

## [資料] SfM と DSM を用いた地震津波碑のデジタル複写による文字の判読

国立研究開発法人海洋研究開発機構 高知コア研究所\* 谷川 亘

国立研究開発法人 防災科学技術研究所† 内山 庄一郎・鈴木 比奈子

高知大学 海洋コア総合研究センター‡ 浦本 豪一郎

公益財団法人 徳島県埋蔵文化財センター§ 大橋 育順

### Digital Rubbed Copy of Historical Earthquake-Tsunami Stone Monuments by Using SfM Photogrammetry Based DSM

Wataru TANIKAWA

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 200 Monobe-otsu, Nankoku, Kochi, 783-8502 Japan

Shoichiro UCHIYAMA, Hinako SUZUKI

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3-1 Ten-nodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-0006 Japan

Go-Ichiro URAMOTO

Kochi University, Center for Advanced Marine Core Research, 200 Monobe-otsu, Nankoku, Kochi, 783-8502 Japan

Yasunobu OOHASHI

Tokushima Prefectural Archaeological Properties Centre, 86-2 Itano-cho, Itano-gun, Tokushima, 779-0108 Japan

Earthquake-tsunami stone monuments have been built as mediums to pass on historical records and lessons of past disasters. However, the impression on the stone monuments becomes illegible due to damage by natural and biological weathering for a long period. In this study, a digital surface model (DSM) of 6 earthquake-tsunami stone monuments in Kochi and Tokushima prefectures were created by Structure from Motion photogrammetry (SfM) to decipher and record the characters on the monuments. The result shows that the modification of DSM based on map-representation methods was useful to help reading characters on the stone monuments even when the surface of the monument was not so flat. In particular, a composite of hill shaded, surface curvature, and slope map reproduces the similar characters to corresponding rubbed copy. In contrast, it was difficult to create DSM accurately for newly built monuments due to shiny and smooth surface by polishing. In order to construct 3D models of such new monuments, orthomosaic image from 3D texture data was useful. We conclude that digital rubbed copies constructed by various map models can help to decipher and record the stone monuments. A website that introduces digital rubbings, 3D models, and map information of earthquake-tsunami monuments will help public to understand the historical earthquakes.

Keywords: SfM, DSM, Earthquake Tsunami Stone Monument, Rubbed Copy, Digital Collection.

\* 〒783-8502 高知県南国市物部乙 200  
電子メール: tanikawa@jamstec.go.jp

† 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1 第一地震調査研究棟  
電子メール: uchiyama@bosai.go.jp, hinasuzuki@bosai.go.jp

‡ 〒783-8502 高知県南国市物部乙 200  
電子メール: uramoto.go@kochi-u.ac.jp

§ 〒779-0108 徳島県板野郡板野町犬伏字平山 86-2  
電子メール: ikujun@rice.ocn.ne.jp

## §1. はじめに

過去に発生した地震、水害、火事などの記録を後世に伝える災害記念碑は日本各地に点在している。こうした災害碑は、災害の記録、経験、教訓を伝える媒体(メディア)としての機能と、津波到達地点と浸水域などの災害規模を伝える標識(マーク)としての機能を発揮してきた[羽鳥(1978), 井若・他(2011), 今井・他(2017), 佐藤・他(2018)]. 平成二十三年(2011年)東北地方太平洋沖地震や平成三十年7月豪雨(西日本豪雨)を契機に、災害碑の機能的価値が見直されつつある[井若・他(2011), 小山・他(2017)]. そのため、災害碑の記録を収集し、データベース化し、機能的情報を提供する取り組みが各地で行われはじめてきた[国立民族学博物館(2017), 鈴木・他(2020)]. 徳島県は全国に先駆けて県内の地震津波碑を文化財として調査し、国の記念物として登録を進めている[徳島県教育委員会編(2017)].

ただし、以下に挙げる事情で、災害記念碑の機能的側面が低下ないし失われつつあることが多いのも実情である。まず、神社や公園の片隅や他の慰霊碑と同じ場所に建てられて目立たない(視認性の低下した)碑が多く存在する[秋本・櫻井(2015)]. この場合、説明看板の設置がなく、土地の再開発等により移設された災害碑もある。古い災害碑は、現代文でなく、かつ楷書体・行書体でない文字(崩し文字・草書体)で書かれているため、解読が困難とされる[羽鳥(1978), 田畑・他(2020)]. また、楷書体・行書体で文字が彫られていても、現場では光の反射や岩石の色に隠れて判読困難な災害碑も認められる。さらに、多くの災害碑は野ざらしで設置されているため、岩石表面に地衣類やつる性植物の生育による生物風化や風雨・日射による物理・化学風化により、表面の剥離、文字の摩滅、割れ目の生成が徐々に進行し、銘文の判読を困難にしている[秋本・櫻井(2015)]. 銘文判読の困難さは一般の人々の興味関心をそぐことになり、ひいては災害碑の忘却を招くこととなり、その結果、災害記念碑の本来の機能を発揮できないことになる。管理者が存在しない災害碑も存在するため、将来、災害碑そのものが失われてしまうことが十分に起こりうる。

以上のことから、災害碑の銘文の正確な記録保存は喫緊の課題と言えよう。災害記念碑の保存では、銘文の文章の保存は機能的側面から重要であることは言うまでもないが、加えて、字体、字間、文字配置、彫り具合など銘文の表現方法、さらには、災害碑全体の形状や色、質感も歴史的価値があると考えられる[朽津(2018)]. 従来、こうした石碑や土器などの内容を記録するために拓本(石拓)が古くから用いられてきた。しかし、石拓は技術・経験の差が完成度の違いに大きく反映され、直接石碑に接触するため、損傷のリスクがある。さらに、巨大な石碑を対象とした石拓

には大がかりな準備と道具を要する。一部のデータベースでは写真情報も含めた災害碑の情報が公開されているが[国立民族学博物館(2017)], 写真からの文字の読み取りは困難を要する。また、拓本や写真は2次元情報のため災害碑全体の形状、質感、凹凸を忠実に伝えることができない。

このような問題もあり、最近新しいデジタル画像化技術を活用して石碑を記録する試みが行われ始めてきた[上相・他(2012), 内山・他(2014), 谷川・他(2017), 杉本・他(2018), 上相・他(2019), 内山(2019)]. その中でも、多数のステレオペア画像から対象物の3次元形状データを得ることのできる SfM 多視点ステレオ写真測量(Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry, 以下 SfM)技術を適用した方法は、デジタルカメラさえあれば比較的容易に対象物の三次元形状を復元できることから[早川・他(2016)], 石拓に変わる新たな記録方法として期待されている。SfM 技術で作成した三次元形状復元データはレプリカやアニメーションへ転用でき、防災教育面などへの活用の幅が広がるものと考えられる。すでに、内山・他(2014)により SfM 技術の地震津波碑への活用例が紹介されているが、文字の判読しやすさや三次元形状データの問題点に関する細かな議論は十分に行われていない。そこで、本研究では高知県と徳島県の地震津波碑を対象に SfM 技術を用いて作成した数値表層モデル(DSM: digital surface model)とオルソモザイク画像をもとに碑文のデジタル複写を試みた。一般に使用されている地図表現方法を用いて DSM の解析を行い、文字の判読しやすさを評価した。また、実際の石拓とデジタル複写の比較、および三次元形状復元データの問題点についても考察した。

## §2. 研究手法

本研究は高知県と徳島県の6基の地震津波碑を対象に行った(表1)。高知県と徳島県の地震津波碑は、過去の調査により詳細な情報がまとめられている[羽鳥(1978), 木村・他(2002), 岡村(2003), 徳島県教育委員会編(2017), 田畑・他(2020)]. また、両県の地震津波碑の拓本の原本とデジタルデータは高知県立歴史民俗資料館に保管されている[木村・他(2002)]. 6基の石碑の多くは1854年安政南海地震に関する碑である。石碑は砂岩、花崗岩、もしくは安山岩から制作されており、転石と考えられる天然の巨礫の形状をほぼ保持して制作されたものと(自然石)、切出し・研磨等により角柱型もしくは平板型に加工成型されたものがある。本研究で取り扱う石碑のうち一番古い石碑は今から160年程前に建てられた徳島県松茂町の中喜来春日神社敬湊碑である。

石碑の DSM, オルソモザイク, および 3D テクスチャはデジタルカメラで撮影した画像データを使用して

表1. 研究対象の高知県と徳島県の地震津波碑の基本情報. 撮影枚数と精度は 3D モデルに関する情報.

Table 1. Basic data of earthquake-tsunami monuments on Kochi and Tokushima prefectures in this study.

石碑銘	場所	地震	岩石	形状	高さ(m)	制作日	撮影枚数	分解能 (mm/pix)
やすかんのんやまじしんつなみひ 夜須観音山地震災津波碑	高知県香南市夜須町	1854年安政南海地震	砂岩	自然石	1.6	不明	455	0.157/1.868
かみおかはちまんぐうじしんつなみひ 上岡八幡宮地震津波碑	高知県香南市	1854年安政南海地震	砂岩	角柱	1.725	明治十五年(1882年)8月	132	0.137/2.638
みまとにいだじんじしんつなみたまがきひ 三里仁井田神社地震津波玉垣碑	高知県高知市	1854年安政南海地震	砂岩	角柱	0.62	安政四年(1857年)2月	327	0.381/2.809
ともうらかいしろうまひ 頼浦海嘯記碑	徳島県海部郡海陽町	1854年安政南海地震	砂岩	平板	1.68	昭和二年(1927)5月1日	446	0.617/5.768
むぎちろう 牟岐町における南海震災史碑	徳島県海部郡牟岐町	1946年昭和南海地震	花崗岩	平板	1.0	平成八年(1996)12月21日	157	0.251/0.764
なかからいやすがじんじしんつなみ 中喜来春日神社敬諭碑	徳島県板野郡松茂町	1854年安政南海地震	安山岩	平板	1.49	安政三年(1856)1月1日	271	7.447/47.286

3D モデル作成ソフトウェア(Agisoft 社製 Metashape)で構築した. カメラは市販のデジタルカメラ(RICHO 社製 GR, もしくは Olympus 社製 TG5)を使用した. 石碑の文字が彫られている面に対しては数十 cm~1 m ほどの一定の距離を保ち, 面に対してなるべく傾斜しない角度から撮影を行った. 撮影条件は絞り優先モードで画素数最大(TG5 の場合, 4000×3000 px=1200 万画素数)に設定し, Raw 形式で保存した. 石碑付近の地面にステンレス製の曲尺(50 cm×20 cm, もしくは 30 cm×15 cm)を置いて, 3D テクスチャ作成時のスケールとした. Raw データを TIFF 形式に変換した画像をもとにソフトウェアにより高密度三次元点群データを構築し, 点群データから DSM を作成した. さらに, 三次元点群データから三次元メッシュを作成し, テクスチャ画像の生成および, オルソモザイクの作成を行った.

作成した DSM は, 地理情報システムである ArcGIS (ESRI 社製)およびその追加機能 Spatial Analyst を使用して文字面の解析を行った. これは本来 3D 地表解析ソフトウェアであるが, 石碑の文字面の微細な凹凸を地形標高に見立てて, 文字面を三次元的に解析した. 文字面の解析は, 次の手順で行った. DSM を対象として, 3 ピクセル移動平均を求め, 陰影起伏図, 曲率図, および傾斜量を求め, 異なる色調で彩色し, これらを透過させて重ねる(オーバーレイ)ことにより石碑のデジタル複写を試みた. 各図の透過量は 50%とした(図1).

### §3.結果

図 1 から図 6 にデジタル複写の結果を示す. 高知県高知市の仁井田神社玉垣碑には二つの玉垣の計三面に碑文が刻まれているが, そのうちの一面に書かれている碑文の結果を紹介する(図1a). 碑には「大地震まもなく大潮 入向々潮くるい候時ハ ゆたんすへからす」と彫られている. 文字は 4~5 cm 程度と比較的大きいため(図 1h), 肉眼でも十分判読できる. 文字が彫られている面は非常に平坦で, 彫られて

いる文字の奥行きは約 2 mm, 文字以外の面の奥行き方向の較差は最大 2 mm 程度であった(図 1e). 陰影図(図 1c)は文字を判別できたが, 同じ文字の中で強い濃淡のコントラストが生じたため読みづらい印象である(例えば「大」の字が濃い黒色と薄い白色で表現されている). 曲率図(図 1d)は文字内の濃淡のコントラストは出なかったが, 文字が彫られていない部分に斑点模様が現れ, 文字を読みづらくしていた. 傾斜量図(図 1e)では文字が縁取り文字のように表現され, 曲率図の斑点模様は現れなくなった. ただし, 縁取りの程度にムラが出ていた. 陰影図と曲率図を重ね合わせたモデル(図 1f, 以下モデル A とする), およびそのモデルに傾斜量図を重ね合わせたモデル(図 1g, 以下モデル B とする)のいずれも重ね合わせをしないモデルと比較して文字がより明瞭に判別できた. モデル B はモデル A と比較して文字が太く, 石拓(図 1b)の質感をより再現している. モデル A は文字が細いものの, モデル B よりも文字が読みやすい印象である.

高知県香南市の上岡八幡宮地震津波碑(図 2a)については, 裏面に書かれている碑文についてデジタル複写の比較を実施した. この碑も仁井田神社玉垣碑と同様に文字が大きく彫られて, 文字が彫られている面が平坦に加工されているため肉眼でも文字の判読が可能であった. 上から約 1 m の高さで割れ目が発達していて, 割れ目から上部の面は下部に対してやや傾いていた(図 2h). 曲率図(図 2d)は文字が彫られていない部分に斑点模様が現れたが, 文字と比較して淡く表現されている. 傾斜量図(図 2e)は文字の縁取りが仁井田神社玉垣碑と比較してやや太くなった. デジタル複写モデル A とモデル B とともにすべての文字を明瞭に判別することができた(図 2f, 2g). また, 割れ目のテクスチャも忠実に再現され, 面の傾斜変化がもたらす文字判読への影響は認められなかった.

高知県香南市の夜須観音山碑は安政地震の記録が前面に刻まれている(図 3a). 自然石から製作され

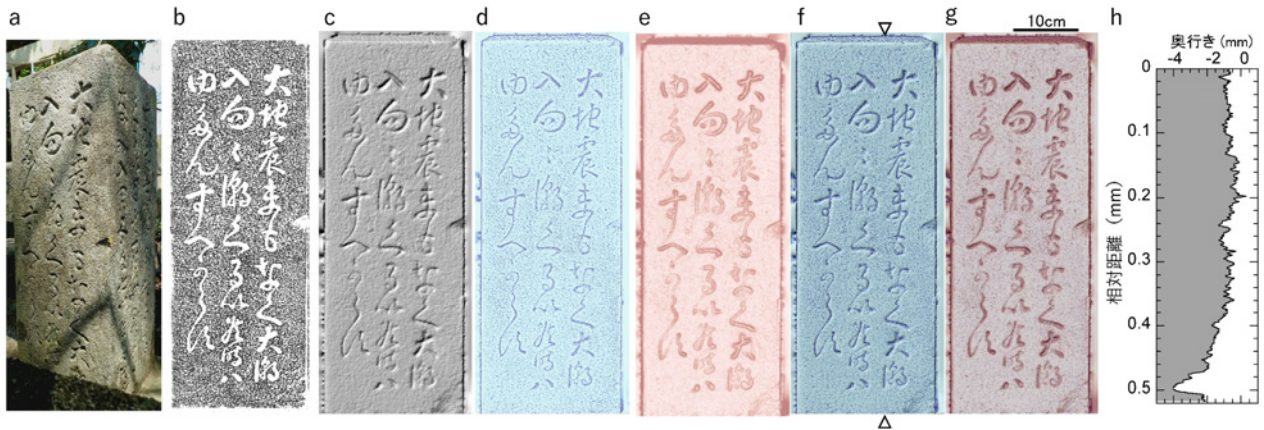


図 1. 高知県高知市の仁井田神社玉垣碑: a. 写真 b. 石拓(高知県立歴史民俗資料館所蔵) c.陰影図 d. 曲率図(透過率 50%) e. 傾斜量図(透過率 50%) f. 陰影図と曲率図の合成 g. 陰影図と曲率図と傾斜量図の合成 h. 高度断面図(▽-△間, 図 1f)

Fig. 1 The stone fence surrounding the Niida shrine at Kochi City, Kochi Prefecture: a. photo, b. rubbed copy (owned by Kochi Prefectural Museum of History), c. hill shaded map, d. surface curvature map (50 % opacity), e. slope map (50 % opacity), f. composite hill shaded and surface curvature map, g. composite hill shaded, surface curvature, and slope map, and h. elevation profile from ∇ to Δ in Fig. 1f.

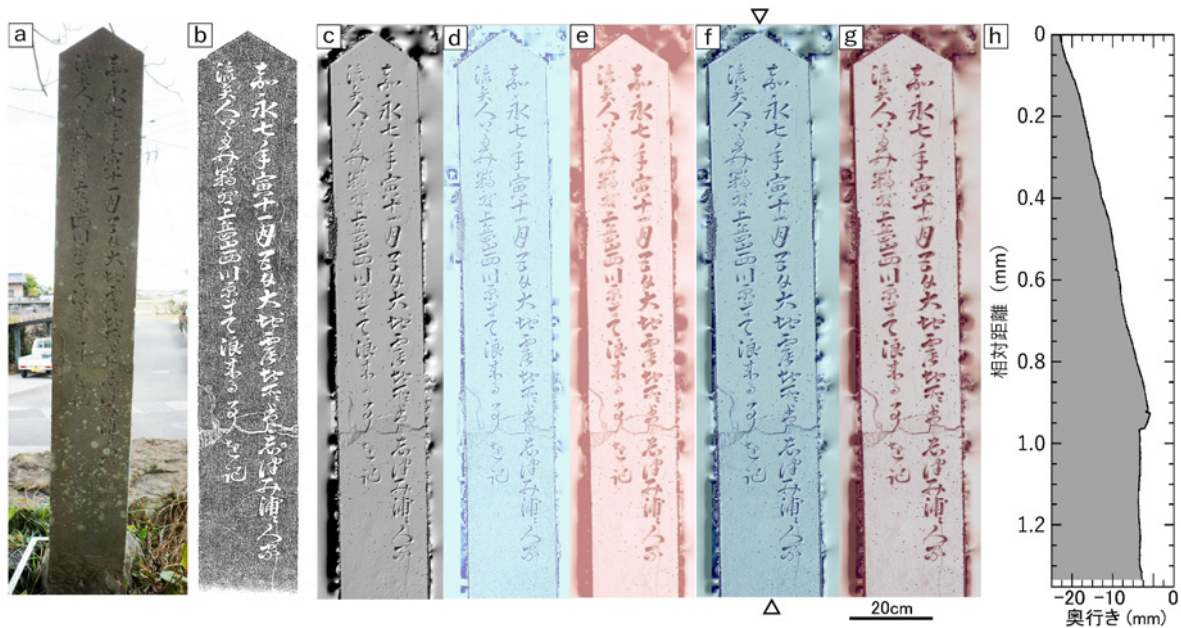


図 2. 高知県香南市の上岡八幡宮地震津波碑: a. 写真 b. 石拓(高知県立歴史民俗資料館所蔵) c.陰影図 d. 曲率図(透過率 50%) e. 傾斜量図(透過率 50%) f. 陰影図と曲率図の合成 g. 陰影図と曲率図と傾斜量図の合成 h. 高度断面図(▽-△間, 図 2f)

Fig. 2 The earthquake-tsunami monument of Kamioka-Hachiman-Gu shrine at Konan City, Kochi Prefecture: a. photo, b. rubbed copy (owned by Kochi Prefectural Museum of History), c. c. hill shaded map, d. surface curvature map (50 % opacity), e. slope map (50 % opacity), f. composite hill shaded and surface curvature map, g. composite hill shaded, surface curvature, and slope map, and h. elevation profile from ∇ to Δ in Fig. 2f.

ているため、文字が彫り込まれている面の凹凸が大きく、面の奥行き方向の較差は 50 mm 以上あった(図 3g)。また、生物風化による白色化が肉眼観察の妨げになっていた。デジタル複写モデル A とモデル B と

に前面の文字一つ一つ判別することができた(図 3c, 3d)。また、モデル B は、自然石の凹凸感がより顕著に表現された(図 3d)。

徳島県牟岐町の中喜来春日神社敬湊碑(図 4a)は

平板に規則正しく漢字が彫られている。文字の大きさは 25 mm 四方で、他の石碑と比較して非常に小さいが、肉眼でも文字の判読は可能である。小さい文字にもかかわらず、モデル A とモデル B ともに一つ一つの文字の判別ができた。

徳島県海陽町の鞆浦海嘯記碑は苔の付着と生物風化による白色化が進行しており、特に日陰になると、肉眼では非常に文字の判読が困難になる(図 5a)。しかし、モデル A とモデル B により、文字の判別が容易になった(図 5c, 5d)。

徳島県牟岐町の南海震災史碑(図 6a)は平成になって建てられた石碑である。面が鏡面のように磨かれ、文字も大きく(約 4 cm 四方)深く彫られているため、肉眼では文字が容易に読み取れた。一方、いずれのデジタル複写モデルも文字を明瞭化することはできなかった(図 6b, 6c)。オルソモザイクはきれいに構築することができた(図 6d)。

## § 4. 考察

### 4.1 SfM デジタル複写の特徴

本研究で解析した地震津波碑は近年になって建立された徳島県牟岐町の南海震災史碑を除くと、SfM によるデジタル複写化により文字の判別がしやすくなった。石碑の面の凹凸が激しい場合でも問題なく文字の判別可能なモデルを作成できた(図 3)。特に、陰影図に曲率図と傾斜図を重ねて透過処理を行ったデジタル複写は可読性が大きく向上した。陰影図単独のモデルでも可読性は高まったが、地形の見え方と同様、光源の位置により文字の見え方が異なるという短所があった[戸田(2014)]。そのため、文字が細く表現され、かつ文字全体が強調される曲率図と、文字が縁取られて強調される傾斜量図を重ねることにより陰影図の欠点を補うことができた。一方、DSM データの一般的な表現方法の一つに高度段彩図がある。そこで仁井田神社玉垣碑と上岡八幡宮地震津

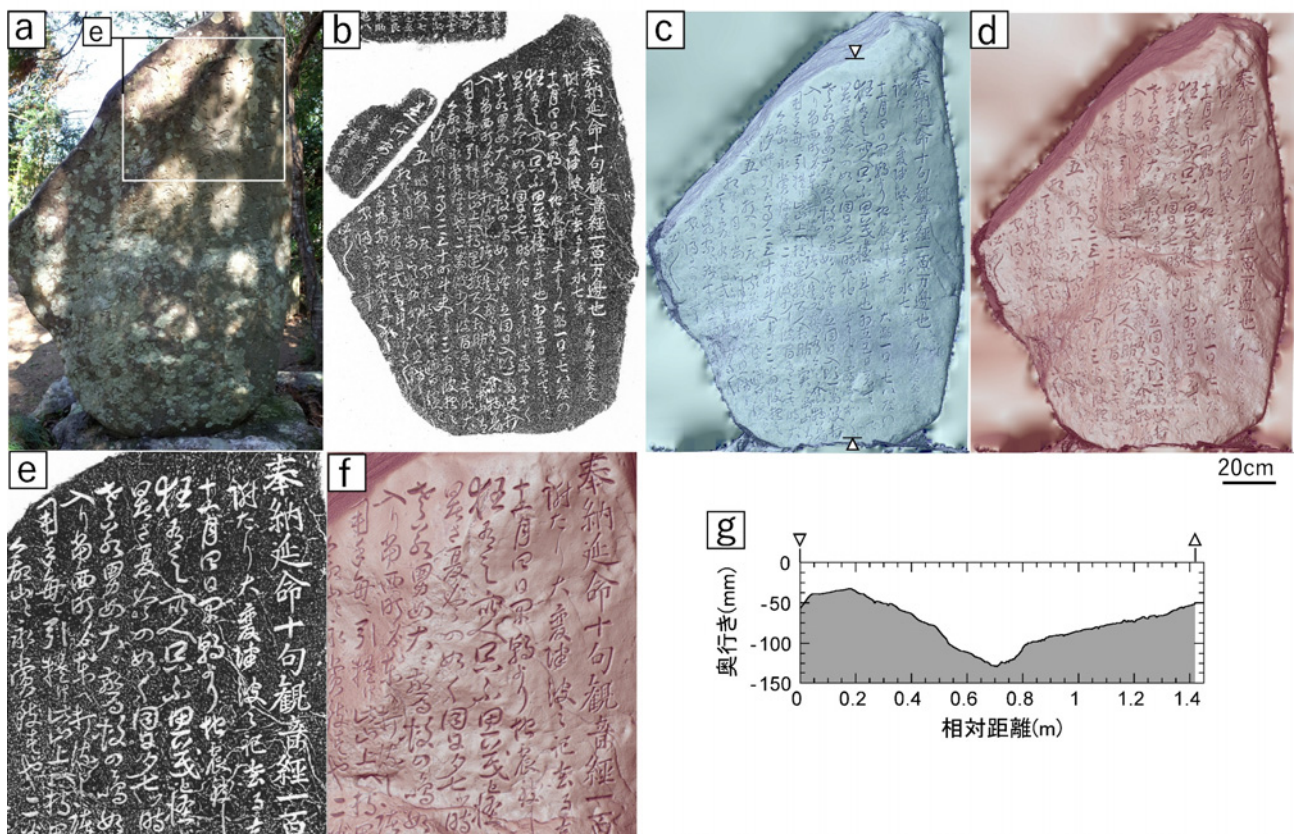


図 3. 高知県香南市の夜須観音山地震津波碑: a. 写真 b. 石拓(高知県立歴史民俗資料館所蔵) c. 陰影図と曲率図の合成 d. 陰影図と曲率図と傾斜量図の合成 e. b の拡大図 f. d の拡大図 g. 高度断面図(▽-△間, 図 3c)

Fig. 3 The earthquake-tsunami monument of Yasu-Kannon-Yama mountain at Konan City, Kochi Prefecture: a. photo, b. rubbed copy (owned by Kochi Prefectural Museum of History), c. composite hill shaded and surface curvature map, d. composite hill shaded, surface curvature, and slope map, e. close-up picture of b, f. close-up picture of d, and g. elevation profile from ▽ to △ in Fig. 3c.

波碑に対して適用を試みた(図 7). 仁井田神社玉垣碑は文字の輪郭はぼやけるが一つ一つの文字は判別できた(図 7a). 一方, 上岡八幡宮地震津波碑は半分以上の文字が認識できなかつた(図 7b). この可読性の違いは碑文面の平面度の違いが影響しており, 平面度が悪い自然石から製作した石碑や時代の古い石碑については高度段彩図を適用できないことをうかがわせる.

石拓では, 文字のない背景部分において白黒のまだら模様が現れるために文字が見づらくなる傾向がある. 一方, デジタル複写ではまだら模様が低減されるため, 一部の石碑では石拓よりも文字が判別しやすくなった(例えば図 2 や図 3). SfM によるデジタル複写の作成は, 対象物に直接触れることなく拓本と同等の文字の記録が行えるため, 対象物を汚損する

リスクが無い. さらに, 特別な道具や技術を要することなく, デジタルカメラが一台あれば, 誰でも簡単かつ直感的にデータを取得することができる. そのため, 一般の調査者でも, デジタル複写をデータの取得が可能であり, 今後, 一般の方々も含めたデジタルデータ保存に向けた取り組みが普及することが期待される. 注意すべきこととして, 円柱型の石材や複雑な形状をした自然石(本稿で扱っていないが, 前者は高知県土佐市の萩谷名号碑, 後者は高知県香南市の岸本飛鳥神社懲愆などがある)に彫られた碑文は 1 枚の近似平面のみでは表現することができない. そのため, 複数の平面に分割投影するか, 三次元モデルとして扱う必要がある. ただし, 三次元モデルを表示閲覧するためには CloudCompare などの点群解析ソフトが必要となる.

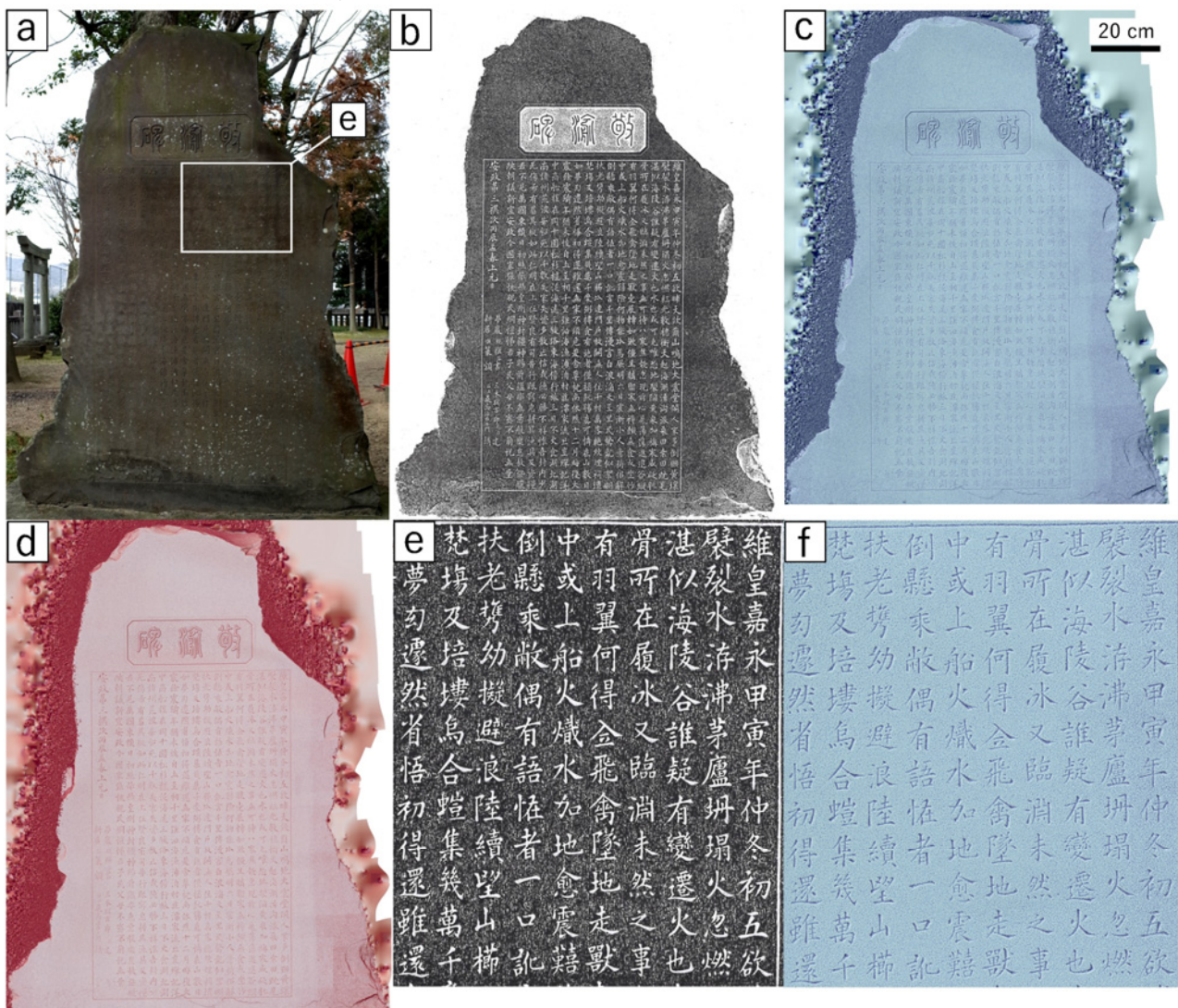


図 4. 徳島県松茂町の中喜来春日神社敬湔碑: a. 写真 b. 石拓(高知県立歴史民俗資料館所蔵) c. 陰影図と曲率図の合成 d. 陰影図と曲率図と傾斜量図の合成 e. b の拡大図 f. c の拡大図

Fig. 4 The earthquake-tsunami monument of Nakakirai-Kasuga Shrine at Matsushige town, Tokushima Prefecture: a. photo, b. rubbed copy (owned by Kochi Prefectural Museum of History), c. composite hill shaded and surface curvature map, d. composite hill shaded, surface curvature, and slope map, e. close-up picture of b, and f. close-up picture of d.

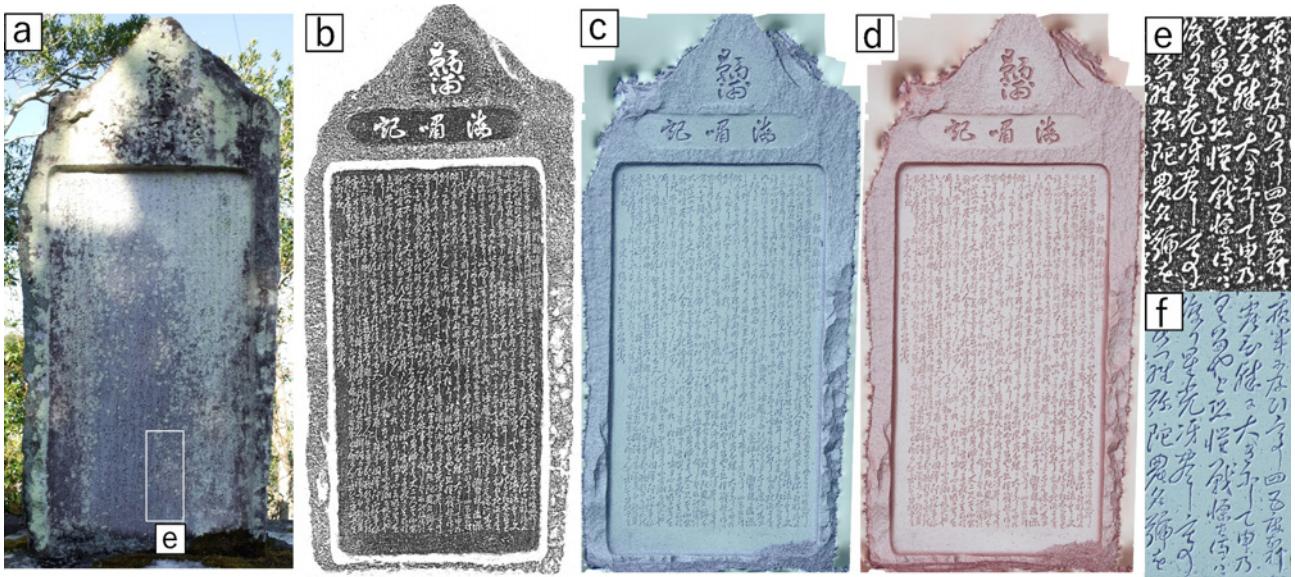


図 5. 徳島県海陽町の輛浦海嘯記碑: a. 写真 b. 石拓(高知県立歴史民俗資料館所蔵) c. 陰影図と曲率図の合成 d. 陰影図と曲率図と傾斜量図の合成 e. bの拡大図 f. cの拡大図

Fig. 5 The earthquake-tsunami monument of Tomoura Kaisho-Ki (Tsunami record) at Kaiyo town, Tokushima Prefecture: a. photo, b. rubbed copy (owned by Kochi Prefectural Museum of History), c. composite hill shaded and surface curvature map, d. composite hill shaded, surface curvature, and slope map, e. close-up picture of b, and f. close-up picture of d.

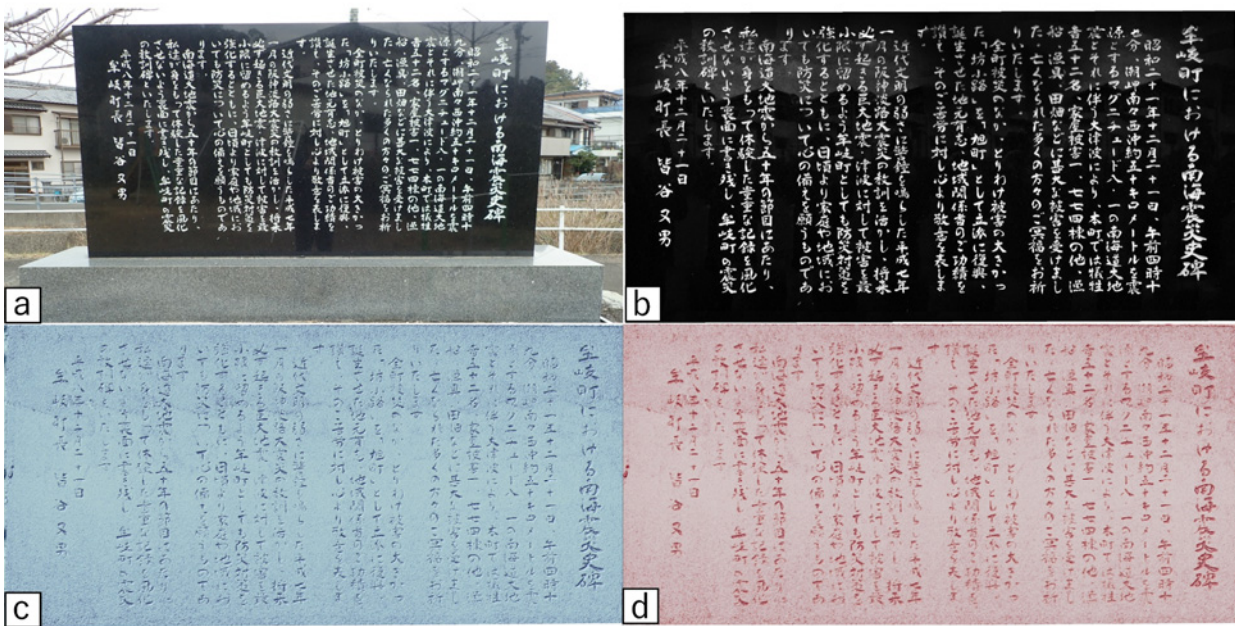


図 6. 徳島県牟岐町の南海震災史碑: a. 写真 b. オルソモザイク c. 陰影図と曲率図の合成 d. 陰影図と曲率図と傾斜量図の合成

Fig. 6 The monument of Nankai earthquake history at Mugi town, Tokushima Prefecture: a. picture taken by a digital camera, b. orthomosaic, c. composite hill shaded and surface curvature map, and d. composite hill shaded, surface curvature, and slope map.

石拓の作業と比較した場合のデジタル複製の短所としては、現場でイメージ画像を取得後、データ処理後にDSMの構築までに時間を要するため、取得した画像の善し悪しを即座に確認することができない点が挙げられる。そのため、撮影部分の欠損や低品質

の撮影画像によって、モデルの作成に失敗した場合、再度現場へ出向いて、撮影をしなければならない。

デジタル技術を用いた文字判読の別の方法として、3Dスキャナーを活用した方法[河村・他(2018)],『ひかり拓本』[上梶(2019), 上梶・他(2019)],もしくは

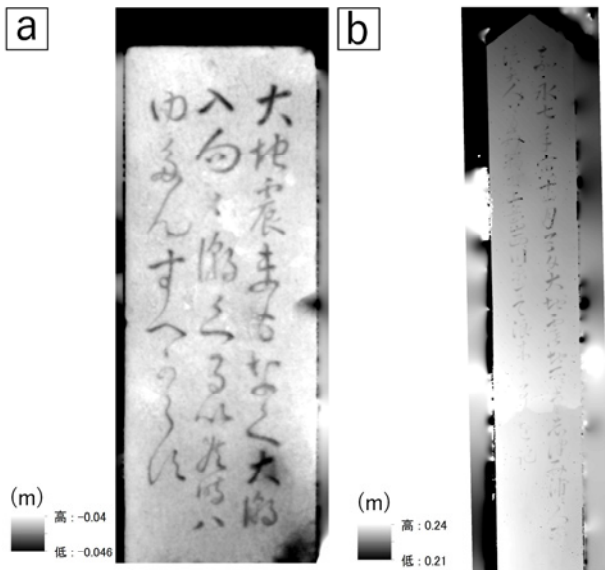


図7.高度段彩図: a. 仁井田神社玉垣碑 b. 上岡八幡宮地震津波碑  
 Fig.7 Elevation map: a. The stone fence surrounding the Niida shrine, and b. The earthquake-tsunami monument of Kamioka-Hachiman-Gu shrine

Reflectance Transformation Imaging (RTI) [Earl et al. (2011)]などの方法が提案されている。これらの方法では、現場で3Dデータを確認できるため上記問題を解決できる。3D スキャナーと『ひかり拓本』は取得したデータの善し悪し、もしくは欠損を現場で確認できるため上記問題を解決できる。ただし、SfM-DSMと比較した場合の文字の判読精度については不明である。また、本研究では可読性の評価は主観的に行っているため、今後は可読性の客観的評価を異なる手法との比較も含め検討したい。

#### 4.2 SfM の技術的課題

本研究で紹介したデジタル複製の結果の一部については、文字がかすれやたりつぶれたりして文字の判読が出来なかったため、SfM に使用する画像の黒つぶれ、白飛びの領域を、Adobe 社製 Photoshop Camera Raw を使用してシャドウ(暗部)およびハイライト(明部)を調整し、新たに SfM 処理を行ったものである。デジタル複製に失敗した要因としては、極端な明部・暗部の存在に加えて、3D モデル作成用に撮影した文字面以外の画像や手ぶれのある画像を使用していたこと、もしくは彫りの深さ(Z 方向)に対する画像の分解能不足が考えられる。そのため、文字が彫られている面の画像のみを使用すること、そして高分解能カメラの使用などにより撮影時の分解能を高めることでデジタル複製の改善が期待できる。

また、牟岐町における南海震災史碑は画像の再調

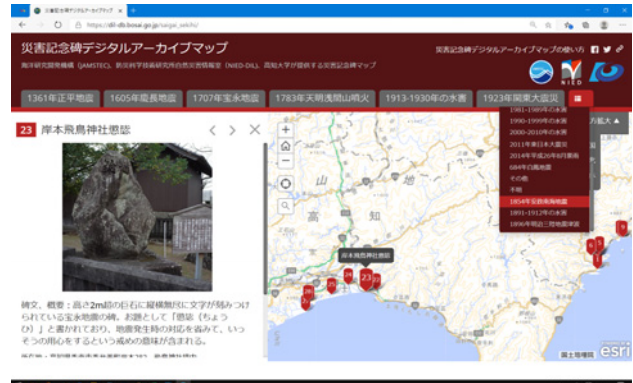


図 8. 災害記念碑デジタルアーカイブマップ  
 (https://dil-db.bosai.go.jp/saigai\_sekihi/) Fig.8 Digital archive map for disaster monument.

整を実施しても、文字の判読ができるモデルを構築できなかった。これは鏡面仕上げによる石碑表面の光沢により、光沢面に画像特徴点が得にくいこと、および、光沢面に映り込んだ背景が画像特徴点のロバスト性を低下させたことが原因として考えられる[内山(2019)]。外光の映り込みを低減する方法として、対象物に直接日光が当たらないように日よけを設置して撮影する、偏光レンズを用いて映り込みを低減させる方法などが考えられるが、今後の課題とする。近年製作された石碑は文字の判読が容易なものが多いため、デジタル複製化しなくても写真やオルソモザイクで十分代用できる。しかし、そのような新しい石碑についても三次元情報のデジタル記録は後世のために必要である。

#### 4.3 3D モデルとデジタル複製の活用方法

本研究では石碑に彫られた文字の明瞭化を中心に検討を進めてきた。一方、SfM を使用して 3D モデルも構築できる。点群データやテクスチャ化した 3D モデルは CloudCompare, Acrobat Reader (PDF データ), 3D モデルビューアーのサイトである Sketchfab (https://sketchfab.com/) などを利用することにより、高解像度の 3D モデルを観察することができる。現在、筆者らは製作した 3D モデル(obj ファイル)を Sketchfab にアップロードして誰でも自由に閲覧できるようにしており(https://sketchfab.com/tanikawa\_wataru), 本研究で紹介した 6 基の石碑についても閲覧できる。Sketchfab には 3Dmesh データの凹凸を強調表現できる Matcab 化の機能があるため、文字の判読にも活用できる。ただし、Matcab は陰影図と類似した出力方法のため、対象物の光源の当たり方によって、文字の読みやすさが大きく変化する。また、文字を明瞭に浮かび上がらせるためには細かく mesh 化する必要があるため、データ量が膨大となる点は注意しなければならない。そのため、デジタル複製や Sketchfab に備わっている注釈機能を文字判読の補





図 9. 3D プリンターで作成した地震津波碑の小型模型

Fig.9 3D-printed miniatures of earthquake-tsunami monuments.

助資料として活用するのが望ましい。

3D モデルは災害情報と地図情報をリンクさせることにより、過去に発生した地震災害および将来発生しうる災害を知る手段として活用が期待できる。そこで現在、防災科学技術研究所では海洋研究開発機構と協力して、全国各地の自然災害碑(地震津波碑を含む)を発生した自然災害ごとに分類し、石碑の位置情報を地図上にマークしたウェブサイトを作成している(図 8, 災害記念碑デジタルアーカイブマップ: [https://dil-db.bosai.go.jp/saigai\\_sekihi/](https://dil-db.bosai.go.jp/saigai_sekihi/))。なお、このサイトで紹介している一部の地震津波碑については、3D デジタルモデルをアーカイブしたサイト(地震津波碑デジタルアーカイブ: <http://www.jamstec.go.jp/res/ress/tanikawa/>)とリンクしている。地震津波碑デジタルアーカイブを活用すれば石碑が設置されている現場に赴くことが困難な状況でも、精巧に作られた 3D モデルをモニターや VR を通して疑似的な鑑賞が可能となる。地震津波碑デジタルアーカイブを拡張し、ウェブサイトの一つの博物館として位置づけた「デジタル災害碑ミュージアム(仮)」を設置し、全国各地の災害碑を鑑賞する仮想空間を開設することで 3D データのさらなる活用が期待できる。すでに国内外のいくつかの博物館・美術館では、保管しているコレクションの 3D コンテンツを鑑賞できるサイト(たとえばスミソニアン博物館: <https://3d.si.edu/>)を無料で公開している。

作成した 3D モデルは STL ファイルなどに変換することにより市販の 3D プリンターで小型模型を製作することができる。現在の 3D プリント技術では、細かい文字の凹凸まで再現することは難しい。一方、石膏を材料として 3D カラー印刷をすれば、小型模型に色を付けて彫られている文字や岩石のテクスチャを表現するため、より本物感を味わえる(図 9)。博物館や学

校教材のレプリカとして、様々な応用的な活用が考えられ、今後の展開が期待される。

## § 5. おわりに

本研究では地震津波碑を対象に、デジタルカメラで撮影した画像をもとに SfM 技術により作成した DSM を用いて「デジタル複写」の可能性を評価した。地図で利用されている表現方法をもとに検討した結果、陰影図と曲率図を組み合わせると石碑に刻まれる文字がより鮮明になり、碑文を容易に判読できる画像が得られた。さらに、この画像に傾斜図を重ね合わせると拓本と同じ質感が得られた。一方、近年になって設置された一部の地震津波碑は、表面の光沢によって外光の映り込みや反射が起こり、SfM によるモデル構築は困難であったため、こうした石碑に対応可能なデジタル化技術の利用は今後の課題となる。以上から、碑文全体を解読するにあたっては、いくつかの地図表現方法によるデジタル複写を作成し、それぞれ文字が判読しやすい部分を相補することになる。本研究で検討した方法は拓本とともに、記録保存の有力なツールとして期待できる。

## 謝辞

地震津波碑のデータ取得について高知県と徳島県の各市町村区役場などの自治体、寺社の許可指導のもとに行った。高知大学橋本善孝教授、山本裕二教授、原忠教授には 3D モデル作成のためのハードウェアとソフトウェアのサポートをいただいた。長田晴恵氏には 3D モデル作成作業の補助をいただいた。本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業(科研費番号 15K12487)の補助を受けて実施した。高知県立歴史民俗資料館から貴重な所蔵資料の借用許可をいただいた。

対象地震: 1854 年安政南海地震, 1946 年昭和南海地震

## 文献

- 秋本悠喜・桜井慎一, 2015, 教訓を後世に伝承する津波碑の保存整備に関する研究, 沿岸域学会誌, **28**, 29-40.
- Earl, G., P. Basford, A. Bischoff, A. Bowman, C. Crowther, J. Dahl, M. Hodgson, K. Martinez, L. Isaksen, H. Pagi, K. Piquette, and E. Kotoula, 2011, Reflectance transformation imaging systems for ancient documentary artefacts. Bowen, J., S. Dunn, and K. Ng (eds.), In EVA

- London 2011: Electronic Visualisation and the Arts. BCS, 147-154.
- 羽鳥徳太郎, 1978, 高知・徳島における慶長・宝永・安政南海道津波の記念碑--1946年南海道津波の挙動との比較, 東京大学地震研究所彙報, **53**, 423-445.
- 早川裕弑・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎, 2016, SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的应用, 地形, **37**, 321-343.
- 今井健太郎・石橋正信・行谷佑一・蝦名裕一, 2017. 新たな史料に基づく和歌山県沿岸における安政東海・南海地震の津波痕跡調査. 津波工学研究報告, **33**, 121-130.
- 井若和久・上月康則・山中亮一・田邊晋・村上仁士, 2011, 徳島県における地震・津波碑の価値と活用について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), **67**, I\_1261-I\_1265.
- 河村友佳子・日高真吾・園田直子・末森薫・橋本沙知・和高智美・日尾紀暁・余語珠未・山本彩乃・2018, 3D スキャナーを活用した津波碑の文字情報取得についての検証—高知県地震津波碑の事例から, 第 35 回日本文化財科学会要旨集, 328- 329.
- 木村昌三・小松勝記・岡村庄造, 2002, 歴史探訪 南海地震の碑を訪ねて, 毎日新聞高知支局, 159pp.
- 国立民族学博物館, 2017, 津波の記憶を刻む文化遺産 —寺社・石碑データベース—, <http://sekihi.minpaku.ac.jp/>
- 小山耕平・熊原康博・藤本理志, 2017, 広島県内の洪水・土砂災害に関する石碑の特徴と防災上の意義, 地理科学, **72**, 1-18.
- 朽津信明, 2018, 日本における石碑保存の歴史的事例とその考え方, 保存科学, **58**, 55-71.
- 松倉公憲, 2008, 地形変化の科学—風化と侵食—, 朝倉書店, 242pp
- 岡村庄造, 2003, 土佐の地震津浪碑 (上), 土佐史談, **224**, 36-41.
- 佐藤翔輔・新家杏奈・川島秀一・今村文彦, 2018, 東日本大震災の発生前における津波伝承に対する認識の地域間比較・評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), **74**, I\_505-I\_510.
- 鈴木比奈子・谷川亘・内山庄一郎・浦本豪一郎, 2020, 地域の災害経験の共有—災害記念碑デジタルアーカイブマップの公開—, 2020 世界災害語り継ぎフォーラム.
- 杉本卓司・花住陽一・上月康則, 2018, 南海地震津波碑の三次元モデル作成と Sketchfab を活用した公開アーカイブス, 平成 30 年度土木学会四国支部技術研究発表会.
- 田畑佳祐・佐藤翔輔・谷川亘・今村文彦, 2020, 高知県における津波碑の分類体系の試みと建立実態の評価分析. 土木学会論文集 B2(海岸工学), **76**, I\_1261-I\_1266.
- 谷川亘・浦本豪一郎・内山庄一郎・折中新・山品匡史・原忠, 2017, 高知県の地震津波碑の保全に向けたデジタルアーカイブ化計画, 歴史地震, **32**, 127.
- 戸田堅一郎, 2014. 曲率と傾斜による立体図法 (CS 立体図) を用いた地形判読, 森林立地, **56**, 75-79.
- 徳島県教育委員会編, 2017, 南海地震徳島県地震津波碑調査報告書, 徳島県埋蔵文化財調査報告書 第 3 集, 157pp.
- 内山庄一郎, 2019, 新たな観測手法としての SfM 写真測量の活用, 地震ジャーナル, **67**, 58-62.
- 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.
- 上相英之・上相真之・多仁照廣, 2012, 石造遺物銘文取得のためのアーカイビング手法の開発, 人文科学とデータベース, **18**, 59-66.
- 上相英之・多仁照廣・蝦名裕一, 2019, 判読可能な津波碑文画像の取得方法の提案, 歴史地震, **32**, 258.
- 上相英之, 2019, ひかり拓本による石造物画像の資源化, 画像史料解析センター通信, **86**, 12-21.