

遺物の3次元デジタルデータ 保存と復元システム

河嶋 壽一¹⁾・矢野 文規²⁾・山根 琢博²⁾・篠田 潤一¹⁾・
中村 幸司²⁾・藤田 周平²⁾・平田 健太郎²⁾

●キーワード：デジタルデータ (digital data), 測定 (measurement), 復元 (restoration), 遺物 (relics),
製作 (make), 機械加工 (machine), 数値制御 (NC), 金具 (metal fitting), 瓦 (tile),
菩薩 (Bodhisattva), 貨幣 (coin)

1. 緒 言

遺跡から出土する遺物の多くは損傷した状態で現れる。これらは保存や展示のために、元来の形状に復元することが必要となる場合がある。従来、復元作業は熟練した専門家により行われてきたが、一般的には難しい作業であり、遺物をさらに損傷する可能性も高かった。また、遺物の保存状態にもよるが、遺物の状態はさらに劣化していくものと思われる。一方、昨今のコンピュータ技術の進歩により、工学分野では、製品の3次元形状を非接触で測定し(望月：2001)、3次元のデジタルデータを活用した設計・解析によって、新製品の試作・加工を行う、いわゆるリバースエンジニアリングが実用化されつつある(日経ものづくり：2004)。これらの技術は文化財分野にも適用され、遺物の3次元形状を計測して(佐藤ら：2001, 金谷ら：2002)、3次元のデジタルデータとして保存する(塚本ら：2002)、いわゆるデジタルアーカイブが活発に行われるようになった(池内ら：2002)。さらに、遺物形状の差異の解析や(今津ら：2002)、復元の試み(渡辺ら：2002)も行われているが、実際の復元作業性や復元品製作の実現性などについては、あまり触れられていない。

本研究では、遺物の3次元デジタルデータ保存と復元システムの構築のために、対象物として、龍谷大学学術情報センター蔵の唐草紋様青銅製金具(龍谷大学：2002)、単弁蓮華文軒丸瓦、菩薩像頭部(龍谷大学：2001)、および大阪造幣局で販売されていた富本銭のレプリカを取り上げた。これらについて、3次元形状の測定とデジタルデータの保存、3次元デジタルデータを用いた形状の復元、NC(Numerical Control：数値制御)工作機械と樹脂造形機での復元品の製作という一連の工程を行うことにより、古代遺物の復元品や複製品の製作工程において、人手による作業が最低限で可能なシステムを構築することを目的とした。

唐草紋様青銅製金具においては、復元作業の具体的な手順を短時間で把握することを目的に、3次元形状の高さ方向の情報を白黒の濃淡に置き換えた2次元のグレースケールデータを活用して、復元の作業性と精度について検討した。単弁蓮華文軒丸瓦においては樹脂材料を用いて復元品を製作し、菩薩像頭部においては樹脂造形とともに切削加工にて複雑な立体形状の復元品の製作を行った。富本銭のレプリカにおいては、形状測定方法として、最近の非接触式の作業性と精度を、旧来の接触式と比較検討した。また、復元品を非損傷品の複製品と比較して、

¹⁾ 龍谷大学理工学部機械システム工学科 〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷 1-5

²⁾ 元龍谷大学理工学部機械システム工学科 〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷 1-5

復元精度について検討した。なお、全ての対象物について、形状の対称性を考慮した復元を試みた。

2. 唐草紋様青銅製金具

2.1 対象物

龍谷大学大谷探検隊（小田義久：2001）によって発掘された唐草紋様青銅製金具を写真1に示す。これは、鍍金痕跡のない青銅製金具で、大きさは5.8×6.0cmである。製作年代は7～8世紀頃で、出土場所はトルファン盆地である。銅薄板の金具で、固定用に小さな穴が8箇所（うち1箇所は破損）あり、方形の穴を中心として周囲に上下左右対称の唐草紋様が打出されている。

2.2 実験方法

2.2.1 全体の流れ

図1には本システムにおける測定・復元手順の流れを示す。3次元デジタルデータを直接取り扱う前に、グレースケールデータによる復元手順を求めた。得られた手順に従い、3次元データによる復元を行った。さらに、復元品を多数製作するために、復元品の鋳型を製作した。グレースケールデータによる復元品①、3次元データによる復元品②にはケミカルウッド（木の微粉末を樹脂で固めたもの）を用い、鋳型による復元品③にはシリコンラバーを用いた。

以下に記す詳細手順で、金具の3次元デジタルデータを、測定・保存・復元し、復元品を製作した。

(1) 測定・加工機械（Roland 社製 MDX-15）の形

状スキャン機能を用いて、金具の3次元形状を接触式センサーで測定する。

(2) 測定したデータを、3次元デジタルデータを取り扱う際に一般的な STL 形式で保存する。また、物体の凹凸を白黒の濃淡で2次的に表すために、グレースケールの BMP 形式でも保存する。

(3) (2) で保存したグレースケールデータを Photoshop (Adobe 社製の画像編集ソフト) にて修復する。この作業により、金具の復元可能性や復元すべき箇所、手順、仕上がり形状などを確認する。

(4) (3) で作成したグレースケールデータを MaquetteVolume (Techsoft 社製の機械加工ソフト) にて3次元データに変換した後、STL 形式で保存する。その後、測定・加工機械でケミカルウッドを切削加工し、復元品①を製作する。

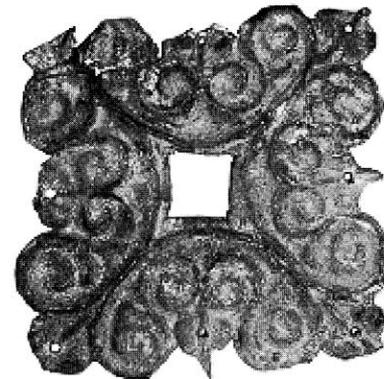


写真1 唐草紋様青銅製金具

Photo. 1 Bronze fitting of arabesque pattern

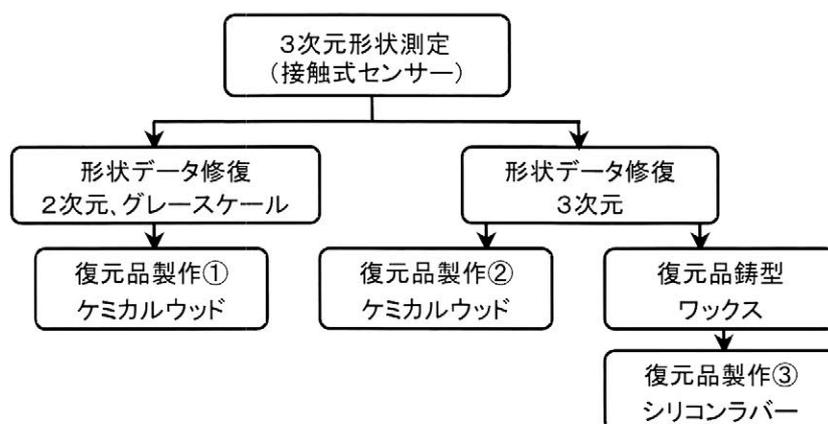


図1 金具の測定・復元手順の流れ

Fig. 1 Flow of measurement/restoration procedure of bronze fitting

- (5) また、(2) で保存した 3 次元データを Rhinoceros (RobertMcNeel & Associates 社製の 3 次元コンピュータグラフィックソフト) にて修復し、STL 形式で保存する。その後、MaquetteVolume にて、STL 形式の鋳型データを作成する。
- (6) (5) で作成した 3 次元データを測定・加工機械で切削加工し、ケミカルウッドの復元品②とモデリングワックスの鋳型を製作する。
- (7) (6) で製作した鋳型にシリコンラバーを押し込み、数時間放置した後、鋳型から取り出し、復元品③を製作する。

2.2.2 復元手順

データの種類に対応して、具体的な復元手順を以下に示す。

(1) グレースケールデータによる復元手順

- ① 復元すべき箇所とその復元可能性について検討する。
- ② ①において決定した箇所の形状を復元していく。
- ③ 平面に垂直方向での凹凸変数を表す白黒の濃淡レベルを、適切な値に調整する。
- ④ ③で得られたグレースケールデータを 3 次元データに変換する。この際に、プレビュー画面で仕上がり形状を確認しながら、凹凸変換係数を調整する。
- ⑤ 測定・加工機械により復元品①を製作する。製作後、復元箇所および全体の形状を再度検討し、不備が認められた場合は、その内容により前の作業に戻る。

(2) 3 次元データによる復元手順

- ① グレースケールデータによる復元時に得た復元手順に基づいて、3 次元形状を復元していく。
- ② ①の復元データに基づいて、その鋳型データを作成する。
- ③ ①②で作成した 3 次元データを用いて、復元品②と鋳型を測定・加工機械により製作する。製作後、復元箇所および全体の形状を再度検討し、不備が認められた場合は、その内容により前の

作業に戻る。

- ④ ③で製作した鋳型にシリコンラバーを押し込み、数時間放置した後、鋳型から取り出し、復元品③を製作する。

2.3 結果および考察

2.3.1 3 次元形状測定結果

金具を 0.1mm のピッチで測定した 3 次元デジタルデータを図 2 に示す。上方左部に大きなデータの欠落がある。これは、この部分が損傷しており、測定時に更に損傷を受けることを防ぐために、厚紙で保護した上を測定したことによりできたものである。

3 次元データは STL 形式で、2 次元データであるグレースケールデータは BMP 形式に変換して保存した。

2.3.2 形状データの復元

図 3 中の丸印で示すように、測定データ上で検討する

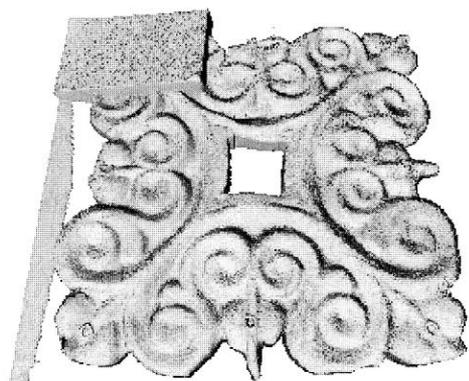


図 2 金具の形状測定結果

Fig. 2 Shape measurement result of bronze fitting

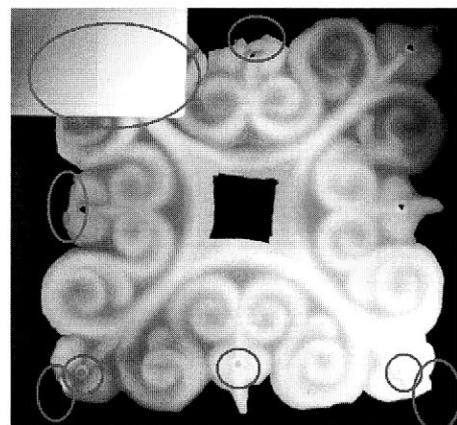


図 3 金具の復元箇所

Fig. 3 Restoration portions of bronze fitting

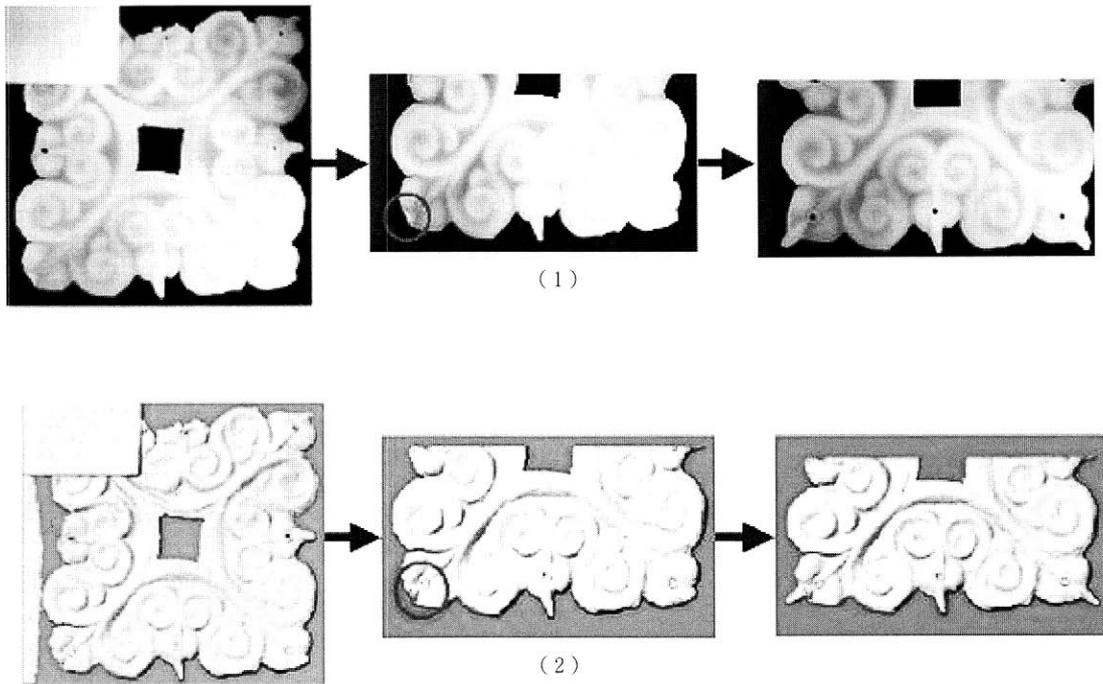


図4 金具の復元手順 (1)
 (1) 2次元データ (2) 3次元データ

Fig. 4 Restoration procedure of bronze fitting (1)
 (1) 2-dimensional data (2) 3-dimensional data

必要があると考えられる項目は以下の3点である。

- ① 上方中央, 中央左部, 下方左部, 下方右部にあるべき角(つの)が損傷している。
- ② 下方左部, 下方中央, 下方右部に固定用の穴があいていない。これは, 測定時に金具を固定した台座の表面が, 金具とともに測定されたためと考えられる。
- ③ 上方左部に大きなデータの欠落がある。これは, 前述のように, 測定時に更に損傷を受けることを防ぐために, 厚紙で保護した上を測定したことによりできたものである。

金具は方形の穴を中心として, 周囲に上下左右対称の文様を有していたと考えられる。今回の測定結果では, 金具の中央から下半分においては, ほぼ元来の形としての左右対称の形状データが取れていると考えられることから, 上下対称性を考慮して復元を試みた。すなわち, 中央から下半分の損傷した箇所をまず図4のように復元した。次にこれをコピーして上部に反転し,

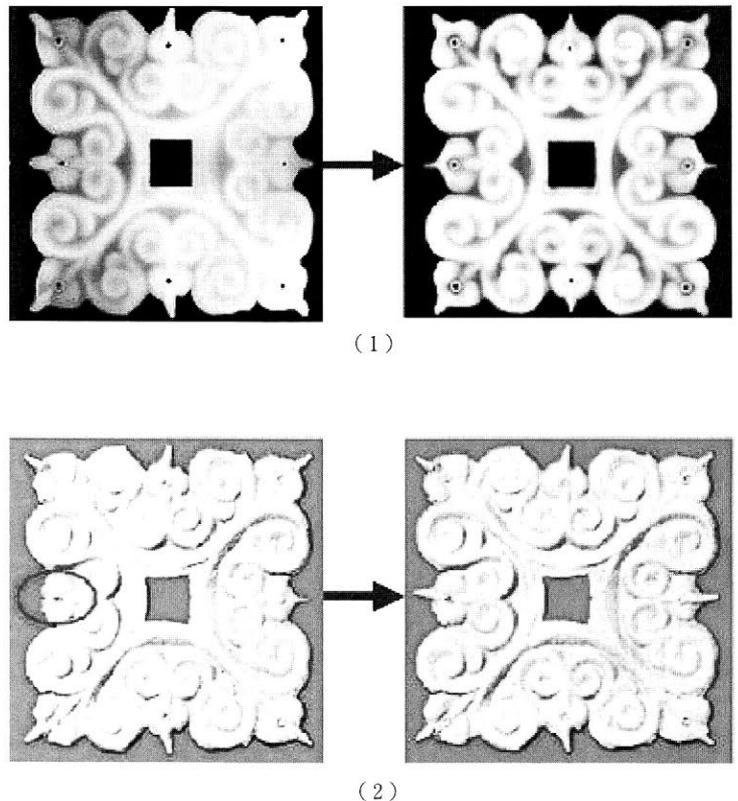


図5 金具の復元手順 (2)
 (1) 2次元データ (2) 3次元データ

Fig. 5 Restoration procedure of bronze fitting (2)
 (1) 2-dimensional data (2) 3-dimensional data

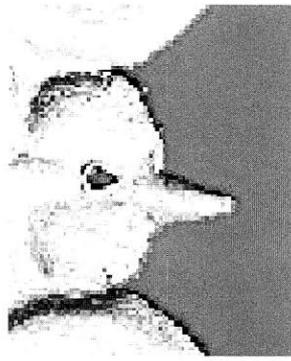


図6 角（つの）の復元用データ
Fig. 6 Data for restoration of a horn

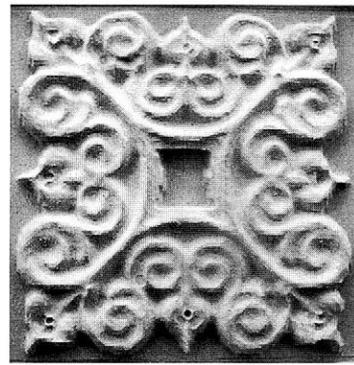


写真2 金具の復元品①
Photo. 2 Restoration article of bronze fitting ①

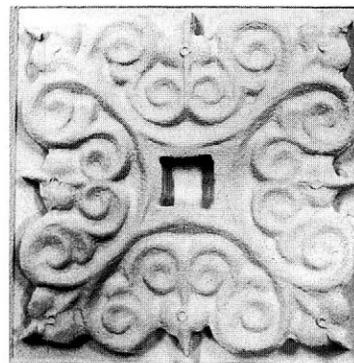


写真3 金具の復元品②
Photo. 3 Restoration article of bronze fitting ②

図5のように元の下半分と結合した後に、さらに全体としての損傷箇所を復元することを試みた。

2次元および3次元の形状データにおいて、その復元手順の詳細を以下に示す。

- ① 図6に示す中央右部の角（つの）をコピーする。
これを図4中の丸印で示す復元部分に移動し、位置と角度を微調整して、周囲の形状になじませる。また、固定用の穴があいていない箇所については、測定誤差と考えると、補正用の穴をあける。
- ② 復元した下半分全体を選択し、図5のように上半分を反転コピーで作成した後に結合する。結合する際には、垂直方向の高さに注意を払いながら微調整を行う。
- ③ 図5中の丸印のように、損傷している角（つの）の復元を行う。
- ④ 2次元のグレースケールデータでは全体的な白黒の濃淡を調整して、高さを設定する。

2.3.3 復元品の製作

（1）グレースケールデータによる復元品①の製作

2.3.2節で得られたグレースケールデータによる復元データを用いて、実際に手にとることができる復元品①を製作した。これによりコンピュータ画面上だけではわかりにくい復元状態を確認することができ、また新たな復元に対する手順を再検討することが可能になる。なお、グレースケールデータでは形状の左右対称性を考慮して、左半分を右半分に反転コピーすることにより、全体的な白黒の濃淡を調整しやすくした。

先端半径 0.5mm のスクエアエンドミルを用いて、荒

加工の後、仕上げ加工を行った。荒加工では約 3.5 時間、仕上げ加工では約 3 時間かかり、合計で約 6.5 時間かかった。得られた復元品①を写真2に示す。

（2）3次元データによる復元品②の製作

2.3.2節で得られた3次元データによる復元データに基づいて、先端半径 0.5mm のスクエアエンドミルを用いて、荒加工の後、仕上げ加工を行った。荒加工では約 6.5 時間、仕上げ加工では約 3 時間かかり、合計で約 9.5 時間かかった。得られた復元品②を写真3に示す。

（3）鋳型の製作

2.3.2節で得られた3次元データによる復元データに基づいて、鏡像変換さらには凹凸反転変換して鋳型データを作成し、写真4に示すように、モデリングワックスを切削加工して鋳型を製作した。

（4）シリコンラバーの復元品③の製作

上記（3）で製作した鋳型にシリコンラバーを押し込み、数時間放置した後、鋳型から取り出し、復元品③を製作した。得られたシリコンラバーの復元品③を写真5に示す。

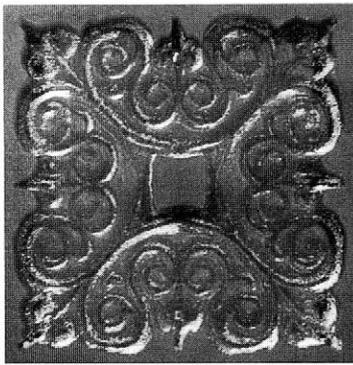


写真4 金具復元品の鋳型

Photo. 4 Mold for restoration article of bronze fitting

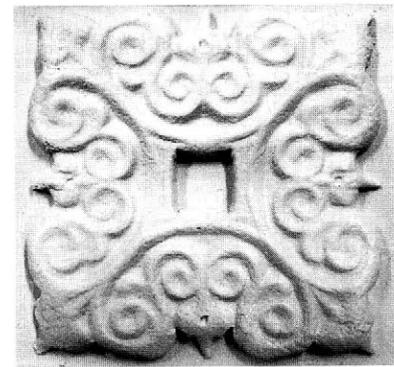


写真5 金具の復元品③

Photo. 5 Restoration article of bronze fitting ③

2.3.4 復元方法の比較

2次元グレースケールデータでの復元は、3次元データで復元を行うための予備試験として行ったが、結果から見て、比較的良好に復元できたと考えられる。2次元グレースケールデータは3次元データと比べて、とくに作業性に優れている点もあり、これらの点に着目して比較検討する。

復元品における角（つ）の細部形状の比較を写真6に示したが、3次元復元データを用いたほうが2次元グレースケール復元データを用いたよりも滑らかに仕上がっている。これは、3次元復元データを用いた製作では、測定されたままのデータを用いているため、元の滑らかな形状を維持しているのに対し、2次元グレースケール復元データは3次元データでの高さを256段階のグレー階調に置き換えているためである。

復元品の粗加工時間は、復元品①では復元品②の約半分であった。前述のように、グレースケール化によって高さ方向のデータ間隔が粗くなり、粗加工における高さ方向の切込み量が大きく設定された結果として、復元品①での粗加工時間が短縮されたと考えられる。なお、仕上げ加工では切削条件は同等に設定され、加工時間の差は小さかった。

3次元データにおけるSTL形式のデータ量は31,000kBで、2次元グレースケールデータの1,150kBと比べて非常に大きい。これは3次元データでは形状をポリゴンメッシュにより管理しているためである。ポリゴンメッシュとは、3角形のX、Y、Z座標値を記録したもので、これが集まってオブジェクトを形成している。金具におけるポリゴンメッシュ数は約190万に及んでい



(1) (2)

写真6 角（つ）の細部形状の比較

(1) 2次元データ (2) 3次元データ

Photo. 6 Comparison of detailed shape of horn

(1) 2-dimensional data (2) 3-dimensional data

る。このデータ量の大きさは復元作業と計算処理時間に影響を及ぼし、グレースケールデータにおいては容易にできた作業と計算処理が、3次元データでは一日以上かかる原因の一つとなった。なお、作業と計算処理時間の差異としては、3次元データを処理したRhinocerosは曲面データの処理には適しているが、ポリゴンデータの処理には必ずしも適していないことや、コンピュータのメモリ不足なども考えられる。

以上より、3次元データはデータ量が大きく処理に時間がかかるが、対象物を正確に再現することが可能であり、一方、グレースケールデータは対象物における正確性では劣るが、データ量が小さく処理時間が短いという特徴がある。

3. 単弁蓮華文軒丸瓦

3.1 対象物

龍谷大学学術情報センター蔵の単弁蓮華文軒丸瓦を写真7に示す。材料は粘土、寸法は直径約17cm、出土と年代は不明である。半球状の中房を中心に、6つの単弁

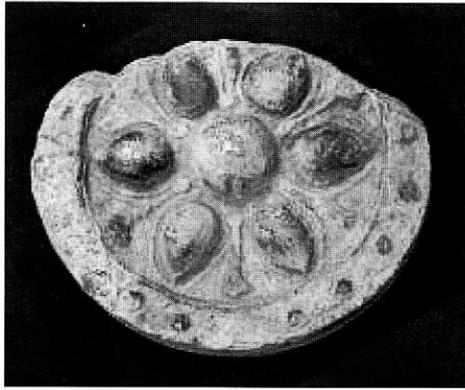


写真7 単弁蓮華文軒丸瓦

Photo. 7 Round eave tile of simple lotus petal design



図8 瓦の形状測定結果と復元箇所

Fig. 8 Shape measurement result and restoration portion of eave tile

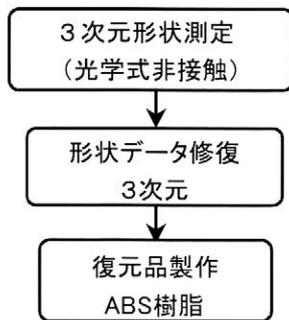


図7 瓦の測定・復元手順の流れ

Fig. 7 Flow of measurement/restoration procedure of eave tile

が配置され、その間には楔状の間弁が入られている。周りに配している珠文の一部と上部の瓦当部が欠損しているが、前面については円周方向で6つの単弁に対応した対称形状と見なせることから、復元は可能であると判断した。

3.2 実験方法

本システムの流れを図7に示す。本章においては、光学式非接触3次元形状測定機により形状を測定し、3次元データを復元後、樹脂造形機で復元品を製作した。以下の詳細手順で、瓦の3次元デジタルデータを測定・復元・保存し、復元品を製作した。

- (1) 光学式非接触3次元形状測定機（GOM社製 ATOS）を用いて、瓦の3次元形状を測定し、3次元デジタルデータをSTL形式で保存する。
- (2) 3次元データをRhinocerosにて修復し、STL形式で保存する。瓦形状の対称性を考慮して、損傷していない部分のデータをコピーして損傷部に貼り付けることで復元した。

- (3) (2) で作成した3次元データを熱溶解積層方式の樹脂造形機（Stratasys社製 Dimension）で製作する。

3.3 結果および考察

3.3.1 3次元形状測定結果

ATOSで測定した3次元デジタルデータを図8に示す。表、裏および側面からのデータを合成して得られたもので、上部の損傷状態も測定されている。

STL形式のデータ量が22,450kBと大きいため、ATOSでのメッシュの間引き機能を用いて6,000kBに減らし、形状の精度を損なわない範囲で、効率良く復元作業を行えるようにした。

3.3.2 形状データの復元

瓦の前面は円周方向で6つの単弁に対応した対称形状を有しているが見なせるが、図8の形状測定結果では、下半分においてほぼ元来の形としての左右対称の形状データが取れていると考えられる。ここでは、瓦の前面形状のみに着目して、上下対称性を考慮して復元を試みた。すなわち、図8中の曲線で囲った損傷している箇所を、下記の手順で図9に示すように復元した。

- ① 損傷が少ない下半分の領域のデータを活用することとし、図9①に示すように、瓦の下半分のデータを選択する。
- ② 下半分のデータをコピーして上下反転する。
- ③ 上下のデータを結合する。

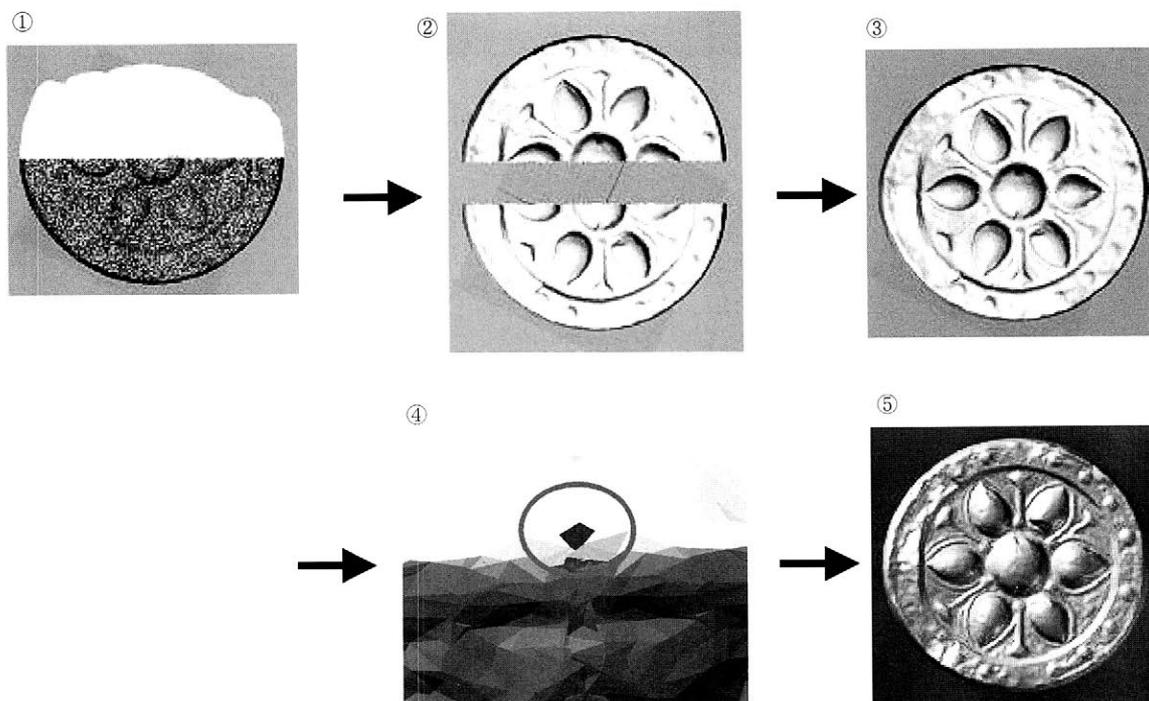


図9 瓦の復元手順

Fig. 9 Restoration procedure of eave tile

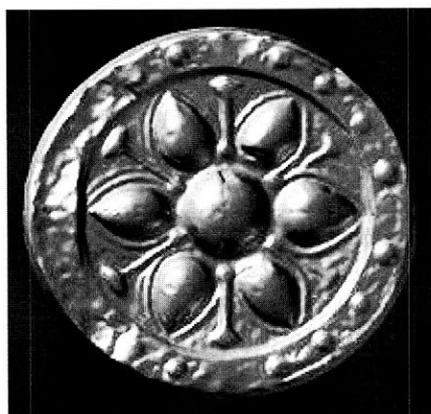


図10 瓦の復元品データ

Fig. 10 Restoration data of eave tile

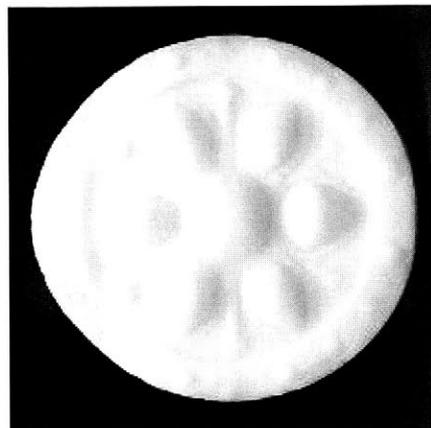


写真8 瓦の復元品 (ABS樹脂)

Photo. 8 Restoration article of eave tile (ABS resin)

- ④ 復元途中で残った図9 ④中の丸印で示す小さいデータ欠損部分を、ATOS 付属ソフトにより埋める。
- ⑤ 復元データを完成し、STL形式で保存する。

3.3.3 復元品の製作

3.3.2節で得られた図10に示す3次元復元データを用いて、ABS樹脂の復元品を樹脂造形機で写真8のように製作した。製作には約33時間を要した。これにより、3次元の立体形状の復元品を製作できることが示された。

なお、ここでは瓦の前面形状のみに着目した復元を行ったが、実際には上部の瓦当部が全て欠損しており、今後は瓦当部を含めた復元を検討する必要がある。

4. 菩薩像頭部

4.1 対象物

龍谷大学学術情報センター蔵の菩薩像頭部を写真9に示す。大谷探検隊による収集品(大谷コレクション)であり、出土場所は中央アジアのショルチュクで、年代は6~7世紀と考えられている。中央アジアから中国、そして日本にどのように仏教文化が伝播したのかについて



写真9 菩薩像頭部
Photo. 9 Head of Bodhisattva

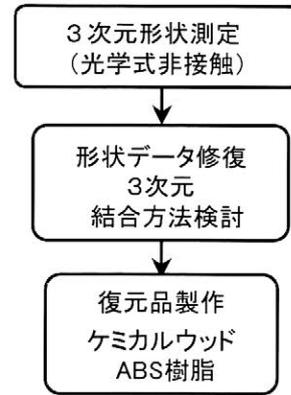


図11 頭部の測定・復元手順の流れ
Fig. 11 Flow of measurement/restoration procedure of Bodhisattva head

知る手がかりとなりうるものであると考えられている。大きさは、高さ約10.5cm、幅約8.8cmであり、粘土で作られた塑像である。頭髪の部分は型を使って製作され、顔の部分と接合されたものである。ふくよかで端正な顔立ち、ほぼ左右対称に巻き上げられている前髪と大きな肉髻（にくけい）などが特徴で、古代ガンダーラ仏の影響を受けていると考えられる。

4.2 実験方法

本システムの流れを図11に示す。本章においては、光学式非接触3次元形状測定機により形状を測定し、3次元データを復元後、NC工作機械と樹脂造形機で復元品を製作した。

以下の詳細手順で、頭部の3次元デジタルデータを測定・復元・保存し、復元品を製作した。

- (1) 光学式非接触3次元形状測定機を用いて頭部の3次元形状を測定し、3次元デジタルデータをSTL形式で保存する。
- (2) 3次元データをRhinocerosにて修復し、STL形式で保存する。前髪形状の対称性を想定して、損傷していない部分のデータをコピーして損傷部に貼り付けることにより復元する。

- (3) (2) で作成した3次元データを、NC工作機械（ミマキエンジニアリング社製NC-5K）および熱溶解積層方式の樹脂造形機（Stratasys社製Dimension）で製作する。

4.3 結果および考察

4.3.1 3次元形状測定結果

菩薩像頭部の3次元デジタルデータを図12(1)に示す。44,500kBの測定データを11,700kBに減らし、形状の精度を損なわない範囲で、効率良く復元作業を行えるようにした。

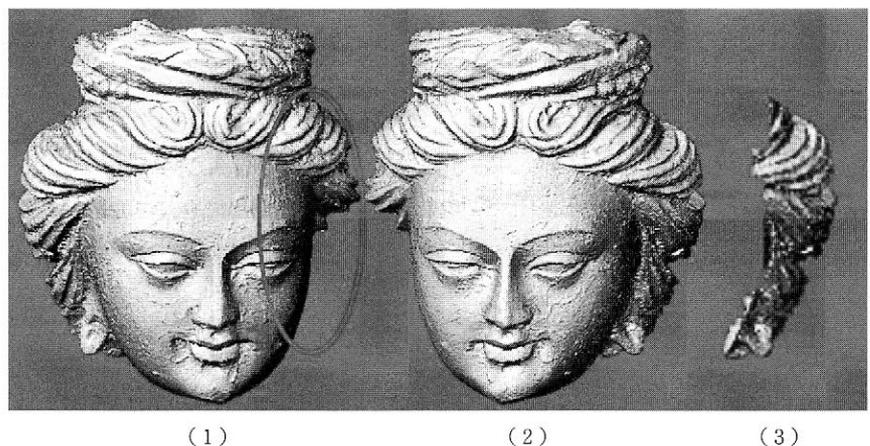


図12 菩薩像頭部の復元手順
(1) 元データ (2) 左右反転データ (3) 復元用データ
Fig. 12 Restoration procedure of Bodhisattva head
(1) original data (2) right-and-left reversal data
(3) data for restoration

4.3.2 形状データの復元

図12(1)中の曲線で囲ったように、頭部の左側の前髪が損傷していると考えられることから、損傷していない右側のデータを活用して復元することを試みた。以下の手順で図13に示すように復元した。

- ① 図12(2)に示すように、元データをコピーして左右反転する。
- ② 左右反転してできたデータの不要な部分を削除して、図12(3)に示すような復元用データを作成する。
- ③ ②で得た復元用データを元データに結合する。
- ④ 復元データを完成し、STL形式で保存する。

4.3.3 復元品の製作

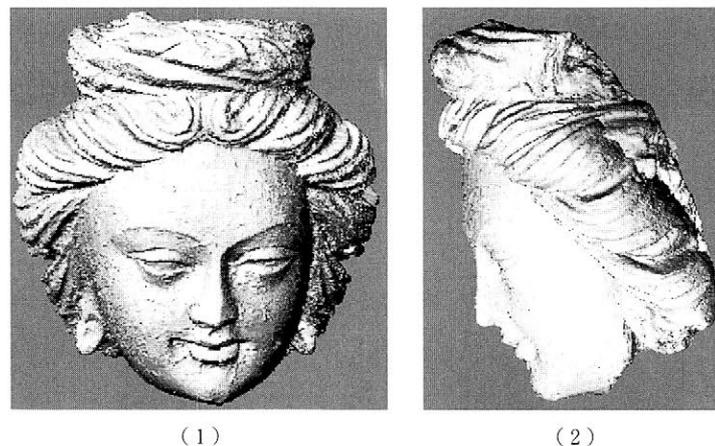
4.3.2節で得られた3次元復元データを図13に示す。

元データを目標として、元データとの重なり具合を確認しながら復元用データを重ね合わせるにより、細かいデータの修復を行うことが可能になった。

この復元データを用いて、NC工作機械と樹脂造形機で復元品を製作した。NC加工の被切削物にはケミカルウッドを用い、樹脂造形にはABS樹脂を用いた。

NC加工のためのツールパスの一例を図14に示す。今回用いたNC工作機械では、通常のX、Y、Zの3軸のほかに回転軸を有しているため、複雑な立体の輪郭形状を加工することができた。写真10、写真11には製作された切削加工品と樹脂造形品を示す。

切削加工時間は約46時間、樹脂造形時間は約18時間であった。今回の菩薩像頭部については、前髪は左右対称という仮定で復元したが、実際には、髪型の分け目が完全には顔の中心ではなく、頭部自体も少し傾いていた。



(1) (2)
図13 菩薩像頭部の復元品データ
(1)正面 (2)左側面

Fig.13 Restoration data of Bodhisattva head
(1) front side (2) left side

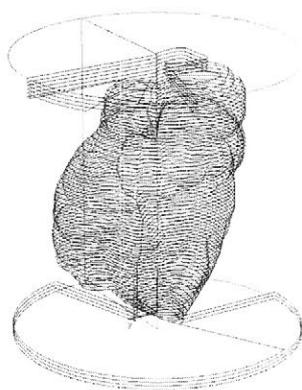


図14 NC加工ツールパス
Fig.14 NC cutting tool path



写真10 頭部の復元品(ケミカルウッド)
Photo.10 Restoration article of Bodhisattva head (chemical wood)

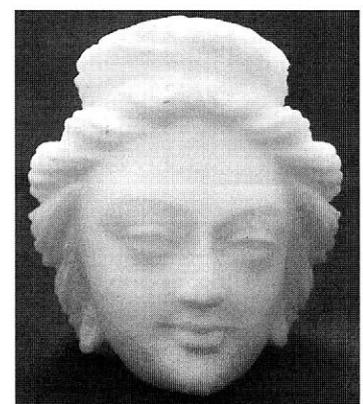


写真11 頭部の復元品(ABS樹脂)
Photo.11 Restoration article of Bodhisattva head (ABS resin)

したがって、復元形状については推測の要素が含まれているが、復元技術としては活用できるものと考えられる。

5. 富本銭のレプリカ

5.1 対象物

大阪造幣局で販売されていた富本銭のレプリカを写真12に示す。鋳造品で、形状が損傷していないものと、一部に損傷が見られるものがある。ここでは、復元品を非損傷品と比較検討するのに適した対象物として取り上げ、写真13の損傷した形状を測定し、これを復元することを試みた。

5.2 実験方法

本システムの流れを図15に示す。本章においては、光学式非接触3次元形状測定機および接触式測定機により形状を測定し、3次元データを復元後、測定・加工機械で復元品を製作した。

以下の詳細手順で、古銭の3次元デジタルデータを測定・復元・保存し、復元品を製作した。

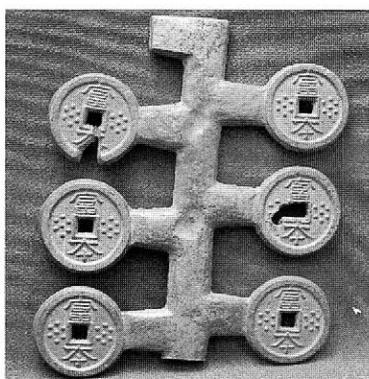


写真12 富本銭のレプリカ
Photo.12 Replica of *Fuhon* coin

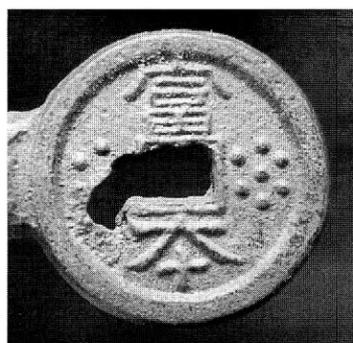


写真13 損傷した古銭
Photo.13 Damaged old coin

- (1) 光学式非接触3次元形状測定機および2章で用いた測定・加工機械を用いて古銭の3次元形状を測定し、3次元デジタルデータをSTL形式で保存する。
- (2) 3次元データをRhinocerosにて修復し、STL形式で保存する。損傷していない部分のデータをコピーして損傷部に貼り付けることにより復元する。
- (3) (2)で作成した3次元データを、測定・加工機械で切削加工し、ケミカルウッドの復元品を製作する。
- (4) 復元品形状を非損傷品の形状と比較検討する。

5.3 結果および考察

5.3.1 3次元形状測定結果

光学式非接触測定機による非損傷品と損傷品の測定結果を図16に示す。また、2章で用いた測定・加工機械の形状スキャン機能により、損傷品を接触式センサーで、0.05mmのピッチで測定した結果を図17に示す。STL形式でのデータ量は、光学式で11,600kB、接触式で19,900kBであった。

両測定機による損傷品の測定結果には大きな差異は見られず、形状は精度良く測定されている。光学式非接触測定機では比較的短時間(約1時間)での測定が可能で、壊れやすく比較的大きな遺物の形状測定には有効である。一方、接触式測定機では、測定時間は長い(約26時間)が、自動測定が可能であるため、壊れにくく細かな測定が必要な遺物には適していると考えられる。

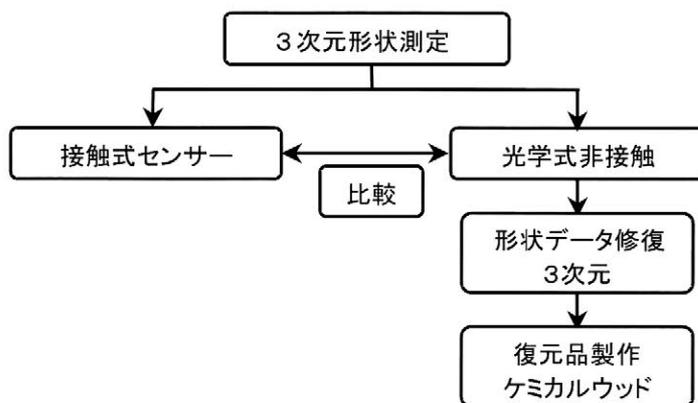


図15 古銭の測定・復元手順の流れ
Fig.15 Flow of measurement/restoration procedure of old coin

5.3.2 形状データの復元

以下では、光学式非接触測定機で測定したデータを用いて形状の復元を行った。図16(2)中の丸印で囲った損傷している箇所を、下記の手順で図18に示すように復元した。

- ① 図18(1)に示すように、元データをコピーして左右反転する。
- ② 損傷がない領域のデータを活用することとし、図18(2)に示すように、損傷部に相当する箇所を含むデータを切取る。
- ③ ②で得られたデータを元のデータ上に移動し、図18(3)に示すように結合する。
- ④ 復元データを完成し、STL形式で保存する。

5.3.3 復元品の製作

5.3.2節で得られた3次元復元データを用いて、測定・

加工機械によりケミカルウッド上に切削加工した。粗加工に約2時間、仕上げ加工に約1時間を要した。写真14(1),(2)には、非損傷品の複製品と損傷品の復元品を比較した。概観はほぼ同じであり、比較的よく復元できていると考えられる。今回は一つの損傷品から復元を行ったが、類似の複数の損傷品から復元を試みることで、さらに復元精度を向上することが可能と考える。

6. 結 言

本研究では各種遺物について、3次元形状の測定とデジタルデータの保存、2次元データおよび3次元データによる復元、復元データを用いた各種復元品の製作という一連の工程を行い、時間的および精度的観点から実用可能な、遺物の3次元デジタルデータ保存と復元システムを構築した。

最初に、実際の復元作業性を向上する手段として、3

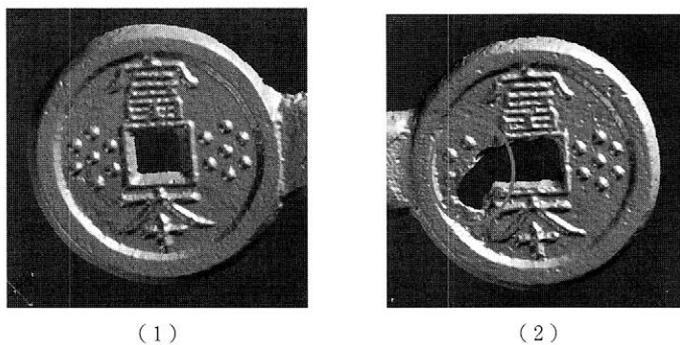


図16 光学式非接触測定機による古銭の形状測定結果
(1) 非損傷品 (2) 損傷品

Fig. 16 Shape measurement result of old coin by optical non-contacting measurement machine

(1) Non-damaged article (2) Damaged article

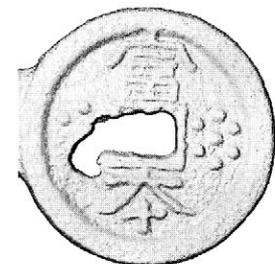


図17 接触式センサーによる古銭の形状測定結果
Fig. 17 Shape measurement result of old coin by contact sensor

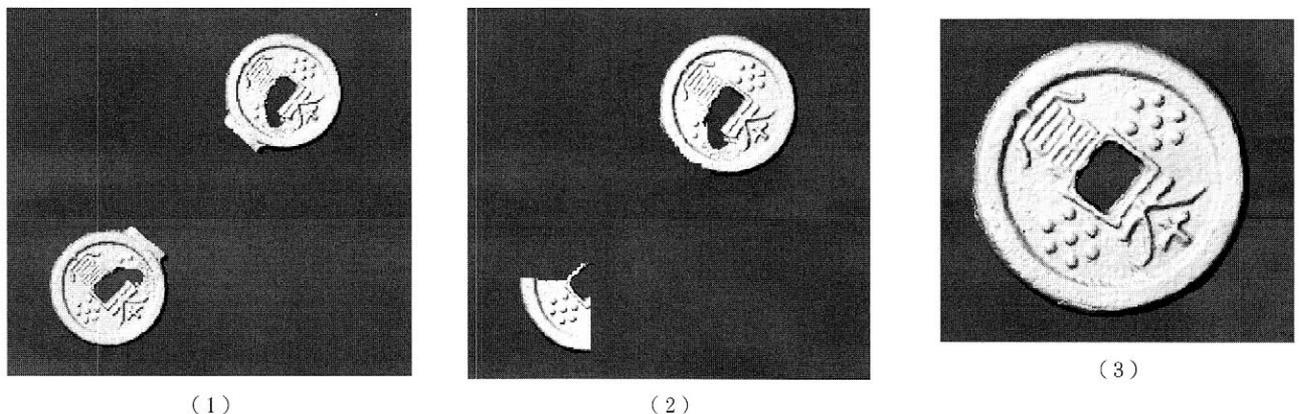
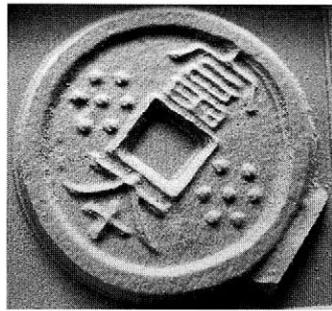


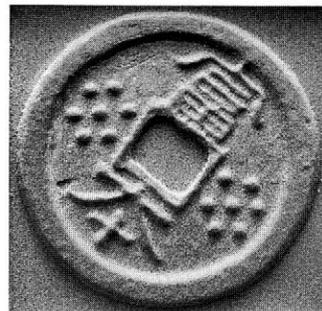
図18 古銭の復元手順
(1) 反転データの作成 (2) 復元用データの切取り (3) 結合による復元

Fig. 18 Restoration procedure of old coin

(1) Creation of reversal data (2) Cut-off data for restoration (3) Restoration by data coupling



(1)



(2)

写真 14 非損傷品と復元品の比較

(1) 非損傷品の複製品 (2) 損傷品の復元品

Photo. 14 Comparison of non-damaged article and restoration article

(1) Duplicate article of non-damaged coin (2) Restoration article of damaged coin

次元データを変換した2次元のグレースケールデータの利用に着目し、復元手順の早期決定に有効活用できることを示した。次に、復元品の具体的な製作手段について各種検討し、樹脂造形のみならず切削加工によっても複雑な立体形状を製作できることを示した。また、接触式／非接触式での測定方法の比較検討も行った。

本研究で得られた実際の復元作業性や復元品製作の実現性に関する見解は、遺物の考古学的情報を考慮しながら適正に適用していくことにより、遺物の復元に活用していくことができると考える。

このように、デジタルデータを活用することにより、人手による作業を最低限とした遺物の復元技術が向上し、

復元時間と費用の削減につなげられる。また、形状を3次元デジタルデータとして保存することによって半永久的に残すことが可能となり、多くの人と情報を共有することで幅広い学術的研究にも役立てられると考える。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、龍谷大学の古典籍デジタルアーカイブ研究センターおよび学術情報センターの関係各位には、多大のご支援とご協力をいただきました。また、龍谷大学理工学部機械システム工学科の関係学生各位には実験にご協力いただきました。ここに、心より深く感謝申し上げます。

参考文献

- 池内克史 (2002) 文化遺産のデジタルアーカイブ, 情報考古学, 第8巻1号, pp18-19.
- 今津節生・増田智仁・古谷毅・鈴木勉・平井孝憲 (2002) 三次元デジタルデータベースを活用した同範・同型鏡における差異の解析, 日本文化財科学会第19回大会研究発表要旨集, pp24-25.
- 小田義久 (2002) 大谷光瑞師と中央アジア探検, シルクロード西域文物展 (龍谷大学), pp6-21.
- 金谷一郎・岡根真治・安川慶・吉川武志・千原國宏 (2002) 文化財のデジタルアーカイブのための三次元形状計測ツール, 日本情報考古学会第13回大会発表要旨, pp37-43.
- 佐藤宏介・塚本敏夫 (2001) 遺物・遺構の三次元計測と認識, 電子情報通信学会学会誌, 第85巻3号, pp166-170.
- 塚本敏夫・佐藤宏介・伴好弘・藤原典彦・小林謙一・難波洋三・古谷毅・糊田寿夫・今井重晃 (2002) 考古遺物用高精細三次元デジタルアーカイブシステムの評価とデータ活用法, 日本文化財科学会第19回大会研究発表要旨集, pp174-175.
- 日経ものづくり (2004) 3Dものづくり製造業勝利への道, 日経BP社, pp1-221.
- 望月達也 (2001) リバースエンジニアリングを使ってデジタルモデルを作ってみよう, 機械設計, 第45巻18号, pp81-89.

龍谷大学（2001）シルクロード西域文物展，p60.

龍谷大学（2002）仏の来た道 シルクロードの文物，p19.

渡辺恭弘・阿部憲広・田中和明・瀧寛和・木下良正（2002）X線CTスキャンを用いた遺物のサーフェス
モデル生成および自動復元へのアプローチ，情報考古学，第8巻1号，pp1-11.

（2004年6月25日受付，2004年12月6日受理）

Conservation and Restoration System with 3-dimensional Digital Data of Relics

Hisakazu KAWASHIMA¹⁾, Fuminori YANO²⁾, Takuhiro YAMANE²⁾, Zyun-iti SHINODA¹⁾, Kouzi NAKAMURA²⁾, Syuuhei FUJITA²⁾, and Kentarou HIRATA²⁾

¹⁾ Department of Mechanical and Systems Engineering, Faculty of Science and Technology, Ryukoku University, 1-5 Yokotani, SetaOe-cho, Otsu-shi, Shiga 520-2194, Japan

²⁾ Department of Mechanical and Systems Engineering, Faculty of Science and Technology, Ryukoku University ret., 1-5 Yokotani, SetaOe-cho, Otsu-shi, Shiga 520-2194, Japan

As many relics excavated from the sites are damaged, it is needed to restore them to their original shapes for their conservation and exhibition. Although restoring works are carried out by the skilled technicians, there is still much possibility of damaging relics. By the progress of a recent computer technology, it has become able to measure the precise 3-dimensional shapes of relics with the 3-dimensional measuring technology.

In this research, in order to build up a conservation and restoration system with 3-dimensional digital data of relics, several relics were chosen : a bronze fitting of arabesque pattern, a round eave tile of simple lotus petal design and a head of Bodhisattva owned by Ryukoku University, and a replica of Fuhon coin sold at the Mint Bureau in Osaka.

We aimed at building up a series of systems that is composed of the measurement/conservation of the 3-dimensional relics shape with measuring machines, the restoration of damaged portions with 3-dimensional digital models, and the making of the restoration article with NC (Numerical Control) machines and a molding machine.

By this system, the difficulty of digital restoration caused by the data quantity and processing time was decreased to some degree, and the precise restoration has come to be made. Also the possibility of damaging the relics after excavation will be decreased, because the restoration process can be checked without actual relics.