

Title	個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用：西アジアの調査事例から
Sub Title	Deployment of 3D measurements in overseas surveys by individuals and small groups : a case study in West Asia
Author	長尾, 琢磨(Nagao, Takuma)
Publisher	三田史学会
Publication year	2025
Jtitle	史学 (The historical science). Vol.94, No.1/2 (2025. 1) ,p.85 (85)- 125 (125)
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	論文
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00100104-20250100-0085

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

——西アジアの調査事例から——

長尾 琢磨

1. はじめに

近年、三次元計測の低価格化と普及により、考古学における調査手法が急速に変化しつつある。土器片の計測作業の効率化 (Göttlich et al. 2021)、テル型遺跡の正確且つ効率的な計測 (西山他 二〇一七)、単独での地形計測 (石井 二〇二三) など、三次元計測を活用した調査事例は枚挙にいとまがない。文化財分野において、三次元計測はもはや新しい技術ではなく普遍的なものであるといえるだろう。

三次元計測は、従来の計測とは全く異なる詳細で情報密度の高い記録である (野口 二〇二〇・五九)。それと同時に、単独且つ短時間で計測可能であり、手実測と比較して技術や経験にそれほど大きく影響を受けないこと

がメリットとして挙げられる。考古学的調査において三次元計測が有用であることは言うまでもないが、特に個人や少人数で一定の質を保った調査が可能となったことは重要である。三次元計測により考古学的調査の敷居が下がったともいえ、発掘調査と比較してコストをそこまで要さない踏査⁽¹⁾の事例が増えることが期待される。

発掘調査では未発見の新情報を得ることができるが、地域によっては面的に広範囲の情報が把握できる踏査が必要な場合もある。たとえば、筆者がフィールドとするパレスチナ自治区では、既知であるが十分に調査されていない遺跡が多く存在する。これらは盗掘や不法な開発工事によって損傷を受け始めており、情報が記録される前に失われてしまう遺跡も多い⁽²⁾。見張り塔や横穴墓など地表に露出する遺構の被害は重大であり、土中で保存

されている未発見の遺跡と比較して消失の可能性は高い。このような問題を解決するためには、短時間で正確な情報を得られる三次元計測を伴う広範囲の踏査が極めて有効であり、多くの遺跡が失われてしまう前に迅速に踏査を行う必要がある。

この点において、若手研究者が三次元計測を活用することで大きな役割を果たすことができるようになったといえる。これまで予算の限られる若手研究者の海外踏査や巡検では、スケッチや写真で記録を行うことが多く、たとえば遺構の正確な形状や寸法など研究に資する情報が不足しがちであった。しかしながら、前述のように、三次元計測の活用によって個人や少人数且つ低コストで正確な計測を行うことが可能となったため、若手研究者が現地調査で持ち帰ることのできる情報量は飛躍的に増加したといえる。どのような研究者にとっても三次元計測の恩恵はあるが、三次元計測を活用することで若手研究者の海外踏査が増加し、正確な記録と共に報告がなされていくということは、より迅速に情報の蓄積が進むという点で対象地域の研究にとって大きな意味があるといえるであろう。

とはいえ、三次元計測に用いる機器・ソフトウェアや

それらの予算、踏査事例に基づく現地での計測方法など、実際に海外踏査においてどのように三次元計測を活用するかという具体的な議論はいまだ不足しているといえる。よって、本稿では個人や少人数での海外踏査を主な対象として、筆者が実施した、または参加した調査の事例を挙げながら、三次元計測の具体的活用法について述べる。また、調査者については予算の限られる若手研究者を念頭に置き、今後実施される海外踏査で活用されることを期待する。なお、本稿では調査で得られた三次元データ自体の活用にも言及するが、どの程度の予算で、何を行うことが可能であり、どのような情報を持ち帰ることができるか、という調査の過程に重点を置きたい。

2. 三次元計測に用いる機器、ソフトウェア

文化財分野における三次元計測は、LiDAR⁽³⁾スキャンとSfM-MVS⁽⁴⁾法による写真計測(フォトグラメトリ)⁽⁵⁾に大別される。両者ともに近年様々な機器、ソフトウェアが開発されており、その選択肢は増加している。そのため、踏査範囲や対象物の規模、必要な情報量、現地状況などを踏まえた踏査計画を事前に決めたいうえで、自らが行う踏査に適した計測機器、ソフトウェアを選定する必

要がある。加えて、渡航時や現地での運搬の可否、価格など、予算や人手も考慮するべきであろう。よって、本章では、LiDAR スキャンとフォトグラメトリに用いる機器の概要を示しつつ、海外踏査に適した機器、ソフトウェアを検討する。

(一) LiDAR スキャン

LiDAR スキャンは、計測場所（屋外／屋内）、対象の規模や範囲（中長距離／近接）などにより専門的な機器に分化しており、一台で汎用的に使えるものではない（野口二〇一三：四）。LiDAR スキャナーは、中長距離計測用と近接計測用に主として分けられる。中長距離計測用スキャナーは、設置型⁶⁾以外に移動型スキャナーが普及しつつあり、近年土木・建築業界での活用が著しい。

遺構や地形など広範囲を高精度にスキャン可能であることが中長距離計測用スキャナーの特徴であり、スキャン結果をモバイル端末を通して現場段階で確認できる、数分ほど操作を学べば誰でも容易に計測可能である、スキャン結果の品質が操作者によらずほぼ一定であるなど、操作性の点でも優れているといえる。一方で、中長距離計測用スキャナーはいずれも高額であり、小型化が進ん

でいるとはいえ、渡航時や現地での運搬の際に可搬性の点で問題となるスキャナーも多い。

近接計測用スキャナーは小型化と低価格化が進んでおり、中長距離計測用スキャナーよりも廉価なものが多い。⁹⁾ 大型の構造物をスキャンできるものもあるが、基本的に中～小型の対象物に適している機器である。本体がモニターを持つ独立型（図一）やパソコンとの接続が必要であるもの、写真測量と併用可能であるものなど種類も様々であり、たとえば独立型のスキャナーは、石像など中型の対象物の踏査に活用可能である。また、屋内で行う遺物の資料調査であれば、パソコンと接続しながら利用するタイプのスキャナーも選択肢に入る。近接計測用スキャナーは大きさに幅があるため一概には言えないが、中長距離計測用スキャナーと比較して可搬性の点で問題とならないものが多いといえる。

一方で、中長距離計測用スキャナーで土器や石器の詳細な形状は計測できず、反対に近距離計測用スキャナーで大型の遺構や地形を計測することは難しい、という冒頭でも触れた汎用性の問題がある。踏査では表面採集を伴うことが多く、遺構の踏査が主目的であったとしても遺物の記録が必要な場合がある。たとえば、筆者が行っ



図1 Artec Leoによるスキャンの様子、パハレーン国立博物館

たパレスチナ自治区のザワタ (Zawata) の踏査（長尾二〇二四）では、現地の文化財を管轄するパレスチナ観光・遺跡庁が発掘調査を行った墓が未実測、未整理であるということが現地で判明し、急遽遺構と遺物の三次元計測を行った。この踏査では墓の計測を主目的としていたため、仮に中長距離計測用スキャナーの持ち込みだけであつたとしたら、遺物は計測できなかったことになる。とはいえ、このような場合、遺構、地形用の中長距離計測用スキャナー、遺物用の近距離計測用スキャナーの双方を揃えることは、予算と可搬性の点で難しいであろう。総じて、予算と汎用性、渡航時や現地での可搬性という観点で、LiDARスキャナーは、個人や少数人数での海外踏査に関して最適な機器ではないと結論付けられる。しかし、あくまで個人や少数人数での海外踏査に限ったことであり、国内踏査や調査者が多数人数である場合、予算が潤沢である場合は、LiDARスキャナーが選択肢に入る可能性は十分考えられる。また、本稿では触れないが、中長距離計測用スキャナーには計測後のBIM⁽¹⁰⁾化まで対応するものもあり、建造物の調査には特に有効である。

(2) フォトグラメトリ

フォトグラメトリはLiDARスキャンのように専用の機器を用いるのではなく、写真とそれを処理するソフトウェアがあれば計測が可能である。計測対象は幅広く、小さな遺物から地形まで一つのソフトウェアで処理することができる。⁽¹¹⁾ 本稿ではフォトグラメトリの原理や処理過程に関して詳しくは触れないが、LiDARスキャンが対象物に直接光線を照射して計測するのに対して、フォトグラメトリは写真からパソコン上で三次元形状を復元する。それゆえ、ソフトウェアの性能や操作で三次元モデルの品質、精度に顕著な違いが生じるのではなく、写真の品質が処理結果に大きな影響を与えることになる。事前知識なく現場で写真を撮影し、ソフトウェアで処理をするだけでも三次元モデルを作ることができるが、高品質・高精度の三次元モデルを作るためには写真撮影の知識がある程度必要となる。これは計測者によって計測結果に差が生じるということでもあり、LiDARスキャンよりもやや難しい計測方法であるといえる。

写真とカメラ

フォトグラメトリに必要な機器としては、第一にカメラ
個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

ラが挙げられる。一眼レフカメラ、ミラーレス一眼カメラ、コンパクトデジタルカメラ、スマートフォン付属のカメラ等である。どのカメラで撮影した写真であっても三次元モデル作成には問題ないが、前述のように写真の品質が処理結果に影響を及ぼすことを考慮すべきである。SfM/MVS処理では、写真内の特徴点(目印のようなもの)を抽出しタイポイントを取得する。また、フォトグラメトリのソフトウェアはテクスチャ生成まで行えるものが多いが、このテクスチャも写真をもとに生成される。つまり、高品質な写真があればそれだけ多くの特徴点を抽出することが可能であり、実物と遜色ないテクスチャを生成することができるのである。この場合の高品質とは、写真の画質が良い、ピントが合っている、白飛び・黒つぶれがない、手ブレがないことを指すが、これはカメラ性能、カメラ設定と関わっている。

スマートフォンのカメラ性能は、画像処理技術の進化などにより近年大幅に向上しているが、搭載されるイメージセンサー(撮像素子)が小さく、受ける光の情報量が少ない。それゆえに、一眼レフカメラと同じ画素数であったとしても、一画素の大きさが小さくなるため階調表現やノイズの点で劣り、一眼レフカメラよりも画質

が低くなる。また、イメージセンサーが小さいことからダイナミックレンジも一眼レフカメラと比較して狭く、白飛び・黒つぶれが生じやすい。コンパクトデジタルカメラに関しても、イメージセンサーがスマートフォンと同じ1/2.3型であるものが多く、同様の問題があるといえる。

一眼レフカメラ、ミラーレス一眼カメラは、一部にマイクロフォーサースという4/3型イメージセンサーを採用したものもあるが、大半がフルサイズ（約36mm×24mm）、APSC（約24mm×17mm）センサーという大きいイメージセンサーを搭載したものである。レンズが交換可能であることや撮影に際しての様々な設定、補正があることも含め、フォトグラメトリのための写真撮影には一眼レフカメラ、ミラーレス一眼カメラが最も適しているであろう。

一眼レフカメラとミラーレス一眼カメラ、そしてその中でフルサイズ機、APSC機のどちらを選ぶかについては、判断が難しい。イメージセンサーとカメラの重量からは、フルサイズ機のミラーレス一眼カメラが最適であるように思われるが、ミラーレス一眼カメラは一眼レフカメラよりもバッテリー持ちが悪く、フルサイズ機は

APSC機よりもボケやすい、価格が高い、重いなどのデメリットもあるためである。また、明るい場所ではフルサイズ機とAPSC機に顕著な違いはなく、暗所であってもLEDやストロボで補うことで、暗所性能の差を埋めることが可能である。よって、APSCサイズ以上のイメージセンサーを持つカメラがフォトグラメトリに最適であると本稿では結論付ける⁽¹⁵⁾。

なお、スマートフォン付属のカメラでも画面化や分析に耐えうる品質の三次元モデルを問題なく作成できることは改めて強調したい。撮影方法に工夫が必要であるが、ダイナミックレンジの狭さ、暗所性能の弱さは遮光や補光で、画質の低さは接写と撮影枚数の多さで補うことができるためである⁽¹⁶⁾。一眼レフカメラやミラーレス一眼カメラを所持していない、または、予算の問題で購入が難しいということを理由にフォトグラメトリを諦める必要はない。

フォトグラメトリに用いるソフトウェア

文化財分野ではMetashape、RealityCaptureの二つが普及している。どちらも同様の技術を用い、似たような処理過程であるが、いくつかの点で異なっている。一

つは価格である。Metashape はライセンス買い切り型であり、教職員や学生向けの教育用ライセンスであれば、Professional Edition が五四九ドル、Standard Edition が五九ドルである（二〇二四年七月時）。Standard Edition は、座標やスケールに関する機能が利用できず、ポイントクラウドの分類が行えないという違いがある。RealityCapture は二〇二四年四月に、過去十二カ月間の収益が百万ドル未満の個人および中小企業、教育機関、学生であれば無料で利用可能となった。一方で、RealityCapture は Windows のみの対応であり、グラフィックボードは Nvidia 製の CUDA 3.0 以上（推奨は CUDA6.1 以上⁽¹⁷⁾）にしか対応していない。Metashape は macOS や Linux にも対応しており、少数の写真の処理に限られるが CPU 内蔵 GPU でも利用は可能である。この点で、Metashape の方がややパソコンの費用を抑えることができる可能性がある。ただ、点群や三次元モデル処理のためには、ある程度のパソコン性能が求められるため、いずれにしても三次元データを処理するためのパソコンは必要になる。

次いで、処理時間について述べる。既に両者の比較は行われており（Qureshi et al. 2022; 山口二〇二二）⁽¹⁸⁾、

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

RealityCapture の方が Metashape よりも処理時間がやや短いことが明らかになっている。本稿でも同じ写真二四七枚を用いて同条件で検証を行ったが、Metashape はアラインメント三分三五秒、メッシュの構築が四分六秒、RealityCapture はアラインメント一分五六秒、メッシュの構築が二分四三秒という結果であった。また、RealityCapture は Normal Detail でメッシュを構築したが、High Detail で構築した場合も三五分五一秒と Metashape よりも処理時間が短かった。Normal Detail のポリゴン数は約四千四百万（Metashape もポリゴン数を合わせているため同様）、High Detail のポリゴン数は約一億八千万であったため、RealityCapture は Metashape よりも約四倍多いポリゴン数を短時間で処理できることになる。なお、本稿では処理結果について比較は行わないが、同様に検証が既になされており、両者に大きな違いはみられないようである（山口二〇二二）⁽¹⁹⁾。

価格と処理時間の点では RealityCapture が優れているが、これまで Metashape のユーザーが多かったため、マニュアルや web 上の情報は Metashape に関するものが多い傾向にある。また、文化財分野でも Metashape

を活用した事例や解説が RealityCapture を用いたものよりも多い。フォトグラメトリをこれから導入するという場合、Metashape を選んだ方が現状は参考となる情報が豊富であると思われる。いずれにしても、ソフトウェアの選択できわめて大きな影響が生じるわけではないため、どちらも試してみたいうえで利用するソフトウェアを決めればよいであろう。

パソコン

先ほども少し触れたように、Metashape、RealityCapture には推奨されるパソコン性能がある。フォトグラメトリの処理に求められる要素は、メモリ (RAM)、CPU、グラフィックボードであり、各ソフトウェアの推奨スペックを参考にすればよい。遺構や建造物の撮影では写真が多くなりやすいが、Metashape の場合ソフトウェアで処理可能な写真枚数がメモリの容量によって決められているため、あまりに容量が少ないとメモリ不足で処理ができないことには注意が必要である。RealityCapture に関しても、同様にメモリによる処理枚数の上限はあるが、分割処理とその後の結合によって、実質

無制限に処理できる仕組みがある⁽²³⁾。

海外踏査の場合はノートパソコンが推奨される。ノートパソコンであれば、現場で写真撮影を行った後、宿舎で処理を始めることができるためである。アラインメントと中品質のメッシュであれば一時間も要せずに確認用の三次元モデルを作ることが可能であり、もし失敗などがあれば調査期間中に写真を撮り直しに行くことができる。デスクトップパソコンでもリモートデスクトップを利用することで、常用のノートパソコンを踏査の際に持っていけば同様に現地で処理可能であるが、通信が安定していることが条件である。とくにフォトグラメトリに用いる写真はかなりの容量となるため、事前に現地の通信状況を確認しておく必要があるだろう。

デスクトップパソコンのメモリットとしては、小型化の必要がないため廉価であり、パーツの換装も容易であることが挙げられる。加えて、CPU や GPU は同じ番号（たとえば RTX 4090）であつても、ノートパソコンに搭載されるものは性能が低い場合が多く、排熱等も加味するとデスクトップパソコンの方がパフォーマンスが高い傾向にある。筆者の場合、最高品質で多量の写真を処理可能なデスクトップパソコンと少し性能の劣る現地での本処理用のノートパソコンを併用している。

海外踏査におけるフォトグラメトリの有用性

これまで、フォトグラメトリのために必須であるカメラ、ソフトウェア、パソコンについて概要を示してきた。LiDARスキヤンの節でも検討した価格と可搬性について、ここで改めて考えたい。カメラについては、APSC搭載のエントリー機であれば約一五万～二〇万円で購入できる。ソフトウェアはMetashapeであれば約八万五千円 (Professional Edition) か約九千円 (Standard Edition) 、RealityCaptureは無料である。Metashape、RealityCaptureの推奨スペックを満たすパソコンは約二五万円～三五万円で購入可能である。それぞれ最大値で考えたとしても、約六四万円でフォトグラメトリに必要な機材を揃えることができる。

この金額はさらに減らすことができる。たとえば、既に一眼レフカメラ、ミラーレス一眼カメラを所持しているのであれば、カメラ代は必要なくなる。研究室や所属機関が高性能パソコンを有しているのであれば、現地では必要スペックの下限に相当するノートパソコンを利用して、アラインメントの確認だけに用途を絞ることでコストカットが可能である。このように、利用者の所有する機器や状況に合わせて予算を調整可能である点はフォト

トグラメトリの利点である。また、想定される機器・ソフトウェアの価格は、若手研究者が獲得することができる民間の研究助成や大学内の研究助成の金額で十分に賄えるものである。

フォトグラメトリに用いる基本的な機器は、カメラとパソコンのみであり、これは三次元計測を実施しなくとも海外調査で必ず利用する機器である。高性能なノートパソコンは、常用ノートパソコンと比較して大型になるが、運搬が困難なほどではない。また、パソコンはソフトウェアでの処理に使うものであるため、遺跡で調査する際の機器はカメラのみでよい。

以上のことから、予算と可搬性、本節冒頭でも述べた汎用性という点で、フォトグラメトリが個人や少人数での海外踏査に際して最適な計測方法であろう。遺物から遺構、地形まであらゆる対象をカメラのみで計測可能であること、機器とソフトウェアを一度揃えれば長期間運用可能であること、機器やソフトウェアの部分的な更新ができることなどは、まさに予算や人手の限られる個人や少人数での海外踏査という状況に合致している。

(3) モバイルスキャン

iPad Pro や iPhone Pro に二〇二〇年から LiDAR センサーが搭載されたことにより、モバイル端末による三次元計測を行うことができるようになった。また、LiDAR センサーを用いないフォトグラメトリアプリも増加しており、廉価で手軽な三次元計測として急速に普及している。これらは LiDAR スキャン、フォトグラメトリの手法に基づいたものであるが、モバイルスキャンとして確立されているため、本稿では別途取り扱うこととする。

前提として、モバイルスキャンは、精度や性能面で LiDAR スキャンやフォトグラメトリのソフトウェアに劣る。設置型レーザースキャンは一度に数十万〜数千万点の光線が照射されているが、iPad や iPhone の LiDAR センサーは一度に五七六点であり、その照射密度はかなり低い（モバイルスキャン協会二〇二二）。また、精度や品質を保つための照射距離も五 m と従来のレーザースキャンよりも短く、計測範囲が広くなるのに伴って精度が著しく悪化し、顕著な歪みが生じる傾向にある。これらの点から、広範囲のスキャンや小型の対象物の正確なスキャンは難しいといえる。フォトグラメ

トリアプリでは、処理可能な写真の枚数に制限があり、写真の枚数が少ないためパソコン上で行うフォトグラメトリに劣る場合が多い。同じフォトグラメトリを行うのであれば、iPhone で写真を多数撮影し、写真を Metascape や Realitycapture で処理した方が、より高精度、高精度な三次元モデルを作ることができるだろう。

しかしながら、モバイルスキャンは計測が容易且つ短時間で完了し、処理も数分から十分分程度で終わり、モバイル端末上で計測結果をすぐに確認することができるという利点がある。iPad であれば、三次元モデル完成後、三次元モデルが表示される画面のスクリーンショットを撮り、iPad 上で対象物の情報を書きこむ、といった作業がその場で可能である。モバイルスキャンでは寸法が三次元モデルに自動で付与されるため、対象物の寸法や観察の所見、番号などの様々な情報を現場段階で記録することができるのである。たとえば、筆者が所属する東京文化財研究所・文化遺産国際協力センターが実施したバハレーンにおけるイスラーム墓碑の三次元計測調査では、現代の墓地の中に位置するイスラーム時代の墓碑のおおまかな分布状況を記録するため、Scaniverse を利用してアブ・アンバラ (Abu Anbara) 墓地の一区画を

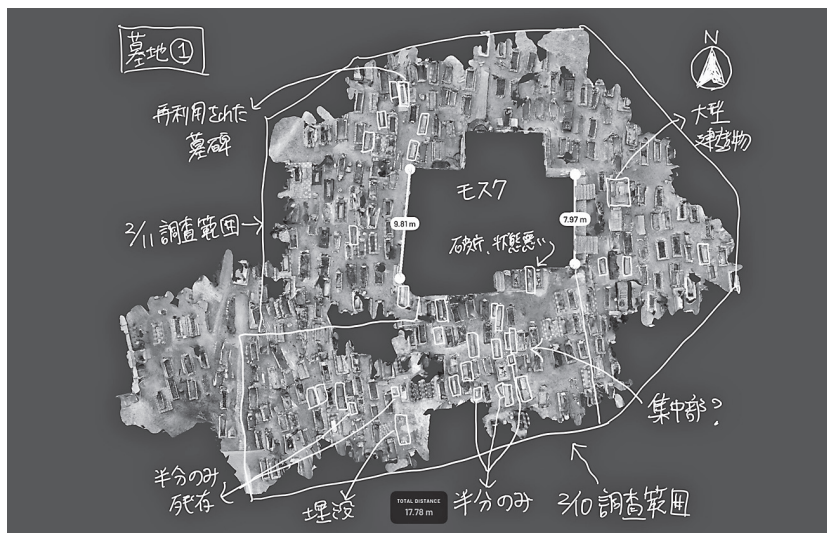


図2 画像へのメモ書きの例、アブ・アンバラ墓地（パハレーン）
（計測後 Scaniverse から出力し、iPad 上でメモ書きを行った）

計測した。個々の墓碑の計測が主目的であり、時間も限られていたためモバイルスキャンを利用した形になる。Large Object Areaコード⁽²⁴⁾は約30m×30mの範囲を十分程かけて計測し、六分程で処理が完了した。その後、前述のようにスクリーンショットをし、タブレットを片手に墓地を歩き、墓碑の位置や特徴的な状態などを記録した（図2）。帰国後、この情報と個々の墓碑の三次元モデルを合わせることで、墓碑の年代や形状と分布状況の関わりを検討することができた。

モバイル端末が小型・軽量であることから、開口部の小さい横穴式石室や横穴墓などで機動的に運用できる利点も指摘されている（野口ほか二〇二三）。加えて、小型・軽量なモバイル端末は日常的な利用にも共用できるものであり、常に持ち歩いていることでふとした瞬間にすぐ三次元計測を行えることもメリットである。筆者の場合、博物館の展示を見る際に寸法付きで情報が欲しい展示物をモバイルスキャンすることが多い。⁽²⁵⁾ 計測機器が日常で利用するモバイル端末であることは、操作が理解しやすいということにも繋がり、モバイルスキャンアプリのユーザーインターフェースが分かりやすいことも相まって、LiDAR スキャナー以上に操作性に優れている

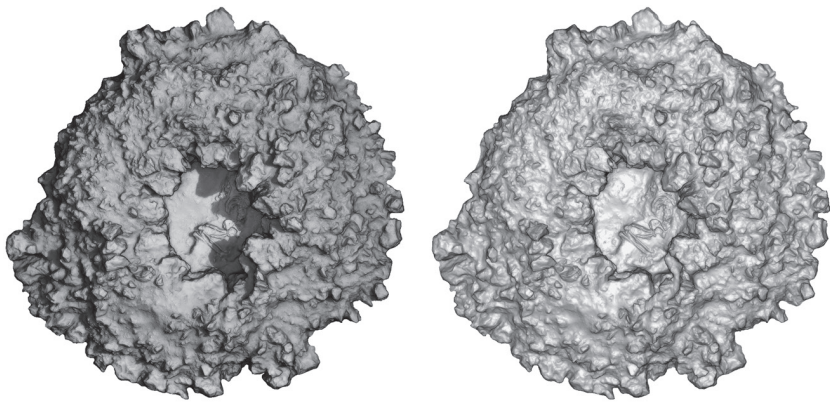
るといえるであろう。

また、冒頭で述べた精度に関して、LiDARセンサーや端末の性能から従来のLiDARスキャナー、フォトグラメトリソフトウェアに劣ることは事実であるが、十分に実用可能であるといえる。生成されたメッシュを見るとLiDARスキャナー、フォトグラメトリソフトウェアによって生成されるものとは異なり、粗いメッシュであることが理解できるが、iPadやiPhoneのカメラ性能が高いこともあり、テクスチャを貼った三次元モデルは明瞭で高精細なものが出来上がる。

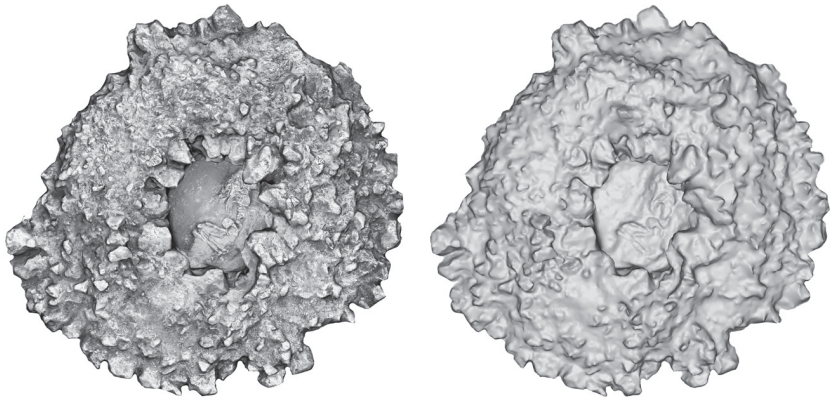
これに関して、筆者が参加したワーディー・アッサイル (Wadi al Sai) 古墳群 (バハレーン) の発掘調査で計測を行ったWS47号墓を例として実際に確認した⁽²⁶⁾。WS47号墓では石室内で解剖学的位置を保った人骨が出土したため、人骨のクリーニング後の段階で、昼頃にフォトグラメトリを行い、翌日の早朝、Scaniverseを用いてモバイルスキャンを実施した⁽²⁷⁾。生成された三次元モデルを見た目上で比較すると(図3)⁽²⁸⁾、テクスチャ付きモデルでは、両者に顕著な違いがみられないことが分かる。どちらも人骨の形状は明瞭であり、古墳の大小の石材も計測できている。拡大するとわずかに

Scaniverseの三次元モデルの方が人骨や石の輪郭がやや緩いといえる。コンパクトデジタルカメラで撮影した写真を元にフォトグラメトリを行っているため、両者の差が小さいということもあるが、この品質で計測できているのであれば記録としては十分で、手実測よりも得られる情報量は多いであろう。メッシュでは大きな違いが見られ、Scaniverseで生成されたメッシュは融けたような粗い形状になっている。ポリゴン数で比較すると、Metashapeで作成した三次元モデルは約二〇倍の数であった。細部の判断が難しい一方で、基本的な形状は計測できており、古墳全体や石室の形状はメッシュでも理解できる。以上のことから、遺構の場合に限るが、モバイルスキャンで得られる三次元モデルは、平面図や断面図への図化、形状の記録という用途に十分に利用することができるといえる。

モバイルスキャンに必要なものは、モバイル端末とアプリである。モバイルスキャンアプリは多数リリースされているが、Androidに対応していないアプリが多いため、iOSデバイスを推奨する。LiDARスキャンを行うのであれば、iPad Pro、iPhone Proを選ぶのがよい。なお、たとえばScaniverseではLiDARセンサーを有して



撮影機器・枚数	OLYMPUS STYLUS TG-3 Tough、196 枚
ソフトウェア	Metashape Proffesional
パラメーター	アラインメント：高、メッシュ：高、テクスチャ：8192×1
ポリゴン数・時間	ポリゴン数：910 万、撮影時間：13 分、処理時間：38 分



撮影機器	iPad Pro(12.9 インチ)(第 5 世代)
ソフトウェア	Scaniverse
パラメーター	Scan Type: Mesh, Size: Area, Processing: Detail mode
ポリゴン数・時間	ポリゴン数：45 万、撮影時間：約 5 分、処理時間：約 6 分

0 3m

図3 WS47 号墓（ワーディー・アッ＝サイル古墳群）計測結果の比較（左：テクスチャ付きモデル、右：メッシュモデルのオルソ画像。上図は安倍雅史氏が計測）

いないiOSデバイスとManyDepth技術を用いて計測が可能であり、⁽³⁰⁾LiDARスキャンよりは精度が落ちるが実用可能である。モバイルスキャンアプリはScaniverseやRealityScanなど無料のものが多く、特に必要な機能があるのでなければ無料のアプリで問題ない。ScaniverseやLumaAIは、三次元情報を表現する新しい手法である3D Gaussian SplattingやNeRF⁽³¹⁾に対応している。総じて、モバイルスキャンはモバイル端末の費用だけで実施することが可能であり、これまでの計測方法の中で最も廉価で取り回しやすい計測方法であるといえる。

個人や少人数での海外踏査におけるモバイルスキャンの使い道は二つあると考えられる。一つはモバイルスキャンを主な三次元計測手段にすることである。遺構はLiDARセンサーを活用したアプリ、遺物はフォトグラメトリアプリという使い分けを行えば、大半の対象物は計測可能であり、予算がかなり限られる状況であっても踏査を実施することが可能である。土器のハケ目や建造物に残る工具痕など微細な特徴をモバイルスキャンで捉えることは難しいが、たとえば分割して計測を行うなど、撮影と計測の工夫で補える。もう一つはフォトグラメト

リと補助的に活用することである。フォトグラメトリの欠点でもあるが、現場段階で三次元モデルを確認できないため、常に失敗のリスクがある。ソフトウェアの進化により近年失敗することも少なくなっているが、モバイルスキャンによってある程度の品質の三次元モデルを現場段階で作成することで、情報不足のリスクを軽減することが可能である。また、フォトグラメトリを行う時間がない時などにモバイルスキャンであれば短時間で計測することができる。必須ではないが、後者の活用法は筆者の推奨するところである。

本章では、LiDARスキャン、フォトグラメトリ、モバイルスキャンの概要を示しながら、個人や少人数での海外踏査で三次元計測を行う際に、どのような機器・ソフトウェアが適しているのかを検討してきた。まとめるとして、MetashapeやRealitycaptureを用いたフォトグラメトリが最適であり、必須ではないがその補助にモバイルスキャンを活用することで様々な状況に対応可能である。よって、次章からはフォトグラメトリに注目し、その根幹である写真撮影について述べていきたい。

3. フォトグラメトリにおける写真撮影

海外踏査は国内踏査と比較して頻繁に実施できるものではなく、一度の調査で自らの求める情報を漏れなく十分に記録する必要がある。この点で三次元計測は踏査に適した方法であるが、遺構や遺物の三次元計測を行う場合、三次元モデルに欠けや歪みがある、想定していた品質よりも粗い三次元モデルとなる、という三次元モデルの破綻や質の低下を防ぐことが求められる。高品質・高精度の三次元モデルを作るためには、写真の撮影方法とカメラ設定をよく考えるべきである。前者に関しては、フォトグラメトリに関する研究やマニュアルで多々言及されているが、後者について詳述されているものはこれま⁽³³⁾でほとんどない。よって、本章では主としてカメラ設定に注目し、遺構や遺物の三次元計測に適した写真撮影について述べる。

(1) 適切な写真の撮影方法

フォトグラメトリに用いる写真の撮影では、オーバーラップ率(写真の重なり具合)の高い連続した写真撮影を行うことが原則である。写真同士に共通する部分が少

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

なければ、カメラの位置・姿勢の推定やタイポインットの三次元座標の算出が難しいためである。オーバーラップ率は六〇%以上が推奨されているが、写真の四隅はレンズの歪みやボケの影響で信頼性が低く計算に利用されない場合もあるため、六〇%のオーバーラップ率の写真群であると、ソフトウェア上の処理ではそれを下回る可能性がある。撮影する際は七〇%〜八〇%のオーバーラップ率を意識した方がよい。連続した撮影に関しては、高いオーバーラップ率を保って撮影し続けていけば必然的にそのようになる。仮に前の写真に全く写っていない範囲で次の写真を撮影すると、オーバーラップ率は〇%となり、写真の連続が途切れることになる。このような場合、生成された点群が分離してしまう可能性がある。しかし、現在のフォトグラメトリソフトウェアは、連続的に撮影した写真から特徴点の移動を見出すオプティカルフローだけでなく、画像局所特徴量を利用した対応点探索も行われているため(織田二〇一六)、連続が切れた後に前の写真群と共通する部分を撮影すれば問題なく処理される場合が多い。

対象物とカメラの距離もオーバーラップ率に関係している。対象物とカメラの距離が近ければ、対象物をより

高精度に写すことができるが、オーバーラップ率を高く保つ必要がある以上、写真の枚数が増加することになる。反対に対象物とカメラの距離を離すことで、オーバーラップ率を安定して高く保つことができ写真の枚数を減らせるが、対象物から離れすぎると細部まで写真に写すことができない。生成された三次元モデルが想定よりも粗いという場合、対象物とカメラの距離が離れすぎていることが一因である。対象物とカメラの距離に関しては適正距離が定められているわけではないため、対象物の性格や求めるモデルの品質等に合わせて自ら決定すべきである。たとえば、土器のハケ目が詳細に判別できるほどの三次元モデルを作りたければ、ハケ目が明瞭に写真に写る距離（あるいはズーム率）で撮影を行うべきである。これまで述べてきた内容からも分かるように、写真に写っていない対象について三次元モデルを作ることとはできず、微細な痕跡が三次元モデルに表されるようにするためには、写真の段階で明瞭に検出できている必要がある。遺構の大まかな形状だけを要するのであれば、広い画角で撮影を行うことで撮影時間を短縮することが可能である。加えて、情報量の強弱をつけることもできる。たとえば、ある遺構について積み石が判別できる程度の三

次元モデルを作りたいが、石材に施される装飾は高精細な情報が欲しいという時には、装飾がある部分だけ接写を行うことで、両立が可能である。遺跡全体や広範囲の地形の三次元モデルを作りたい場合は、一脚や UAV⁽³⁴⁾ (Unmanned Aerial Vehicle) を活用し、さらに遠距離から撮影することで非常に短時間で広範囲の撮影を行うことができる。LiDAR スキャナーが搭載された UAV は高額であるが小型 UAV は廉価であり、個人や少数での海外踏査でも十分に利用できるものである。しかし、特に西アジアでは UAV の持ち込みや飛行自体が禁止されている国もあるため、事前に飛行禁止区域等も含めて確認しておくことが推奨される。

それ以外に撮影の際に注意すべき点としては、カメラの位置を変えて撮影すること、様々なアングルから漏れなく対象物を撮影すること、詳細は後述するが焦点距離を固定することなどが挙げられる。Meshape³⁵、RealityCapture ではアラインメント完了後、復元されたカメラの位置を表示することができるが、これまで述べてきた内容に従って撮影していれば、地表の遺構や遺物の場合、カメラがドーム状に対象物を覆うような結果となる。このように、フォトグラメトリのための写真撮影では、

計測者の判断に任せられる部分が多く、前述のように計測者によって結果に差が生じる可能性がある。一方で、撮影時に三次元モデルの品質をある程度コントロールできるということであり、習熟すれば情報の多寡や撮影時間などを計測者が自由に調整できるのである。

(2) スケールとGNSS測位

LIDAR スキャナーとは異なり、フォトグラメトリでは三次元モデルに自動で寸法が付与されない。タイプポイントの三次元座標というのはソフトウェア上の仮の座標であるため、別途寸法を付与する必要がある。最も簡易的な手段は、計測時に特徴的な箇所の長さを記録しておくことである。三次元モデルが完成した後に、ソフトウェア上の該当箇所に長さを入力すればモデルに寸法が与えられる。しかし、この方法では誤差が生じる可能性が高く、水平面が得られないため推奨される方法ではない。より精度の高い方法として、対象物の写真を撮影する際にスケールを配置し写し込む方法が挙げられる。遺構の場合は、アルミ製の標尺など厚みのあるスケールを遺構のそばに設置する。その際に水平器や計測アプリなどを用いてスケールを水平に設置するとよい。そして、遺

構の写真撮影をする際にそのスケールが映り込む写真を十分に撮影する。スケール自体が三次元モデルになるように撮影できるとよい。処理が完了した後は、ソフトウェア上でスケールにローカル座標を付与する。写真と三次元モデルのどちらでもよいが、スケールの四隅にポイントを打ち、スケールの寸法に合わせてXYZの数値を入力する。その際、Z（高さ）は0mなど同じ数値で合わせる。時間不足等によりスケールを設置しないまま撮影したという話を聞くこともあるが、とくに水平情報を三次元モデルに付与できると図化の際の明確な基準となるため、特段の理由がなければスケールを写し込んでおくことを推奨する。

室内での遺物撮影では、同様にスケールを利用しても良いが、各ソフトウェアで自動検出されるマーカーを使う方法もある。Metashapeであれば、「ツール」→「マーカー」→「マーカーのプリント」からマーカーデータを入手できる。マーカーはパネル等に貼り付け自作することになる。個別のマーカーを複数用意する場合やL字型にマーカーを配置したタイプは、持ち歩きやすく遺物の大きさに合わせて設置範囲を変更できるため汎用性が高い。一方で、個別のマーカーを用いる場合は、

定規や標尺などを用いてズレがないように注意して設置する必要がある。複数のマーカーが配置されたシートタイプであれば、設置時のズレの心配はほとんどないが、大型になるため可搬性の点で問題がある。自動検出のマーカーであれば精度が上がるということではないので、使いやすい方法を選択すればよい。

これまで述べてきた方法はローカル座標を三次元モデルに付与する方法である。遺物は必然的にローカル座標を付与することになるが、遺構の場合はGNS⁽³⁶⁾によって位置情報を与えることが可能である。ソフトウェア上の操作はスケールと同様であるため割愛するが、撮影前にベグや釘、標識によって三次元モデル上でも判別できる測定点を複数設置しておく必要がある。三次元モデルに位置情報を与えることで、GISとの連携やモデル上の任意の地点の座標を検出できるなど様々なメリットがある。データの活用を考えるとGNS⁽³⁷⁾によって位置情報を付与することが最適であり、GNS機器の小型化、RTK⁽³⁷⁾測位により、個人や少人数での踏査でも導入の実現可能性が高まりつつある。

(3) 撮影環境の整備とカメラ設定

ピントが合っていない写真や白飛び・黒つぶれが生じている写真、著しいノイズがみられる写真からは、特徴点を探索することが難しいため、タイポイントやテクスチャがうまく生成できないことがある。三次元モデルの形状と本来の形状に差異がみられたり、モデルが歪んだり欠けが生じてしまうのは、写真の質が悪いことに原因があることが多い。写真の質を高めるためには、撮影時の状況に合わせた撮影環境の整備とカメラ設定を行う必要がある。よって、本節ではいくつかの項目に分け、撮影環境の整備とカメラ設定について述べる。

撮影環境の整備

撮影環境の整備とは、端的に言えば遮光・補光することである。暗すぎず明るすぎない環境で撮影することで、余裕を持ったカメラ設定で撮影を行うことができる。遺物に関しては屋内撮影がほとんどであるため撮影環境を整備しやすい。まず、LEDライトやリングライト、外付けストロボなどで補光する。通常の遺物写真の撮影とは異なり、極力影が生じないライティングにするのがよい。環境光や室内灯を遮断し、LEDライトを複数用



図4 三脚と外付けストロボを活用した屋内撮影の例、サンヘドリンの墓（エルサレム）
（切削工具痕をブレなく写すため、部分的に三脚を活用した）

いた方がライティングを調整しやすい。撮影者が対象物の周囲を回り撮影するのではなく、遺物を回転させる方法が⁽³⁸⁾容易であり安定した撮影ができる。遺物はスケールや自動認識マーカーと共にターンテーブルに載せ、背景の余計なものが映り込まないように背景布を設置し、カメラは三脚に固定して用いる。このようなセットを組むことによって、同じ条件下での撮影が可能となり、カメラの手ブレも防ぐことができる。小さい遺物であれば、撮影ボックスの利用も可能である。海外調査の場合は簡易的な機材に抑えることで荷物の量を減らすことができる。複数のLEDライトではなく外付けストロボを用い、背景布はA3サイズのレフ版等で代用する。ソフトウェア側で対象物以外の静的な背景を除外する機能があるため、レフ版がなくとも問題はない。また、三脚に固定した方がよいが、ストロボの光量を上げればシャッタースピードを上げることができるため、手持ちでも撮影可能である。

一方で、遺構はその構造や立地、撮影時の季節・天候などによって様々に状況が異なるため、遺物よりも撮影環境を整えることが難しい。屋外では太陽光と影の影響が大きく、太陽が低い早朝や曇りの日など、まずは時間

や天候に気を付けるべきである。また、雨が降った後も遺構の濡れや水たまりの反射、質感の違いなどが生じるため避けた方がよい。とはいえ、踏査の際は遺跡までの移動に時間がかかり、最適な時間・天候の下で撮影をできるとは限らないため、対策を講じておく必要がある。

太陽光が強すぎる時は、調査協力者がいればシェードなどを張ってもらい、撮影箇所全体を日陰にすればよい。

人数がいなければ、太陽光によって作られる強い影の部分をストロボやLEDライトで照らすと、黒つぶれを防ぐことができる。この方法であると太陽光に照らされる場所と影になる場所での色の違いは生じるが、遺構の形状は写真に写し込むことができる。

また、たとえば横穴墓など屋内での撮影が必要な遺構も多い。屋内での撮影は光源に乏しい場合がほとんどであり、補光を考える必要がある。遺物撮影と同様にLEDライト、外付けストロボを用いるのがよいが、遺構の撮影では遺構の形状に合わせて自らが移動する必要があるため、カメラと完全に追従する外付けストロボを推奨する。遺構では撮影枚数も多いため、撮影する瞬間だけ光が出るストロボの方がバッテリーの点でも優れている。ストロボは内臓ストロボではなく、外付けストロ

ボを使う方がよい。外付けストロボは光量が多く、角度調整が可能（バウンスにより反射光を活用できる）であり、連続撮影可能枚数も多いためである。内臓ストロボは連続して撮影しているとシャッターが切れなくなってしまうが、外付けストロボは五〇〇枚以上は問題なく連続撮影可能である。三脚を利用する場合もあるが（図4）、撮影者が移動し撮影枚数も多いことから撮影の回転率が悪く、撮影時間が増加することには注意が必要である。手ブレについてはシャッタースピードを上げること、短めの一脚を撮影補助で取り付けることなどで対応するのが効率的である。

絞り値、シャッタースピード、ISO感度

撮影環境の整備を行っただうえで、カメラ設定を調整することで、より質の高い写真を撮ることができ。広い範囲にピン트가合っている、ピンボケしていない、白飛び・黒つぶれがない、ノイズが少ない、というのがフォトグラメトリに適した写真であるがこれを実現するために、カメラの基本的な設定である絞り値、シャッタースピード、ISO感度を調整する。絞りとはレンズ内にあるレンズを通過する光量を調整する機構であり、この光の

量を表したものを絞り値（F値）という。絞り値を大きくするとレンズを通る光量が少なくなり、小さくすると光量が多くなる。絞り値を小さくした方が撮影に適しているように思われるが、絞り値が小さいほど被写界深度が浅くなる、つまり写真がボケることになる。ボケが強い写真はフォトグラメトリに適していないため、被写界深度が深くなるように絞り値を大きくする必要がある。

また、絞ることでレンズの中心だけが利用されるため、ある程度絞った方が画質がよい。しかし、絞り値を極端に大きくしすぎると回折現象が生じ、画質を悪化させてしまうことになる（小絞りボケ）。レンズによって異なるが、F16辺りから顕著に画質が悪化していく傾向にある。一般にF5.6～F11の範囲が画質が良く、被写界深度のことも考慮するとF8～F11がフォトグラメトリには適しているといえる。ただ、奥行きがあり複雑な遺構の場合は、パンフォーカス（全体にピン트가合う）でボケをなくす方が、小絞りボケによる画質低下を回避するよりも対象物を鮮明に写すことができる場合があるため、画質低下を許容したうえでF16～F22に絞り値を設定することもある。

絞りを絞った場合、レンズを通過する光量が減少する

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

ため、それを補うためシャッタースピードを調整する。基本的にはシャッタースピードを遅くするが、遅くすることで手ブレが生じやすくなる。よって、シャッタースピードを遅くする場合は、前節で述べたように三脚を用いるとよい。三脚とLEDライトを用いた遺物撮影では、絞り優先モードに設定すればシャッタースピードが自動で調整され、適切な明るさの写真となる。遺構撮影を効率的に行う場合は手持ち撮影となるが、その際はシャッタースピードを速くする。焦点距離によって目安が異なるが、1/150以上であれば手ブレが生じにくい。一方で、F8、1/150の設定は屋外撮影では問題にならないことが多いが、屋内や暗所の撮影では光量不足となる。前述のようにLEDライトや外付けストロボで補光することが必須である。

絞りとシャッタースピードに加えて、ISO感度の調整によって光量を増幅させることができる。ISO感度とはレンズを通過してきた光を、カメラ内でどのくらい増幅させるかの数値であり、ISO感度を上げれば写真が明るくなる。しかし、電気信号を増幅させることで光の量を増やしているため、上げすぎるとノイズが生じ、画質が著しく低下する。遺物撮影ではISO100に固定して撮影

することを推奨する。遺構の場合は、ISO 100～800の間に抑えるとういが、どうしても光量不足となる場合はISO感度を高くすることも選択肢に入る。絞り値、シャッタースピード、ISO感度は合わせて調整するのがよいであろう。なお、遺構撮影では、場所によって光量が変わることが大半であり、撮影する場所に合わせてこれらの設定を変更するのもよいが、カメラ設定を固定してストロボやLEDの光量を調整した方が楽である。

焦点距離

焦点距離とはレンズの中心からイメージセンサーまでの距離を指す。前述の被写界深度はレンズの焦点距離でも決められ、焦点距離が短いほど被写界深度が深くなる。たとえば、二八―七五mmのレンズであれば、二八mmで撮影した方がピントの合う範囲が広いということである。

よって、フォトグラメトリでは、短い焦点距離で撮影を行う方がよい。また、焦点距離を変更できる望遠レンズよりも単焦点レンズの方が焦点距離が短くなる。望遠レンズはレンズ自体が複雑な構造で長く、それに伴い焦点距離が長くなるためである。同じ二四mmで撮影した場合、単焦点レンズの方が焦点距離が短いことになる。

単焦点レンズは開放絞り値が小さく明るい（ボケやすい）写真を撮りやすい、フォトグラメトリの場合は焦点距離が固定できるという点がメリットによく挙げられるが、焦点距離が短くなるという利点もある。フォトグラメトリソフトウェアでは三五mm換算で二〇mm～八〇mm範囲の焦点距離のレンズが推奨されている。筆者は二四mm（三五mm換算で約三八mm）のパンケーキレンズを主として利用しているが、遺物撮影ではマクロレンズが利用されることも多い。

また、焦点距離は撮影距離によっても厳密に言えば異なり、焦点距離を固定に近い状態にするには対象物との距離も一定に保った方がよい。ただ、セットを組んで撮影する遺物撮影ではほぼ一定の距離を保つことは容易であるが、遺構ではカメラを移動させる必要があるため、一定の距離を常に保って撮影することは現実的には難しいであろう。とはいえ、フォトグラメトリソフトウェアでは焦点距離が異なる写真、異なるカメラで撮影された写真でもアラインメントするため、焦点距離を固定するために撮影距離を一定にするということに、とくに遺構の場合は固執する必要はないと思われる。むしろ、撮影距離も被写界深度を決める要素であるため、そちらを考

慮した方がよい。撮影距離が遠くなるほど被写界深度が深くなるが、前述のように対象物との距離が遠くなると対象物の精細度が落ちる。両者のバランスを取りつつ、例えば接写する場合は絞り値を上げるなど、被写界深度を意識して撮影を行った方が、顕著に結果に違いが表れると考えられる。

ファイル形式

カメラ内の設定で記録する写真のファイル形式を選択することができる。カメラのセンサーが受け取るデータをそのまま記録するファイル形式がRAWファイルであり、カメラ内で圧縮され現像されたものがJPEGファイルである。RAWファイルは光の情報をそのまま記録したデータであるため、撮影後に画像編集ソフトでJPEGファイルやTIFFファイルに自ら現像を行う必要がある。この現像がRAWファイルの利点でもあり、露出やホワイトバランスを撮影後に劣化なく変更できる。JPEGは現像を行う必要はないが、不可逆圧縮方式で圧縮されたファイルであるため、画像編集と保存を繰り返すと画質が劣化していく。⁽³⁹⁾

撮影後に写真の編集を行うのであれば、RAWファイ

ルで編集を行い、非圧縮形式であるTIFFファイルに現像するのがよい。一方で、撮影時の条件により異なるが、RAWファイルはJPEGの二倍以上容量が大きい。同様にTIFFファイルも容量が大きく、三次元計測の回数が増えるほど三次元モデルと合わせてストレージを圧迫することになる。カメラの持つ映像エンジンの性能も近年向上しており、撮影後に写真の編集を行わないのであれば、カメラ内で現像されたJPEGファイルで十分であるともいえる。RAWファイルで保存すれば高画質になるというわけではないため、データ容量と撮影後に編集を行うかどうかという観点で考えた方がよい。筆者は遺構の三次元計測を行うことが多いが、一つの遺構あたり約一五〇〇〜二五〇〇枚ほどの写真を撮影する。RAWファイルとTIFFファイルであるとかかなりの容量となり、それに伴ってフォトグラメトリソフトウェアの処理時間も増加するため、JPEGファイルで記録することが多い。なお、撮影の際は編集が必要ない適切な明るさになるように気を付けて撮影をしている。RAW現像であっても手ブレやピントは修正できないため、撮影時にカメラ設定を適切に調整するというのはJPEGファイルであってもRAWファイルであっても変わらないといえる。

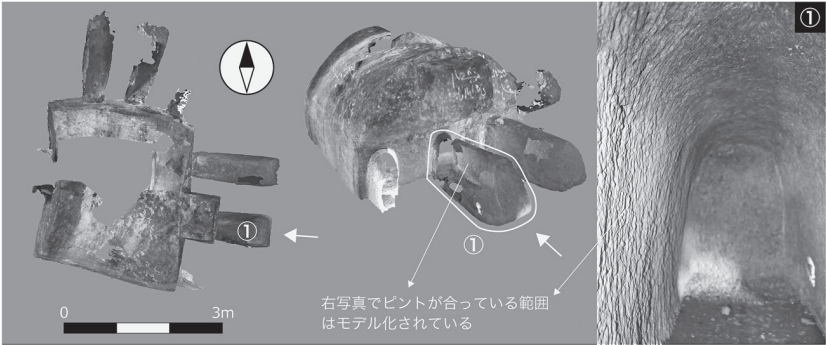
なお、遺物撮影では、写真の色を目で見ている色味に近づけるためホワイトバランスを調整することが多い。ホワイトバランスを調整したい場合、グレーカードと対象物を写しその写真を元にRAW現像時に全ての写真のホワイトバランスを補正するため、RAWファイルで撮影することが必須である。RAWファイルに加えて、JPEGも保存すると現像前に写真の確認が可能である。

フォーカスや逆光時の撮影など、まだ触れていない項目もあるが、本節で挙げた項目を意識して撮影することで写真の質が高まり、生成される三次元モデルの質も満足いくものになると考えられる。繰り返しになるが、フォトグラメトリはソフトウェア上の設定・操作ではなく写真の質が最も重要であり、写真の撮影にこそ注力すべきである。屋外撮影であればオート撮影でもうまくいくことが多いが、絞り値、シャッタースピード、ISO感度を調整するだけでもより品質の高い三次元モデルを生成することができる。

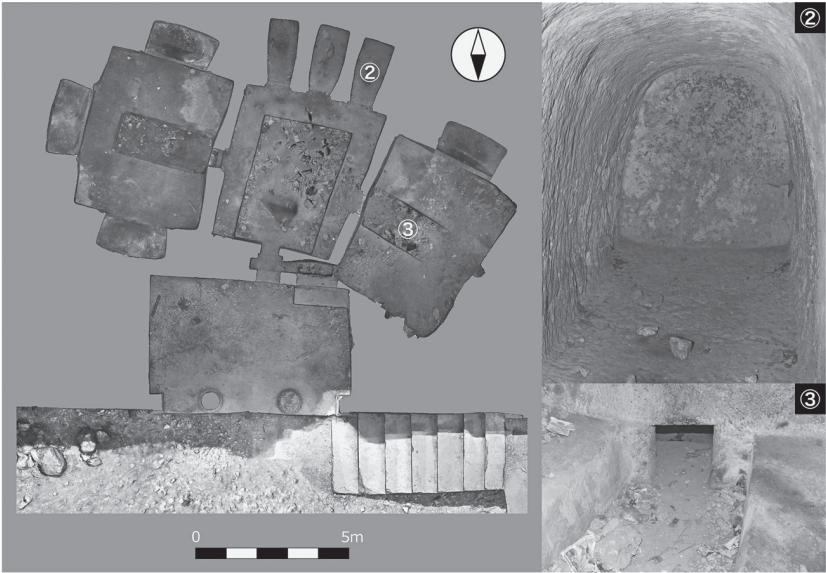
(4) 写真撮影の最適化による三次元モデルの違い
本節では、カメラの知識がほとんどない状態で撮影した写真・三次元モデル、前節で述べた内容を踏まえ撮影

した写真・三次元モデルを比較し、写真撮影の最適化による影響を検討する。図5で示したように、筆者が作成した三次元モデルから比較対象となり得るものを選択した。なお、どちらも現在のMetashapeで再度処理を行い、アラインメント中、メッシュ中、テクスチャ8192×2の設定で統一した。前者は筆者が二〇一八年に実施したパレスチナ自治区における墓地の踏査(長尾二〇二三)で作成した三次元モデルである。計測対象はアブード(Aboud)(パレスチナ自治区)に位置するローマ時代の横穴墓である。フォトグラメトリのための写真撮影、Metashapeの利用も初めてであり、前節で述べた内容をほとんど満たしていない。後者は筆者が二〇二三年に行ったパレスチナ自治区における墓地の踏査(長尾二〇二四)で作成した三次元モデルである⁴⁰⁾。計測対象はカラワット・バニ・ハサン(Qarawat Bani Hasan)(パレスチナ自治区)の墓地に位置するデイル・エッ・ダルブ(Deir ed-Darb)の墓と呼称されるローマ時代の横穴墓である。この計測を行うまでに既に数十回以上の三次元計測を経験しており、本稿で述べた撮影方法・カメラ設定と同様の方法で計測している。

アブードの横穴墓の三次元モデルは、欠けがないモデ



遺跡名・調査日	Tomb1, アブード／2018年8月14日	絞り値	F3.5
撮影機器・枚数	Canon EOS Kiss X7、EF-S18-55mm(レンズ)、68枚	シャッタースピード	1/60
撮影環境等	LEDライト不使用、一部の写真に内蔵ストロボを使用。オートモードで撮影。玄関部を共有する Tomb2 とは分割して撮影。	ISO 感度	1600
		焦点距離	29mm



遺跡名・調査日	デイル・エッ・ダルブの墓／2023年8月8日	写真	②	③
撮影機器・枚数	Canon EOS 90D、EF-S24mm(レンズ)、1985枚	絞り値	F5.6	F10
撮影環境等	墓内の写真は全て外付けストロボを使用。屋外は影がある場所で利用した。マニュアルモードで撮影。	シャッタースピード	1/125	1/125
		ISO 感度	100	400

図5 撮影方法・カメラ設定による三次元モデルの違い
(図中の平面図はオルソ画像、デイル・エッ・ダルブの墓は天井をカットしたもの)

ルを作るという点では失敗している。対象とした横穴墓はロクリ (Loculi) と呼ばれる遺骨や石棺を安置する壁龕を持つことが最たる特徴であるが、六本あるうちの二本はモデル化できておらず、他の四本のロクリにも欠けがみられる。また、入口や床、天井は完全に穴が開いてしまっている。失敗の要因として、まず撮影方法が不適切であったことが挙げられる。遺構の大きさに対して撮影枚数が68枚と明らかに不足しており、それゆえにオーバーラップ率が十分ではない。対象物とカメラの距離を離して撮影していれば、少ない撮影枚数であつてもここまで欠けることはなくモデルを作ることができると、この撮影では近い距離で撮影をしているためオーバーラップ率が足りていないのである。もう一つの要因は、カメラ設定である。二〇一八年当時は補光なしのオートモードで撮影していたため、絞り値がF35、シャッタースピードが1/60、ISO感度が1600と本稿で述べた設定の真逆に自動で合わさっている。それゆえに、被写界深度が浅くピントが写真の一部にしか合っていない、シャッタースピードが遅いことにより手ブレが生じている、ISO感度の数値が高いことによりノイズがみられる、という問題がほぼ全ての写真にみられる。たとえば、図5

の①の写真では、ロクリ左壁面の最も手前側にのみピンが合っており、それより右側はボケていることが分かる。ロクリのように開口部、横幅が狭く奥行のある構造は、オートモードの撮影では難しいことがこの例から理解できる。

一方で、写真の中でわずかにピントが合っている部分や開口部から入る自然光に照らされていた場所（壁際など）は、アライメントが成功し三次元モデル化されている。図5で示したように、写真のピントが合っている部分とモデル化されている部分は概ね対応している。このように、写真のピントがあっている、手ブレがないということは処理結果に大きく影響するのである。興味深い点として、ただ撮影しただけの少数の写真であってもある程度の質の三次元モデルは完成するということが挙げられる。アブードの横穴墓は翌年にLEDライトを用いて再度計測を行い完全な三次元モデルを作ることができたが（長尾二〇二三）、二〇一八年の三次元モデルのモデル化できている部分はこのモデルと一致していた。平面図や断面図を最終的に作る図化のための計測であれば、かなり少ない撮影枚数であっても正確な形状を計測できることがこの例から伺える。



図6 テクスチャ表示での三次元モデルの比較
左：アプードの墓 右：デイル・エツ・ダルブの墓

対して、デイル・エツ・ダルブの墓は、アプードの墓よりも大型・複雑な横穴墓であったが、モデルに欠けが生じることもなく完全な三次元モデルを作ることができている。撮影枚数が多く、十分なオーバーラップ率を確保できていたことが、成功の要因の一つであるといえる。とくにロクリや各部屋の入口などは集中的に撮影を行うことで、部屋が分離したりロクリが欠けてしまったりというのを防ぐことができた。また、外付けストロボを用い適切なカメラ設定のもと撮影を行うことで、手ブレやピンボケ、被写界深度が浅い写真をほぼなくすことができたことがもう一つの要因である。図5の②の写真は、奥行のある構造であるとストロボの光が手前に強く当たり白飛びしやすいため、ストロボの光を弱めて撮影したものである。パンケーキレンズの使用とやや遠くからの撮影で十分な被写界深度の深さが確保されたため、絞り値をF5.6とした。写真を見て分かるように、ロクリの手前から奥までピントが合っていることが分かる。それ以外の場所は、図5の③の写真のようにパンフォーカスで撮影を行い、写真に写るほとんどの場所にピントを合わせることができている。撮影した写真のほとんどが適切であることで多くの特徴点を探索することが可能となり、

十分な数のタイポイントが生成されるということがこの事例からは理解できる。

生成されたテクスチャを比較しても同様に差はみられる。アブードの墓はピントが合っていない写真から作られていることでテクスチャがぼやけており、デイル・エツ・ダルブの墓はピントが合った写真を元に行っているため鮮明なテクスチャである(図6)。テクスチャの質はソフトウェア上の操作では向上させることはできず、見た目の品質を向上させるためにも適切な写真撮影は重要である。

4. 個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用—パレスチナ自治区の事例から—

これまで三次元計測に用いる機器・ソフトウェアの選定、フォトグラメトリにおける実践的な写真撮影に関して述べてきた。各章で筆者が実施・参加した調査で記録した三次元モデルを例示してきたが、本章では筆者個人で行っているパレスチナ自治区における踏査の事例から、三次元計測の具体的活用について述べる。

(1) ローマ時代の墓地における三次元計測

筆者がフィールドとするパレスチナ自治区は、イスラエルと比較して調査報告数が著しく少なく、イギリス委任統治時代やそれ以前に行われた踏査(Conder and Kitchen 1881-1883)以来、情報が更新されていない遺跡が大半である。近年、過去の踏査に加えてイスラエルの研究者による踏査(Magen 2008)が実施されているが、両者とも遺構の記録にスケッチを用いているため正確な測量がなされておらず、分布調査も十分に行われていない。また、情報の取捨選択がされることもある。

たとえば装飾された玄関を持つ墓では、装飾のある玄関が重点的に記録され、墓の内部は省略や単純化された形で記録されることが多い。加えて、墓地全体でみると、装飾のある墓以外はそもそも記録されないなど、情報の不足も目立つ。筆者は、ヘレニズム〜ローマ時代(前二世紀〜後四世紀)におけるユダヤ人の埋葬を主な研究対象としているが、当時のユダヤ人居住域はイスラエルとパレスチナ自治区に現在では分かれており、後者の情報が不足しているということが研究を進めるうえで大きな問題であった。

さらに、本稿の冒頭でも述べたように、パレスチナ自

治区の遺跡は盗掘や開発により損傷を受け続けており、正確な記録がなされないまま情報が失われている状況である。中でも墓地は盗掘の主な対象となっており、大半の墓が盗掘され副葬品を有していないため、墓の年代推定を行うことが難しい。とくにユダヤ人の墓は同一の型式がヘレニズム時代（ビザンツ時代（前二世紀）後七世紀）にかけて利用されているため、副葬品がない墓の年代を墓の型式から限定することは困難である。近年の調査事例の蓄積により、入口と墓内の構造やファサードの装飾によって年代を限定できる可能性が出てきたが、前述のような情報の取捨選択が行われた調査成果をそのまま活用することはできず、墓の内部の情報が省かれている事例が多いことも課題であった。

このような状況から、盗掘された墓の資料化が必要であると考え、パレスチナ自治区（とくにヨルダン川西岸地区・エルサレム以北）で盗掘された墓を対象とした踏査を行うこととした。その際には、①墓の内外を正確に計測するため、②計測の労力・時間を削減するため、③手実測では得られない微細な痕跡を記録するため、といった理由で三次元計測を計測方法として選択した。パレスチナ観光・遺跡庁の協力のもと、二〇一八年から踏査

を開始し、これまでに二〇一九年、二〇二三年の計三回、パレスチナ自治区の墓地における個人踏査を実施している（長尾二〇二三、長尾二〇二四）。

本踏査では墓の形状だけでなく、壁面や装飾を加工する際の切削工具痕を記録するため、多量の写真撮影を行った。前述のデイル・エツ・ダルブの墓では一九八五枚（所要時間一時間半）、二〇一九年に再計測を行ったアブードの墓では一五七九枚（所要時間二時間）、二〇二三年に計測を行ったエルサレムのサンヘドリン（Sanhedrin）の墓では一六六九枚（所要時間三時間）である。いずれも長時間の計測であったが、手実測をはるかに上回る速度で計測が完了した。また、完成した三次元モデルからは、墓の詳細な三次元形状、切削工具痕、壁面のフレスコ画の残存範囲等の三次元情報、二次元情報である任意の位置の平面・断面・立面のオルソ画像など、手実測とは比べものにならない程の多量の情報を得ることができた。たとえば、同じ墓の平面図一枚、断面図二枚、立面図一枚を手実測で計測したならば二日以上は要すると考えられ、それに含まれる情報量は三次元モデルよりも圧倒的に少ない。また、高さ四m以上の装飾された玄関を有する墓（図7）も計測したが、このような墓の場



図7 サンヘドリンの墓（エルサレム）玄関、メッシュモデルのオルソ画像

合正確な図面を作るのであれば足場などを組む必要があるだろう。墓地の踏査では個々の墓の計測以外にも、墓地の規模や周辺遺構の性格を明らかにする分布調査、墓地内での遺物の表面採集、墓地を有する町・村の住民への聞き取り調査、など行うべきことは多く、個々の墓の計測に要する時間を計測結果の質を向上させながら削減できたことで、踏査全体で得られる情報が増加した。

また、墓の三次元モデルからは様々な情報を読み取ることが可能であった。一つは墓の精巧さである。とくに装飾された入口を持つ大型墓では左右対称性が重要視されており、当時の中心地であったエルサレムの大型墓はほとんどが玄関から墓の奥までが一直線で繋がる精巧な造りであった。二〇二三年の踏査では、エルサレムのサンヘドリンの墓、ヤソン (Jason) の墓の三次元計測を行ったが、この点を改めて確認できている。一方で、パレスチナ自治区の墓は、図5で示したように墓全体が傾いており、歪んだ造りとなっていた。過去の踏査ではパレスチナ自治区の大型墓は左右対称の精巧な墓であるようにスケッチされていたが、三次元計測を行うことで正確な形状が明らかとなった。もう一つは墓の切削工具痕である。横穴墓は石灰岩質の岩盤に造られており、墓の

壁には岩盤を削った跡が残っている場合がある。このような切削工具痕はこれまでの図面では記録されてこなかったが、三次元計測を行うことで墓の壁面全てに関して記録することができた。これらの墓の精巧さと切削工具痕については、年代が明らかかな墓を含めた三次元データの蓄積がさらに必要ではあるが、盗掘された墓の年代決定の指標となる可能性がある。とくに前者に関しては、それ以外の墓の内部構造や装飾の類例などから一世紀後半～二世紀頃の特徴であると推定された（長尾 二〇二四）。

踏査で得られた三次元データは研究に資するものであると同時に、成果の証明や公開、踏査の円滑化にも活用可能であった。近年、三次元データを公開・販売できるプラットフォームである Sketchfab⁽⁴²⁾ が個人研究者や博物館、研究所で利用されており、筆者も本踏査で得られた三次元モデルを公開している⁽⁴³⁾。その役割としてまず成果の証明が挙げられる。たとえば、前述の装飾された玄関を持つ墓のスケッチは、書籍内では平面図と書かれていた。さらにいえば、単純化という点は読み解くことができたが、情報の省略と平面図がスケッチである点を実際にその墓を現地で見えて気づいたことである。つまり、そ

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

の墓を見たことがない第三者は、平面図がどのような方法で作られたもので、どれほどの精度であるのかということ来判断し、再検証することができないのである。これはこの墓に限ったものではなく、手実測全体に関わる問題であるといえるだろう。一方で、三次元モデルはこれが可能である。論文や書籍に掲載するためには三次元モデルをオルソ画像やトレースした図面という形に図化することになるが、その元となった三次元モデルを Sketchfab に公開することで、オルソ画像や図面の証明とすることができる。また、三次元モデルの元となる写真も公開すれば、同じソフトウェアを利用することで第三者が三次元モデルを再生成し検証することが可能となる。もちろん三次元モデルが改変可能なデジタルデータであることには留意しなければならないが、手実測の図面と比べれば証明や検証が容易であることは明らかである。

また、Sketchfab を利用することで調査成果の公開もこれまでにない情報量で行うことができた。考古学者は平面図、断面図、立面図の組み合わせで、頭の中で対象物の三次元形状を認識しているが、筆者でも専門外の地域の遺構などは図面や写真だけでは理解できない場合が

ある。Sketchfab に三次元モデルをアップロードするためにはポリゴン数を削減し容量を減らす必要があるため、そのままの三次元モデルをアップロードできるわけではないが、それでも三次元情報は情報公開の形として非常に理解しやすい形である。標準の機能として Sketchfab を介して AR・VR を利用できるため、実際に現地に行ったような体験を容易に提供できることも利点である。

また、筆者は踏査の成果を報告した際の内容の一部について、Sketchfab の注釈機能を利用して三次元モデル上に情報を書き込んでいる。これは前述の成果の証明とも関わるが、墓の年代推定の基準となった構造やその類例、判断の根拠等の情報を三次元モデルと合わせることで、研究の結果だけでなく過程も公開可能となり、第三者が判断することができ形で情報公開を行うことができるようになった。

Sketchfab に三次元モデルをアップロードすることで、通信環境が整っていれば、モバイル端末で三次元モデルを閲覧することができる。この点は踏査で墓地や墓を探索する際に有用であった。パレスチナ自治区ではその存在だけが過去の踏査で報告されている墓地も多く、墓地を有する町や村に着いてから墓地を発見することに一定

の時間を要していた。そこで町や村に着いてから住民に聞き取りを行っていたが、図面や古い白黒写真では伝わらないことが多かった。しかし、Sketchfab にアップロードした類似する墓の三次元モデルを iPad で見てもらうことを二〇二三年の踏査から始めたが、こちらが探している墓のことが適切に伝わり、場合によっては隣接する別の村の墓を教えてもらうこともあった。墓や墓地というと現在の墓地に案内される場合が多かったことを踏まえると、僅かなことながら踏査が円滑になったといえるであろう。同様の役割はモバイルスキャンでも果たすことが可能である。

(2) ナブルスのグレートモスクにおける三次元計測
最後に特殊な状況下で行った三次元計測の事例を紹介したい。二〇二三年の踏査ではパレスチナ自治区の大都市であるナブルスの西に位置するザワタの墓の三次元計測を行った。ザワタの墓はパレスチナ観光・遺跡庁が緊急発掘調査を行った墓であるが、墓の実測と遺物の整理が行われていなかったため、墓と出土遺物である石棺の三次元計測を実施した。その際に同行したパレスチナ観光・遺跡庁のスフィヤン・イダイス氏 (Sufyan Idais)

より、ナブルスに位置するグレートモスクの三次元計測を依頼され、墓の計測と合わせて行うことになった。

グレートモスクはナブルスで最古・最大のモスクであり、元はビザンツ時代の教会堂であった建造物である。

初期イスラーム時代にはビザンツ時代の教会堂からモスクへと改築され、十字軍時代にはモスクから教会堂へと戻された。そして、アイユーブ朝時代にはまたモスクへと改変され現在に至る。このような増改築を繰り返したことからグレートモスクには様々な時代の建築様式・技法がみられ、ナブルスの歴史を考えるうえで重要な遺構であるといえる。一方で、グレートモスクの測量調査はこれまで行われておらず、パレスチナ観光・遺跡庁からは、おおまかな平面図を作ることができるような三次元モデルが欲しいとの要望があった。

筆者らがグレートモスクに到着した際は、多数のイスラーム教徒が礼拝をしており、人が動き回る中で写真の撮影を行う必要があった。これはグレートモスクが放棄された遺構ではなく、今もなおイスラーム教徒に利用されているモスクであるためである。筆者もこのような状況で撮影を行うことは初めてであったが、LIDAR スキャナーとは異なり一定時間継続して計測を行う必要がな

いため、フォトグラメトリであれば可能であると判断した。また、グレートモスクは約七〇m×一二mと巨大なモスクであり、当日中にもう一つのモスクの計測も予定していたため、写真の枚数を抑えてモスクの全体形状が理解できる程度の三次元モデルを目指し撮影を行った。

計測結果は図8に示した通りである。実際のモスクでは多数の人々が礼拝していたが、礼拝が終わった瞬間や移動を見計らい、極力人が存在しない状態での写真を撮影した結果、モスクの形状を記録することができた。また、撮影枚数は一三・一六枚とモスクの大きさと比較して少ないが、柱や柱頭を歪みなく三次元モデル化できた。本事例から、フォトグラメトリは今も利用されている建造物や観光地など人の多い場所での計測に向いているといえる。フォトグラメトリの撮影では、計測者の撮影方法次第で人や動物などの動体を避けることができるのである。とくにイスラエル／パレスチナ自治区は教会堂やモスク、修道院など現在も利用されている宗教施設が多く、フォトグラメトリの活用が期待される。このような宗教施設や観光地化されている遺跡は、これまでに正確な記録が行われているようで、実際は不正確な計測しか記録が存在しないという事例も多く、三次元計測によつ

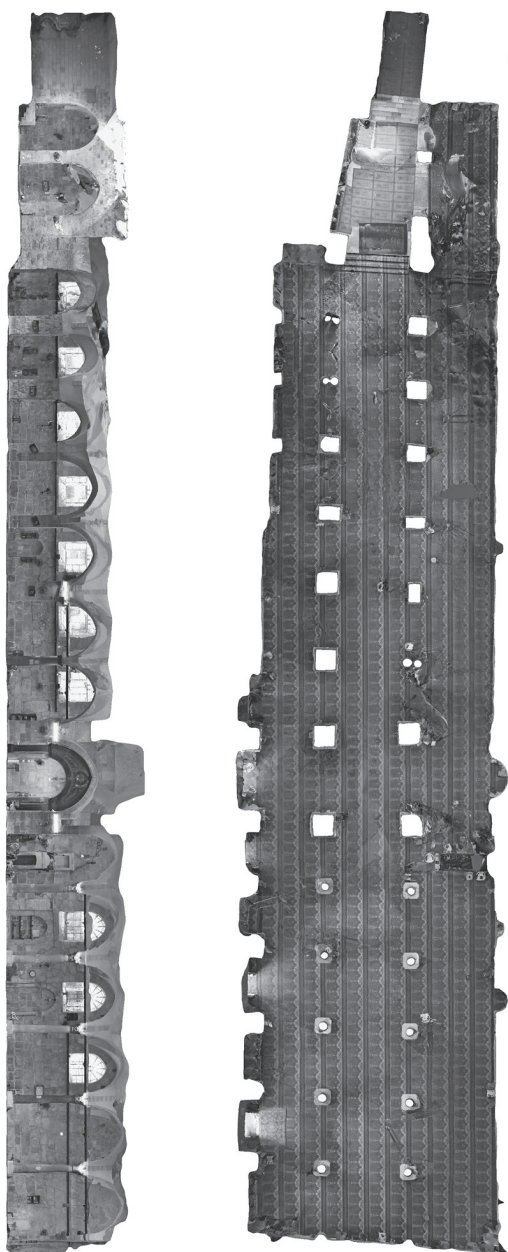


図 8 グレートモスク (ナゾルス) の平面図と南壁立面図 (オルソ画像)

てそれらの再調査を行うことは重要であると考えられる。

5. おわりに

以上、個人や少人数での海外踏査で三次元計測を活用する際の、計測機器・ソフトウェア、フォトグラメトリに用いる写真の適切な撮影方法、三次元計測の具体的な活用方法について、実例を交えながら紹介・検証してきた。三次元計測は比較的容易な計測方法ではあるが、自らの踏査に適した機器・ソフトウェアを選定し、たとえばフォトグラメトリの場合はその根幹となる写真の適切な撮影方法を把握し実践することで、低コストでより正確な計測を実施できるのみならず、研究や情報の公開・還元に新しい展開をもたらすことができるということを示せたと考えている。

三次元計測の発達に伴い、三次元モデルを考古学的研究に具体的に取り込む研究事例も増えてきている。本稿で触れたように、筆者も三次元計測でしか記録することができない微細な切削工具痕や墓の精巧さによって、盗掘された墓を資料化することに取り組んでいる。三次元モデル自体を分析・解析する研究が増えていくことは好ましいことではあるが、それらが真価を発揮するために

は、より三次元データの蓄積が進んでいく必要があると考えられる。現在の一般的な記録・公開手段である図面のように、自らが調査していない遺跡の三次元モデルを容易に閲覧・利用できるようになれば、その成果はある特定の遺跡やプロジェクトに限定されたものとなってしまうであろう。

とはいえ、三次元データの蓄積は一人の研究者でどうにかできるものではなく、三次元計測を用いた調査自体が増加していかなければならない。本稿の冒頭でも述べたように、三次元計測により考古学的調査の敷居は下がっており、とくに若手研究者が果たす役割が大きくなっていると思われる。今後、若手研究者が自ら企画立案した踏査を実施し、三次元データの蓄積に寄与していくことを期待する。

参考文献

- Alby, E., Elter, R., Ripoché, C. and Quere, N. 2013, Close Range Photogrammetry Applied to the Documentation of an Archaeological Site in Gaza Strip, Palestine, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W2, 19-24
- Banning, E. B. 2002, *Archaeological Survey*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.

- Conder, C.R. and Kitchen, H. H. 1881-1883, *The Survey of Western Palestine: Memoirs of the Topography, Orography, Hydrography, and Archaeology*, London.
- Göttlich, F., Schmitt, A., Kilian, A., Gries, H. and Badreshany, K. 2021, A New Method for the Large-Scale Documentation of Pottery Sherds Through Simultaneous Multiple 3D Model Capture Using *Structure from Motion*: Phoenician Carinated-Shoulder Amphorae from Tell el-Burak (Lebanon) as a Case Study, *Open Archaeology*, 7 (1), 256-272.
- Kaneda, A., Nakagawa, T., Tamura, K., Noshita, K. and Nakao, H. 2022, A Proposal of a New Automated Method for SfM/MVS 3D Reconstruction through Comparisons of 3D Data by SfM/MVS and Handheld Laser Scanners.
- Magen, I. 2008, *Judea and Samaria: researches and discoveries*, Staff Officer of Archaeology, Civil Administration for Judea and Samaria: Israel Antiquities Authority, Jerusalem.
- McCown, C. C. 1947, *Tell en-Nasbeh. Excavated Under the Direction of the Late William Frederic Bade, Vol. 1: Archaeological and Historical Results*, Palestine Institute of Pacific School of Religion and American Schools of Oriental Research, Berkeley and New Haven.
- Pepe, M., Alfio, V. S. and Costantino, D. 2022, UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field, *Applied Sciences*, 12(24), 12886
- Qureshi, A. H., Alaboul, W. S., Murtyoso, A., Saad, S. & Manzoor, B. 2022, Comparison of Photogrammetry Tools Considering Rebar Progress Recognition, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2022, 141-146.
- Watanabe, N. 2017, *Booklets for Protection of Syrian Cultural Heritage Vol. 1 Photogrammetry for Cultural Heritage*, University of Tsukuba, Ibaraki.
- 石井淳平 二〇一三年 「一人でもフィールドワーク〜iPad LIDARを利用した地形計測〜」『デジタル技術による文化財情報の記録と活用5』奈良文化財研究所研究報告三三〇 四三―四八頁
- 織田和夫 二〇一六年 「解説: Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とポイント調整」『写真測量とリモートセンシング』五五 (三) 一〇六―一〇九頁
- 金井 理 二〇一一年 「SfM-MVS 技術の動向」『写真測量とリモートセンシング』六〇 (三) 九五―九九頁
- 飛田幹男・神谷泉・中壱貴元 二〇一四年 「無人機による西之島地形計測の高精度化」『国土地理院時報』一二五 一四五―一五四頁
- 長尾琢磨 二〇一三年 「ラマッラー・ナブルス間 (パレスチナ自治区) における墓地の考古学的踏査」『西アジア考古学』二四 (六一) 七五頁
- 長尾琢磨 二〇一四年 「ローマ時代ユダヤ人の離散状況―ラマッラー・ナブルス間 (パレスチナ自治区) における分

布調査(二〇二三年)』『第31回西アジア発掘調査報告会
報告集』五六—六〇頁

中野一也 二〇一六年 「解説: Structure from Motion (SfM)

第三回 SfM による三次元形状復元ソフトウェアについて」『写真測量とリモートセンシング』五五(五)、三三—
三三—四頁

仲林篤史 二〇二三年 「Sketchfab に公開する3Dモデル
の魅力的な見せ方」『デジタル技術による文化財情報の記
録と利活用5』奈良文化財研究所研究報告三七、五八—六
九頁

中村亜希子 二〇二二年 「SfMによる計測方法につ
いて」『3次元データによる瓦の同范認識技術の基礎的研
究』独立行政法人国立文化財機構 奈良文化財研究所、一
—二八頁

西山伸一・常木晃・渡部展也・辰巳祐樹 二〇一七年 「西
アジアのテル型遺跡に関するフィールド調査の技術的革新
と展望: イラク・クルディスタンの調査事例から」『西ア
ジア考古学』一八、九九—一六頁

野口 淳 二〇二〇 「3次元データの可能性—活用と課題
—」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用2』

奈良文化財研究所研究報告二四、五九—七〇頁

野口 淳 二〇二三年 「文化財3次元データ概論 2022」
『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用5』奈良
文化財研究所研究報告三七、一—三頁

野口淳・中島将太・高木翼郎 二〇二三年 「モバイルスキ
ャンによる迅速な遺構計測と埋蔵文化財調査への効果—東

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

京都小金井市平代坂横穴墓の事例」『デジタル技術によ
る文化財情報の記録と利活用5』奈良文化財研究所研究報
告三七、三三—三九頁

布施孝志 二〇一六年 「解説: Structure from Motion (SfM)
第二回 SfM と多視点ステレオ」『写真測量とリモートセ
ンシング』五五(四)、二五九—二六二頁

モバイルスキャン協会 二〇二三年 「モバイル端末による
デジタルアーカイブ手法と利活用」『デジタル技術による
文化財情報の記録と利活用5』奈良文化財研究所研究報告
三七、一四—一八頁

山口欧志 二〇二二年 「異なるフォトグラメトリ実行プロ
グラムで構築した瓦の三次元モデルの比較」『3次元デー
タによる瓦の同范認識技術の基礎的研究』独立行政法人国
立文化財機構 奈良文化財研究所、二二—二六頁

渡部展也 二〇二三年 「農業集落としてみた十字軍時代の
ベイティン遺跡(パレスチナ自治区)―農業・水利関連施
設の分析と考察から」『史学』九二(一/二)、三五—六七
頁

註

(1) 考古学的な踏査は発掘調査の第一段階として行われる
ことも多いが、それ自体が主要な調査方法でもある。パ
ニングによれば、踏査の範囲は多岐に渡り、地域全体で
遺跡や遺物を見つける可能性を高めるサンプリング調査、
現代の地表面の明確な特徴や人工物の目視調査、リモー
トセンシング技術による地下探査などが含まれる(Ban-

ning 2002, 1)。本稿では発掘調査の第一段階ではない遺跡の表面的調査を踏査と定義する。

(2) たとえば、ラマッラーに位置するテル・エン・ナスベの墓地は一部の発掘が行われたが (McCown 1947) 、開発により全て破壊されたため墓地は現在見つからない。

(3) Light Detection And Ranging または Laser Imaging Detection And Ranging の略称。近赤外光や紫外線を利用して対象物に光線を照射し、その反射光から対象物との距離や状態を測定する技術。

(4) Structure-from-Motion (SfM) は、撮影した複数の写真から、カメラの位置・姿勢推定を行い、疎な三次元点群 (タイポインント) を生成する手法。Multi-View-Stereo (MVS) は、多視点ステレオ法により密な三次元点群 (ポイントクラウド) を生成する手法。SfM は基本的には写真測量の原理を応用したものであるが、処理が自動化されていること (織田 二〇一六:二〇六) や画像間の対応点抽出、対応点の精度を向上させるアルゴリズムが向上していること (渡部 二〇二三:三七) が特徴である。

(5) 本稿では SfM/MVS 法による写真計測をフォトグラメトリと呼称する。

(6) 地上レーザースキャナー (TLS: Terrestrial Laser Scanner) とも呼称される。

(7) 車両搭載型 (MMS: Mobile Mapping System) 、 UAV 搭載型 (ULS: UAV Laser Scanning) 、手持ち型など。

(8) たとえば、ライカの BLK 360 は三脚等のアクセサリを含まない最低価格で二万六千八百五ドル (<https://shop.>

[leica-geosystems.com/leica-blk360/buy](https://shop.)、閲覧日: 二〇二四年七月一六日) 、中長距離スキャナーの中では廉価であるマターポートの Matterport Pro3 は最低価格で五千九百九十五ドル (https://support.matterport.com/s/article/Matterport-Price-list?language=en_US、閲覧日: 二〇二四年七月一六日) である。これに加えて、データの書き出しや複数スキャンのアラインメントのためのソフトウェア、アプリが必要となる。

(9) たとえば、レヴォポインントの MIRACO 3D スキャナーは、三脚等のアクセサリを含み二十万七千円 (<https://www.revopoint3d.jp/products/standalone-3d-scanner-miraco?variant=43433528033449>、閲覧日: 二〇二四年七月一七日) である。

(10) Building Information Modeling の略称。三次元モデルに部材のコストや管理情報など様々な属性データを追加したデータを施工管理などで活用するワークフローを指す。関連する HBIM (Heritage BIM) はこれを文化財に適用するものである。

(11) 遺物のフォトグラメトリによる計測例として、テル・エル・ブラク (レバノン) が挙げられる (Göttlich et al. 2021)。遺構の計測例としては聖ピラリオン修道院 (ガザ地区) (Alby et al. 2013) やベイトイン (パレスチナ自治区) (渡部 二〇二三) 、地形の計測例は西之島 (飛田ほか 二〇一四) など。

(12) 織田 二〇一六、中野 二〇一六、布施 二〇一六、金井 二〇二二に詳し。

(13) 三次元モデルにおいて物体の質感を表現するために使われる画像。

(14) 電子機器が処理可能な信号の最大値と最小値の比率やその範囲。カメラの場合は明暗の幅を指す。

(15) 参考までに、筆者はフォトグラメトリ用に Canon の EOS 90D (APSC 機) を使用している。購入時にはミラーレス一眼カメラのバッテリー持ちは今よりも悪かったため、まず一眼レフカメラを選択した。そして、軽さと価格の安さ、所持するレンズとの兼ね合いもあり APSC 機を選んだ。また、同じレンズであれば、APSC 機はフルサイズ機よりも約1.5倍望遠になるため、フォトグラメトリだけでなく調査時に行う望遠撮影を安価に行えるということも理由の一つである。

(16) 近年三次元モデルのウェブ公開が進んでおり、中には自らの撮影機器や枚数などの情報を含めて公開されているものもある。実際にこれらを見てみることで、スマートフォン付属のカメラでもカメラ性能だけでなく撮影環境の整備、撮影方法の工夫、カメラ設定の調整などで、高品質な三次元モデルを作成可能なことが分かる。たとえば、Sketchfab にアップロードされている「Avalokitesvara (Thousand-armed Goddess) 千手観音」(<https://sketchfab.com/3d-models/avalokitesvara-thousand-armed-goddess-7f1fd1260cf64f42b74d8c452adae5bd>、閲覧日：二〇二四年七月一七日) という三次元モデルは、iPhone 6S Plus で撮影された一四五〇枚の写真から作られているが、光背の細部まで抜けや変形がなく計測できて

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

いることが見て取れる。

(17) Cloudcompare などのフリーソフトウエアを利用することで座標やスケールの付与ができるため、予算を抑えるために Standard Edition を購入するという選択肢もある。

(18) グラフィックボードは、GPU が搭載された基盤であり、パソコンの映像出力、処理を担うパーツである。通常のパソコンは CPU 搭載の GPU で十分であるが、三次元情報の処理や高画質の映像処理を十分に行うためには、グラフィックボードを別途搭載することが推奨される。

(19) CUDA とは Nvidia 社の GPU で並列実行させるためのプラットフォームである。最新のグラフィックボードであれば RealityCapture の推奨を満たしているものがほとんどである。NVIDIA.developer・CUDA GPU (<https://developer.nvidia.com/cuda-gpus> 閲覧日：二〇二四年七月二〇日) で確認可能。

(20) まづ RealityCapture と Meshape それぞれでアライメント処理を行った。RealityCapture 側のアライメント設定をデフォルト設定とすること、Meshape 側の「精度：高」「キーポイント制限：4000」「タイポイント制限：10000」と等しい設定となる。その後、RealityCapture 側で「Normal Detail」且つデフォルト設定でメッシュの構築を行った。生成されたメッシュのポリゴン数を確認し、Meshape のメッシュ構築設定の「ポリゴン数」→「カスタム」で同じポリゴン数を入力し、メッシュの構築を行った。RealityCapture ではポイントク

クラウドもメッシュ構築の際に生成されるが、これはメッシュ完成後にメッシュの頂点から生成されるものであり (https://rhelp.capturingreality.com/en-US/tutorials/quickstart_6_computeModel.htm 閲覧日：二〇二四年七月二〇日) 、ポイントクラウドからメッシュが構築されているわけではない。よって、Metashape 側ではポイントクラウドの構築は行っていない。

- (21) 立体を表すデータ形式の一つであるポリゴンメッシュのこと。頂点同士を結んで作られる面が集合した中空の構造で形状を表す。

- (22) 調査地で処理をすることを想定し、筆者所有の調査用ノートパソコンで処理を行った。CPUはCore i9-12900HX、グラフィックボードはNvidia Geforce RTX 4080 Laptop、メモリは64GBである。撮影機器はCanon EOS 90D、レンズは同社の単焦点広角レンズ EF-S24mmを使用した。また、RAW現像は行わず、カメラ内で変換されたJPEGファイル (6960×4640ピクセル) を利用した。

- (23) <https://dev.epicgames.com/community/learning/knowledge-base/Wj7B/capturing-reality-realitycapture-os-and-hardware-requirements?locale=ja-jp> を参照 (閲覧日：二〇二四年七月二二日)

- (24) Scaniverse には Splat と Mesh の二つの計測方法があり、Mesh を選択した場合は計測対象の大きさに合わせて計測モードを選択する必要がある。小型の対象物は Small Object、中型の対象物は Medium Object、大型の

対象物や広範囲の領域は Large Object/Area モードを選択する。

- (25) 博物館によつては写真撮影や三次元計測が禁止されている施設もあるため、モバイルスキャンを行う前には施設の情報を確認すべきである。

- (26) 本稿の執筆にあたり東京文化財研究所・文化遺産国際協力センターの安倍雅史氏よりデータを提供いただいた。

- (27) 調査時は異なる計測法の比較という意図はなく、Scaniverse が AR 表示機能を有しているため、WS 47号幕をAR上で表示するためのスキャンであった。光の強さや太陽光の角度によってモデルの質感が変わるため、厳密に比較を行うのであれば同時に計測した方がよい。

- (28) Metashape で生成した三次元モデルは東京文化財研究所の Sketchfab に公開している。 <https://sketchfab.com/3d-models/ws47-burial-mound-b15529c73bc-247ce89ac09a5dc781985> (閲覧日：二〇二四年七月二二日)

- (29) <https://mobilescan.jp/> (閲覧日：二〇二四年七月二二日) に詳し。

- (30) <https://scaniverse.com/support/no-lidar-no-problem> (閲覧日：二〇二四年七月二二日)

- (31) 写真をもとにガウス分布 (広がりを持った楕円体形状) の重ね合わせで三次元映像を表現する手法。照明と反射状況を正確に表現するため、LiDAR スキャンやフォトグラメトリが苦手とする光沢・反射のある物体も扱うことができるが、メッシュを用いる三次元モデル化は

行われない。

- (32) Neural Radiance Fields の略称。写真から深層学習（ディープラーニング）を用いて三次元データを生成する手法。光沢・反射のある物体も三次元モデルにすることができ、深層学習による予測で生成されているため、実際の対象物の計測とは異なる。

- (33) Watanabe 2017⁴ 中村二〇二二などに詳しい。

- (34) UAV による三次元計測は、西山ほか 二〇一七⁵ Pepe et al. 2022 に詳しい。

- (35) たとえばエンブートでは UAV の持ち込みと飛行が禁止されており、UAV を利用するためには現地で認可を得ている会社からドローンクルーを雇う必要がある（<https://www.drone-made.com/post/egypt-drone-laws>⁶、閲覧日：二〇二四年九月一六日）。また、イスラエルでは UAV の持ち込み自体は禁止されていないが、飛行禁止区域が多く設定されており、特にパレスチナ自治区やその国境沿い全体が飛行禁止区域に設定されている（<https://www.google.com/maps/d/u/0/view-er?mid=1BTpBkrwecCvYivWnAhwA5Kfw&ll=31.990395098077826%2C35.445234269295234&z=9>⁷、閲覧日：二〇二四年九月一六日）。

- (36) Global Navigation Satellite System の略。GPS や GLONASS⁸、QZSS（みちびき）などの測位システムが含まれる。
- (37) Real Time Kinematic の略称。固定局と移動局（二つの受信機で四つ以上の衛星から信号を受信する技術で、二つの受信機の間で情報をやりとりしてズレを補正する）

個人や少人数での海外踏査における三次元計測の活用

とで、単独測位よりも精度の高い位置情報を得ることができ（<https://www.softbank.jp/biz/blog/business/articles/202009/rtk-gps/>⁹、閲覧日：二〇二四年七月二五日）。

- (38) 背景やライト、ターンテーブルを含む写真撮影スタジオである FOLDIO¹⁰ を用いた遺物の撮影方法は Kaneda et al. 2022 に詳しい。

- (39) 編集・保存をした場合に劣化が進むのであって、フォルダ移動やコピー&ペーストでは劣化は生じない。

- (40) 本モデルは筆者の Sketchfab で公開している。
<https://sketchfab.com/3d-models/rock-cut-tomb-deir-ed-derb-ad51ad13d84d4494b09733d359d4ab19>（閲覧日：二〇二四年七月二六日）

- (41) 奥行や高低差が反映された中心投影のモデルを正射変換し正射投影を行った画像。

- (42) 本稿では Sketchfab については詳細に解説しないが、仲林 二〇二三に詳しい。

- (43) <https://sketchfab.com/Palestine-Arc-Project>（閲覧日：二〇二四年七月三〇日）