

〔報文〕 多視点ステレオ技術に基づく 磨崖和靈石地蔵の劣化状況評価

朽津 信明・森井 順之・酒井 修二*・運天 弘樹*

1. はじめに

近年、計測技術の進歩に伴い、対象物の三次元形状を迅速かつ正確にデータ化することが可能となり、様々な文化財を解明して理解する研究にも大きく貢献している¹⁾。一方で、形状を正確に記録することは、文化財の劣化状態を正確に把握することにも貢献すると考えられ、同一の対象について時間を置いてから再度計測して比較すれば、その間に進行した劣化を評価できることになる²⁾。本研究では、広島県指定重要文化財である三原市の磨崖和靈石地蔵を対象として、30年前に型取りされて製作されていたレプリカの三次元形状を、現物の現在の形状と比較することから、この30年間に進行した劣化について評価し、それを今後の保存対策に役立てようと試みるものである。

2. 磨崖和靈石地蔵とレプリカ

2-1. 磨崖和靈石地蔵

磨崖和靈石地蔵（図1）は三原市佐木島の花崗岩塊に刻まれた広島県指定重要文化財の磨崖仏³⁾で、銘文から西暦1300年に佛師念心によって製作されたことが確認される。磨崖仏の彫られている大きさ2m程の花崗岩塊は、この地域に広く分布する白亜紀の花崗岩類である広島花崗岩類が、自然の風化・侵蝕を受けて残った球形に近い形状のコアストーン⁴⁾と判断され、その海側（西面）の側面に1m程の大きさの地蔵坐像が薄肉彫りで表現されている。花崗岩塊は海岸の波打ち際に存在し、現在は干潮時には像全体が海面上に姿を現す（図1）が、満潮時には石



図1 干潮時の磨崖和靈石地蔵（2016年撮影）



図2 満潮時の磨崖和霊石地藏 (2012年撮影)

仏の一部または全部が海面下に沈む状況にある(図2)。満潮時海水面は日によって変動するが、気象庁で公表されている最も近傍の水位観測点である糸崎の2016年の潮位表⁵⁾に基づいて見積もると、おおむね像の顎または首辺りが平均満潮時水位と推測され、その辺りから下の岩塊表面は藻類と思われる暗色物質に覆われた状態にある(図1)。像では一般に下部において、顔などの像上部に比べると体や衣などの形状表現に現在はシャープさが認められず(図3)、築造時に比べて侵蝕が進行している可能性が考えられるが、目鼻などの像上部は比較的シャープさを留めている。以上のように、潮位の関係から磨崖仏表面は多かれ少なかれ毎日必ず波に打たれることになり、また乾湿の繰り返しなどから地元では「磨崖仏は近年になって急速に劣化が進行しているのではないかと懸念されていた⁶⁾」と懸念されていた。しかしながら、現在は干潮時の限られた時間しか像に近づくことができないため客観的な科学データは存在せず、それはあくまでも主観的な印象に過ぎない。

2-2. レプリカ

この像の現在の劣化状態を客観的に議論するための有力な判断材料として、1986年に造られたレプリカ(図4)の存在が知られている。これは、岩塊の大部分を型取りすることによって

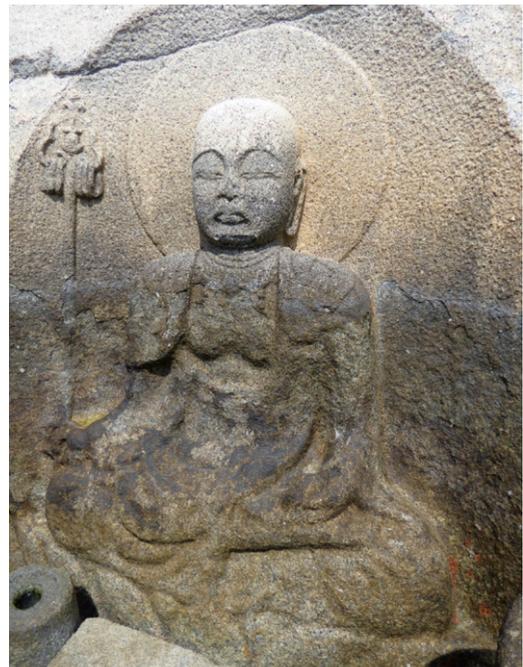


図3 磨崖和霊石地藏の現在の表面状態(2016年撮影)

像上部の表面は比較的形状が残されているが、下部では侵蝕が進んでいる。

FRPで造られた精巧なレプリカが、広島県立歴史博物館内で展示公開されてきているものである⁷⁾。レプリカは継続して博物館内に置かれてきたことから、その形状は基本的に1986年当時の磨崖和霊石地蔵の形状を忠実に反映していると解釈される。従って、もしもこのレプリカと現在の磨崖和霊石地蔵との間に形状の差異が存在すれば、それはすなわちこの30年間に起きた劣化を意味していると考えられる。そこで、レプリカと磨崖和霊石地蔵現物について、今回同一の方法で計測を試みることにした。

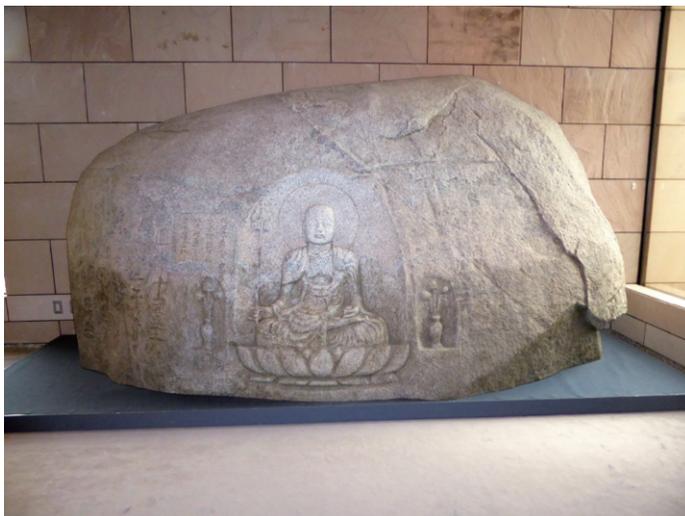


図4 磨崖和霊石地蔵のレプリカ（広島県立歴史博物館蔵，1986年製作）

なお、レプリカにおいても岩塊下部は相対的に暗色化して表現されているが、その暗色化部の上端は磨崖和霊石地蔵の現状よりも低い位置にあり、像のお腹付近に相当している（図4）。

3. 計測と解析

3-1. 写真撮影

磨崖和霊石地蔵は干潮時の限られた時間しかアクセスができないため、計測はごく短時間で簡易に行われる必要がある。このことから本研究では、多視点ステレオ技術⁸⁾を用いて計測を試みた。多視点ステレオ技術は、多方向からデジタル写真を撮影し、それらの画像のマッチング結果から対象物の形状を計測する方法であり、簡易に三次元計測が行え、また色情報を同時に得ることが可能である。本研究では、Canon社製のデジタルカメラ PowerShot G7Xを用い、磨崖和霊石地蔵については一枚当たり約70cm角ずつで57枚、レプリカについては約120cm角ずつで43枚の写真をそれぞれ撮影し、それらに基づいてそれぞれの形状を計測した（図5）。撮影作業は2016年6月の同時期に、一人の人間によって、磨崖和霊石地蔵については6分、レプリカについては4分以内でそれぞれ終了した。

3-2. マッチング

得られた画像群から同一地点が写る異なる視点からの写真を複数組選び出し、地点ごとに両眼立体視の原理に基づき部分的な三次元座標を計算した。そのようにして得られた地点ごとの部分的な三次元情報を、位置合わせを経て最終的にひとつに統合することで、磨崖和霊石地蔵、レプリカそれぞれの三次元形状モデルを生成した。それぞれの位置合わせに際しては、Iter-



図5 磨崖和霊石地蔵における調査風景
コンパクトデジタルカメラによる写真撮影

ative Closest Point (ICP)⁹⁾と呼ばれる手法を利用し、各モデル間の偏差の総和(最近傍偏差)が最小になるように計算して行った。現在の磨崖和霊石地蔵の三次元形状モデルに正対した点群オルソ画像を図6に、レプリカの三次元形状モデルに正対した画像を図7に、それぞれ示す。

3-3. 変位の検証

当初状態により近い形状を保っていたと考えられる、レプリカの三次元形状モデルに基づき、現在の磨崖和霊石地蔵の三次元形状モデルの位置合わせを行った後、両者の間のずれの最短距離を算出し、モデル間の差分を求めた。その際には、大域的な歪みによる影響を除くため、31枚の部分的な三次元形状モデルごとに比較を行い、局所的な差異のみを抽出した。多視点ステ



図6 磨崖和霊石地蔵の三次元モデルのオルソ画像



図7 レプリカの三次元モデルのオルソ画像

レオ技術に関するこれまでの精度検証結果¹⁰⁾に基づき、今回の方法による計測誤差は0.7mm以内と計算されるが、肉眼で差異を認知できるレベルの違いを前提として、本研究では相互に3mm以上の変位が認められた地点をこの30年間に変位が認められた箇所と認定して抽出した。この変位箇所を統合されたレプリカの三次元形状モデル上に色分けして表示した上で、磨崖仏に正対する位置から見たオルソ画像として出力したものが図8となる。

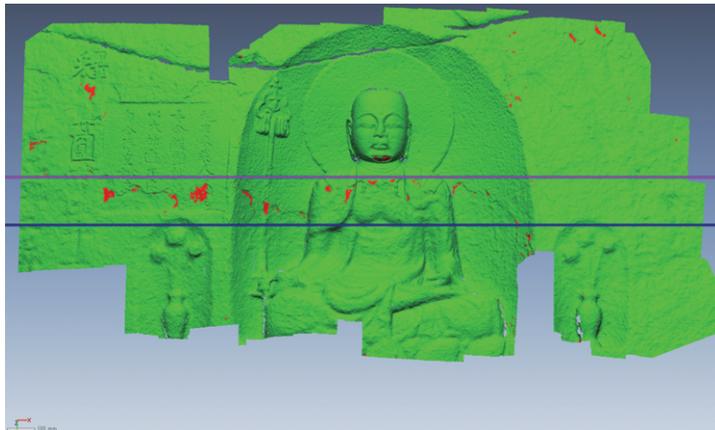


図8 図6と図7の変位分布図

● (赤色)：変位3mm以上, ● (緑色)：変位3mm未満
 — (紫色)：現在の藻類繁茂域上限, — (青色)：1986年の藻類繁茂域上限

図8において、3mm以上の変位が観察された箇所は、磨崖仏中位で海水面に対して平行な幅約20cmの帯状に集中し、全計測エリア中で約0.56%を占めるに留まった。また、藻類の沈着に起因すると見られる計測域下部の暗色化部分の範囲を抽出すると、レプリカと現物とでは上限のラインが20cm程度異なっており(図1, 4)、現物における暗色化部の上面は、変位が集中する帯状劣化エリアの上面にはほぼ相当し(図1, 8)、レプリカにおける暗色化部の上面は帯状劣化エリアの下面にはほぼ相当した(図4, 8)。

4. 考察

以上に基づき、磨崖和霊石地蔵の現在の劣化状況について評価を試みる。

まず、磨崖仏が存在する花崗岩塊（コアストーン）の現在の形状を見ると（図1）、通常の風化で形成される一般的な花崗岩コアストーンの形状⁹⁾を十分に保っており、マクロに見た場合に、コアストーン形成後に特定の部位が極端に侵蝕を受けた状況とは考えにくい。つまり、岩塊の外形を大きく変えるような（例えば深さ方向に数cm以上の規模の）劣化はコアストーン形成後には起きていないだろうと判断され、少なくとも岩塊自体が現在極端に侵蝕を受けやすい環境にあるとは考えにくい。次に、磨崖仏のレプリカと現状との間で観察された変位は、この30年間にも磨崖仏の劣化が進行したことを示していると考えられるが、3mm以上の変位が認められたエリアは計測領域全体の中で考えれば、それ程広範囲に及んでいるとは認められない（約0.56%）。現状評価は、こうした客観的データに基づいて行われるべきである。

その30年間に劣化が認められた部位の分布域は、この30年間に暗色化域が拡大したエリア内に殆どが収まっている。現在の暗色化域の上面が現在の平均満潮時水位とほぼ一致していることから、暗色化部分は満潮に伴う海水の供給状況と密接に関係していると判断され、それが1986年製作のレプリカと現状とで異なっていることには、この30年間におけるこの地域での海水準上昇が関与している可能性がある。30年前のこの地域の潮位データに関しては、近傍では例えば広島について確認することができ¹¹⁾、それに基づけば広島地点ではこの30年間で20cm程度平均海水位が上昇したことが指摘されている¹²⁾。つまり、平均満潮時水位に代表されるような、像付近での日々の平均的な海水の到達面が、物理的あるいは化学的に像の劣化に関係している可能性が考えられ、その上昇に伴ってこの30年間の劣化が進行してきたことが推測される。

地球規模の海水準変動曲線¹³⁾から考えると、この磨崖仏が築造された西暦1300年頃の海水準は現在よりもかなり低かったことが想定され、恐らくは像が日常的に水没する状況にはなかったのではないかと推測される。もしも平均満潮時水位が像の劣化と関係するのであれば、過去の劣化は主としてこの30年間に劣化が観察された箇所よりも下位で起きていた蓋然性が高い。像下部の現在の表面状態（図3）は、顔などの像上部と比べて築造当初の造形をそのまま残しているとは考えられず、磨崖和霊石地蔵の劣化は近年だけに特徴的に起きている現象ではなく、製作以後の海水準の様々な変動に伴って、継続して進行してきたことが窺われる。

この30年間に変位が認められたエリアが全計測域の0.56%だったことから、仮に像が造られてから同じ比率で劣化が継続してきたと考えた場合には、 $0.56 \div 30 \text{ (年)} \times (2016 - 1300) = 13.4\%$ が、像築造後に劣化を受けたエリアの総計と計算されることになる。築造時の厳密な形状がわからないため実際の劣化総量を定量することはできないものの、この30年間の劣化速度に基づいて算出された劣化総量の見積もりは、像下部における現在の表面状態（図3）から考えた場合に、極端に大きく見積もられ過ぎているとは決して思われない。以上より、磨崖和霊石地蔵でこの30年間に観察された劣化は、歴史的に受けてきたであろう劣化と比して特に極端に大きいとは認められず、「近年になって急速に劣化が進行している」という状況にあるとは積極的に認め難い。むしろ、歴史的にずっと起きていた劣化が、今も止まらずに進行し続けていると理解する方が適切かと思われる。

ただし、その劣化部位がもしも海水準変動と本当に関係しているのであれば、今後さらに海水準が上昇すれば、劣化はさらに像の上部、すなわち顔などの、像にとって本質的な部位へと及ぶ可能性も否定できないことになる。従って、さらなる慎重な観察が必要という点は指摘可能である。例えば平均満潮時水位が像の劣化に関与しているのだとすれば、海面上の浮遊物が

物理的に像に損傷を与える可能性も懸念され、それに対する対策ならば、磨崖仏前面に何らかのバリアのような概念のものを構築することで直接浮遊物が磨崖仏に接触することを妨げられれば、ある程度の対策となり得るかも知れない。このように、ただ闇雲に不安を煽るのではなく、客観的データに基づいたきちんとした検証の下に、有効かつ効率的な対策が、今後冷静に議論されていくことが望まれる。

5. 結論

急速な劣化が懸念されていた広島県指定重要文化財である磨崖和霊石地蔵について、多視点ステレオ技術に基づいて現状を計測し、30年前に造られたレプリカについて同技術で計測した形状と比較した。その結果、3 mm以上の変位が認められた箇所は全計測域の約0.56%だった。ただし、像中位で海水面に平行に帯状に集中して変位箇所が認められ、これはこの30年間の海面上昇がこの部分の劣化に関与した可能性を示す。従って、今後の海面上昇に伴って劣化が像の顔部分にまで及ばないようなケアは必要となるかも知れない。

謝辞 磨崖和霊石地蔵における計測に際して、三原市教育委員会の松田英之氏にお立会いいただき、結果の公表に関する便宜をお図りいただいた。レプリカの計測に際しては、広島県立歴史博物館の山本智宏氏にご協力いただき、公表に関する便宜をお図りいただいた。また、大和郡山市教育委員会の山川均氏からは、磨崖和霊石地蔵に関して様々なご教示をいただいた。以上を記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、池内克史・大石岳史：3次元デジタルアーカイブ、東京大学出版会（2010）
- 2) 例えば、Masuda, T., Kuchitsu, N., Yamada, Y., and Ikeuchi, K.: Aged Shape Deterioration Visualization Based upon 3D Shape Measurement -Observing Brick Wall in Ayutthaya relic-, Conservation of Monuments in Thailand III, 29-34, The Fine Arts Department of Thailand, National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo, Japan (2004)
- 3) 片山清：安芸国佐木島割石地蔵 —正安二年銘磨崖仏一、史迹と美術、314、143-154（1961）
- 4) アーサー・ホームズ：一般地質学 II 原書第3版 上田誠也・貝塚爽平・兼平慶一郎・小池一之・河野芳輝訳、東京大学出版会（1984）
- 5) <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php?stn=IZ>
- 6) 大和郡山市教育委員会・山川均氏による私信
- 7) <http://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/bunkazai/bunkazai-data-202030480.html>
- 8) 酒井修二・伊藤康一・青木 孝文・増田 智仁・運天弘樹：多視点ステレオのための位相限定相関法に基づく画像マッチングの高精度化、情報処理学会報告、186、1-8（2013）
- 9) Besl, P. J. and McKay, N. D., A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, pp. 239-256（1992）
- 10) 酒井修二：高精度ウィンドウマッチングに基づく多視点3次元復元に関する研究、東北大学情報科学研究科博士学位論文（2015）
https://tohoku.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=71933&item_no=1&page_id=33&block_id=38
- 11) <http://cais.gsi.go.jp/cmdc/center/annual.html>

12) http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/sl_trend/sl_trend.html

13) Fairbridge, R. W., Eustatic Changes in sea-level, in L. H. Ahrens, K. Rankama, F. Press and S. K. Runcorn (eds): *Physics and Chemistry of the Earth* vol 4, London: Pergamon Press, pp. 99-185 (1961)

キーワード：三次元計測 (three-dimensional measurement)；佐木島 (Sagi Island)；海水準変動 (sea level change)；レプリカ (replica)；広島県立歴史博物館 (Hiroshima Prefectural History Museum)

The Degradation State of the Wareishi Rock Cliff Sculpture Based on Multi-view Stereo

Nobuaki KUCHITSU, Masayuki MORII, Shuji SAKAI* and Hiroki UNTEN*

The Wareishi Rock Cliff Sculpture, carved in A.D. 1300 on a core stone of granite, designated as an important cultural property of the Hiroshima Prefecture, is located near a shoreline of the Sagi Island, Mihara City, Japan. It is pointed out by the local people that the sculpture seems to have recently been suffering from rapid degradation more and more due to the direct influence of tidal ebb and flow. The present three-dimensional shape of this sculpture was investigated through multi-view stereo technique in order to estimate the present degradation state exactly. On the other hand, the same technique was also applied on a replica of the sculpture made in 1986 using a mold and exhibited in the Hiroshima Prefectural History Museum. The difference revealed by the measurement between the present shapes of the sculpture and the replica can be basically regarded as the degradation of the sculpture during these 30 years. As a result, the difference between the shapes of the sculpture and the replica was detected mainly on the middle part of the core stone constituting a horizontal belt of ca. 20 cm parallel to the sea level, and the total area of the places where more than 3 mm displacement was detected constitutes ca. 0.56 % of the whole measured area. Accordingly, the degradation of the Wareishi Rock Cliff Sculpture does not seem to be recently accelerated so much but to be progressing at not so different pace as the history of the sculpture, especially following the sea level rise. If the degradation extends up to the face of the sculpture in the future, some countermeasure may be required.

*Toppan Printing Co., Ltd.