図・本館

脆性板の加工に関する研究

1989

1030355

社本英二

目　　次

1．　緒　論 ---------- 1

2．　脆性板の打抜き加工 ---------- 6

2.1　緒言 ---------- 6

2.2　実験装置 ---------- 6

2.3　緩衝材 ---------- 9

2.4　実験条件 ---------- 12

2.5　打抜き穴の形成 ---------- 13

2.6　打抜き抵抗 ---------- 13

2.7　打抜き穴の評価 ---------- 16

2.8　穴抜き加工条件 ---------- 19

2.9　段付きポンチによる穴抜き ---------- 22

2.10 結言 ---------- 25

3．　油圧によるポンチレス打抜き方式の検討 ---------- 26

3.1　緒言 ---------- 26

3.2　実験装置 ---------- 26

3.3　打抜き穴とその評価 ---------- 27

3.4　穴抜き加工条件 ---------- 30

3.5　打抜き圧力の概算 ---------- 31

3.6　円環状ダイスによる打抜き ---------- 33

3.7　結言 ---------- 35

4. 加圧ブランキング ---------- 36
4.1 緒言 ---------- 36
4.2 加工原理 ---------- 36
4.3 実験条件 ---------- 38
4.4 加圧によるガラス板の割れ方 ---------- 39
4.5 ブランキング条件 ---------- 41
4.6 加圧ブランキングによる製品 ---------- 45
4.7 結言 ---------- 47

5. プレス加工における加工可能条件の総合的検討 ---------- 48
5.1 緒言 ---------- 48
5.2 加工の概要 ---------- 48
5.3 穴抜きと加圧ブランキング ---------- 50
5.3.1 実験条件 ---------- 50
5.3.2 製品の評価 ---------- 50
5.3.3 加工可能条件 ---------- 51
5.4 外辺打ち捨てと加圧ブランキング ---------- 59
5.4.1 実験条件 ---------- 59
5.4.2 素板の評価 ---------- 59
5.4.3 加工可能条件 ---------- 61
5.5 加工の実例 ---------- 62
5.6 結言 ---------- 64

６．　加工面の評価と切削による仕上げ加工 ---------- 65
6.1　緒言 ---------- 65
6.2　切削実験 ---------- 65
6.2.1　実験条件 ---------- 65
6.2.2　実験結果 ---------- 68
6.3　各種加工によるガラス加工面の比較 ---------- 71
6.4　結言 ---------- 74

７．　結　論 ---------- 75

参　考　文　献 ---------- 77

謝　辞 ---------- 80

1．緒　論

近年，ファインセラミックスなどの硬くて脆い新素材が数多く開発されている．この種の硬脆材料は，硬度，剛性，耐摩耗性，耐熱性が高く，また電気的，熱的，化学的，光学的にすぐれた特性を持つものも多いため，これからの素材として大きな期待を集めている．しかしもともと硬脆材料は，ガラス，セラミックスを初めとして加工が困難な材料であり，現在もこれを量産加工できる高能率な加工法はほとんどない．このため，近年の新素材開発，生産量増加に伴い，ますますこれらの材料に対する高能率加工法の開発が強く望まれるようになっている．

本研究では，上述の硬脆材料の中から，特に脆性の大きい板材について取り上げ，その高能率加工の可能性を探ることにした．脆性板は，電子機器用の機能材，基板材などに多く用いられており，穴あけ，ブランク製作などの加工に対する要望が非常に高いものである．ここで穴あけとは板材に穴をあけることであり，ブランク製作とは板材から所望の外形を持ったブランク（素板）を切り出すことである．これらの加工は，通常，延性材料に対してはプレス機械を用いた打抜き加工法によって行われている．そしてこの打抜きを初めとするプレス加工法は他の機械加工法より抜群に生産性が高いため，可能ならば脆性板に対してもプレス加工を実現したいというのが実状である．

脆性板のプレス加工に関する過去の研究は，ベークライト板などあまり硬くなくて脆性の程度も低い板材に対する打抜き加工を扱ったものがほとんどで，その研究の概略は以下のようである．

フェノール樹脂積層板（ベークライト板）は電子機器用の基板として古くから量産されており，これの打抜きに関しては早期から研究が行われている．この板材は脆性の程度が小さいため通常の打抜きも可能であるが，その精度等に問題があって熱間打抜きなどが用いられる．しかしこの方法も生産性の点で見劣りがするため，冷間での打抜き特性などが北條らによって研究され[(1)-(5)]，そして冷間で精度良く打ち抜くための方法が隅部[(6)]，北條ら[(7)(8)]，山内ら[(9)]によって提案されている．また最近

では，横井ら[10][11]がガラスエポキシ積層板の打抜きについて同様の研究を行っている．

普通鋳鉄板も脆性材料の一種であり，通常この板材はドリル加工などの切削加工によって加工されている．そのためより生産性の高い打抜き加工法の適用が試みられているが[12][13]，板の端から穴までの幅が十分に大きい場合の穴あけを除いては，この板材を通常の方法で打ち抜くことは困難なようである．

セラミックス材に関して言えば，絶縁性，熱伝導性，機械的強度などの高いアルミナ板が，ＩＣ基板などに多く用いられ半導体周辺機器の代名詞的存在となっている．また最近では，炭化シリコンや窒化アルミニウムが，これからますます高密度，高性能化するＩＣ基板に適した素材として期待されている．これらを代表としたセラミックス板は，非常に硬くて脆いため通常の方法で打ち抜くと板全体がバラバラに割れてしまい，一般には打抜き加工の可能性はないと考えられている．そして現在のところ，ダイヤモンド研削，超音波加工，レーザービーム加工など，生産性の低い方法で加工されているのが実状である．そのため能率を上げようとして，焼結前のグリーン状態（この状態では数％の伸びを示すほど脆性が低く，通常の打抜きができる）で打ち抜く研究[14]-[17]も行われているが，焼結後の寸法の狂いなどが問題になっている．

ガラス板もセラミックスと同様に非常に硬くて脆い材料であり，この穴あけやブランク製作には通常，ダイヤモンド研削，超硬ドリル，超音波加工，噴射加工などが用いられる．また熱間での打抜きが用いられることもあるが，加熱による膨らみやだれを生じるため打ち抜いた状態のまま使用されることはまれである．切断に関しては，佐藤らによって熱応力を利用する切断法も報告されている[18]が，通常はガラス切りが用いられている．このようにガラス板についても，その量産加工法は未だ確立されていない状態と言えよう．

以上のように，脆性板を打抜きのような高能率で加工できる実用的技術は現在ほとんどないが，もしこれが開発されれば加工コスト低下に貢献でき，材料の用途を拡大することができるだろう．そこで本研究では，代表的脆性板としてガラス板を例にとり，実用的な高能率加工法の開発を試みた．

その第一段階として，打抜き加工に取り組んだ．そして従来の板押えでは使われない極めて強い圧力で板の製品部分を加圧することによって，打抜き時の製品部分へのクラック伝播を抑え，ガラス板の穴抜きに成功した[19][20]．その後この手法は，山田らによってプリント基板の打抜きにも効果が大きいことが確かめられている[21]．

これに続いて本研究では，従来のゴム工具による打抜き[22]を発展させ，ゴムのかわりに油を用いる方法を考えてガラス板の穴抜きを行った．この種の方法は，生産性，汎用性，精度の面ではあまり期待できないが，ポンチや板押えの必要がないため多品種小量生産には有利になる可能性を持っている．この油圧方式に似た例としては，黒崎らの研究[23][24]がある．これは，ゴムのかわりにシリコーンポリマなどの粘塑性体を，プレスのかわりにドロップハンマによる衝撃力を利用する点で本方式と異なる．

次に本研究では実用的加工法開発の第二段階として，ガラス板の破壊現象について調べ，その破壊を利用した新しいブランク製作加工法（加圧ブランキングと名付けた）を考案した．この加工は，板を上下から円柱状アンビルで加圧するだけで簡単に行われるものであり，本研究ではこの高能率な加工法によって円形，ハート形などのさまざまな形のブランク製作に成功している[25][26]．このように高圧による脆性材料の破壊を利用する他の方法には，佐藤らの脆性丸棒の切断法の研究[27]-[29]があるが，これは Pinching-Off[30]，Disking[31]として知られる側圧による脆性丸棒の破壊を利用したもので，板材に適用できるものではない．

そして最後に本研究では，上述の打抜きと加圧ブランキングについて，これを同時に行うことのできる加工条件や加工面精度，各種脆性板への適用などについて詳しく検討した[32]．

本論文に述べる研究内容を要約すると，以下のようである．

２章では，板の製品部分に高い圧力を与えることのできる加圧板を備えた穴抜き装置を試作し，ガラス板の加工を行った． その結果，製品部分を 400 MPa 程度の圧力で加圧すれば穴抜きが可能になることがわかった．そして，良好な製品を得るための

最適なクリアランスが存在すること，その値は延性材料の場合よりかなり大きいこと，段付きポンチによって加工精度向上の効果があることなどを明らかにした．

３章では，前章の打抜き方法とは違った油圧方式を採用し，その装置を試作してガラス板の穴抜きを行った．その結果，一応穴抜きが可能であることがわかった．前章の方法と比べてこの方法は，生産性，加工精度などの点で劣るが，ポンチと板押えの必要がない点で有利である．

４章ではまず，円柱状のアンビルでそれより広いガラス板を上下から加圧し，板の割れ方を調べた．その結果剛性の高いアンビルで 1000 MPa 程度まで加圧した場合には，加圧されていない部分のガラスが自然に飛び散り，加圧した部分だけが割れずに残ることがわかった．本研究ではこの破壊を利用した加工法を展開し，加圧ブランキングと名付けた．そしてその加工特性を詳細に調べるとともに，円形，角形，ハート形など各種形状のアンビルを用いて加圧するだけで，その形状のブランクが製作できることを確かめた．

５章では，加圧板でブランクを保持しながら外辺部を打ち捨ててブランクを作る，いわば外辺打ち捨てを試み，これに上述の穴抜き加工，加圧ブランキングを加え，三つの新しいプレス加工法を組み合わせた実験を行った．そしてさまざまな条件下でガラス板の加工を試み，加工条件を選べば穴抜きと加圧ブランキングの同時加工が可能であることを示した．また加圧ブランキングによる製品の品質は良い条件で外辺打ち捨てされた製品と同程度であること，素板の端にどの程度近くまで穴抜きが可能であるかなどを明かにし，脆性板のプレス加工法による製品の品質と加工条件の関係を総合的に検討した．さらにここでは，ガラスを用いて得られたデータを基に他の脆性板の加工を行い，アルミナセラミックス板などに対しても同様な穴抜き，ブランク製作が可能であることを示した．

６章では，プレス加工された製品の仕上げ加工を行う場合の基礎的データを得る目的で，ガラス丸棒の外周切削実験を行った．その結果，これを行う工具には焼結ダイヤが適していること，また切削油が工具寿命に極めて大きな影響を与えることなどがわかった．そして最後に，加圧ブランキング，外周切削，ガラス切りによって加工さ

れた製品の表面を比較，検討した．その結果，加圧ブランキングとガラス切りによる加工表面の性状は比較的似ており，切削による表面より非常にあらさが小さいかわりに若干うねりが大きいことなどがわかった．

７章は，本論文の結論である．

以上により，これまでほとんど行われていなかったガラス，セラミックスなどの穴抜きやブランク製作を非常に生産性良く行うことができたので，次章以下にその各論について述べる．

2．脆性板の打抜き加工[19][20]

2.1　緒言

本章では，脆性板の高能率加工法を開発するための第一段階として，ガラス，セラミックスなどのような硬脆板にも可能な冷間打抜き加工法の開発を試みた．

これまでの過去の研究にはガラスやセラミックスの冷間打抜きを扱った研究はなく，先に述べたようにフェノール樹脂積層板など脆性の程度の小さい材料に対して試みられている[6]-[11]程度である．これらの研究では，脆性を示す材料を打ち抜くために，対向ポンチを用いてポンチをその進行方向に振動させる方法が用いられているが，この方法では生産性も悪く，また本章で取り扱っているような硬脆板を打ち抜くことはできない．

そのため本研究では，引張応力に弱く圧縮応力に強い脆性材料の性質を利用し，板の製品部分を極めて強い圧力で加圧することによって，打抜き時の製品部分へのクラック伝播を抑える手法を考えた．本章では，この手法を用いて穴を打ち抜く装置，その装置を用いてガラス板に穴を打ち抜くことのできる条件について述べる．

2.2　実験装置

一般に脆性材料は圧縮力によっては破壊しにくいが，引張力によっては低い応力で破壊する．そこで脆性材料を加工するには，製品部分を強く加圧することによって打抜き時に生じる引張応力に対抗させ，製品部分の破壊を抑える方法が考えられる．

このような原理から設計された穴抜き装置の全体図を図 2-1 に示し， その機構図を図 2-2 に示す．図で①がポンチ，②がダイスである． 穴抜きは，まず加圧板④，⑦で打ち抜こうとするガラス板を上下から極めて高い圧力で加圧してから行われる．この装置におけるポンチの打抜き運動は，ボルト③に取り付けたナット⑥を回転させることによりブッシング⑤を横方向にすべらせ，ブッシングのテーパ部を介してポンチ①を下方向に押すことで行われる．なおポンチ①，ダイス②，加圧板④，⑦は，すべて焼入れ鋼で製作した．ポンチとダイスのクリアランスの設定はダイス②を穴径の

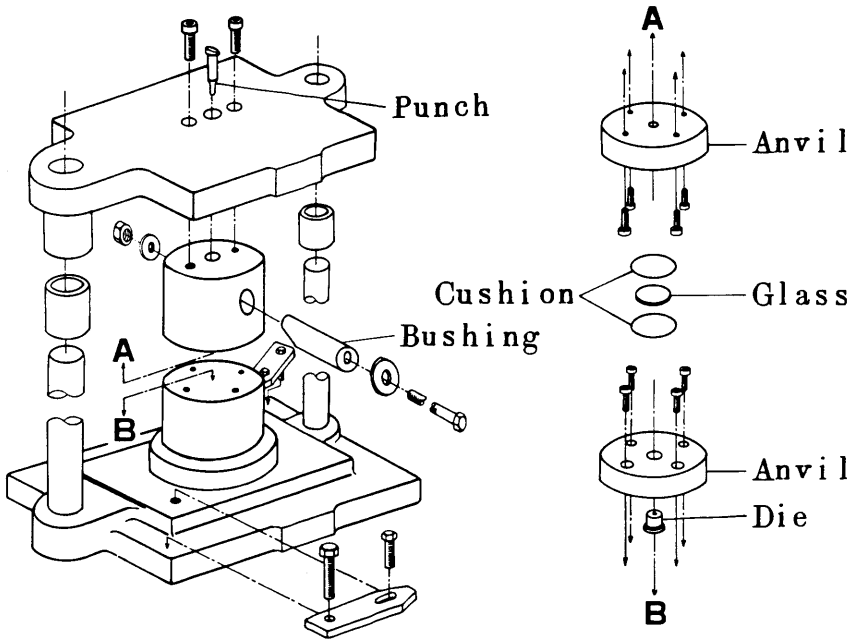


図 2-1　穴抜き装置全体図

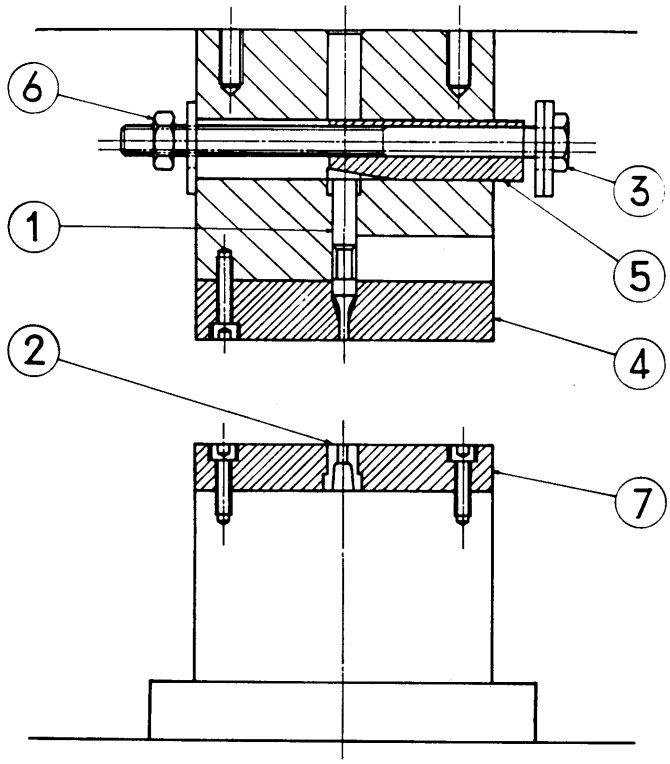


図 2-2　穴抜き装置機構図

異なるものに取り替えることにより行った．この装置は図 2-1 に示すようにすべてダイセットに組込まれ，ダイセットごとプレスで加圧される．またポンチを一定速度で送り込むために，ナット⑥の締め付けはモータ駆動により行った．本実験でのポンチ送り速度はおよそ 0.1 mm/s である．

打抜き過程を調べるためには，加工中の材料の変形やポンチにかかる荷重の経過を把握することが重要である．そこで，ポンチにかかる荷重とポンチストロークとを同時に検出した．その機構を図 2-3，図 2-4 に示す．ポンチ荷重の測定は，図 2-3 に示すようにポンチの一部を切り欠き，その円柱の中央にプラス形の歪みゲージでホイートストンブリッジを形成させ，歪み計の温度補償をすると同時にポンチに加わる偏心荷重による曲げモーメントの影響を相殺させて行った．ポンチストロークの検出は，図 2-4 のように板ばねの片持ちはりに歪みゲージを上下対称位置に接着したものにより行った．はりの先端部が切り欠きしたポンチと接しており，この部分の降下量をはりのたわみとして歪みゲージによって検出し，ポンチストロークを求めた．な

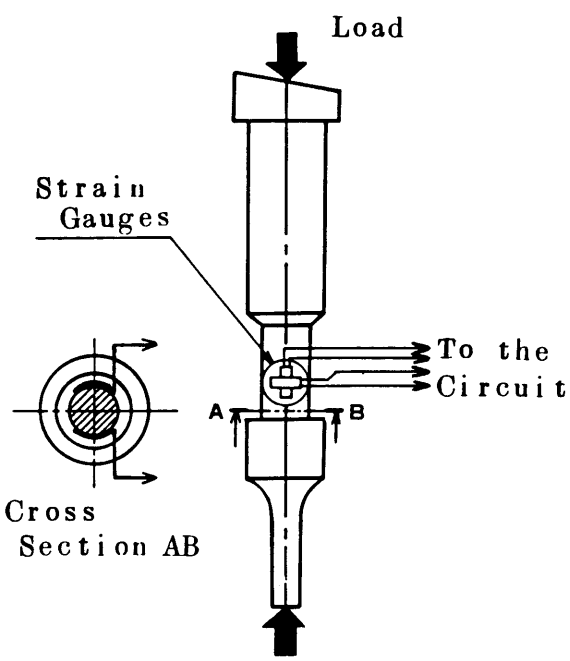


図 2-3 ポンチ荷重検出部

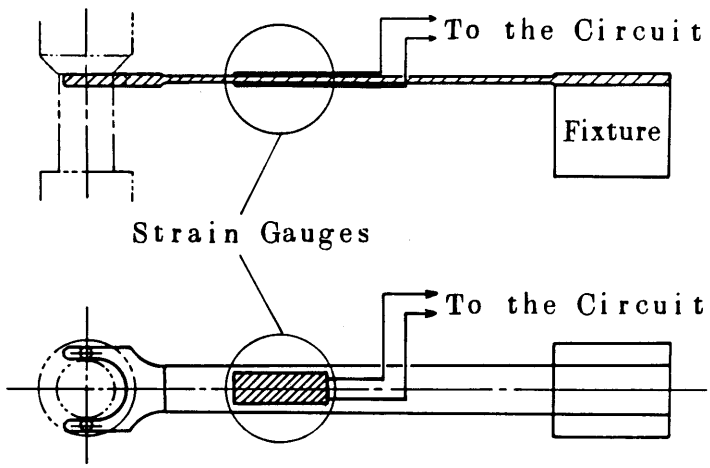


図 2-4　ポンチストローク検出部

おこれらの検出機構については，それぞれについて検定試験を行ない，実用上十分な線形性と再現性を得た．

2.3　緩衝材

前項で述べたように，本実験ではガラス板を加圧した状態で打抜きを行うのであるが，加圧板で直接ガラス板を圧縮したところ，図 2-5 に示すようにして板全体が粉砕しやすかった．そこで本章の実験では，ガラス板と加圧板との間に軟質の薄板（緩衝材と名付ける）をはさんで加圧を行うことにした．以下に最適な緩衝材を選ぶために行った予備実験について述べる．

実験装置は前項で紹介した装置をそのまま使用した．加圧板は平面研削により表面粗さ Rmax ＝ 3 μm 以下に仕上げた．本研究で使用したガラス板はすべて市販の透明普通板ガラスであり，組成上より見ればソーダ石灰ガラスに属する最も一般的なものである．この試料ガラスの機械的特性を，焼入れ鋼と比較して表 2-1 に示す．なお表中のガラスの引張強さ 120 MPa は，簡単な曲げ試験によって求めた値の平均値

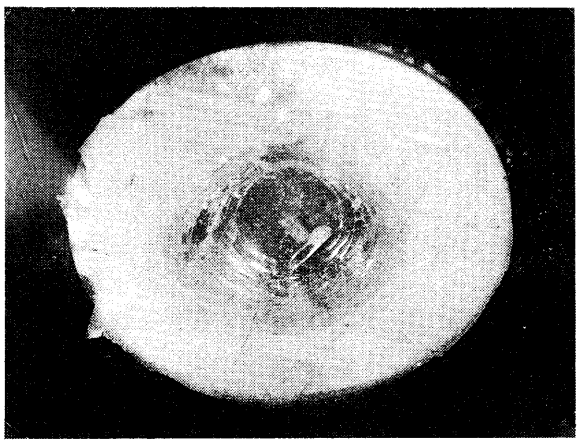


図 2-5　ガラス板粉砕例

表 2-1　ガラス板と焼入れ鋼の諸特性

	Soda-Lime Glass	Quenched Steel
Hardness (Hv)	6.3 GPa	8.1 GPa
Elastic Modulus	71 GPa	210 GPa
Tensile Strength	120 MPa	−
Manufacturing Process	Float Process	−

であり，その測定値は 70〜170 MPa 程度の範囲で大きくばらついていた（この値の求め方にはいろいろ検討を要する点が多々あるが，だいたいの目安にはなるだろう）．またその表面粗さは，Rmax ＝ 1 μm 以下であった．この緩衝材の実験では，ガラス板の形状はすべて直径 45 mm の円形とし，板厚 0.7 mm のものを使用した．なお本装置の加圧板の直径は 80 mm である．

加圧によってガラス板は周辺部分から破壊していったので，その中央部分に残った板の面積の割合を残余率と名付け，どの緩衝材を用いたときに最も残余率が高いかを

調べた．図 2-6 は各緩衝材を用いてガラス板に所定の圧力を加えたときの残余率を示している．図より，本実験で扱った緩衝材の中では 0.05 mm 厚の銅箔が最も良く，最高圧力 1000 MPa でも 80 % 以上の残余率を示した．なお，緩衝材を使用せず加圧板で直接ガラスを加圧した場合には，圧力 400 MPa まではガラス板はほとんど粉砕しなかったがそれを超えると全面が粉砕してしまい原形をとどめなかった．

また同じ材質の緩衝材では，薄いものの方が残余率が良かった．これは，厚いものでは圧縮応力によって変形が起こり半径方向に広がりやすいため，ガラスに加わるはずの半径方向の拘束力が相対的に減少するためと思われる．

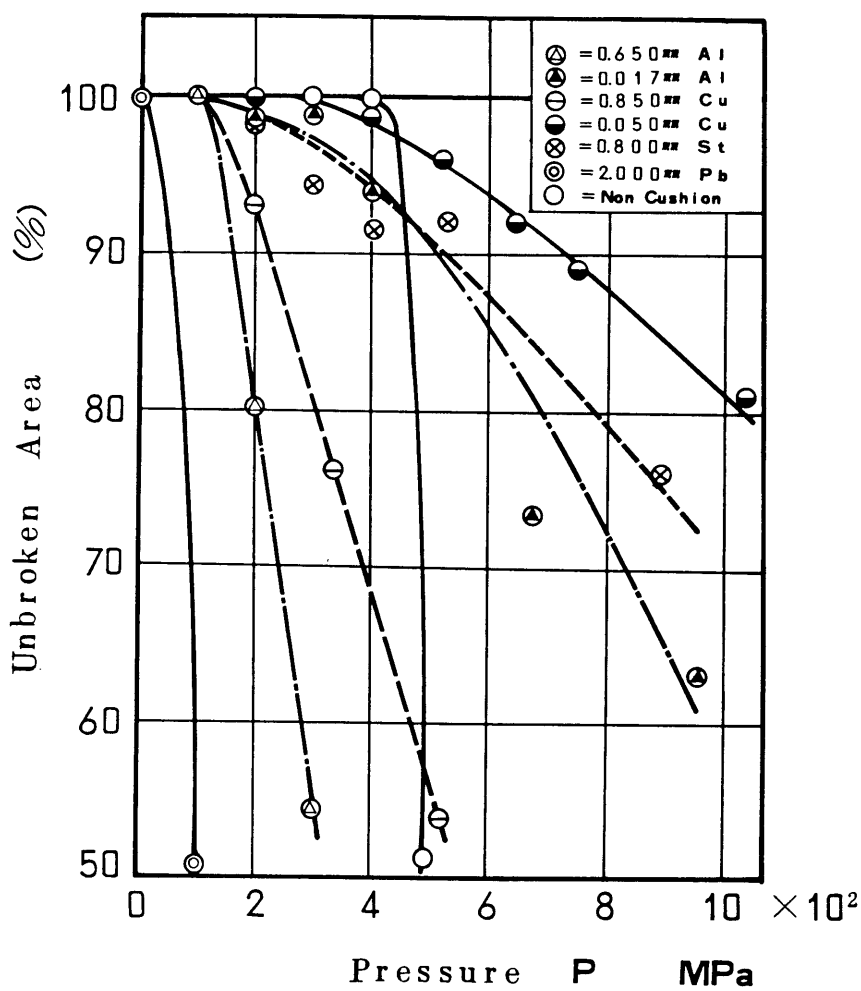


図 2-6 各緩衝材によるガラス板の残余率

2.4　実験条件

前項の予備実験の結果より，ここでは 0.05 mm 厚の銅箔を緩衝材として使用した．ガラスの板厚 t は 0.4～1.8 mm の範囲で変化させた． ガラス板の形状は，直径 45 mm の円形と一辺 50 mm の正方形の二種類を用いた．ポンチ直径 d は 3 mm で一定とし，ダイス穴径 d'を 3.05～9.00 mm の範囲で変化させることによりクリアランス c を変化させた．

なお実験条件を変えるパラメータは図 2-7 を参照して，

p　：ガラス板を加圧する圧力

c / t：板厚に対するクリアランス

d / t：板厚に対するポンチ直径

の三つを主なパラメータとし，これらの条件がいかなる条件を満たす時，脆性材料であるガラスを打ち抜くことができるかを調べた．

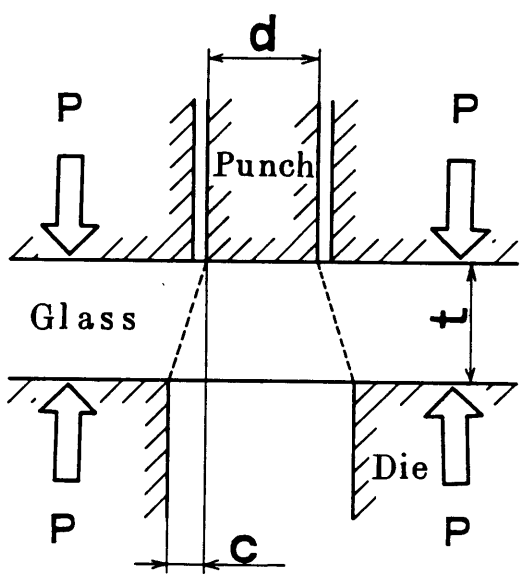


図 2-7　パラメータ説明図

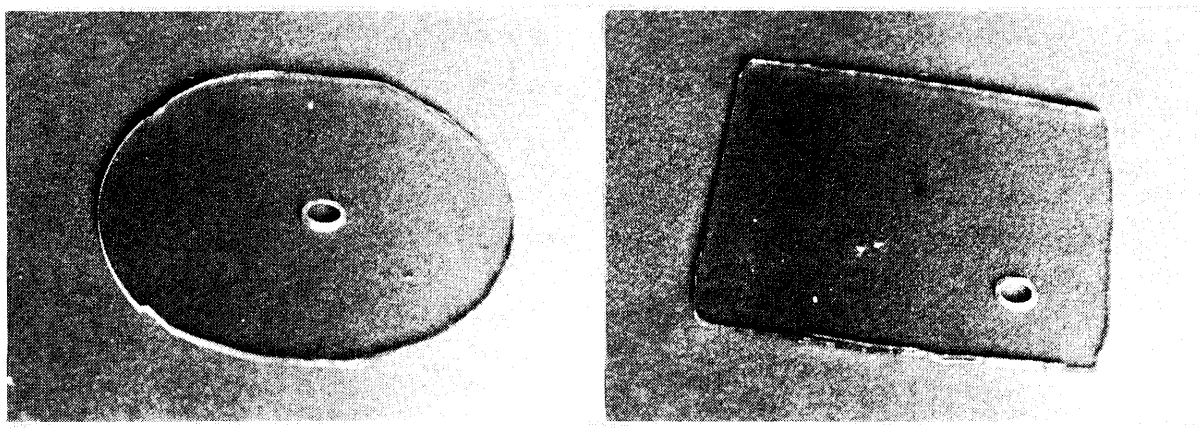
2.5　打抜き穴の形成

本装置による打抜き穴の例を図 2-8 に示す．図の（a）は本実験で得られた打抜き穴の外観である．(b) は板の形状，穴の位置を変えた場合にも打抜きが可能であることを示した例である．

またここでは，加工中のガラスの挙動を知るために，ポンチストロークを途中で停止して打抜き途中のガラス断面を観察した．その写真を図 2-9 に示す．ここで (a), (b), (c) は打抜きの進行する順番を表している． 図よりこの場合には，打抜き穴はまずポンチ側から最初のクラックが入り，その後内部に無数のクラックが入って穴が形成されている． また (c) を見るとクラックは途中で止まり加圧域には伸展せず穴があいていることがわかる．

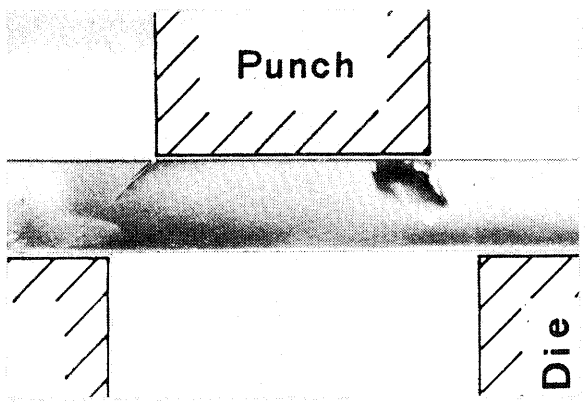
2.6　打抜き抵抗

加工中にポンチにかかる荷重がポンチストロークに応じて変化する様子を求めた例を図 2-10, 図 2-11 に示す． ここで縦軸は，ポンチにかかる荷重を打抜き円筒面の面積で割った値（この値は応力の次元を持つが事実上ポンチ荷重の変化を示すので，以後ポンチ荷重と呼ぶ）を用いた．図 2-10 は加圧力 p を変化させた時の線図の例であり，図 2-11 はクリアランス c / t を変化させた時の線図の例である． これらの図のように，ガラスの打抜きにおいてはまずポンチストロークに応じてほぼ直線的にポンチ荷重が上昇し，荷重がガラスの破壊点に達すると衝撃音と共に瞬時に打抜きが完了して荷重が減少する．このためガラスは延性材料の場合と異なり，図のように最高点において鋭くとがった線図となる．

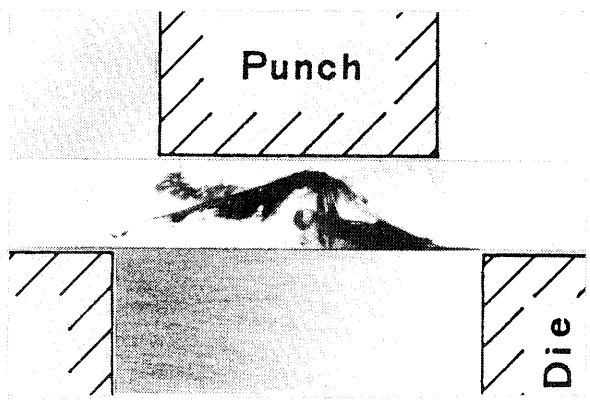


(a)　　(b)

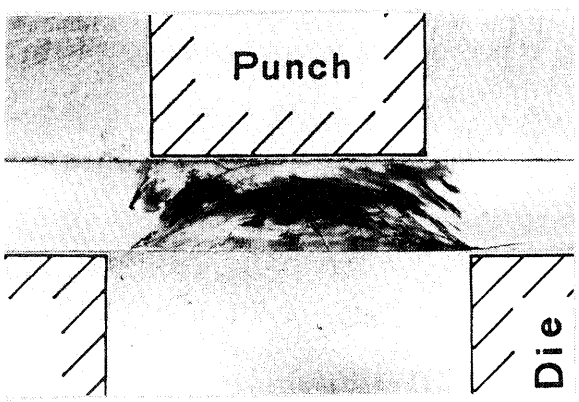
図 2-8　打抜き穴外観



(a)



(b)



(c)

図 2-9　打抜き途中のガラス断面

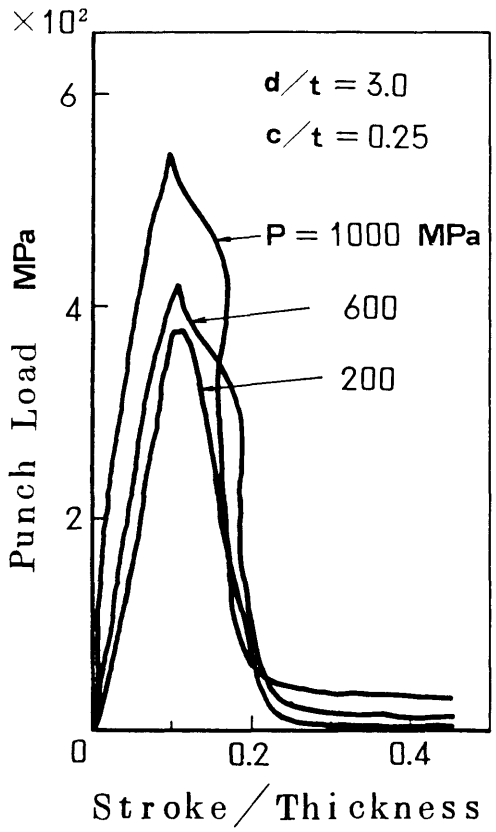


図 2-10　加圧力p変化による荷重線図

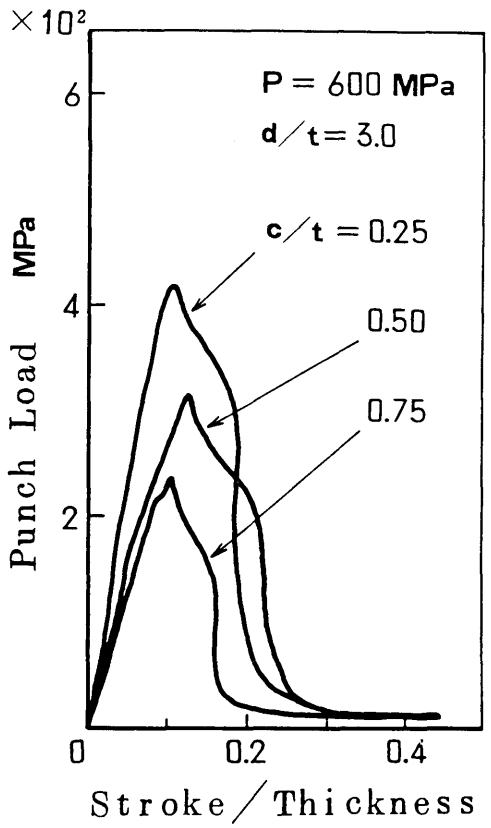


図 2-11　c／t変化による荷重線図

これらの線図で，ポンチ荷重の最大値をガラスの打抜き抵抗とし，この値と加圧力p並びにクリアランスc／tの関係を求めたものを図 2-12 に示す．このように打抜き抵抗は，c／tが大きいほど，またpが低いほど低くなる．

打抜き加工においては打抜き抵抗が低いことが望ましいが，この目的を満たすためには上述のようにクリアランスc／tを大きくし加圧力pを低くしなければならない．しかしクリアランスを大きくすれば，打抜き穴の精度を下げる原因となりやすく，また加圧力を低くするほど，当然製品部分にクラックが発生する危険が大きくなる．このため良好な打抜き穴を得るためには，必然的にある程度きびしい条件下で加工を行わなければならない．

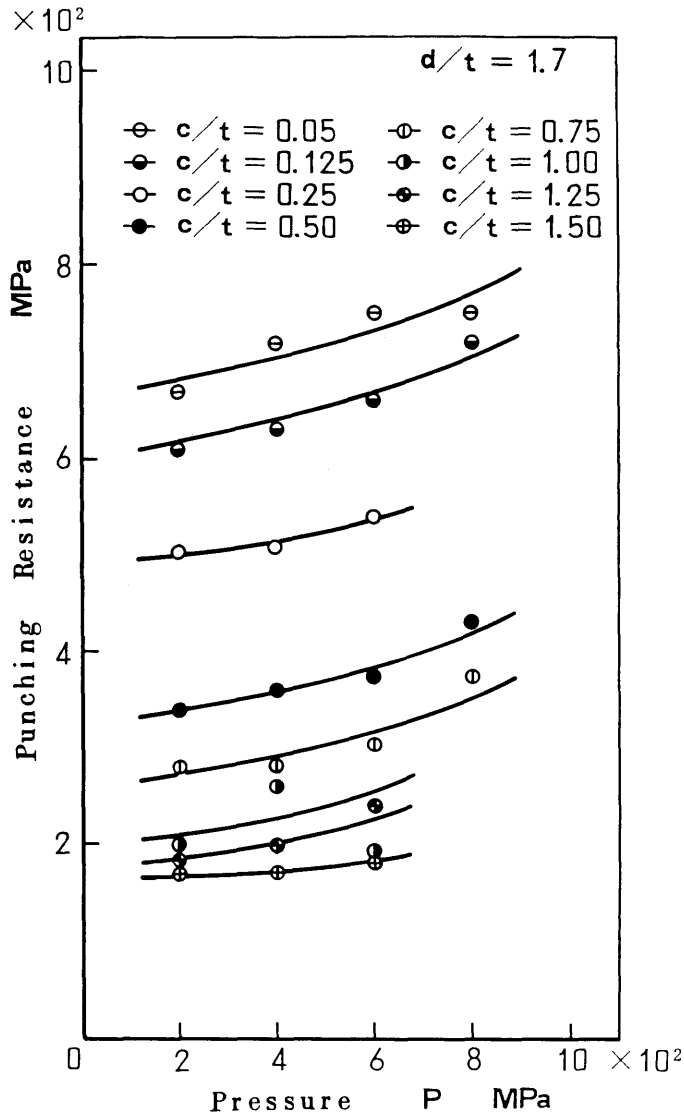
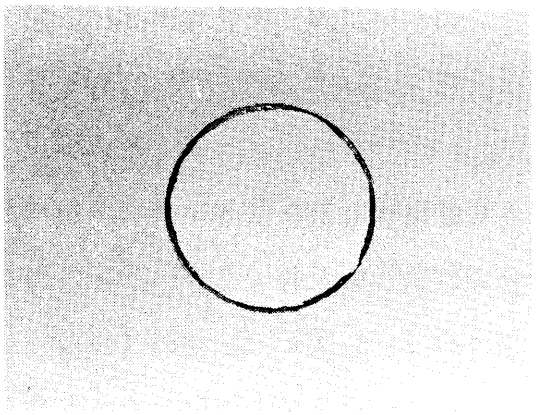


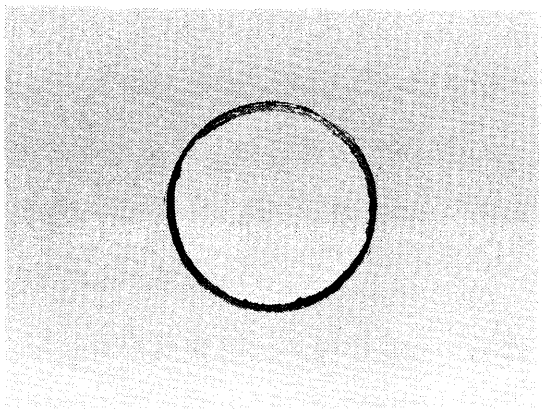
図 2-12　打抜き抵抗と加圧力pの関係

2.7　打抜き穴の評価

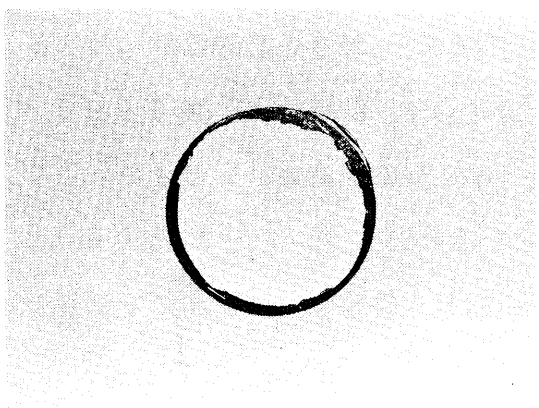
打抜き穴の性状は，打抜き条件によっていろいろ異なったものとなる．その代表的なものを図 2-13 に示す．このように条件によって，テーパの小さいきれいなもの(a)，ほぼテーパ状の破断面だけのもの (b)，円周方向に小さなクラックの入るもの(c)，半径方向に微小クラックの入るもの (d)，半径方向に大きなクラックの入るもの (e) など，さまざまな穴が得られた．



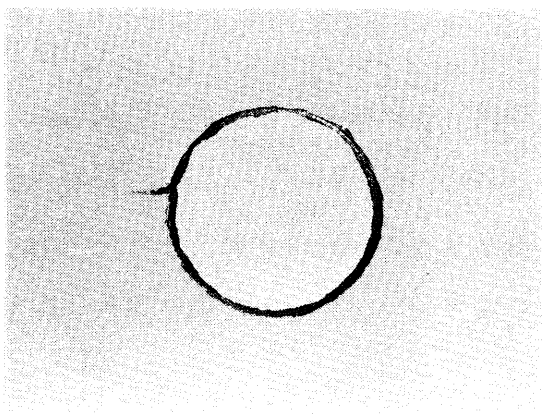
（ａ） ◎



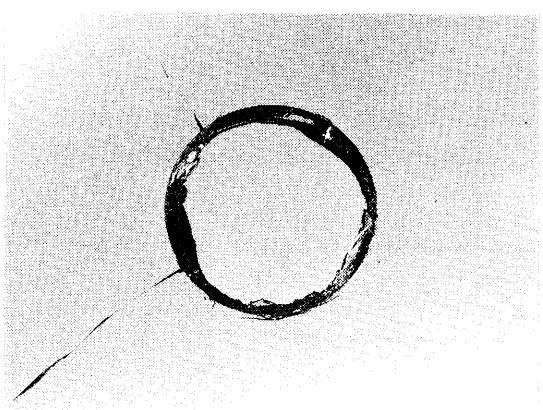
（ｂ） ○



（ｃ） □



（ｄ） △



（ｅ） ×

図 2-13　打抜き穴の拡大写真

そこでこれらの打抜き穴の性状を評価するために，次のような基準を考えた．まず図 2-14 で，ガラス内に損傷の見られる部分すなわち半径方向クラック，円周方向クラック， 破断面のうちで， 最大なものの先端から他方の先端までの距離を最大寸法 Dmax とする． この値が小さいほど損傷が小さくて良い．この最大寸法 Dmax を相対的に評価するために相対損傷長さ L＝（Dmax－d）／ 2t を定義し， これを評価の基準とした．評価は五段階に分類し，以下のように定めた．

（ 1 ）評価 ◎： 図 2-13（a）に示すように，破断面のテーパが小さく，半径方向クラックも円周方向クラックもないもの．相対損傷長さは，L＜0.5 の範囲に入る．

（ 2 ）評価 ○： 図 2-13（b）に示すように，半径方向クラックが全くなく，円周方向クラックもほとんど認められないもので，ほぼテーパ状の破断面だけでできているもの．相対損傷長さは， 0.5≦L＜1 の範囲に入る．

（ 3 ）評価 □： 図 2-13（c）に示すように，半径方向クラックがなく，円周方向クラックもあまり大きくないもの．相対損傷長さは，1≦L＜2 の範囲に入る．

（ 4 ）評価 △： 図 2-13（d）に示すように，クラック伸展の危険の多い半径方向クラックはあるが，その長さは短いもの．通常，円周方向クラックを伴っており，相

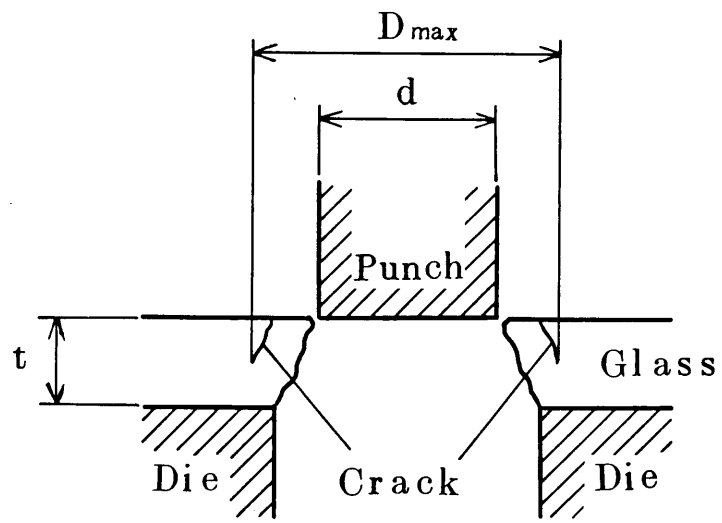


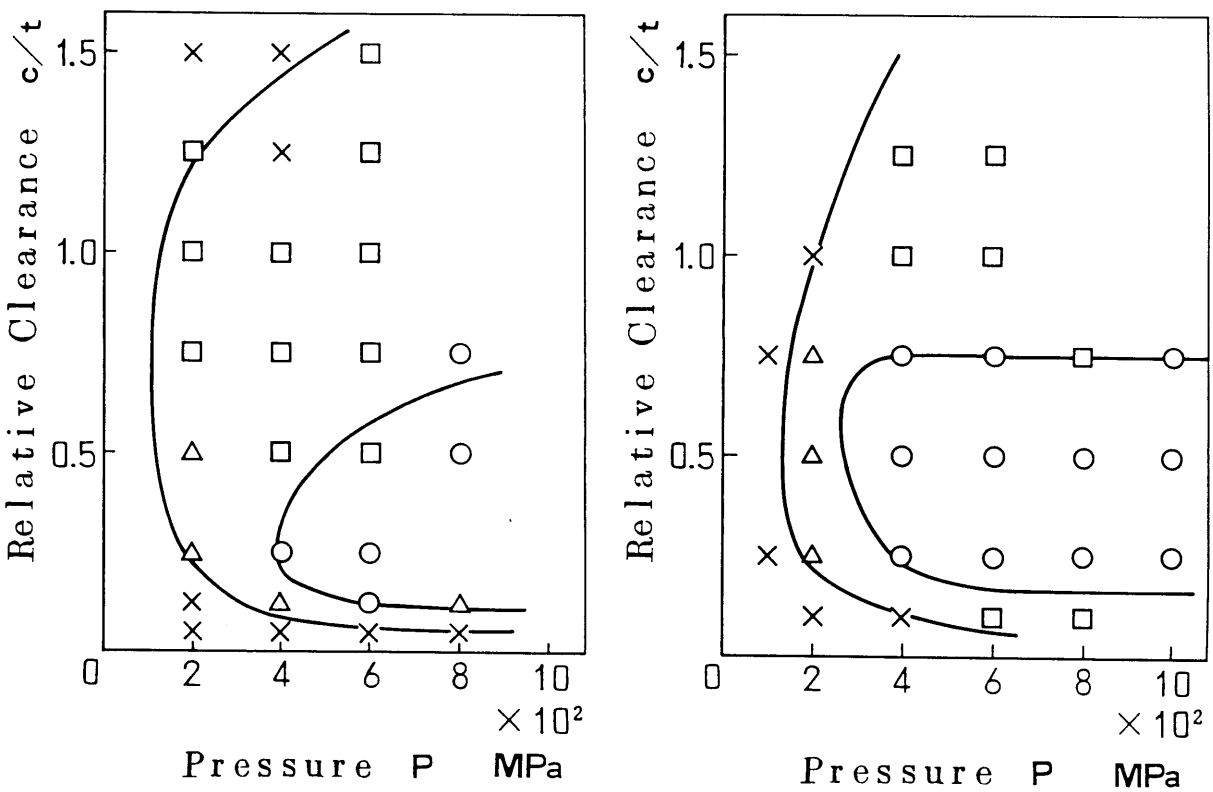
図 2-14　相対損傷長さ説明図

対損傷長さは，1≦L＜2 の範囲に入る．

（５）評価 ×： 図 2-13（e）に示すように，大きな半径方向クラックがあるか，または大きな円周方向クラックがあるもの．相対損傷長さは，2≦L となるもの．破壊してしまったものはこの評価に入る．

2.8 穴抜き加工条件

本実験で変化させた種々の条件のうちで，いかなる条件の組み合わせのとき良好な打抜き穴が得られるかを示したものが図 2-15（a)～(e）である． 図で良好な打抜き

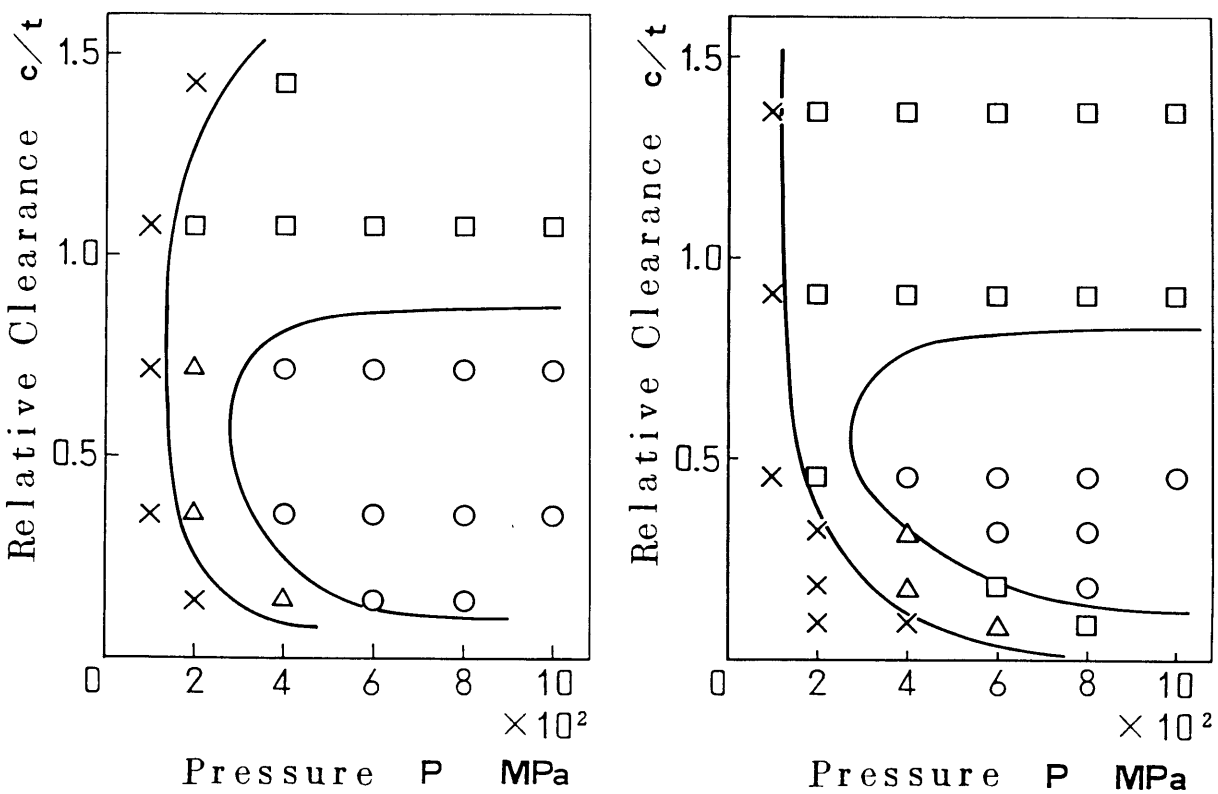


（ａ） d/t＝ 1.7 の場合　　（ｂ） d/t＝ 3.0 の場合

図 2-15 穴抜き加工可能条件

穴を得ることができたのは，○で示された領域である．すなわち，良好な打抜き穴を得るには，加圧力pが 400 MPa 以上，クリアランスc/tが 0.2～0.8 の範囲でなければならない．最適クリアランスが存在するのは，これが小さいと円周方向クラックや半径方向クラックが発生しやすく，逆に大きすぎると穴に大きなテーパがついて評価が下がるためである．なおここでは，評価◎の穴は得られなかった．

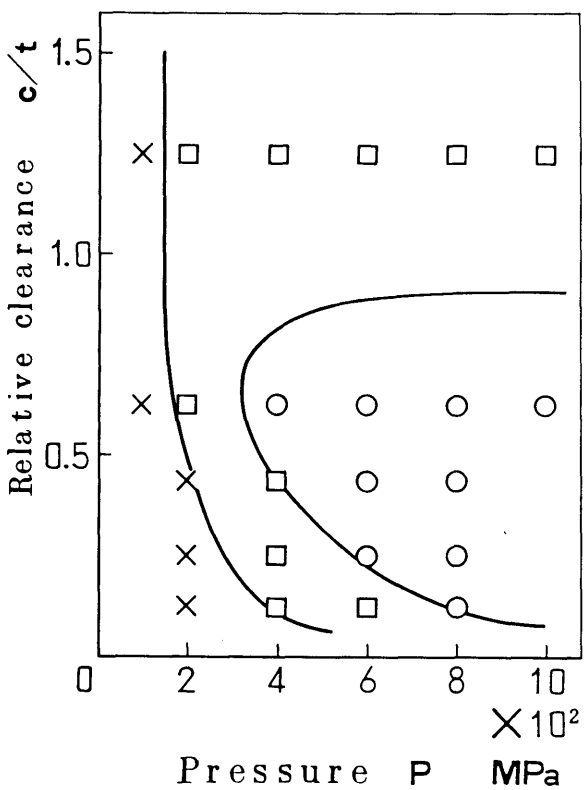
ポンチ直径d/tに関しては，これが小さいほど深穴を打ち抜くことになり， 加工が困難になると考えられる．図 2-15 (a) を見ると，d/t = 1.7 の条件では○の領域が狭くなっており，これ以上の深穴を打ち抜くことは難しくなると予想される．



（c） d/t = 4.3 の場合　　（d） d/t = 5.5 の場合

図 2-15 穴抜き加工可能条件

結局，ガラス板に対する精度良い穴抜き加工は，加圧力ｐが 400 MPa 程度以上で，クリアランスｃ/ｔが 0.2～0.8 の範囲においてのみ可能であること， 加圧力ｐが高すぎるとガラス板の周辺部に欠陥が生じる問題のあること，ポンチ直径ｄ/ｔが 2 付近を下まわると穴抜き可能条件が狭められることがわかった．



（ｅ） ｄ/ｔ＝ 7.5 の場合

図 2-15 穴抜き加工可能条件

2.9　段付きポンチによる穴抜き

先に述べたように，脆性材料であるガラス板の穴抜きにおいては，クリアランスが小さすぎると穴付近に円周方向クラックや半径方向クラックを生じやすく，逆に大きすぎると穴に大きなテーパがついてしまった．そこで，半径方向クラック，円周方向クラックがなくテーパも小さい評価◎の穴を得るためには，まず最初にクリアランスの比較的大きな条件で打ち抜き，ほぼテーパ状の破断面だけの穴を得た後に，テーパ部分だけを打ち抜くという方法が考えられる．このような考えから図 2-16 に示すような段付きポンチを用いて穴抜きを行った．

その結果が図 2-17 (a)，(b) である． これらの図は，段付きポンチを使用した場合にいかなる条件の組み合わせのとき良好な打抜き穴が得られるかを示したものである．ここで，これら (a)，(b) の二段目ポンチによる加工条件は， それぞれ図 2-15 (b)，(e) の場合と同じであり， これらのグラフの違いは一段目ポンチの有無のみによるものである．

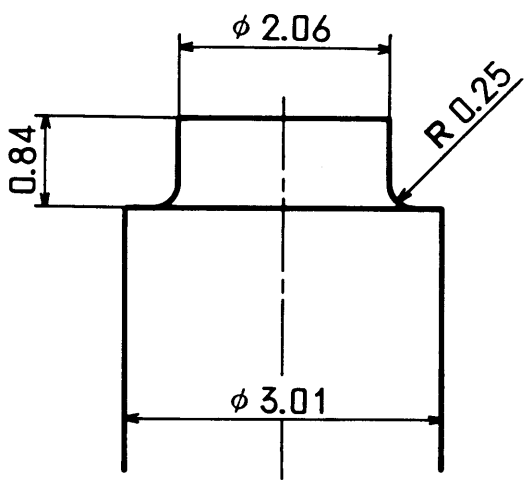
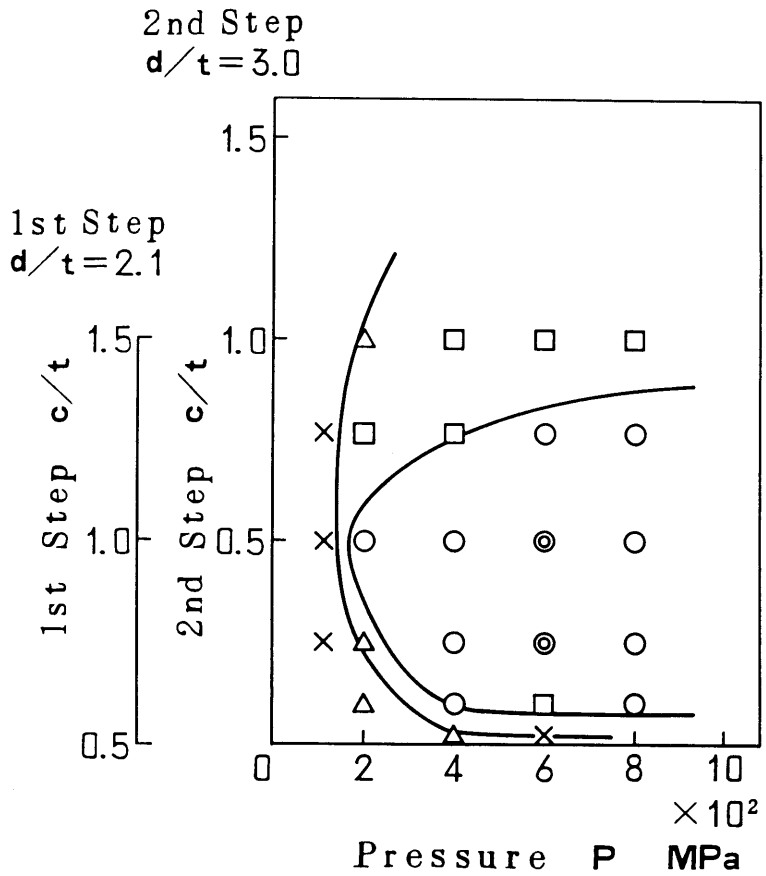


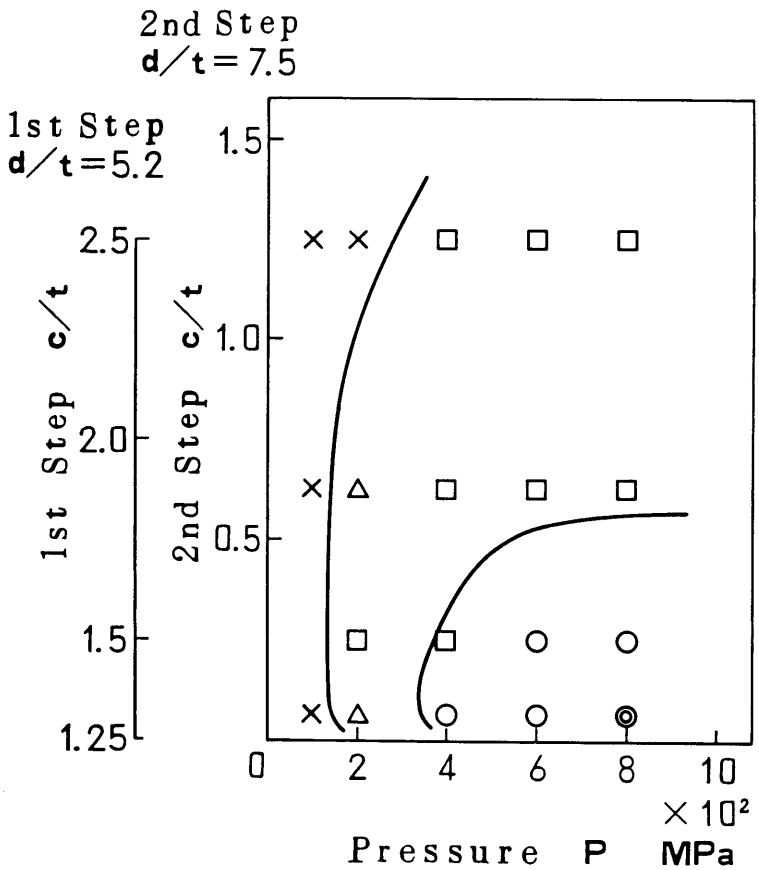
図 2-16　段付きポンチ頭部

図 2-17 (a) を図 2-15 (b) と比較すると，一段目ポンチを付加することにより穴抜き可能条件が広くなり評価◎の穴も得られるようになっている．また図 2-17 (b) を図 2-15 (e) と比較すると， c / t が小さい条件での評価が良くなり評価◎の穴も得られるようになっているものの，c / t = 0.6 付近においては逆に評価が悪くなっており，結局一段目のクリアランス c / t を 1 付近， 二段目を 0.5 以下の小さな値にしたときに段付きポンチの効果が大きいと考えられる．



(a) 二段目 d / t = 3.0 の場合

図 2-17 段付きポンチによる穴抜き加工可能条件



（ｂ） 二段目 d/t = 7.5 の場合

図 2-17 段付きポンチによる穴抜き加工可能条件

2.10 結言

本章では，脆性板に対する量産打抜き加工法の開発を試み，ガラス板の穴抜きを行った．得られた結果をまとめると以下のようである．

（１）加圧板を用いてあらかじめ製品部分を加圧しておく打抜き方法を開発し，ガラス板の穴抜きに成功した．

（２）良好な打抜き穴を得るためには，加圧力ｐが 400 MPa 以上必要であり，クリアランスｃ／ｔが 0.2～0.8 程度でなければならない．ただし加圧力ｐが高すぎるとガラス板周辺部に欠陥を生じる問題があった．

（３）ポンチ直径ｄ／ｔが 2 以下の深穴になると穴抜き可能条件が狭くなる．

（４）打抜き途中のガラス断面を観察し，また打抜き荷重線図を求め，脆性材料の打抜き特性を調べることができた．

（５）段付きポンチを使用し，一段目のクリアランスｃ／ｔを 1 程度，二段目を 0.5 以下の小さな値にすることによって，製品の品質向上の効果がある．

以上のように本章では，代表的脆性板であるガラス板の冷間打抜きが可能であることを示すことができた．

3．油圧によるポンチレス打抜き方式の検討

3.1　緒言

前章の研究により，板の製品部分を強く加圧することが脆性板を加工する上で有効であることがわかった．一方，従来のゴム工具による延性板の打抜き[22]は，その原理上製品部分に板押え力の加わる加工法である．この加工法は，生産性，汎用性，精度の点で見劣りがするものの，ポンチや板押えを製作する必要がなく多品種少量生産に有利な加工法と言われている．

そこで本研究では，ゴム工具による打抜きを脆性板の打抜きに適用すれば，多品種少量生産に有利な打抜き加工法ができるのではないかと考えた．そしてゴムを用いて加工を試みたが，ゴムのかわりに液体である油を用いた方が良好な結果が得られることがわかったので，延性板のハイドロフォームと同じように油を圧力伝達媒体として用いる装置を試作してガラス板の穴抜きを試みた．本章では，その装置やそれを用いて得られた製品について述べる．

3.2　実験装置

図 3-1 が油圧による穴抜き装置の概要である．この装置における穴抜きは，上下からプレスで加圧して油圧を上昇させることにより行う．つまりこの装置においては，加圧板を用いた場合の加圧板とポンチの両方の役割りを油圧によって行わせており，打抜きに要した圧力がそのままガラス板全体を圧縮した圧力になるものである．この方法ではポンチが不要であって，1ストロークで加圧と打抜きができるところに特徴がある．

装置のダイス，シリンダ，プランジャは全て SKD 11 焼入れで製作し，研削仕上げをした．油は日本石油（株）製のシリンダ油で動粘度 1300 cSt のものを使用した．試料ガラスは前章と同じものを使用し，板厚 t を 0.4～1.8 mm の範囲で変化させた．ガラス板の形状は一辺 40 mm の正方形とした．ダイス穴径 d'は 2.1～10.0 mm の範囲で変化させた．

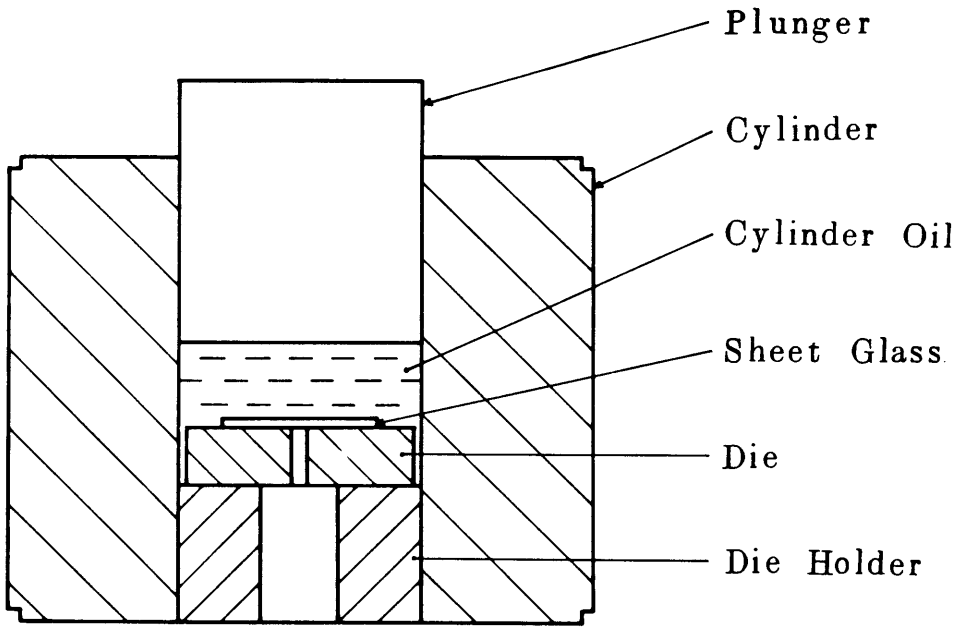


図 3-1 油圧式穴抜き装置

結局この実験において取り扱ったパラメータは，板厚に対するダイス穴径d'/tのみである． d'/tを 2.3～15.3 の範囲で変化させ，この条件がガラス板の穴抜きに与える影響について調べた．なお緩衝材は使用していない．

3.3 打抜き穴とその評価

油圧式による打抜き穴の例を図 3-2 に示す． この方法では，図のように大きなテーパを持った穴が得られ，そのテーパはいつも同じ程度でおよそ 45° であった． 製品部分のクラックに関しては，円周方向クラックの発生は少なかったものの，ほとんどの場合に半径方向クラックが発生し，全体的に見て加圧板を用いた場合より精度が低かった．

打抜き穴の性状は，d'/tの条件によっていろいろ異なったものとなった．その代表的なものを図 3-3 に示す． すなわち条件によって，ほぼテーパ状の破断面だけのもの (a)，半径方向に微小クラックが入るもの (b)，半径方向に大きなクラックが入

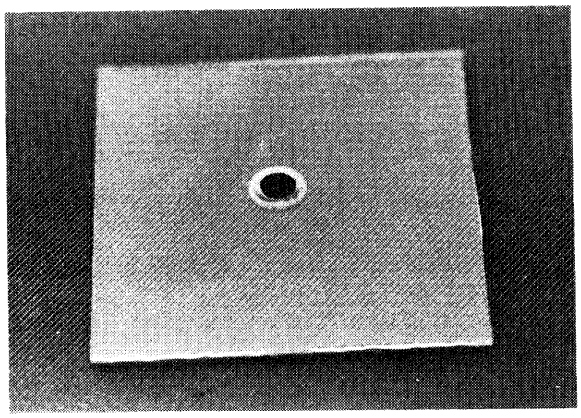
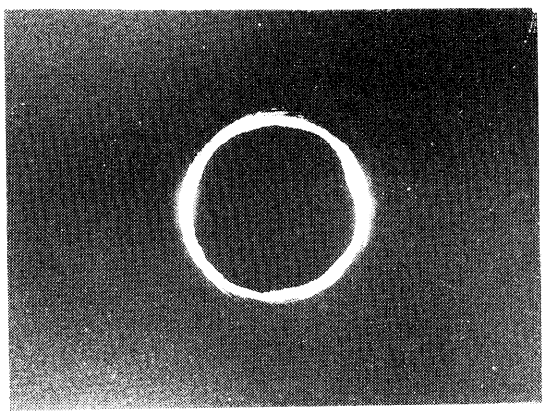
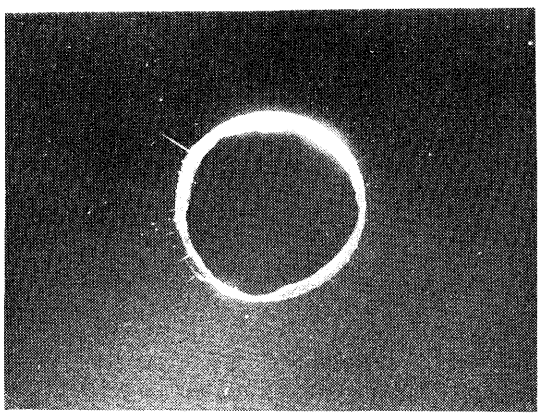


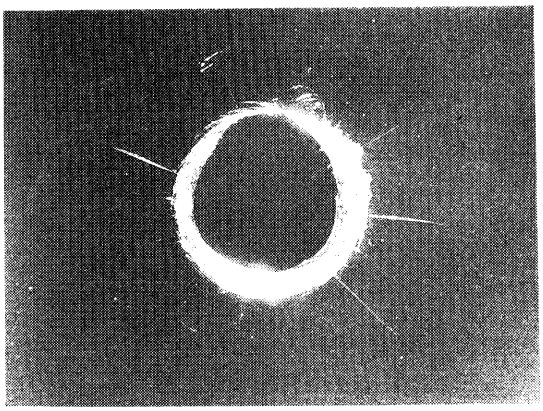
図 3-2　油圧式による打抜き穴



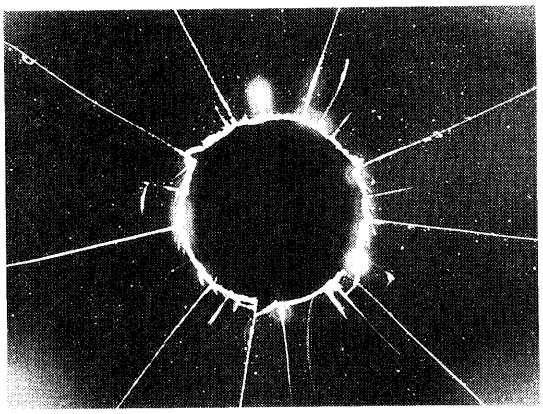
（ａ）○



（ｂ）△



（ｃ）×



（ｄ）＊

図 3-3　油圧式による打抜き穴代表例

るもの（c），板全体がバラバラになってしまったもの（d）などに分けられる．

これらの油圧による打抜き穴はポンチを用いずに得られているために，前章まで評価基準としていた相対損傷長さを適用することができない． そこで図 3-4 を参照し，新しい評価基準として相対クラック長さ L’ ＝（Dmax － d’）／ 2t を定義した．評価は三段階に分類し，以下のように定めた．

（１）評価 ○： 図 3-3（a）に示すように， ほとんど損傷がなく，ほぼテーパ状の破断面だけでできているもの．相対クラック長さは L’<1 の範囲に入る．

（２）評価 △： 図 3-3（b）に示すように， 半径方向クラックはあるが，その長さは短いもの．相対クラック長さは 1≦L’<3 の範囲に入る．

（３）評価 ×，＊： 図 3-3（c），（d）に示すように，大きな半径方向クラックの入ったもの．相対クラック長さは 3≦L’ の範囲に入る．（d）のように板全体がバラバラに破壊してしまい，破断面がテーパ状にならなかったものは特に記号＊で表した．

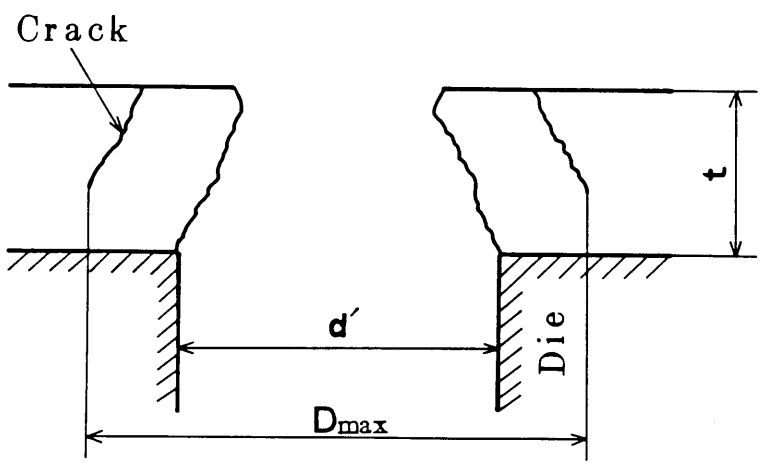


図 3-4 相対クラック長さ説明図

3.4　穴抜き加工条件

打抜き時の圧力（打抜き圧力と呼ぶ）p_m と得られた打抜き穴の評価が，d'/tによってどのように変化するかを示したのが図 3-5 である．図を見ると，打抜き圧力 p_m はd'/tが小さくなるほど，すなわち深穴になるほど急激に高くなること，比較的良好な打抜き穴が得られているのは d'/t = 6 ～ 7 の範囲に限られていること，評価○の良好な打抜き穴を得ることができたのは d'/t = 6.1 における四回の打抜きの中の一回のみであり，この方式において再現性良く良好な打抜き穴を得ることは難しいこと，d'/t >10 の範囲では評価＊しか得られないことなどがわかる．

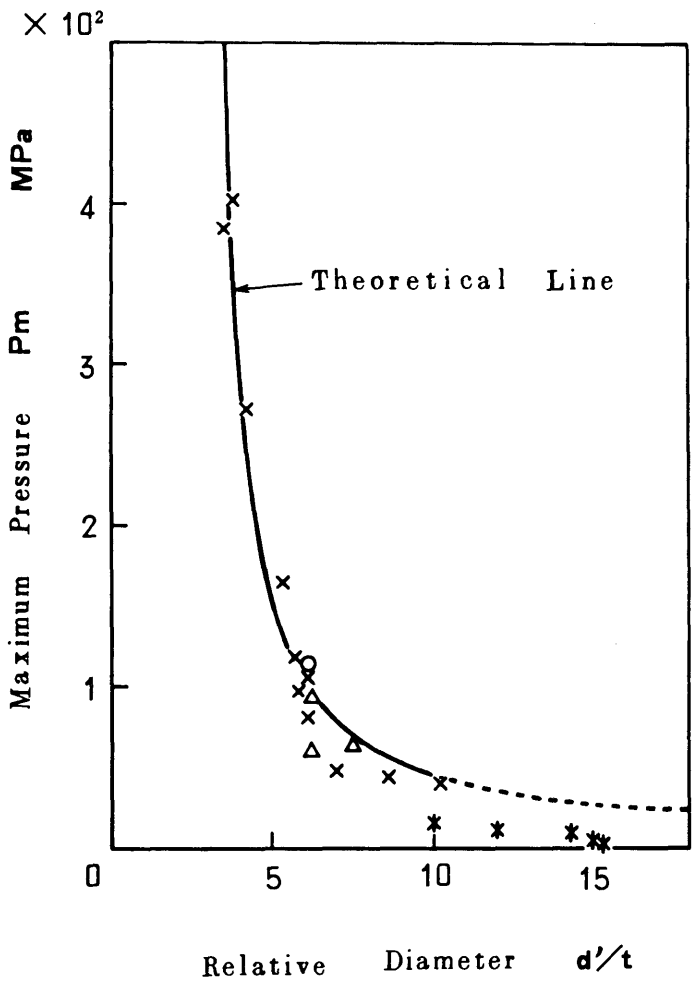


図 3-5　穴抜き加工可能条件

ダイス穴径d'/tが大きいすなわち浅穴の場合に評価が悪くなるのは，圧力が低いうちに打抜きが起こってしまい，ガラス板の製品部分を圧縮する力が十分でないためと考えられる．またd'/tが小さい場合に評価が悪くなるのは，前章の方式においてもそうであったように，深穴を打ち抜くことが困難であるためと考えられる．

3.5　打抜き圧力の概算

図 3-5 に見られるように，ダイス穴径d'/tと打抜き圧力 p_m の間にはある一定の関係がある．本研究では，脆性材料の打抜きに対する理解を深めるために，この関係を初等解によって求めることを以下のように試みた．

まず図 3-3 (a)～(c) の打抜き穴のようなおよそ 45° のテーパ状破断面を，せん断力に起因する引張破壊によるものと考える（純せん断状態での引張応力はせん断方向から 45° 傾いた面で最大になる）．そして断面のせん断応力が一般に中立面で最大になることから，図 3-6 のA部における最大引張応力 σ_m が材料の引張強さ σ_b に達した時に加工が行われると仮定する．σ_m は，図 3-7 に示すA部の応力状態からモールの応力円により求めることができるので，まず τ，σ_z をそれぞれr，z

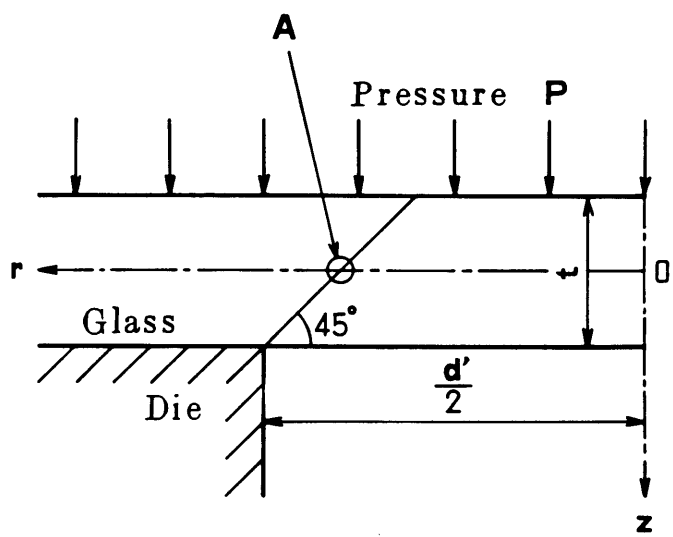


図 3-6　打抜き破断面

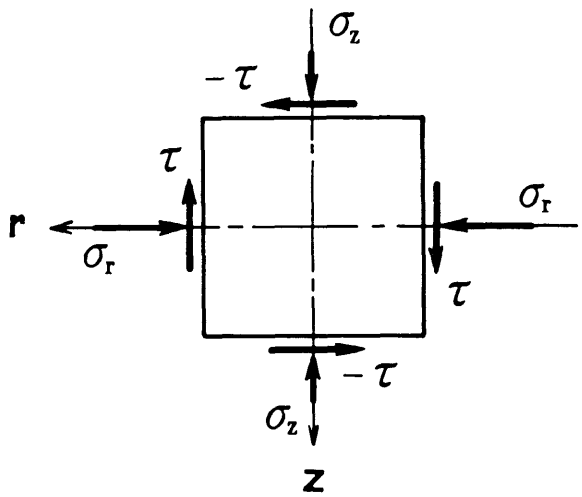


図 3-7　A部の応力状態

方向の力の釣り合いより求めて，

$$\tau = -\frac{3}{8}\left(\frac{d'}{t}-1\right)p\ ,\qquad \sigma_z = -\frac{p}{2}$$

σ_r は，ガラス板の側面からの圧力に等しく，

$$\sigma_r = -p$$

したがって σ_m は，

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_r+\sigma_z) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_r-\sigma_z)^2 + 4\tau^2}$$

$$= \frac{p}{4}\left\{\sqrt{1+\frac{9}{4}\left(\frac{d'}{t}-1\right)^2} - 3\right\}$$

打抜き時において $\sigma_m = \sigma_b$ ，$p = p_m$ となることから p_m を求めて，

$$p_m = \frac{4\sigma_b}{\sqrt{1+\frac{9}{4}\left(\frac{d'}{t}-1\right)^2} - 3} \qquad \text{----------} \qquad (3\text{-}1)$$

以上のように，p_m とd'/tの関係を求めることができる．

図 3-5 の理論線は，表 2-1 より σ_b = 120 MPa とし，式 (3-1) によって描いたものである．図のように，理論線は○，△，×で示された実験値に良く合っており，以上のように打抜き圧力を初等理論によって概算できると言えるだろう．

3.6 円環ダイスによる打抜き

油圧式における装置をそのまま使用し，ダイスのみを図 3-8 に示す円環ダイスに取り換えて打ち抜くことを試みた．この方式は，ダイスの溝の幅を変えることにより，打抜き時の圧力を自由に選ぶことのできるところに着目した打抜き方法である．すなわち通常ダイスの場合には，上述のように d'/t = 6～7 の範囲でしか打ち抜くことができなかったが，円環ダイスを使用すれば溝の幅 b ($=(d_2-d_1)/2$) を適当に定めて，任意の大きさの穴をほぼ定められた圧力で打ち抜くことができるだろう．

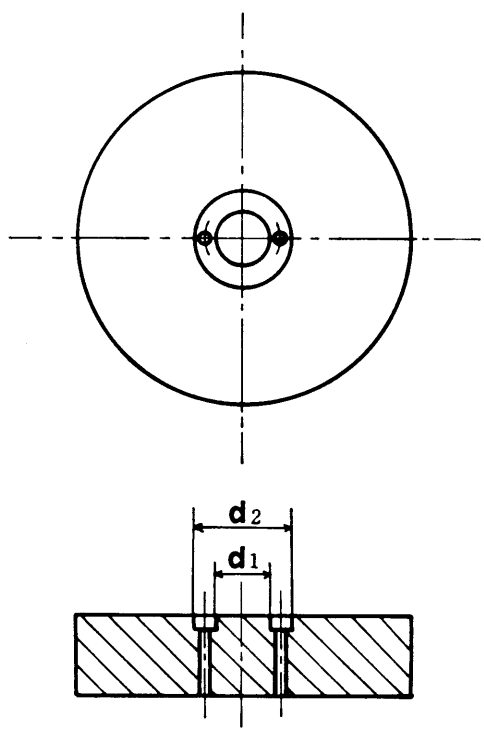


図 3-8 円環ダイス

ダイスは d_1，d_2 がそれぞれ 14.0，18.3 mm のもの， 11.9，18.2 mm のもの，11.1，18.3 mm のものの三種類を使用した． 実験結果は板厚に対する溝の幅 b / t をパラメータとして整理した．以下に実験結果を述べる．

図 3-9 は円環ダイスによる製品の例である． 図に示すように円環ダイスを用いた場合，通常ダイスでは得られない浅穴を得ることができた．そして中心に円形のガラスが残った．

図 3-10 は，円環ダイスにおける打抜き圧力 p_m と打抜き穴の評価が，b / t によってどのように変化するかを示したものである． 図を見ると，もう少し b / t の小さな条件下での実験を行うべきであるが，本実験の装置においてはこれ以上の圧力を得ることはできなかった．そして図のように評価△の打抜き穴しか得ることができなかった．

しかし図 3-9 に見られるように， 円環ダイスにおいては板方向とほぼ垂直な破断面が得られており，この円環ダイスによる穴抜きはテーパのない良好な穴の得られる可能性を秘めたものと言えるだろう．

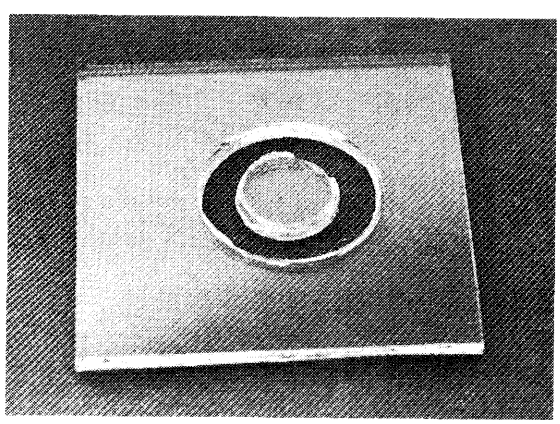


図 3-9 円環ダイスによる製品

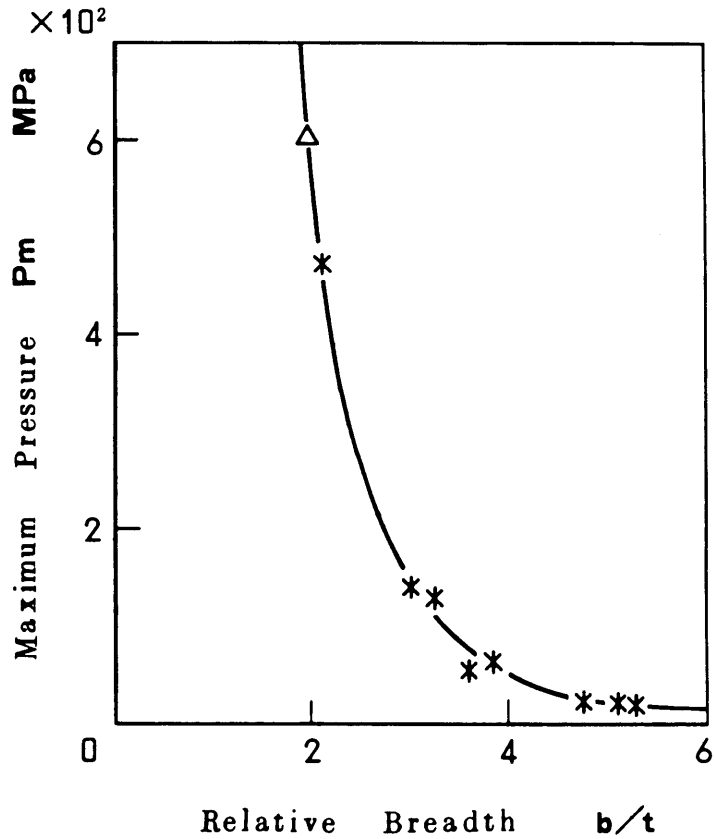


図 3-10　打抜き加工条件および打抜き圧力

3.7　結言

油圧を用いた脆性板の穴抜き装置を試作し，実際にガラス板を加工して以下の結果を得た．

（１）通常の打抜き方法では不可能なガラス板の穴抜きを行うことができた．

（２）簡単な初等理論から打抜きに必要な圧力を概算することができた．

（３）円環ダイスを用いて，通常ダイスでは得られない浅穴を打ち抜くことができた．

この方法は，前章の加圧板を用いる方法とは違った特徴を持ち，多品種少量生産に有利になる可能性を持っているが，今のところ良い条件で打ち抜いてもいつも良好な穴が得られるとは限らず，その再現性が最も大きな課題である．

4．加圧ブランキング[25][26]

4.1　緒言

本章では脆性板の高能率加工法開発の第二段階として，新しいブランク製作加工法の開発を試みた．

２章で述べた加圧板によって製品部分を強く圧縮する打抜き方法は，穴抜きだけではなく，ブランク製作，切断などの打抜き加工法全般に適用することができると考えられ，しかも極めて生産性が高い方法である．しかし本章ではこの方法よりさらに簡単でブランク製作に適した方法の開発を試み，実際にガラス板に対していろいろな形のブランク製作を行った．

4.2　加工原理

一般に，脆性材料は圧縮力によっては破壊しにくいが，引張力によっては低い応力で破壊する．またそのときの破断が引張方向と垂直な面で起こることもよく知られている．

一方，図 4-1 に示すような弾性接触問題が田中らによって解かれている[33]が，このように剛体スタンプによって加圧される無限弾性厚板内の応力分布に着目してみると，剛体スタンプで加圧されている部分の厚板内には強い圧縮応力が存在し，最も大きな引張応力はスタンプ外周に沿った厚板表面において半径方向に発生する．またその応力 σ_r と平均圧力pとの関係は次のように求められている．

$$\sigma_r \approx p / 8 \quad \text{----------} \quad (4\text{-}1)$$

$$(\ r_o = 1,\ r_i = 0.5,\ h = 1\ \text{の場合}\ )$$

著者らは，この弾性接触問題における応力分布に着目し，また上述の脆性材料の性質を考えあわせ，次のような加工法を考えた．その加工法とは，ガラス板を図 4-2 のように剛性の高い加圧板（Anvil）で加圧してゆき，式（4-1）の σ_r によって加圧板周辺部のガラス内に円周方向のクラックを発生させて，ガラス板を加圧板の加圧面と同じ形に加工しようとするものである．このように加圧するだけでブランク製作

を行うことを，本研究では加圧ブランキングと名付けた．

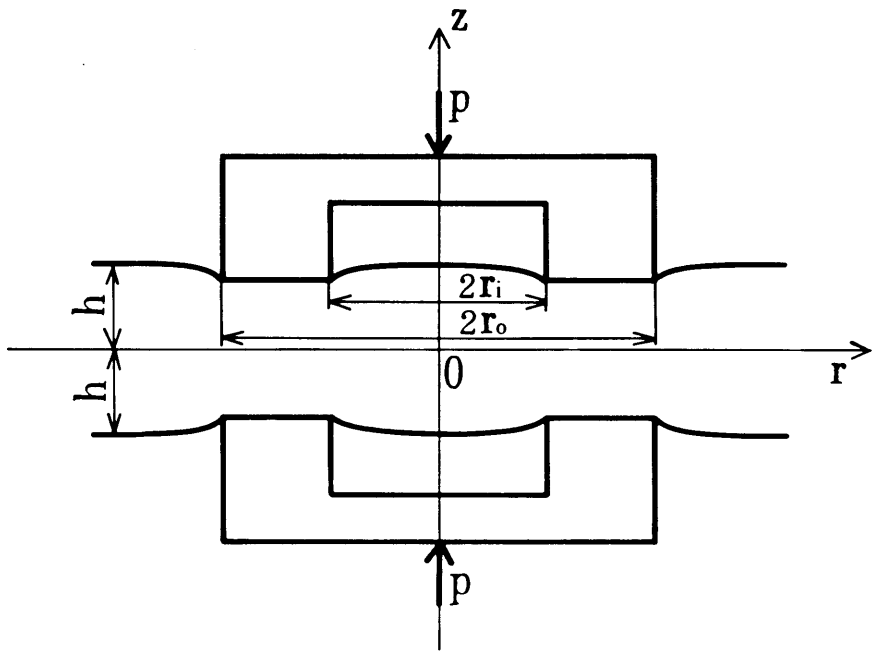


図 4-1　円環状剛体スタンプによる厚板の弾性接触問題

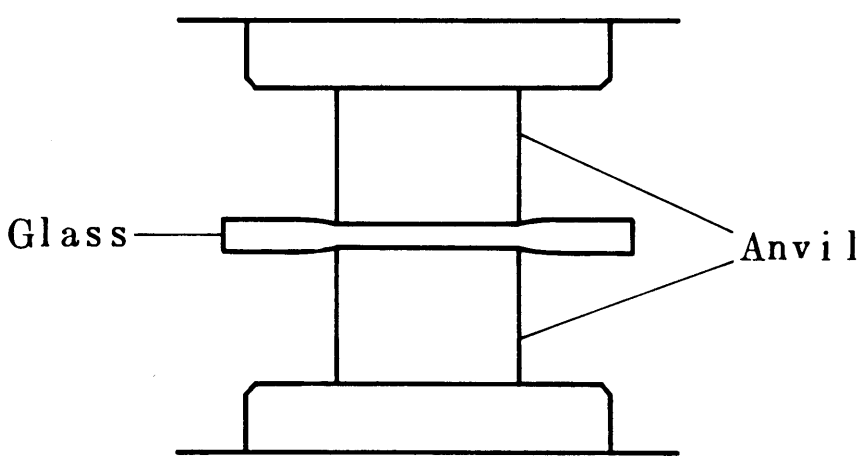


図 4-2　加圧装置

4.3　実験条件

実験装置は図 4-2 のように上下の加圧板だけの単純なもので，これをダイセットに組み込み，ダイセットごとプレスで加圧した．

試料ガラスは，前章までと同じ材質で板厚 0.55 mm のものを用いた．ガラス板の形状はすべて正方形とし，一辺の長さを 10～160 mm の範囲で変化させた．加圧板は，表 4-1 に示す四種類の材料のものを用意した．加圧板直径Dについては，鋼の加圧板を 40，20，10 mm の三種類とし，残りの材料の加圧板を 40 mm のみとした．なお加圧板表面は，鋼と超硬の加圧板を平面研削によって，アクリル樹脂とジュラルミンの加圧板をサンドペーパーによる研磨によって仕上げた．

図 4-2 のようにして加圧ブランキングを行うとき，この加工を左右する重要な因子としては，加圧力，加圧板の剛性，ガラス板と加圧板との寸法比などが考えられる．本実験ではこれらを，図 4-3 を参照して，

p　：ガラス板を加圧する圧力

E　：加圧板の縦弾性係数

s/D：加圧板の直径に対する，ガラス板の一辺の長さ

D/t：ガラスの板厚に対する，加圧板の直径

表 4-1　各種加圧板の材料とその縦弾性係数

Materials	Elastic modulus (GPa)
Acrylic acid resin	3
Duralumin	72
Steel	210
Sintered carbide	700
Glass	71

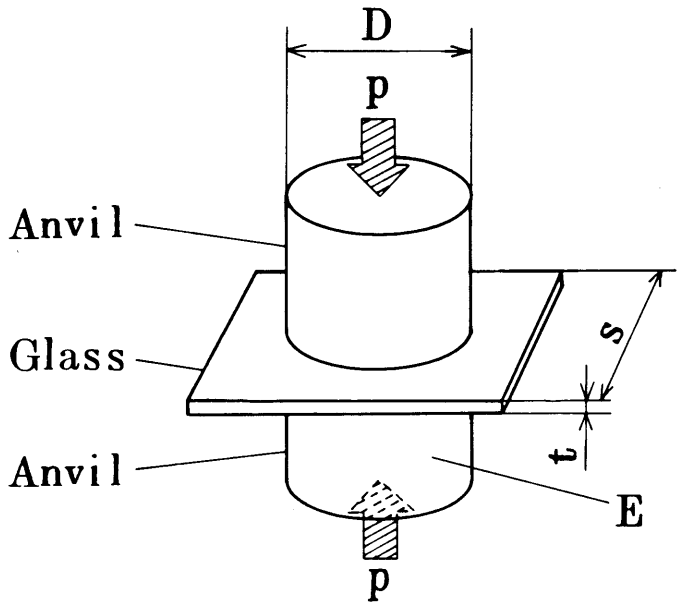
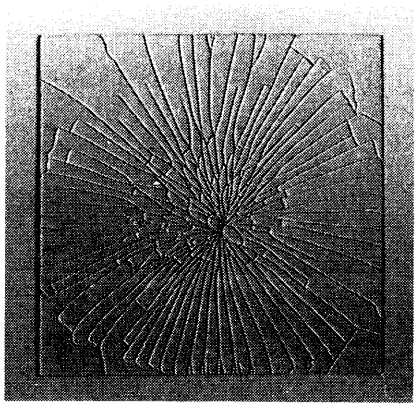


図 4-3　パラメータ説明図

の四つのパラメータに整理し，これらの値を変化させてガラス板の挙動を調べ，加圧ブランキングを行うことのできる条件を明らかにした．

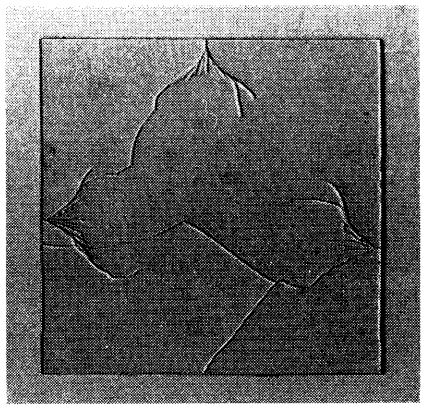
4.4　加圧によるガラス板の割れ方

各種加圧板によって加圧したときのガラス板の割れ方を，図 4-4，4-5，4-6，4-7 に示す（注；図 4-7 (a) は光のあて方を変えて撮影した）．これらの写真のように，ガラス板は加圧板の材料の違いによって，それぞれ特徴ある割れ方を示した．ここで，図 4-4，4-5，4-6 (a)，4-7 (a) の四枚の写真は，それぞれの加圧板で加圧したときに，ガラス板が割れ始めた瞬間を示している．これらの写真に見られるように，加圧板の縦弾性係数が低いほどガラス板には半径方向にクラックが入りやすく，逆に縦弾性係数が高いほど加圧板の周囲にそって円周方向にクラックが入りやすい．鋼，超硬の加圧板で割れ始めた後さらに加圧してゆくと，加圧板で圧縮されていない周辺部分が自然にとびちり，図 4-6 (b)，図4-7 (b) のように加圧された部分だけが残る．ま



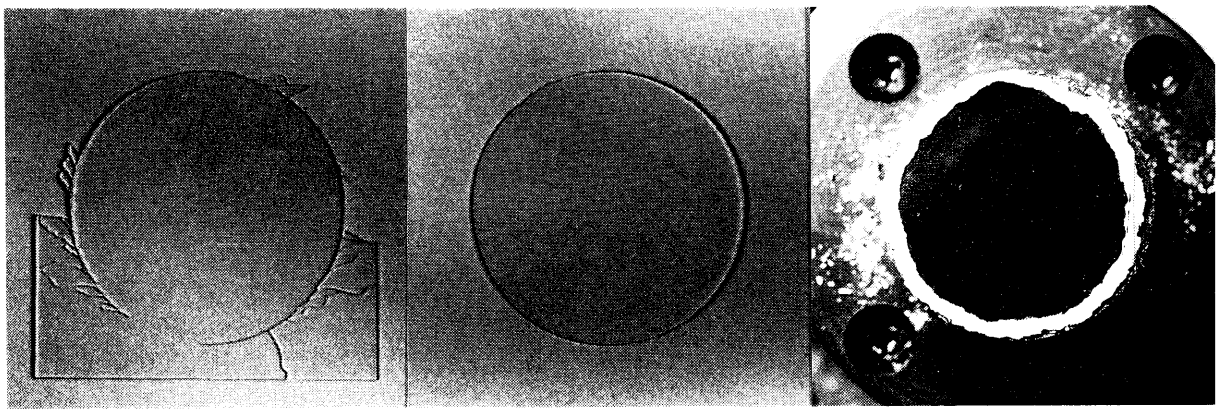
×

図 4-4　アクリル樹脂
加圧板による割れ方



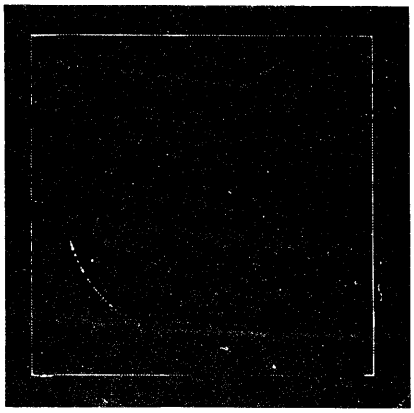
△

図 4-5　ジュラルミン
加圧板による割れ方

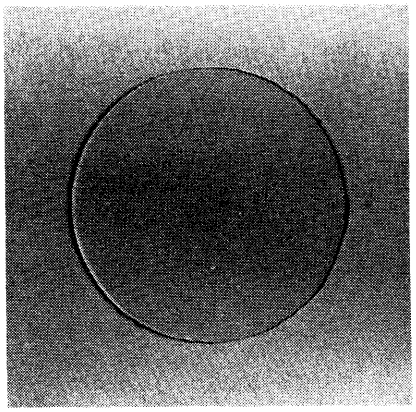


（a）◑　（b）○　（c）●

図 4-6　鋼加圧板による割れ方



（a）◫



（b）□

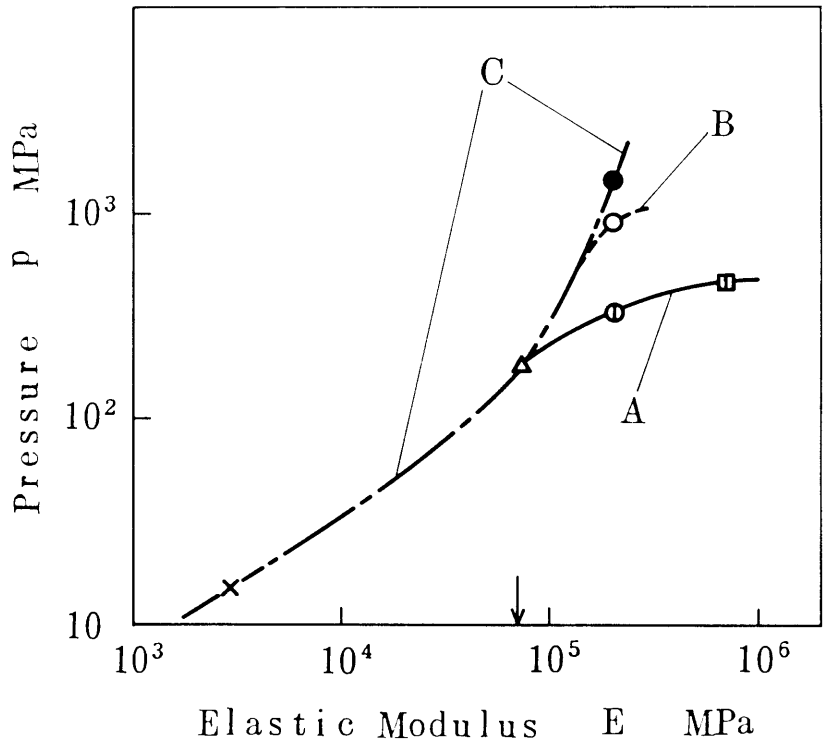
図 4-7　超硬加圧板による割れ方

た鋼の加圧板の場合には，図 4-6 (b) の状態からさらに加圧してゆくと図 4-6 (c) のように加圧領域内の周辺部分が粉々に砕けたが，超硬の加圧板の場合には同じ圧力まで加圧しても砕けなかった．

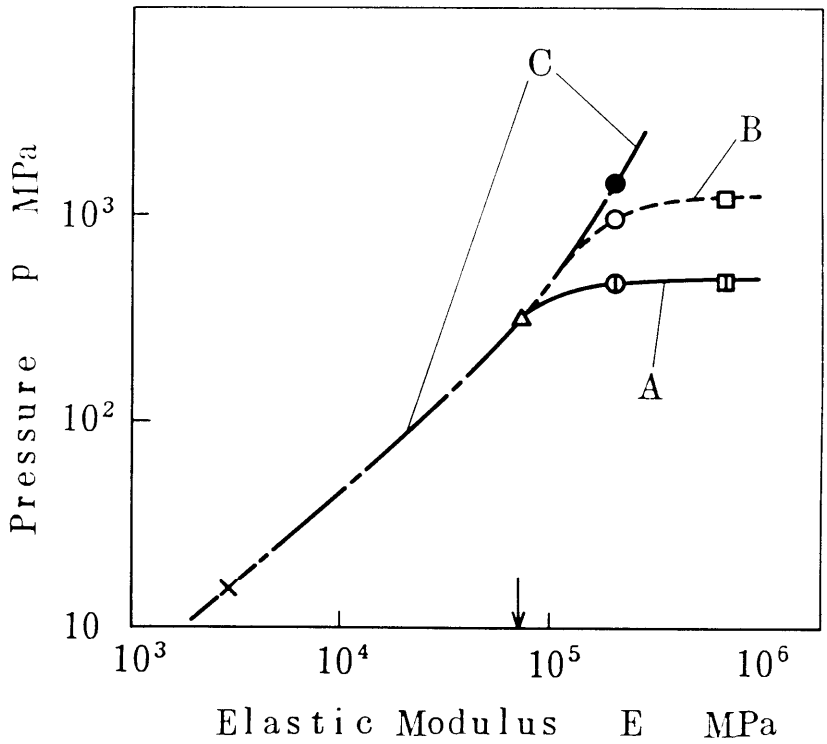
以上のように，ガラス板は加圧板の縦弾性係数などによって大きく異なる割れ方を示したが，結局加圧ブランキングという加工法として見た場合には，図 4-6 (b)，図 4-7 (b) の二つが成功例である．なおこれらの写真の下の記号は，以後の図中においてそれぞれの割れ方を表すものとする．

4.5　ブランキング条件

図 4-8 は，加圧ブランキングを行うことのできる条件と，ガラス板の各種の割れ方の起きる条件を，E，p，s/Dの三つのパラメータを変化させて調べたものである．ここではD/tを 73 で一定とした．なお，図中の矢印はガラスの縦弾性係数を示す．また，図中の実線Aはガラス板が割れ始めて加圧ブランキングが始まる条件を，破線Bは加圧されていない部分が飛び散って加圧ブランキングが完了する条件を，一点鎖線Cは加圧部分内に損傷が起きてしまう条件をそれぞれ示している．つまりガラス板に加圧ブランキングを行うためには，破線Bより圧力が高く一点鎖線Cより圧力が低い条件まで加圧すればよく，すなわち図 4-8 からわかるように，ガラスの三倍以上の縦弾性係数を持つ鋼や超硬の加圧板を用いて，およそ 1000 MPa 程度まで加圧すれば加圧ブランキングが完了する．またs/Dが大きくなると，鋼の加圧板を用いた場合に加圧ブランキングの始まる圧力が高くなる傾向があるが，超硬の加圧板を用いた場合にはあまりこの影響は見られない．

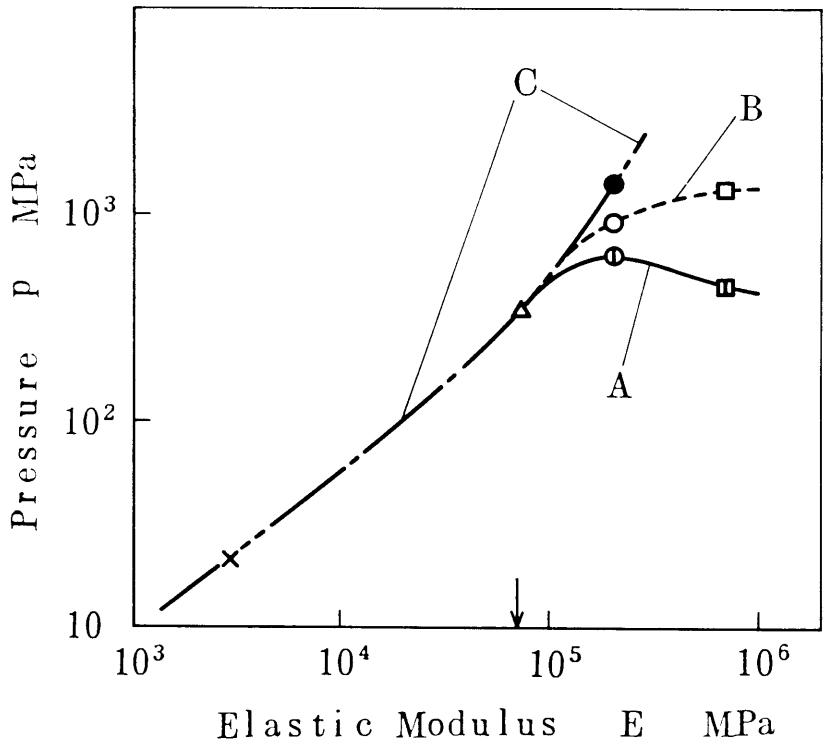


（ａ） s/D＝１の場合



（ｂ） s/D＝２の場合

図 4-8 加圧ブランキング条件および各種割れ方の起きる条件（D/t＝一定）

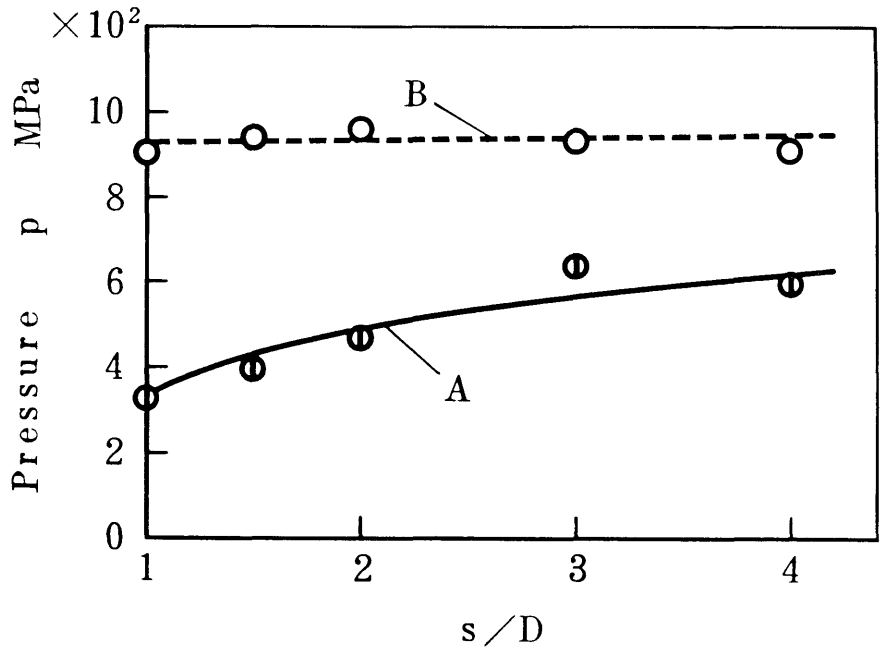


（ｃ） ｓ/Ｄ＝ ３ の場合

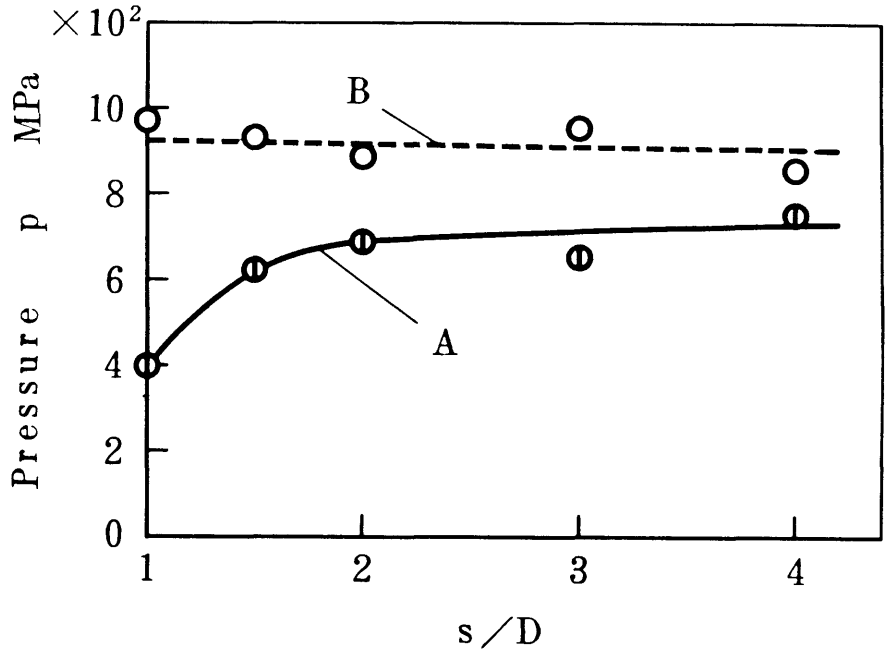
図 4-8 加圧ブランキング条件および各種割れ方の起きる条件（Ｄ/ｔ＝一定）

次に図 4-9 は，図 4-8 において一定としたＤ/ｔを変化させ，図 4-8 と同様にして加圧ブランキング条件を求めたもので，ここでは鋼の加圧板のみを用いてＥを一定とした． この図に見られるように，Ｄ/ｔが小さくなると加圧ブランキングの始まる圧力（Ａ線）が高くなるが，加工の完了する圧力（Ｂ線）にはほとんど影響がない．またｓ/Ｄについては，図 4-8 の場合と同様の傾向がさらに顕著に見られる．

図 4-8，図 4-9 から考えて，縦弾性係数がガラスに比べて十分に大きくｓ/Ｄも十分に大きい時には，加圧ブランキングの始まる圧力は 800 MPa 程度である． 一方剛体スタンプで無限弾性厚板を加圧した時の先の理論式（4-1） によって予想されるこの圧力は， 表 2-1 の引張強さ 120 MPa を用いて求めてみると 960 MPa 程度になる．この理論の場合と本実験の場合には加圧面形状などに多少の差はあるが，脆性材料を扱っていることを考えれば，上述の理論値と実験値とはよく一致していると言える．

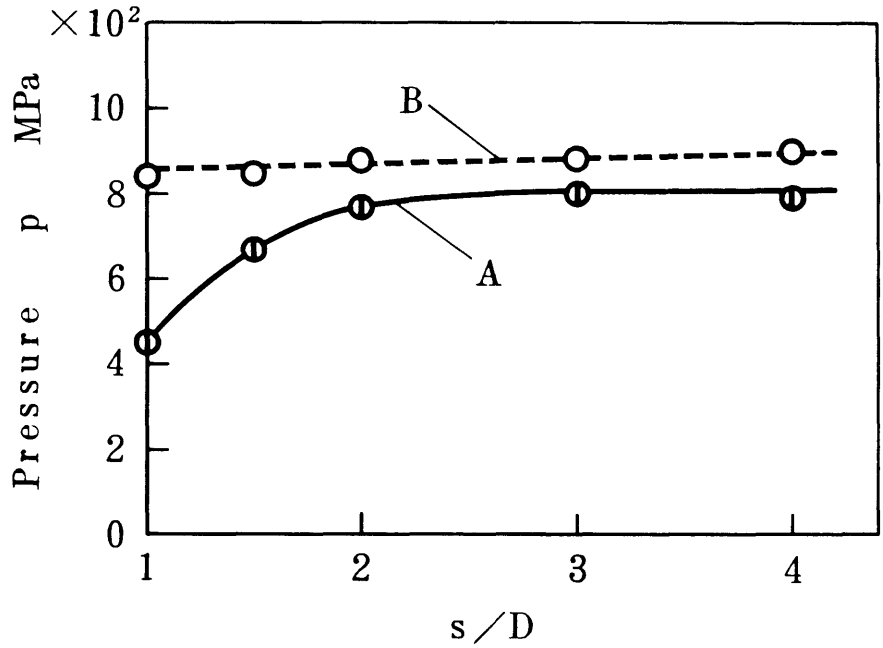


（ａ） D／t ＝ 73 の場合



（ｂ） D／t ＝ 36 の場合

図 4-9 加圧ブランキング条件および各種割れ方の起きる条件（E＝一定）



（ c ） D/t = 18 の場合

図 4-9 加圧ブランキング条件および各種割れ方の起きる条件（E＝一定）

4.6 加圧ブランキングによる製品

前項までに述べたように，加圧ブランキングによって簡単に円形のブランクを製作することができた．そこで，ここでは加圧ブランキングの応用例としていろいろな形の加圧板を製作し，円形の場合と同様にして加工を行った．それらの製品の例を，円形のガラス板も含めて図 4-10 に示す．これらの写真のように，加圧ブランキングによって，ガラス板を簡単にしかもいろいろな形に加工することができる．

これまでに述べてきた加圧ブランキングは，くず部がバラバラに破壊されてしまう例であるが，正方形の加圧板を用いて，その一辺の長さより長い辺と短い辺を持った長方形のガラス板を加圧した場合には，図 4-11 のようにくず部にクラックが発生せずに破断することがわかった．このようにして，加圧ブランキングは板の切断にも応用することができる．

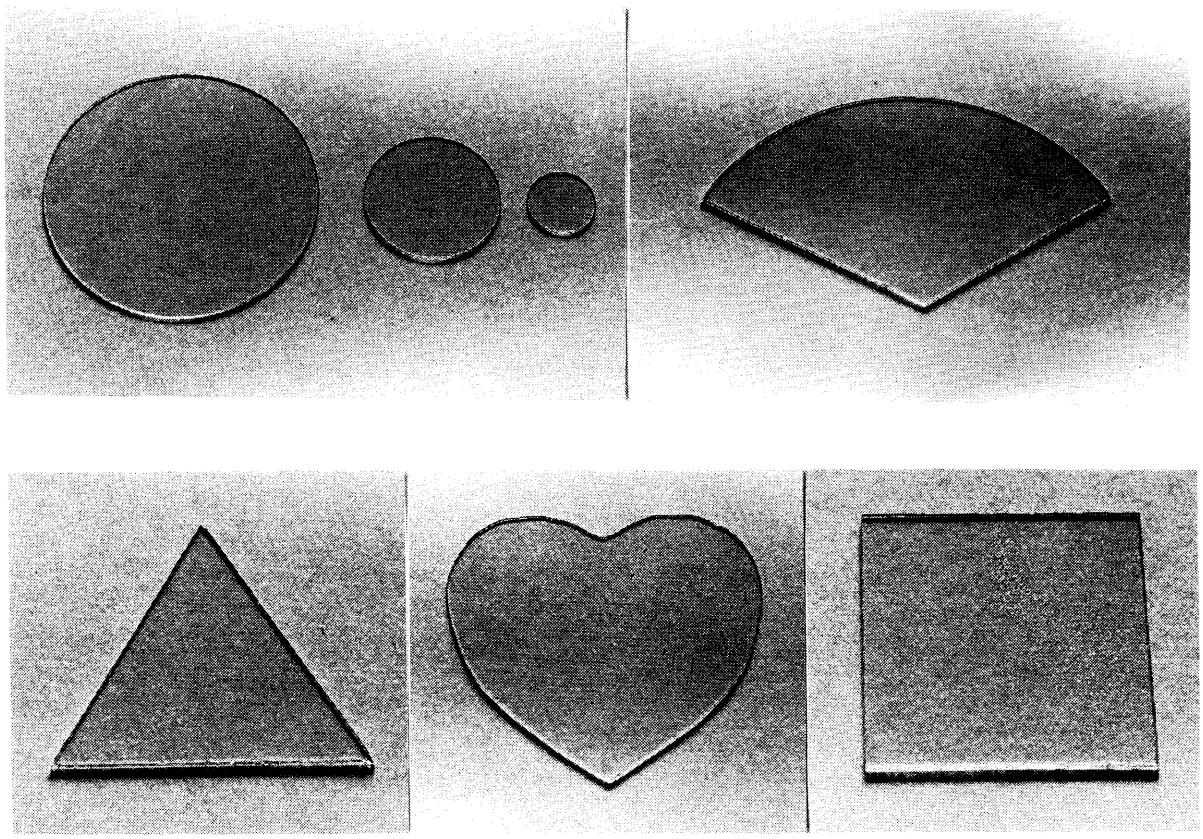


図 4-10　加圧ブランキングによる製品の外観

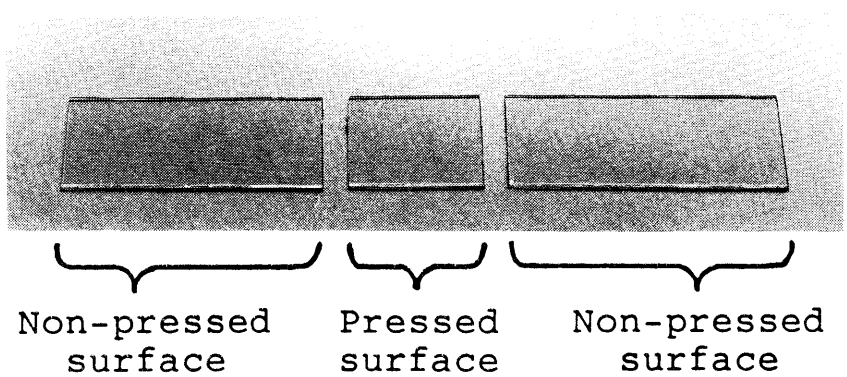


図 4-11　加圧ブランキングによる切断例

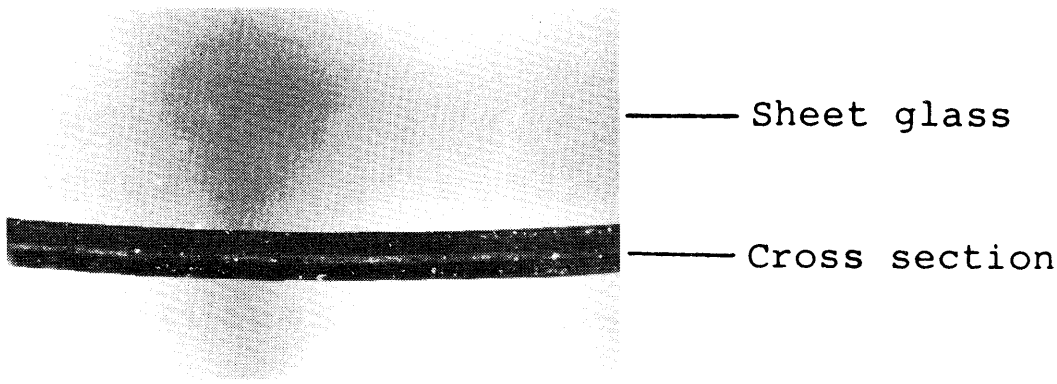


図 4-12　加工面の拡大写真

また図 4-12 は，加圧ブランキングによって得られた製品の加工面の拡大写真である．このように加圧ブランキングにおいては，その加工の簡単さに比べて，良好な加工面を得ることができる．

4.7　結言

本章において得られた成果は，次のようにまとめられる．

（１）剛体スタンプによって加圧される無限弾性厚板内の応力状態に注目して，加圧ブランキングと呼ぶ非常に簡単な加工法を考案し，またその加工を行うことのできる条件を明らかにした．

（２）脆性材料であるガラス板を加圧板によって加圧するとき，ガラス板がどのような条件でどのような割れ方をするのかを明らかにした．

（３）加圧ブランキングによって，実際にガラス板をいろいろな形に加工し，この加工法の汎用性を示した．

以上のように，加圧ブランキングは非常に簡単な加工法であり，実用的にも十分な能率と精度，汎用性をもっていると考えられる．

5．プレス加工における加工可能条件の総合的検討[32]

5.1　緒言

本研究では前章までに，ガラス板を例にとって脆性板のプレス加工法の開発を試みてきた．そして，加圧板で板の製品部分を圧縮する打抜き加工法と，板を上下からプレスするだけでいろいろな形のブランクを製作することのできる加圧ブランキング法を開発した．

本章では，これらの（1）穴の打抜きのための条件，（2）素板の成形条件，さらに以下に述べるように（3）素板成形における打ち捨て機構の付加の影響など，脆性板のプレス加工における製品の品質と加工条件の関係を総合的に検討した．

5.2　加工の概要

本章での穴抜きは，図 5-1 のようにしてガラス板を上下の加圧板で直接加圧して行う．この場合，加圧する圧力が低いと穴の周辺に大きなクラックが発生してしまい，逆に高すぎると加圧板の外周に沿ってガラス板が割れ始めて（加圧ブランキングの開始を意味する）しまう．そのため，加圧条件と製品の品質の間の関係を知ることが重要になってくる．

またここでは図 5-2 のように加圧板の外側にスリーブを設け，スリーブを下げて外辺を破壊させて加圧板で加圧された部分を残す，いわば打ち捨て加工も行った．外辺の打ち捨ては図のようにガラス板を加圧した状態で行うので，加圧板の圧力が高いと加圧ブランキングが完了してしまいスリーブで打ち捨てる必要がなくなる．また低すぎる状態で打ち捨てると，やはり素板内に大きなクラックが発生してしまう．

本章では，以上の二つの装置を用いてさまざまな条件下で加圧ブランキング，穴の打抜き，外辺打ち捨てを行い，（ｉ）穴だけをあけたい場合，（ii）素板だけを得たい場合，（iii）穴と素板の両方を得たい場合の加工について，良好な製品の得られる加工条件を検討した．

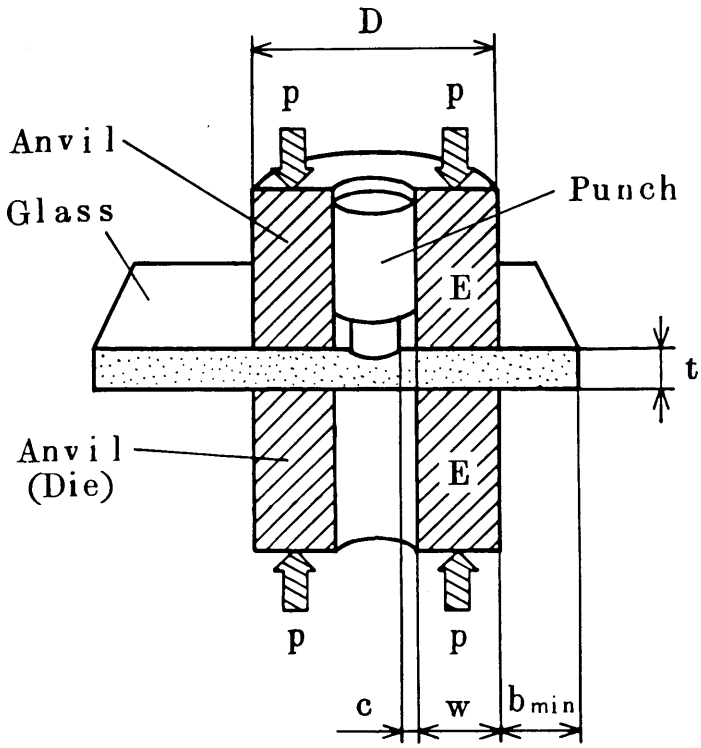


図 5-1　穴抜きと加圧ブランキング

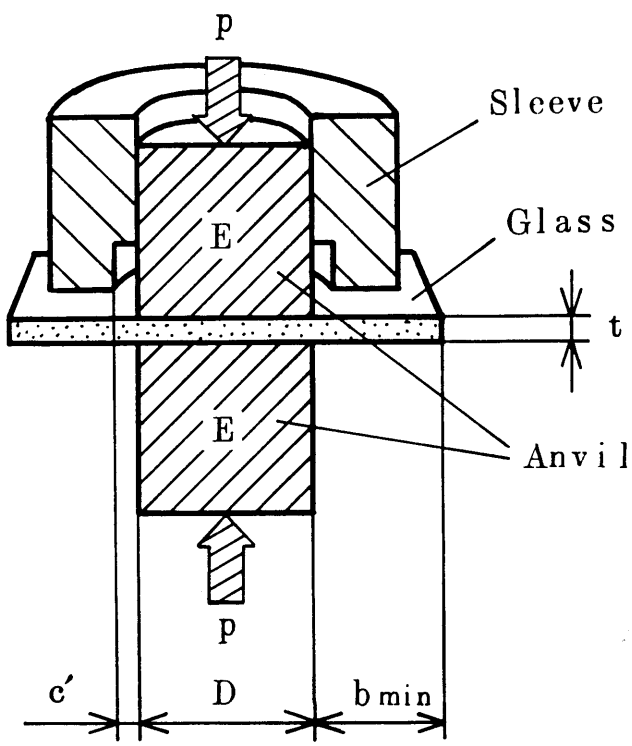


図 5-2　外辺打ち捨てと加圧ブランキング

5.3　穴抜きと加圧ブランキング

5.3.1　実験条件

ここでは図 5-1 のようにして，ポンチによる穴抜きと加圧板外周での加圧ブランキングを行う．加圧板及びポンチは焼入れ鋼（SKD 11）で製作し，ポンチとダイス（この場合下側の加圧板がダイスに相当する）のクリアランスｃの設定は，ポンチを径の異なるものに取り替えて行った．ガラス板には，前章までと同じ普通透明ガラスを用いた．

このように穴の打抜きと加圧ブランキングを行うとき，これらの加工を左右する重要な因子としては，ガラス板を加圧する圧力，加圧板の剛性，加圧板とポンチとガラス板の間の寸法比などが考えられる．ここではこれらを，

p　　：ガラス板を加圧する圧力

E　　：加圧板の縦弾性係数

c/t　：ガラスの板厚に対するクリアランス

w/t　：ガラスの板厚に対する加圧幅

bmin/t：ガラスの板厚に対する，ガラス板の最小突き出し部分の突き出し幅

D/t　：ガラスの板厚に対する加圧板直径

の六つのパラメータに整理し，それぞれのパラメータが加工に与える影響を調べた．

5.3.2　製品の評価

図 5-3 (a) は穴だけをあけた例，(b) は穴と素板の両方を同時に加工した例である．これらは成功例であるが，実際には，素板を加工するのに成功したが穴を加工するのに失敗した場合など，いろいろな結果が得られている．そこで，打抜き穴の良否と加圧ブランキングの成否を表す記号を以下のようにして別々に定め，実験結果を記号で表した．

打抜き穴については，２章の方法とまったく同様にして評価を行い，◎から×までの五段階に分類した．

一方加圧ブランキングの成否については，次のような簡単な方法で表示した．

▽：加圧ブランキングがすでに始まっていることを示す．

◇：加圧ブランキングがすでに完了していることを示す．

＊：ガラス板が加圧内部で粉砕したときの条件を示す．

実験の結果は，以上の二つの表示法を総合して表した．例えば記号○は良好な穴のみが得られたことを，記号◇は良好な穴と同時に素板も加工されたことを示す．これらの記号の組合せの一部と，それに対応する実験結果の例を図 5-4 に示す．

5.3.3　加工可能条件

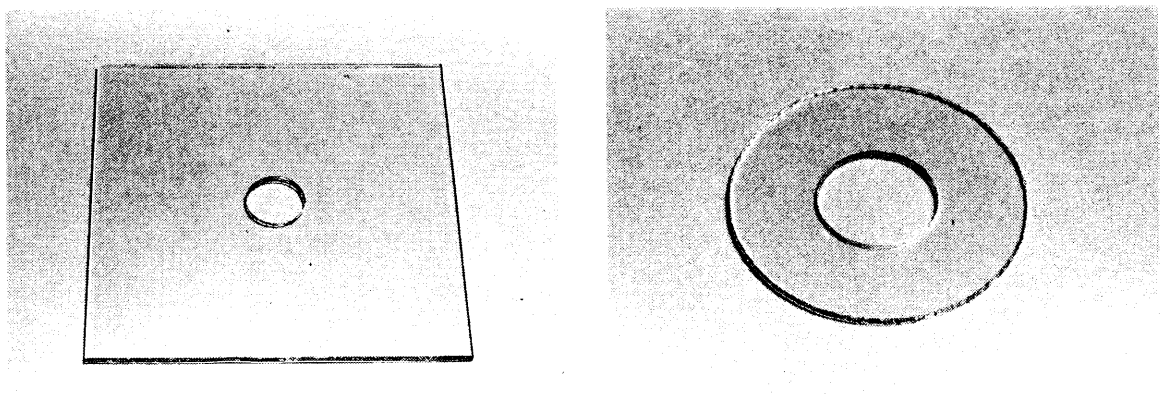
実験条件を変えるパラメータが非常に多いので，各々のパラメータごとに，それぞれの加工が可能な条件を以下に検討した．

（１）ｃ/ｔとｐ　図 5-5 はクリアランスｃ/ｔと圧力ｐを変化させて穴抜きを行い，加工可能な条件を示したものである．図の下にはこの場合の実験条件を示す．ここで，Ａ線は加圧ブランキングの始まる圧力，Ｂ線は加圧ブランキングの完了する圧力，Ｃ線はガラス板が加圧内部で粉砕し始める圧力，Ｇ線は良好な穴が得られる条件とそうでない条件との境界を示している．

すなわち，穴抜き加工はＣ線とＧ線に囲まれた領域において可能であり，そのうち穴のみを加工するにはＡ線とＧ線に囲まれた領域，穴と素板の両方を加工するにはＢ，Ｃ，Ｇ線に囲まれた領域でなければならないことがわかる．

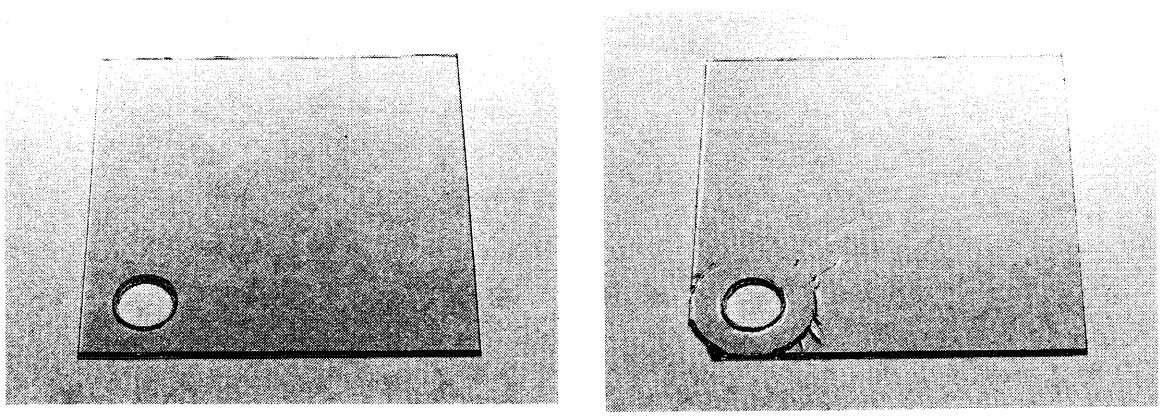
加圧力ｐについて，ここでは 100 MPa から良好な穴抜きが可能になっているが，２章の実験ではこの四倍程度の圧力が必要であった．これは２章では柔らかい緩衝材を用いていたために，同じ平均圧力でも板の変形を拘束する力が弱かったためと考えられる．

クリアランスｃ/ｔについては，２章での結果と同様に，大きすぎても小さすぎても良い穴は得られず 0.2～0.8 程度が適している．

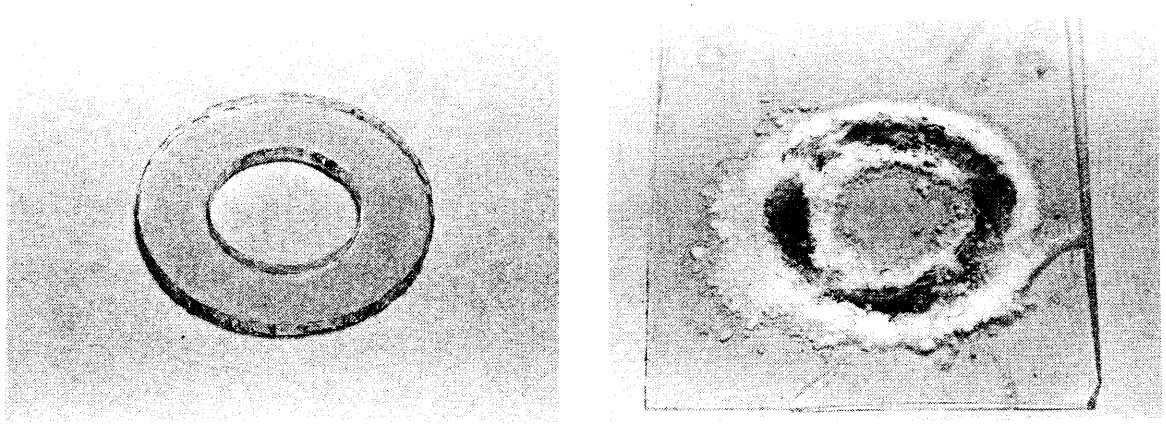


（ a ）　　（ b ）

図 5-3　製品例

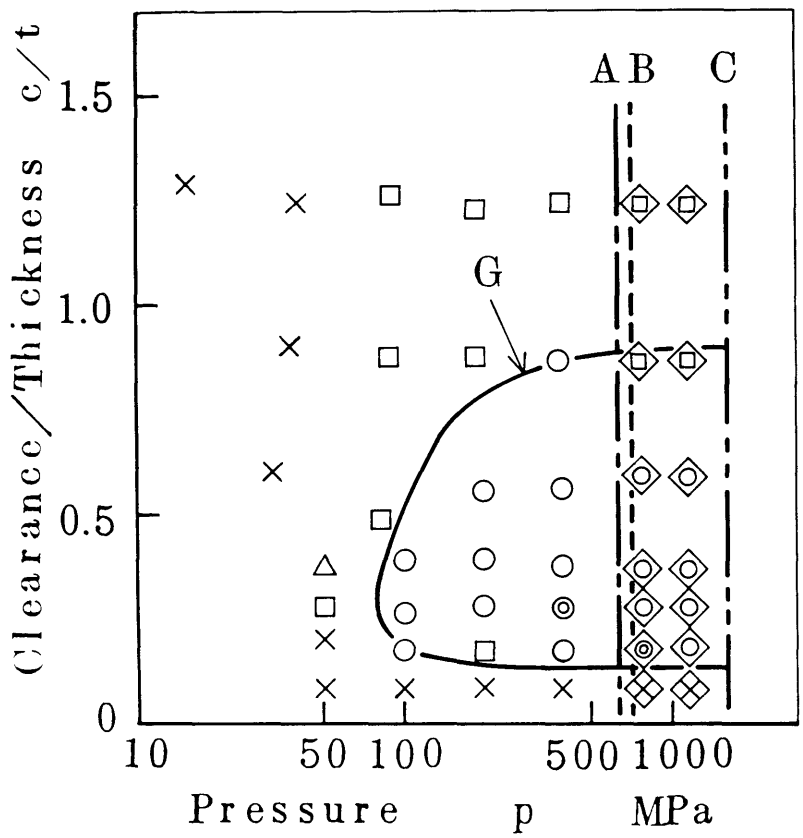


○　　▽



◇　　＊

図 5-4　加工したガラス板とそれに対応する記号



[bmin/t = 21, D/t = 29, w/t = 8.6
E = 210 GPa (Steel), t = 0.7 mm]

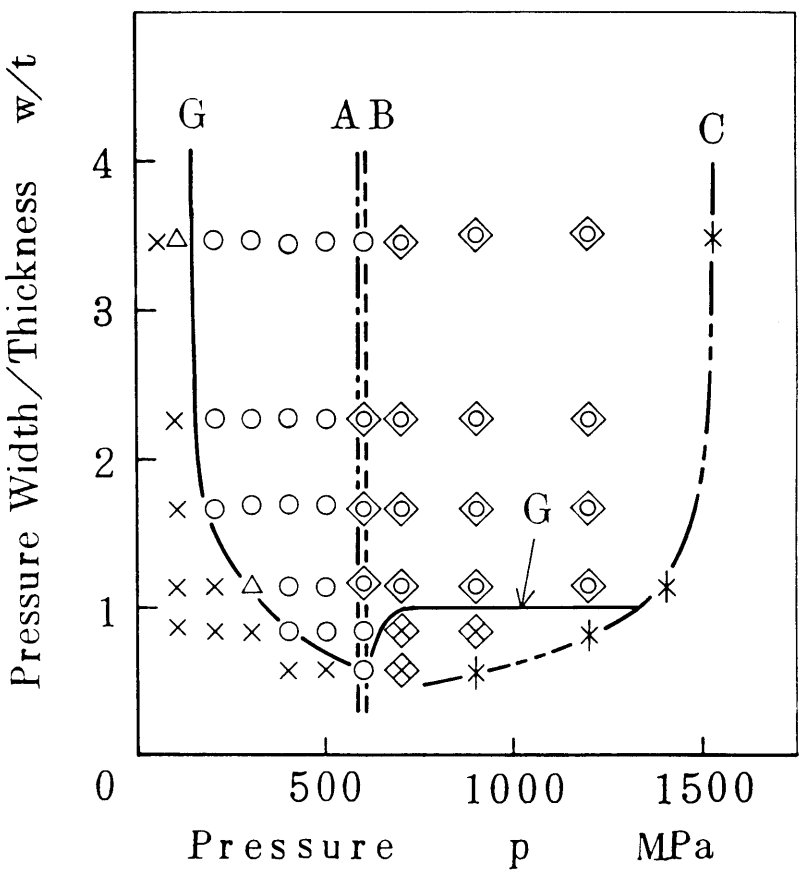
図 5-5 加工可能条件（c/t，p変化）

（2）w/tとp　図 5-6 は加圧幅w/tと加圧力pについて加工可能条件を表したものである．(a) は突き出し量bmin/tが十分に大きい場合，(b) は 0 の場合を示している．A線とG線に囲まれた領域で穴のみを，B，C，G線に囲まれた領域で穴と素板の両方を加工できることは，前述の通りである．

図のように，加圧幅w/tが小さすぎると高い圧力でしか穴加工できなくなり，1以下では急激に加工できなくなってしまう．このことは，板の端に穴をあける場合に，

端から穴までの寸法（さん幅）を板厚以下にはできないことを意味している．

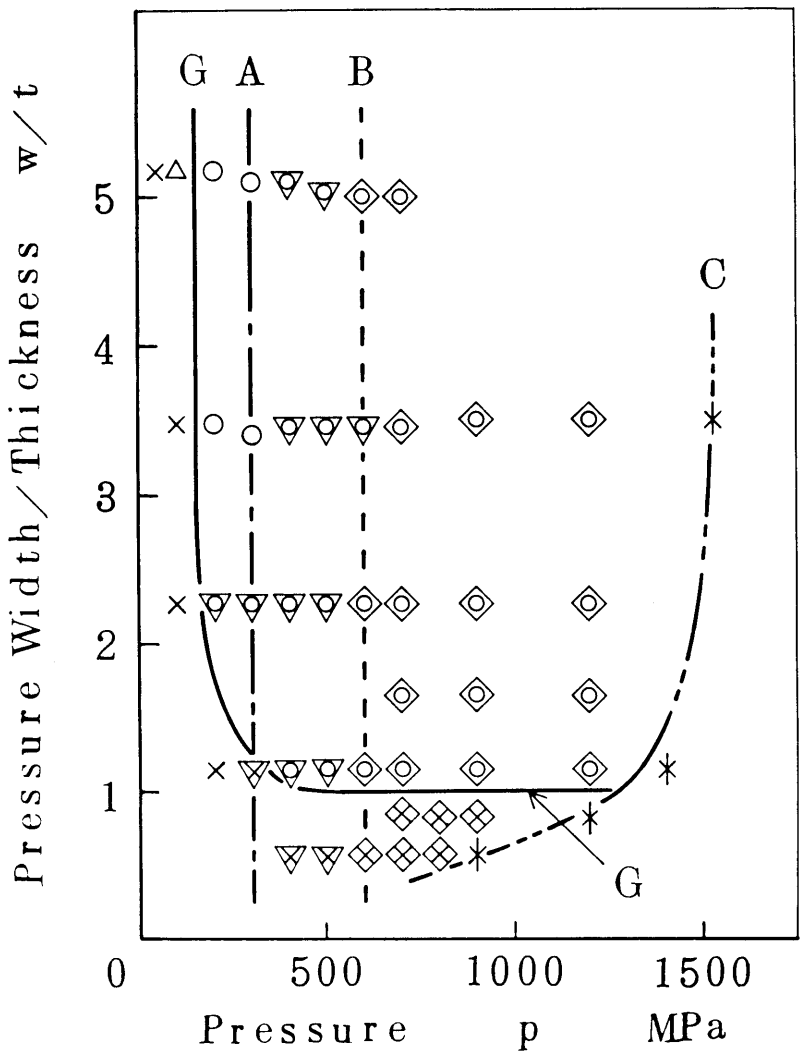
また（a），（b）両図を比較すると，突き出し量bmin/tは主に加圧ブランキングの開始を表すA線に影響を与え，それが小さいと（b）のようにA線とG線に囲まれた領域（穴のみを加工できる領域）が狭くなってしまうことがわかる．



［ bmin/t = 10～17, D/t = 6～14, c/t = 0.5
E = 210 GPa (Steel), t = 1.2, 1.8 mm ］

（a） bmin/t が十分に大きい場合

図 5-6 加工可能条件（w/t，p変化）



［ bmin/t = 0, D/t = 6～17, c/t = 0.5
E = 210 GPa (Steel), t = 1.2, 1.8 mm ］

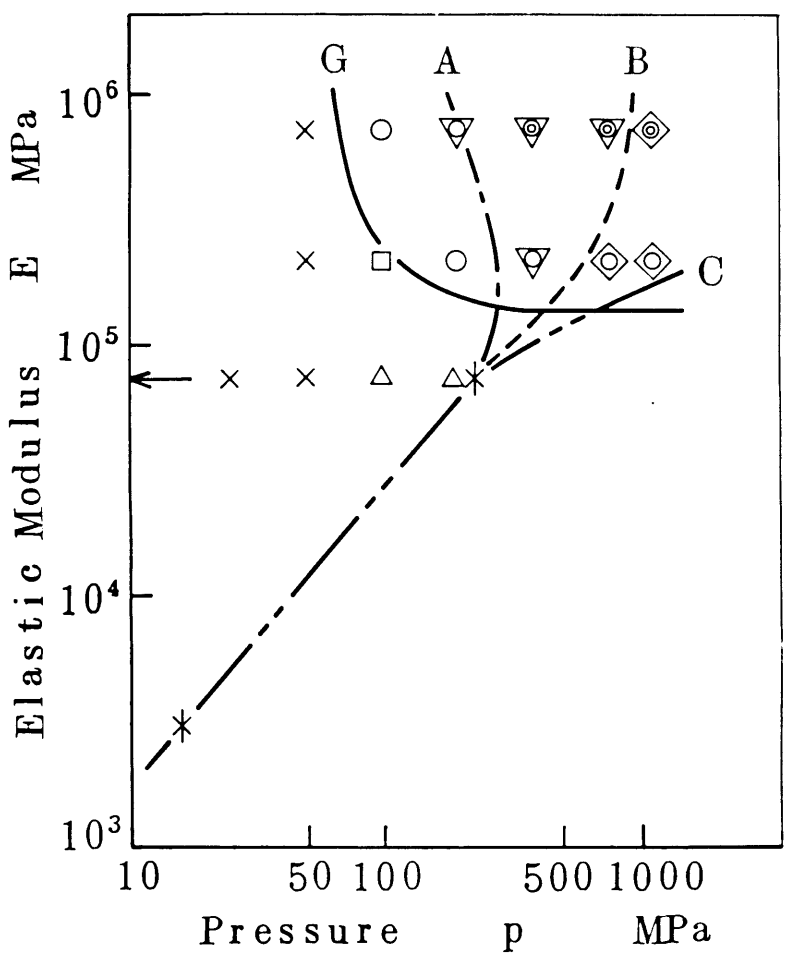
（ b ） bmin/t = 0 の場合

図 5-6 加工可能条件（w/t，p変化）

（３）Eとp　この実験では，加圧板の材質に焼入れ鋼の他，超硬，ジュラルミン，アクリル樹脂を用いた．図 5-7 はその加工の結果をそれぞれの材質の縦弾性係数の違いで整理したものである．図中の矢印はガラスの縦弾性係数の値を示している．

この図から，縦弾性係数がガラス板とほぼ同じジュラルミンでは評価△の穴しか得られず，鋼，超硬と高くなるにつれて○，◎と良好な穴が得られることがわかる．つまり良好な穴加工を行うには剛性の高い工具を用いなければならない．また縦弾性係数は，図のようにA，B，C線にも大きな影響を与えている．

（４）bmin/tとp　突き出し量bmin/tは主に加圧ブランキングに対して影響を与えると考えられるので，ここでは穴抜きを行わず加圧実験のみを行った．図 5-8 にその結果を示す．グラフ内の▲は加圧ブランキングが始まった圧力，●は完了した



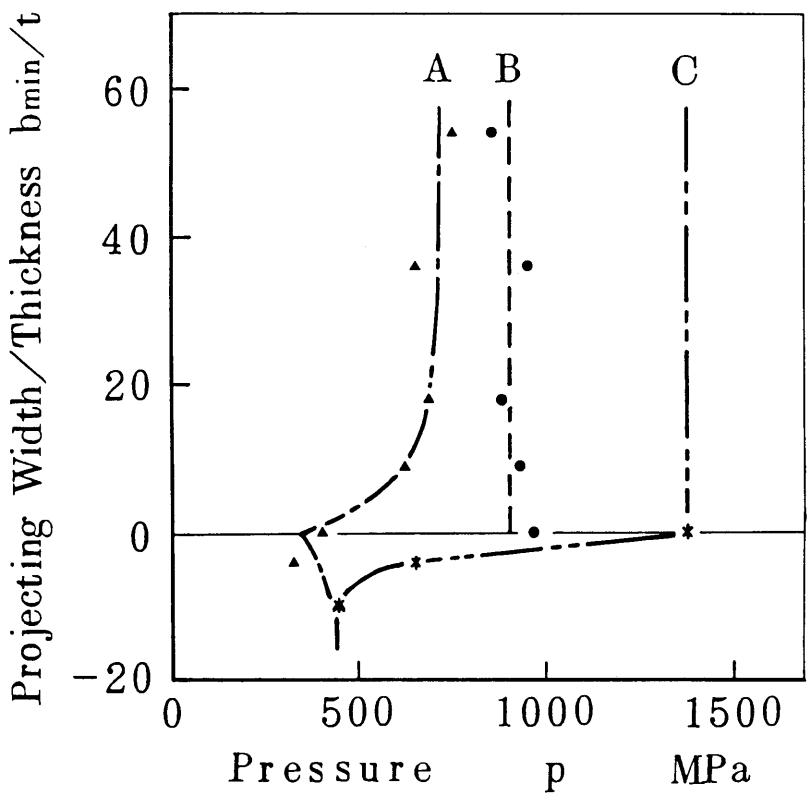
〔 bmin/t = 5, D/t = 40, c/t = 0.25, w/t = 15, t = 1.0 mm 〕

図 5-7　加工可能条件（E，p変化）

圧力，＊は加圧内部でガラス板が粉砕した圧力を表している．

ここで，穴抜きのみを行いたい場合には加圧ブランキングが始まってはならないのでＡ線より加圧力ｐの低い領域，加圧ブランキングを同時に行いたい場合にはＢ線とＣ線の間の領域で，ガラス板を加圧しておかなければならないと考えられる．図よりｂmin/ｔが大きいほどＡ線の圧力が高いので，穴抜きのみを行うには，ｂmin/ｔが大きい方が加工可能領域が広くて良いことになる（図 5-6 (a)，(b) を比較した前述の結果と同様である）．

ｂmin/ｔが負の領域では，加圧部分が加圧板の面より少ない加工になるが，図のようにＡ，Ｃ線の圧力が共に低いなど本研究の加工に不適切な点が多かった．この結果



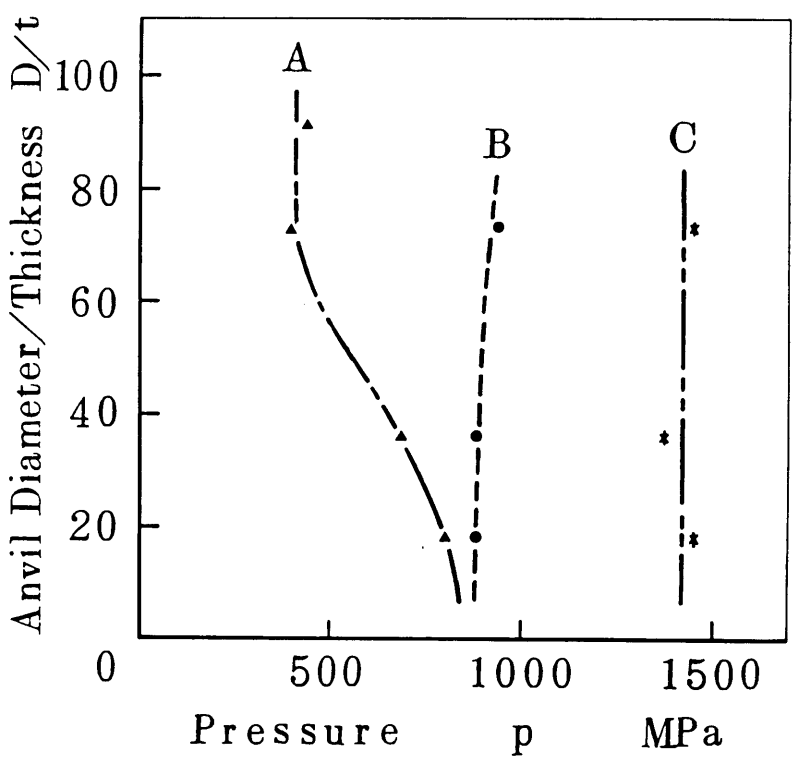
〔 D/t = 36, E = 210 GPa (Steel), t = 0.55 mm 〕

図 5-8 ガラス板の割れる圧力（ｂmin/ｔ変化）

から振り返ると，２章の実験ではこの不適切な（ガラス板が低い圧力で破壊してしまう）条件で加圧を行っていたために，緩衝材を用いても板の周辺部に欠陥を生じていたことがわかる． 一方良い加圧条件で穴抜きを行えば，図 5-3 (a) の例のようにこうした問題は生じないので，穴抜きを行うにはまず良い条件で板を加圧することが重要である．

なおＢ線より圧力の高い領域は，加圧ブランキングが完了してしまい結果的に突き出し量が 0 になるので，bmin/tに無関係になる．

（５）D/tとp　加圧板直径D/tも加圧実験のみを行った．その結果を図 5-9 に示す． 図より穴のみを加工したい場合には，D/tが小さいほどＡ線の圧力が高くて良いことがわかる．



〔 bmin/t = 18, E = 210 GPa (Steel), t = 0.55 mm 〕

図 5-9 ガラス板の割れる圧力（D/t変化）

5.4　外辺打ち捨てと加圧ブランキング

5.4.1　実験条件

ここでは図 5-2 の方法を用いて，外辺打ち捨てと加圧ブランキングを行う．加圧板及びスリーブは焼入れ鋼で製作し，クリアランスｃ'の設定はスリーブを内径の異なるものに取り替えて行った．

加工条件を変えるパラメータは，前項と同様にして ｐ，Ｅ，ｃ'/ｔ，ｂmin/ｔ，Ｄ/ｔの五つと考えられる．しかしＥ，ｂmin/ｔ，Ｄ/ｔが加圧ブランキングに与える影響は前項で明らかになっているので，ここではｃ'/ｔとｐの影響を調べた．

5.4.2　素板の評価

図 5-10 は外辺打ち捨てによる素板の一例であり，図 5-11 はいろいろな条件で得られた素板の加工部分を拡大したものである．このように外辺打ち捨てと加圧ブランキングによってさまざまな素板が得られたので，これらの良否を評価するために次のような基準を定めた．まず図 5-12 のように，損傷部分の最小直径を Ｄmin，最大直径を Ｄmax とする．これらの値がともに加圧板直径 Ｄ に近いほど製品の品質が良い．そこで，これらの値と加圧板直径 Ｄ との差をとって板厚で無次元化した値（Ｄmax－Ｄ）／ 2ｔ，（Ｄ－Ｄmin）／ 2ｔ のうち，大きい方の値を評価の基準 Ｌ″とした．得られた素板は Ｌ″ によって以下の三段階に分類した．

○：　　Ｌ″ ＜ 0.5　（ 図 5-11 (a) ）

△：0.5 ≦ Ｌ″ ＜ 1　（ 図 5-11 (b) ）

×：　1 ≦ Ｌ″　（ 図 5-11 (c) ）

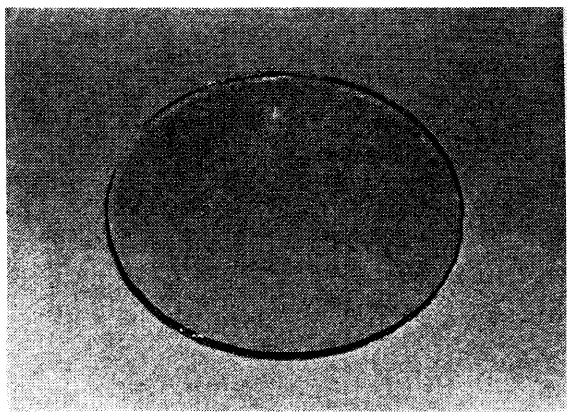
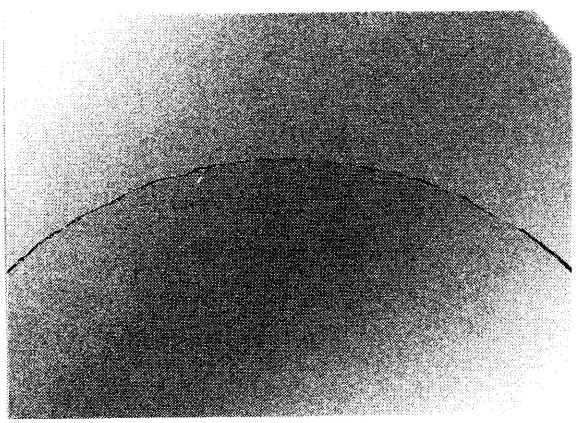
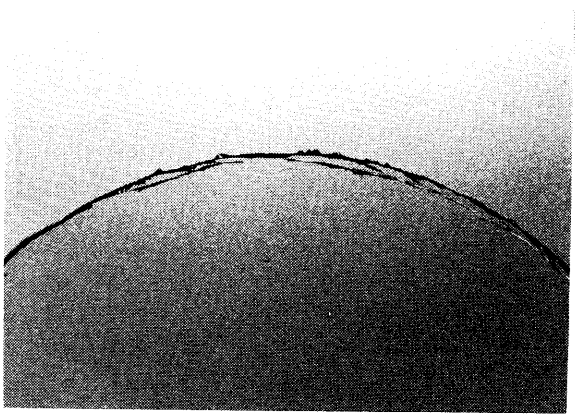


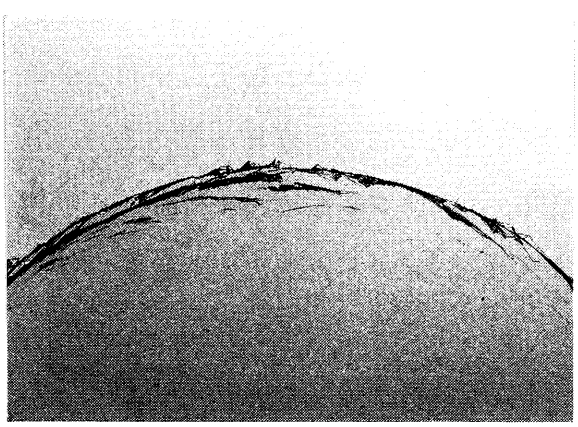
図 5-10　外辺打ち捨てによる製品



（a）○



（b）△



（c）×

図 5-11　加工部分の拡大写真

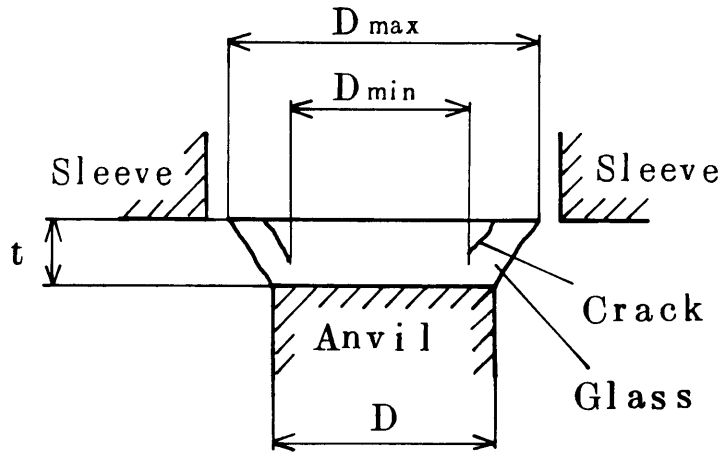


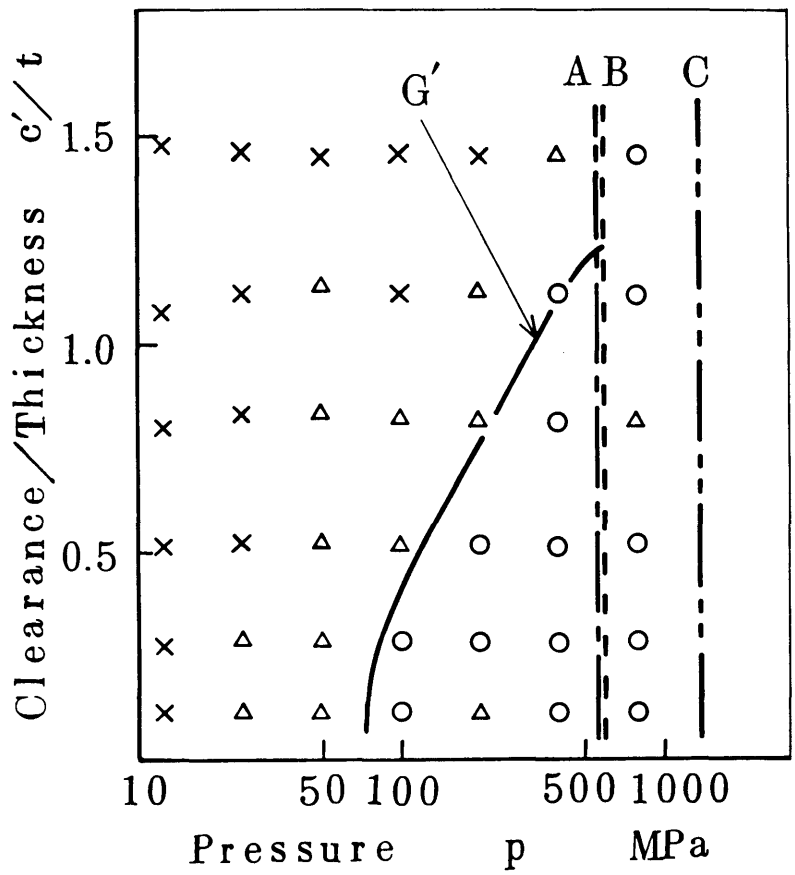
図 5-12　L″ の説明図

5.4.3　加工可能条件

図 5-13 は，クリアランスｃ'/ｔと圧力ｐを変化させ，品質の良い素板が得られる条件と加圧ブランキングの起こる条件をあわせて示したものである．ここで良好な素板を得ることができたのは○で示された領域である．　またＧ'線は外辺打ち捨てによって良好な素板が得られる条件とそうでない条件との境界を示しており，Ａ，Ｂ，Ｃ線は前述の通りである．

すなわち，　Ｇ'線とＢ線に囲まれた領域は外辺打ち捨てによって良好な素板の得られる条件を，Ｂ線とＣ線の間の領域は加圧ブランキングの行われる条件を表している．言い替えれば，Ｂ線とＣ線の間の領域では加圧するだけで製品が得られ（つまりクリアランスに無関係な領域である），　圧力がＢ線より低いとスリーブによる打ち捨てが必要になり，その圧力はＧ'線が示すようにクリアランスが小さいほど低くてよい．

図 5-13 のように，加圧ブランキングによって得られる製品は，良い条件で外辺打ち捨てを行った場合と同じ程度の品質であった．



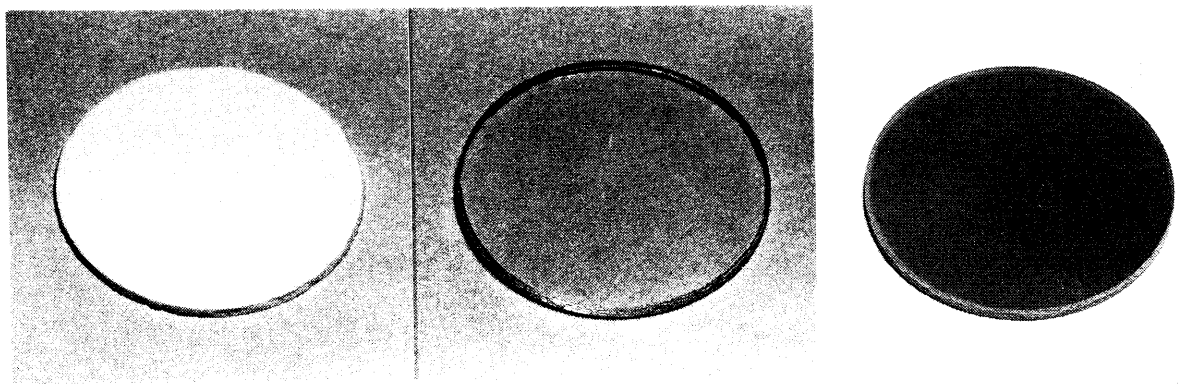
[bmin/ t = 27, D/ t = 36
E = 210 GPa (Steel), t = 0.55 mm]

図 5-13 加工可能条件

5.5 加工の実例

これまではガラス板を用いて加工可能な条件を調べてきたが，ここではこれらのデータを基に他の脆性材料の加工を試みてみた．図 5-14 は前項で用いた鋼製の工具によって外辺を打ち捨てた例，図 5-15 は多数穴あけの例である．写真の下にはそれぞれの加工条件を示した．

以上のように，アルミナセラミックスなどの脆性板に対してもガラス板と同様なブランク製作，穴抜きが可能であった．

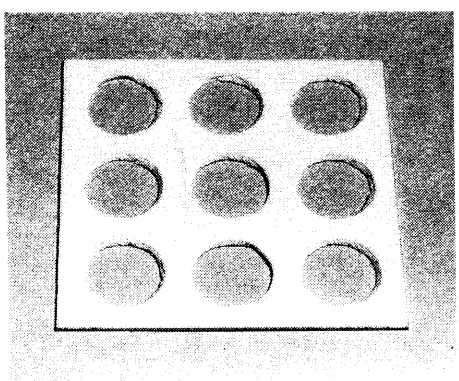


Alumina Ceramics
p=200 MPa, t=0.63 mm

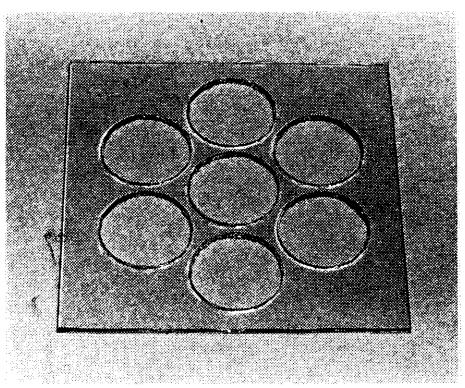
Acrylic Acid Resin
p=100 MPa, t=1.0 mm

Bakelite
p=5 MPa, t=1.0 mm

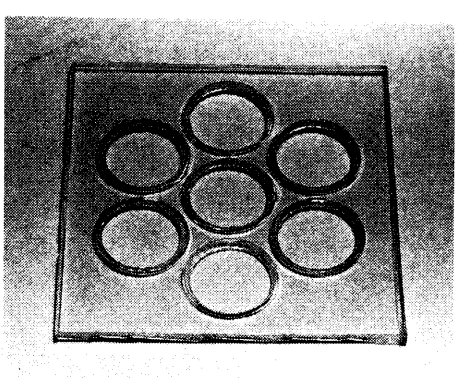
図 5-14　外辺打ち捨て加工例



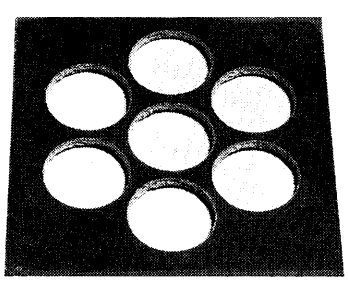
Alumina Ceramics
p=300 MPa, t=0.5 mm, E=550 GPa



Glass
p=300 MPa, t=0.55 mm, E=210 GPa



Acrylic Acid Resin
p=50 MPa, t=1.0 mm, E=210 GPa



Bakelite
p=10 MPa, t=1.0 mm, E=210 GPa

図 5-15　多数穴あけ加工例

5.6　結言

以上のように本章では，さまざまな条件を変化させてガラス板に対する高能率なプレス加工すなわち穴抜き，外辺打ち捨て，加圧ブランキングを行い，良好な穴，素板，あるいはその両方を得ることのできる加工条件を明らかにした．

その主なものは以下のようである．

（１）穴抜きのみを行いたい場合には，加圧力ｐが 100～700 MPa 程度，クリアランスｃ/ｔが 0.2～0.8 程度，加圧幅ｗ/ｔが 1 以上の範囲でなければならない． ただし突き出し量ｂmin/ｔが小さく加圧板直径Ｄ/ｔが大きいほど，加圧力の上限 700 MPa が低くなって加圧力の範囲が狭められる．

（２）穴抜きと加圧ブランキングの同時加工を行いたい場合には，加圧力ｐを 700～1400 MPa 程度にして穴抜きをすればよい．

（３）板の端から穴までの幅（さん幅）が板厚と同程度まで良好な穴抜きが可能である．

（４）加圧板の剛性Ｅが高いほど良好な打抜き穴が得られ，ガラスと剛性が同程度のジュラルミンでは一応打抜きが可能だったものの良好な製品は得られなかった．

（５）外辺打ち捨てを行うには，加圧力ｐが 100 MPa 以上，クリアランスｃ/ｔが 1 以下でなければならない． そしてｐがおよそ 700 MPa 以上になると加圧ブランキングが行われるため外辺を打ち捨てる必要はなくなり，さらに 1400 MPa 程度になるとガラス板が圧縮破壊を起こしてしまう．

（６）加圧ブランキングによる製品は，良い条件で外辺打ち捨てされた製品と同程度の品質である．

また本章では，アルミナセラミックスなどの他の脆性板に対しても本手法のプレス加工が可能なことを確かめることができた．

6．加工面の評価と切削による仕上げ加工

6.1　緒言

前章までの実験で，脆性板の穴抜き加工やブランク製作加工を高能率に行うことのできる方法の開発に成功した．そしてこれらのプレス加工による製品の品質についても，その生産性の高さを考えれば十分なものと考えられる．しかし特にその精度が重要になる場合や厚板の加工を行った場合などには，仕上げ加工の必要を生じる場合もあるだろう．

そこで本章では，まず仕上げ加工のための基礎データを得る目的でガラス丸棒の外周切削実験を行い，ガラスの切削に適した工具などを調べた．そしてさらに加圧ブランキングによる加工面や切削，ガラス切りによる加工面の性状について調べるために，表面形状測定機，電子顕微鏡写真を用いて比較，検討を行った．

6.2　切削実験

6.2.1　実験条件

試料ガラスには，前章までと同じソーダ石灰ガラス（Hv = 6.3 GPa）とパイレックスガラス（Hv = 6.8 GPa）の二種類を用いた．ソーダ石灰ガラスは市販丸棒がなかったため，図 6-1 のように板厚 19 mm の正方形の板ガラスを数枚張り合わせて六角ボルトで固定し，超硬工具 K10 で荒削りして丸棒にした． パイレックスガラスは，直径 30 mm，長さ 125 mm の丸棒を使用した．

切削条件は，切込み 0.1 mm，送り 0.056 mm/rev，湿式切削とした．切削油剤は不水溶性切削油バイオカット（大協石油（株））である． 本実験で用いた工具，その組成，硬さ，および製造会社を表 6-1 に示す．

ガラスを外周切削した場合の工具摩耗は， 図 6-2 に示すように工具のノーズ部分に生じる． そこで本実験では， このノーズ部分の摩耗の最大幅（ノーズ摩耗幅）が 0.2 mm に達したときの時間を工具寿命とした．ただし，切削時間が 200 分を超えて

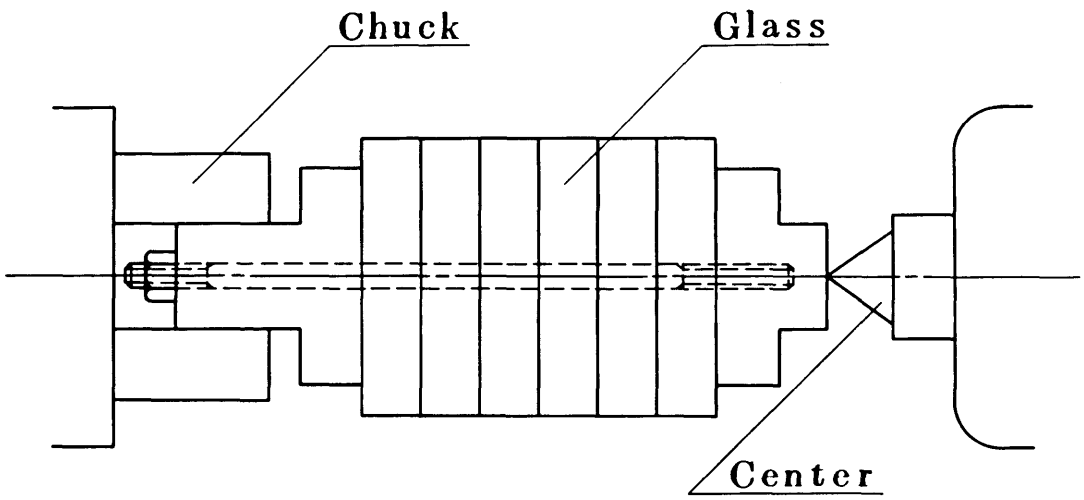


図 6-1　切削装置

表 6-1　使用工具とその組成および硬度

工具	組成（通称）	硬度 Hv	製造会社
P20（超硬）	WC+Co+TiC+TaC	15 GPa	東芝タンガロイ
K01（超硬）	WC+Co	18 GPa	東芝タンガロイ
K10（超硬）	WC+Co	16 GPa	東芝タンガロイ
AC10（ｺｰﾃｨﾝｸﾞ）	母材(WC+Co)+TiC+Al_2O_3	−	東芝タンガロイ
AC815（ｺｰﾃｨﾝｸﾞ）	母材(WC+Co)+TiC+TiCN+TiN	−	東芝タンガロイ
CBN	CBN(ｷｭｰﾎﾞﾅｲﾄ)	32 GPa	東芝タンガロイ
T•DIA	焼結ダイヤ	78 GPa	東芝タンガロイ
Crystal Mini	天然ダイヤ	>90 GPa	大阪ダイヤモンド

も摩耗幅が 0.06 mm に達しないものは，0.06 mm になるまで切削を行い，図 6-3 のような方法で寿命を推定した（焼結ダイヤの場合に２回あった）．推定法は，工具の初期摩耗を省いた定常摩耗領域で最小自乗法による直線近似を行い，ノーズ摩耗幅が 0.2 mm に達したと思われる時間を工具寿命とした．

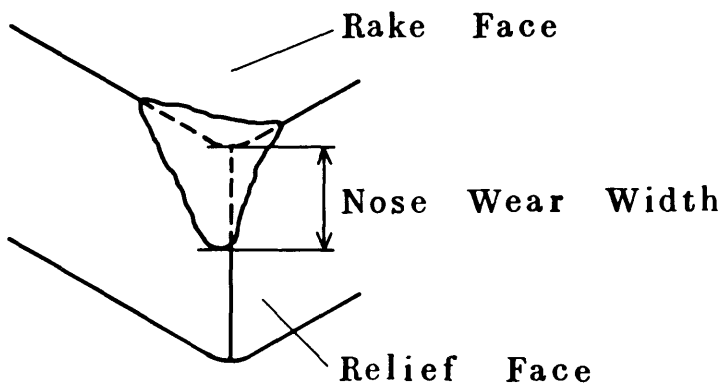


図 6-2 工具摩耗概略図

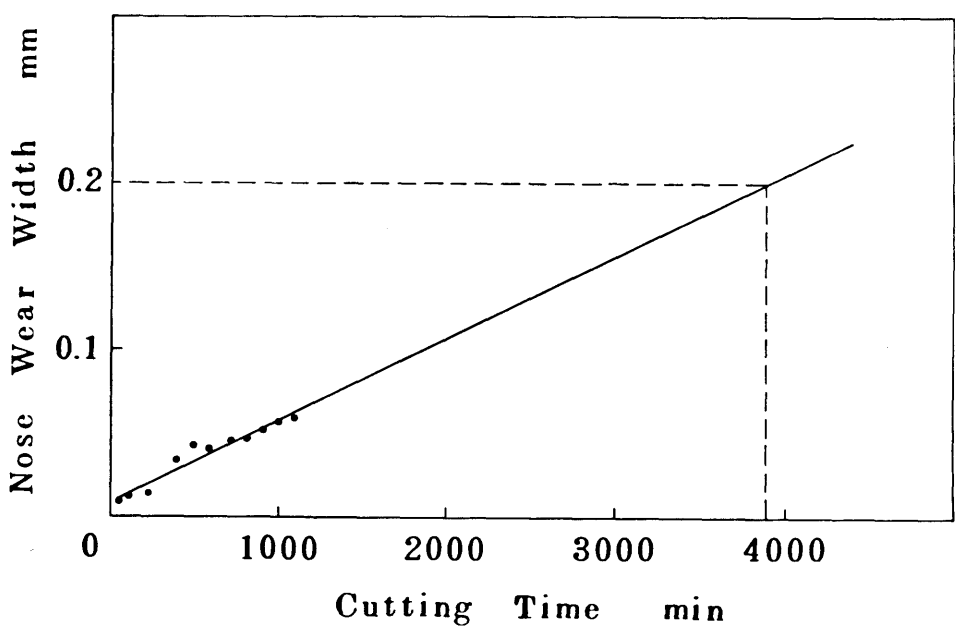


図 6-3 工具寿命の推定例

6.2.2　実験結果

図 6-4 は，ソーダ石灰ガラスに対する各種工具の工具寿命を示したものである．この図からわかるように，焼結ダイヤ（T-DIA）の工具寿命が，他の工具の寿命より著しく良かった．

図 6-5 は，ソーダ石灰ガラスに対して乾式切削を行ったときの工具寿命を示したものである．この実験では，湿式切削で寿命の伸びた焼結ダイヤと超硬 K10 を用いた．しかし，その工具寿命は，前述の切削油を使用した場合より著しく短くなること

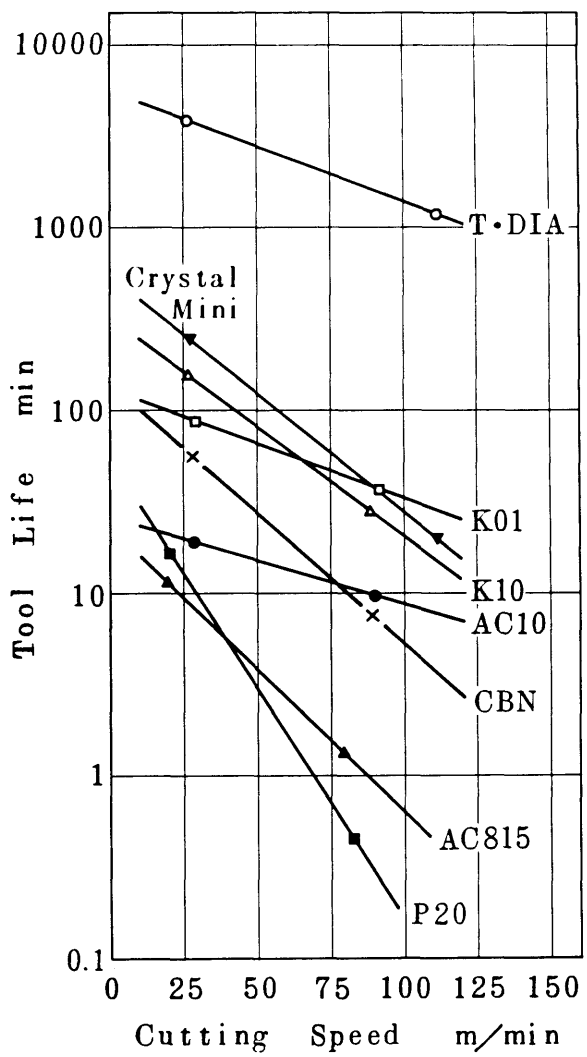


図 6-4　ソーダ石灰ガラスに対する工具寿命

がわかった．

以上のようにソーダ石灰ガラスの切削には焼結ダイヤによる湿式切削が最も適していたが，これはやや異なる実験方法，条件で同様の研究を行った石川らの結果[34]にも一致している．

図 6-6 は，パイレックスガラスに対する焼結ダイヤと K10 の工具寿命を示したものである．図 6-4 と比較すると，パイレックスガラスはソーダ石灰ガラスより難削材であることがわかる．また，ソーダ石灰ガラスを切削した場合と同様に，パイレックスガラスの切削にも焼結ダイヤが適していると考えられる．

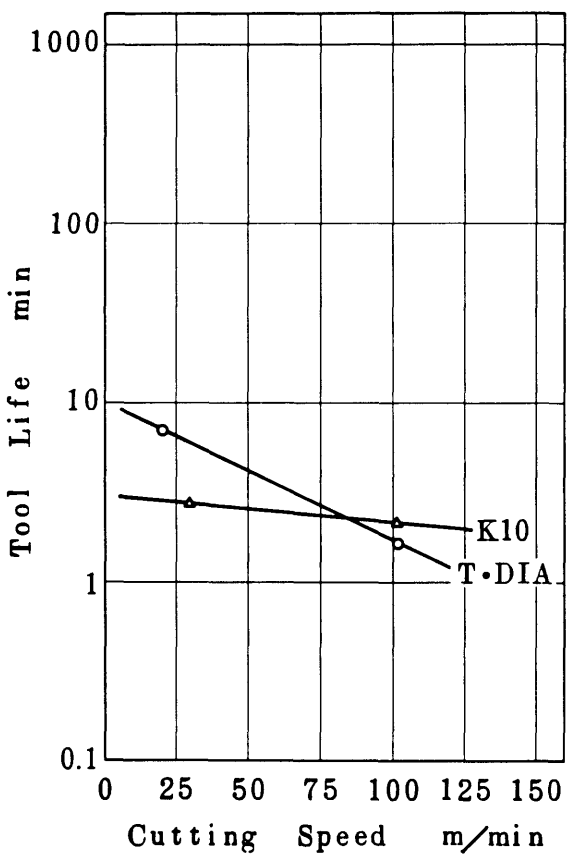


図 6-5 ソーダ石灰ガラスに対する工具寿命（乾式切削の場合）

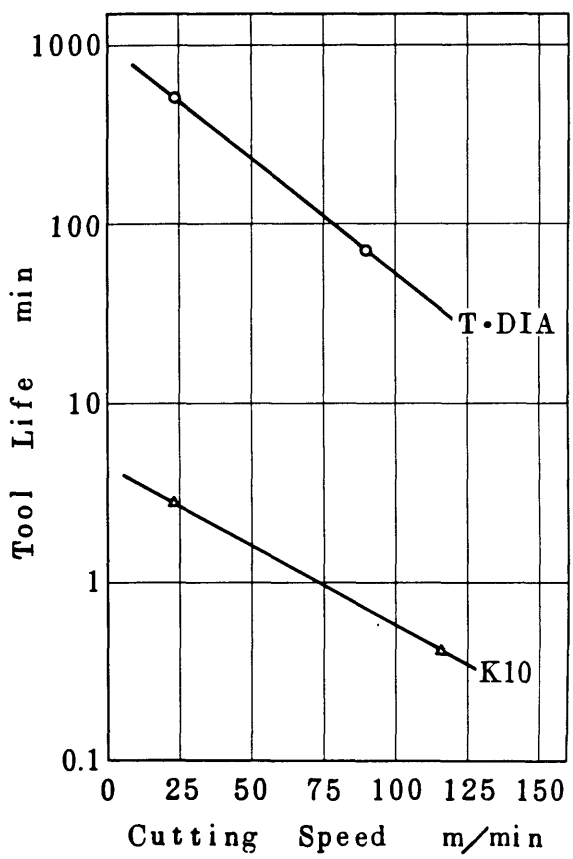
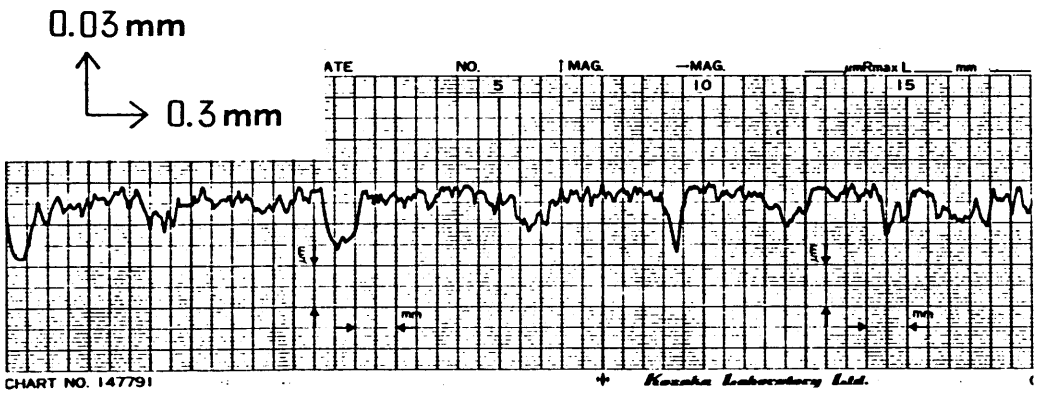


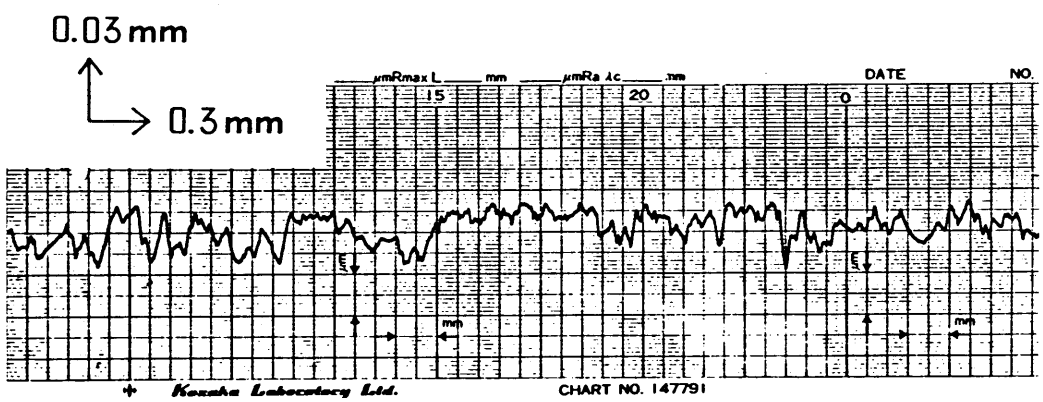
図 6-6 パイレックスガラスに対する工具寿命

なお切削速度には，切削を開始したときの切削速度と，終了したときのものとの平均値を用いた．

図 6-7 は， ソーダ石灰ガラスを焼結ダイヤ T-DIA と超硬 K01 で湿式切削した場合の加工面を，表面形状測定機を用いて比較したものである．工具寿命の長かった焼結ダイヤも，このように加工表面のあらさに関しては他の工具と同じ程度であった．



（ a ） 焼結ダイヤ T-DIA の場合



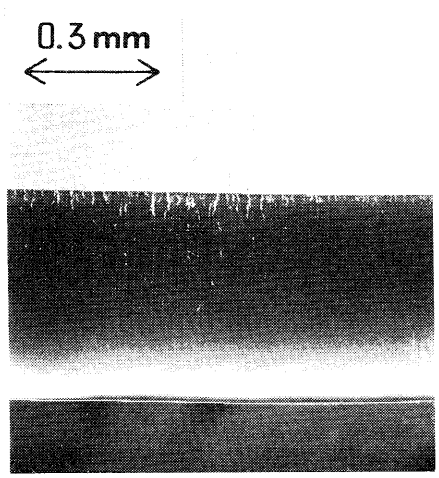
（ b ） 超硬 K01 の場合

図 6-7 切削面の表面形状

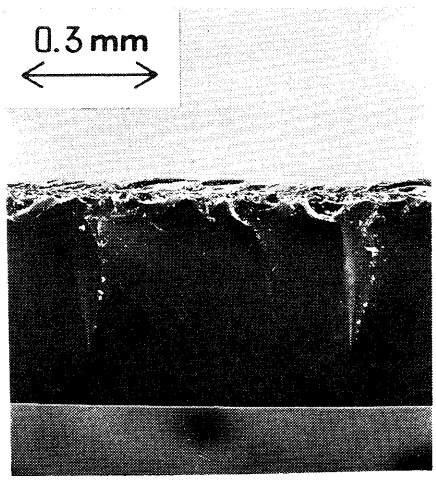
6.3　各種加工によるガラス加工面の比較

ここでは，加圧ブランキング，切削，ガラス切りによる切断の三つの加工を取り上げ，これらの加工によってガラス板を加工し，その加工面の特性を調べた．

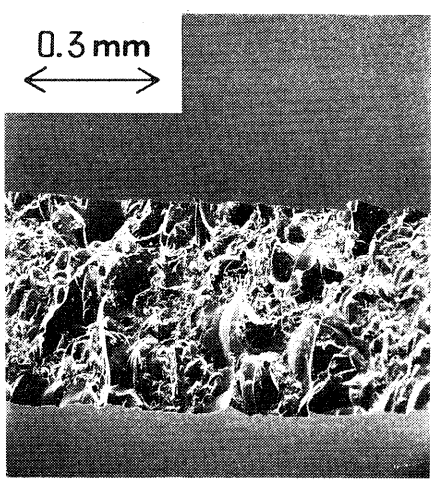
図 6-8 は，それぞれの加工法によるガラス板の加工面を金蒸着し，電子顕微鏡で拡大した写真である．ここで（a）は鋼製加圧板を用いて加圧ブランキングを行った



（ a ）　加圧ブランキング



（ b ）　ガラス切り

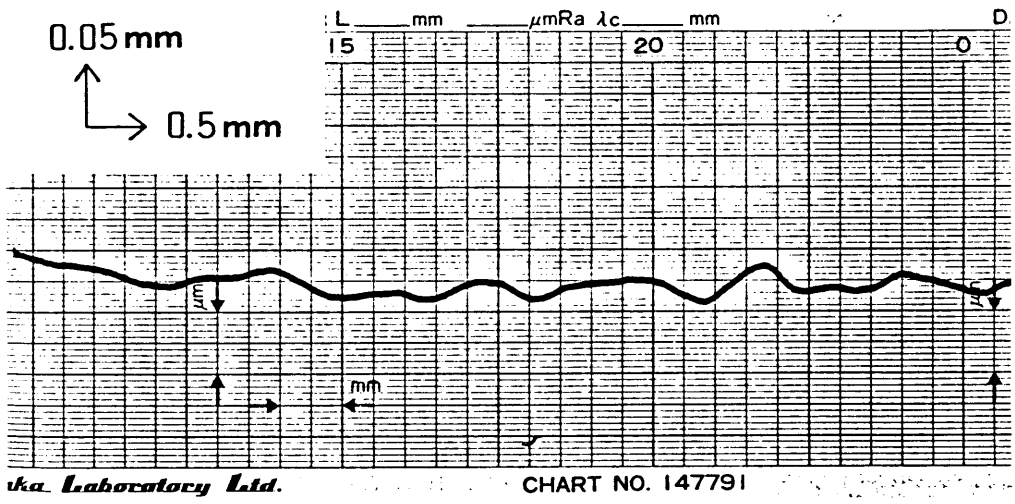


（ c ）　切削

図 6-8　各種加工面の電子顕微鏡写真

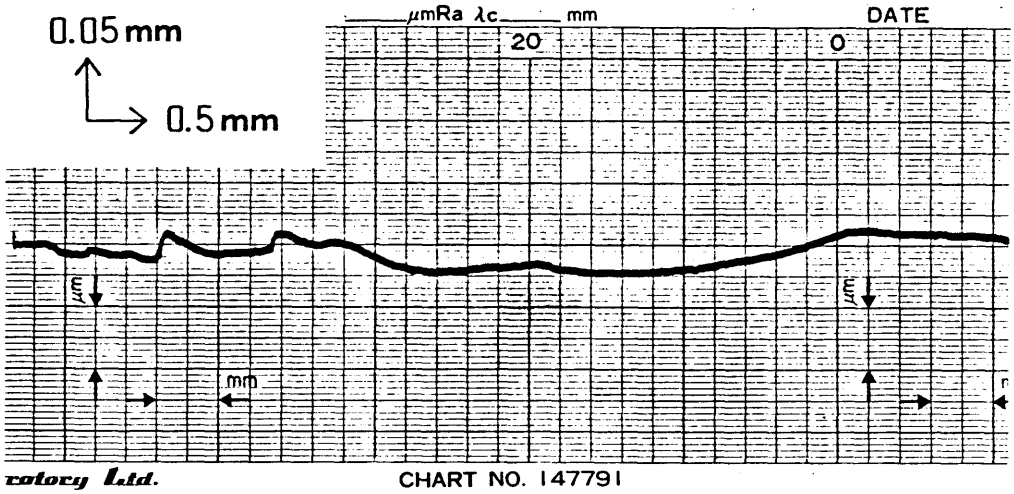
場合，（b）はダイヤモンドのガラス切りを用いて手作業で切断した場合，（c）は 10 枚のガラス板を張り合わせ， 工具に焼結ダイヤ T-DIA を用いて湿式外周切削を行った（切込み 0.1 mm，送り 0.056 mm，切削速度 63 m/min）場合のものである． これらのガラス板はすべて同じ 0.55 mm 厚のものである． 図のように，切削による加工面が細かい凹凸によって構成されているのに対し，加圧ブランキング，ガラス切りによる加工面は非常に滑らかであった． また（b）を見ると，ガラス切りによる加工面のエッヂ部分にはダイヤモンドによる引っかき傷が残っていることもわかる．

次に図 6-9 は，図 6-8 の場合とまったく同様にして得た三種類のガラス加工面の表面形状を示したものである．ここで（a），（b）は上述の表面形状測定機によって，（c）は回転式の測定機によって測定したものである．これらの図からもわかるように，切削による加工表面には細かいあらさが目だち，ガラス切り，加圧ブランキングによる加工面にはうねりが目だっていた．これらの表面を Rmax（ 8 mmの間 ）によって比較すると，三つともほぼ同程度の精度であり，若干切削，ガラス切り，加圧ブランキングの順に良かった．

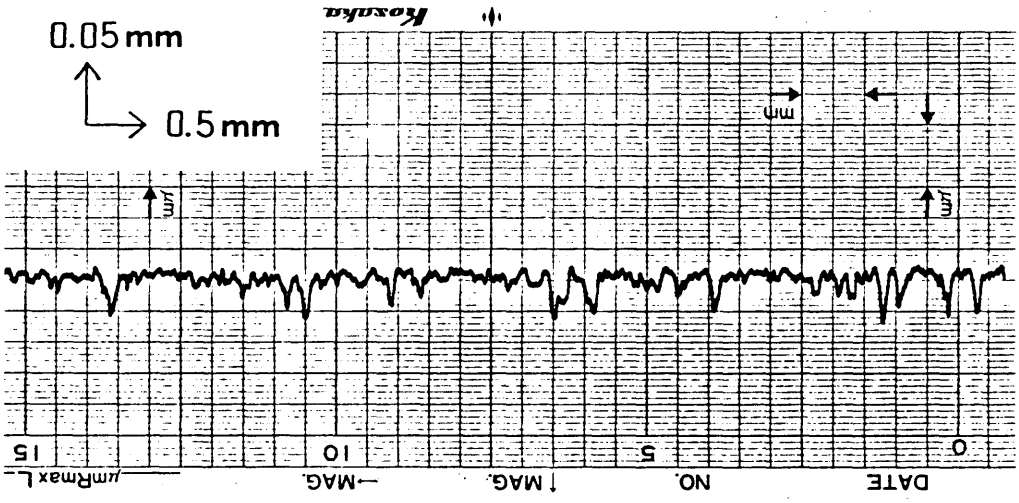


（ a ） 加圧ブランキング

図 6-9 各種加工面の表面形状



（ｂ） ガラス切り



（ｃ） 切削

図 6-9 各種加工面の表面形状

結局ここで扱った三種類の加工法によるガラスの加工面は，どれが最もすぐれているとは言い難く，それぞれに特徴があった．

6.4　結言

本章で得られた結果をまとめると以下のようである．

（１）ガラスを切削するには，工具として焼結ダイヤが適している．

（２）ガラスの切削には，切削油が大変良い影響を与える．

（３）加圧ブランキングとガラス切りによる加工表面は，切削による表面より非常にあらさが小さいかわりに若干うねりが大きい．

7．結　論

本研究では，脆性板の代表例としてガラス板を選び，これを用いて脆性板に対する高能率プレス加工法の開発を試みた．そしてその打抜き加工法を開発し，さらに加圧ブランキングと呼ぶ新しい加工法を開発した．

この開発にあたって本研究で得られた結論をまとめると，以下のようである．

（1）　加圧板を用いてあらかじめ製品部分を加圧しておく冷間打抜き加工法を開発し，ガラス板の穴抜きに成功した．その中で以下のようなことが明らかになった．

（i）　良好な打抜き穴を得るためには，加圧力pが 400 MPa 以上（緩衝材を用いる場合），クリアランスc/tが 0.2～0.8 程度でなければならない．またポンチ直径d/tが 2 以下の深穴になると加工が困難になり始める．

（ii）　段付きポンチを用いると穴抜き精度向上の効果がある．ここで一段目のクリアランスc/tは 1 程度，二段目は 0.5 以下の小さな値が良い．

（iii）　加圧板とポンチのかわりに油圧を用いる方法を考え，一応ガラス板の穴抜きに成功した．この方法はまだ再現性などに課題が残っているが，多品種少量生産に有利になる可能性を持っている．

（2）　加圧ブランキングと呼ぶ新しい高能率ブランク製作加工法を開発し，その中で以下のようなことが明らかになった．

（i）　加圧ブランキングを行うためには，加圧力pを 700～1400 MPa 程度とし，加圧板の材質には鋼や超硬など剛性の高いものを使わなければならない．

（ii）　加圧ブランキングによって円形，角形，ハート形などさまざまな形状のブランクを製作できることを確かめた．

（3） 穴抜き，加圧ブランキング，外辺打ち捨ての三つのプレス加工をさまざまな条件で行い，（ｉ）穴だけをあけたい場合，（ii）素板だけを得たい場合，（iii）穴と素板の両方を得たい場合の加工について良好な製品の得られる加工条件を総合的に明らかにした．その主なものは以下のようである．

（ｉ） 穴のみを打ち抜くためには，加圧力ｐが 100～700 MPa 程度，クリアランスｃ／ｔが 0.2～0.8 程度，加圧幅ｗ/ｔが 1 以上でなければならない． ただし突き出し量ｂmin/ｔが小さく加圧板直径Ｄ／ｔが大きいほど，加圧力の上限 700 MPa が低くなって加圧力の範囲が狭められる．加圧板の剛性Ｅについては，これが高いほど製品の品質が高くなり，低くてもガラスと同程度の値が必要である．

（ii） 打抜きによってブランクを製作（外辺打ち捨て）するには，加圧力ｐが 100 MPa 以上，クリアランスｃ／ｔが 1 以下でなければならない．ただしｐがおよそ 700 MPa 以上になると加圧ブランキングが行われるため外辺を打ち捨てる必要はなくなり，さらに 1400 MPa 程度になるとガラス板が圧縮破壊を起こしてしまう．

（iii） 加圧力ｐを 700～1400 MPa 程度にすれば， 穴抜きと加圧ブランキングの同時加工を行うことができる．

（4） ガラスを用いて得られたデータを基に他の脆性板のプレス加工を行い，アルミナセラミックス板などに対しても同様な穴抜き，ブランク製作が可能であることを示した．

（5） 加圧ブランキングによるガラス加工面に対する評価を，切削，ガラス切りの場合と比較して行った．

参 考 文 献

(1) 北條・木下，「フェノールレジン積層板のせん断加工（第１報)」，精密機械，26巻5号（1960)，262.

(2) 北條・木下・増田，「フェノールレジン積層板のせん断加工（第２報)」，精密機械，27巻12号（1961)，765.

(3) 北條，「フェノールレジン積層板のせん断加工（第３報)」，精密機械，29巻5号（1963)，383.

(4) 北條，「フェノールレジン積層板のせん断加工（第４報)」，精密機械，30巻9号（1964)，743.

(5) 北條，「フェノールレジン積層板のせん断加工（第５報)」，精密機械，30巻10号（1964)，785.

(6) 隅部，「超音波振動ポンチによるベークライト板の冷間打抜加工」，日本機械学会論文集（第３部)，27巻181号（1961)，1419.

(7) 北條，「フェノールレジン積層板のせん断加工（第６報)」，精密機械，30巻11号（1964)，838.

(8) 北條・吉田・増田，「ぜい性材料のせん断加工」，塑性と加工，5巻38号（1964)，203.

(9) 山内・小牧，「フェノール樹脂積層板の超音波振動打抜き加工」，塑性と加工，10巻99号（1969)，261.

(10) 横井・中川，「ガラスエポキシ積層板の振動仕上げ抜き特性と加工プロセス」，塑性と加工，25巻279号（1984)，335.

(11) 横井・中川，「ガラスエポキシ積層板の振動仕上げ抜き機構と加工因子」，塑性と加工，25巻280号（1984)，410.

(12) 中川・町田・鈴木・須山，「鋳鉄のせん断加工」，第25回塑性加工連合講演会講演論文集（1974)，377.

(13) 山県・小池，「片状黒鉛鋳鉄管の打抜き加工方法の研究」，第36回塑性加工連合講演会講演論文集（1985），515.

(14) 岩村・村上・高崎・市本・大沢，「アルミナグリーンシートの高密度穴抜き（セラミックグリーンシートの加工　第１報）」，塑性と加工，29巻326号（1988），265.

(15) 岩村・村上・高崎・市本，「アルミナグリーンシートの高密度穴抜き加工特性（セラミックグリーンシートの加工　第２報）」，塑性と加工，35回塑性加工連合講演会講演論文集（1984），405.

(16) 岩村・村上・高崎・大沢，「アルミナグリーンシートの穴抜き加工におけるポンチ摩耗（セラミックグリーンシートの加工　第３報）」，昭和61年度塑性加工春季講演会講演論文集（1986），23.

(17) 銘苅，「集積回路用セラミックシート材のせん断加工」，昭和61年度塑性加工春季講演会講演論文集（1986），19.

(18) 佐藤・綿住・佐伯，「熱応力によるガラス板の新切断法」，塑性と加工，18巻201号（1977），821.

(19) 山口・五十君・社本・小嶋，「高静圧下におけるガラス板の打抜き加工」，日本機械学会論文集（Ｃ編），52巻483号（1986），2967.

(20) Yamaguchi, K., Isogimi, K., Shamoto, E., and Kojima, J., "Punching Holes in Sheet Glass under High Pressure", JSME International Journal, Vol.30 No.269 (1987), 1833.

(21) 山田・江里口・村上・神馬，「プリント基板穴抜き加工における板押え面圧の影響」，昭和61年度塑性加工春季講演会講演論文集（1986），27.

(22) 福田・山口，「ゴムを用いた金属板の穴抜き」，塑性と加工，10巻96号（1969），53.

(23) 黒崎・藤城・水草・三宅，「粘塑性体を圧力伝達媒体とした材料加工法（高脆材料の穴あけへの応用）」，日本機械学会論文集（Ｃ編），53巻493号（1987），2035.

(24) 黒崎・藤城・三宅・古川,「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」, 日本機械学会論文集（C編), 54巻500号 (1988), 984.

(25) 山口・社本・鳥居,「ガラス板の加圧ブランキング」, 日本機械学会論文集（C編), 54巻502号 (1988), 1357.

(26) Yamaguchi, K., Shamoto, E., and Torii, M., "Pressure Blanking of Sheet Glass", JSME International Journal, 掲載予定.

(27) 佐藤・直之,「側圧によるぜい性材料の切断」, 日本機械学会論文集（第３部), 42巻359号 (1976), 2250.

(28) 神保・佐藤,「セラミックスと超硬合金の側圧切断」, 日本機械学会講演論文集, No.760-17 (1976), 68.

(29) 佐藤・宮内・森,「側圧によるディスキングを利用したぜい性材料の新切断法」, 塑性と加工, 19巻208号 (1978), 403.

(30) Bridgman, P. W., "Breaking Tests under Hydrostatic Pressure and Conditions of Rupture", Phil. Mag., Vol.24 No.139 (1912), 63.

(31) Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W., "Pinching-Off and Disking of Rocks", Journal of Geophysical Research, Vol.68 No.6 (1963), 1759.

(32) 山口・社本・佐藤,「脆性板のプレス加工における加工可能条件の総合的検討」, 日本機械学会論文集（C編), 掲載予定.

(33) 田中・渋谷・小泉・中原,「円環状剛体スタンプによる無限厚板の弾性接触問題」, 日本機械学会論文集（第１部), 41巻349号 (1975), 2567.

(34) 石川・梶原・町田・中山・田口,「ガラスの切削加工」, 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会論文集 (1981), 458.

謝　辞

終わりに，本研究を通じて終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました名古屋大学工学部　山口勝美教授に心より感謝いたします．また本論文をまとめるにあたり，多大な御教示と御助言を賜りました名古屋大学工学部　河合望教授ならびに　近藤一義教授に厚く御礼申し上げます．

さらに，実験を遂行するにあたり適切なる御助言と惜しみない御協力を頂きました名古屋大学工学部　鬼頭武彦助手，古橋利保技官，布目清成技官に深く感謝いたします．また同じく実験を遂行するにあたり多大な御協力を頂きました当時大学院博士前期課程　小嶋純一氏（現在東芝（株）勤務）に深く感謝の意を表します．

（平成元年1月）