

3 金型高精度加工システムの開発（第4報）

切削条件決定を支援するエンドミル加工シミュレーションソフト

西川隆敏，菊田敬一，大田耕平，古本浩章，小玉龍，佐野誠，門藤至宏，筒本隆博

Development of the system for high accuracy machining of die and mold (4th Report)

End milling simulation software for decision of cutting conditions

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi, OTA Kohei, FURUMOTO Hiroaki, KODAMA Ryu,
SANO Makoto, MONDOU Munehiro and TSUTSUMOTO Takahiro

End milling process is often used for manufacturing die and mold. However, it is difficult to obtain high accurate machined surface because end mill is usually slender and flexible. In this study, an end milling simulation software was developed to predict machining error and surface roughness caused by dynamic tool deflection. It has two simulation models. One is the rigid force model that calculates cutting force with neglecting tool deflection. The other is the regenerative force model considering tool deflection that can calculate regenerative chatter. The software was verified with two cutting experiments. As a result, the machining error and roughness showed a good agreement with the prediction using the regenerative force model at various tool rotational speeds.

キーワード：エンドミル，シミュレーション，加工誤差，表面粗さ，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，一般的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悪化する問題が生じやすい。

筆者らは，NC データを入力として，3軸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するNC切削シミュレーションソフトの開発を進めている。このソフトは予測に基づいてNCデータを修正する機能を備えており，切削力を一定にするように送り速度を修正¹⁾することや，加工誤差を補償するように工具経路の座標値を修正²⁾することが可能である。加工前のNCデータ検証ツールとして，工具経路や加工工程の検討に活用されている³⁾。

一方，その前段階であるNCデータ作成時には，回転数，送り速度，切込み，ピックフィードなどといった基本的な切削条件をCAMオペレータが入力する必要がある。しかし通常，この条件決定は工具メーカーから提示される推奨条件や過去の経験などに基づいて行われており，十分に検討されたものであるとは言い難い。

そこで本研究では，高精度，高能率な加工が可能な切削条件の決定を支援することを目的として，切削条件から加工誤差と表面粗さを計算可能なエンドミル加工シミ

ュレーションソフトを開発した。このソフトの基本的な計算手法はすでに報告済²⁾・⁴⁾である。本報ではソフトの概要とソフト利用に必要な測定，適用例について述べる。

2 エンドミル加工シミュレーションソフト

2.1 ソフトの概要

開発したソフトの概要を図1に，メイン画面を図2に示す。本ソフトで計算可能な工具は，ボールエンドミル，ラジアスエンドミル，スクエアエンドミルであり，加工形態としては傾斜面の等高線加工（図1の紙面垂直方向の工具送り）に対応している。

ソフトへの入力項目は，回転数，送り速度，切込み，ピックフィード，被削物の傾斜角度などの切削条件と，工具径，刃数，ねじれ角などの工具仕様，そして，測定などから事前に求めておく必要がある切削力係数と動剛性である。また切削条件のうち，任意の2条件の値を等間隔で変更した，複数の条件を設定可能である。

本ソフトでは，切削力による工具のたわみを計算し，たわみを考慮した工具切れ刃の運動軌跡が被削物へ転写されるものとして計算する。計算方法として，工具はたわまない剛体と仮定して切削力を計算する「剛体モデル」と工具のたわみを考慮して切削力を計算する「たわみ考慮モデル」の2つの方法がある。

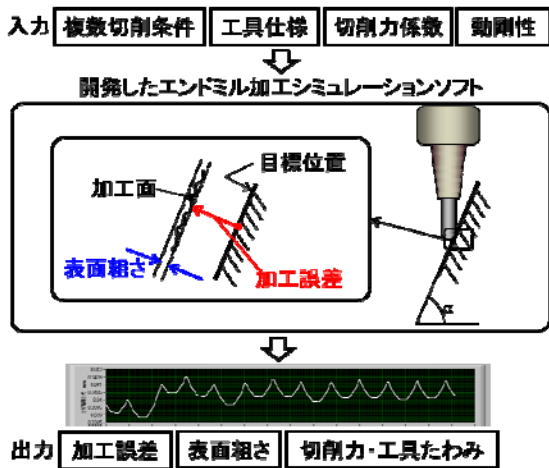


図1 開発したソフトの概要

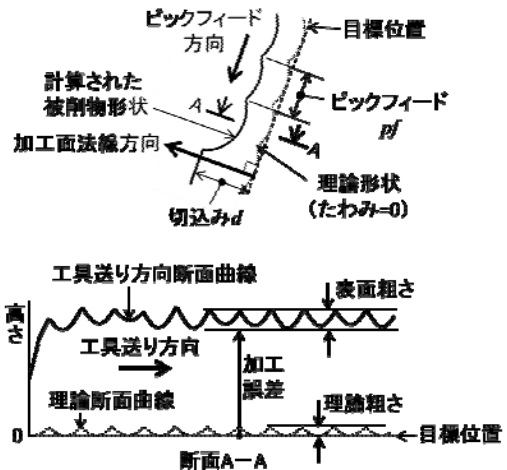


図3 たわみ考慮モデルでの加工誤差と表面粗さ

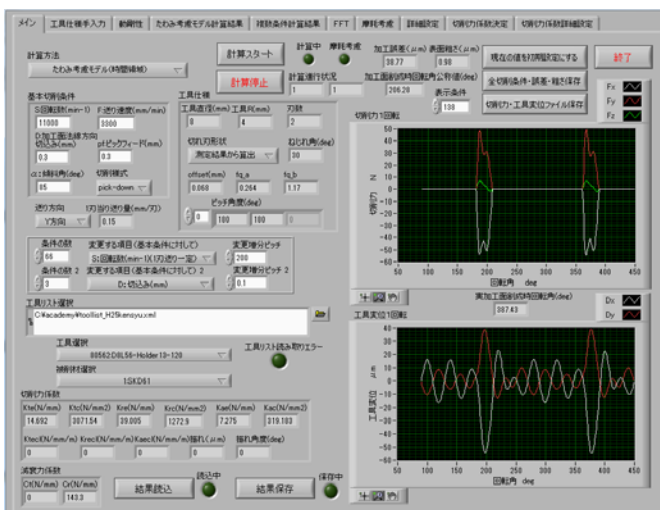


図2 ソフトのメイン画面

①剛体モデル²⁾

切削力の計算に必要な切取り厚さを、切れ刃回転軌跡を球（ボールエンドミルの場合）または円（スクエア、ラジアスエンドミルの場合）で近似して幾何学的に求める。工具1回転中の切削力を計算し、周波数領域で運動方程式を解くことにより工具1回転中のたわみ波形を得る。そして、仕上げ加工面を創成する瞬間のたわみ量の加工面法線方向成分を加工誤差とする。

この方法はエンドミルの断続切削による定常強制振動のみを計算し、短い計算時間で加工誤差を求めることができる。しかし、再生びびりに影響を及ぼす再生効果を考慮しないため表面粗さを計算することはできない。

②たわみ考慮モデル⁴⁾

工具たわみを考慮した切れ刃位置と、多面体でモデル化した被削物形状から正確な切取り厚さを求め、ある瞬間の切削力を計算する。時間領域で運動方程式を解くことにより微小時間後のたわみを求め、被削物形状を更新

し、これを数回転、数ピックフィード繰り返す。そして、図3に示すように、計算された被削物形状を加工面法線方向と平行な平面（断面 A-A）で切断し、工具送り方向の断面曲線を得る。切削開始直後は過渡的な振動が発生し切削が安定しないため、最後の数回転（ユーザが指定）の断面曲線を抽出し、目標位置からの断面曲線の高さの最小値を加工誤差とする。正が削り残し、負が削り過ぎである。また、高さの最大と最小の差を表面粗さとする。なお、断面 A-A の位置は、最後のピックフィードで生成される加工面内で、断面曲線の高さの平均値が最小になる位置としている。

この方法は剛体モデルより計算時間が必要となるが、再生効果を考慮した実現象により近いシミュレーションであり、加工誤差に加えて表面粗さも計算できる。

2.2 ソフト利用前に必要な測定

①切削力係数の測定^{2), 4)}

切削力係数とは、切取り厚さと切削力の関係を表すもので、主に工具と被削材の組み合わせで決まるものである。3方向の切削力（主分力、背分力、軸方向分力）をそれぞれ切取り厚さの1次関数（切片と傾き）でモデル化するため、合計6個の係数となる。また、たわみ考慮モデルでプロセスダンピングと呼ばれる減衰力を考慮する場合は、さらに2つの係数が必要となる。

切削力係数は切削速度にも依存するが、その影響はあまり大きくないため、通常、回転数は一定とし、送り速度の異なる条件で切削力を測定して決定する。本ソフトでは、切削力測定結果を読み込み、予測値と測定値をローパスフィルタで処理して、それらの差の2乗和が最小になるように切削力係数を決定することが可能である。

②動剛性（モーダルパラメータ）の測定²⁾

工具のたわみを計算するため、工具先端部の XY の 2

方向の動剛性が必要である。動剛性には工作機械、工具ホルダ、工具材質、工具突出し長さなどが影響するため、基本的に工具を工作機械へ取り付けられた状態で測定する必要がある。測定は、力センサが内蔵されたインパルスハンマで工具先端部を加振し、その反対側の振動を測定して行く。加速度センサを取り付けて測定することが多いが、レーザドップラ振動計などの非接触センサを用いる方がセンサの質量や接触の問題が無く、精度良く測定できる。

ソフトへの入力は、動剛性測定結果から求めたモデルパラメータ (m (質量), c (減衰), k (剛性)) が必要である。開発したソフトでは、測定結果をカーブフィットしてモデルパラメータを決定することが可能である。

3 適用例

3.1 回転数の違いと加工誤差⁵⁾

開発したシミュレーションソフトを図4に示す傾斜面加工に適用した。工具は直径 12mm, 2枚刃のボールエンドミル、被削材は SKD61 (硬さ HRC45) を用いた。複数の回転数で加工した被削物を三次元測定機で測定し、各回転数における加工誤差の平均値を求めた。また、切削力と工具変位の予測精度を検証するため、加工中の切削力と工具シャンク部の振動を測定した。なお、本実験では、びびりの発生はみられなかった。

図5に加工誤差の予測と測定の比較を示す。複数の条件で計算した場合、この図のような予測結果がソフトの画面に表示される。回転数によって加工誤差が大きく異なることが確認される。これは、工具剛性が低い場合に良くみられる現象であり、回転数により工具に作用する切削力の周波数が異なることが主な要因である。

たわみ考慮モデルでは、全ての回転数で測定とよく一致している。一方、剛体モデルは $5,000\text{min}^{-1}$ 程度以下で予測精度が悪化している。この精度悪化について考察するため、図6に $2,000\text{min}^{-1}$ と $8,000\text{min}^{-1}$ の切削力と工具変位の予測と測定の比較を示す。切削力は予測値、測定値ともに 2kHz のローパスフィルタで処理したものである。また、工具変位の測定値は、非切削時 (回転のみ) の振動を取り除くため、回転周波数の 1.2 倍のハイパスフィルタで処理し、工具先端部の変位に変換²⁾している。図の θ_m は加工面創成時の工具回転角であり、本実験条件では、 θ_m における X 方向変位 D_x が加工誤差へ影響する。 $2,000\text{min}^{-1}$ の剛体モデルでの予測は、測定と比較して実切削時間が短く、 θ_m における切削力 F_x と工具変位 D_x の測定との差はそれぞれ 14N , $32\mu\text{m}$ であり、予測精度が悪い。エンドミル加工のダウンカットでは、現在の

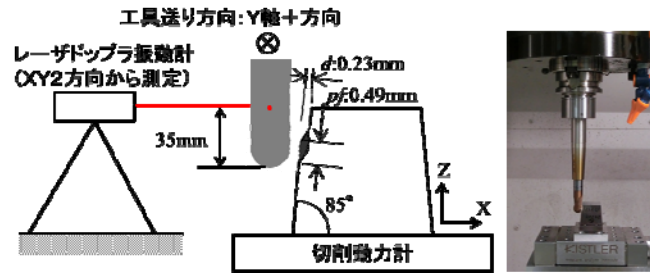
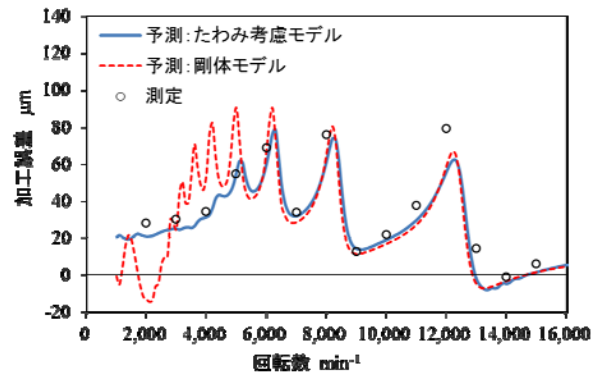
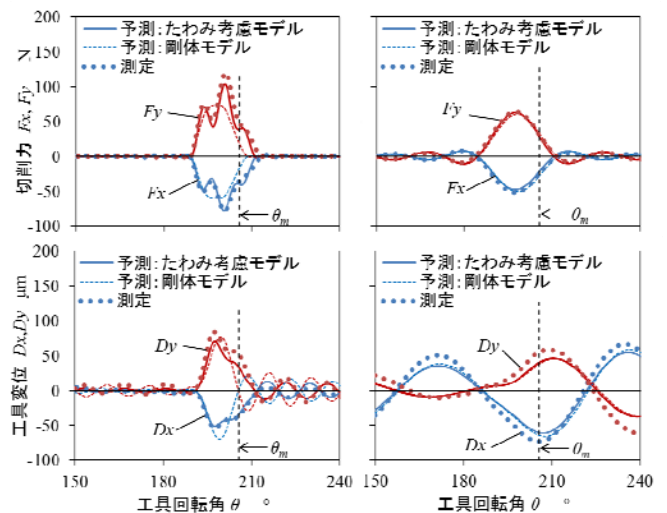


図4 実験方法



工具: $\phi 12\text{mm}$, 2枚刃ボールエンドミル 被削材: SKD61 (HRC45), 傾斜角 85°
 切削条件: 切込み 0.23mm , 送り 0.35mm/刃 , ピックフィード 0.49mm , ダウンカット

図5 加工誤差の予測と測定の比較



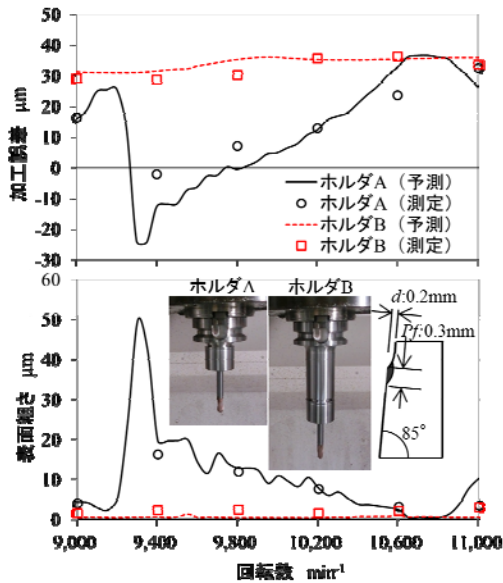
a) $S: 2,000\text{min}^{-1}$ b) $S: 8,000\text{min}^{-1}$

図6 切削力と工具変位の予測と測定の比較

変位と、ちょうど1刃前よりも少し前の変位の差が、工具変位により発生する動的な切り取り厚さとなる。図6にみられるように、低回転では回転角に対する振動周期が相対的に短くなるため、この動的な切り取り厚さが大きくなる。そのため、この現象を考慮しない剛体モデルでは予測精度が悪くなると考えられる。

3.2 工具ホルダの違いと加工誤差・表面粗さ

2種類の工具ホルダを用いて、ホルダの違いと加工特



工具：φ8mm, 2枚刃ボールエンドミル 被削材：SKD61 (HRC45)
 切削条件：切込み0.2mm, 送り量0.15mm/刃, ピックフィード0.3mm

図7 加工誤差, 表面粗さの予測と測定の比較

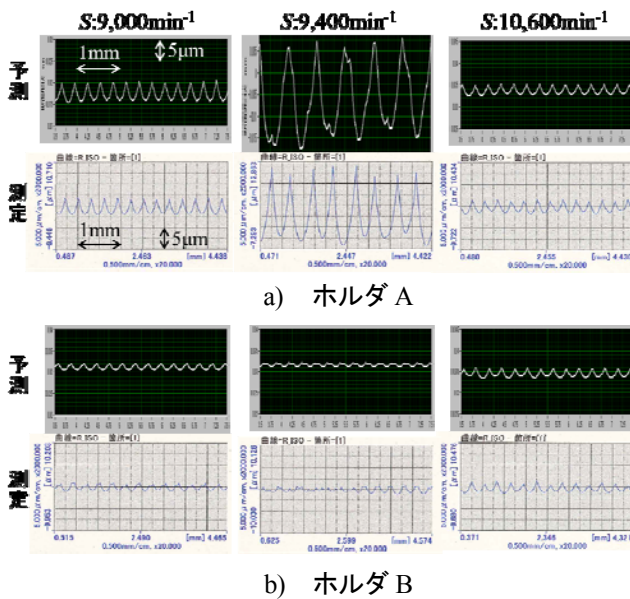


図8 加工面曲線の予測と測定の比較

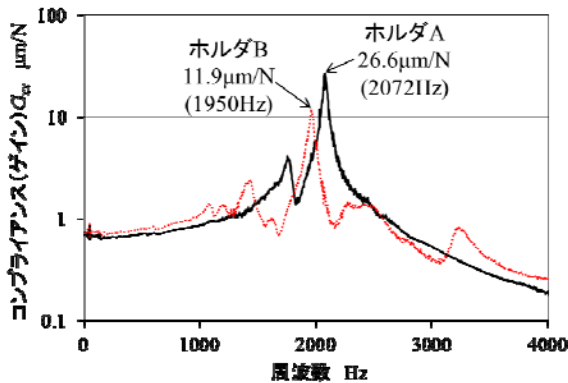


図9 動剛性測定結果

性について評価した。工具は直径8mm, 2枚刃のボールエンドミル, 突出し長さは56mm (L/D=7)である。予測はたわみ考慮モデルで行った。図7に加工誤差と表面粗さの予測と測定の比較を示す。図8は工具送り方向の加工面曲線を示しており, 予測した断面曲線と表面粗さ測定機で測定した粗さ曲線を示している。ホルダや回転数によって加工誤差や表面粗さが異なるが, 予測は測定と概ね一致していることが確認される。

ホルダ間の比較では, ホルダAの方が全体的に表面粗さが大きい。この理由として図9に示す動剛性の違いがあげられる。動剛性のX方向とY方向の違いはほとんどみられなかったため, この図はX方向のものを示している。この図の縦軸は動剛性の逆数であるコンプライアンスであり, 一般にこの最大値が大きい方がびびりが発生しやすい。今回の条件では, ホルダAの最大値の方が大きいため, びびりが発生し, 表面粗さを大きくしていると考えられる。

また, ホルダAの表面粗さが小さい回転数では逆に加工誤差が大きい傾向が確認される。これは, 一般に再生びびりの発生しにくい回転数 (固有振動数(Hz)×刃数/60/k (k=1,2,3,・・・)) では, エンドミルの断続切削の周波数の高調波成分が固有振動数に近くなり, 強制振動の影響が大きくなるためであると考えられる。切削条件決定の戦略としては, びびりによる表面粗さの悪化を避けたうえで加工誤差の小さい回転数を選択するか, あるいは表面粗さの最小値をねらい加工誤差は工具経路の補正²⁾によって低減するという2つの方向が考えられる。

4 結 言

良好な切削条件を決定するためのツールとして, 切削条件から加工誤差と表面粗さを予測するエンドミル加工シミュレーションソフトを開発した。本ソフトを回転数や工具ホルダの異なる加工に適用した結果, 切削力の計算にたわみを考慮する「たわみ考慮モデル」を用いることで, 加工誤差と表面粗さを精度良く予測でき, 回転数の決定や工具ホルダの選択に有用であることがわかった。

今後は, 現状測定が必要な切削力係数, 動剛性について, 材質毎のデータベース化や FEM (有限要素法) などの計算の援用を検討していきたい。

文 献

- 1) 西川他：広島県西部工技研究報告, 55(2012), 1
- 2) 西川他：精密工学会誌, 78, 11(2012), 975
- 3) 土本他：型技術, 28, 7(2013), 46
- 4) 西川他：精密工学会秋季大会講演論文集, (2008), 93
- 5) 西川他：精密工学会春季大会講演論文集, (2013), 457