

## 粘塑性圧力媒体の衝撃圧縮を利用したガラス板の穴あけ加工法\*

黒崎 靖\*<sup>1</sup>, 藤城 郁哉\*<sup>1</sup>  
三宅 慶幸\*<sup>2</sup>, 古川 泰士\*<sup>2</sup>A Piercing Technique of Glass Sheets by the Impact Compression  
of a Viscoplastic Pressure MediumYasushi KUROSAKI, Ikuya FUJISHIRO,  
Yoshiyuki MIYAKE, and Yasushi FURUKAWA

Piercing of a circular hole through glass sheets, difficult by conventional punching or drilling, is investigated by a manufacturing process using the impact compression of a viscoplastic pressure medium. Since the original method previously proposed by the authors is not available for a larger aspect ratio, an improvement on it is attempted. Two techniques are proposed for this purpose: a method based on the delay phenomenon in the elastic response of the specimen and a differential pressurizing method. As the result, both are shown to be useful. The latter method is also effective to improve the accuracy of the formed hole.

**Key Words:** Nontraditional Processing, Special Piercing Technique, Glass Sheets, Viscoplastic Pressure Medium, Impact Pressure, Drop Hammer

## 1. 緒 言

近年, 新素材の開発が活発化するに伴い, 硬脆材料の加工が問題になってきた。この種のいわゆる難加工材料に対する加工法としては, 現在, 砥石, ダイヤモンド工具などによる切削加工, 高圧水ジェット加工, 放電加工, 高エネルギー密度ビーム加工, などが採用されているが, 生産性あるいは経済性の点からその用途は限られる。金属材料に対するプレス加工のように生産性に優れ, あるいはドリル加工のように簡便な加工法が開発されれば, 硬脆材料の用途拡大に役立つと思われる。

本研究では, このような可能性を探る第一段階として, ガラス板の穴あけの問題を取り上げる。穴あけ方法としては, 先に著者らにより提案された粘塑性体の衝撃圧縮を利用する手法(以下, O法と呼ぶ)<sup>(1)~(3)</sup>に改善を加える。この方法の説明を図1に示す。無定形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形成する。一方, 板押

え部においては, クラックの伝ばあるいは発生を抑制することをねらう。このように, 高圧力場と脆性破壊を材料加工に活用する考え方は, 本研究以外に佐藤のディスクングの研究<sup>(4)</sup>, 山口らの圧力付加パンチングの研究<sup>(5)</sup>などに見受けられる。

前報<sup>(3)</sup>では, O法の原理的な問題点として, アスペクト比(穴径 $D$ と試験片板厚 $t$ の比)が大きくなると穴あけが困難になることが指摘された。本報ではこの問題を解決する加工原理を提示し, その妥当性を調べ

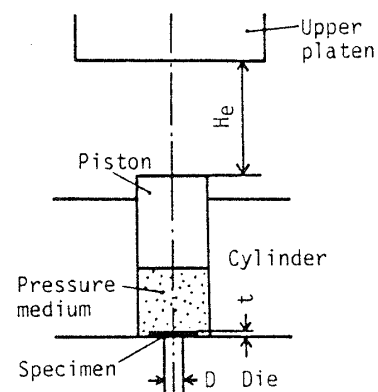


図1 粘塑性体の衝撃圧縮を利用した穴あけ方法(O法)

\* 昭和62年11月3日 北陸信越支部北陸地方学術講演会において講演, 原稿受付 昭和62年2月23日。

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

\*<sup>2</sup> 学生員, 三重大学大学院。

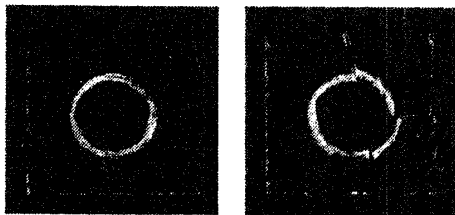
る。

## 2. 加工原理

**2.1 改善の方針** 後述のソーダ石灰ガラス板について、O法により得られた穴あけの成功と失敗の例を図2(a)および(b)に示す。図(b)にみるように、O法では、比較的小さいアスペクト比(=5)においてもダイス面上の材料内(以下、板押え部と称する)にクラックが侵入し、穴あけが不成功となることがある。前報<sup>(3)</sup>では、アスペクト比が大きいほどこの確率が增大すること、および、その原因として板押え圧力が不足することが挙げられた。よって本研究では、板押え圧力の向上策をはかることにした。その方法には種々考えられるが、ここではできるだけ簡易な方法という観点から、新しい手法を二つ考案した。以下に、その原理について述べる。

### 2.2 弾性応答の遅延現象を利用する方法(C法)

O法では、穴部材料内で破壊が生ずる時点の加圧力



(a) Successfully pierced (b) Failure

Soda-lime glass,  $t=1$  mm,  $D=5$  mm,  
 $H_c=18$  cm.

図2 O法による穴あけの成功と失敗の例

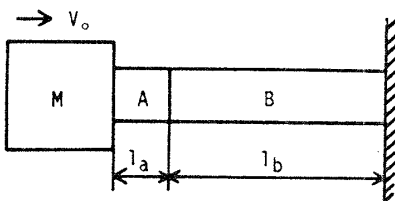


図3 弾性棒の縦衝撃の計算モデル

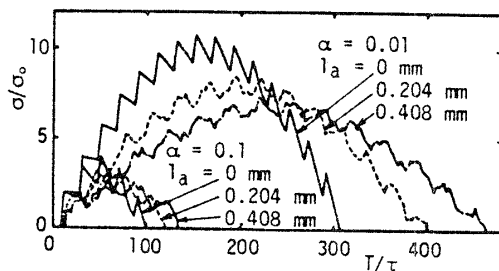


図4 弾性棒の縦衝撃における緩衝効果(理論値)

が板押え圧力とみなせるので、加圧過程で穴部材料の弾性応答を遅延できれば、そこでの破壊時期は遅れ、したがって相対的に板押え圧力は増加することになる。応答の遅延策として、ここでは緩衝材を用いる手法を採用する。まず、簡単な計算モデルおよび模擬実験によりその効果を調べる。

**2.2.1 弾性棒の縦衝撃における緩衝効果** 図3に示すように、一端が固定された均一断面の弾性棒Bの他端に、これと同一断面の緩衝材A(弾性体)を介して重錘(剛体)が取付けてあり、重錘に初速度 $v_0$ の縦衝撃を与えるものとする。A材をアルミニウム、B材を軟鋼とし、両者は境界面で密着していると仮定する。付録に示す方法により、固定端における応力 $\sigma$ を計算した結果を図4に示す。図の縦軸は $\sigma$ を基準応力 $\sigma_0$ で割った相対値にて、また横軸は衝撃後の経過時間 $T$ の基準時間 $\tau(=2 \times 10^{-8}$  s)に対する相対値にて、それぞれ示されている。図のいずれの場合も $v_0$ は同じとし、 $\sigma_0 = -\rho_b c_b v_0 = -1$  MPaとなるように選ばれている。ここに、 $\rho_b$ はB材の密度、 $c_b$ はB材の弾性波の速度である。計算では $l_b = 1.04$  mmで一定とし、 $l_a$ を変更した( $l_a = 0, 0.204, 0.408$  mm)。パラメータ $\alpha$ は、 $\alpha = A_0 l_b \rho_b / M$ を表し、今 $l_b$ が一定ゆえ、これが小さいことは応答の遅い系を意味する。ここに、 $A_0$ は棒の断面積、 $M$ は重錘の質量である。

図4によれば、 $l_a$ が長いほど応答が遅れ、 $\sigma/\sigma_0$ も全体的に低下すること、およびこの現象は応答の遅い系ほど顕著になることがわかる。また、ここには示さないが、A材のヤング率が小さいほど遅延が大きいこともわかった。以上の結果より、衝撃端に緩衝材を配置することが応答の遅延に有効なことが結論される。しかし、穴あけのような負荷様式や境界条件の異なる系に対して有効か否かに疑問が残るが、実際の穴あけ条件に対して確かめることは困難である。よって、次のような模擬実験を採用して定性的傾向を調べることにした。

**2.2.2 緩衝効果の模擬実験** 穴部材料に対する模擬実験として、図5(a)に示すような両端固定ばりの横衝撃試験を採用した。10 cmの高さから円柱形重り(SK3材、直径19.4 mm、高さ38 mm、質量87 g)を後述シリコンポリマ媒体(正方形、 $30 \times 30$  mm<sup>2</sup>、厚さ2 mm)上に落下衝突させ、緩衝板を通してはりに衝撃荷重が加えられる。はりの応答は、その下面にはり付けたひずみゲージにより検出した。この出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、衝撃後にペンレコーダ上に書き出させた。はりの材料はS55C、固定端間長さは50 mm、

幅は 30 mm、厚さは 4 mm とした。系の固有振動数は 1.7 kHz であった。緩衝板は  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  のアルミニウム板とし、その厚さ  $t_c$  を変更した ( $t_c = 0.4, 0.8, 1.5 \text{ mm}$ )。

一方、板押え部に対する模擬実験として、図 5 (b) に示すように、平板に対する厚さ方向の衝撃試験を採用した。平板は厚さ 4 mm の正方形板 ( $30 \times 30 \text{ mm}^2$ ) とした。平板内の応答測定は困難なため、その下部に水晶式圧電形ロードワッシャー (最大容量 118 kN、固有振動数 55 kHz) を配置した。系の固有振動数は 10 kHz であった。衝撃試験条件ははりの場合と同じとした。

試験結果を図 6 および 7 に示す。応答の遅いはりの場合 (図 6)、緩衝板が厚いほど応答が遅れ、かつ出力値も低下し、前述弾性棒の計算結果と同じ傾向が得られている。一方、応答の早い平板の場合 (図 7)、緩衝板の効果はほとんど認められず、前述計算結果と異なっている。この一因として、境界条件の違い、すなわち、この系では装置が設置してあるベッドを通して弾

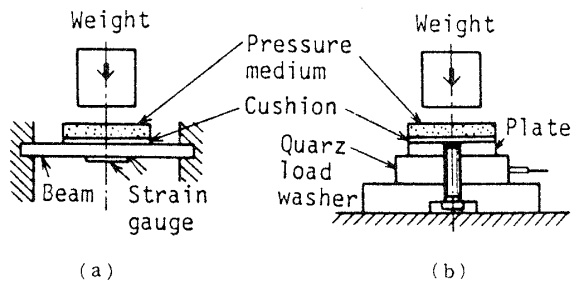


図 5 模擬衝撃実験の説明図

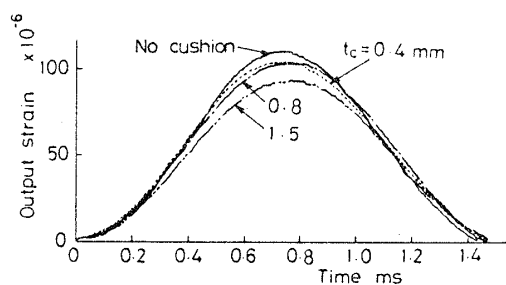


図 6 はりの衝撃試験結果

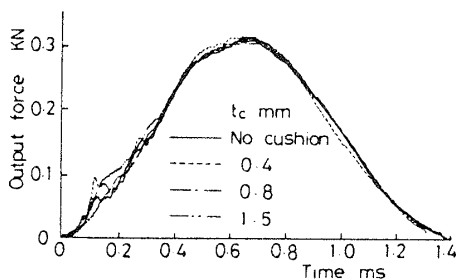


図 7 平板の衝撃試験結果

性波が外部に散逸しやすく、反射波の影響が小さかったことが考えられる (実際の穴あけ加工でも、板押え部は同様の条件にあると思われる)。遅延現象は、波の反射の繰返しによって生ずるからである。

**2.2.3 C法の提案** 機械振動の観点からみて、穴部材料の弾性応答のほうが板押え部のものよりかなり遅いこと、および 2.1.1 項、2.1.2 項の結果を考慮すれば、図 8 に示すように、被加工材上面に緩衝板を配することにより、主として穴部材料の応答を遅延できることが期待される。以下、この方法を C 法と称することにする。

**2.3 域差加圧法 (FR 法)** いま一つの穴あけ方法として、穴部に比べて板押え部により大きな圧力が加わるように、媒体内の圧力分布を制御する方法を提案する。図 9 に示すように、大・小二つの加圧室を設け、その境界にダイス穴と同じ直径の穴を持つリングを配置する。リングの上・下面には金属はくが置かれている。下のはくは、穴内上方へ張出されることにより、この直下、下部媒体内の圧力を低下させる役目をする。上のはくは、その材質、厚さを変更することにより、板押え圧力の絶対量を制御する。穴あけは、(1) 上部圧力室への加圧、(2) 下部圧力室内で不均一圧力の発生、(3) 上部はくに穴が貫通、(4) リング穴内に上部媒体が流入、(5) 下部はくに穴が貫通、(6) 穴部材料の破壊により試料に穴が貫通、の過程で行われることをねらう。以下、この方法を FR 法と称することにする。

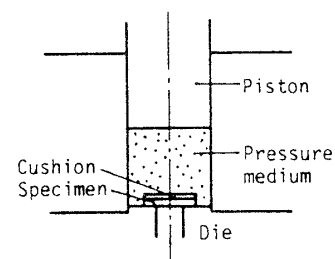


図 8 C 法による穴あけの説明図

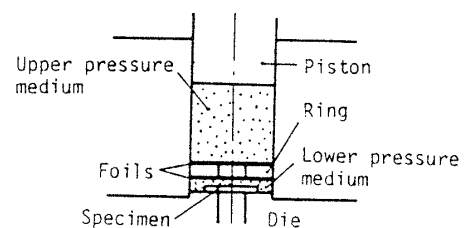


図 9 FR 法による穴あけの説明図

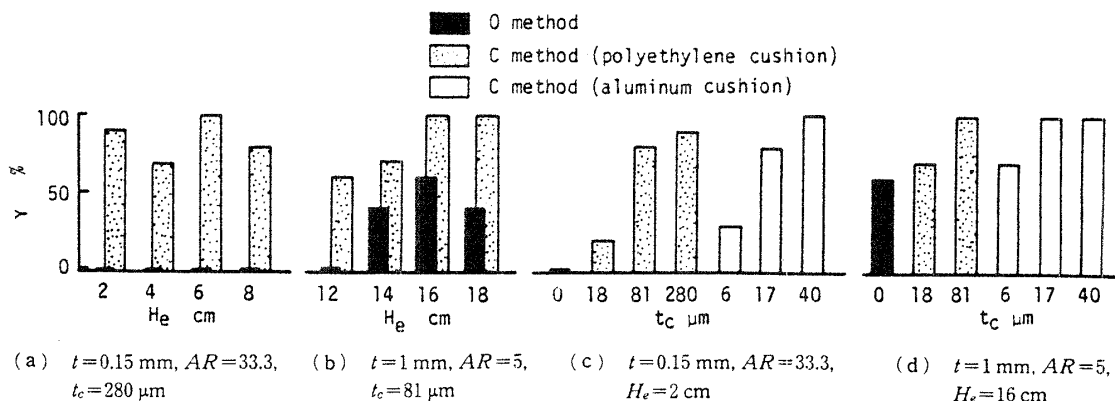


図 10 C法による穴あけ実験結果

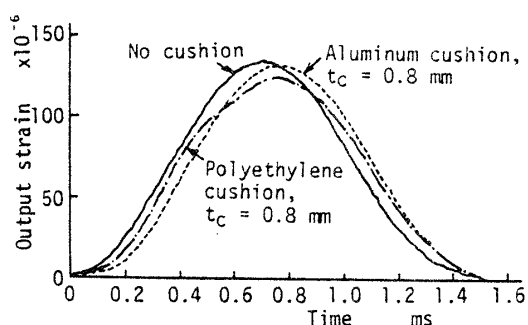
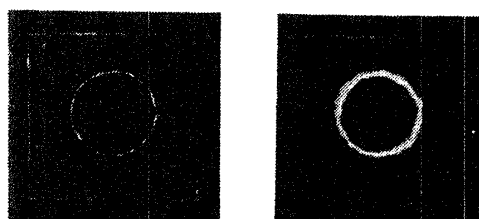


図 11 はりの衝撃応答に及ぼす緩衝材の影響



(a) Borosilicate glass,  $t=0.15$  mm,  $AR=33.3$ ,  $H_e=2$  cm.  
(b) Soda-lime glass,  $t=1$  mm,  $AR=5$ ,  $H_e=18$  cm.

Cushion: Polyethylene,  $t_c=81$  μm.

図 12 C法による試料の外観写真

### 3. 実験方法

衝撃装置としては、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、落下高さ  $H_e$  (ピストン上面よりハンマ体下面までの高さ、図 1 参照) を  $H_e \leq 40$  cm の範囲で変更した。圧力の発生能力は最大で約 450 MPa である。圧力媒体には、前報<sup>(3)</sup>と同じシリコーンポリマ (信越化学製, KE-SAP 1, 密度 1.1 g/cm<sup>3</sup>, 25°C におけるフローテスト粘度 5 000 Pa·s) を採用した。O 法, C 法, FR 法ともに、シリンダに設けられた内径 15 mm の穴が加圧室として用いられた。ピストンの高さは 20 mm, ピストン・シリンダ壁間のすき間は 0.01 mm とした。ピストンおよびシリンダには SK 3 材 (焼入れ,  $H_v=780$ ) が用いられた。媒体の高さは、O 法, C 法, FR 法 (上部媒体) ともに 15 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 5 mm とした。

C 法では緩衝材として、ヤング率が小さく、かつ比較的安価と思われるポリエチレンシート (厚さ  $t_c=18, 81, 280$  μm) およびアルミニウムはく ( $t_c=6, 17, 40$  μm) を採用した。FR 法では、厚さ 2 mm のリング (SKD 11,  $H_{RC}=60$ , 穴径 5 mm) および SK 3 はく (上

はくの厚さ  $t_u=50$  μm, 下はくの厚さ  $t_l=10, 50$  μm) を採用した。

被加工材料には、O 法による穴あけがやや困難もしくは不可能な条件より選び、市販のソーダ石灰ガラス板 (公称厚さ  $t=1$  mm, アスペクト比  $AR=5$ , 曲げ強さ  $\sigma_b=92$  MPa) およびホウケイ酸ガラス板 ( $t=0.15$  mm,  $AR=33.3$ ,  $\sigma_b=122$  MPa) を採用した。試験片は一辺 10 mm の正方形板とし、その製作には精密切断機を用いた。穴あけ実験には潤滑剤を用いず、実験のつどアセトンによりすべての工具を脱脂した。実験温度は  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  とした。

### 4. 実験結果および考察

4.1 C 法による実験結果 ハンマ体高さ  $H_e$  および緩衝材の組合せを変更して穴あけ成績を調べた。その結果を図 10 (a)~(d) に示す。穴あけ成績  $\gamma$  は、同一加工条件で 10 回の試験に対する成功割合 (%) を表す。図によれば、O 法に比べて C 法の  $\gamma$  が一般的に大きい。特に、図 10 (c) より、大アスペクト比のホウケイ酸ガラス板の場合、O 法により穴あけが不可能 ( $\gamma=0\%$ ) であるが、C 法では加工条件を選べば  $\gamma=$

100%に改善できることが注目される。緩衝材の影響に関しては、アルミニウムはくのはほうがポリエチレンシートより良好な結果が得られている[図 10(c)]。これは、図 11 に示すはりの模擬実験とも対応している(アルミニウム板のほうがポリエチレンシートより応答の立上りが遅い)。しかし、この結果は、ヤング率が小さいほど緩衝効果が大きいとした前述計算結果と逆になっている。この理由は現在のところ明らかでないが、ポリエチレンシートの粘性が関与した可能性が考えられる。緩衝材の最適条件についてはなお検討を要するが、本加工条件では、 $t_c \geq 40 \mu$  のアルミニウムはくを用いれば、アスペクト比を問わず  $\gamma = 100\%$  の穴あけ成績を期待できることが結論される。

穴あけが成功した場合の試料写真を図 12(a), (b) に示す。いずれもダイス側より撮影したものである。ソーダ石灰ガラス板の外観[図 12(b)]は前述 O 法によるもの[図 2(a)]と大差ないようである。

4.2 FR 法による実験結果

4.2.1 圧力分布 穴あけ実験に先立って、FR 法における圧力分布を調べた。圧力センサには、図 13 に示すように、厚さ 0.2 mm の 60/40 黄銅板と 240 番のサンドペーパーを重ね合わせたものを用い、黄銅板表面に転写されるおうとつを表面粗さ計にて測定した。圧力の較正には万能試験機による圧縮試験を行い、圧力  $p$  と中心線平均粗さ  $R_a$  との関係線図を求めた。その結果を図 14 に示すが、良好な直線関係が見られる。た

だし、粗さ測定の基準長さは 8 mm とした。同じ圧力に対して 3 個の試料を準備し、それぞれについて 3 回の  $R_a$  測定を行い、それらを平均した。

穴あけ条件での圧力分布の測定では、基準長さを 2 mm とした。同一試験条件については 10 個の試料を準備し、それぞれについて 3 回の  $R_a$  測定を行い、それらを平均して圧力に換算した。ガラス試料内にクラックが生じない  $H_e$  の範囲で圧力分布を測定した例を図 15 に示す。ソーダ石灰ガラス板の場合、O 法と比較

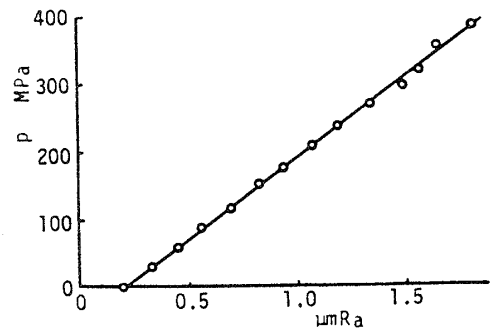


図 14 圧力の較正結果

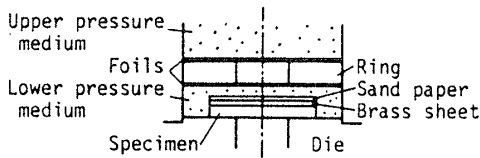


図 13 FR 法における圧力分布の測定法

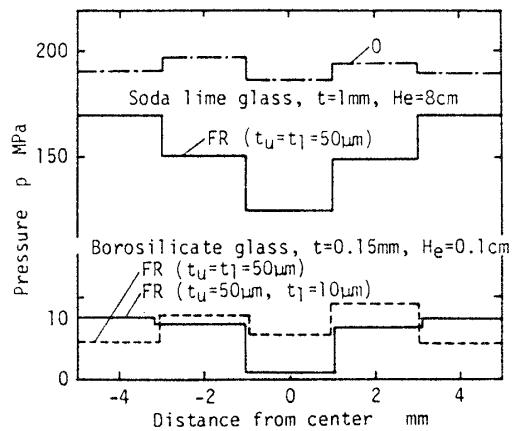


図 15 FR 法における圧力分布

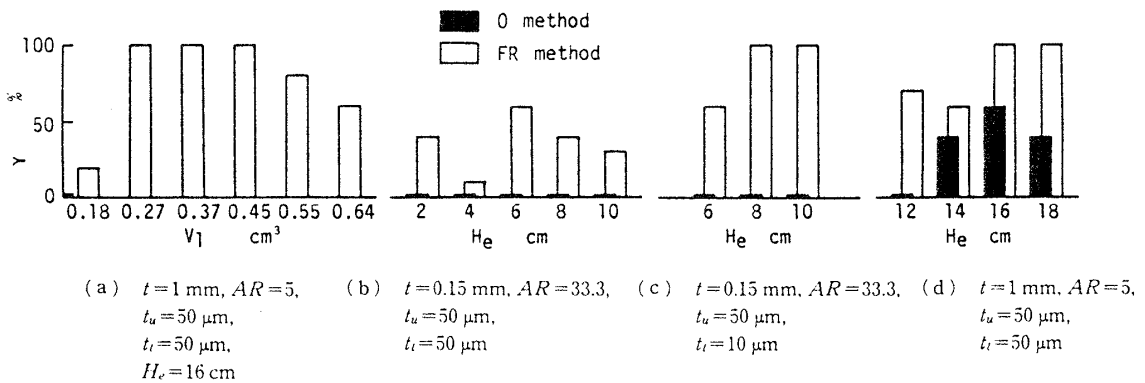


図 16 FR 法による穴あけ実験結果

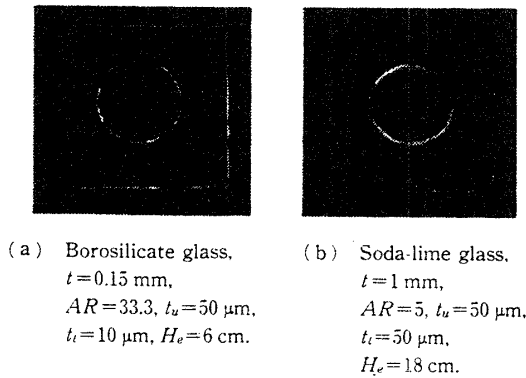


図 17 FR 法による試料の外観写真

されているが、FR 法において明りょうな圧力こう配が生じ、試料中心から離れるほどより大きな圧力が発生している。ホウケイ酸ガラス板の結果より、下はくの厚さ  $t_e$  が厚すぎると域差加圧が得られないことがわかる。

**4・2・2 穴あけ実験結果** C 法の場合と同様に、FR 法による穴あけ成功率  $\gamma$  を調べた結果を図 16(a)~(d) に示す。  $\gamma$  と下部媒体体積  $V_i$  の関係を図(a) に示すが、  $V_i$  に最適値が存在することがわかる。他に示す FR 法に関するデータはすべて、この最適値 ( $V_i=0.27 \text{ cm}^3$ , 質量 3 g) による結果である。図 (b), (c) の比較より、ホウケイ酸ガラス板では、  $t_e$  が薄いほうが  $\gamma$  が大きいことがわかる。この結果は上述圧力分布と対応しており、域差加圧が生じる条件の時穴あけ成績が良いことがわかる。結局、図(c), (d) より、2 種類のガラス板ともに、  $H_e$  をある程度大きくすれば、  $\gamma=100\%$  の成績を期待できることが結論される。なお、穴あけが成功する時の板押し圧力を測定した結果、ホウケイ酸ガラス板では 143 MPa ( $H_e=8 \text{ cm}$ ) を、また、ソーダ石灰ガラス板では 214 MPa ( $H_e=16 \text{ cm}$ ) を得た。

FR 法により得られた試料の外観写真を図 17(a), (b) に示す。図(a) のホウケイ酸ガラス板に対する結果は、前述 C 法による結果 [図 12(a)] と類似しており、かなり良好にダイス穴が転写されている。一方、ソーダ石灰ガラス板に対する結果を示す図 17(b) と前述 O 法、C 法による結果 [図 2(a), 図 12(b)] とを比較すると、穴周辺部の白色部の幅が FR 法において減少し、加工穴の精度が向上することがわかる。この部分は、加工穴がテーパ状 (ダイス側ほど直径が大き) となるために観察されるもので<sup>(4)</sup>、FR 法では上・下はくの抜きくずが加工穴を整形したものと推定される。

## 5. 結 言

ガラス板に対する新しい穴あけ方法として、弾性応答の遅延現象を利用する加工原理 (C 法) および域差加圧に基づく加工原理 (FR 法) を提案し、その有効性を検討した。この結果、従来法 (O 法) で困難であった大アスペクト比の穴あけの問題が、いずれの方法によっても解決でき、アスペクト比 5~33 の範囲でほぼ 100% の穴あけ成功率を達成できることがわかった。また、FR 法は加工穴の精度向上にも役立つこともわかった。本研究では加工原理の立証を主眼としたので、C 法と FR 法の優劣、最適加工条件などに関して究明が不十分である。よって、これらを今後の検討課題としたい。

## 付 録

図 3 に示した複合弾性棒の一次元縦衝撃の解析法を以下に示す。次の仮定を用いる。(1) 任意の時刻において、A 材左端より  $\sigma = -\rho_a c_a v$  のパルス弾性波が入射する。(2) 重りは運動方程式  $(M/A_0) dv/dt - \sigma = 0$  に従う。(3) A 材と重りの境界、A・B 材の境界および固定端ではウゴニオの定理<sup>(6)</sup>に従って波の反射または透過が起こる。(4) 材料の密度変化を無視する。ここに、 $\rho_a, c_a$  は、それぞれ A 材の密度および弾性波の速度、 $v$  は重りの速度、 $M$  は重りの質量、 $A_0$  は棒の断面積である。これらの仮定のもとで、 $\tau (=2 \times 10^{-8} \text{ s})$  の時間ごとに 1 個ずつ仮定 (1) の波を入射させ、その後の進行位置および応力変化を追跡した。すべての波は  $\tau$  の時間にちょうど一要素進行するように、はりの要素分割を行った。各々の要素の応力は、その時刻にその要素内に存在する波をすべて加算することにより算出した。計算にはパーソナルコンピュータを使用した。ただし、同一位置で同一方向に向う波は加算して一つの波として扱うようにし、追跡すべき波の数を減少させた。解の妥当性は、A 材のない単一はりについて、Timoshenko の解<sup>(7)</sup>と比較することにより確かめた。A 材はアルミニウムとし、ヤング率  $E_a = 7 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、密度  $\rho_a = 2.7 \text{ g/cm}^3$  とした。また、B 材は軟鋼とし、 $E_b = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、 $\rho_b = 7.9 \text{ g/cm}^3$  を用いた。B 材の長さは  $l_b = 1.04 \text{ mm}$  (要素数  $N=10$ ) で一定とし、A 材の長さは  $l_a = 0.204 \text{ mm}$  ( $N=2$ ) あるいは  $0.408 \text{ mm}$  ( $N=4$ ) とした。

## 文 献

- (1) 黒崎・ほか 2 名, 機論, 51-465, C (昭 60), 1058.
- (2) 黒崎・ほか 3 名, 機論, 52-480, C (昭 61), 2272.

- (3) 黒崎・ほか3名, 機論, 53-493, C (昭62), 2035.  
 (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, 機論, 52-483, C (昭61), 2967.  
 (6) 山田, 塑性力学, (昭43), 322, 日刊工業.  
 (7) Timoshenko, S. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, (1951), 446, McGraw-Hill.

## 討 論

〔質問〕 横井秀俊〔東京大学生産技術研究所〕  
 今回のご発表の範囲を超えるかとも思うが、主として実用上の観点から以下の点をおうかがいしたい。

(1) C法, FR法ともに負荷速度の低下とともに加圧応力の緩和を招くと想像されるが, これらは加工現象にプラスに作用しているのか。

(2) 異形穴加工には, C法とFR法どちらがより好ましいか。

(3) 板押えとして, ほぼ同寸法の上ダイス, またはウレタンゴムなどで板をあらかじめ挟み込み, 粘塑性体の衝撃圧縮を付与する, より簡易な方式では, 大アスペクト比の問題改善は期待されないか。

(4) 抜きかす中央近くに, 下から逆押えを付与することで板拘束条件が変わり, アスペクト比減少とほぼ等価な効果が期待されないか。

〔回答〕 (1) 前報<sup>(3)</sup>で示したように, 本加工条件の範囲では加圧速度に比べて応力緩和速度はきわめて遅く, 緩和挙動はほとんど問題にならない。これよりかなり低速加圧になり緩和挙動が影響する場合には, 板押え圧力不足を招く可能性があり, 応力の緩和

は加工性にとってマイナスと思われる。実際, C法, FR法ともに, 油圧プレスによる加圧では成功しない。

(2) 両法とも異形穴あけに対してどの程度有効かは明らかでないが, 一般的に言えば, 作業性を重視する場合にはC法を, また, 加工精度を重視する場合にはFR法を推奨したい。

(3) 加工を成功させる条件は, 穴部材料の破壊以前に, 板押え部にできるだけ等方的な圧力を十分加えることである。上ダイスを挟み込む方式を試みたことがあるが, 上ダイスとガラス試験片との間の局所的な固体衝突に起因するとみられる破壊が板押え部材料内に生じ, 不成功に終わっている。ウレタンゴムによって上記条件を満足させうるか否かは明言できないので, 今後検討してみたい。

(4) ご指摘の効果は原理的には十分期待できると思われる。ただし, 実施上の問題点として, C法, FR法に比べて著しく大きな加工圧力を要すること, ガラス試験片と逆押えの固体衝突による破壊の発生, などが挙げられる。