

金型の加工誤差補償システムの開発 (第3報)

2 工具振動を考慮した加工面形状の予測

西川隆敏, 菊田敬一, 古本浩章, 山下弘之, 門藤至宏*, 中濱久雄*

Development of compensation system for machining error of die and mold (3rd Report)

Prediction of machined surface profile by considering tool vibration

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi, FURUMOTO Hiroaki, YAMASHITA Hiroyuki,
MONDOU Munehiro* and NAKAHAMA Hisao*

Dynamic cutting model which predicts surface profile in ball end milling was presented. The model included the static cutting force related to uncut chip thickness and the process damping force due to contact between cutting edge and workpiece. The damping force coefficients were identified by minimizing the sum of squared deviations between the calculated tool vibrations and the measured ones. The predicted machined surface profiles were in good agreement with the results of cutting experiments of inclined surface with a long ball end mill under wide range of rotating speed.

キーワード: ボールエンドミル, 加工面形状, 切削力, 工具振動

1 結 言

金型の製作に使用されるボールエンドミルは一般に剛性が小さく, 工具たわみに起因する加工誤差が大きくなりやすい。そのため, 金型加工後の再加工や熟練者による修正に多大な時間を要し, リードタイム短縮, コスト低減のネックとなっている。

本研究では, 加工前に加工誤差を予測して, これを補償した工具経路を作成することにより, 高精度な加工を実現することを目的としている。これまでに, 工具経路と被削物の初期形状から, 切削力¹⁾と工具たわみを予測して工具経路を修正するシステムのプロトタイプを開発した²⁾。このシステムの特徴は, 工具の動たわみに起因する加工誤差を, グラフィックスハードウェアの描画機能を用いて高速に予測できることである。

切削力やたわみの予測モデルは従来からいくつか提案されており³⁾, 基本的な考え方は次のとおり大別される。

- ①剛体を仮定した切削力予測—静たわみ予測
- ②剛体を仮定した切削力予測—動たわみ予測
- ③動たわみによる切取り厚さの変動を考慮した切削力・たわみ予測

通常, 誤差予測には①のモデルがよく用いられるが, 実際の金型の仕上げ加工条件 (高回転, 切削量小) では, 切削力がパルス状に作用するため, 動たわみを考慮する

*広島県立総合技術研究所東部工業技術センター

必要がある。前報²⁾では, ②の動たわみモデルを用いた誤差の補償により, 直径 20mm の工具による円筒面加工において, 加工誤差が低減できることを示した。しかし, この方法は工具を剛体と仮定して切削力を計算するため, 工具たわみによる切取り厚さへの影響が大きい条件では予測精度が低下する問題がある。③はこの影響を考慮するものであり, これまで主に再生びびりの予測に用いられてきた。このモデルでは, 切削中の減衰力 (プロセスダンピング) の取り扱いが困難であることが知られている。

本報では, 高精度な誤差予測を行うことを目的に, 切取り厚さの変動や減衰力を考慮して加工面形状を予測する切削シミュレーションモデルを開発したので報告する。本モデルは, 工具切れ刃と被削物形状の干渉状態から減衰力を含む切削力を予測し, 工具たわみを考慮した切れ刃回転軌跡により被削物形状を更新する。減衰力については2つの係数を用いて単純化した式でモデル化し, この係数を切削中の工具振動測定結果から決定した。そして, 本モデルを小径工具の傾斜面加工に適用し, 実験結果との比較を行った。

2 加工面形状の予測

開発したシミュレーションモデルのフローを図1に示す。まず, 被削物の初期形状, 初期値 (工具位置, 回転角, たわみ, 速度), 切削条件 (回転数, 送り速度ベク

トル)を設定する。被削物形状は XY 平面格子に高さ情報をもつ Z-map 構造とし、近傍の3点を平面で張った多面体として表現した。

切削力は、図2に示すように工具切れ刃を微小刃の集合としてモデル化し、切取り厚さに依存する静的切削力と振動速度により発生する力(減衰力)を考慮する。

各微小刃に作用する静的切削力 $dFts$, $dFrs$, $dFas$ は、切削力係数 Kte , Ktc , Kre , Krc , Kae , Kac と、切取り厚さ at , 切削幅 wt を用いて、次式により算出する。

$$\begin{aligned} dFts &= (Kte + Ktc \cdot at) \cdot wt \\ dFrs &= (Kre + Krc \cdot at) \cdot wt \quad \dots (1) \\ dFas &= (Kae + Kac \cdot at) \cdot wt \end{aligned}$$

剛体モデルとした前報²⁾では、切取り厚さ at は、切れ刃の回転軌跡を球面で近似して算出した。本モデルでは、現在までに加工された加工面形状と、現在の工具たわみを考慮して at を正確に求める。具体的には、図3に示すように、たわみを考慮して求めた工具中心 O と微小刃とを結んだ直線と、被削物形状との交点を求めることにより算出する。

減衰力は、図4に示すとおり、工具振動による瞬間的な切削方向の変化により、刃先に作用する力が発生することを考慮する。ここでは、工具振動が XY 平面内であることを考慮し、XY 平面内の減衰力 $dFtd$, $dFrd$ を、工具軸方向切削幅と切削方向の変化角度(公称の切削方向と瞬間的な切削方向とのなす角度) γ に比例する以下の単純な式でモデル化した。

$$\begin{aligned} dFtd &= Ct \cdot wt \cdot \sin q \cdot \gamma \\ dFrd &= Cr \cdot wt \cdot \sin q \cdot \gamma \quad \dots (2) \\ \gamma &= \tan^{-1} \{ vr / (vc + vt) \} \end{aligned}$$

ここで、 Ct , Cr は減衰力係数、 q は微小刃の位置角、 vr は切削方向に垂直な方向の振動速度、 vc は切削速度、 vt は切削方向の振動速度である。

そして、静的切削力と減衰力の和を微小刃に作用する微小切削力とし、この微小切削力を刃の位置を考慮して X, Y, Z 方向に変換する。これを、全ての微小刃について積算することにより、ある瞬間($t=t_i$)での切削3分力 $Fx(t_i)$, $Fy(t_i)$, $Fz(t_i)$ を求める。

次に、微小時間経過後 ($t_{i+1} = t_i + \Delta t$) の工具たわみ $Dx(t_{i+1})$, $Dy(t_{i+1})$ と工具速度 $Vx(t_{i+1})$, $Vy(t_{i+1})$ を、次式の運動方程式から求める。計算には4次のルンゲ・クッタ法を用いた。

$$\begin{aligned} Mx \frac{dVx}{dt} + CxVx + KxDx &= Fx \quad \dots (3) \\ My \frac{dVy}{dt} + CyVy + KyDy &= Fy \end{aligned}$$

ここで、 M , C , K はモーダルパラメータであり、機

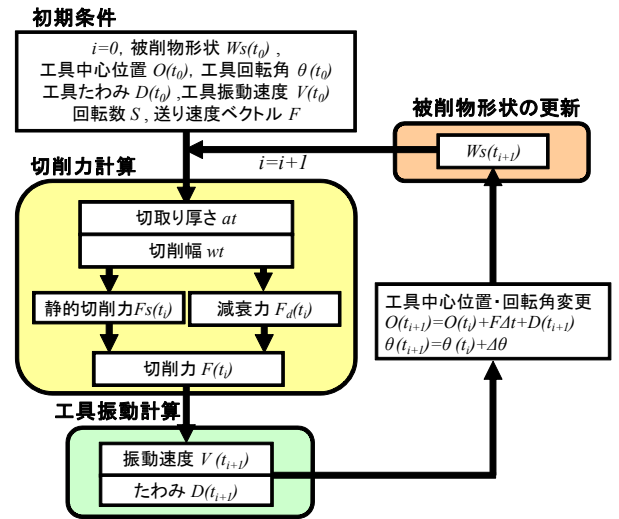


図1 開発した切削シミュレーションモデルのフロー

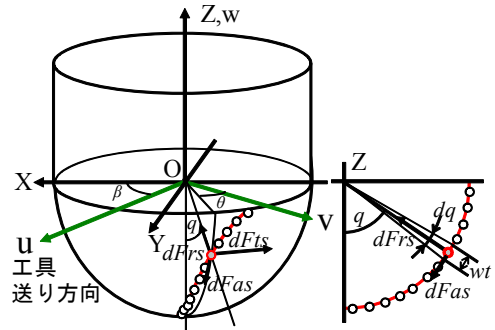


図2 微小切れ刃に作用する静的切削力

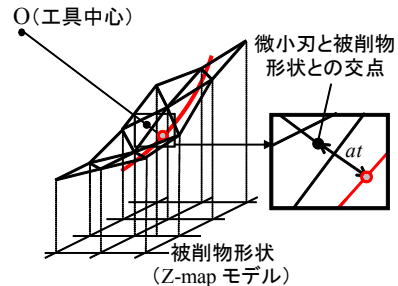


図3 切取り厚さ at の算出方法

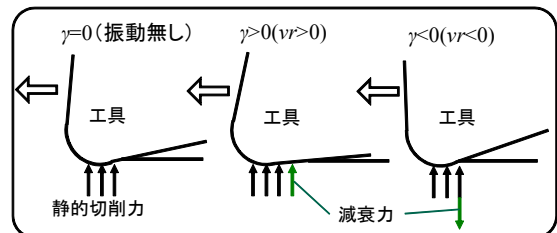
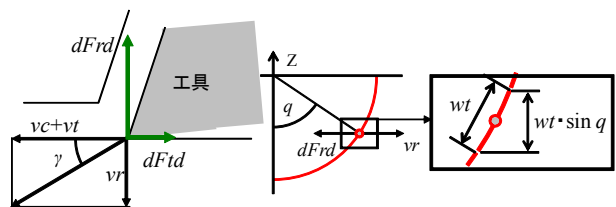


図4 振動速度により発生する減衰力

械に工具を取り付けた状態で工具の R 中心部をインパルス加振し、応答をレーザドップラー振動計で測定した結果から算出する。

次に、工具たわみと工具回転角、送り速度ベクトルを考慮して刃の位置を求め、**図5**に示すとおり、現在より微小時間前と現在の刃との間で形成される面により被削物形状の高さ情報を更新する。これを微小な時間ステップで繰り返すことにより、工具振動を考慮した加工面形状の予測が可能となる。

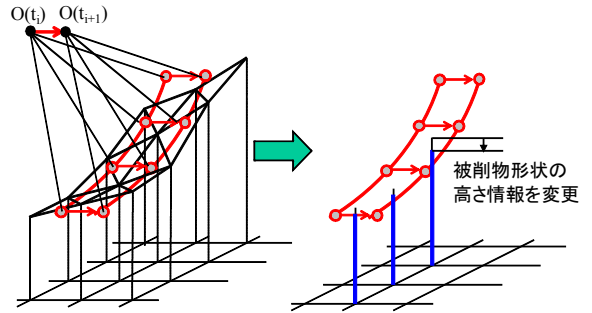


図5 被削物形状の更新

3 傾斜面加工への適用

3.1 切削係数の決定

本予測モデルでは、予め切削力係数と減衰力係数を決定しておく必要がある。これらの係数は主に工具と被削材との組み合わせで決まるもので、以下の手順で求めた。

まず、立型マシニングセンタ (OKK製PCV-40) を用い、直径6 mm、2枚刃の TiAlN コーティング超硬ソリッドボールエンドミルで**図6**に示す被削材 (材質: SKD61, 硬さ HRC45) の傾斜面を加工した。切削条件は**表1**の3条件として、加工中の切削3分力と、工具先端から 22mm の位置の工具シャンク部の振動速度を、圧電型動力計とレーザドップラー振動計で測定した。また、工具をインパルス加振し、**表2**に示すモーダルパラメータを得た。

そして、工具振動速度の影響の無視できる、工具突き出し長さの小さい条件 (実験①) の切削力測定値を用いて、切削力係数を決定した¹⁾。次に、工具突き出し長さの大きい条件 (実験②) の測定結果を用いて、減衰力係

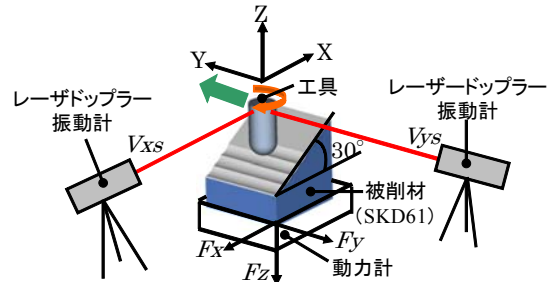


図6 実験方法

表1 切削係数決定用の切削条件

実験番号	①	②	③
L(工具突き出し長さ)/D(工具径)	4		9
回転数 min^{-1}	5000	9500	4750
切込み(加工面法線方向) mm	0.35		0.1
送り mm/刃		0.15	
ピッチフィード mm		0.2	

表2 工具のモーダルパラメータ

	L/D=4	L/D=9
$Mx, My \times 10^{-3} \text{kg}$	3.39, 3.30	5.36, 5.18
$Cx, Cy \text{ Ns/m}$	1.81, 1.95	0.918, 0.706
$Kx, Ky \times 10^5 \text{N/m}$	35.1, 33.7	7.39, 7.12

表3 切削力係数・減衰力係数

$Kte, Kre, Kae \text{ N/mm}$	25.56, 26.71, 1.08
$Ktc, Krc, Kac \text{ N/mm}^2$	2391.5, 1258.7, 277.7
$Ct, Cr \text{ N/mm}$	24.77, 123.6

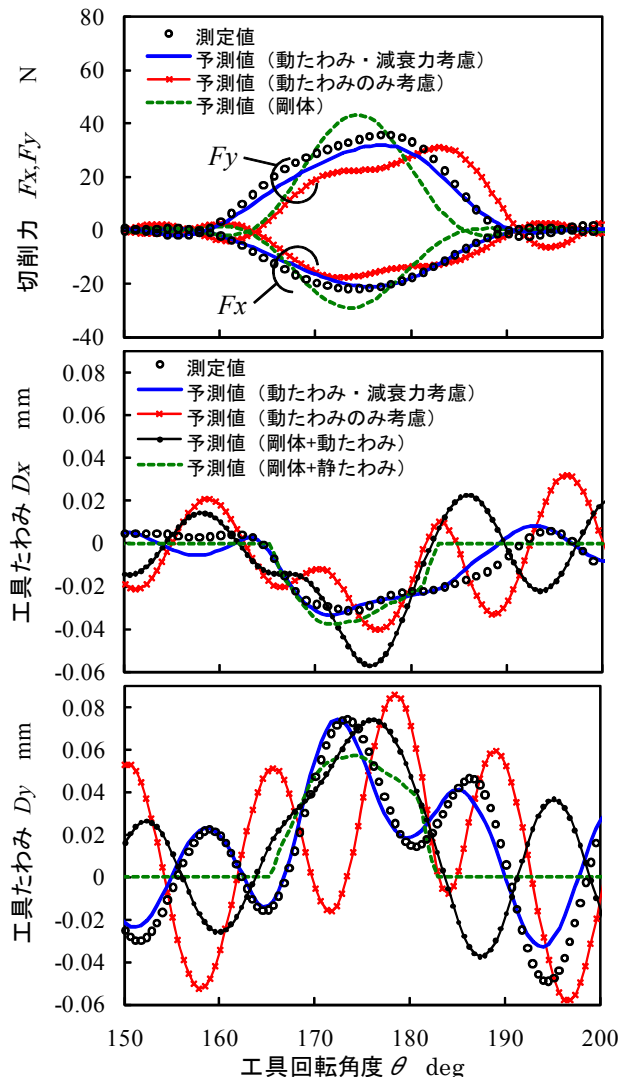


図7 切削力とたわみの予測と実測の比較 (実験③)

数を求めた。具体的には、工具シャンク部の振動速度の予測値と測定値との誤差の2乗和を最小化するように決定した。表3に求めた係数の値を示す。

この値を用いて実験③の予測を行った結果を図7に示す。この図は1枚の工具切れ刃が被削物を削り取る際の切削力・たわみ波形である。予測は、動たわみ・減衰力を考慮したモデル、動たわみのみを考慮したモデル ($C_t, C_r=0$)、剛体を仮定した動たわみモデル、剛体を仮定した静たわみモデルの4つの方法で行った。切削力は、予測値、測定値とも2kHz以上の成分をFFTによりカットしたものを表示している。たわみの測定値は、工具シャンク部の振動速度を積分して、先端部のたわみに変換したものである。工具たわみと減衰力を考慮することにより、切削中の工具挙動を精度良く予測できることがわかる。

3.2 加工面形状の検証

広範な回転数での予測モデルの有効性を確認するため、表4に示す切削条件にて、前項と同様の傾斜面加工を行った。なお、切削中の切込みを変動させるために、まず、図8に示すように切削試験の方向と直角方向に前加工を行った。そして、切削試験時の切込みを0.1~0.35mmに変化させた。工作機械は横型マシニングセンタ (JTEKT(株)製 UH55) を使用し、工具のL/Dは9、工具種類や被削材は前項と同じものを用い、実験は2回行った。加工面の送り方向には切込みの違いにより、図9下段に示すようなうねりが残る。これを評価するため形状測定機を用いて加工面を測定し、送り方向断面曲線の

最大高さを求めた。

予測は、表3の係数と表5のモーダルパラメータを用い、前項と同様に4つのモデルで行った。図9上段に加工面の最大高さ、下段に代表的な条件での加工面形状の比較を示す。工具たわみと減衰力を考慮したモデルでは、回転数の広い範囲で測定値と良く一致している。特に15,000min⁻¹以下で、他のモデルよりも予測精度が高いことがわかる。これは、低回転では減衰力の影響が大きくなることや、切削プロセスに対して相対的に工具振動周期が短くなり、たわみの切り取り厚さへの影響が大きくなることなどが原因であると考えられる。

4 結 言

- 1) 工具たわみによる切り取り厚さの変動と工具振動速度により発生する減衰力を考慮した加工面形状の予測モデルを開発した。
- 2) 予測に必要な減衰力係数を切削中の工具シャンク部の振動速度の測定値を用いて決定した。
- 3) 開発した予測モデルを小径工具による傾斜面加工へ適用し、広範な回転数において加工面形状を精度良く予測できることを示した。

文 献

- 1) 菊田他：広島県西部工技研究報告，51(2008)，26
- 2) 西川他：広島県西部工技研究報告，52(2009)，40
- 3) S. Smith and J. Tlustý: J. Eng. for Industry, 113 (1991), 169

表4 切削条件

回転数	min ⁻¹	2500~50000
切込み(加工面法線方向)	mm	0.1~0.35(変動)
送り	mm/刃	0.1
ピックフィード	mm	0.2

表5 工具のモーダルパラメータ

$[M_x], [M_y] \times 10^{-3} \text{kg}$	[8.36, 14.31], [8.49, 14.35]
$[C_x], [C_y] \text{Ns/m}$	[7.28, 12.38], [7.30, 8.74]
$[K_x], [K_y] \times 10^5 \text{N/m}$	[9.59, 22.51], [9.40, 22.29]

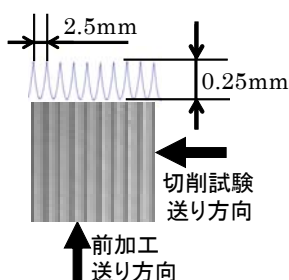


図8 前加工後の加工面形状

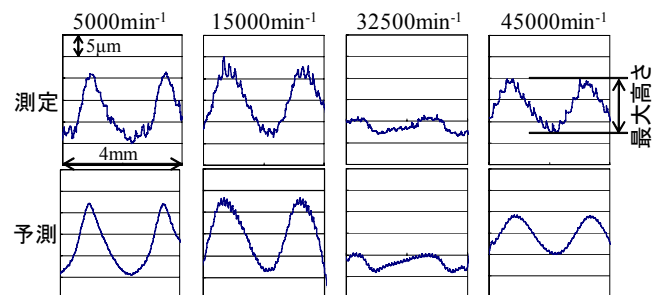
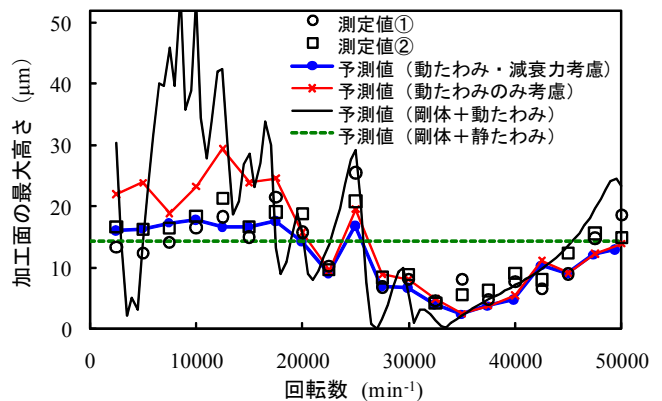


図9 加工面最大高さの予測と実測の比較