

2 金型高精度加工システムの開発（第3報） 工具摩耗を考慮した加工誤差補償システムの開発

西川隆敏, 菊田敬一, 竹保義博*, 筒本隆博, 門藤至宏, 弓場憲生, 佐々木憲吾

Development of the system for high accuracy machining of die and mold (3rd Report)

Development of machining error compensation system considering tool wear

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi, TAKEYASU Yoshihiro, TSUTSUMOTO Takahiro,
MONDOU Munehiro, YUBA Norio and SASAKI Kengo

Tool wear causes additional machining error. In this paper, a machining error compensation system considering the effect of tool wear is presented. Tool wear depends on the real cutting length. In the system, the real cutting length at each cutting edge position is calculated, and the increase of cutting force and the recession of the cutting edge are modeled as a function of the real cutting length. The original tool paths are modified based on the error prediction. The presented system was verified with cutting experiments of radius end milling of S55C. As a result, the machining errors showed a good agreement with the prediction and were decreased from 49 μ m to 7 μ m.

キーワード：工具摩耗, 実切削距離, 切削力, 工具たわみ, 加工誤差予測

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、切削力の作用による工具のたわみなどは考慮されないため加工誤差が生じ、加工後の修正に多くの工数が費やされている。これまでに筆者らは、ボールエンドミルの3軸加工¹⁾やラジラスエンドミルの等高線加工²⁾を対象に、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開発することで、高精度加工に有効であることを示した。

このシステムでは、切削力を計算するための切削力係数や工具形状誤差が切削中に変化しないという前提で計算を行っている。しかし、切削が進むにつれて工具は摩耗し、工具形状誤差が変化する。さらに、切れ味が低下し切削力が増大する。したがって、加工誤差を精度良く予測するためには、これら2つの現象も考慮する必要がある。また、工具摩耗は工具切れ刃と被削物とが実際に摺動する距離である実切削距離に依存する。これまでに、被削物形状をZ-mapモデルで表現し、切れ刃位置毎の実切削距離を求める手法が提案されている³⁾。しかし、所定の精度を得るためには、Z-mapモデルの格子間隔を小さくする必要が生じ、特に大きな金型では計算機のメモリ使用量が膨大となる。また、従来の研究では逃げ面摩

耗幅³⁾や切れ刃後退量⁴⁾を実切削距離から予測する手法は提案されているが、切削力増大の予測手法については十分研究されていない。

そこで、本研究では、工具摩耗を考慮するために工具切れ刃位置毎の実切削距離をGPU (Graphics processing unit) の描画機能を用いて高精度に算出し、工具切れ刃の後退量と切削力の増大量をこの実切削距離の関数としてモデル化した加工誤差予測手法を提案する。なお、本研究では、工具摩耗が実切削距離に比例して安定的に進行する定常摩耗領域を対象とする。以下、提案手法の概要とラジラスエンドミルによるサンプル金型の加工に適用した事例について報告する。

2 工具摩耗を考慮した加工誤差の予測

図1に工具摩耗を考慮した加工誤差予測の概要を示す。まず、被削物の初期形状データやNCデータなどを読み込む(Step1)。次に、1つの工具経路毎に切削領域を導出し、切れ刃位置毎の実切削距離を算出する(Step2)。そして、実切削距離を用いて摩耗した工具の切削力と切れ刃後退量を計算する(Step3)。最後に、工具のたわみと形状誤差に起因する加工誤差を予測し、誤差を補償するようにNCデータを修正する(Step4)。Step1とStep4は提案済みのシステム¹⁾と同じ手順であるため、以下では、Step2とStep3について説明する。

* (現) 広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター

2.1 実切削距離の算出 (Step2)

開発済みのシステム¹⁾では、GPUの描画機能を用いて切削力を予測している。これは、工具近傍の被削物形状をGPUの並列処理機能を用いて高速に導出するもので、高精度な予測が可能である。この手法を拡張して実切削距離を算出する。まず、1つの工具経路中の1箇所での1回転中の切削領域を図2(a)のように得る¹⁾。そして、工具切れ刃を分割した各微小切れ刃が切削領域内に存在する場合に、切削中であると判断する。次に、この微小切れ刃の実切削距離 Δl_c を、送り Δf と回転 $\Delta\theta$ を考慮した移動距離から求める(図2(b))。切れ刃の通過軌跡はトロコイド曲線となるが、微小な直線で近似して求めている。これを微小回転毎に1回転分繰り返し、工具1回転中の実切削距離 L_{cr} を得る。そして、この切削状態が1つの工具経路移動中は変わらないと仮定し、1つの工具経路での実切削距離 L_{cp} を次式で得る。

$$L_{cp} = \frac{L}{f_r} L_{cr} \quad (1)$$

ここで、 L は1つの工具経路のうち切削中の工具移動距離、 f_r は工具1回転当りの送り量である。ある予測箇所(m 番目の工具経路)での n 番目の微小切れ刃の実切削距離 $L_{c(m,n)}$ は、次式のとおり実切削距離を順次加算して

求める。

$$\begin{aligned} L_{c(m,n)} &= 0 \quad (m=1) \\ L_{c(m,n)} &= L_{c(m-1,n)} + L_{cp(m-1,n)} \quad (m \neq 1) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 切削力と切れ刃後退量のモデル化 (Step3)

工具が摩耗すると切削力のエッジフォース成分(切取り厚さ0での切削力で、逃げ面力とも呼ばれる)が増大することが知られている⁵⁾。そこで、簡単な近似として、図3に示すエッジフォース成分(K_{te} , K_{re} , K_{ae})の増大量が実切削距離 L_c に比例するとして、次式でモデル化する。

$$\begin{aligned} dF_t &= (K_{te} + K_{tel}L_c + K_{ict_r})t_w \\ dF_r &= (K_{re} + K_{rel}L_c + K_{rc}t_r)t_w \\ dF_a &= (K_{ae} + K_{ael}L_c + K_{act_r})t_w \end{aligned} \quad (3)$$

この式は従来よく用いられる切削力の計算式に第2項を追加したものである。ここで、 dF_t , dF_r , dF_a は図3に示す微小切れ刃に作用する主分力、背分力、軸方向分力、

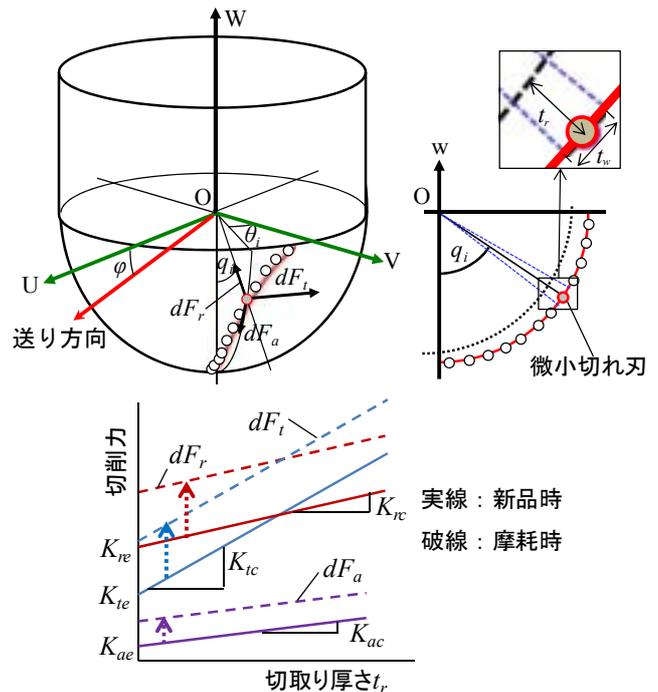


図3 摩耗を考慮した切削力のモデル化

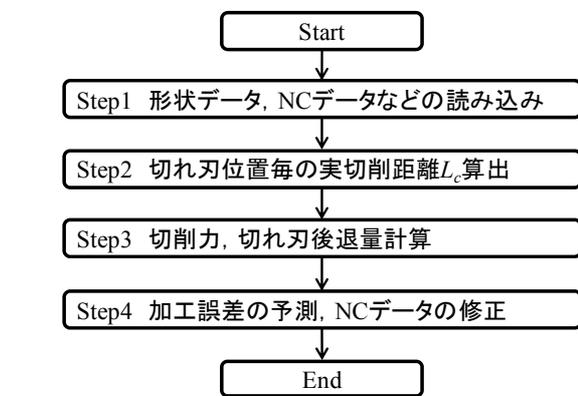


図1 工具摩耗を考慮した加工誤差予測

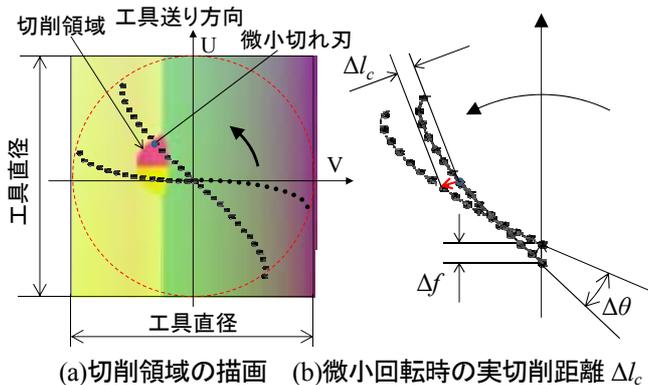


図2 実切削距離の算出

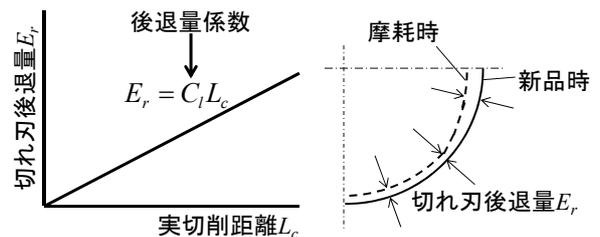


図4 摩耗による切れ刃後退量のモデル化

t_r は切取り厚さ、 t_w は切削幅、 $K_{te}, K_{lc}, K_{re}, K_{rc}, K_{ae}, K_{ac}$ は摩耗に依存しない切削力係数、 $K_{tel}, K_{rel}, K_{ael}$ は摩耗に依存する切削力係数である。

また、図4に示すように切れ刃の工具R中心方向の後退量 E_r を、実切削距離 L_c と後退量係数 C_l を用いて次式でモデル化する。

$$E_r = C_l L_c \quad (4)$$

これらの係数は新品工具と摩耗工具から実験的に求める。

3 適用例

提案手法を図5に示す加工高さ100mmのサンプル金型の仕上げ加工に適用した。表1に使用した工具と被削材、表2に切削条件を示す。市販のCAMを用いて上から下へ等高線のダウンカットで加工するNCデータを作成した。まず、この修正前のNCデータで加工し、切削力係数と後退量係数を決定した。次に、開発したシステムで加工誤差の予測、NCデータの修正を行い、修正したNCデータで加工した。

3.1 後退量係数と切削力係数の決定

図6に工具切れ刃位置毎の実切削距離を示す。また、図7に加工後の工具写真を示す。切れ刃位置によって実切削距離や摩耗量が異なることが確認される。

後退量係数は以下の手順で求めた。まず、形状測定機(キーエンス製LS-7030)を用いて、加工前と加工後の工具径を工具軸方向に0.1mm間隔で測定し、半径の差から各位置の切れ刃後退量を求めた。図8は、切れ刃後退量と実切削距離との関係をまとめたものである。図のプロット横の数値は工具先端からの距離(mm)を示す。実切削距離が大きい箇所では、後退量が多い傾向が確認された。この結果を線形近似し後退量係数を求めた。

切削力係数は以下の手順で求めた。まず、加工前と加工後に傾斜角89.5°の加工(送り方向はY軸+方向)時の切削力を測定し、ノイズ除去のため1kHzのローパスフィルターで処理した波形を図9に示す。摩耗により切削

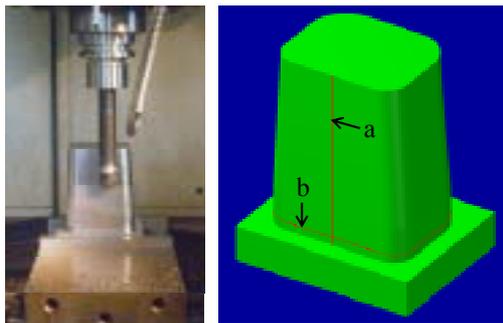


図5 被削物形状

表1 工具と被削材

工具種類	ラジアスエンドミル(チップ式)
径	20mm
長さ	120mm
先端R	1mm
刃数	2枚
被削材	S55C
大きさ	W100×L80×H100mm

表2 切削条件

回転数	S	2700min ⁻¹
送り速度	F	1300mm/min
切込み	D	0.2mm
軸方向ピッチ	Ad	0.5mm
切削様式		等高線ダウンカット
切削油		ドライ

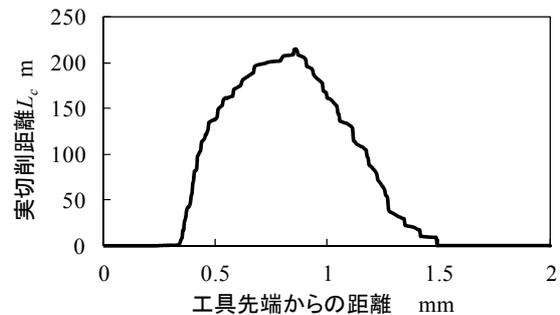


図6 実切削距離

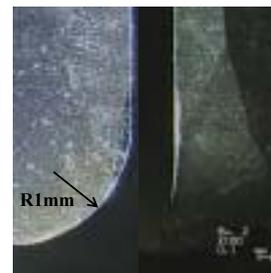


図7 加工後の工具写真

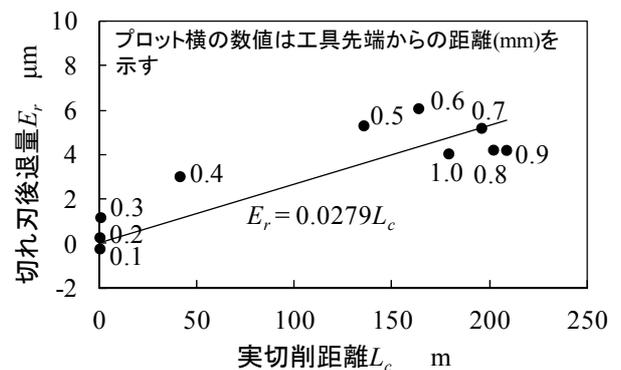


図8 実切削距離と切れ刃後退量

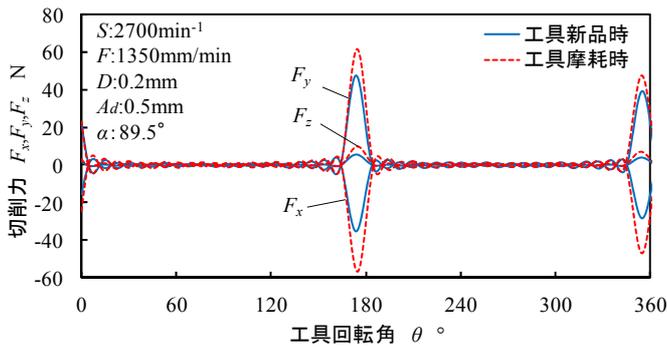


図9 工具新品時と摩耗時の切削力測定結果

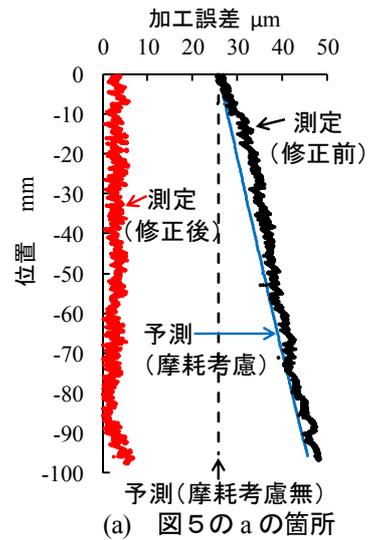
表3 切削力係数と後退量係数

C_l	$\mu\text{m}/\text{m}$	0.0279
K_{te}, K_{re}, K_{ae}	N/mm	16.2, 18.3, 0
$K_{teb}, K_{rel}, K_{ael}$	$\text{N}/\text{mm}/\text{m}$	0.0969, 0.142, 0
K_{tc}, K_{rc}, K_{ac}	N/mm^2	1970, 886, 0

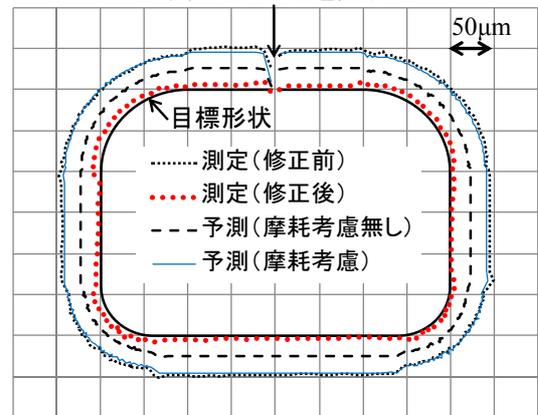
力が增大していることが確認される。次に、新品時の切削力測定値と、実切削距離を 0 とした予測値が一致するように摩耗に依存しない切削力係数を求めた。そして、この値を固定し、摩耗時の切削力測定値と予測値が一致するように摩耗依存切削力係数を求めた。なお、今回使用した工具のねじれ角はほぼ 0° であるため、軸方向分力 dF_a は無視し、切削力係数 K_{ae}, K_{ac}, K_{ael} は 0 とした。表 3 に得られた係数の値を示す。摩耗依存切削力係数は、主分力成分 K_{te} よりも背分力成分 K_{rel} が大きいことから、摩耗は加工誤差に効く方向の力である背分力へ大きな影響を与えるといえる。

3.2 予測結果と工具経路修正による効果

図 10 に NC データ修正前後の加工誤差測定値と修正前の予測値を示す。図 10(a) は図 5 の a の箇所の加工誤差であり、位置 0 は被削物上面を示している。修正前の加工誤差は加工が進むにつれて大きくなっているが、摩耗を考慮することにより予測精度が向上している。予測値は、新品時 $25.7\mu\text{m}$ (形状分 $-1.6\mu\text{m}$, たわみ分 $27.3\mu\text{m}$)、摩耗時 $45.7\mu\text{m}$ (形状分 $2.9\mu\text{m}$, たわみ分 $42.8\mu\text{m}$) であり、今回の実験条件では摩耗による切れ刃後退よりも切削力増大の影響が大きいといえる。また、修正した NC データにより、最大 $49\mu\text{m}$ あった加工誤差が $7\mu\text{m}$ に低減した。図 10(b) は図 5 の b の箇所 (位置 -95mm) の加工誤差である。直線部分よりも円弧部分で誤差が小さいことや、工具の進入・退避箇所でも誤差が小さくなることを精度良く予測できている。また、修正により全周にわたって加工誤差が低減していることが確認できる。



(a) 図 5 の a の箇所



(b) 図 5 の b の箇所 (位置 -95mm)

図 10 加工誤差の予測値と測定値

4 結 言

工具摩耗を考慮して高精度に加工することを目的として、工具切れ刃位置毎に実切削距離を算出する方法、および、切削力と切れ刃後退量のモデル化方法について提案した。提案手法を実装したプロトタイプシステムを開発し、サンプル金型の加工に適用した結果、切削の進行につれて加工誤差が増大することを精度良く予測できた。また、本システムで NC データを修正した結果、最大 $49\mu\text{m}$ あった加工誤差が $7\mu\text{m}$ に低減した。

文 献

- 1) 西川他：精密工学会誌，78, 11 (2012), 975
- 2) 西川他：広島県西部工技研究報告，55 (2012), 1
- 3) 宋他：砥粒加工学会誌，53, 3 (2009), 162
- 4) 香山他：精密工学会誌，67, 9 (2001), 1427
- 5) 社本他：日本機械学会論文集 C 編，69, 683 (2003), 1927

