

UZUME 阿蘇巡検 2022

眞部 広紀**1, 春山 純一**2, 長谷中 利昭**3, 川口 允孝**3, 松広 航**4, 永田 紘樹**5

Report on UZUME Aso Excursion in 2022

Hiroki MANABE**1, Junichi HARUYAMA**2, Toshiaki HASENAKA**3,
Masataka KAWAGUCHI**3, Ko MATSUHIRO**4, Kouki NAGATA**5,

Key words: Aso Volcano, Komezuka Wind Cave, Robot Experiment,
3D model, Robot Exploration Simulator

Abstracts

In this report, we introduce the Aso Volcano 2022 excursion including 3D modeling of Komezuka Wind Cave etc. and robot preliminary experiments for UZUME project aiming at direct exploration of Lunar/Martian vertical holes with underground caverns.

1. はじめに

日本の月周回探査衛星「かぐや (SELENE : Selenological and Engineering Explorer)」や米国の月周回探査衛星「LRO : Lunar Reconnaissance Orbiter」、米国の火星周回探査衛星「MRO : Mars Reconnaissance Orbiter」の地形カメラ画像をはじめとした高精細画像の解析により、月・火星の地表面に巨大な縦孔が検出・認知された。地球の溶岩チューブ洞窟 (横穴) の天井に開口した「天窗」 (縦孔) のように、縦孔の底部には長大な地下空洞が繋がると推定されている。このような地球外天体の「縦孔-地下空洞」は人類にとって未踏のフロンティア、探検・学術調査の対象であるだけではない。太陽フレア・宇宙線の被曝、隕石・デブリの空襲から防護される天然のシェルターであり、地表面よりも温度変化幅が少ない地下空間は、人類拠点・基地の候補地でもある^{1,2)}。

国内では JAXA-ISAS (宇宙科学研究所) の研究者らを中心に『UZUME (Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/ Mars Exploration 古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査) 計画』が立ち上げられ、UZUME ワーキンググループによって月・火星の「縦孔-地下空洞」の直接探査に向けて取り組んでいる³⁾。しかしながら、2022 年 11 月現在の人類にとっても「縦孔-地下空洞」のほとんどが未知であり、地球の類似地形から類推せざるを得ない。

2022 年 11 月、1 日から 4 日にかけて第 66 回宇宙科学技術連合講演会が熊本城ホールで開催され、オーガナイズドセッション『OS18 月惑星の縦孔・地下空洞探査 UZUME 計画』は 3 日に 12 件、4 日に 16 件の口頭発表があった。日程終了後 11 月 5 日に、スコリア丘「米塚」に近い溶岩洞窟「米塚風穴」 (図 3~11) と「上米塚」 (図 12,13,14)、中岳火山に近い「砂千里」付近 (図 15~20) を巡検地とした UZUME 阿蘇巡検 2022 が行われた。この巡検は、JAXA (春山) と (株) ダイモンの共同研究の一環として実施したイベントでもある。本稿では巡検の概略を紹介し、現場で獲得した 3D データの応用例 (ロボット探査シミュレーション) を報告する。

* 原稿受付 令和 4 年 10 月 31 日

**1 佐世保工業高等専門学校 基幹教育科

**2 JAXA 宇宙科学研究所

**3 熊本大学くまもと水循環・減災研究教育センター
減災型社会システム部門

**4 早稲田大学大学院 先進理工学研究科

**5 阿蘇ジオパーク推進協議会

2. 「米塚風穴」

九州島のほぼ中央に位置する阿蘇カルデラは、東西 18km、南北 25km の規模を有し、カルデラの中心部には阿蘇五岳（「高岳」「中岳」「根子岳」「烏帽子岳」「杵島岳」）で有名な中央火口丘群がある。中央火口丘群北西部の「米塚」は、2017年の熊本地震によって山頂火口周辺に多数の亀裂⁴⁾が生じたものの、国内で最も均整のとれた美しいスコリア丘の一つである（図1上）。噴火したのは約3000年前で、阿蘇で最も新しい火山の一つであり⁵⁾、山体は頂上に直径80mの火口（図1下）を有する基底直径約380m、山頂標高954.3m、比高約80mで、「杵島岳」の北西に位置する。ここで、スコリアとは火口から勢い良く噴き上げられ、著しく発泡したマグマが固結してできる黒色の軽石で、スコリア丘とはそれが降り積もってできた火山地形である。降り積もった山が高くなり斜面が不安定になると、スコリアは斜面上を転動し約33°の直線的な斜面を形成する⁶⁾。遠望した米塚スコリア丘の斜面角は約30°であった。

「米塚」から北西側に流下した溶岩流「米塚溶岩」の中に、「米塚風穴」⁷⁾がある（図2）。米塚溶岩は玄武岩質安山岩の溶岩で、溶岩流は阿蘇谷のカルデラ床に近い国道57号線付近まで達している⁸⁾。流走距離にして約3.5kmである。玄武岩質な組成から考えて、溶岩の流動性が高かったことがうかがわれる。溶岩は噴出後に外気や地表と接触して表層部から冷却・固化していくが、噴出継続時間が長期間に及ぶ場合には、内部の未固結な部分が流動し続け溶岩トンネル（Lava tube）を形成することがある⁹⁾。溶岩は一般的に熱伝導率が低いため、トンネル内部を流動する溶岩は、温度が低下せずに流動性を保ったまま長距離を効率よく流動する¹⁰⁾。溶岩が流れていった跡は空洞となり、トンネルの一部が崩落して地表とつながったものは溶岩風穴となる¹¹⁾。このうちトンネルの天井が崩壊して形成されたものを天窗型（スカイライトタイプ）と呼ぶ。米塚溶岩の分布域では、小規模な風穴も含めると現在1756もの風穴が見出されている¹²⁾。「米塚風穴」は給源に最も近い天窗型大規模風穴の1つで、内部は人が立って歩ける程の高さがある。

巡検隊は「米塚風穴」において、天井・洞壁の生成物、ノッチ、割れ目についてレクチャーを受け、観察・撮影を行った（図4,5,6）。



図1 「米塚」

上：東側からの外観、下：山頂火口跡



図2 「米塚風穴」洞口位置2Dオルソ画像
処理ソフト：Terra Mapper™（株）テラドローン）



図3 「米塚風穴」に向かう巡検隊



図4 中央洞口



図5 洞内



図6 天井・洞壁の観察

観察・撮影と並行して、小型ロボット「YAOKI」の洞床走行実験（図7）、LiDAR スキャナが搭載されている iPhone13 Pro を用いて 3D モデル化用の撮影（図8）が行われた。使用した 3D スキャンアプリは「Niantic Inc., Scaniverse」で、LiDAR により

取得したデータとカメラの RGB 画像を用いて、ほとんどその場でテクスチャ付の 3D メッシュモデルを簡易的に取得できる。今回は巡検の時間的制約があったため、「米塚風穴」の画像データから、一部の形状が取得できていない部分はあるものの概形を得ることができた（図9,10,11、詳細は別稿）。



図7 小型ロボットの洞床走行実験
「YAOKI™」（株）ダイヤモンド



図8 3D撮影

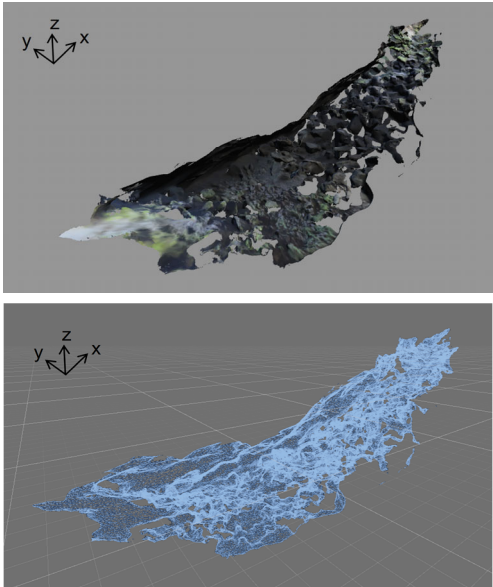


図9 「米塚風穴」外観 3D モデル

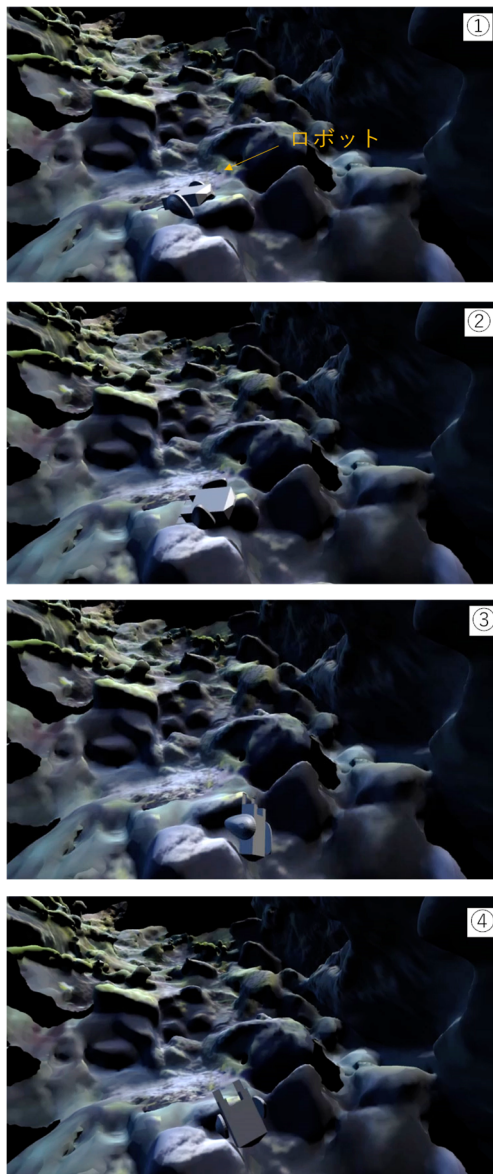


図10 ロボットシミュレーションの様子



図11 ロボットシミュレーションの様子

4. 「上米塚」

「米塚風穴」の巡検では溶岩流の給源である「米塚」自体は観察できなかったため、近くのスコリア丘「上米塚」¹³⁾で露頭観察を行った。「上米塚」は「米塚」と「杵島岳」の間、阿蘇登山有料道路赤水線沿いにあり、道路造成時に開鑿されている。断面ではスコリア丘の内部構造が観察できるため、巡検地として好適である(図12,13,14)。巡検隊はレクチャーを受けた後、斜面を登り露頭観察を行った。「上米塚」は赤褐色～黒色のスコリアにより構成されている。急冷されたスコリアは黒色だが、「上米塚」で観察される鮮やかな赤褐色のスコリアは、マグマの熱と空気中の酸素による高温酸化で FeO が Fe_2O_3 になったために色が変化したものである。スコリアは気泡が多く、スコリア同士の間も隙間があるので、酸素はスコリア丘内部まで容易に供給される。この場所では約 800°C 以上の温度で酸化したと推定されている¹⁴⁾。よく見ると火山口跡と考えられる部分(図14、左手側斜面)から離れた箇所では黒色のスコリアが多い。スコリアには空隙に富んだ発泡の良いものと、扁平に潰れたもの(火山弾)があり、幸運にも道路脇では短径約 85 cm を超える火山弾を観察することができた。



図 12 「上米塚」そば

上：到着・準備、下、レクチャーを受ける巡検隊



図 13 「上米塚」の露頭観察



図 14 「上米塚」スコリア丘の内部

5. 「砂千里」付近

「砂千里（ヶ浜）」は岩肌と火山灰で覆われた砂浜が広がる火口跡であり、「中岳」火口の南東部に位置する。探査ロボット実験が行われた伊豆大島三原山「裏砂漠」¹⁵⁾と同様に、惑星地質フィールド巡検⁸⁾の対象地になっている¹⁶⁾。

巡検隊は阿蘇山上広場を出発して阿蘇山公園有料道路沿いに上り、料金所付近から「砂千里」に向かう登山道（皿山迂回ルート）を辿った（図15）。このルートは「中岳」火口周辺規制時の立入禁止区域を避けて2021年に新設されたもので、皿山方面の尾根を経由するため従来よりも到達に時間がかかる。

「YAOKI」走行実験（図16,17）や移動経路の3Dモデル（図18,19）の取得撮影も行われたが、巡検の終了時間が迫ったため「砂千里」の手前で引き返した（図20）。



図15 「砂千里」に向かう巡検隊



図16 「砂千里」付近
上：歩道、 中、下：「YAOKI™」走行実験



図17 「砂千里」付近
上、中、下：「YAOKI™」走行実験

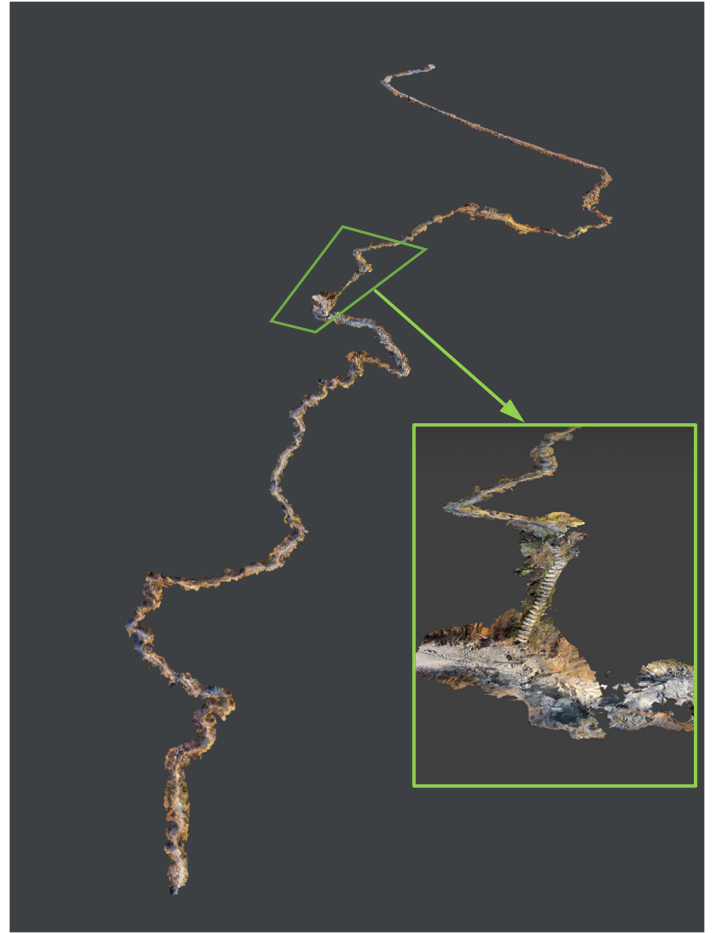


図18 「砂千里」付近移動ルートの3Dモデル

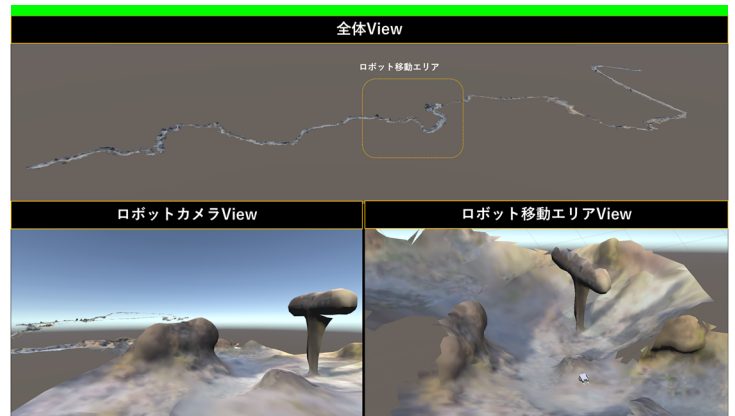


図19 「砂千里」付近移動ルートの探索シミュレーション



図 20 「砂千里」からの復路

6. まとめ

「百聞は一見に如かず、百見は一触に如かず」の故事に比較すれば、バーチャルではなく現場をリアルに巡る巡検は「千見、百触」の機会である。前回の「野外巡検：阿蘇米塚溶岩トンネルと阿蘇の火山岩」

(2012年7月)から10年ぶりに企画された「UZUME 阿蘇巡検 2022」では、地形・地質・地層の解説や観察に加えて、技術進歩を反映させた新項目(小型ロボット「YAOKI」の不整地移動実験、3Dモデルのその場計測・その場生成の実験)を盛り込んだ。数年前に研究連携ネットワークの『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』が初めてUAV実験(図1,2)の取り組みを実施した場所が阿蘇であり、実験前の予備調査と実験後の補足調査に6回ほど踏査を行った経緯から、今回の「UZUME 阿蘇巡検 2022」の企画・実施に協力した。『UZUME 計画』に携わる巡検隊のメンバーが阿蘇というフィールドで見識・経験を積み増し、地球外の「縦孔-地下空洞」への意欲・覇気の向上に資することができたならば幸甚である。

参考文献

- 1) 日本航空宇宙学会,
JSASS 宇宙ビジョン 2050 (2021年7月)
<https://www.jsass.or.jp/wp-content/uploads/2021/08/f8f3e1ff5286673fb4cf443bb7d4276d.pdf>

- 2) 日本航空宇宙学会,
JSASS 宇宙ビジョン 2050 を達成するための
宇宙科学技術ロードマップ
人間が定住する月拠点建設へのロードマップ
【2019年度・2021年度増補】【ロボット】補足
資料
<https://www.jsass.or.jp/wp-content/uploads/2021/09/6baf476a014f9552c89a14ed52289812.pdf>
- 3) 春山純一, 河野功, 西堀俊幸, 岩田隆浩, 山本幸生,
桜井誠人, 大槻真嗣, 諸田智克, 石上玄也,
月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ.
古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)
計画
日本惑星科学会誌 Vol. 29, No. 3, 2020
<https://www.wakusei.jp/book/pp/2020/2020-3/2020-03-115.pdf>
- 4) 宮縁育夫,
阿蘇火山米塚スコリア丘,
地学雑誌, 125, 表紙解説, 2016
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography/125/3/125_125.Cover03_01/pdf-char/ja
- 5) 平田康人, 上田圭一, 宮脇理一郎, 家村克敏,
横山俊高, 宮脇明子,
阿蘇カルデラ北西部, 蛇の尾火山における
火山層序と約4000年前の斜面崩壊,
地形第41巻1号, pp27-47, 2020
- 6) Thomas R. McGetchin, Mark Settle, Bernard A. Chouet,
Cinder cone growth modelled after Northeast crater, Mount Etna, Sicily,
Journal of Geophysical Research, 79, pp3257-3272., 1974
- 7) 渡辺一徳,
米塚付近にみられる溶岩トンネル,
熊本地学会誌, 第. 45, 巻 pp9-10, 1974
<https://core.ac.uk/download/pdf/57736849.pdf>
- 8) 小野晃司, 渡辺一徳,
阿蘇火山地質図(5万分の1),

火山地質図 4. 地質調査所, 1985

9) Ronald Greeley,

The role of lava tubes in Hawaiian volcanoes.,
US Geological Survey Professional Paper, 1350,
pp1589-1602, 1987

https://www.higp.hawaii.edu/~scott/Workshop_reading/Greeley_1987.pdf

10) Donald A. Swanson

Pahoehoe flows from the 1969-1971 Mauna Ulu eruption, Kilauea volcano, Hawaii.,
Geological Society of America Bulletin, **84**, pp615-626, 1973

11) 濱野一彦, 田中収, 河西秀夫, 服部清二,
戸沢義和,

熔岩洞穴の構造と成因について,

地質ニュース, **305**, pp50-63, 1980

https://www.gsj.jp/data/chishitsunews/80_01_08.pdf

12) 平川泰之, 宮縁育夫, 園村道明,

阿蘇火山・米塚溶岩における風穴の分布,

日本火山学会講演予稿集 2017 年度 秋季大会,
P020

13) 池辺伸一郎,

阿蘇火山中央火口丘の上米塚(かみこめづか)

スコリア丘(日本の露頭 No.22),

地球科学 第 69 卷 4 号, P188, 2015

https://www.jstage.jst.go.jp/article/agcjchikyukagak/69/4/69_KJ00010014483/pdf-char/ja

14) 江島輝美,

**熊本県阿蘇市上米塚産スコリアの
かんらん石斑晶における鉄酸化数と
噴出後の高温酸化の影響,**

岩石鉱物科学, **44**, pp323-328, 2015

https://www.jstage.jst.go.jp/article/gkk/44/6/44_150816/pdf

15) 永谷圭司, 大木健, Nathan Britton, 佐藤毅一,
野寄敬博, 高橋悠輔, 山内元貴, 秋山健,
吉田和哉,

**伊豆大島における不整地移動ロボットの
走行試験および自己位置推定試験**

日本惑星科学会誌遊星人 第 21 卷 2 号, pp121-129,
2012

https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/21/2/21_KJ00008113707/pdf-char/ja

16) 石丸亮,

**2011 年 PERC 惑星地質学フィールドシンポジウム
開催報告**

日本惑星科学会誌 Vol. 21, No. 1, pp79-82, 2012

https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/21/1/21_KJ00007980076/pdf-char/ja