

資料

iPhone ProによるLiDAR測量を活用した洞窟調査；七久保の道穴
(群馬県下仁田町青倉川上流) を例として

小竹祥太¹・林田 敦¹・柏木健司^{2*}

¹パイオニアケイビングクラブ

²富山大学理学部自然環境科学科：〒930-0051 富山市五福3190
(kasiwagi@sci.u-toyama.ac.jp)

要旨：七久保の道穴（側線延長約12 mの横穴型洞窟）を対象に、iPhone Proを用いたLiDAR測量を実施した。測量には3DスキャンアプリPolycamを使用し3Dデータを得た。断面図作成補助ツールであるCave MapperをBlender 3.0.1にアドオンを適用し、Blender上で平面図、縦断面図、横断面図を含む測図を作成した。iPhoneを用いたLiDAR測量は、匍匐が強い空間を含む洞窟調査において、極めて有用なツールである。

キーワード：iPhone Pro, LiDAR 測量, 洞窟, 七久保の道穴

Cave survey using LiDAR measurements with the iPhone Pro; an example of
Nanakubo-no-michiana Cave (limestone cave) in the upper reach of Aokura River,
Gunma Prefecture of central Japan

KOTAKE Shota¹, HAYASHIDA Atsushi¹ and KASHIWAGI Kenji^{2*}

¹Pioneer Caving Club

²Department of Natural and Environmental Sciences, School of Science, University of Toyama: 3190 Gofuku,
Toyama 930-855, Japan
(kasiwagi@sci.u-toyama.ac.jp)

Abstract: We conducted a Light Detection and Ranging (LiDAR) measurements using iPhone Pro for Nanakubo-no-michiana Cave (limestone cave), which contains an almost horizontal passage of approximately 12 m in length. We used the three-dimensional (3D) scanning application Polycam for LiDAR measurements to obtain 3D data. In addition, Cave Mapper was added to Blender 3.0.1 as a supplementary add-on tool for cave profile illustration. Cave maps, including plan views, longitudinal- and transversal cross-sections, were created using Blender. LiDAR technology on an iPhone is valuable for surveying caves, mainly when the cave features tight and cramped passages.

Key Words: iPhone Pro, LiDAR measurement, cave, Nanakubo-no-michiana Cave

はじめに

地上レーザー測量（Terrestrial Laser Scanning; TLSまたは Terrestrial Light Detection and Ranging; T-LiDAR）は現在、様々な分野かつ多様な対象物に用いられ（例；早川，2015，2019；早川・小口，2016；松嶋ほか，2022），国内外を含め活用範囲は今後、急速に広がっていくことが予想される。Apple社は2020年、LiDAR（Light Detection and Ranging）機能を搭載したiPad Pro, iPhone Pro 12およびiPhone 12 Pro Maxを発売し、現行最新機種はiPad Pro, iPhone 14 ProおよびiPhone 14 Pro Maxである。iPadとiPhoneはともに手持ちサ

イズであることに加え、これまでの産業用TLS計測機器（数百万円～数千万円，註1）に比較して極めて安価（20万円前後，註2）で、汎用性の高い利用が可能となっている（松嶋ほか，2022）。

あらゆる地下空間を研究対象とする洞窟学において、自然洞窟はその中でも最も研究されている地下空間の一つである。その調査研究に際して、平面図や縦断面図、横断面図などの洞窟の測図を、調査者が自ら測量し整備する必要がある。この測量作業は、洞窟の規模の大小および形状の複雑さの程度により、それに要する期間は様々であり、測

量作業の習練度合いにより、測図の精度が大きく異なる問題を内在する。

iPhone Proに搭載のLiDAR機能は、洞窟で活動する洞窟探検家に測量技術の進歩として好意的に受け入れられ、試行実施事例が幾つか報告されている(林田ほか, 2021; 荒波, 2021; 本多・本多, 2022)。筆者らの所属するPioneer Caving Club (PCC; 東京都, 芦田宏一会長)は、関東地方を主たるフィールドに活動する社会人ケイビング団体で、2020年以降、ファンおよび調査ケイビングに際してiPhoneを用いたLiDAR測量を積極的に実施している。対象洞窟は、測図の未整備な洞窟に加えて、既に測図が公表済みの洞窟も含む。これらの作業を通して、iPhoneを用いたLiDAR測量が、洞窟測量に際して時間短縮と測量精度の向上につながることで、二次元と三次元を含み多様な表現が可能であることを確認した。

以上の観点から、本稿では群馬県下仁田町青倉川上流域に位置し、測図が未整備の七久保の道穴を対象に、iPhoneを用いたLiDAR測量を実施した。本研究を進めるにあたり、小竹は七久保の道穴のLiDAR測量と測図作成を担当し、付ファイルの「洞窟測量におけるPolycam (3Dスキャンアプリ) 操作マニュアル」「Blender 3.0.1で使うアドオンCave Mapperマニュアル; 導入編」を執筆した。林田はLiDAR測量全般を担当した。柏木は七久保の道穴の地形地質調査を担当し、責任著者として論文全体の取りまとめを行った。本稿では、LiDAR測量により得られた3Dデータを基にBlenderで測図を作成し、七久保の道穴を新洞として記載した。加えて、洞内でのLiDAR測量からBlenderを用いた測図作成までの一連の工程を解説し、洞窟を対象とするLiDAR測量の利便性と改善点について議論した。

地質概要

群馬県下仁田町の青倉川上流域には、秩父累帯の北部に位置する秩父累帯北帯の付加体堆積岩類が広く露出し、それらはKamikawa et al. (1997) による万場層と上吉田層、中野ほか(1998)による万場・上吉田ユニットにあたる(Fig. 1)。その岩相は、弱変成を被り面構造が密に発達する粘板岩基質中に、玄武岩質溶岩および同質火山碎屑岩類、石灰岩、層状チャート、珪質頁岩、砂岩などをブロックとして含む混在岩である。粘板岩と含まれるブロック中の面構造は北ないし南に中角度に傾斜し(Kamikawa et al., 1997; 柏木ほか, 2022)、地質図スケールで西北西-東南東方向の背斜軸と向斜軸が発達する(Kamikawa et al., 1997)。最近、小林(2009)は平原南方の地域を対象に詳細な岩相分布図

を示し、秩父北帯の地質構造として西南西-東北東走向で急傾斜する地域があることを明らかにした。柏木ほか(2022)は、小林(2009)の示した範囲内で石灰岩の分布を示し、当地域の地質構造についてKamikawa et al. (1997)に追認する結果を報告した。

青倉川沿いの赤谷と土谷沢間に、東西約2 kmで南北約500 mの石灰岩体が知られている(Kamikawa et al., 1997; 中野ほか, 1998)。一方、青倉川上流域に広く分布する万場・上吉田ユニットには、走向方向に数十mから数百mに伸長する石灰岩の岩体が点在し、これらはKamikawa et al. (1997)と中野ほか(1998)には混在岩類中に含まれられ区別されていない。平原地域に点在する石灰岩洞窟は、このような石灰岩の小規模な岩体中に胚胎している(柏木ほか, 2022)。

七久保の道穴付近の地質

七久保の道穴を胚胎する石灰岩体は、青倉川上流域の七久保南南西の町道沿いに開口する(Fig. 1)。層厚は約12 mと小規模な岩体で(Fig. 2)、石灰岩の見かけ上下位に位置する玄武岩質火山碎屑岩類中には、数cmから数m径の石灰岩が礫状に含まれる(Fig. 3)。洞口が開口する石灰岩の南西向き急崖斜面には、石灰岩にへばりつくように玄武岩質火山碎屑岩類が狭い範囲に孤立分布する(Fig. 2B)。石灰岩を礫として含む玄武岩質火山碎屑岩類の産状に基づくと、七久保の道穴を含む石灰岩体は玄武岩質火山碎屑岩類中の径10 mを越える礫と判断できる。なお、石灰岩に隣接する南方と北方の斜面上には、石灰岩の露頭ないし転石は認められない。

方法

七久保の道穴で実際に行ったLiDAR測量の手法を以下に示す。なお、LiDAR測量の実施プランは洞窟の規模や形状により異なり、それについては議論の章で述べる。

iPhone 13 Pro (以下、iPhone)に3DスキャンアプリPolycamをインストールし、iPhoneに内蔵のLiDARを用いて洞内と洞外の測量を実施した。なお、LiDARによる計測範囲は5 m以内である。iPhoneに搭載されたLiDARは、搭載カメラが撮像可能な明るさ環境で、スキャン対象の色情報の取得が可能である。洞窟記載の基礎データとなる洞内測図を作成するため、洞内ではiPhoneにヘッドライトを固定してLiDAR測量を実施した。最初に洞窟全体の状況を確認した後、最奥から洞口に戻る方向に一回のスキャンで測量を

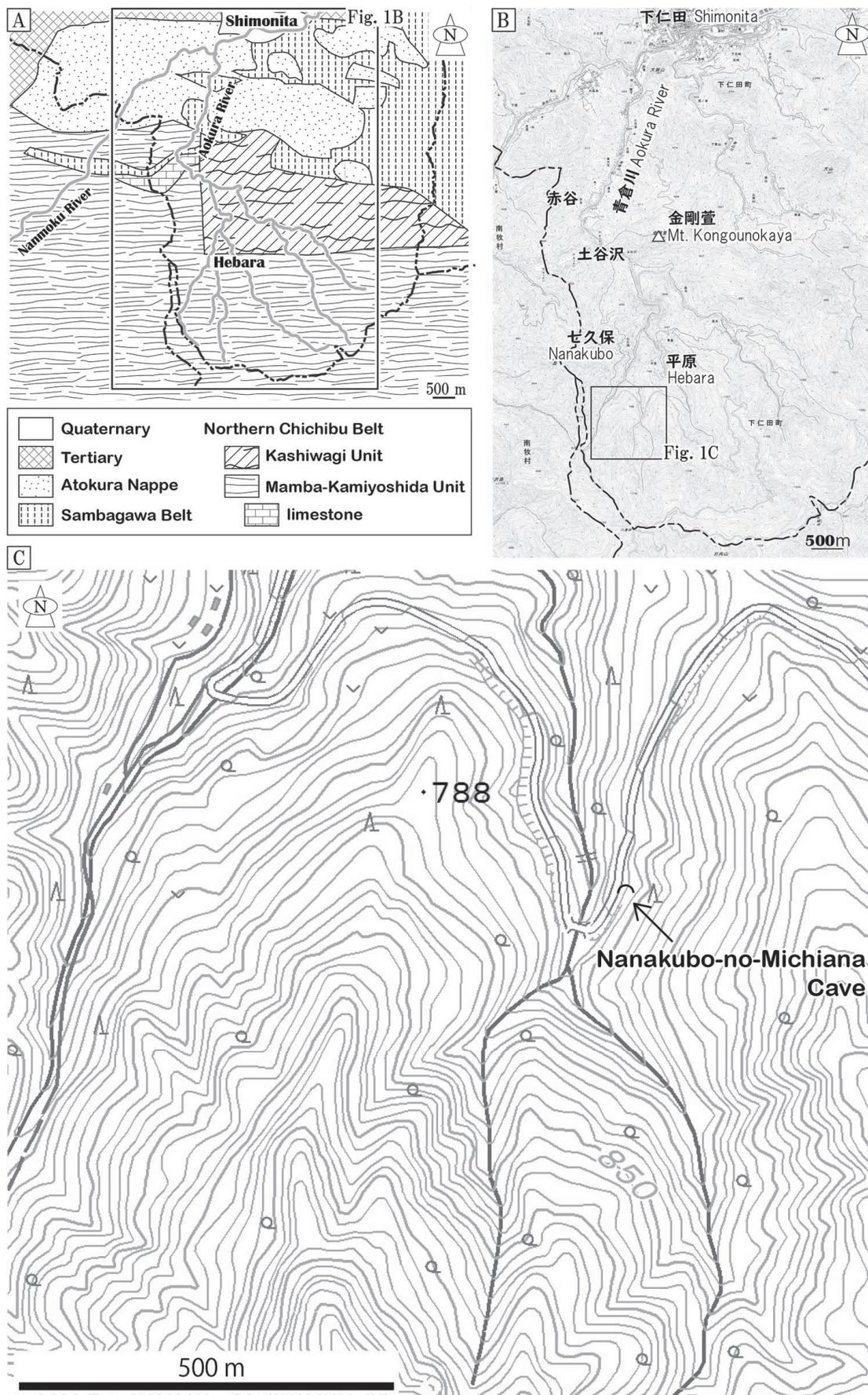


Fig. 1. Location and geological setting of the study area with location of Nanakubo-no-michiana Cave. A) Geological outline in the drainage basin of Aokura River. Simplified from Nakano et al. (1998). B) and C) Maps illustrating the study area with location of Nanakubo-no-michiana Cave. Based map is a 1/25,000 digital topographic map published by the Geographical Information Authority of Japan.

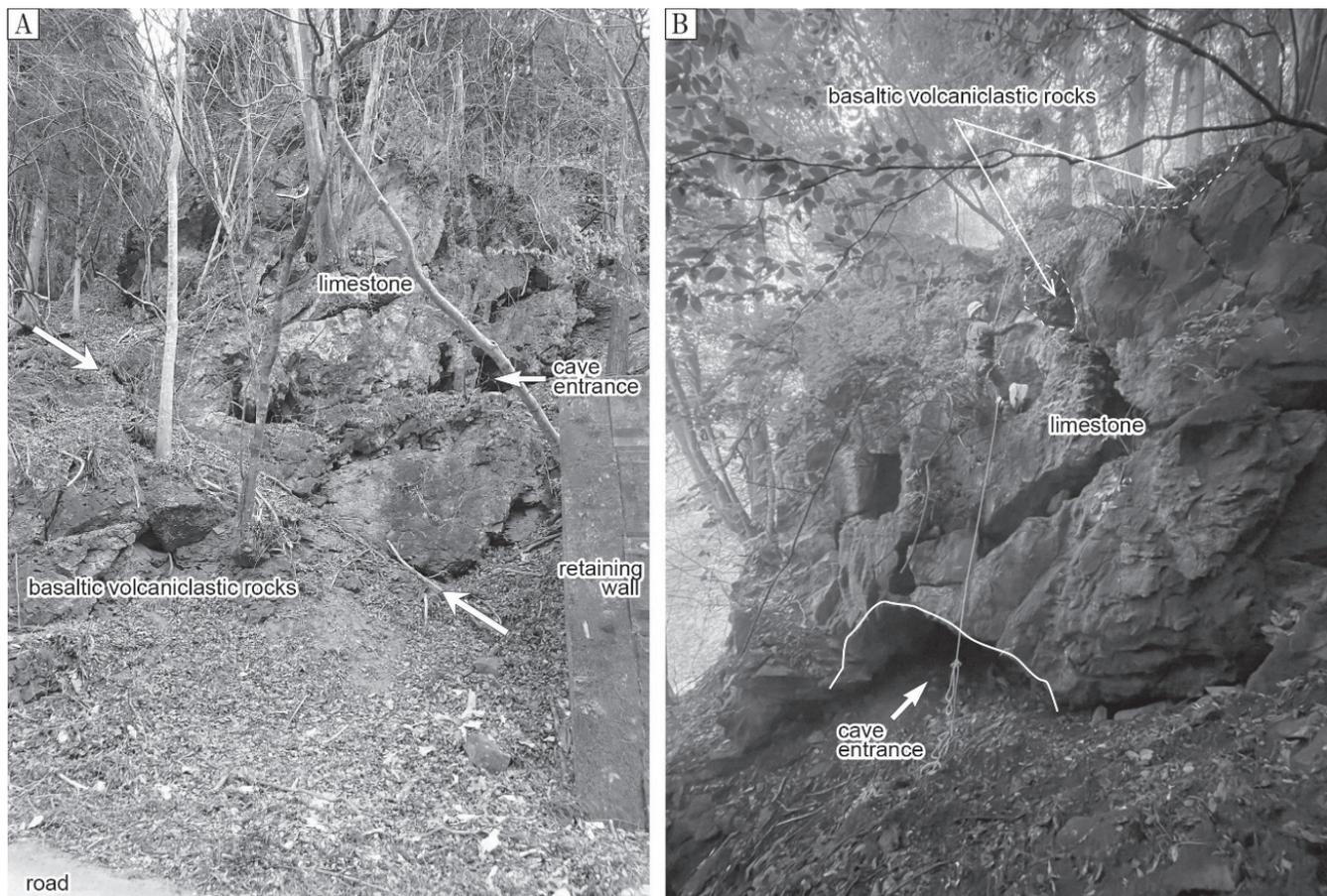


Fig. 2. Field photographs of Nanakubo-no-michiana Cave. A) Photo of cave entrance taken from the forest road. Limestone of approximately 12 m in thickness is situated on top of basaltic volcaniclastic rocks. White arrows indicate the boundary between limestone and basaltic volcaniclastic rocks. B) Cave entrance located at the base of a limestone cliff over 10 m high. Basaltic volcaniclastic rocks are distributed on both the vertical surface and above the limestone cliff.

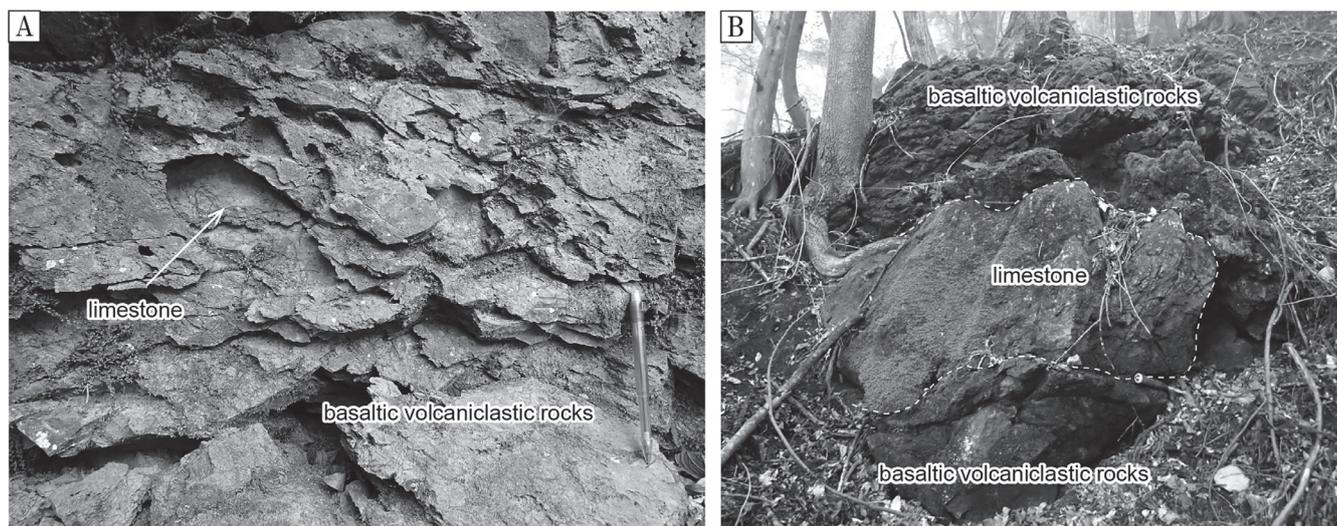


Fig. 3. Lithofacies of basaltic volcaniclastic rocks, including limestone clasts ranging from several centimeters to several meters in length. See Fig. 4 for each location.

行った。LiDAR測量に要した時間は事前の下見を含み約15分であった。

七久保の道穴周辺の地形断面の概略を把握するため、沢床から町道、洞口、および洞口上方の尾根まで、LiDAR測

量を分割して実施した。全体をまずは見渡し小崩壊地形を避けてルートを設定し、沢床から斜面を傾斜方向に登りながら測量した。洞口が基部に開口する石灰岩の急崖斜面は、斜面上部の立ち木にザイルを固定し、SRT (Single Rope

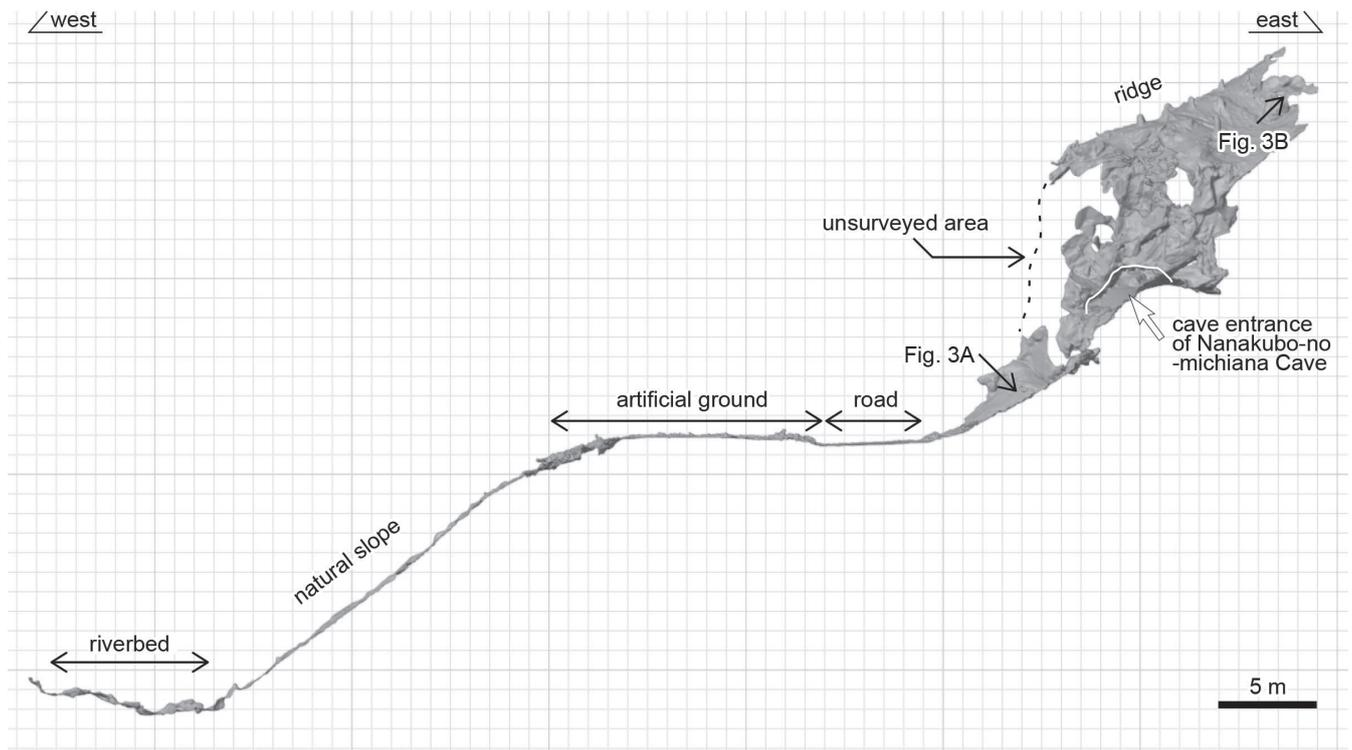


Fig. 4. Topographic section from the riverbed through the forest road and Nanakubo-no-michiana Cave to the ridge. The entire section was scanned with an iPhone 13 Pro.

Technique) で斜面を下降しながら測量した (Fig. 2B). 測量に要した時間は、SRTを用いた斜面を除き20分未満であった。

測図 (平面図, 縦断面図, 横断面図) の作成に際して Blender 3.0.1 (以下, Blender) を利用した. Blenderは高機能な3DCGソフトウェアで, 一般的に映像作品やゲーム制作などの用途に用いられる. さらに, プログラミング言語であるPythonを用いてアドオンを作成し導入することにより, 様々な用途の機能拡張が可能である. 本研究では, 洞窟の測図作成のためのアドオンとして, 小竹がCave Mapperを新たに作成した. Cave Mapperは, 分割スキャンした3Dデータの結合や断面図作成, データの軽量化を補助するツールである. なお, 現行のBlenderの最新バージョンは3.4.1であり, ここで使用するアドオンCave Mapperは3.0.1で動作確認済みである.

先述のPolycamを用いたLiDAR測量の手法, およびBlenderを用いた測図作成方法は, 付ファイルの「洞窟測量におけるPolycam (3Dスキャンアプリ) 操作マニュアル」と「Blender 3.0.1で使うアドオンCave Mapperマニュアル; 導入編」に詳述する. さらに詳しい情報は, 小竹が運営管理するGitHubリポジトリに取りまとめている (註3). なお, PolycamとBlenderともに基本機能は無料であるが, Polycamでは一部

有料の機能拡張も存在する. ただし, 洞窟測量と測図作成はともに, PolycamとBlenderの無料の基本機能で実施可能である.

七久保の道穴 (新称)

七久保の道穴の記載に当たり, LiDAR測量の結果とともに洞窟の研究史と位置等を含む基本情報を示す. 加えて, 洞口形成過程をこの章に含めた.

研究史: 2018年9月24日, 須藤和成と渡邊 薫により発見され, 近傍の集落名である七久保および洞窟が町道に近接することから, 七久保の道穴と仮称された. 2021年12月11日, 柏木, 橘 悠生, 増山 慈 (富山大学) の三名が須藤の情報に基づいて再確認し, その際に洞床堆積物を採集した. 翌2022年1月30日, 柏木を含むPCCメンバーにより, 七久保の道穴のLiDAR測量と周辺の洞窟探索が実施された. 同年10月15-17日と12月11日, 柏木と小竹, 増山は, 七久保の道穴周辺の地質地形調査と再測量を実施した.

位置: 群馬県甘楽郡下仁田町内の, 下仁田町青倉から神流町に抜ける町道6009号沿いで, 七久保集落の南南東約1 km付近に位置する (Fig. 1C). 七久保の道穴を含む地形断面をLiDAR測量により作成した. 北流する幅10 m弱の小溪流

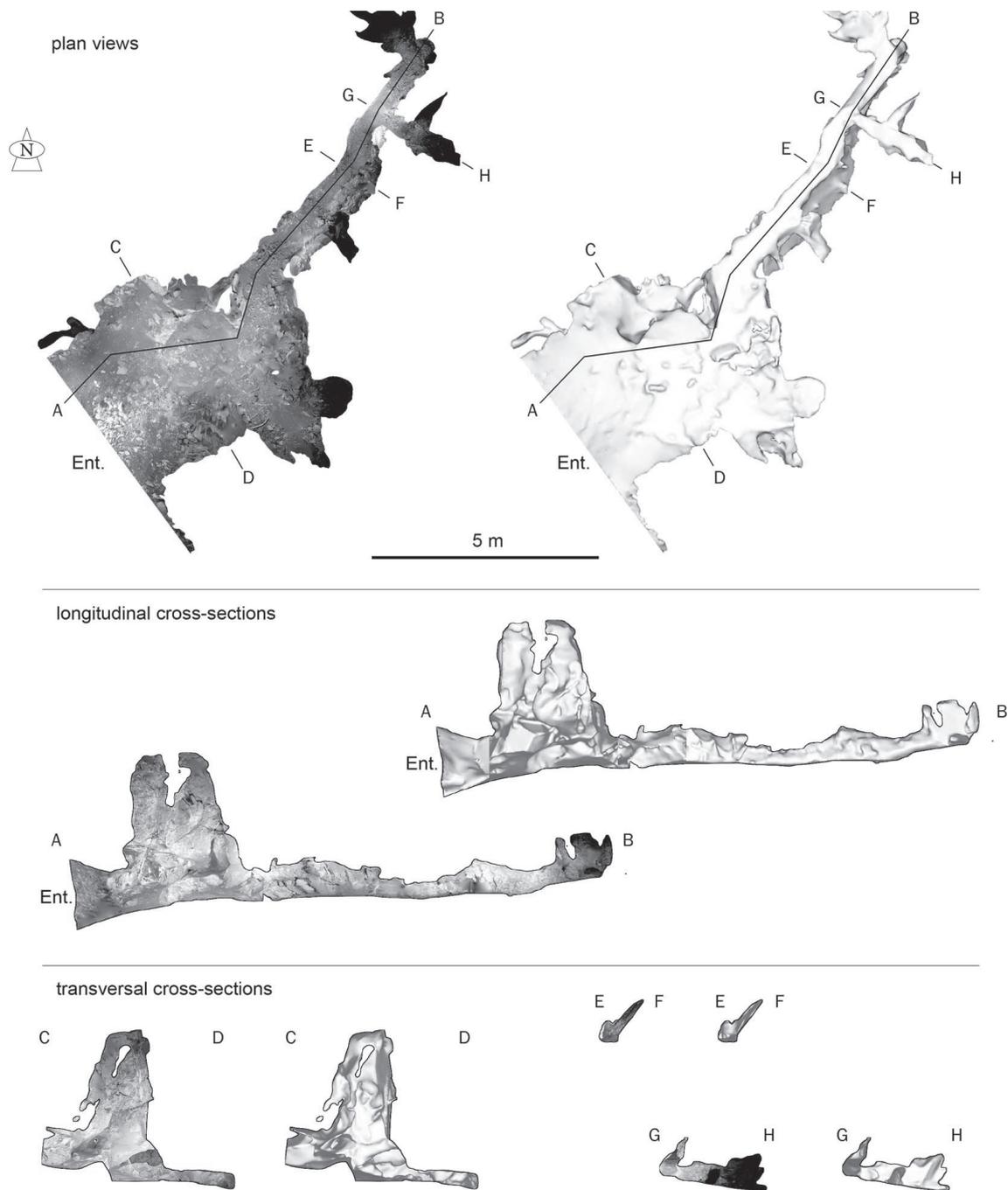


Fig. 5. Map of Nanakubo-no-michiana Cave. Black lines indicate position of longitudinal and transversal cross-sections. The cave interior was scanned using an iPhone 13 Pro.

の沢床から、約40°傾斜で比高約12 mの斜面上に北北東-南南西方向で町道が走り、七久保の道穴の洞口は町道からさらに比高8 m付近に急崖に開口する (Fig. 4). なお、町道から斜面を登り数十秒で洞口に達するものの、洞口は町道からは死角となり目視できない。

命名: 下仁田町青倉から洞窟の地点にいたる町道沿いの集落の地名「七久保」、および道路脇の斜面上に位置することから、七久保の道穴 (新称) と命名する。本名称は、発見者らが当初から仮称として利用してきたものを踏襲し

た。

規模: LiDAR測量により平面図、縦断面図、横断面図を作成した (Fig. 5)。洞口から洞奥へとA-B間に設定した主測線沿いに、主測線延長11.82 mのほぼ平坦な横穴型洞窟である。南西向きの急崖基部に開口する洞口は、高さ1 mの幅3.5 mである。洞口付近は平面図で5 m弱の広がりを示すものの、C-D横断面によると南東側で高さ20-30 cmと低く、実際には北西側で約2.5-3 m程度の広がりをもつ空間である。この空間で上方に伸びる裂隙が発達し、洞床か

ら天井までの比高は約3.4 mである。測図には表現されていないものの、この裂罅の最上部で南西方向に延びる裂罅が開口している。最奥地点Bにいたる約6 mの区間はNE-SW方向に伸びる狭洞で、幅40-70 cmで高さ30-70 cmで匍匐移動し、最奥は入洞不能となる。狭洞沿いの三ヶ所に、それと直交する幅30-65 cmの裂罅が発達する。

二次生成物：洞口入ってすぐの空間の洞壁に乾燥した洞窟珊瑚と流れ石が、狭洞の洞壁に洞窟珊瑚が認められる。洞口から最奥に至り、洞内に成長中の鍾乳石は確認できなかった。

洞口開口過程：洞口が開く石灰岩の南西向き急崖斜面は、その表面の一部に玄武岩質火山砕屑岩類の小分布が確認されることから、石灰岩と玄武岩質火山砕屑岩類の境界面であったと考えられる。また、洞口入ってすぐの空間には、洞壁の所々に乾燥した洞窟珊瑚が存在し、洞口付近が過去に鍾乳石を形成しうる暗黒かつ湿潤環境にあったことを示す。七久保の道穴は、周囲を玄武岩質火山砕屑岩類に囲まれた石灰岩中で、地表との空気循環のほとんど無い地下空間として成長した。その後、南西側に接する玄武岩質火山砕屑岩類からなる斜面が崩壊し、現在の洞口が地表に開口した。

議論

七久保の道穴を対象に、iPhone 13 Pro内蔵のLiDARを3DスキャンアプリPolycamにより使用し、七久保の道穴のLiDAR測量を実施した。得られた3Dデータを用いて平面図、縦断面図、横断面図を含む測図を作成し、その際、小竹が作成したアドオンCave Mapperを3DCGソフトウェアのBlenderに導入した。以下では、LiDAR測量と従来の測量手法とを比較し、洞窟を対象とするLiDAR測量の有用性と改善点について議論する。さらに、Blenderを利用した3Dデータの様々な利活用について言及する。

従来の洞窟測量では、レーザー距離計とクリノメーター、測量テープなどを用い、現地で結果を耐水性方眼紙上に鉛筆で作図し、測点間の洞壁や洞床、天井などの形状は、一般的に目視で記録してきた。例えば、黒部峡谷鐘釣にある縦横複合型洞窟のサル穴の測量では、洞口から主測線延長で約20 mの横穴空間の測量に、二名で複数回にわたり測量を実施し測図を作成した(柏木ほか, 2012a)。この横穴空間は、幅が2-3 m未満と狭く最大でも5 m強で、洞床の底質の状況について転石分布も含め目視で可能な限り正確に図面上に記録した。この際に作図した平面図は、ニホンザルが厳冬期に洞窟を利用した際に排泄した糞の分布

を記録する上で、極めて有用であった(柏木ほか, 2012b)。一方、洞床の底質を正確に記録することは、数十mを越える空間では時間的制約を含め現実的ではない。LiDAR測量では、洞床や壁面の凸凹は点群データとして取得されることに加え、同乗カメラによる色情報も伴われることから、得られた3Dデータを特性に応じて活用することで、転石の分布を含む洞床底質のみならず壁面の亀裂系の分布の把握が可能となる。iPhoneによるLiDAR測量は、より早く正確にデータを取得する手法として、洞窟空間の大小に関わらず、従来型の測量に比較してより有用である。

iPhoneを利用したLiDAR測量は、iPhoneそのものが小型かつ片手で操作が可能であり、狭い空間を含む洞窟での測量において高い利便性を有する。一方、LiDAR測量に伴うiPhoneのバッテリーの消耗は大きく、複数の洞窟を対象とした筆者らのこれまでの試行では、3-4時間程度でバッテリーが低レベルの状態となった。考える現時点でのバッテリー対策としては、予備のモバイルバッテリーの準備、ないし車が近くにある場合はシガーソケットからの充電などが考えられる。また、複数名でLiDAR測量を行う場合、スキャンする空間を計画的に割り当てることで、一定規模の洞窟空間をカバーするLiDAR測量が可能である。計測範囲の5 mを越える平面的に広い空間については、洞床と洞壁を含みくまなく歩いてスキャンすることで、データ取得は可能である。一方、天井の高い空間については、自撮り棒や伸縮性ポールの先端にiPhoneを取り付け、長さや方向を調整しながらLiDAR測量を行うなどが想定できる。

iPhoneを用いるLiDAR測量は、産業用TLS計測機(註1)を用いた場合に比較すると、測定精度や測定可能範囲、データ編集における作業性などで見劣りすることは想像に難くない。しかし、iPhoneはスマートフォンとして広く流通し汎用性を持つ点、産業用TLS計測機器に比較して極めて安価である点、洞窟構造を把握する目的に対しては十分な精度であると考えられる点、小型であるため匍匐での移動を強いられる狭い空間でも利用できる点から、洞窟測量に対して極めて有用なツールと判断できる。

LiDAR測量で得られた3Dデータの画像処理では、高性能なPC上でBlenderにアドオンCave Mapperを導入するなど事前準備に加え、Blenderそのものの操作手法の習得も必要である。また、より精度の良いデータを取得する上で、Polycamの適切かつ有効な操作が求められる。本稿では、付ファイルとして「洞窟測量におけるPolycam(3Dスキャンアプリ)操作マニュアル」と「Blender 3.0.1で使うアドオンCave Mapperマニュアル; 導入編」を準備した。また、Blenderについてはインターネット上に多くの解説ページ

が公開されている。以上を参照ないし補助として利用することで、Blenderを用いた画像処理の事前準備は円滑に行えるはずである。Blenderに導入したアドオンCave Mapperを活用することで、分割して取得した3Dデータの結合やデータの軽量化が可能であり、平面図に加えて任意のライン上での断面図を作成できる。また、三次元データとして取り扱うことで、洞内の3Dウォークスルー動画の作成が可能であり、本稿では洞口から最奥にいたる動画を付ファイルとして公開する。この3Dウォークスルー動画は、研究面での活用のみならず、洞窟探検の疑似体験ツールとしての一般への普及活動への貢献も期待できる。iPhoneのLiDAR測量により得られた3Dデータは、それが点群データから構成されていることから、従来型の測量にはない多様な表現が可能であり、研究と普及の両側面での有効利用が望まれる。

まとめ

七久保の道穴（群馬県下仁田町青倉川上流域）を対象に、iPhone 13 Proに3DスキャンアプリPolycamをインストールし、LiDAR測量を実施し洞内外の3Dデータを得て、Blender 3.0.1上で画像処理を実施した。七久保の道穴とその周辺の地形地質調査を含み、本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 七久保の道穴は、側線延長12 m未満で比高3.5 m未満と小規模で、かつほぼ平坦な横穴型洞窟である。洞口付近の洞壁には乾燥した洞窟珊瑚と流れ石がみられる。約6 m長の狭洞を経て最奥は入洞不能となる。
- 2) iPhoneを利用したLiDAR測量は、従来の洞窟測量手法に比較して、狭い洞内において高い機動性を有し、空間の規模に関わらず迅速かつ正確な測量が可能な点で、極めて高い利便性を持つ。
- 3) Cave Mapperは3Dデータの結合や断面図作成の補助ツールで、3DCGソフトウェアのBlender 3.0.1にアドオンを適用した。Blender 3.0.1上で3Dデータの画像処理を行い、七久保の道穴の測図（平面図、縦断面図、横断面図）を任意の平面上で作成した。
- 4) 3DデータをBlender上で扱うことで、得られた測量データの多様な表現が可能であり、研究と普及の両側面での活用が期待できる。
- 5) 七久保の道穴を胚胎する石灰岩は、玄武岩質火山砕屑岩類中に含まれる厚さ12 m程度の礫であり、現在の洞口は石灰岩との境界をなす玄武岩質火山砕屑岩類の崩壊で開口した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、PCCメンバーには情報提供と現地調査のご協力を、関谷友彦氏（下仁田町自然史館）と保科 裕氏（下仁田自然学校）には下仁田町における鍾乳洞調査についてご助力を、増山 慈さん（富山大学理学部生物圏環境科学科）には地形地質調査を手伝って頂いた。2021年度の七久保の道穴の調査は下仁田ジオパーク学術奨励金を用いた。以上の方々と機関に感謝する。

<註>

註1) 産業用ないしプロ仕様のTLS計測機器の価格は、インターネット上での検索によると、メーカーに問い合わせないし個別見積もりを必要とする場合が多い。価格が掲載されている例として、手持ちサイズの3D scanner BLK2GO (Leica製) は6,050,000円 (<https://shop.leica-geosystems.com/jp/ja-JP/leica-blk/blk2go;20230208確認>) であった。より高額と予想される設置型機器も含め、本稿ではTLS計測機器の価格を数百万～数千万円と記している。

註2) Apple社の公式Webサイト (<https://www.apple.com/jp;20230208確認>) によると、現行機種となるLiDAR搭載のiPhone 14 ProおよびiPhone 14 Pro Maxのうち、最安価の端末はiPhone 14 Pro ストレージ128GBモデルの149,800円、最高値の端末はiPhone 14 Pro Max ストレージ128GBモデルの239,800円であった。

註3) <https://github.com/CaveMapper/CaveMapper>

引用文献

- 荒波遼太 (2021): 憧れの3D測量を試す～お手軽な測量手法～. ケイピングジャーナル, (72): 11-13.
- 林田 敦・渡邊 薫・芦田宏一 (2021): スマートフォンの3Dレーザー scannerを用いた『精進湖口・試練の穴』の新溶岩洞窟の測量. ケイピングジャーナル, (71): 1-8.
- 早川裕式 (2015): 地上レーザー測量 (TLS). 日本地すべり学会誌, 52 (5): 29-30.
- 早川裕式 (2019): 3次元デジタル技術の地形学・考古学への応用. 精密工学会誌, 85 (3): 243-246.
- 本多 力・本多由香利 (2022): スマートフォンを使った溶岩樹型の3Dレーザー scanner計測. ケイピングジャーナル, (74): 40.
- Kamikawa, Y., Hisada, K., Sashida, K. and Igo, H. (1997): Geology of the Nanmoku area in the Chichibu Terrane, the northwestern part of the Kanto Mountains, central Japan. *Science Reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Section B (Geological Sciences)*, 18: 19-38.
- 柏木健司・阿部勇治・高井正成 (2012b): 豪雪地域のニホンザルによる洞窟利用. 霊長類研究, 28 (2): 141-153.

- 柏木健司・増山 慈・橘 悠生(2022):群馬県下仁田町平原地域の秩父北帯の地質構造および石灰岩体の分布. 下仁田町自然史館研究報告, 7: 43-49.
- 柏木健司・瀬之口 祥孝・阿部勇治・吉田勝次(2012a):富山県黒部峡谷の鐘釣地域のサル穴(鍾乳洞). 地質学雑誌, 118(8): 521-526.
- 小林忠夫(2009):平原の岩石-日本列島の基盤岩博物館-. 下仁田町と周辺の地質編集委員会(編)下仁田自然学校文庫5, 下仁田町と周辺の地質. 下仁田自然学校, 群馬県下仁田町, p. 76-77.
- 松嶋秀士・井良沢 道也・鄒 青穎・林 一成・落合達也・鈴木太郎(2022):落石調査におけるモバイルレーザスキャナの活用に向けての検討. 日本地すべり学会誌, 59(3): 16-22.
- 中野 俊・竹内圭史・加藤碩一・酒井 彰・浜崎聡志・広島俊男・駒沢正夫(1998):20万分の1地質図幅「長野」. 地質調査所.

<本論文の付ファイル01, 02, 03は群馬県立自然史博物館Webpageの下記アドレスで公開>

付ファイル01 洞窟測量におけるPolycam (3D スキャンアプリ) 操作マニュアル

http://www.gmnh.pref.gunma.jp/wp-content/uploads/bulletin27_17_01.pdf

付ファイル02 Blender 3.0.1 で使うアドオンCave Mapper マニュアル; 導入編

http://www.gmnh.pref.gunma.jp/wp-content/uploads/bulletin27_17_02.pdf

付ファイル03 七久保の道穴の3Dウォークスルー動画

http://www.gmnh.pref.gunma.jp/wp-content/uploads/bulletin27_17_03.mp4

