

溶岩流の予備測量と 縦穴溶岩洞窟洞口への UAV 自律接近実験サイトの検討*

眞部 広紀**1, 岡本 渉**2, 堀井 樹**3, 堀江 潔**1, 大浦 龍二**1

Preliminary Photogrammetry of Lava Flow and Study on UAV Autonomous Approach Experiment Site to a Vertical Lava Cave Entrance

Hiroki MANABE**1, Wataru OKAMOTO**2, Tatsuki HORII**3, Kiyoshi HORIE**1, Ryuji OHURA**1,

Key words: Lava Cave, Lava Flow, Scoria Hill, UAV

Abstracts

In this paper, we discuss UAV experiment site for autonomous approach to, vertical lava cave entrance.

1. はじめに

月面の巨大な縦孔を世界で初めて発見した JAXA 宇宙科学研究所の研究グループ有志メンバーが縦孔と地下空洞の直接探査を目指して『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』を立ち上げ、探査プラットフォームの検討と関連分野の基礎研究を進めている。さらに、UZUME 計画ワーキンググループが『UZUME 計画 (火星版)』を始動し、火星ヘリコプタをプラットフォームとした探査の検討を行っている。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』は UZUME 計画ワーキンググループと連携して、地球の「縦孔-地下空洞」類似地形の探索・測量・3D モデル化を進めている。2022 年 1 月現在、未だ人類は月・火星の縦孔-地下空洞に探査機を到達させていない。これらの未知・未踏の領域探査を実行する前段階として、基礎技術の検証と予行演習を目的とした、地球の類似地形における探査シミュレーション実験が必要になる。『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は実験候補地の選定について探査ルートを三つに区分する (図 1) :

- [フェーズ 1] 縦孔洞口への接近
- [フェーズ 2] 縦孔内部への降下 (側壁・底部の探査)
- [フェーズ 3] 地下空洞への進入 (奥部の探査)

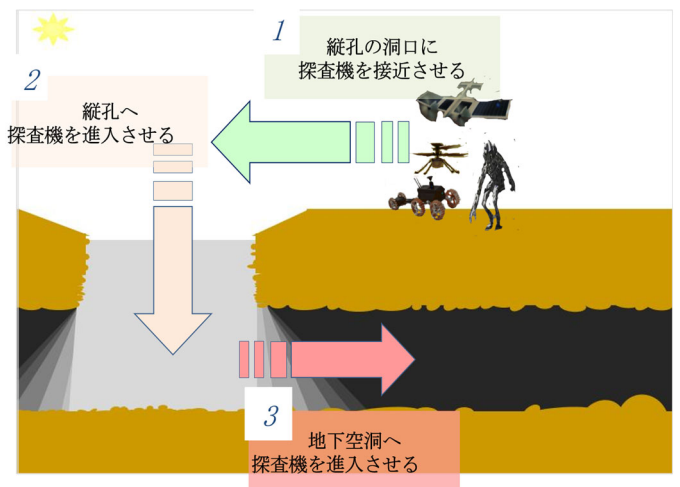


図 1 「縦孔-地下空洞」直接探査の区分 (模式図)

本稿では、静岡県伊東市大室山麓の「穴ノ原溶岩洞穴」を想定した [フェーズ 1] の UAV 自律接近飛行実験の検討を行う。

* 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 名古屋大学 全学技術センター

**3 先進的 UAV 研究事業 Aero Flex

2. 背景

NASA の『Mars 2020 Mission Perseverance Rover』において、2021 年 4 月、二重反転ロータ式ヘリコプタドローン Ingenuity が世界で初めて火星大気中の動力飛行に成功した¹⁾。Ingenuity の実験成功は「火星 UAV の縦穴-地下空洞探査」への道筋を拓くものである。Mars 2020 の開始以前から、ドローンによる [フェーズ 1] [フェーズ 3] の洞窟探査実験が世界各地で実施されている²⁻⁴⁾。本研究ネットワークは、2021 年 6 月、静岡県伊東市大室山山麓の「穴ノ原溶岩洞穴」において、ドローン搭載レーザースキャナ測定実験と [フェーズ 2] である縦穴への降下進入実験を実施した（詳細は別稿に譲る）。

①UAV、②UAV+UGV、③UGV、いずれの場合も [フェーズ 1] の実験には「縦穴+周辺地形」がセットとして必要になる。周辺地形は高低差・起伏が少なく平坦地に近い実験サイトが良い。そのような条件を満たし樹木が少ない溶岩流が、①②の写真測量、縦穴の画像検出、UAV の接近・降下実験に有利になる。

「穴ノ原溶岩洞穴」は「さくらの里」園地内にあり、洞门口縁部以外にはほとんど樹木はない。『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は、[フェーズ 1] の基盤データとして「穴ノ原溶岩洞穴」の周辺溶岩流のドローン写真測量と 3 次元モデル化を進めている（図 2, 3）。

3. 溶岩流とスコリア丘

地表に現れた溶岩流の水平方向の幾何的な形は多種多様であり、おおよそ「単純閉曲線に囲まれた領域」程度の条件しかなく個性豊かである。境界線が検出できれば識別・特定しやすいであろう。しかしながら、クレーターやドリーネとは異なり、溶岩流は高低差・起伏に乏しい地形であり、地形としての境界線は明瞭ではない。一部の例外を除いて、画像の見た目の形状に基づいて溶岩流単体の識別・特定を行うことは困難であり、別の地形に解決の糸口を求めるべきであろう。

4. スコリア丘の識別

溶岩流に関係する地形の一つにスコリア丘がある。「穴ノ原溶岩洞穴」の溶岩流の湧出元とされるのは、直近の「大室山」である⁵⁾。

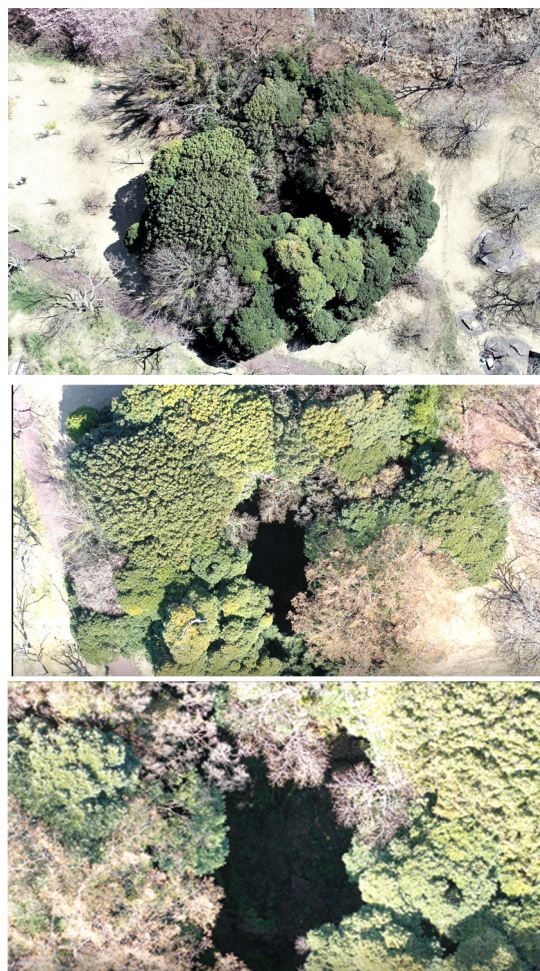


図 2 「穴ノ原溶岩洞穴」(ドローン空撮)

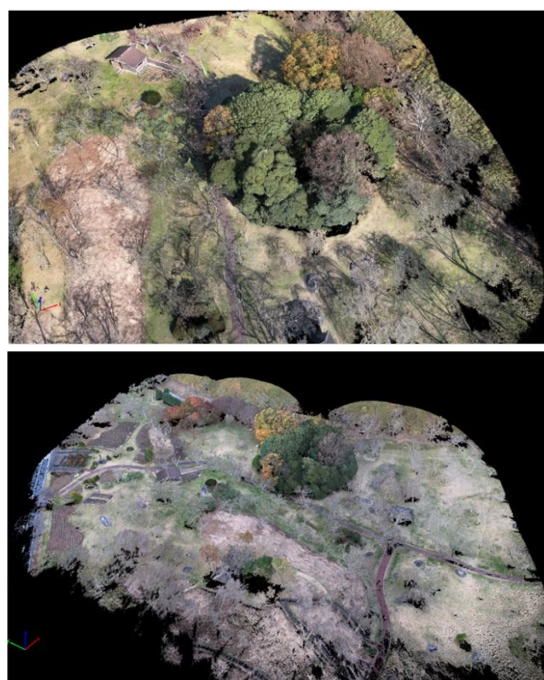


図 3 「穴ノ原溶岩洞穴」3次元点群モデル
上：狭域 下：広域

スコリア丘は碗を伏せたような円錐に近いプリン型の独立峰であり、画像でも地形を識別しやすい。とくに画像の情報量を落としても識別できるのは、山麓を取り巻く山体の境界線と山頂火口跡の稜線などの傾斜転換線であろう。

円錐に近いとはいえ完全に回転対称ではなく、山麓側面から溶岩流の湧出があれば、亀裂や盛り上がりをもとに「縦穴」との相対的な方位の読み取りが可能である。例えば、「穴ノ原溶岩洞穴」は「大室山」の西山麓にある溶岩流の湧出元(図4)から(火口跡を中心として)時計回りに30°~45°の位置にある。

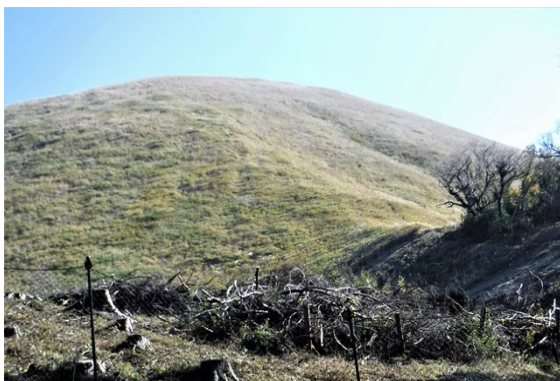


図4 「大室山」の西山麓

5. UAVの縦穴アプローチの検討

スコリア丘を基準に置くと縦穴との位置関係は二種類に分類される：

- ・ある1つのスコリア丘と隣接する
- ・どのスコリア丘にも隣接しない
(複数のスコリア丘から距離を置く)

前者の場合、UAV 自律飛行[フェーズ1]を以下のように三つの段階プロセスに設定する：

- (S1-1) UAV を目標のスコリア丘まで移動させる
- (S1-2)スコリア丘近辺の上空の UAV を目標縦穴近辺の上空に移動させる
- (S1-3)ドリーネ底面近くにある目標縦穴上空まで UAV を移動させる

後者の場合、複数のスコリア丘を頂点する多辺形など幾何的な配置(本稿では「近傍図形」と呼んでおく)の特定が必要になる。UAV 自律飛行[フェーズ1]は以下のように三つの段階プロセスになる：

- (N1-1) UAV を目標の「近傍図形」まで移動させる
- (N1-2)「近傍図形」内にある目標縦穴近辺の上空に UAV を移動させる
- (N1-3)目標縦穴の直上まで UAV を移動させる

(S1-1) (N1-1) (S1-2) (N1-2)は画像照合航法を想定しているため、ナビゲーション用のマップが必要になる。マップはスコリア丘を含めた広域 3D モデルをもとに作成する。

(→すでに 3D モデルは作成途中にある。)

(S1-3) (N1-3)は縦穴上空への誘導制御を行うため、深度画像測定などによる縦穴のリアルタイム相対水平位置検出が必要になる。

(→すでに深度画像測定による洞窟の奥行検出は本研究ネットワークで研究中。)

参考文献

- 1) NASA Science MARS (web ページ) ;
, <https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/>
- 2) Pascal Lee et al.,
LOFHELLIR LAVA TUBE ICE CAVE, ICELAND:
SUBSURFACEMICRO-GLACIERS,
ROCKFALLS, RONE LIDAR 3D-MAPPING,
AND IMPLICATIONS OR THEEXPLORATION
OF POTENTIAL ICERICH
LAVA TUBES ON THE MOON AND MARS,
50th Lunar and Planetary Science Conference 2019
(LPI Contrib. No. 2132)

- 3) Wennie Tabibet al,
Autonomous Cave Surveying with an Aerial Robot,
arXiv:2003.13883v1 [cs.RO] 31 Mar 2020
- 4) Lydia Sam et al.,
Small Lava Caves as Possible Exploratory Targets on Mars:
Analogies Drawn from UAV Imaging of an Icelandic Lava
Remote Sens. 2020, 12, 1970; doi:10.3390/rs12121970
- 5) 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