

# 穴ノ原溶岩洞穴における UAV のレーザースキャナ測量・写真測量と 深奥部探査の検討\*

眞部 広紀\*\*1, 久間 英樹\*\*2, 岡本 渉\*\*3, 稲川 直裕\*\*4,  
阿依 ダニシ\*\*5, 堀井 樹\*\*6, 堀江 潔\*\*1, 大浦 龍二\*\*1

## UAV Laser Scanner Surveying/Photogrammetry and Study on Deep Exploration of Ananohara Lava Cave, Itoh, Sizuoka, Japan

Hiroki MANABE\*\*1, Hideki KUMA\*\*2, Wataru OKAMOTO\*\*3, Naohiro INAGAWA\*\*4,  
Danishi AI\*\*5, Tatsuki HORII\*\*6, Kiyoshi HORIE\*\*1, Ryuuji OHURA\*\*1

Key words: Lava Cave, UAV, Drone, Laser Scanner Surveying, Photogrammetry

### Abstracts

In this paper, we discuss UAV laser scanner surveying and photogrammetry for 3D models of lava cave analogous to vertical holes and underground caverns.



図1 「穴ノ原溶岩洞穴」(ドローン空中撮影:鳥瞰)



図2 「穴ノ原溶岩洞穴」洞门口縁部の樹木



図3 「穴ノ原溶岩洞穴」洞口

上層の溶岩流断面、“テラス”部分、横穴

\* 原稿受付 令和4年1月14日

\*\*1 佐世保工業高等専門学校 基幹教育科

\*\*2 松江工業高等専門学校 電子制御工学科

\*\*3 名古屋大学 全学技術センター

\*\*4 日本文理大学大学院航空電子機械工学専攻  
工学部機械電気工学科

\*\*5 筑波大学理工学群応用理工学類4年(学生)

\*\*6 先進的UAV研究事業Aero Flex

## 1. はじめに

静岡県伊東市のスコリア丘である大室山北西山麓の「さくらの里」園地内に、「穴ノ原溶岩洞穴」(図1)は位置する。大室山西側から噴出した溶岩流の北上分岐側にあり(文献<sup>1)</sup>の図5の15b地点)、溶岩流に沿った横穴(溶岩洞窟)の天井部が崩壊し地表に縦穴(洞口)が形成されたと考えられているが、成因を確定するに足る詳細な洞窟調査は実施されてこなかった。本研究ネットワーク『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では、令和3年(2021年)に計4回の調査実験を計画し、ドローン(UAV)による上空からの縦穴空中撮影・写真測量を行い、縦穴と周辺地形の3次元点群モデルを作成した。並行して、レーザースキャナ装置を搭載したドローンを縦穴内部に降下進入させてレーザー測量を行い、縦穴側壁と底部に開口する横穴の一部の3次元点群モデルを作成した。さらに、縦穴内部にドローンを滞空させて側壁の空中撮影を行った。また、縦穴底部に2カ所開口する横穴を空中撮影した。横穴画像の撮影範囲は光量の関係で開口部近くに限定されていたが、レーザースキャナ測定の3次元モデルの横穴部分の奥行き距離は間違いに大きかった。横穴がさらに奥に続いている証左と考えることができる。

本稿では、「穴ノ原溶岩洞穴」を対象とする各種のUAV調査成果を紹介し、横穴奥部の探査計画を検討する。

## 2. UAV調査

さくらの里園地内のスコリアラフトと異なり、「穴ノ原溶岩洞穴」は文化財の指定を受けていない園地内の一施設である。繁茂した樹木(図1,2)が取り囲む口縁部には柵が設置され、来訪者は縦穴の内部(図3)を覗き込んで観察できるようになっている。しかしながら、柵から縦穴底まで約15m程度の高低差があり、縦穴側壁や横穴の詳細観察には障害になる。

『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では山口県秋吉台と福岡県平尾台において、ドローンを使用した縦穴の写真測量とレーザースキャナ測量を行い、3次元モデルを作成している<sup>2)</sup>。これらの実績に基づき、「穴ノ原溶岩洞穴」をUAV調査の対象とした。

### 2. 1 地表+縦穴(主に底部)：空中撮影

最初の作業段階として、小型ドローン(図4)を使用して上空から縦穴内部の撮影を行った。繁茂した樹木のため、内部を撮影可能なアングルは限定されている(図5)。



図4 使用した小型ドローンの例

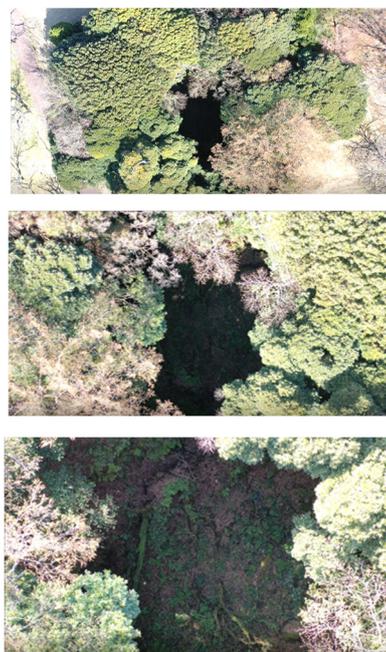


図5 「穴ノ原溶岩洞穴」  
(ドローン空中撮影：直上から)

## 2. 2 地表+縦穴（主に底部）：写真測量

ドローン空中撮影によって得られた画像は、静止画であれ動画であれ、ドローンの飛行軌跡を基点とする視点とアングルのものに限定される。自由視点からの画像と定量的な測定という研究上の需要があるため、『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では、3次元モデルを基盤資料に位置付けている。

「穴ノ原溶岩洞穴」空中撮影の次の段階は3次元モデルの作成とし、機器材の変更・増設が殆ど不要な写真測量を行った（図6,7）。

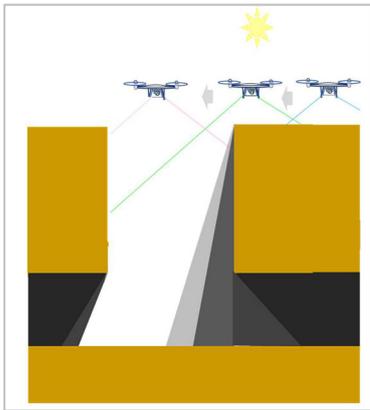


図6 縦穴の空中撮影/写真測量（模式図）



図7 「穴ノ原溶岩洞穴」（3次元点群モデル）

1ロータヘリ（図4中）のフライバイで空中撮影し、動画のピックアップ画像群をPix4Dで処理

経済安全保障上の理由により、『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では年度途中から国産ドローン（「先進的 UAV 研究事業 Aero Flex」製）を採用している（図8,9,10,11）。



図8 国産ドローン Ibis プロトタイプ



図9 Ibis のフライトパターン設定画面例



図10 「穴ノ原溶岩洞穴」（狭域3次元点群モデル）

Ibisの事前設定自動飛行で上空から空中撮影し、動画のピックアップ画像群をPix4Dで処理

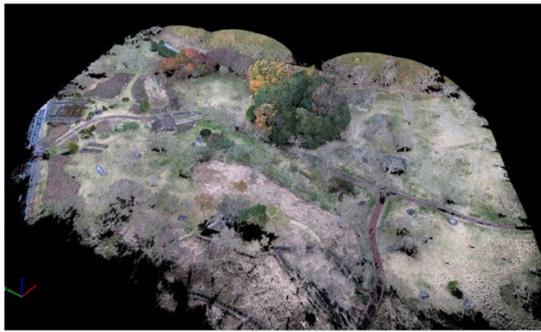


図 11 「穴ノ原溶岩洞穴」(広域 3 次元点群モデル)

Ibis の事前設定自動飛行で上空から空中撮影し、  
動画のピックアップ画像群を Pix4D で処理

2. 3 縦穴+横穴(一部) : レーザースキャナ測量

環境光(日光)に依存する写真撮影では、縦穴側壁の日当たりの悪い部分は写らず、上空から見通しにくい部分は撮影さえできない。その結果、日が当たらず上空から見通せない側壁の部分は 3 次元モデル化しても欠測する(図 7, 10, 11)。この課題を解決する対策として、縦穴内にドローンを降下進入させ、環境光に依存しないレーザーセンシングを行うことにした(図 12)。

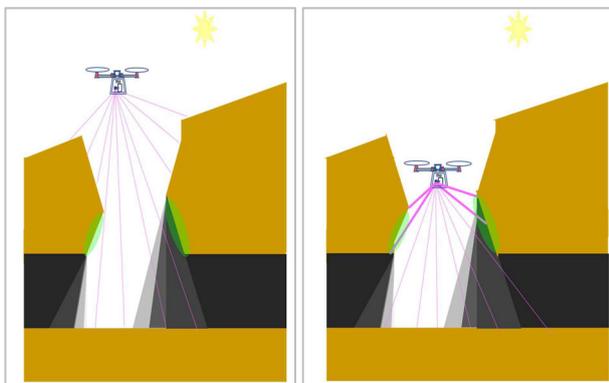


図 12 縦穴の降下進入レーザースキャナ測量(模式図)

『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では令和 3 年(2021 年)6 月に、松江高専の久間英樹教授の研究室が製作したレーザースキャナ装置をドローンに搭載して、「穴ノ原溶岩洞穴」のレーザースキャナ測量を行い、3 次元モデルを作成した(図 13, 14, 15, 16)。



図 13 レーザースキャナ装置搭載ドローン(DJI のドローン Matrice600 の上部と下部のジンバルに分けて取り付けられている)



図 14 レーザースキャナ装置搭載ドローンの降下進入(上空から小型ドローンで縦穴を空中撮影)



図 15 レーザースキャナ装置搭載ドローンの降下進入

## 2. 4 縦穴+横穴（一部）：縦穴内ホバリング撮影

ジンバルの取り付け配置の関係で、レーザースキャナ装置搭載ドローンのカメラが使えず、縦穴内部の撮影ができなかった。そのため、別途に、小型ドローンを縦穴内部で滞空させて撮影を行った（図 17）。

第 1 節では、横穴が縦穴底部に 2 カ所開口する（図 18）と述べた。正確には、横穴が縦穴底部に 2 カ所開口しているように見えている。その理由の根拠は、横穴の輪郭の上側を縁取る溶岩断面を辿っていくと、土砂で被覆されている一部を除いて、側壁のほとんど全周を取り巻いていることに基づく（図 19）。

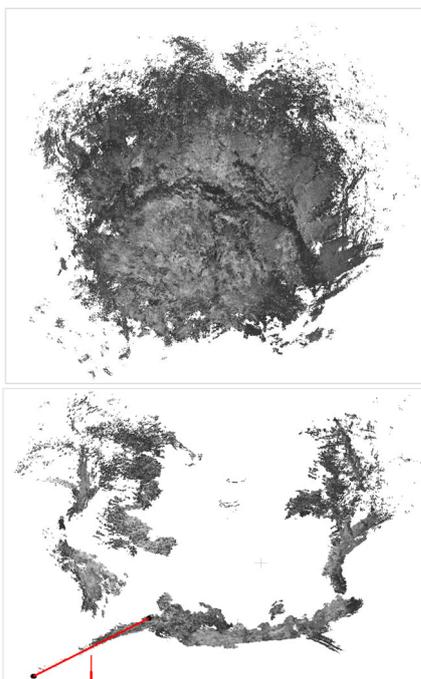


図 16 「穴ノ原溶岩洞穴」（3次元点群モデル）

当初の目標である側壁全体の 3 次元モデル化はほぼ成功した。次の目標は縦穴底に開口する横穴である。3 次元モデルでは最大の奥行き（図 16 下、赤ラインの部分）は約 11m である。スキャナ装置搭載ドローンが縦穴底に接近して着陸していれば、横穴のさらに奥まで測定できた可能性が残る。実際は、縦穴底は平坦ではなく傾斜していたため、着陸時にドローンが転倒する予想が立った。また、ドローンの巻き起こす気流の影響で機体揺動が徐々に大きくなり、側壁と接触する懸念が出てきた。これらのリスクを回避するため、縦穴底着陸を諦め測定作業を中断し、ドローンを縦穴内部から上昇離脱させた。

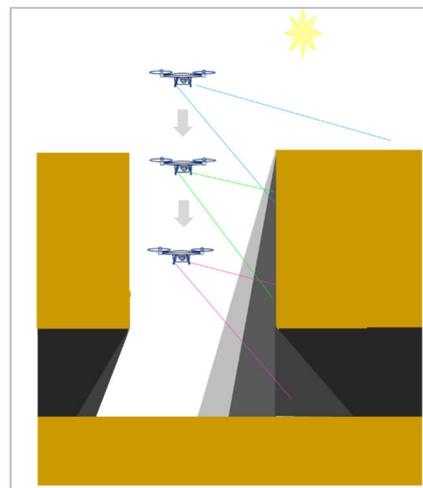


図 17 縦穴の空中撮影（模式図）

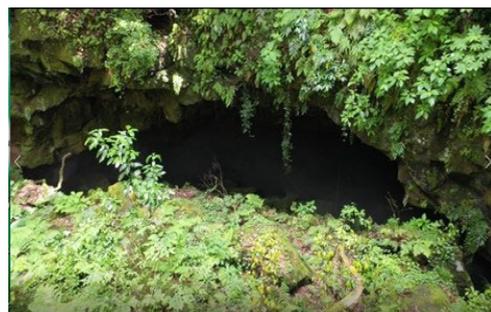


図 18 横穴（上：北側、下：南側）

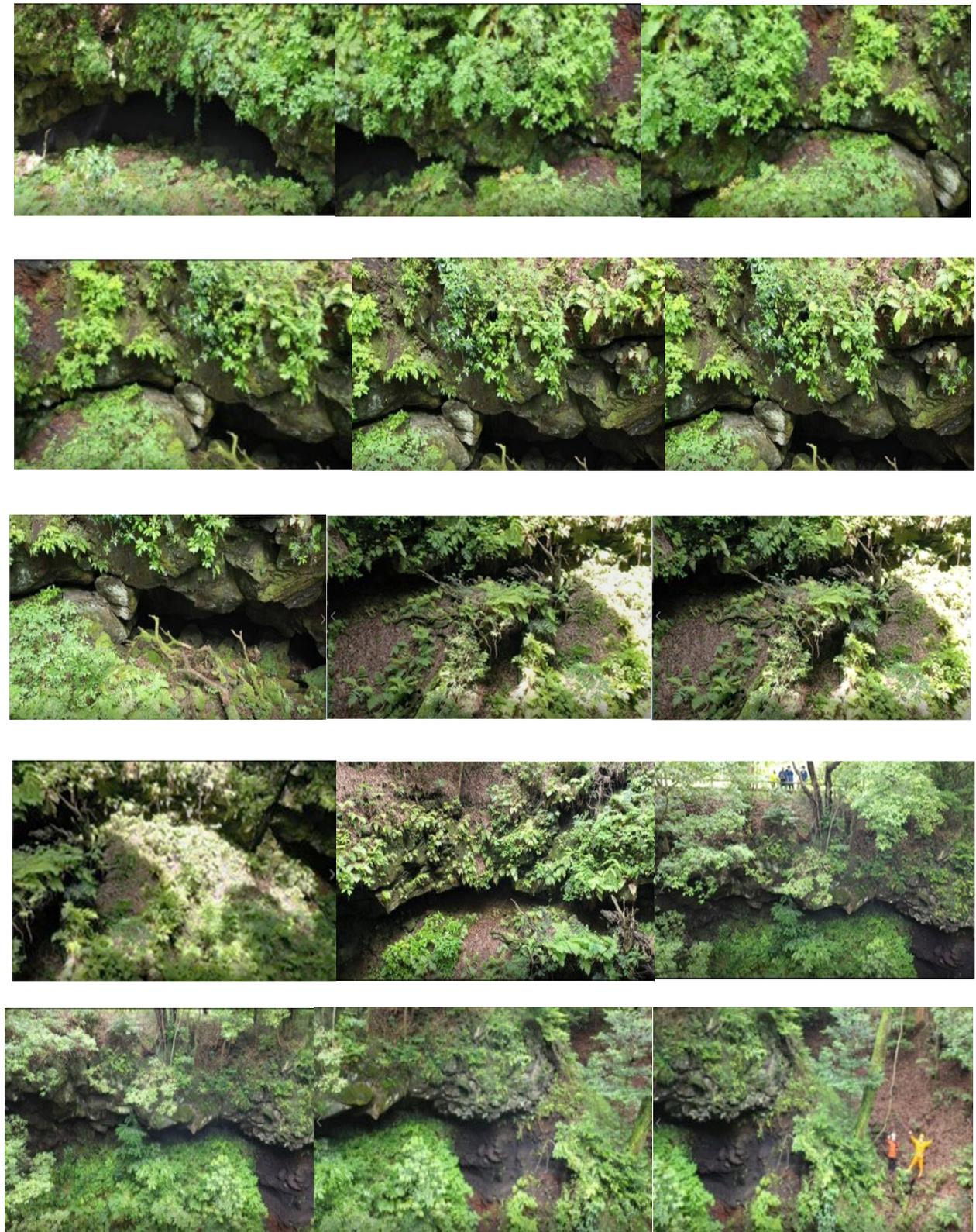


図 19 溶岩断面の追跡

### 3. 考察

溶岩断面が側壁全周を取り巻いていると前節の根拠を強化した仮定を置けば、横穴の外殻の一部が天窓状に崩れ落ちて露出した縁の部分が溶岩断面と推定できる(図20(赤紫部分))。横穴が2カ所開口しているように見えるのは、縦穴底の堆積物が本来の横穴を分断しているからかもしれない。このような構造を持つ例として溶岩チューブ洞窟の天窓(図21)があるが、「穴ノ原溶岩洞穴」が「溶岩チューブ洞窟の天窓」か、あるいは他のタイプの溶岩洞窟かを判断するためには、縦穴底に開口する横穴の奥を直接調査する必要がある。

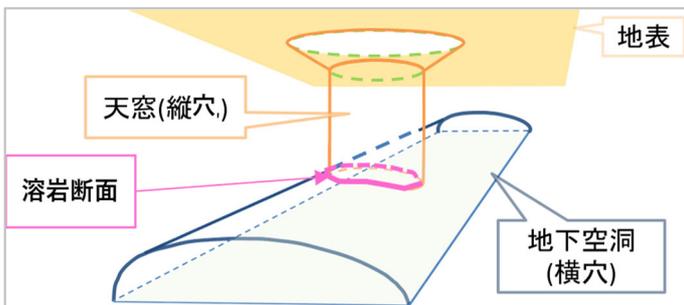


図20 「穴ノ原溶岩洞穴」(構造推定模式図)



図21 長崎県五島市富江「井坑溶岩トンネル」  
(「通抜井坑」を抜けて「野穴」方向を臨む)

### 4. 横穴の調査手法の検討

洞窟付近を除いて、横穴内への日光の入射は皆無であり、殆どが暗黒の領域である。「穴ノ原溶岩洞穴」の横穴に十分な奥行きがあれば例外なく暗闇を蓄えた空間が待ち受けている。そのような環境においてロボットによる探査・写真測量・Visual SLAMを行う場合には、光源として人工の照明が必要になる。

LiDAR 測距・レーザースキャナ測量・Laser SLAM などのアクティブセンシングの手法であれば、洞窟の暗闇にも費用対効果良く対応できる。本節では「穴ノ原溶岩洞穴」の横穴探査に向けた『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』の取り組みについて言及する。

#### 4. 1 UAV

縦穴内部に降下進入した UAV をさらに横穴に進入させる。UAV の機動性を活かして、より早く横穴の深奥部に到達できる。ただし、機体が天井、洞壁、洞床との安全な間合いを保つ仕組みが必須であり、非 GPS 環境に対応したナビゲーションや SLAM も必要になる。詳細な検討は別稿に譲る。

#### 4. 2 UAVによるUGVの空中輸送

UGV による横穴探査の実績・確実性に重点を置き、UAV は UGV の輸送力と機動性を利用する(図22)。UGV を運搬可能なペイロード重量の大きさが UAV には不可欠である。また、飛行運搬中の UGV を把持固定し、着陸後には把持を解除して UAV から分離させる仕組みも必要になる。

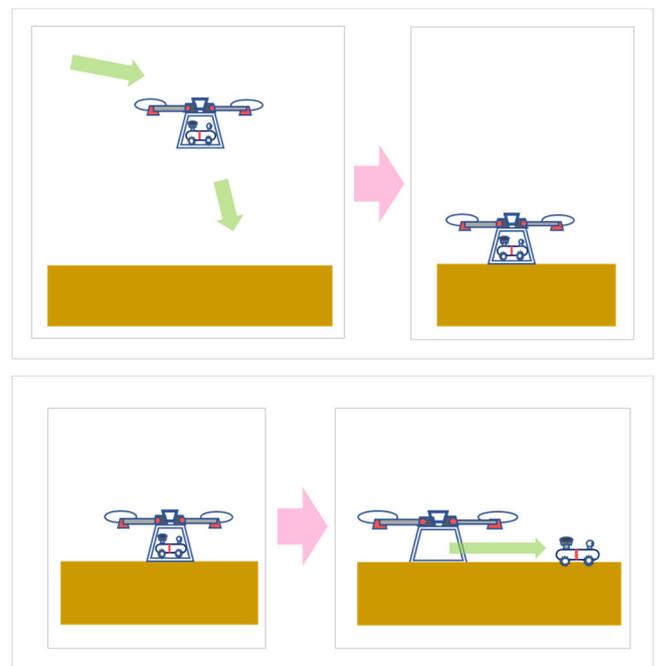


図22 UAV+UGV(模式図)

上: UGV を把持した UAV が縦穴底に降下着陸  
下: 把持を解除した UGV が UAV から分離発進

『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は令和2年(2020年)9月に、「秋吉台」において UAV と UGV を協働させた先行的な予備実験を実施した。日本文理大学の稲川直裕教授の研究室が製作した小型地上走行ロボットとキャリアフレームをドローンに搭載して、離陸・飛行・着陸・地上走行ロボットの発進・無線操縦に成功している(図23)。



図23 ドローンによる地上走行ロボットの空中輸送

## 5. 意義と展開

21世紀初頭、日本の月周回探査衛星 SELENE (かぐや) や米国の LRO などの地形カメラ画像の解析研究により、月面に巨大な縦孔がいくつも発見された。地球の溶岩チューブ洞窟(横穴)の「天窗」との類似から、「縦孔-地下空洞」(縦穴-横穴複合洞窟)の構造モデルが提唱された。重力分布やレーダサウンダの電波反射面の解析により、長大な地下空洞の存在の科学的証左が積み重ねられている。米国の MRO などの地形カメラ画像から、火星の表面にも縦孔が数多く発見されている。

地球外の「縦孔-地下空洞」は洞窟の学術価値と利用価値を大きく転換させた。月・火星の地下空洞内は放射線・紫外線・隕石・デブリから防護された天然のシェルターであり、有人基地や生活拠点の建設地として有望視され、月開拓・火星開拓の対象として世界の宇宙研究機関の注目を浴びている。

日本では JAXA 宇宙科学研究所の有志メンバー達を中心にした『UZUME (Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration 古今未有の日本の月/火星地下世界探査)計画』により、直接探査に向けた研究や取り組みを加速させている。

『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は UZUME 計画のワーキンググループと連携して、「縦孔-地下空洞」の地球類似地形探索と並行して、直接探査シミュレーション実験の取り組みを行っている。初動的な実験のとりかかりやすさでは「穴ノ原溶岩洞穴」は国内で最も好条件に恵まれている。しかも未知・未踏・未測量の地下空間という魅力も併せ持つ。ここを攻略していくときに蓄積する知見やノウハウは、未知・未踏・未測量である月・火星の「縦孔-地下空洞」直接探査を担う若い探検者達に大きな糧となるであろう。

## 参考文献

- 1) 古谷野裕, 早川由紀夫, 町田洋,  
東伊豆単成火山地域で起こった  
大室山噴火の推移と継続時間  
地学雑誌 Journal of Geography 105(4)  
pp475-484 1996
- 2) 眞部広紀, 久間英樹, 梅木太嗣, 岡本渉,  
村上崇史, 堤紀文, 堀江潔, 大浦龍二,  
ドローンによる堅穴の 3D レーザースキャナ測定  
SfMMV 写真測量～恵藤穴・こむそう穴・はる穴～  
佐世保工業高等専門学校研究報告第 56 号,  
pp.105-114(2020年1月)