

粘塑性体を圧力伝達媒体とした材料加工法\*  
(硬脆材料の穴あけへの応用)黒崎 靖\*<sup>1</sup>, 藤城 郁哉\*<sup>1</sup>  
水草 孝\*<sup>2</sup>, 三宅 慶幸\*<sup>3</sup>A Manufacturing Process Using Impact Compression  
of a Viscoplastic Pressure Medium  
(Application to Piercing of Brittle Sheets)Yasushi KUROSAKI, Ikuya FUJISHIRO,  
Takashi MIZUKUSA, and Yoshiyuki MIYAKE

Piercing of brittle sheets, difficult by conventional shearing or drilling, is attempted using a new manufacturing process utilizing the impact compression of a viscoplastic pressure medium, recently proposed by the authors. The impact pressure is analysed with the linear viscoelastic model to determine optimum working conditions. Under a specific condition the process has succeeded in piercing a circular hole through various brittle materials: for example, inorganic glass, alumina ceramic and glassy graphite composite. The hole formation process in a glass sheet is examined experimentally and theoretically.

**Key Words:** Nontraditional Processing, Special Piercing, Brittle Materials, Viscoplastic Pressure Medium, Drop Hammer, Dynamic Contact Pressure

## 1. 緒 言

著者らの一部はこれまで、粘塑性体を圧力伝達媒体とする材料加工法を提案し、極薄板の成形<sup>(1)</sup>、微細穴あけ<sup>(2)(3)</sup>などの特殊加工に有用であることを示してきた。本研究では新しい応用として、近年ニーズが高まっているガラス板、セラミック板など難加工硬脆材料の穴あけに本法が適用できる可能性を検討する。

加工の実施例を図1に示す。無定形の粘塑性圧力媒体をドロップハンマ装置により衝撃圧縮し、その際発生する高圧力によりダイス穴部材料内に脆性破壊を生ぜしめて貫通穴を得ると同時に、板押さえ部においてはクラックの発生、伝ばの抑制をねらう。高圧力場と脆性破壊の組合せを材料加工に活用する考え方は、本研究以外に佐藤らのディスクングの研究<sup>(4)</sup>、山口らの圧力付加せん断加工の研究<sup>(5)</sup>などに見受けられる。本加工法の場合、加工速度  $v$  は数 m/s 以下、圧力持続時間  $t_h$  は ms のオーダーで、放電成形 ( $v=15\sim 200$  m/s,

$t_h=$ 数  $\mu$ s) などに比べれば低速加工といえるが、本質的には衝撃圧を利用すること、ポンチが不要なこと、穴形成と板押さえへの負荷が同時であること、などの点が山口らの方法と異なる。

## 2. 発生圧力の解析

2.1 仮定 穴あけ加工条件を設定する必要から、発生圧力の解析を行った。採用した計算モデルを図2

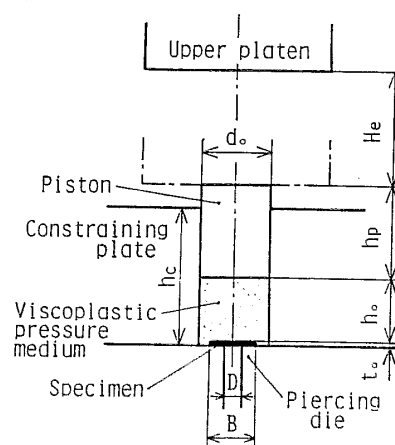


図1 粘塑性体の衝撃圧縮を利用した穴あけ加工の説明図

\* 昭和60年10月8日 第36回塑性加工連合講演会において講演、原稿受付 昭和61年10月27日。

\*<sup>1</sup> 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

\*<sup>2</sup> 准員、日本特殊陶業(株) (〒485 小牧市大字岩崎2808)。

\*<sup>3</sup> 三重大学大学院。

に示す。簡単のため、被加工材およびダイス穴を省略し、円柱形媒体を密閉状態で衝撃圧縮（一次元変形、 $\epsilon_r = \epsilon_\theta = 0$ ）する問題を扱う。工具はすべて剛体、媒体は線形粘弾性体とする。ハンマ体は高さ  $H_e$  より落下し、速度  $v_0$  でピストンに衝突後これと一体となって媒体を圧縮すると仮定する。結果的には、本実験条件では粘性項を無視できることがわかったので、厳密な取扱いは弾性液柱の衝撃圧縮<sup>(6)</sup>あるいは弾性棒の一次元衝撃<sup>(7)</sup>の理論に準じて行うことができる。しかし本実験条件では、 $\alpha = h_0 \rho A / M'$ （ここに、 $h_0$ は媒体の高さ、 $A$ はその断面積、 $\rho$ は密度、 $M' = M + m$ 、 $M$ 、 $m$ はハンマ体およびピストンの質量）は  $10^{-5}$  のオーダーできわめて小さいので、初等的取扱いで十分と考えられる<sup>(7)</sup>。よって以下では、波の伝ば過程を考慮せず、あらゆる瞬間に応力およびひずみは一様に分布すると仮定する。

**2.2 基礎式および解法** 線形粘弾性体の構成式の一般形は次のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{形状変化に対して } p'S = Q'E \\ \text{体積変化に対して } p''s = Q''e \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $p'$ 、 $p''$ 、 $Q'$ 、 $Q''$  は微分演算子、 $S$ 、 $E$  はそれぞれ偏差応力および偏差ひずみ、 $s$ 、 $e$  はそれぞれ平均応力および平均ひずみである。形状変化に対して Maxwell モデル、体積変化に対して弾性体モデルを適用すれば、式(1)は3要素モデル式と等価な次式になる。

$$K\epsilon_z + a\dot{\epsilon}_z = \sigma_z + b\dot{\sigma}_z \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\sigma_z$ 、 $\epsilon_z$  はそれぞれ  $z$  軸方向の応力およびひずみ、ドット・は時間微分、 $a$ 、 $b$ 、 $K$  は材料定数である。ハンマ体の運動方程式は次式にて表される。

$$M'\dot{v} = A\sigma_z + M'g \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $g$  は重力の加速度、 $v$  はハンマ体の速度である。ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_z$  は

$$\dot{\epsilon}_z = -v/h = -v/(h_0 e^{\epsilon_z}) \dots\dots\dots (4)$$

である。ここに、 $h_0$ 、 $h$  はそれぞれ媒体試験片の初期お

よび変形後の高さである。 $t$  を経過時間として  $\epsilon_z = \Delta(t)$  の単位ステップひずみを加えた場合を考えると、式(2)より緩和弾性率  $Y(t)$  は  $t \geq 0^+$  に対して

$$Y(t) = K\{1 - \exp(-t/b)\} + (a/b) \exp(-t/b) \dots\dots\dots (5)$$

となる。ボルツマンの重ね合わせの原理<sup>(8)</sup>より

$$\sigma_z = \int_0^t Y(t-\tau) \frac{d\epsilon_z}{d\tau} d\tau \dots\dots\dots (6)$$

となる。 $t=0$  においてステップひずみ  $\Delta\epsilon_z = -0.002$  を与え、 $\Delta\tau = 0.2$  ms の時間間隔で差分法により式(2)~(6)を解いた。万能試験後により  $\dot{\epsilon}_z$  を変更した密閉圧縮試験を行い、 $b$  を測定した結果、 $b \approx 8$  s であった。一方、本実験条件では  $t$  は ms のオーダーであるから、 $t/b \ll 1$  なるゆえ、式(5)より  $Y \approx a/b$  として計算を行った。ここに、 $a/b = K + (2/3)E_s$ 、 $K$  は体積弾性率、 $E_s$  は形状変化の弾性率である。実際には媒体のもれ、弾性波の散逸などにより発生圧力は低下する。ここでは簡便法として、各圧縮段階において力積効率  $\eta$  を導入し、 $\eta = p_{th} A \Delta\tau / \Delta(M'v) = p_{th} A \Delta\tau / (-\sigma_z A \Delta\tau) = -p_{th} / \sigma_z$  より

$$p_{th} = -\eta \sigma_z \dots\dots\dots (7)$$

にて発生圧力  $p_{th}$  を算出した。

**2.3 計算結果** 後述のシリコンポリマの媒体を対象に算出した  $p_{th}-t$  曲線の例を図3に示す。図3には、前報<sup>(3)</sup>と同じ測圧ピン装置による実験値も記入してある。装置の詳細は前報に譲るが、受圧部の直径 3 mm のピンを下部圧縮板中に組み込み、圧力センサには水晶式圧電形ロードワッシャ（最大容量 118 KN, 固有振動数 55 KHz）を使用した。圧力信号はいったんトランジェントメモリ（8 bit, 2048 word）に記憶させ、圧縮完了後にペンレコーダ上に書き出され

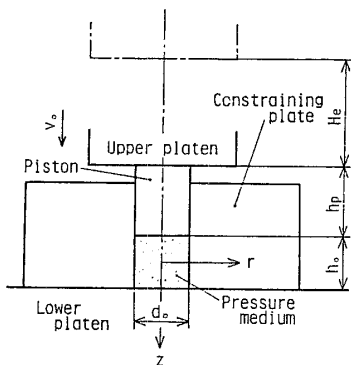


図2 発生圧力の計算モデル

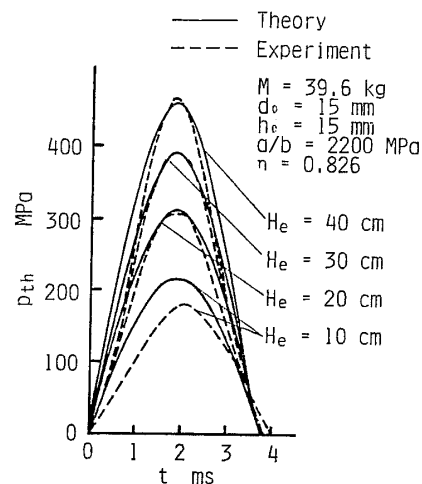


図3 発生圧力の理論値と実験値の比較

た。弾性率  $a/b$  は圧縮完了時間が実験値と一致するように定め、 $M=39.6$  kg,  $H_e=20$  cm,  $d_0=h_0=15$  mm の条件より  $a/b=2200$  MPa を得た。また、 $\eta$  は同じ圧縮条件で記録した圧力-時間線図より測定し、 $\eta=0.826$  とした。図 3 より、上記計算がある程度有効であることがわかる。 $p_{th}$  に及ぼす影響因子を検討した結果、ハンマ体有効高さ  $H_e$  および質量  $M$ 、弾性率  $a/b$ 、媒体の高さ  $h_0$  および直径  $d_0$  などを変更することにより、圧力のピーク値  $p_{max}$  および圧力持続時間を幅広く制御できることがわかった。一例として、 $p_{th}$  と  $a/b$  の関係を図 4 に示す。後述穴あけ加工条件 ( $M=39.6$  kg,  $h_0=d_0=15$  mm) に対して得られた  $p_{max}$  と  $H_e$  の関係を図 5 に実線にて示す。図 5 には、媒体の中心および 5 mm の半径位置において測定した実験値もプロットしてある。図 5 より、 $p_{max}$  の見積もりに本計算が有効なこと、および friction-hill が小さいことがわかる。また、図 5 には Boussinesq の式<sup>(9)</sup>より  $p_{max}=\eta v_0 \sqrt{\rho a/b} (\sqrt{M'/(h_0 \rho A)} + 1)$  にて算出した値も破線にて示してあるが比較的有効であることがわか

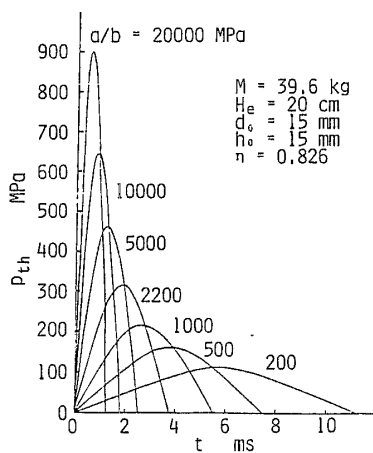


図 4 発生圧力  $p_{th}$  に及ぼす弾性率  $a/b$  の影響

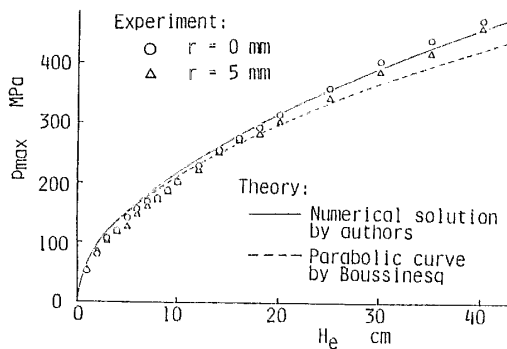


図 5  $p_{max}$  と  $H_e$  の関係 ( $M=39.6$  kg,  $h_0=d_0=15$  mm)

る。

### 3. 穴あけ加工実験

**3.1 実験条件** 衝撃試験装置としては、自家製の自由落下式ドロップハンマ装置を用いた。ハンマ体質量  $M$  を 39.6 kg で一定とし、有効高さ  $H_e$  を変更した。圧力容量としては、加工工具の強度より  $p_{max}=500$  MPa とし、前述計算(図 5)より  $H_e \leq 40$  cm とした。圧力媒体には、前報<sup>(3)</sup>と同じシリコンポリマ(信越化学製, KE-SAP 1, 密度  $\rho=1.1$  g/cm<sup>3</sup>, 25°C でのフロースタ粘度 = 5 000 Pas) を採用した。媒体試験片は円柱形で、直径  $d_0$ 、高さ  $h_0$  とともに 15 mm とした。ピストンおよび拘束板には SK 3 材 (焼入れ,  $H_v=780$ ) を使用し、ピストンの高さは 20 mm, 拘束板穴壁とピストンの間のすきまは 0.01 mm とした。穴あけ用ダイスには市販のもの (SKD 11,  $H_{RC}=60\sim 62$ ) を使い、穴形状は丸穴、穴径は 6 種類 (公称径  $D=1, 2, 3, 4, 5, 6$  mm) とした。被加工材料としては、ホウケイ酸ガラス板 (公称板厚  $t_0=0.15$  mm, 曲げ強さ  $\sigma_b=122$  MPa), ソーダ石灰ガラス板 ( $t_0=1.0$  mm,  $\sigma_b=92$  MPa), GC コンポジット板 (ガラス状グラファイト複合材料,  $t_0=0.4$  mm,  $\sigma_b=73$  MPa) およびアルミナ板 ( $t_0=0.6$  mm,  $\sigma_b=437$  MPa) の 4 種類を使用した。試験片は一辺の長さ 10 mm の正方形板とし、その製作には精密切断機を用いた。穴あけ試験には潤滑剤を使用せず、実験のつどアセトンにてすべての工具を脱脂した。

**3.2 実験結果** 貫通穴を形成した場合の例を図 6 に示す。いずれもダイス側および媒体側より眺めた外観が示されている。厚さが比較的薄いホウケイ酸ガラス板と GC コンポジット板の場合、良好な穴が形成されている。しかし、比較的厚いソーダ石灰ガラス板およびアルミナ板の場合、ダイス側ではほぼ正確にダイス穴が転写されるものの、媒体側ではこれより小さな穴となり、テーパ穴が形成されることがわかる。ソーダ石灰ガラス板に見られる白色部分 [図 6 (b)] はテーパ穴壁に相当し、この近辺にクラックが残留している。

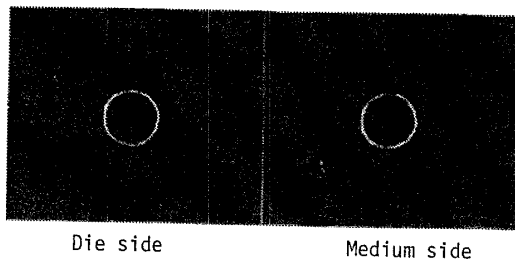
上述貫通穴の形成は、特定の  $D$  で、一定の  $H_e$  を超えた場合のみ可能であった。この条件は次のようにして調べた。 $H_e \leq 40$  cm の範囲で 2 cm 間隔で  $H_e$  を変化させ、すべての  $D$  との組合せに対してそれぞれ 3 回の穴あけ試験を実施した。2 回以上穴あけが成功した場合の穴径  $D$  と臨界ハンマ体高さ ( $H_e$ )<sub>cr</sub> をまとめて表 1 に示す。また、加工不良の例をスケッチにて図 7 に示す。ソーダ石灰ガラス板およびアルミナ板の場

合  $D \leq 3 \text{ mm}$  での加工は達成できなかった。これは圧力不足によるもので、せいぜいタイプ(a) (板押しえ部圧力不足) もしくは(b) (破壊圧力不足) の不良にとどまった。また、いずれの材料でも  $D$  が大きくなるとタイプ(c) もしくは(d) の不良が生じ、やはり穴あけが不成功となった。この理由については、4・2節において考察する。一方、加工可能な  $D$  においても、 $H_e < (H_e)_{cr}$  のとき(a)~(c) の不良が混在した。なお、試みに万能試験機を用いて低速加工により穴あけを行ったとこ

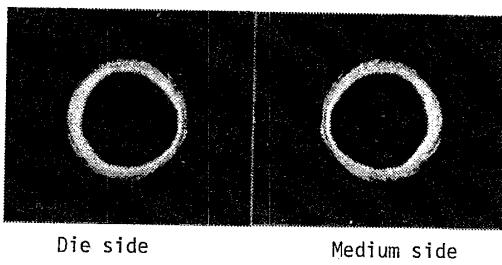
ろ、常に(c)の不良が生じ、結局、穴あけが可能なのは高速加工に限られることがわかった。

穴あけが成功した場合について、加工に要する圧力  $(p_{max})_{cr}$  の  $\sigma_b$  に対する相対値と穴径比  $D/t_0$  との関係性を調べた結果を図8に示す。 $(p_{max})_{cr}$  は、表1の  $(H_e)_{cr}$  を図5の関係を用いて圧力に換算したものである。また、図8には参考のため、金属はく(SK3はく)の穴あけ<sup>(3)</sup>の場合の  $(p_{max})_{cr}$  も引張強さ  $\sigma_T$  に対する相対値として示してある。限られたデータからではあるが、図8より、 $D/t_0$  が5より小さくなると  $(p_{max})_{cr}/\sigma_b$  は急増すること、 $D/t_0=6$  のときでも  $\sigma_b$  オーダの圧力が必要なこと、比較の基準が異なるが、金属はくに比べて硬ぜい材料の  $(p_{max})_{cr}/\sigma_b$  が著しく大きく、圧力の点で加工難度がより高いこと、などがわかる。

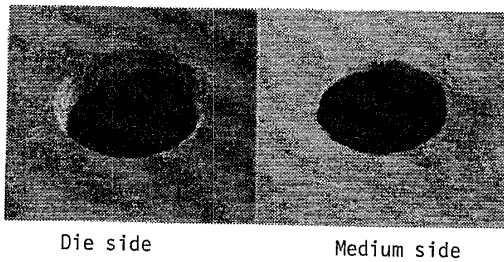
3・3 クラックの発生状況の観察 ソーダ石灰ガラスを用い、 $D=4 \text{ mm}$  において  $H_e$  を変化させてクラックの発生状況を観察した結果を図9(a)~(e)に示す。図9の上部の写真は試験片の断面写真(上部が媒体側)であり、下部の写真はダイス側[図9(a)]も



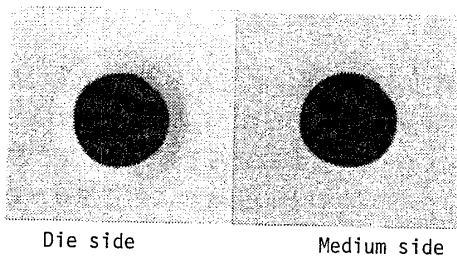
(a) Borosilicate glass,  $t_0=0.15 \text{ mm}$ ,  $D=2 \text{ mm}$ ,  $H_e=6 \text{ cm}$



(b) Soda-lime glass,  $t_0=1 \text{ mm}$ ,  $D=4 \text{ mm}$ ,  $H_e=38 \text{ cm}$



(c) G C composite,  $t_0=0.4 \text{ cm}$ ,  $D=2 \text{ mm}$ ,  $18 \text{ cm}$



(d) Alumina,  $t_0=0.6 \text{ mm}$ ,  $D=5 \text{ mm}$ ,  $H_e=30 \text{ cm}$

図6 穴あけの実施例

表1 穴あけが成功した加工条件

Materials	D mm	D/t <sub>0</sub>	(H <sub>e</sub> ) <sub>cr</sub> cm	(p <sub>max</sub> ) <sub>cr</sub> /σ <sub>b</sub>
Borosilicate glass	1	6.7	8.0	1.42
	2	13.3	6.0	1.22
Soda-lime glass	4	4.0	38.0	4.82
	5	5.0	16.0	2.97
G C composite	1	2.5	14.0	3.46
	2	5.0	2.0	1.14
	3	7.5	2.0	1.14
Alumina	4	6.7	34.0	0.96
	5	8.3	26.0	0.81

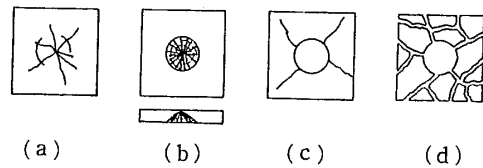


図7 加工不良の例

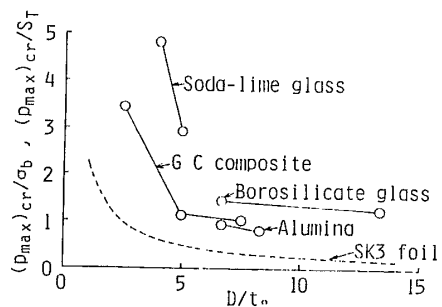
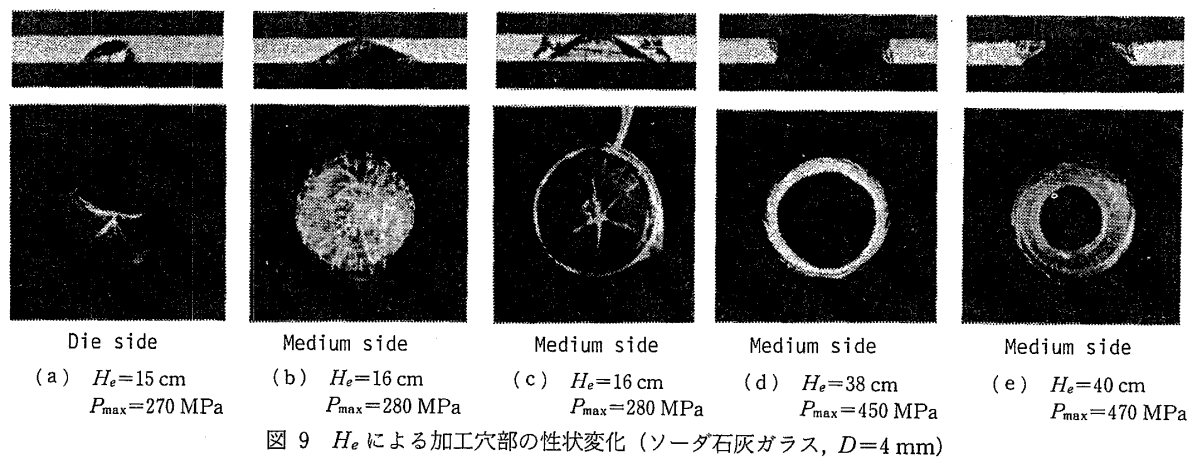


図8 加工に要する圧力  $(p_{max})_{cr}$  と穴径  $D$  の関係

図9  $H_e$ による加工穴部の性状変化(ソーダ石灰ガラス,  $D=4$  mm)

しくは媒体側〔図9(b)~(e)〕より撮影したものである。

$H_e$ が小さいとき, ダイス側下表面中心部より放射状にクラックが発生し, 球冠状の伝ば域が形成される〔図9(a)〕。 $H_e$ が増加するとこの領域は円すい台状に拡大し〔図9(b)〕, 新たにダイス穴に近い半径位置で試験片上・下表面より板面にほぼ垂直にクラックが発生する〔図9(c)〕。しかし, これらは互いに会合したり, 板厚方向に貫通するまでに至らず停留している。 $H_e$ をさらに大きくし,  $p_{max}$ を高めると, 円すいクラック面と垂直クラック面に囲まれた領域においてクラックの貫通が起き, 穴が形成される。貫通面がいずれのクラック面に近いかにより, ストレート穴となったりテーパ穴となったりする〔図9(d), (e)〕。もちろん加工穴としては前者が望ましいが, 現在のところ再現性良くこれを実現させるまでに至っていない。

#### 4. FEM解析による検討

静的に加圧した場合どのようなクラック発生の可能性が存在するかについて, 軸対称弾性FEM解析を用いて検討した結果を以下に述べる。

**4.1 計算条件** 円板に丸穴をあけることを想定した計算モデルを図10に示す。材料はガラス板とし, 円板の直径 $B=10$  mm, 厚さ $t_0=1.0$  mm, ヤング率 $E=6.9 \times 10^4$  MPa, ポアソン比 $\nu=0.21$ , 引張破壊応力 $\sigma_f=98$  MPaとした。境界条件としては, 円板の上面および側面に一様圧力 $p$ が加わるとし, ダイス角の節点を固定した。また, ダイスとの接触部は摩擦がなく, 半径方向に自由に変位できるものとした。要素数は240, 節点数は145とした。

**4.2 計算結果および考察**  $D=4$  mmおよび6 mmにおける静水圧 $\sigma_h$ の分布を図11(a), (b)に示す。図11では試験片の半分が示されており,  $\sigma_h/p < 0$ は引張りを意味する。図10中に示す矢印は, 中間主応

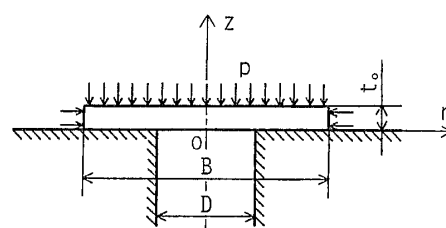


図10 FEM解析モデル図

力 $\sigma_2$ が破壊に影響しないと仮定してGriffithの理論より算定したクラックの発生方向<sup>(10)</sup>である。また, 代表的な要素A~Hの応力状態を主応力平面( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ 平面,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )上にプロットした結果を図12(a), (b)に示す。図12は要素AがGriffithの破壊限界に到達したときの応力状態であり, それぞれの要素が破壊限界に達するに要する圧力 $p_{cr}$ も示してある。これらの図より次のことが言える。

(1) 要素Aの $\sigma_h/p$ および $P_{cr}$ がもっとも小さく, ここにおいてもっとも早期にクラックが発生する可能性がある。

(2) 図11(a)より, 要素Gの上表面に向かうクラックによりテーパ穴が, また, 要素D~Fにおける板面にほぼ垂直なクラックの会合によりストレート穴が形成される可能性がある。しかし, そのためにはかなり大きな圧力を要する。

(3) 図11(b), 12(b)より,  $D=6$  mmの場合, 板押さえ部の特定箇所, (例えば要素H)では $\sigma_h/p < 0$ ,  $\sigma_1 > \sigma_3 > 0$ であり, 穴形成に先行して小さな圧力で破壊を生ずる可能性が高い。

上記項目(1)および(2)は定性的に前述実験結果と対応している。しかし, 定量的には速度効果を見逃した影響は, 要素Aの $P_{cr}$ の計算値が実験値より異常に小さい(図12(a)および図9(a)参照)など各所に現われている。

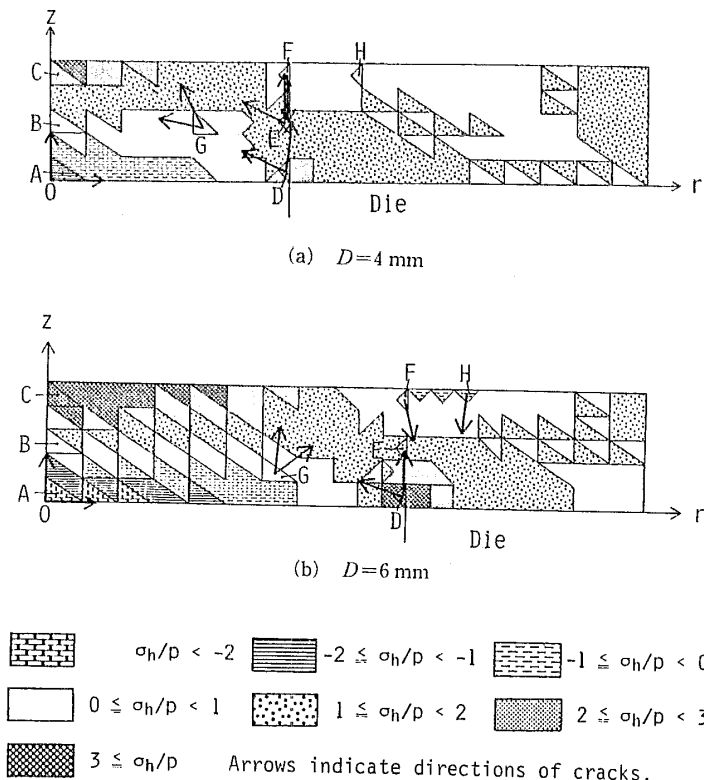


図 11 静水圧  $\sigma_h$  の分布 (FEM 計算値)

また、(1)に関連して次のことが推論される。圧力をゆっくり増加させるとき、まず、点0を起点とした放射状クラックが発生する。しかし、この時点では試験片下表面および板押さえ部の  $\sigma_h$  は小さいので、クラックは板押さえ内部まで伝ばし、結局、図7にみた不良(a)の結果となる。これが低速加圧で穴あけが成功しない理由である。一方、本実験のように昇圧速度を高め、このクラックが発生・伝ばする時間内に、その抑制に足る  $\sigma_h$  を板押さえ部に発生できれば、穴あけを達成できると考えられる。また、(3)の結果から類推すると、前述のように、 $D$  が大きくなると穴あけが困難になるのは、結局、板押さえ部における応力場が引張側へ移行してクラック抑制効果が失われるか、あるいはここがクラック発生源になるためと考えられる。

### 5. 結 論

本研究で得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 線形粘弾性モデルによる発生圧力の見積もり方法を提示し、これが有用であることを確かめた。

(2) 特定の穴径に限られるが、採用した2種類のガラス板、GCコンポジット板、アルミナ板に貫通穴

を加工できた。

(3) 加工穴の性状に関しては、程度の差はあれテーパー穴となり、板厚が厚いほどこれが顕著になることがわかった。よって本加工法は、薄い材料への適用もしくは仕上げを前提とした粗加工として利用するのが望ましい。

(4) FEM解析を行い、加工圧力とクラック発生挙動との関係を調べた結果、おおむね実験結果を理解することができた。また、穴径が大きくなると穴あけが不成功となるのは、板押さえ部における圧縮応力の減少もしくは引張応力の発生に起因すると解釈された。そして、この問題の解決が本加工法の実用化への鍵になると考えられた。

### 文 献

- (1) 山口・ほか3名, 機論, 50-452, C (昭59), 757.
- (2) 黒崎・ほか2名, 機論, 51-465, C (昭60), 1058.
- (3) 黒崎・ほか3名, 機論, 52-480, C (昭61), 2272.
- (4) 佐藤, 材料の強度と塑性, (昭55), 208, 森北出版.
- (5) 山口・ほか3名, 機講論, No. 840-15 (昭59), 216.
- (6) Donaldson, I. S., ほか2名, *Int. J. Mech. Sci.* 6(1964), 153.
- (7) Timoshenko, S. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, (1951), 438, Mc Graw-Hill.
- (8) 山田, 塑性・粘弾性, (昭59), 179, 培風館.
- (9) 文献(7)の, 451ページ.
- (10) 横堀, 材料強度学, (昭42), 90, 技報堂.

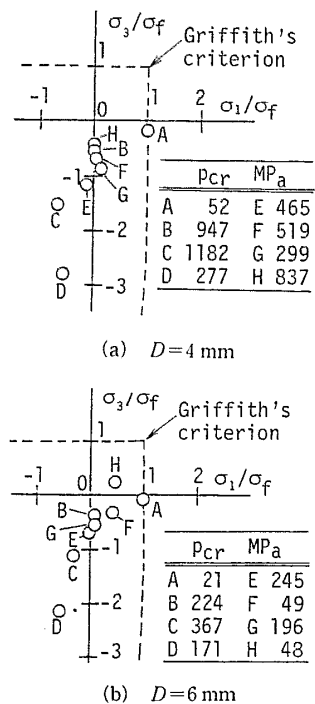


図 12 各要素の応力状態 (FEM 計算値)

## 討 論

〔質問〕 松尾 陽太郎〔東京工業大学工学部〕

硬脆材料の有用な新加工法を開発されたことに敬意を表す。なお、下記についてご意見をお伺いしたい。

(1) 2・3節「弾性率  $a/b$  は圧縮完了時間が実験値と一致するように定め」とあるが、その根拠をお教えいただきたい。また、 $k$  が既知であるので、このことは  $E_s$  を上述の実験により定めることに相当するが、本来は直接  $E_s$  を定めるべきではないか。

(2) 質問というよりコメントというべきだが、著者自身も述べておられるように、図7～9の現象を定量的に把握するには動的な解析、特にき裂の動力学による解析が必要と思われる。

〔回答〕 (1) 圧縮完了時間を採用した理由は、これがハンマ体有効高さ  $H_e$  の影響をあまり受けず、

弾性率  $a/b$  が敏感に反映する物理量と考えられたことによる(図3および図4参照)。ご指摘のように、 $E_s$  などの材料定数は何らかの基礎的試験によって直接決定するのが本筋と思われる。しかし、高分子媒体の機械的性質の圧力ならびにひずみ速度依存性、採用した構成関係式の適用性を考慮すると、できるだけ実験条件に近い高圧力および高ひずみ速度の環境下において材料試験を実施する必要がある。本実験の範囲内でこの問題をカバーすることは困難なため、簡便法を採用した。

(2) コメントに感謝する。ご指摘の点は、加工条件の正確な設定、加工性の改善などに不可欠と思われる。