

## 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\*

眞部広紀<sup>\*\*1</sup>, 前田貴信<sup>\*\*2</sup>, 長嶋豊<sup>\*\*3</sup>, 浦田健作<sup>\*\*4</sup>, 染谷孝<sup>\*\*5</sup>,  
久間英樹<sup>\*\*6</sup>, 新部一太郎<sup>\*\*7</sup>, 長谷川均<sup>\*\*8</sup>, 岡本渉<sup>\*\*9</sup>, 春山純一<sup>\*\*10</sup>

### On Landforms Analogous to Skylights and Lava Tube Caves for Preliminary Experiments of Robotic Exploration\*

Hiroki MANABE<sup>\*\*1</sup>, Takanobu MAEDA<sup>\*\*2</sup>, Yutaka NAGASHIMA<sup>\*\*3</sup>, Kensaku URATA<sup>\*\*4</sup>, Takashi SOMEYA<sup>\*\*5</sup>,  
Hideki KUMA<sup>\*\*6</sup>, Ichitaro NIIBE<sup>\*\*7</sup>, Hitoshi HASEGAWA<sup>\*\*8</sup>, Wataru OKAMOTO<sup>\*\*9</sup>, Junichi HARUYAMA<sup>\*\*10</sup>

Key words: Lava Tube Cave, Skylight, Analogous Landforms, Robotic Exploration

#### Abstracts

In this paper, we discuss sandstone caves, limestone caves and tuff caves analogous to the skylights of lava tube caves for preliminary experiments of robotic exploration.

#### 1. はじめに

黎明期の人類に避難所・住居・安息の場として利用されていた洞窟は、現代も畏敬と崇拝、好奇心・探究心の対象になっている。闇に包まれた深奥部は不整地・高低差・屈曲・狭窄が交錯する迷宮である。外界の影響を受けにくい地下空間は、地形学・地質学・火山学・地下水文学・生物学・地理学の調査フィールドを併せ持つ。人類史や自然史の貴重なタイムカプセルであり、科学者と探検隊の継続的な尽力により一部が明らかになってきた。本研究グループは探検調査活動の容易化・効率化・高精度化をテーマとして、洞窟の移動ロボット・形状計測システムの開発に取り組むとともに、実験候補地の予備調査と難易度による系統化を進め、ロボットやシステムの開発段階に対応した実証実験を行ってきた<sup>1)2)3)4)5)6)7)8)9)10)</sup>。

2007年と2009年に火星や月の軌道探査機により、巨大な縦孔が数多く発見され、洞窟を取り巻く研究状況に大きな転換点があった<sup>11)12)13)14)15)</sup>。これらの縦孔の中にはチューブ型地下空洞の天井開口部(天窓 skylight)であることが確実視されるものもあり、月・火星の形成史や太陽系の起源に関する学術成果が期待されている。また、紫外線・宇宙線・隕石から防護された拠点基地候補地や観測機器の設置場所として有望視されている。地球外の縦孔・地下空洞の探査に向けて世界の宇宙研究機関が動き始め、日本ではJAXAを中心にUZUME計画が進められている<sup>16)17)</sup>。探査の成否を握る鍵は洞窟探検調査作業の自動化と遠隔/自律制御システムであり、その要素技術の開発と実証には地球上の類似環境におけるシミュレーション実験が不可欠である。月・火星の巨大な縦孔・地下空洞の規模を再現できる実験候補地(地球における溶岩チューブ洞窟の天窓)は見つかっていない。しかしながら、対象を砂岩・石灰岩・凝灰岩の洞窟や類似地形・部分地形まで広げれば、「巨大な規模の再現」を見込むことができる。

本研究グループでは第一段階として、実験候補地の忠実性(fidelity)の条件のうち「溶岩チューブ洞窟の天窓」を緩め、複数の実験プロジェクトにより段階的な規模の漸増を目指すことにした。本稿では、ドローンと地上ロボットの縦孔・地下空洞探査ミッションにおいて、飛行経路や移動経路の類型化を試みる。また、今までのプロジェクトで調査した洞窟や類似地形をケーススタディとして、実験可能な経路の類型範囲を抽出する。

\* 原稿受付 平成 28 年 10 月 20 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

\*\*3 佐世保工業高等専門学校 特命教授

\*\*4 大阪経済法科大学

\*\*5 佐賀大学

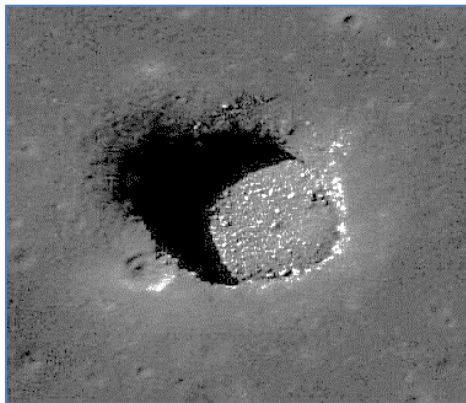
\*\*6 松江工業高等専門学校

\*\*7 島根大学

\*\*8 国士舘大学

\*\*9 名古屋大学

\*\*10 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所



(1a)

図 1 月の縦孔地形

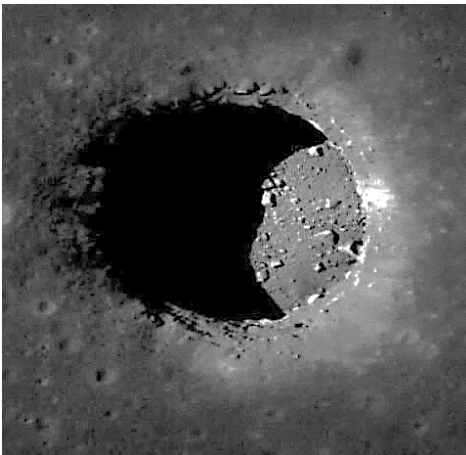
NASA Lunar Reconnaissance Orbiter Camera 画像：

(1a) 「Marius Hills の縦孔」 ID: M122584310L

(1b) 「静かの海の縦孔」 ID: M126710873R

(1c) 「賢者の海の縦孔」 ID: M123485893R

(1d) 「Lacus Mortis の縦孔」 ID: M126759036L



(1b)

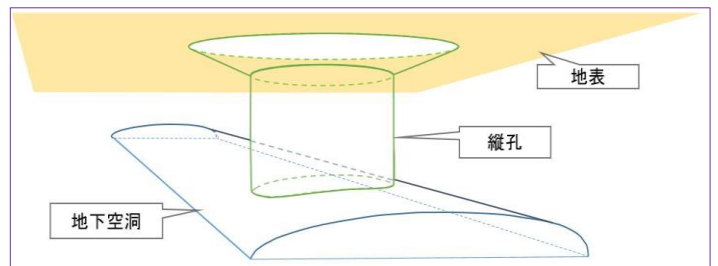
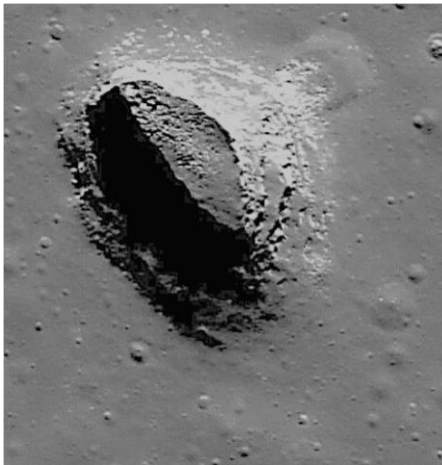
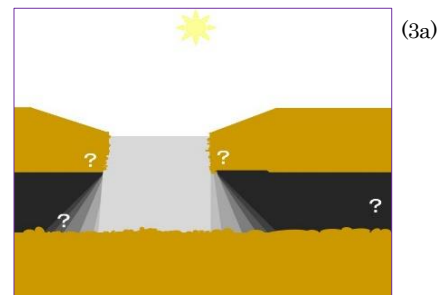


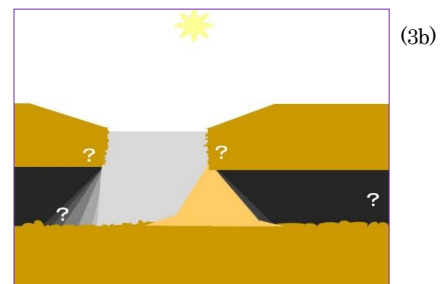
図 2 縦孔・地下空洞壁面(模式図)



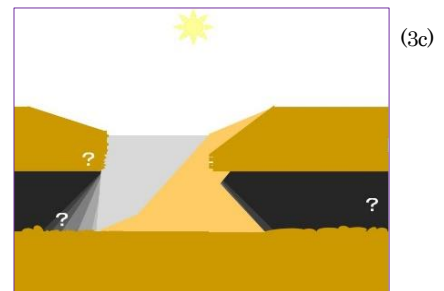
(1c)



(3a)

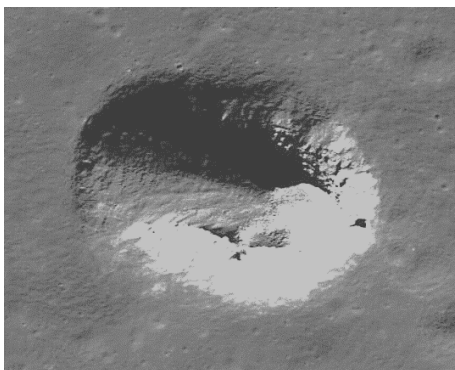


(3b)



(3c)

図 3 縦孔・地下空洞の縦断面概念図



(1d)

## 2. 背景

21 世紀に入り、JAXA の月軌道探査機 Selenological and Engineering Explorer (かぐや) や NASA の月軌道探査機 Lunar Reconnaissance Orbiter、火星軌道探査機 Mars Odyssey、Mars Reconnaissance Orbiter のカメラ画像の解析から、月や火星の表面に縦孔が数多く発見された<sup>11)12)13)14)15)</sup>(図 1)。直径は数 10 ～100 m 程度で垂直な壁面や急傾斜面を持つ。深さが直径の 1 倍以上の縦孔もある。底の様子や斜め観測により、図 2 のように地下空洞の天井部が崩落・陥没して地表に開口した「天窓」と見なされる縦孔も存在する。また、洞口辺縁の一部が崩壊してスロープを形成しているものもある(図 1c, 3b, 1d, 3c)。

地下空洞は火成起源の横穴(溶岩チューブ洞窟)であることが確実視される中で、GRAIL で観測された月重力場の精密な解析により、長さ数 10km におよぶ地下空洞の存在が裏付けられている<sup>18)</sup>。現在、確認されている地球の溶岩チューブ洞窟は幅 30m 程度のものが最大級であるのに対して、月の重力加速度に基づいた空洞の幅の上限値は数 100m～数 km 程度と推定され、地球には例のない巨大な規模の溶岩チューブ洞窟の存在を示唆している<sup>19)</sup>。今後、「溶岩チューブ洞窟」という地質学的条件に忠実に実験候補地を探しても「規模」の点では頭打ちであり、月・火星の縦孔・地下空洞の規模に及ばない可能性が大きい。一方、石灰岩地形では、ベトナム「Son-Doong Cave」(幅約 150m)やボルネオ「Good Luck Cave」の「Sarawak Chamber」(幅約 400m)の規模が月・火星の空洞の推定幅に近い。「天窓」である陥没ドリーネには、規模が月・火星の縦孔に近いものもある。また、砂岩や凝灰岩にも規模の大きい「天窓」や「溶岩チューブ洞窟」に類似した地形がある。

探査シミュレーション実験は月・火星の縦孔・地下空洞と規模の近い地形で行う方が望ましい。本研究グループでは第一段階として、「溶岩チューブ洞窟の天窓」という条件を緩め、砂岩・石灰岩・凝灰岩の洞窟や類似地形を選定して、さまざまな「規模」の実験候補地を揃えることにした。

## 3. 地形と経路の類型

本節と次節では、各候補地の実験可能な範囲を策定

するために、ロボットの移動経路を区間や節点で表現する。

### 3.1. ドローンの飛行経路

火星には非常に希薄であるが大気が存在するため、地形的な起伏や低差の影響を受けにくい UAV、中でも偵察・撮影の用途が期待される回転翼型のドローンが検討されている<sup>20)21)22)</sup>。本研究グループでは、ドローンによる縦孔・地下空洞探査の基本項目として、以下の 4 点を挙げる：

P：縦孔の上空観察・撮影<sup>8)9)</sup>

Q：遷急線の観察・撮影

R：垂直壁・オーバーハングの観察・撮影<sup>8)9)</sup>

S：地下空洞入口の観察・撮影

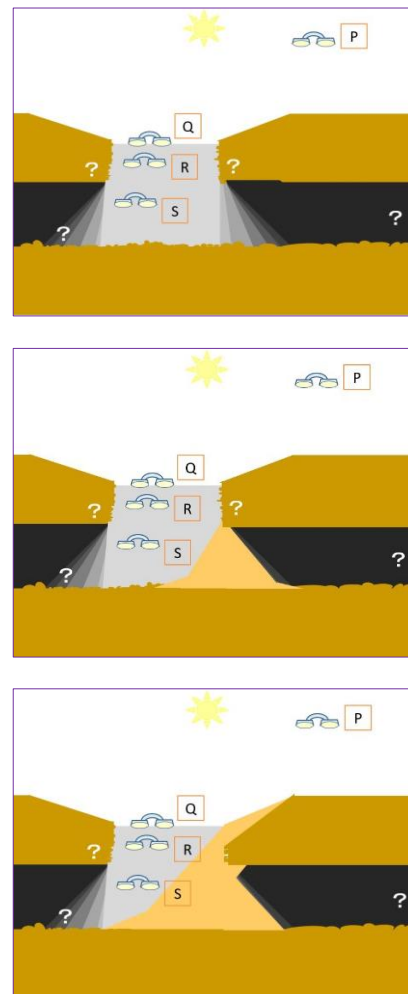
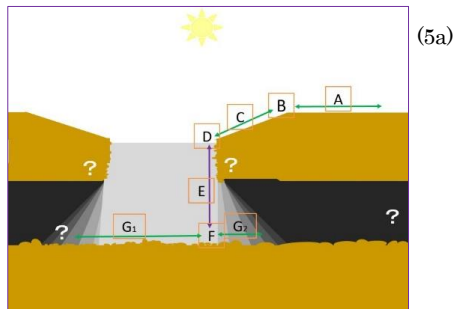


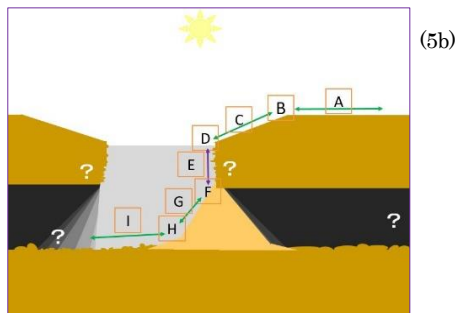
図 4 ドローンの進入飛行経路

### 3.2. 地上ロボットの移動経路

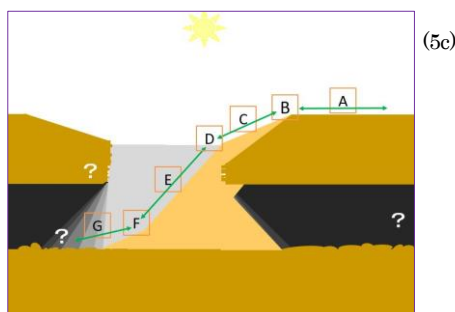
ドローンと異なり地上ロボットは地形的な起伏や高低差の影響を受けやすい。縦孔には垂直壁面やオーバーハングの部分もある(図 5a,5b の区間 E)。ここを鉛直方向に移動するときには、接地移動(ローバー型・クローラ型の走行、多脚型の歩行、匍匐型の這行)に替わる別方式の移動機構が必要になる。HAKUTO プロジェクトの preflight model (Tetris)<sup>23)</sup>や NASA Jet Propulsion Laboratory の Axel Rover<sup>24)</sup>の探査ミッション計画では、テザーケーブルを伸展して懸垂下降する方式を採用している(図 6c,6d)。ロボットの移動経路に鉛直区間を含まない場合(図 5c)は、HAKUTO プロジェクトの flight model<sup>25)</sup>のように従来の接地移動方式を使用することもできる(図 6a, 6b)。鉛直区間



(5a)



(5b)



(5c)

図 5 縦孔・地下空洞における  
地上ロボットの移動経路

の有無は、ロボットにテザーケーブル懸垂機構等を装備する/しないの選択に直結する。

ロボットの移動経路について下記の条件を課せば、図 5 のように縦断面図(展開縦断面)の中で模式化できる：

- [i] 出発点は縦孔辺縁部近くの地表に置く
- [ii] 到達点は縦孔の底に置く  
(地下空洞の入口付近が望ましい。)
- [iii-1] 接地面の傾斜角が  $90^\circ$  未満のとき、移動方向は傾斜方向から大きく外れない
- [iii-2] 接地面の傾斜角が  $90^\circ$  (垂直壁)のとき、移動方向は鉛直方向から外れない
- [iii-3] ロボットに最寄りの壁面の傾斜角が  $90^\circ$  以上 (オーバーハング)のとき、移動方向は鉛直方向から外れない

※ [iii-2] [iii-3] の経路部分が鉛直区間

上記の条件をみたす移動経路は無数にあるが、鉛直区間の有無によって、縦孔は 2 つに大別できる：

I 型：鉛直区間を含まない経路がある (図 5c)

II 型：すべての経路が鉛直区間を含む (図 5a,5b)

「Lacus Mortis の縦孔」(図 1d)は I 型<sup>26)</sup>であり、「Marius Hills の縦孔」(図 1a)「静かの海の縦孔」(図 1b)「賢者の海の縦孔」(図 1c)は II 型である。

### 4. 候補地の実験可能範囲

探査シミュレーション実験は期間をあけて複数回行うため、時間・費用がかからない実験場所が望ましい。佐世保工業高等専門学校の所在地(長崎県佐世保市)を中心にした九州・沖縄の実験候補地の例(図 7～19)について、以下の形式で実験可能範囲(記号は図 5 に対応)を表す：

場所の名称(構成する岩石の種類、図番号)、所在地、洞窟の形状(横穴、斜洞、縦穴等)、実験可能範囲

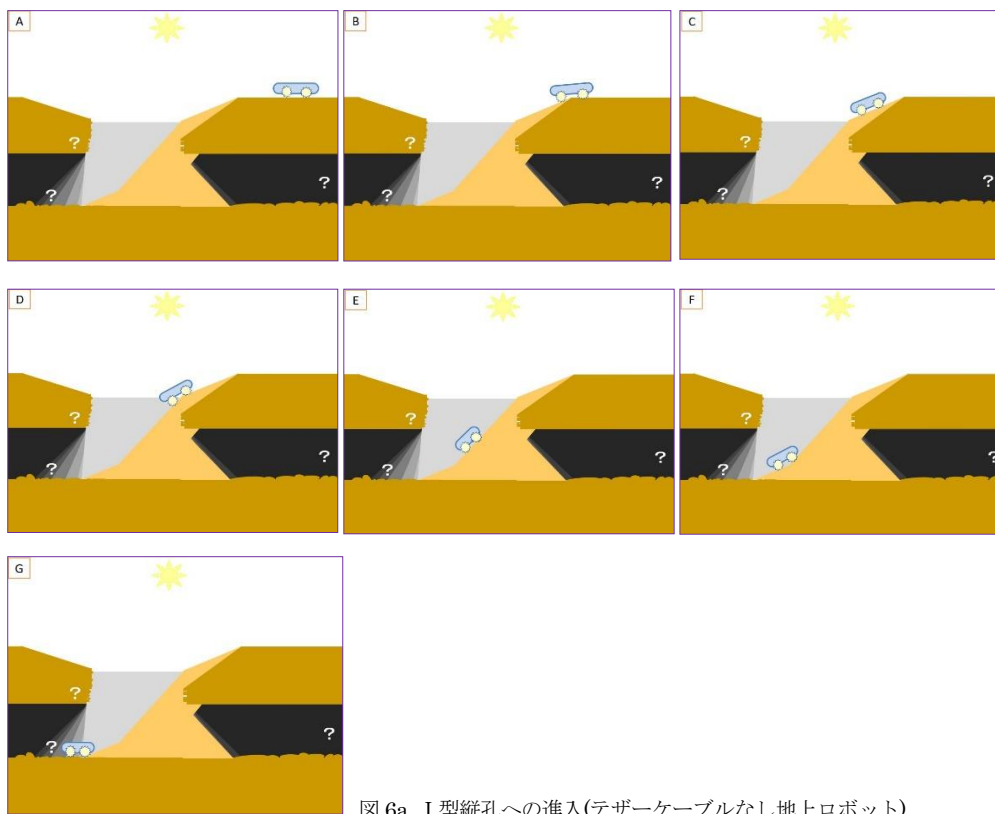


図 6a I 型縦孔への進入(テザーケーブルなし地上ロボット)

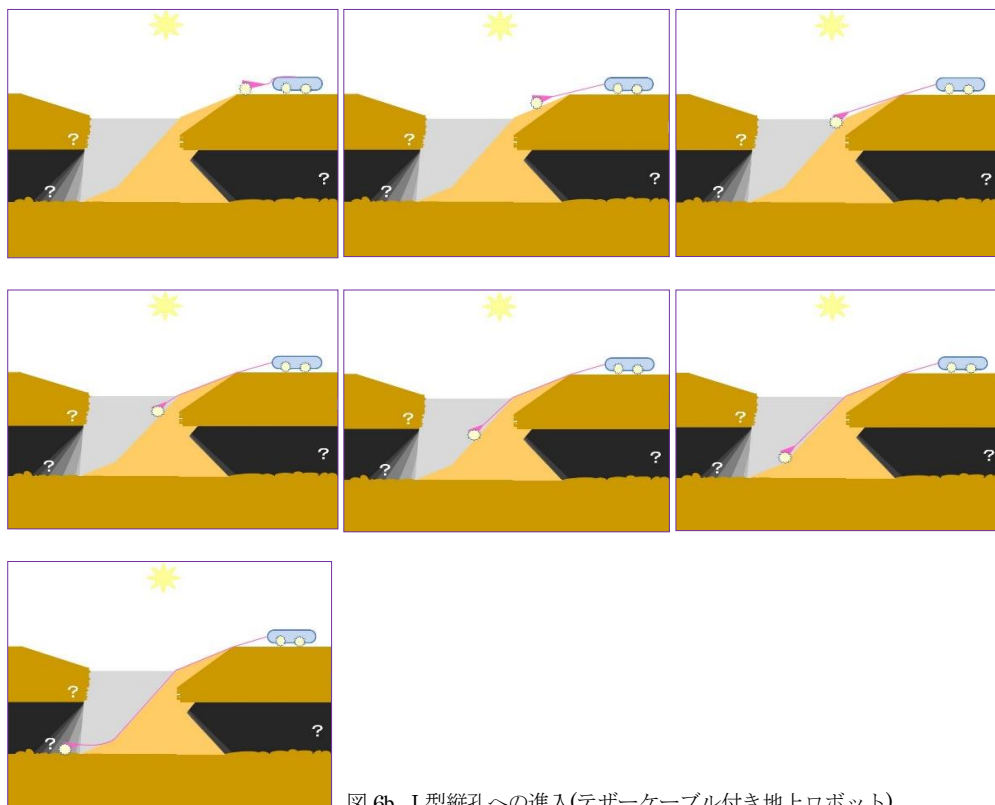


図 6b I 型縦孔への進入(テザーケーブル付き地上ロボット)



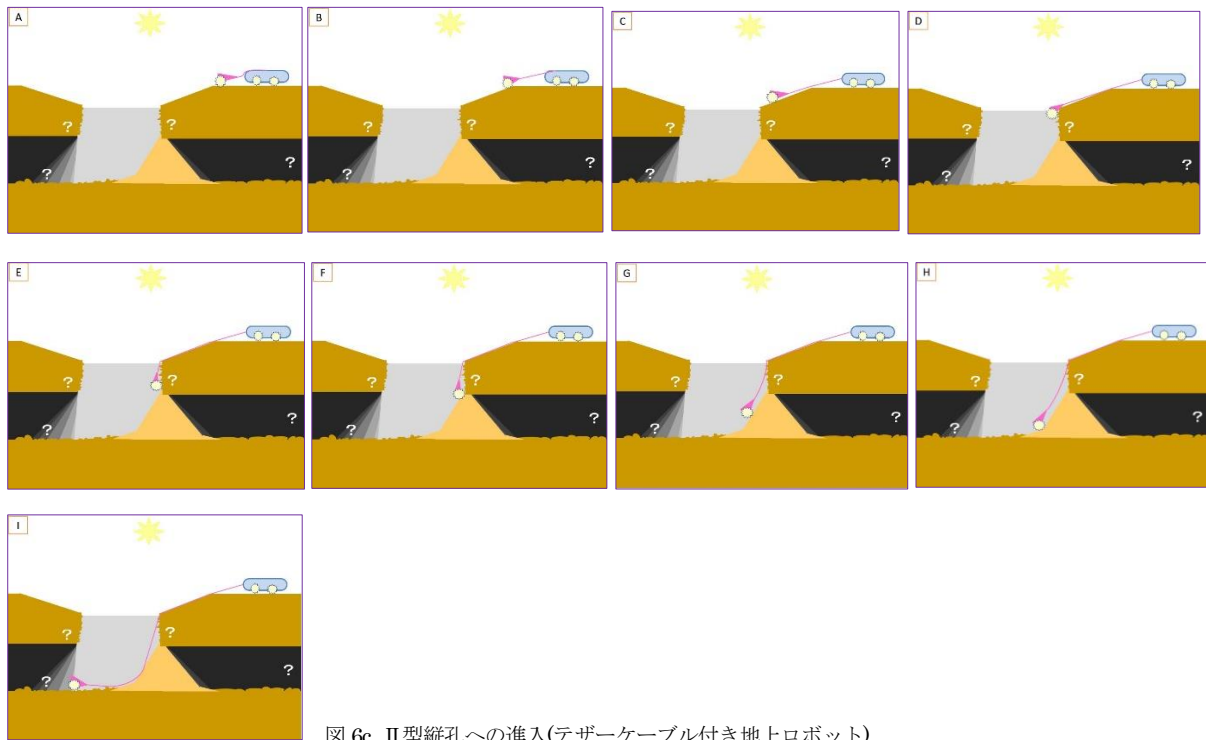


図 6c II型縦孔への進入(テザーケーブル付き地上ロボット)

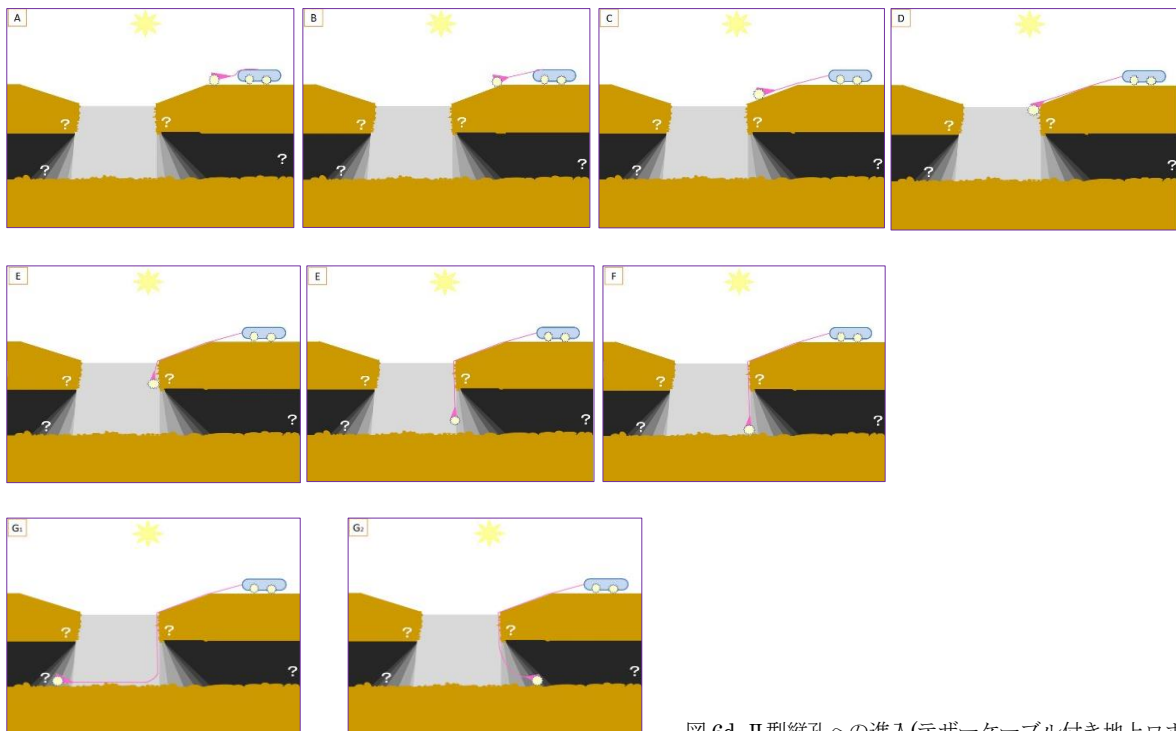


図 6d II型縦孔への進入(テザーケーブル付き地上ロボット)

(1)「泉福寺洞窟」(図7、砂岩)

長崎県佐世保市瀬戸越

横穴(岩陰)

ⅡBCDEFG<sub>2</sub>、ⅡQR

(2)「御橋観音石橋」(図8、砂岩)

長崎県佐世保市吉井

天然橋(天窓の一部)

ⅡBCDEFG<sub>1</sub>、ⅡQR

(3)「牡鹿洞」(図9、石灰岩)<sup>4)5)8)9)</sup>

福岡県北九州市平尾台

縦穴+横穴

ⅡBCDEF(G<sub>1</sub>+G<sub>2</sub>)、ⅡPQRS



図7 「泉福寺洞窟」



図8 「御橋観音石橋」



図9 「牡鹿洞」



(4)「青龍窟」主洞西洞口側(図 10、石灰岩)<sup>4)5)8)9)</sup>

福岡県荊田町(平尾台)

縦穴+横穴

Ⅱ BCDEF( $G_1+G_2$ )、Ⅱ PQRS

(5)「青龍窟」主洞東洞口側(図 11、石灰岩)<sup>4)5)8)9)</sup>

福岡県荊田町(平尾台)

縦穴+横穴

Ⅱ BCDEF( $G_1+G_2$ )、Ⅱ PQRS



図 10 「青龍窟」主洞西洞口側

図 11 「青龍窟」主洞東洞口側



(6) 「大瀬洞」(図 12、石灰岩)

熊本県球磨村大瀬

横穴(洞口、挿り鉢穴(半水没))+斜洞(水没)

I ABCDEFG、I PQRS

(7) 「岩戸洞」(図 13、石灰岩)<sup>1)</sup>

熊本県球磨村神瀬

横穴(洞口、挿り鉢穴(半水没))+斜洞(水没)

I ABCDEFG、I PQRS

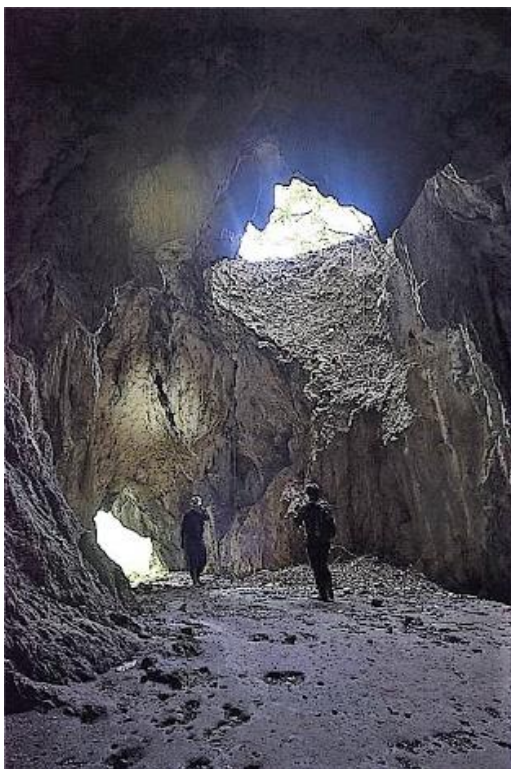
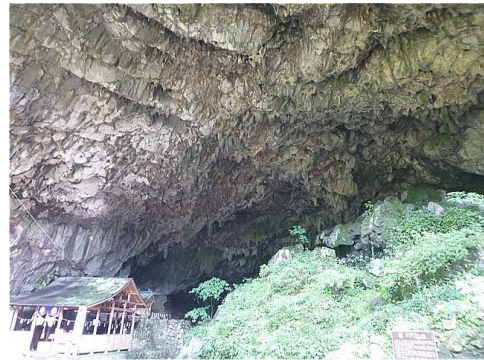


図 12 「大瀬洞」

図 13 「岩戸洞」



(8)「溝ノ口洞穴」(図 14、凝灰岩)

鹿児島県曾於市財部

横穴

ⅡFG<sub>1</sub>、ⅡPQRS

(9)「浅間湾屋洞穴」(図 15、石灰岩)

鹿児島県徳之島天城町

縦穴+横穴(水没)

ⅡBCDEF、ⅡPQR

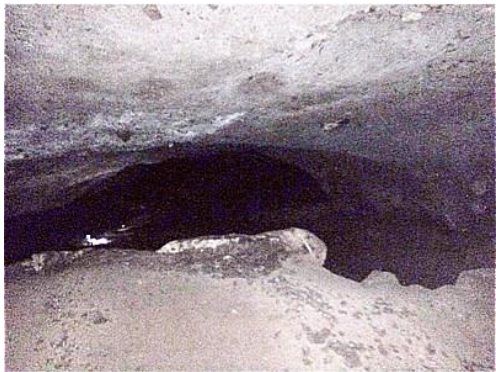


図 14 「溝ノ口洞穴(岩穴)」

図 15 「浅間湾屋洞穴」



(10)「陸軍病院山城本部壕」(図 16、石灰岩)

沖縄県沖縄島八重瀬町

縦穴+横穴

I ABCDEF( $G_1+G_2$ )、I PQRS

(11)「ティラスガマ」(図 17、石灰岩)

沖縄県沖縄島読谷村都屋

縦穴+横穴

II ABCDEF( $G_1+G_2$ )、II PQRS



図 16 「陸軍病院山城本部壕」



図 17 「ティラスガマ」





図 18 「鍋底」

(12)「鍋底」(図 18、石灰岩)<sup>10)</sup>

沖縄県宮古島市下地島

縦穴(半水没)+横穴(水没)

I ABCDE、I PQR、II ABCDE、II PQR

(13)「通り池」(図 19、石灰岩)<sup>10)</sup>

沖縄県宮古島市下地島

縦穴(半水没)+横穴(水没)

II ABCDE、II PQR

#### 4. まとめ

洞窟学を中心とした理学側の要請から、石灰洞や玄武岩溶岩洞のカテゴリーの中で、規模が大きい洞窟のレーザー計測、精密な3次元点群モデル作成、アーカイブ化を目的とする分野横断プロジェクトを本研究グループは進めていた<sup>5)6)7)8)</sup>。近年、地球外洞窟の探査ロボットシステムをテーマとする工学側の要請が加わり、洞窟と周辺地形の形状データを探査シミュレーション実験用の“研究資源”として利用する道が拓けてきた。本稿では、“研究資源”を整備する拡大プロジェクトの立ち上げを報告した：

月や火星に発見された縦孔・地下空洞のロボット探査に向けて、探査シミュレーションの予備実験を行うために、「溶岩チューブ洞窟の天窗」の類似地形から実験候補地を選定した。地上ロボットの移動経路に含まれる鉛直区間の有無を基準に候補地を分類して、ドローンと地上ロボットの実験可能範囲を評価した。これらの評価は現場確認踏査による所見に基づく。



図 19 「通り池」(一の池・二の池)

#### 5. 課題

- ①候補地の「規模」を段階的に大きくしていくために、海食洞や急崖地の類似地形も検討する。
- ②「規模」が大きい候補地の全体像を撮影するために、ドローンによる空中撮影を行う。作業の効率化を図り、GPS 制御によるオートパイロット法を導入する。
- ③候補地の定量的解析と評価を行うために、撮影した画像から写真計測により3次元モデルを作成する。

上記の各課題に対する実績・準備状況は以下の通りである：

①該当場所の選定が済み、下見・予備調査のプロジェクトシリーズを計画している。1 回目は関東地方以西の該当場所を対象とする。

②本研究グループ全体として複数機のマルチロータードローンを保有し、サンゴ礁浅海域の GPS 制御オートパイロット法で空中撮影を実施済みである<sup>27)</sup>。

また、縦穴上空からの空中撮影にも成功している<sup>89)</sup>。

③写真計測ソフトウェアの導入を準備している。

## 6. 今後の展開

火星探査の分野では複数機の UGV(ローバー)と UAV(ドローン)による協同ミッションの検討が開始されている<sup>28)</sup>。本研究グループでは、洞窟探査に対応できる地上ロボット(ローバー)とドローンの研究を進めてきた<sup>89)</sup>。今後は「ローバー+偵察用ドローン」を基本的な枠組みとした火星の縦孔・地下空洞探査ミッションを目標に設定して、シミュレーション実験を実施する。

## 謝辞

本研究はキャノン財団助成プログラム「理想の追求」第 2 回『陸海域カルスト水文系の追跡によるロボット探査とマッピング』(代表 眞部、平成 22~24 年度)の助成費の一部、科学研究費補助金(基盤 C(一般))『水没によって閉鎖された空間環境を探索する水中・非水中ロボット複合システム』(代表 眞部、平成 25~27 年度)と『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、平成 28~30 年度)の補助の一部により進めました。

沖縄本島の候補地を踏査するにあたり、NPO 法人沖縄鍾乳洞協会理事長の山内平三郎氏に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, 浦田健作, 須田淳一郎,  
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 (2010)

2) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝, 下尾浩正,  
前田貴信, 三宅飛翔, 柴田裕貴, 原崎芳加, 原田明,  
白川知秀, 福岡聡紀:

**水中洞窟系のロボット探査と**

**ソナーによる形態計測の予備実験,**

佐世保工業高等専門学校研究報告第 49 号 pp.51-64 (2013)

3) 眞部広紀, 前田貴信, 井手雄太, 市丸智裕,

**地上移動型ロボットを使用した**

**計測システムの開発と三次元モデル,**

第 40 回日本洞窟学会学術講演会(七釜大会) (2014)

講演要旨集 pp19-20,

4) 眞部広紀, 前田貴信, 市丸智裕, 井手雄太,

**飛行ロボットを用いた洞窟測量に関する基礎研究**

**—小型計測システムの開発と 3 次元環境地図作成—,**

第 40 回日本洞窟学会学術講演会(七釜大会)

5) 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)

6) 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

7) 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)

8) 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)

9) 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)

10) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 山本祐二,

近藤正義, 岡本渉,

**宮古諸島下地島の西沿岸域における**

**アンキアライン陥没ドリーネ群の予備調査**

佐世保工業高等専門学校研究報告第 53 号, (2016)

11) 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,

12) J. Haruyama, et al.

**Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras,**

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L21206, 2009,

13) J. Haruyama, et al., 2010,

**NEW DISCOVERIES OF LUNAR HOLES IN MARE TRANQUILLITATIS AND MARE INGENIT.**

41st Lunar and Planetary Science Conference (2010) #1285

13) J. Haruyama et al., 2012, In: V. Badescu, (Eds.),

**Moon-Prospective Energy and Material Resources,**

Springer, pp.139

14) G.E. Cushing

**CANDIDATE CAVE ENTRANCES ON MARS**

Journal of Cave and Karst Studies, v. 74, no. 1, p. 33–47. 2012

15) G. E. Cushing and C. H. Okubo,

**The Mars Cave Database**

2nd International Planetary Caves Conference (2015) #9026

16) 春山純一, 西堀俊幸, 岩田隆浩, 山本幸生, 河野功, 大槻真嗣, 嶋田和人, 桜井誠人, 小林憲正, 西野真木, 月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ

**月火星の縦孔・地下空洞探査 UZUME 計画のめざすもの,** 第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集(2016) #1C11

17) 河野功, 春山純一, 岡田慧, 星野聖, 大山英明, 床井浩平, 若林靖史, 大槻真嗣, 桜井誠人:

**月火星縦孔地下空洞探査(UZUME)システムの研究,** 第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2016) #1C07

18) Sood et al.

**Detection of Buried Empty Lunar Lava Tubes**

**Using GRAIL Gravity Data,**

2nd Intl. Planetary. Caves Conf., 20-23 October, (2015) #9016,

19) D. M. Blair, L. Chappaz, R. Sood, C. Milbury, H. J. Melosh, K. C. Howell, and A. M. Freed.

**DETERMINING THE STRUCTURAL STABILITY OF LUNAR LAVA TUBES.**

46th Lunar and Planetary Science Conference (2015) #2174

20) L.A.Young, E.W. Aiken, V. Gulick, R.Mancinelli, G.A.Briggs,

**Rotorcraft as Mars Scouts,**

2002 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, March 9-16,

21) L.A. Young, E.W. Aiken, M.R. Derby, R. Demblewski, J. Navarrete

**Experimental Investigation and Demonstration of Rotary-Wing Technologies for Flight in the Atmosphere of Mars**

58th Annual Forum of the American Helicopter Society, International, Montreal, Canada, June 11-13, 2002.

22) 野玉達郎, 梅崎修一, 砂田茂, 米澤 宏一, **火星探査用マルチロータ機の可能性検討**

第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集(2016) #4C12,

23) 田中利樹, 吉田和哉, Britton Nathan 他, **HAKUTO プロジェクトにおける月面縦孔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 回宇宙科学技術連合講演会講演集(2015) #3D08,

24) K. L. Mitchell, R. C. Anderson,

**EXPLORING PITS AND CAVES WITH THE AXEL EXTREME TERRAIN ROVER.**

2nd International Planetary Caves Conference (2015) #9022

25) 吉田和哉, 及川拓人, Nathan Britton, John Walker, 清水 敏郎, 田中利樹, 古友大輔, 袴田武史

**HAKUTO ローバーのフライトモデル開発状況**

第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集(2016) #2C08

26) Ik-Seon Hong, Yu Yi, Jaehyung Yu, Junichi Haruyama,

**3D Modeling of Lacus Mortis Pit Crater with Presumed Interior Tube Structure,**

Journal of Astronomy and Space Sciences 32(2), 113-120 (2015)

27) 長谷川均,

**UAV(自律型飛行体)を使った高解像空中写真の撮影と活用 — サンゴ礁浅海域での事例 —**

国土大学地理学報告 No.22 (2014)

28) J.Matthaei, T.Krüger, S.Nowa and U.Bestmann,

**Swarm Exploration of Unknown Areas on Mars Using SLAM**

International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV2013) 17-20 September 2013