

金型高精度加工システムの開発 (第7報)

3 異形工具の加工誤差予測システムの開発

姫宮一輝, 西川隆敏, 前田圭治, 久保田将矢

Development of Machining Error Prediction System for Barrel Lenz Tools

HIMEMIYA Kazuki, NISHIKAWA Takatoshi, MAETA Keiji and Kubota Shoya

A system for predicting machining errors caused by tool deflection of barrel lens tools has been developed. For prediction, it is necessary to model the shape of the tool edge of the barrel lens and to model the sweep shape of contour lines and scanning lines. The system was verified by cutting experiments on inclined surfaces, and the predicted cutting forces and machining errors were in good agreement with those measured. In addition, when examining cutting conditions using a machining error prediction system for the machining surface step of the die, the machining surface step was reduced from 32.3 μm to 5.9 μm .

キーワード: エンドミル加工, シミュレーション, 加工誤差, 工具たわみ, 切削力, 異形工具, バレルレンズ

1 緒 言

金型の切削加工では高精度・効率化を目指して様々な取り組みが行われている。そのなかで工具径を変えずに切削領域を広げることができる異形工具が注目されている。異形工具は工具径に対してより大きな刃先 R を得ることができるので、同径のボールエンドミルと比べてピッチ方向の理論表面粗さを表すカスプを小さくすることができる。また、同カスプでの条件では、ボールエンドミルと比べてより大きなピッチをとれるため、加工時間を削減することも可能になる。異形工具の中でも、**図1**に示されるような急傾斜と低傾斜の両方にこの利点を持つバレルレンズ工具の利用が進んでいる。

ただし、大きなピッチでの加工は切削力が大きくなるので、工具たわみによる加工誤差が大きくなることが懸念される。また、通常は1つの異形工具のみで全ての形状を加工することができないので、ボールエンドミルと併用されることが多い。このとき、異形工具とボールエンドミルの加工誤差の違いによって加工面の境界に段差が生じることが問題となっている。

筆者らは、3軸のエンドミル加工で生じた、切削力による工具たわみに起因した加工誤差を予測する金型高精度加工システム¹⁾を提案している。本システムではボール、ラジラス、スクエアの各エンドミルを対象としているが、バレルレンズ工具の予測には対応していない。

本研究では、金型高精度加工システムを拡張し、バレルレンズ工具に対応した加工誤差予測システムを開発した。バレルレンズ工具は**図1**で示すように複数の刃先 R

で構成されているので工具移動掃引体形状の定義が既報のボールエンドミルより複雑である。そこで、バレルレンズの刃先形状や掃引体形状のモデル化とそれらを活用した加工誤差予測システムを提案する。

以下に提案手法の概要と開発したシステムを傾斜面加工や実金型モデルの加工面段差の低減に適用した事例を述べる。

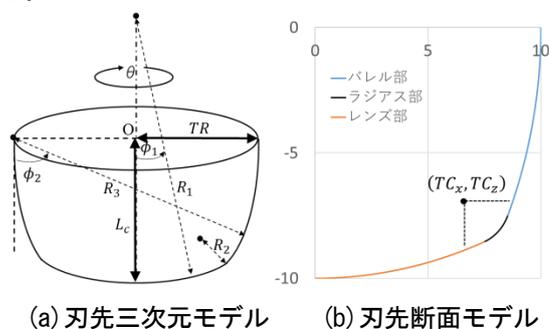


図1 バレルレンズ刃先モデル化

2 モデル化

2.1 工具刃先形状

バレルレンズの刃先形状はレンズ部、ラジラス部、バレル部の3つの領域で構成されており、工具形状をモデル化するためには各領域の刃先半径 R_1, R_2, R_3 と刃先半径 TR 、工具刃先長 L_c が既知であることが必要である。これらの値からラジラス部の刃先半径 R_2 中心座標 (TC_x, TC_z) と、レンズ部とラジラス部の接する点と工具軸とのなす角である接点角度 ϕ_1 、バレル部とラジラス部の接点角度 ϕ_2 が求められる。なおこれらの接点角度はバ

レールレンズの工具中心 O からのものではなく各領域の刃先半径中心からの角度である。

図 1 (a) にあるように工具軸回転方向角 θ , 工具軸となす角 ϕ でパレルレンズをモデル化すると ϕ に応じた各領域の式(1.1)~(1.3)でそれぞれレンズ部, ラジラス部, パレル部が表される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \sin\phi \sin\theta \\ R_1 \sin\phi \cos\theta \\ (R_1 - Lc) - R_1 \cos\phi \end{pmatrix} \quad \dots \text{式(1.1)}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{TC_x + R_2 \sin\phi\} \sin\theta \\ \{TC_x + R_2 \sin\phi\} \cos\theta \\ -TC_z - R_2 \cos\phi \end{pmatrix} \quad \dots \text{式(1.2)}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{(TR - R_3) + R_3 \sin\phi\} \sin\theta \\ \{(TR - R_3) + R_3 \sin\phi\} \cos\theta \\ -R_3 \cos\phi \end{pmatrix} \quad \dots \text{式(1.3)}$$

以上から 3 つの領域を組み合わせた形状を構成し, パレルレンズの刃先形状をモデル化することができる。

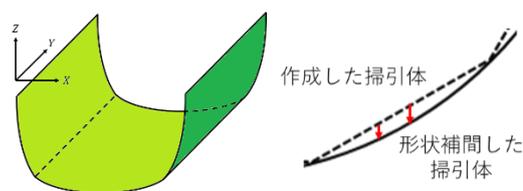
2.2 掃引体形状

本システムでは OpenGL を用いて工具移動掃引体形状を描画し, Z 軸負方向から視たときの高さ情報から切削領域を導出する手法を用いているので, パレルレンズでも同様に掃引体形状を描画する必要がある。

工具の Z 軸移動を伴わない等高線掃引体については, 図 2 (a) のようにパレルレンズの工具刃先形状の最大外形を水平方向に引き延ばした楕円形状が掃引体となる。

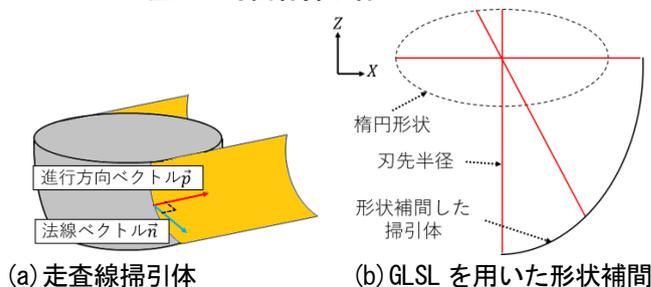
従来のボールエンドミルでは等高線掃引体の半円楕円形状がそのまま走査線掃引体にも適用できたが, パレルレンズではその方法だと適切ではない。Wang らの研究²⁾では工具掃引体形状は工具表面法線ベクトル \mathbf{n} と工具進行方向ベクトル \mathbf{p} が直交するという条件「 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{p} = 0$ 」で得られるとしている。これを用いて図 3 (a) のようにパレルレンズの掃引体を描画した。

OpenGL 上でより高精度な描画を行うために金子ら³⁾は GLSL を利用して図 2 (b) のような形状補間を提案しており, 本システムもその手法を用いて高精度な計算を実現している。パレルレンズ走査線掃引体の GLSL による形状補間を行うためには, 掃引形状を数式で表現する必要がある。レンズ部はボールエンドミルと同様に半円楕円形状で表現し, ラジラス部は楕円を刃先半径分にオフセットした形状⁴⁾で表現した。パレル部については, ラジラス部の考え方を拡張し, 図 3 (b) に示すように楕円と刃先半径を用いて表現した。また, 工具進行方向角度と接点角度の関係によって掃引形状となる領域(レンズ部, ラジラス部, パレル部)が異なることを考慮して掃引形状を実現した。



(a) 等高線掃引体 (b) GLSL を用いた形状補間

図 2 等高線掃引体のモデル化



(a) 走査線掃引体 (b) GLSL を用いた形状補間

図 3 走査線掃引体のモデル化

3 適用例

3.1 傾斜面加工

表 1 に示す, 同じ径のボールとパレルレンズを用いて被削材質 SKD61 (HRC45) の 85° 傾斜面の等高線加工を実施した。パレルレンズはボールと同じピッチ 0.4mm の加工と, ボールと同じカスプとなるピッチ 0.567mm の 2 つの条件で NC データを生成して加工し, 開発した手法を用いて予測した切削力と加工誤差を各種測定機器による測定結果と比較した。

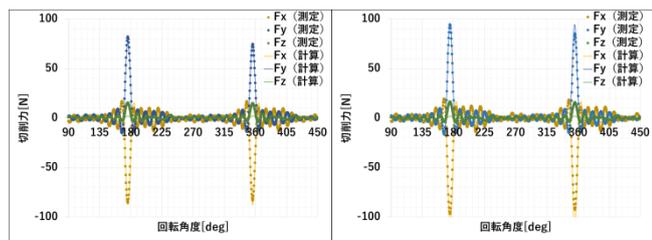
表 1 傾斜面加工の仕上げ加工切削条件

工具	直径 [mm]	つき出し [mm]	回転数 [rpm]	送り速度 [mm/min]	切込量 [mm]	ピッチ [mm]
R10ボール	20	120	4000	2000	0.2	0.4
Φ20パレルレンズ	20	120	4000	2000	0.2	0.4
Φ20パレルレンズ	20	120	4000	2000	0.2	0.567

3.1.1 切削力試験結果

切削動力計 (キスラー製 9256A1) を用いて測定した各加工時の切削力波形と開発したシステムで計算した切削力波形を比較してその効果を確認する。なお, 計算に必要な切削力係数はボールの結果から算出した。

図 4 (a) はボールとピッチが同じときのパレルレンズの切削力波形である。また, 図 4 (b) はボールとカスプが同じときのパレルレンズの切削力波形になり, どちらの結果も測定値と予測値が概ね一致しており, 実装した切削力計算の効果を確認した。



(a) ピッチ一定 (b) カスプ一定

図4 バレルレンズ工具の切削力計算値と測定値の比較

3.1.2 加工誤差の検証

図5に開発したシステムで加工誤差予測の計算結果を示す。加工誤差量に応じて描画の色を変えており、赤色に近いほど誤差が大きくなる。この計算結果から、ボールによる加工で最も誤差が小さく、バレルレンズではピッチ一定よりもカスプ一定の切削条件で加工誤差が大きくなるのが分かる。また、バレルレンズ同士の工程間はNCをオーバーラップさせているので誤差が小さくなると予想される。図6は加工誤差予測計算の断面図の結果(a)と加工したマシニングセンタ(MU-400VA)に搭載されているタッチセンサで加工誤差を測定した結果(b)を比較したのになり、計算値と測定値が概ね一致する結果となった。また、加工工程間の段差部分やNCをオーバーラップさせた部分の加工誤差が小さくなっていることも予測計算通りになっていることを確認できた。

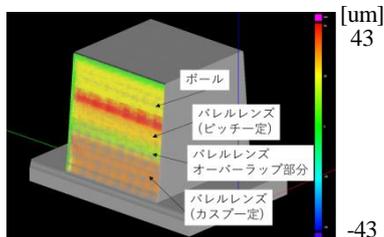
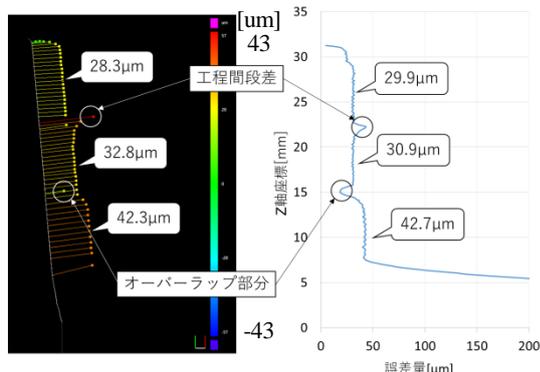


図5 傾斜面加工の加工誤差計算結果



(a) 計算結果 (b) 測定結果

図6 加工誤差比較

3.2 金型モデル

加工誤差予測計算を被削材質 SKD61 (HRC45) の金型モデルに適用した。この加工ではバレルレンズ工具と

ボールエンドミルの加工面段差が問題となっている。

図7(a)は対象とする加工形状であり、仕上げ加工の各工程を色ごとに表示している。緑色がバレルレンズ、紫色がR10 ボール、青色がR5 ボール、黄色がR3 ボールでの加工を示している。図7(b)は使用工具で左からバレルレンズ、R10 ボール、R5 ボール、R3 ボールである。



(a) 加工形状 (b) 使用工具

図7 加工形状と加工に使用した工具

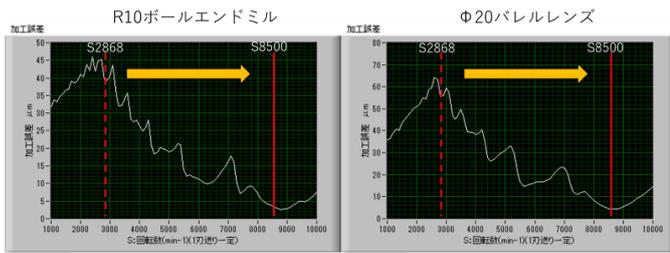
3.2.1 切削条件変更による加工面段差低減の検討

開発したシステムを用いて加工面段差の発生要因を検討したところ、バレルレンズとR10 ボールの各加工誤差がその要因であることが分かった。これらの加工誤差を小さくすることによる加工面段差の低減を試みた。図8は簡易誤差予測ソフト⁵⁾を用いて、バレルレンズとR10 ボールの工具回転数と加工誤差(傾斜角 85° の等高線加工)の関係を表したものになる。どちらの工具についても従来の回転数(S2868)よりも高回転数の部分(S8500)に加工誤差が小さくなる回転数があると予測された。そこで、新規回転数をS8500とし、開発したシステムで金型全体の加工誤差を計算した。各工具の切削条件は表2に示し、計算結果を従来条件のものと併せて図9(a), (b)に示す。S2868ではバレルレンズ加工箇所とR10, R5 ボール加工箇所のそれぞれ間に加工面段差が生じていることが確認できる。一方S8500ではバレルレンズとR10 ボールの加工誤差量が小さくなり、加工面段差は低減されている。

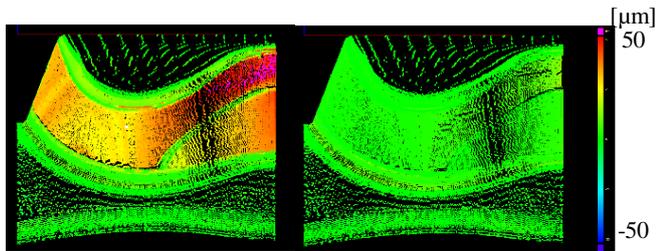
以上の計算結果に基づき、これら2つの条件で加工を行った。三次元測定機(BROWN&SHARPE 製 PMM-C700P)による被削物の測定結果とCADモデルから算出した加工誤差を図9(c), (d)に、被削物の写真を図9(e), (f)に示す。(a), (b)の計算結果と概ね一致した。

表2 金型モデルの仕上げ加工の切削条件

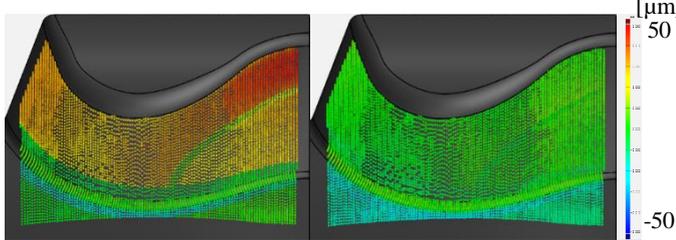
工程	工具	従来条件		変更条件	
		回転数 [rpm]	送り速度 [mm/min]	回転数 [rpm]	送り速度 [mm/min]
仕1	Φ20バレルレンズ	2826	1380	8500	4090
仕2	R10ボール	2826	1380	8500	4090
仕3	R5ボール	4800	1981	4800	1981
仕4	R3ボール	8000	2570	8000	2570



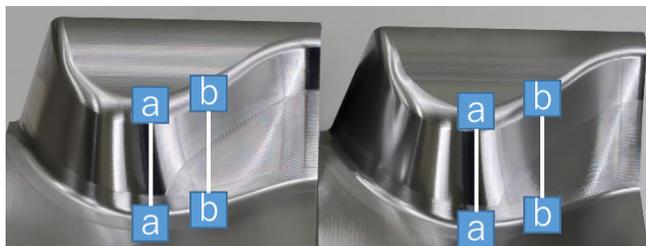
(a) R10 ボールエンドミル (b) φ20 バレルレンズ
図 8 簡易誤差予測ソフトの計算結果



(a) 計算結果 (S2868) (b) 計算結果 (S8500)



(c) 測定結果 (S2868) (d) 測定結果 (S8500)

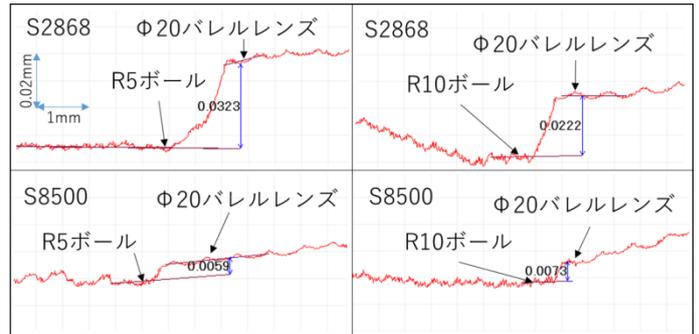


(e) 加工結果 (S2868) (f) 加工結果 (S8500)

図 9 結果比較

3.2.2 加工面段差の検証

加工面段差を、表面粗さ測定機（ミツトヨ製 CS-5000）を用いて、**図 9 (e), (f)** の a-a, および、b-b の箇所を測定を行ったところ、**図 10** のような結果を得た。**図 10 (a)** は a-a の箇所での、バレルレンズと R5 ボールの加工面段差の結果比較である。S2868 で加工したときの加工面段差 $32.3\mu\text{m}$ が S8500 では $5.9\mu\text{m}$ にまで低減されていた。**図 10 (b)** は b-b の箇所で、バレルレンズと R10 ボールの加工面段差が $22.2\mu\text{m}$ から $7.3\mu\text{m}$ に低減することができた。また、切削条件をより高回転数になる箇所を設定したので送り速度も回転数に合わせて大きくした結果、**図 11** のように回転数を上げた工程の加工時間がそれぞれ短くなり、全体で加工時間がおよそ 12% 短縮された。



(a) R5 ボール (b) R10 ボール
図 10 バレルレンズ加工面との段差比較

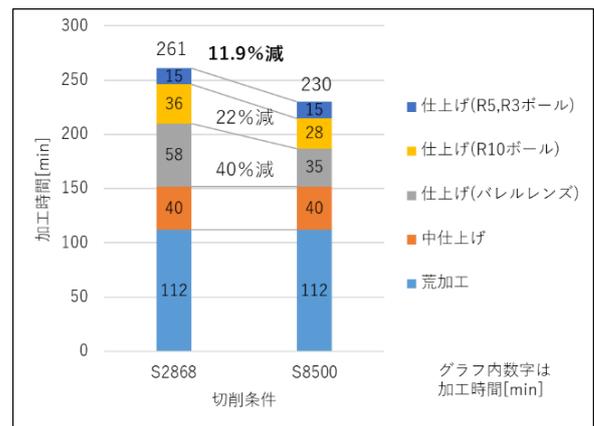


図 11 加工時間の比較

4 結 言

金型高精度加工システムの拡張としてバレルレンズ工具への切削力予測や加工誤差予測に対応するために工具形状や工具掃引体のモデル化を実現し、加工誤差予測システムを開発した。本システムを直径 20mm のバレルレンズ加工に適用した結果、 85° 傾斜の立壁加工では切削力・加工誤差の正確な予測が実現できた。また、金型モデルに適用した結果、加工面段差の予測を実現できた。さらに金型モデルに対してより最適な切削条件の検討を行うことで加工面段差が $32.3\mu\text{m}$ であった箇所を $5.9\mu\text{m}$ にまで低減することができた。

文 献

- 1) 西川他:精密工学会誌, 83, 3, 195(2017)
- 2) W.P.Wang and K.K.Wang: IEEE Computer Graphics and Applications, 6, 12, 8(1986)
- 3) 金子他:精密工学会誌, 74, 5(2008)
- 4) 岩部他:日本機械学会論文集, 81, 832, 15(2014)
- 5) 西川他:広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告, 57, 9(2014)

