

大規模横穴における UGV と UAV の探査実験サイトの検討*

眞部 広紀**1, 前田 貴信**2, 岡本 渉**3

Study on UGV and UAV Exploration Experiment Sites in Large Scale Caves

Hiroki MANABE**1, Takanobu MAEDA **2, Wataru OKAMOTO**3

Key words: UGV, UAV, Exploration Experiment Sites, Cave

Abstracts

In this paper, we discuss cave exploration experiment sites for UGV and UAV.

1. はじめに

平成 20 年度 (2008 年度) に活動を開始した本研究ネットワーク『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は、洞窟の機動的・効率的な 3 次元計測探査システム開発をコアテーマとして、洞窟の現場で水中ロボット (ROV) ・地上ロボット (UGV) ・ドローン (UAV) の探査実験・計測試験を実施・検討してきた。2000 年代に月・火星の表面に発見された巨大な縦孔の底部には大規模な横穴 (地下空洞) の繋がりが推定されているが、2022 年 1 月現在、これらの縦孔-地下空洞は未知・未踏領域である。日本では JAXA の『UZUME 計画』ワーキンググループが月・火星の「縦孔-地下空洞」の直接探査に向けた研究や準備を加速させている。地球外の「縦孔-地下空洞」直接探査の前段階として、地球における基礎技術の検証と予行演習、即ち、類似地形・類似環境の探査シミュレーション実験が不可欠である。「縦孔-地下空洞」の想定探査ルートを区分した三フェーズ:

[フェーズ 1] 縦孔洞口への接近

[フェーズ 2] 縦孔内部への降下 (側壁・底部の探査)

[フェーズ 3] 地下空洞への進入 (奥部の探査)

に対して、本研究ネットワークは各フェーズの探査シミュレーション実験の準備として、対応する類似地形・類似環境の探索を進めてきた。

[フェーズ 3]の地下空洞 (横穴) (図 1, 2) は[フェーズ 1] [フェーズ 2]とは異なり、入り口近く以外は暗黒空間であり、衛星測位が使用できない非 GPS 環境である。探査シミュレーション実験の項目は、群ロボット間通信、群ドローン間通信、ロボット-ドローン間通信の基礎となる無線中継通信実験、レーザースキャナ測定実験、深度カメラによる深度画像測定実験、Laser SLAM 実験など多岐にわたる。

本稿では、本研究ネットワークの中〜大規模横穴の調査例について、UGV と UAV の[フェーズ 3]実験地としての検討を行う。

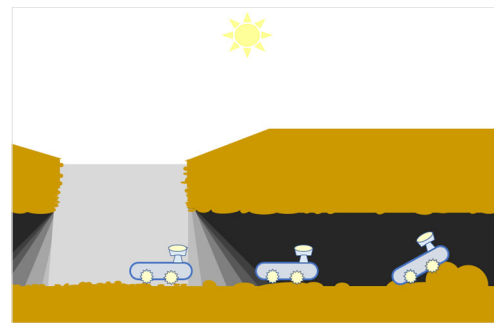


図 1 [フェーズ 3]の UGV

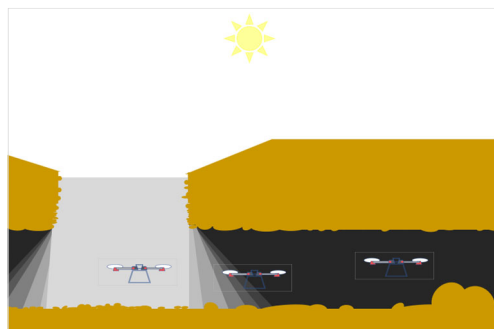


図 2 [フェーズ 3]の UAV

* 原稿受付 令和 4 年 1 月 14 日

**1 佐世保工業高等専門学校 基幹教育科

**2 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

**3 名古屋大学 全学技術センター

2. 候補地

「縦孔-地下空洞」では「縦孔」の底部に「地下空洞」(横穴)が繋がっているため、崖などの垂直壁の基底部に開口している横穴洞窟は[フェーズ 3]の局所的な類似地形とみなすことができる。

2. 1 「溝ノ口洞穴」¹⁾ (鹿児島県曾於市)

観光洞部分で UGV の走行実験・レーザー測定実験と UAV の飛行実験を実施している (図 3)。

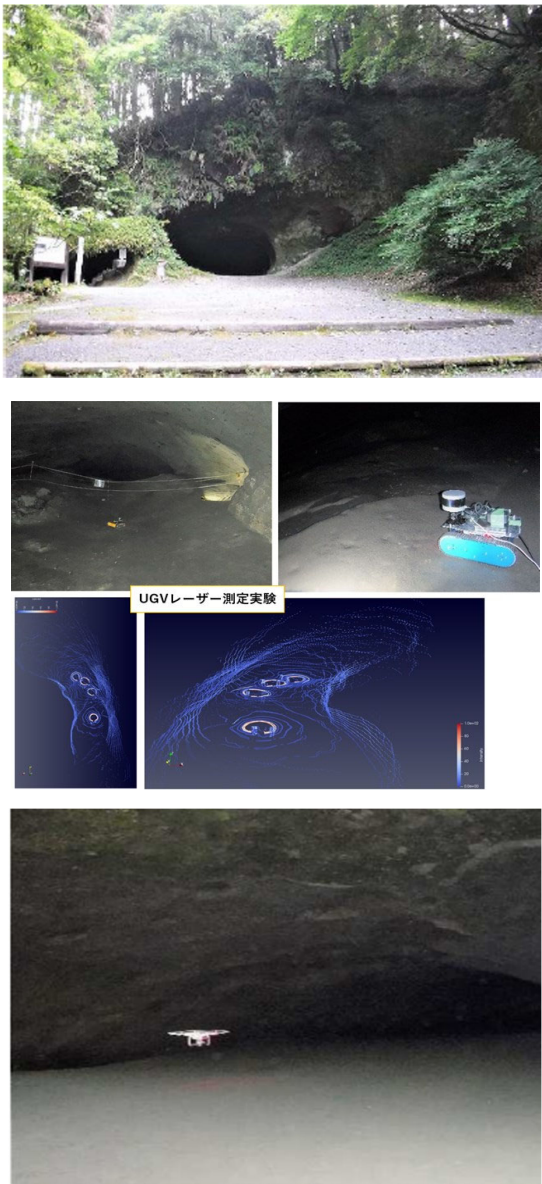


図 3 「溝ノ口洞穴」

上：洞口 中：洞内 (UGV のレーザー測定実験)

下：洞口付近 (UAV 飛行実験)

2. 2 「青龍窟」²⁾ (福岡県京都郡苅田町)

主洞東側では、ウェアラブルのレーザー測定実験、UGV の走行実験と UAV の飛行実験を実施している (図 4)。西側では、踏査のみ実施している (図 5)。



図 4 「青龍窟」主洞

上：東洞口 中上：洞口ホール

中下：UGV 走行実験 下：UAV 飛行実験



図5 「青龍窟」主洞

上：東側奥 中上：中央部
中下：西洞口奥 下：西洞口

2. 3 「神瀬石灰洞窟」³⁾ (熊本県球磨郡球磨村)
播鉢穴までの踏査と地底湖のゴムボート調査を実施している (図6)。

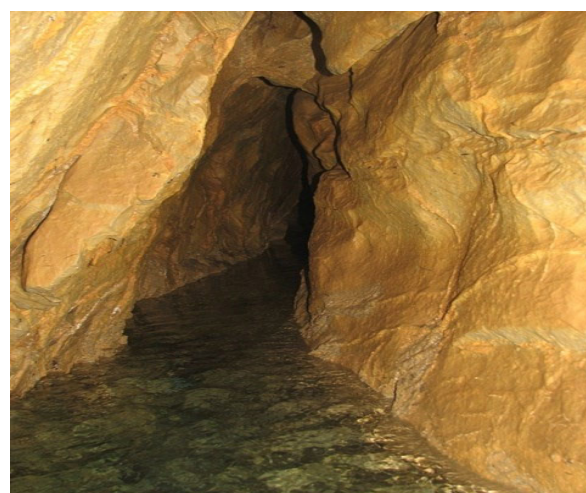


図6 「神瀬石灰洞窟 (岩戸洞)」

上：洞口 中：地底湖水面
下：地底湖奥の水没部

2. 4 「秋芳洞」(山口県美祢市)

観光洞部分の踏査のみ実施している(図7)。



図7 「秋芳洞」

上: 洞口 中、下: 洞内

2. 5 「井坑」溶岩トンネル⁴⁾(長崎県福江市)

踏査のみ実施している(図8)。

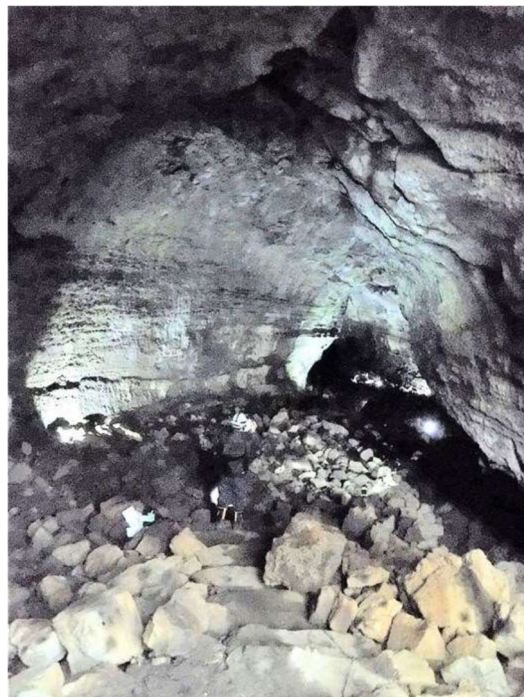


図8 「井坑」溶岩洞窟系

上: 「先不知井坑」
中、下: 「野穴」

3. 検討

既往実験を実績をもとに、前節の候補地について各実験項目の実施見込みを述べる。

3. 1 「溝ノ口洞穴」

[UGV]

(1G1) 操縦走行実験：可

∵観光部分の洞床は凹凸・ボルダーが少なく、車輪型や履帯型のUGVは走行可能。

(1G2) レーザースキャナ測定実験：可

∵空間形状が水平方向に優位であり天井高がおおむね3m以下で一定している。天井・壁面の曲面がなだらか。

(1G3)深度画像測定実験：可

∵同上

(1G4) Laser SLAM 実験：可

∵同上

(1G5) 自律走行試験：可

∵(1G1)～(1G4)が可

(1G6) 群ロボット間通信実験：可

∵空間のトレンドは直線的で、見通し範囲が大きい。

[UAV]

(1A1) 操縦飛行実験：可

∵空間形状が水平方向に優位であり天井高がおおむね3m以下で一定している。天井・壁面の曲面がなだらか。空間の中ほどで一定の高度を維持できればUAVは飛行可能。

(1A2) レーザースキャナ測定実験：可

∵同上

(1A3) 深度カメラによる深度画像測定実験：可

∵同上

(1A4) Laser SLAM 実験：可← (1A1)～(1A4)が可

∵同上

(1A5) 自律飛行試験：可

∵(1A1)～(1A4)が可

(1A6) 群ドローン間通信実験：可

∵空間のトレンドは直線的で、見通し範囲が大きい。

[UGV-UAV]

(1GA1) ロボット・ドローン間通信実験：可

∵(1G5) (1A5)が可

3. 2 「青龍窟」

[UGV]

(2G1) 操縦走行実験：条件付きで可

∵主洞東側の洞床は土・粘土で凹凸・ボルダーが少なく、車輪型や履帯型のUGVであれば走行可能。主洞の西側の洞床は凹凸・ボルダーが多く、西洞口付近は傾斜があり、車輪型や履帯型のUGVはスタックしやすい。

(2G2) レーザースキャナ測定実験：可

∵主洞東側はホール上の空間部で天井高が10m以上ある。中央部の天井高は3m程度である。天井・壁面の曲面がなだらか。主洞西側は斜洞で、天井高は6m以上ある。

(2G3)深度画像測定実験：可

∵同上

(2G4) Laser SLAM 実験：可

∵同上

(2G5) 自律走行試験：条件付きで可

∵(2G1)が条件付きで可、(2G2)～(2G4)が可

(2G6) 群ロボット間通信実験：可

∵空間のトレンドは東側～中央部、中央部～西側はそれぞれ直線的で見通し範囲が大きい。

[UAV]

(2A1) 操縦飛行実験：可

∵主洞東側は天井高が10m以上あり、天井との距離を維持できればUAVは飛行可能。中央部の天井高は3m程度であり、天井との距離をUAVは飛行可能。主洞西側は斜洞であり、天井との距離を一定に維持できればUAVは飛行可能。

(2A2) レーザースキャナ測定実験：可

∵主洞東側、中央部、西側はれぞれの見通し範囲が大きい。

(2A3) 深度カメラによる深度画像測定実験：可

∵同上

(2A4) Laser SLAM 実験：可

∵同上

(2A5) 自律飛行試験：可

∵(2A1)～(2A4)が可

(2A6) 群ドローン間通信実験：可

∵空間のトレンドは東側～中央部、中央部～西側はそれぞれ直線的で見通し範囲が大きい。

[UGV-UAV]

(2GA1) ロボット・ドローン間通信実験：可
 ∴(2G5)(2A5)が可

3. 3 「神瀬石灰洞窟」

[UGV]

(3G1) 操縦走行実験：可
 ∴洞奥の播鉢穴の手前までは、熊野座神社と堆積物の山の間
 の間の舗道を使えば UGV は走行可能。
 (3G2) レーザースキャナ測定実験：可
 ∴熊野座神社と堆積物の山の間
 の間の舗道から見通せる範囲
 であれば測定可能。
 (3G3) 深度画像測定実験：可
 ∴同上
 (3G4) Laser SLAM 実験：可
 ∴同上
 (3G5) 自律走行試験：可
 ∴(3G1)～(3G4)が可。
 (3G6) 群ロボット間通信実験：
 ∴(3G2)～(3G4)が可。

[UAV]

(3A1) 操縦飛行実験：可
 ∴洞内空間部はホール状であり、天井との距離を維持
 できれば UAV は飛行可能。
 (3A2) レーザースキャナ測定実験：可
 ∴洞内空間部の中心付近に位置すれば、ほとんどが
 見通し範囲内になる。
 (3A3) 深度画像測定実験：可
 ∴同上
 (3A4) Laser SLAM 実験：可
 ∴同上
 (3A5) 自律飛行試験：可
 ∴(3A1)～(3A4)が可。
 (3A6) 群ドローン間通信実験：可
 ∴洞内空間部の中心付近に位置させた UAV から
 他の位置の UAV を見通すことができる。

[UGV-UAV]

(3GA1) ロボット・ドローン間通信実験：
 ∴(3G6)(3A6)が可。

3. 4 「秋芳洞」

[UGV]

(4G1) 操縦走行実験：可
 ∴観光洞部分の舗道を利用できるので、UGV は走
 行可能。
 (4G2) レーザースキャナ測定実験：可
 ∴舗道から見通せる範囲は測定可能。
 (4G3)深度画像測定実験：可
 ∴同上
 (4G4) Laser SLAM 実験：可
 ∴同上
 (4G5) 自律走行試験：可
 ∴同上
 (4G6) 群ロボット間通信実験：可
 ∴隣接見通し点を舗道上に配置できる。

[UAV]

(4A1) 操縦飛行実験：可
 ∴洞口からエレベータ入口までの観光洞部分の空
 間トレンドは水平方向優位であり、大きく緩やかに
 蛇行している。天井との距離を維持できれば UAV
 は飛行可能。
 (4A2) レーザースキャナ測定実験：可
 ∴舗道上の 1 点から見通せる範囲は、その 1 点の
 直上から見通せる範囲とおおよそ同じである。した
 がって舗道から見通せる範囲はほとんど測定可能
 (4A3) 深度画像測定実験：可
 ∴同上
 (4A4) Laser SLAM 実験：可
 ∴同上
 (4A5) 自律飛行試験：可
 ∴(4G1)～(4G4)が可。
 (4A6) 群ドローン間通信実験：可
 ∴大きく緩やかに蛇行している観光洞部分では、空
 中の隣接見通し点に UAV を直列的に配置すれば可
 能。

[UGV-UAV]

(4GA1) ロボット・ドローン間通信実験：可
 ∴(4G6)(4A6)が可。

3. 5 「井坑」

[UGV]

(5G1) 操縦走行実験：条件付きで可

∴「先不知井坑」の洞床は岩石が多く、車輪型や履帯型のUGVはスタックしやすい。観光洞として舗道が整備された「通抜井坑」はUGVが走行可能。野穴」の洞床は、土・粘土で岩石・ボルダーが少ない区間と多い区間が混在する。

(5G2) レーザースキャナ測定実験：可

∴天井・壁面の曲面がなだらかであり、空間トレンドは水平方向優位で大きく緩やかに蛇行しているため、洞内各点からの見通し範囲が大きい。

(5G3) 深度画像測定実験：可

∴同上

(5G4) Laser SLAM 実験：可

∴同上

(5G5) 自律走行試験：条件付きで可

∴(5G1)が条件付きで可、(5G2)～(5G4)が可。

(5G6) 群ロボット間通信実験：条件付きで可

∴ボルダーが多い区間以外は見通し範囲が大きいので、隣接見通し点の直列的な配置が可能。

[UAV]

(5A1) 操縦飛行実験：可

∴空間トレンドは水平方向優位で大きく緩やかに蛇行しているため、天井との距離を維持できればUAVは飛行可能。

(5A2) レーザースキャナ測定実験：可

∴天井・壁面の曲面がなだらかであり、大きく緩やかに蛇行している空間トレンドであるため、洞内各点からの見通し範囲が大きい。

(5A3) 深度画像測定実験：可

∴同上

(5A4) Laser SLAM 実験：可

∴同上

(5A5) 自律飛行試験：可

∴(5A1)～(5A4)が可

(5A6) 群ドローン間通信実験：可

∴空間トレンドは水平方向優位で大きく緩やかに蛇行している。洞内各点からの見通し範囲が大きいので、空中隣接見通し点の直列的な配置が可能。

[UGV-UAV]

(5GA1) ロボット・ドローン間通信実験：条件付きで可

∴(5G6)は条件付きで可、(5A6)は可。

参考文献

- 1) 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 年 1 月)
- 2) 眞部広紀, 前田貴信, 浦田健作,
井出雄太, 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 56 号,
pp.28-33 (2015 年 1 月)
- 3) 眞部広紀, 浦田健作, 須田純一郎,
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 年 1 月)
- 4) 眞部広紀, 久間英樹, 稲川直裕, 前田貴信,
堀江潔, 大浦龍二, 岡本渉, 春山純一,
**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 年 1 月)