

UAV-UGV システムによる縦孔・地下空洞の 計測探査シミュレーションの検討

眞部 広紀**1, 稲川直裕**2, 前田貴信**3, 久間英樹**4, 松見豊**5, 岡本渉**6,

Study on Simulation of Measurement and Exploration for Vertical Holes and Underground Caverns Using UAV-UGV System

Hiroki MANABEE**1, Naohiro INAGAWA**2, Takanobu MAEDA**3 ,
Hideki KUMA**4, Yutaka MATSUMI**5, Wataru OKAMOTO**6

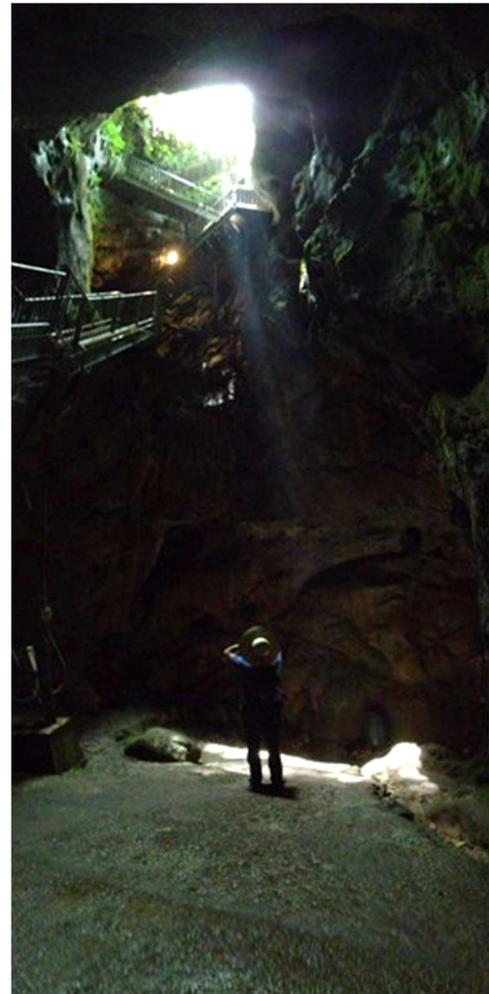
Key words: Vertical Hole, Underground Caverns, UAV, UGV, Measurement, Exploration

Abstracts

In this paper, we discuss methods of survey, measurement, and exploration for vertical holes and underground caverns using cooperated system of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and UGV (Unmanned Ground Vehicle).



画像 1 山口県秋吉台「無名穴」 (撮影：村瀬健志氏)



画像 2 福岡県平尾台「牡鹿洞」

* 原稿受付 令和元年10月31日

**1 佐世保工業高等専門学校 一般科目

**2 松江工業高等専門学校 電子制御工学科 **3

佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科 **4

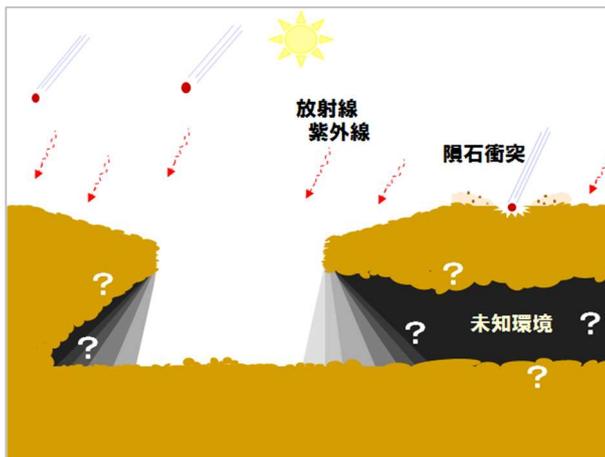
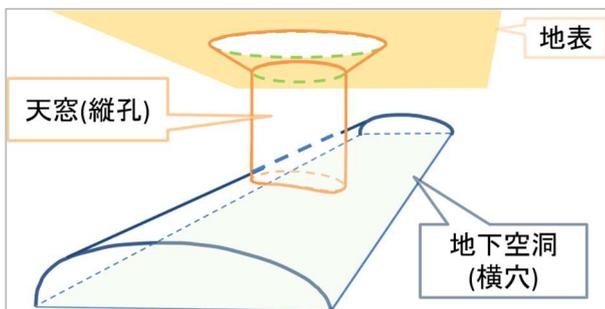
日本文理大学 工学部工学科

**5 名古屋大学 全学技術センター

**6 JAXA 宇宙科学研究所



画像3 長崎県五島市富江「野坑」



画像4 縦孔-地下空洞縦断面模式図

1. はじめに

「洞窟」は揺籃期の人類にシェルター・住居・祭祀の場を与え、現在も畏敬の対象であり、未踏のフロンティア、探検の対象でもある。変化に富んだ地形が織りなす暗黒の地下迷宮の奥部には、地質学・地下水学・古気候学・古生物学・生物学・古人類学・考古学など、多くの学術分野にとって貴重なフィールドが広がっている。20世紀までは人間による探検だけが現実的かつ有効な調査手法であった。連綿と続けてきた探検隊や

科学者の尽力によって一部が明らかになってきたが、未着手の洞窟の領域は無尽蔵と言える。本研究グループは地上ロボット (UGV) やドローン (UAV) をプラットフォームとする効率的かつ機動的な「洞窟計測探査システム」の研究・実証を進めてきた¹⁻⁶⁾。

21世紀に入り、月や火星の表面に縦孔が数多く発見された⁷⁻¹²⁾。長大な地下空洞が底部に繋がっていると推定される縦孔 (画像4上) も少なくない^{13,14,15)}。地下空洞は放射線や紫外線、隕石から防護されたシェルターであり (画像4下)、内部の温度変動が外部に比べて非常に小さいと推定され、地球型固体惑星の形成学・地質学・生命科学などのタイムカプセルとして期待されている。また、隕石や放射線を遮断するのに十分な構造体・構造物を地表面に建造することは、物資が乏しい探査初期においては現実的ではない。代替案として縦孔底と地下空洞 (横穴) を利用した基地建設が検討されている¹⁶⁾。これらの重要性が縦孔・地下空洞の学術価値や利用価値を大きく飛躍させた。

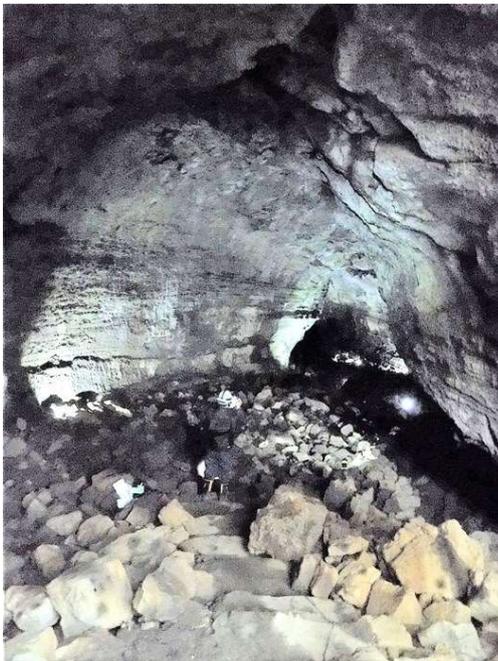
2018年の宇宙機関の閣僚級会合 International space exploration forum 2 (ISEF2)の開催に先立ち、Global Exploration Roadmap (GER) 3版に、将来の探査地点候補として“lava tube”が初めて記載された。米国では、月の「静の海の縦孔」を対象とするNASAの『ディスカバリー計画』にMoon Diverチームが応募している¹⁷⁾。日本では、『UZUME (Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration (古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査) 計画』のJAXA有志メンバーを中心に『月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ』がJAXA宇宙科学研究所の宇宙理学・工学委員会のもとに設置された。縦孔・地下空洞を直接探査する科学的意義と山積する工学的な挑戦的課題 (垂直移動、不整地踏破、未知領域調査等) を解決するため、技術開発の戦略が現在進行形で練り上げられている¹⁸⁾。

本稿では、縦孔・地下空洞探査のシミュレーションを目的とした、UAVによるUGVの空中輸送、着陸後のUGV分離、UGVによるUAVの周辺探査の予備実験を紹介する。また、縦穴・横穴複合洞窟におけるUAV+UGVの想定探査を分類して難易度順をつけ、シミュレーション実験の段階化について検討する。

2. 背景

月と地球の距離は約 $3.8 \times 10^4 \text{ km}$ 、火星と地球の距離は約 $2.25 \times 10^8 \text{ km}$ あり、光（電磁波）の速度でも片道の無線通信時間はそれぞれ約 1.3 秒、約 4~22 分を要する。地球から月・火星の地表に位置する移動探査機を遠隔操縦する場合、無線通信時間の遅れの影響を受けず、なおかつ、環境の変化に細かく対応しながら移動させることは困難である。探査機が移動するには、自律的な「自己位置推定」「環境認識」「経路計画」「移動」の必要がある。

地球と月・火星の地表とは時間遅れがあるものの、直接無線通信を行うことができるが、月・火星の地表と地下とは、厚い地盤が無線通信の障壁となる。したがって、地球と月・火星の地下とは直接無線通信は現実的に困難であり、地下空洞内においては自律探査への要求水準が高まる。



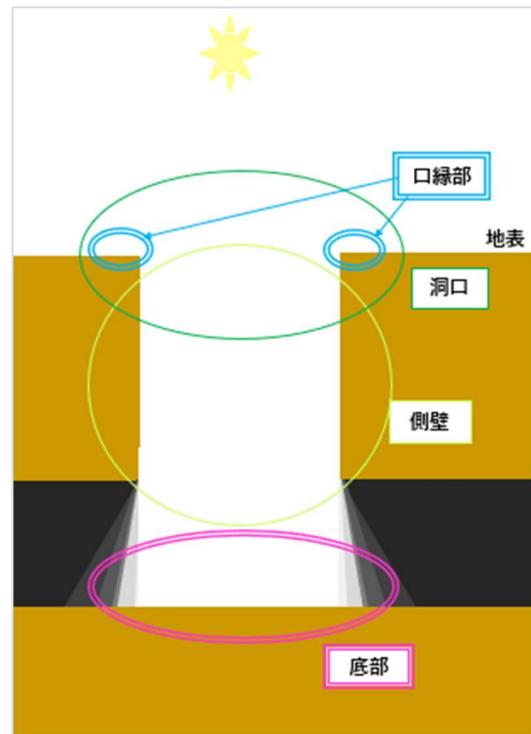
画像 5 上：「野坑」 下「：先不知井坑」
長崎県五島市富江（福江島）

接地移動する UGV が地下空洞の探査を行う場合、洞床の不整地性がネックになる。溶岩チューブ洞窟の洞床は低不整地から高不整地まで様々なタイプがある（画像 5）。ローバ型・クローラ型の UGV は低不整地では移動できるが高不整地では困難であり、多脚型 UGV や跳躍型プローブ等を使用した探査手法が検討されている^{19,20)}。

月とは異なり火星には 100 分の 1 気圧程度の大気が存在する²¹⁾。希薄大気の中を飛行できる回転翼や固定翼の火星無人飛行探査機 Unmanned Aerial Vehicle (UAV) の研究は、NASA とジェット推進研究所 Jet Propulsion Laboratory、JAXA と東北大学流体科学研究所などで進められている²²⁻²⁹⁾。

3. ミッションの想定

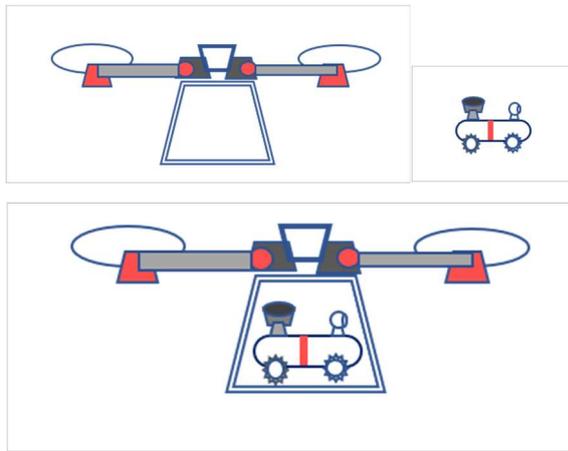
月・火星に着陸機が着陸する場所（着陸点）は、着陸機が安定して姿勢を保持できる場所（傾斜がほとんどなく不整地性の低い場所）が選定される。本稿では、縦孔-地下空洞探査ミッションの着陸点を縦孔底部か縦孔口縁部付近に設定する（画像 6）。さらに、「着陸機は着陸点を動かさず、探査機が着陸機から分離する」という前提に立ち、着陸点と分離点を同一視する。



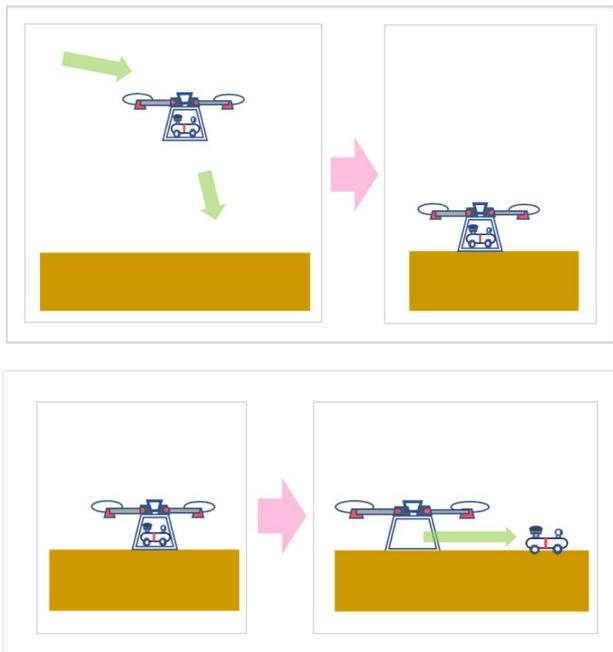
画像 6 縦孔における着陸-分離点（二重線部分）

着陸-分離点におけるミッションは「探査機を搭載した着陸機が着陸、探査機が分離移動、探査機による着陸-分離点周辺の探査」と想定した。

NASA-JPLの「UGV：親機、UAV：子機」方式の火星探査ミッション構想^{23,24}とは役割分担を入れ替え、「UAV：親機、UGV：子機」方式を本研究グループは採用した。「UAV：着陸機、UGV：地上移動探査機」とみなした縦孔-地下空洞探査のシミュレーションが目的である(画像7,8)。



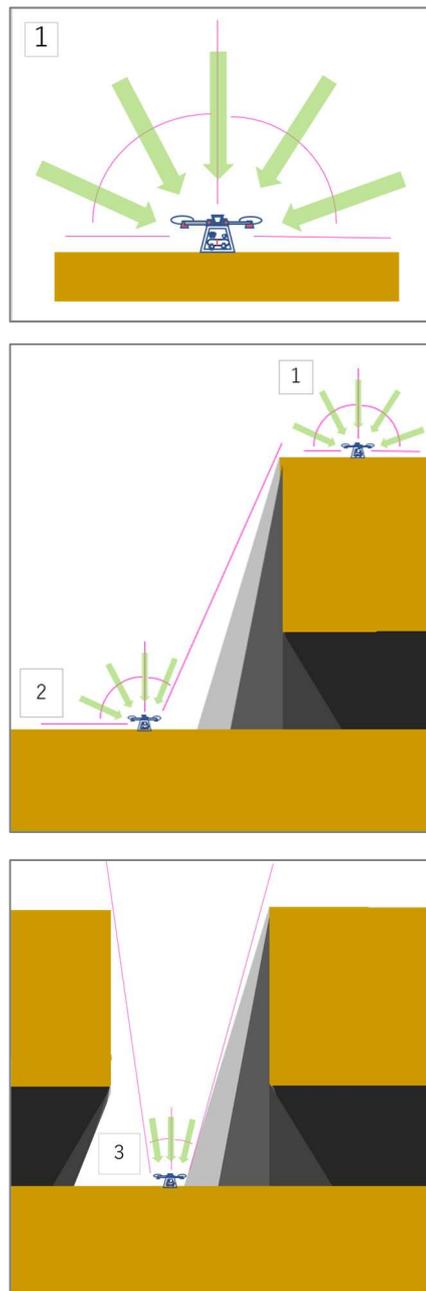
画像7 上左：着陸機 上右：地上探査機
下：地上探査機を搭載した着陸機



画像8 上：着陸 下：分離

3.1 着陸点の難易度

通常のドローン空中撮影ではHP(離陸点と着陸点の兼用)は着陸が容易な空が広い場所を選定する。縦孔-地下空洞探査のシミュレーション実験では、着陸点が離陸点と異なり、着陸が難しい空が狭い場所になる(画像9)。本研究グループでは空が広い場所①から着陸-分離実験に取り掛かり、②③と段階的に空が狭い条件にレベルアップしていく。



画像9 上：平坦地、中：横穴そばの谷底
下：縦穴底

3.2 UAV と UGV の協同シミュレーション予備実験

本節では段階 1 の予備実験を紹介する。2019 年 9 月に山口県秋吉台科学博物館近くの元青少年訓練所跡地において、日本文理大学工学部稲川研究室の UGV（小型地上走行ロボット）を UAV（ドローン DJI 社製 Matrice600）のペイロードとして、

- (a) UGV 空中輸送
- (b) 着陸後に分離（出庫）
- (c) 周辺探査

の予備実験を、跡地（離陸点）と隣接するドリーネ底（着陸-分離点）の間で行った（画像 10,11）。



画像 10 上 : UAV（着陸機）
 中 : UGV（地上移動探査機）
 下 : 離陸点付近



画像 11(a) UGV の空中輸送



画像 11(b) 着陸後分離（出庫）



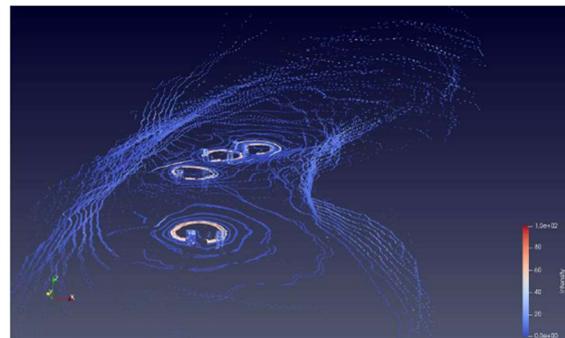
画像 11(c) 着陸-分離点の周辺探査

3.3 段階②の実験候補地

鹿児島県曾於市財部の凝灰岩洞窟「溝ノ口洞穴」(画像12)は谷奥に開口する横穴であり、段階②の場所の条件を満たす。この候補地は佐世保工業高等専門学校電子制御工学科前田研究室が、LRFを搭載したマニュアル有線操縦のUGV(地上走行ロボット)によって形状測定実験を実施した⁵⁾(画像13)。



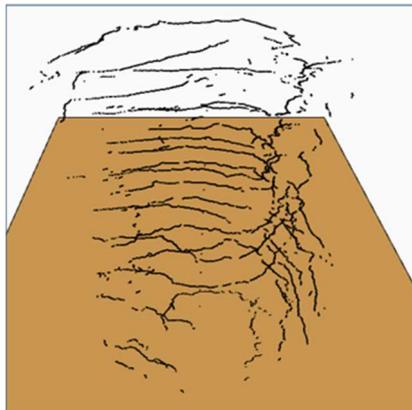
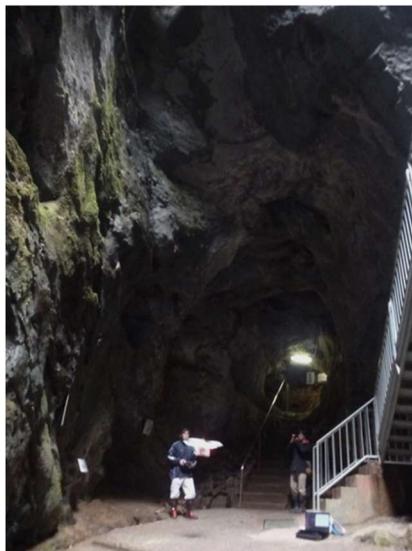
画像12 「溝の口洞穴」
上：洞口前 中・下：洞口



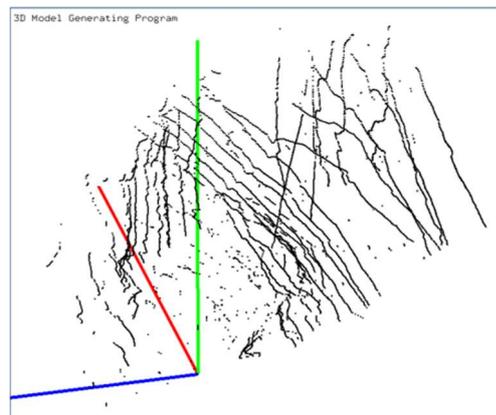
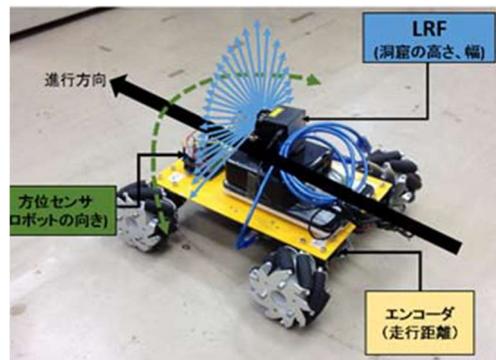
画像13 上・中上：洞内のレーザー測定
中下・下：3D点群モデル

3.4 段階③の実験候補地

鹿児島福岡県北九州市平尾台の石灰岩洞窟（観光洞）「牡鹿洞」（画像 2）はドリーネ底に開口する縦穴であり、段階③の場所の条件を満たす。この候補地は佐世保工業高等専門学校電子制御工学科前田研究室が、LRF を搭載した無線操縦の UAV（ドローン）と有線操縦の UGV（地上走行ロボット）によって壁面形状測定実験を実施済みである³⁾（画像 14,15）。



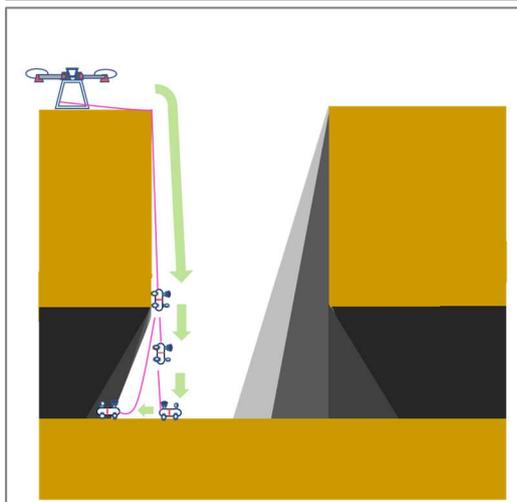
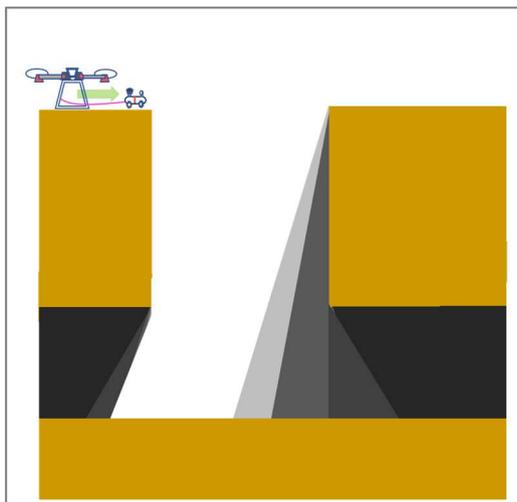
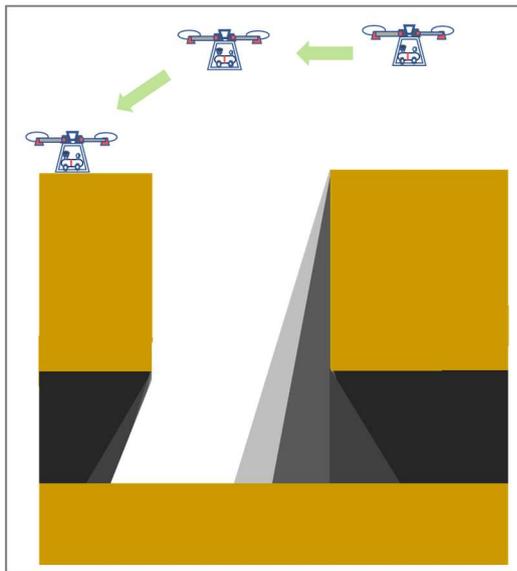
画像 14 上：UAV 測定システム外観
 中上：レーザー測定中
 中下：3D 点群モデル（鳥瞰）



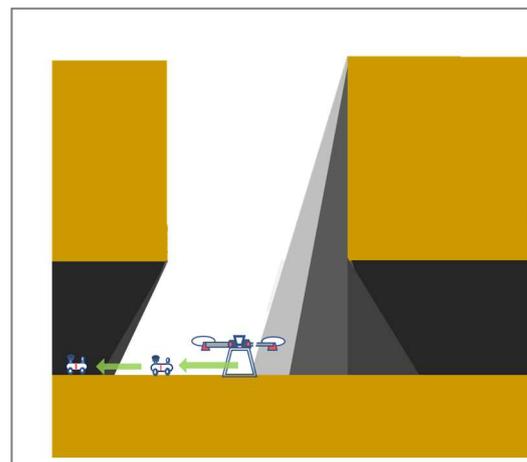
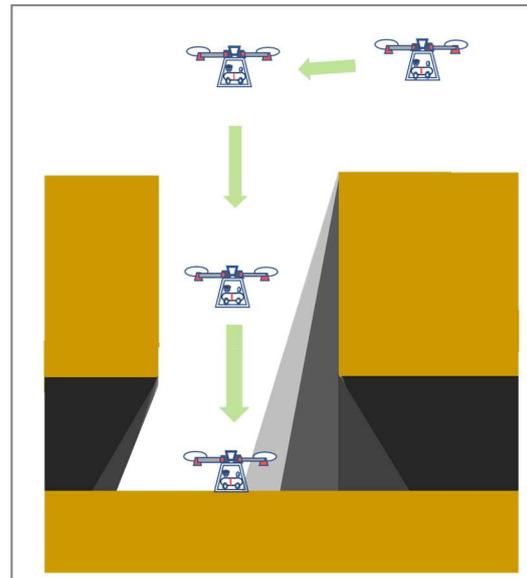
画像 15 上：UGV 測定システム外観
 中：レーザー測定中
 下：3D 点群モデル

4. 今後の計画と課題

条件②,③の場所において、UAV+UGV による着陸分離の予備実験を行う。実験成果をフィードバックして、条件③の場所で口縁部における着陸分離、UGV の懸垂下降・着底・横穴進入計測（画像 16）、縦穴底部における着陸分離、横穴進入計測（画像 17）の予備実験を行う。UGV の懸垂下降機構については、別途に研究を進める。



画像 16 縦穴口縁部の着陸-分離点
上：着陸 中：分離 下：降下・着底・横穴進入



画像 17 縦穴底の着陸-分離点
上：着陸 下：分離・横穴進入

参考文献

- 1) 眞部広紀, 前田貴信, 浦田健作他
平尾台カルスト青龍窟における
レーザー測域センサーを使用した移動計測の予備実験
佐世保工業高等専門学校研究報告第 51 号 pp.28-33(2015)
- 2) 眞部広紀, 前田貴信, 久間英樹, 新部一太郎,
浦田健作, 染谷孝, 春山純一,
洞窟探索のためのレーザー計測と 3 次元モデルについて
佐世保工業高等専門学校研究報告第 52 号 pp.16-21(2015)
- 3) 前田貴信, 眞部広紀
マルチコプター (ドローン) を活用した縦穴洞窟の形状計測
佐世保工業高等専門学校研究報告第 52 号 pp.8-11(2015)

- 4) 眞部広紀, 前田貴信, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝, 久間英樹, 新部一太郎, 長谷川均, 岡本渉, 春山純一
**ロボット探査の予備実験に使用する
 天窓・溶岩チューブ洞窟の類似地形について**
 佐世保工業高等専門学校研究報告第 53 号
 pp14-27(2016)
- 5) 眞部広紀, 前田貴信
**溝ノ口洞穴におけるレーザー計測とロボット探査の
 予備実験**
 佐世保工業高等専門学校研究報告第 54 号
 pp.15-20(2018)
- 6) 前田貴信, 眞部広紀, 山下寛文, 富永敦士
無窮洞におけるレーザー計測とロボット探査の予備実験
 佐世保工業高等専門学校研究報告第 54 号
 pp.10-14 (2015)
- 7) J.Haruyama et al.,
**Possible lunar lava tube skylight observed by
 SELENE cameras**
 2009, Geophysical Research Letters 36, L21206
- 8) J.Haruyama et al., 2010,
**New Discoveries of Lunar Holes in Mare
 Tranquillitatis and Mare Ingenii.**
 41th Lunar and Planetary Science Conference,
 abstract #1285
- 9) J.Haruyama et al.,
**Lunar Holes and Lava Tubes as Resources for
 Lunar Science and Exploration**
 2012, Moon - Prospective Energy and Material
 Resources. Springer, 139-164
- 10) G. E. Cushing et al.,
THEMIS observes possible cave skylights on Mars
 GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS,
 VOL. 34,L17201,doi: 10.1029/2007GL030709, 2007
- 11) G.E. Cushing,
CANDIDATE CAVE ENTRANCES ON MARS
 Journal of Cave and Karst Studies, v. 74, no. 1,
 pp. 33-47.DOI: 10.4311/2010EX0167R
- 12) G.E.Cushing, C.H. Okubo, and T.N. Titus,
**A typical pit craters on Mars: New insights from
 THEMIS,CTX, and HiRISE observations**
 2015, Journal of Geophysical Research: Planets
 120(6),1023-1043, DOI: 10.1002/ 2014JE004735
- 13) L.Chappaz et al.,
**Evidence of large empty lava tubes on the Moon
 using GRAIL gravity**
 Geophysical Research Letters, Volume 44, Issue 1
 pp105-112
- 14) J Haruyama, T Kaku, R Shinoda, W Miyake, A
 Kumamoto, K Ishiyama, T Nishibori, K Yamamoto,
 K Kurosawa, AI Suzuki, et al.
**Detection of lunar lavatubes by lunar radar sounder
 onboard selene (kaguya).**
 In Lunar and Planetary Science Conference,
 volume 48,2017.
- 15) L. Carrer, C. Gerekos and L. Bruzzone
**Detection of Lunar Lava Tubes with Orbiting Radar
 Sounder Systems**
 EPSC Abstracts Vol. 11, EPSC2017-290, 2017
 European Planetary Science Congress 2017
- 16) 内藤雅之,小平聡,長谷部信行,敷島真奈,春山純一
月面及び縦孔周辺の放射線環境と防護
 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集
 抄録番号 3C18 (SASS-2019-4567), 2019
- 17) L.Kerber et al.,
**MOON DIVER: A DISCOVERY MISSION CONCEPT
 FOR UNDERSTANDING SECONDARY CRUST
 FORMATION THROUGH THE EXPLORATION OF A
 LUNAR MARE PIT CROSS-SECTION.**
 2019, 50th Lunar and Planetary ScienceConference,
 abstract #1163.
- 18) 春山純一, 河野功, 西堀俊幸, 岩田隆浩,
 桜井誠人, 大槻真嗣, 山本幸生, 石上玄也,
UZUME 計画 その現状と今後について
 第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集
 抄録番号 3C01 (JSASS-2019-4550), 2019
- 19) W.Whittaker,
**Technologies Enabling Exploration of
 Skylights,Lava Tubes and Caves,
 NASA Innovative Advanced Concepts Phase I,
 FINAL REPORT**
 GRANT NUMBER: NNX11AR42G
 AWARD DATE: SEPTEMBER 15, 2011
 END DATE: SEPTEMBER 14, 2012
 By ASTROBOTIC TECHNOLOGY

- 20) J. Thangavelautham et al.,
FLYING, HOPPING PIT-BOTS FOR CAVE AND LAVA TUBE EXPLORATION ON THE MOON AND MARS
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1701/1701.07799.pdf>
- 21) C.W.Snyder,
The Planet Mars as Seen at the End of the Viking Mission,
1979: Journal of Geophysical Research,84,8487–8519
- 22) J. Balaram, et al.,
Mars Helicopter Technology Demonstrator
8–12 January 2018, Kissimmee, Florida
2018 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference
- 23) W. J.F. Koning, W. Johnson, H.F. Grip
Improved Mars Helicopter Aerodynamic Rotor Model for Comprehensive Analyses
Presented at the 44th European Rotorcraft Forum, Delft, the Netherlands, 18-21 September, 2018.
- 24) NASA,
NASA's Mars Helicopter Attached to Mars 2020 Rover (URL) :
<https://mars.nasa.gov/news/8507/nasas-mars-helicopter-attached-to-mars-2020-rover/>
- 25) 野玉達郎,梅崎修一,砂田茂,米澤宏一 :
火星探査用マルチロータ機の可能性検討
第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集,
抄録番号 4C123 (JSASS-2016-4572), 2016
- 26) 大山聖, 永井大樹, 藤田昂志他
火星飛行機の高高度飛行試験計画 MABE2 の概要
第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集
抄録番号 3B01 (SASS-2019-4533), 2019
- 27) 藤田昂志, 永井大樹, 大山聖, 藤田和央, 石上玄也
RSL 観測用火星飛行機の初期概念検討
第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集
抄録番号 3B06 (JSASS-2019-4538),2019
- 28) 藤田昂志, Pomar Guillaume, 永井大樹
火星縦穴探査用回転翼機の初期概念検討
第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集,
抄録番号 1C16 (JSASS-2018-4071), 2018
- 29) 眞部広紀, 久間英樹, 岡本渉, 村上崇史,
松見豊, 前田貴信他,
UAV と UGV を使用した洞窟計測探査と環境地図作成
第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集,
抄録番号 3C14 (JSASS-2019-4563), 2019