

マイクロ放電加工による微細穴加工技術の開発*

和合 健**、大石 敦彦***、中屋敷 利幸***、鄭 鋼****、菅原 睦*****

プレス加工による $\phi 20\mu\text{m}$ の穴加工の実現を目的として、 $\phi 25\mu\text{m}$ のダイス穴加工に取り組んだ。実験を行った結果、単純Z送り加工では $\phi 25\mu\text{m}$ の穴は実現できるが、入口と出口の径差が $3\mu\text{m}$ と大きく穴径の10%以上となり無視できない。振り下ろし揺動加工法を使用することで入口と出口の径差を縮小することができることがわかったが、効果がみられるのは $\phi 18\mu\text{m}$ 以上の電極（穴径 $28\mu\text{m}$ 以上）である。

キーワード：放電加工、微細穴加工、プレス加工、WEDG

Development of Micro Hole Processing Technology by Micro Electric Discharge Machining

WAGO Takeshi, OISHI Atsuhiko, NAKAYASHIKI Toshiyuki,
TEI Kou and SUGAWARA Mutsumi

Micro hole level as $\phi 25\mu\text{m}$ of die casting was processed through experimental try for the purpose of realization of micro hole processing level as $\phi 20\mu\text{m}$ by press manufacturing. As a result of experimenting, micro hole level as $\phi 25\mu\text{m}$ was processed passing through hole using method of simple Z feed processing, but taper form deviation of hole was $3\mu\text{m}$ as 10% rate of hole diameter so too large. Taper hole deviation of hole was decreased using method of swinging down processing, although the effect had limit that core pole outer diameter more than $\phi 18\mu\text{m}$ (the case of hole inner diameter as $28\mu\text{m}$).

key words : Electric Discharge Machining, Micro hole processing, Press manufacturing, WEDG

1 緒 言

自動車燃料インジェクションノズル、プリンターインクジェットノズル、環境家電イオン噴霧ノズルなど微細穴の要求は多い。現状の微細穴加工製作方法は、主に半導体プロセスによる化学的な方法等により製造されている。化学的製造方法はLIGAプロセスと呼ばれ、リソグラフィ (Lithografie)、電鍍 (Galvanoformung)、モールド (Abformung) の各工程のドイツ語表記の頭文字をとったものである¹⁾。LIGAプロセスは、ナノスケールの極微細な形状を成形できる反面、高額な装置と材料、薬品が必要になり中小企業でその技術を使用することは難しい。汎用的な設備を利用して微細穴加工を行う方法は、切削加工法と放電加工法の二つがあげられる。切削加工法は、実用レベルでは $\phi 0.1\text{mm}$ のエンドミルも市販されているが、切削メカニズムの負荷が過大になり切削力の影響が大きくなるマイクロ領域に切削加工は適さない。その点、放電加工は非接触加工であるため加工力が低減されることと、WEDG (ワイヤ放電研削法) により独自で微細径電極が成形可能であるため、汎用的な微細形状加工に適した加工方法と言える。ここでは、放電加工を使用して $\phi 25\mu\text{m}$ の微細穴を高精度成形するための技術構築に取り

組んだ。

2 実験装置

本研究では、実験装置として三菱電機製微細放電加工機 EDSCAN8E を使用した。微細放電加工機の外観を図 1 に、主な仕様を表 1 に示す。

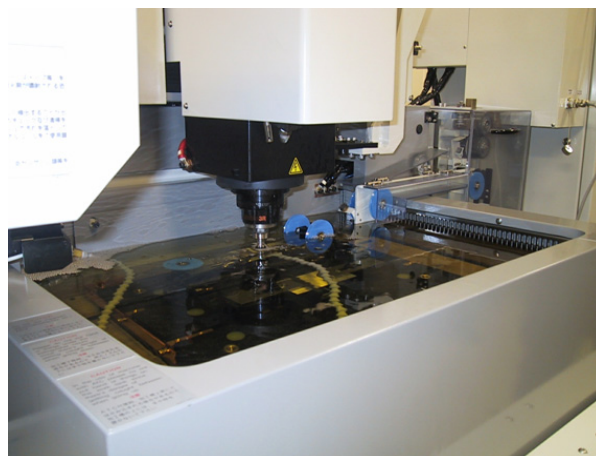


図 1 実験装置外観

* ものづくり基盤技術集積促進事業

** 電子機械技術部

*** 株式会社ミクニ

**** 株式会社ニュートン

***** 岩手大学工学部

表1 EDSCAN8E の主な仕様

項目	仕様
XYZストローク	300×250×250 (mm)
XYZ軸制御方式	リニアスケールフィードバック
XYZ軸駆動単位	0.1 (μm)
特殊機能	WEDG (ワイヤ放電研削法) μSF電源 創成放電CAM
加工面粗さ	0.3 μmRy
加工面真直度	1.0 μm以下

微細放電加工機は微細加工に適する WEDG、μSF 電源を備えている。WEDG は図2に示すとおり棒状電極を回転させ Y 軸及び Z 軸の移動制御によりワイヤ電極で微細径電極を成形する。

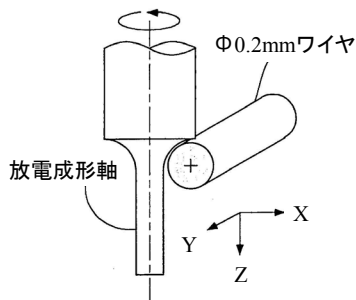


図2 WEDG の原理

3 実験方法

電極材質を超硬として、φ1 mmの丸棒をWEDGにより電極径φ11~20 μmに小径成形し穴加工を実施する。電極径φ11~20 μmでは、一般的な放電電極材料である銅、銅タングステンでは機械的剛性が低く小径成形が難しい。図3にWEDGにて製作した銅タングステン電極を示す。先端が曲がり電極として使用できない状況となっている。よって、ヤング率の大きな材質を使用する必要があり、銅のヤング率 $12.98 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ に対してヤング率が $53.44 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ と4倍である超硬を電極材質として採用した。

また、放電加工機上でのプレス加工を考慮すると電極とパンチを共用するため、超硬を電極材料として使用する必要がある。

図4に製作した最小径φ11 μmの超硬材の電極を示す。図4のとおり、最小径φ11 μm長さ0.7 mmでアスペクト比60の電極が製作可能であることが判った。被削材の材質は、電極と同等の超硬材、厚さ0.16 mmとした。穴加工方法は、図5に示すように単純Z送り加工のみと単純Z送り加工後同一電極による振り下ろし揺動加工をおこなう方法とした。電極回転数は200r.p.m.、電極の送りは、0.1 mm/min.、振り下ろしの揺動量はR5 μmとした。

電気条件は、最弱条件である E855 (RC 回路、浮遊容量のみ、μSF 回路 ON) とした。電極径測定は、放電加工機上で WEDG のワイヤ電極に接触検知させる方法でおこなった。穴径測定は、光学式測定器 (三鷹光器製 NH-3SP) で透過光による照明にて測定した。

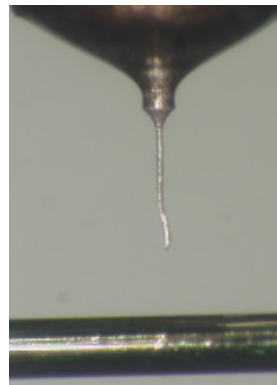


図3 銅タングステン



図4 超硬

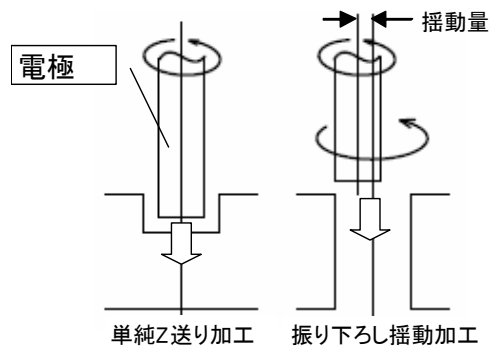


図5 加工方法

4 実験結果及び考察

4-1 単純Z送り加工の場合

図6に、単純Z送り加工の場合の電極径と穴径の関係を示す。電極径に対し、比例的に穴径が変化していることがわかる。これから、電極径と穴径の差である放電ギャップが電極径にかかわらず一定であることが判る。また、入口と出口の穴径差が電極径にかかわらず一定であることがわかる。図6から穴径の影響を除き、電極径と放電ギャップの関係のみを抽出し図7に示した。図7から放電ギャップは、入口径と電極径の差の約1/2であり、電極径にかかわらず約4 μmと一定であることがわかる。

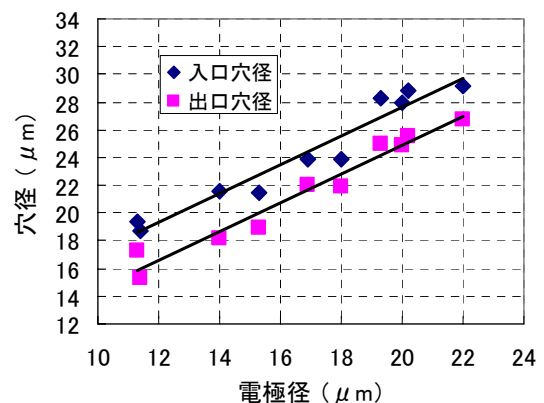


図6 電極径と穴径 (Z 単純送り加工法)

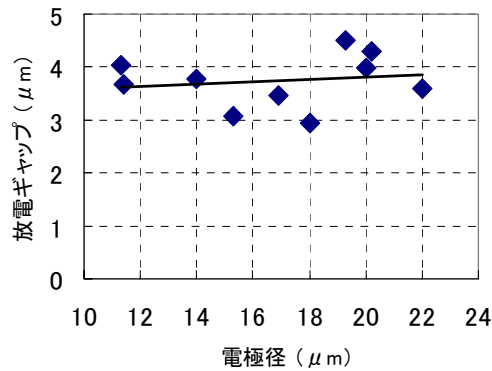


図7 電極径と放電ギャップ (Z 単純送り加工法)

図6から穴径の入口と出口の径差の関係を抽出し、図8に示す。入口と出口の径差は、電極径にかかわらず約3μmと一定であることがわかる。以上により、電極径を調整することにより目標の穴径が得られることがわかった。しかし、入口と出口の径差が0.16mmの長さで3μm程度発生しており、φ20μm程度の穴では無視できない数値といえる。この径差の原因は、加工穴上部に滞留した加工クズにより穴側面で2次放電が発生するためである。

図9に単純Z送り加工の場合の電極消耗比を示す。

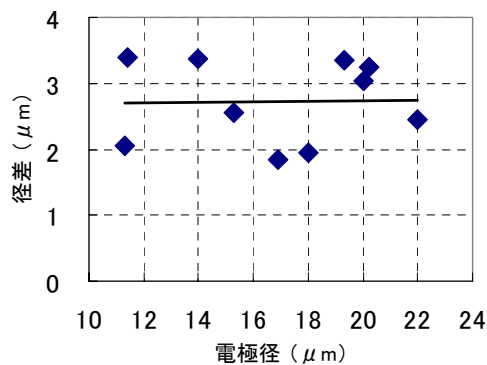


図8 電極径による入口と出口の径差 (Z 単純送り加工法)

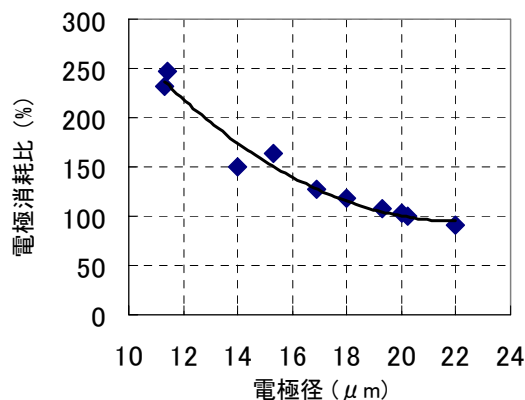


図9 電極径と電極消耗率

電極消耗比は式(1)により算出した。

$$\text{電極消耗率 (\%)} = \frac{\text{電極消耗長さ}}{\text{工作物加工深さ}} \times 100 \quad (1)$$

電極消耗率 100%は、深さ 1mm の穴加工終了時に長さ 1mm の電極が消失した状態をいう。図9より、電極径が小さくなると2次曲線的に電極消耗比が大きくなることがわかる。電極径φ11μmでは、電極消耗比は250%となり、工作物加工深さの2.5倍の電極が消耗することになる。電極径φ11μmでは、電極長さ0.7mmがWEGD成形限界であることが実験でわかっていることから、電極径11μmで穴加工できる加工深さは、 $(0.7\text{mm}/250\%) \times 100$ の算出式より0.2mm程度ということがわかった。

4-2 単純Z送り加工後振り下ろし揺動加工の場合

入出口穴径差の縮小を狙い、単純Z送り加工後同一電極で揺動量R3μmとする振り下ろし揺動加工を実施した。図10に単純Z送り加工後振り下ろし揺動加工の場合の電極径と穴径の関係を示す。振り下ろし揺動加工の場合、電極径と穴径の関係は単純Z送りの時のような比例的变化ではなく、2次曲線的に変化している。図11に示した加工方法の違いによる入口径の比較では電極径18μmを基点として、電極径が小さくするにしたがい単純Z送り時の穴径との差が広がっている。これは、電極径が18μmより小さくなると揺動加工による径拡大量が大きくなることを示している。

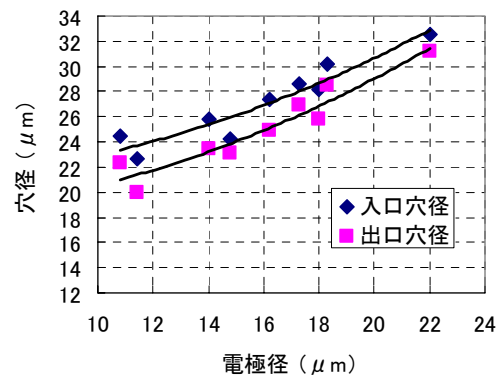


図10 電極径と穴径 (振り下ろし加工法)

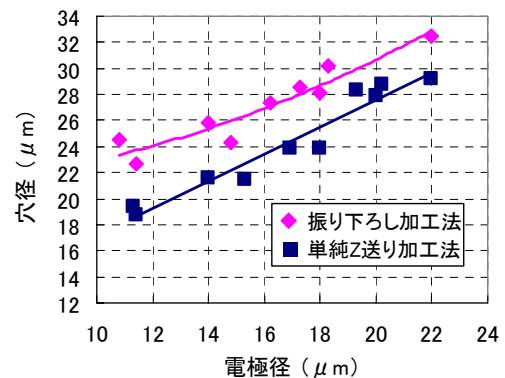


図11 入口径比較

図12に、電極径と放電ギャップの関係を示す。放電ギャップは揺動量を加味し、入口穴径と電極径の差の1/2から揺動量 $3\mu\text{m}$ を引いたものとした。電極径が $18\mu\text{m}$ より小さくなると、放電ギャップが急激に大きくなっていることがわかる。これにより、電極径 $18\mu\text{m}$ より小さい範囲で、揺動加工による径拡大が大きくなる。この理由は振り下ろし加工では電極側面での放電加工となり、電極が加工材料に引き寄せられる引張力が働く。電極径が小さくなると、この引張力により先端にたわみが発生する。このたわみが振れとなり、穴径を大きくしているものと推定した。また、電極径 $\phi 22\mu\text{m}$ では放電ギャップ量が $2\mu\text{m}$ となり、単純Z送り時の1/2に縮小した。この理由は、単純Z送り加工後に振り下ろし加工を実施したため、貫通穴に加工することになり、穴内の加工くずの排出が促進されたためと考察される。

図13に、電極径と入口と出口の穴径差の関係を示す。穴径差は、電極径が小さくなるほど大きくなる傾向がみられる。電極径 $\phi 11\mu\text{m}$ では、入出口径差は $2.5\mu\text{m}$ となり、単純Z送り加工時と同等となり、振り下ろし加工実施による径差改善効果はみられない。この理由についても、前述のとおり放電引張力による電極の振れと考察される。電極径が $18\mu\text{m}$ より大きくなると、径差は $2\mu\text{m}$ 以下と単純Z送り加工時より小さくなり振り下ろし加工実施による径差改善効果が確認された。

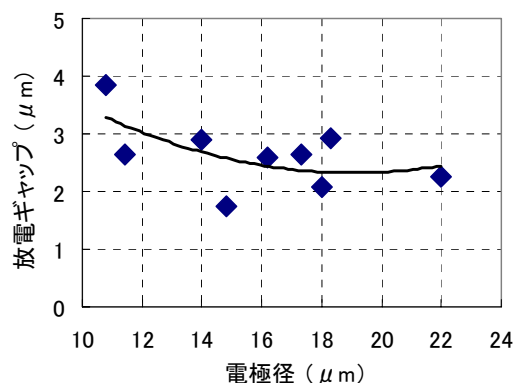


図12 電極径と放電ギャップ（振り下ろし加工法）

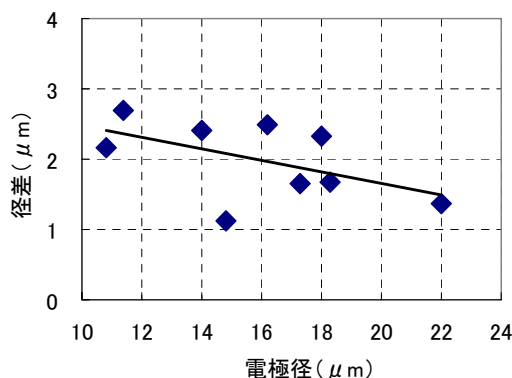


図13 電極径による入口と出口の径差（振り下ろし加工法）

4-3 揺動量をパラメータとした場合

揺動量をパラメータとして、 $\phi 20\mu\text{m}$ の電極にて穴加工を行った。加工方法は、揺動量が $0\mu\text{m}$ は単純Z送り加工、揺動量が $3\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$ は単純Z送り加工後同一電極にて振り下ろし揺動加工を実施した。

図14に揺動量と穴径の関係を示す。出口穴径は揺動量に応じて、比例的に穴径が変化していくのに対し、入口穴径は2次曲線的に変化している。揺動量が $0\mu\text{m}$ の単純Z送り加工では穴入口部は電極に対して $\phi 8\mu\text{m}$ 程度大きくなりこの場合の放電ギャップは片側 $4\mu\text{m}$ である。揺動量 $3\mu\text{m}$ では加工量が小さくなり、図14のように穴径が小さくなった。揺動量が $3\mu\text{m}$ では放電ギャップを考慮すると穴径は $34\mu\text{m}$ と予想したが $31\mu\text{m}$ となった。揺動量 $3\mu\text{m}$ では、入口部でほとんど加工が行われず出口付近でのみ加工が行われていると考察される。図15に示した揺動量と入出口径差は、揺動量 $3\mu\text{m}$ で、 $2\mu\text{m}$ 以下に改善されるものの、揺動量 $5\mu\text{m}$ では $4.5\mu\text{m}$ と揺動量 $0\mu\text{m}$ の時より大きくなっている。これは放電現象で生じる特異な引張力によるものと考えられ、ここでは揺動量 $3\mu\text{m}$ で良好な結果を示した。

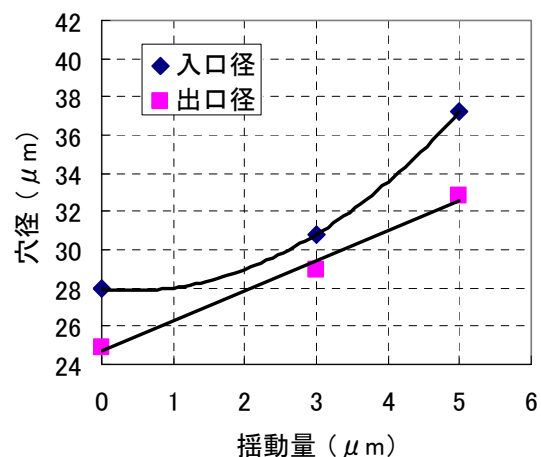


図14 揺動量と穴径

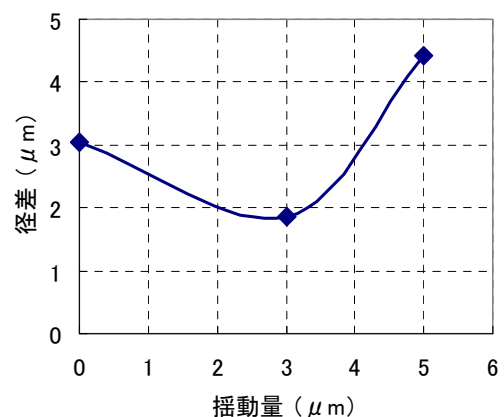


図15 揺動量による入口と出口の径差

図 16 に揺動量 $5\mu\text{m}$ 加工後の電極の 300 倍 SEM 画像を示す。図 16 より電極がテーパ形状に消耗しているのがわかる。この電極のテーパ状の消耗は、穴入口部で加工量が大きいいため大きな消耗が発生し、加工出口付近では電極と加工材料のギャップが大きくなり加工量が小さくなったため、入口と出口の径差が発生するものと考察される。

4-4 穴入口部の SEM 観察

穴入口部の加工形状について、SEM 画像により観察を行った。図 17 に各揺動量毎の穴入口部の 2,000 倍 SEM 画像を示す。 $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度の溶融バリが入口部に発生しているのがわかる。揺動量を増やしていくと加工バリが小さくなるのがわかる。穴内部の面性状は、放電特有のうろこ状になっているが、揺動加工を実施することにより、面性状が改善されていることがわかる。

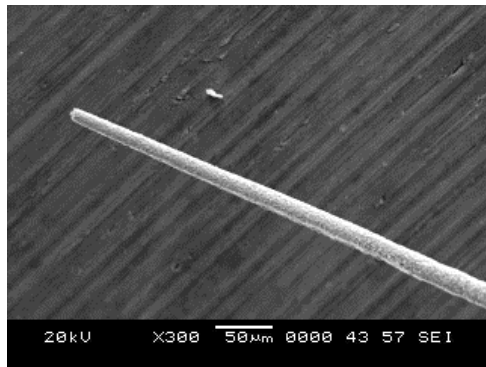
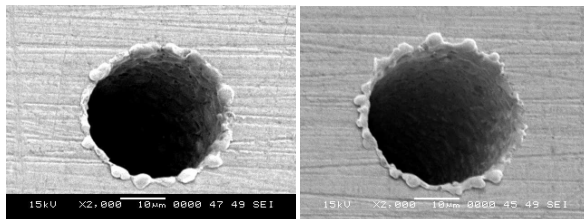
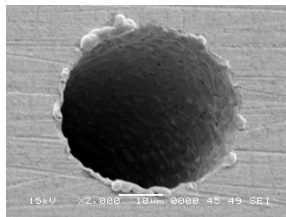


図 16 揺動量 $5\mu\text{m}$ 加工後の電極



揺動量 $0\mu\text{m}$ (単純 Z 送りのみ)

揺動量 $3\mu\text{m}$



揺動量 $5\mu\text{m}$

図 17 穴入口部 SEM 画像

5 結 言

本研究により次のことが明らかになった。

- 1) $\phi 20\mu\text{m}$ の WEDG 電極成形では超硬材が適しており、一般的な電極材料である銅タンは先曲がりが生じ機械的剛性が不足する。
- 2) 単純 Z 送り加工では、電極径がかわっても放電ギャップは約 $4\mu\text{m}$ で一定であり、電極径の寸法を制御することで穴径の寸法制御が可能である。
- 3) 単純 Z 送り加工では、加工くずの排出の悪さにより入口と出口の穴径差が $\phi 3\mu\text{m}$ 程度発生する。
- 4) 入口と出口の穴径差を解決手法として、電極径 $18\mu\text{m}$ 以上では、単純 Z 送り加工後同一電極で振り下ろし加工が有効である。揺動量 $3\mu\text{m}$ では、入口と出口の穴径差が $2\mu\text{m}$ 以下に改善できる。電極径 $18\mu\text{m}$ 以下では、電極の剛性不足により効果みられない。
- 5) 揺動量 $5\mu\text{m}$ では、穴入口部で加工量が大きいいため電極が先細りテーパ形状となり、入口と出口穴径差が揺動量 $3\mu\text{m}$ のときより大きくなる。
- 6) 穴入口部には、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度の溶融バリが発生する。振り下ろし加工の揺動量を増やすことにより、溶融バリが低減することがわかった。また、穴内部の面性状改善にも効果があることがわかった。

本研究の目的は、プレス加工による $\phi 20\mu\text{m}$ の穴加工の実現である。 $\phi 20\mu\text{m}$ のプレス加工に必要なダイス穴径は $\phi 25\mu\text{m}$ である。今回の実験によると、単純 Z 送り加工でも $\phi 25\mu\text{m}$ の穴が実現できる。しかし、入口と出口の径差が $3\mu\text{m}$ と大きく穴径の 10% 以上となり無視できない。振り下ろし揺動加工により、この径差を縮小することができることがわかったが効果がみられるのは $\phi 18\mu\text{m}$ 以上の電極 (穴径 $28\mu\text{m}$ 以上) である。よって、 $\phi 18\mu\text{m}$ 以下の電極による入口と出口の穴径差低減が今後の課題である。

文 献

- 1) 中島 尚正, 梅田 章: LIGA プロセス, 日刊工業新聞社 (1998)
- 2) 増沢 隆久: やさしいマイクロ加工技術, 日刊工業新聞社 (2000)