

マイクロ塑性加工に関する研究*

(多数微細穴同時加工の検討)

黒崎 靖*¹, 古川 泰士*²

Studies on Microplastic Working

(One-Shot Piercing of Many Fine Holes by VM Process)

Yasushi KUROSAKI and Yasushi FURUKAWA

Recent developments in the electronics industries require a piercing technique for many fine holes at a high production rate. The present research attempts to apply to such piercing a manufacturing process using a viscoplastic pressure medium process (VM Process) previously proposed by one of the authors. The appearance of the holes pierced through copper foils is observed microscopically, and the effect of the working conditions on it is examined. Although only for a specific condition, the process is shown to be successful in piercing the circular holes of 50 μm in diameter with 75 μm in pitch, unobtainable by the conventional shearing process. Besides, a new technique (AFM method) for precise piercing applicable to general working conditions is proposed.

Key Words: Nontraditional Processing, Fine Hole Piercing, Viscoplastic Pressure Medium, VM Process, Abrasive Flow Machining

1. 緒 言

近年、エレクトロニクス関連製品および精密機械部品を中心に軽薄短小化が進展するに伴い、多数の微細穴を加工するニーズが増大している。このための方法として、現在、エッチング、ドリル加工、放電加工、レーザー加工、電子ビーム加工など、各種マイクロ加工法が実施されているが、いずれも生産性が低い難点がある。生産性の点では塑性加工的手段が有利である。せん断加工もマイクロ化が進み、直径 50 μm 内外の単一の穴や 200 μm 程度のピッチの多数穴あけが達成されるようになってきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、一般に、穴径が小さくなると、パンチの強度不足による折損、パンチの製作上の困難さ、クリアランスの正確な設定の困難さ、工具配置のスペースの制約、などの理由から加工可能な穴径やピッチは限られる。

本研究では、他の方法として、以前に著者らが提案した粘塑性圧媒加工法⁽³⁾ (以下、VM プロセスと称する) の適用を試みる。VM プロセスによる微細穴あけの説明を図 1 に示す。圧力媒体として無定形粘塑性体

を採用することにより高圧力場を発生させるとともに、穴形成過程での圧力低下や工具からの漏れを防止する。また、パンチを用いないので、上記問題の回避が期待できる。前報⁽³⁾では衝撃加圧法を採用して、単一の微細穴あけ加工を試み、本法が有用であることを示した。本研究では、VM プロセスが通常のプレス機械にも利用できるように低速加圧としたうえで、電子部品用銅はくに対して多数微細穴の同時加工を達成できる可能性と問題点を調べた。この結果、特定の加工条件下ではあるが、従来にない小ピッチの微細穴あけが達成できたうえ、新しい改善策 (AFM 法) により高精

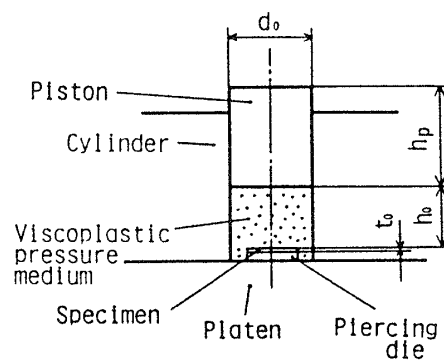


図 1 VM プロセスによる微細穴あけ法

* 昭和 63 年 5 月 14 日 昭和 63 年度塑性加工春季講演会において講演, 原稿受付 昭和 63 年 7 月 15 日。

*¹ 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

*² 学生員, 三重大学大学院。

度加工が行える指針を得たので、ここに報告する。

2. 実験方法

2.1 実験装置 加圧工具として一对のピストンとシリンダを用い、図1に示すように、圧力媒体を密閉状態で圧縮する拘束加圧法を採用した。加圧室は直径15 mmの丸穴で、ピストンの高さは20 mm、ピストンとシリンダ穴壁のすきまは0.008 mmとした。ピストンとシリンダの材料はSK3材(焼入れ)である。加圧には万能試験機(最大容量490 kN)を用いた。

2.2 圧力媒体 圧力媒体として、前報⁽³⁾と同じく、 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 $\rho=1.1 \text{ g/cm}^3$)を採用した。万能試験機を用いた単軸圧縮試験により、構成関係式として、 $\sigma=0.122 \varepsilon^{0.45} \varepsilon^{0.39}$ を得た。ここに、 σ , ε , および $\dot{\varepsilon}$ 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。媒体試験片は、直径、高さともに15 mmに成形して使用した。

2.3 供試材 被加工材料として、市販の電子部品用純銅はく(99.9% Cu, 公称厚さ $t_0=0.005, 0.01$ および 0.1 mm)を用いた。試験片寸法は、 $t_0=0.1 \text{ mm}$ の場合、一辺10 mmの正方形とした。他の t_0 の場合には取扱いを容易にするため、中央に直径2 mmの穴を持つ補強板(黄銅板, 厚さ 0.2 mm , $6 \times 6 \text{ mm}^2$)に一辺6 mmの正方形の銅はく試験片を接着剤にてはり合せた。圧力媒体はこの補強板の穴を通じて試験片に作用するようにした。銅はく試験片は所定の寸法に切断後、 380°C で1 hの焼なまし処理を行った。供試材の単軸引張特性値(板面内平均値)を表1に、その結晶粒径の測定結果を表2に示す。板厚方向の結晶粒数は、 $t_0=$

0.005 mm および $t_0=0.01 \text{ mm}$ の場合に約1個、 $t_0=0.1 \text{ mm}$ の場合に3~4個となっている。

2.4 穴あけ試験 穴あけ試験では寸法効果についても調べるため、主として幾何寸法(穴径、ピッチおよび被加工材の板厚との関係)が相似となる条件を採用した。穴あけダイスには、図2に示す配置の9個の丸穴を持つダイスを使用した。公称穴径 D は0.05, 0.1 および 1.0 mm の3種類とし、ピッチ P_t はそれぞれの D に対して $P_t/D=1.5, 2.0$ および 3.0 の3種類とした。 $D=1.0 \text{ mm}$ のダイスには厚さ2 mmのS55Cみがき鋼板($H_v=250$)を用い、一辺10 mmの正方形に切断後、二次元精密ドリリングマシンにより所定のピッチの穴を加工した。次いで、#1200 アルミナ砥粒によりダイス表面にラップ仕上げを行った。 $D=0.1 \text{ mm}$ のダイスには厚さ0.4 mmのSK3板(焼入れ, $H_v=810$)を用い、一辺10 mmの正方形に切断後、放電加工により所定の穴を加工した。その後、上記と同様のラップ仕上げを行った。 $D=0.05 \text{ mm}$ の場合には、市販のブロックゲージ(厚さ $0.2\sim 0.35 \text{ mm}$, SKD11, $H_v=927$)を $5 \times 10 \text{ mm}^2$ に切断後、これに放電加工により所定の穴を加工した。加工したダイス穴の寸法の測定結果を表3に示す。また、ダイスの一例をSEM写真にて図3に示す。

穴径と板厚の比($=D/t_0$, 以下穴径比 AR と表す)に関しては、主として $AR=10$ になる D と材料板厚 t_0 の組合せを採用した。試験時の圧力上昇速度は約 $0.056 \text{ MPa}\cdot\text{S}^{-1}$, 試験温度は $25 \pm 5^\circ\text{C}$ とした。穴あけに潤滑剤

表3 ダイス穴の寸法

Nominal diameter D mm	Pt/D		
	1.5	2.0	3.0
1.00	0.999	1.004	0.997
0.10	0.100	0.098	0.097
0.05	0.050	0.051	0.050

Unit: mm

表1 供試材の単軸引張特性値(板面内平均値)

Nominal thickness t_0 mm	n *	F MPa	Tensile strength MPa	Total elongation %
0.005	0.404	532	186	9.2
0.01	0.412	576	232	16.0
0.10	0.445	519	217	29.3

* $\sigma = F \varepsilon^n$

表2 供試材の結晶粒径

Thickness t_0 mm	In plane R. D. T. D.		Thickness direction
	0.005	0.009	
0.01	0.009	0.008	0.008
0.10	0.031	0.035	0.027

Unit: mm

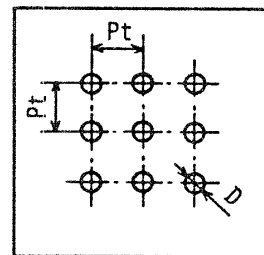


図2 ダイス穴の配置

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。

3. 実験結果

3.1 加工圧力 まず、穴径比 $AR=10$ で一定として、穴径 D とピッチ P_t の9種類の組合せに対して、穴あけに要する圧力 p について調べた。ここに、圧力は圧縮荷重と加圧室の横断面積より算定した。一例として、 $D=0.05$ mm の場合の結果を図4に示す。ここでは加工穴の性状は問わないこととし、9個すべての穴が形成された場合○印にて、形成穴数が9個に満たなかった場合△印にて、また、穴がまったく形成されなかった場合×印にて、それぞれ示されている。同様の図を他の D の場合についても作成し、9個すべての穴が形成される臨界圧力 p_{cr} を調べた結果を図5に実線にて示す。図5の縦軸は p_{cr} の供試材の引張強さ S_T に対する無次元量にて示されている。隣接穴の影響をもっとも受けやすいと考えられる中央の穴に着目し、これの p_{cr}/S_T について調べた結果を図5に破線にて示す。図より、実線、破線ともに、 p_{cr}/S_T に対して D の影響が大きく、 D が小さいほど p_{cr}/S_T が増加することがわかる。 P_t の影響は D により異なるが、 $D=0.05$ mm のとき、9個穴、中央穴の場合ともに、 P_t が大きいほど、 p_{cr}/S_T は増加している。これらの結果より、加工圧力に関して相似則が成立せず、穴径が小さくなるほど、加工に要する圧力が材料の強度と相対的に大きくなり、加工圧力の面から加工難度が高くなることが結論される。相似則が成立しない理由として、(1)ダイス角における曲げに板厚効果に関与する、(2)穴形成の破壊機構が板厚に依存する、(3)穴径が小なるほど結晶粒の個性が敏感に反映する、などが考えられる。これらは、以下に述べる加工穴性状からも推論できる。

3.2 加工穴の観察 前報⁽³⁾では、高強度低延性の炭素鋼箔の微細穴あけを試み、ダイス角における引

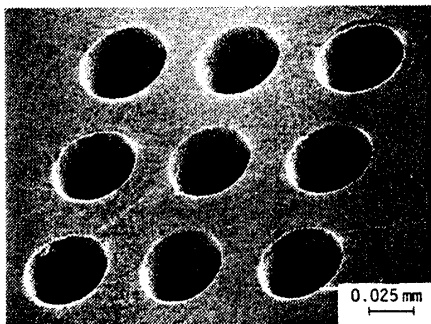


図3 ダイスの外観写真 ($D=0.05$ mm, $P_t=0.075$ mm)

張曲げによる延性破壊によって穴が形成されることを示した。この場合の形成穴は以下に述べるAタイプのものに限られた。しかし、高延性の銅箔を用いた本実験では3種類のタイプの加工穴が観察された。その例をSEM写真にて図6(a)~(c)に示す。これらはダイス側より撮影したものである。ダイス角全周にて破断分離が起こり、正常に貫通穴が形成される場合〔図6(a)〕をAタイプの穴と呼ぶことにする。このほかに、一部でダイス角破断が生じ、抜きくずが残留するBタイプ〔図6(b)〕、およびバルジ頂部で破断が生じ、やはり抜きくずが残留するCタイプ〔図6(c)〕の存在することがわかった。図4に示した形成穴(○印)の中には、これら3種類のタイプが混在している。なお、穴のタイプと穴の位置関係に規則性は認められなかった。

Aタイプの穴について、穴壁のSEM拡大写真を図7(a)~(c)に示す。図7(a)では上方が媒体側であ

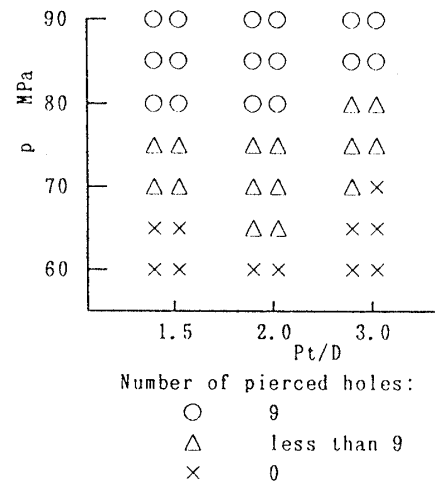


図4 穴あけ可否と加工圧力の関係 ($D=0.05$ mm, $AR=10$)

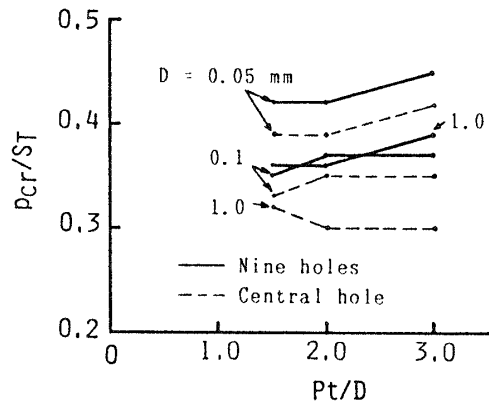


図5 加工圧力に及ぼす P_t および D の影響 ($AR=10$)

り、図7(b), (c)はダイス側より撮影したものである。図7(a)の $D=1.0$ mm, $t_0=0.1$ mmの場合、穴壁にはディンプルが観察され、ポイドの成長・合体に伴う延性破壊により穴が形成されたことがわかる。また、上方にはだれが、下方にはかえりが認められる。一方、図7(b), (c)に見るように、 D および t_0 が小さくなると穴壁の様子は一変する。ここではディンプルはなく、板面にほぼ垂直かつ平滑な破面が観察される。これらの場合には、板厚方向に結晶粒が1個程度存在するだけであり、クラックが板厚方向に抜けやすいためと思われる。また、図では結晶粒界が観察され、穴の輪郭が結晶粒に依存して不規則に変化する様子が伺える。

以上のように、穴の形成機構は穴径（したがって板厚）によって変化し、微細穴になるほど、加工穴性状に被加工材の組織の影響が敏感に反映することが結論される。

3.3 加工穴のタイプに及ぼす影響因子 加工穴のタイプとしてはもちろんAタイプが望ましいのであ

るが、これがどのような因子に影響されるかについて調べてみる。図8(a)~(d)は、加工穴タイプの発生率 R (%)を各種加工条件について示したものである。穴のサンプル数は18とした。図8(a)の $D=1.0$ mm, $t_0=0.1$ mmの場合、Aタイプの穴の R は100%で、良好な穴が得られた。しかし、 D および t_0 が小さくなると、図8(b)に示すように、Aタイプの穴が激減し、B, Cタイプの穴が増大する。図8(b), (c)の比較より、穴径比 AR が小さくなると（したがって t_0 が大きくなると）、逆にAタイプが増加することが知れる。これらの結果はダイス角における曲げの厳しさに起因し、 t_0 が大なるほど曲げひずみが増加し、したがってダイス角で破壊が生じやすくなるためと考える。図8(d)はドロップハンマ装置⁽⁹⁾を用いて衝撃加圧を行った場合を示している。図8(b)と図8(d)の比較より、加工速度を大きくすることはむしろCタイプの穴の増大をもたらし、メリットがないことがわかる。材質との関係を知るために、焼なまし前の硬質銅はくを用い

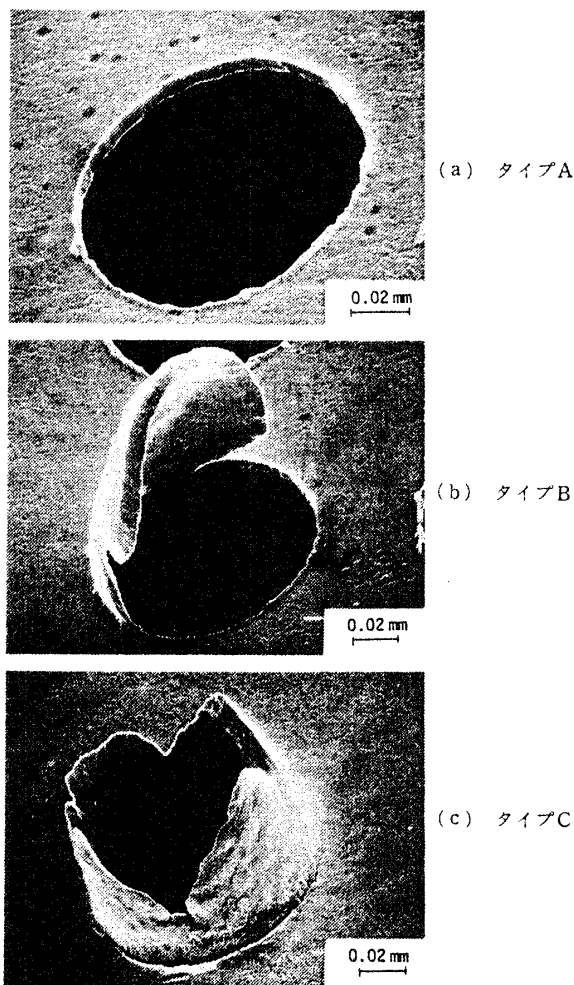


図6 加工穴のタイプの分類 ($D=0.1$ mm, $AR=10$)

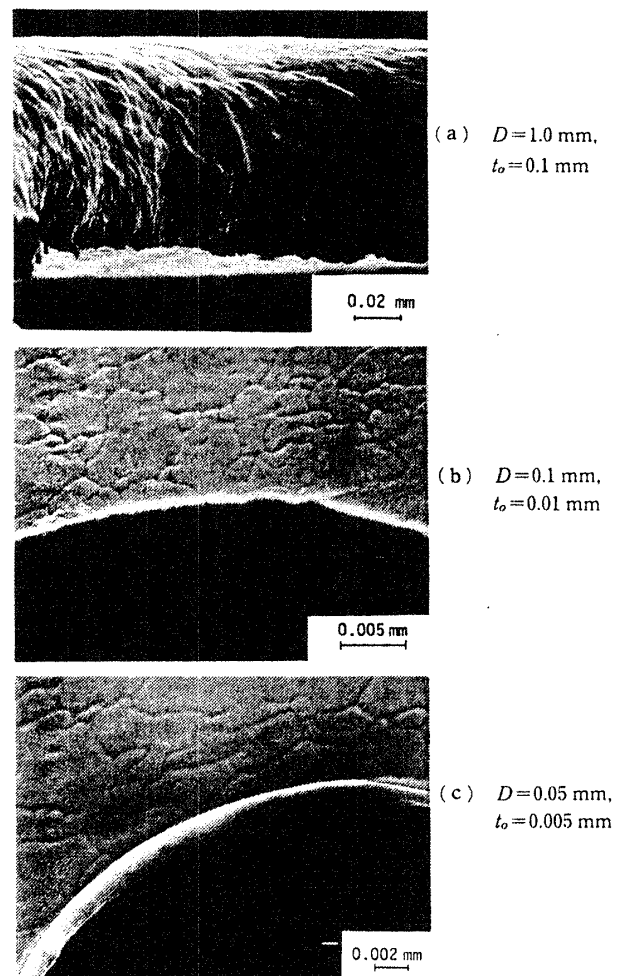
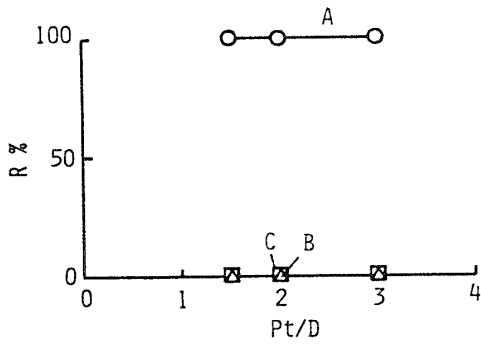
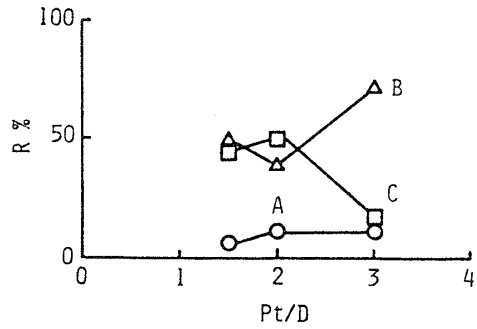


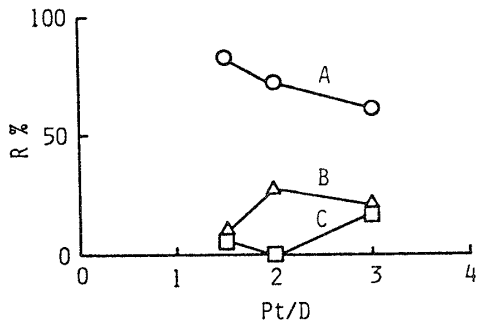
図7 加工穴壁のSEM写真 ($AR=10$)



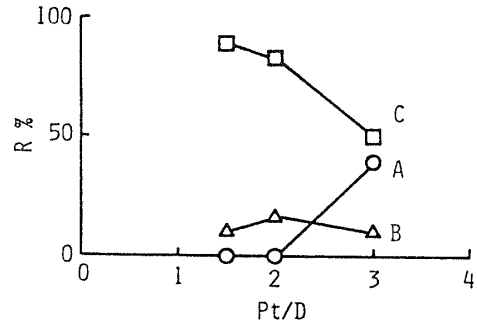
(a) $D=1.0$ mm, $t_0=0.1$ mm, $AR=10$



(b) $D=0.05$ mm, $t_0=0.005$ mm, $AR=10$



(c) $D=0.05$ mm, $t_0=0.01$ mm, $AR=5$



(d) $D=0.05$ mm, $t_0=0.005$ mm, $AR=10$, Drop hammer

図 8 加工穴タイプの発生率と加工条件の関係

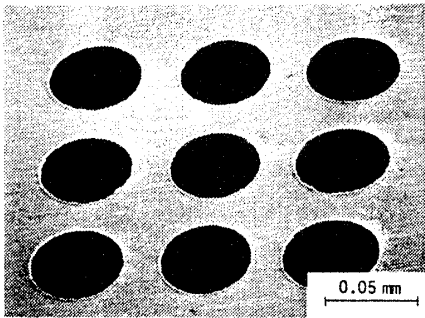


図 9 硬質銅はくに対する穴あけ試験結果 ($D=0.05$ mm, $P_t=0.075$ mm, $AR=10$)

て穴あけ試験を行った結果、Aタイプの穴がきわめて得やすいことがわかった。図9に加工サンプルの例を示すが、比較的良好な穴が形成されている。このようにして、特別な条件下ではあるが、穴径 $50 \mu\text{m}$ 、ピッチ $75 \mu\text{m}$ (さん幅 $25 \mu\text{m}$) という、従来のプレス加工で困難な小ピッチの微細穴加工を実施できた。

4. 加工穴の改善策の検討

前述のように、一般的にはVMプロセスによる加工穴は実用上不十分であり、何らかの改善策が必要と

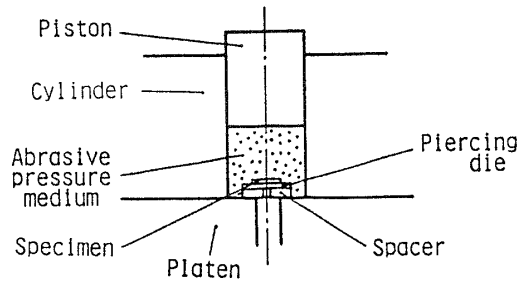


図 10 AFM法による微細穴あけの説明

考えられた。よって、ここでは新しい試みとして、ばり取りなどに利用されている高圧砥粒流動加工 (AFM法)⁽⁴⁾の考え方を導入した複合加工法を提示する。AFM法の説明を図10に示す。その方法は簡単であり、圧力媒体に砥粒を混入した点のみがVMプロセスと異なる。加工の初期段階ではVMプロセスにより穴形成を行い、その後、AFM作用により残留する抜きくずおよびかえりを除去することをねらう。VM, AFMともに 90 MPa の圧力下で穴あけを行った結果のサンプル写真を図11(a)~(c)に示す。ただし、砥粒には #8000 のアルミナを用い、混合比 (重量比) はシリコンポリマ : アルミナ砥粒 = 4 : 1 とした。図より、ピス

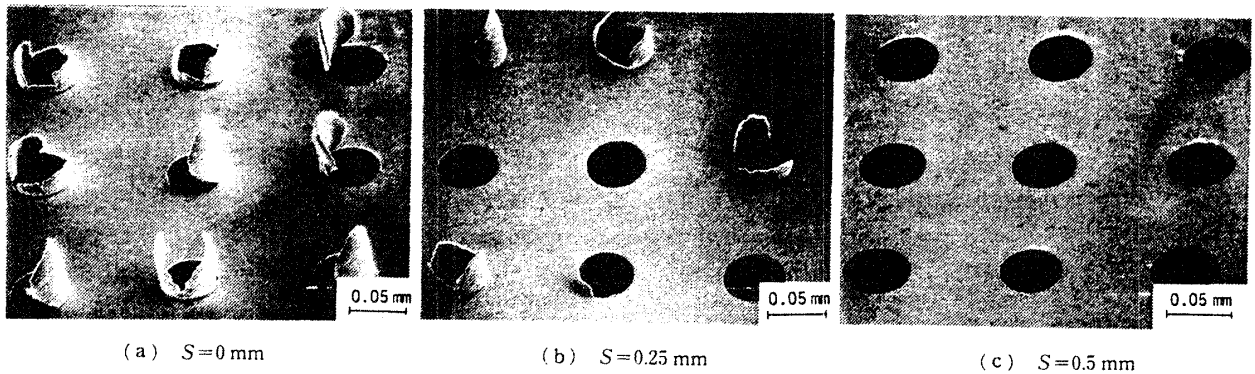


図 11 AFM 法による加工穴の改善状況 ($D=0.05$ mm, $P_t=0.15$ mm, $AR=10$)

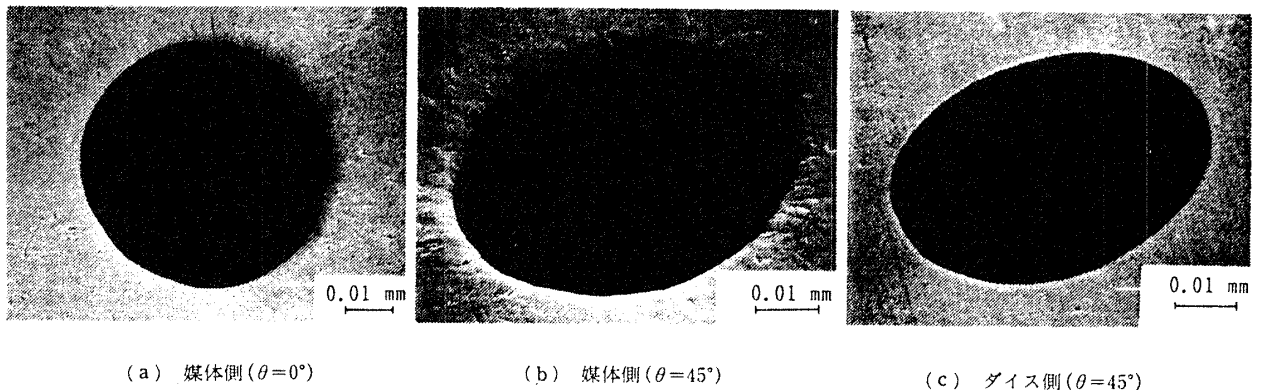


図 12 AFM 法によって得られた加工穴の SEM 写真 ($D=0.05$ mm, $P_t=0.15$ mm, $AR=10$)

トン押し込み量 S の増加に伴い加工穴が改善されることが明瞭にわかる。図 12(a)~(c)は、こうして得られた加工穴の SEM 拡大写真である (θ は試料台の傾斜角度)。媒体側では、穴縁より数 μm の範囲で丸みが付いているが、全体として穴の輪郭は良好であり、結晶粒の個性に起因する凹凸もほとんど消えている。以上の結果より、AFM 法は加工穴精度の改善に有効であり、新しい高精度微細穴あけ技術として利用できる可能性のあることが結論される。

5. 結 論

本研究結果を要約すると次のとおりである。

(1) 粘塑性圧媒加工 (VM プロセス) により、硬質の銅はくに穴径 $50 \mu\text{m}$ 、ピッチ $75 \mu\text{m}$ (さん幅 $25 \mu\text{m}$) という慣用のせん断加工で困難な小ピッチの微細穴あけを実施できた。

(2) 軟質の銅はくに対して VM プロセスを適用した結果、加工圧力、加工穴性状、穴の形成機構などに寸法効果が認められた。そして、穴が微細になるほど、加工に要する圧力が材料の強度と相対的に増加し、かつ加工穴性状が劣化し、加工難度が高くなることが

わかった。ピッチの影響は二次的と考えられた。

(3) 正常な貫通穴 (A タイプの穴) を得る条件について検討した結果、穴径および板厚が大きいほど、穴径比 (= 穴径 / 板厚) が小さいほど、加工速度が遅いほど、材料の延性が小さいほど、このタイプの穴が生じやすいことがわかった。

(4) 加工穴精度の改善策として、新たに高圧砥粒流動加工法 (AFM 法) の原理を導入した複合加工法を提案し、これが高精度微細穴加工に有用であることを確かめた。AFM 法の最適加工条件の究明は現在のところ不十分であり、これを今後の検討課題としたい。

終わりに、微細穴ダイスの製作にご協力いただいた松下技研(株)に感謝する。なお、本研究は昭和 61・62 年度文部省科学研究費 (一般研究 C) の助成を受けた。

文 献

- (1) 松林・小川, プレス技術, 25-7(1987), 67.
- (2) 豊田・ほか 2 名, 昭和 61 年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, (1986), 363.
- (3) 黒崎・ほか 3 名, 機論, 52-480, C (1986), 2272.
- (4) Benedict, G. F., *Nontraditional Manufacturing Processes*, (1987), 53, Marcel Dekker.

討 論

〔質問〕 山口克彦

〔京都工芸繊維大学工芸学部〕

圧力媒体として無定形粘塑性体を使用し、プレスせん断的な手法によって加工がきわめて困難な微細穴の同時穴あけ加工を実現しておられる点、大変興味深く拝見した。

質問者らは、以前に、ゴムを圧力媒体として薄板の穴抜き加工(付1)を行ったことがある。そのときの経験より、以下の点について質問させていただく。

(1) 図6(b), (c)のような破断を防ぐためには、ダイスの厚さを小さくすればよいのではないかと考えられるが、いかがか。

(2) 圧力媒体に砥粒を混入したAFM法の場合、ピストンの押込みにつれて二次破断が生じ、その結果としてきれいな穴あけができていようであるが、ダイス穴の摩耗による寸法精度の低下は心配ないか。

(3) 圧力媒体はどれほど繰返して使用することができるか。同一の場所がダイス穴のエッジに当たる場合、損傷がおこるのではないかと考えられるが、ご教示願いたい。

〔回答〕 (1) ご指摘に感謝する。適切な厚さの

(付1) 福田・山口, 塑性と加工, 10-96(1969), 53.

ダイスを採用すれば、張出し頂点と圧盤との接触摩擦によりタイプCの破断を防止できる可能性は十分に考えられる。しかし、組織不均一に起因するタイプBの破断については確言できない。ご指摘の方法では、ダイスの剛性低下、工具配置などの理由からVMとAFMを一つのシーケンスとして実施することが困難なので、利用できるとすれば、結晶粒径が穴径に比べて十分小さい被加工材料でAFMを要しない場合が対象になると思われる。その際、ダイス穴内に残留する抜きくずの除去策を講じる必要がある。

(2) ご指摘の点は重要であり、過度のAFMを避けるべきと考えている。実際問題としては、加工穴はダイス穴よりおよそ2~5%小さくなるので⁽³⁾、この寸法差を矯正する程度にAFMを抑えること、および高硬度のダイス材料(超硬, セラミックスなど)を採用することが肝要と考える。

(3) 採用した圧力媒体は常圧では液体に近い振舞いを示すので、損傷の問題は全くない。使用可能な繰返し数は損傷よりむしろ抜きくずの混入率に依存し、およそ目安として約10%の混入率(重量比)を限界と考えている。