

月の地下のトンネル

(国研)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所助教
春 山 純 一

本稿は、去る6月9日定時総会における特別講演会の内容をとりまとめたものである。

月にトンネルがある！？

今からちょうど30年前、私はカリフォルニア工科大学(カルテク)でポストドク研究員として研究を行っていた。カルテクは、アメリカNASAの惑星探査を主導するジェット推進研究所(JPL)と密接な関係を持ち、多くの優れた月惑星科学研究者が在籍するところである。

ある日のこと私は、月探査に関する興味深いテーマを探すため、地球惑星学科の図書室を訪れた。私はその秋には帰国し、宇宙開発事業団(NASDA)の月探査計画に加わることになっていた。そこで偶然手にした本の中に、「Lava Tube (ラバ・チューブ)」という言葉を見つけたのである。この出会いが、私が月の地下にあるはずの「溶岩トンネル」に興味を持つきっかけとなった。

溶岩トンネルは、溶岩が流れたあとに形成される地下空洞である。日本では富士山麓(写真-2)や韓国の済州島(写真-3)などに多く見ることができる。ハワイ島では、現在進行形で形成される様子を観察することもできる。

噴火によって流れ出た溶岩の表面は冷えて固まるが、内部の溶岩は流れ続ける。噴火が収まると内部の溶岩が流れ去り、空洞(トンネル)が残る。主にこのようにして、溶岩トンネルはできる。溶岩トンネルは、他にも、地下に流れる溶岩が地表に出ずに形成されるケースもある。

月の表面には、われわれが「うさぎ模様」とし

て見ているような黒いところがある。この黒いところは「海」と呼ばれている。月の海は、内部からマグマが噴出し、大量の溶岩が埋めたところで



写真-1 講演会の様子



写真-2 (左)富士山麓の溶岩トンネル(溶岩チューブ、溶岩洞窟などと呼ばれる)。溶岩トンネルは、富士山やハワイ島のような玄武岩質溶岩の領域に形成されることがあり、月の「海」領域にも存在するとされる。玄武岩溶岩は粘性が低く、床は平らになっていることが多い。

写真-3 (右)韓国済州島の溶岩トンネル「万丈窟」。観光地化されており、誰でも入ることができる。規模が非常に大きく、奥に2 kmほど続く(写真提供は、白尾元理氏の好意による)。

ある。海は、月の白い部分(「高地」と呼ばれる)に比べ低地で、そしてクレータが少なく平に見えるので、かつては、水で覆われた海と思われて、そう呼ばれたのであろう。この海領域には川のような痕が存在する。かつては水の流れてできたのではないかと考えられたこともあったようだが、その形状やアポロ計画で持ち帰られたサンプルから、これらは溶岩が流れてできた谷(リル)であると結論づけられていた。このリルの一部は、かつて天井があった溶岩トンネルの天井が陥没したり、隕石衝突によって崩れてしまっただけでできたといわれていた。そして、まだ完全に崩れていない溶岩トンネルが月に存在するかもしれない、とアポロ計画のころから推察されていたのである^{例えは、1), 2)}。しかし、地下のものである。月の溶岩チューブ(溶岩トンネル)の存在は仮説の域を脱していなかった。

月面の過酷な環境

月の溶岩トンネルは、アポロ計画が終わったころから注目されていた。それは、優れた天然のシェルターとなり、月基地建设に有用と考えられたからである¹⁾。

月面は、大気がないため、高速で隕石や塵が降り注ぐ。ただし、太古の昔と異なり、今現在、月面への隕石落下率は非常に少ない。月面に立った宇宙飛行士に直接隕石が当たることはまずない。以前、「宇宙ステーションが隕石で壊れたことはない。月面に基地を作るのに隕石を必要以上に怖がる必要はない」という人がいた。しかし、それは間違いである。問題なのは、隕石衝突によって撒き散らされる、高速の岩石、小石である。それらは、周りにマシンガンのように撃ち込まれるのである。それも月には大気がないため、飛び出たときの速さそのまま、である。軽い薄膜の構造体など穴が開いてしまう。

さらに問題なのは、放射線である。地球には磁場と大気があり、それらが、太陽や遠くの銀河からくる宇宙線からわれわれ人間ほか、地球上の生命を守ってくれている。しかし、月面は大気も磁場もない。地球の固有磁場に守られている宇宙ス

テーションよりずっと放射線被曝率が高い。太陽からの放射線は、最大で1 Svを越える場合が何度も観測されている。1 Svは、人間の致死量である。この放射線の対策のため、基地に月の砂(「レゴリス」と呼ばれる)を被せればよい、というのがずっと言われてきた。そのような図がよく描かれたりする。しかし、この砂を被せる、というのは逆に被曝率を上げる、ということが専門家による研究で結論づけられている。高速の宇宙放射線が被せたレゴリスと反応して、一つ一つは弱いが大量に発生する二次放射線を出してしまう。3~4 m以上もレゴリスを被せない限り、むしろ、被曝率は上がってしまうのである^{3), 4)}。

月面は、隕石や塵、放射線の危険に曝されていて、とても人類が、長期滞在するには不適な環境なのである。このことが、アポロ計画以後、人が月に行かなくなった大きな理由の一つであるともいえる。

月面基地建设場所として最適な溶岩トンネル

月の地下トンネルは、隕石や放射線の危険から、人や機器を守ってくれる。それゆえ、月の地下トンネルの存在は、非常に重要な意味を持つ。

地下トンネルの利点はまだ多くある。まずは熱的環境である。非常に温度が安定していると考えられている。トンネル関係の方には常識かと思われるが、地下空洞の中は、外気が入り込まなければ、温度は一定である。月の赤道付近、地下100mの深さでの温度は-20~0℃程度と推定され、人にはちょっと寒い、機器も壊れない温度である¹⁾。

さらに、溶岩トンネル内は、形成の最終段階で、溶岩が流れ終わって固まった床があるはずである。月の溶岩は水などを含まず、また、溶岩の冷却は放射でしか起きないので、溶岩はゆっくりと固まり、結果、平らな床となっている可能性が高い(写真-2, 3)。天然の舗装床となっていると考えられる。物を設置したり、車を走らせたりするのに都合がいいに違いない⁵⁾。

また、溶岩トンネルは密閉性が高いとも考えら

れる。溶岩トンネルは、内部を高温の溶岩が流れて作るため、天井も壁も岩石が融けている状態となっている。溶岩が流れ去ると、トンネル内部が急激に冷却して、トンネルの天井や壁の表面はガラス化する。実際、地球の溶岩トンネルの内部の表面は、つるつるしてガラス化しているところがある。月のトンネル内の表面がガラスでコーティングがなされ、ひび割れなどが覆われているとしたら、トンネルの前と後ろにシャッターをつけて、空気を送り込めば、宇宙服を着ることなく人が住める与圧空間ができるであろう。

セレーネ搭載カメラで溶岩トンネル入り口を探す

アメリカでのポストドク生活を終えて、私は帰国し、科学技術庁の管轄する(旧)宇宙開発事業団(NASDA)に任期付きの研究者として採用された。ちょうど、NASDAでは月探査計画を立ち上げようとしていた。NASDAで企画された月探査は、やがて、文部省と科学技術庁が協力するかたちへと発展しSELENE(セレーネ)と名づけられる。セレーネとは、ギリシャ神話にでてくる月の女神の名前である。また、SELENEは、Selenological and Engineering Explorer(月の理学と工学の探査機)の略称でもある。探査は、何かを知りたいとする理学者だけでも、非常に優れた技術を持った工学者だけでもできない。互いに密接な関係を構築することで素晴らしい成果を生む探査ができる。そうした理工学の密接な連携のうねり成し遂げるのだ、という思いを込めて付けられた名前である。

私は、セレーネ計画で、科学探査用のカメラ「地形カメラ」(地球の出を撮したNHKの「ハイビジョンカメラ」とは異なる)の開発の主責任研究者(PI: Principal Investigator)を任されることになった。このときに私が、地形カメラ観測でぜひとも達成したいと思っていた目標の一つが、月の溶岩チューブの発見であった。

どのようにして、地下のものをカメラで発見するか。私が考えたのは、溶岩トンネルの崩れた入

口となる「横穴」を発見するというものである。地形カメラは、月表面の立体視画像、すなわち凸凹の情報を得るため、前方と後方を見る望遠鏡を持つ。この斜めを向くカメラで、「横穴」を発見できないかと考えたのである。セレーネでは、10 m/画素という高解像度で月全球表面の画像取得を目指した。これらの画像の中に、例えば、先に述べた溶岩の流れの痕であるリル構造のどこかに「横穴」があるのではないかと考えたのである。

見つからない「横穴」

2007年9月14日、セレーネは、無事、JAXA種子島宇宙センターから打ち上がった。企画が始まって、すでに10年以上の年月が経っていた。その間に多くの困難があった。日本ではバブル経済が破綻し多くの企業が倒産した。2001年にはアメリカ貿易センターがテロで攻撃される9.11が起き、月探査などしている場合か、という声も上がった。加えて、ロケットの打上げ失敗、衛星の失敗、探査機の失敗と続き、日本の宇宙開発は試練を迎える。そして、セレーネ中止もやむなし、というところまでも行った。しかし、それでも、多くの人々の理解に助けられ、セレーネは無事、なんとか打ち上がったのである。

約一月で、セレーネは月に到着し、観測を始めた。当然、私は、カメラのデータから、地下トンネルの崩れた痕のような横穴探しを続けた。まず探したのは、クレータが列をなしている場所であった。溶岩が噴出することで陥没した「カルデラ」のような地形からクレータがチェーンのように並び、地下にトンネルが形成され、その所々が崩壊している、と見えるところである。その場所は、それまで粗い解像度の画像データしかないところであった(写真-4)。その10倍ほどの解像度があるわれわれの地形カメラデータならば、横穴を見つけられると期待し、データを調べた(写真-5)。しかし、そこには横穴らしきものは、見つけれなかった。その後も、もたらされたデータを丹念に調べたが、やはり、それらしい横穴を見つけることができなかった。セレーネで得られた

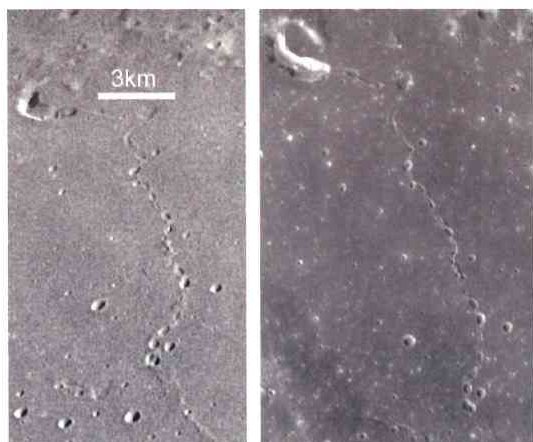


写真-4 (左) 月面雨の海領域に見られる鎖状(チェーン状)に並んだクレータ群。北方にカルデラ(上昇してきた溶岩が噴き出すなどして抜けたあとにできる陥没地形)が見られる。これらチェーンクレータは、溶岩トンネルの陥没にできたのではないかとされている。画像は、アポロ15号(1971年)の周回機が、斜め方向から撮ったもの。

写真-5 (右) 写真-4と同じチェーンクレータのSELENE(かぐや)の「地形カメラ」が撮ったもの。解像度は10m/画素。ここに、溶岩トンネルの入口となる「横穴」があるのではないかと調べたが、見つからなかった。

データで、何かしら発見できると期待していただけに、その失望感は大きかった。

地下トンネルに開いてると期待していた「横穴」を発見できずに、ミッションもあと数箇月という2009年4月初旬、横穴に代わるものの発見があった。「縦孔」である。

■「縦孔」の発見

その日、自分の部屋で執務していると、地形カメラデータを画像チェックしていた地形カメラチームのメンバーから、「データ解析室に来てください」との連絡を受けた。部屋に駆けつけると、解析用のモニタに、周囲のクレータとは異なる黒い孔が映っていた(写真-6)。

孔の直径は50mほど。この孔が黒いということは、底が映っていないということである。そして、データの取得時の太陽高度は、42°であった。つまり、直径以上の深さをもつような非常に深い

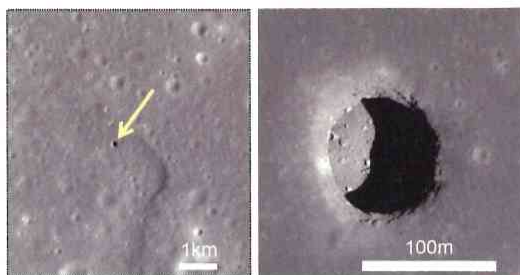


写真-6 (左) 月のマリウスヒルに見つかった縦孔(写真中、矢印の先)。直径50m。太陽高度が約45°のときに撮られた画像で、クレータの底が写っていないことから、50mより深いと推測され、溶岩トンネルのような地下の空洞に開いた「天窓」と考えられる(画像: JAXA/SELENE)。

写真-7 (右) 米国月探査機LROが撮像した月の静の海の縦孔(図中、矢印の先)。直径は90m、底までの深さは110m。縦孔の底は、当初の予想とは異なり、ほぼ平らである。静の海の縦孔は、2009年SELENE搭載地形カメラにより発見され、その後、この画像のように、さまざまな太陽高度で画像が取得されている。通常のクレータの周りに形成される円環状の縁(リム)とよばれる構造が見られない。そのため、この縦孔は、溶岩トンネルのような地下空洞の天井を隕石が撃ち抜いてできたものと考えられる。

ものであった。このような径と深さを持つ孔は、通常の隕石衝突では形成されない。地下に溶岩トンネルのような空洞があることを示唆していた。そしてまた、この孔は「嵐の大洋」のマリウス丘西端、かつて溶岩が流れた痕跡であるリルの上に位置していた。まさに地下のトンネルに開いた「天窓」と呼べるものであった。これこそ、横穴に代わる、地下のトンネルの存在を証拠づける「縦孔」であった。

実は、地下空洞の「天窓」としての縦孔の存在は、事前に予想されていた。火星では、2007年に米国地質調査所のクッシング研究員らが、火星探査機のデータから黒い縦孔を発見していたのである⁶⁾。彼らは、火星のアルシア山麓で直径100～250mの縦孔を7つ見つけ、それぞれに女性の名前を付けていた。火星の地形には月と同様に溶岩流の痕跡が多く、地下に溶岩トンネルが存在する可能性が示唆されていた。火星に発見された縦孔の中には、周囲に陥没地形が見られるものもあり、

地下に空洞が存在することはほぼ間違いないと思われる、「溶岩トンネル天窓の候補」として報告されていたのである。こうした前例もあり、月にも同様の縦孔が存在すると考えていて、メンバーにも注意をしてもらっていた。しかし、システムティックな探索は行っておらず、最初の縦孔の発見は、まったくの偶然の産物でもあった。最初に縦孔を見たときの私の感想は、「ここにいたのか!」というものであった。遂に見つけた、という気持ちで一杯であった。成果は、その後、国際誌に発表され、その号の表紙に発見した縦孔の画像も載せられることになった⁷⁾。

その後、月面全面について、探索し、マリウス丘以外に、ウサギ模様の顔にあたる静の海、裏側の賢者の海に、直径数十m規模の縦孔を発見した。その後、米国月探査機 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) のカメラチームによって、より解像度の高い画像が得られ(写真-7)、その底には横方向に奥行きがあることもわかっている。

■ 地下のトンネルの耐久性

月の地下トンネルが基地として有用であることはすでに述べたが、その有用性には異論もある。日米欧をはじめとする多くの宇宙機関が参加する国際宇宙探査調整グループ(International Space Exploration Coordination Group: ISECG)が2021年に発表した科学知識ギャップ評価レポートには、「溶岩洞(トンネル)の使用には、表面の清掃や水平化、壁の支えが必要になる」との記述がある⁸⁾。この記述は、月の溶岩トンネルの天井が部分的に崩落し、床に岩が散乱しているという前提にもとづいているようである。そのため、レポートでは「月の溶岩洞は将来的に基地として利用する可能性はあるが、現時点では難しい」と結論づけている。しかし、この評価は、地球の溶岩トンネルの崩壊原因の多くが地球特有の要因に起因することを考慮していないようである。

地球の溶岩トンネルの天井が崩壊する主な原因として、次の二つが挙げられる。一つは水の影響である。地表に降り注いだ雨水が溶岩トンネルの

天井の岩石に浸透し、気温の低下によって凍結・膨張することで岩石の破壊を引き起こす。この過程がくり返されることで、天井の割れ目が成長し、最終的に崩落する。もう一つは植物の根の影響である。地上の草木の根が成長し、溶岩トンネルの天井を貫通することがある。このような根の侵食により天井の構造が弱まり、崩落の要因となる。しかし、これらの要因は月には存在しない⁵⁾。

月の地震(ムーン・クエイク)による影響を懸念する声もあるが、その規模はほとんど人間が感じないほど小さい。さらに、地球上の溶岩トンネルが大地震で崩壊したという事例はほとんど報告されていない。例えば、富士山麓の溶岩トンネル群は、大地震の影響を受けても崩壊していない。また、ハワイ島では近くの火山噴火に伴いマグニチュード7～8の地震が発生した際にも、溶岩トンネルの崩壊は観測されなかった²⁾。したがって、「月の溶岩トンネルの内部は崩落が進行しており整地が必要である」という主張には科学的根拠が乏しい⁵⁾。

次に、縦孔の下に溶岩トンネル(溶岩チューブ)がある場合としたとき、その耐久性を梁理論から考えてみよう。梁の端にかかるモーメントによる剥がし応力が梁の端の引張強度を超えない限り、その梁は破壊しない。月の重力加速度を g 、溶岩トンネルの天井厚、すなわち縦孔の深さを d 、溶岩トンネルの天井の岩石密度を ρ 、引張強度を S とすると、溶岩トンネルの最大幅 w は、 $\sqrt{Sd/3\rho g}$ と表せる^{7),9)}。例えば、溶岩を玄武岩として、 $S=6.9$ MPa、密度 $\rho=2,500\text{kg/m}^3$ 、そして $g=1.62\text{m/s}^2$ のもと、 $d=60\text{m}$ (静の海の縦孔の壁の厚さをその下の溶岩トンネルの天井厚とした場合)としてみると、 w は300mとなる。これは、天井厚が60mの溶岩トンネルは、最大300mの横幅を有しても崩壊しないことを示している。観測された静の海の縦孔の直径は約100mであり、さらに横方向にも広い空間が存在すると期待できることを意味する。

梁理論は、天井が水平の場合である。しかし、溶岩トンネルは往々にして、アーチ状になる。アーチ形状が天井の崩落をもたらす加重を分散す

るからで、逆に言えば、構造的に安定になるように溶岩トンネルが形成されるといってもよいだろう。Blairらは、溶岩トンネルの天井形状をアーチ形(実際には半楕円)として、溶岩トンネルの安定性を議論した。その結果、天井厚が2mもあれば、幅が1km以上の溶岩洞は安定した状態を保つことができることを示した¹⁰⁾。

また、Chwalaらによる研究¹¹⁾では、溶岩トンネルの天井の形状を実際の洞窟の断面形状から確率的に推定し、トンネルの安定性を議論した。その結果、天井厚が10mより薄くなると重力的に不安定で崩落が起きやすいことがわかった。さらに、溶岩トンネルの上方には厚い溶岩層が一枚あるのではなく、溶岩層が積層しているとして、トンネルの天井の安定性も議論したところ¹²⁾、こうした薄い溶岩層が積層しているケースでは、予想どおり、溶岩トンネルの天井の不安定性が認められた。ただし、これらの結果は注意が必要である。崩落しやすいのは、実際のところ、ランダムに与えたトンネル形状の中でも水平に近い天井を持つ場合であり、これらが崩壊の確率を格段に高めているのである。この研究でもう一つ注意点がある。それは、この研究は二次元解析にもとづいており、実際の三次元構造では、奥方向へのひび割れの成長もあって初めて崩落に至るため、二次元解析での崩落可能性は、三次元解析でより高く顕れるということである。Chwalaらのこれまでの研究は、月の溶岩トンネルの重力による自然崩壊は起きにくいことを再確認したともいえる。

月の縦孔は、これまで、10個程度しか見つかっていない¹³⁾。実際のところ、これは月の溶岩トンネルの天井は、非常に崩壊しにくいことを意味しているとすれば、構造耐性の計算と整合性がつくともいえよう。一方で、火星に発見された縦孔は、すでに50を越えている¹⁴⁾。

梁理論の式からもわかるように、重力が大きいほど溶岩トンネルの幅は小さくなり、耐性が低くなる。したがって、火星では溶岩トンネルの崩落がより多いと推測できる。また、火星に縦孔が多いのは、過去や現在にわたって水が存在しているこ

とに関連し、溶岩トンネルの天井の崩壊に水が関与している可能性を示唆しているのかもしれない。

UZUME 計画

現在、日本の理工学者約50名が、月の縦孔・地下空洞の探査計画を検討している。この計画の名称は「うずめ計画」である。「うずめ」は、古事記や日本書紀に登場する女神で、^{あまのいわと}天岩戸に隠れた^{あまてらすおおみかみ}天照大神を、踊りによって誘い出したと語られている。うずめの女神によって洞窟に光が当たったということにちなんで、この名前が採用された。「うずめ」はローマ字で「UZUME」と書く。そして、その各アルファベットを書き下したフルネームが、Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration(古今未曾有の日本の月地下世界探査)である。これは、数人の会議で額を寄せ合ってひねりだした。まず、探査計画の名称は日本語にしようという方針が決まった。そのうえで、Moon Explorationの「ME(め)」を付けるとして、「うずめ」を思いついた。そして、最初の「U」であるが、Unprecedentedという単語にたどり着いた。当初、「Unprecedented」は「空前絶後」と訳していたが、それでは探査が一度限りになってしまう。そこで、現在は「古今未曾有」(過去から現在に至るまで、いまだかつてない)という表現を採用している。その次の「Z」については難問だった。Zoo(動物園)とか、Zenith(天頂)とか、Zodiac(黄道帯)とか出たが、どれもしっくりこなかった。しかし、ついに「Zipangu」(ベネチアの商人で中国に来たマルコ・ポーロが、見聞した内容を記録した東方見聞録に、中国の東にある黄金の国—日本のこととも思われる—であり、Japanの語源ともいわれる)を、辞書で見つけたとき、「これだ!」と思った興奮は忘れられない。こうなると、最後のUは「まあ、なんでもいいか」という雰囲気になり、Underworldに決まった。ただし、「地下世界」という表現はやや怪しげな印象を与えかねず、人によってはやや少し引かれてしまうかな、と思うこともある。

UZUMEが目指すのは、月だけではない。火星

の縦孔・地下空洞も探査対象としている。その際は、UZUMEという名前のMoonをMarsに変えるだけでよい。

月の地下トンネルでの科学

月や火星の縦孔、地下トンネルを探査する科学的意義について、本稿で簡潔に述べておきたい。

月や火星の縦孔の壁面は、希少な露頭(地層を見せる断面)を形成しており、過去の溶岩噴出過程を直接観察できる。つまり、月の火山活動の歴史を明らかにする手がかりとなる。火山活動は天体内部の変化を反映しているため、縦孔の壁面にみられる露頭の調査を通じて、これまで不明だった内部変化の歴史を解明できると期待される。また、溶岩トンネルの形成過程を詳しく理解することは、天体の溶岩の温度やガス成分の多寡と密接に関係し、月や火星の進化過程に対する制約を与える重要な要素となる。

現在、月には磁場が存在しない。しかし、もし過去に月が地球のような固有の磁場を発生していたなら、その時期に噴出した溶岩は残留磁化を獲得しているはずである。この残留磁化を有意に計測できるのが、縦孔や地下トンネル内部である。一方、月面は隕石衝突に曝されて、磁化が失われたり、衝撃磁化を帯びていたりで、過去の磁場を知るのには不適である。磁場は天体表面の生命を宇宙放射線から守る役割を果たす。月のように小さな天体でも磁場が形成されるのであれば、宇宙に存在する無数の小型惑星にも生命が発生する可能性があることを示唆する。過去の月の磁場を明らかにするため、UZUME計画での探査をぜひ実施したいと考えている。

火星の地下トンネルに地球外生命？

火星の縦孔・地下空洞は、科学探査においてさらに重要な対象である。そこに地球外生命が誕生している可能性があるからだ。

地球型生命を構成するアミノ酸の基本要素は、炭素を骨格とする有機物である。有機物は宇宙に

広く存在しているが、それが高分子化し、機能を持つアミノ酸へと進化し、さらに膜構造を形成して細胞となり、DNA・RNAを持ち、エネルギーを生み出すタンパク質を合成するに至らなければ、現在の生命体にはならない。この有機物の化学進化を促進する要因の一つが宇宙放射線である。宇宙放射線は高エネルギーによって分子構造を変化させ、結合を促す。しかし、ある程度、複雑な有機分子が形成されると、宇宙放射線は逆にそれら分子を破壊してしまう。したがって、生命が誕生するには、宇宙放射線の影響を受けすぎない環境が必要となる。

火星の溶岩トンネル内部もまた、宇宙放射線から遮蔽されており、この点で生命の発生、そして進化が起こり得る場所である。そこでわれわれは、地球外生命を、それも単一の個体や単一の種ではなく、生態系コロニーを形成している可能性を探ることができるかもしれない。もし、そのようなコロニーを発見し、詳細に調査できれば、有機物からアミノ酸、さらには生命へと進化する過程を解明する重要な手がかりを得られるだろう。

一方で、もし、火星の地下トンネルに生命が発見されなかった場合、そのときこそは、地下トンネルに人類の居住拠点建設を加速する契機となろう。

月の地下トンネルに基地をつくる意味

もし、月に基地を建設できるとしたら、われわれは何を考えるだろうか。それは、多くの人がワクワクしながら想像できる題材である。まず、私ならば、科学探究の拠点として活用したい。未知の空間の探検は、科学的な目的を超えても魅力的な挑戦である。

月の重力が地球の1/6であることは、非常に重要な要素だ。ある宇宙飛行士は、微小重力の宇宙から帰還した際、地球の重力がストレスに感じられ、戻りたくなかったと語っている。さらに、月の低重力環境では、植物が地球よりも大きく成長する可能性があるともいわれている。高齢になり、身体の動きに支障を感じるようになったとき、重

力の小さい月で第二の人生を始めることも考えられるかもしれない。

また、月の過酷な環境は、人間の挑戦欲を刺激し、リアルな危険を伴う新たな娯楽の場ともなり得る。地下トンネルは、適度な温度を保つ天然のシェルターであり、さまざまな物資の貯蔵に適している。エネルギー供給や排熱の課題はあるものの、情報サーバの設置場所としても価値が見出されるだろう。

月の地下トンネルでの人類の居住拠点構築の未来には、多様な可能性が待っている。

これまで宇宙は遠い存在だった。しかし、現在、宇宙に至る技術は急速に進化している。月を含む宇宙への輸送コストは大幅に低下すると予測される。その結果、40万 km 離れた月に人類を送ったアポロ計画以来、地球の上空わずか400kmの宇宙ステーションに留まっていた人類が、再び月へと向かい、人類全体が月に長期居住拠点を建設し、さらには、その先の宇宙へ進出する時代となるはずだ。

月への進出は、一国や一民族の努力だけでは成し遂げられない。人類が一丸となって目指すべきものであり、その過程を通じて、国境を越えた協力と平和の実現につながる可能性にも、私は期待したい。

月面の環境は非常に過酷であり、人類がそこに恒久的な拠点を築くことは容易ではない。しかし、月の地下トンネルは、その難題を解決する鍵となる存在である。そして、その入口である縦孔を発見した日本は、UZUME計画を通じて、人類の平和的發展を推進する重要な役割を担うべきだと考える。

今回のご縁を機に、トンネルにかかわる最先端の知識・技術・経験を持つトンネル技術協会の方々に、ぜひ今後のUZUME計画の実現にご協力いただきたいと思っている。そして、一緒に月を、そしてその先の宇宙を目指しませんか？

参 考 文 献

- 1) Horz, F.m, Mendell, W.W. (ed.): LAVA TUBES: POTENTIAL SHELTERS FOR HABITATS, Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, pp. 405-412, 1985.
- 2) Coombs, C.R. and B.R. Hawke: A Search for Intact Lava Tubes on the Moon: Possible Lunar Base Habitats, The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, SEE N93-17414 05-511 91, pp.219-229, 1992.
- 3) Naito, M. *et al.*: Radiation dose and its protection in the Moon from galactic cosmic rays and solar energetic particles: at the lunar surface and in a lava tube, *Journal of Radiological Protection*, Vol.40, pp.947-961, 2020.
- 4) Denisov, A.N. *et al.*: On the problem of lunar radiation environment, *Cosmic Research*, Vol.48, No.6, pp.509-516, 2010.
- 5) Haruyama, J. *et al.*: Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon and Mars Exploration (UZUME): Great resource-based exploration benefits, *Journal of Evolving Space Activities*, Vol.1, 108, DOI: 10.57350/jesa.108, 2023.
- 6) Cushing, G.E. *et al.*: THEMIS observes possible cave skylights on Mars, *Geophysical Research Letters*, Vol.34, L17201, 2007.
- 7) Haruyama, J. *et al.*: Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *Geophysical Research Letters*, Vol.36, L21206, 2009.
- 8) ISECG Science Knowledge Gap Assessment team, In-situ resource utilization gap assessment report, 2021.
<https://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/04/ISECG-ISRU-Technology-Gap-Assessment-Report-Apr-2021.pdf>
- 9) Oberbeck, V. R. *et al.*: On the origin of Lunar sinuous rilles, *Modern Geology*, Vol.1, pp.75-80, 1960.
- 10) Blair, D.M. *et al.*: The structural stability of lunar lava tubes, *Icarus*, Vol.282, pp.47-55, 2017.
- 11) Chwala, M. *et al.*: Structural stability of lunar lava tubes with consideration of variable cross-section geometry, *Icarus*, Vol.411, 115928, 2024.
- 12) Chwala, M. *et al.*: Effects of layered roof for stability and exploration of lunar lava tubes, *Icarus*, Vol.643, 118918, 2024.
- 13) Wagner, R.V. and Robinson: Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits, *Icarus*, Vol. 237, pp.52-60, 2014.
- 14) Cushing, G.E.: CANDIDATE CAVE ENTRANCES ON MARS, *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol.74, No.1, pp.33-47, 2010.

1) Horz, F.m, Mendell, W.W. (ed.): LAVA TUBES: