電解加工小特集

電 解 加 工 の 研 究 (第1報)*

— 見かけの比抵抗と加工精度について —

前 田 祐 雄** 斎 藤 長 男** 荒 井 伸 治**

Studies on Electro Chemical Machining
 — Apparent Specific Resistance and Machining Accuracy (1st Report) —
 Sachio MAEDA, Nagao SAITO, Shinji ARAI

This paper presents machining accuracy of electro chemical machining (E. C. M.) analysed quantitatively by apparent specific resistance.

(1) In order to know machining accuracy of E. C. M., first of all, it is necessarily to know the gap length during the E.C.M.

The authors considered the concept of apparent specific resistance of electrolyte, and investigated experimentally the relation between apparent specific resistance and current density, gap voltage, or volumetric flow rate, and after that, have been introduced experimental formula on the apparent specific resistance which is written as function of ratio of generated hydrogen gas volume to volumetric flow rate of electrolyte.

$$\rho = A \cdot \left(\frac{Q_H}{Q_e} \right) + B \quad \Omega \text{cm}$$

Where

$$\left(\frac{Q_H}{Q_e} \right) < 1$$

$$g = \frac{E}{\rho \cdot J} \quad \text{cm}$$

ρ : apparent specific resistance Ωcm

Q_H : generated Hydrogen gas volume at N.T.P. l/min

Q_e : volumetric flow rate of electrolyte l/min

A : 18 } where 20% NaCl at 20~25°C

B : 8 }

g : gap distance cm

E : gap voltage V

J : current density A/cm^2

(2) General tendency, bottom surface flatness machined by E.C.M. make inclination from outer circle to center of cavity, and special tendency, bottom surface becomes flat by make use of gas mixing method, have been investigated and analysed quantitatively as follow.

$$\delta \text{ max} = g_{ri} - g_{ro} = -\frac{E}{J} \left(\frac{1}{\rho_{ri}} - \frac{1}{\rho_{ro}} \right) \quad \text{cm}$$

where $\delta \text{ max}$: maximum hollow depth cm

g_{ri} : gap distance at inner radius cm

g_{ro} : gap distance at outer radius cm

(3) The relation between overcut and current density, gap voltage, or volumetric flow rate, have been investigated experimentally, and formula of overcut have been introduced theoretically, which is written as function of gap length and electrode side width, and overcut have been analysed quantitatively based on apparent specific resistance.

$$C_3 = g \sqrt{1 + 2(l_o/g)} \quad \text{cm}$$

where C_3 : theoretical overcut(per side) cm

g : gap distance cm

l_o : electrode side width cm

* 昭和38年4月, 昭和40年4月 精機学会春季大会学術講演会にて発表

** 正会員 三菱電機株式会社中央研究所

1. は し が き

電解加工を工業的見地から見れば、中心となる問題は、加工面、クリアランスなどの加工精度に関するものである。この論文では加工精度を支配する因子を追求し、それによって加工精度に関する実験結果を解析しようとするものである。なおこの論文では、多くの事項を述べようとしたため、詳細な説明と検討を省略した部分があるので、それらの詳細については稿を改めたいと考えている。

2. 極間距離および見かけの比抵抗

電解加工の加工精度を論ずるには、加工中の極間距離を知る必要がある。極間距離はまた、極間電圧、電流密度および電解液自体の比抵抗、分極電圧、電解により発生する水素ガスのボイドによる抵抗など影響する因子が多い。この章では、極間距離と電解条件との間の支配的な関係を求めた。被加工材料としては解析を容易とするために、0.15% C の軟鋼を用いた。この材料であれば、この電解加工にて溶出不能と考えられるセメンタイト (Fe_3C) は 2.25 % となり、重大な障害にはならないと考えた。

2. 1 実験装置と実験方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。支持部は剛性の大きいアームにより保持されており、強い液圧によっても極間距離に対し変位は問題にならぬ程度になっている。電極はねじ込み固定、被加工体は 13 クロームステンレス鋼製定盤にとりつけられ、この定盤は手動ねじ送りによ

図 1 実験装置

て軸方向に移動し極間距離をきめる。極間距離は抵抗計により零点を設定し、1/100mm 目盛のダイヤルインジケータにより測定した。

実験は極間距離をあらかじめきめておき、電解液を流し電源スイッチを投入し、極間電圧、電流を同時記録する。

- (1) 電源：三相全波整流，無負荷 15V，700A
- (2) ポンプ：トロコイドポンプ，圧力 20kg/cm² で流量 30l/min。流量調節は図 1 バイパス弁を用いる。
- (3) 液体流量計：浮遊式磁気結合形，1~25l/min (液温 20°C，20%食塩水にて目盛，精度 ± 0.2 l/min)
- (4) 気体流量計：浮子式気体流量計，0~300l/min
 CO_2 ガス 25kg/cm²，25°C で測定，目盛は標準状態(N.T.P.)
 CO_2 ガスは第 1 減圧弁にて 25kg/cm² に減圧，ヒータにて加熱 20~25°C とし，第 2 減圧弁にて所用圧力に減圧。回路図を図 2 に示す。精度 ± 5 l/min
- (5) 炭酸ガスボンベ：内容積 35.4l， CO_2 充てん量 25 kg
- (6) 電圧電流の測定：バリコーダ，ペン速度 200mm/1.2秒
 シンクロスコープにて電流立上りを検討しバリコーダにて差しつかえないことを確認。
- (7) 被加工体：軟鋼 (0.15% C)，50mm×50mm，厚さ 20mm
- (8) 電極：四六黄銅，外径 20mm，内径 6 mm

図 2 電解加工実験装置回路図

噴出口丸み 2 mm, 外周エポキシ絶縁

(9) 電解液: (a) 20%食塩水 20~25°C

(b) 20%食塩水中に CO₂ ガス 25 l/min
(N.T.P.) 混入

2.2 実験結果

実験結果を図3に示す。図の左上が電解液単独の場合(20%食塩水), 右上が気体混入の場合である。左下には電流とそれに応じて垂下する極間電圧を示す。電解液単独の場合では, 電解液流量を一定とすれば, 極間距離が小さいほど電流が多く流れ, また極間距離を一定とすれば, 電解液流量を増大するにつれて電流は漸増する。しかしさらに流量が増大すると電流はかえって漸減する。電流減少の範囲においては, 被加工体加工面に放射状の条痕が見られる場合が多く, 条痕の発生点を⊗印にて示した。なお, 気体混入の場合は, 電流の漸減もな

く, 条痕の発生もない。

2.3 極間距離と見かけの比抵抗

いま, 図3の実験結果を整理するために, 加工中の極間のみかけの比抵抗なる概念(式2.1)を考え, 極間距離 g , 極間電圧 E , 電流 I , 電極面積 S , 電流密度 J , 極間全抵抗 R と, 分極電圧や水素ガスのボイドによる抵抗増加の影響も含めた平均の見かけの比抵抗 ρ との関連を求める。

$$E = I \cdot R = J \cdot S \cdot g \cdot (\rho / S) = J \cdot g \cdot \rho$$

$$\text{よって, } \rho = \frac{E}{g \cdot J} \quad (2.1)$$

$$\text{または } g = \frac{E}{\rho \cdot J} \quad (2.2)$$

図3に示すように加工液濃度, 液温, 材質などの実験条件に限定はされるが, 式(2.1)より ρ を求めることが

(a)

(b)

(c)

電極寸法 外径 20mm, 内径 6mm,
噴出口丸み 2mm

(d)

陽極: 軟鋼 (0.15C)

陰極: 四六黄銅

20% 食塩水

液温 20~25°C

(a): 電解液単独の場合

CO₂ 25 l/min(N.T.P.)

(b): 電流と極間電圧の関係

図3 極間距離, 電解液流量と極間電圧, 電流の関係

できるから、電流密度や流量の変化による ρ の一般傾向がわかれば、加工条件を与えることにより加工中の極間距離を知ることができる。

見かけの比抵抗 ρ と電解条件の間に簡単な関係を求めるために、電解液中の水素ガスあるいは溶出生成物による電解液の有効体積の減少に注目し、標準状態における水素ガス (H_2) の発生体積 (Q_H , l/min, N.T.P.) と、溶出生成される金属水酸化物の体積 ($V_{Fe(OH)_2}$, l/min) とを検討する。

$$Q_H = 6.96 \times 10^{-3} \cdot I \quad (l/min) \quad (2.3)$$

溶出した鉄が、水酸化第一鉄、 $Fe(OH)_2$ になり、また、その比重が 20% 食塩水の比重 1.14 と同じと仮定しても、つぎようになる。

$$V_{Fe(OH)_2} = 24 \times 10^{-6} \cdot I \quad (l/min) \quad (2.4)$$

以上から標準状態の水素ガスの体積は、水酸化第一鉄の約 300 倍となる。またこの実験では電解液流量を 2~20 l/min 程度まで極間に流通しているが、たとえば 200 A の電解電流では水素ガスが 1.4 l/min を発生することになり、電解液中に占める気体体積は、約 70%~7% となり、電解液の流量が少なければ、電解液の有効体積が減少し、見かけの比抵抗も大きくなると考えられる。さらに電解液中に気体を混入すれば、一層電解液の有効体積は減少し見かけの比抵抗が減少すると考えられる。

そこで図 3 より式 (2.1) にて算出した ρ の値と、電解液中の水素ガスの混入割合 Q_H/Q_e 、および、水素ガスと CO_2 ガスの総和の混入割合 $(Q_H + Q_g)/Q_e$ との関連を求めた。これが図 4 である。

図の電解液単独の場合 (図 4(a)) についてみれば、 Q_H/Q_e の増大とともに ρ が漸増する範囲と、 Q_H/Q_e の

小さい範囲にてきわめて大きな ρ の値を示している範囲とがある。前者は図 3 において Q_e の増大とともに I が漸増する範囲である。後者はおもに、図 3 において Q_e の増大とともに I が漸減する範囲が含まれ、また別におこなった実験によれば、1~4 V 程度の低電圧で 2.1 項と同様に求めた見かけの比抵抗がほとんど後者に含まれる。いずれにしても、後者すなわち Q_H/Q_e が小さい範囲で ρ が異常に大きい場合は、電解加工には通常あまり使用しないので除外し、前者すなわち、 Q_H/Q_e の増大とともに ρ が漸増する範囲だけを取り扱うことにする。

なお図 4(a) には、図 3 とは別に、電極直径 30 mm と太くした場合の見かけの比抵抗を実験より求め、併記した。

これらの実験結果を一次式として近似的に求めれば、つぎようになる。

$$\rho = A \cdot (Q_H/Q_e) + B \quad (\Omega \cdot cm) \quad (2.5)$$

図の直線から A, B を求めれば、つぎようになる。

$$\rho = 18 \cdot (Q_H/Q_e) + 8 \quad (\Omega \cdot cm) \quad (2.6)$$

気体混入の場合 (図 4(b)) には、 CO_2 ガスを混入したときの見かけの比抵抗を示し、あわせて式 (2.6) を示す曲線も記入した。

電解液単独の場合は、 Q_H/Q_e の増加に対し ρ は極間距離と関係なく 1 本の線で近似してもさしつかえないと見られるが、気体混入の場合には、 $(Q_H + Q_g)/Q_e$ に対し、極間距離 g の相異により異なった曲線を示し、 $(Q_H + Q_g)/Q_e$ の増加に対し、 ρ の増加傾向が飽和している。

2.4 見かけの比抵抗に対する考察と検討

(a) 電解液単独の場合

(b) 気体混入の場合

図 4 見かけの比抵抗と気体混入割合

2.4.1 一次式による近似について

電解液のみを流した場合、流量が極間に負圧を生ずる²⁾ほど多くなければ、極間の大部分は大気圧に近いから、標準状態で示した水素ガス発生体積と実際に極間で電解液と混合している水素ガス体積とは、ほぼ同一の体積となり、 Q_H/Q_e によって電解液の有効体積の減少が示されると考えられる。一方気体混入による極間圧力は大部分が数気圧となっており²⁾、また極間距離の小さい方が同一流量であれば高い圧力となり、極間における気体体積の圧縮減少によるボイドの有効体積の減少があるので、圧力のえいきょうが入ってきて、一次式では近似できなくなり、しかも $(Q_H+Q_g)/Q_e$ の増加に対し ρ の増加割合が小さくなり、また極間距離 g の大きさによって ρ の値が異なってくると考えられる。

この報告では、気体混入の場合は実験式を求めないまま、図 4 (b) に示してある。

2.4.2 常数項 B について

式 (2.5) で $Q_H=0$ の見かけの比抵抗 $B(\Omega\text{cm})$ は、20%食塩水 20~25°C の比伝導度 (1000 c/s 電源にて分極を打ち消して測定) より求めた比抵抗 5.9 Ωcm よりはずかには大きいだけできわめて近い値である。これが主として電解液自体の比抵抗より定まるものとするれば、電解液の濃度、温度、種類などによってこの常数項が変わってくるかも知れないと考える。

2.4.3 極間を通る間の電解液の温度変化の影響

電解液が極間を通る間の電解液の温度上昇、および気体混入による温度降下の大要を検討した。これは極間を通る間の液温変化による比抵抗を、無視してもさしつかえないかを知るためである。

20%食塩水自体の、温度変化に対する比抵抗の変化を求めると、40°C で 4.3 Ωcm 、30°C で 5 Ωcm 、20°C で 5.9 Ωcm 、10°C で 7.2 Ωcm である。

電解液が、電極の噴出口から極間を通る間に極間に加わる電力 (極間電圧×電流) が、全部熱となり、電解液にもち去られると仮定すれば、電解液が入口から出口に至る間の温度上昇 T は、つぎの式に示される。

$$T = \frac{14.4 \cdot I \cdot E}{10^8 \cdot Q_e} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.7)$$

ただし

I : 電流 (A), E : 極間電圧 (V), Q_e : 電解液流量 (l/min), 電解液比熱を 1 とする。

2.2 項の実験条件にて最も温度上昇の大きい例を計算してもせいぜい 10°C であり、電解液の比抵抗が 5.9 Ωcm から 5 Ωcm に低下するのが最大である。見かけの比抵抗に対する温度のえいきょうは、比抵抗の温度変化と同

程度のもので仮定すれば、工業的な指標を得る目的としては、この程度の誤差なら極間距離を求める式 (2.2) で ρ 一定としても十分といえよう。

なお炭酸ガスの断熱膨張によって電解液温度が低下する可能性を検討すると、つぎのようになる。

CO_2 ガスは約 25kg/cm² にて 25°C にヒータにて加熱される。いま $Q_g/Q_e=20$ とし、 $Q_e=1$ l/min とすれば、 $Q_g=20$ l/min (N.T.P.) となる。標準状態で 20 l になる CO_2 ガスは 39gr である。これは 25kg/cm² から大気圧になるまで 100°C の温度変化をしたと仮定しても (凝固点 -78.5°C) 比熱 $C_p=0.2$ cal/g°C であるから、うばいする最大の熱量は 780 cal にすぎず、1 l の食塩水を約 0.78°C 温度低下させるにすぎない。

以上検討したように、図 4 に示される見かけの比抵抗によって、加工中の極間距離は計算できる。

3. 見かけの比抵抗による平たん度の解析

平らな円板電極による電解加工底面の平たん度を測定し、見かけの比抵抗より一般的傾向を解析した。

3.1 実験条件と測定法

ある加工深さまで電解加工を進める過程において、加工深さを数 mm 進めるごとに被加工体をとり外し、加工孔底面の平たん度を底面コーナの丸みのつけ根を結ぶ線を基準線とし、1/100 mm ダイアルインジケータによって、平たん度を測定した。この様子を図 5 に示す。

図 5 平たん度の説明

表 1

A. 電解液単独		B. 高圧気体混入 (CO_2 ガス)		
電流密度	電解液流量	電流密度	電解液流量	気体混入量
$J(\text{A/cm}^2)$	$Q_e(\text{l/min})$	$J(\text{A/cm}^2)$	$Q_e(\text{l/min})$	$Q_g(\text{l/min})$
16	10	16	10	35
26	10	26	10	35
53	5	53	5	35
53	10	53	10	35
26	19	—	—	—

図6 平たん度くぼみ量と電解条件

- (1) 被加工体：軟鋼(0.15%C)，80mm×80mm，厚さ20mm
- (2) 電極：四六黄銅，外径50mm，内径6mm，噴出口丸み2mm，電極底面の平たん度は1/100mm以内に入っている。
- (3) 加工機：ダイアシンカ MC-10V，無負荷電圧15V，最大電流1000A
- (4) 実験条件：表1に示す。

3.2 実験結果

平たん度測定結果を図6に示す。左方AからEまでが電解液だけを使用した場合である。右方FからIまでが気体混入の場合のくぼみで、実線で示し、電解液単独の場合を比較のため点線で示した。

3.2.1 電解液だけの場合

電流密度の低いA，Bでは，加工孔底面の外周から中心に向けて次第にくぼみを増し，電極噴出口つけ根部分から残留心（へそ）として立ち上っている。

加工深さが2mm程度になるまでは，くぼみ量も次第

に増すが，2mm以上ではほぼ一定となる。この一定値となつたくぼみを最大くぼみ（ $\delta \max$ ）と称することにする。 $\delta \max$ はAで0.35～0.40mm，Bで0.2～0.30mmとなり電流密度が大きくなると $\delta \max$ は小さくなる。

図のDはA，Bと流量を同じ $Q_e=10 \text{ l/min}$ にしているが，電流密度を 53 A/cm^2 と高くしたものである。加工深さが1.5mm以上になると，外周より中心に向け一応くぼみを生じたあと，段丘を形成している。同一流量でも電流密度が高いと段丘を生じやすいことが，これによっても認められる。ここで流量を 5 l/min と低下させたものがCであり，段丘は消失し，くぼみ量 $\delta \max$ は0.10～0.018mmとA，Bの場合よりも低くなっている。Bでは $J=26 \text{ A/cm}^2$ で段丘を生じなかったのを，これを $Q_e=19 \text{ l/min}$ と増してみたのがEであり，段丘の高さは0.3mmにもおよんでいる。

3.2.2 気体混入の場合

A～Dと同様の条件のもとに，電解中に気体を混入したものが右方のF～Iである。図に見られるように平たん度が格段に向上し，段丘の発生もないことが見られる。

3.2.3 結果の要約

- a. 加工孔底面のくぼみは，加工深さが2mm程度までは漸増し，それ以上になるとほぼ一定の値になる。
- b. 電流密度が高いほど最大くぼみ量 $\delta \max$ は小さくなる。
- c. 電流密度が高いほど段丘は生じやすくなる。
- d. 電解液流量が多いと，段丘を生じやすい。
- e. 気体を混入すると $\delta \max$ は小さくなり段丘も消える。

3.3 考察

電極底面が平滑であるにもかかわらず，加工底面にくぼみを生ずる理由を，見かけの比抵抗より考察する。

3.3.1 加工初期の電流密度

加工初期は，電極の半径いづれの点においても極間距離は等しい。水素ガスは電極面いづれの点でも，その点の電流密度に応じて発生するから，半径 r の円周上の水素ガスの流量は，半径 r により定まる面積 $\pi(r^2 - r_i^2)$ に発生した水素ガス全部が r の円周上を通過することになる。中心ほど見かけの比抵抗が少なく，外周ほど見かけの比抵抗は多くなるから，中心ほど電流密度が高く，外周ほど低くなる。すなわち加工初期の電流密度 J_r は，

図 7

極間距離を一定値 g_o とおき、半径 r の点における見かけの比抵抗を ρ_r とおけば、式 (2.2) よりつぎようになる。

$$J_r = \frac{E}{g_o \cdot \rho_r} \quad (3.1)$$

これを模式的に示したものが図 7 である。

3.3.2 最大くぼみ量

外周に近いほど低くなるような電流密度で加工が進み電流密度の高い中心に近い部分は次第に極間距離が大きくなってゆき、くぼみ量が増大していく。やがて全底面積にわたり等電流密度の状態になると、くぼみ量はそれ以上には成長しないことになる。これが最大くぼみ量である。すなわち、最大くぼみ量 $\delta_{\max t}$ は、全面が等電流密度とした場合の、内径における極間距離 g_{ri} から外径における極間距離 g_{ro} を差引いた値としてあらわされることになる。

$$\delta_{\max t} = g_{ri} - g_{ro} = \frac{E}{J_c} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{ri}} - \frac{1}{\rho_{ro}} \right) \quad (3.2)$$

ここで半径の相異による ρ_r はつぎようになる。

式 (2.5) より

$$\begin{aligned} \rho_r &= 18 \cdot \frac{Q_H r}{Q_e} + 8 \\ &= 18 \cdot \frac{\pi(r^2 - r_i^2) \cdot 6.96 \times 10^{-3} \cdot J}{Q_e} + 8 \quad (\Omega \text{cm}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

平たん度の最大くぼみ量の計算値 $\delta_{\max t}$ は

$$\begin{aligned} \delta_{\max t} &= \frac{E}{J} \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{18 \cdot \frac{\pi(r_o^2 - r_i^2) \cdot 6.96 \times 10^{-3} \cdot J}{Q_e} + 8} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

式 (3.4) より計算した値と実測した値との比較を表 2 に示す。実際の傾向とよく一致している。

一方気体を混入した場合には、一般に発生水素ガス量 Q_H よりも気体混入量 Q_g で多く、 Q_H を無視できる程

表 2

	実 験 値			計算値式(3.4)
	$J_c (\text{A/cm}^2)$	$Q_e (\text{l/min})$	$\delta_{\max} (\text{cm})$	$\delta_{\max t} (\text{cm})$
A	16	10	0.035~0.040	0.025
B	26	10	0.020~0.030	0.021
C	53	5	0.010~0.018	0.018

度なので、半径方向の圧力分布による気体の体積変化を無視すれば、内径から外径に至るまで気体流量は一定であり、また電解液の流量も一定なので $(Q_g + Q_H/Q_e)$ は半径上いずれの点も一定となり、式 (3.2) で $\rho_{ri} \doteq \rho_{ro}$ となつて $\delta_{\max t}$ は零となり、平たんになることが理解される。

4. 見かけの比抵抗によるクリアランスの解析

平らな円板電極によって加工された円孔のクリアランスが、電流密度、電解液流量、電極の側面幅の形状などにより変わる状況を実験により求め、電極形状による側壁に対する溶出形状を、みかけの比抵抗を利用して解析する。なおクリアランスは極間距離との対応を考える上から、片側について取り扱う。

4.1 実験条件

被加工体：軟鋼 (0.15% C)

電極：四六黄銅、外径 30mm、内径 15mm、電極側面幅 0.5mm

液温：20~25°C

加工深さ：約 12mm

(1) 実験 1 極間電圧： $E=6, 8, 10, 13 \text{ V}$

電解液：流量 $Q_e=5 \text{ l/min}$ 、

液温 20~25°C

電流密度： $J=30, 60, 90, 120 \text{ A/cm}^2$

(2) 実験 2 極間電圧： $E=12 \text{ V}$

電解液流量： $Q_e=5, 10, 20 \text{ l/min}$

電流密度： $J=30, 50, 100 \text{ A/cm}^2$

(3) 実験 3 気体混入の場合

極間電圧と電流密度の組合わせ：

$E=10 \text{ V}$ では $J=30, 60, 90, 120 \text{ A/cm}^2$

$J=30 \text{ A/cm}^2$ では $E=6, 8, 10, 13 \text{ A/cm}^2$

電解液流量： $Q_e=5 \text{ l/min}$

気体混入量： $Q_g=25 \text{ l/min}$

4.2 実験結果

実験 1, 2 を図 8 (a), (b)、実験 3 を図 9 (a), (b) に示す。

図 8 (a) には加工孔入口クリアランス C_1 と孔底クリアランス C_2 とをそれぞれ示した。図に見られるように、

図8 クリアランスと加工条件 (電解液単独の場合)

図9 クリアランスと加工条件 (気体混入の場合)

電流密度が高く、極間電圧が低いほど、クリアランスは小さく、テーパも小さくなる。

図8(b)には電解液流量によるクリアランスの相異を示す。流量が多いほどクリアランスは大きくなる。

図9(a)には電解液単独の場合と気体混入の場合を示す。気体混入により低電流密度においてもクリアランスおよびテーパが小さくなることが見られる。

4.3 考察

以上の実験結果のうち孔底側面のクリアランスを主として考察する。

電極側面が孔底側面に対向して電解が進行する状態

図 10

表 3

電解液単独, 外径 30φ, 内径 15φ, $l_0=0.5$ mm, $Q_e=5$ l/min, () 内実測値

J (A/cm ²)	ρ (Ωcm)	式(2.2)より求めた g (cm)				図 8 の 実 験 値 C_2 (cm)			
		13V	10V	8V	6V	13V	10V	8V	6V
30	12.0	0.036	0.028	0.022	0.017	0.070 (0.067)	0.060 (0.054)	0.052 (0.045)	0.044 (0.035)
60	16.5	0.013	0.011	0.008	0.007	0.038 (0.040)	0.035 (0.035)	0.034 (0.029)	0.026 (0.020)
90	20.0	0.007	0.006	0.005	0.003	0.028 (0.025)	0.024 (0.021)	0.021 (0.019)	0.019 (0.015)
120	23.9	0.005	0.004	0.003	0.002	0.022 (0.019)	0.017 (0.017)	0.017 (0.015)	0.015 (0.013)

表 4

気体混入方式 $E=10$ V, $Q_e=5$ l/min, $Q_g=25$ l/min

J (A/cm ²)	$(Q_g+Q_H)/Q_e$	ρ (Ωcm)	式(2.2)より求めた g (cm)	式(4.3)より求めた C_3 (cm)	図9の実験値 C_2 (cm)
30	5.22	28	0.012	0.035	0.033
60	5.43	28	0.006	0.024	0.024
90	5.65	28.5	0.004	0.020	0.019
120	5.90	29	0.003	0.017	0.016

は, つぎの事項を仮定すれば, 式(4.1) 以下に示すことができる。

(a) 電極の底面および側面に向い合っている被加工体の部分にしか電流は流れないものとする。

(b) 極間の見かけの比抵抗 ρ は, 底面, 側面とも均一とみなす。

このように仮定すれば, ファラデーの法則より, dt 時間に被加工体の加工孔側面が電極側面幅 l_0 によって半径方向に溶出拡大される寸法 dC と, 電極が送り込み方向に溶出進入する深さ dl は, それぞれつぎのようになる。

この関係を図10に示す。

$$dC = \frac{\alpha \cdot K}{\gamma} \cdot J_0 \cdot dt \quad (4.1)$$

$$dl = \frac{\alpha \cdot K}{\gamma} \cdot J \cdot dt \quad (4.2)$$

ただし, dC : 孔側面が半径方向に溶出する長さ (cm)

dl : 電極が送り込み方向に進入する深さ (cm)

γ : 被加工体の密度 (g/cm³)

K : 電気化学当量 (g/A·s)

α : 電流効率, 通常 100%とする

J_0 : 側面極間における電流密度 (A/cm²)

J : 底面極間における電流密度 (A/cm²)

C : 電極側面幅の任意の点 l に対向する部分

のクリアランス (cm)

l : 電極側面幅の任意の位置 (cm)

式(4.1), (4.2) より

$$dC = (J_0/J) \cdot dl$$

また $J_0 = E/\rho \cdot C$, $J = E/\rho \cdot g$ よって $J_0/J = g/C$

$$C \cdot dC = g \cdot dl \quad \text{よって} \quad \frac{1}{2} \cdot C^2 + k = g \cdot l$$

図10に示すように $l=0$ にて $C=C_0$, $l=l_0$ にて $C=g$ とすれば

$$C_3 = g \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (l_0/g)} \quad (4.3)$$

2 節式(2.2), (2.5) より g を求めれば式(4.3) より, 孔底のクリアランスを計算することができる。クリアランス C_3 を小さくするには, 極間距離 g を小さくするとともに, 電極側面幅 l_0 も小さくする必要あることが理解される。

図8に示した電解液単独の場合のクリアランス実測値と, 式(4.3) によるクリアランスの計算値を比較したものを表3に示す。この場合の ρ は式(2.5) より求め, g はその ρ の値を用いて式(2.2) より求めたものである。実験値と計算値とがよく一致していることが見られる。

また図9に示した気体混入の場合のクリアランス実測値と, 式(4.3) によるクリアランスの計算値を比較したものを表4に示す。この場合の ρ は図4(b)より g を仮定して ρ を読みとり, この ρ より式(2.2) にて g を算出

し、仮定した g と一致する ρ を見出すようにする。この場合の加工条件より求めた試算では g は 0.01cm 以下のとき一致している。図 4(b) にて、 $g=0.01\text{cm}$ と $g=0.005\text{cm}$ の曲線は一致しているので、表 4 の $g=0.003\text{cm}$ のときもこれと同じ曲線上にあるものとして、 g の算出をおこなった。

気体を混入した場合も、計算結果と実験結果はよく一致していることが見られる。

図 8, 9 の実験結果は前述の計算により説明できるように、電解液単独の場合には式 (2.2) と式 (2.6) とから、電流密度 J が 2 乗の項を含んだ形で、極間距離 g にえいきょうを与える。

$$g = \frac{E}{J\rho} = \frac{E}{J \cdot \{A \cdot (Q_H/Q_e) + B\}}$$

$$= \frac{E}{A \cdot \frac{J^2 \cdot 5.6 \cdot 96 \times 10^{-8}}{Q_e} + B \cdot J}$$

したがって、 J が大きいほど、 g は二重に電流密度のえいきょうを受け、低電流密度におけるクリアランスと高電流密度におけるクリアランスが大きな差異を示す場合が出てくることが理解される。気体混入の場合は、 ρ に対し J はあまりえいきょうを与えないから、 g は E/J に比例する傾向となり、低電流密度でも高電流密度でも、電解液単独よりは極間距離もクリアランスも差異が少なく、また小さくなる。

テーバは、電極側面を通過する電解液の見かけの比抵抗の大小によって考えられ、気体混入の場合は、見かけの比抵抗が大きいので、テーバが小さくなると考えられる。

5. 結 論

電解加工における加工精度を論ずるため、電解時の極間の見かけの比抵抗なる概念を考え、これを実験によって求め、これより加工孔底面の平坦度、クリアランス

の実験結果を定量的に説明した。

(1) 見かけの比抵抗は、本来電解液自体の比抵抗（濃度、温度などの影響を受ける）、水素ガス発生によるボイド、分極電圧などの関数であるが、この論文では、水素ガスのボイドに注目して実験式を求めた。

$$\rho = A \cdot (Q_H/Q_e) + B \quad (\Omega\text{cm})$$

$$\rho = 18 \cdot (Q_H/Q_e) + 8 \quad (\Omega\text{cm})$$

ただし 20% 食塩水、 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 、 $Q_H/Q_e < 1$

なお、 $Q_H = 0$ のときの $\rho = 8 (\Omega\text{cm})$ は、電解液自体の比抵抗 $5.9 (\Omega\text{cm})$ と近い値を示している。

気体を水素ガスよりも多量に混入すれば、この実験式を延長した傾向よりは、小さい見かけの比抵抗を示す。これは極間圧力が高いために気体体積が圧縮減少することによるものと考えられる。

(2) 加工孔底面の平坦度を測定すると、加工孔底面の外周から中心に向けて次第にくぼみを増す傾向にあり、気体混入により平坦になることを明らかにし、さらに内径における極間距離と外径における極間距離との差として見かけの比抵抗の実験式より定量的に解析し、よい一致を見た。

(3) クリアランスを多くの実験により求め、電流密度、極間電圧、電解液流量によりいちじるしく変わることを明らかにし、さらにクリアランスを極間距離と電極側面幅との関数として計算式を求め、見かけの比抵抗の実験式と図表より定量的に解析し、よい一致を見た。

(1965, 8月2日受付)

参 考 文 献

- 1) 前田, 斎藤, 荒井: 電解加工, 三菱電機技報, 36 巻 9 号 (昭37).
- 2) S.Maeda, N. Saito and S.Arai: Mitsubishi Denk Laboratory Reports, Vol.5. No. 371 (1964).