高硬度金型材のエンドミル加工（第６報）
—ボールエンドミルの切削抵抗の簡易推定式とそれによる切削抵抗の一定化制御—

大塚裕俊*・山路伊和夫**・垣野義昭**・中川平三郎***
*生産技術部・**京都大学工学部・***滋賀県立大学工学部

Endmilling of Hardened Die(6th Report)
- A Prediction Model of Cutting Forces for Ball End mills and Control for Constant Cutting Forces Using this Model -

Hirotoshi OHTSUKA*・I. YAMAJI**・Y. KAKINO**・H. NAKAGAWA***
*Production Engineering Division・**Kyoto University・***The University of Shiga Prefecture

要旨

前報で構築した（Al, Ti)Nコーテッド工具による高硬度材エンドミル加工の切削抵抗予測式について，ボールエンドミルへの適用について検討した．そして最大切りくず厚さ t_m と切削円弧長Lおよび切削関与角 θ よりなる切削抵抗予測式を構築した．そしてこれを厳しい内側円弧切削を含む２次元切削加工における切削抵抗の予測と，その一定化制御に適用した結果その有効性が確かめられた．とりわけボールエンドミル切削加工で問題となる，刃先の場所ごとに切削特性が変化する問題や，切りくずが薄くなる微小切削の場合にも本予測式による切削抵抗の予測と制御が可能であることがわかった．

1.　はじめに

近年，焼入鋼の切削に適したエンドミル（(Al, Ti)N-コーティッド超硬工具）の開発により，HRC53程度までの高硬度材からなる金型の高精度切削加工が可能となっている[1]．

しかし高硬度材のエンドミル加工では比較的微小な切込み量でも大きな切削抵抗が生じることが経験的に知られており，また過大な切削抵抗がすぐに工具に重大な損傷を与えるという難点を抱えている．そのため切削抵抗の特性を十分把握した上で適切な加工条件や工具経路を選択することが重要である．

とりわけボールエンドミルによる金型の切削加工においては，直線部の加工よりも円弧部の加工の方がはるかに多いが，円弧部では切削抵抗が直線部とは大きく変化する場合が多い．また２次元平面内の輪郭加工であっても切削する平面の傾斜角によって切削抵抗が変化するという問題もある．そのため工具経路の各場所で各々の幾何的条件に応じてそこで生じる切削抵抗や加工誤差を許容値以下に保ちつつ，高能率な加工（＝高い送り速度の加工）を行うことができれば大変好都合である．

以上の目的を達成するためには，適切な数学モデルを用いた切削抵抗の推定により送り速度を制御する必要がある．たとえば Altintas らがエンドミル切れ刃各部分における傾斜切削モデルに基づく方法で，ボールエンドミル切削時の抵抗を推定する方法を提唱している[2]．しかしこの方法は，モデルに含まれる比切削抵抗など係数の数が多いためその決定が複雑であること，また係数自体がエンドミル切削における種々の加工パラメータの影響を受けやすいなどの点で実用的でない．また加えて一般的にボールエンドミルでは外周刃から工具先端にむかっての切れ刃ねじれ角などの幾何的な条件が変化する場合が多く，切削速度も切れ刃の場所ごとにそれにつれて変化するなどのボールエンドミル特有の問題が多いため，数学モデルによる取扱いはストレートエンドミルの場合と比較して非常に困難である．

また一般的に実際の加工では，送り速度を制御する方法として，単位時間当たりの切削体積が一定となるように送り速度を場所ごとに変化させる方法がよく用いられる．これは幾何的な計算だけですむので簡便で優れた方法である．しかしながらこの手法により，ボールエンドミルの刃先の場所ごとに切削特性が変化する点や，切りくずが薄くなる微小切削の場合に切削特性が変化する点を表現することは難しい．

そこで本研究においては実用的なボールエンドミルの切削抵抗の予測や制御に使用可能な数学モデルを構築するため，その切削抵抗の簡易推定式について研究することとした．

まず本研究では，２次元平面内におけるボールエ

ンドミルによる高硬度材の切削加工について，近似化手法である応答曲面法を適用して切削抵抗の予測式を構築する．そして変形前の最大切りくず厚さ，切削円弧長および先端切削関与角を３つのパラメータとする本予測式により，直線部切削および円弧部切削を含む２次元平面内の輪郭加工での切削抵抗の予測や制御が可能となることを示す．また本予測式が，前述の刃先の場所ごとに切削特性が変化する問題や，切りくずが薄くなる微小切削の場合にも適用可能となることを示す．

なおボールエンドミルによる金型の切削加工においては，直前の工具経路を経路方向に対し垂直な方向について等ピッチ量オフセットして生成した工具経路に沿って次の切削加工が行われる場合（以下これを広義のピックフィード加工として定義する）が，一般的に多く発生する．そこで本研究では，このピックフィード加工を金型加工におけるボールエンドミルによる一つの典型的な切削形態と考えてモデル化を行う．またボールエンドミルの切削抵抗は一般に切れ刃の回転によって大きく変動が生じるため，予測値としての切削抵抗値はその時間平均値を用いることとする．

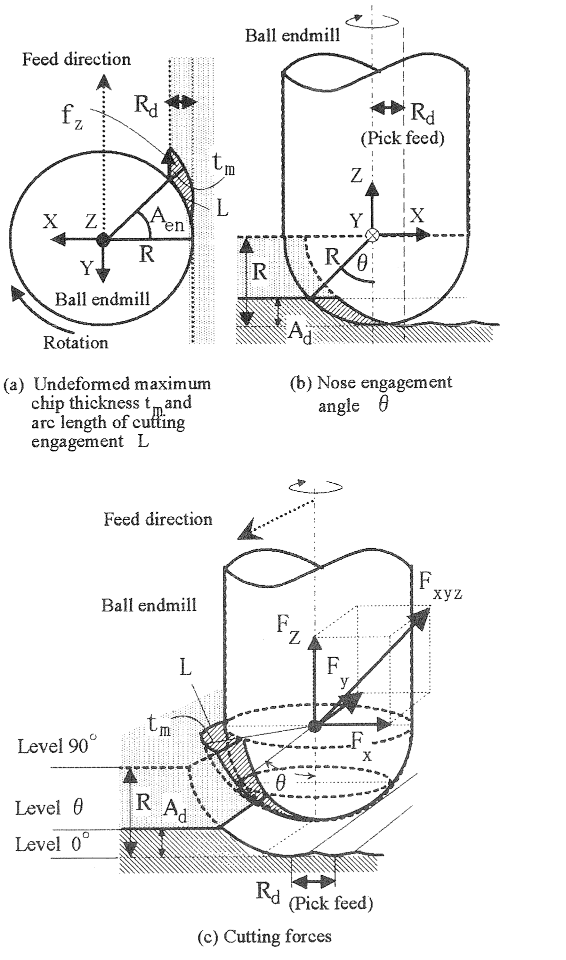

Fig. 1 Geometrical model for pick feed cutting by ball end mill

2. 直線ピックフィード加工における幾何的な干渉関係

図１はボールエンドミルによる直線ピックフィード加工を単純化のうえモデル化したものであり，XY平面内での変形前の最大切りくず厚さ t_m，切削円弧長 L および先端切削関与角 θ と他の加工パラメータによる幾何的干渉関係について示す．R_d は径方向切込み量（ピックフィード量），f_z は１刃あたり送り量，R はエンドミル半径，A_d は軸方向切込みである．A_{en} は切削関与角であり，工具送り方向に面したエンドミル外周円のうち被削材と重なる部分に対応するものとする．なお変形前の最大切りくず厚さ t_m，切削円弧長 L および切削関与角 A_{en} は，図 1(c)中の Level 90°（先端切削関与角 θ=90°）における XY 平面内での値で表す．つまり図 1(c)において Level θ での切削のケースを考えればわかるように，エンドミル中心軸の幾何的変位量である径方向切り込み量 R_d と送り量 f_z が一定であっても図中の Level θ での実際の切りくずによる t_m や L は先端切削関与角 θ（A_d）によって変化する．そこで θ に対して t_m や L を独立変数として容易に扱うため，また解析や応用における変数の取り扱いの便宜のため，t_m と L は次式(1)～(3)から R_d と f_z から一意に決まる変数とする．すなわち t_m と L（および A_{en}）は，R_d と f_z が与えられた場合に図１で θ= 90° として Level 90° で得られる値で仮想的に代表させるものとする．

$$L = R \cdot A_{en} \tag{1}$$

$$t_m = f_z \cdot \sin(A_{en}) \tag{2}$$

$$A_{en} = \cos^{-1}\{(R - R_d)/R\} \tag{3}$$

3. 切削抵抗予測式

切削抵抗とそれに影響を与える要因を近似式として結びつけるため，前報[3]までと同様に応答曲面法を用いる．本研究では切削抵抗の予測式として簡単のため２次の多項式による応答曲面を構築する．その場合，一般的に X を説明変数，Y を予測値，β を回帰係数とすれば応答曲面は次式によって表される．

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n}\beta_i X_i + \sum_{i=1}^{n}\beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^{n}\beta_{ij} X_i X_j \tag{4}$$

なお n は説明変数の数を示す．例えば３説明変数による応答曲面は，式(4)において n= 3 として次式になる．

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \tag{5}$$

未知の係数βは回帰分析により最小二乗法を用いて求められる．測定点とそれに対する応答値（測定値）が与えられた場合，回帰モデルは次式になる．

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{6}$$

Yは応答値ベクトル，Xは測定点による行列，βは回帰係数ベクトル，εは誤差ベクトルである．最小二乗法によるβの推定値は次式になる．

$$\beta_e = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{7}$$

本研究では，図 1 (c)に示す切削抵抗の合力 F_{xyz}を予測値として，変形前の最大切りくず厚さ t_m，切削円弧長 L および先端切削関与角θを 3 つの説明変数として数学モデル化を行う．

4. 実験装置と方法

4.1 被削材と切削工具

工具として直径 10mm，2 枚刃の(Ti, Al)N コーティングされた微粒子超硬ボールエンドミルを用いる．被削材としてダイス鋼 SKD-61(硬さ HRC53)を用いる．

4.2 実験装置と手順

実験装置の概略は次のとおりである．まず上記の材料から作製した被削材を立形マシニングセンタ(MC)のテーブル上に取り付ける．被削材は圧電素子を用いた 3 成分工具動力計上に保持され，切削抵抗の測定に用いられる．切削抵抗を測定する際は図 1 中の R_d，A_d に示されるように，被削材についてエンドミルの軸方向と径方向に一定の切込み量を与え，XY 平面内での直線切削および円弧切削を行う．

4.3 実験条件

切削抵抗測定実験において用いる標準切削条件（水平面上の直線ピックフィード加工を基準とする）を表 1 に示す．円弧部切削も被削材の半径に応じて送り量を変化させる以外はこれに準じる．ただし表 1 の軸方向切込み量 A_dの値は，それぞれ先端切削関与角θがそれぞれθ=15°，30°，60°，90°の場合に対応している．また主軸回転数は常に一定であり，対応する切削速度は工具半径が 5mm となる点での標準的な値を示す．

4.4 応答測定点と応答曲面

最小二乗法により応答曲面を求める際，より誤差の小さい応答曲面を得るためには X_i より成る変数空間において応答測定点をどのように取るかが重要である．まず X_1，X_2 については，2 次の多項式による応答曲面に対して一般によく用いられる X_i 変数空間での等半径の測定点の配置を利用し，この円形領域内を実験空間とする [4]．切削抵抗測定実験での工具摩耗の進行の影響を避けるためには測定点数は少ない方が望ましいが，応答曲面の精度を考慮して標準切削条件を中心として t_mと L の 2 次元空間上に配置された 10 個の測定点を用いる． X_1，X_2 は各々t_mと L を式(8)～(9)によって正規化した t_m^*，L^*を用いる．すなわちδt_mとδL は各々t_mと L の実験区間の基準幅/2 であり，測定点 9，10 は標準切削条件での t_{m0} と L_0 に対応している($t_m^*=0$，$L^*=0$)．これらの値は表 2 に示す値を用いる．なお図 1 に示す幾何的関係から，t_mと L および R_dと f_z は式(1)～(3)により相互に変換することができる．また X_3は，エンドミルの先端切削関与角θを式(10)によって単位角度 30°で正規化したθ^*=0.5, 1, 2, 3 の 4 とおりを用いる．このとき表 1 に示すようにθ^*=0.5, 1, 2, 3 では，軸方向切込み量 A_d は各々A_d=0.17, 0.67, 2.5, 5.0 mm となる．

Table 1 Standard cutting conditions

Cutting speed (Spindlespeed)	S V	302 m/min (maximum) (9600 min^{-1})
Feed per tooth	f_z	0.06 mm/tooth
Cutting direction		Down cut
Free length of end mill		30 mm
Tool runout		≦ 4 μm
Radial depth of cut	R_d	0.3 mm
Axial depth of cut	A_d	0.17, 0.67, 2.5, 5 mm
Workpiece		Die steel SKD-61 (HRC53)
Coolant		Dry air

Table 2 Undeformed chip thickness (t_m: X_1) and arc length of cutting engagement (L: X_2) for cutting force experiments

End mill ϕ	Standard range of t_m and L (1/2)		t_m and L for standard cutting conditions		Standard cutting conditions		
	δt_m	δL	t_0	L_0	R_d	f_z	spindle speed
mm	μm	mm	μm	mm	mm	mm/tooth	1/min
10	7	0.262	20.5	1.74	0.3	0.06	9600

$$X_1 = t_m^* = (t_m - t_{m0})/\delta t_m \tag{8}$$

$$X_2 = L^* = (L - L_0)/\delta L \tag{9}$$

$$X_3 = \theta^* = (\theta - \theta_0)/\delta\theta \tag{10}$$

5. 実験結果と考察

5.1 切削抵抗 F_{xyz}の予測式

切削抵抗測定実験により得られた 2 次多項式応答曲面を先端切削関与角θ^* = 3 の場合を例として等

高線図により図2に示す．実験結果によれば切削抵抗値 F_{xyz} の値は，先端切削関与角 θ^* が0から1に変化する間に急速に増大しており，先端切削関与角 θ^* が1から2に変化する間に比較して切削抵抗値 F_{xyz} の変化率が大きい．このような場合は，一般的に説明変数 X_i の空間上で領域分割を行い，各々で低次関数による応答曲面を作成して近似を行うのが予測精度などの点で有利である[5]．そこで先端切削関与角 $\theta^*=1(X_3=1)$ を境界として2つの領域A，Bに説明変数 X_i の空間を分割して各々で応答曲面を構築した．これにより3説明変数による応答曲面の全係数が得られるのでそれを用いて，原点($t_m^*=0$， $L^*=0$)を通る断面によって応答曲面を表示したものを図3に示す．これらにより得られる予測値 F_{xyz} の単位はNである．また統計値の R^2 は決定係数であり，$R_a{}^2$ は自由度調整済みの決定係数である．得られた各係数について統計学上のF検定を用いて優位水準 $\alpha=0.05$ で有効性を検証した．これによればすべてのケースで $R_a{}^2>0.999$ となっており，得られた応答曲面はかなり良い近似となっていることがわかる．

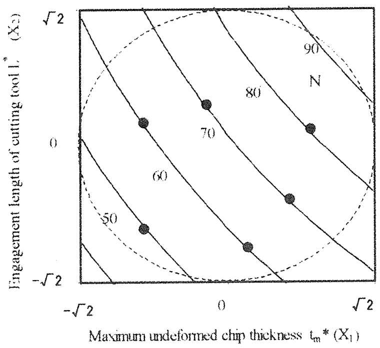

Fig. 2 Contour plots of F_{xyz} based on response surface（Nose engagement angle $\theta^*=3$ ($X_3=3$)）

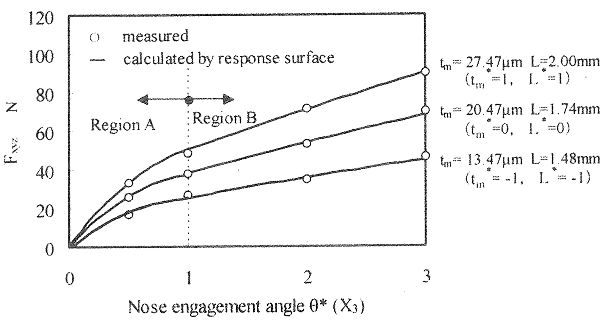

Fig. 3 Sections of response surfaces (F_{xyz})

5.2 予測式による切削抵抗の一定化制御（直線切削）

次に，得られた係数による切削抵抗予測式を用いて，水平面上のピックフィード加工（直線切削）における切削抵抗の制御が可能かどうかを検証した．すなわち先端切削関与角 $\theta^*=3$ の場合，図2中の6個の点により示した F_{xyz} の10N毎の等高線上の最大切りくず厚さ t_m と切削円弧長Lの組合せを任意に選び，これによる直線切削実験を行って切削抵抗値を測定する．幾何的な条件である t_m とLから R_d と f_z を算出するには，式(1)～(3)を用いる．その測定結果を図4に示す．他の実験条件は t_m とLに応じて R_d と f_z を変更する以外は標準切削条件と同じとした．図4によれば，切削抵抗の測定値と予測値の誤差は4％以内となっており，十分な精度で切削抵抗値 F_{xyz} の一定化が達成されていることがわかる．

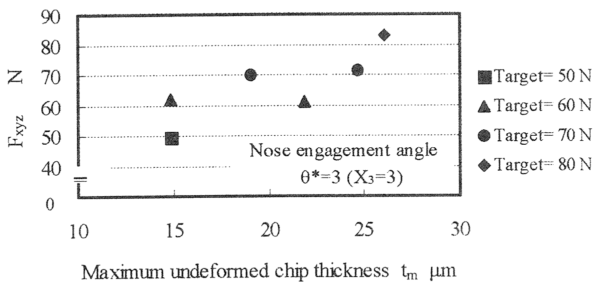

Fig. 4 Measured F_{xyz} for constant cutting force (straight cutting)

5.3 傾斜面の切削における切削抵抗の予測（直線切削）

次に，得られた切削抵抗予測式を用いて，ボールエンドミルによる傾斜面上のピックフィード加工（直線切削）における切削抵抗の予測が可能かどうか検討する．傾斜面に対し上向きと下向きのボールエンドミルによるピックフィード加工における幾何的な干渉関係を図5に示す．図5中の軸方向切り込み量（除去部分の軸方向厚さ）A_d，径方向切り込み量（ピックフィード量）R_d が一定であれば，単位時間当たりに除去される体積は傾斜角 θ_1 によらず常に一定である．ただし工具の送り方向は紙面に対し垂直な方向とする．同図中の θ_2，θ_3 はボールエンドミルの切削に関与する切れ刃部の工具中心軸からの角度であり，これらは傾斜角 θ_1 や軸方向切り込み量 A_d，径方向切り込み量 R_d から幾何的に求めることができる．

図6は原点($t_m^*=0$， $L^*=0$)を通る断面によって標準切削条件での応答曲面を表示したものである。

いま標準切削条件（直線切削）により傾斜面上のピックフィード加工を行うとき，図5中のθ_1，θ_2，θ_3が$\theta_1 < \theta_3 < \theta_2$なる関係であるとするとそれに対応する先端切削関与角θ^*の値から切削抵抗予測式によりF_{xyz}が図6中のF_1，F_2，F_3のように求められる．図5において切削に関与する切れ刃に対応した先端切削関与角θ^*の範囲について，図5(a)では$\theta_1 < \theta^* < \theta_2$，図5(b)では$-\theta_1 < \theta^* < \theta_3$のように近似することができる．いま標準切削条件により一定の径方向切り込み量R_dで直線切削を行うことから，図5(a)(b)の傾斜面のピックフィード加工における切削抵抗F_{xyz}の予測値$F_{xyz\ up}$，$F_{xyz\ down}$は，図6による切削抵抗の予測値を用いて式(11)～(12)のように近似することができる．すなわちこれは先端切削関与角θ^*の範囲が傾斜角と工具の加工の向きによって変化することにより，予測式から得られるF_{xyz}の減算ないし加算によって傾斜面上での予測値F_{xyz}が表されることを示している．

$$F_{xyz\ up} = F_2 - F_1 \tag{11}$$

$$F_{xyz\ down} = F_1 + F_3 \tag{12}$$

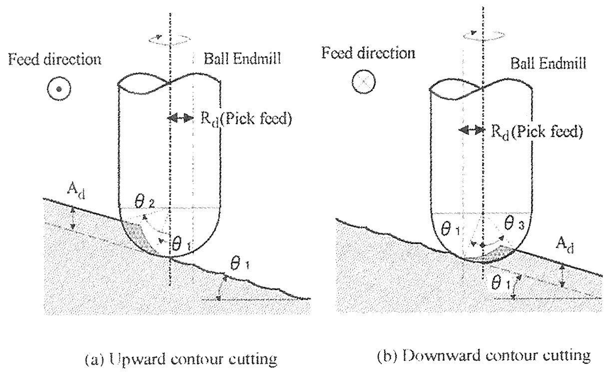

Fig. 5 Geometrical relations of nose engagement angle θ on inclined surfaces in pick feed cutting by ball end mill

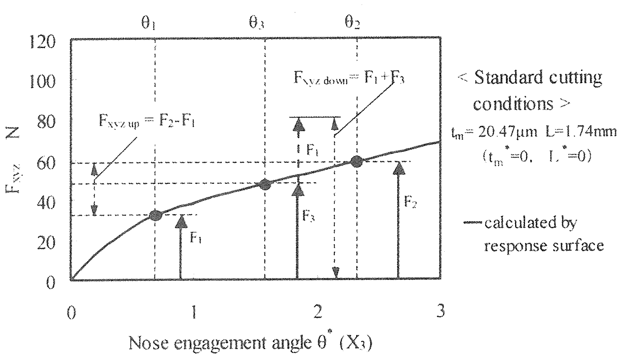

Fig.6 Estimated cutting forces $F_{xyz\ up}$ and $F_{xyz\ down}$

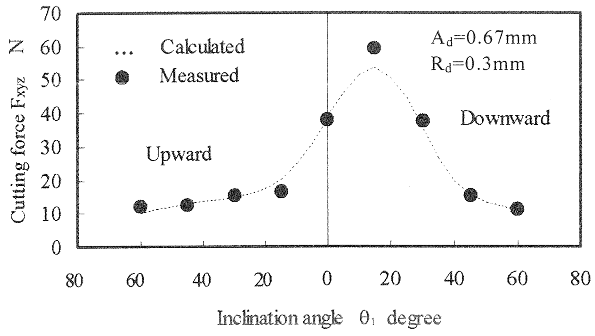

Fig. 7 The comparison between estimated and measured cutting forces F_{xyz} with different inclination angle

この方法によって求めた，さまざまな傾斜角における標準切削条件による切削抵抗の予測値と実測値を比較して図7に示す．これによれば傾斜面上のピックフィード加工(直線切削)については両者の差は最大でも10%以下であり，実用上あまり問題ない誤差で切削抵抗を予測することができている．

また図7においては，どの条件でも単位時間当たりに切削される体積は常に一定であることから，本予測式による手法が，刃先の切削に関与する場所で切削抵抗が変化する問題にも十分対応できていることがわかる．

5.4 予測式による切削抵抗の一定化制御（円弧切削）

次に，得られた切削抵抗予測式を用いて，曲線切削における切削抵抗の制御が可能かどうかを検討する．なお本実験では，直線切削と同様に，軸方向切り込み量A_dが一定のもとでは変形前の最大切りくず厚さt_mと切削円弧長Lによって切削抵抗が決定されるものとして，以下の切削抵抗の制御実験を行い，本予測式の一般的な有効性を確認することとする．すなわち直線切削での切削抵抗値F_{xyz}と常に等しくなるように，半径の異なる内側円弧部の切削における，エンドミル中心での1刃あたり送り量f_zを予測式に基づいて計算し，円弧切削による切削抵抗の測定を行って，ある切削抵抗の目標値について直線・円弧切削によらず，その一定化制御が可能であるかを確認する．

実際に水平面上のピックフィード加工（内側円弧切削）について先端切削関与角θ^*=3（軸方向切り込み量A_d=5.0mm）の場合に，円弧中心を固定し内側円弧の半径を変えて行った実験結果を図8に示す．基準となる切削抵抗値（F_{xyz}=68.8N）と等しくなるよう変形前の最大切りくず厚さt_mと切削円弧長Lを計算し，対応するエンドミル中心の送り量f_zを与えた．

図8中の点線は基準となる直線切削での送り量（fz = 0.06mm/tooth）と切削抵抗 F_{xyz} の値（F_{xyz}=68.8 N）を示す．実験条件は円弧切削で送り量 f_z を変更する以外は標準切削条件と同じとした．これによれば半径比 K_r（被削材円弧半径/工具半径）が 2 とかなり小さな内側円弧部を含む切削について 6%以内の誤差で切削抵抗を直線切削と等しくすることができている．これにより，前述の仮定がボールエンドミルについても実用上あまり問題なく受け入れられることがわかる．

図9は図8について，その加工条件における一刃当たりの切削体積を計算し，単位時間当たりの切削体積を一定とする手法の場合と比較したものである．後者の体積を1としたときの体積比Kv として，半径比 K_r に対してプロットしたものである．これより半径比 $K_r \geqq 3.0$ の場合は，半径比 K_r が大きくなるほど（直線切削に近づくほど）単位時間当たりの切削体積を一定とする手法の場合に近づくことがわかる．

しかし半径比 $K_r \leqq 3.0$ の場合は，半径比 K_r が小さくなるほど急激に体積比Kv が減少することがわかる．すなわち半径比 K_r が小さい内側円弧部では，切削抵抗を直線切削と等しくしようとして送り量 f_z を減少させると変形前の切りくず厚さ t_m が幾何的に著しく減少する切削条件となる．そのため，切りくずの寸法効果による非線形な効果が顕著に現れることにより，発生する切削抵抗の特性が変化するものと考えられる．すなわち半径比 $K_r \leqq 3.0$ では，半径比 K_r の減少とともに，切りくずが薄くなる微小切削となり，比切削抵抗が通常の切削の場合に比べて非常に大きくなっている．

以上の結果より，ボールエンドミル切削加工で問題となる切りくずが薄くなる微小切削の場合にも，本予測式により切削抵抗の予測と制御が可能となることがわかる．

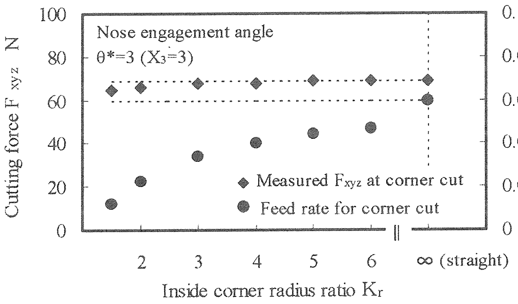

Fig. 8 Cutting forces at concave contour

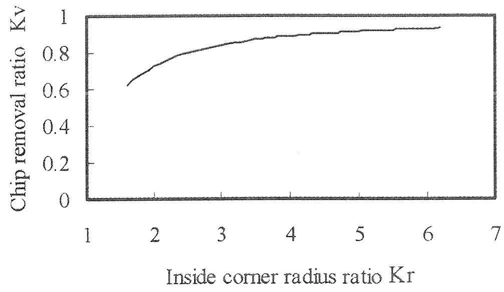

Fig. 9 Change of chip removal ratio Kv with increasing Kr

6. おわりに

高硬度材のボールエンドミルによる切削加工について，切削抵抗予測式の構築およびその予測と制御について研究を行い，次の結果を得た．

(1) 応答曲面法を利用して，ボールエンドミルについて変形前の最大切りくず厚さ t_m，切削円弧長 L および先端切削関与角 θ の3つをパラメータとする切削抵抗の xyz 成分の合力の時間平均値 F_{xyz} の 予測のための数学モデルを構築した．

(2) 水平面上のピックフィード加工（直線および内側円弧切削）について，同モデルによる切削抵抗の予測と制御を試みた結果，それぞれ 4%，6%以内の誤差で F_{xyz} の一定化を達成できた．

(3) 傾斜面上のピックフィード加工（直線切削）について，先端切削関与角 θ の干渉区間についての幾何的な近似手法に基づき，同モデルによる切削抵抗の予測を試みた結果，最大でも 10%以内の誤差で F_{xyz} の予測ができた．

(4) ボールエンドミル切削加工で問題となる，刃先の場所ごとに切削特性が変化する問題や，切りくずが薄くなる微小切削の場合にも本予測式による切削抵抗の予測と制御が可能であることがわかった．

追記

本実験に使用した高速加工機（MC）は，日本自転車振興会の補助金を受けて設置したものである

参 考 文 献

1) 山田保之，青木太一，田中裕介，脇平浩一郎：コーティッド超硬工具による高硬度材の切削，日本機械学会論文集（C編），**60**, 577　(1994) 2906.
2) G.Yucesan,Y.Altintas：Prediction of Ball End Milling Forces, Trans.　ASME, 118, 2, (1996) 95.
3) 大塚裕俊，垣野義昭，松原　厚，中川平三郎，廣垣俊樹：焼入鋼のエンドミル加工に関する研究（第 2 報），精密工学会誌，67，8 (2001) 1294.
4) J.A.Cornell: The Basic References in Quality Contorol, Vol.8, How to Apply Response Surface Methodology, American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee, (1990) 51.
5) 轟　章：応答曲面法による非線形問題の最適設計入門資料，日本機械学会講習会，(1999) 9.