

# 月と火星の縦孔-地下空洞を目指すための 地球における洞窟計測探査シミュレーション

眞部広紀\*\*1, 久間英樹\*\*2, 稲川直裕\*\*3, 前田貴信\*\*4,  
堀江潔\*\*1, 大浦龍二\*\*1, 岡本渉\*5, 春山純一\*\*6

## Terrestrial Simulations of Cave Measurement and Exploration for Vertical Holes and Underground Caverns in the Moon/Mars

Hiroki MANABE\*\*1, Hideki KUMA\*\*2, Naohiro INAGAWA\*\*3, Takanobu MAEDA\*\*4  
Kiyoshi HORIE\*\*1, Ryuji OHURA\*\*1, Wataru OKAMOTO\*\*5, Junichi HARUYAMA \*\*6

Key words: Terrestrial Simulation, Cave, Measurement, Exploration

### Abstracts

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

## 1. はじめに

現在のロボット技術や形状測定技術にとって、未知環境の洞窟を直接探査することは挑戦的な課題であり、洞窟の複雑な形状構造を把握するには、膨大な情報量を記録可能な3次元(3D)モデルが不可欠である。平成20年度(2008年度)を開始した本研究グループでは、洞窟の機動的・効率的な3次元計測探査システム開発を中心テーマに設定し、洞窟の現場においてプラットフォームとして水中ロボット(ROV)・地上ロボット(UGV)・ドローン(UAV)を使用した探査実験・計測試験を実施・検討してきた<sup>1-16)</sup>。

リモートセンシング・軌道探査機な発達により、21世紀に入り、地球外の天体(月や火星)の表面に縦孔が数多く発見され<sup>17-22)</sup>、洞窟の学術価値や利用価値を大きく飛躍させる転換点となり、縦孔・地下空洞探査への動きが世界的に加速している。本研究グループ

では、縦孔・地下空洞深奥部に進入するシステムの実証実験の場を確保するため、候補となる溶岩洞窟や類似地形の選定を継続している<sup>10)</sup>。

月や火星の縦孔や地下空洞に進入する直接探査は工学的に挑戦的課題(垂直移動、不整地踏破、未知領域調査)が多く、2019年現在においても、世界のどの宇宙研究機関も実現していない。本研究グループが拡大した『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』(拠点校:佐世保工業高等専門学校)は「地球外洞窟及び氷衛星氷層下水中環境の計測探査シミュレーションに関する研究ネットワーク形成に向けた準備活動」として、平成30年度(2018年度)の独立行政法人国立高等専門学校機構の研究ネットワーク形成支援事業の一つに採択されている。

本稿では、『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』が実施してきた、縦孔・地下空洞探査のシミュレーションのための予備実験を紹介する。

## 2. 背景

月・火星の縦孔の多くは溶岩チューブ洞窟(lava tube)の天井が開いた天窗(skylight)と推定されている(画像1-3)。縦孔(縦穴)の壁面は溶岩が幾層にも重なった状態が記録されている露頭であり、月・火星の縦孔・地下空洞は地球型固体惑星の火成史・

\* 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 日本文理大学 工学部工学科

\*\*4 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

\*\*5 名古屋大学 全学技術センター

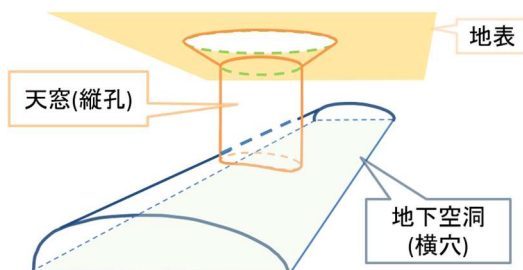
\*\*6 JAXA 宇宙科学研究所



画像 1 溶岩洞窟「富士風穴」  
山梨県富士河口湖町精進

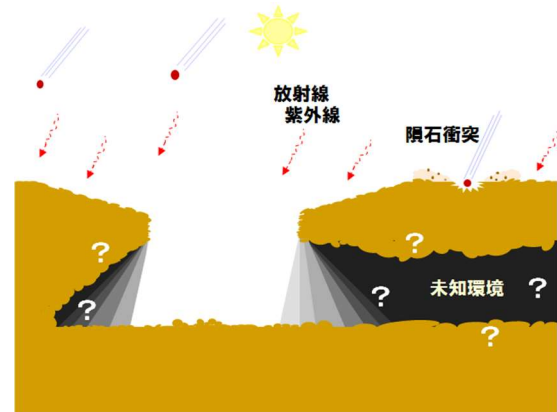


画像 2 上：天窗 下：溶岩チューブ洞窟  
「野坑」長崎県五島市富江（福江島）



画像 3 縦孔-地下空洞の模式図

地質学・宇宙生物学に研究材料を与える理学的なタイムカプセルとして期待されている。縦孔深部や地下空洞内部は未知環境であり、形状や内部環境の詳細な情報はリモートセンシングでは得られない。月面では、昼夜で 300K 以上変動し、隕石が降り注ぎ、銀河宇宙線 (GCR: Galactic Cosmic Ray) や太陽粒子線 (SEP: Solar Energetic Particle) などの荷電粒子に曝露される (画像 4)。長期間の探査を実施するためには、宇宙空間から隔離された避難所 (シェルター) の建設が不可欠である。物資が乏しい探査初期の月面上に、隕石や放射線を十分に遮断する構造体・構造物の建造は困難であり、より現実的な案として地形の一部を利用した基地建设が検討されている。有望な場所の候補に、縦孔底と地下空洞 (横穴) が含まれている<sup>23)</sup>。



画像 4 シェルターとしての縦孔-地下空洞

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、International Space Exploration Coordinate Group (ISECG)が編纂した 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、月の縦孔の一つである「静の海の縦孔」について NASA の『ディスカバリー計画』の公募に応募しているグループ (Moon Diver チームなど) がある<sup>24)</sup>。日本では、JAXA の有志メンバーを中心とした『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』が礎となり、JAXA/宇宙科学研究所の宇宙理学・工学委員会のもとに『月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ』が設置され、地下空洞を直接探査する科学的意義と技術開発戦略が練り上げられている<sup>25)</sup>。



近年では、縦孔・地下空洞を想定した無人走行探査機 Unmanned Ground Vehicle (UGV)によるレーザー測定・3D モデル作成実験も行われている<sup>10,12,13-26</sup>。

## 2.1 自律探査

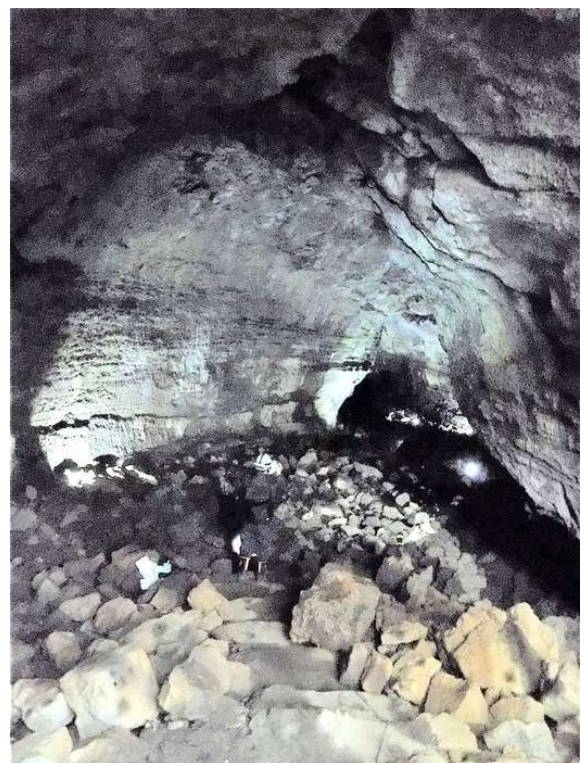
地球～月の距離は約  $3.8 \times 10^4 \text{km}$ 、地球～火星の距離は約  $2.25 \times 10^8 \text{km}$  あり、片道の無線通信時間はそれぞれ約 1.3 秒、約 4～22 分を要する。月・火星の直接地表探査機を地球から無線遠隔操縦する場合、環境の変化に細かく対応しながら移動させることは困難である。遅れの影響を受けずに移動するには、探査機が自律的に「自己位置推定」「環境認識」「経路計画」「移動」を行う必要がある。探査機が確実に縦孔洞口に接近するためには、洞门口縁部との距離と機体の傾斜を測定し、「環境認識」と「自己位置推定」を行う必要がある。月・火星の地下と地球の無線通信はできないので、地下空洞においては自律探査への要求水準が高まる。

## 2.2 地下空洞（横穴）における移動方法

接地して移動する UGV が地下空洞（横穴）の探査を行う場合、洞床の不整地性が移動するためのネックになる。溶岩チューブ洞窟の洞床の例を挙げれば、平坦に近い低不整地タイプ（画像 2 下）からボルダーに埋め尽くされている高不整地タイプ（画像 5）まで様々である。低不整地タイプではローバ型・クローラ型 UGV でも移動可能であるが、高不整地タイプでは跳躍型プローブ等も探査手法に入る<sup>27</sup>。

## 2.3 火星の縦孔・地下空洞飛行探査

月と火星の環境の相違点の一つに大気の有無がある。火星無人飛行探査機 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)は、100 分の 1 気圧程度の火星大気<sup>28</sup>)の中を飛行する航空機であり、UGV よりも短時間で広域探査することを期待されている。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では、火星大気を想定した回転翼機や固定翼機が研究されている<sup>29-35</sup>)。また、火星の地下空洞であれば、飛行移動に UAV（ドローン型）も探査手法の候補に入る。火星の縦孔・地下空洞を想定したドローンによるレーザー測定・3D モデル作成実験も実施されている<sup>9,36-40</sup>)。



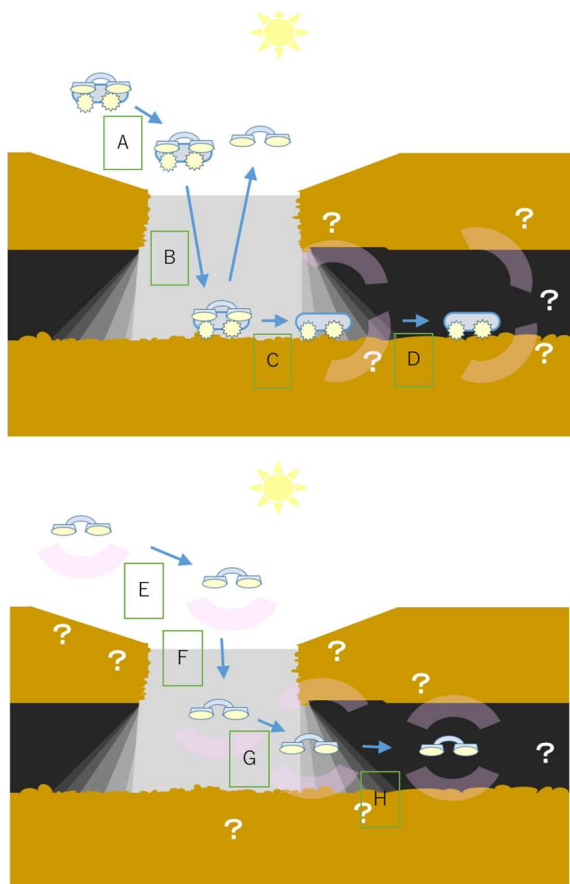
画像 5 上、中：「野坑」 下「：先不知井坑」  
長崎県五島市富江（福江島）

### 3. ミッションの分類・分解

本稿では、探査機の出発点を縦孔口縁部付近に設定し、縦穴に進入して底部で機体を分離する/しない：

- ① 子機が親機の探査機から分離して横穴に進入
- ② そのまま探査機が横穴に進入

を基準として、ミッションを①②に分類する(画像 5)。



画像 5 上：ミッション①、下：ミッション②

### 4 シミュレーション実験

本研究グループでは、「自己位置推定」「環境認識」「経路計画」「自律移動」を次年度(令和2年度)の研究目的に設定している。シミュレーション実験の目標は、探査機と見立てた UAV や UGV が前節のミッションを自律的に遂行することにある。

最初のステップとして、①②を遠隔無線操縦可能な距離範囲内毎に分解した部分ミッションを実験する。

次年度に予定するステップとして、部分ミッションを半自律化・自律化して実施する。最終ステップでは、自律化した全部分ミッションを一つのミッションに統合して実験する。以下に今年度(令和1年度)までに実施した実験を列举する：

#### 【ミッション①】

- A) 縦孔洞口直上まで探査機(親機+子機)が接近  
第 4.1 節, 第 4.2 節(4.2.1~4.2.4)
- B) 縦孔底に探査機(親機+子機)が降下  
第 4.2 節(4.2.5)
- C) 子機探査機が親機から分離して地下空洞進入  
第 4.3 節
- D) 子機探査機が地下空洞深奥部に進入：  
第 4.4 節

#### 【ミッション②】

- E) 縦孔洞口直上まで探査機が接近  
第 4.1 節, 第 4.2 節(4.2.1~4.2.4)
- F) 縦孔底に探査機が降下  
第 4.2 節(4.2.5)
- G) 探査機が地下空洞進入  
第 5 節(飛行実験は完了、形状測定は次年度)
- H) 探査機が地下空洞深奥部に進入  
第 5 節(飛行実験は完了、形状測定は次年度)

#### 4.1 縦穴の写真測量・画像測定と 3D モデル作成

本節では、UAV(ドローン DJI 社製 Phantom4Pro、画像 6)を使用した縦穴洞口の SfM/MVS 写真測量実験と、画像データをもとに Agisoft 社 Metashape で作成した 3D モデルを紹介する(画像 7,8)。



画像 6 Phantom4Pro 外観



[4.1.1]山口県秋吉台「恵藤穴」のドリーネ (2019 年 3 月)



画像 7 上：科学博物館と「恵藤穴」のドリーネ  
中上：元青少年訓練所跡地  
中下、下：3Dモデル

[4.1.2]福岡県平尾台「虚無僧穴」 (2019 年 5 月)



画像 8

上：「牡鹿洞」上空から「虚無僧穴」方向  
中上：3Dモデル（真上から）  
中下：3Dモデル（鳥瞰）  
下：3Dモデル（側面から）



## 4.2 縦穴のレーザー形状測定と 3D モデル作成

第3節で検討したように本研究グループの目標は、縦孔・地下空洞に探査機が進入するミッションを目標にしている。外部の自然光が届かない内部の環境においては、受動的な光学センシングは使用できず、能動的な光学センシングが必要になる。また、縦孔深部や地下空洞においては、GPS を前提にした UAV の自律制御手法は使用できない。

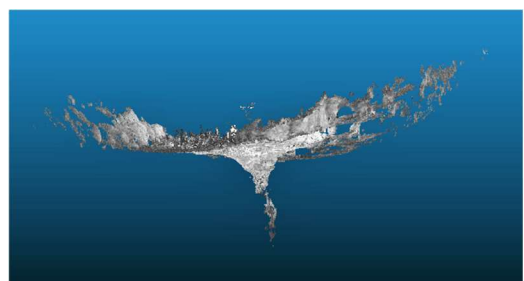
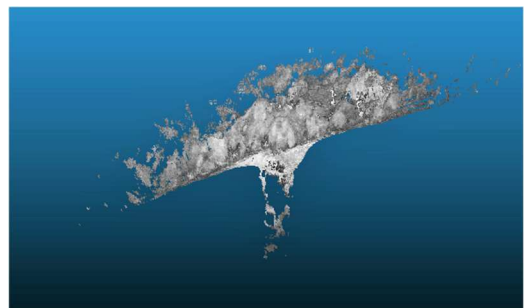
本節では、UAV（ドローン）にレーザースキャナやレーザ測域センサを搭載して行った縦穴洞口の形状測定実験と、測定データをもとに作成した 3D 点群モデルを紹介する。

### [4.2.1] 山口県秋吉台「恵藤穴」2019 年 3 月

UAV（ドローン DJI 社製 Matrice600）下部に松江工業高等専門学校電子制御工学科久間研究室のレーザースキャナ 3 次元測定装置を取り付け、「恵藤穴」の計測を行った（画像 9,10）。測定装置のモーメントが大きかったため、UAV の機体と共振してしまい測定精度が下がった。次の 10 月実験では測定装置のモーメントの低減を行った。



画像 9 上: スキャナ取り付け  
中: 下: 「恵藤穴」直上の UAV



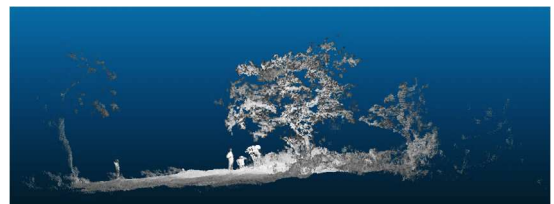
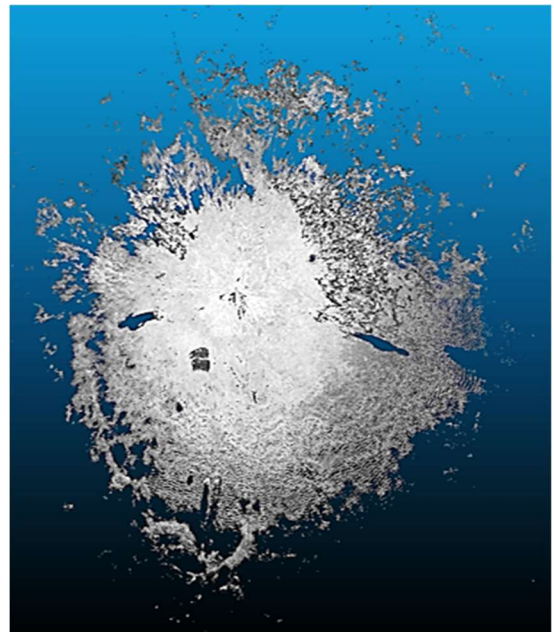
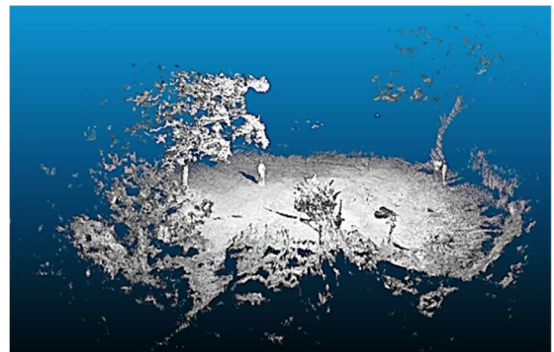
画像 10 上: 「恵藤穴」のドリーネ  
中上: 洞口（直上から）  
中: レーザー測定中  
中下、下: 3D 点群モデル



[4.2.2]秋吉台「元青少年訓練所跡地」(2019年9月)  
 モーメントを低減した改良版のレーザースキャナ  
 ー測定装置を使用して、「元青少年訓練所跡地」の測  
 定実験を行った(画像 11,12)。



画像 11 上：スキャナ取り付け  
 中：飛行テスト  
 下：跡地（鳥瞰）



画像 12 上：レーザー測定中  
 中上、中下、下：3D 点群モデル

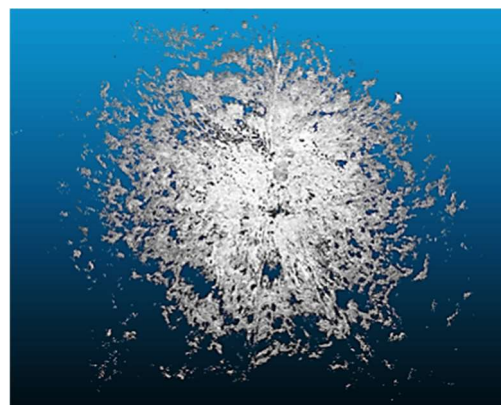


[4.2.3]福岡県平尾台「虚無僧穴」(2019年9月)

改良版レーザースキャナー3次元測定装置を使用して、「虚無僧穴」の測定実験を行った(画像13,14)。



画像13 上：洞口(人が立っている位置)  
中上：スキャナ取り付け、中下：離陸準備  
下：レーザー測定中

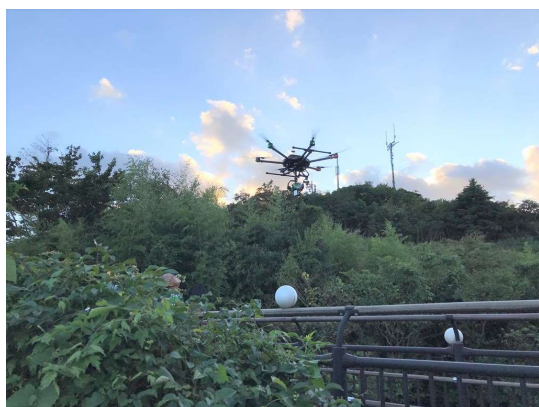
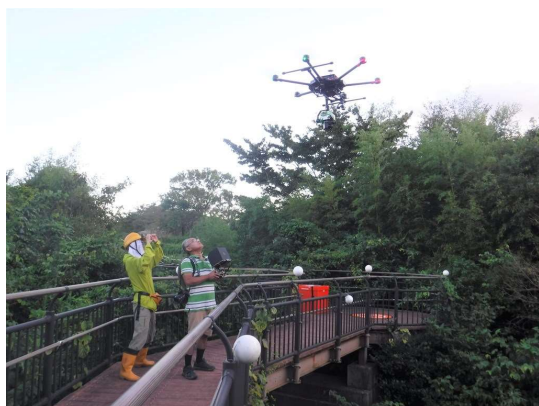


画像14 上、中上：洞口(直上から)  
中下～下：3D点群モデル



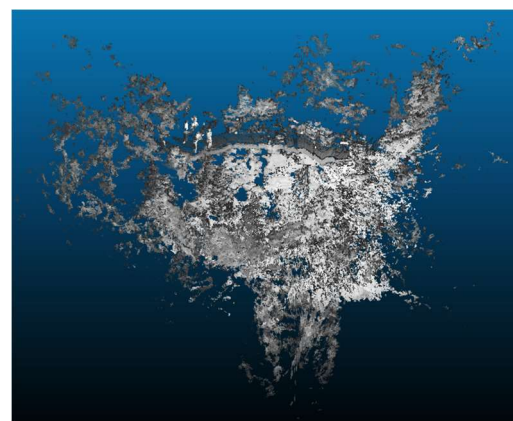
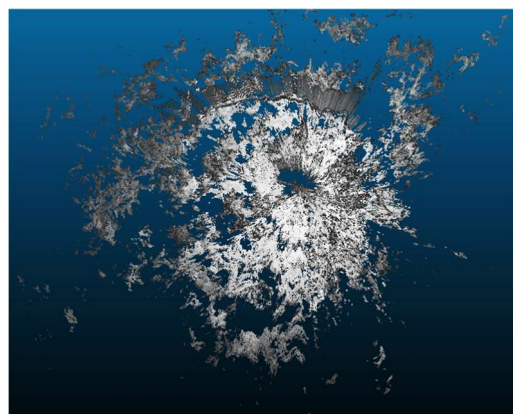
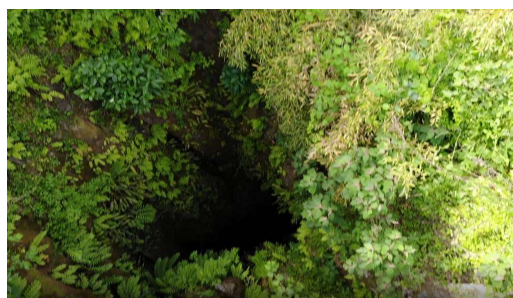
[4.2.4]平尾台自然の郷「はる穴」 (2019 年 9 月)

福岡県平尾台自然の郷(株式会社ハートランド平尾台)の縦穴観察施設であるドリーネデッキ「はる穴」において、改良版レーザースキャナ 3 次元測定装置を使用して測定実験を行った(画像 15,16)。



画像 15 実験作業

上・下：ドローンによるドローン撮影画像  
(堤紀文氏(ハートランド平尾台)ご提供)



画像 16 上：洞口(直上から)

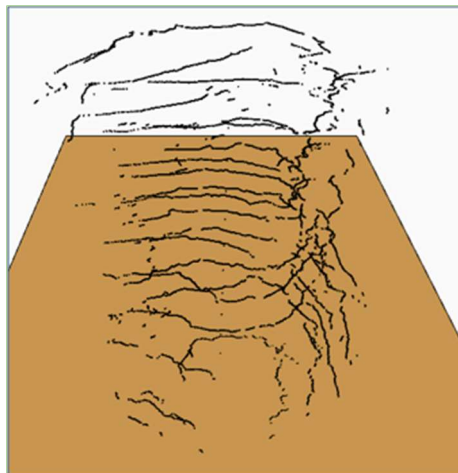
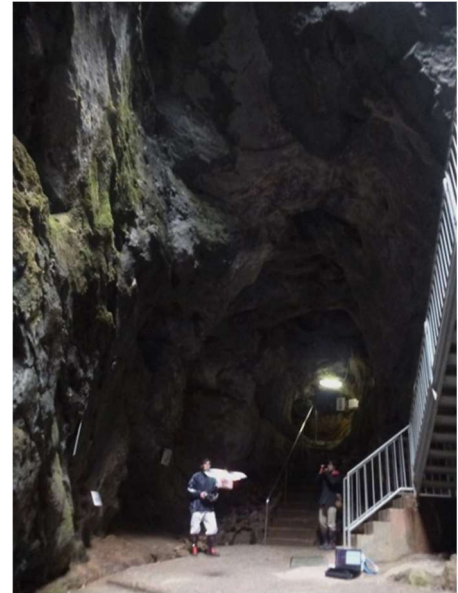
中上～下：3D 点群モデル

#### [4.2.5]福岡県平尾台「牡鹿洞」

本校の電子制御工学科前田研究室では、マニュアル操縦の UAV (ドローン) に LRF を搭載して「牡鹿洞」の壁面形状計測実験を実施した(画像 17,18) 9)。



画像 17 上：直上、中：側壁  
下：底部（正面右手の奥：横穴の入口）



画像 18

上：測定システム外観  
(DJI Phantom3 と  
北陽電機 URG-04LX-UG01)  
中：レーザー測定中  
下：3 次元点群モデル



#### 4.3 UAV と UGV の協同

NASA-JPL の「UGV：親機、UAV：子機」方式の火星探査ミッション構想<sup>29)</sup>とは異なり、「UAV：親機、UGV：子機」方式を採用した。これは、UAV による UGV の広域デリバリーを想定したものであり、「UAV：着陸機、UGV：地上移動探査機」とみなした月/火星探査ミッションのシミュレーションも兼ねている。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、UAV（ドローン DJI 社製 Matrice600）のペイロードとして、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）を積載して揺動実験を行った（画像 19）。積載時のペイロードの安定性が確認できたため、跡地に隣接するドリーネとの間で UGV 空中輸送・着陸後探査・回収帰還実験を行った（画像 20）。次回の課題は UAV と UGV の無線チャンネル混信解消である。



画像 19 上：揺動実験 下：UGV 外観



画像 20 UGV の空中輸送・着陸後探査・回収帰還実験

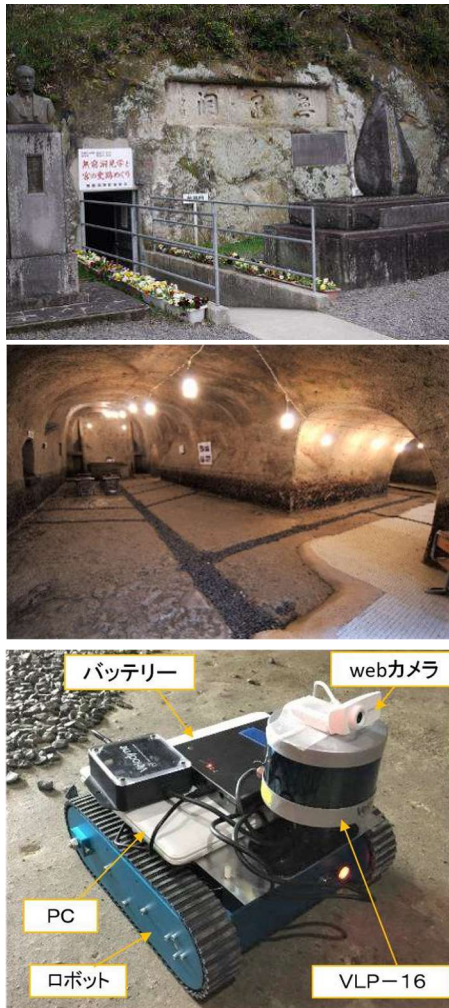


#### 4.4 横穴のレーザー形状測定と 3D モデル作成

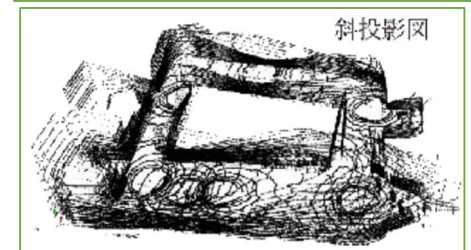
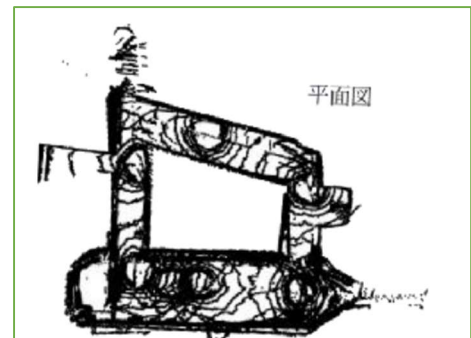
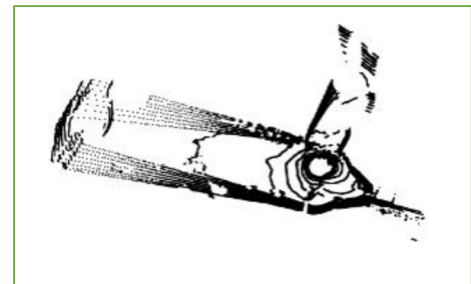
横穴においては GPS の衛星電波が途絶する状態であり、GPS を前提にした UGV の自律制御手法を前提にすることはできない。本節では、UGV による横穴の形状計測実験と、作成した 3D モデルを紹介する。

佐世保工業高等専門学校電子制御工学科前田研究室では、マニュアル有線操縦の UGV(地上ロボット)に能動的光学センサ (LRF) を搭載して、防空壕遺跡「無窮洞」(画像 21,22)と凝灰岩洞窟「溝ノ口洞穴」(画像 23,24)の壁面形状測定実験を実施した<sup>12,13)</sup>。

##### [4.4.1]長崎県佐世保市宮「無窮洞」



画像 21 上：入口、中：内部  
下：測定システム外観、  
(NEXUS Robot 社 New Tracked Mobile Tank  
Robot (10022) と Velodyne 社 VLP-16)



画像 22 上：レーザー測定中  
中上：主洞の測定データ  
中下：3D 全体モデル (真上から)  
下：3D 全体モデル (鳥瞰)

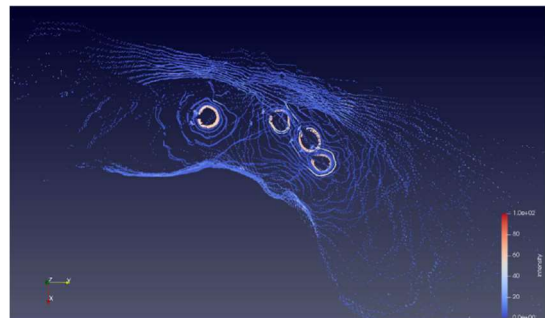
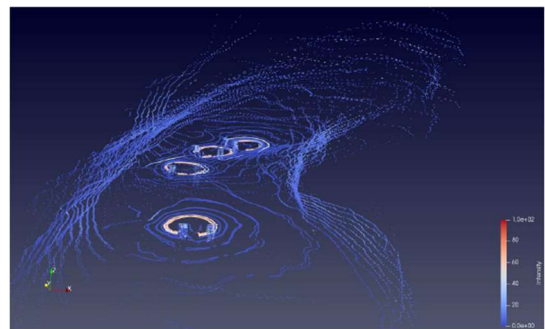
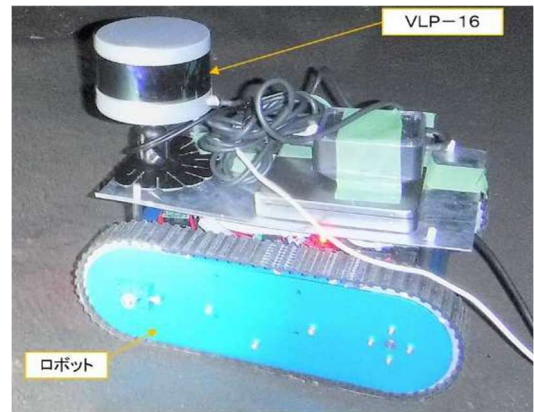


[4.4.2]鹿児島県曾於市財部「溝ノ口洞穴」



画像 23 洞口

上、中上：外から内部  
中下、下：内部から外



画像 24 上：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）

下：3D 点群モデル（真上から）

#### [4.4.3]島根県大根島「竜溪洞」

松江工業高等専門学校の電子制御工学科久間研究室では、マニュアル有線操縦のUGV(地上ロボット)に能動的な光学センサ(レーザースキャナ)を搭載して、大根島の溶岩洞窟「竜溪洞」の壁面形状の測定実験を実施した(画像 25,26)<sup>10)</sup>。



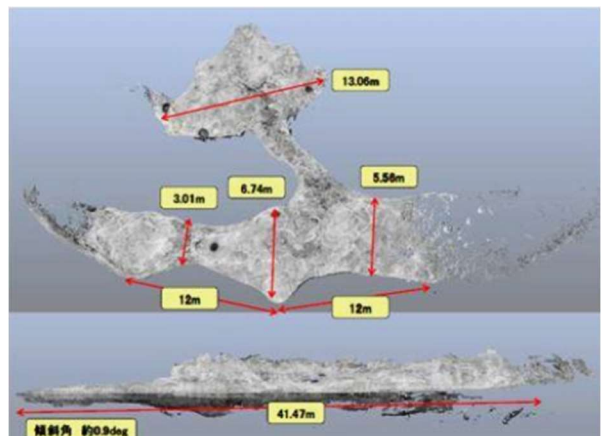
画像 25

上:「竜溪洞」人工洞口、

中:「竜溪洞」内部

下:測定システム外観

(ローバーと FARO 社 Laser Scanner Focus3D)



画像 26 上:レーザー測定中

中:3D 点群モデル

下:3D 点群モデル(全体)



## 5. 課題

横穴ドローン飛行の予備実験は実施済みである(画像 27)<sup>8,12)</sup>。今後はレーザー測定システム搭載のドローンを使用して、「自己位置推定」「環境認識」「経路計画」「自律移動」の研究を進める。



画像 27 上:「溝ノ口洞穴」(洞口付近)  
下:「青龍窟」(主洞ホール)

## 参考文献

- 1) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 宮本憲  
水中洞窟探索ロボットの検証実験と予備調査,  
佐世保工業高等専門学校研究報告第 46 号  
pp.43-48 (2009)
- 2) 真部広紀, 浦田健作, 長嶋豊他  
白滝の穴水中洞窟における探索ロボットとサーベイ  
システムの実証実験

佐世保工業高等専門学校研究報告第 47 号  
pp.39-44 (2011)

3) 真部広紀, 浦田健作, 須田淳一郎

**球磨山地カルストの水文地質予備調査**

佐世保工業高等専門学校研究報告第 47 号  
pp.45-50 (2011)

4) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他

**岩戸洞水中洞窟におけるロボット探索と  
球磨カルストの水文地質予備調査**

佐世保工業高等専門学校研究報告第 48 号  
pp.33-44 (2011)

5) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他,

**水中洞窟系のロボット探索とソナーによる形態計測の  
予備実験**

佐世保工業高等専門学校研究報告第 49 号  
pp.51-64 (2013)

6) 真部広紀, 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)

7) 真部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他

**徳之島浅間湾屋のウンブキ水中洞窟における**

**ロボット探索とソナーによる形態計測の予備実験**

佐世保工業高等専門学校研究報告第 51 号  
pp.19-27 (2015)

8) 真部広紀, 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)

9) 前田貴信, 真部広紀

**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)

10) 真部広紀, 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

**ロボット探索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  
pp.14-27 (2016)

- 11) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 山本祐二,  
近藤正義, 岡本渉,  
**宮古諸島下地島の西沿岸域におけるアンキアライン  
陥没ドリーネ群の予備調査**  
佐世保工業高等専門学校研究報告第 53 号  
pp.5-13 (2016)
- 12) 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)
- 13) 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)
- 14) 眞部広紀, 稲川直裕, 山田努, 岡本渉, 堀江潔,  
松見豊, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝  
**山地カルストの洞窟水文系における  
ROV と UAV を使用した調査法の検討**  
佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号  
pp.76-92 (2019)
- 15) 眞部広紀, 松見豊, 岡本渉, 稲川直裕, 山田努,他  
**水没した陥没ドリーネのアンキアライン水文系に  
おける山地カルストの洞窟水文系における  
UAV-ROV 調査法の検討**  
佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号  
pp.66-75 (2019)
- 16) 眞部広紀, 稲川直裕, 山田努, 長嶋豊  
**沿岸域カルストのアンキアライン水文系における  
ROV 調査法の検討**  
佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号  
pp.56-65 (2019)
- 17) J.Haruyama et al.,  
**Possible lunar lava tube skylight observed by  
SELENE cameras**  
2009, Geophysical Research Letters 36, L21206
- 18) J.Haruyama et al., 2010,  
**New Discoveries of Lunar Holes in Mare  
Transquillitatis and Mare Ingenii.**  
41th Lunar and Planetary Science Conference,  
abstract #1285
- 19) 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
- 20) G. E. Cushing, T. N. Titus, J. J. Wynne, and  
P.R. Christensen  
**THEMIS observes possible cave skylights on Mars**  
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS,  
VOL. 34,L17201,doi: 10.1029/2007GL030709, 2007
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 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
- 24) 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.
- 25) 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
- 26) W.Whtaker,  
**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

27) J. Thangavelautham, M. S. Robinson, A. Tait, T. J. McKinney, S. Amidan, A. Polak

**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>

28) C.W.Snyder,

**The Planet Mars as Seen at the End of the Viking Mission,**

1979: Journal of Geophysical Research, 84, 8487–8519

29) J. Balaram, et al.,

**Mars Helicopter Technology Demonstrator**

8–12 January 2018, Kissimmee, Florida

2018 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference

30) 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.

31) 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/>

32) 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

33) 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

34) 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

35) 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

36) 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

37) 岡本渉, 眞部広紀, 松見豊, 中西幸弘, 山崎高幸,

久間英樹, 村上崇史, 前田貴信他

**火星 UAV を想定した縦孔探査と大気観測の**

**ミッション構想**

第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集,

抄録番号 3B09 (JSASS-2019-4541), 2019

38) P.Lee, E.Kommedal, A.Horchler, E.Amoroso, K. Snyder, and A.F.Birgisson

**LOFTHELLIR LAVA TUBE ICE CAVE, ICELAND: SUBSURFACE MICRO-GLACIERS, ROCKFALLS, DRONE LIDAR 3D-MAPPING, AND IMPLICATIONS FOR THE EXPLORATION OF POTENTIAL ICERICH LAVA TUBES ON THE MOON AND MARS.**

2019, 50th Lunar and Planetary Science Conference abstract #3118

39) C.Papachristos, T.Dang, S.Khattak, F.Mascarich, N. Khedekar and K.Alexis

**Modeling, Control, State Estimation and Path Planning Methods for Autonomous Multirotor Aerial Robots**

Now Foundations and Trends, 27 December 2018

40) G.Zhang, B.Shang, Y.-Q.Chen, and H. Moyes

**SmartCaveDrone: 3D cave mapping using UAVs as robotic co-archaeologists**

Conference: 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)