研 究

円弧切れ刃ボールエンドミルの切削作用角の解析*

—円弧切れ刃ボールエンドミルの切削機構に関する研究 (第2報)—

岸 浪 建 史** 鈴 木 裕*** 斎 藤 勝 政**

A Theoretical Analysis of Cutting Operation
Angle of Circular Cutting Edge Ball End Mill
—A Study of Cutting Mechanism of Circular
Cutting Edge Ball End Mill (2nd Report)—

Tateshi KISHINAMI, Hiroshi SUZUKI
and Katsumasa SAITO

In this paper, a theoretical analysis procedure of cutting operation angle of ball end mill was proposed in order to estimate its cutting ability. Three

geometrical models of typical ball end mill cutting operation were established for estimating the cutting operation angle, and geometrical cutting conditions were given by vector functions. Relationship between cutting operation angle and cutting conditions which involved the cutting edge shapes of ball end mill was discussed.

Key words: ball end mill, cutting ability, cutting mechanism, cutting operation angle, cutting edge shape.

1. 緒 論

前報¹⁾では円弧切れ刃ボールエンドミルがボールエンドミルの一般的切れ刃形状の一つであって、その切れ刃成形作業、および切れ刃形状精度の管理が容易である外に、スローアウェイ化にも適している切れ刃形状であることを述べた。また、すくい面切削速度成分の解析を行い三次元工具運動下における球体部切れ刃の各切れ刃点での切削状況を明らかにした。しかし、ボールエンドミルの切削機構は本質的に断続切削であるので、その切削性を評価するには工具1回転における切削に寄与する範囲、いわゆる切削作用角を明らかにすることが重要である。すなわち同一切りくず体積を排出するためには切削作用角が大きいものほど最大切削抵抗値は小さく、その切削性は良好であると言える。ボールエンドミルの切削作用角から見た切削性の検討は実験的に細井ら²⁾によって限定された切削条件、切れ刃形状に対して行われたにすぎず、理論的検討はほとんど行われていないと言える。本研究では望ましいボールエンドミルの切れ刃形状、使用切削条件の体系化を目的として、種類の切れ刃形状、切削条件、前加工面に対して切削作用角を理論的に求め、その切削性能を明らかにすることを目的とする。

2. 円弧切れ刃ボールエンドミルの代表的切削様式と切れ刃形状の設定

2.1 ボールエンドミルの代表的切削様式とそのモデル化

ボールエンドミルによる代表的切削様式を図1に示す。すなわち、ボールエンドミルによる形状加工はその負荷能力が一般には小さいため、カットオフセット操作、あるいは z 軸方向の一定切込みを順次加えることにより最終形状を得る加工手順がよく用いられる。この場合、工具の被削材への切削開始、終了時に、切込みの変動を伴う領域が存在するが、多くは一定切込みによる切込みから見た定常状態が維持される。ここでボールエンドミルの代表的切削様式として、前加工面と球体部切れ刃との干渉が生じない図1のモデルIの切削様式、あるいは切込みの小さい場合にみられる前加工面と球体部切れ刃との干渉を考慮しなければならぬモデルII、さらにビ

図1 ボールエンドミルによる代表的切削様式

* 原稿受付 昭和55年4月24日、昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和54年10月11日)にて発表。

** 正会員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

*** 学生会員 北海道大学大学院

図2 工具運動ベクトル $\vec{V}$, 前加工面法線ベクトル $\vec{N}$, ピックフィードベクトル $\vec{F}_p$, λ, μ の定義

ックフィード操作を考慮するモデル III の切削様式が考えられる。この場合、前加工面はオフセット操作を行う以前の同一ボールエンドミルによる加工面そのものであるが、ピックフィードによって生ずる表面の凹凸が切込みに対して十分小さければ前加工面を滑らかな面であると仮定してもよい。各モデルにおける切削作用角を解析するために図2に示すような前加工面法線ベクトル $\vec{N}$, 工具運動ベクトル $\vec{V}$, ピックフィード運動ベクトル $\vec{F}_p$, 切込み d_0 , 及び送り量 f_p を定めた。すなわち被削材に固定された座標系 $O-xyz$, 及びそれに平行で原点がボールエンドミルの中心 O にある座標系 $O-x'y'z'$ を図2のように定めると, $\vec{N}, \vec{V}, \vec{F}_p$ 各ベクトルを $O-x'y'z'$ 系に対して次のように定める。

$$\left. \begin{aligned} \vec{N} &= (l_1, m_1, n_1) \\ \vec{V} &= (s_x, s_y, s_z) = f(l_2, m_2, n_2) \\ \vec{F}_p &= (f_x, f_y, f_z) = f_p(l_3, m_3, n_3) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで,

l_i, m_i, n_i は xyz 軸となす方向余弦

$$f = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} \quad (\text{mm/rev})$$

$$f_p = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2} \quad (\text{mm})$$

s_i : i 方向送り量 (mm/rev)

f_i : i 方向ピックフィード量 (mm)

である。またボールエンドミルの切削作用角は軸回転位相角には依存しないから $s_y = 0$ においても一般性は失われない。したがって次式のように書き表せる。

$$\left. \begin{aligned} s_x &= f \cos \lambda \\ s_z &= f \sin \lambda \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで λ は x' 軸と工具運動ベクトル $\vec{V}$ がなす角である。又、切込み d_0 は前加工面に垂直な方向に測定した最大切込み量を意味し、切込み d_0 が常に一定であるためには

$$\vec{N} \cdot \vec{V} = \vec{V} \cdot \vec{F}_p = \vec{F}_p \cdot \vec{N} = 0 \quad (\cdot \text{スカラー積}) \quad (3)$$

の関係を満たす必要がある。

図3 円弧切れ刃ボールエンドミルの切れ刃形状模型

ここで, $x'z'$ 面内にあって, $\vec{V}$ と直角な軸を z'' とすると, z'' と前加工面法線ベクトル $\vec{N}$ がなす角を μ とおき, 式(2), (3)を考慮すると式(1)は次式のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} \vec{N} &= (-\cos \mu \sin \lambda, -\sin \mu, \cos \mu \cos \lambda) \\ \vec{V} &= f(\cos \lambda, 0, \sin \lambda) \\ \vec{F}_p &= f_p(-\sin \mu \sin \lambda, \cos \mu, \sin \mu \cos \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2.2 円弧切れ刃ボールエンドミルの切れ刃形状の定義

ボールエンドミルの切れ刃は側刃部と球体部切れ刃とに分けて考えることができ、側刃部は、エンドミル、プレーンカッタと同様な切削機構を有すると考えられ、ボールエンドミル切れ刃の特徴は球体部切れ刃にある。したがってここでは、ボールエンドミルの球体部切れ刃による切削作用角について議論を進める。前報¹⁾で述べた円弧切れ刃ボールエンドミルはボールエンドミルの球体内部に頂点を持つ円すい体を考え、円すいと球との交差曲線すなわち円弧がボールエンドミルの頂点 P を通る場合、その円すい面をすくい面とする切れ刃形状を円弧切れ刃ボールエンドミルと呼び図3にその切れ刃模型を示す。ここで α は円すい頂点開き角, β は円すい体取付角, r_0 はボールエンドミル球体部半径である。又、解析にあたって、ボールエンドミルに固定された座標系(図4)で、ボールエンドミルの軸方向を Z 軸, 円すい底面に平行に X 軸をもつ $O-XYZ$ 座標系を定めた。切削作用角は切れ刃頂点近傍を除いて、切れ刃後線部($\widehat{PST}$)における切削開始・終了によって決まるから、任意の切れ刃点

図4 ボールエンドミル球体部任意切れ刃点の運動

の工具1回転中の切削に寄与する範囲を明らかにする必要がある。図3に示す円弧切れ刃ボールエンドミルの切れ刃模型から明らかなように、任意の切れ刃点Sの座標系O-XYZに対する座標値(X, Y, Z)は次の関係式を満たす。

$$\begin{cases} X = r_0 g_1(r/r_0, \beta) = \sqrt{r^2 - \cot^2 \beta (r_0 - \sqrt{r_0^2 - r^2})^2} \\ Y = r_0 g_2(r/r_0, \beta) = \cot^2 \beta (r_0 - \sqrt{r_0^2 - r^2}) \\ Z = r_0 g_3(r/r_0, \beta) = -\sqrt{r_0^2 - r^2} \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 r は任意の切れ刃点Sの回転半径である。

3. 円弧切れ刃ボールエンドミルの 切削作用角の推定法

円弧切れ刃ボールエンドミルの球体部切れ刃の切削作用角を明らかにするためには最初に任意の切れ刃点Sでの切削作用角を図1に示す切削様式モデルI, II, IIIに対して求めておく必要がある。今、図4に示すボールエンドミルの運動模式図において、ボールエンドミルに固定された座標系O-XYZが角速度 ω で正回転運動と同時に被削材に固定された静止座標系o-xyzに対して、工具運動ベクトル $\vec{V}$ で平行運動を行う場合、時刻 t における任意の切れ刃点Sの静止座標系o-xyzに対する座標は次式で与えられる。ただし $t=0$ で原点Oと原点oは一致していたとする。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t & 0 \\ -\sin \omega t & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \frac{\omega t}{2\pi} \vec{V} \quad (6)$$

式(2)及び(5)を考慮すると式(6)は次式となる。

$$\frac{1}{r_0} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t & 0 \\ -\sin \omega t & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1(r/r_0, \beta) \\ g_2(r/r_0, \beta) \\ g_3(r/r_0, \beta) \end{pmatrix} + \frac{\omega t}{2\pi r_0}$$

図5 切削開始・終了点を与える η と θ の関係

$$\times \begin{pmatrix} \cos \lambda \\ 0 \\ \sin \lambda \end{pmatrix} \quad (7)$$

3.1 モデルIにおける球体部切れ刃点の切削作用角

モデルIにおいては球体部切れ刃点と前加工面との干渉を考えなくてよいから、図4に示す切れ刃点の被削材中の軌跡の干渉のみによって切削作用角 ϕ は決定される。今、ボールエンドミルの球体部切れ刃の任意の2個の切れ刃点をA, Bとして、その軸からの距離すなわち半径を r_1, r_2 とする。切れ刃点Aが時刻 $t=t$ で通過した点を切れ刃点Bが t 時間後に通過したと仮定し、その交点を P_0 とする。交点 P_0 を求めるためには式(7)で与えられる切れ刃点Aの時刻 t における位置と切れ刃点Bの時刻 $t+\tau$ における位置の差 Δ がゼロであることから求めることができる。すなわち距離 Δ は次式で与えられる。

$$\Delta = \frac{1}{r_0} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1(r_1/r_0, \beta) \\ g_2(r_1/r_0, \beta) \\ g_3(r_1/r_0, \beta) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos(\theta+\eta) & \sin(\theta+\eta) & 0 \\ -\sin(\theta+\eta) & \cos(\theta+\eta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1(r_2/r_0, \beta) \\ g_2(r_2/r_0, \beta) \\ g_3(r_2/r_0, \beta) \end{pmatrix} - \frac{\eta f}{2\pi r_0} \begin{pmatrix} \cos \lambda \\ 0 \\ \sin \lambda \end{pmatrix} \quad (8)$$

ただし、 $\theta = \omega t$, $\eta = \omega \tau$ である。式(8)において、工具送り速度 f/r_0 、工具運動方向 λ 、切れ刃形状 β が与えられているならば、任意の r_1 に対して、 Δ をゼロとする θ, η, r_2 の組合わせを数値解法により求めることができる。

図5は式(8)において $\beta=90^\circ$, $f/r_0=0.1$ とおき、 $\lambda=0 \sim 60^\circ$ まで変化させたときのボールエンドミルの任意切れ刃点 r_1 での切削開始・終了点を与える r_2, θ, η の中

の θ と η との関係を示したものであって, η が 2π 以下の曲線は切削開始線, 2π 以上では切削終了線を表している. なお実線は計算結果を求めた領域で, 破線は推定値である. 一般に工具運動ベクトルの傾斜角 λ が小さいもののほど η は大きく広範囲の切れ刃点 (r/r_0) に対して切削現象を伴っていることが分かる. 切削作用角 ϕ は切れ刃点 (r/r_0) を固定し, 対応する切削開始点・終了点間の図5に示す $\phi_1 + \phi_2$ として求めることができる. このようにして, 種々の切削条件, 切れ刃形状に対して任意の切れ刃点の切削作用角を明らかにすることができる. なお, f/r_0 が十分小さければ, 切削開始・終了曲線は工具運動ベクトル $\vec{V}$ に垂直で球体部中心を通る平面と球体部との交差曲線として与えられる. この交差曲線のボールエンドミルの軸に垂直な xy 平面への投影曲線は次式で与えられる.

$$(1 + \cos^2 \lambda)x^2 + y^2 = r_0^2 \quad (9)$$

3.2 モデル II における球体部切れ刃の切削作用角

モデル II における切削作用角 ϕ はモデル I において求められる切削作用角の内, 前加工面と球体部切れ刃との交差曲線内の角度として求められる. 前仕上面は面法線方向が (l_1, m_1, n_1) である平面であるから, 切込み d_0 におけるボールエンドミルの球体部との交差曲線の xy 平面への投影曲線は次式で与えられる.

$$\left(1 + \frac{l_1^2}{n_1^2}\right)x^2 + 2\frac{l_1 m_1}{n_1^2}xy + \left(1 + \frac{m_1^2}{n_1^2}\right)y^2 - \frac{2l_1}{n_1^2}\left(1 - \frac{d_0}{r_0}\right)x - \frac{2m_1}{n_1^2}\left(1 - \frac{d_0}{r_0}\right)y + \frac{\left(1 - \frac{d_0}{r_0}\right)^2}{n_1^2} - 1 = 0 \quad (10)$$

式 (10) において式 (4) を考慮すると

$$\begin{aligned} & \cos^2 \mu x^2 + 2 \cos \mu \sin \mu \sin \lambda xy \\ & + (\sin^2 \mu + \cos^2 \mu \cos^2 \lambda) y^2 + 2 \cos \mu \sin \lambda \left(1 - \frac{d_0}{r_0}\right) x \\ & + 2 \sin \mu \left(1 - \frac{d_0}{r_0}\right) y + \left(1 - \frac{d_0}{r_0}\right)^2 - \cos^2 \mu \cos^2 \lambda = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

で表すことができる. 式 (11) において $d_0/r_0 = 0.16$, $\lambda = +30^\circ$, $\mu = 0^\circ$ における交差曲線 B を図 6 (b) に示す. なお図 6 (b) はボールエンドミルの軸方向から見た球体部の投視図であって曲線 A は $\lambda = +30^\circ$ における式 (9) で与えられる切削開始・終了曲線である. 切削に寄与する範囲は曲線 A の外側と曲線 B の内側に囲まれる範囲であって任意の切れ刃点での切削作用角は原点 o を中心とする任意半径のその範囲内の角度として求められる. 図 6 (a) は図 6 (b) より求めた任意切れ刃点での切削作用角を示したものである. このようにして任意の球体部切れ刃点の切削作用角を (d_0, λ, μ) に対して図式的, あるいは数値解析的に求めることができる.

図 6 モデル II における各切れ刃点での切削作用角

3.3 モデル III における切削作用角

モデル III における切削作用角はモデル II における切削作用角の内, ピックフィードによって創成される面すなわち円筒面と球との交差曲線内の角度として求められる. この円筒面と球との交差曲線の xy 平面への投影曲線は

$$\begin{aligned} & (l_2 x + m_2 y \pm n_2 / 1 - x^2 - y^2)^2 \\ & + 2 \left(\frac{f_p}{r_0}\right) (l_3 x + m_3 y \pm n_3 / 1 - x^2 - y^2) - \left(\frac{f_p}{r_0}\right)^2 = 0 \quad (12) \end{aligned}$$

で与えられる. ここで式 (4) を考慮すると式 (12) は

$$\begin{aligned} & (\cos \lambda x \pm \sin \lambda y / 1 - x^2 - y^2)^2 + 2 \left(\frac{f_p}{r_0}\right) (-\sin \lambda \sin \mu x \\ & - \cos \mu y \pm \cos \lambda \sin \mu / 1 - x^2 - y^2) - \left(\frac{f_p}{r_0}\right)^2 = 0 \quad (13) \end{aligned}$$

と書ける.

式 (13) において $\lambda = +30^\circ$, $\mu = 0^\circ$ に固定し, f_p/r_0 を 0.2~1.6 まで変化させたときの式 (13) によって与えられる交差曲線 C を図 7 (b) に示す. 図 7 (b) における曲線 A, B は図 6 (b) によって与えられた曲線 A, B と同一である. したがってモデル III における切削作用角は曲線 A, B, C に囲まれた領域内の原点 o を中心とする円弧角で与えられ, 対応する切削作用角の変化を図 7 (a) に示

図7 モデル III における各切れ刃点での切削作用角

す。

4. 切削条件と切れ刃形状による切削作用角の変化

ボールエンドミル加工における切削条件は被削材材質、切削油、主軸回転数のほかに、比送り量 f/r_0 、比切込み d_0/r_0 、比ピックフィード量 f_p/r_0 、工具移動方向表示パラメータ λ 、前加工面法線方向表示パラメータ μ を考えなければならない。これらの切削条件の内、幾何学的切削条件は f/r_0 、 d_0/r_0 、 f_p/r_0 、 λ 、 μ であって、これらと切れ刃形状による切削作用角の変化について述べる。

4.1 モデル I における切削条件と切れ刃形状による切削作用角の変化

モデル I において考慮すべき幾何学的切削条件は f/r_0 、 λ のみであって、それらと切れ刃形状によるボー

ルエンドミルの切削作用角の変化について述べる。円弧切れ刃ボールエンドミルの切れ刃形状は円すい頂点角 α と円すい取付角 β によって一義的に決定される。切削作用角の解析においては切れ刃稜線部のみを考慮すればよいから、切れ刃形状としては β のみを取扱えばよい。円弧切れ刃ボールエンドミルにおける円すい取付角 β は $\pi/2 \sim \pi/4$ まで変化させることができ、それぞれが切れ刃形状の位相角の下限、上限を与えている。したがって最初に $\beta = \pi/2$ に固定し解析を行う。図8は式(8)及び図5を基に工具移動方向 λ を $-75^\circ \sim +75^\circ$ まで 15° おきに变化させたときの $\beta = \pi/2$ での球部各切れ刃点 (r/r_0) での切削作用角を表したものであって、実線は $f/r_0 = 0.1$ 、破線は $f/r_0 = 0$ の場合を示したものである。実用切削条件においては1刃当たりの送り量 f/r_0 は0.05以下である場合が多く、 $f/r_0 = 0.1$ は最大使用限界値と考えてよい。したがって実用切削条件下における切削作用角は図8の実線と破線の中間に存在すると言える。一方 $f/r_0 = 0$ を示す破線は式(9)より求められる値と一致し、 f/r_0 が十分小さければ工具頂点部を除いて実用上、切削開始・終了曲線として取扱いうる。 $\lambda = 0^\circ$ においては、 f/r_0 が0でないかぎり、 r/r_0 が小さいほど切削作用角は大きい。一方、 $\lambda > 0$ の場合、 $r/r_0 = 1.0$ において最大切削作用角を示す。一方、 $\lambda < 0$ の場合、 λ の値に対応して、工具頂点部にかけて常に切削作用角が 2π となる r/r_0 の領域が存在する。したがって $\lambda < 0$ においては、どこかの切れ刃が常に切削を行っているという意味で切削作用角は 2π である。このように $\beta = \pi/2$ (S. E. B. 系切れ刃) の場合には工具切れ刃全体で見た切削作用角は最大切削

図8 S. E. B. 切れ刃における切削条件と任意切れ刃点での切削作用角の関係

図9 C.E.B. 切れ刃 ($\beta = \pi/4$) における切削条件と任意切れ刃点での切削作用角の関係

図10 モデルIIの切削様式における切削作用角の変化

作用角を示す切れ刃点によって決まる。

一方、円弧切れ刃形状の上限を与える $\beta = \pi/4$ (C.E.B. 系切れ刃) における切削作用角の解析結果を図9に示す。図9は $f/r_0 \equiv 0$ に固定し、 $\lambda = -75^\circ \sim +75^\circ$ まで 15° おきに变化させたときのC.E.B. ($\beta = \pi/4$) 系切れ刃形状の切削作用角を示したものであって、各切れ刃点での切削作用角は β が $\pi/2$, $\pi/4$ とも大きな変化はないが、 r/r_0 に対応して位相角が存在し、切削作用角を図の上方に移動させるように定まる。そして $r/r_0 = 1.0$ において最大位相角 $\pi/2$ を取る。したがって切れ刃全体での切削作用角は最初に切削を開始する $(r/r_0)_1$ と最後に切削を終了する $(r/r_0)_2$ によって決まる。このように各切れ

刃点での位相角が大きい切れ刃形状の方がモデルIにおいては切削作用角は大きく切削性は良好であると推定できる。

4.2 モデルIIにおける切削条件と切れ刃形状による切削作用角の変化

モデルIIにおいて考慮すべき幾何学的切削条件は f/r_0 , d_0/r_0 , λ , μ である。切れ刃形状は前節と同様に $\beta = \pi/2$ (S.E.B. 系切れ刃) と $\beta = \pi/4$ (C.E.B. 系切れ刃) の二つを代表的切れ刃形状と考える。切削条件は $f/r_0 \equiv 0$, $d_0/r_0 = 0.16$ に限定し、 $\lambda = -45^\circ \sim +45^\circ$, $\mu = -45^\circ \sim +45^\circ$ まで 5° おきに变化させたときの切れ刃全体の切削作用角を式(9), (11)に基づいて求め、その結果を図10に示す。図10において実線は $\beta = \pi/4$

(C.E.B.), 破線は $\beta = \pi/2$ (S.E.B.) の切れ刃形状を表している。モデルIIにおける切れ刃全体での切削作用角を求める具体的手順は式(9), (11)に基づいて図6に相当する図式を求め、最小切削開始角を与える $(r/r_0)_1$ と最大切削終了角を与える $(r/r_0)_2$ の角度差をもって切削作用角とした。なお、C.E.B. 系切れ刃における切削作用角を求める場合、切れ刃点に有する位相角を考慮して切削作用領域を図6(a)に示す破線領域として求め、切れ刃全体としての切削作用角を求めた。一般に λ を固定して考えると μ の絶対値が大きくなるほど切削作用角は小さくなり、特に $\beta = \pi/2$ の切れ刃形状においては μ に対して対称である。一方、 $\beta = \pi/4$ の切れ刃形状においては各 λ に対して μ の絶対値が同一でも $\mu > 0$ の場合が切削作用角は小さく、C.E.B. 系切れ刃は下向き切削において切削作用角は大きいと言える。切れ刃形状と切削作用角の関係をみると、 $\lambda > 0$, $\mu > 0$ においてC.E.B. 系切れ刃はS.E.B. 系切れ刃よりも切削作用角は小さいが、他の切削条件下ではC.E.B. 系切れ刃の方が切削作用角は大きく切削性は良好であると推定できる。

4.3 モデルIIIにおける切削条件と切れ刃形状による切削作用角の変化

モデルIIIにおいて考慮すべき幾何学的切削条件は f/r_0 , d_0/r_0 , f_p/r_0 , λ , μ である。考慮すべき変数が多いので、代表的変数の組み合わせについてのみ検討を行った。すなわち、 $f/r_0 = 0$, $d_0/r_0 = 0.16$, $\beta = \pi/2, \pi/4$, $\lambda = \pm 30^\circ$, $\mu = -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ$ に限定し、 $f_p/r_0 = 0.0 \sim 1.0$ まで变化させたときの切削作用角を求め、その結果を図

図 11 モデル III の切削様式における切削作用角の変化

11に示す。図 11において実線はC. E. B. 切れ刃 ($\beta = \pi/4$)、破線はS. E. B. 切れ刃 ($\beta = \pi/2$)を表している。ピックフィード量の変化による切削作用角は図 7(a)に示すように変化するので、その中で最小切削開始角を与える $(r/r_0)_1$ と最大切削終了角を与える $(r/r_0)_2$ がなす角度差を切削作用角として求めることができる。一般に f_p/r_0 を小さくすると切削作用角はいずれの条件でも小さくなり、特に $\lambda < 0$, $\mu = 0$ の場合に f_p/r_0 がある値よりも小さくなると急激に切削作用角は減少すると言える。また上向き切削においてC. E. B. 切れ刃の切削作用

角は f_p/r_0 を小さくするに従い、S. E. B. 切れ刃より早く減少することが明らかとなった。

5. 結 論

本報ではボールエンドミルの切削性を評価する量として切削作用角を取り上げ、円弧切れ刃ボールエンドミルの切削作用角を求める解析的手法を提案し、種々の切削条件と切れ刃形状との組み合わせに対して切削作用角を予測し以下の結論を得た。

- (1) ボールエンドミルを用いた加工様式として、代表的な3種類の切削様式のモデル化を行い、幾何学的切削条件の定式化を行った。
- (2) 幾何学的切削条件を考慮した円弧切れ刃ボールエンドミルの切削作用角を求める解析手順を明らかにした。
- (3) モデル I における切削様式においては、切れ刃点位相角の大きいC. E. B. 切れ刃の方が切削作用角は大きく切削性が良好であると推定された。
- (4) モデル II における切削様式においては $\lambda > 0$, $\mu > 0$ においてS. E. B. 切れ刃の方が切削作用角は大きい、他の切削条件ではC. E. B. 切れ刃の方が切削作用角は大きく切削性が優れていると推定された。
- (5) モデル III における切削様式においては f_p/r_0 を小さくするに従い切削作用角は減少し、一般に切れ刃形状よりも幾何学的切削条件によって大きく影響されることを明らかにした。

引 用 文 献

- 1) 岸浪建史ほか：円弧切れ刃ボールエンドミルのすくい面切削速度成分の解析，精密機械，46，10 (1980) 1303.
- 2) 細井俊明，星 鉄太郎：渦巻状刃先をも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，No. 770-6 (1977).