

## 逃げ面テクスチャ工具によるびびり抑制効果の時間領域シミュレーション

中央大学 ○横川優弥, ©鈴木教和 名古屋大学 藤中翼

## 要旨

プロセスダンピングを積極的に利用してびびり振動を抑制する逃げ面テクスチャ技術が提案されている。本研究では、逃げ面テクスチャの効果を考慮することが可能な新しい時間領域シミュレーション技術を開発した。有限要素法解析を用いてプロセスダンピング係数を推定し、これを考慮して端面旋削シミュレーションを行った。検証実験の結果、提案モデルにより逃げ面テクスチャ工具のびびり抑制効果を推定し得ることを確認した。

## 1. 緒言

切削加工におけるびびり振動は生産効率の低下を引き起こす課題である。びびり振動を回避する手法の一つとしてプロセスダンピングという現象を積極的に利用する“逃げ面テクスチャ工具”を用いる方法が提案されている<sup>1)</sup>。本研究では、逃げ面テクスチャの影響を定量化し、プロセスダンピングの影響を推定可能なびびり振動の時間領域シミュレーション技術を開発する。検証実験を通じて、通常工具と逃げ面テクスチャ工具の振動抑制性能を比較するとともに、提案手法の妥当性と課題を明らかにする。

## 2. 有限要素法解析によるプロセスダンピング力の推定

切削動力計により計測された切削力からプロセスダンピング力を分離して定量化するのは困難である。すなわち、実験的なアプローチによってプロセスダンピング力の特性を分析するのは容易ではない。そこで、本研究では有限要素法解析 (FEM) を利用し、プロセスダンピング力  $F_{pdFEM}$  を求める。切込み方向に式(1)に示す振動  $u$  を仮定して二次元切削シミュレーションを行い、プロセスダンピング現象を分析する。

$$u(t) = A \sin \omega_c t \quad (1)$$

$A$ は振動振幅、 $\omega_c$ はびびり周波数である。FEMの結果から工具逃げ面に作用するプロセスダンピング力  $F_{pdFEM}$  を抽出する。ここで、 $F_{pdFEM}$  と  $u$  の間に式(2)が成立すると考える。 $L$ は切れ刃長さであり、 $K_{pdk}$ は振動変位、 $K_{pdc}$ は振動速度に依存するプロセスダンピング係数である。すなわち、プロセスダンピング力のびびり周波数成分を、プロセスダンピング係数を用いて表す。

$$F_{pdFEM} = (K_{pdk} + iK_{pdc})u(i\omega_c)L \quad (2)$$

式(2)よりプロセスダンピング係数は式(3)のように求められる。

$$K_{pdk} + iK_{pdc} = -\frac{F_{pdFEM}(i\omega_c)}{Lu(i\omega_c)} \quad (3)$$

切削プロセスにおいて想定される振幅  $A$ 、波長  $\lambda$  の範囲内で網羅的に係数を求め、予めデータベースを作成する。これを参照することで、任意の条件に対する係数を内挿して推定することができる。

## 3. 旋削プロセスの時間領域シミュレーション

図1の端面切削プロセスの時間領域シミュレーションについて考える。左図は使用したフラット工具である。切削力は切りくず生成力、エッジフォース、プロセスダンピング力の和として式(4)のようにモデル化する。

$$F_z = F_{cz} + F_{ez} + F_{pdz} = K_{ct} \cos \eta S(t) + K_{et} \frac{a_p \cos \theta_1}{\tan \theta_1} - \frac{a_p}{\sin \theta_1} \left( K_{pdc} \frac{\dot{z}(t)}{\omega_c} + K_{pdk} z(t) \right) \cos^2 \theta_1 \quad (4)$$

さらに、機械構造の運動方程式を1自由度のバネ・マス・ダンパ系でモデル化し、4次精度のルンゲクッタ法により構造振動を推定する。振動の影響を考慮して、式(2)から切削力変動を推定し、この影響で生じる振動変位を推定する。これらの機械構造とプロセスの相互作用を考慮して時間領域シミュレーションを行う。ここでは、プロセスダンピングに加えて、多重再生効果やジャンプ現象等の非線形現象についても考慮する。

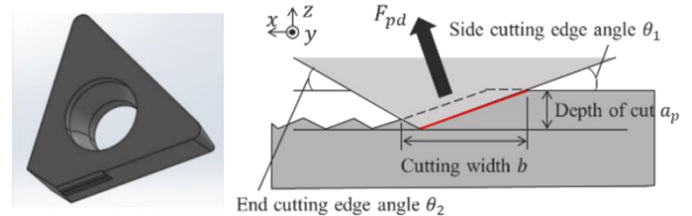


図1:フラット工具による旋削プロセスの模式図

## 4. プロセスダンピング係数の比較

先行研究<sup>1)</sup>で設計した逃げ面テクスチャ工具 PL087 と通常工具 WOT を用いてプロセスダンピング係数の算出を行った。仮定した工具の断面形状を図2に示す。逃げ面に突起状の構造を与えることで、高切削速度条件においても逃げ面接触が生じてプロセスダンピングが発現しやすい。工具形状の諸元を表1に示す。

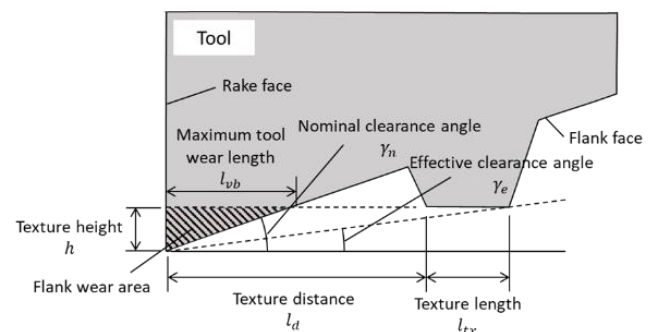


図2:テクスチャ工具の断面形状

表1:工具形状の諸元

tool	WOT	PL087
Rake angle		0
Nominal clearance angle [deg]		7
Effective clearance angle $\gamma_e$ [deg]		2.36
Texture distance $l_d$ [mm]		0.87
Texture length $l_{tx}$ [ $\mu\text{m}$ ]		100
Texture height $h$ [ $\mu\text{m}$ ]		400

通常工具と PL087 において算出したプロセスダンピング係数 ( $K_{pdc}$  のみ) を図 3 に示す。図から通常工具に比べ PL087 はプロセスダンピング係数が増大している領域が拡大していることがわかる。これはテクスチャを与えることによって、実効逃げ角が減少し、より逃げ面が被削材と接触しやすくなっていることを表している。最大軌道角  $\phi_{max}$  と (実効) 逃げ角が等しくなる境界条件は以下の式で表される。

$$z = \frac{\lambda \tan \gamma}{2\pi} \quad (5)$$

式 (5) より最大軌道角が逃げ角  $\gamma_n$  と等しい条件を赤色の破線、実効逃げ角  $\gamma_e$  と等しい条件を緑色の破線で示す。このことからプロセスダンピング係数は各逃げ角による境界よりも振動が大きい条件で増加することが分かる。なお、時間領域シミュレーションにおいては、低振幅領域のモデル化誤差を改善するため振幅制限 ( $A_{lim} = 33.5\mu\text{m}$ ) を与えて計算を行う<sup>2)</sup>。

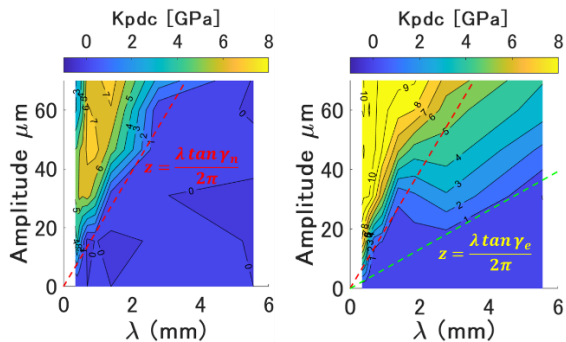


図 3: FEM による  $K_{pdc}$  の推定結果 (左: 通常工具, 右: PL087)

## 5. 実験装置および実験方法

図 4 のようにオークマ製ターニングセンタ SPACE TURN3000EX に加速度計、動力計を配置し、表 2 に示す実験条件で端面切削実験を実施した。主軸の回転数を一定とし、外側から内側に向けて一定速度の送りを与えた。このため、内周側に移動すると切削速度が低下して、プロセスダンピングの影響が無視できない臨界切削速度に到達すると、びびり振動が抑制される。z 軸方向の剛性を意図的に低減した平行板ばね構造の先端に工具を固定し、加工中の振動の加速度および切削力を計測した。

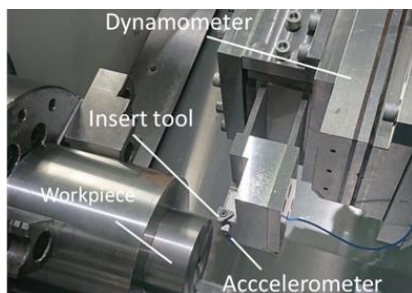


図 4: 実験装置の外観

表 2: 実験条件

Tool	WOT, PL087
Workpiece	S45C
Feed rate [mm/rev]	0.1
Depth of cut [mm]	0.6
Spindle speed [rev/min]	750
Cutting speed [m/min]	23~163
Side cutting edge [deg]	20
End cutting edge angle [deg]	30

## 6. 実験結果とシミュレーション結果の考察

切削実験で計測された振動変位を図 5 に示す。同様の切削条件を設定して行った時間領域シミュレーションの結果を図 6 に示す。実験結果から、通常工具 WOT では低切削速度領域に移行するにつれ振幅が減少し、55m/min (臨界切削速度) で急激に振動が収まり安定化した。PL087 においては 97m/min と通常工具より高い臨界切削速度が確認できた。時間領域シミュレーションにおいても同様の傾向がみられ、提案モデルは概ね妥当であるといえる。すなわち、提案手法を用いることで、任意のテクスチャ形状のびびり抑制効果を、工具試作することなく推定し得る可能性がある。ただし、臨界切削速度やテクスチャ工具における振動状態の推定精度は高いとは言えず、さらに検討が必要である。

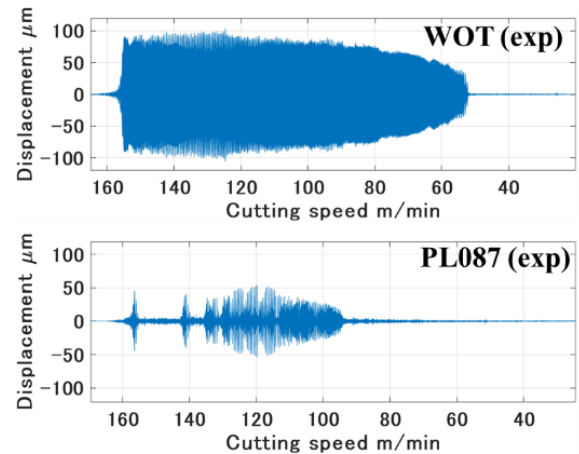


図 5: 振動変位の測定結果 (実験)

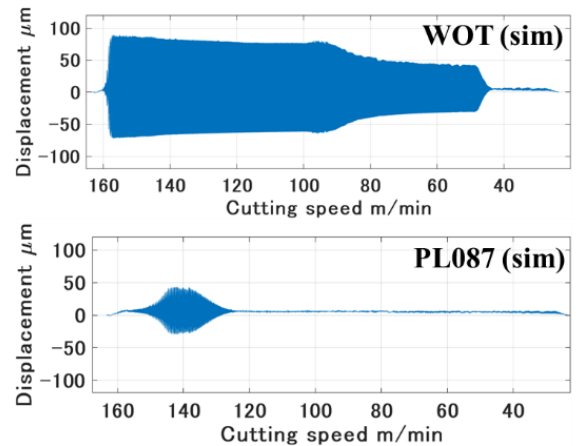


図 6: 振動変位の推定結果 (シミュレーション)

## 7. 結言

テクスチャ工具におけるプロセスダンピング効果を推定可能な時間領域シミュレーション技術を提案した。検証実験を通じて、通常工具と逃げ面テクスチャ工具の振動抑制性能を比較し、提案手法により概ね同様の傾向を推定し得ることを確認した。さらなる高精度化を実現するには、実工具形状の考慮や、逃げ面凝着の影響などを考慮したモデルの考慮が必要になると考える。

## 参考文献

- 1) N. Suzuki et al. Flank face texture design to suppress chatter vibration in cutting, CIRP Annals, 69 1(2020) 93-96.
- 2) N. Suzuki et al., Time domain simulation of turning process considering amplitude-dependency in process damping, Procs. 10th Int. Conf. LEM21, (2021) 220-223.