極微粒ダイヤモンド電鍍工具に対する砥粒平坦化および平滑化 ツルーイング技術*

合 屋 尚 子^{*1}, 孫 万 福^{*2}
原 田 武 志^{*3}, 仙 波 卓 弥^{*3}

Truing Technique for Flattening and Smoothing Fine Diamond Grains on Wheel Working Surface of Electroformed Diamond Tool

Naoko GOHYA, Wanfu SUN,
Takeshi HARADA and Takuya SEMBA^{*4}

^{**} Fukuoka Institute of Technology, Department of Intelligent Mechanical Engineering,
3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 811-0295 Japan

A truing technique for an electroformed diamond tool with a mesh size of #1000 that can fabricate a flat and smooth tip of diamond grains on a hemispherical wheel working surface was developed to adapt the tool to the nanometer grinding of a cemented carbide. A truing test using a polycrystalline diamond disk with a primary diamond grain size of 1 μm as a truer was conducted by varying the contact load between the tool and the truer, the setting depth of cut, the grain size in the diamond slurry used as a grinding fluid and the number of traverses in no-cut grinding carried out after reaching the total wheel depth of cut. It was verified through the truing test that 51% of diamond grains on a hemispherical wheel working surface could be made flat and smooth, and that 76% of grains could be made flat by adding flattened grains with tiny cracks when the contact load, the setting depth of cut, the grain size in the diamond slurry and the number of traverses in no-cut grinding were set at 5.2 N, 9 μm , 0-1, and 10 times, respectively.

Key Words: Truing and Dressing, Microgrinding, Electroformed Diamond Tool, Cemented Carbide

1. 緒 言

ガラスレンズを量産する金型の材料には主として超硬合金が用いられており、同材料に対して研削加工と研磨加工を行うことによって表面粗さが10 nm Rz以下の金型が作られている。ただし、直径が1 mm以下のガラスレンズ金型に対する研磨加工技術は今のところ確立されていない。したがって、直径が1 mm以下のガラスレンズを量産するためには、超硬合金に対して表面粗さが10 nm Rz以下の金型を作ることができるマイクロ機械加工技術⁽¹⁾を開発する必要がある。

マイクロ機械加工技術の中でも、マイクロ研削加工⁽²⁾は高硬度材料に対して超精密微細形状を作ることができる潜在能力を持っている。しかし、耐欠損性や耐摩耗性に優れた工具素材が開発されていないことや、表面粗さが10 nm Rz以下の研削加工面を短時間で作ることが容易でないこと等が原因で、マイクロ研

削加工が実用化されるには至っていない。

これらマイクロ研削加工が抱えている2つの問題点のうち、工具の耐欠損性に関してはP種超硬合金の抗折力と同等の曲げ強さを持つダイヤモンド電鍍工具⁽³⁾を開発することができた。また、表面粗さが10 nm Rz以下の研削加工面を短時間で作ることにしても、半球状の砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を工具の輪郭に沿って平坦かつ平滑に成形することができれば実現できる可能性がある⁽⁴⁾。

本研究では、メッシュサイズが#1000のダイヤモンド電鍍工具に対し、工具の先端を半径が0.2 mmの半球状に成形できると同時に半球状の砥石作用面にある砥粒の先端を平坦かつ平滑に成形できる。砥粒平坦化ツルーイング技術⁽⁴⁾の開発を行った。また、砥粒平坦化ツルーイングの効果を確かめるため、ビッカース硬さが640 Hvのガラス状炭素⁽⁵⁾と2600 Hvの超硬合金に対する研削実験を行った。

2. 実験装置

2.1 研削工具 研削工具には、メッシュサイズが#1000、集中度が100のダイヤモンド電鍍工具⁽³⁾を使用した。曲げ試験を行い測定した同工具の比例限

* 原稿受付 2010年5月6日。

^{*1} 正員, 福岡工業大学工学研究科知能機械工学専攻(☎811-0295 福岡市東区和白東3-30-1)。

^{*2} 福岡工業大学工学研究科知能機械工学専攻。

^{*3} 正員, 福岡工業大学工学部知能機械工学科。

E-mail: senba@fit.ac.jp

度応力は約 2 GPa であり、P 種超硬合金の抗折力と同等の曲げ強さを持っている³⁾。

2.2 ツルア ダイヤモンド電鍍工具を成形するためのツルアには、ダイヤモンドの一次粒子径が 0.5 μm で直径が 15 mm の焼結ダイヤモンド (Polycrystalline Diamond: PCD) を使用した。

2.3 4 軸自公転ステージ ダイヤモンド電鍍工具のツルージングに使用した、4 軸自公転ステージ⁶⁾の外観を図 1 に示す。ツルアは真鍮製の芯振れ防止治具を介してブラシレスモータ、ブラシレスモータは X-Y ステージを介して回転テーブルに固定した。ツルアの自転運動と公転運動を併用することにより、立形マシニングセンタの主軸に装着されたダイヤモンド電鍍工具の先端を半球状に成形できる機能を持っている。

2.4 定圧研削機構 図 2(a) に示したのは芯振れ防止治具の断面である。ツルアの面振れが原因でダイヤモンド電鍍工具の砥石作用面が粗らされるのを

防ぐため、芯振れ防止治具の内部にバネを組込み、ツルアを弾性支持することにした。図 2(b) に示したのは回転していないツルアに対して測定したバネの圧縮特性、圧縮試験に使用したバネの仕様は表 1 に示すとおりである。ツルアにダイヤモンド電鍍工具が接触すると、接触荷重は予め与えた圧縮変位に相当する荷重 P_0 まで瞬時に増加する。ただし、表 1 に示したようにバネ定数が低いバネを用いており、接触後に圧縮変位を 0.1 mm 加えた場合に生じる荷重の増加 ΔP は P_0 の 1.5% 以下の値に収まっている。したがって、切残しが蓄積されツルアがダイヤモンド電鍍工具に弾性接触した状態でツルージングを行う場合、切残しが 0.1 mm 以内の範囲ではほぼ定圧での研削加工を行うことができる。

3. 実験方法

3.1 成形手順 図 3 に示しているのは、ダイヤモンド電鍍工具の成形手順である。電気めっきを行い試作したサイズが $\square 3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ のダイヤモンド電鍍工具に対して研削加工を行い円柱状に成形した

Fig. 1 Overview of a four-axis rotary stage used for the truing and dressing of an electroformed diamond tool

Fig. 2 Cross section of a tool holder and contact load measured by varying the compression spring

Table 1 Specifications of springs inserted in a tool holder

	Type 1	Type 2	Type 3
Spring stiffness (N/mm)	0.27	0.47	1.32
Free length (mm)	21.0	21.0	21.0
Outside diameter (mm)	6.0	6.0	6.0
Precompressed length (mm)	7.5	11.0	7.0
Precompressed load P_0 (N)	2.04	5.17	9.24
Increase in contact load against applied displacement of 0.1 mm ΔP (N)	0.03	0.05	0.13
Increasing ratio of contact load against precompressed load $\Delta P/P_0$ (%)	1.33	0.91	1.43

Fig. 3 Forming process of a microgrinding tool using electroformed diamond tool as a tool material

後⁽⁵⁾, これを S 45 C 製の工具ホルダに圧入した。工具ホルダの他端に圧入した直径が 6 mm のジルコニアセラミックスを立形マシニングセンタの主軸に装着し、ダイヤモンド電鑄工具の先端を半径が 0.2 mm の半球状に成形すると同時に、半球状の砥石作用面にある砥粒の先端を平坦かつ平滑に成形するための砥粒平坦化ツルージングを行った。

3・2 ツルアの成形 PCD 製ツルアに対する成形の要領を図 4 に示す。まず初めに、メッシュサイズが # 600 で直径が 15 mm のダイヤモンド電着工具を陰極、ツルアを陽極に接続して放電加工(Electrical Discharge Machining: EDM)を行い、ツルアの面振れを除去した。次に、加工面に残留する炭化層を除去するため、陰極に使用したダイヤモンド電着工具を用いてツルアに対する湿式ラッピングを行った。ツルアの成形条件は表 2 に示すとおりである。面振れを 0.5 μm 以下、砥石作用面の表面粗さを 1.6 μm Rz 程度の値に成形したツルアをダイヤモンド

電鑄工具の形状成形と砥粒平坦化ツルージングに使用した。

3・3 形状成形 まず初めに、図 1 に示したマイクロメータを使用して公転中心からツルアの砥石作用面までの距離を 0.2 mm に調節した。次に、立形マシニングセンタの Z 軸方向に砥石切込みを 1 μm 加える毎にツルアを工具の輪郭に沿って 3 回・往復公転運動させ、ダイヤモンド電鑄工具の先端を半径が 0.2 mm の半球状に成形した。工具の円錐部とツルアとが接触してツルアに目詰まりが生じるのを避けるため、図 5 に示した半球部の直径 d_0 が 0.27 mm に達した時点で形状成形を止め、半球状の砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を平坦かつ平滑に成形するための砥粒平坦化ツルージングに移行した。成形条件は表 3 に示すとおりである。研削液には水溶性研削液を使用した。

3・4 砥粒の平坦化と平滑化 Z 軸方向への砥石切込みは、ツルアを工具の輪郭に沿って 1 回・往復公転運動させる毎に 1 μm 加えることにした。砥石切

Fig. 4 Shaping PCD truer to eliminate side run out by EDM and to remove carbonized layer from the wheel working surface by wet lapping

Fig. 5 Schematic view of truing for shaping the tip into a hemisphere and flattening diamond grains on the wheel working surface

Table 2 Machining conditions of a PCD truer using EDM and wet lapping

	EDM	Wet lapping
Truer (cathode)	Electroplated diamond tool, #600	Electroplated diamond tool, #600
Tool (anode)	PCD	PCD
Rev. speed of tool	250 rpm	500 rpm
Rev. speed of truer	200 rpm	2 000 rpm
Maximum voltage	200 V	—
Maximum current	40 mA	—
Capacitance	3 300 pF	—
Diamond slurry	—	Mesh size of #600, #1 000 and #3 000
Fluid	Dielectric oil	Air

Table 3 Truing conditions of an electroformed diamond tool

	Shaping	Flattening
Truer	PCD, primary grain size of 0.5 μm	PCD, primary grain size of 0.5 μm
Contact load	0.74~9.24 N	0.74~9.24 N
Rev. speed of tool	500 rpm	500 rpm
Rev. speed of truer	4 800 rpm	4 800 rpm
Orbital speed of truer	0.33 rpm	0.33 rpm
Setting depth of cut	1 μm	1~9 μm
Total depth of cut	—	70 μm
Nocut number	—	5~80 traverses
Fluid	Water-soluble type (1 000 $\times$)	Water-soluble type (1 000 $\times$)
Diamond grain size in fluid	0-1/5~0-2	0-1/5~0-2

込みが設定切込み深さに達した後にツルアを工具の輪郭に沿って5回・往復公転運動させ、ノーカット研削を行った。形状成形後に砥石作用面に出ていたダイヤモンド砥粒を1層分除去するため、総切込み深さが70 μm に達するまで砥粒平坦化ツルーイングを行った。形状成形と砥粒平坦化ツルーイングの条件は表3に示したとおりである。

表3に太字で示したように、ダイヤモンド電鍍工具へのツルアの接触荷重、設定切込み深さ、ダイヤモンドスラリの粒径、ならびに総切込み後のノーカット研削の回数等を変化させ形状成形と砥粒平坦化ツルーイングを行った。研削液には、水溶性研削液の他にツルアの目詰まりを防ぐためにダイヤモンドスラリーを使用した。砥石切込みが設定切込み深さに達した後や総切込み深さに達した後のノーカット研削時、ツルアが工具の輪郭に沿って5回・往復公転運動する毎にダイヤモンドスラリーをツルアの表面に塗布した。

3.5 砥粒の分類 砥粒平坦化ツルーイング後のダイヤモンド電鍍工具の砥石作用面を走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)で観察すると、ダイヤモンド砥粒の形態は図6に示す5つの形態に分類できることが明らかになった。(a)は平坦かつ平滑に成形された砥粒、(b)は平坦に成形されたが研磨面に微細な割れが生じていた砥粒、(c)は凸状に成形された砥粒、(d)は割れた砥粒、ならびに(e)は微細に破碎した砥粒である。

そこで、砥粒平坦化ツルーイング後のダイヤモンド電鍍工具を工具軸の周りに90度刻みで回転させ、砥

石作用面を4方向からSEMで観察した。SEM画像を取得した後、4枚の画像に写されていた約350個の砥粒を図6に示した5つの形態に分類して集計することにした。

4. 砥粒平坦化ツルーイングとドレッシングの結果

4.1 ツルアの接触荷重 設定切込み深さを1 μm 、ダイヤモンドスラリの粒径を0-1/2、ならびに総切込み後のノーカットの回数を5往復に設定して砥粒平坦化ツルーイングを行った。Z軸方向に砥石切込みを1 μm 加える毎にツルアを工具の輪郭に沿って5回・往復公転運動させ、ノーカット研削を行った。図7に示しているのは、接触荷重を0.74~9.24 Nの範囲で変化させた場合に得られた砥粒の集計結果である。

ツルアの接触荷重を0.72~5.17 Nの範囲で増加させると、凸に成形された砥粒の割合が減少する代わりに平坦に成形された砥粒の割合が増加した。また、接触荷重を5.17 N以上に増すと、割れた砥粒や微細に破碎した砥粒の割合が増加し、平坦に成形された砥粒の割合が減少した。このように、砥粒を平坦に成形するためには接触荷重を増す必要があるが、接触荷重を7.54 N以上に増すと砥粒の割れや破碎が増加することが明らかになった。

そこで、ダイヤモンド電鍍工具へのツルアの接触荷重を5.17 Nに設定し、砥粒の先端を平坦かつ平滑に成形できる成形条件を見出すための実験を行った。

4.2 設定切込み深さ 接触荷重を5.17 N、ダイヤモンドスラリの粒径を0-1/2、総切込み後のノーカットの回数を40往復に設定して砥粒平坦化ツルーイ

Fig. 6 Typical features of diamond grains observed on a wheel working surface

Fig. 7 Percentage of flattened diamond grains on a wheel working surface obtained by varying the contact load between the tool and the truer

Fig. 8 Percentage of flattened diamond grains on a wheel working surface obtained by varying the setting depth of cut

ングを行った。Z 軸方向への砥石切込みは、ツルアを工具の輪郭に沿って1回・往復公転運動させる毎に1 μm 加えることにした。また、砥石切込みが設定切込み深さに達した後にツルアを工具の輪郭に沿って5回・往復公転運動させノーカット研削を行った。

設定切込み深さを3~9 μm の範囲で変化させた場合に得られた砥粒の集計結果を図8に示す。設定切込み深さが増すに従って、凸に成形された砥粒の割合が減少する代わりに平坦に成形された砥粒の割合が増加した。これは、設定切込み深さが増すに従って蓄積される切残しが増加し、ツルアがダイヤモンド電鍍工具と弾性接触する度合いが増加したためであると考えられる。

ただし、設定切込み深さを10 μm 以上に設定すると、切残しが蓄積されることが原因で工具先端の半径を0.2 mm に成形できなかった。そこで、設定切込み深さは9 μm に設定することにした。

4.3 ダイヤモンドスラリの粒径 接触荷重を5.17 N、設定切込み深さを9 μm、ならびに総切込み後のノーカットの回数を40往復に設定して砥粒平坦化ツルージングを行った。ダイヤモンドスラリの粒径を0-1/5~0-2の範囲で変化させた場合に得られた砥粒の集計結果を図9に示す。ダイヤモンドスラリの粒径を0-1/5~0-1の範囲で増加させると凸に成形された砥粒の割合が減少する代わりに平坦に成形された砥粒の割合が増加した。ただし、粒径が0-2のダイヤモンドスラリを用いると平坦に成形された砥粒の割合は減少した。

このように、ツルアに生じる目詰まりを防止する目的でダイヤモンドスラリを使用したのが、このダイヤモンドスラリは砥粒の平滑化に寄与していることが明

Fig. 9 Percentage of flattened diamond grains on a wheel working surface obtained by varying the grain size in the diamond slurry

Fig. 10 Percentage of flattened diamond grains on a wheel working surface obtained by varying the number of traverses in no-cut grinding

らかになった。この場合、粒径が0-1のダイヤモンドスラリを用いると平坦かつ平滑に成形された砥粒の割合は40%程度にまで増加した。そこで、ダイヤモンドスラリの粒径は0-1に設定することにした。

4.4 総切込み後のノーカットの回数 接触荷重を5.17 N、設定切込み深さを9 μm、ならびにダイヤモンドスラリの粒径を0-1に設定して砥粒平坦化ツルージングを行った。総切込み後のノーカットの回数を10~80往復の範囲で変化させた場合に得られた砥粒の集計結果を図10に示す。ノーカットの回数が増すに従って、凸に成形された砥粒の割合が増加する代わりに平坦に成形された砥粒の割合は減少した。

これは、ノーカットの回数が増すに従って蓄積されていた切残しが減少し、ツルアとダイヤモンド電鍍工具とが弾性接触する度合いが減少したためであると

(a) Wheel working surface (b) Diamond grain

Fig. 11 Wheel working surface and topograph of diamond grain observed after the truing test

(a) Wheel working surface (b) Diamond grain

Fig. 13 Wheel working surface and flattened diamond grain observed after the dressing test

(a) Groove (b) Enlargement

Fig. 12 Tool working surface of a PCD truer observed after the truing test

考えられる。したがって、図8に示した結果と同様に、この結果からも平坦に成形される砥粒の割合を増すためにはツルアをダイヤモンド電鍍工具へ弾性接触させ、砥粒平坦化ツルージングを行う必要があることが確かめられた。

図11に示しているのは、ノーカットの回数を10往復に設定した場合に得られた砥石作用面と平坦化された砥粒のSEM画像である。砥石作用面には割れた砥粒や凸に成形された砥粒が残っており、砥粒の100%を平坦かつ平滑に成形することはできなかった。ただし、砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の51%を平坦かつ平滑、研磨面に微細な割れが生じていた砥粒を含めると砥粒の76%を平坦に成形することができた。

図12に示しているのは、砥粒平坦化ツルージング後に観察したツルア表面のSEM画像である。ツルアが摩滅して生じた溝の表面には、図12(b)に示すように焼結助剤として用いられているコバルトが脱落したと思われる凹部が生成されていた。また、同図に

白く浮き上がって見える微細な粒子はSEM観察中にチャージアップしたダイヤモンド砥粒であり、コバルトが脱落した凹部にダイヤモンド砥粒が埋まっているようすが観察された。このツルア表面の凹部に半固定化されたダイヤモンド砥粒が微細な切れ刃として作用し、ダイヤモンド電鍍工具の砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒が平滑に研磨された可能性が高いと考えている。

4・5 ドレッシングの結果 図11に示したように砥粒平坦化ツルージングを行った後、ダイヤモンド電鍍工具とツルアとの間に隙間を5 μm 空け、ツルアの表面につれ回っている遊離砥粒で工具表面を擦過することにより、ダイヤモンド電鍍工具に対するドレッシングを行った。濃度が6%のカルボキシメチルセルロース CMC 溶液⁽⁷⁾に、平均粒径が1.5 μmの酸化アルミナ WA 砥粒を150%分散させたスラリーを研磨液として使用した。

ダイヤモンド電鍍工具の回転数を500 rpm、ツルアの回転数を2000 rpm、ならびにツルアの公転速度を0.33 rpmに設定してツルアを往復公転運動させ、ドレッシングを15分間行った。ドレッシング後に観察した砥石作用面のSEM画像を図13に示す。ドレッシングを行い砥石作用面からボンドを後退させた結果、平坦化されたダイヤモンド砥粒の縁部分は鋭利に成形されていることが確かめられた。

5. 研削実験の結果

5・1 研削実験の条件 図13に示したようにドレッシングされたダイヤモンド電鍍工具を使用し、ビッカース硬さが650 Hvのガラス状炭素と2600 Hvの超硬合金に対して研削実験を行った。立形マシニングセンタのテーブルに対して45度傾斜させた工作物表

Fig. 14 Tool path and grinding conditions

Fig. 15 Topograph and surface profiles of a ground surface measured by AFM obtained when glass-like carbon was used as a work material

面の□0.5 mmの領域に対して研削加工を行った。研削実験の要領と加工条件は図14に示すとおりである。半径方向切込みを1 μm、横送りを1 μm、ならびに工具一回転当たりの送り速度を0.28 μm/revに設定した。なお、研削実験には位置決めや送り運動に対する制御分解能が10 nmの立形マシニングセンタを使用した。

5.2 ガラス状炭素に対する研削実験の結果 まず始めに、ガラス状炭素に対する研削実験を行った。原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope: AFM)を用いて測定した研削加工面のトポグラフと断面曲線を図15に示す。砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒が鋭利な研削工具を用いた場合、工具一回転当たりの送り量を f に設定すると、研削加工面の表面粗さは $f/2$ Rz程度の値になる⁽⁴⁾。これに対し、図13に示した研削工具を用いた場合には、工具一回転当たりの送り速度を0.28 μm/revに設定したにもかかわらず、工具の送り方向ならびに横送り方向とも表面粗さが5 nm Rz前後の平滑な研削加工面を作ることができた。

このように、半球状の砥石作用面にあるダイヤモンド

Fig. 16 Topograph and surface profiles of a ground surface measured by AFM obtained when cemented carbide was used as a work material

ド砥粒の先端を平坦かつ平滑に成形することにより、表面粗さが10 nm Rz以下の研削加工面を短時間で作れることが確かめられた。なお、研削加工後に砥石作用面を観察した結果、砥石作用面から砥粒が脱落した痕や砥粒が摩滅したようすは全く観察されなかった。

5.3 超硬合金に対する研削実験の結果 ガラス状炭素だけでなく、超硬合金に対しても同様の研削実験を行った。図16に示しているのは、AFMを用いて測定した研削加工面のトポグラフと断面曲線である。被削材にガラス状炭素を用いた場合と異なり、工具の送り方向ならびに横送り方向とも10 nm Rz程度の表面粗さしか作ることができなかった。トポグラフと断面曲線との対比から、トポグラフで白く見えている箇所は凸に成形されていることが確かめられた。おそらく、被削材に用いた超硬合金の硬さにむらがあり、硬い部分を完全に除去できなかったことが影響しているのではないかと考えている。なお、加工後にダイヤモンド電鍍工具を観察した結果、砥粒が摩滅したようすや砥粒がボンド面から脱落した痕は全く観察されなかった。

6. 結 論

本研究では、メッシュサイズが#1000のダイヤモンド電鍍工具に対し、工具の先端を半球状に成形できると同時に砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を工具の輪郭に沿って平坦かつ平滑に成形できる、砥粒平坦化ツルージング技術の開発を行った。本研究で得られた結論は、以下のようにまとめられる。

(1) 砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の平坦化には、ダイヤモンド電鍍工具へのツルアの接触荷重、設定切込み深さ、ダイヤモンドスラリの粒径、ならび

に総切込み後のノーカットの回数といった成形条件が影響する。

(2) 接触加重を 5.17 N, 設定切込み深さを 9 μm , ダイヤモンドスラリの粒径を 0-1, 総切込み後のノーカット回数を 10 往復に設定して砥粒平坦化ツルーイングを行うと, 砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の 51%を平坦かつ平滑, 研磨面に微細な割れが生じていた砥粒を含めると砥粒の 76%を平坦に成形することができた。

(3) 砥粒平坦化ツルーイングを行ったダイヤモンド電鍍工具を用いてガラス状炭素や超硬合金に対する研削加工を行った結果, 半球状の砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を平坦かつ平滑に成形することにより表面粗さが 10 nm Rz 前後の研削加工面を短時間で作れることが明らかになった。

文 献

- (1) Schaller, Th., Bier, W., Linder, G. and Schubert, K., Mechanische Mikrostrukturierung Metallischer Oberflächen, *F & M*, No. 102 (1994), pp. 274-278.
- (2) Morgan, C. J., Vallance, R. R. and Marsh, E. R., Micro machining glass with polycrystalline diamond tools shaped by micro electro discharge machining, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14 (2004), pp. 1687-1692.
- (3) Semba, T., Hamaguchi, M. and Harada, T., Development of Electroformed Diamond Tool Strengthened by Synthesized Intermetallic Alloy, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 726 (2007), pp. 626-631.
- (4) Harada, T., Semba, T. and Stone, B. J., A Truing Technique for Flattening Fine Diamond Grains on the Hemispherical Working Surface of an Electroformed Tool, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 74, No. 738 (2008), pp. 453-458.
- (5) Marumatsu, K., Sakashita, Y., Hara, Y. and Ohnishi, Y., Development of Densified Amorphous Carbon and Its Application, *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol. 39, No. 4 (1989), pp. 35-38.
- (6) Semba, T. and Uchijyo, K., Development of an Electroformed Diamond Tool for Fabricating Microsized Dies and Molds, *Proceedings of the Third International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, Vol. 3 (2005-10), pp. 1253-1256.
- (7) Ikegami, T. and Semba, T., Development of Elastic Electrode and Electrophoretic Polishing on Die Materials, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 61, No. 583 (1995), pp. 481-487.