3Dデータを用いた横穴式石室の定量的分析の一手法

青木　弘

要旨　筆者は群馬県藤岡市伊勢塚古墳の横穴式石室を対象に、三次元記録による定量的分析の成果を発表した。その目的は、横穴式石室の各部構成比と使用尺度を推定するためである。ここでは、この分析結果の提示と考察を重視したため、定量的分析に関する技法的解説は、全体の手順を述べるにとどめた。

本稿では前稿で実施した三次元点群データ（XYZ座標）を用いた定量的分析の手法を解説する。データの取り扱いから、ソフトの使用手順まで、筆者が実際に行った作業を示す。

はじめに

近年ではレーザースキャナーを用いた三次元計測やデジタルカメラを用いたSfM/MVSによって、3Dモデルが作成でき、文化財の調査・研究への導入が進んでいる。3Dモデルは様々な属性をもって構成されているが、基本的にはXYZ座標をもつ点の集合体（＝点群）で成り立っている。この三次元点群データを用いた分析は、まだ盛んではなく、これから開拓すべき状況にある。

こうした3D技術による調査と研究について、筆者は横穴式石室を対象に進めている。

それでは三次元記録から何を分析し、何を明らかにしたいのか。

3Dという立体的記録の特性を活かして、横穴式石室の構造を定性的に分析する手法もある。一方、筆者は定量的分析によって、横穴式石室の企画と使用尺度を検討した（青木2003、以下「前稿」）。現状では尺度が出土しておらず、各地の横穴式石室がどのような企画で築造されていたのか定見のないことから、三次元記録の定量的分析によって、より客観的（恣意性の少ない）に検討できる研究が必要な状況である。

本稿では、前稿で示した三次元記録の定量的分析の手法について解説する。

なお、横穴式石室の左右は、入口から奥壁を見た方向で呼称する。

1　横穴式石室の定量的分析で目的とするところ

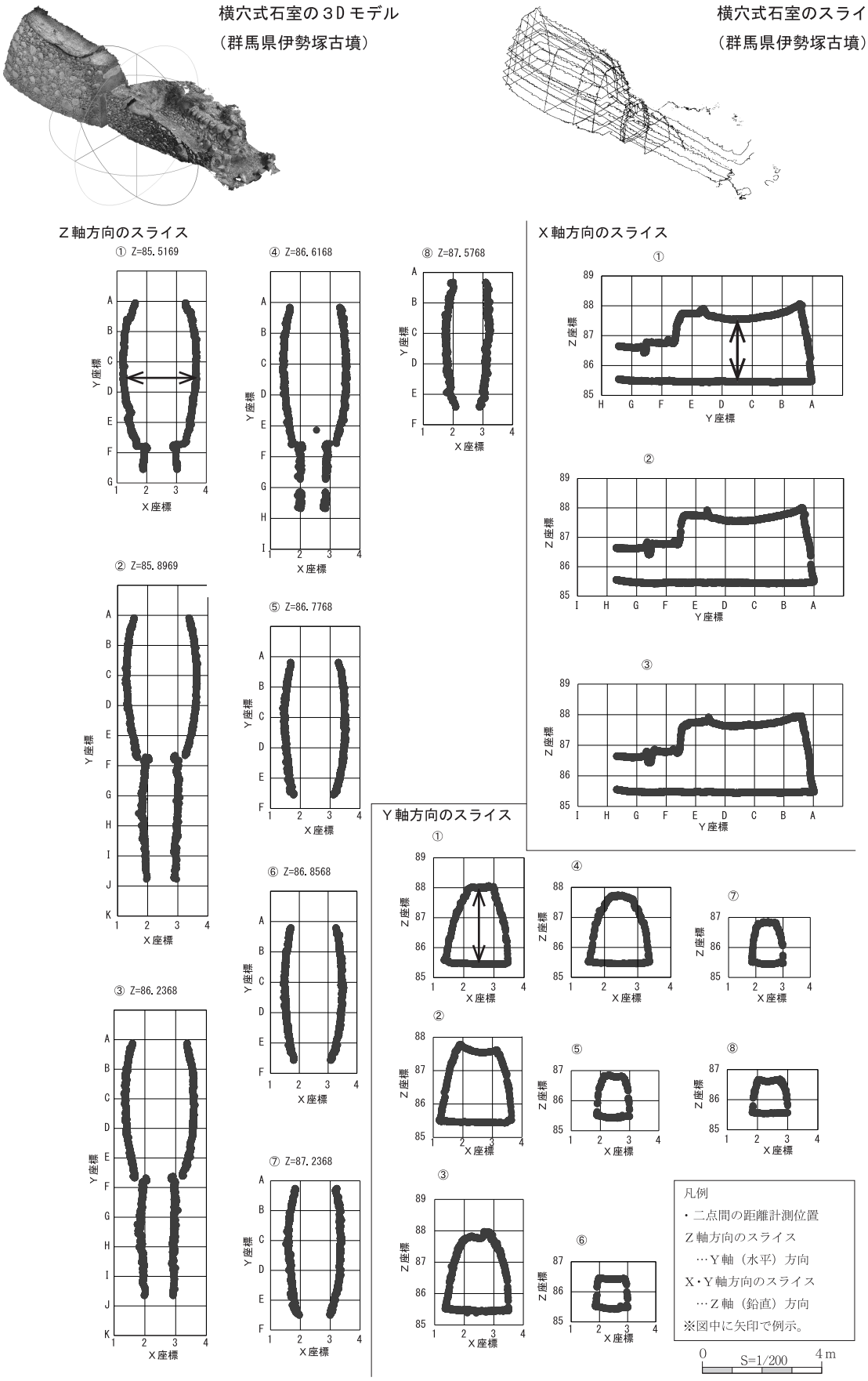
今回の定量的分析の目的は、第1図のように、横穴式石室のXYZ各方向の任意の位置におけるスライス（いわゆるエレベーション）を作成し、幅や高さなど2点間の距離を機械的に算出することによって、その算出値から横穴式石室の企画や使用尺度を求めることにある。スライスは線ではなく無数の点で構成されており、1点1点がXYZの位置情報をもつ。その位置情報を利用して、例えば同じY・Z座標上のX座標方向の2点間の距離を計算することができる。

この分析の利点は、手計測では不可能な無数の点を対象とし、2点間の距離を定量的に算出することよって、より確度の高い分析結果が得られる点にある。

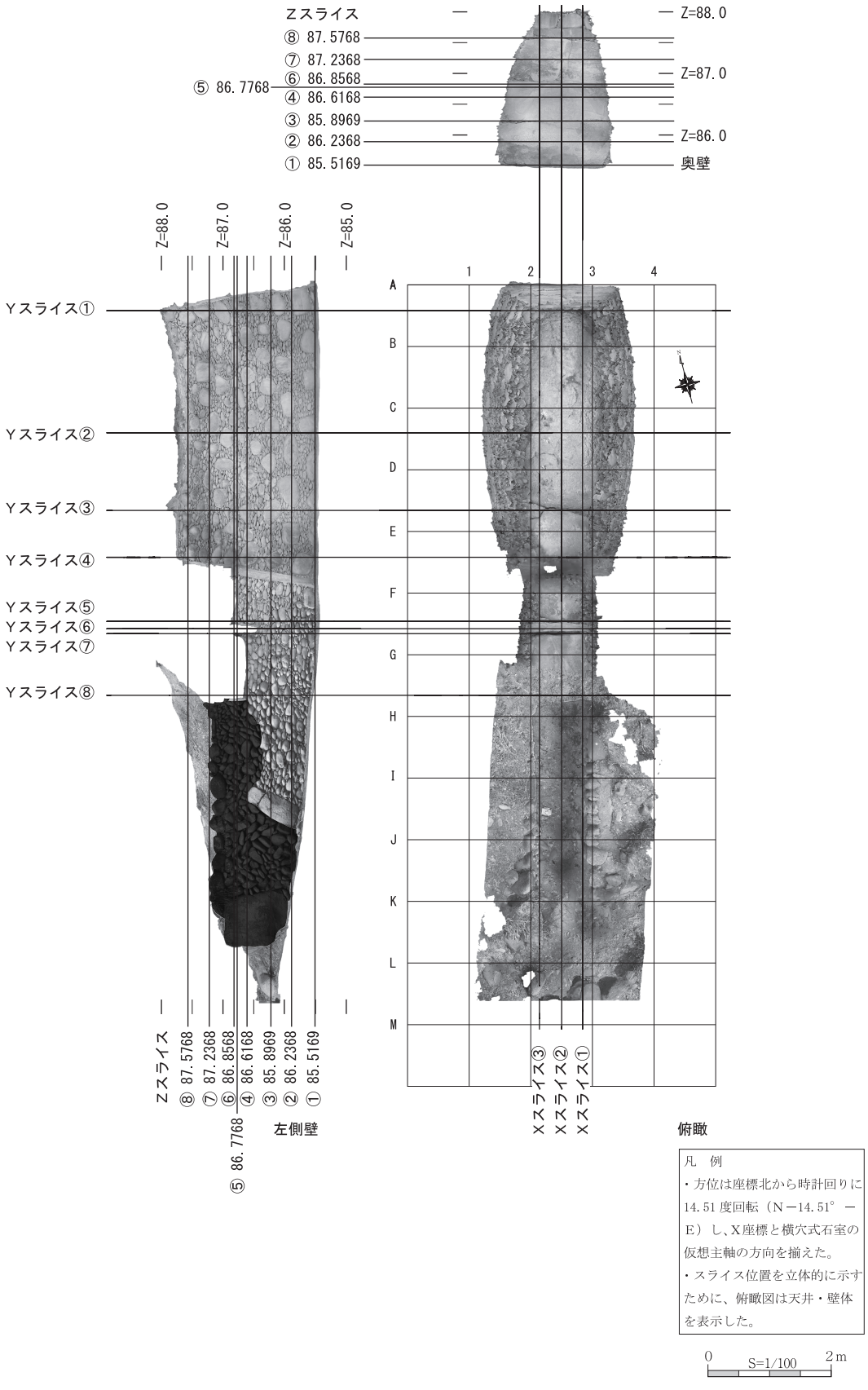
今回の場合は、横穴式石室の形態や石積みに対応させる形で、あらかじめスライス位置を決定した（第2図）。

2　SfM/MVSによる3Dモデル作成方法

現地調査における基準点測量から、横穴式石室



第１図　XYZ 軸各方向における二点間の距離に基づく散布図（群馬県伊勢塚古墳）



第２図　XYZ 各軸におけるスライスの作成位置

の撮影、データ処理の大きな流れは、（青木ほか 2017）や（山中 2017）、（呉・青木 2023）などを参照していただきたい。

また、Metashape に関するメーカーのマニュアルは、Agisoft 社のホームページで英文が公開されている（Agisoft LLC 2023）。邦文では（鳥海 2022）が詳しい。

以下では、筆者が SfM/MVS による横穴式石室の３D モデルを作成する方法を説明する。なお、これは現在の方法であり、現地の環境や各種機材・ソフトの刷新に伴い、更新していく予定である。

２－１　横穴式石室内外の清掃

三次元計測や SfM/MVS は、対象のありのままの形・状態を記録する。つまり、記録に不要な物、例えば横穴式石室では枯葉やゴミなども記録されてしまうため、記録したい状態に清掃する必要がある。

当然清掃の方法は、横穴式石室が所在する自治体の担当者とよく確認する。

２－２　カメラの設定

カメラは１機種に限定して使用することが望ましい。複数機種が混在すると、処理がうまくいかない場合や仕上がりが悪くなる恐れがある。カメラの機種は、デジタル一眼レフカメラは重く、数百枚の撮影に向かないため、ミラーレス一眼レフカメラや中堅のコンパクトデジタルカメラを使用している。

横穴式石室内は暗いため、光源は均一に光が当たるように、カメラの内蔵フラッシュを使用せず LED ライトを使う。LED ライトはカメラのホットシューに取り付けられるタイプが販売されている。これ以外に補助ライトを使用する場合は、特定の写真だけではなく、他の写真にも使用する。ただし補助ライトを使用すると、横穴式石室内の動きが制限されることもあるため、なるべくカメラに取り付けたライトだけで撮影できるとよい。

写真は一定の仕上がりにするために、しぼりを 11 に固定する（しぼり優先オート）。ISO 感度は状況に応じて 100 ～ 400 を基本とする。3200 でも処理は可能だが、写真自体は粗くなるため注意を要する。

レンズは固定し、ズームは使わない。近年の Metashape では焦点距離の固定を推奨しており、これがバラバラだとアラインメントしにくい。

仮に、デジタル一眼レフカメラでズームレンズをどうしても使う場合は、養生テープなどでズームリングを固定して動かないようにする。コンパクトデジタルカメラなどでは、ズームリングに不意に触れないように気を付ける。液晶画面に表示される情報をよく確認する。

ホワイトバランスはオートにして、はじめにグレーカードを写し込み、現像時に色調補正をする。

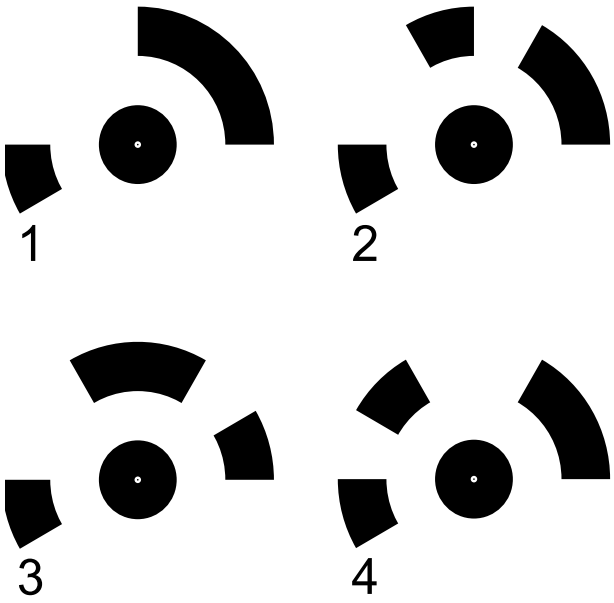
保存形式は、JPEG と RAW の同時記録。JPEG は最高画質にする。JPEG は現地で仮処理をする際の確認用として使用し、報告用には RAW データを TIFF（８bit）に現像した画像を使用する。

２－３　写真撮影

Metashape で３D モデルに位置情報を付与するための一番簡単な方法は、Metashape で作成できるマーカーを使用することである（第３図）。

このマーカーは３枚以上床面に配置する。一直線にならないように、ジグザグに配置する。マーカーは床に設置する都合上、どうしても踏まれたりして、動いてしまったり、汚れてしまうことがある。動いてしまうと正確な座標を記録することができないため、必ず写真撮影とマーカーの測量が終わるまで、マーカーが動かないようにする。

マーカーを地面に固定する方法は様々だが、例えば周囲に穴の開いた金属板を基礎にして、それに耐候性・耐水性のあるマグネットシートにマーカーを印刷して貼り付けると比較的安定し、かつ再利用ができる。金属板は釘で固定する。マグネットのマーカーは、四周に各色のビニールテープ（赤・黄など）を貼ることで、水の侵入を防ぐ



第３図　Metashape で用いるマーカーの一例

とともに、写真上でマーカーが目立つ。

写真撮影では、１枚目と２枚目が 50 ～ 60％オーバーラップするように撮る。オーバーラップしていないと、処理がうまくいかない。

対象とカメラの距離は、対象物の大きさにもよる。横穴式石室の場合は大きいので、例えば左側壁を撮影するときには、右側壁に身体（ないしはカメラ）が触れるかどうかくらいまで下がって撮影するケースが多い。壁体がもろい、あるいは漆喰等で触れない状態の場合は、身体や機材がぶつからないように注意する。この距離は、一度決めたら極力変えない方がよい。

撮影の順序は、どこから始めてもよいが下記に留意する。

まず、後々写真を見返したときに、撮影の順序がおおよそ分かるように、一定のルートで撮影する（入口左側壁最下段→中段→最上段→奥壁最下段→中段・・・といった具体に）。

マーカー周辺は、意図的に細かく枚数を重ねて撮る。マーカーが写った写真の枚数が少ないと、座標設定で誤差が大きくなる。

各部隅角・玄門・梱石など壁体間の接する箇所や突出部は、斜め方向のカットも必ず撮影する。

撮影後、必ずピンボケや撮影漏れがないかを確認する。撮影ミスがあった場合は取り直す。

撮影枚数は、横穴式石室１基で 1000 枚以内が望ましい。多くても 1500 枚。2000 枚を超えるとデータが重くなるため、モデルを「玄室モデル」や「羨道モデル」など複数に分けることも検討するべきだが、モデルが複数になればなるほど作業の手間が増えるため、１つのファイルで済むように、撮影枚数を調整する。

現地で撮影が完了（複数日にまたがる時は作業終了時）した時に、Metashape で仮処理（JPEG、低精度）をして、アラインメントするか確認する。

写真を保管するフォルダは、オリジナルは日付ごと、編集に使用するフォルダは JPEG と RAW（TIFF 8bit）を分けるなど、第三者がみてもわかるようにする。CloudCompare で OBJ ファイルなどを使用する可能性がある場合は、フォルダ名をすべて英数字にしておく（日本語が入っているとエラーが起きる）。

３　使用するパソコンとソフトについて

筆者が分析に使用したパソコンは、2021 年に購入した ASUS 社 TUF GAMING A15（ラップトップパソコン）である。主要なシステムとスペックは、OS（Windows10 Home64bit）、プロセッサ（AMD Ryzen9 4900H with Radeon Graphics3.30GHz）、ストレージ（SSD500GB）、メモリ（16.0GB）、ビデオカード（NVIDIA GeForce RTX2060）である。なお、使用するデジタルデータ類は、パソコンへの負荷や処理速度の低下を避けるために、パソコンの内蔵ストレージには保存せずに、外付 HDD や外付け SSD を使用している。

パソコンは、より高性能なデスクトップパソコンやラップトップパソコンであるに越したことはない。特に、画像処理と点群処理ソフトを使用す

るためには、16.0GB 以上のメモリや相応のビデオカードが搭載されていることが求められる。

使用したソフトは、3D モデルの処理は Agisoft 社 MetashapePro（Ver.1.7.2)、三次元点群の処理は GNU GPL の CloudCompare（Ver.2.11.3)、座標値の関数処理とグラフ作成は Microsoft 社 Excel（Office365.Ver.2204)、図の製図は Adobe 社 IllustratorCC（Ver.26.2.1）を利用した。ここに記載した各ソフトのバージョンは、作業を行った 2022 年上半期以前のもので、現在はそれぞれバージョンのアップデートが進んでいる。

4　3D モデルの作成と出力

4－1　Metashape による 3D モデルの作成

Metashape による画像処理工程は、下記のように大きく分かれる（第 1 表)。

①　写真の読み込み

はじめに写真を読み込む。「モデル→写真の追加」で該当する写真を追加する。なお、読み込むことで写真一枚一枚にパスが作成されるため、写真を移動、ないしはフォルダのリネームや移動を行うと、読み込みエラーが生じる。

②　品質の概算

読み込んだ写真の品質を計算する。写真を選択し、「右クリック→品質の概算」で全ファイルを対象に実行する。概算値は 0.5 以上が良好な画像とされ、0.5 未満（特に 0.3 以下）は、画像のブレや色調等に問題があるため、使用に適していない。そのため、3D モデルの作成では、使用する画像は 0.5 以上を基本にしている。

③　写真のアラインメント

写真のアラインメントは、撮影写真の位置関係を計算し、その後の処理の基礎となるタイポイント（写真間の重複部分）を生成する作業である。「モデル→アラインメント」で実行する。

品質は、「最低・低・中・高・最高」の 5 段階を選ぶことができる。「最低」や「低」は現地での仮処理の際に利用し、報告や分析には「高」以上を使う。

アラインメントの結果が良好であれば、次の工程に進む。なお、マスク処理（不要部分を予め排除する処理）はこの前の段階でできる。ただし、横穴式石室の場合は室内で撮影し、全面がモデルに必要な対象となるため、基本的には行わない。墳丘のモデルを作る場合には、周囲の構造物等、不要なものを消すために実施することがある。

④　カメラの最適化

カメラの最適化は、アラインメントした画像のパラメータや点群座標を最適化するものである。チェック項目は全てにチェックを入れて行う。

⑤〜⑦不要部分の削除・カメラの最適化

アラインメントした結果に対して、⑤不要部分を削除し、⑥３D モデルを作る領域を決定した後、改めて⑦カメラの最適化を行う。カメラの最適化は、⑤で点群を削除し、④とは異なる状態になるため実施する。

⑧・⑨マーカーの検出と位置修正

配置したマーカーは、⑧自動検出機能で検出し、各マーカーの位置と名称を確認の上、修正する必要がある場合には、⑨修正作業を行う。

⑩〜⑫マーカーの座標計算と入力

Metashape で作成する 3D モデルは、横穴式石室のような構造物の場合、国土座標に基づく座標とスケールを与える必要がある。何も設定しなければ、３D モデルの縮尺と位置は定まらない。この作業には、写真撮影時にマーカーを設置し、マーカーをトータルステーションで測量する手法がある。

マーカーを利用する場合、⑧・⑨で位置が確定したマーカーについて、一つ一つマーカーを選択し、座標を入力する。なお、この座標は、トラバース測量や GNSS による測量を現地で行い、各マーカーの座標を測定して記録した点を用いる。

以上の数値の入力作業を終えて、データを「更

第 1 表　Metashape の作業工程

No.	基本情報	備　考
1	対象	遺跡の名称
2	目的	仮処理か、報告・分析用か
3	撮影日	西暦 / 月 / 日
4	使用ソフト・バージョン	
5	写真ファイル形式	JPEG か TIFF
6	写真の深度合成	
7	写真枚数（アライン枚数）	アライン枚数 / 写真枚数
8	Metashape 上の誤差（㎜）	
9	写真撮影の設定	「しぼり値」などを記入。
10	RAW 現像（ホワイトバランスの調整）	調整の有無を記入。
11	RAW 現像（TIFF8bit に書き出し）	TIFF8bit
No.	**作業工程**	**備　考**
1	写真の読み込みと品質の概算	おおむね 0.5 以上を採用。
2	マーカー検出	マーカーのある写真だけを選択して実行すると少し早い。
3	マスクの準備	マスク処理は必要に応じて実施。
	写真のアラインメント	
	高密度クラウドの構築	
	メッシュの構築	
	データ整理	いらない部分を消す。
	マスクの実施	モデルからインポート
4	写真のアラインメント	マスク適用先：キーポイント
5	カメラの最適化	
6	不要部分の削除	
7	領域の決定	ここで領域を決めると、基本的に以後変更できない。
8	カメラの最適化	
9	マーカー検出	「ツール→マーカー→マーカーの検出」
10	マーカーの位置修正	
11	マーカーの座標計算	座標入力マーカーは、プロジェクションの枚数が多く、誤差の少ないものを選ぶ。
12	座標の入力と更新	
13	スケールバーの作成	必要に応じて実施。
14	カメラの最適化	
15	タイポイントの削減	必要に応じて実施。段階的選択で、「プロジェクションの精度」、「再構築の不確実性」、「プロジェクションエラー」をそれぞれタイポイントの 1/10 削減。
16	高密度クラウドの構築	「最低→低→中→高」と段階を踏む。最後は「信頼度の計算」にチェックを入れる。
	※深度マップ設定	「弱」を基本。
	信頼度の計算	高密度ポイントクラウドの信頼性を表示し、確認する。
17	高密度クラウドの複製	18・19 を実施する場合は、コピーを使う。
18	信頼度の低い点群をフィルタリング	
	信頼度の低い点群を選択、削除	「ツール→高密度クラウド→信頼度でフィルタリング」。「最小」の数値を任意で設定し、信頼度の低い点群を非表示にする。逆の数値を入力して信頼度の低い点群だけを表示して削除する。削除後、フィルタを解除する。
19	高密度クラウドをフィルタリング	必要に応じて実施。
20	メッシュの構築	
	※ソースデータ	「高密度クラウド」
	※サーフェスタイプ	「自由形状（3D）」
	※ポリゴン品質	
21	不要部分の削除	
	3D モデルを複製	
	選択ツールで不要部分の削除	
	浮いた小さなメッシュを削除	「モデル→段階的選択→接続しているコンポーネントサイズ」で調整して削除。
22	テクスチャの作成	
	テクスチャーの種類	拡散マップ
	テクスチャーの種類サイズ	4096 × 1 「穴を埋める」か「穴を埋めない」か選択 ゴーストフィルターを有効にする。
23	DEM の作成	必要に応じて実施。
24	オルソ画像の作成	
25	3D データの書き出し	OBJ や PLY ファイルなど

新」することで、理論値と実際に作成した 3D モデル間の誤差が計算される。誤差が大きい場合は、座標やマーカーを再検証する。

⑬カメラの最適化

前段階で座標を入力したため、ここで再度、カメラの最適化を行う。

⑭タイポイントの削減

⑮以降の作業に入る前に、データが重くなっている場合、タイポイントの削減を行う。

⑮高密度クラウドの構築

高密度クラウドは、深度情報をもつ点群を指す。この作業では、作成する品質を「最低・低・中・高・最高」の５段階を選ぶことができる。報告や分析の場合、「高」以上としている。深度マップの設定は「弱」である。

⑯メッシュの構築

メッシュの構築では、写真のピクセル情報から、表面の三次元位置を計算し、ポリゴン等のメッシュを作成する。ここでは深度マップとポリゴンの品質を「低・中・高・最高」の４段階を選ぶことができる。やはり報告や分析の場合、「高」以上としている。写真枚数が多くデータが重い場合、この段階で処理ができなくなることがある。

⑰テクスチャの構築

テクスチャの構築は、作成した 3D モデルの表面に写真を貼り付けることで、色情報を付加する作業である。

⑱オルソ画像の作成と出力（エクスポート）

完成した３D モデルは、任意の方向で正射投影画像（オルソ画像）を作成できる。「オルソモザイクの構築」から、方向や精度の設定をして出力する。この画像は、TIFF や JPEG 等の画像に出力できる。

⑲３D モデルの出力（エクスポート）

一方で３D モデルについては、モデル自体やポイントのみなど、必要に応じて使い分けて出力できる。ファイルの保存形式は、OBJ や PLY など汎用形式も選択可能である。

ここまでが、Metashape 上で行う作業である。これらの作業によって、撮影した写真から点群やポリゴン、色情報を有した 3D モデルが作成できる。

４－２　QGIS による座標網図の作成

Metashape で作成した俯瞰ないし断面・立面方向のオルソ画像（GeoTIFF 形式）は、QGIS で読み込み、座標方眼やスケールの付与ができる。

作業は「レイヤ→レイヤの追加→ラスタレイヤの追加」から対象ファイルを選択し、「プロジェクト→新規印刷レイアウト」で体裁を整える。具体的には縮尺と印刷サイズを決めた上で、座標グリッドやスケール、方位の追加を行う。

グリッドは、イラストレーターで再度編集することもあるため、グリッドあり版となし版の２種類を作成しておくとよい。

エクスポート（出力）は TIFF や PDF 等を選択し、必要な解像度で行う。

5　CloudCompare によるデータの整理

５－１　CloudCompare とは

CloudCompare は３D 点群、３D モデルを編集することができるソフトウェアである。GNU GPL ライセンス下で開発、配布されており、利用に費用等は生じない。

本ソフトによる作業工程は以下の通りである（第２表、第４図）。

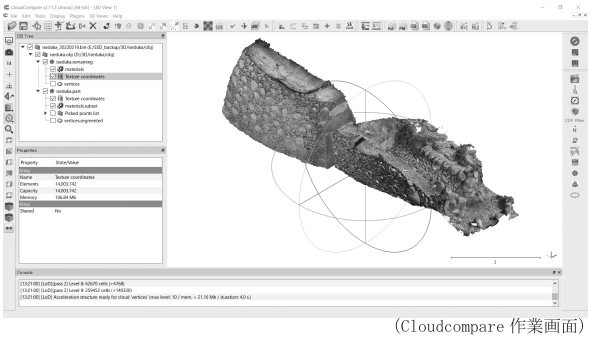
５－２　Metashape から３D モデルの出力

前章⑲で示したように、Metashape から３D モデルをエクスポートする。前稿では、「エクスポート」→「ポイント」を選択し、OBJ ファイルで出力した。ポイントの密度は「高密度」・「低密度」が選択できる。伊勢塚古墳の横穴式石室では、「高密度」で出力すると、CloudCompare における点数は、155,188,577 点（13.9GB）、「低密度」で出力すると、951,243 点（87.6MB）だっ

第２表　CloudCompare と Excel の作業工程

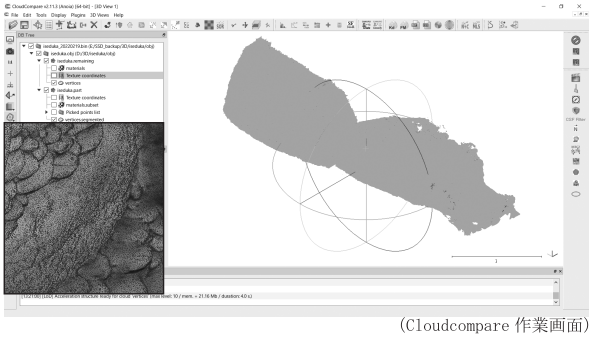
No.	CloudCompare の作業工程	備　考
1	ファイルの読み込み	ファイル・フォルダ名は半角英数字。
2	法線ベクトルの計算	「Edit（編集）→ Normal（法線）→ Compute（演算）→ per vertex」
3	点群の間引き	必要に応じて実施。Sub Sampling ツールを使用。
4	点群の削除（手動）	必要に応じて実施。segment ツールで不要箇所を手動で削除する。
5	点群の削除（自動）	必要に応じて実施。SOR filter ツールを使用。
6	座標リストの作成	回転前の XYZ 座標を数点（６点ほど）記録。Point list picking ツールを使用し、CSV ファイルに出力。スクリーンショットでポイントの位置を控える。
7	３D モデルの主軸の決定	横穴式石室の場合、仮想主軸を決定する（Illustrator 等を用いて角度を算出）
8	３D モデルの回転	数値入力で回転する場合は「Edit（編集）→ Apply Transformation」で Axis,Angle タブの Rotation axis で軸を決め、Rotation angle に角度を入力する。
9	座標リストの更新	回転前に対して、回転後の座標がどのように変化したか記録する。
10	回転後の座標網図の作成	「Tools → Projection → Rasterize」 画像出力後、QGIS で編集する。
11	X 軸の等間隔スライス	Mesh ツリー内の Vertices を選択。Cross Section ツールで２cm 間隔で各軸をスライス（間隔は任意）。厚さ 0.002m、間隔 0.018m。
12	Y 軸の等間隔スライス	上記と同じ。
13	Z 軸の等間隔スライス	上記と同じ。
14	スライスの選択と整理	必要なスライスを選択し、DBTree を整理する（リネーム、削除等）。
15	スライスの複製	２点間の距離を算出する上で、例えば左側壁のみのスライスと右側壁のみのスライスという相対する２点を含む点群のデータを個別に用意するために、スライスを複製して不要点群を削除する。
16	スライスの出力	CSV ファイルで出力、スライスの図像をスクリーンショットで記録しておく。
17	スライス作成箇所位置図の作成	３D モデルとともに、選択したスライスを表示させて、それをオルソ画像で出力し、位置図を作成する。
18	（補足）三次元方眼図像の作成	分析終了後、実施する。
No.	**Excel の作業工程**	**備　考**
1	CSV ファイルの読み込み	１つのスライス（互いに相対する２種の点群）につき、１つの Excel ファイルを作る。２種の点群ははじめはシートを分ける。
2	ROUND 関数	両者の点群の桁数を揃える。「=ROUND(対象行列 ,3（桁数））」
3	列の並び替え	基準となる座標軸を先頭にする。
4	行の並び替え	後に作る散布図やヒストグラムが、スライスと同じ形を描くように、降順にする。
5	連番を振る	２種の点群のうち、座標数が少ない方に連番を振る。
6	座標列の複製	２種の点群のうち、座標数が少ない方を隣接する行列に複製する（XLOOKUP 関数で範囲指定するため）。
7	XLOOKUP 関数	２種の点群のうち、座標数が少ない方を XLOOKUP 関数で処理し、対応する２点を導き出す。「=XLOOKUP(検索値 , 検索範囲 , 戻り範囲 , 見つからない場合 , 一致モード , 検索モード)」
8	重複する座標の強調表示	XLOOKUP 関数を実施した点群列に対して、「条件付き書式→セルの強調表示→重複する値」で強調表示をする。
9	データの複製	新しいシートにデータを複製する。コピー方法は「値の貼り付け」。
10	シートの整理	タイトル行を１行にする。
11	関数処理結果の確認	スライスした軸の座標同士をマイナスして、０になるか検討する。
12	２点間の距離の計算	「=SQRT((A2-D2)^2+(B2-E2)^2+(C2-F2)^2)」
13	重複データの削除	「データ→データツール→重複の削除」→「連番」、処理後、画面に重複数と残存数が表示されるのでメモしておく。
14	確認作業（散布図の作成）	スライスが元の形態に即しているか、散布図で確認する。
15	確認作業（ヒストグラムの作成）	座標分布の確認。
16	散布図とヒストグラムの作成	散布図は方眼を cm 単位などに設定すると縮尺を与えられる。
17	散布図とヒストグラムの出力	

1　点群処理ソフト上に表示された横穴式石室の３Ｄモデル



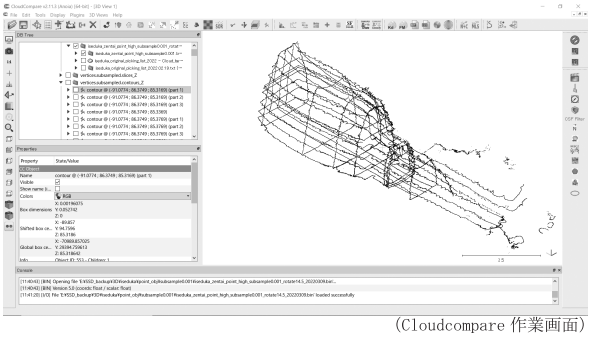
（Cloudcompare 作業画面）

2　点群（左下図：拡大（石材上の点の集合））表示と回転



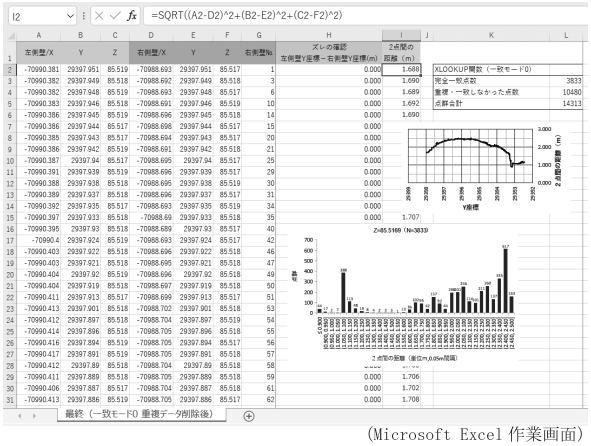
（Cloudcompare 作業画面）

3　ＸＹＺ軸方向のスライス（切断）と点群の csv ファイル出力



（Cloudcompare 作業画面）

4　点群の関数処理ソフトへの出力とデータ処理・グラフ化



（Microsoft Excel 作業画面）

第 4 図　CloudCompare から Excel の作業工程

た。ここでは低密度は分析に不十分と判断し、高密度を選択した。これが後のデータ処理前のオリジナルファイルである。

なお、データを出力する際に、フォルダ名・ファイル名は半角英数字で保存する。日本語が入ると CloudCompare ではファイル展開できないためである。

もしもファイルを展開し、画面下段に法線未計算の警告が表示された場合は、法線ベクトル（normal）の計算が必要である。その場合は左上に表示されている DBTree のメッシュを選択し、「編集→法線→演算」と進めて、「per vertex」を選ぶ。そうするとプロパティに法線が表示される。

５－３　点群の間引き

オリジナルファイルは、点数 155,188,577 点でファイル容量が 13.9GB と、データが重すぎてソフト上で処理速度が低下し、取り扱いが難しい。また、点間の距離・密度も一定ではない。そのため、「点群の間引き」を行った。

手順は、画面左上の「Sub Sampling」をクリック。「method」を「space」にすると、「min. space between points」で指定した距離間に位置する点が削除される。ここでは「0.001m（=1mm）」に設定した（0.001m 間に位置する点が削除される）。0.001m とした理由は、横穴式石室の企画・使用尺度の分析では、1㎜単位の検討が必要なためである（逆にそれ以上細かい密度は、不要と判断した）。

結果、点数は 155,188,577 点（13.9GB）から 58,533,158 点（3.18GB）へと減じた。

試しに上記以外の設定結果を確認すると、「0.005m（=5mm）」は 3,565,574 点、「0.01m（=10mm）」は 900,023 点であった。余談だが、0.005m 間隔の点群は、横穴式石室全体の構造を把握する上で十分である。加工痕や線刻等の細かい箇所、あるいは遺物についてはもっと細かい点群が必要だろう。どれが正解というわけはなく、

目的に応じた数値設定が求められる。

５－４　CloudCompare で点群を削除する

「segment」ツールを使い手動で範囲選択の上、不要箇所の点群を削除する。

手動ではなく、数値設定によって点を削除する場合は、「SOR filter」を使う。「Standard deviation」でどれくらい外れた位置にある点を許容するか決められる。つまり、値が大きいほど除去される点は少なくなる。

５－５　座標リストを作成する

横穴式石室の仮想主軸と方位は、必ずしも同一ではない。国土座標に基づいて作成した３D モデルは、X 軸と Y 軸は国土座標に位置づけられており、仮想主軸と合致しない。このままでは、仮想主軸に基づいたデータの取得はできない。

そこで、CloudCompare で３D モデルを水平方向に回転し、仮想主軸に位置づける作業が必要である（鉛直方向の Z 軸（標高）は変えない）。具体的には（５－６）の工程で３D モデルを回転する。

この作業によって、X 座標と Y 座標は、回転後の値に変換される。

変換前後の座標値の変化を捉えるために、座標リストを作成する。このリストを作成するもう一つの理由として、奥壁両隅角と玄門両隅角などの座標を定量的に確定させることがある。模様積石室などの場合には、隅角が複数の石材で構成されていることから、1 点を確定させることが難しい。以後の分析では、奥壁隅角や玄門隅角などの端部に基づいたデータの取得も行うことから、座標リストの作成を通じて、主要な箇所のオリジナルの座標を把握する。

具体的には、「Point list picking」ツールで６点（奥壁両隅角、玄門両隅角、玄門両端部）を選択し、point1-point6 として記録した（ポイント数は任意）。これらを CSV ファイルに出力する。このポイントを選択する作業では、スクリーンショットで選択したポイントの位置を記録しておくと、確認が必要な時の資料となる。

５－６　仮想主軸の変更

繰り返しになるが、筆者が調査した横穴式石室は基準点測量を実施し、３D モデルを国土座標に位置付けている。そのため、Metashape で作成した３D モデルは、横穴式石室の仮想主軸に即した方向になっていない。このままでは、CloudCompare 上で横穴式石室の構造に即した作図や点群獲得作業ができないため、仮想主軸を変更する必要がある。なお、仮想主軸の角度はアナログ的手法で印刷した図面に分度器で計測するか、Illustrator の回転ツールで測定する。

３D モデルの角度を変更する方法は２つある。

１つ目は手動で変更する方法である。「Edit → Translate / Rotate」を使う。この方法では指定の軸（X 軸・Y 軸・Z 軸）を変更できる。実行後、「Axis/Angle タブ」の「Angle」に表示される角度（例 Angle 14.0 deg.）を確認しつつ肉眼で回転する。この場合、指定した数値での回転はできない。前稿では、（青木 2018）に基づきこの方法で角度を変更した。

２つ目は指定した数値で変更する方法である。この手法は前稿の発表後に、株式会社 LANG の千葉史氏より教わったものだが、重要なためここで紹介する。

使い方は DBTree 内のメッシュを選択し、「Edit → Apply Transformation」を選ぶ。表示されたメニューの中で、「Axis, Angle」タブを選び、「Rotation axis」で回転の軸を入れ、「Rotation angle」に数値を入れて、OK をクリックする。

3D モデルを回転後、（５－５）で作成した座標リストと同じ点を再度、「Point list picking」ツールで座標を確認し、回転に伴う座標の変化値を記録する。この作業自体は、この後の分析データを作成する上で必須ではない。

5－7　回転後の 3D モデルの座標網図を作成

回転後の 3D モデルは、座標値が変換されているため、Metashape と QGIS で作成する座標網図とは当然ＸＹ座標が変わっている。そこで、変換後の座標網図を作成する。これを作成することによって、６のデータ取得作業をどの位置で行ったのか示すことができる。

座標網図の作成方法は、まず CloudCompare 上で「Tools → Projection → Rasterize」を選択する。

「Rasterize」の各種入力値は、「step」は 0.001、「direction」はＺ、「cell height」は average、「Fill with」は leave empty とする。入力後、「Raster」を選択し、TIFF 形式の画像を作成する。

作成した画像は QGIS で読み込み、座標網図を出力する。この画像をそのまま図として使用しない場合には、AdobeIllustrator で別途 Metashape から出力した高解像度のオルソ画像と重ね合わせて座標網を整えると、図として見栄えが良くなる。

6　CloudCompare による分析データの作成

6－1　3D モデルのスライス

前章までの作業は、本分析の核となる作業のスライスを行うための準備である。本章で解説するスライスとは、発掘調査報告書におけるエレベーション図に相当する。言うまでもなくエレベーション図は、対象遺構・地形の任意の箇所を計測し、点間を結線して作成する。CloudCompare でのスライスは、3D モデル（点群）を任意の位置で、あるいは機械的な間隔で「輪切り」にする作業である（第５図）。この作業ではＸ・Ｙ・Ｚどの軸を、どのような間隔で輪切りにするか指定する。輪切りにした箇所はスライスと呼び、直線的な点群の集合と点間を結んだ線（ポリライン）の２つで構成される。

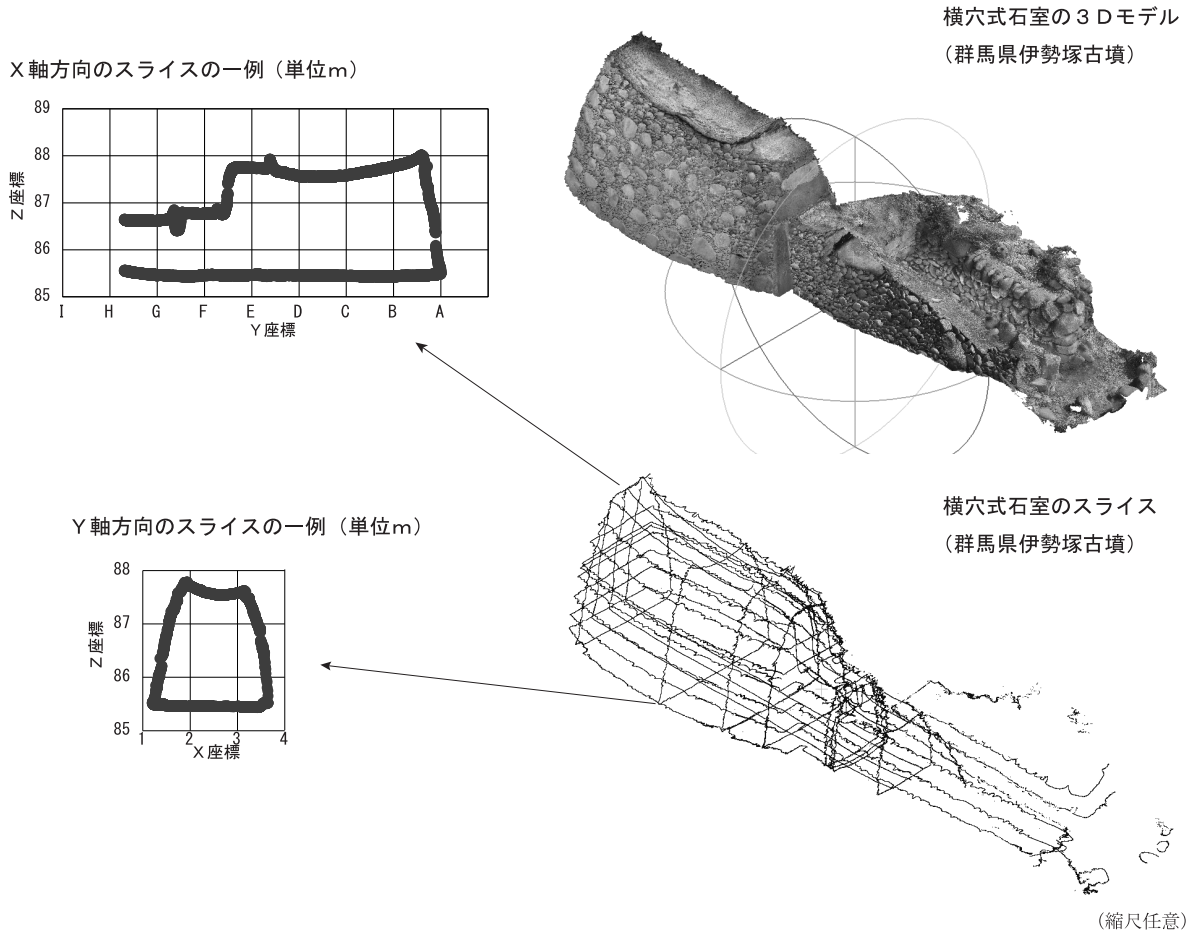
前稿では、 Cross Section ツールを用いて上記の作業を行い、２cm 間隔でスライスした。２cm とした理由は、横穴式石室の構造や石積みの工程上重要な箇所のスライスを得るためである。２cm 間隔の細かなスライスを作り、Ｘ軸方向は仮想中軸上、奥壁と天井石の接する両隅角上のスライスを抽出する。Ｙ軸方向は奥壁最上段と天井石の境界、仮想玄室中央、玄門楣石、羨道など、Ｚ軸方向は床面、奥壁二段目上部、側壁と天井石の境界などにあたるスライスを選択・抽出した（第２図）。

実際の作業に際し、画面左上の DBTree にある「Mesh」→「 Vertices」にチェックを入れておく（materials と Texture coordinate は初めからチェックが入っている）。

２cm 間隔のスライスを行うためには、まず Cross Section を選択する。「Box thickness」内の「advanced」を選択し、「Edit clipping box」の左上タブを「Max Corner」にする。この Max Corner は、3D モデルを構成する点群の中で、最も大きい座標値を意味する。ここでは Max Corner を選択し、ここを基準に上記間隔でのスライスを作る。Max Corner はここでは天井石設置面が該当する。これを基準とする理由は、伊勢塚古墳の横穴式石室は、床面の一部が埋没しており、床面はもちろん、床面下の根石設置面（構築上の基底面）が検出されていないためである。

選択後、右上「width」のＸ欄を 0.002 と入力する。なお、Ｘ方向のスライスを作る時はＹ・Ｚ欄の数値は変えず、Ｙ方向の時はＸ・Ｚ欄、Ｚ方向の時はＸ・Ｙ欄を変えない。つまり、各軸で数値の入力とスライス作成作業が必要なため、最低でも３回は同じ作業をする。

入力後、「OK」を選び、始めの画面に戻る。次に、画面右下の「Slices」にある二つのコマンドのうち、右側を選択（Export Multiple ～）。別画面に「Slice extraction」が表示される。この画面では「Extract envelope(s)」にチェックを入



第５図　CloudCompare で作成できるスライス例

れ、さらに「multi-pass」と「split envelope(s) on longer edges」にチェックを入れる。Other options」の Gap を「0.018」と入力（0.002m 厚のスライス＋ 0.018m 間隔＝ 0.02m）。最後に OK を選択すると、スライスとポリラインの作成が始まる。対象の規模と作成数によって、出力終了時間に差がある。

繰り返しになるが、以上の作業を XYZ 各軸で行う。

出力が終わると DBTree に新たなレイヤーができる。このレイヤーは、スライスごとに「Vertices.slices」と「Vertices.envelopes」のレイヤーがセットとなる。

スライスは数多く出来上がるが、その中から必要なスライスを見出し、レイヤー名を変更するなどして区別できるようにする。

なお、データが重くなることとレイヤー数が膨大になるため、XYZ 各軸のスライス作成作業は、作業ファイルを複製して別々に行うことを薦める。

６－２　スライスの整理

スライスは、不要なものも数多く作られるため、取捨選択をする。この作業は手動で一つ一つ該当するスライスを選択し、リネームするか不要なものを削除する。リネームは XYZ の座標値は残しつつ、分析に応じた名を付ける。

DBTree 上でスライスの取捨選択やリネームを終えると、次は各スライスの点群を整理する。

例えばＺ軸方向のスライスの場合、一つのスライスには左側壁・奥壁・右側壁・玄門と各部が点

群として含まれている。このままの状態で次項以降の CSV 出力と Excel での当該ファイルの読み込みを行うと、１点１点の座標が、どの部位を示すかが分からない。そして、この作業の目的は、２点間の距離を定量的に測ることにあるため、例えば左側壁の点 A に対して、右側壁の点 B に対する両点間の距離を関数計算することになる。

つまり、計算する２箇所（左側壁と右側壁、天井石と床面など）を、CloudCompare から CSV ファイルに出力する時に、分類しておかなければならない。

そこで、一つのスライスを複製し、例えば片方が左側壁の点群、もう片方が右側壁の点群のみとなるように、それぞれのスライスで不要な箇所を削除する。点群の削除の方法は、「Segment」で不要な点群を指定する。

整理を終えたスライスは、レイヤーを選択し、CSV ファイル形式で保存する。ファイル名はスライスの DBTree と同じにするなど、元ファイルと CSV ファイルとの対応が分かるようにする。なお、保存するレイヤー（点群）が、画面上にどのように表示されているか、横穴式石室のどの箇所をどのように保存するのか、対象スライスを表示した画面のスクリーンショットを保存しておくとよい。

６－３　スライス作成箇所位置図の作成

横穴式石室におけるスライス作成位置を視覚的に示すために、３D モデルの俯瞰（平面）、左側壁、奥壁の画像上に作成したスライスを重ねて、オルソ画像として出力する。これを下図として Illustrator で編集し、第２図を作成する。

６－４　三次元方眼図像の作成（補足）

前稿でも扱ったが、上記に取り上げたスライス作成機能を利用して、３D モデルに直接方眼を入れ、立体的に企画や使用尺度を検討する方法を示す（青木 2023）。第 6 図では、CloudCompare で横穴式石室の 3D モデルに、試験的に 0.35m（高麗尺幅）間隔で XYZ 各軸のスライスを作り、擬似的な方眼を設定した。

このスライスの設定には、起点をどの位置（座標）に設定するか決める必要がある。ここでは方眼の起点は、XYZ 各軸の最端点とし、0.35m 間隔（正確にはスライスの厚さ 0.002m ＋間隔 0.348m) のスライスを作成した。

作業の詳細は、「cross section」機能でスライスを設定する際に、起点となる座標を指定する。

次に、厚さ 0.002m ＋間隔 0.348m ＝ 0.35m 間隔のスライスを作成する。スライスの設定は、XYZ 各軸で行う。

X スライスは、玄室最大幅となる点を左側壁から選択した（X：-70990.799、Y：29395.612、Z：85.515）。

Y スライスと Z スライスは、玄室左側壁と奥壁の隅角の点を選択した（X：-70990.381、Y：29397.951、Z：85.519）。

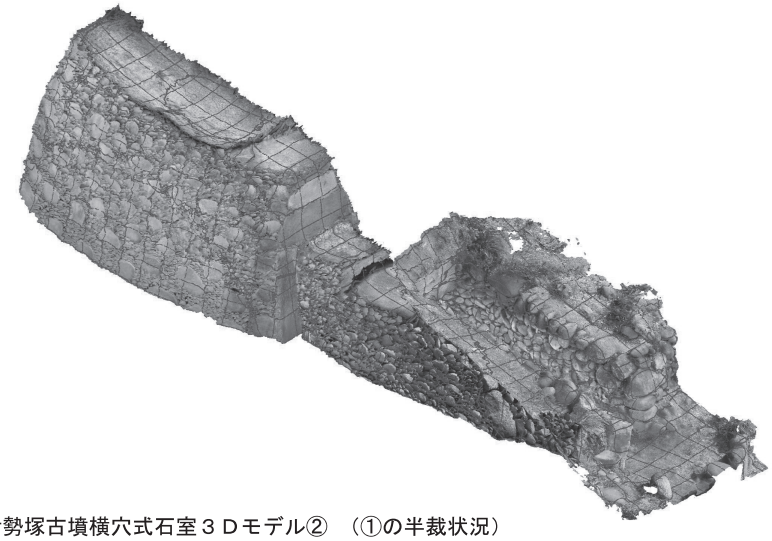
上記の作業で作成した「slice」レイヤーの各データを選択し、左下プロパティ中の「cloud-point size」の値をデフォルトから「3」に変更し、点群の表示を大きく強調すると、各スライスが太く表示される。

上記の作業を終えると、３D モデルに XYZ 方向のスライスが方眼をなす。ここから更にオルソ画像を各面で出力すると、二次元図も作ることができる。

この作業は、３D モデルを活かした新たな分析となる可能性がある。墳丘や発掘調査のトレンチなどの３D モデルがある場合、それも複合した検討が可能である。

しかし、これははじめにスライス（方眼）の間隔を設定して図を作成するため、一連の定量的分析を終えて、横穴式石室の構成比や使用尺度の推定ができて初めて実施する方がよい。

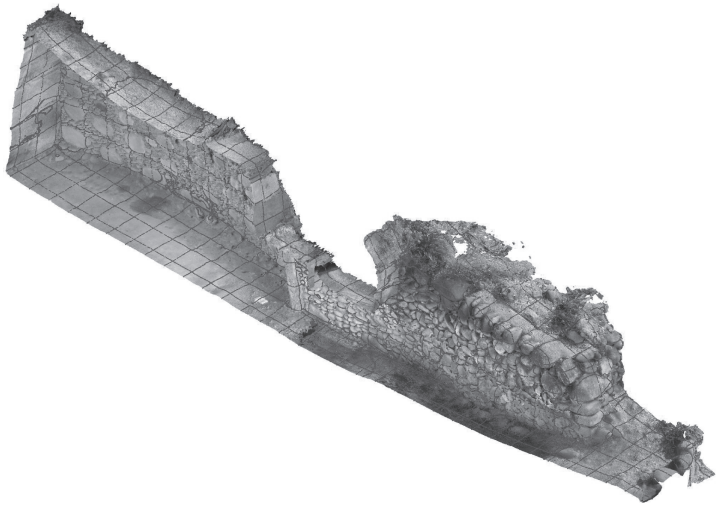
伊勢塚古墳横穴式石室３Ｄモデル①　（３Ｄモデル＋想定尺度方眼）



①　横穴式石室の３Ｄモデル（テクスチャー＋点群）に、想定尺度（高麗尺0.35m）の方眼を当てはめた図。方眼は、点群処理ソフト上で起点となる座標を決定し、ＸＹＺ軸各方向に0.35m間隔の方眼を設定し、作成した。方眼の各線は、点群と輪郭線の二種で構成される。

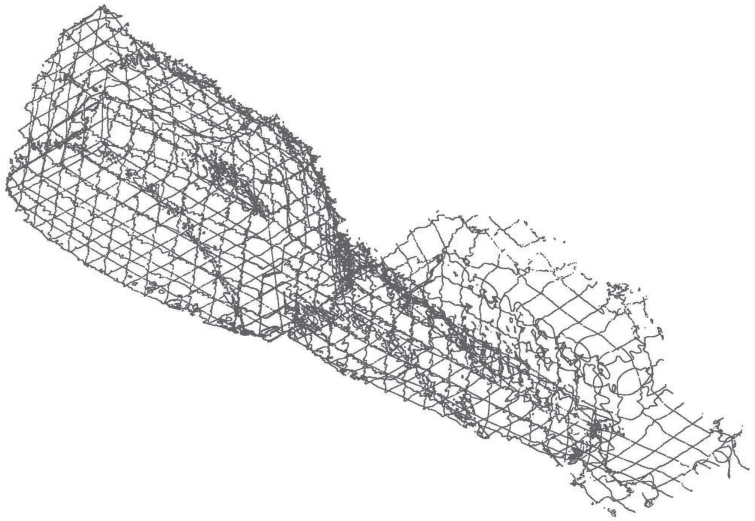
本図は３Ｄモデルの「外観」の図であるため、横穴式石室の内部ではなく、反転された状態が表示されている。

伊勢塚古墳横穴式石室３Ｄモデル②　（①の半裁状況）



②　①を長軸方向で半裁し、横穴式石室の内部を見える状態にした図。３Ｄモデルのトリミング（半裁）を任意の位置で行い、横穴式石室の内部から各部を確認できる。横穴式石室の各部でトリミングを行うことで、二次元図の作成も可能である。

伊勢塚古墳横穴式石室３Ｄモデル③　（想定尺度方眼のみ）



③　３Ｄモデルを非表示にして、想定尺度方眼のみの状態にした図（本図は点群を強調し、方眼を太く濃く表示している）。図にはＸＹＺ軸全ての方眼を表示しているが、各軸の表示を選択できる。方眼の間隔は各軸に基づく限り、自由に設定できる。そのため、分析に必要な任意の位置でのスライスの作成や、方眼の設定などは個別に繰り返し実行できる。

（縮尺任意

第６図　３Ｄモデルに基づく尺度方眼の割り付け方法（試論）

7　Excel によるデータの整理と処理

CloudCompare で作成した CSV ファイルは、Excel で関数処理を行う。実際に２点間の距離を算出し、グラフ等を仕上げるまでには、以下の工程を踏む。

7－1　エクセルで CSV ファイルを読み込む

作業の前提として、1 つの Excel ファイルには、１つのスライスから作成した２つの CSV ファイル(例えば左側壁のファイルと右側壁のファイル)を読み込む。

この後の作業で混乱を避けるために、２つの CSV ファイルは、はじめはシートを分ける。

7－2　ROUND 関数で座標の桁数を揃える

座標値は小数点以下の値が不揃いなため、ROUND 関数を用いてミリ単位（小数点第３位）に揃える。数式は、「=ROUND(対象行列 ,3（桁数))」である。

7－3　基準となる座標軸を先頭にする

例えば基準が Y 軸の場合、Y → X → Z という順に、列を並べ替える。

7－4　基準の軸をもとに座標を並べ替える

基準が Y 軸の場合は降順にする。これを実施しなければ、２点間の距離を出してグラフを作成する際に、座標順に並ばない。

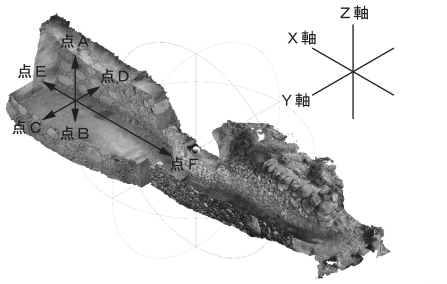
7－5　座標数が少ない方に連番を振る

１つのスライスから作成した２つの CSV ファイルは、両者が点群からなるため、点数は一定ではない。しかし、この両者が XYZ いずれかの軸で鉛直ないし水平方向に位置することで、条件を満たす２点間の距離を求めることができる。こうした両者の対応関係を把握するために、いずれか数が少ない方に連番を振る。

7－6　XLOOKUP 関数で整列

XLOOKUP 関数は、検索の場所や方向、エラーの場合の処理などを柔軟に指定し、様々なケースの表引きに対応できる関数である。

これを用いて、両点群中で対応する２点間（仮



Ｘ軸：点Ａ－点Ｂ間の鉛直方向の距離（横穴式石室の長軸方向）
Ｙ軸：点Ａ－点Ｂ間の鉛直方向の距離（横穴式石室の短軸方向）
Ｚ軸：点Ｃ－点Ｄ間の水平方向の距離（横穴式石室の短軸方向）
※横穴式石室左側壁上部をトリミング（縮尺任意）

第７図　横穴式石室の仮座標軸と二点間の距離算出模式図

に A 列・B 列とする）を導き出し、両点を一行に並べる。これは、理論上はある点 A に対して、点 B が XYZ の３種の座標のうち、２種が同一値であることによって、２点間は水平方向ないし鉛直方向で同一の軸上に位置することを意味する(第７図)。

数式は、「=XLOOKUP(検索値 , 検索範囲 , 戻り範囲 , 見つからない場合 , 一致モード , 検索モード)」である。XLOOKUP 関数では、「戻り範囲」として複数の行や列が含まれる範囲を指定することができる。この場合、検索範囲で値が見つかった場合、対応する複数の項目をまとめて取得することができる。つまり、検索値をＸ座標とすると、それに対応する（隣接する列にある）Ｙ／Ｚ座標をともに指定することができる。

実際には、「=XLOOKUP(A3,$H$3:$H$8174, $H$3:$K$8174,”0”,0)」といった形で入力する。

なお、「一致モード」は、以下の３種のうち一つを選ぶ。この欄は入力せずに、省略も可能である。

「0 または省略：検索する値と同じ値と一致」

「1：検索する値と同じまたは、それ以上の最小値と一致」

「-1：検索する値と同じまたは、それ以下の最大値と一致」

７－７　重複する座標の強調表示

XLOOKUP 関数では、検索結果を機械的に算出するため、時に複数の座標に同じ座標が対応することがある（座標Ａ～Ｃに対し、座標①が対応する）。このように重複する座標がどの程度存在するのかを把握するために、XLOOKUP 関数を実施したデータの連番が入った列を対象に、「条件付き書式→セルの強調表示→重複する値」で強調表示をする。この段階では、点数のカウントや重複座標の削除はしない。

７－８　データの複製

XLOOKUP 関数を実施したシートは、オリジナルのデータ群として残し、新しいシートにデータを複製する。この際、数式のエラーが発生しないように、「値の貼り付け」にする。

７－９　シートの整理

新しいシートでは、タイトル行の整理（タイトル行が１行になっていなければ、１行にする）、列を X/Y/Z の順に直す（Y 軸が基準の場合、XLOOKUP 関数の作業過程上、Y/X/Z の順になっていることがある）といった体裁の整理をする。

７－10　XLOOKUP 関数処理結果の検証

XLOOKUP 関数による本分析の検索は、完全一致モードで実施しているため、本来は必要ないが、２点間の座標にズレがないか（鉛直・水平か）を確認するために、スライスした軸の座標同士をマイナス（例えば左側壁 Y 座標－右側壁 Y 座標）して、０になるか確認する。

７－11　２点間の距離を関数計算する。

２点間の距離の算出結果を表示するために、新たな列を設ける。

三次元座標上の２点間の距離の計算式は、「$L=\sqrt{((X2-X1)^2 + (Y2-Y1)^2+ (Z2-Z1)^2)}$」である。これを Excel の数式で表現すると、「=SQRT((A2-D2)^2+(B2-E2)^2+(C2-F2)^2)」となる。この数式を入力し、データの計算を行う。

７－12　重複データの削除

ここで重複データを削除する。方法は、データの入力されたセルを選択した状態で、「データ」タブの「データツール→重複の削除」を選択する。「重複の削除」メニューが表示されたら、「連番」を選択して重複項目を削除する。削除を実行した際に、重複数と残存数が表示されるので、控えておく。

７－13　確認作業その１（散布図の作成）

座標がスライスを作成した元の形態に即しているか、散布図で確認する。問題ない場合は、グラフにスライスした箇所の形状（石積みのライン）が表示される。

７－14　確認作業その２（ヒストグラムの作成）

スライスした軸の座標でヒストグラムを作成して、重複項目やエラーを削除した結果、座標の分布が散在していないか確認する。

ここまでがデータの整理手順である。次にグラフの作成等、データ処理について説明する。

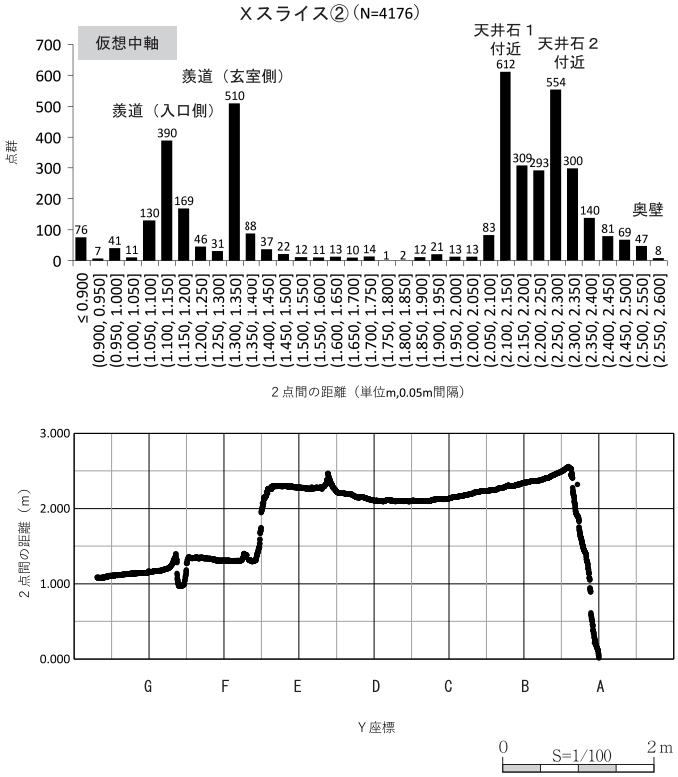
７－15　散布図とヒストグラムの作成

本分析の目的の一つは、ある２点間の距離を定量的に算出することである。ただし、算出しただけでは分析はできないため、その結果をもとに散布図とヒストグラムをつくる（第８図）。

散布図は、結果的に点群の分布が対象とした横穴式石室の形状を示すことから、方眼の設定を既存の尺度や導き出した単位にすることによって、点群とその設定値との適合性を判断することができる。

ヒストグラムは、どのような距離の点数が多いかを確認することによって、横穴式石室の企画における核となる距離を想定する材料とする。

使用尺度の推定作業では、一つのスライスを対象とした散布図で大枠はつかめるが、確定は難しい。そこで複数のスライスを組み合わせた散布図によって、勾配や構造上の変化を同一軸（座標）



第８図　二点間の距離のヒストグラムと散布図の例

上で比較することができる。

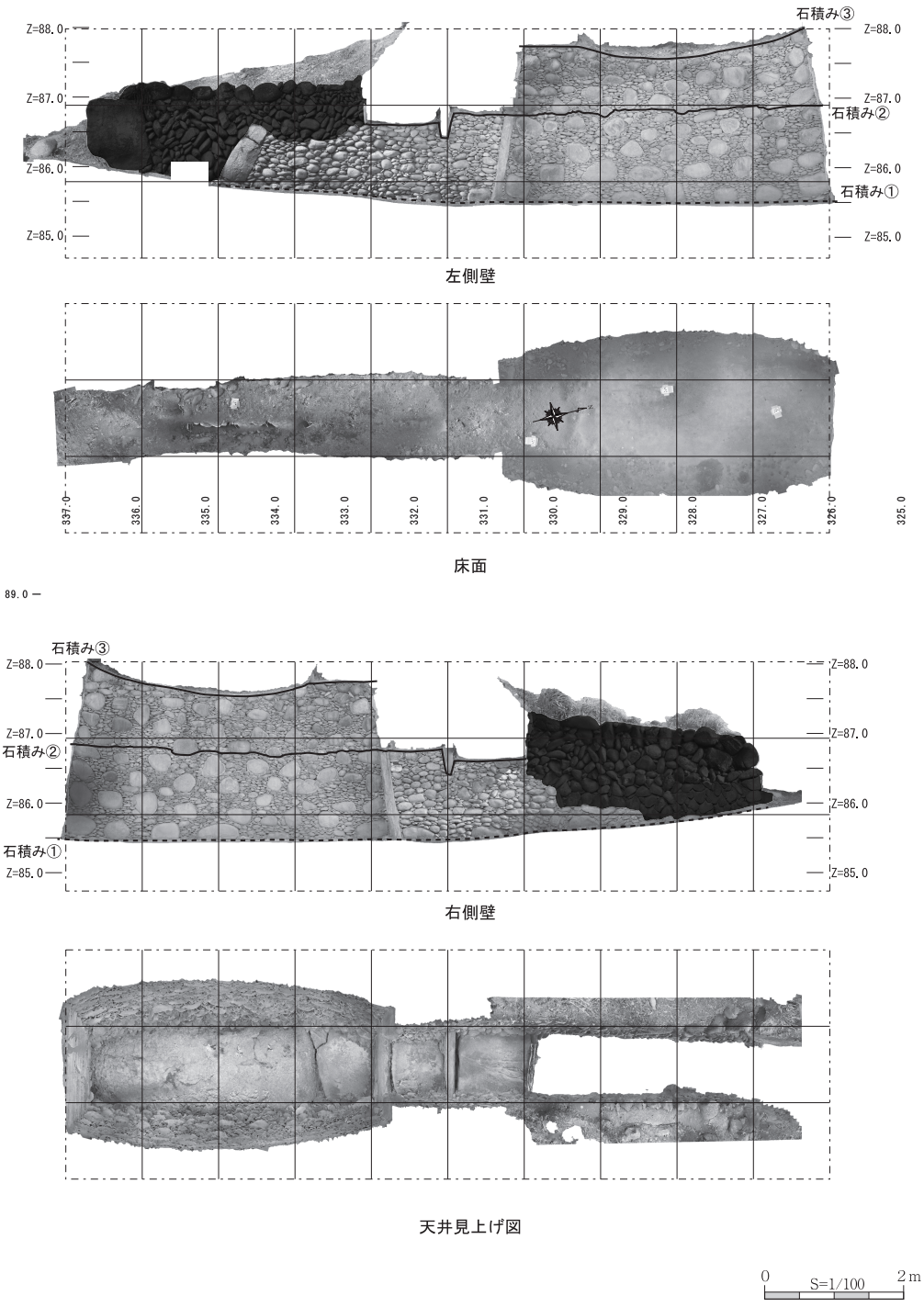
以上の作業によって作成できる２点間の距離算出値、及び散布図とヒストグラムによって、横穴式石室各部の構成比や使用尺度の推定にかかる分析が可能である（第９図）。

ただし、この分析は、あくまで一つの横穴式石室を定量的に検討したに過ぎない。そのため、歴史性や地域性を内包する使用尺度については、分析事例を増やしてから考察するべきである。同時期の単独地域・複数地域における横穴式石室を対象として検討することが望ましい。例えば、関東地方内での分析を重ねることに加えて、東海地方、近畿地方、九州地方など横穴式石室の構造が異なる地域で比較検証も求められる。そのためには各地で横穴式石室の三次元計測やSfM/MVSが進み、３Dデータが記録されることが必要不可欠である。

おわりに

Metashape、QGIS、CloudCompare、Excel（関数処理）は、３Dモデルの作成と編集において根幹をなすソフトウェアである。今回は前稿で行った横穴式石室の定量的分析の手法を解説することに注力したため、各ソフトの多様な利用方法は取り上げられなかった。

今後、三次元記録を分析に活用する上で、この分析に興味を抱いた方々が同様に実施し、共にブラッシュアップしていきたい。



本図は（青木 2023）における横穴式石室各部の構成比を分析した結果に基づき、横穴式石室の各面に基本単位（=1.1m）に基づく方眼を割り付けた。あわせて石積みに関する３箇所の主要な工程を示した。

第９図　定量的分析結果の一例：基本単位の割り付けと石積み工程の関係

引用・参考文献

（邦文）

青木　弘・横山　真・千葉　史ほか　2017「第２部　横穴式石室の非破壊調査研究」『デジタル技術を用いた古墳の非破壊調査研究』早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所調査研究報告 4　pp.37-86　早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所

青木　弘　2018「群馬県藤岡市伊勢塚古墳の SfM/MVS による調査と分析」『日本情報考古学会講演論文集（第 41 回大会）』Vol.21（2018）（通巻 41 号）　pp.7-12　日本情報考古学会

青木　弘　2020「Ⅵ　出土遺物の３次元記録」『新井堀の内遺跡』埼玉県埋蔵文化財調査事業団報告書 464　pp.205-214　上野真由美編・埼玉県埋蔵文化財調査事業団発行

青木　弘　2023「三次元記録に基づく横穴式石室の定量的分析―群馬県伊勢塚古墳を対象に―」『古代』第 150 号　pp.27-53　早稲田大学考古学会

青木　弘　2024．３刊行予定『横穴式石室の築造技術と造墓集団』早稲田大学エウプラクシス叢書 44　早稲田大学出版部

喜多耕一　2022『業務で使う QGISVer.3　完全使いこなしガイド（改訂版（Ver.3.22 対応））』 全国林業改良普及協会

呉　心怡・青木　弘　2023「第８章　宝塔山古墳・蛇穴山古墳の三次元計測調査」『総社古墳群範囲内容確認調査報告書Ⅱ　遠見山古墳・総社二子山古墳・愛宕山古墳・宝塔山古墳・蛇穴山古墳の調査』pp.99-146　前橋市教育委員会　（http://doi.org/10.24484/sitereports.131059）

鳥海幸一　2022『フォトグラメトリの教科書』 インプレス R&D

中村亜希子　2020『フォトグラメトリーを使った遺物の三次元計測講座』（第１回～第７回）（http://independent_academia.edu/AkikoNakamura）

野口　淳　2023『CloudCompare クイックリファレンス』考古学・文化財のためのデータサイエンスサロン online#40 資料（2023.4.22ver.）

山中良平　2017『有年地区埋蔵文化財詳細分布調査報告書』赤穂市文化財調査報告書 84　赤穂市教育委員会

（英文）

Agisoft LLC　2023『Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 2.0』

図版出典

第１図～第２図（青木 2023）を引用・改変、第３図　筆者作成、第４図～第９図　（青木 2023）を引用・改変

第１表～第２表　筆者作成