

特集 4

放電微細加工の問題点

Problems in Micro-Machining by EDM

増 沢 隆 久*

Takahisa MASUZAWA

放電加工の微細加工への適性が最近になって認識されはじめ、応用範囲が急激に拡大されようとしている。そこで、放電による微細加工技術の現状と今後の可能性、およびそれに関わる問題点について微小穴加工を中心に概観してみる。

1. 緒 論

近年、電子部品、光学部品、ノズル等さまざまな対象に微細加工を行う要求が増大している。それらのうちあるものは従来通りの加工方法、例えば、ドリルによる穴あけなどで要求を満たすことができるが、被加工材質や加工精度、返りを嫌う等の理由で加工不能とされる場合も多い。そのような時、放電加工を利用することができれば問題が解決するケースがかなりあるものと推察される。実際、10年程前までは微細加工には縁のないものとさえ考えられていた放電加工も、研究、開発の進んだ現在では微細加工の有力な手段の一つとも言えるほどであり、生産プロセスの中での利用価値も充分高いと考えられる。

しかし、微細加工への適用が考えられるようになってからの日も浅く、放電加工自体も切削のような機械的加工法に比べ研究の進捗が浅く、理想的な加工の実現からは程遠い面もある。そこでここではいろいろな面から放電微細加工の到達点と問題点を整理すると共に、生産システムへの導入の可能性を示してみる。

2. 放電加工における微細加工の位置および普通加工との相違

「微細加工」という言葉の定義はまだ一般的なものがないが、ここでは「微小な寸法の形状を得る加工」とし、「微小な寸法」としては普通のボール盤などではあまり加工しない0.5 mm以下を想定して話を進めることにする。また、微細加工にも穴加工、溝加工、表面加工などが考えられるが、代表的なものとして穴加工について述べる。

微細加工が放電加工の分野で占める位置は放電加工の進歩と共に大きく変ってきた。30年ほど前我国でこの技術が取上げられてしばらくは電源パルスが不適当であったために工具電極（以下単に電極という）の消耗が激しく、電極の形状を転写するこの加工法として

は高い精度は得られなかった。そのため微細加工には到底利用できそうもなかった。その後研究が進み、あら加工での電極消耗は著しく改善され、精密加工にも徐々に使われるようになったが、微細加工には初期のイメージがたたってなかなか目が向けられなかった。しかし、ソ連などでは比較的早くから（1960ごろ）微細加工への応用に目をつけ研究が始められた。¹⁾ 数年後我国でも微細加工の研究が着手され、微小パルスの放電で電極消耗が小さくなることがわかって²⁾ から次第に実用化の道が開けてきた。現在では専用機もかなり製造されるに至っており、大型、中型の加工機による型加工などと並び微細加工が放電加工の中で一つの重要な分野を形づくるまでになっている。

放電微細加工は主として二つの方式で行われる。一つは普通の形彫りと同じ方式で寸法のみが小さいもの、他方は張力をかけた細い針金電極により糸鋸のようにくり抜き加工をするもの（ワイヤカット方式）であるが（図1）、除去機構は同じである。その他、電解液中

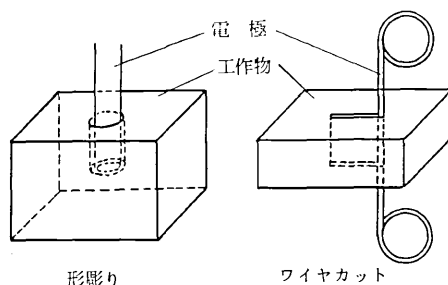


図1 放電微細加工の方式

で行なう非金属の放電加工や、気中高電圧で行なうダイヤモンドの放電加工などでも微細加工が可能であるが、³⁾⁴⁾ 金属の加工とは機構が異なるので本文では割愛する。

以下特に断らない限り型彫り式の微細加工について述べるが、考え方はおおむねワイヤカット方式にも適用できる。

微細加工の普通の寸法の放電加工との基本的な違いは電極寸法が小さいこと、放電パルスが小さいことであ

* 東京大学生産技術研究所 第2部

る。この二つの違いによって様々な技術上の問題が生じ、加工可能とするために多くの研究が必要となってくる。

以下に問題点を加工回路、電極、電極送り制御と加工くずの処理の3項目に分けてやや詳しく述べる。

3. 加工回路

放電加工ではパルス状のアーク放電によってちょうどキツキが穴をほる時のように少しずつ工作物を除去していく。そこで1回の放電パルスにより除去される量が大きければ加工面のあらさが大きく、1回の除去量が小さければあらさも小さい。加工面あらさは加工寸法より充分小さくしなければならないから、微細加工を行うには非常に加工面あらさの小くなる条件で加工しなければならない。そのためには放電パルス1回で極間に放出されるエネルギーを非常に小さくする必要がある。RC回路(後述)によるコンデンサ放電の場合の容量と加工面あらさの関係の一例を図2に示す。

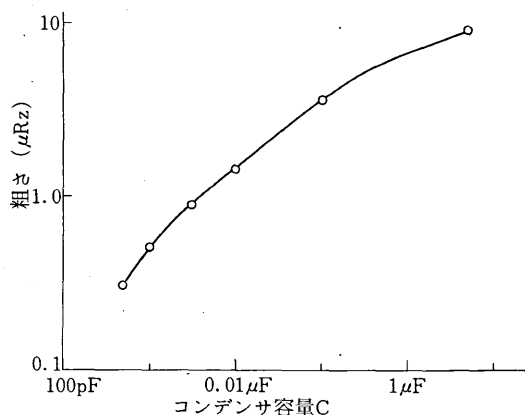


図2 コンデンサ容量と加工面あらさの関係
(電源電圧 100V, 工作物 STi20)

放出エネルギーは $\int_0^{\tau} v i dt$ (v : 極間電圧, i : 放電電流, t : 放電開始後の時間, τ : 放電持続時間) であるが、極間電圧は普通の電極材料、加工液の場合20V前後で、電流値による影響は少ないので、 $\int_0^{\tau} i dt$ を小さくすれば加工面あらさを小さくできる。図2を見ると例えば0.3μmのあらさで加工するには1回の放電パルスの電流量を約0.05μCにすればよいことがわかる。

微細加工を行うために $\int_0^{\tau} i dt$ を小さくするには i を小さくすることと τ を小さくすることが考えられる。しかしアーク放電を起させるために、 i はピークで1Aぐらい必要となるので、 τ を小さくする以外に方法はない。0.3μmのあらさを得るために0.05μCとするには短形波でパルス幅0.05μs以下となり、それほど容易ではなくなってくる。

このようにパルス幅の小さいパルスを得るために適しているのがRC回路と言われるもので、放電加工の

最初に用いられた回路である。トランジスタ回路の発達と共に普通の加工領域ではあまり用いられなくなったが、微細加工では依然として有力である。回路は図3のようにごく単純で、極間距離を適当に保つことにより図4のような電圧、電流波形で放電を繰返す。こ

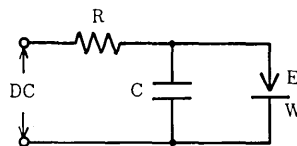


図3 RC回路

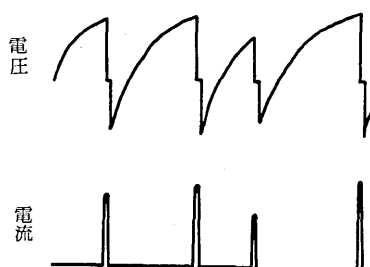


図5 RC回路の電流、電圧波形

の回路ではnsオーダーのごく短いパルスでも容易に発生させることができる。欠点は電圧波形からわかるように放電の繰返しが時定数RCの影響を受け、しかもRをあまり小さくすると持続アークとなってしまう加工ができなくなるためduty factorを大きくできないことである。そこで少しずつトランジスタのスイッチングによる短形波発生回路にとって代られつつある。

しかし、どこまでパルスを小さくできるか、という点ではRC回路が最も優れている。図5aに示すよう

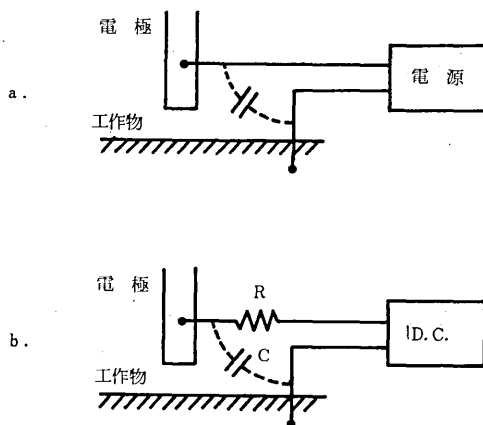


図5 浮遊容量の影響とRC回路での利用

に、電極と工作物の間およびリード線間にはその形状

に応じて必ずいくらかの浮遊容量が存在するため、どのようなパルス電源をつないでもそれにこの浮遊容量の放電が重畳されてしまう。RC回路では図5bのようにコンデンサとしてこの浮遊容量を利用することができ、しかもRを電極の近くにつけることによりリード線間の容量を切り離すことも可能なため1pF以下の容量さえも実現できる。

浮遊容量の限界は極間の静電容量であり、例えば直径100 μ の円形面とし、距離1 μ で灯油中で対向しているとすると、灯油の比誘電率を2とすれば約0.14pFとなり、充分小さい。

次に、どのような加工回路を用いる場合も重要なのは放電電流路（リード線が主である）のインダクタンスで、これをLとすると、電流の立上りが $\frac{di}{dt} = \frac{V-u}{L}$ （V：電源電圧，RC回路ではコンデンサ端子電圧，u：極間電圧）となるので、パルス幅が小さくLが大きいと電流ピーク値を大きくできない。例として仮にV=100V，u=20V，L=0.5 μ Hとすると、 $\frac{di}{dt} = 1.6 \times 10^8$ A/sであり、1Aまで立上るのに6ns必要となりパルス幅をそれ以上小さくできない。RC回路では放電開始後Vが変化（減少）するのでさらに厳しくなる。電流波形は計算で求まる⁶⁾がここでは省略する。微細加工を行うために電源回路は作ったが、電極と工作物に接続する線を延々数mも引張って失敗したという例は多い。

トランジスタを用いた回路では普通のスイッチング式（パルス発振器を用いるもの）でパルス幅0.08 μ sまで小さくした例がある。⁷⁾

以上、加工回路としては微細加工の全範囲にわたって要求に応え得るものが現状で可能であると言える。

4. 電 極

パルスを小さくすることと並んで、電極の寸法が小さくなるのが微細加工の条件である。放電加工では原則として加工された形状は電極の寸法よりわずかに大きくなるので例えば100 $\mu\phi$ の加工をするなら100 μ より小さい径の電極で加工しなければならない。

電極に関して最大の問題点はその製作である。

最も容易に製作できると思われる丸穴加工用の電極について考えてみる。微小穴を加工するにはまず必要な直径としなければならないが、これは各種の線引きされた細線を利用することにより解決できる。材質としては銅、タングステン、鉄、銀など、特別融点の低いもの以外の大部分の金属が使用可能なので選択の範囲は広い。

次にこの細線を真直ぐにする必要がある。これがなかなか難しく、加熱して張力を加えるのが比較的確実であるが、均一に加熱することが容易でなく、張力を加えると直径が変化する。

もう一つの大きな問題は細い電極を保持することである。100 $\mu\phi$ 以下ともなるとなかなか適当な方法が無い。実験室的には張力をかけて真直ぐにしてから切断し、チャックできる太さの銅線にハンダ付けして一応加工可能となるが、最終的に送り方向に平行度良く電極が取付けられた状態を実現するのは容易なことではない。

さらに考慮すべき事は、ドリルなどに比べれば桁違いに小さいが加工中気泡などにより電極に力が加わることである。そのため電極の長さはなるべく短くしなければならぬ。例えば銅電極なら0.1mm ϕ で5mmぐらい、0.05mm ϕ で2mmぐらいより小さくしないと放電が不安定になりやすいし、穴径が大きくなってしまう。⁸⁾このことは電極保持をますます困難にする。

以上のように細いうえに短い電極を真直度良く、送り方向への平行度良くチャックした状態をいかに簡単に歩止り良く実現するかは放電微細加工を生産加工に適用するための最大の問題点の一つである。もっとも電極材料の選択の自由度は大きいし、切刃を成形する必要もないのでドリルによる微細加工に比べれば工具としてはむしろ容易であろう。

その他、10年ほど前までは電極が細くなると電極消耗が大きくて使いものにならないのではないかと考えられてきたが、放電パルスを小さくすると電極消耗が小さくなることがわかり、3で述べたように微細加工では必然的に放電パルスを小さくするので実用化の大きな支障ではなくなった。

5. 電極送り制御と加工くずの処理

放電1回のパルスのエネルギーを小さくしていくと電極と工作物の間隙（極間距離）はだんだん小さくなる。⁸⁾⁹⁾ただし極間距離は電極の端面と側面で異なり、端面については正確な値は不明であるが、多くの実験から微細加工の領域では1~2 μ 以下にもなると推察される。普通の加工領域では数 μ ~数十 μ と言われており、微細加工ではそれに比べ著しく小さい。従って電極送り制御もそれだけ高い性能を要求される。特に1~2 μ 行きすぎれば短絡してしまうわけであるから、送りの滑らかさが強く要求される。モータサーボによる送りなどはバックラッシュや慣性等の影響が大きくあまり適当でない。微細加工用の特に滑らかな送り装置も研究され、0.003 μ /secという極微小送り装置なども発表されている。⁹⁾

一方、微細加工のように加工面積が小さい場合、放電の繰返し数が小さくなってしまふ現象がある（面積効果と呼ばれる）。これが電極の送り制御と大きな関係があり、可動コイル式のように応答の速い機構により繰返し数増大効果があらわれる。¹⁰⁾面積効果と送り制御との関係は主に加工くずを通じてのものと考えられる

が詳細は明らかになっていない。

また加工深さが大きい時に加工くずの処理が特に重要であり、放置すれば底にたまった加工くずにより短絡を繰返すばかりで加工が進行しなくなる。応答の速い機構では短絡時の急速な引上げ、送り込みにより加工液の流動がおり、加工くず流出を促す効果もあるようである。

上述のことから滑らかでかつ応答の速い送り制御系が微細加工に適しているように思われるが、加工液の制御等と併せて今後さらに検討する必要がある。

6. 加工精度および寸法の限界

放電加工で微細加工を行った時、どのくらいの精度で加工できるかは重要な問題である。テーブルの精度や加工機本体の剛性等により決まるもの（位置決め精度など）は除き、どのくらい精度良く電極形状が工作物に転写されるかを考える。

転写の精度に関する主要素としては電極消耗と極間距離が挙げられる。

電極消耗があると図6に示すように加工中に電極が消耗して形が変ってしまうことになり、工作物には加工後の電極形状の方が転写されるのでそれだけ精度が悪くなる。電極消耗は曲率の大きい部分ほど大きくなるようである。

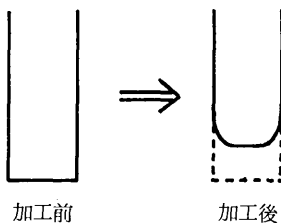


図6 電極の消耗

次に、電極と工作物の間には必ずすきまがあり、そのため電極消耗が全く無いとしても図7のように加工された寸法がその分だけ大きくなると共に、隅部は丸みを帯びる。

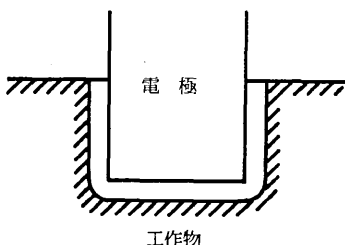


図7 極間距離の影響

これらの精度低下は重なり合っておくが、貫通穴の加工と止り穴の加工で分けて考えてみる。

まず貫通穴の場合は図8のように電極を充分送り込んでやることにより電極消耗の影響は大部分除くことができる。しかし極間のすきまの影響は除くことができず、断面寸法が大きくなると同時に円形断面以外では隅部が丸味を帯びる（図8上面図）。このすきまおよび丸味の半径は、電圧を下げパルスを小さくすることにより微細加工域では普通数 μ 程度になる。

貫通穴のもう一つの問題は穴の入口と出口の径が異

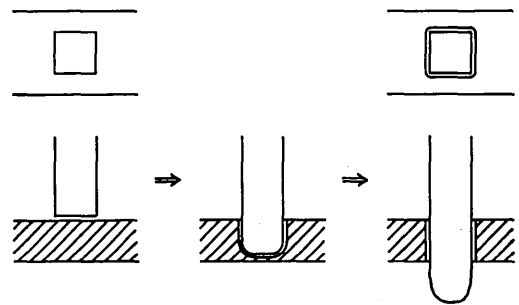


図8 貫通穴の加工精度（角穴の加工）

ることで、約 60μ の穴加工の例では入口の方が直径で 2μ 程度大きくなった。⁸⁾これは後述のように電極先端が貫通する前と後で極間の条件が異なるためと考えられる。

止り穴の場合は電極消耗の影響が除けないため精度は複雑に低下する。列举すると、1) 穴の深さが電極消耗長さ一端面極間距離だけ小さくなる。2) 深さ方向の形状は隅部が丸味を帯びる。3) 断面寸法が側面極間距離一電極消耗分だけ大きくなる。4) 断面形状は隅部が丸味を帯びる。などである。電極消耗は端面の方が側面より大きい。又、側面の消耗は端面に近い部分の方が大きい。

貫通穴、止り穴共通に現れるものとして図9のように入口の形状の不規則な変化がある。これは放電部位で生じた加工くずが極間から流出する時、不均一な流れとなってすきまを通過するために濃度の大きい部分で不要な放電が起り外壁を余分に加工してしまうためと思われる。貫通穴での入口、出口径の相違も、貫通前に極間に多量に存在する加工くずにより側壁の余分な加工が起り、貫通後は加工くず排出が極めて良くなり側面の極間距離が急激に小さくなるためであろう。

以上のような精度低下を防ぐには、できるだけ消耗の少ない電極材料を用いることと、極間距離を小さくするために必要以上に高い電圧をかけず、加工くず排出を均一に、かつ良好に行うことである。

消耗の少ない電極としてはタングステンが 0.11mm の

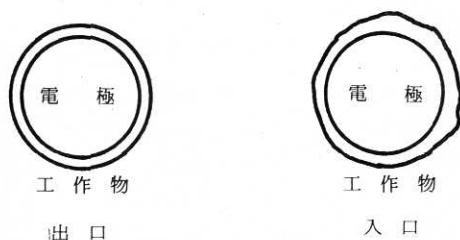


図9 貫通穴での入口形状の悪化

とき超硬合金に対し8%ぐらい、0.8% C炭素鋼に対し測定不能ぐらいの微小な長さ消耗率で、微細加工に適している。

極間距離と加工くずの関係は加工くずの存在が加工速度向上に大きな役割を果たしているところから簡単に割り切ることはできず、今後の重要な研究課題である。あるていど排除を良好に行なえば極間距離1~2 μ 程度は容易に実現できると思われるが、放電パルス的大小にもよるので加工する寸法によって限界は異なるであろう。RC回路でのパルス的大小（コンデンサ容量および電圧）と放電間隙の関係の一例を図10に示す。ただしこの場合電圧はパルスエネルギーに寄与すると共にそれ自身も一つのパラメータである。なお、貫通穴のすきまの均一な部分は電極寸法をそれだけ小さく設計することにより相殺できる。

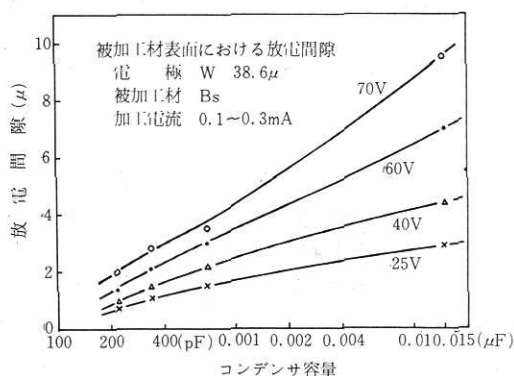


図10 コンデンサ容量と放電間隙(稲垣, 阿部, 圧子)

加工寸法の限界、つまりこの場合どこまで小さい穴が加工できるかは軽々しく予断はできないが、加工深ささえ小さければ1 μ ぐらいの加工はおそらく可能と思われる。加工電源としては前述のようにRC回路によれば充分小さいパルスを作ることができる。問題はやはり電極の製作、取付けができるかどうかにかかってくるであろう。

10 μ ぐらいの穴は実験的には加工できている。⁸⁾また

出口のみの寸法であるならば、貫通した最後の一発の放電で止めることにすれば1 μ 以下の穴も当然加工できる。ウィスカーを電極として用いて0.4 μ の穴を得た例を図11に示す。

実用的なレベルでは電極の製作・取付ができたとして10 μ ぐらいまでは割合容易に使えらるであろう。その場合極間距離が無視できないだろうから、円断面以外の穴は形状精度がかなり悪くなるであろう。

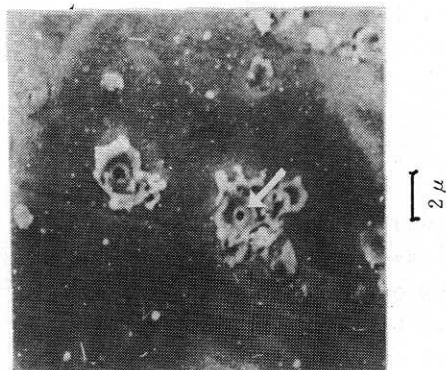


図11 微小穴加工例

(工作物: 0.7 μ 銅, 電極: タングステンウィスカー)
加工条件: V=63V, R=10k Ω , C=1 pF

50 μ 程度の寸法になれば、電極さえ製作、取付けができれば容易に加工できる。やや大きめのパルス条件で角穴を加工した例を図12に示す。隅の丸味は3~5 μ になっている。

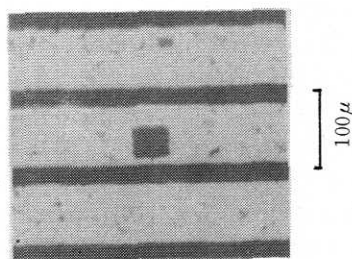


図12 微小角穴加工例

(工作物: 0.5 μ 超硬合金
加工条件: V=88V, R=1 k Ω , C=100 pF)
加工時間: 15sec

7. 加工速度の限界

ある寸法の微小穴が加工可能であると言う場合、それがどのくらいの時間で加工できるかが大きな問題で、1分ぐらいで加工したいのに10時間かかるというのはその加工は不可能であるというに等しい。

図12の加工例では約15秒であるから、常識的には少

くとも「加工可能」の部類には入るであろう。しかし、加工時間は短かければ短いほど良いので可能な限り加工速度（単位時間当りの除去量）の向上を追求すべきである。

まず、理想的な状態として極間に放出されたエネルギーは全て工作物に注入されるとし、そのエネルギーのすべてが工作物の溶融に使われ、融点以上の温度には上らないとして単位時間にどれだけの工作物を融解できるかを考えてみる。

鉄を例に計算してみる。比熱約0.15、融点約1500℃、融解熱65cal/g（理科年表より）としてまず単位電力、単位時間当りの融解量を計算すると約 8×10^{-4} g/Wsとなる。アーク電圧をおよそ20Vとして、放電電流1A当りの毎分の融解量に直してみると約1 g/A・minという結果が得られる。融けたものが全て除去されるとするならばこれが単位電流当りの理想加工速度をあらわすことになる。しかし非常に能率の良いと言われる大電流での高速放電加工でも1000Aで150g/minぐらいの加工速度であるから、¹¹⁾熱伝導その他のロスがあって1桁ぐらい下るのはやむを得ないことになる。

それにしても理想的な加工速度はパルスの与え方によらない形で出てくるので、非常に小さいエネルギーのパルスでも繰返し数を大きくして平均電流を1000Aぐらいにできれば150g/minぐらいの加工速度が可能ということになる。

実際にはパルス幅を小さくすると大電流を流すのは困難になってくるし、局所的な過熱で沸とう、気化なども起り、効率もさらに低下することになる。

仮に全部気化により除去されるとすると4～5倍のエネルギーを必要とするであろう。またピーク電流も1～2Aぐらいしか得られなくなり平均電流0.5Aぐらいが限界になるかもしれない、それでも0.01g/minぐらいの加工速度は可能性のあることになる。仮に鉄に0.5mm ϕ で深さ0.5mmの穴を加工するとしたら5秒ぐらいでできる計算になる。ところがこれはピーク電流を5Aも流しても40秒～1分はかかるというのが現実である（ステンレスの例）。¹²⁾また、図12の加工例の加工速度を計算するとわずか7 μ g/minであり、工作物が超硬合金であることを考慮しても理想状態には遠く及ばない。見方をかえればまだまだ短時間で加工できる可能性があるので、今後の研究に待つところ大である。方向としては微細加工域での加工効率の低下を正確に把握することと、加工くず、気泡等の影響を分析して放電繰返しの最適化をはかることが必要である。実際、微細加工域では放電繰返しが非常に疎らであることが加工速度低下の一大原因であることは明らかである。¹³⁾

黄銅やAlでは現在のこの不十分な状態でも加工時間としてはかなり実用的な結果が得られている。例えば約0.2mm ϕ で深さ0.5mmの穴を黄銅に12sec、Alに8 sec

で加工した例がある。¹⁴⁾

8. 他の加工法との比較

最後に放電加工による微細加工を他の加工法で微細加工が可能なものと比較し、それぞれに対する優れている点、劣っている点を挙げてみる。

1) 切削（ドリルによる加工）に対して。

切削加工も微量の資料採取用として数 μ の加工も行った例があり、微細加工において有力な手段の一つである。しかも従来比較的小さい穴あけは多く切削によっているのでまずこれと比較してみる。

優れている点

イ. 電気を通すものであれば機械的性質によらず加工できる。（焼入れされた鋼、超硬合金なども容易）

ロ. 変形しやすい薄板や箔も支障なく加工できる。

ハ. 電極は回転させる必要がないので円以外の断面を持つ異形穴も同様に加工できる。（四角穴、三角穴、スリットなどが加工できる。）

ニ. 斜めの穴も容易に加工できる。（図13）

ホ. 返りが出ない。

劣っている点

イ. 深穴（深さ/直径>5ぐらい）では加工時間、精度の点で劣る。

ロ. 止り穴では底付近の精度が悪い。

ハ. 非金属が加工できない。

ニ. 市販の加工機は高価である。

ただし、ニについては小穴専用機がもっと生産されるようになれば同程度になるかもしれない。

このように切削に比べ優れている点は多く、普通の

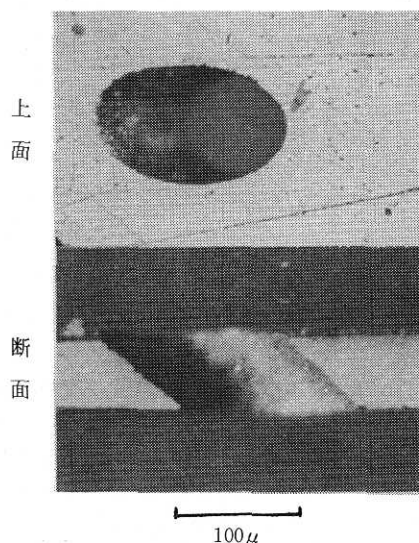


図13 斜め穴加工例
（工作物：超硬合金，加工条件：V=100V，R=1 k Ω ）
（C=100 pF，加工時間：90sec）

ボール盤で加工できない範囲の微小穴については加工手段として放電加工を先ず思い浮べるべきである。

2) プレス加工に対して

打抜きにより0.5mm ϕ 以下の穴を加工することは可能であり、異形穴も加工できることなど、放電加工と競合する面もあるのでこれと比較してみる。

優れている点

- イ. 深穴が可能である。(打抜きでは深さ/直径は黄銅でも3ぐらいが限度である⁵⁾)
- ロ. より小さい穴が可能である。
- ハ. ダイスが不要である。従って型合せも不要で、加工機の構成が容易である。
- ニ. 硬脆材料でも加工できる。
- ホ. だれ、返りが出ない。
- ヘ. 工具(電極)は硬さが不要でないため製作が容易である。

劣っている点

- イ. 加工時間が長い。
- ロ. 精度が劣る場合がある。
- ハ. 工具寿命が短い。

以上のようなが、実際問題としてはプレスで数十 μ ϕ 以下の穴を加工するのは困難なようである。比較的大きく浅い穴(0.1mm ϕ 以上, 0.1mm ϕ 以下)を軟い材料に加工する場合で量産が必要な時のみプレスが有利となるだろう。

1), 2)では、主に放電加工が熱的加工であるということから違いが現れているが、次に同じく熱的な加工であるレーザ、電子ビーム加工と比較してみる。

3) レーザ加工に対して、

優れている点

- イ. 精度が高い。
- ロ. 熱変質層が小さい。
- ハ. 異形穴が容易に加工できる。

劣っている点

- イ. 非金属が加工できない。
- ロ. 加工時間が長い。
- ハ. 電極の成形が必要である。

4) 電子ビームに対して

優れている点

- イ. 熱変質層が小さい。
- ロ. 真空の必要がない。
- ハ. 装置が簡単である。(高電圧が不要である。)

劣っている点

- イ. 非金属が加工できない。
- ロ. 加工時間が長い。
- ハ. 電極の成形が必要である。

以上のように、主な違いは除去単位の違いと非金属に対する可能性から来ており、その他の点ではこれらの技術が開発途上であることから今後変化することも

考えられる。加工寸法の限界については、レーザ加工は5 μ ϕ 程度の加工例がある⁶⁾が波長から考えても放電加工をしのぐとは思えない。電子ビームは理論上1 μ 以下も充分可能であり、薄膜加工などでは放電加工より上まわるかもしれないが、放電加工も微細加工域では一種の低エネルギーのビーム電子による加工と考えられる⁸⁾ので予断できない。

その他、電解加工、非金属の放電加工、超音波加工、研削、化学腐食加工、マイクロ波加工、水ジェット加工、電铸等が挙げられるが、放電加工と加工対象がやや異っていたり、まだ実用段階に近づいていないものもあり、今回は省略する。

9. 結 び

放電による微細加工の現状と問題点の概略を述べた。本所においては現在のところ放電繰返し数の増大による加工時間の短縮と、精度、加工速度の両方に影響する加工くずの処理に重点を置いて研究を進めているが、すでに実用的なレベルのデータも出はじめており、電極の製作、取付けという極めて現場的な問題が最後の壁となっているように思われる。

参 考 文 献

- 1) ベー・イ・スタビッキー；真空管等の精密部品の放電製作，金属の放電加工，第2巻(1960)，(久保田訳，第43回放電加工研究会資料2)
- 2) 倉藤，増沢；超硬合金の放電微小穴加工，昭和42年度精機学会秋季大会前刷，(1967)，p 77
- 3) 倉藤，須田；ガラスの微小穴あけ，第44回放電加工研究会資料1 (1966)，P 27—37
- 4) 倉藤，増沢，古明地；ルビーの放電小孔加工，電気加工学会誌3巻6号(1970) p 33—40
- 5) 元木，小野，上出；放電加工のギャップ現象，電気加工学会誌8巻15号，(1974) p 44—53
- 6) 増沢，佐田；微小エネルギーC放電加工における持続アーク発生機構，電気加工学会誌5巻9号(1971) p 35—52
- 7) 増沢，佐田；微小エネルギー放電加工(第2報)，昭和44年度精機学会秋季大会前刷(1969) p 329
- 8) 倉藤，増沢；超硬合金の放電による微細加工，電気加工学会誌2巻3号(1968) p 1—16
- 9) 稲垣，阿部，庄子；微細放電加工の放電間隙と工具電極の微小送り装置，昭和46年度精機学会春季大会前刷(1971) p 355
- 10) 増沢，田中，藤野；放電加工における放電繰返しの制御(第2報)，昭和49年度精機学会秋季大会前刷(1974) p 183
- 11) 倉藤，須田；高速放電加工の研究，電気加工学会誌3巻4号(1969) p 22—33
- 12) 増沢；放電加工における放電繰返しの制御(第1報)，昭和47年度精機学会秋季大会前刷(1972) p 453
- 13) 増沢；放電加工の電極送り制御，生産研究25巻10号(1973) p 25—31
- 14) 増沢，田中，藤野；可動コイル式ヘッドによる放電微細加工の高速化，電気加工学会誌8巻16号(1975) p 43—52
- 15) 前田；プレス抜きによる微小穴加工，昭和41年度精機学会春季大会シンポジウム資料(1966) p 23—26
- 16) 小林他；レーザの加工への応用，昭和46年度精機学会春季大会前刷(1971) p 333