

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：57301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06206

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Utilization of 3D model and measurement system for cave topography including extraterrestrial vertical holes and underground caverns

研究代表者

真部 広紀 (Manabe, Hiroki)

佐世保工業高等専門学校・基幹教育科・准教授

研究者番号：10249881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：地球外天体である月・火星の縦孔-地下空洞は未知の極限環境であり、深奥部は数多くの困難が予想される。探検調査手法・要素技術の事前評価研究は不可欠かつ急務である。本研究は縦孔-地下空洞の形状把握と探査シミュレーションを目的とし、進入ミッションを3フェーズ[(1)縦孔洞口の口縁部/中心直上まで接近、(2)縦孔内部に降下進入、(3)縦孔底から横穴に進入]に分け、地上走行ロボットやドローンをプラットフォームとした探査システムの開発と検証、要素技術の検討を各フェーズごとに行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

21世紀初頭、月・火星の地表面に複数の巨大な縦孔が発見され、底部に続くと推定される地下空洞(横穴)の科学的証左が積み重なった。洞窟は地球科学から惑星科学の対象になり、宇宙基地の有望な候補地になった。壁面の溶岩は月科学・火星科学のフィールドとして期待されている。地下空洞は放射線・隕石から防護されたシェルターであり、有人基地の建設地として有望視されている。縦孔-地下空洞の直接探査・計測システムを具現化すれば、関連学術分野に横断的な研究基盤を提供できる。また、3次元モデルは地下拠点の建設基盤として貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Extraterrestrial Caves, vertical holes, underground caverns of the Moon/Mars are unknown extreme environment, and many difficulties are expected in the deep interior. Prior evaluation research on exploration methods and elemental technologies for vertical holes and underground caverns is indispensable and urgent. This study divides the approach mission into three phases for the purpose of morphometry and exploration simulation: (1) approach to the rim of the vertical cave entrance/just above the center, (2) descend into the vertical hole, (3) enter into the underground cavern from the bottom of the vertical hole. The development and verification of the exploration system using the ground robot and the drone as a platform, and the study of the elemental technology were conducted in each phase.

研究分野：数学(幾何学、ゲージ理論)、洞窟探検調査

キーワード：洞窟 計測 探査 シミュレーション 縦孔-地下空洞 ロボット ドローン 探検

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

現在のロボット技術や形状測定技術にとって、未知環境の洞窟を直接探査することは挑戦的な課題である。洞窟の複雑で立体的な空間構造を把握・記録するには、3次元モデルが不可欠である。本研究グループでは、機動的かつ効率的な洞窟計測探査システム開発を中心テーマに設定し、洞窟の現場において水中ロボット・地上ロボット・ドローンを使用した探査実験・計測試験を実施し、性能検証を行ってきた。

軌道探査機によるリモートセンシング技術の発達のおかげで、21世紀に入ると地球外天体の地表地形の詳細情報を得ることが可能になった。日本のSELENE(かぐや)、米国のLROやMROの地形カメラ画像解析によって数多く発見された月・火星の巨大な縦孔は、洞窟の学術価値や利用価値を大きく飛躍させる転換点となった。地球の溶岩チューブ洞窟(横穴)の天井に開口した「天窓」と類似していることから、「縦孔は天窓」という仮説とともに地下空洞(横穴)の存在が推定された。地形カメラの斜め視画像や重力分布の異常やレーダサウンダの電波反射面の解析から、地下に伸びる長大な地下空洞の存在に関する科学的証左が積み重ねられている。月・火星の地下空洞内は温度変化が少なく放射線・紫外線・隕石・デブリから防護された天然のシェルターであり、有人基地や生活拠点の建設地として有望視されている。洞窟は地球科学から惑星科学の研究対象に、地球の未踏地探検から月開拓・火星開拓の対象に拡大されたのである。しかしながら、地表面から地下をリモートセンシングしても、地下空洞の情報の詳細さには限界がある。

限界を突破するために、「縦孔-地下空洞」を進入・直接探査・計測することが必要になる。これらの作業を自動的かつ効率良くロボタストに行うことが可能になれば、地球科学の関連学術分野だけでなく固体惑星科学の関連学術分野に横断的な研究基盤を提供できる。また、洞窟形状の3次元測定・測量の研究と3次元モデル作成は、「縦孔-地下空洞」に有人基地・生活拠点を建設する基盤資料として貢献できる。

2. 研究の目的

月・火星の「縦孔-地下空洞」への進入・直接探査・計測が可能な自律システムを目指すため、本課題では、地球の「縦孔-地下空洞」の類似環境・類似地形における探検調査手法の検討・検証、要素技術の事前評価、探査シミュレーションを研究の目的とした。

3. 研究の方法

地球の「縦孔-地下空洞」の類似環境・類似地形に限らず、洞窟は洞口から深奥部まで不整地であり、数多くの困難・障害を包含する極限環境である(下図)。



左上：溶岩チューブ洞窟入口

(「富士風穴」斜め上方から撮影)

上：溶岩チューブ洞窟(「先不知井坑」)

左：天窓と溶岩チューブ洞窟入口

(「野坑」真横から撮影)



実験の準備段階として、候補場所の調査（撮影や測量、3次元モデル化）を行い、候補場所を難易度別にストックした。さらに、探査ミッションを3つのフェーズ：

- (1) 着陸機から分離した探査システムが縦孔洞口の口縁部/中心直上まで接近
- (2) 探査システムが縦孔内部に降下進入
- (3) 探査システムが縦孔底から横穴に進入

に分けて、ドローンや地上ロボットをプラットフォームとした探査システムを構築し、実証実験を計画・実行する。

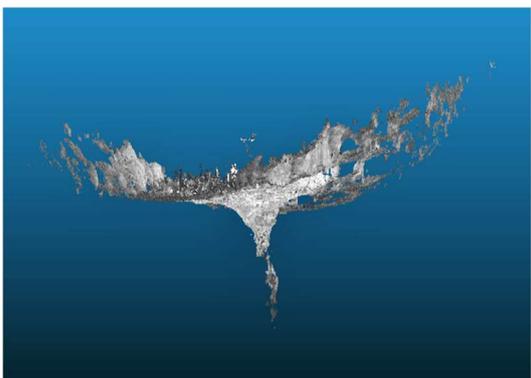
4. 研究成果

フェーズ毎に探査システムの実験を行い、概ね所期の性能を実証することができた。

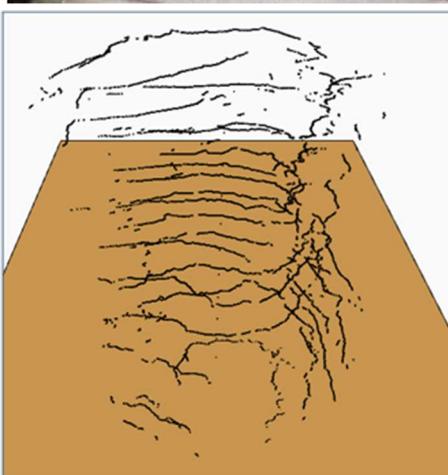


「平尾台」ドローン写真測量
上：平尾台「牡鹿洞」上空
中上：「牡鹿洞」～「虚無僧穴」3次元モデル
中下：洞口を含むドリーネ3次元モデル
下：洞口3次元モデル

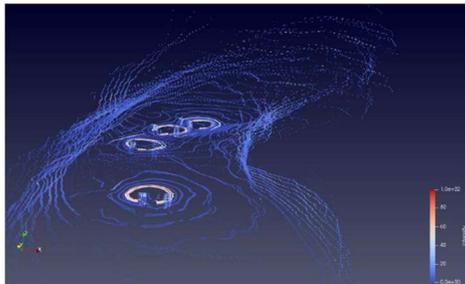
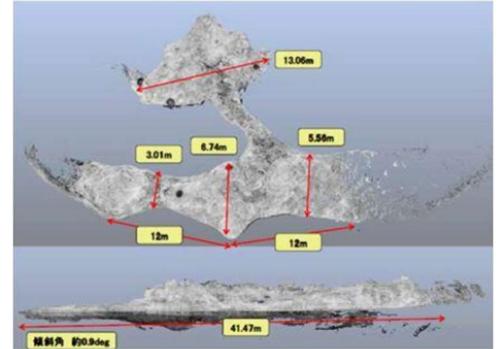
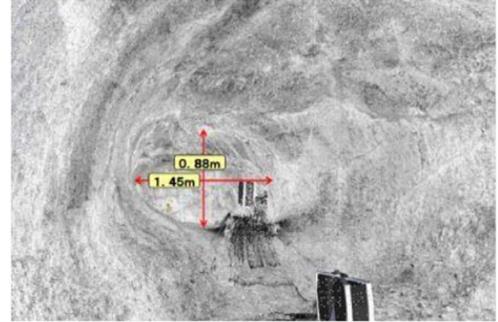
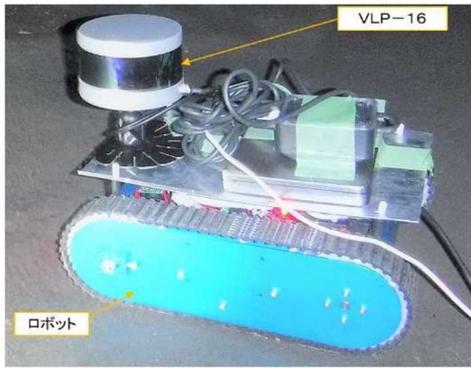
「秋吉台」小型地上走行ロボットの
空中輸送・出入庫実験



「恵藤穴」 ドローンレーザー測定
 上：ドローンとスキヤナの準備
 中上：レーザースキヤナ測定
 中下：洞口（直上空中から撮影）
 下：3次元点群モデル
 [フェーズ(1)(2)]

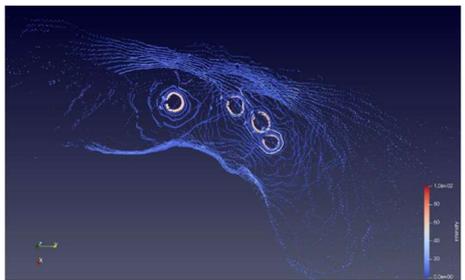


「牡鹿洞」 ドローンレーザー測定
 上：測定システム外観
 中：レーザー即域センサ測定
 下：3次元点群モデル
 [フェーズ(2)]



「竜溪洞」地上ロボットレーザー測定
 上：レーザースキャナ測定
 中：3D 点群モデル
 下：3D 点群モデル（統合）

[フェーズ(3)]



「溝ノロ洞穴」地上ロボットレーザー測定
 上：測定システム外観
 中：レーザー測域センサ測定
 下：3D 点群モデル

[フェーズ(2)(3)]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 眞部広紀/稲川直裕/山田努/堀江潔/岡本渉/松見豊/長嶋豊/浦田健作/染谷孝	4. 巻 55
2. 論文標題 山地カルストの洞窟水文系におけるROVとUAVを使用した調査法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 76-92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 眞部広紀/松見豊/岡本渉/稲川直裕/山田努/長嶋豊/長谷川均	4. 巻 55
2. 論文標題 水没した陥没ドリーネのアンキアライン水文系におけるUAV-ROV調査法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 66-75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 眞部広紀/稲川直裕/山田努/長嶋豊	4. 巻 55
2. 論文標題 沿岸域カルストのアンキアライン水文系におけるROV調査法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 56-65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 堀江潔/眞部広紀/岡本渉	4. 巻 55
2. 論文標題 三次元モデルによる古代山城比較研究試論 佐賀県武雄市おつぼ山神籠石と福岡県久留米市高良山神籠石	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 48-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 前田 貴信/眞部 広紀/ 山下 寛文 /富永 敦士	4. 巻 第54号
2. 論文標題 無窮洞におけるレーザー計測とロボット探査の予備調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 10-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 眞部 広紀/前田 貴信/山下 寛文 /富永 敦士	4. 巻 第54号
2. 論文標題 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調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 15-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 眞部 広紀/前田 貴信/長嶋 豊/浦田 健作/染谷 孝/久間 英樹/ 新部 一太郎/長谷川 均/岡本 渉/春山 純	4. 巻 第53号
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 14-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 眞部広紀/長嶋豊/浦田健作/山本祐二/近藤正義/岡本渉	4. 巻 第53号
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 佐世保工業高等専門学校研究報告	6. 最初と最後の頁 5-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 眞部広紀/岡本渉/久間英樹/村上崇史
2. 発表標題 洞窟計測探査シミュレーションプログラムにおけるドローンの活用
3. 学会等名 第1回火星ヘリコプター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本渉/眞部広紀
2. 発表標題 MDRSにおけるTeamNippon, TeamAsiaの活動とドローン利用
3. 学会等名 第1回火星ヘリコプター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本渉/眞部広紀/松見豊/山崎高幸
2. 発表標題 九州・中国地方におけるドローンを活用した大気観測、地形・洞窟探査ミッション
3. 学会等名 九州大学総合技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 眞部広紀/前田貴信/岡本渉/山下寛文
2. 発表標題 洞窟の探査・計測とデータ活用
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本渉/宮嶋宏行/眞部広紀/松見豊/山崎高幸
2. 発表標題 火星におけるドローンによる大気観測及び地形探査への道
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀江潔/眞部広紀/岡本渉
2. 発表標題 ドローンによる西北九州地域の古墳・山城の空中撮影ー3D化によるアーカイブ構築を目指してー
3. 学会等名 日本情報考古学会第41回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 眞部広紀/岡本渉/ 前田貴信
2. 発表標題 洞窟地形のドローン空中撮影ー写真測量と3Dモデルを目指してー
3. 学会等名 日本洞窟学会第44回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 眞部 広紀/前田 貴信/岡本 渉/春山 純一/久間 英樹/新部 一太郎/浦田 健作/染谷 孝
2. 発表標題 UZUME計画が目指す月と火星の縦孔・地下空洞に向けたレーザー計測と探査シミュレーション
3. 学会等名 日本洞窟学会第43回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 眞部 広紀/前田 貴信/長谷川 均/松見 豊/岡本 渉/春山 純一
2. 発表標題 ドローンを活用した溶岩洞窟と縦孔類似地形の調査・計測
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前田 貴信/眞部 広紀/春山 純一
2. 発表標題 洞窟のレーザー計測と3次元モデル作成
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 眞部 広紀/春山 純一/浦田 健作/染谷 孝
2. 発表標題 UZUME計画が目指す月・火星の洞窟科学研究
3. 学会等名 日本洞窟学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 眞部 広紀/長嶋 豊/浦田 健作/染谷 孝//山本 祐二/近藤 正義/白石 香一
2. 発表標題 ROVを援用した水中洞窟調査(短報)～宮古島平良ピキャズと平尾台不動洞
3. 学会等名 日本洞窟学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

洞窟計測探査シミュレーションプログラム [2019 夏の活動報告1 (松江高専編)]
<https://www.sasebo.ac.jp/snct/news/2019/10/24/23936>

洞窟計測探査シミュレーションプログラム [2019 夏の活動報告2 (日本文理大編)]
<https://www.sasebo.ac.jp/snct/news/2019/10/24/23968>

洞窟計測探査シミュレーションプログラム [2019 夏の活動報告3 (早稲田大編)]
<https://www.sasebo.ac.jp/snct/news/2019/11/08/24213>

レーザースキャナによるドリーネ・縦穴のドローン3D空中測定実験 (山口県秋吉台)
<http://www.sasebo.ac.jp/snct/news/2019/03/26/22397>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----