

## 3D ものづくり技術による文化財の複製品製作

松田晋幸\*・永田正道\*2・村川 収\*3

A Study on Replica of Cultural Property by 3D manufacturing Technology  
Nobuyuki Matsuda, Masamichi Nagata and Osamu Murakawa

## 1. 緒 言

近年は3Dプリンター、3Dスキャナー、3D-CADなど、ものづくりの現場においては3Dものづくり技術を活用したものづくりの高度化が急速に進んでいる。このような中で、山口県産業技術センターでは県内企業の3Dものづくり技術の向上・普及を目的とした「やまぐち3Dものづくり研究会」を立ち上げ、県内企業の3Dものづくり技術に対するニーズ調査およびニーズを解決する技術の研究開発を行ってきた。このような活動を行う中で3Dものづくり技術を活用した文化財の複製品製作に対するニーズが提案され、3Dものづくり技術の新たな分野での活用事例として取り組むこととした。

本研究では実際に文化財の複製品製作作業を通じて、必要な技術を習得し、これら技術を県内企業へ普及することで3Dものづくり技術を活用した新たな事業分野の創造を目的としている。

## 2. 重要文化財「金銅鱧口」について

複製品製作の対象である重要文化財「金銅鱧口<sup>1)</sup>」は1254年頃(建長6年)に月輪山円政寺天神宮(現在の山口市に建立)寄進されたものである。刻印された「山口」の文字は確認できる最古の「山口」の地名を記した貴重な文化財の一つである。円政寺天神宮はその後、毛利氏とともに現在の萩市へ移転し、明治には神仏分離令によって円政寺と多越神社に分離している。重要文化財「金銅鱧口」は、その間に遺失し、現在は奈良国立博物館の収蔵品となっている。図1に金銅鱧口の写真を、表1に鱧口の諸元を示す。



図1 重要文化財「金銅鱧口」

表1 金銅鱧口(原品)の諸元

大きさ	最大直径約16cm 最大厚み4.3cm
重さ	1718.41g(奈良国立博物館調べ)
材質	青銅製(金メッキ後に文字を彫刻)
仕上げ	金メッキ仕上げ(推定)

## 3. 製作方法について

## 3.1 形状測定方法

重要文化財である「金銅鱧口」を博物館外へ持ち出すことは困難であるため、当センター所有のハンディ型3Dスキャナー(Creaform, Inc. 製HandySCAN700)を博物館に持ち込み、形状計測を行った。表2に3Dスキャナーの諸元を示す。

使用した3Dスキャナーでは図2に示すポジショニングターゲットを認識することで、様々な角度から測定した形状データをつなぎ合わせる事が可能となっている。本測定では測定対象物にポジショニングターゲットを貼付することができないため、予めターゲットシールを貼付したポジショニングターゲットシート(以下ターゲットシートと称す)を作成し、対象物をそのシートの上に乗せて測定を行った。尚ターゲットシートはターゲット以外のものが測定されないように黒色のシートにターゲットシールを貼付している。図2にターゲットシート上に測定対象物に乗せた状況を示す。形状測定は鱧口の表裏を別々に測定し、ソフトウェア上で両面を結合した。

表2 ハンディ型3Dスキャナーの諸元

方式	非接触レーザー方式
連続スキャン範囲	0.1m~4m
解像度	0.05mm
容積精度	0.02mm+0.06mm/m



図2 ターゲットシート上に測定対象物に乗せた状況

\* 企業支援部デザイングループ

\*2 企業支援部加工技術グループ

\*3 企業支援部設計制御グループ

### 3・2 CAD データの作成

リバーエンジニアリングソフト(3DSystems, Inc. 製 Geomagic Design X)を利用し、以下の手順により CAD データを作成した。

- ① 測定データ (STL) の結合
- ② 測定データの不良箇所の修正
- ③ 測定データから CAD データを生成
- ④ 彫刻文字の形状データの復元



図3 鱈口の形状測定の様況

### 3・3 樹脂 3D プリンターによる造形

#### 3・3・1 造形姿勢の検討

樹脂 3D プリンターは最下層より 1 層ずつモデル材を積層していく方法のため、形状によってはモデル材を支えるためのサポート材が必要となる。鱈口表面に彫刻された文字の再現性や内部の空洞部の研磨や塗装などの仕上げ処理のし易さを考慮して造形姿勢の検討を行った。

#### 3・3・2 仕上げ処理の検討

奈良国立博物館の情報によれば、原品が製造された当時は銅製の本体に金メッキが施されていた<sup>2)</sup>。そこで、複製品についても原品の製造当時の状態を再現するための仕上げ処理の方法について検討した。

### 3・4 金属積層造形機による造形

#### 3・4・1 青銅の造形条件の検討

原品と同じ材質である青銅での鱈口の複製品の造形を試みた。青銅材料は当センターの所有する金属 3D プリンター (Concept Laser GmbH 製 M2 Cusing) の標準材料では無いため、新たに最適な造形条件を探索する必要がある。

本検討では、対象となる造形物を支持するのに十分な強度を有するサポートの作成について、レーザー出力とレーザー走査速度を変化させて造形可能な条件を絞り込んだ。

#### 3・4・2 造形姿勢の検討

金属積層造形では、仕上がりや機械的特性などの造形品質や造形時間、後加工の容易さなど造形物への要求事項に応じて適した造形姿勢が異なる。鱈口の複製品を造形するにあたり、本造形では造形の可否および鱈口の表面に彫刻された文字の再現性に着目し、造形姿勢の事前検討を行った。尚、造形姿勢の検討は作業効率化のため、1/2 スケールかつ片面のみのデータを用いて行った。

## 4. 製作結果

### 4・1 形状測定

測定の結果、全体の形状については問題無く測定が可能であったが、表面に彫刻された文字については、彫りの深さが浅く 3D スキャナーでは十分な測定が出来なかった。そのため彫刻文字については画像データを元に形状を復元する方法を検討するため、デジタルカメラにより撮影を行った。図 3 に形状測定の様況を示す。

### 4・2 CAD データの作成

#### 4・2・1 測定データの結合

鱈口の表と裏のデータで共通する部分(表と裏の双方で測定出来ている箇所)を元にし、大まかなデータ結合を行ったのち、ベストフィット処理および手動による微調整を行った。図 4 に結合作業の様況を示す。

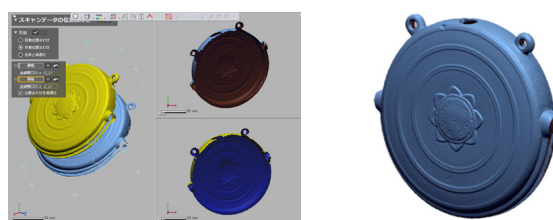


図4 形状データの結合作業様況

#### 4・2・2 測定データの不良箇所の修正

測定不良によって空いた穴を埋める作業を行い、形状が不明確な部分については図 5 に示すように対象形状部分から反転コピー等を行って形状を復元した。また、測定データ(測定した座標点)が多いため、データ数を削減することで、後工程での処理時間の短縮を図るとともに形状測定では正確な測定ができなかった彫刻文字部分については、図 6 に示すように一旦、形状データから消去した。

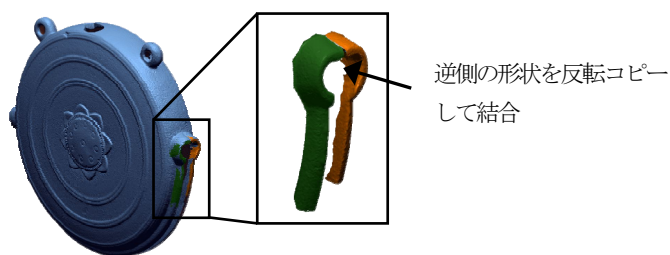


図5 形状復元作業

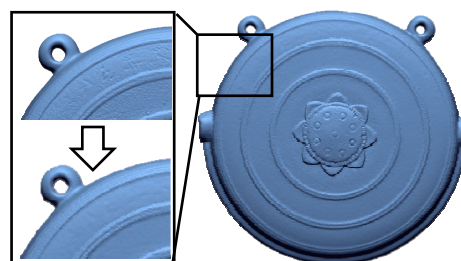


図6 彫刻文字形状データの消去



#### 4・2・3 測定データから CAD データの生成

当初はソフトウェアの面データ作成機能を利用した自動での CAD データの生成を想定していたが、形状の欠落や再現性が低いなどの問題があり、補助線の描画を手作業で試行錯誤することで解決した。図 7 に CAD データの生成工程を示す。

内部の空洞部分については 3D スキャナーでは内部形状は測定出来ないため、原品の重量と材質の比重から 3D-CAD の質量計算機能にて質量を確認しながら内部空洞の形状を作成した。図 8 に完成した CAD データを示す。

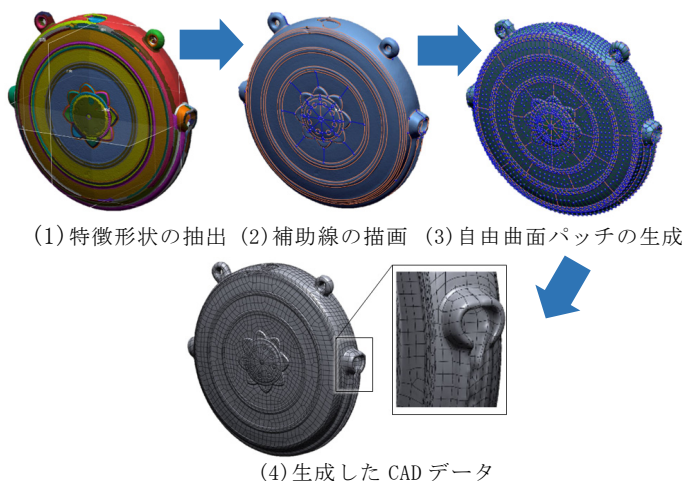


図 7 CAD データの生成工程



図 8 完成した CAD データ (文字部は除く)

#### 4・2・4 彫刻文字の形状データの復元

鱗口表面の彫刻文字については 3D スキャナーでは測定出来なかったため、デジタルカメラで撮影した画像から文字の輪郭をトレースすることで形状を生成した。

尚、文字の輪郭トレースおよび輪郭形状を基にした文字の 3D データの生成は 3D-CAD (SolidWorks) 上で行った。

図 9 に彫刻文字の復元作業の流れを示す。

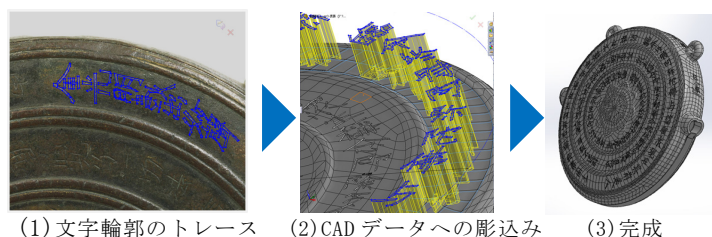


図 9 彫刻文字の形状データの復元作業の流れ

#### 4・3 樹脂 3D プリンターによる造形

##### 4・3・1 造形姿勢

前述までに作成した CAD データをそのまま造形した場合、3D プリンターの造形の仕組み上、内部の空洞部分にサポート材が充填され、また表裏のどちらかの面 (文字が彫刻された面) にもサポート材が付着し、サポート材の除去作業が増大するほか、サポート材の取り残しの結果、彫刻された文字の再現性の低下が懸念される。そのため、図 10 の様に CAD データを 2 分割し、図 11 の様な姿勢で造形することにした。これにより、文字彫刻部にサポート材が付着せず、かつ空洞部のサポート材を容易に除去することが出来る。

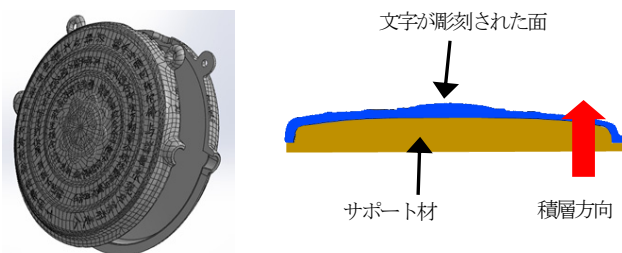


図 10 データの分割

図 11 造形姿勢

##### 4・3・2 仕上げ処理

2 分割して造形することにより、それぞれのパーツについて研磨と空洞部を塗装した後にプラチック用接着剤を用いて、貼り合わせた。図 12 に工程を示す。原品が製作された当時に再現するため、研磨の後、金メッキ調の塗装を施した。文字部分については、原品は金メッキ後に彫刻したと思われることから、文字部分は青銅がさびていたと想定した。そこで複製品については金メッキ塗装後に文字部に墨入れを行った。図 13 に完成した複製品を示す。

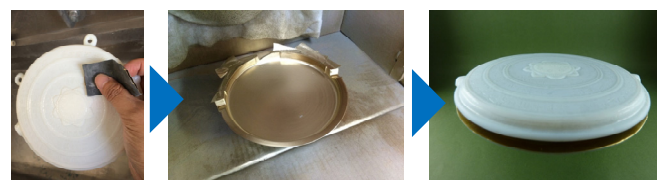


図 12 仕上げ工程



図 13 金銅鱗口の複製 (樹脂製) の完成品

4・4 金属積層造形機による造形

4・4・1 青銅の造形条件

造形条件の検討に使用した造形形状は、15×15×厚さ1mmのモデルの底面を、高さ3mmのサポートで保持するものとした。

本検討でレーザー出力とレーザー走査速度を変化させて造形した結果を図14に示す。条件が適当でない場合には、金属粉末の溶融不良により造形物が形成されないものや、造形時に生じるひずみによってモデル部が変形しているのがわかる。これらの結果からレーザー出力と走査速度との関係をまとめたものを図15に示す。レーザー出力が高い又は走査速度の遅い場合、つまりエネルギー密度(単位体積あたりの投入エネルギー量)が高い領域では、サポートとして十分な保持力を得られていることがわかる。またモデルの形状や姿勢によって、造形時に生じるひずみは変化するため、対象とするモデルに応じた造形条件の選定が必要となる。

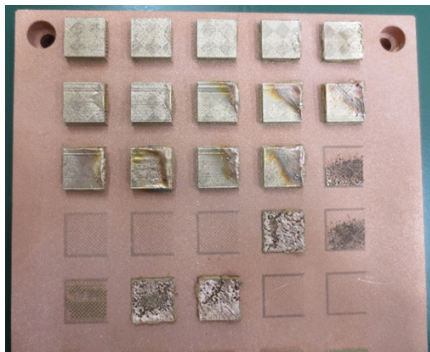


図14 造形条件の検討状況

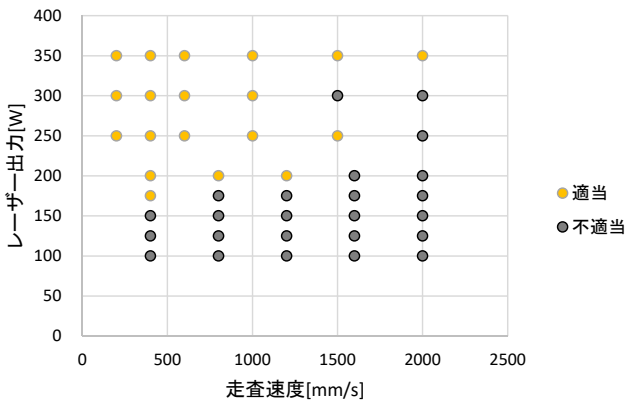


図15 造形条件と造形可否の関係

4・4・2 造形姿勢の検討

表3に造形姿勢による造形結果を示す。各造形姿勢においてひずみ等による造形不良は見られなかった。モデル、サポート共に造形条件は適正であると考えられる。プレートに対して水平方向に配置したモデルの造形は積層痕が顕著に見られ文字が積層痕によりつぶれていた。45°傾角したものと垂直方向に配置したモデルでは大きな差は見られなかった。以上の結果より、後加工の容易性を考慮しサポート量の少ない垂直モデルを採用した。

表3 造形姿勢による造形結果

造形方向	水平	垂直	傾角 (45°)
造形不良	○	○	○
文字の再現性	×	○	○
	(積層段で文字が潰れる)		
造形時間	○ (5時間)	△ (9時間)	△ (9時間)
後加工	×	○	△
	(サポートが大量)		(サポートが多い)
造形物			

4・4・3 金属積層造形機の実寸大モデルの造形

事前検討の結果を基に実寸大の造形を行った。サポート部の造形条件はレーザー出力 250[W]、走査速度 1000[mm/s]とした。図16に造形直後のモデルの状態、図17に青銅製「金銅鱈口」の複製完成品を示す。造形時はひずみ等による造形不良はなく、造形物の文字の再現性も良好であった。青銅製の複製品については、原品と同じ材料である青銅の質感を重視し、塗装等の後加工は行わず研磨のみとした。尚、内部空洞部の一部にサポート材が残留したため、最終的な重量は原品より重く 1780g となった。



(1) 造形機から取出しの様子



(2) 造形直後の状態

図16 造形直後のモデルの状態



(1) 前面



(2) 上部側面



(3) 左部側面

図17 金銅鱈口の複製(青銅製)の完成品

5. 結 言

今回の取り組みの結果、既存物からCADデータを生成する作業、いわゆるリバースエンジニアリングの技術から3Dプリンターの特徴を考慮した造形まで、3Dものづくりの技術全般について習得・向上ができた。

今回、製作した金銅鱈口の複製品については、金銅鱈口にゆかりのある神社やお寺の他、博物館での公開もあり、3Dものづくり技術に関心のある県内企業だけでなく、一般の方にも大きな関心を持って頂くことができた。今後はこれらの技術が教育・文化に関する産業への活用に期待している。

複製品の製作にあたり、重要文化財「金銅鱈口」の複製

品の製作についてご許可を頂きました奈良国立博物館ならびに奈良国立博物館工芸考古室の清水室長様には複製品製作について多大なるご協力を賜りました。

また、やまぐち3Dものづくり研究会会員である中原工務所社長の中原正男様には、金銅鱧口に関する資料提供や複製品の鱧口の展示・披露などについて多大なるご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) [http://imagedb.narahaku.go.jp/archive\\_search/search/viewer.php?requestArtCd=0000006179](http://imagedb.narahaku.go.jp/archive_search/search/viewer.php?requestArtCd=0000006179)
- 2) <http://www.narahaku.go.jp/collection/1185-0.html>