SiC ファイバをポンチに用いた超微細穴抜き法の開発*

森 敏彦^{*1}, 中 島 邦彦^{*2}

Development of Ultra-Fine Piercing By Using SiC Fiber Punch

Toshihiko MORI and Kunihiko NAKASHIMA

A new ultra-fine piercing in which SiC fiber was used for a punch was proposed. In the discussion whether the SiC fiber is suitable for a ultra-fine punch, it was clarified that its strength is sufficient and becomes higher particularly in a small size and its tribological properties is good due to characteristics of ceramics. In addition to these suitability the cross section of a ceramics fiber becomes truly round in a smaller size. Many new techniques had to be developed in order to realize the process. An SiC fiber of 14 μm diameter is fixed firmly among an aluminum bar through a plastic deformation of the aluminum, the end of fiber and aluminum is polished, buffed and lapped and finally only aluminum is removed away by 50 μm depth by an electrolysis. Thus the ultra-fine fiber punch which has a flat end and an acute corner and is an appropriate length-to-diameter ratio can be obtained. This fiber punch making method was referred as BEFP. A die without a die hole is set up in a die-set and a hole is pierced by the fiber punch, so the center of the punch agrees well with that of the die. A new micro press was developed for this process. Three kinds of metals which have various thickness and strengths were pierced. A 17 μm thick aluminum foil is a specimen of high aspect ratio and low strength, a 15 μm thick beryllium copper is a specimen of high strength and a 8 μm stainless steel is hard-to-form material. It was cleared by observations of a scanning electron microscopy that every hole is truly round and sheared surface is smooth.

Key Words: Plastic Forming, Ceramics, Formability, Tool, SiC Fiber, Ultra-fine forming, Ultra-Fine Piercing

1. 緒 言

マイクロマシニングは、工業的にも学問的にも興味深い技術であり、今後一層の進展が期待される分野である。その中でも、微細穴あけ加工は、プリンタ用のインクジェットノズル、自動車用の燃料噴射ノズル、プリント基板、ガスタービン冷却用ガスセンサ、フィルタ等の高機能要素の創成には欠かせない。これらの穴は微細になるほど製品の性能を向上させることとなる。

微細穴あけ加工に対しては、多くの最新技術が試されてきた。しかし、レーザで微細穴あけ加工を行おうとすると、材料の反射率、光吸収特性、原子結合状態に左右され、また、原理的に溶融加工であり、一般的に穴形状は思わしくない⁽¹⁾。放電加工により $\phi 5\mu\text{m}$ の超微細穴開け可能であるが、被加工材料は導電性材料に限られる⁽²⁾。加工速度、精度の点で優れているせん断も通常工具製作法のスケールダウンを図るのみでは製作限界があり、微小化を妨げている。ところが、

ここで発想の転換を行い、超微細であるが故の利点を生かす方法を模索すれば解決が得られる。通常寸法であればもろいセラミックスも、超微細寸法であれば無欠陥のものが得られる。また、超微細寸法においては表面力が物体力に勝り、真円形状となる。すなわち、超微細寸法においては高強度高剛性無欠陥の真円工具が自然に得られるわけである。そこで、本研究では高強度高剛性ファイバの優れた特性や寸法形状を生かして、穴抜き工具として使用することを試みた。ファイバをポンチに使用できるならば、ポンチ製作工程が簡略化でき、さらに、現状のポンチ製作技術では実現できない超微細径のポンチを得ることができる。

本報告では、高強度高剛性の SiC ファイバを工具とした場合に解決すべき点、それらに対する方策、試みた結果、得られた製品性状に関して検討する。

2. ファイバポンチ適性に関する検討

2・1 SiC ファイバの一般的特性 今回ポンチとして用いた SiC ファイバ (商品名ニカロン)・SiC_(PCS) は溶融紡糸の段階ではポリカルボシランを前駆体とし、それを熱酸化不融化、焼成することにより、Si-C 結合の骨格よりなる直径 15 μm 程度の長繊維としている。束ねた状態の SiC ファイバ・SiC_(PCS) を図 1 に示

* 原稿受付 1998 年 3 月 2 日。

*¹ 正員, 名古屋大学大学院工学研究科 (☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。*² 名古屋大学大学院。

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

Fig. 1 Bundled SiC fiber

Fig. 2 Comparison of SiC fiber and human hair

すが、通常はしなやかで直径 1 mm 程度のループ状にも曲げられる。ただし、1 本 1 本の繊維は図 2 で髪の毛と比較した走査電子顕微鏡写真でもわかるように肉眼で確認するのはほとんど不可能なくらいに直径は小さい。ただし、直径に応じて長さを短くすれば、通常寸法でしなやかなものも超微細寸法では高剛性でありうる。SiC ファイバ・SiC_(PCS) の諸特性を表 1 に、穴あけの被加工材に対しての強度、剛性の比較を図 3 に示す。鋼材各種に比べてさえも、強度は高く、剛性は匹敵し、十分にポンチ工具として使用可能である。穴抜き加工においては、工具が被加工材に比べヤング率が若干低い場合でも、工具食込みまでの弾性変形が工具で大きいだけである。ところが、工具の降伏応力（もしくは強度）が被加工材に比べ低い場合には加工不可能となる。

超微細穴抜きでは、潤滑液の流動、表面張力によってポンチ心ずれのおそれがあり、通常、無潤滑で加工され、連続穴抜きにおける加工熱、凝着摩耗対策が重要である。

本繊維は空气中に 1 000°C、100 時間保持しても、組織変化、強度変化を起こさない。しかも、金属との反応性が小さい。したがって、金属製ポンチより焼付き、摩耗に強く、長いポンチ寿命が期待できる。

なお、組成が Si-T-C-O のチラノ繊維・SiC_(PTC) は直径 10 μm 程度で強度、剛性ともに硬鋼を上回る。W を芯として SiC を化学気相蒸着した SiC_(PTC) の剛性はヤング率で 420 GPa とダイヤモンドに匹敵するが、直径が 140 μm と大きく今回の超微細打抜き用には適

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

Fig. 3 Comparison of strength and rigidity of SiC fiber and typical metals

しない。

2・2 寸法、形状 本研究目的のポンチとしては超微細、真円、径が一定のファイバを必要とする。そのための検討を加える。

超微細ファイバは溶融物体をノズルから吐出し、凝固させる溶融紡糸で形成される。したがって、ファイバの径の寸法は溶融物体のジェット流の安定性の問題となる。Rayleigh, Weber の表面張力波理論⁽²⁾によってジェット流が崩壊して液滴化する時間 t^* は

$$t^* = R(6\eta + \sqrt{8\sigma\rho R}) \ln\left(\frac{R}{\delta}\right) \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここで、 R はジェット流の半径（ファイバーの半径）、 η は粘度、 σ は表面張力、 ρ は密度、 δ は表面張力波の初期振幅である。一方、凝固に要する時間 t_c は

$$t_c = \frac{\rho R}{2h} \left[c_p \ln\left(\frac{T_o - T_m}{T_m - T_\infty}\right) + \frac{L_p}{T_m - T_\infty} \right] \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ここで、 h は熱伝達係数、 c_p は比熱、 T_o は溶融物体の温度、 T_m は融点、 T_∞ は外気温度、 L_p は凝固熱である。

径が一定で安定な紡糸の条件は

$$t_c \ll t^* \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。Weber 関数、温度差の比の代表的な値として

$$\ln\left(\frac{R}{\delta}\right) = 15, \ln\left(\frac{T_o - T_m}{T_m - T_\infty}\right) = 0.5$$

を選ぶ。

具体的に、 $T_\infty = 288 \text{ K}$ として、高分子と金属の場合を比較する。

高分子（ナイロン-6）における特性値を各式に代入すると、ファイバ半径に関係なく $h \gg 4.88 \text{ J/Km}^2\text{s}$ となる。この条件は容易に達せられるが、実際はこの値の200倍程度の熱伝達率で冷却される。

一方、金属（鉄）における特性値を各式に代入すると、 $hR^{1/2} \gg 6.165 \text{ J/Km}^{3/2}\text{s}$ となり、ファイバ半径が小さくなればなるほど、高速冷却を必要とする。

$R=0.1 \text{ mm}$ の場合、 $h \gg 6.17 \times 10^5 \text{ J/Km}^2\text{s}$ であり、このような急激な冷却はほとんど不可能である。

断面の真円条件についても同様な議論がなされる。ノズルから真円で吐出された溶融物体の断面形状変化を拘束するのも表面力である粘性と表面張力である。したがって、形状変化に関与する物体力に対して形状維持の表面力を優勢にするためにはファイバ半径を小さくするほうが好ましい。

以上の検討で明らかなように溶融紡糸によりセラミックスは容易に超微細真円ファイバーが作成可能であるが、金属材料はノズルから粒子となって噴出され、ファイバーとはならない。

2・3 強度の寸法効果 脆性材料の理論強度は $E/10$ であるが、実在材料の強度はこれに遠く及ばない。SiC ファイバも 20 GPa 程度の理論強度に対し、引張り強度約 2.75 GPa と低い。これは、ファイバの強度が局所構造に支配され、含まれる微細な欠陥が破壊に大きく影響する（最弱環仮説）からである。したがって、ファイバの破壊強度は欠陥の存在確率に左右され、式(4)のワイブル分布に支配される。

$$F(\sigma) = 1 - [\exp(\sigma/\sigma_{10})^\xi] \dots\dots\dots (4)$$

σ_{10} : 尺度のパラメータ

ξ : 形状のパラメータ

図4に、SiC ファイバの長さで破壊応力（破壊確率 $= 1/e = 0.63$ ）の関係を示す⁽³⁾。本研究で使用するSiC ファイバポンチの長さ 50 μm 程度に外挿した強度は 10 GPa を越える。逆に図4からパラメータを $\sigma_{10}=10 \text{ GPa}$, $\xi=3.2$ と求め、式(4)に代入し、破壊確率を求めると図5となる。これより 3 GPa（厚さ 10 μm のステンレス箔に対して大きめに見積もったポンチ力 500 mN に対応）で破壊確率はたかだか 1% 程度である。したがって、通常寸法では欠陥の存在のために強度への信頼性が低いセラミックスも、本研究で扱うオーダーでは欠陥の存在確率は低く、ほぼ無欠陥の工具材料ということができ、ポンチとして十分使用できる。

3. 本研究遂行で解決すべき課題

本研究は新たな着想のもとにおける超微細穴抜き法

Fig. 4 Correlation between strength and fiber length

Fig. 5 Probability of failure for 50 μm length SiC fiber

であるため、多くの解決すべき課題がある。それらを以下に挙げる。

(1) ファイバポンチの座屈を防ぐためには、工具部長さを直径の2~4倍とし、他の根本部分は保持しなければならない。

(2) セラミックスファイバをいずれの方法で切断しても、切断面には多くの割れが入る。それを穴抜きポンチとして使用可能にするためには、端面を平坦にかつ刃角を鋭利にしなければならない。

(3) 穴抜きにおいてはポンチとダイスの芯あわせがキーテクノロジーとなる。

(4) 穴抜きではポンチ行程制御、特にポンチと被加工材との接触時期の同定が重要となる。

以下に、これら諸点を解決すべき手法の開発、製作過程における検討、穴抜き結果の検討について述べる。

4. ファイバーポンチの製作

4・1 BEFP 法 課題(1), (2)を解決するため、図6に示す方法でポンチを製作した。SiC ファイバを長い状態でアルミニウム半割軸の軸に一致するようにはさむ。半割軸はボルトにより十分に締結するため、ファイバ周囲の局部におけるアルミニウムは塑性変形し、ファイバを包み込む状態で一体となる。ファイバ、半割軸一体を、さらに、鋼製円筒コンテナに納めてポンチユニットとする。端部を旋盤で円すい状に加工し、その端面を円すい状の軸ごとと研磨、バフ、ラップ

Fig. 6 Fiber punch made by buffing and electrolysis

Fig. 7 End of punch unit after buffing

仕上げする。次に、電解研磨により導電性のアルミニウムのみを50μm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。

このファイバポンチ製法をその過程をとって、BEFP法 (Fiber Punch made by Buffing and Electrolysis) と名付ける。

4・2 製作過程 半割軸のファイバ保持長さは約30mmで、ポンチ長さ約50μmの600倍程度である。したがって、被加工材の強度とは無関係に適度な強度さえあればよく、むしろ、ファイバーポンチを包み込むだけの局所の十分な塑性変形が要求される。今回は、半割軸材料にアルミニウムF材を用いた。半割軸合せ面の最終仕上げは#2000のエメリ紙で研磨仕上げし、最大粗さを1μm以下とした。

端面仕上げの3段階ともに、0.25μmのダイヤモンド砥粒を用いた。第1段階では、オートマチックラッピングマシンMA-200 (武蔵野電子製) を用いMM490グラインディングディスク上で研磨し、直径1mm程度の平面を作る。この時点で、ファイバ端面は複雑な破断面、大きな欠けも残す。第2段階の木綿布によるバフ研磨で破断面を取除いたSEM写真を図

Fig. 8 Solved mass by electrolysis

Fig. 9 Completed state of fiber punch

7に示す。アルミニウムが優先的に研磨され、それに比べ強いファイバの研磨速度は遅く、その結果ファイバの先端は縁がだれた状態で丸くなっている。この2μm程度に突き出たファイバ部分のみを研磨するように、平坦ステンレス板上で非常に弱い力でラップ仕上げする第3段階以上げを行い、ファイバ先端の平坦化、刃角の鋭利化を達成する。

ファイバ先端が平面に仕上げられたことを確認後にアルミニウム部を電解研磨する。なお、電解液の表面張力を利用してポンチ先端のみを電解液と接触させた。過塩素酸、メチルアルコール、ブチルセルソルブ混合液を電解液とし、電圧40~60V、電流密度0.003~0.005 A/mm²で電解研磨を行った。図8に示す電解量測定結果により、電解アルミニウム量 $m(\text{mg})$ は投入電荷量 $C(\text{c})$ に対し次式で表される。

$$m = (0.24 \pm 0.01)C \quad \dots\dots\dots (5)$$

この式を基にして電解研磨を制御し、ポンチを所定長さに作成した。

製作したファイバポンチのSEM写真を図9に示す。ファイバポンチ端面は平坦で、欠けも残らず、刃角はほぼ正確に直角となっている。また、側面も平滑で凹凸も0.1μm以下である。なお、半割面、ファイバとの境界面には電解液が侵入し、先行して電解されている。これによって、アルミニウムが塑性変形してファイバを支えていることがわかる。

5. 実験装置

5.1 ダイスの製作およびポンチ、ダイスの組付け

課題(3)を解決するため、以下の手法でダイスを作成、ならびにポンチとダイスの組付けをした。延性金属の打抜きに対して推奨されるすきまは被加工材板厚の0~3%程度であり、板厚10 μm の箔に対してはすきま0~0.3 μm となる。さらに、ポンチとダイスの芯がずれてすきまに数%の偏りが生ずれば、両工具とも摩耗が急速に進む。本研究の超微細穴では、ポンチ、ダイスを別々に作成し、後に芯合せするのは不可能である。本研究では、ファイバポンチおよび穴なしダイスをプレスに組み込み、図10に示すようにファイバポンチでダイスに穴あけを行い、その状態で両工具を設置し、その後ダイス上に被加工材を載せて加工した。この手法をとれば、ポンチ、ダイスの芯合わせ、零すきま設定も、同時に精度よく可能である。

この手法のダイスは、ファイバポンチで穴抜きが可能のように穴の箇所を30 μm 程度の厚さとし、工具としての剛性のため周囲は厚くする必要がある。対称性を考慮すれば、直径0.1 mm程度の円形領域を30 μm の厚さ、そこから円すいで逃げを作ることとなる。ところが、この形状では局所の板厚測定が不可能である。結局、図10の逃げの一方方向部分は抜いたダイス形状、すなわち、V溝をダイスの奥行き2/3程度掘った形状とした。V溝加工には立てフライスを用い、工具材を45°傾けてバイスで固定し、平坦端面のエンドミルで行った。したがって、最薄部幅はエンドミル・アール部の0.1 mm程度となった。立てフライスによって、最薄部厚さを50 μm 程度まで加工し、その後、エメリ紙研磨(#2000)、バフ仕上げ(0.05 μm のアルミナ砥粒)でさらに薄くした。研削の際には、顕微鏡板厚測定を交互に繰返すことにより設定板厚25~40 μm とした。

ファイバポンチによるダイスへの穴あけは慎重を要し、特に両者の接触開始時点の検出は重要となる。そのため、ポンチとダイスが接触するとつながる電気回路を作成、導通を電流計で測定し、接触検出を行った。

(a) Setting punch (b) Piercing die (c) Piercing foil and die

Fig. 10 Piercing die and foil

ただし、セラミックス・ファイバは絶縁体であるため、これに導通性を持たすため、表面に1 μm 厚さ程度に金を真空蒸着した。

5.2 マイクロプレス 本研究のため、図11に示すマイクロプレスを自作した。最大変位68 μm 、発生力800 Nの金属ケース封入形積層圧電アクチュエータを動力源とし、その変位をカンチレバーによって、およそ十倍に増幅した。加工速度をモードも含めて任意に設定、制御するため、圧電アクチュエータ電源のピエゾドライバはD/Aコンバータを介してパーソナルコンピュータに接続されている。粗位置決め、穴抜き状態監視用には、顕微鏡が設けられている。ただし、ファイバポンチそのものを観察することは不可能である。ポンチ案内精度を高めるためには、3本の高精度ミニチュアストロークベアリングを用いた。

6. 超微細穴抜き実験

6.1 被加工材 穴径を超微細にするに従い、アスペクト比が1以上の穴、すなわち、箔厚さより小さな穴径の要求が高まる。一方、製品材質、強度の仕様も満たす必要がある。

今回は、低強度、中強度であるがアスペクト比が1以上の材料、アスペクト比が1以下であるが高強度の材料の3種類を被加工材とした。前二者には板厚17 μm の市販純アルミニウム箔A1100 Hおよび板厚15 μm のベリリウム銅箔25合金1/4 H、後者には板厚8 μm のステンレス鋼箔SUS 304 Hを選んだ。ステンレス箔は高信頼性高強度材で広い用途、ベリリウム銅は良好な加工特性をもった高導電率高強度ばね材として使用される。表2にそれぞれの機械的特性値を示す。箔の厚さが8~17 μm と極めて薄いため、硬さ測

Fig. 11 Schematic of micro press

Table 2 Tensile strength of material used

Property	Material Aluminum A1100-H	Be-Cu 25 alloy -1/4H	Stainless steel SUS-304H
Hardness (GPa)	0.56	4.50	6.47
Equivalent Vickers hardness	52	413	594
Tensile strength (MPa)	36	510~620	>1500

定に通常のマイクロピッカース試験は適用不可能であり、超微小押し込みで行うナノインデンテーション法(CSIRO社製のナノインデントー UMIS-2000を使用)で硬さ値を得た。測定荷重 1 mN, 押し込み量は 53 nm (ステンレス箔)~188 nm (アルミニウム箔)で箔厚さの 1/10 程度である。引張強さはアルミニウム箔については簡易試験法で求めた値を示し、ステンレス鋼箔, ベリリウム銅箔については箔メーカ保証値を示した。なお, ベリリウム銅は時効処理により引張強さを 1500 MPa まで高めることができる。

6・2 結果の検討 穴抜き加工はポンチ速度 640~3 800 $\mu\text{m/s}$, 無潤滑で行った。

図 12 に各箔に対して開けた穴を上面(ポンチ側)から SEM 観察した結果を示す。アルミニウム, ベリリウム銅とも超微細穴は真円に開けられ, ほとんどだけれもなく, 加工分離面はほとんどせん断面が占め, わずかの破断面しかない。ステンレス鋼箔の場合でも真円の超微細穴が開けられているが, 破断面は 1/3 程度で, 2/3 程度を占めるせん断面には二次せん断を受けた部分もあり, クラックも認められる。

1 000 回穴抜きした後で, アルミニウム箔とベリリウム銅箔に使用したファイバポンチには何らの欠け, 摩耗, 焼付きも観察されなかった。ただ, ステンレス鋼に対して使用したポンチに摩耗は認められないものの大きな欠けが生じていた。

7. 結 論

SiC ファイバをポンチとした超微細穴抜き法に対

Fig. 12 Pierced holes for three kinds of metals

し, 以下の開発および性能評価をした。

- (1) 直径 14 μm の SiC ファイバは強度, 形状, 信頼性を検討し, ポンチとして使用可能である。
- (2) 平坦端面, 鋭利な刃角, 適切な軸比を有するファイバポンチの製法である BEFP 法を開発した。
- (3) ポンチ, ダイス組付け後にダイス穴開けを行い, 両工具の芯合せを達成した。
- (4) 超微細穴抜き用マイクロプレスを自作した。
- (5) 厚さ 17 μm のアルミニウム箔, 長さ 15 μm のベリリウム銅箔, 厚さ 8 μm のステンレス箔に超微細穴(直径 14 μm)を真円で穴抜きした。前二者の分離面はほぼ全面がせん断面, ステンレス箔では 2/3 程度をせん断面が占めた。

文 献

- (1) 藤森康朝, レーザ技術とその応用, 機誌, **94** 866(1991), 65-69.
- (2) Ziabicki, A., *Fundamentals of Fibre Formation*, (1976), 373, John Wiley & Sons.
- (3) Wu, H. F. and Netravali, A. N., Weibull analysis of strength length relationships in single Nicalon SiC fibres, *J. Mater. Sci.*, **27** (1992), 3318-3324.