

粘塑性圧媒加工法による微細穴あけ加工技術の開発

黒崎 靖*

1. まえがき

金属や非金属の薄板に対する微細穴加工技術として、現在リソグラフィ、小径ドリル加工、放電加工、レーザ加工、電子ビーム加工などが慣用されているが、いずれも生産性もしくは設備費の点で難点がある。生産性および経済性の観点からは、塑性加工的手段が有利であり、せん断加工のマイクロ化も進みつつある^{1)~6)}。しかし、一般に、慣用の打抜き加工法をミニチュア化する手法では、パンチの強度不足による折損、パンチの製作上の問題、クリアランスの正確な設定の困難さ、工具スペースの制約などの理由から、穴径やピッチの微小化はいずれ限界に達すると思われる。

そこで本研究では、塑性加工様式を持ちながらもこれらの問題を回避でき、かつ簡便に微小径・微小ピッチの穴あけ加工ができる方法として”粘塑性圧媒加工法”の開発を試みた。本稿では、この方法による適用例を示し、その特性について説明する。

2. 加工法の概要

粘塑性圧媒加工法の基本様式を図1に示す。圧力伝達媒体として半固体の粘塑性体を採用し、これをピストン・シリンドラ装置により圧縮して高圧力を発生させ（本実験装置では約2万気圧までの圧力発生が可能であった）、パンチレス状態で所用の穴あけを行う。金属箔の穴あけの場合には、ダイス穴周上の材料内に延性破壊を生ぜしめて貫通穴を形成させる。また、板押え部上の材料内は高圧縮応力場になり、ガラス板のような脆い材料でも割れ難いので、これを利用すればダイス穴部上の材料のみを脆性破壊させることにより貫通穴を得ることができる。圧力媒体は半固体のため、ピストンおよびシリンドラを省略して自由圧縮することもできる^{7)~8)}。この場合には、フリクションヒルにより媒体中心部に集中的に発生する高圧力場を活用する。加圧方式としては、ドロップハンマ装置などによる衝撃加圧とプレスなどによる低速加圧が考えられる。以下では、前者をV I P、後者をVMと略称する。また、加工穴の高精度化策として、圧力媒体中に研磨材を混入することにより、仕上げ加工を行なう手法も試みた^{9)~10)}。この手法はもともとは複雑な曲面や狭いみぞ部を持つ機械部品の仕上げ加工用に開発されたもので¹¹⁾、以下ではAFMと略称する。粘塑性圧媒加工法の利点としては次のことが挙げられる。

- (1) パンチおよび板押え工具を省略するので、パンチに起因する前述問題を回避できる。そして、箔のような薄

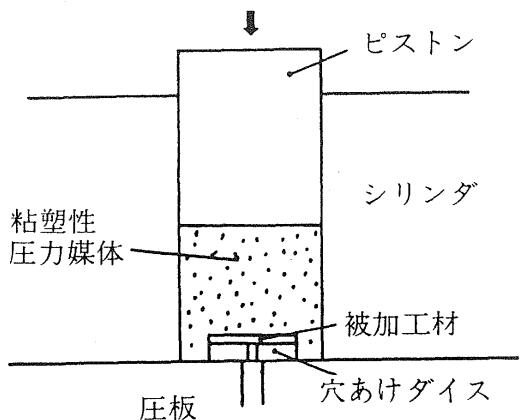


図1 粘塑性圧媒加工法の基本様式

い材料でもクリアランス設定の問題がなく、原理的にはダイスさえ製作できれば、いくらでも小さな穴が加工できる可能性がある。

- (2) 液体を用いる加工法に比べて圧力発生能力が高く、1万気圧を超える超高压力を容易に発生できる。また、シールの問題が比較的少ない。
- (3) 圧力媒体を反復使用できるので、ゴムを用いる場合のようなリサイクルの問題が比較的少ない。
- (4) 上記(1), (2)の特徴から、金属薄板の微細穴加工のみならず、ガラス・セラミックスなど脆い材料の穴あけ加工にも利用できる^{10), 12)~14)}。

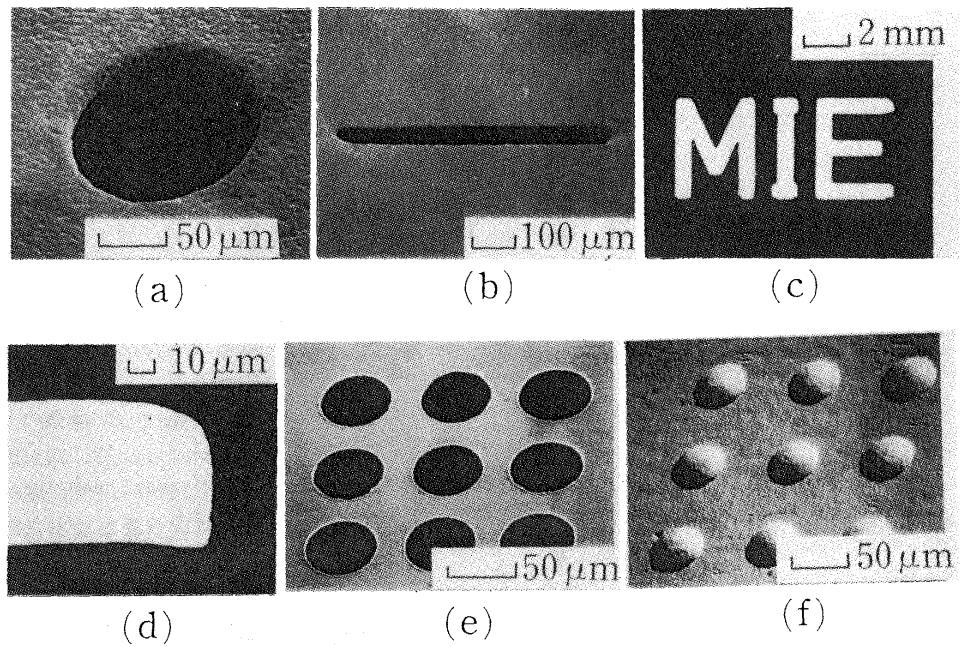
3. 実験方法

3・1 実験装置

加圧工具として一対のピストンとシリンドラを用い、圧力媒体を密閉状態で圧縮した。加圧室は直径15mmの丸穴で、ピストンの高さは20mm、ピストンとシリンドラのすきまは0.008mmとし、これらの材料はSK3材（焼入れ）とした。加圧には、低速加圧（VM, AFM）のときは万能試験機（最大容量490KN）を、高速衝撃加圧のときは自由落下式ドロップハンマ装置（ハンマ体質量39.6Kg）を用いた。

3・2 圧力媒体

VMおよびV I P用の圧力媒体には変形応力のひずみ速度依存性の極めて高い材料が望ましい。ここでは、モデル材料として市販のシリコーンポリマー（フローテスタ粘度5000Pa/s, 密度1.1g/cm³, ひずみ速度敏感度指數m値=0.45）



- (a) 丸穴の加工（穴径 $100\mu\text{m}$ 、SK3箔、厚さ $10\mu\text{m}$ 、VIP）
 (b) スリットの加工（幅 $50\mu\text{m}$ 、SK3箔、厚さ $10\mu\text{m}$ 、VIP）
 (c) 英文字の穴加工（SK3箔、厚さ $10\mu\text{m}$ 、VIP）
 (d) 加工穴壁の断面（穴径 $300\mu\text{m}$ 、SK3箔、厚さ $50\mu\text{m}$ 、VIP）
 (e) 多数丸穴の加工（穴径 $50\mu\text{m}$ 、ピッチ $75\mu\text{m}$ 、銅箔硬質材、厚さ $5\mu\text{m}$ 、VM）
 (f) 球面成形（半径 $25\mu\text{m}$ 、銅箔軟質材、厚さ $10\mu\text{m}$ 、VM）

図2 V I PおよびVMの応用例

を採用した。AFMの場合にはシリコーンポリマにアルミニウム砥粒 (#1200もしくは#8000) を混合したものを採用した。これらの媒体は直径、高さとも 15mm の円柱形に成形して使用した。

4. 金属箔の微細穴あけ加工

4・1 低延性金属箔への適用

穴加工の成否は被加工材料の材質、とくに延性と密接な関係があることが分った。低延性の金属箔に微細穴もしくは小穴を加工した事例^{9), 15), 16)}を図2(a)～(e)に示す。加工圧力の点から、本法の適用は穴径比 (=穴径/板厚) がおよそ2以上の比較的大きい場合に限られるが、引張強さ 1800MPa クラスの高強度SK3箔でもV I Pにより微細穴加工が可能であり、ダイスさえ製作できれば穴径に下限はないと考えられる。また、穴形成時に板押え圧力が自発的に加わるので、小ピッチの多数微細穴を1ショットで加工できる(図2(e)参照、硬質銅箔、穴径 $50\mu\text{m}$ 、さん幅 $25\mu\text{m}$)。これらの例のようにV I PとVMに有意の差はなく、いずれも低延性材料に対して有効であったが、延性の大きい材料や高精度の穴を得たい場合には後述のAFMを推奨したい。

SK3箔に微細丸穴をV I P加工した場合について加工穴

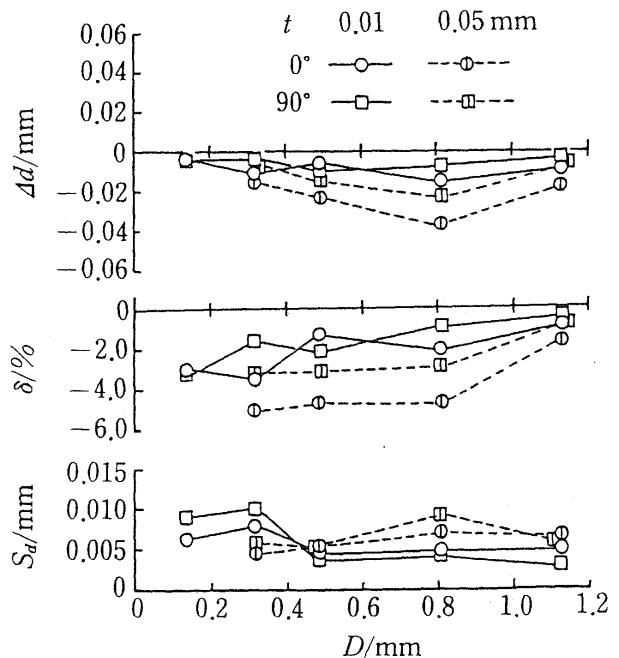


図3 加工穴の精度 (SK3箔, VIP, t : 板厚, D : 穴径)

径 d とダイス穴径 D との差 $\Delta d = d - D$, Δd の D に対する相対値 $\delta = \Delta d/D \times 100$ (%), および d の標準偏差 S_d を調べた結果^{1,5)}を図3に示す。図より、 Δd は常に負値で加工穴はダイス穴よりやや小さいこと、 $|\Delta d| \approx 0.5 \sim 1.0t$ であり (t は板厚), Δd は板厚に依存すること、および S_d は μ オーダーであることが分る。これらの結果より、板厚が薄いほど良い転写精度を期待できる。なお、図2(d)に示すように、本法では穴壁よりおよそ $1/2t$ の範囲が‘だれ’の発生領域となる。

4・2 延性金属箔の穴あけ加工

VMを用いれば、図2(f)に示すように、軟質の銅箔に対して微小径の球面成形も容易に行うことができた。しかし、このような10%を超える伸びを持つ材料に対する穴あけでは、V I P, VMともに問題が生じた。軟質銅箔にVMを適用した場合のサンプル写真³⁾を図4に示す。穴の加工状態は3種類に分類される。すなわち、ダイス角全周にわたって破断が生じ、正常な貫通穴が形成される場合(A), 部分的にダイス角破断が生じ、抜き屑が残留する場合(B), およびバルジ頂点部で破断が生じ、やはり抜き屑が残留する場合(C)である。そこで、改善策として高圧砥粒流動加工 (A F M) を導入した複合加工 (VM/A F M) の開発を行った。その方法はきわめて簡単であり、圧力媒体 (シリコーンポリマ) 中に微細な研磨材を混入してVMと同じように加圧すればよい。加工の初期段階ではVM作用により貫通穴を形成させ、その後AFM作用により残留抜き屑およびバリを切削除去するものである。研磨材として#8000のアルミナ砥粒を用い、混合比(重量比)をシリコーンポリマ:アルミナ砥粒 = 4 : 1 として、90MPaの圧力下で軟質銅箔に微細加工を行った場合のサンプル写真³⁾を図5(b)に示すが、AFMにより加工穴が改善されることが分る。こうして、被加工材料の材質に関せず、VM/A F Mにより高精度微細あけが可能となった。

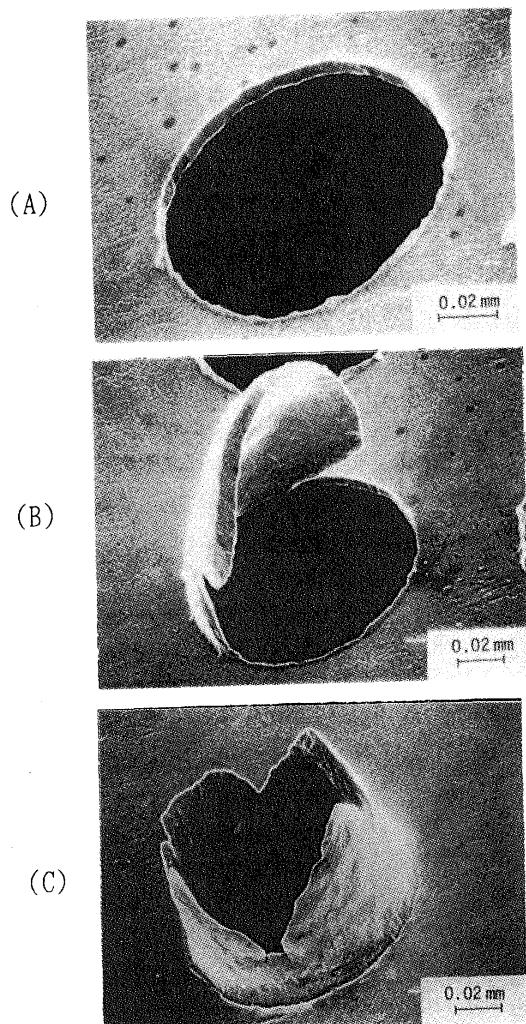


図4 軟質銅箔における加工穴の外観 ($D = 0.1$ mm, $D/t = 10$)

、およびバルジ頂点部で破断が生じ、やはり抜き屑が残留する場合(C)である。そこで、改善策として高圧砥粒流動加工 (A F M) を導入した複合加工 (VM/A F M) の開発を行った。その方法はきわめて簡単であり、圧力媒体 (シリコーンポリマ) 中に微細な研磨材を混入してVMと同じように加圧すればよい。加工の初期段階ではVM作用により貫通穴を形成させ、その後AFM作用により残留抜き屑およびバリを切削除去するものである。研磨材として#8000のアルミナ砥粒を用い、混合比(重量比)をシリコーンポリマ:アルミナ砥粒 = 4 : 1 として、90MPaの圧力下で軟質銅箔に微細加工を行った場合のサンプル写真³⁾を図5(b)に示すが、AFMにより加工穴が改善されることが分る。こうして、被加工材料の材質に関せず、VM/A F Mにより高精度微細あけが可能となった。

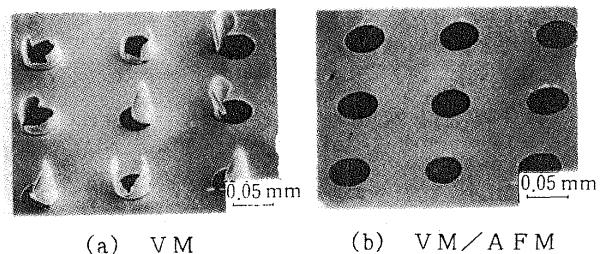


図5 AFMの効果 (穴径 50μ m, ピッチ 150μ m, 軟質銅箔, 厚さ 5μ m)

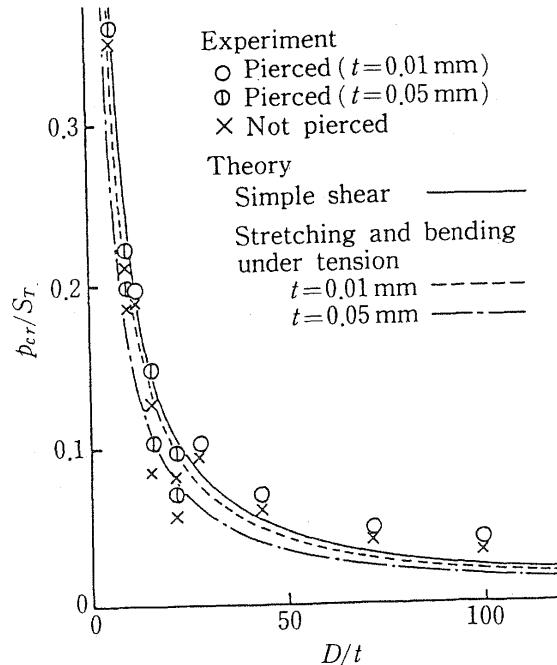


図6 金属箔の穴あけに要する圧力と穴径の関係
(SK3箔, V I P, p_{cr} : 加工圧力, S_t : 引張強さ, D : 穴径, t : 板厚)

3・3 加工圧力

穴加工に要する圧力 p_{cr} の計算式を単純せん断モデルによって求めると次式のようになる¹⁵⁾.

$$p_{cr}/S_T = (4/\sqrt{3})/(D/t)$$

ここに、 S_T は被加工材料の引張強さ、 D は穴径、 t は板厚である。SK3箔に対してこの式による計算値と実験値を比較した結果¹⁵⁾を図6に示す。図の縦軸は p_{cr}/S_T として、横軸は D/t として、それぞれ無次元量にて表示してある。また、図には、ダイス角で引張り曲げ破壊を生ずるモデルを用いて得られた理論値も示されている。図より、上式のような簡便式でも比較的良好な見積もりが可能であること、および p_{cr} は D/t および S_T に依存し、 $D/t=2$ でも材料の引張強さのオーダーの高圧を要することが分る。

5. ガラス板の微細穴あけ加工

5. 1 普通寸法の穴あけ加工

ガラスのような脆性材料は引張りに弱く、圧縮に強い。VIPおよびVMでは、穴部材料内は引張り応力状態になり、一方、板押え部材料内は高圧縮応力状態になるので、もともと穴部材料が破壊しやすい。したがって、加圧条件を適切に制御し、板押え部内にクラックが伝播したり、破壊が生じることを防止できれば貫通穴をあけることができる。VIPではこれに加えて、板押え部と穴部とで応力応答に時間差があることが有利に働く。すなわち、板押え部で圧縮応力が十分高まった後に穴部に引張り応力が作用するので、板押え部の破壊を抑制できる。この原理に基づいてガラス板やセラミック板にVIPを適用したところ、普通寸法の穴加工が可能であることが確かめられた^{12), 13)}。しかし、なお実用の観点から、

(1)油圧プレスのような汎用機械によって加工できるVM法を工夫すること、

(2)加工穴精度を向上させること、

の2点について究明をはかった。この結果、(1)についてはクラック抑制板と称する延性極薄板を被加工材の上に重ねてVM加工すればよいことを見出しえ¹⁴⁾、(2)については金属箔の場合と同様にAFMを併用することにより解決できることが分った^{10), 14)}。

クラック抑制板の機能については次のように説明されている¹⁴⁾。図7に示すように、 σ の引張り応力状態にあるガラス板にクラック抑制板を介して面圧 p が作用する時、ガラス板とクラック抑制板との界面に摩擦せん断応力 τ_f が生じ、これによりマイクロクラックの成長を抑制し、板押え部を強化する。クラック抑制板の条件としては、ヤング率 E および厚さ t_f が大きく、被加工材との摩擦が大きいほど望ましい。抑制板としてアルミニウム箔($t_f=6\sim100\mu m$)、銅箔($t_f=5\sim50\mu m$)およびポリエチレンシート($t_f=20\sim80\mu m$)を採用し、穴加工の成功率 γ について調べた結果を図8に示す。図の縦軸は $E\tau_f/D$ 、横軸は D/t (D :穴径、 t :

板厚)により表示されているが、抑制板を適切に選べば、 $D/t \leq 6.7$ において100%の成功率で穴あけを達成できることが分る。

VMおよびAFMによりガラス板の穴あけを行った事例を図9に示す。一般に、VMのみでは媒体側穴径がダイス側穴径より小さいテーパ穴となる上、穴壁にクラックが残留して穴形状も不規則になる。図9(a), (c)の白色部分がこの領域に該当する。一方、図9(b), (d)に見るよう、これらにAFMを施すと穴形状が著しく改善される。

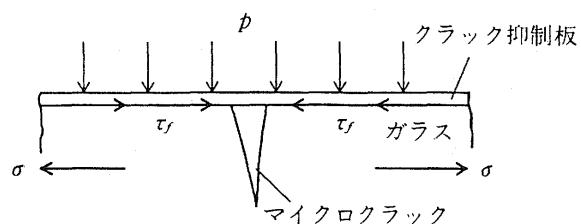


図7 クラック抑制板による強化機構の説明

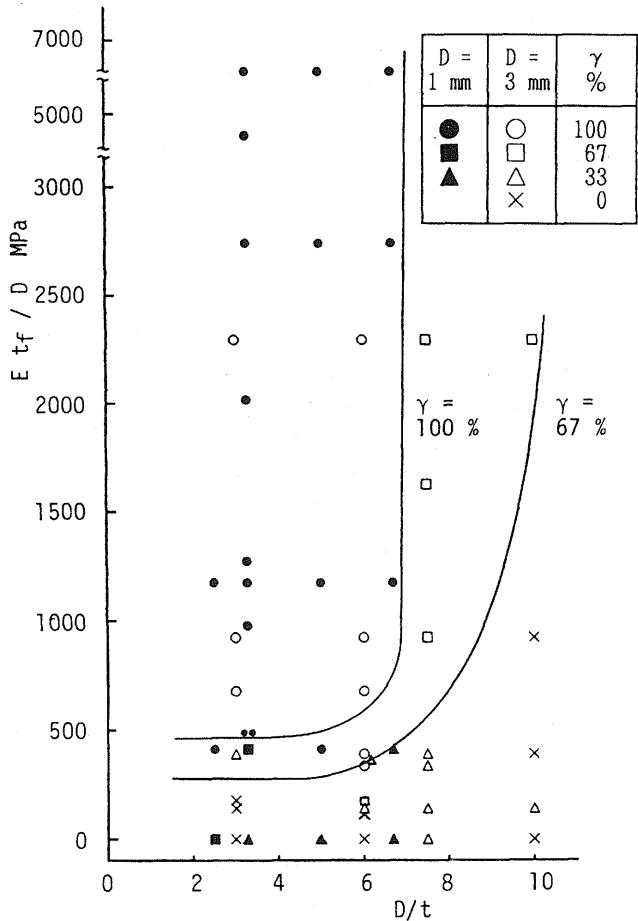
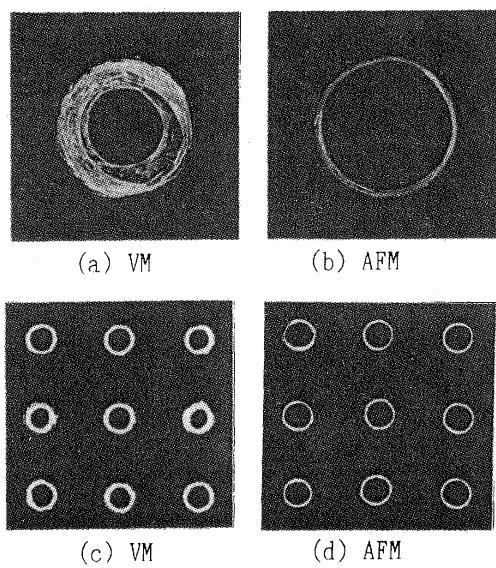


図8 ガラス板の穴あけ可能な加工条件 (#240 WA砥粒、混合比 SP:WA = 1:2)



加工条件

(a), (b): $D=5 \text{ mm}$, $t=1 \text{ mm}$, ソーダ石灰ガラス,
アルミニウム箔抑制板、 $t_f=17 \mu\text{m}$ 、#240
WA砥粒、混合比 SP:WA = 1:2.

(c), (d): $D=1 \text{ mm}$, $t=0.15 \text{ mm}$, ホウケイ酸ガラス,
アルミニウム箔抑制板、 $t_f=17 \mu\text{m}$ 、#240
WA砥粒、混合比 SP:WA = 1:1.

図9 ガラス板の穴あけへのAFMの適用例

5・2 微細穴の加工

前節の結果より、クラック抑制板を適切に選択し、最初から研磨材を混入した圧力媒体を用い、穴を粗加工（VM）した後も継続して仕上げ加工（AFM）を行えば、1ショットでガラス板の高精度穴加工が可能になることが分った。そこで、この方法を適用して厚さ $80 \mu\text{m}$ のホウケイ酸ガラス板に直径 $300 \mu\text{m}$ の穴加工を行った。この結果のサンプル写真を図10に示すが、ほぼ満足できる加工穴が得られた。

5・3 加工圧力

ガラス板およびアルミナセラミック板の穴加工に要する圧力 p_{cr} をまとめた結果¹⁴⁾を図11に示す。図の縦軸は加工圧力 p_{cr} を曲げ強さ σ_b にて無次元化して示してある。図より、VMよりVIPの加工圧力が大きく、速度効果が認められること、および穴径比が小さくなると加工圧力が急増することが分る。一般に、脆性材料の曲げ強さは寸法効果を持ち、板厚が薄くなるほど増加することが知られている。したがって、微細穴加工を行う材料が薄いほど、より高い加工圧力を要することが予想され、よって、十分な圧力発生能力を備えた加圧装置を準備する必要がある。参考までに、図10の場合の加工圧力は1.1 GPaであった。

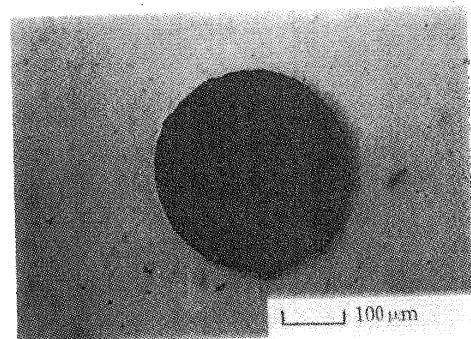


図10 ガラス板の微細穴あけの例（穴径 $300 \mu\text{m}$ 、ホウケイ酸ガラス板、厚さ $80 \mu\text{m}$ 、VM/AFM）

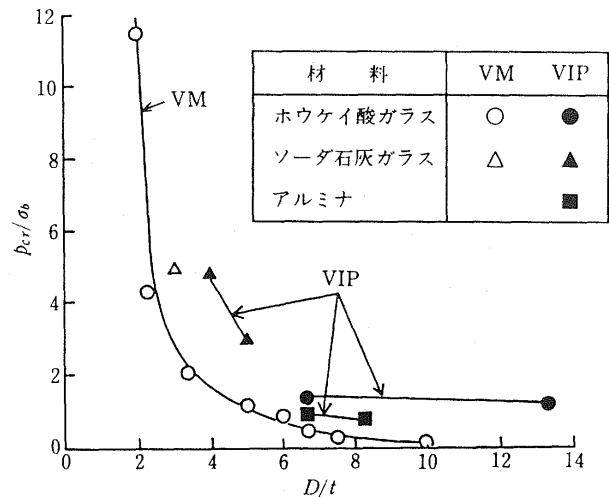


図11 脆性材料の穴あけ加工圧力と穴径の関係 (p_{cr} : 加工圧力, σ_b : 曲げ強さ, D : 穴径, t : 板厚)

6. あとがき

簡便かつ低成本で微細穴加工を行う方法として考案した“粘塑性圧媒加工法（VIP, VM, AFM）”の実施例と特徴について紹介した。プレスのような汎用加工機械によって加圧することを想定すれば、金属箔に微細穴を加工する場合には、最初から研磨材を混入した圧力媒体を用いて1ショットで加工する方式（ここではVM/AFMと称した）がもっとも実用的であろう。また、普通寸法の穴加工を対象とする場合でも、被加工材料の板厚がきわめて薄く、通常のせん断加工でクリアランスの正確な設定が困難なときには本法を推奨したい。また、クラック抑制板と称した延性極薄板を適切に選択・採用すれば、VM/AFMはせん断加工で不可能であったガラス板などの脆性材料の微細穴あけにも有効である。以上は実験室レベルで得られた結果であるが、この方法を実用化するためにはなお究

明すべき課題が1つ残されている。それは圧力媒体についてである。本実験でモデル材料として用いたシリコーンボリマは機械的性質に優れているものの、作業性、後処理およびコストに問題がある。圧力媒体としては、粘性係数の圧力依存性の顕著な半固体もしくは液体が望ましいので、今後そのような材料が新たに開発され、あるいは発見されることを期待したい。本稿が今後の微細加工技術の発展に多少とも寄与できれば幸せである。

終わりに、微細穴ダイスの製作にご援助いただいた松下技研(株)および三菱電機(株)名古屋製作所に感謝致します。また、本研究は、天田金属加工機械技術振興財団ならびに文部省科学研究費(昭和63年度～平成2年度、一般研究(C))の助成を受けたことを付記して感謝致します。

参考文献

- 1) 神馬敬・関根文太郎・関谷健助・勝瑞真一・森本亘：塑性と加工，28-315 (1987), 355.
- 2) 岩村亮二・高崎光弘・村上碩哉：プレス技術，26-9 (1988), 10.
- 3) 松林雄輔・小川良仁：同上，25-7 (1987), 6.
- 4) 増沢隆久：塑性と加工，29-335 (1988), 1275.
- 5) 豊田隆一・山口勝正・河田耕一：昭和61秋精密工講論，(1986), 363.
- 6) 森敏彦・中島国彦：48回塑加連講論，(1997), 151.
- 7) Kurosaki, Y. & Fujishiro, I.: Proc. 1st ICTP, 1 (1984), 759.
- 8) 黒崎靖・藤城郁哉・児玉靖：機論C, 51-465 (1985), 1058.
- 9) 黒崎靖・古川泰士：機論C, 55-516 (1989), 2206.
- 10) 黒崎靖・安田匡宏・加藤達夫：平元春塑加講論，(1989), 26.
- 11) Benedict, G.F.: Nontraditional Manufacturing Processes, (1987), 53, Marcel Dekker.
- 12) 黒崎靖・藤城郁哉・水草孝・三宅慶幸：機論C, 53-493 (1987), 2035.
- 13) 黒崎靖・藤城郁哉・三宅慶幸・古川泰士：機論C, 54-500 (1988), 984.
- 14) 黒崎靖・加藤達夫：平2春塑加講論，(1990), 595.
- 15) 黒崎靖・藤城郁哉・坂鉄一・岡本淳：機論C, 52-480 (1986), 2272.
- 16) Kurosaki, Y.: Proc. 3rd ICTP, 2 (1990), 1059.