

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った。

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スキャナ FARO社Focus 3D (※1)	ハンディスキャナ Creaform社EXAScan (※2)	SfM/MVS 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	地藏塚古墳	伊勢塚古墳	
カメラ	NikonD700				
光源	内蔵フラッシュ			LEDライト (UTEBIT PT-30Ⅱ)	
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。

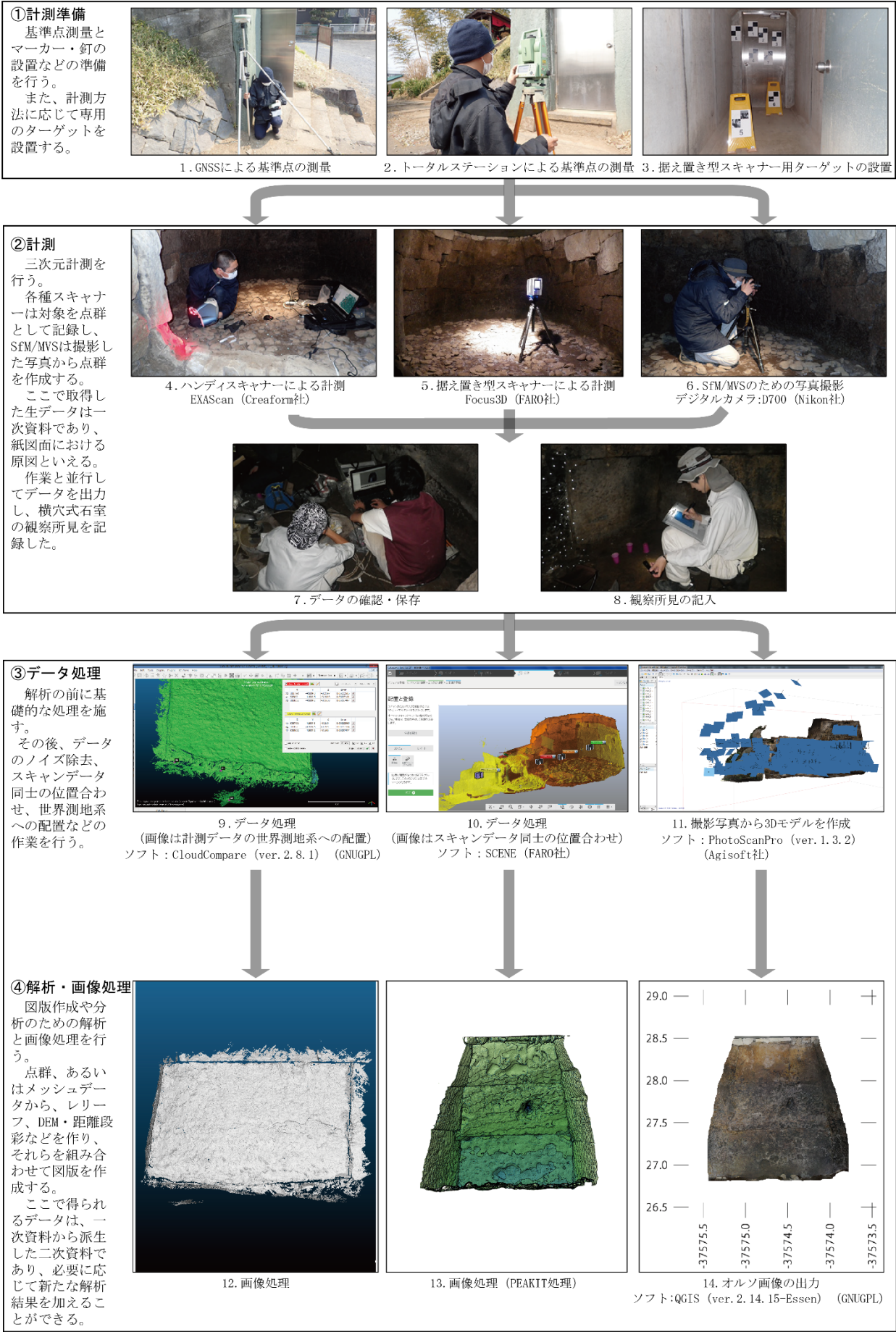


図1 据え置き型レーザースキャナ・ハンディスキャナ・SfM/MVSの作業フロー

- ・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。

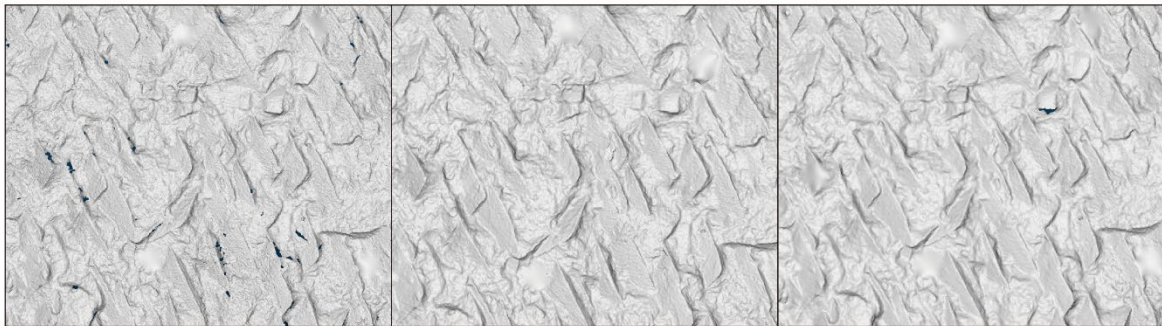
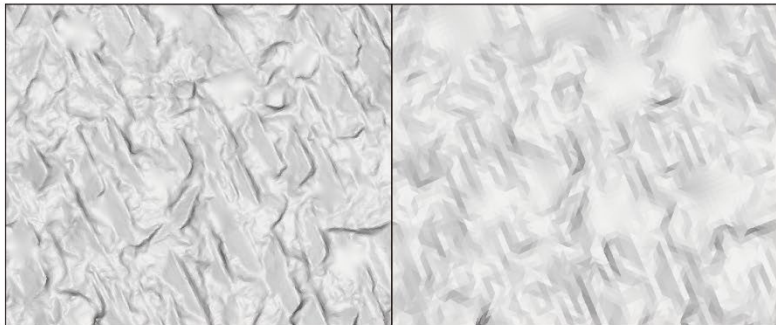
計測事例	若宮八幡古墳横穴式石室前室左側壁 6（表面積 0.233 m ² ）（S=1/4）		
計測面			
計測密度	0.2mm	0.3mm	0.5mm
計測結果	加工痕と石表面の細かな凹凸も認識できる	加工痕の重複を認識できる	加工痕の重複まで認識できる
計測時間	70 分	60 分	40 分
ファイルサイズ	1.31GB+α（全範囲未計測）	1.28GB	449MB
計測面			
計測密度	1 mm	3 mm	
計測結果	加工痕は認識できるが、重複は難しい	凹凸が認識できる程度	
計測時間	13 分	6 分	
ファイルサイズ	219MB	99.8MB	
掲載箇所模式図（縮尺任意）  0 1 4 8 cm			

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。

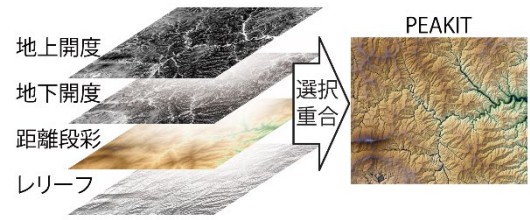


図5 横山真氏・千葉史氏による
PEAKIT の概念

- ・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。

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

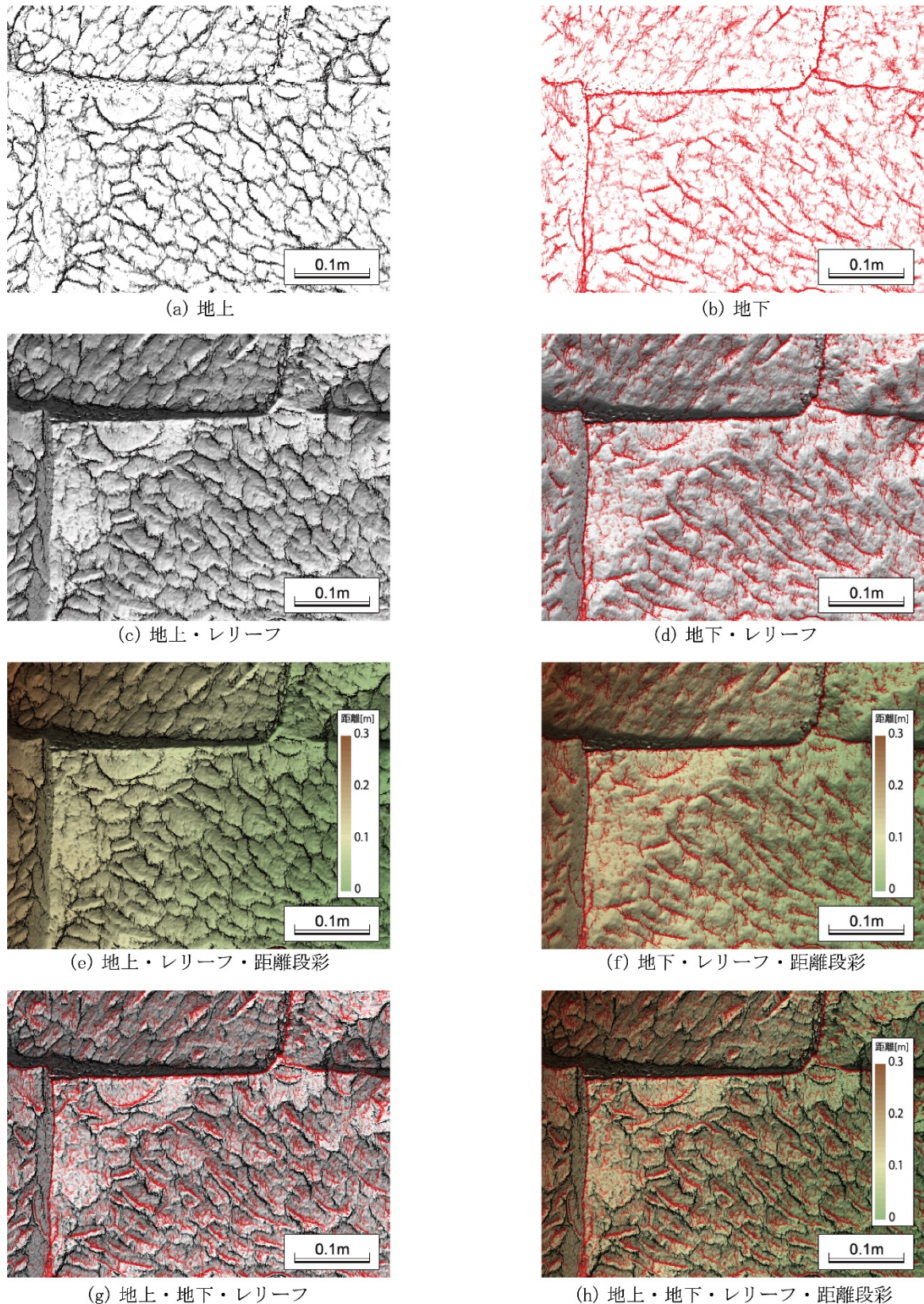


図6 PEAKIT のバリエーション

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。

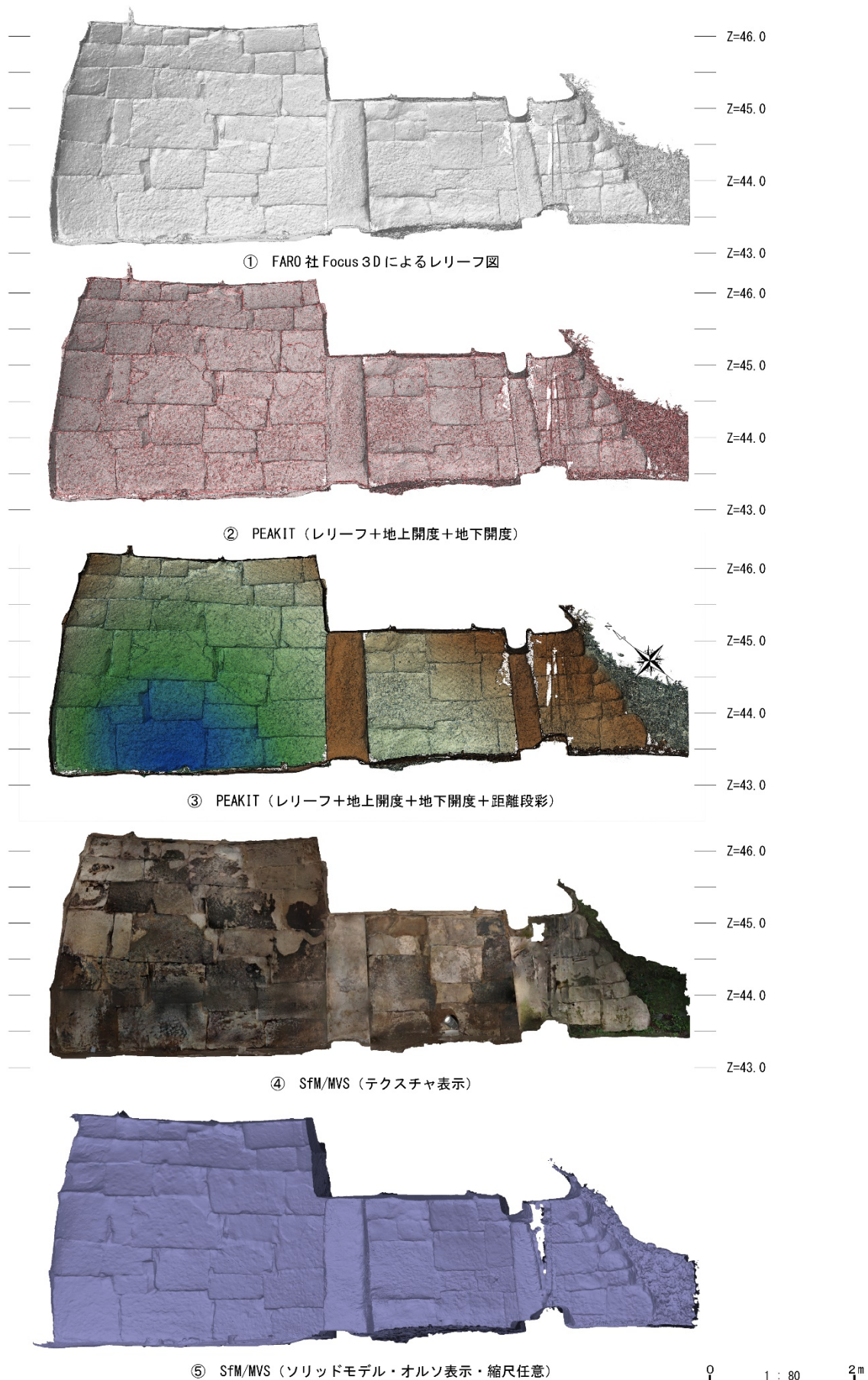
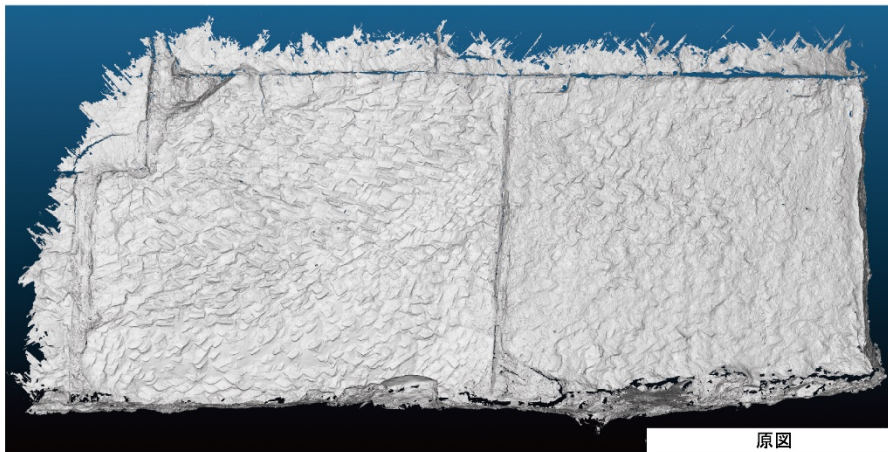
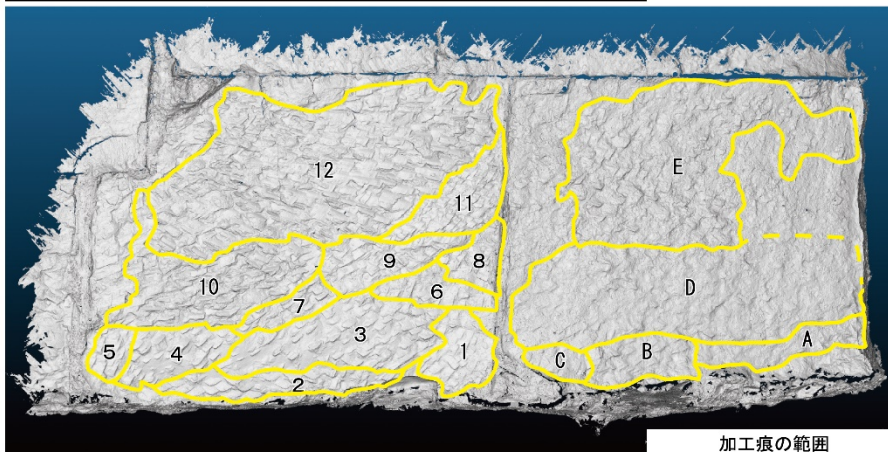


図7 据え置き型レーザースキャナと SfM/MVS のバリエーション
(若宮八幡古墳横穴式石室)



原図

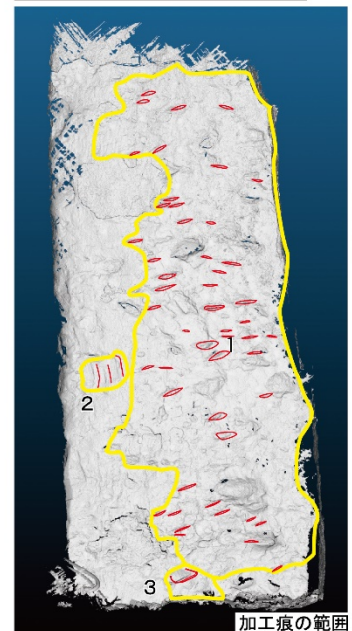


加工痕の範囲

①玄室左側壁 1・2 (S=1/20)

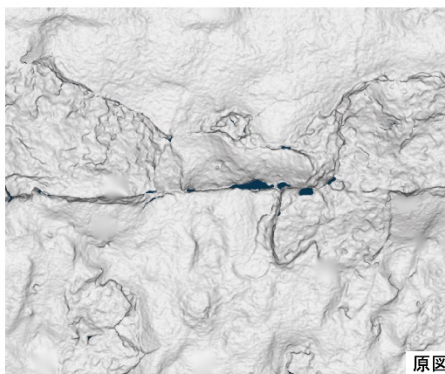


原図

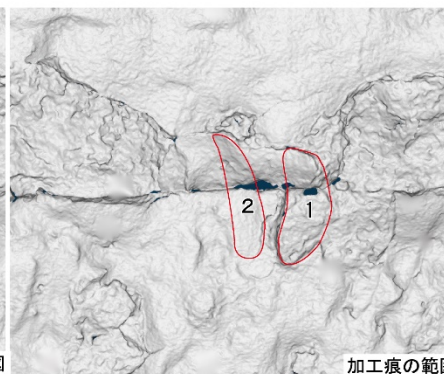


加工痕の範囲

③左玄門 (S=1/20)

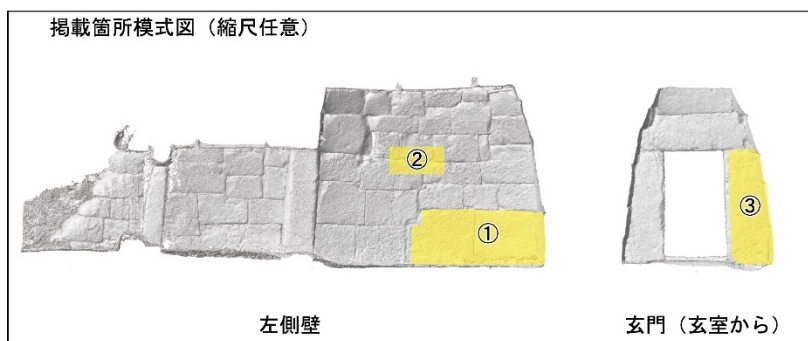


原図



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 40 cm

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)

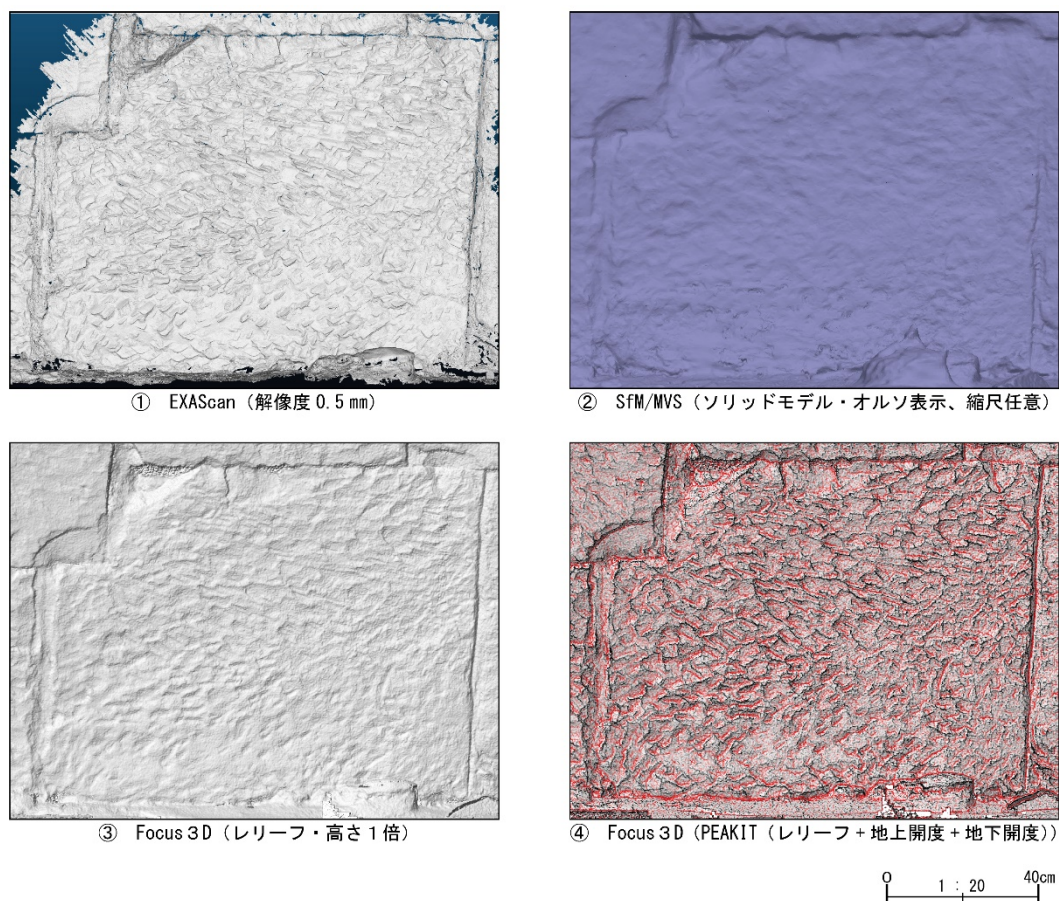


図9 ハンディスキャナと据え置き型レーザースキャナ・SfM/MVS の比較
(若宮八幡古墳横穴式石室)

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>)