

台地カルストの予備測量と 縦穴を含むドリーネへの UAV 自律接近実験の検討*

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 Plateau Karst and

Study on UAV Experiment for Autonomous Approach to a Doline containing a Vertical Hole

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

Key words: Plateau Karst, Autonomous Approach, Experiment Site, Vertical Hole

Abstracts

In this paper, we discuss UAV experiment for autonomous approach to a doline containing a vertical hole.

1. はじめに

火星表面の大気圧は平均 750Pa であり、地球海面の上の平均気圧 101.3KPa の約 0.75% に相当する。火星の希薄大気中を飛行できる航空機は高機動な探査プラットフォームとして有望視されている。世界の研究機関が火星航空機の研究を進める中で、2021 年 4 月、ヘリコプタドローンの Ingenuity が世界で初めて火星大中の動力飛行に成功した¹⁾。一方、2000 年代後半、周回探査衛星の地形カメラ画像の解析により、月と火星の地表に地下空洞（横穴）の接続が示唆される巨大な縦穴が数多く発見されてきた。有人探査の基地拠点建設候補地として世界の宇宙探査研究機関の関心と注目を集め、縦穴-地下空洞探査に向けた国際競争が激化しつつある。日本では、月の縦穴を世界で初めて発見した JAXA 宇宙科学研究所のメンバーが中心となって立ち上げた『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』が、縦穴の直接探査を目指して関連分野の基礎研究や探査プラットフォームの検討、プロジェクトシリーズの策定を加速させている。地球の「縦穴-地下空洞」類似地形探索と 3D モデル化に取り組んで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、

- [フェーズ 1] 地表に開口する縦穴への接近・探査
- [フェーズ 2] 縦穴（側壁・底部）の探査・降下
- [フェーズ 3] 地下空洞奥部への進入・探査

のように探査ルートを三つに区分して（図 1）、各フェーズの類似地形における探査シミュレーション実験を行っている。

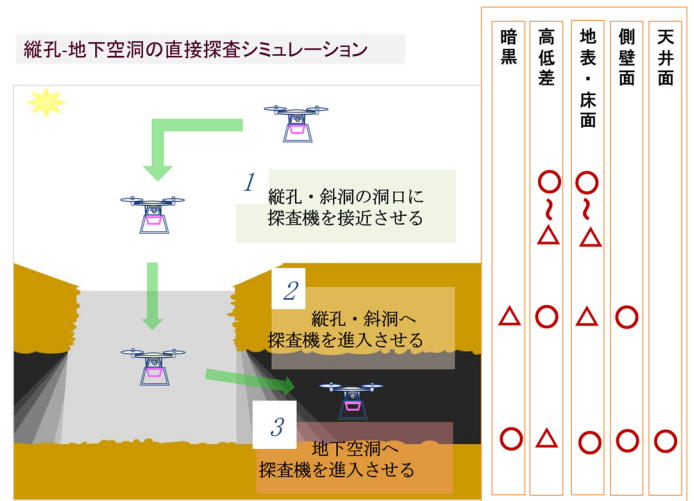


図 1 探査ルートの区分

Ingenuity の画期的な成功は「ドローンを使用した火星の縦穴-地下空洞探査」の実現可能性をも大きく拓くものである。Mars 2020 の開始以前から世界各地で [フェーズ 1] や [フェーズ 3] のドローン探査実験が実施されている²⁻⁴⁾。UZUME 計画ワーキンググループにより『UZUME 計画（火星版）』では、「縦穴-地下

* 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

空洞」直接探査用の火星ヘリコプタの研究開発を進めている。本研究ネットワークは、2021年6月、静岡県伊東市大室山麓の「穴の原溶岩洞穴」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)。本稿では、火星 UAV の[フェーズ1]の探査を想定したシミュレーション実験候補地としての台地カルストとナビゲーション方式の検討を行う。

2. 台地カルスト、ドリーネ、縦穴

[フェーズ1]の実験には、①UAV、②UAV+UGV、③UGV、いずれの場合も「縦穴+周辺地形」のセットが必要になる。周辺地形は高低差・起伏が少なく平坦地に近い方が実験サイトとして望ましい。そのような条件を満たす台地カルストの中で樹木が少ないエリアが、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。山口県「秋吉台カルスト」と福岡県「平尾台カルスト」では、年1回2月頃に「野焼き」が行われるため、地表の地形が写真測量しやすい。『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]実験用基盤データとして、「秋吉台カルスト」「平尾台カルスト」のドローン写真測量と3Dモデル化を進めている¹⁾。

2. 1 「恵藤穴」と「秋吉台」

竪穴洞窟「恵藤穴」は、「秋吉台」(図1)の南に位置する秋吉台科学博物館の北側ドリーネ斜面に開口する(図2)。「恵藤穴」周辺地形の基盤資料として、ドリーネに対してドローン写真測量をおこない、3Dモデルを作成した(図3)。

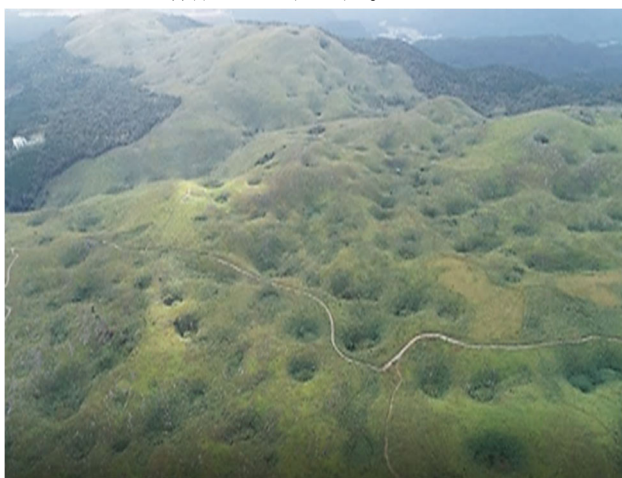


図2 「秋吉台」(ドローン空中撮影)

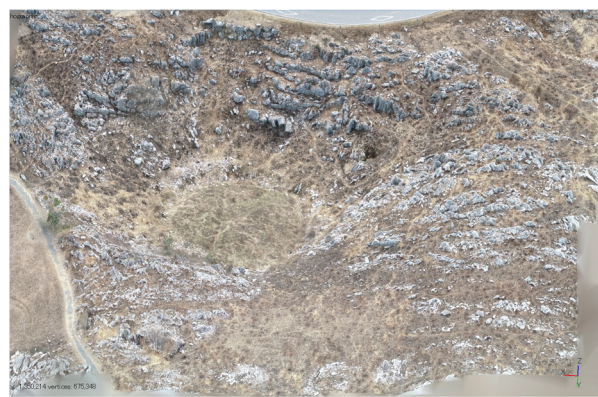


図3 「恵藤穴」のドリーネ(3Dモデル)

2. 2 「虚無僧穴」と「平尾台」

福岡県北九州市と苅田町に跨がる「平尾台」(図4)は、東側のエリアが国定公園に指定されている。竪穴洞窟「虚無僧穴」周辺地形の基盤資料として、ドリーネとセットでドローン写真測量をおこない、3Dモデルを作成した(図5, 6)。



図4 「平尾台」(ドローン空中撮影)



図5 「平尾台」(3Dモデル)
「牡鹿洞」から「虚無僧穴」までの間



図6 「虚無僧穴」

3. ドリーネの識別

「恵藤穴」も「虚無僧穴」もドリーネの斜面に開口していること踏まえて、縦穴より規模が大きい地形であるドリーネの位置を特定する方法を検討する。そのために画像でドリーネを検出することから始める。画像の情報量を落としても識別できるのは、ドリーネの底面と斜面の境界線、境界線近く斜面の一部である(図7, 8)。

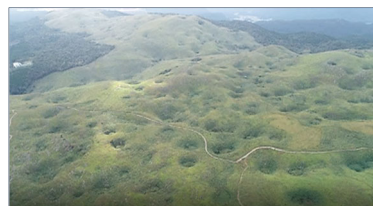


図7 「秋吉台」のドリーネ群

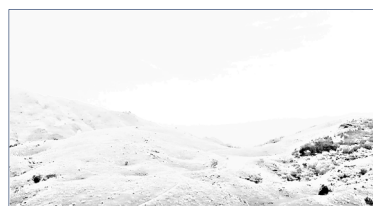
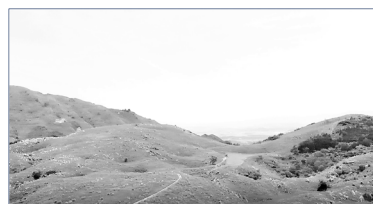


図8 「平尾台」のドリーネ群

このようにドリーネの底面は画像で識別しやすいメリットがある。そこで、ドリーネの底面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つの底面と交わる
(底面に含まれる場合、一部が底面と交差する場合)
- ・どの底面とも交わらない
(あるドリーネの斜面に含まれる場合、どのドリーネにも含まれない場合)

ドリーネの底面の幾何的な形は、おおよそ円に似た単純閉曲線に囲まれた領域であり個性に乏しい。ウバーレの底面であれば、括れた単純閉曲線であるので識別しやすいが、例外的なケースである。一部の例外を除いて、見た目の形状に基づいてドリーネ底面単体の識別・特定を行うことは現実的に困難である。単体で解決しなければ、他のドリーネ底面と複合させた関係性(幾何的な配置、例えば複数のドリーネ底面を頂点とする多边形など)に突破口を求めるべきであろう。本稿では、このような幾何的な配置をドリーネ底面の「近傍図形」と呼ぶことにする。

4. UAVの縦穴アプローチの検討

台地カルストにおける 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：

- (1-1)台地カルストのどこかの上空に位置する UAV を目標の「近傍図形」まで移動させる
- (1-2)「近傍図形」内にある目標ドリーネ底面上空に UAV を移動させる
- (1-3)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

(1-1) (1-2)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。マップは台地カルストの 3D モデルをもとに作成する。

(→すでに 3D モデルは作成途上にある。)

(1-3)は縦穴上空への誘導制御のため、深度画像測定などによる縦穴の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研究中である。ドローン搭載型の測定装置も「虚無僧穴」で予備実験を実施済。)

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 THEXPLORATION
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) 眞部 広紀, 堀江潔, 岡本 渉, 大浦 龍二
カルスト地表地形と沿岸域の水没陥没ドリーネの
3次元モデル作成を目的とした
ドローン写真測量の検討
佐世保工業高等専門学校研究報告第 57 号,
p.50 (2021 年 1 月)