

日本機械学会論文集(C編)
50巻452号(昭59-4)

粘土を圧力伝達媒体とした板材成形法に関する研究*

(発生圧力の検討)

山口勝美**, 黒崎靖***
Katsumi YAMAGUCHI, Yasushi KUROSAKI
前田実†, 児玉靖††
Minoru MAEDA, Yasushi KODAMA

Key Words: Forming, Clay Specimens, Dynamic Compression Stress, Viscoplastic Body, Contact Pressure, Batch Production, Sheet Metal Forming

1. ま え が き

近年、いわゆる省資源・省エネルギーの社会的要請と成形品の多様化指向とが相まって、プレス成形現場では多種少量生産方式の確立が重要課題となってきた。このため、金型費の節約という観点から、ゴム、液体など非金属の圧力伝達媒体を使用した板材成形法が脚光を浴びつつある⁽¹⁾⁽²⁾。加圧方法、成形の種類などにより異なるが、一般に、ゴムは取扱いが容易な反面、流動性、圧力の伝達性、寿命(損傷、老化)、廃ゴム処理などの点で液体よりも不利である。一方、液体では加圧装置に費用がかかる上、もれ防止のため特別な配慮が要求される。

本研究の最終目標は、これらの欠点のない媒体を用いた多種少量生産向きの板材成形法を開発することである。一つの試みとして、本研究では粘塑性体の流動応力のひずみ速度依存性に着目する。そして図1に示すように、特別な加圧工具を用いず、粘塑性体を高速自由圧縮することにより得られる高圧を利用して板材成形を達成する手法を検討対象とする。第一段階として、市販の油粘土を自由落下式ドロップハンマ装置により自由圧縮する基礎実験を行い、圧力の発生状態を調査した結果、本法が上記目的に沿う加工法として利用できる可能性を得たのでここに報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置 使用した実験装置は自作の自由

* 昭和56年11月21日 第32回塑性加工連合講演会および昭和57年5月22日 塑性加工春季講演会において講演、原稿受付 昭和57年10月25日。

** 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

*** 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

† (株)東芝 (〒230 横浜市鶴見区末広町2-4)。

†† 学生員、三重大学大学院。

落下式ドロップハンマ装置で、ハンマ体質量 M を 39.6~85.2 kg の範囲で約 9 kg 間隔で 6 段階に、またハンマ体設定高さ H を 0~172 cm の範囲で任意に、それぞれ変更できるようにした。

発生圧力に関する系統的情報を得るため、ひとまず板の塑性変形を除外し、粘土試験片を平板工具にて動的に圧縮して工具・試験片境界面で発生する圧力の分布を測定することにした。このため、下部圧縮板に図2に示す測圧ピン装置を装着した。最大測定圧力を 60 MPa (612 kgf/cm²) と設定し、圧力の時間に対する変化を電磁オシログラフ上に記録できるようにした。圧力の半径方向分布を測定する場合、ピン中心を試験片中心位置に対して所定量偏心させた。圧力較正法の概略と較正試験結果を図3に示すが、負荷、除荷ともに良好な直線関係が得られた。ピンの突出量については表面あらさ計によりこれを検出し、 $\pm 3 \mu\text{m}$ の範囲内となるように調整した。圧力の時間経過に伴う変化の測定例を図4に示す。こうして得た線図より圧力の最大値を続み取り、測定値 p として採用した。本実験条件の範囲内では、測圧ピン装置の応答は現象の変化の

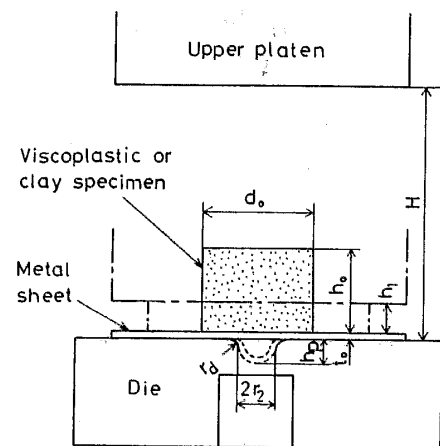
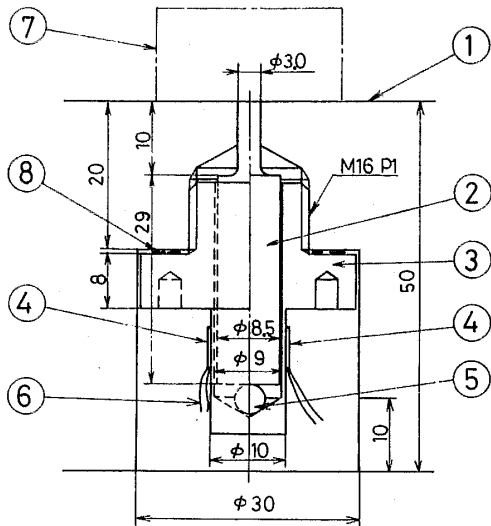
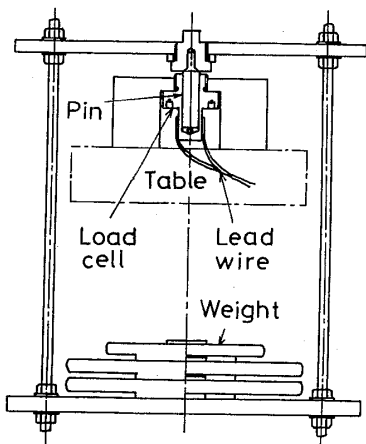
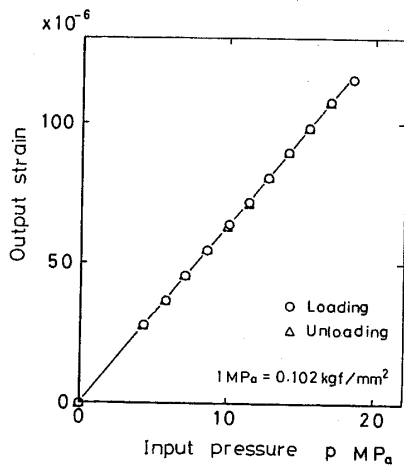


図1 粘塑性体を用いた板材成形法



- ① Lower platen ⑤ Steel ball
- ② Pin ⑥ Lead wire
- ③ Load cell ⑦ Clay specimen
- ④ Wire-resistance strain gage ⑧ Liner

図 2 測圧ピン装置

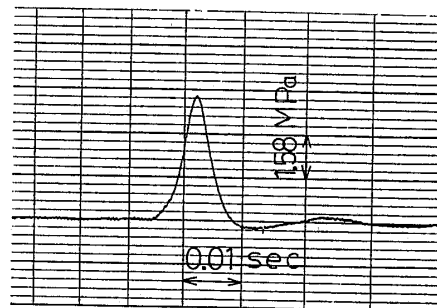


Schematic drawing of calibration method

図 3 圧力校正法の概略と校正試験結果

5倍以上早く、十分な応答性を保有していると考えられた。また、ここでは述べないが、念のため測圧ピン法と極薄板の張出し法とで圧力の測定値の比較を行い、本測定値が十分信頼できることを確認した。

2・2 粘土材料および試験片 圧力伝達媒体として採用した粘土材料は市販の油粘土（青緑色、密度 $\rho = 1.91 \text{ g/cm}^3$ 、体積弾性率 $K = 2940 \text{ MPa}$ ）で、粉体（石灰、パイロフィライト）、鉱油および添加剤（ワックス、界面活性剤、顔料など）によって構成されている。混合比（重量比）はおおよそ（粉体）：（鉱油+添加剤）= 7：3である。準静的圧縮試験による粘土材料の圧縮応力（ σ ）-圧縮ひずみ（ ϵ ）曲線を図5に示す。ただし、潤滑剤としてグラファイトグリースとテフロン膜を併用した。測定したひずみ、ひずみ速度の範囲内では、 σ は最大でも 0.08 MPa を若干上まわる程度できわめて小さい。粘土試験片（以後、試験片と略称する）は、ピストンとシリンダを用いて円柱状に成形後、一晚放置した。試験片寸法については、直径を $d_0 = 20, 40, 60, 80 \text{ mm}$ の4種類とし、高さ比 h_0/d_0 を 0.065~2.15 の範囲で種々変更した。圧縮板面にはラップ仕上げを施し、 $0.5 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ の表面あらさとした。動的圧縮試験においては非潤滑とし、試験のつどアセトンにて圧縮板面を脱脂した。試験温度は $20 \pm 5^\circ\text{C}$ とした。



$d_0 = 80 \text{ mm}$ $h_0 = 20.8 \text{ mm}$
 $H = 70 \text{ cm}$ $M = 39.6 \text{ Kg}$

図 4 圧力の測定例

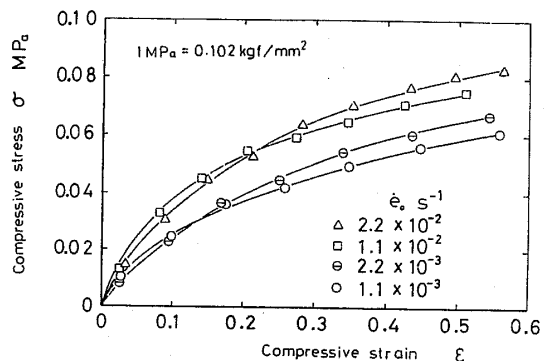


図 5 粘土試験片の準静的圧縮試験結果

2.3 供試材 板材成形に用いた材料は市販の工業用純アルミニウム板 A1050-H24 材 (板厚 $t_0=0.2$ mm) である。その引張特性値を表 1 に示す。ただし、板面内平均値を $(X_0+2X_{45}+X_{90})/4$ によって算出した。ここに、 X_0, X_{45}, X_{90} は、それぞれ圧延方向に対して $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の方向の引張特性値である。板の表面あらさは、圧延方向において $0.6 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ 、またこれと直角方向において $0.5 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ である。

3. 発生圧力に及ぼす影響因子

ハンマ体質量 M 、設定高さ H 、試験片直径 d_0 および高さ比 h_0/d_0 を種々変更した場合に得られた圧力 p の半径方向分布を図 6 に示す。図中に付記した試験条件番号のうち、1 と 2 を比較することにより p に及ぼす試験片体積 V_0 の影響を、また 2 と 3 より H の影響をみることができる。4 と 5 はハンマ体の位置エネルギーをほぼ同じとして、質量 M の効果を比較したものである。図にみるように、本実験では p の半径位置 r に対して常に減少傾向を呈し、試験片中心位置 ($r=0$ mm) において最大となった。板材成形の観点からすれば、この場所における圧力 (以後 p_0 と記す) を効果的に活用することが一つの着眼点になると思われる。各種 H および V_0 の組合せについて、 p_0 と h_0/d_0 の

関係を図 7 に示す。図 6 および 7 より、 H および M を大きく、 V_0 および h_0/d_0 を小さくするほど、大きな p_0 が得られることがわかる。

以上のことから、発生圧力の大きさに関しては、 H, M, V_0 および h_0/d_0 といった因子を選択することにより所要の大きさを達成することは容易と思われる。 p_0 の上限は現在のところ追求されていないが、本実験装置で計測可能な最大圧力 $60 \text{ MPa} \{612 \text{ kgf/cm}^2\}$ 程度は何ら困難なく発生できることがわかった。よって、ある程度の板材成形への適用も可能といえる。ただし、高圧の領域が試験片中心部に限定されることを考慮すると、本法では小物の張出し成形、エンボス加工、曲げ加工などが加工対象になると考えられる。

4. 最大圧力 p_0 の見積もり方法

上記実験結果をふまえて、試験片の中心位置において発生する最大圧力 p_0 を板材成形に活用することを前提として、加工条件の設定上必要となる p_0 の見積もり方法について以下に検討する。

4.1 平均圧縮応力 Y_m の導入 金属、プラスチックおよび各種モデル材料を用いた高速圧縮試験における圧縮応力に関しては、かなり以前から多数の研究者が検討を行っている⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。このうち、Aku らはプラスチックを用いたドロップハンマ圧縮実験を行い、次のような簡便法によって平均圧縮応力 Y_m を算出している⁽⁵⁾。

運動量保存の法則より

$$v = \{M / (M + m)\} v_0 \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここに、 $v_0 = \{\sqrt{2g(H-h_0)}\}$ および v は、それぞれ衝突直前および直後のハンマ体速度、 g は重力の加速度、また、 M および m は、それぞれハンマ体ならびに試験片の質量である。圧縮に要する時間 t_1 、公称ひずみ表示ならびに対数ひずみ表示による平均ひず

表 1 供試材の引張特性値

材料：工業用純アルミニウム A1050-H24材、 $t_0 = 0.2$ mm

採取方向*	n 値	r 値	F 値 MPa (kgf/mm ²)	引張強さ MPa (kgf/mm ²)	全伸び %
0°	0.02	—	142 (14.5)	133 (13.6)	8.7
45°	0.02	—	143 (14.6)	134 (13.7)	2.5
90°	0.01	—	145 (14.8)	136 (13.9)	6.9
平均	0.02	—	144 (14.7)	134 (13.7)	5.2

*：圧延方向に対する角度、 $\sigma = F_e/n$

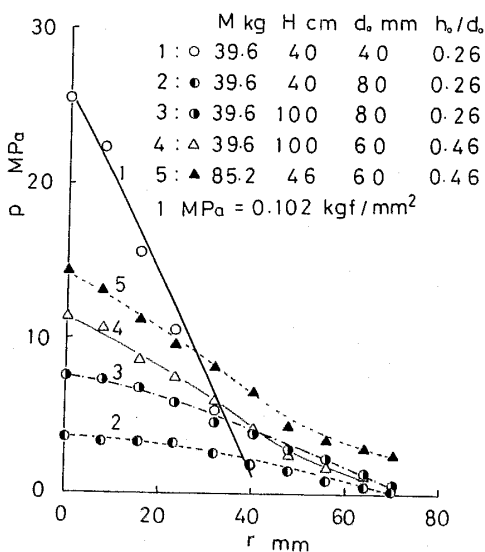


図 6 圧力分布の測定結果

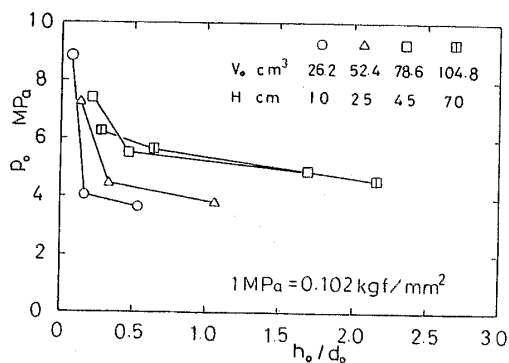


図 7 試験片の中心位置 $r=0$ における圧力 (最大圧力) p_0 と高さ比 h_0/d_0 の関係

み速度 $\dot{\epsilon}_m, \dot{\epsilon}_m$ をそれぞれ次式にて定義する.

$$t_1 = (h_0 - h_1) / (1/2v) \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{\epsilon}_m = e_1 / t_1 = \{(h_0 - h_1) / h_0\} / t_1 = v / (2h_0) \dots (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_m &= \epsilon_1 / t_1 = \ln(h_0 / h_1) / t_1 \\ &= \dot{\epsilon}_m \epsilon_1 / (1 - e^{-\epsilon_1}) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに, e_1 および ϵ_1 は, それぞれ公称圧縮ひずみならびに対数圧縮ひずみ (いずれも正值表示), また e は自然対数の底である. 力積の法則より平均圧縮力 F_m は次式で表される.

$$F_m = (M + m)v / t_1 = Mv_0 / t_1 \dots\dots\dots (5)$$

本実験の場合 m は M に比べて十分小さいので, 式(1)より $v \approx v_0$ とおくと式(2)および(5)より次式が得られる.

$$F_m \approx (1/2)Mv_0^2 / (h_0 - h_1) \dots\dots\dots (5)'$$

平均圧縮応力 Y_m を次式によって定義する.

$$Y_m = F_m / A_m = (h_0 + h_1)F_m / (2V_0) \dots\dots\dots (6)$$

ここに, A_m は平均断面積, V_0 は試験片の体積である. Y_m は半径位置ならびに圧縮行程を通しての平均応力を意味し, 圧縮後における試験片の高さ h_1 さえ測定すれば, 式(5)' および(6)より試験片の横断面積形状を問わず算出できる. 図8は測圧ピン法による p_0 の実測値と Y_m の関係をみたものである. 両者の間に近似的に

$$p_0 = 2.92 Y_m \dots\dots\dots (7)$$

なる関係式が成立している. この関係の成立を前提とすれば, 何らかの方法で Y_m を求めることにより p_0 の概略値を予測できることになる.

4.2 Y_m の見積もり方法 Y_m を見積もるためには, 圧縮後の試験片高さ h_1 あるいは圧縮ひずみ ϵ_1 ($= \ln h_0 / h_1$) を求める必要がある. このための試験をそのつど実施することも一法であるが, ここではより一般性を持つ手法として計算による方法を提示する.

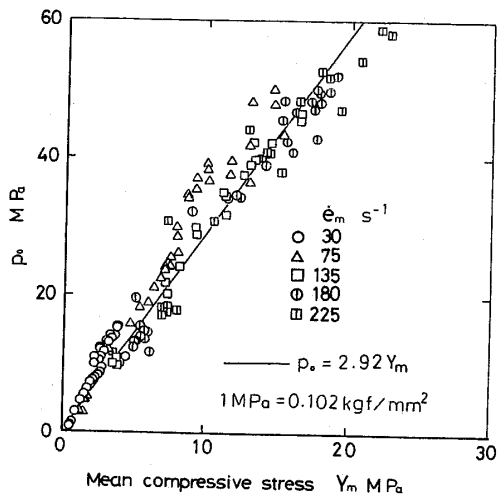


図8 平均圧縮応力 Y_m と p_0 の関係 (実験値)

Akuらは, 金属の熱間加工に対してしばしば引用される構成式から着想して, プラスティシンの場合 Y_m と $\dot{\epsilon}_m$ との間に $Y_m = c\dot{\epsilon}_m^\alpha$ なるべき乗則が成立することを報告している⁽⁶⁾. 本実験の粘土の場合 $\dot{\epsilon}_m$ ごとにこの関係の成立が認められ, 結局次に示す式(8)が良好な近似式となることがわかった.

$$Y_m = c\dot{\epsilon}_m^\alpha \epsilon_m^\beta \dots\dots\dots (8)$$

図9は, M を一定($=39.6\text{kg}$)として, H, d_0 および h_0/d_0 を種々変更して得られた Y_m と $\dot{\epsilon}_m$ の関係をプロットしたものである. 図中に示す曲線は式 $Y_m = 0.0033\dot{\epsilon}_m^{-1.29}\epsilon_m^{2.55}$ (MPa)を描いたものであるが, 実験値と比較的よく一致している. ただし, 式中の係数は最小二乗法によって定めたものである. 試みにプラスティシンについても調査した結果, やはり同様の関係を得た. このように Akuらと異なる結果が得られた一因として, 採用された潤滑条件の違いが考えられる (Akuらの場合フレンチチョーク粉潤滑, 本実験の場合非潤滑). 式(4)および(8)を参照すれば, Y_m は $\dot{\epsilon}_m$ (あるいは ϵ_m) および ϵ_1 に対してとともに正相関関係を有することがわかる. 前者の相関関係は主として粘土材料の粘性に, また後者の関係は試験片・圧縮板境界面における摩擦に起因すると考えられる. また, 発生圧力の大きさの観点からすれば, 式(8)中の係数 c および $(\alpha + \beta)$ が大きいことが本加工法に適した媒体の特性ということになる.

式(6)と(8)を等置し, 整理すると次式を得る.

$$A\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) + \frac{1 - e^{\epsilon_1}}{1 + e^{\epsilon_1}} \left(\frac{\epsilon_1}{1 - e^{-\epsilon_1}}\right)^\beta = 0 \dots\dots\dots (9)$$

ここに, $A = MgH / (2V_0 c \dot{\epsilon}_m^{\alpha + \beta})$ である. あらかじめ $\dot{\epsilon}_m$ を規定した圧縮実験を行い, 係数 c, α および β を定めておけば, 任意の試験条件における ϵ_1 は式(9)を数値的に解くことにより定まる. Newton法を用い

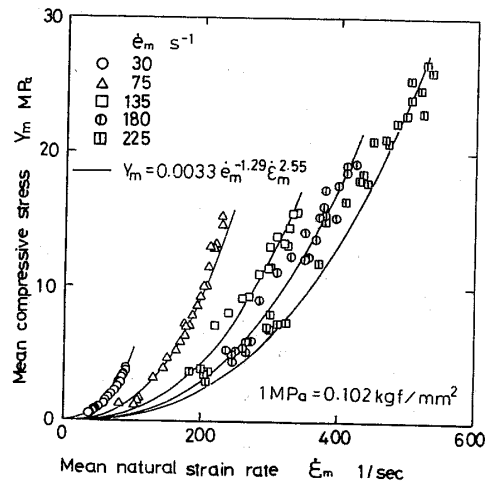


図9 Y_m と $\dot{\epsilon}_m$ の関係

て ϵ_1 を定めた後、式(5)'および(6)より Y_m を算出した。また、この Y_m を用いて式(7)より p_0 を定めた。図10(a)および(b)は、それぞれ Y_m ならびに p_0 の理論値と実験値を比較したものである。図によれば、 Y_m は十分精度よく求められ、一方 p_0 は ±10% 程度の誤差範囲内で予測できることがわかる。

4.3 Y_m と p_0 の関係の考察 図11は青緑色粘土試験片中に環状黑色粘土を挿入した試験片を作成して、圧縮後におけるその縦断面を観察したものである。図によれば、試験片両端面において半径方向の材料移動はほとんど認められず、試験片・圧縮板境界面においてきわめて高い摩擦状態が生じたものと推定される。プラスチックの実験においても、他の方法によって同様の観察がなされている⁽⁵⁾。一方、試験片内部ではきわめて大きな材料流動が見受けられる。こうした変形状態を考慮した厳密な力学的解析は他に譲ることとし、ここでは簡単な理論による考察を行う。

試験片・圧縮板境界面において付着摩擦を仮定した初等解⁽³⁾によれば、円柱状試験片のすえ込み加工における最大面圧 p_0 と半径位置にわたる平均圧縮応力 $\bar{Y} (= \int_0^r 2\pi\xi p d\xi / (\pi r^2))$ との間に次式の関係が得られる。

$$p_0 = D_1 \bar{Y}, \quad D_1 = (1 + D_2) / (1 + D_2/3) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $D_2 = (2/\sqrt{3})(r/h) = (2/\sqrt{3})(r_0/h_0)e^{1.5\epsilon}$ 、 r および h は、それぞれ試験片の半径および高さ、また ϵ は圧縮ひずみである。式(10)は準静的な場合の理論式であるが、慣性項を考慮した場合にも類似の式を導くことができる⁽⁸⁾。しかし、 D_1 に対するその影響はせいぜい1%程度と小さいことがわかった。

ここで、式(10)を本圧縮問題に適用してみる。 \bar{Y} の圧縮ひずみ ϵ による変化は実験的に把握してないが、付録に $\bar{Y} = c' e^p \epsilon^q$ のタイプの構成式に基づく解析式(式(17))が導かれている。これを引用して式(10)とを組み合わせれば、任意の ϵ に対する p_0 が定まる。また、式(5)', (6)および付録の式(16)より Y_m が定まる。計算結果によれば、各種 $d_0, h_0/d_0, H$ を通して、 p_0 は $\epsilon = (1/2)\epsilon_1$ において最大を示した。 p_0 の最大値と Y_m との関係の計算結果を図12に示すが、ほとん

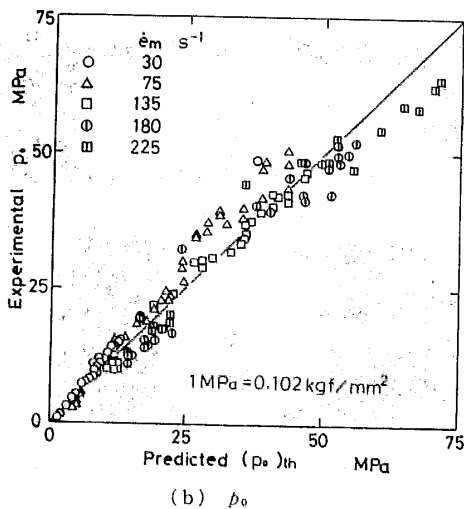
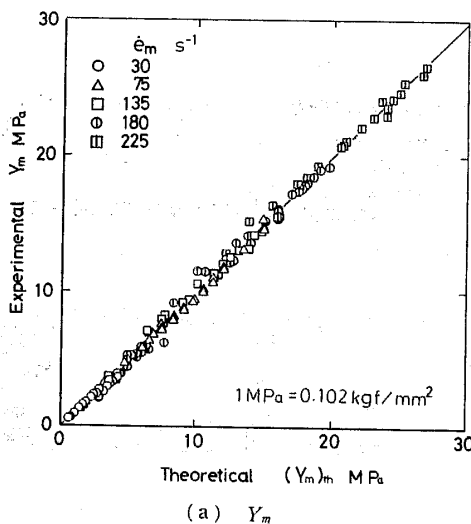
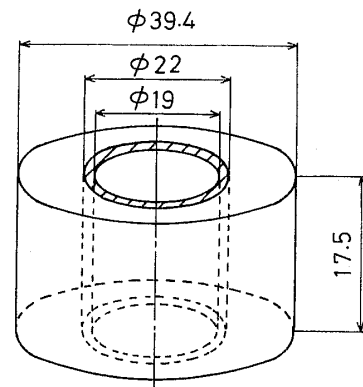


図10 Y_m, p_0 の理論値と実験値の比較



H = 5 cm, M = 39.6 Kg

(a) Initial specimen



(b) After compression

図11 試験片の変形状態の観察

どの場合 $p_0 = 3Y_m$ の直線近傍にプロットされている。このように、特定の圧力分布と構成式モデルに基づく解析結果からではあるが、式(7)が力学的に可能な近似式であることが理解される。そして、この関係は結局本実験のようにきわめて大変形($\epsilon_1 = 0.6 \sim 3.0$)と高摩擦の両条件がそろった場合に成立するものようである。なお上記計算結果によれば、 Y_m は厳密な意味での平均応力 $Y_{mean} = \int_0^{\epsilon_1} \bar{Y} d\epsilon / \epsilon_1$ とは量的に一致せず、これより 20~30% 程度大きいことが判明した。しかし、本提案の圧力予知法では両者が一致することを必要条件としていないので何ら問題は生じず、 Y_m は簡便かつ有用な情報源として役立つものと考えられる。

4.4 張出し成形におけるハンマ体設定高さ H の見積もり 上記圧力予知法の応用として、本節では金属薄板の張出し成形に必要なハンマ体設定高さの見積もりを試みる。張出し深さ h_p を指定し、高橋による液圧バルジ変形の近似式⁽⁹⁾を用いて圧力 p を算出した

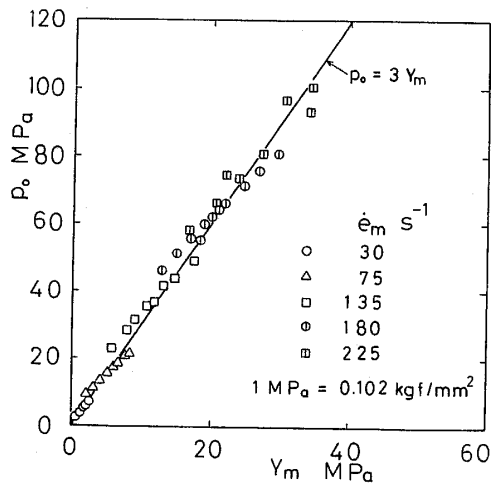


図 12 Y_m と p_0 の関係 (理論値)

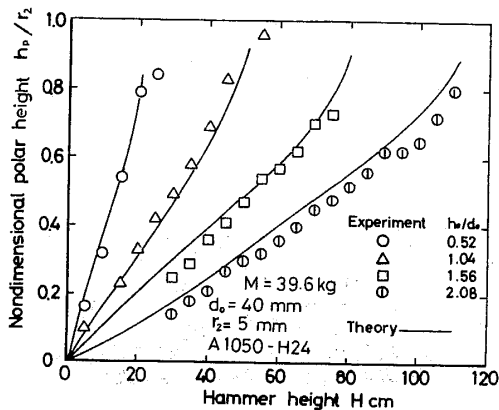
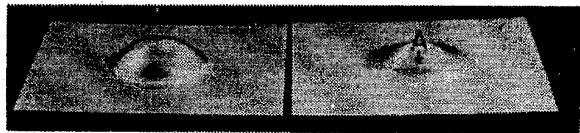


図 13 相対張出し深さ h_p/r_2 とハンマ体設定高さ H との関係

後、 $p_0 = p$ とおいて 4.1 節および 4.2 節にて述べた理論式を用いて必要な H を逆算する。 h_p/r_2 と H の関係について、理論値と実験値を比較した結果を図 13 に示す。ただし、ダイス穴半径 $r_2 = 5$ mm, ダイス肩半径 $r_a = 3$ mm とし、素板には A1050-H24 材($t_0 = 0.2$ mm)を使用した。図より本計算法がある程度有効であることがわかる。ただし、本提案の圧力予知法では板の塑性変形の影響が考慮されていないので、成形部の容積および板の塑性変形仕事が粘土試験片のそれらと比べて相対的に大きくなるほど、 H を過小に見積もることになる。このような場合の補正法に関しては、今後の検討課題としたい。



Clay ($r_2 = 5$) Round-headed punch ($d_1 = 9.4, r_p = 4.7$)

(a) Stretch-forming (round-headed)



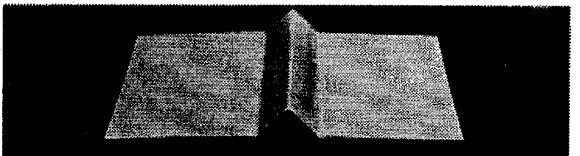
Clay ($r_2 = 5$) Flat-headed punch ($d_1 = 9.4, r_p = 1.0$)

(b) Stretch-forming (flat-headed)

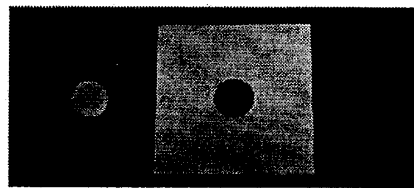


Clay ($d_2 = 22, d_f = 14, \theta = 90^\circ$) Conical-headed punch ($d_1 = 20, d_f = 14, \theta = 90^\circ$)

(c) Conical cup forming



(d) 90° - V bending



(e) Blanking and piercing ($\phi 20$)

A: necking, B: fracture, C: wrinkling, Unit: mm.

図 14 各種加工への応用例

5. 板材成形の試み

本加工法の応用として、A1050-H24材(図14(c)を除く)を用いて小物の板材成形を試みた結果を図14(a)~(e)に示す。図(a)左は本法により自由張出し成形を行った結果を示すものである(ダイス穴半径 $r_2=5$ mm, ダイス肩半径 $r_d=3$ mm, 破断開始直前)。図(a)右に金属工具を用いた場合の実験結果を示す(球頭ポンチ, 半径 $r_1=4.7$ mm, ダイス寸法は上記と同じ, くびれ開始直後)。また, 上記と同一のダイスの穴中に逆押しさえ板を配備して, 平頭形状の張出し成形を行った結果を図(b)左に示す。同様に平頭ポンチによる実験結果を図(b)右に示す($r_1=4.7$ mm, ポンチ肩半径 $r_p=1$ mm)。これらの図によれば, 限界成形深さはいずれも本法の方が金属工具を用いた場合よりも大きくなっており, 図(a)の場合で20%強, 図(b)の場合で50%強向上した。この理由の一つとして, 本法の方が圧力分布の不均一が小さく, ひずみ集中が緩和されたことが考えられる。

図(c)は, 表2に示した材料とは別にアルミニウムはくA1N30-H18材($t_0=0.1$ mm)を準備し, これを用いて円すい台成形($\theta=90^\circ$)を試みたもので, 上述と同様に金属工具による実験結果(しわ押さえ力1.96 kN(200 kgf))も示してある。金属工具による場合, 素板寸法ならびにしわ押さえ力を各種変更しても, 成形深さが $h=4.0$ mmに達する以前に常にしわまたは破断が生じた。一方, 本法では側圧の発生によりしわが抑制されかつ破断も生じない圧縮条件が見い出された。このように, しわ押さえ工具を用いずともある程度の絞り成形が可能であることがわかった。

図(d)は頂角 90° のV曲げ成形の場合である。媒体の流動性の異なる特性は, 鋭い角部での形状性の向上に有効のようである。図(e)は円板の打抜きおよび穴あけ($\phi 20$)を試みた結果を示すものである。発生圧力が十分であれば, こうした小径のせん断加工にも適用できる。

本加工法の特徴についてなお究明すべき点が多い。しかし, 現段階でも上述のように, ポンチおよびしわ押さえ工具が省略でき, 作業も簡便で, 成形の対象によっては金属工具を用いる場合よりも成形性を向上させるといった利点が見い出されており, 所期の目的に沿う加工法として十分期待できることが結論される。ただし, 本実験において採用した粘土材料は金属工具あるいは素板との付着性が強いので, 実用上何らかの離型対策を要する。これについては今後の検討課題としたい。

6. 結 論

多種少量生産向きの新しい板材成形法を開発することを最終目標におき, その第一段階として圧力の発生状況を把握するため, 円柱状粘土試験片を自由落下式ドロップハンマ装置によって高速自由圧縮するモデル実験を試みた。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 粘土試験片・圧縮板境界面で発生する最大圧力の分布に関しては, 試験片中心位置で極大を呈し, いわゆる friction-hill と類似した分布形態が常に得られた。そして, ハンマ体設定高さを大きく, 試験片の体積および高さ比を小さくするほど, 高い圧力が試験片中心部に集中して生じた。ハンマ体の位置エネルギーを一定とした場合, ハンマ体の質量を大きくした方が圧力を高める効果の大きいことがわかった。

(2) 発生圧力の大きさそのものに関しては, 上記因子を適宜選択することにより実用に沿える程度の圧力を発生できることがわかった。本実験で測定された最大圧力は60 MPa(612 kgf/cm²)で, これは粘土の準静的圧縮応力の約750倍に相当する。ただし, 高圧の領域が狭い範囲に限定されるため, 本法は小物の成形に適すると結論された。

(3) 広範囲の圧縮試験条件を通して, 平均圧縮応力 Y_m と平均ひずみ速度との間に成立する実験式を得た。また, 試験片中心位置における最大圧力 p_0 が Y_m の約3倍に等しいとする実験結果を得た。この関係の成立を前提として, 加工条件の設定上必要とされる p_0 の見積もり方法を提示した。本手法による p_0 の予測誤差はおよそ±10%以内であった。 p_0 と Y_m の関係は力学的解析によって立証された。

(4) 本加工法の板材成形への利用面について若干検討した結果, 作業が簡便なこと, ポンチおよびしわ押さえ工具を省略できること, 半硬質材の張出し成形では金属工具を用いるよりも成形限界が向上すること, 側圧の発生により金属工具で困難なはくの円すい台成形が可能なこと, などが利点として浮かび上がってきた。ただし, 本実験において採用した粘土材料には離型性の点で検討の余地が残されている。

〔付 録〕

ドロップハンマ装置によって円柱試験片を自由圧縮する際の平均圧縮応力 \bar{Y} と圧縮ひずみ ϵ との関係式を以下に導く。たる形変形を無視し, 次式に示す構成関係を仮定する。

$$\bar{Y} = c' \epsilon^p \epsilon^q \dots \dots \dots (11)$$

定数 c' , p および q は, 材質, 試験片・圧縮板境界面の摩擦および余剰仕事に依存するものとする. $\dot{\epsilon}$ は公称ひずみ速度で, 次式にて定義する.

$$\dot{\epsilon} = de/dt = d\{(h_0 - h)/h_0\}/dt = v/h_0 \dots\dots (12)$$

ハンマ体の運動方程式は次式にて与えられる.

$$-M dv/dt = A \bar{Y} \dots\dots (13)$$

ここに, A は試験片の変形後の横断面積である. 式(11)および(12)を式(13)に代入して整理すると次の微分方程式を得る.

$$d\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}^{p-1} = B\epsilon^q d\epsilon \dots\dots (14)$$

ここに, $B = -A_0 c' / (M h_0)$, A_0 は試験片の初期断面積である. $\epsilon = 0$ において $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$ を初期条件として式(14)を解くと次式を得る.

$$\dot{\epsilon}^{2-p} = \dot{\epsilon}_0^{2-p} + B(2-p)\epsilon^{q+1}/(q+1) \dots\dots (15)$$

圧縮完了後 $\epsilon = \epsilon_1$ において $\dot{\epsilon} = 0$ であるから, 式(15)より ϵ_1 は次のように表される.

$$\epsilon_1 = \{[(q+1)\dot{\epsilon}_0^{2-p}/\{B(p-2)\}]^{1/(q+1)}\} \dots\dots (16)$$

式(15)を(11)に代入すると \bar{Y} は次のように表される.

$$\bar{Y} = c' [\dot{\epsilon}_0^{2-p} + B(2-p)\epsilon^{q+1}/(q+1)]^{p/(2-p)} \epsilon^q \dots\dots (17)$$

圧縮条件が指定されれば, 式(5)', (6) および(16)より Y_m を, また式(4)および(16)より $\dot{\epsilon}_m$ を算出できる. 式(11)中の定数は, $Y_m - \dot{\epsilon}_m$ 関係が実験曲線とできるだけ一致する条件より定め,

$$\bar{Y} = 0.025 \dot{\epsilon}^{1.25} \epsilon^{1.1} \text{ (MPa)}$$

とした.

文 献

- (1) 福田・山口, 塑性と加工, 21-235 (昭55), 727.
- (2) 中村・中川, プレス技術, 19-9 (昭56), 60.
- (3) 春日, 塑性学および加工, (昭43), 139, コロナ社.
- (4) Samanta, S. K., *Int. J. Mech. Sci.*, 9 (1967), 485.
- (5) Aku, S. Y., ほか2名, 文献(4)の495ページ.
- (6) Slater, R. A. C., ほか2名, *Int. J. Mech. Sci.*, 10 (1968), 169.
- (7) Hawkyard, J. B. and Potter, T. B., *Int. J. Mech. Sci.*, 13 (1971), 171.
- (8) 春日, 塑性学および加工, (昭43), 189, コロナ社.
- (9) 高橋, 機論, 36-289 (昭45), 1444.

討 論

〔質問〕 畑村洋太郎〔東京大学工学部〕

粉粒体を力の媒体として用いるというユニークな着想を興味深く拝見した. 従来, 粘土などについてこのように大きなひずみ速度を与える研究は, ほとんど行われていないので, 貴重なデータを与えていると思う.

測定方法について, 次の点につき質問する.

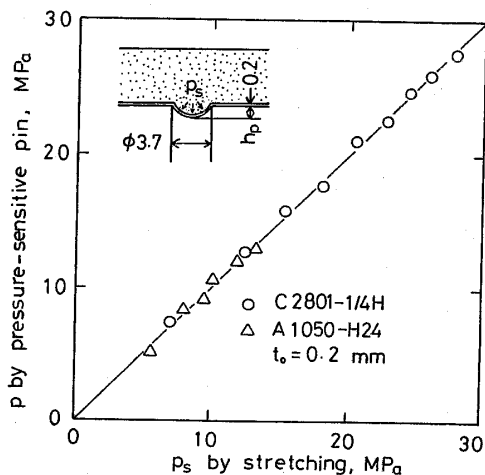
(1) 図3の圧力較正法では測圧ピン単体としての性能はわかるが, これは図2の検出器全体としての性能を調べたことにはならない. 受圧面に働く摩擦応力により, 受圧ピンがケーシングの穴におしつけられ, そのため非常に大きなヒステリシスが出てしまうのが普通と思う. これに対し何らかの対策がとってあるのか.

(2) したがって図6の測定値が正しいのかという疑問が生じる. 円柱の圧縮では周辺に行くほど摩擦が大きくなるため, ピンがひっかかる可能性があるためであるが, この点についてはいかがか.

〔回答〕 (1) ケーシングの穴壁に高粘度鉱油(動摩擦係数 $\mu \approx 0.1$)を塗布することにより, ご指摘の現象をできるだけ回避するよう努めている.

(2) ピンがケーシング穴壁に押付けられるときに生ずる摩擦力 $F_f = \mu \tau_f A$ と軸方向荷重 $F_p = pA$ との

比 δ は, $\delta = \mu \tau_f / p$ となる. ここに, μ はピンとケーシング穴壁との間の動摩擦係数, τ_f はピン受圧部に作用する摩擦せん断応力, A はピンの受圧面積, p は面圧である. δ が最大となる試験片外縁部において, この値を試算する. ここでの p は粘土の圧縮降伏応力 Y_c に等しく, また, 付着摩擦状態および T_{resca} の降伏条件を仮定すると $\tau_f = 0.5 Y_c$ となり, 結局 $\delta = 0.5 \mu$ となる. 本実験の場合 $\mu \approx 0.1$ とすると $\delta \approx 0.05$ となり, 最悪で5%程度 p を過小に測定することになる.



付図1 圧力の測定法による比較

なお、本測圧ピン装置は他の原因による測定誤差を持つ可能性も考えられるので、次のような方法により総合的にチェックを行っている。まず、所定の半径位置に極薄板および小径穴($2r_2=3.7\text{ mm}$)のゲイスを配置し、粘土を圧縮後張出し高さ h_p を測定する。ついで、あらかじめバルジ試験により定めた h_p - p_s 曲線より圧力 p_s を換算する。こうして得られた p_s と測圧ピン法による圧力測定値 p とを比較した結果を付図 1 に示す。図によれば、両者の差異は 5% 以内であり、結局、本測圧ピン装置は最大でもこの程度の誤差を有し、本研究目的に十分沿うものと考ええる。

〔質問〕 中島 浩衛 (新日本製鉄(株))

(1) 図 9 の平均圧縮応力 Y_m と平均対数ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_m$ との関係において、両者間に $Y_m = A \cdot \dot{\epsilon}_m^b$ の関係が存在することは一般に知られている。しかしながら、それらの関係がさらに平均公称ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_m$ 別に表示できること、また実験式 (8) で表すことも同様に理解しがたいように思う。したがって図中の $\dot{\epsilon}_m$ は、むしろ H , d_0 あるいは h_0/d_0 などの条件、例へばひずみ量、あるいは摩擦条件の違いなどを表すものであれば理解できるように思うがいかがか。

(2) 図 13 は圧力伝達媒体としての粘土の高さの低いものほど、すなわち直径一定とすれば、体積の小さい方が低い加工エネルギーで成形可能であることを示している。圧力伝達と粘土の流れ特性、および成形体の破断特性 (成形限界) などの間にどのような関係があるかご教示頂きたい。

〔回答〕 (1) 本研究では、friction-hill を活用

するねらいから、 Y_m に対しても摩擦が関与した取扱いを行っており、したがって式 (8) の持つ内容は通常の構成式のものとは異なる。式 (8) および図 9 において $\dot{\epsilon}_m$ がパラメータとして介在する理由はご指摘のとおりと考える。すなわち、 $\dot{\epsilon}_m$ を同じ値に規定しても圧縮条件を変更することにより圧縮ひずみ ϵ_1 を自由に選べること、 ϵ_1 を媒介として $\dot{\epsilon}_m$ と $\dot{\epsilon}_m$ の間に式 (4) の関係が成立すること、 ϵ_1 が異なれば媒体の変形仕事および摩擦仕事、したがって Y_m が異なること、といった事項を考慮すれば Y_m が $\dot{\epsilon}_m$ に依存することが理解できる。

(2) 結論として、自由張出し成形に限定すれば、粘土の流れ特性は伝達圧力の絶対量と密接な関係を持つものの、成形限界に対する影響はほとんどないものと考えられる。粘土試験片の高さを低くした場合の影響の一つとして、摩擦による半径流の拘束が強まることが挙げられ、その反作用として試験片中心部の圧力が高まり、ひいては低い加工エネルギーで成形が可能となる。この場合、当初薄板には場所的に著しく不均一な圧力が伝達されることになるが、容器の成形が進行すると容器内部に流入した粘土材料は密閉状態に近い変形拘束を受ける結果、この領域のみにおいて等分布化した圧力が伝達されるようになる。一方、工業用純アルミニウム板の場合、限界ひずみのひずみ速度依存性はほとんどないので、結局、圧力が十分発生できる圧縮条件でさえあれば、粘土の流動状態のいかに関係せず、通常の液圧バルジ成形とほぼ同じ張出し限界を得る。