

## 金型高精度加工システムの開発（第2報）

# 1 ラジアスエンドミルの加工誤差補償システムの開発

西川隆敏, 菊田敬一, 筒本隆博, 門藤至宏, 山本 健, 岩谷 稔, 弓場憲生, 佐々木憲吾, 金子順一\*

Development of the system for high accuracy machining of die and mold (2nd Report)

Development of machining error compensation system of radius end mill

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi, TSUTSUMOTO Takahiro, MONDOU Munchiro,  
YAMAMOTO Ken, IWATANI Minoru, YUBA Norio, SASAKI Kengo and KANEKO Jun'ichi\*

A machining error compensation system for radius end milling was developed. The system gives machining error caused by dynamic deflection and shape error of tool by the help of rendering function of graphics processing unit (GPU) that enables rapid calculation of cutting surface and finished surface. NC data generated with CAM software is modified based on the results of error prediction. The system was verified with cutting experiments of inclined surface. The predicted machining errors showed a good agreement with the measured ones, and the maximum machining error decreased from 42 $\mu$ m to 4 $\mu$ m by applying the error compensation system.

キーワード：ラジアスエンドミル, 加工誤差予測, 加工誤差補償, GPU, 工具動たわみ

## 1 緒 言

金型の加工に利用される CAM ソフトは, CAD モデル形状の幾何学的な情報に基づいて NC データを作成している。その際, 切削力の作用により工具がたわむ現象などは考慮されないため, CAD モデル形状に対して加工誤差が生じ, 加工現場では修正に多くの工数が費やされている。金型加工で一般に用いられる 3 軸のエンドミル加工では, 工具のたわみが加工誤差の大きな要因であり, 高精度加工を行うには, これを予測し補正することが有効である。

筆者らは, 3 軸のボールエンドミル加工を対象に, 切削力による工具のたわみと工具自体の形状誤差に起因する加工誤差を事前に予測し, NC データを修正する加工誤差補償システムを提案している<sup>1), 2)</sup>。本システムの特徴は, 動たわみモデルにより高精度に誤差を予測できることと, GPU (Graphics processing unit) として知られる超並列処理デバイスの描画機能を用いることにより, 金型のような大規模な加工に対しても高速に計算できることである。

近年, 2.5 次元の比較的単純な形状に対しては, **図 1 (a)**に示すボールエンドミルではなく, **図 1 (b)**に示すラジアスエンドミルによる等高線加工が多用されている。この理由として, 製品の最小凹 R とは無関係に工具直径を大きくできるため剛性面で有利なことと, 平坦部の加

工では径方向の切込みを大きくできるため, 能率面で有利なことがあげられる。

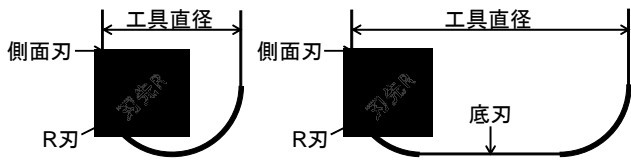
そこで本研究では, ボールエンドミルの加工誤差補償システム<sup>1), 2)</sup>を拡張し, ラジアスエンドミルの等高線加工に対応したシステムを開発した。ラジアスエンドミルの等高線加工では, 主に**図 1**に示す R 刃と側面刃が切削に関与する。そこで, GPU を用いた工具側面からの描画により, 高い計算精度で切削領域を検出する手法を提案する。

以下, 提案手法の概要と, 開発したシステムの構成, 傾斜面加工への適用例について述べる。

## 2 ラジアスエンドミル適用時の問題点

**図 2**に既提案の GPU による切削領域推定手法<sup>1)</sup>を用いて, ボールエンドミルとラジアスエンドミルの切削領域を描画した例を示す。この図は, 工具直径を一辺とする正方形を視界範囲とし, 工具刃先の下側から工具を見る方向に視点を設定し, 「予測位置の工具切れ刃の回転軌跡」と「1 刃送り前以前の全ての工具移動軌跡 (工具掃引体)」と「被削物初期形状」を同時に描画したものである。ここで, 工具切れ刃の回転軌跡が表示される領域を, 工具が被削物に切り込む切削領域として検出する。ボールエンドミルでは, 視界範囲の正方形に内接する円の内側全てが, 工具切れ刃の回転軌跡領域となる。一方, ラジアスエンドミルの有効な切れ刃が存在する領域は, 正方形に内接する円と工具刃先 R 分内側に入った同心円

\*埼玉大学大学院 理工学研究科



(a) ボールエンドミル (b) ラジラスエンドミル

図1 ボールエンドミルとラジラスエンドミルの模式図

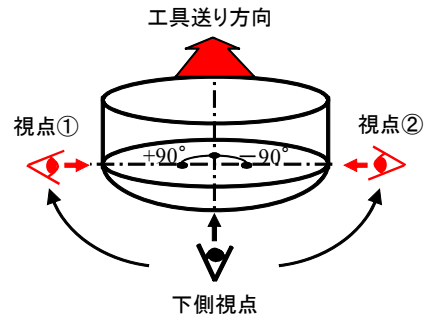
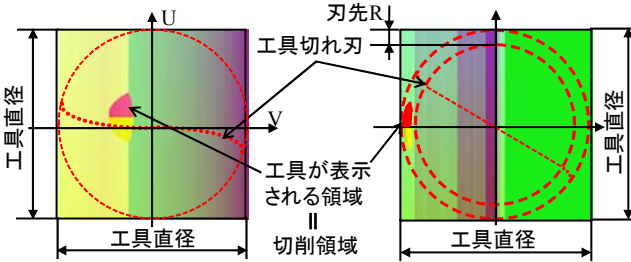


図3 視点の工具側面への移動



(a) ボールエンドミル (b) ラジラスエンドミル

図2 工具下側視点による切削領域検出時の描画面面

に囲まれた範囲である。そのため、少ない画素数で切削領域を検出することになり、計算精度の悪化が懸念される。また、工具下側からの描画では、工具側面が表示されないため、側面刃の切削を考慮できない問題もある。

### 3 ラジラスエンドミルの誤差補償システム

前述した問題に対応するため、工具側面からの描画により切削領域を検出する手法を提案する。一般に、仕上げ加工では径方向の切込みが工具径に対して小さいため、等高線加工における切削領域は、アップカットかダウンカットかにより、工具の送り方向に対して工具軸回りに $+90^\circ$  または $-90^\circ$  ずれた位置近傍に存在する。そこで、図3に示すように切削領域があると予想されるいずれかの工具側面に視点を変更し、視界の幅を工具直径、高さを工具刃先Rの2倍にして描画する。図4はこのときの描画例であり、有効な切れ刃が存在する範囲はほぼ画面全体となる。つまり、同一加工条件では下側視点の図2(b)と比較して、切削領域を大きく表示できるため、計算精度が向上する。さらに、下側視点では不可能な側面刃による切削も考慮することが可能になる。

提案手法のフローチャートを図5に示す。基本的な流れはボールエンドミルの場合と同様であるが、step1の視点位置を決定するステップが追加されている。処理はNCデータの一つのパス（ブロック）毎に行う。

step1では、一つのパスを工具が移動する間に、被削物を加工する領域（加工領域）を判定する。GPUの描画機能を用いて、「一つのパスの工具移動軌跡」と「それまでの全ての工具移動軌跡」及び「被削物初期形状デ

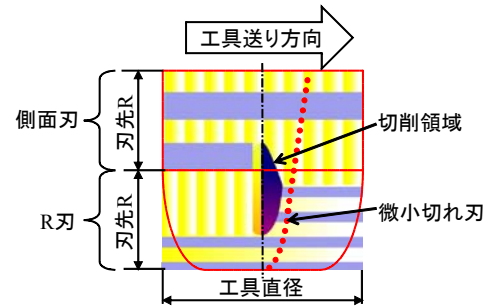


図4 工具側面視点によるラジラスエンドミルの切削領域検出時の描画面面

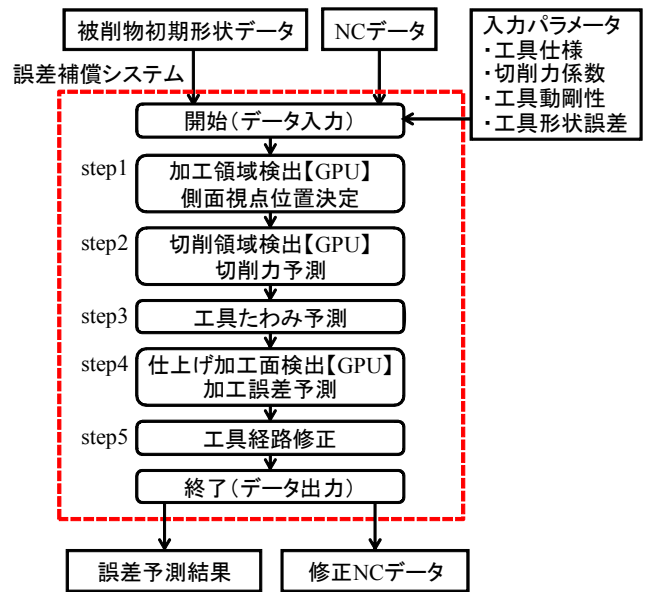


図5 提案手法のフローチャート

ータ」を重ねて配置し描画する。図6はこの描画例であり、工具の下側に視点を置き、工具送り方向が画面上方向になるようにして、視界の幅を工具直径、高さを一つのパスの工具経路長としたものである。ここで、一つのパスの工具移動軌跡が表示されている箇所は、工具がこのパスを移動する際に加工が行われる加工領域を示している。この領域内に誤差予測位置を設定し、側面視点位置を決定する。図6の場合は、加工領域が画面左側にあ

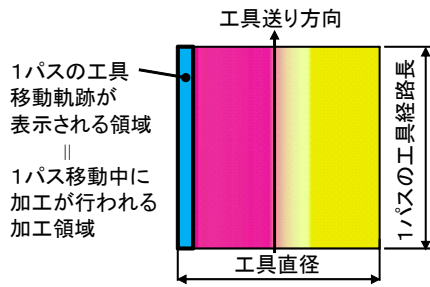


図6 1パス移動中の加工領域検出時の描画面面

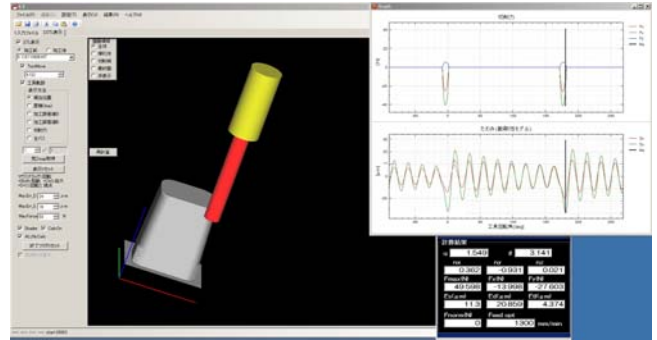


図7 開発したシステムの画面イメージ

るためダウンカットと判定し、図3の視点②とする。

step2 では step1 で決定した視点で、切削力の予測に必要な描画を行う。図4が描画例である。その後、工具切れ刃を分割した微小切れ刃の位置が切削領域内にあれば切削中と判定し、幾何学的に算出される切り取り厚さと切削力係数から工具1回転中の切削力を得る。

step3 では、工具1回転中の径方向のたわみを切削力と動剛性から動たわみモデルにより算出する。

step4 では、加工誤差を予測するために加工終了時の仕上げ加工面の検出を行う。step2 の描画結果(図4)に、1刃送り後以降の工具掃引体を加えて描画し、工具回転軌跡が表示される領域を仕上げ加工面として検出する。仕上げ加工面内の一点を代表点(加工面創成点)とし、工具切れ刃がこの点を創成する瞬間の工具たわみ量からたわみに起因する誤差を求める。さらに、この切れ刃位置における工具形状誤差から工具形状に起因する誤差を求める。工具形状誤差とは公称の工具半径から実工具回転半径を減じたもので、事前に測定して求めておく必要がある。これらの誤差の和を加工誤差として算出する。

step5 では step4 で得られた加工誤差の予測値と反対方向に工具経路を修正する。

#### 4 適用例

本提案手法に基づいて開発したプロトタイプシステムの画面イメージを図7に示す。このシステムを図8に示す89.5°の傾斜を有する立ち壁形状の等高線加工に適用した。工具は直径20mm、刃先R1mm、突出し長さ130mmのチップ式2枚刃ラジアスエンドミルであり、被削材はKTSM21(S55C系硫黄快削鋼)である。NCデータは中仕上げ加工の残り代を0.2mm、仕上げ加工の切削条件を表1で示すものとして、市販のCAMで作成した。

予測のための入力パラメータは次の手順で求めた。切削力係数は側面刃が切削に関与しない傾斜角80°の面を等高線加工した時の切削力測定値を基に決定した。

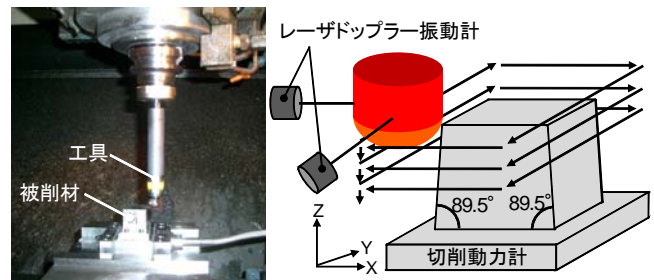


図8 実験方法

表1 切削条件

回転数 $S$	min <sup>-1</sup>	2700
送り速度 $F$	mm/min	270, 1350
加工面法線方向切込み $D_n$	mm	0.2
Z方向ピッチ $D_z$	mm	0.5
切削様式		ダウンカット
切削油		ドライ
傾斜角 $q$	°	89.5

表2 切削力係数

$K_{te}, K_{re}, K_{ae}$	N/mm	16.21, 18.98, 0
$K_{ts}, K_{rs}, K_{as}$	N/mm <sup>2</sup>	1999, 1034, 0

表3 工具のモーダルパラメータ

$m_x$	kg	0.1004, 0.2437
$c_x$	Ns/m	24.49, 290.7
$k_x$	MN/m	1.830, 10.96
$m_y$	kg	0.09750, 0.2966
$c_y$	Ns/m	22.47, 568.9
$k_y$	MN/m	1.773, 15.59

切削力係数を表2に示す。工具の動剛性はインパルス応答法で測定し、モード解析により表3のモーダルパラメ

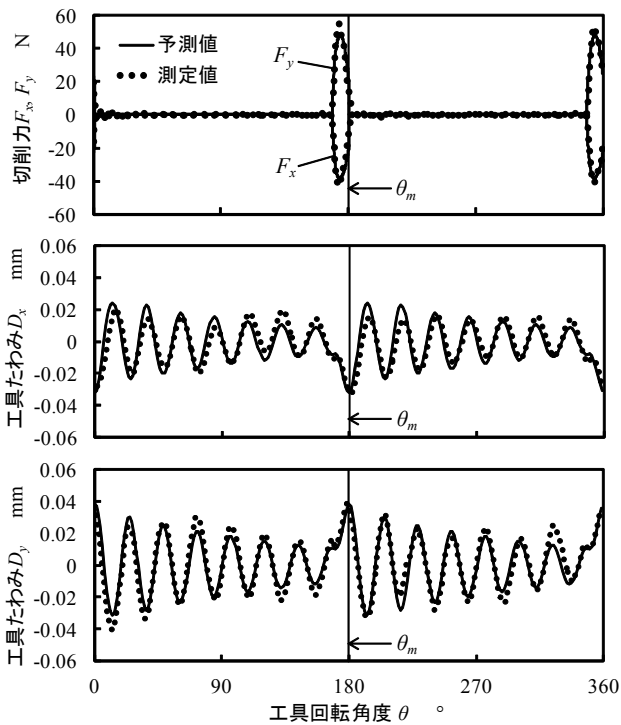


図9 工具1回転中の切削力と工具たわみの予測値と測定値の比較

ータを得た。工具形状誤差は形状測定機（株式会社キーエンス製 LS7030）を用いて回転中（回転数  $100\text{min}^{-1}$ ）の工具最外径を軸方向に  $0.1\text{mm}$  間隔で測定した。これらのパラメータと NC データ、被削物の初期形状（STL データ）を本システムに入力し、仕上げ加工の NC データを予測した誤差と同じ大きさだけ反対方向に修正した。

加工は、まず荒加工と中仕上げ加工を行い、その後、修正した NC データで上側  $10\text{mm}$  を仕上げ加工し、続いて下側  $10\text{mm}$  を CAM で作成した元の NC データで仕上げ加工した。いずれも上側  $5\text{mm}$  を送り速度  $270\text{mm}/\text{min}$ 、下側  $5\text{mm}$  を送り速度  $1350\text{mm}/\text{min}$  で行った。また、仕上げ加工中の切削力と工具たわみを既報<sup>2)</sup>と同様の方法で測定した。図9に工具1回転中の切削力と工具たわみの予測値と測定値の比較を示す。この図は送り速度  $1350\text{mm}/\text{min}$  で、工具が Y 軸+方向に移動するときのものである。図に示した  $\theta_m$  は加工面創成時の工具回転角であり、この時の工具たわみ量（今回の条件では X 方向たわみ  $D_x$ ）が加工誤差となる。予測値は測定値と概ね良く一致しており、動たわみモデルでの予測により切削力に対してたわみの位相が遅れる点も予測できている。また、図10に従来の下側からの描画と、本研究で提案した側面からの描画による X 方向切削力の予測値の比較を示す。今回の加工条件では側面刃が切削に参与しているが、提案手法ではこれを考慮できるため予測精度が向上している。

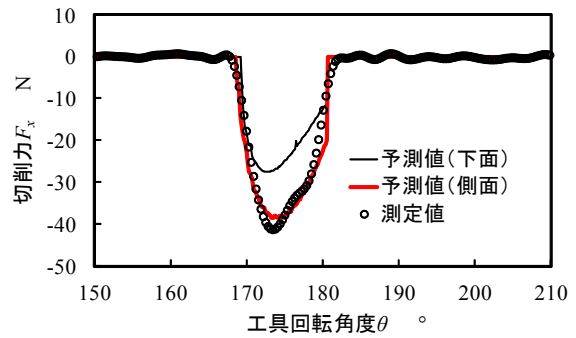


図10 描画方法に違いによる X 方向切削力の予測値と測定値の比較

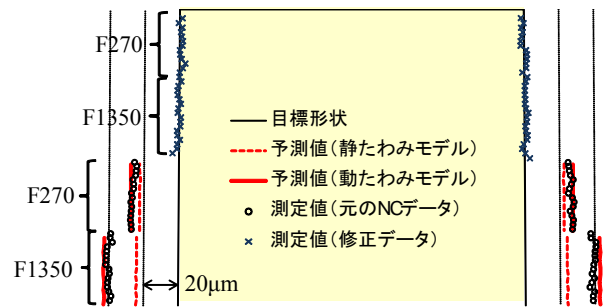


図11 修正前後の加工誤差測定値と予測値の比較

図11に加工誤差の測定値と予測値を示す。予測は、誤差予測によく用いられる静たわみモデルのものも示している。元の NC データでは、送り速度が大きい条件で加工誤差が大きくなっているが、動たわみモデルではいずれの送り速度においても精度良く予測できている。予測値の内訳は、工具たわみ分が送り速度  $270\text{mm}/\text{min}$  のとき  $17\mu\text{m}$ 、 $1350\text{mm}/\text{min}$  のとき  $32\mu\text{m}$  であり、工具形状誤差分が  $10\mu\text{m}$  である。本システムで修正した NC データでは、いずれの送り速度でも高精度な加工が行われており、最大  $42\mu\text{m}$  あった加工誤差が  $4\mu\text{m}$  に低減した。

## 5 結 言

ラジラスエンドミルによる等高線加工時の加工誤差を低減するため、GPU を用いた工具側面からの描画により切削領域を検出する手法を利用した加工誤差補償システムを開発した。本システムを直径  $20\text{mm}$  のラジラスエンドミルによる傾斜角  $89.5^\circ$  の立ち壁加工に適用した結果、最大  $42\mu\text{m}$  あった加工誤差が  $4\mu\text{m}$  に低減した。

## 文 献

- 1) 菊田他：広島県西部工技研究報告，51 (2008)，26
- 2) 西川他：広島県西部工技研究報告，52 (2009)，41