

# 樹脂系3Dプリンタ造形品の平滑化処理

安田 星季, 岩越 睦郎

## Smoothing Process for Resin Type 3D Printer Models

Seiki YASUDA, Mutsuro IWAKOSHI

### 抄 録

樹脂材料の3Dプリンタは多様化, 低価格化が進み, 道内企業でも様々な機種を導入し, 幅広く利用されている。一般的に3Dプリンタ造形品は積層段差により表面が粗くなるため, より高品質なモデルを製作するにはそれぞれの造形品表面の特性に合った方法で表面を平滑にする必要がある。そこで, 本研究では代表的な5種の材料の3Dプリンタ造形品について表面粗さや塗料の付着性などを調べ, その表面を適切かつ効率的に平滑化する方法を検討した。

キーワード: 3Dプリンタ, 表面粗さ, 塗料付着性

### Abstract

Resin type 3D printers are becoming more diverse and less expensive, and many companies in Hokkaido are introducing various models and are widely using. In general, 3D printer shaped articles have roughened surfaces due to stacking steps, so to produce higher quality models it is necessary to smooth the surface in a way that matches the characteristics of each shaped article surface. Therefore, in this research, surface roughness, adhesion of paint, etc. were examined for representative 3D printer shaped articles of five types of materials, and methods for smoothing the surface appropriately and efficiently were examined.

KEY-WORDS : 3D printer, Surface roughness, Adhesive of paint

## 1. はじめに

樹脂材料の3Dプリンタは多様化, 低価格化が進み, 北海道内の企業でも様々な機種を導入し, 開発中の製品を実体化し, 外形や内蔵部品のレイアウトなどを検討するために幅広く利用されている。一般的に3Dプリンタ造形品は積層段差により表面が粗くなるため, 最終製品に近いモデルを製作したり, 造形品をシリコン型のマスターモデルに使用したりする場合などは, それぞれの造形品表面の特性に合った方法で表面を平滑にする必要がある。樹脂系3Dプリンタ造形品の表面を平滑にする一般的な手法は塗装である。小野澤らは, ナイロン粉末焼結方式の造形品について塗料の付着性を調べ, 表面を平滑にする適正な塗装工程をまとめた<sup>1)</sup>。しかし, 当該研究で対象にした3Dプリンタは本体価格が数千万円と高

価でかつ造形コストも高く, 北海道内の企業が利用する頻度は低いと考えられる。また, 当該研究で報告された手法は中低価格帯の3Dプリンタでは採用されていないナイロン粉末焼結方式で造形した造形品を対象としたものであり, 表面特性の異なる中低価格帯の3Dプリンタ造形品に適用できるか不明である。そこで, 本研究では北海道の企業が導入, 利用する可能性が高いと思われる本体価格が数百万円台の3Dプリンタ造形品の表面を適切に平滑にする方法をまとめるため, 代表的な5種の造形品を対象に表面粗さや塗料の付着性などを調べ, 各造形品を適切かつ効率的に平滑にする処理工程を検討した。

事業名: 経常研究

課題名: 樹脂系3Dプリンタ造形品の平滑化処理に関する研究

表 1 対象 3D プリント機種, 材料名, 標準積層ピッチ

試料名	プリンタ機種名 (メーカー)	造形方式	材料名	標準積層 ピッチ(μm)
A	Projet660 (3D Systems)	バインダー ジェット	Visijet PXL	100
B	Projet3500 (3D Systems)	インクジェット	Visijet M3	32
C	FORTUS 250mc (Stratasys)	熱溶解積層	ABS-M30	254
D	FORTUS 400mc (Stratasys)	熱溶解積層	ASA	254
E	RM-3000 (シーメット)	光造形	TSR-832	100

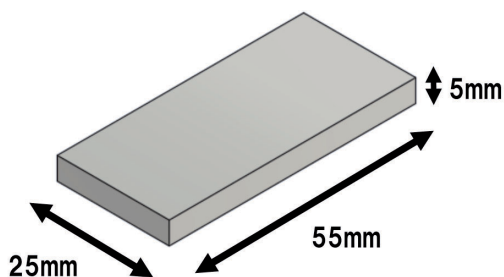


図 1 試験片の外形

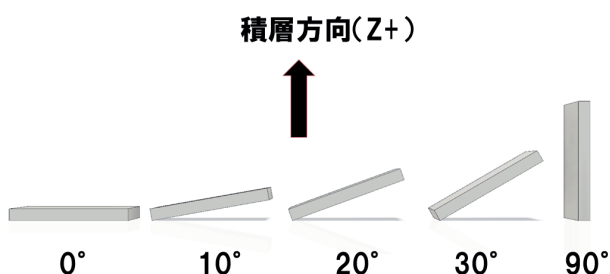


図 2 造形角度

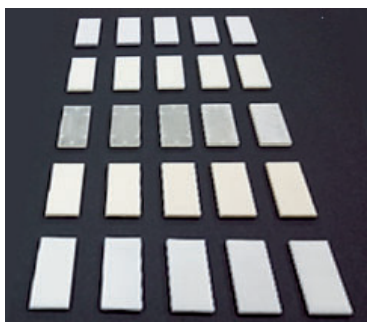


図 3 試験片

## 2. 樹脂系 3D プリント造形品表面の特性

### 2.1 対象 3D プリント機種, 材料

本研究で対象とした 3D プリントの機種, 材料および標準積層ピッチを表 1 に示す。3D プリントの機種は, 造形コストが比較的低いバインダージェット方式と, 造形品表面が比較的滑らかなインクジェット (マテリアルジェット) 方式, さらに本体価格が比較的低く最も普及が進んでいる熱溶解積層方式の機種の中から, 道内企業が業務用途に利用する可能性が高い本体価格が数百万円程度の中価格帯の 4 機種を選定した。また, 参照用機種として 3D プリントの最初の造形方式であり, 当工業試験場で最も稼働実績のある光造形方式の機種を加えた。材料は各 3D プリントで利用可能な材料のうち, 道内企業が利用する可能性が高い標準的なものを選定した。

### 2.2 試験片

各造形品表面の特性を調べるため, 選定した 3D プリントと材料で平板状の試験片を, 各 3D プリントの標準積層ピッチで造形した。試験片の外形を図 1 に示す。造形品表面の段差の大きさは造形角度と大きく関係することが知られている。ここで, 造形角度は積層方向に対する造形面の角度を指す。本稿では積層方向 (Z+ 方向) に垂直な角度を 0°, 積層方向に平行な角度を 90° と表す。一般的に造形角度が小さい場合は角度が大きい場合よりも積層段差が大きくなる。そこで, 各造形品表面粗さの差を明確にし, 特性を理解しやすくするため, 基本的な造形角度 (0°, 90°) のほかに造形角度が小さい条件 (10°, 20°, 30°) の計 5 つの角度で試験片を造形した。造形角度の模式図を図 2 に, 造形した試験片の外観を図 3 に示す。

### 2.3 反り量の評価

3D プリントの形状再現性を表す指標の一つである反り量を調べるため, 非接触 3 次元測定機 (Steinbichler 社製, Comet5) で試験片を 3D スキャンし, 解析ソフト (Geomagic 社製, Studio2012) で試験片の CAD データとスキャンデータを比較した。その結果の一例を図 4 に示す。図 4 でグレーの濃淡は CAD データとスキャンデータとの誤差量を, ヒストグラムは測定点の分布を表す。

解析した結果, すべての試験片で試験片表面の 6 面のうち最も面積が大きい 2 面 (Z+ 面, Z- 面) の誤差量 (反り量) が最も大きいことがわかった。各 3D プリントの特性を把握するため, 造形角度 0°, Z+ 面の結果を並べたグラフを図 5 に示す。

図 5 からインクジェット方式のプリンタ (3D Systems 製, Projet3500) で造形した試験片 (以下, 試料 B) の誤差量

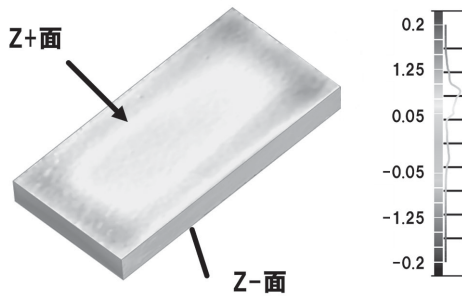


図4 試験片のCADデータとスキャンデータの比較結果例

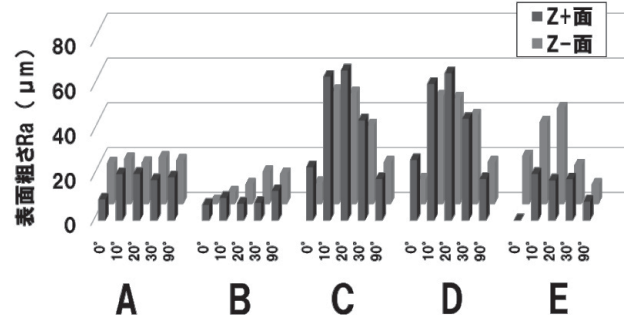


図6 試験片の表面粗さ

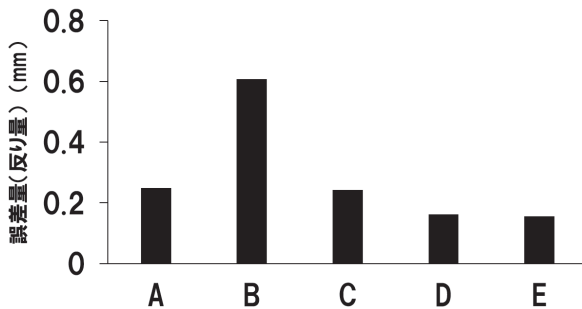


図5 試験片の誤差量(反り量)  
(造形角度0°, Z+面)

(反り量)が最も大きいことがわかった。これは、本試料が面状に塗布した紫外線硬化樹脂の全面に紫外線を繰り返し照射して積層造形されたため、硬化収縮による反りが累積し、形状に大きく影響したためと考えられる。光造形方式の機種(シーメット製, RM-3000)で造形した試験片(以下, 試料E)の誤差量(反り量)が最も小さく、次いで熱溶解積層方式のプリンタ(Stratasys製, FORTUS400mc)で造形した試験片(以下, 試料D)の誤差量(反り量)が小さいことがわかった。

#### 2.4 表面粗さの評価

粗さ計(ミットヨ製, SV-648)で試験片表面の面積が最も大きいZ面の算術平均粗さRaを測定した。結果を図6に示す。

バインダージェット方式のプリンタ(3D Systems製, Projet660)で造形した試験片(以下, 試料A)はすべての造形角度で概ね同程度の表面粗さであることがわかった。これは本機が樹脂粉末に接着材を塗布、硬化して積層する方式であるため、粉末粒子による凹凸が造形角度によらず同程度に生じるためと考えられる。試料Bは他の試験片と比べて表面粗さが比較的小さいことがわかった。これは本試料の積層ピッチが32μmで他の試料よりも特に小さかったためと考えられる。熱溶解積層方式のプリンタ(Stratasys製, FORTUS250mc)で造形した試験片(以下, 試料C)および試料Dは他の試験片と比べて表面粗さが比較的大きく、最

も値が大きい造形角度が20°の場合、試料Bの約9倍の値であることがわかった。これは、本試料の積層ピッチが254μmで他の試料よりも特に大きかったことと、線状の材料を積層した造形品の表面に生じる凹凸が他の試料よりも大きかったためと考えられる。試料Eは造形品が垂れ下がるのを抑止する目的で設けられる「支柱」(サポート)が接する面(造形角度0°~20°のZ-面)の粗さがZ+面の約2倍大きいことがわかった。

#### 2.5 下塗り塗料の付着性の評価

樹脂系3Dプリンタ造形品の表面を平滑にする一般的な手法は塗装である。塗装工程において、下塗り塗料の付着性は塗膜の強度や仕上りの良し悪しに大きく影響する。一般的に表面粗さが小さいほど塗料は付着しにくい。そこで、各試験片の下塗り塗料の付着性を評価するため、試験片の表面粗さが最も小さい造形角度0°, Z+面に対し下塗り塗料の付着性試験を行った。

##### 2.5.1 試験方法

試験片の全面に市販のウレタンプラサフ(関西ペイント製, SUウレタンプラサフ2エコ)をメーカー推奨条件でスプレー塗装した。乾燥後、試験片に対しクロスカット法による塗料の付着性試験(JISK5600-5-6)を行った。試験結果の表し方の分類を表2に示す。

表2 試験結果の分類

分類	説明
0	カットの縁が完全に滑らかで、どの格子の目にもはがれない。
1	カットの交差点における塗膜の小さなはがれ。クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に5%を上回ることはない。
2	塗膜がカットの縁に沿って、及び/又は交差点においてはがれている。クロスカット部分で影響を受けるのは明確に5%を超えるが15%を上回ることはない。
3	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全的に大はがれを生じており、及び/又は目のいろいろな部分が、部分的又は全的にはがれている。クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に15%を超えるが35%を上回ることはない。
4	塗膜がカットの縁に沿って、部分的又は全的に大はがれを生じており、及び/又は数か所の目が部分的又は全的にはがれている。クロスカット部分で影響を受けるのは、明確に35%を上回ることはない。
5	分類4でも分類できないはがれ程度のいずれか。

2.5.2 試験結果

試料A, C, D, Eは脱脂の前処理を行わない場合でも分類0であり、塗料の付着性は良好だった。例として、試料Cの結果を図7に示す。試料Bは塗装前にエタノールで脱脂を行わなかった場合、分類5だった。塗装前に脱脂を行った場合、分類2だった。これは、造形品の形状を保つために全面に付着するワックス系のサポート材が表面に残存していたためであると考えられる。脱脂なしの結果を図8に、脱脂ありの結果を図9に示す。

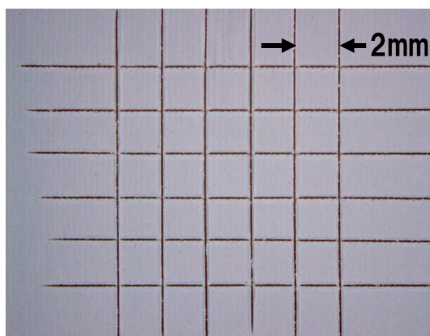


図7 試料C (ABS) の付着性試験結果 (分類0)

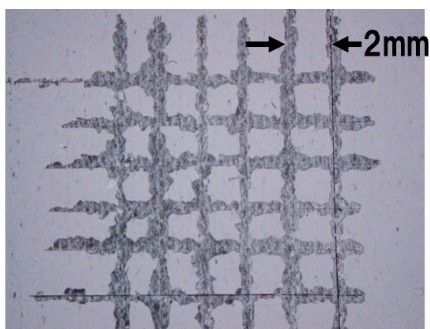


図8 試料B (Visijet M3, 脱脂なし) の付着性試験結果 (分類5)

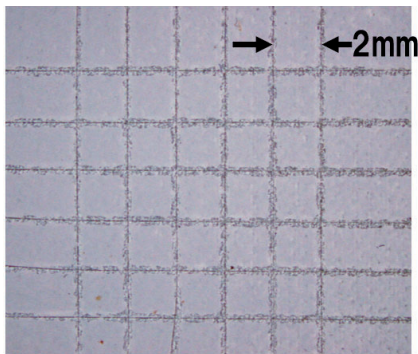


図9 試料B (脱脂あり) の付着性試験結果 (分類2)

3. 適切な塗装工程

樹脂部品に対する標準的な塗装工程を基に設計した、当工業試験場で従来行ってきた光造形品に対する一般的な塗装工程を表3に示す<sup>2)</sup>。本塗装工程と前章までの試験結果を踏まえ、対象とした樹脂系3Dプリンタ造形品の適切な塗装工程をまとめた。工程の一覧表を表4に示す。

表3 当試験場における光造形品の塗装工程

下塗り	中塗り①	中塗り②	上塗り
サポート跡除去 #360ペーパー ブラサフ	#360ペーパー パテ ブラサフ	#600ペーパー ブラサフ	#1000ペーパー クリヤ

表4 塗装工程

	下塗り	中塗り①	中塗り②	上塗り
A	#360ペーパー ブラサフ	-	#600ペーパー ブラサフ	#1000ペーパー クリヤ
B	脱脂 #360ペーパー ブラサフ	-	#600ペーパー ブラサフ	#1000ペーパー クリヤ
C	#360ペーパー ブラサフ	#360ペーパー パテ ブラサフ	#600ペーパー ブラサフ	#1000ペーパー クリヤ
D	#360ペーパー ブラサフ	#360ペーパー パテ ブラサフ	#600ペーパー ブラサフ	#1000ペーパー クリヤ

試料A, Bは比較的表面粗さが小さいため、パテ作業は不要で中塗り工程は1回である。試料Bは前処理としてエタノールなどで脱脂を行う。試料C, Dはパテ作業が必要なため、中塗り工程を2回とした。

4. パテ作業の効率化手法の検討

各試料の処理前の表面粗さと、上記表4にまとめた塗装工程における中塗り②後、上塗り後の表面粗さを測定した結果を並べ、工程における表面粗さの推移を表したグラフを図10に示す。この図から、中塗り②までの工程において表面粗さ

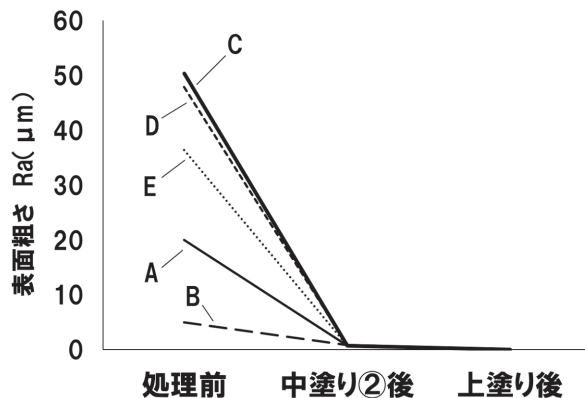


図10 表面粗さの推移

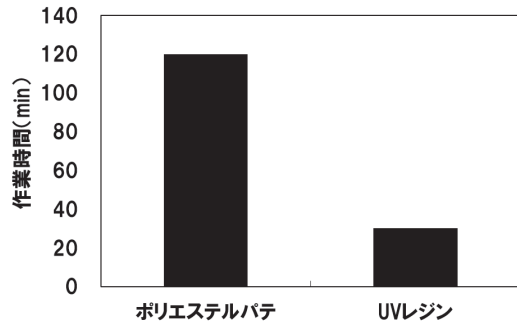


図11 ポリエステルパテとUVレジン作業時間

表5 従来手法と本手法

従来手法	—	下塗り	中塗り① (パテあり)	中塗り②	上塗り
本手法	切削加工	下塗り	—	中塗り②	上塗り

が大幅に小さくなることを確認した。これは、主にパテ作業による積層段差解消の効果である。表4と2.4節の図6で示した表面粗さの測定結果を照らし合わせると、表面粗さが概ね20μmよりも大きい箇所はパテ作業が必要といえる。また、最も普及が進んでいる造形方式で、道内企業が利用する可能性が最も高い熱溶解積層方式の3Dプリンタ造形品(試料C、D)は、造形角度が30°より小さい角度の表面粗さが40~60μm程度であることから、パテによる段差解消作業が必要であると考えられる。一方、パテ作業はほぼすべてが手作業で行われ、かつ難度が高い作業であるため、適切に仕上げるには手間と時間を要する。そこで、パテ作業を効率化する手法を検討した。

#### 4.1 紫外線硬化パテ

当工業試験場では光造形品のパテは主に車両用ポリエステルパテ(久保考ペイント製, T-UP)を使用している。研磨可能になるまでの硬化時間は30分以上であり、パテ作業を含む1回目の中塗り工程は硬化待ち時間を含め2時間程度を要する。そこで、硬化時間が数分程度の紫外線硬化材料によるパテ作業の作業性を確認するため、パテとして流用可能なUVレジン(清原製, UVクラフトレジン)を用いて1回目の中塗り工程の作業時間を測定した。その結果、従来のポリエステルパテを使用する場合と比較して、1/4程度の作業時間になることがわかった。作業時間を比較したグラフを図11に示す。

ただし、UVレジンの単価はポリエステルパテの10倍程度であることから、小さい面積を処理する場合に限って使用す

るなど、状況に応じてポリエステルパテと併用すると効果的であるといえる。また、硬化したUVレジンもポリエステルパテよりも表面が硬く研磨しにくいいため留意が必要である。

#### 4.2 切削加工

前節まではパテで積層段差を埋める方法について議論してきた。本節では熟練を必要とするパテ作業の代わりに切削加工で段差を除去する手法について検討した内容について述べる。本手法は処理前に切削加工などを施すことで、中塗り①工程を省く狙いがある。パテ作業を伴う従来手法と切削加工を取り入れた本手法の流れを表5に示す。本研究では実際の鋳造品の木型モデルをテストケースとして、処理前に当該モデルに切削加工を行うことで段差を除去する手法を検討した。対象とした実際の鋳造品と木型の外観を図12に示す。

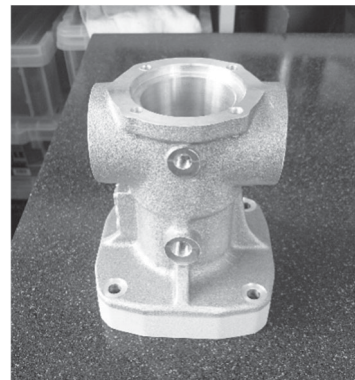


図12 鋳造品(上)と木型(下)

##### 4.2.1 木型モデルの造形、切削加工

熱溶解積層方式の3Dプリンタ(Raise3D社製, Raise3D Pro2)でメーカー純正品のABS材料を使用し標準的な造形条件で木型モデルを造形した。この際、あらかじめ表面に数mm程度の削り代を付加した。造形品の外観を図13に示す。造形品を5軸NC加工機(庄田鉄工社製, NC7000U-1631X)に設置し、表面を仕上げ加工した。加工の様子を図14に示す。

##### 4.2.2 表面粗さ

切削加工の有無による表面粗さの違いを図15に示す。木型

モデル表面において造形角度が30°程度に相当する箇所は表面粗さが切削加工により大幅に小さくなることを確認した。従来手法における中塗り②後の表面粗さよりも大きな値ではあるが、切削加工を施すことで時間と熟練を要するパテ作業を含む中塗り①工程を省くことが可能となる。

#### 4.2.3 本手法の利点、欠点

本手法の利点はパテ作業を省略できる点に加え、造形品の精度が大幅に向上する点である。切削加工を行わずに3Dプリンタのみで造形した造形品は反り、収縮など複合的な要因で最大で数mm程度の誤差が生じる場合があるが、NC切削加工を加えると機械の繰り返し位置決め精度（上記加工機で±0.02mm）まで誤差を低減することが可能となる。しかし、

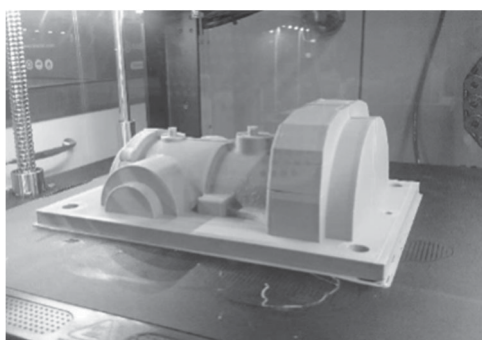


図 13 3D プリンタによる木型モデル



図 14 木型モデルの5軸切削加工の様子

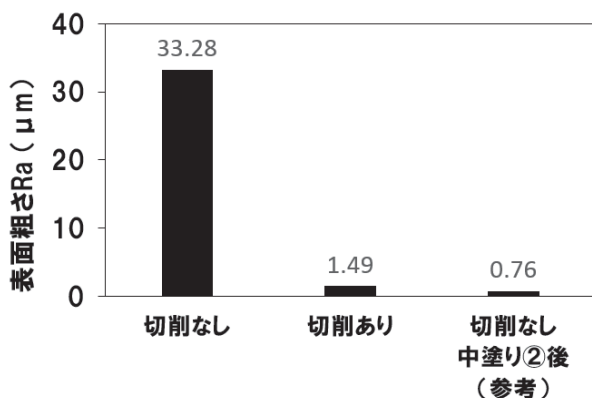


図 15 切削加工の有無による表面粗さの違い  
(造形角度 30°，未塗装処理箇所)

削り代を付加した3Dモデルデータを追加で作成する必要がある。さらにCAMプログラミング作業、加工段取り作業が生じるなどの欠点がある。製品の要求精度や追加発生する作業量を考慮し、状況に応じて本手法の採否を検討する必要がある。なお、今回テストケースとして作成したモデルの木型としての実用性については耐久性などさらなる検討が必要である。

## 5. まとめ

本報は樹脂系3Dプリンタ造形品の平滑化処理に関する下記項目について報告した。今後は得られた知見を道内企業の技術支援に活用していく。

- ① 本体価格が数百万円程度の樹脂系3Dプリンタ4機種と光造形について、造形品表面の特性に関する指標である造形品の反り量、表面粗さ、下塗り塗料の付着性を調べ、各造形品の特徴を把握した。
- ② 各造形品の表面特性と既往の知見を踏まえ、本研究で対象とした造形品表面を適切かつ効率的に平滑にする方法を一覧にまとめた。
- ③ ポリエステルパテ作業を主とした大きな積層段差を解消する従来手法の効率化を図る新たな手法として、硬化時間が早い紫外線硬化パテを使用する手法と、作業工程に切削加工を取り入れて段差を除去する手法について検討し、各手法の利点、欠点を把握した。

## 謝辞

本研究で使用した5軸NC加工システムは競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 小野澤明良, 村井まどか, 神谷嘉美他: ナイロン粉末焼結型積層造形品への塗装技術の開発, 日本デザイン学会デザイン学研究 BULLETIN OF JSSD, pp88-89, (2014)
- 2) 岩越睦郎: 塗装による光造形物の鏡面化手法の検討, 北海道立工業試験場報告, pp157-161, (1995)