

# 工具経路生成時間短縮のためのポリゴンメッシュの簡略化

## Simplification of polygon mesh to shorten tool path generation time

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 夏井憲司  
 応募企業名 有限会社トライ金型

CAMにおいてポリゴンメッシュから工具経路を生成する場合、計算時間が長時間になるという問題が発生する。その対策として、ポリゴンの間引きを行ってから工具経路の計算をするという方法が知られているが、間引きを行うと元々の形状から偏差が発生してしまう。そこで、今回ポリゴンメッシュの間引き条件が工具経路の計算時間や機械加工後の形状に与える影響を調べた。その結果、工具経路の計算時間は切削モデルの総ポリゴン数に依存することやエッジ部が間引きの影響を受けやすいことなどのいくつかの知見が得られた。

**Key words:** ポリゴンメッシュ、CAM、工具経路、リバースエンジニアリング

## 1. 緒言

図面やCADデータのない古い金型を複製したいというニーズが高まっている。現在は、非接触三次元測定機で測定したスキャンデータからリバースエンジニアリングでCADデータを作成し、それをを用いて機械加工するという方法で金型の複製が行われている。しかし、リバースエンジニアリングは高価な専用ソフトが必要になることに加え、形状が複雑な場合は作業が長時間に及ぶという問題がある。

そこで、応募企業では、測定されたスキャンデータをそのまま工具経路生成のための切削モデルに使用し、リバースエンジニアリングなしに金型を複製するという取り組みを行っている。しかし、CAMでの工具経路生成にポリゴンメッシュを使用する場合、CADデータを使用した場合に比べて計算時間が長時間に及ぶという問題が発生する。その解決法として、ポリゴンメッシュの間引きを行う方法があるが、間引きを行うとスキャンデータの形状から偏差が発生する。間引き後のポリゴンメッシュを基に工具経路を計算すると、間引きによる偏差が加工後の製品形状にも影響してしまうため、適切な間引き条件を見定めることが重要となる。

そのため、今回ポリゴンメッシュの間引き条件が工具経路の計算時間や機械加工後の形状に与える影響を下記の手順で調べた。

- ① 実験用CADモデルの作成
- ② CADモデルを使用した工具経路生成、加工品の削り出し
- ③ 非接触三次元測定機を使用した加工品の形状測定（スキャンデータの取得）
- ④ スキャンデータに間引きを施した切削モデルの作成
- ⑤ 切削モデルを使用した工具経路生成、加工品の削り出し
- ⑥ 自由曲面形状の評価
- ⑦ エッジ部の形状評価

## 2. 実験

### 2. 1. 実験モデル

今回の実験のために作成したCADモデルを図1に示す。提案企業の取り扱う金型には自由曲面を含んだものが多いため、CADモデルの上には位相をずらした正弦波形状の断面をロフトでつないだ自由曲面と長穴形状の突起をモデリングした。また、ポリゴンの間引きによる影響はエッジ部が一番大きいと考えられるため、突起の外周にはシャープエッジやR面取り、C面取りなど様々なエッジ形状を持たせた。

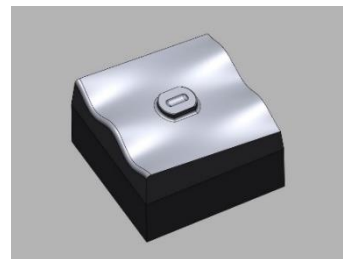


図1 実験用CADモデル

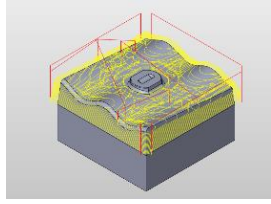
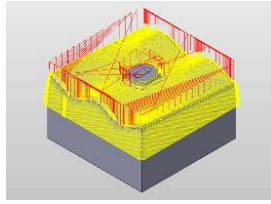
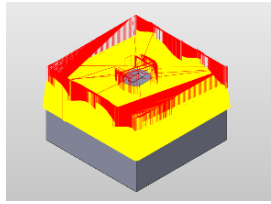
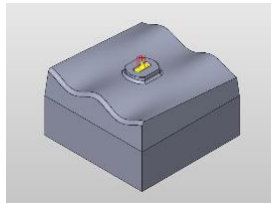
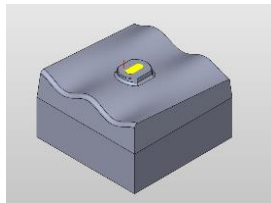
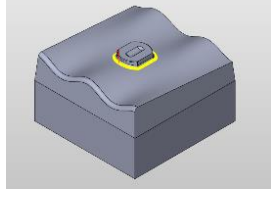
### 2. 2. 実験モデルの削り出し

作成したCADモデルを基に、マシニングセンタ（VARIAXIS j-600/5X AM（ヤマザキマザック製））を用いて機械加工を行い加工品を削り出した。工具経路の作成には、hyperMillバージョン19.2を使用した。使用した工具を表1に、工程及び加工条件を表2に示す。被削材にはアルミニウム合金（A5052）を使用した。なお、CADモデルを使用した工具経路の計算時間は、合計60[秒]であった。

表1 使用した工具

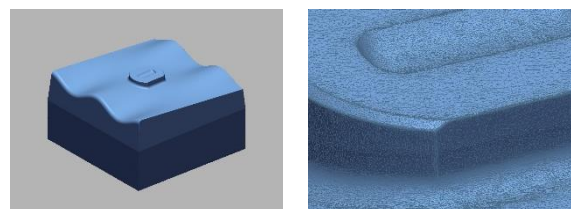
	名称	詳細
T1	スクエアエンドミル	超硬 外径10mm
T2	ボールエンドミル	超硬 外径6mm
T3	ボールエンドミル	超硬 外径3mm

表2 工程及び加工条件

工程	加工条件
1 自由曲面部粗加工 等高線粗加工 (T1) 	S(主軸回転数) :10,000[rpm] f(送り速度): 1,000[mm/min] a <sub>p</sub> (軸方向切込み) :0.5[mm] a <sub>e</sub> (半径方向切込み) :8[mm]
2 自由曲面部中仕上げ加工 等高線最適化加工 (T2) 	S:10,000[rpm] f:1,000[mm/min] a <sub>p</sub> :0.5[mm] a <sub>e</sub> :0.5[mm]
3 自由曲面部仕上げ加工 等高線最適化加工 (T2) 	S:10,000[rpm] f:1,000[mm/min] a <sub>p</sub> :0.1[mm] a <sub>e</sub> :0.1[mm]
4 上面溝部粗加工 等高線粗加工 (T3) 	S:10,000[rpm] f:800[mm/min] a <sub>p</sub> :0.3[mm] a <sub>e</sub> :0.3[mm]
5 上面溝部仕上げ加工 走査線仕上げ加工 (T3) 	S:10,000[rpm] f:800[mm/min] a <sub>e</sub> :0.05[mm]
6 削り残り部加工 (T3) 	S:10,000[rpm] f:800[mm/min] a <sub>p</sub> :0.05[mm] a <sub>e</sub> :0.05[mm]

### 2. 3. スキャンデータの取得

非接触三次元測定機 (ATOS Compact Scan 12M (GOM社製)) を使用して、CAD 加工品の形状測定を行った。切削加工面は金属光沢を有するため、浸透探傷試験の現像液を表面に塗布してから測定を行った。取得したスキャンデータを図2に示す。



(a) 全体 (b) 中央突起部

図2 スキャンデータ

### 2. 4. 間引き条件

取得したスキャンデータに複数の条件で間引きを行い、切削モデル (以下、スキャンデータに間引きを施した後のポリゴンメッシュを切削モデルとする。) を作成した。各切削モデルの間引き条件と処理後のポリゴン数、処理時間を表3に示す。ポリゴンの間引きには、Geomagic DesignX (3D Systems 社製) の間引きとメッシュの最適化のコマンドを使用した。

間引きは、ポリゴンメッシュの幾何特徴形状を維持しながら、ポリゴンの頂点を合成することによりポリゴン数を削減するコマンドである。条件設定には、目安となるポリゴンの削減率と曲率の高い領域の解像度をスライドバーで設定することができる。今回の実験では、削減率 50、75、90 [%] の3条件と解像度を最高と最低にした2条件を掛け合わせた6つの切削モデルを作成した。

図3に No. 3 と No. 6 の切削モデルを示す。曲率の高い領域の解像度を最高にした No. 3 では、主に曲率の低い緩斜面や平面で間引きが行われておりエッジ形状は保たれていたが、解像度を最低にした No. 6 では、曲率に関係なく間引きが行われたためエッジが崩れた形状をしていた。

メッシュの最適化は、スキャンデータを有限要素解析やリバーエンジニアリングに適したメッシュに変換するコマンドである。オプションとして、変換後のポリゴンエッジの最小・最大長さ (図4) の制限やスムージング効果を調整する機能もあり、前者を活用することによりポリゴンの間引きを行うこともできる。また、メッシュの最適化は、すべてのポリゴンに正三角形に近い形状に変換するため、間引きのコマンドに比べて処理時間が長くなるという特徴がある。

今回の実験では、ポリゴンエッジの最小長さを 0.15[mm] と 0.3[mm] とした2条件と最大長さを 0.6[mm] と 1.5[mm] にした2条件を掛け合わせた4つ

の切削モデルを作成した。

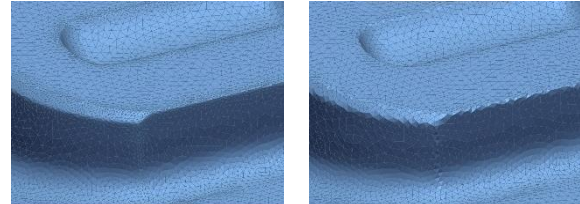
図5にNo.7とNo.9の切削モデルを示す。ポリゴンエッジの最小長さを0.15[mm]としたNo.7ではエッジ部が小さなポリゴンで形成されるため、比較的均一な形状になっていたが、最小長さを0.3[mm]としたNo.9ではエッジ部を形成するポリゴンが大きくなったため、不均一な粗いエッジ形状となった。



図4 ポリゴンエッジの長さ

表3 間引き条件

No.	間引き条件	ポリゴン数 (削減率)	処理 時間
ref	スキャンデータ (間引きなし)	894, 878	-
1	間引き (削減率 50%、 解像度 高)	441, 316 (50.7[%])	7[秒]
2	間引き (削減率 75%、 解像度 高)	217, 722 (75.7[%])	7[秒]
3	間引き (削減率 90%、 解像度 高)	84, 701 (90.5[%])	7[秒]
4	間引き (削減率 50%、 解像度 低)	441, 068 (50.7[%])	7[秒]
5	間引き (削減率 75%、 解像度 低)	222, 437 (75.1[%])	7[秒]
6	間引き (削減率 90%、 解像度 低)	89, 303 (90.0[%])	7[秒]
7	メッシュの最適化 (最小長さ 0.15mm、 最大長さ 0.6mm)	258, 782 (71.1[%])	98[秒]
8	メッシュの最適化 (最小長さ 0.15mm、 最大長さ 1.5mm)	112, 820 (87.4[%])	77[秒]
9	メッシュの最適化 (最小長さ 0.3mm、 最大長さ 0.6mm)	226, 232 (74.7[%])	91[秒]
10	メッシュの最適化 (最小長さ 0.3mm、 最大長さ 1.5mm)	76, 239 (91.5[%])	72[秒]



(a) No. 7

(b) No. 9

図5 メッシュの最適化を行った切削モデル

## 2. 5. 工具経路の計算および加工品の削り出し

作成した切削モデルを基に、工具経路の計算を行った。工程および加工条件は、2. 2節と同じものを使用した。その後、作成した工具経路を使用して、加工品の削り出しを行った。

## 3. 結果及び考察

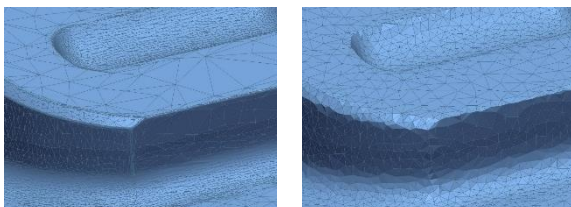
### 3. 1. 工具経路の計算時間

工具経路の計算時間と切削モデルの総ポリゴン数の関係を図6に示す。すべての間引き条件で工具経路の計算時間は、CADモデルでの計算時間60[秒]を超える結果となった。特にスキャンデータを使用した場合は、342[秒]とCADモデルの6倍近い計算時間が必要となり、ポリゴンメッシュを工具経路生成に使用すると計算時間が長時間になることが確認された。また、ポリゴン数を90[%]削減した条件3では計算時間が90[秒]まで減少しており、間引きによりポリゴン数を削減するほど、計算時間も減少することも確認された。

今回、曲率の高い領域の解像度を変更してエッジ部のポリゴンの大きさの変更や、メッシュの最適化を用いてポリゴン形状の正三角形に近い形への変更などいろいろな条件を試したが、それらに関係なく、計算時間と総ポリゴン数の相関係数は0.98となり強い正の相関がみられた。このことから、工具経路の計算時間はポリゴンの大きさや形状にはほとんど影響を受けず、総ポリゴン数のみに依存することが確認された。

### 3. 2. 自由曲面形状の評価

削りだした加工品を非接触三次元測定機で測定し、自由曲面の形状評価を行った。図7にスキャンデータ及びポリゴン数の削減率の大きい間引き条件No.3、No.6、No.10の加工品の測定データとCADモデルとの



(a) No. 3

(b) No. 6

図3 間引きを行った切削モデル

形状偏差を示す。削減率の大きい切削モデルでも、スキャンデータと同様に自由曲面部では大きな形状偏差は見られなかった。曲率の低い自由曲面においては、大幅な間引きを行っても形状の崩れは小さいことがわかった。

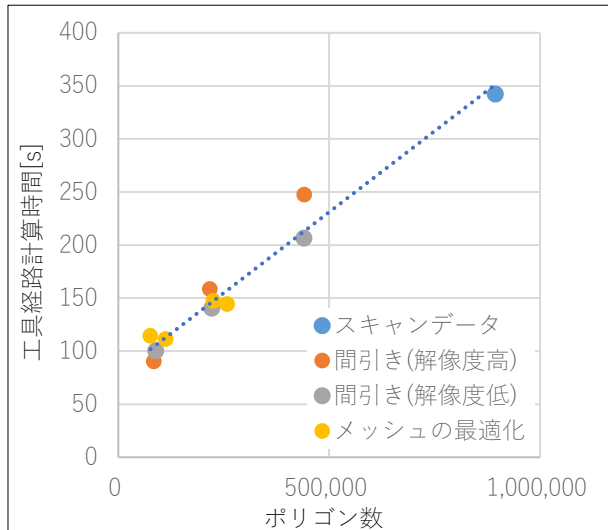


図6 工具経路の計算時間とポリゴン数の関係

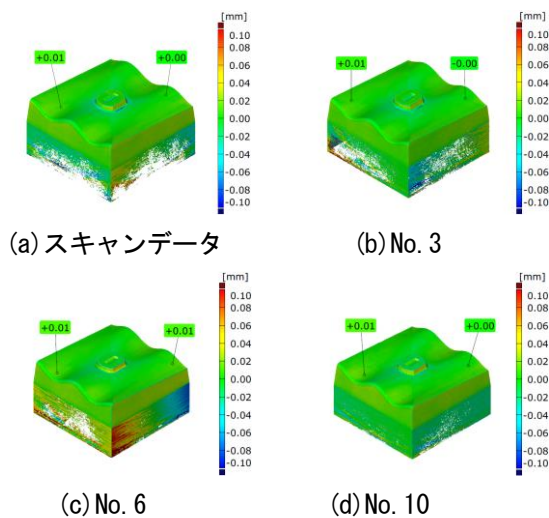


図7 CADモデルとの形状比較

図8にNo. 6とNo. 8の加工品の自由曲面の観察画像を示す。観察には実体顕微鏡 (S9i (ライカ社製)) を使用した。No. 6の自由曲面は滑らかな表面をしているのに対し、No. 8の自由曲面は表面がうろこ状になっていた。これはメッシュの最適化を行った際の設定でエッジの最大長さを 1.5[mm]と大きくしたことで、1つのポリゴンが定義する平面の面積が大きくなりすぎたためだと考えられる。



(a) No. 6 (b) No. 8  
図8 自由曲面の観察画像

### 3. 3. エッジ形状の評価

表面粗さ・輪郭形状測定機 (SV-C4500L8 (株) ミットヨ製) を使用して、各加工品の図9に示すシャープエッジ部の輪郭形状測定を行った。CAD とスキャンデータの加工品の輪郭曲線を図10に示す。CAD 加工品のエッジは、シャープエッジが形成されていたのに対し、スキャンデータ加工品は鋭利なエッジにはならず、わずかにR面取りしたような形状になっていた。

今回使用した非接触三次元測定機は、測定原理の関係でシャープエッジを測定したとしても、スキャンデータのエッジ部には 0.1[mm]程度の小さなコーナーR(図11)が発生する。スキャンデータ加工品のエッジが、シャープエッジにならなかったのは、形状を削り出す基となるスキャンデータ自体のエッジ形状がシャープエッジではなかったためである。

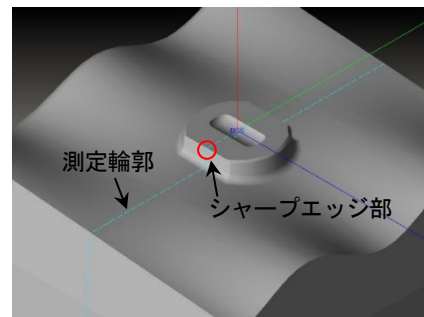


図9 輪郭形状測定箇所

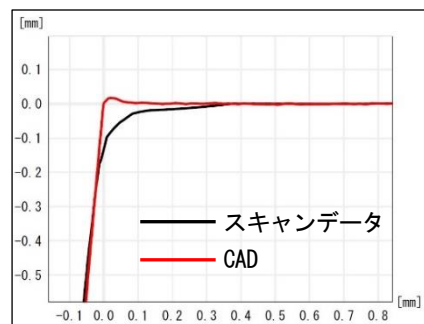


図10 シャープエッジ部の輪郭曲線

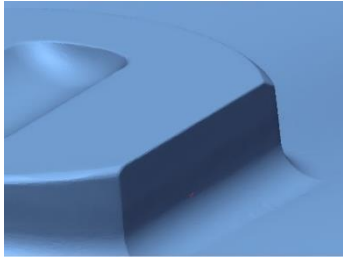


図 1.1 スキャンデータのシャープエッジ部

その他の加工品の測定結果を図 1.2 に示す。曲率の高い領域の解像度を最高にし、90[%]の間引きを行った No. 3 加工品は、スキャンデータの輪郭曲線と一致していたが、解像度を最低にした No. 6 加工品では、スキャンデータの輪郭曲線とずれが発生していた。

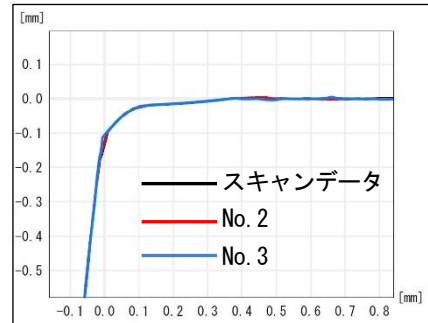
メッシュの最適化のコマンドでエッジの最小長さを 0.15[mm]とした No. 7、No. 8 加工品は、スキャンデータの輪郭曲線と一致していたのに対し、エッジの最小長さを 0.3[mm]とした No. 9、No. 10 加工品は一部にずれが発生していた。これは、2.4 節の No. 9 切削モデルで見られた粗いエッジ形状の影響だと考えられる。

### 3. 4. リバースエンジニアリングの試み

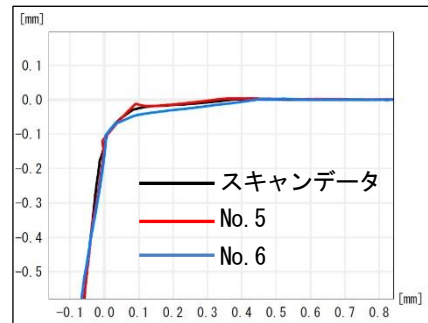
Geomagic DesignX を使用してリバースエンジニアリングを行い、スキャンデータから CAD データ（以下、リバース CAD とする。）を作成した。リバース CAD 加工品を削り出して、自由曲面とエッジ形状の評価を行った。

リバース CAD 加工品と CAD モデルとの形状偏差を図 1.3 に示す。No. 1~No. 10 の加工品では、自由曲面での形状偏差がほぼなかったのに対し、リバース CAD から切削したモデルでは R3[mm] のフィレット部に 0.08[mm]程度の偏差が発生した。これはモデリングの手法の違いが原因だと考えられる。

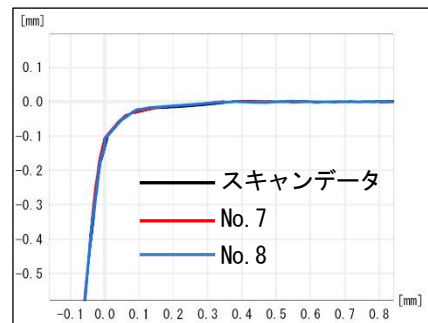
CAD モデルを作成した際は、位相をずらした正弦波形状の断面をロフトでつなぐことにより自由曲面を作成したが、リバースエンジニアリングではスキャンデータの自由曲面部を一枚の NURBS 曲面で近似することによりモデリングを行った。自由曲面自体に偏差は発生しなかったが、フィレット形状を付与したエッジは近似した NURBS 曲面を曲率が変わらないという仮定のもと延長させたサーフェスと平面との交線として作成した。曲率が変わらないという仮定の下、サーフェスの延長を行ったため、フィレット部で偏差が発生したと考えられる。



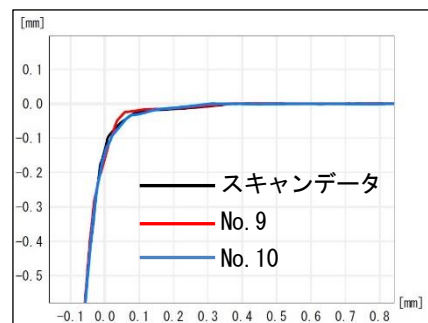
(a) No. 2、No. 3



(b) No. 5、No. 6



(c) No. 7、No. 8



(d) No. 9、No. 10

図 1.2 シャープエッジ部の輪郭曲線

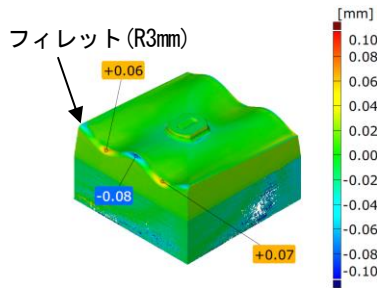


図 1.3 CAD モデルとの形状偏差 (リバース CAD)

図 1.4 に、リバース CAD 加工品のシャープエッジ部の輪郭形状の測定結果を示す。リバース CAD 加工品のエッジは、CAD 加工品と同様にシャープエッジとなっていた。

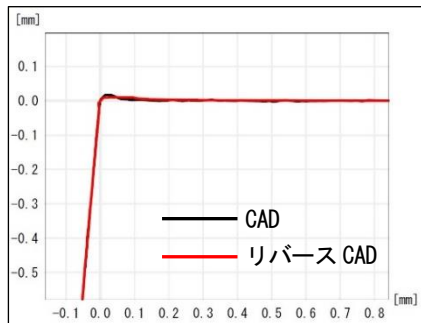


図 1.4 シャープエッジ部の輪郭曲線

## 4. 結言

ポリゴンメッシュデータを使用した工具経路生成において、ポリゴンメッシュの間引き条件が工具経路の計算時間や機械加工後の形状に与える影響の調査を行った。その結果、本実験の範囲内で以下の知見を得た。

- 1) 工具経路の計算時間は、ポリゴンの大きさや形状にはほぼ影響を受けず、切削モデルの総ポリゴン数だけに依存する。そのため、工具経路の計算時間を短縮するためには、切削モデルの総ポリゴン数を減少させることが重要である。
- 2) 曲率の低い自由曲面などは、間引きの影響を受けにくい。ポリゴンエッジの長さを大きくすると、表面がうろこ状になることがある。
- 3) 曲率の高いエッジ部などは間引きによる影響を受けやすいため、形状偏差を小さくするには曲率の高い領域の解像度を高めるなど適切な間引き条件の設定が必要となる。
- 4) シャープエッジを非接触三次元測定機で測定すると、小さなコーナーRが発生する。このコーナーRをシャープエッジにするには、リバースエンジニアリングが有効である。