

三次元 CAD を活用したボールエンドミル および楕円エンドミル加工における 切削機構の解析と切削特性の評価*

Analysis of Cutting Mechanism and Evaluation of Cutting Performance of Ball End Mill and Oval End Mill Using 3D-CAD

岩部洋育** 藤田 剛***
Hiroyasu IWABE and Tsuyoshi FUJITA

Key words ball end mill, oval end mill, cutting mechanism, cutting performance, 3D-CAD, evaluation

1. はじめに

精機学会（現精密工学会）において、昭和51年11月に「エンドミルの切削性能に関する調査研究分科会」（主査：藤井義也教授）が設立され、後に「エンドミル加工に関する基本的問題」と題して報告された¹⁾。岩部は幹事を務めたが、この分科会での取り組みが先駆けとなり、スクエアエンドミルによる側刃および底刃による加工面生成機構が明らかにされている²⁾³⁾。1980年代半ばより主軸回転数が毎分1万回転以上、送り速度も数十 m/min の高速加工機が普及してくるが、この種の機械による加工誤差要因の解明⁴⁾とその有効活用を目的としたエンドミルによる高速・高精度加工法の提案も行われている⁵⁾。

一方、金型等の加工においては工具先端部が半球状のボールエンドミルの活用が不可欠であり、各種形状ならびに寸法の工具が多用されている。また、コーティング技術の発展により、高硬度な金型材の直彫り加工も行われるようになり、ボールエンドミルの役割はさらに広がっている。この種の工具による加工に関しては、これまで実験的・解析的検討による多くの研究が報告されており、得られた知見も多い。文献6)ではそれらを7つに分類している。しかし、現場においては切削条件の選択に、長年の経験に依存する場合がほとんどである。主な理由は、解析的検討による結果が難解であり、その切削機構や切削特性の評価も

捉えがたく、切削条件の選択において基本的な方針を見いだせていないためと考えられる。

岩部らは三次元 CAD を活用してボールエンドミルによる切削モデルを作成し、上記の問題に対する解決案を提案している⁶⁾。本解説では簡単な傾斜面の等高線加工における切削機構の解析ならびに切削特性の評価を簡易的に行う方法を示すとともに検証実験の結果を含めて検討を行っている。そのため、基本的な4種類の加工法とその特徴および良好な切削特性が期待できる工具と工作物の姿勢等を、容易に理解できるものと考えている。なお、この方法は各種の工具による加工に適応させることも可能となるが、紙面の関係で切れ刃形状が類似なエッグタイプの楕円エンドミルに適用した場合についての結果を加え、ボールエンドミルによる結果と比較して示すことにする。

2. 三次元 CAD による切削モデルと解析方法

2.1 モデリング

図1は3D-CAD (CATIA-V5) によるモデルの作成方法を示したもので、(a) 図が工具、(b) 図が工作物の場合であり、以下の手順により行った。

- (1) X-Y-Z の直交3軸を定義し、原点を O (0, 0, 0) とする。
- (2) Z 軸を中心とする半径 $R_c = 8 \text{ mm}$ の円筒を定義する。
- (3) 円筒面上にねじれ角 $\eta = 30^\circ$ の切れ刃 QQ' を定義する (点 Po(8, 0, 0) を通るものとする)。
- (4) 原点 O(0, 0, 0) を中心とし、 $Z = -8 \sim 0 \text{ mm}$ の位置に半径 $R_c = 8 \text{ mm}$ の半球を定義する。
- (5) 切れ刃の PoQ' 部分を中心軸方向に、半球面まで移動 (矢印) させ、切れ刃 QPoO₂ を定義する。
- (6) 切れ刃 QPoO₂、直線 O₁Q および Z 軸 O₁O₂ で囲まれる面によりすくい面を定義する。
- (7) Y-Z 面に直線 ST を底辺とし、斜辺との角度が α の直角三角形 STU を定義する。
- (8) 直角三角形 STU を X 軸正方向に $4R_c$ 移動させて、直角三角形 S' T' U' を定義する。



*原稿受付 平成23年5月18日

**正会員 新潟大学工学部機械システム工学科 (新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)

***学生会員 新潟大学大学院自然科学研究科 (新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)

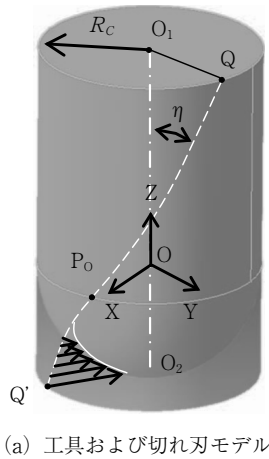
岩部洋育

1974年新潟大学大学院工学研究科修士課程修了、同大学助手、准教授を経て、教授。1985年工学博士。エンドミル加工を中心に高速・高精

度加工、三次元 CAD を活用した切削機構・特性に関する研究、超音波振動付与による切削加工に関する研究に従事。

藤田 剛

2011年新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了、同後期課程1年。三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる傾斜面加工の切削機構に関する研究、5軸制御機を想定した主軸傾斜による高速・高精度ボールエンドミル加工に関する研究に従事。



(a) 工具および切れ刃モデル

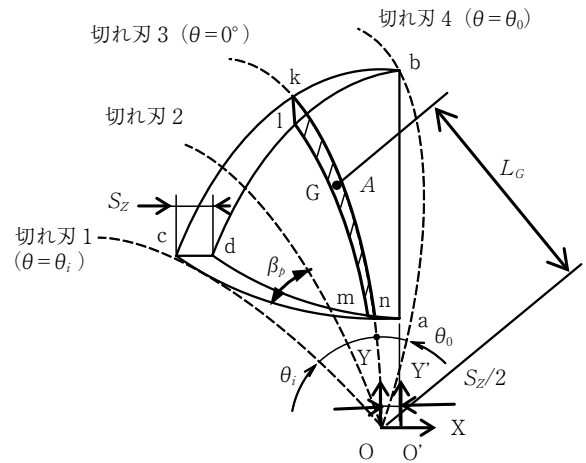
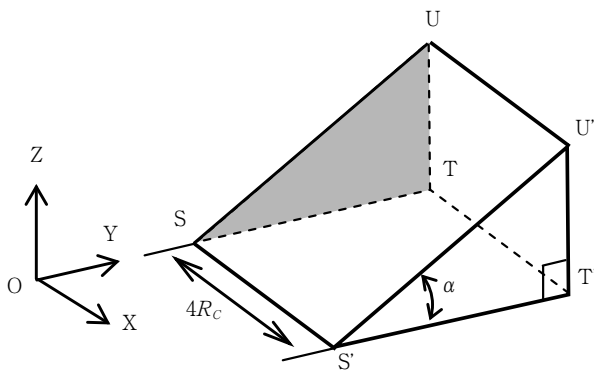


図3 切削面積の計算方法



(b) 工作物モデル

図1 3D-CAD モデルの作成方法

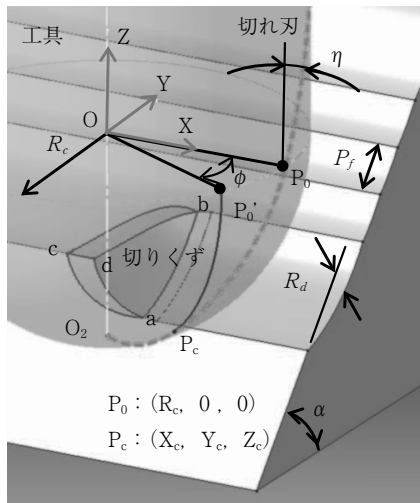


図2 傾斜面加工における切削モデル

(9) 2つの直角三角形で囲まれる立体 $STUU' T' S'$ により工作物を定義する。

図2は、上記により定義された工具、切れ刃および工作物を組み合わせ、切削面積とその重心を計算するためのモデルおよび座標系と記号を示している。図において、ピックフィードは下方に与えるステップダウンの場合を示しており、上方向に与える場合はステップアップとなる。な

項目	値
工具半径	R_c : 8 mm
半径方向切込み	R_d : 0.8 mm
工作物傾斜角	α : 0~75°
1刃当たりの送り	S_z : 0.16 mm/tooth
ピックフィード	P_f : 0.8 mm
ねじれ角	η : 30°

お、原点 O は工具半球の中心、破線は切れ刃、abcd は1回の切削で除去される切りくず立体である。

2.2 解析方法

2.2.1 切削面積

図3は図2の切りくず立体abcdをZ軸よりX-Y面に投影し、工具の回転に伴って切りくずを通過する切れ刃(破線)と切削面積の関係を示している。図より、切れ刃1で切削を開始し、切れ刃2および3を経て切れ刃4の位置で終了する。切削面積 A は切りくず立体abcdとすくい面が干渉する部分であり、切れ刃3の位置では斜線部klmnとなる。工具の回転角の基準 ($\theta=0^\circ$) は切れ刃がY軸に接した切れ刃3の位置である。図中の点Gは切削面積の重心であり、その座標値および主軸から点Gまでの距離 L_G の計算もCAD内蔵の解析ツールを用いている。なお、計算精度を高める目的で、モデルは125倍に拡大して計算を行った後に元の倍率の値に変換しており、表1は計算および切削条件である。

2.2.2 評価値

切削力が切削面積の重心Gに最も近い切れ刃点 G_p に集中力として作用するものと仮定する。最大切削面積にはほぼ比例する最大切削力の作用点が主軸に近い方が切削トルクを抑制し、切削特性を改善することにつながると考えられる。また、主軸から点Gおよび点 G_p までの距離の差は非常に小さいため、両者を L_G により近似して次式により切削トルクに対応する評価値 E_d を計算すれば、簡易的な切削特性を評価することが可能になると考えられる。

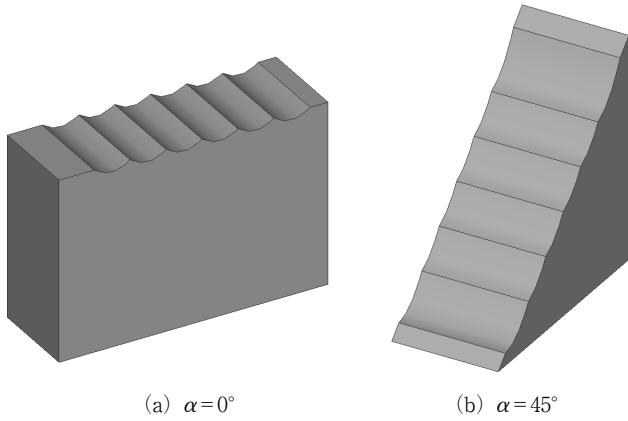


図4 仕上げ面粗さ

$$E_d = AL_c \quad (1)$$

2.2.3 理論粗さ

ボールエンドミルによる傾斜面の加工における理論粗さ R_{th} は図2のツールマークによる削り残しの高さであるが、幾何学的には次式で求められる。

$$R_{th} = \frac{P_f^2}{8R_c} \quad (2)$$

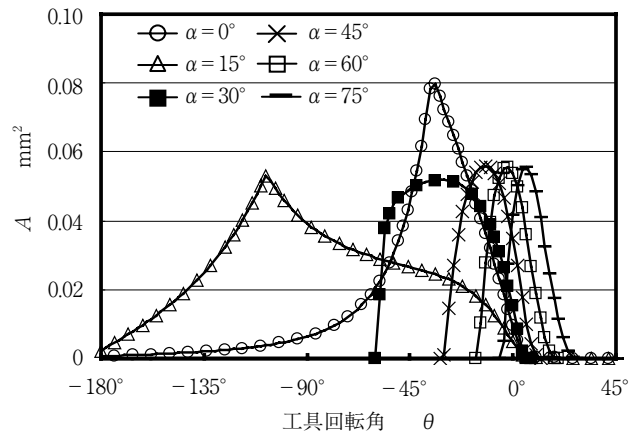
一方、楕円エンドミルの場合、図1(a)のモデルにおいて OO_2 の長さを楕円の長軸半径 R_1 としてモデルを作成し、工具と工作物の相対運動に基づいて図4に示すような加工面を表示させることができる。この加工面のツールマークによる削り残しの高さが理論粗さ R_{th} であり、容易にその数値を求めることができる。なお、楕円エンドミルの場合も、三次元CADを使用することなく、幾何学的な解析によって理論粗さ R_{th} を求めることが可能である⁷⁾。

3. 解析および実験結果に基づく評価

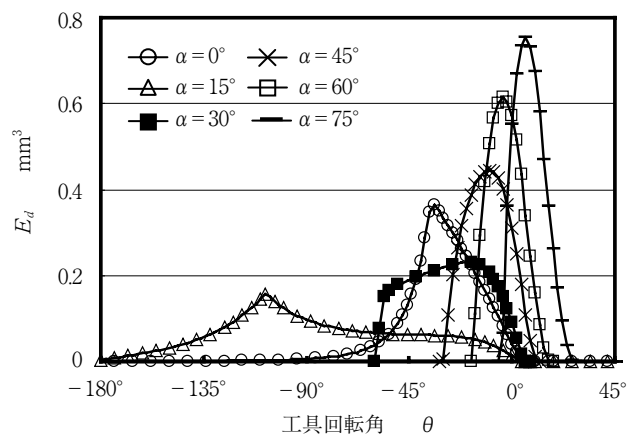
3.1 ボールエンドミル加工

3.1.1 切削面積と評価値

図5は横軸に工具回転角 θ をとり、切削中における切削面積および式(1)で計算した評価値の変化を示したもので、工作物の傾斜角 α をパラメータに用いている。(a)図より工作物の傾斜角 α が増加すると切削面積の最大値 A_{max} および切削の開始から終了までの工具回転角の範囲が減少する。一方、(b)図では $\alpha = 15^\circ$ で評価値の最大値 E_{dmax} は最小値を示した後に増加する。 $\alpha = 30^\circ$ 以上で急増する理由は、切りくず立体 $abcd$ が主軸より遠ざかり、切削面積の重心までの距離 L_c が急増することによる。図5の解析結果は図2に示した工具軸がZ軸と一致する場合であるが、5軸制御機による加工を想定するとさらに送り方向への主軸傾斜について検討しなければならない。その角度を λ とし、前傾姿勢を正(+), 後傾姿勢を負(-)と定義するが、図5と同様な計算の後、図6に示す結果として整理することができる。(a)図に示す切削面積の最大値 A_{max} は工作物傾斜角 α が 15° 近傍においては主軸の傾斜 λ の影響を受けておらず、ほぼ最小な値である。一



(a) 切削面積



(b) 評価値

図5 解析結果(下向き切削, ステップダウン, $\lambda = 0^\circ$)

方、(b)図に示す評価値の最大値 E_{dmax} は λ の絶対値が増加すると増加する傾向にあるが、最小値を示す条件(下向き切削, ステップダウン, $\alpha = 15^\circ$, $\lambda = -5^\circ$)で良好な切削特性が期待できることになる。なお、太い線で囲まれる谷部の条件においても E_{dmax} は微増する程度であり、良好な切削特性に大きな差はないものと理解できる。

3.1.2 切削トルクと切削特性

図7は $\lambda = 0^\circ$ の条件で検証実験を行い、切削三分力に基づいて切削トルク T を算出し、その最大値 T_{max} (破線) を E_{dmax} (実線) と比較している。図中の \downarrow および \uparrow 印はそれぞれステップダウンおよびステップアップ, up および down は上向き切削および下向き切削を意味している。図より、等高線加工における4つの切削パターンにおいて、工作物の傾斜角 α の増加による T_{max} と E_{dmax} の変化の傾向は良く一致しており、図6(b)の太線の範囲内の切削条件である $\alpha = 15^\circ$ および 30° で良好な切削特性が得られることが分かる。また、本提案による簡易的な切削特性の評価の妥当性も明らかである。

3.2 楕円エンドミル加工

3.2.1 仕上げ面粗さ

図8は横軸に工作物傾斜角 α をとり、楕円エンドミル

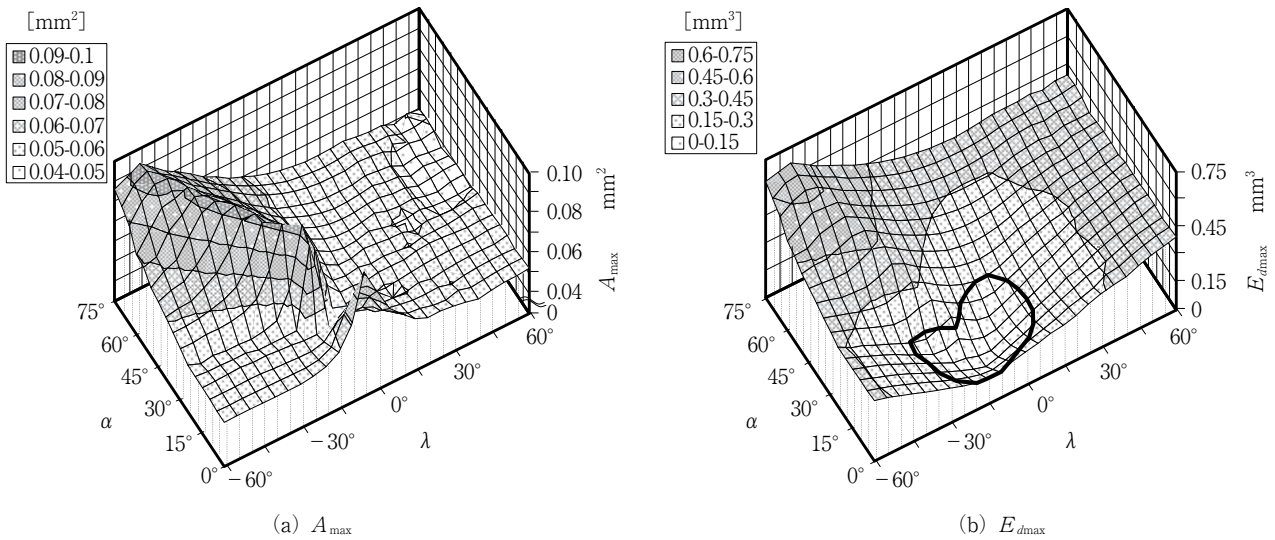


図6 A_{max} と E_{dmax} (下向き切削, ステップダウン)

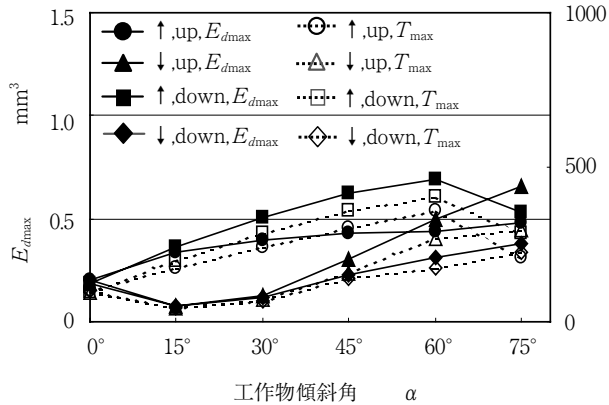


図7 E_{dmax} と T_{max}

表2 切削条件

工具半径	: R_t	24 mm (軸方向)
	: R_s	8 mm (半径方向)
半径方向切込み	: R_d	0.8 mm
送り	: S_z	0.16 mm/tooth
ピックフィード	: P_f	0.8 mm (一定)
工作物傾斜角	: α	0~75°

による傾斜面加工における最大高さ R_z の結果を理論粗さ R_{th} と比較している。実験条件は表2に示す通りであり、使用した機械はNC立フライス盤、工具は2枚刃、超硬ソリッド楕円エンドミル、(TiAl)Nコーティングである。図より、 $\alpha=0^\circ$ を除き一点鎖線で示す理論粗さと実験値は良く一致している。また、 α が増加すると式(2)中に示す工具の曲率半径 R_c が増加し、最大高さ R_z は減少することになる。 $\alpha=0^\circ$ における両者の差は工具先端が幅約0.6 mm平坦に仕上げられていたことによる⁷⁾。図8は傾

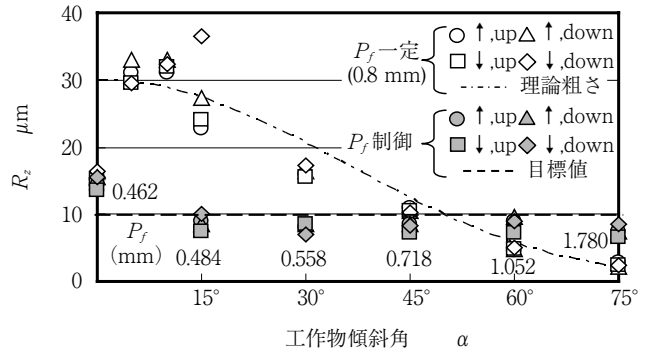


図8 仕上げ面粗さとピックフィード制御の効果

斜角の大きな面の高精度加工に楕円エンドミルを用いることが有効であることを示しているが、曲面の任意の位置における最大高さ R_z を一定にするためには、傾斜角に対応したピックフィード制御が避けられない。図中には $R_{th} = 10 \mu\text{m}$ を目標値(破線)とした検証実験の結果を併記しているが、両者はほぼ目標値に一致している。なお、それぞれの結果の近傍に示した数値はピックフィード制御の値であり、これらの値も三次元CADを用いた繰り返し計算により求めている。

3.2.2 ピックフィード制御と切削特性

図9は図7と同様の座標軸を用いて楕円エンドミルによる評価値の最大値 E_{dmax} と切削トルクの最大値 T_{max} を比較したものであり、(a)図が一定のピックフィード ($P_f = 0.8 \text{ mm}$)、(b)図が制御したピックフィードを用いた場合である。両図より傾斜角 α の変化による E_{dmax} と T_{max} の変化はともによく対応しており、図7に示したボールエンドミルと同様に評価値 E_{dmax} による簡易的な切削特性評価が可能であることが分かる。

しかし、仕上げ面粗さを均一にすることを目的としてピ

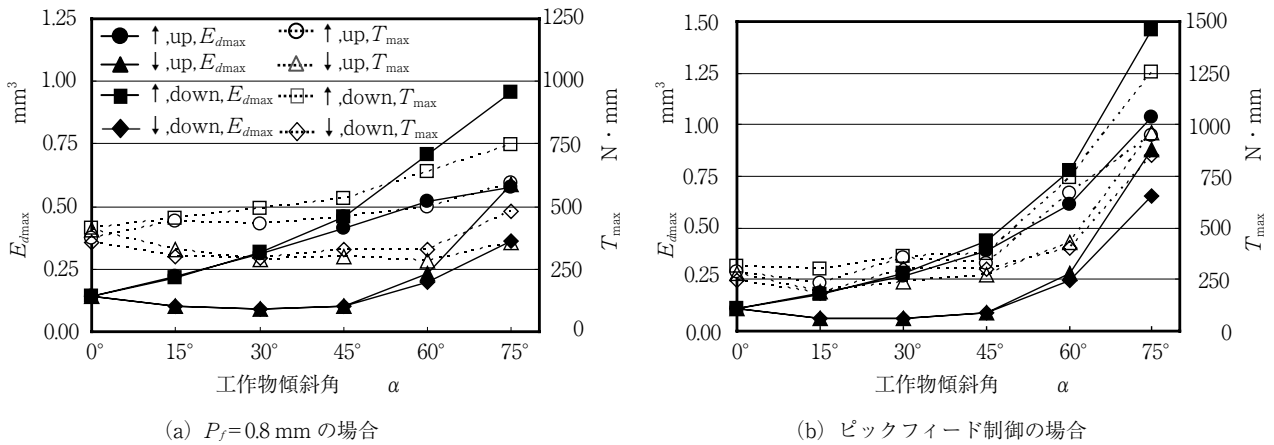


図9 楕円エンドミルによる E_{dmax} と T_{max}

ックフィード制御を行うと、楕円エンドミルにおいては $\alpha=45^\circ$ 以上で P_f が増加するため E_{dmax} と T_{max} はともに増加し、切削特性が悪化することになる。そのため、楕円エンドミルを使用する場合はステップダウン、 $\alpha=0\sim45^\circ$ の条件を選択することが望ましい。ただし、5軸制御機を用いて $\alpha=45^\circ$ 以上の傾斜面を加工することが可能であれば、傾斜面から主軸までの角度が $45\sim90^\circ$ を満たす条件で行えば良いことになる。

4. ま と め

三次元 CAD を活用し、複雑な切削過程となるボールエンドミルによる傾斜面の切削機構に関する解析とその結果に基づいた切削特性の評価について、検証実験の結果と比較しながら述べた。また、この方法は切れ刃形状の複雑な工具による切削加工に適用可能である。そこで、一例として楕円エンドミルによる切削機構の解析および検証実験の例を示し、同様に良好な切削特性が得られる加工方法とその切削条件、さらには加工面の粗さを均一にする際に考慮すべき点についても言及した。

なお、本文がボールエンドミルや類似工具のみならず、複雑な切れ刃形状の工具による切削過程の解明に関心のあ

る方々にお役に立てば、望外の喜びである。

参 考 文 献

- 1) エンドミルの切削性能に関する調査研究分科会：エンドミル加工に関する基本的問題，精密機械，**45**，9 (1979) 1128-1133.
- 2) 藤井義也，岩部洋育，鈴木雅晴：切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係（第1報）—加工誤差生成機構—，精密機械，**43**，7 (1977) 807-813.
- 3) 岩部洋育，藤井義也：切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係（第2報）—底面の加工誤差生成機構—，精密機械，**54**，5 (1988) 940-945.
- 4) 岩部洋育，竹本和博，今井純一：エンドミルによる高速加工に関する研究（輪郭加工精度と誤差要因），日本機械学会論文集（C編），**63**，612 (1997) 2878-2885.
- 5) 岩部洋育：エンドミルによる加工精度に関する基本的問題と高速・高精度加工法について，日本機械学会論文集（C編），**66**，645 (2000) 1417-1422.
- 6) 岩部洋育，清水啓輔，佐々木三宣：三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる切削機構の解析（傾斜面加工における切削面積と評価値による切削特性），日本機械学会論文集（C編），**72**，713 (2006) 247-254.
- 7) H. Iwabe, T. Kumaki and I. Hori: Study on Cutting Mechanism and Cutting Performance for Inclined Surface by Oval End Mill Using 3D-CAD, Proc. of the 5th Int. Conf. on LEM21, Japan, (2009) pp. 495-500.