

電 解 加 工 の 理 論 と 応 用

Theory and Application of Electro-Chemical Machining (E. C. M.)

川 船 和 儀* 能 戸 幸 一*

Kazuyoshi Kawafune

Kôichi Noto

要 旨

電解加工における加工精度の基礎となる加工間げきおよび加工形状に関して過渡状態から平衡状態にいたる生成過程を理論的に明らかにし、さらに定常加工形状と電極形状間に存在する関係を求め、簡単な台形状電極についてこれらを実験し、理論と実験とがよく一致することを述べている。さらに電解加工の応用範囲と加工例についても記している。

1. 緒 言

科学技術の進歩に伴って新しい加工法が登場してきた。電解加工法⁽¹⁾⁽²⁾もその一つであり、1959年にアメリカノカット社より世界初の電解加工機が発表されて以来、各国が本加工法の研究、開発を進めており、航空機部品、タービンブレード、超硬合金などの難切削材からなる機械部品の加工、鍛造用金型などの複雑形状の形彫り加工に適用され大きな効果を納めている。

原理的には、電極を直流電源の負端子に、被加工物を正端子に接続し、電極と被加工物間に電解液を流しながら直流電圧を印加し、電極を被加工物へ送り込み電気分解を行なわせ、所定の加工形状を得ようとする加工法であり、

- (1) 複雑形状の加工が一工程で行なわれ、加工速度が大きい
- (2) 加工面あらさが良い
- (3) 被加工材質の硬度に無関係に加工できる
- (4) 加工ひずみが生じない
- (5) 放電加工と異なり電極の消耗がない

などの長所を有している。しかし一方、

- (1) 一般に放電加工に比べ加工精度が劣る
- (2) 電解液によるさびの発生

の問題が残されているが、本加工法の急速な研究と相まって今後ますますその適用範囲が拡大されるものと思われる。

本論文は、電解加工による加工精度、繰返し精度について重要な電極の形状と、電解加工条件および加工形状に関する一般的な関係を明らかにするものである。これまでに、Kleiner氏⁽³⁾らによって電極と被加工物間に定電圧を印加し、定速で電極を送り込んだ場合に一定時間経過後に一定の加工間げきになることは報告されているが、加工間げきおよび加工形状の生成過程を明らかにしたものはない。

ここでは定電圧、定速送り方式における電解加工において重要となる、

- (1) 電極底面における加工間げきの推移の過程
- (2) 単純な台形電極によって加工した場合の加工形状の生成過程
- (3) 定常加工形状と電極形状間に存在する関係

などについて理論的、実験的に検討を加える。さらにこれらの基礎的な結果を用いて種々の複雑形状の応用加工を行なった結果について簡単に述べるものである。これらについて理論と実験とがかなりよく一致した。

2. 理 論 的 考 察

2.1 底面加工間げきの推移について

* 日立製作所機械研究所

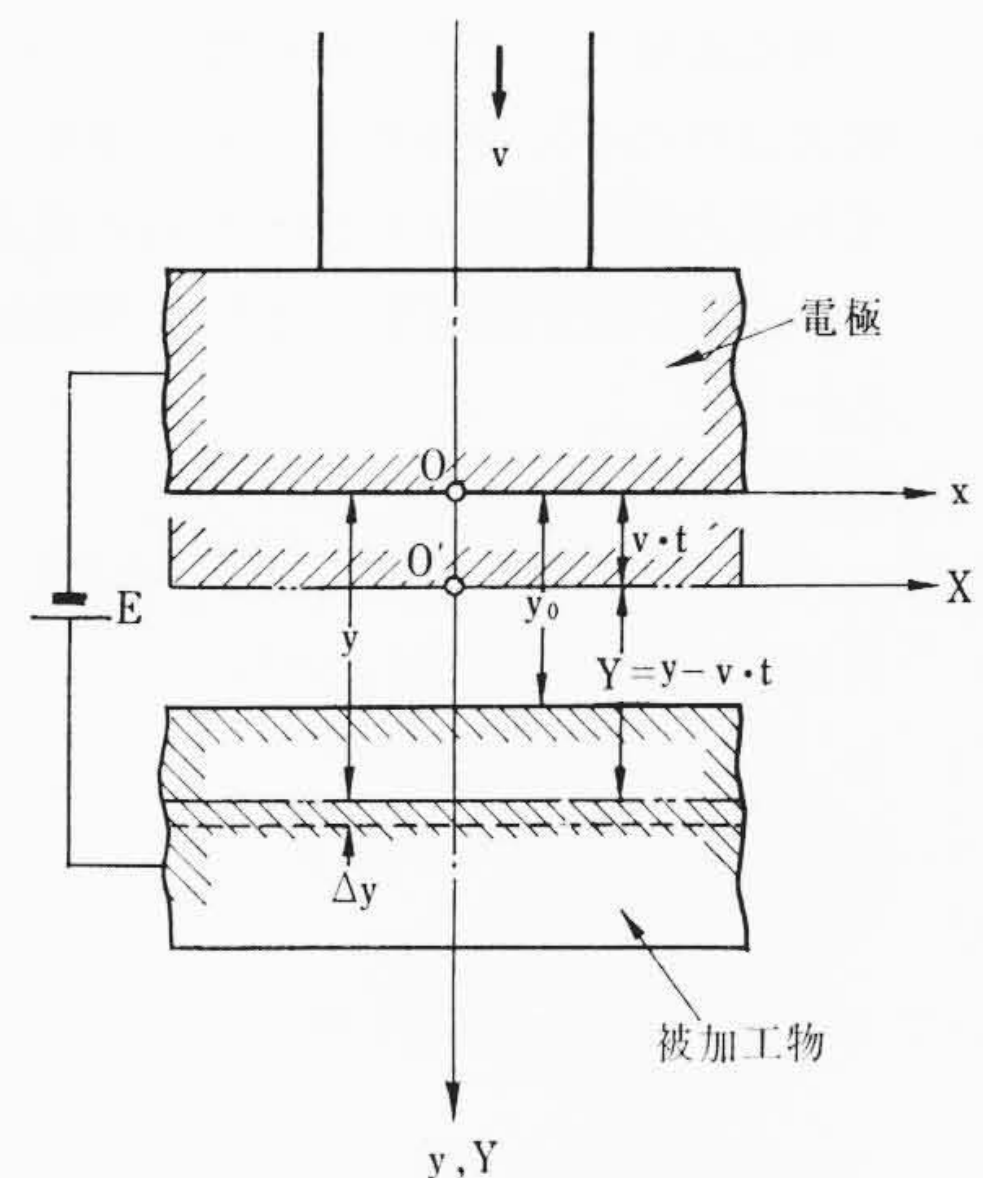


図1 無次元平衡加工間げき

電解加工法により複雑形状の加工を行なうにあたって、まず電極底面の加工間げきが、電極と被加工物間の初期間げき、および電極の送り速度、印加電圧、電解液の比電導度などの電解加工条件、および被加工材質によってどのように示されるかを明らかにすることが重要である。そこでこの電極底面における加工間げきが、電極送り速度一定、印加電圧一定の加工方式においてどのように推移するかを検討する。このためつぎの仮定を設ける。

- (1) 加工中加工間げき内の電解液の比電導度は一様とする
- (2) 加工間げきの大きさに比べ加工面は十分広い
- (3) 電極底面と被加工物加工面を平行な平面とする

図1のように電極と被加工物を初期間げき y_0 だけへだてて、こへ電解液を高速で流し、電極と被加工物間へ一定直流電圧を印加し、定速 v で電極を送り込むとき、加工間げきの変化はつぎのように与えられる。

固定座標 oxy を図のように設定すると、時間 t 後には電極は距離 vt だけ移動しこの間に被加工物は $(y - y_0)$ だけ加工されたとすると

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\eta_i MK}{nF\rho} \frac{E_{ohm}}{(y - vt)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方電極とともに移動する座標系を $O'XY$ とすると加工間げきを与える Y 座標は $Y = y - vt$ であるから、これを(1)式へ代入して

$$\frac{dY}{dt} = \frac{\eta_i MK}{nF\rho} \frac{E_{ohm}}{Y} - v \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

ここで、 η_i : 電 流 効 率

M : 被加工物のグラム原子量 (g)

K : 電解液の見かけの比電導度 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

E_{ohm} : $E - (E_r + E_{ir})$

E : 印 加 電 圧 (V)

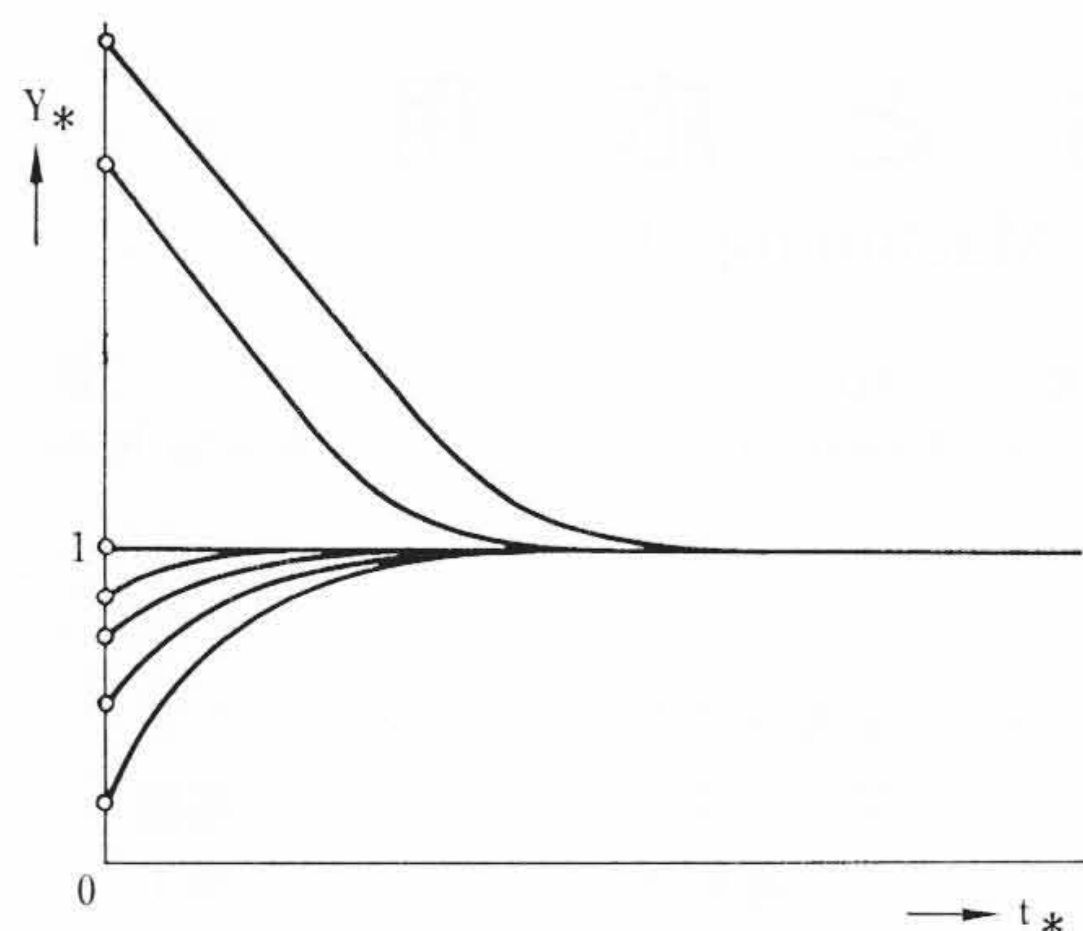


図 2 底面加工間げき

- E_r : 分解に必要な可逆的の最小電圧 (V)
 E_{ir} : 抵抗以外の不可逆作用のための電圧 (V)
 E_{ohm} : 電解液の電気抵抗に打勝つための電圧 (V)
 $(E_r + E_{ir})$ を分極起電力または実験的分解電圧⁽⁴⁾ という。
 n : 被加工物のイオン荷
 F : ファラデー定数 (クーロン/g 当量)
 ρ : 被加工物の密度 (g/cm³)
 Y : 加工間げき (cm)
 v : 電極の送り速度 (cm/s)

となる。

(2)式において η_i , M , n , ρ は被加工物の材質によって決まる定数であるから

$$\frac{\eta_i M}{n F \rho} = m \quad \dots\dots\dots (3)$$

とおき、さらにつぎの無次元量 Y_* , t_* を用いて (2) 式を変形すると (6) 式のように示される。

$$Y_* = \frac{v}{m K E_{ohm}} Y \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$t_* = \frac{v^2}{m K E_{ohm}} t \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{dY_*}{dt_*} = \frac{1 - Y_*}{Y_*} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式を積分して無次元の加工間げき Y_* と加工時間 t_* の関係を求めると (7) 式で与えられる。

$$t_* = Y_{*0} - Y_* + \ln \frac{1 - Y_{*0}}{1 - Y_*} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Y_{*0} = \frac{v}{m K E_{ohm}} Y_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで Y_{*0} , Y_0 は初期間げきを示す。

(6), (7) 式は底面加工間げきの推移を示す関係式であり、縦軸に加工間げき、横軸に加工時間をとって示すと図 2 のようになる。

図 2 について説明を加えると

- (1) $dY_*/dt_* > 0$ の場合は、 $1 - Y_* > 0$ となり加工時間の経過につれて初期間げきから徐々に加工間げきが増加する $Y_*=1$ より下の曲線群に相当し $Y_*=1$ に漸近する。
- (2) $dY_*/dt_* = 0$ の場合は $1 - Y_* = 0$ となり加工時間と無関係に、一定な平衡加工間げきの状態を示す。
- (3) $dY_*/dt_* < 0$ の場合は $1 - Y_* < 0$ となり加工時間の経過につれて初期間げきから徐々に加工間げきが減少し、 $Y_*=1$ に漸近する $Y_*=1$ より上の曲線群を示す。

このように、電極送り速度、印加電圧および電解液の比電導度が同一で、初期間げきが異なる場合、加工時間の経過につれていづれ

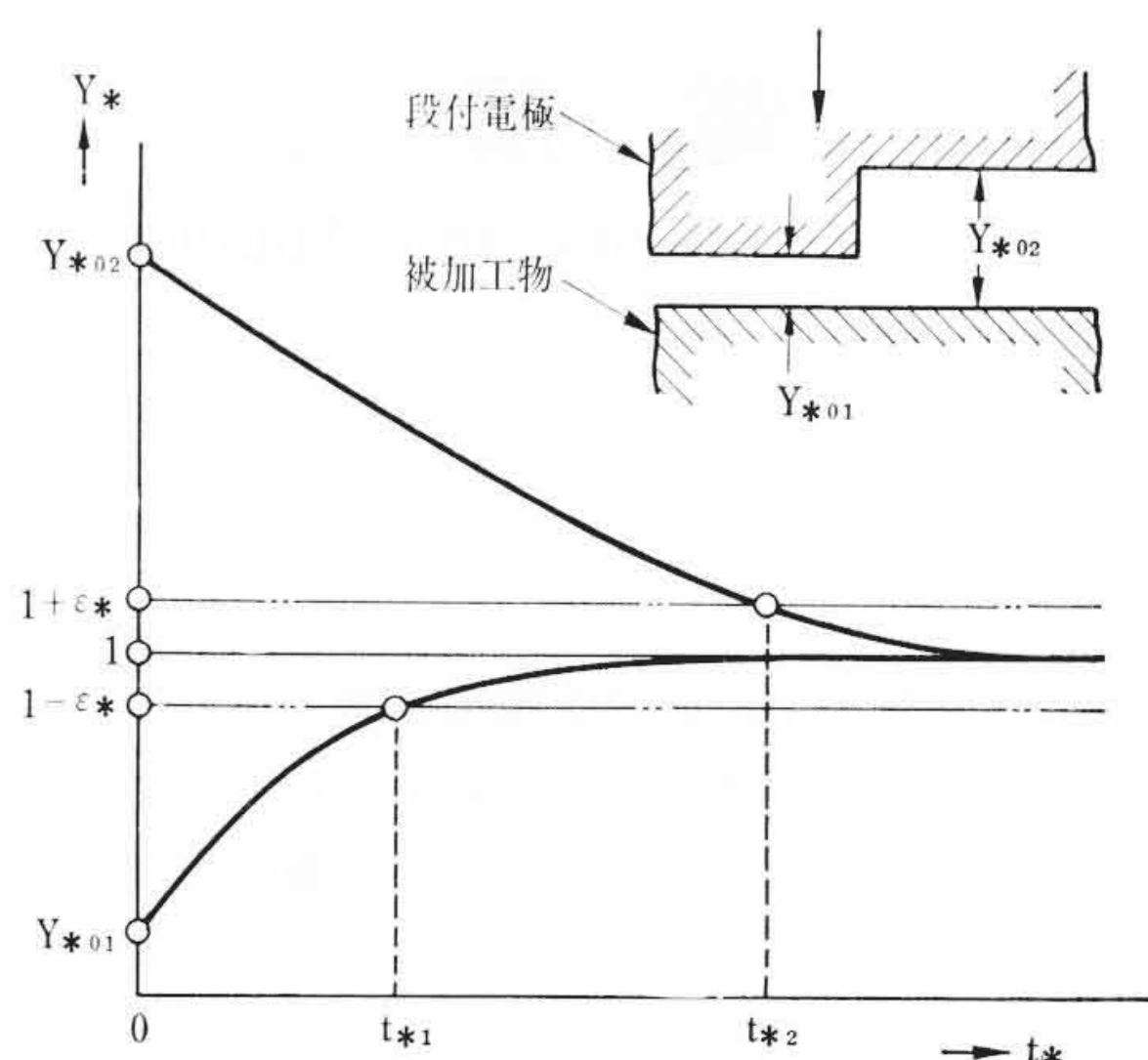


図 3 実用平衡間げき

も $Y_*=1$ となり一定の平衡加工間げきに近づくことがわかる。この場合の平衡加工間げきは (4) 式で $Y_*=1$ とおいて (9) 式で与えられる。

$$Y = \frac{m K E_{ohm}}{v} \quad \dots\dots\dots (9)$$

しかし (7) 式から明らかなように、厳密に加工間げきが平衡状態となり $Y_*=1$ となるためには、加工時間 t_* が無限大であることが必要で、実際の加工においては、(9) 式で与えられるような平衡加工間げきには初期間げきを平衡加工間げきに一致させて加工を行わないかぎり短時間では到達しない。

そこで、初期間げきが平衡加工間げきと異なる設定値を持つ一般の加工の場合は、実用的見地から、平衡加工間げきからの誤差を ϵ とすればつぎのように示される。

$$Y_* = 1 \pm \epsilon_* \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\epsilon_* = \frac{v}{m K E_{ohm}} \epsilon \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで ϵ_* , ϵ は平衡加工間げきからの誤差を示す。(10) 式を (7) 式へ代入して加工間げき Y_* と加工時間 t_* の関係を示すと (12), (13) 式となる。

$$t_* = Y_{*0} - (1 + \epsilon_*) + \ln \frac{Y_{*0} - 1}{\epsilon_*} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$t_* = Y_{*0} - (1 - \epsilon_*) + \ln \frac{1 - Y_{*0}}{\epsilon_*} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(12) 式は $Y_{*0} > 1$ の場合で、初期間げきが平衡加工間げきより大きい位置からの加工間げきの推移を示し、(13) 式は $Y_{*0} < 1$ の場合で、初期間げきが平衡加工間げきより小さい位置からの加工間げきの推移を示している。

実際の電解加工においては複雑な形状の電極により被加工物の平坦面から加工を開始することが多い。このため図 3 に示すように電極底面における初期間げきが場所によって異なってくる。

図 3 では、初期間げき Y_{*01} が平衡加工間げきより小さく、初期間げき Y_{*02} は平衡加工間げきより大きい $Y_{*02} > 1 > Y_{*01}$ に相当する位置からの電極底面における加工間げきの推移を示すものである。このとき電極底面において加工精度 ϵ_* を得るためには、初期間げきの大きい Y_{*02} に対する加工間げきが $1 + \epsilon_*$ 以内となる t_{*2} 以上加工を行わなければならないし、初期間げきの小さい Y_{*01} に対しては t_{*1} 以上加工する必要がある。結局、両者の加工精度を $1 \pm \epsilon_*$ 内に納めるためには、すくなくとも t_{*2} 以上加工を続ける必要がある。被加工物の寸法上の制約のために t_{*2} 以上加工することが不可能なときは、電極底面の段差寸法を加工間げきと時間の関係をもとにして修正を加えなければならない。

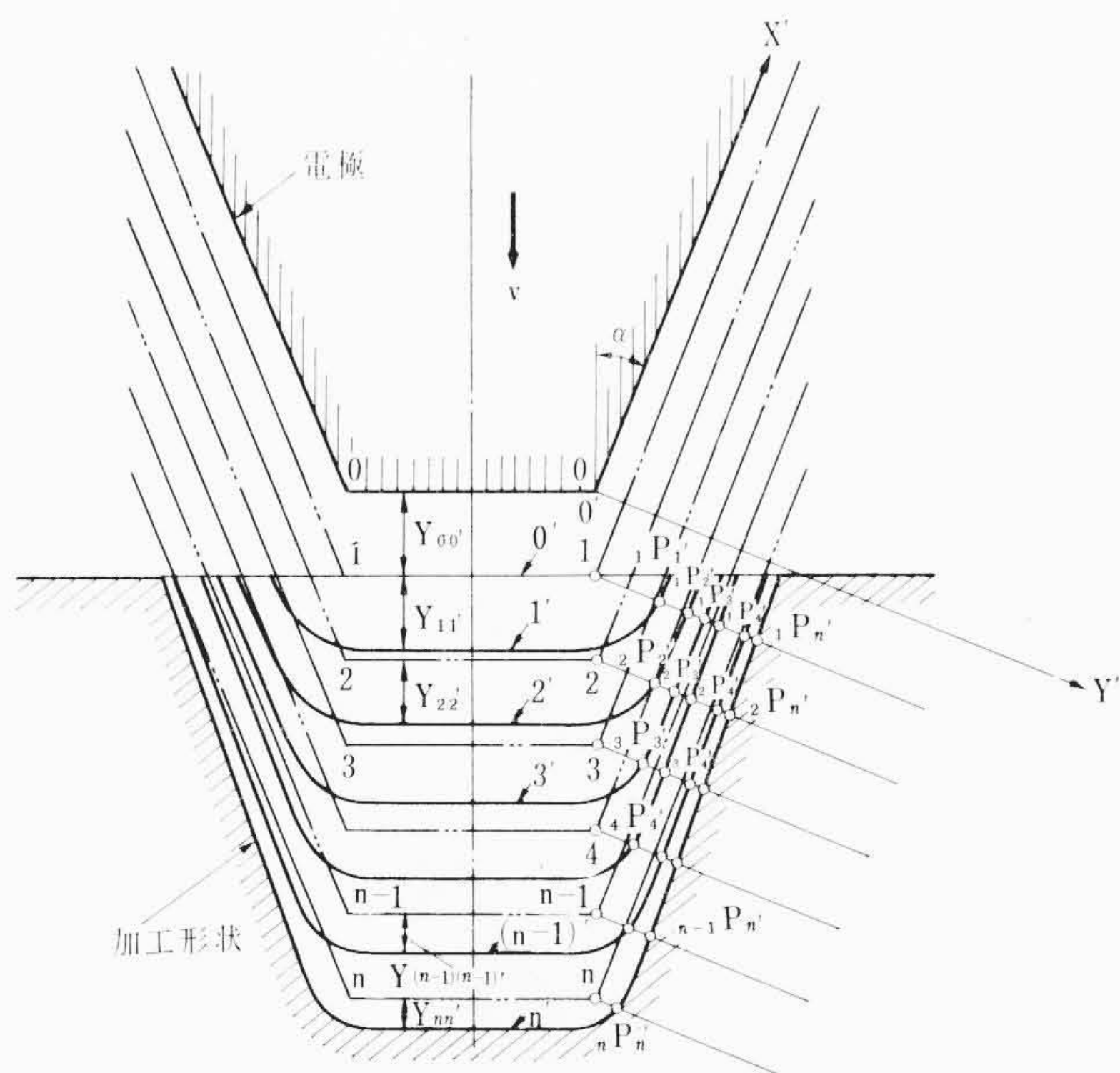


図4 加工の進行状態

以上電極底面における加工間げきの推移について示したが、初期間げきを平衡加工間げきに一致させて加工するか、所定の加工精度に納まるように加工時間をとるか、これができないときは加工間げきの推移を見込んで電極を修正することによって指定加工深さ以内で安定かつ良好な底面加工間げきが得られる。

2.2 加工形状の生成過程について

一般の複雑形状の形彫り加工においては、平たんな被加工物上面より加工を行なうため、2.1の底面加工間げきの推移にけると同様に、加工形状についても過渡加工形状から定常加工形状へ至る生成過程が存在する。

この生成過程について電極形状、電解加工条件および加工形状との相関関係を明らかにすることは、加工精度および繰返し精度に検討を加えるうえに重要である。

本項では前項の底面における平衡加工間げきの生成過程を基礎として、図4のような単純な台形状電極によって加工を行なった場合の加工形状の生成過程を示す。なおこれを行なうにあたって以下の仮定を設ける。

- (1) 電極形状は紙面と直角方向では一様であるとし、各点の加工方向は電極面に直角方向とする。
- (2) 任意の加工時間における電極角部における加工間げき(図4における距離 $\overline{O'nP'_n}$)は電極底面の加工間げき(図4における $Y_{nn'}$)に係数 ν をかけたものに等しい。すなわち

$$\overline{O'nP'_n} = \nu \cdot Y_{nn'} \quad \dots\dots\dots (14)$$

2.2.1 初期条件について

図4において電極側面の電極送り方向に対する角度を α 、加工時間 $t=0$ における電極位置を O 、被加工物上面を O' 、電極底面の初期間げきを $Y_{00'}$ 、加工時間 $t=t_n$ の電極位置を n 、被加工物加工形状を n' 、電極底面の加工間げきを $Y_{nn'}$ とする。また電極の角を原点として斜面に X' 、これと直角に Y' なる移動座標系 $O'X'Y'$ を設けておく。そこで加工形状の生成過程の検討前に、電極底面の平衡加工間げき、電極側面の平衡加工間げきおよび図4における電極1によって生成された電極角部における初期加工間げき $\overline{O_1P'_1}$ ($=\nu \cdot Y_{11'}$) との大小関係によりつぎの初期条件が得られる。

すなわち側面の平衡加工間げきについては Y' 方向の電極送り速度は $\nu \sin \alpha$ となるから、底面の平衡加工間げきを与える(9)式へ代入して求まる。

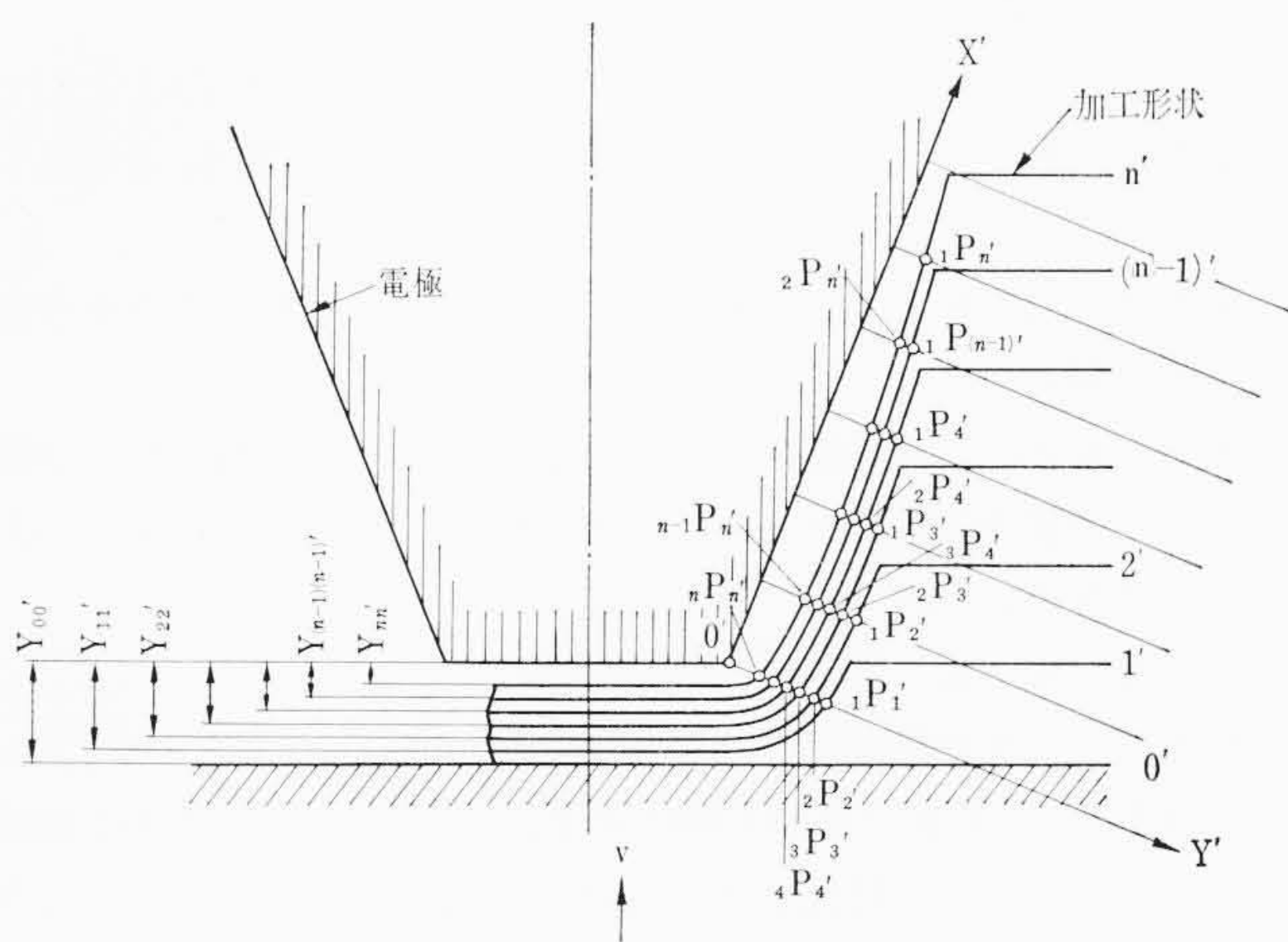


図5 加工形状の推移説明図

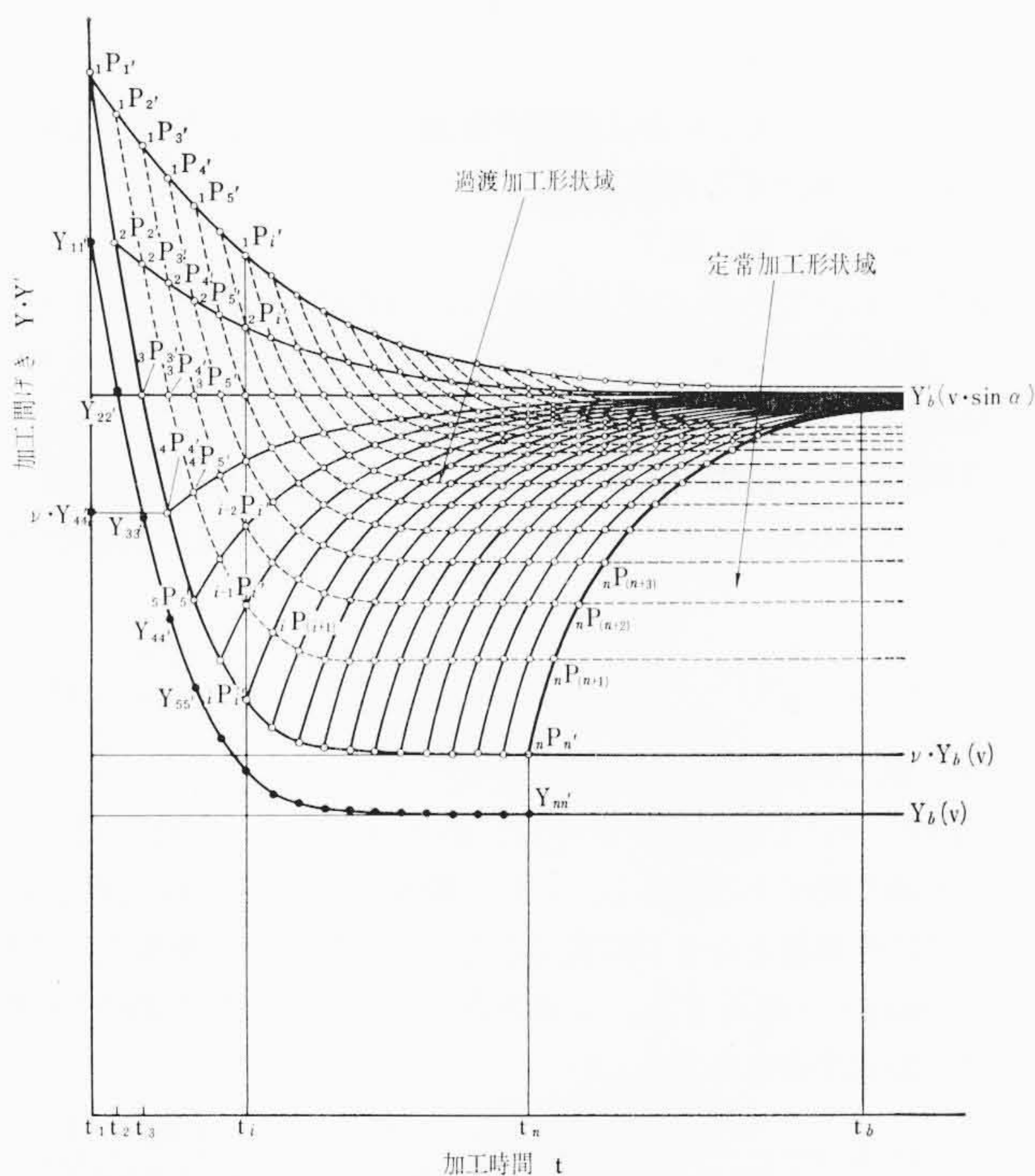


図6 加工間げきの推移

$$Y_b'(v \sin \alpha) = \frac{mKE_{ohm}}{\nu \sin \alpha} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $Y_b'(v \sin \alpha)$ は側面の平衡加工間げき
いま、(9)式において $Y=Y_b(v)$ とおきかえると、常に $\nu > \nu \sin \alpha$ であるから

$$Y_b'(v \sin \alpha) > Y_b(v) \quad \dots\dots\dots (16)$$

なる関係が存在し、同一加工条件で加工する場合、電極傾斜角度 α が小さくなるにつれて側面の平衡加工間げきは拡大する。つぎに電極角部における初期加工間げきについては、図4における電極底面の加工間げき $Y_{11'}$ および(14)式の係数 ν の大小によって決まるため上記の(16)式の関係を使って結局図4における初期条件としてつぎの5とおりの場合が存在する。すなわち

- (1) $\overline{O_1P'_1} > Y_b'(v \sin \alpha) > Y_b(v)$
- (2) $Y_b'(v \sin \alpha) > \overline{O_1P'_1} > Y_b(v)$
- (3) $Y_b'(v \sin \alpha) > Y_b(v) > \overline{O_1P'_1}$
- (4) $Y_b'(v \sin \alpha) > \overline{O_1P'_1} = Y_b(v)$
- (5) $Y_b'(v \sin \alpha) = \overline{O_1P'_1} > Y_b(v)$

2.2.2 加工間げきの推移について

上記5種類の初期条件のうち(1)の場合について $v>1$ として電極各部の加工時間と加工間げきの推移を示すと図5, 6のようになる。

図5は説明の便宜上、電極を静止させ、被加工物に送りを与えてある。図6では加工時間 $(t-t_1)$ 以後の関係を示してある。

本図をもとに、電極底部、電極角部、加工形状上端部および任意の加工形状上の電極と相対する加工間げきの推移を示すとつぎのようになる。

(a) 電 極 底 部

図5において初期間げき Y_{00}' からはじまる $Y_{11}', Y_{22}', \dots, Y_{nn}'$ の直線を示し、図6では加工間げき $Y_{11}', Y_{22}', \dots$ と変化する曲線を示している。加工時間と加工間げきの関係は(7)式によって与えられ、これを次元式で示すと(17)式で与えられる。

$$t = \frac{1}{v} (Y_{00}' - Y) + \frac{A}{v^2} \ln \frac{A - vY_{00}'}{A - vY} \quad (17)$$

ここで、 $A = mKE_{ohm}$

すでに記したように加工時間の経過につれて底面平衡加工間げき $Y_b(v)$ に漸近する曲線となる。

(b) 電 極 角 部

図5において $t=t_1$ のとき生成される $\overline{O_1P_1'}$ を初期間げきとして Y' 軸上を ${}_2P_2', {}_3P_3', \dots, {}_nP_n'$ と減少する経過をたどり、図6でも同様に ${}_1P_1', {}_2P_2', \dots, {}_nP_n'$ と電極角部の平衡加工間げき量、すなわち電極底面の平衡加工間げき $Y_b(v)$ に係数 v を乗じた $v \cdot Y_b(v)$ へ漸近する。このときの加工時間と加工間げきの関係は(18)式で与えられる。

$$t - t_1 = \frac{1}{v} (Y'_{t_1} - Y') + \frac{A}{v^2} \ln \frac{A - vY'_{t_1}}{A - vY'} \quad (18)$$

(c) 加工形状上端部

図5において初期間げき $\overline{O_1P_1'}$ からはじまり点 ${}_1P_2', {}_1P_3', \dots, {}_1P_n'$ と加工間げきは推移し、これを図6で示すと同様に ${}_1P_1', {}_1P_2', \dots, {}_1P_n'$ の曲線となり(15)式で与えられる側面の平衡加工間げき $Y_b'(v \sin \alpha)$ へ漸近する。このときの加工時間と加工間げきの関係は(19)式で与えられる。

$$t - t_1 = \frac{1}{v \sin \alpha} (Y'_{t_1} - Y') + \frac{A}{(v \sin \alpha)^2} \ln \frac{A - v \sin \alpha \cdot Y'_{t_1}}{A - v \sin \alpha \cdot Y'} \quad (19)$$

(d) 任意の加工形状上について

つぎに任意の加工形状上の加工間げきの推移はつぎのように示される。一例として図5における加工形状の一点 ${}_2P_n'$ の生成過程は電極角部における初期加工間げき $\overline{O_2P_2'}$ から点 ${}_2P_3', {}_2P_4', \dots$ をたどって点 ${}_2P_n'$ に至ったものであり、図6では、電極角部の加工間げきを示す曲線上の一点 ${}_2P_2'$ からはじまって ${}_2P_3', {}_2P_4', \dots, {}_2P_n'$ と変化する曲線を示している。

このように同一加工形上の各点の加工間げきはそれぞれ異なる電極角部の加工間げきを初期間げきとして、電極側面との対向時間をもとにして求まることになる。

したがって任意の加工形状上の加工間げきと加工時間との関係は(20)式で与えられる。

$$t - t_i = \frac{1}{v \sin \alpha} (Y'_{ti} - Y') + \frac{A}{(v \sin \alpha)^2} \ln \frac{A - v \sin \alpha \cdot Y'_{ti}}{A - v \sin \alpha \cdot Y'} \quad (20)$$

ここで Y'_{ti} は $t=t_i$ における電極角部の加工間げきを示し(18)式から求まる。図6の電極角部の加工間げきの推移を示す曲線上から出ている ${}_iP_i', {}_iP_{(i+1)}'$ の曲線がこれに相当し、いずれも側面の平衡加工間げき $Y_b'(v \sin \alpha)$ へ漸近する。

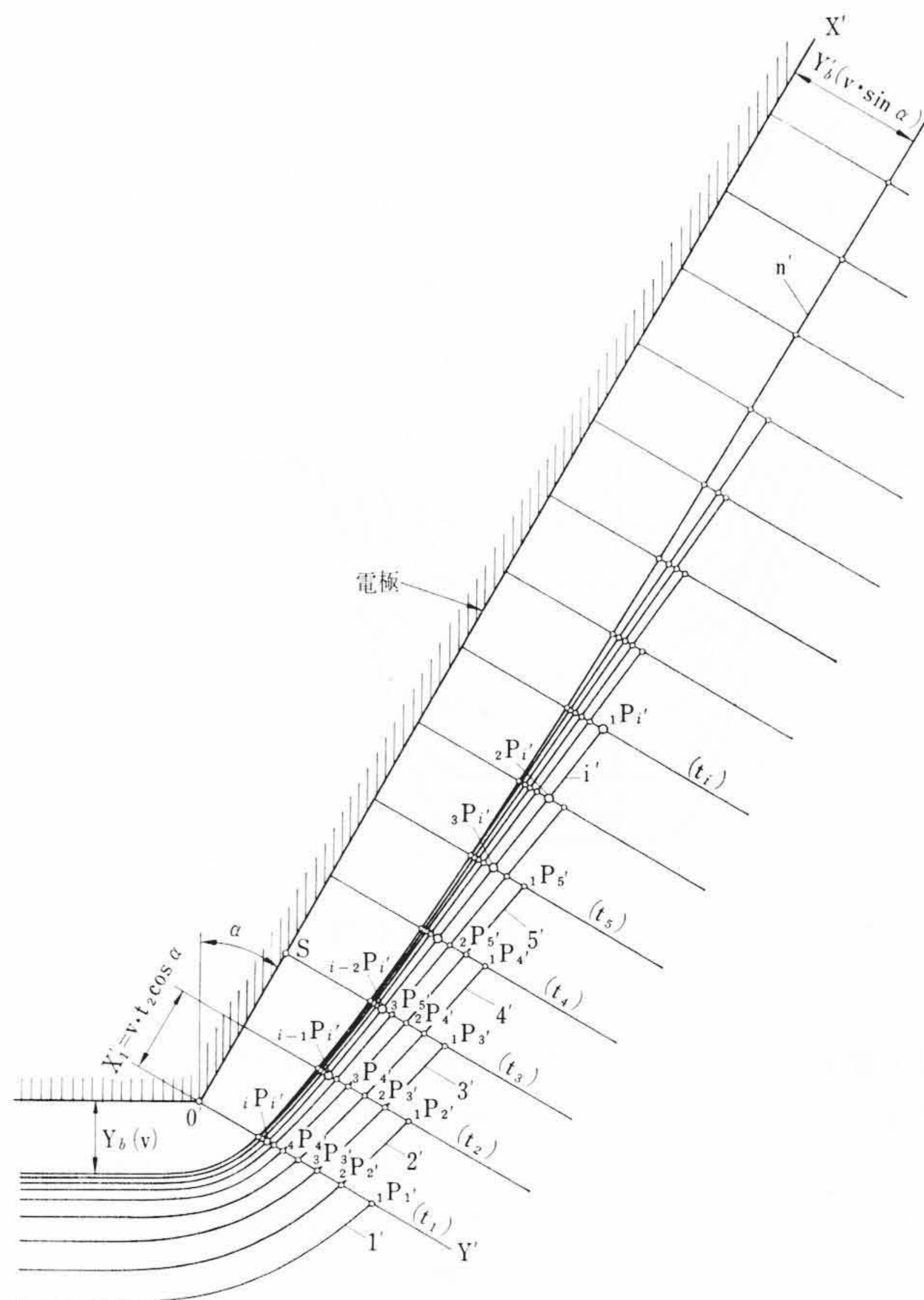


図7 加工形状の推移

2.2.3 加工形状の推移について

2.2.2の加工間げきの生成を基にして、過渡的加工形状から定常加工形状へ移行する過程について説明し、さらに定常加工形状の式を示す。

過渡的加工形状の求め方については $t=t_1, t_2, \dots, t_i$ を(18)式に代入し、電極角部における加工間げき $Y'_{t_1}, Y'_{t_2}, \dots, Y'_{t_i}$ を求め、これを初期間げきとして(20)式を用いて $t=t_i$ までの加工間げき Y' を求める。また電極の送り速度 v 、電極側面に沿う X' 座標と加工時間 t との間には

$$X' = v \cos \alpha \cdot t \quad (21)$$

の関係があり、これらを用いて求めた各加工時間における加工形状を図7に示す。図7は電極を静止させて、被加工物に送りを与えたものとして示してある。本図から明らかなように、電極側面における加工間げきが時間の経過につれて、一定の値に収れんしてくる。

つぎにこの加工形状が過渡状態から定常状態へ推移する過程は図6, 7において説明を加える。

図6において、一例として点 ${}_1P_3', {}_2P_4', {}_3P_5', \dots$ を結ぶ点線で示された曲線に注目する。この点線上の点は図7からも明らかなように、それぞれ電極の角部における初期間げき ${}_1P_1', {}_2P_2', {}_3P_3', \dots$ が生成されてから電極側面との同一対向時間 t_3 後の各位置における加工間げきを示している。

これらの点線群で示された曲線は加工時間の経過にしたがって、時間軸に平行となってくることがわかる。物理的には、この点線群および実線で示してある電極底面の加工間げきを示す曲線 $Y_{11}', Y_{22}', \dots, Y_{nn}'$ さらに電極角部における加工間げきを示す曲線 ${}_1P_1', {}_2P_2', \dots, {}_nP_n'$ のすべてが時間軸に平行となったときに加工形状は過渡状態から定常状態へ移行したことを意味している。図6

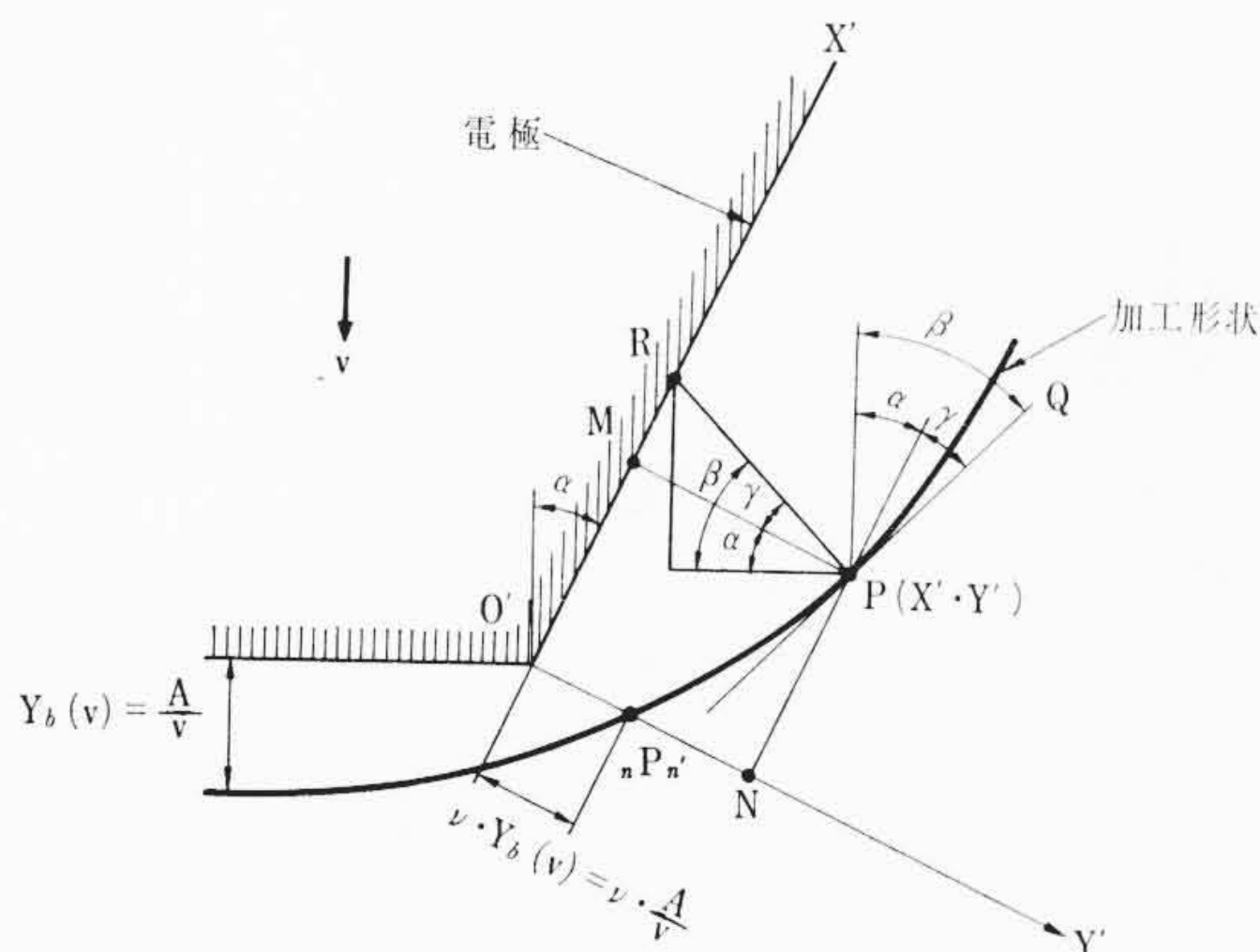


図8 電極と加工形状の関係

において、電極底面の加工間げきが平衡に達すると同時に、電極角部の加工間げきも $\nu \cdot Y_b(v)$ なる平衡値に達しており、この平衡に達した点を ${}_nP_n'$ とすれば、ここから ${}_nP_{(n+1)}'$, ${}_nP_{(n+2)}'$ …… を通って側面の平衡加工間げき $Y_b'(v \sin \alpha)$ へ漸近する太い実線の右側において前記の点線群はすべて時間軸と平衡となっている。したがって、過渡加工形状域と定常加工形状域の限界を示す曲線は ${}_nP_n'$, ${}_nP_{(n+1)}'$ …… で示され、これは(22)式で与えられる。

$$t - t_n = \frac{1}{v \sin \alpha} (\nu Y_b(v) - Y') + \frac{A}{(v \sin \alpha)^2} \ln \frac{A - v \sin \alpha \cdot \nu Y_b(v)}{A - v \sin \alpha Y'} \quad (22)$$

ここで t_n は電極底面が平衡加工間げき $Y_b(v)$ に達するまでの加工時間を示す。なお前記点線群は電極底面に近いところから平行に達していることから、加工形状の定常化は電極底部から次第に上部へ進行し、加工時間 t_b において加工形状全域が定常化する。厳密には t_b は無限大であるが、実用的には加工間げきが誤差 $\pm \varepsilon$ 内にはいるまでの加工時間をもって t_b とする。

つぎに定常加工形状を与える式を求める。

電極角部の加工間げきが平衡に達した点をもとにして新しく時間 T を設ければ

$$T = t - t_n \quad (23)$$

また、電極送り速度 v 、時間 T と座標 X' との間には

$$X' = v \cos \alpha \cdot T \quad (24)$$

の関係がありこれらを用いて

$$X' = \frac{\cot \alpha}{v} \left(\nu \cdot A - v Y' + \frac{A}{\sin \alpha} \ln \frac{1 - \nu \sin \alpha}{1 - \frac{v \sin \alpha}{A} Y'} \right) \quad (25)$$

が定常加工形状を与える式で、図7に示す形状 n' がこれに相当する。

2.3 定常加工形状と電極形状間の関係

電解加工による形彫り作業においては、図面形状で定められた深さ以内で定常加工形状に到達させ、かつ図面形状と一致させなければならない。このためには(25)式で与えられる定常加工形状をもとにして電極形状との間に存在する関係を明らかにすることが重要である。すなわち与えられた図面形状を定常加工形状とするような電解加工条件および電極形状を決定することが必要となる。この関係が不明であると、良好な加工精度を得るための電解加工条件ならびに電極形状の決定に際してあれこれ多くの実験を重ねなければならぬきわめて非能率的となる。

本項では、この電極形状と定常加工形状間の相関関係を示す。

図8は、これまで述べてきた電極の送り方向と、角度 α を有する

電極によって生成された定常加工形状を示している。ここで定常加工形状上の一点 P をとりこの座標を $P(X', Y')$ とする。この P 点で定常加工形状上に接する接線 PQ を引き、接線 PQ の法線を PR とし、電極の送り方向と接線 PQ との角度を β とし、また電極斜面と接線 PQ とのなす角度を γ とする。

このとき

$$\tan \gamma = \frac{dY'}{dX'} \quad (26)$$

また

$$\frac{Y'}{\cos \gamma} \sin(\alpha + \gamma) = PR \sin \beta \quad (27)$$

の関係があるから上式は

$$Y' \left(\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \frac{dY'}{dX'} \right) = PR \sin \beta \quad (28)$$

となり、さらに定常加工形状の(25)式から(29)式の関係が得られる。

$$\frac{dY'}{dX'} = \frac{A}{v \cos \alpha Y'} - \tan \alpha \quad (29)$$

(28)式を(29)式へ代入してつぎの関係が得られる。

$$PR \sin \beta = \frac{A}{v} (= Y_b(v)) \quad (30)$$

(29)式が定常加工形状上の任意の点に立てた法線 PR 、接線の電極送り方向となす角 β 、さらに電極底面の理論平衡加工間げき $Y_b(v)$ との相関関係を示す式である。

つぎに電極の側面の角度 $\alpha = 0$ の場合について(30)式の関係が成立しているかを調べる。

電極側面における加工間げきの関係は、電極送り速度成分が0であるため

$$\frac{dY'}{dt} = \frac{A}{Y'} \quad (31)$$

また $dX' = v dt$ であるから上式は

$$\frac{dY'}{dX'} = \frac{A}{v Y'} \quad (32)$$

一方(28)式で $\alpha = 0$ とすれば

$$PR \sin \gamma = Y' \frac{dY'}{dX'} \quad (33)$$

となり(33)式へ(32)式を代入して

$$PR \sin \gamma = \frac{A}{v} (= Y_b(v)) \quad (34)$$

となり(30)式と同様の関係が成立している。

この場合の定常加工形状を与える式は(32)式を積分してつぎのようになる。

$$X' = \frac{v}{2A} \left(Y'^2 - \nu^2 \frac{A^2}{v^2} \right) \quad (35)$$

$\alpha = 0$ の場合には電極側面の平衡加工間げきは $\alpha > 0$ のときと異なり一定値に取れんせず加工の進行につれ増大しつづける。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

実験装置のブロック線図を図9に、装置の仕様を表1に、実験装置の外観を図10に示す。本実験装置は基本的にはつぎの4部分により構成されている。

- (i) 加工機本体
- (ii) 直流電源
- (iii) 電解液タンク関係
- (iv) 運転操作卓

加工機は電極を取り付ける電極取付け板を有しここへ直流電源か

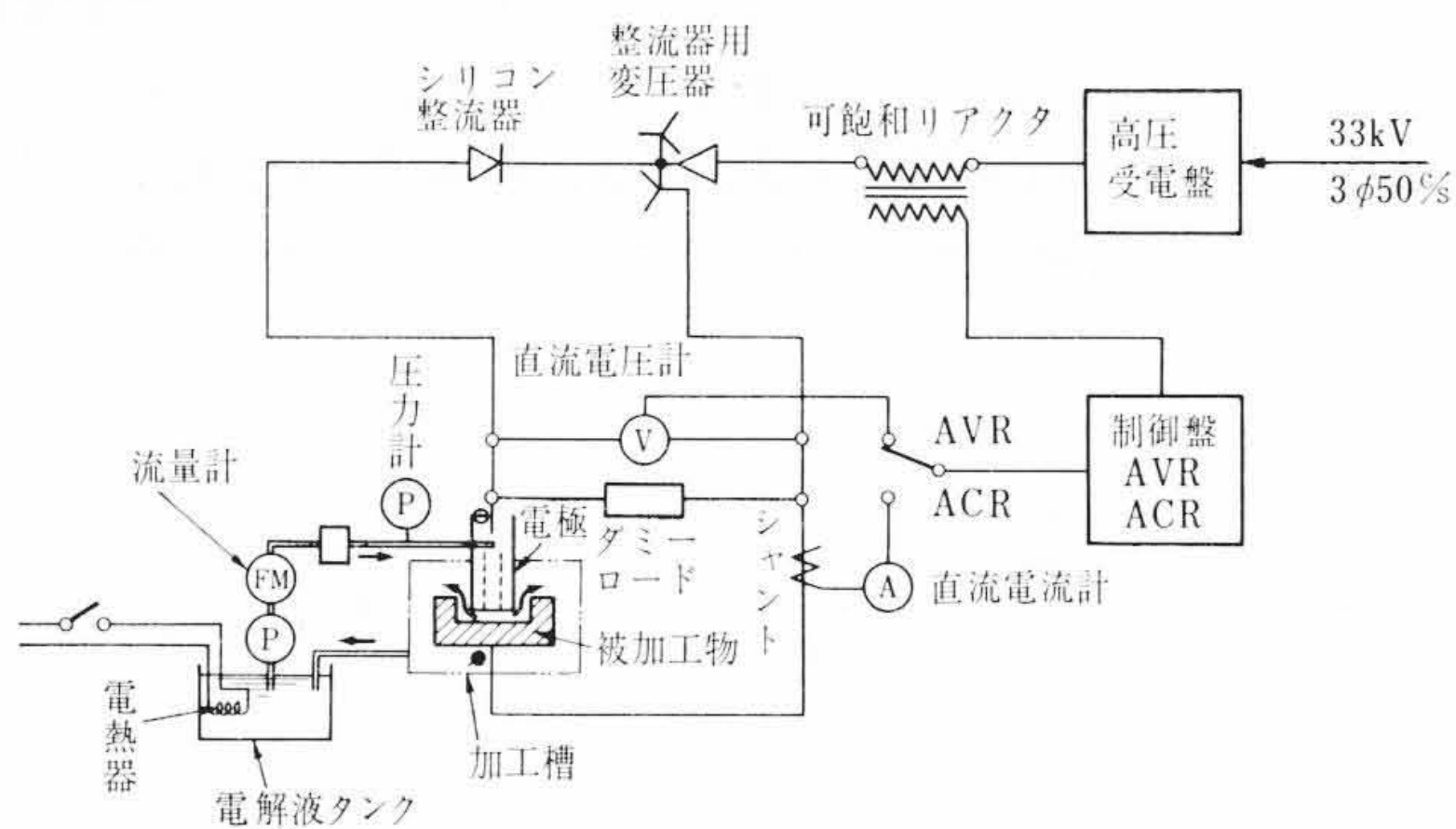


図 9 実験装置のブロック線図

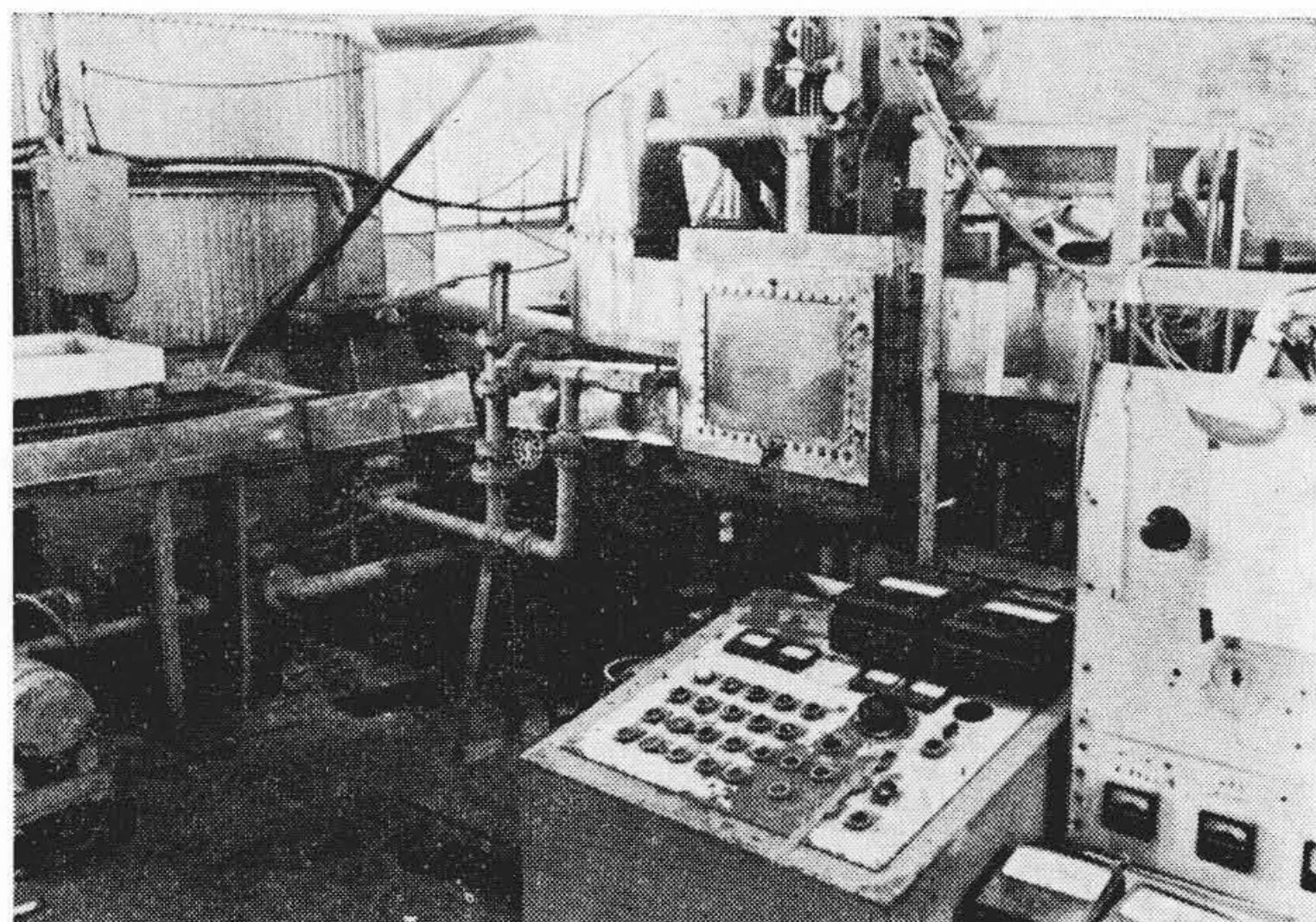


図 10 実験装置

表 1 実験装置の仕様

分 類	機 器 名	仕 様
電解液供給関係	電 解 液 タ ン ク	1,500×2,500×1,200
	電 解 液 ポ ン プ	400 l/min 20kg/cm ²
	電 解 液 電 熱 器	33 kW 3φ 200 V
	フ ィ ル タ	100 μ
加 工 器	主 軸 送 り 速 度	0.2~20 mm/min
	主 軸 送 り 電 動 機	DC 400 W 分巻界磁形
直 流 電 源	高圧コンビネーションスタータ	3.3 kV 3φ 50 c/s
	可 飽 和 リ ア ク タ	700 kVA 3.3 kV
	変 圧 器	650/920 kVA 3.3 kV/DC 45V
	シ リ コ ン 整 流 器	30 V 12 kA
	制 御 盤	

らの負端子、また被加工物を載せるテーブルへは正端子が接続されている。電極の送りは直流サーボ電動機により、ラムを介して電極を定速で送っている。また電極の送り深さを指示するインジケータを有し、さらに電極および被加工物は加工中の電解液の飛散を防止するようプラスチック製の加工槽内に納められている。また加工中に発生する水素ガスはファンによって屋外へ排出している。

電源系統は 3.3 kV、3φ、50 c/s を受電する屋外高圧受電盤、出力電圧ならびに電流を制御する可飽和リアクトル、高圧から低圧へおとす整流器用変圧器およびシリコン整流器より成っている。

電解液タンク関係は、電解液タンク内の電解液をフィルタを通してポンプにより加工機内ラムへ圧送し、電極取付け板に固定された電極内部を通して加工間げきへ供給される。ここで加工により発生した電解析出物といっしょになって電解液タンクへ戻される。電解析出物はタンク内で分離され、またタンク内には電解液温制御装置が設けてある。

運転操作卓には各部の運転操作作用押ボタン、電圧計、電流計、電極送り速度用指示計などが一括してまとめられている。

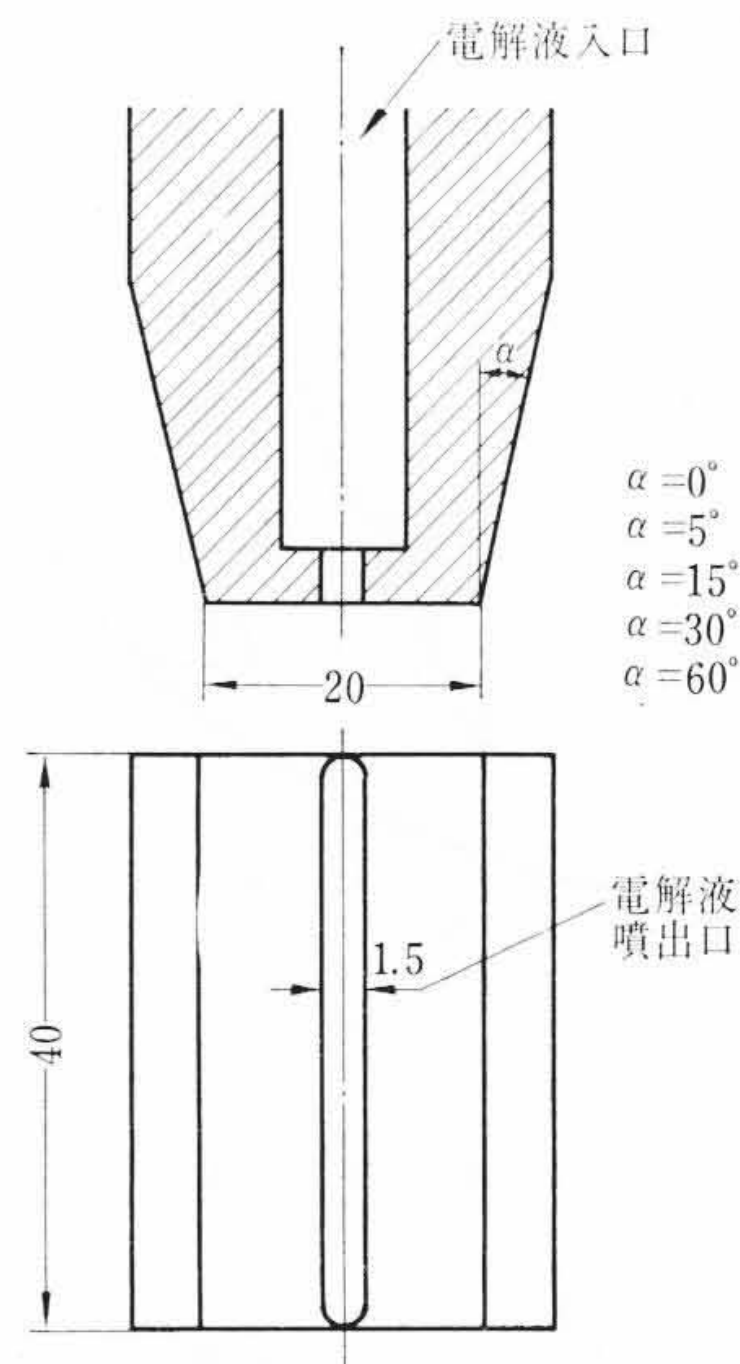


図 11 電 極

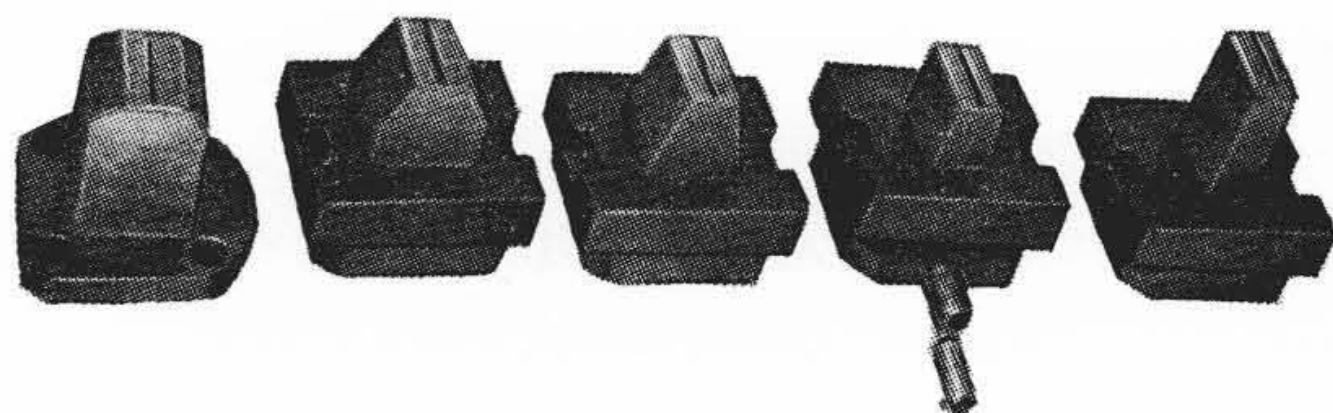


図 12 電 極

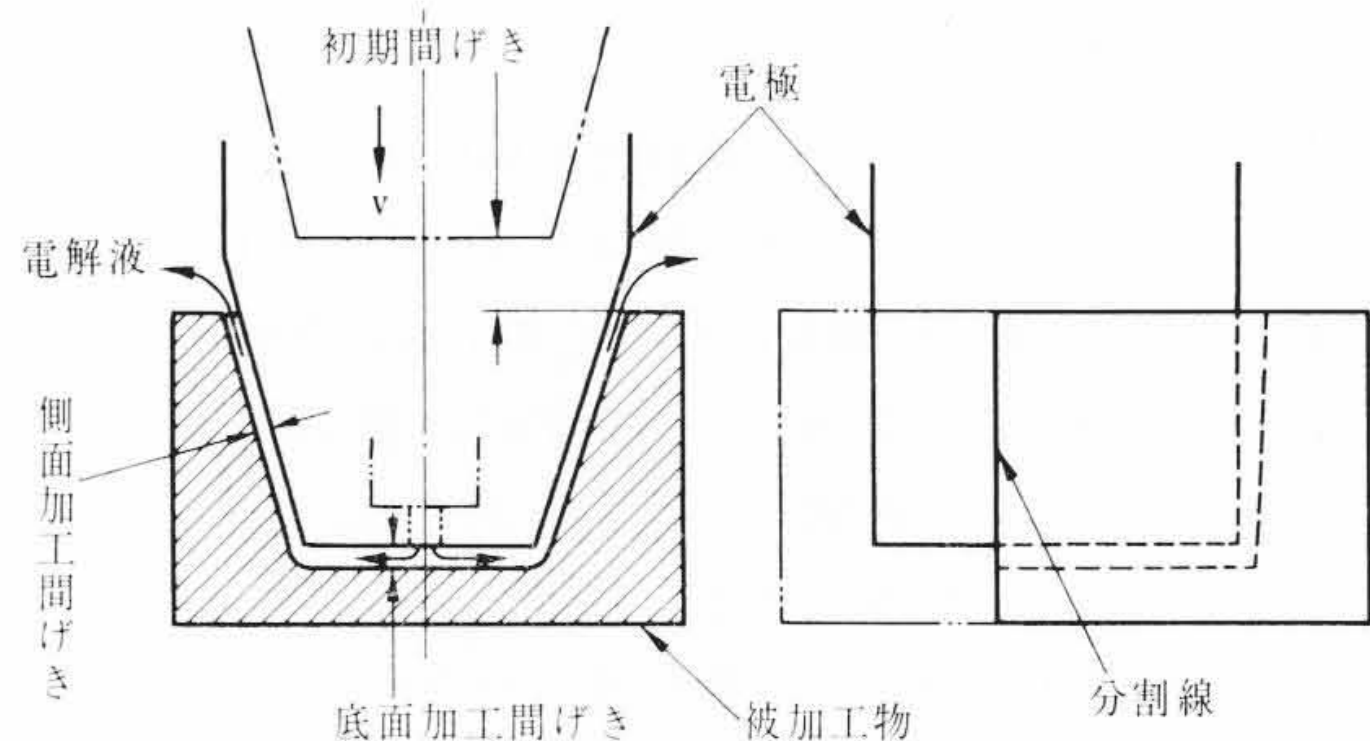


図 13 被 加 工 物

3.2 実験方法

電極底面の加工間げきの推移、加工形状の推移および定常加工形状と電極形状との関係を調べるために使用した電極の寸法を図 11 に、その外観を図 12 に示した。電極側面の傾斜角度としては $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の 5 種をとった。

被加工物は加工形状を測定しやすいように 2 分割のブロックをボルトで結合したものをを用い、加工後に分解して加工形状を U. M. M. および万能投影器で測定した。被加工物の材質は S45C で、被加工物の分割線と電極の関係を示したのが図 13 である。

電解液として NaCl 10% (重量) 水溶液を使用し、電解液の供給圧力を 11.2~12.0 kg/cm² とした。

印加電圧については $E = 3, 7, 11, 15$ V、電極送り速度としては各実験に応じて $v = 0.3, 0.7, 1.1, 1.5$ mm/min を適宜えらんだ。

4. 実験結果および考察

4.1 底面の加工間げき

(i) 初期間げきと平衡加工間げき

印加電圧 11 V、電極送り速度 11 mm/min、電解液温度 43°±1.5°C の同一加工条件のもので、初期間げき 0.3, 5.3, 10.3 mm の 3 種類について電極送り量と加工間げきの関係を求めて図 14 に

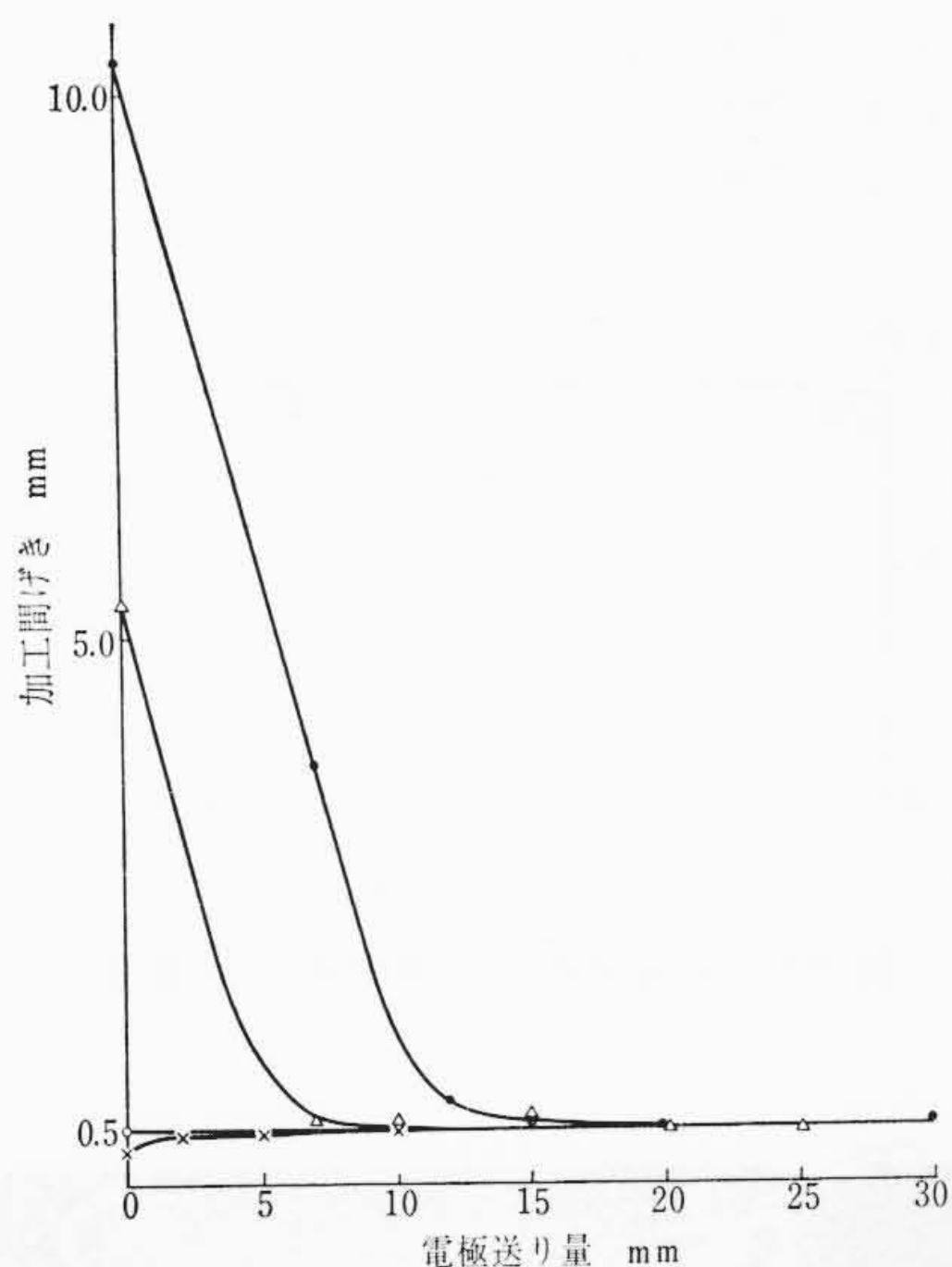


図 14 初期間げきと平衡加工間げき

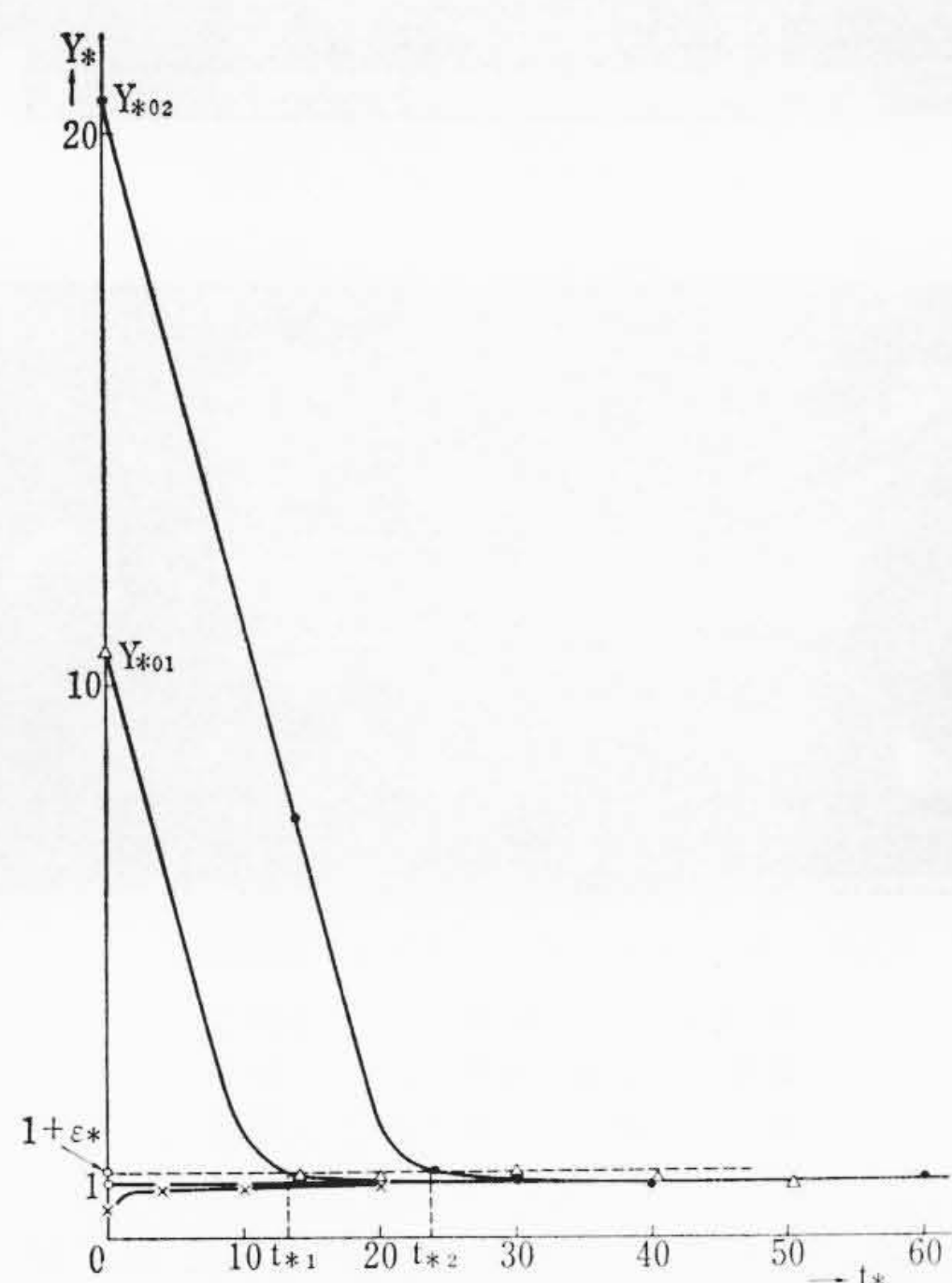


図 15 無次元平衡加工間げき

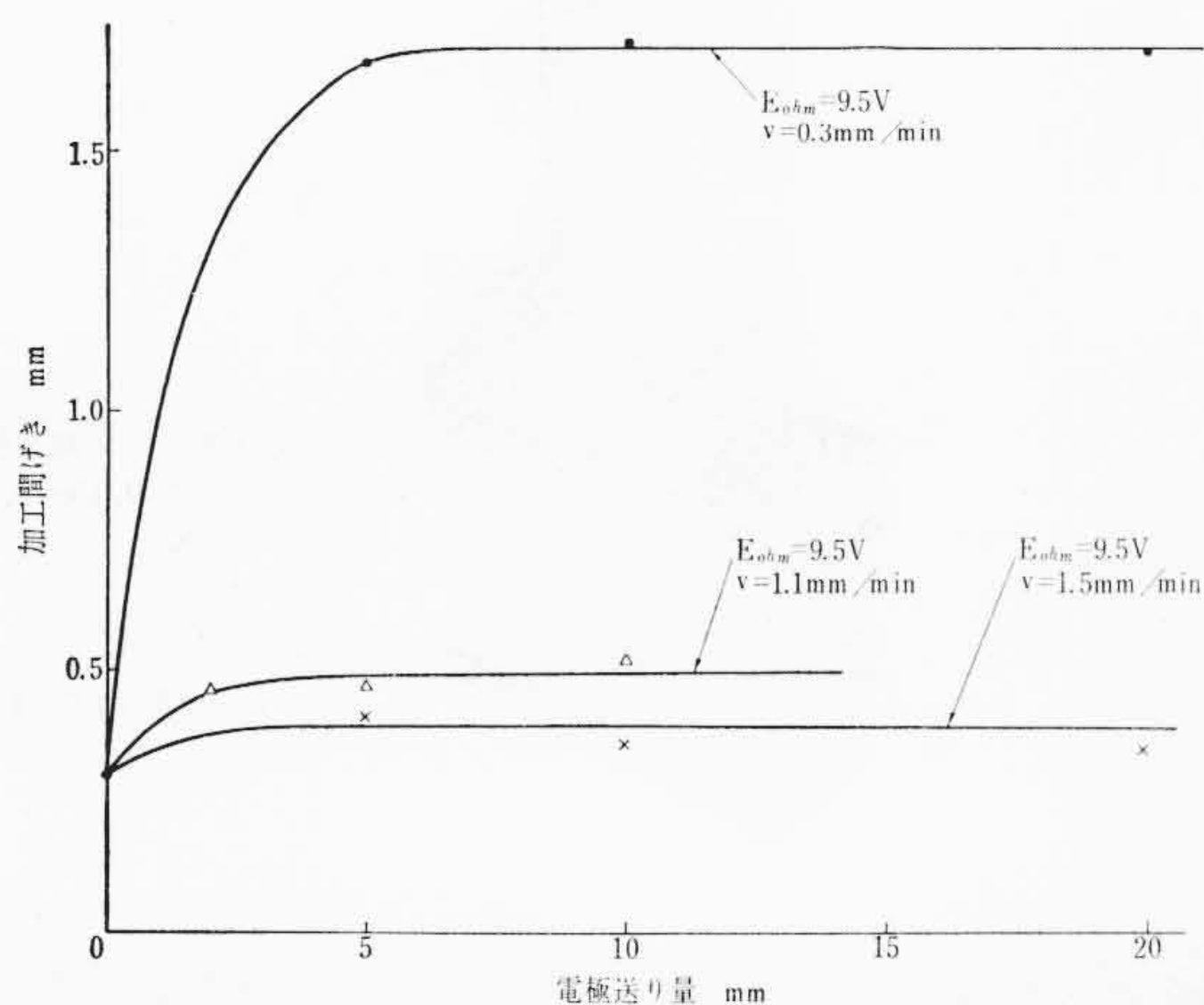


図 16 電極送り速度と平衡加工間げき

示した。図 15 は無次元表示である。いずれの初期間げきについても一定の平衡加工間げきへ近づき、平衡加工間げきに近いものほど短時間で平衡に達する。また $\epsilon = 0.01 \text{ cm}$, $\epsilon_* = 0.2$ として実用的に平衡に達する t_* を求めると、 $Y_{*02} = 20.6$ に対し $t_{*2} = 23.98$,

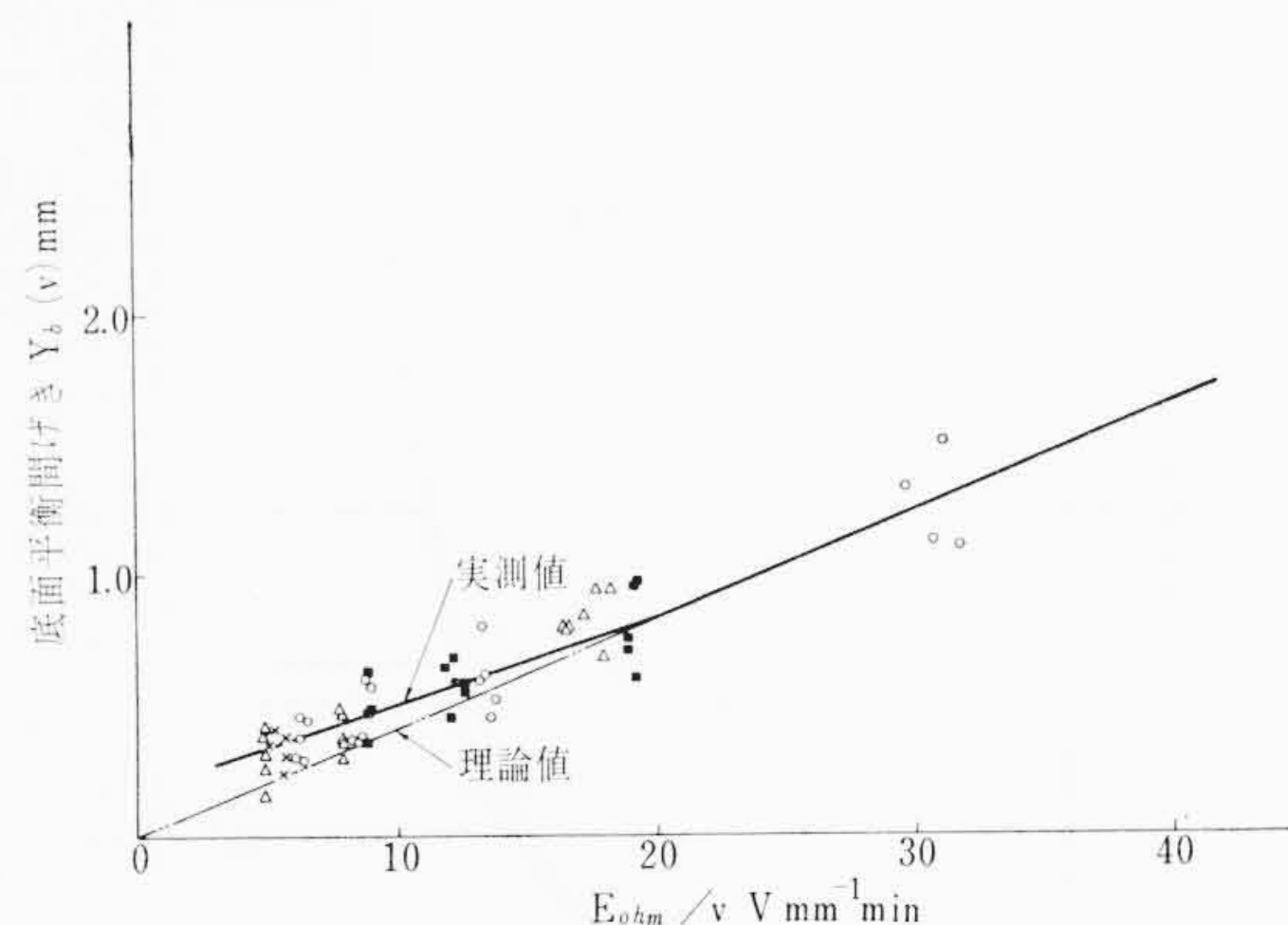
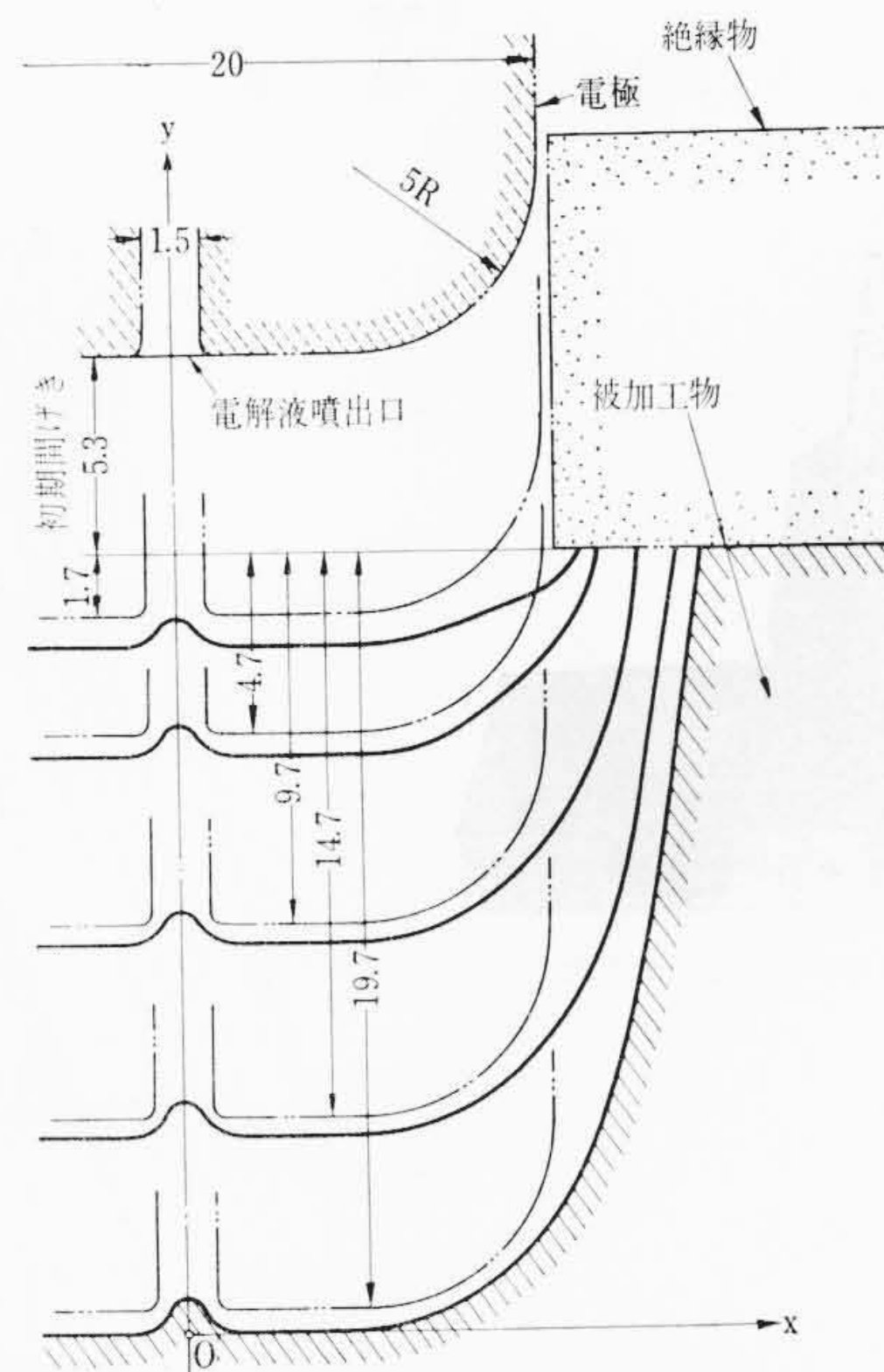
図 17 $Y_b(^\circ\text{C})$ と E_{ohm}/v との関係

図 18 加工形状の推移(加工実験による)

$T_{*01} = 10.6$ に対し $t_{*1} = 13.36$ となり実験値とよく一致している。

(ii) 電極送り速度と平衡加工間げき

初期間げき 0.3 mm 、印加電圧 11 V と一定とし、電極送り速度を $0.3, 1.1, 1.5 \text{ mm/min}$ の 3 種に変えたときの電極送り量と加工間げきの実験結果を図 16 に示した。この結果、電極送り速度が大きいほど、すなわち E_{ohm}/v が小さいほど平衡加工間げきに達する時間は短くなることがわかる。

(iii) E_{ohm}/v と平衡加工間げき

初期間げき 0.3 mm 一定とし、印加電圧と電極送り速度を 3.2 に示した 4 種類ずつとり、電解液温度 $30 \sim 44.6^\circ\text{C}$ に対して 54 個の底面の平衡加工間げきと E_{ohm}/v との関係を図 17 に示した。2 点鎖線は 54 個の平均電解液温度 37.5°C に対する計算値で、電解液の比電導度 $K^{(5)} = 0.185 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, $m = 3.68 \times 10^{-5} \text{ A}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^3$ ($\eta = 100\%$, $M = 55.85 \text{ g}$, $n = 2$, $F = 96,500 \text{ クーロン/g 当量}$, $\rho = 7.86 \text{ g/cm}^3$) として求めたものである。

E_{ohm} は印加電圧 E^V から実験的分解電圧⁽⁶⁾ 1.5 V を減じた値である。実験値は E_{ohm}/v 直線的関係を示し、計算値とほぼ一致しているが E_{ohm}/v が 20 以下で差を生じておりこの原因については究明中である。

4.2 加工形状の推移

(i) 過渡および定常加工形状

$\alpha = 0^\circ$ の電極を用い 4.1 (i) におけるものと同一の加工条件で

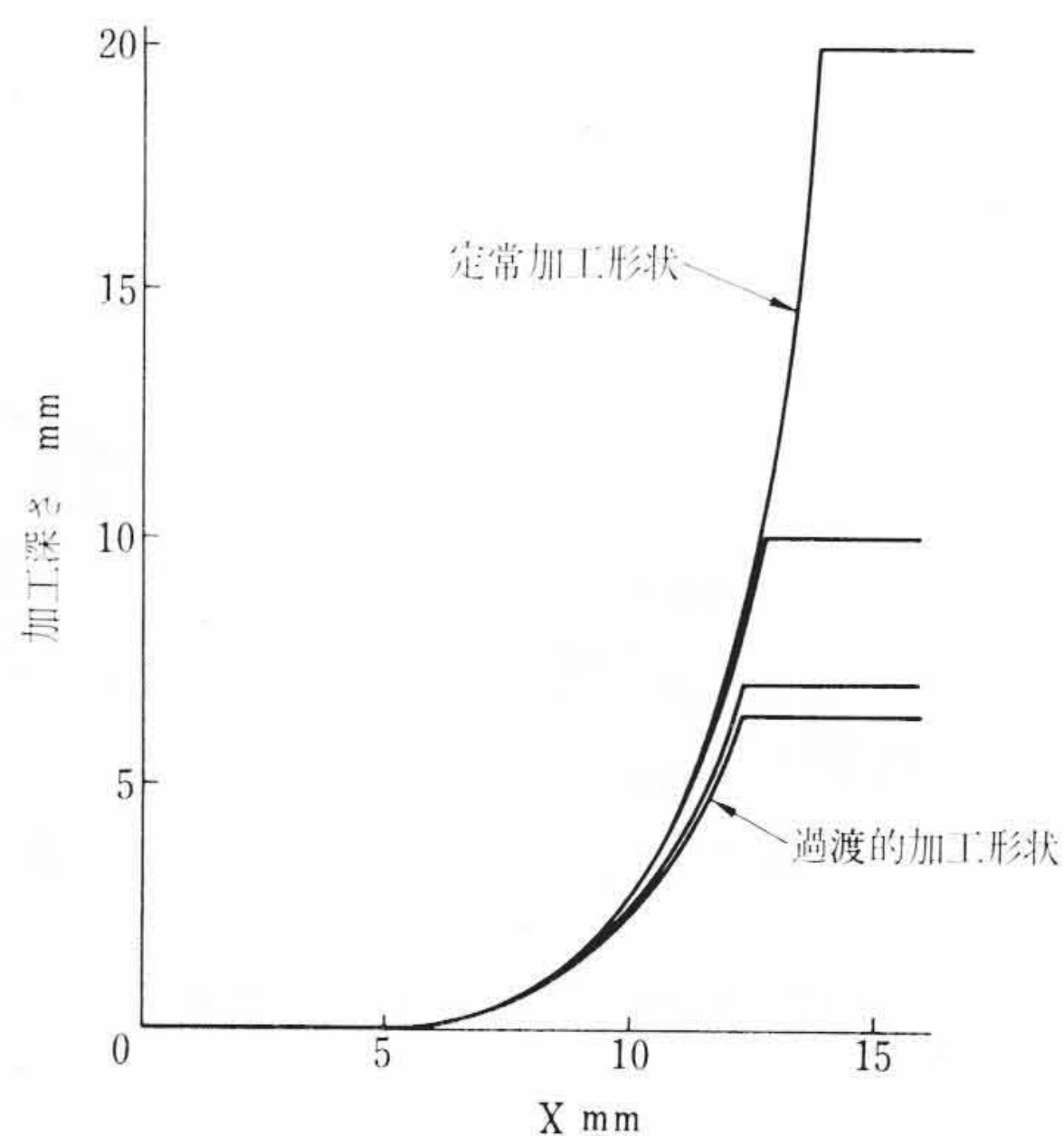


図19 再現性

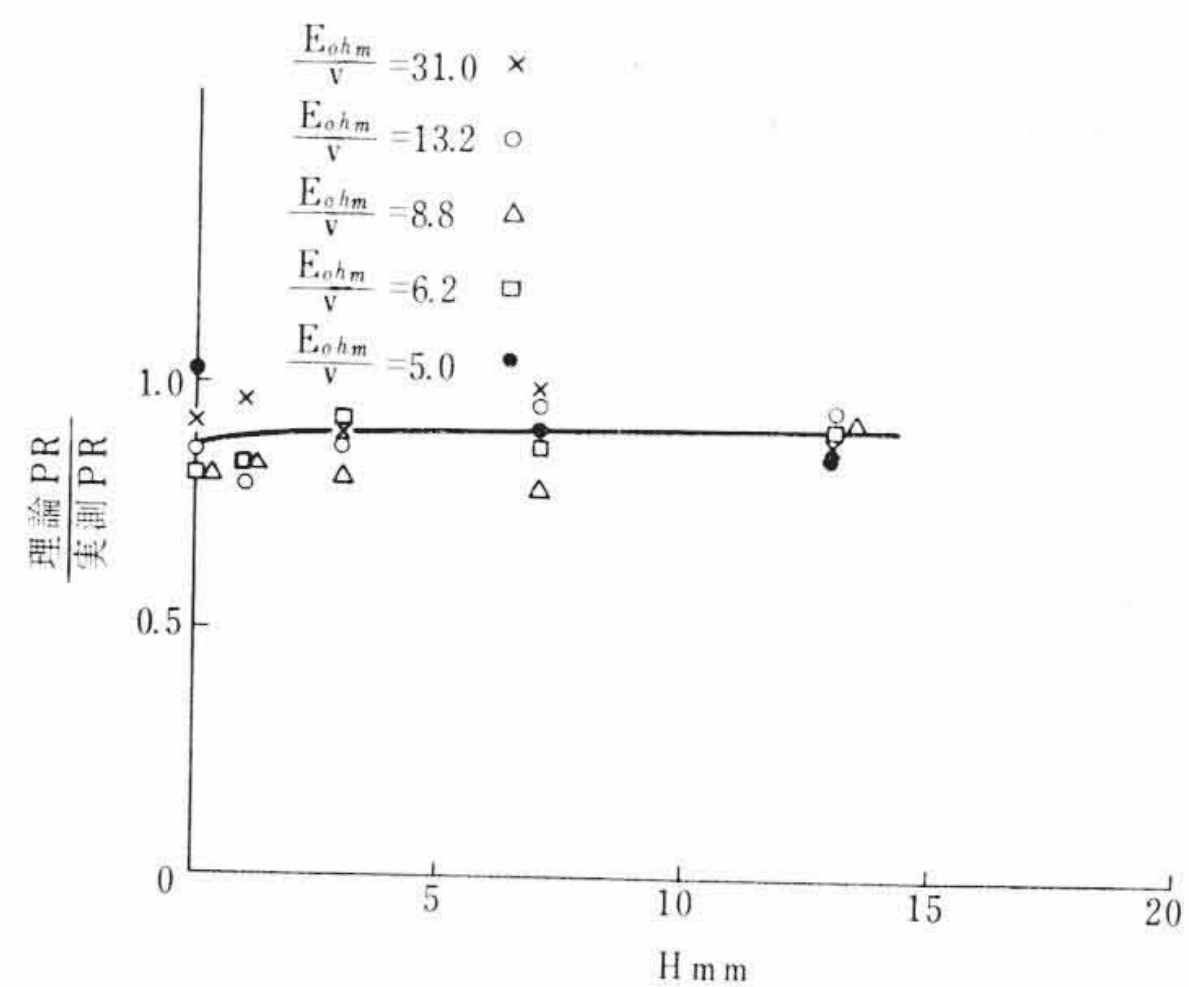


図22 理論PRと実測PRの一致度

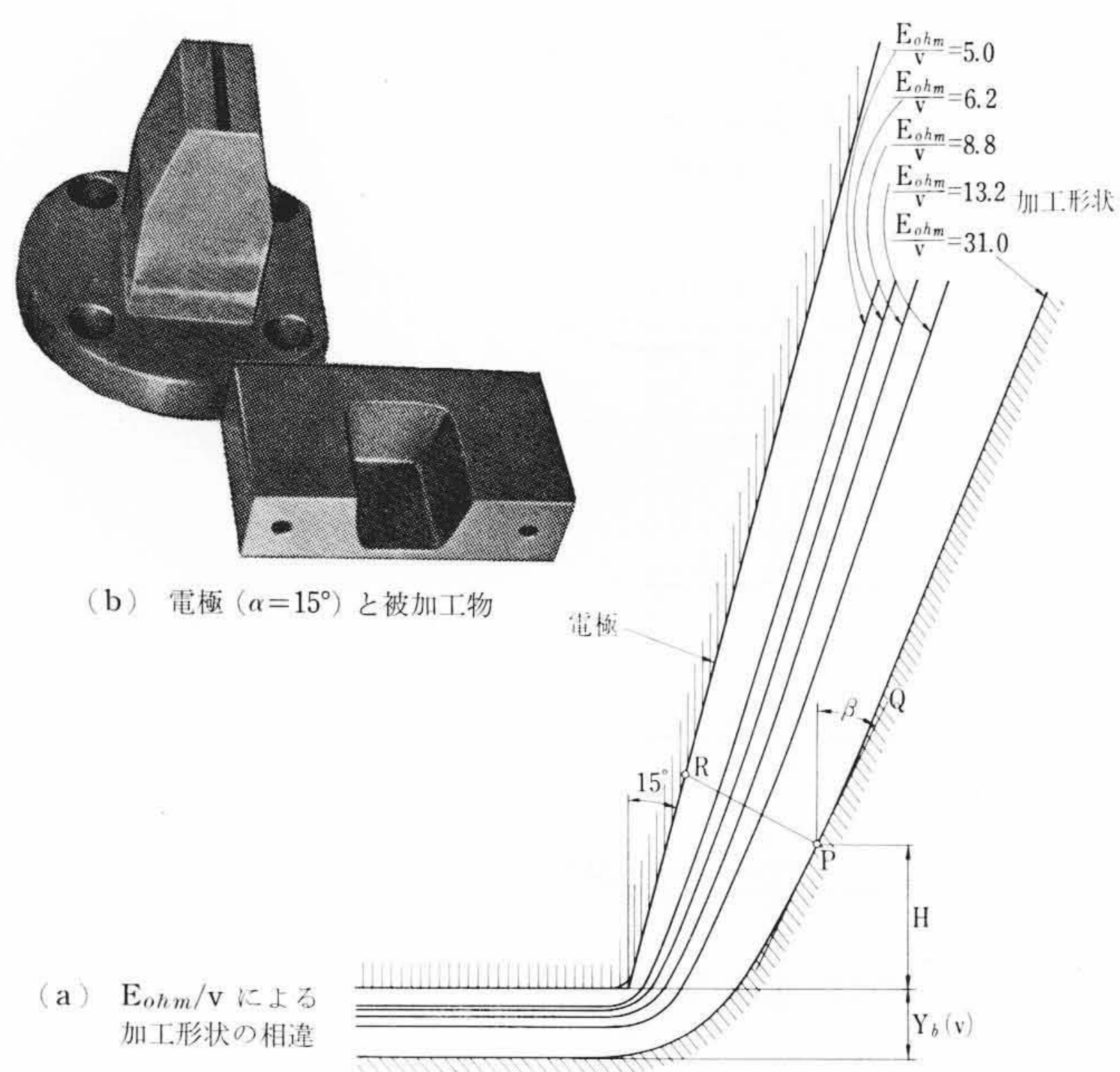
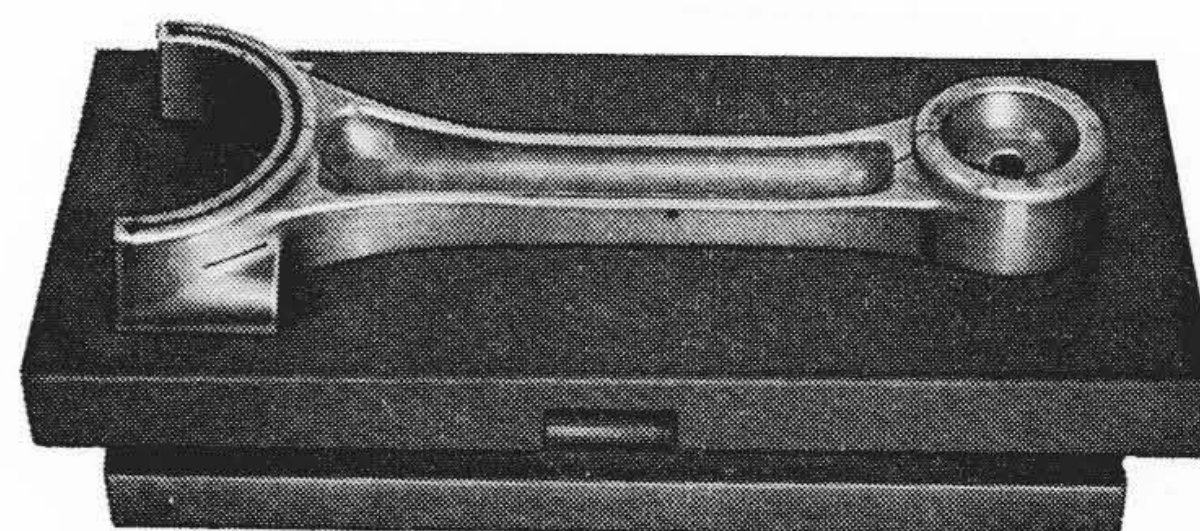
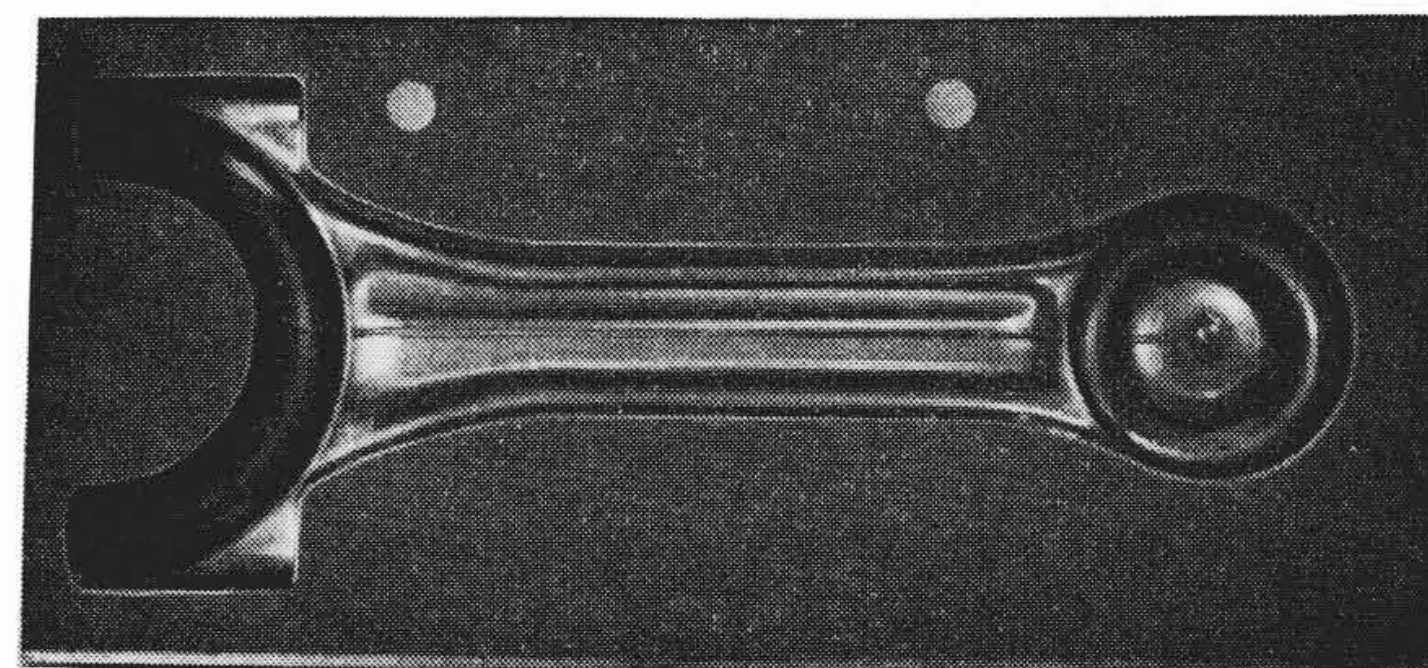


図20 定常加工形状



(a) コネクティングロッド電極



(b) コネクティングロッド鍛造形

従来の加工時間.....2,100分
 電解による加工時間..... 30分
 能率比..... 70倍
 加工電流.....3,600 A

図23 コネクティングロッド電極と加工品

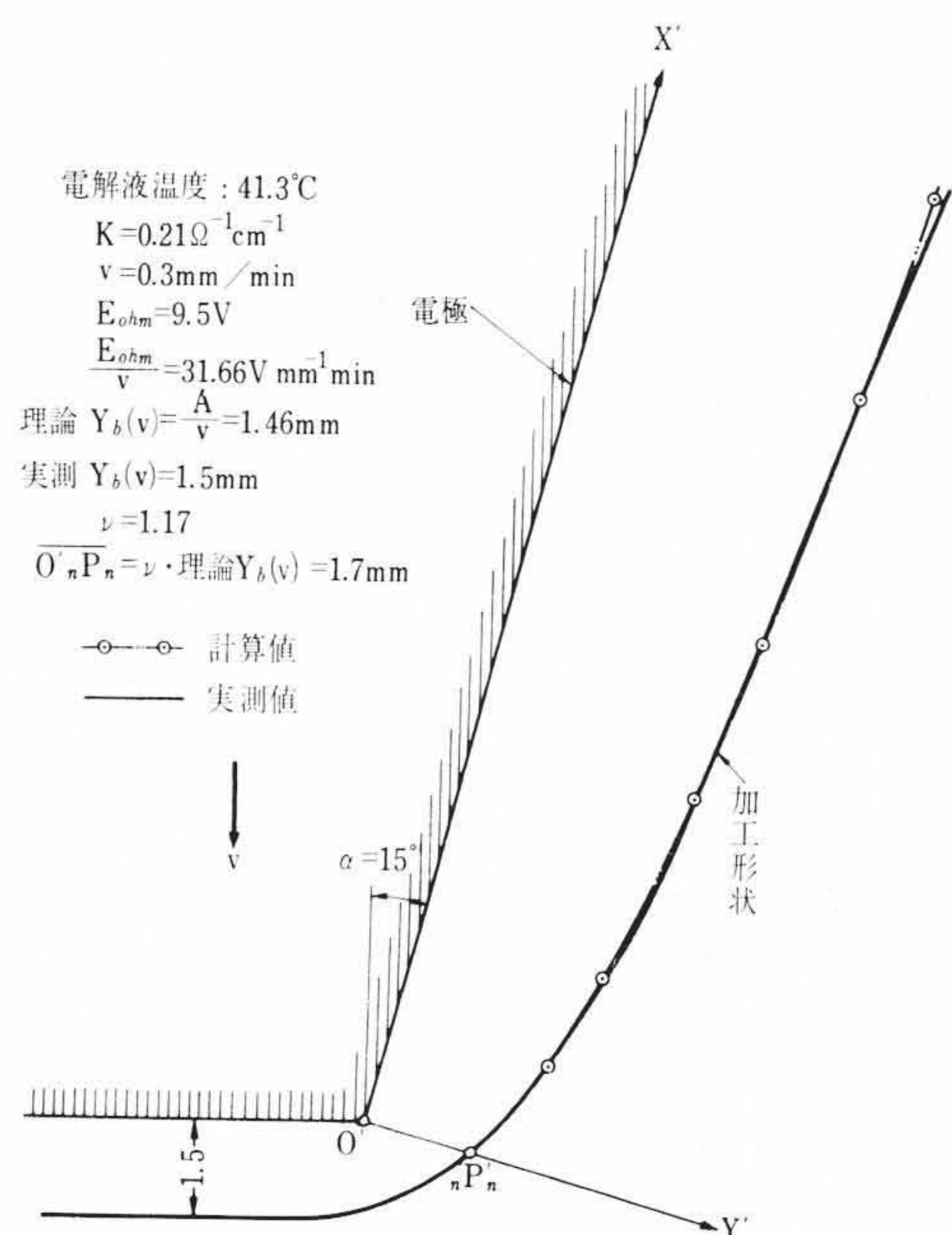
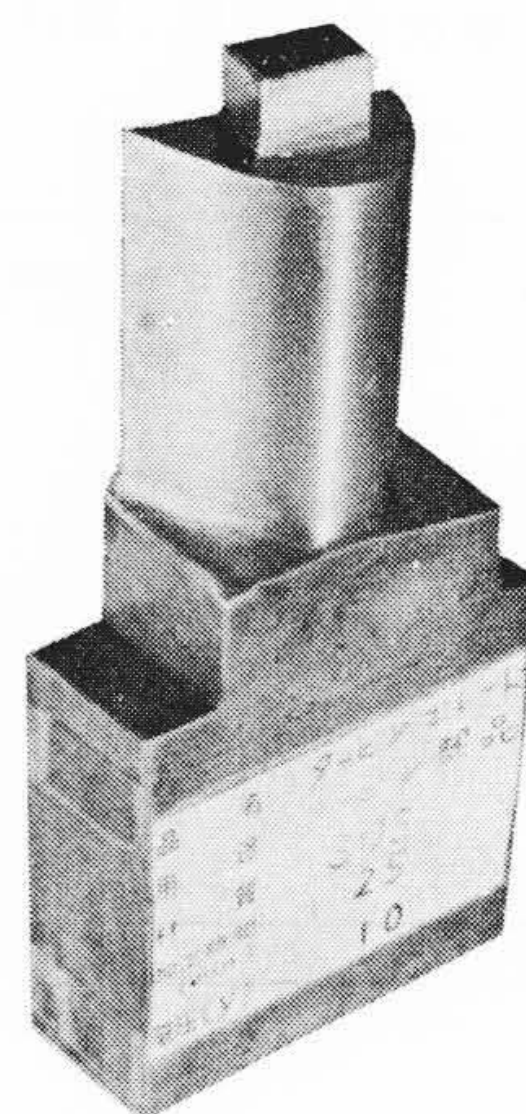


図21 加工形状の比較



高硬度のタービン翼を加工し、
 仕上面あらさ 0.15~0.2μ が
 得られている。

図24 タービン
ブレードの加工

ステンレス鋼板を数字の形に抜加工したもので、従来は手作業で行っていた
 ものが著しく能率向上した。

図25 文字板加工

行なった加工形状の推移を図18に示した。電極底面は約7mm送り込まれると平衡しそれ以降は底面に近い部分から上部へ向かって加工形状は定常化する。この推移を示したのが図19で、これは電極底面が平衡に達した加工深さの異なる6個を重ね合わせたもので、加工深さの浅い3個は上端部で0.1mm程度広がっておりまだ側面が平衡に達していないことを示す。加工深さの大きい3個については加工形状が0.05mmの誤差内にはいっており定常加工形状に達していることを示す。

(ii) 定常加工形状

$\alpha=15^\circ$ の電極で $E_{ohm}/v=5.0, 6.2, 8.8, 13.2, 31.0V \cdot mm^{-1} \cdot min$ として加工実験を行なった定常加工形状の一例を図20(a)に、電極と被加工物を図20(b)に示す。 E_{ohm}/v の値に応じて加工間げきはことなっている。また $E_{ohm}/v=31.0V \cdot mm^{-1} \cdot min$ に対して電極角部の加工間げきに実測値を用い(25)式から加工形状を計算によって求め、実測加工形状と比較してみると10倍拡大図においてきわめてよく一致することを図21に示した。

(iii) 電極形状と定常加工形状間の関係

つぎに(30)式で与えられる電極形状と定常加工形状との関係を図20を用いて確かめる。

図20の加工形状上において角度 β を実測し、これと加工条件を(30)式へ代入して電極底面における理論 $\overline{PR}$ を求め、実測 $\overline{PR}$ と比較した結果を図22に示した。なお H は電極底面からの高さを示す。

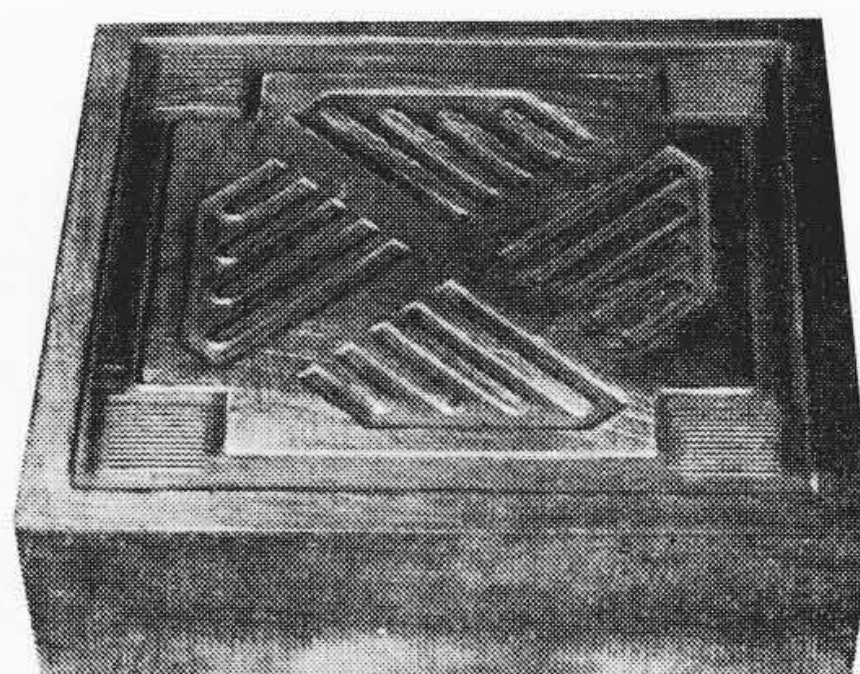
この結果、各 E_{ohm}/v と無関係に理論 $\overline{PR}$ と実測 $\overline{PR}$ の比は1にほぼ等しく(30)式の関係が成立していることがわかる。

5. 応 用

電解加工法の応用範囲と加工例について述べる。

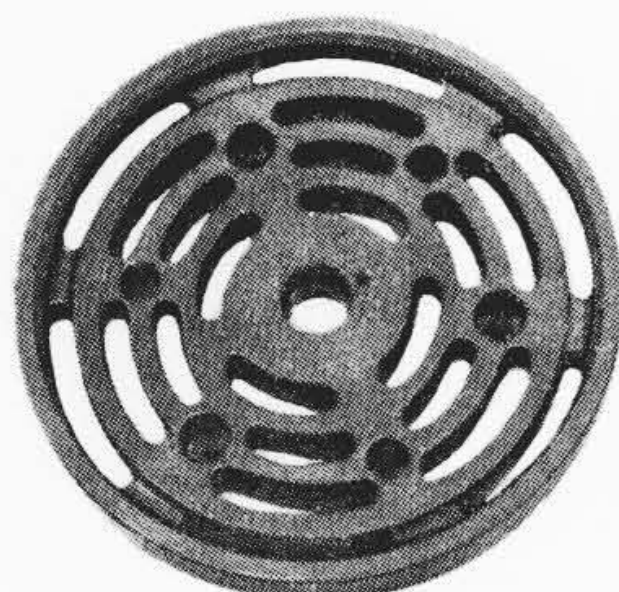
電解加工法を効果的に適用するためには、従来の切削工作機械では加工そのものができないか、または低能率な作業しかできない分野に着目する。すなわち

- (1) 通常のカッタで加工するには硬度が高すぎるか、あるいは切削送りが極度に制限されるような形状寸法の加工品。たとえば焼入鋼、合金工具鋼の加工、鍛造用金



従来の加工時間..... 26分
電解による加工時間..... 2分
能 率 比..... 8.7倍
加 工 電 流..... 2,500 A

図26 タイルモールド形



従来の加工時間..... 120分
電解による加工時間..... 17分
能 率 比..... 7倍
加 工 電 流..... 2,800 A

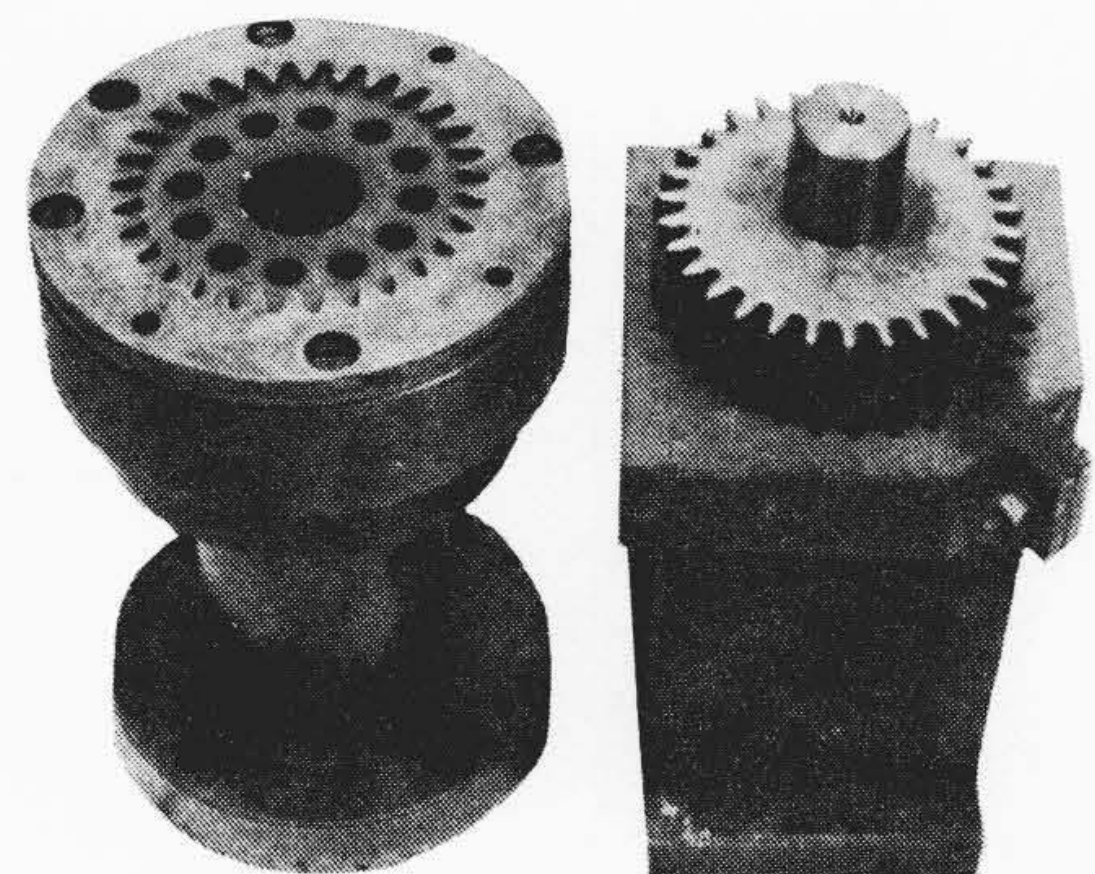
図28 バルブ(圧縮機部品)の抜加工

表2 電 解 加 工 の 応 用 分 野

区分	作業内容	機 種	加 工 物	加工電流	電解の利点	需 要 先
形彫り	形彫り加工	立形加工機	鍛造, プレスダイキャスト モールド ガラス ゴム金型	2,500~20,000 A	加工能率が高い, 仕上面良好, 高硬度材が使える。	自動車工業 金型工業
部 品 加 工	穴あけ, 溝入れ, 輪郭, サルベージ	立形加工機 横形加工機	プレス抜型部品, タービン翼, タップドリルの打込	1,500~5,000 A	加工能率が高い, 高硬度材が使える。	航空機工業 事務機械工業 一般機械工業
	鍛造, 切削加工のバリ取り	電解バリ取り機	一 般 部 品	300~600 A	加工能率が高い。	自動車工業 一般機械工業
	歯先に丸みをつける	電解バリ取り機	歯 車	300~600 A	加工能率が高い。	機 械 工 業
	回転体の輪郭加工	電 解 旋 盤	ガスタービンのホイール, 超硬のドローイングタイ	2,500~20,000 A	加工歪がない 硬度に無関係	航空機工業 一般機械工業
	スプライン加工 輪郭加工 面加工	電解ブローチ	各種スプライン 外形加工 取付面の加工	1,500~5,000 A	加工歪がない 同時加工可能	自動車工業 機 械 工 業
	内径のホーニング	電解ホーニング	シ リ ン ダ	300~1,500 A	能 率 向 上	自動車工業 機 械 工 業
	素材の切断	電解切断機	鋼 材, 金 型	1,500 A	能 率 向 上	機 械 工 業
	ラ ッ ピ ン グ	電解ラッピング	薄 板, 細 穴	300~600 A	能 率 向 上	機 械 工 業
	深 穴 加 工	電解穴明機	径の5倍以上の深穴	600~1,500 A	能 率 向 上 バリ取り	油 圧 機 器 機 械 工 業
	歯 切 加 工	ブローチと同じ	歯 車 一 般	600~1,500 A	能 率 向 上 高硬度の加工	一般機械工業
	超 仕 上	電解仕上機	軸類の外径仕上	300~600 A	能 率 向 上	一般機械工業
	細 密 加 工	電解細密加工機	微細な穴加工	300 A	能 率 向 上 バリ取り	電 線, 繊 維
	圧 延 材 料	可搬式電解	圧 延 板	300~600 A	能 率 向 上	製 鉄 工 業
特 殊 用 途	傷 取 り	ユ ニ ッ ト			騒音防止	特殊鋼工業
	試験片採取	ユ ニ ッ ト	大 物 部 品	300~600 A	容易に取れる	機 械 工 業 研 究 部
	製 版	電解製版機	凸版, オフセット, グラビア用版	1,500~5,000 A	能 率 向 上	印 刷 工 業
	ビード取り	可搬式電解 ユ ニ ッ ト	溶 接 部 品	300~600 A	能 率 向 上 面アラサ向上	造 船 工 業 製 缶 工 業

型の加工。

- (2) 難切削のため従来の機械加工法では加工不能で放電加工やその他の特殊加工法によっているもの。たとえば超硬合金の加工。
- (3) 機械加工ができないために手作業によっている品物, タガ



歯車のバリの除去に用いたもので、加工時間5~15秒で複数個同時にできる。

図27 歯車の面取り加工

ネやハンドグラインダにたよっている作業。たとえば油圧機器類の油穴の面取り、かえり取り。一般の機械部品あるいは素材のバリ取り、傷とり。

- (4) くりかえし生産の場合で、とくに加工工具の損耗が問題になるものに対しては、電解加工は電極工具の消耗がなく有利である。

以上の考え方にに基づき内容を整理すると表2のようになる。
図23～図28は加工例を示したものである。

6. 結 言

電解加工に関して、電極底面における加工間げきの推移、加工形状の生成過程および定常加工形状の特性を理論的、実験的に説明しさらに応用例についても説明を加えた。これらをまとめると、

- (1) 定電圧、定速送り方式による電解加工では、加工時間の経過につれて、底面の加工間げきは一定値に収れんし、この平衡加工間げきに至る特性を定量的に示した。

- (2) 加工形状の生成過程において過渡状態から定常状態へ移行することを示し、加工形状の定常化は底面に近い部分から起こり次第に上縁部へ向かって移行する。
(3) 定常加工形状と電極形状間には一定の相関関係があることを示し、これは電極の修正においてきわめて重要である。

参 考 文 献

- (1) 川船, 御子柴, 平田: 機械学会誌 昭69-564 (昭41-1), 89
(2) 川船: 精機学会, 春季大会シンポジウム資料 (昭40-4)
(3) W. B. Kleiner & F. A. Pitschke, SAE-ASME-849 E (1964-1), 5
(4) 亀山: 電気化学の理論および応用 上巻 I, (昭38) 296 丸善
(5) National Research Council of U. S. A., International Critical Table of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology 6, (1929), 233, McGraw-Hill
(6) 川船, 御子柴, 平田: 精機学会 秋季大会学術講演会前刷, No. 404 (昭40-11)



特許第480028号 (特公昭41-4086号)

渡辺文則・田村順司

極細目金網の接合方法

極細目の金網を重ねて直接溶接すると、溶接部分に連続的に溶孔を生ずる欠点がある。この発明はこのような欠点を除いたもので、接合しようとする金網の端縁を重ね合わせ、その上に金網と同じ材質の極薄板からなる上当板のL字形折り曲げ部を突き合わせて載せ、突き合わせによって形成された凸部をTIG溶接法によって溶融することにより金網の重ね合わせ部を接合することを特長とする。

図はこの発明の一実施例を示し、1は金網の横線、2は縦線、3は金網と同材質のL字形上当板、4は冷し金定盤、5は溶接部以外

の部分の冷却する押え板である。

突き合わせによって形成された上当板3の凸部をTIG溶接法によって溶融すれば、上当板3が溶融し、その裏波金属で金網が完全に溶融されて2枚の金網は接合される。この場合溶着金属量の不足分は上当板3のL字形部で補うことができるので、接合部に溶孔を生ずることはなく、TIG溶接法によって溶融するので、溶接入熱の小さな条件でも安定したアーク炎が得られ、溶接境界部の強度も大で美しい裏波ビードが得られる。
(武居)

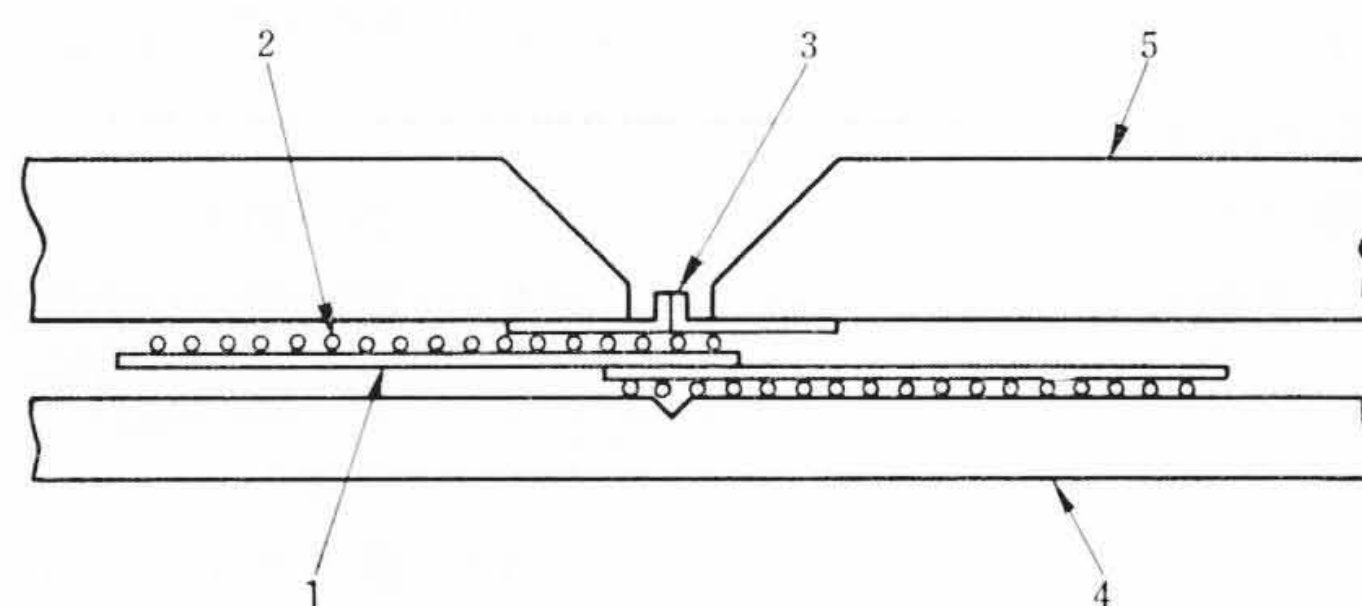


図1 極細目金網の接合方法