

磨崖仏における三次元モデル作成手法の構築と検証

平嶋 拓人・小山 拓志・土居 晴洋・河野 晋也

Proposal and Verification of a Three-Dimensional Model Creation Method for
Buddhist Images on a Cliff

HIRASHIMA, T., KOYAMA, T., DOI, H. and KONO, S.

大分大学教育学部研究紀要 第46巻第1号

2024年9月 別刷

Reprinted From

RESEARCH BULLETIN OF THE

FACULTY OF EDUCATION

OITA UNIVERSITY

Vol. 46, No. 1, September 2024

OITA, JAPAN

磨崖仏における三次元モデル作成手法の構築と検証

平嶋 拓人^{*1}・小山 拓志^{*2}・土居 晴洋^{*3}・河野 晋也^{*4}

【要 旨】 崖面に直接彫り込まれた磨崖仏は貴重な文化的遺産であり、精密な三次元モデルの作成は学術的研究だけでなく、その保存や修復を行うための基礎資料となる。しかし、磨崖仏は移動が不可能であるうえ、剥落など損壊の恐れがあるため、計測のために機器や人の接触が許されない。これらの制約を克服するとともに、安価で簡便に実施できる手法として、SfM 解析を用いた三次元モデルの作成方法を提案する。本稿では大分市に所在する二つの磨崖仏について三次元モデルを作成し、その妥当性を検証する。

【キーワード】 石仏 文化財 数値標高モデル 保存整備 大分県

I はじめに

石を素材とした仏像彫刻は一般に石仏と称されるが、石仏には石材場から切り出された石材に彫刻を施したものと崖面を直接彫り込んで作成するものがある。本稿で対象とする磨崖仏は後者にあたり、切り出された石材を刻む石仏と異なり、自然に露出した崖の岩肌を直接彫り込んで作成される仏像である。そのため、調査や研究、あるいは保存や修復を行うために、崖面から剥がして移動することはできない。また、母岩の性質や地下水など磨崖仏の立地環境の影響を受けて、剥落などの劣化も進行しやすい。このような磨崖仏が持つ特徴は、保存や整備事業ばかりでなく、学術的な研究を進める際の妨げとなっている。

文化庁の国指定文化財等データベース¹⁾によれば、石仏は日本各地に見られる。このうち全国で 24 件が登録されている磨崖仏の中で、大分県には半数近い 11 件が所在する。この国指定文化財を含めて、大分県内には 88 ヶ所の磨崖仏が存在するとされている（大分県立宇佐風土記の丘歴史民俗資料館，1996）。この数は京都府や奈良県を含む近畿地方全体の数に匹敵し、大分県は全国的にも多くの磨崖仏が造立された地域である²⁾。大分県内の磨崖仏の地域的分布を見ると、指定を受けた磨崖仏が最も多いのは豊後大野市の 14 件であるが、県庁所在地であ

令和 6 年 5 月 31 日受理

*1 ひらしま・たくと 大分大学大学院教育学研究科教職開発専攻（教職大学院）

*2 こやま・たくし 国士舘大学文学部史学地理学科地理・環境コース（自然地理学）

*3 どい・はるひろ 大分大学教育学部特任教授（人文地理学）

*4 こうの・しんや 大分大学大学院教育学研究科教職大学院（教科教育）

る大分市においても、国指定史跡が 2 件、県指定史跡が 3 件、市指定が 2 件、未指定が 5 件、合計で 12 件の磨崖仏が確認されている（図 1）。

大分県内の磨崖仏に関する研究は、濱田（1925）によれば、大正期に京都帝国大学の小川琢治が先鞭を付けたとされる。濱田（1925）は「豊後の磨崖石佛研究」という論考において、5ヶ所の磨崖仏³⁾を調査し、尊像の配置等をもとに様式の検討を行った。それ以後、磨崖仏の歴史的・美術史的 position 付けに関する研究が進められた。例えば、岩男（1961, 1964, 1966）は、写真の記録や測量に基づいて略図の作成を行い、様式の検討を行った。また、仲嶺（1992, 1995）は、像容などから様式及び成立年代を検討している。

これらの研究成果を踏まえて、磨崖仏の劣化や保存に関わる調査や研究も進められてきた。本研究の対象の一つである大分元町石仏では、1986（昭和 61）年から 1996（平成 8）年にかけて行われた保存修理事業の中で、劣化の主要因として地下水が特定され、劣化抑制のために排水トンネルの整備などの対策が行われた⁴⁾。

しかし、このような調査研究や保存整備事業が行われているのは、文化財に指定されている一部の磨崖仏にとどまっている。また文化財に指定されていても、多額の予算を必要とする保存整備事業に着手されていないものも多い。大分県内の磨崖仏の多くは、例えその存在が知られていても、保存整備はおろか、具体的な調査や研究さえ実施されていないものが少なくないのが実情である。磨崖仏は移動が不可能で、立地環境の影響を受けて劣化しやすいという特徴を踏まえると、かつて先人が残したこれら磨崖仏の一刻も早い調査研究と保存整備が求められる。そのためには、各磨崖仏に対する正確な情報の収集が必要であり、大分県内では、玉川（2018）や池見（2023）がレーザースキャナを用いて、それぞれ豊後高田市の福真磨崖仏と豊後大野市の菅尾磨崖仏の三次元測量を実施している。

筆者らは、レーザースキャナのような測量専用の機器を用いない、磨崖仏の三次元モデルの作成手法を提案したい。具体的には、近年、様々な分野で活用されている、SfM-MVS (Structure from Motion・Multi-view stereo) 解析（以下、SfM 解析と表記）という手法を活用する。これは、対象物（磨崖仏）を撮影した複数の写真と基準点（標定点）（Ground Control Point；以下、GCP と表記）をインポートすることにより、簡易な操作で数値表層モデル (Digital Surface Model；以下、DSM) を作成するとともに、点群データからデジタル標高モデル (Digital

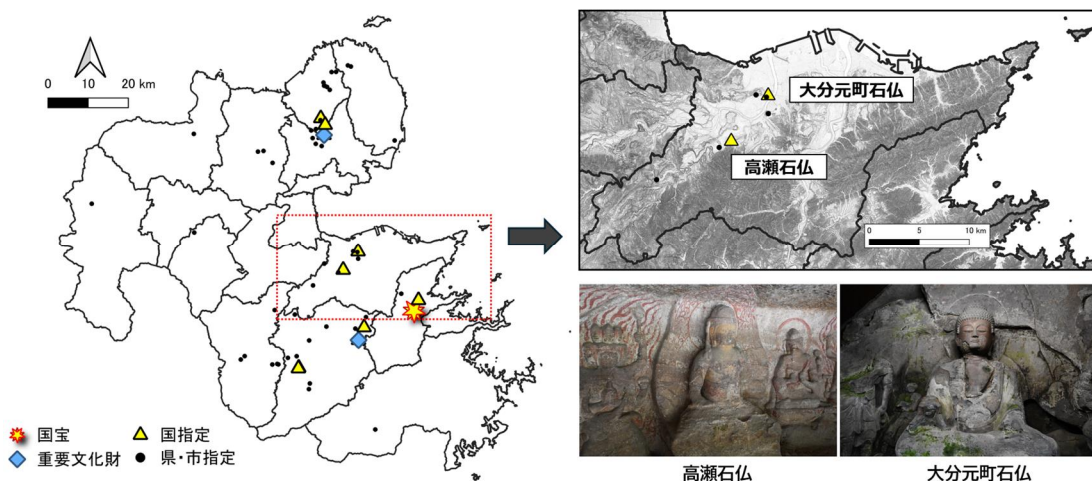


図 1 大分県における磨崖仏の所在と本研究の対象磨崖仏

Elevation Model ; 以下, DEM と表記) を作成する技術である。SfM 解析は, 対象物から離れた場所からカメラによって動画や静止画を撮影することで, 対象物の各所の位置を推定し, その三次元形状を復元する要素技術である。一般的なデジタルカメラを使用し, 撮影方法を工夫することにより, レーザースキャナではデータ取得が困難な, 対象物の側面から背面を比較的容易に撮影可能である。このように SfM 解析は対象物に直接触れることなく, その三次元モデルを作成できるという点で, 貴重な文化財である磨崖仏の三次元モデル作成に適している。

本稿では, 過去の研究で像高などの寸法が明らかになっている, 大分市内に所在する二つの磨崖仏(高瀬石仏と大分元町石仏)を対象として, SfM 解析を用いた三次元モデル作成手法を適用し, 得られた三次元モデルの妥当性を検証する。二つの磨崖仏の概要は以下の通りである。

高瀬石仏は, 大分市高瀬の七瀬川右岸の支谷沿いに位置する, 国指定史跡の磨崖仏である。敷戸火砕流堆積物であると考えられる凝灰岩の層に彫り込まれた岩窟内に, 本尊である胎藏界大日如来を中心として計 5 軀彫られている(吉岡, 2017)。その作風から 12 世紀後半の作と考えられており, 七瀬川流域に植田荘を開発した植田氏によるものとされている。植田氏は後白河院との関係もあったことから, 高瀬石仏は, 中央文化の影響を受けたものであると考えられている(大分県宇佐風土記の丘歴史民俗資料館, 1996)。

大分元町石仏(以下, 元町石仏と表記)は, 大分市元町の台地の東端に露出した崖面に位置している磨崖仏で, 阿蘇火砕流堆積物の弱溶結凝灰岩に, 13 軀の磨崖仏が彫り込まれている(大分市教育委員会, 1996)。このうち, 覆堂内の伝薬師如来を中心とした 7 軀が国指定史跡に指定されている。その作風から平安末期の作と考えられており, 磨崖仏のある元町周辺が宇佐神宮の土地に組み込まれた 1077 年頃に, 同宮の後押しにより造営されたものと考えられている(大分県宇佐風土記の丘歴史民俗資料館, 1996)。

なお, 高瀬石仏と元町石仏については, 大分市教育委員会文化財課の「大分市デジタルアーカイブ」にそれらの三次元モデルが掲載されているが⁵⁾, これは本研究で作成した三次元モデルとは別のものである。同モデルは大分市教育委員会が令和 5 年度 6 月補正予算「地域文化資源保存活用推進事業」において 2023 年 10 月 16 日に入札を行い, 落札業者による写真撮影およびモデル作成を経て 2024 年 3 月 28 日に公開されたものである。これに対して, 本研究で作成した三次元モデルは, 筆頭著者である平嶋が 2022 年 11 月から 12 月に写真撮影等の作業を行い, 翌年 1 月にかけてデータ処理を経て作成したものである⁶⁾。大分市文化財課作成のモデルはスケールのない画像のみの三次元モデルで, 具体的な大きさを把握することはできない。一方, 本研究で作成したモデルは任意の地点間の距離を計測可能であり, 立体的造形の詳細把握により適したものである。

II 調査手法

1 写真の撮影

1) 使用機材

撮影に使用したカメラは, 次の二つである。一つは, Nikon のミラーレス一眼レフカメラボディである Z6 に, Nikon のレンズである NIKKOR Z (24-70mm F/4 S) を取り付けたものである。もう一つは, GoPro のアクションカメラである HERO 7 (以下, GP7 と表記) である。

一般に, 多い画素数および大きいイメージセンサーで撮影された写真ほど, 写真を構成する

点の密度が高くなり、対象物を詳細に表現することが可能であると言われている。SfM 解析による処理では、使用する写真の画素数が多いほど、点群密度の増加が期待される（小花和ほか、2014）ため、より高解像度の写真を撮影できる機種が望ましい。今回、撮影のメイン機種として使用した Z6 は、撮影当時（2022 年当時）の市販品としては最大のイメージセンサー（フルサイズ）のカメラであるとともに、2000 万画素以上を有していることから、機材として適していると判断した。一方で、カメラ本体とレンズを合わせると、約 1 kg 以上もの重量となるため、貴重な文化財である磨崖仏の高所を撮影する際に、接触による損傷のリスクがあった。そこで、高所を撮影する際には、重量が約 116g と軽量で、物干し竿の先端にも取り付けやすい、GP7 を併用することとした。それぞれの使用機材の詳細は表 1 に示したとおりである。

2) 撮影方法

SfM 解析による三次元モデルの作成手法の詳細をまとめた内山ほか（2014）によると、視差計算によるモデル作成に最低限必要な写真の重複の割合（オーバーラップ率）は 65% 以上としている。さらに、表面が凹凸に富んだものを対象とする場合には、部分的にオーバーラップ率を高くする必要があるとしている。

そこで、本研究では、凹凸に富む磨崖仏をさまざまな位置や角度から撮影するために、まずオーバーラップ率が 80% 以上となるように、Z6 による手持ち撮影を移動しながら行った。次に、手持ちでの撮影では難しい奥まった箇所の撮影を行うことを目的として、一脚による撮影を行った。また、Z6 を持ち上げて撮影するには不安定な場所や高所は、物干し竿の先端に GP7 を取り付けて撮影した（図 2a）。一脚による撮影（Z6）と GP7 は、いずれも 2 秒間隔のインターバル撮影とした。

なお、GP7 は魚眼無効の設定を有効にし、広角ではない写真が撮影されるように設定した。記録する写真のファイル形式は、ともに JPEG のみとした。

2 測量

既述したように、SfM-MVS 解析の中で、SfM 解析は多視点画像から三次元

表 1 使用機材の性能と撮影時の設定

		Z6 + NIKKOR Z	Hero7 Black
機材の性能	会社名	Nikon	GoPro
	寸法(mm)	223×101×68	62.3×44.9×33
	重量(g)	1175	116
	総画素数(MP)	24.5	12
	撮影素子(mm)	フルサイズ	1/2.3
撮影時の設定	F値	8~10	2.8
	露出時間(s)	1/100	AUTO
	ISO感度	6400~20000	AUTO

機材の性能は各機材説明書による。



図 2 撮影及び測量の様子（a：高所の撮影，b：2 点間の距離の計測）

形状を復元する要素技術である。この時生成されるのは、低密度な点で構成された三次元データである。高密度な点群データの生成や、テクスチャ付きのポリゴンモデル生成のために、SfM解析に多眼ステレオ(MVS)の技術を組み合わせたのが SfM-MVS 解析である。ただし、SfM 解析では大きさ(スケール)が算出されないため、測量用途の場合は指標となるマーカーも含めて撮影し、生成された三次元データの寸法を補正する必要がある。例えば、小型 UAV などによる空撮の場合には、地上に GCP(標定点)を設置して座標値を精密に測量し、その値をカメラパラメータ推定の補助や点群のジオリファレンスに用いる。一般的な地形測量の場合には、GCP 座標を GNSS(衛星測位システム)で測位したり、トータルステーションなどで測量したりする。

しかし、磨崖仏は風化に伴い表面がもろくなっているため、文化財保護の観点から、GCP となるターゲットマーカーを磨崖仏の表面に物理的に設置することも、測量のために反射板などを設置することもできない。そこで本研究では、簡単に入手でき、かつ簡便に非接触で測量するために、Apple 社の携帯端末で利用可能な純正アプリの「測量」を利用した。このアプリは、拡張現実テクノロジー(AR)を用いた機能で、任意の 2 点を決めると、その 2 点間の距離を自動計測してくれるものである。本来であれば、三次元モデルの生成に必要な GCP 座標、すなわち x 値、y 値、z 値の取得が望ましいが、本研究では GCP 間の距離測量のみとし、この値を基に DEM を作成した。

本研究では、iPad Pro11 インチ(第三世代)と iPhone 12 Pro を使用した。これら機器の差による距離測量の精度は明らかではないが、Apple 社が推奨している最適な結果を得るための距離、すなわち 0.5~3m(2~10 フィート)の距離において事前に折れ尺やコンベックスを複数回計測したところ、誤差は 5mm 以内に収まることが確認された(最大 20mm)。計測の方法としては、まず磨崖仏の表面を観察し、撮影した写真に確実に写っていて、かつ確実に写真上で判断可能な 2 点の特徴点を探し出し、それぞれ GCP として番号を振った。次に、GCP1 と GCP2、GCP3 と GCP4 といった具合に、2 点間の距離を測量アプリで計測した(図 2b)。計測は可能な限り近距離から 3 回行い、その平均値を採用した。

Ⅲ 磨崖仏における三次元モデルの生成と計測

1 撮影および測量結果

元町石仏における撮影には、Z6 および物干し竿の先端に固定した GP7 を使用した(表 1)。Z6 による撮影時の設定は、絞り値 f/8、露出時間 1/100、ISO 感度 10000、焦点距離 24mm で行った。GP7 は、絞り値 f/2.8、露出時間 AUTO、ISO 感度 AUTO、焦点距離 3mm で行った。その結果、ぶれがなく、三次元モデル生成に利用可能な合計 862 枚(Z6 : 666 枚、GP7 : 196 枚)の写真を撮影することができた。高瀬石仏における撮影には、Z6 のみを使用した。撮影時の設定は、絞り値 f/8、露出時間 1/100、ISO 感度 6400、焦点距離 24mm で行った。その結果、同じく三次元モデル生成に利用可能な合計 1,633 枚の写真を撮影することができた。

また、元町石仏では GCP を 20 点設置し、2 点間の距離測量を計 10 ヶ所で行った。高瀬石仏においては、GCP を 26 点設置し、計 13 ヶ所の距離測量を実施した。

2 SfM 解析

1) 処理のフロー

SfM 解析には、Agisoft 社の Metashape Professional 版 (Windows 64bit 版バージョン 2.1.1) を用いた。三次元モデルの生成処理の概略を表 2 に、SfM 解析の結果を図 3 に示した。

まず、Metashape に撮影した写真 (元町石仏 : 1,064 枚, 高瀬石仏 : 1,686 枚) を取り込み、撮影位置の推定 (Align Photo ; 写真のアラインメント) を行った。この際、使用したカメラ機材は GNSS 位置情報などを持たないため、位置情報を利用せず全写真をマッチングすることで計算した。この処理の Accuracy (正確さ) の設定は「High (最高)」とした。次に、複数の写真画像に写っている対象物の同一地点に対し視差を計算することで、三次元の高密度点群を構築した (Build Dense Cloud (高密度クラウド構築) : Quality (品質) は「Medium (中)」設定)。この処理では、「外れ値」のフィルタリングの強さを設定することができる。なぜなら、ノイズが多い画像や焦点が合っていない画像が多い場合、点群の位置が正し

表 2 Metashape の設定と結果

		大分元町石仏	高瀬石仏
写真	撮影した枚数	1,064	1,686
	精度	最高	最高
	座標事前選択	推定値	推定値
	キーポイント制限	40,000	40,000
	タイポイント制限	4,000	4,000
写真のアラインメント	推定された写真の枚数	862	1,633
	品質	中	中
	深度フィルタ	中	中
	点群数	67,654,675	133,405,974
高密度クラウド構築	サーフェスタ입	自由形状 (3D)	自由形状 (3D)
	ソースデータ	高密度クラウド	高密度クラウド
	ポリゴン数	9,961,810	11,582,965
	内挿補間	有効 (標準)	有効 (標準)
	メッシュ構築		
メッシュ構築	テクスチャの種類	拡散マップ	拡散マップ
	ソースデータ	イメージ	イメージ
	マッピングモード	汎用	汎用
	ブレンドモード	モザイク (標準)	モザイク (標準)
	テクスチャーサイズ	8,192	8,192
テクスチャー構築	GCP (評定点)		
	GCP の数	20点	26点

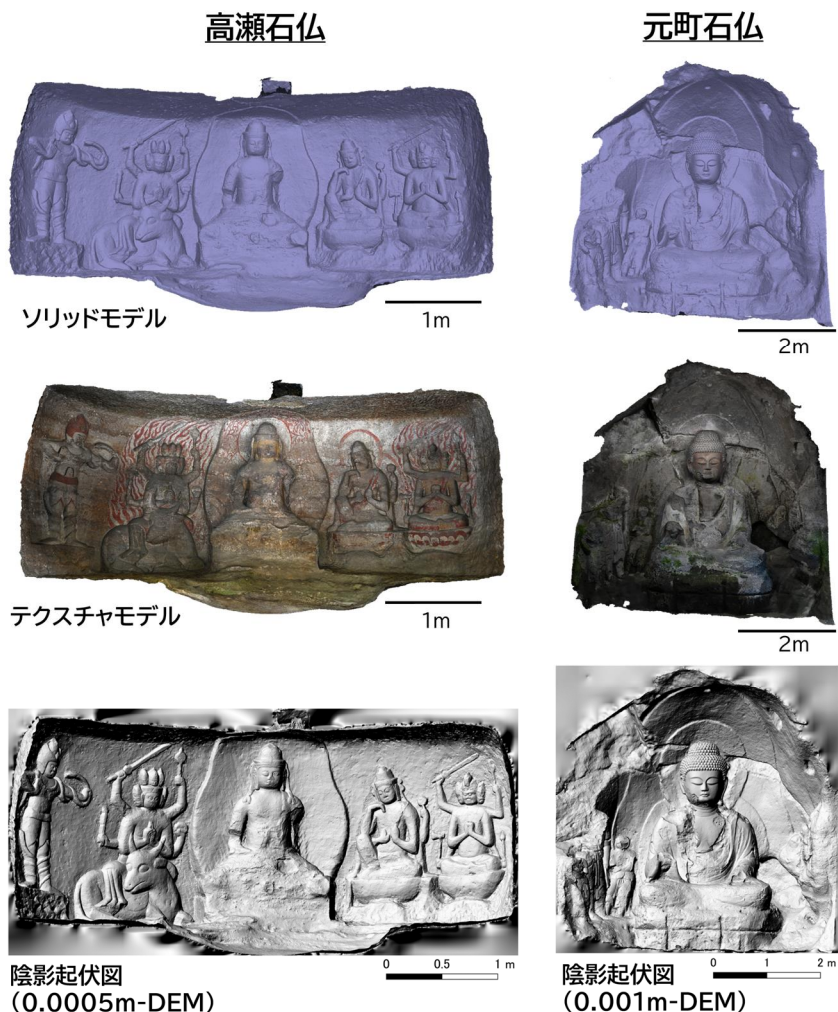


図 3 SfM 解析の結果

い位置からずれた場所に生成される可能性があるためである。磨崖仏は岩窟に彫られていることもあるため、どうしても凹凸部や背後に影が多くなる。そこで、フィルタが強く適用されるよう、この設定を **Aggressive**（中設定）とした。また、明らかに精度の悪い点（ポイント）は、手作業で除去した。次に、高密度点群から **TIN** モデルを生成する **Build mesh**（メッシュ構築）処理を行った。

一般的に、この処理の過程で設定する **Surface type**（サーフェスタイプ）は、建築物や洞窟内部など完全な三次元形状を再現する場合には **Arbitrary**（自由形状）を、垂直写真から地形モデルを生成する場合は **Height field**（ハイトフィールド）を使用する。今回は、垂直写真から地形モデルを作成することと、磨崖仏の完全な三次元形状を再現することの二つの目的があるため、今回は試行として **Arbitrary**（自由形状）にした。また、この処理の過程で、覆堂の柱や賽銭箱など、三次元モデルに反映させたくない不要なオブジェクトも手作業で削除した。最後に、**Build Texture**（テクスチャ構築）で三次元モデルに写真画像を貼り付ける処理を行った。この処理で生成した **Texture**（テクスチャ）は、他の三次元アプリケーションにエクスポートする際の **UV マップ** となる。これにより、例えば **3D PDF** などでも磨崖仏の三次元モデルを回転させながら、実際の色彩などを観察することが可能となった。

2) DEM の作成

上記の作業で **Build mesh**（メッシュ構築）まで作成したのち、写真上に写っている基準点（**GCP**）にマーカーを手作業で追加した。一般に、小型 **UAV** などを使う地形測量では、**GCP** のターゲットマーカー（対空標識）にチェッカー盤などを使用することが多いため、手作業でマーカーを打つことが容易である。また、歴史的資料や遺物の計測に **SfM** 解析が使われる場合には、円形 **12bit** のターゲットマーカーを利用することが多く、それらを自動検出で抽出する。しかし、既述したように、磨崖仏にはターゲットマーカーを物理的に設置することが不可能である。そのため、写真上に写る特徴点を現地で正確に記載し、**SfM** 解析でマーカーを追加する際には最大限画像を拡大することで、特徴点の中心に **1mm** 程度の誤差も生まないように細心の注意を払って、正確にマーカーを追加していった。次に、現地で測量した **GCP** の 2 点間の距離の値を入力し、座標設定を **Local Coordinates (m)** として三次元モデルに大きさの情報を追加した（スケールバーの作成）。なお、スケールバーの誤差は、高瀬石仏で最大 **-0.007949m**、最小 **0.00007m**、平均 **0.003849m**、元町石仏で最大 **-0.014020m**、最小 **-0.00090m**、平均 **0.00760m** であった。

上記の作業後、再度三次元の高密度点群の構築および **Build mesh**（メッシュ構築）処理を行った。高密度点群の構築の作業を終えると、それを基にして **DEM** を作成することができるようになるので（**Build DEM**）、座標系を **Local Coordinates (m)** として **DEM** を構築した。その結果、高瀬石仏で **0.0005m**、元町石仏で **0.001m** の **DEM** を構築することができた。

3 DEM による磨崖仏の計測

構築された **DEM** を使って、各磨崖仏の部位の長さや周長、面積、およびそれぞれの左右比（基準数、左を 1）などを計測した。計測の概略と測量結果は図 4 に示した。なお、高瀬石仏の大日如来は左目の一部が欠損しているため、目の面積は計測していない。ただし、**DEM** で目の両端を判別することができたため、目の長さは計測した。

高瀬石仏（大日如来）の目の長さを測定したところ、左目が **6.2cm**、右目が **6.8cm** で、その

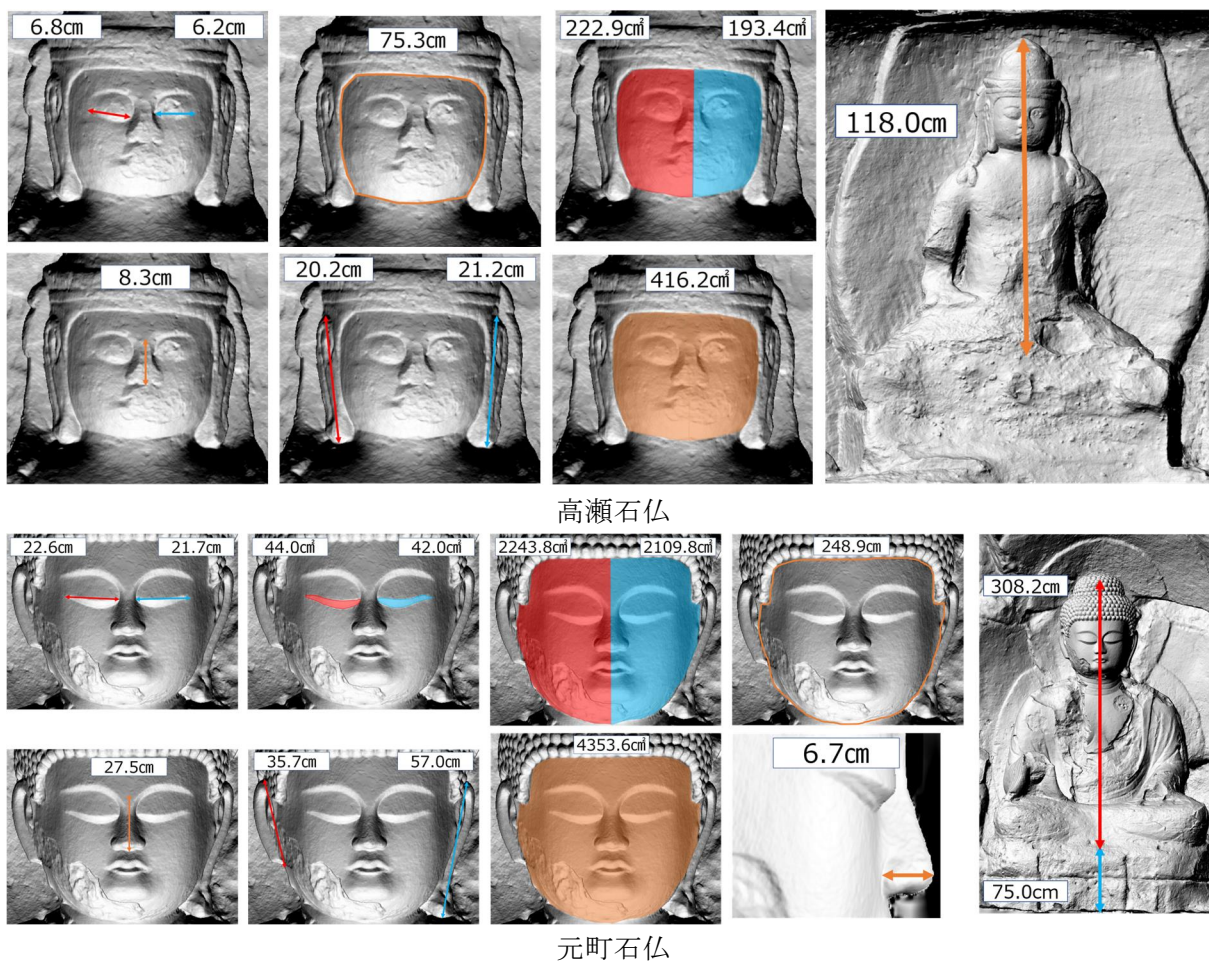


図4 計測の概略と測量結果

比率は1:1.097であった。また、鼻の長さは8.3cmで、左耳の長さが21.1cm、右耳の長さが20.2cm (1:0.957)、顔の周長は75.3cmであった。次に顔の面積を計測したところ、その値は416.2cm²で、鼻根から鼻柱を結んだ線を境に、顔の左半分が193.4cm²、右半分が222.9cm²であった (1:1.153)。

次に、元町石仏（薬師如来）の各部位の計測を行った。目の長さは、左目が21.7cm、右目が22.6cmで、その比率は1:1.04であった。目の面積は、左目が約42cm²、右目が44cm²で (1:1.048)、目と上瞼を含めた面積は、左目が241.0cm²、右目が258.2cm² (1:1.071) であった。鼻の長さは27.5cmで、右耳と左耳の長さがそれぞれ35.7cm（一部欠損）と57.0cm、顔の周長は248.9cmであった。また、顔全体の面積は4,353.6cm²で、左半分が2,109.8cm²、右半分が2,243.8cm²、その比率は1:1.064であった。

IV 三次元モデルの検証と新発見

ここでは、本研究で作成した三次元モデルとDEMの精度の検証として、既往研究や調査報告等に掲載された図や写真、記述内容との比較を行う。

1 造形の特徴：既往研究との比較

1) 高瀬石仏の造形と色彩

高瀬石仏の造形や色彩については、大分県教育委員会（1958）に詳しい。それによれば、高瀬石仏の大日如来は、「方形の座に蓮華を付した上に坐り」（下線は筆者加筆，以下同じ），と記されている。現在は，側面と正面の一部にのみ蓮華の模様が認められる。この蓮華について，

三次元モデルの

テクスチャモデル（図 5b）では分かりにくい，凹凸が表現されるソリッドモデル（色なしのメッシュ）（図 5a）を確認すると，大日如来の坐る台座に花びらを模した凹凸（蓮華）をはっきりと確認することができる。また，上述した報告では深沙大将立像について，「深沙大将は珍しいもので，胸に 9 個の髑髏を並べて瓔珞とし，腹部に童女面を描き，左手には身体に巻きついたへびの頭を握り，よく特異の形相を表現している」と記している。深沙大将のソリッドモデル（図 6a）を確認すると，この記載の中の左手の蛇の頭，瓔珞の輪郭が明瞭に表現されていた。一方で，書籍に記載されている髑髏はソリッド

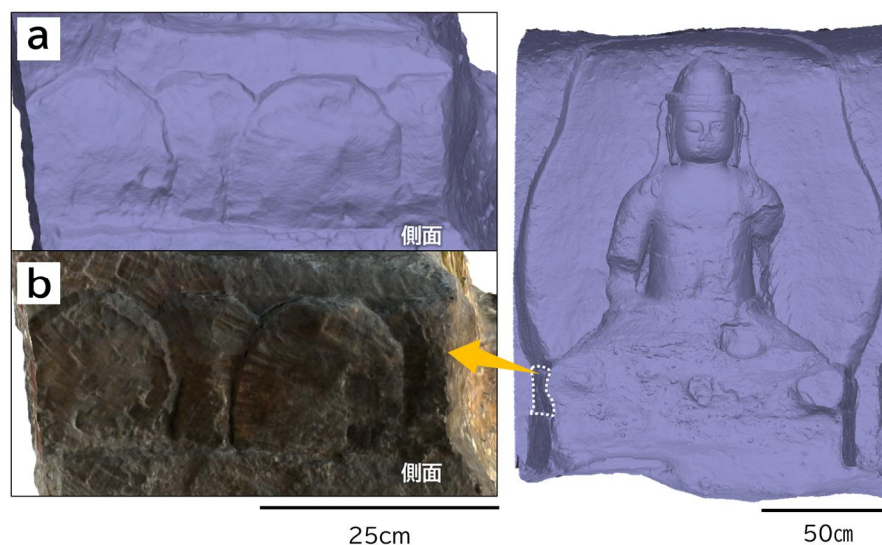


図 5 高瀬蓮華座のソリッドモデル（a）とテクスチャモデル（b）

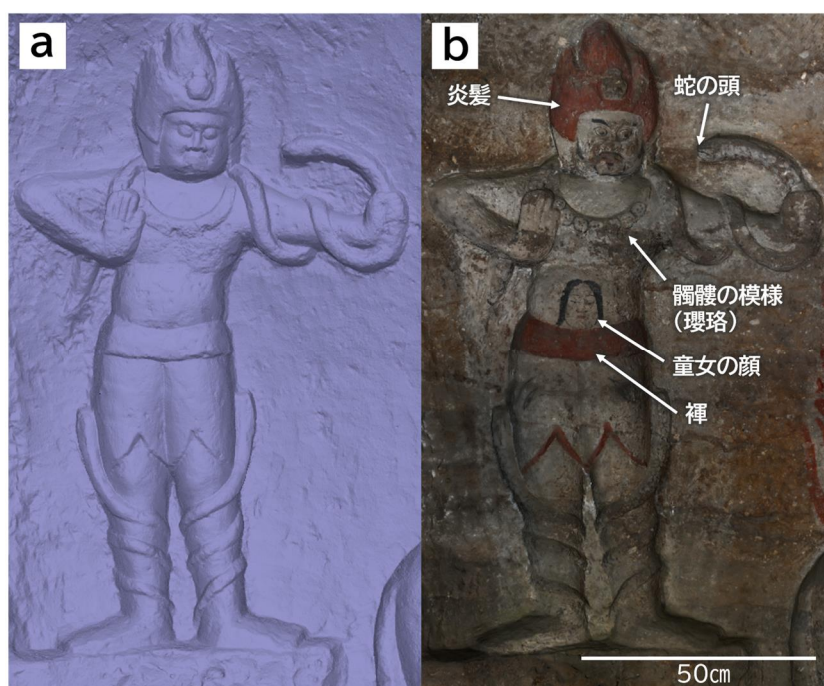


図 6 深沙大将のソリッドモデル（a）とテクスチャモデル（b）

モデルに表現されていなかった。

さらに、大分市教育委員会（2011）には、この深沙大将立像について、「赤く彩色された炎髪を逆立て、どんぐり目に丸い顔、額に髑髏、胸に髑髏の瓔珞を付けており、腹部には童女の顔を描き、赤い褌をしめている」、といった色彩や模様について記されている。これらをテクスチャモデル（図 6b）で確認すると、確かに髪や褌の赤い彩色に加え、顔や蛇には目を確認することができる。また、瓔珞にも丸い模様が描かれていることがわかり、腹部に描かれている童女もはっきりと確認することができる。ところが、これらをソリッドモデルや DEM から作成した陰影起伏図で確認したところ、髪や褌、瓔珞を除いて凹凸を判別することができなかった。

以上のことから、凹凸をはっきりさせるソリッドモデルで表現されていた台座の蓮華模様は彫刻であるのに対して、胸の瓔珞に描かれている髑髏や腹部の童女の顔、蛇の目などは彫刻ではなく、彩色によってのみ表現されているということが明らかとなった。これらの模様にもミなどで彫り込んだ凹凸が一切認められないということは、これらを描くための何かしらの基準点や目安（下書き的なもの）を、少なくともノミなどによる彫り込みでは示さなかったことになる。あるいは、あまりに細かい箇所は、当時の道具の性能や技術的な理由で、彫り込むことができなかったのかもしれない。いずれにしても、これらは実物の観察や写真では決して分からないことであり、本研究の凹凸を表現できる DEM の構築によって初めて明らかになったものである。

2) 元町石仏の造形と色彩

大分県教育委員会（1958）によれば、薬師如来の造形や色彩について、「手部・胸部・顔面の一部を欠損しているが、頭部には肉けいを有し、螺髪は整い、柳葉形の目は半眼に開いた姿は莊嚴である。ふつくらとした張りのある頬、空豆型の唇、長大肉太の耳、二重あご、首の三道、厚い胸板、乳下の肉付等は（中略）舟形光背には圓光を刻み、火炎は朱で描き、仏体には胡粉を塗り上に彩色を施した形跡が見られる」とある。ここに記されている造形や色彩の特徴は、DEM から作成した陰影起伏図やテクスチャモデル、ソリッドモデルで確認することができる。

まず、舟形光背に描かれた火炎について、本尊を正面から見たソリッドモデルで確認すると、舟形光背のラインが本尊

を覆うようにして天井まで続き、先端が船のようになっている様子が認められる。また、その中に描かれている火炎付近のテクスチャモデルを拡大すると、僅かではあるが舟形光背の中に赤い彩色を認めることができる。

また、二重顎の様子については、岩男（1961）に掲載されている写真と計測略図に記されている。それによれば、当時の

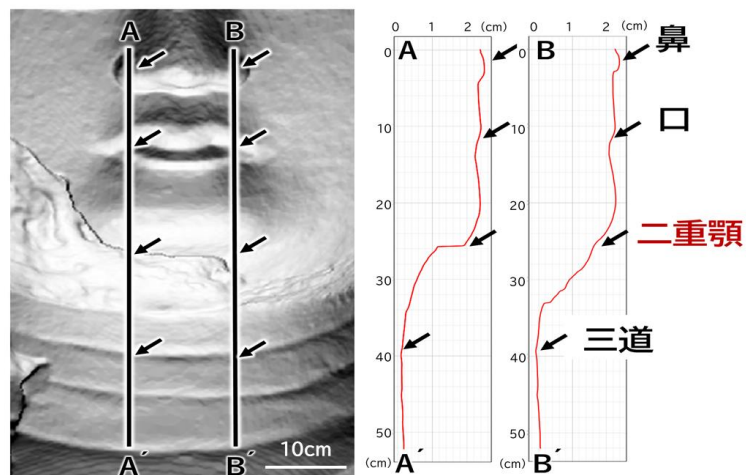


図7 薬師如来の頭部の陰影起伏図（左）と断面図（右）

二重顎のくぼみは、残存していることが認められる。ところが、本研究で構築したソリッドモデルを確認すると、右頬の一部が欠損しており、右頬の下部には二重顎の窪みが認められない。実際に、左頬と右頬の縦断面図を DEM によって作成すると、左頬の断面図 B-B'には二重顎のくぼみを確認することができる一方で、右頬の断面図 A-A'には二重顎のくぼみを確認することができない(図 7)。つまり、右頬は本来二重顎のくぼみが見られた場所から首元にかけて、欠損してしまったことがわかる。

ところで、上述したように、元町石仏の薬師如来に関しては DEM を使っていくつかの断面図を作成した。これによって、本研究によって初めて鼻の高さや唇の厚さ、二重顎の深さなどを計測することが可能となった。例えば、薬師如来の鼻の高さは 6.7cm と算出されている(図 4)。また、元町石仏には、薬師如来の他に、向かって右に毘沙門天と脇侍に善膩師童子および吉祥天、向かって左に不動明王と脇侍に矜羯羅童子および制吒迦童子が造形されている。しかし、これらの一部は風化や欠損が著しく、実物の観察はおろかテクスチャモデルを見てもその姿かたちを認識することは難しい。これらも、ソリッドモデルであれば認識できるものが多く、初めてその詳細な造形が認められることとなった(図 8)。

3) 高瀬石仏と元町石仏の像高

ここで言う像高とは、仏像そのものの背の高さのことで、坐像の場合は頭頂部から足と台座の付け根まで、立像の場合は頭頂部から足元までを指す。両磨崖仏の本尊の像高については、これまで既往研究や報告書において記されている。すなわち、高瀬石仏の大日如来の像高は、濱田(1925)が約 121cm、岩男(1964)が 123cm、大分県立宇佐風土記の丘歴史民俗資料館(1996)では 119cm と示されている。元町石仏の薬師如来については、その像高と台座について、大分市教育委員会(2016)は像高を 306cm、台座を含めた総高を 384cm としている。また、岩男(1969)は、台座の高さを 74cm と報告している。

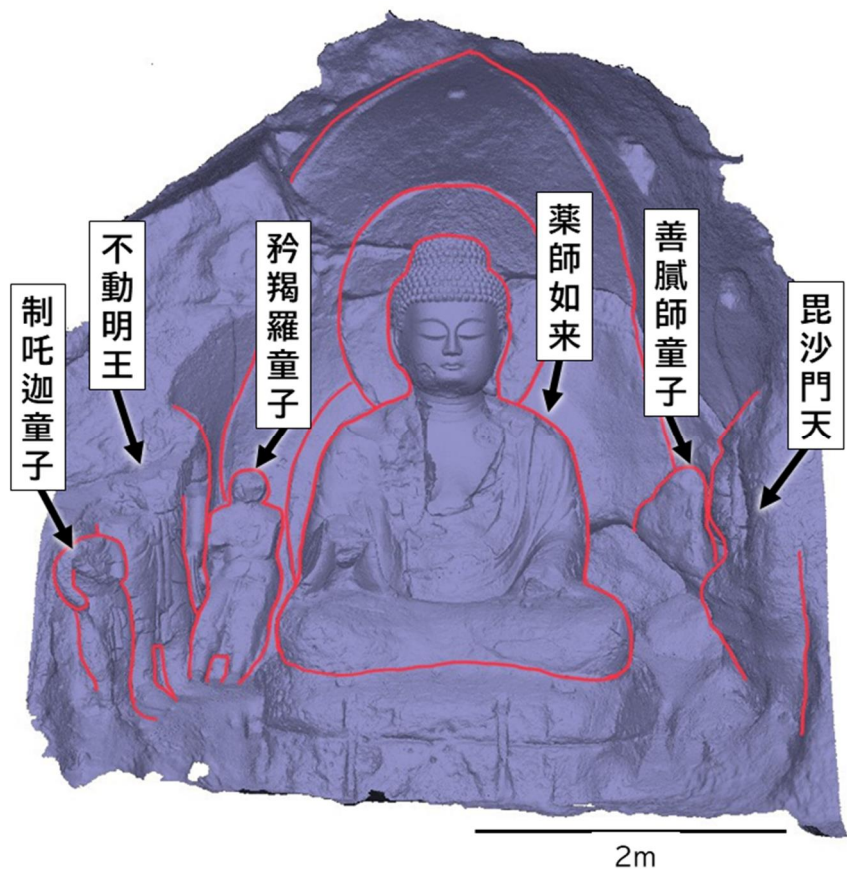


図 8 ソリッドモデルより確認できる諸仏と尊名

本研究で計測した両磨崖仏の本尊は、ともに足の周囲が風化しており付け根が不明瞭となっている。そのため、本研究では頭頂部から両ひざと台座の付け根を結んだ線までの長さを、像高として計測した。その結果、高瀬石仏の大日如来の像高は 118.04cm、元町石仏の薬師如来の像高は 308.2cm、台座は 75.0cm という値が求められた。一方で、既往研究や報告書には計測方法や基準点が明確に示されていないため、本研究で得られた数値を単純比較することはできない。しかし、数値だけを見れば概ね調和的であり、かつ DEM の精度を鑑みると、本研究で計測した数値が最も実物に近い値であると考えられる。

2 造形の特徴：新知見

1) 薬師如来の釘穴

大分市教育委員会（2016）によれば、元町石仏の薬師如来の顔や胸から腹部にかけて、塑土による整形と塑土を保つための鉄釘が使用されているとの報告がある。具体的には、「胸～腹部にかけての衣紋部分において、5～15mm の厚さで釘を絡ませる形で衣紋を表現する塑土を確認した。今は失われた衣紋の延長線上には 2 列の釘穴が腹部に向かって伸びており（後略）」と、その詳細が記されている。

この記載にある上下二列の釘穴について、実物やテクスチャモデルでは確かに穴であることが確認できた。そこで、DEM を活用して、この穴の数と直径を計測した。その結果、釘穴とみなされるものは計 16 ヶ所確認することができた。それらは、きれいな上下二列というよりはむしろ、正面から見て左側半分で上下に互い違いに続き、左から 10 個目の釘穴から上段のみとなる。次に、計 16 ヶ所の釘穴の直径を計測したところ、その平均は 0.7cm となった。元町石仏は塩類風化が強く作用し、いわゆるタフォニと呼ばれる風化穴のような微地形が壁面や仏体に多数認められる。そのため、この釘穴も風化作用によって多少大きくなっている可能性があるものの、DEM による計測から当時使用した釘は、 $\phi 5\sim 7\text{mm}$ 程度のものであることが明らかとなった。

2) 薬師如来における欠損部位の面積

過去の薬師如来の姿かたちは、詳細な計測記録が残っている岩男（1961）に詳しい。この報告書には、どのような方法で各部位を計測したかの計測手法が示されていないが、少なくとも当時の薬師如来を「計測略図」として復元している。撮影当時（2022 年）の薬師如来は、既述したように右頬の一部が欠損している一方で、岩男（1961）の「計測略図」に示されている薬師如来は、その欠損部分が下顎まで至っていない。そこで、この 60 年余りで欠損した面積を計測することとした。なお、この報告書には 1960 年ごろの薬

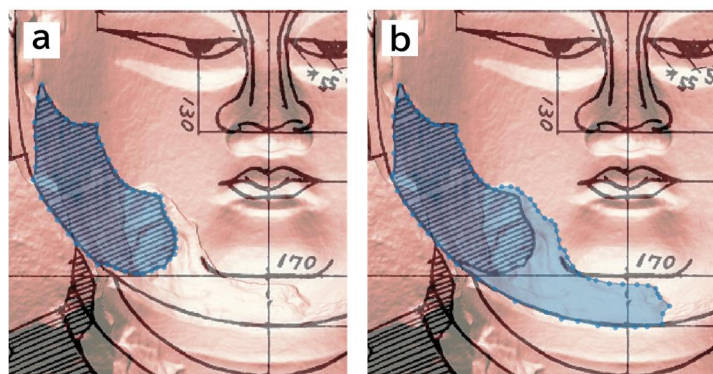


図 9 元町石仏の「計測略図」に示された欠損部分 (a) と現在の欠損部分 (b)

図中の数字や直線等は「計測略図」に記載された情報

師如来の写真も掲載されているが、撮影角度が下からで、かつ解像度が悪く欠損部分が判別しにくいので、今回は「計測略図」を使うこととした。面積の計測方法は以下の通りである。

まず、構築した DEM 上に、岩男（1961）の計測略図を地理情報システム（Quantum GIS : 以下、QGIS）を使って幾何補正し重ね合わせを行った（図 9）。その際、計測略図と DEM 上で同じとみなされる特徴点 4 点を GCP とし、座標系はデカルト座標系とした。次に、計測略図に描かれた欠損部分の面積と現在の欠損部分を QGIS で計測した。

その結果、岩男（1961）の「計測略図」に描かれている面積は約 376cm^2 、DEM から計測した現在の欠損面積は約 626cm^2 であることが明らかとなった。もちろん、この数値は「計測略図」を幾何補正したものなので、正確な数値ではない。しかし、少なくとも、薬師如来の右頬の欠損は、この 60 年余りで 1.7 倍程度拡大した可能性が高いとみなされる。この欠損範囲が広がった原因が風化作用によるものなのか、あるいはその他の要因なのかは定かでないが、DEM 上で面積を計算した限りでは、1961 年の欠損部分よりさらに下位の部分が概ね 250cm^2 欠損したとみなされる。

3) 薬師如来の欠損部分を復元する試み

ここでは、右頬が欠損している薬師如来を、三次元モデルを使って復元した方法について記す。その方法として、まず Metashape 上の「選択範囲の切り抜き」機能を用いて、顔の右半分を切り抜き、OBJ 形式の三次元モデルを書き出した。次に、3DCG ソフトの Blender にエクスポートし、顔の正面の切り取った直線部分が軸に接するように移動させた。そして、オブジェクトを右クリックし「原点の設定」から、原点を 3D カーソルへ移動させた。次に、「プロパティ」から「モディファイアプロパティ」を選択し、「モディファイアを追加」から「ミラー」を選択し、反転する軸を設定した。この一連の処理によって、設定した軸を中心に反転した三次元モデルが形成される。もちろん、この三次元モデルも、正確なスケールを持ち合わせている。

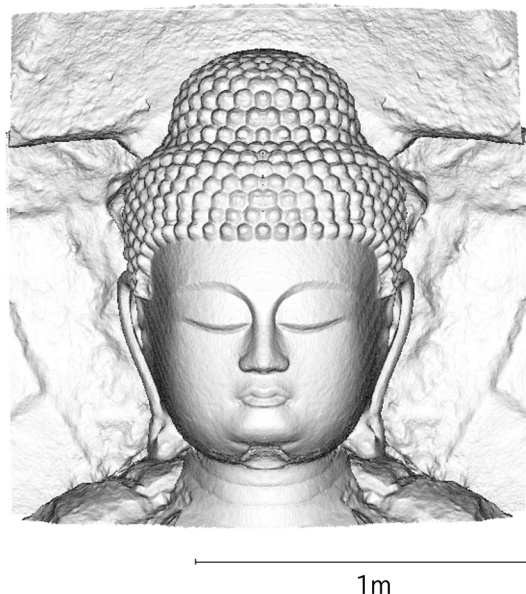


図 10 反転して推定した元町石仏の頭部

復元した薬師如来を見ると（図 10）、欠損していない左側の顔半分のデータを使ったにも関わらず、現在の薬師如来と比較しても、違和感やバランスの差などはさほどないように見える。これは、薬師如来の各部位や頭部の左右比が、ほぼ 1 対 1 で造形されていることに起因すると考えられる。このような発見もまた、正確なスケールが入った三次元モデルの構築ができたことで初めて認められた知見である。

V おわりに

磨崖仏は自然の崖面を彫り込んで作られているため、移動をすることができず、母岩の性質

や所在する場所の自然環境の影響を受けて、表面の風化や剥落などの劣化が進行しやすい環境にある。また、学術的研究や保存修復事業を行う際には、機器等が接触することによる破損の危険性を避けることができない。本稿は、そのような特徴を持つ磨崖仏に対して、安価で簡便な SfM 解析を用いることで、精密な三次元モデルを作成し、その妥当性を検証した。

三次元モデル作成のプロセスはⅡ章とⅢ章に示したとおりであり、磨崖仏の特徴を踏まえて、さまざまな工夫を行った。例えば、写真撮影におけるタイムラプス撮影の時間間隔を調整することで、オーバーラップ率を 80%以上とした。また、像高が 3 メートルを超える元町石仏では、床面からでは頭頂部やその背後を撮影することができないため、物干し竿に軽量のカメラを据え付けることで、磨崖仏全体の撮影を可能とした。GCP の取得についても、脚立を用いることで、精度の高い計測を実現した。もちろん、磨崖仏の表面に調査者や機器が触れることがないように細心の注意を払ったことは言うまでもない。

三次元モデルや DEM の作成など、アプリケーションを用いた解析の過程では、高密度クラウドの構築において「中」を選択し、DEM の構築においては、特徴点との誤差を生まないようにスケールバーの追加を行うなどの工夫を行った。

作成した三次元モデルから得られた像高などの長さの値は、既存の研究において報告されている寸法と近いものであることが確認された。生成されたソリッドモデルとテクスチャモデルからは、それぞれ磨崖仏の表面の凹凸の詳細な把握や模様の特徴の読み取りが可能であった。また、同じく生成された DEM を用いることで、任意の地点間の断面図を作成し、造形的な特徴を把握しやすい陰影起伏図を作成することができた。さらに DEM を活用することで、剥落した箇所範囲の特定や剥落前の状況の推定も行った。

以上のように、本稿で提示した SfM 解析を用いた三次元モデル作成方法は、様々な特徴を持つ磨崖仏に対して妥当であり、磨崖仏の形態や模様などの確認に有効であることが確認できた。

歴史文化遺産の多くは、地域固有のもので、二度と再現できないものであり、他に代えがたい唯一のものである。何より、こうした歴史文化遺産の価値を大切に次代に受け継ぎ、残してきたという人の営みや社会の在り様を現代に伝えている。それは現代社会では観光資源ばかりでない多様な価値を持つと同時に、地域住民にとっては心の拠り所でもある。本稿で取り上げた磨崖仏は、まさにそのような歴史文化遺産の一つである。その価値を次世代に受け継ぎ、残していくために、学術的な意義ばかりでなく、その多様な価値を社会に広く伝えていくことが求められる。また、歴史文化遺産は教育に活用されることで「過去から受け継いだたんなる『遺産』ではなく、未来から預かっている『宝物』であり、次世代に無傷でバトンタッチしなければならないものである」という認識に変化する」(田淵, 2011)。本稿で提示した三次元モデルは、磨崖仏の多様な価値を伝えるための手段として利用価値の高いものであり、今後は他の地域の磨崖仏についても三次元モデルの作成を進めると同時に、教材などの活用方法についても検討を進めていきたい。

本稿は筆頭著者である平嶋が大分大学教育学部に提出した卒業論文(令和 3 年度)をもとに、その後の考察の進展を加えて加筆修正したものである。現地における写真撮影や測量にあたって、当時いずれも大分大学の学生であった宮川遼大・上石悠貴(教育学部)、井上慧(理工学部)、和田達旺(経済学部)各氏の助力を得た。また調査対象磨崖仏は国指定史跡であるため、柵内での撮影および測量にあたり、大分市教育委員会文化財課の許可を得た。記して感謝申し上げます。

ます。なお、本稿の概要は地理科学学会 2023 年度春季学術大会（2023 年 6 月 3 日，広島大学）で報告した。

注

- 1) 文化庁「国指定文化財等データベース」(<https://kunishitei.bunka.go.jp/bsys/index>)。最終閲覧日 2024 年 4 月 30 日
- 2) 明確な理由は明らかではないが，大分県内には古くから仏教文化が浸透し，それらの造営を支える有力な寺院や支配者がいたこと（大分県立宇佐風土記の丘歴史民俗資料館，1996）や，「建造に適した岩石と好適な露出地（比較的広い急傾斜の岸壁など）が多かった」（村上，1994）ことが指摘されている。
- 3) 大分市に所在する国指定史跡の大分元町石仏と県指定史跡（元国指定史跡）の岩屋寺石仏，豊後大野市に所在する国指定重要文化財の菅尾磨崖仏，臼杵市に所在する国宝及び国指定特別史跡の臼杵石仏の合計 5 つの磨崖仏を調査した。
- 4) 大分元町石仏については，その後も保存修理後の劣化などに関する研究（山田，2009；高取ほか，2017）などが行われている。
- 5) 大分市デジタルアーカイブ (https://oitacity-archive.jp/special/3d_magaibutsu/)。最終閲覧日 2024 年 5 月 5 日。
- 6) 像高が 3 メートルを超える大分元町石仏の GCP の測定において，当初，人の目の高さから頭部を見上げるようにして測定したところ，得られた GCP 間の距離（スケール）に誤差が生じていることが確認された。そこで，2024 年 4 月 29 日に，脚立を用いて，頭部をほぼ水平に見ることが出来る約 3 メートルの高さから測定し直した。その際に取得した GCP は頭部付近の 4 点のみである。
- 7) メッシュ（面）に画像などを貼り付ける（テクスチャマッピングする）ために利用する座標系の 1 つ。

文献

- 池見洋明 2023. おおいた豊後大野ジオパークの磨崖仏群の 3D 測量—デジタル・アーカイブ—. 日本文理大学紀要, 51, 99-103.
- 岩男 順 1961. 大分県磨崖石仏研究 大分市元町磨崖仏・薬師如来像について. 大分大学学芸学部研究紀要（人文・社会科学）B 集, 2(2), 39-51.
- 岩男 順 1964. 大分県磨崖石仏研究 大分市滝尾・曲石仏について. 大分大学学芸学部研究紀要（人文・社会科学）B 集, 3(1), 40-55.
- 岩男 順 1966. 大分県磨崖石仏研究大分市植田町高瀬石仏について. 大分大学学芸学部研究紀要（人文・社会科学）B 集, 2(4), 125-139.
- 岩男 順 1969. 『大分市文化財第十集 大分市周辺磨崖石仏の研究』, 大分市教育委員会.
- 内山庄一郎・井上公・鈴木比奈子 2014. SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告, 81, 37-60.
- 大分県教育委員会 1958. 『大分県の文化財（第 1 集）』, 大分県教育委員会, 44, 46.
- 大分県立宇佐風土記の丘歴史民俗資料館 1996. 『大分県立宇佐風土記の丘歴史民俗資料館報告書第 18 集 石造文化財の保存対策のための概要調査—石造文化財の基礎調査報告書—』, 大分県立宇佐風土記の丘歴史民俗資料館.

- 大分市教育委員会 1996. 『国指定史跡大分元町石仏保存修理事業報告書』, 大分市教育委員会.
- 大分市教育委員会 2011. 『国指定史跡高瀬石仏: 保存整備事業報告書』, 大分市教育委員会.
- 大分市教育委員会 2016. 『国指定史跡大分元町石仏: 保存整備事業報告書』, 大分市教育委員会.
- 小花和宏之・早川裕弐・齋藤仁・ゴメスクリストファー 2014. UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較. 写真測量とリモートセンシング, 53(2), 67-74.
- 高取伸光・小椋大輔・脇谷草一郎・安福 勝・桐山京子 2017. 覆屋内温湿度変動が磨崖仏の塩類風化に及ぼす影響の数値解析—元町石仏の保存に関する研究—その 1. 日本建築学会環境系論文集, 82(733), 215-225.
- 田渕五十男 2011. 『世界遺産教育は可能か: ESD (持続可能な開発のための教育) をめざして』奈良教育大学ブックレット, 東山書房.
- 玉川剛司 2018. 福真磨崖仏の 3D 測量. 『大分県指定史跡福真磨崖仏石造覆屋保存修理事業報告書』, 豊後高田市教育委員会
- 仲嶺真信 1992. 大分市元町石仏群の成立年代について. 芸術学論叢, 11, 1-24.
- 仲嶺真信 1995. 臼杵石仏群の造立年代とその背景について: 山王・ホキ三尊・古園を中心とした問題提起. 芸術学論叢, 25, 19-45.
- 濱田耕作 1925. 豊後の磨崖石佛研究. 京都帝國大文學部考古學研究報告, 9, 1-146.
- 村上允英 1994. 石仏の材質と保存—主として大分県下の磨崖仏について—. 史学論叢, 2(4), 39-40.
- 山田拓伸 2009. 磨崖仏の保存修理後の経過Ⅱ—大分元町石仏と岩屋寺石仏について—. 大分県立歴史博物館研究紀要, 10, 57-68.
- 吉岡敏和 2017. 碩南層群及び大分層群中の火砕流堆積物と磨崖仏. 大分地質学会誌, 23, 1-10.

Proposal and Verification of a Three-Dimensional Model Creation Method for Buddhist Images on a Cliff

HIRASHIMA, T., KOYAMA, T., DOI, H., and KONO, S.

Abstract

Buddhist images carved directly into natural cliffs are valuable cultural heritage, and precise three-dimensional models provide valuable materials for academic research and their preservation and restoration. However, removing them from the cliff for measurements is impossible, and contact with equipment or people may damage the surface. The authors propose a method for creating three-dimensional models using SfM-MVS as an inexpensive and easy-to-use method that overcomes these limitations. They will create a model for two Buddhist images in Oita City and examine its validity.

【Key words】 stone Buddhist image, cultural property, digital elevation model, conservation and maintenance, Oita Prefecture