A-10

切削シミュレーションのための 3 次元工具モデル生成手法の提案

北海道大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻　○松永大輝，小野里雅彦，田中文基

切削仕上げ面には切れ刃運動軌跡の輪郭が転写されるため，エンドミルを用いた切削加工シミュレーションでは，仕上げ面の正確な精度評価には切れ刃の形状を考慮する必要がある．本報では，切れ刃，主軸回転を考慮した，より精密な切削加工シミュレーションを行うため，工具の断面形状を含む工具仕様をパラメトリックに変更可能であるボールエンドミルの 3 次元メッシュモデルの生成手法を記述する．

1　緒論

エンドミル加工による切削仕上げ面には切れ刃運動軌跡の輪郭が転写されるため，仕上げ面の精度評価には切れ刃の形状を考慮する必要がある．本報では，切れ刃，主軸回転を考慮した，より精密な切削加工シミュレーションを行うため，工具の断面形状を含む工具仕様をパラメトリックに変更可能であるボールエンドミルの 3 次元メッシュモデルの生成手法を提案する．

2　ボールエンドミルの 3 次元メッシュモデル作成

2.1　作成手法概要

本研究では，2 枚刃で工具径とシャンク径の等しいボールエンドミルをモデリングの対象とする．ボールエンドミルモデルは Fig.1 に示す円柱部，ボール部の 2 部位に分けて作成する．本研究において変更可能である工具パラメータは，1)工具径 R, 2)シャンク長L_s, 3)切れ刃長L_e, 4)接続部長さL_f, 5)ねじれ角λ, 6)第 1 逃げ角α_1, 7)第 2 逃げ角α_2, 7)すくい角γ, 8)シャンク部，切れ刃部，接続部それぞれのメッシュ分割数N_s, N_e, N_f，である．

2.2　円柱部

円柱部は断面形状の点群を層状に積み重ね，対応する点を結ぶことで三角形メッシュを生成する．断面形状は，切れ刃部，接続部，シャンク部の 3 種類存在する．シャンク部の断面形状を半径 R の円を用いる．また，切れ刃部，接続部においては Fig.2 示すように 1 層ごとに回転させて積層することでねじれを表現する．1 層あたりの回転角$\Delta\Theta$は切れ刃一周あたりの高さL_1と各層の間隔lの比を用いて式(1)より算出する．

$$\Delta\Theta = 2\pi \cdot \frac{l}{L_1} = 2\pi \cdot \frac{\tan\lambda}{2\pi R} \cdot \frac{L}{N} = \frac{L}{NR}\tan\lambda \qquad (1)$$

・切れ刃部断面形状

切れ刃部の断面形状は Fig.3 に示す円C_1(半径r_{C1}), C_2(半径r_{C2})と直線 cd,de,ea'の組み合わせによって表現した．弧 ab，弧 bc 上に点群を配置し，その点群と点 a,b,c,d,e,a'を断面形状点群として用いる．弧 ab がすくい面，点 c,d,e,a'が逃げ面を構成する点群である．Fig.3 は片側のみの断面形状を示しており，もう片方の形状は原点に関して点対称な形状を用いることで作成する．

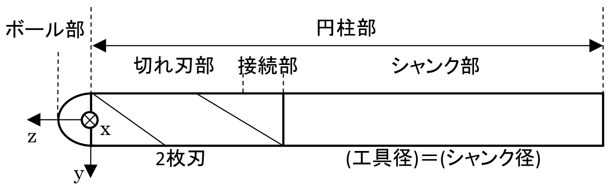

Fig. 1　ボールエンドミルの各部位

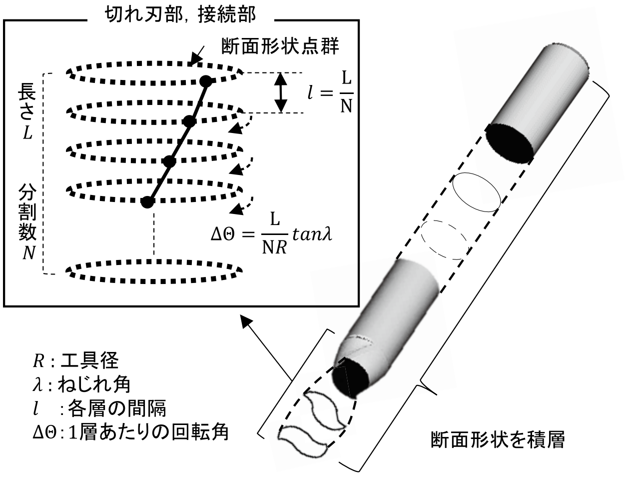

Fig. 2　断面形状の積層とねじれ角

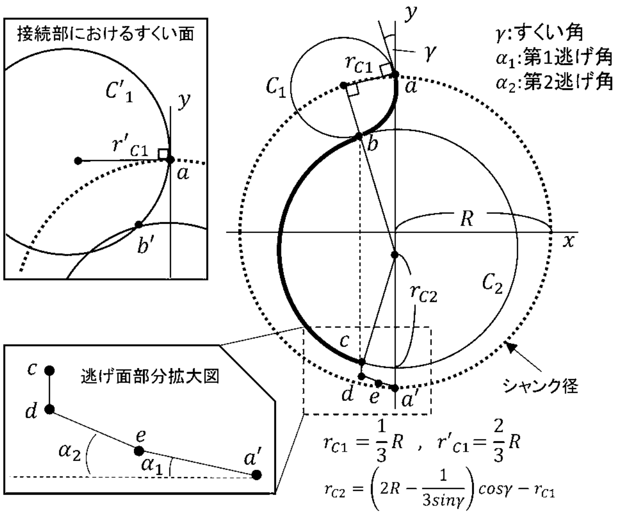

Fig. 3　切れ刃断面形状

・**接続部断面形状**

接続部の断面形状は Fig.3 左上図のように切れ刃部断面形状における円C_1の半径をr'_{C1}に拡大した円C'_1から導出される断面点群を切れ刃部終端の断面点群と接続し，その断面点群を，最終的にシャンク部の円と一致するように段階的に広げながら積層することで接続部を表現する．

2.3　ボール部

ボール部は，Fig.4 に示す曲線，面に分けて作成する．刃先曲線と切れ刃底線は Nguyen ら[1]によって定義された式を用いる．なお，現状ではボール部と円柱部を接続する三角形メッシュの自動生成は行っておらず，今後の研究課題とする．

・**側部平面**

側部平面は実際の工具を計測することによって境界上の特徴点の座標を取得し，半球の中心に対し，拡大，縮小することで半径 R の関数で表した特徴点の座標式を導出，それを用い側部平面の方程式$\xi(x, y, z)$を算出した．特徴点 A,B,C と座標値を Fig.4 に示す．本研究では YG-1 社の 2 枚刃ボールエンドミル(半径 6,切れ刃長 22,工具長 110 [mm])を用いている．辺 AB は直線，弧 BC は下部の断面形状の点群をサンプリング点として用いた 3 次スプライン曲線，弧 AC は第 2 逃げ面の終端の曲線である．弧 AC はもう一方の切れ刃逃げ面生成の過程で得られる点群を用いている．

・**溝面**

溝面は側部平面の辺 AB と切れ刃底線を結ぶ直線上に点群を配置することで表現する．

・**逃げ面**

Nguyen ら[1]の刃先を表す曲線の定義によると，刃先の位置は，半径 R と角度$\theta(z), \varphi(z)$により決定される．XY 平面上において第 1 逃げ面を構成する点a', e, 第 2 逃げ面を構成する点e, dを作成，その形状を，a'が刃先の位置a''と一致するように Z 軸周りにφ，Y 軸周りにθ回転することでボール部の逃げ面を表す点a'', e', d'を生成する(Fig.5 左図)．この後，第 2 逃げ面の終端点(d')を側部平面ξ上まで延長する(Fig.5 右図)．

3　ボールエンドミルモデル生成結果

提案した手法に基づいて生成したボールエンドミルの 3 次元メッシュモデルと YG-1 社の 2 枚刃ボールエンドミル(半径 6,切れ刃長 22,工具長 110 [mm], ねじれ角 30 度)を Fig.6 に示す． ボールエンドミルモデルは，YG-1 社のボールエンドミルの寸法と同様のパラメータを入力し，生成した．また，工具のパラメータを変更し出力した結果を Fig.7 に示す．Fig.6 上図のモデルと，Fig.7 に示す 2 つのモデルのパラメータを Table.1 に示す．工具パラメータの変更によってモデル形状が変更されていることが確認できた．

4　結論

本研究では，工具仕様をパラメトリックに変更可能な切れ刃を持つボールエンドミルの 3 次元メッシュモデルの生成手法を提案し，実際に提案手法に基いてボールエンドミルの 3 次元メッシュモデルが生成されることを確認した．今後は，ボール部と円柱部を接続する三角形メッシュの自動生成方法の確立，今回生成した工具モデルでの切削シミュレーションを本研究室で開発されている 4 次元形状モデリングシステムを用いて表現する予定である．

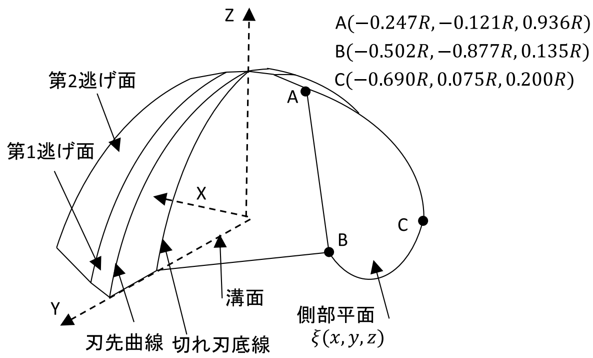

Fig.4　ボール部の形状

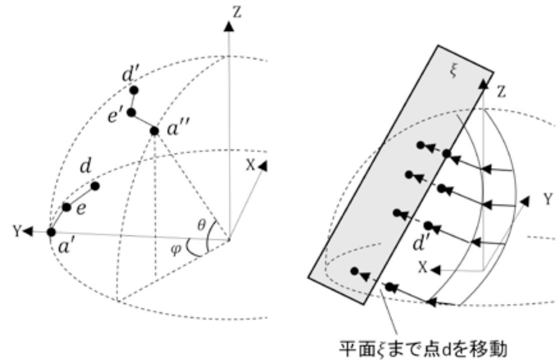

Fig.5　ボール部逃げ面の生成

Fig.6　生成したモデル(上)と実際の工具(下)

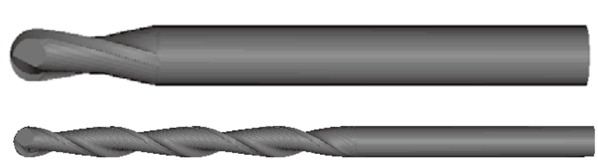

Fig.7　工具パラメータ変更例

Table 1 工具モデルのパラメータ

モデル	R[mm]	$L_e, L_f, L_s[mm]$	λ[rad]	N_s, N_e, N_f
Fig.6 上図	6.0	12, 10, 72	30	48, 30, 10
Fig.7 上図	6.0	12, 10, 72	15	48, 30, 10
Fig.7 下図	3.0	52, 10, 42	30	48, 30, 10

※いずれも点数 3740，メッシュ数 7422

参考文献

[1]　Hien Nguyen, Sung-Lim Ko, A mathematical model for simulating and manufacturing ball end mill. Computer-Aided Design, 50, 16-26, 2014

[2]　澤　武一,『目で見てわかる　エンドミルの選び方・使い方』, 日刊工業新聞社, 2012