

# 洞窟と地表地形の 3D モデルに基づくロボット探査シミュレータの検討

松広 航\*\*1, 眞部 広紀\*\*2

## Study for Robot Exploration Simulator Based on 3D Models of Cave and Surface Terrain

Ko MATSUHIRO\*\*1, Hiroki MANABE\*\*2

Key words: 3D model, Robot Exploration Simulator

### Abstracts

In this report, we introduce 3D modeling of Komezuka Wind Cave etc. and robot exploration simulator for UZUME project aiming at direct exploration of Lunar/Martian vertical holes with underground caverns.

### 1. はじめに

2000年代の後半において、日本の月周回探査衛星「SELENE : **SE**Leological and **EN**gineering Explorer」の「かぐや」、米国の月周回探査衛星「LRO : **L**unar **R**econnaisance **O**rbiter」、米国の火星周回探査衛星「MRO : **M**ars **R**econnaisance **O**rbiter」の地形カメラの高解像度画像の解析研究により、月・火星の地表面に巨大な「縦孔」がいくつも確認された(図 1)。地球の「溶岩チューブ洞窟の天井に開口した天窓」の類推から、「縦孔」の底部に繋がる長大な「地下空洞」の存在が推定されている(図 2)。2022 年 11 月現在、「縦孔-地下空洞」のほとんどが未知であり、研究には地球の類似地形に頼らざるを得ない。

国内では JAXA-ISAS (宇宙科学研究所) の研究者らを中心に『UZUME (古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査) 計画』が立ち上げられ、近年は UZUME ワーキンググループが月・火星の「縦孔-地下空洞」の探査に向けた取り組みを行っている<sup>1)</sup>。早稲田大学では『UZUME 計画』に連動して、不整地に強くスタックしにくい特殊車輪形状を有した小型ロボットを、月の縦孔-地下空洞直接探査システ

ムとして開発している(図 3)<sup>2)</sup>。また、小型ロボットの走行性能の検証や強化学習等の機械学習の適用を行うために、シミュレータを用いた取り組みを行っている<sup>3)</sup>。シミュレータを用いるメリットとして、実環境では困難な月の重力等の再現ができることや、強化学習のように繰り返し学習を行う上で実時間以上の速度で試行を実行できる点などを挙げることができる。

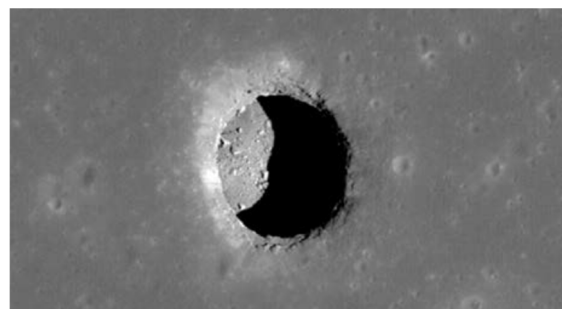


図 1 月の「静の海の縦孔」©NASA/LRO/ASU

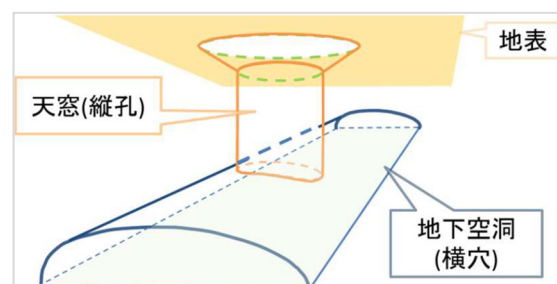


図 2 「縦孔-地下空洞」模式図

\* 原稿受付 令和 4 年 10 月 31 日

\*\*1 早稲田大学大学院 先進理工学研究科

\*\*2 佐世保工業高等専門学校 基幹教育科

早稲田大学では、2019 年には NPO 法人『火山洞窟学会』、高専大学研究ネットワーク『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』と連携して、山梨県富士河口湖町の溶岩洞窟「富士風穴」の学生巡検を行い 3D 計測・3D モデル化を行った（図 4～6）。

2022 年 11 月の「UZUME 阿蘇巡検 2022」では、スコリア丘「米塚」山麓の溶岩洞窟「米塚風穴」と「砂千里」が巡検地になったため、3D 計測・3D モデル作成の実験を並行して行うことになった。本稿では、「米塚風穴」と「砂千里」付近の 3D モデルとロボット探査シミュレータについて紹介する。

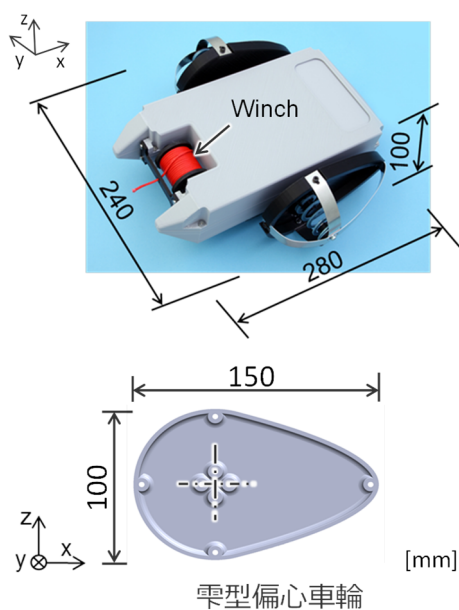


図 3 特殊車輪形状を有した小型ロボット



図 4 「富士風穴」巡検



図 5 「富士風穴」 穴洞口と 3D モデル

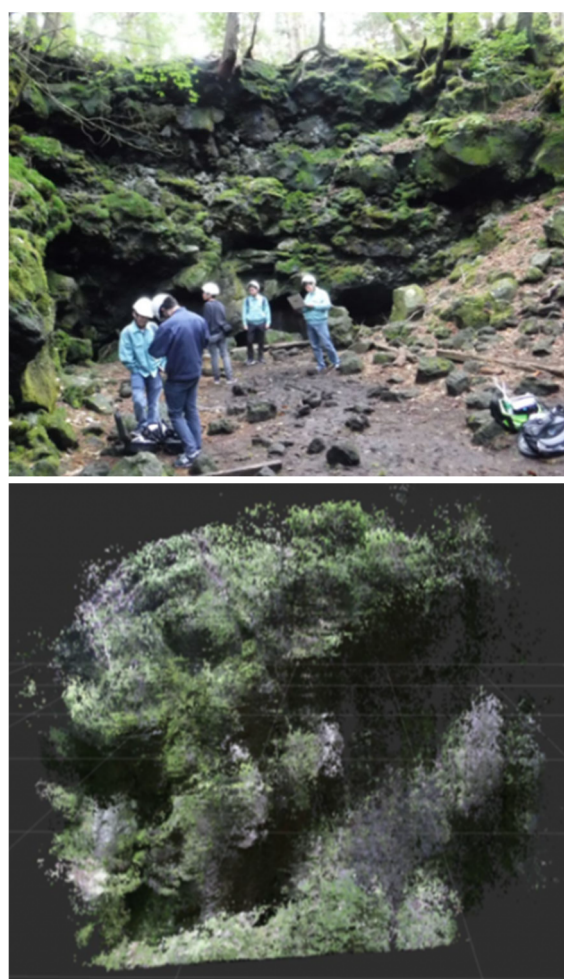


図 6 「富士風穴」 側壁と 3D モデル

## 2. 「米塚風穴」の撮影と 3D モデル化

スコリア丘「米塚」は九州の阿蘇カルデラ底の北側に位置し、その西側山麓に「米塚風穴」<sup>4,5,6)</sup>は開口している(図 7)。「UZUME 阿蘇巡検 2022」の第一巡検地である「米塚風穴」では、洞内の解説・観察(図 8)と小型ロボット「YAOKI」の走行実験(図 9)に並行して、LiDAR スキャナ搭載の iPhone13 Pro による「米塚風穴」の 3D モデル化用撮影を行った。Niantic 社の 3D スキャンアプリ「Scaniverse」<sup>7)</sup>を活用しカメラの RGB 画像と LiDAR による点群データを取得し、ほとんどその場での処理を行うことで、テクスチャ付 3D メッシュモデルを簡便に取得できる(図 10~13)。



図 7 「米塚風穴」洞口



図 8 「米塚風穴」洞内観察



図 9 小型ロボットの洞床走行実験  
「YAOKI™」(株)ダイモン

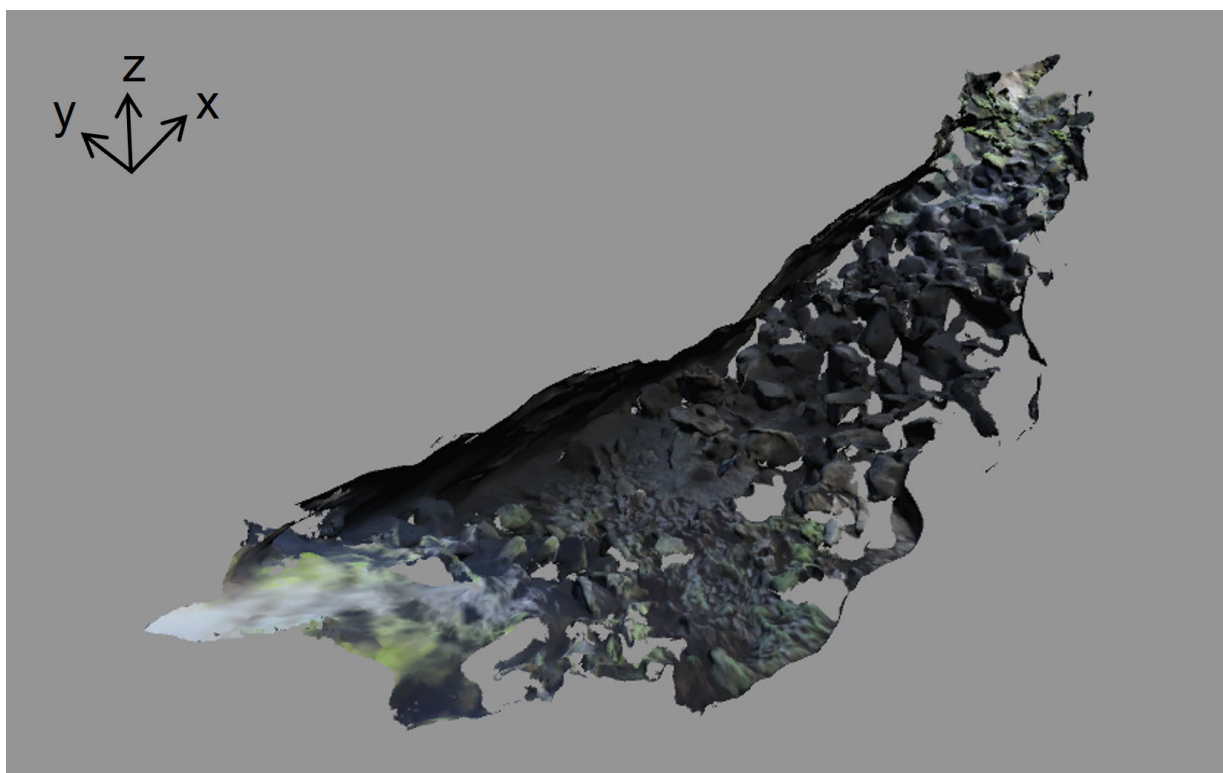


図 10 米塚風穴 3D モデル概形

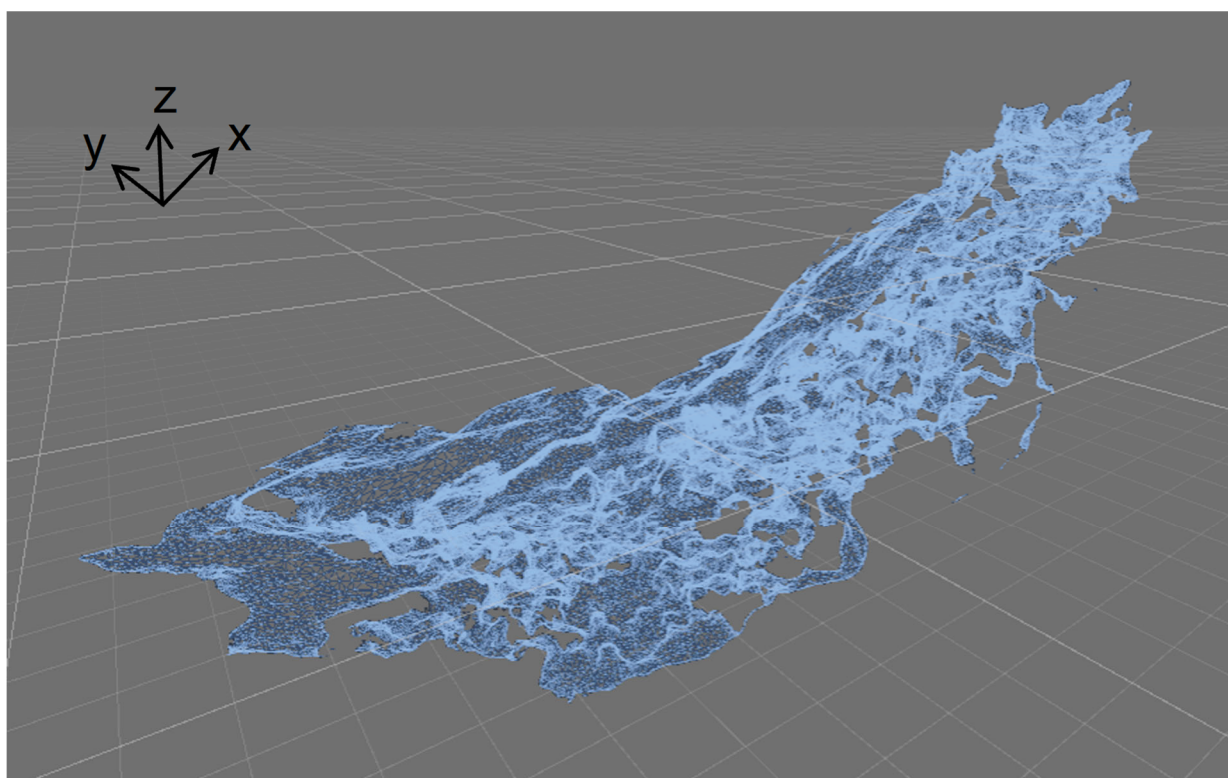


図 11 米塚風穴 3D モデル概形（メッシュ表示）

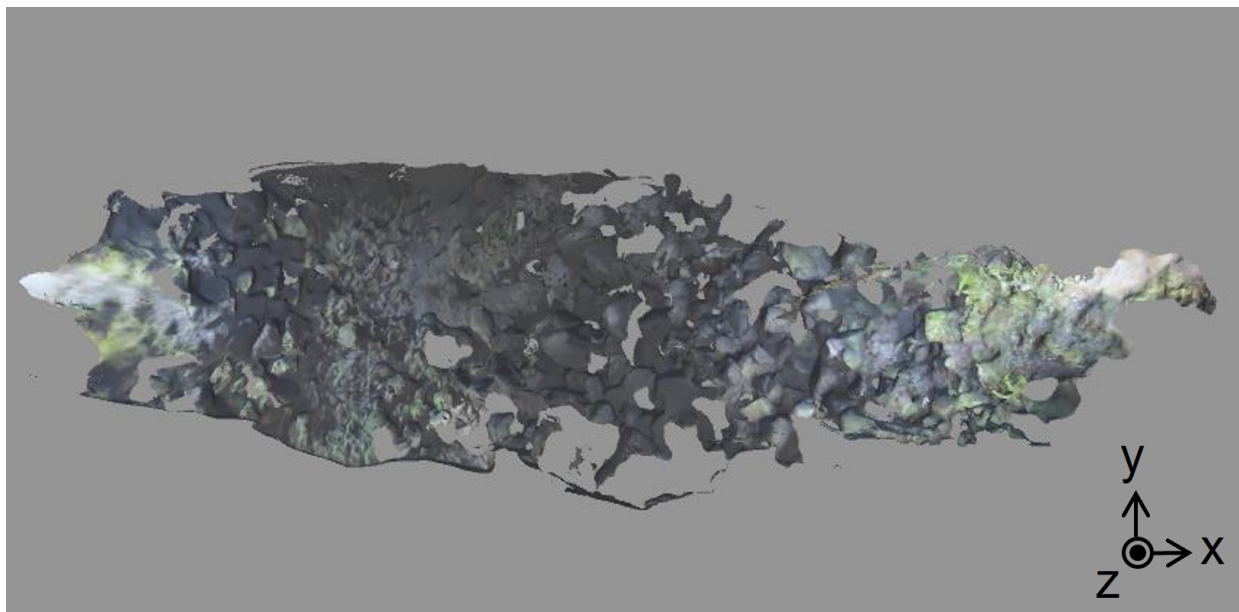


図 12 米塚風穴 3D モデル概形 上面図

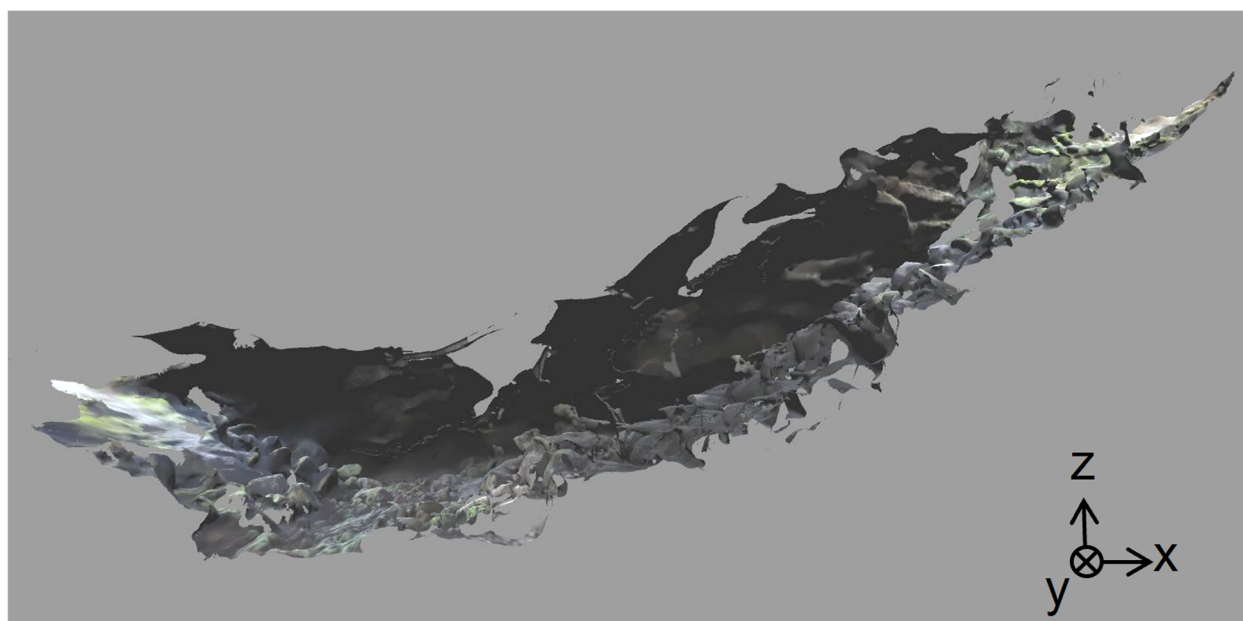


図 13 米塚風穴 3D モデル概形 側面図

### 3. 「米塚風穴」の探索シミュレーション

取得した「米塚風穴」の 3D モデルを物理エンジンが搭載されたシミュレータ環境に入れ、ロボットモデルを走行させた。全体の様子を図 14 にまとめた。また、シミュレータ上でロボットには仮想カメラを搭載した。仮想カメラで取得した映像の様子を図 15 に示す。シミュレータ上でロボットの車輪に速度指令を与え移動させた様子を図 16,17 に示す。図 16 のように比較的なだらかな路面において走行している様子を確認することができた。一方で図 17 のように高低差の大きい環境ではロボットが滑落している様子が伺える。以上のように、探査の過程で

取得が可能なセンサ情報の確認や遠隔操作をはじめとした運用のシミュレーションなどに用いることが可能である。また、これらの動作の様子を簡易的に確認するだけでも、ロボットの設計・制御における性能確認や課題抽出に役立てることも可能である。加えて、強化学習をはじめとした機械学習の適用も可能である。機械学習を行うためには数百・数千回、またはそれ以上の試行が必要な場合があり、実環境で試行回数を達成することは現実的ではない上、月環境のように重力の違いは再現できない。このような場合において、実環境から取得した 3D モデル環境の有用性は高いと考えられる。



図 14 ロボットシミュレーションの様子（まとめ）



図 15 ロボットに搭載した仮想カメラからの映像

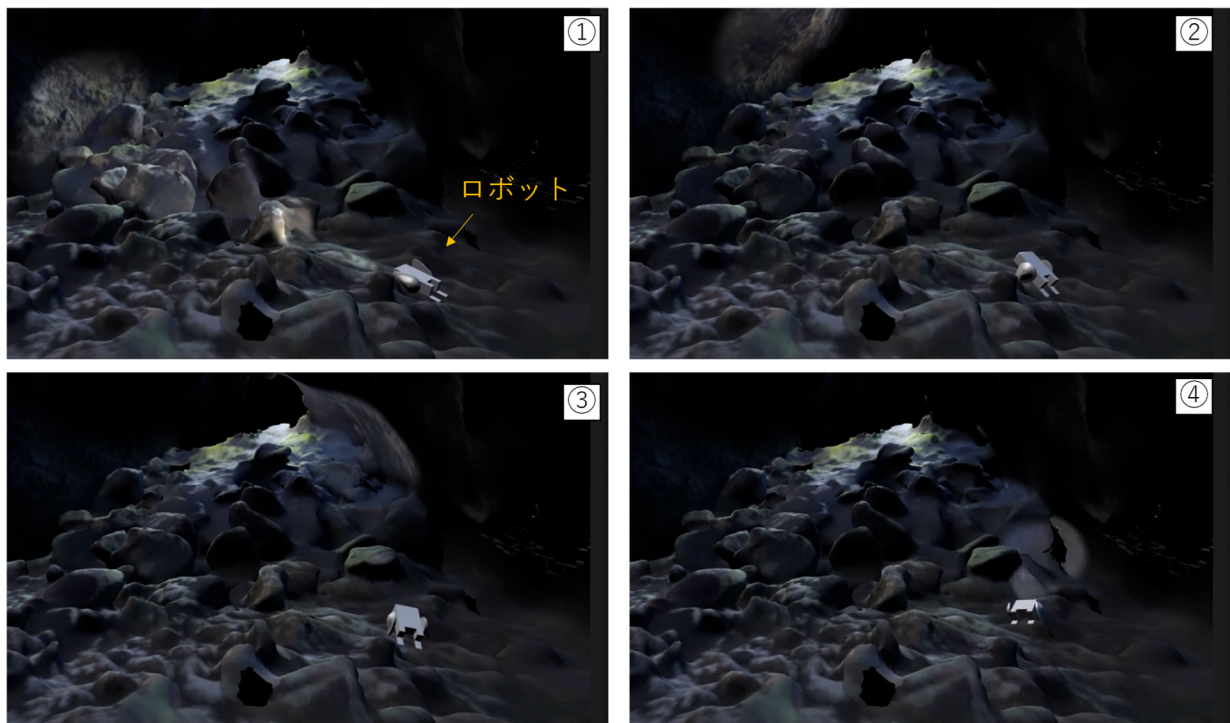


図 16 ロボットシミュレーションの様子（走行）

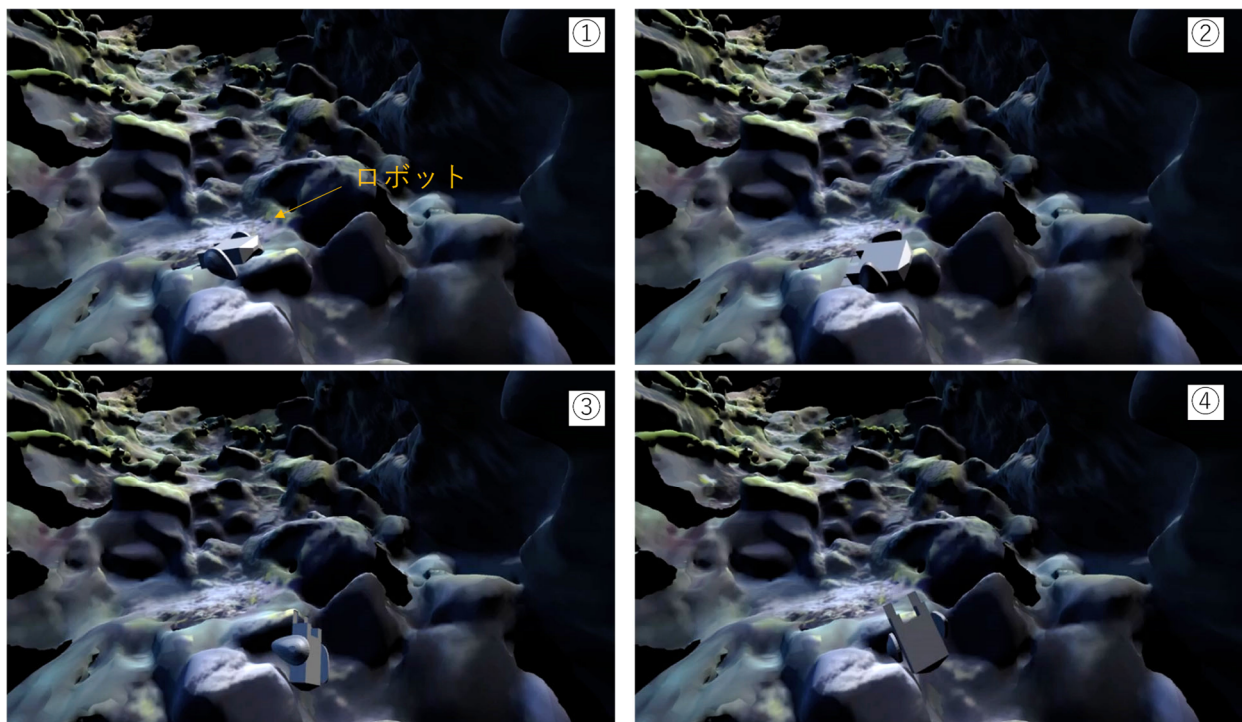


図 17 ロボットシミュレーションの様子（滑落）

#### 4. 「砂千里」付近の撮影と 3D モデル化

火山灰で覆われた「砂千里（ヶ浜）」は「中岳」火口の南東部に位置する岩肌と火口跡であり、伊豆大島三原山の「裏砂漠」<sup>8)</sup>と同様に惑星地質巡検<sup>9)</sup>の重要なフィールドである。阿蘇山上広場を出発して阿蘇山公園有料道路沿いに進んだ巡検隊は、料金所付近から「砂千里」に通じる歩道を移動した（図 18）。終了時間が迫ったため「砂千里」の手前で巡検隊は引き返したが、「YAOKI」走行実験（図 19）や移動経路の 3D モデルの取得撮影を行った。3D モデルの取得は第 2 節において述べた iPhone13 Pro 及び Scaniverse を利用した。精細かつ正確な 3D モデルを取得するためには、測定対象とするエリアを様々な方向から時間をかけてスキャンすることが望ましいが、本巡検では限られた調査時間内で作業を完了することが求められていた。基本的には歩行しながら iPhone13 Pro の画角を左右に振りながら環境を測定し、500m 程度の道のりを約 3m 程度の道幅を一連で取得した。取得した 3D モデルの概形を図 20 に示す。図 21 に示したように、地図データの衛星画像に示した歩行ルートと取得した 3D モデルの概形を比べるとおおそ一致していることが分かる。



図 18 「砂千里」に向かう巡検隊

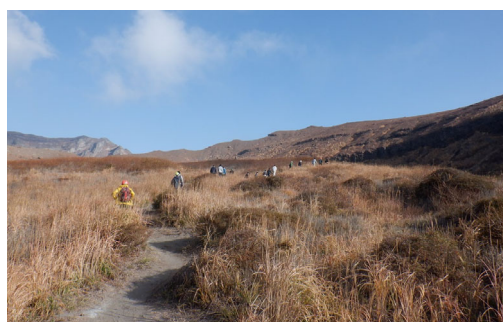


図 19. 「砂千里」付近  
上：歩道，中下：歩道添いの緩斜面  
中上，下：「YAOKI」™ 走行実験

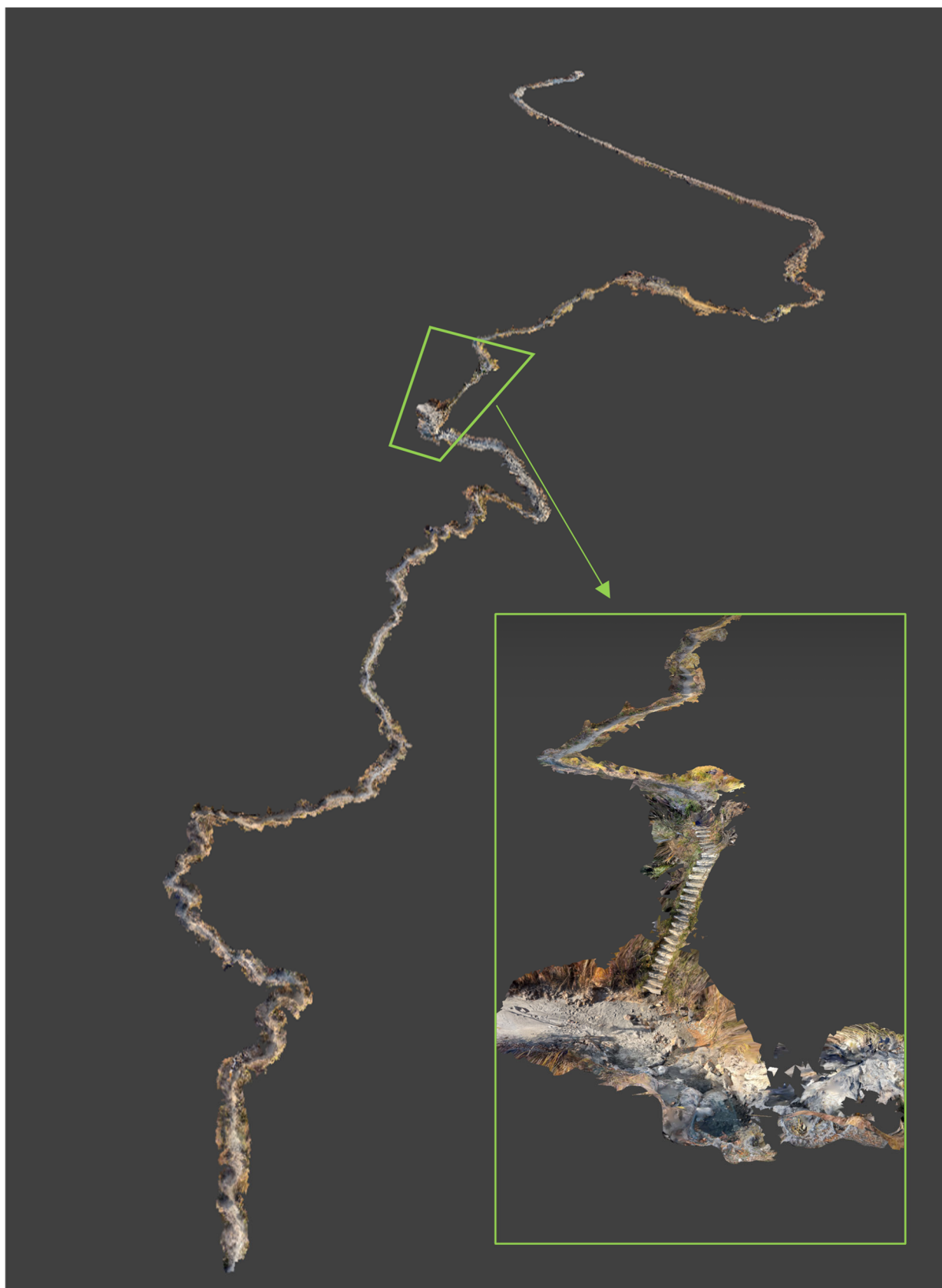


図 20 「砂千里」 付近移動ルート の 3D モデル 概形



画像 ©2022 Maxar Technologies, Planet.com, 地図データ ©2022 Google Mapより取得

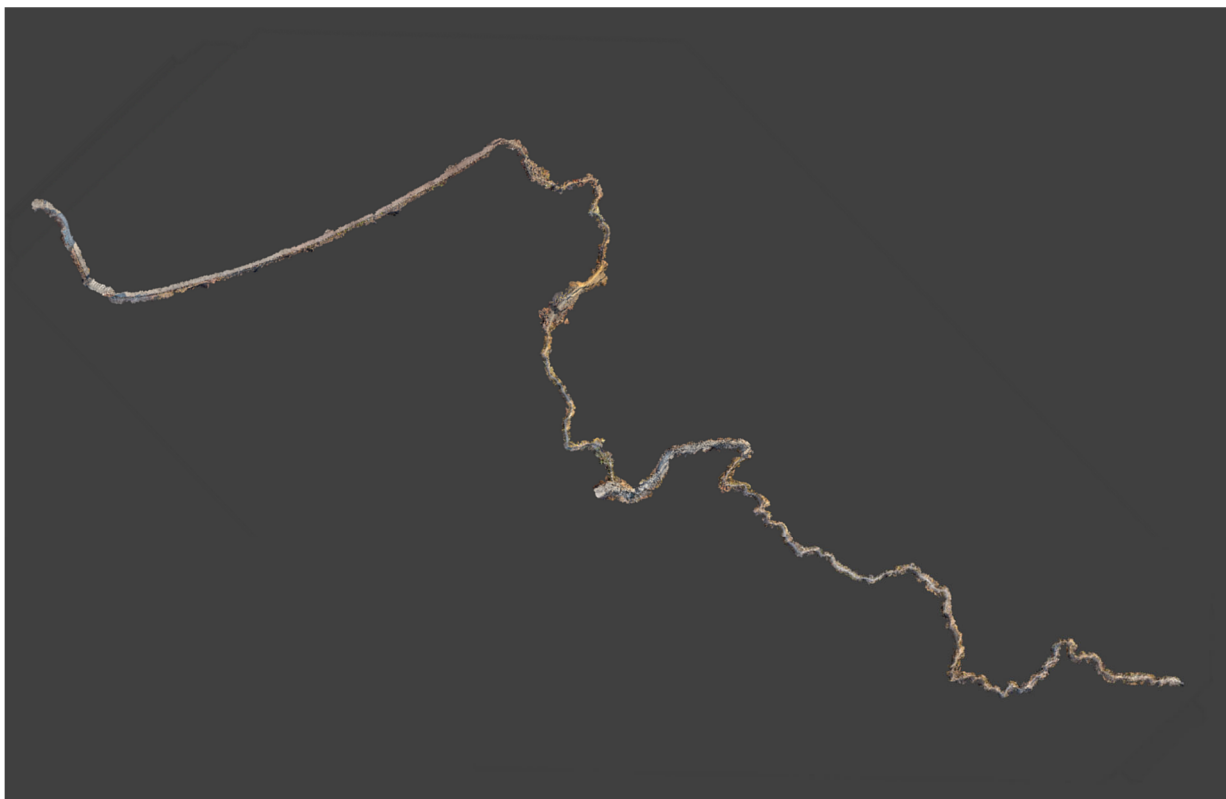


図 21 ルート比較  
(上：地図データ 衛星画像, 右：3D モデル概形 上面図)

## 5. 「砂千里」付近の探査シミュレーション

取得した「砂千里」付近移動ルート of 3D モデルを物理エンジンが搭載されたシミュレータ環境に入れてロボットモデルを配置させた。シミュレーションの様子を図 22,23 に示す。3D モデルの取得方法の関係上、比較的精度が粗い 3D モデルではあったが、地形やロボット以上のサイズの岩などの特徴的な様

子が確認できる。このような広域な 3D データは第 2 節で述べた「米塚風穴」の探査シミュレーションと同様に、ロボットの動作確認やセンサ情報の確認が可能となるのに加え、探査ロボットにおける経路計画や探査ミッション全体のシミュレーションといった、よりマクロな視点での活用も期待される。



図 22 ロボットシミュレーションの様子（まとめ）

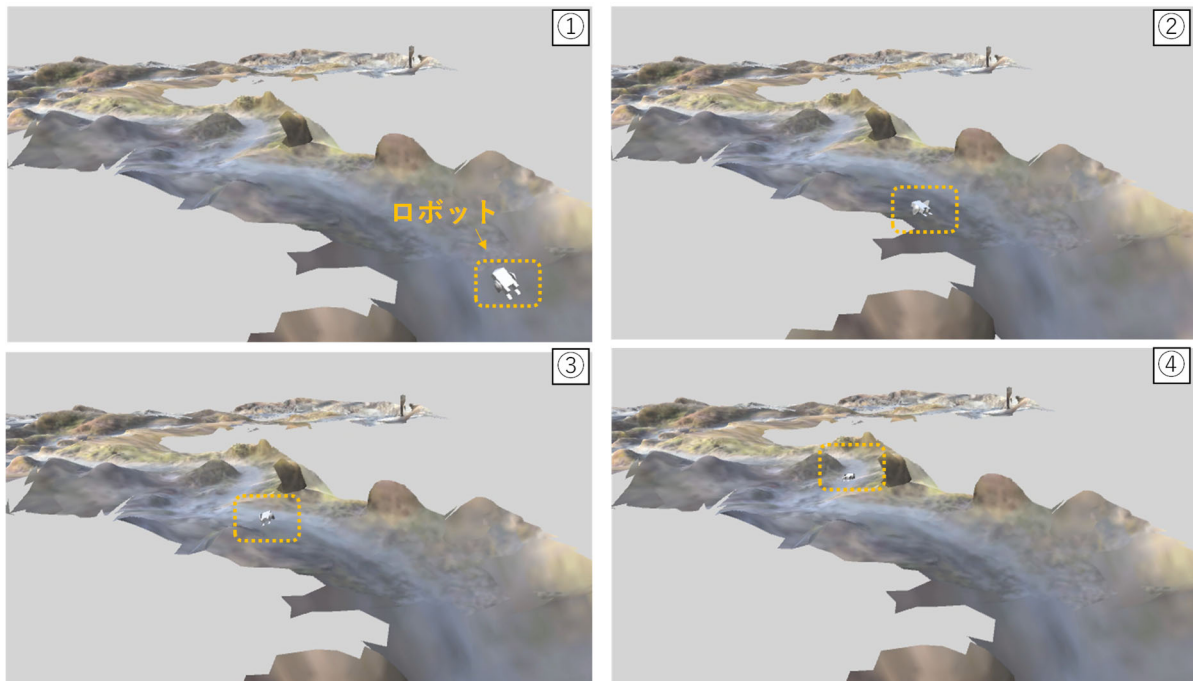


図 23 ロボットシミュレーションの様子（走行）

## 6. まとめ

「野外巡検：阿蘇米塚溶岩トンネルと阿蘇の火山岩」から10年ぶりに企画された「UZUME 阿蘇巡検 2022」では、地形・地質・地層の解説や観察に加えて、昨今の技術進歩を反映させた新項目（小型ロボット実験、3D 現場計測・モデル生成の実験）が盛り込まれた。本報告では、「UZUME 阿蘇巡検 2022」をフィールドとして、簡易的な方法によるスマートフォンと既存アプリを用いた 3D 環境データの取得と、それらのロボットシミュレーションへの適用可能性について言及した。巡検では、「米塚風穴」および「砂千里付近移動ルート」のテキストチャ付 3D モデルを取得することができた。一部の形状が取得できていない部分はあるものの、フィールドの概形を得ることができ、シミュレータ上でロボットモデルの走行の様子を確認することができた。より精細かつ正確な 3D モデルを得る目的で、高解像度のセンサ類やドローンを用いた環境計測にも期待が寄せられる一方、「UZUME 阿蘇巡検 2022」のように限られた時間の中でも簡易的な環境情報の取得は可能であり、それらのデータを用いたロボットシミュレーションにおいても一定の有効性があると考えられる。加えて、環境計測に既製品のスマートフォン及び既存のアプリケーションを活用することで、環境情報の 3 次元取得に対する専門的な知識や技術がない一般的なユーザーにおいても、画像や映像といったこれまでの 2 次元のデータ以上の情報量を大きな負荷なく取得することができる。これらは自然環境のみならず、都市部や災害現場など多岐に渡るロボット利用が期待されるフィールドにも適用可能であり、積極的に活用されることを期待する。

## 謝辞

本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2128 の支援を受けて実施された。

## 参考文献

- 1) 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 [https://www.wakusei.jp/book/pp/2020/2020-3/2020-](https://www.wakusei.jp/book/pp/2020/2020-3/2020-03-115.pdf)

[03-115.pdf](https://www.wakusei.jp/book/pp/2020/2020-3/2020-03-115.pdf)

- 2) 松広航, 鈴木滋英, 永井涼太, 野田慶太, Nu NuWin, 菅原雄介, 春山純一, 高西淳夫, 石井裕之

壁面跳躍により月面縦孔の探査を行う

小型ロボットに関する研究

第 65 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 2021

- 3) 松広航, 岩淵拓実, 野田慶太, 住田和也, 永井涼太, Nu NuWin, 春山純一, 菅原雄介, 石井裕之, 高西 淳夫

零型偏心車輪を用いた月面縦穴探査ロボットにおける強化学習による走行動作の獲得

第 66 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 2022

- 4) 渡辺一徳,

米塚付近にみられる溶岩トンネル

熊本地学会誌, 第 45 巻, pp.9-10, 1974

<https://core.ac.uk/download/pdf/57736849.pdf>

- 5) 平川泰之, 宮縁育夫, 園村道明

阿蘇火山・米塚溶岩における風穴の分布

日本火山学会講演予稿集 2017 年度 秋季大会, P020

- 6) 平川泰之, 宮縁育夫, 園村道明

阿蘇火山中央火口丘の上米塚(かみこめづか)

スコリア丘 (日本の露頭 No.22)

地球科学 第 69 巻 4 号, P188, 2015

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/agcjchikyukagaku/69/4/69\\_KJ00010014483/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/agcjchikyukagaku/69/4/69_KJ00010014483/_pdf-char/ja)

- 7) Niantic Inc., Scaniverse ホームページ

<https://scaniverse.com/>

- 8) 永谷圭司, 大木健, Nathan Britton, 佐藤毅一,

野寄敬博, 高橋悠輔, 山内元貴, 秋山健, 吉田和哉,

伊豆大島における不整地移動ロボットの

走行試験および自己位置推定試験

日本惑星科学会誌遊星人, 第 21 巻 2 号, pp.121-129, 2012

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/21/2/21\\_KJ00008113707/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/21/2/21_KJ00008113707/_pdf-char/ja)

- 9) 石丸亮

2011 年 PERC 惑星地質学フィールドシンポジウム開催報告

日本惑星科学会誌, Vol. 21, No. 1, pp.79-82, 2012

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/21/1/21\\_KJ00007980076/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/yuseijin/21/1/21_KJ00007980076/_pdf-char/ja)