様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月　 ２ 日現在

機関番号：１１３０１
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2020～2024
課題番号：２０Ｈ０００１９

研究課題名（和文）石材構築文化財の保全のための３次元デジタルアーカイブの標準化の研究

研究課題名（英文）Research on standardization of 3D digital archives for conservation of stone-built cultural properties

研究代表者

藤澤　敦（Fujisawa, Atsushi）

東北大学・学術資源研究公開センター・教授

研究者番号：００２３８５６０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　33,500,000円

研究成果の概要（和文）：自然災害で被害を受けやすい、石材で構築された文化財の保全のためには、３次元データを事前に取得しておくことが重要である。本研究では、石造文化財の多様な特徴に適合した、精度や計測方法を選択する基準を、比較検討して明確にした。特に、写真から３次元化するフォトグラメトリが、撮影方法や照明を工夫することで、ほとんどの場合に適合できることを明らかにした。この方法では、通常使用しているデジタルカメラで作業が可能であり、文化財の３次元計測による保全が、大きく進展することが期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は、文化財の３次元計測に、その対象の特質と精度に応じた、一定の基準を準備するものである。中でも、フォトグラメトリの適合範囲を広げられることを明らかにし、その際に求められる撮影や照明方法の留意点を明確にすることができた。このような基準の明確化は、３次元計測の普及にあたっての基盤となる。本研究の成果を、広く地方自治体の文化財保護担当職員に周知していくことによって、文化財の保全のための３次元計測の活用を推進していくことが可能となった。

研究成果の概要（英文）：For the preservation of cultural properties constructed of stone, which are vulnerable to damage from natural disasters, it is important to obtain 3D data in advance. In this study, we compared and clarified the criteria for selecting accuracy and measurement methods that are compatible with the various characteristics of stone-built cultural properties. In particular, it was clarified that photogrammetry, which converts photographs into 3D data, can be adapted in most cases by devising the method of photography and lighting. This method can be used with a digital camera, which is normally used, and is expected to greatly advance the preservation of cultural properties through 3D measurement.

研究分野：考古学

キーワード：文化財　3次元計測　デジタルアーカイブ　フォトグラメトリ

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１（共通）

１．研究開始当初の背景

2011 年の東日本大震災を始め、その後も日本各地で災害が相次ぎ、文化財が被災する事態が続いている。中でも、古墳石室や城郭石垣などの石材で構築された文化財の被害が目立つ。これらの石造文化財が被災した場合、3 次元計測データがあると、被害状況の把握、被災後の修復・復元の際に、大きな威力を発揮することが知られているが、現実にはあまり進んでいない。遺跡の種類によって必要となる精度や有効な測定方法などが異なり、標準となるべき基準の検討が、いまだ充分とは言えないことが背景にある。

近年、写真から 3 次元情報を作成するフォトグラメトリにおいて、多数のデジタルカメラ画像を解析することで 3 次元化する SfM（Structure from Mortion）－MVS（MultiView-Stereo）法（以下 SfM 法と略）が、パソコン用解析ソフトの普及によって、急速に拡がっている。自治体の文化財担当職員の中には、自ら SfM 法を用いて、文化財の 3 次元化を試みる動きが各地で始まっている。しかし、SfM 法で 3 次元化する際の留意点やノウハウが確立されているとは言えない。しかし逆に言えば、対象となる文化財に応じた測定方法の選定基準を明確化し、SfM 法で対処可能な範囲の見極めを行い、測定にあたっての標準が明確化されれば、文化財の 3 次元計測によるアーカイブ化は、劇的に進展させることが可能である。

２．研究の目的

装飾のある古墳石室などの極めて詳細なデータが必要なものから、城郭石垣のように規模が大きくデータ精度をある程度落とす必要があるものまで、様々な特質を有した石材で構築された文化財を対象に、保全を目的とした 3 次元計測の標準を明確化することが、本研究の目的である。具体的には、3 次元計測方法の選定の基準、比較的簡便な SfM 法での対処可能範囲の見極めとノウハウの確立などを検討する。そのことによって、文化財の保全のための 3 次元計測の標準化へ途を開き、文化財保護のための行政施策へと発展させていくことを目指す。

あわせてＶＲ技術を活用した新たな研究方法を模索するとともに、一般向けの活用方法についての研究を行う。さらに、3 次元計測データによるアーカイブの管理と利用の方法や、態勢を構築していくための課題についても検討する。

このような研究を進めることによって、石材構築文化財の 3 次元計測による保全と活用への取組を、飛躍的に前進させることを意図するものである。

３．研究の方法

本研究では、計測方法の検討を目的として、各年度に数ヶ所の計測を実施した。計測にあたっては、複数の計測方法を併用するなどして、計測方法や使用する機器を比較検討することを目的に、対象遺跡と計測方法を選定した。必要に応じて、計測を専門とする業者に作業を委託した。

計測対象遺跡の選定は、計測方法の検討に合致することを基本とした。それに加えて、近年の自然災害によって被害を受けた遺跡や、今後の保全が懸念される遺跡を優先するとともに、被災した自治体を支援することも目的として、計測対象を選択してきた。なお、岩盤を掘り込んで構築されたものであるが、石材加工の点で共通点の多い横穴墓についても、対象に含めて研究を実施した。各年度の主要な計測箇所と、検討した計測方法は、以下のとおりである。

【2020 年度の計測実施場所】
◆東北大学片平キャンパス正門・小川記念園：手持ちカメラとドローン併用による SfM 法
【2021 年度の計測実施場所】
◆宮城県名取市経の塚古墳石棺：SfM 法とレーザー計測器の比較
◆熊本県人吉市大村横穴群（横穴部分）：SfM 法とハンディ 3D スキャナの比較
◆福島県いわき市中田横穴：光学式非接触ハイエンド 3D スキャナと SfM 法を併用
◆宮城県仙台市仙台城跡千貫橋石垣（1 回目）：SfM 法
【2022 年度の計測実施場所】
◆宮城県仙台市仙台城跡千貫橋石垣（2 回目）：SfM 法で 1 回目データと比較
◆福島県須賀川市前田川大塚古墳横穴式石室（1 回目）：ハンディ 3D スキャナと SfM 法の比較
◆福岡県朝倉市湯の隈古墳横穴式石室：SfM 法で照明方法を改良
◆熊本県人吉市大村横穴群（上部崖部分）：ドローンを用いた SfM 法
【2023 年度の計測実施場所】
◆宮城県仙台市仙台城跡千貫橋石垣（3 回目）：SfM 法で 1･2 回目データと比較
◆福島県須賀川市前田川大塚古墳横穴式石室（2 回目）：SfM 法
◆福岡県うきは市塚堂古墳前方部横穴式石室：SfM 法と小型レーザー計測器を比較
【2024 年度の計測実施場所】
◆宮城県仙台市東北大学植物園内防空壕：ハンディ 3D スキャナ

これらの計測を行うと同時に、各年度に 1～2 回、研究打合せと研究会を開催し、計測方法などについて検討するとともに、得られた計測データを用いたＶＲ技術の活用や、一般向けの活用方法についての検討も行った。また、3 次元計測データを活用するためのサーバーを設置し、デ

ータの管理と利用の方法などについても検討した。

４．研究成果

（1）計測方法ごとの特性と評価

３次元計測には、様々な機器・方法を用いたものがあり、本研究で得られた知見をもとに、計測機器・計測方法ごとの特性と評価を行った。

①光学式非接触ハイエンド 3D スキャナ

本研究は、彩色のある装飾横穴で採用して計測した。白色 LED を光源としており、彩色などへの負荷が極めて少ないと考えられる点が、この方法を採用した理由である。

壁面の工具痕跡の詳細な特徴まで再現可能で、計測精度は高い。ただし色調の再現性については、課題が残る。大きな凹凸が少ない横穴墓では適合性が高いが、形状が複雑な横穴式石室などでは、隙間無く計測することが難しい場合や、計測に要する時間が長くなる課題がある。

機器が高額で、所有している専門業者に計測を委託する必要があり、経費がかさむ。高い精度で計測するためデータ容量が膨大となり、データ取得後の加工などの作業も、かなり強力な PC が必要となる。そのため、データ加工も専門業者に委託する必要が生じることから、この点でも経費が必要となる。重要な遺跡で、特に詳細な情報が必要となる場合には、有効な方法である。

②レーザー3 次元計測

色情報を同時に取得するレーザー3 次元計測器は、小型化して普及が進み、計測時間も短縮されている。レーザー光は、通常の光線よりはエネルギーが強いことから、計測対象への影響は厳密に評価することが必要である。彩色などがない場合には、有効な方法である。石の組み合う隙間など、陰になる部分は計測できないことは、他の方法にも共通する課題である。

近年、きわめて小型化されたレーザー計測機器が開発されており、計測時間もかなり短縮されている。機器が小型であり操作性が良いことも相まって、機器の設置位置を細かく移動させながら計測することも可能であり、文化財の３次元計測で活用できる可能性がある。

③ハンディ 3D スキャナ

ハンディタイプの 3D スキャナは、使用する光線の種類や、計測の方法で様々な仕様の機器が開発され、実用に給されている。一概に評価することは難しいが、機器によっては屋外作業での操作性に課題があるものもあり、機器の特性に応じて評価し活用することが重要である。計測レンジが広く迅速な作業が可能な機器では、さほど高い精度が求められず、危険性があるため迅速に計測をする必要がある場合などには有効性が高い。近現代の地下壕や防空壕などでは、きわめて有効である。機器の違いに関わらない共通の課題としては、石の組み合う隙間など、陰になる部分の計測が難しい点である。

ハンディ 3D スキャナ での
東北大学植物園内防空壕の計測状況

モバイル機器に搭載されている LiDER 機能を使った３D 計測は、高精度のデータを得ることは難しいが、メモ的な使用や緊急時での利用を想定した場合、非常に有効であると判断できた。

④デジタル写真による SfM 法

本科研費での研究を開始した際には、SfM 法と他の計測方法との、適合範囲を見極めることを目標とした。実際に計測を実施しながら検討を進めてきた結果、撮影方法を工夫することで、SfM 法での計測精度をあげることは可能であり、ほとんどの対象物に対して、対処できることが明らかとなった。特に、本研究が対象とした、石材で構築された文化財では、SfM 法が特に有効な方法であることを確認できた。

石材で構築された文化財では、自然石や粗く割られた程度の石材が使用されている場合、石材同士の接合部分が、表面より奥に深くなることが多い。石材の形状を正確に把握するためには、石同士が接する場所を、深い所まで計測することが求められる。ところが、石材同士の隙間を深くまで計測することは簡単でなく、特に壁面や床面に近い場所などの隅になる場所では、上記①～③の、いずれの機器を用いても困難である。

３次元計測は、機器から影になる部分は計測できない。影になる部分をできるだけ少なくするためには、計測する機器の位置を細かく移動して、多数の場所から計測を行う以外に方法はない。このような方法は、機器が大きくなるほど、操作性の観点から難しくなる。計測場所が多くなることから、１ヶ所あたりの所要時間も問題となる。SfM 法による計測の場合、デジタル写真を撮影するカメラの位置を細かく移動すれば良く、１ヶ所あたりの所要時間もきわめて短い。隅などの撮影が難しい場所も、小型のカメラを使用すれば、死角となる部分を、ほとんどなくすことも可能である。このような観点から、SfM 法での計測が適している場合が多いことが確認できた。

この場合でも、写真が暗くなると３次元化はできないので、照明方法を工夫することも重要となる。カメラの上と左右の３方向に LED ランプを取り付ける方法をとってきたが、上下と左右の

4 方向に LED ランプを取り付ける方法や、リング形の LED ランプを試行した。ただし、照明機器の増加や大型化は、撮影機材の重量を増加させることにもなるので、ブレの原因ともなるので注意が必要である。

前田川大塚古墳 2023 年度計測状況
（4灯照明によるSfM用写真の撮影）

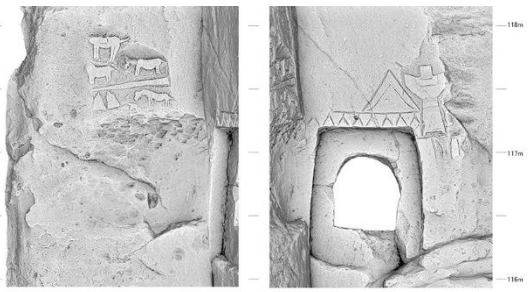
詳細な特徴を再現するために解像度を高くするには、SfM 法に用いる写真を、できるだけ細かく撮影することが必要となる。SfM 法では、写真自体の解像度より、計測の解像度が高くなることはない。カメラの解像度は、撮影距離と画素数によって決まる。本研究では、使用するカメラごとに、撮影距離と解像度の関係を計算で求め、実際の計測成果で検証した。このような計算をもとに、求める解像度を満たすためには、どれくらいの距離より近づいて撮影する必要があるか、おおよその指標を示すことが可能であることを明らかとした。

実際の撮影では、期待した解像度が得られないことがあるが、原因として微妙なブレやピントのズレが考えられる。通常の写真では認識されない、わずかなズレやブレがあると、その分だけ解像度は低くなる。確実にカメラが動かないように、三脚や一脚を用いるなどの対策や、小型軽量のカメラを利用するなどの対策が重要である。

(2)計測データの加工方法

３次元計測で得られたデータを、学術的検討に供する際には、2 次元の図面として提示することが一般的である。そのため、3 次元データから正射投影（オルソ）画像を作成する必要があるが、点群数が多い場合、かなりの手間と時間を要し、PC の能力も高いものが要求される。その際、凹凸を強調する必要が生じるが、そのための加工も簡単ではない。

本研究では、特に詳細なデータが必要なものは専門業者に強調加工を依頼し、有効性を確認したが、経費面での課題がある。近年、仲林篤史（2023）によって、オープンソースの無料ソフトウェアである Blender を用いて、その Workbench レンダリングによって稜線を強調し、正射投影画像としたものを作成する方法が提案されている。この仲林の方法を改良し、凹凸をより簡便に表現する方法で陰影図を作成した。これらの成果を踏まえ、Blender を用いた正射投影画像の作成と、陰影を強調する加工について、操作マニュアルなどを作成していけば、利用は大きく進むことが期待される。



大村横穴群 7 号横穴装飾詳細図

（3）計測データの管理と活用

本科研費ではサーバーを設置し、大容量の 3 次元デジタルアーカイブの構築と運用方法の検討も目標とした。サーバー設置後は、研究参加者内に限定した形ではあるが、サーバーから様々な形式のファイルをダウンロードして配布する方法を試行した。データ容量を落として、簡便に 3 次元画像を閲覧できる方法も試行した。3 次元データは、データ容量が大きくなりがちであり、受け手側の通信環境や PC の能力を考慮していくことが必要である。

保存のため立ち入りが制限される装飾古墳などで、VR(バーチャルリアリティ)技術を活用し、複数人で同時に 3 次元データを検討することができれば、新たな研究の方法が得られる。比較的安価で入手可能な VR ヘッドセットを利用し、VR 体験を実施し有効性を検討した。点群データを利用する方法であるが、陰影の強調などができないため、詳細な凹凸を認識することが難しい。3 次元データをより認識しやすいように加工していく方法や、メタバース技術の応用など、課題が多いことを確認した。

3 次元計測データをもとに、3D モデリング技術を応用した公開活用法については、石膏を利用し色データの再現も可能な 3D プリンターを用いた模型を試作し、有効性を検討した。対象に応じて縮尺を変化させることで、効果的な展示公開などへの活用が期待できる。ただし、石膏を利用した詳細な 3D プリンターでの製作は、経費がかさむという問題がある。より安価な樹脂積層の模型作成も検討したが、再現性という点では課題が残っている。

（4）3 次元計測の一般化への課題

本研究では、石材構築文化財の 3 次元計測について、測定方法について評価し選定基準を明確化した。特に、SfM 法による計測が広く適用可能であり、有効な方法であることを明らかにするとともに、そのためのノウハウを蓄積することができた。このような成果を踏まえるならば、自治体の文化財担当の専門職員をはじめ、自治体の一般職員、文化財に関心を有する一般市民でも、SfM 法を用いた文化財の 3 次元計測が可能である。次の段階として、本研究で得られた知見を、

判りやすい手引きという形にして一般化していくことが可能であり、そのことによって文化財の 3 次元計測によるアーカイブ化は、大きく進展させることが可能である。

<引用文献>
仲林篤史 2023「古代瓦の三次元データを用いたシェーディング処理の検討」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用 5』奈良文化財研究所研究報告 37、75〜90 頁、独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計4件（うち査読付論文　3件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　2件）

１．著者名 藤沢敦・鹿納晴尚・田尻義了・志村将直	４．巻 23
２．論文標題 福岡県湯の隈古墳石室のSfM法による高精細3次元計測	５．発行年 2024年
３．雑誌名 東北大学総合学術博物館紀要	６．最初と最後の頁 53-66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 藤沢敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利亜	４．巻 22
２．論文標題 福島県清戸迫横穴の高精細３次元計測	５．発行年 2023年
３．雑誌名 東北大学総合学術博物館紀要	６．最初と最後の頁 7－38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 鹿納晴尚・藤沢敦	４．巻 20
２．論文標題 小型ドローンを利用したSfM法による屋外構造物の三次元計測	５．発行年 2021年
３．雑誌名 東北大学総合学術博物館紀要	６．最初と最後の頁 67－78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 杉井健	４．巻 747
２．論文標題 災害から文化財を守るために考古学ができること	５．発行年 2021年
３．雑誌名 考古学ジャーナル	６．最初と最後の頁 10－12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計4件（うち招待講演　3件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 田尻義了・中原周一・藤原彰久・池田拓・中山元智・高橋寛宇
２．発表標題 蓋井島における戦争遺跡の３D調査について
３．学会等名 九州考古会
４．発表年 2023年

１．発表者名 藤沢敦
２．発表標題 国史跡清戸迫横穴の３次元計測と活用
３．学会等名 考古学研究会第57回東京例会－東日本の古墳壁画を考える（招待講演）
４．発表年 2022年

１．発表者名 藤沢敦
２．発表標題 横穴墓・横穴室石室の三次元計測－福島県での計測事例を中心に
３．学会等名 福島県考古学会第64回大会（招待講演）
４．発表年 2023年

１．発表者名 藤澤敦・鹿納晴尚
２．発表標題 文化財保全のための三次元計測の活用
３．学会等名 日本文化財科学会第38回大会特別セッション（招待講演）
４．発表年 2021年

〔図書〕　計3件

1．著者名 菊地芳朗・千田優・伊藤冴恵・神山裕理	4．発行年 2024年
2．出版社 福島大学考古学研究室	5．総ページ数 53
3．書名 前田川大塚古墳２・大仏古墳群２	

1．著者名 菊地芳朗・千田優	4．発行年 2023年
2．出版社 福島大学考古学研究室	5．総ページ数 66
3．書名 前田川大塚古墳１・大仏古墳群１	

1．著者名 杉井健	4．発行年 2023年
2．出版社 熊本大学文学部	5．総ページ数 42
3．書名 ドローンによる空撮写真を用いた熊本県球磨郡錦町四ツ塚古墳群の測量調査	

〔産業財産権〕

〔その他〕

石材構築文化財の保全のための3次元デジタルアーカイブの標準化の研究 http://webdb1.museum.tohoku.ac.jp/index.html

6．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	菊地　芳朗 (Kikuchi Yoshio) (10375347)	福島大学・行政政策学類・教授 (11601)	
研究分担者	金田　明大 (Kaneda Akihiro) (20290934)	独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・上席研究員 (84604)	
研究分担者	田尻　義了 (Tajiri Yoshinori) (50457420)	九州大学・比較社会文化研究院・教授 (17102)	
研究分担者	片岡　太郎 (Kataoka Taro) (80610188)	弘前大学・人文社会科学部・准教授 (11101)	
研究分担者	杉井　健 (Sugii Takeshi) (90263178)	熊本大学・大学院人文社会科学研究部（文）・教授 (17401)	

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究協力者	鹿納　晴尚 (Kanou Harumasa) 	東北大学・学術資源研究公開センター・技術職員 (11301)	

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関