

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*

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*****

On Laser Measurement and Three Dimensional Modeling for Cave Exploration

Hiroki MANABE**, Takanobu MAEDA***, Hideki KUMA****, Ichitaro NIIBE*****,
Kensaku URATA*****, Takashi SOMEYA*****, Junichi HARUYAMA*****

Key word: Cave Exploration, Laser Measurement, Survey, Three-dimensional Modeling

Abstracts

In this paper, we discuss cave morphometry, cave survey, exploration with laser measurement system, and three-dimensional modeling.

1. はじめに

古代から人類に避難所・居住空間、畏敬・祭祀・啓示の場を与えてきた洞窟は、21世紀の現在において暗黒の未踏探検領域、フロンティアとして残されている。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、ダイナミックな地形と迷宮の奥部に包蔵されている。20世紀までは人間による探検行動だけが現実的な洞窟調査方法であった。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、未着手の洞窟は実質的に無尽蔵にある。より有効な調査方法を開発し関係学術分野に提供すればその貢献度は大きいものとなる。21世紀の今日、電子工学・ロボット工学の発達をもとに、世界では探査ロボット・センシング技術の研究開発が精力的に進められている。本研究グループは

高等専門学校の教員を中心とする理学・工学の研究者の分野横断的な連携組織であり、探査対象として「未知の閉鎖空間環境(洞窟)」に取り組んできた。現場における実証実験の支援体制を確立し、新しい手法である「洞窟探査計測システム」の具現化を目指している。

近年、洞窟の学術価値や利用価値を大きく飛躍させる転換点があった。リモートセンシング・探査機技術の発達によって、地球の表面だけではなく月や火星・小惑星・彗星など、固体型天体表層の詳細な地形・地質情報が得られるようになり、JAXAの月探査機SERENE「かぐや」の観測データから、月面の数か所に巨大な縦孔が発見された¹⁾。これを契機として月面や火星表面において数多くの縦孔の発見が続いた^{2,3,4,5)}。2015年現在、月のどの縦孔・地下空洞も未探査であり、地下空洞は内部の形状・サイズや環境条件のデータがない未知環境である。縦孔底部からの接続が推定されている地下空洞(横穴)は、地球型固体惑星の形成学、地質学、生命科学などの研究対象として重要である⁶⁾。また、将来的な地下資源や月基地開発の候補地として有利な条件が推定されている⁵⁾。内部を探査・測定して条件が確認できれば、拠点開発に向けて産官学財民が連携できるため、世界では月の縦孔・地下空洞探査に向けて競争が始まっている。国内ではJAXAが月や火星など他天体の縦孔・地下空洞内部進入探査ミッションを目的としたUZUME計画を進めている^{7,8,9)}。未知

原稿受付 平成 27 年 12 月 3 日

** 佐世保工業高等専門学校 一般科目

*** 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

**** 松江工業高等専門学校 電子制御工学科

***** 島根大学 生物資源科学部

***** 大阪経済法科大学 地域総合研究所

***** 佐賀大学 農学部

***** 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

環境に対する工学側の準備段階として、地球上の洞窟におけるロボット探査・形状計測・環境測定の実験、マッピング、VR シミュレーションの研究が不可欠である。また、理学側の準備段階である類似地形（洞窟）の定量的な研究には、正確かつ精密な‘白地図’が必要になる。計測・測量の技術的な問題で地球の洞窟であっても、理学側の要求水準を満たす定量的な3次元モデルは僅少の例外を除けば近年まで作成されていなかった。しかしながら、レーザー計測の技術的な発達により、簡便で精密な洞窟の測定手法が普及してきた^{10,11)}。

本研究グループは本校の平成27年度校長裁量経費(融合研究)の採択テーマ『縦孔・地下空洞を含む洞窟地形のレーザー計測と3次元モデルの活用』の補助により、洞窟レーザー計測・3次元モデル化・アーカイブのプロジェクトを立ち上げた。理学側の要求水準に応えるために、ロボット計測とレーザー測量を相補的に組み合わせた検証手法も採用した。本稿では、ローバーやドローンに搭載したレーザー測域センサーによる石灰洞窟の断面計測、レーザースキャナーによる溶岩洞窟の3次元計測・測量、3次元点群モデルとアーカイブモデルについて中間報告する。

2. 背景と構想

2009年に日本の月探査機SELENE「かぐや」の計測データから、春山らの研究チームは世界で初めて、巨大な縦孔(直径60m・深さ50m)を月面のマリウス丘群に発見した¹⁾。また、SELENEデータの全球サーベイによって、より巨大な二つの縦孔(直径数10~100m・深さ数10~100m)を発見した²⁾。縦孔の底部には縦孔の直径を越える規模をもつ地下空洞(横穴)の存在が推

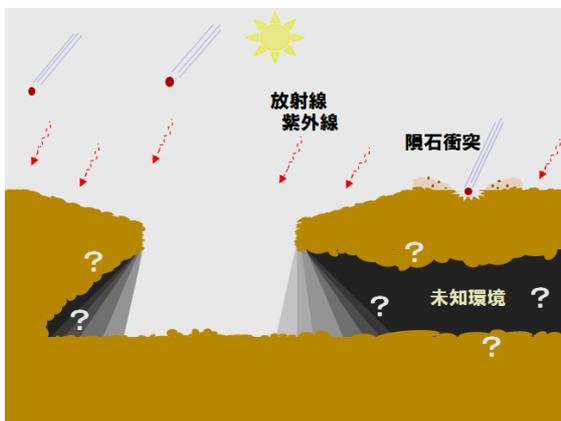


図1. 月の縦孔と地下空洞 (概念図)

定されている。地下空洞は放射線や紫外線、隕石から防護されていることに加え、内部は温度が非常に安定していると考えられている(図1)。

月だけでなく火星にも発見された縦孔³⁾とその奥に推定されている地下空洞は、地球型惑星の形成学の露頭として、生命科学のタイムカプセルとして非常に重要な場所とみなされている⁵⁾。地下空洞の内部環境を直接測定し、居住地や基地の候補場所として有利な条件を確認できれば、将来の拠点利用に向けて道が大きく拓かれる¹²⁾。以上の点から、早期に縦孔・地下空洞内部の直接探査を行うことが望まれている。月面の縦孔発見を契機として、JAXA/ISASはUZUME計画(古今未曾有の日本の月地下世界探査 Unprecedented Zipangu Underground of the Moon Exploration)を立ち上げ、広く民間からも人材とアイデアを結集させて、探査システムの構想・開発と要素技術の確立を進めている^{6,7,8)}。縦孔・地下空洞の探査ミッションの基本的なシナリオは、月面上に開口する縦孔に接近、縦孔に進入、横穴の地下空洞に進入という段階を踏む。このコンセプトは、「Google Lunar X prize」に参加しているHAKUTOプロジェクトの実機(Moonraker+Tetris)にも採用されている¹³⁾。

3. レーザー計測と3次元モデル

本校ではPBL型教育の一環として、ローバーなどの探査ロボットに搭載したレーザーセンサーによる野外現場(洞窟)の環境形状計測技術を活用して、洞窟学・水文学・地形学・地質学などのフィールドサイエンスの分野に貢献してきた¹⁴⁾。また、松江工業高等専門学校と島根大学の連携協力により、サイエンス側の要求水準を満たす洞窟の定量的な3次元モデルを作成する体制を整えた¹⁵⁾。洞窟内部を進入探査するロボットと洞窟形状のレーザー計測はUZUME計画の探査システムの基幹的な要素技術であり、JAXA/ISASと連携を進めることにした。

3.1 石灰洞窟のレーザー計測 本校では、福岡県平尾台カルストの石灰洞窟「青龍窟」において、探査ロボットに搭載したレーザー測域センサー(北陽電機社製URG-04LX-UG01; 概形50×50×70mm、質量約160g、測距範囲20~5600mm)による断面計測を行った(図2,3,4,5)。また、福岡県平尾台カルストの石灰洞窟「牡鹿洞」洞口(縦穴)において、飛行ドローン(クラウドコプター)に搭載したレーザー測域センサーによる断面計測を行った(図6)¹⁶⁾。



図2. 福島県平尾台「青龍窟」(上)東洞口 (下)西洞口

図4. レーザー測域センサー
北陽電機社製
URG-04LX-UG01

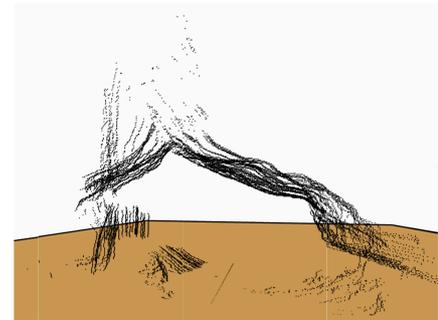


図5. 「青龍窟」下層通路
(上)写真 (下)3次元点群モデル



図3. 「青龍窟」洞口ホール
(上)ドローン(無線式)の飛行実験
(下)ローバー(無線式)の走行実験

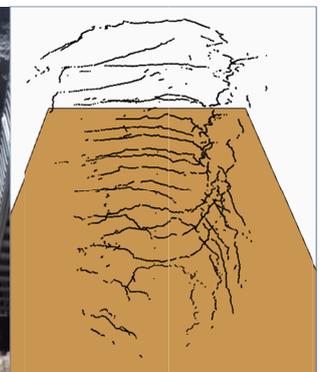
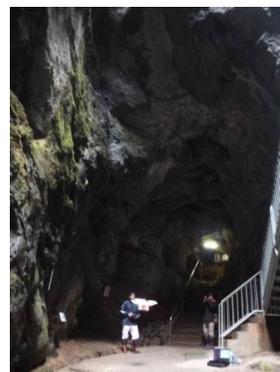


図6. 福島県平尾台牡鹿洞の洞口(縦穴)
(上、下左)写真 (下右)3次元点群モデル

3.2 溶岩洞窟のレーザー計測・測量 レーザーセンサーによって計測データの精度・情報量はセンサーの重量・サイズとトレードオフの関係にあり、ロボットに搭載するレーザー計測の精度には一定の限界がある。移動プラットフォームであるロボットに搭載したレーザーセンサーの計測データの精度を検証するためには、精度の異なるセンサーの計測データどうしの比較が必要となる。UZUME 計画との連携プロジェクトとして、松江工業高等専門学校と島根大学は島根県大根島の溶岩洞窟「竜溪洞」においてレーザー計測・測量を行った(図7, 8)¹⁷⁾。今回は対照のために同機種種のレーザースキャナー(FARO 社製 Laser Scanner Focus3D; 概形240×200×100mm、質量5kg、測距範囲0.6~120m)(図9,10)を使用した。松江工業高等専門学校はローバーに搭載したスキャナー計測と3次元点群モデル・3Dプリント模型(図11)の作成を行った。島根大学はスキャナー測量とスチル画像のテクスチャを貼りこんだ3次元アーカイブモデルの作成を行った(図12)。



図8. (上)レーザースキャナー計測 (下左) ローバー(有線式)
(下右) レーザースキャナーFARO 社製
Laser Scanner Focus3D



図7. 島根県大根島「竜溪洞」
(上)洞口 (中、下)洞内



図9. (上)溶岩チューブ通路(写真)
(下)溶岩チューブ通路(3次元点群モデル)

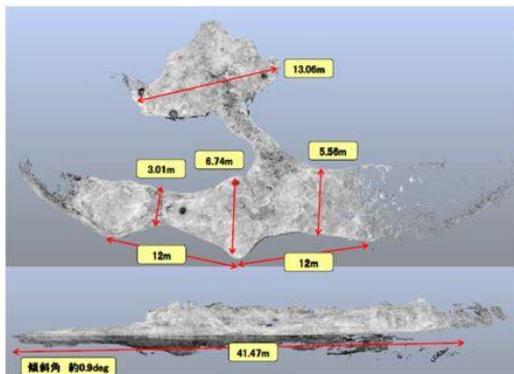


図 10. 「竜溪洞」の全体像(3次元点群モデル)



図 11. 「竜溪洞」(樹脂製 3D プリント模型)
(上)全体像 (下)産屋

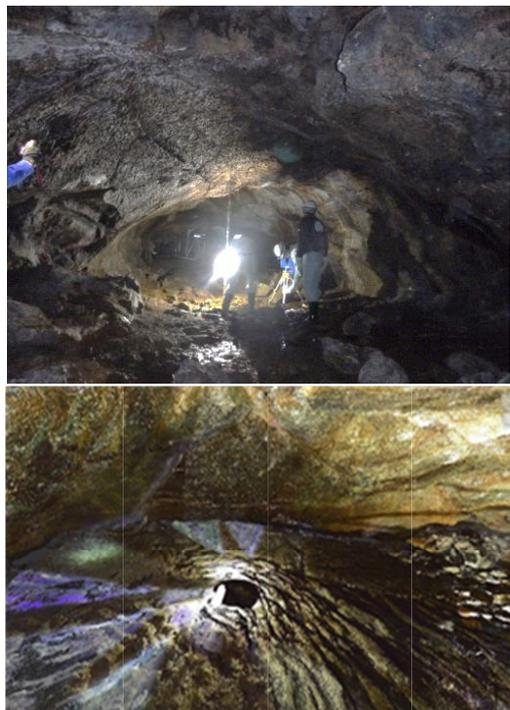


図 12. 「竜溪洞」(上)レーザースキャナー測量
(下)3次元アーカイブモデル

4. 今後の展開

精度の異なった別機種のセンサーによる洞窟計測実験を行い、データの精度を比較検証する。本校では、吊り下げたレーザーセンサーによる縦穴（垂直な壁面やオーバーハング）の計測を計画している。また、センサーをロボットに搭載する計測方式だけでなく、人間にセンサーを装着するウェアラブル方式の洞窟計測も準備している。

現在のところ、月の縦孔奥の地下空洞は内部の形状やサイズのデータがない未知環境であるが、類似地形（地球の溶岩チューブや玄武岩洞窟）は比較研究されている。定量的な計測値と重力加速度値に基づいて地下空洞の高さや傾斜角を推定する研究¹⁸⁾も始まっている。これによって、地球の溶岩チューブ洞窟の3次元モデルを換算して、月地下空洞の推定3次元モデルを作成する。また、不整地踏破ロボットの移動シミュレーションの研究¹⁹⁾と合わせて、月地下空洞のVR環境を構築する。

謝辞

島根県大根島「竜溪洞」のレーザー計測実験のために、プロジェクトのとりまとめと渉外を行ってくださり、実験時には「竜溪洞」の案内をしていただきました島根県自然観察指導員の門脇和也氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Junichi Haruyama, et al. "Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras", Geophysical Research letter, VOL. 36, L21206, oi: 10.1029/200 GL040635, 2009
- 2) Junichi Haruyama, et al. "New discoveries of lunar holes in Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii", 41st Lunar and Planetary Science Conference, #1285, ・ Lunar and Planetary Science Institute, 2010
- 3) Glen E. Cushing, "Candidate cave entrances on Mars", Journal of Cave and Karst Studies, 44(3), vol. 74 no.1 pp33-47, April 2012
- 4) Glen E. Cushing, H. Okubo, "The Mars Cave Database", 2nd International Planetary Caves Conference 9026.pdf (2015)
- 5) Junichi Haruyama, et al. "Luna Holes and Lava Tubes as Resources for Lunar Science and Exploration", Viorel Badescu ed. MOON - Prospective Energy and Material Resources, pp139-164 Springer publisher 2012

- 6) Richard J. L veill , Saugata Datta, “Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review”, *Planetary and Space Science*, 58(3), pp592-598, (2010)
- 7) 春山純一, 西堀俊幸, 岩田隆浩, 山本幸生, 河野功一, 大槻真嗣, 嶋田和人, 桜井誠人, UZUME 研究グループ, “月と火星の縦孔・空洞探査 UZUME 計画のミッションコンセプト”, 第 59 回宇宙科学宜技術連合講演会講演集, 3D05(JSASS-2015-4475)(2015)
- 8) 河野功, 春山純一, 若林靖史, 香河英史, UZUME 研究グループ, “月惑星の縦穴・地下空洞探査(UZUME)システムの研究”, 第 59 回宇宙科学宜技術連合講演会講演集, 2D12(JSASS-2015-4285) (2015)
- 9) Junichi Haruyama, et al. “JAPAN’S EXPLORATION OF HOLES AND CAVES ON THE MOON AND MARS – UZUME PROJECT”, 2nd International Planetary Caves Conference 9012.pdf (2015).
- 10) Robert Zlot, Michael Bosse, “Three-dimensional mobile mapping of caves”, *Journal of Cave and Karst Studies*, 76(3), pp191-206, Tampa, FL (USA) December, 2014
- 11) Michal Gally, et al. “Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning:: a case study Domica Cave, Slovakia”, *International Journal of Speleology*, 44(3), pp277-291, Tampa, FL (USA) September, 2015
- 12) Jacques Blamont, “A roadmap to cave dwelling on the Moon and Mars”, *Advances in Space Research* 54 (2014) pp2140-2149
- 13) 田中利樹, 吉田和哉, Nathan Britton, John Walker, 清水敏郎, 古友大輔, “HAKUTO プロジェクトにおける月面縦穴探査を目指したマイクロローバーの設計と開発状況”, 第 59 回宇宙科学宜技術連合講演会講演集, 3D08 (JSASS-2015-4478) (2015)
- 14) 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)
- 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) 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)
- 17) 久間英樹, 眞部広紀, 新部一太郎, 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, 3D03 (JSASS-2015-4473) (2015)
- 18) 本多力, “地球の溶岩チューブ洞窟から月と火星の溶岩チューブ洞窟を類推する”, 第 59 回宇宙科学宜技術連合講演会講演集, 3D02 (JSASS-2015-4472) (2015)
- 19) 妻木俊道, 加藤裕基, 本田瑛彦, 藤岡紘, “変形型不整地踏破ロボットの開発”, 第 59 回宇宙科学宜技術連合講演会講演集, 3D09 (JSASS-2015-4479) (2015)