
超微細穴抜き用セラミック・ファイバ・パンチを
電極とした超音波援用放電加工

17560095

平成17年度～平成18年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)) 研究成果報告書

平成19年5月

研究代表者 森 敏彦

名古屋大学情報科学研究科教授

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製には欠かせない。これらの穴は微細になるほど製品性能を向上させることとなる。微細穴明け加工に対しては、多くの最新技術が試されてきた。しかし、レーザで微細穴明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、原理的に熔融加工であり、一般に穴形状は思わしくない⁽¹⁾。放電加工により $\phi 5\mu\text{m}$ の超微細穴あけ可能であるが、被加工材料は導電性材料に限られる⁽²⁾⁽³⁾。塑性加工の一つであるせん断による穴抜きは加工速度、精度の点で優れ、ICリードフレームなどの電子部品製作に用いられ、厚さ $100\mu\text{m}$ の金属シートに直径 $100\mu\text{m}$ の穴が開けられている。しかし、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。解決策の一つとしてワイヤカット放電加工によりポンチを作成する方法があるが、この方法は費用もかかり、手間もかかることとなっている⁽⁴⁾。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。通常寸法では脆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、超微細寸法で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、 $\phi 14\mu\text{m}$ の高強度高剛性セラミックス・ファイバの優れた特性や形状を生かして、穴抜き工具として使用した。ファイバをポンチに使用することができるなら、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。

ポンチと同様にダイにも穴抜き工具としての十分な強度を持たせる必要があり、硬質工具鋼を素材としなければならない。その際、穴抜き加工において重要項目であるクリアランスの設定と軸心合わせが問題となる。ただし、別々に製作した両工具の軸心を合わせることは、ここで対象とする超微細寸法では不可能であり、ポンチでダイ穴を製作するという手法の開発を図った。それを可能とするためにポンチとして用いる超微細 SiC ファイバを電極とした放電加工により硬質工具鋼に超微細穴をあけてダイとした。放電加工によるダイ穴製作と打抜き加工を同一ダイセット内で一貫して行なうことで、工具の軸心合わせを確実に行なうことが可能となる。

しかしこの構想の具現化には、SiC ファイバは工具としての強度特性に加え、導電性や放電特性など、これまでとは異なる特性が求められることとなる。通常、放電加工では電極も消耗するが、ダイ穴製作後の消耗した電極は打抜き用のポンチとして利用することができない。また、放電で生じるクリアランスが大きければ、それは同時に打抜きクリアランスの増加を意味するので極力抑える必要がある。これらの問題点を克服するために、電氣的な特性を明らかにしていった。

なお、抜きカス除去、被加工材箔の保持を真空システムにより確実にを行い、ダイ磨耗の進展を抑制することで工具寿命を延長した。

以下、本研究課題において開発した方法について述べる。

研究組織

研究代表者： 森敏彦（名古屋大学情報科学研究科）

研究分担者： 廣田健治（九州工業大学工学部）

研究経費

平成 17 年度	2,400 千円
平成 18 年度	1,000 千円
計	3,400 千円

研究発表

学会誌など

- (1) T. Mori, S. Kurimoto: Development of Ultrafine Piercing System, Proceedings of 8th International Conference on Technology of Plasticity, (2005), 1116-1121.
- (2) T. Mori, S. Li: Determination of Design Parameters in Metal Forging by Using FEM and Neural Network, Proceedings of 8th India-Japan Joint Seminar, Advanced Manufacturing Systems, (2005), 67-72.
- (3) 森敏彦：セラミック・ファイバ・ポンチ電極によりオンマシン放電穴加工されたダイスを用いた超微細穴抜き, 精密工学会誌, 69 巻 9 号 (2003), 1230-1233.
- (4) 森敏彦, 李蘇洋: 鍛造行程設計のためのニューラルネットワーク構築に関する検討, 精密工学会誌, 72 巻 3 号 (2006), 37-341
- (5) 森敏彦・栗本真司, 超微細穴抜き法の高精度化および連続加工化, 日本機械学会論文集 (C 編), 68-667(2002-3), 275-280.

2. ポンチ材料選択

2. 1 SiC ファイバの特性

ポンチとする SiC ファイバ (商品名ニカロン)・SiC_(PCS)は最適な機械的, 電気的特性を有する高機能複合材料を創製するためプラスチック, 金属母強化するために通常用いられる. そのセラミック・ファイバは有機高分子から熱分解で作られる⁽⁵⁾. 高分子からセラミック・ファイバへの変換は熔融体の紡糸, 架橋結合, ガラス転移温度以下のキュア, 約 1473K での熱分解という複雑なプロセスを経る. セラミック・ファイバは約 10 μm の 12 面体に近い多環籠構造からなる. これらは図 1 に示すようにヤーン, ケーブル, ロープで約 500 本程度のファイバが束ねられた状態で, 通常はしなやかで ϕ 1 mm 程度のループ状にも曲げられる. ただし, ϕ 14 μm の 1 本 1 本のファイバは図 2 で髪の毛と比較した走査電子顕微鏡でも分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

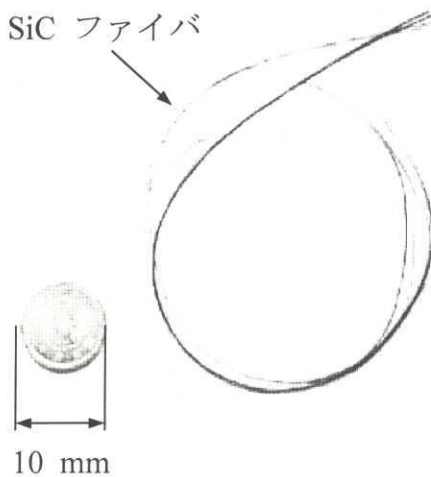


図 1 SiC ファイバ束

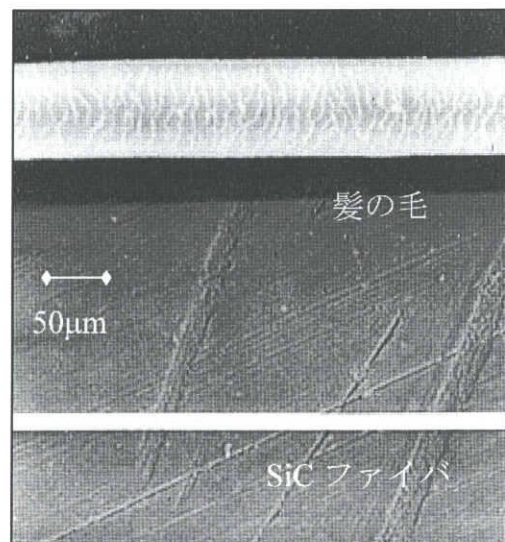


図 2 SiC ファイバと髪の毛の比較

径は小さい。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、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

表 1 SiC ファイバの特性

直径	14 μ m
密度	2.55g/cm ³
引張り強さ	2.75GPa
ヤング率	196GPa

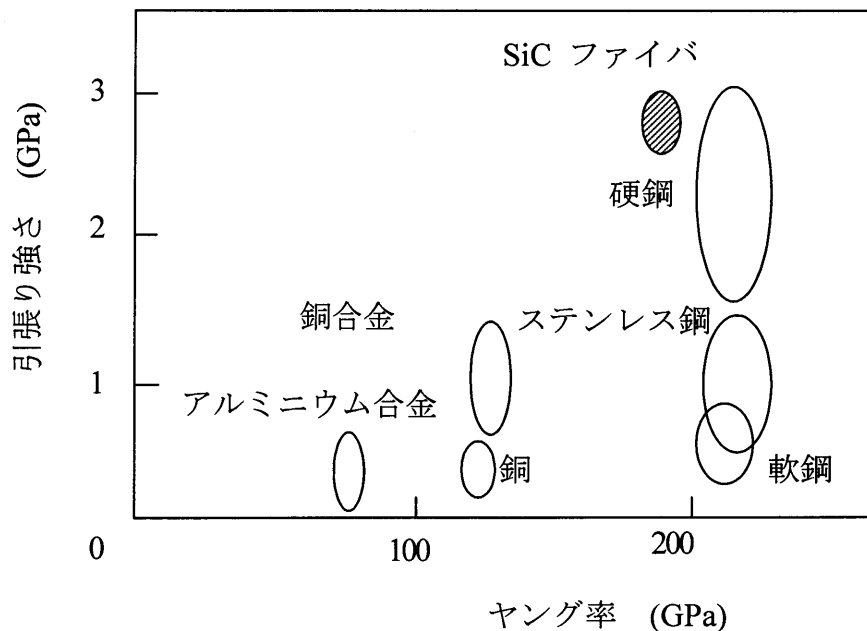


図 3 強度, 剛性について SiC ファイバと被加工材の比較

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。セラミック・ファイバの熱的安定性は 1473K 以上まで保証されており、酸素不感シリカ層によって酸化に対しても安定している。

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。本ファイバは空気中に 1000°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。

2. 2 SiC ファイバの寸法，形状

紡糸はガラス転移より 50 K 高い温度でオリフィスを通して高分子を押出す熔融紡糸か、高分子溶液を乾式または湿式紡糸でなされる。したがって、SiC ファイバの寸法，形状は紡糸された材料の噴流の安定性によって決まる。Rayleigh と Weber の表面張力波理論によって崩壊時間 t^* は噴流半径，粘度，表面張力，密度，表面張力波振幅の関数として与えられる。凝固時間 t_c は熱伝達係数，比熱，熔融材料の温度，室温，凝固潜熱の関数として与えられる。安定紡糸の条件は $t_c \ll t^*$ によって与えられ，高分子の場合にはこの条件は容易に満足されるが，金属の場合には異常に高い冷却速度が必要であり，かなえられたとしてもファイバにならなくて微粒子になる。

粘性力，表面張力といった表面力は形状変動を抑えるが，物体力は形状を歪める。小寸法であれば表面力が物体力に勝り，こうして真円ファイバが得られる。

2. 3 強度に対する寸法の効果

脆性材料は応力レベルが最弱な欠陥の強度に達するとキャタストロフィックに破壊する。最弱欠陥の分布に関する最も一般的な仮説はそれらが材料内でランダムに分布するだけでなく、厳しさもランダムということである⁽⁶⁾。材料寸法が大きくなり厳しい欠陥が生ずる確率が増すにつれて、強度変動が増すだけでなく大きな強度の減少が見られることでもこの仮説は納得される。ゲージ長 $50\ \mu\text{m}$ の単一ファイバは古典的 Weibull 分布に従う強度分布を有している。ゲージ長を変えた場合の強度を予測するために、古典的最弱連鎖則は個々のファイバに関係なく統計的に Weibull 分布を与えるとする。この仮説に基づけば長さを 10 倍にするとファイバ強度の 30~50% の減少をもたらすという厳しい寸法効果

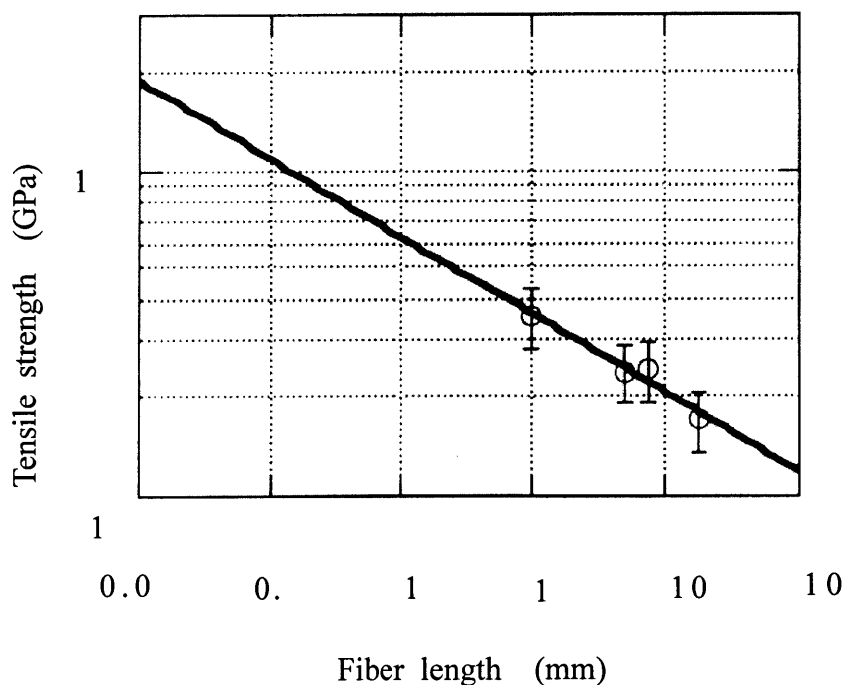


図4 強度とファイバ長さの相関

を予測する。図4は破壊確率 0.63 とした場合のファイバ長さと破壊応力の間の相関関係を示す。ポンチ長 $50\ \mu\text{m}$ であれば応力値は $10\ \text{GPa}$ を越えている。図5はポンチ長 $50\ \mu\text{m}$ における各付加応力に対する破壊確率を示す。微細穴抜きにおける最大付加応力の $3\ \text{GPa}$ でも破壊確率は 1% 以下である。したがって、通常寸法では脆い材料であるセラミックも微小寸法ではポンチとして使用しうる。

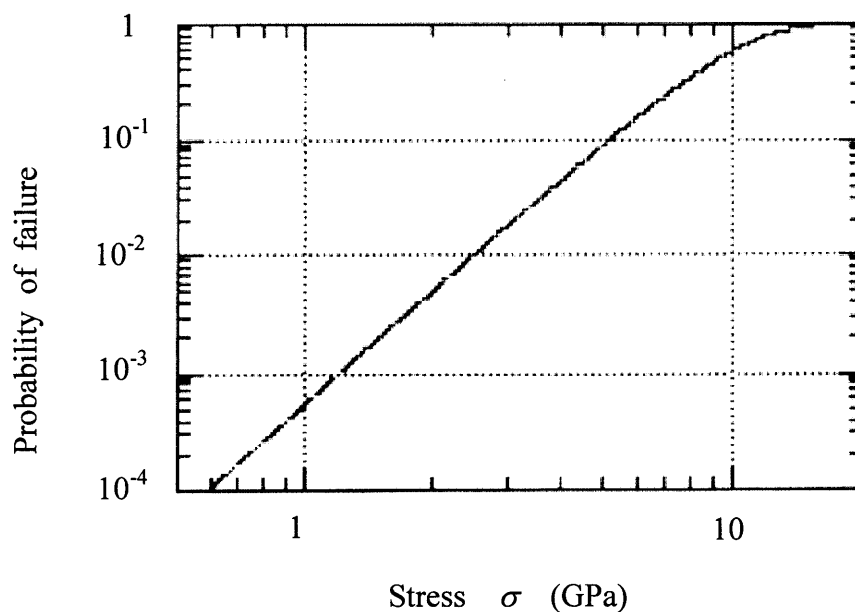


図5 長さ $50\ \mu\text{m}$ の SiC ファイバの破壊確率

3. 超微細穴抜き装置設計指針

金属箔の超微細穴抜きを高精度に達成するために、以下の設計指針を与えた。

- (1) ファイバ・ポンチの座屈を抑えるために、工具長は径の4倍以下とする。
- (2) セラミック・ファイバ・ポンチ先端は平滑かつ平坦とし、刃角は鋭くする。
- (3) ポンチとダイの位置決めは高精度に実施する。
- (4) ポンチの動きは高精度に制御し、ポンチと材料の接触時間も同定する。

これらの問題を解決するために開発した各方法および工具製作法に関する検討、試行実験の結果を以下に記述する。

4. ファイバ・ポンチの製作

一般に、工具の座屈を防ぐためには工具部長さを直径の3～5倍とし、他の根本部分は保持しなければならない。また、セラミック・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とするためには、端面を平坦にかつ刃角を鋭利にしなければならない。それらを解決するために、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。保持長はポンチ長50 μm の600倍である30mmとした。また半割軸の保持面は#2000のエメリ

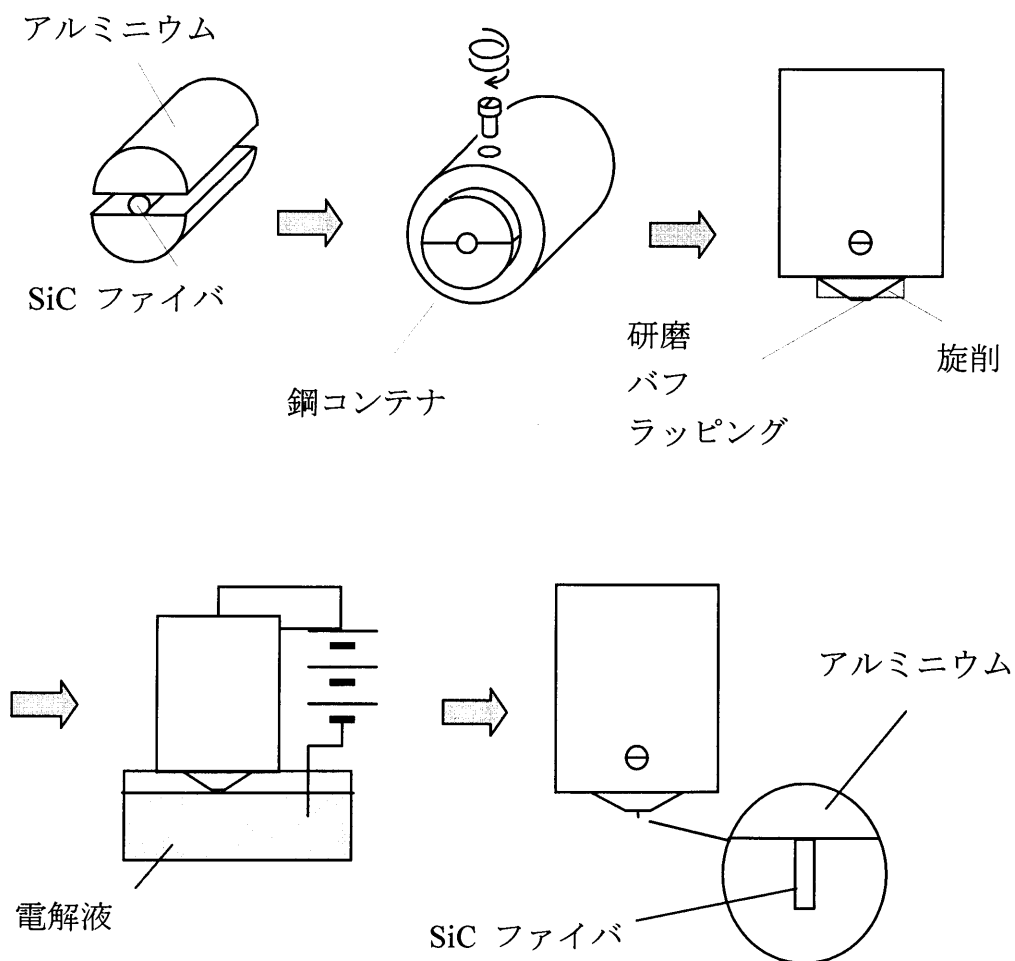


図6 SiCファイバ・ポンチ製作法

一紙で粗さ $1\ \mu\text{m}$ 以下とされている。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。端部を旋盤で円錐状に加工し、その端面を円錐状の軸ごと研磨、バフ、ラッピング仕上げする。この段階では図7の走査電子

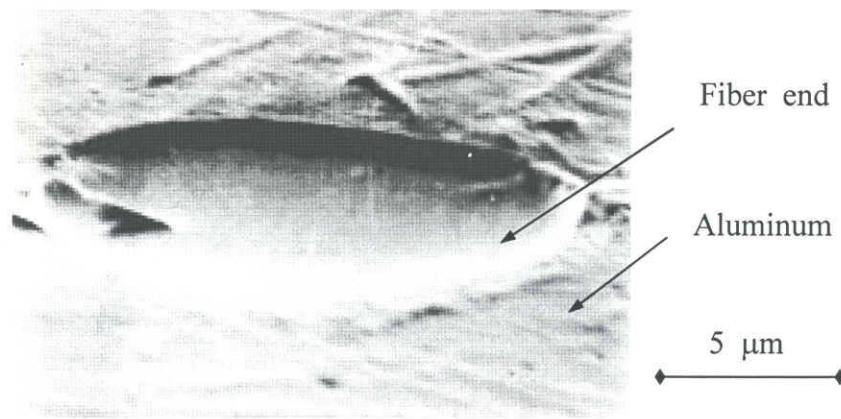


図7 バフ後のファイバ端

顕微鏡の写真で示すようにセラミック・ファイバの先端には割れが残り、保持するアルミニウムより突き出している。この突き出し部分のみを除去し、先端を割れの無い平坦面にするため平坦ステンレス鋼のディスク上で直径 $0.25\ \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒で最終仕上げをする。次に、電解研磨により導電性のアルミニウムのみを $50\ \mu\text{m}$ 程度除去することにより、残った $\phi 14\ \mu\text{m}$ のファイバが適度な軸比を持ったポンチとなる。この電解研磨は過塩素酸、メチルアルコール、ブチルセルソルブ溶液の中、電圧 $40\sim 60\ \text{V}$ 、電流密度 $0.03\sim 0.05\ \text{A}/\text{mm}^2$ で行った。図8に示すように、アルミニウムの電解除去量 m (mg)は付加電荷量 C (coulomb)によって

$$m = (0.24 \pm 0.01)C$$

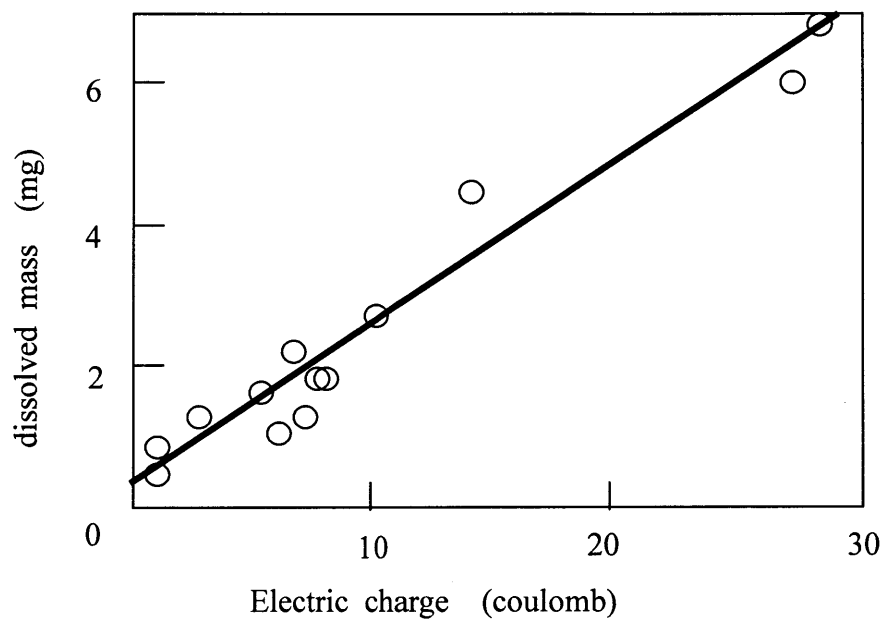


図8 電解研磨におけるアルミニウムの除去量

で与えられる。この方程式を用いて所望のアルミニウム電解深さすなわちポンチ長に対する必要電解時間を計算した。図9が完成したポンチであり，平坦かつ鋭い刃角を有する。

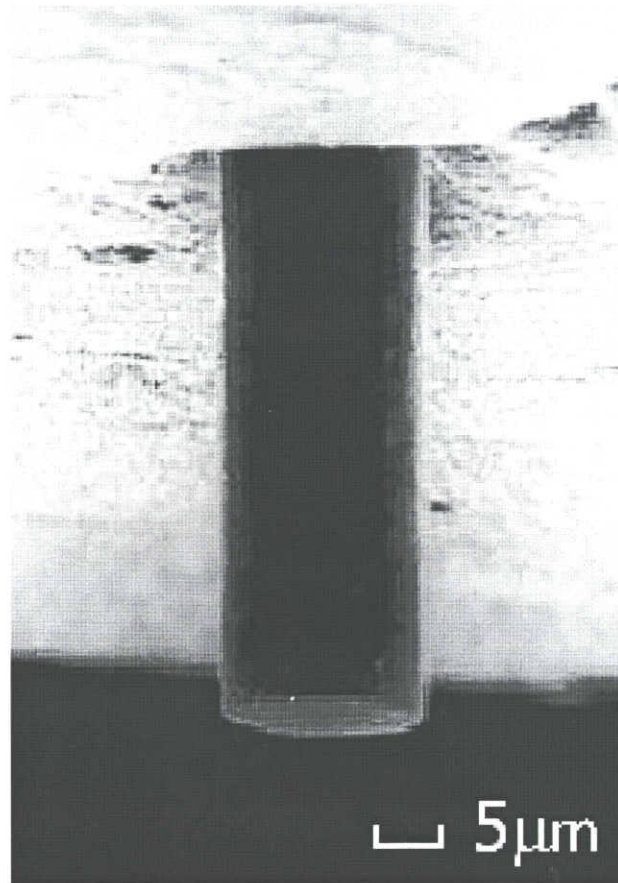


図9 SiC ファイバ・ポンチ製作例

5. 制御および計測システム

超微細穴抜きシステムはパーソナルコンピュータ PC-9801XA で制御されている。コンピュータからの制御信号は D/A コンバータを通して (1) ポンチを移動させる piezoアクチュエータ, (2) 被加工材の箔を巻き取るステッピングモータに送られ, 得られたデータは A/D コンバータを通して (3) ポンチ力を測定するロードセル, (4) ポンチ行程を測定する変位計から取得する。

5. 1 制御システム

piezoドライバーからポンチ行程への変換係数は $0.45 \mu\text{m}/\text{V}$ であり, ポンチ移動信号は粗送りに対し 10 V (ポンチ行程 $45 \mu\text{m}$ に対応), 中間送りに対し 1 V ($4.5 \mu\text{m}$), 精密送りに対し 0.1 V ($0.45 \mu\text{m}$) で行った。ポンチ速度は piezoドライバーへの電圧信号を変化させることによって行い, $6.4 \mu\text{m}/\text{sec}$ から $3.8 \text{ mm}/\text{sec}$ で変動させた。金属箔の送りは巻き取りドラムの直径とステッピングモータの回転速度を変えることによって行い, 単一送りは 0.1 mm とした。

5. 2 計測システム

ポンチ行程を計測するための渦電流式変位センサーの仕様は最大計測長 1 mm , 応答時間 10 msec , 5 V のフルスケール 0.03% の分解能, 0.3% の非線形性である。変位センサーは非接触式でありポンチ力計測に擾乱を与えない。ポンチ力を計測するためのロードセルの仕様は容量 5 N , 非線形性はフルスケールの 1% である。計測した力にはポンチ力以外に上型ダイを支えるばね力, リニアベアリングの摩擦力も含まれるために, 加工時にロードセルに作用する力から無加工時にロードセルに作用する力を差引き, 実質的に加工に要するポンチ力を求めた。

6. SiC ファイバのパンチとしての適性

ファイバ・パンチの特性評価はダイ上面に載せたシリコンにパンチを押し付ける圧縮試験を行い、圧縮力とひずみを計測することによって行った。ファイバ・パンチとロードセルの間のマイクロプレスの変形量はファイバ・パンチの代わりに直径 4 mm の剛な鋼棒を用いることにより予め求めた。ファイバ・パンチの正味の変形量は変位センサーの出力からマイクロプレスの変形量を差引くことにより得られる。セラミック・ファイバ・パンチの寿命を評価するために圧縮試験は繰返し実施しており、図 10 には過負荷圧縮試験の 40 回目と 120 回目の結果を示す。分かりやすくするために 120 回目の試験結果は縦軸の原点が 0.5 mm だけ上にずらして描かれている。圧縮力はファイバの横断面積の値で割り、応力の値で示してある。試験した圧縮力は、後述する被加工材をステンレス鋼、ベリリウム銅とした場合における穴抜き実験のパンチ力最大値 2.8 GPa を

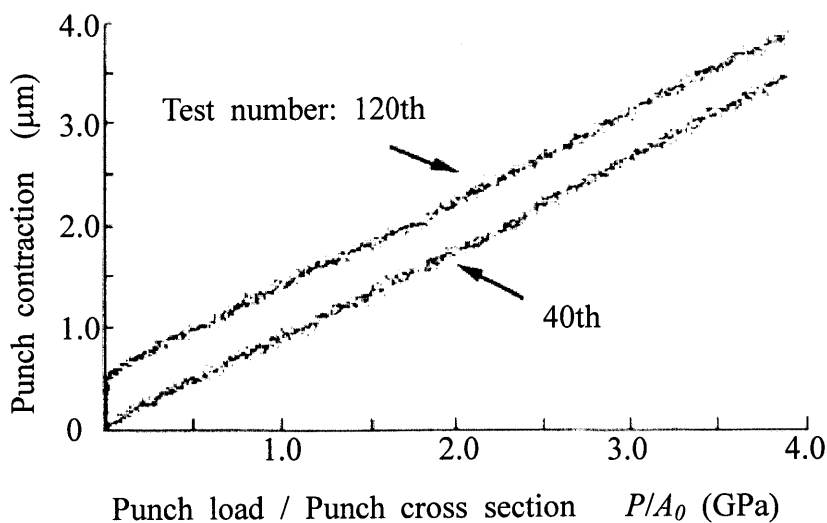


図 10 圧縮試験におけるファイバ・パンチの圧縮量と負荷

はるかに超える 4 GPa で行った。2回の圧縮試験結果は一致し、したがってセラミック・ファイバをポンチとして十分に使うことは明らかである。グラフの傾き $\delta/\sigma = 0.8 \mu\text{m}/\text{GPa}$ とファイバのヤング率は $E = 196 \text{ GPa}$ を $l = E\delta/\sigma$ に代入し、ポンチの有効長さ $156.8 \mu\text{m}$ を得る。アルミニウム表面からのファイバ・ポンチの突出量は $50 \mu\text{m}$ であり、アルミニウムとファイバの界面に電解研磨液が侵入し、 $100 \mu\text{m}$ 程度は保持力が弱くなっていることを伺わせる。

微細穴抜きプロセスにおいては荷重の微小な変動でもポンチに過負荷を与えることとなる。図 11 はファイバ・ポンチの安定性を保証するために行ったはるかに大きな荷重による過負荷圧縮試験結果である。長さ 100 mm のファイバの引張り強さ 2.75 GPa よりはるかに大きな 15 GPa の圧縮応力でもファイバ・ポンチは破壊していない。この理由は長さ $150 \mu\text{m}$ ではファイバ内の欠陥の存在確率が極めて低いことと負荷形式が圧縮であることによる。グラフの傾きが増加し始

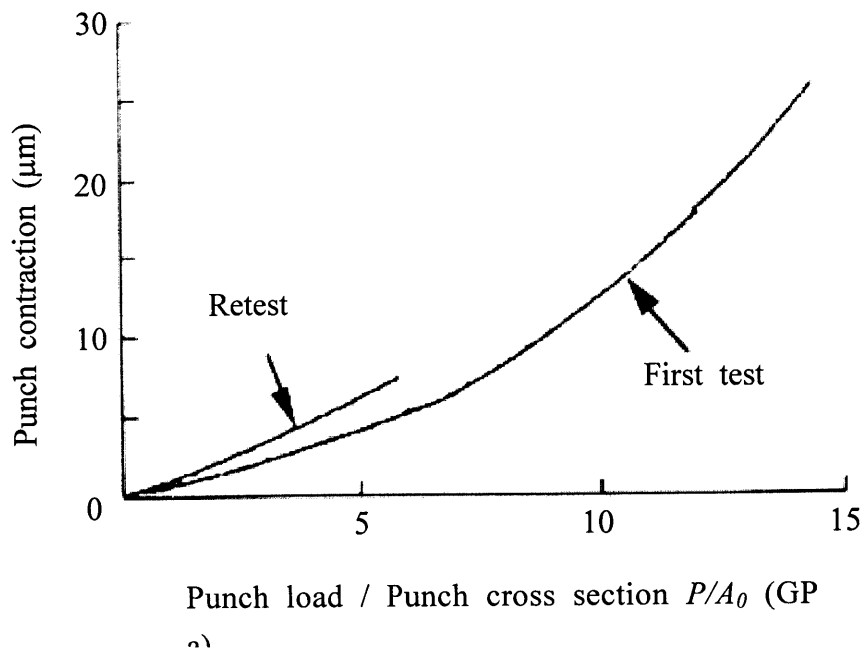


図 11 過負荷状態でのポンチ圧縮

める応力 7 GPa は $W/A = 4\pi^2 EI/l^2$ で求める 156.8 mm の長柱の座屈応力に一致する。
1 回目の試験後に除荷，再負荷した場合，グラフの傾きは除荷前の値に一致しており，過負荷で有効ポンチ長が増加しているようであるが，その後でも穴抜きは安定して行える。

7. 超微細穴抜き実験

7. 1 供試材料

高強度材の高アスペクト比の微細穴抜きが価値ある応用であり、厚さ 17 μm の工業用順アルミニウム箔 (A1100-H)、厚さ 15 μm のベリリウム銅 (25alloy-1/4H)、厚さ 8 μm のステンレス鋼箔 (SUS304-H) を被加工材として選んだ。ステンレス鋼は高強度材、ベリリウム銅は良好な加工性を有し、高強度伝導性スプリングとして用いられる。機械的特性を表 2 に示す。超薄材料には通常のマイクロビッカース硬さ試験は不可能であり、負荷 1 mN でナノインデント (NMIS-2000 CRISO) を用いて硬さ得た。押し込み深さはステンレス鋼で 53 nm、アルミニウムで 188 nm であり、硬さ測定の信頼性を保証する。アルミニウムの引張強さはデッドウェイトを用いた簡易引張り試験で得た値であり、ステンレス鋼、ベリリウム銅に対する値はメーカー保証値である。穴抜き実験条件はポンチ速度 3,800mm/sec、無潤滑とした。ただし、この場合のダイは、普通鋼 S45C の無穴状態でプレス内のダイセットに組込み、ファイバ・ポンチ自身で穴をあけたものであり、そのままの状態で行った穴抜き実験としている。

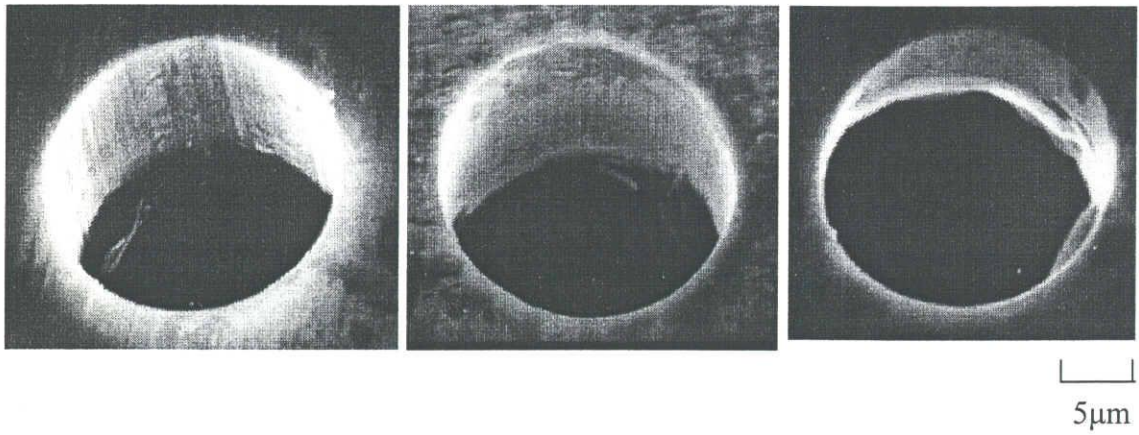
表 2 被加工材箔の諸特性値

	硬さ* (GPa)	HV 相当値	引張強さ (MPa)	厚さ (μm)
アルミニウム A1100-H	0.56	52	36	17
ベリリウム銅 25-1/2H	4.50	413	510 ~ 620	15
ステンレス鋼 SUS304H	6.47	594	> 1500	8

* : ナノインデントによる測定値

7. 2 加工面の観察

図 12 にあけた穴の SEM 観察結果を示すが、いずれの箔でも超微細穴は真円、だれもなく、穴側面はほとんど平滑面となっている。高強度のステンレス鋼にのみ穴側面に破断面が認められる。図 13 はベリリウム銅箔に対して、1 列約 100 穴を 50 μm 送りで連続抜きし、元位置に戻り 50 μm 横送りし、次の列の抜きというようにして、多数列連続穴抜き実験した結果の SEM 観察例である。1 列中における送りは正確であるが、元位置に戻る際に若干の誤差が生じている。引き続き、1000 回の工具耐久試験を行っていった。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が、ダイはステンレス鋼を抜く際に大きな摩耗の進展が認められた。



(a) アルミニウム

(b) ベリリウム銅

(c) ステンレス鋼

図 12 各種被加工材箔に対する穴抜き性状

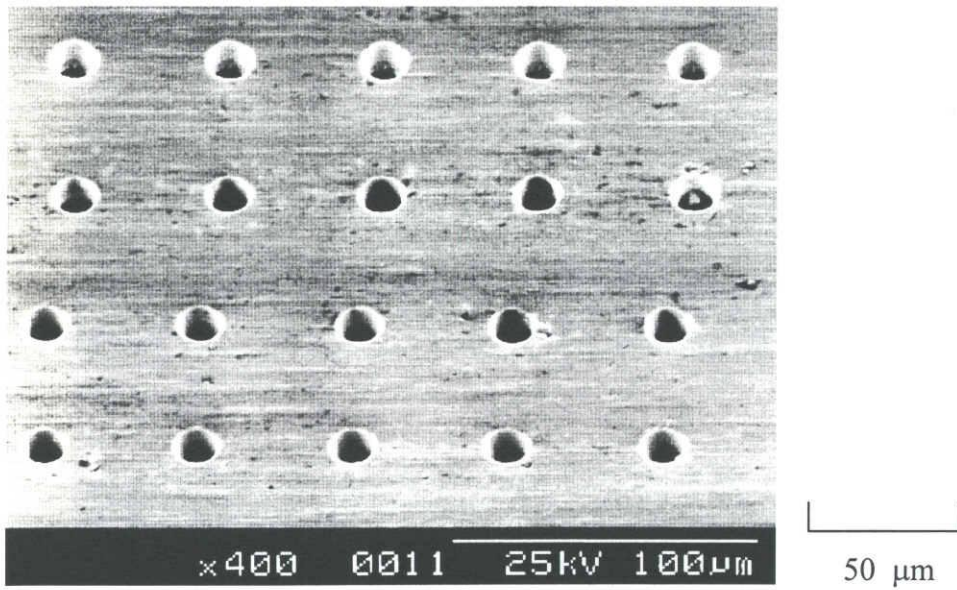


図 13 多数穴抜き例 (ベリリウム銅, 箔厚 15μm)

7. 3 ポンチカーポンチ行程線図

図 14 にアルミニウム穴抜きにおけるポンチカーポンチ行程線図を示す。上 2 つはロードセル、変位計からの直接データであり、その中の上が穴抜き時に得たもの、下が無加工工程において得たものである。前者から後者をコンピュータ内で差引くことにより正味の穴抜きポンチカーポンチ行程線図が得られるが、これを一番下に表す。ポンチ力 66.2 mN をせん断面積 $2\pi \times 14^2 = 747.7 \text{ mm}^2$ で割って得られる最大せん断応力 88.5 MPa は引張り強さの半分より若干小さい。穴抜き完了した筈の $s/t_0 = 1$ でもポンチ力は最大値の 1/2 程度に留まったままであるが、これは高いアスペクト比 1.21 で変形域は圧縮応力状態であり、抜きかすがダイ穴内に留まったままであるからである。ポンチ力は一旦減少後に $s/t_0 = 2.25$ で再び増加しているが、これは前穴抜きの抜きかすに現穴抜きのぬきかす

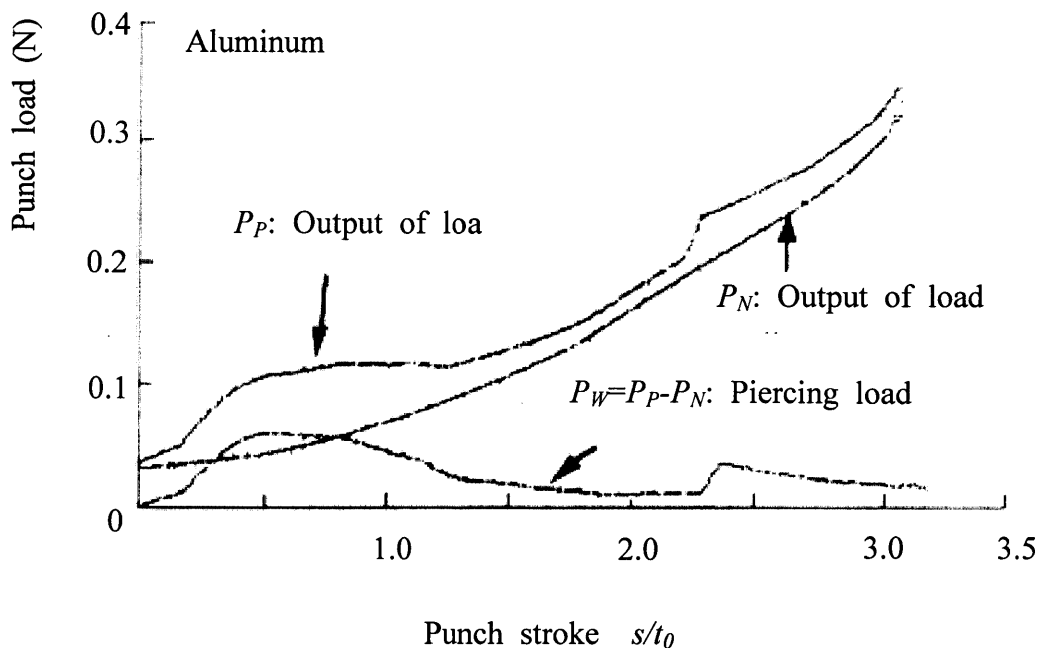


図 14 ポンチカーポンチ行程線図 (アルミニウム)

があたったためである。

図 15 に示すベリリウム銅のポンチ力-ポンチ行程線図において、ポンチ力は $s/t_0 = 1$ で急落し、最大せん断応力値は引張り強さの 1.27 倍で比較的大きな値である。図 16 に示すステンレス鋼では亀裂発生、分離は早い段階で起こり、最大せん断応力 1142 MPa は引張り強さの 0.76 倍である。超微細穴抜きにおける材料挙動は基本的には通常穴抜き加工と同一である。ただし、ポンチ力-ポンチ行程線図は材料、アスペクト比により異なる。

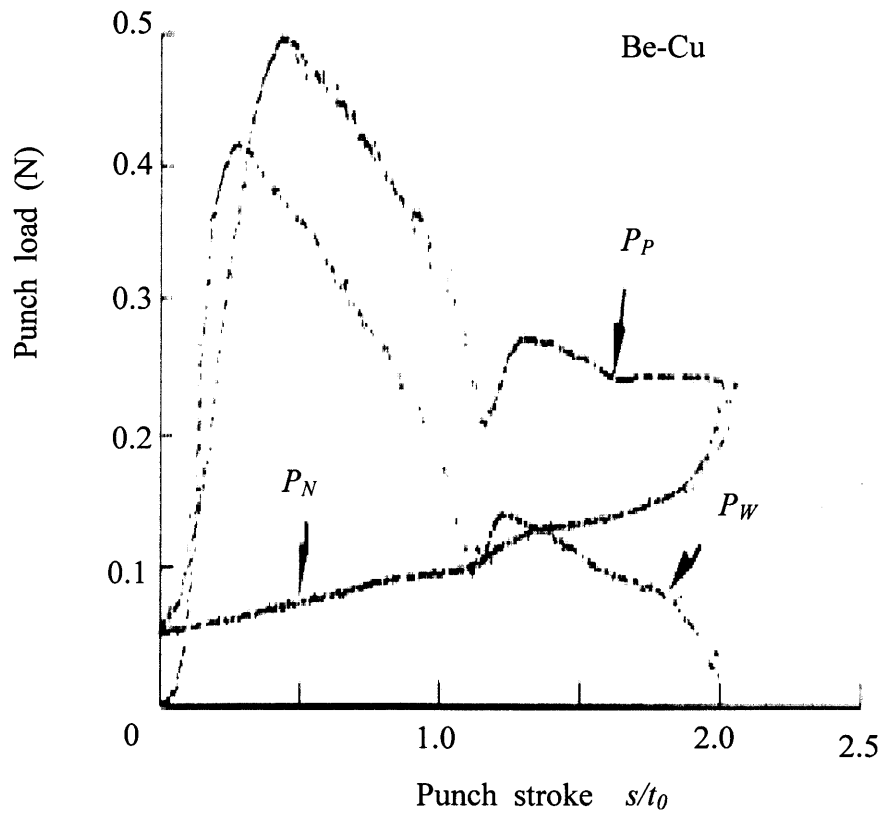


図 15 ポンチ力-ポンチ行程線図 (ベリリウム銅)

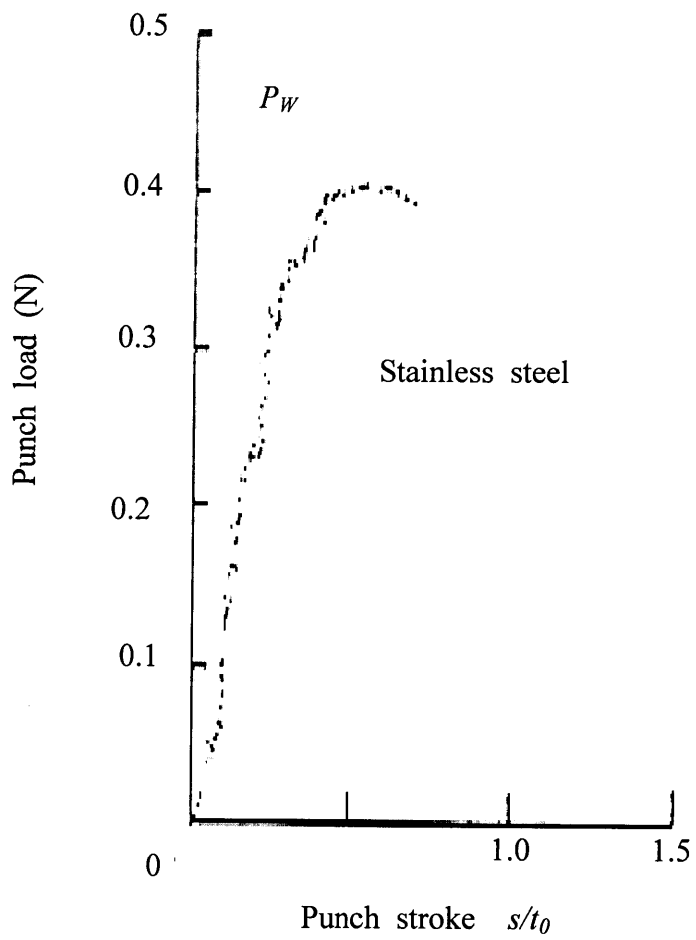


図 16 ポンチカーポンチ行程線図 (ステンレス鋼)

8. ファイバ・ポンチを電極としたダイ穴放電加工

ダイの耐摩耗向上のためには、ダイを金型材質の超硬、合金工具鋼などから製作しなければならない。一方、超微細寸法、芯出し、位置決め的重要性を考慮すると、熱処理、研磨仕上げしたダイをファイバ・ポンチ設置要素に組み込み、最後のダイ穴のみはそのポンチであけなければならない。なお、ダイは金型強度を有するため、ファイバ・ポンチを用いた機械的方法による穴加工は不可能である。これらの条件を満足させる方法として、ポンチである SiC ファイバを電極とした放電による穴加工を開発していった。図 17 に示すマイクロダイセット

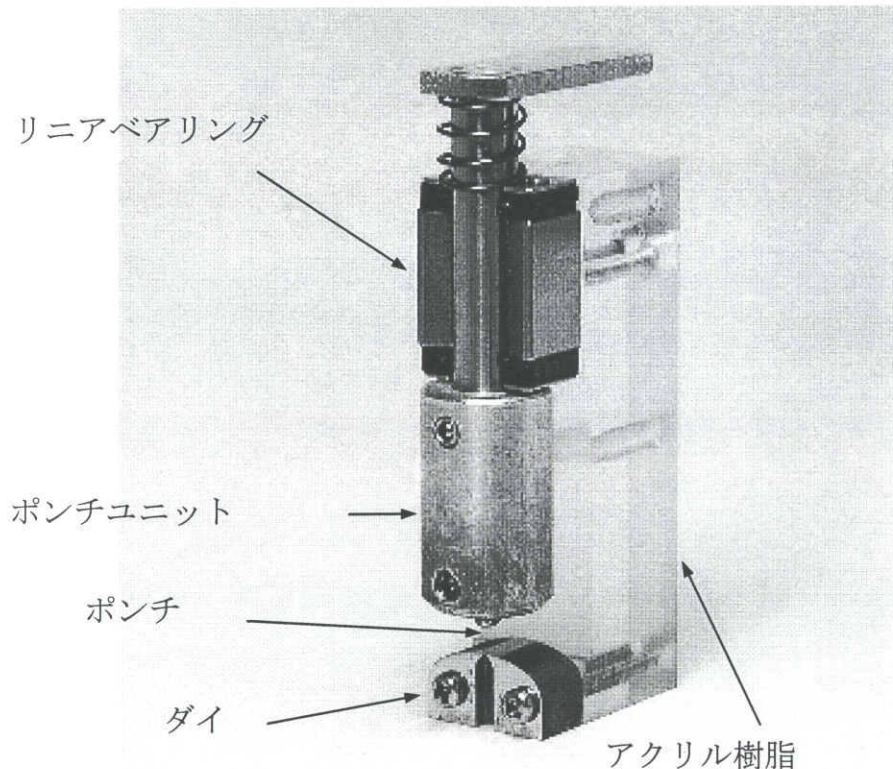


図 17 マイクロダイセット

トにファイバ・ポンチおよびダイを組み込み一体のまま放電加工装置内でのダイ穴加工，引き続きマイクロプレス内での穴抜き加工を行う。

ただし，この方法を実現するためには多くの課題が待ちうけていた．SiCセラミックス・ファイバ高抵抗材であり，これまで放電電極として試みられたこともなかった．また，超微細寸法の電極は焼損，溶損の虞がある．これらの解決のために，図 18 に示すように，SiC ファイバ・ポンチを含めてポンチユニット全体を金で薄く被覆した．このようにすることにより，電気伝導は被覆金が果たし，放電を持続することができる．かつ，電極の耐消耗性指標の熔融エネルギー密度は熱電導率と融点の積であるが，前者を被覆金の値，後者を SiC ファイバの値で考えれば，安定した消耗しない電極となる．高電界であるファイバ先

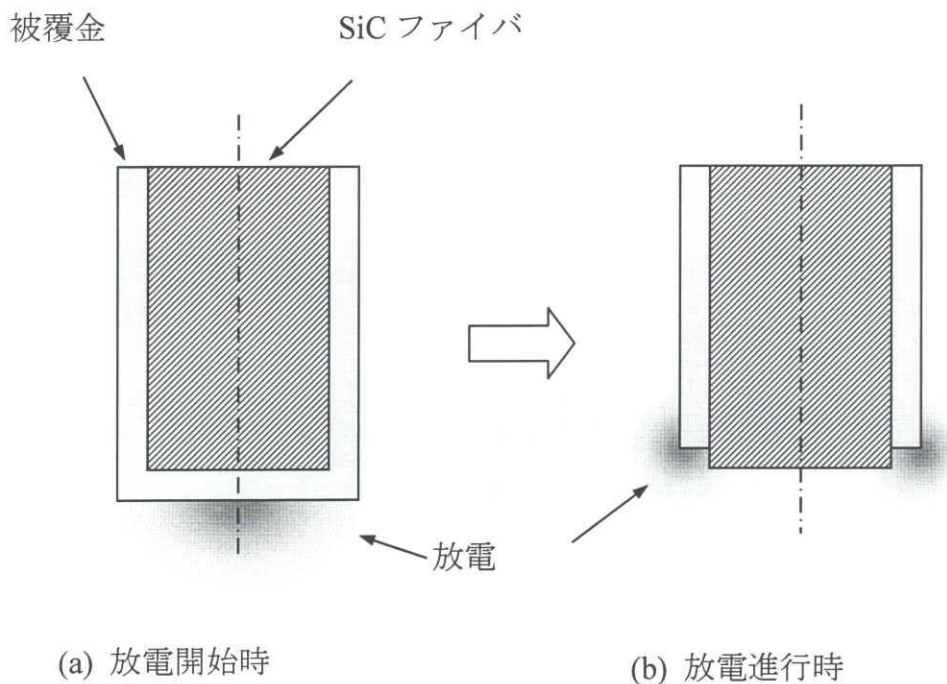


図 18 金被覆 SiC ファイバ・電極による放電過程

端角の金被覆部から放電が発生し、当初の(a)では主に先端面から放電がなされる。しかし、放電が進行すると金の融点は低く、先端面の被覆金は溶融蒸発して消失するが、それ以降も側面の被覆金で放電は持続される。なお、陰極となるファイバ・電極と陽極となるダイ間で放電可能とするために、両者間は図 17 で示すようにアクリル樹脂で電氣的に絶縁した。

さらに他の問題としては、放電加工ではスラッジの除去が必要であり、通常は加工液を浴槽内で循環させ、加工面を常に洗浄し続けるが、超微細電極に対

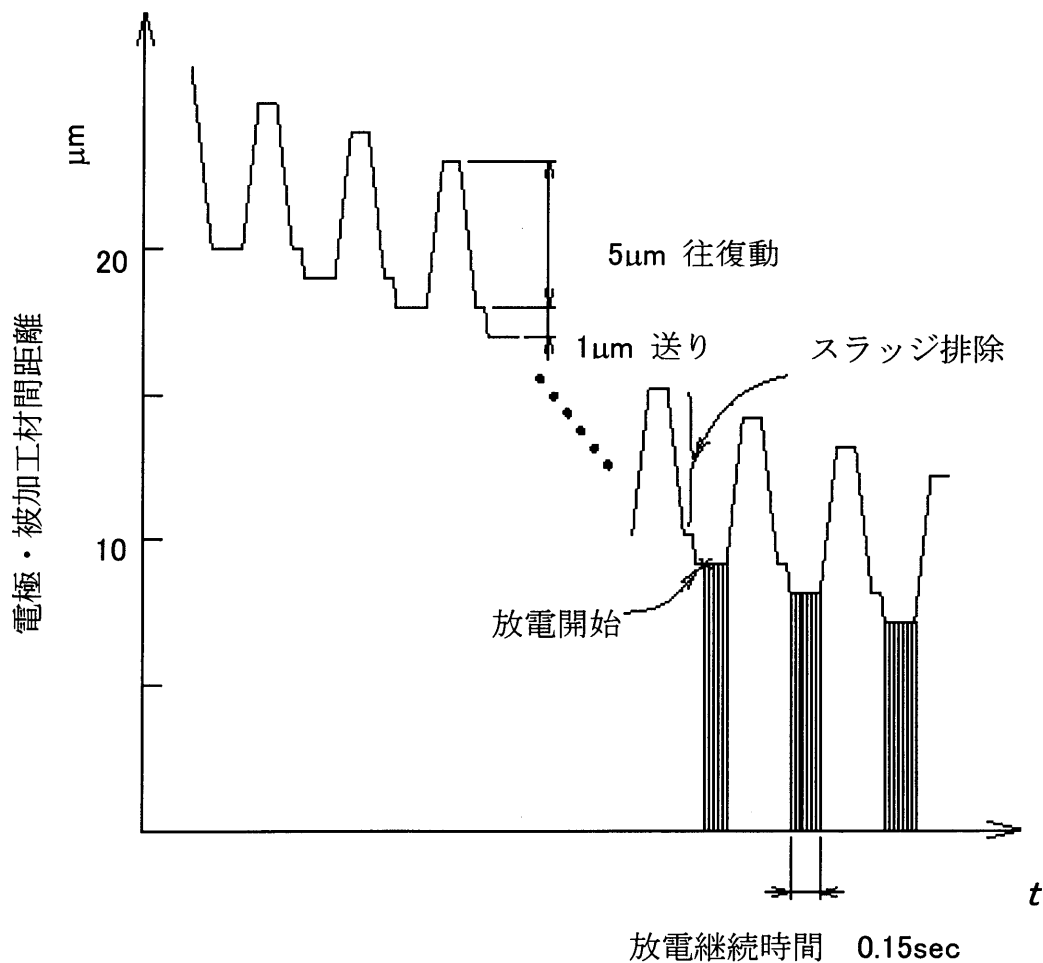


図 19 放電制御過程

しては、この循環流が電極の位置を不安定性にする虞がある。また、放電開始判定が微妙だという事情もあり、これらを図 19 に示す電極送り制御で果たすこととした。この送り制御は極間距離 $20\mu\text{m}$ 以降に進める。急激な $5\mu\text{m}$ の往復動でファイバ・ポンチ固定軸の円錐下面が加工液内でダイス上面に向かって放射状に軽い衝撃波を発し、この波動がスラッジを外側へ排出させる。 $1\mu\text{m}$ 送り後に一定時間保持し、慎重な放電監視により放電開始を確認した。

商用放電加工機で微細加工をする場合、加工機が備える自動制御電極送りでは粗すぎるなどの理由で図 20 に示す超小型放電加工システムを自作した。加工機の主要部分は加工浴槽、電極送りスライダ・ベアリングから成り、スライダ上部のステッピングモータをコンピュータで制御することで電極を $1\mu\text{m}$ 単位で

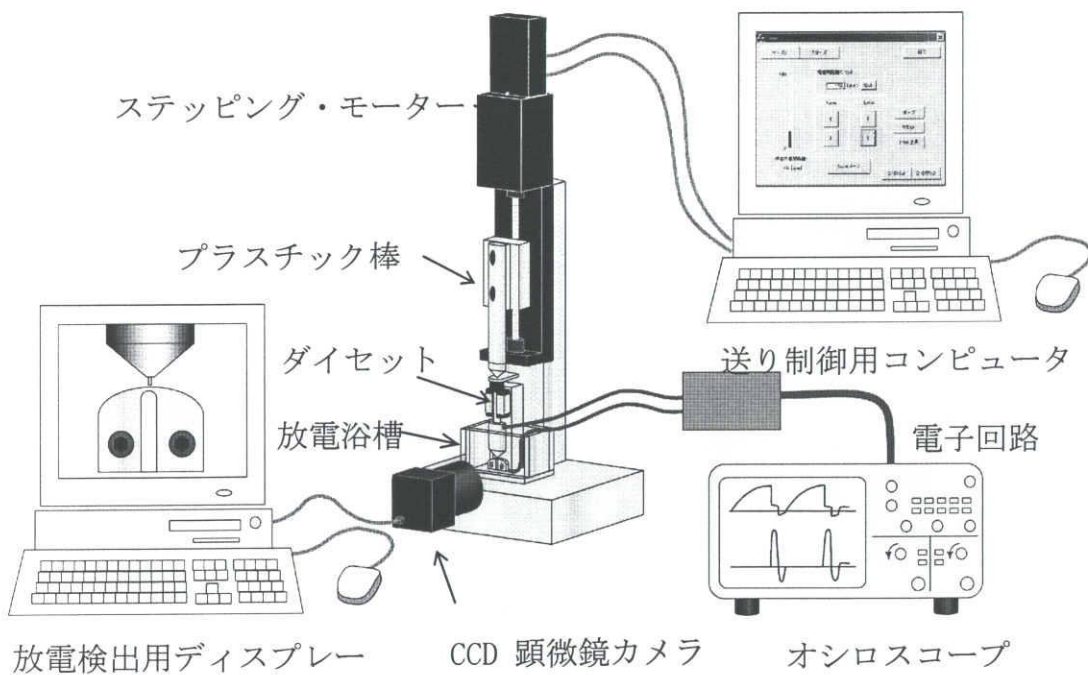
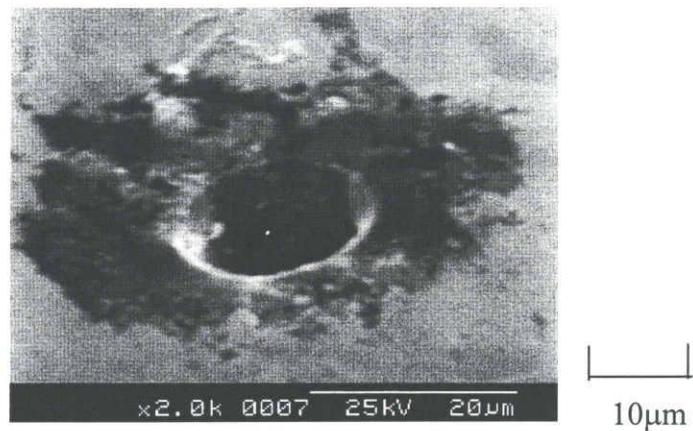
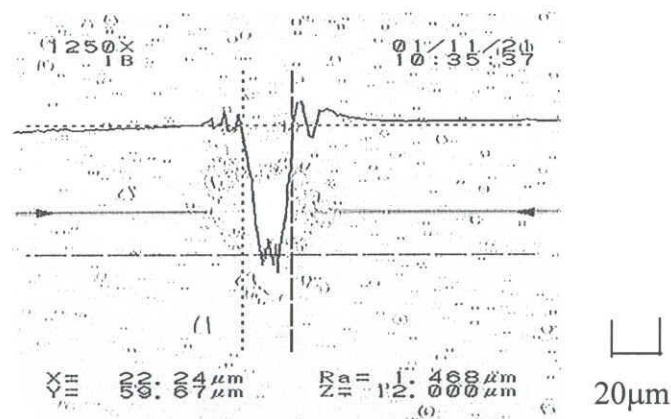


図 20 放電加工システム

上下させる。放電監視機構は二重に設けてあり、電極間中央部に焦点を合わせた CCD 顕微鏡で放電に伴う発光を捉えると同時に、放電回路に接続したオシロスコープ上に極間電圧を表示した。



(a) SEM 像



(b) レーザー顕微鏡による寸法測定

図 21 放電加工で彫られた穴の性状および形状

この放電加工システムを用いて、ダイ材質である被加工材 SKD11 をファイバ電極で放電加工した。図 21 に放電加工で彫られた穴の性状を (a) の SEM 像で、穴の形状寸法を (b) のレーザー顕微鏡による測定結果で示す。穴寸法は直径

22 μm , 深さ約 12 μm であった。一方, ファイバ電極の直径は放電前後で寸法変化せず, 19 μm のままであり, 金被覆ファイバ電極の性能を実証する。すなわち, 金が電気伝導と熱伝導を受け持ち, かつ, 熔融蒸発するが, セラミックス・ファイバは高融点で放電の際の熱影響を受けない。なお, 穴抜き時の被加工材厚さを 15 μm 以上であると想定すれば, ファイバ・ポンチ径とダイ穴径の間の片側隙間 1.5 μm は適切な値である。また, 1 回ごとの放電継続を短くすることにより, 超微細で懸念があった過剰放電による電極消耗を免れることができた。

初期放電位置は被加工材より 2~5 μm 上方であり, この位置で 0.15sec 間放電を行い, 5 μm の往復動, 再び放電という繰り返しを 10 回行う。次に, 電極を 1 μm 降下, その位置から同様に 5 μm 往復動, 放電の繰り返しを施していった。これらを 5 度繰り返すことで, 最終的には放電開始位置から 5 μm 下方の位置まで電極を降下させた。なお, 放電パルス周期は 2500Hz であり, 0.15sec 継続の 1 回の保持で 375 パルス, 同一保持位置で 10 回の継続を行うため, 3750 パルスの放電を行っている。ファイバ電極径を 14~19 μm と変え, 降下量を種々変えて行い, 放電加工量の再現性を確認した。これら多数回の放電によって, 初期放電の放電ギャップは 2~5 μm , 同一位置での放電 3750 回 (1 ターン 375 回 \times 10) で 2~4 μm 彫ることができ, 放電によるクリアランス増加は直径, すなわち, 両側で 1~3 μm であった。図 22 に, 初期放電以降の電極送り量 u μm と彫られた穴深さ h μm の関係を示す。両者はほぼ線形性を有し, 以下の近似式で表すことができる。

$$h \approx 2.25u$$

この関係式より, 所望厚さの貫通ダイス穴を製作することができる。ダイは熱処理前に, 予め逆方向から逃げのある穴, すなわち, テーパー穴の先端面直径 0.1mm を僅かに残すまで機械加工しておく。したがって, 所望厚さは 10~

20 μm でよい。

図 23 にマイクロダイセットをマイクロプレスに組込んだ主要部の状態を示す。ポンチ駆動は移動速度、応答性、耐負荷特性に優れる圧電アクチュエータを用いた。図には示されていないが、粗動のためにマイクロメータを圧電アクチュエータの上部に設置し、分解能 1 μm で 15mm の範囲を上下でき、ダイセットの着脱における作業性が配慮されている。また、荷重計測はアクチュエータ先端部に設置されたロードセル、ポンチ変位計測はマイクロダイセット上部に設置された渦電流式変位センサで行われる。

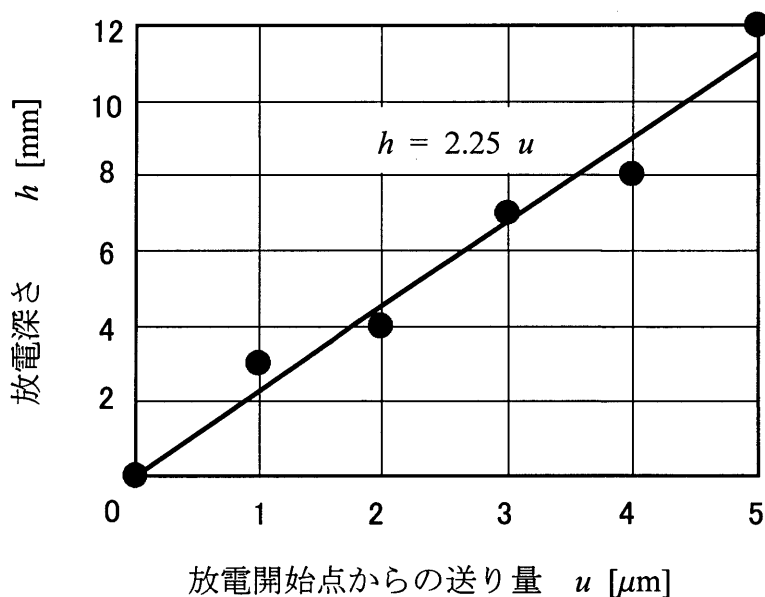


図 22 放電開始点からの電極の送りに対する放電深さの関係

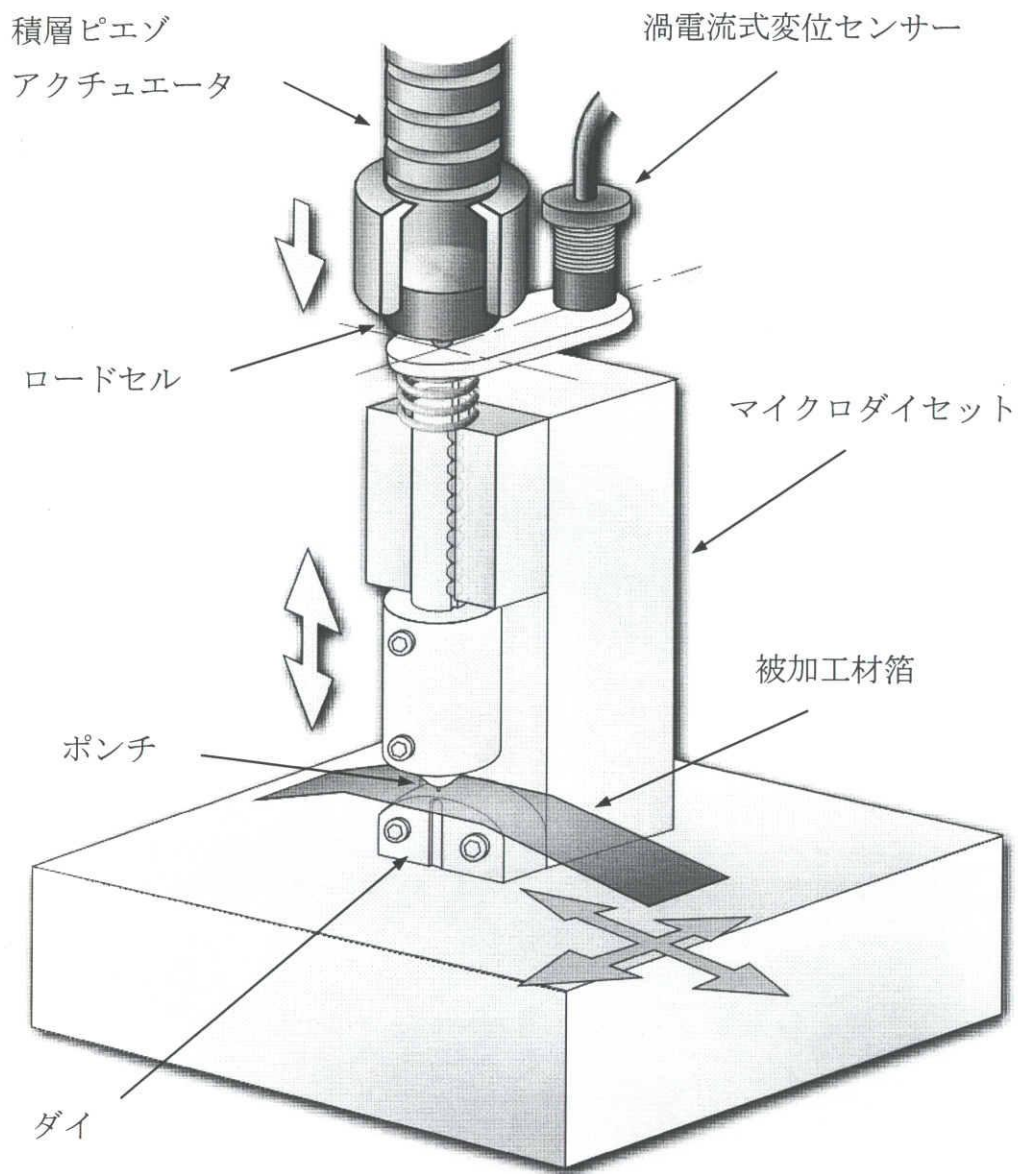


図 23 マイクロプレスにマイクロダイセットを組込んだ状態

9. まとめ

SiC セラミックス・ファイバを用いた超微細穴抜きシステムの開発で以下の事実が明らかにされた。

- (1) プラスチックもしくは金属強化用の SiC セラミックス・ファイバはステンレス鋼，ベリリウム銅材に対する超微細穴抜き用のポンチとして使用することができ，ポンチ整形技術が確立された。
- (2) ポンチとして用いる SiC セラミックス・ファイバを電極として用い，ダイ穴を放電する技術が確立し，マイクロダイセットへのポンチ、ダイの設置，ダイ穴の加工，マイクロプレスでの穴抜きの一連のシステムが確立され，超微細穴抜きの正確・精密な芯出し，位置決めを果たした。

参考文献

- [1] Du, K., Gillner, A., Hoffmann, D., Kovalenko, V.S., Masuzawa, T., Ostendorf, A., Poprawe, R. and Schulz W. 2002, "Laser Machining by Short and Ultrashort Pulses, State of the Art and New Opportunities in the Age of the Photons," *Annals of the CIRP*, 51(2), pp. 531-550.
- [2] Heeren, P.-H., Reynaerts, D., van Brussel, H., Beuert, C., Larson, O. and Bertholds, A., 1997, "Microstructuring of silicon by electro-discharge machining (EDM)," *Sensors, and Actuators*, A61, pp.379-383.
- [3] Watanabe, N., Suda, M., Furuta, K. and Sakuhara, 2001, "Fabrication of Micro Parts Using Only Electrochemical Processes," *The 14th IEEE International Conference of Micro Electro Mechanical Systems*, pp.143-146.
- [4] Masuzawa, T., Fujino, M. and Kobayashi, 1985, "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," *Annals of CIRP*, 34(1), pp.431-434.
- [5] Ziabicki, A., 1976, "Fundamentals of Fibre Formation," pp.373, John Wiley & Sons.
- [6] Wu, H.F. and Netravali, A.N., 1992, "Weibull analysis of strength-length relationships in single Nicalon SiC fibres," *J. Mater. Sci*, Vol. 27, pp.3318-3324.