

石丁場のデジタル調査方法 ー フォトグラメトリ・ドローン・RTK-GNSS・LiDAR ー

高田祐一（奈良文化財研究所）

Investigating Quarries with Digital Devices

Takata Yuichi (Nara National Research Institute for Cultural Properties)

・ 石丁場／Quarries ・ フォトグラメトリ／Photogrammetry ・ ドローン／Drones
・ RTK-GNSS／RTK-GNSS ・ LiDAR／LiDAR

1. はじめに

筆者は、2002 年より石丁場のフィールドワークを実施してきた。この間、科学技術が進歩してきたわけであるが、特にこの 5 年ほどの情報機器の高度化・低廉化が著しい。まさに新登場したデジタルデバイスの普及速度が、加速している状況である¹⁾。現在の状況を記録し、過去の調査法を振り返ることで、未来への振り返り材料としたい。筆者に個別問い合わせも増えてきたので、本稿をもって紹介としたい。本稿の内容や機材を筆者はワンオペで山中に携帯し操作しているので、読者も実施可能である



図1 2022年調査の使用道具の一部

(図1)。ただし実際に参考にする際には読者自身で必ず調べて欲しい。

2. 2000年代の調査方法

石丁場のフィールドワークは下記の工程である。

①準備、文献調査

当該地における史料調査や、既往調査結果の整理、地図などの調達

②踏査

当該地を踏査。位置情報の取得として、登山用ハンディGPSで記録。

③清掃

発見した石材を清掃

④記録（写真撮影・実測）

写真撮影し、実測する。スケッチにて記録をとる。石材は不整形であることが多く、石材のどこを計測の基点とするかで、法量の数字が変わってくるのが課題。

⑤拓本

刻印があった場合は、拓本をとる。しかし、石材表面が風化していることが多く、凹凸の判断が難しい場合が多い。

⑥位置情報の記録

ハンディGPSの経緯度を参考にしながら、地図の地形を読み、位置のドットを地図に打つ。複数の石材がある場合は、目測によって相対関係を把握し、地図に記録する。樹木が繁茂し、見通しが悪

い場合、誤った位置を記録しても気づくことができない。誤差が10m程度発生するのが課題。

⑦後日、当該石材を再確認する

後日、別のメンバーが当該石材を確認するケースがある。しかし、紙面の関係上、刊行物に掲載されている画像は多くないうえ、樹木が繁茂しており寄って撮影せざるを得ないことが多い。結果、再確認する際に、どの石材か再特定が難しい場合がある。

3. 2010年代の調査方法：矢穴の3次元記録法

矢穴の研究は、縦断面形状の観察を中心に行われてきたのであるが、筆者たちは、2014年に矢穴形状の3次元的な記録をするべくシリコンによる型取りと型の3次元計測を始めた²⁾。3次元スキャナーそのもので、矢穴を計測できれば良いが、山中にあるうえ穴形状であり、うまくレーザーが入らないため、困難であった。普及しつつあった当時のAgisoft PhotoScan（現 Metashape）でのフォトグラメトリであって、暗い穴底の写真を撮影できず、難しかった。そこで型取りしたシリコンを3次元計測することにした（図2・3）。しかしながら、シリコンが高額であること、手間がかかることで限定的な使い方となった。しかし、2016年にリングライトを用いる方法が紹介され、矢穴に対してもフォトグラメトリが可能となった³⁾。



図2 シリコンによる矢穴の型取り



図3 型取りしたシリコンを3次元スキャナーNextEngineで3D化

4. 2022年の調査方法

2010年代後半から、急速に機器が低廉化し、現場レベルで使用可能となってきた。短時間で高精度な記録が可能となった。

4.1 フォトグラメトリで詳細記録

4.1.1 刻印の拓本はやめた

石丁場にて刻印を探すのは、非常に難しい。多人数で何回も刻印の前を通っていても気づかない時があるし、たまたま見つかる時もある。日光の角度、日光の強さ、石材の湿り具合、草木の状況など様々な要因で、見え方が変わる。まさに『The Hobbit』の「ドゥリンの日が沈む最後の光が鍵穴を照らす」が如く、特定の条件が重ならないと発見できない刻印が存在する。もし刻印らしきものを視認しても、形状を把握しない限りは拓本で記録ができない。石材面は風化していることや未調整であること多く、刻印の一種の読み解きが難しい場合がある。映える拓本とするための凹凸の恣意的な解釈は、学術としての資料性に問題が発生する。しかし、フォトグラメトリであれば、客観的に凹凸を記録できるため、有用である。取得されたデータをどう解釈するかは人それぞれで良い。3Dであっても見えないものは記録できないのであるが、人間の目で見えていても

それを認識できなければ、結局見えていないのと同義である。デジタルデータであれば、フィルター処理などによって可視化できる（図4）。

4.1.2 石材・加工痕跡・矢穴の記録

石材の形状・加工痕跡・矢穴を一体で記録できるフォトグラメトリは効果的である（図5）。調査地から帰ってきた後も詳細に観察できることは至便である。ある程度の範囲や巨石を記録する場合は、4.5mポールにコンパクトカメラをつけ、インターバル撮影を実施する。しかしフォトグラメトリはモデル作成やスケール付与などの手間が発生するため、限定的運用にならざるを得ない。また処理には相応のハイパフォーマンスPCが必要であり、コストがかかる。大量の画像ファイルの保管も課題となってくる。

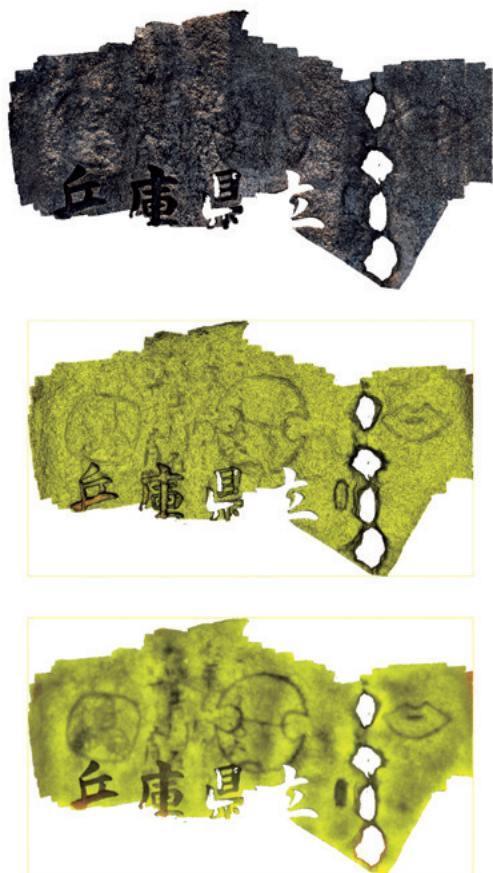


図4 石材に彫られた刻印

（1枚目 肉眼では明確な刻印しか認識できない。2枚目 MetaShape で3D化。何らかの文字があることが判明。3枚目 Cloudcompare で鮮明化処理。肉眼では認識できないものを可視化できた。

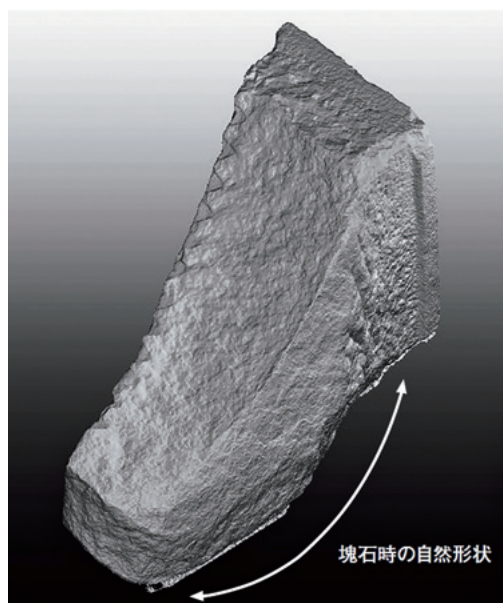


図5-1 フォトグラメトリによる石材・加工痕跡・矢穴の記録（奈良文化財研究所 2021『日韓文化財論集4』学報100）



図5-2 フォトグラメトリによる関西学院構内古墳（墳丘と石室）

4.2 ドローンで広域撮影

広域を撮影する際は、ドローンが便利で効率的である。しかし、石丁場調査では森林が多く樹木によって運用できないことが多い。

4.3 RTK-GNSS

スマホアプリ Drogger と RTK-GNSS 受信機を現地で運用し、補正情報のリアルタイムデータ配信サービス（有償）を利用することで、きわめて容易に誤差数cmの高精度測位が可能である（図6）。踏査による石材位置の記録や、3Dモデルの位置情報を付与するには、高額な機器が必要であったが、低コスト化したうえ、操作性も直感的になった。誰でも扱えるため、今後普及すると考えている。問題として測量用三脚を徒歩で持ち運ぶには体力が必要である。携帯電波が必須であるため、山間部で使えない場合がある。早期に衛星携帯の低廉化が望まれる。



図6 RTK-GNSS測量の様子

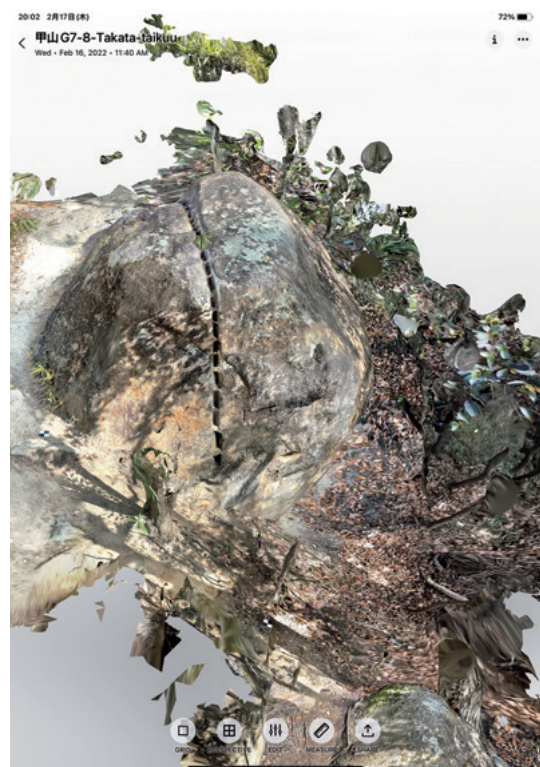


図8 iPadによるLiDAR計測した徳川大坂城石丁場跡東六甲石丁場跡甲山刻印群G7番石材。計測時間は4分



図7 iPadによるLiDAR計測した関西学院構内古墳の墳丘と石室。初めて操作する学生が計測。墳丘は20分程度、石室は10分程度の作業

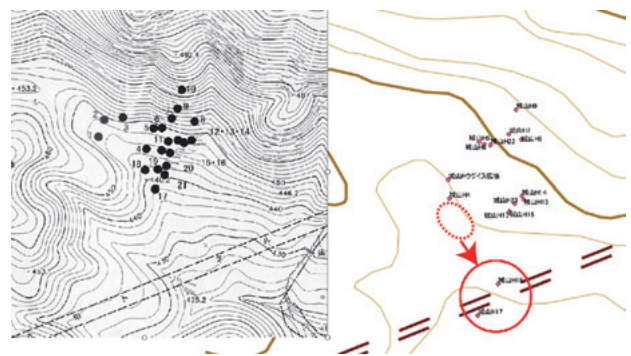


図9 東六甲採石場城山刻印群H地区 2006年の調査による位置(左)と2022年の調査による位置(右)。再計測の結果、17番石材が南へ約80m移動。(『徳川大坂城東六甲採石場』兵庫県教育委員会事務局文化財室、2008年)

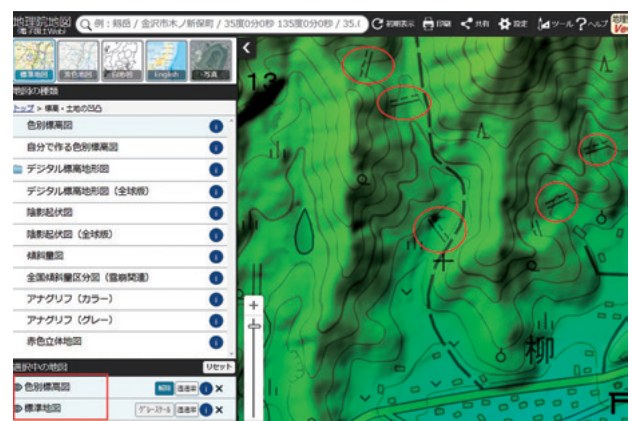


図10 国土地理院の地理院地図で石丁場候補地を探す

4.4 iPhone/iPad LiDAR を使って数分で 3D モデル作成

iPhone/iPad の機種には、LiDAR 機能を搭載しているものがあり、多数のアプリが公開されている。これを使えば、画像のような 3D モデルが数分で完成する。操作もきわめて簡単で、初めての人であっても即座に使えるようになる（図 7）。LiDAR であるため、スケール情報も持っており、便利である。位置情報については、モデル作成時に対空標識も一緒に記録し、RTK-GNSS 受信機によって後で位置を与える（図 8）。iPhone/iPad の LiDAR には若干誤差があると言われるが、採石遺構や石材については問題とされないレベルである。手ばかりやスケッチよりはるかに高精度である。大量にある石材全てをフォトグラメトリすることは、現実的に困難であるため、石材の記録としては iPhone/iPad の LiDAR が有力なツールとなる。とにかく操作が簡単であるため、今後も普及するだろう。筆者は、2022 年 2 月時点では Metascan と Scaniverse のアプリを使っている。

5. 比較：位置情報の差

2006 年に実施した兵庫県神戸市東六甲採石場城山刻印群 H 地区の調査⁴⁾と 2022 年に再調査した結果である（図 9）。2022 年の調査では、RTK-GNSS 測量を実施した結果、群になっている地点については石

材の相対関係があっていたものの、石材の一部が約 80m ずれていることが判明した。2006 年当時としての限界が、情報技術の進展によって解決したといえる。

6. 閑話休題：地理院地図を使った石丁場の探し方

もし何ら現地の手掛かりもなく石丁場の踏査を実施することになった場合、まず地理院地図で砂防ダムを探すことをお勧めする。花崗岩を採石する場合、近代的な重機や火薬がない近代以前は露頭の岩盤ではなく、転石を選んで採石していた。しかし、転石が多い場所は、土石流で危険となる。また採石活動においては石材運搬が必要労働力の中で大きな割合を占める。当然、平地に近い場所となり、運搬を考えると交通至便なところを選ばれる。そのような場所は、現代に集落になっていることが多い。つまり、集落に近い場所で、転石が多い場所は、防災上、重点的に砂防ダムが設置されるのである（図 10）。当てずっぽうに踏査するよりは、マシだろう。なお、筆者が西日本の花崗岩帯をフィールドにしたうえでの経験論である。そのため、一般論であるとは限らない。

7. 作業比較と調査機材

2000 年代と 2022 年の調査方法と所要時間、2022 年

表 1 2000 年代と 2022 年の調査方法比較

	2000 年代の方法と所要時間	2022 年の方法と所要時間
採石遺構や広域の撮影	写真 (-)	ボール撮影やドローン撮影による フォトグラメトリ（撮影 30 分 + 処理 3 時間）
石材単体の記録	写真 (-) スケッチ（30 分）	iPhone/iPad LiDAR（5 分） フォトグラメトリ（撮影 10 分 + 処理 2 時間）
加工痕跡	写真 (-)	フォトグラメトリ（撮影 10 分 + 処理 2 時間）
矢穴の記録	シリコンで型取り（12 時間）	フォトグラメトリ（撮影 10 分 + 処理 2 時間）
刻印の記録	拓本（2 時間）	フォトグラメトリ（撮影 10 分 + 処理 2 時間）
法量等の実測	実測（30 分）	iPhone/iPad LiDAR（5 分）
位置情報の取得	登山用ハンディ GPS （誤差 10m）	RTK-GNSS （誤差数 cm）

表2 2022年調査の使用道具の一部

道具類	製品名	費用（2022年2月時点）
ポール	ルミカ iRod（アイロッド）4G-4500	廃番 類似の Bi Rod 6G-4500 18,700円（税込）
ドローン	Marvic mini	40,000円前後（税込）
フォトグラメトリ	Metashape pro	402,489円（\$3499を1ドル115円換算）
PC	2019年購入（メモリ128GB、グラフィックボード GeForce RTX3090（換装））	総額100万円程度
RTK-GNSS受信機	RWP（W-band RTK-GNSSオールインワンパッケージ）	87,780円（税込）
センチメートル級測位サービス	ALES株式会社リアルタイムデータ配信（Ntrip方式）	39,600円/年（税込）
LiDAR	iPad Pro	106,800円（税込）

の調査で使用している道具を示す（表1・2）。方法比較は、成果の質が大きく異なるため、単純に所要時間では比較できないので注意が必要である。筆者はワンオペで全て実施するが、一般的に調査の目的や投入できるリソース（ヒト・カネ・モノ）によって使い分けることが必要であることは言うまでもない。

8. おわりに

皮肉なことに、各種デジタルデバイスの登場で、山に持参する荷物が激増した。ワンオペ調査として一人で背負うのはそろそろ限界である。

調査成果はほぼデジタルデータである。今後はこの生データの超長期保管と公開が課題となろう。iPhone/iPadのLiDARの登場によって、3Dモデルが誰もがいつでも簡便に取得できるようになった。スマホやタブレットの中に死蔵しないで、どう活か

すことができるか、アイデア次第で色んな可能性を秘めている。

【注】

- 1) 高田 祐一 2021「デジタル時代において文化財専門家に求められること」『デジタル技術による文化財情報の記録と利活用3』奈良文化財研究所研究報告27 <http://doi.org/10.24484/sitereports.90271>
- 2) 高田 祐一・広瀬 侑紀・福家 恭・藤田 精「三次元形状計測による前近代石割技術検討の新手法」『日本文化財科学大会研究発表要旨集』31th、2014年7月
- 3) 山口 欧志・阿部 来「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』2016年5月
- 4) 『徳川大坂城東六甲採石場』兵庫県教育委員会事務局文化財室、2008年