

正倉院宝物特別調査

動物由来素材（牙甲角）に関連した三次元計測について

山 口 欧 志

はじめに

（１）三次元計測調査の背景と目的

正倉院宝物特別調査 動物由来素材（牙甲角）の調査では、動物由来の牙や骨、角製品などを調査対象としており、動物標本との比較のため任意の箇所の長さや断面の形状を正確に計測する必要があった。しかし、正倉院宝物は、何より守り伝える対象であり、接触による損傷のリスクをできる限り減らすことが重要である。一般的に、対象物の立体的な形状を計測する方法は、接触法と非接触法の三次元計測方法がある。接触法は伝統的で蓄積のある方法だが、対象に計測機器を接触させる必要がある。他方、非接触法はこの15年ほどで大きく精度や利便性が向上し、様々な分野で応用が進んだ。すでに文化財分野でも数多くの実績がある（金田ほか2010）。そこでこの調査では、非接触による三次元計測方法を選択した。

（２）対象とした正倉院宝物

特別調査の調査員により三次元形状の計測が必要とされた27点を三次元計測した（表1）。なお、表1中の項番と宝物名称、図番号は本号「正倉院宝物特別調査 動物由来素材（牙甲角）調査報告」に記載したものと同一である。また三次元モデルから作成した図は23点で、前記の調査報告に掲載している。

表1 三次元計測を行った正倉院宝物

項番	宝物名称	図番号
1. 象牙製品	(1) 牙笏〔北倉10〕	6
	(2) 通天牙笏〔北倉11〕	8
	(5) 白牙尺 甲〔北倉15〕	13
	(6) 白牙尺 乙〔北倉15〕	14
	(7) 双六頭（大）〔北倉17〕	21
	(9) 未造了牙尺 其1〔中倉54〕	27
	(11) 金字牙牌〔中倉64〕	32
2. 犀角製品	(2) 小三合水角鞘御刀子（把）〔北倉9〕	51
	(3) 犀角杯 甲〔北倉16〕	53
	(4) 犀角杯 乙〔北倉16〕	55
	(5) 犀角器〔北倉50〕	57
	(6) 斑犀尺〔中倉52〕	59
	(7) 犀角坏〔中倉75〕	61
3. 牛角鞘製品	(1) 小三合水角鞘御刀子（鞘）〔北倉9〕	66
	(6) 漆葛胡禄 第29号 付属箭（平題）〔中倉4〕	79

項番	宝物名称	図番号
4. 骨製品	(1) 大魚骨笏〔北倉12〕	85
	(2) 箭 黄染大鷹尾 第67号 其18〔中倉6〕	86
	(3) 箭 雁羽蘆葦幹骨鏃 第68号 其3〔中倉6〕	89
	(3) 箭 雁羽蘆葦幹骨鏃 第68号 其4〔中倉6〕	89
	(4) 箭 鶴羽蘆葦幹骨鏃 第69号 其1〔中倉6〕	92
	(5) 魚骨笏〔中倉87〕	97
5. 鹿角製品	(3) 白葛胡禄 第33号 付属箭（平題）其1〔中倉5〕	104
	(4) 角製工具〔南倉174第206号櫃其31〕	106
6. 化石	(4) 五色龍齒（大）〔北倉70〕	—
	(5) 五色龍齒（小）〔北倉70〕	—
7. その他	(1) 馴鹿角〔南倉174第206号櫃其19〕	—
	(2) 象牙〔南倉174第206号櫃其20〕	—

1. 計測方法

(1) 三次元計測の方法

正倉院宝物の三次元形状と質感の記録は、Structure from Motion and Multi-View Stereo（以下、SfM-MVS と略す）による三次元計測を用いておこなった。SfM-MVS は、対象を複数の方向から撮影した画像を解析して三次元モデルを構築する技術である。SfM-MVS は、かねてより文化財の記録に用いられてきた写真測量の一種であり、今日ではフォトグラメトリ（Photogrammetry）と言うことが多い。対象物に接触せずにおこなう非接触の計測方法である。

この方法については、カタログスペックが正確度0.03mm、精密度0.03mmの高性能な三次元レーザースキャナーとの比較研究により、十分な質の画像一式があれば、対象物の高精度かつ詳細な三次元モデルを構築することができることを検証している（山口2021）。十分な質の画像一式とは、画像がボケていない、ブレていない、写真の撮像範囲が60～80%程度重複している、この3点を満たす画像群を指す。

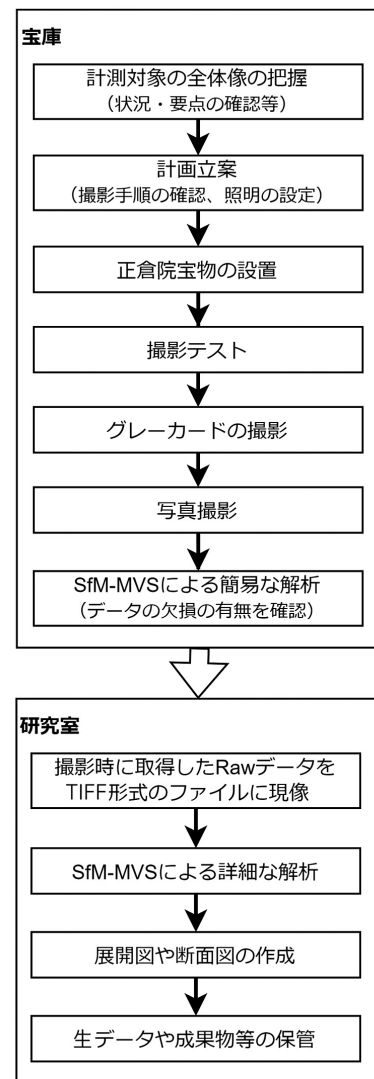
元々はコンピュータビジョン（Computer Vision）の分野で開発された技術だが、2010年代頃から土木や防災、農業、生物学など様々な分野で応用が進み、文化財の分野でも広く普及している。構築した三次元モデルはコンピュータ上で任意の2点間の距離の計測や容量の算出、展開図・断面図等を作成することが可能である（より詳しくは、山口2023a）。

また、非接触の三次元計測方法という点では、奈良文化財研究所が所有する高性能な三次元レーザースキャナーによる三次元計測も計測方法の選択肢に挙げた。しかし今回測定した正倉院宝物は、象牙製品や犀角製品など、レーザの乱反射が生じやすい光沢感のあるものが多く、また作業空間の周辺を人が往来するため機器に微細な揺れが生じ結果に影響を及ぼすことから、三次元レーザースキャナーは使用しなかった。

(2) 三次元計測に用いた機材

三次元計測に用いた主な機材は、デジタルカメラとレンズ、スマートターンテーブルと簡易撮影ボックスおよびLEDライト、タブレット端末、ストロボライト、カメラ三脚、SfM-MVS実行用PC一式、SfM-MVS 実行プログラムである。これらの機材は、すべて奈良文化財研究所埋蔵文化

【SfM-MVSによる三次元計測の流れ】



挿図1 三次元計測のワークフロー

財センター遺跡・調査技術研究室（現遺跡調査技術研究室）が所有するものを用いた。

カメラとレンズは対象物に合わせて以下の組み合わせを利用した。

- ・ Sony α 7R III、50mmマクロレンズ、90mmマクロレンズ
- ・ Nikon D800、60mmマクロレンズ、105mmマクロレンズ
- ・ OLYMPUS OMD EM1-Mark II、30mmマクロレンズ、90mmマクロレンズ

Sony α 7R III と Nikon D800 はフルサイズセンサーのカメラであり、OLYMPUS OMD EM1-Mark II はマイクロフォーサーズサイズセンサーのカメラである。撮影にあたり、被写界深度を優先させたい場合にはセンサーサイズが小さい OLYMPUS OMD EM1-Mark II を利用した。

写真データの記録形式は、jpeg と Raw である。jpeg は現場での簡易な三次元モデル構築による確認のために用いた。Raw は後日、露出やホワイトバランスなどを調整し、TIFF 形式の画像に現像したうえ、詳細な解析用に利用した。

その他の機材については以下を利用した。

- ・ ORANGEMONKIE 社 Foldio360 スマートターンテーブル：リモート撮影機能付き電動回転台
- ・ ORANGEMONKIE 社 Foldio3：LED 照明附属撮影 BOX
- ・ コメット社 TWINKLE LED II：大光量 LED ライト
- ・ Profoto 社 ストロボ A1
- ・ ワークステーション一式
- ・ テザーケーブル（2023年度より）
- ・ カメラ用三脚
- ・ バック紙

スマートターンテーブルと簡易撮影ボックスおよび LED 照明は、ORANGEMONKIE 社の以下の機材を利用した。これらの機材は、数年にわたり利用実績を積み重ね、安全に稼働することを確認済みである。スマートターンテーブルはスマートフォンやタブレット端末などから任意に設定した一定の角度（本調査では10度または15度）で自動的に回転し、回転後カメラにシャッターを切る信号を送る。この仕組みを使って、正倉院宝物を様々な角度から撮影する作業を迅速・簡便・確実にした。大きさや形状の点から電動ターンテーブルの使用が不向きな正倉院宝物は、三脚に取り付けたカメラを移動させて様々な角度から撮影した。

LED 照明では十分な明るさが足りない場合は、Profoto 社のストロボ A1 を 3 台利用し、ストロボは直接対象に当てず天井や壁面に向け、光が柔らかくなるよう拡散させた。

SfM-MVS は、三次元レーザースキャナーによる三次元計測と異なり、通常は即時に成果を確認することができない。したがって計測作業の確実性を高めるためには、撮影したその場で画像を解析して結果を表示する必要がある。三次元モデルが構築できるかどうかを確認する程度の軽い負荷の簡易な解析（仮解析という）は、比較的短時間で終わることができる。そこで仮解析を計測作業の現場で実施するためのワークステーション一式と、SfM-MVS 実行用プロ

グラムを利用した。2023年度の調査では、テザーケーブルも用いて撮影と同時に仮解析を自動的に処理するリアルタイムフォトグラメトリを導入し、仮解析の所要時間を大幅に短くした（山口2023b）。

使用した SfM-MVS 実行用プログラムは、Agisoft 社の Agisoft Metashape Professional と Capturing Reality 社の RealityCapture である。これらのプログラムは、SfM-MVS の実行に必要な複雑な処理を自動化し、効率的に高品質な三次元モデルを構築する。

（３）計測に用いたその他の資料

このほか、計測手簿と解析手簿を作成した。計測手簿には、計測する正倉院宝物 1 点ごとに、いつ、どのような機材で、どのように撮影したかなどを記入した。また解析手簿は、どのような手順でどのように解析したかを記入した。これらの資料により、どのような計測調査をおこなったのか、再検証できるようにした。

（４）撮影手順

SfM-MVS による三次元計測は、複数の写真に写った部分を三次元モデル化する。そのため、写真に写っていない部分は三次元モデルにならない。そこで資料の完全な三次元モデルを構築する計測では、まず対象を周囲から一通り撮影する（この写真一式を Side A とする）。次に、最初の向きでは接地して写真に写っていなかった部分（例えば底部）が写真に写り、かつ先に撮影した範囲の半分程度も写真に写るように対象の向きを変え、写真を撮影する（こちらの写真一式を Side B とする）。この 2 回の撮影でも写らない部分がある場合は、もう一度対象の向きを変え、写真を撮影する（Side C とする）。なお、正倉院宝物の三次元モデルに大きさの情報を与えるため、SfM-MVS 実行用プログラム上で自動認識可能なマーカーを配置した台紙を用意し、これらマーカーが写真に写り込むように撮影した。

ただし、資料を毀損させることのないよう、撮影前に安全性の高い資料の設置方法を検討する。安全性に少しでも疑問がある場合は、完全な三次元モデルの構築は断念する。今回の調査においてもこの方針に従い撮影した。計測時の正倉院宝物の取扱いは、宮内庁正倉院事務所の担当者がおこなった。



挿図 2 計測風景（西宝庫 前室）

2. データ処理

（１）取得データの処理方法

データの解析には以下のソフトウェアを使用した。

- ・ Agisoft 社 Metashape Professional 版
- ・ Adobe 社 Lightroom
- ・ Adobe 社 Illustrator
- ・ CloudCompare
- ・ Capturing Reality 社 RealityCapture

確認のための仮解析は宝庫内でおこない、質の高い三次元モデル構築のための詳細な解析は、奈良文化財研究所埋蔵文化財センター遺跡調査技術研究室（以下、研究室）でおこなった。

・ 宝庫での仮解析

取得データが十分か確認するため、その場で撮影により取得した jpeg 形式のファイルを解析用のPCにコピーし、SfM-MVS 実行プログラムを用いた負荷の軽い処理をおこない、三次元モデルを構築できるか確認した。

・ 研究室での詳細な解析

作業手順の概要は以下のとおりである。はじめに、撮影したデータを調整して現像する。この現像した画像データから十分に精密度と正確度および解像度の高い三次元モデルを作成する。最後に三次元モデルから各種図面を作成する。

より詳しくは、以下の①～⑥の手順でおこなった。なかでも三次元モデルの構築は大量の高解像度の画像を扱うため負荷が大きい。この解析を迅速かつ安定しておこなうため、GPU を搭載した高性能なPCを利用した。

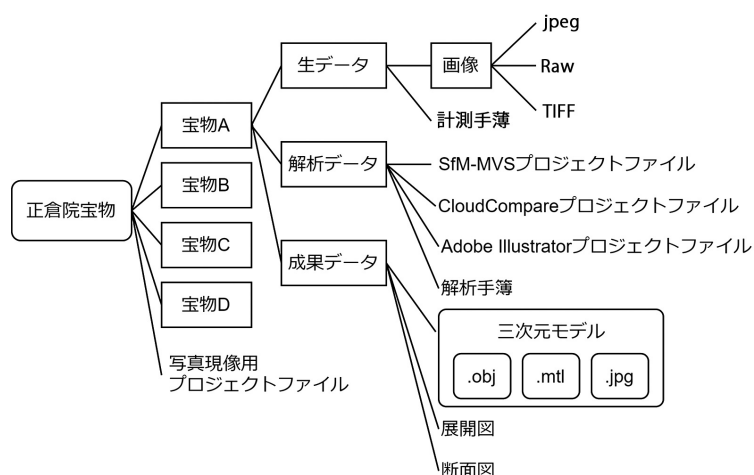
- ① Adobe 社の Lightroom を使って撮影により取得した Raw データを現像する。現像の具体的な処理は、色味を正しく補正するホワイトバランスの調整と露出の調整、そして TIFF 形式の画像への出力である。
- ② TIFF 形式の画像ファイルは、Agisoft 社 Metashape Professional 版(または RealityCapture)に読み込み、Side A、Side B 等に分けて三次元モデルの構築をおこなう。三次元モデルの大きさは、撮影した画像群に写っているマーカー間の距離から設定する。
- ③ それぞれの三次元モデルについて、不要な部分を削除し、必要な部分を指定して、三次元モデルからその要不要の設定を全ての画像に反映させる。
- ④ 画像のマスクを有効にした状態で全ての画像を一度に解析し、欠損が無い完全な三次元モデルを構築する。
- ⑤ 断面図や展開図作成のため、構築した三次元モデルを「.obj」形式で出力する。このとき、出力されるデータは、三次元形状を表現する「.obj」形式のファイルと、表面の色や質感を表現する「.jpg」形式のファイル、そして「.mtl」(material template library の略)形式のファイルである。
- ⑥ 出力したデータを CloudCompare に読み込み、三次元モデルの向きなどを調整し、TIFF 形式の画像データとして出力する。出力した TIFF データを Adobe 社 Illustrator に読み

込み、レイアウトして断面図や展開図として出力する。

これら一連のデータ処理の内容を山口が計画し、遺跡調査技術研究室技術補佐員の李賢恵氏が具体的な処理をおこなった。

(2) データの保存

今回の調査で取り扱ったデータは大きく分けて、①計測現場で取得した画像データと計測手簿（生データ）、②中間生成物であるプロジェクトデータと解析手簿（解析データ）、③三次元モデルと各種の図（成果データ）の3種である。①のデータさえあれば、再度



②は解析の過程がわかる

挿図3 正倉院宝物三次元計測データの整理

データであり、③は直接活用できるデータである。これらのデータは宝物1点毎に①～③に分類してバックアップを取得した。なお、写真現像用のプロジェクトファイルは、宝物ごとに作成するとファイル管理が煩雑になるので1つとした。

(3) データの活用

今回構築した宝物の三次元モデルは、調査研究に多くの点で寄与する。たとえばコンピューター上で自由に回転・拡大縮小して観察したり、任意の部分の距離を計測したりすることができる。さらに、三次元モデルを活用して、宝物に触れずに展開図や断面形状を図化することができる。

具体的には、馴鹿角（南倉174第206号櫃其19）の年齢の推定には三次元モデルから得た計測値を活用し、五色龍齒（北倉70）の事実記載に必要な計測値を得た。箭（中倉6）（骨鏃）や犀角製品の展開図・断面形状などの実測図を作成した。特に箭に関してはこの実測図によって、出土遺物との詳細な比較が可能になった。

以上は、現時点の成果の一部であり、今後の詳細な検討や活用にも寄与することができる。

3. 今後の課題と展望

(1) 課題

2021年度から2023年度にかけて実施した正倉院宝物の三次元計測調査における課題は、安全

性の確保および迅速性・簡便性・確実性の一層の向上であった。その課題を克服するため、計測治具の開発や撮影の工夫、データ処理のリアルタイム化などを進めた。その結果、計測の仕組みは洗練したが、より良い調査に向けて今後も継続する必要がある。

また、SfM-MVSを用いたフォトグラメトリは、文化財分野においても広く普及しつつある。しかし、この技術を学術的な研究目的で利用するためには、基幹となる専門的な知識と技術そして経験が必要である。特に、正倉院宝物のような細部に至るまで詳細な記録を必要とする三次元計測は、より一層高い水準の基幹が必要となる。そこでこの調査では、SfM-MVSを利用した三次元計測に必要な撮影作業を撮影補助をした正倉院事務所の担当者に身振りと言葉で伝え、作業工程を分けて段階的に分担し、必要な知識・技術・経験の蓄積を図った。

(2) 展望

今回の調査で計23点の正倉院宝物の詳細な三次元モデルを構築した。これらの三次元モデルは対象の三次元形状と質感を写實的に再現した立体的なデジタルデータであり、コンピューター上で任意の向きや大きさで表示することができる。もちろん今回のような調査研究目的以外にも、3DCG 動画やレプリカなどの製作に利用することも可能である。こうしたデジタルデータの活用は、正倉院宝物を今後も守り伝えるうえで、より一層の可能性を拓くことができると考える。

(やまぐち ひろし 国立文化財機構奈良文化財研究所

埋蔵文化財センター遺跡調査技術研究室主任研究員)

謝辞

今回の計測にあたり、金田明大氏(奈良文化財研究所)、村田泰輔氏(同左)からご助言、ご協力を賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

金田明大・木本挙周・川口武彦・佐々木淑美・三井猛 2010『文化財のための三次元計測』(岩田書院)

山口欧志 2021「文化財の三次元計測方法の違いによる収集データの比較」『日本考古学協会第87回総会研究発表要旨』p. 31

山口欧志 2023a「国内におけるフォトグラメトリの応用」『月刊文化財』No. 719 p.21-25

山口欧志 2023b「文化財三次元計測のためのリアルタイムフォトグラメトリの実現」『日本文化財科学会第40回記念大会研究発表要旨集』p. 194-195