

# 電解加工—新しい電解液と加工技術—

## Electrochemical Machining Using New Electrolyte Solution

The electrochemical machining has made large strides of late thanks to improvements in its technique as well as in facilities. A new technique of electrochemical machining which makes use of a sodium nitrate solution instead of sodium chloride solution is becoming popular, because of its superior machining characteristics. In this report, the characteristics of electrochemical machining by sodium nitrate solution, new method of producing electrodes, some examples of application, etc. are described.

能戸幸一\* Koichi Noto  
 奥平弘明\* Hiroaki Okudaira  
 平田健二郎\*\* Kenjiro Hirata  
 東靖夫\*\* Yasuo Azuma

### 1 緒言

電解加工は、材料が難削のものや複雑な形状を持つものの加工に対して有効であり、わが国においては自動車、電機、造船、金型産業ならびに一般機械産業で、各種金型、タービンブレード、難削、複雑形状の機械部品、ばり取りなどの加工に広く適用されている。

本加工法は歴史的には、昭和33年アノカット社より世界初の電解加工機が発表されたのに始まり、わが国においても実用機が登場してより約10年を経過し、前記各分野で、重要な加工法として大きな地位を占めるに至った。

この間、電解加工機、加工技術の両面において研究開発がなされ、形彫り加工の実用化、各種電解加工機の開発、加工間げき適応制御装置、短絡検出装置、スラッジ分離システム、NC(数値制御)工作機を使用した電極製作システム、新しい電解液の登場などが行なわれた。これらのうち、加工技術に着目すると適用分野の拡大、加工精度の向上などを目的とした新しい電解液として硝酸ソーダ系電解液の実用化およびこれに付随した多くの加工技術の進展が見られた。

電解加工における電解液の種類は、加工間げき、表面あらさに大きな影響を与えるものであり、当初から多くの利点を有する食塩水電解液が広く用いられているが、新しく開発された硝酸ソーダ系電解液では、被加工物の表面に不動態被膜を介在させながら溶解されるので、次に示すような食塩水電解液にはないすぐれた特長を有する。

- (1) 電極から離れたところで溶解が生じにくくなり、「だれ」の少ない精度の良い加工が可能である。
- (2) 被加工物の表面あらさが良く、孔食の発生がない。
- (3) 電解液温度変化に対する加工間げきの変化が少ない。
- (4) 新しい電極の製法(反転電極法)が可能である。
- (5) 無絶縁電極でも垂直壁の加工が可能である。

しかし一方、本系統の電解液では食塩水電解液の場合よりも電源容量が増大すること、電解液が高価なこと、被加工材質の種類、加工条件に対する加工間げきが単純でないことなどがあるが、前記長所がこれらを補って十分効果を上げ、本系統の電解液を用いなければ不可能な適用分野を持つに至った。

本稿は、硝酸ソーダ系電解液を用いた場合の電解加工特性および新しい電極の製法ならびに各種応用例について述べる。

### 2 硝酸ソーダ系電解液の加工特性

#### 2.1 電流効率

食塩水電解液における陽極(被加工物)の溶解反応は被加工物の溶解のみで、溶解の電流効率は電流密度などの加工条件によらず常に100%であった。これに対し硝酸ソーダ系電解液では、被加工物の溶解と酸素の発生との両反応が同時に起こるため、溶解の電流効率が100%になることはない。また電流効率は図1に示すように電流密度などの加工条件によって大きく変化する。硝酸ソーダ系電解液によって被加工物の溶解と酸素の発生とが同時に起こるのは、被加工物の表面が酸化被膜でおおわれるためであると考えられる。

同図からわかるように電流密度の小さい範囲では、溶解の電流効率は数パーセントで、加工電流の大部分が酸素の発生に使われている。しかし電流密度がある値に達すると、電流効率は急激に増大して70~80%に達する。この急激な立上りは加工条件、特に電解液の温度により大きく影響される。立上りの起こる電流密度は温度の高いときのほうが大きく、立上り後の電流効率は小さくなる。そのため、同一の加工速度

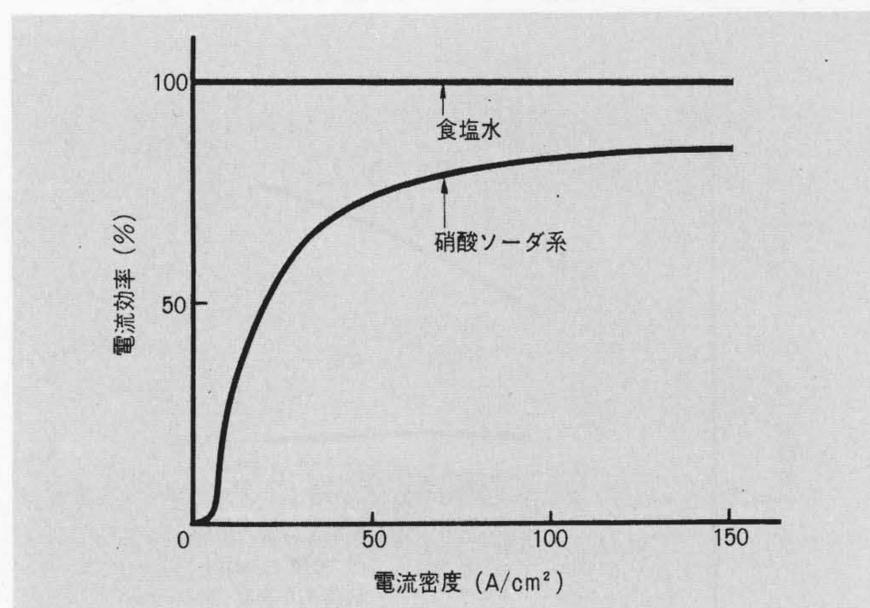


図1 電流効率と電流密度の関係 食塩水と硝酸ソーダ系電解液の電流密度と電流効率の関係を示した。

Fig. 1 The Relation between the Current Efficiency and the Current Density

\* 日立製作所生産技術研究所

\*\* 日立精工株式会社

で加工を行なうには電解液の温度が高いときのほうが大きな加工電流が必要となる。

このように硝酸ソーダ系水溶液では、電流密度により溶解の電流効率が大きく変化するのが特徴であり、この性質が硝酸ソーダ系水溶液の加工特性がすぐれている主因となっている。

### 2.2 加工間げき

硝酸ソーダ系電解液における側面の加工間げきは食塩水電解液に比べて小さくなる。これは硝酸ソーダ系電解液における溶解速度が低電流密度において極端に低速になるためである。加工電流の大部分は電極底面に対向した被加工物の加工面に集中して流れるが、一部の電流は電極の側面から被加工物の側面へ流れる。この電流により被加工物の側面が溶解され側面間げきが拡大する。硝酸ソーダ系電解液では被加工物の側面における電流密度の範囲で、溶解の電流効率がわずか数パーセントであるため、側面に流れた電流の大部分は酸素の発生に使われる。そのため、被加工物の側面はほとんど溶解されず、側面間げきもあまり拡大しない。一方、食塩水電解液では電流密度によらず常に電流効率が100%であり、被加工物の側面に流れた電流のすべてが被加工物の溶解に用いられるため側面間げきが拡大する。

硝酸ソーダ系電解液で単純な丸形電極を用いてSUS53を加工したときの側面間げきを図2に示す。同図から明らかなように、硝酸ソーダ系電解液における側面間げきは、食塩水電解液の場合に比べて小さくなっており、特に50°Cでは食塩水電解液のときの1/2以下になっている。また、側面間げきは電解液温度によらずほぼ一定である。食塩水電解液では、電解液温度の上昇に伴い側面間げきは増大する。

### 2.3 表面あらさ

硝酸ソーダ系電解液における加工表面のあらさは図3に示すように食塩水電解液よりすぐれている場合が多い。特に食塩水電解液のように電極送り速度の小さいところで急に表面あらさが悪くなることはなく、常に一定のあらさを保っている。これはSUS53だけでなくアルミニウム、インコネルなど他の材質に対しても同様である。また、食塩水電解液で13Cr系材料を加工した場合のように点食を生ずることもない。

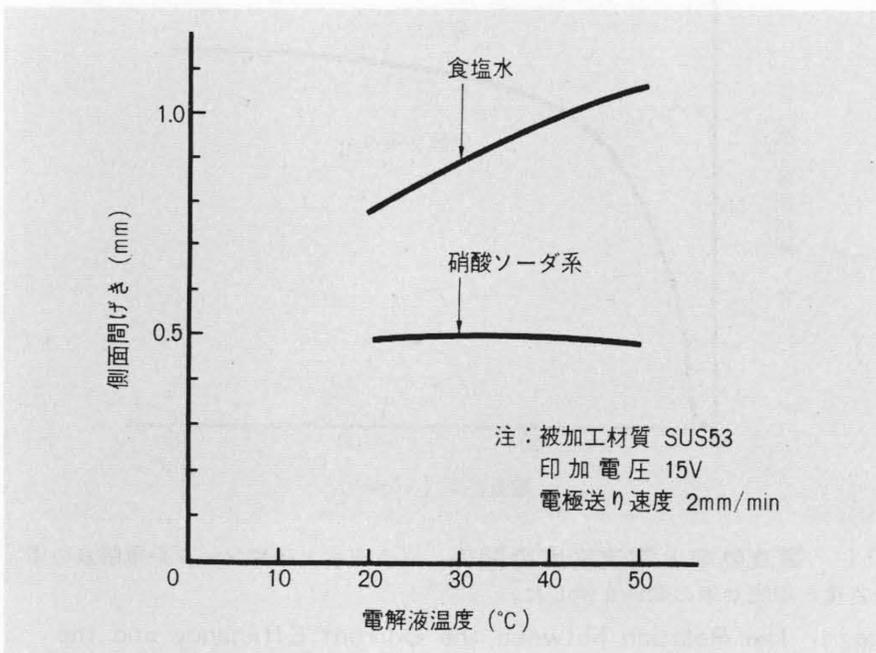


図2 側面間げきと電解液温度の関係 材質SUS53, 15V, 2mm/min における液温と側面間げきの関係を示す。

Fig. 2 The Relation between the Side Working Gap and the Electrolyte Temperature

## 3 新しい電極の製作法

### 3.1 電極の間げき修正法

電解加工の電極は加工品形状に合わせて作られるが、加工品寸法どおりに加工するためには加工間げきだけ修正した寸法の電極を作る必要がある。したがって精度の高い加工を行なうためには、加工間げきを正確に予測しなければならない。

#### 3.1.1 加工間げき式

電解加工の加工間げきは「ファラデーの法則」と「オームの法則」から次の式で与えられる。

$$h_n = \eta_i \frac{60M}{nF\rho} K \frac{E_{ohm}}{V \sin \alpha} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $h_n$ ：加工間げき（法線間げき）(cm)

$\eta_i$ ：電流効率

$M$ ：被加工物元素の原子量 (gr)

$n$ ：被加工物元素の溶出イオン価数

$F$ ：ファラデー定数

$\rho$ ：被加工物の密度 (gr/cm<sup>3</sup>)

$K$ ：電解液の比電導度 ( $\Omega^{-1}/cm$ )

$E_{ohm}$ ：電解加工間げき内の電解液の抵抗に打ち勝つための電圧 (V)

$V$ ：電極送り速度 (cm/min)

$\alpha$ ：加工品表面と電極送り方向となす角度

$\alpha = 90$ 度の場合を特に底面間げきと呼び、 $h_b$ で示すが、 $\eta_i$ が一樣であれば（この場合を線形特性と呼ぶ）(1)式は、

$$h_n = \frac{h_b}{\sin \alpha} \dots\dots\dots(2)$$

と書くことができる。

食塩水電解液を用いた電解加工では $\eta_i$ が一定であるので、図4に示すような(2)式を図示した形状がそのままあてはめられることが実用上、確かめられている。

ところが、硝酸ソーダ系電解液では電流効率 $\eta_i$ が、電流密度によって変化するため、加工間げきの大きいところでは予測した加工間げきと大きな誤差を生じてしまう。また、電圧や送り速度、あるいは被加工材質を変化させても $\eta_i$ が変わるため加工間げきの予測が非常に困難になった（電流効率 $\eta_i$ が

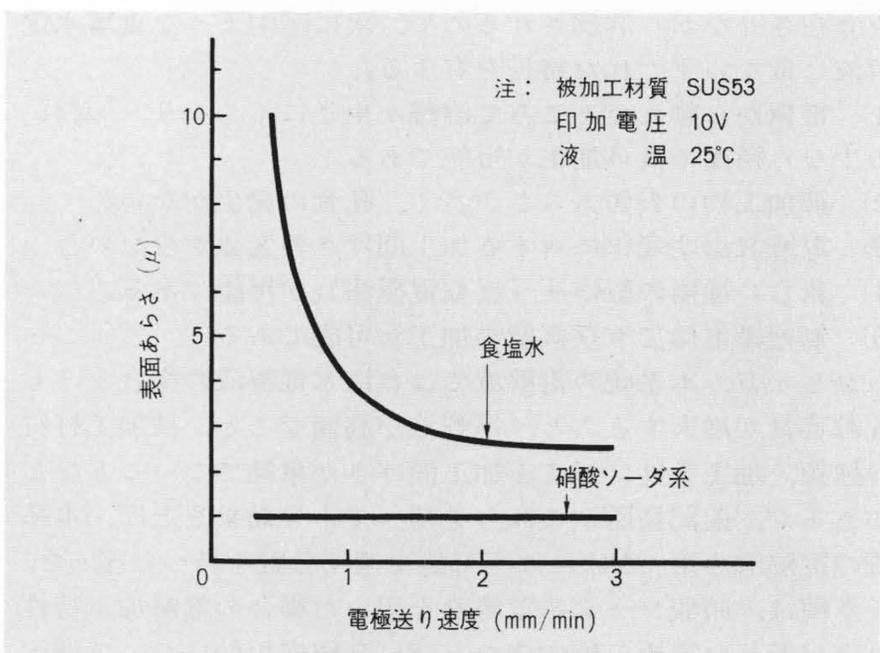


図3 表面あらさと電極送り速度の関係 SUS53, 10V, 25°C における食塩水と硝酸ソーダ系の表面あらさの比較を示す。

Fig. 3 The Relation between the Surface Roughness and the Feed Rate of Electrode

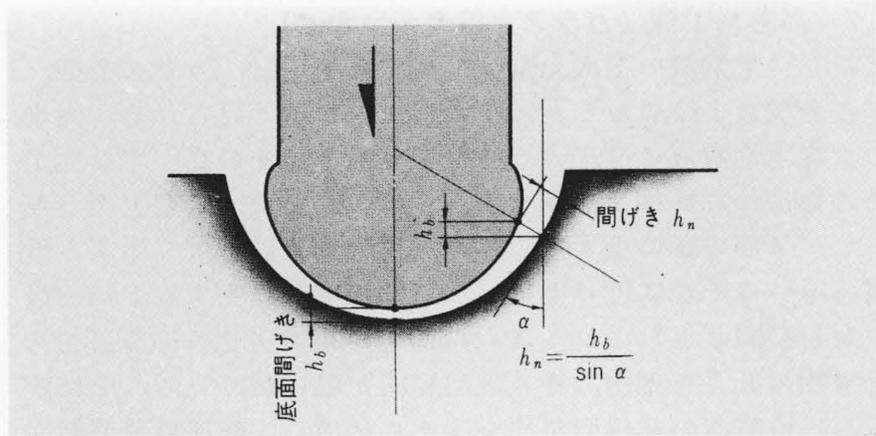


図4 修正電極による加工状況 NaCl液における電極形状と被加工物の相関を示す。

Fig. 4 The Working Gap by Modified Electrode

加工条件によって変わる場合を非線形特性と呼ぶ)。

### 3.1.2 電極の加工間げき修正法

電極製作時の加工間げき修正は、食塩水電解液を使用する場合には(2)式をあてはめて修正ゲージを作成し、このゲージに合わせて電極を成形する方法がとれた。

このゲージや電極はあらかじめプログラムに加工間げき値を記憶させておいてNC工作機によって加工する方法も開発されている<sup>(2)</sup>。

新しい電解液の加工間げき修正は2.で述べた特性を解析して(2)式に相当する加工間げき式を導き、同様な手法で修正する方法が現在進められている。

### 3.1.3 二次元形状加工用電極の製作法

二次元形状加工とは平面図形をそのまま深く加工し、電極の送り方向と平行な側面と直角な底面から成る形状を加工することをいう。このような加工をするためには、従来の食塩水電解液では電極の先端部に加工間げきを修正したリップをつけ、シャンク部は加工物の側壁が二次電解するのを防ぐため、絶縁皮膜でおおうようにした電極が使われる。先端部の間げき修正は、線形特性でも非線形特性の液でも同様にほぼ均一に行なえばよい。非線形特性の強い電解液を使うときはリップ先端からシャンク部までのある距離をとると絶縁皮膜を塗布しないでも二次電解が生ずるおそれがないので製作上工程を一つ省くことができる(図5参照)。

### 3.2 反転電極法

電解加工用電極を製作するためには必ず間げき修正を行わなければならないが、3.1.1で述べたとおり、この作業は難作業である。

ところが非線形特性液を使用した電解加工では、電流密度の低い部分では電流効率が極端に低くなり、電解速度が小さくなるので加工間げきが形状全体でかなり均一化される傾向がみえる。そこでマスタ金型を電極にして型加工用電極を電解加工で製作する方法が考案された。この電極は加工間げき分も含んで修正製作されたことになるからである。理論的には、電解加工の加工間げきは時間を含んだ関数で与えられる<sup>(1)</sup>ので、反転電極製作時に形状生成の順序が逆であるから、正しい加工間げきに修正された電極は得られない(たとえば、垂直な壁の部分では2~4度のテーパがつく)がある程度の精度で満足する場合には十分効果的な製作法である(図6)。これを反転電極法と呼ぶ。

この手法によれば従来の電極製作法に比べ大略25%の工数で完成できる。反転複製した型の転写精度は、加工形状や電極素材の材質や加工条件によって変わるので一概に述べられ

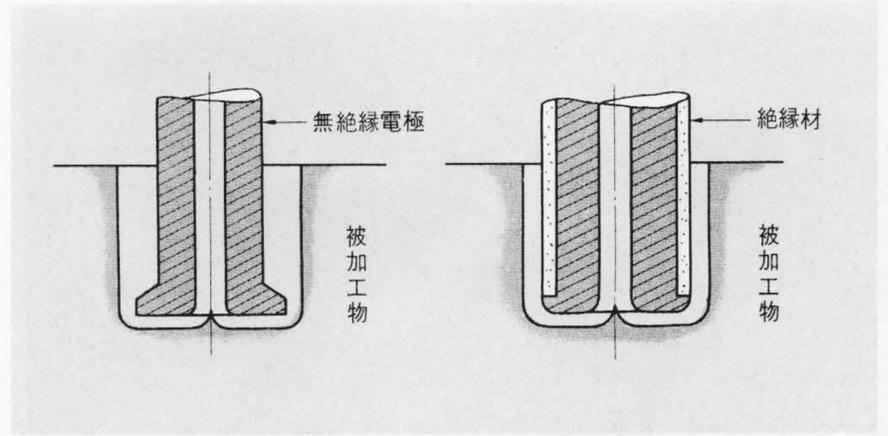


図5 二次元電極 無絶縁電極と絶縁電極を示す

Fig. 5 Two Dimensional Electrode

ないが、加工間げきを小さくすれば、その加工間げき値の範囲内に収めることができる。一般に用いられる加工間げき値は、0.1~0.8mmである。

電極素材の材質は電解加工間げきを均一化するために非線形特性の強い材料が選ばれる。材料選定は図7よりSKD11, SS41, S22Cが多く用いられる。図7は材料厚板に内径20φの

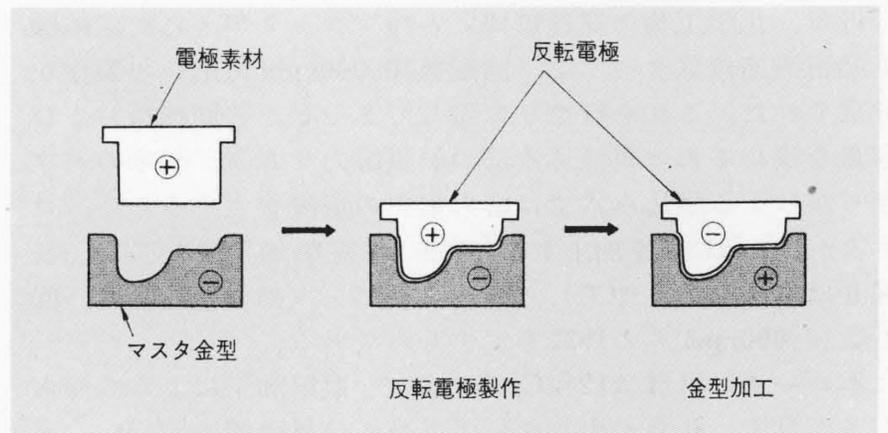


図6 反転電極法の加工順序 反転電極法の加工順序を図示したものである。

Fig. 6 Machining Process of Reverse Electrode Method

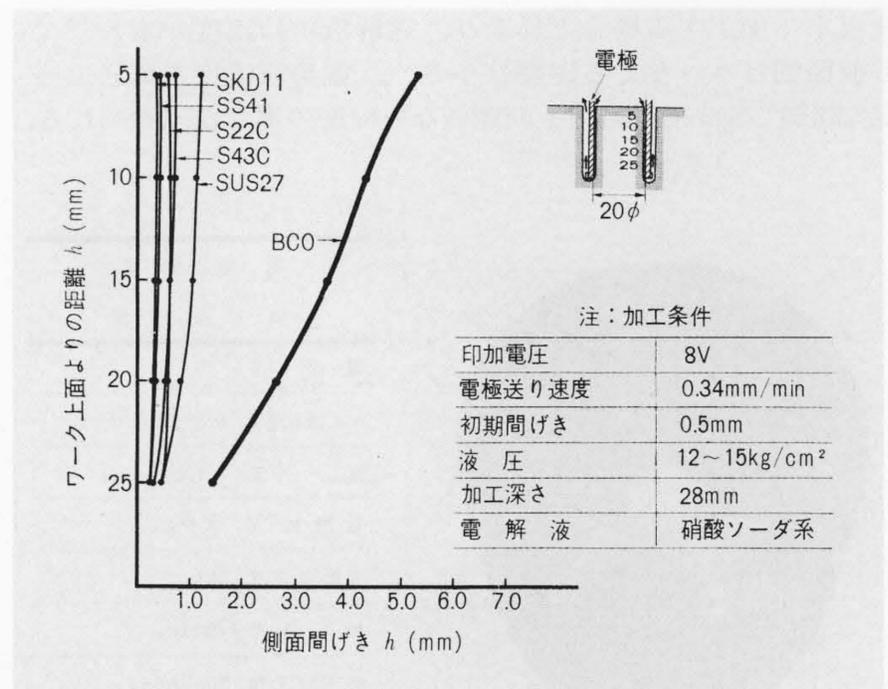


図7 材質と側面間げきの関係 反転電極用材質の選定のために求めた材質と側面間げきの関係を示す。

Fig. 7 The Relation between the Work Material and the Side Working Gap

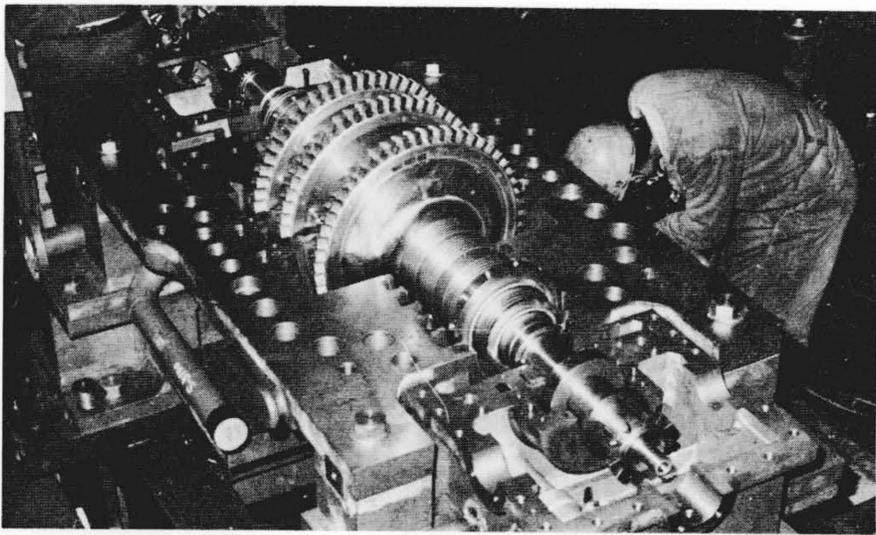


図8 高速蒸気タービン 高速蒸気タービンの外観（工場組立て中）を示す。

Fig. 8 High Speed Steam Turbine

電極を使って同一条件で加工したとき、内径に残るボス形状を測定してボスの外径方向の寸法変化を加工間げきとして図示したものである。

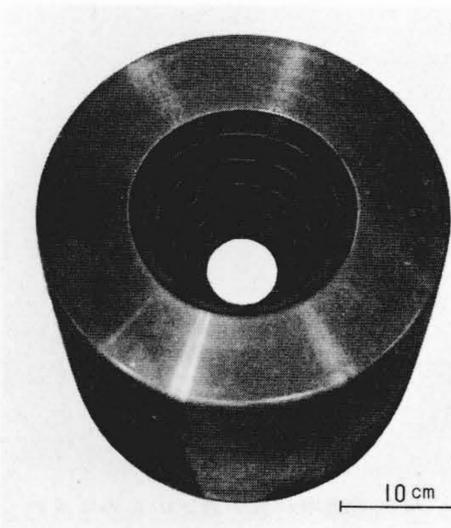
#### 4 各種応用に対する加工例

##### 4.1 高速タービン<sup>(3)</sup>

近年、化学工業の発達に伴い各種プロセス用として圧縮機駆動用高速蒸気タービン（回転数10,000rpm以上）の製作が要求された。これを行なうに際してタービンの回転数および容量を決めるのは翼植込み部の引張応力であり、従来のダブテールによる植込み式では応力集中の危険が生ずるため、ロータから一体に翼を加工する方法として電解加工法を応用した。図8は本法により加工した高速タービン（出力1,100kW、回転数14,000rpm）の外観を示すものである。

本ロータの材質は12%Cr系の鋼で、電解加工による表面あらかさが良く、孔食が生じないことおよび翼先端の「だれ」、テーパが少ないなどの点から硝酸ソーダ系電解液を用いるのが有利である。

さらに、本翼は円周上に数十枚連続しており、同一加工をくり返し行なう必要がある。特に、硝酸ソーダ系電解液では食塩水で加工する場合と異なり、電解液供給温度が変わっても側面間げきへ与える影響は小さく、電解液温度を厳密に一定に制御しなくても実用上問題のない程度の翼寸法が得られる。



電 解 加 工 加 工 条 件 表	
電 圧	7V
加工送り速度	0.3~0.16mm/min
電 流	5,500A
電 解 液 圧	16.5kg/cm <sup>2</sup>
電 解 液 温 度	38℃
加 工 時 間	190min
使用加工機	50ECM-6V
使用電解液	硝酸ソーダ系

図9 ガラス金型 ガラス金型を電解加工による加工条件データとともに示した。

Fig. 9 Die for Glass

##### 4.2 形彫加工例（ガラス、鍛造金型など）

新しい電解液の三次元金型に対する適用は、ガラス金型、鍛造金型およびアルミサッシ金型などに多く見られる。従来の食塩水電解液では、ガラス金型を除き、その高能率な加工特性ゆえに電解加工は多く用いられてきたが、金型上面とキャビティ部の縁に生ずる「だれ」、積分効果によって生ずる垂直あるいはそれに近いキャビティ部の側壁に生ずる1mm前後の大きな間げきおよびこれらに基づく精度劣化や微細部分の分解能の低下を理由にその適用範囲が限られていた。それが新しい電解液の非線形特性をうまく利用し、前述の金型製作ではその応用が一段と増加してきている。

図9に示すのはガラス金型の加工例である。ガラス金型の場合、特に要求されることは次の点である。

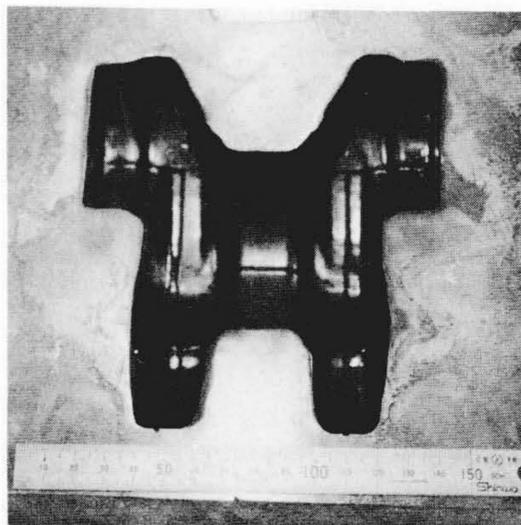
- (1) 表面あらかさが良好なこと。
- (2) うねりの小さいこと。
- (3) シャープなコーナが得られること。

(1)の表面あらかさの良好さは電解加工の持つ本来の特性である。うねりを小さくすることは、従来の食塩水電解液における手段、たとえば絶縁ガイド法によって背圧をかけ、流れの分布を均一にするなどで達成できる。(3)のシャープなコーナはこの新しい電解液を利用することにより初めて達成される。その理由は前述したように、不動態皮膜が加工面に生じ、電流密度の低い場合は著しく電流効率を低下させ電解を阻止する。このため、加工間げきはあまり拡大せずほぼ均一になる。加工間げきが小さく、場所によらずほぼ一様なため、電極の細かな模様が金型に転写されることになる。

図10はクランクシャフトの鍛造金型加工例を示すものである。従来よりこの鍛造金型には最も広く電解加工が用いられていた。しかし金型上面の「だれ」、積分効果による側面間げきの拡大などにより、今一步の改善が望まれていた。鍛造金型の場合は特に下記の点が要求される。

- (1) 加工速度が速いこと。
- (2) 表面あらかさが良いこと。
- (3) 金型上面の「だれ」の小さいこと。
- (4) リシンクが可能なこと。
- (5) 電極製作が簡単になること。

(1)、(2)は従来から持つ電解加工の利点である。(3)は前述の非線形特性のため、食塩水電解液に比較し著しく改善される。(4)のリシンクの問題は図11に示すように、従来の食塩水電解液を使用した場合、再利用をするとき上面をかなり多く削除



電 解 加 工 加 工 条 件 表	
電 圧	7.5V
加工送り速度	0.7~0.35mm/min
電 流	5,800A
電 解 液 圧	5 kg/cm <sup>2</sup>
電 解 液 温 度	39℃
加 工 時 間	125min
使用加工機	日立100ECM-12V
使用電解液	硝酸ソーダ系

図10 クランクシャフト鍛造金型 クランクシャフト鍛造金型を電解加工による加工条件データとともに示した。

Fig. 10 Forgings Die for Crankshaft

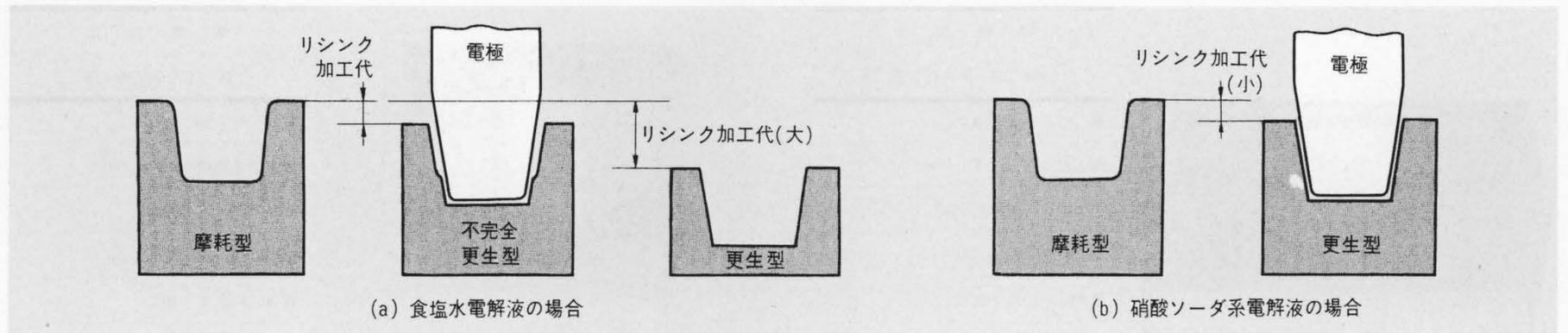


図11 金型のリシク代の比較 金型のリシク代を食塩水電解液(a)と硝酸ソーダ系電解液(b)について比較し図示した。

Fig. 11 Comparison on Depth of Cut for Resink

しないと、再加工されるキャビティ部とそれに追加される新しい部分に段差が生ずる。これが新しい電解液を使用することにより段差をなくすることができる。

電極の製作も加工間げきがかなり一様化されるので、従来の食塩水電解液のものより製作時間が短縮される。特にマスタ金型がある場合は、その型から電極を写し取る前述の反転電極法が用いられ、電極は非常に簡単になる。図12は鍛造品のトリミング金型の反転を示すものである。このように精度的には若干部分的に悪くなる場合もあるが、この反転法によりほぼ満足な金型が短時間で製作可能になってきている。

#### 4.3 抜き型の加工例 (タイル, アルミサッシ金型)

この新しい電解液の利用は、4.2 で述べた三次元の形彫りで非常に効果があると同時に、抜き型の加工にも同様のことがいえる。抜き型に共通して要求されることは次の点にある。

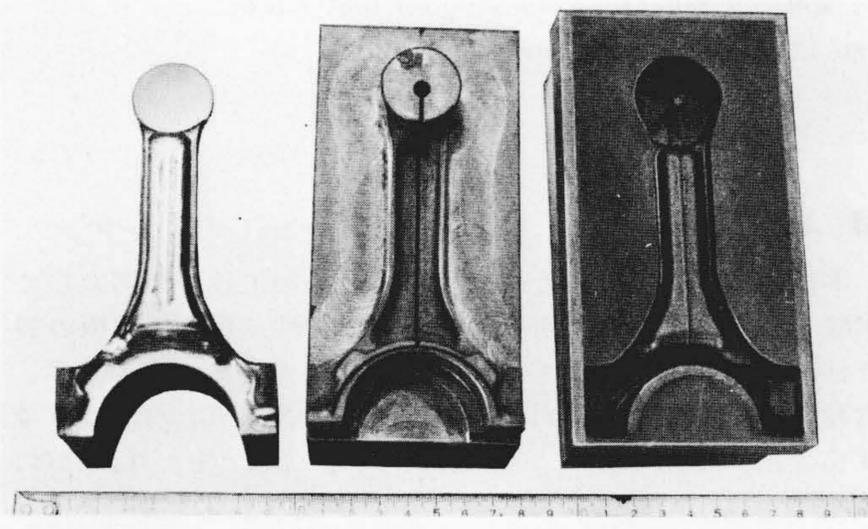
- (1) 上面, 下面の「だれ」が少ないこと。
- (2) 側面の表面あらかのよいこと。
- (3) コーナRが小さくできること。
- (4) テーパが少ないこと。
- (5) 電極製作が簡単にできること。

(1)は従来の食塩水電解液では電極などに絶縁を注意深く施し、電極と加工物上下面に漏えい電流が流れて電解反応を生じないようにしなければ防げなかった。しかし新しい電解液

では、単に電極を逃がすなどの処置をして金型面と電極の距離を離せば、漏えい電流密度は非常に小さくなり電解は促進されず、(1)の問題が解決されてきた。(2)は食塩水電解液の場合に確立されている手段と同じでよい。(3)と(4)は4.2でも述べたように積分効果を生ずる電流密度では電流効率が低下するので簡単な電極でも加工間げきは小さくでき、著しく改善される。また従来の抜き型用電極の製作は4.2で示した形彫電極に比較すれば簡単であるが、食塩水電解液では、図5に示すように側面を絶縁するような作業があり、形状が複雑になると実際には絶縁に工数を要し問題となる。新しい電解液では、この絶縁皮膜塗布作業が特殊の場合を除き省略されるので電極製作が簡易化される。

図13はランタン タイル金型の加工例を示すものである。電極は図14に示すとおり底部の形状よりシャンク部が逃げているだけである。この状態で加工品の「だれ」0.12~0.3R, 側面の面あらか4μが得られている。また図面に対する精度は、±0.08であり、テーパは2/1,000であった。

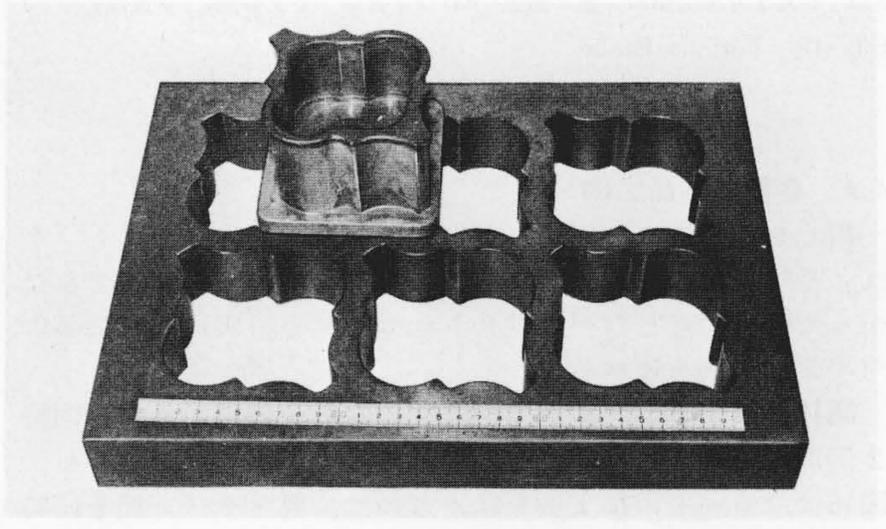
図14はアルミサッシ バックアップ ダイの加工例を示すものである。この場合は加工部が4mmで狭く、その電極に絶縁を施すことは非常に難作業となる。新しい電解液で、非線形特性が特に顕著な加工条件によりこれを達成することが可能になった。



電 解 加 工 加 工 条 件 表			
電 圧	7V	電解液温度	30℃
加工送り速度	0.2mm/min	加工時間	80min
電 流	1,700A	使用加工機	日立25ECM-2V
電解液圧	15kg/cm <sup>2</sup>	使用電解液	硝酸ソーダ系

図12 コンロッド鍛造トリミング ダイ 反転法によるコンロッドのマスタ(左), 電極(中)および金型(右)を示す。

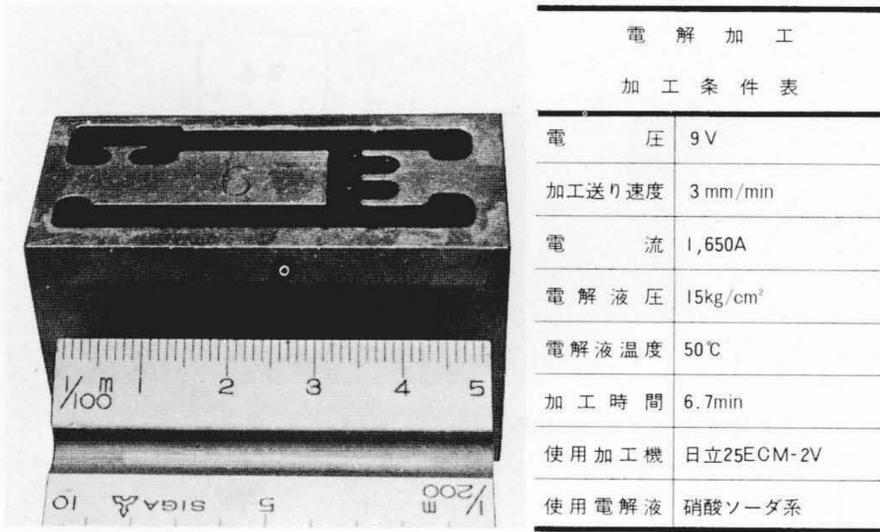
Fig. 12 Forging Die for Conecting Rod



電 解 加 工 加 工 条 件 表			
電 圧	10V	電解液温度	40℃
加工送り速度	0.6mm/min	加工時間	270min
電 流	4,600A	使用加工機	日立50ECM-6V
電解液圧	13.5kg/cm <sup>2</sup>	使用電解液	硝酸ソーダ系

図13 ランタン タイル金型 ランタン タイル金型の電極(上部)と加工品を示す。

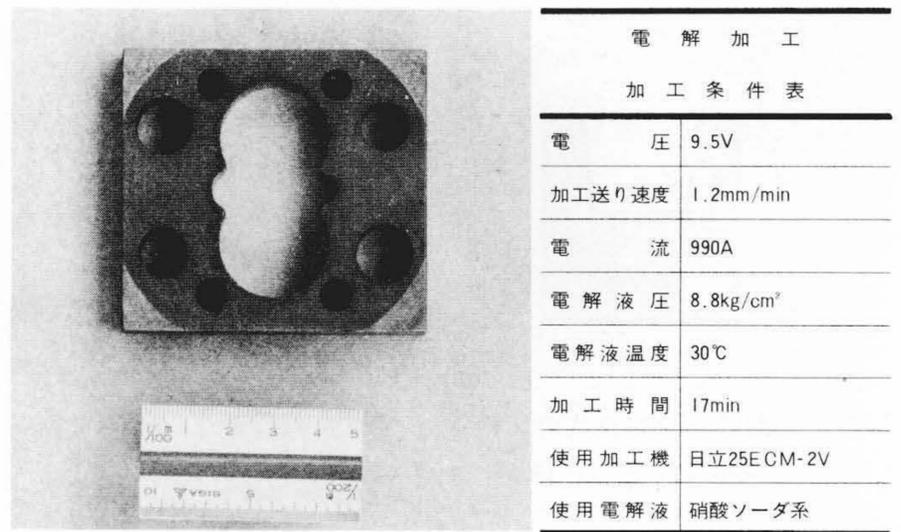
Fig. 13 Die for Tile of Lantern



電 解 加 工 加 工 条 件 表	
電 圧	9V
加工送り速度	3 mm/min
電 流	1,650A
電解液圧	15kg/cm <sup>2</sup>
電解液温度	50℃
加工時間	6.7min
使用加工機	日立25ECM-2V
使用電解液	硝酸ソーダ系

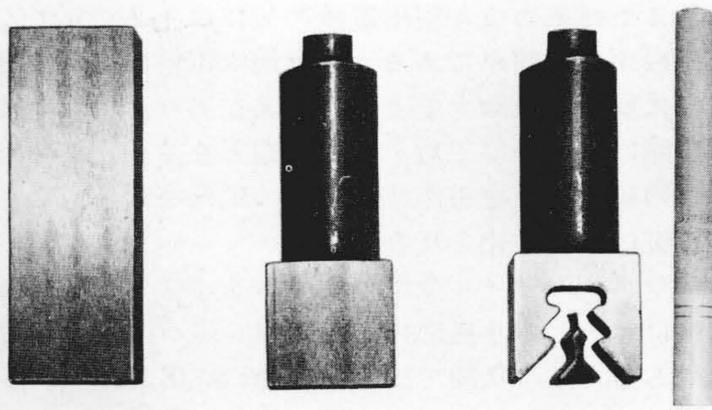
図14 アルミサッシバックアップダイ アルミサッシバックアップダイに関する加工品を示す。

Fig. 14 Back Up Die for Aluminum Sash



電 解 加 工 加 工 条 件 表	
電 圧	9.5V
加工送り速度	1.2mm/min
電 流	990A
電解液圧	8.8kg/cm <sup>2</sup>
電解液温度	30℃
加工時間	17min
使用加工機	日立25ECM-2V
使用電解液	硝酸ソーダ系

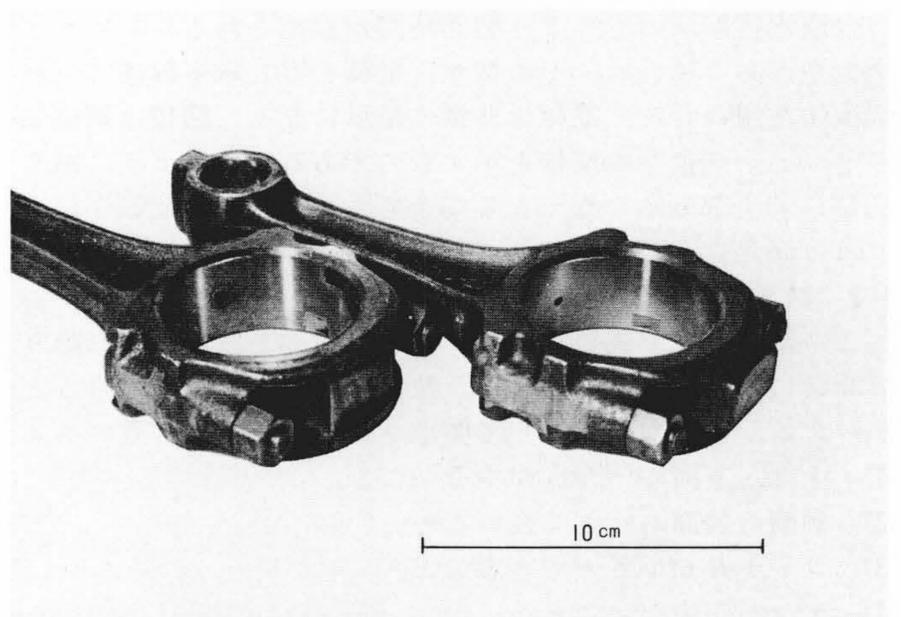
図15 ギヤポンプケーシング ギヤポンプケーシングの加工品を示す。  
Fig. 15 Gear Pump Casing



電 解 加 工 加 工 条 件			
電 圧	15V	電解液温度	35℃
加工送り速度	1.5mm/min	加工時間	31min
電 流	450A	使用加工機	日立25ECM-2V
電解液圧	16kg/cm <sup>2</sup>	使用電解液	硝酸ソーダ系

図16 タービンブレード タービンブレード(テストピース, 加工品)を示す。(左より加工素材, 第1加工(プロフィール部, テノン部), 完成品)。

Fig. 16 Turbine Blade



電 解「ばり」取 加 工 条 件 表			
電 圧	10V	加工時間	20s
電 流	55A	使用加工機	日立6ECD-G2
電解液圧	1.5kg/cm <sup>2</sup>	使用電解液	硝酸ソーダ系
電解液温度	27℃	—	—

図17 コンロッドの「ばり」取り コンロッドの「ばり」取りを示すもので、電解「ばり」取りは省力化の手段として広く用いられる。

Fig. 17 Deburring of Connecting Rod

#### 4.4 各種部品加工例

新しい電解液は、従来の食塩水電解液ではどうしても「だれ」や加工部以外の電解反応のために電解加工を利用できなかった分野にもしだいに拡大されつつある。次に機械部品に対する加工例を述べる。

図15はギヤポンプのケーシングの穴加工の例であり、同時2個取りで加工される。すべての穴は1工程で加工できる。図16はブレードの加工例を示すもので、翼とテノン部を同時加工し、クリスマス部は別に荒加工する。

このほかの利用としては、機械加工において加工品に発生する「ばり」取り加工がある。これは電極をそのそばに静置し、一定時間通電電解させ、「ばり」を取る電解「ばり」取りがある。図17はコンロッドの「ばり」取りを示すものである。

電解「ばり」取りは、省力化の手段として最近自動車メーカーや油圧器機メーカーで多く用いられている。

#### 5 結 言

本稿は電解加工の最近の成果のうち、加工技術に関連して硝酸ソーダ系電解液を用いた電解加工特性、新しい電極の製法および各種応用例について述べた。本システムの電解液は、食塩水電解液では得られない性能を有しており、今後ますます広く使用されるものと考えている。なお、今後ともわれわれは、電解加工技術の発展のため、いっそう努力する所存である。

#### 参考文献

- (1) 川船ほか：「電解加工の理論と応用」 日立評論 49, 953 (昭42-9)
- (2) 平田ほか：「電解加工法の研究—電極製法について—」 電気加工学会誌 5, 5 (昭47-5)
- (3) 今井ほか：「高速蒸気タービンの開発」 日立評論 54, 494 (昭47-9)