

福岡県湯の隈古墳石室の SfM 法による高精細 3次元計測 High-resolution 3-D measurement of stone chamber of Yunokuma Tumulus in Fukuoka Prefecture using SfM method

藤沢 敦*・鹿納 晴尚*・田尻 義了**・志村 将直***

* 東北大学総合学術博物館 ** 九州大学比較社会文化研究院環境変動部門 *** 株式会社シン技術コンサル

Atsushi Fujisawa, Harumasa Kano*, Yoshinori Tajiri** and Masanao Shimura****

The Tohoku University Museum, **Department of Environmental Changes, Faculty of Social and Cultural Studies, Kyusyu University, *SHIN ENGINEERING CONSULTANT CO. LTD.*

Abstract: Yunokuma Tumulus is a round burial mound with a diameter of approximately 20 meters, located in Asakura City, Fukuoka Prefecture, and has a corridor-style stone chamber. Some of the walls of the stone chamber are painted with circles and other patterns in colors. The chamber is made of unworked natural stone piled together, so the surface of the walls is rough and uneven. It is estimated to have been built in the second half of the 6th century, based on the typological characteristics of the stone chamber. In order to obtain high-resolution 3-D measurements of the stone chamber of the Yunokuma Tumulus using the Structure from Motion (SfM) method, we developed a method of photography and illumination. By analyzing 2,187 photographs taken, we were able to create a point cloud data set of about 1 billion points.

1. はじめに

東日本大震災以降、熊本地震や相次ぐ水害では、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続いている。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。しかし、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は、いまだ充分とは言えない。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次元計測の標準を確立することが必要である。

このような観点から、藤沢が研究代表者となり、2020年度から文部科学省科学研究費助成事業（基盤研究（A）・2020-2024年度）「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」を実施してきている¹⁾。この科研費による研究の一環として、2022年度に計測を実施した、福岡県朝倉市に所在する湯の隈古墳の横穴式石室

の計測成果を報告する。当該科研費での研究で、これ以前に計測を行った遺跡もあり順序とは前後するが、報告の準備が整ったものから、順次報告を行うこととしている²⁾。

なお本論は、1. 3. 6. を藤沢、2. を田尻、4. を鹿納・藤沢、5. を志村・鹿納・藤沢が分担して執筆した。

2. 湯の隈古墳について

湯の隈古墳は、朝倉市宮野に所在する直径約20mの円墳である。宮地嶽古墳がある宮地嶽丘陵の丘陵上の南西側に位置し、標高は約60mにある（図1参照）。墳丘は周囲が削られやや歪になっている。石室は複室構造の横穴式石室で、彩色系の装飾古墳である（図2参照）。装飾は肉眼では判別し難いが、写真をデジタル処理すると玄室奥壁には同心円文や蕨手文、玄室右壁にも同心円文、玄門の左袖石には同心円文や船形などが描かれているようである。石室構造から6世紀後半頃の築造と考えられているが、発掘調査を含め詳しい調査は行われておらず、その他の情報は不明である。朝倉市の史跡に指定されている。

なお、この湯の隈古墳に関して以前は名称に混乱が生じ

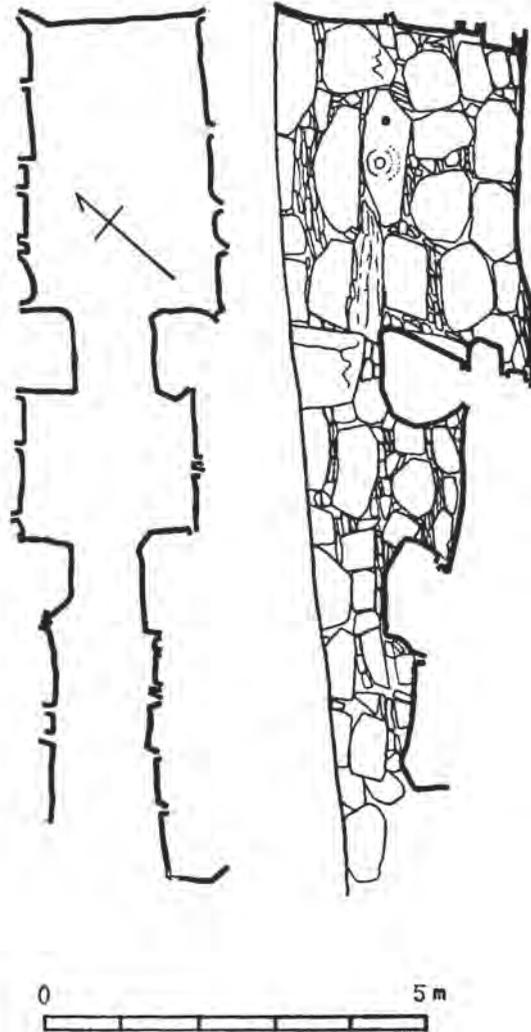


図1 湯の隈古墳位置図（姫野編 2000 より）

ていたが、姫野健太郎編 2000『朝倉の古墳と埴輪』朝倉市文化財調査報告書第9集において整理されている。また、石室の実測図については、小林行雄編 1964『装飾古墳』54頁に、森貞次郎が原図の実測図が公開されている。

3. 調査の目的

本科研費での研究では、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ている。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つつ、近



(小林編1964より)

図2 湯の隈古墳石室実測図

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。

2017年(平成29年)7月5日から6日にかけて福岡県と大分県を中心とする九州北部で発生した平成29年7月九州北部豪雨の際に、朝倉市では市内の各所で被害があり、文化財も多数が被災した。湯の隈古墳は被災しなかったが、開口していることから装飾の風化の進行が憂慮されており、今後の保全を考えるとできるだけ早く3次元計測を実施し、詳細なデータを残しておく必要があると考えられた。

福岡県南部の筑後川流域は、彩色による装飾古墳が集中する地域として著名であるが、左岸側がほとんどで、湯の隈古墳のように右岸側に所在するものは少数である。この点

からも湯の隈古墳は重要と考えられるが、十分な調査が行われていない状態であった。

湯の隈古墳の石室は、自然石を使用したもので、考古学的な検討では、石室の石が組み合う間を、できるだけ深いところまで図化することが望まれる。また、彩色による装飾の色調の再現性も重要である。これらの点について、SfM法の有効性や、解析用の写真の撮影方法を検討することは、本研究の目的に適合すると考えられる。

3次元計測には様々な方法があり、計測対象と必要とされる精度を踏まえ、計測方法を選定することが必要である。例えば横穴墓では、壁面の保存が良好な場合、掘削工具の痕跡などの微細な凹凸を記録することが必要になることから、高精細な3Dスキャナなどを用いることが効果的であ

る。自然石かそれに近い石材を用いた横穴式石室の計測では、石と石が組み合った隙間部分をできるだけ奥まで深く記録することによって、石材の組み方に関する情報を得ることができることから、狭小な隙間の計測ができるだけ可能な手法を選択することが必要となる。

石材が組み合った隙間を計測するためには、計測機器から陰になる部分ができないようにする必要がある。そのためには、計測機器の位置を、細かく移動させて計測することが必要となる。どのような計測方法を利用する場合でも、計測機器を三脚に据え付ける必要がある場合には、移動と計測に必要な時間の関係で、現実的な方法とならない場合が多い。手持ちで計測するハンディスキャナでは、細かく計測位置を移動することが可能である。しかしハンディスキャナでは、機器の方向によっては、細い隙間を計測できない場合がほとんどである。隙間と同じ向きにスキャナを向ける必要があるなど、計測可能な範囲に制約があり、隙

間をくまなく計測することは簡単ではない。

またハンディスキャナでは、機器の計測可能距離がさほど広くない場合が多く、40cm程度が基準の距離となっている場合が一般的である。そのため、天井が高い石室などでは、計測が難しい場合もある。2022年6月に実施した、福島県須賀川市の前田川大塚古墳の横穴式石室の計測では、計測可能レンジが0.5～4mと広い、ハンドヘルド型3Dスキャナ F6 SMART (Mantis Vision・イスラエル) を試した(菊地ほか編 2023)。計測機器から距離がある場合でも計測が可能であったが、機器からの距離が離れると、機器に取り付けた照明の明るさが不足し、色情報が充分得られないなどの課題があった。石が組み合う細い隙間では、隙間と同じ方向に機器を向ける必要があり、床面近くの壁面や、コーナー付近では計測できない部分が生じることは、他のハンディスキャナと同じであった。

これに対して、多数のデジタルカメラ画像を解析して3



1. 湯の隈古墳の現況



2. 評定点の計測作業



3. リングライトによる撮影状況



4. 4灯ライトによる撮影状況

図3 湯の隈古墳の現況と作業状況

次元化する SfM (Structure from Motion) 法であれば、カメラの位置を細かく移動させることで、石の組み合う隙間を、くまなく撮影することができる。手持ちで撮影が可能な条件を整えることができれば、比較的短時間で、細かく位置を移動しながら撮影が可能である。

この場合でも、石の組み合う隙間に照明の影ができてしまうと、その部分は暗くつぶれ、3次元化は難しくなる。細い隙間の深いところまで、照明をまわしていくことが必要である。湯の隈古墳の石室には彩色による装飾があることから、色調をできるだけ正確に記録することも求められる。しかし、石室内という限られたスペースで、均質な照明で撮影することは簡単ではない。照明の機材や方法を工夫することが不可欠となる。

このように、SfM 法での 3 次元計測は、横穴式石室の計測で有効な方法と考えられるが、解析用の写真の撮影方法には検討課題が多い。照明方法や、使用する機材を工夫しつつ、SfM 法の有効性を検討することは、本研究の目的に適合する。以上のような観点から、湯の隈古墳の石室を SfM 法で計測し、上記課題を検討することとした。

4. 調査の方法と経緯

調査に先立つ 2022 年 11 月 24 日に、藤沢と田尻が現地を視察し、朝倉市教育委員会の担当者と、計測作業方法などについて打合せを実施した。上記のように、石室の石が組み合う間を、できるだけ深いところまで図化できることが望ましいこと、装飾の色調の再現性にも留意する必要があることを踏まえ、SfM 法で計測することとし、東北大学で計測用の写真撮影を行うこととした。標定用の基準点測量の方法なども検討し、作業実施への見通しを得た。

計測作業は、2023 年 2 月 6 日と 7 日の 2 日間で行った³⁾ (図 3)。その際、湯の隈古墳での計測作業に併行して、同市入地に所在する狐塚古墳石室の線刻部分についても SfM 法での計測を試みた。また朝倉市での作業が終了した 7 日午後には、うきは市教育委員会の要請を受けて、うきは市吉井町福益に所在する安富古墳石室の一部について、SfM 法での計測を試みた。これらは、SfM 法で線刻などの微細な凹凸をどれだけ再現できるかを検証する目的に行ったものである。湯の隈古墳石室の計測とは、目的がやや異なるため、別途検討し報告する予定である。また今回の計測では、参加した研究分担者の杉井 (熊本大学) によって iPad Pro を使用した 3 次元計測のテストも行った。2020 年以降発売の iPad Pro は、搭載された LiDAR (light detection and ranging) センサーで、簡便に 3 次元計測を実施できる機能が備えられており、同時に取得した画像データを合わせて 3D データを作成できる。同じ機能は iPhone 12 Pro・iPhone 13 Pro にも搭載されている。これらを利用した計測についても、別途検討して報告する予定である。

計測にあたっての標定点の測量と、公共座標に位置づけるための測量用に、石室入り口外側の、石室中軸線上にほぼあたる位置に、木杭に測量釘を打った仮基準点を設置した (点 A)。玄室内には、杭を打つことを避けるため、標尺台を置いて仮基準点とした (point19)。床面の正射投影画像に、標尺台が見える。点 A を原点として、point19 と結んだラインを基準として、局地座標を組んで標定点を計測することとした。点 A と point19 にトータルステーションを設置し、石室内の特徴のある場所 18 ヶ所を標定点として、トータルステーションで測量を行った。トータルステーションは、ノンプリズム測距のものを使用し、レーザーポインターで計測場所を示した状態で、写真や動画を撮影し、標定点の記録とした。

点 A と point19 を結んだラインのほぼ反対側に、以前に使用された測量用のコンクリート釘の測量鉞があり、C4 との記号が付けられていた。公共座標に位置づけるための測量用に、この点 C4 を利用することとし、局地座標での位置をトータルステーションで測量した。これらの測量作業は田尻が担当し、九州大学の測量機材を用いて、同大学大学院生の協力を得て実施した。

仮基準点とした点 A と点 C4 については、後日に公共座標値の測量を委託することとし、地元の測量会社である有限会社グローバルプランに委託した。計測作業中の 7 日に現地で打合せを行い、後日に測量を行っていただいた。周囲に存在する既知点を調査していただき、それを基準にした。基準点の位置や測量成果は、図 4 のとおりである。

トータルステーションでの測量を終えた後に、デジタルカメラを用いて、SfM 法での解析に使用する写真の撮影を行った。上記の目的に合致することを考慮して、以下のような機材、作業方法で、撮影を実施した。

使用したカメラボディは、Canon EOS 6D Mark II で、レンズは EF24mm F2.8 IS USM、F 値は 8、ISO を 2000 で固定し、シャッタースピードを石室内では、1/50 程度になるように照明をつけて撮影した。このような撮影条件で、手持ちで、細かく移動しながら撮影を行った。それによって、石の組み合う隙間も、できるだけ深くまで撮影できるように企図した。

影を作らないように撮影するために、今回はあらたにリングライトの使用を試みた。バッテリーで作動できる、LPL 社製のリングライト (VLR-F300XP) を使用した。リング形ライトでは撮影が難しい場所や、リング形ライトだけでは光量が不足することが懸念される場合には、4 灯ライトを使用した。従来は、鹿納が考案した、カメラの上と左右の 3 方向に、LED ライトを取り付ける方法をとってきた。今回はさらに下にも増設し、上下と左右の 4 方向に LED ライトを取り付けられる器具を、市販の器具を組み合わせで作成した。照明からの距離が変わると、壁面の明るさも変わるので、カメラと壁面との距離を一定に保つように撮影した。



図4 基準点の位置

石室内は、奥に進むと外光の影響はほぼなくなるが、入口付近では外光の影響を受ける。このように環境光の状況が変わるごとに、カラーチャート (x.rite 社 Color Checker CLASSIC) を撮影しておき、補正ができるようにした。

撮影した画像ファイルは jpeg 及び raw(CR2) 形式で保存した。キヤノン社製現像ソフトである Digital Photo Professional 4 を使い、raw ファイルをカラーチャートでホワイトバランスを調整した後、16bit tiff のファイル形式で出力したファイルを 3D 再構成に使用した。3D 再構成に使用したソフトウェアは Agisoft Metashape Professional (Version 2.0.1) で、使用した写真は 2187 枚である。高品質で再構成した点群数はノイズ除去前でおおよそ 10 億点、メッシュ作成用に中品質で再構成した点群数は、おおよそ 2 億点となった。

5. 計測データの加工

東北大学総合学術博物館では、特定のソフトウェアに依存しない形で 3 次元データを保存するために、X・Y・Z の座標値と RGB データによる、色付き点群データとして保存し利用する方法を採用している。一方、考古学的データとして、学術的検討に供する方法は、本報告を含めて、2 次元の図面として調査報告を作成することが一般的である。そのため、3 次元データをもとに、正射投影画像を作成する必要がある。3 次元計測データから正射投影画像を作成する作業は、今回のように点群数が多い場合、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、簡単な作業ではない。計測方法に留まらず、計測データの加工についても、その目的と効果、それに応じて使用するソフト、作業に必要な時間と PC の能力、外部委託する場合の経費など、検討すべき課題は多く存在する。

今回の計測では、局地座標で標定点を測量し、そのまま解析を行い、3 次元化を行った。基準点の公共座標の測量は、これらの作業の後となったため、局地座標による数値を、公共座標の数値に換算する必要がある。この公共座標値への換算と、報告用のオルソ画像作成を、2023 年度事業として、株式会社シン技術コンサルに委託した。以下に、作業の手順を記す。これらの作業は、フリーソフトウェアの Blender を使用して書き出しを行っている。ソフトで操作できる容量の関係もあり、3 次元データのメッシュの頂点数は 1000 万点程度で作成している。

最初に標定点の取得が任意座標であったため、基準となる 2 点の杭を基に回転と移動を行った。

点 A

(任意座標 0,0)

(公共座標 44073.885,-25477.441)

点 C4

(任意座標 -16.557,-3.434)

(公共座標 44064.950,-25491.794)

二つの杭の任意座標の角度 (-101.717 度) と公共座標の角度 (-148.097 度) の差分 (46.380 度) を回転角度とし、点 A を起点に各座標の回転、点 A の公共座標の値分移動を行い、公共座標とした。

標高値については、起点となる点 A・点 C4 以外は、任意座標の点 A の標高値が 0 m であるため、点 A の公共標高値である 66.405 m を各点の任意標高値にプラスして算出している。

報告用に、床面、天井面、両側面、奥壁面、後室見返し、前室奥、前室見返し、入口の計 9 面の正射投影 (オルソ) 画像を作成した⁴⁾。基準となる石室中軸線を設定し、SPA ラインとした。点 A を起点に、SPA が図上の縦軸と平行に、横断するラインである SPB ~ E が横軸と平行になるように 46.146 度回転をかける。床面と天井面は標高 67.117 m のポイントでカットして作成した。

SPA の両側面はセクションラインと片面を合わせた立方体に対して A-A' は交差でカット、A'-A は差分でカットして作成。SPB ~ E も同様に 3 次元モデルをカットし、3 次元モデルのテクスチャ空間の大きさとカメラのサイズを合わせて正射投影でカラー画像と陰影画像の 2 パターンを撮影した。

正射投影画像作成の際に使用するソフトの都合上オブジェクトの原点を (0/0/0) 付近にオフセットを行わなければならないため、オフセットの値は (44,080/-25,470/66) として作業を行った。

本資料のオルソ画像はフリーソフトウェアの Blender を使用して書き出しを行っている。撮影するカメラのサイズとオブジェクトのテクスチャ空間のサイズを一致させることで余白のない正射投影画像を書き出している。また、背景部分を透過に設定することによりオブジェクトが写っていない箇所を透明にしている。

陰影画像も、Blender を用いて書き出している。3 次元データから 2 次元画像とする際に、凹凸を表現する方法は、様々な方法がある。今回は、仲林篤史が遺物を対象に提案した、Blender を用いて陰影を強調する方法を試行した (仲林 2023)。

作成した正射投影画像をアングルごとに Adobe 社の illustrator へ埋め込み配置し、床面、天井面には座標値を、各種展開面は標高値の入力を行った。3 次元画像の場合、裏側からの画像が見えてしまう場合がある。断面をカットした場合、カットされた石材の輪郭の外側に、裏面からの画像が見えることが多く、判りづらくなってしまふ。そのため、カットされた石材の輪郭をトレースし、その外側を白く塗りつぶしたレイヤーを重ねることで、裏面を隠した。

上記のような作業を行って作成した正射投影画像を、図 5 から図 11 に示す。全て縮尺 50 分の 1 にそろえている。いずれも、カラー画像と陰影画像を並べて示した。

6. 計測成果について

湯の隈古墳石室の3次元計測では、SfM法によって、石材の組み合う隙間を、できるだけ深くまで計測することを目的とした。そのために照明を工夫するとともに、彩色による装飾があることから、色調の再現性にも留意する必要があった。これらの目的を果たすために、撮影方法や照明機材を工夫し、計測を実施した。

図示した正射投影図を見ると判るように、石材が組み合う隙間も、ほとんど欠落無く計測ができており、特に暗くなっている部分も、ほとんど見られない。解像度についても、微細な凹凸の再現性については、なお検討の余地があると思われるが、石材の形状については、ほぼ十分なものとなっていると考える。色調を厳密に再現することは容易ではないが、比較的安定して記録できているように思われる。今回の計測の目的は、おおむね達成できたのではないかと考えている。

湯の隈古墳の石室は、複室構造で比較的規模の大きなものであるが、2000枚を超える写真を撮影して、解析を行った。これだけの量の写真を解析するためには、使用するPCの能力が問題となるため、どこの機関でも簡単に実施できるわけではないが古墳の横穴式石室は、SfM法でかなりの高解像度で3次元計測の実施が可能であることを示せたものと考えている。

なお本報告では、色調を調整して彩色を強調する加工は行っていないが、今回報告した正射投影画像でも、加工は可能である。今後、現地で観察しながら、このような検討を行うことで、彩色についても新たな知見が得られる可能性があるものと考えられる。

※本論には、日本学術振興会（JSPS）科研費20H00019「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」（基盤研究A・2020～2024年度・研究代表者藤沢敦）による研究成果を含みます。

謝辞

今回の計測では、朝倉市教育委員会の姫野健太郎、中島圭、倉元慎平の各氏には、多大なご協力をいただいた。また、九州大学大学院生の松尾樹志郎、日高風海斗の両氏には、表定点の測量でご協力いただいた。基準点測量を担当していただいた有限会社グローバルプラン、計測データの加工を担当いただいた株式会社シン技術コンサルには、様々な面倒な依頼にも関わらず丁寧な対応をしていただいた。ここにあらためて感謝したい。

註

1) 本科研費での研究については、WEBページを作成し、その概要を紹介しているので参照されたい。

<http://webdb1.museum.tohoku.ac.jp/index.html>

2) 本科研費で計測した成果で、これまでに報告しているのは、次のとおりである。

- ・福島県双葉町清戸迫横穴：東北大学総長裁量経費を利用して2016年度に計測。光学式非接触ハイエンド3DスキャナであるSmartSCAN-HEを使用。計測成果の整理等に本科研費を利用。藤沢・鹿納・吉野・小池2023。

- ・宮城県名取市経の塚古墳出土長持形石棺：2020年度株式会社シン技術コンサルの協力で計測。藤沢・大橋2023。

- ・福島県須賀川市前田川大塚古墳石室：2022年度計測の成果を菊地ほか2023で報告。2023年度にSfM法で再計測。

3) 今回の計測作業に参加したのは、以下のとおりである。

東北大学：藤沢敦・鹿納晴尚（総合学術博物館）、九州大学：田尻義了（比較社会文化研究院）、松尾樹志郎・日高風海斗（九州大学大学院地球社会統合科学府大学院生）、熊本大学：杉井健（大学院人文社会科学部）。

4) 横穴式石室などでは、奥から玄門側を見て、左右を示すことが一般的である。一方、入口側から奥壁側を見た際の方向で表現した方が記載しやすい場合もある。今回は、奥壁側を見た際の左側を西側壁、反対側を東側壁と呼ぶ。実際には、石室の中軸線は約46度傾いており、正確には北西側と南東側となるが、簡便に記載するために、西側壁、東側壁と呼称する。

引用・参考文献

菊地芳朗ほか2023『前田川大塚古墳1・大仏古墳群1』福島大学考古学報告第16集

小林行雄編1964『装飾古墳』平凡社

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

姫野健太郎編2000『朝倉の古墳と埴輪』朝倉市文化財調査報告書第9集

藤沢敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利垂2023「福島県清戸迫横穴の高精細3次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 22、7～38、東北大学総合学術博物館

藤沢敦・大橋葵2023「経の塚古墳と東北の埴輪」『国家形成期におけるヤマト政権と地域権力の相互関係の再定義-東北地方を中心に-』科研費報告書、35～44頁、福島大学行政政策学類



図5 湯の隈古墳石室正射投影図（床面）



図6 湯の隈古墳石室正射投影図（天井）



図7 湯の隈古墳石室正射投影図（西側壁）



図8 湯の隈古墳石室正射投影図（東側壁）

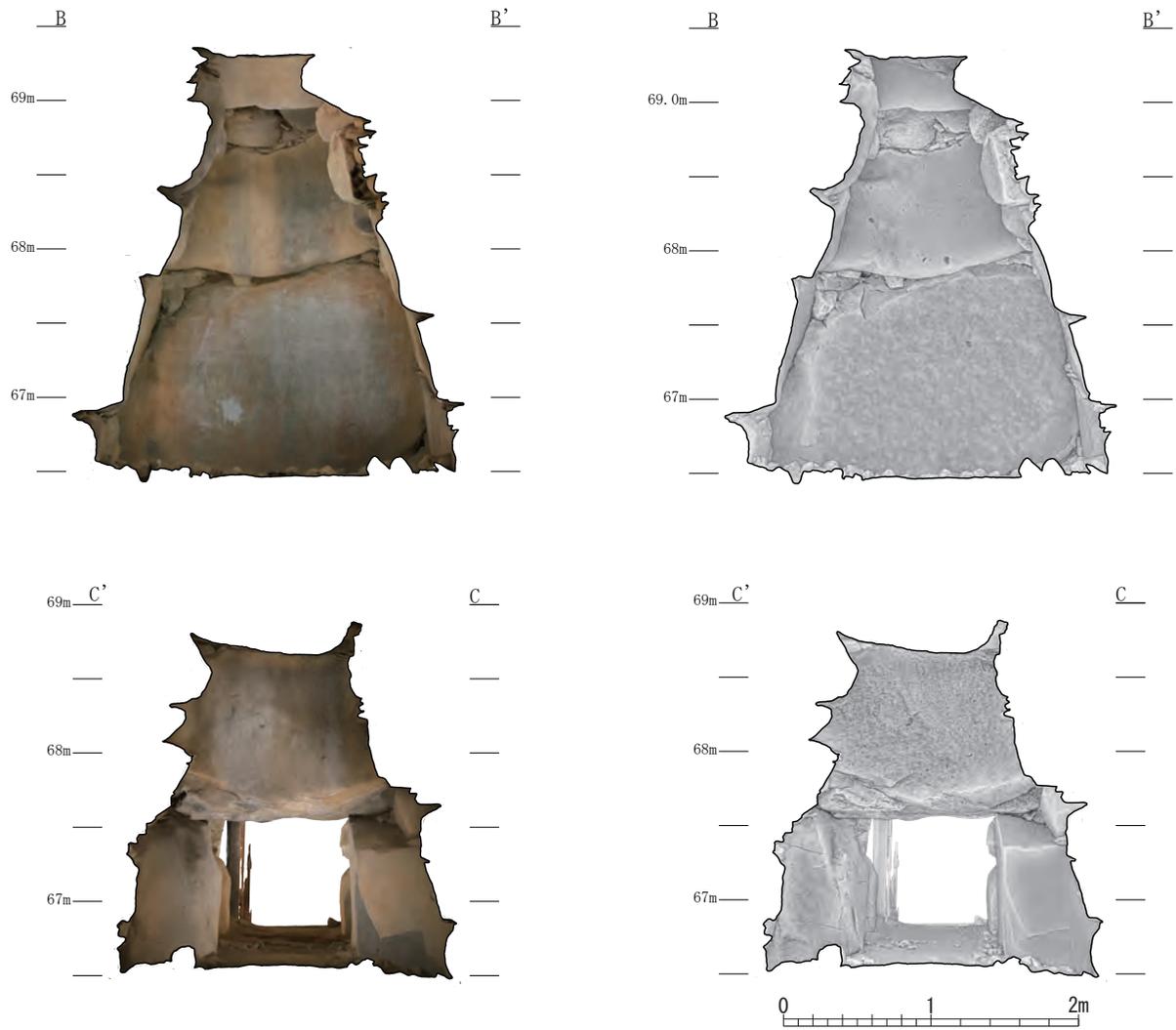


図9 湯の隈古墳石室正射投影図(玄室)

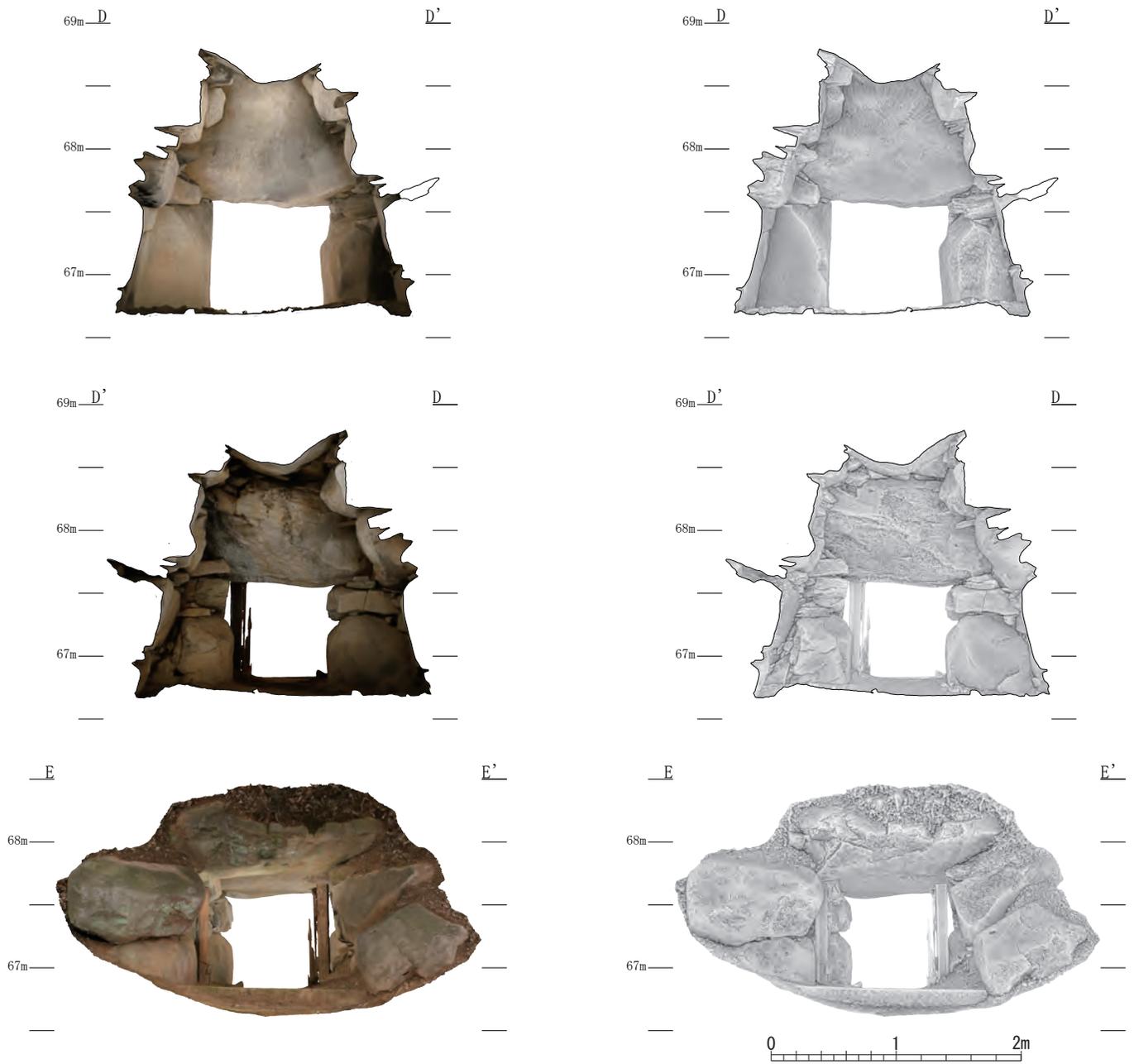


図 10 湯の隈古墳石室正射投影図（前室・入口）