

プロセスダンピングの影響を考慮した5軸ボールエンドミル切削の時間領域シミュレーション

名古屋大学 ○塚本有美, ◎鈴木教和, 社本英二, DMG 森精機株式会社 入野成広, 今別府泰宏

要 旨

5軸ボールエンドミル加工を対象とした、時間領域シミュレータの開発を行った。ボールエンドミル加工では、底刃付近で切削速度が低下するため、プロセスダンピングが発現しやすく、これがびびり振動の安定性に大きく影響する。そこで、プロセスダンピングを考慮する新しいシミュレーション手法を開発し、工具姿勢とびびり安定性の関係を分析した。従来の解析手法および実験結果との比較を通じて、提案手法の有効性を検討した。

1. 研究背景及び目的

5軸加工機の普及に伴い、ボールエンドミルによる自由曲面の加工の需要が増加している。加工効率を向上するには適切な切削条件の選定が重要であり、これを目的とした市販のシミュレーションツールが広く利用されつつある。特に、高能率切削を実現するには、びびり振動の推定技術が必要不可欠である。しかし、5軸ボールエンドミル加工においては、工具の姿勢の影響を考慮したびびり振動の解析技術が確立されておらず、その推定精度の低さが問題となっている¹⁾。本研究では、有限振幅の振動の影響を考慮することで、現実の現象の推定を可能とする新しい高精度解析モデルを考案し、これを適用した時間領域シミュレーション技術を開発する。

2. 5軸ボールエンドミル切削プロセスのモデル化

まず、5軸切削機構をモデル化する。工具を基準とした工具座標系(0-xyz)、および被削材を基準とした加工面座標系(0-x'y'z')を定義し、工具傾斜角(χ, ψ)を用いて図1のように相対姿勢を表す。工具送り方向はx'軸方向とし、工具半径をRとする。工具の回転軸はz軸と一致する。刃先位置は回転角(θ, φ)で定義し、回転軸に垂直な接線方向をt、半径方向をr、それぞれに垂直な方向をaとする。

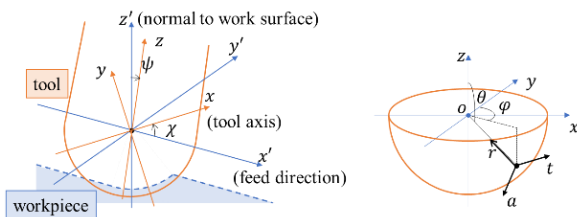


Fig. 1 Coordinate systems of workpiece and tool

切取り厚さhは、名目切取り厚さ h_n と振動に起因する切取り厚さ変動 Δh の和となる。切削力Fの推定にはメカニスティックモデルを採用し、微小切れ刃で発生する切削力dFを、比切削抵抗 K_c とエッジフォース係数 K_e を用い次式で表す。

$$F = \int dF = \int (K_c h + K_e) R d\theta \quad (1)$$

また、工具および被削材の変位uについて、以下の2自由度系の運動方程式を採用し、4次のルンゲ・クッタ法を用いる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (2)$$

3. プロセスダンピングモデル

次に、プロセスダンピングのモデル化を行う。逃げ面と被削材の接触において塑性変形のみが生じると仮定し、プロセスダ

ンピング力が逃げ面接触長さ l_n に比例するモデルを採用する。見かけの切削方向に対して工具の相対運動軌跡がなす角を軌道角 α と定義する。ボールエンドミルの軌道速度vは次式で表される。

$$v = (\dot{u}_t - \dot{u}_w) + R\omega \sin\theta \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ 0 \end{pmatrix} + v_c \quad (3)$$

右辺第1項は振動による相対速度であり、工具と被削材の振動速度の差によって表される。また、第2項は工具回転による速度、第3項は工具送りによる速度である。各微小切れ刃において、刃先方向単位ベクトル $e_{y''}$ 、半径方向単位ベクトル $e_{z''}$ 、およびボール面に平行かつ工具刃先に垂直な単位ベクトル $e_{x''}$ を定義する。軌道角 α を次式で計算することができる。

$$\alpha_e = \tan^{-1} \frac{v \cdot e_{z''}}{v \cdot e_{x''}} \quad (4)$$

ここで、軌道角 α が逃げ角 γ より大きくなる時、工具の逃げ面と被削材が接触しプロセスダンピングが生じると考えられる。本研究では、工具の逃げ面と被削材が接触している累積時間から逃げ面接触長さ l_n を推定し、各微小切れ刃における垂直方向及び摩擦方向のプロセスダンピング力 dF_{pdr} 、 dF_{pdt} は圧縮応力 P_{pdr} 、せん断応力 P_{pdt} 、及び切削幅aを用いて次式から求める。

$$dF_{pdr} = a l_n P_{pdr} e_{z''} \quad (5)$$

$$dF_{pdt} = a l_n P_{pdt} \frac{v - (v \cdot e_{z''}) e_{z''}}{|v - (v \cdot e_{z''}) e_{z''}|} \quad (6)$$

切れ刃全体が発生するプロセスダンピング力は、各微小切れ刃で発生するプロセスダンピング力の総和として求められる。

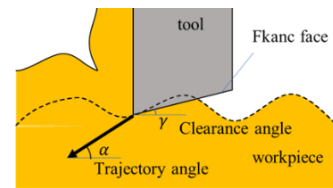


Fig. 2 Cutting process with chatter vibration and process damping

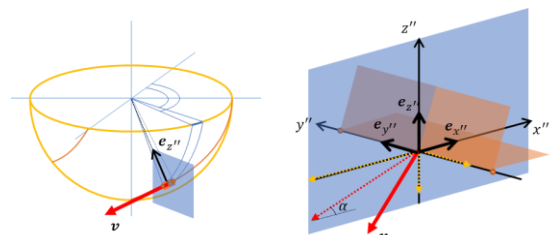


Fig. 3 Schematic illustration of vectors in ball end milling

4. びびり振動安定解析と実験結果

炭素鋼の切削実験を行い、前述したシミュレーションとの比較を行った。主な実験条件およびインパルス試験により求めた

各構造の動特性パラメータを表1に示す。条件1では被削材側が工具に対して十分剛性が高い構造を採用した。条件2では被削材側のy軸方向の剛性が突出して低くなるよう、平行ばね構造を利用して被削材を固定した。また、びびり振動が発生しない条件で切削実験を実施し、計測された切削力とシミュレーションを比較することにより、表2に示す切削プロセスパラメータを同定した。なお、シミュレーションにおけるびびり振動の安定性評価指標として、切り厚変動の最大値 Δh_{max} と最大名目切り厚 h_n の比 $\Delta h_{max}/h_{nmax}$ が閾値を超えるまでの時間（以降、びびり成長時間と呼ぶ）を用いる。

Table 1 Cutting conditions and modal parameters

	Condition 1	Condition 2
Depth of cut a_p, a_e [mm]	3, 3	3, 2
Tilt angle ψ, χ [deg]	30, 0-360	30, 0-360
Spindle speed n [min ⁻¹]	4000	4000
Cutting style	Down cut	Down cut
Tool radius R [mm]	5	7
Number of flutes	2	2
Natural Frequency f_n [Hz] (x, y)	(Tool) 3342, 3383	(Workpiece) 975.0, 362.5
Mass m_x, m_y [kg]	0.04, 0.04	0.74, 0.63
Damping Ratio ζ_x, ζ_y	0.014, 0.021	0.022, 0.034

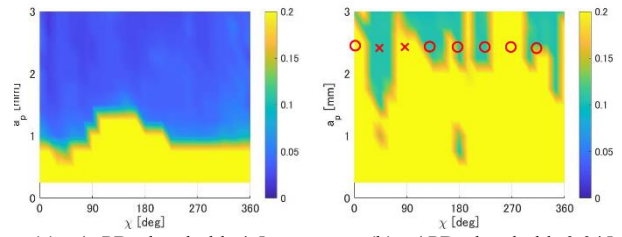
Table 2 Identified cutting parameters

Shear strength τ_s [MPa]	1025.55
Friction angle β [deg]	28.58
Specific edge force K_e [kN/m] (t, a, r)	80, 24, 92

条件1について、被削材側の構造を剛体として時間領域シミュレーションを実施し、工具傾斜角 χ と切込み深さ a_p に対する安定性を分析した。図4(a)はプロセスダンピングを考慮せずに閾値を4.5としてびびり成長時間を求めた結果である。図4(b)は $P_{pdr} = 1000$ [MPa], $P_{pdt} = 100$ [MPa], 閾値を0.045と設定した場合の結果を示している。図中の青い領域は不安定な条件を示している。また、実験において主軸側構造固定部に加速度計を配置して加速度を計測し、得られた振動を分析して、強制振動でない成分の振幅の最大値が5nm以上の場合にびびり振動が発生したとみなしxで示し、5nm以下の場合には安定であるとみなしてoで示した。

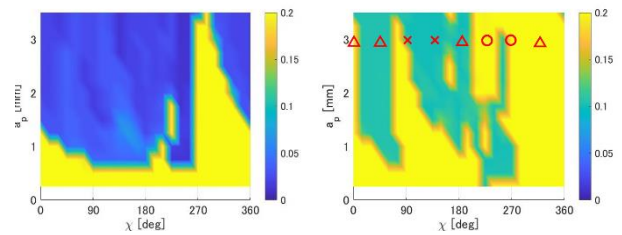
図4(a)から、プロセスダンピングを考慮しない場合、傾斜角 χ が135度付近で安定性が高く、それ以外の領域で安定性が低い。一方、図4(b)においては閾値が1/100であるにもかかわらずびびり成長時間が増加しており、全体的に安定化することが分かる。特に、270度付近で安定性が高い。以上の結果から、プロセスダンピングの考慮の有無によって傾斜角 χ が270度付近では安定性推定結果が真逆の傾向を示すことが分かる。実験結果は、図4(b)に示す結果と比較的傾向が一致している。

この違いは、モードカップリングとプロセスダンピングの影響に依存する。条件1では、傾斜角 χ が270度付近のときに刃先の回転中心が常に被削材に接触することになる。このような条件では、切れ刃の広い範囲でエンゲージ角が大きくなり、モードカップリングが生じやすくなってびびり安定性が低下すると考えられる。一方で、回転中心付近では切削速度が低下するため、プロセスダンピングが発現しやすい特性を併せ持つ。この影響でプロセスダンピングを考慮しない場合は安定性が低下し、考慮することで安定化したと考えられる。以上より、提案モデルによりシミュレーションの精度が向上することがわかる。



(a) w/o PD; threshold=4.5 (b) w/ PD; threshold=0.045
Fig. 4 Estimated chatter growth time and experimental results (Condition 1)

次に、条件2について同様のシミュレーションを実施した。ここでは、工具を剛体として扱い、被削材のy方向剛性がx方向に比べて低いため、y方向の振動について分析した。図5(a)にプロセスダンピングを考慮せずに閾値を2.5としてびびり成長時間を求めた結果を示す。図5(b)は材料強度を $P_{pdr} = 800$ [MPa], $P_{pdt} = 80$ [MPa], 閾値を0.25と設定した場合の結果を示している。合わせて実験中に計測された振動について、強制振動でない成分の振幅の最大値が20μm以上の場合にびびり振動が発生したとみなしxで示し、また強制振動が20μm以上の場合について△で示した。強制振動、びびり振動ともに20μm以下の場合にはoで示した。



(a) w/o PD; threshold=2.5 (b) w/ PD; threshold=0.25
Fig. 5 Estimated chatter growth time and experimental results (Condition 2)

図5(a)と(b)を比較すると、プロセスダンピングの影響を考慮することによって χ が210度から270度付近で a_p が2mm以上の領域において安定性が高くなることと分かる。前述した通り、傾斜角 χ が225度付近で工具回転中心が常に被削材に接触して、切削速度が低下しプロセスダンピングが発現しやすくなるためであると考えられる。実験結果においても同範囲ではびびり振動、強制振動とも抑制されており、プロセスダンピングの影響がシミュレーションの結果に反映されている。なお、 χ が45度付近では実験中には強制振動が発生している、シミュレーションとはやや異なる結果が得られているが、その原因は不明である。今後、さらに詳細な比較および検証を実施する予定である。

5. 結言

プロセスダンピングを考慮したボールエンドミルの5軸加工プロセスにおける動的な時間領域シミュレーション技術を開発した。このシミュレーションによってプロセスダンピングがびびり振動の安定性に影響を与えていることが確認できた。また、実験検証を通し、プロセスダンピングを考慮することでより高精度なシミュレーションを行い得ることを確認した。

参考文献

竹内裕也, 他; 2020年度精密工学会春季大会 第27回学生会員卒業研究発表講演会講演論文集, (2020) pp.51-52