

1 1 金型の加工誤差補償システムの開発（第2報） 加工誤差の予測に基づく工具経路修正システムの開発

西川隆敏, 菊田敬一, 岡野仁, 山下弘之, 門藤至宏*, 中濱久雄*, 金子順一**

Development of compensation system for machining error of die and mold (2nd Report)

Development of tool path generation system based on machining error prediction

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi, OKANO Hitoshi, YAMASHITA Hiroyuki,
MONDOU Munehiro*, NAKAHAMA Hisao* and KANEKO Jun'ichi**

Tool path generation system compensating for machining error was developed. The system can predict machining error caused by both dynamic deflection and shape error of tool in short time with high accuracy. And, the system can modify tool path generated with CAM software to decrease machining error. The system was verified with cutting experiments of cylindrical surface. It was shown that the predicted machining errors were in good agreement with the measured ones and the machining errors were decreased using the tool paths modified with the developed system.

キーワード：ボールエンドミル，誤差予測，工具経路修正，動たわみ

1 緒 言

金型の製作に用いられるCAMソフトは、CADモデル形状の幾何学的な情報に基づいて工具経路が作成される仕組みとなっている。しかし、実際の加工では、切削力による工具のたわみなどが発生するため、CADモデル形状に対して加工誤差が生じる。そのため、例えばプレス金型では、上下型の板厚クリアランスの調整やプレス工程間の金型精度確保のために多くの修正工数が費やされている。加工誤差の要因としては、工作機械の運動精度や熱変形、工具のたわみ、工具自体の形状精度や振れ、工具磨耗などがあげられる。近年の工作機械の高精度化は目覚ましく、高精度加工を行うためには加工に起因する誤差を低減させることが重要である。

本研究では、加工誤差を補償する工具経路を作成することにより、高精度加工を実現することを目的としている。前報¹⁾では、グラフィックスハードウェアの描画機能を用いることにより、工具1回転中の切削力を高速に予測できることを示した。本報では、切削力による工具のたわみ、および、工具の形状誤差に起因する加工誤差を予測し、工具経路を修正するシステムの開発を行った。本システムの特徴は、①高速に誤差予測・工具経路修正が行えること、②工具の動たわみを考慮することにより、高精度に誤差を予測できることである。以下、開発したシステムの概要と、円筒形状の加工への適用例について報告する。

*広島県立総合技術研究所東部工業技術センター

**埼玉大学大学院理工学研究科

2 誤差予測に基づく工具経路修正システム

2.1 工具たわみに起因する加工誤差の予測

本システムのフローチャートを図1に示す。現在、工具はボールエンドミル、工具経路は直線補間(G01)に対応している。本システムでは、CAMから出力された工具経路(NCデータ)と被削物(素材)形状から、工具経路の1行(パス)毎に、切削する領域があるかどうかを判断する。切削する領域があるときには、この領域内に誤差予測位置を設定し、工具1回転中の切削力と工具たわみを予測する。予測モデルについては、これまでにいくつか提案²⁾されているが、本システムでは予測時

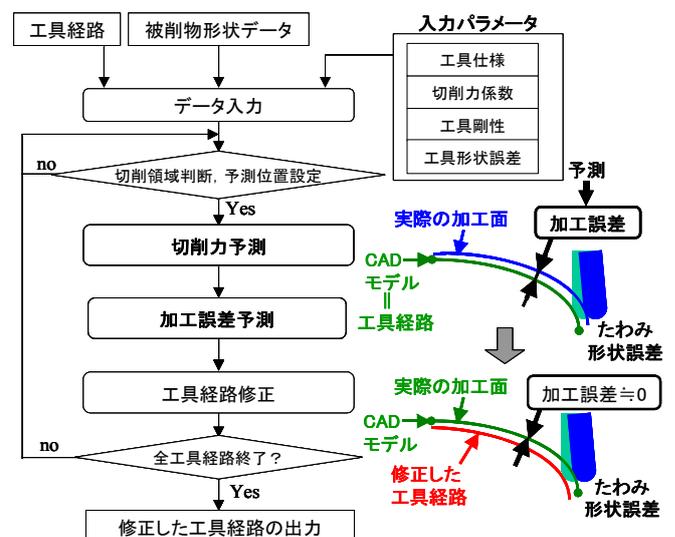


図1 開発したシステムのフローチャート

間と予測精度を考慮して、以下の方法で行う。

切削力の予測は、工具と被削物を剛体とし、幾何学的な切り厚から瞬間切削力モデルを用いて行う。前報で述べたように、本システムでは、工具の被削物への切込み状態をグラフィックスハードウェアの描画機能を利用して推定することにより、高速な予測が可能である。

工具たわみについては、**図2**に示すように XY 2 方向の並進運動としてモデル化し、次式の運動方程式を用いて、予測された切削力 F_x, F_y の作用による工具たわみ D_x, D_y を算出する。

$$M_x \frac{d^2 D_x}{dt^2} + C_x \frac{dD_x}{dt} + K_x D_x = F_x \quad \dots (1)$$

$$M_y \frac{d^2 D_y}{dt^2} + C_y \frac{dD_y}{dt} + K_y D_y = F_y$$

このモデルは再生びびりを予測することはできないが、通常誤差予測に用いられる静たわみではなく動たわみを考慮するため、高精度な誤差予測が可能になると考えられる。また、回転数の違いによる加工誤差の違い³⁾を予測することも可能である。式(1)の一般解は、自由振動と強制振動の和となるが、数回転同じ状態で加工が行われた後の定常状態では強制振動のみを考慮すればよい。そこで、予測された1回転中の切削力をFFTした結果 $F(\omega)$ と、インパルス加振実験から求められる工具のコンプライアンス伝達関数 $G(\omega)$ (動剛性の逆数) の積である周波数領域の工具たわみ $D(\omega)$ を算出し、これを逆FFT

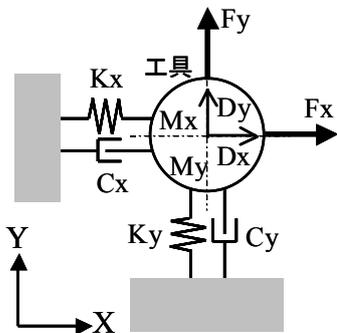


図2 工具たわみ計算モデル

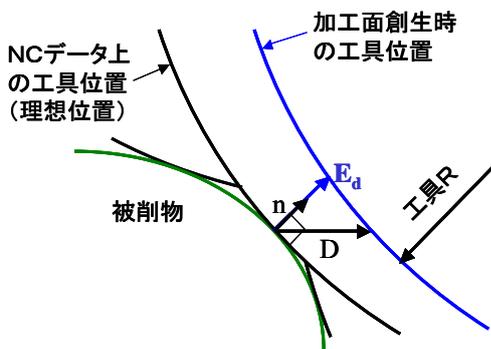


図3 工具たわみに起因する加工誤差

することにより工具1回転中のたわみを得る。これにより、高速な工具たわみの予測を可能としている。なお、一般的な金型加工では、被削物は工具に比べて十分剛性が大いと考えられるため、被削物の変形は無視する。

1回転中の工具たわみのうち、加工誤差は、加工終了時点に加工面として残る箇所を工具切れ刃が創成する瞬間(加工面創成時)におけるたわみ量となる。したがって、加工面創成時のたわみ量 D_{xm}, D_{ym} を用いて、次式により加工面法線方向の誤差 E_d を予測する(**図3**)。

$$E_d = (\mathbf{D} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad \dots (2)$$

$$\mathbf{D} = [D_{xm}, D_{ym}, 0]$$

ここで、 \mathbf{D} : 加工面創成時工具たわみベクトル

\mathbf{n} : 加工面法線単位ベクトル

2.2 工具形状誤差に起因する加工誤差の予測

図4に示すように、工具にはそれ自体に形状誤差があり、さらに機械に取り付けた状態での芯ずれやアンバランスにより、回転中の切れ刃最外周の軌跡は理想形状(ボールエンドミルの場合は真球)から乖離する。この誤差は使用する工具毎に異なると考えられるため、加工前に回転中の工具最外径をいくつかの工具軸断面で測定して、理想形状との差である工具形状誤差を求めておく。そして、加工面を創成する工具切れ刃位置における工具形状誤差を用いて、工具形状誤差に起因する加工誤差

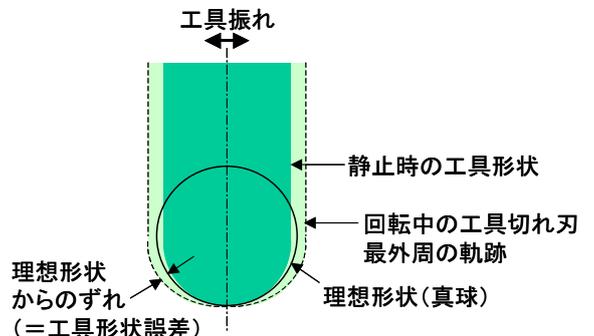


図4 回転中の工具切れ刃最外周の軌跡と工具形状誤差

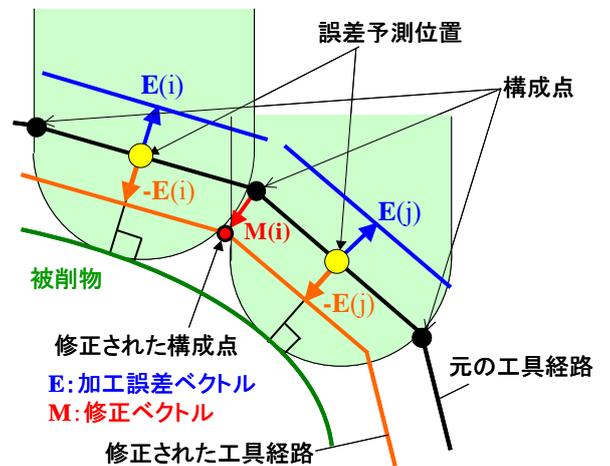


図5 工具経路の修正方法

E_p を予測する。

2.3 工具経路の修正

以上の2つの要因による誤差の和を加工誤差 E ($=E_d+E_p$) とし、この加工誤差に基づいて工具経路を修正する。具体的には、**図5**に示すとおり、元の工具経路の各構成点を修正ベクトル M により移動させることにより修正する。修正ベクトル M の方向は、構成点の前後2つのパスにおける加工誤差ベクトル E と大きさが等しく向きが反対のベクトルの和方向($-(E(i)+E(j))$)とする。また、修正ベクトル M の大きさは、修正ベクトル M の方向に前後2つのパスが平行移動するとき、修正前後のパス間の距離とそれぞれの加工誤差の大きさとの差が小さくなるように決定する。

3 適用例

3.1 実験方法および予測方法

本システムを、**図6**に示す円筒形状の等高線加工と走査線加工に適用した。走査線加工はピックフィードを工具送り方向に対して右方向、左方向の2通りとした。まず、荒加工と中仕上げ加工を行い、仕上げ加工をCAMから出力された工具経路と、本システムを用いて修正した工具経路の2種類で行った。仕上げ加工の切削条件を表1に示す。被削材はFCD550とし、一部、切削力の無視できる樹脂（三洋化成工業(株)製サンモジュール TW-E)でも行った。工具は直径20mmの2枚刃ボールエンドミルとし、全ての仕上げ加工を同一工具で行った。工具の静的な振れは $2\mu m$ である。工具形状誤差は、工具軸方向に0.5mmピッチ毎に形状測定機(㈱キーエンス製LS-7030)を用いて測定した。また、切削動力計の周波数特性を利用して、実際に工具に作用する切削力を測定するようにした。切削中の工具先端部のたわみは、工具シャンク部の振動測定値を変換して求めた。そして、加工後の被削物形状を3次元測定機で測定した。

予測は、樹脂加工では切削力を0として行い、FCD550では傾斜角 65° の等高線加工での切削力測定値

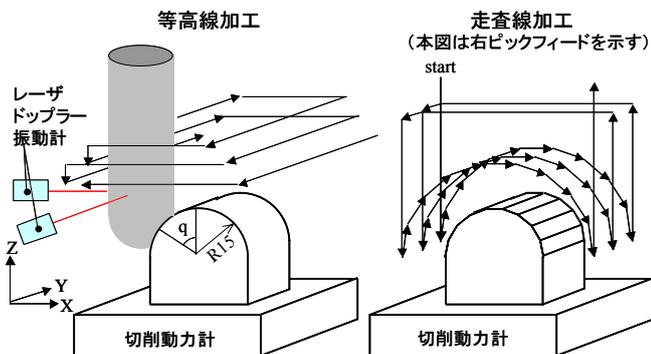


図6 実験方法

から切削力係数を同定¹⁾し、全て同一の切削力係数を用いて行った。使用したパソコンの仕様は、CPUがIntel製Core2 Duo 3GHz、メモリ2GB、グラフィックスハードウェアがnVIDIA製のGeForce8800GTS512MBである。

3.2 結果および考察

仕上げ加工の全てのパス(等高線加工809パス、走査線加工508パス)の誤差予測・工具経路修正に要した時間は、等高線加工28秒、走査線加工35秒であり、高速に計算することができた。

図7に、樹脂の等高線加工における加工誤差の予測結果を示す。傾斜角の大きな箇所では、予測値、測定値ともに削り残しがみられる。これは、使用した工具の外径が小さいためであり、工具形状誤差が被削物へ転写されていることが確認される。

図8に、FCD550の加工における切削力と工具たわみの予測結果を示す。この図は1つの切れ刃が被削物を削りとりとる様子を示しており、図中には、加工面創成時の工具回転角を表示している。傾斜角によって切削速度は変化するが、今回の実験条件範囲内においては、同一の切削力係数で切削力を良好に予測できている。また、工具たわみは、動たわみモデルでの予測により、静たわみモデルでは考慮できない切削力に対する位相遅れも含めて予測できていることが確認できる。

図9に、FCD550の加工誤差予測値と工具経路の修正前後での測定値を示す。全ての加工において概ね精度良く予測できている。予測に基づく工具経路の修正により加工誤差を低減することができた。走査線加工では、ピックフィードや送り方向により、加工誤差が異なるこ

表1 切削条件

回転数	6000min ⁻¹
送り速度	4800mm/min
切込み(法線方向)	0.2mm
ピックフィード	0.63mm
傾斜角q	0° ~ 90° (等高線) 0°, 20°, 40°, 60°, 80° (走査線)

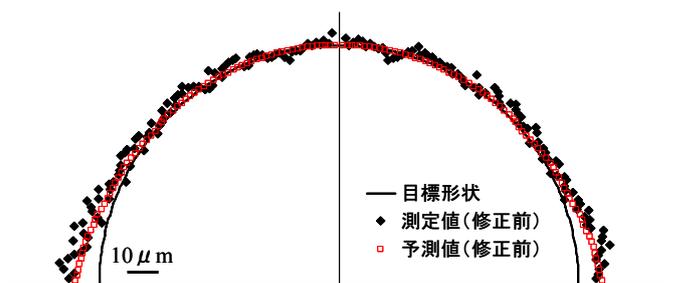
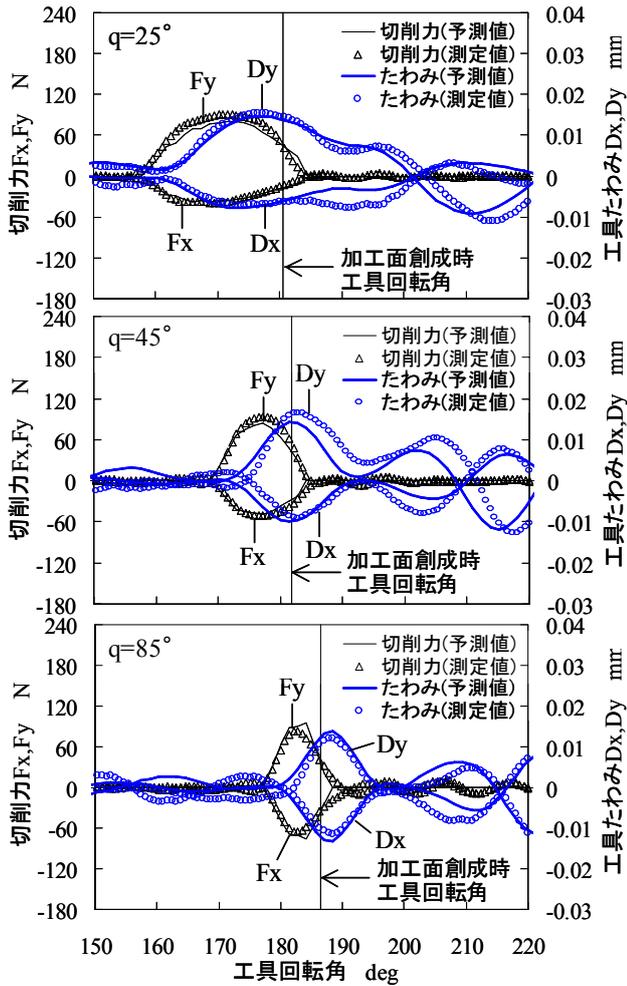
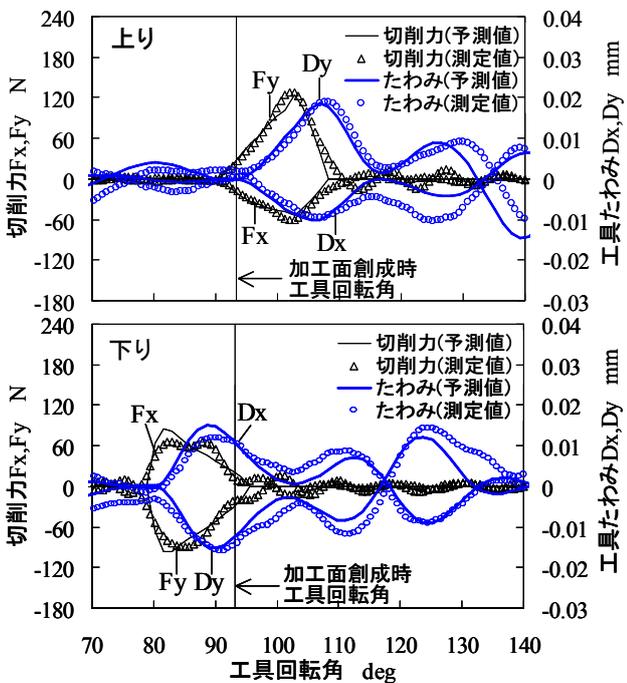


図7 樹脂加工における加工誤差の予測と実測の比較



a) 等高線加工



b) 走査線加工 (右ピックフィード, 傾斜角 60°)

図8 切削力・工具たわみの予測と実測の比較

とが確認される。これは、図8 b) に代表的に示されるように、加工面創成時の切削力の大きさにはあまり差がみられないが、切削力に対して工具たわみの位相が遅れるため、工具切れ刃が被削物を削り始めて離脱するまでのどの時点で加工面が創成されるかによって、加工面創成時の工具たわみが異なることが原因と考えられる。

4 結 言

加工誤差の予測に基づき工具経路を修正するシステムを開発し、円筒形状の加工へ適用して有効性を示した。

今後は、実金型モデルに適用するとともに、工具の振れや工具磨耗などによる切削力・加工誤差への影響の検討、計算時間のさらなる高速化に取り組む予定である。

文 献

- 1) 菊田他：広島県西部工技研究報告, 51(2008), 26
- 2) S. Smith and J. Tlustý: J. Eng. for Industry, 113 (1991), 169
- 3) 西川他：2008 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2008), 93

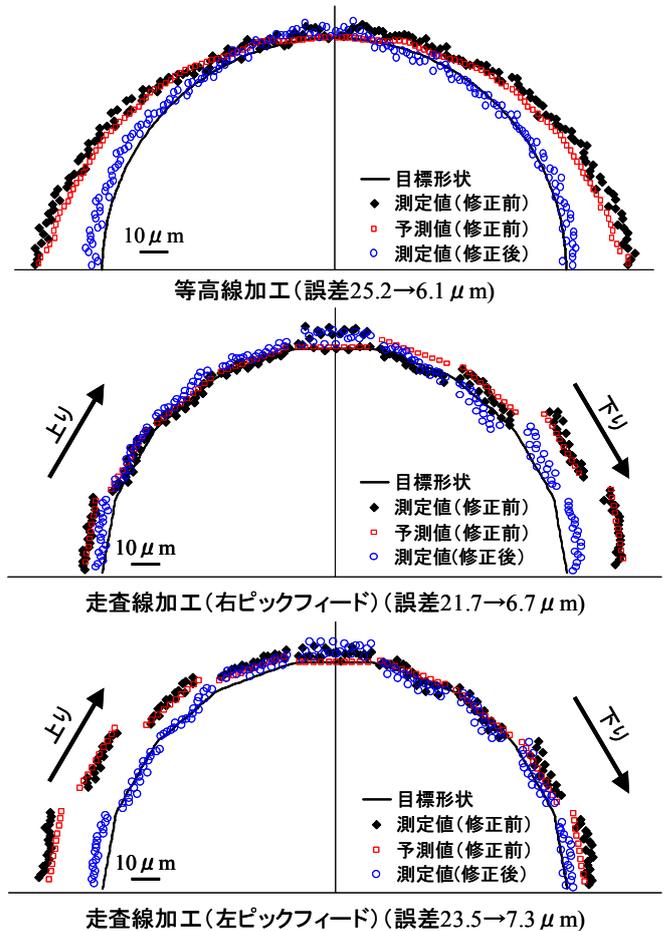


図9 加工誤差予測結果と工具経路修正による効果