

モバイルLiDARで捉えた洞窟-秋芳洞・大正洞の事例

Digital Mapping of the Natural Caves using Mobile LiDAR : Example of the

Akiyoshi and Taisho Caves

楮原 京子

Kyoko Kagohara

山口大学教育学部

Faculty of Education, Yamaguchi University

要旨

秋芳洞などの鍾乳洞は、共有の財産として適切な保護・保全・活用が行なわなければならない。しかし、鍾乳洞の形状は凹凸に富んで複雑であり、自然光が届かない中でその全貌を把握するのは難しい。本稿では、小型化・低価格化したLiDAR装置を用いて、美祢市秋芳洞・大正洞を計測することを試み、その有効性について検討した。その結果、モバイルLiDAR(Livox社製Avia)による点群データ及び3Dモデルは1963年測量の実測図と整合的であり、その有効性は認められた。しかし、優れた3Dモデルには十分な点群密度が必要である。

1. はじめに

山口県美祢市には古生代石灰岩を土台として、地上では数多くの円形窪地(ドリーネ)や明灰色の尖った岩(ピナクル)が林立する特徴的なカルスト地形が広がる。また、その台地の地下には国指定の特別天然記念物である秋芳洞をはじめとする鍾乳洞が形成されている。これらの地形は、人間の手では作ることが難しい何億年という時間をかけて形成されたものであり、後世に引き継ぎたい共有の財産である。そして、そのためには適切に保護・保全を図りながら、その価値の活用を維持することが重要である。しかしながら、それらの形状は大小の凹凸に富んで複雑であり、特に鍾乳洞は、自然光が届かないために視認するのに光源を必要とし、その全貌の把握は難しい。久間ほか(2020)は、全方位測定可能なLiDAR(Light Detection And Ranging、3次元レーザースキャナと呼ばれる場合もある)を遠隔操作型ロボットに搭載して、島根県松江市の竜溪洞(大根島の溶岩洞窟)の計測を行っている。この手法は測定点にLiDARを設置し、その点から全方位(水平 360° 、垂直 305°)にレーザーを照射して空間の3次元点群データ(XYZ座標)を取得する。それ

によって高精度な点群データが取得されている。しかし、複雑な形状の洞窟という見通しの悪さから約41mの区間に対して43箇所の測定点が必要とされた。本稿対象の秋芳洞内でも、観光洞部分を3区間、3日間に分けて(営業終了後の18時頃から)類似のLiDAR計測が行われている(久間, 2022)。使用されたLiDARはFocus 3D(FARO(株)製)であり、測定精度は25mに対して ± 2 mmと高精度である。しかし、その重量は約5kgと重く、急峻な斜面等では計測が困難であることから、小型LiDAR(3D restoration of Mines-Mark II、3DRM-MarkII、エス計画(株)製)も用いている。その測定精度は0.1~10mに対して ± 30 mmであり、この2つの機種を用いた計測では、約572mの区間に対して225箇所の測定点が設けられた。測定点1点あたりの計測時間に、数分は必要であることを考えると、延べ計測時間は数時間以上におよんだことが類推される。

一方、地形の計測技術に関しては、フォトグラメトリー技術(例えば、多視点の写真から位置を特定するSfM(Structure from Motion)やSLAM(Simultaneous Localization And Mapping)技術により、より軽量かつ簡易な機材を用いた方法が開発されている。計測手法の効率化・低価格化は、定期的な地形計測を容易にし、永続的な洞窟の保護・保全に資すると考えられる。本稿では、3DRM-MarkIIと同等の測定精度をもちながら、より簡便で効率的な地形計測方法を見出すため、小型で低価格のLiDAR(以下、モバイルLiDARと称す)を用いた計測を試み、その有効性について検討した。モバイルLiDARのセットアップについては濱・松本(2022)を参照した。計測は2022年4月5日に美祢市・秋芳洞、大正洞で実施した。本稿ではモバイルLiDAR計測結果のほか、モバイルLiDAR計測の原理・方法と点群データの処理についても報告する。

2. モバイル LiDAR 計測の原理と使用機器

モバイル LiDAR 計測では、LiDAR 装置の他に SLAM 技術を用いる。この技術は自動運転用のセンシング技術の一つとして発展したもので、センサを搭載した移動体の位置（自己位置）の推定と周囲の 3 次元構造の把握（環境地図作成）を同時に行う技術である。この技術によって、モバイル LiDAR を持って歩くだけ（LiDAR で照射しながら）で 3 次元の点群データが取得可能となる。

LiDAR の場合、照射したレーザーが物体や地形などに当たって反射した信号を点群として取得し、その位置情報は 2 次元座標 (X, Y) または 3 次元座標 (X, Y, Z) で記述される。このように取得された点群を互いにマッチングさせることで LiDAR の移動量を推定し、自己位置を決定する。点群マッチングの手法はいくつかあるが、本報告では、香港大学によるソフトウェア開発キット (SDK ; Software Development Kit) に従い LOAM (Laser Odometry and Mapping) ^{注1)} を用いた。これは LiDAR で取得する点群がスパースであるという難点に対処するため、点群の中の点と線 (エッジ) 上、あるいは面 (サーフェス) 上の点という特徴点を参照して、自己位置の決定を行う方法である。

本研究で用いたモバイル LiDAR は Livox 社製の Avia である。Avia は 905 nm のレーザー (Class 1、IEC60825-1:2014) で、水平・垂直方向に約 70° 走査することができ、角度精度は 0.05°、測定距離は 460m (有効な計測範囲は 200~300m 程度) である。結果として 1 秒間に 240,000 点のデータを取得し、範囲精度は約 2cm である。また、Avia の魅力は軽量 (498g) であることである。狭く暗い洞窟内での計測を考えると、手に持つものは小型で軽い方がよい。モバイル LiDAR 計測では、モバイル LiDAR (Livox Avia) の他に、カメラ用三脚、前述の SLAM 処理を行う SDK をインストールしたノート PC (Panasonic Let's note)、モバイルバッテリー



図1 モバイル LiDAR 計測機器

(30W)、LiDAR とノート PC 及び LiDAR とバッテリーを接続するケーブル類の機材を用いる (図 1)。

3. 計測方法

計測方法は、モバイル LiDAR を片手に持って、ノート PC で点群取得状況を確認しながら歩くことを基本とし、秋芳洞では、取得データの質と効率性について検討することを目的に、以下の方法をとった。

1. 洞外で LiDAR の水平・方位 (センサーを東に向ける) の設定を行う。
2. 洞外の地形をスキャンする。
3. Avia A : 洞内に入ったら、LiDAR を同方向に保持し、止まることなく黒谷支道入口まで計測する。

Avia B : 洞内に入ったら、上下左右に LiDAR を動かし、およそ 100m ごとに立ち止まって LiDAR を 360° 回転させて計測し、黒谷支道入口まで計測する。

Avia の特性として 3m 内に物体があると反射信号を適切に取得できず LiDAR の位置決定に不備が生じる。そのため、幅狭い所が多い大正洞においては、狭いところを通過する際に、一番見通しがきく方向に LiDAR を向けて、LiDAR を振るのを控えた。

4. 計測結果

図 2 に秋芳洞及び大正洞で取得した点群データを示す。秋芳洞は約 11km に延びる洞窟であるが、本調査では、そのうち洞窟正面入り口から直線にして約 600 m の範囲を計測した。Avia A の計測方法では観光客と遜色ない速度で計測することができたが Avia B の計測方法では、途中で 2 回ビューアが終了したため、再起動にも時間が費やされ Avia A の倍近くの所要時間がかかった。図 2 を見ると秋芳洞の基底は、百枚皿付近から上昇する傾向にあり、平面形状の変化に富む様子も捉えられている。大正洞は、秋芳洞以上に鉛直方向の変化が明瞭で、階層的な広がりを持つ様子が捉えられている。

以上のような特徴は、計測以前に知り得た洞窟の様子でもあるが、モバイル LiDAR 計測でも正確に再現されており、点群から 3 次元的な広がりを読み取ることができる。図 2c には大正洞・獅子岩付近の実際の様子と点群を示す。大正洞では、狭小な空間の複雑な内部形態がよく再現されており、Avia の特性を考慮しながら移動させていたことが功を奏したと考えられる。また、鍾乳洞表面の反射強度は均質ではなく、表面の植生や湿度、粗度の違いを反映していると推察される。

次に、秋芳洞にて実施した Avia A と B の計測結果を図 3 に示す。Avia A による全体の点群数は

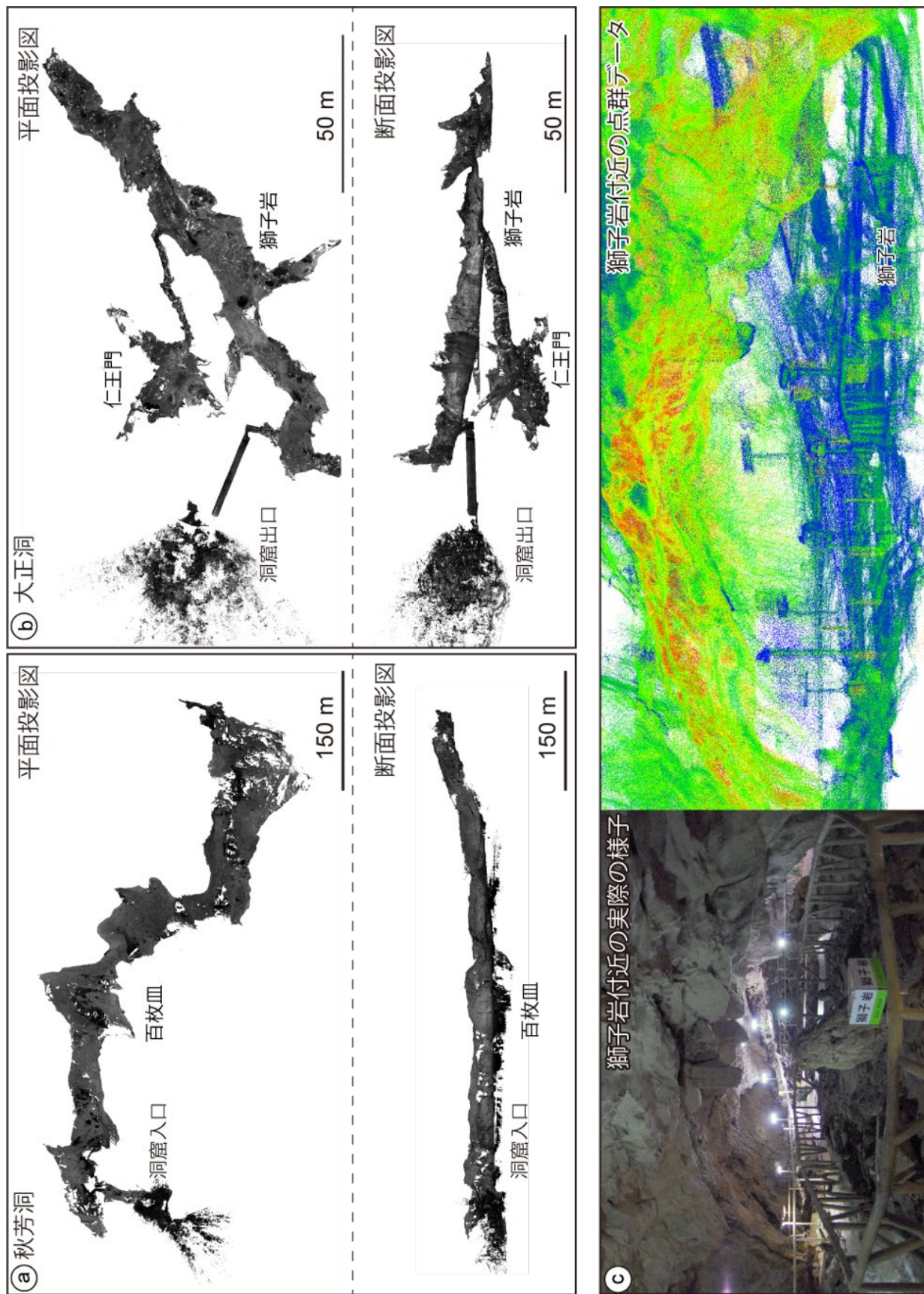


図2 モバイル LiDAR 計測で取得した点群データ

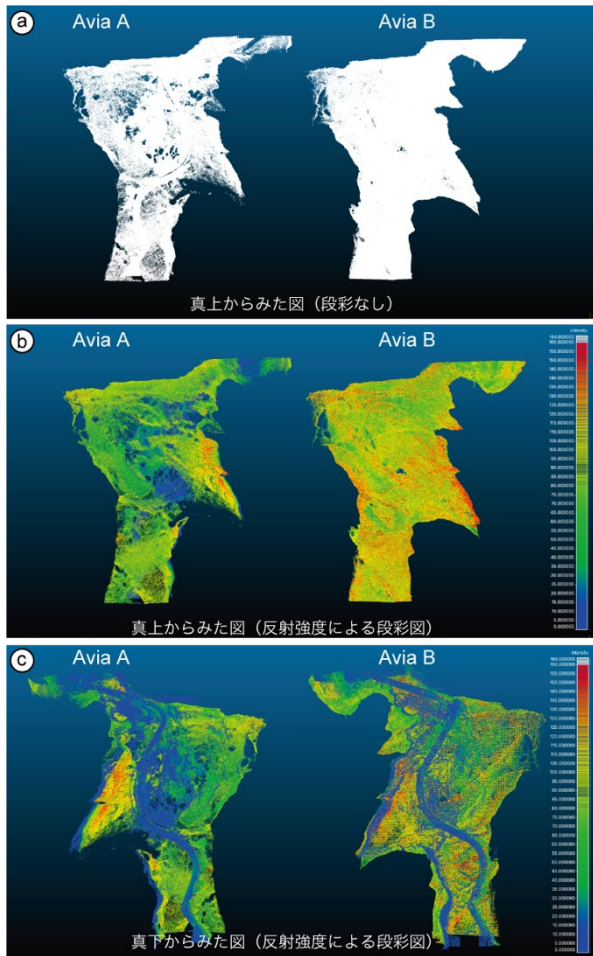


図3 計測方法 Avia A・B による点群の比較

59,374,549 点で 1.9 GB の PCD (Point Cloud Data) ファイルが生成された。そのうち、百枚皿付近を切り出した一部で、10,844,194 点、Avia B は同じ範囲で 24,061,417 点であった。図 3a をみると Avia A の方が、点群は疎で、ところどころ取得されていない (背景が透けて見えている部分) ことがわかる。また、図 3b と図 3c の比較から、点群を真上から見た図 3b では Avia A において歩道が敷設されている場所を中心に、取得範囲の中央付近で反射強度が低く、右端の一部が反射強度の強い部分となっているなど、反射強度の変化が明瞭であるのに対して、Avia B では全体的に反射強度が中程度～強で、反射強度の側方変化は乏しいという違いが認められる。一方、点群を真下から見た図 3c では、Avia A と B の結果は類似し、いずれも反射強度の側方変化が明瞭で、特に歩道が帯状の低反射強度部分として捉えられている。

以上のことから、Avia A の計測方法では歩道を中心とした洞窟内下部が捉えられているものの、天井をはじめとする洞窟内上部はよく捉えられていないことがわかる。したがって、走査が水平・垂直共に 70° と広角な Avia であっても、複雑な洞窟の形状

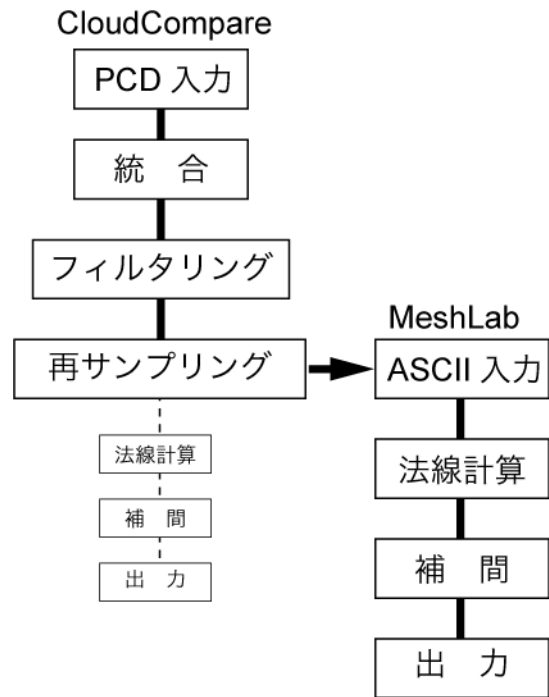


図4 点群処理フロー

を捉える場合には、進行方向のみの照射だけでなく、進行逆方向からの照射や上下・左右に LiDAR を動かしながらの照射が必要であり、大正洞での計測結果も踏まえると計測者が 360° 回転してとる (上下に LiDAR を動かしながら、体を 360° 回転させる) 機会は洞窟の形状に合わせて、具体的には、せばまったところから広い空間に出た際や、側方からの岩の張り出しを過ぎた際に、360° の計測を行うのがよいと考えられる。

5. 点群データ処理

モバイル LiDAR の計測が終了すると、ノート PC には PCD と BAG の 2 種類のファイルが生成される^{注2}。PCD は一般的な点群処理ソフトウェアでよく取り扱われるファイル形式である。BAG ファイルは、点群と計測時間が収録されている生データであり、概ね 10 分間の計測で生成されるファイルサイズは 5GB であった。PCD ファイルが一般的な点群データ処理に用いられていることもあり、大容量となる BAG ファイルは保存しない設定にすることも可能であるが、計測状況を確認したり、点群密度の異なる PCD ファイルを再生成できたりという利点もある。

今回は、取得 PCD データをフリーの点群処理ソフトウェア CloudCompare 2.12 と MeshLab 2022.02 を用いて、メッシュ化し、3D モデルを作成した。図 4 にメッシュ化の処理フローを示し、その概要を以下に紹介する。

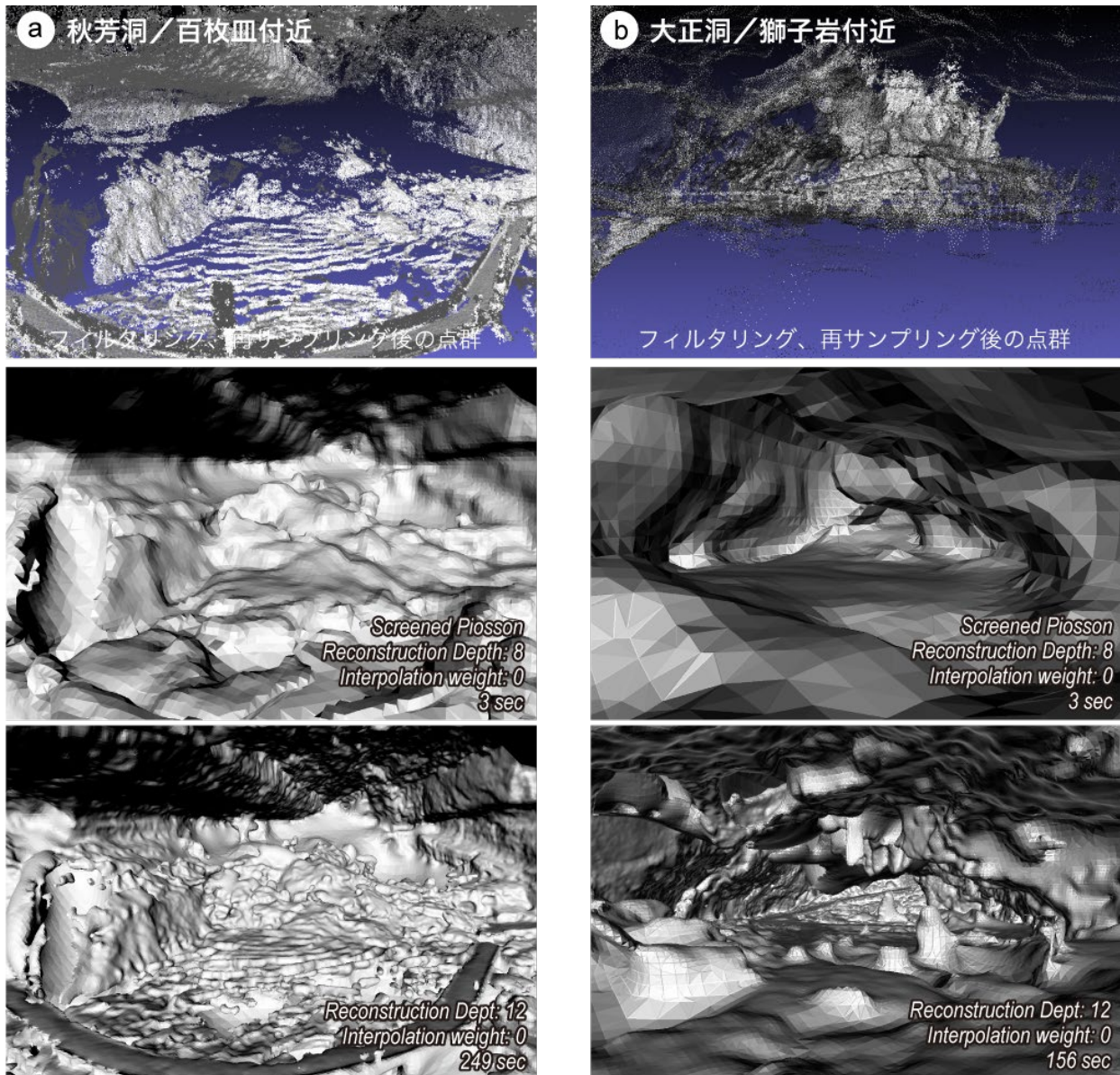


図5 秋芳洞及び大正洞における点群とメッシュ化
各メッシュの右下にパラメタと処理にかかった時間(秒)を示す。

1. PCDの入力

- ・ CloudCompare を起動し、メニューから **File > Open** で PCD ファイルを選択するか、ブラウザでファイルを選択し、CloudCompare 上にドロップ&ドラッグして、PCD ファイルを開く。PCD ファイルが分割されている場合には、複数選択して同様の操作を行う。

2. 統合

- ・ CloudCompare のデータベースツリー (DB Tree) から統合する複数の点群を DB Tree で選択し (Shift キーを押しながら点群名をクリックする)、**Edit > Merge**。

なお、CloudCompare で複数の点群を読み込んだ際は、自動配置されるものの適切でない場合がある。

その際は、手動もしくは任意点座標を用いて位置合わせを行う。また、一部切り取りを行う場合は **Edit > Segment** でツールを開始し、多角形または四角の枠で点群を囲ったのち、枠内または枠外を選択して分割する。

3. フィルタリング

- ・ モバイル LiDAR で取得した点群には散乱で生じたノイズ等があるため、フィルターでそれらを除く。今回は近傍の点群から推定される平面から大きく外れる点群を除く **SOR filter** を適用した。DB Tree から点群名 (Cloud) を選択し、**Tools > Clean > SOR filter**。

4. 再サンプリング

- ・ 過大な点群データを減らすために再サンプリング

を行う。DB Tree から点群名 (Cloud) を選択し、Edit > Subsampling。再サンプリング方法には Random (ランダム)、Space (点間隔)、Octree (八分木) があるが、今回は Space とし、min. space between points (最小点間隔) を 0.05 とした。

以上の処理を行った点群を ASCII Cloud (.txt) 形式のファイルとして保存し、以後の処理を MeshLab2022.02 で行う。MeshLab へのファイルの入力は、File > Import Mesh で点群データ (ASCII Cloud ファイル) を選択するか、ブラウザでファイルを選択し、MeshLab 上にドロップ&ドラッグする。

5. 法線の計算

・点群の補間で生成される面の向きを定義する法線を求める。Project タブに表示される点群名を選択し、Filters > Point set > Compute normals for point sets。

6. 補間

・点群の補間方法はいくつかあるが、今回はオーバーハングした形状の再現に適している Poisson Surface を適用した。Filters > Remeshing, Simplification and Reconstruction > Surface reconstruction > Screened Poisson Reconstruction。パラメタの Reconstruction depth の値を大きくすると、高精細となるが時間とメモリを多く費やす。

図 5 には Reconstruction depth を 8、12 と変化させた例を示す。

7. 出力

・Project タブからメッシュ名を選択し、PLY (ASCII) ファイル等、3D モデルのファイル形式で出力する。

6. モバイル LiDAR 計測結果と既存実測図との比較

モバイル LiDAR で取得した点群の処理状況を図 5 に示す。計測結果として、まず、モバイル LiDAR 計測は可搬性が高く、Avia B での計測でも、計測そのものに過度の時間は必要なかった。点群データの状態から、洞窟の大まかな様子は捉えているように思われるが、鍾乳洞でしばしば見られる天井近くの狭小な平らな面に LiDAR を照射することはかなり難しく、メートルオーダーの地形でありながらも再現できていないところがあることがわかった。秋芳洞の百枚皿の上部で点群が広く抜けているのも、こうした地形の影響とみられる。また、点群密度の低い箇所ではメッシュ化が適切に行われず、バルーンのように膨張する形状となりやすい。例えば、秋芳洞に比べて大正洞の 3D モデルが滑らかな曲面から構成されていて再現性が低くみえるが、その要因も

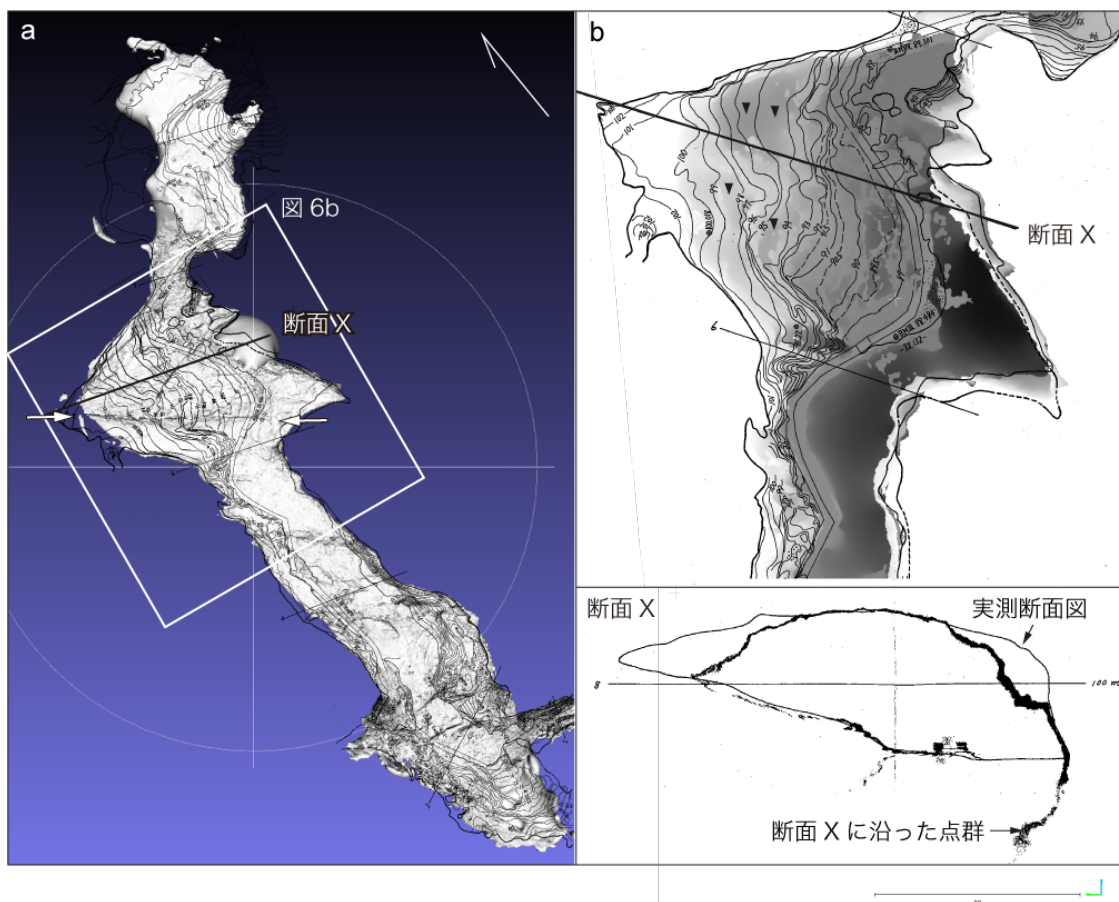


図 6 モバイル LiDAR による 3D モデルと実測図との比較

点群を密に取得できていなかったことにある。そのため、精度の良い 3D モデルを作成するにはある程度の点群密度が確保されていることが重要である。

一方、今回作成した 3D モデルにおいて、点群密度が十分な部分では、秋芳洞・百枚皿のリムの形状や壁面の凹凸(質感)の違い等、微地形が適度に再現されている。今回は、Avia の精度が cm オーダーであったことを考慮して最小点間隔を 0.05m に間引いた点群でメッシュ化しているが、この点群間隔で微地形が再現されていることを鑑みると、Avia による照射を綿密に行うことで、精度の良い 3D モデルを取得できる見込みは高い。

鍾乳洞内に多く見られる mm オーダーの微細地形は、今回用いた LiDAR センサーの性能から判断して、再現は難しい。洞窟には大小様々なスケールの地形が存在しているため、対象とする形態のスケールに応じた LiDAR の性能と点群密度を見極めることが重要であろう。

図 6a には、今回作成した 3D モデル(秋芳洞の一部)に、1963 年の実測図(山口ケイビングクラブ作成)を重ね合わせている。3D モデルは洞窟を真上から見たもので、天井の凹凸が陰影で表現されている。実測図は洞窟の基底部の形状を、等高線を用いて表現している。両者の概形は正面入口の冒険コース付近で少しずれが生じているものの、それ以外はよく一致している。1963 年当時は洞窟内にいくつもの測点を設置して測点間の長さ、高さ、角度を計測すること繰り返したと思われるが、この正確さに脱帽である。また、両者を比較すると図 6a の天井に直線的な高度の不連続を見ることができ(矢印付近)、洞窟底部の等高線にもこれと調和的な方向の崖地形が読み取れる。両者の間には、百枚皿が形成されており、洞窟底部から天井へと貫く亀裂とそれに伴う凹地が形成されたことが類推される。図 6b では 3D モデルの洞窟底部を切り取って高度段彩とし、それに実測図を重ねた。両者の比較から等高線の間隔がやや広い場所に凹地が形成されていることがわかる(図中の▼)。等高線のみでは表現しにくい点を 3D モデルが補っている。断面 X で点群と実測断面図とを比較してみると、天井側の断面両端(左右)部で大きくずれている。断面左端は、平面図からも明らかのように、LiDAR は天井付近の奥まっている平らな地形に照射できていない(図 6a の左側の矢印付近)。さらに右端は出入りに富む谷壁となっており、わずかな位置のずれで大きく形状が異なる。点群からなる断面図は、実測図を参照して断面位置を決定し、その線を中心とする幅 1m の点群を抽出して作成したものである。したがって、洞窟断面図の違いは断面を作成した位置のずれを反映している可能性が高い。ただし、断面位置が 10m もずれているとは

考え難く、洞窟形状の側方変化の著しさを象徴するものとする。

以上のように、モバイル LiDAR 計測の成果である点群データおよび 3D モデルと実測図を比較し、両者による計測結果は整合的であり、点群密度が低下しないように留意さえすれば、モバイル LiDAR 計測技術は、洞窟の地形計測に有効であると考えられる。

7. モバイル LiDAR の点群データの利活用

今回のモバイル LiDAR 計測は、試験的に実施したものであったが、機器の手軽さや取り回しのしやすさ、短時間での計測など、モバイル LiDAR の利を活かすことができた。また、計測は観光客も行き交う中での実施であったが支障は生じなかった。このようなモバイル LiDAR の軽量・小型化は、濱ほか(2023)などによってさらに進んでいる。

今回使用したモバイル LiDAR は、物体の形状を点群として取得する。秋芳洞・大正洞も観光資源として洞窟を保護しながら活用することが求められ、その一環に適切なメンテナンスや安全対策等が必要と考えられる。その点において、モバイル LiDAR は気軽に計測可能であり、正確な形状の情報を取得することができる。また、定期的な形状の計測を行えば、異なる時期の点群データから差分をとって、岩屑移動や割れ目・侵食の進行等を把握したり、反射強度の情報から洞窟壁面の被覆状況を観察したりと、様々な活用方法が見出される。また、Google ストリートビューや VR のような視聴者が没入感を体験するコンテンツとまではいかないまでも、3D モデルを使って洞窟内の形に着目した散策は可能であり、地上の地形等のデータと統合すれば、地上と鍾乳洞がどのようにつながっているのかを具体化することが可能である。

さらに、伝統的建造物や遺跡をはじめとする「形」「外観」に魅力あるものは、周囲との調和を図りつつ修繕や防災対策、そして活用を図っていく必要がある。その際に、LiDAR で 3D マッピングし、3次元地図の上で検討することにより、様々な角度、スケールで、俯瞰的に捉えられという利点もある。センサーの技術は進化し続けており、本計測方法を応用したより高度なセンシングが身近なものとなりつつある。形態の研究に限らず、地域の文化や生活に関してもセンシング技術の活用が期待され、本稿がこうした技術への足がかりとなれば幸甚である。

【注】

1) 香港大学の MaRS ラボが開発した SDK : A robust LiDAR Odometry and Mapping (LOAM) package for Livox-LiDAR (https://github.com/hkumars/loam_livox)

2)生成ファイルは自動的に名称変更されないため、連続して撮影する場合には、上書きされないよう、その都度ファイル名を変更する必要がある。また、計測終了してしばらく経っても PCD ファイルが確認できない場合には、一度、ログアウトすると良い。

【謝辞】

本稿は、中田 高氏(広島大学名誉教授)、熊原康博氏(広島大学)、眞鍋広紀氏(佐世保高等専門学校)と共同で行なったモバイル LiDAR 計測に基づくものである。モバイル LiDAR の計測機器や部材、計測方法に関して、岩佐佳哉氏(広島大学・院生)、低空空撮技術活用研究会の方々から大変有益なご助言をいただいた。美祢市教育委員会・美祢市立秋吉台科学博物館ならびに美祢市観光協会のみなさまには、モバイル LiDAR 計測のための入洞に関して、ご配慮いただいた。ここに記して感謝申し上げます。

【引用・参考文献】

濱 侃・松本祐太郎, 2022, 「Livox SLAM のインストールと点群の処理方法」, [https://www.h.chiba-u.jp/lab/gmet/media/Livox_SLAM のインストール.pdf](https://www.h.chiba-u.jp/lab/gmet/media/Livox_SLAMのインストール.pdf)

濱 侃・中田 高・岩佐佳哉・杉田 暁, 2023, 「低価格レーザースキャナを用いた簡易型 3D マッピングシステムの構築」, 『日本地理学会発表要旨集』, No.103, pp.227.

久間英樹・眞部広紀・福岡久雄, 2020, 「3次元レーザースキャナを用いた竜溪洞の形状測定」, 『洞窟学研究』, No.45, pp.57-69.

久間英樹, 2022, 「II-A.2.2 3次元測定」, 山口県美祢市教育委員会, 『特別天然記念物秋芳洞 天然記念物緊急調査報告書』, pp.23-35.