

精密微小孔放電加工機の開発

中国職業能力開発大学校 原 主 吾
杉 山 誠
椎 葉 彰
井 上 仁 志
天 野 隆
四国職業能力開発大学校 西 田 和 哉

Development of Precision Micro Hole EDM Machine

Keigo HARA、Makoto SUGIYAMA、Akira SHIIBA、
Hitoshi INOUE、Takashi AMANO、Kazuya NISHIDA

要約 化学繊維の製作に用いる紡糸ノズルは、数十個の微小な異形穴が空いた金属円盤で製作されている。このノズルの製造に当たっては、高度な熟練を必要とするため、近年のフレキシブルな生産体制や低コスト化、頻繁な設計変更の要求に対応しにくい。そこで本開発では、紡糸ノズルの穴あけ工程を省力化・自動化することで、これらの要求に応えられる加工機の開発を目指した。具体的には穴あけ工程を自動化するとともに、操作の簡素化、保守性の向上を目的として開発を進めた。2台のカメラを用いて加工位置座標の検出を行い、リニアモータによって駆動される放電電極で穴あけ加工を行う方法を考案した。本稿では開発した加工機の構成について述べるとともに、従来の製品と同等の形状精度かつ、加工速度を向上させることができたことを報告する。

I はじめに

我々が日常使用している化学繊維は、豊かな膨らみ感や伸縮性、天然素材の特性や吸湿性等、様々な機能を持たせることで製品の付加価値を高めている。このような性質は、製品を構成する一本一本の繊維の断面形状を工夫することで実現されている。現在この繊維を製作するためには、溶融したポリマを数十個の微小な異形穴（穴径1mm～0.01mm）があいた紡糸ノズル（以下ノズル）と呼ばれる、金属製ノズルから押し出して製作されている。

この製作工程は、高温・高圧下の条件でおこなわれるため、ノズルの摩耗や汚れに伴うメンテナンスが欠かせない。さらに市場の要求により、繊維に求められる機能も高度化するため、新しい断面形状を持った繊維が常に求められている。しかしノズルの微小な穴あ

け加工は、高度な技能をもった熟練工が、特殊な電極を取り付けた放電加工機で、顕微鏡を用いて一穴ずつ位置決めをしながら作業をしているため、製作効率の低下やコストの上昇につながっている。また加工形状は熟練工の技能に依存する傾向が強いため、受注状況、市場動向に応じたフレキシブルな対応が難しい。

そこで本稿では作業者の負荷を軽減し、省力化・自動化を目的として開発した精密微小孔放電加工機について、構成・性能等を報告する。

II 現在の微小孔放電加工機の構成と加工法

1 現在の微小孔放電加工機の特徴

現在用いられている微小孔放電加工機（以下、放電加工機）の外観を図1に示す。テーブルワークを固



図1 現在の微小孔放電加工機の外観

定し、上下方向に取り付けられた電極によって穴あけ加工を行う。電極の送り制御にはオペアンプ等を利用したアナログサーボ系で実現している。このため制御回路・操作系の全てがアナログ素子で構成されており、部品によっては現在既に製造中止をしたものもあり、作業環境は、作業者が顕微鏡を用いながら一つ一つ穴あけ加工を行っており、加工精度及び加工速度の向上にはかなりの熟練を必要としている。

2 加工ワーク

加工ワークの外観を図2に、穴形状の例を図3に示す。ワークの材質はステンレス鋼、直径 $\phi 40 \sim \phi 150$ 、厚さ $10 \sim 25\text{mm}$ である。放電加工機で加工される穴は、図2(c)の下穴中心位置へ、反対側の面(図2(a))から加工を行う。穴形状は図3に示すY字のもの他に「V」「田」「W」「十」等の異形穴である。

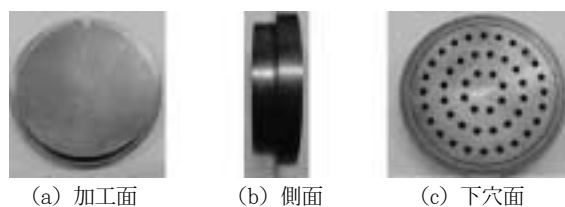


図2 ワーク外観

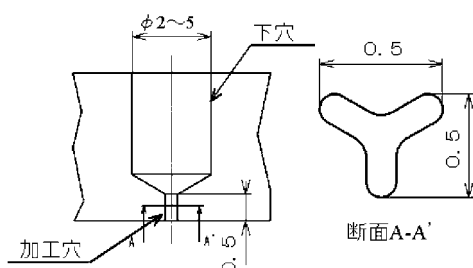


図3 加工穴形状の例

3 現在の加工方法

下穴の中心位置に穴あけ加工を行うため、図4(a)に示すような治具を下穴内へ挿入し、加工面に一つ一つポンチで刻印する。作業者はポンチで刻印されたマークを顕微鏡で確認し、無電解水を加工点に供給しながら放電加工を行う。

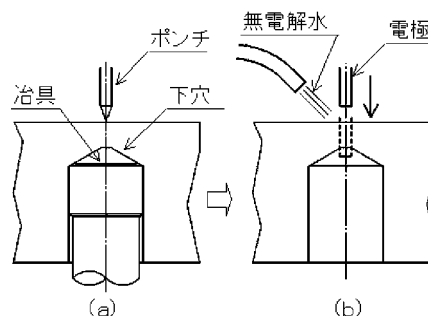


図4 現在の加工方法

IV 開発した精密微小孔放電加工機

1 開発目標

精密微小孔放電加工機(以下、加工機)の開発にあたり、次のような技術的課題が挙げられる。

- ① 加工の自動化と連続運転の実現
加工位置を自動で検出し、穴あけ加工の連続運転を実現すること。
- ② 省スペース化
設置スペースを大きくできないため、現在の放電加工機と同等の大きさ(奥行き $305 \times$ 幅 $545 \times$ 高さ 660mm)であること。
- ③ 保守性の向上
アナログサーボ系からデジタルサーボ系へ制御回路を変更し、使用部品の入手性や保守性を考慮すること。
- ④ 作業効率の向上
操作の簡素化と作業者による加工精度のバラツキをなくすこと。
- ⑤ 加工時間の短縮
現在の加工時間(50秒 \sim 65秒/穴)の短縮、加工工程の削減を実現すること。
- ⑥ 穴位置精度の安定化
下穴中心位置に対し、加工穴中心位置が $\pm 0.01\text{mm}$ 以内であること。

2 加工機の構成

現在の放電加工機と開発した加工機の、機械仕様の

比較を表1に示す。また開発した加工機の構成を図5に示す。

表1 機械仕様の比較

	現在の放電加工機	開発した加工機
X軸移動距離	100mm*	150mm*
Y軸移動距離	125mm*	150mm*
電極移動距離	10mm	50mm
最大ワーク径	φ100	φ130
取付可能電極径	φ0.1~2.0	
大きさ(W×D×H)	305×544×660	650×450×700
質量	80kg	100kg

*現在の加工機の軸構成

- ・X軸：テーブルの左右移動
- ・Y軸：テーブルの前後移動

開発した加工機の軸構成

- ・X軸：テーブルの前後移動
- ・Y軸：テーブルの上下移動

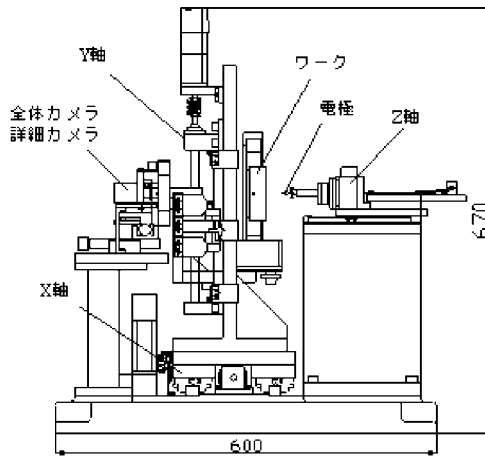


図5 開発した加工機の構成

開発した加工機では、ワークはX-Y軸ステージ上に固定され、Z軸上に取り付けられた電極により穴あけ加工が行われる。なおZ軸モータはリニアモータを使用することで、加工精度の向上および機構の簡略化を実現させた。

加工位置を検出するためには、2台のカメラ（全体カメラ、詳細カメラ）を設け、後述するような画像処理を行って加工位置座標を算出している。加工点に供給する無電解水がカメラへ与える影響を避けるために、加工方向は水平とした。

(1) X軸ベース

X軸ベースは機械剛性と振動減衰性向上のため、鋳物材（FC250）とした。テーブルの駆動は、ACサーボモータに直結されたボールねじの回転により実現し

ている。またガイドブロックとテーブルの間には、シムを挟み、テーブルの水平度、位置精度を調整しながら組み付けを行った（図6参照）。

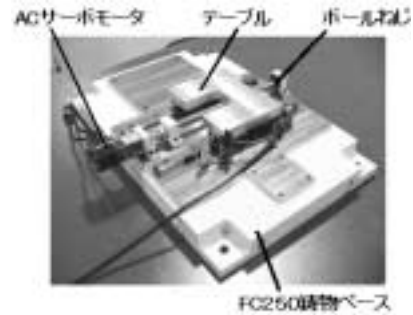


図6 X軸ベースの構造

(2) Y軸ベース

Y軸ベースは機械剛性向上のため、溶接による一体構造とした。穴あけ加工がベース中央で行われるため、左側へACサーボモータを取り付けた。テーブル部は耐水性が必要なためステンレス鋼を用いた（図7参照）。

(3) Z軸コラム

Z軸コラムも機械剛性向上のため、溶接による一体構造とした。アッペ誤差の影響を少なくするとともに、構造の単純化、位置決め精度の向上を目的に電極の駆動にはリニアモータを採用した。またサーボアンプをコラム内に収納することで機械全体のコンパクト化を図っている（図8参照）。

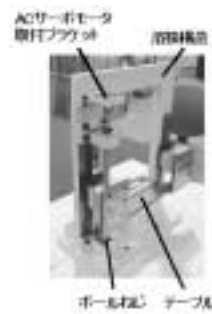


図7 Y軸ベース



図8 Z軸コラム

3 制御システム構成

PLC（三菱製FX2N）にA/D変換ユニット、位置決めユニット、パルス出力ユニット、通信ユニットを接続することで制御システムを構成した。作業者の操作性向上と保守性向上を目的にPLCにはGOTを接続し、各種スイッチ、表示器類をまとめた。加工位置座標を算出する2台のカメラはパソコン（PC）に取り付けられた画像処理ボードに接続されている。（図9参照）

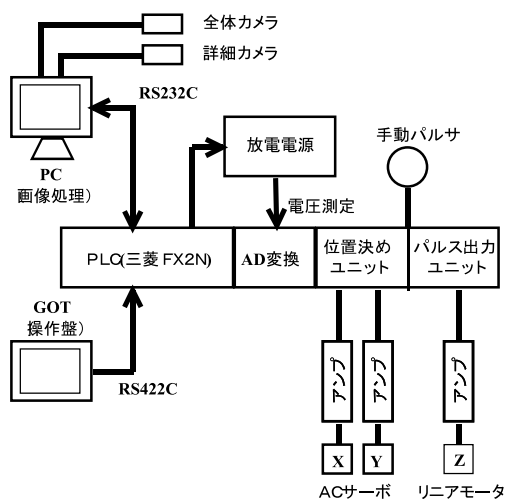


図9 制御システム構成

V 加工方法

1 加工方法

加工方法を図10に示す。ワークと電極間に電圧をかけ、放電作用により加工を行う。加工中は加工点と電極間のすきまが約 $2\mu\text{m}$ になるよう加工電圧をモニタする（開発した加工機では約110V）。サンプリングされた電圧測定値に対しPI演算を行い、電極（リアモータ）にフィードバックして制御を行っている。また加工終了付近では加工電圧を一時的に高くすることで、加工穴の形状精度を向上させている。

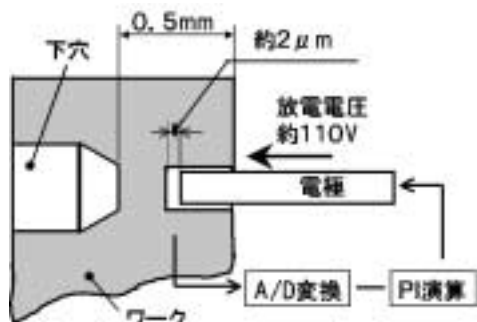


図10 加工方法

2 動作フロー

開発した加工機の動作フローを図11に示す。

まずテーブルに固定されたワークを全体カメラ撮影し全ての下穴位置を検出する。全下穴位置を検出後、テーブルを駆動させ、一つ一つの加工対象の下穴を、加工位置へ移動してから、詳細カメラでさらに下穴を画像認識する。この動作によって正確な加工位置（下穴の中心）を検出する。次に電極とワーク間で放電を

行い、穴あけ加工を行う。加工終了後は次の下穴へ移動し、同様の動作を繰り返すことで、ワークに存在している全ての穴あけ加工を行う。

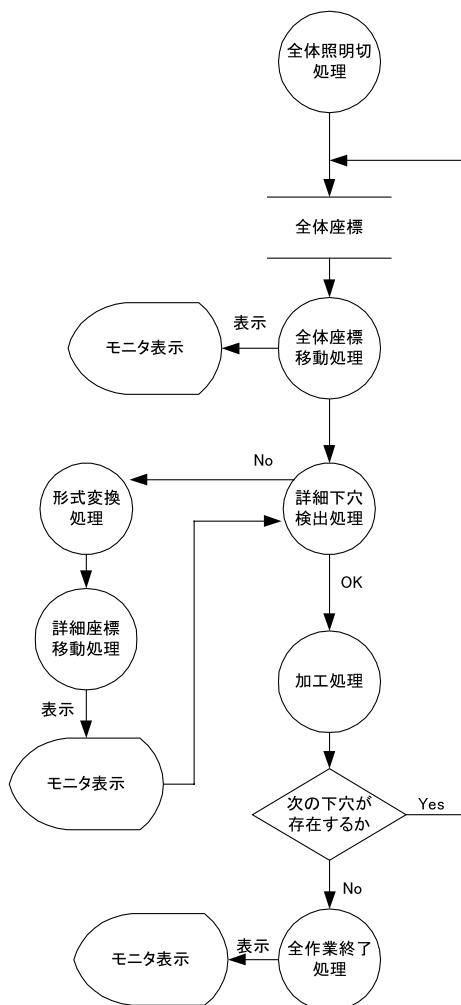


図11 加工機の動作フロー

VI 画像処理の構成

1 機器構成

下穴の検出処理の中心となる画像処理部は、

- ・パソコン：PC/AT互換機（Celeron 1.7GHz）
- ・OS：RedHatLinux7.3
- ・画像処理ボード：（株）日立製作所 IP5005BD-S
- ・詳細カメラ：東京電子工業株式会社 CS8620（マクロレンズ 株式会社モリテックスMML1-65D）
- ・ハロゲン光源 株式会社モリテックスMHF-D100LR 同軸照射照明として利用
- ・全体カメラ：株式会社キーエンス CK-200B（広角レンズ 株式会社キーエンス OP-32936）
- ・リング蛍光灯照明装置 電通産業株式会社

92B-NHF-GLC-DF

・開発言語：C言語（gcc-2.9.6）

の機器で構成している。（図12参照）

全体カメラは、加工対象となるワークの下穴の位置を大まかに検出するために利用する。一方、詳細カメラは下穴の中心を正確に位置決めするために用いる。このため全体カメラは、ワークの取り付け位置付近で、加工対象となるワーク全体が視野に入るように配置し、詳細カメラは、図13に示すように、加工方向（電極）とはワークを挟んで反対の位置に必要な照明類とともに配置している。

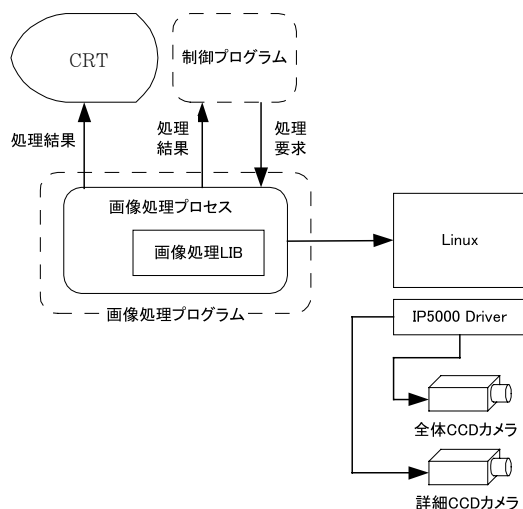


図12 機器構成

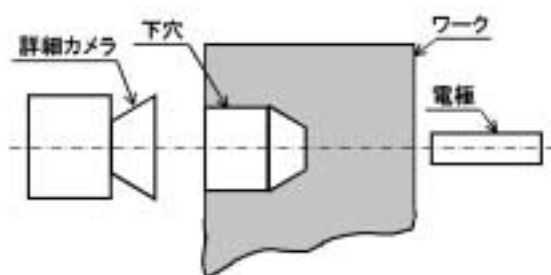


図13 詳細カメラの配置

2 全体カメラ

全体カメラは、加工するワーク上に存在する複数の下穴の位置を検出する。ワークの大きさを考慮して、視野が横方向で150mm程度となるように、ステージの機械原点付近で撮影が可能な場所に設置している。

全体カメラには広角レンズを取り付けているため、ひずみが大きく、画像上から直接下穴の位置を読みとることが困難であるため、あらかじめ用意したφ85の円盤の上に5mm間隔で目印を付けた基準ワークを用いて、キャリブレーション処理を行い、座標データを

補正している⁽¹⁾。

これらのデータを利用して、後述する詳細カメラの視野内に少なくとも下穴の一部が入る位置までの移動をPLCに指示し、ステージを移動する。図14に下穴の検出結果を示す。

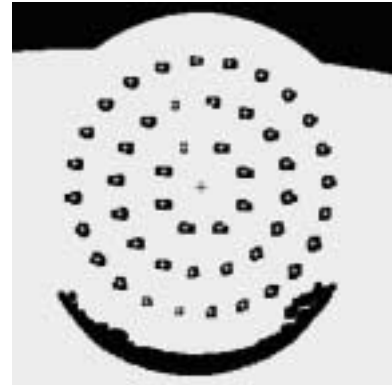


図14 全体カメラで捕らえた下穴の位置

3 詳細カメラ

全体カメラを用いて、大まかな位置決めをした後、詳細カメラを使って下穴の中心位置の正確な位置決めを行う。詳細カメラはマクロレンズ（1倍、WD：65mm、1/2CCD）を利用しているため、視野は3mm程度となり、より詳細な位置決めが期待できる。

4 中心位置の検出方法

全体カメラの画像を用いて、ワーク上の加工穴1つに対して大まかな位置検出を行った後、ステージを加工位置付近にまで移動する。このとき、詳細カメラには、少なくとも加工対象となる穴の一部を捕らえているので、その後、下穴（直径約2mm）の中心を割り出すために、次のような手順で中心位置を検出している。

- ① 視野に捕らえた下穴の位置を濃度分布によって、中心に近い位置に移動する。

具体的には、画像を $n \times n$ の領域に区切り、それぞれの領域ごとに画素値（256階調）の標準偏差を求める。ワーク表面の性状より、下穴部分の標準偏差は、表2のような違いがあることを利用して、画像周辺部分により標準偏差の小さな領域を配置できるように移動することで、視野内で捕らえた穴の一部を中心位置に近い位置まで移動することができる。以上の処理後、詳細カメラの視野内には下穴のほぼ全体が捉えらえることができる。ワーク表面の異なる下穴を撮影した画像から標準偏差を求めた例を表2に示す。

表2 下穴近辺での濃度値の標準偏差

ワーク	下穴内部	周辺部分	下穴以外
ワークA	13.2	11.3	7.6
ワークB	12.5	24.1	4.6
ワークC	11.5	15.7	6.5

② 前述した通り、下穴の中心に放電加工をする必要があるため、視野内に捕らえた下穴の中心から位置を検出する必要がある。

これには、あらかじめ用意した図15のような位置関係で作成した8つのテンプレートを用いて、正規化相関法により、それぞれのテンプレートに対する相関値を求める⁽²⁾。なお、正規化相関は、画像処理ボードIP5000の標準ライブラリを利用しているので、非常に高速な中心位置の検出処理を行うことができる。

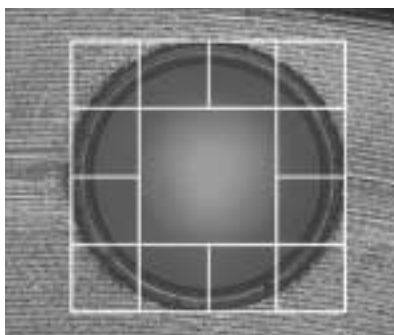


図15 テンプレートの登録位置

③ 用意した8つのテンプレートそれぞれに対して、下穴の周辺に、相関値の大きな位置を見つけることができる。

理想的には、8つのテンプレートが図15の位置関係になる場合の相関値がもっとも大きな値を示すが、表面の性状により、このような関係になることが少ない。これは、ワーク表面に存在している加工痕の影響が大きいため、テンプレートにはマスク処理を行って、周囲の円弧との相関による値を算出している。最終的に8つのテンプレートの、位置のずれが幾何学的に少ない4つから6つのテンプレートの位置から中心を割り出している。

上記の手順で、得られた下穴の中心座標を元に、ステージを加工位置まで移動した後、放電加工が開始される。

VII 開発結果

図16に今回開発した加工機の外観を示す。GOTにより作業者は全操作を行うことができ、操作の簡素化

を実現した。

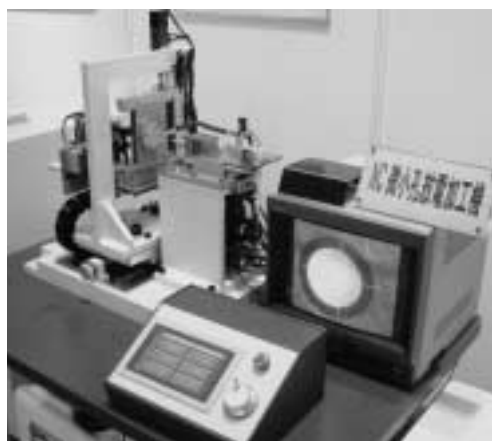


図16 開発した加工機外観

VIII 加工実験および考察

1 実験方法

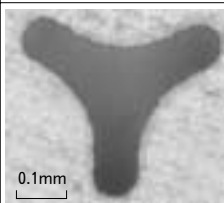
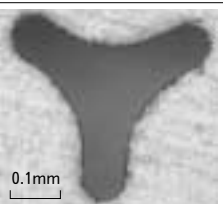
被加工材は、下穴加工済みのステンレス製ワークで加工深さ0.5mmのものを用いた。加工用電極は「Y」型形状を持つタングステン電極で、無電解水をかけながら加工を行った。

2 加工形状評価

表3に現在の放電加工機による場合と、開発した加工機による場合の加工後の穴形状を示す。

現在の放電加工機と比較して開発した加工機は、加工平均電圧が約40V高いが、形状精度はほぼ同等レベルであることがわかる。工具顕微鏡を用い、各部の寸法を測定した結果、製品として問題ない精度で加工できることが分かった。

表3 加工評価実験の結果

	現在の加工機	開発した加工機
材質	ステンレス材 厚さ0.5	
放電電圧	無負荷145V	無負荷180V
	加工平均約70V	加工平均約110V
加工形状		
放電時間	30.76sec	37.22sec
電極送り量	1.1mm	0.8mm

2 中心位置精度

デジタル画像処理機能付顕微鏡（ミットヨMF-A）を用い、図17に示すような下穴中心位置と加工穴中心の誤差（ Δx 、 Δy ）を測定した。測定結果を表4に示す。

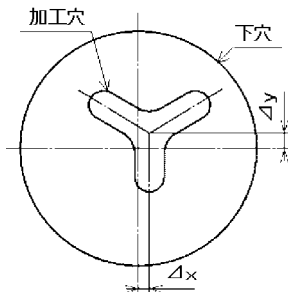


図17 中心位置精度の定義

表4 中心位置精度評価

	現在の放電加工機	開発した加工機
Δx	4.6 μm	59.0 μm
Δy	8.0 μm	109.7 μm

現在の放電加工機に比較して、 Δx 、 Δy ともに大きくなっており、要求精度を満足していない。これを直すためには、電極取り付け方法の見直しや、下穴中心位置検出のアルゴリズムの見直しが考えられた。

3 加工時間評価

現在の放電加工機における穴1個当たりの作業時間と、開発した加工機の作業時間の比較を表5に示す。加工時間が現在の加工方法に比較して長いですが、総加工時間は同等である。これは電極の取り付け精度や送り速度の改善で短縮できると考えられる。

なお開発した加工機では、ポンチ打ち工程を削減することができ、それに伴う待ち時間等が削減できたことで省力化が実現できた。

表5 作業時間の比較

作業者	ポンチ	位置決め	加工時間	待ち時間	合計
A	1.51	9.38	35.10	5.53	51.52
B	1.51	22.02	35.10	10.08	69.71
C	1.51	13.04	35.10	12.06	64.07
加工機	—	7.00	49.00	—	56.00

単位：秒

IX おわりに

本開発により次のような結論を得ることができた。

- (1) 作業者の熟練に依存しない精密微小孔放電加工機の開発を実現した。
- (2) 総加工時間は現在の作業時間と同程度であるが、ポンチ打ち工程を無くすことができるため、省人化を実現することができた。
また今後の課題としては、
 - ① 電極取り付け精度の向上
 - ② 穴あけ加工後の形状検査も同時に行うこと。
 - ③ 大きさ、厚さ、穴数が違うワークに対応できること。
 - ④ 加工速度の向上
 - ⑤ 複数のワークの連続加工（無人運転の実現）
 などが挙げられる。

最後に、本開発に協力していただいた株式会社化繊ノズル製作所様に深く感謝いたします。

[参考文献]

- (1) 井口征士、佐藤宏介著
三次元画像計測 昭晃堂 1990
- (2) 安居院猛、中島正之著
画像情報処理 森北出版 1991