

特集「古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画」 古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画

春山 純一¹, 河野 功¹, 西堀 俊幸¹, 岩田 隆浩¹, 山本 幸生¹, 桜井 誠人¹,
大槻 真嗣¹, 諸田 智克², 石上 玄也³,
月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ

(要旨) Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/ Mars Exploration (UZUME:古今未曾有の日本の月/火星の地下世界探査計画)は, 月や火星の縦孔とその底の奥に広がる溶岩チューブのような地下空洞の探査を目指すものである。本計画では, 理学目的として, 1)「生命圏」の発現, そしてその「持続条件」, および2) 人類の「居住圏」拡大の可能性についての知識を積み重ねることを掲げ, これまで, 宇宙科学研究所宇宙理学委員会のもとで「月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ」において検討を重ねてきた。現在, ワーキンググループとなることを目指している。本特集では, UZUME計画に関わる, 解説論文2本ほか, 査読論文4本を本号, ならびに次号以降に収録予定である。本稿では, UZUME計画の概要を解説する。

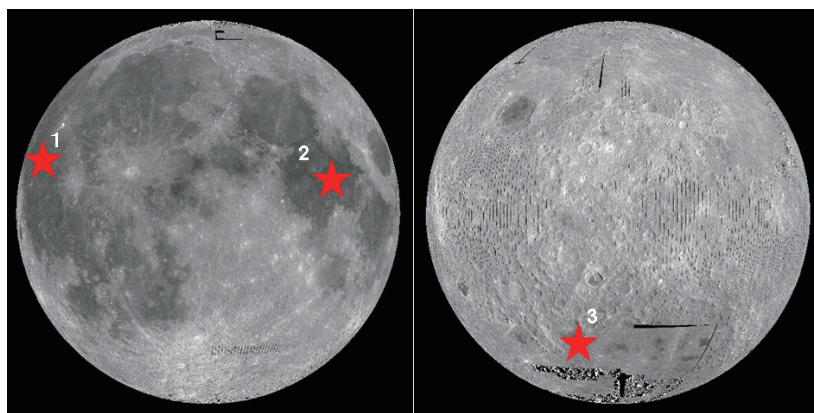


図1: SELENE搭載地形カメラが2009年に発見した縦孔の位置。1:マリウス丘の縦孔(303.3°E, 14.2°N)。2:静の海の縦孔(33.2°E, 8.3°N), 3:賢者の海の縦孔(166.0°E, 35.6°S)。背景はSELENE/地形カメラ画像。

1. 月の縦孔・地下空洞

2009年, 日本の月周回探査機Selenological and Engineering Explorer (SELENE, かぐや)に搭載された地形カメラは, 直径深さともに数10m

にも及ぶ縦孔を, 月のマリウス丘, 静の海, 賢者の海に発見した(図1)[1-3]。ハワイ島や日本の富士山麓は, 月の海と同じ玄武岩質溶岩に覆われているが, そこには火成活動起源の地下空洞「溶岩チューブ」が数多く見られることから, これら月の縦孔は, 溶岩チューブに開いたものとの仮説が立てられた[1-3]。

その後, 米国探査機Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) に搭載された狭角カメラによる高解像度画像データにおいて, これらの縦孔底は通

1. 宇宙航空研究開発機構

2. 東京大

3. 慶応大

Haruyama.junichi@jaxa.jp

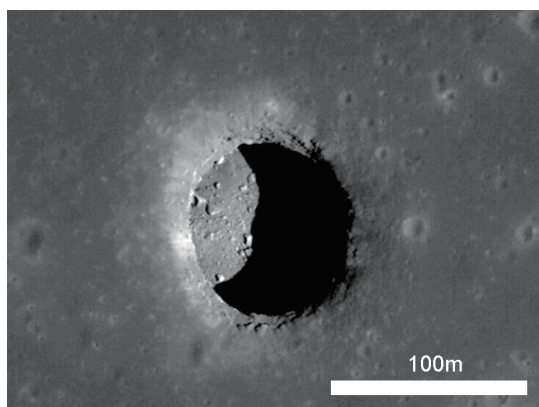


図2: LRO狭角カメラによる、月の静の海の縦孔直下視画像(Product ID: M12671087R). 縦孔の底は、お椀型をしておらず、また縦孔周辺に飛散物が見られない。これらのことは、縦孔は溶岩チューブのような地下空間に開いたものとの仮説を支持する。撮像時の太陽角度と、縦孔底の明暗境界位置から深さ107mと求められている。

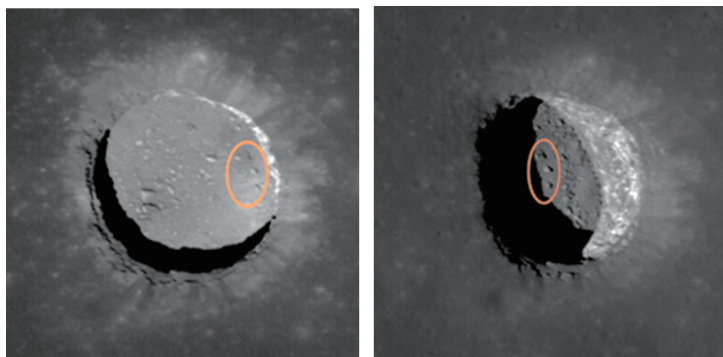


図3: LRO狭角カメラによる、月の静の海の縦孔直下視画像(左:Product Id_M155016845R)と斜め撮像画像(右:Product ID_M152662021R). 斜め観測から直下視で見えていた三つの岩の奥に空間が広がっていることが分かる。右画像の三日月状の明るいところは、縦孔の壁でおおよそ47mの張り出し、すなわち高さ60mにも及ぶ空洞の入り口になっている。(両図中の精円は、安田遼氏による)

常のクレータとは異なり、お椀型となっていないことや、縦孔周りには飛散物がまったく見られないことが確認され(図2)[4]、月の縦孔は地下空洞に開いたものとの仮説がより強く支持されることになった。

更に、LRO狭角カメラによる斜方観測では、SELENEの発見した三つの巨大な縦孔底に、明らかに水平方向に延びている地下空間が存在することが見いだされ、この仮説が更に一層支持されることになった[4]。

その後、「海」領域には、十にも及ぶ縦孔、あるいは陥没地形が発見されているが[5]、画像データ以外にも、「月の縦孔は、溶岩チューブに開いたもの」とする仮説を支持する探査データが得られてきている。

2017年、米国の重力場探査機Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)のデータ解析結果から、マリウス丘の縦孔から西方向、縦孔が見られるリル構造に沿って、質量が相対的に欠損していることが見いだされた[6]。また、SELENE搭載の能動的なレーダ探査装置であるLunar Radar Sounder(LRS)のデータに、このマリウス丘の縦孔がみられたリル構造にはほぼ沿った場所数カ所に、地下からのエコーの急激な減少(地下の空洞の存在を示唆する)の後に引き続いてみられる強い反射(チューブの底の存在を示唆する)を示すものが発見された[7]。これから推察するに、この溶岩チューブは距離にして50kmに及ぶ。

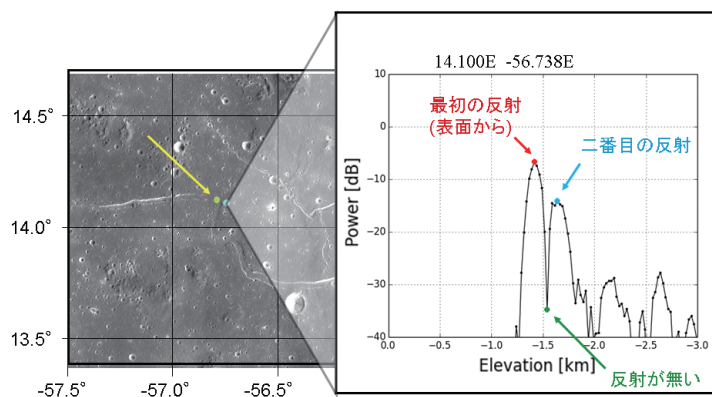


図4: マリウス丘の縦孔(矢印先)近傍で得られたSELENE搭載レーダサウンダー受信波のプロファイル。横軸は、真空を仮定したときの反射面の深さ。月の平均半径1737.4kmが、ここでは0km。縦軸は反射波強度。月表面からの最も強い反射(赤点)と、より深部からの二番目に強い反射(青点)が見られる。これら一番目と二番目の強い反射の間に急激な反射の減少が見られ、地下空洞の存在を強く示唆する[7]。

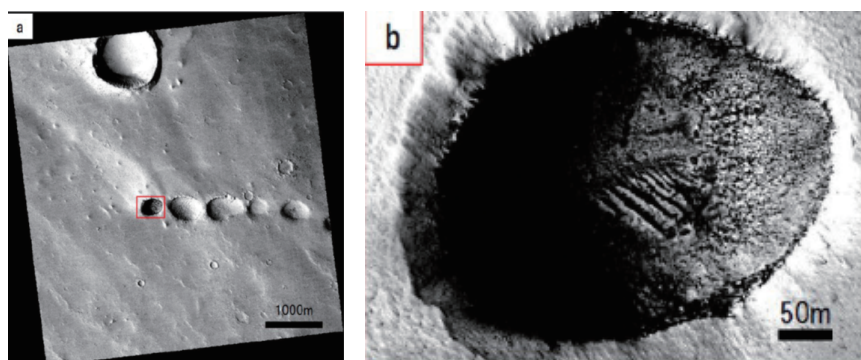


図5: a:MRO搭載HiRISEが撮像したエリシウム山近傍の縦孔列(28.5N,139.9E, EPS_04629_2090)。b:aの四角枠拡大図。火星にも、多数の縦孔が見つかっており、中には本図のように、縦孔や陥没地形が鎖状に連なってみられるものがあり、その下に溶岩チューブが存在しているのが想像に難くない。図は、Goto et al. (2017)[10]より転載。

このように、近年得られた様々なデータから、月の地下空洞の存在が、そしてそれは溶岩チューブであることが、確実なものになりつつある。

2. 火星の縦孔・地下空洞

火星においても、月と同様の縦孔が発見されている[8]。その形態から、火星の縦孔も溶岩チューブに開いたものと考えられる。すでに火星では発見された縦孔の数は、50以上に上り[9]、最初に発見されたアルシア山の麓の他、かつて海に囲まれていたとされるエリシウム山にも、多数見つかっている[10](図5)。アルシア山、エリシウム山地域は共に、火星

の1年のうち1-2週間ほど、温度-圧力関係から液層の水が存在しうる可能性が高く、生命探査の重要候補地である。また、利用可能性も高い。火星の縦孔・地下空洞探査において、地球により近い月の縦孔・溶岩チューブの探査で培われる知見と経験が、非常に有用になることは言うまでも無い。

3. 月火星の縦孔・地下空洞の基地としての有用性とUZUME計画

月火星の溶岩チューブが重要視されるのは何故か?それは、人類が活動領域を地球から宇宙に広げて行く際に、優れた居住域を提供すると考えられる

からである[1,3,11]. 例えば, 月火星の溶岩チューブの様な地下空間は, 宇宙からの放射線や, 微隕石から, 人類や機器を守ってくれる。(月の縦孔内における, 放射線の影響については, 本特集号の内藤らによる論文を参照されたい。)また月表面は, 極端な温度変動がある場所であるが, マリウス丘や静の海の縦孔に関わる地下空洞は, 約 -20°C , 非常に一定した温度環境であると理論的に推測されている。火星表面には砂嵐が発生するが, それもまた, 地下空間であれば, 影響がきわめて少ないであろう。

アポロ11号による人類初の月面着陸は, すでに50年以上前のことである。当時, 人類はすぐにでも宇宙へとその活動領域を広げていくかに見えた。しかし月面の過酷な環境は人類の訪れを拒み, また一方で, アポロ計画や旧ソ連のルナ計画による優れたリモセンデータ, 合計400kg近くにもなる岩や砂の試料をもとに, 月の科学が一気に推し進められたことで, 逆に, 月の科学探査の魅力を失わせ, 結果的に月探査を推し進める原動力が無くしてしまったのかもしれない。実際, 月への回帰が始まるのは, 1990年代を待たねばならなかった。

今世紀に入って再び, 日本をはじめ, 欧米, インド, 中国が, 月探査へと乗り出している。そうした中, 月の溶岩チューブ探査も探査対象として, 注目を浴びつつある。例えば, 2018年3月, 日本によるホストで, 各国の宇宙機関の閣僚級会合International space exploration forum 2 (ISEF2)が開催されたが, それに先立ち, International Space Exploration Coordinate Group (ISECG) によりまとめられたGlobal Exploration Roadmap (GER) 3版で, 将来の探査地点候補として“lava tube”の語句が記されたりしている。

こうした動きもふまえ, 我々, 宇宙理学・工学者, 更に教育現場や科学館など文化施設に籍をおく者たちで, 月火星の縦孔, 地下空洞探査を進めようとしている。この探査計画をUnprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration (古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査)「UZUME」計画とよんでいる。

2016年, 30名以上に上る研究者達の申請により, JAXA/宇宙科学研究所の宇宙理学・工学委員会のもとに「月火星の地下空洞直接探査リサーチグルー

プ」が設置され, 探査の第一歩をより現実的にしようとしてきた。2020年度には次のステップとなるワーキンググループへ移行し, 2020年代半ばのプロジェクト実現を目指す。

4. UZUME計画における科学探査

宇宙理工学委員会のもとに設置された国際宇宙探査専門委員会による中間報告書(2019年3月)によれば, 「惑星科学の大目的は『ハビタビリティ』にかかわる知識を増やしていくこと」である。すなわち, (1) 過去にどのように生命や生命を育んだ環境「生命圏」が生まれ, その後, 進化維持されたかという「持続条件」といった知識を増やしていくこと (2) 今後, 我々人類の住む世界「居住圏」を宇宙へと「拡大」していくうえで必要な宇宙の知識を増やしていくこと, である。

惑星科学の大目的(1)の「生命圏」の起源と進化維持に関わる要素は, 多種多様にあるが, 地球のような固体天体でも最も重要な要素の一つは「火成活動」である。火成活動は, 地表面, 大気, 更には深海に物質・エネルギーの再分配をもたらす。環境に大小様々な規模の変動をもたらす。言い換えると, 環境変動に敏感な「生命圏」の変化を理解するには「火成活動の理解」が必須である。

月の地下空洞直接探査によって調査を行おうとする月の「溶岩チューブ」は, 地球にも見られる溶岩流によって形成される地下空洞である。火成活動が大規模, 広範囲になれば, より多くの生態系へと影響し, 「生命圏」の激変を生むことにもなるが, 溶岩チューブの形成は, 溶岩の長距離輸送を可能にし, 火成活動の影響を広範囲に広げることから, 溶岩チューブの形成は, 火成活動そのものだけでなく, 生命圏への火成活動への影響, という点で重要な因子である。また, 溶岩チューブのサイズや形状等からは溶岩流の物理的諸量が求まり, それらは, 例えば溶岩流の温度などの噴出情報を知る手がかりとなる。更にまた, 月火星の火成活動を知る上で縦孔が最適な場所の一つである。というのも, 縦孔の垂直「壁」が露頭だからである。地質活動を理解する上で露頭が重要なのは言うまでも無い。月の縦孔壁には層構造が見られている(図6) [3,4]。その調査は, 天

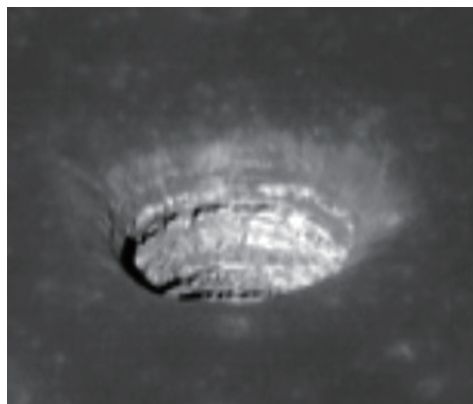


図6: LROによる静の海の縦孔の斜め観測画像(直下視画像は、図2ならびに図3の左図)。縦孔の壁には各数m程度の厚さからなる層構造がみられ、地質学的に極めて重要な露頭となっている。(Product ID_M144395745L)。

体の噴出物の時代変遷を語ってくれるであろう。

こうした溶岩噴出情報によって、天体の火成活動によるエネルギー再分配や水を含む揮発性物質やダストの放出等による環境変動の可能性に関する知見が高まり、ひいては「生命圏」がどのように生まれ、その後、進化維持、あるいは破壊されたかの理解においても重要な情報を与えることが期待される。

溶岩チューブを構成する岩体は、月表面表層の碎屑された、或いは礫化した環境とは異なり、固化したときの状態そのままである。このため、溶岩チューブは、過去の磁場や、過去に噴出した揮発性物質、そして、地下深部物質等の情報を保持している可能性が高い。こうした情報は、天体の火成活動、さらにまた、天体での生命現象の起源と進化の理解にとって、有意義である。例えば、磁場は多くの生命現象にとっては有害となる宇宙放射線を遮蔽する効果があるため、月での残留磁化の情報は、月、ひいては固体天体一般の磁場の形成メカニズムを解明する手がかりとなる。言い換えれば、月での残留磁化の情報は、固体天体での生命圏の発現の有無、あるいはその条件を推察する上で重要な情報となる。

5. UZUME初号機

前節に述べたように、月の縦孔・地下空洞は、月惑星における生命生存圏の発現と維持、また人類の居住圏の拡大につながる鍵をいくつも有しており、世界的にも注目を浴びており、月における最も重要な探査対象である。

一方で、月の縦孔・地下空洞は、月周回軌道からのリモートセンシングによってのみ知られており、対象が地下にあることで、その詳細は不明である。将来のサンプルリターンを含む詳細な理学探査、基地建設着手のためにも、月の縦孔・地下空洞に関して最も基本的な情報である、(1) 地下空洞は実際の程度巨大なのか、そして、また(2) その地下空洞が溶岩チューブである可能性はどの程度有るのかという情報の収集を、最初にそして確実に行う必要がある。そのため、まず、縦孔付近にピンポイント着陸しなければならない。しかし、これまで日本は月軟着陸の実績がなかった。そこが大きな壁であった。

しかし、JAXA宇宙科学研究所は、2022年度に月ピンポイント着陸探査SLIMを実施すべく開発を進めている。このSLIMのヘリテージを、UZUMEの初号機に大いに利用できることがみえてきたので

ある。実際に、地下空洞内のデータを得るのに、広角カメラと、できればレーザ測距計が有用であるが、そうした機器は既に民生品として小型・軽量のものが開発されている。もちろん、宇宙機搭載品としての耐環境性は十分に確認、場合によっては改良していく必要はあるが、SLIM搭載機器重量範囲に十分載るものと思われる。さらに、これら機器以外にも、さらにエクストラな観測もできるであろう。

もちろん、実際の探査計画を推し進める上で、更なる工学的挑戦は多い。それは次の三つの課題に集約されよう:1) 垂直移動, 2) 不整地踏破, 3) 未知領域調査。

縦孔底へのアプローチは、オーソドックスには、ローバによるものが考えられる。投擲マシンの検討もなされている。更に、近年の急速なロボット技術の発展は、多肢型のロボットの可能性もまた、検討に値するものとなっている。多肢型のロボットは、垂直降下のみならず、不整地踏破、未知領域調査まで、多様な場面で、時には形状を変えるなどして、作動されることも期待される。

縦孔底へのアプローチとして、最近になって可能性を高めているひとつに、通信を確保するテザー付きのプローブを、探査機が縦孔上空を通過する際に投下しようというものがある。

問題は、プローブが投下後のハードランディングに耐えられるか、テザーによる緩衝制御は可能か、投下後の探査は実現可能か、ということである。しかし、はやぶさ2号機でのミニローバによる自律探査、近く行われる月面へのミニプローブ投下計画OMOTENASHIなどのヘリテージによって、問題解決の可能性も見えてきている。こうしたミニプローブによる探査可能性を高め、他月探査プロジェクトとの相乗りを含めた「パスファインダー」的な探査を、UZUME計画では視野に入れている。

6. UZUMEのアウトリーチ活動

UZUME計画では、理学、工学の他に、もう一つ重要な柱を立てている。それはアウトリーチである。

UZUME計画は、将来的には、人類の宇宙への進出を目指すものである。それは、理学者・工学者だけでなされるものではない。より多くの、一般の人

達とともになしていく計画である。そのためには、現在の計画を知ってもらうことが必要である。そして、単に「支援をお願いします」ではなく、「一緒にやっていきましょう」とする活動を目指している。UZUMEのアウトリーチ活動には、高校や高専の先生方、科学館の方々に担ってもらっている。本特集号の新井らによる解説記事を参照されたい。

7. 終わりにかえて

何故、人は月を、そしてその先を目指すのか?それは、自然は人類に必ずしも優しくなく、人類はその生存環境を様々に求めておくことが必要であるからである。にも関わらず、1972年に、アポロ17号が月面を去って以来、人類は月へと訪れていない。その理由としては、多額になってしまった予算のことなどもあるだろうが、やはり、過酷な月面環境が挙げられよう。しかし、月の縦孔の発見により、状況が変わろうとしている。月に、そして火星に、人類が新たな世界を築ける天然の環境が用意されているようなのである。もちろん、そのような世界のことはもっと先に考えればよい、という考えもあるかもしれない。しかし、少しずつでもその可能性を知るための情報を集めることは、科学者にとって興味あふれることである。

月火星で人類が切り拓く新たな世界は、初期においては、人類にとって究極の極限環境である。少ない人的・物的資源を効率良く使って、活動を維持・発展させなければいけない。その過程で、科学者によって大いなる知見が得られるであろう。得られた知見は、地上での活動、特に少子高齢化が進行する我が国にとって有益なものとなることが期待されよう。

更に一方で、本特集号でも論じられるように、人類の生存環境の拡大に資する情報とは別に、月や火星の様々な科学課題を解明できるための様々な知見が、月や火星の地下空洞探査で得られる。

UZUME(古今未曾有の日本の月/火星地下世界探査)を行う価値は高い。現在、50人近くの日本人科学者とエンジニアが、計画を実現に至らせようと議論を行っている。もちろん、困難にあふれた探査になるであろう。一度や二度で成し遂げられないことは確実である。それ故、UZUME計画では、宇宙理学

者・工学者だけでなく、様々な人たちが、様々な面で活躍していくことになっていく。本特集でUZUME計画に様々な面から興味を持っていただけたらと思う。UZUME計画,「是非,一緒にやりませんか」。

謝辞

本解説記事は、2019年度、日本航空宇宙学会主催の宇宙科学技術連合講演会予稿として投稿された「UZUME計画 その現状と今後について」を元としています。許諾いただいた当学会に謝意を表します。図5については、Goto, Y., et al., (2017), JAXA-RM-16-008から転載しています。許諾いただいた著者らならびにJAXA出版に謝意を表します。

参考文献

- [1]. Haruyama, J. et al., 2009, Geophysical Research Letters 36, L21206.
- [2]. Haruyama, J. et al., 2010, 40th Lunar and Planetary Science Conference, abstract #1285.
- [3]. Haruyama, J. et al., 2012, in Moon - Prospective Energy and Material Resources. Springer, 139.
- [4]. Robinson, M.S. et al., 2012, Planetary Space Science 69, 18.
- [5]. Wagner, R.V. and Robinson, M.S., 2014, ICARUS 237, 52.
- [6]. Chappaz, L. et al., 2017, Geophysical Research Letters 43, DOI: 10.1002/2016GL071588.
- [7]. Kaku, T. et al., 2017, Geophysical Research Letters 44, 10, 155.
- [8]. Cusshing, G.E. et al., 2007, Geophysical Research Letters 34, L17201.
- [9]. Cusshing, G.E. et al., 2015, 2nd International Planetary Caves Conference, abstract #9026.
- [10]. Goto, Y. et al., 2017, JAXA-RM-16-008.
- [11]. Hörz, F. 1985, in Lunar Bases and Space Activity of the 21st Century, 405.