

UZUME 計画のための縦孔-地下空洞類似地形・環境における 多段階模擬探査実験プログラム

眞部 広紀**1, 久間 英樹**2, 稲川 直裕**3, 吉森 聖貴**4, 岡本 渉**5,
毛利 聡**6, 上寺 哲哉**7, 前田 貴信**8, 堀江 潔**1, 大浦 龍二**1,
阿依 ダニシ**9, 堀井 樹**10

Multi-stage Program of Exploration Simulation Experiments in Topographies and Environments Analogous to Vertical Holes and Underground Caverns for UZUME Project

Hiroki MANABE**1, Hideki KUMA**2, Naohiro INAGAWA**3, Seiki YOSHIMORI**4,
Wataru OKAMOTO**5, Satoshi MOHRI**6, Tetsuya UEDERA**7, Takanobu MAEDA**8,
Kiyoshi HORIE**1, Ryuji OHURA**1, Danishi AI**9, Tatsuki HORII**10

Key words: Exploration Simulation, Vertical Holes and Underground Caverns, UZUME Project

Abstracts

In this paper, we discuss multi-stage program of exploration simulation experiments in topographies and environments analogous to vertical holes and underground caverns.

1. はじめに (緒言と目的)

月や火星の「縦孔-地下空洞」(図1・2)を直接探査するシステムの策定を行うには、「縦孔-地下空洞」内部の具体的なデータや情報が必要にある。しかしながら、2022年11月現在までそれらは未踏の領域のみであり、状況は変わっていない。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』では、現実的な対応策として「縦孔-地下空洞」に類似する地球の環境において探査・計測を項目とした実験シミュレーションを行い、経験値を

上げる方向で動いてきた。洞窟や周辺地形の初動的探索や高速な3次元測量が可能なロボット・システムは、『UZUME計画』に繋がる研究である。『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では『UZUME計画』を支援・加速するために、「縦孔-地下空洞」の地球類似環境実験を多段階化・系統化して提供するプロジェクトを進めている。天然の大規模な洞窟や類似地形の候補から実験サイトの適地を選び、ロボットやドローンを使用して探査実験・計測実験を実践してきたり。近年では天然の洞窟だけでなく、人工洞窟である地下空間を有する近代遺跡の「砲台跡」をリストに加えた^{2,3)}。2021年度からは「地下採石場跡」「地下壕」「掩体壕」も加えている。『UZUME計画』などの無人機探査プロジェクトでは、「縦孔-地下空洞」の3つのフェーズPh1, Ph2, Ph3(図2)の全てを無人で連続して行うことを目標とした。

本稿では、「縦孔-地下空洞」直接探査の地球アナログ実験を多段階化する有利性・優位性について考察し、関東圏におけるシリーズ化した実験サイト群の構成例を紹介する。

* 原稿受付 令和4年10月31日

**1 佐世保工業高等専門学校 基幹教育科

**2 松江工業高等専門学校 電子制御工学科

**3 日本文理大学大学院 工学研究科 航空電子機械工学専攻

**4 日本文理大学大学院 工学研究科 環境情報学専攻

**5 名古屋大学 全学技術センター

**6 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科

**7 呉工業高等専門学校 機械工学科

**8 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

**9 東北大学大学院工学研究科

航空宇宙工学専攻1年

**10 先進的UAV研究事業Aero Flex

2. 背景

『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』では、当初 3 つのフェーズに対応するパート全てが揃ったベストな適地を 1 か所見つけ、その場所をホームグラウンドとして利用できる体制を構築する方針であった。

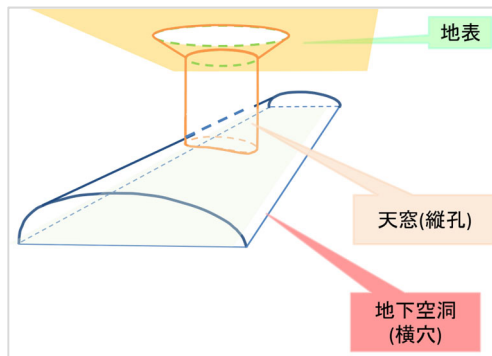


図1 「縦孔-地下空洞」の概形（模式図）

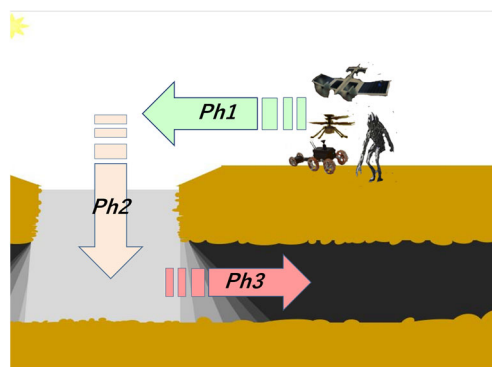


図2 3つのフェーズ（概念図）

国内で候補場所の探索・踏査・探査シミュレーション実験を10年以上にわたって実施したが、全てが揃ったベストな適地はみつけることができなかった。しかしながら、複数の場所で探査実験を実施した経験を比較検討をすることで、実験を実施する上で場所ごとの難易度に大きな差があることを強く認識した。そこで「ベストな適地」から「易～難を揃えた複数のUZUME用実験サイト」を構成することに方針を転換した。

3. 難易度順の実験サイトシリーズ（その1）

UZUME計画の対象となる縦孔-地下空洞は、溶岩洞窟と推定されている。そこで、溶岩洞窟を揃えた実験サイトシリーズA（A1→A2）を構成した。

[A1. 富士風穴（図3）]

山梨県富士河口湖町に位置し、実験を実施しやすい環境である。Ph2の径は大きいがそれに比較して深さは浅い。Ph3の地下空間（地下通路）の径は大きいが堆積した落石が多い。

Ph1: UAV（実施済, 易）, UGV（易, 見込み）

Ph2: UAV（実施済, 易）, UGV（やや難, 見込み）

Ph3: UAV（難, 見込み）, UGV（難, 見込み）

Ph1→Ph2:

UAV（実施済, 易）, UGV（やや難, 見込み）

Ph2→Ph3: UAV・UGV（難, 見込み） 段差あり

Ph1→Ph2→Ph3: UAV/UGV（難, 見込み） 段差あり



図3 「富士風穴」

[A2. 穴の原溶岩洞穴 (図4・5)]

Ph1,Ph2,Ph3 の全パートが大規模な溶岩洞窟であり、
 洞口(縦穴)の周囲に繁茂する樹木を除けば非常に条件の
 良い実験サイトである⁴⁾。

Ph1: UAV (実施済, 易), UGV (実施済, 易)

Ph2: UAV (実施済, 難), UGV (実施済, 難)

Ph3: 可 (見込み) ・未踏 (データなし, 未知)

Ph1→Ph2:

UAV (実施済, 難), UGV (難, 見込み)

Ph2→Ph3: 可 (難, 見込み) 傾斜あり

Ph1→Ph2→Ph3: 可 (難, 見込み)



図4 「穴の原溶岩洞穴」



図5 「穴の原溶岩洞穴」
 縦穴側壁と横穴開口部

4. 難易度順の実験サイトシリーズ（その2）

シリーズ A のように溶岩洞窟に限定して実験サイトを選ぶと、対象地が少ないため難易度の差が開いて、実験機のPDCAを回しにくい。そこで、溶岩洞窟に限定していたカテゴリーを石灰岩洞窟や凝灰岩洞窟に広げて、実験サイトシリーズ B（B1→B2→B3→B4）を構成した。

[B1. 溝ノ口洞穴（図6・7）]

鹿児島県曾於市財部にある谷地形の崖斜面に開口する凝灰岩洞窟（横穴）である⁵⁾。洞窟自体はPh3であるが、開口する崖斜面をPh2とみなすことができる。

Ph2: UAV（実施済, 易）, UGV（難, 見込み）

Ph3: UAV（実施済, 易）, UGV（実施済, 易）

Ph2→Ph3:

UAV（実施済, 易）, UGV（難, 見込み）

Ph1→Ph2→Ph3:

UAV（易, 見込み）, UGV（難, 見込み）



図6 「溝の口洞穴」洞口



図7 「溝の口洞穴」洞内

[B2. 富士風穴 =A1]

[B3. 牡鹿洞（図8）]

福岡県北九州市平尾台にある観光洞の石灰岩洞窟（縦穴・横穴複合型）である⁶⁾。

Ph1: UAV（実施済, 易）, UGV（易, 見込み）

Ph2: UAV（実施済, やや難）, UGV（難, 見込み）

Ph3: UAV 可（見込み）・UGV（実施済, 易）

Ph1→Ph2:

UAV（難, 見込み）, UGV（難, 見込み）

Ph2→Ph3: UAV（難, 見込み）, UGV（難, 見込み）

Ph1→Ph2→Ph3: UAV（難, 見込み）, UGV（難, 見込み）



図8 「牡鹿洞」

[B4. 穴の原溶岩洞穴=A2]

5. 難易度順の実験サイトシリーズ（その3）

シリーズBの実験サイトは、B1（鹿児島県）、B2（山梨県）、B3（福岡県）、B4（静岡県）のように所在地が国内に分散しているため、ある実験サイトが近いときは他の実験サイトが遠くなる。洞窟探査システムを研究開

発するには、一つの実験サイトにおいて複数回実験を行いPDCAを回す必要がある。実験サイトシリーズの中に遠い場所が含まれるのは、効率・利便・実験費用・機器材運搬の安全の面でデメリットが大きい。そこで、おおよそ地方単位の中で実験サイトシリーズを構成することにした。自然洞窟に限定して実験サイトを選ぶと、好適な対象地が少なくなる。自然洞窟に限定していたカテゴリを人工洞窟に広げて、関東圏における実験サイトシリーズC（C1→C2→C3→C4）を構成した。

[C1. 野島掩体壕（図9・10）]

神奈川県横浜市金沢区野島公園内の国内最大規模の掩体壕である。壕の地下空間自体はPh3であるが、開口する崖斜面をPh2とみなすことができる。

Ph2: UAV（易, 見込み）, UGV（難, 見込み）

Ph3: UAV（実施済, 易）, UGV（実施済, 易）

Ph2→Ph3:

UAV（易, 見込み）, UGV（難, 見込み）

Ph1→Ph2→Ph3:

UAV（易, 見込み）, UGV（難, 見込み）



図9 「野島掩体壕」（東側入口）



図 10 「野島掩体壕」
東入口付近のコンクリート壁区間



図 11 「野島掩体壕」素掘り壁区間開始地点

[C2. 千代ヶ崎砲台跡 (図 12・13・14)]

神奈川県南東部に位置する整備された園地であり、実験を実施しやすい環境である。Ph2 の径は大きいですがそれに比較して深さは浅く、Ph3 の地下空間 (地下通路) の径は小さい。

Ph1: UAV (実施済, 易) , UGV (易, 見込み)

Ph2: UAV (実施済, 易) , UGV (易, 見込み)

Ph3: UAV (易, 見込み) , UGV (実施済, 易)

Ph1→Ph2:

UAV (実施済, 易) , UGV (易, 見込み)

Ph2→Ph3:

可 (やや難, 見込み) 段差あり

Ph1→Ph2→Ph3:

可 (やや難, 見込み)



図 12 「千代ヶ崎砲台跡」砲座



図 13 「千代ヶ崎砲台跡」砲座口縁部



図 14 「千代ヶ崎砲台跡」地下通路

[C3. 大谷資料館地下採石場跡] (図 15)]

栃木県宇都宮市に位置する大谷石採石場の一つで、Ph1・Ph2・Ph3 の全パートが大規模であり、開口部（縦穴）の周辺が若干斜面であることを除いて、条件の良い実験サイトである。

Ph1 : UAV (実施済, 易) , UGV (易, 見込み)

Ph2 : UAV (やや難, 見込み) , UGV (易, 見込み)

Ph3 : UAV (実施済, やや難) , UGV (実施済, 易)

Ph1→Ph2:

UAV (易, 見込み) 、 UGV (やや難, 見込み)

Ph2→Ph3:

UAV: (やや難, 見込み) , UGV (やや難, 見込み)

Ph1→Ph2→Ph3:

UAV: (やや難, 見込み) , UGV (やや難, 見込み)

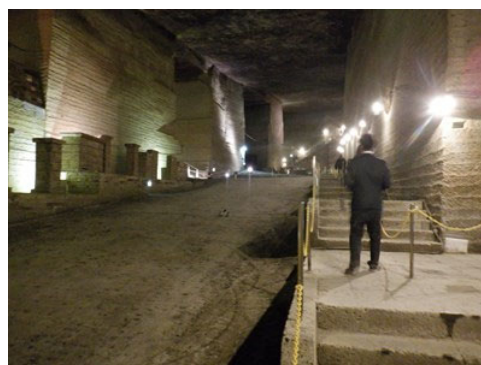
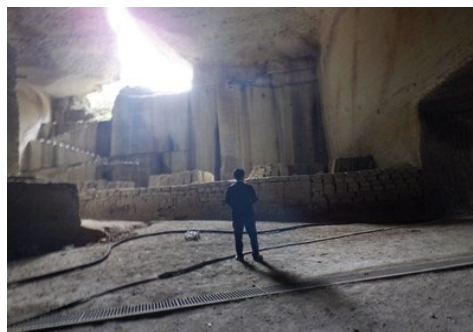


図 15 「大谷資料館地下採石場跡」

[C4. 穴の原溶岩洞穴=B4=A2]

6. まとめと課題

複数のUZUME用実験サイトに対して進入移動実験の難易度による系統化を行い、実験機のレベルをステップアップさせる多段階プログラムを作成した(図16)。『UZUME計画』に関係する実験サイトや研究機関・拠点が国内各地に分散しているため、研究機関の所在地から遠い実験サイトを使用することは、長距離移動に伴う時間・労力・費用・リスクを増やすことになる。そこで「易～難を揃えた複数のUZUME用実験サイト(地方別)」を構想し、関東圏では実験サイトシリーズCとして実現した。

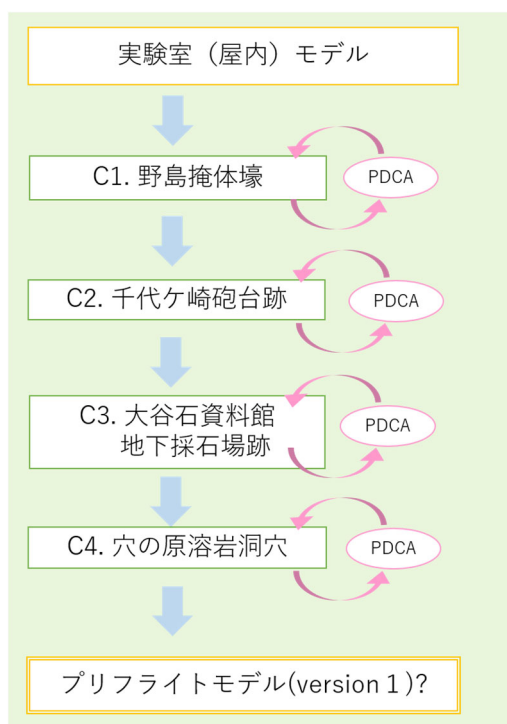


図16 実験の多段階化

2022年10月現在では、UAVとUGVの進入移動実験に関して全てのフェーズを網羅していない。今後は未実施部分の実験を、中長期的に実施していく。関西圏、東北圏、九州圏についても、シリーズCのような実験サイトシリーズを中長期的に構成する予定である。

参考文献

- 1) 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 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,
pp77-93, 2020.
- 2) 眞部広紀, 前田貴信, 堀江潔:
地下空洞を模擬する防空壕跡を活用したUGVとUAVの探査予備実験,
佐世保工業高等専門学校研究報告, 第58号,
pp105-107, 2022.
- 3) 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,
pp71-77, 2022.
- 4) 眞部広紀, 久間英樹, 岡本渉, 稲川直裕, 阿依ダニシ, 堀井樹, 堀江潔, 大浦龍二:
穴ノ原溶岩洞穴におけるUAVのレーザースキャナ測量・写真測量と深奥部探査の検討,
佐世保工業高等専門学校研究報告, 第58号,
pp86-93, 2022.
- 5) 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,
pp15-20, 2018.
- 6) 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,
pp8-11, 2016

謝辞

本調査の一部は、JSPS 科研費 22K18490 の助成を受けて実施した。