

デジタル技術を活用した矢穴の記録方法

矢野 定治郎*

How to record wedge holes using digital technology

Sadajiro YANO

要 旨

「矢穴」とは近世石丁場遺跡や近世城郭石垣で普遍的にみられる採石加工痕である。本稿では、矢穴の三次元計測方法（SfM-MVS、携帯端末搭載LiDAR）を提示したうえで、各方法を比較検討し、その有効性について検討した。その結果、低コストで導入可能な三次元計測機器であっても、研究データとして有効な精度で3Dモデルが生成可能であることを確認した。また、三次元計測の導入によって形態記録が効率化し、矢穴の資料化が捗るため、矢穴研究がより深化し、新たな成果が得られる可能性を指摘できた。

キーワード：矢穴、石丁場、城郭石垣、三次元計測

I はじめに

考古資料の記録方法としては実測や拓本が一般的である。しかし、近年はデジタル技術の発展が目覚ましく、考古学分野においても三次元計測を活用して、資料を立体的に記録する事例が増加している。筆者の研究フィールドである石丁場や城郭石垣の分野においても、調査方法としてデジタル技術が積極的に導入されている（残念石研究会2021、高田2022ほか）。本稿では、三次元計測による矢穴の記録方法を提示し、その有効性を検討したい。

II 問題提起と目的

「矢穴」とは石材分割を目的として石材の表面にミシン目状に穿たれる穴のことである。近世石丁場遺跡や近世城郭石垣で普遍的にみられる採石加工痕である。矢穴による採石加工技術のことを「矢穴技法」と定義付けられている（森岡・藤川2008）。

従来の矢穴調査といえば、手測りによる法量記録・手測り実測や拓本による形状記録が主流であった。しかし例えば、未分割の矢穴（完形矢穴）の場合、底部の法量や形状を正確に記録することは難しい。また、手測り実測や拓本は一面的（二次元的）な形状記録であり、資料のもつ多

くの形態情報を捨象してしまっている。さらに、矢穴資料は膨大な量が存在し、従来の記録方法では非効率である。そこで、効率のかつ多面的で立体的に形態記録が可能な三次元計測の導入が有効であると考え。また、三次元計測は非接触での記録が可能のため、資料保存の観点からみても適当な計測方法といえる。

矢穴の三次元計測は複数の先行事例が確認できる。①レーザー式三次元計測機器で直接計測する方法（高砂市教委2014）、②シリコンで型取りし、それをレーザー式三次元計測機器で計測する方法（高田2019）、③複数枚の画像から三次元形態を再構築する方法（山口・阿部2016、北野2021、残念石研究会2021、二橋2022）が挙げられる。①②は高価な機器や大量のシリコンが必要なことからコストが高くなり、導入のハードルが高い。一方で、③は必要な機材が比較的低価格で揃えられるため、低コストでの導入が可能である。

筆者も以前、三次元計測（写真計測）によって矢穴を記録し、形態検討をおこなったことがある（矢野2022）。しかし、三次元計測による矢穴記録の有効性について十分に説明することができなかった。そこで本稿では、低コストで導入可能な三次元計測による矢穴の形態記録方法を述べ、各方法を比較する。また、その有効性を検証する。

Ⅲ 矢穴の三次元計測方法

三次元計測には様々な手法が存在する（金田2019）。計測機器には高価格なものから比較的低価格なものまで存在し、性能も様々である。本章では、その中でも個人で導入しやすい廉価な機材を用いた三次元計測による矢穴の記録方法を提示する。

(1) SfM-MVS

SfM-MVS (Structure from Motion and Multi-View Stereo) はフォトグラメトリとも呼ばれる写真測量法である。60～80%程度重なり合う多視点からの画像をパソコンの解析ソフトで計算処理し、三次元形態を再構築する技術である。基本的にはパソコンと解析ソフト、カメラがあれば計測可能である。矢穴を計測する際に必要な機器・ガジェットは次の通りである。

①カメラ

接写可能なカメラが必要である。レンズは単焦点マクロレンズが好ましいが、最短撮影距離の短いズームレンズでも代用可能である。ただし、その場合にはズーム機能は使用せず、焦点距離固定で撮影する必要がある。



写真1 SfM-MVSの撮影機材

筆者はNikon D5000の一眼レフカメラにAF-S DX NIKKOR 18-55mm f/3.5-5.6G VR（最短撮影距離28cm）のズームレンズを装着し、18mm固定で撮影している。ちなみに、最近のスマートフォンであれば搭載カメラでも問題ない（詳細はIV章を参照）。

②リングライト

矢穴全体の明るさを一定に維持するために必要

である。深い矢穴の場合、矢穴底に十分な光が届かず、計測結果に影響する可能性が考えられる。特に、完形矢穴を計測する際には必須である。筆者の使用しているリングライトはK&F Concept KF-150である。光量調整機能があると、環境に合わせて調整可能なので便利である。

③スケール

SfM-MVSは完成した3Dモデルに正しいスケール情報を改めて付与してあげる必要がある。そのため、アルミロッドやターゲットなどを計測対象の近くに設置し、併せて撮影する。

④解析機材（PC）

解析にはある程度のスペックを有するパソコンと解析ソフトが必要である。必要スペックは処理枚数や処理設定などによって異なるため、詳細については各自で調べていただきたいが、参考までに筆者の使用しているパソコンのスペックを提示する。CPUはAMD Ryzen 7 5700G、GPUはGeForce RTX 3060Ti、メモリは32GBである。

解析ソフトには有償ソフトと無償ソフトがある。筆者はAgisoft社Metashape Standard版（有償ソフト）を使用している。また、スケール情報の付与や断面抽出などの作業にはフリーソフトであるCloudCompareが活躍する。

次に計測手順を述べる。

①竹べらやミニほうきなどで矢穴内部の異物を的確に取り除く。

②計測対象の近くにスケールを設置する。

③矢穴のすべての面を様々な角度からこまかく撮影する。できるだけ面に対して正対になるように撮影することが重要である。矢穴底隅部やエッジ部はとくに細かく撮影する。②で設置したスケールも併せて撮影する。ピント設定は1点集中モード（Nikon一眼レフカメラの場合はダイナミックAFモード）が適当である。ピント位置の一例は図1に示した。カメラ設定であるが、ISO感度は100～800程度、F値は11前後、WBはオートで撮影している。撮影枚数は矢穴列や石材の規模にもよるが、1石につき2～300枚程度が平均である。完形矢穴の場合、1矢穴につき60～70枚程度の撮影が目安である。画像ファイル拡張子はJPEGでも問題ないが、調整痕の詳細な表現が必要な場合はRAWで撮影し、TIFFに現像することが望ましい。

撮影した画像は各種解析ソフトにインポートし、手順通りに処理する。解析ソフトの使用法やCloudCompareによるスケール情報の付与方法の説明は割愛する。

2021年度以降、スマートフォン

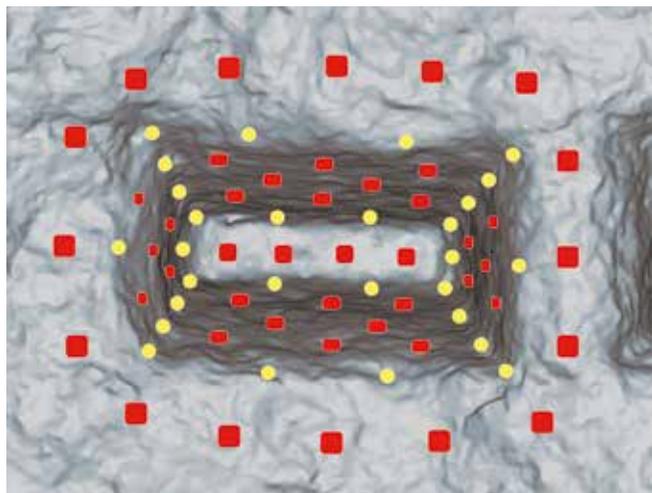


図1 ピント位置の一例
(赤印…面 黄印…隅部・エッジ部)

単体でフォトグラメトリが可能な3Dスキャンアプリが多数登場している。例えば、MetascanやPolycam、WIDARなどが挙げられる。三次元形態の再構築はクラウド処理によるため、通信環境が必要である。パソコンの解析ソフトで処理した3Dモデルと比較すると、点群密度が低く、メッシュに若干のノイズが発生することがある。

(2)携帯端末搭載LiDAR

iPhone12以降のproモデルおよびiPad pro (2020年モデル以降) にはToF (Time of Flight) 方式のLiDAR (Light Detection and Ranging) センサーが搭載されている。スキャンレンジが最大5mと短く、レーザー照射密度も低いため、本格的なLiDAR計測機器と比較すると性能は落ちるが、比較的廉価なため導入しやすい利点がある。携帯端末搭載LiDAR (以下、LiDAR) は空間計測に適しており、遺物などの小物の計測には向かない。つまり、矢穴石全体の記録や石丁場の空間記録には適しているが、矢穴の記録方法としては不適當である。

しかし、2022年1月にリリースされたScaniverse (LiDARアプリ/無償) のDetail Modeでは矢穴の記録が可能であることを確認した。Detail ModeはLiDARによって低密度点群を生成してから、フォトグラメトリモードで高密度点群やメッシュ、テクスチャの生成をしている。Detail Modeの特徴として、①ローカル処理であるため、通信環境は不要、②スキャンと処理にかかる時間が極めて短い、③一般的なフォトグラメトリとは異なり、スキャン時にLiDARが連動しているため、スケール情報が自動的に付与される、の3点が挙げられる。

計測手順は、記録したい矢穴の面に沿って端末を動かすだけと極めて単純である。SfM-MVSの場合と同様で、すべての面をあらゆる角度からスキャンする必要がある。端末はゆっくり慎重

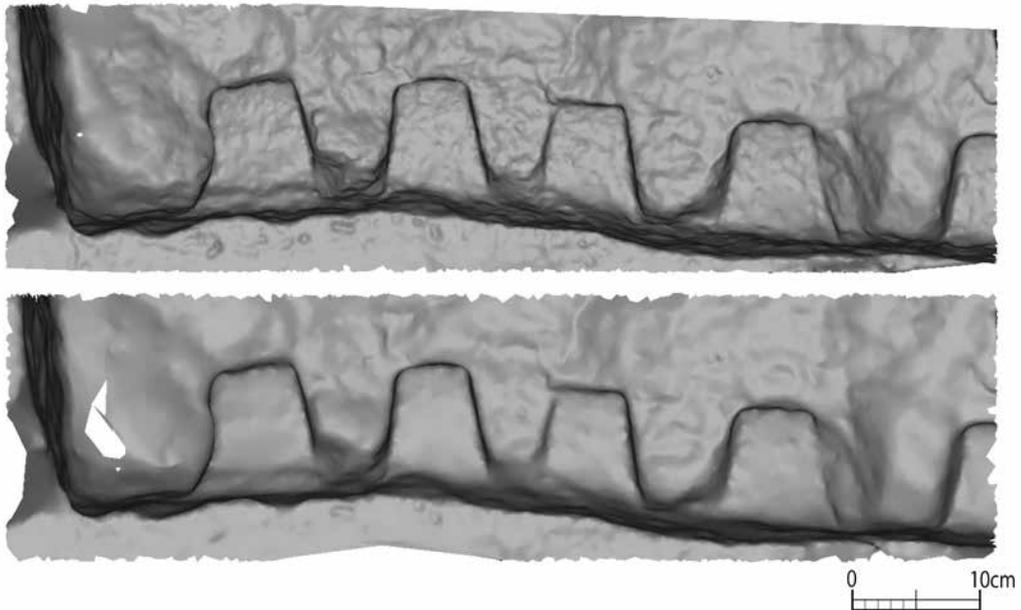


図2 凹凸表現の差異
(上) 部分スキャン (下) 石材全体スキャン

に動かすことで精度が向上する。しかし、長時間のスキャンは精度に影響を及ぼすことがあるので注意すべきである。5分以上継続してスキャンすると、調整痕や石材表面の凹凸表現が弱くなる現象を確認している。また、石材全体を含めて矢穴列をスキャンした場合、矢穴列だけを部分スキャンした場合と比較して、凹凸表現が弱くなる傾向がある（図2）。

Ⅳ 各計測方法の比較

本章では、前章で提示した各計測方法を比較し、その有効性について検証する。

それぞれの方法によって計測した矢穴の3Dモデル（サーフェス表示）を並べてみた（図3）。①一眼レフカメラで撮影した画像（JPEG）をパソコンの解析ソフトMetashapeで処理、②スマートフォンの3DスキャンアプリMetascanで撮影した画像（RAW）を外部エクスポートし、パソコンの解析ソフトMetashapeで処理、③スマートフォンの3DスキャンアプリMetascanで撮影し、アプリ内でクラウド処理、④スマートフォンの3DスキャンアプリScaniverseでLiDARスキャンし、Detail Mode（フォトグラメトリ）でローカル処理。いずれも、大坂城の刻印広場にある矢穴石（石材1）の矢穴列である（図5）。

まず、各3Dモデルから抽出した縦断面の外形線を重ね合わせて形状比較した（図4）。細かな凹凸表現に差異が認められるが、全体的な形状は極めて近似している。この結果は、本稿で提示した計測方法はいずれも矢穴の全体形状を把握したい場合に有効であることを示せた。

表1 各計測方法の比較

計測方法	画像枚数	Points(点)	Faces(面)	ファイル容量(OBJ)	計測時間	処理時間
①Metashape (SLR/JPEG)	376	203,821	405,456	50.0MB	17分	40分
②Metashape (Smartphone/RAW)	251	378,928	755,083	91.1MB	10分	34分
③Metascan(Photogrammetry)	251	58,112	115,334	22.9MB	10分	25分
④Scaniverse (LiDAR/Photogrammetry)	-	69,973	138,854	17.0MB	1分	3分

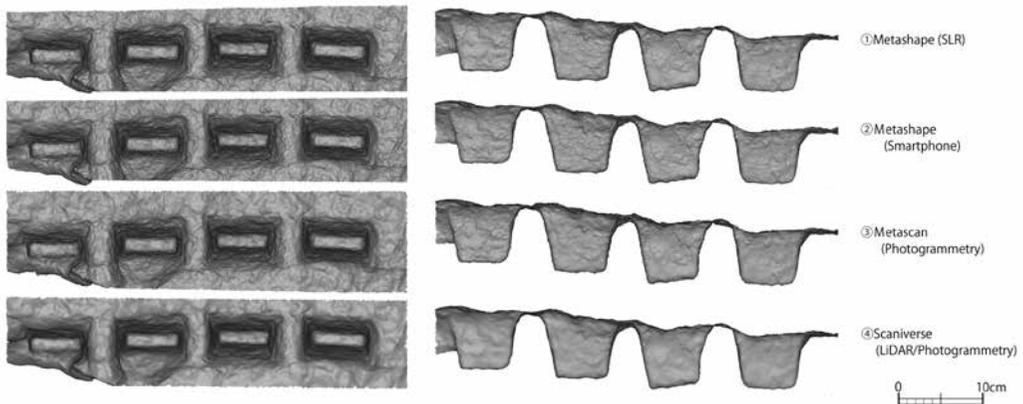


図3 各計測方法の比較（3Dモデル）



図4 矢穴縦断面の外形線重ね合わせ比較

表2 実測値と3Dモデル値の矢穴法量と誤差値

石材番号	矢穴番号	位置		実測値(cm)			3Dモデル値(cm)			誤差値(cm)		
		緯度	経度	矢口長	矢口幅	深度	矢口長	矢口幅	深度	矢口長	矢口幅	深度
1	1	34.68838	135.52615	8.5	5.2	6.5	8.2	5.2	6.3	0.3	0	0.2
	2			8.9	5.7	7.8	8.8	5.6	7.6	0.1	0.1	0.2
	3			8.9	5.7	7.4	8.9	5.7	7.3	0	0	0.1
	4			8.3	5.3	7.8	8.2	5.2	7.5	0.1	0.1	0.3
2	1	34.68834	135.52634	7.5	-	6.6	7.7	-	6.9	0.2	-	0.3
	2			9.1	-	6.5	9.0	-	6.8	0.1	-	0.3
	3			8.4	-	7.2	8.2	-	7.3	0.2	-	0.1
	4			8.9	-	6.8	8.8	-	7.1	0.1	-	0.3
	5			8.1	-	6.5	7.9	-	6.8	0.2	-	0.3
	6			8.6	-	6.2	8.5	-	6.7	0.1	-	0.5
	7			9.6	-	8.1	9.7	-	8.4	0.1	-	0.3
	8			9.1	-	8.6	9.1	-	8.5	0	-	0.1
	9			8.4	-	7.4	8.3	-	7.5	0.1	-	0.1
	10			10.3	-	7.7	10.2	-	7.6	0.1	-	0.1
3	1	34.68816	135.52536	9.8	-	8.2	9.7	-	8.4	0.1	-	0.2
	2			8.5	-	8.3	8.3	-	8.3	0.2	-	0
	3			8.5	-	8.2	8.3	-	8.5	0.2	-	0.3
	4			10.5	-	9.3	10.2	-	9.5	0.3	-	0.2



図5 誤差値比較資料の石材と矢穴列の3Dモデル

つぎに、各3Dモデルの面を観察してみると、計測方法によって調整痕の凹凸表現が大きく異なっていることがわかる。とくに、矢穴底付近はその違いが顕著に現れている。パソコンの解析ソフトで処理した3Dモデルが最も明瞭に凹凸表現されている。JPEG画像処理(①)とRAW画像処理(②)を比較すると、後者の方が画像枚数が少ないにもかかわらず、より精緻な凹凸表現が認められる。③は①②と比べ、やや不明瞭な表現に見える。④に関しては、凹凸表現が最も不明瞭で、調整痕分析を目的とする場合には向かない計測方法であることがわかる。しかし、矢穴の全体形状を記録する目的であれば、前述の理由から問題ないと思われる。

最も時間的コストの低い計測方法は④である。石材1の矢穴列の場合、スキャンと処理に要した時間は約4分であった。携帯端末1台で計測から処理まで完了するため、最も手軽な計測方法ともいえる。現地で手軽に計測・処理できるため、この計測方法を導入することによって、視認しにくい矢穴底形状の現地観察の補助的な役割を果たすことが可能である。また、LiDARによる計測が伴うため、スケール情報が自動的に付与されるという特徴がある。スケール情報の信頼性を検証してみたが、実測値との誤差は大半が0～3mmの範囲内であった(表2)。手測りの場合でも、同程度の誤差は発生することがあるため、許容範囲の数値であるといえるだろう。

以上の検証結果から、比較的低価格で高精度な三次元計測方法は、RAWで撮影した画像をTIFF形式に現像して、パソコンの解析ソフトで処理する方法であることがわかった。矢穴壁面の調整痕まで詳細に記録し、分析したい場合に適している。一方で、膨大な量の矢穴を短時間で記録したい場合には、LiDARアプリScaniverseのDetail Modeが最も適していると思われる。

いずれの計測方法も多面的かつ立体的に矢穴の形態をとらえることができる。記録後は、任意箇所での断面観察が可能となる。また、サーフェス表示にすることによってテクスチャ情報が取り除かれ、調整痕などの凹凸の視認性が向上する。矢穴の記録方法に三次元計測を導入することによって、新たな視点からの形態分析が可能となり、矢穴研究の深化につながると思われる。ただし、計測・記録方法は状況にあわせて適切に選択することが重要である。

V おわりに

本稿では、三次元計測による矢穴の記録方法を提示し、その有効性について検討した。これからの矢穴研究は、全国的な矢穴の資料化と形態の比較研究が重要な課題であると考えている。そのためには、膨大な量の矢穴を記録する必要があるが、従来の記録方法では非効率である。また、二次元的な資料化しかできず、その後の形態分析に制約がかかってしまう。そのため、効率的かつ多面的な記録が可能な三次元計測を導入することが有効的であると考えている。

近年、地震や豪雨などによる城郭石垣の被災事例が多い。石垣修復は基本的に崩落した石材を再利用するが、必要に応じて新補石材に入れ替えることもある。その場合、石材の形状や大きさは再現されるが、矢穴情報は失われてしまう場合がある。しかし、三次元計測によって記録しておくことで、万が一の場合でも、デジタル媒体上で立体的な観察が可能である。このような点においても、三次元計測による矢穴の記録は有効性が高いと考える。

主要参考文献

- 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
- 北野博司2021「公儀普請の採石活動と組織」『歴史遺産研究』第15号 東北芸術工科大学歴史遺産学科
- 残念石研究会2021『生駒山地西斜面石切丁場跡群の研究－大坂城再築普請における生駒山石切場跡の考古学的調査－』
- 高砂市教育委員会2014『石の宝殿・竜山石採石遺跡－竜山採石遺跡詳細分布調査報告書Ⅱ－』
- 高田祐一2019「矢穴研究の方法と可能性－慶長・元和・寛永期における城郭石垣石材を中心に－」『中世石工の考古学』高志書院
- 高田祐一2022「石丁場のデジタル調査方法－フォトグラメトリ・ドローン・RTK-GNSS・LiDAR－」
『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用4－オープンサイエンス・Wikipedia・GIGA
スクール・三次元データ・GIS－』奈良文化財研究所
- 二橋慶太郎2022「名古屋城跡石垣における矢穴形状の基礎的検討」『名古屋城調査研究センター研究紀要』
第3号 名古屋城調査研究センター
- 森岡秀人・藤川祐作2008「矢穴の型式学」『古代学研究』第180号
- 矢野定治郎2022「沼津市の近世石丁場の矢穴について」『沼津市博物館紀要』46 沼津市歴史民俗資料館・沼津市明治史料館
- 山口欧志・阿部 来2016「矢穴の非接触三次元計測による石割技法の検討」『日本考古学協会第82回総会 研究発表要旨』日本考古学協会

Abstract

How to record wedge holes using digital technology

Sadajiro YANO

“Wedge holes” are traces of quarrying work that are universally found at early modern quarry sites and early modern castle stonewalls. In this paper, I present 3D measurement methods (SfM-MVS, LiDAR with a mobile terminal) for wedge holes, compare each method, and discuss their effectiveness. As a result, I confirmed that even low-cost 3D measurement devices can generate 3D models with effective accuracy as research data. The introduction of 3D measurements also improved the efficiency of morphological recording and documentation of wedge holes, which may lead to more in-depth wedge hole research and new results.

Key words : ①Wedge holes ②Quarry ③Stone wall at castle ④3D measurement