研 究 速 報
特 集 14
UDC 621.91.048

微小深穴の放電加工

Electrodischarge Machining of Deep Microholes

藤 野 正 俊*・増 沢 隆 久*・塚 本 純 一*・郭　佳 儱*
Masatoshi FUJINO, Takahisa MASUZAWA, Jun-ichi TSUKAMOTO and Chia-Lung KUO

1. は じ め に

各種の金型，部品の生産において，直径0.1mm前後の微細な穴加工が必要とされることが多くなっている．これらの微細穴のうち，深さ/直径（以下1/dと表記）が小さいものについては多くの適用可能な加工方法があるが，1/dが10ぐらいの深穴では，実現が困難なことが多い．放電加工も例外ではなく，従来の放電加工液中では1/dが5を超えると加工屑，加工液の熱分解などによる生成物の排除が困難となり加工が不安定となる．

本研究では，加工液を分解生成物の影響が最も少ないと思われる純水とし，加工方法を加工屑の排除が行いやすいと考えられる横方向加工で微細深穴の加工を試みた．

2. 実験方法および加工装置

純水は，イオン交換樹脂を通るループを常に循環させて比抵抗をH_2Oの理論限界値に近く保ち，バルブにより一部分岐して取り出すことで，加工部での比抵抗を10^7 Ωcm程度の値に保つことが出来る．加工装置は図1のような形で，WEDG法[1)]により電極を成形し，その場で穴加工を行う．加工方向は水平で，工作物面に沿って加工位置に向け純水を勢いよく流しかけた．

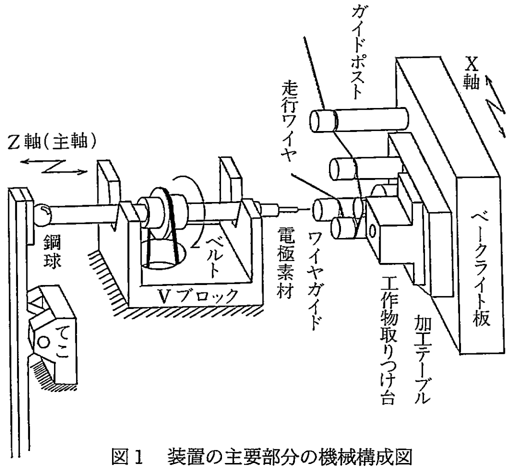

図1　装置の主要部分の機械構成図

電極材料は超硬合金とし図2に示す円断面電極と太鼓状断面電極を使用した．工作物としては厚さ1mmのSK5の焼入材とSUS304を用いた．加工電源はRC回路で，開放電圧80Vである．コンデンサ容量は47pF（SK5のみ），100pF，470pF（SK5のときは330pF），1000pFとした．穴加工時および円断面電極の外径加工と先端部加工時は，電極を3000rpmで回転させた．

3. 実 験 結 果

3.1　純水による横加工の効果

上記のような方法で実験を行った結果，加工は極めて安定で，深穴加工性も優れていることがわかった．図3は灯油中での縦加工と加工進行状況を比較したものである．灯油中の例は工作物がS45Cであるため，やや適性さを欠くが，傾向としてはこの図で判断しても大きな違いはないであろう．すなわち，純水中では著しく加工速度が大きく，しかも送り深さが電極径の10倍を超えても安定な加工が継続できる．灯油中では直径の5倍を超えると不安定となり，図からはわからないが，電極消耗が激

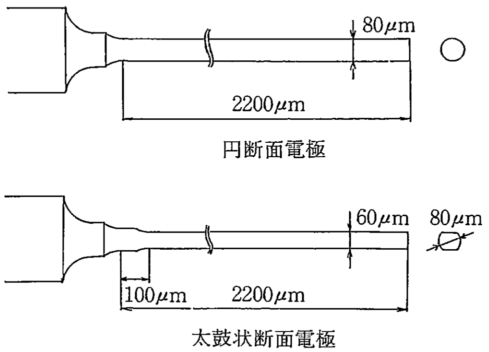

図2　微細深穴加工用電極形状

*東京大学生産技術研究所　第2部

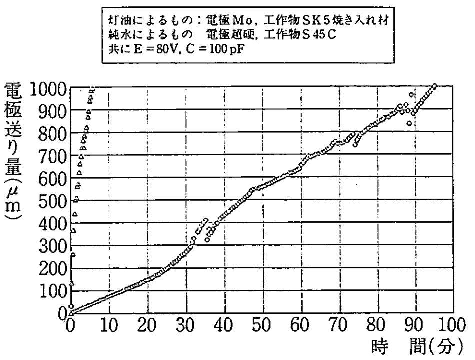

図3　灯油と純水の加工進行状況の比較

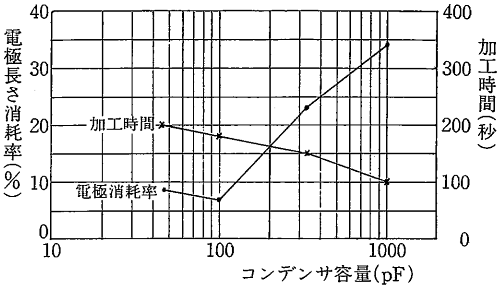

図4　貫通穴加工時の電極消耗率と加工時間

増して，穴深さとして電極径の10倍まで加工することは困難である．

3.2　円断面電極による加工特性

図4にSK5の加工特性を示す．加工速度は加工容量が大きくなるほど大きくなっている．加工容量が100pFのときでおよそ3分で貫通し，灯油とは比較にならないほど高い実用性を示した．電極消耗率は47pF，100pFで10％以下となり，これより大きい条件では増加する．同一電気条件で，より小寸法の加工をする場合は，除去量が少ないため，さらに加工時間は短縮する．直径40μmの電極で，500μmの板厚を貫通加工するのに要した時間は25秒程度であった．

図5はSUS304の加工特性で，各7回の加工を行った結果である．SK5のとき良好な加工特性を示した加工容量100pFでは，加工深さが400μm程度まで進行するとハンティングを起こし，加工が安定せず加工不能となることが多かった．図からわかるように，100pFでは1回しか貫通加工を行えず，加工時間も27分ほどでSK5の9倍程度要している．470pFでは貫通したのが6回，加工時間は平均で13分，1000pFでは3回で，平均20分となり加工容量は小さいほど良い，あるいは大きいほど良いという訳ではなく，穴の形状寸法に最も適した大きさが存在するようである．電極消耗率は加工容量が100pFで23％とSK5よりかなり多くなっているがこれより大きな条件ではほぼ同程度となっている．

3.3　異形状電極の効果

深穴加工では加工屑の排除が悪くなり，加工の安定性を低下させるのが普通である．WEDG法による電極成形では異形状の成形も容易に出来ることを利用して，太鼓状断面電極を成形し比較実験を行った．

図6にSK5の加工進行状況曲線を示す．円断面電極では電極送り量が500μmほどで，加工進行状況曲線の傾きが小さくなり加工速度が低下しているのがわかる．太鼓状断面の電極ではスムーズに加工が進行し加工屑の排除が順調に行われているものと考えられる．加工時間2分程度で貫通穴加工が行える．

図7はSUS304の太鼓状断面電極と円断面電極の加工特性を比較したものである．貫通回数，加工時間共，電極断面形状の効果はほとんど認められない．

以上の結果から，SK5では実用にたえうる加工特性を示した．しかし，SUS304では深穴加工の可能性は示したものの，貫通率，加工時間，電極消耗率などの点で問題を残している．

ここで，水を加工液として使用する場合は電解現象の

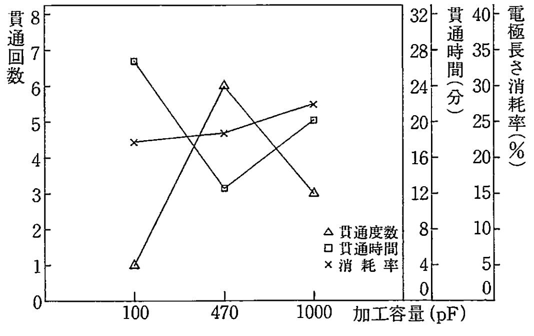

図5　SUS304の加工特性

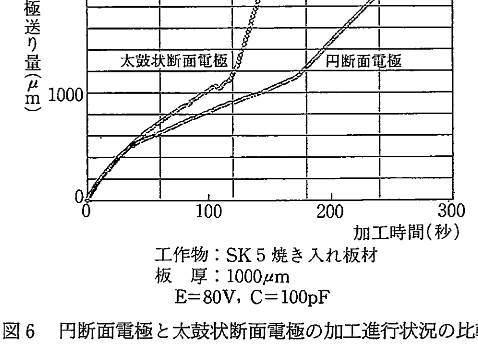

図6　円断面電極と太鼓状断面電極の加工進行状況の比較

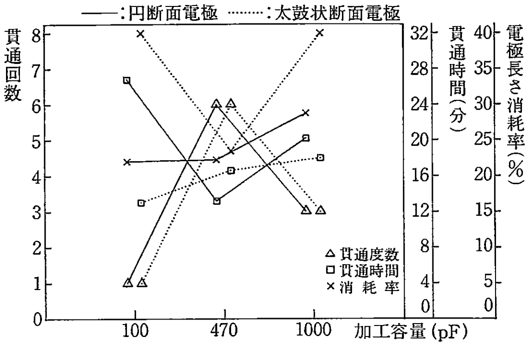

図7　SUS304の加工特性の比較

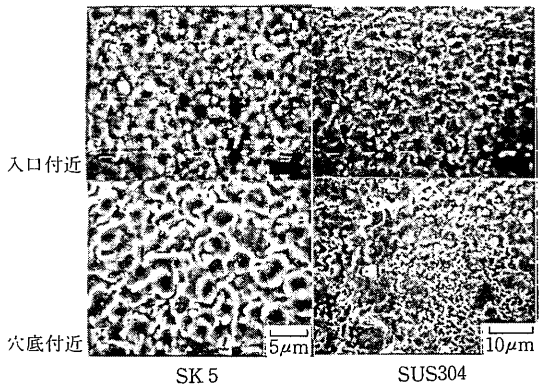

図8　穴内面の加工性状

影響が懸念される．そこで，穴加工した後の内面をSEMにより観察することとした．本実験で得られる加工穴は微小であるため加工後これを二つに割ることは非常に難しい．そこで，研削した7mm厚の加工材2枚を合わせ，この合わせ面に加工することとした．加工深さは電極送り量で1200μmとした．

図8にSEM像を示す．図からわかるように，SK5では入口付近，穴底付近とも放電によるクレータで覆われており，電解現象の影響は少ないものと考えられる．しかし，SUS304では入口付近は放電のクレータで覆われているものの，穴底付近では放電のクレータが見られないため，電解現象が起こっている可能性が十分考えられる．これは，加工時間が長いことと，新しい加工液が穴底部まで到達しにくく穴底部で加工液が汚れ，純水の純度が低下したものと考えられる．

電極の回転，加工方向を水平にすることなどは，それぞれ一定の効果はあるようであるが，まだフラッシングが不充分であることは以上の結果からも明らかである．そこで，新たなフラッシング法を提案する．

4．付加容量を用いた放電圧フラッシング

4.1　付加容量によるフラッシングの考え方

一般に加工屑の排除は電極ジャンプなどの方法で対処しているが，微細穴では底面積が小さいためジャンプ速度を極端に高めない限りその効果は小さい．

図9によって，微細穴加工におけるこの効果を少し考察してみる．放電によるフラッシング効果は一般に放電エネルギが大きい方が大きいと考えられる．そこで，図9a．のように，コンデンサ容量が小さい場合は充分なフラッシング効果は得られず，穴底に加工生成物が停滞してしまう．一方図9b．のように，コンデンサ容量を大きくした場合は，たしかに放電による爆発力は大きいが，その反面，放電間隙は一般にコンデンサ容量が大きいほど大きいため，発生した圧力が充分な液流を誘起できず，フラッシング効果が減少してしまうとも考えられる．そこでここでは，次のような方法を提案する．

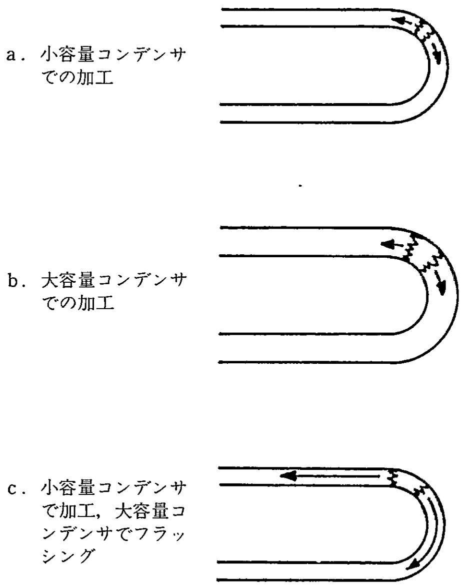

図9　微細穴加工における放電圧力によるフラッシング状態

まず，小さいコンデンサ容量によって加工を行う．したがって放電間隙は小さい状態にある．もし加工途中で進行状況が悪化したら，図9c．のように直ちに大容量コンデンサより放電を発生させる．この場合は放電間隙が小さいので，大エネルギ放電のフラッシング効果が充分発揮されるはずである．こうしてフラッシングを行ったら再び小容量コンデンサによる加工を継続する．

これと同様の考え方は，一般の形彫り放電加工の放電安定性維持の手法としてde Bruynが提案している[2]．彼

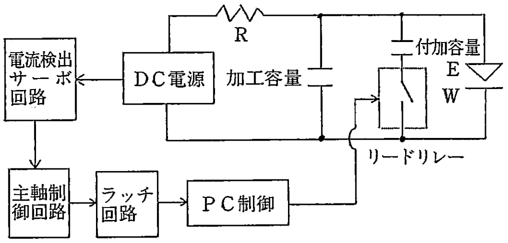

図10　加工回路

の手法は放電状態が異常になったら単一大電流放電パルスを発生させ異常点を排除するというものであるが，RC放電回路にそのまま適用するのは困難である．本研究では，上述のような状況を実現するのに，加工用コンデンサ（以下加工容量とする）と別に，フラッシング用コンデンサ（以下付加容量とする）を用意し，加工状態が悪化したら加工容量に並列に付加容量を接続して，大エネルギ放電を発生させることにした．

4．2　付加容量を用いた実験，およびその結果

図10に付加容量の接続および駆動方法を示す．電極送り込み方向の位置を1秒ごとに検出し，前回の位置より進んでいない場合は放電不良であるとみなし，リードリレーを駆動して付加容量を接続する．接続は0.1秒間だけ維持した後解除する．

加工容量を100pFで一定とし，付加容量を用いない場合，付加容量が470pFの場合，同じく1000pFの場合について，前節同様の加工実験を行った結果を図11に示す．図11(a)から明らかなように，付加容量を用いると貫通率が顕著に改善される．また，付加容量が大きいほどその効果も大きい．図11(b)(c)の加工時間，電極消耗率でも付加容量によって顕著に改善されている．

付加容量の効果は円断面電極のみならず太鼓状断面電極にも表れている．付加容量を用いた場合のみで比較すると太鼓断面電極の方が円断面電極よりクリアランスに関して良い結果が得られた(図11(d))．その他の点ではほぼ同等と見ることが出来る．

加工容量470pF付加容量1000pFの場合は，貫通率100%が実現でき，加工時間も改善され安定な加工を行うことができた．

4．3　加工穴内面の観察

付加容量を用いる方法は，大エネルギ放電が随時発生するため，穴内面の表面性状に悪影響を与えることが懸念される．そこで付加容量を用いた場合と用いない場合の加工内面をSEMにより観察比較してみた．少なくともSEM像の目視観察による限りでは，両者には違いが認められなかった．この理由は，実際に付加容量が接続されている時間が，長くても全加工時間の数%であることと，付加容量による放電が主として電極先端部に発生し，それによるクレータは通常の放電により除去され消失するためと推察される．

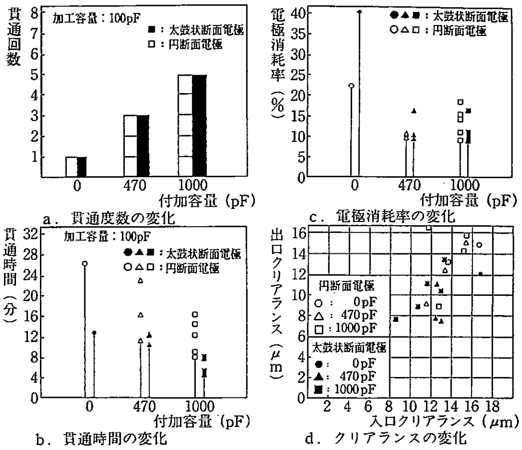

図11　付加容量による加工特性の変化（加工容量100pF）

5．ま　と　め

SK5では，純水を加工液とした横放電加工によって，従来困難とされてきた放電による深穴の加工が，高速高精度で実現されることがわかった．特に，太鼓状断面電極を使用すると板厚1mmにϕ0.1mmの穴をおよそ2分で貫通加工することができた．また，円断面電極で板厚0.5mmにϕ50μmでは25秒程度と十分実用にたえうる高速加工が可能となった．

SUS304では付加容量を使用することにより瞬時大エネルギ放電を発生することで，加工の安定性が促進されることがわかった．これにより，板厚1mmのSUS304にϕ0.1mmの微小穴を約10分で貫通加工することができた．また，付加容量接続時間や付加容量値など可変パラメータがいくつかあるので，さらに最適な条件を追及することで，加工時間などの加工特性について改善をはかることは可能であると考えられる．　(1990年4月2日受理)

参考文献

1)　増沢，藤野，金沢，家富；精密工学会春季講演論文(昭和62年) 735
2)　H.E. de Bruyn; Proc. of ISEM7 (1983) 77