放電加工成形された極小径ボールエンドミル による切削加工*

江 頭 快** 水 谷 勝 己***

Milling Using Ultra-Small Diameter Ball End Mills Fabricated by Electrical Discharge Machining

Kai EGASHIRA and Katsumi MIZUTANI

Ultra-small diameter cemented carbide ball end mills have been developed. Tools having a radius of ball nose of 10 μm have been manufactured by electrical discharge machining (EDM), because conventional methods cannot be readily applied to microtool fabrication. The spherical shape of the tool cutting part is realized via an electrode wear phenomenon in EDM. Milling of brass using fabricated tools has been performed at 2 μm axial depth of cut and 4 μm pick feed. Although simulation suggests the surface roughness (R_z) in tool feed direction to be 0.05 μm at 100 $\mu\text{m/s}$ feed speed, in actual milling, the surface roughness is 0.42 μm , due to plastic deformation of the workpiece. Investigations indicate that the tool life decreases rapidly when the feed speed or the body length increases above a certain value. The tool life can be improved, especially at low feed speeds, by changing the angle between the two planes that each contain one ball end cutting edge from 180° to 90°.

Key words: milling, ball end mill, ultra-small diameter, microtool, EDM, electrode wear

1. 結 言

ボールエンドミルは金型の製作に代表される三次元形状の切削加工に多く用いられる。近年多くの工業製品の小型化・高精度化により複雑かつ微細な形状の加工の要求が高まっており、直径 1 mm 以下の小径工具の使用頻度が多くなっている¹⁾。高精度加工のためにはより小径の工具を用いることが望ましいが、現在市販されているボールエンドミルの最小ボール半径は 0.05 mm から 0.1 mm の範囲に留まっている。その理由として、これ以上小径の工具を研削を中心とした従来の手法で製作することが困難であることがあげられる。それ以外の手法では集束イオンビーム (FIB) 加工が有力な製作法の一つで、実際に極小径工具を製作して切削に用いた例も報告されている²⁾。しかし、FIB 加工は加工速度が低く工具製作にかなりの時間を要し、またボールエンドミル形の工具の製作は試みられていない。筆者らは、加工力が非常に小さく小径工具の製作に適し、加工速度の高い放電加工に着目した。放電加工の一種であるワイヤ放電研削 (WEDG)³⁾により半円柱形状の極小径工具を製作し、エンドミル加工やドリル加工を行い、内径 7 μm 以下の微細穴や幅 10 μm の微細溝の加工に成功した^{4)~7)}。けれども、例えば半径 10 μm といった微細な球形状の作成は WEDG を用いても困難であり、ボールエンドミル形の工具の製作はできなかった。

ところで、放電加工における大きな問題の一つに電極の消耗があげられる。加工中に電極が短くなり角部が丸みを帯びて電極形状が変化するので、加工能率が低くなり加工精度が悪化する。したがっていかに電極消耗を小さくするかが重要な課題と

なっているが、筆者らはこの消耗現象に着目した。問題とされる電極角部の消耗を逆に利用し、これにより極小径ボールエンドミルの球状部分を実現することにした。この作業は放電加工プロセスなので工具製作工程に容易に組み込むことができる。本論文では、この作業を組み込んだボール半径 10 μm のエンドミル形工具の製作法について述べ、さらに製作された工具で実際に平面切削を行い、その基本的な性能を明らかにする。

2. 極小径ボールエンドミルの製作

2.1 電極消耗による球形状の作成

本研究ではボールエンドミル先端の球形状を放電加工における電極消耗現象を利用して作成する。微細な電極の消耗に関しては詳細な研究もあるが^{8)~9)}、これらは電極消耗量に重点を置いており、消耗後の電極先端の形状変化に着目したものではない。さらに、本実験で用いる超硬合金を電極とした場合については調べられていない。そこで微細な球形状を実現できる放電加工条件を実験により確かめることにした。

加工機には超微細放電加工機 (MG-ED72, 松下電器産業(株)製)を用いた。まず WEDG により直径 20 μm の微細軸を作成し、それを工具電極として黄銅に穴加工を行うことにより電極先端を消耗させた。穴加工の加工条件を表 1 に示す。電極材料はボールエンドミルの材料となる超硬合金 (㈱アライドマテリアル製)を用いた。本研究で使用した超硬合金の特性を表 2 に示す。

Table 1 EDM conditions for rounding electrode tip

Electrodischarge circuit	RC circuit
Electrode material	Cemented carbide
Workpiece material	Brass
Polarity	Electrode (+), Workpiece (-)
Open circuit voltage	60 V
Capacitance	Stray capacitance, 3300 pF
Feed	40 μm

* 原稿受付 平成 15 年 1 月 14 日

** 正 会 員 近畿大学生物理工学部 (現, 京都工芸繊維大学工芸大学; 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

*** 正 会 員 近畿大学生物理工学部 (和歌山県那賀郡打田町西三谷 930)

Table 2 Properties of cemented carbide

Grain size	0.6 μm
Coefficient of thermal conductivity	65 W / (m $\cdot$ K)
Melting point	1300°C
Density	14.05 g / cm^3
Hardness (HRA)	91.2
Bending strength (TRS)	3.24 GPa
Fracture toughness	9.7 MPa $\cdot$ m ^{1/2}

Fig.1 Electrode tips rounded in EDM of holes with capacitance of (a) stray capacitance, (b) 3300 pF and (c) 3300 pF at 1st process and stray capacitance at 2nd process

Fig.2 Tool fabrication process

図 1 に消耗した電極先端を示す。図 1 (a) はコンデンサ容量が浮遊容量のみの場合で、表面粗さは良好だが、角部がわずかに消耗しただけで長さ方向の消耗もほとんどなかった。一方、図 1 (b) はコンデンサ容量が 3300 pF の場合で、角部は完全に消耗しているが、放電エネルギーが大きく加工面が粗い。長さ方向の消耗は約 5 μm であった。ともにボール刃の製作に不適当であるため、コンデンサ容量 3300 pF の条件で電極を消耗させた後、容量を浮遊容量のみに変え、再度手順を繰り返した。図 1 (c) にその結果を示す。表面粗さの良好な球形が電極先端に実現されており、工具の製作ではこの加工条件を用いることにする。

2.2 工具の製作

WEDG による工具製作の手順を図 2、そのときの放電加工条件を表 3 に示す。加工機は同じ超微細放電加工機を用いた。工具材料は直径 0.3 mm の丸棒である。まず粗加工の条件で直径 50 μm 程度の円柱形状に加工し (図 2 (a))、仕上げ加工条件で目

Table 3 EDM conditions for tool fabrication

EDM processes in Fig.2	Open circuit voltage	Capacitance	Polarity of tool material	Rotation of tool material	Wire electrode
(a)	100 V	3300 pF	+	Rotating	Running
(b)	60 V	Stray capacitance	+	Rotating	Running
1st process in (c)	60 V	3300 pF	-	Rotating	Not running
2nd process in (c)	60 V	Stray capacitance	-	Rotating	Not running
(d)	60 V	Stray capacitance	+	Not rotating	Running

Fig.3 Tool shape (type A: AB and CD are peripheral cutting edges, BO and OC are ball end cutting edges, R is radius of ball nose and R_w is radius of wire electrode plus electrodischarge gap)

標の直径にする (図 2 (b))。次に、前節で述べたように、逆にワイヤ電極 (黄銅製) に対して穴加工を行い先端を球形にする。このとき異なるコンデンサ容量で 2 回加工を行う (図 2 (c))。RC 回路を用いた微細放電加工では陽極側の材料除去量が多いので、このときに工具材料とワイヤ電極の極性を入れ替える必要がある。加工中はワイヤの走行を止めるが、1 回目の加工が終わったら少し走行させ、2 回目の加工位置と重ならないようにする。その後、再び極性を切り替え工具材料の回転を止めてワイヤ電極に切り込むことにより、先端を半球状に作成してボールエンドミル形の極小径工具にする (図 2 (d))。ボール半径 10 μm 、ボデー長 70 μm の工具の製作時間は約 15 min で、研削による製作工程と比較すると非常に短い。

図 3 は工具の形状を示している。直線 AB、CD の部分が外周刃に、弧 BOC がボール刃の部分に相当する。BOC は二枚の切れ刃 BO と OC が連続しているといえる。ABO 側が紙面手前に回転する場合、AB および BO のすくい角は 0°、OC および CD のすくい角は負となる。

製作されたボール半径 10 μm 、刃長 15 μm 、ボデー長 70 μm の極小径工具の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を図 4 に示す。研削加工面に比較して放電加工面は表面粗さが良好でないが、この寸法の工具の製作は研削では困難である。

3. 製作された工具による切削加工

3.1 切削シミュレーション

本実験で用いる切削加工機の工具回転数は 3000 rpm であり、極小径工具であることを考えるとかなり低い。そのため、一刃あたりの送り量が工具径に比較して大きくなる。一刃あたりの送り量が大きいと大きな削り残しが生じ、表面粗さを悪化させ

(a) Overview

(b) Close-up view of cutting part

Fig.4 Fabricated tool of 10 μm radius of ball nose, 15 μm length of cut and 70 μm body length

(a) Feed speed = 300 $\mu\text{m/s}$ (b) Feed speed = 200 $\mu\text{m/s}$ (c) Feed speed = 100 $\mu\text{m/s}$

Fig.5 Simulated milled shapes

る¹⁰⁾。また、半球状の刃部による軌跡形状についての知見も少ない。そこで切削シミュレーションを行い、工具軌跡を転写した切削形状を求めることにより、適した工具送り速度やピックフィードを選ぶことにした。

図5に、表4の条件下で平面を切削したときの切削形状を求めた結果を示す。工具の送り方向および回転の位相は各送りで同一としている。図5(a)は送り速度 300 $\mu\text{m/s}$ の場合である。

Table 4 Conditions for simulating milled shape		
Tool	Radius of ball nose	10 μm
	Rotation speed	3000 rpm
Milling conditions	Pick feed	4 μm
	Axial depth of cut	2 μm
	Feed speed	100, 200, 300 $\mu\text{m/s}$

Fig.6 Milling setup

Fig.7 Milling process

最大で 0.5 μm 近い高さの削り残しが生じ、カスプの高さ 0.20 μm と比較してかなり大きい。図5(b)は送り速度 200 $\mu\text{m/s}$ の場合で、削り残しの部分の高さは最大で 0.21 μm であり、カスプとほぼ同じである。図5(c)の送り速度 100 $\mu\text{m/s}$ の場合ではそれは 0.05 μm 程度であり、かなり低くなる。これらの結果より、工具送り速度は削り残し高さのシミュレーション値がカスプより大幅に大きくならない範囲の値を用いることにした。

3.2 切削加工機

本実験で使用した切削加工機の概要を図6に示す。この加工機はNC三軸制御で、最小移動単位は 0.05 μm である。スピンドルシステムはV形滑り軸受とマンドレルにより構成され、超微細放電加工機と同じ型式のものを採用している。DCモータ駆動で回転振れは 0.5 μm 以下に抑えられている¹¹⁾。放電加工機上で工具製作を行った後、工具をマンドレルで保持したまま切削加工機のV形軸受に取り付けて切削を行う。同型の軸受を用いているため回転精度が保たれる。スピンドルの回転数は 3000 rpm で一定である。滑り軸受であることと、放電加工では高回転数が必要なく回転数の違いによる影響も少ないことから一定の低回転数となっている。また、ステージが電子天秤上にあり、これにより工具と工作物の接触を検出する。

3.3 切削加工結果

次に製作されたボールエンドミル工具により実際に平面切削を行った。図7に示すように、まず一溝を設定送り速度の 1/3 の送り速度で切削し、その後ダウンカットのみまたはアップカットのみで加工が行われるように工具の送り方向を一定にして切削を続けた。溝の長さは 200 μm に設定した。加工条件を表

Table 5 Experimental conditions

Tool	Material	Cemented carbide
	Radius of ball nose	10 μm
	Body length	50, 70, 90 μm
	Length of cut	15 μm
	Rotation speed	3000 rpm
Workpiece	Material	Brass
Milling conditions	Pick feed	4 μm
	Axial depth of cut	2 μm
	Feed speed	25, 50, 100, 200 $\mu\text{m/s}$
	Cutting direction	Down cut only or up cut only

(a) SEM micrograph

(b) Surface profile measured by AFM

Fig.8 Milled surface (feed speed = 100 $\mu\text{m/s}$, down cut)

5に示す。工作物には被削性の良い黄銅（60/40 黄銅）を用いた。

図 8 (a)に送り速度 100 $\mu\text{m/s}$ 、ダウンカットで切削を行ったときの加工面の SEM 写真を、図 8 (b)に原子間力顕微鏡 (AFM) による形状測定結果を示す。工具送り方向の表面粗さ Rz は 0.42 μm であった。切削条件は図 5 (c)の場合と同じで、シミュレーションでは Rz = 0.05 μm となるが、実際の切削では塑性流動による盛り上がりが生じるために表面粗さの値が大きくなる。図 9 は同じ条件でアップカットで切削したときの加工面で、大きなバリが発生し加工面を覆っている。これらの結果から、今後はダウンカットのみで切削を行うことにした。

図 10 は工具寿命を示している。極小径工具の場合は工具折損が生じやすく、工具寿命は切れ刃の摩耗より工具折損で評価する場合が多い。本図でも工具寿命を工具折損までの切削距離で表している。図 10 (a)はボデー長 70 μm の工具を用いたときの工具寿命と送り速度の関係を示している。送り速度 50 $\mu\text{m/s}$ では 130 mm の距離の切削が可能だが、それを越えると工具寿命は急に短くなる。またそれより小さくしてもあまり寿命は伸長しない。図 10 (b)は送り速度 50 $\mu\text{m/s}$ のときの工具寿命とボデー長の関係を示している。ボデー長 50 μm では切削距離 200 mm まで加工が可能であったが、90 μm では工具はすぐに折損した。このボデー長の工具を使用する必要がある場合は、送り

Fig.9 Surface milled by up cut (feed speed = 100 $\mu\text{m/s}$)

(a) Relationship with feed speed (body length = 70 μm) (b) Relationship with body length (feed speed = 50 $\mu\text{m/s}$)

Fig.10 Tool life (down cut)

(a) At 30 mm milling length

(b) At 120 mm milling length

Fig.11 Milled surfaces at different milling lengths (feed speed = 50 $\mu\text{m/s}$, down cut)

速度や切込み深さ、ピックフィード量を小さくする必要がある。

図 11 はボデー長 70 μm の工具を用い送り速度 50 $\mu\text{m/s}$ で切削を行った場合の、切削距離 30 mm と 120 mm のときの切削面を比較したものである。切削距離 120 mm は工具寿命に近いが、この観察では両加工面に大きな違いはなく、工具の摩耗による影響は特に見られない。

3.4 刃部形状の改善

図 3 の形状の工具 (タイプ A とする) は 0° と負のすくい角のボール刃をもち、それぞれを含む二平面間の角度は 180° である。図 12 (a)は表 4 の条件で送り速度を 100 $\mu\text{m/s}$ に設定して一溝を切削したときに、工作物表面がどちらの刃で切削されるかを表したもので、それぞれの領域の面積は等しい。ところで、負のすくい角をもつ切れ刃は切削抵抗が大きく、工具折損につながりやすいと考えられる。そこで刃部形状が図 13 (a)に示される工具 (タイプ B とする) を製作した。図 13 (b)はその SEM 写真である。この形状では二平面間の角度は 90° となる。製作

Fig.12 Areas milled by each cutting edge of (a) type A tool and (b) type B tool (feed speed = 100 $\mu\text{m/s}$)

Fig.13 Tool with modified cutting part (type B)

Fig.14 Simulated shape milled by type B tool (feed speed = 100 $\mu\text{m/s}$)

Fig.15 Comparison of tool life (body length = 70 μm , down cut)

は、図 2 (d)の工程の後、工具材料を 90° 回転して同じ条件で加工を行うことで可能である。

タイプ B の工具で図 12 (a)の場合と同じ条件で一溝を切削したときの、各切れ刃により切削される領域を図 12 (b)に示す。負のすくい角の切れ刃が受け持つ領域は小さくなり、これにより切削抵抗が減少し工具折損までの寿命が伸長することが期待される。ただし、刃部の体積が半減することにより刃先強度が低下して折損しやすくなる可能性がある。図 14 にシミュレーションにより切削形状を求めた結果を示す。切削条件は図 5 (c)

の場合と同じである。削り残しの最大高さは 0.10 μm と大きくなっているが、実際の加工で生じる盛り上がりには比るとその差はかなり小さいといえる。

タイプ B の工具により切削を行い、タイプ A の工具寿命と比較した結果を図 15 に示す。送り速度が高い条件ではあまり差は見られないが、送り速度が低い場合では工具寿命は大きく伸長しており、刃先強度の低下を上回る効果があることが確認された。

4. 結 言

ボール半径 10 μm の極小径ボールエンドミルを製作した。研削による従来の手法では製作が困難なので放電加工を用いて製作を行った。刃部の球形状を作成するために、放電加工における電極消耗現象を活用した。そして製作された工具を用いて黄銅に平面切削を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 同一電極で放電穴加工をコンデンサ容量 3300 pF および浮遊容量のみの条件でそれぞれ行うことにより、電極先端が表面粗さの良好な球形状になることが確認された。
- (2) シミュレーションにより切削形状を求めた結果、工具回転数が 3000 rpm と低いので、切込み深さ 2 μm およびピックフィード 4 μm の条件では送り速度 200 $\mu\text{m/s}$ で削り残しの高さがカスプの高さとほぼ同じになる。
- (3) 平面切削を切込み深さ 2 μm およびピックフィード 4 μm の条件で行った。送り速度 100 $\mu\text{m/s}$ では送り方向の表面粗さ R_z は 0.42 μm になった。また、切削方向をダウンカットにすると大きなバリが生じず良好な加工が行える。
- (4) 送り速度およびボデー長と工具寿命の関係をそれぞれ調べた結果、工具寿命が急に短くなる値がそれぞれ存在することがわかった。
- (5) 刃部形状を修正し、それぞれのボール刃を含む二平面間の角度を 180° から 90° に変更した場合、特に低送り速度領域において工具寿命が大きく伸長した。

参 考 文 献

- 1) 高橋一郎, 安斎正博: 極小径ボールエンドミルによる高精度高速ミリング, 2001 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2001)526.
- 2) D. P. Adams, M. J. Vasile, G. Benavides and A. N. Campbell: Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools, Precision Engineering, **25**, 2 (2001) 107.
- 3) T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi and K. Suzuki: Wire electrodischarge grinding for micro-machining, Annals of the CIRP, **34**, 1 (1985)431.
- 4) 江頭 快: 硬ぜい材料の微細工具による切削加工, 精密工学会誌, **67**, 1 (2001) 157.
- 5) K. Egashira and K. Mizutani: Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool, Precision Engineering, **26**, 3 (2002) 263.
- 6) K. Egashira, K. Mizutani and T. Nagao: Ultrasonic vibration drilling of microholes in glass, Annals of the CIRP, **51**, 1 (2002) 339.
- 7) K. Egashira and K. Mizutani: Microdrilling and micromilling of brass using a 10 μm diameter tool, Proceedings of The 6th International Conference on Progress of Machining Technology (2002) 213.
- 8) Y. Y. Tsai, T. Masuzawa and M. Fujino: Investigations on electrode wear in micro-EDM, Proceedings of ISEM XIII, (2001) 719.
- 9) 蔡 曜陽, 増沢隆久, 藤野正俊: マイクロ放電加工における電極消耗に対する材料要因の影響, 電気加工学会全国大会講演論文集 (2001)61.
- 10) 是田規之, 江川庸夫, 黒田基文, 渡部 健, 伊井良治: ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析, 精密工学会誌, **59**, 9 (1993)129.
- 11) 佐藤健夫, 水谷 武, 河田耕一: 微細穴加工機, National Technical Report, **31**, 5 (1985)725.