

粘性体を圧力伝達媒体とした板材成形法*
(媒体の機械的性質の検討)黒崎 靖**, 藤城 郁哉**, 児玉 靖***
Yasushi KUROSAKI, Ikuya FUJISHIRO, Yasushi KODAMA**Key Words** : Forming, Viscous Materials, Strain-Rate Sensitivity, Dynamic Contact Pressure, Stretch-Forming, Piercing

1. 緒 言

近年, 多種少量生産方式への対応の一つとして, ゴム, 液体などの非金属材料を利用した板材成形法が再評価されつつある⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, ゴムの場合, 寿命(老化, 大変形あるいは反復使用に伴う損傷) および廃ゴム処理の問題があり, また, 液体の場合, もれ防止のための特別な工夫を要するため, その用途はある程度限定される.

これに対する一つの方策として, 先に著者ら⁽³⁾は, 無定形粘性体をドロップハンマ装置などにより高速圧縮させ, その際発生する高圧を利用して板材成形を達成する手法を提案した. 自由圧縮により張出し成形を

行う様子を図1に示す. 前報⁽³⁾では, 油粘土を用いたモデル実験により, この手法が上記欠点の克服のみならず成形性の向上にも役立つ可能性が示された. 本論文では, この加工法の実用化を進める観点から, 望ましい加圧方式および媒体の機械的性質について実験的に検討した結果を述べる. また, 本加工法の新しい用途についても報告する.

2. 実験方法

本研究では, 粘性に限定せず, 幅広い機械的性質の中で本加工法に望ましい媒体の特性を再検討することにした. このため, 媒体用材料として, 典型的な粘弾塑性の特徴をもつ非金属材料を4種類準備し, 次の4種類の性能実験を行った. まず, 圧力の発生能力試験として, 1対の平行平板およびダイスと平板を用いる圧縮試験を, 次に加工性試験として, 金属薄板の穴あけ試験および張出し試験をそれぞれ実施した. 以下に実験条件の詳細を記す.

2.1 実験装置 前報⁽³⁾と同様に, 高速圧縮試験装置として自家製の自由落下式ドロップハンマ装置を使用した. ハンマ体の全質量 M は後述3種類の加圧方式とも同じで $M=39.6$ kg とし, ハンマ体設定高さ H も通常 $H=70$ cm で一定とした.

2.2 媒体用材料 採用した媒体用材料は, 前報⁽³⁾で用いた油粘土(高崎粘土製, 密度 $\rho=1.91$ g/cm³) 以外に, プラスティシン ($\rho=1.8$ g/cm³, せん断降伏応力 $k=0.083$ MPa), シリコーンポリマ(信越化学工業製, KE-SAP1, $\rho=1.20$ g/cm³, フローテスト粘度 $\eta=5000$ Pa·s) および天然ゴム (HS=64, 引張強さ $=2.45$ MPa, 全伸び $=260\%$) の合計4種類である.

2.3 媒体の機械的性質 媒体の機械的性質を調べるため, 図2に示すように, 途中で速度を変更する圧縮試験を行った. まず, 一定速度 V で $h \approx 1/2 h_0$

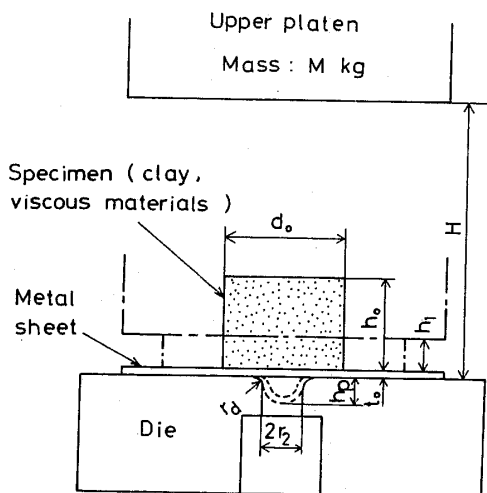


図1 粘性体の高速自由圧縮による張出し成形法

* 昭和58年5月21日 昭和58年度塑性加工春季講演会において講演, 原稿受付 昭和59年2月6日.

** 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515).

*** 学生員, 三重大学大学院, 現在日本アイ・ピー・エム(株)野州工場 (〒520-23 滋賀県野州郡野州町大字市三宅800).

まで圧縮し (OA), t_h 時間応力緩和させた後 (AB), $-V$ の速度で除荷した (BC). V としては, 5, 50, 500 mm/min を採用し, これに対応して $t_h \approx 200, 20, 5$ s とした. 試験片には直径 $d_0 = 40$ mm, 高さ $h_0 = 40$ mm の円柱を用い, 潤滑剤には, 天然ゴムではグラフアイトグリースを, 他の材料ではタルクを塗布した. 試験温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ とし, 試験機には島津オートグラフ (IS-5000 形) を用いた.

得られた圧縮応力-圧縮ひずみ (σ - ϵ) 曲線を図 3 に示す. 現在のところ, 図 3 に示す挙動を統一かつ正確に表現できる構成式は見いだせなかったため, ここでは負荷過程に対して比較的近似度の良かった $\sigma = c \dot{\epsilon}^m \epsilon^n$ なる構成式を適用して媒体の特徴の把握をはかった. ここに, $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度である. 最小二乗法により定めた係数を表 1 に示す. 表 1 には, 除荷後におけるひずみの残留率 γ の値も追記してある. ここに, $\gamma = \epsilon_c / \epsilon_a \times 100(\%)$ で, ϵ_a および ϵ_c はそれぞれ図 3 における点 A, C でのひずみである.

シリコンポリマの場合, 図 3 より応力緩和がきわ立って速く, また, 表 1 より m が最大で, 粘性が支配的な材料といえる. 天然ゴムでは, その C が他の材料より 40 倍以上大きくなっており, n が最大かつ γ が

表 1 媒体用材料の圧縮特性値

Materials	m	n	c MPa·s ^{m}	γ %
Clay	0.11	0.23	0.100	99
Plasticine	0.01	0.21	0.173	99
Silicone polymer	0.45	0.39	0.122	100
Rubber	0.07	0.72	4.62	15

$$\sigma = c \dot{\epsilon}^m \epsilon^n, \gamma = \epsilon_c / \epsilon_a \times 100.$$

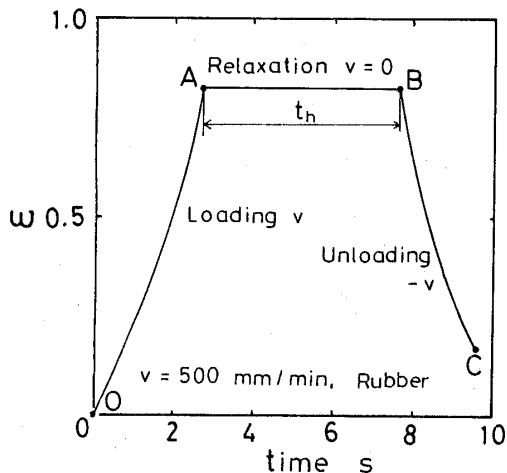


図 2 圧縮試験における速度経路

最小で, 弾性体に近い特徴が現れている. プラスティシンではその m および n が最小で, 完全塑性的である. 油粘土は, プラスティシンとシリコンポリマの中間的性質をもつことが分かる. 以下では, c, m, n の観点から媒体の適性を比較検討する.

2.4 試験片 ドロップハンマ実験に用いた媒体試験片の形状は直径 $d_0 = 40$ mm の円柱形で, その高さ比を $h_0/d_0 = 0.5, 1.0, 1.5$ の 3 種類に変更した. 天然ゴムの場合, 厚さ 10 mm のゴムシートより正方形板を採取し, 旋盤にて円形に仕上げた後, 所定の高さになるまでゴムのりで重ね合せ接着した. 他の材料では, ピストンとシリンダを用いて所要寸法に成形した. いずれの試験片も作成後一晩放置した.

2.5 加圧方式 以下の各種試験では, 図 4 に示す 3 種類の加圧方式のいずれかを採用した. 前報⁽³⁾ で用いた自由圧縮 (F.C.) に加え, 拘束リングを用いて材料の半径方向流動を管制する方法として, $d_i \approx d_0$ の場合と $d_i = 1.55d_0$ の場合を採用した. ここに, d_i は拘束リングの内径である. 本論文では前者を拘束圧縮 (C.C.), 後者を半拘束圧縮 (S.C.) と称することにする. ただし, 両者とも上部圧縮板と拘束リング

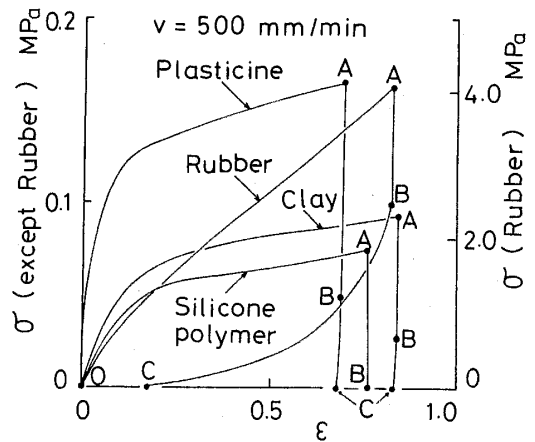
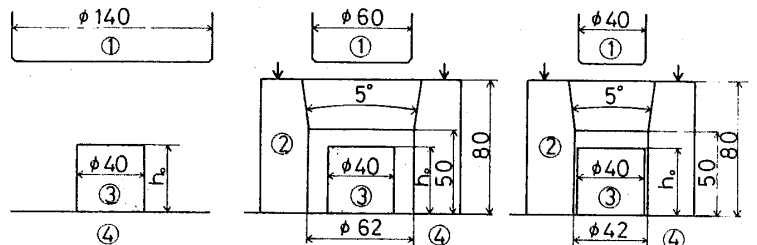


図 3 媒体用材料の σ - ϵ 曲線



(a) Free compression (F.C.) (b) Semi-constrained compression (S.C.) (c) Constrained compression (C.C.)
①: Upper platen, ②: Constraining ring, ③: Specimen, ④: Lower platen or die

図 4 加圧方式

の間に1mmのすきまが設けてある。図4において④の位置には、試験の種類に応じて専用の下部圧縮板もしくはダイスを配備した。

2.6 平板圧縮試験 媒体の圧力発生能力を調べるため、平行平板による圧縮試験を行い、下部圧縮板に作用する面圧を測定した。このため、前報⁽³⁾で使用したものと同じ測圧ピン装置(図5)を下部圧縮板中に組み込んだ。今回の測定では、ロードセルの出力をいったんトランジェントメモリ(8 bit, 2048 word)に記憶させ、圧縮終了後にペンレコーダ上に書き出させた。本測圧装置の応答周波数は2.5 KHzで、本実験条件の範囲内では使用に耐えると判断された。潤滑条件および試験温度は以下の他の試験とも共通で、非潤滑(アセトンによる脱脂)および20±5°Cとした。

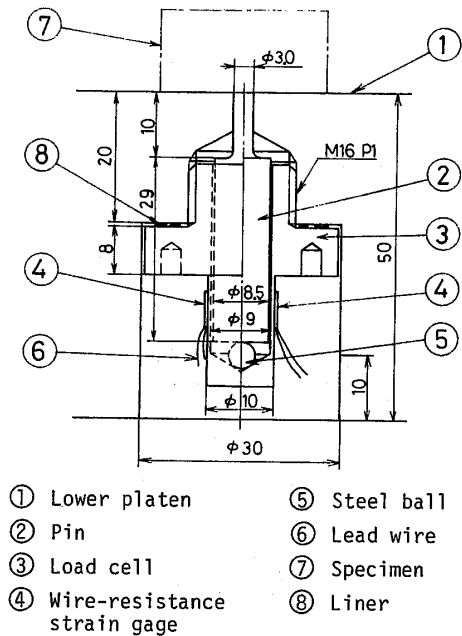


図5 測圧ピン装置

2.7 ダイスと平板による圧力試験 直径に比べて深さが相対的に大きい成形品の場合、板の塑性変形に追隨してダイス穴内へ流入できる変形能力と加圧能力とがともに高いことが要求される。このような能力のシミュレーション試験として、図6に示すダイスと図4の加圧工具を組合せた圧縮試験を採用した。そして、あらかじめダイス穴壁および底部にてん布した感圧フィルム(プレスケール高圧用、富士フィルム製)によって圧力を測定した。図7は、同一圧縮条件(平板圧縮, C. C., シリコンポリマ使用)のもとで得られた

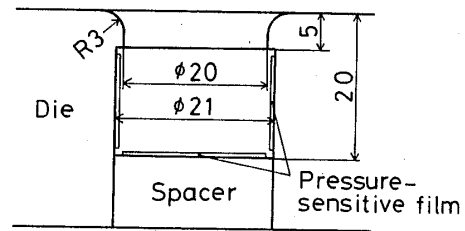


図6 ダイス穴における圧力測定法

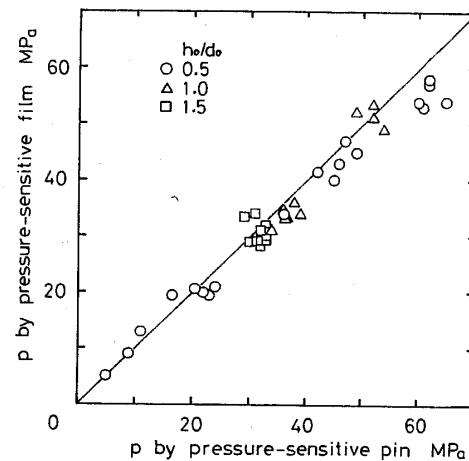


図7 圧力測定値の比較

表2 素板の引張特性値

Materials	Direction	n-value	n-value	F-value MPa	Tensile strength MPa	Total elongation %
Commercially pure aluminum (A 1100- H24)	0°	0.13	0.50	170	116	22.5
	45°	0.10	1.55	144	104	20.0
	90°	0.12	0.77	166	114	21.0
	mean	0.11	1.09	156	109	20.9
Killed steel	0°	0.24	1.74	543	305	37.9
	45°	0.22	1.33	549	316	34.5
	90°	0.23	2.10	531	301	37.6
	mean	0.23	1.60	543	310	36.1
OFHC, soft	0°	0.44	0.90	513	221	44.4
	45°	0.44	0.98	501	218	47.6
	90°	0.45	1.00	509	219	48.3
	mean	0.44	0.97	506	219	47.0

$t_0 = 0.8 \text{ mm}, \sigma = F \epsilon^n$

圧力を感圧フィルム法と測圧ピン法とで比較したものであるが、両者の相対差は±10%以内となっている。

2・8 加工性試験 ダイス上面に素板と媒体試験片を置き、図4に示す加圧方式のもとで次の加工性試験を行った。まず、工業用純アルミニウム板(A1100-H24)と孔径 $d_1=10$ mmの打ち抜きダイスを用いて穴あけ試験を行った。次に、キルド鋼板および無酸素銅軟質板を用いて張出し試験(ダイス孔径 $2r_2=20$ mm, ダイス肩半径 $r_d=3$ mm)を行った。公称板厚はいずれも0.8 mmで、両試験とも素板形状は一辺42 mmの正方形とした。素板の引張特性値を表2に示す。

3. 実験結果および考察

3・1 平板における圧力分布 平板圧縮試験でそ

れぞれの半径位置 r において記録した圧力-時間線図より最大値を読み取り、これを p と表し r に対してプロットした結果を図8(a)~(c)に示す。ただし、天然ゴムのC.C.における p は本測圧装置の容量(設計値は60 MPa)をかなり超えることが予想されたので、この場合のみ $H=15$ cmとした。F.C.の場合を示す図8(a)によれば、試験片高さ比 h_0/d_0 が小さいほど試験片中心近辺の p が急増し、著しい不均一分布を呈している。しかし、図8(b), (c)にみるように、S.C., C.C.と拘束が増すにつれて全般的に p は均一化し、その大きさも増加する傾向がみられる。ただし、天然ゴムのS.C.の場合は例外で、圧縮時の変形量が小さく拘束リングと接触しなかったため、實際上F.C.と同じ結果が得られている。結局、 p の分布状態および大きさの点で、いずれの媒体でもC.C.がもっと

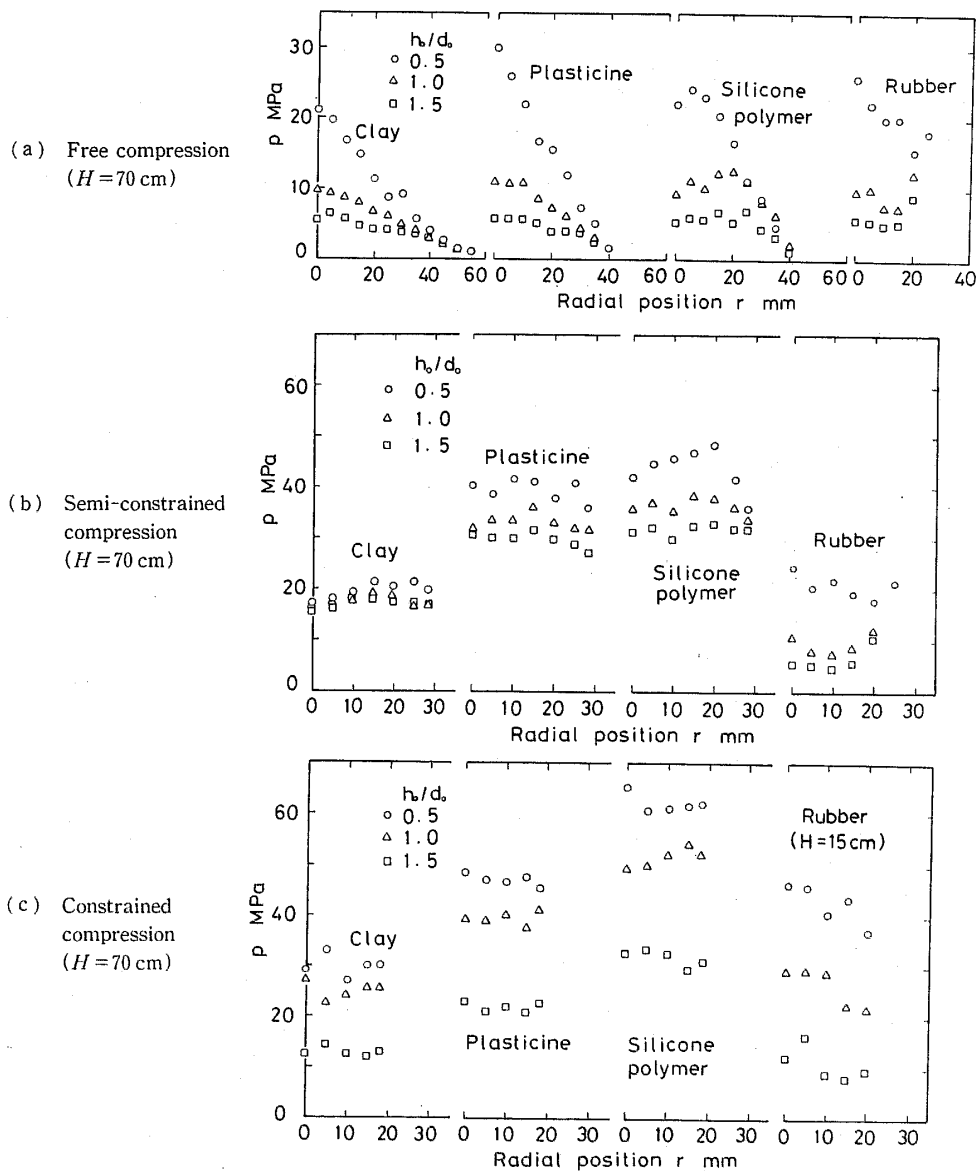


図8 平板圧縮試験における圧力分布

も優れた加圧方式であるといえる。

F.C. および C.C. における p の最大値を p_{fc} , p_{cc} , また、低速での圧縮応力を σ_s と表し、相互の比を媒体間で比較した結果を表 3 に示す ($h_0/d_0=0.5$)。ただし、天然ゴムの p_{cc} は、上記測定とは別に感圧フィルムにより $H=70$ cm, $r=0$ mm において測定した。また、 σ_s については、 $\dot{\epsilon}=0.2$ s⁻¹, $\epsilon=0.5$ として $\sigma=c\dot{\epsilon}^m\epsilon^n$ より算出した。表 3 によれば、油粘土、プラスチックおよびシリコンポリマの p_{fc}/σ_s が一般的に大きく、特に m の大きいシリコンポリマの p_{fc}/σ_s がきわだって大きくなっている。前報³⁾ではこの圧力増加機構が friction hill と速度効果によるものであることを示したが、ここでは m が大きいほどその効果の大きいことが分かる。 p_{cc}/p_{fc} については、シリコンポリマおよび天然ゴムにおいてその値が大きく、拘束効果の大きいことが分かる。これは、前者において主として m と $\dot{\epsilon}$ が、また、後者では n と ϵ が関与して、拘束リング・上部圧縮板間のすき間からの材料流出低抗が大となり、ひいては高い密閉度が得られるためと考える。このように、 m もしくは n の大きい媒体では、はめあいにさほど留意しなくても拘束リングにより 3 倍弱の増圧を期待できることが分かる。以上の結果より、 m が大きいことは速度効果、拘束効果の両面で有利となり、実際、表 3 によれば、 m のもつと

も大きいシリコンポリマにおいて $p_{cc}/\sigma_s=1460$ ときわだった増圧能力をもつことが分かる。

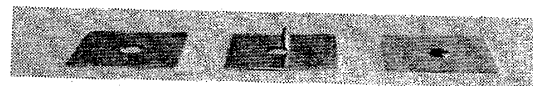
3.2 ダイス穴内での加圧力 ダイス穴壁および底部における圧力を測定した結果を表 4 に示す。天然ゴムの場合、ダイス穴への流入量がきわめて少なく、感圧フィルム位置まで材料が到達しなかったため、圧力を零とみなして表 4 への記入を省略してある。感圧フィルムの測定誤差 ($\pm 10\%$) を考慮すれば、ダイス穴壁および底部における圧力はほぼ等しく、等方的に圧力が作用することが分かる。いずれの媒体でも、拘束が強まるほど、また、 h_0/d_0 が小さいほど大きな圧力が生ずる点は前述平板圧縮の場合と変わらない。しかし、媒体の適性は全く異なり、一般的にプラスチックの圧力が大きくなっている。これは、その m および n が小さく、ダイス穴への流入仕事ひいては流入低抗が相対的に小さくなることに一因があると考えられる。以上のことから、ダイス穴径程度の深さまで媒体が流入することを要する加工条件に対しては、完全塑性的性質の媒体が望ましく、 m および n の大きいことはむしろ阻害因子となることが結論される。

3.3 穴あけ試験結果 穴あけの実例を図 9 に示す。図 9 に示す記号 (○:穴あけ成功, Δ :一部可, \times :不可) を用いて試験成績をまとめた結果を表 5 に示す。表 5 と図 8 (a)~(c) を対照すれば、 $r \leq 5$ mm における p が 23.6 MPa 以下では穴あけ不可、25.4~30.5 MPa では一部穴あけ可、また 30.6 MPa 以上で穴あけ成功となっており、したがって平板圧縮試験は穴あけ可否を判断するためのシミュレーション

表 3 p_{fc}/σ_s , p_{cc}/p_{fc} および p_{cc}/σ_s の比較

Materials	p_{fc}/σ_s	p_{cc}/p_{fc}	p_{cc}/σ_s
Clay	299	1.56	466
Plasticine	196	1.62	318
Silicone polymer	538	2.71	1460
Rubber	10	2.91	30

$$h_0/d_0 = 0.5, H = 70 \text{ cm}, \sigma_s = c (0.2)^m (0.5)^n$$



Pierced Partially pierced Not pierced

図 9 穴あけの実例

表 4 ダイス穴内における発生圧力

Unit : MPa

Materials	h_0/d_0	F.C.		S.C.		C.C.	
		Wall	Bottom	Wall	Bottom	Wall	Bottom
Clay	0.5	26	22	24	23	34	34
	1.0	15	10	25	26	34	37
	1.5	12	6	25	23	26	23
Plasticine	0.5	22	23	30	30	43	45
	1.0	13	9	26	29	45	49
	1.5	4	3	25	21	42	37
Silicone polymer	0.5	17	18	21	22	40	37
	1.0	8	9	19	19	40	39
	1.5	5	5	15	12	37	34

試験として利用できることが知れる。

3.4 張出し試験結果 図10(a)~(c)は、キルド鋼板を用いて張出し成形を行った場合に得られた相対張出し深さ h_p/r_2 を媒体試験片の高さ比 h_0/d_0 に対してプロットしたものである。ここで、 h_p は張出し深さ、 r_2 はダイス穴径である。この結果と図8(a)~(c)を対照すれば、 h_p/r_2 は $r \leq 10$ mm での p と正相関関係を有しており、平板圧縮試験は $h_p/r_2 \leq 0.7$ 程度の浅物の成形に対する情報源としても役立つことが分かる。

図10(a)は、さらに大きな h_p/r_2 が生ずる無酸素銅板の張出し試験結果(ただし、C.C.)を示したものである。これと図10(c)を比較すると、天然ゴムとシリコーンポリマにおける h_p/r_2 の大小関係が両図で逆になっている。これは、図(d)において媒体の流入性の差が反映するようになったためと考えられる。表4およびこれらの結果を総合すると、結局、張出し成形に対する媒体の適性は h_p/r_2 により変化し、これが小さいほど平板圧力特性が、逆に、大きいほど流入特性が支配的になると解釈できる。両者に関する定量的議

論は別報で行いたい。

3.5 媒体の総合評価 前述のように、4種類の性能試験のいずれにおいても、拘束圧縮の場合にもっとも良好な結果が得られる。表6は、この加圧方式による試験結果に基づいて、媒体の性能評価を相対順位A~Dによって示したものである。ここに、Aは最上位、Dは最下位を表す。表6には、再利用および離型の難易についての相対評価も示してある。天然ゴムは、平板圧縮試験、穴あけ試験、浅物の張出し試験(キルド鋼板)および離型に関して最上位となっている反面、

表5 穴あけ試験成績

Materials	h_0/d_0	F.C.	S.C.	C.C.
Clay	0.5	X	X	Δ
	1.0	X	X	Δ
	1.5	X	X	X
Plasticine	0.5	Δ	o	o
	1.0	X	o	o
	1.5	X	o	X
Silicone polymer	0.5	X	o	o
	1.0	X	o	o
	1.5	X	o	o
Rubber	0.5	X	X	o
	1.0	X	X	o
	1.5	X	X	o

o : pierced, Δ : partially pierced, X : not pierced, A 1100 H24, $t_0 = 0.8$ mm, $2r_2 = 10$ mm.

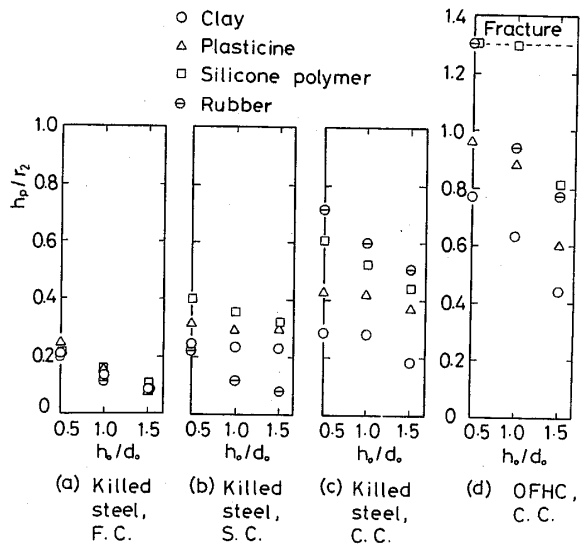


図10 張出し試験結果

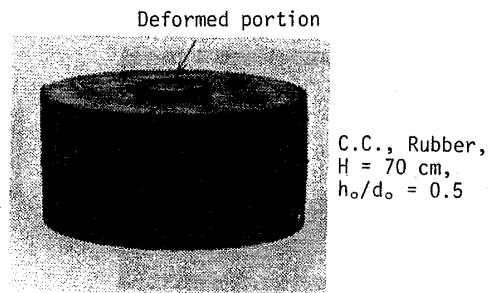


図11 天然ゴム試験片の穴あけ使用後の外観

表6 媒体の性能比較一覧

Materials	Fundamental test *		Stretch-forming *		Piercing *	Re-cycling	Releasability
	Flat platens	Die and platen	Killed steel	OFHC			
Clay	D	C	D	D	D	A	D
Plasticine	C	A	C	C	B	A	D
Silicone polymer	B	B	B	A	A	A	B
Rubber	A	D	A	B	A	D	A

A~D : comparative ratings, with A indicating the highest estimation, D the lowest. * : constrained compression.

流入性（ダイス・平板試験）に極端に劣っている。また、図 11 にみるように、穴あけ時にダイス穴への流入部が切断されて突出部を形成するため、再利用に不都合である。天然ゴムと対照的なのはプラスチックで、流入性に優れ、媒体使用後も機械的処理により容易に再利用できるものの、他の性能に劣っている。シリコンポリマはいずれの試験項目に対しても比較的良好で、少なくとも前報⁽³⁾で用いた油粘土よりもすべての点で優れており、現在のところこの媒体と拘束圧縮の組合せを推奨したい。

以上の結果を媒体の機械的性質の面からまとめておく。まず、 n の大きい材料（弾性体、ひずみ硬化塑性体）は、平板圧力発生能力に優れる反面、天然ゴムで例示した不都合を回避することは困難なため、本加工法に不向きといえる。よって、焦点は $\sigma=c$ タイプの完全塑性体と $\sigma=c \epsilon^m$ タイプの粘塑性体に絞られる。しかし、表 3 より m が大なるほど速度効果と拘束効果による増圧能力が急増するので、少なくとも $h_p/r_2 \leq 0.7$ 程度の浅物の成形あるいは穴あけ加工に対しては、後者タイプで c および m が大きい媒体が望ましいといえる。この種の媒体の開発は本法を実用化するうえでのキーポイントになると思われる。一方、3・4 節で述べたように、深物成形に対する媒体の適性は h_p/r_2 に依存するので、 h_p/r_2 、加工速度、 m および C の最適な組合せについて、なお系統的な検討を要すると考える。

4. 新しい応用の試み

本提案の加工法の特徴として、比較的高速であること、高圧の発生が容易なこと、加圧面積が小さいこと、高圧力ふん囲気があること、ポンチおよびしわ押さえが不要なこと、などが挙げられる。これらの特徴を活用した新しい応用として、以下の加工を試みた。いずれもシリコンポリマによる拘束圧縮を採用した。

厚さ 0.01 mm の SK3 はく（箔）に幅 0.1 mm、長さ 4.8 mm のスリットを加工した場合の外観およびその断面写真を図 12(a) に示す。本加工法の穴あき機構は押し出しと引張り曲げ下における破断によるので、断面写真にみるように、分離面近傍にだれが観察される。しかし、スリット幅のばらつきは 0.005 mm 程度でかなり小さいことが分かった。これと同じ SK3 はくに直径 0.3 mm の丸穴を加工した結果を図 12(b) に示す。せん断加工による小寸法の穴あけに関しては、通常法では 1.0 mm までが、また、ストリッパガイド形では 0.4 mm までが実施されている⁽⁴⁾。しかし、本法はこれ以下の寸法でポンチの製作あるいは使用が困難な場合の穴あけに適用できることが分かった。

図 12(c) は、厚さ 0.15 mm のガラス板（顕微鏡標本用カバーガラス）に直径 1 mm の丸穴を加工した例を示すものである。ポンチとダイスを用いる通常法でも試みたが成功しなかった。本加工法の有効な理由の一つとして、ダイス穴周辺部の高圧力ふん囲気により、クラックの発生ならびに伝ばがダイス穴ごく近傍に局限されることが考えられる。従来、せん断加工に

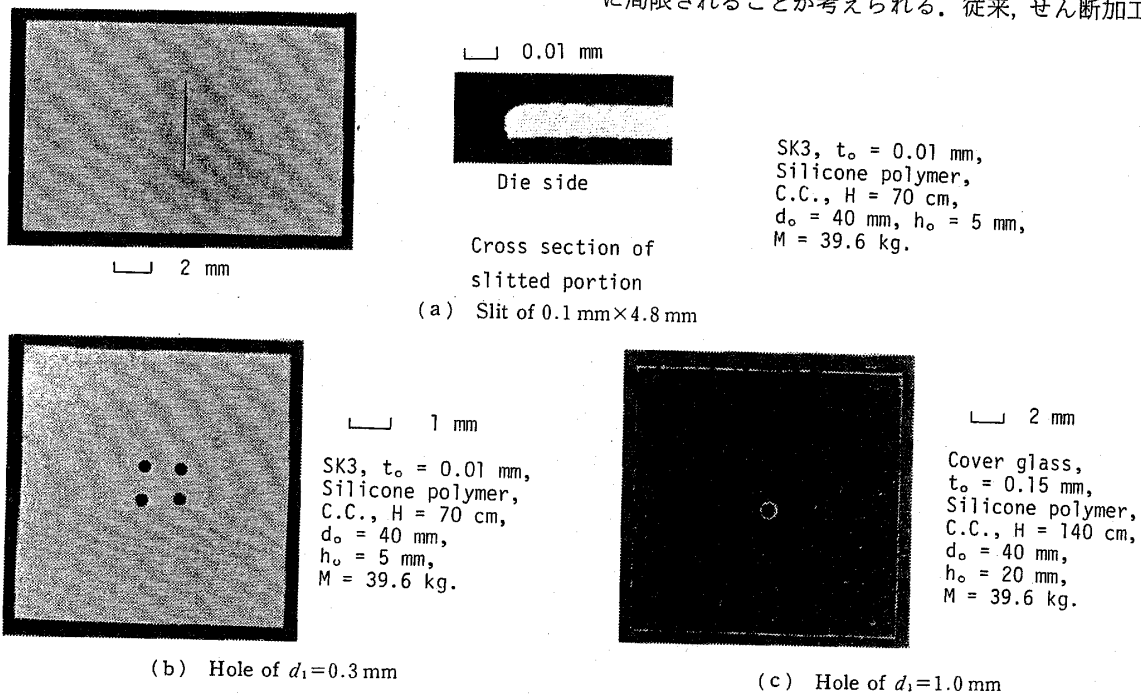


図 12 微小穴あけ加工およびガラス板の穴あけ加工の実例

よりガラス板に穴あけを行った事例は報告されていない。

5. 結 論

本研究で得られた結論は次のとおりである。

(1) 加圧方式としては、発生圧力が大きく、分布も均一な点で、拘束圧縮がもっとも優れている。

(2) 平行平板による圧縮試験は、穴あけ加工および $h_p/r_2 \leq 0.7$ 程度の浅物の張出し成形に対するシミュレーション試験として利用できる。ここに、 h_p は張出し深さ、 r_2 はダイス穴半径である。

(3) 構成式 $\sigma = c\epsilon^m \epsilon^n$ からみた媒体の適性は次のとおりである。穴あけ加工および上記浅物成形に対しては、 C および m が大きい粘塑性体が適している。しかし、 h_p/r_2 が大きくなるほど m および n が小さい完全塑性的性質をもつ媒体が有利となる。

(4) 現在のところ、 m が大きく速度効果ならびに拘束効果による増圧能力に優れたシリコンポリマ ($p_{cc}/\sigma_s \approx 1500$, p_{cc} は拘束圧縮における最大圧力、 σ_s は低速圧縮応力) が推奨できる。

(5) 微小穴あけ加工、ガラス板の穴あけ加工など、従来のせん断加工では困難な穴あけに本加工法が利用できることが分かった。

本研究の一部は、昭和57年度文部省科学研究費(一般研究C)の助成により実施された。

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) 山口・ほか3名, 機論, 50-452, C (昭59), 707.
- (4) 日本塑性加工学会編, プレス加工便覧, (昭50), 167, 丸善.

討 論

〔質問〕 福田正成

〔京都工芸繊維大学工芸学部〕

穴あけの可否および張出し(深さ)の評価に際して、ダイス穴半径の1/2より内側における圧力値 p を用いておられるが、このように特に圧力発生位置を指定された理由をご教示願いたい。

〔回答〕 Friction-hill により圧力こう配が存在

するものの、穴あけの可否ならびに張出し深さは、主としてダイス穴径程度の範囲内で板に加わる全圧力に支配されるとの考え方に立って、本研究では一つの目安としてこの範囲(ダイス穴半径の1/2より内側でなく)における平均圧力を評価の基準として採用している。