

金型高精度加工システムの開発 (第8報)

8 エンドミル加工のびびり解析 NC シミュレータの開発

西川隆敏, 姫宮一輝, 菊田敬一*

Development of NC milling simulator for chatter vibration

NISHIKAWA Takatoshi, HIMEMIYA Kazuki and KIKUTA Keiichi

Chatter often occurs in end milling due to low rigidity of tool and causes poor surface quality and tool damage. A chatter stability lobe diagram based on analytical approach is an effective tool to improve productivity without chatter. But it is insufficient for milling complex shape including die and mold where the cutting depth varies with tool positions, because it is effective mainly under the constant cutting depth. The paper presents a quantitative index of chatter stability based on semi-discrete time domain analysis for milling complex shape with arbitrary cutting conditions. A NC milling simulator is developed for visualization of chatter stability and avoidance of chatter. It calculates cutter-workpiece engagement conditions, dynamic forces including process damping and indexes of chatter stability. Additionally, tool paths are modified with the reduced axial cutting depth at the instable positions to avoid chatter. Two examples are shown to validate the effectiveness of the simulator.

キーワード：びびり振動, NC シミュレータ, エンドミル加工, NC データ修正

1 緒 言

金型や部品の加工で用いられるエンドミルは、径に対する長さの比 (L/D) が大きく、曲げ剛性が低いため、加工中にしばしばびびり振動 (以下、びびり) が発生し、加工面性状の悪化や工具損傷を引き起こす。

びびりは切削加工における古くからの課題であり、加工現場では機械オペレータが音や振動などの状況からびびりを把握し、回転数を下げるなどの対応が行われてきた。近年では、理論解析¹⁾に基づいたびびり安定限界線図も活用されている。びびり安定限界線図とは図1のような回転数と切込み量の2次元マップ上にびびり発生有無の境界線を示すものである。この図からびびりが発生しにくい回転数を採用することで、大きな切込み量による高能率な加工が可能となる。

びびり安定限界線図はある方向 (通常は径方向) の切込み量が一定であることを前提として、他方 (通常は軸方向) の限界切込み量を示すものである。しかし、実際の加工では、切込み量は径方向、軸方向ともに加工箇所によってさまざまな値に変化するのが通常である。さらに、自由曲面の加工では切れ刃の位置によっても切込み

量が異なる。そのため、安定限界線図から加工全体のびびり発生有無を評価することは困難である。加工全体のびびり評価には実加工データである NC データからのびびり解析が有効であるが、そのようなびびり解析シミュレータは現状見当たらない。

一方で、加工中に発生するびびりをマイクや振動センサで検知し、びびりにくい回転数に自動変更 (例えば、図1の×→○に変更) する技術²⁾が実用化されている。しかし、切込み量によっては図1の×→×で示されるようにびびりを回避できない。また、小径工具などの加工負荷の小さい状況では振動自体が小さいため、そもそもびびりを検知できないという問題がある。

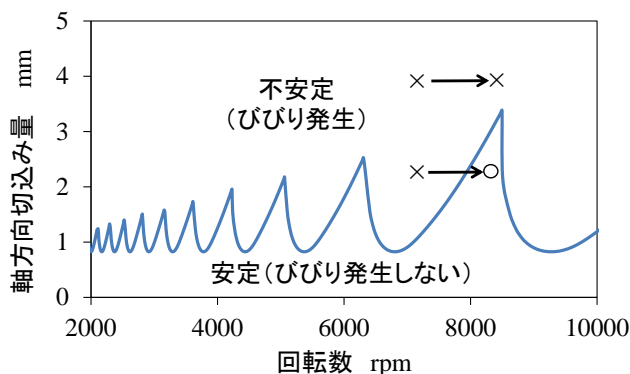


図1 びびり安定限界線図

*広島県土木建築局営繕課

そこで、本研究では理論解析に基づいて加工前にびびりの問題を解決することを目的とし、NC データから加工箇所毎にびびりの有無を予測し、びびりが発生すると予測される箇所に工具経路を追加してびびりを回避するびびり解析 NC シミュレータを開発した。これにより、加工全体のびびり予測が可能になるとともに、回転数のみの変更では対応できないびびりについても有効となる。具体的には、これまでに開発済の加工誤差予測シミュレータ³⁾にびびり解析機能と NC データ修正（工具経路追加）機能を付加する形で開発した。なお、本研究で対象とするびびりは、金型加工などでよく問題となる工具側の剛性に起因する自励びびりである。

以下、開発したシミュレータの概要と適用例について述べる。

2 びびり解析 NC シミュレータ

2.1 採用するびびり安定性解析手法

びびり安定性を解析する技術として、周波数領域法 (Frequency domain analysis)¹⁾ と半離散化法 (Semi-discrete time domain Analysis)⁴⁾ が知られている。周波数領域法ではプロセスゲインの平均値を用いる方法がよく用いられるが、径方向切込み量が小さい場合の計算精度の低下が指摘されている⁵⁾。半離散化法ではこの問題はないが、安定限界線図作成の際に回転数毎に切込み量を変えながら繰り返し計算する必要があるため、計算時間がかかるという問題がある。

本研究では、加工中のさまざまな工具位置において安定か不安定かを求めることを目的としており、安定限界を求める必要はない。そこで、より広い加工条件で適用可能な半離散化法を採用することとした。

2.2 びびり解析 NC シミュレータの概要

びびり解析 NC シミュレータの構成とフローチャートを図2、図3に示す。入力データは、加工前の被削物形状データ (STL 形式)、NC データ、工具情報 (種類、径、刃数、切削力係数、動剛性など) である。計算処理は工具経路を所定の長さ以下に分割した 1 パス毎に行う。まず、工具切れ刃の被削物への切込み状態を取得し、安定性解析によりびびり安定度を算出する。びびり安定度とは、びびり安定性を定量的に表す指標として定義したものである。次に、びびり安定度が閾値以下の箇所に工具経路を追加する。そして、びびり安定度の大きさに応じて被削物や工具経路の色を変えて可視化するとともに、工具経路が追加された修正 NC データを出力する。

以下、主な工程 (図3の①~③) の処理について説明する。

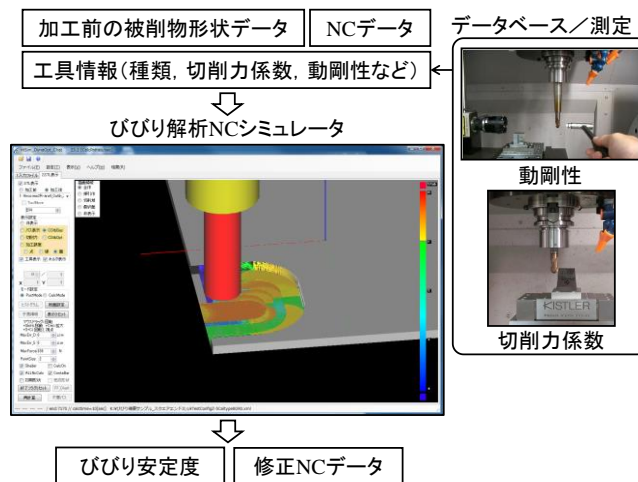


図2 びびり解析 NC シミュレータ

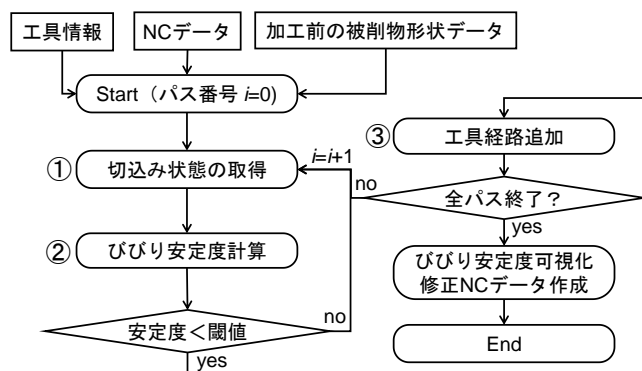


図3 フローチャート

2.3 切込み状態の取得

加工に伴って変化する被削物形状を考慮して、工具の被削物への切込み状態を取得する。ここでは、開発済の加工誤差予測シミュレータ³⁾と同様に、グラフィックスハードウェアの描画機能を用い、予測する工具位置近傍における加工直前の被削物形状を Z-map モデルで得る。そして、図4に示すとおり、工具切れ刃を複数に分割した各微小切れ刃の Z 座標 c_z と Z-map モデルの被削物高さ w_z を比較することで、微小切れ刃毎に切削判断を行い、切込み状態を取得する。

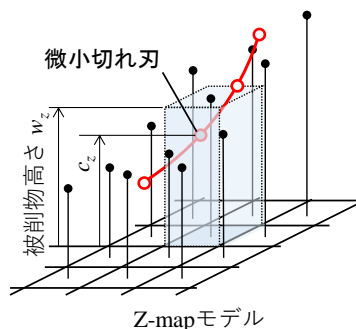


図4 Z-map モデルによる切込み状態の取得

2.4 びびり安定度計算

びびり安定性解析では、プロセスゲインと呼ばれる単位振動変位当たりの切削力増分量と、プロセスダンピングゲインと呼ばれる単位振動速度当たりの切削力増分量が必要である。そこで、**図5**に示す各微小切れ刃に作用する切削力を次式でモデル化する。

$$dF_t = (K_{te} + K_{tc} t_r + C_t v_r / v_c) t_w$$

$$dF_r = (K_{re} + K_{rc} t_r + C_r v_r / v_c \sin q_i) t_w$$

$$dF_a = (K_{ae} + K_{ac} t_r + C_r v_r / v_c \cos q_i) t_w$$

ここで、 dF_t は主分力、 dF_r は背分力（工具 R 中心 O へ向かう方向の力）、 dF_a はそれらと直交する方向の力、 K_{te} 、 K_{tc} 、 K_{re} 、 K_{rc} 、 K_{ae} 、 K_{ac} 、 C_t 、 C_r は切削力係数、 t_r は切取り厚さ、 t_w は切削幅（微小切れ刃の長さ）、 v_c は切削速度、 v_r は v_c に垂直な方向（Z軸に垂直な平面内）の被削物へ食い込む方向の振動速度、 q_i は微小切れ刃の位置を示す角度である。

XY方向の振動変位（正確には現在と1刃前の振動変位の差）による切取り厚さ t_r の増分と、XY方向の振動速度による食い込み方向の振動速度 v_r の増分によるXY方向の切削力増分量をそれぞれ算出し、プロセスゲインとプロセスダンピングゲインを得る。

そして、半離散化法による安定性解析を行う。半離散化法では状態遷移行列の固有値の大きさの最大値 μ_{max} が安定性の指標となる。本研究では、この最大値 μ_{max} と刃数 z を用いてびびり安定度 C_s を次式で定義する。

$$C_s = (1/\mu_{max})^z$$

びびり安定度 C_s は、工具1回転後に状態変数（振動）の大きさがどの程度減衰するかを示す値であり、大きいほどびびり安定性が大きく、 $C_s > 1$: 安定、 $C_s = 1$: 安定限界、 $C_s < 1$: 不安定な状態を示す。びびり安定性を定量的に示すものとしては、プロセスゲインの大きさに着目した周波数領域法のゲイン余裕⁶⁾があるが、ここで示すびびり安定度は振動の大きさに着目したものである。

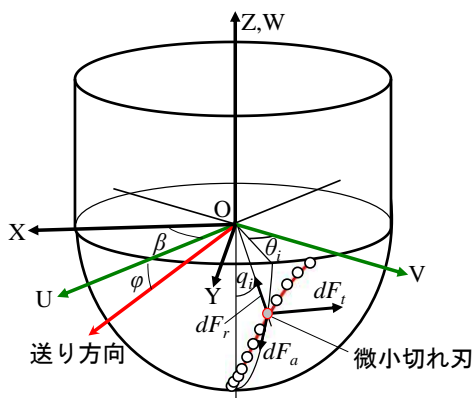


図5 微小切れ刃に作用する切削力

2.5 工具経路の追加

びびり安定度が閾値以下となる工具経路の工具軸（Z）方向切込み量を分割し、**図6**に示すとおりZ軸正方向にオフセットした工具経路を追加する。オフセットする量と回数は、びびり安定度が閾値を超えるように決定する。なお、閾値は理論的には1であるが、モデル化誤差なども考慮してユーザが任意に設定できる。

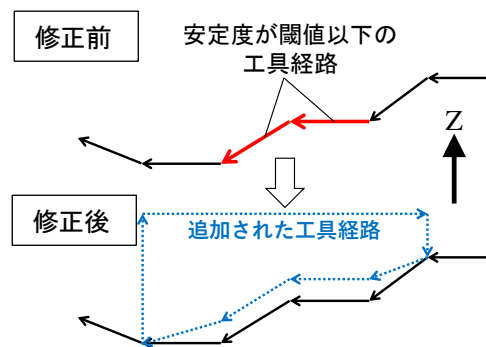


図6 工具経路の追加

3 適用例

3.1 工具経路追加によるびびり回避例

開発したびびり解析NCシミュレータを**図7**に示す直径20mm、突き出し長さ60mm、4枚刃のスクエアエンドミルによるアルミニウム合金（A5052）のポケット加工に適用した。切削条件を**表1**に示す。**図8**の左側に示す元の工具経路（修正前）に対し、びびり安定度の閾値を1として計算した結果、**図8**の右側に示す工具経路（修正後）が作成された。工具が被削物へ進入する径方向切込み量が20mmとなる箇所では軸方向切込み量が3分割され、曲線経路（インコーナ）の箇所では2分割されていることが確認される。計算に使用したパソコンの仕様は、CPU: Intel® Core i7-3770K、メインメモリ32GB、GPU: NVIDIA® GeForce GTX780Tiで、計算時間は12秒であった。

図9に修正前後の計算結果と加工結果の比較を示す。**図9(a)**はびびり安定度の計算結果であり、びびり安定度が1以下の箇所（びびりが発生すると予測される箇所）を暖色（黄～赤）で表示している。**図9(b)**は加工面の写真と深さである。深さは非接触三次元測定装置（三鷹光器製 NH-3）で測定した結果で、深い箇所を暖色で示している。びびり安定度の計算結果が概ね1以下の箇所では、加工においてもびびりマークや加工面深さが大きい状態（食い込み）が確認された。また、その状態はびびり安定度がより小さい箇所でも顕著に確認され、びびり安定度が低いほど大きなびびりが発生しているといえる。



図7 実験風景

回転数 [rpm]	11600
送り速度 [mm/min]	4600
軸方向切込み量[mm]	5 (修正前) 1.667-5 (修正後)
径方向切込み量[mm]	5-20
切削油	水溶性切削油

表1 切削条件

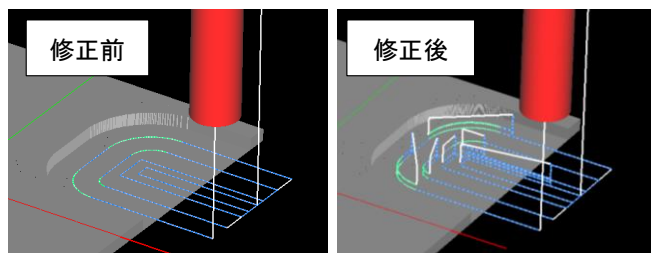
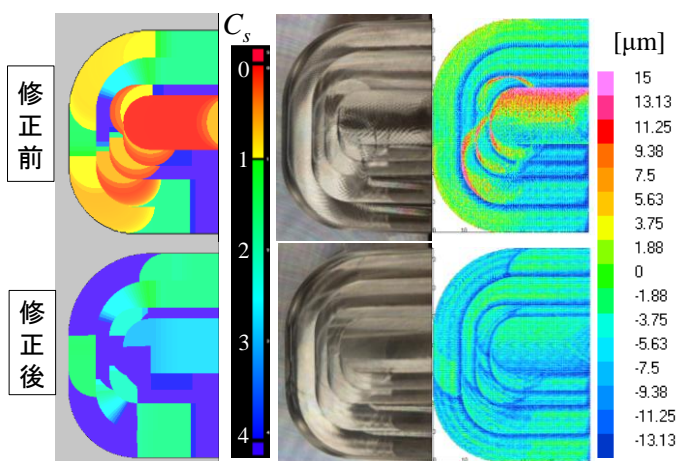


図8 修正前後の工具経路



(a) びびり安定度計算結果 (b) 加工面の写真と深さ

図9 計算結果と加工結果の比較

修正後の工具経路ではびびりの無い良好な加工面が得られており、本シミュレータの有効性が確認された。

3.2 びびり安定度に基づく金型加工工程の検討例

サンプル金型を用いて、2種類の加工工程でびびり安定度の計算と加工を行った。工程Aは荒、仕上げの2工程、工程Bは工程Aの荒と仕上げの間に中仕上げ工程を追加したものである。荒はφ12ラジアスエンドミル、中仕上げと仕上げにはφ5ボールエンドミルを用いた。仕上げ加工のびびり安定度計算結果と加工結果を図10に示す。工程Aでは、インコーナ部でびびり安定度が1以下(黄～赤)の箇所があり、加工においてもインコーナ部でびびりマークが確認された。びびり安定度が大きい工程Bではびびりの発生は確認されなかった。このことから、本シミュレータによるびびりを考慮した加工工

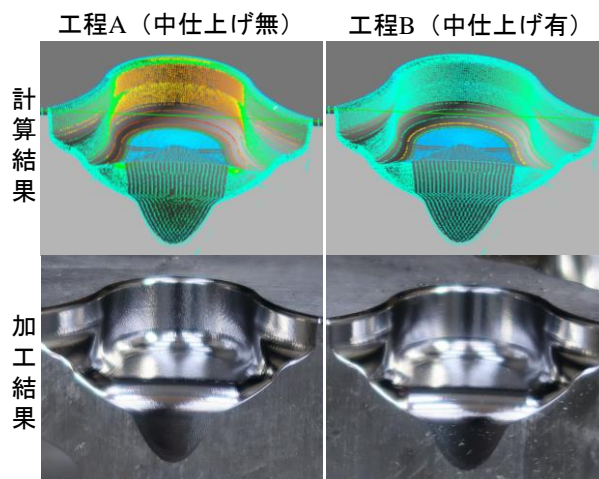


図10 工程の違いによる計算結果と加工結果

程の検討が可能であるといえる。

4 結 言

エンドミル加工のNCデータからびびり安定性を評価し、びびりを回避することを目的として、任意の加工状態におけるびびり安定度を算出する手法を提案した。そして、びびり安定度を可視化し、びびり安定度が低い箇所工具経路を追加してびびりを回避するNCシミュレータを開発した。

本シミュレータをスクエアエンドミルのポケット加工に適用した結果、元のNCデータではびびり安定度が1以下の箇所ではびびりが確認され、自動修正されたNCデータではびびりの無い良好な加工面が得られた。また、ボールエンドミルによるサンプル金型の加工事例では、加工工程の違いによるびびりの有無を予測できた。

文 献

- 1) Y. Altintas and E. Budak: Annals of CIRP, 44, 1 (1995), 357
- 2) 上野他: 生産と加工に関する学術講演会 2010, (2010), 273
- 3) 西川他: 精密工学会誌, 78, 11 (2012), 975
- 4) T. Insperger and G. Stepan: International Journal for Numerical Methods in Engineering, 61, 1 (2004), 117
- 5) Y. Altintas et al.: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 1, 1 (2008), 35
- 6) E. Shamoto and K. Akazawa, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58, 1 (2009), 351

