研 究

電 解 超 仕 上 の 研 究 (第2報)*

—電解超仕上における仕上面の形状について—

瀬 領 浩 一** 西 本 廉***

The Study on the Electrolytic Superfinishing (2nd Report)

—On the Shape of Electrolytic Superfinished Surface—

Koichi SERYO, Kiyoshi NISHIMOTO

The effects of electrolyte layer thickness and swelling of electrolyte at the edges of the workpieces on the shape of the electrolytic superfinished surface was studied theoretically and experimentally. The perforated resinoid bonded wheel was taken to be a homogeneous electrolytic layer. To calculate the electric field intensity at any point on the superfinished surface in cases when there is no swelling of the electrolyte, conformal mapping is employed; and in cases when the electrolyte dose swell resistant paper method is employed. Hence the shape of finished surface was estimated on the assumption that the quantity of electrolysis at any point on the finished surface is proportional to the intensity of electric field at the same point. Eventually cases when both cutting and electrolysis effects were present were considered.

The results obtained are as follows:

- 1) The degree of edge rounding was found to be approximately proportional to the thickness of the electrolyte layer in cases when there is no swelling of the electrolyte.
- 2) The degree of edge rounding increases by an amount equal to the amount of electrolysis on the sides in cases when there is swelling of the electrolyte.
- 3) The shape of the electrolytic superfinished surface can be obtained by superimposing the electrolysis and cutting effects.

1. まえがき

前報¹⁾において試作穿孔レジノイド砥石を用いて電解超仕上を行なえば、切削作用と電解作用とをそれぞれ独立に制御でき、かつ理論電解量にほぼ等しい電解量が得られ、加工量が著しく増大すること、および超仕上面とほぼ同じ程度の仕上面が得られることを報告した。一方前報で述べているように仕上面の周辺にだれが生じていることが明らかになった。このようなだれについては鏡の超硬パイトの電解研削におけるエッジ丸みの生成²⁾、伊東の円筒シリンドラの電解ホーニングによる電極工具挿入側端面でのだれについての研究³⁾がある。鏡は砥石面上の電解液層中に浸漬した加工物側面が電解されることによってエッジに丸みが生ずると考え、エッジの丸みの生成程度を導電紙模型を用いて求めた比電流密度分布から吟味している。それに対して筆者は前報に述べている

ように端面のだれは端部効果による仕上面端部での電流集中および試料側面への電解液盛りあがりに起因するものと考えている。そこで本報では電解超仕上面の平面度の向上を目的として、まず試料側面への電解液の盛りあがりのない場合について仕上面上の電界の強さの分布が極間距離および砥石幅によってどのように異なるかを理論的に吟味した。ついで電解液の盛りあがりのある場合について抵抗皮膜法により仕上面上の電界の強さの分布を求め、それより仕上面ならびにその側面の形状を吟味した。最後に上述の理論的に得られる仕上面の形状と電解超仕上面のそれとを比較吟味した。

2. 電解による仕上面形状の理論解析

平面の電解超仕上において加工液は第1報で述べたようにノズルから垂直面内で回転する穿孔レジノイド砥石平面に供給される。加工液は砥石平面に開口する3mmφの孔ならびに砥石の気孔に侵入、充満すると同時に砥石面に付着し、それを被覆する(図1)。砥石面に付着する電解液膜の厚さは電解液の供給量ならびに供給方法、砥石回転数、電解液供給場所からの砥石面上の角度位置な

*原稿受付 昭和44年3月17日。日立地方講演会(昭和43年11月15日)にて発表。

**学生会員 東京工業大学大学院(東京都目黒区大岡山2-12-1)

***正会員 東京工業大学工学部

図1 加工物と砥石との接触状態

どにより異なると考えられる。第1報に述べた電解超仕上においては加工液に5% KCl水溶液、その供給量500 cc/min, 砥石回転数100 rpmが用いられているが, この条件では電解液の砥石面への供給場所により加工物の仕上を行なう砥石面上ではほぼ一様厚さの液膜が形成されることを砥石面の観察により確かめた。砥石内および砥石面上の電解液の状態は上述のようであるが, 電解超仕上による仕上面の形状を理論的に吟味するために砥石内に一様に電解液が存在し, かつ砥石面上の液膜の厚さは無視できるとした。すなわち砥石の厚さ t ならびに砥石の幅 $2b$ に等しい電解液層が幅 $2b$ の導電板上にあり, その液層表面に加工物の仕上げを行なうべき面が接するとした。このような状態での仕上面の形状は仕面上の各点の電解量が求まれば予測することができる。第1報に述べたように5% KCl水溶液では電解量は電解電流に比例するので, 仕面上各点の電流密度を求めればよい。なおその点の電流密度は電解液中の電界の強さに比例すると考えられる。加工物および導電板の比抵抗は電解液の比抵抗に比べて十分小さいので, 加工物および導電板上の各点はそれぞれ等電位にあると考えることができる。そこで加工物および電解液層をそれぞれ幅 $2a$ および $2b$ の無限帯板と近似すれば図2に示すように二次元問題におきかえることができる。電流場における電位 V はラプラスの方程式 $\nabla^2 V = 0$ で与えられ, 電界の強さ E は $E = -\text{grad } V$ となる。このような電解液に接する仕面上の電界の強さは次に述べるような等角写像法により求めることができる。まず図2に示す電解液内の電界は対称の原理により図3(a)に示すようにCD面に V , C'D'面に $-V$ なる電位を与えた場合のそれと同じである。そこで電解液層ABE'F'E'B'A'がCD, C'D'に完全にはさまれるようにW平面に等角写像を行えば電界の強さが求まる。その方法を次に述べる。

1) Z-平面からS-平面への写像

長方形ABCEFF'E'D/C'B'A'は次の写像関数により

図2 電解のみを考慮した場合の加工状態モデル化

図3 等角写像の方法

S-平面の上半面に写像できる (図3 b)。

$$s = c_1 \cdot \text{sn} \left(\frac{z}{\alpha}, k \right) \quad (1)$$

$$\text{ただし, } k = \left(\frac{\vartheta_2(0, i \frac{2b}{t})}{\vartheta_3(0, i \frac{2b}{t})} \right)^2, \quad \alpha = \frac{t}{K(k)}$$

sn: だ円関数, k はその母数

ϑ_2, ϑ_3 : だ円データ関数

$K(k)$: 母数 k の第1種完全だ円積分

c_1 : 定数

ここで c_1 は S-平面上での D 点の座標が (1, 0) となるように決める. これより式は次のようになる.

$$s = \operatorname{dn}\left(\frac{b-a}{\alpha}, k'\right) \cdot \operatorname{sn}\left(\frac{z}{\alpha}, k\right) \quad (2)$$

ただし $k': k$ の補母数, $k'^2 = 1 - k^2$

(2) S-平面から W-平面への写像

S-平面から W-平面への写像は次に示す円関数により行なう.

$$s = \operatorname{sn}(C_2 W, k_1) \quad (3)$$

母数 k_1 は S-平面上の C 点の座標が $1/k_1$ となるように決める. すなわち

$$k_1 = \frac{\operatorname{dn}\left(\frac{b+a}{\alpha}, k'\right)}{\operatorname{dn}\left(\frac{b-a}{\alpha}, k'\right)}$$

また定数 c_2 は W-平面での D 点の座標が (V, 0) となるように決めると式(3)は次のようになる.

$$s = \operatorname{sn}\left(\frac{K(k_1)}{V} W, k_1\right) \quad (4)$$

したがって Z-平面から W-平面への変換式は式(2), (4)より得られる. すなわち

$$\operatorname{dn}\left(\frac{b-a}{\alpha}, k'\right) \cdot \operatorname{sn}\left(\frac{z}{\alpha}, k\right) = \operatorname{sn}\left(K(k_1) \frac{W}{V}, k_1\right) \quad (5)$$

このように等角写像の変換式が与えられると, Z-平面上での電界の強さは次式で与えられる⁴⁾.

$$E = -\frac{dW^*}{dz} \quad (6)$$

ただし $\frac{dW^*}{dz}$ は $\frac{dW}{dz}$ の共役関数である.

加工物仕上面 C D は

$$z = t + i\xi$$

であらわされる. そこでいま加工物仕上面中心からその面上の任意の点までの距離を l とすれば, その点は

$$z = t + i(b+l)$$

ただし $-a \leq l \leq a$

で与えられる. (5), (6)式より仕上面上の任意の点の電界の強さは

$$E(l) = \frac{V \cdot K(k) \cdot \operatorname{dn}\left(\frac{b-a}{\alpha}, k'\right) \operatorname{sn}\left(\frac{b+l}{\alpha}, k'\right) \operatorname{cn}\left(\frac{b+l}{\alpha}, k'\right)}{t \cdot K(k_1) \cdot \sqrt{\left(\operatorname{sn}^2\left(\frac{b-a}{\alpha}, k'\right) - \operatorname{sn}^2\left(\frac{b+l}{\alpha}, k'\right)\right) \operatorname{sn}^2\left(\frac{b+l}{\alpha}, k'\right) - \operatorname{sn}^2\left(\frac{b+a}{\alpha}, k'\right)}} \quad (7)$$

となる.

電解が進行しても式(7)が成り立つとすれば仕上面の任意の点の電解量 $\delta_e(l) [\mu]$ は

$$\delta_e(l) = CE(l) \quad (8)$$

ただし $C = C_0 \sigma \tau / \gamma \times 10^4$

C_0 : 加工物の電気化学当量 [g/coul]

γ : 加工物の比重量 [g/cm³]

σ : 電解液層の電気伝導率 [$\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$]

τ : 電解時間 [s]

図 4 砥石厚さを変えた場合の加工面の形状

で与えられる. そこで仕上面中心 $l=0$ の電界の強さ $E(0)$, 電解量 $\delta_e(0)$ より, ある時間後の仕上面の形状は

$$\delta_e(l) - \delta_e(0) = C(E(l) - E(0)) \quad (9)$$

で与えられる. そこで仕上面の形状を無次元表示すると

$$\frac{\delta_e(l) - \delta_e(0)}{\delta_e(0)} = \frac{E(l) - E(0)}{E(0)} \quad (10)$$

または

$$\frac{\delta_e(l)}{\delta_e(0)} = \frac{E(l)}{E(0)}$$

で表わせる. 式(10)と式(11)とはいずれも電解面の形状をあらわすもので, 式(11)は電解前の加工物面を基準にした表示である. そこで加工物仕上面幅 $2a=10 \text{ mm}$, 砥石幅 $2b=30 \text{ mm}$ を一定として電解液層厚さ t を 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10 mm の 6 種にかえて仕上面の形状を式(7)および式(11)を用いて計算により求めると, それは図 4 に示すようになる. これより電解液層厚さすなわち砥石厚さが小さくなると, だれの深さは小さくなることがわかる. 仕上面の端に近づくにつれて電解量は急激に増大し, 端

図5 砥石幅を変えた場合の加工面の形状 (計算値)

では電解量は無限大となる。実際の加工においては仕上面は常に電解液に接しているので端部にだれが生ずると仕上面端部の鋭いかどがなくなるために電流の集中が小さくなり、その部分の電解量も減少する。

次に電解液層の厚さを 6.2 mm 、加工物幅を $2a=10\text{ mm}$ に一定として砥石幅を $10, 12, 20, 30, 40\text{ mm}$ および無限大と 6 種に変え、加工物仕上面の形状を(7)式および(11)式を用いて計算により求めた結果を図5に示す。加工物仕上面の形状は砥石の幅によっても異なり砥石幅と加工物の幅が等しい時はだれは無くなり、それより大きくなるにつれてだれも大きくなる。しかし砥石幅がある大きになると、仕上面の形状は砥石幅無限大の場合のそれとほぼ等しくなる。ここで砥石幅を無限大とすると(7)式は

$$E(l) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{t \cdot K(k_1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - e^{-\pi/l(a-l)})(1 - e^{-\pi/l(a+l)})}} \quad (12)$$

となる。また電解液層厚さ t が加工物の幅 $2a$ に比べて十分小さい時は、仕上面の形状を表わす(9)式は次のようになる。

$$\frac{\partial_e(l) - \partial_e(0)}{\partial_e(0)} = \frac{1}{2} e^{-\pi/l(a-l)} \quad (13)$$

ただし $\{\partial_e(l) - \partial_e(0)\}/\partial_e(0) \ll 1$ の範囲について式(13)より仕上面の許容だれ比を $\epsilon_1 = \{\partial_e(l) - \partial_e(0)\}/\partial_e(0)$ とすると、だれを生ずる範囲 $(a-l_1)$ を知ることができ、電解液層の厚さ t とだれを生ずる範囲 $(a-l_1)$ とは正比例することがわかる。

図6 電解液盛りあがりの様子

3. 加工物周辺に電解液の盛りあがりがある場合の電解による仕上面形状の解析

電解超仕上の加工物試料周辺の電解液の流動状態を図6に示すA方向およびB方向からストロボ撮影した。その結果を図6に示す。それより砥石の回転方向に対して迎え側ならびに送り側および上側ならびに下側の加工物側面には、砥石面からわずかの高さではあるが、ほぼ同じ形状に電解液の盛りあがりが生じていることがわかる。その盛りあがりの断面形状は半径約 1 mm の円弧状である。加工物側面の周囲にほぼ一様に生じているものと考えられる。この電解液の盛りあがりによりその部分においても電気分解が生じ、それが前述の仕上面端部のだれに付加されることが考えられる。そこで電解液の盛りあがりの断面形状を半径 1 mm の円弧とし、かつ盛りあがり部の電解液の電気伝導度は砥石部のそれと等しいと仮定して加工物表面の電界の強さを求めた。

この場合電解液層境界面の断面形状は直線とならないので、等角写像法により電解液と接する加工物表面上の電界の強さを求めることは困難である。そこで抵抗皮膜法により電界の強さを求めた。抵抗皮膜法による電解液と接する加工物表面の電界の強さの測定法を図7に示す。同図(a)は陽極である加工物、陰極である砥石導電部により形成される電解液層の断面形状を抵抗皮膜紙に拡大して写し、加工物に相当する部分を陽極、砥石導電部に相当する部分を陰極として電解液層中の等電位線を求める正常法を示す。同図(b)は同図(a)の絶縁境界を電極とし、電極を絶縁境界とするいわゆる反転法を示す。正常法および反転法により電解液層内の等電位線および電流線(反転法での等電位線)を求めた結果の一例を加工

図 7 抵抗皮膜法の測定回路図

物と砥石導電部との間隙が 6.2 mm の場合について図 8 に示す。それより加工物仕上面端部およびその側面盛りあがり部に電解電流が集中することがわかる。

電極の幅に比べて電極間距離が小さい場合は、仕上面に接する電解液の電界の強さを正常法より高精度に求めることは等電位線間の距離が小さく、その測定精度の点から困難なので、反転法によった。一般に正常法と反転法との電極間抵抗 R_1 , R_2 の間には次のような関係式が成り立つ。

$$R_1 \times R_2 = R_{\square}^2 \quad (14)$$

ただし, $R_{\square}$: 抵抗皮膜の素抵抗 [Ω]

ここで反転法による微小な 2 点間の電位差 ΔV_2 は正常法で上述の 2 点を結ぶ線分 ΔL [mm] を通過する電流 I_1 に比例する。すなわち

$$\frac{\Delta V_2}{V_2} = \frac{\Delta I_1}{I_1} \quad (15)$$

ただし V_2 : 反転法での電極間電圧 [Volt]

I_1 : 正常法での電極間を流れる全電流 [A]

上記線分 ΔL を通過する電流の電流密度はその部分の電界の強さ E_1 に比例するので、次の関係が成り立つ。

$$E_1 = R_{\square} \cdot \frac{\Delta I_1}{\Delta L_1} \quad (16)$$

またオームの法則より

$$V_1 = I_1 \cdot R_1 \quad (17)$$

したがって (14), (15), (16), (17) 式より

$$E_1 = \frac{R_2}{R_{\square}} \cdot \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{\Delta V_2}{\Delta L} \quad (18)$$

が得られる。これより仕面上その中心から l の点の電界の強さを求める場合には電解液層を抵抗皮膜紙に写した場合の拡大率を M とすれば、相似法測により実際の電界の強さは電極間にかかる電圧を V とすると次式で与えられる。

$$E(l)M \cdot \frac{R_2}{R_{\square}} \cdot \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{\Delta V_2}{\Delta L} \quad (19)$$

すなわち反転法により仕上面各点の電界の強さを求める

図 8 抵抗皮膜法により求めた電解液中の等電位線および電流線

図 9 電解液の盛りあがりのある場合の加工面の形状 (抵抗皮膜法による)

場合は極間距離が小さくても、電解面にそって測定に必要な十分大きな ΔL を選ぶことができる利点がある。本研究では $M=20$ とし, ΔL は 4 ± 0.2 mm とし, ΔV_2 は精密級直流電位差計を用いて測定した。

電界の強さが求まれば (11) 式により仕上面および側面盛りあがり部各点の電解量が求められる。このようにして得られる電解量を図 9 に示す。これより電解液の盛りあがりにより、加工物のエッジはその仕上面端部のみならず側面盛りあがり部からも集中的に電解を受けることがわかる。側面盛りあがり部からの電解量の大きさは極間距離によって異なり、極間距離が 6.2 mm のほうが 0.1 mm の場合より大きいことがわかる。また電解液の盛りあがりがない場合の理論的に求める仕上面の電解量と盛りあがりのある場合のそれとを比較すると、加工物の周辺に電解液の盛りあがりがあっても仕上面端部からの電解量には著しい差異は認められないことがわかる。そこで電解液の盛りあがりがある場合は側面部からの電解量

だけ仕上面端部のだれは増大することがわかる。盛りあがりの高さに比して電極間距離が小さい場合は仕上面上の電界の強さはほぼ一様となり、盛りあがりによる端部周辺からのだれのみを考慮すればよい。鏡の研究はこの場合に相当する。

4. 電解作用と切削作用とを考慮した仕上面の形状の解析

上述のようにして加工物側面に電解液の盛りあがりのない場合およびある場合について、それぞれ理論的におよび抵抗皮膜法により電解のみによる仕上面形状を求めることができる。かつ前報において述べたように筆者が試作した砥石によれば電解超仕上の全加工量は電解による理論電解量と超仕上による切削量との和にほぼ等しい。筆者の試作した砥石による超仕上のみによる切削量は図10に示すように、いずれの砥石圧力においても本実験の加工時間の範囲では加工時間にほぼ比例しているとなすことができる。そこで切削量を $\delta_c[\mu]$ 、加工時

砥石: WA 240 穿孔レジノイド砥石
砥石回転数: 100 rpm, 加工振動数: 1500 cpm
加工時間: 0~5 min, 加工液: 5% KCl 水溶液

図10 超仕上切削量の時間による変化

図11 電解作用と切削作用とを考慮した場合の加工形状

間を $\tau[s]$ とすると、次の実験式が得られる。

$$\delta_e = c_2 \tau \quad (20)$$

ただし c_2 : 比例定数 $[\mu/s]$

また電解超仕上中に加工面形状が変化しても、仕上面上の各点の電界の強さ $E(l)$ は変らないとすると、(8)式より仕上面各点の電解量 $\delta_e(l)$ は次式で与えられる。

$$\delta_e(l) = c_1 E(l) \tau \quad (21)$$

ただし $c_1 = c_0 \cdot \alpha / \gamma \times 10^4$

$E(l)$ は加工液の盛りあがりのない場合は(7)式で与えられ、盛りあがりのある場合には(9)式で与えられる。したがって微小時間 $\Delta\tau$ における電解量 $\Delta\delta_e(l)$ は

$$\Delta\delta_e(l) = c_1 E(l) \Delta\tau \quad (22)$$

となる。またこの $\Delta\tau$ 時間中の加工物中心部の切削量が(20)式で与えられるとすれば、加工物は砥石面にならって加工されるから図11に示すように

$$\Delta\delta_e(l) \leq \Delta\delta_e(0) + c_2 \Delta\tau \quad (23)$$

の条件が満足される範囲について切削が行なわれる。したがって(23)式を変形して

$$\frac{\delta_e(l) - \delta_e(0)}{\delta_e(0)} \leq \frac{\delta_e}{\delta_e(0)} \text{ または } \frac{E(l) - E(0)}{E(0)} \leq \frac{c_2}{c_1 E(0)} \quad (24)$$

より加工面で切削が行なわれる範囲 l_1 が求まり、 $\Delta\tau$ 時間中の全加工量 $\Delta\delta(l) [\mu]$ は

$$\begin{aligned} \Delta\delta(l) &= (c_1 E(l) + c_2) \Delta\tau & l \leq l_1 \\ &= c_1 E(l) \Delta\tau & l \geq l_1 \end{aligned}$$

で与えられる。上式で $\Delta\tau \rightarrow 0$ とし $\Delta\delta(l)$ を $0 \sim \tau$ まで積分すれば τ 時間後の仕上面の形状 $\delta(l)$ が求まる。すなわち次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta(l) &= \delta_e(0) + \delta_c & l \leq l_1 \\ &= \delta_e(l) & l \geq l_1 \end{aligned} \quad (25)$$

すなわち(24)式より求まる $\{\delta_e(l) - \delta_e(0)\} / \delta_e(0) = \delta_c / \delta_e(0)$ が(13)式の許容だれ比 ϵ_1 と考えることができる。上式により砥石圧力が 0.5 kg/cm^2 厚さが 6.2 mm および 0.1 mm で中心部の加工量がそれぞれ 240μ および 200μ の場合について加工物形状を求めたものを図12に示す。同図(a)および(b)は電解液の盛りあがりのない場合について等角写像法によって得られた電界の強さを使用して電解量を求め、それを使って(25)式により計算したものを示す。同図(c)および(d)は電解液の盛りあがりのある場合について抵抗皮膜法により得られた電界の強さを用いて、(a)および(b)と同様に求めた加工物の形状を示す。また同図(e)および(f)はそれと比較の目的で前報で述べた実験装置を使用して得られた加工物の形状を日本光学万能投影機により撮影したものを示す。同図(c)と(e)および(d)と(f)に示す加工物形状がほぼ一致するので上述の仮定により電解超仕上面の形状を求

砥石: 穿孔レジン砥石 (WA 240)
 砥石回転数: 100 rpm, 加工物振動数: 1500 cpm
 砥石圧力: 0.5 kg/cm², 電解液: 5% KCl 水溶液
 加工時間: 5 分

図 12 電解超仕上げによる加工物の形状

得ることがわかる。このようにして加工物の形状は抵抗皮膜法および切削実験により求めることができ、だれの大きさは簡単には等角写像法によってもほぼ推定することができる。また加工物周辺のだれを小さくするためには

- (1) 極間距離を小さくする
- (2) 電解液の盛りあがりを少なくする

ことが必要である。(2)の方法についてはすでに述べた砥石面に付着、被覆する電解液膜の厚さを小さくするという点から電解液の供給量の調節、供給方法の吟味、加工物直前において上記砥石面上の液膜をパット、ブラシなどにより除去する方法が考えられる。しかし(1)および(2)の方法にも限度があると考えられるので、ごくわずかのだれも許されない場合には加工物の周囲に加工物と同一

材質の捨てピースを付し、加工物エッジでの電流集中を捨てピースに行なわせることが考えられる。この捨てピースの幅 d は式(13)および式(14)より次式で与えられる。

$$d = a - l$$

$$= -\frac{t}{\pi} \ln \frac{\delta_e}{\delta_e(0)}$$

電解液の盛りあがりの大きい場合は上式で得られる d より大きくしなければならない。

5. む す び

以上の結果より次のことがわかる。

- 1) 等角写像法の結果より、加工物仕上面のだれは、(a) 極間距離が小さいほど少なく、(b) 電解液の幅が加工物の幅に等しい時だけはなく、それより大きくなるとだれの程度も大きくなる。
- 2) 反転法を利用した抵抗皮膜法により加工物仕上面周囲に電解液の盛りあがりのある場合も加工物仕上面の形状は等角写像で求めた電解液の盛りあがりのない場合とほぼ一致し、周辺のだれ量は加工物側面からの電解量だけ大きくなる。
- 3) 電解超仕上げの加工物断面形状は電解超仕上げを電解作用と切削作用とに分けることにより求めることができその形状は次式で与えられる。

$$\delta(l) = \delta_e(0) + \delta_c \quad l \leq l_1$$

$$= \delta_e(0) \quad l \geq l_1$$

- 4) 加工物仕上面のだれは極間距離の小さいほど小さい。おわりに本研究にあたり、ご指導をいただいた浅枝敏夫教授に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 瀬領浩一, 西本 廉: 電解超仕上げの研究, 日本機械学会北陸信越支部講演会論文集, No. 5-1 (1968) 65.
- 2) 鏡重次郎: 電解研削における超硬バイトのエッジの丸みについて, 精機学会東北支部講演会前刷 (1965) 5.
- 3) 伊藤祐光, 本多孝蔵: 電解ホーニングについて, 第52回電気加工研究会資料, 電気加工学会 (1968-7) 1.
- 4) 宮本慶己: 二次元問題, 修教社 (1951) 36.