

二重リング形回転電極を備えた接触放電ツルーイング装置の開発 とプロファイル研削用導電性レジンボンドホイールへの適用

水野雅裕*1, 井山俊郎*1, 田中伸哉*1, 中津 隆*2, 佐藤祐吉*2

Development of electrode-contact discharge truing device with dual-ring rotary electrode
and its application to electroconductive resin-bonded profile grinding wheel

Masahiro MIZUNO, Toshirou IYAMA, Shinya TANAKA, Takashi NAKATSU and Yuukichi SATOU

二重リング形回転電極を用いた接触放電により、導電性研削ホイールを簡便にツルーイングする装置を開発した。本論文では開発した装置の概要とそれをプロファイル研削用ホイールに適用した結果について述べている。二重リング形回転電極は外輪電極、絶縁層、内輪電極から構成されている。電極を回転させながら導電性研削ホイールに接触させると接触放電が生じ、その熱で研削ホイールの結合材が熔融除去され、ツルーイングが進行する。放電状態が常に一定に保たれるよう、電極には回転軸方向に自動的に送りが与えられる。刃先角 30° のプロファイル研削用導電性レジンボンドダイヤモンドホイールの表裏の V フェースをツルーイングした結果、#1000 の研削ホイールでは 18μm 程度の刃先半径が、#2000 の研削ホイールでは 8μm 程度の刃先半径が得られた。

Key words : electrode-contact discharge truing, dual-ring rotary electrode, electro conductive resin-bonded grinding wheel, profile grinding, V-face wheel

1. 緒言

情報端末機器等の急速な小型化に伴い、金型の細密加工技術に対する要求が高まっている。細密化が要求される代表的な部品としてコネクタがある。従来、金型の隅部半径は 50μm 以下に指示されるのが一般的であった。しかし、細密化が求められるコネクタ等の部品の金型においては隅部半径が 20μm 以下に指示されるケースが急増している。

通常、こうした金型の隅部の加工には V フェース砥石を用いたプロファイル研削が適用される。上記要求に応えるため、一般的な金型メーカーでは超砥粒研削ホイールで隅部の荒加工を行い、従来砥石で仕上げ加工を行っている。隅部の仕上げ加工に従来砥石を用いるのは、従来砥石の方がツルーイングが容易で、鋭い刃先を得やすいからである。しかしながら、従来砥石は摩耗が激しいため、頻繁なツルーイングが必要である。それが作業効率低下の大きな原因になっている。

超砥粒研削ホイールの刃先を実機上で容易にツルーイングすることができれば、作業効率を大幅に改善することができる。こうした背景から、我々は超砥粒研削ホイールを実機上で簡便にツルーイングすることのできる装置の開発に取り組んだ。鋭い刃先を得るためにはできるだけ力を与えずにツルーイングを行う必要があると考え、機械的なツルーイング方式ではなく、放電を利用したツルーイング方式を採用することにした。なお、V フェースの研削ホイールを用いるプロファイル研削では刃先の耐摩耗性の向上と仕上げ面粗さの低減を両立

させるため、導電性レジンボンド研削ホイールが用いられることが多い。このタイプの研削ホイールの場合、放電を利用したツルーイングが可能である。

放電を利用したツルーイングの研究は多くの研究者によってなされている^{1)~10)}。提案されてきた方法の多くは、適切な放電状態を得るために、ツルーイング時の研削ホイールの周速、電極の周速(または送り速度)、電極に対する研削ホイールの切込み深さなどを研削ホイールの種類ごとに試行錯誤的に決定する必要がある。その決定にはかなりの経験と時間を要する。我々は、二重リング形回転電極を用いた接触放電ツルーイング方式を採用し、経験の浅い作業者でも簡便に適切な放電状態が得られるよう、放電電流をパソコンでモニタリングし、そのピーク値が設定値になるように研削ホイールと電極の接触の度合いを制御できるようにした。

本論文では、開発したツルーイング装置の概要と、それをプロファイル研削用 V フェース導電性レジンボンド研削ホイールのツルーイングに適用した結果について述べる。

2. ツルーイング装置の概要

ツルーイング装置の概要を図 1 に示す。外輪電極と内輪電極およびそれらを電氣的に絶縁する絶縁層から構成されている。本実験では電極材としてグラファイトを用いた。また、絶縁層としてアルミナセラミックスを用いた。外輪電極と内輪電極はブラシを介して直流電源に接続されている。電極を回転させながらその端面を研削ホイールに接触させると、電極材が研削ホイールによって削られ、その削りくずによって接触放電が生じる仕組みになっている。

*1 岩手大学工学部:〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

*2 小林工業(株):〒015-8686 本荘市石脇字赤ハゲ1-372

(学会受付日:2004年5月13日)

電極端面と研削ホイールの間の放電状態を適切に制御するため、回路内には電源に対して直列に電流制限抵抗 R と電流計が挿入されている。電流制限抵抗 R は電極間が電氣的に短絡状態に陥っても電源装置が破損しないようにするためのものである。本装置では 10Ω の無誘導巻線抵抗器を使用している。

図 2 に回路モデルを示す。電源電圧を E [V], 接触放電電流を I_c [A], 接触放電電力を P_c [W], 研削ホイールとの接触の程度によって変化する電極間の抵抗を R_c [Ω] とすれば、オームの法則より

$$E = I_c(R + R_c) \quad [V] \quad (1)$$

である。また、 P_c は

$$P_c = I_c^2 R_c = EI_c - I_c^2 R \quad [W] \quad (2)$$

である。ここで

$$\frac{\partial P_c}{\partial I_c} = E - 2I_c R \quad [W/A] \quad (3)$$

であるから、 P_c は $I_c = E/(2R)$ [A] のときに最大になることがわかる。以下では $I_c = E/(2R)$ [A] のときの I_c の値を 100% として I_c の大きさをパーセント表記することにする。 I_c と P_c の関係を図 3 に示す。なお、 I_c が $\varepsilon\%$ であるときの I_c のアンペア単位表記、電極間電圧 E_c [V], 電極間抵抗 R_c [Ω], 接触放電電力 P_c [W] はそれぞれ次のようになる。

$$I_c = \frac{E\varepsilon}{200R} \quad [A] \quad (4)$$

$$E_c = E \left(1 - \frac{\varepsilon}{200} \right) \quad [V] \quad (5)$$

$$R_c = R \left(\frac{200}{\varepsilon} - 1 \right) \quad [\Omega] \quad (6)$$

$$P_c = \frac{E^2 \varepsilon}{200R} \left(1 - \frac{\varepsilon}{200} \right) \quad [W] \quad (7)$$

開発したツルーイング装置は、接触放電電流 I_c のピーク値 I_{cp} をピーク電流検出器で検出し、それが 100% 以下の設定ピーク電流 I_{cp_set} になるように電極送りの制御を行う。 I_{cp_set} を 100% 以下にする理由は、図 3 の関係からわかるように、 I_c が 100% を超えると研削ホイールの振れの大きい部分を選択的に除去できなくなるからである。

電極送り制御のフローチャートを図 4 に示す。 I_{cp} が I_{cp_set} の 90% よりも小さくなったとき、電極を 1 ステップ前進、 I_{cp_set} の 110% より大きくなったとき 1 ステップ後退、それ以外の場合

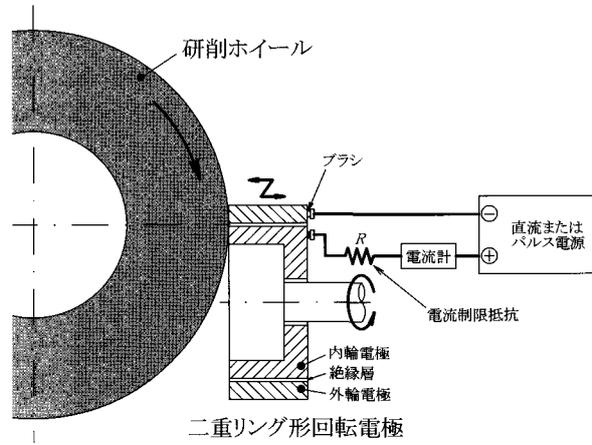


図 1 ツルーイング装置の概要

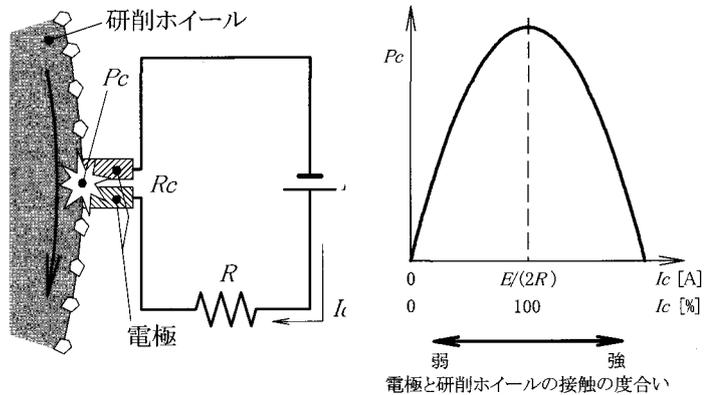


図 2 回路モデル

図 3 I_c と P_c の関係

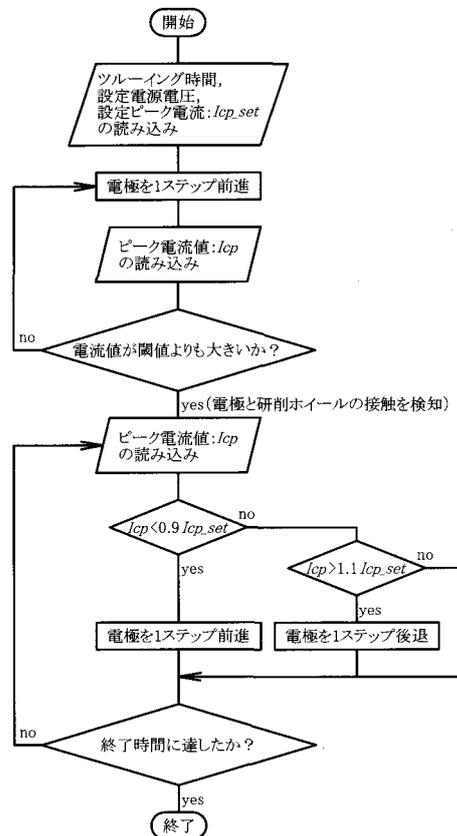


図 4 電極送り制御のフローチャート

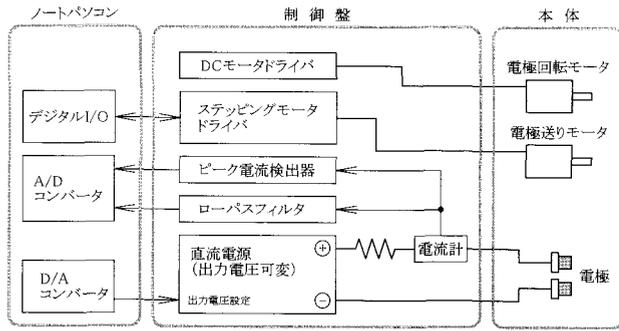


図5 システムのブロック線図

表1 装置の寸法と重量

装置本体	
サイズ	64(W)×80(H)×187(D)
重量	2.3kg
制御盤	
サイズ	370(W)×200(H)×301(D)
重量	11.5kg

は停止, という単純な方式を採用した. 上述した I_{cp} の検出, I_{cp} と I_{cp_set} との比較, 電極駆動の 1 サイクルを 25ms 間隔で行っている. なお, 電極送りにはリード 1mm のボールねじおよびステップ角を 0.09° に設定したマイクロステップ駆動のステッピングモータを使用している. したがって電極送りの 1 ステップは計算上 $0.25\mu\text{m}$ である.

システムブロック線図を図 5 に示す. システムは, ツルーイング装置本体, 制御盤, 制御用ノートパソコンから構成されている. 図 6 にシステム全体の写真を示す. また, 装置の寸法と重量を表 1 にまとめた.

図 7 は本システムを制御するソフトウェアの画面である. この画面上でツルーイング条件の設定や, ツルーイング中の接触放電電流のピーク値 I_{cp} , 平均電流, 電極進行量のモニタリングを行うことができる.

3. ツルーイング原理

本ツルーイング装置は, 基本的に導電性研削ホイールのツルーイングを目的として開発した. 接触放電の発生メカニズムを図で表したのが図 8 である. 図のように, 接触放電電流は内輪電極の削りくずー研削ホイールの結合材ー外輪電極の削りくずを介して流れる. 接触放電によって発生した熱によって導電性の結合材が溶かされ, それによって砥粒が脱落してツルーイングが進行する.

4. ツルーイング実験

4.1 実験方法

実験では外径が 50mm の電極を用いた. 電極の形状を図 9 に示す. 内輪電極の内径は 46mm, 外径は 47.8mm である. 内輪電極と外輪電極との間に絶縁層を形成するために内輪電極の外周面にアルミナを溶射し, その外径を研磨により 48.2mm (絶縁層の厚さ: 0.2mm) に仕上げた後で外輪電極の内側にはめ込んでいる. 電極端面の顕微鏡画像を

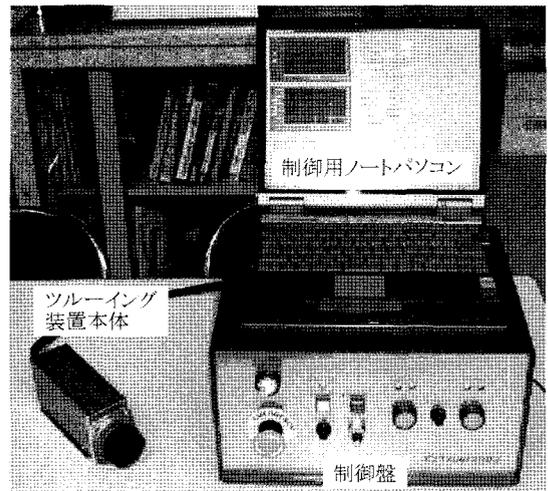


図6 システム全体の写真

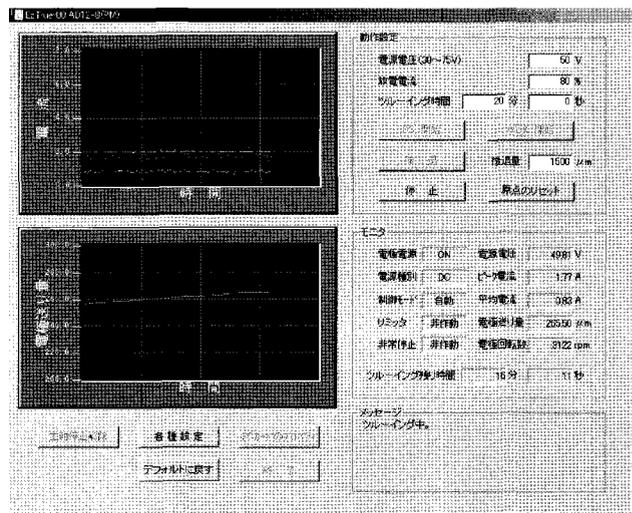


図7 制御ソフトの画面

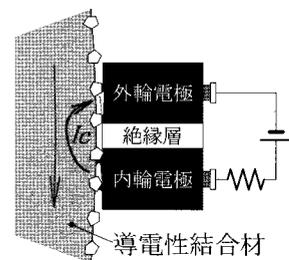


図8 ツルーイングにおける電流の流れ

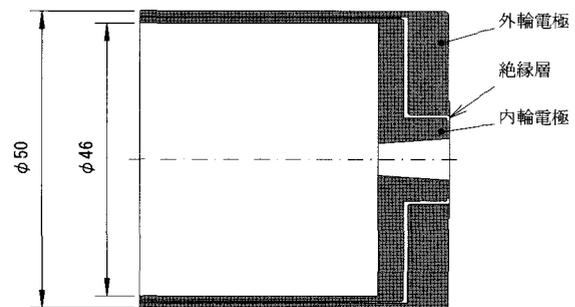


図9 電極の形状

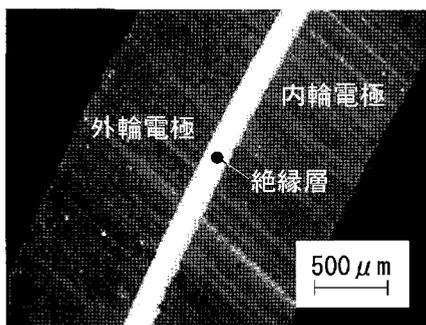


図 10 電極端面のマイクロSCOPE画像

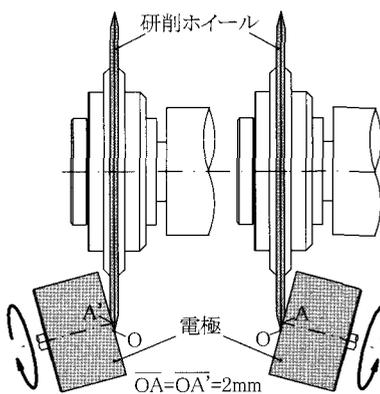


図 12 ツルーイング方法

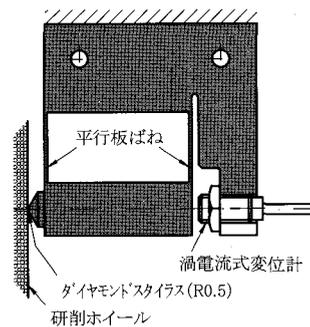


図 13 振れの測定方法

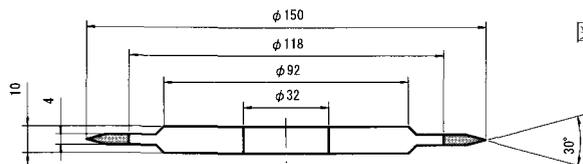


図 11 研削ホイールの形状

図 10 に示す. 同図で白く見える部分が絶縁層である.

また, 実験に使用した研削ホイールの形状を図 11 に示す. 直径は 150mm, 刃先角は 30°である. 結合材は銅を含んだ導電性レジンボンドであり, 結合度は N である. 砥粒はダイヤモンドであり, 集中度は 125 とした. 砥粒サイズが刃先半径に与える影響を調べるため, #1000 と #2000 の研削ホイールを用意した.

ツルーイングは図 12 に示すように表裏の V フェースに対して行った. ツルーイング時の電極の回転方向の設定にあたっては, 研削ホイールと電極の接触位置における電極の速度ベクトルが研削ホイールの刃先の方向を向くようにした. ツルーイング時の研削ホイールの回転数は 1000rpm, 電極の設定回転数は 3000rpm とした. ツルーイングは湿式 (㈱マルターのクーラント C を水道水で 50 倍に希釈して使用) で行った.

ツルーイング性能は, 刃先形状の観察と V フェースの法線方向の振れの測定を行って評価した. 具体的には, 厚さ 1mm の転写片に研削ホイールの刃先形状を転写し, それを 1000 倍のマイクロSCOPEで観察して刃先半径を算出した. 転写片としては研削が比較的容易なフェライトを用いた. また, V フェースの振れは, 図 13 に示す自作の振れ測定器のダイヤモンドスタイラスを図 12 の A 点に押し当てて測定した. なお, この測定器の平行板ばねの厚さは 40μm, 幅 12.5mm, 長さ 13mm であり, 測定力によって生じる被測定点の変位は V フェースの振れ量に対して無視できるほど小さいと考えられる. さらに, 電極消耗率の目安として一定時間当りの電極進行量 τ も調べた.

主軸に取り付けた直後の研削ホイールの V フェースには砥石フランジの取り付け誤差のために大きな振れが存在する. これを除去するため, 研削ホイールを主軸に取り付けた後, 設定電圧 45V, 設定電流 50% のツルーイング条件で V フェースの振れが最小になるまでツルーイングを行った. その後, 実験のためのツルーイング条件で V フェースの 1 面当たり 5

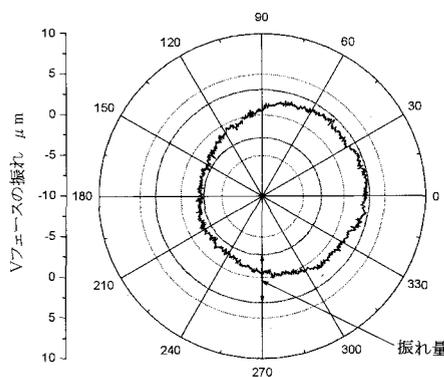


図 14 V フェースの振れの測定結果の一例 (電源電圧 $E = 50V$, $I_{cp_set} = 60\%$)

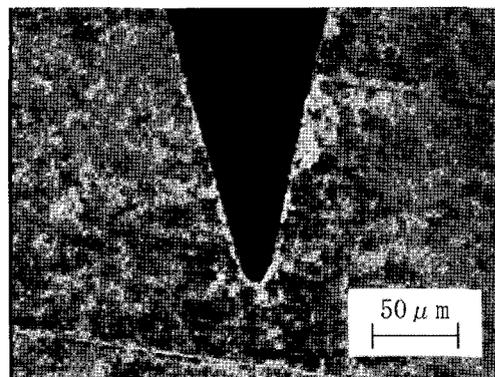


図 15 刃先形状の一例 (#2000, 電源電圧 $E = 50V$, $I_{cp_set} = 60\%$)

分間のツルーイングを行い, ツルーイング条件がツルーイング結果に与える影響を調べた.

4.2 実験結果および考察

まず, #2000 の研削ホイールを用い, 電源電圧 E を 50V, I_{cp_set} を 50% から 90% まで 10% 刻みで増加させて実験を行った. 実験結果の一例として, $I_{cp_set} = 60\%$ の条件で得られた V フェースの振れの測定結果を図 14 に, 刃先形状 (転写片の溝の断面形状) を図 15 に示す. 実験結果をまとめたのが表 2

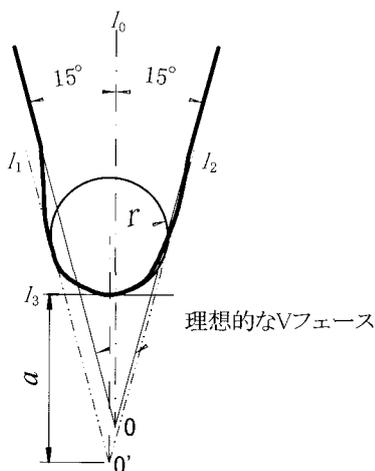


図 16 刃先半径の算出

である。表中の E_{cp} , P_{cp} , R_{cp} はそれぞれ, I_c が I_{cp_set} に一致したときの電極間電圧, 接触放電電力, 電極間抵抗の計算値を表している。

表 2 の振れ量 ρ は次のようにして求めた。まず振れのプロファイルデータ(サンプリング数:7200 点/周)を 11 点の移動平均により平滑化し, そのデータを図 14 のように円グラフ上に描く。次にその円グラフと同じ中心をもつ同心円で振れのプロファイルの内側と外側の両方から挟み, それら 2 つの同心円の半径差を振れ量 ρ とした。

また, 刃先半径 r は次のようにして求めた。得られた刃先形状を少しデフォルメして描いたのが図 16 である。図のように, 刃先の V フェースは理想的な V フェースから少し外にはみ出した形状となった。これは, 刃先が電極によって力を受け, 弾性変形しながらツルニングが行われたためであると考えられる。刃先は丸みを帯びているが理想的な円弧にはなっていない。刃先半径 r を求めるにあたって, まず, 理想的な V フェースの直線に平行でかつ刃先に接する直線 l_1 と l_2 を描き, 次に刃先中心線 l_0 に直角でかつ刃先に接する接線 l_3 を描いた。そしてこれら 3 直線に接する円の半径を求め, それを刃先半径 r とした。具体的には直線 l_1 と l_2 の交点 O' から直線 l_3 に下ろした垂線の長さ a を測定し, 次式から r を算出した。

$$r = \frac{a \sin 15^\circ}{1 - \sin 15^\circ} \quad (8)$$

表 2 からわかるように, 実験条件の変化に対し, 振れ量 ρ と刃先半径 r には一義的な変化は現れなかった。振れ量に関しては実験条件の変化に対し $5\mu\text{m}$ 前後の数値で変動したが, 振れのプロファイルの形状自体には大きな変化は見られなかった。振れの大きさには, 砥石剛性, 砥石フランジと主軸の接合の剛性, 砥石スピンドルの精度などが大きく影響していると考えられる。また, 刃先半径 r は $8\mu\text{m}$ 前後で変動しているが, #2000 の砥粒の平均粒径は $8\mu\text{m}$ 程度であるから, 本実験で得られた刃先の幅は砥粒 2 個を並べた程度の幅であることが

表 2 E を一定にして I_{cp_set} を変化させた実験の結果

実験番号	E [V]	I_{cp_set} [%]	E_{cp} [V]	I_{cp_set} [A]	P_{cp} [W]	R_{cp} [Ω]	τ [μm]	ρ [μm]	r [μm]
初期	-	-	-	-	-	-	-	4.8	6.8
1	50	50	37.5	1.25	46.9	30.0	308	5.6	7.7
2	50	60	35.0	1.50	52.5	23.3	334	5.9	7.5
3	50	70	32.5	1.75	56.9	18.6	353	4.8	9.0
4	50	80	30.0	2.00	60.0	15.0	388	5.0	9.8
5	50	90	27.5	2.25	61.9	12.0	438	4.7	6.8

表 3 I_{cp_set} [%] を一定にして E を変化させた実験の結果

実験番号	E [V]	I_{cp_set} [%]	E_{cp} [V]	I_{cp_set} [A]	P_{cp} [W]	R_{cp} [Ω]	τ [μm]	ρ [μm]	r [μm]
初期	-	-	-	-	-	-	-	6.0	10.1
6	45	70	29.3	1.58	46.1	18.6	309	6.8	9.7
7	50	70	32.5	1.75	56.9	18.6	362	7.2	6.7
8	55	70	35.6	1.93	68.8	18.6	464	7.2	7.6
9	60	70	39.0	2.10	81.9	18.6	552	7.3	8.1
10	65	70	42.3	2.28	96.1	18.6	-	-	-

わかる。得られる刃先半径は研削ホイールの刃先に存在する砥粒の空間的な分布状態に大きく依存するものと考えられる。

電極の進行量(5 分間当たりの進行量) τ は I_{cp_set} [%] の増加に伴って大きくなった。 I_{cp_set} [%] を大きくすることは, 電極間の抵抗を小さくすることを意味する。 I_{cp_set} [%] の増加に伴って電極間の抵抗を小さくするように電極が研削ホイールに強く押付けられた結果, 電極の進行量が増えたものと考えられる。

設定電圧 45V, 設定電流 50% の条件で表裏の V フェースを 10 分間ずつツルニングして初期化した後, I_{cp_set} を 70% に固定し, 設定電圧を 45V から 65V まで 5V 刻みで増加させて実験を行った。実験結果を表 3 に示す。表には示していないが, 電圧を 60V にした実験では電極の回転数が 2000rpm 程度まで低下した。また, 65V では 1000rpm 以下に低下したので実験を中止した(安全のため, 電極回転数が 1000rpm 以下に低下するとツルニングが自動停止するようになっている)。なお, 電極の回転数はモータに内蔵されたホールセンサからのパルス出力に基づいてモニタリングしている。表 3 からわかるように, 本実験条件において電極間の抵抗 R_{cp} は一定である。 R_{cp} が一定であれば研削ホイールに対する電極の押付け力は同程度になると考えるのが普通であるが, 電極の回転数の低下から判断すると実際にはそのようにはなっていない。今後, この原因に関して詳細に調べる必要がある。設定電圧の増加に伴って振れ量 ρ がわずかに増加しているのは, 研削ホイールに対する電極の押付け力の増加が原因であると考えられる。一方, 刃先半径 r に関しては, 先の実験と同様, 一義的な変化は見られなかった。

さらに, 設定電圧 45V, 設定電流 50% の条件で表裏の V フェースを 10 分間ずつツルニングして初期化した後, 接触放電電力のピーク値 P_{cp} が一定となるように E と I_{cp_set} を設定して実験を行った。実験結果を表 4 に示す。 E を大きく, I_{cp_set}

を小さくするほど振れ量 ρ が減少する傾向が見られる。また、電極の進行量も大幅に低下する傾向が見られる。これは、 E を大きく、 I_{cp_set} を小さくすることで研削ホイールに対する電極の押付け力が小さくなり、V フェースに大きな弾性変位を与えることなしに振れの大きい部分を選択的に除去できた結果であると考えられる。

次に、砥粒サイズが刃先半径に与える影響を調べるため、#1000 の研削ホイールを用いて実験を行った。設定電圧 45V、設定電流 50% の条件で V フェースの振れが最小になるまでツルーイングを行った後、刃先形状を観察した。刃先形状を図 17 に示す。刃先半径を求めたところ $18\mu\text{m}$ であった。#1000 の砥粒の平均粒径は $15\mu\text{m}$ 程度であるから、刃先の幅はやはり砥粒 2 個を並べた程度の幅である。以上の結果より、刃先の半径は砥粒径に大きく依存し、平均砥粒径程度になると推測できる。

5. 結言

二重リング形回転電極を備えた接触放電ツルーイング装置を開発し、刃先角 30° のプロファイル研削用導電性レジンボンドダイヤモンドホイールの V フェースのツルーイングに適用した。設定電圧と設定ピーク電流を変化させてツルーイング実験を行い、V フェースの振れ、刃先半径、電極進行量に与える影響を調べた。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) #2000 の研削ホイールにおいては $8\mu\text{m}$ 程度の刃先半径が、#1000 の研削ホイールにおいては $18\mu\text{m}$ 程度の刃先半径が得られた。刃先半径は研削ホイールの砥粒径に大きく依存し、ほぼ平均砥粒径と同じ大きさになると推測できる。
- (2) 得られた刃先の V フェースは理想的な V フェースから少し外にはみ出た形状となった。これはツルーイング中に刃先が弾性変形したためであると考えられる。
- (3) 設定電圧を 50V に固定して設定ピーク電流のパーセント表記値を 50% から 90% の範囲で増加させたところ、設定ピーク電流の増加に伴って電極の進行速度が増加した。
- (4) 設定ピーク電流のパーセント表記値を 70% に固定して設定電圧を 45V から 65V の範囲で増加させたところ、設定電圧の増加に伴って電極の進行速度が増加し、さらに 60V 以上の設定電圧では電極と研削ホイール間の力学的接触抵抗によって電極の回転数が大幅に低下した。
- (5) 接触放電電力のピーク値を 50.1W に固定して、設定電圧を 45V から 65V の範囲で増加させたところ、設定電圧の増加に伴って V フェースの振れ量が減少した。また、電極の進行速度も減少した。

開発したツルーイング装置によって、V フェース形プロファイル研削用導電性レジンボンド研削ホイールの刃先に十分

表 4 P_{cp} を一定にして E と I_{cp_set} を変化させた実験の結果

実験番号	E [V]	I_{cp_set} [%]	E_{cp} [V]	I_{cp_set} [A]	P_{cp} [W]	R_{cp} [Ω]	τ [μm]	ρ [μm]	r [μm]
初期	-	-	-	-	-	-	-	7.5	8.5
11	45	90	24.8	2.03	50.1	12.2	365	7.2	7.0
12	55	42	43.5	1.15	50.1	37.7	278	6.7	7.0
13	65	28	56.1	0.89	50.1	62.7	43	5.4	7.4

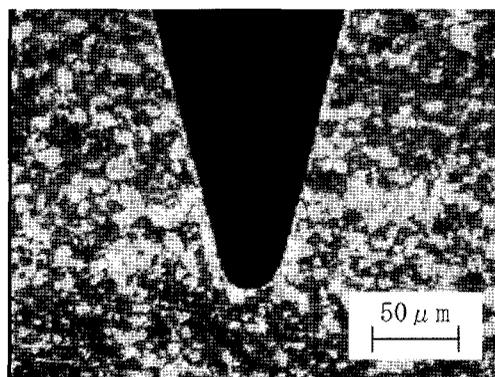


図 17 #1000 の研削ホイールのツルーイング後の刃先
(電源電圧 $E = 50\text{V}$, $I_{cp_set} = 60\%$)

小さな刃先半径を与えられることがわかった。今後、ツルーイング条件がツルーイング量や電極消耗量に与える影響を詳細に調べる必要がある。

本研究を推進するにあたって、NEDO 地域コンソーシアム 研究開発「次世代金型製造プロセスに関する研究開発」(平成 10-11 年度) および 科学技術振興事業団 地域研究開発促進拠点支援事業 (RSP 事業) (平成 12 年度) の助成を得た。また、実験の準備にあたっては、本学技術職員・三船英伸氏の協力を得た。ここに併せて深甚なる謝意を表す。

6. 参考文献

- 1) 鈴木清, 毛利尚武, 植松哲太郎, 中川威雄: ツイン電極法による放電ツルーイング法の提案, 1985 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1985)575.
- 2) 鈴木憲二, 高橋邦夫: ツイン電極式接触放電ドレッシング法の実用化研究 (第 1 報), 1989 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1989)327.
- 3) D.Z.Chen and Y.Y.Tian: Form Dressing of Metal-bonded Diamond Wheel, Proceedings of ISEM-9(1989)18.
- 4) M.Kubota, Y.Tamura and T.Okita: Electrocontact Discharge Dressing of Metal Bonded Diamond Wheels Using Twin Electrode System, Proceedings of ISEM-9(1989)22.
- 5) 田牧純一, 北川武揚: 回転電極方式によるメタルボンドダイヤモンド砥石の接触放電ドレッシング (第 1 報), 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990)429.
- 6) 鈴木清, 鍾博任, 竹内恵三, 柳瀬辰仁, 植松哲太郎: ブラシ電極によるメタルボンド砥石の放電ドレッシングの試み, 砥粒加工学会誌, 39-5 (1995)266.
- 7) 柳瀬辰仁, 薄木雅雄, 植松哲太郎, 鈴木清: 放電加工による薄刃砥石の機上精密ツルーイング, 精密工学会誌, 61-6(1995)819.
- 8) 林偉民, 大森整, 山形豊, 守安精, 上原嘉宏, 伊藤伸英, 林漢錫, 片平和俊, 森田晋也, 牧野内昭武: ELID 研削における砥石のマイクロツルーイング, 砥粒加工学会誌, 45-5(2001)221.
- 9) 謝晋, 田牧純一, 久保明彦, 井山俊郎: 接触放電ドレッシングの微粒ダイヤモンド研削ホイールへの適用, 精密工学会誌, 67-11(2001)1844.
- 10) 久保明彦, 田牧純一, 杉野豪, 間紀旺, 成田潔: 低電圧を用いたレジンボンド CBN ホイールの接触放電ドレッシング, 砥粒加工学会誌, 46-7(2002)348.