

電着ダイヤモンド砥石の放電ツルーイング法の開発

Electrical Discharge Truing for Electroplated Diamond Tools

渡邊 幸司* 南 久* 平松 初珠**

Koji Watanabe Hisashi Minami Hatsumi Hiramatsu

増井 清徳***

Kiyonori Masui

(2011年7月8日 受理)

Electroplated diamond tools are widely used for grinding because of their high grinding efficiency. However, the height of the grain protrusion of the electroplated diamond tool is not uniform, which degrades the surface roughness. Therefore, it is necessary to make the height of diamond grains uniform. Herein, we propose a new electrical discharge truing (ED truing) method for electroplated diamond tools. This ED truing method is applicable to a conventional electroplated diamond tool whose grains (diamond) have no electrical conductivity. Results show the capability of truncating only the diamond grain tips directly using this new ED truing method and the ability to obtain an electroplated diamond tool with uniform grain height. Moreover, results show that the ground surface roughness is improved using the ED-trued electroplated diamond tool.

Key words : electrical discharge truing, electroplated diamond tool, truncate

1. はじめに

情報・通信, 医療, 環境エネルギーなどの先端技術分野では, 機器の小型化・軽量化に伴い, 使用される部品や生産用金型の加工に対し, より一層の微細化と高精度・高能率化が求められている。

このような状況の中, 電着ダイヤモンド砥石は, 砥粒保持力が高く, 切れ味に優れるため, 高能率加工に適しているばかりでなく, 複雑・微細形状の砥石を比較的容易に製作できるため, 安価な微細加工用工具として注目されている。一方で, 電着砥石は, めっき製法で台金表面にダイヤモンド砥粒を固定して製造するため, 砥粒の突き出し高さが不均一であり, 何らかの方法で突き出し高さを揃えるツルーイングを行わないと高精度加工には利用することができない。

砥石のツルーイング法としては, ツルアを用いた機械的作用による方法が一般的であるが, 小径の軸付砥石の場合, 砥石軸の剛性が低いいため, 従来の機械的なツルーイング法では加工反力により砥石軸が変形し, 正確なツルーイングを行うことは困難である。このため, 加工反力の小さな放電加工をツルーイングに利用しようとする試みが幾つか報告されている¹⁻²⁾。

メタルボンド砥石などに適用されている放電ツルーイング法¹⁾は, 導電性のバインダー(金属)を放電で除去し砥粒を脱落させる手法であるが, 砥粒層が一層のみの電着砥石に適用することはできない。新たに導電性のCVDダイヤモンド砥粒を開発し, この砥粒を用いて砥石を製作し, 高精度な放電ツルーイングを実現した報告²⁾があるが, 導電性のない一般のダイヤモンド砥石には適用できない。

近年になって, 絶縁性セラミックスの放電加工³⁾が可能となり, 非導電体のダイヤモンド粒子そのものを

* 機械金属部 加工成形系

** 情報電子部 制御情報系

*** E.D.M. ラボ

放電加工する研究が報告⁴⁻⁶⁾されるようになった。これらによれば、放電加工油から生成される熱分解カーボンを非導電体のダイヤモンド上にうまく形成させながら加工を行えば、ダイヤモンド砥粒自体を放電加工することができると考えられている。

本研究では、導電性を有しないダイヤモンド砥粒で作られた一般的なダイヤモンド砥石の砥粒先端部のみを放電加工することで、砥粒突き出し高さを揃える放電ツルージング法を提案し、小径軸付電着ダイヤモンド砥石への適用の可能性について検討した。

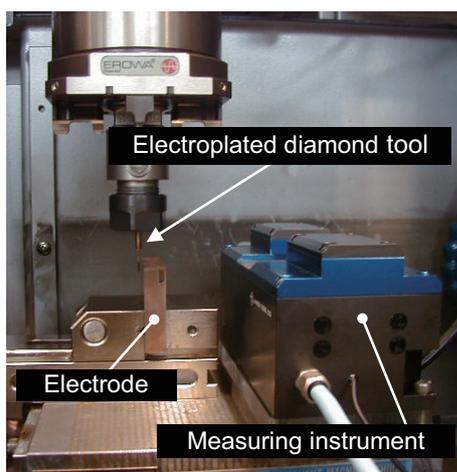


Fig. 1 Appearance of experimental equipment for electrical discharge truing.

2. 実験方法

放電ツルージング実験は、Fig. 1 に実験装置の外観を示すように、放電加工機の主轴に取り付けた軸付電着ダイヤモンド砥石をテーブル上に固定した銅タンゲステン合金電極(以下ではブロック電極)で放電加工することで行った。この時、ダイヤモンド砥粒に初期の放電を発生させるために、あらかじめ砥石全体を金蒸着した。また、本実験は放電加工油中で行った。

具体的なツルージング手順としては、低速(20 min^{-1})で回転する軸付砥石にステップ状の送りを与えてブロック電極に近づけることで軸付砥石の放電加工を行った。この時、各ステップ送り毎に、砥石の位置を固定して一定時間放電加工(タイマー加工)し、突出した砥粒の先端部を完全に除去した後、次のステップ送りを与えた。詳細な放電ツルージング条件をTable 1 に示す。

ツルージング前後の砥石形状は、ユニオンツール(株)製微細工具測定器を用いて測定した。Fig. 2 に示すように、回転する砥石が1回転する間にLEDの平行光(厚さ=約1 μm)を遮った幅を計測し、これを砥石直径とした。さらに、砥石をZ軸(垂直)方向に移動させながら、各断面での直径を計測し、砥石形状を求めた。

Table 1 Experimental conditions.

EDM-machine	Sodick AP1L
Discharge current	$i_e = 2 \text{ A}$
Open circuit voltage	$u_i = 120 \text{ V}$
Discharge duration	$t_e = 1 \mu\text{s}$
Duty factor	$\tau = 10 \%$
Workpiece	Electroplated diamond tool : (+) Diameter: $\phi 1.0\text{mm}$, grain size: #140 Gold deposition : almost 50 nm
Electrode	Cu-W : (-)
Rotating speed	20 min^{-1}
Step feed	1 μm , 5 μm
Dielectric working fluid	EDM oil

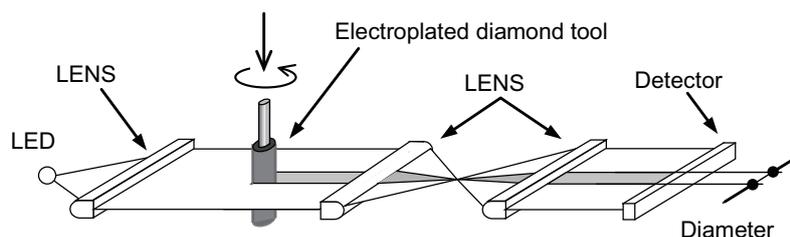


Fig.2 Measuring system for profile of diamond tool.

Fig. 3は、砥石形状の測定例を示す。Z軸方向の測定ピッチは砥石の平均粒径(約100 μm)の1/10(10 μm)とした。ここで、計測した砥石形状は、回転軸対称であるため、砥石直径を1/2倍し、半径で表示した。

3. 実験結果

3.1 ダイヤモンド砥粒の放電加工特性

放電ツルーイングに適した加工条件を検討した。本実験では、加工後の観察や計測が容易なように、比較的粒子サイズが大きな#40 ダイヤモンド砥粒(平均粒径 = 420 μm)を用いた。

Fig. 4は、最大放電電流値(i_e)が1 Aの場合の放電持続時間(t_e)と加工速度、放電発生数の関係を示す。加工速度は放電持続時間を短く設定するほど高くなる傾向を示す。この時、放電発生数(N)は、放電持続時間(t_e)の減少に対してほぼ反比例して増加することから、加工点に投入されるエネルギー($\propto N \times t_e$)は、いずれの加工条件でもほぼ等しいと考えられる。このことから、ダイヤモンドの放電加工速度を高めるためには、放電持続時間を短く設定した方が有効である。

Fig. 5は、放電持続時間が1 μsの場合の最大放電電流値と加工速度の関係を示す。加工速度は、 $i_e = 2$ Aの場合に最も高い値を示す。 $i_e = 5$ Aの場合、設定したパルス幅(1 μs)より長い放電持続時間を持った放電パルス波形が加工中に多数観察された。 $i_e = 5$ Aで加工速度が低下するのは、放電持続時間が長い放電パルスの発生が、原因であると考えられる。

以上の結果から、加工速度が比較的高い値を示す $t_e = 1$ μs, $i_e = 2$ Aで、以下のツルーイング実験を行った。

3.2 電着ダイヤモンド砥石の放電ツルーイング

放電ツルーイングにおいては、各ステップ加工時のステップ送り量とタイマー加工の加工時間がツルーイング精度と加工能率に影響すると考えられる。

Fig.6は、ステップ送り量1 μm, 5 μmでタイマー加工した場合の電圧電流波形を示す。ステップ送り量が5 μmの場合、短絡波形(図中矢印)が観測される。これは、ステップ送り量が放電ギャップ以上の場合、砥石の回転速度にサーボが追従せず、砥粒先端部と電極が接触するためと考えられる。一方、ステップ送り量が1 μmの場合、短絡波形は認められず、正常な放電ツルーイングが繰り返されている。このことから、ステップ送り量は1 μmとして、以下の実験を行った。

タイマー加工時間としては、ステップ送り後、放電がほとんど発生しなくなるまでの時間に設定することが加工能率の点で望ましい。そこで、1 μmのステッ

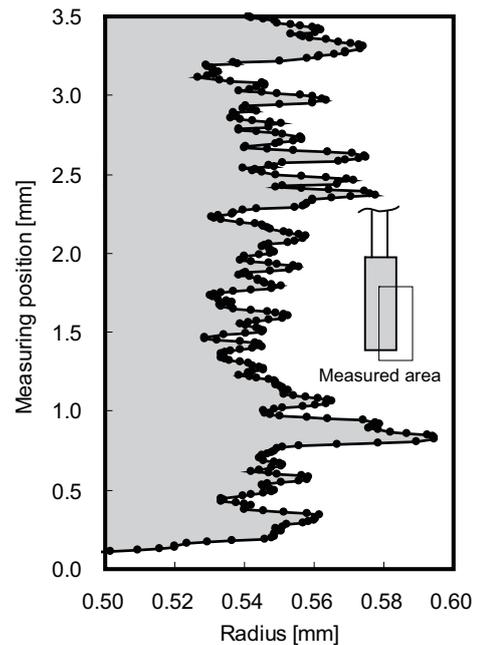


Fig. 3 Profile of electroplated diamond tool.

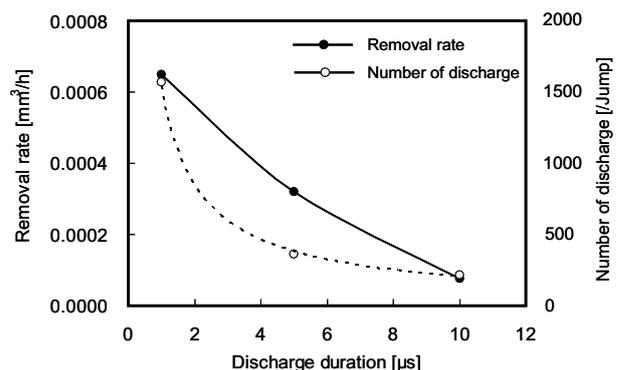


Fig. 4 Relationship between removal rate and number of discharge ($i_e = 1$ A).

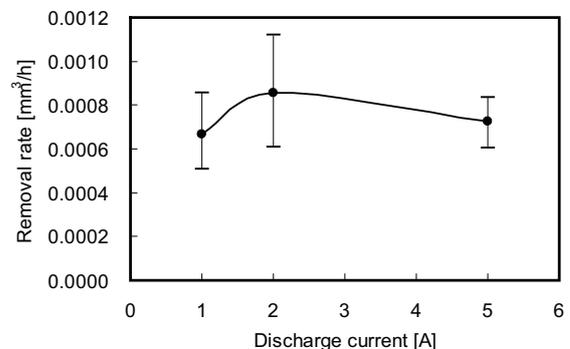


Fig. 5 Relationship between removal rate and discharge current ($t_e = 1$ μs).

プ送りを与えた後、加工時間の経過に伴う放電発生数の変化について調べた。Fig. 7に示すように、砥石に

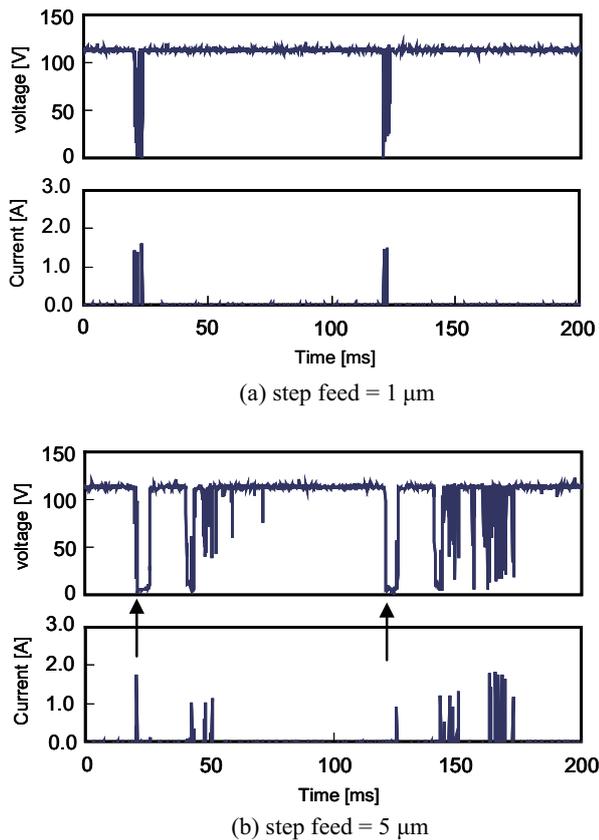


Fig. 6 Wave form of gap voltage and discharge current.

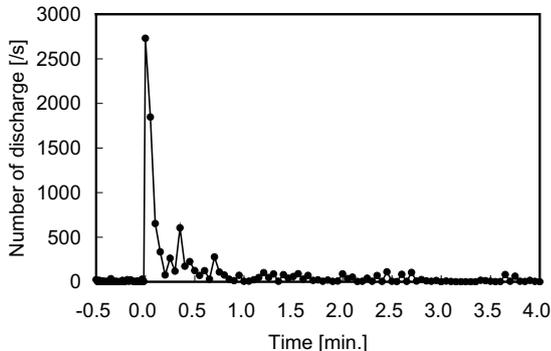


Fig. 7 Change in number of discharge.

ステップ送りが与えられた直後、放電発生数は急激に増加するが、加工時間の経過とともに減少し、約2分で、放電はほとんど発生しなくなる。このことから、タイマー加工時間を3分とした。

Fig. 8は、ツルーイング前後の砥石形状を測定した結果である。総送り量が30 μm(ステップ送り30回)までは、突き出し高さの高い砥粒先端部(図中矢印)のみが選択的に放電加工されているが、総送り量が80 μm(ステップ送り80回)の砥石では、突き出し高さが低い砥粒も放電加工されており、突き出し高さは均一化されていない。そこで、この原因について調べるため、ブロック電極表面の観察を行った。

Fig. 9は、ツルーイング後のブロック電極表面の

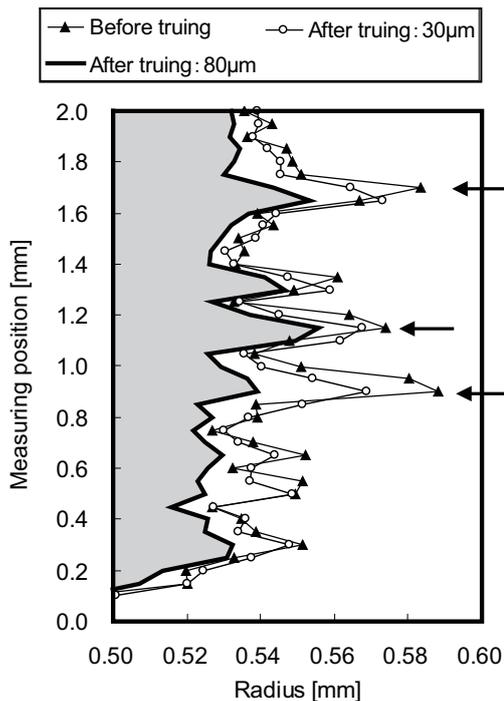


Fig. 8 Profile of the electroplated diamond tool.

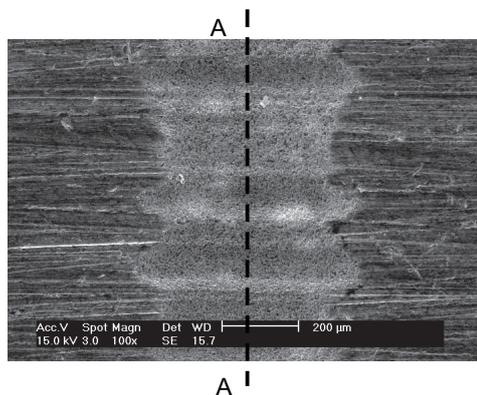


Fig. 9 Surface of electrode after ED-truing.

SEM像を示す。放電加工を行った電極表面には、多数の放電痕とともに放電で消耗したと思われる痕跡が観察される。そこで、ブロック電極の表面形状(Fig. 9に示すA-A断面部)を測定し、砥石形状と比較した(Fig. 10)。ブロック電極の表面には多数の凹凸が形成されており、この形状はツルーイング後の砥石形状とよく一致している。このことから、突き出し高さの低い砥粒にも放電が発生したのは、ブロック電極が消耗することによって、砥石形状が電極面へ転写されたことが原因であると考えられる。そこで、突き出し高さが高い砥粒のみに放電を発生させるため、ブロック電極の消耗を考慮し、ステップ送りを一定回数与えた後にツルーイング位置を変更し、新たな電極面でツルーイングを行った。

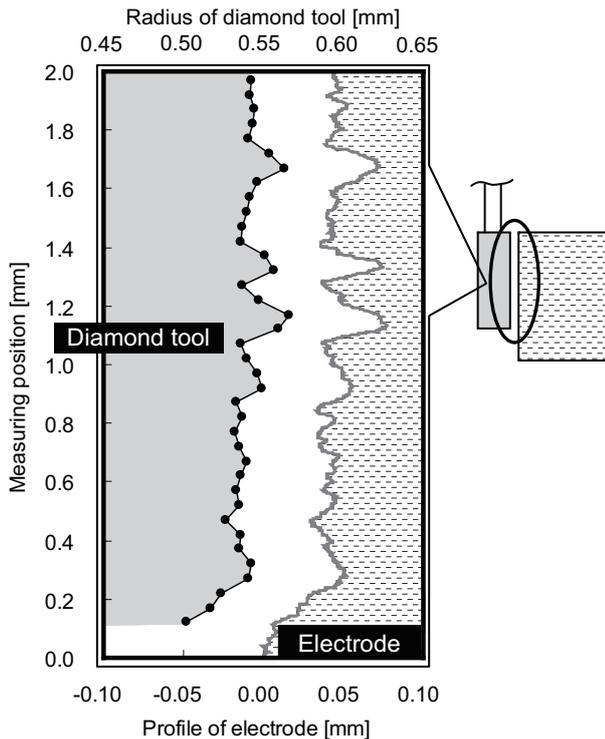


Fig. 10 Comparison of electroplated diamond tool and electrode after ED-truing.

Fig. 11 は、ステップ送りを 15 回行う毎に新たな電極面に移動してツルーイングを行った砥石の形状を示す。突出した砥粒の先端部のみが選択的に除去され、砥粒の突き出し高さが均一化されている。Fig.12 は、このときのツルーイング前後の砥石面の SEM 像を示したものである。ツルーイング後の砥石面には、砥粒が脱落した様子は認められず、突出したダイヤモンド砥粒の先端部のみが放電加工されている。

以上のように、ブロック電極の消耗を考慮し、ツルーイングを行う電極面を定期的に変更しながら加工することによって、突き出し高さの高いダイヤモンド砥粒の先端部のみを選択的に放電加工する放電ツルーイングが可能となる。

3.3 放電ツルーイング砥石による研削加工

放電ツルーイングの効果を検証するため、ツルーイング後の砥石を用いて研削加工実験を行った。Fig.13 は、実験装置の外観、および研削加工における砥石の運動軌跡を模式的に示す。

実験では、放電加工機の主軸に取り付けた(株)ナカニシ製高速エアタービンスピンドル(回転数 = 150,000 min⁻¹)の先端部に軸付電着ダイヤモンド砥石を装着して研削加工を行った。また、研削加工実験は、加工機の高速度ジャンプ機能(リニアモータ制御)を利用して、Z 軸方向に砥石をジャンプ(ジャンプ速度 = 1 m/s)させながら、同時に工作物を Y 軸方向へ移動さ

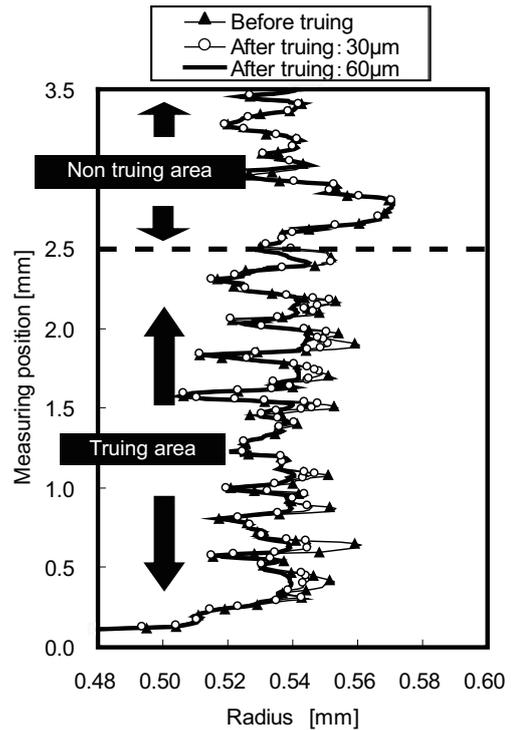
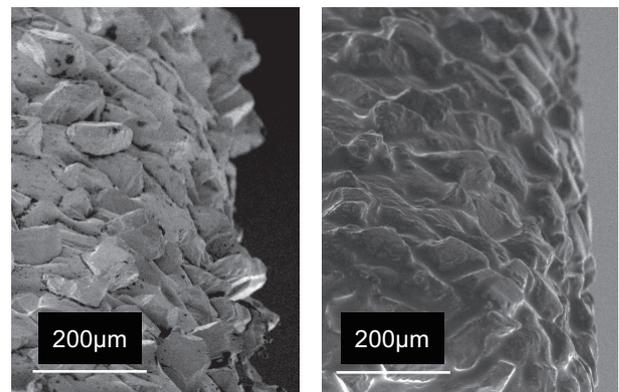


Fig. 11 Profile of electroplated diamond tool before and after ED-truing.



(a) Before ED-truing (b) After ED-truing

Fig. 12 SEM images of diamond tool.

せることで行った。工作物には超合金(ダイジェット工業(株):超微粒タイプ)を用い、あらかじめ表面粗さ 6.6 µmRz に仕上げた放電加工面を研削加工の前加工面とした。

加工手順としては、まずツルーイングを行っていない軸付砥石で研削加工した後、砥石を放電ツルーイングし、これを用いて仕上げ加工を行った。

Fig. 14 は、それぞれの加工面の SEM 像と粗さ曲線を示す。ツルーイング前の砥石を用いた研削加工面は、表面粗さ 2.4 µmRz であるのに対して、ツルーイング後の砥石で仕上げられた加工面の表面粗さは 0.81 µmRz に向上している。このことから、放電ツルーイ

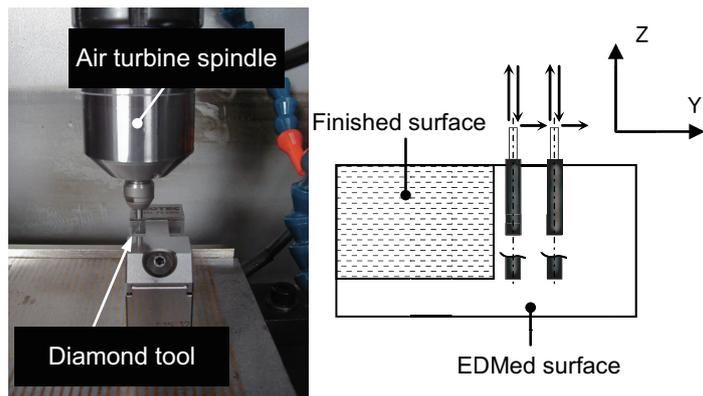


Fig. 13 Appearance of the spindle for grinding and schematic diagram of tool paths for grinding of EDMed surface.

	Pre-machining (EDMed surface)	1st finishing (by not trued tool)	Final finishing (by trued diamond tool)
SEM			
Surface roughness	5μm 6.6μmRz 	5μm 2.4μmRz 	5μm 0.81μmRz

Fig. 14 Improved surface by grinding with ED-trued diamond tool.

ングを行った電着ダイヤモンド砥石は、硬脆材料である超硬合金の研削加工が可能であること、また、放電ツールイングで砥粒の突き出し高さを均一化することで、ツールイングを行っていない砥石に比べて加工面の表面粗さを向上できることを確認した。

3.4 球形状砥石への放電ツールイングの適用例

電着砥石は、めっき製法で砥粒を固定したものであ

るため、台金さえあれば複雑な形状の砥石でも比較的容易に作製できる。このため、円筒形状の砥石だけでなく、円錐形状や球形状の砥石なども一般に用いられている。そこで、三次元形状加工にも適用可能な球形状電着ダイヤモンド砥石に対して放電ツールイングを試みた。ここでは、φ250 μmの走行ワイヤ(黄銅)を電極とし、Z-X軸の円弧補間を用いて加工を行った。

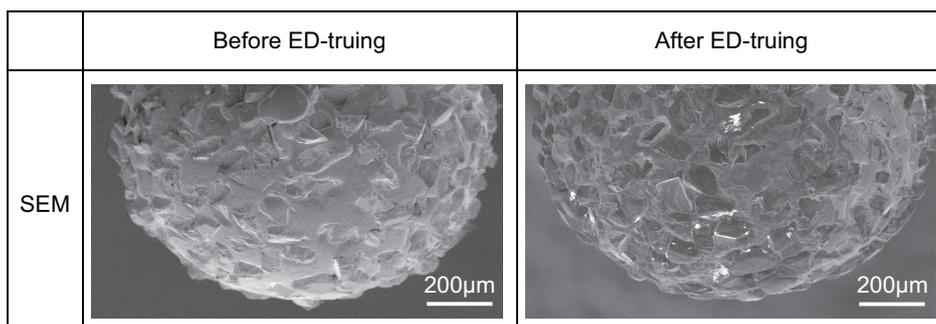


Fig. 15 ED-truing for spherical electroplated diamond tool.

Fig. 15は、放電ツルーイングを適用した $\phi 1$ mmの球形状電着ダイヤモンド砥石のSEM像、Fig. 16は、砥石形状の測定結果を示す。電着砥石は放電ツルーイングによって、砥粒の突き出し高さが均一化され、ほぼ目的とする理想的な球形状(形状精度 = 5.9 μm)にツルーイングされている。このことから、放電ツルーイングは、円筒形状だけではなく、球形状などの複雑な形状の砥石に対しても適用可能であることが確認できた。

4. まとめ

導電性を有しないダイヤモンド砥粒で作られた一般的なダイヤモンド砥石の砥粒先端部のみを放電加工することで、砥粒突き出し高さを揃える放電ツルーイング法を提案し、小径軸付電着ダイヤモンド砥石への適用の可能性について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ダイヤモンド砥石の放電ツルーイングには、放電持続時間の短いパルス条件が効果的である。
- (2) ブロック電極の消耗を考慮し、ツルーイングを行う電極面を定期的に変更しながら、突き出し高さの高いダイヤモンド砥粒の先端部のみを選択的に放電加工することで、均一化された砥石形状にツルーイングすることができる。
- (3) 放電ツルーイングを行った電着ダイヤモンド砥石は、硬脆材料である超硬合金の研削加工が可能である。
- (4) 放電ツルーイングで砥石の砥粒突き出し高さを均一化することで、ツルーイングを行っていない砥石に比べて加工面の表面粗さを向上することがで

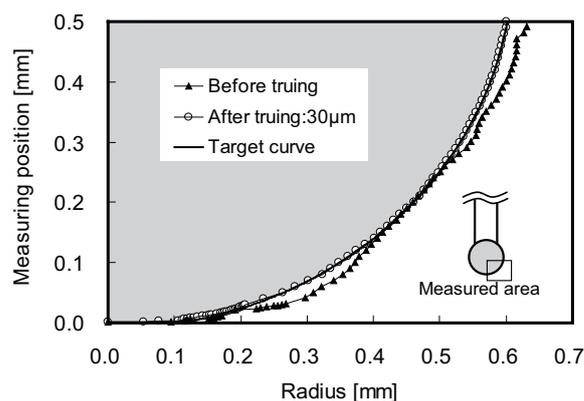


Fig. 16 Profile of spherical electroplated diamond tool before and after ED-truing.

きる。

- (5) 放電ツルーイングは、円筒形状だけではなく、球形状などの複雑な形状の砥石に対しても適用可能である。

参考文献

- 1) 柳瀬辰仁, 薄木雅雄, 植松哲太郎, 鈴木 清: 精密工学会誌, **61** (1995) 819.
- 2) 岩井 学, 張 丹陽, 田中幸徳, 佐野定男, 植松哲太郎, 鈴木 清: 電気加工学会全国大会2005講演論文集 (2005) 41.
- 3) 申 泰民, 山田 久, 毛利尚武, 古谷克司, 福澤 康, 谷 貴幸: 電気加工学会誌, **32** (1998) 1.
- 4) 河田耕一, 掛水大介, 佐藤健夫, 西村一仁, 寺田研一郎, 江 南: 電気加工学会全国大会2002講演論文集 (2002) 61.
- 5) 中奥 洋, 増沢隆久, 藤野正俊: 電気加工学会誌, **39** (2005) 24.
- 6) 南 久, 渡邊幸司, 増井清徳, 鍋倉伸嘉: 電気加工学会誌, **44** (2010) 17.