

デジタル技術を活用し陸海空から石丁場を調査する

高田 祐一（奈良文化財研究所）

1. はじめに

石丁場の調査は過酷である。石材の切り出し地である山には道はなく、草木が繁茂した斜面を上り下りする。石材を発見した際には清掃し記録する必要があるため、調査道具も持参しながら登山することになる。石材の輸送目的地は大坂城であり、石材は船運のため、船が接岸する海岸は重要遺構である。石材分布を把握するため海に潜って確認する。冬は山に入り、夏は海に潜る研究分野である。山や海では常に事故の危険性があるうえ、調査対象地も広大である。そこで、小豆島石丁場調査委員会による調査では、調査の効率化・高次化を目指し、様々な機材を投入して、デジタル技術を活かした分析も実施している。本稿では陸・海・空の面から調査機材の実例を紹介する。

2. 空から石を探す・記録する

2.1 空から偵察 ドローン

人間が山中を移動するのは非常に時間を要する。ドローンであれば、迅速に上空から確認できる（図1）。人間の目線以上にある石材も確認できることは大きな武器となる。無人航空機パイロットである坪佐利治氏の高性能ドローンで、空からの石丁場発見に繋がった。小瀬の重岩不動石鎚神社横にある石材は、ドローンによって新発見されたのである。

2.2 木々で見えない地形を高精度計測 UAV-LiDAR

別稿「UAV-LiDARによる小豆島加藤家石丁場の高精度地形計測」参照のこと。

2.3 空中写真から3D化 ドローンフォトグラメトリ

フォトグラメトリとは、対象物を様々な方向から撮影した写真をコンピュータで処理し、3Dモデルを作成する技術である。これにドローンで撮影した写真を元データとすることで、人間では撮影できないアングルからの3Dモデルを作成することが可能となる（図2～6）。

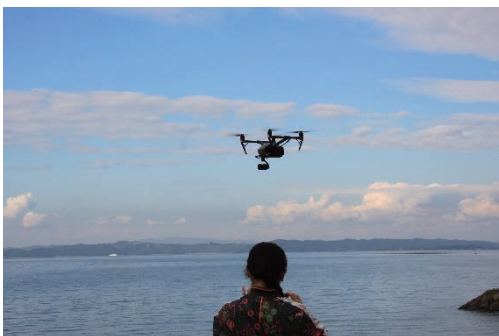


図1 ドローン



図2 ドローンフォトグラメトリによる重ね岩の3Dモデル

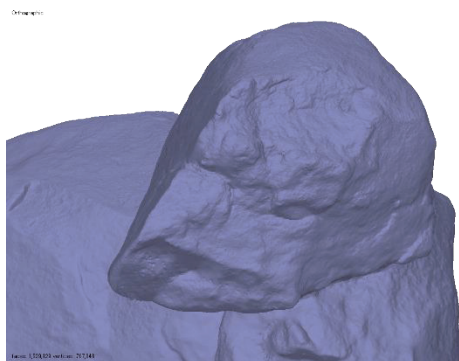


図3 重ね岩3Dモデル（裏側）

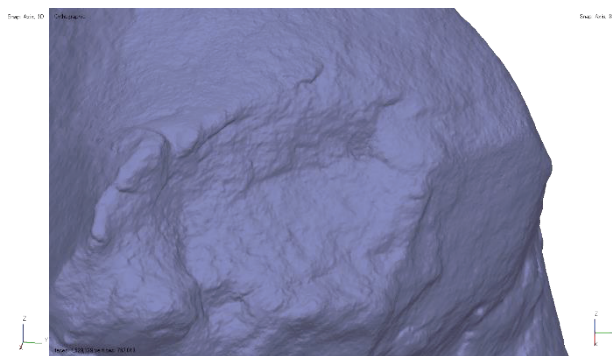


図4 重ね岩3Dモデル（裏側）矢穴？

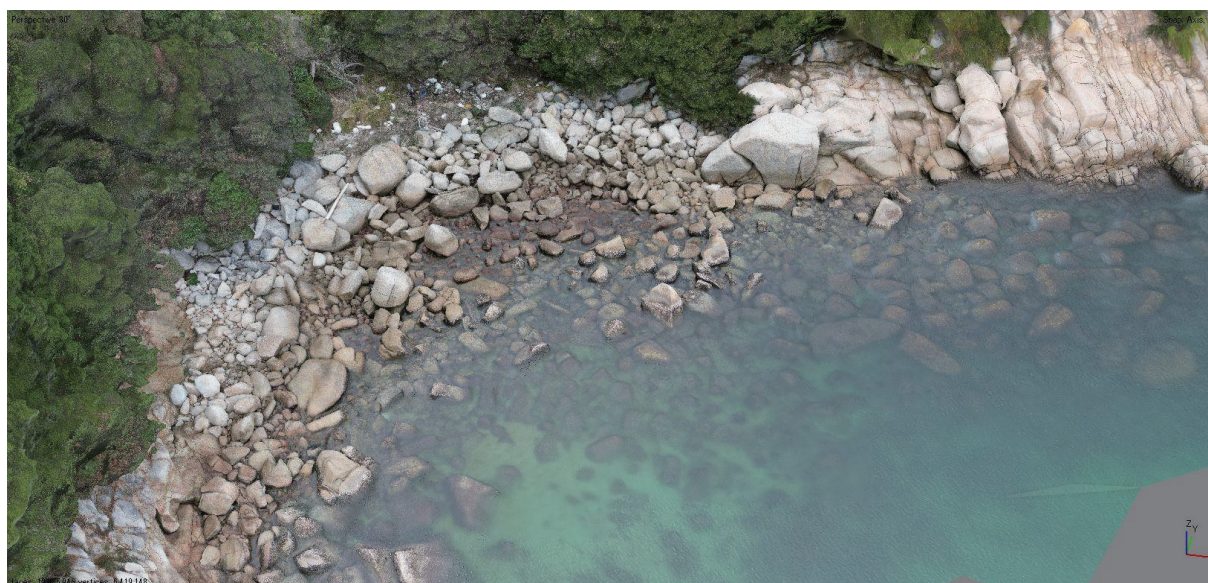


図5 ドローンフォトグラメトリによる岩谷 八人石磯丁場3Dモデル

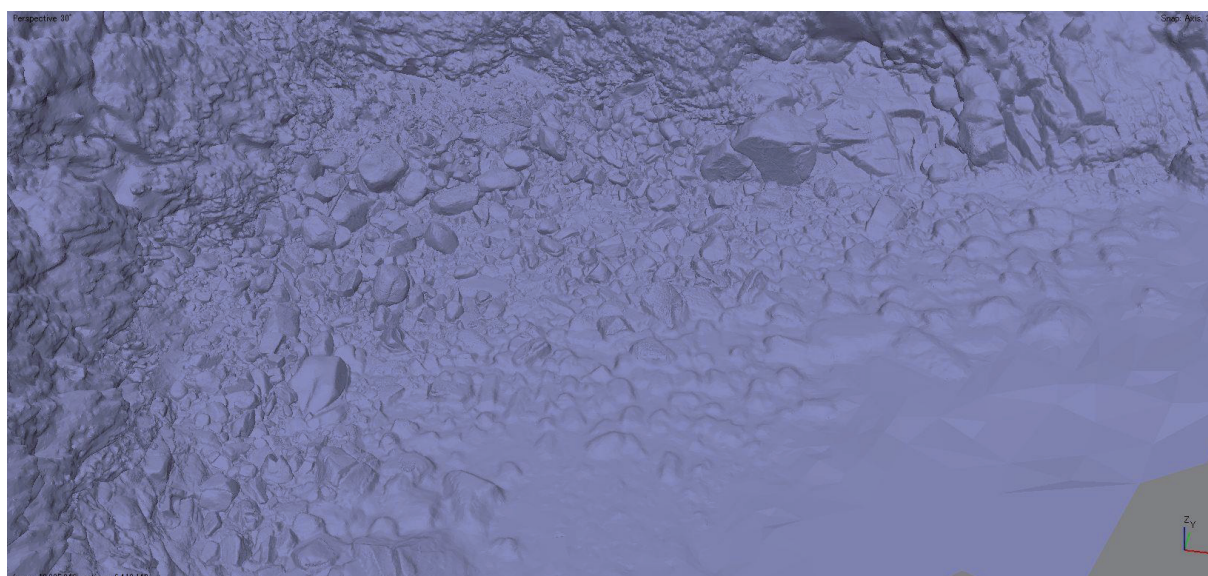


図6 岩谷 八人石磯丁場3Dモデル（ソリッド）

3. 陸から探す・記録する

3.1 簡単に3D記録で迅速化 スマホ LiDAR

iPhone と iPad の一部の機種には、LiDAR センサーがついている。レーザー光を照射し、反射光が返ってくるまでの時間を計測することで、物体までの距離を計測し3Dモデルを作成する。石材や採石遺構は立体であり、スケッチと手測りによる記録は非常に時間がかかるうえ、精度を確保できない。その場で3次元形状を簡便に取得でき、寸法まで記録できる iPhone/iPad の LiDAR は調査ツールとして有力である（図7）。さらに iPad 上で、ペンツールにて観察結果を画面上で書き込むことで、デジタルデータとしても記録をリアルタイムに残すことが可能である。調査の迅速化につながる。AirDrop 機能でのデータ授受も便利である。



図7 iPad LiDAR で記録した小瀬加藤家丁場の石材。寸法が即座にわかる

3.2 写真から3D化 フォトグラメトリ

広範囲な採石痕跡や石材の加工痕跡など詳細に記録するには、フォトグラメトリが良い。石材加工痕跡は、色に左右されない観察が可能であり、矢穴の3Dモデルでは、通常では見えない視点での観察も可能となる（図8～10）。



図8 フォトグラメトリにて記録した矢穴列（小瀬石材4）

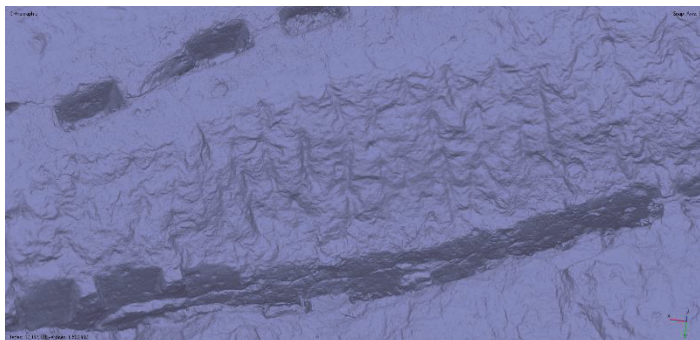


図9 3D表示した石材加工痕跡（小瀬石材4）。ヤバトリの痕跡。鑿で線にはついている。叩いた回数もわかる

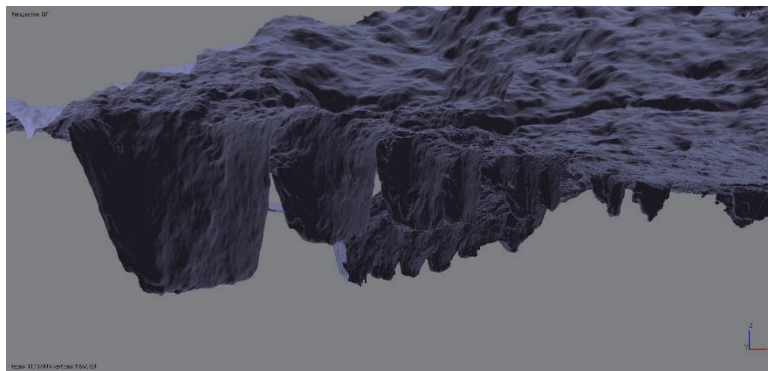


図 10 矢穴を裏面（石材内側）から見た図（小瀬石材 4）

3.3 刻印の鮮明化処理

刻印とは、石丁場の担当大名が石材採取の作業管理や石丁場範囲の明示化などを目的に、文字やマークを石に刻んだものである。花崗岩は表面が粗いため、刻印を識別しにくく、人間の目では判然としないものも多い。そこで刻印を 3D 化し、凹凸の強調、シェーダー処理によって鮮明化することで客観的に図化できる（図 11～13）。

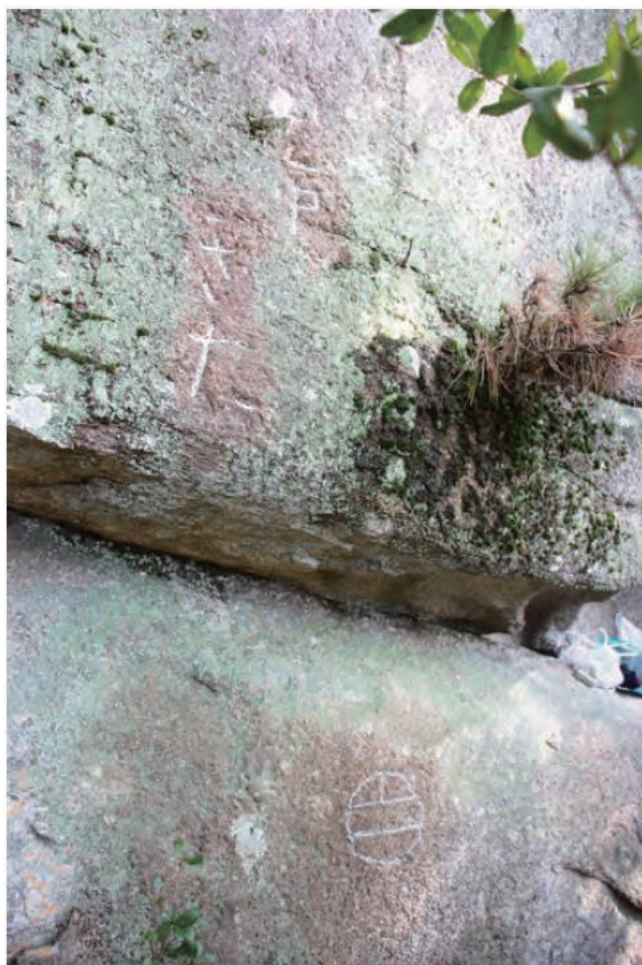


図 11 小瀬丁場にある文字刻印

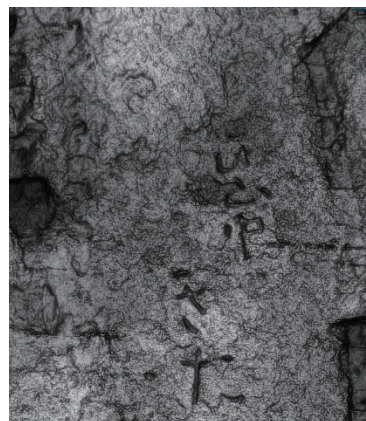


図 12 EDL 処理による図

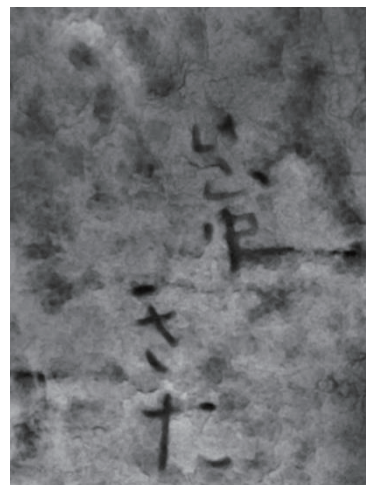


図 13 SSAO shader 処理による図

3.4 高精度な位置測定 RTK-GNSS

分布調査では、石材の位置情報取得が重要である。海や山では人口構造物がないため、高精度に位置を取得することが難しい。そこで、衛星測位技術のうち、ネットワーク型 RTK-GNSS（VRS 方式）を活用すれば、センチメートル級の位置測定を可能にすることができる（図 14）。

4. 海中を探す・記録する

4.1 船上から水中を探す サイドスキャンソナー

水中にある石材を探すには、最終的には痕跡の有無を確認する必要があるため、潜る必要がある。しかし、広範囲を潜水して探すには、現実的に困難である。また夏季は全般的に透明度が低いため、作業効率は悪化する。そこで、サイドスキャンソナーが有効である。サイドスキャンソナーとは海底面に音波を発信し、反射してくる音波を解析し、海底面を調べる技術である。今回の調査では廉価な魚探の製品を活用している（図 15・16）。



図 14 海岸の石材を
RTK-GNSS で位置測定



図 15 SUP にサイドスキャンソナーを搭載



図 16 サイドスキャンソナーの画面

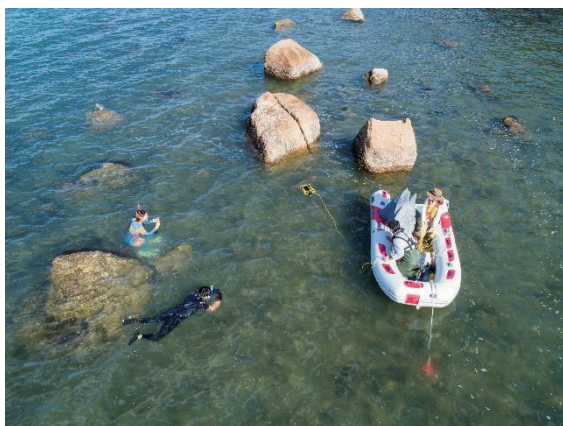


図 17 水中ドローンを撮影する人間を
空中ドローンが撮影する図

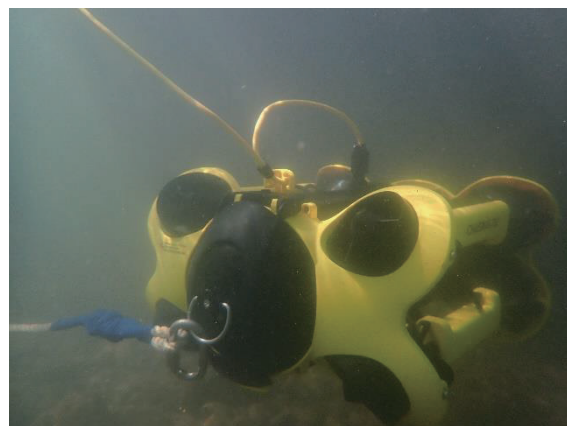


図 18 海中の水中ドローン。水中ドローンで
写真撮影可能

4.2 機動的に展開し浅瀬も可能 SUP

サイドスキャンソナーは通常、船に取り付けるため、浅瀬では座礁の恐れがある。使用に制限があった。そこで、SUP（Stand Up Paddleboard（スタンドアップパドルボード））に登載することで、浅瀬でも利用可能となり、水深0mまで計測可能となった。またSUPは空気を膨らませて展開するため、コンパクトに収納でき、どこでも機動的に展開可能である（図15）。

4.3 水中に直接確認しに行く 水中ドローン

サイドスキャンソナーでは、粗い画像として記録される。人間が潜らずに鮮明な写真を撮影するには、水中ドローンが有効である（図17・18）。

4.4 水中を3D化 水中フォトグラメトリ

人間による潜水や船上から水中の写真を多数撮影することで、海中であっても3D化可能である。画像加工ソフトでかすみ除去することで、水中の軽微なごみなどを除去できクリアな3Dモデルを作成可能である（図19）。

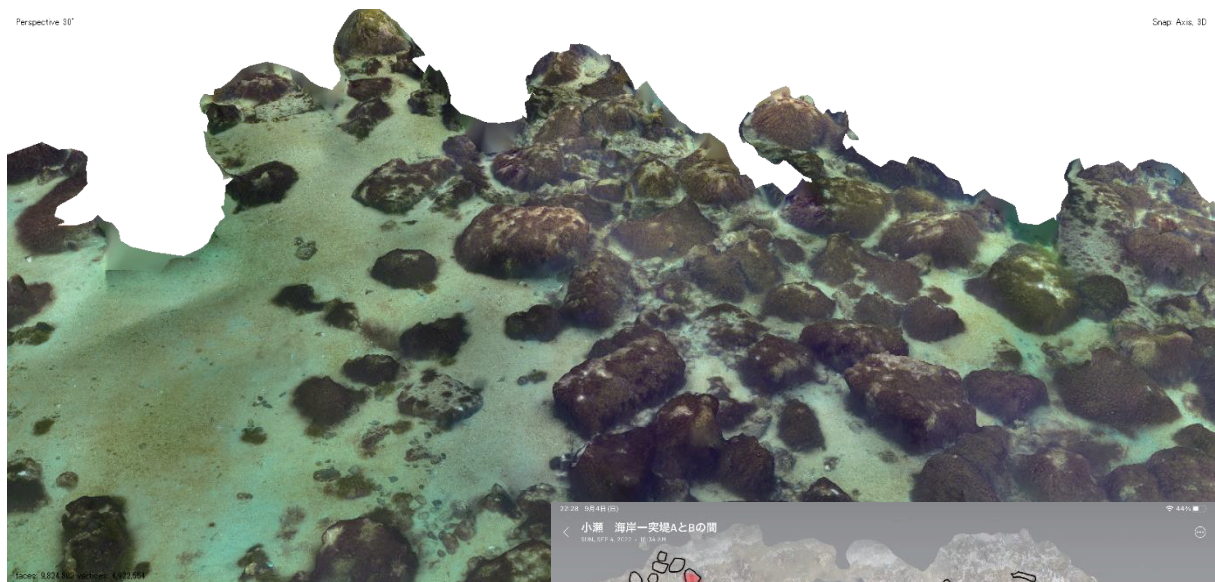


図19 八人石磯丁場の海底3Dモデル。角石などの石垣石材が散在している。

5. 加藤家石丁場の突堤遺構（推定）

2022年度の調査では、小瀬の加藤家石丁場の海岸部分から突堤遺構（推定）が発見された。単なる干潮ではなく、潮位がかなり下がるタイミングでなければ出現しない遺構である。そのため、出現した機会を捉え、海岸全体をフォトグラメトリによる3D化を実施した（図20～

22）。海岸から海中に向けて伸びる6つの石列を確認できた。近現代の護岸工事の影響が大きいも



図20 小瀬加藤家石丁場の突堤遺構（推定）。赤枠が石列の一部。面を揃えている。iPad LiDARにて取得した3Dモデルにスケッチを書き込み

の奇跡的に一部が残存している。近世初頭とみられる矢穴石もある。面を揃えた石列もあり、今後の追加調査が必要である。

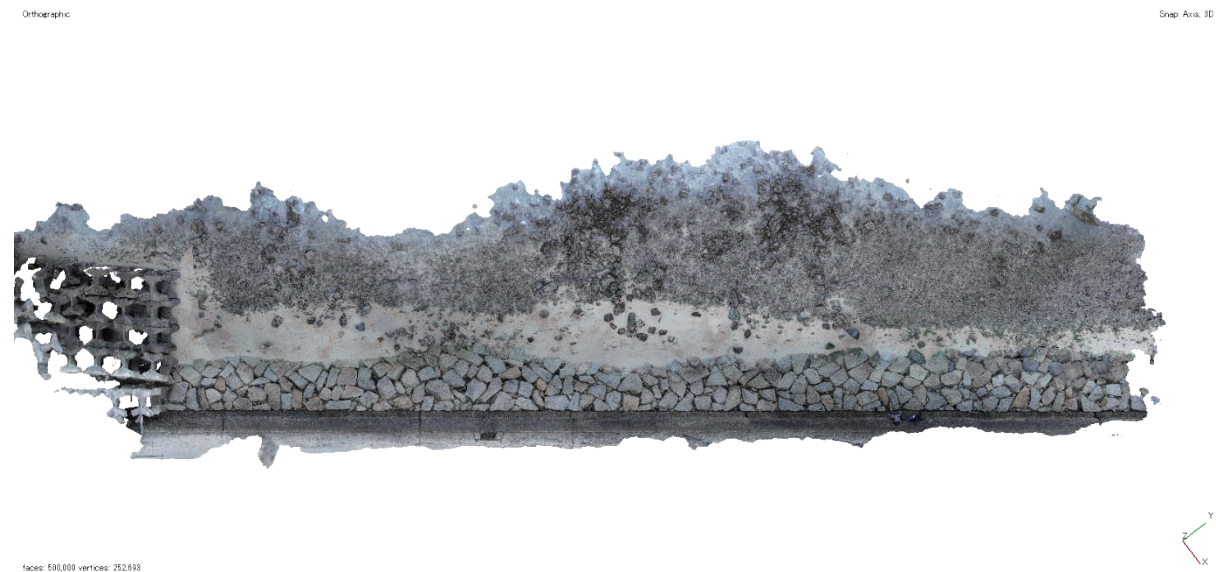


図 21 小瀬加藤家石丁場の突堤遺構（推定）の全体オルソ画像

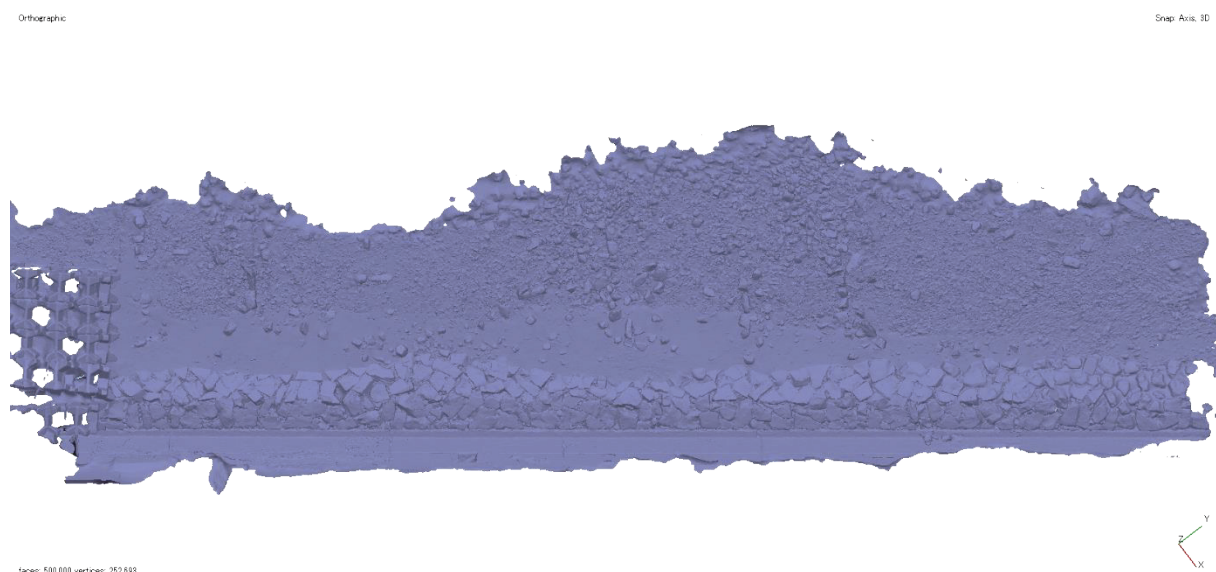


図 22 小瀬加藤家石丁場の突堤遺構（推定）の3D表示（ソリッド）

6. 成果発信・データ公開

小豆島石丁場調査委員会では、調査の際、リアルタイムで成果発信していくこととなった。その理由はいくつかある。①現在は、SNS等によって無償でリアルタイムな発信が容易であること、②調査は可能な範囲で地域住民参画型であり、積極的にSNS発信してもらった方がより周知が進むこと、③石丁場は山にあり、存在の継承が難しい。たくさんの方に知ってもらうことこそ文化財の継承に資すること、等である。調査当日の成果を評価し位置づけをしていくには、一定の時間が必要であるため、それらは刊行物としてまとめていく予定である。それぞれ発信する情報形式によって、下記のサービスを開設した。たくさんの方に成果を知ってもらえることを願っている。