電解放電穴あけに関する基礎的実験*

榊 田 勝 実**, 加 藤 隆 一***
石 川 広 美***, 長 沼 朗****

Experimental Studies on the Drilling With an Electrolyte Discharge System

Katsumi SAKAKIDA, Ryuichi KATO,
Hiromi ISHIKAWA, and Akira NAGANUMA

The electrolyte discharge system where an electrolyte is provided from a nozzle and the machining is performed by a tool at the center of the nozzle is prepared. In this system, an onset of the machining under a thin fluid depth is possible, although a higher voltage than that in the previous system with an electrolytic cell is necessary. In the drilling of glass, a high voltage is obtained for a positive polarity compared with that for a negative one. Therefore, the removal rate is high and the taper of the machined hole is small. The supply of square wave DC brings an increase in the voltage and a noticeable improvement of the removal rate.

Key Words: Nontraditional Processing, Electrolyte Discharge System, Machining, Nonconducting Materials, Glass

1. ま え が き

電解液を用いる電解加工, 絶縁液を使用する放電加工などが, 金属の加工に対して広く行われている。

一方, 電解液中の放電を利用して, 非導電体の加工を行おうとする試みもなされ, 実際にダイヤモンドダイスの穴あけに利用されているという⁽¹⁾。Kurafuji らも, このことを紹介している。そして精度を向上させるために装置を改良し, ガラスに微小な円すい状の穴を加工する詳細な実験を行い, ルビーやダイヤモンドなどの硬質材料への応用の可能性を述べている⁽²⁾。

Kurafuji らが, 直径 0.1 および 0.2 mm の細線の先端を円すい状に加工した電極を用いたのに対し, Cook らは, 約 1.6 mm という太い電極をそのまま使用し, ガラスや花こう岩, その他の材料に穴を加工する研究を行っている⁽³⁾。本研究では微小穴加工に近い, 直径 0.3 および 0.4 mm の工具電極を用いて比較的深い穴あけを試みた。

先に述べた二例の研究⁽²⁾⁽³⁾では, 電解槽を使用して

おり, 被加工物は液面下, 数 mm の深さに置かれている。Kurafuji らは, この深さが浅いほど好適であろうと予想しているが, あまり浅すぎると放電中に液が加工面から逃げて, 加工が中断されることを指摘し, 深さ 1 mm で実験している。本実験では, この予想を参考にして, ノズルから電解液を加工面に供給し, ノズル中央に置かれた電極から放電させる方法をとっている。

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概略を示す。工具電極は他方の極板(銅板)の上に置かれた加工物に軽く接触している。圧縮窒素によって加圧された電解液は, ノズルを通り工具を包みながら流れる。加工物に達した電解液は, 電極を中心に放射状に流れ, 下の電極に到達して流れ落ちる。電圧を徐々に上げてゆくと, 放電火花が発生するようになり, 条件がよければ穴あけが進行する。下の極板には, 工具が貫通した時の短絡を防止するために径 10 mm の穴があけられている。

電源は直流で方形波も発生でき, いずれも 0~300 V の間で設定可能である。方形波は周波数およびデューティ比を変えることができる。

電解液としては, 主に NaOH を用い, その他

* 昭和 61 年 9 月 28 日 北海道支部第 28 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 2 月 7 日。

** 正員, 秋田大学鉱山学部 (〒010 秋田市手形学園町 1-1)。

*** 秋田大学鉱山学部。

**** イトー鑄造(株) (〒010 秋田市川尻町字大川反 170-73)。

NaCl, KNO_3 も試みた。工具用電極には、銅やタングステンなども用いてみたが後に述べる理由から、ほとんど白金線を使用した。

供試材は、25 mm の正方形で厚さ 5 mm の普通板ガラスである。

3. 実験結果および考察

3.1 直流電源による加工

3.1.1 電解液 図 2 は濃度 18 wt % の NaOH および NaCl, KNO_3 を電解液として用いたときの加工時間に対する加工量の変化である。工具は直径 0.4 mm の白金線で、極性は正である。またノズル内径はおよそ 0.7 mm, 溶液加圧力は約 0.1 MPa である。NaOH が他に比べて加工能力が大きいことがわかる。モル濃度では NaOH (5.0 mol/L), NaCl (3.4 mol/L), KNO_3 (2.0 mol/L) となり、一応、濃度順になっている。しかしながら、加工電圧は NaOH が 125 V に対し、NaCl と KNO_3 は 2 倍の 250 V で、どうにか比較可能になっており、ひかえめに見ても NaOH の加工

性能は極めて大きい。ちなみに、同図に対応する加工深さは、NaOH では約 15 分で 5 mm 厚さを貫通しているのに対し、他の二種では 16 分で 0.2 mm 程度である。前にあげた研究⁽²⁾⁽³⁾でも、ガラスの加工には NaOH が優れているようである。この理由は、まだ明らかとはいえず、また他の材料に対しても有効であるかどうかは現在のところ、よくわからないが、ダイヤモンドに対しては、 KNO_3 が適しているとのことである⁽¹⁾。

なお、電解槽を用いた例よりは、本装置の場合、火花放電開始電圧は高くなっている。これは主に形成する回路、特に電解液の電気抵抗が大きくなるためであろう。実際、液の加圧力を上げていくと、火花は工具先端に集中するようになりついには火花は消失し、放電を再発させるには、さらに印加電圧を高くする必要が生じる。加圧力を上げると電解液の流出速度が増加し、ガラス表面上の液膜の厚さが減少するのが一因である。しかしながら、これは加工の初期についていえることで、ある程度深くなってくると、穴からの噴出液のため加圧力を上げた割には、液膜厚さは薄くはならない。にもかかわらず、加圧力の影響はそれほど小さくはならない。工具表面における流速も、放電電圧に関係するようである。したがって、加圧力は電解液流速の目安としての意味が強い。

3.1.2 工具の極性の影響 図 3 には NaOH, 濃度 5.0 mol/L, 加工電圧 125 V, 溶液加圧力 0.1 MPa の条件のもとで、工具の極性を変えたときの加工深さと加工時間の関係を示す。工具側を正にしたほうが負の場合に比較し、かなり加工速度が大きいことがわかる。このように工具が正の場合、加工能率が良好な反面、電解反応により工具が溶出する極性でもある。工具に銅の細線を用いた場合は、時には熱による損傷も

図 1 実験装置の概略図

図 2 電解液の比較

図 3 加工深さと工具の極性

加わり極めて消耗が激しく、加工には適さなかった。タングステンは銅ほどではないが、やはり溶出は無視できず、先端が円すい状に消耗した。しかし負にした場合は、支障はなかった。試みた範囲では白金線が安定であり、電解反応による溶出も観察できるほどのものではなかった。ここに示した結果は、すべて白金線を用いたものである。

図4は、図3で得られた結果を、縦軸に加工量、横軸に加工深さをとって表したものである。この図から、およその加工精度を推定できると思われる。すなわち、同一加工深さに対し、加工量が少なければ精度のよい加工がなされたと考えられる。したがって、ここでいう精度とは、工具の太さにどの程度近い穴が加工されたかということを意味している。以下でもこの限定された意味で用いている。工具が負極性の場合、加工初期では比較的良好に加工が進むが、穴が深くなるにしたがい工具側面での放電が激しくなり、一方工具先端からの放電も減少する。そのため、穴あけ速度が低下するとともに、加工深さに対する加工量の割合は大になる。結果として、テーパの大きな穴が加工される。工具が正の場合も、もちろん工具側面からの放電は生じるが、先端からの放電も継続し、穴あけが進行する。

工具を負にした場合は、正に比較して低い電圧で火花放電を開始する。放電中の電流の変動も少なく、火花の安定性もよい。工具の溶出がないことは大きな長所である。加工初期で、加工性能はかなりよいので、みぞ削りなど表面の加工には適するかも知れない。反面、印加可能な電圧も低い。それ以上の電圧では、突発的に高輝度の大きな放電が生じて、加工物が割れること（異常放電と仮称する）がしばしば生じるようになる。工具先端は溶融して球状になる。

図4 加工量と加工深さ

ガラスの穴あけでは、工具を正極にするほうが高い電圧を印加することが可能であり、それだけ加工速度を上げることができる。また精度のよい穴が加工される傾向が大きい。

(a)

(b)

(c)

図5 電解液濃度の影響

なお、火花放電中は、諸条件を変えても電流の変化は小さく、およそ1~1.5 Aの範囲であるが、工具が負のほうで電流は大きくなる傾向がある。

3・1・3 加工速度に及ぼす電解液濃度の影響 図5に、各電解液濃度に対し、加工電圧を変えた時の加工深さと加工時間の関係を示す。工具の極性は正である。図(a)は、2.5 mol/Lの場合である。この濃度では、125 V未満では測定できるほどの加工は見られなかった。125 V、150 Vでは放電火花は観察できなかったが、微小ながらも加工が進行しているのがわかる。穴の内面は、火花放電状態のものに比べると極めて滑らかであった。確認できないほど小さな、火花放電によるものか、あるいは化学的な作用によるものか、今のところ不明である。もし、加工機構に化学的作用が関与しているとすれば、加工対象によって、より適合性のよい電解質を選定できる可能性がある。

175 Vでは、加工開始後4分前後まで火花を発生し、穴あけが順調に進むが、加工深さが2 mmぐらいになると図に示すように、加工速度は著しく減少する。これは、初期の段階では工具先端に放電が集中して穴あけが進むが、それにつれて工具側面からも放電するようになる。ある深さになると導電面積の増加に伴う電流密度の減少のため放電火花が消失してしまうことが大きな原因である。ちょうど125 Vや150 Vの例と同様の状態になってくる。このように、工具側面からの放電が重大な障害となっている。工具側面に耐熱性の高い安定な絶縁薄膜を施すことができれば、テーパの減少とともに、加工速度も大きく改善されることが期待できる。

200 Vでは、5 mmのガラス板を貫通するまで火花放電が持続している。図(b)は濃度5.0 mol/Lの結果である。2.5 mol/Lでは微少な加工しか示さなかった125 Vでも、この場合は貫通しており、濃度の影響が大きいことがわかる。図(c)の7.5 mol/Lでは、さらに低い100 Vでも順調に穴あけが行われ、5 mm以上でも可能なことを示している。

加工速度が極めて小さい状態から貫通可能な状態に移る印加電圧の差は小さく、図3の例では25 V程度であり、この傾向は濃度の大きいほど敏感であることがわかる。

加工が継続した例として、濃度2.5 mol/L、5.0 mol/L、7.5 mol/Lに対して、それぞれ200 V、125 V、100 Vの例を示した。これ以上の電圧でも加工できないこともなかったが、放電の規模が大きくなり、穴径が大きくなるだけでなく、仕上面も劣化した。また、加工中、電解液の流れに変化が生じたりすると、異常放

電を誘発し加工物が割れる頻度が高くなった。

NaOHの場合、室温ではおよそ5 mol/L付近で電導度は最大となるが⁽⁴⁾、図5は室温での電導度には直接影響されず、濃度が大きいほど低電圧で加工可能なことを示している。

3・2 方形波電源による加工 3・1・3項で述べたように、加工速度は印加電圧にかなり敏感である。しかし、濃度によって加え得る電圧には限度があり、これが加工速度を増大させるための一つの妨げとなっている。適度の電圧であれば、加工の不安定時になんらかの原因で電気抵抗が減少し、電流が増加しても、ただちに安定状態に回復するが、電圧が高すぎると、そのまま暴走してしまうというのが異常放電の大きな原因と考えられる。だとすれば断続的な電圧を加えることによってある程度、抑止できる可能性がある。そこで、チョッパ回路を通して直流方形波電圧を加えた。工具は直径0.3 mm、ノズル内径は約0.6 mmである。

図6は40 Hz、パルス幅7 ms (デューティ比, 0.28)、濃度5.0 mol/Lの例で、印加電圧ごとに整理したものである。工具径や加圧力などが異なるので単純に比較できないが、図3(b)で最大印加電圧が125 Vであったのが、図6では170 Vに達している。加工速度も大幅に改善されている。電圧が高い割には、表面の荒れかたや精度低下は少なかった。

図7は40 Hz、パルス幅8 ms (デューティ比, 0.32)、電圧150 Vの条件で、ガラス板5 mmを貫通する時間と、電解液加圧力Pとの関係を示したものである。加圧力が増加すると、加工速度は減少する傾向が見られる。図の5.0 mol/L、0.09 MPaが図5(b)の貫通例にだいたい相当するが、電圧が高いせいもあり、およそ2.5倍の平均速度を示している。濃度が7.0

図6 方形波電源による加工例

mol/L の場合は、さらに著しく改善されている。

電圧の高さだけが、加工速度を左右しているわけではないのもちろんである。図示していないが、周波数および電圧が一定の場合、デューティ比が大きくなると加工速度も増加するので、大きな加工速度を望む場合は、異常放電が生じない範囲でデューティ比を大きくすることになる。ただ、デューティ比が大になると若干であるが精度が低下する傾向が見られた。デューティ比が0.75以上になると、異常放電の生じる機会が多くなった。周波数もまた加工速度に影響する。デューティ比を一定に保ち、周波数を上げてゆくと加工速度が減少する傾向があり、特にデューティ比が小さい場合は、かなり大きく現われる。ガラスの穴あけではおよそ20~50 Hzの範囲が適当なようである。

図8(a)は、図7に対応するもので、加工量の変化を示してある。加圧力が大きくなると、加工速度は減少するが、加工量も減少し精度がよくなる傾向が見られる。

3.3 加工穴の状態 前に述べたように工具側面からの放電が、テーパ穴になる主要因である。したがって、過度に加工時間が長びくとテーパは大きくなる。また、異常放電を誘発しやすい条件では、いわゆる

図7 加工時間と電解液加圧力 P の関係

(a) 加工量と電解液加圧力 P の関係

(b)

(c)

(d)

図8 加工量と穴の形状

荒削りの状態を呈するので、時間が比較的短くてもやはりテーパは大きくなることが多い。図8(b)は、図8(a)の5.0 mol/L, 0.07 MPaで加工された穴の断面の一例である。下方に一部、滑らかな内壁が見られるが、大部分は工具側面からの放電のため仕上面は劣下している。貫通時には、ガラス下面に回り込んだ電解液に比較的大きな放電が起こるため、割れが生じている。これは、貫通が近くなった際に電圧を下げてやることにより、ある程度避けることができる。

同図(c), (d)は、加工量から平均直径を求め、ガラス板下面の穴径がおよそ0.6 mm内外なることを考慮して描いた、穴形状の概略図である。それぞれ図(a)のsおよびl点に相当し、s点の平均直径は $D_s \approx 1.1$ mm, l点では $D_l \approx 1.4$ mmである。図は完全なテーパとして描いたものであるが、同じ拡大率の写真(b)と略図(c)は、かなり近い形状であることがわかる。実際、形状の概略を推定するには十分であった。濃度が高く、かつ加圧力が小さいl点では、テーパの大きな穴が加工されている。

4. む す び

直流および、直流方形波電源を用いて、普通板ガラスに電解放電穴あけを試みた。結果を要約すれば次のようになる。

- (1) 試みた範囲では、ガラスの加工にはNaOHが好適であった。
- (2) 穴あけでは、工具が正極性のほうが、高電圧が印加できるので加工能力が大になる。またテーパが小さく、細い穴が加工される傾向が大きい。
- (3) 加工速度は、初期には大きく、加工の進行とともに小さくなる。この傾向は濃度が小さいほど大きい。
- (4) 加工能力は、常温における電解液の電導度と

直接には関係なく、濃度とともに増大する。

厚くお礼申しあげる。

(5) 方形波電源を用いると、印加電圧を高くすることができ、加工速度が大きくなる。

(6) 工具が負極性の場合は低電圧で放電開始するが、正の場合より電流は大きくなる傾向がある。

本研究の一部は、昭和 54 年度文部省科学研究費、および 55 年度秋田大学鉱山学部鉱業博物館後援会の助成のもとに行われた。深く謝意を表す。

また、本学学生であった、副島 力、および濱崎浩二、片瀬成明、熊谷友市の諸氏に負うところ大である。

文 献

- (1) 例えば、田中・津和、精密工作法、(昭 33)、496、共立出版。
伊東編、特殊加工および処理、(昭 45)、210、誠文堂新光社。
- (2) Kurafuji, H. and Suda, K., *Annals of the C. I. R. P.*, **16**-4(1968), 415.
- (3) Cook, N. H., ほか 3 名, *Trans. ASME, Ser. B*, **95**-4(1973), 945.
- (4) 例えば、緒方、電気計測とその実習、(昭 47)、97、昭晃堂。

討 論

〔質問〕 豊 山 晃〔長岡技術科学大学〕

この加工法はどのような物理現象と考えられるか。

〔回答〕 顕微鏡観察によると、溶融と微小割れが認められる。耐熱性の高いアルミナセラミックスに対しては、加工速度がかなり小さいので、ガラスの加工

においては、熱衝撃による微小割れよりも、溶融現象が支配的であろうと、現段階では考えている。もちろん、ほかの物理現象も関連していると思われるが、確かめるまでには至っていない。