PCD 製マイクロボールエンドミルと超硬合金に対する
荒加工への応用*岡崎 隆一^{*1}, 杉谷 紀彦^{*1}
原田 武志^{*1}, 仙波 卓弥^{*2}Roughing of Cemented Carbide Using Microball Endmill
Made of Polycrystalline DiamondRyuichi OKAZAKI, Norihiko SUGITANI,
Takeshi HARADA and Takuya SEMBA^{*3}^{*3} Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology,
3-30-1 Wajirohigashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 811-0295 Japan

A polycrystalline diamond ball endmill with a radius of 50 μm was fabricated by grinding assisted by electric discharge machining to adapt the tool to high-speed machining of cemented carbide having a hardness of 23.8 GPa Hv. A hemispherical endmill with a high tip strength was fabricated by cutting hemispherical tool tip at an inclined surface of 45 degrees. The cutting test revealed that the newly developed endmill, the cutting edge of which was roughened by electric discharge machining with high energy, was effective in preventing tip breakage during high-speed roughing of cemented carbide. In addition, a surface roughness of 160 nm Rz could be achieved when fabricating a cutting edge smoothed by grinding both rake and spherical faces using an electroplated diamond tool of #600 diamond mesh size after electric discharge machining.

Key Words: Microcutting, Polycrystalline Diamond Tool, End Mill, Cemented Carbide

1. 緒 言

工具素材の硬さ, 切れ刃の鋭利さ, ならびに切れ刃稜線の滑らかさという点で単結晶ダイヤモンドに勝る材料はない。ただし, 単結晶ダイヤモンドは〈111〉面に平行にへき開するだけでなく, 衝撃力や大きなせん断力に耐えられないといった欠点をもっている。

工具の硬さと切れ刃稜線の滑らかさは単結晶ダイヤモンドに劣るが, 焼結ダイヤモンド(PCD)は粒子がランダムに配向しており, へき開性をもっていない。また, ダイヤモンド粒子のすきまに介在する焼結助剤は工具の靱性を増す役目を果たしている。

したがって, PCD は高硬度材料に対する高速加工に使用できる可能性がある。しかし, 市販のチップ交換式, あるいはろう付けタイプの PCD 製切削工具は, 高硬度材料ではなく非鉄合金を高速加工するために開発されたように判断される⁽¹⁾。

本研究では, PCD 工具素材に対して放電ならびに研削加工を行い, 高硬度材料に対して断続切削加工を

行うことができる PCD 製のマイクロボールエンドミルを試作した。また, 切れ刃の稜線を滑らかに成形することにより, 試作した工具をマイクロ荒加工だけでなく中仕上げ加工にも用いることを試みた。

2. 工具の成形方法

2・1 工具素材 工具素材にはダイヤモンドの一次粒子径が 5 μm , 曲げ強さが 1.95 GPa, ならびに硬さが 100~120 GPa Hv の PCD を使用した。焼結助剤として用いられているコバルト系金属は導電性をもっており, PCD 工具の成形には放電加工が使用できる⁽²⁾。また, 単結晶ダイヤモンド砥粒の硬さが PCD よりも硬いため⁽³⁾, PCD 工具表面の平滑化にはダイヤモンドホイールを用いることができる⁽⁴⁾。

2・2 工具の成形手順 工具成形の手順を図 1 に示す。超硬合金製の基板上に焼結された厚さが 0.5 mm の PCD を $2 \times 15 \text{ mm}$ の短冊状に切断した後, 短冊状の工具素材を S 45 C 製の工具ホルダに止めねじで固定した。工具ホルダの他端に直径が 6 mm のジルコニアセラミックスを圧入し, これを C 軸制御機能をもつ立て形マシニングセンタの主軸に装着した。PCD 工具素材に対して放電や研削加工を行うことにより, 半径が 50 μm の PCD 製ボールエンドミルを試

* 原稿受付 2007 年 8 月 27 日。

^{*1} 学生員, 福岡工業大学大学院工学研究科(☎ 811-0295 福岡市東区和白東 3-30-1)。^{*2} 正員, 福岡工業大学工学部。
E-mail: senba@fit.ac.jp

作した。

2・3 ツルア 工具を成形するためのツルアには、平均粒径が25 μm 、直径が15 mmのダイヤモンド電着工具を使用した。図2に付記したようにツルアの外周に傾斜角が15度の斜面を付け、同斜面を使って円弧状の切れ刃に対して刃直角逃げ角が15度の第1逃げ面を成形した。

2・4 工具の成形装置と成形方法 工具の成形には図2に示した四軸回転ステージ⁽⁵⁾を使用した。ツルアの自転運動と公転運動とを利用することにより、1枚刃ボールエンドミルを成形できる機能をもっている。PCD工具を陽極、ツルアを陰極に接続してPCD工具に対する機上放電成形を行った。

工具の形状成形時には、式(1)のように求められる放電エネルギー⁽⁶⁾を0.245 μJ 以下に設定した。同条件下では工具とツルアとの間に明確なすきまが顕微鏡で観察されず、工具に対する放電加工と研削加工とが同時に行われた可能性が高い。仕上げ成形時には印加電圧を0 Vに設定し、切れ刃の稜線を平滑化するた

めの研削仕上げ加工を行った。

$$E = CV^2/2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 C はコンデンサの容量、 V は印加電圧である。

3. すくい面に対する放電 ならびに研削加工

3・1 放電エネルギーと加工面の粗さ $X-Z$ 平面内でツルアを傾斜させて頂角が40度の円すいを成形した後、円すいの頂点を通る平面で円すいをカットしてすくい角が0度のすくい面を成形した。すくい面を成形する過程で測定した、すくい面を工具の軸方向に20 μm 彫り下げるのに要した加工時間、すくい面の粗さと放電エネルギーとの関係を図3に示す。加工時間は放電エネルギーに反比例すること、また放電エネルギーを0.1 μJ 以下に設定すればすくい面の粗さを1 μm Rz以下に成形できることが確かめられた。

3・2 研削仕上げ面の粗さ 式(1)のように計算される放電エネルギーをアークが発生する限界の

Fig. 1 Process for fabricating microball endmill made of PCD by grinding assisted by EDM

Fig. 3 Effect of electric discharge energy on machining time required for digging rake face 20 μm and surface roughness

Fig. 2 Four-axis rotary stage used for fabricating microball endmill made of PCD

Finishing: Grinding assisted by EDM
Truer: Electroplated tool #600 mesh size
Energy: 0.013 μJ (50 V/10 pF)
Rev. speed of truer: 1,000 rpm

Finishing: Grinding
Truer: Electroplated tool #600 mesh size
Rev. speed of truer: 3,000 rpm
Wheel depth of cut: 2 μm
Machining time: 1 hr

Fig. 4 Surfaces obtained by grinding assisted by EDM and grinding

0.013 μJ まで下げてすくい面を成形した後、印加電圧を 0 V に設定して同面に対する研削仕上げ加工を行った。すくい面に対して砥石切込みを 2 μm 与えた後、切りくずが出なくなるまで約 1 時間程度、乾式での研削仕上げ加工を行った。放電加工面と研削加工面との比較を図 4 に示す。加工条件は図 4 に併記したとおりである。

放電加工後の表面には、焼結助剤のコバルト系金属が介在していたと思われる箇所に放電痕が残っていた。この放電痕のサイズは研削仕上げ加工を行うことにより微細化できたが、放電痕を完全に除去することはできなかった。

4. 半月状ボールエンドミルと 快削黄銅の加工

4.1 工具形状と成形条件 CAD を使って作画した半月状ボールエンドミル⁽⁷⁾の外観を図 5 に示す。半径は 50 μm 、すくい角は 0 度、第 1 逃げ面に関する刃直角逃げ角は 15 度、ならびに X-Z 平面内でツールアを 70 度傾斜させ第 2 逃げ面を成形した。また、切れ刃の反対側から傾斜角が 45 度の平面で工具の先端をカットし、工具の回転中心を除去している。

工具の成形条件は表 1 に示すとおりである。すくい面ならびに第 1 逃げ面とも、工具の形状成形には放電加工、切れ刃の稜線を平滑化するために研削仕上げ加工を行った。砥石切込みを 2 μm 与えた後、切りくずが出なくなるまで約 1 時間程度、乾式での研削仕上げ加工を行った。

4.2 快削黄銅の加工 試作したボールエンドミルの外観を図 6 に示す。すくい面や第 1 逃げ面から放電痕を完全に除去することは難しく、切れ刃の稜線には微細な凹凸が残ってしまった。ただし、ほぼ予定し

た形状に工具を成形することができた。そこで、図 6 に示した工具を使用し、ピッカース硬さが 0.98 GPa Hv の快削黄銅に対して底辺が $\square 0.4 \text{ mm}$ 、深さが 0.2 mm の凹状ピラミッドを加工した。

工具軌跡と加工条件は図 7 に示すとおりである。繰

Table 1 Machining conditions fabricating tool faces

Common conditions	Tool: PCD (anode) Truer: electroplated tool #600 mesh size, 15 mm diameter (cathode) Fluid: oil for EDM and dry for grinding Rev. speed of truer: 1000 rpm for EDM and 3000 rpm for grinding Forming: grinding assisted by EDM, 0.013 ~ 0.245 μJ of electric discharge energy Finishing: grinding 2 μm of wheel depth of cut
	Rake angle: 0 degree Finishing: grinding
Rake face	Clearance angle: 15 degrees Rotation speed of the truer: 0.27 rpm Finishing: grinding
Conical clearance face	Inclination angle in X-Z plane: 70 degrees Finishing: grinding assisted by EDM, 0.013 μJ of electric discharge energy
2 nd clearance face	Inclination angle in X-Z plane: 45 degrees Finishing: grinding assisted by EDM, 0.013 μJ of electric discharge energy
Center cut

Figure 6 Overview of PCD microball endmill fabricated for roughing of nonferrous materials

Fig. 5 CAD image of microball endmill made of PCD with radius of 50 μm and clearance angle of 15 degrees

Fig. 7 Tool paths for fabricating concave pyramids of 0.4 mm square size and 0.2 mm depth

り広げ加工を行った後、等高線加工を行った。図8に加工面の状態を示している。切れ刃稜線の微細な凹凸が加工面に転写され、 $0.78\text{ }\mu\text{m Rz}$ 程度の荒い加工面しか作ることができなかった。ただし、工具の逃げ面が工作物の表面と接触したようすは全く観察されなかった。また、加工時に切れ刃の稜線が欠損したようすも見られなかった。

5. 半月状ボールエンドミルと 超硬合金の加工

5・1 半月状ボールエンドミル 被削材を快削黄銅から硬さが 26.0 GPa Hv の超硬合金に代え、超硬合金に対する切削実験を行った。工具には図6に示した半月状ボールエンドミルを使用した。加工条件は図7に示したとおりである。加工後に観察した工具の外観は図9に示すとおりであり、工具の先端が大きく欠けてしまった。このように、半月状ボールエンドミルは工具の先端強度が不足しており、超硬合金に対する荒加工には適していないことが確かめられた。

Fig. 8 Results of cutting test using brass with hardness of 0.98 GPa Hv as a work material

Fig. 9 Overview of PCD microball endmill observed after cutting test of cemented carbide with hardness of 26.0 GPa Hv

5・2 半球状研削工具 放電加工によって表面を荒らしたPCD工具は、硬脆材料に対する研削工具として使用されている⁽⁶⁾⁽⁸⁾。そこで、式(1)のように計算される放電エネルギーを $32\text{ }\mu\text{J}$ に設定して工具表面を大きく荒らした半径が $50\text{ }\mu\text{m}$ の半球状研削工具を試作し、超硬合金に対する研削加工を行った。なお、半球成形時の工具回転数は 50 rpm 、ツルア回転数は $1,000\text{ rpm}$ 、ならびにツルアの公転速度は 0.27 rpm に設定した。

加工の前後で観察した、研削工具表面の状態を図10に示す。加工条件は図7に示した条件と同じである。半月状ボールエンドミルと異なり、荒加工時に工具の先端が大きく欠けるといった現象は生じなかった。ただし、工具の先端は切りくずで覆われており、工作機械の主軸にかかる負担を減らすためには工具の回転中心を除去する必要があると判断された。

Fig. 10 Hemispherical grinding tool fabricated with $32\text{ }\mu\text{J}$ electric discharge energy, observed before and after grinding cemented carbide

Fig. 11 CAD image of PCD microball endmill fabricated for roughing and semifinishing of cemented carbide

6. 強化形半月状ボールエンドミルと超硬合金の加工

6・1 工具の形状と成形条件 半球状研削工具の先端が切りくずで覆われるのを防ぐため、傾斜角が45度のすくい面で工具の半球面をカットした、図11に示す強化形半月状ボールエンドミルを試作した。すくい面については表1に示した条件で研削仕上げ加工を行った。半球面に関する工具の成形条件は図10に示した工具の成形条件と同じである。すくい面と半球面とが交わる稜線を切削工具の切れ刃稜、半球状の工具表面を砥石作用面として作用させることを試みた。

6・2 荒加工用の強化形半月状ボールエンドミル 試作した工具の外観を図12に示す。半球状の工具表面が大きく荒らされたことが原因で、切れ刃の稜線に大きな凹凸が発生した。この、図12のように試作した強化形半月状ボールエンドミルを使用し、図7に示した条件で超硬合金に対する切削実験を行った。加工面の状態を図13、工具の損耗状態を図14に示す。

切れ刃の稜線に大きな凹凸が生じていたことが原因

で、 $1.3\text{ }\mu\text{m Rz}$ 程度の荒い加工面しか作ることができなかった。しかし、過酷な条件で超硬合金に対する荒加工を行ったにもかかわらず、切れ刃が大きく欠損するといった現象や工具の先端が切りくずで覆われるといった現象は生じなかった。

6・3 中仕上げ加工用の強化形半月状ボールエンドミル すくい面だけでなく半球状の工具表面についても研削仕上げ加工を行い、切れ刃稜線の凹凸を微細化することを試みた。すくい面や半球面に関する放電加工の条件は表1に示したとおりである。なお、半球成形時には工具回転数を50 rpm、ツルアの回転数を1000 rpm、ならびにツルアの公転速度を0.27 rpmに設定した。また、研削仕上げ加工時にはツルアの回転数のみを1000 rpmから7000 rpmに増加させた。

試作した強化形半月状ボールエンドミルの外観を図15に示す。すくい面と半球状の工具表面について研削仕上げ加工を行ったがダイヤモンド粒子のすきまに発生した放電痕を完全に除去することは容易でなく、切れ刃の稜線には微細な凹凸が残ってしまった。ただ

Fig. 12 Overview of PCD microball endmill fabricated for roughing of cemented carbide

Fig. 14 Overview of PCD microball endmill observed after roughing of cemented carbide

Fig. 13 Results of cutting test using cemented carbide with hardness of 26.0 GPa Hv as workpiece

Fig. 15 Overview of PCD microball endmill fabricated for semifinishing of cemented carbide

Fig. 16 Tool paths and machining conditions for semifinishing of cemented carbide

Fig. 17 Worksurfaces of cemented carbide obtained by moving cutting tool on contour and scanning paths

し、図 12 の結果に比べると、切れ刃の稜線を平滑に成形することができた。

そこで、図 15 のように成形した強化形半月状ボールエンドミルを超硬合金に対する中仕上げ加工に用いることを試みた。工具軌跡と加工条件は図 16 に示すとおりである。凹状ピラミッドに対して走査線加工を行うことにより、中仕上げ加工に適した工具軌跡を見出すことを試みた。なお、荒加工には図 12 の工具を使用し、繰り広げ加工を行った。

図 16 に示した A と B の斜面に関する工作物表面の状態を図 17 に示す。A の斜面に関する粗さは 0.54 $\mu\text{m Rz}$ であり、同じ軌跡間隔で等高線加工を行った図 13 の結果に比べ平滑な加工面が得られた。一方、工具が走査線の軌跡に沿って運動した B の斜面に関する粗さは 0.19 $\mu\text{m Rz}$ であり、A の斜面にも増して平滑な加工面を作ることができた。

加工後に観察した工具の外観は図 18 に示すとおりである。加工時に逃げ面がわずかに摩耗し、切れ刃の稜線が荒れてしまった。しかし、A の斜面を加工する

Fig. 18 Overview of PCD microball endmill observed after semifinishing of cemented carbide

等高線の軌跡間隔が 1.4 μm であったのに対し工具 1 回転当たりの送り量が 0.29 μm と微細であったため、工具が走査線の軌跡に沿って運動した B の斜面は A の斜面に比べて平滑に加工された可能性が高い⁽⁹⁾。

7. 結 言

ダイヤモンド電着工具を陰極に使用し、PCD に対して放電ならびに研削加工を行うことにより、半径が 50 μm の PCD 製ボールエンドミルを試作した。本研究で得られた結論は以下のようまとめられる。

(1) 硬さが 26.0 GPa Hv の超硬合金に対して断続切削加工を行うことができる、半球面を平面でカットした PCD 製の強化形半月状ボールエンドミルを試作することができた。

(2) 放電加工によって切れ刃の稜線を荒らした強化形半月状ボールエンドミルは超硬合金に対する荒加工、研削仕上げ加工を行うことによって切れ刃稜線の凹凸を微細化した強化形半月状ボールエンドミルは中仕上げ加工に使用できることを確認した。

(3) 研削仕上げ加工を行ったとしてもコバルト系金属が介在している箇所に発生する放電痕を完全に除去することは難しく、その結果として切れ刃稜線に残留する微細な凹凸を完全に除去できなかった。

文 献

- (1) Yoshimoto, A. and Inoue, H., Cutting tools and chips made of polycrystalline diamond, *A Comprehensive of Diamond Technology* (in Japanese), (2007), pp. 200-204, NJT.
- (2) Seki, Y. et al., Application of PCP to Grinding Wheel, 1st Report: Generation of Micro Cutting Edge and Profile by EDM, *Proc. of the Abrasive Technology Conference 1996*, (1996-9), pp. 349-352.
- (3) Sumitomo Electric Hard Metal Co, Synthesized Single Crystal Diamond, *Calalogue of Single Crystal Diamond*, <http://www.sumitool.com/products2/sumicry->

- r8.pdf.
- (4) Toge, N., Grinding of Polycrystalline Diamond, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology* (in Japanese), Vol. 46, No. 10 (2002), p. 16.
 - (5) Senba, T. et al., Development of an Electroformed Diamond Tool for Fabricating Microsized Dies and Molds, *Proc. of the 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, Vol. 3 (2005-10), pp. 1253-1256.
 - (6) Morgan, C. J., Micro machining glass with Polycrystalline Diamond tools shaped by micro electro discharge machining, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14 (2004), pp. 1687-1692.
 - (7) Takano, N., Advanced technology of micro tools, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology* (in Japanese), Vol. 49, No. 10 (2005), pp. 2-5.
 - (8) Wada, T. and Masaki, T., Machining of micro PCD tool using micro EDM process and machining example, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology* (in Japanese), Vol. 49, No. 10 (2005), pp. 14-17.
 - (9) Yasui, H. et al., Trial Manufacturing of Productive Ultra-smoothness Vertical Surface Grinder Based on the New Concept (1st Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 73, No. 5 (2007), pp. 553-557.
-