

超硬楕円ボールエンドミルの切削性

青 山 英 樹*・岸 浪 建 史**・斎 藤 勝 政**

Cutting Ability of Elliptic Ball-End-Mill

Hideki AOYAMA, Takeshi KISHINAMI and Katsumasa SAITO

要 旨

(1)切れ刃の成形加工が容易である, (2)再研磨作業がきわめて単純である, (3)再研磨後も再研磨以前と同一直径の切れ刃が得られる, という特徴を有する楕円ボールエンドミルを提案し, 試作した。楕円ボールエンドミルの切削性を明かにするため, 切削抵抗, 加工面粗さ, 切りくず生成状況に関して, 他の3種類のボールエンドミルとの比較を行った。その結果, 曲率の大きな曲面加工や, 上向き切削あるいは下り勾配切削となるように工具経路を生成した曲面加工において, 楕円ボールエンドミルは他の工具と同程度あるいはより優れた切削性を示すことが明かになった。

Abstract

An elliptic ball-end-mill, whose characteristics are that (1) the forming operation of the cutting edge is easy, (2) the regrinding operation of the cutting edge is very simple, and that (3) the same cutting edge shape is obtained by the regrinding operation, is developed. In order to confirm cutting ability of the elliptic ball-end-mill, comparisons between the elliptic ball-end-mill and other ball-end-mills concerning cutting force, surface roughness and chip formation are made. As the results, it becomes clear that the elliptic ball-end-mill has equal or excellent cutting ability in comparisons with other ball-end-mills if it is used in machining of curved surface with large curvature or in cutter paths with up cutting or falling gradient cutting.

1. 緒 言

曲面形状の設計・加工技術はCAD/CAMシステムの発展とともに確立し, 計算機およびNC工作機械の性能の向上にともない, 曲面形状の高精度加工が可能になってきた。

切削加工において切削工具は最も重要な役割を担っており, CAD/CAMシステムにおいて加工可能な精度以上に切れ刃形状の精度を管理することが要求されている。曲面加工用工具としては一般にボールエンドミルが用いられているが, 次に示す二つの問題により切れ刃形状精度の管理が容易ではない。

- (1) ボールエンドミルは再研磨により再研磨量だけ半径が小さな切れ刃形状となる。
- (2) 再研磨を必要としないスローアウェイ型のボールエンドミルが出されているが, スローアウェイチップの設置誤差を含む。

筆者らは切れ刃形状精度の管理を容易にする楕円ボールエンドミル¹⁾を提案し, その切れ刃形状の成形加工法を確立するとともに, 可能となる切れ刃形状において最高の切削性能が得られる切れ刃形状を決定してきた。楕円ボールエンドミルは以下に示す特徴を有している。

- (1) 切れ刃の成形加工が容易である。
- (2) 再研磨作業がきわめて単純である。
- (3) 再研磨後も再研磨以前と同一直径の切れ刃形状が得られる。

本研究は, 超硬楕円ボールエンドミルを試作し,

* 助 手 機械工学科

** 教 授 北海道大学工学部精密工学科

その切削性を明かにするため、他の三種類のボールエンドミルを参照工具として用いて、切削抵抗、加工面粗さ、切りくず生成状況について比較検討を行った。

2. 楕円ボールエンドミルと参照ボールエンドミル

図1は試作した超硬楕円ボールエンドミルの切れ刃形状を示している。図1に示されるように、楕円ボールエンドミルは楕円柱とその切断面により切れ刃が形成されており、その切れ刃は楕円柱をすくい面とする第一切れ刃と楕円柱の切断面をすくい面とする第二切れ刃により構成されている。

図2(a)~(d)は比較のために用いた三種類の参照ボールエンドミルと楕円ボールエンドミルを示している。図2(a)は最も一般的な切れ刃形状を有するボールエンドミルであり、以後 NTB と表す。図2(b)は渦巻き切れ刃形状を有するボールエンドミル²⁾であり、以後 HTB と表す。図2(c)は円弧切れ刃形状を有するボールエンドミル³⁾であり、以後 CEB-1 と表す。図2(d)は試作した超硬楕円ボールエンドミルであり、以後 CEB-3 と表す。

NTB, HTB は二枚刃であり、CEB-1 は一枚刃、CEB-3 は一枚刃に等価な変形二枚刃となっている。また、用いたボールエンドミルの直径はすべて 8 mm である。

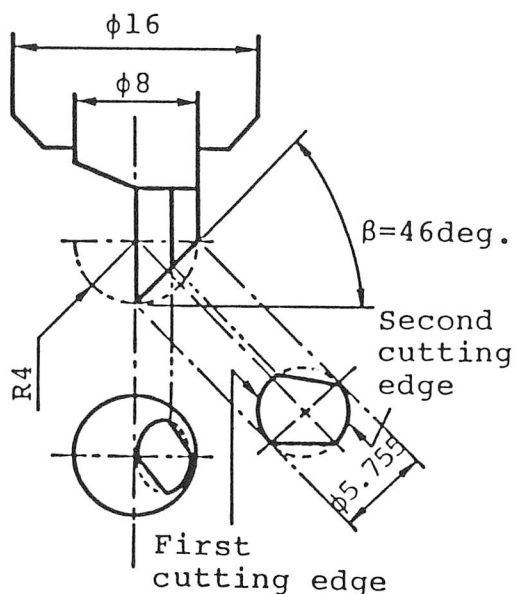


図1 楕円ボールエンドミルの切れ刃形状

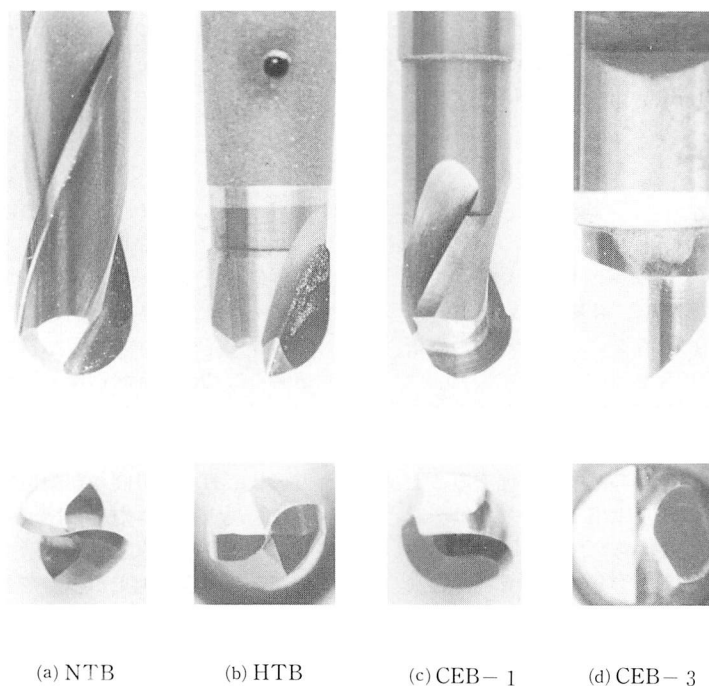
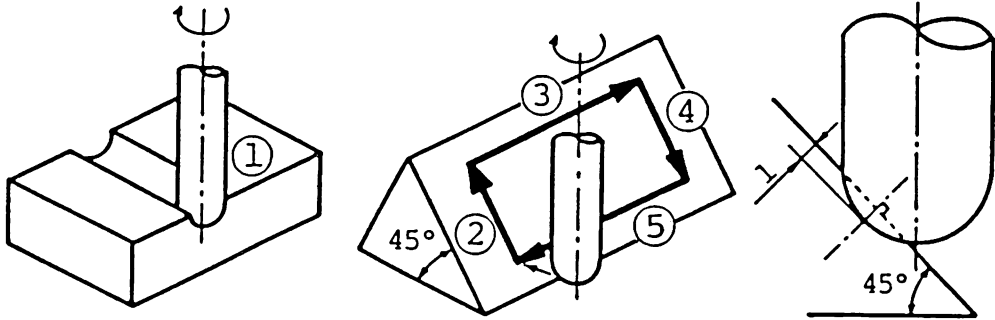


図2 参照ボールエンドミルと楕円ボールエンドミル



平面溝切り切削

斜面切削

図3 切削モード

3. 実験方法

3.1 切削モード

曲面形状の切削加工は、さまざまな切削様式が含まれている。本研究では、曲面形状加工の代表的な切削モードとして図3に示すような5つの切削モードにより、CEB-3と他のボールエンドミルとの切削性の比較検討を行った。

すなわち①平面の溝切り切削 (A plane cutting), ②斜面の上り勾配切削 (Rising gradient cutting), ③斜面上向き切削 (Up cutting), ④斜面的下り勾配切削 (Falling gradient cutting), ⑤斜面的下向き切削 (Down cutting) により、CEB-3の切削性を評価した。

斜面切削における斜面の勾配は45 deg.とした。切込み深さは、平面の溝切り切削では1, 2, 3, 4 mmとし、斜面切削では斜面に垂直方向に1 mmとした。

3.2 切削条件

被削材として黄銅(銅60%, 亜鉛40%)を用いて、2章において示した4種類のボールエンドミルにより、NCフライス盤において乾式切削を行った。回転数は1160 rpmとし一定とした。送り速度は、切削能率を同一にして比較するため、一枚刃(CEB-1, CEB-3), 二枚刃(NTB, HTB)とも同一の送り速度116 mm/min (0.1 mm/rev)とした。また、一枚の切れ刃により切削除去する量を同一にして比較するため、二枚刃(NTB, HTB)については2倍の送り速度の232 mm/min (0.2 mm/rev)において切削実験を行った。

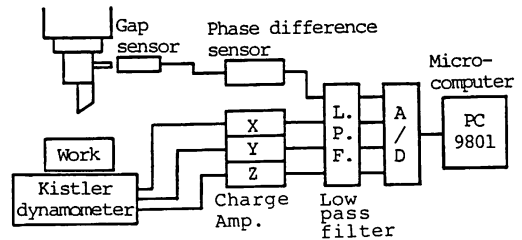


図4 実験装置

3.3 比較項目と測定方法

切削性を評価するための比較項目は切削抵抗、加工面粗さ、切りくず生成状況の3項目とした。

図4は切削抵抗の測定装置を示している。切削抵抗は水晶圧電素子を用いた動力計によりX, Y, Zの三分力として検出され、ローパスフィルターを通し、A/Dコンバータを介してマイクロコンピュータ(NEC: PC9801VM2)へ入力される。X分力, Y分力は工具軸に対して垂直方向の切削抵抗成分であり、Z分力は工具軸方向の切削抵抗成分である。Z分力に比較し、X, Y分力は加工精度、振動発生等に及ぼす直接的な影響力が大きいと考えられる。したがって、X, Y分力の合成抵抗ベクトル最大値の比較を行い、切削抵抗に関するCEB-3の切削性の評価を行った。

加工面粗さは表面粗さ計(小坂研究所製)を用いて測定し、最大高さ R_{max} により評価を行った。加工面粗さの測定位置は、平面の溝切り切削では切込み深さが1, 2, 3, 4 mmにより形成されたそれぞれの加工面について、上向き切削面, 下

向き切削面の両面において最も早い切削速度で切削された位置とした。また、斜面切削により形成された加工面粗さの測定位置は溝の最も深い位置とした。

切りくず生成状況の比較における評価は、切削終了後、生成された切りくずを收拾し、切りくずの観察を通して切削状態の良否の推定を行った。

4. 結果および考察

4.1 切削抵抗による切削性の評価

図5(a)は平面溝切り切削において検出されたX-Y合成抵抗ベクトルの最大値を示している。同図より、平面の溝切り切削におけるCEB-3の切削抵抗は次のように評価できる。

- (1) 切込み深さが1, 2, 3 mmすなわち半径の75%以下の切削において、送り速度(切削効率)を同一とした場合のHTB, CEB-1と同程度である。
- (2) 切込み深さが1, 2, 3 mmすなわち半径の75%以下の切削において、2倍の送り速度(1枚の切れ刃による除去量を同一)とした場合のNTB, HTBよりも小さな値となっている。
- (3) 切込み深さが4 mmすなわち半径の75%以上の切削においては、CEB-3の切削抵抗は他のどの工具よりも大きな値となっている。

上記(3)は2つの原因による。第一の原因は、切込み深さが増大したためにCEB-3の第二切れ

刃による切削領域が多くなったこと。第二の原因は、本研究において試作したCEB-3にはサイド刃を形成していないため、切削により生じたバリがCEB-3の切れ刃上部の楕円柱側面に接触し、摩擦抵抗力が発生したことである。

第一の原因である「第二切れ刃による切削領域が多くなったために切削抵抗が大きくなった」理由は、第二切れ刃が楕円柱の切断面をすくい面とする切れ刃で、きわめて大きな負のすくい角を有しており、第一切れ刃に比較し切削性が低下するためである。

図5(b)は斜面切削において検出されたX-Y合成抵抗ベクトルの最大値を示している。同図より、斜面切削におけるCEB-3の切削抵抗は、次のように評価できる。

- (1) 上向き切削(Up cutting)においてはHTB, CEB-1と同程度である。
- (2) 下り勾配切削(Falling gradient cutting)においてはHTBより大きくCEB-1より小さい。
- (3) 上り勾配切削(Rising gradient cutting), 下向き切削(Down cutting)においては、他よりも大きな切削抵抗となっている。

上記(3)は平面の溝切り切削における切込み深さが4 mmの切削において、CEB-3の切削抵抗が他のボールエンドミルよりも大きくなったことと同じ原因に基づいている。すなわち、上り勾配切削, 下向き切削ではCEB-3の第二切れ刃による切削領域が多くなり、さらにサイド刃を形成していないために楕円柱側面に被削材が接触し摩擦

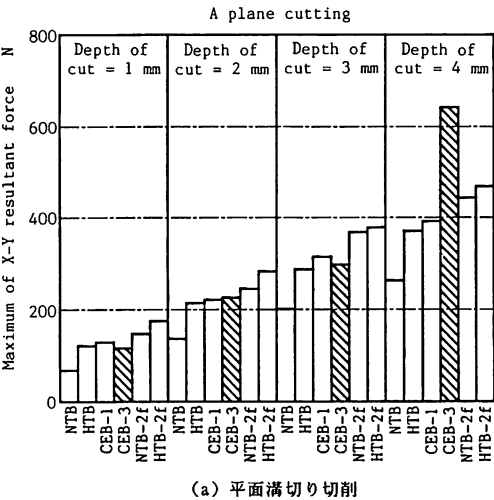


図5 X-Y合成抵抗最大値

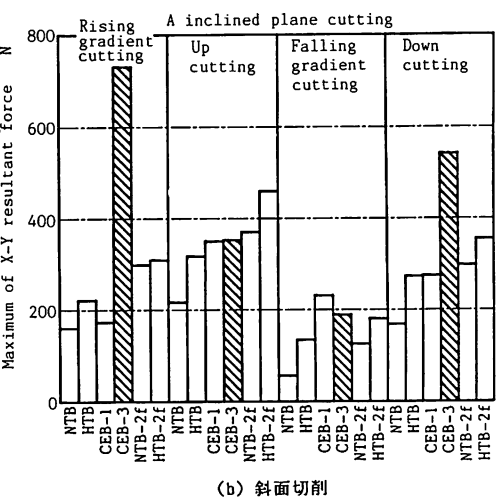


図5 X-Y合成抵抗最大値

抵抗力が生じ、CEB-3の切削抵抗力が大きくになっている。

以上より、切削抵抗からCEB-3の切削性を評価すると、CEB-3の第一切れ刃による切削が中心となる切削モード、すなわち平面の溝切り切削における切込み深さが半径の75%以下の切削、および斜面切削における上向き切削と下り勾配切削において、CEB-3はHTB、CEB-1と同程度の切削性が得られている。しかし、第二切れ刃が中心となる切削モード、すなわち平面の溝切り切削における切込み深さが半径の75%以上の切削、斜面切削における上り勾配切削と下向き切削では、CEB-3の切削性は他のボールエンドミルに比較し劣っている。

4.2 加工面の表面粗さによる切削性の評価

図6(a)は平面の溝切り切削において形成された下向き切削面の表面粗さ（最大高さ）を示している。同図より、平面の溝切り切削においてCEB-3により形成された下向き切削面の表面粗さは次のように評価できる。

- (1) 切込み深さが1 mm すなわち半径の25%の切削において加工面の表面粗さは $1\text{ }\mu\text{m}$ であり、NTB、CEB-1とともに最も小さな表面粗さとなっている。
- (2) 切込み深さが2 mm すなわち半径の50%の切削において加工面の表面粗さは $2\text{ }\mu\text{m}$ であり、NTB、CEB-1より大きな表面粗さとなっているが、HTBと同程度である。
- (3) 切込み深さが3, 4 mm すなわち半径の50%

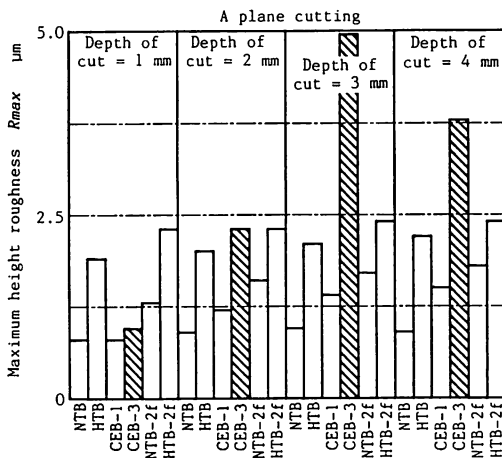
以上の切削においては他のボールエンドミルにより形成された加工面の表面粗さよりも大きな表面粗さとなっている。

また、平面の溝切り切削における上向き切削面に関しては、下向き切削面と比較し全体的に小さな表面粗さとなっているが、図6(a)と同様の傾向を示している。

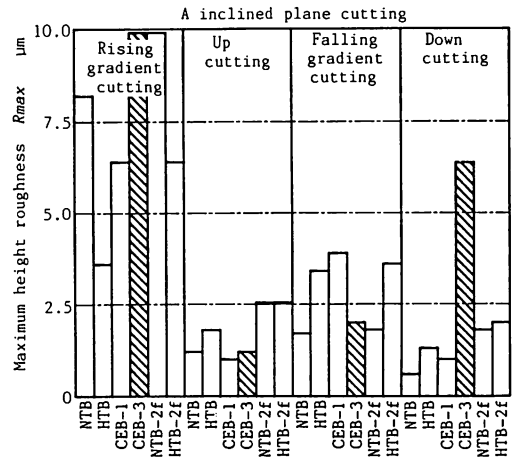
図6(b)は斜面切削において形成された加工面の表面粗さ（最大高さ）を示している。同図より、斜面切削においてCEB-3により形成された加工面の表面粗さは次のように評価できる。

- (1) 上向き切削 (Up cutting) により形成された加工面の表面粗さは NTB、CEB-1 と同程度の $1\text{ }\mu\text{m}$ であり、HTB や2 倍の送り速度とした NTB により形成された加工面の表面粗さより小さな表面粗さである。
- (2) 下り勾配切削 (Falling gradient cutting) により形成された加工面の表面粗さは NTH と同程度の $2\text{ }\mu\text{m}$ であり、HTB、CEB-1 により形成された加工面の表面粗さより小さな表面粗さである。
- (3) 上り勾配切削 (Rising gradient cutting)、下向き切削 (Down cutting) により形成された加工面の表面粗さは、他のボールエンドミルにより形成された加工面の表面粗さより大きな表面粗さである。

以上より、平面の溝切り切削における切込み深さが半径の50%以下の切削および斜面切削における上向き切削、下り勾配切削により形成された加工面、すなわちCEB-3の第一切れ刃により形



(a) 平面溝切り切削(down cut)



(b) 斜面切削

図6 表面粗さ（最大高さ）

図6 表面粗さ（最大高さ）

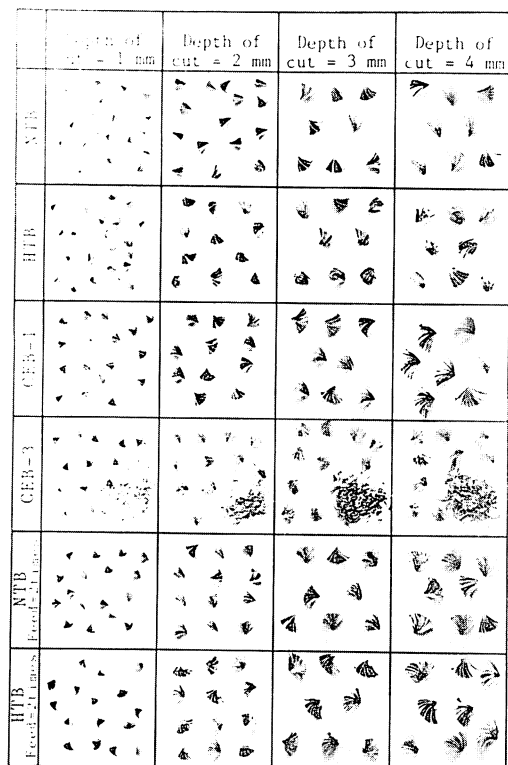


図 7(a) 平面溝切り切削において生成された切りくず

成された加工面の表面粗さは NTB, CEB-1 により形成された加工面の表面粗さと同程度あるいはより小さくなっている。また、平面の溝切り切削における切込み深さが半径の 50%以上の切削および斜面切削における上り勾配切削、下向き切削により形成された加工面、すなわち CEB-3 第二切れ刃により形成された加工面の表面粗さは、他のボールエンドミルにより形成された加工面の表面粗さよりも大きくなっている。

4.3 切りくず生成状況による切削性の評価

図 7(a)は平面の溝切り切削において生成された切りくずを示しており、図 7(b)は斜面切削において生成された切りくずを示している。

図 7(a), (b)より、切れ刃形状、切削モードの違いにより切りくず形状も異なっており、CEB-3 の切削において生成された切りくずに関し、次のようにまとめられる。

- (1) NTB, HTB, CEB-1 により生成された扇形状の切りくずに類似の形状をした切りくずと、粉状の小さな切りくずが混合している。
- (2) 扇形状の切りくずは第一切れ刃により生成さ

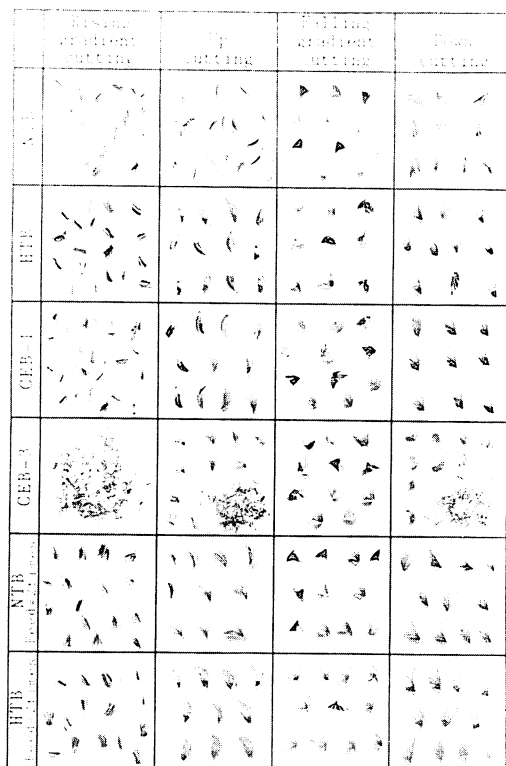


図 7(b) 斜面切削において生成された切りくず

れた切りくずである。

- (3) 粉状の小さな切りくずは第二切れ刃により生成された切りくずである。

4.2, 4.3 節において述べた切削抵抗および加工面粗さに関する結果と切りくずの生成状況から判断し、扇形状の切りくずに対する粉状の小さな切りくずの割合と切削性は相互に関係があり、粉状の切りくずが多い切削モードにおいて、CEB-3 の切削性は他のボールエンドミルと比較して劣っているが、扇形状の切りくずが多く生成される切削モードにおいては CEB-3 の切削性は他と比較し、同程度あるいはより優れていると言える。

5. 結 論

筆者らが提案している楕円ボールエンドミルの切削性を明かにするため、切削抵抗、加工面粗さ、切りくず生成状況に関して、他の 3 種類のボールエンドミルとの比較を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 楕円ボールエンドミルの第一切れ刃による切

削性は、他のボールエンドミルと比較し同程度あるいはより優れている。

- (2) 楕円ボールエンドミルの第二切れ刃による切削性は、他のボールエンドミルと比較し劣っている。
- (3) 第一切れ刃による切削が中心となる切削モードは、平面の溝切り切削における切込み深さが半径の50%以下の切削および斜面切削における上向き切削と下り勾配切削である。

したがって、楕円ボールエンドミルは、

- ① 曲率の大きな曲面形状の加工、
 - ② 工具経路が上向き切削あるいは下り勾配切削となるように生成されている曲面形状加工、
- において用いることにより、その性能、特徴を生かし効果的に利用することが可能となる。

参 考 文 献

- 1) 青山, 岸浪, 斎藤: 楕円ボールエンドミルの開発と切削性能に関する研究, 精密工学会誌, 53, 3 (1987), 461.
- 2) 細井, 星: 渦巻状刃先を持つボールエンドミルの切削作用, 日本機械学会講演論文集, 707-6 (1977).
- 3) 岸浪, 鈴木, 斎藤: 円弧切れ刃ボールエンドミルの切削作用角の解析, 精密機械, 47, 4 (1981), 459.

(昭和 62 年 11 月 30 日受理)

