

古墳・横穴墓×3D

考古学・文化財のための

データサイエンス・サロン #02

# 考古形態測定学研究会

考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン

#02

古墳・横穴墓×3D

予稿集

## 目次

趣旨説明：計測の最適化を考えよう	野口 淳（NPO 南アジア文化遺産センター ／奈良文化財研究所客員研究員） .....4
和歌山県立紀伊風土記の丘の取り組み	金澤 舞（和歌山県立紀伊風土記の丘） .....7
スマホで横穴式石室を測りまくる	岩村孝平（古墳見学者／NDS・TS 株式会社） ....10
SfM/ MVS による石棺・石槨加工技術の検討	大村 陸（筑波大学大学院） .....17
レーザースキャナと SfM/MVS による横穴式石室の調査	青木 弘 （公益財団法人埼玉県埋蔵文化財調査事業団／ 早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所招聘研究員） ...24
全天球画像等を利用した SfM/MVS について	伊藤佑真（京都造形芸術大学） .....38

本予稿集は、クリエイティブコモンズ・ライセンス表示 4.0 国際 (CC BY 4.0) の下で刊行・頒布されます

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>



### 〈出版情報〉

タイトル	第2回考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン予稿集
著者	野口 淳、金澤 舞、岩村孝平、大村 陸、青木 弘、伊藤佑真
編集・発行	考古形態測定学研究会（代表連絡先：野口 淳、 <a href="mailto:asiansophia@gmail.com">asiansophia@gmail.com</a> ）
発行日・版	2019年7月26日 公開版
ライセンス	クリエイティブコモンズ・ライセンス表示 4.0 国際 (CC BY 4.0)



日 時：2019年7月13日（土）12:00～

会 場：横浜市歴史博物館

主 催：考古形態測定学研究会

共 催：横浜市歴史博物館

・本サロンは、一般財団法人中辻創智社「学術研究や社会貢献を目的とした会議開催費の助成」を得て開催されます。

・本サロンは日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)「3D石器形態研究の確立による日本列島後期旧石器時代の生活・技術・文化の解明」普及公開事業です。



<https://southasianpalaolithic.net/>

#### プログラム

11:45～ 開場、受付

12:00～ 趣旨説明

野口 淳 (NPO 南アジア文化遺産センター  
／奈良文化財研究所客員研究員)

12:15～ 話題提供 1 和歌山県立紀伊風土記の丘の取り組み

金澤 舞 (和歌山県立紀伊風土記の丘)

12:45～ 話題提供 2 スマホで横穴式石室を測りまくる

岩村孝平 (古墳見学者／NDS・TS 株式会社)

13:15～ 質疑応答 1 スマホで 3D 計測できるの？

14:00～ 休 憩

14:15～ 話題提供 3 SfM/MVS による石棺・石槨加工技術の検討

大村 陸 (筑波大学大学院)

14:40～ 話題提供 4 レーザースキャナと SfM/MVS による横穴式石室の調査 青木 弘

(公益財団法人埼玉県埋蔵文化財調査事業団／

早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所招聘研究員)

15:05～ 話題提供 5 全地球画像等を利用した SfM/MVS について

伊藤佑真 (京都造形芸術大学)

15:30～ 休 憩

15:45～ 質疑応答 2 対象に適した計測機器・手法について考えてみよう

16:20～ 質疑応答 3 成果の公開・利用方法について考えてみよう

16:55 閉会



## 考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン

### データサイエンス・サロンて何をするの？

一般化、普及が進む 3D 計測をはじめ、考古学・文化財関係の計測記録、情報処理、ICT 技術は日々変化、発展しており、書籍等でフォローアップすることが難しくなっています。本サロンは、現場での実践の報告と情報交換を中心に行います。一定の方針、計画にもとづく分析・検討結果を提示する研究会よりカジュアルに、ちょっとした思いつき、アイデアをもとに参加者が気づきや学びを得る、そこから次の試行錯誤に進む、そのような場としてサロンを設定しました。

### なぜデータサイエンス？

これまで、3D 計測のハンズオン講習や分析研究方法についての研究会を開催しました。機器や技術、研究方法の一般化と普及はますます進むでしょう。その時、次の課題は、得られた結果=情報・データを有効活用する枠組みです。それは、個別的には考古学研究、文化財保護、史跡整備、博物館展示、公開普及等々のテーマ、目的に沿って行なわれるでしょう。一方で、新しい情報・データの蓄積が進んでいく過程では、それらを包括的、体系的に取り扱う枠組み、すなわちデータサイエンスへの理解が必要になると考えます。

### 考古学・文化財は情報・データの宝庫

人文科学系に位置づけられる考古学や文化財は、データサイエンスとは縁遠いように思われるかもしれませんが、しかし、限られた特殊な資料だけでなく、どこにでもありふれたものも取り扱い、それらをつなぎあわせることで、過去の歴史を復原し、また市井の人びとの日常や文化を描き出す取り組みは、実はデータサイエンスと親和性が高いものでもあります。これまでに蓄積されてきた膨大な記録を活用し、その意義・価値を高めるためにデータサイエンスを取り入れることは、人文科学にこそ必要なのではないのでしょうか？

### 本サロンの基本方針

本サロンは、固定的なメンバーシップ、会則などを設けません。会費を徴収したり、刊行物を販売することで得られる収益を蓄積し、それにもとづいて活動することも目指しません。身軽で、迅速な活動を重視し、また成果を広く公開することを目的とするためです。そのため、運営にはできる限り費用をかけません。案内のチラシ、予稿・資料集などは印刷せず、電子版のみを、自由なライセンスで公開し、配布します。このような趣旨にご賛同いただける方は、ぜひ、サロンにご参加、話題提供をしてください。また運営ボランティアも募集します。できる時に、できることをお手伝いいただければ充分です。

引き続き、考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロンをよろしく願いいたします。

連絡先：[asiansophia@gmail.com](mailto:asiansophia@gmail.com) (野口)

## 趣旨説明：計測の最適化を考えよう

野口 淳

(NPO 法人南アジア文化遺産センター／奈良文化財研究所客員研究員)

第 2 回のテーマは、「古墳・横穴墓×3D」である。そしてもう一つのテーマは、目的・対象による計測手法・機器の最適化である。具体的な事例にもとづき議論し、理解を深めるために、対象として横穴式石室・横穴墓が選択された、ということである。

今回も焦点となる 3D 計測は、考古学・埋蔵文化財の分野で従来行なわれてきた計測の方法—計測点を指示・指定して位置座標を取得し計測点間を結線する—とは大きく異なり、対象の表面形状を高い解像度と精度で面的に計測する。しかし 3D 計測といっても、手法や使用機器はさまざまである（金田ほか 2010、金田 2019）。それらは、それぞれに固有の特性をもち、長所と短所がある。特定の手法や機器が他に優越するということではなく、目的によって最適な手段を考えるべきである。今回は、SfM/ MVS による写真計測（フォトグラメトリ）、SLAM、レーザー・スキャナを取り上げるが、ほかにも LiDAR などがある。

最適化について注目したいのは、以下の 3 点である。

**1) 導入・運用の容易さ**は、主に金銭的成本と習熟コストである。解像度において優れた特性を示す手法・機器であっても、導入や運用のハードルが高ければ選択肢としては優先度が下がることもあるだろう。

**2) 解像度**は、細かさだけが注目されがちだが、実際には運用のコストと関連して検討すべき事項である。高い解像度は、計測・処理の時間コストの上昇、データ・サイズの増大による取り回しの困難さ、維持・管理コストの上昇を招く。目的または対象によって必要な解像度が定まる時、入出力の解像度を調整できない機器・手法では、オーバースペックによる損失が生じる場合がある。この点は青木報告に詳しい。考古学・文化財分野に引き付けるならば、どのような縮尺・サイズが必要とされるかを考えれば良い。たとえば  $S=1/40\sim 1/50$  で可視化ないし解析・検討する際に、0.1mm 単位の解像度は本当に必要であろうか？

もちろん、高解像度=大縮尺のデータから、低解像度=小縮尺のデータを生成（リサイズ、リサンプリング）することはできるが、逆は困難であるから、できる限り高解像度の記録を残しておくべきだという思想・設計もあり得る。しかし際限なく解像度を高くすればよいということではない。サイズの大きなデータは保管するだけでもコストがかかるし、何よりも処理するために高スペックのコンピュータが必要となるため、運用コストの増大を招く。

しかし現状では対象や場面ごとの最適解を示すことは難しい。ケースバイケースで対応しつつ、事例を蓄積して最適化を模索するべきだろう（金澤報告参照）。処理・運用環境によりコスト評価も変わるので、画一的な規格化・標準化は避けるべきである。それぞれの環境条件下での、その時点におけるベストを追求するための情報・知識の共有が重要である。

**3) 計測可能範囲・条件**は、機器・手法により大きく異なる。計測可能範囲は、最小計測距離と最大計測距離で定義されるが、多くの場合、段階的（あるいは連続的）に精度・解像度

も変化する。計測可能条件は、考古学・文化財分野では、とくにフィールドワークでの計測記録との関係で、直射日光下での計測が可能かどうか、および外部電源が必要か、バッテリーのみでどの程度稼働できるかが検討対象になるだろう。

次に、これら3点について、今回取り上げる機器・手法ごとに概観してみよう。

**SfM/MVS** は、デジタル画像（静止画・動画）を専用のソフトウェア・アプリケーションで解析処理する。導入の金銭コストは、撮影機材+ソフトウェアの価格となるが、考古学・文化財分野では撮影機材は既に揃っている場合が多い。ソフトウェアの価格は様々だが、必要最小限の機能を確保するためには無償～数万円で、撮影機材の価格を含めなければもっとも安価と言える。ただし無償のソフトは操作性（たとえば日本語化されていない）や機能の制約（SfMのみでメッシュ生成等は別のソフトが必要）がある。

有償の商用ソフトも多々あるが、現状では、主に価格面から Agisoft Metashape が、考古学・文化財分野では最も普及しているように見える。日本語化された操作環境（GUI）も導入・運用コストの低減に一役買っているだろう。ドローン（UAV）や延長ポールを利用した俯瞰撮影による平面的な撮影・処理の場面が多いことも Metashape が有効と見なされる理由の一つかもしれない。価格的には高くなるが（\$3,499）、Professional 版では座標を付与でき、オルソ画像が出力できるので、遺跡や調査区全体を計測し、可視化・図化したい需要に即している。一方、SfM やメッシュ生成、テクスチャ処理などについてはソフトごとの長所短所があるので、たとえば遺物の種類・表面状態別に、異なるソフト（Reality Capture：<https://www.capturingreality.com/>など）の出力と比較する必要がある。

SfM/ MVS の精度・解像度は、主に入力（画像セット）の品質に依拠する。解像度は処理過程において指示・変更することもできる。とくにミクロな表面状態の計測・図化・解析が可能なのは長所である（大村報告）。CPU/ GPU の性能やメモリは、画像サイズや数に対する処理精度・解像度と処理時間（あるいは直接的な処理可能画像数）に影響する。しかしそもそも低品質な画像を改善することはできない（専用ソフトでの画像処理は除く）。処理過程での秘訣や裏技はあるが、基本的に要求されるのは画像取得、すなわち撮影の技量であり、それはかなりの部分で SfM/ MVS 用以外の写真撮影の技術と共通する。計測可能範囲・条件も、写真撮影に準じる。これらの点で、写真撮影の知識・技術を一定程度身に付けている担当者が少なくない考古学・文化財分野では習熟コストが低く、かつ条件も整備しやすいため、SfM/ MVS が普及しているといえるだろう。なお Metashape は、動画や全天球画像も利用可能なため、画像セット作成においてキャパシティが大きい（伊藤報告）

**SLAM** は、Simultaneous Localization and Mapping の略称であり、自己位置推定と地図作成をリアルタイムで行なう技術である。レーザー・スキャナによる測距や、画像による深度認識、モーション・トラッキングなどの組み合わせによる。全自動掃除機が室内の状況を認識し自走する際に利用される技術と言えれば分かりやすいだろう。実は、機器導入の金銭的成本において SfM/ MVS と大きく変わらないか、場合によっては安価なこともある<sup>2)</sup>。運用もそれほど複雑ではなく、機器にもよるが習熟は比較的容易である。一方で、他用途への互換性がない専用機器を必要とすることから、コストパフォーマンスの点で SfM/ MVS より劣ると捉えられがちなのかもしれない。また現状では、解像度において SfM/ MVS やレーザー・スキャナより劣る場合が多く、計測可能範囲・条件もタイトである。直射日光下では、SfM/

MVS や中距離用レーザー・スキャナに大きく及ばない。こうしたこともあってか、考古学・文化財分野では知名度・普及度も低い。しかし対象あるいは場面によっては SfM/ MVS やレーザー・スキャナより優位に立つ。金澤報告、岩村報告を参照して欲しい。

**レーザー・スキャナ**は、レーザー光の直進性を利用し、その反射を検出して対象の表面形状を計測するものである。レーザー・スキャナの種類と特性については、金田ほか（2010）に解説されているほか、青木報告で、長所短所が SfM/ MVS との比較を通じて詳説されている。端的に言えば、導入・運用コストは最も遥かに高い。比較的小さな遺物（<300mm 程度）を対象とするのであれば、SfM/ MVS のソフト+撮影機材の導入コストと拮抗する可能性もあるが、古墳の石室クラスの対象に適した機器の導入コストは、最低でも十数倍～百倍以上になる。ただし、高価な機器は計測可能範囲や条件において高い性能を示すため、導入コストとトレードオフの関係にあるとも言える。この場合、広い範囲を短時間で計測できることが最大の魅力である。機器ないし制御・処理ソフトウェアにおいて、計測の解像度を調整できるので、広範囲の計測であっても不必要に大きなサイズのデータを生成することを避けることもできる。導入の初期コストをクリアでき、かつ十分な稼働率が確保されるなら、運用面で償却できるとも考えられるだろう。一方で、広範囲を計測可能な機器は最小計測距離も相対的に大きいため、狭い空間や小さい対象には不向きである。

このほかにも、各機器・手法ごとの特徴、長所と短所は、条件によって様々に挙げることができる。しかし重要なのは、計測機器・手法の違いに関係なく、取得された 3D 計測データを、同じ過程で処理し、利用できることである。たとえば、正射投影（オルソ）図像を作成し、また展開図や断面図を作成する、あるいは各種の画像処理を行なうにあたって、計測機器・手法ごとの特性を考慮する必要はあるが、まったく別の過程を準備する必要はない。3D 計測は、考古学・文化財におけるデータ取得モジュールとして、多様で多彩なアウトプットを生み出す基点となる。そこでは、どのような機器・手法を選択し、実施するかは、互換可能な選択肢である。であるからこそ、その時点、場面、条件ごとに最適な選択を行なうことができるよう、知識や経験を共有することが、貴重なデータの記録において最重要タスクだということが理解されるだろう。これこそが、今回、共有したい点である。

その上で、見たことのない図化・視覚化と研究の視点が表れることを期待する。

## 注

1) 2019 年 7 月時点で無償利用できるオープンソース SfM ソフトとして、COLMAP (<https://demuc.de/colmap/>)、Regard3D (<http://www.regard3d.org/>)、MESHROOM (<https://alicevision.github.io/#meshroom>)、VisualSfM (<http://ccwu.me/vsfm/>)、MicMac (<https://micmac.ensg.eu/index.php/Accueil>) などがある。3DF Zephyr (<https://www.3dflow.net/3df-zephyr-pro-3d-models-from-photos/>) は有償の商用ソフトだが無料版でもモデルの出力・保存が可能、ただし処理できる画像は 50 枚まで。

2) たとえば Microsoft Kinect Sensor for Windows や Intel RealSense Depth Camera D435i は、いずれも店頭価格で 3 万円前後、ZenfoneAR (SIM フリー、ストレージ 64GB) は中古価格で 4~5 万円前後。

## 文 献

金田明大・木本拳周・川口武彦・佐々木淑美・三井 猛 2010『文化財のための三次元計測』岩田書院  
金田明大 2019「3 次元技術等によるデジタル技術の導入」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用』奈良文化財研究所研究報告第 21 冊

## 和歌山県立紀伊風土記の丘の取り組み

金澤 舞

(和歌山県立紀伊風土記の丘学芸員)

### はじめに

岩橋千塚古墳群は、和歌山平野の東側、紀ノ川南岸にある岩橋山塊一帯の東西約 3.0km、南北約 2.5km の範囲に広がる古墳群である。この古墳群は、4 世紀末から 7 世紀後半にかけて造られた総数 900 基以上にも及ぶ国内最大級の古墳群で、この古墳群に眠る人々は、文献史料から紀ノ川下流域の在地勢力であった豪族「紀氏」とする説がある。

岩橋千塚古墳群は、昭和 6 年（1931 年）には、その規模とともに「岩橋型横穴式石室」のほか竪穴式石室や箱式石棺など埋葬施設の多様性が評価され、一部が国の史跡に指定された。昭和 27 年（1952 年）には国の特別史跡に指定され、その後、追加指定を経て、現在の特別史跡指定地は約 63 万 m<sup>2</sup> となった。指定地内には、500 基程度の古墳が点在する。

和歌山県立紀伊風土記の丘（以下、「紀伊風土記の丘」という）は、1971 年に特別史跡「岩橋千塚古墳群」の保全と公開を行うとともに、県内の考古資料及び民俗資料の保存・活用を目的として開園した。園内には古墳群のほか、江戸時代の移築民家 4 棟、万葉に詠われる草木を植樹

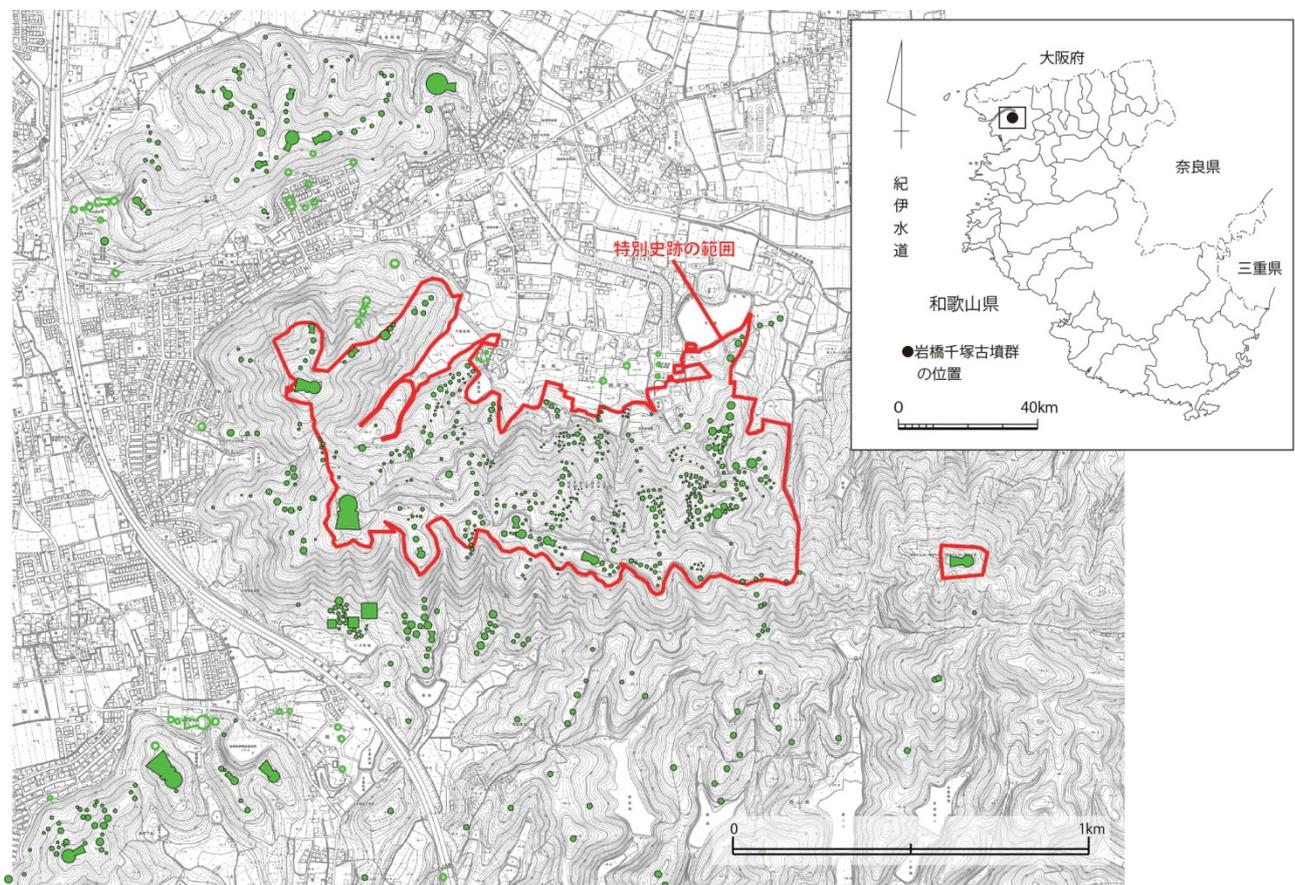


図 1 岩橋千塚古墳群の位置と古墳の分布

した万葉植物園と考古資料、民俗資料を収蔵・展示する資料館などがある。また、園内には1周約3kmの幹線道路と散策路が設けられ、誰でも自由に古墳などを見学することができる。

### 古墳が多すぎる!?!～紀伊風土記の丘の課題～

紀伊風土記の丘では、歴史的価値が高い特別史跡岩橋千塚古墳群の本質的な価値を未来へ維持・継承するにあたって、とくに地震や豪雨などの災害に備えた各古墳の墳丘・埋葬施設の測量・実測図や写真といった基礎的なデータの取得や、崩落の危険性が懸念される墳丘や埋葬施設の定期的なモニタリングが喫緊の課題となっている。

**基礎的なデータの取得** 基礎的なデータの取得は、岩橋千塚古墳群の学術的成果となるだけでなく、万が一南海トラフ地震のような大災害などで古墳が毀損しても、原状に近い状況に修復できる可能性を高めることができる。紀伊風土記の丘でも、これまでに古墳カルテを作成し、各古墳の位置や現況についておおまかなデータの把握や発掘調査によるより詳細な基礎的なデータの取得に努めてきた。ただし、これまでこうした詳細な記録の作成方法は、調査員等による手実測や委託業者による3次元レーザー測量によっていたため、どうしても予算や人員配置・体制などの問題から、たくさんの古墳の記録を一気に取ることは難しい。そのため、現在でも、こうした基礎的なデータを取得できている園内の古墳は、110基程度である。残りの古墳、約390基を全てこれまでと同様の方法で取得していくとすれば、かなりの予算と期間が必要となることが想定される。

**モニタリング** 紀伊風土記の丘では、主要な古墳については、墳丘並びに石室内で定期的にモニタリングを行っているが、古墳の数が多く、全ての古墳に対して行うことは難しい。また、とくに埋葬施設のモニタリングは、温湿度のデータの記録とともに、石室・古墳崩落につながる石材の劣化や石積みの孕みなどの継続的、かつ比較可能なデータの取得が必要であるが、現在は写真撮影など2次元の記録にとどまり、立体構造物である墳丘や石室の状況が比較しにくい。

このように、紀伊風土記の丘では、園内に所在する全ての古墳の基礎的なデータを短時間で取得すること、また全ての古墳で定期的なモニタリングを行うには、予算的にも、体制的にも極めて厳しく、また記録方法についても新たな方法を模索する必要があると感じている。

### 3次元データを安価で手軽に取得できる!?!～紀伊風土記の丘の課題解決に向けて～

近年、著名なものであれば Agisoft Metashape を用いた3次元データの取得は、かなり手軽で身近なものとなっている。紀伊風土記の丘でも、その操作方法や活用方法を知り、また検討するため、今年度の4月に、3次元データの取得・活用方法について、野口淳氏や岩村孝平氏を招き、県内の有志で勉強会を行った。この会では、Agisoft Metashape だけではなく、ZenFone AR の使用方法やその活用方法についても紹介いただき、実際に園内の古墳を測量するなどした。なかでも、ZenFone AR は数万円程度のスマホを使用する手軽なもので、数m程度の墳丘や埋葬施設であればわずか5分程度で3次元データを取得できる。取得したデータからは、墳丘や石室の現在の規模や形状など基礎的な情報を把握でき、また、RTAB-Map や CloudCompare を使用すれば任意の断面をみることもできることから、埋葬施設の石積みやその孕みを確認することもできる。安価で手軽に、かつ短時間で3次元データを取得できる。ZenFone AR は、まさに紀

伊風土記の課題を解決する上で現状最も適した方法となりえると思われる。

現在、紀伊風土記の丘では、有志で集まり、園内の古墳で ZenFone AR 等を使いながら、操作方法の習得や活用の方法などについて試行錯誤している段階である。実際、その手軽さ、コストから得られる情報量は多く、今後、紀伊風土記の丘での運用を目指している。



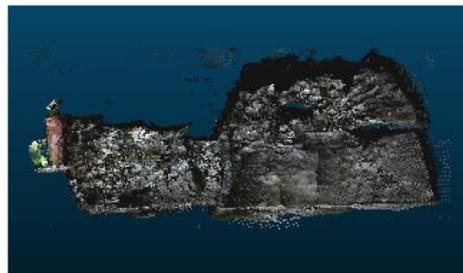
写真1 勉強会風景



写真2 ZenFone AR 使用風景



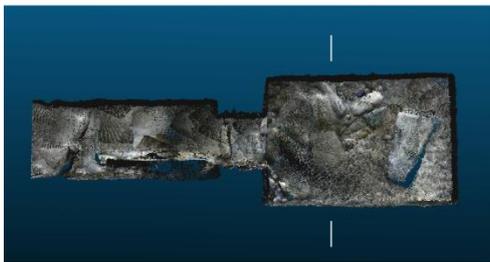
大日山35号墳 平面



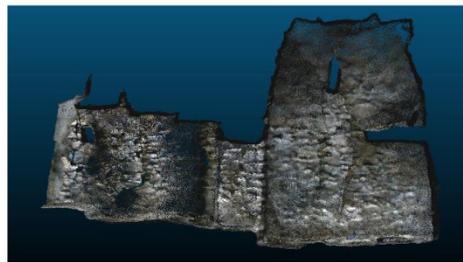
大日山35号墳 右側壁



大日山35号墳 断面



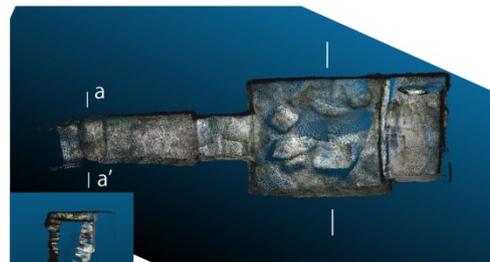
前山B53号墳 平面



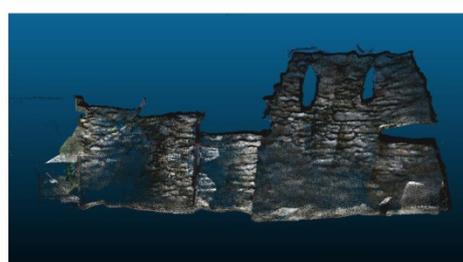
前山B53号墳 右側壁



前山B53号墳 断面



前山A67号墳 平面



前山A67号墳 右側面



前山A67号墳 断面

前山A67号墳 断面(a-a)

図2 岩橋千塚古墳群で ZenFone AR を使用し作成したデータ

## スマホで横穴式石室を測りまくる

岩村 孝平

(古墳見学者/NDS.TS 株式会社)

### はじめに

21 世紀に入り安価かつ高性能になったデジタルカメラや情報通信端末が広く使用されることで、多くの古墳画像や動画がインターネットに公開されるようになった。さらに、Augmented Reality (AR: 拡張現実) や Simultaneous Localization and Mapping (SLAM: 自己位置推定と地図作成の同時実行) を実現させるために、従来高性能な PC を必要とした深度センサーをスマートフォン上で動作させることが可能となりつつある。

報告者は、そのような安価に市販されている 3 次元計測可能な機材を用い、横穴式石室/横穴墓の記録を行った。2014 年 9 月から 2019 年 6 月までの古墳見学で、500 基を超える横穴式石室と横穴墓の 3 次元データを得た。これらの 3 次元データを計測した 3 種類の手法と、古墳見学の過程で得たノウハウを共有する。

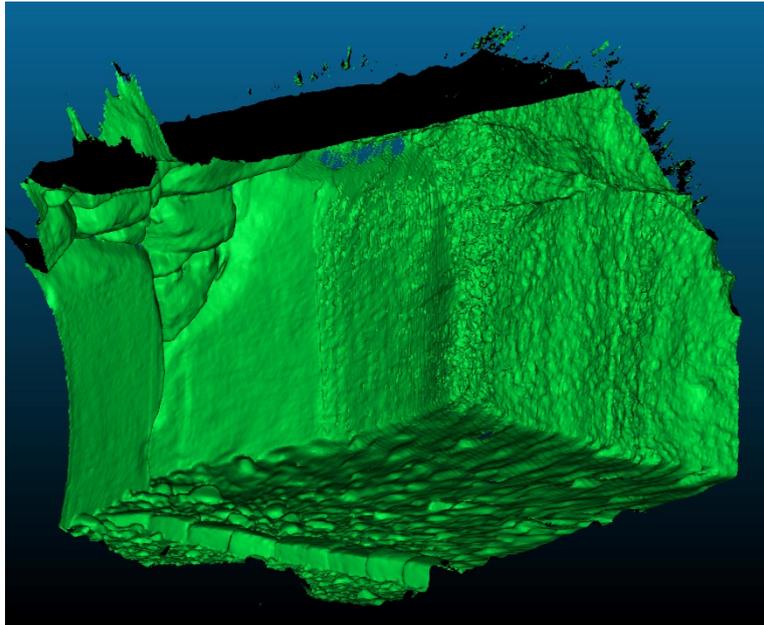
### なぜ、横穴式石室/横穴墓の 3 次元計測に至ったのか

2013 年に行われた持ち運べる 3D スキャナのクラウドファンディングを支援したことで、iPad に外付けする 3D スキャナを入手した。当初は、使用環境を選ばないモーションキャプチャ機器として使用する予定であった。サンプルアプリなどを試す過程で、光沢面を持たない空間記録に適していることが分かり、趣味である古墳巡りに転用。横穴式石室や横穴墓を 3 次元記念撮影を開始した。

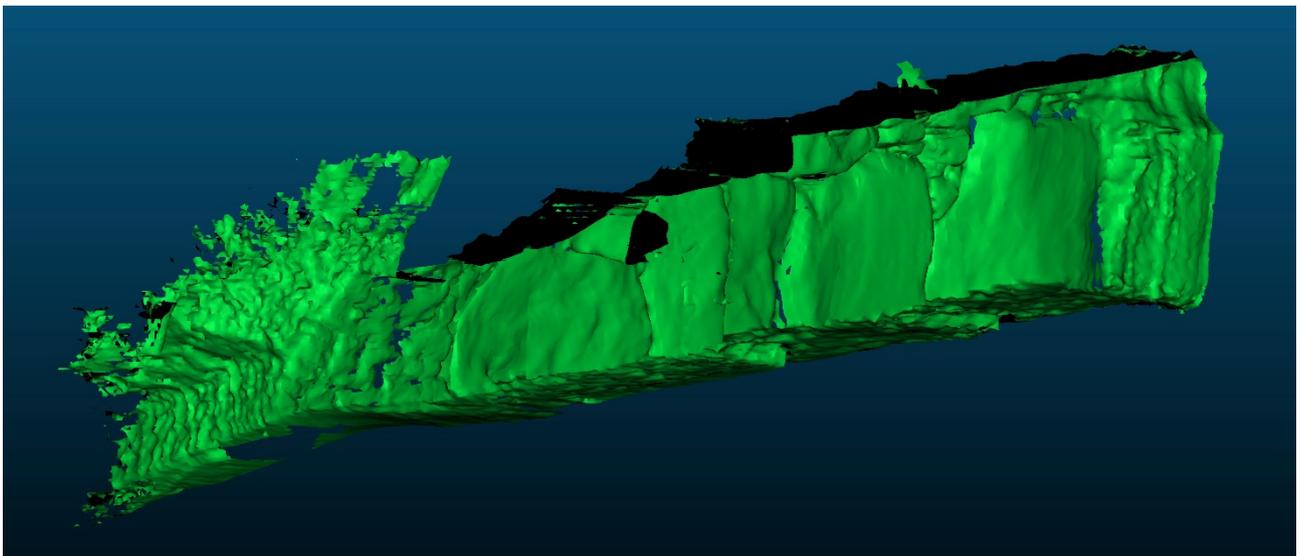
また、全国の古墳を見学するのに伴って横穴式石室の形状を表現する「ドーム型」「胴張り」といった文言について、実際の遺構との相違を感じるようになった。写真や動画では形状を客観的に把握するのが難しく、平面図や立面図も遺構の一部を切り出して作成された物であるため完全ではない。情報の閲覧者が、「急激な持ち送り」ではなく「傾斜〇〇度の持ち送り」といった共通の認識を持てるよう 3 次元データを取得/公開することとした。古墳見学者の WEB サイトでも 3 次元データ利用を行っている事例はごく少数であったことも理由として挙げられる。

### ZenfoneAR 以前の使用機材 1 (Occipital 社 StructureSensor)

ハードウェアとして StructureSensor、ソフトウェアとして Skanect および Roomcapture を使用した。Skanect は、StructureSensor と PC を有線もしくは無線で接続し、データ処理を接続している iPad ではなく PC に担わせる形式である。高密度の点群データが取得できる反面、ノート PC を見学場所に持ち込む必要があり 1 人での運用は難しい。Roomcapture は、StructureSensor と接続する iPad 上で動作する iOS ソフトウェアであり、片手でも運用が可能である。横穴式石室の石材構成や形状が分かる程度には 3 次元計測が可能で、取得データ



画像 1 Skanect で 3 次元計測した群馬県高崎市観音塚古墳

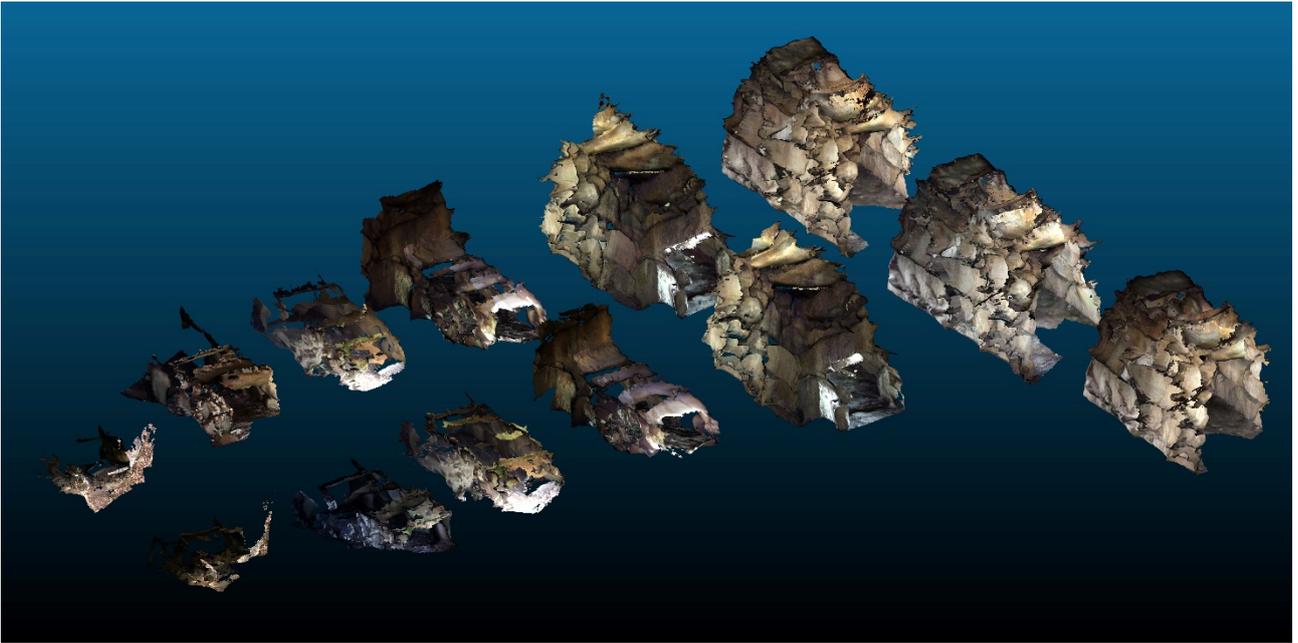


画像 2 Roomcapture で 3 次元計測した群馬県高崎市観音塚古墳

サイズも 100Mbytes 以下に収まることから、この形態を多用した。

### デメリット

- ・パターン投影方式の 3 次元計測は ToF (Time of Flight) 方式と比較して、直射日光などの状況で 3 次元計測が破綻することが多く、横穴式石室/横穴墓の開口部記録が行えない。
- ・StructureSensor 自体は持ち運べるものの、移動しながらの 3 次元計測ができるわけではない。据え置き型の台座を人が行うことに近く、石棺/石屋形など付帯設備を持つ石室や大型のものでは計測位置が多くなりやすい。公開前に、3 次元計測データの位置合わせを行う必要がある。



画像3 Roomcapture で3次元計測した岡山県総社市緑山古墳群4号墳  
結合前の3次元データ

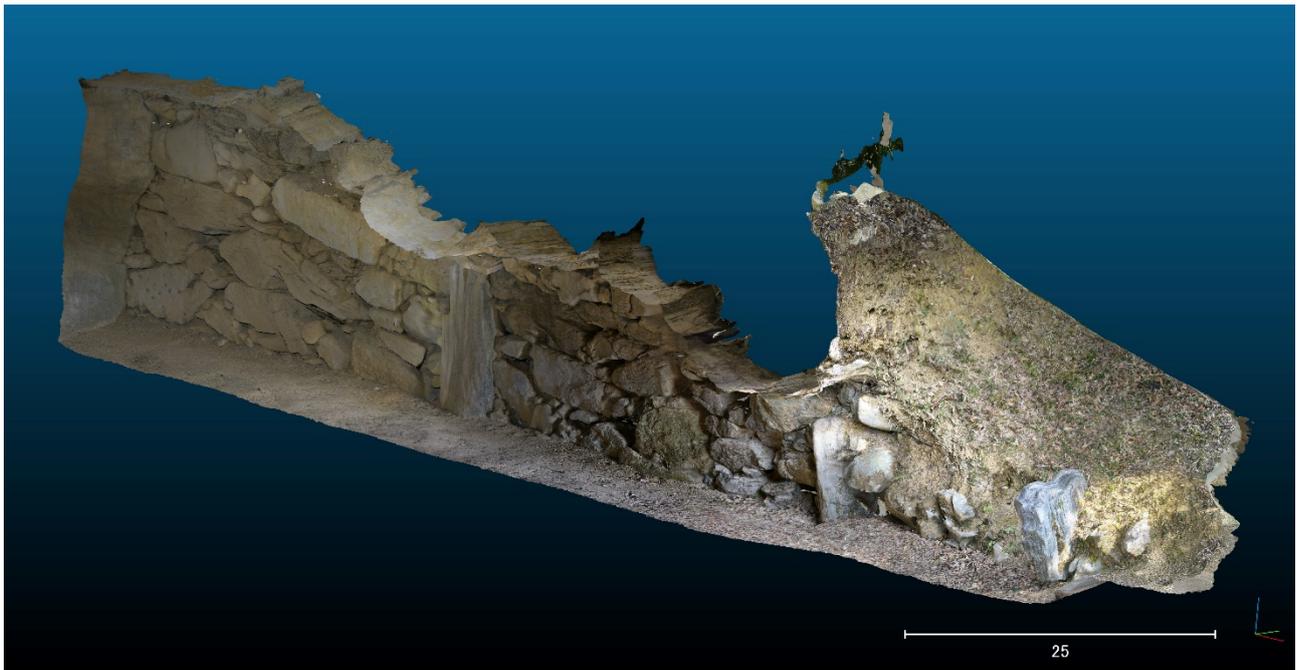
### ZenfoneAR 以前の使用機材 2 (Pix4D 社 Pix4DMapperMesh/Agisoft 社 Metashape)

StructureSensorとは重複しない分野である墳丘やトレンチといった遺構を3次元化するために Pix4DMapperMesh を導入した。ドローン測量用のソフトウェアで、2~3m の一脚に遠隔操作可能なカメラを取り付け撮影した写真の処理を行った。Metashape (旧 Photoscan) へ乗り換えた際に、崖面の横穴墓群や横穴式石室にも使用できることが判明した。高密度の3次元データを作成することができ、テクスチャもそのまま VR コンテンツ (virtual reality) として使用できる品質を持つ。StructureSensor (計測) と併用する形で運用した。

#### デメリット

- ・撮影の難しい狭い羨道や石棺/石屋形など付帯設備は、3次元化に失敗可能性が高い。また、3次元化の成否が帰宅後となり、画像データの再取得が難しい。
- ・SfM/MVS 用の写真撮影に大型の石室で1~3時間と時間がかかる。また、別に計測データをとる必要があり、古墳1基あたりの滞在時間が延びる。
- ・ソフトウェアの要求 PC スペックが高い。

以上のようなデメリットを解消するため、2016年ごろより伸張してきた Augmented Reality (拡張現実) を実現するための技術に着目した。ARでは、現実感を失わせないように表示機器と空間および物体の位置を相互に把握している必要がある。そのために必要な深度センサーや複数のカメラを機器に搭載する例が出現した。その中の1つである Project Tango (Google 社) で見学に転用できる機器がないか調査を続けていた。2017年に入り、ProjectTangoに対応したハードウェアである ZenfoneAR と3次元計測が可能な RTAB-Map 等のソフトウェアがリリースされたため、前述のスマートフォンを購入しデメリットを解消できるか見学を行った。



画像 4 Metashape で作成した愛知県豊橋市馬越長火塚古墳

### ZenfoneAR + RTAB-Map を使用して

ハードウェアとして ZenfoneAR。ソフトウェアとして、RTAB-Map を使用した。3次元計測の方式が ToF 方式となり、低照度下であれば小型の墳丘や崖面の横穴墓群の3次元計測も十分可能である。3次元計測結果をリアルタイムで確認しながら移動することができ、石棺/石屋形なども容易に3次元データ化できる。3次元計測に必要な時間も、10m以下の横穴式石室や横穴墓であれば5分程度。15mを超える大型の横穴式石室でも20分以内に3次元計測データが得られる。SfM/MVSと比較すると、点群密度やテクスチャの精緻さで劣り、小型の石材や工作痕といったものは記録できない。

### ZenfoneAR のみで行える3次元計測

ZenfoneAR 自体が通信機器であるため、RTAB-Map で処理した3次元データをインターネット回線を使用して Sketchfab (<https://sketchfab.com/>) 等にアップロードが可能となっている。例として、奈良県桜井市赤坂天王山古墳の見学時に行ったデータ共有のタイムテーブルを記載する。このような、短時間でのデータ共有が可能になれば、見学の状況を共有し有識者の意見を求めるといった使用方法も考えられる。

9:50 横穴式石室の3次元計測を開始

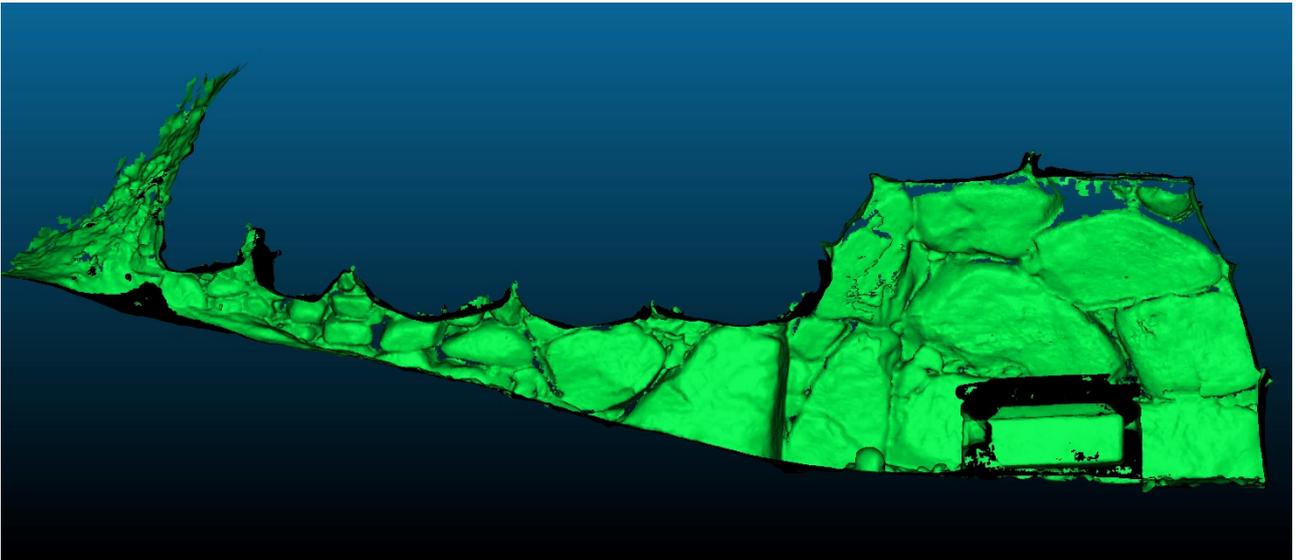
10:30 3回の3次元計測が終了

10:40 優良データを選択し、スマートフォン上でデータ容量の削減を実施

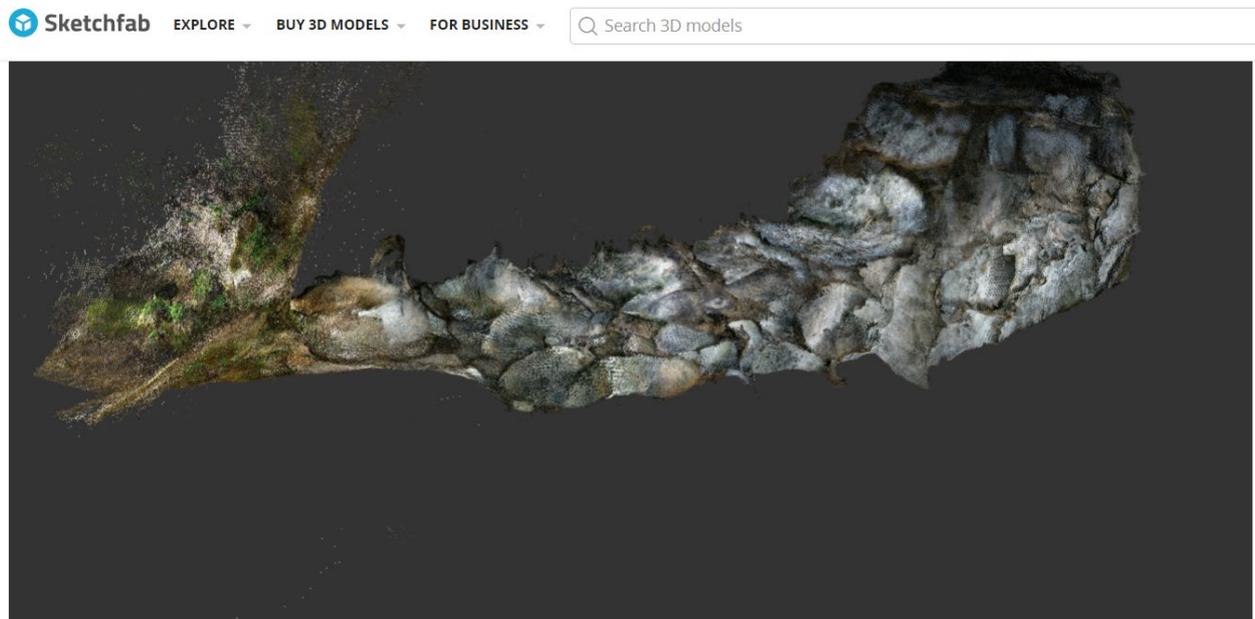
10:58 3次元データを Sketchfab にアップロード。Facebook で共有リンクを公開

※実際にアップロードした赤坂天王山古墳の3次元データの Sketchfab リンクアドレス：

<https://skfb.ly/6JFYD>



画像5 RTAB-Mapで作成した奈良県桜井市天王山古墳メッシュ



Akasakatennozokofun\_Nara\_jp(Ver1.0)

3D Model



nonaka PRO  
FOLLOW

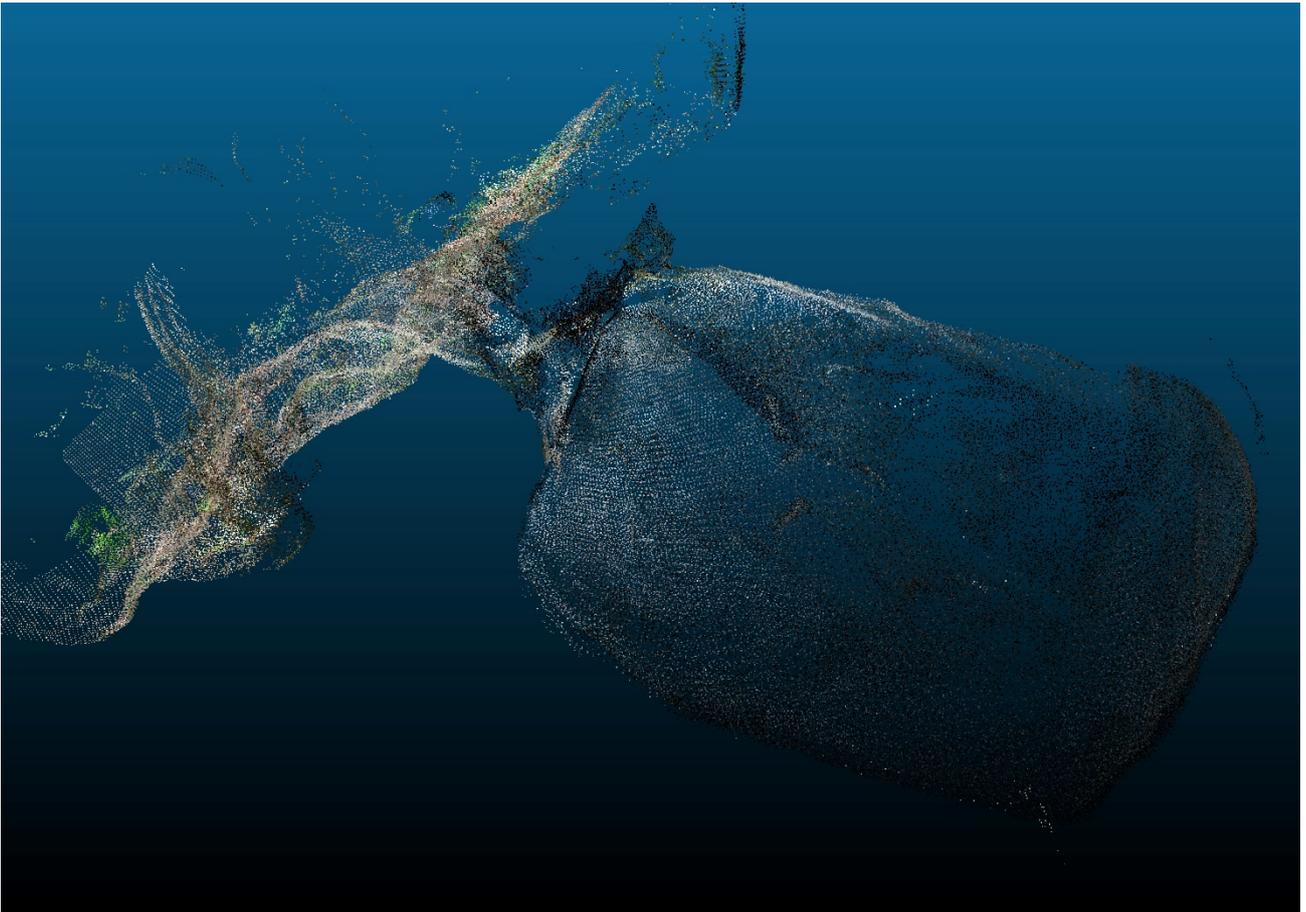
55

★1

画像6 Sketchfab上の奈良県桜井市天王山古墳

機材自体が小型のスマートフォンであるため、人の入れない開口部であってもその先にある程度の空間があれば3次元計測が実施できる。茨城県日立市十王前横穴墓群10号墓では、20cmほどの開口部からZenfoneARを差し入れて回転させることで3次元計測を行った。また、奈良県桜井市谷首古墳では土砂の流入で空いた石材間の空間を3次元計測することで、石材の大きさを推定することが可能となった。

以上のように他の3次元計測機器とは異なる利点を持つものの、ProjectTangoが終了した



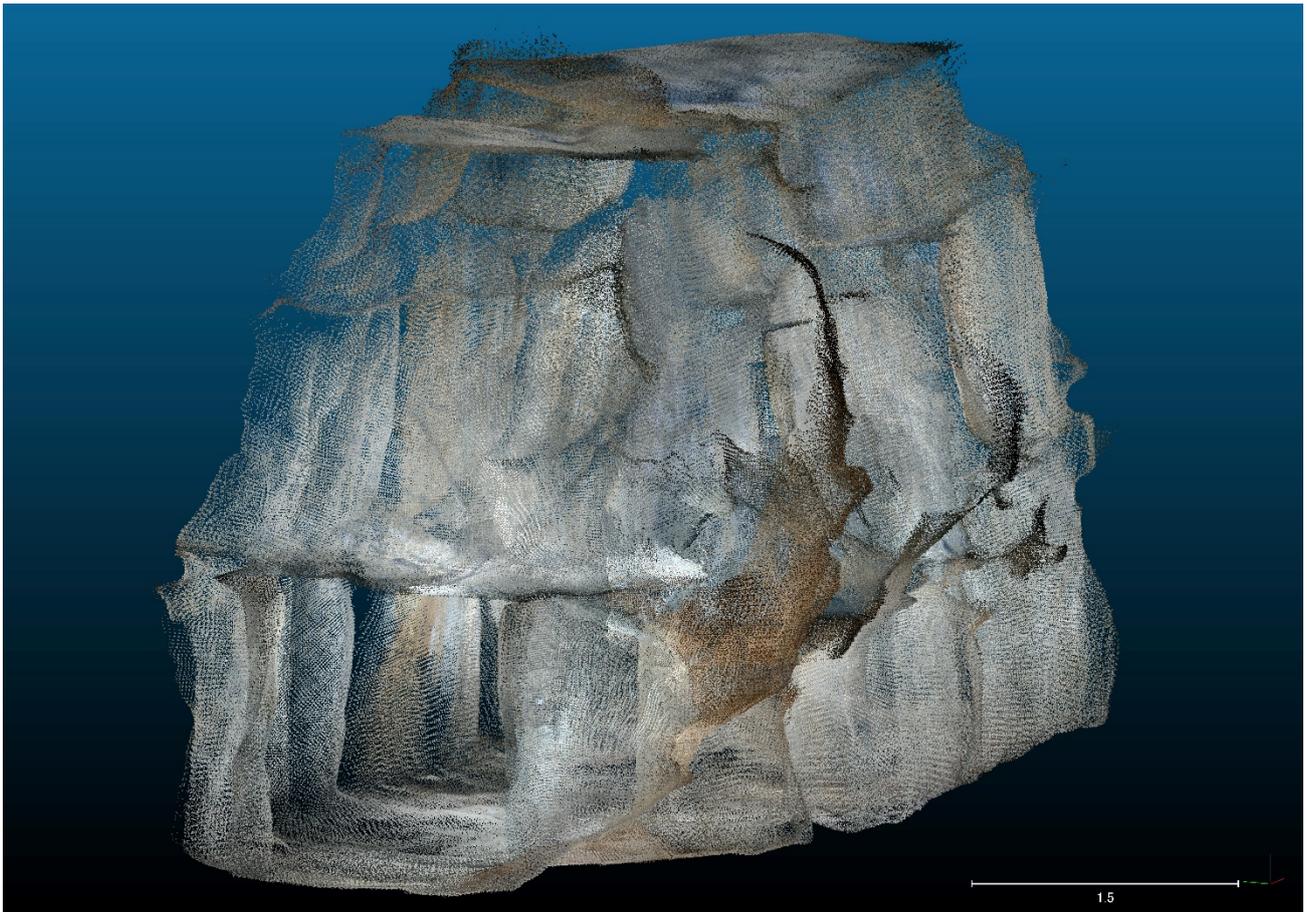
画像 7 RTAB-Map で作成した茨城県日立市十王前横穴群の 10 号墓

ことから対応したスマートフォンは今後発売されない。ZenfoneAR の AndroidOS は 7.0 で、Google の対応が打ち切られるのが通常のライフサイクルでいけば 3 年後の 2022 年。ハードウェアの保守期間も同様の時期に終了する。2022 年以降、使用できないわけではないが懸念は残る状態ではある。

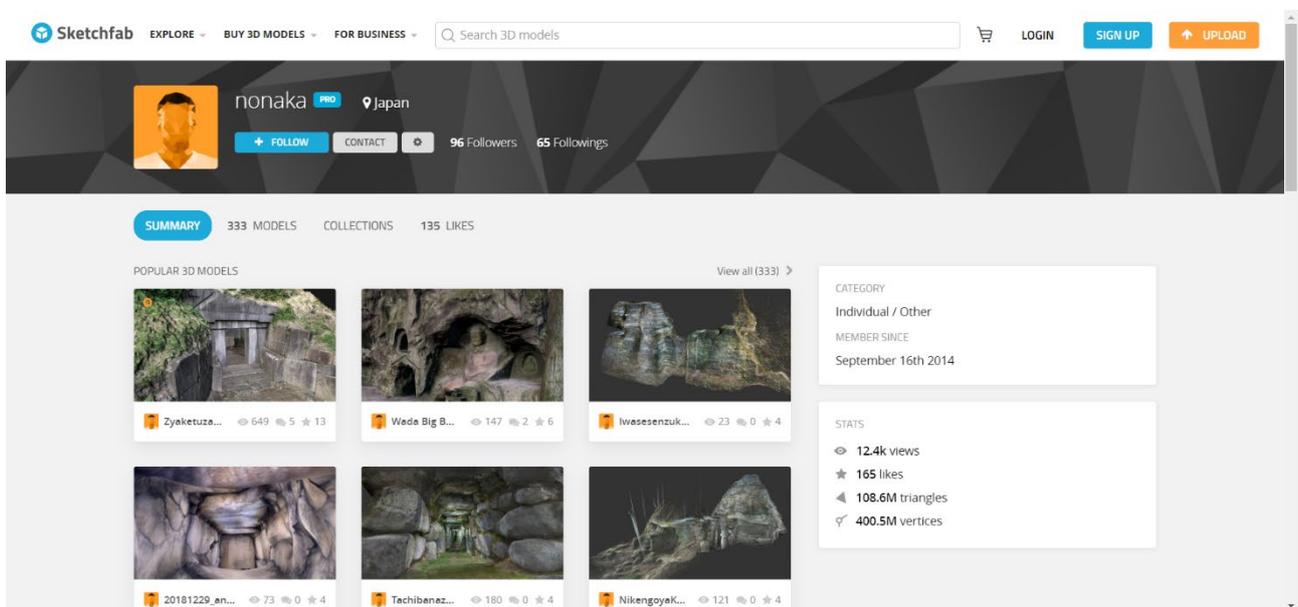
### おわりに

紹介した 3 種類の手法の内、ZenfoneAR を見学に多用してはいるが他の機材が使用できないわけではない。特に SfM/MVS は、光を使用する機材が不得意とする直射日光下の屋外 3 次元化ができる・横穴墓の工作痕が記録できるなど、ZenfoneAR と重複しない機能が多い。横穴式石室や横穴墓群の状況によって、選択できる技術を広げていけるよう安価な技術の調査を続けていきたい。

また、見学開始から 5 年間で取得した 3 次元データの活用についても検討していく必要がある。現在、500 基を超える 3 次元データは、一部が Sketchfab に公開されているものの、大部分は活用されずに報告者の PC/NAS に保管されている。もし、これらのデータが考古学の研究・分析に耐えられるもので活用できるものであるならば、市民から研究者へのデータ流路を作る必要があるのかもしれない。



画像 8 RTAB-Map で作成した奈良県桜井市谷首古墳側壁



画像 9 Sketchfab nonaka アカウント・ページ  
(<https://sketchfab.com/nonakasabu>)

# SfM/MVS による石棺・石槨加工技術の検討

大村 陸  
(筑波大学大学院)

## はじめに

石棺・石槨といった古墳時代の石材加工物の製作技術を探る研究は、表面に残る加工痕跡の分析というミクロな視点を基盤としており、これまではその手段として主に拓本や写真が利用されてきた。しかし、近年、考古学の分野で 3D 計測が広く用いられるようになり、石材加工技術研究でも加工痕の立体形状を欠けることなく記録できることなどから、3D 計測が新たな分析手段として注目されつつある。報告者は、従来のある程度蓄積された研究手段があるなかで、3D 計測とくに SfM/MVS を用いた加工痕の分析を実践しているため、本報告を通して改めてその意義を示しておきたい。そこで本報告では、まず石材加工技術研究のこれまでの分析において重要とされてきた属性を抽出し、その属性を 3D 計測ではいかに捉えることができるかについて検討することで、新たな分析手段としての有効性を示す。そして、実際に石棺や石槨を 3D 計測で分析するなかで、報告者が実施している SfM/MVS がどのような有用性をもっているかについて報告する。

## 従来の分析結果からみた加工痕分析における属性

石材加工技術研究は、1983 年に和田晴吾氏が石棺製作技術における加工技法を設定した(和田 1983)以降、数 cm から 10 数 cm 程度の加工痕の観察からその加工技法を認定し、技術を検討するというミクロな視点のなかで進展してきた。そこで技法認定された加工痕は、拓本や写真、実測図によって示されていたが、近年 3D 計測による加工痕の分析(廣瀬 2015 など)という新たな手段が提示されてきている。報告者は、このような中で 3D 計測を用いた分析を積極的に取り入れていく前に、一度 3D 計測による分析を従来の分析と比較し、正当性について検討する必要があると感じた。そこで、まずはこれまでの分析方法を属性に分解することで再評価し、その属性をもとに 3D 計測による分析を検討する。

従来の加工痕の分析方法について、はじめから想定される細かな属性を羅列して検討するのではなく、具体的な分析結果をみることから探っていきたい。石橋宏氏は、古墳時代の石棺秩序と製作技術との相互的關係性を探る目的で詳細な加

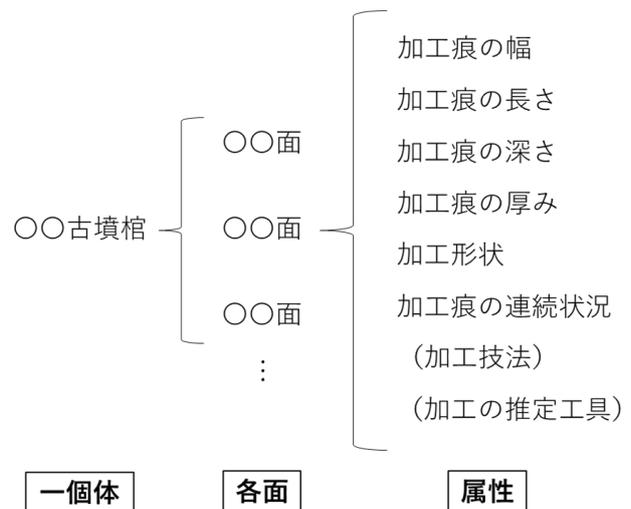


図 1 加工痕の分析における属性

工痕の分析を行っている（石橋 2013）。ここでは他の加工痕研究と共通する方法論で一般的な分析がされているため、一例として取り上げるとする。石橋氏のある石棺一個体の分析例を挙げると、「磨白山古墳の棺身外面では、側面の段より上は幅 3～4cm 程のやや刃先によるチョウナ叩き技法、段より下は凹凸と一部幅 2～3cm、長さ 2～3cm の U 字の削り痕があり、まずノミ叩き技法を行なった後に一部チョウナ削りを試しているのではないかと判断した」（石橋 2013）と書かれている。ここから、加工痕の分析では、まず石棺をある程度の面ごとに把握し、その面において、確認された加工痕の幅や長さを計測していることがわかる。そして、「やや刃先」や「U 字」として述べられているように加工痕の形状が抽象的に記述され、それぞれで認定した技法を提示している。また、石橋氏の他の分析例をみると、「刃の厚さ」（加工痕の厚み）や「ピッチ」（加工痕の連続状況）なども記述していることから、ひとまずこれらを加工痕分析における属性として考えていきたい（図 1）。

### 従来の加工痕分析における課題：加工技法

従来の分析結果例をみると前述したような属性が抽出された一方、ここで検討しなければならない課題が 2 点存在する。まず 1 点目は、加工技法の問題である。石橋氏の分析結果例では、計測数値や形状の表現とともに加工技法の記述があるが、この加工技法については和田晴吾氏によって別に定義付けられているため、さらに掘り下げる必要がある。そして 2 点目は、これらの分析結果が 1 枚の写真のみで示されていることである。分析のなかで実際の数値情報や加工痕の状況を述べている一方で、その証拠となっている写真は石棺の全体形状が分かるような画角にスケールを入れて撮影したものとなっており、分析情報を図上で確認できない状態にあるのは問題といえる。この点について、他の先行研究とも比較して課題を明らかにする。

では、まず加工技法における定義を再確認することからはじめていきたいが、先にも少し述べた通り、最も早く石材加工技術における加工技法を設定したのは和田晴吾氏である。和田氏は、古墳時代の石工と石棺製作技術について研究し、製作工程や技術の変遷、石工の性格など、多岐にわたる検討と考察を行った（和田 1983）。そこで加工技法についても検討しており、製作工程ごとにそれぞれの技法を設定した。ここでひとつひとつの技法の定義について再確認していくと論旨とずれてしまうため、本報告では軟質の石材で粗削りの段階や仕上げの段階の技法とされた「チョウナ削り技法」を一例に、技法の定義を再確認する。また、和田氏は 1991 年に加工技法の名称を一部変更していることから、この論文をもとに技法の定義について引用する。和田氏は、チョウナ削り技法を一言では「チョウナによる削りを指す」と表現しており、また「工具の痕跡はチョウナの刃による削り痕」で、「削りの精粗には著しい差が」あること、「この工具の刃先には丸みをもつものも、直線的なものも存在する」（和田 1991）と記述して説明している。この定義付けから先程と同じように属性の抽出を試みると、「チョウナによる削り」という特徴的な形状がひとつの属性として挙げられるかもしれないが、この表現によって明確に他の技法と区別することは難しく、技法の定義が曖昧なものとなっているために属性は十分に考えられなかった。

和田氏の論文では、このような説明とともに 2 枚の拓本がチョウナ削り技法の例として挙げられているが、この研究以降、ほとんどの石材加工技術研究で和田氏の設定した技法がそ

のまま利用され、石橋氏の研究事例のように加工技法が認定されていることを考えると、かなり不十分な定義付けであるだろう。これは別の課題といえるが、ここでひとつ、和田氏の設定した加工技法とは異なる技法を提示した研究を取り上げたい。磯貝龍志氏は、出雲東部地域の終末期古墳の石材加工技術を検討するにあたって、和田氏が提示した技法研究による畿内の技術様相とは異なる様相があるとして、技法の設定から再検討している。このなかで、再び「チョウナ削り技法」を取り上げると、「刃幅が 4cm 以上の幅広の工具によって薄く匙面をなすように表面を削った痕跡がみられる」（磯貝 2016）としている。これを和田氏の定義付けと比較すると、技法認定における条件が明記されており、技法の定義としてはより明確といえるのではないだろうか。



図 2 従来の写真による図示のイメージ

このように加工技法の定義から属性を抽出できるか検討をおこなった結果、定義の不明瞭さによる属性の不分化が明らかとなり、新たな課題が生じてしまった。ただ、和田氏の技法以外にも技法の検討を行う研究があり、今後はこのような再検証の積み重ねによって、明確な技法の定義が確立されなければならない。

### 従来の加工痕分析における課題：分析結果の図示

続いて、前節にて 2 点目の課題として提示した、加工痕の分析結果を従来ではどのように図示しているかについて取り扱う。石橋氏の分析結果を示すものとして 1 枚の写真しか提示されておらず、和田氏の技法設定でも 2 枚の拓本のみで例示していることは先に述べた通りである。これらを具体的にみると実際に行っている加工痕の分析結果が検証できないものとなっている。写真による加工痕の提示は、質感や色情報を示すことができる一方で、大きさや形状を示すことには限界がある。また、拓本による提示についても、陰影から加工痕を示すことはできるものの、大きさや形状、質感や色情報が示せない点で不十分といえる。また、石橋氏は写真の他にも、加工痕の連続状況を石棺の実測図上に模して図示した模式図を作成しているが、連続状況を把握できる一方で、加工痕の実際の形状は反映されておらず、確実な図化とはいえない。

このように、従来の加工痕分析では、写真や拓本、実測図、模式図などを用いて分析結果を図示してきたが、ひとつひとつをみていくと、加工痕の分析が十分に再検証できるようなものはほとんどない。正しい図化ということを考える際にも、先の属性についての検討は有効であり、加工痕分析における属性をいかに再検討可能なかたちで示せる図面を作成するかによって、より良い図示が可能となるのではないだろうか。この課題については 3D 計測による加工痕分析である程度解決できると考えており、次節で検証していく。

### 3D 計測は新たな加工痕分析の手段となるのか

ここまで石材加工技術研究において重視されてきた加工痕の属性を検討し、従来の加工痕分析の課題を提示してきたが、3D 計測による加工痕分析ではこれらをいかに捉えることができるのか検証してみたい。

まずは、属性について考えると、3D 計測では立体物の 3 次元情報をそのまま記録するため、作成した 3D モデルを分析することで、加工痕の幅や長さといった数値をデータ上で計測することができる。次に、加工痕の形状の分析をみると、3D データから立体形状をそのまま示すことで検証可能である。この点については、2 次元の分析では十分に行えなかった、加工痕の立体形状から石材加工工具の推定という新たな属性を提示できるかもしれない。これらのことから、3D 計測では従来の分析で重視されてきた加工痕の属性を従来通り、またはそれ以上の情報量をもって分析できるといえる。そして、これらの分析を 3 次元という情報量をもってデータ上で検証可能であるということから、一個体の資料で加工痕を全点分析しデータ解析するといった新たな方法による研究が行える可能性をもっている分析手段として評価できる。また、3D 計測によるデータ分析が進んでいけば、加工技法の定義についてもより明確な設定が可能となるだろう。

続いて、分析結果の図示については 3D データ計測でどのように行えるかを考える。先ほども記したように、3D 計測では立体物の 3 次元情報を記録することで 3D モデルを作成しており、その 3D モデルには当然 3 次元情報が含まれている。ここから、加工痕の数値を分析した結果などもスケールをもって示すことが可能である。そして、作成した 3D モデルではテクスチャーを除去して立体形状のみを示すことができ、加工痕をより見やすくする処理が行える。その他にも、作成した 3D モデルの表現の変更や、加工を行うことで、分析をより分かりやすく示すことができることも特筆すべき点といえる。このように 3D 計測による分析結果の図示では、これまでおこなわれてこなかったスケールの表示が簡便であり、加工痕の図示方法も 3D モデルを編集することで様々に行えるという点で有効である。ただ、3D 情報を 2 次元媒体で図示する際には情報を削減する必要がある、分析結果をそのまま掲載することは不可能であるが、インターネットでの 3D 情報の公開などの別媒体を用いることでこれは解決できるだろう。

#### 石棺・石槨における SfM/MVS の有用性

上述してきた検討から、3D 計測は加工痕分析において有効な手段であることを改めて示すことができたが、最後に報告者が実際に石棺・石槨を対象に行っている SfM/MVS を用いた加工痕分析について述べたい。報告者は石棺・石槨を対象として加工痕の分析を行う際には、SfM/MVS による 3D 計測が最も適していると判断し、これを実践している。ここではその有用性について考えていくが、これは以下の前提条件による

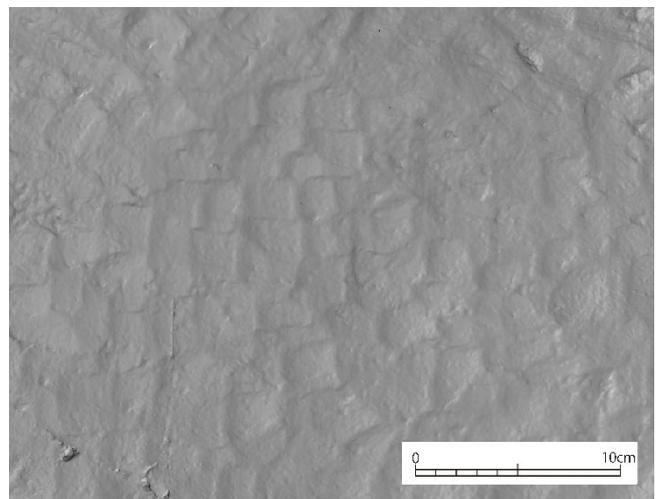


図3 3D 計測(SfM/MVS)による加工痕の図示

判断であり、これと異なる場合は他の分析手段の方が適切となる可能性があることに注意していただきたい。

前提条件として、はじめから個人的な問題であるが、レーザー計測機器を購入する研究費がないことが挙げられる。石棺・石槨を 3D 計測する際にハンディ型のレーザー計測器があれば、より迅速に直感的に 3D 計測ができるが、それを購入することが出来ないため、カメラと PC、PC ソフトのみで対象物の 3D モデルが作成できる SfM/MVS を行っている。第二に、加工痕の分析には高い精度の 3D モデルが必要となることが条件としてある。加工痕は数 cm 程度の大きさでみられることも多いことから、それが計測できる程度の精度が求められる。レーザー計測器には比較的安価なものもあり、その入手は困難でないが、加工痕の分析が可能となる程の精度は持っていない。そのため、カメラの撮影状況を変えることによってマクロな 3D モデルもミクロな 3D モデルも作成できる SfM/MVS はその点で優れているといえる。

主にこの 2 点の条件から SfM/MVS を利用しているといえるが、ここで石棺と石槨の計測対象としての特徴についても述べておく。第一に、石棺と石槨は対象として比較的規模の大きい特徴をもつものである。これらを遺物と評価する意見もあるものの、大きさは長辺部で 1~2m 程度もつものが一般的であり、石槨については高さも同程度あることを考慮すれば、撮影するには遺物のように扱うことは出来ない。具体的には、カメラを固定した状態で対象を回転台の上に乗せて回転させながら撮影するようなことはかなり難しく、対象の周りを自らが回りながら撮影していくことになる。そして、これに関連するものとして保管状況が様々であることも注意しなければならない。石棺や石槨は、野外に移転展示しているものもあれば、石棺を覆う屋根がつけられていたり、供物台がつけられていたりすることもある。これらの保管状況によって、表面の風化が進んでいたり、破壊されている箇所がみられたり、様々な影響を受けているため、このことに考慮して撮影や分析を行う必要がある。そして、もちろん石室内でそのまま保管されていることもあるが、この際には暗い環境で撮影しなければならないという問題と、石室側壁と石棺の間のような十分に撮影範囲を確保できないという問題が生じてしまう可能性があることを把握しておかなければならない。このように石棺・石槨を対象とする場合は、それぞれで異なる保管状況と資料の状況ごとに的確に対応して 3D 計測を行う必要があるのである。

以上のような条件・特徴のもとで、SfM/MVS によって石棺・石槨の 3D モデルを作成し、本報告でもそれを図示しているが、図化方法についても少し述べておきたい。まず、SfM/MVS のソフトには Agisoft 社 Metashape Standard を用いており、そこで作成したモデルを obj ファイルで出力し、オープンソースの CloudCompare にてスケールを調整している。そのモデルをもとにして、基本的には CloudCompare 上で数値の計測や、ライティングの変更によって加工痕の可視化を行い、保存したキャプチャー画像を Adobe Illustrator で編集したものが図 3~5 である。加工痕の図化についてはこれ以外の方法も多くあると思われるが、加工痕の形状を明確に示すこととスケールを付与することの 2 点を重視した結果、上記の方法で行っている。

ここまで、SfM/MVS と石棺・石槨の特徴、そして実践状況を示してきたが、SfM/MVS の有用性について考えると、従来以上の加工痕の分析が可能となる程の細かな 3D モデルが作成できることが最も大きい。先に示した通り、3D 計測は石材加工技術研究の新たな分析手段

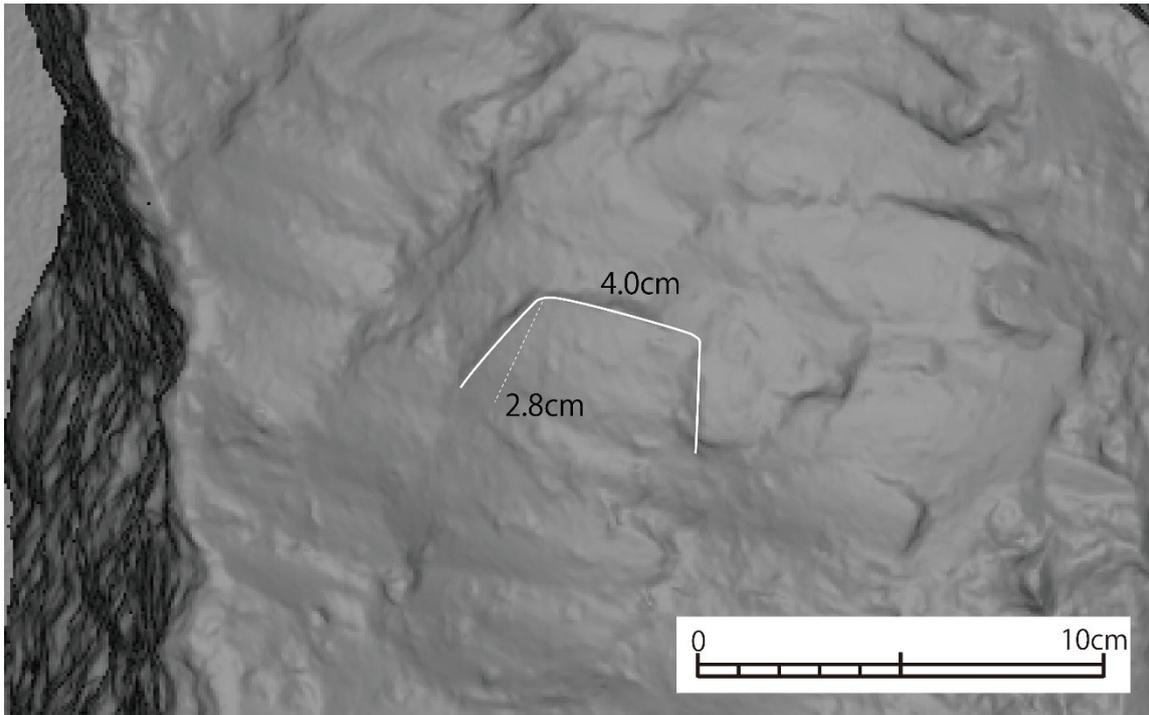


図4 SfM/MVS を用いた加工痕の形状と計測値の図示方法(一例)

となりうる方法であり、SfM/MVSでも当然加工痕の幅や長さなどの従来の属性を検討し、それを図示できる3Dモデルが作成可能である。また、従来よりも明確に加工痕の形状や計測値をスケールとともに図化できることも、拓本や写真による提示と比べて評価できる。そして、これらがレーザー計測などよりも安価で、細かな形状を復元できることも重要な点として挙げられる。このように、ミクロな視点を必要とする石材加工技術研究では、これまでの拓本や写真による分析よりもSfM/MVSによる分析のほうが優れている点が多いことから、より有用性のある分析手段といえる。今後はこうした加工痕の分析が、新たな分析手段として広く利用されていく必要がある。また、これまでの研究における加工技法の課題や、図示の課題についても、3D計測からアプローチしていくことで、早急に解決していかなければならないだろう。

最後に、本報告ではミクロな視点に焦点をおいて議論をすすめてきたが、3D計測ではマクロな視点でも有効であることを紹介して終わりたい。図5は、SfM/MVSによって作成したモデルのスケールを調整して先行研究の実測図と重ねたものであるが、比較すると全体の形状や中央に空いた穴の形状など多くの異なる点がみられる。古い実測図などにおいては形状が簡略化してかかれていることが多々あるため、全体の形状をみる際にも、実測図より3D計測によるモデルの方がより細かな形状を示す場合がある。また、3Dモデルの図示では、表面の加工状況や風化状況などを示すことができるという点でも優れているといえる。こうしたマクロの視点は、型式研究や石槨における構築研究などへとつながっていくものであり、こちらについても新たな手段として注目していきたい。

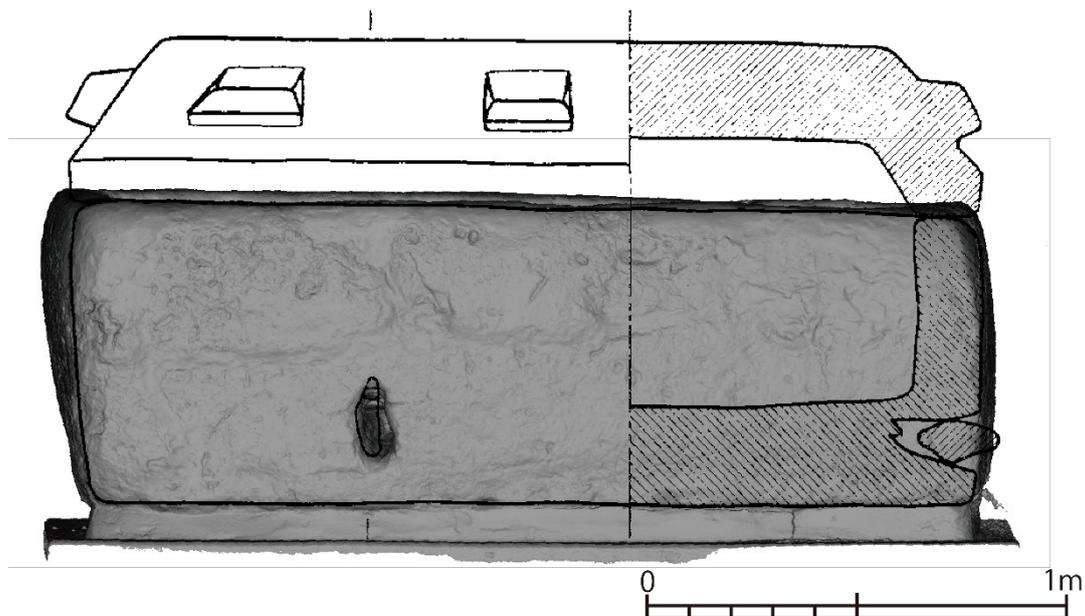


図 5 3D モデルと実測図の比較

#### 掲載図出典

図 1～4 は、すべて報告者が作成したものである。図 2・3 で示した資料は伊豆の国市洞古墳石槨（白石の石棺）で、図 4 の資料は長泉町原分古墳棺（静岡県埋蔵文化財センター所蔵）である。また、図 5 は静岡市駿河丸山古墳羨道棺の 3D モデルを『駿河丸山古墳』（望月薫弘・手島四郎 1962）の実測図と比較したものである。これらの 3D データについては、管理する各自治体に許可を得て作成し、掲載している。

#### 引用文献

- 石橋 宏 2013 「製作技術からみた石棺の系譜」『古墳時代石棺秩序の復元的研究』、六一書房
- 磯貝龍志 2016 「終末期古墳の埋葬施設にみる石材加工技術」『廻原 1 号墳発掘調査報告書』、島根大学法文学部考古学研究室
- 廣瀬 覚 2015 『三次元計測による飛鳥時代の石工技術の復元的研究：平成 23 年度～26 年度科学研究費(学術研究助成金(若手研究 B))研究成果報告書』、奈良文化財研究所
- 望月薫弘・手島四郎 1962 『駿河丸山古墳』、静岡市教育委員会
- 和田晴吾 1983 「古墳時代の石工とその技術」『石川考古学研究会々誌』第 26 号、石川考古学研究会
- 和田晴吾 1991 「石工技術」『古墳時代の研究 5 生産と流通Ⅱ』、雄山閣

# レーザースキャナと SfM/MVS による横穴式石室の調査

青木 弘

(公益財団法人埼玉県埋蔵文化財調査事業団／  
早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所招聘研究員)

## はじめに

本発表では、レーザースキャナと SfM/MVS を利用した横穴式石室の三次元記録について扱う。筆者が実施した調査事例をもとに、据え置き型レーザースキャナとハンディタイプのレーザースキャナ、そして SfM /MVS を比較し、現地作業から処理、公開までのメリットとデメリットを示す。その上で現状の課題を確認し、これから取り組んでいくべき事柄を提示したい。なお、本論では筆者の調査事例を中心とするため、先行研究や先行事例については拙稿をご参照願いたい（青木 2017）。

なお、本発表では、横穴式石室の左右の呼称については、入口から見た方向を指す。

## 三次元計測と SfM/MVS に注目したきっかけ

きっかけは筆者が横穴式石室をもつ古墳の築造技術について研究を進める中で、現在の記録方法に限界を感じたことにある。

横穴式石室（というよりも埋葬施設全般）の構造を知るためには、現地に残されている遺跡であれば、現地で観察することが一番である。なぜならこれまでの図面では、横穴式石室の築造技術や構造を知る上で必要な情報（データ）、あるいは調査担当者が現地で観察した所見が十分に反映されない箇所がどうしても生じてしまう。それは立体的構造物である横穴式石室を、二次元に記録する上で情報が捨象されてしまうためである。おそらく多くの発掘調査担当者や遺構を研究対象としている者は、「現地で観察したことを第三者にわかりやすく、的確に示したい」と考えていることだろう。横穴式石室を立体的に記録し、目的に応じて二次元・三次元双方のデータや図面を提示することが、研究を進展させると考えている。

このような課題に直面する中、筆者が所属していた早稲田大学では、三次元計測の取り組みを進めていた。例えばトータルステーションを用いた点群測量、ハンディスキャナによる遺物の三次元計測、SfM/MVS の活用などである（城倉 2017 など）。そのため、本論で扱う据え置き型レーザースキャナ、ハンディスキャナ、SfM/MVS の 3 種が揃った環境に筆者も恵まれ、横穴式石室の調査を実施することができた（据え置き型レーザースキャナは早大と奈良文化財研究所や（株）ラングとの共同研究により、借用させていただいた）。

次に筆者が実施した調査事例を紹介したい。

## 導入事例

調査を実施した古墳は、筆者が研究対象としている埼玉・群馬県内の古墳のうち、遺存状態が比較的良いものの、調査年が古く図面が十分ではない事例（埼玉県東松山市若宮八幡古

表 1 調査対象古墳の作業項目

古墳名	据え置き型レーザーสキャナ	ハンディスキャナ	SfM/MVS
	FARO社Focus 3D (※1)	Creiform社EXAScan (※2)	NikonD700 (※3)
若宮八幡古墳	○	○	○ (内蔵フラッシュ)
附川1号墳	○	○	○ (内蔵フラッシュ)
地蔵塚古墳	○	—	○ (内蔵フラッシュ)
伊勢塚古墳	—	—	○ (LEDライト)

※1 若宮八幡古墳は(株)ラングが実施、附川1号墳と地蔵塚古墳は奈良文化財研究所より借用し筆者実施。

※2・3 各機材は早稲田大学考古学研究室より借用。

※4 鉄砲山古墳は横穴式石室内部の調査ではなかったため、本表からは除外した。

表 2 SfM/MVS の実施概要

処理過程/古墳名	若宮八幡古墳	附川1号墳	地蔵塚古墳	伊勢塚古墳	
カメラ	NikonD700				
光源	内蔵フラッシュ			LEDライト (UTEBIT PT-30 II)	
三脚	○				
マーカーの種類	五寸釘		Metashapeから作成したマーカー		
使用ソフト	Agisoft社Metashape (旧Photoscan) Professional (※1)				
バージョン	1.3.2			1.4.0	
使用枚数/形式	841/Jpeg	442/Jpeg	788/Jpeg	804/Tiff	1255/Tiff
アライン品質	High	High	High	High	High
高密度クラウド品質	High	High	High	High	High
メッシュ品質	High	High	High	High	High
誤差	0.013m	0.006m	0.002m	0.008m	0.009m
オルソ画像品質	0.001m/pix	0.001m/pix	0.001m/pix	0.001m/pix	0.001m/pix
編集ソフト	QGIS (Ver2.14.15-Essen)、AdobeIllustratorCC/CS6				

※1 2019年1月より「Photoscan」は「Metashape」に名称を変更した。

※2 鉄砲山古墳は横穴式石室内部の調査ではなかったため、本表からは除外した。

墳、同市附川1号墳、埼玉県行田市地蔵塚古墳)、逆に調査がなされ、多くの図面が報告された事例(群馬県藤岡市伊勢塚古墳)である。埼玉県行田市鉄砲山古墳については、横穴式石室の入口周辺部分の記録をさきたま史跡の博物館での調査に合わせて実施した。

調査年月は若宮八幡古墳が2016年7月、鉄砲山古墳が2016年8月、附川1号墳が2017年3月、地蔵塚古墳が2017年3月、伊勢塚古墳が2018年3月である。いずれも早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所を主体とする調査である。これらの調査における三次元計測とSfM/MVSの作業内容と作業方法は、表1・表2と図1のとおりである。各古墳の詳細は(青木・ナワビ2016、青木・横山・千葉・川村2017、青木2018a、青木2019)をご参照願いたい。

### 各計測手法のメリットとデメリット

次に横穴式石室を調査する上で、据え置き型レーザースキャナ・ハンディスキャナ・SfM/MVSそれぞれのメリットとデメリットを示したい。なお、各調査ではこれらの計測・撮影作業を行う前に、基準点測量を実施した。基準点測量はトータルステーションによる開放トラバースとレベルによる水準点測量のほか、附川1号墳と地蔵塚古墳ではGNSSを用いたGPS測量も行った。そして横穴式石室内に、世界測地系に基づく座標をもつポイントを五寸釘やマーカーで数カ所(概ね玄室内で5箇所以上)設定した。

#### 据え置き型レーザースキャナ(例:FARO社Focus 3D)

##### メリット

- ・精度(分解能)は対象範囲や調査に要する時間によって変えられる。

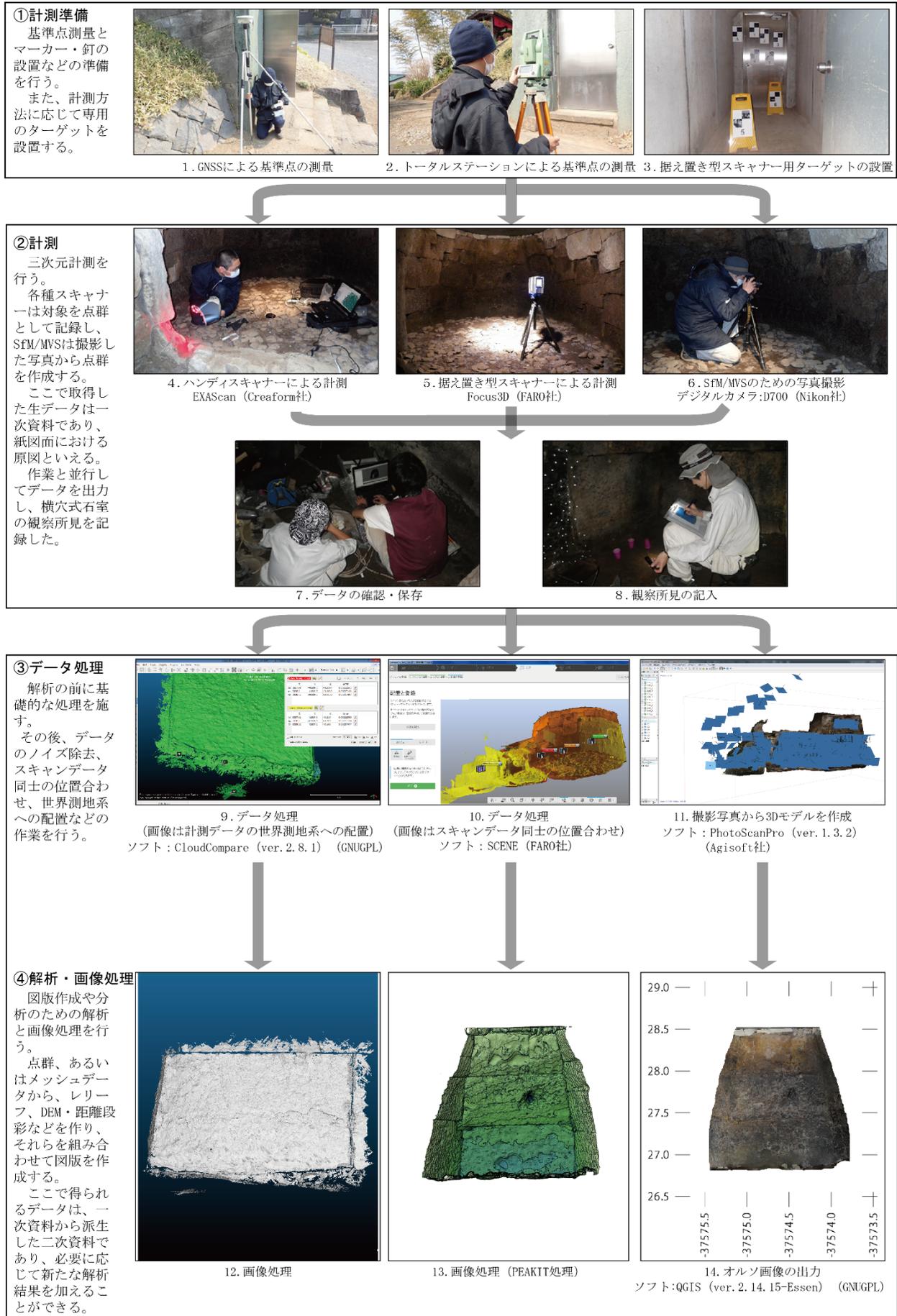


図1 据え置き型レーザースキャナー・ハンディスキャナー・SfM/MVSの作業フロー

- ・ハンディスキャナや SfM/MVS よりも早い時間で、現地の計測作業は終わる。
- ・Focus3D の場合、処理は専用ソフトで行えば、フローに即して行うため簡便である。  
そのため、ノートパソコンにソフトが入っていれば、短い時間内に現地で処理結果を確認することもできる（若宮八幡古墳では、(株) ラング横山真氏と千葉史氏による計測と確認のための現地処理は、合計 1 時間ほどで終了した）。

#### デメリット

- ・三脚を立てられる広さが必要。
- ・レーザーの入らない箇所（＝死角）を減らすため、数度の移動と計測が必要である。
- ・データの処理には専用ソフトが必要（FARO 社 Focus3D の場合は SCENE）である。  
専用ソフトを介さずに、CloudCompare でもファイルを扱うことはできるが、専用ソフト以上に位置合わせ（マージ）等の手間がかかり効率が悪くなる可能性が高い。
- ・観察所見を記入する媒体が別途必要となる。
- ・計測範囲と精度に応じて、データが重くなる。
- ・色情報は得られない（機種による）。

#### ハンディスキャナ（例：Creaform 社 EXAScan）

##### メリット

- ・精度（分解能）は対象範囲や調査に要する時間によって変えられる（図 2）。当然、精度を密にすればするほど、計測にかかる時間とファイルサイズは大きくなる。
- ・石材加工痕等、石材表面の形状を最も精細に記録することができる。
- ・計測結果に死角によるデータの欠落が少ない。

##### デメリット

- ・計測に発電機や電源から電力を供給し、かつノートパソコンと専用ソフトが必要である。  
ハンディスキャナの電源ケーブルとスキャナ・PC を接続するケーブル、PC の電源ケーブルが必要になるため、計測範囲に限界が生じる。
- ・1 ファイルが重く、計測時間も据え置き型レーザースキャナよりも要するため、広い範囲の計測には適さない。石材 1 つにつき 1 ファイルといった具合に絞る必要がある。
- ・本体が重く、高所の石材の計測は大変である。
- ・専用のマーカーが弱粘性のため、野外（土・水滴あり）条件下では動きやすい。
- ・観察所見を記入する媒体が別途必要となる。
- ・1 ファイルのデータが重い（設定した精度による）。
- ・色情報は得られない（機種による）。

以上の通り、ハンディスキャナは出来上がるデータの精度は高いものの、横穴式石室に対しては現地作業での運用が難しいこともあり、若宮八幡古墳と附川 1 号墳、鉄砲山古墳以降は実施していない。

計測事例 若宮八幡古墳横穴式石室前室左側壁6 (表面積 0.233 m <sup>2</sup> ) (S=1/4)			
計測面			
計測密度	0.2mm	0.3mm	0.5mm
計測結果	加工痕と石表面の細かな凹凸も認識できる	加工痕の重複を認識できる	加工痕の重複まで認識できる
計測時間	70分	60分	40分
ファイルサイズ	1.31GB+α (全範囲未計測)	1.28GB	449MB
計測面			<p>掲載箇所模式図 (縮尺任意)</p>
計測密度	1mm	3mm	
計測結果	加工痕は認識できるが、重複は難しい	凹凸が認識できる程度	
計測時間	13分	6分	
ファイルサイズ	219MB	99.8MB	

図2 ハンディスキャナ (EXAScan) における計測密度の比較

### SfM/MVS (例: NikonD500)

#### メリット

- ・必要不可欠な道具はデジタルカメラ、LED ライト、三脚程度と簡便である (対象に応じて一脚や高さの異なる複数の三脚を利用することもある)。

LED ライトは暗い横穴式石室内で光量を確保するために、伊勢塚古墳の調査から導入した (図3)。カメラの内蔵フラッシュは使用せずに、写し込みにグレーカードをいれて、RAW データの色調補正を行い、TIFF 現像を行った上で Metashape の各処理をしている。LED ライトの種類は様々だが、現在は UTEBIT を使用している。通販サイトで 10,000 円弱と比較的安価だが、一日中フル稼働させるためには予備バッテリーが複数セット必須である。

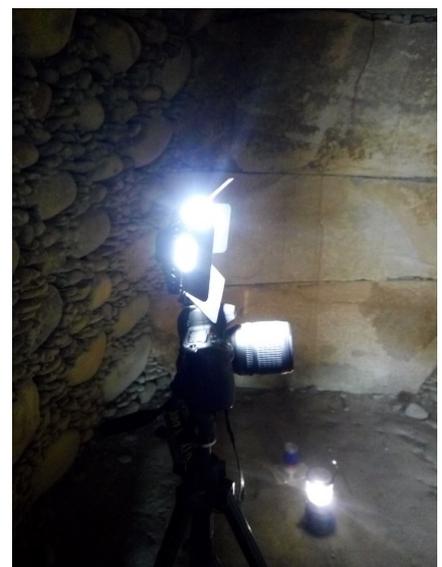


図3 LED ライト使用状況

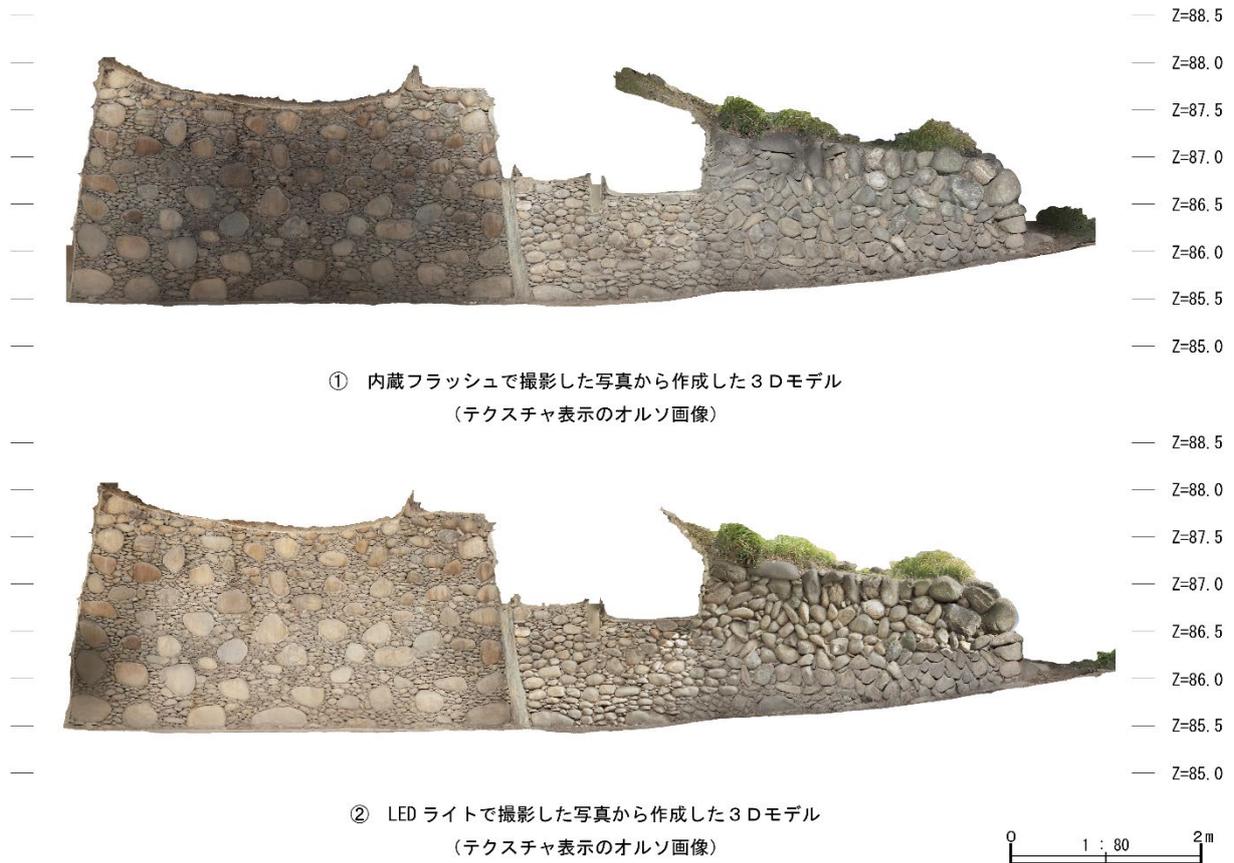


図4 SfM/MVS における内蔵フラッシュと LED ライトの撮影結果の比較  
(伊勢塚古墳横穴式石室)

内蔵フラッシュを使用した場合と比較すると、仕上がりの差は明らかに LED ライトを使用した場合の方が良好である (図4)。

- ・撮影が主な作業のため、専用機器の設定がなくはじめやすい (カメラの設定 (しぼりやシャッタースピード等) は文化財担当者には馴染み深い)。
- ・Metashape による作業は、少しずつ事例が蓄積されつつある。

#### デメリット

- ・精度の設定はないため、撮影写真の質が重要となる。
- ・一定の作業フローがない (Metashape で処理する上での撮影条件はあるが、何枚とればよいのか、カメラ (レンズ) の種類、ライティングの方法、撮影データの保存形式 (RAW か JPEG か) などに、最善を目指すための約束事のようなものはあっても、決まりはないと思われる)
  - 良い成果を上げるためには撮影経験がものをいう? ≒従来の一子相伝的、口頭伝承的指導になる恐れもある。
  - 今後、「成果物としての最低条件」を満たすためのマニュアルや作業フローが求められる。赤穂市教育委員会では、横穴式石室の撮影方法と処理の過程を報告に掲載している (赤穂市教育委員会 2017)。SfM/MVS では様々な工程があるため、こうした説明はその都度必要だろう。

- ・一眼レフカメラに LED ライトを装着して三脚にのせるため、やや大型な機材となる。そのため、狭い横穴式石室の場合には小回りが利かない。現在は光量を確保した上で、軽量・小型化して、ピンボケしない撮影方法がないか模索中である。そのため、デジタル一眼レフカメラだけでなく、コンパクトデジタルカメラやミラーレスカメラの検討、あるいは三脚以外の固定（安定）方法も検討するべきと考えている。
- ・レーザースキャナによる計測では、レーザーによる物理的計測を行うが、SfM/MVS では作業上、計測を伴わない。そのため、精度を保証するために、レーザー計測を併用するか、手計測による簡易計測を行う必要がある。
- ・観察所見を記入する媒体が別途必要となる。

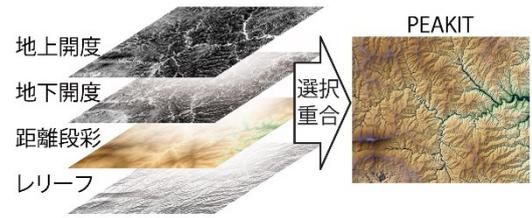


図5 横山真氏・千葉史氏による PEAKIT の概念

## 成果の比較

据え置き型スキャナ・ハンディスキャナ・SfM/MVS のメリットとデメリットについては以上の通りである。それでは実際の成果を示し、個々の特徴をより明確にしたい。

なお、若宮八幡古墳・附川1号墳・地蔵塚古墳の調査では、FARO 社 Focus3D による計測成果は、(株) ラングに PEAKIT による画像処理を実施していただいた。PEAKIT とは「開度」という演算処理で得られた画像を基本に、レリーフや距離段彩などほか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5) (青木・横山・千葉・川村 2017)。横穴式石室における PEAKIT の詳細は (青木・横山・千葉・川村 2017) に詳しいが、横穴式石室を対象にこの画像処理を行った場合、石材の形状と表面に残る工具痕といった、壁面の微細な特徴が鮮明に抽出される (図6)。図6は附川1号墳の横穴式石室を FARO 社 Focus3D (本発表における据え置き型レーザースキャナ) で計測した結果に、PEAKIT 処理をしていただいた図だが、図7最上部に示した処理前のレリーフと比べると、石材間の石積みと石材単体の形状や工具痕が、より鮮明になっていることが分かる。それに加えて、図6のように、PEAKIT では各表現を取捨選択でき、目的に応じた様々な図表現が可能である。

次に、図7は若宮八幡古墳の横穴式石室の右側壁をもとにした、レリーフ、PEAKIT、PEAKIT + 距離段彩 (以上の3つは Focus3D 計測データ)、SfM/MVS (テクスチャとソリッドモデル) の比較図である。レリーフであっても石積みは捉えられるが、工具痕は PEAKIT の方が鮮明である。距離段彩は地形図のようにある面からの距離を色分けした表現方法で、二次元図においても石材と石積みの傾斜が把握することができる (距離段彩は後述するように QGIS でも作成することができる)。SfM/MVS の成果はテクスチャ表示では、調査当時は内蔵フラッシュによる撮影を行ったため、全体的に暗い色調だが、ソリッドモデル表示から、石積み等はレーザースキャナと同程度に捉えられる。

ハンディスキャナ (Creaform 社 EXAScan) は図8に若宮八幡古墳における計測例を示した。いずれも Focus3D や SfM/MVS 以上に、個々の石材の特徴を鮮明に記録できている。図

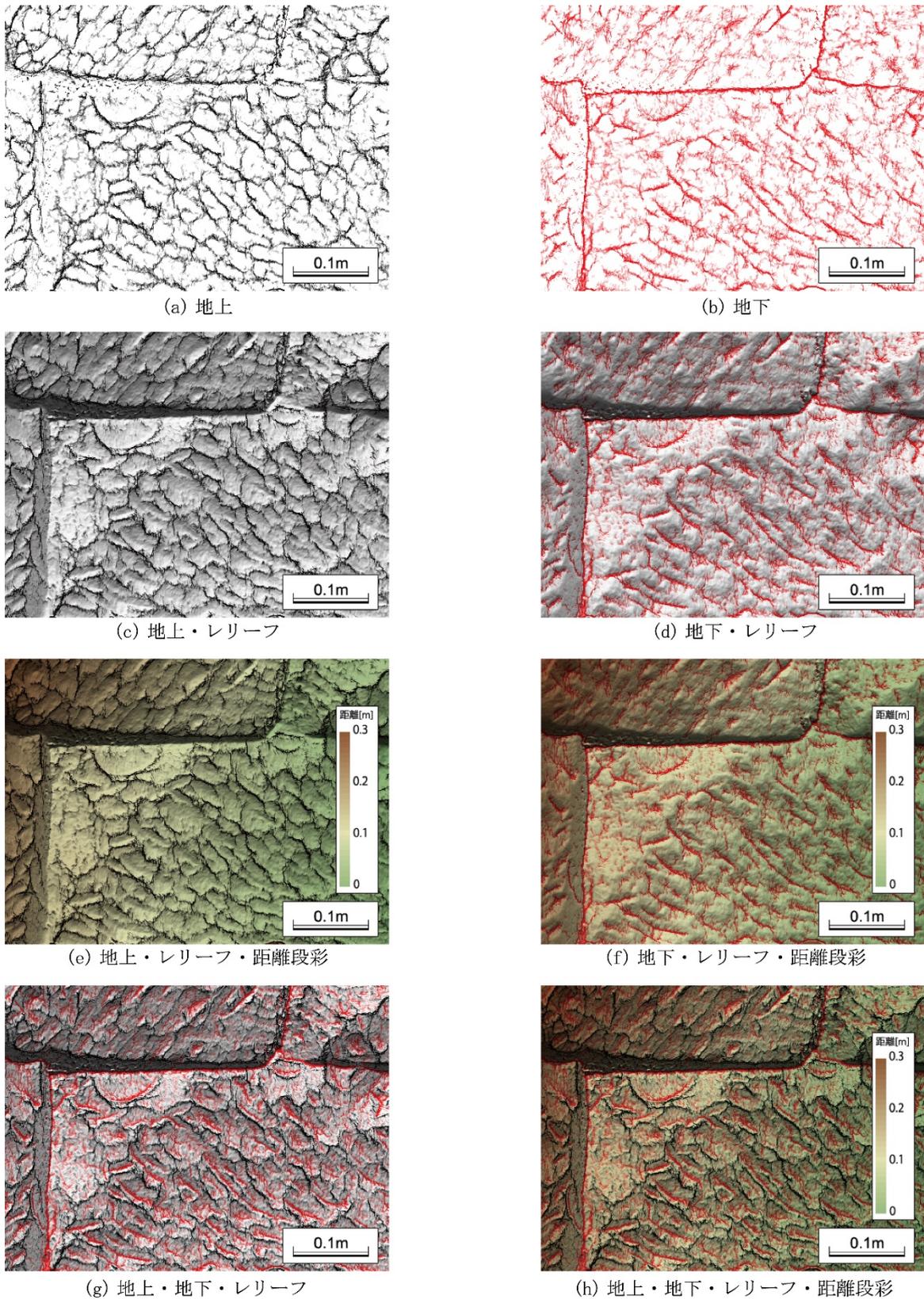


図6 PEAKIT のバリエーション

9には EXAScan の画像の比較として、Focus3D で計測したデータ単体（レリーフ）と、それに PEAKIT を施した画像、および SfM/MVS のソリッドモデルを示した。微細な特徴まで捉えられる点が、ハンディスキャナの強みと言えよう。

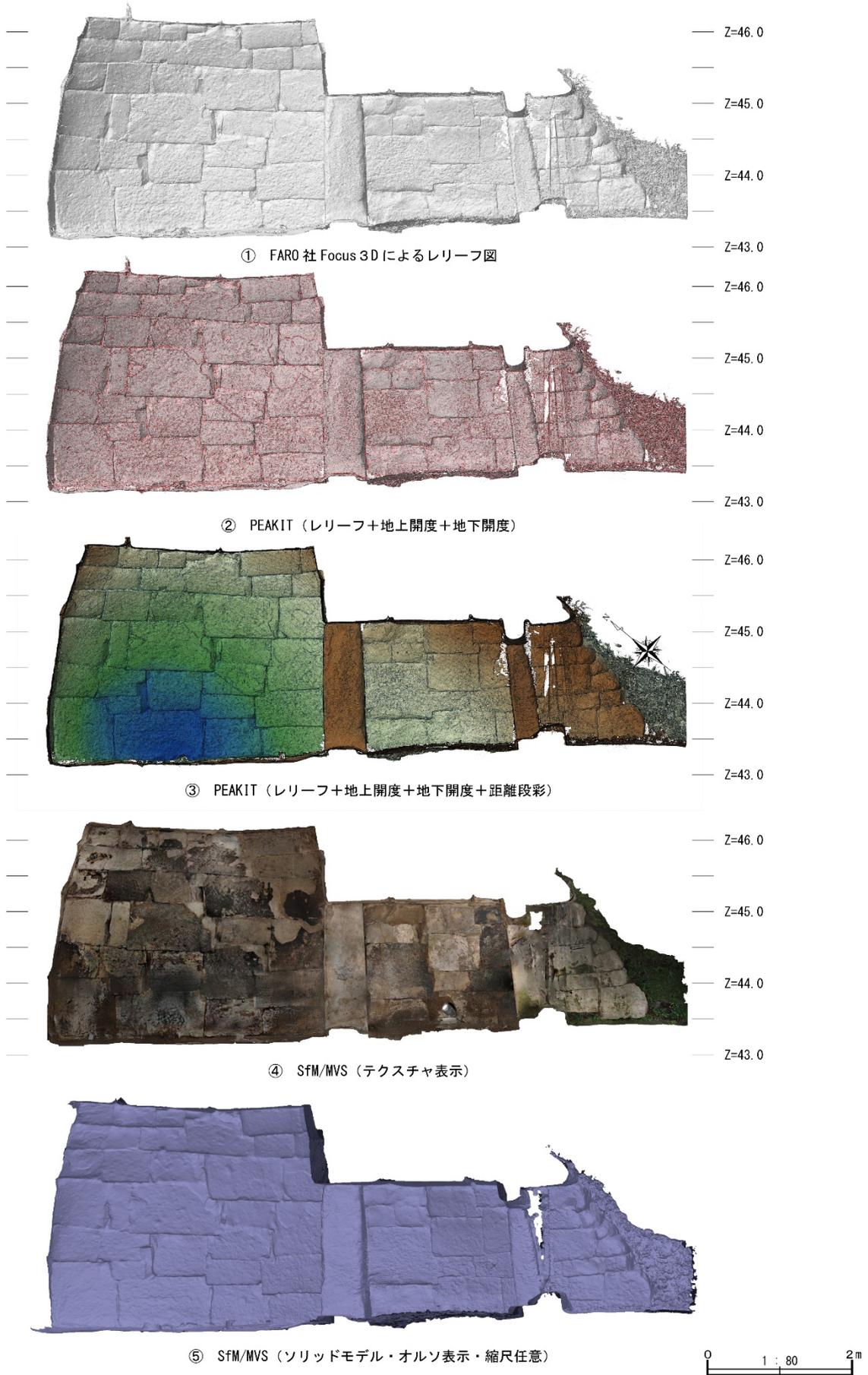
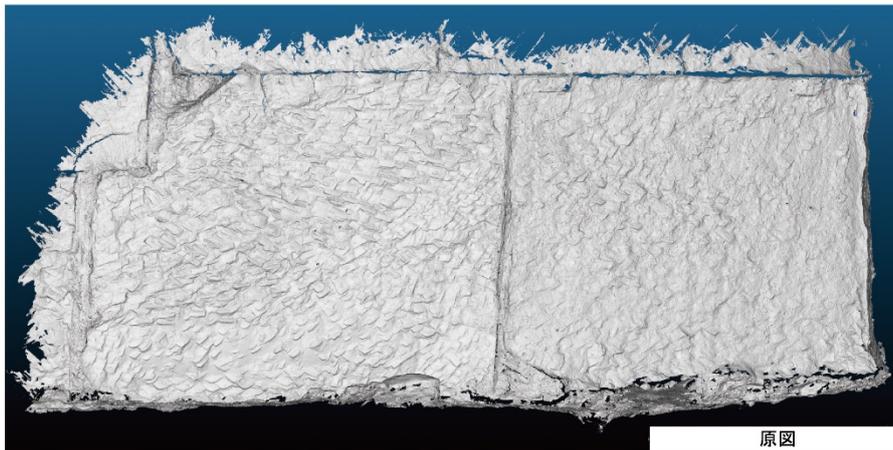
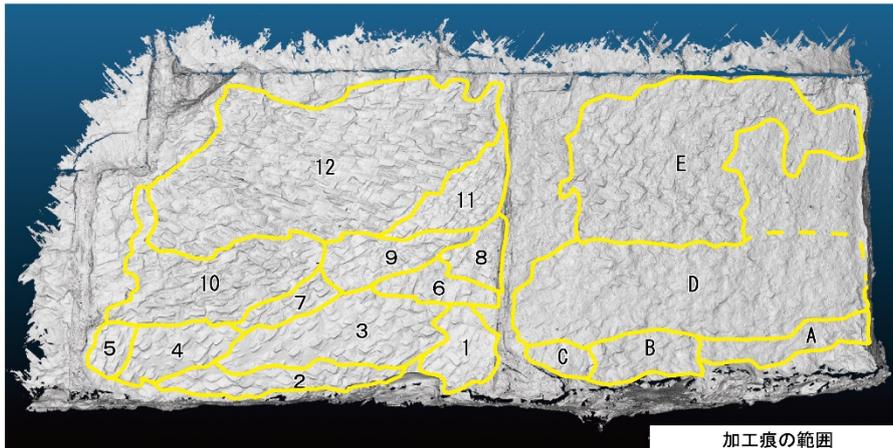


図7 据え置き型レーザースキャナと SfM/MVS のバリエーション  
(若宮八幡古墳横穴式石室)

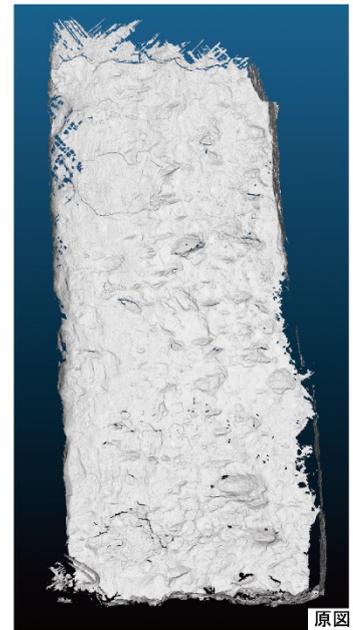


原図

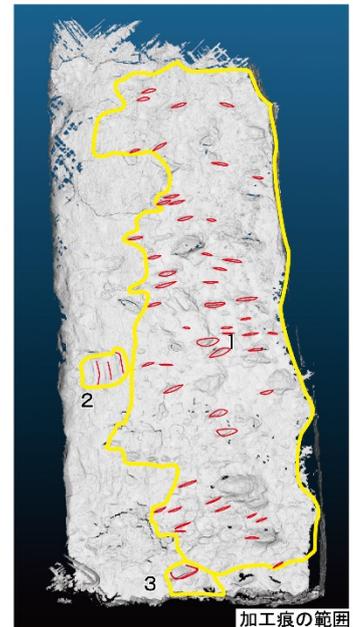


加工痕の範囲

①玄室左側壁 1・2 (S=1/20)

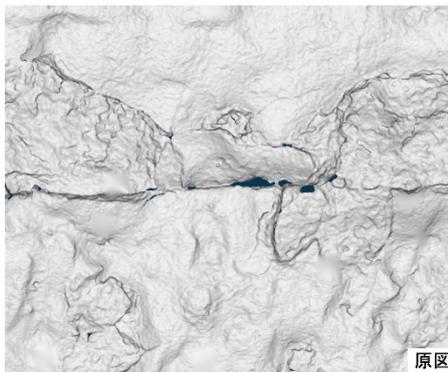


原図

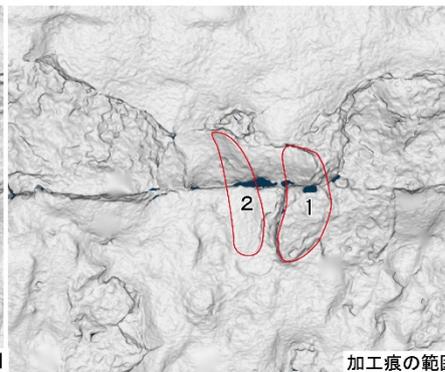


加工痕の範囲

③左玄門 (S=1/20)

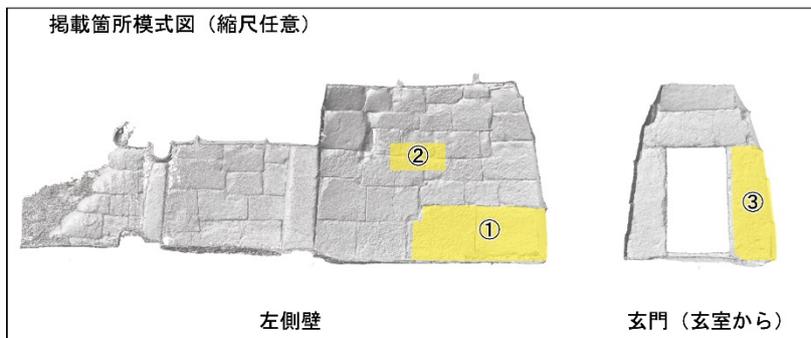


原図



加工痕の範囲

②玄室左側壁 13 と 17 の目地 (S=1/4)



0 1 4 8 cm

0 1 20 40cm

図 8 ハンディスキャナの計測例 (若宮八幡古墳横穴式石室)

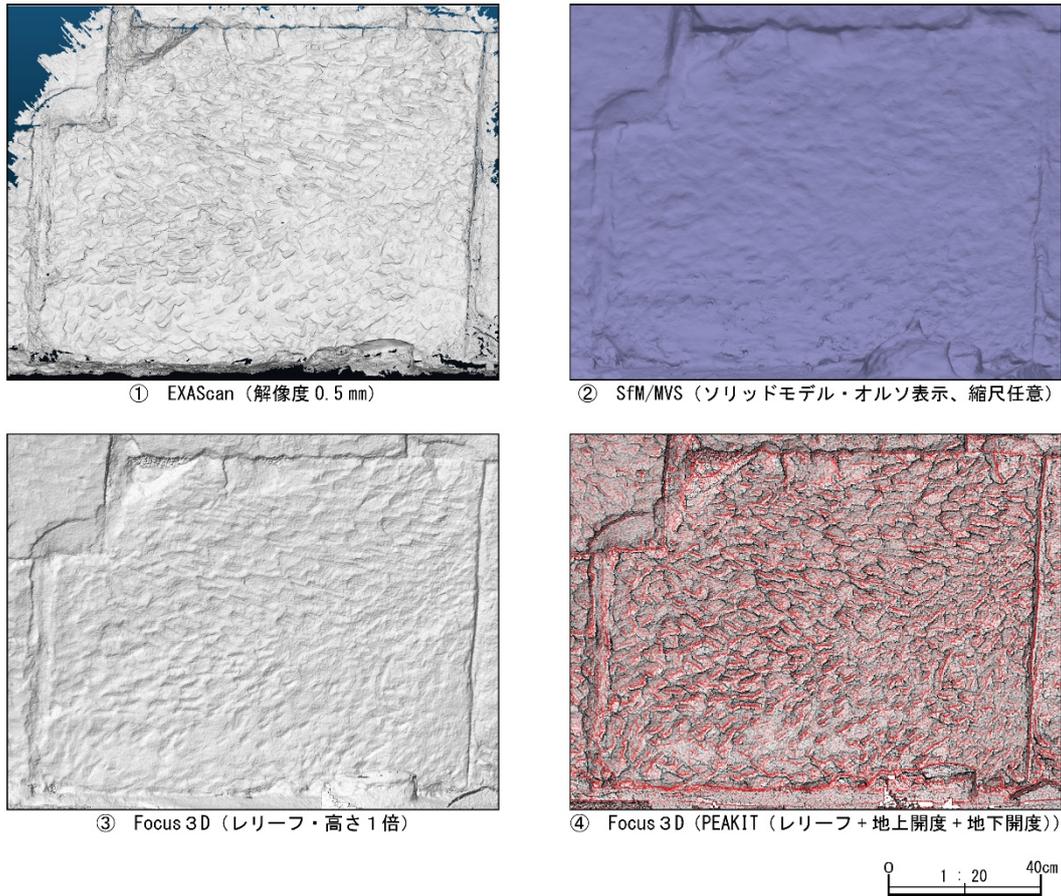


図9 ハンディスキャナと据え置き型レーザースキャナ・SfM/MVS の比較  
(若宮八幡古墳横穴式石室)

以上のように、簡単ではあるが、各計測と SfM/MVS の成果を比較した。今回の比較は、図化表現に特化しており、精度の比較検証は実施していない。実際には各作業で作成したモデルを、点群などの同一形式で比較し、点群の密度や精度も検証するべきだろうが、筆者の力量不足により実施できなかった。スケールについては、それぞれの計測結果を現地での手計測の結果と比較し、使用に耐えうる精度を確保していることを付言しておきたい。

### 三次元計測と SfM/MVS の課題

これまで三次元計測と SfM/MVS の特徴を取り上げてきたが、ここで改めて見直すべき点や今後の課題を挙げておきたい。

考古学の記録方法の基本は、計測や計量といった自らの観察（認識）の下で測ることにある。そのため、測る作業によって生まれる観察者の所見や閃き等は、手計測を伴わないレーザー計測と SfM/MVS の作業では反映させにくい。

作業が効率化された分だけ、今までよりも観察所見の記録を重視する必要がある。これまで作図に要していた時間と労力を、観察や新たな分析・調査に投下することで、この技術を利用したこれまで以上に良い記録・研究や、人材の育成もできるだろう。この意味ではレーザー計測や SfM/MVS は、自分自身の負担軽減には繋がらないのである（むしろ PC 作業が増える分、編集にかかる作業量は増加するかもしれない）。

また、3D 技術全般で注意すべき点は、3D 技術が対象を「ありのまま」に記録することから、図化作業の考え方がこれまでと大きく異なることである。加えて、3D 技術では客観性が高いデータが得られるという意見も散見されるが、筆者の考えはやや異なる。なぜなら 3D 技術による記録であっても、遺構掘削方法や清掃の度合い、計測にかかる機械の設定、データ処理におけるノイズ（成果に関わりのないデータ）の除去作業といったところに、人の手（解釈）が加わることから、文化財の記録において 3D 技術に客観性を求めることは困難である。

こうした点から、3D 技術のメリットを主張する際には、客観性ではなく、正確性や計測速度の向上、およびこれによる調査と記録の質の向上を取り上げるべきである。3D 技術の導入は全国的な潮流であることから、こうした点を留意するべきだろう。

特に、SfM/MVS は物理的な計測を伴わない技術である。それに加えて、写真から 3D モデルを作るという手法は、解析がどのようなアルゴリズム（仕組み）で行われているか文化財担当者（少なくとも私）にはわかりにくく、作業過程で対象に直接触れることもないため、ソフト上での処理過程と結果に対して全幅の信頼を置いてよいのか、不安感が残ることは否めない。SfM/MVS 自体も誤差の評価方法や写真の撮影方法、歪み補正の可否など、技術的に課題も残る発展途上の技術である。その保険としてレーザースキャナやトータルステーションによる計測、手実測を併用し、現在は実用性を検証している段階と言えよう。このような課題をもちつつも、ようやく写真測量が簡便に各調査に導入できる状況に至ったということが現状であろう。

## 現在取り組んでいること

### ・分析（3D 点群データ、モデルの活用）

これまでに紹介した方法で 3D データを得た場合には、当然これを用いた分析を行うことが期待される。筆者は 3D データをもとに作成した二次元的図面から、各横穴式石室の構造や構築過程の分析を試みた（青木 2018b、青木・横山・千葉 2018、青木 2019）。しかし、それだけではなく、3D データを駆使した分析の構築を目指したい。

その一例として、先に示した距離段彩図は、同様の事例を蓄積することで、形態・構造の比較検討に役立つことが予想される。また、横穴式石室単体で考えると、二次元図から石材の傾斜の度合いがわかることで、これまでエレベーション図を中心に把握していた石積みの特徴をより具体的に検討、共有することが可能となる。また、現状確認調査と災害との関係では、災害等による室内の歪みの発生などを確認する上でも有益な表現方法であろう。

最近では川村悠太氏を中心に、千葉県上宿古墳、岩屋古墳西石室、みそ岩屋古墳の三次元計測・SfM/MVS 結果が報告された（川村ほか 2019、川村・城倉ほか 2019）。川村氏は、上宿古墳の報告では、Metashape から 3D モデルを CloudCompare で読み込み、軸線等の決定をしたのちに、QGIS を用いて傾斜等の解析を行った。Metashape は有償のソフトだが、CloudCompare や QGIS はフリーに扱えるソフトのため、今後、様々な事例で同様の方法を試し、データが蓄積されることが望まれる。なお、筆者が若宮八幡古墳の処理の際に、(株)ラングの横山氏と千葉氏とも議論を重ねた話題として、距離段彩図を作る際に、横穴式石室のどの箇所を基準とするかが大きな問題となった。川村氏も同様の課題を抱え、問題提起してい

るが、一つの横穴式石室であっても、基準とする面によっては距離段彩図や傾斜図の見え方は変わってくる。そのため、このような図を作図し、公開する際には、文章や図面等で作図過程を説明する必要があるだろう。そして、これは横穴式石室を造る上での基準は何か？という研究課題に通じるため、看過すべきではない。

3D データの解析や副次的な図面（多数のエレベーション図など）の作成は、Cloud Compare や QGIS、Fusion360（3D-CAD ソフト）などが効果を発揮すると思われるが、この点は今後とも取り組んでいく中で検討していきたい。

## おわりに

今回の発表では、横穴式石室を対象としたレーザースキャナや SfM/MVS による記録が、どれだけ効果があり、反面、どのような課題があるのかという点に注目した。ただし、筆者の調査事例は少なく、作業経験が少ないため、どれだけ役立つ内容かははなはだ不安である。

筆者はこれら三種類の手法のうち、SfM/MVS に注目している。なぜならレーザースキャナやハンディスキャナでは、機材の準備にも相当な額の設備投資が必要だが、SfM/MVS ではカメラとソフト・PC があれば実施できるためである。もちろん PC はハイスペックが要求され、その上、いずれの機材も日々進化するため、機材に対する悩みは尽きない。しかし、SfM/MVS では条件を満たすことで、色情報をもつ 3D モデルをはじめ、点群や DEM、オルソ画像など様々な形で資料を記録することができ、上述の研究・分析面だけでなく、資料の公開においても役に立つことは疑いない。

いずれの作業も現地での観察作業の重要性を訴えたが、その反面、それぞれのデメリットに観察所見を記入する媒体が別途必要と明記した。これはスキャナにせよ SfM/MVS にせよ成果が出来上がるまでにタイムラグが生じるためである（計測成果にその場で所見の記入等ができない）。所見の記入が作業日当日でなくてもよいのであれば、当日の夜に PC でデータを表示し、印刷すれば簡単なメモ程度の画像を作ることはできる。ただし、これも紙媒体への記入に固執することなく、例えばタブレットに処理画像をコピーするか、タブレットで通常の写真やパノラマ写真を撮影し、その画像にペンツールで所見を記入するといったこともできる。手帳やメモなどもデジタル化している現代では、デジタルとアナログが融合した観察所見のあり方も今後、見直されていくべきかもしれない。

さらに、本旨から離れるテーマであるが、これらの技術は形状に関する記録である。例えば石材の種類や盛土の土壌学・土木工学的性質などの性状（性質）に関する記録は、当然、他分野の専門家と連携して、より学際的で豊かな内容を目指していくべきである。

現在、全国各地で横穴式石室（横穴系埋葬施設）の調査に三次元手法が導入され始めている。今後、横穴式石室の調査と研究は、こうした技術の発達により、三次元記録の蓄積が見込まれ、これからは記録の蓄積方法（保管）と活用方法についても検討を進める必要がある。

## 謝辞

本発表は早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所の成果に基づきます。発表にあたり、(株) ラングの横山真氏・千葉史氏には図面の掲載と使用の許可をいただきました。記して感謝申し上げます。

また、様々なアドバイスや資料提供をいただいた魚水環氏、川村悠太氏に重ねて感謝申し上げます。

#### 掲載図出典

- 図1 (青木・横山・千葉・川村 2017) p40・図1を引用、図2 (青木・横山・千葉・川村 2017) p54・図19を引用
- 図3 筆者撮影、図4 筆者作成
- 図5 (青木・横山・千葉・川村 2017) p43・図7を引用 (図は(株)ラングが作成)
- 図6 (青木・横山・千葉・川村 2017) p44・図9を引用 (図は(株)ラングが作成)
- 図7 筆者作成 (PEAKIT 処理図は(株)ラングが作成)
- 図8 (青木・横山・千葉・川村 2017) p.55・図20を引用・改変
- 図9 (青木・ナワビ 2016) p.82・第4図を引用・改変 (PEAKIT 処理図は(株)ラングが作成)
- 表1・表2 筆者作成

#### 引用文献

- 青木 弘 2017「東国の横穴式石室に関する近年の研究について—研究史と三次元計測の利用動向—」『研究紀要』第31号 埼玉県埋蔵文化財調査事業団
- 青木 弘 2018a「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) 日本情報考古学会
- 青木 弘 2018b「三次元計測による横穴式石室の構造の分析—凝灰岩を用いた石工集団の推定—」『WASEDA RILAS JOURNAL』No.6 早稲田大学総合人文科学研究センター  
(<http://hdl.handle.net/2065/00058598>)
- 青木 弘 2019「模様積石室の構築技術」『横穴式石室と用石技法』山梨県考古学協会 2018 年度研究集会資料集 山梨県考古学協会
- 青木 弘・ナワビ矢麻 2016「横穴式石室の三次元計測と分析—若宮八幡古墳・埼玉鉄砲山古墳を事例として—」『3D考古学の挑戦』 早稲田大学総合人文科学研究センター
- 青木 弘・千葉史・横山真・川村悠太 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—墳丘のデジタル三次元測量・GPR、横穴式石室・横穴墓の三次元計測を中心に—』早稲田大学東アジア都城・シルクロード考古学研究所 早稲田大学文学部考古学コース  
(<http://hdl.handle.net/2065/00056499>)
- 青木 弘・横山 真・千葉 史 2018 「三次元計測と SfM/MVS を用いた横穴式石室構築技術の分析」『日本情報考古学会講演論文集 (第40回大会)』Vol.20 (2018) (通巻40号) 日本情報考古学会
- 赤穂市教育委員会 2017『有年地区埋蔵文化財分布調査報告書1』赤穂市文化財調査報告書84
- 川村悠太ほか 2019「上宿古墳横穴式石室の三次元計測—SfM/MVS を用いた三次元データの取得—」『溯航』第37号 早稲田大学大学院文学研究科考古談話会  
(<http://hdl.handle.net/2065/00062809>)
- 城倉正祥ほか 2017『殿塚・姫塚古墳の研究』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第3冊 六一書房
- 川村悠太・城倉正祥ほか 2019「龍角寺古墳群横穴式石室の三次元計測」『溯航』第37号 早稲田大学大学院文学研究科考古談話会 (<http://hdl.handle.net/2065/00062810>)

## 全天球画像等を利用した SfM/MVS について

伊藤 佑真

(京都造形芸術大学非常勤講師)

### はじめに

写真測量（フォトグラメトリ）は今日、考古学・文化財関連分野に限らない多くの分野で使われ始めている。ゲームコンテンツではアセットと呼ばれるゲーム内 3D モデル作成のために、例えば写実的なキャラクターを作るためにモデルとなる人物に対してフォトグラメトリを応用したボディスキャンや、創作料理をスキャンすることで表現が豊かになるような利用が行われている。

ここでは、建築など構造物のゲームアセットを CG アーティストが多少の手直しすることを前提として、全天球画像から作成するフォトグラメトリを利用したロケーションハンティングおよびアタリを作るために、機動性を重視した撮影手法として Spherical Photogrammetry を紹介する。

### Spherical Photogrammetry とは

全天球写真を利用したフォトグラメトリは Spherical Photogrammetry と呼ばれ、一枚で 360 度の情報が収められている写真を使って構成するフォトグラメトリである。

Spherical Photogrammetry で懸念されている点として、バンドル調整によるレンズキャリブレーションがある。商用ソフトウェアの Metashape Professional (<https://www.agisoft.com>)では Camera Type を Spherical にすることで全天球写真としてパラメータを適用でき、同じく商用ソフトウェアの 3DF Zephyr (<https://www.3dflow.net>)では全天球画像を正六面体に投影して展開して画像を読み込むことができる。現状、ブラックボックス化した両ソフトウェアによる全天球画像向けの調整を使用しているフォトグラメトリになるため、バンドル調整は困難であり、よってレンズキャリブレーションもまた、ソフトウェアに依存するものとなっている。

### 洞窟および坑道内での撮影

洞窟や坑道での周囲が囲まれているフォトグラメトリにおいて、通常のカメラでは画像ごとのオーバーラップを考慮して慎重に撮影するが、360 度をカバーする全天球写真でのフォトグラメトリの得意とするところである。

静岡県浜松市、竜ヶ岩洞の洞窟内での撮影においては、周囲の 8メートル程度の距離を 14 枚の画像のみで 3次元化 (<https://skfb.ly/6KDsU>) できた。(図 1) それぞれの壁から中心を撮影することで満遍なく撮影できるよう、AR メジャーアプリで大体の天井からの高さを算出し、一脚で調整しつつ、撮影を行った。



図 1 洞窟内でのカメラ位置アラインメント

## 異なるカメラとの組み合わせについて

全天球写真と通常の写真の組み合わせを行うことで、それぞれのカメラの利点を使って補うことができる。あらかじめバンドル調整を行ったカメラを使用することで計測精度を高める事ができ、全天球写真においては広い範囲で特徴点を抽出する事ができる。図2では RICOH 社製 Theta.SC と Apple 社製 iPhone.XSMax を使用して、東京都足立区にある伊興遺跡公園内の展示物を三次元化 (<https://skfb.ly/6LRZD>) した。(図2) 処理ソフトは Metashape Professional を使用し、周囲 72 枚の全天球写真と詳細部として通常の写真 10 枚の撮影を行い、それぞれを組み合わせた結果である。ステッチングの歪みも考慮する必要があり正確に計測数値を求めることは難しい。精度を高めるには、マーカーや手動でのコントロールポイントの配置を併用する事が必須である。

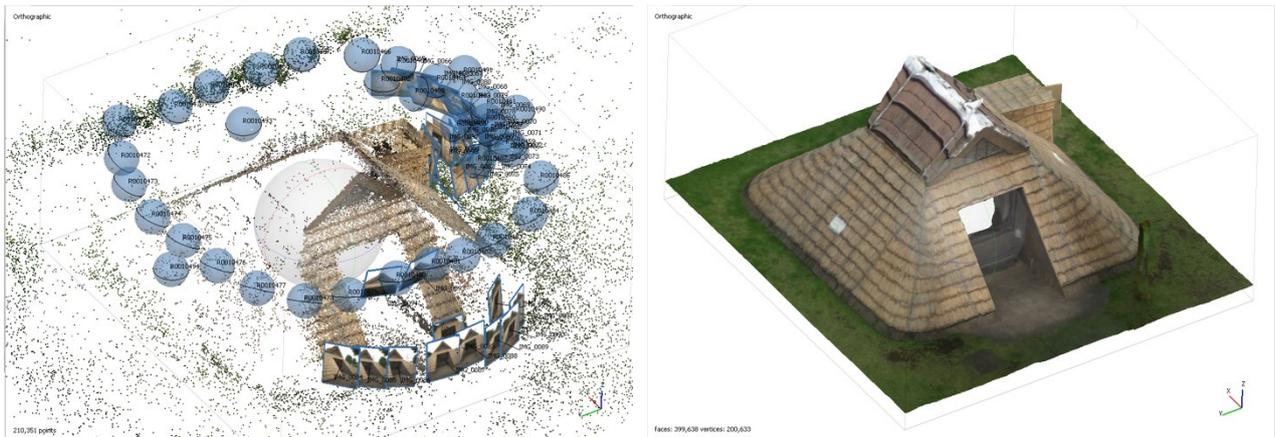


図2 複数カメラで三次元モデル化(左：アラインメント、右：出力モデル)

## 掲載図出典

図1に示した3D計測データは竜ヶ岩洞管理事務所、図2に示した3D計測データは足立区伊興遺跡公園展示館に撮影許可を取ったものである。

## 考古学・文化財のためのデータサイエンス・サロン

次回以降の予告

**第3回** 2019年9月10～11日 会場：奈良文化財研究所（奈良市）

考古学・文化財データサイエンス研究集会

「考古学ビッグデータの可能性と世界的潮流」

アメリカ・ワシントン大学の Ben Marwick 教授を招聘して、透明性・再現性を高めた考古学調査・研究のためのデータサイエンスについての講演と、R、Github を用いた実践についてのハンズオン・ワークショップを開催します。使用言語は英語ですが、逐次通訳が付きまゝす。本サロンの主題の本丸にあたる内容です。奮ってご参加ください（詳細は次ページ）

**第4回** 2019年10月を予定 会場未定

テーマ「博物館展示・普及と3D」

博物館における展示や普及活用における3Dモデルの利用について事例報告を中心に議論する予定です。サブライズ・イベントもあるかも。詳細は Peatix サイト (<https://3dmlm.peatix.com/>) から周知します。

第5回以降、以下のテーマを企画中です。

- ・計測機器・技術の変遷と特性
- ・考古学データの公開と流通
- ・幾何形態測定学ハンズオン

また本サロンでは、みなさんの経験を集合知として活用するために、フォトグラメトリの成功例・失敗例を募集します。当面は、カメラ位置や撮影環境によるアラインメントの成功・失敗、ミニマムな画像セットの事例を募集します。以下の情報と画像をお送りください。

- ・アラインメント状態のスクリーンキャプチャ画像（PNG形式） 1～複数枚

※対象がはっきりと映ってなくても構いません。事情により詳細を公表できな場合でも、以下の情報を添えて提供していただければと思います。

- ・対象の概要（遺構・遺物の種別概略、サイズ）
- ・撮影機材（カメラ、レンズ、照明、補助機材：三脚・ポール・撮影台等）
- ・使用画像枚数
- ・アラインメントの精度
- ・結果（成功・失敗等、失敗の場合はどのような問題があったか）

情報提供先：[asiansophia@gmail.com](mailto:asiansophia@gmail.com)（野口）