

フィールド科学のためのアップル LiDAR 測量 Part 2

木庭元晴

はじめに

前合併号の Part 1 では、本報告の第 1 章にあたる「I 2020年アップル LiDAR デバイスの理解」を報告した。本号 Part 2 はそれに続くものである。Part 1 を読むこと無く本報告を理解することができる。Part 2 の章立ては Part 1 に続く形で、第 II 章から始め、図表も図13, 表 3 から続ける。

2023年 9 月、iPhone 15シリーズが発売される。iPhone 12 Pro 以降の iPhone (LiDAR 搭載機種, iOS17以降) を使った Object Capture¹⁾ 編集も可能になる (これまでは macOS Monterey 以降)。LiDAR 測量ではバッテリー消費が激しいが 15 では軽減されるようである。LiDAR 測量よりも写真測量法 photogrammetry を使った 3D スキャニングの方が距離の制限は小さい。画像処理は mac または iPhone 内で実行され、USDZ ファイルで出力できる。この段落の内容は本 Part 2 と直接関係しないがアップルが指向する AR 利用の観点からも意味があり、撮影から結果を得るまでアップルデバイス内で完結できるのはユーザーとしてありがたい。

本報告は屋外の自然物の LiDAR 測量を目的としたものであるが、写真測量法による 3D ファイルについても適用できる。ネット上では屋外での測量的視点のコンテンツも増加しているが、本報告の視点のコンテンツは見当たらない。ここでは、アップル LiDAR デバイスを使った 3D スキャン結果の筆者の体験的評価、そしてオープンソース CloudCompare, MeshLab, Blender, そして Autodesk Meshmixer を使ってターゲットの外形と体積を得る手法を示している。具体的な操作などの詳細は筆者のウェブサイトに掲載しているので

後に参照頂きたい。なお、地理教育的観点でもこの報告を記しており、個々の児童生徒が自ら3Dデータを取得して楽しく学習できるようなフィールドワークの基礎資料として使われることを願う。

II 身近な直方体のLiDAR測量

自然界の地形などをLiDAR測量する場合、関心事の一つは外形と体積を求めることにある。一定の条件下で再現及び算出は可能ではあるが、得られたモデルはターゲットとどの程度の懸隔があるのだろうか。

それを確かめるために、まずはコンベックスで計測が可能な身近な直方体をLiDAR測量することにし、室内に置いた段ボール3箱と屋外の柱状石碑を選んだ。

II.1 室内に置いた段ボール3箱

図13(a)は室内に段ボール箱3箱を配置した際のスチル写真である。図13(b)は無料のScaniverse - 3D Scanner (今後は略称Scaniverseを使用)²⁾の3Dオブジェクトで、図13(c)は定期使用料が必要なMetascan - 3D Scanner (今後は略称Metascanを使用する)³⁾のものである。(b)図では、右下の白い矩形枠で示した場所にノッチが形成されている。(c)図では垂直のはずの段



図13 室内の段ボール3箱LiDAR測量例

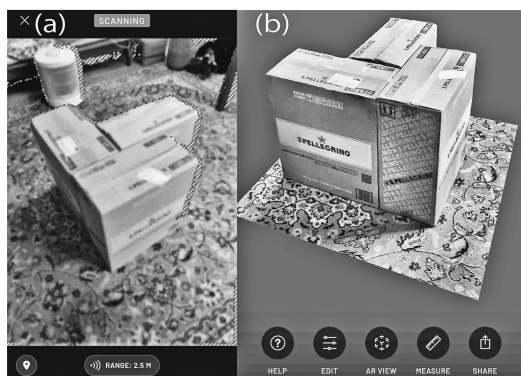


図14 Scaniverse による LiDAR スキャン結果

ボール箱の側稜がかなり歪んでいるのが見える。

図13はいずれも夜間の天井灯だけの照明の環境下で実施した結果であった。後日、同じ場所で、昼間の影が出ない日に撮影して、iPhone 12 Pro を逆さにして、できるだけ段ボール下部に対して垂直に撮影する工夫をして、図13(b)に現れたノッチを取り除くことができた(図14(b))。後日、他のアプリ3点も試したが最も優れた結果を示したのは、Scaniverse であった。Metascan は山道での再現性が最も高い印象を受けたが、室内の小さなターゲットの再現性には問題があった。

図14(a) は Scaniverse による LiDAR 測量を始めた際のスクリーンショットである。Scaniverse はスキャン開始のはじめに、次の3択メニューが現れる。Small Object (food, toys, pets, flowers), Medium Object (people, vehicles, furniture), Large Object / Area (rooms, buildings, outdoor spaces)。

(a) 図下端に RANGE: 2.5 M が見えるがこれは Medium Object に対応するスキャン距離に対応している。(a) 図には紅白幕(原図はカラー)のようなパターンが段ボール箱やこの後背の家具を縁取っており、Scaniverse ではまずは、シーン内の家具などの縁取りから始める設計がなされていることを示して

いる。ユーザーは、この紅白幕パターンが入った箇所についてスキヤンが順次、終了したと見做すことができる。全スキヤン完了時には、すべてのシーンが紅白幕パターンで埋め尽くされる。

(b) 図は全スキヤン完了後の編集画面のスクリーンショットの一部である。いわば図13(a) のスチル写真レベルで再現されていることがわかる。

II.2 屋外の柱状石碑

近所の^{いなつひこ}為那都比古神社には^{じんむてんのうようはいしよ}神武天皇遙拝所碑（図15(a) スチル写真）がある。方位磁石としては筆者が最も信頼するコンパス SUUNTO を使って、遙拝方位を求めるべく、まずは台石に載せてみた（図15(b)）。方位軸線（遙拝方向軸）はほぼ北東に向く。筆者のこの地の方位感覚からすると異常なので、この土台からコンパスを離してみた（図15(c)）。方位軸線は正しく東に向く。コンパスの縦エッジと碑の台石北縁枠がほぼ平行になるようにこの写真を撮影している。

この花崗岩は磁鉄鉱系列の山陰起源のようだ。遙拝先として考えられるのは奈良盆地南部^{うねびやま}畝傍山の麓に明治になって造営された神武天皇陵である。遙拝所碑は磁北から時計回り90°の東方向に向かって遙拝する形になっており、遙拝方向としては不適切と言わざるを得ない⁴⁾。

アプリ Metascan を使って、LiDAR 測量した結果が図16(a) である。この碑文の文字、特に「天」はかなり歪んでいる。石碑垂直方向の側稜も波打っている。この現象を LiDAR 測量特有のものと考えて、同アプリの写真モードも試してみた。その結果が図16(b) である。文字に歪みは無いが石碑垂直方向の側稜の歪みは、LiDAR 測量結果よりもむしろ大きくなっている。直方体の側稜の低い再現力は、LiDAR 測量に固有のものでは無いようだ。なお、図16(c) は、Scaniverse の LiDAR 測量結果の動画のスクリーンショットである。Metascan の測量結果（図16(a), (b)）よりも優れている。

これまでの使用経験から、Metascan は屋外での測量に適していると考えて

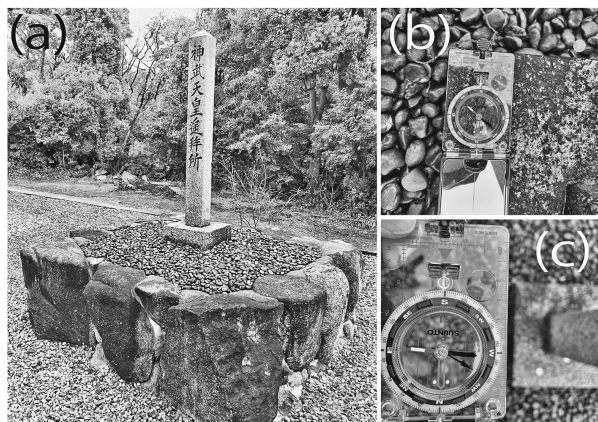


図15 為那都比古神社神武天皇遙拝所碑

いたが、厳密には自然界の不定形のオブジェクトを捉える能力に優位性がある
と考えるべきかもしれない。前述のように、図16(a) は LiDAR モード、図16
(b) は写真モードの結果である。写真モードでは石垣がよく再現されている
が、それは光学カメラによって撮影された写真が一気に広範囲を捉えうるから
である。図16(a)と(b)の差は、LiDAR モードでのスキャン作業が石碑を捉え
ることに集中した結果に過ぎない。

写真モードではシーンの重なりを2/3 (66%) ほどにして50枚撮影している。
ただし、空中写真のように光軸を平行にする必要性は全く無い。これはフィー
ルドで立体写真を多用してきた筆者にとっては驚くべきことであった。
LiDAR モードでは計算処理は iPhone 12 Pro 内部で実行されるが、写真モード
の場合は Metascan のサーバーにファイルをアップロードしてサーバー内で計
算処理される。撮影した写真ファイルは iPhone に保存されているので、後に
自宅やカフェなど Wi-Fi 環境の整った場所で実行した方が良い。バッテリー
も消耗するので予備バッテリーを持参した方が良い。LiDAR モードでは
iPhone 12 Pro の 5 m 制限があるが、写真モードではほぼ距離制限が無く、よ

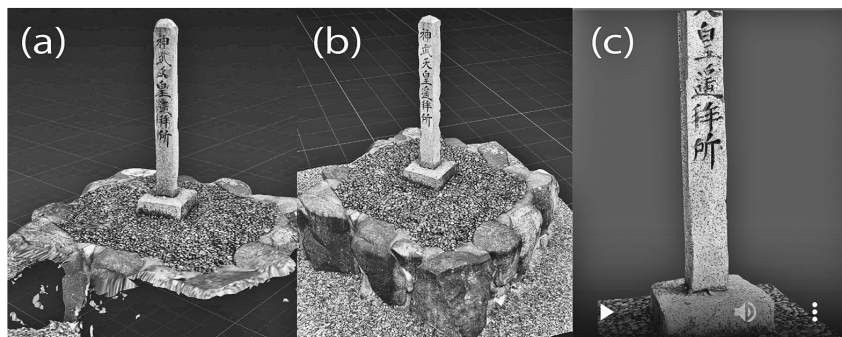


図16 神武天皇遙拝所碑のLiDAR写真測量結果

り広い場所での撮影に適している。

II.3 地球上の2地点間の方位関係

閑話休題。これは、社会科地理のテーマの一つである。高校地理で習う地図投影法の知識であるが、このテーマについては教科書には明記されていないし、授業でも取り上げられていないだろう。遙拝は人類の古くからの習慣であろうが、社会科レベルの教程を経た筈の神官が、神武天皇を遙拝すると言って日本列島を素通りして遙か太平洋に向くのはどうかと思う。

LiDAR 測量の際には、撮影地の方位は重要である。LiDAR 測量結果には方位は含まれない。米軍が公開するGPSをiPhoneで利用すると2023年現在、条件が良ければ地表数メートル内に位置を特定できる。さらに、近辺に地球座標系 \oplus と関連させうるランドマークが無い場合、方位情報が必須になる。この方位情報が無いと、LiDAR 測量結果は、数メートルの正確度で地球上に特定できたGPS地点を中心に360度回転して固定できないのである。屋外でのLiDAR 測量には、方位計測は欠かせない。

カシオの計算サイトの「2地点間の距離と方位角」⁵⁾には簡便法が提供され

ている。この計算法は地球を、赤道半径 $r=6378.137$ km とする球体として計算する。方位角は、北：0度、東：90度、南：180度、西：270度、と時計回りで表示される。地球形ではなくて、簡便に球体と見做されている。「2地点間の距離と方位角」を求めるには、まずは2地点を通過する大円を求めることである。高校地理で習う正距方位図法に該当している。

計算サイトでは、A から B の方角が出力されるので、A は神武天皇遙拝所碑、B は神武天皇陵の中心点とし、この2地点の経緯度（度単位）を求める必要がある。Google map を開くと A 地点は筆者の近所なので碑の場所がもう見えている。（空中）写真レイヤーを選んで、写真に見える碑の中心をクリックすると、プッシュピンアイコンが表示され、それを右クリックすると緯度経度情報が見えるのでこれをクリックするとクリップボードにコピーされる。それをペーストした座標値が、34.839443401497455, 135.4979094349702である。筆者は Google にログインして実行したがログインは不要かも知れない。検索窓に、「神武天皇陵」を入力すると一瞬で、ミサンザイ古墳（神武天皇畝傍山東北陵）が現れ、中心にプッシュピンアイコンが見える。上記同様、この B 地点プッシュピンを右クリックして、34.497598385218616, 135.78797768344108 が得られた。AB の経緯度をカシオの計算サイトで入力すると、次の計算結果が現れる。距離 = 46.404679 km, 方位角 = 145.006786° , $145^\circ 0' 24.43''$ 。碑から陵の方位は、ほぼ南東となっており、筆者の方位感覚とも合う。

Ⅲ 直方体の体積を CloudCompare で求める

主に iPhone 12 Pro + Scaniverse で取得した段ボール 3 箱と柱状石碑という直方体を主とするターゲットの体積を CloudCompare で求める作業に入る。CloudCompare は、Windows 版、Linux 版、Mac 版の形で公開されているオープンソースである。<https://www.danielgm.net/cc/> からダウンロードして自らの PC にインストールして欲しい。メニューの一部が日本語化されている

バージョンもあるが翻訳が不完全で、ユーザーがコマンドの機能を理解する上で混乱が生じるのでお勧めできない。PointCloud データ編集可能ソフト CloudCompare 概要⁶⁾、に使用法が簡潔に示されている。使い込むなかで他の機能も利用できるようになる。

筆者は mouse 製 Windows 10で使っている。なお、Mac 版も提供されているが以前使って問題があったので mac では削除している。CloudCompare を実行する上で参考になるので、可能ならば次の筆者のウェブページを本稿読了後に参照頂きたい。「iPhone 12 Pro 撮影の 3D スキャン画像の座標を捉える」⁷⁾、「裸岩露頭の iPhone 12 Pro を使った点群撮影」⁸⁾、「二つの 3D スキャンマップを繋ぐ」⁹⁾。

Ⅲ.1 ファイル出力

LiDAR 測量の結果は CloudCompare が扱うことのできる 3D ファイルフォーマットで出力が可能である。Metascan の無料版ではファイル出力はメッシュフォーマットの USDZ に限定されている。Pro の契約をしていないと他のファイルフォーマットではファイル出力できない。そして CloudCompare は USDZ に対応していないので、一応 Pro 契約が必要とはなる¹⁰⁾。筆者の LiDAR の使用頻度は低く、例えば二、三日、使用してまた数ヶ月後に二、三日、使用する。使用したい場合に、その都度、月契約 \$4.17 (2023 年夏) をしている¹¹⁾。Scaniverse は、出力も含めて無料である。

出力ファイルフォーマットは、メッシュフォーマットと点群フォーマットに分けることができる。点群ファイルの各点には RGB と深度情報が含まれ、センサーが受信したすべての反射光の点群で構成されている。メッシュファイルは LiDAR 測量結果とスチル写真情報から抽出された面情報から生み出されたものと言うとわかりやすい¹²⁾。

“How do you compare and evaluate mesh and surface representation vs

point cloud for 3D visualization?”¹³⁾ にはより適切な解説があるので参照していただきたい。このサイトでは Mesh を Mesh and Surface と称している。次の記述は示唆的である。“Each polygon has vertices, edges, and a normal vector that defines its orientation. The surface of the object can be smoothed, textured, or colored by applying different attributes to the polygons or their vertices.”

ネット上の情報¹⁴⁾と筆者の経験から、フィールドワークで得られた LiDAR 測量結果は、メッシュフォーマットでは FBX または OBJ、点群フォーマットでは PLY でファイル出力するようになった。OBJ は、Wavefront Technologies 社によって開発されたファイルフォーマットで、多くの 3D モデリング、レンダリングソフトが対応しており、「動かない 3D オブジェクト」に適していると言われる。FBX (アプリ FilmBox から) は、Autodesk 社が公開したファイルフォーマットである。「動く 3D オブジェクト」に適しているとされる。PLY (Polygon File Format) は、Stanford Computer Graphics Laboratory¹⁵⁾ で開発された。3D 点群の汎用フォーマットになっている。PLY - Polygon File Format¹⁶⁾ と題した概要には、“A typical PLY object definition is simply a list of (x, y, z) triples for vertices and a list of faces that are described by indices into the list of vertices. Most PLY files include this core information. Vertices and faces are two examples of “elements”, and the bulk of a PLY file is its list of elements.” という記述が見えており単なる点群からなるものではないことがわかる。それゆえ、PLY が点群ではなくメッシュとする誤解がネット上には見られるのである。

CloudCompare などによる分析過程で同じオブジェクトに対して、点群とメッシュの何れをも使うことが多い。本号をまとめる過程でわかったことであるが、PLY ファイルと OBJ ファイルは構造的に共通点が多く、期待した結果もより容易に取得できると感じている。Part 3 では、OBJ ファイルの問題点なども論じたい。

Ⅲ.2 段ボール3箱の点群ファイルPLYで体積を求める

図17のステル写真には、同じ段ボール箱を3個配置している。この箱を正位置にして、短辺と長辺を比べると長辺は短辺の正しく2倍になっているので、短辺を一つの単位とすると、図17の側面は12面から構成される。体積と面積に共通の上面の面積は実測値 $(3 \times \text{短辺}) \times (2 \times \text{短辺}) = 41.5 \text{ cm} \times 61.5 \text{ cm}$ となっている。図17では短辺のみからなる辺は5辺あるがいずれも21 cmであった。以上の観点と計測結果から、図17右手に示した体積と面積を得ることができた。

CloudCompare は点群処理が得意であり、主要アルゴリズムを使って体積を求めるには点群ファイルを使用する必要性を感じ、ここではPLY ファイルを使用した。

Ⅲ.2.a ステップ1： 必要な部分を切り抜く¹⁷⁾

ファイル「段ボール箱 Scaniverse Jan10-2 complete」のCloudCompare 画面を図18に示す。図中の正面に見える段ボールの側面はスカスカで、より内側



体積と面積の計算

$$\begin{aligned} \text{体積: 上面 } (41.5 \text{ cm} \times 61.5 \text{ cm}) \\ \times \text{高さ } (47.5 \text{ cm}) \\ = 121231.875 \text{ cm}^3 = 0.1212 \text{ m}^3 \\ \text{面積: 側面 } (21 \text{ cm} \times 47.5 \text{ cm} \times 12 \text{ 面}) \\ + \text{上面 } (41.5 \text{ cm} \times 61.5 \text{ cm}) \\ = 14,522.25 \text{ cm}^2 = 1.4522 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

図17 段ボール3箱の体積と面積

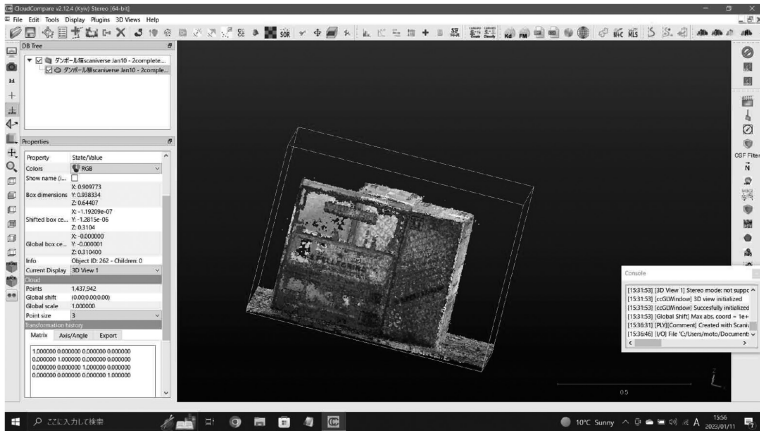


図18 段ボール箱 PLY の CloudCompare 表示

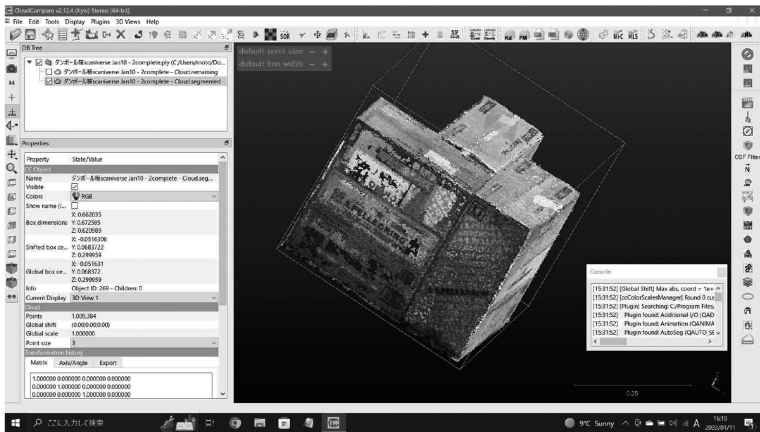



図19 segmented cloud の CloudCompare 表示

の段ボール内面も透かし見えている。Points 数は1,437,942で十分だと思うが、図18左ペーン下部に見られるように Point size 3 に設定しているが、Point size を増やしても、汚くなるだけだ。どうも（直射日光ではないが）ガラス窓

から入る自然光からすると影の部分がスカスカになっている。アップル LiDAR の特性に由来するものと思われる。

不要な部分を削除することになるが、ここでは段ボールが載るカーベットの見える部分が削除対象になる。左端のツール群から set top view（虫眼鏡アイコンの直下）を選択して、平面図を表示し、上段のツール群のハサミアイコンをクリックして、分割 segmentation を実施した。図19左ペーン上部の DB Tree ウィンドウに見られるように点群 segmented だけを表示している。分割を実行すると segmented cloud と remaining cloud に分かれる。欲しいのは segmented cloud（段ボール3箱）で remaining cloud（周辺のカーベット）は削除対象になる。なお、DB Tree ウィンドウに表示されているフォルダは、一般に group entities、この構成要素は entities と呼ばれる。脚注¹⁸⁾に説明する。

Ⅲ.2.b ステップ2： 体積を求める¹⁹⁾

体積計算では段ボール3箱を設置したカーベットの（高度軸の）Z値が必要である。上段ツールの左から四番目の  Point list picking（このツールでクラウド内の座標値を得ることができる）を使用する。分割した後であっても、辛うじて残ったカーベットでの5点のZ値のうち、0.008332が最小であったので、Ground 値を一応、0.008とした（0.000で問題が無い）。この作業実行後、DB Tree ウィンドウに示したように、八分木 Octree が作成される。

segmented cloud を選んで、Tools > Volume > Compute 2.5D volume、を実行した（図20）。Ground > Default height=0.008とし、Ceil のファイルはこの segmented cloud で、Empty cells には一応、interpolate、Grid > step=0.001（最小）とすると、自動で平面サイズ663×674（44,862 cells）が現れる。横に長い赤いボタン Update（原図はカラー）をクリックした結果が図20。警告メッセージはない。

図20に現れた Volume calculation パネル下部の矢印で示した場所に、Volume 0.133（図17の実測値は0.1212、計算値/実測値=1.097）、Surface

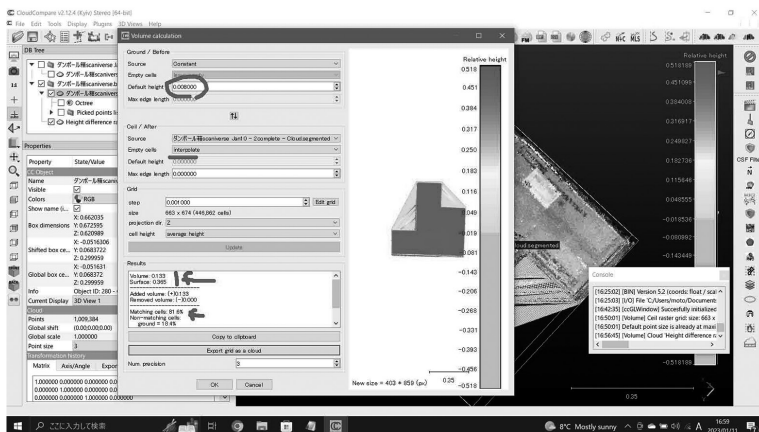


図20 体積計算

0.365 (図17の実測値は1.4522) が見える。matching cells は81.6%でかなり高い。

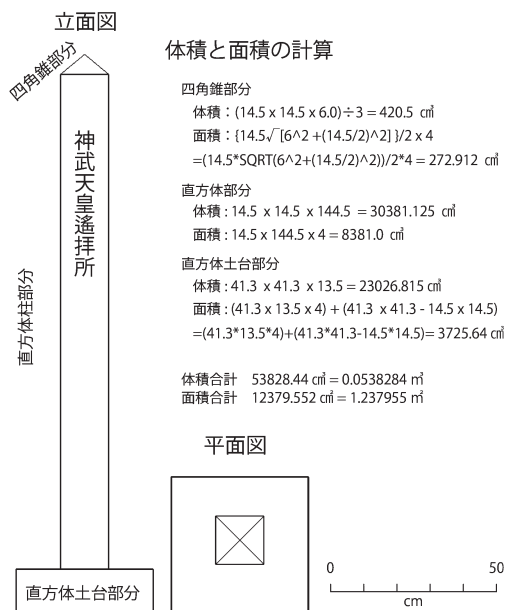
表面積計算値は実測値と大きな差があるが、Surface は平面図の面積を指している。Grid size (663*674)×cell 面積 (0.001^2)×Matching cells 率²⁰⁾ (81.6%)=0.365となる²¹⁾。この計算式が成り立つのはGroundをConstantにした場合に限られる。

Ⅲ.3 柱状石碑のメッシュファイル FBX と OBJ で体積と表面積を求める²²⁾

Scaniverse の神武天皇遙拝所碑メッシュファイルとしては、FBX と OBJ を使った。実測値を図21に示す。

Ⅲ.3.a FBX ファイル

FBXについて、碑の部分だけを分割したのが、図22 (top view) の左ペーン DB Tree ウィンドウに見える mesh.part であり、このメッシュエンティ



体積と面積の計算

四角錐部分

体積 : $(14.5 \times 14.5 \times 6.0) \div 3 = 420.5 \text{ cm}^3$

面積 : $\{14.5\sqrt{[6^2 + (14.5/2)^2]}\} \div 2 \times 4$
 $= (14.5 \times \text{SQRT}(6^2 + (14.5/2)^2)) / 2 * 4 = 272.912 \text{ cm}^2$

直方体部分

体積 : $14.5 \times 14.5 \times 144.5 = 30381.125 \text{ cm}^3$

面積 : $14.5 \times 144.5 \times 4 = 8381.0 \text{ cm}^2$

直方体土台部分

体積 : $41.3 \times 41.3 \times 13.5 = 23026.815 \text{ cm}^3$

面積 : $(41.3 \times 13.5 \times 4) + (41.3 \times 41.3 - 14.5 \times 14.5)$
 $= (41.3 * 13.5 * 4) + (41.3 * 41.3 - 14.5 * 14.5) = 3725.64 \text{ cm}^2$

体積合計 53828.44 $\text{cm}^3 = 0.0538284 \text{ m}^3$

面積合計 12379.552 $\text{cm}^2 = 1.237955 \text{ m}^2$

平面図

図21 柱状石碑の体積と表面積

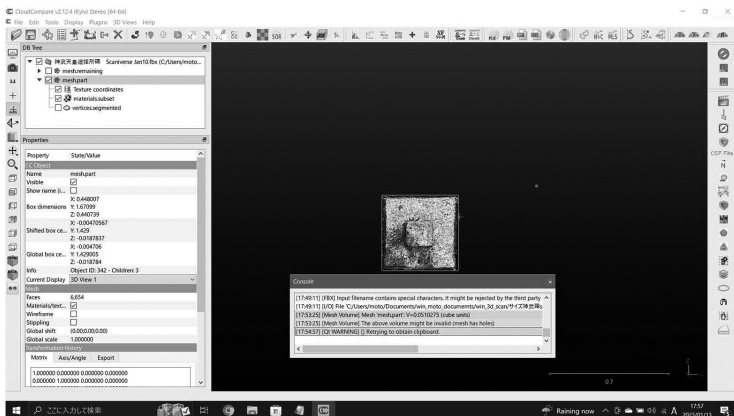


図22 FBX ファイルの体積計算

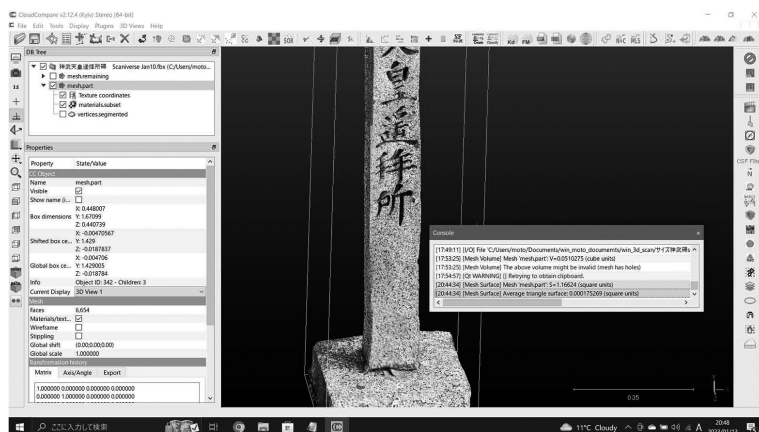


図23 FBX ファイルの表面積計算

ティーを対象に Edit > Mesh > Measure Volume を実行した結果が図22メーンページ下部に載る Console に見える。体積は、 $V=0.0510$ (cube units) で、図21の実測値= 0.0547 m^3 との間に、大きな違いはない。ただ、このコンソールのメッセージには、赤字（原図はカラー）で“The above volume might be invalid (mesh has holes)”，とある。

mesh part の表面積について、Edit > Mesh > Measure Surface を実行した結果を図23に示している。Console に結果が表示されているが、 $S=1.16624$ (square units) で、図21の実測値= 1.264 m^2 と比較すると、これも大きな違いはない。V と違って、“invalid” のメッセージは無い。

III.3.b OBJ ファイル

FBX ファイルに代わって、もう一つのメッシュの OBJ ファイルの結果も得られた。FBX ファイル同様、体積の計算結果については、“invalid” 表示が出る。V=0.0511 (cube units) で FBX ファイルとほぼ同様である。表面積は S=1.146 (square units)。OBJ ファイルに係わる出力図は省略する。

Ⅲ.4 計算結果の比較²³⁾

メッシュファイルの体積の計算の際には必ず，“The above volume might be invalid (mesh has holes)”という警告メッセージが出る。この原因を特定すべく種々の試行錯誤を行なった。つまり，MeshLab内で，オブジェクトの穴をすべて塞いだ。それでも警告メッセージは消えない。この警告メッセージは，LiDAR 測量で得られたオブジェクトの底のメッシュの欠落に由来するものであった。空中に浮くターゲットを除いて，オブジェクトの底のメッシュは得られない。ただ，この文脈では後述のようにこのメッセージを無視しても正確な体積を得ることができる。

段ボール3箱，柱状石碑，いずれもこのターゲットの底をスキャンしていない（出来ない）から，得られたオブジェクトの底には例えば，図24(a)のようにメッシュがない。これが警告メッセージの原因であった。

表3には，段ボール3箱と柱状石碑について，3種のファイルフォーマット，すなわち，「点群ファイル PLY からメッシュに変換しさらに点群に変換したエンティティ（表3のRemarksでは，『→メッシュ→点群』）」（脚注²⁴⁾に説明），メッシュファイル FBX，OBJ それぞれについて，体積や表面積，そして実測値との比を示している。いずれも LiDAR 測量アプリ Scaniverse の出力結果を使用している。

表3の第5列（体積についての VR：CloudCompare 計算値/実測値）と第6列（表面積についての SR：CloudCompare 計算値/実測値）に示すように，メッシュファイルについては，体積，表面積いずれの計算値も，実測値との比は1に近い。

点群ファイルの表面積の結果はすでに見たように論外である。前述の，Ⅲ.2 段ボール3箱の点群ファイル PLY で体積を求める，得られた段ボール3箱の体積は 0.133 m^3 であった（図20）。CloudCompare 内で点群をメッシュ化して穴除去作業の後に点群に戻すという回りくどい作業で得られた 0.1290 m^3

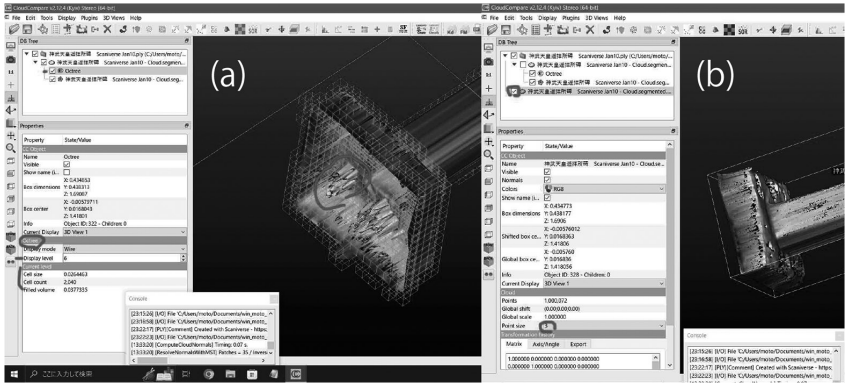


図24 柱状石碑 (a) 点群からメッシュに (b) メッシュから点群に

(表3)については、処理前の0.133(図20)と比べて真値に近づいてはいる。

問題は、点群をメッシュ化して穴除去作業の後であっても、柱状石碑の体積については、実測値との比が0.59となっていて、この結果は実用に耐え得ない。CloudCompareで柱状石碑PLYファイルをメッシュに変換したものの台座付近の像を図24(a)に八分木Octree(図中のネット)とともに示している。(b)はこのメッシュをさらに点群に戻した(変換した)ものの台座付近である。両図を見ると、風化で斑らに汚れた部分などは、深く陥没している。これは、アップルのLiDARの特性とアプリScaniverseに組み込まれているアルゴリズムに由来するものであろう。なお、段ボール3箱についてはこの石碑のような極端な歪みは見えない。それゆえ、点群PLYについては、3Dスキャン像の確認によって、得られた体積値の信頼性を評価できるだろう。

点群PLYファイルの2.5D Volume計算値については、このように3Dスキャン像を確認することで採用、不採用を決めることができるのである。

なお、柱状石碑の点群PLYをメッシュに変換した3Dメッシュ²⁵⁾について、Edit > Mesh > Measure Volumeを実行すると、 $V=0.0541241$ (cube units)となり、実測値0.0538に極めて近い結果(VR=1.006)が得られる。

表3 段ボール3箱と柱状石碑の体積と面積の計算結果

身近な直方体	ファイル形式	Volume (m ³)	Surface (m ²)	VR: CC値/実測値	SR: CC値/実測値	Remarks
段ボール3箱	実測値	0.1212	1.4522			実測
	点群 PLY	0.1290	0.3630	1.06	0.25	→メッシュ→点群
	メッシュ FBX	0.1328	1.4893	1.10	1.03	
	メッシュ OBJ	0.1437	1.3208	1.18	0.91	
柱状石碑	実測値	0.0538	1.2380			実測
	点群 PLY	0.0320	0.1890	0.59	0.15	→メッシュ→点群
	メッシュ FBX	0.0510	1.1662	0.95	0.94	
	メッシュ OBJ	0.0511	1.1460	0.95	0.93	

表4 3D点群とメッシュの穴埋め作業の結果

身近な直方体	穴埋め作業	Volume (m ³)	Surface (m ²)	VR: CC値/実測値	SR: CC値/実測値
柱状石碑	実測値	0.0538	1.2380	—	—
	点群 PLYを3Dメッシュ化	0.0541	—	1.006	
段ボール3箱	実測値	0.1212	1.4522	—	—
	メッシュ OBJをMeshLabで	0.1287	1.4542	1.062	1.001

前述のごとく、アプリ MeshLab を使って 3D データの欠損を埋める²⁶⁾作業も実施した。この結果、例えば段ボール3箱の OBJ ファイルから、体積 0.1287 m³、表面積 1.4542 m² が得られた。VR=0.1287/0.1212=1.062、SR=1.4542/1.4522=1.001であり労力は要するが、より満足の行く結果になった。

以上2例(表4)のように、高い正確度で体積を求めることができる。

Ⅲ.5 オブジェクトの底抜きを補修しても

柱状石碑オブジェクトの底抜きを解消して、そのことが正確度の向上に繋がるのかを調べた。この手順は結構複雑で、筆者のウェブサイトの「LiDAR スキャンオブジェクトの底を塞ぐ」²⁷⁾の「8 柱状石碑メッシュ系 OBJ ファイルで底抜きを塞ぐ」に掲載している。

図25(a)は MeshLab で底抜きを塞いだところである。Filters > Remeshing, Simplification and Reconstruction > Close Hole などの過程を経ている。柱状石碑だけを対象にして底を塞ぐことはできず、その周囲の玉砂利地面も含める

ことで達成できた。図25(b)に見えるように玉砂利の部分は膨れあがっている。このオブジェクトを CloudCompare で読み込んで (図25(b))、体積計算を実行すると invalid 警告表示もなく、 $V=0.119938 \text{ m}^3$ を得ることができた (図25(d))。このオブジェクトを図25(c) (top view) の赤線枠 (原図はカラー) で柱状石碑と「それ以外」に分割して、膨れあがった「それ以外」のオブジェクトを MeshLab に読み込んで切り口を塞いだ (図25(e))。そして柱状石碑と「それ以外」の合計体積 $V=0.119938 \text{ m}^3$ から、切り口を塞いだ「それ以外」(図25(e))の体積を差し引いて、柱状石碑の体積 $V=0.0518695 \text{ m}^3$ を得ることができた。この実測値との比は0.965となり、元々の点群 PLY を 3D メッシュ化したものの比1.006 (表4) よりも実測値からより離れる結果となった。

つまり、invalid 警告が出ても、底抜けオブジェクトを直接計算することに問題は無いことがわかる。

3D メッシュオブジェクトに対する、Edit > Mesh > Measure volume や、3D 点群オブジェクトに対する Tools > Volume > Compute 2.5D volume の命令について、CloudCompare フォーラムでの CloudCompare 開発者 Daniel Girardeau-Montaut によるアドバイスを次に記す。

Edit > Mesh > Measure volume について：テーマ “Calculation of volume”²⁸⁾ の中で、次のアドバイスが掲載されている。“Don't you get a warning in the Console?! Because this method needs (normally) a closed mesh

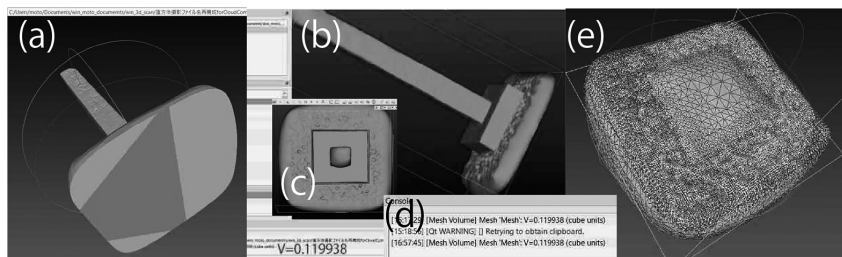


図25 オブジェクトの底抜けを塞ぐ


to produce an accurate volume (since it computes the volume ‘inside’ the triangles). If your mesh is open, it only works under very specific conditions (like the mesh should be cut at $z = 0$ or something like that).” ターゲットから作成されたオブジェクトの下限がほぼ水平であれば、オブジェクトの底が抜けていても問題が無いということだ。

Tools > Volume > Compute 2.5D volume²⁹⁾ について：テーマ “2.5D vs. 3D”³⁰⁾ の中で、次のアドバイスが掲載されている。“2.5D means that there’s no point that projects on top of other points when the cloud is projected along a specific dimension (generally Z). This generally means that the cloud has been acquired from a quite far distance without changing the orientation too much (e.g. with airborne LIDAR). Or that the shape has only one side (e.g. a mountain seen from the top, etc.). This tool can be used to compute the volume between a 2.5D cloud and an arbitrary plane (constant height) or between two 2.5D clouds.”








CloudCompare でのコマンド選択の可能性の観点から、前者は 3D メッシュオブジェクト用、後者は 3D 点群オブジェクト用と考えてしまうが、前者は、メッシュオブジェクトを三角錐に分割しそれらを足し合わせることで全体の体積を求めているのでオブジェクトに破れがあると計算に混乱が生じる。後者は図20と図24(a) で垣間見えるように、垂直の正四角柱に分割してその総和で体積を求めており、その構造は極めてシンプルと言える。

IV 3D の点群またはメッシュのための CloudCompare 分割ツール³¹⁾

ここで述べる内容は CloudCompare での LiDAR 測量結果のいわば整頓作業の手法である。3D 点群またはメッシュの不要な部分を削除するツールは、図26の segmentation tool (分割ツール) にあたる。本章は CloudCompare で実際に作業する際に読めば良い。

ステップ 1 : 3D モデルを平行移動 (右クリック + ドラッグ) したり回転など (左クリック + ドラッグ) しつつ不要な点群 clouds や面群 meshes を探す。**ステップ 2 :** このツールの起動は、CloudCompare 画面³²⁾上段トップのアイコン群の右の segmentation tool (図26右端に拡大表示したハサミアイコン、CloudCompare のバージョンによってアイコン位置は異なる) で実行する。Edit > Segment, でも呼び出しが可能で、その結果、3D の点群またはメッシュの表示画面の右上に、図26左下の大きな枠で示したツールバーが現れる。**ステップ 3 :** 初期設定は、図26のツールバー 3 に見えるように、ポリゴン編集モードになっている。多角形で不要なものを囲むことになる。左クリック、左クリック、左クリック、と不要な部分を囲む。五角形で囲みたい場合、5 回左クリックして、その後、適宜右クリックするとポリゴンが閉じる。**ステップ 3' :** 矩形編集モード Rectangular selection mode にするには、図26の 3 の  をクリックして選ぶ。矩形を作る場合は、矩形 1 頂点を左クリック (プレス) してそのままホールドして、その対角線が到達する頂点でリリースする。

アップル LiDAR デバイスで 3D スキャンしたい対象域 (ROI : region of interest) は基本的には矩形領域と考えて良いだろう。それゆえ、矩形編集ツールで囲む場合、必要な部分を対象にしているのだから、図26の 4 を使って、矩形以外の領域を削除することになるだろう。これを削除作業の最初に使用すると、PC の負荷が低下して、その後の削除作業が軽くなる。

ステップ 4 : 3 または 3' に続いて、図26の 4  または 5  のボタンをクリックする。4  を押すと、囲んだ範囲の内側が残る (to keep points inside)。5  を押すと、囲んだ範囲の外側が残る (to keep points outside)。不要な範囲を囲むのが普通だから、通常は繰り返し 5  を押すことになる。5 のアイコンは多角形の内部が空白なので、内部を削除するというように考えれば良いだろう。勘違いした場合、6 の  で前の手順に戻ることができる。**ステップ 5 :** 一つ実行する度に、paused mode になる。この時、削除したい点群や面群をはっきりと見えるようにして、ツールバーの 1 の  をクリックすると、

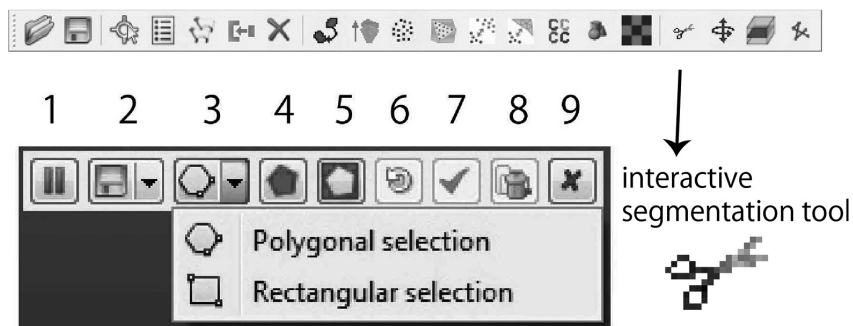


図26 segmentation tool, tool bar for segmentation











paused mode からまた segmentation モードになり，多角形で削除する対象を囲むことができる。削除ツール segmentation tool からすると，この機能がオフされている状態を，paused mode つまり，分割ツールの休止状態，とよぶ。この状態の時に，3D 点群またはメッシュの回転，移動，ズームなどができる，と考えるのである。図26のツールバーの1の  は，paused mode と segmentation mode のトグルになっている。paused mode では3Dの点群やメッシュを移動または回転などをして，作業がし易いように削除範囲を表示し， をクリックして，segmentation mode で作業を実施する。図26の6の  (clear segmentation) によって，segmentation の実行結果の一つ前に戻ることができる。Refresh という表現でも代替できる。**ステップ6**： 以上の segmentation 作業を繰り返した後に，これまで繰り返してきた分割（削除）作業を3D点群またはメッシュに分ける必要が生じる。図26の7の  (confirm segmentation) をクリックすると，後述するエンティティー表示機能が働いて，それまで削除してきたゴミが復活したように見える。上記リンクのマニュアルでは，“validate the current segmentation and create two clouds: one with the selected points and one with the others” とあるが，わかりにくい。

図26の7の  (confirm segmentation) ボタンの役割を知るために，図27を

用意した。これは筆者の近所の集合住宅をアプリ Metascan Pro 写真モードで撮影したもの³³⁾の一部である。南面には別の建物が接して、全周は撮影できない。午後の撮影なので西面では太陽の斜光が直射している。図27の CloudCompare 画面内にあたる像は中央のコの字型のもの(平面図)で、左下の建物の鳥瞰像は Adobe Photoshop で CloudCompare 画面の上に乗せたものである。FBX ファイルを CloudCompare で開いた際には、3D メッシュエンティティ Mesh 0 が用意されるが例えば、この建物の周辺を Segmentation tool の3の  (polygonal selection) ボタンを使って、4の  (segment in, 多角形で囲んだ範囲を残す) を選択した。この作業をここでは種々の作業の最後のものとしてみよう。

7の  (confirm segmentation) を実行すると、Mesh 0 は、Mesh 0.remaining と Mesh 0.part に分割される。segment in した建物が Mesh 0.part で、作業者としては不要なエンティティが Mesh 0.remaining に対応している。この段階では前述のように両 Mesh が表示される。図27左上の DB Tree ウィンドウでは Mesh 0.part のみ表示するように を入れている。7の  の代わりに、8の  をクリックすると、どうなるのか。このボタンには、“validate the

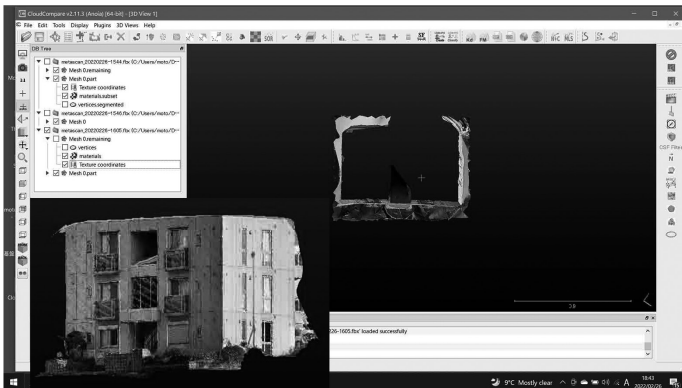


図27 confirm segmentation の役割

current segmentation and create only one cloud with the visible points (☒) – the other points will be deleted” と説明がある。✓の場合は元の Mesh 0 は Mesh 0.remaining と Mesh 0.part に分割されて図27の左ペーン上部の DB Tree ウィンドウに見えるようにメッシュエンティティ remaining が生成されるが、☒の場合は、新たなメッシュエンティティ remaining は作成されない³⁴⁾。なお、図26の9の✕ボタンをクリックすると、削除ツールの作業はすべてキャンセルされる。

V 元伊勢大饗石の LiDAR 測量

伊勢神宮は現在の安住の地に辿り着くまでに近畿地方を数十年単位で移動してきたようで、その幾つかは片鱗が残存しており、元伊勢と呼ばれている。現在の伊勢ではこの伝統に基づいて境内域内で、式年遷宮が千年以上続く。元伊勢の代表格は、京都府京丹後市峰山町久次にある比沼麻奈為神社とされる。その奥山にあたる久次山の中腹に大饗石^{おおあえいし}があり、これはテーブル状を呈し、古代またはそれ以前に遡る可能性もある伝説を伴う。この大饗石の LiDAR 測量を実施した。いわば、これは Part 2 の本題とも言える。

V.1 大饗石の地球科学的起源³⁵⁾

図28地質図南西部に大饗石の位置を示す。この地図の南東隅には丹後半島付け根付近にある天橋立内海^{らぐん}の阿蘇海が見える。丹後半島は主に古第三紀に貫入した宮津花崗岩で構成され、この上位に大きな不整合を介して前期中新生の火山岩が載っている。大饗石は花崗岩域に分布するが、近隣の久次山山頂付近に分布する火山岩がロックフォールしてきた岩群の一つにあたる。大饗石はいわば御神体なので、この裾部の一部の破片や大饗石側面の地衣類が見られない露頭から、凝灰岩と判断した。

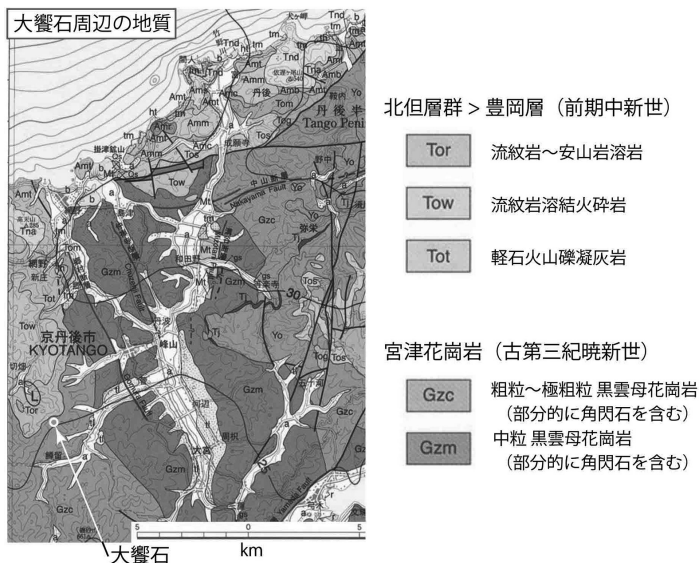


図28 20万分の1地質図『宮津』第2版(2022年刊)の大饗石付近

Fisher (1966)³⁶⁾ によれば, 含有する火山礫(ここでは斜長石結晶)の構成比は1/4より多少低く凝灰岩に分類される。図29の(a)にはスケールを配置している。(b)は同岩片一部の拡大写真で斜長石の長軸方向と堆積構造がほぼ対応しており, フローユニットを構成しているように見える。(a)図と(c)図についてはPhotoshopのスマートシャープツールを使用して堆積構造を強調している。宇井忠英先生によれば, 「淘汰が宜しくないので降下火山灰起源とするのは疑問」というコメントを頂いた。この堆積構造もあって, ロックフォール過程で, 層理面が大饗石つまりテーブル状の様相を呈して落ち着いたものと思われる。

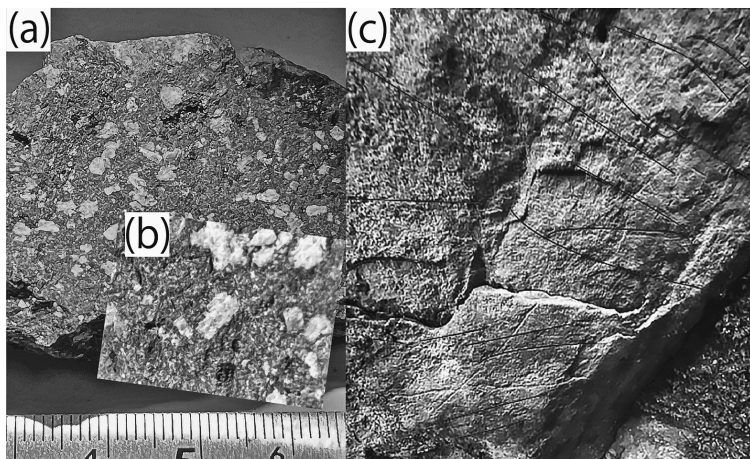


図29 (a) (b) 凝灰岩岩片 (c) 露頭の層理

V.2 LiDAR 測量 3D 点群 PLY から大饗石の地形学的立地を検出

図30は、アプリ Metascan Pro で大饗石周辺を LiDAR 測量した結果の一部で、左ペーン上部ウィンドウ DB Tree に表示されているように、点群 PLY ファイルのものである。

3カ所の赤丸（原図はカラー）で囲んだ言わば白いキノコのようなものは、大饗石のそばのより高いオブジェクト、つまり大饗石に覆い被さる大枝が捉えられたものだった。図30画面右下隅に小さく見える XYZ 軸（カラー画面では RGB で表示）は、右手座標系で Z 軸は高度軸に対応している。

図31は、IV で示したツールを使って図30より広い範囲を示したもので、その側面図にあたる。ほぼ中央に位置するトップが水平に近い岩塊が凝灰岩からなる大饗石である。大饗石に続く左手の大きな岩塊はデイサイト³⁷⁾からなっているが、この岩塊頂部も土台の斜面とほぼ平行になっている。それぞれ前期中新世の凝灰岩層と溶岩層からの崩落物である。

現地でも iPhone の LiDAR 操作をしている際には、図31に見える岩塊とその

フィールド科学のためのアップル LiDAR 測量 Part 2 (木庭)

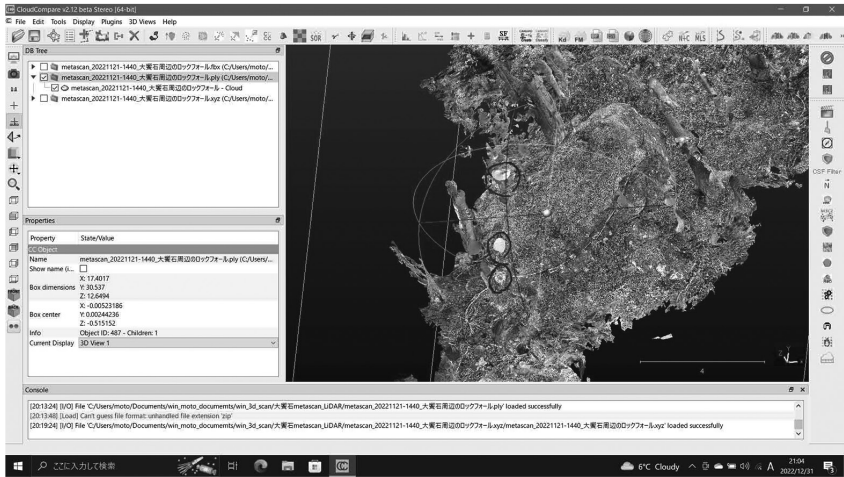


図30 大甕石周辺 LiDAR 測量 PLY

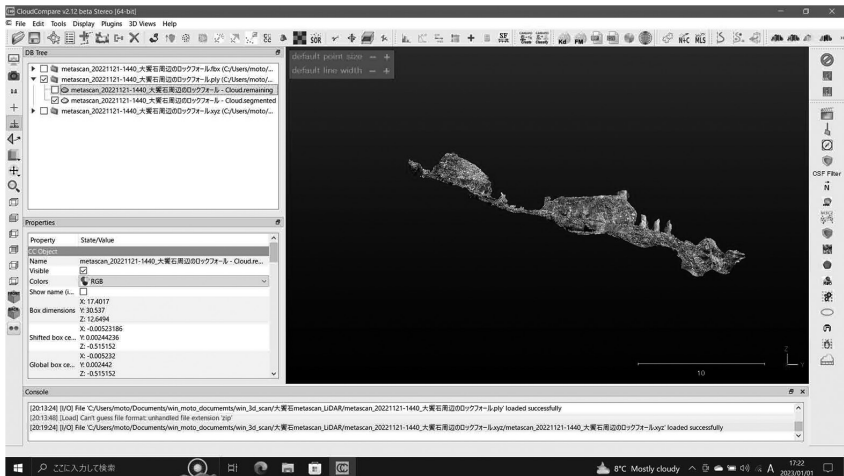


図31 点群 remaining を非表示にして (左手上方が久次山方面)

土台の斜面の関係を筆者には全く認識できていなかったのである。なお、大饗石が、緩斜面にただ載っていて地山にはほぼ埋まっていないのか、大饗石の左手（山頂側）については埋まっているのか、と言ったことはわからない。ここで大饗石の体積という場合は、地表に出ている部分を指すものとする。

V.3 大饗石の3Dオブジェクト抽出

大饗石だけの3Dオブジェクトを確保したい。図32(a)は図31の大饗石付近のtop viewを表示したものである。これを、回転、移動、拡大などを繰り返して分割 segmentation を続けて得られたものが、図32(b)のオブジェクトである。この図の右下には3m長のスケールが見える。この作業結果はCloudCompare bin ファイル³⁸⁾として保存した。

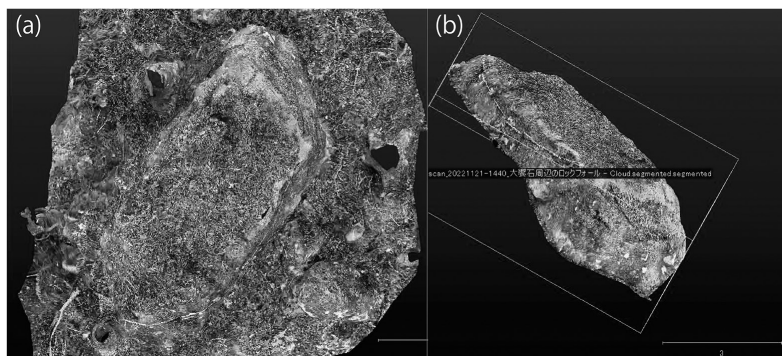


図32 (a) 大饗石と周辺 top view (b) 大饗石だけ スケール 3m

V.4 Meshmixer で大饗石の底抜きを解消して体積を求める

Meshmixer 3.5 is now available!³⁹⁾ からこのアプリをダウンロードできる。筆者が用意していた大饗石オブジェクトだけの MeshLab ファイルから OBJ

ファイルを抽出して Meshmixer にインポートした。メッシュの綻びをチェックすべく、解析>検証, を選んだ。かなりの綻びがシーンに表示される。「すべて自動修復」ボタンを押した。実行にかなりの時間を要した。MeshLab でこの種の作業を実施してきたファイルではあったが、Meshmixer からするとまだ綻びがあるようだ。Meshmixer は、ビジュアルに簡便に、この種の作業が実施できる。これは驚きであった。

その上で、解析>ソリッド作成, を実行した。これも時間を要したが、図33(a)のように見事に底抜けが解消した。しかも MeshLab でのポアソン再建の如く異様に膨らむこともなく、しっかりとした薄皮一枚で底抜けが解消されたのである。

Meshmixer は、編集過程などで生じた 3D オブジェクトの変形を修復する機能も持っている。ここではブラシのフラット化ツールを使って修正した結果を図33(b), (c) に示している。(b) は (a) の新たに付加された底面をフラット化ツールを使って滑らかにした bottom view である。(c) は大饗石地上部の東壁および周辺をフラット化したもので、これはフラット化前の (a) 右手突出部にほぼ対応している。

なお、このような作業を経たファイルは CloudCompare で開く前に、Meshmixer で、解析>検証>すべて自動修復, を改めて実行しなければならない。

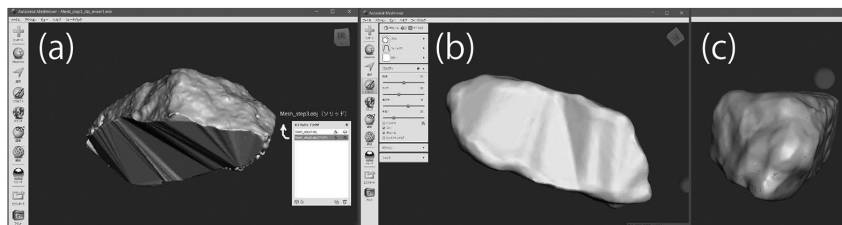


図33 Meshmixer によるソリッド化とフラット化

V.4.a 大饗石 OBJ ファイルのメッシュ体積計算

この OBJ ファイルを CloudCompare で開いて、Edit > Mesh > Measure volume 及び > Measure surface を実行すると、図34(a) のように、 $V=37.6635$ （警告メッセージなし）、 $S=69.7322$ を得ることができた。

V.4.b 大饗石 OBJ ファイルの点群 vertices から2.5D volume 計算

OBJ メッシュファイルには点群 vertices が含まれており、これを使うと点群対応の2.5D volume 計算が可能になる。2.5D volume 計算は、Ceil（シール、天井面）にあたる点群と Ground（底面）にあたる点群の間の3D空間を垂直方向の小さな立方体で構成される正四角柱で分割して、Ceil と Ground の間の立方体を数える手法である。

この手法では、OBJ ファイルの点群 vertices を、3D 構造を考慮して、Ceil 点群と Ground 点群に分割する必要があるが、IVで示した分割ツールを使って、Ceil 点群と Ground 点群として、それぞれ segmented 点群と remaining 点群を割り当てることになるのである。図34(b) では分割できた两点群を選んで表示しているのので、シーンには……segmented……と……remaining……の名称が見える。白っぽく広い面は底面の部分であって、Ground 点群に対応している。

Ceil 点群と Ground 点群それぞれを構成する点数は、この大饗石の例ではそ

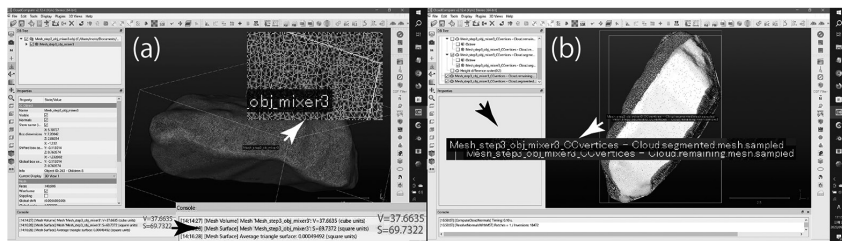


図34 CloudCompare でメッシュ体積面積計算と点群体積計算の準備

それぞれ5万点, 2万点ほどなので, Ⅲ.4 計算結果の比較, で述べた「点群ファイル PLY からメッシュに変換しさらに点群に変換したエンティティ」の手法で, それぞれ百万点ほどに増やして, 図34(b) のように Ceil と Ground の両点群を選択して, Tools > Volume > Compute 2.5D volume を実行した。実行結果を図35に示している。正四角柱の断面は正方形であるがその一辺を CloudCompare では Grid の step といい, 図35のものは step=0.005 m としている。図35(a) は計算結果のパネルを示していて, この結果の数値がみえるように切り取って拡大している。Volume : 31.825 m³, Surface : 17.921 m², Matching cells : 81.6%を示している。このパネル下部の OK ボタンを押すと, パネル表示が消えて, 図35(b) が現れる。点群密度は, 反射光量を反映して北壁は南壁に比べるとかなり低い。大饗石の標高分布別に赤色と緑色の間で段彩(原図はカラー)されており, 最下部付近の緑色の点群の塊は Ground cloud に相当するものである。

なお, 上述のように点群の点数を増やさない場合, step : 0.1より小さくすると, 赤字で At least one of the cloud is sparse! You should fill the empty cells... という警告が現れる。

V.4.a のメッシュの体積は前述のように37.6635 m³であった。点群の体積は31.825 m³である。メッシュの体積は, 図34(a) のメッシュ拡大図に見える

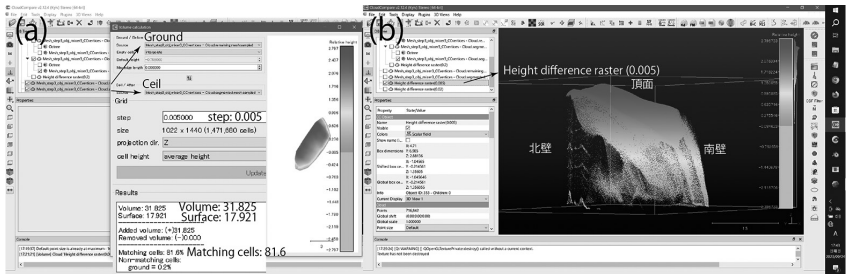


図35 点群2.5D volume 計算

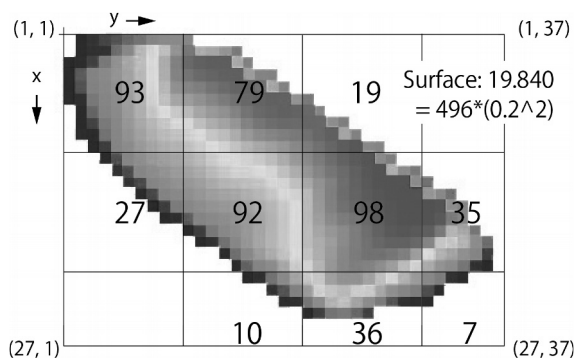


図36 Surfaceを構成するセルマップ

ようにメッシュエンティティは三角面 triangle faces からなり、適当な原点から三角面それぞれの頂点に側稜が伸びて、オブジェクトは三角錐で埋められる。それぞれの三角錐の体積の総和がメッシュファイルの体積となる。前述のように2.5D volume 法はこのメッシュ法に比べると粗雑になっているので、メッシュ法の体積 $V = 37.6635 \text{ m}^3$ を採用することになる。土木工事などで工事の前後の土量の移動などの場合は、適用が2.5D volume 法に限定されるので、もちろん、この手法の使用価値はある。

なお、図35(a)のSurface値：17.921の算出法について確認したい。step値は図35(a)では0.005であるが、読者の目に見える形で表現しにくいので、step：0.200として図36に示している。ここでは、 $V : 32.441$ 、 $S : 19.840$ 、Matching cells：82.4%となる。なお、図中のSurfaceの計算式中の496 (=93 + 79 + … + 36 + 7)は正四角柱の総本数に当たっている。CeilとGroundの両cloudで算出する場合、Surfaceの計算式にMatching cells (%)値は関与しない。

おわりに

第七十三巻第一・二合併号の Part 1 では、2020年アップル LiDAR デバイスの市場提供の目的とそれを達成すべく設計された構造などについて見てきた。本稿 Part 2 では、それを踏まえて、アップルデバイスを使った LiDAR 測量の実例の一つ、外形取得と体積計算を述べてきた。この認識に至る試行錯誤は当方のウェブサイト <https://motochan.info/wp/> に見える。

退職直後から、この iPhone の LiDAR 測量を使った地形測量に関心を持ち、小さな実験を繰り返してきた。その小さな成果は、フィールドワークや地理教育に活かせるように思う。引き続き Part 3 に公開して行きたいと思う。この嵩高い発表にご理解頂いている本論集スタッフに感謝したい。

注

- 1) Object Capture <https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/object-capture/>
- 2) Scaniverse - 3D Scanner <https://apps.apple.com/jp/app/scaniverse-3d-scanner/id1541433223> 2023年夏現在, 無料。以前は有料だが今後改善されて有料になる可能性がある <https://scaniverse.com/>。
- 3) Metascan - 3D Scanner <https://apps.apple.com/jp/app/metascan-3d-scanner/id1472387724> 事実上, 有料で Pro に加入する必要がある。2023年夏現在, 月 \$ 4.17, 年 \$ 49.99 <https://metascan.ai/> 写真スキャンは300枚/回, 150回/月。
- 4) この例では磁鉄鉱の多い花崗岩からコンパスを離すことで、ノイズ解消が可能であったが、例えば磁鉄鉱の多い花崗岩地域ではコンパスは使えない。他にレーダーサイトなど強い電磁波発生源から例えば数キロメートル以上離れていても時刻によっては同様の現象が起きる。iPhone 装備の半導体コンパスに比べて SUUNTO のコンパスの信頼度はより高く、フィールドワークでの方位把握に SUUNTO は欠かせない。海外の耐久レースなどでは多くの選手が使用しているのを目にしている。
- 5) <https://keisan.casio.jp/exec/system/1257670779>
- 6) http://www.pointcloud.jp/blog_n23/
- 7) <https://motochan.info/wp/2022/02/12/coordinates-of-point-cloud-obtained-by-iphone-12-pro-in-cloudcompare/>
- 8) <https://motochan.info/wp/2022/02/16/acquisition-of-point-cloud-of-rock-outcrops-by->

iphone-l2-pro/

- 9) <https://motochan.info/wp/2022/02/19/merging-two-clouds-using-align-command-on-cloudcompare/>
- 10) オープンソースの Blender で USDZ から一般に多用されている OBJ に変換が可能。
- 11) 30日に達する前に月契約をキャンセルしても使用期間は30日間継続される。
- 12) 次のウェブページに点群ファイルとメッシュファイルのファイルサイズや表現の違いなどを示している。iPhone-LiDAR + Scaniverse or Metascan から書き出された点群とメッシュを比較 <https://motochan.info/wp/2023/01/27/estimating-point-cloud-and-mesh-exported-by-scaniverse-or-metascan-for-iphone-lidar/>
- 13) <https://www.linkedin.com/advice/0/how-do-you-compare-evaluate-mesh-surface-representation> Aug. 25, 2023
- 14) Adobe 3D ファイルフォーマットに関するガイド <https://www.adobe.com/jp/products/substance3d/discover/3d-files-formats.html>, はじめての 3D 空間データ <https://hackmd.io/@geopythonjp/BJSwJc0w9>
- 15) <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>
- 16) PLY – Polygon File Format <https://paulbourke.net/dataformats/ply/>
- 17) 元伊勢大饗石の LiDAR 測量 <https://motochan.info/wp/2022/12/06/lidar-measurement-of-oo-ae-ishi-a-big-table-rock-for-a-banquet-near-the-former-grand-shrine-of-ise/> このウェブページの「2 必要な部分を切り抜く」, に対応。
- 18) DB Tree ウィンドウ内のフォルダは group entities と呼ばれ, その中の点群やメッシュなどは entities と呼ばれる。データベースの構成要素を指す。日本語の適当な用語はない。研究社英和コンピューター用語辞典では, 実在; 実在物; 実体, エンティティー《1 つのまとまりをもった存在物: (1) SGML, HTML で単位として参照できるデータ》などとされている。本著では entities をそのままエンティティーとする。
- 19) 元伊勢大饗石の LiDAR 測量 <https://motochan.info/wp/2022/12/06/lidar-measurement-of-oo-ae-ishi-a-big-table-rock-for-a-banquet-near-the-former-grand-shrine-of-ise/> このウェブページの「4 大饗石の体積を求める 1」「5 大饗石の体積を求める 2」参照。
- 20) CloudCompare Forum “Volume calculation” での開発者 Daniel の回答に, “And regarding the matching cells percentage, it’s indeed the number of cells that have a matching cell in the other grid. However it only indicates how well the two clouds overlap. There’s no particular reason to use it as a criteria when changing the step size.” とあるように, Matching cells 値は Volume 値や Surface 値の正確度の目安にはならず, この記述にはないがマッチングの目安にもならない。
- 21) 図17の上面実測値は 0.274 m^2 。図20の Volume calculation パネルに見える段ボール3箱のそばに見える二つの直角三角形の面積は 0.06615 m^2 で, 実測値にこれを足すと 0.340

となる。 $0.365/0.340=1.07$ だから Volume calculation の Surface 値は悪くない。直角三角形は点群をメッシュ化した際に形成されたもので Ground に 1 cell の厚さで形成されたもので体積計算にはほとんど影響がない。点群をメッシュ化した段階で削除すべきものではあった。

- 22) 身近な直方体の体積を iPhone 12 Pro + LiDAR 写真測量で求める <https://motochan.info/wp/2023/01/07/reliability-of-dimensions-of-familiar-cuboid-by-iphone-12-pro-lidar-laser-scanning-and-photogrammetry/> このウェブページの「8 CloudCompare による直方体体積の計算」参照。
- 23) 身近な直方体の体積を iPhone 12 Pro + LiDAR 写真測量で求める <https://motochan.info/wp/2023/01/07/reliability-of-dimensions-of-familiar-cuboid-by-iphone-12-pro-lidar-laser-scanning-and-photogrammetry/> このウェブページの「9 紙箱と石碑の材質の差による違いはなかった」以下を参照。
- 24) 点群 PLY のエンティティを選択して、① Edit > Normals > Compute (デフォルト値) を実行すると、Octree がこの下位に作成される。② 同エンティティを選択して、Edit > Mesh > Delaunay 2.5D (best fitting plane) を実行。この直後に normals に関するメッセージが出るが触らずに Yes。その結果、対象エンティティの下位で Octree と同階層に隙間の無い Mesh エンティティ (メッシュアイコンが付加されている) が作成される。③ この Mesh エンティティを選択して、Edit > Mesh > Sample Points でデフォルトで OK。デフォルトで百万点にしていたので作成されるエンティティも 1,000,000 点になる。このプロセスを実行する前の筆者が使った点群 PLY は 2 万点であったから、Points 数は 50 倍になっている。なおこのエンティティは元の点群 PLY と同じ階層に生成される。
- 25) 筆者のコンテンツとしては、神武天皇遙拝所碑 Scaniverse2.bin Scaniverse Jan10 - Cloud.segmented.mesh
- 26) <https://motochan.info/wp/2023/01/25/filling-in-blanks-of-3d-data-using-meshlab/>
- 27) LiDAR スキャンオブジェクトの底を塞ぐ <https://motochan.info/wp/2023/09/06/closing-the-bottom-hole-of-a-lidar-scanned-object/>
- 28) <https://www.danielgm.net/cc/forum/viewtopic.php?t=3560>
- 29) 2.5D Volume https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/2.5D_Volume
- 30) <https://danielgm.net/cc/forum/viewtopic.php?t=3110>
- 31) <https://motochan.info/wp/2022/02/20/how-to-delete-unwanted-points-or-faces-in-cloudcompare/>
- 32) Toolbars and icons https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Toolbars_and_icons
- 33) Metascan 写真画像測量モードの利用-2 <https://motochan.info/wp/2022/02/26/using->

apples-photogrammetry-object-capture-by-iphone-app-metascan-2/

- 34) remaining エンティティには、繰り返し実行された segment out の点群またはメッシュがまとめてマージされており、これを例えば Ground cloud として使う場合には、confirm を実行することになる。
- 35) 比沼の真名井（京都府京丹後市峰山町久次）の大饗石（おおあえいし）
<https://motochan.info/wp/2022/11/09/a-big-table-rock-for-a-banquet-at-hinunomanai-the-former-grand-shrine-of-ise/>
- 36) 宇井忠英, 2023. 現場で熱を感じ探る 火山の仕組み. ベレ出版. この本の図9・10には Fisher の火山碎屑岩分類法が見える。火山礫 ($\phi 2 \sim 64$ mm), 火山岩塊 ($> \phi 64$ mm), そして火山灰 ($< \phi 2$ mm) を頂点とする三角ダイアグラムでみると、大饗石（本文の図29(a)）は火山灰が3/4以上占めており、凝灰岩となる。
- 37) このデイサイトは、次の報告によれば、豊岡層の上位層の浅海・陸上噴火由来の丹後層由来のもののようなものである。辻野匠, 2022. 西南日本 丹後半島の中新世～鮮新世火山活動と堆積盆発達. 日本地質学会第129年学術大会, T2-P-1.
- 38) metascan_20221121-1440大饗石周辺のロックフォール_onlyOoaeishi.bin
- 39) <https://meshmixer.com/download.html>