

粘塑性体を圧力伝達媒体とした材料加工法*
(小径・微小径の穴あけ加工への応用)黒崎 靖**, 藤城 郁 哉**
坂 鉦 —***, 岡本 淳****A Manufacturing Process Using the Impact Compression
of a Viscoplastic Pressure Medium
(Application to Piercing of Fine Holes)by Yasushi KUROSAKI, Ikuya FUJISHIRO,
Koichi BAN, and Atushi OKAMOTO

The recent development of electronics industries requires a piercing technique for fine holes with a high production rate. The present research attempts to apply to such piercing a new manufacturing process utilizing the impact compression of a viscoplastic pressure medium, recently proposed by the authors. As a result, the process has succeeded in making various fine holes, unobtainable by the conventional shearing process: for example, circular holes with a 0.05~0.1mm order in diameter and a slit of 0.05mm in width. The piercing pressure is examined theoretically and experimentally.

Key Words: Nontraditional Processing, Fine Hole Piercing, Viscoplastic Pressure Medium, Drop Hammer, Dynamic Contact Pressure

1. 緒 言

近年、エレクトロニクス関連産業の目覚ましい発展に伴い、微小径の穴あけ加工に対するニーズが増大してきた。この方法としては、従来、ドリル加工、化学エッチング、放電加工、レーザ加工、電子ビーム加工などが用いられているが、いずれも生産性が低い難点がある。本研究では、この点で有利と考えられる塑性加工的手法の可能性を探る。せん断加工では、穴寸法が小さくなるとポンチの剛性が不足するうえ、ポンチの製作およびクリアランスの正確な設定が難しくなる。このため、実用上の最小穴径は通常法で1 mm、ストリップガイド方式で0.4 mm程度になっている⁽¹⁾。こうした問題はポンチに起因するので、これを使用しない加工法であれば回避できる可能性がある。

一つの方策として、著者らがこれまで手がけてきた粘塑性圧力伝達媒体の衝撃圧縮を利用した加工法^{(2)~(4)}の適用を試みる。本加工法の概略を図1に示す。無定形の粘塑性体を圧力伝達媒体として用い、こ

れをドロップハンマ装置などにより衝撃圧縮した際、媒体の変形応力の動特性により生ずる高圧を利用して、ポンチおよび板押えなしで薄板に穴あけを行うものである。以下では、上記穴径より小さい0.05~0.3 mm程度の穴あけを目標に実験的検討を行った結果を報告する。

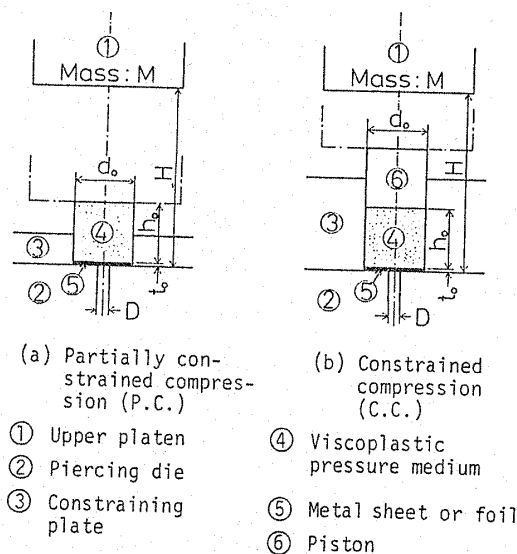


図1 粘塑性体の衝撃圧縮を利用した穴あけ加工法の説明図

* 昭和60年5月23日 昭和60年度塑性加工春季講演会において講演、原稿受付 昭和60年12月6日。

** 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

*** 日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町1-1)。

**** 光精工(株) (〒511 桑名市塚塚新町806)。

2. 実験方法

2.1 実験装置 衝撃試験装置として、自家製の自由落下式ドロップハンマ装置を使用した。加圧方式としては、図1に示すように、圧力媒体④の一部もしくは全体を位置決め兼用の拘束板③により拘束する方式とした。以後、前者を部分拘束圧縮(P.C.)、後者を拘束圧縮(C.C.)と称することにす。加圧室の直径 d_0 は両者とも10 mmとし、拘束板の厚さは5 mm(P.C.)もしくは15 mm(C.C.)とした。また、C.C.におけるピストン⑥の高さは10 mm、これと拘束板③とのすき間は0.04 mmとした。上部圧縮板を含むハンマ体の全質量は39.6 kgで一定とし、ハンマ体設定高さ H は50 cm以下の範囲で適宜変更した。

2.2 圧力伝達媒体 本加工法に適した媒体の条件として、圧力発生能力が高く、離型性に優れ、反復使用に耐えることが挙げられる。前報⁽⁴⁾の検討結果から、本研究ではこのような条件を満たす媒体材料として、 m 値の大きい市販のシリコンポリマ(フローテスタ粘度 $\eta=5000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、密度 $\rho=1.20\text{g}/\text{cm}^3$)を採用した。圧縮試験により媒体の構成関係を調べた結果、万能試験機による低速圧縮の場合 $\sigma=0.122\epsilon^{0.45}\dot{\epsilon}^{0.39}$ ($\epsilon=0\sim 1.0$, $\dot{\epsilon}=0.21\sim 0.42\text{ s}^{-1}$)、またドロップハンマ装置による高速圧縮の場合 $\sigma=0.032\epsilon^{0.59}\dot{\epsilon}^{2.0}$ ($\epsilon=0\sim 2.0$, $\dot{\epsilon}=90\sim 420\text{ s}^{-1}$)なる近似式を得た。ここに、 σ , ϵ , $\dot{\epsilon}$ はそれぞれ圧縮応力 [MPa]、圧縮ひずみおよび圧縮ひずみ速度である。以下に述べる面圧測定および穴あけ試験では、圧力媒体として直径 d_0 、高さ h_0 ともに10 mmの円柱形試験片を用いた。試験片は工具にて成

形後、室温で一晩放置した。

2.3 圧力測定 加圧装置の圧力発生能力を調べるため、次のような平板による圧縮試験を行い、面圧を測定した。図2に示すように、下部圧縮板①中に測圧ピン装置を組み込み、穴あけと同様に部分拘束および拘束の条件で衝撃圧縮試験を行った。受圧ピン②は試験片⑦に対して任意の半径位置に偏心させて配置できるようにしている。圧力センサ④(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)からの出力は、いったんトランジエントメモリ(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せた。圧力の校正には万能試験機を用い、一定の圧縮荷重を負荷後、急速に除荷する方法を採用したが、十分良好な直線性が得られた。圧力-時間曲線の測定例を図3に示す。本報では圧力のピーク値に注目し、これを p にて表すことにす。鋼球を落下衝突させて測定系全体の固有振動数を調べた結果16.1 kHzであり、これは p の測定に対する応答性としては十分と考えられた。下部圧縮板表面にはラップ仕上げを施し、 $0.5\mu\text{m}R_{\text{max}}$ の表面あらさとした。試験温度は $25\pm 5^\circ\text{C}$ とした。潤滑剤は使用せず、試験のつどアセトンにてすべての工具を脱脂した。

2.4 穴あけ試験 穴あけ用ダイスの穴は放電加工により得られた円形の貫通穴で、その公称直径を $D=0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8\text{ mm}$ および 1.0 mm (実測径はそれぞれ0.056, 0.135, 0.314, 0.487, 0.808, 1.127 mm)の6種類とした。ダイス材料としては、 $D=0.05\text{ mm}$ および 0.1 mm の場合厚さ0.2 mmのSK3板(焼入れ, $H_v=910$)、その他の場合15 mm角のSKS3棒材(焼入れ, $H_v=780$)を使用した。ダイス表面にはラップ仕上げを施し、 $0.5\mu\text{m}R_{\text{max}}$ の表面あらさとした。被加工材料としては、強度の大きい公称厚さ $h_0=0.01\text{ mm}$ および 0.05 mm のSK3はくを用いた。これらの機械的性質を表1に示す。穴あけ試験における温度および潤滑条件は上述圧力測定のものと同じと

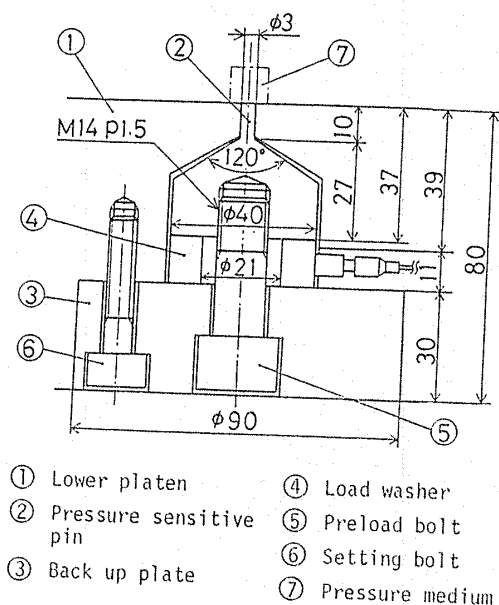


図2 測圧ピン装置

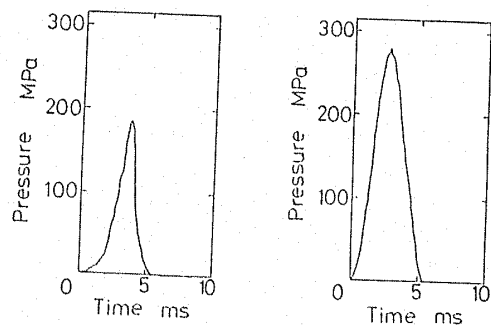


図3 圧力の測定例

した。

3. 実験結果

3.1 圧力の測定結果 媒体試験片の中心位置($r=0$ mm)および $r=\pm 3$ mmの半径位置において測定した圧力のピーク値 p とハンマ体設定高さ H との関係を図4に示す。図4より、 p の半径位置による差は小さく、近似的に均一分布とみなせること、同一 H に対してC.C.の p のほうがP.C.のものより50%以上大きいこと、しかし両加圧方式とも450MPa(≈ 4600 kgf/cm², 媒体の準静的変形応力の約10000倍に相当する)程度の高圧が容易に発生できることなどがわかる。

3.2 穴あけ可否に対する影響因子 ハンマ体設定高さ H 、穴径 D 、板厚 t_0 および加圧方式の種々の組合せに対して、穴あけの可否を調べた結果を図5に示す。図5では、貫通穴が形成された場合を○印で、一部穴あきもしくは全く穴が形成されなかった場合を×印で示し、両者の境界 H_{cr} を実線で示してある。ただし、 D には実測値が用いられている。図5より、 t_0 が同じ場合、C.C.の H_{cr} がP.C.のものより小さく加工効率が良いこと、および D が小さくなると H_{cr} が急増することがわかる。前者の結果は、図4よりC.C.のほうがP.C.より圧力発生能力に優れていることと符合している。結局、本実験条件では、 $t_0=0.01$ mmの場合 $D \geq 0.1$ mmの穴を、また、 $t_0=0.03$ mmの場合 $D \geq 0.3$ mmの穴をSK3はく加工できた。

3.3 加工穴の観察 加工穴およびダイス穴の外

観写真を図6(a)および図6(b)に示す。加工穴は媒体面より眺めたものであるが、ダイス穴形状が良好に転写されていることがわかる。加工穴部の断面を示す図7によれば、穴壁より約 $1/2 t_0$ の範囲において、だれ、破断面、かえりなどの不規則領域の存在が観察される。穴壁の破面写真を図8に示すが、媒体側材料がダイス穴へ向かって流入する様子および多数のディンプルが観察される。臨界ハンマ体設定高さ H_{cr} より小さい H において得られた試料の外表面プロフィールを図9に示す。図7~9より、本加工法における穴の形成機構は、板の張出し過程でダイス角で加えられる引張曲げにより生ずる延性破壊現象と推定される。なお、本加工条件では、素板の運動速度は数10 mm/sときわめて小さく、素板の変形は液圧バルジと大差ないことを確認した。

3.4 加工穴の寸法 それぞれの D につき10個の試料の加工穴径を測定し、平均穴径 \bar{d} と D との差 $\Delta d = \bar{d} - D$ 、 Δd の D に対する相対値 $\delta = \Delta d / D \times 100$ (%), 標準偏差 Sd を調べた結果を図10に示す。これらは、供試材の圧延方向およびこれと直角の方向について示してある(それぞれ $0^\circ, 90^\circ$ と表記)。図10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、 D に関せず $|\Delta d| \approx 0.5 \sim 1.0 t_0$ であり、 Δd は板厚に依存し、したがって $|\delta|$ は D が大きいくほど減少すること、 Sd はミクロンオーダーで全般的に加工穴の再現性が良いことなどがわかる。これらの結果より、本加工法では被加工材の板厚が薄いほど良好な転写精度を期待できることが結論される。なお、ここでは示さないが、加工精度に関しては加圧方式による有意の差

表1 穴あけ材料の機械的特性値

Thickness t_0 , mm	0.05	0.01
Tensile strength MPa	1891	1793
Total elongation %	2.4	1.3
n-value	0.026	0.015
F-value MPa	1932	2128
Vickers hardness H_v	593	-

$\sigma = F(\epsilon_\gamma + \epsilon)^n, \epsilon_\gamma = 0.002$

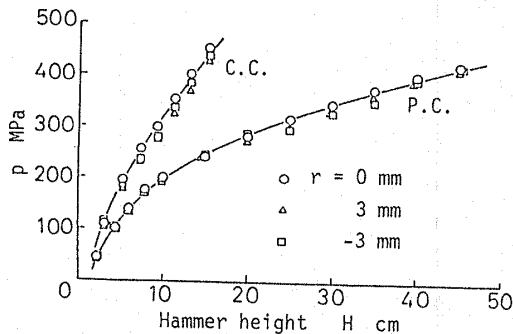


図4 発生圧力 p とハンマ体設定高さ H の関係

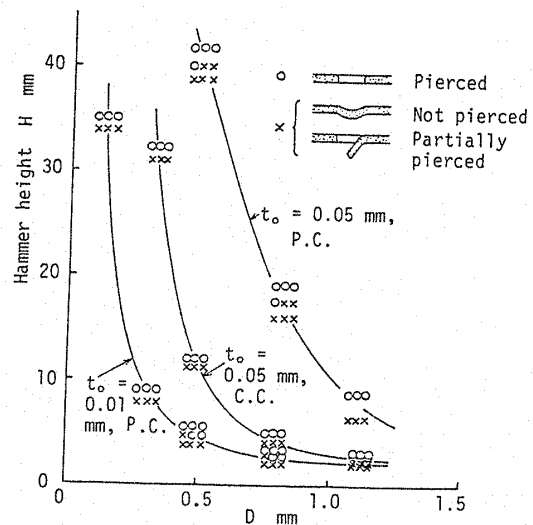
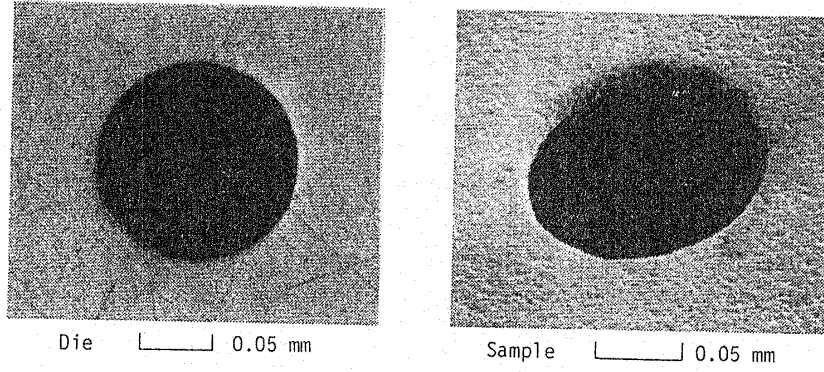
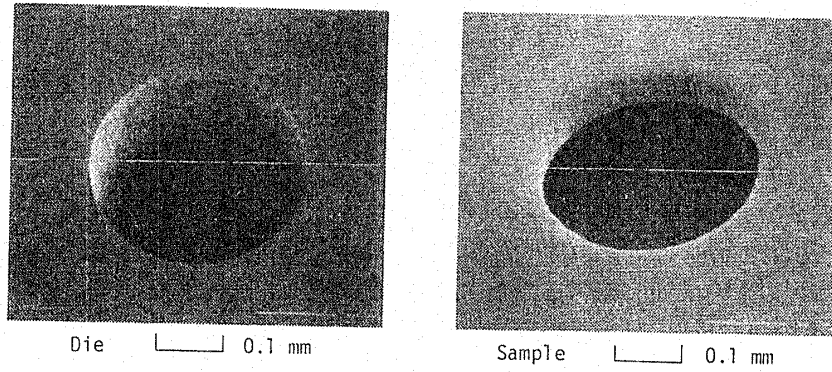


図5 穴あけ可否とハンマ体設定高さ H の関係



(a) $D=0.1$ mm (SK 3 はく, $t_0=0.01$ mm, $H=35$ cm, P. C.)



(b) $D=0.3$ mm (SK 3 はく, $t_0=0.05$ mm, $H=32$ cm, C. C.)

図 6 ダイス穴および加工穴の外観写真

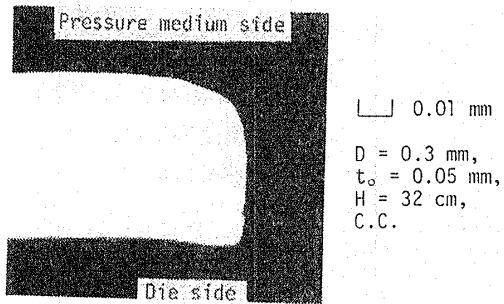


図 7 加工穴部の断面写真

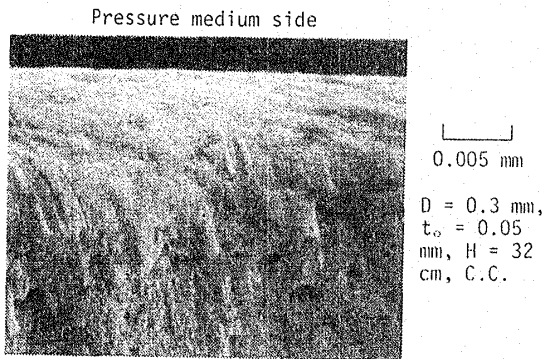


図 8 加工穴壁の破面写真

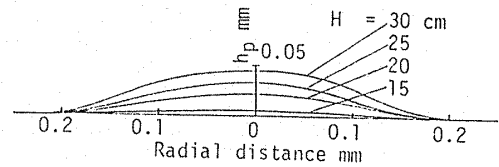


図 9 試料の外表面プロファイル ($D=0.3$ mm, $t_0=0.05$ mm C.C.)

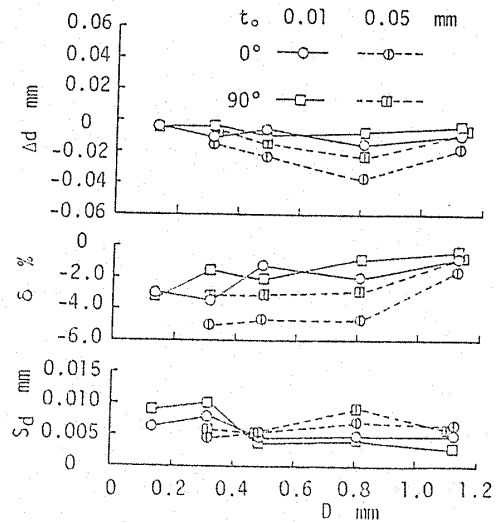


図 10 加工穴の精度

は認められなかった。

4. 穴あけ圧力の検討

以下に示す二つの簡単な計算モデルを用いて、穴あけに必要な圧力の見積もりを行った。

4.1 単純せん断モデル 図11(a)に示すように、板の上面直径 D の円内に一様圧力 p が作用し、 $D/2$ の支持位置でせん断破壊により穴が形成されるものとする。板のたわみを無視すると、板厚方向の釣合いより

$$p_{cr} = 4t_0\tau_{cr}/D \dots\dots\dots (1)$$

を得る。ここに、 τ_{cr} はせん断強さである。 τ_{cr} と引張強さ S_T の間に近似的に $\tau_{cr} = (1/\sqrt{3})S_T$ の関係を仮定すれば、式(1)より次式が得られる。

$$(p_{cr}/S_T) = (4/\sqrt{3})/(D/t_0) \dots\dots\dots (2)$$

4.2 張出し・引張曲げモデル 図11(b)に示すように、板が均一圧力 p を受けて張り出される過程でダイス角において引張曲げが作用し、曲げの外表面(加圧側)における子午線方向伸びひずみ ϵ_ϕ が限界値に達した時破壊が生じて穴が形成されるものとする。

張出しに要する圧力の算出式としては、高橋⁽⁵⁾による球面近似式を採用する。材料は等方性を有し、 n 乗硬化則 $\sigma_{eq} = F(\epsilon_Y + \epsilon_{eq})^n$ に従うとし、ダイス角の丸みを無視すれば、張出し圧力は次式のように表される [記号は図11(b)参照]。

$$p = 2t_0 F(\epsilon_Y + \ln a)^n / \alpha \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\alpha = 8\rho^2(1 - \cos\phi_c)/D^2,$$

$$\phi_c = \sin^{-1}\{D/(2\rho)\},$$

$$\rho = (D^2 + 4h_p^2)/(8h_p)$$

である。計算では、まず、張出し高さ h_p を与え、式(3)より p を、また、釣合い式 $t\sigma_\phi = p\rho/2$ より子午線

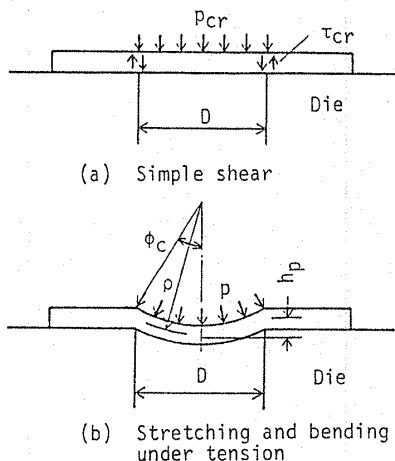


図 11 穴あけ圧力の計算モデル図

方向張力を算出した。ダイス角では、この張力のもとで平面ひずみ曲げが加わるとし、Chung-Swift⁽⁶⁾による引張曲げの理論を採用して、各張出し段階で曲げ外表面に生ずる ϵ_ϕ を算出した。そして、これが限界値 $\epsilon_{\phi cr}$ に達した時の圧力を p_{cr} とした。曲げの内表面での曲率 ρ_d (mm) は実験式 $\rho_d = 0.29/\phi_c$ より算定した。 $\epsilon_{\phi cr}$ の正確な見積もりは困難であるが、液圧バルジ試験による限界ひずみを流用し、 $\epsilon_{\phi cr} = 0.09$ ($t_0 = 0.05$ mm) もしくは $\epsilon_{\phi cr} = 0.06$ ($t_0 = 0.01$ mm) とした。

4.3 計算結果および考察 上述モデルに基づく計算結果を p_{cr}/S_T と D/t_0 との関係として図12に示す。図12中にプロットした実験点は、穴あけ可否と H の関係(図5)および圧力 p と H の関係(図4)を用いて、穴あけ可否と p の関係に換算し直したものである(ただし、図4にないC.C., $H > 16$ cm の場合の p は別途に定めた)。穴形成に要するエネルギーが媒体への付与エネルギーに比べて小さい場合、平板での発生圧力が穴あけ圧力の見積もりに利用できることは前報⁽⁴⁾で示した。

図12によれば、採用したモデルによる p_{cr}/S_T の差違は小さく、いずれも実験値と比較的良好に対応し、簡便式(2)でもある程度実用に耐えることがわかる。これは、採用した被加工材の延性が極めて小さいことに起因すると考えられる。また、図12より、 p_{cr} すなわち穴あけの難度は D の絶対寸法でなく、 D/t_0 と S_T に依存することが結論される。前述のように、SK3はくの場合、 D の下限値として 0.1 mm ($D/t_0 = 7$) が得られたが、これは本加圧装置の圧力発生容量の限界によるもので、本加工法の原理的な問題ではない。

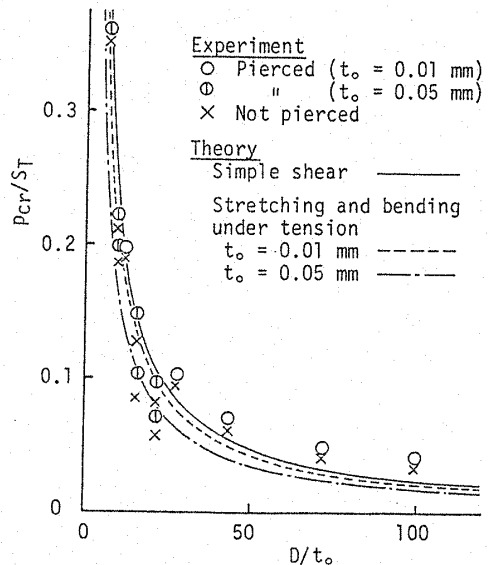


図 12 穴あけ圧力と穴径の関係

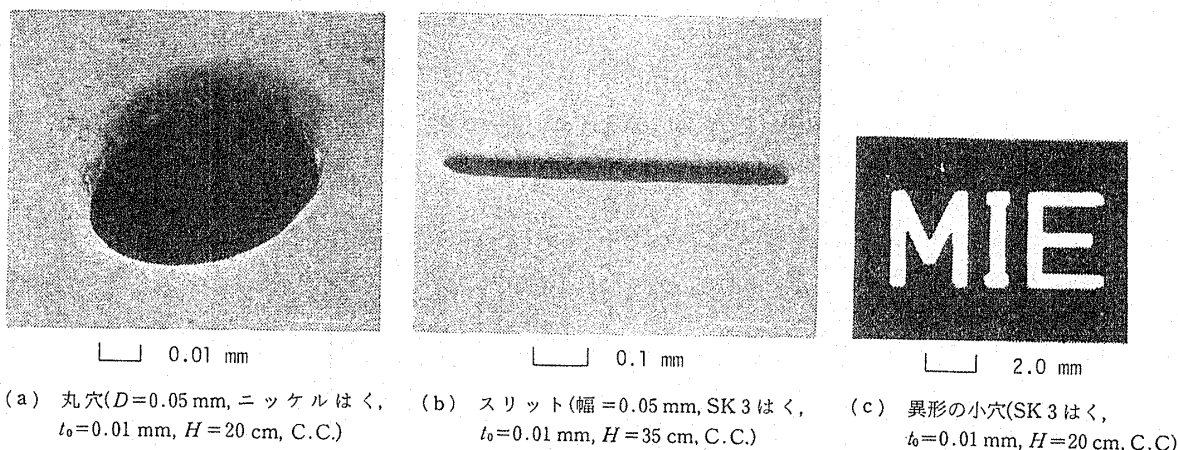


図 13 各種穴あけの実施例

5. 各種穴あけの試み

本加工法の応用として、 $t_0=0.01$ mm のニッケルはくに $D=0.05$ mm の丸穴を加工した例を図 13(a) に示す。また、 $t_0=0.01$ mm の SK3 はくに幅 0.05 mm のスリットを加工した例を図 13(b) に示す。さらに、複雑な形状の穴加工の例として、 $t_0=0.01$ mm の SK3 はくに英文字の穴を加工した結果を図 13(c) に示す。いずれも媒体面より眺めたものであるが、比較的良好的な穴が形成されている。切口面性状を観察した結果、前述 SK3 はくの丸穴あけの場合と類似していること、およびこの程度微細になると、ダイス角の丸み、表面あざ、穴の幾何形状などの不完全さが穴形成に敏感に反映することがわかった。

なお、本報で示した加工には放電成形などの利用も考えられる。ただし、きわめて大きい加工速度 (15~200 m/s) と短い圧力持続時間 (10^{-6} s のオーダー)⁽⁷⁾ により、 p_{cr} の増大、素板中央部でのひずみ集中⁽⁸⁾ による破断が予想され、加工可能な D/t_0 および材種に制約が加わる可能性が考えられる。

6. 結 論

本研究結果を要約すると次のとおりである。

(1) 通常のせん断加工で困難な直径 0.55, 0.1 mm の丸穴および幅 0.05 mm のスリットを本法により加工できた。

(2) 加工穴壁の面性状およびダイス穴に対する転

写精度は、穴の絶対寸法に関せず、被加工材の板厚に依存し、これが薄いほど良好となることがわかった。

(3) 単純化した計算モデルを用いて、穴あけ圧力 p_{cr} を見積もる方法を提示し、これが有効であることを確かめた。 p_{cr} は、穴の寸法に関せず、これと被加工材の板厚との比 D/t_0 およびその引張強さ S_T に依存することがわかった。結局、微小寸法といえども、加工の難易は D/t_0 および S_T だけであり、前者が小さく後者が大きいほど難度が高くなる。

(4) 上述特性およびポンチならびにしわ押さえを要しない利点を考慮すると、本加工法の用途として、極薄板に対する多数微細穴の同時加工、複雑形状の微細穴あけなどが考えられる。

終わりに、ダイスの製作に御協力頂いた神奈川電機 (株) 伊藤直人氏および松下技研 (株) 松下久登氏に感謝致します。

文 献

- (1) 日本塑性加工学会編, プレス加工便覧, (昭 50), 167, 丸善.
- (2) 山口・ほか 3 名, 機論, 50-452, C (昭 59), 707.
- (3) Kurosaki, Y. and Fujishiro, I., *Proc 1st ICTP, Advanced Technology of Plasticity*, 1(1984), 759.
- (4) 黒崎・ほか 2 名, 機論, 51-465, C (昭 60), 1058.
- (5) 高橋, 機論, 36-289 (昭 45), 1444.
- (6) Chung, S. Y. and Swift, H. W., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 165 (1951), 211.
- (7) 鈴木, 塑性と加工, 22-246 (昭 56), 634.
- (8) 河合・ほか 3 名, 塑性と加工, 25-283 (昭 59), 723.