

CanSat 型 UGV を使用した地下空間の予備探査実験 ～赤猫洞（屋敷余り特殊地下壕）～

阿依 ダニシ**1, 眞部 広紀**2, 佐藤 海斗**3, 舘岡 佳蓮**4, 安田 伊吹**5

Preliminary Exploration Experiments using CanSat UGV in Underground Space: Akaneko-dou Cave (Yashiki-amari Shelter Ruin), Usuki, Ohita, Japan

Danishi AI**1, Hiroki MANABE**2, Kaito SATOH**3, Karen TATEOKA**4, Ibuki YASUDA**5

Key words: CanSat, UGV, exploration, Akaneko-dou Cave, underground cavern

Abstracts

In this paper, we report on UGV preliminary exploration experiments in Akaneko-dou Cave analogue to underground caverns.

1. はじめに

本研究の UGV は 2 輪ローバー¹⁾の一種で CanSat 型 (図 1,2) と呼ばれ、「ハイブリットロケット等に搭載して打ち上げられ、パラシュート降下・着地後に、目標を目指して自律走行する」小型ロボットの機体であり、学生団体による技術向上の目的に使われている。その小型でありながらさまざまな場所を探査できる汎用性を活かして、「縦孔-地下空洞」探査に適用することを企図した。

『UZUME 計画』²⁾が目指す月と火星の「縦孔 (-地下空洞)」、その未知・未踏領域を直接探査するシステムを構想・実現するには、検討材料となる「縦孔-地下空洞」内部の具体的なデータや情報が必要になる。しかしながら、それらは 2022 年 11 月現在まで未知・未踏のままであり、基盤となるデータや情報は得られていない。高専大学連携研究ネットワーク『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は現実的対応策として、「縦孔-地下空洞」の形状に類似する

地球の地形 (例 図 3,4) において UGV のシミュレーション実験を行ってきた^{3,4)} (以下、地球洞窟 UGV と略記)。近年では、人工洞窟^{5,6)} (例 図 5,6) を含めた難易度の異なる複数の実験サイトにおいて探査シミュレーション実験を実施して、月/火星洞窟 UGV を想定した地球洞窟 UGV の系統的な性能向上を目指している。

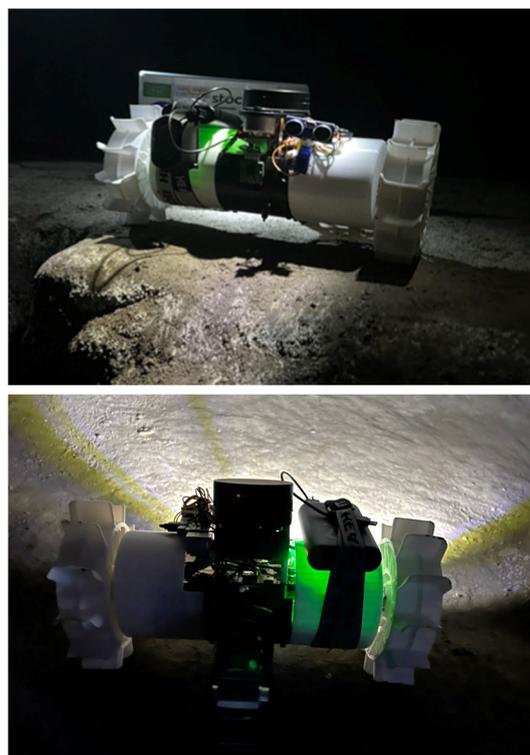


図 1 開発した CanSat 型ローバ (UGV)
上: 前面、下: 上面

* 原稿受付 令和 4 年 10 月 31 日

**1 東北大学大学院工学研究科

航空宇宙工学専攻 1 年

**2 佐世保工業高等専門学校 基幹教育科

**3 大分大学理工学部創生工学科 4 年

**4 慶應義塾大学理工学部物理学科 2 年

**5 弘前大学理工学部地球環境防災学科 3 年

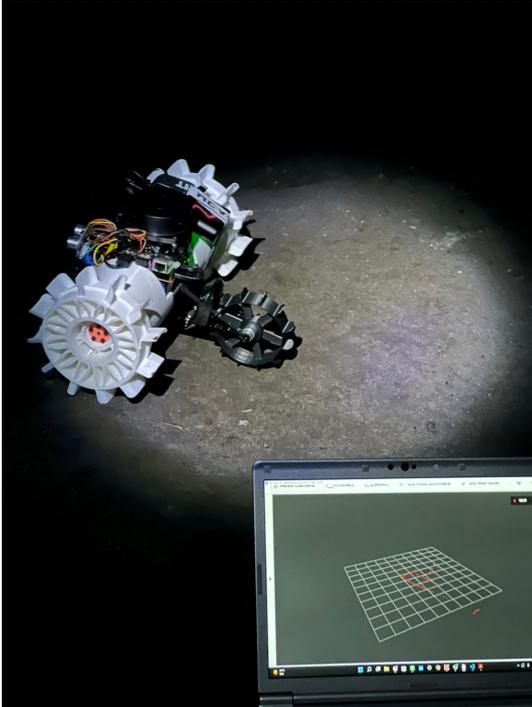


図2 CanSat 型 UGV の「赤猫洞」実験
上：闇の中の壕内移動、下：LiDAR 計測



図3 「富士風穴」 (山梨県富士河口湖町)



図4 「井坑」 (長崎県五島市)



図5 「大谷資料館地下採石場跡」 (栃木県宇都宮市)

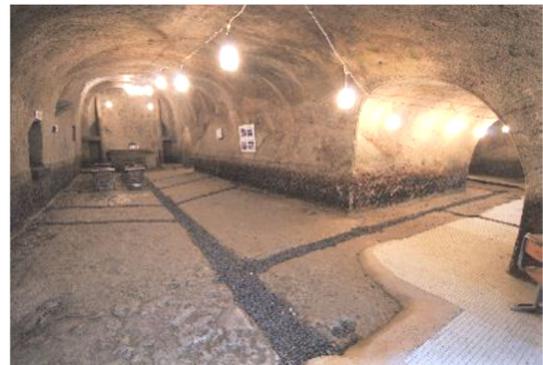


図6 「無窮洞」 (長崎県佐世保市)

『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では、
縦孔-地下空洞の進入経路を三つに区分する：

[Phase1.] 縦孔へのアプローチ

縦孔縁部への接近

→縦孔口縁部 (地表面と縦孔側壁の交線付近) からの、
縦孔内のセンシング

[Phase2.] 地下空洞への降下

→縦孔内部への降下 (→急斜面等での走行)

→縦孔底部でのセンシング・探査

[Phase3.] 地下空洞内進入探査

→地下空洞入口付近のセンシング・探査

→地下空洞内のセンシング・探査

今回の実験サイトである「赤猫洞（屋敷余り特殊地下壕）」（大分県臼杵市福良字屋敷余り）は、上述した三つのフェーズに対応するポイントが揃っている、コンパクトで集約された地下空間である（図7）。

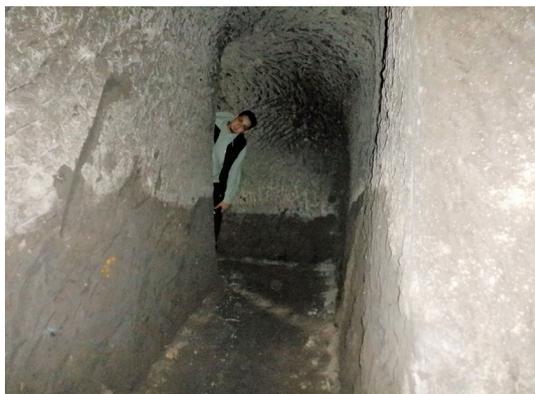


図7 「赤猫洞」地下空間

上：Phase1～Phase2（縦孔口縁部付近の想定）

中：Phase2（斜洞）、下：Phase3

本稿では、地球洞窟 UGV として複数機の CanSat 型ローバーを使用した、「赤猫洞」における探査シミュレーションの予備実験を報告する。

2. 実験サイト「赤猫洞」

臼杵市の国登録有形文化財「齋藤家住宅（俵屋）」裏の「アカネコ館」の横（図8）、福良天満宮の真下（図9上）に「赤猫洞（屋敷余り特殊地下壕）」は位置する。阿蘇溶結凝灰岩台地の岩盤を掘削して造り上げた巨大な防空壕であり、福良天満宮境内の地表面から壕内（地下空間）の天井まで約12～13メートルの高低差がある（図9下）。

「赤猫洞」には実験サイトとして大きなメリットがある。それは至近の位置にあるサポート施設「アカネコ館」であり、「赤猫洞」に関する展示資料、壕内探索や壕内泊の装備が保管され、PCやバッテリー充電に使用できるAC電源も完備している（図10）。今回の実験では、UGVの組立・再調整の作業準備室として使用した（図11）。



図8 「赤猫洞」入口



図9 「赤猫洞」の井戸蓋
上：地表位置（福良神社境内）
下：地下位置（縦穴底から見上げる）



図10 「アカネコ館」外観



図11 準備作業

3. UGV

3. 1 機体諸元

本実験のために開発した UGV の外観と電装部品の配置図を図 12 に示す。車輪の直径は 150mm、機体の幅は 310mm の円筒形をしている。UGV は弾性に優れている TPU 樹脂で作成された 3D プリント部品で構成されており、LiDAR を備えている。

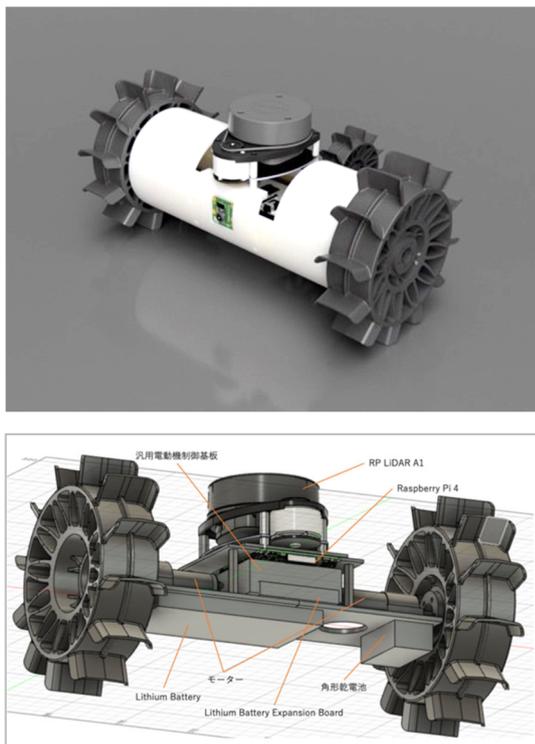


図 12 UGV (上：外観図 下：電装部品配置)

3. 2 タイヤについて

縦孔-地下空洞探査においては、縦孔内部において UGV を投下もしくは急斜面を降下させる必要があるため、UGV のタイヤは機体を衝撃力から保護する重要なパーツになる。2022 年 11 月現在、月・火星の縦孔内部とそれに続くと推定される地下空洞の環境はほとんどが未知であり、様々な障害物が存在すると想定したシミュレーションが必要になる。これを受けて、落下時の衝撃及び急斜面での走破性を考慮してタイヤの設計を行った。⁵⁾

本機体を 4 輪や 6 輪ではなく 2 輪に設計した理由は、機体の全質量を減らして駆動性を向上させるためであり、生産過程を縮小させてコストを削減するためである。また、このタイヤは表面が滑らかであるため、土壌が緩くて

もタイヤが地表にとどまり、グラウザによって前進する駆動力を得ることができる。⁵⁾

UGV の衝撃シミュレーションには Autodesk Fusion360 の動的イベントシミュレーションを用いた。シミュレーションを行うにあたり、タイヤを鋼鉄ブロックに衝突させるという方法でシミュレーションをおこなった。タイヤの材料を ABS 樹脂に、地面の材質を鋼鉄に設定し、材料の物性値は Autodesk Fusion360 のライブラリのものを使用した。落下姿勢は、一番大きい変形が起こると推測される、2 枚のグラウザの中間が最も低い位置となるように設定した (図 13)。

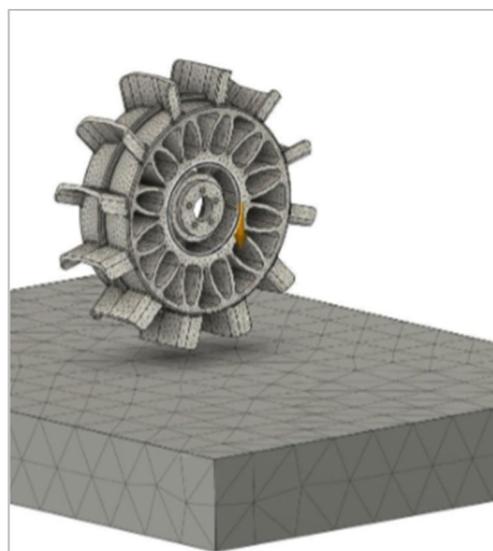


図 13 今回設計したタイヤと地面

月におけるタイヤの落下速度について、月の重力を 1.62m/s^2 、縦孔の深さを 100m と仮定して

$$v = \sqrt{2gh} = 18.0 \text{ m/s}$$

の式から、落下速度を 18.0 m/s と設定した。

シミュレーションの結果として図 14 のように変形が起こると予測された。また、衝撃時の応力分布から、衝突時にタイヤの内部形状がクッションの役割を果たすことにより、タイヤ自体は変形しつつ力を分散させると予測された。しかしながら、グラウザ自体は変形しており、着地時に破壊が起こる可能性があることがシミュレーションにより示唆された。また、グラウザ根本部分に応力集中しているため、クラック

が入る可能性があることが示唆された。そこで、シミュレーションで使用した ABS 樹脂に代わり、TPU 樹脂を試験的に使用した。TPU 樹脂は、耐摩耗性・耐屈曲性・耐油性に優れる素材である。加工性も良いことから試験的に使用するうえで性能を素早く検証することができ、地面衝突時の衝撃に耐えることができると考えた。

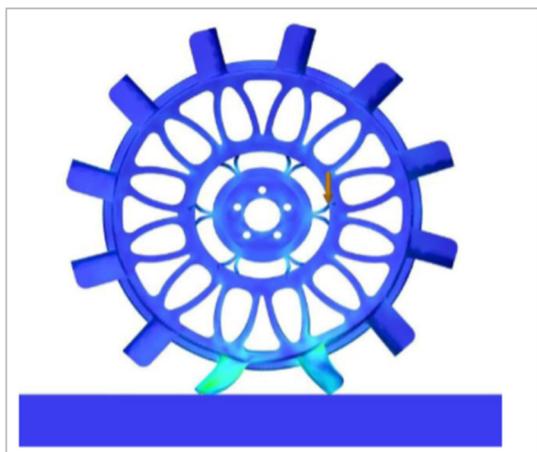


図 14 タイヤ落下シミュレーション

3. 3 LiDAR センシング

本実験では、縦孔-地下空洞内部の環境地図を作成するために、LiDAR による SLAM を用いる。SLAM は GPS などの衛星システムに依存せずに環境地図の作成と自己位置の推定ができるため、低コスト化だけでなく、高い汎用性が期待できる。SLAM に用いるセンサーは ToF やカメラなど様々ある。縦孔-地下空洞(とくに地下空洞)は画像によるセンシングが難しいので、非常に高い精度で物体までの距離が計測できる LiDAR を採用した。また、より低コストで環境地図を作成することを目的として、2D の LiDAR-SLAM を採用した。

4. 「赤猫洞」実験

実験を実施するにあたり、縦孔及び地下空洞探査ミッションを 3 つのフェーズに分け、それぞれの探査実験を分類することにした(図 15)。フェーズ 1 の縦孔へのアプローチでは、縦孔の口縁部まで接近し、縦孔口縁部及び外部からのセンシングを行う。フェーズ 2 の縦孔への降下では、縦孔内部への降下及び急斜面での走行が要求される。フェーズ 3 では地下空洞内の探査を行う。

フェーズ 2 及びフェーズ 2 に関連した探査実験を、テスト用小型 UGV を使用して行った。最初に、ライトと一般的なカメラを用いたが、400lux、1000lux のライトのいずれの場合でも殆ど観測を行うことができなかった。広角集光カメラと 1000lux 程度のライトの場合、壁面観測などに使用できるデータ獲得の見込みが立った。地下空洞想定横穴への斜面の登坂/降下実験においては、急斜面では走行が安定しなかった(図 16)。目視確認による遠隔操作によって低速度で登ることが可能であるが、自律走行の際にリアルタイムでマッピングしながら登る、或いは降下することは難度が高いことが明らかになった。暗視カメラや強力なライトを用いて進行ルートを観察しながら走行することは可能であった(図 17,18,19)。しかしながら、大きな段差等の存在を認識することができても、見た目の距離が正確ではないことから、フォトリフレクター等を用いたセンサフュージョンが必要になる。LiDAR で SLAM を行った場面を図 20~23 に示す。複雑な壁面があるポイントの SLAM の様子を図 21 に示す。物陰による計測不能の場所は殆どデータを取ることができなかったため、2D よりも 3D LiDAR を用いた方が適切であると考えられる。複数機による測定では、図 23(上:ローバーの様子、下:LiDAR マッピングの様子)の画像中の白い点がローバーの位置、黄色で囲んである点が他のローバーである。壁面が動かず他のローバーが動くことによって、お互いの位置情報を確認できることが分かった。図 24 に示す縦孔口縁部付近ポイントの探査では、口縁の先で LiDAR のデータが飛んでしまうことが崖の検出に利用できると着想した。しかしながら、多くのエラーを招く要因にもなり得るため、最適な探査手法の選択には 3D LiDAR との比較実験が必要である。

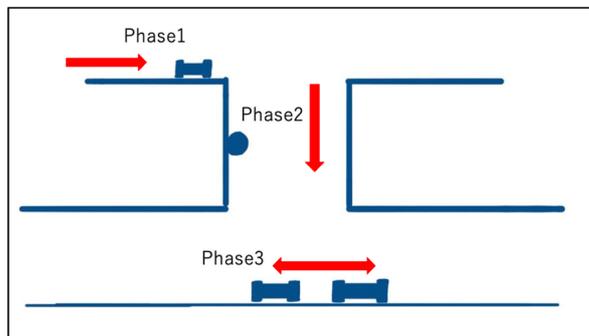


図 15 縦孔-地下空洞探査の三つのフェーズ



図 16 斜路を移動するテスト用 UGV
(上：上り、下：下り)



図 17 横穴を移動するテスト用 UGV

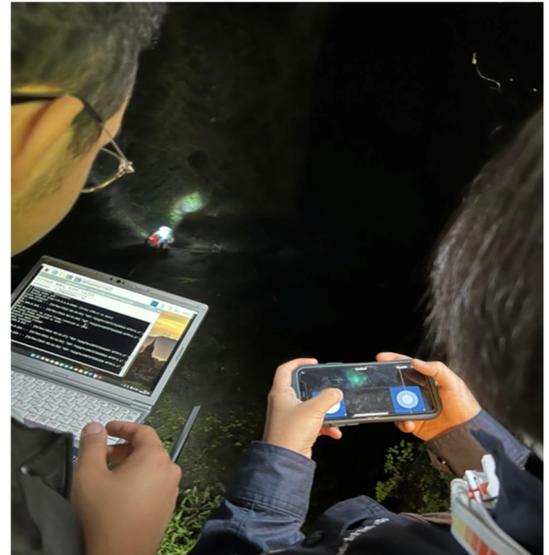


図 18 遠隔操縦モニタの映像

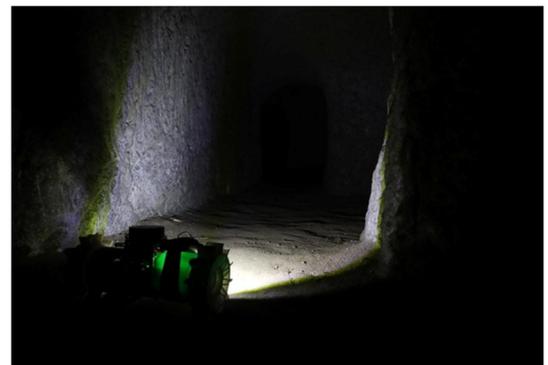


図 19 開発した CanSat の遠隔操縦走行

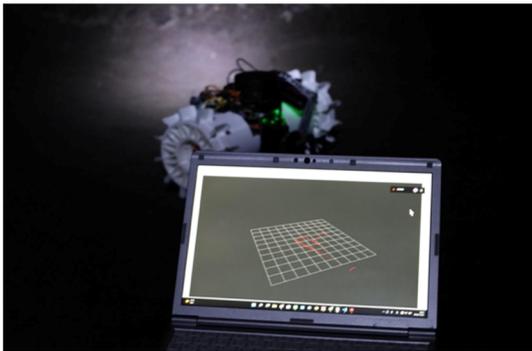


図 20 CanSat に搭載された RPLiDAR による
壁の形状測定データの受信

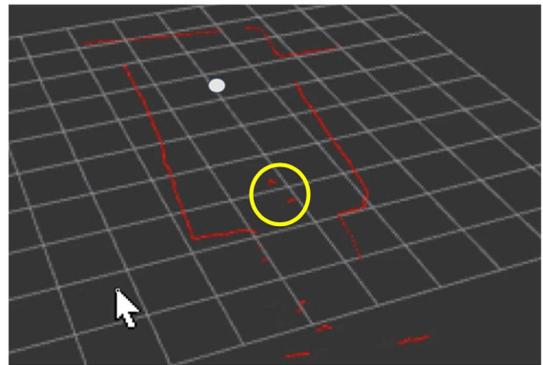


図 22 複数機 CanSat による LiDAR マッピング

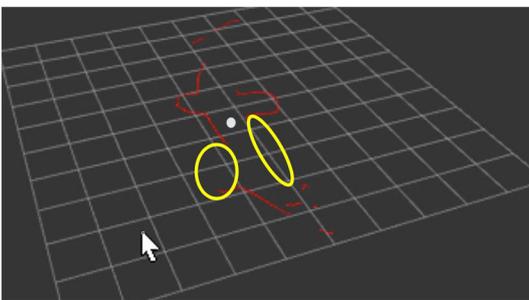


図 21 入り組んだ地形での LiDAR マッピング

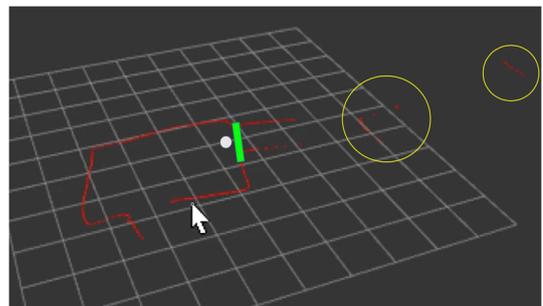


図 23 縦孔口縁部での LiDAR マッピング

5. 考察

複数機での探査について、これまで縦孔探査をターゲットにした CanSat による様々な手法が提案されている。これまでの地球上における模擬実験により、予想以上に探査が困難であることが明らかとなった。例えば、縦孔口縁部から縦孔内部全体をくまなく撮影するのはアングルの的に難しく、自然光が十分に差し込まない場所もあるため、カメラ画像によるセンシングは難しい（図 24）。



図 24 CanSat 搭載広角カメラによる撮影

上：低光度カメラ使用 下：高光度カメラ使用

探査範囲の拡張を企図するとともに、1 機体が故障してもミッションの継続を可能にするため、複数機の CanSat を用いた探査手法の実験を行うことにした。今回の「赤猫洞」実験では、月の縦孔を想定した自律群ロボットを、縦孔-地下空洞内部での環境や消費電力の観点から RP LiDAR による SLAM の群ロボット探査を実験項目に盛り込んだ。

開発した 2 輪式ローバーを使用して、「赤猫洞」の探査ポイントのマッピングを試行した。また、ウェアラブルカメラを用いたセンサフュージョンを試行した。その結果、LiDAR による相互位置の検知をより正確に行う必要があることが課題として浮上した。

今回は、ポイントごとにマップが生成したが、複雑な「赤猫洞」全地下空間の完全自律な SLAM を検証する必要がある。また、機体の改良、段差等の地形認識手法の検討も必要である。縦孔内部を想定したセンサー等によるセンサフュージョンも必要がある。

6. まとめと課題

複数の探査機による群探査では、探査機相互の位置把握、衝突時の対処、縦穴内部の複雑とされる形状での走行など、さまざまな課題が存在する。今回の実験により、2DLiDAR による互いの位置情報の把握の可能性、またデータ共有による統一地図作成を用いた自己位置推定への補助が将来的に可能であるということが示唆された。このような技術を実証するには、簡単なモデルにおける室内実験に始まり、アルゴリズムの検証を端緒として段階的にフィールド実験を行う必要がある。また、縦孔-地下空洞の内部における障害物の存在や段差、起伏などを考慮すると 2D LiDAR のみの情報では完全な自己位置推定は厳しいため、今後の展望として 2 つの手法を検討した。

一つは 3DLiDAR や Intel realsense d435i などの組み合わせにより、リアルタイムマッピングを行う方法である。この方法では信頼性における自己位置推定が可能となり、より実践的な群探査できるというメリットがあるが、これらのセンサーは大きな演算処理を CanSat におけるメイン計算機に要求するため、縦孔-地下空洞の内部の群探査には不向きのようなのである。

もう一つは簡易的なセンサーを用いたセンサフュージョン及びある程度の自己位置推定を用いた群探査を実施する手法である。CanSat 等の小型探査機に実装しやすいメリットがあるが、今後の探査において重要になる縦孔-地下空洞内部の正確な形状の把握が難しいデメリットがある。このようにそれぞれの手法には短所と長所があり、最適な手法を選択するには、それぞれを用いたフィールドテストをさまざまな地形で実施することが必要だろう。

7. UZUME 計画への展開

縦孔内部の探査、縦孔までの到達及び、外部からの探査など様々な手法が提案されているが、縦孔底部への到達手法の課題を解決しない限り、内部を探査することは難しい。以上の課題及び要求を踏まえ、3 つのフェーズにおけるフィールド実験を実施しながら様々な方式のロボットを検討し、多方面から実現に向けた取り組みを推進する予定である。具体的には、脚型ロボットによる壁面からの降下を目指しつつ、走行型ローバーによる探査手法の研究も同時に

進めることで、縦孔底部到達の手法を検討する。また、想定される険しい環境において複数の探査機による群探査のフィールド実験を行う。最終的には、有効とされる探査手法やアプローチ方法、縦孔内部で想定しうる課題などを試行・体験しながら解決していき、『UZUME 計画』の実現を推し進めていくことが目標である。

8. 地域貢献・アウトリーチ

民間の防空壕（特殊地下壕）の中で日本最大級の広さを持つ「赤猫洞」は、第二次大戦（太平洋戦争、大東亜戦争）のさなかに造られた。7つの部屋、150人程度の収容能力をもつホール、炊事場、トイレ、井戸の縦穴、それらを結ぶ通路で地下空間が構成され、真の暗闇と静寂が経験できる壕内宿泊など多面的な活用が行われている。2021年5月から一般公開されているため、壕外の「アカネコ館」を含めて体験型の研修施設として利用できる。

『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では、洞窟探査システムの性能レベルの向上だけでなく、参加研究チームのスキル・経験値を向上させる研修プログラムにも焦点をあててきた。これは地下文化遺産（Underground Built Heritage）の活用新しい方向性を拓くものであり、『UZUME 計画』アウトリーチ活動の地下壕活用事例として先駆けとなるものである。

謝辞

今回の各種探査実験では、「赤猫洞」の地元である臼杵の方々から様々なご声援・ご支援をいただいた（図25）。とくに「赤猫洞」「アカネコ館」を利用することで、多くの成果を上げることができた。また、第66宇宙科学技術講演会のOSで発表することができた。所有者の齋藤行雄氏から厚く援助していただいたからである。ここに深く感謝を申し上げる。



図25 地元ケーブルテレビ局の取材

参考文献

- 1) Mickaël Lainé, Chihiro Tamakoshi, Meven Touboulic, John Walker, Kazuya Yoshida, **Initial Design Characteristics, Testing and Performance Optimisation for a Lunar Exploration Micro-Rover Prototype**
Advances in Astronautics Science and Technology (2018)1, pp.111-117
- 2) 春山純一 河野功, 西堀俊幸, 岩田隆浩, 山本幸生, 桜井誠人, 大槻真嗣, 諸田智克, 石上玄也, 月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ.
古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画
日本惑星科学会誌 Vol. 29, No. 3, 2020
- 3) 眞部広紀, 前田貴信, 久間英樹他
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, 2016
<http://id.nii.ac.jp/1416/00000002/>
- 4) 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
<http://id.nii.ac.jp/1416/00000849/>
- 5) 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, 2018
<http://id.nii.ac.jp/1416/00000850/>
- 6) 堀江潔, 堀井樹, 大浦龍二, 眞部広紀
神奈川県横須賀市千代ヶ崎砲台跡のドローン写真測量とUGV探査の予備実験—歴史文化観光資源としての活用法検討—
佐世保工業高等専門学校研究報告第58号, pp.71-77, 2022
<http://id.nii.ac.jp/1416/00000898/>

- 6) 眞部広紀 ,久間英樹 岡本渉他
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
佐世保工業高等専門学校研究報告第 56 号,
pp.77-93,2020
<http://id.nii.ac.jp/1416/00000876/>
- 7) 阿依ダニシ,佐藤海斗,安田伊吹,館岡佳蓮,
眞部広紀
縦孔-地下空洞型類似地形における
ロボット探査シミュレーション実験
第 66 回宇宙科学技術連合講演会,予稿集
JSASS2022-4671