.

Characteristic \ Powder		Electrolytic copper powder CE-6	Atomized copper powder Cu-At-100
Apparent density (g/cm^3)		1.96	5.14
Specific surface area (cm^2/g)		546	168
Particle size distribution (wt.%)	+100 (mesh)	0.3	5.1
	+145	15.8	15.8
	+200	53.9	17.6
	+250	20.7	10.9
	+350	14.5	10.8
	-350	12.7	39.8

り，誤差が大きくなるのでクロスヘッドの変位速度が 0.5 から 20 mm／min の場合はポンチの上下の圧盤間に差動トランスをつけ，この間の変位速度が一定となるようにした．

6・2・2　実験結果

負荷時の圧縮速度を変えた場合の電解銅粉の応力－密度比関係を Fig. 6・2 に示す．密度比が 0.281 となるまではほぼ応力 0 で 密度が上昇し，その後上に凹な曲線となっている．なお，この密度比が 0.281 の時の 粉体の長さ 10.68 mm を初期長さとし，以下のひずみ計算は公称ひずみを用いた．したがって圧縮速度 20, 5, 2, 0.5,0.01 mm／min はひずみ速度に直すとそれぞれ 3.12×10^{-2}, 7.80×10^{-3}, 3.12×10^{-3}, 7.80×10^{-4}, 1.56×10^{-5}／s となる．図を見ると圧縮速度が大きくなるにつれて，同じ密度になる応力が大きくなっているのがわかる．

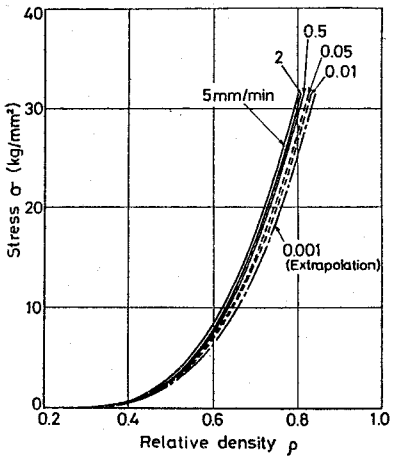


Fig.6.2 Stress - relative density relations of various compression speeds.

圧縮時の圧縮速度を種々変えた場合の電解銅粉の応力緩和の一例として設定荷重が 8 t と 1 t の場合について緩和率の時間変化を Fig. 6・3に示す．ここで 緩和率とは その時の応力緩和量と応力緩和開始時の応力との比であ

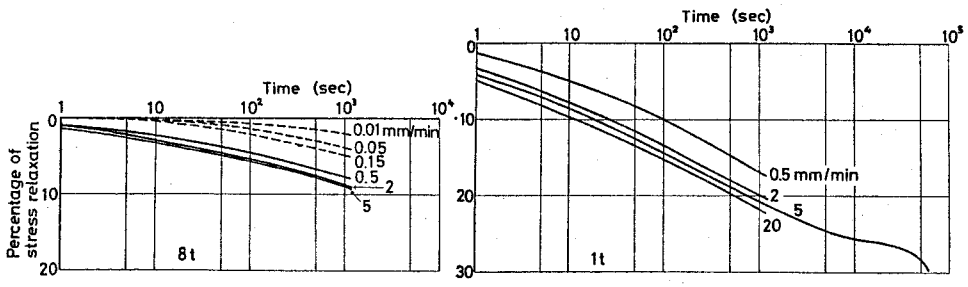


Fig.6.3 Stress relaxation curves of compacted powders compressed to the same load with various strain rates.

る．この図からわかるように，電解銅粉の応力緩和は非常に大きく，今回の実験範囲内では緩和率は一定にならず増加し続けている．また最初の 1 s でかなり緩和している．

負荷を種々に変えた場合の電解銅粉の緩和率の時間変化の一例として圧縮速度が 0.5 mm／min の場合を Fig. 6・4 に示す．

荷重と圧縮速度を変えた場合の1000 s 後の電解銅粉の応力緩和率を Fig. 6・5 に示す．

これらの図からわかるように　荷重が小さいほど緩和率が大きく　荷重が大きくなれば（すなわち密度が大きくなり中実金属に近づくと）緩和率は小さくなる．また，圧縮速度が大きいほど緩和率が大きい．

応力緩和終了後 除荷し 再び負荷した時の応力－ひずみ曲線から求めた電解銅粉の容器内での弾性係数と密度比の関係を Fig. 6・6 に示す．密度が大きくなり，中実金属に近づくほど弾性係数は大きくなっている．なお，この弾性係数においては，圧縮時の速度の違いによる差は認められなかった．

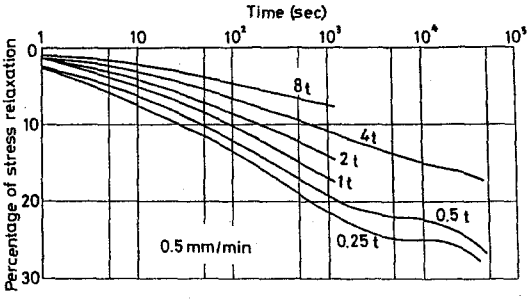


Fig.6.4 Stress relaxation curves of compacted powders compressed to the various loads with same strain rate.

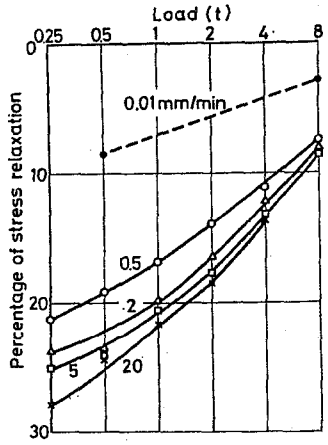


Fig.6.5 Percentages of stress relaxation at 1000 sec.

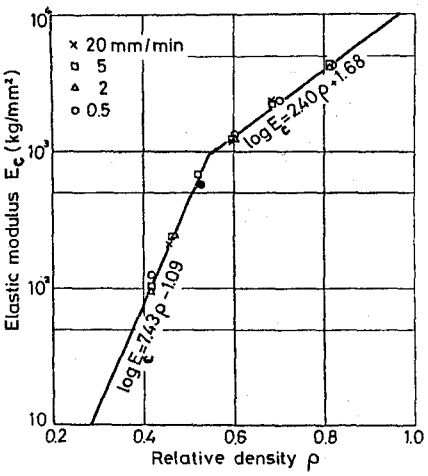


Fig.6.6 Elastic modulus - relative density relations.

6・2・3　粉体の圧縮と応力緩和のメカニズム

粉体を圧縮する場合，次の順序により密度が上昇すると考えられる．

（１）　ごくわずかの荷重で粒子の移動が可能なほどすきまがあいているためほとんど応力 0 で密度が上昇する．

（２）　粒子同志は互いに直接接触しており，荷重を加えることにより，粒子が互いに滑りながらすきまへ落込むように移動するため密度が増える．この場合は 粒子表面に摩擦力が働いており その分だけ密度を上げるのに大きな力が必要となる．この摩擦力は滑り速度すなわち圧縮速度が大きいほど大きく，粒子の単位重量当りの表面積（比表面積）が大きいほど大きい．

（３）　圧縮が進み，粒子間のすきまが小さくなったため粒子がすきまに落込めない場合は，粒子自身の塑性変形により粒子の一部がはみ出し，すきまを埋めていく．（２）の滑りよりも塑性変形を起す方がより大きな力を必要とするため，応力は大きくなる．

この（２）と（３）は明確な変態点で変るわけではなく，実際は（２）と（３）が混ざりながら同時に進行していく．圧縮初期は（２）の影響が大きいが，圧縮が進むにつれて（３）の影響が大きくなる．

この（２）と（３）の現象は次のように説明することもできる．すなわち，Fig. 6・7 に示すように，粉体を圧縮すると 粒子を塑性変形させるのに必要な応力 σ_p と粒子を滑らせて移動させるのに必要な応力 σ_v とに分けられる．この両方の応力の和 $\sigma = \sigma_p + \sigma_v$ が粉体全体の見かけの変形を起すのに必要な応力である．この σ_v が（２）の現象を表わし，σ_p が（３）の現象を表わす項となる．この（２）の粒子が滑って移動する現象は 確率的に起り，粒子１個が単位時間内に滑って移動する確率 m_v は応力 σ_v の関数

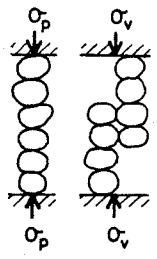


Fig.6.7 Schematic model for powders.

であると考えられ，次のように書ける．

$$m_v = g(\sigma_v) \qquad (6\cdot1)$$

粉体全体の体積をVとすると，単位時間内に滑った粉体の体積$\Delta V/\Delta t$は$m_v V$である．粉体を圧縮した時の見かけの体積減少は，この粒子の滑りによるものと考えると，単位時間内の体積ひずみ減少（すなわち，ひずみ速度）$\dot{\varepsilon}_p$ は

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{\Delta V}{V}\Big/\Delta t = \frac{m_v V}{V} = m_v = g(\sigma_v) \qquad (6\cdot2)$$

となる．これが粉体を圧縮した時の粘性項の働きをすると考えられる．

さて，圧縮中に変位を一定にした場合，粒子はまだ安定な位置になく，荷重も加わっているため（２）の滑りは進行するが，変位一定のため 密度は上昇せず，代りに応力が減少し，応力緩和が起る．応力が下がるため（３）の現象は進行しない．したがって変位を一定にすると，密度が大きいほど（２）の現象の示める割合が少ないので応力緩和率は小さい．また，変位を一定にする設定荷重が同じでも，圧縮時の速度が小さいほど密度が大きいので，変位一定の間でも（２）の現象の進み方が小さく応力緩和率は小さい．

６・２・４　追加実験

さて，この（２）に影響を及ぼす滑り摩擦を減らすため電解銅粉に潤滑剤としてステアリン酸亜鉛を添加して圧縮し，応力緩和を調べた．

圧縮時の応力－密度比曲線を Fig. 6・8 に示す．圧縮時の速度 5mm／min でステアリン酸亜鉛１％添加の曲線は Fig. 6・2の 添加しない曲線より下になっており潤滑剤添加の効果が現れて

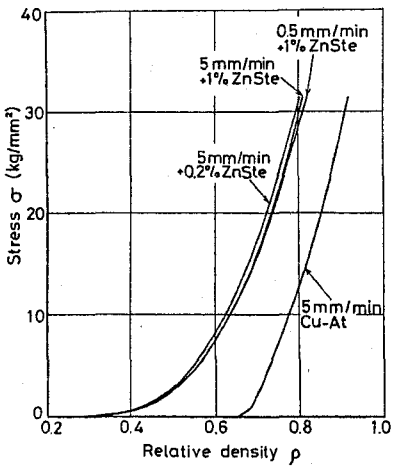


Fig.6.8 Stress - relative density relations of electrolytic copper powders mixed with zinc stearate and atomized copper powders.

いる．圧縮速度 0.5mm／min のものやステアリン酸亜鉛 0.2%添加の曲線と添加しない曲線との差はあまり認められない．

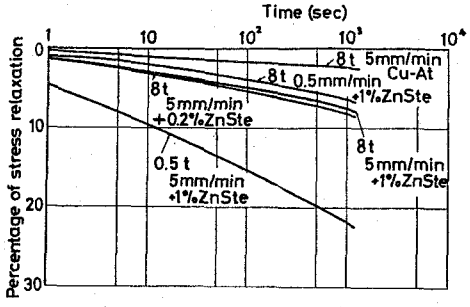


Fig.6.9 Stress relaxation curves of electrolytic copper powders mixed with zinc stearate and atomized copper powders.

応力緩和曲線を Fig. 6・9 に示す．Fig. 6・3 の曲線と比べていずれも潤滑剤添加により緩和量が減少しておりステアリン酸亜鉛 0.2%添加よりも1%添加の方が応力緩和減少の効果が大きい．

また，電解銅粉と粒子形状の異なる噴霧銅粉を使って圧縮し応力緩和を調べた．第1章 Fig. 1・1に示す (a) 電解銅粉と (b) 噴霧銅粉 の走査電子顕微鏡写真を見ると電解銅粉は樹枝状であり，噴霧銅粉は球状であり，比表面積は噴霧銅粉の方がはるかに小さく，したがって滑り摩擦力も小さいと考えられる．

噴霧銅粉の応力－密度比曲線を Fig. 6・8 に，応力緩和曲線を Fig. 6・9 に示す．電解銅粉に比べ噴霧銅粉の応力－密度比曲線は下にあり，応力緩和も小さいことがわかる．

粉体の圧縮中に圧縮速度を変えると，応力－密度比曲線はそれぞれの圧縮速度の応力－密度比曲線と異なると予想される．Fig. 6・10 は圧縮中 2 t（7.86 kg／mm²）付近で圧縮速度を 20 から 0.01 mm／min へ，および 0.01 から 20 mm／min へ変えた場合の応力－密度比曲線である．この実験の場合，圧盤間の圧縮速度を制御できないので，

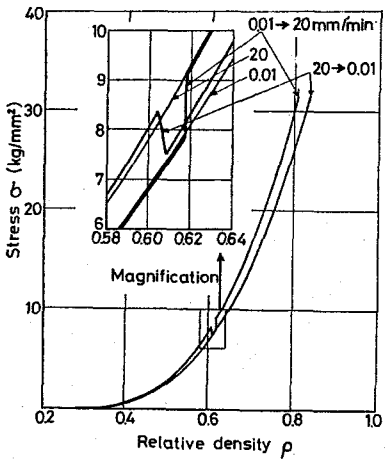


Fig.6.10 Stress - relative density relations when compression speeds shift abruptly at about 2 ton.

クロスヘッドの速度を制御した．Fig. 6・10 の拡大図には クロスヘッドの速度が 20 mm／min と 0. 01 mm／min の場合の応力密度比曲線も示してある．これを見ると圧縮速度変更後，短時間でそれぞれの速度に応じた応力-密度比曲線と一致している．したがって圧縮速度が変る場合でも;応力- 密度比曲線はそれぞれの速度に応じた圧縮速度一定の応力- 密度比曲線を使っても大きな誤差はないと思われる．なお，応力緩和量は圧縮速度変更後の速度に応じた応力緩和量とほぼ一致した．

6・3　動的圧縮実験

6・3・1　実験装置および実験方法

粉体の動的圧縮中の応力-密度関係を求めるのに用いたHopkinson棒法装置の概略図と全景写真を Fig. 6・11に示す．この装置により得られる 試料のひずみ ε，ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$，応力 σ は 時間 t において 平均的に次式で与えられる．[165]

$$\varepsilon = \frac{1}{\rho_s C_s l_0} \int_0^t (\sigma_A - \sigma_R - \sigma_T)\, dt \qquad (6・3)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\rho_s C_s l_0} (\sigma_A - \sigma_R - \sigma_T) \qquad (6・4)$$

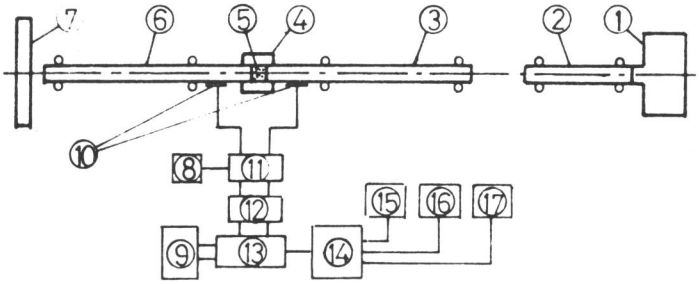
$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_A + \sigma_R + \sigma_T) \qquad (6・5)$$

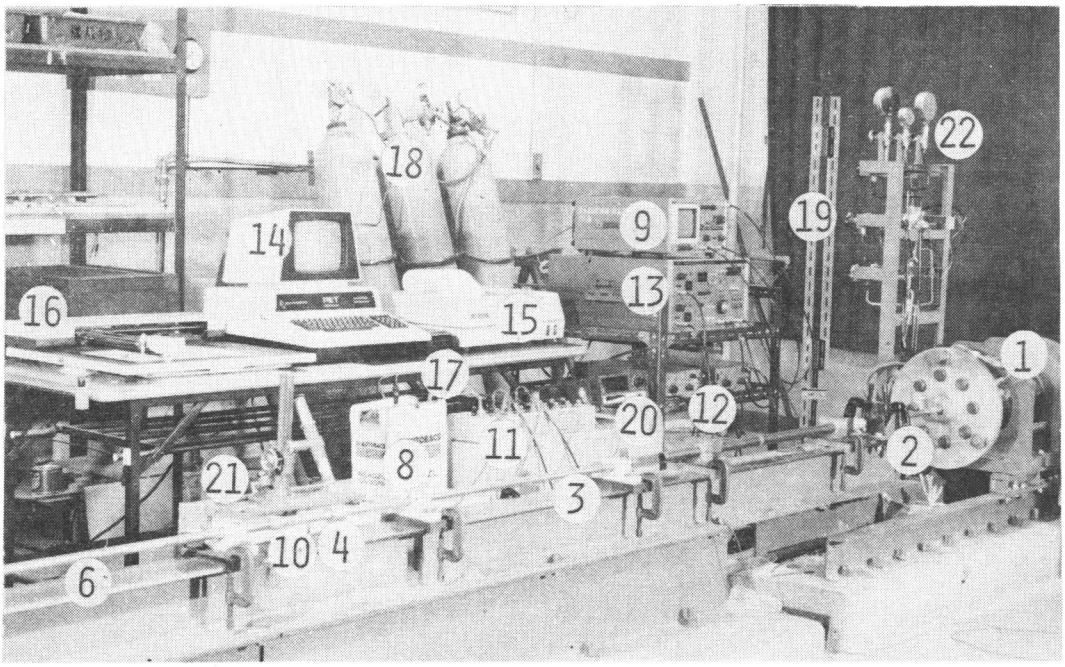
ここで，σ_A は入射応力，σ_R は試料と入力弾性棒の境界での反射応力，σ_T は試料を透過して出力弾性棒に出ていく応力である．ρ_s および C_s はそれぞれ入力および出力弾性棒の密度および弾性波の伝ぱ速度であり，l_0 は 試料の初期長さである．また試料の密度比 ρ は

$$\rho = \rho_0 / (1 - \varepsilon) \qquad (6・6)$$

で与えられる．ここで ρ_0 は初期密度比である．

実験に当ってはこの入力および出力弾性棒の応力- 時間関係を測定し，こ





1. Gas gun
2. Striker bar
3. Incident pressure bar
4. Die
5. Specimen powders
6. Transmitter bar
7. Anvil
8. D.C. power supply
9. Oscilloscope
10. Strain gauge
11. Strain gauge circuits
12. Amplifier
13. Digital wave memory
14. Micro computer
15. Printer
16. Plotter
17. Data recorder
18. Nitrogen bomb
19. Powder filler
20. Voltmeter
21. Micrometer microscope
22. Gas pressure regulator

Fig.6.11 Schematic figure and photograph of apparatus of split Hopkinson pressure bar method.

れより σ_A，σ_R および σ_T を求め，式（6・3）～（6・6）を用いて試料の応力－密度比－ひずみ速度関係を求める．従来この計算に当っては応力－時間関係をシンクロスコープに描き，これを写真撮影し，その写真から応

力－時間関係を一定時間間隔で読取り，この値を式（6・3）～（6・6）に代入し数値計算していた．そのため，この間の手間はかなり大きく，誤差の入る要因も多い．また，粉体圧縮の性質上，得られた応力－ひずみ関係にある程度のバラツキがあり，同じパラメータの実験を複数個行なって平均値をとる必要があり，実験の数も多く行なわねばならない．そこで，本研究では，これら誤差の入る要因を減らし，解析時間を大幅に短縮させるためマイクロコンピュータシステムを導入した．すなわち，Fig. 6・11 に示すように，入力および出力弾性棒の応力－時間関係をデジタルメモリに記憶させ，この値を直接マイクロコンピュータに入れ，演算処理した後，プリンタやXYプロッタにより必要な応力－密度比関係などをグラフとして直接描かせた．このようにして，ほとんどオンライン的に処理できるため，計算結果をすぐに手に入れることができ，次の実験にフイードバックすることも可能となった．また生データはデータレコーダにデジタルで記録されているため後で種々の演算処理を行なうことも可能となった．例えば，数値計算の時間間隔を細かくすることもでき，また あるレベル以上の飛び離れた値もノイズとして除去することもできた．

実験に用いた試料粉末は電解銅粉（CE－6）で，充てんした重量は 2.28 g であり，これは銅粉がダイス内で完全に圧縮され密度比が1となった時長さ1mm となる量である．この銅粉を初期密度比が 0.281（試料長さが 3.56 mm）となるようにダイス内に充てんした．ダイスは準静的圧縮に用いたものと同じものを用いた．ダイス内壁の摩擦を小さくするため，壁面にはステアリン酸亜鉛を軽く塗布した．打出し棒・入力および出力弾性棒はいずれも直径 18 mm，長さ 1000 mmの鋼棒で，入力および出力弾性棒には，いずれも試料端面から 110 mm の位置で円周上対称な場所に 波形計測のためのひずみゲージをはった．

6・3・2　実験結果と考察

入射応力 σ_A を 16.5, 24.8, 30.5 kg／mm²の 3種類に設定してそれぞれ5回実験を行なった．実験結果の3種類の入射応力のそれぞれのバラツキは1.0, 1.4, 3.2 %であった．この実験で得られる応力- 時間波形の一例をFig. 6・12 に示す．上側が入力弾性棒の波形,下側が出力弾性棒の波形であ

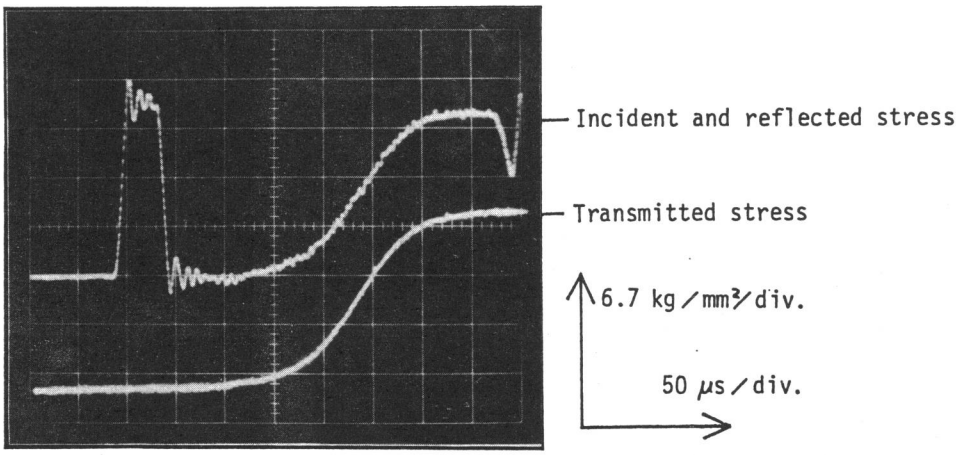


Fig.6.12 An example of stress - time diagram.

る．その波形を解析して得られた応力- 密度比関係を Fig. 6・13 に，ひずみ速度- 密度比関係を Fig. 6・14 にそれぞれ入射応力別に示す．応力- 密度比曲線はいずれも下に凸となっており，また，ひずみ速度は密度比の増加とともに急激に減少しており 金属固体に比べ粉体の加工硬化特性が大きいことがわかる．Fig. 6・13 の各図においてそれぞれの曲線群の中でそれらの平均に最も近い曲線を一本ずつ取り，Fig. 6・15 に描き直した．すなわち,この図は異なる入射応力に対する応力- 密度比曲線を描いたものである．この時の入射応力に対するひずみ速度- 密度比曲線を Fig. 6・16 に示す．

Fig. 6・15 のそれぞれの曲線の差がひずみ速度の違いによって現われたものか，それとも誤差なのかを調べるため Fig. 6・13 のデータについて 同じ密度比 ρ に対する応力 σ について検定を行なった．設定入射応力ごとに σ の標本を5個ずつとり，その母集団はどれも近似的に分散の等しい正規分布であるとし，それぞれの標本の平均値がどの程度の水準で有意に異なるかを

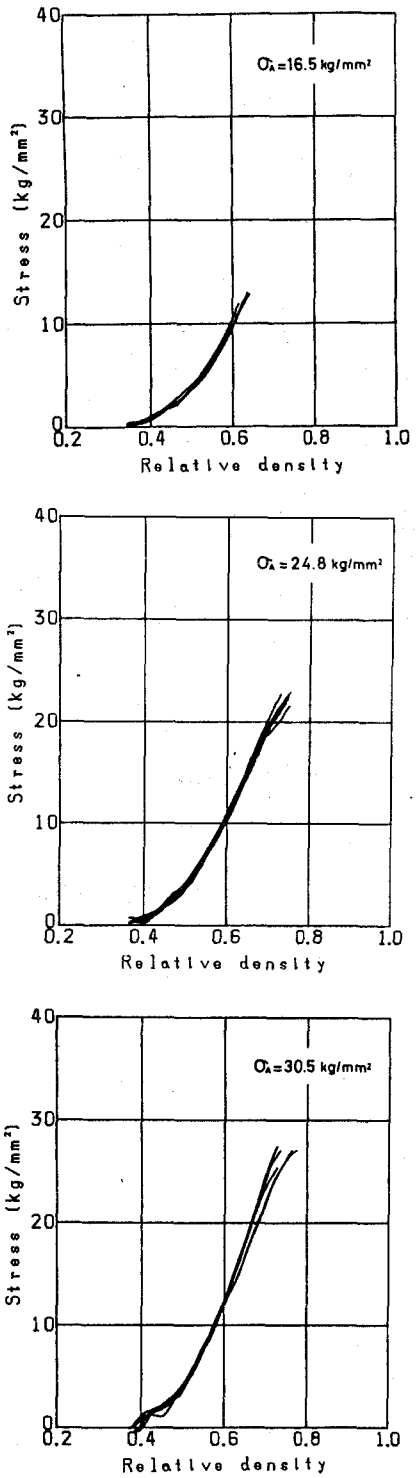


Fig.6.13 Stress - relative density relations.

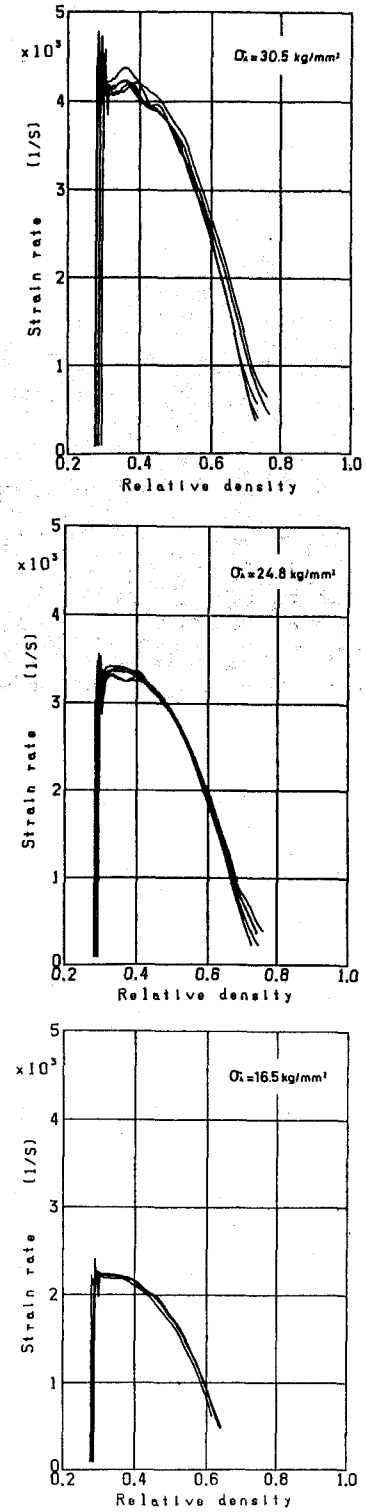


Fig.6.14 Strain rate - relative density relations.

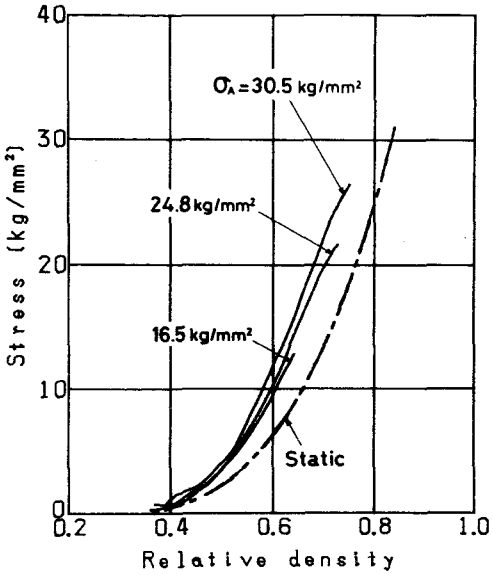


Fig.6.15 Stress - relative density relations for several incident stresses.

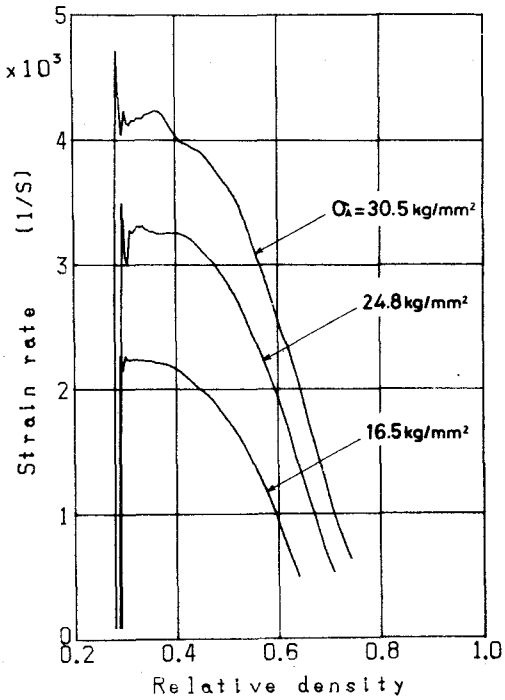


Fig.6.16 Strain rate - relative density relations for several incident stresses.

Table 6.2 Probabilities of false rejection of the null hypothesis that stress - relative density relations obtained from different incident stresses are different to each other. (Significance levels)

Relative density	Significance level (%)		
	σ_A=16.5 (kg/mm²) & σ_A=24.8 (kg/mm²)	σ_A=24.8 (kg/mm²) & σ_A=30.5 (kg/mm²)	σ_A=16.5 (kg/mm²) & σ_A=30.5 (kg/mm²)
0.5	——	12.0	15.0
0.55	0.54	0.072	less than 0.05
0.6	0.56	less than 0.05	less than 0.05
0.62	1.47	less than 0.05	less than 0.05

t 分布を利用して検定した．その検定結果を Table 6・2 に示す．この表より 密度比 0.5 ではあまり有意に異なっているとはいえないが，密度比0.55以上では有意水準 5%以下となっており，有意に異なっているといえる．つまり，Fig. 6・15 の応力- 密度比曲線の差は 粉体の特性によるものであるといえる．

つぎに，初期密度比の大きい圧粉体の応力- 密度比関係を調べるため，Fig. 6・11 の1m の打出し棒の代りに，短い 8, 10, 24 cmの 3 種類の打出し棒を用いて，粉体を動的に予備成形し 初期密度比 ρ_0 が 0.42, 0.46, 0.58の圧粉体試料を作った．そして これらの圧粉体試料を 再び1m の打出し棒を用いて 入射応力 σ_A = 24.8 kg／mm² で圧縮した．各密度比で 数個の実験を行ない，それぞれの応力- 密度比曲線の平均値に最も近い曲線を取って描いたのが Fig. 6・17 である．この図を見ると 粉体は 応力の低い時は直線部分を持っており，その後 折曲って折点以後は元の Fig. 6・15 で示される ρ_0 =0.281の応力- 密度比曲線にほぼ一致することがわかる．この直線部分は弾性であると考えられる．このことを確めるため，2度目の動的圧縮に短かい打出し棒を用いて折点以下の応力を加えた．その結果，負荷時の応力- 密度比関係と除荷時の応力- 密度比関係がほぼ一致する直線となり，この直線部分は弾性であることがわかった．したがって，折点は降伏点とみなすことができる．

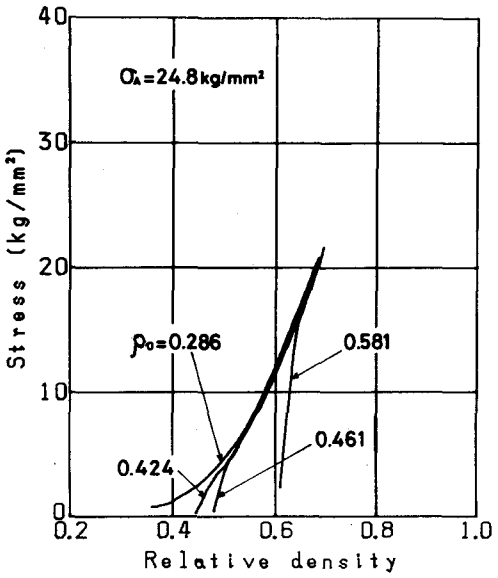
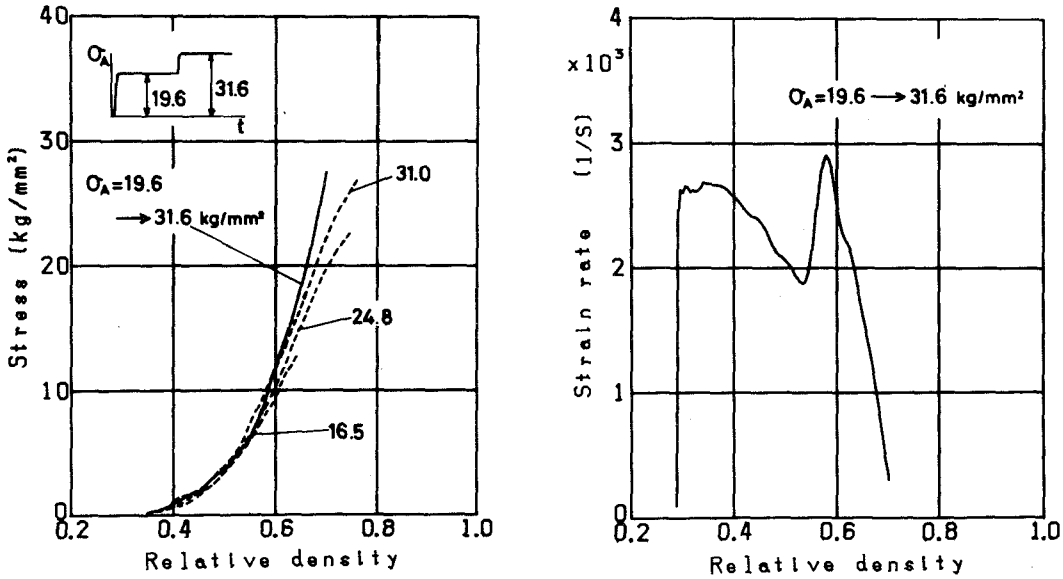


Fig.6.17 Stress - relative density relations for powders pre-compacted to various density.

つぎに，圧縮中に応力が急変する場合，いいかえると，ひずみ速度が急変

する場合の実験を行なった．すなわち，1 m の長さを持つ打出し棒の太さを中央部で変え，入力弾性棒側の直径を 18 mm，長さを500mm，ガスガン側の直径を 35 mm，長さを 500 mm とし，この棒を用いて Hopkinson 棒法実験を行なった．この打出し棒を用いると入射応力が 19.6 kg／mm² から 31.6 kg／mm² に急変する．このようにして実験を行なった結果を Fig. 6・18 に示す．これからわかるように，密度比 0.55 付近でひずみ速度が急変しており，そのとき応力が急変している．Fig. 6・15の応力- 密度比曲線（ Fig. 6・18 に破線で示す．）と比べると 最初はほぼ入射応力 19.6 kg／mm²の曲線と一致しているが，急変後は入射応力 30.5 kg／mm² の曲線より上になっている．



(a) Stress - relative density relations.

(b) Strain rate - relative density relations.

Fig.6.18 Experimental results when strain rate shift abruptly at ρ =0.55.

6・4　モデルによる計算

粉体を任意の速度で圧縮した場合の応力- 密度比関係や応力緩和量を理論計算で求めるには粉体の性質を式の形（構成式）で表わしておく必要がある．

そこで 構成式を求めるため 粉体のモデル化を考える．今までの結果より，粉体のモデルとしては少くとも次の性質を満足せねばならない．

（1） 加工硬化特性を示す．

（2） 弾性成分を持つ．

（3） 負荷過程ではひずみ速度が大きいほど同じ密度にする応力が大である．

（4） 応力緩和現象を示し，その現象は負荷過程のひずみ速度により影響される．

（5） 非線形性が大である．

安茂[156]は医薬品などの粉体に粘弾性標準線形モデルを適用して応力緩和を説明している．しかし このモデルでは （4）に述べた過去の履歴の影響を説明することができない．そこで，ここでは上記（1）～（5）の特性を表わす以下のようなモデルを考えた．

いま，粉体を静的に圧縮し，除荷した場合の理想的応力－ひずみ曲線の概略図を Fig. 6・19 に示す．応力およびひずみは圧縮を正とする．OA は 負荷，AB は除荷であり，さらに負荷を加えると BA をもどり，A 点で降伏し，AC と進む．加工硬化を持つ いわゆる弾塑性体である．これだけでは 上記（1），（2）の性質を表わしているだけである．さらに（3），（4），（5）の性質を示すような最も簡単なモデルとして Fig. 6・20 のような三要素弾粘塑性モデルを考えた．

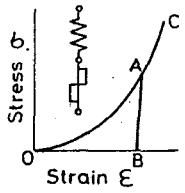


Fig.6.19 Idealized stress - strain diagram of powders.

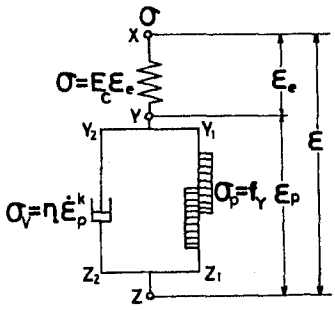


Fig.6.20 Three elements elastic visco-plastic model.

XY 間は弾性部分を表わし，Fig. 6・

19 の AB に相当する．AB の傾きが弾性係数となる．YZ 間は 粘塑性部分を表わす．Y_1Z_1は塑性項を表わし，f_Yは降伏応力で $\sigma > f_Y$ ならば $\sigma_p = f_Y$ となり，$\sigma < f_Y$ならば 剛体として働く．Y_2Z_2は粘性項を表わす．前述の 6・2・3節の（2）および（3）の現象を示すのがこの σ_v および σ_p の項である．

このモデルでは次の関係が成立する．

$$\left.\begin{aligned} &\sigma = \sigma_p + \sigma_v \\ &\sigma = E_c \varepsilon_e \ , \quad \sigma_p = f_Y \\ &\sigma_v = \eta \dot{\varepsilon}_p^{k} , \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \end{aligned}\right\} \qquad (6\cdot7)$$

また，密度比ρとひずみεの間には式（6・6）の関係が成立する．ここでE_c, f_Y, η, kは粉体の性質を表わす材料定数である．この材料定数は粉体の密度により異なると考えられ，密度比ρの関数とすると$E_c(\rho)$, $f_Y(\rho)$, $\eta(\rho)$, $k(\rho)$ となる．これらの材料定数は以下に述べるようにして実験結果から決定する．

6・4・1　準静的圧縮時の粉体の構成式

$E_c(\rho)$ はすでに Fig. 6・6 で求めた．$f_Y(\rho)$ は 変位速度 0 の場合の応力－密度比関係であり，変位速度を種々変えたものから外そう法により求める．実際には変位速度 0 のものの外そうが困難だったので変位速度 0.001 mm／min のものを外そうして求め，それを$f_Y(\rho)$ に代用した．この結果，静的応力－密度比曲線は川北[50]の式を用いて次式で表わされる．

$$f_Y(\rho) = \frac{1}{b}\,\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 - \rho(1-a)} \qquad (6\cdot8)$$

ここで $0.281 \leqq \rho \leqq 0.501$: $\rho_0 = 0.281$, $a = 0.522$, $b = 2.26$

$0.501 < \rho \leqq 0.592$: $\rho_0 = 0.371$, $a = 0.528$, $b = 0.410$

$0.592 < \rho < 1$: $\rho_0 = 0.467$, $a = 0.599$, $b = 0.0922$

であり，この曲線を Fig. 6・2 および Fig. 6・15 に 一点鎖線で示す．

$\eta(\rho)$, $k(\rho)$ は $E_c(\rho)$, $f_Y(\rho)$ が決まれば，次のようにして応力緩和曲線より決まる．すなわち ε, E_cは応力緩和中一定であるから

$$\varepsilon_p = \frac{d\varepsilon_p}{dt} = \frac{d}{dt}(\varepsilon - \varepsilon_e) = \frac{d}{dt}\left(\varepsilon - \frac{\sigma}{E_c}\right) = -\frac{\dot{\sigma}}{E_c} \qquad (6\cdot 9)$$

であり，

$$\sigma_v = \eta \dot{\varepsilon}_p^{\,k} = \eta(-\dot{\sigma}/E_c)^k \qquad (6\cdot 10)$$

となる．また，ここで

$$\sigma_v = \sigma - \sigma_p = \sigma - f_Y \qquad (6\cdot 11)$$

であるから両辺の対数をとると

$$\log \sigma_v = \log \eta + k \log(-\dot{\sigma}/E_c) \qquad (6\cdot 12)$$

となり，縦軸に$\log \sigma_v$，横軸に $\log(-\dot{\sigma}/E_c)$ をとって応力緩和中のグラフを描くと直線となる．この一例をFig. 6・21 に示す．この傾きが k で切辺が $\log\eta$を表わす．それらの結果を密度比の関数として表わしたのがFig. 6・22 である． このようにして実験からE_c, f_Y, η, k がρの関数として求まった．

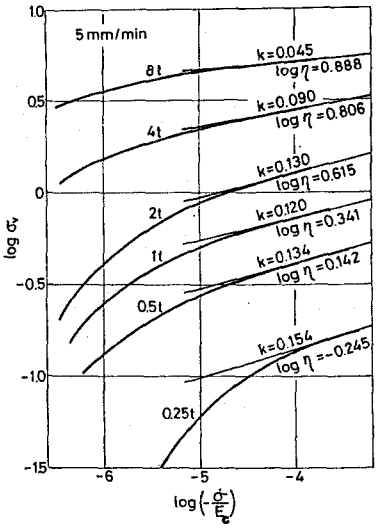
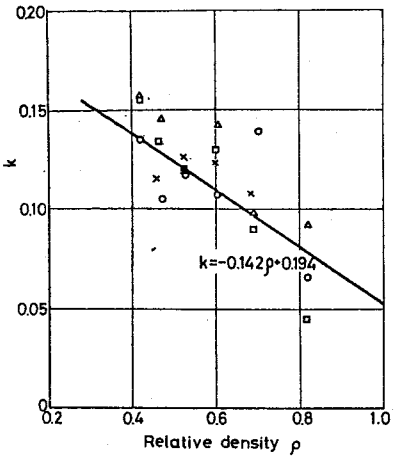


Fig.6.21 Relations of $\log \sigma_v$ - $\log(-\dot{\sigma}/E_c)$ in stress relaxation curves.

これらの材料定数が求まれば，途中で圧縮速度を変えても応力－密度比関係や応力緩和を計算することができる．すなわち，圧縮中は式（6・7）を差分式に直して数値計算をすることができる．また応力緩和中の解析については，式（6・7）より

$$E_c(\varepsilon - \varepsilon_p) - f_Y = \eta \dot{\varepsilon}_p^{\,k}. \qquad (6\cdot 13)$$

が成立し，応力緩和中は ε, E_c, f_Y, η, kが一定であるため式（6・13）



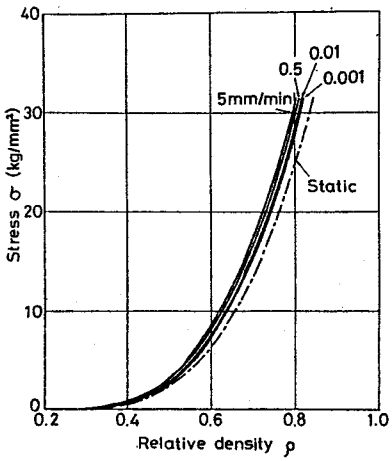


Fig.6.23 Stress - relative density relations by calculations.

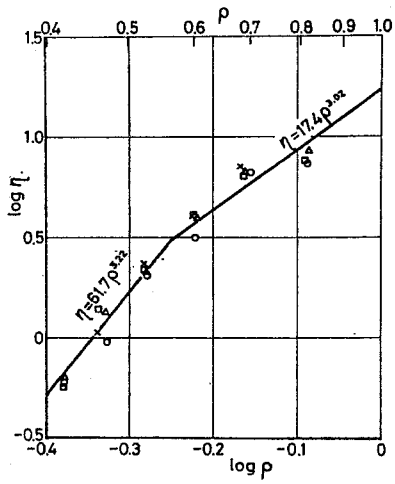


Fig.6.22 Relations of k and η - relative density.

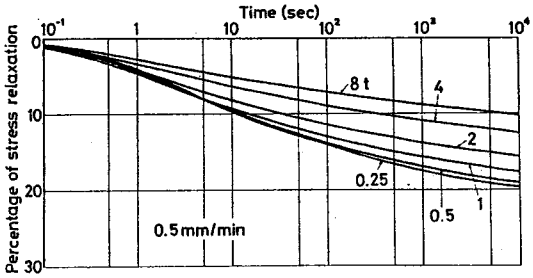


Fig.6.24 Stress relaxation curves by calculations.

は解析的に解け，次式となる．

$$\varepsilon_p = -\frac{\eta}{E_c}\left\{-\frac{E_c}{\eta}\frac{k-1}{k}(t-t_c)\right\}^{\frac{k}{k-1}} - \frac{f_Y}{E_c} + \varepsilon \qquad (6\cdot 14)$$

ここで

$$t_c = \left\{\frac{E_c}{\eta}(\varepsilon-\varepsilon_{p0}) - \frac{f_Y}{\eta}\right\}^{\frac{k-1}{k}} \frac{\eta}{E_c}\frac{k}{k-1} \qquad (6\cdot 15)$$

であり，ε_{p0}は 応力緩和開始時（t＝0）の塑性ひずみである．

これらの計算より求めた圧縮速度一定の場合の応力－密度比曲線の一例を Fig. 6・23 に示す．Fig. 6・2 の実験値より応力が少し大きくなって いる

が定性的な性質は良く表わされている．

圧縮速度一定の場合の応力緩和曲線の一例を Fig. 6・24 に示す．実験では測定できなかった 1 s 以内の 非常に早い時期にかなりの応力緩和が起っていることがわかる．

圧縮速度を途中で変えた場合の応力－密度比曲線を Fig. 6・25 に示す．それぞれの圧縮速度に応じた応力－密度比曲線に短時間で移動しているのがわかる．

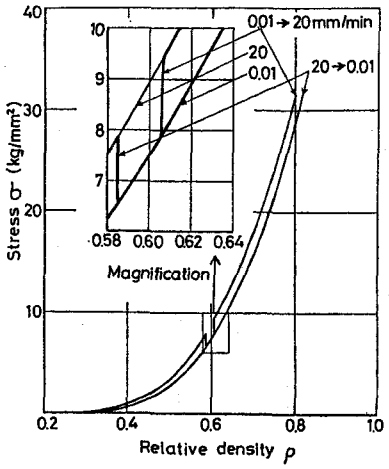


Fig.6.25 Stress - relative density relations when compression speeds shift abruptly at 2 ton by calculations.

このように三要素弾粘塑性モデルを用いて 準静的圧縮実験結果より 材料定数を求めることができ，それを用いて圧縮速度を変えた場合の計算をすると，実験結果と定性的に一致した．このモデルを用いれば密閉容器内で準静的に一軸圧縮を行なう場合の種々の履歴の応力－密度比状態を計算することができる．

6・4・2　動的圧縮時の粉体の構成式

動的圧縮の場合も同じメカニズムが考えられるが，圧縮は応力の伝ぱにより行なわれるため，前述の6・2・3節の（1）の領域でも 粒子同志の衝突により応力が発生する．さらに（2）の領域の滑りが 動的に行なわれるため摩擦係数は小さくなり応力が小さくなる．しかし，すきまへ落込む時間的余裕が少ないため（3）の領域の塑性変形が 早く行なわれ応力が上がる．また，（3）の領域の 金属粒子自身の塑性変形が動的に行なわれるため，金属自身の粘性による過大応力が発生する．

以上の結果，粉体の動的圧縮の場合は準静的圧縮の場合と同様に Fig. 6・20 に示す三要素弾粘塑性モデルおよび式（6・7）を適用できるが，その

材料定数の値は異なるものと考えられる．以下その材料定数の求め方について述べる．

弾性係数 $E_c(\rho)$ は，Fig. 6・17 に示した弾性部分の 直線の傾き σ/ρ から，式（6・6）を用いて σ/ε を求めることにより決められる．その結果を Fig. 6・26 に示す．なお，図中の破線は Fig. 6・6 の準静的圧縮で求められた弾性係数を表わす．このように密度の小さい時は，動的圧縮の方が 準静的圧縮よりも 弾性係数が小さくなる．

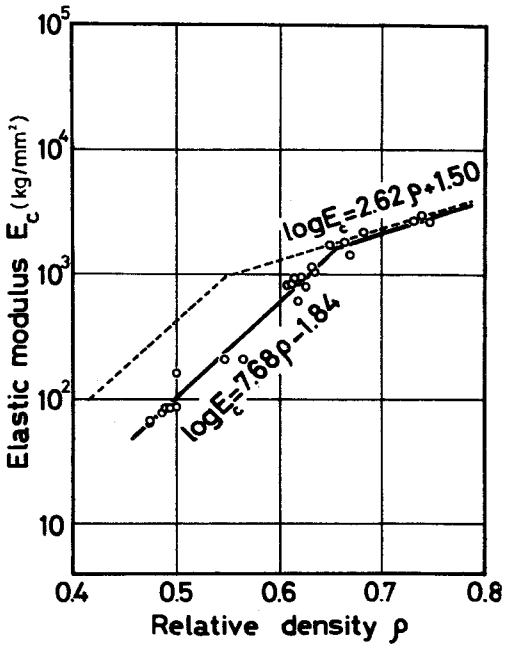


Fig.6.26 Elastic modulus - relative density relations.

$f_Y(\rho)$ は動的圧縮中にひずみまたは応力を一定にし，応力緩和またはクリープを十分に行なわせた後の応力と密度比の関係より得られる．しかし，動的圧縮の場合，この実験は容易に行なえないので，ここでは準静的圧縮実験より求めた応力－密度比関係を用いる．Fig. 6・2 および Fig. 6・15 の一点鎖線がこれである．$\eta(\rho)$，$k(\rho)$ については，準静的圧縮の場合は応力緩和曲線より求めることができたが，動的圧縮の場合は応力緩和を行なうことが困難なので，ここでは式（6・7）を用いて入射応力の異なる二つの実験データの同じ密度比 ρ の時の応力から求めた．すなわち，同じ密度比 ρ の時の二つのデータのそれぞれの値に添字 1 および 2 をつけると式（6・7）より

$$\sigma_{v_1} = \sigma_1 - f_Y, \quad \sigma_{v_2} = \sigma_2 - f_Y \qquad (6\cdot16)$$

$$\dot{\varepsilon}_{p1} = \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_{e1} = \dot{\varepsilon}_1 - \frac{\dot{\sigma}_1 E_c - \sigma_1 \dot{E}_c}{E_c^2}, \quad \dot{\varepsilon}_{p2} = \dot{\varepsilon}_2 - \frac{\dot{\sigma}_2 E_c - \sigma_2 \dot{E}_c}{E_c^2} \qquad (6\cdot17)$$

$$\sigma_{v_1} = \eta \dot{\varepsilon}_{p_1}^{k} \ , \quad \sigma_{v_2} = \eta \dot{\varepsilon}_{p_2}^{k} \qquad (6 \cdot 18)$$

の諸式が導かれる．式（6・16），（6・17）の右辺の諸量は，実験データよりすべて求まるので，σ_v，$\dot{\varepsilon}_p$が決まる．この値を用いて式（6・18）からη，kは次式のように求められる．

$$k = \frac{\log(\sigma_{v_1}/\sigma_{v_2})}{\log(\dot{\varepsilon}_{p_1}/\dot{\varepsilon}_{p_2})} \ , \quad \eta = \frac{\sigma_{v_1}}{\dot{\varepsilon}_{p_1}^{k}} \qquad (6 \cdot 19)$$

しかし，σや$\dot{\varepsilon}$などのデータのバラツキが大きいので解析に当っては統計的処理をせねばならない．そこで一つの密度比ρに対して数個の実験を行ないさらにそれより求められる $\log\eta$，k が密度比ρの一次関数であると近似し二変数の最小自乗法により最適の関数形を求める．その結果，次式のように定式化された．

$$k = 1.11\rho + 0.107 \qquad (6 \cdot 20)$$

$$\log\eta = 2.51\rho - 3.43 \qquad (6 \cdot 21)$$

このようにして式（6・7）の材料定数が求められたので，これを用いて粉体の動的圧縮過程中の応力波の伝ぱの理論計算を行なうことができる．

6・4・3　Hopkinson 棒法を粉体に適用した場合の精度の検討

前述の6・3・1節で示したように Hopkinson 棒法は，試料内の平均的な応力・ひずみ・ひずみ速度を入力および出力弾性棒のひずみから求める方法である．しかし，応力波の伝ぱに有限の時間を要するため，衝撃直後は試料内の応力やひずみが不均一となり精度が良くない．特に試料として粉体を用いる場合は，その中での応力波の伝ぱ速度が遅いため，応力の不均一な時間が長く，精度の良くない範囲が大きいことが予想される．金属固体を試料とした場合の Hopkinson棒法の精度が，特性曲線法を用いて検討されている[166]．ここでは，第4章で示したテンソルコード（差分法の一種）を用いて，Hopkinson 棒法を粉体に適用した場合の精度を検討した．

すなわち，粉体の構成式として前節で求めた銅粉の構成式を用い，Fig. 6

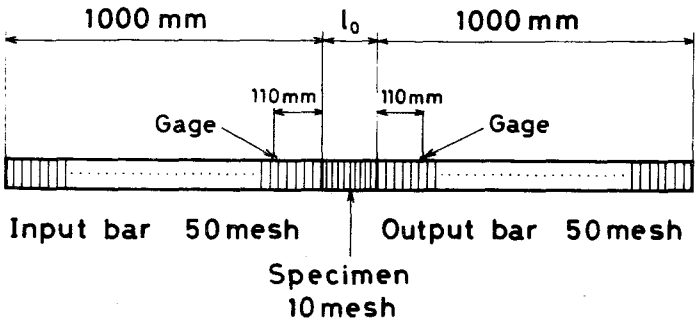


Fig.6.27 Element meshes of split Hopkinson pressure bars and specimen for calculations by tensor code.

・27 のような要素分割で シミュレーションを行ない，その解析中のデータから 入力および出力弾性棒の ひずみゲージの位置の応力値を求め，その値より，Hopkinson 棒法原理によって，応力－密度比関係を求めた．その結果と，試料全体の平均ひずみ・ひずみ速度を直接構成式に代入して求めた応力－密度比関係とを比較することによって Hopkinson 棒法の 精度がわかる．入力弾性棒の衝撃端の境界条件は Fig. 6・28 に示すように，立上り時間の後，一定速度となるようにした．

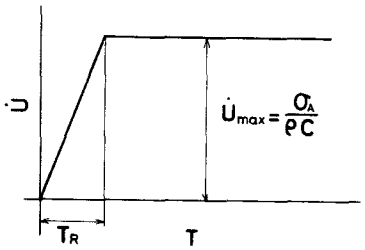


Fig.6.28 Boundary condition at impact end for calculation by tensor code.

このようにして計算した結果の一例を Fig. 6・29 に示す．これは粉体内の応力・密度比・ひずみ速度の分布を示したものであり，図中の時間は粉体内に波が入ってからの時間である．初期にはかなりの不均一があるが波の反射の繰返しが進むとともに均一となっている．

入射波の立上り時間 T_R を変えて解析を行なった結果求まった応力－密度比関係を Fig. 6・30 に，入射応力 σ_A を変えた場合の結果を Fig. 6・31 に，粉体試料の初期長さ l_0 を変えた場合の結果を Fig. 6・32 に示す．これらの図の太実線は Hopkinson 棒法により求めた曲線で，細実線が構成式か

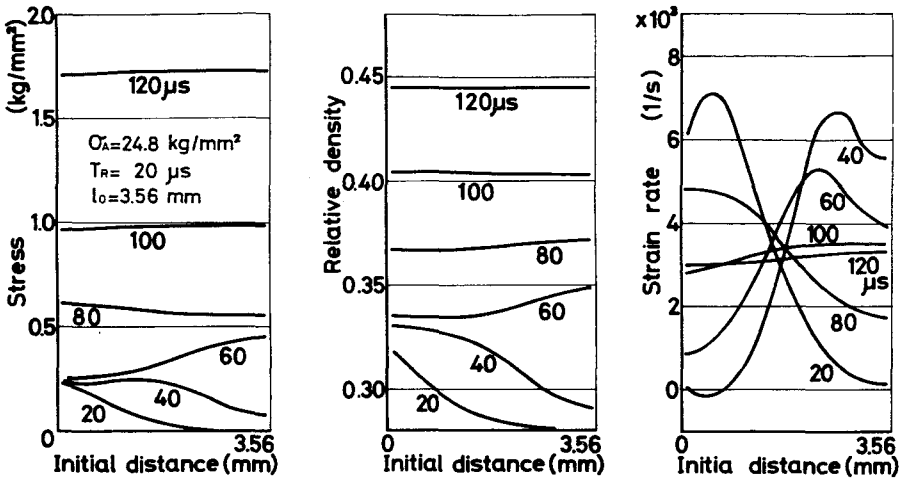


Fig.6.29 Stress, relative density and strain rate distributions in powders calculated by tensor code.

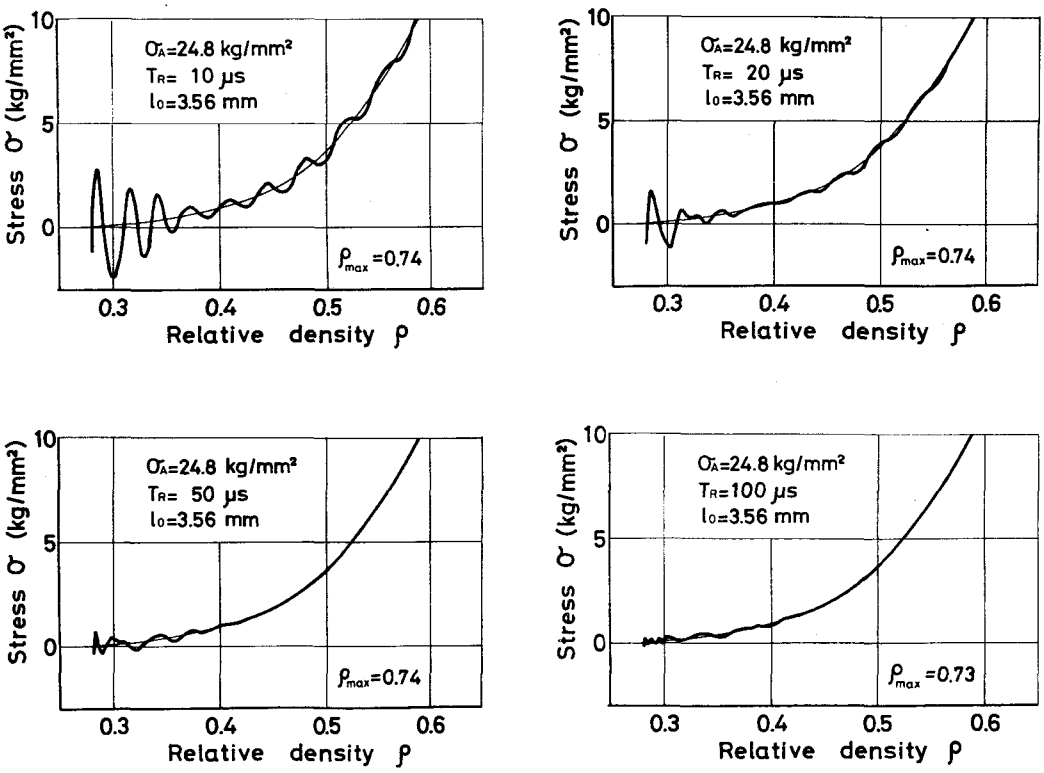


Fig.6.30 Stress - relative density relations by calculations for several values of T_R.

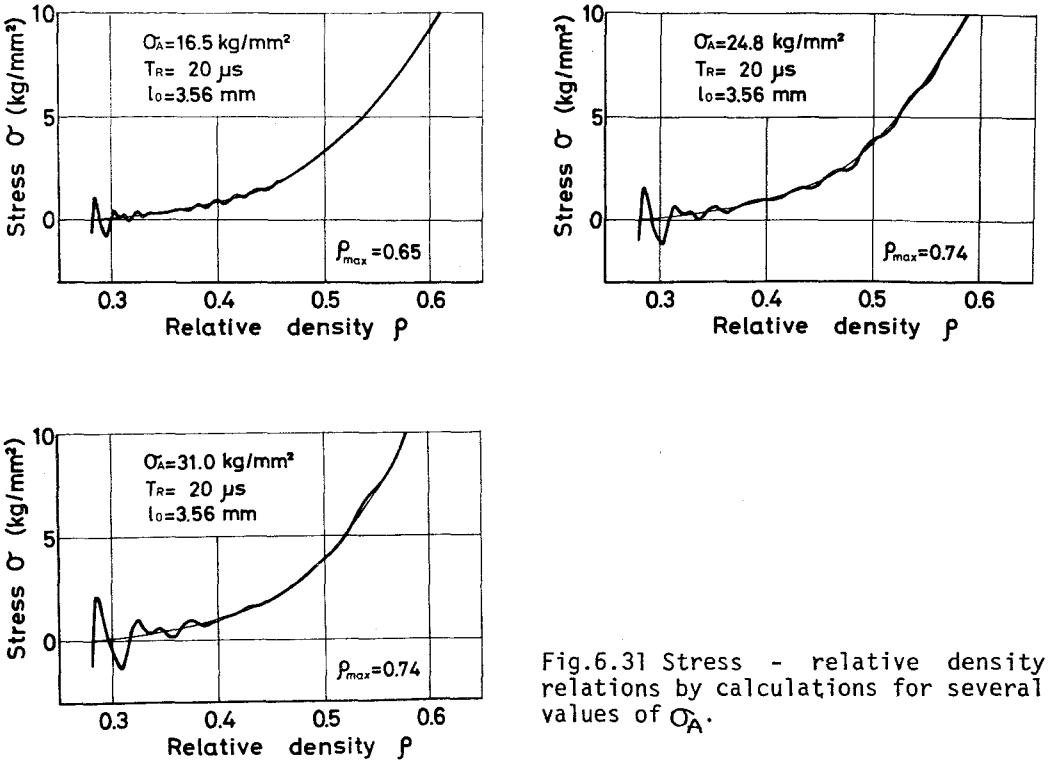


Fig.6.31 Stress - relative density relations by calculations for several values of σ_A.

ら求めた曲線である．なお，Hopkinson 棒法では，試料の応力が入射最大応力と一致すると増密できなくなり，また，反射波が衝撃端で反射し入力ゲージに再びもどってくると，それ以後,この原理では解析できなくなる．図中の ρ_{max}はこの条件の時,Hopkinson 棒法によって解析できる最大密度比を表わしている．

これらの図を見ると，圧縮初期には太実線と細実線とが一致しておらず，精度が悪く，増密が進み応力波が何度も反射を繰返すとともに精度が良くなることがわかる．これらの図を通観した結果，精度の良い実験をする方法として，次の三つの方法が挙られる．すなわち，（1）入射波の立上り時間を長くする．（2）入射応力を小さくする．（3）粉体の初期長さを長くする．しかし，（2）および（3）の方法では精度は良くなっても解析できる最大密度比が小さいので，低密度領域においてのみ精度の良いデータを得たい時

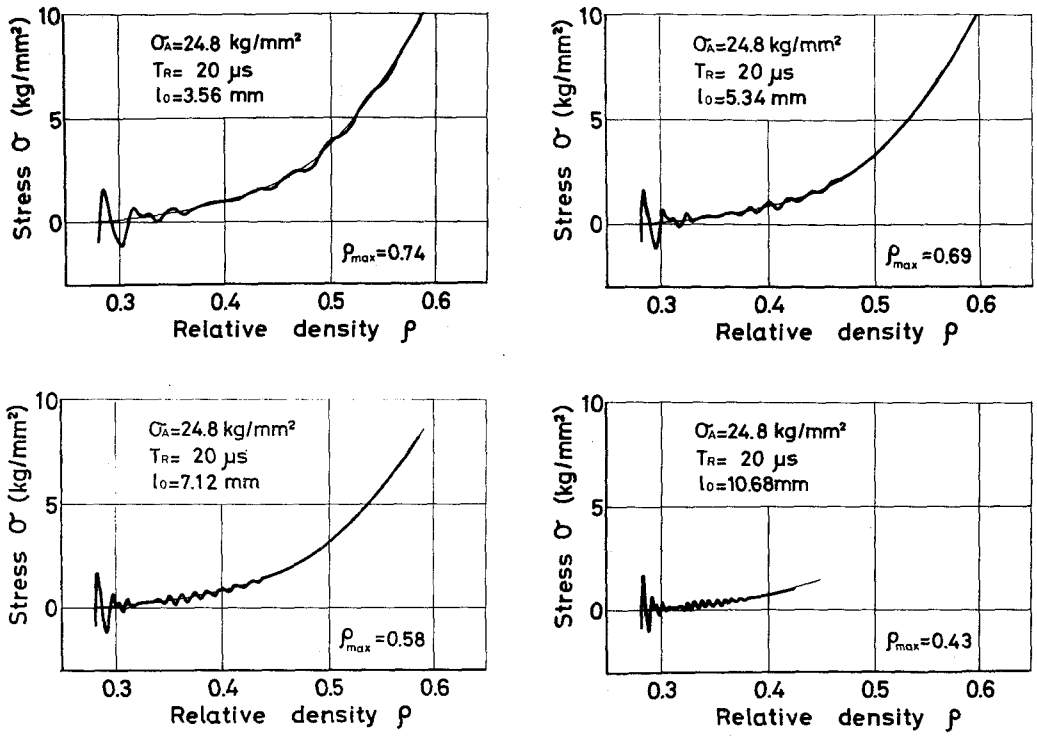


Fig.6.32 Stress - relative density relations by calculations for several values of ℓ_0.

有効である．（1）の方法は高密度まで解析できるが立上り時間を長くすると，一カ所の入力ゲージで入射応力と反射応力を分離することができないので入力ゲージが 2 カ所必要となる．

さて Fig. 6・15, 6・16, 6・17 で示した実験と同様の条件で差分計算によりシミュレーションした場合の結果を Fig. 6・33, 6・34, 6・35 に示す．両者はかなりよく一致していることがわかる．

つぎに，圧縮中に応力が急変する場合，すなわち Fig. 6・18 の実験の場合の計算を行なった．この段付打出し棒を用いた時のテンソルコードによるシミュレーション結果を Fig. 6・36 に示す．この結果は実験結果とわずか異なっているが ひずみ速度急変部付近では ほぼ定量的にも定性的にも一致しているといえる．このように，三要素弾粘塑性を仮定して実験から材料定

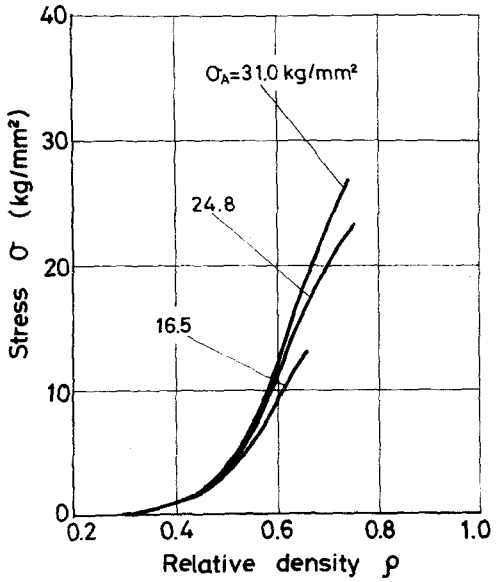


Fig.6.33 Stress - relative density relations by calculations in the same case as Fig.6.15.

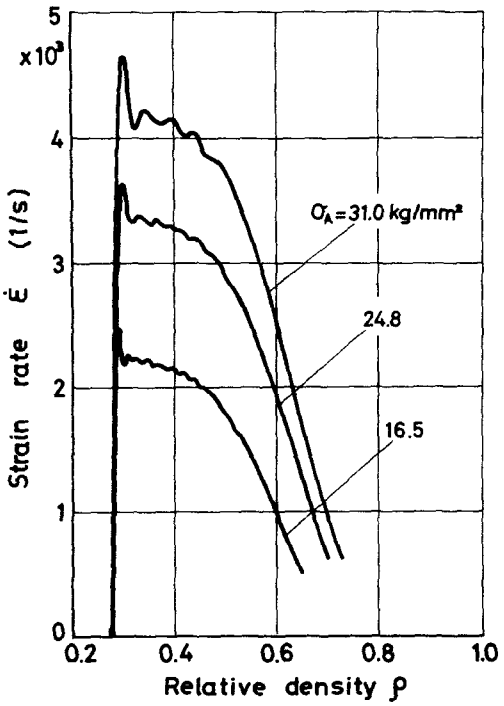


Fig.6.34 Strain rate - relative density relations by calculations in the same case as Fig.6.16.

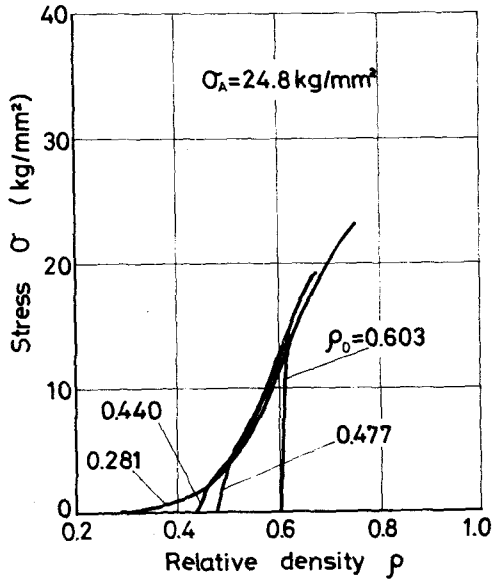


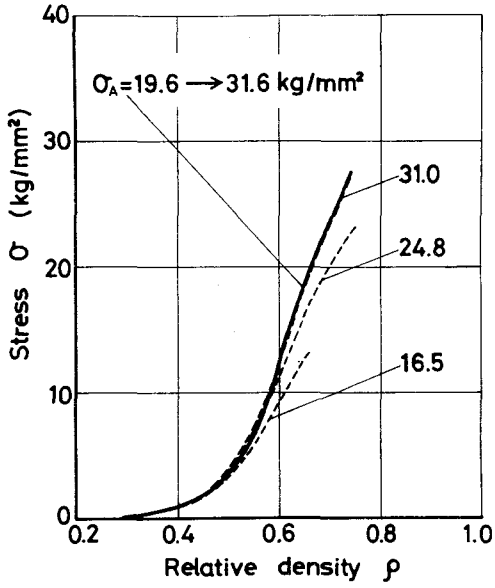
Fig.6.35 Stress - relative density relations by calculations in the same case as Fig.6.17.

数を決めることにより求めた構成式は粉体の挙動を表わしているといえる．

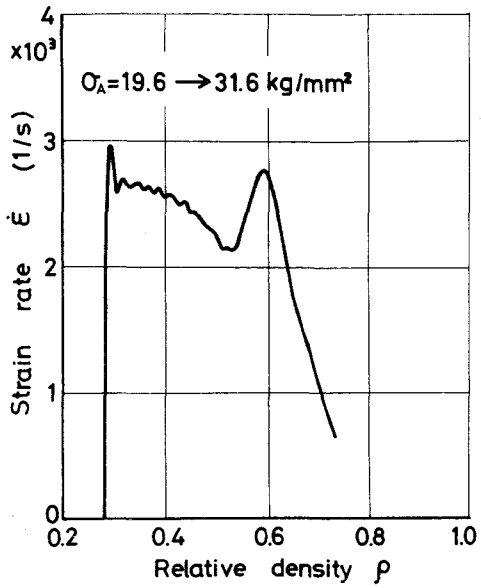
6・5　結論

以上の結果より次のことがいえる．

（１）　電解銅粉は常温で 10^{-2}～10^{-5}／s 程度のゆっくりしたひずみ速度による圧縮においても，応力－密度比関係は，圧縮時のひずみ速度により異なる．ひずみ速度が大きいほど同じ密度にする応力は大きくなる．



(a) Stress - relative density relations.



(b) Strain rate - relative density relations.

Fig.6.36 Results of calculations when strain rate shift abruptly at ρ =0.55 in the same case as Fig.6.18.

（２） 電解銅粉を圧縮成形して変位を一定に保っておくと応力緩和があり，圧縮時のひずみ速度が大きいほど，また低密度なものほど応力緩和率が大きい．

（３） これらの性質は粉体粒子同志の滑り摩擦により起ると考えられる．潤滑剤としてステアリン酸亜鉛を添加すると応力緩和は少なくなる．また比表面積の小さい噴霧銅粉も応力緩和は少ない．

（４） 圧縮途中でひずみ速度を急変させると応力－密度比関係も急変し，すぐにそれぞれのひずみ速度に応じた応力－密度比曲線の上にのる．したがって応力計算などをする場合，粉体の構成式としてそれぞれのひずみ速度に応じた応力－密度比曲線を使用しても大きな誤差は生じない．

また，粉体の応力－密度比に関する実験を行なう場合は，その時のひずみ速度を明記しておく必要がある．

（５） 準静的圧縮中の粉体の性質を三要素弾粘塑性モデルで表わした．これにより過去の履歴を考慮して粉体の挙動を表わすことができた．その結果は実験結果と定性的に一致した．

（６） 粉体の動的応力－密度比－ひずみ速度関係を求めるため Hopkinson 棒法実験を行なった．この実験の解析の精度の向上と解析時間の短縮のためマイクロコンピュータとデジタルメモリからなる解析システムを開発した．このシステムを用いて実験解析を行なった結果，粉体はひずみ速度により応力－密度比関係が異なり，ひずみ速度が大きいほど同じ密度にする応力が大きくなることがわかった．

（７） 粉体の動的圧縮時の性質を三要素弾粘塑性モデルで表わした．これにより，粉体の動的圧縮時の挙動を理論的に解析できるようになった．

（８） 粉体を動的圧縮する場合の理論計算を差分法を用いて行ない，Hopkinson 棒法の測定精度を検討した．その結果，精度良好のデータを広い範囲で得るには，入射波の立上り時間を長くするのが有効な方法であることがわかった．

第7章　前負荷の異なる銅圧粉体の降伏曲線の比較

7・1　まえがき

金属圧粉体の一次元の降伏条件については，圧縮応力と密度の関係として多くの研究[46)～59)]が行なわれている．金属圧粉体の二次元・三次元の降伏条件については，明田ら[82)]，Schwartz ら[83)]，Koerner ら[84),85)]，増田ら[86)～88)]，島・沖本ら[89)～93)]の研究がある．また，金属圧粉体とよく似た挙動をする土やセラミックなどの粒状体[60)～68)]あるいは多孔質体[69)～80)]の降伏条件に関する研究も多く行なわれている．

金属圧粉体の降伏条件は，その材料である金属の性質（特に降伏応力）や圧粉体の密度，粉末粒子の形状によって異なるのは当然として，さらに圧粉体の荷重履歴などによっても異なると考えられる．ところが，この荷重履歴の影響については，わずか沖本ら[92)]が変形履歴の異なる同一密度の金属圧粉体に静水圧圧力を作用させたときの密度変化に差が認められることを述べている程度である．

ところで，金属固体の場合は，降伏条件に及ぼす荷重履歴の影響がかなり詳しく調べられており[169)]，種々の硬化則も報告されている[170)]．金属固体の場合は静水圧圧縮によっても体積変化がほとんどなく，降伏曲線もほとんど変化しないが，金属圧粉体の場合は，静水圧圧縮によって密度が変わり，塑性変形が大きく現われる．そのため金属固体の降伏曲線と異なったものとなる．また金属圧粉体の場合は，個々の粒子の塑性変形だけでなく，粒子間の滑りによっても塑性変形を行なうため，荷重履歴の影響は金属固体の場合と異なると思われる．そこで，この章では，この金属圧粉体の降伏条件に及ぼす荷重履歴の影響を調べた．

7・2　実験方法および実験装置

ここでは以下金属圧粉体を均質な連続体とみなし，応力およびひずみは試料の平均値を用い，圧縮を正として解析した．密度比は除荷後容器より取出して測定した値であり，測定方法は，重量と寸法の測定から求める方法とJIS Z 2505 において 焼結体の密度測定法として規定されているパラフイン処理法を適宜使い分けた．

使用した金属粉は 他の章の実験でも用いた電解銅粉（ CE- 6 ）である．この電解銅粉を用いて まず 密閉容器内成形された圧粉体が力学的に異方性であることを調べる予備実験を行なった．つぎに，静水圧圧縮あるいは密閉容器内圧縮の二つの異なった成形方法で得られた圧粉体に，単軸圧縮，三軸圧縮あるいは静水圧圧縮を行ない，軸対称応力状態での，密度比をパラメータとした降伏点を求めた．

なお，粉体の圧縮においては，ひずみ速度により応力- ひずみ関係が変化したり，応力緩和などが現れるので，圧縮速度は小さくし，同じ種類の試験に対してはできる限り圧縮速度を一定とし，除荷前には一定時間負荷を保持して実験を行なった．以下，実験手順の概要を述べる．

7・2・1　静水圧圧縮

静水圧圧縮を行なうための実験装置の概略を Fig. 7・1 に 示す．この装置は圧力容器を圧縮試験機のラムとクロスヘッドの間に取付けたもので，ハンドポンプで圧力媒体となる油を送り込む．この油圧で押されたピストンをラムとクロスヘッドで固定し，圧力室には最大 2000 kg／cm² の静水圧圧力を発生させることができる．実験は薄いゴム袋に包まれてシールされた銅粉 15 g を圧力室の中に入れ，ハンドポンプでゆっくりと圧力を上昇させた．所定の静水圧圧力に達したら，クリープの影響を除くため，その圧力を 5 分間保持し，その後，除荷した．このようにして，静水圧圧縮時の圧力と除荷後の圧粉体の密度比との関係を求めた．

7・2・2　密閉容器内圧縮

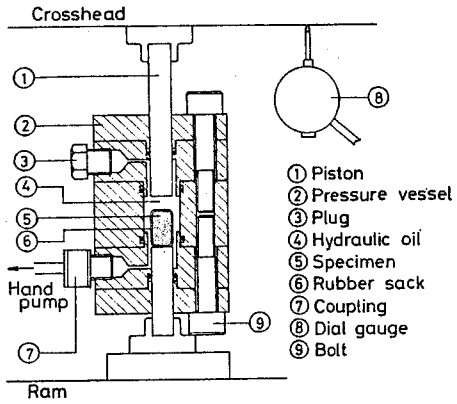


Fig.7.1 Schematic view of hydrostatic compression apparatus.

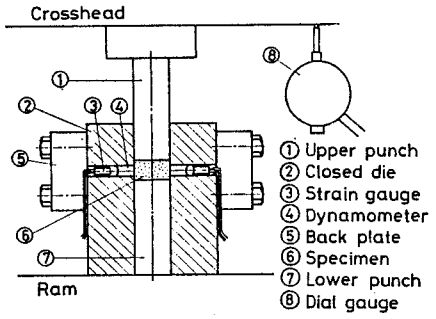


Fig.7.2 Schematic view of closed die compression apparatus.

密閉容器内圧縮試験装置の概略をFig. 7・2 に示す．内径 18 mm の ダイスに銅粉 13.68 g (ダイスに入れて密度比が 1 になる場合を想定すると高さが 6 mm になる重量)を入れ，圧縮試験機により変位速度 0.5 mm／minで圧縮した．圧粉体の軸方向応力を圧縮試験機の荷重計を用いて測定し，圧粉体の側応力をダイス壁に垂直な方向に軸に対して対称な位置に取付けた 2 個の測圧ピンを用いて測定した．同時に，ラムとクロスヘッドの間の変位を軸に対して対称な位置に取付けた 2 個のダイヤルゲージで測定し，ポンチの弾性変形も考慮に入れて，圧粉体の圧縮中の密度比を求めた．また別途，負荷中の最大軸応力を種々変えて，その除荷後の容器外での圧粉体の密度比との関係を求め，それより軸応力および側応力と除荷後容器外での圧粉体の密度比との関係を求めた．実験に際しては，ダイス壁面およびポンチ端面と粉体との間の摩擦の影響を少なくするため，これらの面にステアリン酸亜鉛 60 g を四塩化炭素 1000 cc に 溶したものを軽く塗付した．

7・2・3　予備成形

銅粉を静水圧圧縮したときの静水圧圧力と圧粉体の密度比の関係が 7・2・1 節に述べた実験ですでにわかっているので，静水圧圧縮により密度比が 0. 65, 0.70, 0.78 の圧粉体を作り，これを削って直径 18 mm，高さ 6 mm

の円柱状に整形した．また密閉容器内圧縮により，密度比が 0.65，0.70 あるいは 0.78で重量が 6.84 g の圧粉体を作成した．このように密度は等しいが荷重履歴の異なる直径 18 mm の 円柱状の圧粉体を成形して以下に述べる実験の試料とした．

7・2・4　単軸圧縮試験

この実験は試料を上下二つのポンチの間にセットして，圧縮試験機で加圧圧縮して行なった．軸方向荷重を圧縮試験機の荷重計で測定し，試料の軸方向変位をラムと上ポンチの間にセットした差動トランス形変位検出器（D.T.F.）を用いて測定した．そして，この荷重- 変位線図から降伏点を求めた．なお，ポンチ端面と試料の間の摩擦を低減させるため，この間に厚さ 0.05 mm のテフロンシートを敷いた．

7・2・5　三軸圧縮試験

三軸圧縮試験の実験装置は Fig. 7・1 の試料とピストンを Fig. 7・3 に示す試料とピストンに置き換えたものである．この装置は，まず圧力室に静水圧圧力を加え，さらにピストンで軸方向荷重を加えることによって試料を三軸圧縮するものである．実験は以下の手順で行なった．直径 18 mm の上ピストンと下ピストン A で試料をはさみ，側面を薄いゴム膜でシールした後，圧力容器にセットする．ラムを上げて下ピストン B を下ピストン A に接触させた後，ラムの上昇を止め，ハンドポンプで容器内に油を送り込み，圧力室の静水圧圧力を所定の圧力までゆっくりと上昇させる．この状態でラムを上昇させて試料に軸力を付加して圧縮を行なう．このときの軸荷重- 軸変位線図を単軸圧縮試験と同様にして求め，これから，三軸圧縮状態での降伏応力を求めた．

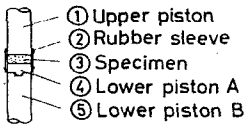


Fig.7.3 Schematic view of inner parts of triaxial compression apparatus.

以上の実験の他に，密閉容器内成形した圧粉体を薄いゴム袋でシールして

静水圧圧縮する実験も行なった．

7・2・6　応力経路

以上の実験はすべて軸対称応力状態であり，主応力をσ_1，σ_2，σ_3とすると軸方向応力はσ_1，側応力はσ_2（$=\sigma_3$）となる．各実験の応力状態を整理すると

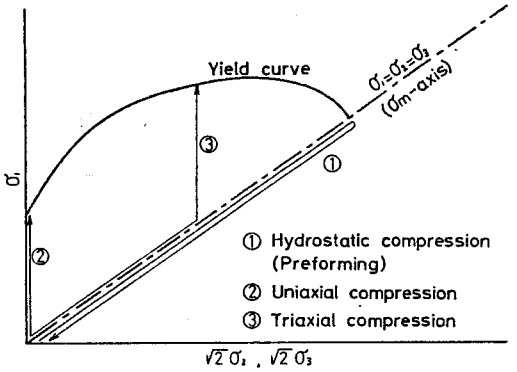
静水圧圧縮　：$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$

密閉容器内圧縮：σ_1，$\sigma_2=\sigma_3=f(\sigma_1)$

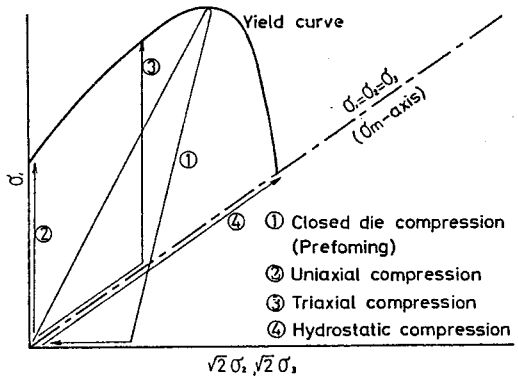
単軸圧縮　：σ_1，$\sigma_2=\sigma_3=0$

三軸圧縮　：σ_1，$\sigma_2=\sigma_3$

となる．主応力σ_2とσ_3が等しいので応力状態を主応力空間の$\sigma_2=\sigma_3$で表わされる平面（Rendulic 応力面）で表示することができる．特に圧粉体は静水圧圧力だけによっても降伏を示すので，金属の降伏曲線を表わすのによく使われるπ平面では簡単には表示できず，この Rendulic 平面で表示することは有効である．Fig. 7・4は今回実験を行なった各圧縮方法の Rendulic 応力面における荷重経路の概略図である．(a) は静水圧圧縮により成形した試料の荷重経路，(b) は密閉容器内圧縮により成形した試料の荷重経路である．今回の実験の応力状態は，この図のσ_1軸と$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$で表わされる$\sigma_m$軸とではさまれる範囲である．



(a) Hydrostatic preform.



(b) Closed die preform.

Fig.7.4 Loading paths for determining yield curve.

7・3　実験結果および考察

7・3・1　異方性

降伏曲線を求める前に，圧粉体が異方性であることを調べる実験を行なった．以下その実験について述べる．

銅粉を静水圧圧縮で予備成形し，これを削って整形した円柱試料および密閉容器内圧縮で予備成形した円柱試料を作成した．これらの荷重履歴の異なる二種類の円柱試料を再び静水圧圧縮したときの静水圧圧力と公称ひずみの関係を Fig. 7・5 に示す．静水圧圧縮で予備成形した試料は，再び静水圧圧縮を行なっても軸方向と半径方向のひずみに有意差は認められない．しかし，密閉容器内圧縮で予備成形した試料は，静水圧圧縮を行なうと明らかに半径方向と軸方向のひずみが異なっており，半径方向のひずみの方がはるかに大きく，半径方向に軟らかく軸方向に硬い異方性材料といえる．

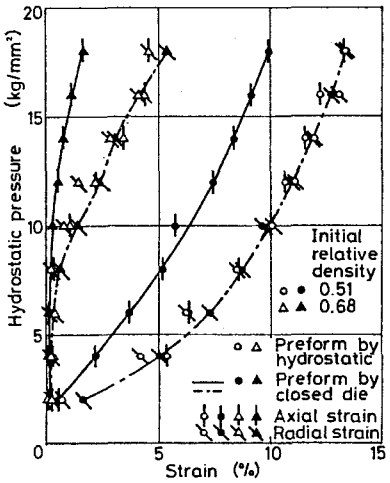


Fig.7.5　Hydrostatic pressure - axial or radial strain relations of hydrostatic preforms and closed die preforms.

7・3・2　降伏曲線

Fig. 7・6 に成形していない粉体の静水圧圧縮における静水圧圧力と密度比の関係，密閉容器内圧縮における軸応力および側応力と密度比の関係を示す．この線上の点はそれぞれ静水圧圧縮による降伏点，密閉容器内圧縮による降伏点となっており，沖本ら[92]は同一の密度比に対応するこれらの応力点を Redulic 応力面に表示し，それらの点を通るだ円を降伏曲線としている．ここでは応力履歴の違いによる降伏曲線の相異を見るために，密閉容器内圧縮と静水圧圧縮とで予備成形した圧粉体についてそれぞれの降伏曲線を求めた．以下種々の圧縮試験に対する降伏点の求め方とその結果を示す．

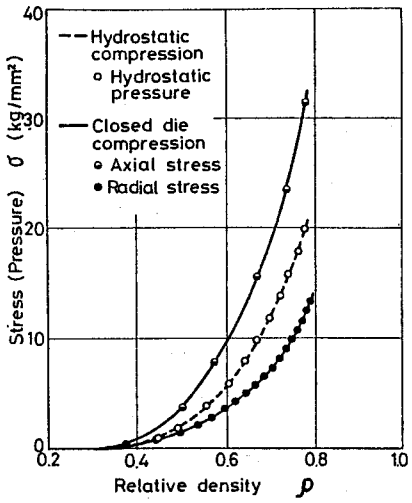


Fig.7.6 Stress - relative density relations of copper powders by hydrostatic and closed die compression.

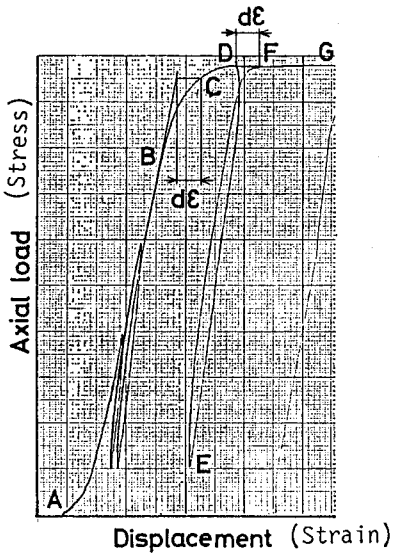


Fig.7.7 An example of diagram for definition of yield point under uniaxial compression.

Fig. 7・7 は圧縮成形した試料に対し単軸圧縮試験を行なったときの荷重－変位関係の一例で，降伏点の定め方を示したものである．圧縮を行なっていくと荷重－変位線は初めはほぼ直線（A—B）であるが，降伏を生じた後は，図のように滑らかな曲線（B—D)を描き降伏点が明確ではない．降伏点が明確に定まらない場合の降伏点の決め方は，金属の場合は，0.2%の永久ひずみを生じる応力とか，Fig. 7・7 の AB の直線部と FG の直線部の交点の応力と定義するなど種々の方法が提案されている[169]が，圧粉体の場合は，ひずみも大きく，FG の 直線部分も明らかには現われないので，今までに明確に定義されたものはないようである．ここでは降伏点を以下のように定義して用いた．すなわち，点 D まで 負荷した後一度除荷し再負荷を行なうと DEFG という ループを描き，曲線 FG は曲線 CD の延長線に近づいていく．この場合，再負荷曲線 EFG 上で 降伏点 D に等しい荷重を示す F 点のひずみは D 点に比べて $d\varepsilon$ だけ増加している．曲線 ABCD もまた圧縮成形後の再負荷曲線であるから，前述の再負荷曲線 EFG と類似の挙動を示すものと仮定し，塑性ひずみが $d\varepsilon$ となる C 点を

降伏点とした．三軸圧縮試験の場合も同様に定義した．

Fig. 7・8 に圧縮成形した試料に単軸圧縮荷重を加えたときの降伏応力と予備成形時の密度比との関係を示す．これより，予備成形時の密度比が大きくなるにつれて降伏応力も大きくなることがわかる．

Fig. 7・9 に密閉容器内成形した圧粉体を静水圧で再圧縮したときの静水圧圧力と体積ひずみの関係を示す．これを見ると同一密度の試料の実験結果は，ほぼ二本の直線よりなる折線の上にのっており，ここではこの折点を降伏点とした．この図と Fig. 7・6の静水圧圧縮における静水圧圧力- 密度比曲線とを比べると，密閉容器内成形された圧粉体は，同じ密度比の静水圧成形された圧粉体に比べて低い静水圧で塑性変形することがわかる．

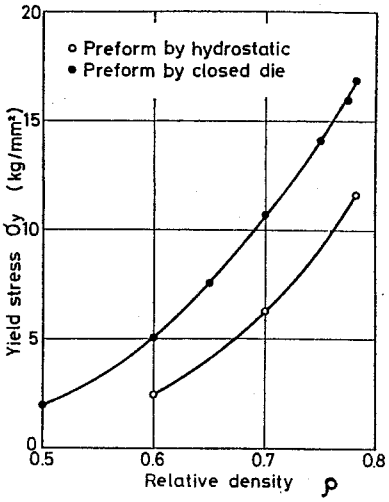


Fig.7.8 Yield stress - relative density relations in uniaxial compression of preforms.

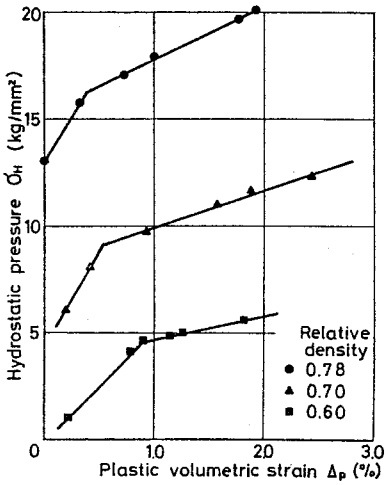


Fig.7.9 Hydrostatic pressure - plastic volumetric strain relations of closed die preforms.

以上の実験結果と三軸圧縮実験で求めた降伏応力を Rendulic 応力面にプロットした図が Fig. 7・10 である．この図を見ると，密閉容器内圧縮と静水圧圧縮とで予備成形した圧粉体の二つの降伏曲線には大きな違いのあることがわかる．密閉容器内成形された圧粉体の降伏曲線は，同じ密度の静水圧成形された圧粉体の降伏曲線に比べて σ_1 軸方向へ伸び，$\sqrt{2}\,\sigma_2$ $(=\sqrt{2}\,\sigma_3)$ 軸方向へ縮んだようになっている． こ

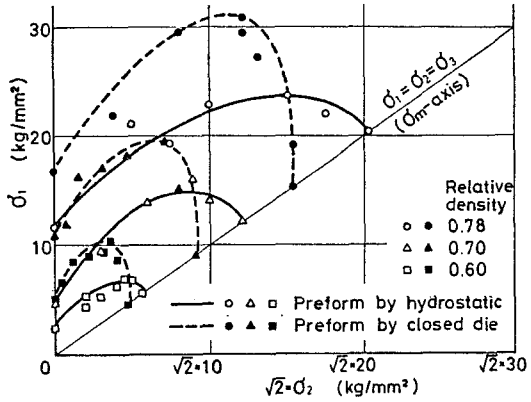


Fig.7.10 Yield curves of copper powder compacts in Rendulic stress plane.

れより，密度が同じ場合，静水圧成形試料に比べ，軸方向に大きな応力履歴を受けている密閉容器内成形試料は，密閉容器内圧縮時の側圧より低い静水圧を受けている間は降伏するのに高い差圧（軸応力と側応力の差）を要するが，密閉容器内圧縮時の側圧力より高い静水圧圧力を受けると降伏に要する差圧の値が急激に下がることがわかる．

静水圧成形試料の降伏曲線の形は，多孔質金属の降伏曲線として，大矢根[72]らが提案しているだ円の中心を σ_m 軸方向に移動させた形に，あるいは Suh[171] が提案しているレムニスケートの形に近い形であり，同じ密度の密閉容器内成形試料の降伏曲線は，さらにそれを σ_1 軸方向に，すなわち前負荷方向に回転させたような形となっている．このように前負荷経路の違いにより降伏曲面の位置が変わることから，これは一種の移動硬化則に従うと考えられる．

また，同じ負荷経路で圧縮した密度の異なる圧粉体の降伏曲線は，静水圧成形試料も，密閉容器内成形試料も，今回の実験の範囲では，密度が大きくなると原点を中心にほぼ相似形に増大している．

このように荷重履歴の違いにより降伏曲線の形は大きく異なることがわかった．

なお，圧粉体の変形中の応力，ひずみ解析を理論解析するには，降伏条件を定量的に示す必要があり，さらに流動則も必要となる．しかし，降伏条件を前負荷の影響を考慮して定量的に定式化するのは金属固体の場合でも困難であり，圧粉体の場合でも もう少し，材質・密度・前負荷などを変えた種々

の実験を行なってからの方がよいと思われる．また，今回の実験装置ではひずみはほぼ正確に測定できても，ひずみ増分を正確に測定することは困難なので，流動則まで調べることはできなかった．したがって，ここでは，降伏曲線を応力空間に表示して前負荷の影響が顕著であることを指摘するに留めた．

7・4　結論

静水圧圧縮と密閉容器内圧縮の二つの異なった前負荷を持つ電解銅粉の圧粉体に，単軸圧縮・三軸圧縮・静水圧圧縮などの再負荷を行なって降伏点を求め，それを Rendulic 応力面に降伏曲線として表示した結果，以下のことがわかった．すなわち，圧粉体の密度が同じ場合，静水圧成形した圧粉体の降伏曲線と密閉容器内成形した圧粉体の降伏曲線とは異なっており，前者は σ_m 軸方向に長いだ円あるいはレムニスケートに近い形であり，後者はそれを原点を中心に前負荷方向に回転させたような形となっている．すなわち，一種の移動硬化則に従う．また，同じ負荷経路で圧縮した密度の異なる圧粉体の降伏曲線は，ほぼ原点を中心に拡大した相似形であり，密度の増加とともに大きくなる．

第8章　　総　括

金属粉末から作られた成形品は種々のものが数多くあるにもかかわらず，粉末成形の力学に関する研究は，金属固体の研究に比べて少ない．その理由として，(1) 粉末は微粒子の集まりであり，固体と流体の中間的な性質を持つため，従来の計測法がそのまま適用できない場合が多く，そのため計測が困難であること，(2) 粉末成形の力学に影響する因子が非常に多く，粉末の力学的性質があまりにも非線形性であること　などが挙げられる．そこで，本研究は 粉末成形中の粉体の力学的挙動を明らかにすること を目的として，いくつかの実験および理論解析を行ない 検討を加えた．まず 従来からあるモアレ法を粉体用に改良し，これを用いて，密閉容器内での準静的圧縮中および動的圧縮中の粉体の挙動を観測し，改良されたモアレ法が粉体圧縮中の計測に適していることを示した．つぎに，有限要素法およびテンソルコードを用いて粉体圧縮中の理論解析を行ない，実験と比較することにより，理論解析により粉体圧縮中の挙動を定性的に調べることができることを示した．そして最後に，これら理論解析に用いた粉体の構成式をより厳密なものにするため，従来無視されていた構成式に及ぼすひずみ速度の影響や，荷重履歴の影響について検討した．

本研究の結果明らかとなった事柄は，それぞれの章の結論で述べたが，ここでは，これらを通観して，主要な事項を総括する．

まず，第2章では，粉体の変形の計測法として，初めてモアレ法を採用した．従来のモアレ法と比較した場合の改良点は，フオトエッチングにより製作したステンレス板のマザーモデルグリッド，けい光顔料で描いたモデルグリッド，アクリル板にスクリーン印刷したマスターグリッド，紫外線ランプ，

水銀燈，クセノンランプ，黄色フイルタ，高速度カメラ，トライ X フイルム，ミニコピーフイルムなどを適当に組合せた点である．このことにより，精度良い鮮明なモアレじま写真を得ることができるようになった．この改良されたモアレ法を用いることにより，第2章,第3章,第5章で示したように，準静的圧縮でも動的圧縮でも，圧縮過程中でも圧縮後でも，比較的複雑な形状の粉体でも，かなり精度良く二次元のひずみ分布や密度分布を測定することができるようになった．

第3章および第4章では，動的圧縮中の粉体の応力分布あるいはひずみ分布などを実験的および理論的に求める方法を示した．これにより，動的圧縮と準静的圧縮の違い，動的圧縮に及ぼすポンチ速度とポンチ質量の影響，圧縮過程中と圧縮後の密度分布およびひずみ分布の違い，圧縮容器内での応力波の伝ぱの様子，容器形状の違いによる等変位線の相違などが明らかになった．これらの理論解析において，構成式としては，従来からある多孔質金属の弾塑性構成式を粉体用に改良し，その材料定数を実験により求めた．さらにこの構成式を発展させ，粉体の構成式として初めて粘性を考慮した三次元三要素弾粘塑性モデルを導いた．そして，有限要素法やテンソルコードを用いて，動的圧縮中の粉体の応力解析を行なった．これにより，衝撃波の発生などにより従来困難であった粉体の二次元応力解析が行なえるようになった．

第5章では，複雑形状部品の準静的圧縮中の挙動を明らかにし，最適圧縮方法を調べた．前述のモアレ法を用いて実験を行ない，さらに理論解析を行なった．この理論解析には，有限要素法を用い，構成式としては第4章で導いた構成式を用いた．ただし，粘性は考慮しなかった．その結果，実験結果と理論結果は良く一致し，複雑形状部品の二次元の等変位線分布，ひずみ分布，密度分布，クラックの発生の様子などが明らかとなった．また，密度分布を均一にする方法などの最適圧縮方法も確められた．

第6章では，準静的および動的圧縮時の粉体の構成式に及ぼすひずみ速度

の効果を調べた．金属粉体は金属固体と異なり，準静的圧縮といわれる低速圧縮時でも，ひずみ速度により応力- 密度関係が異なり，応力緩和現象が大きく現われることを明らかにした．動的圧縮中の応力- 密度関係もひずみ速度により異なることが予測されたが，この測定においては，データのバラツキが大きい．そこで，マイクロコンピュータを用いた計測解析システムを導入した．これにより，誤差を生む人手の入る余地を大幅に減らし，数多くのデータを短時間に解析することができるようになった．その解析結果を統計的に処理することにより精度を上げ，動的圧縮中の応力- 密度関係に及ぼすひずみ速度の影響を明らかにすることができた．今まで，実験計測の自動化には，ミニコンピュータシステムが多く用いられていたが，本研究の実験では，システム化されたマイクロコンピュータが発売されるとすぐにこれを導入し，さらにデジタルメモリや X-Y プロッタなどをこのシステムに加えた．その結果，ミニコンピュータシステムよりも，はるかに安価で気軽に使えるシステムができた．第５章のモアレ法の解析も一部はこのマイクロコンピュータを用いている．今後，計測制御解析の自動化に，ますます盛んにマイクロコンピュータが導入されると思われる．つぎに，粉体の応力- 密度関係に及ぼすひずみ速度の影響のでるメカニズムを考えた．さらに，三要素弾粘塑性モデルでこの性質を表わし，その材料定数を求めた．

第７章では，密閉容器内で成形した圧粉体は異方性であることを明らかにした．さらに，静水圧圧縮と密閉容器内圧縮の二つの異なった荷重履歴を持つ圧粉体の降伏条件を調べた．その結果，前負荷が異なれば，降伏曲線の形も異なることがわかった．すなわち，粉体の降伏曲線は一種の移動硬化則に従うことを明らかにした．

以上のように，本研究では，粉末成形の力学に関する実験および理論解析を行なった．ここで得られたものは粉末成形の力学に関する基礎的なものばかりであるが，これらの成果が，粉末成形の製品品質の向上，適用範囲の拡

大，新しい成形方法の開発などに貢献できれば幸せである．

参　考　文　献

(1) 松山芳治,三谷裕康,鈴木 寿：総説粉末冶金学,日刊工業新聞社,(1972),p61-108

(2) 中川威雄：金属粉末の成形,塑性と加工,18-195(1977),p291-298

(3) 湯河 透,河合伸泰：粉末冶金技術の現状と将来,R&D神戸製鋼技報,24-2(1974),p2-11

(4) 山村隆重,龍野憲三,佐々木泰司,森本浩太郎,緒方和郎：粉末成形技術・粉末鍛造技術とその設備,R&D神戸製鋼技報,24-2(1974),p58-72

(5) Dreger,D.R.：Progress in powder metallurgy,Mach.Des. (1978-9),p116-121

(6) 川北宇夫：焼結機械部品生産の展望,塑性と加工,18-195(1977),p226-233

(7) 小野田岑夫：焼結部品の精度と欠陥,塑性と加工,17-187(1976),p675-678

(8) Morgan,W.R.,Sands,R.L.：Isostatic compaction of metal powders,Metallurgical Reviews,14(1969),p85-102

(9) 河合伸泰,滝川 博：熱間静水圧成形(HIP)技術の現状,塑性と加工,20-226(1979),p971-978

(10) 河合伸泰：粉末鍛造技術の現状と将来,塑性と加工,18-195(1977),p234-242

(11) 中川威雄：粉末鍛造の発展動向,金属材料,16-11(1976),p77-81

(12) 高橋昭夫：粉末鍛造品の経済性,塑性と加工,19-215(1978),p1044-1047

(13) 大矢根守哉,竹綱義允,西原信義：金属粉末の高速高圧成形,粉体および粉末冶金,15-5(1968),p245-253

(14) 大矢根守哉,本田栄一：高速鍛造,日刊工業新聞社,(1969),p33-42

(15) 佐野幸雄：金属粉末の動的成形,塑性と加工,18-195(1977),p250-256

(16) Clyens,S.,Johnson,W.：The dynamic compaction of powdered materials,Mater.Sci. & Engng.,30(1977),p441-447

(17) Vityaz,P.A.,Roman,O.V.：Impulse compacting of powder materials,Proc. 14th Int. J. Mach. Tool Des. & Res.,(1973),p441-447

(18) 佐野幸雄,萩原哲雄,宮城清宏:粉体の高速圧縮に関する研究(第2報),粉体および粉末冶金,21-1(1974),p9-15

(19) Altmann,H.：Comparison between uniaxial and isostatic densified stainless-steel powder preforms forged in a closed die,Proc.13th Int. J. Mach. Tool Des. & Res. (1972),p471-478

(20) Shima,S.,Alexander,J.M.：The interrelation of density and hardness in the isostatic compaction of powders, Proc. 13th Int. J. Mach. Tool Des. & Res.,(1972),p471-478

(21) Kamm,R.,Steinberg,M.,Wulff,J.：Plastic deformation in metal powder compacts, Trans. Amer. Inst. Min. & Metallurg. Enger.,(1947),p439-456

(22) 津和秀夫,明田勇蔵：粉末金属部品の成形に関する研究,精密機械,29-12(1963),p945-953

(23) 渡辺三千雄,粟野洋司,団野 敦,小野田誠次,木村 尚：焼結鍛造における焼結体の変形過程と密度変化,粉体および粉末冶金,21-4(1974),p103-107

(24) Hawkes,I.,Spehrley,C.W.：Point density measurement and flow detection in P／M green compacts,Powder Metallurgy Int.,4-4(1972),p175-180

(25) 真鍋秀幸,鈴木 章,松下博一：粉体層の圧縮過程の解析,材料,20-213(1971),p758-761

(26) Shank,M.E.,Wulff,J.：Determination of boundary stresses during the compression of cylindrical powder compacts, Trans. Metallurg. Soc. AIME (1949)

(27) 沖本邦郎,佐藤富雄,山川俊夫：金属粉末の側圧係数について,粉体および粉末冶金,22-7 (1975),p205-212

(28) 武川淳二郎,増田良道：円筒形金型を用いた金属粉体圧縮成形過程における半径方向応力について,粉体および粉末冶金,23-4(1976),p149-153

(29) Duwez,P.,Zwell,L.：Pressure distribution in compacting metal powders, Trans. Metallurg. Soc. AIME,185(1949),p137-144

(30) 青木隆一,綱川 浩：ホッパー内の粉体の圧力測定,粉体工学研究会誌,2-1(1965)p189-194

(31) 松沢 宏,石井恒久：土中土圧計四種の作動に関する研究,土木学会論文報告集,203 (1972-7),p29-44

(32) 川本朓万：岩石力学の研究における光弾性実験,材料,14-141(1965),p464-472

(33) 岡田寿太郎,福森義信,平井淑子,山根洋子：塩化カリウム錠剤杵接触面における垂直圧力分布の測定,薬学雑誌,99-6(1979),p570-575

(34) 渡辺 明,梅屋 薫：粉粒体の充てん性について,材料,13-125(1964),p73-79

(35) 梅屋 薫：粉体の充填に関して,粉体工学研究会誌,2-1(1965),p127-132

(36) 梅屋 薫：粉体の充てんに関する二,三の知見,材料,15-150(1966),p127-132

(37) 渡辺 明,梅屋 薫：粉粒体の圧縮充てんに及ぼす粒度分布の影響,材料,15-150(1966),p172-177

(38) 荒川正文：粉体の粒度と充てん性,粉体および粉末冶金,15-2(1968),p55-61

(39) Ivashchenko,V.V.：Effect of inertia loading on the vibratory densification of powder materials, Soviet PMMC 11-5(1972),p355- 357

(40) Saileswaren,N.,Panchanthan,V.：Compaction of grains. General parameter evaluation, Powder Technology,8(1973),p19-26

(41) 荒川正文,西野 操：粒度分布をもつ球形粒子群のランダム充てんにおける空隙率と粒子接触数,材料,22-238(1973),p658-662

(42) 荒川正文,岡田隆夫,水渡英二：粒子特性と充てん性,材料,14-144(1965),p764-771

(43) 梅屋 薫,渡辺 明,中村 孝,木村稔人,新田耕司：粉体充てん体の収縮時における挙動に関する模型的観察,材料,14-144(1965),p751-758

(44) 徳光善治：粉体のつめこみに関する研究,材料,13-133(1964),p752-758

(45) 砂田久一,岡本光美,山本伸行,大塚昭信：二次元モデルによる粉体充てんのシミュレーション,材料,21-225(1972),508-511

(46) Shapiro,I.,Kolthoff,I.M.：Studies on the aging of precipitates and coprecipitation, XXXVIII,The compressibility of silver bromide powders, J. Phys. Colloid. Chem.,51(1947),p483-493

(47) Heckel,R.W.：Density - pressure relationships in powder compaction, Trans. Metallurg. Soc. AIME,221(1961-8),p671-675

(48) Heckel,R.W.：An analysis of powder compaction phenomena,Trans. Metallurg. Soc.

AIME, 221 (1961-10), p1001- 1074

(49) Donachie, M.J., Burr, M.F. : Effects of pressing on metal powders, J. Metals, (1963-11), p849-854

(50) 川北公夫：粉体の圧縮状態式, 材料, 13-129 (1964), p421-428

(51) Bockstiegel, G. : Relations between pore structure and densification mecanism in the compacting of iron powders. 1. Compacting properties in relation to the pore structure inside and in between powder particles, Inter. J. Powder Metallurgy, 2-4 (1966), p13-26

(52) Klar, E. : Relationships between pore characteristics and compacting properties of copper powders, J. Materials, 7-3 (1972), p418-424

(53) Hewitt, R.L., Wallace, W., de Malherbe, M.C. : Plastic deformation in metal powder compaction, Powder Metallurgy, 17-33 (1974), p1-12

(54) Tomlinson, P.N., Hewitt, R. L., Venter, R.D. : Powder compaction at very high pressures, Proc. 15th Int. J. Mach. Tool Des. & Res., (1974), p677-681

(55) Kawakita, K., Ludde, K.H. : Some considerations on powder compression equations, Powder Technol., 4 (1970/71), p61-68

(56) 川北公夫：川北粉体圧縮式の特性定数, 粉砕, 19 (1974), p112-121

(57) James, P.J. : Powder metallurgy review 5. Fundamental aspects of the consolidation of powders, Powder Metallurgy Int. 4-2 (1972), p82-85

(58) Helliwell, N., James, P.J. : Isostatic compaction behaviour of copper powder, Powder Metallurgy Int. ,7-1 (1975), p25- 29

(59) 岸上守孝, 江上清一, 松本圭司, 服部一郎：金属粉の静水圧成形機構, 材料, 20-215 (1971), p924-930

(60) 最上武雄：土質力学, (1969) ,技報堂

(61) 最上武雄：土質力学, (1969), 技報堂, p331-478

(62) 同上, p479-622

(63) Drucker, D.C. : Concept of path independence and material stability for soils,

(64) Drucker, D.C., Prager, W. : Soil mecanics and plastic analysis or limit design, Quart. Applied Math., 10 (1952), p157-165

(65) Drucker, D.C., Gibson, R.E., Henkel, D.J. : Soil mecanics and work-hardening theories of plasticity, Trans. ASCE, No2864 (1955), p338-346

(66) Roscoe, K.H., Schofield, A.N., Thurairajah, A. : An evaluation of test data for selecting a yield criterion for soils, ASTM STP No.361 (1963), p111-128

(67) 山口柏樹：土の剛塑性理論における極限定理と応用, 土木学会論文集, 145 (1967), p12-22

(68) 橋口公一：粉粒状体の弾塑性構成式に関する一考察, 日本機械学会論文集, 43-368 (1977), p1242-1250

(69) Kuhn, H.A., Downey, C.L. : Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials, Int. J. Powder Metallurgy, 7-1 (1971), p15-25

(70) Green, R.J. : A plasticity theory for porous solids, Int.J.Mech.Sci., 14 (1972), p215-224

(71) Kaufman, S.M. : The role of pore size in the ultimate densification achievable

during P／M forging, Int. J. Powder Metallurgy,8-4(1972),p183-190
(72) 大矢根守哉,島 進,鴻野雄一郎：粉末焼結体の塑性基礎式,日本機械学会論文集,39-317(1973),p86-94
(73) 大野根守哉,田端 強：多孔質体の延性破壊,塑性と加工,14-149(1973),p439-445
(74) 大矢根守哉,川上 隆,島 進：粉末焼結体の加工に関する力学とその応用,粉体および粉末冶金,20-5(1973),p142-146
(75) 大野根守哉,田端 強：多孔質体の変形におけるすべり線場法と上界法,塑性と加工,15-156(1974),p43-51
(76) 田端 強,真崎才次,畠中 守：多孔質体の破壊条件式と鍛造用プレフオーム形状について,大阪工業大学紀要 (197),p245-258
(77) 真崎才次,島 進：多孔質体変形の基礎式,塑性と加工,18-195(1977),p243-249
(78) 田端 強,真崎才次,阿部吉隆：多孔質体の降伏条件式と同板の圧縮変形の解析,塑性と加工,18-196(1977),p373-380
(79) Oyane,M.,Shima,S.：Consideration of basic equations, and their application, in the forming of metal powders and porous metals. J. Mech. Working Tech.,1(1978), p325- 341
(80) 大矢根守哉,島 進,沖本邦郎：鉄系焼結体の延性破壊,塑性と加工,20-226(1979) ,p1037-1044
(81) 島 進：粉末成形の力学について,材料,22-238(1973),p718-725
(82) 明田勇蔵,津和秀夫：粉体の圧縮成形理論 ── 粉末金属部品の成形に関する研究(第3報)──,精密機械,35-12(1969) ,p765-774
(83) Schwartz,E.G.,Holland,A.R.：Determination of yield criterion for iron powder undergoing compaction, Int. J. Powder Metallurgy,5-1(1969),p79- 87
(84) Koerner,R.M.,Quirus,F.J.：High density P／M Compacts utilizing shear stresses, Int. J. Powder Metallurgy,7-3(1971),p3-9
(85) Koerner,M.：Triaxial compaction of metal powders, Powder Metallurgy Int.,3-4(1971),p186-188
(86) 増田良道,酒井 昇：三軸圧縮試験法による金属粉体の圧縮特性の測定,粉体および粉末冶金,19-1(1972),p1-6
(87) 武川淳二郎,増田良道：金属粉体の三軸圧縮試験,粉体および粉末冶金,24-1(1977),p6-11
(88) 武川淳二郎,増田良道：噴霧銅粉およびα-アルミナ粉の三軸圧縮成形,26-8(1979),p277-282
(89) 島 進：高圧下での圧粉体の変形挙動,塑性と加工,15-164(1974),p703-708
(90) 沖本邦郎, 佐藤富雄,山川俊夫：金属粉末の圧縮成形におけるステアリン酸亜鉛の効果について,粉体および粉末冶金,22-7(1975),p213-219
(91) 沖本邦郎,大矢根守哉,島 進：銅圧粉体の破壊について,粉体および粉末冶金,22-6(1975) p185-191
(92) 沖本邦郎,大矢根守哉,島 進：金属粉末の圧縮成形に関する研究(第1報) (軸対称圧縮成形の場合),粉体および粉末冶金,22-6(1975),p177-184
(93) 島 進,井上隆雄,大矢根守哉,沖本邦郎：金属粉末の圧縮成形に関する研究(第2報) (三軸圧縮装置による成形条件の検討),粉体および粉末冶金,22-8(1976),p257-263

(94) 長尾高明：粉体静力学の研究，日本機械学会論文集(第2部)，33-246(1977)，p229- 241
(95) 長尾高明：粉体の応力- ひずみ関係式(第1報，粒子間にすべりのない場合の関係式)，日本機械学会論文集(第1部)，43- 375(1977)，p4038-4047
(96) 長尾高明：粉体の応力- ひずみ関係式(第2報，粒子間にすべりがある場合の応力の表示式)，日本機械学会論文集(第1部)，44-382(1978)，p1912-1922
(97) 長尾高明：粉体の応力- ひずみ関係式(第3報，粒子間にすべりがある場合の関係式について)，日本機械学会論文集(第1部)，44-385(1978)，p2967-2974
(98) 北村良介：マルコフ過程としての粒状体の変形機構，材料，28-311(1979)，p718-724
(99) 岡 小天，高見 昭：粉体内の圧力分布の理論，材料，19-199(1970)，p299- 301
(100) 高見 昭，岡 小天：粉体内の圧力分布の理論，材料，21-224(1972)，p370-372
(101) 西原利夫，郡 利矩：圧縮せる粉体内の応力分布，日本機械学会論文集，14-48(1948)，p94-107
(102) Horne,R.M.,Nedderman,R.M. : Analysis of stress distribution in two-dimensional bins by the method of characteristics, Powder Tech. ,14(1976),p93-102 .
(103) Takami,A. : Mathematical analysis of the pressure distribution in powder in equilibrium in a conical vessel, Powder Tech.,14(1976),p1-6
(104) 島 進：多孔質体の塑性加工に関する格子線解析の試み，塑性と加工，18-195(1977)，p263-267
(105) 島 進，稲本治朗，小坂田宏造，鳴滝良之助：多孔質金属の弾塑性基礎式と有限要素法，塑性と加工，16-175(1975)，p660-667
(106) 森 謙一郎，島 進，小坂田宏造：剛塑性有限要素法による多孔質金属の塑性加工の解析，日本機械学会論文集(A編)，45-396(1979)，p955-964
(106)′ 森 謙一郎，島 進，小坂田宏造：多孔質体の塑性力学式を応用した剛塑性有限要素法による自由鍛造の解析，日本機械学会論文集(A編)，45-396(1979)，p965-974
(107) Davies,R.,Austin,E.R. : Development in High Speed Metal Forming, Chap. 2・5 Powder compaction, The Machinery Publishing Co.Ltd.,(1970),p159-183
(108) Roman,O.V. : Some theoretical and practical aspect of high energy rate compacting, Modern Developments in Powder Metallurgy, Ed. Hausner,H.H. Vol.4,Plenum Press,(1971),p513- 523
(109) Raybould,D. : The dynamic compaction of aluminum and iron powder, Proc.15th Int. J. Mach. Tool Des. & Res.,(1974),p627-636
(110) Roman,O.V.,Gorobtsov,V.G.,Shelegov,V.I. : Possibilities of high energy rate forming, (197) ,p274-284
(111) Linde,R.K.,Schmidt,D.N. : Shock propagation in nonreactive porous solids, J. Applied Physics,37-8(1966),p3259-3271
(112) Herrmann,W. : Basic response phenomenology and analytical techniques, Sandia Laboratories SC-R-68-1784(1968)
(113) Herrmann,W. : On the dynamic compaction of initially heated porous materials, Sandia Laboratories SC-DR-68-865(1969)
(114) Herrmann,W. : Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials, J. Applied Physics,40-6(1969),p2490-2499
(115) Herrmann,W.,Lawrence,R.J. : The effect of material constitutive models on stress

wave propagation calculations, Trans.ASME, J. Eng. Materials and Tech.,100(1978) , p84-95

(116) Butcher,B.M. : Numerical techniques for one-dimensional rate-dependent porous material compaction calculations, Sandia Laboratories,SC-RR-710112(1971)

(117) Lee,D. : Shock wave structure in porous solids,J. Applied Physics,42-13(1971), p5503-5512

(118) Handelman,G.H.,Rubenfeld,L.A. : Wave propagation in a finite-length bar with variable cross section, Trans. ASME,J. Applied Mech., (1972),p278- 280

(119) 佐野幸雄：粉体の高速圧縮に関する研究(第1報)―成形過程の理論解析―,粉体および粉末冶金,21-1 (1974),p1-8

(120) 佐野幸雄,杉田忠彰：粉体の高速圧縮に関する研究(第3報)―成形過程の擬粘性法による理論解析―,粉体および粉末冶金,22-2(1975),p47-54

(121) Sano,Y. : A continuum approach to dynamic compaction of metal powder, Int. J. Powder Metallurgy & Powder Technol.,13- 2(1977),p81-90

(122) Sano,Y.,Miyagi,K.,Hirose,T. : Influence of die wall friction on the dynamic compaction of metal powders, Int. J. Powder Metallurgy & Powder Technol.,14-4(1978), p291-303

(123) Sano,Y.,Miyagi,K. : Computed dynamic compaction of a two-layered copper powder medium, Trans. ASME,J. Eng. Materials & Technol., (1979),p1-7

(124) Nagayama,K.,Murakami,T. : Theoretical investigation of a converging shock wave in porous or composite materials, J. Physical Soc. Japan,41-3(1976),p1054-1061

(125) Stein,E.M.,Orsdel,J.R.V.,Schneider,P. V. : High velocity compaction of iron powder, Metal Progress,85-4(1964),p83- 87

(126) Wang,S.,Davies,R. : Some effects of high speeds in metal powder compaction, Proc. 9th Int. J. Mach. Tool Des. & Res.,(1968) ,p163- 178

(127) Elwakil,S.D.,Davies,R. : Lubrication effects in the compaction of sponge-iron powder at low and high speeds, Powder Metallurgy,16-31(1973),p72-87

(128) Elwakil,S.,Davies,R. : High speed compaction of metal powders, Proc. 14th Int. J. Mach. Tool Des. & Res.,(1973),p435-440

(129) Elwakil,S. D,Davies,R. : Speed effects in the compaction of copper powders, Proc. Conf. on the Use of High Energy Rate Methods for Forming,Welding and Compaction, Leeds,(1973),Paper 16

(130) Davies,R.,Elwakil,S. : A comparison of slow speed,high speed and multi-blow compaction in ferrous powders, Proc. 17th Int. J. Mach. Tool Des. & Res. (1976),p483-488

(131) Garber,L.W.,Beddow,J.K. : The effect of high velocity compaction on the density of three iron copper metal powders, Powder Metallurgy Int.,6-2(1974),p78-82

(132) Rusnak,R.M. : Energy relationships in the high velocity compaction of copper powder, Int. J. Powder Metallurgy & Powder Technol.,12-2(1976),p91-99

(133) 浅村 均,田中 司,田中 武：Dynapak による高密度粉末成形について,粉体および粉末冶金,14-8(1967),p328-333

(134) Hagemeyer,J.W.,Regalbuto,J.A. : Dynamic compaction of metal powders with a high

velocity impact device, Int. J. Powder Metallurgy,4- 3(1968),p19-25
(135) 野村羊観：爆発加工の応用,工業火薬協会誌,22-6(1961),p321-326
(136) 木村康之：爆薬によって成形した金属酸化物の二,三の性質,粉体および粉末冶金,8-2,(1961),p58-62
(137) 堀口義一,野村羊観：ピストン方式による粉末の爆衷圧搾,理科学研究所報告,39- 5(1963),p211-215
(138) 木村康之,山本富才：金属酸化物粉末の爆薬による成形,精密機械,31-7(1965),p617-623
(139) Clyens,S.,Al-Hassani,S.T.S.,Jhonson,W.：The compaction of powder metallurgy bars using high voltage electrical discharges, Int. J. Mech. Sci. 18(1976),p37-44
(140) Mironov,V.V.：Pulververdichten mit Magnetimpulsen, Planseebericht für Pulvermetallurgie,24(1976),p175- 190
(141) 明田勇蔵,津和秀夫：粉末金属部品の成形に関する研究(第2報)　振動成形法への一寄与　,精密機械,32-9(1966),p624-634
(142) Davies,R.,Dixon,R.H.T.：The forging of powder preforms using Petro-Forge machines, Powder Metallurgy,14-28(1971),p207-234
(143) 森本吉春,林 卓夫,岩田幸雄,岡庭三和：粉体の動的および準静的圧縮中のモアレ法によるひずみ分布の測定,日本機械学会論文集(A編),45-395(1979),p817-822
(144) 森本吉春,林 卓夫,沼田 浩：銅粉の動的圧縮におけるポンチ速度とポンチ質量の影響,粉体および粉末冶金,26-4(1979),p136-142
(145) 森本吉春,林 卓夫：銅粉の圧縮と応力緩和,材料,28-309(1979),p471-477
(146) 森本吉春,林 卓夫,牛谷恵史,竹内徹夫：前負荷の異る銅圧粉体の降伏曲線の比較,材料,29-319(1980),p375-380
(147) 林 卓夫,森本吉春：高速移動荷重による平面応力場の光弾性実験について,日本機械学会論文集,37-297(1971),p889- 897
(147) Hayashi,T.,Morimoto,Y.：Photoelastic studies on the plane stresses produced by moving loads, Bulletin JSME,15-79(1972),p40- 48
(148) Durelli,A.J.,Parks,V.J.：Moire analysis of strain,(1970),Prentice-Hall
(149) 郡 利矩,増尾竜一：圧縮せる異方性粉体内の応力分布,日本機械学会論文集(第1部),23-131(1957),p468-474
(150) Hohenemser,K.,Prager,W.：Z. Angew. Math. Mech.,12(1932),p216-226
or Cristescu：Dynamic plasticity, Chap. X. §.1.2 The elastic／viscoplastic body,(1967) ,North-Holland Publishing Company
(151) 岸田敬三,中川憲治,横山和夫：有限要素法による弾／粘塑性体の動的応答解析,塑性と加工,17- 180(1976),p61-66
(152) Newmark,N.M.：A method of computation for structural dynamics,J. Eng. Mech. Div.,Proc. ASCE,85(1959),p67-94
(153) Maenchen,G. ,Sack,S.：The tensor code,MMethods in Computational Physics. Vol. 3,(1964),Academic Press,p181-210
(154) Silbereisen,V.H.：Vorgäng bei der Verdichtung metallisher Pulver zu Komplizierten Formkörpern,Planseeberichte für Pulvermetallurgie, 7(1959),p67-78
(155) 山田嘉昭：コンピュータによる構造工学講座II-2-A 塑性・粘弾性(1972),培風館
(156) 安茂寿夫,和志武三徳,蔵重達雄,成富正温：粉体の圧縮成形に関する研究(第1報)粉体

の圧縮成形時における応力緩和特性,薬剤学,26-4(1966),p267-272
(157) 安茂寿夫,和志武三徳,蔵重達雄,成富正温,小野弘二,浅野正道：粉体の圧縮成形に関する研究(第2報) 粉体の圧縮機構についての考察,薬学雑誌,88-7(1968),p857-865
(158) 真鍋秀幸,鈴木 章,松下博一：粉体層の圧縮過程の解析,材料,20-213(1971),p758- 761
(159) Morii,M.,Takeguchi,N.,Horikoshi,I.：Evaluation of creep curves from the process of dynamic compression, Chem. Pharm. 21-3(1973),p589-593
(160) Horikoshi,I.,Takeguchi,N.,Morii,M.：Viscous behavior of powder in the process of dynamic compression, Chem. Pharm. 21-3(1973),p589-593
(161) 梅屋 薫,磯田武信,原 隆一,加藤義徳：圧縮ならびにせん断時における粉体のレオロジー的研究,材料,22-238(1973),p637-640
(162) 梅屋 薫,原 隆一,木村知弘：粉体圧縮のレオロジー,材料,25-274(1976),p632-636
(163) 堀越 勇,森井孫俊,中林 晋,竹口紀晃,木村昌行：打錠工程における薬剤の粘塑性挙動,薬学雑誌,99-4(1979),p325-328
(164) 佐藤辰雄,田嶋 司,上滝尚久：鉄圧粉体に及ぼす成形速度の影響,粉体および粉末冶金,16-7(1970),p305-309
(165) 田中吉之助,安達洋治：ホプキンソン棒法による動的強度,日本航空宇宙学会誌,21-230(1973),p126-134
(166) 村上碩哉,室田忠雄,神馬 敬：金属材料の縦衝撃によるひずみ速度効果の測定精度,日本機械学会論文集(第1部),39-318(1973),p556-564
(167) Molerus,O.：Theory of yield of cohesive powders, Powder Tech.,12(1975),p259-275
(168) van Groenou,A.B.：Pressing of ceramic powders：A review of recent work, Powder Metallurgy Int.,10-4(1978),p206-211
(169) 池上皓三：種々の前負荷後の降伏曲面について―その研究の発展過程と現状(その1)―,材料,24-261(1975),p491-504
(170) 井上達雄：固体の力学入門,4.降伏条件と弾塑性構成式,材料,28-305(1979),p163-169
(171) Suh,N.P.：A yield criterion for plastic,frictional,work-hardening granular materials, Int. J. Powder Metallurgy,5-1(1969),p69-78

謝　辞

本研究は，昭和49年より昭和55年にわたり，大阪大学基礎工学部機械力学研究室において行なったものである．その研究期間中，終始，懇切なる御指導，御べんたつをいただきました大阪大学基礎工学部 林 卓夫 教授に 心より感謝の意を表します．

また，本研究をまとめるに当り，貴重な御教示と御助言をいただきました大阪大学基礎工学部 山本 明 教授，福岡秀和 教授，小倉敬二 教授 および大阪大学工学部 津和秀夫 教授に謹んで感謝の意を表します．

本研究の実験および計算においては，大阪大学基礎工学部機械力学研究室の皆様，特に，当時大学院前期課程学生であった 岩田幸雄，牛谷恵史，平川浩巳，武井照隆，見神広保の各氏および4年次学生であった椎原裕美，玉村昇司，西川義富美，橋本 猛，岡庭三和，青木優和，谷川雅則，沼田 浩，竹内徹夫，田中直樹，山田雄一郎，中西章雄，中山貴士，馬場俊明，政春孝夫の各氏に御協力をいただきました．ここに感謝の意を表します．また，実験装置の借用などで種々の労をわずらわしました大阪大学基礎工学部機械工学科，物性物理工学科および工学部産業機械工学第一講座の皆様に厚くお礼申し上げます．