

6 工具たわみに起因する加工誤差の高速高精度な計算法の開発

西川隆敏, 菊田敬一*, 筒本隆博

Development of the system for high accuracy machining of die and mold (6th Report)

Development of high speed and high accuracy calculation method of machining error caused by tool dynamic deflection

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi and TSUTSUMOTO Takahiro

An end milling NC simulation software is developed to predict and compensate machining error caused by tool dynamic deflection. It takes long calculation time to get high accuracy with considering the influence on cutting force of tool deflection. In this study, a new simulation model to reduce calculation time while maintaining accuracy was presented. Tool deflection is calculated using frequency domain method repeatedly until it balances with cutting force. The presented model was verified with two examples. It provided sufficient accuracy at low rotational speed where the previous one (Rigid model) had poor accuracy. And it calculated 24.6 times as fast as the previous one (Regenerative force model).

キーワード：エンドミル加工, シミュレーション, 加工誤差, 工具たわみ, 切削力

1 緒 言

金型や部品の加工に多用されるエンドミル工具は、一般に曲げ剛性が低いため、工具に作用する切削力によってたわみや振動が発生し、加工誤差や表面粗さが大きくなる問題が生じやすい。

筆者らは、エンドミル加工時の工具のたわみや振動に起因する加工誤差を予測・補正する NC 切削シミュレーションソフト¹⁾の開発を進めてきた。これまでに、加工誤差を計算する方法として、剛体モデル¹⁾とたわみ考慮モデル²⁾の2つの方法を提案した。剛体モデルは工具を剛体、つまり、たわまないと仮定して切削力を計算し、その切削力が工具に作用するとして、工具のたわみを計算する方法である。この方法は高速に計算できるが、工具の剛性が低い場合など条件によっては予測精度が低下する場合がある。一方、たわみ考慮モデルは、工具のたわみによる切削力への影響を考慮した方法であり、高精度な計算が可能である。しかし、この方法は時間領域の計算（ルンゲ・クッタ法）であり、工具の微小回転角毎に、被削物形状の更新や工具切れ刃との干渉計算が必要となるため、多くの計算時間を要する。そのため、たわみ考慮モデルを用いて金型加工全体の NC データを解析することは実用的に困難であった。

そこで、本研究では、工具のたわみによる切削力への影響を考慮しつつ、計算時間を短縮する新しい計算法を提案する。本手法は、剛体モデルで採用している周波数領域法を用いて工具たわみを計算し、その工具たわみによる切削力への影響を収束計算で求める。これにより、微小回転角毎の被削物形状の更新や干渉計算が不要となり、高速計算を実現した。以下、開発した手法の概要と適用例について述べる。

2 計算法

2.1 計算の考え方

従来のたわみ考慮モデルでは、微小回転角毎に、たわみを考慮してその回転角での切削力を計算し、その後、微小回転後の回転角におけるたわみを計算する。これを、工具たわみが定常状態になるまで数回転分繰り返す。この方法は、時間経過に伴う工具たわみの推移を知ることができ、自励振動であるびびり振動などの現象も計算できるが、多くの計算時間を必要とする。

剛体モデルでは、工具が数回転した後の定常状態で計算することに着目し、周波数領域で運動方程式を解くことで計算時間を高速化している。そこで、この手法にたわみの影響を取り入れることを考える。工具たわみは切削力へ影響を及ぼし、また、切削力は工具たわみへ影響を及ぼすが、定常状態では工具たわみと切削力とはバランスのとれた状態になる。したがって、周波数領域の計

*広島県土木建築局営繕課

算方法を用いて、切削力と工具たわみがバランスした状態を得ることができれば、高速計算が可能になると考えられる。

なお、この方法は定常状態に着目しているため、びびりが発生しない安定条件において有効な手法である。つまり、びびり発生を伴う加工誤差は計算することができない。しかし、びびり発生時には加工面性状が悪化して表面粗さが大きくなり、加工誤差の値は大きくばらつく。したがって、加工誤差を議論する以前に、切削条件などを調整してびびりを回避することが必要になる。そのため、びびりを考慮しなくても実用上大きな問題はないと考えられる。

2.2 計算の流れ

図1に開発した手法の計算の流れを示す。まず、計算開始時は工具たわみ $D_i(\theta)$ を0、すなわち、たわみがない状態とする。ここで、添え字の i は計算回数を表す値であり、計算開始時は $i=0$ である。工具たわみ $D_i(\theta)$ は1回転分の X, Y の2方向の工具たわみを示し、 $2 \times N$ (N は1回転を分割した分割数) の2次元配列のデータである。次に i を1増分し、工具たわみ $D_{i-1}(\theta)$ を考慮して、工具1回転中の切削力を計算する。そして、この切削力を用いて周波数領域法で工具1回転中のたわみ $D_i(\theta)$ を計算する。1回目の計算では工具たわみを考慮していないため、剛体モデルと同じ結果が得られる。次に、入力されたたわみ $D_{i-1}(\theta)$ と計算されたたわみ $D_i(\theta)$ の差が閾値以下かどうかの収束判断を行う。具体的には、たわみの差の2乗和が閾値以下となったとき収束したと判断する。収束条件を満たした場合、切削力と工具たわみがバランスした状態であるといえる。収束条件を満たさない場合は、次の切削力計算へ入力するたわみを式(1)で決定する。

$$D_i(\theta) = w_1 D_{i-1}(\theta) + w_2 D_i(\theta) \quad (1)$$

ここで、 w_1, w_2 は重み係数である。 $w_1=0, w_2=1$ のとき、計算された工具たわみ $D_i(\theta)$ が次の切削力計算への入力となる。ただし、この場合、たわみによる切削力への影響が大きい条件で収束しないことがあるため、初期の重み係数は $w_1=0.5, w_2=0.5$ とする。すなわち、入力された工具たわみと計算された工具たわみを平均化したものを次の計算の入力とする。そして、この条件で収束しない場合には、 w_1 を徐々に大きくする可変重みとした。この計算を収束するまで繰り返し、収束した工具たわみを用いて加工誤差を計算する。

これらの計算手順のうち、切削力計算、工具たわみ計算、加工誤差計算について次節以降で詳細に説明する。

2.3 切削力計算方法

入力された工具1回転中のたわみを用いて、工具1回転中の切削力を計算する。基本的な方法は剛体モデルと同様であるが、工具たわみを考慮した切れ刃位置を用いて切削中か否か(切れ刃が被削物内部にあるか)を判断する点と、切取り厚さの計算方法が異なる。切取り厚さ t の計算は図2に示すとおり、次式で行う。

$$t = t_s + t_d \quad (2)$$

$$t_d = d_m - d_o \quad (3)$$

ここで、 t_s は工具たわみを考慮しないときの静的な切取り厚さである。静的な切取り厚さは、切れ刃回転軌跡を球(ボールエンドミル)、または、円(スクエアエンドミル)で近似して容易に得ることができる¹⁾。 t_d は動的な切取り厚さであり、工具たわみによって発生する切取り厚さである。動的な切取り厚さは、現在のたわみ量 d_m と1刃前の切れ刃でその加工面が生成される時(以降、1刃前と呼ぶ)のたわみ d_o の差から計算される。したがって、1回転中の工具たわみが与えられれば計算可能である。なお、定常状態では、現在のたわみとちょうど1刃回転分(回転角: $2\pi/n$ (n : 刃数))前のたわみは等しくなる。そのため、ちょうど1刃回転分前のたわみを考慮すると動的な切取り厚さは発生しないことになる。しかし、図2に示すとおりエンドミル加工では、切取り厚さへ影響を与える1刃前の回転角 θ_{0n} が現在の

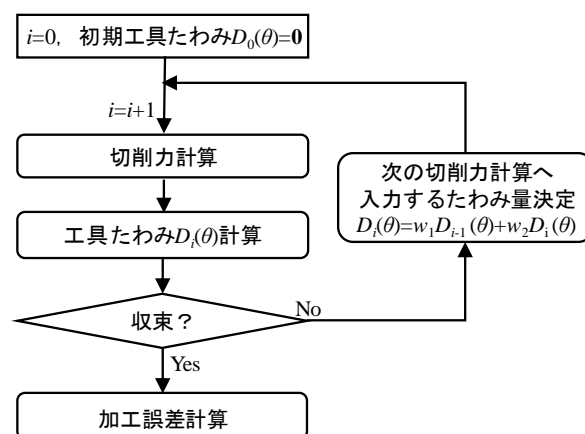


図1 開発手法の計算フロー

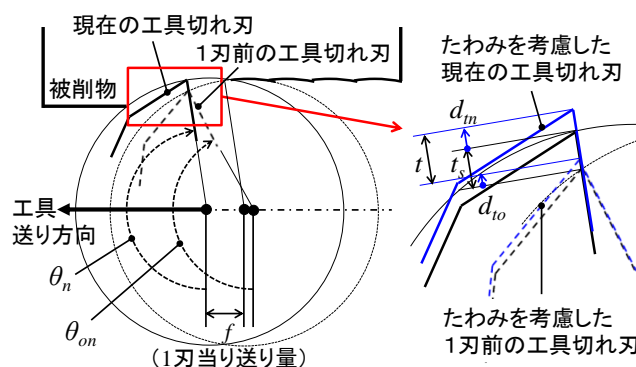


図2 切削力の計算で考慮する工具たわみ

回転角 θ_n とは少し異なるため、 d_m と d_{i0} は異なり、動的な切取り厚さが発生する。

本手法では、切取り厚さ計算時に工具切れ刃と被削物形状の干渉計算が不要であり、また、微小回転角毎の被削物形状の更新が不要であることから、計算時間の短縮が見込まれる。

2.4 工具たわみ計算方法

剛体モデルと同様に、1回転中の切削力と工具動剛性（伝達関数）から、周波数領域で運動方程式を解くことにより1回転中の工具たわみを得る。

高い周波数のたわみ（振動）は、加工中の工具切れ刃逃げ面と被削物の接触により、減衰することが知られている³⁾。そのため、不必要に高い周波数のたわみを除くことで、計算精度を低下させずに高速化が期待される。そこで、得られた工具たわみを切削加工時間に対応した式(4)のカットオフ周波数 f_c でローパスフィルタ処理する。

$$f_c = \gamma / t_c \quad (4)$$

ここで、 t_c はエンドミル加工の断続切削における実切削時間である。 γ はカットオフ周波数を決定する係数であり、 $\gamma=1.5$ のとき、切削力波形を半正弦波と仮定したときの零交点（切削力成分が0）の周波数となる⁴⁾。

2.5 加工誤差計算方法

剛体モデルでは、工具たわみを無視して工具切れ刃が加工面を創生する回転角（加工面創生時工具回転角）を求め、その回転角におけるたわみから加工誤差を計算する。しかし、実際はたわみを考慮した工具切れ刃の回転軌跡が、加工面法線ベクトルと反対方向の被削物側へ最も削りこんだときに加工面が生成される。そこで、**図3** に示すように、微小回転毎に工具たわみを考慮した工具切れ刃位置（正確には仮想的に分割された微小切れ刃位置）を算出し、理想位置（たわみがない状態の加工位置）から各微小切れ刃位置へのベクトル p の加工面法線方向成分の大きさの最小値を加工誤差 e として式(5)で算出する。

$$e = \min(p \cdot n) \quad (5)$$

ここで、 n は加工面法線方向単位ベクトル、 \cdot はベクトルの内積を示す。

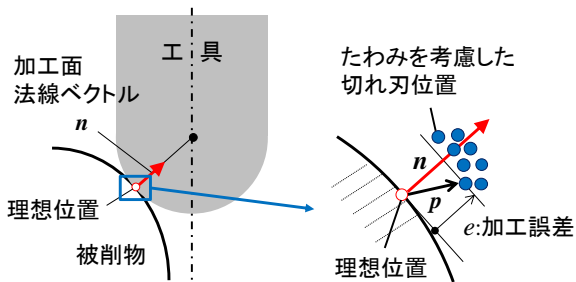


図3 工具たわみに起因する加工誤差

3 適用例

3.1 傾斜面加工

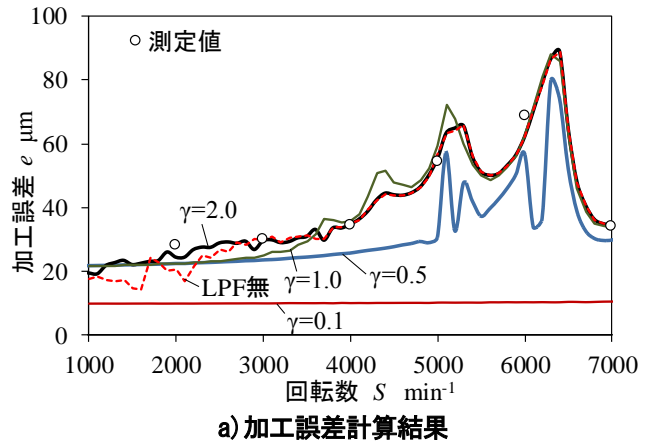
開発した手法を用いて、既報⁵⁾で報告済のボールエンドミルによる傾斜面加工の加工誤差を計算した。本実験ではびびりが発生していないことを確認済である。計算は、工具回転数 1000min^{-1} から 16000min^{-1} まで 100min^{-1} 毎に151条件で行った。

3.1.1 ローパスフィルタの検証

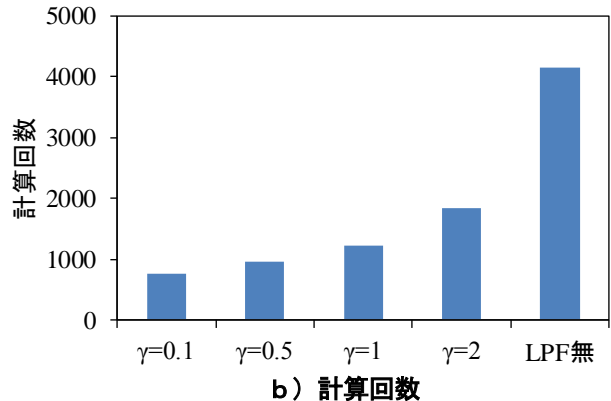
図4 a) にローパスフィルタ (LPF) のカットオフ周波数の係数 γ による計算結果の違いを示す。この図は γ による違いが大きい 7000min^{-1} 以下の結果を示している。また、**図4 b)** に全ての計算 (151 条件) の収束までの総計算回数を示す。 γ が小さい ($\gamma=0.1$) 場合、加工誤差へ影響する周波数のたわみまでカットしているため計算精度が悪い。 γ が大きくなるにつれて、計算精度は向上し、 $\gamma=1.0\sim 2.0$ 程度で良好である。ただし、LPF 無 ($\gamma=\infty$ に相当) では低い回転数で計算値にばらつきがみられる。一方、計算回数は γ が小さいほど少ない。計算精度と計算時間を考慮すると $\gamma=1.0\sim 2.0$ 程度が望ましい。

3.1.2 従来の加工誤差計算手法との比較

図5 に開発法 ($\gamma=2.0$) と従来法の比較を示す。開発法は、従来のたわみ考慮モデル (従来法②) と同様に測定



a) 加工誤差計算結果



b) 計算回数

図4 ローパスフィルタの計算精度、計算回数への影響

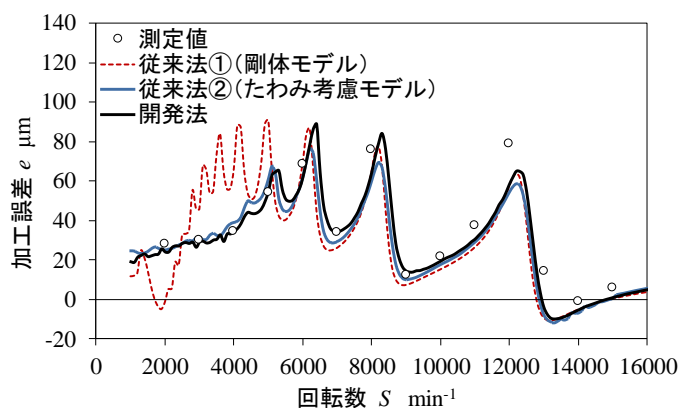


図5 加工誤差の計算結果 (開発法と従来法)

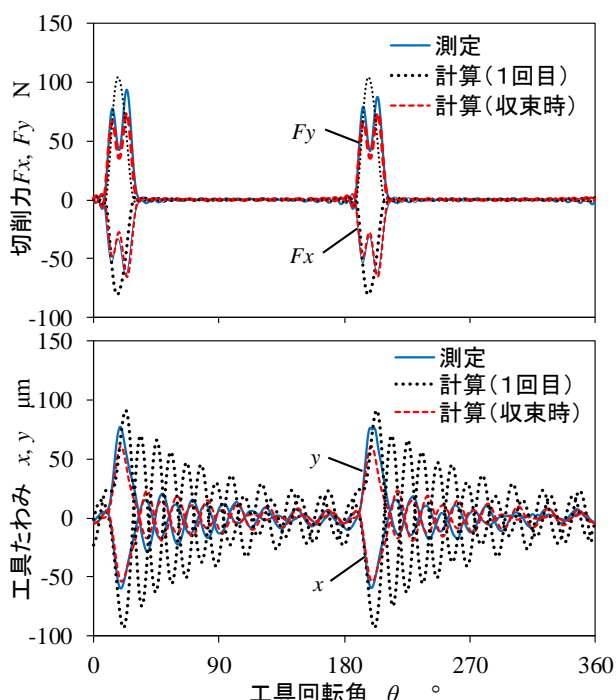


図6 工具1回転中の切削力とたわみの計算結果

値と良く一致しており、剛体モデル (従来法①) における低回転領域での計算精度の悪化が改善されている。

図6は回転数 $3,000\text{min}^{-1}$ での切削力と工具たわみの開発法による計算値と測定値の比較である。計算値は、計算回数1回目終了時点の結果と最終的に収束したときの結果を示している。1回目の計算値は剛体モデルと同じ結果となる。1回目の計算では測定値と差が大きいですが、その後、収束計算を繰り返すことにより、計算値は測定値とよく一致しており、切削力の計算に工具たわみを考慮する開発法の有効性が確認された。

3.2 金型モデル

図7の金型モデルを用いて計算時間を評価した。計算対象のNCデータの工具パスの数は306,929パスである。

使用したパソコンの仕様はCPU: Intel Core i7-950 3.07GHz, GPU: NVIDIA GeForce GTX680である。図8

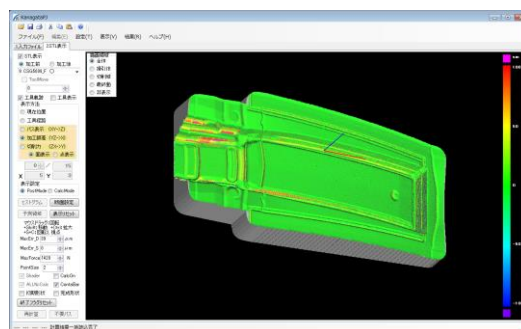


図7 金型モデル形状

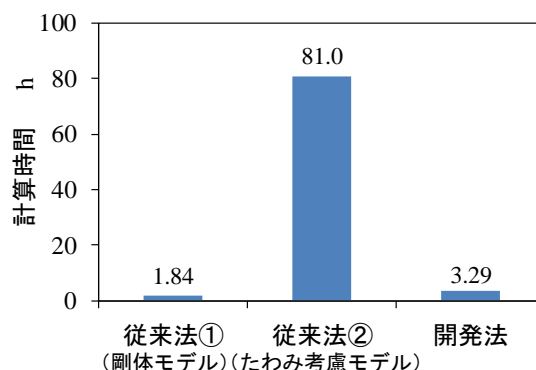


図8 金型モデルにおける計算時間の比較

に計算時間を示す。従来のたわみ考慮モデル (従来法②) 81.0時間に対して開発法は3.29時間であり、24.6倍の高速化を実現した。また、計算時間の少ない剛体モデル (従来法①) の2倍以下で計算できることが確認された。

4 結 言

本研究では、計算精度と計算時間を両立することを目的として、工具1回転中のたわみの影響を考慮して1回転中の切削力を計算し、その切削力を用いて周波数領域法により工具1回転中のたわみを計算する手順を、工具たわみと切削力がバランスするまで繰り返す加工誤差計算手法を開発した。本手法を傾斜面加工と実金型モデルへ適用した結果、従来の高精度な手法 (たわみ考慮モデル) の計算精度を維持しつつ、24.6倍の高速化を実現した。現在、本手法は開発したNC切削シミュレーションソフトの標準的な加工誤差計算手法として採用している。

文 献

- 1) 西川他: 精密工学会誌, 78, 11 (2012), 975
- 2) 西川他: 精密工学会秋季大会講演論文集, (2008), 93
- 3) 星: 機械加工びり現象—解析と対策, (1997), 70
- 4) 長松: モード解析入門, (1993), 297
- 5) 西川他: 広島県西部工技研究報告, 57 (2014), 9