

# 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\*

眞部広紀\*\*1, 前田貴信\*\*2

## Preliminary Experiments for Laser Measurement and Robotic Exploration in Mizo-no-Kuchi-Douketsu Cave, Soo, Kagoshima Prefecture, Japan\*

Hiroki MANABE\*\*1, Takanobu MAEDA\*\*2

Key words: Laser Measurement, Robotic Exploration, Tuff Cave

### Abstracts

In this paper, we demonstrate preliminary experiments of laser measurement for a tuff cave.

#### 1. はじめに

火山やガス・放射線がある場所、高所や断崖など、人間の進入・接近が困難な極限環境ではロボットやドローンの活躍が期待される。洞窟は不整地で自然光の届かない暗黒の領域であり、調査するには洞窟探検のスキルが必要になる。このような極限環境の洞窟を移動探査できる科学者代理ロボットと洞窟内部形状の計測システムの開発を目的として、本研究は開始された。福岡県平尾台の石灰洞「青龍窟」「牡鹿洞」においてロボットやドローンによる洞口撮影・洞内移動、レーザー測域センサー計測、3次元モデル作成などの実証実験を行ってきた<sup>1,2)</sup>。

近年、月探査衛星 SELENE(かぐや)と LRO、火星探査衛星 MRO の地形カメラ画像データの解析により、月や火星に巨大な縦孔地形が発見されている<sup>3-9)</sup>。また、GRAIL 衛星の月重力分布データ解析から、縦孔から帯状に続く低密度(質量欠損)領域が検出されている<sup>10,11)</sup>。2017年に SELENE(かぐや)の月レーダーサウンダーデータの解析から、JAXA を中心とした研究チームが縦孔から続く長大な空洞反射の特徴を検出した<sup>12)</sup>。これによって地下空洞(横穴)が存在する見込みが大きくなった。地下空洞の内部温度は非常に安定していて、隕石衝突や放射線や紫外線から防護されている天然のシェルターである。将来的な月基地候補地として有利な条件が推定されるため、地下空洞への世界の宇宙研究機関の期待が高まっている。日本では JAXA が UZUME 計画(Unprecedented Zipangu

Underground of the Moon/Mars Exploration 古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査)を立ち上げ準備を進めている<sup>13)</sup>。本研究グループはロボット移動やレーザー計測の探査シミュレーションを実施する場として溶岩チューブ洞窟や縦孔・地下空洞の類似地形も研究対象に含めた<sup>14-16)</sup>。本稿では、鹿児島県曾於市の「溝ノ口洞穴(岩穴)」<sup>17,18)</sup>(図1、図2、図3)において実施したロボット搭載センサーによる予備計測実験とドローンによる洞口周辺探査シミュレーション(洞口周辺撮影)実験を報告する。今回の実験は『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』によるシリーズ型プロジェクトとして実施した。



図1 「溝ノ口洞穴」洞口前

\* 原稿受付 平成29年10月31日

\*\*1 佐世保工業高等専門学校 一般科目

\*\*2 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

## 2. 「溝ノ口洞穴」の概要

昭和30年(1955年)に鹿児島県の文化財天然記念物に指定された曾於市財部町の「溝ノ口洞穴」は幅13.8m、高さ8.6mの洞口をもつ、全長224mの大規模な凝灰岩洞窟である<sup>17,18)</sup>。



図2 「溝ノ口洞穴」 洞口(観光部分)



図3 「溝ノ口洞穴」 洞内(観光部分)

## 3. 計測方法とシステムの構成

計測ポイントから壁面までの距離を水平全方位360°で測定することにより横断面の形状を計測する(図4上)。高さを変えて水平面毎に計測を行い、横断面を積み重ねて3次元形状を得る(図4下)。次に、別の計測ポイントに移動し計測を行って3次元形状を得る。

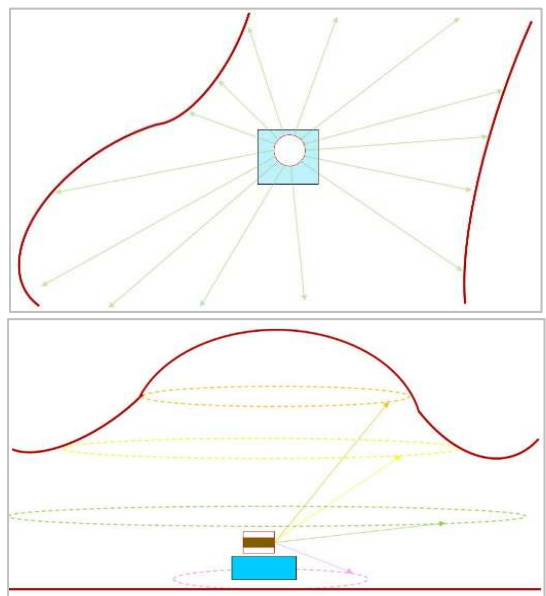


図4 上 横断面計測、下 横断面の積み重ね

このプロセスを反復して、「溝ノロ洞穴」の観光部分全体をカバーした3次元形状を得る。

上記の計測方法を実現するため、センサーには水平全方位 360° が高精度計測可能な、Velodyne 社レーザー測域センサー(Laser Range Finder)「全方位 LiDAR イメージングユニット VLP-16」を使用した。計測ポイント間の移動に使用するプラットフォームには NEXUS Robot 社「New Tracked Mobile Tank Robot (10022)」(寸法:310×300×110mm、アルミ合金製で重量 4.3 kg)を採用した(図 5)。12V Ni-MH 充電電池と 12VDC モータ(動力: 17W)駆動のクローラーにより、最大:0.3 m/s の速度で移動することができる。このロボットにコントローラーとして Arduino 互換機を搭載した。

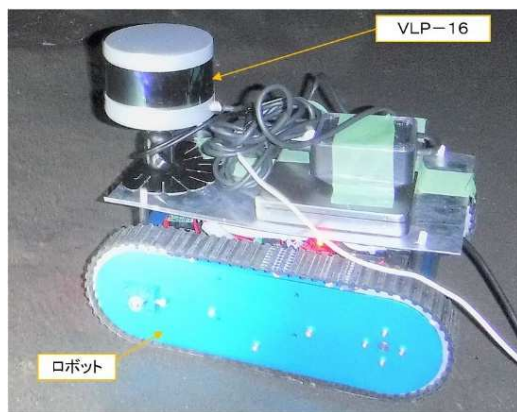


図 5 レーザーセンサー搭載ロボット

#### 4. 計測と 3 次元モデル作成

ロボットを移動させながら VLP-16 により水平全方位 360° と垂直視野 30° で洞窟壁面の 3 次元的形状を計測した(図 6、図 7)。計測データの中から特徴的なものを選び出して、位置と向きを補正して重ね合わせて、一つの 3 次元モデルに統合した。このプロセスを「溝ノロ洞穴」の観光部分全体にわたって実行して、全体 3 次元モデルを作成した(図 8)。

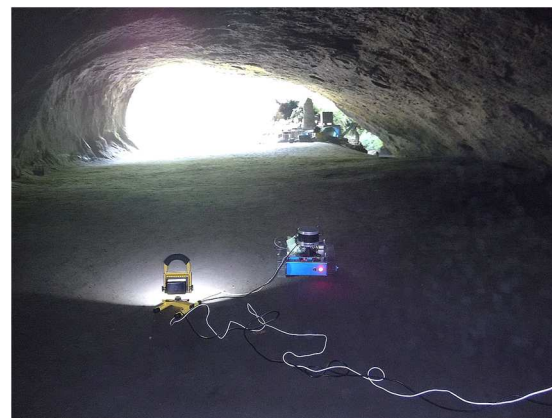
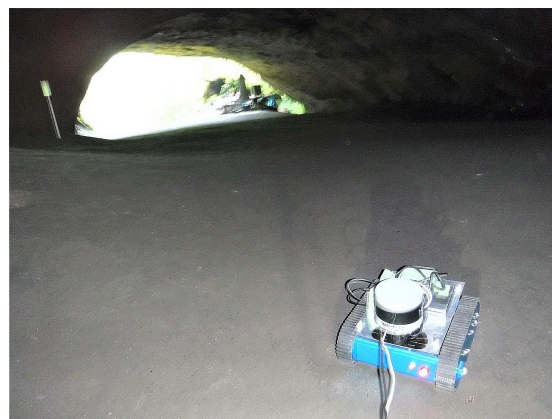


図 6 レーザー計測中のロボット

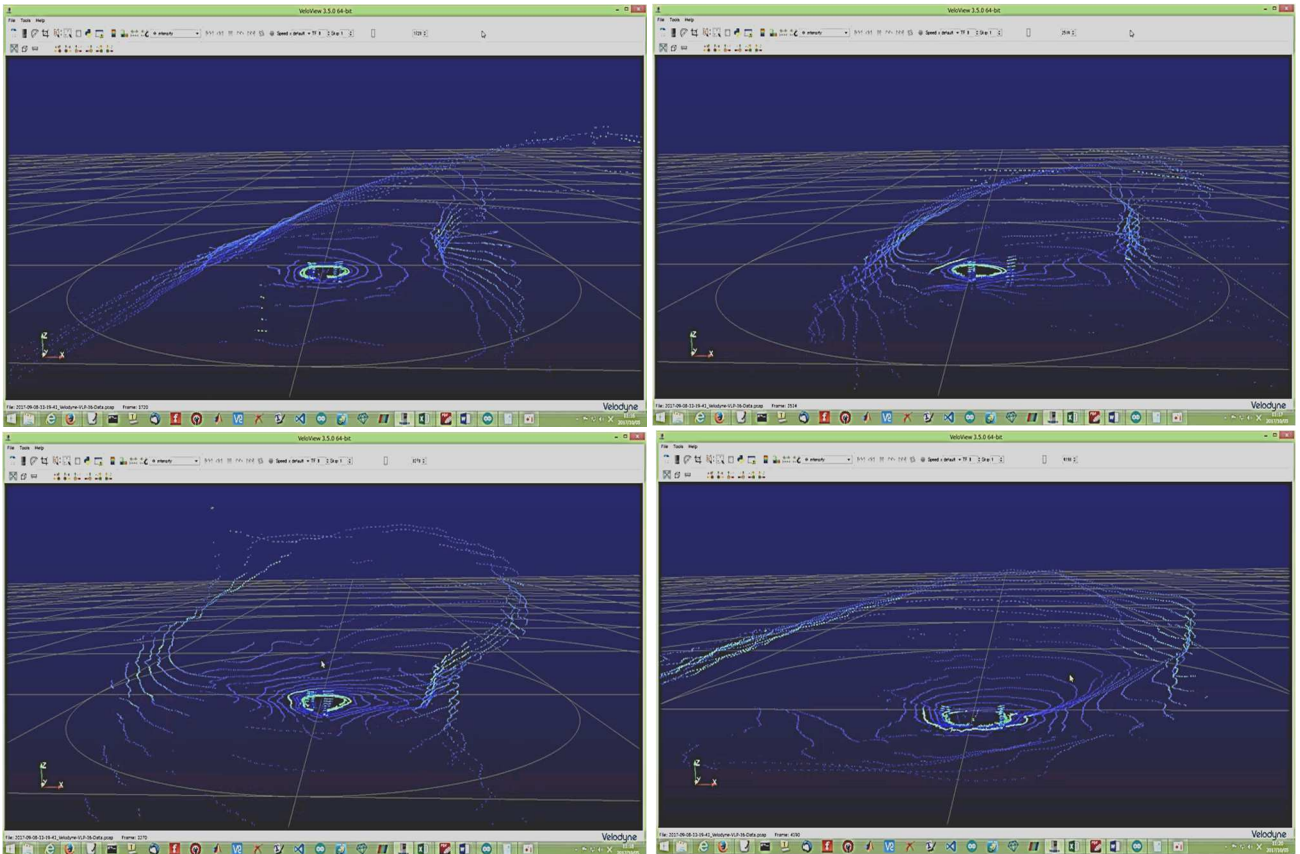


図7 計測ポイント毎の3次元モデル(統合前、VeloView による表示)

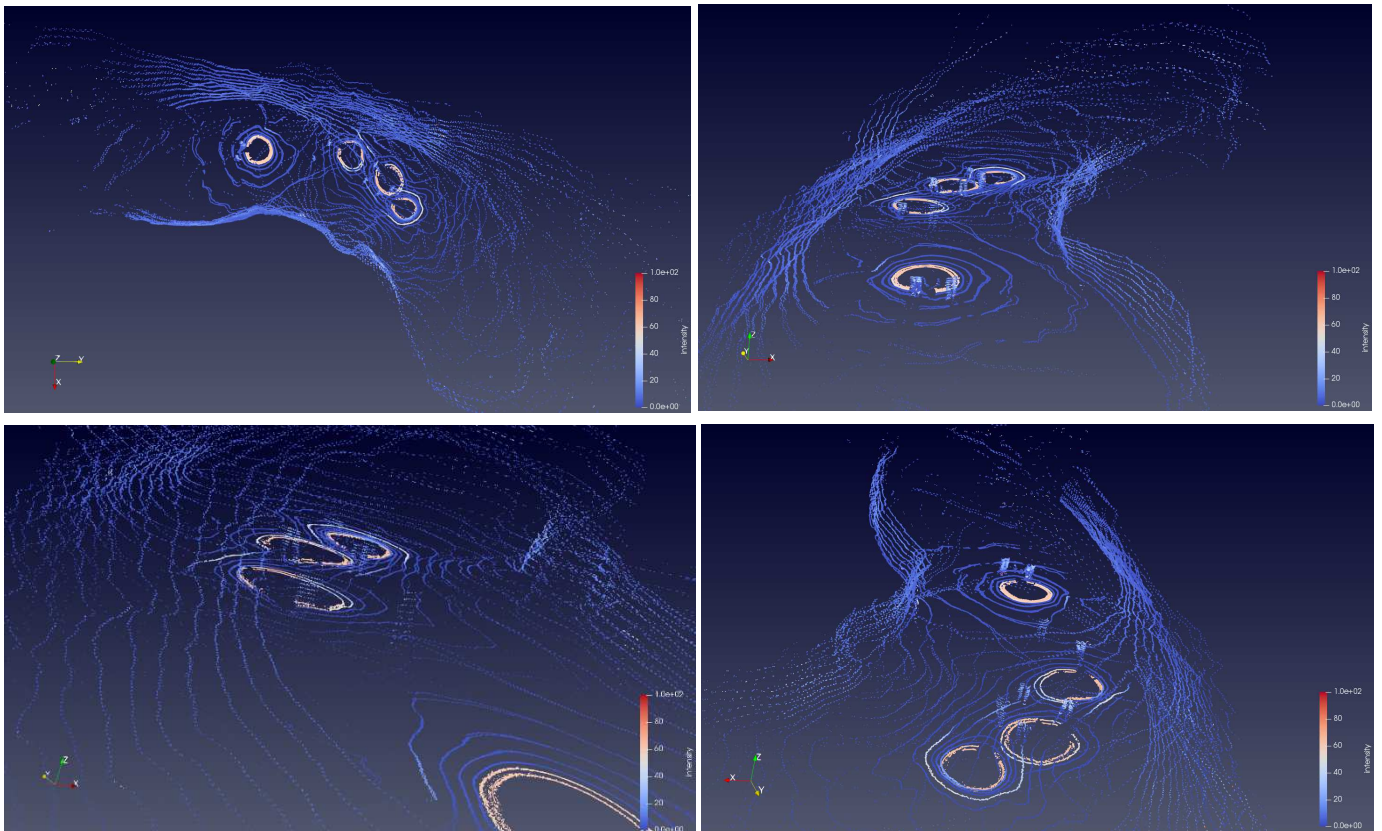


図8 全体の3次元モデル(統合後、ParaView による表示)

## 5. ドローンによる洞口周辺撮影

縦孔・地下空洞探査では縦孔側壁や底部の横穴は重要な観察・撮影対象である(図9)。月とは異なり希薄な大気が存在する火星の探査ではプラットフォームとして UAV が検討されているが、火星表面に縦孔が発見<sup>6-9)</sup>されたことから、ホバリング性能をもつ回転翼型 UAV による縦孔・地下空洞探査方法が注目されている<sup>19-21)</sup>。崖面の下端に開口する横穴「溝ノ口洞穴」は縦孔・地下空洞の部分的な類似地形である<sup>16)</sup>。今回の実験ではマルチローター型ドローン(図10)による探査シミュレーション(洞口周辺撮影)も実施した(図11)。高度④~⑤では洞口上部の崖の壁面を撮影できたが、高度⑥では光量不足のため洞奥の画像を撮影できなかった。

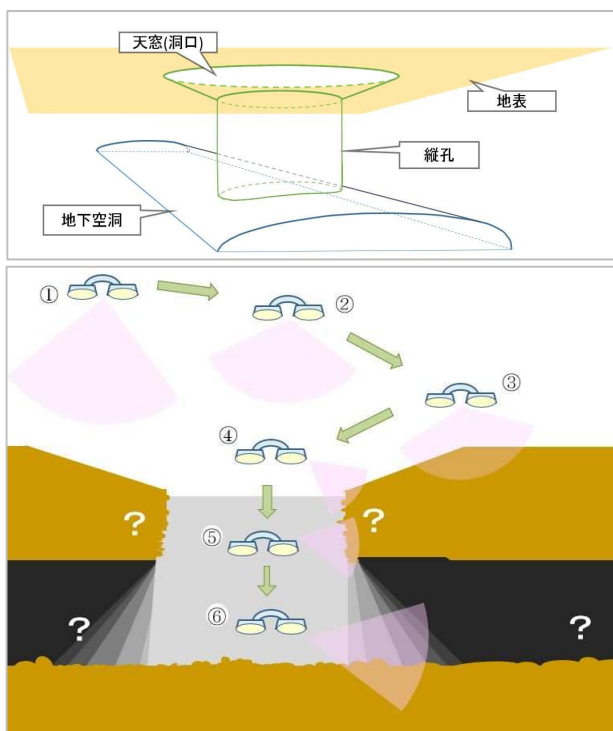


図9 上：縦孔・地下空洞模式図  
下：ドローンの観察・撮影高度



図10 ドローンとコントローラー  
(DJI社 Phantom2)



図11 上：ホバリング中のドローン(図9の高度④~⑤)  
中：ドローンカメラの撮影画像(図9の高度④~⑤)  
下：ホバリング中のドローン(図9の高度⑥)

## 8. 今後の展開

[ロボット] 遠隔操作(他の実験場所で既に実施)、天井部分の計測、画像の自動統合(現在は目視による手作業)が挙げられる。非観光部分の計測に向けて、充分な不整地走破性をもつパワーが大きいロボットプラットフォームを準備する。

[ドローン] 測定距離が大きいレーザーセンサーを搭載するために、搭載重量の大きい機種のドローンを準備する。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤 C(一般) 課題番号 16K06206)『地球外の縦孔・地下空洞を含む洞窟地形の計測システムと3次元モデルの活用』(代表 眞部)の補助の一部により進めました。

「溝ノ口洞穴」の実験を実施するにあたり、曾於市教育委員会社会教育課文化財係の加塩英樹様到大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 眞部広紀, 前田貴信, 浦田健作, 井手雄太, 市丸智裕, 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, 洞窟探査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) J. Haruyama, et al. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L21206, 2009,
- 4) J. Haruyama, et al., NEW DISCOVERIES OF LUNAR HOLES IN MARE TRANQUILLITATIS AND MARE INGENIUM. 41st Lunar and Planetary Science Conference (2010) #1285
- 5) J. Haruyama et al., 2012, In: V. Badescu, (Eds.), Moon-Prospective Energy and Material Resources, Springer, p.139
- 6) 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
- 7) G.E. Cushing, CANDIDATE CAVE ENTRANCES ON MARS Journal of Cave and Karst Studies, v. 74, no. 1, p. 33–47. DOI: 10.4311/2010EX0167R
- 8) G.E.Cushing, C.H. Okubo, and T.N. Titus, Atypical 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
- 9) 後藤祐紀; 郭哲也; 春山純一; 三宅互, 火星エリシウム山麓における縦孔陥没地形リスト JAXA-RM-16-008, pp1-19(2016)
- 10) Sood et al. Detection of Buried Empty Lunar Lava Tubes Using GRAIL Gravity Data, 2nd Intl. Planetary. Caves Conf., 20-23 October, (2015) #9016,
- 11) Chappaz et al. , Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL Gravity, Geophysical Research Letters 43, DOI: 10.1002/2016GL071588.2017
- 12) T. Kaku et al. Detection of Intact Lava Tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder, Geophysical Research Letters (2017) DOI: 10.1002/2017GL074998
- 13) 春山純一, 河野功, UZUME 計画: An Introduction and Overview 第61回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2017) #1B08
- 14) 久間英樹, 眞部広紀, 新部一太郎, 森内敦史, 福岡久雄, 3次元レーザースキャナを用いた洞窟の形状測定, 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集(2015) #3D03
- 15) 新部一太郎, 久間英樹, 眞部広紀, 竜溪洞の3次元レーザー測量による詳細マッピングとデータ展開の可能性, 日本洞窟学会第41回大会(高知大会)学術講演会 (2015)
- 16) 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 p pp14-27 (2016)
- 17) 門田重行, 溝ノ口洞穴, 鹿児島県文化財報告書, pp20–30, 1955.
- 18) 大木公彦, 前田利久, 県指定天然記念物「溝ノ口洞穴」の地質学的特徴, Nature of Kagoshima Vol. 41, pp315-318, Mar. 2015
- 19) 永井大樹, 大山聖, 山田和彦, 火星の飛行探査の現状について, 第61回宇宙科学技術連合講演会講演集(2017) #2B10
- 20) 青木理沙子, 大山聖, 藤田昂志, 永井大樹, 加納健佑, 井上菜生, 曾我部崇, 金崎雅博, 火星の縦孔探査のためのヘリコプタの概念設計, 第61回宇宙科学技術連合講演会講演集(2017) #2B12
- 21) 野村将之, 安達拓矢, 上地健太, 倉根翔, 永井大樹 火星探査用マルチコプター実現可能性の検討, 第61回宇宙科学技術連合講演会講演集(2017) #2B11