

超微細穴抜き法の高精度化および連続加工化*

栗本真司*¹, 広田健治*²
徳元大輔*³, 森敏彦*²Improving High Precision and Continuous Process
of Ultra-Fine Piercing by SiC Fiber PunchShinji KURIMOTO, Kenji HIROTA,
Daisuke TOKUMOTO and Toshihiko MORI*⁴*⁴ Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

A new ultra-fine piercing which had been proposed, have been conducted successfully, but has a few troublesome points. A die material is mild steel, and than a coupling of a die and a pierced material is that of metals. Therefore, pierced scrap accumulated in a die hole and stops a punch advancement. If the pierced material rises up unevenly from the die, a horizontal force acts on the punch and the punch defects, advances deviatly and shaves the surface of the die hole. These were conquered by means of setting a vacuum chamber under the die. A scrap is sucked away from a die hole at each stroke and a foil of pierced material is pulled down through two holes remoted by 1 mm from the die hole. Thus a high precision and continuous process of the ultra-fine piercing is carried out.

Key Words: Plastic Forming, Ceramics, Formability, SiC Fiber, Ultra-Fine Piercing, Vacuum System, Wear, Precision

1. 緒 論

微細穴抜き加工は各種高機能要素の創製には欠かすことができない技術であり、多くの最新技術が試されてきた。前報^{1, 2}では、セラミックも微細寸法であれば、無欠陥、高剛性、高強度の工具となり得ることを指摘し、直径14 μm のSiCファイバを穴抜きポンチとして使用する加工システムを開発した。さらに、加工の制御、ポンチ力、ポンチ変位の計測システムを開発し、加工の実施および現象把握を行った。

本加工システムの弱点はダイスに軟質金属を用いることである。本報では抜きカス除去、被加工材箔の保持を真空システムの追加で確実にを行い、ダイス磨耗の進展を抑制することによって工具寿命を延長し、連続穴抜きを可能とする方策について報告する。

2. 超微細穴抜きの概要

使用したSiCファイバ (株式会社日本カーボン製、

商品名ニカロン) の直径は14 μm であり、表1に諸特性を示す。強度、剛性は鋼材各種に匹敵し、十分にポンチ工具として使用可能である。なお、表1に記載された引張強さは長さ50mmに対するものであるが、ポンチ長50 μm に対しては最弱環仮説³によると10GPa程度となり、高張力鋼強度をはるかに上回る。また、セラミックスファイバは金属との反応性が小さく、耐焼付き、耐摩耗性に優れ、長いポンチ寿命が期待できる。

図1にポンチ製作法を示す。SiCファイバを長い状態で金属半割軸の軸に一致するようにはさみ、金属が塑性変形し、ファイバを包み込む状態で一体となるように十分に締結する。端面を半割軸ごと研磨、バフ、ラップ仕上げし、電解研磨により導電性の金属のみを50 μm 程度除去することにより、除去されずに残ったファイバが適度な軸比を持ったポンチとなる。

ファイバポンチおよび穴なしダイス (S50C) を図

Table 1 Properties of SiC fiber

Diameter	(μm)	14
Density	(g/cm^3)	2.55
Tensile strength	(GPa)	2.75
Young's modulus	(GPa)	196

* 原稿受付 2001年7月23日。

*¹ 名古屋大学大学院。*² 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。*³ 日本電信電話(株) (〒100-0004 東京都千代田区大手町2-3-1) (元: 名古屋大学大学院)。

E-mail: mori@mech.nagoya-u.ac.jp

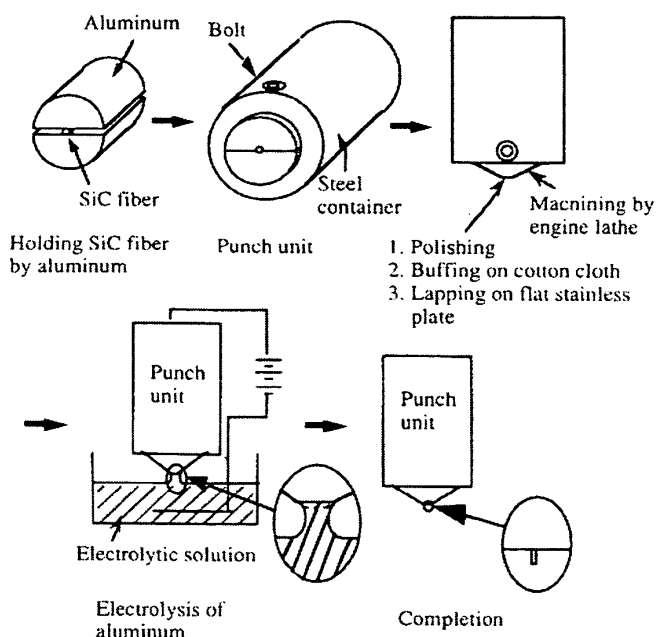


Fig.1 Fiber punch made by buffing and electrolysis

2)に示すマイクロプレスに組み込み、ファイバポンチでダイスに穴抜きを行うことで、ポンチ、ダイスの芯合せおよび零すきま設定を同時に精度よく可能にした。

3. 連続加工 (1:従来法)

3.1 実験方法 実験は図3に示す手順で行った。

- (1) ポンチ、ダイスのマイクロプレスへの設置
- (2) ポンチによるダイス穴の加工
- (3) 箔穴抜き (本加工)

実験は、無潤滑、穴抜き速度 $6.4\mu\text{m/s}$ ~ $3.8\mu\text{m/s}$ で行う。箔の穴抜きを無潤滑で行う理由は、ポンチが箔に近づいたとき、潤滑剤膜とポンチユニットの間の表面張力が無視できず、箔が動きポンチが折損する可能性があるためである。穴抜き速度が最大の場合、加工速度は、1サイクル2秒であり、穴抜き加工のみの1サイクルは0.2秒である。穴抜きに際して箔は曲げモーメントを受け、ダイス上で跳ね上がる。また、加工後ポンチ引き上げの際、箔では大きなカス取り力を必要とする。これらの問題を解決するため、通常は、板押えを取付けるが、被加工材のラフガイドとしてブランクホルダーを取付け、被加工材に引張り荷重をかけることによって対処した。

本実験では主に被加工材を板厚 $15\mu\text{m}$ のベリリウム銅箔 (25合金1/4H材, 日本ガイシ製) とした。ベリリウム銅箔は良好な加工特性をもった高伝導率高強度バネ材料で、時効化処理により引張強度を 1.5GPa まで高めることができ、ステンレス鋼の強度に匹敵する。

3.2 穴形状とポンチストローク線図 3.1節の条件で、ベリリウム銅箔に連続穴抜き加工を行なったときの、初段階、200回目、1000回目の穴の様子を図4~6に示す。また、加工の際に得られるポンチストローク線図の初段階、200回、1000回目を図7に示す。

加工の初段階においては、図4のように、穴形状は良好な真円形状であり、だれもほとんどない。分離面は、ほとんどせん断面であり、わずかに破断面が存在し、極めて小さいクリアランスの打抜き加工の特徴を示している。ポンチストローク線図 (図7(a)) を見ると、板厚の30%前後で最大荷重点に達し、抜きカスの分離はポンチストロークが板厚に達したところで起きている。このことからせん断面の多い良好な分離面を得られていることが分かる。ポンチ荷重は抜きカスの分離後、いったん急激に減少するが、ポンチストローク150%手前で極大を示し、その後の減少率が抜

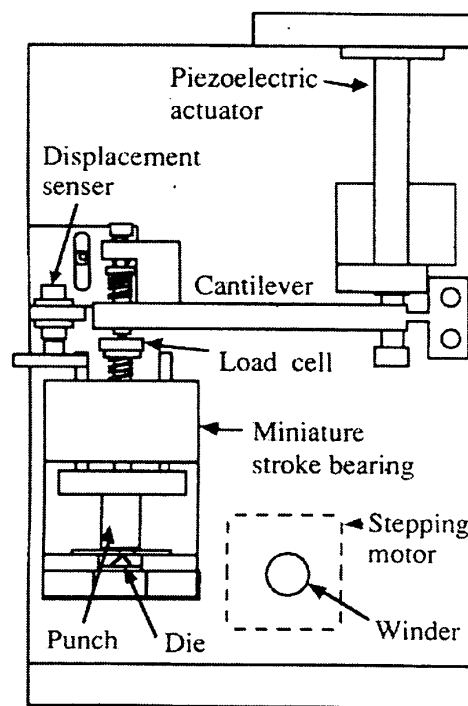
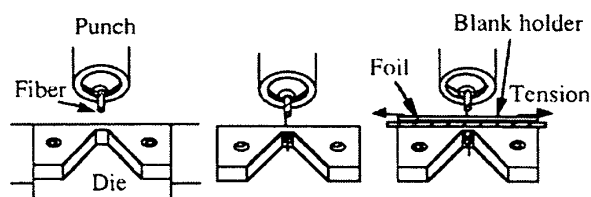


Fig.2 Schematic of micro press



(1) Setting punch (2) Piercing die (3) Piercing foil and die

Fig.3 Piercing die and foil

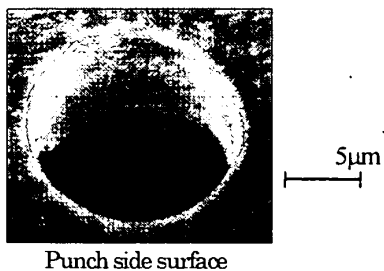


Fig.4 Configuration of pierced hole at beginning of piercing

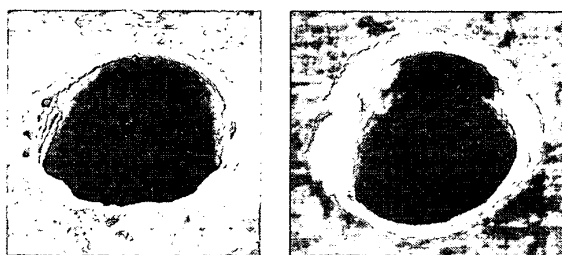


Fig.5 Configuration of pierced hole at 200 times of piercing

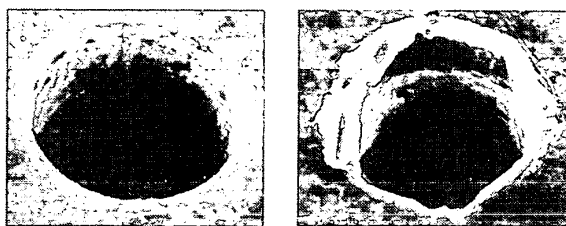


Fig.6 Configuration of pierced hole at 1000 times of piercing

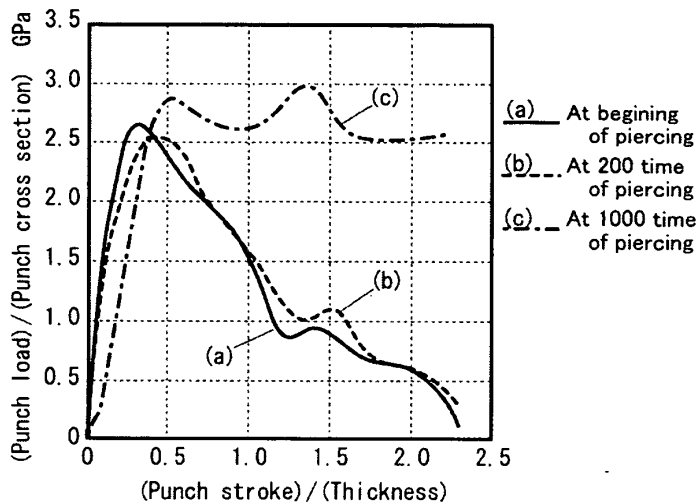


Fig.7 Punch stroke - force curve

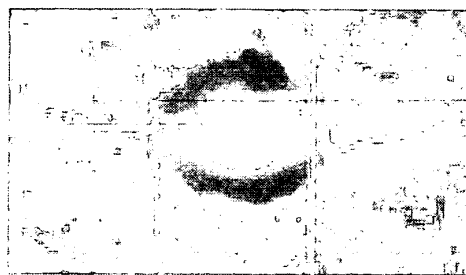


Fig.8 Die hole after 1000 piercing (Laser microscopy)

きカス分離後の減少率のほぼ半分になっている。これは、現加工直前の穴抜きにおける抜きカスがダイス穴内に残っており、これに現加工の抜きカスがあたり、ポンチに対する抵抗となったためである。抜きカス内部の残留圧縮応力が一定であるとすれば、ダイス穴壁面への垂直力が倍になり加工力に対するダイス穴壁面と抜きカスとの摩擦抵抗が倍になったためと考えられる。

穴抜き200回程度の加工を見ると、ポンチ側穴形状(図5)が手前から左右両側で穴の端が乱れており、奥側で鮮明なエッジを示しており、分離面側の穴形状では手前から奥に向かって長穴になっているのがわかる。これは箔とポンチが当初垂直にあっていたのが、加工の途中でポンチに横荷重が加わり箔に対しポンチが斜めに突き出たためと考えられる。この時期のポンチストローク線図(図7(b))を見ると最大荷重点が板厚の40%前後と遅れ、また最大荷重値が10%弱下がっ

ている。これはクリアランスが増加した時の特徴であり、ポンチに比べ柔らかいダイスが磨耗していると予想できる。前述した穴形状の特徴からの推論と同様に、箔との摩擦によるものよりもポンチが箔を打ち抜いた後に斜めになることによるダイス穴との芯ずれの影響が大きいと考えられる。

さらに穴抜き1000回目の加工穴(図6)では、破断面が50~60%を占めるようになり、分離面側で大きなバリが観察された。この時期のポンチストローク線図(図7(c))は加工初段階、200回目の線図とはまったく異なっている。最大荷重点はさらに遅れ、クリアランスの増大をうかがわせる。しかし、一般的に、クリアランスの増加は最大荷重値の減少につながるが、逆にこの場合は連続加工初段階および200回打抜き加工時のポンチ荷重に比べて増加している。この頃のダイス穴部の状態を図8に示す。穴径は22μmにまで拡大しており、穴内面にはベリリウム銅が固着していた。

4. 工具の改良

4.1 連続加工における工具の磨耗 3章の連続穴抜き加工では、1000回程程度の連続加工で、ダイスの損傷が初段階穴 $14\mu\text{m}$ に対し $22\mu\text{m}$ (157%)までも磨耗が進んでいることを示した。被加工材との摩擦による磨耗、ポンチからの側方力がダイスの損傷を大きくする。

ダイス磨耗プロセスを図9に示す。

- (1) ダイス穴周囲の箔の浮き上がり
- (2) 浮き上がりの不均等によりポンチに側方力が作用し、ポンチが斜めになることによるダイスとの芯ずれ
- (3) (2)よりポンチがダイス穴と干渉する。このため、ポンチストローク範囲にわたってダイス穴が拡張され段差部が形成される。
- (4) 次の加工：クリアランス増大により、抜きカス内部に曲げモーメントが発生しダイス内面との摩擦抵抗が残留
- (5) (1)~(4)の繰り返しによりダイス穴の磨耗が進み段差が顕著になると、抜きかすが段差部を通過する際に押し出し、またはシェーピング変形が生じるようになる。この抵抗が穴抜き加工力に加算されるため、図7(c)のように加工力線図に2度目のピークが現れる。

これを回避するために次に述べるような機構を持つダイスにより工具寿命を伸ばす方策を考案した。

4.2 ダイスの新機構 本研究では加工寸法が非常に小さいので、箔押さえを用いても、加工部付近で

は図9のように被加工材が浮き上がる。この問題を解決するため、ダイスの裏側から真空ポンプで負圧をかけ、ダイスの裏側に箔を密着させることとした。負圧をかけるため、ダイス穴から 1mm 離れた位置に直径 0.6mm の穴を2つ開け、ダイス穴と計3カ所で負圧をかけた。これを図10に示す。チャンバーの正面部は、透明な薄いポリエステルシートをシアノアクリレートで正面部に貼り付けることにより密閉した。

5. 連続加工 (2:真空システムの適用)

5.1 実験結果と考察 実験方法は3.1項と同じである。図11に連続加工200回目、図12に連続加工1000回目の加工穴の走査型電子顕微鏡で観察した結果を示す。連続加工初段階に関しては、負圧を用いない通常抜きの図4と同じ傾向であった。さらに加工の際に得られたポンチストローク線図の初段階、200回目、1000回目を図13に示す。

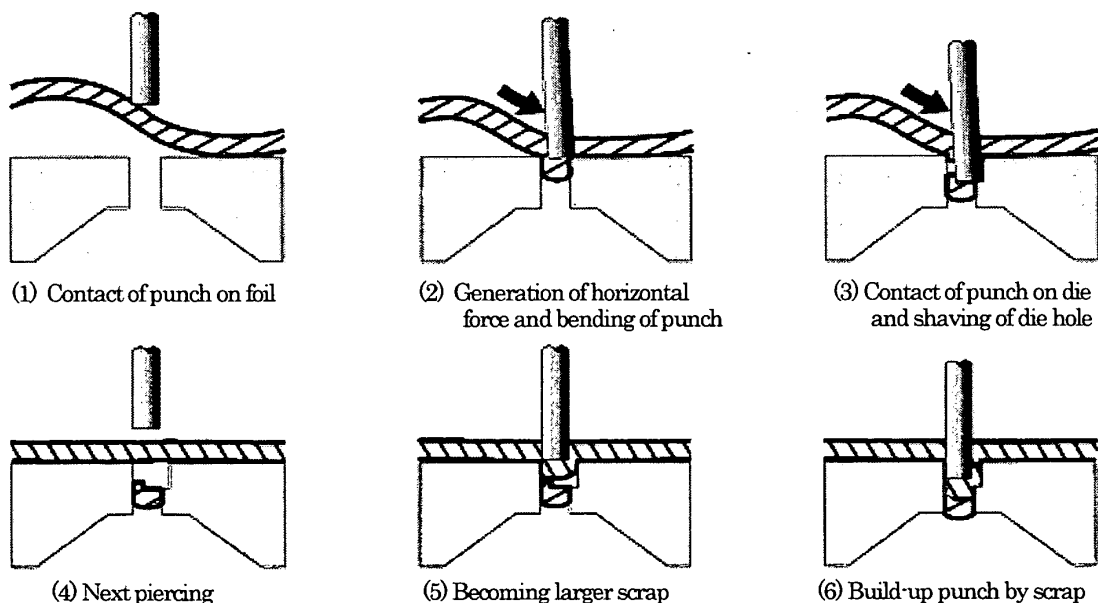
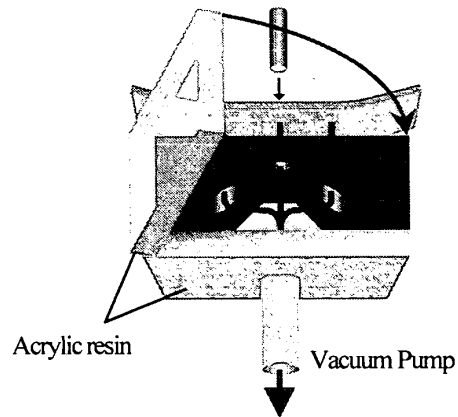


Fig.9 Process of die wear

穴抜き形状のSEM像は、ポンチ側では連続加工200回目(図11)、1000回目(図12)ともにほとんどだれも見られず真円形状を有している。加工分離面は、せん断面がほとんどを占めており破断面はごくわずかしが見られない。裏面のダイス側では、1000回目の加工穴にバリが見られる。負圧を用いたダイスで加工を行った時に得られた図13のポンチストローク線図を通常のダイスで加工を行った時に得られたもの(図7)と比較してみると、図13の加工力線図では、図7で見られた加工力の2回目の上昇が見られなくなっている。また、負圧を用いたダイスで1000回連続穴抜きを行った後のダイスでは、図8のダイスで見られたようなダイス穴内面への抜きカスの固着は見られない。負圧を用いたダイスでの連続穴抜きでは、箔の不等浮き上がりによる、ポンチの芯ずれは起こっていない。

図13の負圧を用いたダイスでの連続加工においても抜き数が増すにつれて最大加工力が低下し、クリアランスが若干大きくなっている。1000回穴抜き後のダイス穴の直径は、レーザー顕微鏡による形状測定結果から16 μm となっており、ダイスのわずかな摩耗が確認された。負圧を用いたダイスを使用することにより、箔からポンチに働く水平力によるファイバーの変形でおこるダイスの摩耗はなくなったが、数万回の連続穴抜きに向けてポンチ、被加工材料にかじられない高硬度の金型材などをダイスに使用することが今後の課題となる。

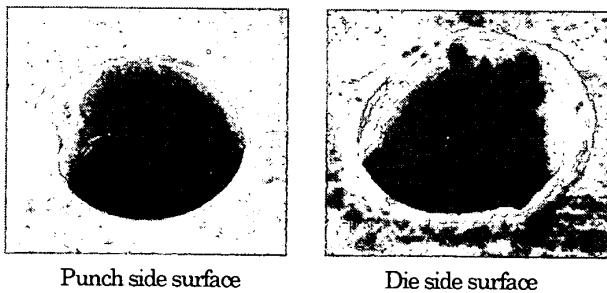


Fig.11 Configuration of pierced hole at 200 time of piercing

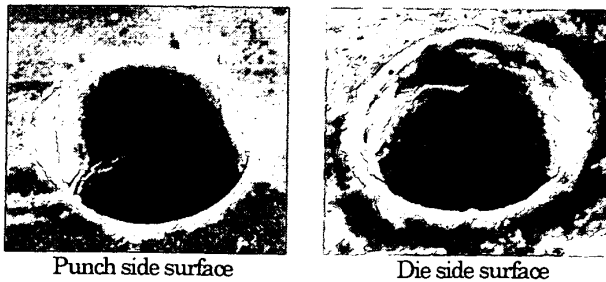


Fig.12 Configuration of pierced hole at 1000 time of piercing

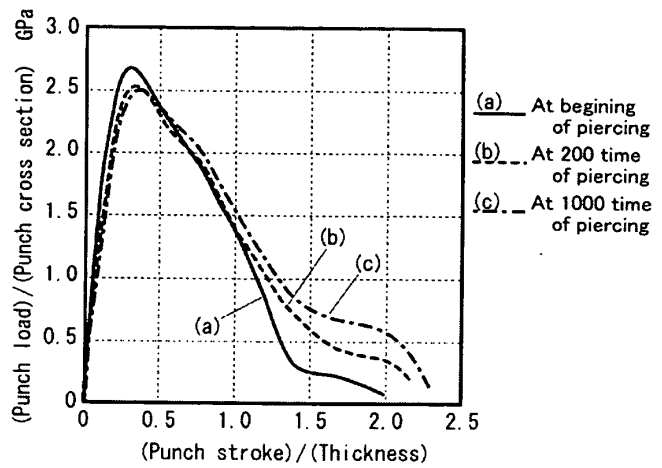


Fig.13 Punch stroke - force curve (With vacuum system)

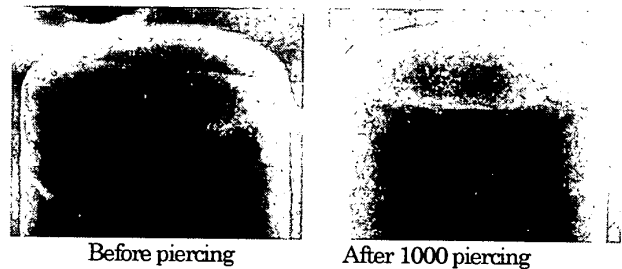


Fig.14 Punch head configuration

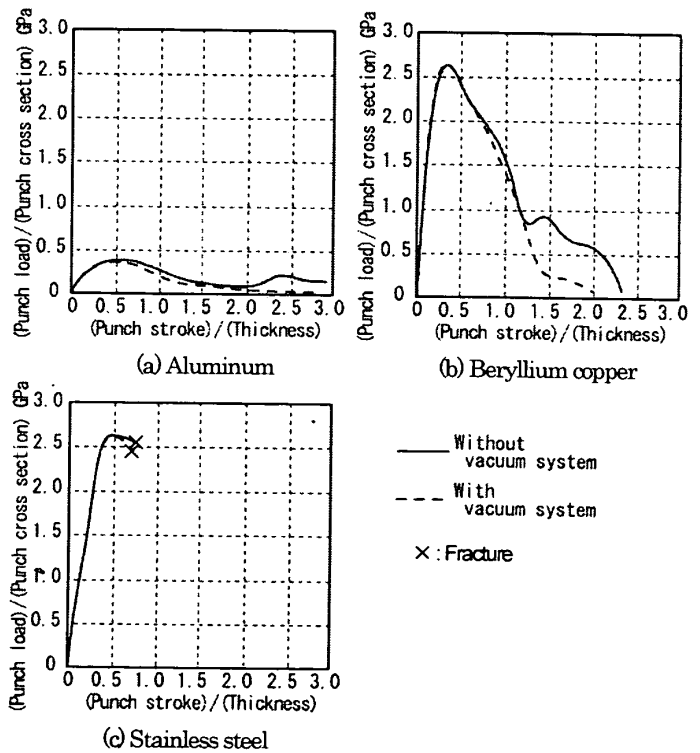


Fig.15 Punch stroke - force curve for each material

5-2 連続加工後のポンチ形状 通常のダイスを
用いた場合でも1000回連続穴抜き後ですら、ポンチに
欠けや摩耗は全く認められず(図14), 数千回程度の
ベリリウム銅の連続穴抜きでは、ポンチは、摩耗・欠
損を起こさないことが確認された。金属製ポンチでは、
過負荷がかかった時に摩耗という形で徐々に損傷が発
生・進行するのに対し、SiCファイバーポンチでは、
延性がないために欠けという形で急激な損傷を引き起
こす。しかし、金属製ポンチでは、無潤滑で連続加工
を行うと凝着摩耗が進行しやすく、微細穴抜きを行う
場合、通常寸法では問題にならないような摩耗でも、
工具・被加工材に対して大きな値となり、高い頻度で
再研磨を行わなければならない。したがって、凝着が
起きにくく摩耗が少ないことから長いポンチ寿命が期
待できる。

5-3 ポンチストローク線図に関する考察 ベリ
リウム銅箔以外にもアルミニウム箔、ステンレス箔に
対して、通常のダイスを使用した場合と負圧を用いた
ダイスを使用した場合で、穴抜き加工を行った際に得
られたポンチストローク線図を素材ごとに示す(図
15)。なお、各素材とも連続加工初段階のポンチスト
ローク線図である。

アルミニウム箔、ベリリウム銅箔では、負圧を用
いたダイスに対する加工力(点線)は、最大加工力後、
通常のダイスの加工力(実線)より低い値をとる。特
に通常のダイスにおける加工力の2回目のピークがな
くなり、加工力を大幅に低減させる。ステンレス箔の
穴抜きではダイスを変えてもポンチストローク線図に
大きな違いは見られなく、連続加工していくにしたが
いポンチに大きな欠けが発生した。これは、ステンレ
ス鋼が高強度、高 n 値のため、ポンチ刃先に応力集中
を生み出すことや、箔の加工硬化によるものだと考え
られる。

6. 結 論

SiCファイバをポンチとして用いた超微細穴抜き加
工の高精度の連続加工を可能とするため、ダイス下部

より負圧をかけるダイシステムを開発し、実験・検討
を行った結果、次を明らかとした。

(1) 板厚15 μm のベリリウム銅箔に対して、通常のダ
イスと負圧を用いるダイスで1000回連続穴抜きを行い、
ダイス摩耗の進行を比較した結果、通常のダイスはポ
ンチによって損傷を受け、クリアランスが大きくなっ
ていたが、負圧を用いるダイスではわずかな摩耗しか
見受けられず、加工時に箔からポンチにかかる水平力
を抑えられ、ポンチの変形を防ぐことができたためと
考えられる。

(2) 連続穴抜き加工を行った、穴形状の観察とポン
チストローク線図の考察から、通常のダイスによる穴
抜きでは箔に対して斜めに加工された穴があり、箔の
浮き上がりによりポンチが箔に垂直に当たっていない
場合があることが分かった。それに対して、負圧を用い
るダイスでは、箔の浮き上がりが抑えられたため、ポ
ンチが箔に対して垂直に当たり、真円形状の加工穴と
なっていた。

(3) 連続穴抜き加工試験後のダイス穴の形状から、
負圧を用いるダイスでは、抜きカスのシェービングが
起こっていないことが分かった。

(4) 穴抜き回数増加にしたがい、負圧を用いるダ
イスでもわずかながら摩耗が観察され、ダイス素材の
適正化により、寿命を延ばすことが望まれる。

(5) ベリリウム銅箔以外にも低強度のアルミニウ
ム箔については負圧を用いたダイスは加工力低減を可
能にする。

文 献

- (1) 森敏彦・中島邦彦, SiCファイバをポンチに用い
た超微細穴抜き法の開発, 機論C, 65-629 (1999-
1), 369-374.
- (2) 森敏彦・中島邦彦, 超微細穴抜きに対する制
御・計測システムの開発, 機論C, 65-635 (1999-
7), 305-311.
- (3) Wu, Hr.F. and Netracali, A.N., Weibull analysis of
strength-length relationships in single Nicalon SiC
fibers, J. Materials Science, 27 (1992), 3318-3324.