

第2部

## 横穴式石室の非破壊調査研究



## はじめに

早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所では、埼玉県東松山市若宮八幡古墳、同附川1号墳、埼玉県行田市地藏塚古墳を対象として三次元計測とSFMを実施した。いずれも古墳時代後期から終末期における埼玉県を代表する横穴式石室である。

今回、三次元計測とSFMを実施した目的は3点ある。

1点目は、横穴式石室の分析・研究・活用に際して、三次元記録の利用方法を検討することである。

2点目は、横穴式石室の調査と記録におけるデジタル技術の有効性を検討することである。

3点目は、切石積石室の展開について、横穴式石室の構造や構築技術から追うことである。

今回の調査については、その一部をすでに発表した（青木・ナビ 2016）。あわせて横穴式石室の三次元計測の動向に関しては、拙稿で扱った（青木 2017）。

## 第1章 横穴式石室の三次元計測の方法と処理

### 1-1 三次元計測の流れと使用機材

今回の調査では、3つの計測手法を実施した。以下に各計測手法の特徴を記述する。

**ハンディスキャナー** 今回はEXAScan（Creaform社）を使用した（早稲田大学考古学研究所所有）。EXAScanは、計測対象にライン状のレーザー光を照射した時にできる歪みを撮影して形状を測定する（光切断法）。

計測には本体に加えて、ターゲットシール、PCとソフトウェア（VXElement）、発電機（電源）を使用した。

ハンディスキャナーは取り回しに優れ、据え置き型スキャナーでは死角になる箇所でも回り込んで計測できる。反面、広範囲の計測には時間がかかる。また、計測対象に弱粘性的ターゲットシールを貼る必要があり、シールを貼った箇所はデータに欠落ができる。

**据え置き型スキャナー** 今回はFocus3D（FARO社）を使用した（株式会社ラング・奈良文化財研究所所有）。Focus3Dは計測対象に光を照射し、受信光との位相差を検出し、対象との距離を計測する（光位相差法）。

計測には本体に加えて、三脚とターゲットボードを使用した。

据え置き型スキャナーは、広範囲を比較的短時間で高精度の計測ができる。一方で、計測対象外の不要な範囲も計測し、結果的にデータ量が増える。この点は計測範囲や精度を設定することで改善できる。

ただし、死角となる箇所は機械を何度も移動して計測を行い、データ処理の段階で合成する必要がある。

**SFM/MVS** SFM（Structure from Motion）/MVS（Multi View Stereo）は、複数の二次元画像から特徴点とカメラ位置・姿勢を算出し（SFM）、多視点画像計測で点群を生成し計測対象の形状を推定する技術（MVS）を指す。現場で用いる機材はデジタルカメラのみと簡便である。一方で、写真から生成される3Dモデルの精度は、カメラの画素数や写真的撮り方などに左右される。なお、今回の撮影にはD700（Nikon社）を使用した（早稲田大学考古学研究所所有）。

### 1-2 各計測手法の調査手順

これら3種の計測は、細かな手順は異なるため、以下に今回の調査の手順を述べる（図1）。

各調査のはじめには、必ず基準点測量を行い、三次元計測と写真撮影時に、世界測地系の座標をもつ点（杭・釘等）をあわせて記録することで、各データを同系上に位置づけられるようにした（図1-1・2）。また、各計測と併行して、前日までに作業を終えた石材の計測結果を印刷し、それに観察所見を記入した（図1-8）。

**ハンディスキャナー** EXAScanでは状態の良い石材を個別に計測した（図1-4）。

計測に先立ち石材にターゲットシールを貼った。計測時間は石材の形状や大きさに依存するが、50cm四方の石材では計測に約40分、準備やデータの保存時間を含めれば約1時間要した。その後のデータ処理には、GNU General Public LicenseのCloudCompare（ver. 2.8.1）を使用し、主に計測データの位置合わせ、合成、ノイズの消去を行った（図1-9・12）。

**据え置き型スキャナー** Focus3Dでは横穴式石室全体の計測を行った（図1-3・5）。今回は分解能1/4、品質値×4（10m先で6.136mmごとに1点）と分解能1/2、品質値×4（10m先で3.068mmごとに1点）の計測精度を選択した。1回の計測には約20～40分を要し、位置を変えて数回の計測を行った。その後のデータの処理には専用のソフトウェアSCENE（FARO社）を使用した（図1-10）。主に計測データの位置合わせ、合成、ノイズや不要な計測範囲の消去を行った。

**SFM/MVS** はじめにデジタルカメラで横穴式石室全体の撮影を行った（図1-6）。撮影では絞り値の固定、内部ストロボと三脚、グレーカードの使用を統一した。その後のデータの処理にはAgisoft社の

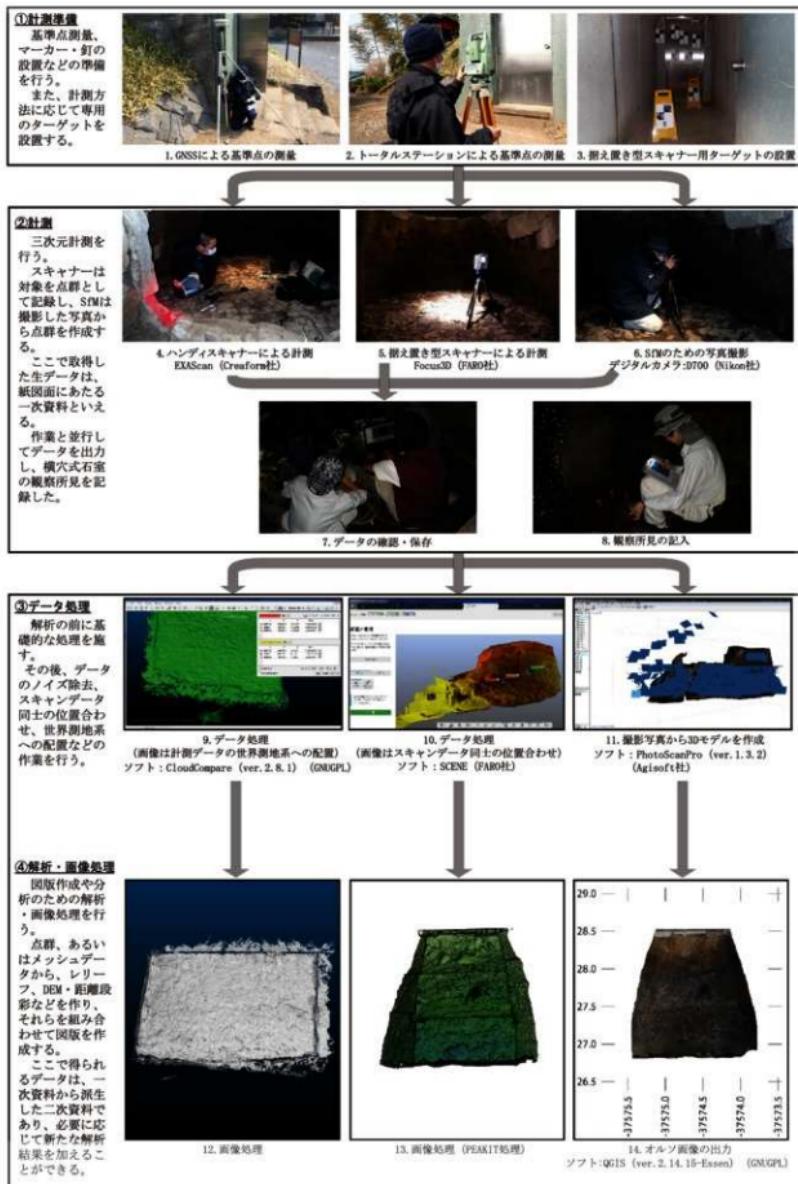


図1 若宮八幡古墳・附川1号墳・地蔵塚古墳の調査における三次元計測の流れ

PhotoScanPro (ver. 1.3.2) を使用し 3D モデルを作成した (図 1-11)。モデルに不備のある場合には、追加の写真撮影を行い、再度処理をすることで 3D モデルの完成度を高めた。

**解析・データ処理** 基本的な処理を終えたデータは、各ソフト上で、距離や角度、体積等の計算が行えるほか、DEM やオルソモザイク（正射投影画像）など二次元図の作成も行うことができる (図 1-12・14)。そのうち、図 1-13 で示した PEAKIT については、第 2 章で説明する。

## 第2章 PEAKIT による横穴式石室の画像処理

### 2-1 三次元データの視覚表現

形状情報の視覚化とは、形状から特微量を算出し、その値を色に変換して画像に格納することである。形状から特微量を算出する典型的な分野の 1 つが地形情報処理である。地形情報処理における視覚表現は、地形の三次元データを一旦数値標高モデル (Digital Elevation Model、以下 DEM と表記する) に変換し、画像処理を適用するのが通常である。DEM とは、三次元データを基準面に投影し、基準面からの高さを等間隔に取得して配列構造で格納したものである (図 2)。DEM はオーバーハング形状を表現できないという欠点

があるが、一般的なデジタル画像と同じ構造をとることからデータの取り扱いが容易で、画像処理を適用しやすいという利点がある。

DEM の基本的な解析方法には、起伏陰影図、標高段彩図などがある (P. A. バーロー 1990)。起伏陰影図 (以下、レリーフと表記する) は、図 3 に示すように光源ベクトルと地面の法線ベクトルとのなす角  $\theta$  の余弦を画像化したものである (Burrough et al., 1998)。このとき光源ベクトルは図 3 のように方位角 A (azimuth angle) と高度角 E (elevation angle) によって指定される。また、入力する DEM 値の倍率 S (scale factor) で強調表示することが可能である。

標高段彩図は、標高をクラスに分け、各クラスを指定した色で着色したもので、教材などでも用いられる一般的な地形の表現方法である。これは、基準面からの距離を表現するため距離段彩図と呼ばれることがある (以下、距離段彩と略す)。また、段彩の境界を明瞭にするために、段彩の段差部分を検出した等高線画像 (以下、等高線と略す) と併用することがある。

これらの処理を附団 1 号墳の三次元データの一部 (図 4 の赤枠、以下、このデータを本サンプルデータと表記する) に適用した。図 5 に適用した結果を示す。(a) はレリーフ ( $A=0$  度、 $E=45$  度、 $S=2$  倍)、(b) は距離段彩 (間隔 1cm)、(c) は (b) から作成した等高線で

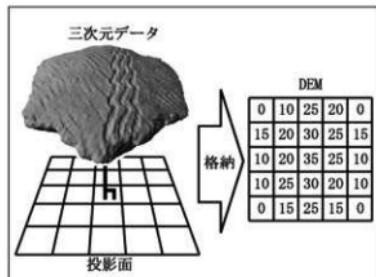


図 2 DEM の概念

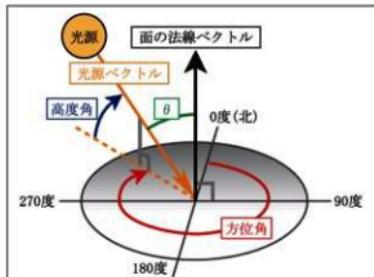


図 3 レリーフの概念



図 4 サンプルデータ (附団 1 号墳左側壁)

ある。これらの画像を重合したものが図6である。(a)はレリーフと距離段彩、(b)はレリーフ、距離段彩、及び等高線を重合した画像である。

このように、壁面の傾きや湾曲、石材の積み方など石室の構造を直感的に表現できる三次元技術は、それだけで十分重要な意義をもつといえる。ところが今回の対象とした石室は、石材を組んだ後に硬い工具によって内壁を削った跡がほぼ全面に残っていた。このような加工の形跡が本遺構の解釈に重要な意味をもつことは明らかであるが、図5・図6のような画像処理では、それらを鮮明に視覚化することができていないのである。

そこで今回、PEAKIT処理を適用することにし

た(F.Chiba, and S.Yokoyama, 2009)。この技術は本来、石器や土器などの考古遺物の視覚化のために考案されたものであるが、これまでに遺物だけでなく様々な考古資料に適用し改良を重ねてきた(城倉2016、野口ほか2016、城倉2017、F.Chiba et all Forthcoming)。本章では、このPEAKIT処理の原理を説明するとともに、この処理を附川1号墳横穴式石室に対して適用した結果を示す。

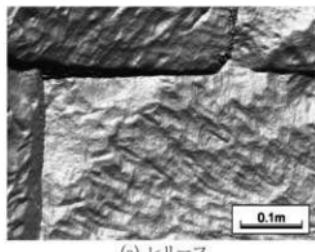
## 2-2 PEAKITの原理

PEAKITとは「開度」という演算処理で得られた画像を基本とし、それにレリーフや距離段彩など他の演算処理によって得られる複数の画像を選択的に重合表示する技術である。図7にPEAKITの概念を示す。

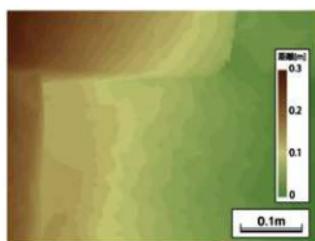
開度は地形学において考案されたアルゴリズムで、着目地点から周辺地形への見晴らし度合いを数値化したものである(Yokoyama et al., 2002)。

図8に開度演算(探索距離L)の概念を示す。開度には「空中」の見晴らし度合いを数値化した地上開度と、「地中」の見晴らし度合いを数値化した地下開度がある。地上開度では数値の高い部分が尾根地形を表し、地下開度では数値の高い部分が谷地形を表す。

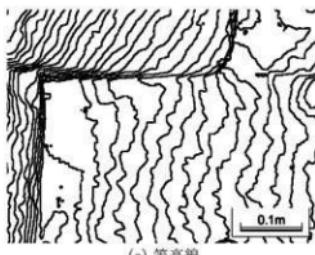
図9に、探索距離を  $L=10\text{mm}$  として、(a)地上開度、



(a) レリーフ

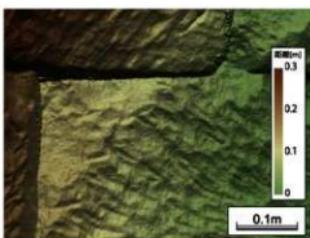


(b) 距離段彩

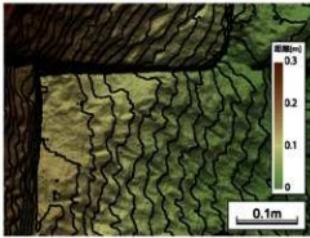


(c) 等高線

図5 地形情報処理における視覚表現1



(a) レリーフ・距離段彩



(b) レリーフ・距離段彩・等高線

図6 地形情報処理における視覚表現2

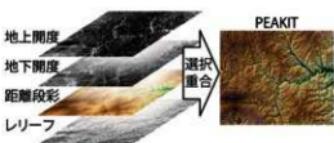


図7 PEAKITの概念

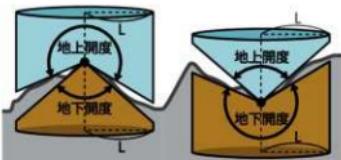


図8 開度演算の概念

及び(b)地下開度を本サンプルデータに適用した結果を示す。地上開度はグレースケール(数値が大きいほど黒く色づけ)で表示し、地下開度は赤色のグラデーション(数値が大きいほど赤く色づけ)で表示した。

### 2-3 PEAKITのバリエーション

PEAKITは対象物の特性に応じて、重合する画像の組み合わせを選択することができる。以下に横穴式石室の判読に有効と考えた組み合わせを示す。図9にそれぞれの組み合わせを本サンプルデータに適用した結果を示す。以下、地上開度画像を「地上」、地下開度画像を「地下」と略す。

(c)：地上・レリーフ：尾根線が鮮明に抽出され、壁面の加工痕の単位、及び加工の方向性を判読することができる。

(d)：地下・レリーフ：谷線が鮮明に抽出され、石材同士の目地の状態、及び壁面の調整加工の方向性を判読することができる。

(e)(f)：上記2種それぞれに距離段彩を加えたもの：遠近を色調の違いで表すことで、それぞれの石材の立体的な位置関係を判読することができる。

(g)：地上・地下・レリーフ：上述の(c)(d)の特徴に加えて、尾根線と谷線の位置関係が抽出されたことで工具の断面形はV字状であったことが判読できる。

(h)：(g)に距離段彩を加えたもの：遠近を色調の違いで表すことで、上述(g)の特徴に加えて、それぞれの石材の立体的な位置関係を判読することができる。

本章では、附川1号墳横穴式石室の側壁の一部をサンプルとして、その三次元データにPEAKIT処理を適用した結果を示した。作成した画像の検討により、一般的な三次元データの表現方法では難しい工具痕の単位、工具痕の移動方向、工具の断面形状など、壁面の微細な形状特徴が鮮明に抽出され、PEAKIT処理が横穴式石室の視覚表現として有効であることがわかつた。

## 第3章 埼玉県東松山市若宮八幡古墳の調査

### 3-1 既往の調査と研究

若宮八幡古墳は『新編武藏國風土記稿』『卷百九十五郡之五』の「石橋村」の項に記載があり、江戸時代明和年間(1764年～1771年)にはすでに人々に知られていた(塙野2004a)。昭和39年3月27日には埼玉県指定史跡に指定され、以後、埼玉県を代表する横穴式石室として認識されてきた。ただし、長年の開口による石材の劣化や構造の歪みが生じたため、2010年～2011年にかけて、修復保存整備に伴う発掘調査が東松山市教育委員会によって実施された(図10・図11)(東松山市教育委員会2012)。

若宮八幡古墳の横穴式石室は、複室構造の凝灰岩切石切組積胴彫形石室である。同じタイプの横穴式石室は、本例を嚆矢として、古墳時代後期後半から終末期にかけて埼玉県から東京都にかけて広くみられる。若宮八幡古墳の石室は、金井塙良一氏が比企地域の複室胴彫石室における、初期の代表例と位置づけたように、当地域における横穴式石室の変遷を考えるうえで重要な資料であるとされてきた(金井塙1972)。

また隣接する青塙古墳との関係性も古くから指摘されてきた。若宮八幡古墳と青塙古墳の関係性については、若宮八幡古墳のみ埴輪が出土した点や、青塙古墳から出土した須恵器が田辺昭三編年のTK209型式並行と考えられている点から、若宮八幡古墳から青塙古墳への変遷が指摘されている(田辺1981、上野2000、藤野2015)。これに対し、草野潤平氏は両古墳を異なる系統であるとし、併存していた可能性を指摘している(草野2016)。

### 3-2 調査の概要と経過

若宮八幡古墳の調査の概要と経過は、以下の通りである。

**【対象】**埼玉県指定史跡・若宮八幡古墳(昭和39年3月27日)。

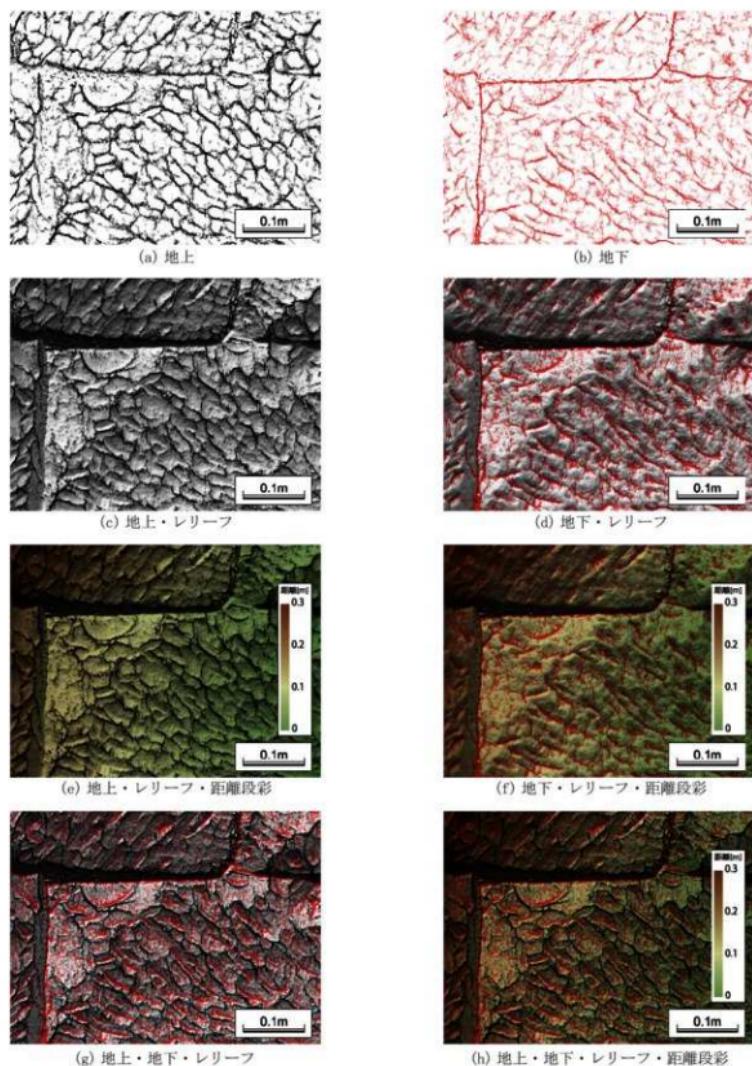


図9 PEAKITのバリエーション

【所在地】埼玉県東松山市大字石橋 2240-1

【書類申請】2016年6月14日に「県指定文化財現状変更等許可申請」を東松山市教育委員会に提出。6月17日に「県指定史跡「若宮八幡古墳」現状変更について」が交付。調査終了後、7月23日に「県指定史跡名勝天然記念物現状変更終了届について」・「現状変更終了届」を提出。

【期間】2016年7月14日(木)～7月20日(水)、合計7日間。

【主体】早稲田大学東アジア地域・シルクロード考古学研究所

【担当】青木弘(埼玉県埋蔵文化財調査事業団、東アジア地域・シルクロード考古学研究所招聘研究員)。

【参加者】山田綾乃(早稲田大学総合人文科学研究中心助手)、伝田郁夫・ナワビ矢麻(早稲田大学大学院博士後期課程)、根本佑・小林和樹・石井友菜(早稲田大学大学院修士課程)、谷川達・ト半馨・芝原実由貴(早稲田大学学部生)。

【協力者】宮島秀夫・佐藤幸恵・矢口翔馬(東松山市教育委員会)、横山真・千葉史(株式会社ラング)、奈良文化財研究所、埼玉県埋蔵文化財調査事業団、若宮八幡神社総代一同。

※敬称略・順不同。所属は2016年7月当時。

**調査の流れ** 調査の始めに基準点測量を行った。測量は以下に示した既知点の公共基準点から古墳まで、開放トラバースを組んだ。設置した点には水準測量も行い、世界測地系第IX系に基づく座標を設定した。

3級基準点: 03-3-360

(X : 3000.511 Y : - 41878.322 Z : 40.861)

4級基準点: H16S3-6

(X : 3025.546 Y : - 41915.597)

経由点:

P1(道路上)

(X : 2998.836 Y : - 41852.058 Z : 39.863)

P2(横穴式石室正面)

(X : 3031.055 Y : - 41832.251 Z : 43.402)

横穴式石室内には、P2から五寸釘で8点の基準点を打設した(図13・表1)。8点のうち、C1～C5は、奥壁・玄門・前門幅の二等分値を仮主軸として設定した。

その後の作業は第1章で示した通り、横穴式石室内のFocus3DとEXAScanによる三次元計測、写真撮影、

及び現地でのデータ処理や観察記録を順次行った。なお、Focus3Dは株式会社ラングが所有する機材で、作業は横山と千葉が実施した。

各作業は並行して進めたが、結果として基準点・水準測量は約2日、Focus3Dによる計測作業は約4時間、写真撮影は約1日半、EXAScanによる計測作業には約5日間を費やした。

一連の作業が終了した後、機材の撤収や原状復帰を行い、調査を終えた。

### 3-3 横穴式石室の三次元計測

**古墳と横穴式石室の遺存状況** 若宮八幡古墳は墳丘と横穴式石室が良好に残る。墳丘は径約34mの円墳で、周溝は部分的に認めるが未調査である(図10)。墳丘上に葺石はみられず、過去の調査で埴輪片が出土した。また、横穴式石室前室・羨道の解体調査により、石材の裏込めに黒色土と凝灰岩の層・粘土・粘土層が互層状に積まれていることが確認された。

横穴式石室は、二室構造の切石切組積石張形石室である。その規模は、主軸N-38.5°-W、全長8.8m、玄室長4.28m、玄室最大幅2.9m、前室長2.55m、前室最大幅2m、羨道残存長1.97m、羨道最大幅1.55mとされる。壁体の石材は全て砂質凝灰岩で、現在、玄室隅角と前室の床面には、河原由来と推定される礫が確認できる。前室床面の礫は、玄室床面の礫が動かされた可能性が指摘されている。

遺存状況をみると、現在、羨道は羨門から前庭部周

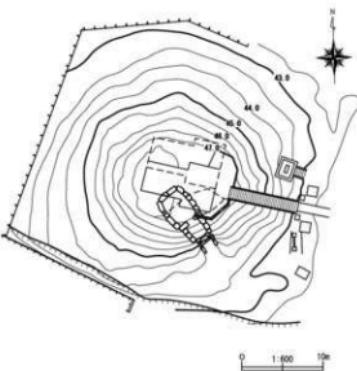


図10 若宮八幡古墳墳丘測量図

## ■番付

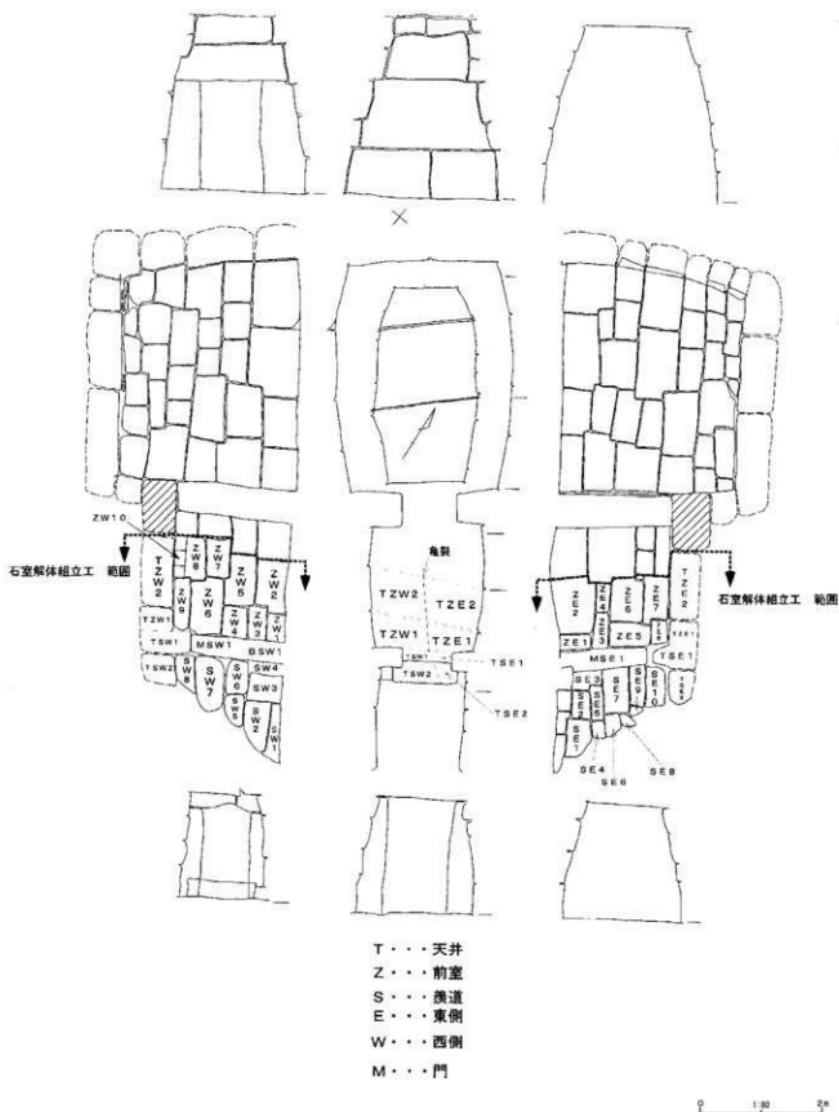


図 11 若宮八幡古墳横穴式石室の既存の実測図（修復保存整備にかかる石材番付図）

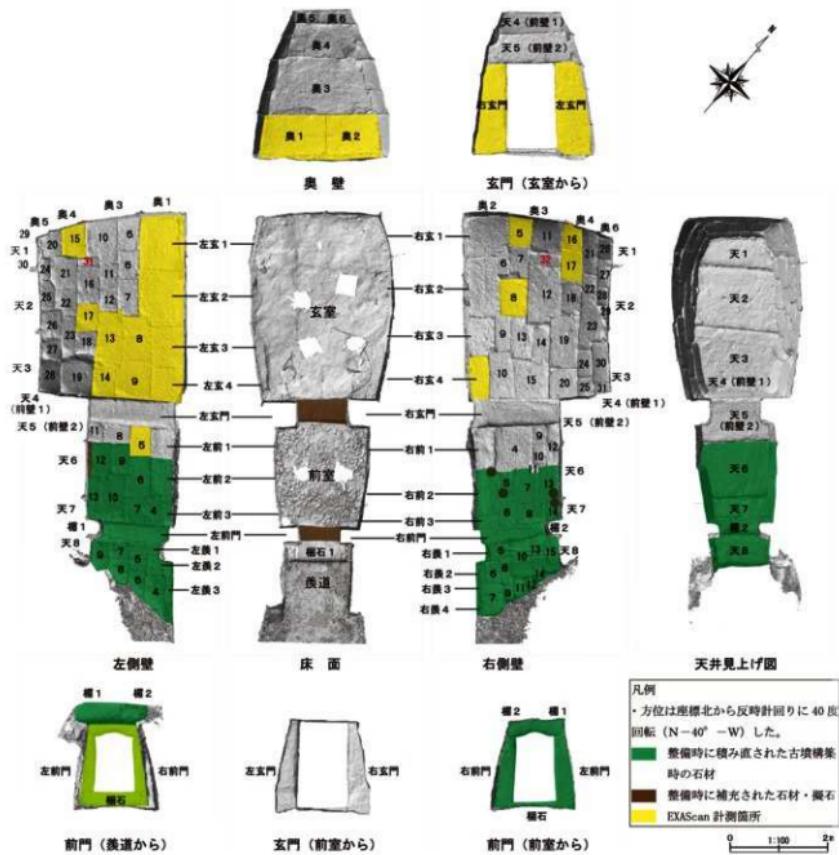


図 12 若宮八幡古墳横穴式石室石材の遺存状況・石材番号・EXAScan 計測箇所

辺の石材は欠失しているが、玄室から羨道半ばまでは良く残る。ただし、2010年～2011年に実施された解体調査により、前室から羨道部を解体し、石材を補強の上、積み直している(図11・図12)。この調査により、床面の樋石や前室側壁の一部は、新規に石材を補充している(図12の茶色部分)。

**横穴式石室の石材番号と計測箇所** 各種の計測にあたり、図12に示したように、便宜的に石材の番号を付けた。横穴式石室の各部名称については、入口から見て左側を左側壁、右側を右側壁とした。この名称を用いて、計測データのファイル名を付け、管理と整理作業を行った。そのうち、EXAScanの計測作業は、表

面に加工痕が良く残る石材を中心に実施した。世界測地系に即した横穴式石室の配置図 三次元計測とSFMで計測・作成した各種データは、対象の横穴式石室とともに、基準点やマーカーを測り、これらに座標値を与えることによって、位置合わせをすることができる。横穴式石室は地面に造られた人工構築物であるため、世界測地系(本地域では第IX系)上に位置づける必要がある。

図13はFocus3Dの計測データと基準点を、世界測地系上に位置づけた図である。若宮八幡古墳の横穴式石室の主軸は、2012年の調査で $N = 38.5^\circ - W$ とされる。今回の調査では、座標北から西に40度傾くこ

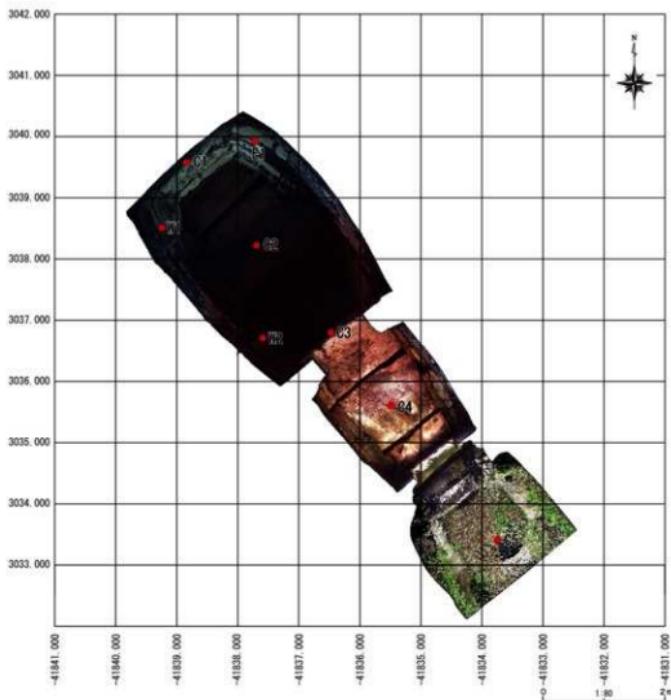


図 13 若宮八幡古墳横穴式石室の Focus3D による平面配置と基準点位置（世界測地系第 IX 系）

表 1 若宮八幡古墳の基準点一覧（図 13 に対応）

| 点名 | X        | Y          | Z      |
|----|----------|------------|--------|
| C1 | 3039.591 | -41838.842 | 43.160 |
| C2 | 3038.229 | -41837.693 | 43.143 |
| C3 | 3036.804 | -41836.475 | 43.325 |
| C4 | 3035.615 | -41835.491 | 43.455 |
| C5 | 3033.404 | -41833.744 | 43.437 |
| W1 | 3038.521 | -41839.241 | 43.166 |
| W2 | 3036.714 | -41837.589 | 43.141 |
| E1 | 3039.935 | -41837.715 | 43.188 |

とから、以下の展開図を作成した。

**横穴式石室の主軸と展開図の作成** 横穴式石室の主軸が座標北から平面的にどれだけ傾いているのかは、通常、方眼紙上で仮設定して決定する。三次元計測と SfM の場合、両作業で作成した 3D モデルから、二次元図を作成する際にも同様の作業が必要となる。以下に示した展開図の作成にあたり、展開図を示す基準となる軸線の決定が第一の作業となる。

つまり、実測図と同様に、各ソフト上で床面とともに、左右側壁・奥壁・玄門等の立面の基準となる軸線を決める必要がある。

今回、軸線の設定は以下の手順で行った。軸線の設定に使用した図面は、Focus3D 計測データを世界測地系上に位置付け、X Y 座標面で表示した図である。

①玄室では奥壁と玄門の隅角から対角線を引き、奥壁幅と玄門幅の二等分値と結ぶ。

②前室では玄門と前門の隅角から対角線を引き、玄門幅と前門幅の二等分値と結ぶ（若宮八幡古墳では前室は積み直している）。

③羨道では前門と羨道先端部から対角線を引き、前門幅と羨道先端部幅の二等分値と結ぶ（羨道部分は積み直している）。

④玄室・前室・羨道で求めた各対角線と各部幅の二等分値とを結ぶ。

若宮八幡古墳の場合、玄室に対して前室は、時計回

玄室の軸主軸



図 14 若宮八幡古墳横穴式石室における軸線の設定

りにややズレている。加えて羨道はさらに西方にズレており、奥壁から羨道まで各部の軸線は一直線には通らない(図 14)。前室と羨道の積み直しを考慮しても、羨道部は構築当初から玄室・前室とわずかにズレていた可能性は残る。

このように各部の軸線にズレがみられるわけだが、今回の報告で提示した展開図は、全て玄室の軸線を優先して作成した。各部の軸線に応じて作図をすることも理論上は可能だが、実態とかけ離れた図になる。そのため、そのような作図は避け、今回はあえて軸線の設定位置を示すことで、展開図が軸線のズレを含むことを明示するに留めた。

横穴式石室における軸線の在り方は、横穴式石室の構築工程や規格を考察する上で重要な要素であるため、作図時に注意を払う必要があることを喚起しておきたい。

**Focus3D の計測成果** Focus3D による計測とデータの PEAKIT 处理は、横山と千葉による。PEAKIT の原理と処理結果のバリエーションについては、第2章を参照していただきたい。

第2章で示されたように、PEAKIT ではレリーフ・地上開度(以下「地上」)・地下開度(以下「地下」)、距離段彩、等高線といった表示を組み合わせることに

よって、三次元計測の結果を様々な表現で提示することができる。

今回の三古墳の報告では、2種類の展開図を提示する。1つ目はレリーフに「地上」と「地下」処理を重ね合わせた図である。なお、各レリーフ図は、向かって左側が暗くなっている。展開図としては不自然な陰影の付き方である。これは、各図を作成する際に、地面を下方向にして図を配置して、左上から光を当てているためである。

2つ目はこれらに距離段彩と等高線を加えた図である。これらは紙幅の都合上、縮尺 60 分の 1~80 分の 1 で提示したが、本来は PC 上で 10 分の 1 以上の縮尺で閲覧・検討することができる。

なお、初めに処理を行った若宮八幡古墳は、レリーフ・地上・地下の処理結果が、附川 1 号墳・地蔵塚古墳と異なる(図 15・16 に対する図 28・29、図 43・44)。これは若宮八幡古墳以後、PEAKIT 処理の方法が改良されたためである。本報告では若宮八幡古墳については、あの二古墳と同様の処理を再び行うには至らなかった。これについては機会を改めて提示したい。

さて、図 15・図 16 は、若宮八幡古墳の横穴式石室をレリーフ+地下表示した図である(処理結果から、地上は表示していない)。本図では、石材の目地や加工痕をより明瞭に確認することができる。

図 17・図 18 はレリーフ・地上・地下に距離段彩と等高線を加えた図である。

距離段彩は、地形図などで標高を色分けして表示する方法を横穴式石室の立面に応用したものである。距離段彩を横穴式石室に採用する場合、基準となる面は地形図における標高値ではなく、横穴式石室の構造上で設定する必要がある。つまり、側壁や奥壁等の立面図では、各面に対する奥行き方向へ、設定した数値に基づく段彩と等高線がつくられる。今回の図面では、各面でおおむね段彩図のバランスが近くなる程度に、基準面を任意に設定している。横穴式石室のような複雑な構築物における距離段彩の基準面の設定方法は、今後の課題として残る。

以上のような前提を踏まえ、改めて距離段彩図から分かることを考えてみたい。

まず、レリーフ・地上開度・地下開度表現に加えて、二次元図上で「奥行き」について知ることができる。若宮八幡古墳のような胴張形石室の場合、平面的なカーブ、及び立地面的なカーブは部位によって細かく異なる。胴張形石室は平面形に注目される傾向にあるが、実際

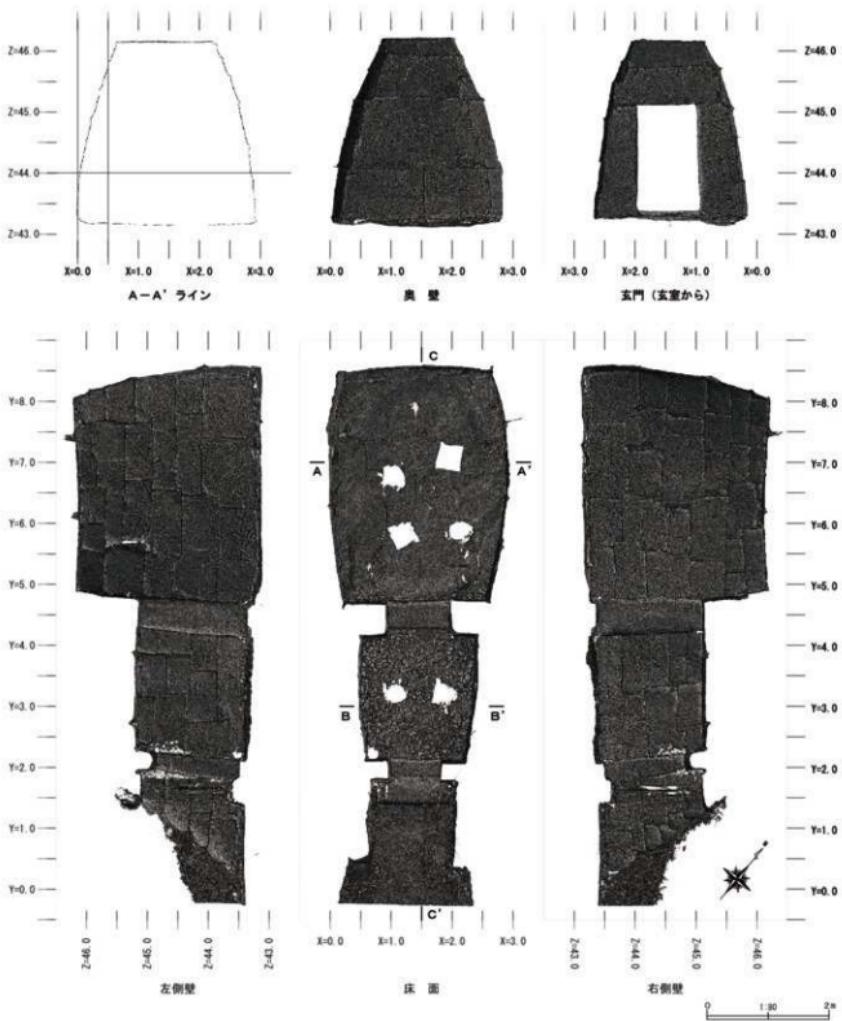


図 15 若宮八幡古墳横穴式石室の展開図（レリーフ・地下）—1

に現地で観察すると、立面方向の屈曲の度合いも部位によって様々である。これらを全てエレベーション図等で図化することは困難である。こうした問題に対して、距離段彩図では、石材の立面的なカーブを二次元図上で読み取ることができる。

例えば玄室では、「右玄2」「左玄2」の石材を中心

に、胴張りが強いことが分かる（最も青い箇所）。両石材の平面的な位置は、奥壁から数えて2石目、玄室中央からやや奥壁寄りに置かれる点が共通する。ここから平面・立面方向における胴張の度合いと、胴張りの起点となる石材が、左右で同じ位置にあることが分かる。

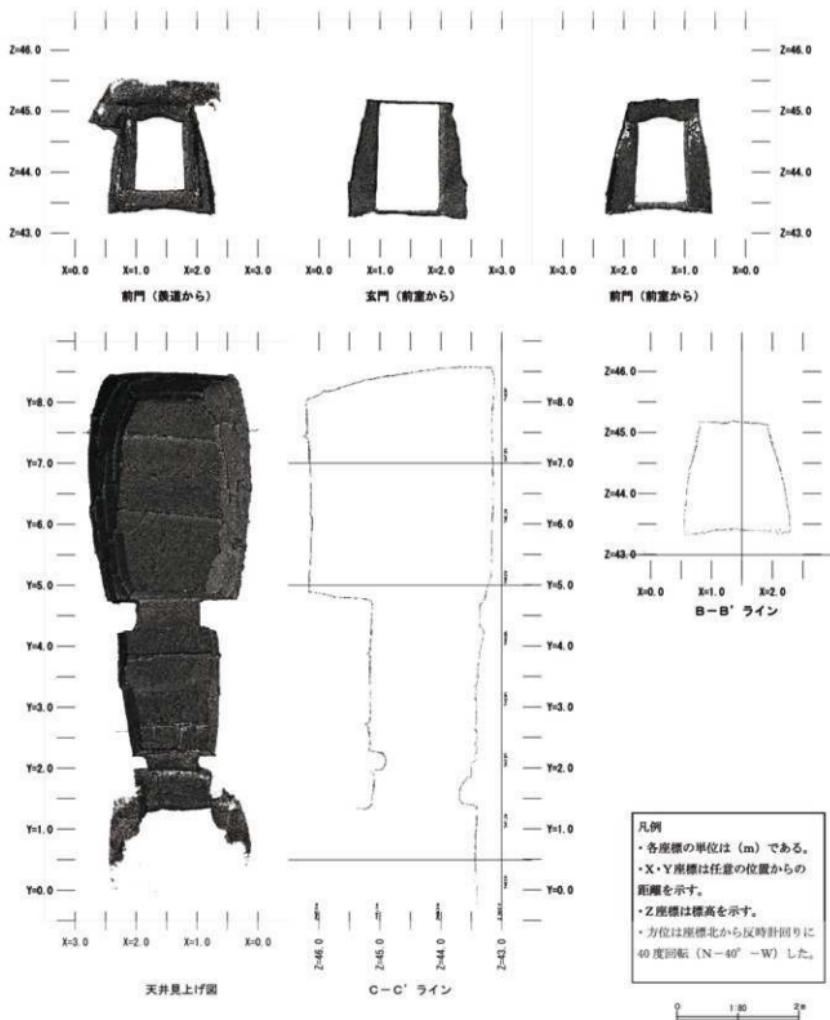


図 16 若宮八幡古墳横穴式石室の展開図(レリーフ・地下) - 2

さらに、両側壁の石積みを「右玄2」「左玄2」を起点としてみると、この石材から弧状に等高線を描くことが分かる。ただし、右側壁の方が奥壁寄りに等高線が密で、より胴張りの強いことが分かる。この傾向は平面形の胴張りが、左側壁よりも強いことからも窺われる。

次に、図18における床面から天井石を見上げた図では、玄室の右側壁と左側壁の持ち送りの度合いが視覚的によく分かる。すなわち、右側壁(天井見上げ図左側)は基底石から最上段までの持ち送りの間隔が狭い。左側壁(天井見上げ図右側)は右側壁よりも、やや間隔が広く、左右側壁でも傾斜の度合いが若干異なる。

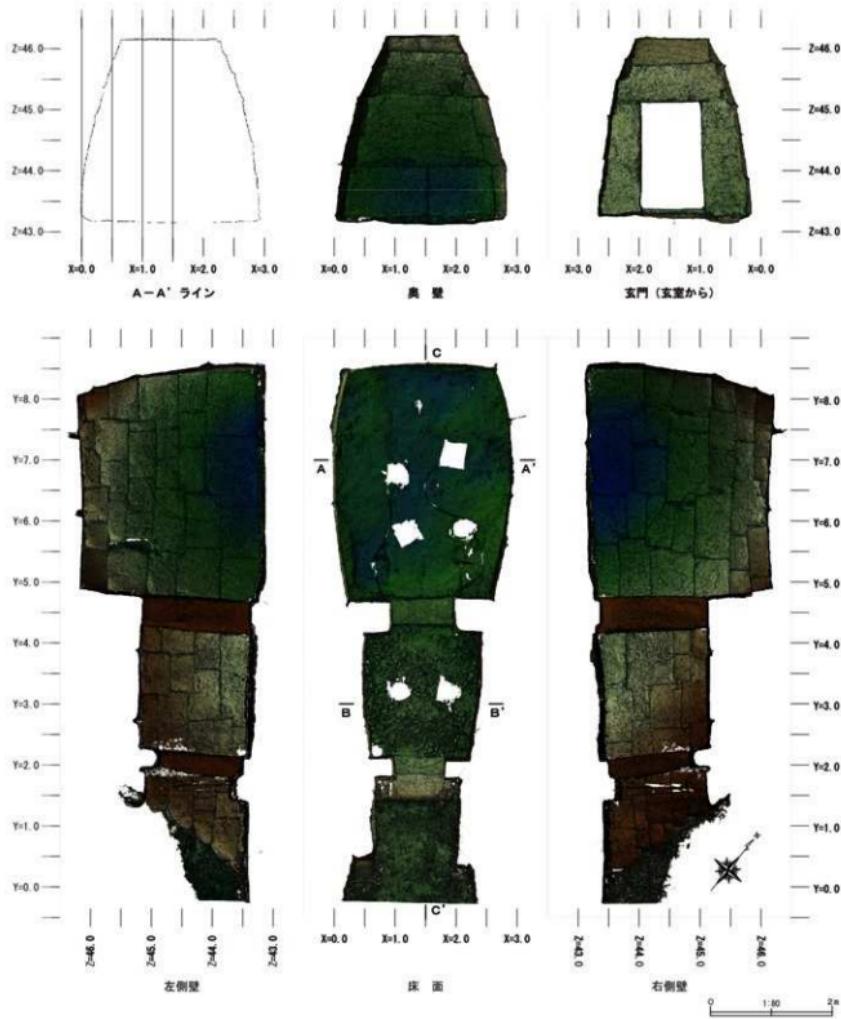


図 17 若宮八幡古墳横穴式石室の展開図（レリーフ・地上・地下・距離段彩）—1

る。奥壁は比較的右側壁と同様の傾向で各石材が傾斜する。これら3箇所の傾斜は、最上段の石材が距離段彩では緑色であることから、各面で最上段の石材を玄室側に強く内傾させていることが分かる。

なお、前室と羨道は積み直しも考慮する必要があるが、前室では、全体的に左右側壁の特徴は共通するも

の、右側壁（右前8・13・14）が茶色く、内傾していることが分かる。それは天井見上げ図にも表れており、左右側壁で傾斜の度合いがやや異なる。

羨道は右側壁の距離段彩は茶色く、左側壁は薄茶色から茶色に移ろう。右側壁は色調に変化が乏しく、石材が垂直気味に積まれていることが分かる。

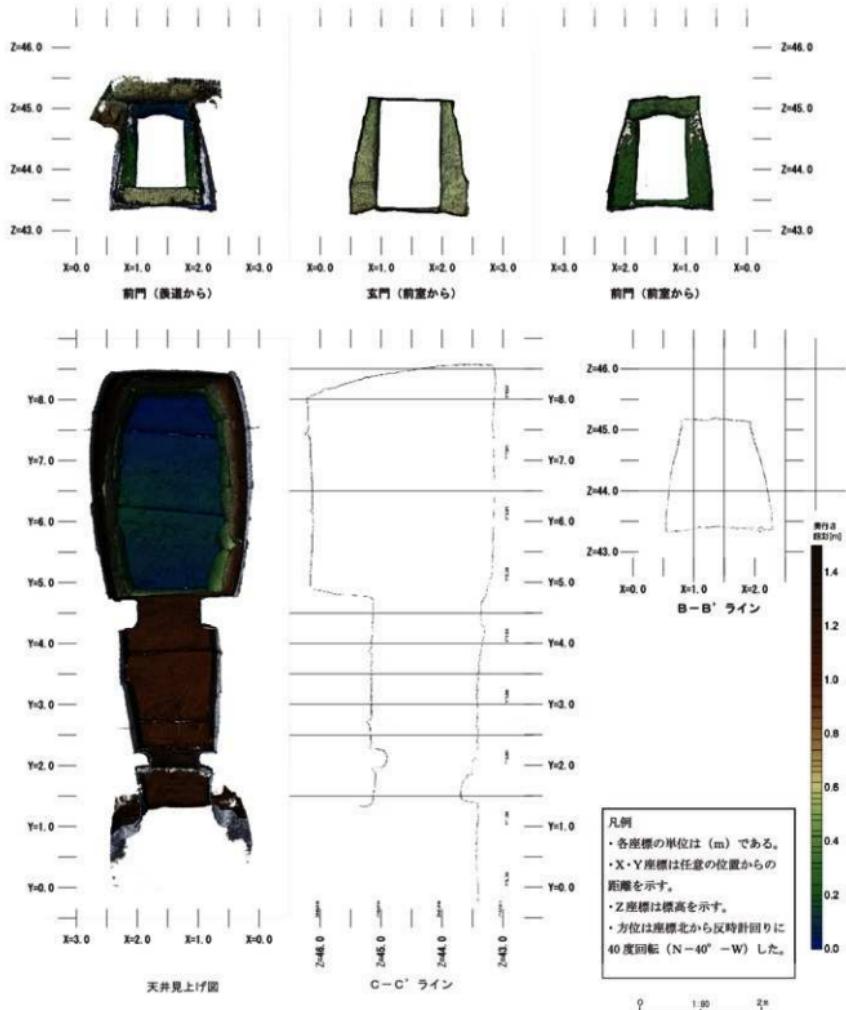


図18 若宮八幡古墳横穴式石室の展開図（レリーフ・地上・地下・距離段影）—2

以上のことから、距離段影図から、各壁面における構造上の共通点と相違点を立体的に検討することができる。こうした共通点と相違点は、横穴式石室を構築する際の計画性の高さとともに、各壁面を構築した工人の体制や技術差も反映していると想定される。

ただし、このような平面・立面における胴張の度合

いを、横穴式石室の構築中にどのように確認して、石積みを進めたのかという点は、まだ不明瞭である。

若宮八幡古墳の場合、各石材は横向方向に目地が通る箇所が多い。例えば奥壁と玄門・前壁は、左右側壁の石材と、各段で密にかみ合っている。奥壁や玄門の石材が、石積みの一つの基準として構築中に役割を果た

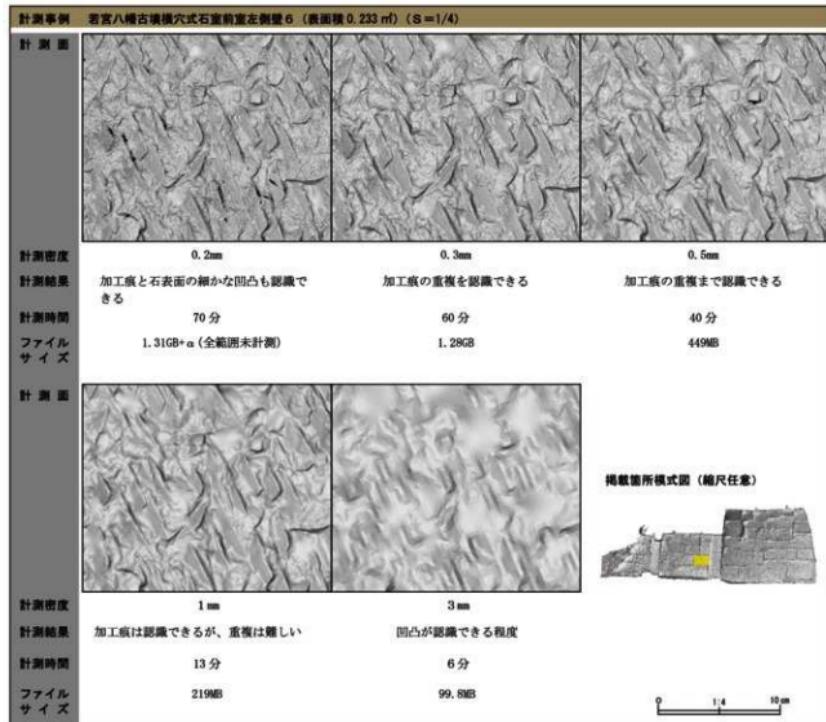


図 19 EXAScan による計測密度の比較

していた可能性は高い。そのため、横方向の目地が通る箇所が、工程の大きな段階として、胴張りの度合いを確認する面だったと考えられる。

**EXAScan の計測成果** EXAScan による横穴式石室石材の計測は、初めての試みであったため、計測に適切な計測密度や効率的な計測方法の検討も併せて行った。また、EXAScan による計測作業中には、前日までの計測成果を印刷した図に、観察を記録した。

EXAScan では、計測密度を対象資料に応じて変えることができる。そのため、横穴式石室で適切な数値を検討する上で、加工痕の良く残る前室左側壁 6 を対象に、計測密度 0.2 mm ~ 3 mm まで 5 つの種類で計測を行い、その結果を図 19 に示した。

計測密度が最も細かい 0.2 mm では、加工痕と石材表面の細かな凹凸も認識することができるが、計測時間とファイルサイズが大きく、対象範囲を全て計測でき

なかつた。そのうえ、石材表面の加工痕以外の情報まで記録する。

0.3 mm では、石材の細かな凹凸は読み取らないが、加工痕の重複は十分に認識できる。引き続き計測時間は多く、ファイルサイズも大きい。

0.5 mm では、石材表面はいくらか滑らかになるが、0.3 mm に続いて加工痕の重複は認識できる。時間は 20 分以上短く、ファイルサイズも小さくなる。

1 mm では、加工痕の存在は確認できるが、重複関係の認識は難しい。計測時間とファイルサイズは大幅に減る。

3 mm では、石材表面の凹凸が認識できる程度で、加工痕は不明瞭になる。計測時間もファイルサイズも小さい。

以上の結果、今回の記録の方向性としては、加工痕の形状とその重複が見えることと、調査の効率化を重

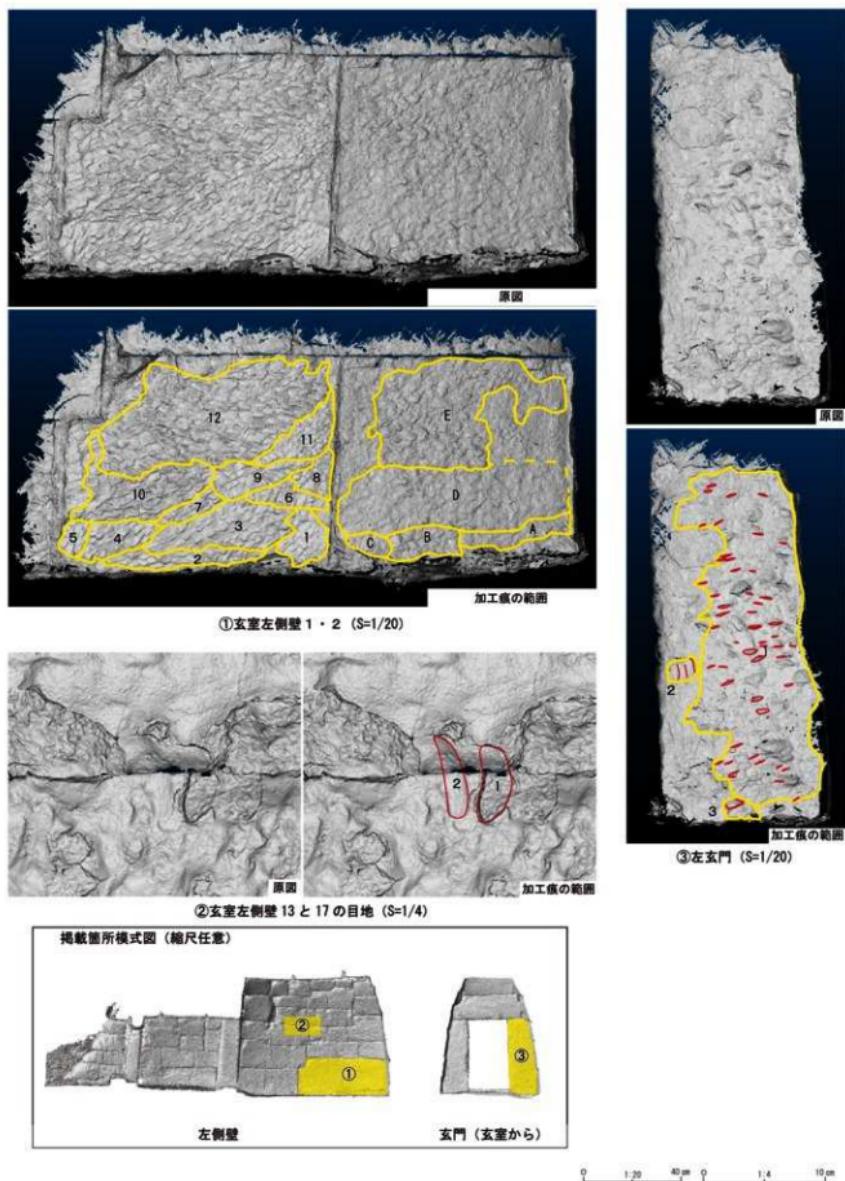


図20 若宮八幡古墳横穴式石室石材のEXAScanによる計測例

視し、計測密度は0.5mmを選択した。

このように、EXAScanによる計測では、Focus3Dよりも精細な記録を得ることができる。その反面、スキャナ一本体やパソコン、そしてそれらの電源を確保する必要がある。

今回の調査でEXAScanを使用して計測した石材は、図12に示した通りである。本報告では紙幅の都合から、全石材の記録を掲載せず、代表的な石材を図20に示した。

図20では①に玄室左側壁1と2、②に玄室左側壁13と17の目地部分、③に左玄門を掲載した。それぞれ何も手を加えない「原図」と、筆者の解釈を交えた「加工痕の範囲」とに分けた。

まず①をみると、玄室左側壁1(図の右側の石材)では、表面の残りがやや悪いものの、Aから順にCまで1列目、Dを2列目、Eを3列目として、石材表面を全体的に下から上方向に加工している。個々の加工痕は磨滅箇所もあるが、左上から右下方向にストロークが走る。玄室左側壁2(図の左側の石材)では、全体の残りが良く、1から12まで加工痕の範囲を確認した。玄室左側壁1と同様に、数字の順番に下から上へと加工し、個々の加工痕は左上から右下方向へ走る。これらの石材には、個々の加工痕に下から上方向に削るストロークが認められず、左上から右下方向でほぼ共通する。そのため、両石材は石材を立てた状態で加工されたと想定される。個々の加工痕の形状は、平坦で長方形の痕跡が多い。幅は下段(1~7)では幅広の加工痕が、上段(11・12)では幅の狭い加工痕がみられる。道具の数は不明だが、加工痕が連続することから、特別道具を持ち替えて加工した結果というよりも、石材に刃を入れる角度の違い等によるものと推定される。こうした加工痕の詳細な分析は、今後の課題としておきたい。

次に②では、石材間に連続する加工痕の可能性がある箇所を示した。石室石材の表面は、剥落も多く、このような加工痕は明瞭ではないが、②に示した箇所は、匙状に抉れており、加工痕の可能性がある。石材間で連続する加工痕の存在は、石積みを行ながら最終加工を行っていた証明の一つとなる。若宮八幡古墳では、裏込めから凝灰岩の層層が出土しており、こうした現地加工を行っていた可能性は非常に高い。さらに、現地加工の裏付けとしては、石材間で胸張り(表面のカープ)が連続する点もあげられる。距離段彩図でも明らかのように、この石室では、複数の石材を組み合わせて胸張りを造っている。しかし、その加工は各石材の表面を単純に削るだけでなく、必要な曲面を加工している。奥壁に接する側壁石材にその傾向が強く、結果として滑らかな壁面に仕上がっている。

最後に③の玄門石材では、①や②で示した例とは異なる加工痕が認められる。すなわち、赤線で示した筋状の加工痕(1)である。通路寄りには縦方向の加工痕(2)、下方では幅広の匙状の加工痕(3)が残る。

この玄門は、石積みの順序をみると奥壁最下段とともに、早い段階で設置された石材である。石材は高さ約140cmと大型で、形状は曲面のない直方体である。

これに対し、1のような加工痕は、石に対して刃を寝かせたのではなく、立てた状態で打ち込んだ結果と考えられる。側壁とは異なる加工痕が残る点は、道具の違いか作業姿勢の違いによる痕跡の変化、あるいは石を寝かした状態など、原位置とは異なる状況下での加工も想定する必要がある。すなわち②で挙げた現地加工ではなく、構築前に別の場所で加工していた可能性も想定される。

本報告では可能性の提示に留めたが、このような加工痕の分析は、工人の動きや技、作業場所を推定し、横穴式石室の構築過程とその体制を知るうえで重要な分野である。三次元計測による記録は、研究の可能性を大きく広げるといえよう。

**SFMの計測成果** 最後にSFMの計測成果を取り上げる。第1章で説明したように、SFMがFocus3DやEXAScanなどの三次元計測と異なる点は、撮影写真を用いる点である。3Dモデルの構築には、Agisoft PhotoScan Pro(ver.1.3.2)を利用した。

若宮八幡古墳の3Dモデル構築にあたり、撮影した写真是約1000枚に達するが、実際にモデルに使用した枚数は841枚である。写真是jpeg形式を採用し、個々の写真に色補正是行っていない。

PhotoScanのワークフローに基づき、3Dモデル形成過程を以下に記すと、写真的アライン、高密度クラウドの構築、メッシュの構築はいずれも「High」モードで実施した。テクスチャーは「汎用／モザイク(標準)」で構築した。

構築した3Dモデルに対して、基準点測量の成果に基づき、座標を与えた。現地で測量した基準点は8点だが、結果として5点(C1~C5)を採用した。その結果の誤差は0.013073mである。

ジオリファレンスを終えた3Dモデルを作成後、図21~図23の平面図・展開図を作成するため、オルソ

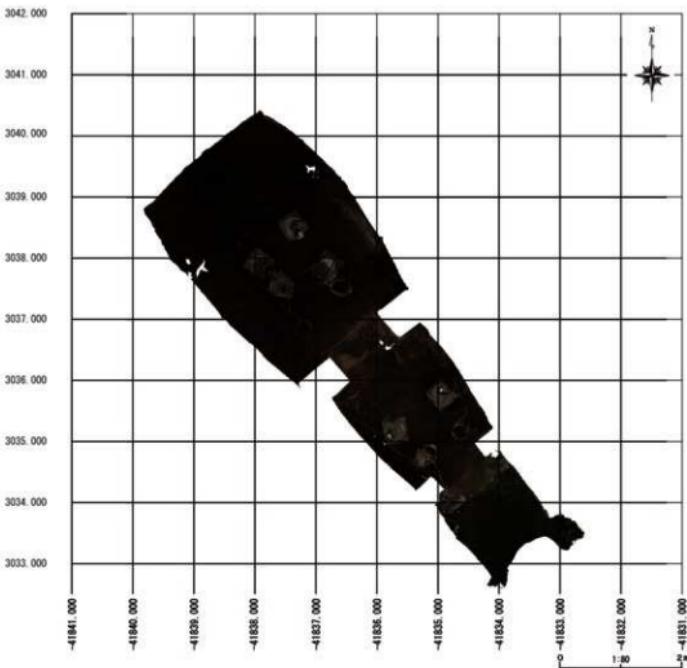


図 21 若宮八幡古墳横穴式石室のSfMによる平面配置（世界測地系第IX系）

モザイク（正射投影画像）の構築を行った。オルソモザイクの構築では、三次元計測の処理と同様に、基準となる面の設定を行う必要がある。PhotoScanPro (ver1.3.2) では、3D モデルを数値で角度を変えることができないため、各種展開図の基準面の決定は以下の方法を探った。まず、X Y 方向は水平、Z 軸も垂直を維持し、モデルを任意の面（横穴式石室の仮主軸）に手動で回転させる。モデルの不要部分をカットし、横穴式石室の室内を表示する（例えば左側壁のオルソモザイクを作成する場合には右半分をカットする）。この面決定には、Focus3D の PEAKIT 処理図を参考にした。

作成する面の決定後、オルソモザイクの構築では、ピクセルサイズを  $0.001\text{px} (\text{m})$  に設定し、geotiff 形式で書き出した。そのファイルを QGIS (ver. 2.14.15-Essen) で読み込み、グリッドの表示等の編集作業を行った。

図 21 には横穴式石室の床面（平面図）を世界測地

系上に配置した図を上げた。Focus3D の計測データから作成した図 13 と比較すると、世界測地系に対する横穴式石室の位置と全体の形状は、大差なく出来上がっていることが分かる。ただし、前門付近の形状のみ両者で異なる。ここには鉄扉が設置されており、Focus3D と写真撮影とともに、わずかな死角が生じたための誤差と考えられる。

図 22 と図 23 には、各面のオルソモザイクを配置した横穴式石室の展開図を上げた。ここに表示した図はテクスチャモデルで、表面の色調や質感を確認できる。一例として挙げたソリッドモデルは、色情報を無くし、形状を確認できる。そのほかにも、ポイントクラウドやシェード、ワイヤーフレームといった表示も行うことができる。

本図をみると、横穴式石室の玄室が、全体的に黒いことが分かる。これは、江戸時代に開口したのち、現代に至るまでに、火が焚かれたことによる。

横穴式石室各面の形状は、図 15 ~ 図 18 の PEAKIT

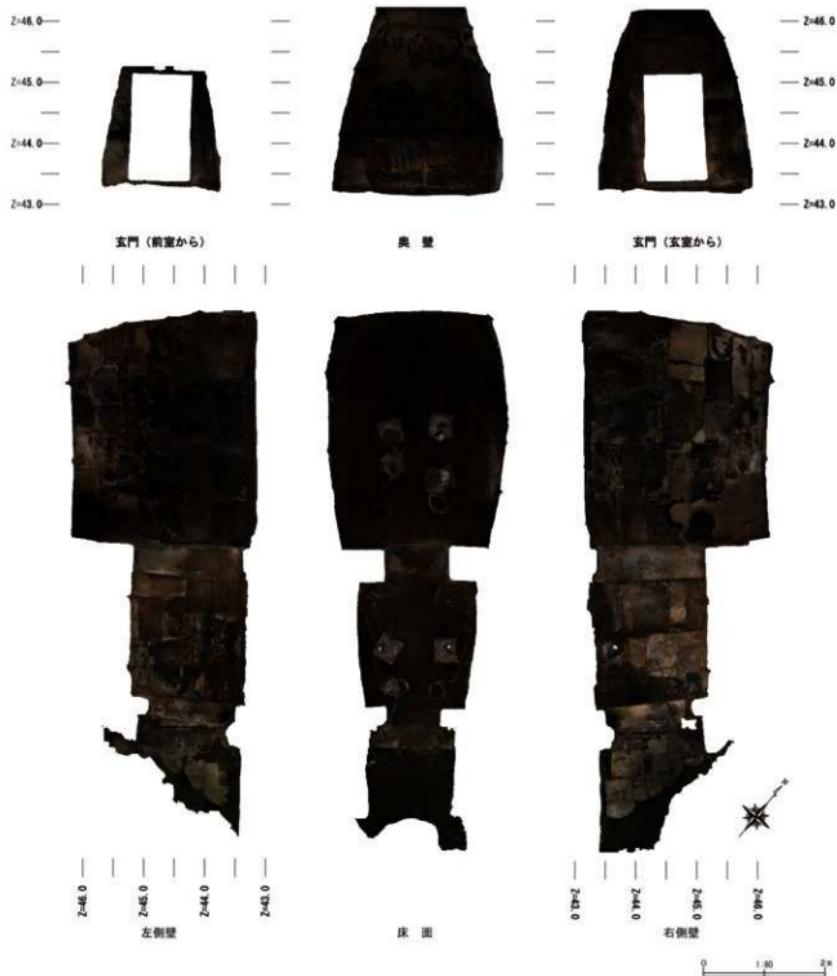


図22 若宮八幡古墳横穴式石室の展開図（SFMによる正射投影画像）－1

処理図と大差ない。これは、SFMの計測誤差を検討する上で重要である。

一方、石材表面の加工痕については、モデル上で視認できる程度で、現状では詳細な分析は難しい。この点は撮影方法や処理方法を再検討することで改善する

余地はあるだろう。

本章では若宮八幡古墳の横穴式石室の調査を報告した。今回の調査ではFocus3DとEXASeanによる三次元計測、及びSFMを複合して、横穴式石室の基礎的な図面を作成し、若干の検討を試みた。3種の手法



図23 若宮八幡古墳横穴式石室の展開図 (SfMによる正射投影画像) -2

は、それぞれに一長一短がある。Focus3Dは広範囲の計測に適し、EXAScanは狭い範囲の精細な計測に適する。SfMは写真画像を元にした色調や質感の表現に適する。特に、簡便に世界測地系上に位置付けられる点、石材加工痕等の表面記録を短時間で記録できる点は、

横穴式石室の調査において大きな効果を発揮する。現状では精度の比較を行いつつ、様々な解析や公開方法を考案し、それらに対応していくためにも、これらを併用した調査事例を積み重ねていく必要があるだろう。

## 第4章 埼玉県東松山市附川1号墳の調査

### 4-1 既往の調査と研究

附川古墳群はその一部が現在の東松山市立南中学校構内に所在する。1958年に始まった同中学校の工事により、そのうちの2基が失われ、1959年に附川1号墳を含む2基が発掘調査された（金井塚 1962）。

発掘された横穴式石室は、複室構造の凝灰岩切石組積洞彌形石室で、石室内から副葬品として、金環や水晶製切子玉、ガラス製小玉などが出土した（図24）。近年には、修復保存整備工事が実施され、墳丘と横穴式石室が復元された（図25）。

周辺に分布する古墳との関係は、附川古墳群と同じ松山台地にある下唐古古墳群（若宮八幡古墳・胄塚古墳）の系列に位置づけられることが多い。

すなわち、若宮八幡古墳を初現として、若宮八幡古墳→胄塚古墳→附川7号墳→附川1号墳といった変遷が主張されてきた。しかし、第3章でも取り上げたように、近年、草野潤平氏は若宮八幡古墳と胄塚古墳を異なる系統と捉えている。そして附川1号墳については、若宮八幡古墳から附川1号墳への変遷という系列を示した（草野 2016）。

### 4-2 調査の概要と経過

附川1号墳の調査の概要と経過は、次の通りである。

【対象】 東松山市指定史跡・附川1号墳（平成18年3月24日）。

【所在地】 埼玉県東松山市大字石橋330 東松山市立南中学校構内。

【書類申請】 2017年1月6日に「学術調査の実施について（依頼）」を東松山市教育委員会に提出。

【期間】 2017年3月16日（木）～18日（土）、合計3日間。

【主体】 早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所、東松山市教育委員会。

【担当】 青木弘（埼玉県埋蔵文化財調査事業団、東アジア都城・シルクロード考古学研究所招聘研究員）。

【参加者】 ナワビ矢麻（早稲田大学大学院博士後期課程）、根本佑（早稲田大学大学院修士課程）

【協力者】 宮島秀夫・佐藤幸恵・矢口翔馬（東松山市教育委員会）、横山真・千葉史（株式会社ラング）、山口歎志（奈良文化財研究所）、奈良文化財研究所、埼玉県埋蔵文化財調査事業団、東松山市立南中学校。

※敬称略・順不同。所属は2017年3月当時。

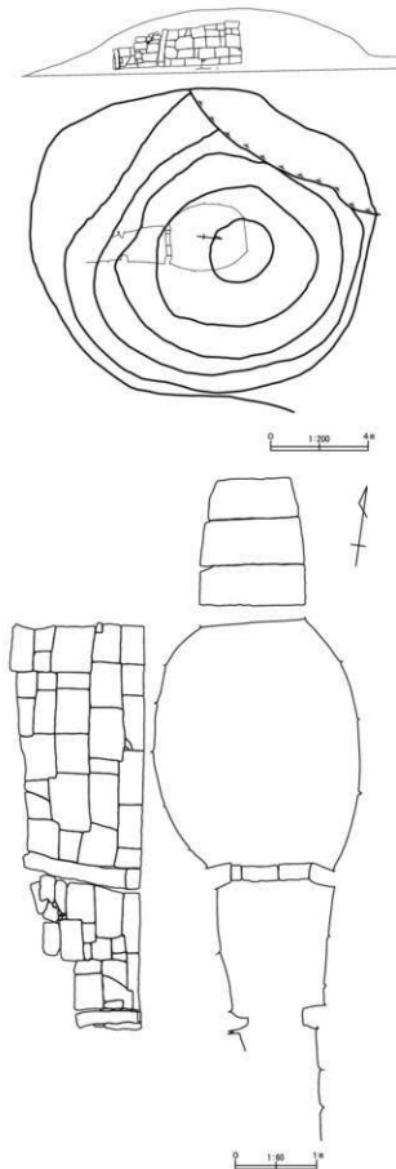


図24 附川1号墳既往の図面

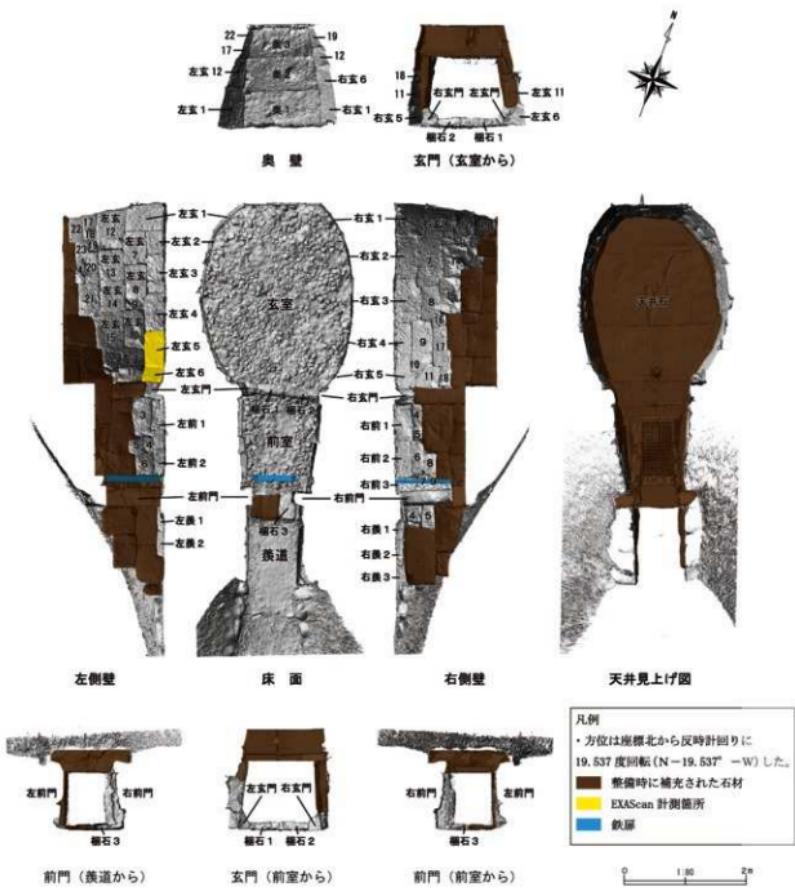


図 25 附川 1号墳横穴式石室の遺存状況・石材番号・EXAScan 計測箇所

**調査の流れ** 調査の始めに基準点測量を行った。測量は奈良文化財研究所から借用したGNSSにより、古墳周辺に3点の基準点を設置した。設置した点に対しては公共基準点から水準測量も行い、世界測地系第IX系に基づく座標を設置した。

1級基準点: 02-1-019

(X : 2769.411 Y : -40492.091 Z : 26.961)

経由点:

T01 (横穴式石室正面)

(X : 2684.038 Y : -40524.531 Z : 27.302)

T02

(X : 2691.714 Y : -40517.608 Z : 27.324)

T03

(X : 2709.576 Y : -40502.375 Z : 27.240)

横穴式石室内には、T01から規準して、6点の基準点を打設した(図26・表2)。6点のうち、TK1・TK2・TK3・TK6の4点は、奥壁・玄門・前門幅の二等分値を仮主軸として設定した。その後の作業は若宮八幡古墳と同様である。なお、Focus3Dは奈良文化財研究所が所有する機材を借用し、作業は背木と根本が進

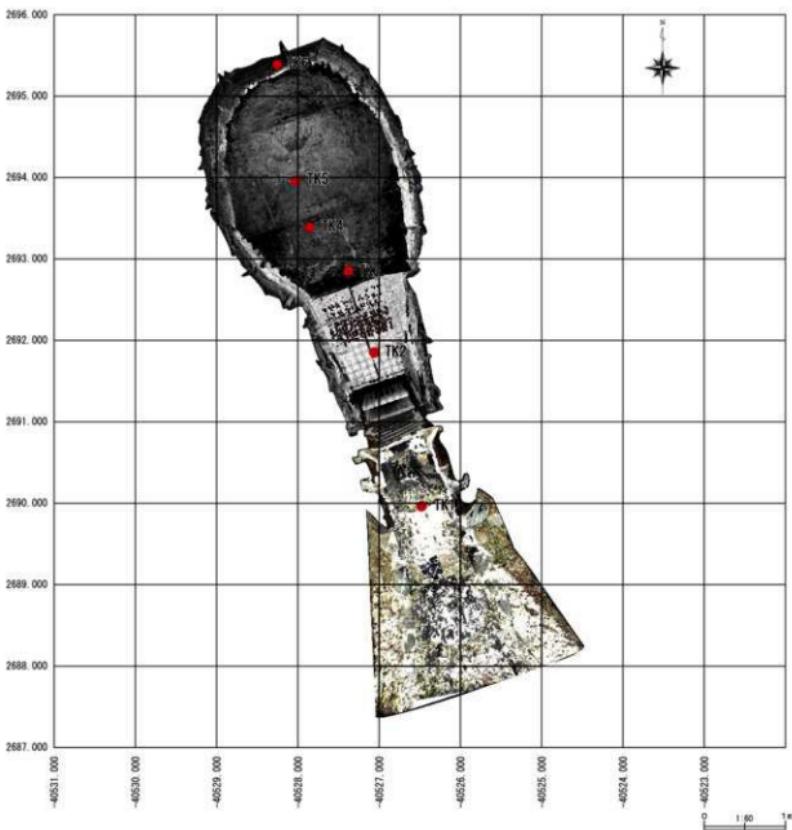


図 26 附川 1号墳横穴式石室の Focus3D による平面配置と基準点位置（世界測地系第IX系）

表 2 附川 1号墳の基準点一覧（図 26 に対応）

| 点名  | X        | Y          | Z      |
|-----|----------|------------|--------|
| TK1 | 2689.969 | -40526.485 | 26.872 |
| TK2 | 2691.856 | -40527.067 | 26.822 |
| TK3 | 2692.854 | -40527.385 | 26.845 |
| TK4 | 2693.389 | -40527.862 | 26.834 |
| TK5 | 2693.962 | -40528.031 | 26.840 |
| TK6 | 2695.388 | -40528.258 | 26.856 |

Focus3D と写真撮影の作業が、若宮八幡古墳よりも時間を要した理由は、横穴式石室に加えて、復元された墳丘に対しても試験的に実施したためである。

一連の作業が終了した後、機材の撤収や原状復帰を行い、調査を終えた。

#### 4-3 横穴式石室の三次元計測

**古墳と横穴式石室の遺存状況** 附川 1号墳は発掘調査当時には墳丘と横穴式石室とともに半壊していた。その後、市指定史跡指定に伴い修復保存整備工事が行われ、横穴式石室上部と墳丘が復元された。墳丘は東西径 12.5m、南北径 13.5m の円墳で、周溝は確認されて

めた。

各作業は並行して進めたが、結果として基準点・水準測量は半日、Focus3D による計測作業と写真撮影は 2 日半、EXAScan による計測は半日を費やした。

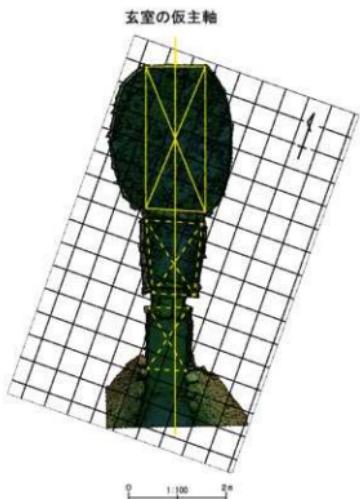


図 27 附川 1号墳横穴式石室における軸線の設定

いない（図 24）。埴丘上に葺石はみられず、埴輪も出土していない。

横穴式石室は、二室構造の切石切組積胴張形石室である。その規模は、全長約 6m、玄室長 2.95m、最大幅 2.85m とされる（図 24）。壁体の石材は全て砂質凝灰岩で、玄室と前室には疊床が残る。

図 25 をもとに遺存状況をみると、羨道は羨門から前庭部周辺の石材は欠失している。羨道壁体は最下段と右前門付近の石材が残る程度である。前室は最下段から 2 段目までが残る。玄室は奥壁とそれに接する側壁石材は、比較的の残りは良いが、玄門とこれに接する側壁石材は欠失が多い。史跡整備に伴い、これらの欠失部分には、天井石も含めて新たな石材が補充されている（図 25 の茶色部分）。なお、天井石は緑泥片岩で復元されている。これは、若宮八幡古墳の整備前の情報をもとに復元したためである。若宮八幡古墳では、整備に伴う調査時に、天井石も凝灰岩と判明した。そのため、附川 1号墳も本来、凝灰岩を使用していた可能性が高い（宮島秀夫氏ご教示）。

**横穴式石室の石材番号と計測箇所** 若宮八幡古墳と同様に、各種の計測にあたり、図 25 に示したように便宜的に石材番号を付けた。EXAScan では玄室左側壁 5・6 の計測を行った。

また、Focus3D の計測データと基準点を世界測地系

上に位置付けた図を図 26 に掲載した。附川 1号墳の横穴式石室の主軸は、過去の調査では示されていないが、今回の計測の結果、N = 19.537° - Wとした。

**横穴式石室の主軸と展開図の作成** 横穴式石室の軸線の設定は、若宮八幡古墳と同じ方法で行った。結果、玄室に対して前室と羨道は軸がズレる（図 27）。ズレの傾向は若宮八幡古墳と近似しており、羨道部は残りが悪いものの、ズレが激しい。横穴式石室の構築当初から、各部がわずかにズれていた可能性がある。附川 1号墳においても、玄室を基準として軸を設定し、以下の展開図を作成した。

**Focus3D の計測成果** Focus3D の計測データの PEAKIT 处理結果を、図 28 ~ 図 31 に示した。図 28・図 29 はレリーフ・地上・地下を重ねた図だが、若宮八幡古墳と異なるのは地下（谷線表示）を赤線に変更した点である。

本図に基づき、横穴式石室の各部に注目してみたい。

まず、全体の石積みは、奥壁・玄門・前門の設置→側壁石材の設置→羨道石材の設置・棚石の設置となる。天井石は羨道天井石・前壁部分を設置したのち、玄室の天井石を置いたと推定される。

次に、奥壁は 3 段残る。若宮八幡古墳と比較すると 1 段少なく、本来は小型の石材を積んだ 4 段目以上が存在していた可能性がある。

この奥壁の目地と左右側壁の目地は通らず、わずかに段差をもつ。そのため、目地は左右対称ではない。

しかし、奥壁 1 段目と 2 段目の目地には、むかって左側に切組を施し、その中に小さな石材を組み合わせている。この小さな石材は奥壁 1 段目と玄室左側壁 1 の上にまたがるように置かれており、ここから両石材を同時に並べ、高さを調整したことが窺われる。

一方、奥壁と両側壁の接する箇所は、どちらの石材も鋭角に削り込み、両者をかみ合わせることで密着させている。奥壁と玄門に接する側壁石材は、表面をやや曲面に加工し、隅角の胴張りを形成している。それ以外の側壁石材は、若宮八幡古墳ほど石材間を密着させるための切り欠き加工はみられない。

玄室側壁全体をみると、左側壁は横目地は通るが、縦目地はそろわない。一方、右側壁は全体を見ると目地は通るが、左側壁ほど整っていない。そして、左右側壁で石材を積む順番が異なる。玄室側壁の目地の通りが違うことや、玄室と前室、羨道の軸が異なることも踏まえると、構築に関わった工人は複数人いたと推定される。

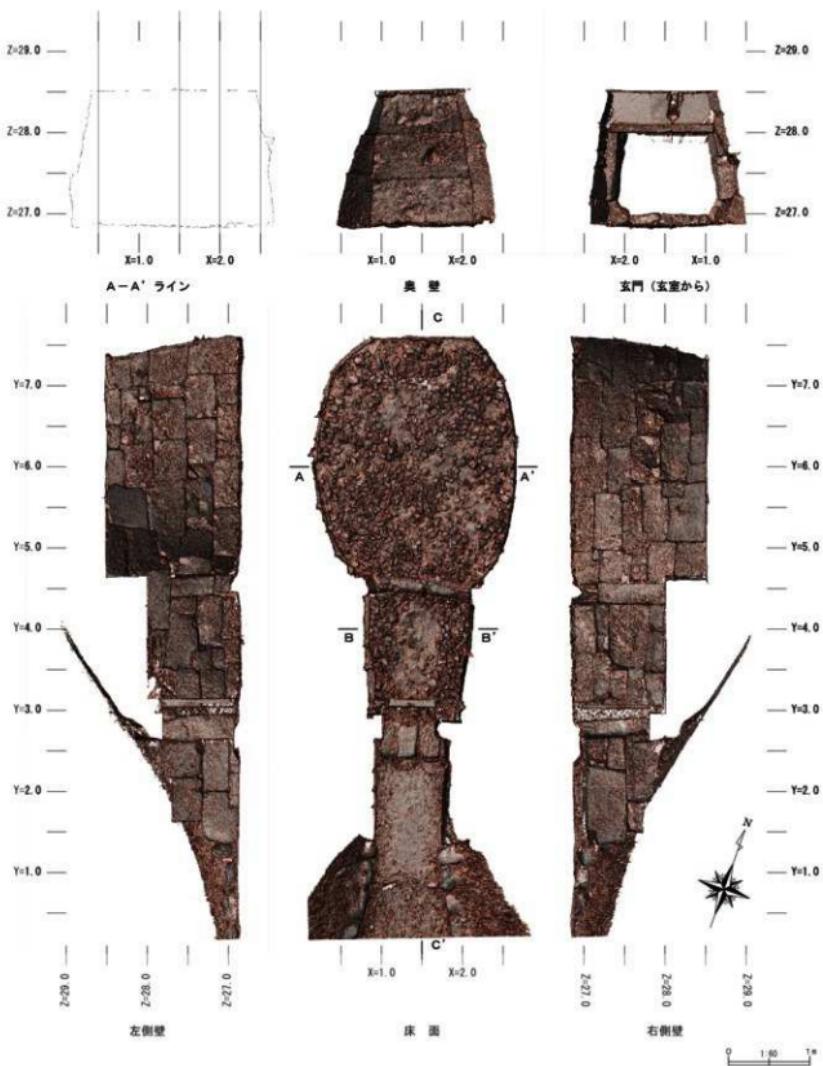


図28 附川1号墳横穴式石室の展開図（レリーフ・地上・地下）—1

床面に目を向けると、樋石は玄門に沿うように3つ並べている。中央に長方形の石材を2つ置き、その左側に小さな石材を1つ、はめ込むように設置している。

玄門は現在、欠損しており、図面上では袖がしっか

り造られていないよう見える。しかし、これは後世に欠損したためであり、本来は樋石まで突出していたと考えられる。ただし、玄門の石材自体は若宮八幡古墳ほど大型ではない。

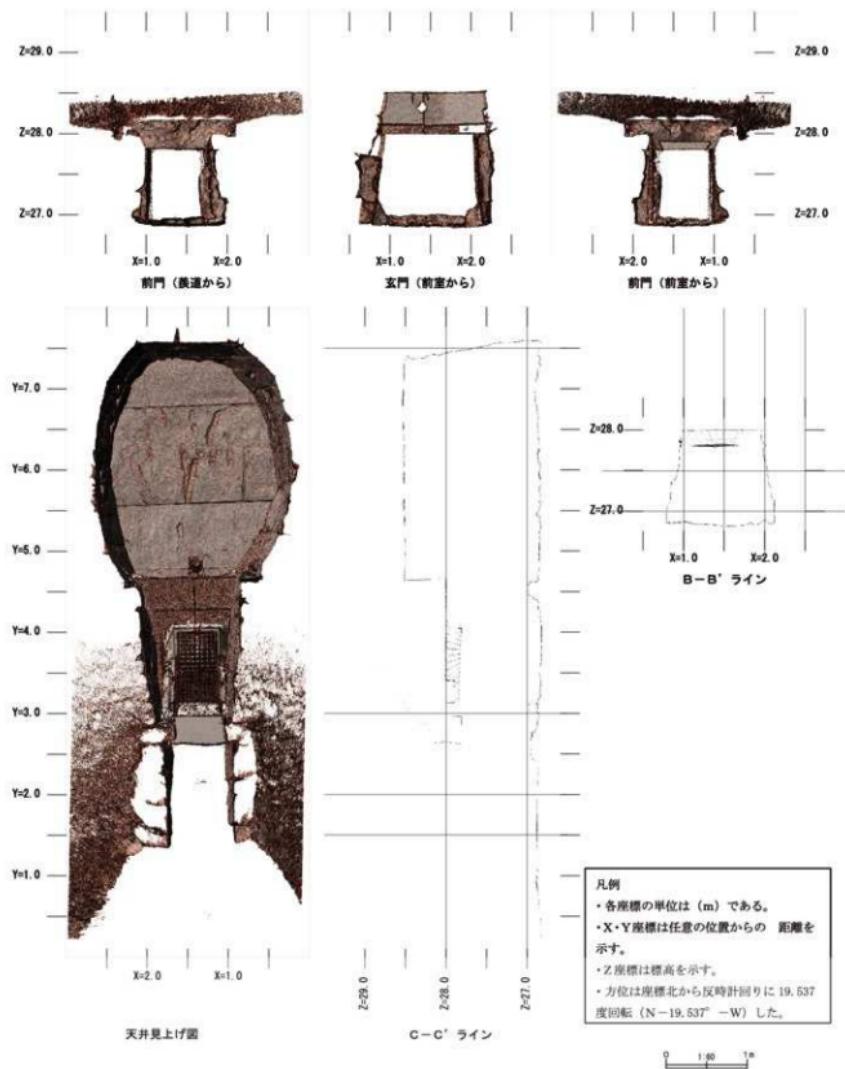


図29 附川1号墳横穴式石室の展開図（レリーフ・地上・地下）—2

前室は若宮八幡古墳と比べると狭い。原状を保つ石材は少ないが、前室右側壁と前門の間に小縫を入れて調整している。前門を置いた後に、側壁を積み上げながら、現場調整を行ったことが窺われる。

右前門とこれに接する樋石をみると、樋石側に切り欠きを施している。石材は小さいが、若宮八幡古墳と同じ箇所で、同様の加工を行っている。

漢道は石材が右側壁基底部しか残っていないが、切