

第5節 合戦原遺跡横穴墓の3次元計測について

株式会社シン技術コンサル 小池 雄利亜

はじめに

山元町合戦原遺跡は阿武隈山地から東へと延びる、丘陵斜面地を掘り込み構築された横穴墓群である。今回の調査区全体で54基の横穴墓が検出され、各遺構の調査進捗に応じて、3次元計測を実施した。3次元画像解析の普及により、3次元データの利用が発掘調査においても一般化しているが、横穴墓の計測自体は一般的ではない。今後の類似調査の参考となる様に、記録において得られた3次元データの成果について紹介する。なお、緊急発掘調査の記録方法として3次元計測が普及していくのであれば、計測作業の標準化（マニュアル化）の取り組みも重要ではあるが、ここでは3次元計測データを利用した観察の可能性を本章の記述目的と考えた。

平板測量や光波測距儀を用いてXYZの座標値を取得する事も3次元の計測である。

本稿における3次元計測とは、表面形状を網羅するデータ取得を行い、後にコンピューター上に形状を再現する事が可能な計測の事を示す。コンピューター上で再現したデータは、実物の規模や重量に関わらず自由に回転させ観察を行える。また、データをカットして観察視点を設定する事で、横穴墓の立体的な構造を様々な方向から観察可能となる。

1 計測方法



図1 合戦原遺跡で利用した UAV

合戦原遺跡の発掘調査が計画された当時は、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) が、埋蔵文化財の発掘調査現場でも利用され始めた時期で、現在ほど一般的では無かった。UAV はそれまでのラジオコントロールによる機体とは異なり、オペレーターによる操作に加えて姿勢制御が自立で行われ、ホバリング（空中で静止する事）や、高度や速度を一定に保ち、コースを飛行する事がプログラムで実施可能となった。

また、同時期に大量の2次元画像データを解析し、カメラ位置と姿勢を推定する事 (Structure from Motion) で、3次元形状データを構築する事が出来るソフトウェアも日本国内で販売される様になった。

以上の点から当該期は、発掘調査において、3次元計測が一般化する流れを作ったツールが登場した時期であった。

図2、は合戦原遺跡の UAV による調査区全体撮影データの解析を行った画面キャプチャ（コンピューター表示画面の切り取り画像）である。画像の水色の四角と赤色の四角の部分が、自立飛行による撮影で、地表近くにある濃い青色の四角が、マニュアルによるオペレートで撮影したカメラ位置の計算結果である。垂直のみの撮影では玄関部分に大きく死角が生

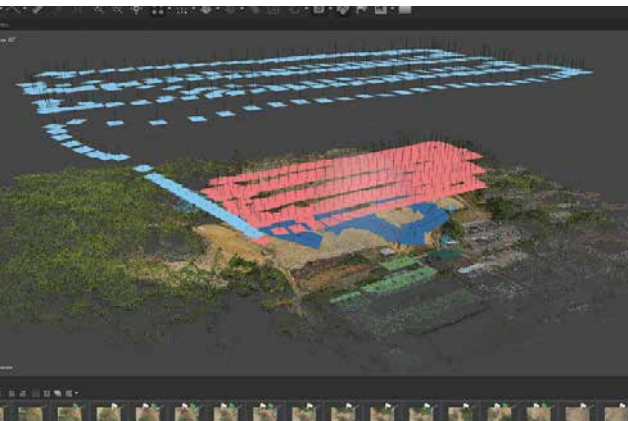


図2 3次元画像解析による画像位置計算状況

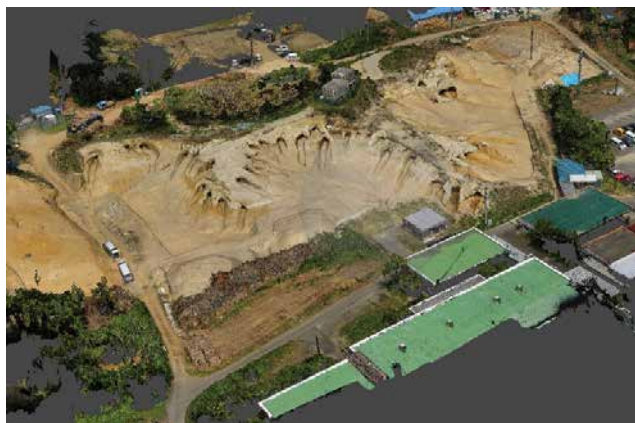


図 3 解析により得られた 3 次元データ

じるため、プログラム飛行が不可となる低高度での斜め撮影は、機体操縦をマニュアルにて実施した。

当時は、十分な解像を得る為にデジタル一眼レフカメラを搭載可能な大きな機体を用いる必要性があったが、現在では、コンパクトな機体でも解析に支障のない良好な画像が得られる。ここでは、当時の撮影諸元のみを記す。使用カメラ：Canon EOS 5D Mark III (5760×3840 ピクセル) 24mm 単焦点レンズ 使用 解析利用画像枚数 228 枚



図 4 発掘区全体 3 次元データ

2 閉塞石の記録成果

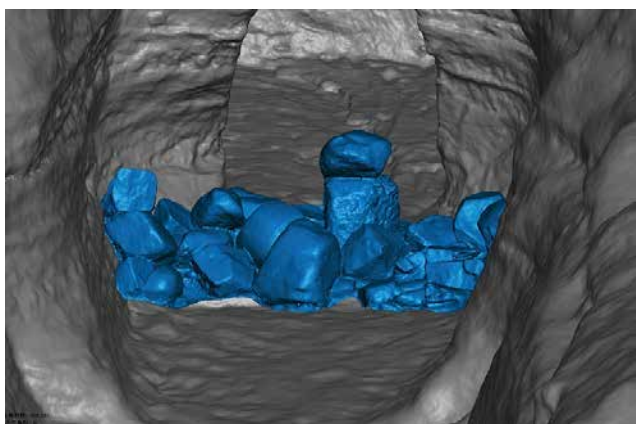


図 5 ST12 閉塞石計測データ

合戦原遺跡では閉塞石の検出から、3次元計測を実施した。従来の水糸を用いた実測では、奥行のある閉塞石の立面の見通し図を正確に記録する事は難しい。3次元データを用いた作図では、横穴墓の主軸や玄門の形状に合わせて、立面図の投影面を決定する事が可能となる。座標管理を行い、時系列の異なるデータを統合して自由に扱う事が出来る。図5の画像における、青色の部分が閉塞石のみを対象として検出時に計測を行った3次元データで、グレースケールで表示した遺構3次元データは、完掘後に計測を行ったものである。

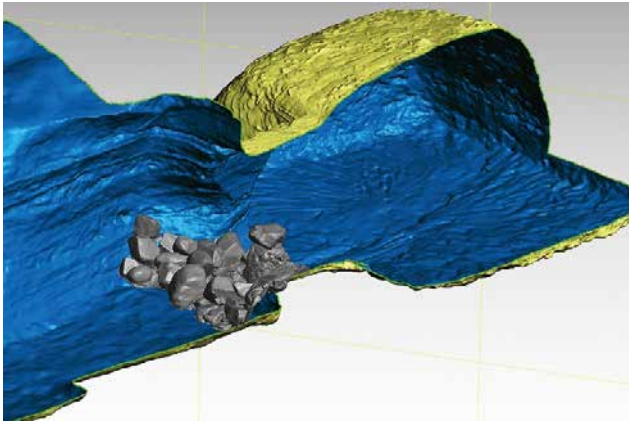


図 6 ST12 閉塞石出土状況 遺構データとの表示

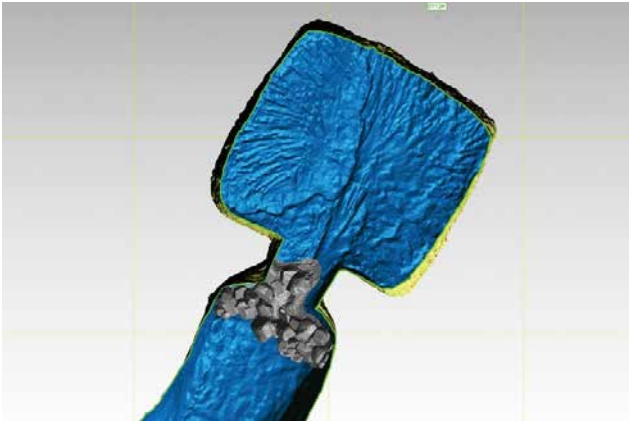


図 7 ST12 の天井をカットした表示

写真で閉塞石の検出状況が分かりやすく伝わる構図が、現地の撮影位置では不可能な場合でも、データでは遺構の一部をカットしたり、死角となる形状を透過したりする表現が可能になる。

図 6 は遺構のデータを一部カットして、閉塞石の検出状況を斜め俯瞰した画像である。

現場では羨道部の死角となる為、同様の撮影位置では、閉塞石は大きく死角に入ってしまう。

図 7 は横穴墓の遺構データを水平にカットして表示し、閉塞石の出土状況を真上からキャプチャした。

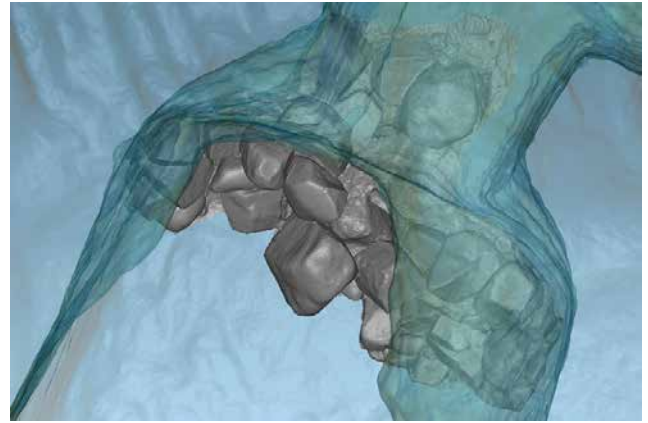


図 8 ST12 を透過した閉塞石の検出状況

図 8 は天井を残して、透過設定として閉塞石を表示した。図示する場合では線が煩雑となるが、3次元データであれば分かりやすい画像が作成可能である。

3 遺物の記録成果

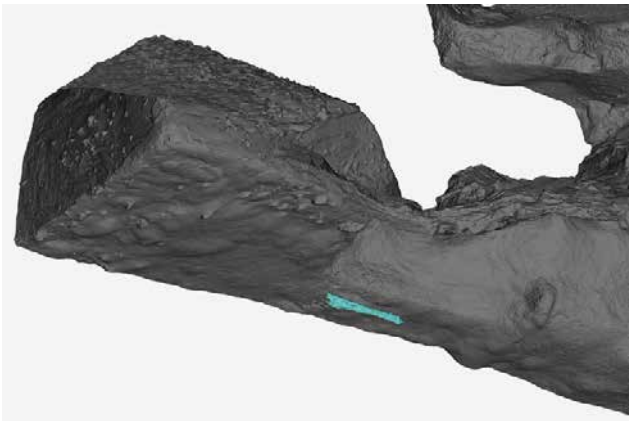


図 9 遺構部半切 斜め俯瞰 遺物出土状況

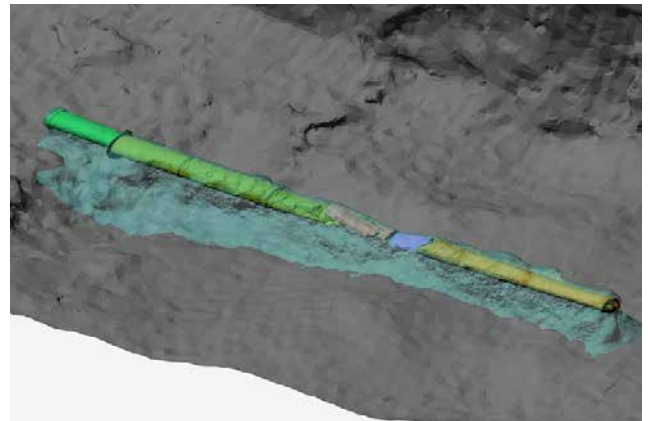


図 10 保存処理後の計測データを出土状況へ再配置

図 9 は閉塞石と同様に、遺物出土状況を計測したデータを横穴墓遺構計測データと合わせて表示したキャプチャ画像である。

図 10 では、保存処理後に計測した遺物データを出土状況時の計測データの形状から類推して、鏝の中（図 9 緑の範囲）に配置したもの。副葬品など、その出土状況が重要な場合は、検出時の様相も分かりやすく再現可能である。閉塞石や遺物出土状況の 3 次元データに、取り上げ後に個々の全周囲の 3 次元データ合成すれば、現地状況のみでは死角となる範囲も加味したエレベーション図などを作図可能となる。図示や作図の必要性に応じて、現地出土状況に加えて、個別計測を実施する計画が必要となる。

4 敷石の記録成果

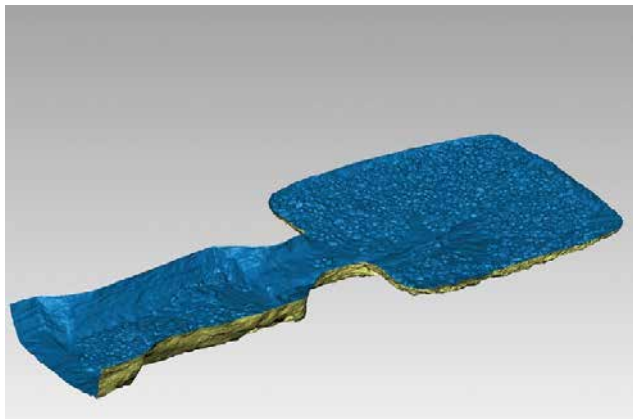


図 11 ST12 敷石検出状況

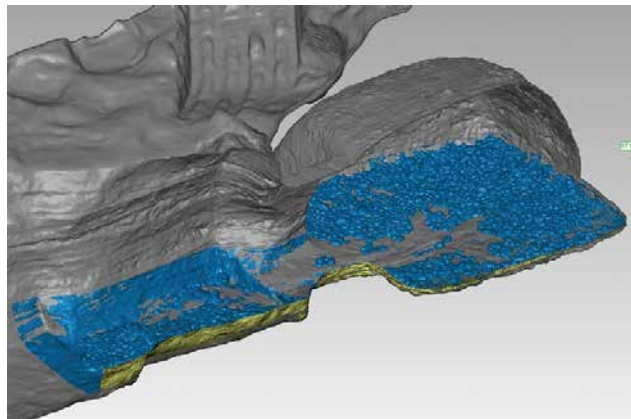


図 12 ST12 敷石 遺構と合わせ表示

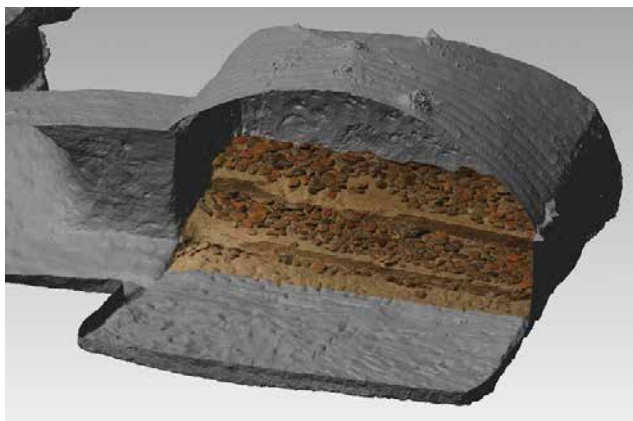


図 13 ST13 敷石出土状況

敷石が検出された遺構に関しては、閉塞石と同様に敷石の範囲に限定（図 11）して 3 次元計測を実施した。

図 12 は、敷石の範囲を計測したデータとその後に計測した横穴墓全体のデータの両方を表示したキャプチャ画像である。

敷石は、直径 10 cm ほどの丸い河原石であり、計測作業に立ち入る事でズレを生じさせる事は不可避であった。その為、計測結果に悪影響が生じない様に、データ取得作業は一筆書きとなる様に心掛けた。

ST13 の敷石も同様に敷石のみの計測を行い、後に遺構全体の形状の計測を行った。（図 13）敷石に使われていた石材の色彩に関しても、色の識別は可能であった。

石の表面の土を取る作業に手間がかかるが、取り切れていない土が発色を鈍らせる場合は、霧吹きなどである程度湿り気を与える事で、石材毎の色の差別化は後のデータでも分かりやすくなる。

遺物の出土状況写真も、撮影時に水気を与えて行う事があると思うが、3 次元計測では映り込みが起こるほどの水濡れ状態ではデータが荒れるため、事前に計測従事者と打ち合わせて実施する方がよい。

5 横穴墓の計測

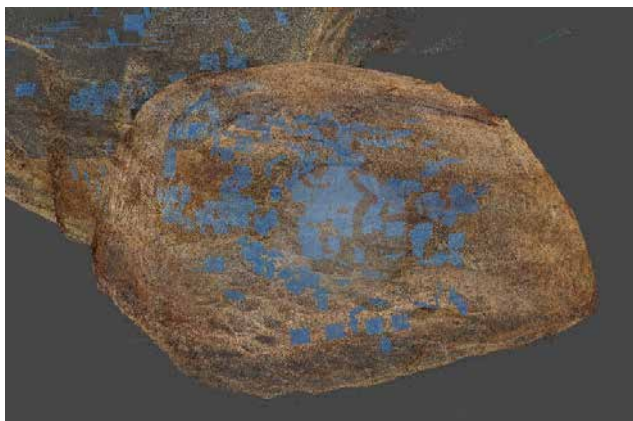


図 14 ST1 玄室内アライメント状況

横穴墓の 3 次元データ取得において、3 次元画像解析は特に相性の良い計測対象であった。

横穴墓の内部から、図 14 の様に様々な方向から、重なりを持った写真撮影を行った。データは側面から天井へと一周して閉合される。その為、誤差の分配やレンズ補正が上手く機能すると考えられる。

横穴墓によっては水が染み出している箇所があり、データが荒れた。水濡れによるデータの乱れは、表面の乱反射によるもので、3 次元画像解析に限らず、非接触光学式計測機での計測や地上型レーザー計測機においても、乱反射による不正は生じる。それでも目的とする遺構形状の把握や工具痕の観察が行えないほど荒れる事は無かった。



図 15 格子投影方式のスキヤナによる計測状況

を行う仕組みにより、高精度なデータ取得が可能な機器である。

合戦原遺跡では0.16mmの分解能で計測を実施したが、線刻はもう少し細かく計測した方が変化点の抽出に迷いが少なかったであろうと反省をし、その後の類似の調査では、smartSCANでの計測を実施している。

撮影にはクリップオンストロボで、ガイドナンバー（出力）が大きな物を用いた。被写界深度を確保する為に絞りを小さくすると、ISO感度はシャッター速度に応じて上がる。再現したいディテールが細かな個所は、被写体に寄って良好な画像取得をする事で再現性が上がるが、線刻などの観察には十分な再現を得られなかった。その場合は、非接触式光学3次元スキヤナAICON社製（現HEXAGON）smartSCAN HE8.0Mを用いた（図15）。このスキヤナは、レンズ交換式により計測範囲（分解能）を変更可能な仕組みを持ち、格子投影

6 横穴墓の記録成果

合戦原遺跡で取得した3次元データを用いて、玄門を正面とした任意の見通しの画像作成を行った。

左（図16）と右（図17）の画像は、同一データによる同じ構図だが、全体を透過して、玄門の形状と玄室の形状を同時に見通し可能な透過効果を用いた。（以下、図79まで同様の画像）

3次元計測を実施する事で可能となる可視化によって、遺構の新たな特徴に気づくかもしれない。本章で掲載した画像は正射投影でのキャプチャであり、スケールや投影方向の明示を行っていないが、明示して掲載する事も可能である。

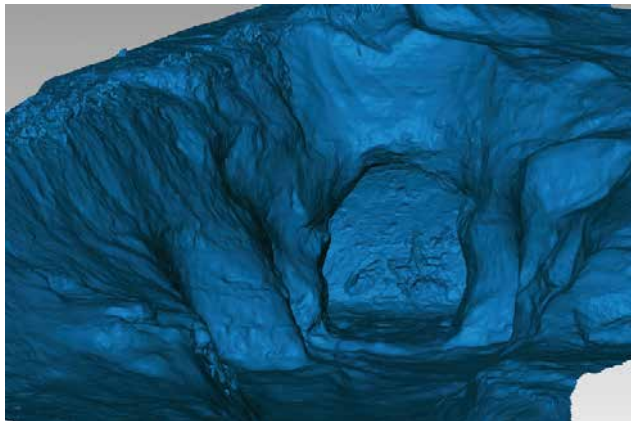


図 16 ST1 玄門

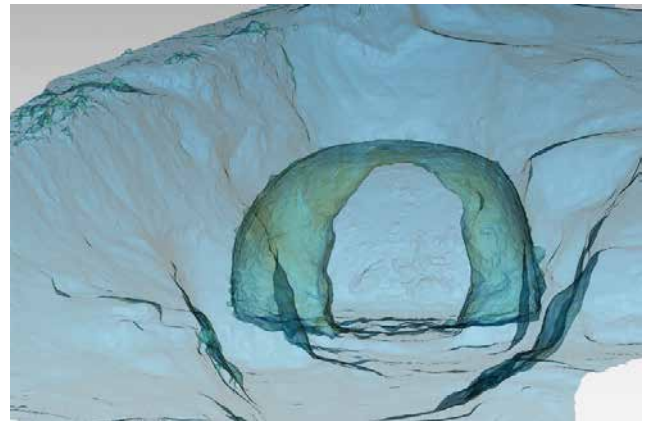


図 17 ST1 玄室透過

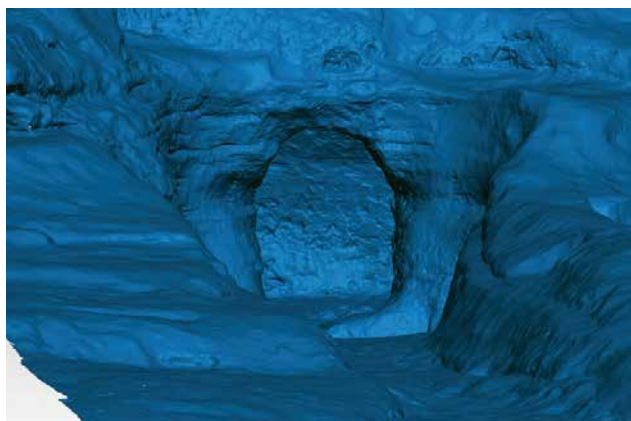


図 18 ST7 玄門



図 19 ST7 玄室透過



図 20 ST8 玄門

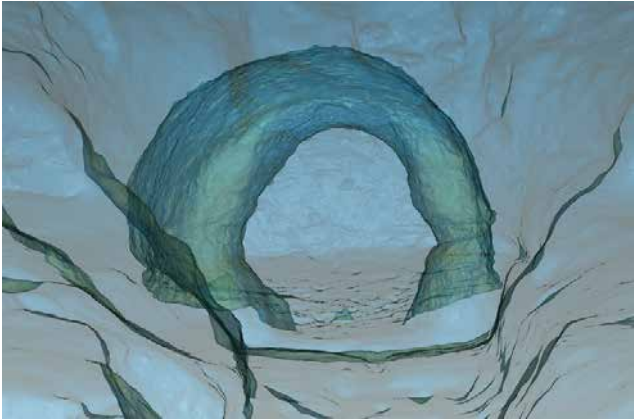


図 21 ST8 玄室透過



図 22 ST9 玄門

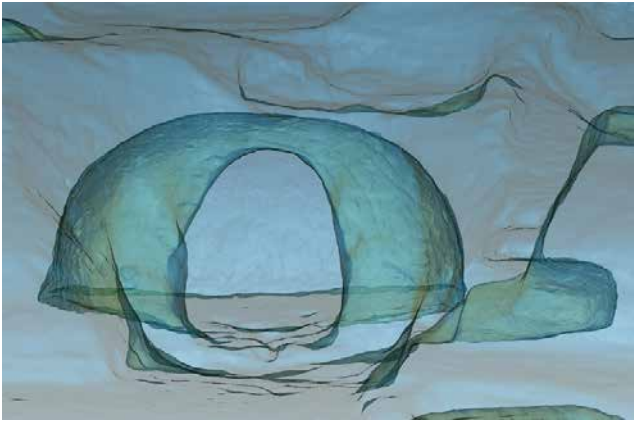


図 23 ST9 玄室透過



図 24 ST10 玄門

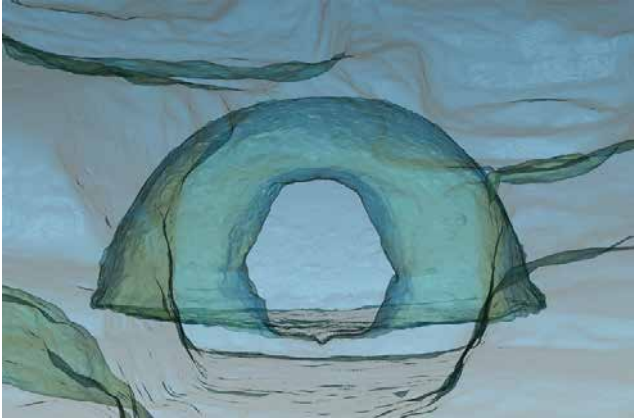


図 25 ST10 玄室透過

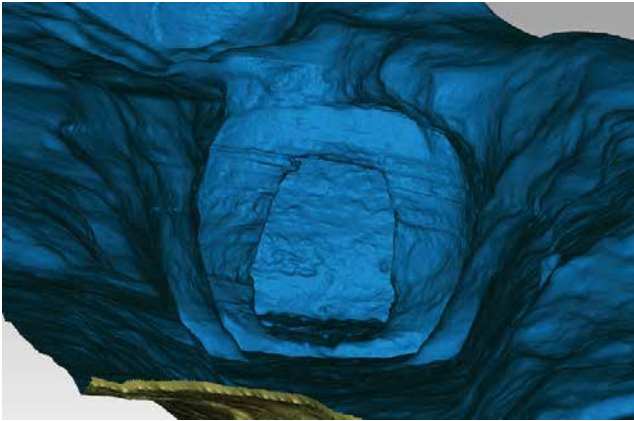


図 26 ST12 玄門

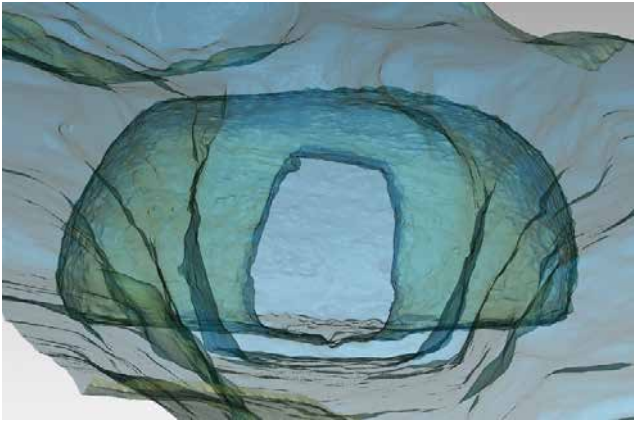


図 27 ST12 玄室透過

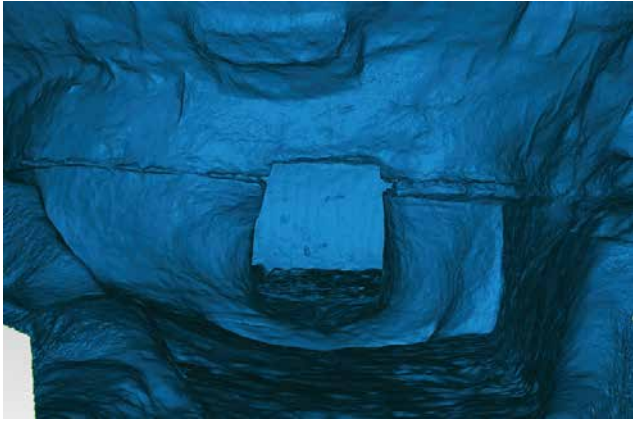


図 28 ST13 玄門

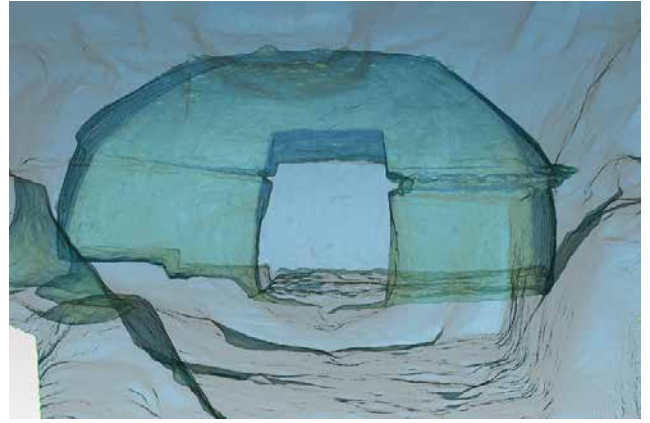


図 29 ST13 玄室透過



図 30 ST18 玄門

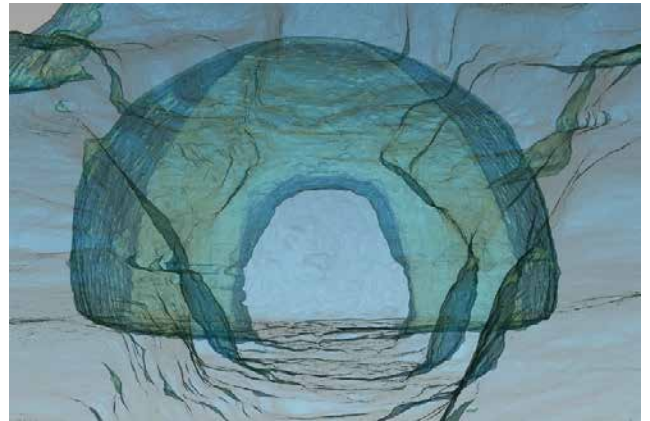


図 31 ST18 玄室透過

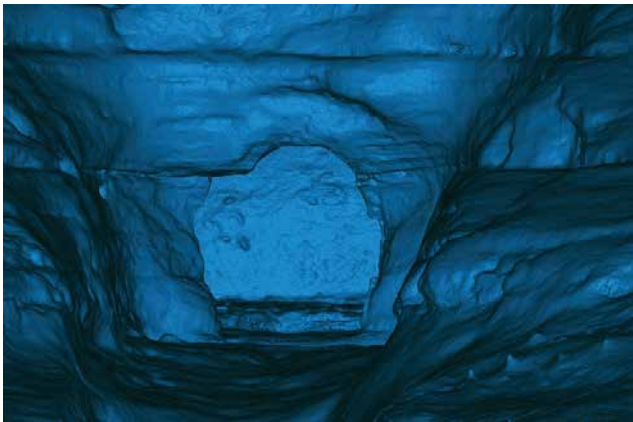


図 32 ST19 玄門



図 33 ST19 玄室透過

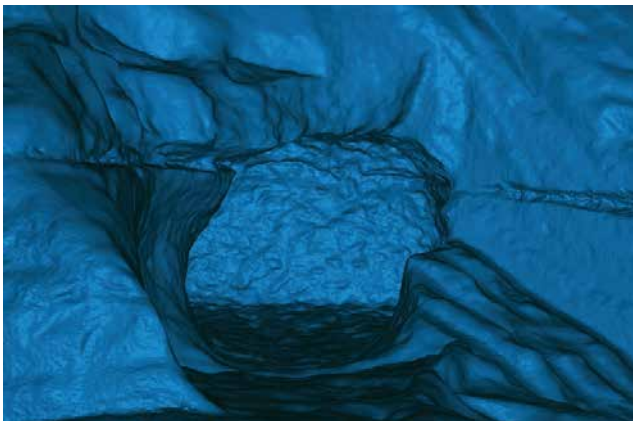


図 34 ST20 玄門

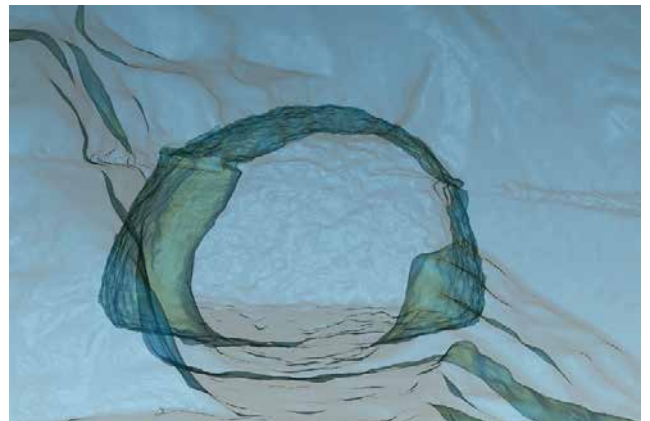


図 35 ST20 玄室透過

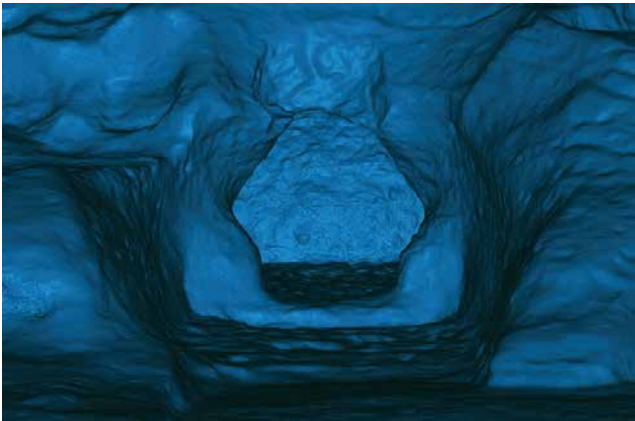


図 36 ST21 玄門

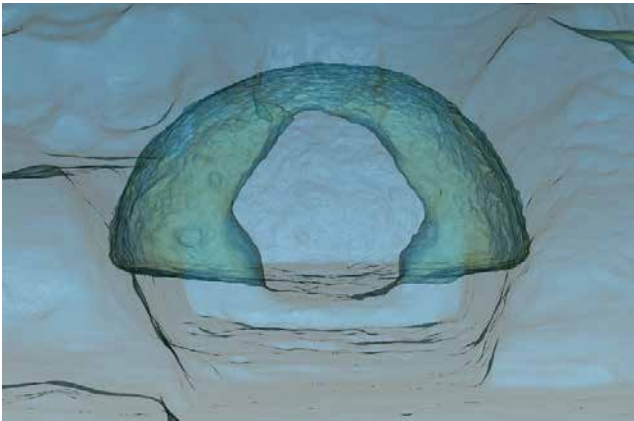


図 37 ST21 玄室透過

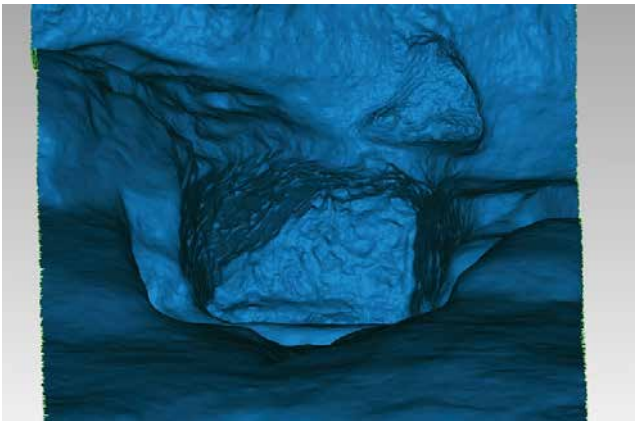


図 38 ST22 玄門



図 39 ST22 玄室透過

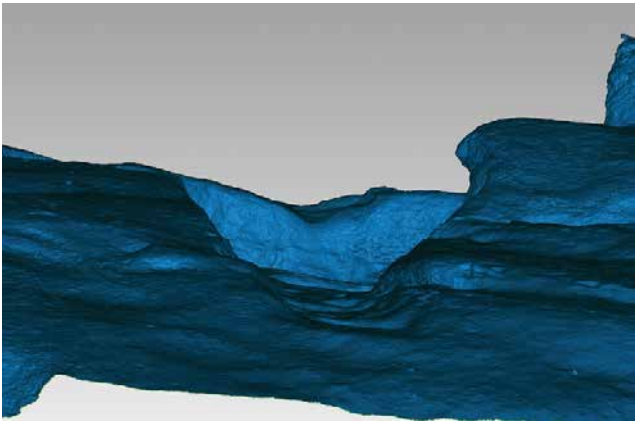


図 40 ST23 玄門

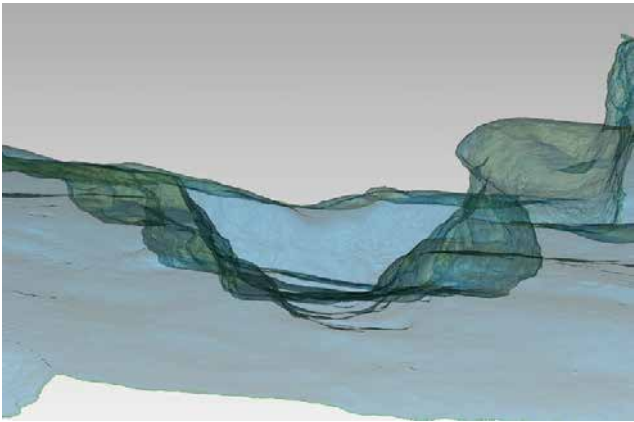


図 41 ST23 玄室透過

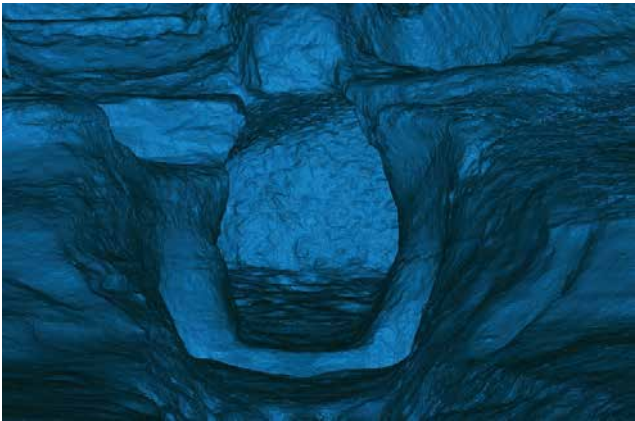


図 42 ST28 玄門

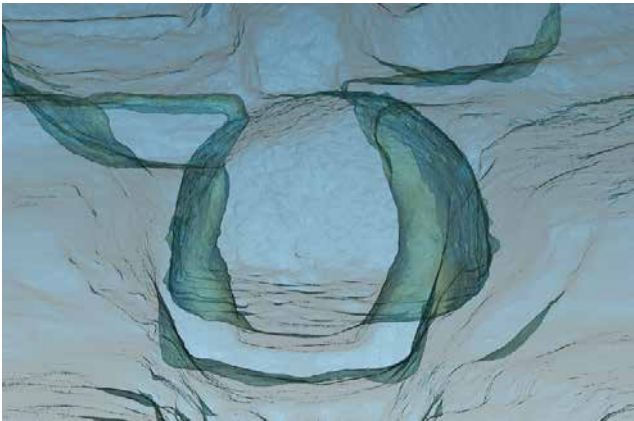


図 43 ST28 玄室透過

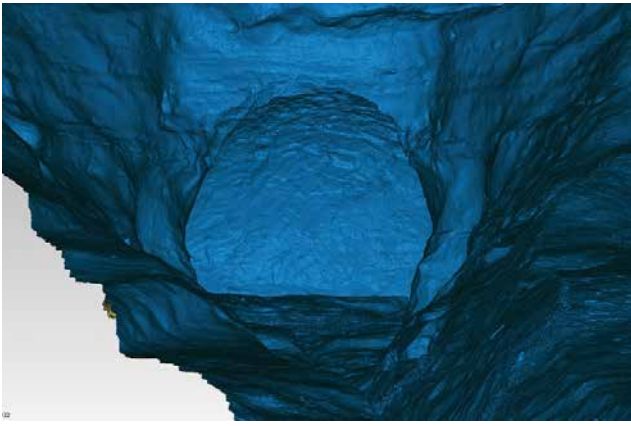


図 44 ST29 玄門

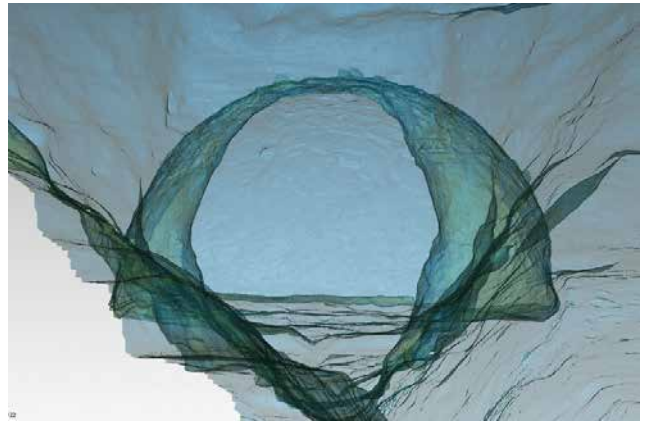


図 45 ST29 玄室透過



図 46 ST30 玄門

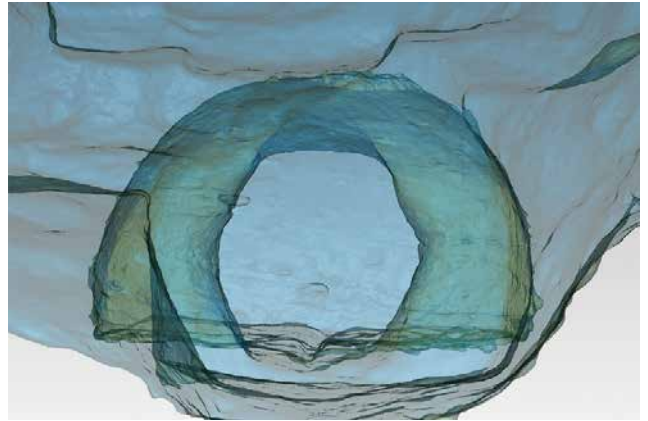


図 47 ST30 玄室透過

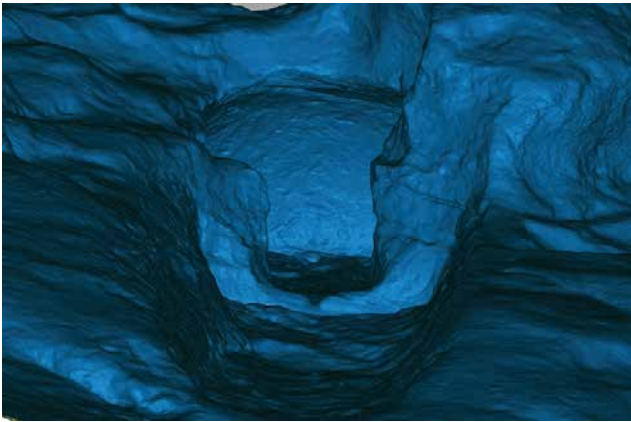


図 48 ST31 玄門

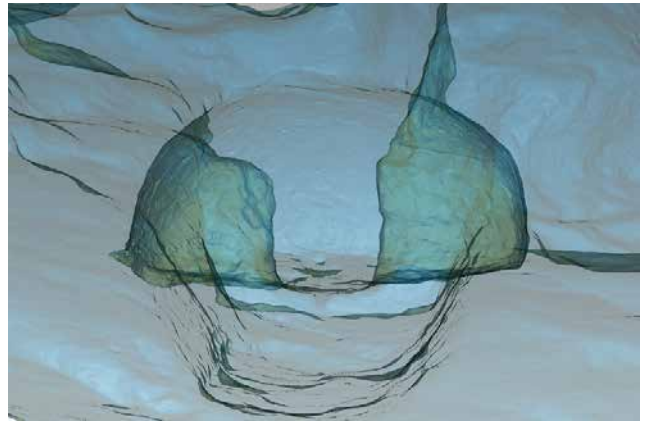


図 49 ST31 玄室透過

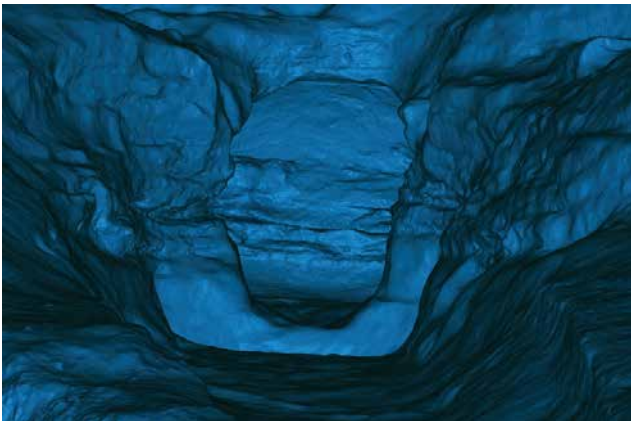


図 50 ST32 玄門

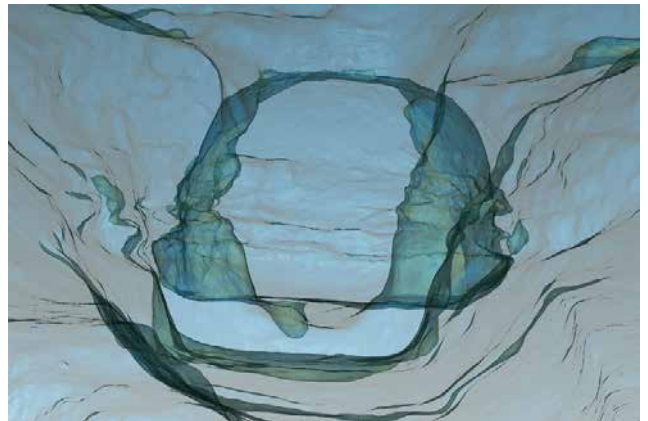


図 51 ST32 玄室透過

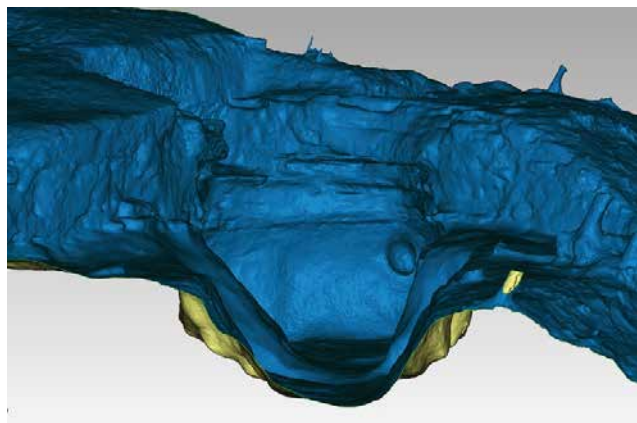


図 52 ST34 玄門

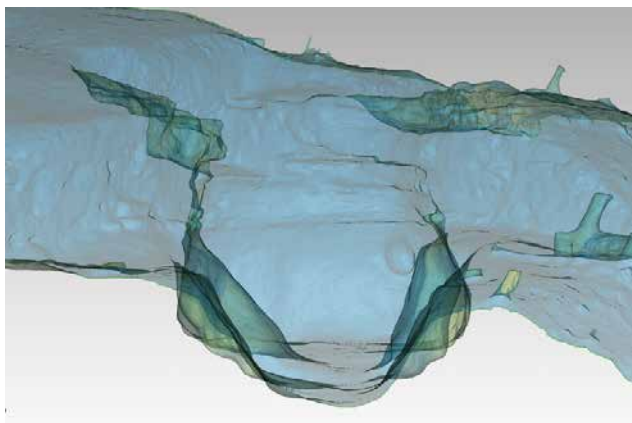


図 53 ST34 玄室透過



図 54 ST35 玄門

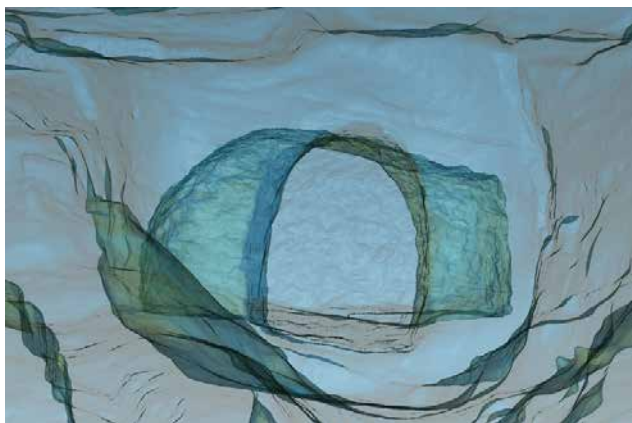


図 55 ST35 玄室透過

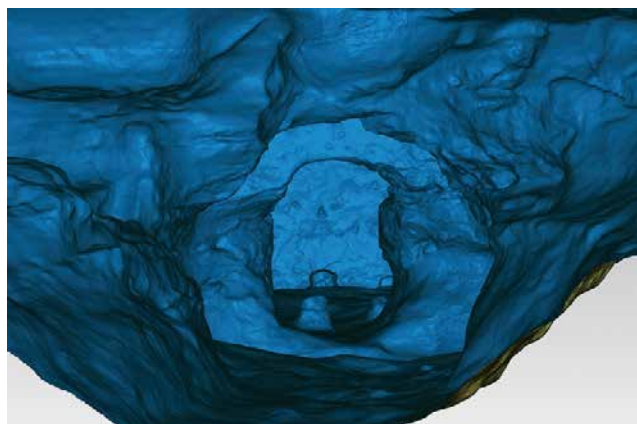


図 56 ST36 玄門

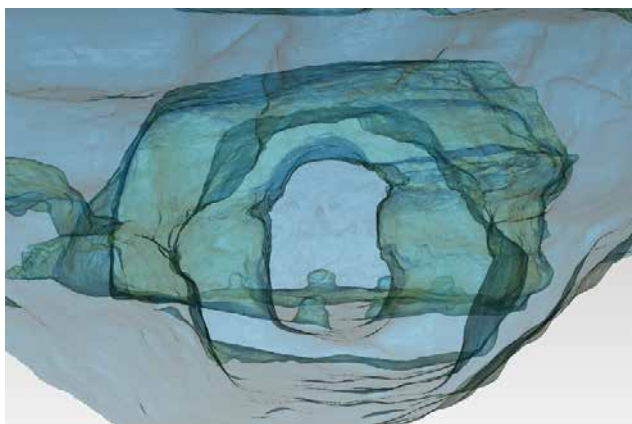


図 57 ST36 玄室透過

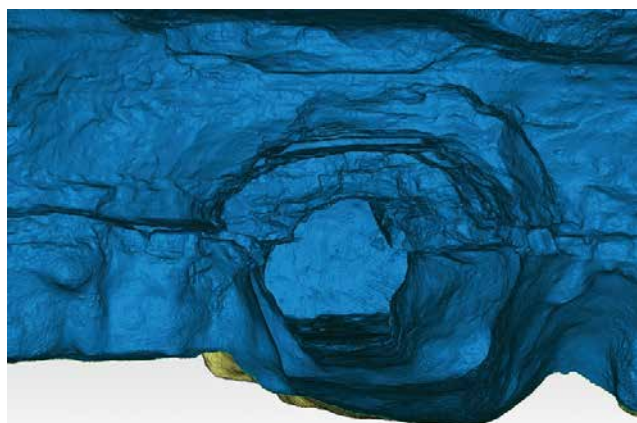


図 58 ST38 玄門



図 59 ST38 玄室透過

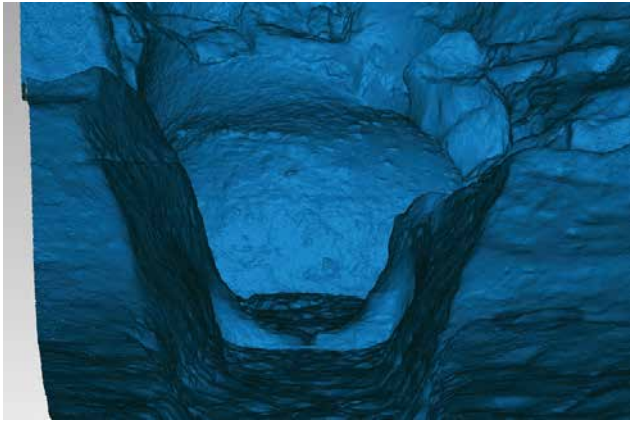


図 60 ST43 玄門

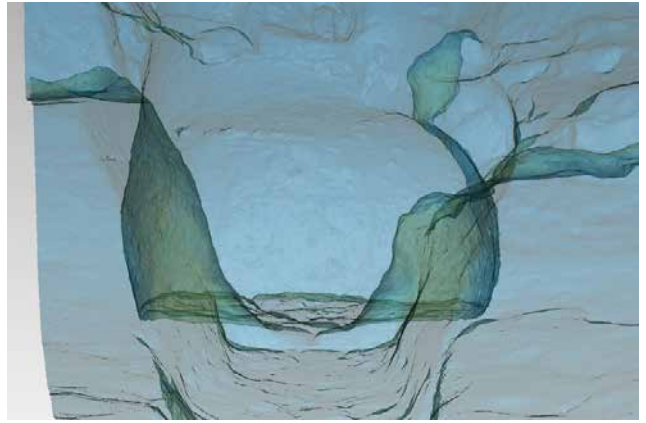


図 61 ST43 玄室透過

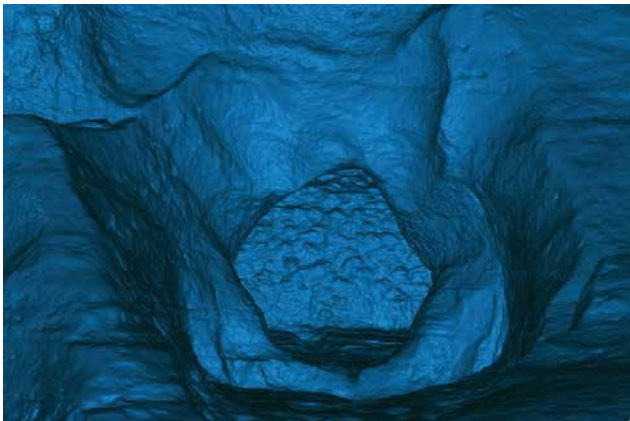


図 62 ST44 玄門

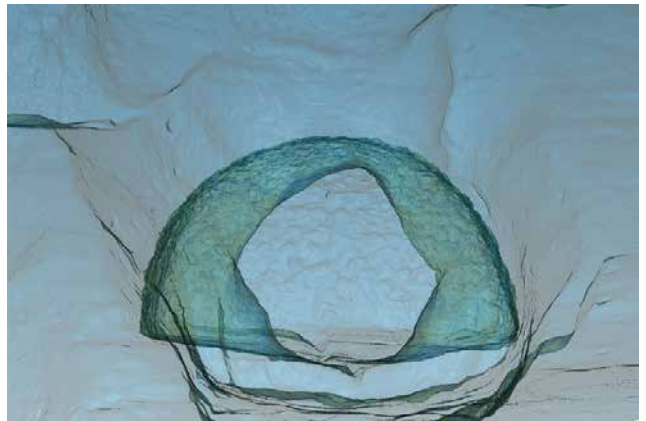


図 63 ST44 玄室透過

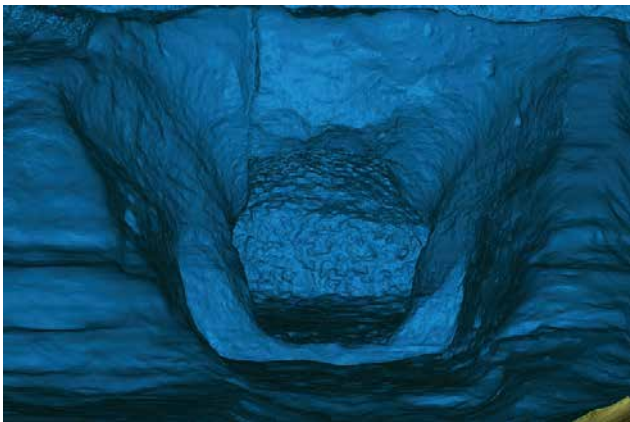


図 64 ST45 玄門

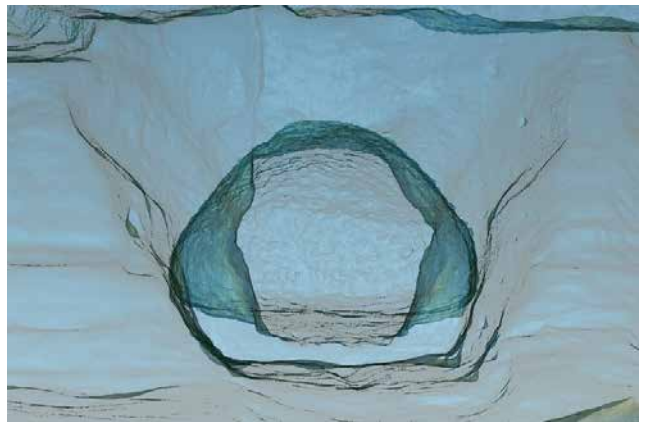


図 65 ST45 玄室透過



図 66 ST46 玄門

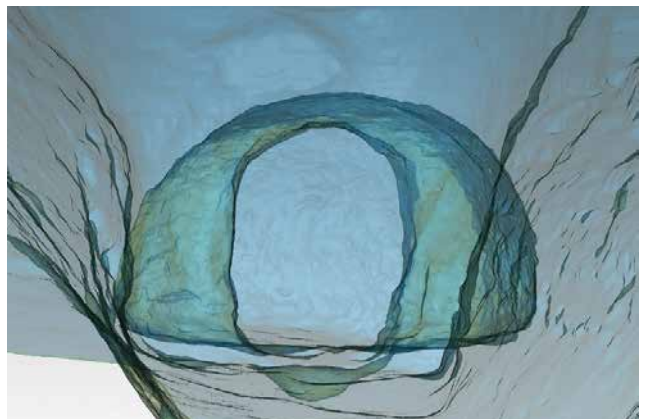


図 67 ST46 玄室透過



図 68 ST47 玄門



図 69 ST47 玄室透過



図 70 ST48 玄門

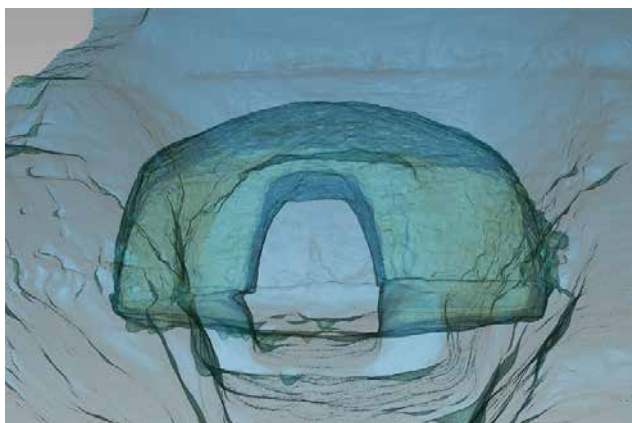


図 71 ST48 玄室透過

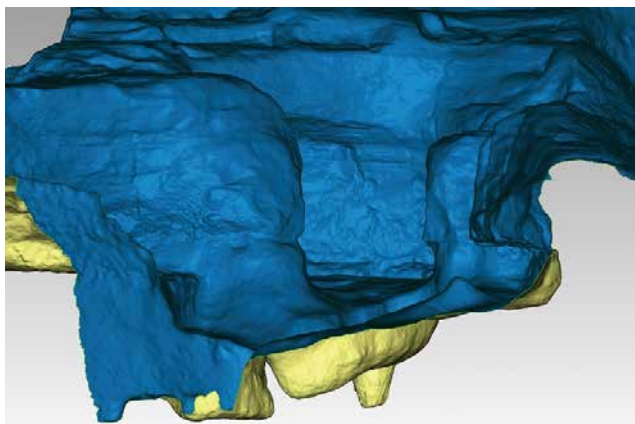


図 72 ST49 玄門

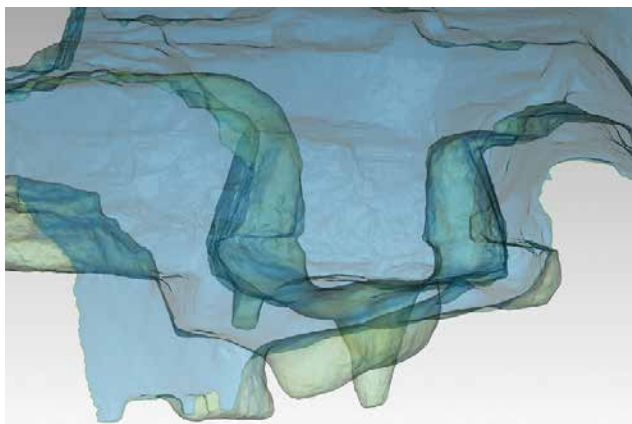


図 73 ST49 玄室透過

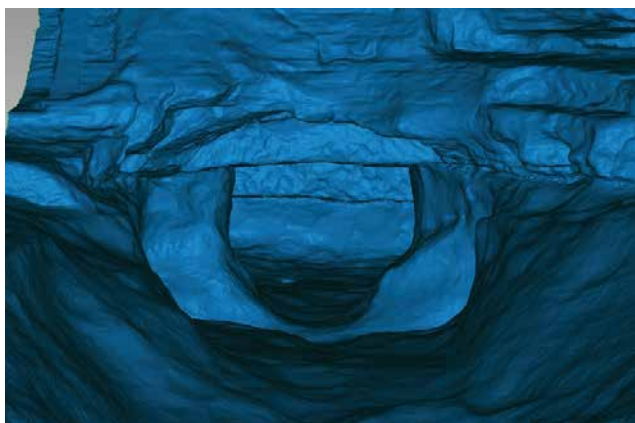


図 74 ST51 玄門

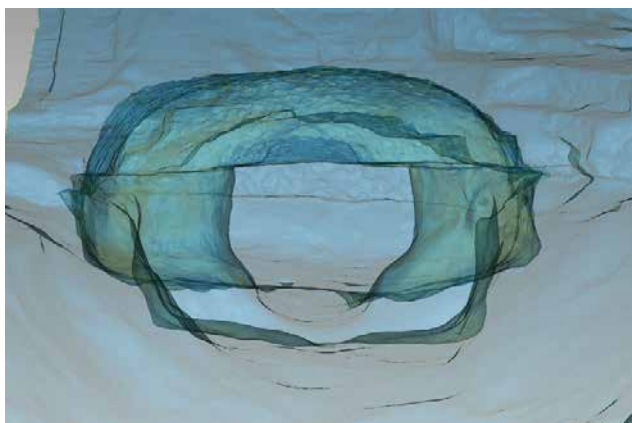


図 75 ST51 玄室透過

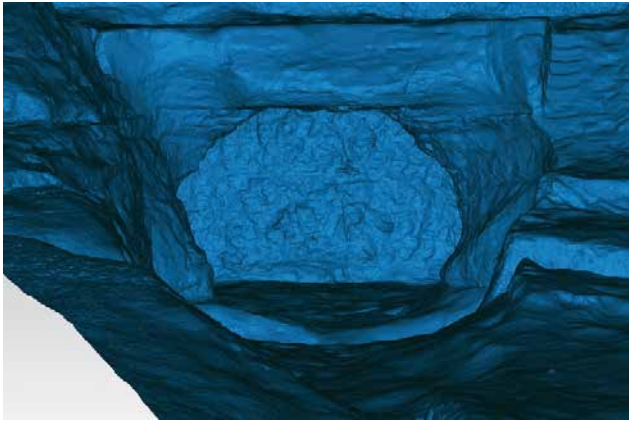


図 76 ST52 玄門

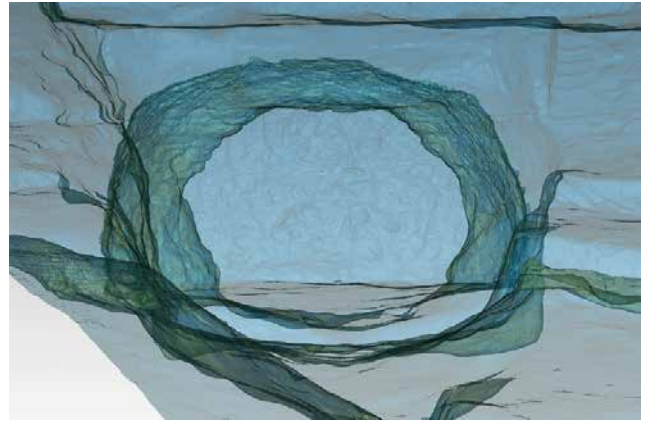


図 77 ST52 玄室透過

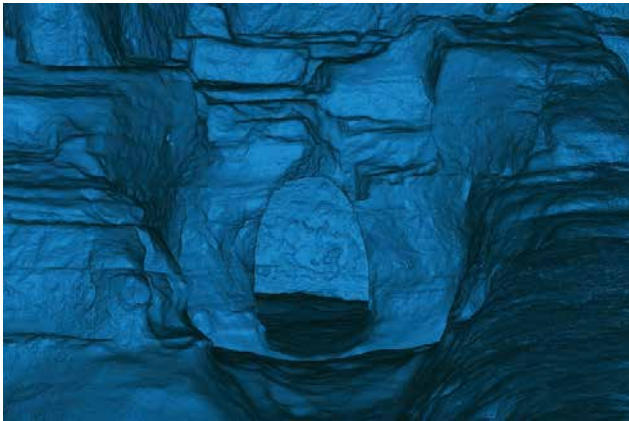


図 78 ST53 玄門

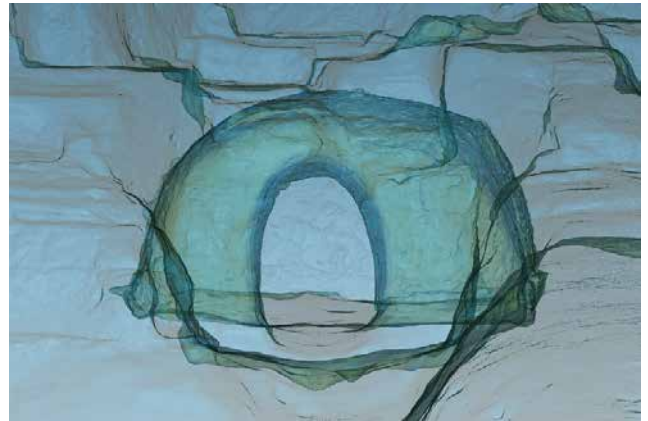


図 79 ST53 玄室透過

現地で個別の横穴墓全景を撮影する場合は、斜面地の低い部分から撮影を行うしかなかった。その為、脚立などにカメラを設置して、遺構全体を俯瞰した構図で撮影を行うが、前述の通り UAV などが普及した事で、理想的な構図での撮影は容易となっている。それでも横穴墓は開削して作られた構造ではない為、羨道の構造、玄門、玄室を一度に観察する撮影を行うには、断割る必要がある。

3次元データ上では断割ることが容易な為、これまでに無い俯瞰した情報を提供する事が可能となる（図 80 青色が表面、黄色が裏面）。

また、天井が残存している玄室の、直上にある地山などのデータをカットする事で、本来は内面から観察する事になる玄室の形状を、真上から見通して可視化する事が可能となる（図 81）。

等高線図も作成可能で、家形などの玄室の形状変化点も、定量的な抽出や図示が可能となる。

図 94 では工具痕の切り合いが観察できた。

玄室の等高線図に関しては、床面と目される範囲が反映されない高さをスタート地点として、任意の標高値から 3 cm ピッチで発生させた（図 82）。

ST13 に限っては、床面が階段状の構造であったため、天井の等高線図と重複するが、床面の等高線図も反映される標高値から発生させた（図 88）。

図 80 は ST1 を断割った画像であるが、図 79 より透過度を落として可視化を行い、表面のディテールも観察可能とし、玄門で死角になる玄室のアウトラインが透過する形で作成した。

図 89・図 90 は任意のレベルで 2 分割したデータを作成し、図 90 は現地における観察視線と同様に、天井を見上げて観察する投影面の設定となっている。

図 91 では玄門エッジ部分を、面取りを行う様に成形されている状況をキャプチャしているが、玄室内で思ようなライティングが出来ない場合では、コンピューター上で示す事が可能となる。

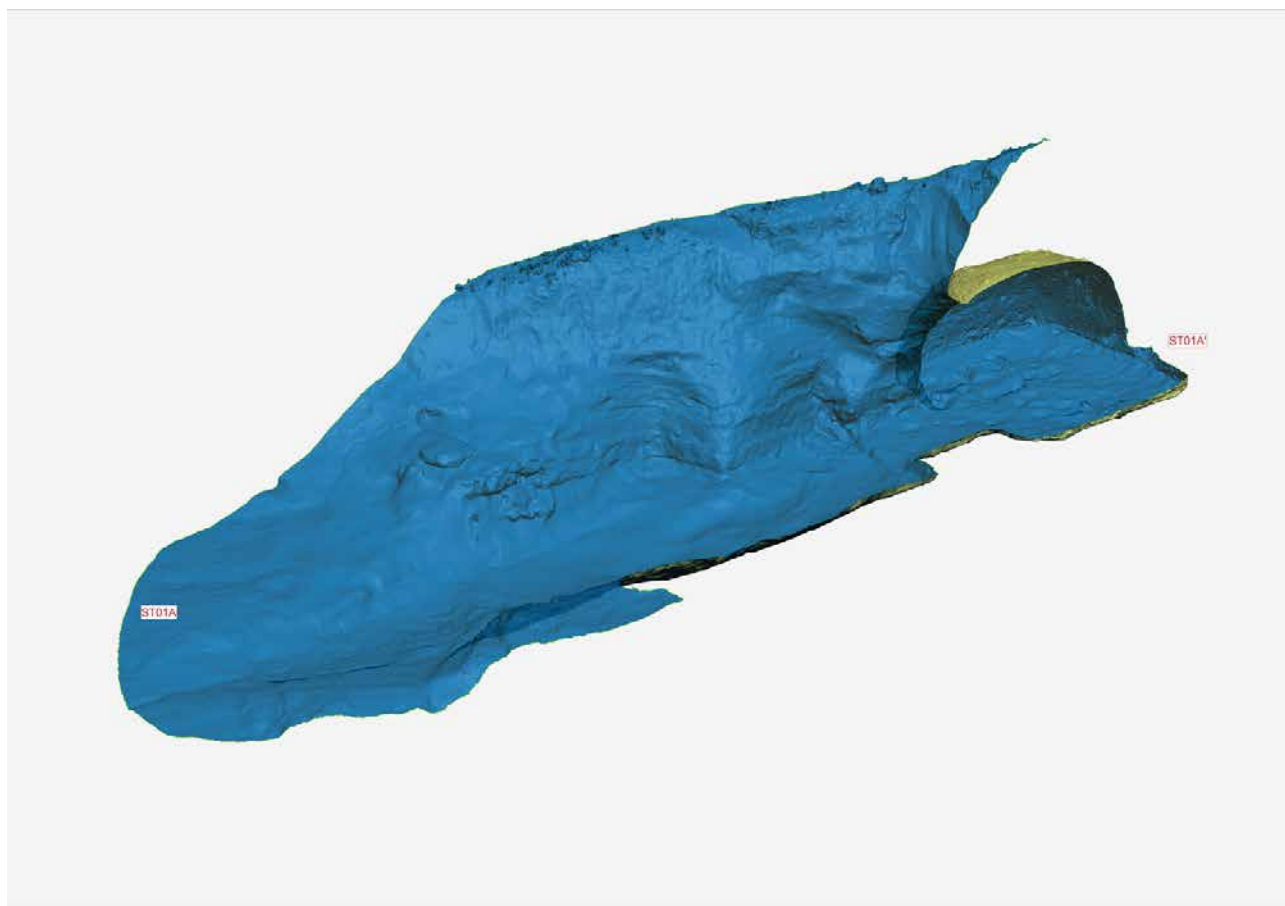


図 80 ST1 断割り

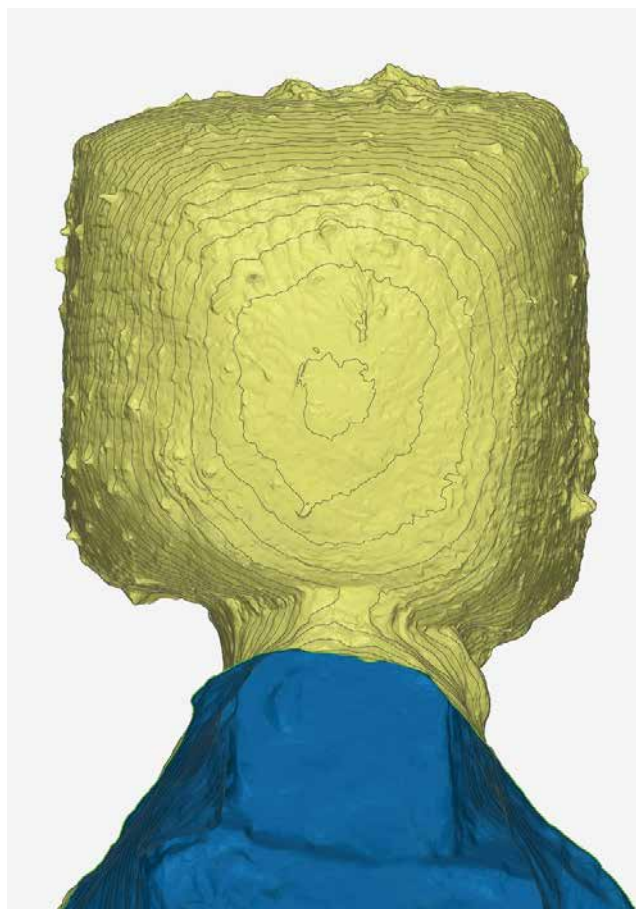


図 81 ST1 玄室天井部裏面キャプチャと天井コンター

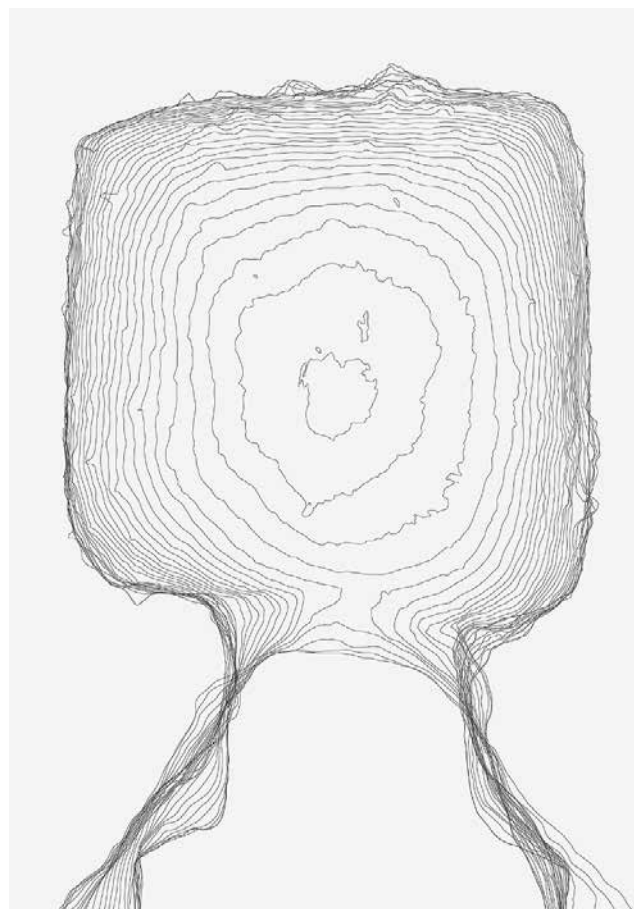


図 82 ST1 玄室天井部コンター

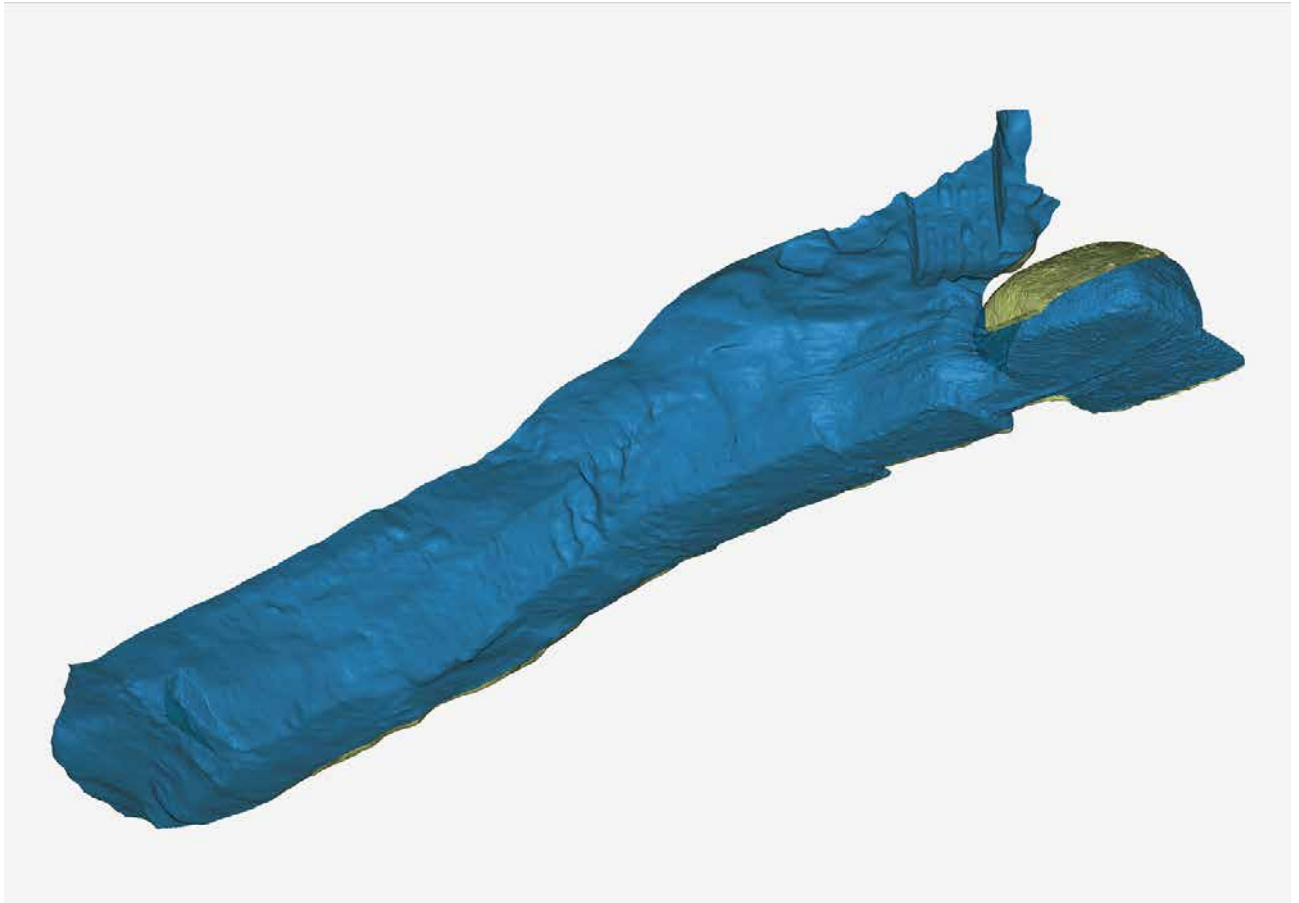


図 83 ST12 断割り

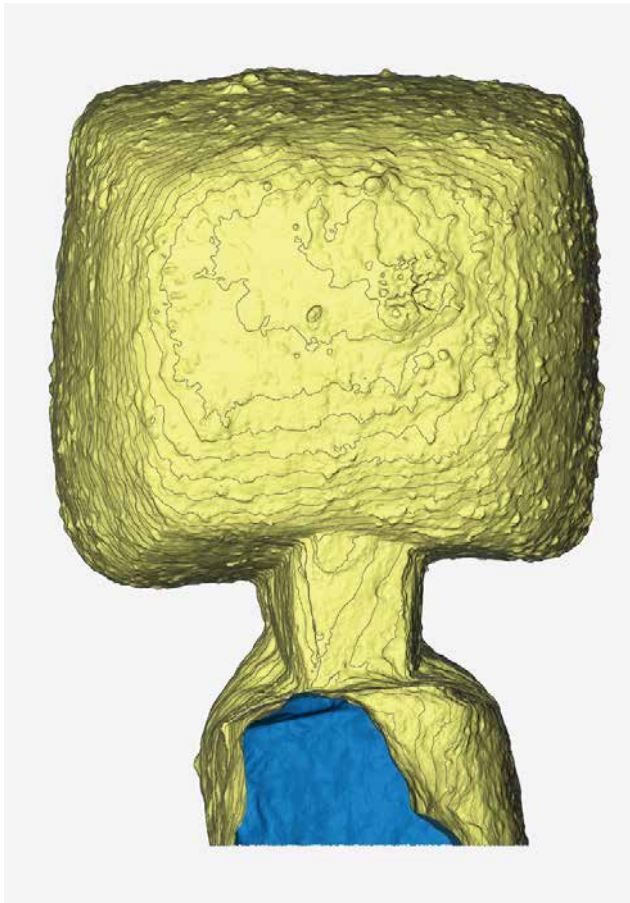


図 84 ST12 玄室天井部裏面キャプチャと天井コンター

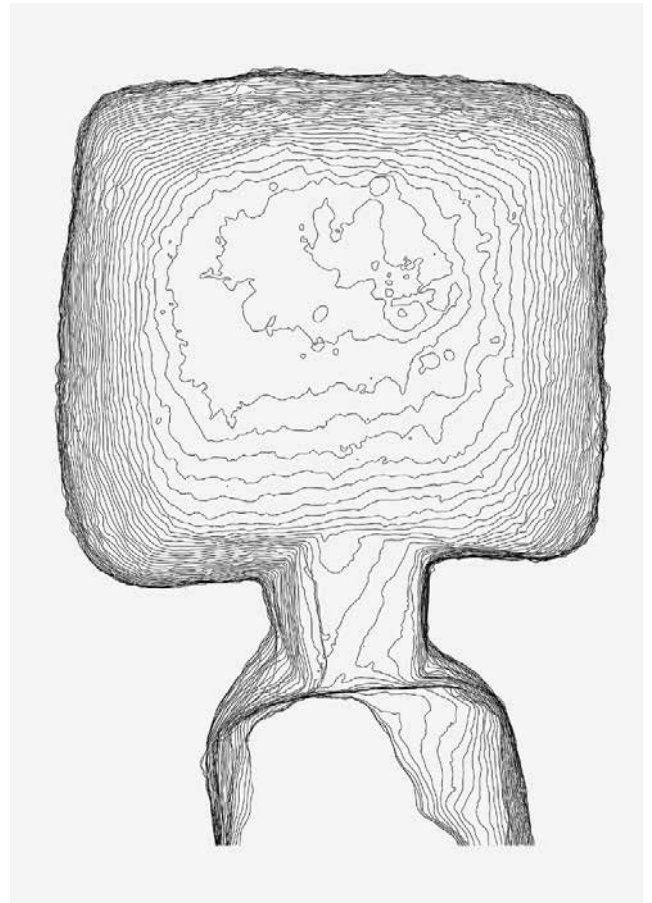


図 85 ST12 玄室天井部コンター

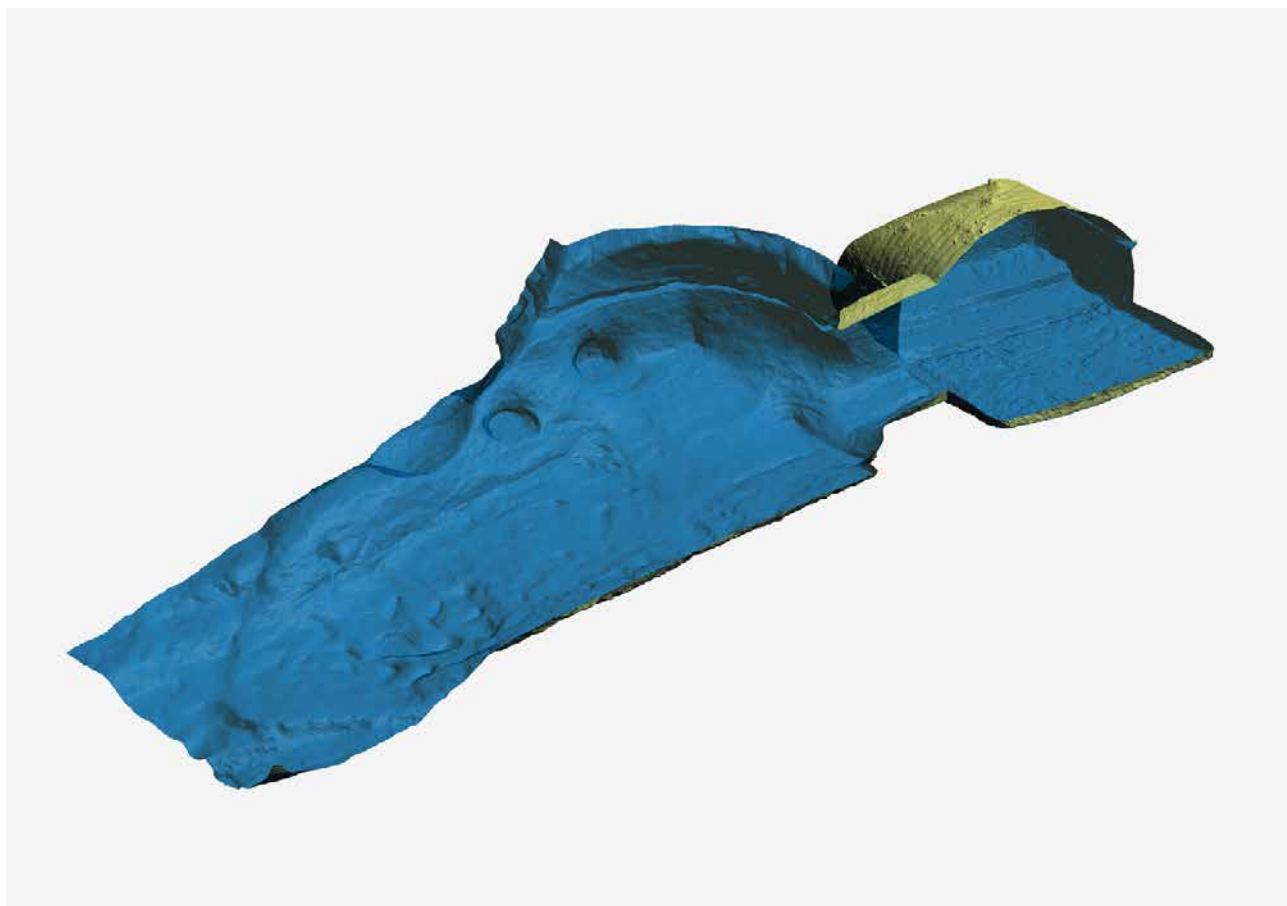


図 86 ST13 断割り

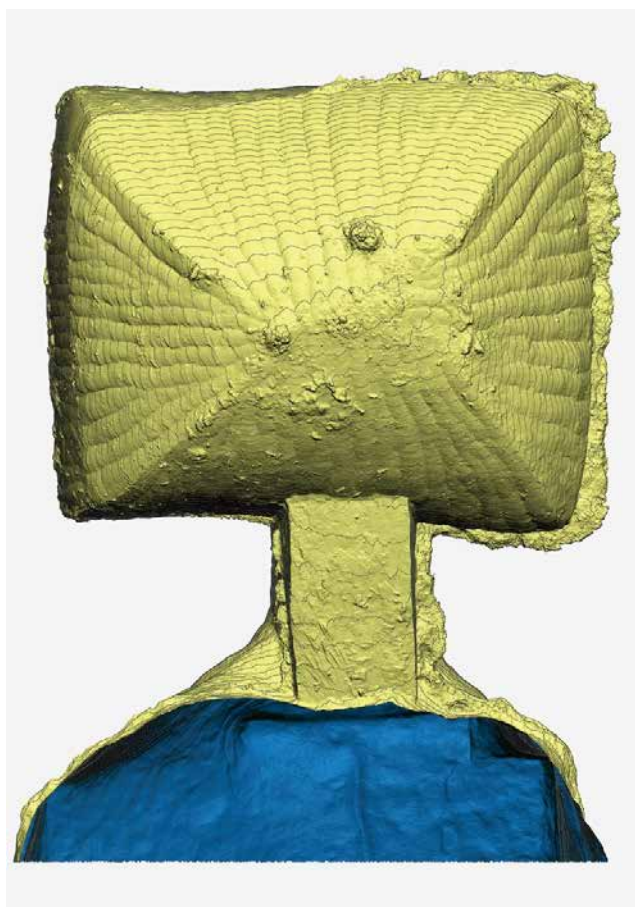


図 87 ST13 玄室天井部裏面キャプチャと天井コンター

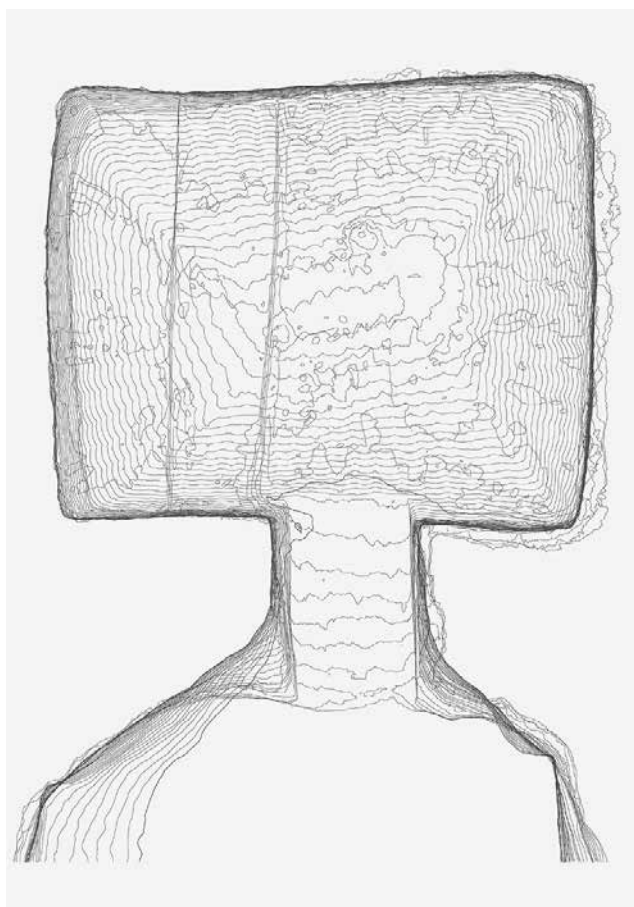


図 88 ST13 床面から天井部のコンター



図 89 ST13 玄室床面

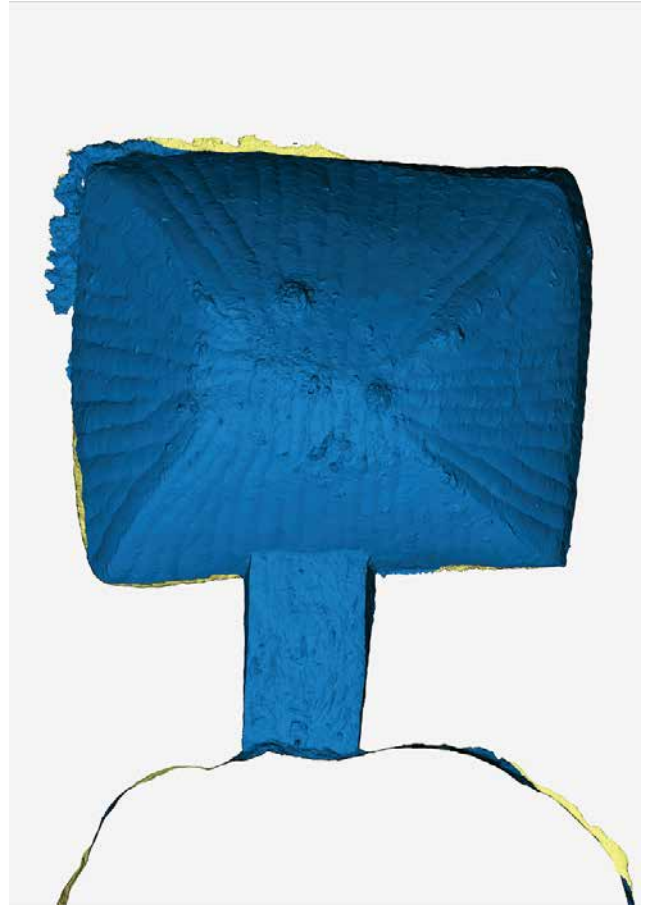


図 90 ST13 玄室天井部表面（下から見上げた状態）

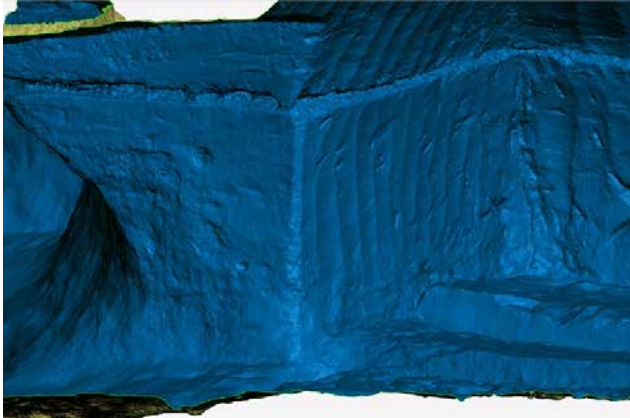


図 91 ST13 玄門側壁

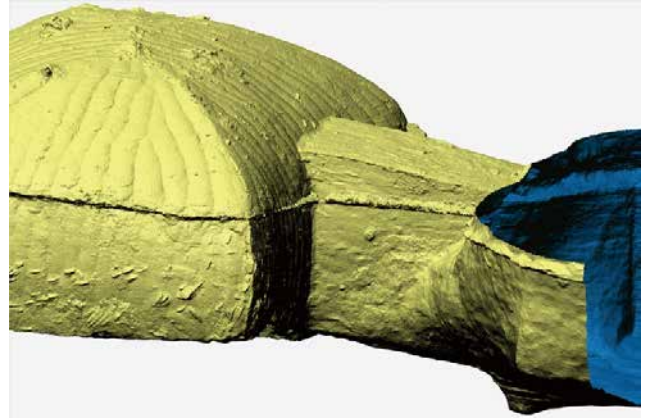


図 92 ST13 玄門側壁（裏面）



図 93 ST13 玄室側壁

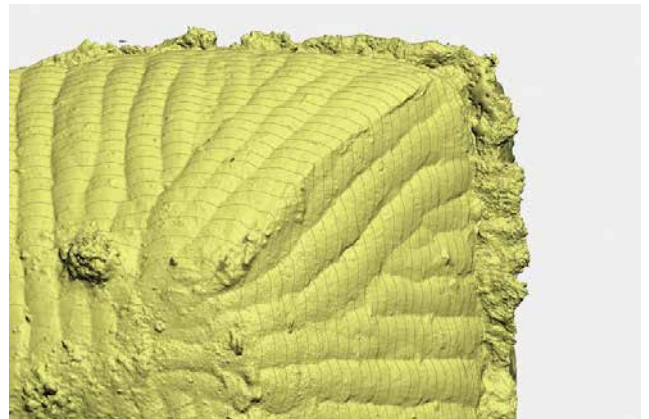


図 94 ST13 玄室天井部（裏面）

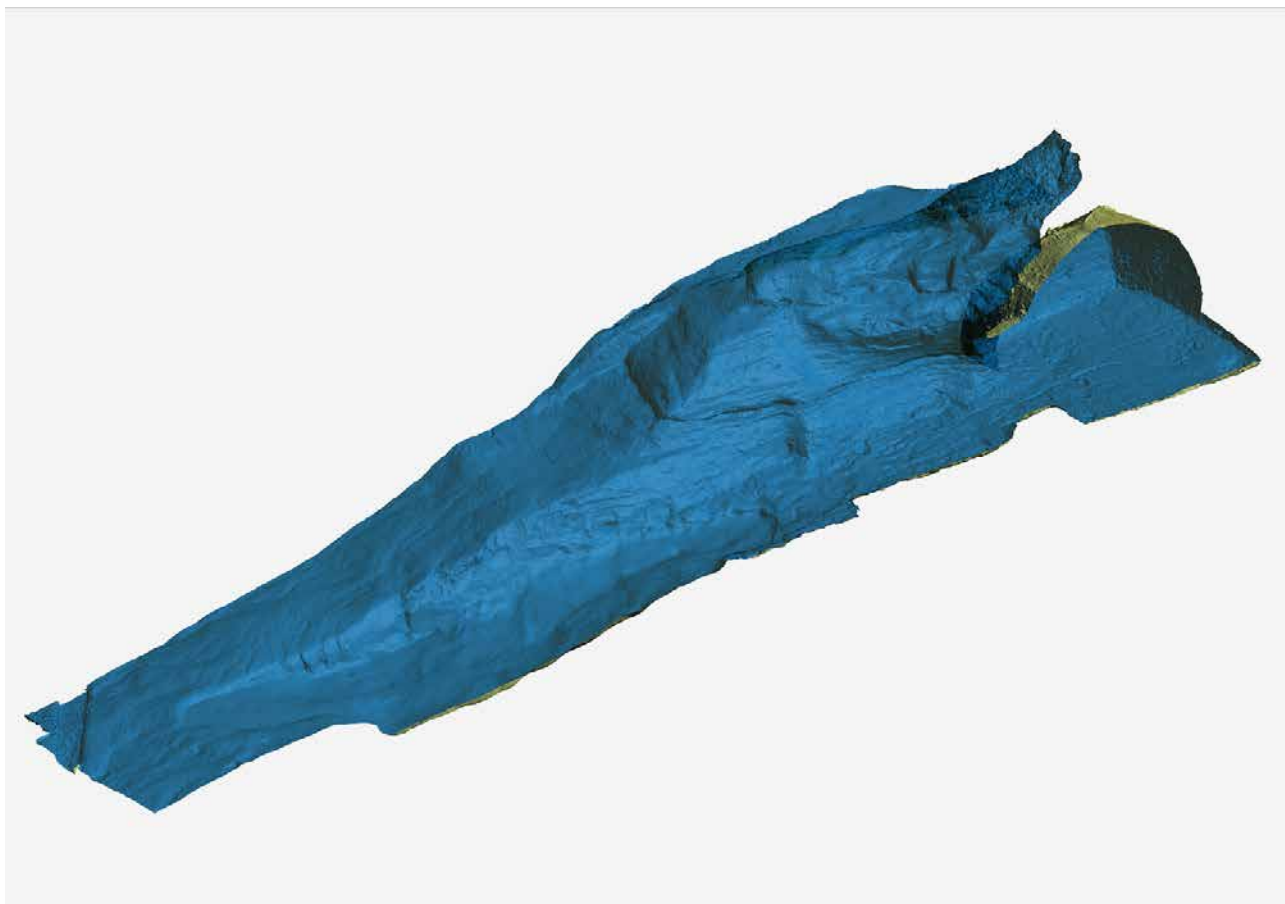


図 95 ST18 断割り

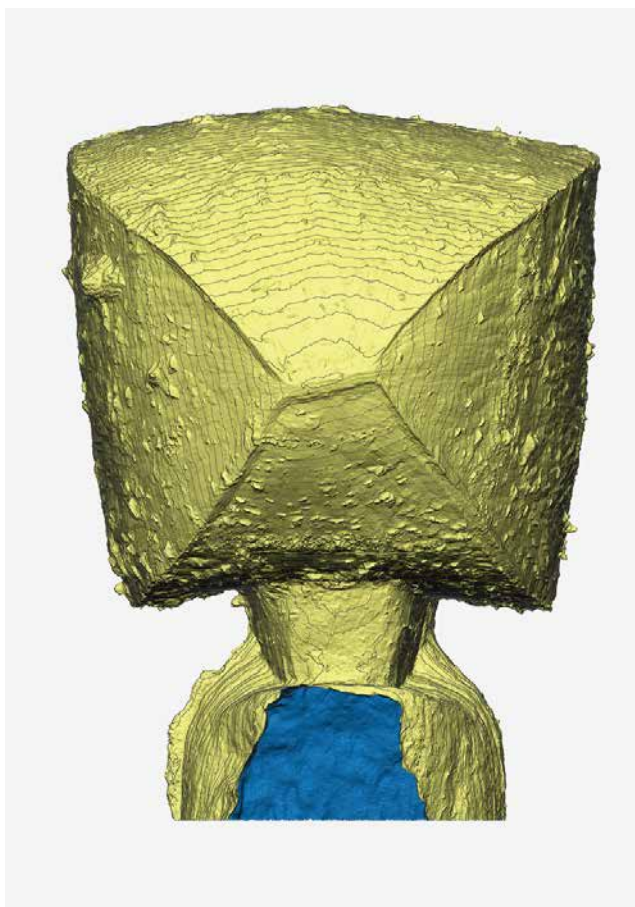


図 96 ST18 玄室天井部裏面キャブチャと天井コンター

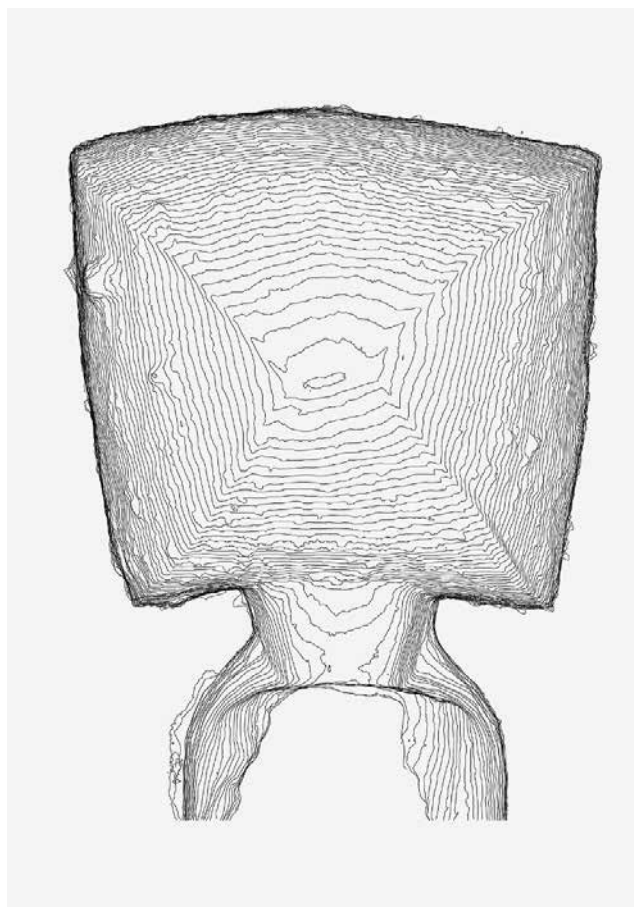


図 97 ST18 玄室天井部コンター

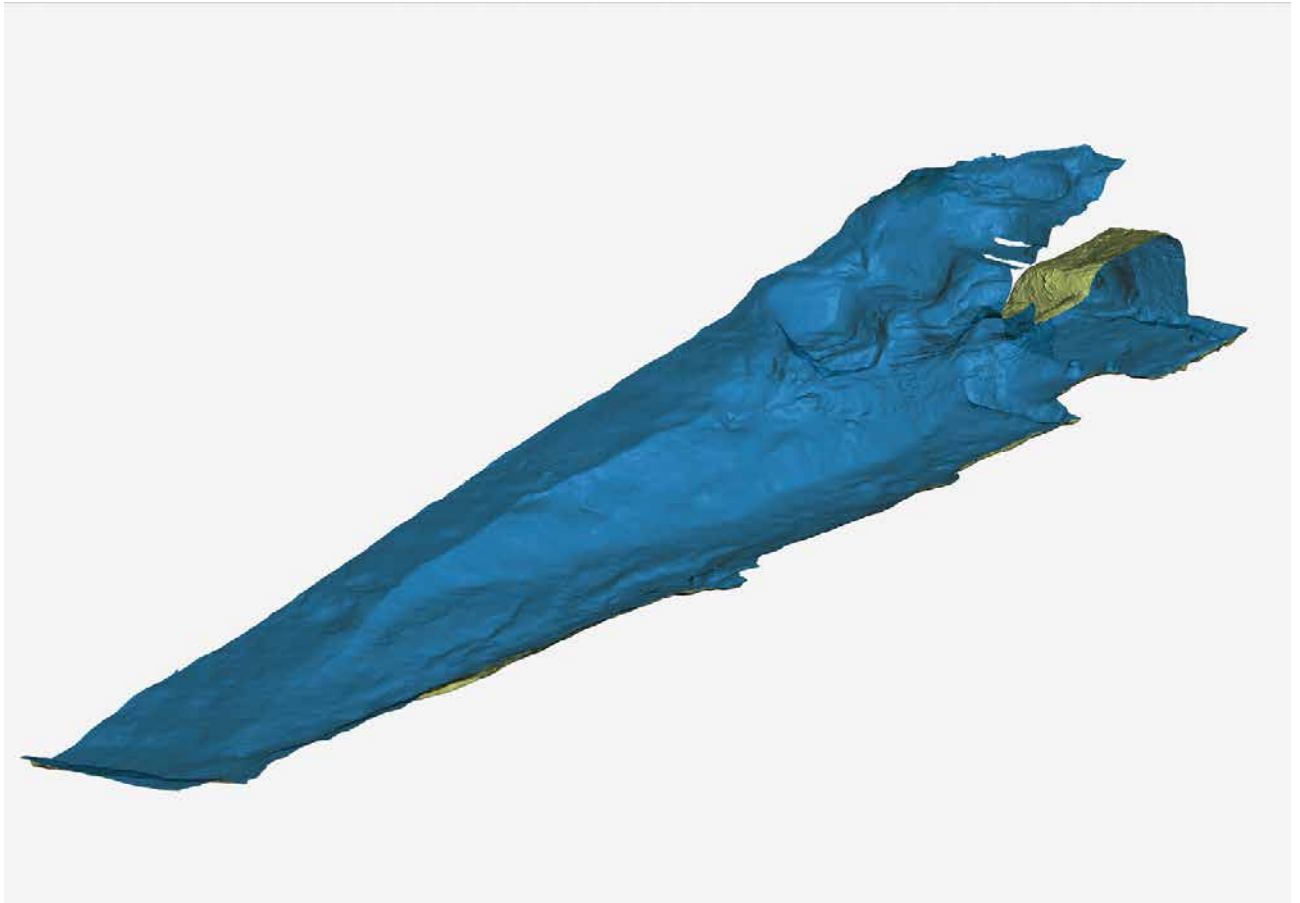


図 98 ST36 断割り

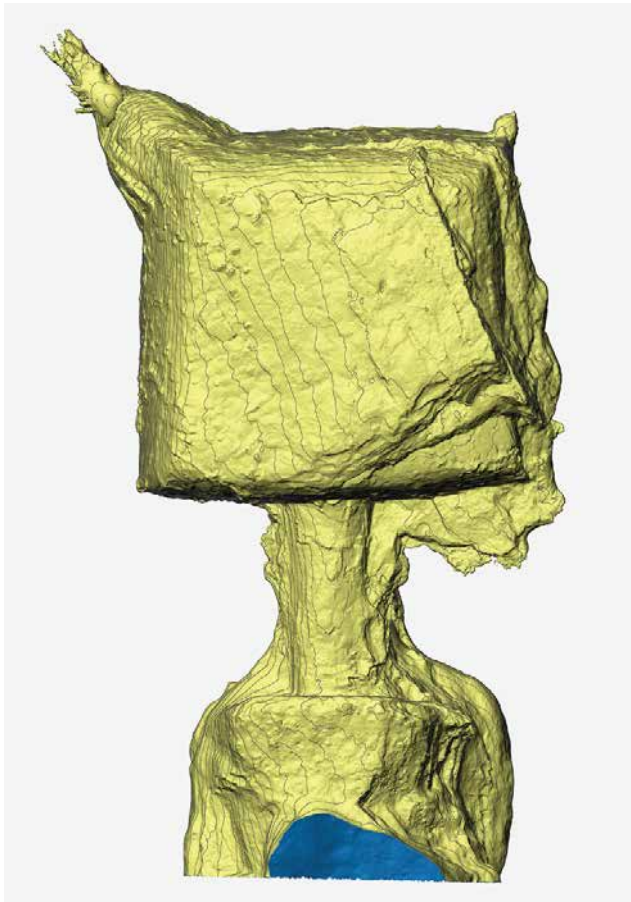


図 99 ST36 玄室天井部裏面キャプチャと天井コンター

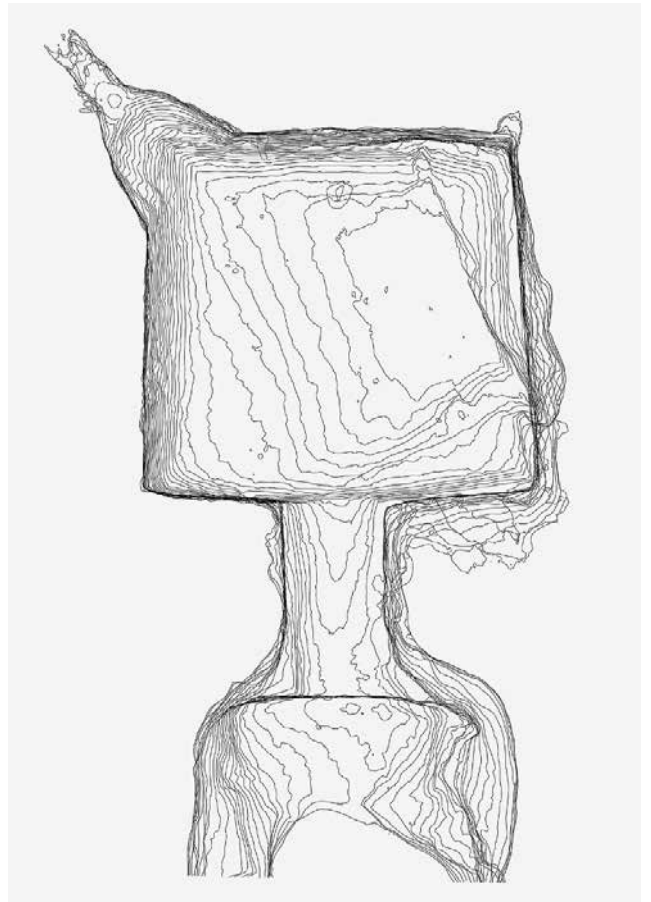


図 100 ST36 玄室天井部コンター

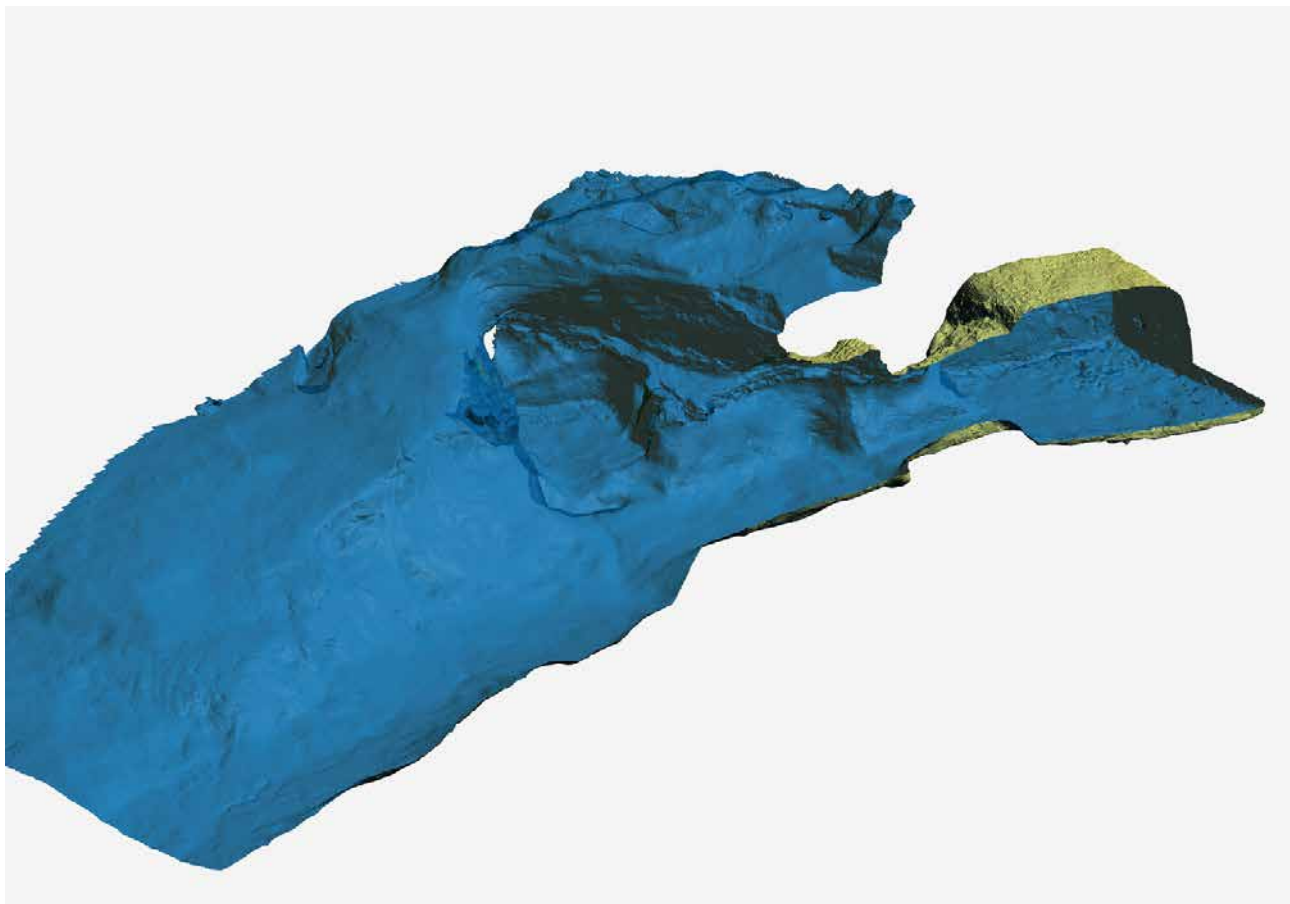


図 101 ST38 断割り



図 102 ST38 玄室天井部裏面キャプチャと天井コンター

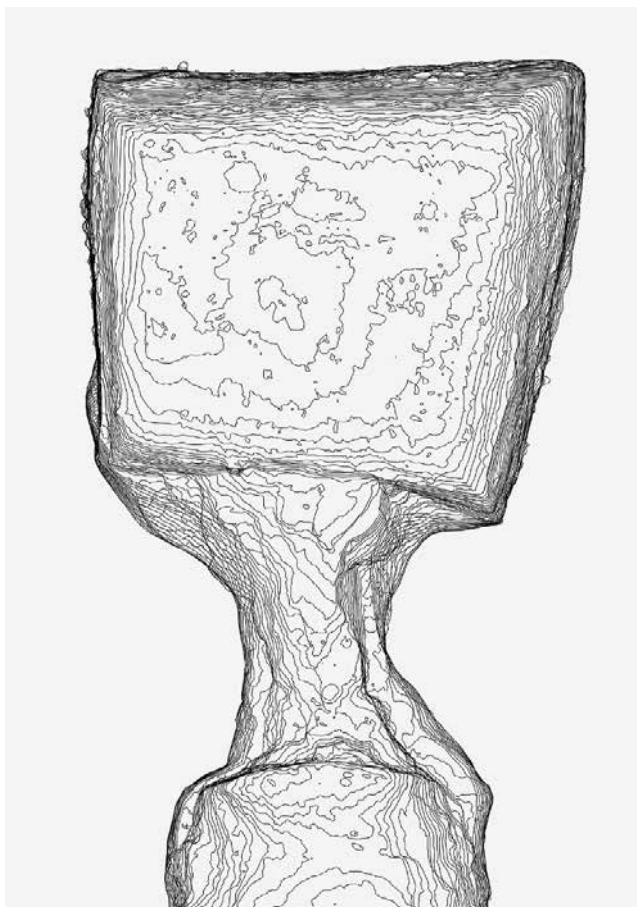


図 103 ST38 玄室天井部コンター

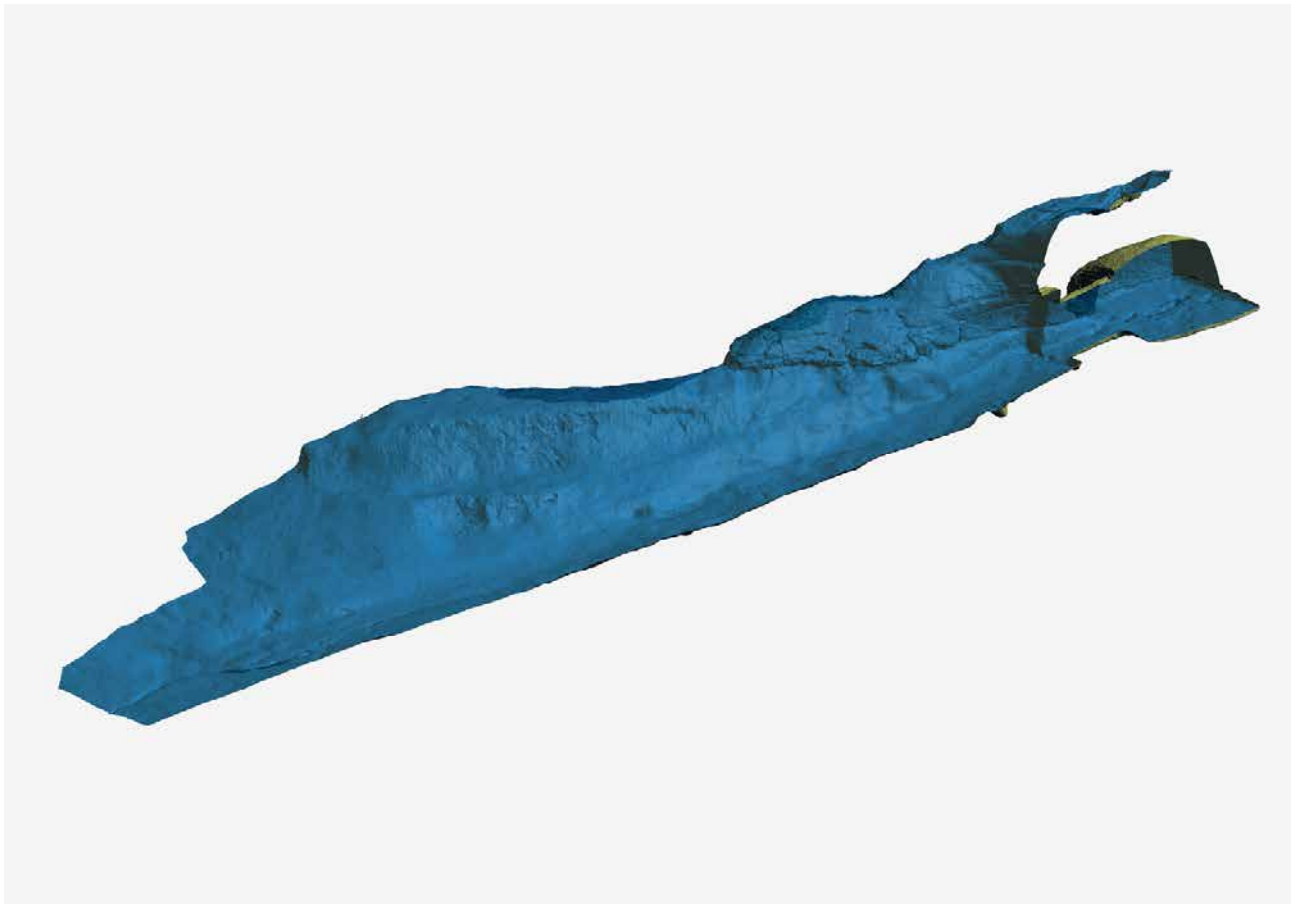


図 104 ST48 断割り



図 105 ST48 玄室天井部裏面キャプチャと天井コンター

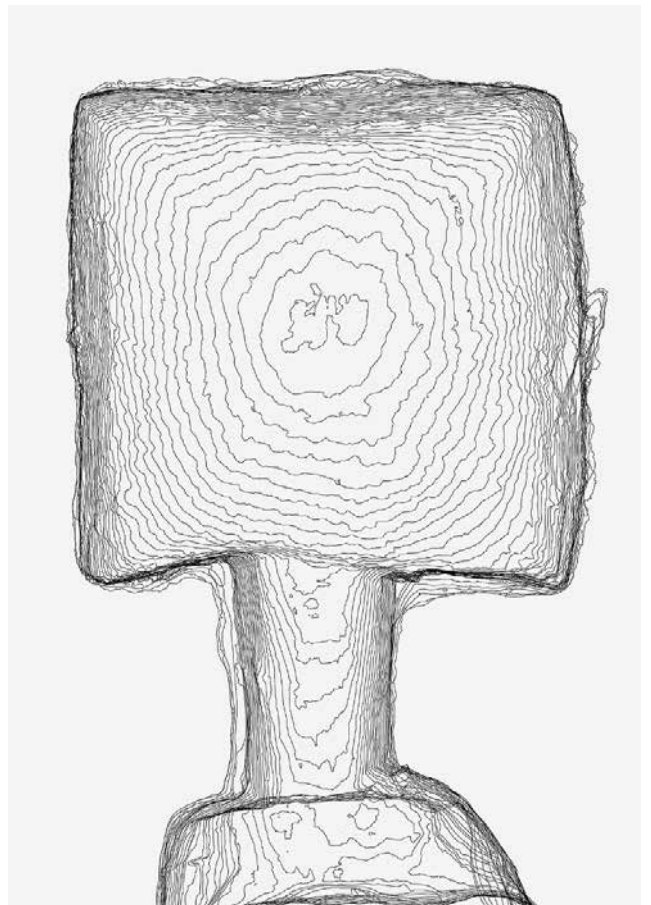


図 106 ST48 玄室天井部コンター

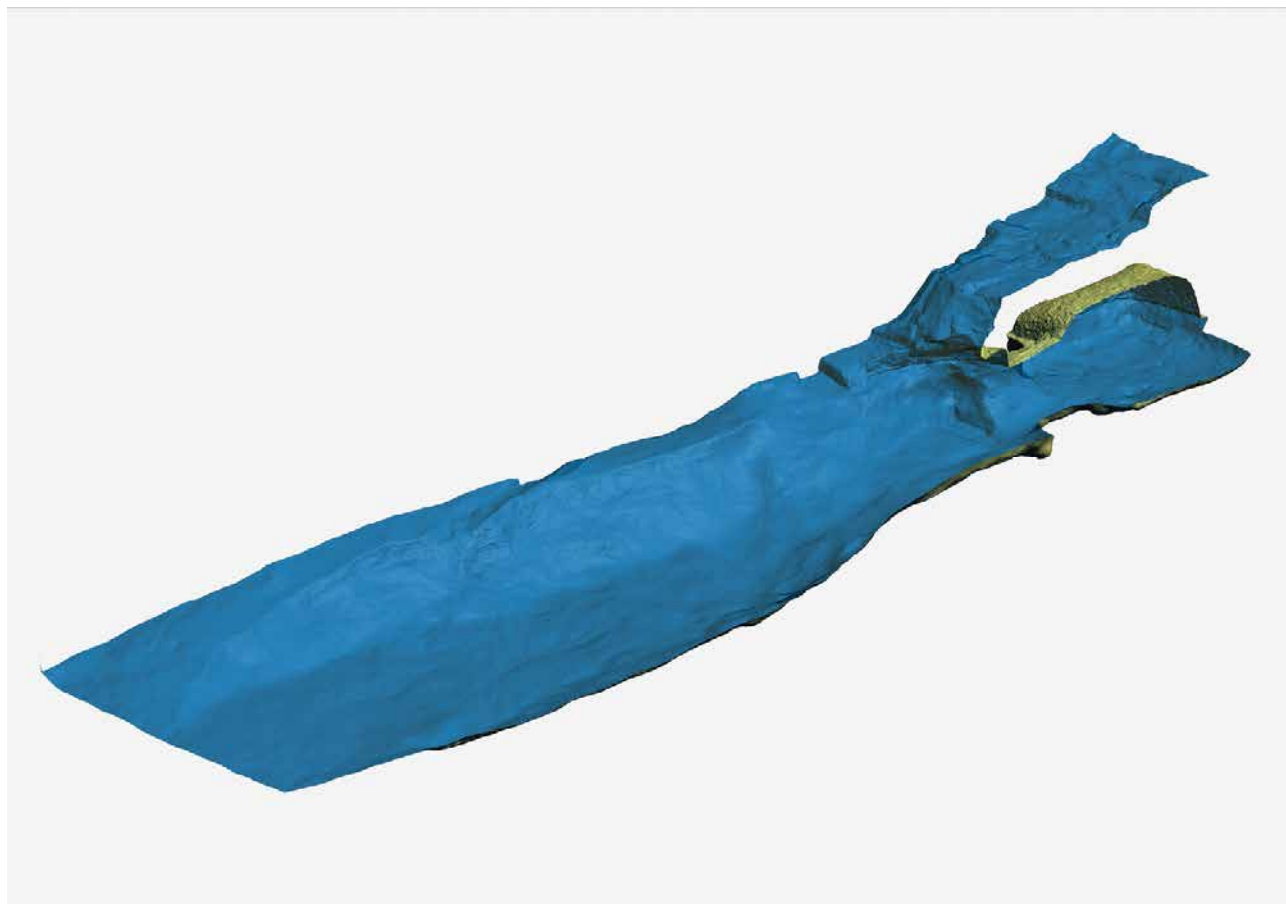


図 107 ST51 断割り

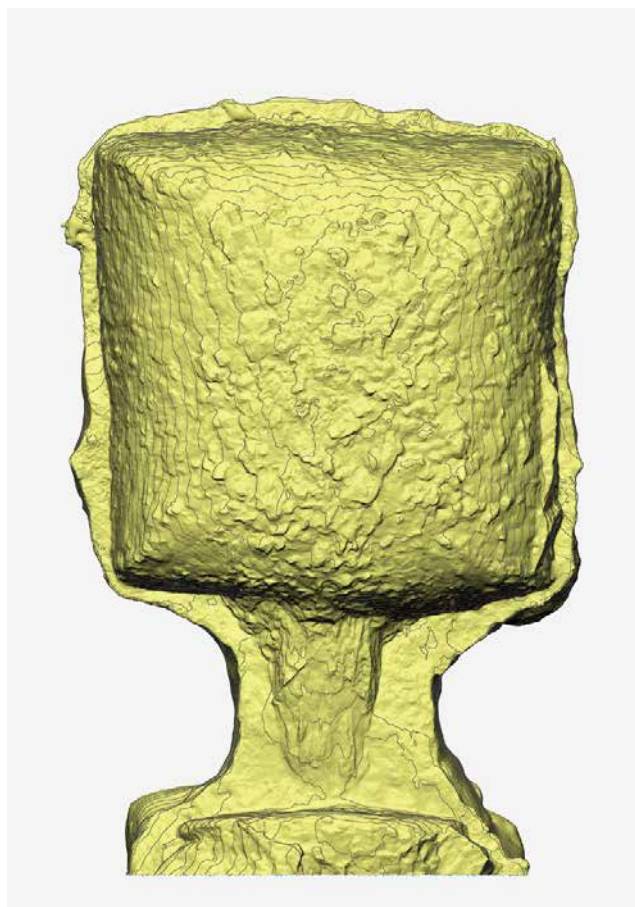


図 108 ST51 玄室天井部裏面キャプチャと天井コンター

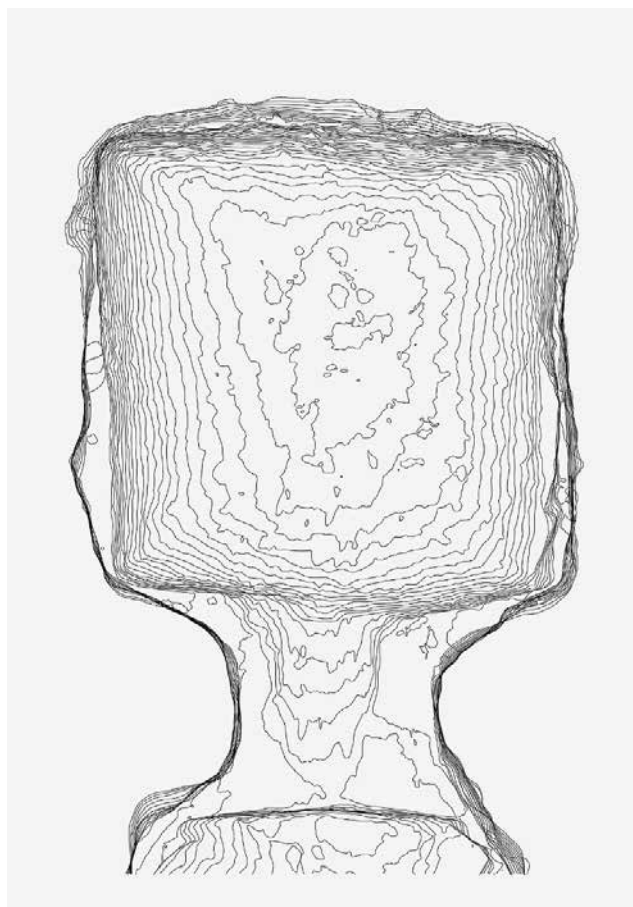


図 109 ST52 玄室天井部コンター

7 線刻計測の成果

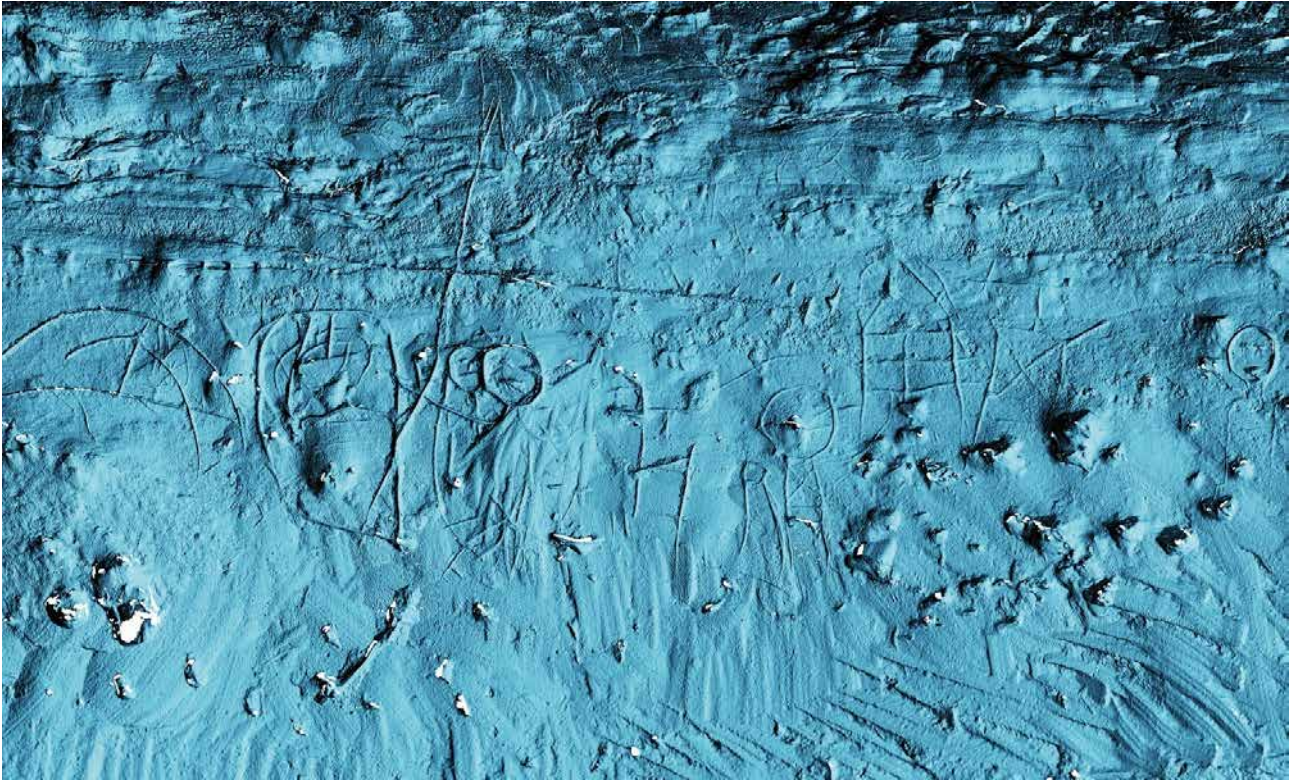


図 110 ST38 smartSCAN による計測データ形状陰影画像



図 111 フォトグラメトリカラーオルソ画像

線刻は、線の幅や掘り込みの深さも様々であった。ST38 の線刻は、彩色は無く色の差異が生じている箇所があるが、土中成分の表面への影響により生じた物であり、線刻によってはカラーオルソだけでは観察が難しい箇所があった。

図 111・112 が、3次元画像解析のデータ、図 110・113 が専用ハードウェア（据え置き型の3次元計測機 smartSCAN-HE8.0）で取得したデータである。

ST38 の玄室は図 102 で示す通り箱型で、天井や壁面は扁平である。



図 112 ST38 線刻形状陰影画像データ

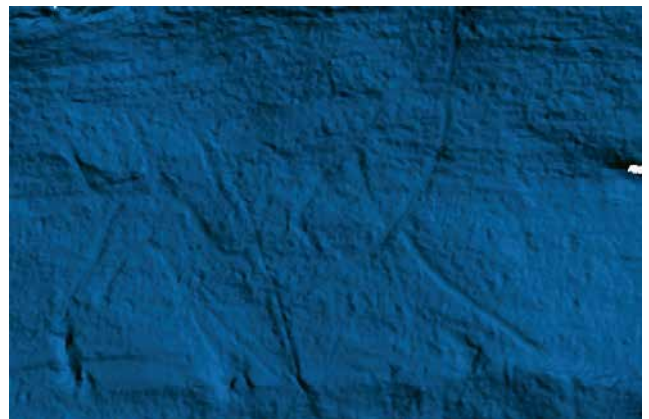


図 113 ST38 線刻形状陰影画像データ

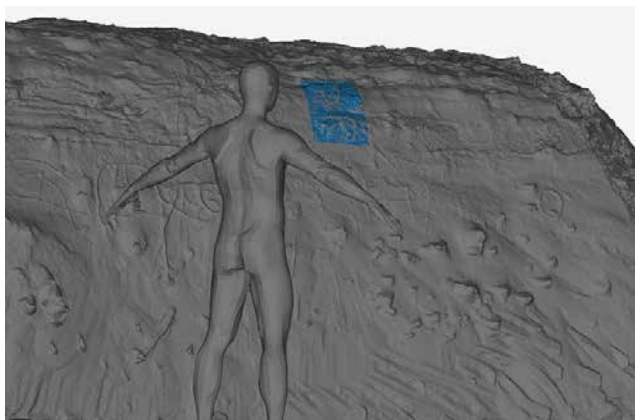


図 114 観察位置と視点（モデルは身長 155 cm）

その為、水平面に直行した立面投影面に基づき作図しても大きく構図は歪まない。しかしながら、図 114 に青でハイライトされている箇所では、図 115 の様に壁面を斜に観察する事になる。

図 116 で示すように、3 次元データでの観察では、遺物の表面を観察するように、回転を行う事が容易に可能である。

図 118 では、上下に構図が伸びる事になる。

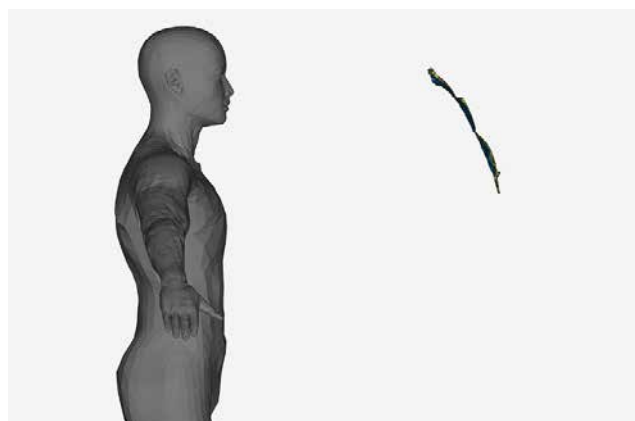


図 115 図 114 のモデルの視点を横から

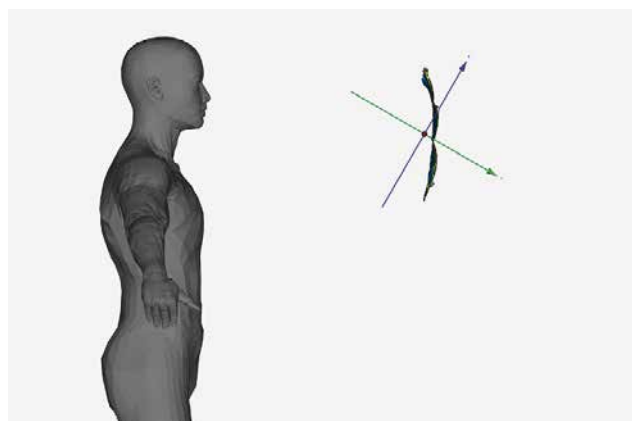


図 116 データでは容易に回転（30 度）が可能



図 117 図 115 の視線



図 118 図 116 の視線（正射投影）

描かれた壁面の傾斜を、図 116 の様に局所的に回転調整を行い、地形データで行う高さ強調（平面と高さの縮尺を異なる倍率で再現し、高さを強調して直感的に地形の高低差を捉えやすくする手法）を施すことも可能となる。

図 120 では 2 倍の強調により線刻のエッジが際立つが、周辺のノイズ（堆積層に生じる凹凸や砂質の壁面の凹凸）も目立つ。

地形データで行う処理とは逆に、観察視線方向（Z 軸）のみ倍率を落とす事も可能で、自然に生じた凹凸より深い掘り込みが、周辺の凹凸と差別化して抽出する事が出来る。

表示の違いを注意深く観察しながら倍率を調整するが、図 121 で採用した 0.5 倍の表示結果が、何らかの痕跡を観察できなくなる限界点であった。



図 119 XYZ 軸等倍

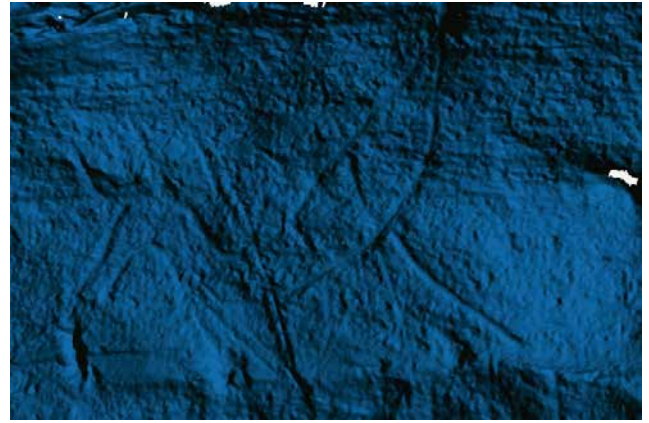


図 120 Z 軸 2 倍

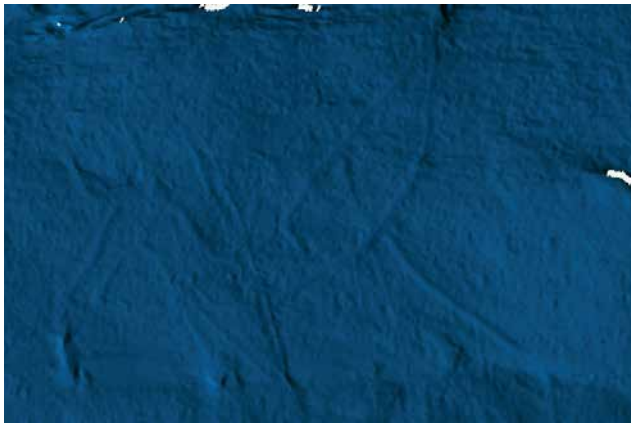


図 121 Z 軸 0.5 倍

ある軸の倍率を変えるだけで見え方が変わる様に3次元データでは、現地では行えないような観察が可能となる。

図 122 は、単に裏面から観察したキャプチャ画像であるが、表からの観察で、谷として再現されていた形態が、山となり線刻した工具痕の違いが分かりやすく観察できる。

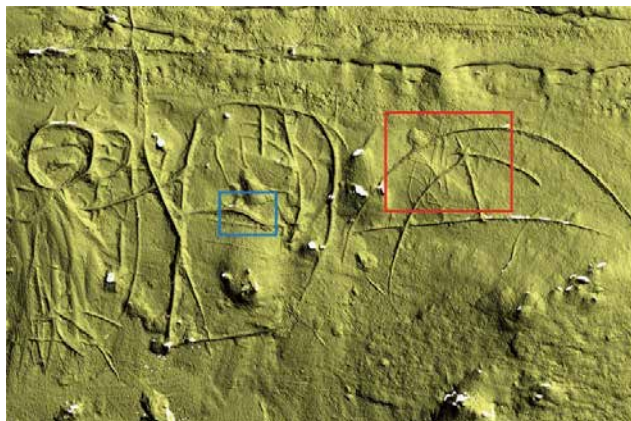


図 122 裏面からの観察

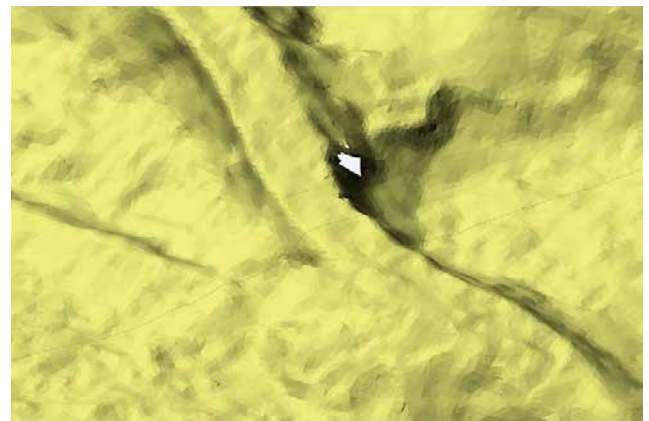


図 123 図 122 青枠の線刻下端形状

図 123 は、幅のある下端となって居る事がわかる。

図 124 は、尖った工具で下端が細く深く刻まれている事が分かる。

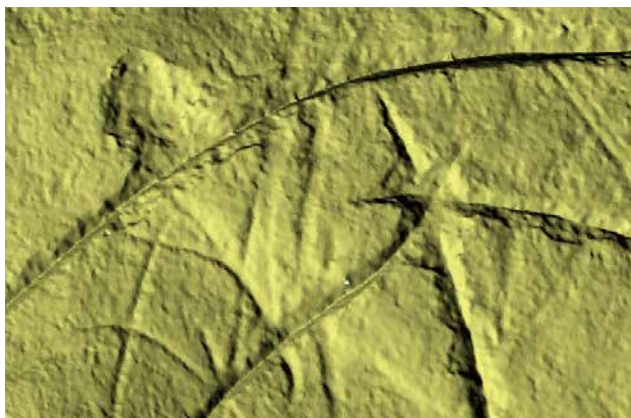


図 124 図 122 赤枠の線刻下端形状

8 まとめ

3次元計測の実施において、計測機器の諸元を参考に成果の要件を決めても、現場は清浄な実験室とは異なり、諸元にある成果を得られない事もある。

本稿では、埋蔵文化財に携わる方々が、3次元計測における機器や手法毎の諸条件を事細かに把握できる参考資料とは考えず、また緊急発掘調査の報告書資料として必要か否かを抜きにして、3次元データを用いてどのような観察資料を得られるか、という点にスポットを当てて合戦原遺跡の成果データを用い掲載を行った。

これからもデータ入力 of 機器や手法の向上、ロボットによる計測の自動化、AIによる点群データ処理やデータを用いた3Dプリント技術など、埋蔵文化財で利用可能な技術は多くある。

本稿に掲載したような、3次元データのキャプチャ画像やオルソ画像を参照して、調査担当者は事実記載を行う、有識者との情報共有に用いる、他の可視化技術を用いて論点となる定量的客観データを蓄積していくなどの様々な利用方法が進むことで、省力化や経済性を含めた3次元計測データの付加価値が向上し、緊急発掘調査における3次元計測の標準化が進んで行くと考ええる。

調査担当者が、もっと違う手順で掘れば良かったと反省がある様に、計測従事者にも反省がある。その反省の殆どの原因は、調査を担当される方と技術を提供する作業従事者との間で、その現場で想定される状況と、その時に採用可能な実施方法に関して、目的に沿った事前のコンセンサスを十分に形成し得なかった際に生じている。計画段階で良い立案が出来れば、成果として設定する条件も具体的となり、成果に齟齬が生じない。

発掘調査においてGISや座標管理の利便性があり、測量技術を応用して現場の記録が行われる様になったとはいえ、3次元計測が普及する中では、もはやその範疇や作業仕様のコピーアンドペーストだけでは成立し得ない。

国指定史跡の横穴墓の3次元計測を実施した際に、40年以上前の報告書に掲載された実測図を用いて、3次元データ化して3Dプリントを行った。3次元計測のツールが無い時代に行った記録データであったが、全体構造を再現する事が可能な、的確な記録資料であった事に驚いた。今では様々なツールを使う事で、これまで図示する事が難しかった複雑な構造を簡単に可視化する事が出来る。しかしながら、それは単にツールの進歩に過ぎない。調査の目的や観察結果と紐づけを行い、無作為に取得したデータから適切に抽出する必要がある。

新たなツールを用いる事で、思わぬ課題に直面する事もあり、解決に向けたワークフローの再構築が必要となる。3次元計測ツールにより、詳細なデータ取得が可能となっているが、それを調査担当者が閲覧可能な環境（コンピューター）が整っていない。また多岐に及ぶ業務でオペレートを習得する時間がない事も考えられる。しかしながら、コロナ禍にあってオンラインでの画面共有も当たり前に行う様になっている。専門的なソフトウェアの画面をオンラインで画面共有し、資料作成の協議を行う事も可能な時代である。本稿の図版の様に、2次元の画像化を行い現地での観察記録との整合を確認する事も可能である。

合戦原遺跡では、山元町の担当者や震災復興支援で他府県から応援に来られた方々が、類似調査の事例が少ない状況で取り組みを行う中、計測作業にも興味をお持ちいただき、必要な情報を頂きながら前向きな取り組みが出来た事に感謝の言葉もありません。

3次元計測が普及するなかで、ツールへの過期待や安易な省力化ではなく、正しく理解してより良い活用に向けた取り組みが今後も継続的に必要だと考える。

埋蔵文化財で当たり前となりつつある3次元計測の利用事例として、今後の埋蔵文化財発掘調査の発展における一助になれば幸いである。