

# 孔があったら入りたい！

## ～エアバックを用いた月の縦孔内部への直接着陸機の技術実証の提案～

山田 かん奈(高3)【名古屋市立北高等学校】、竹内 菜摘、藤原 慎(高3)【愛光高等学校】

井口 蓮(高3)【大阪府立豊中高等学校】、渡邊真隆(高2)【山梨県立吉田高等学校】

### 1. ミッションの目的と意義

#### 1.1 目的

将来、惑星移住を考えた時、火星は地球に比べ日中時間や陸地面積が類似しているなどの、共通点は見られるため一つの有力な候補地である。しかし、火星表面は居住において無視できない問題点、つまり放射線、温度、惑星環境などがある(表1)。一方で、火星で発見されている縦孔は、これらの問題点を克服できる可能性が予想されており、人類は住むのに適しているのではないかと考えられる。

表1 火星の表面と縦穴内部の放射線、温度、その他条件の比較 [(1)(2)]

火星	放射線	温度	その他条件
表面	平均 22mrad/日	平均 -43°C	砂嵐、太陽風の影響が大きい。
縦孔内部	表面より少ないと考えられている。	温度が一定で、表面より暖かいと考えられている。	砂嵐の影響を受けにくく、太陽風も防げると考えられている。

このような縦孔が数十個発見されていて、表面に比べ人類が住むのに適していると考えられている。しかし、現在に至るまで火星の縦孔の内部の詳細はわかっていない。

そのため、直接孔の内部を探索する必要がある。しかし、火星までは距離が遠く、通信を行う際、最接近していても片道4分、最離遠ならば20分程かかってしまい、初めての場所に探索を行うとなると、心許ない。

そこで、火星より詳細が分かっており、尚かつ地球から距離の近く探索のしやすい月の縦孔を使って、縦孔内部を探索する技術実証を行うことを目的とし、その技術を将来の火星縦孔探索に役立てようと考えた。

また、地球の縦孔ではなく月を探索対象とする技術実証を行うことで、地球とは異なった重力場、熱温度、放射線環境で探索を行う技術を獲得することができ、火星に近い環境で技術を習得することができる。

本ミッションの目的は、

「将来の火星の縦孔探索に向けて、火星よりも近く、縦孔内部の様子が、明らかな月の縦孔に直接着陸する技術を実証する。」

こととする。

#### 1.2 ミッションの意義

現在に至るまで、縦孔内部に関する直接的な探索は行われていない。

しかし移住を考えると必ず必要になる技術である。

そして、火星の縦孔の詳細なことがわかれば将来の火星移住に繋がっていく。

またここで得られた技術実証は、火星・月に限らず他惑星で縦孔が発見されたときに孔内部を探索する方法として応用できる。

縦孔内部への直接着陸が成功すれば世界初となり、また着陸することだけでも貴重なデータとなる。

月の縦孔については過去に打ち上げられた月周回衛星「かぐや」などの調査によって具体的な数多くのメリットが考えられた情報を、より確かにできる。

そして、新たな事実を発見するために縦孔へ調査機をおくることは有益であると考えられる。

### 2. 具体的な実現方法、もしくは現実のために必要な課題・開発すべき項目

#### 2.1 具体的な実現方法

月の縦孔は、2009年に日本の月周回衛星「かぐや」が発見した縦孔はマリウスヒル、静の海の縦孔、賢者の海の縦孔の3つである。また、それぞれの孔の場所を特徴を以下の図1に示し、特徴を表3にまとめる。

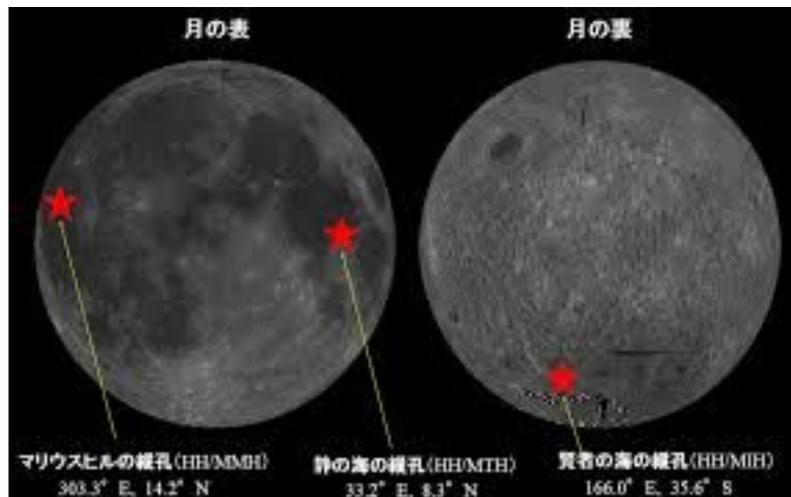
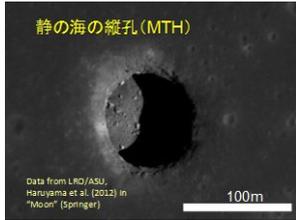
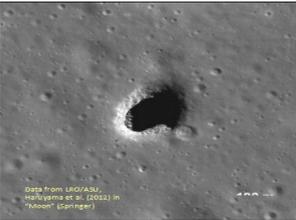


図1 月の縦孔位置画像 [(3)]

表3 月の縦孔の特徴

孔のある地点	マリウスの丘の縦孔	静の海の縦孔	賢者の海の縦孔
孔口の形状、大きさ	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・少々いびつ</li> <li>・推定長径59m, 短径50m, 深さ約50m。</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ほぼ円形</li> <li>・長径98m, 短径89m, 深さ107m</li> <li>・月最大級の縦孔</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・非常にいびつ</li> <li>・長径118m、短径68m、深さ孔の縁から48m</li> </ul>
地下空洞	存在する[(13)]	存在する推定されている [(9)]	存在する推定されている [(9)]
孔の底の状態	・ほぼ平らな底がある	・ほぼ平らな底がある	・異なる底での岩の分布
孔周辺の様子、特徴	・周りに大きな岩やクレータが無い	・底から見える地球 ・周りに大きな岩やクレータが無い	・磁気異常がある(※2) ・月の裏側にあり、地球からの電波の影響が少なく、電波天文観測にも有効と言われている ・周りに大きな岩やクレータが無い

(※1)最初の報告では、深さは80mに及ぶかもしれないと計算されたが、その後のより精度の高い画像情報を基に計算し直された結果、50m程度の深さと訂正された。

(※2)このことから、賢者の海の縦孔では、太陽風(水素イオン)などの被爆量が少なくなると考えられる。

このような条件の中から、着陸が容易で底から地球が見えダイレクト通信が可能と考えられる静の海の縦孔に着陸する。

また、下の2枚の画像は、アメリカのLROが衛星を斜めに傾けて、静の海の縦孔を撮影したもので左は東側から、右は西側から撮ったもので、それぞれ、縦孔の壁、そして奥に広がる地下空洞を捉えている。このことから、探査機で縦孔内部の探査するためにも静の海の縦穴が適していると考えられる。

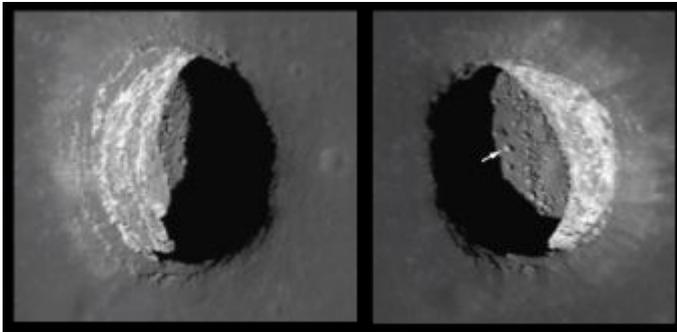


図2 縦孔を横から見た写真[9]

## 2.2 ミッション内容

### ミッションの手順を

メインミッション・・・縦孔直接着陸までの技術実証。

サブミッション・・・着陸に成功したあとに行く。

と呼ぶ。サブミッションでは、縦孔内部の温度・放射線の測定、縦孔内部の撮影を計画する。

また、探査機を作成する。探査機の名前はしんげん餅号として各ミッション段階にあわせて分離をし、ミッションを一番行いやすい形になるように工夫した。それぞれ分離前・後の名称はわかりやすいように変更する。

しんげん餅号・・・分離前の機器。地球から打ち上げ後月の周回軌道までの形(図3)。

大きさ1.5m x 1.5 m x 1.5 m。質量、約3,000kgで構成する。

しんげん号・・・分離後の母体。そのまま月周回軌道をまわり続けて地球と縦孔内部の通信中間機器になり、より確実にデータを地球に、届けることができるようにする(図3の金色の機体)。

餅号・・・分離後の着陸機(図4)。しんげん号から着陸誘導機で分離した後、月縦孔内部に着陸し内部探査であるサブミッションを行う機器。

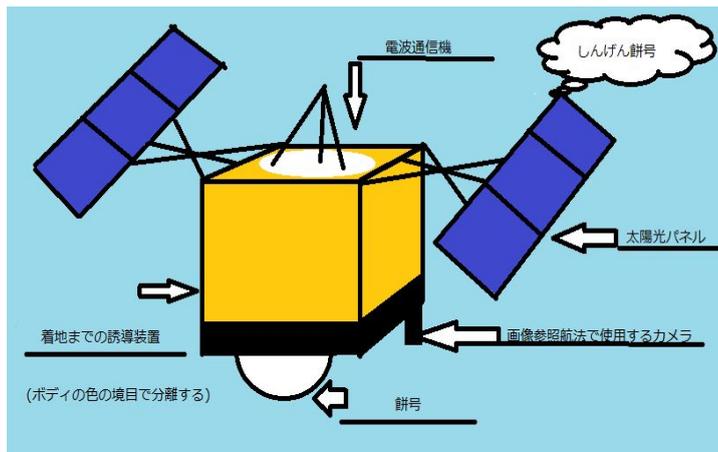


図3 しんげん餅号外観

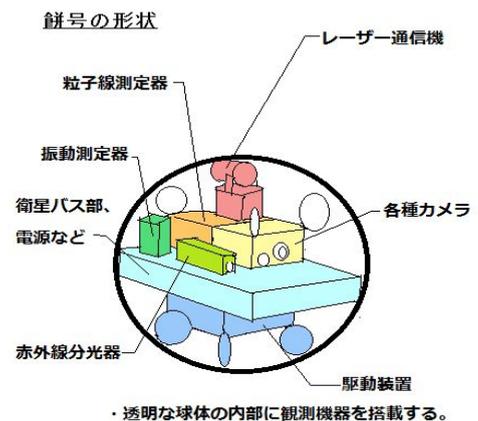


図4 縦孔探査機餅号

餅号(図4)は、衝撃に強い球形をしている。駆動装置と連動した内部に接面している8つのキャタピラが回転し、表面が動くことによって、内部は上下左右混同することなく移動することができる。餅号の外面は抵抗のない状態だと、レゴリスで滑って進めないことが考えられるので、小さな突起を表面のカメラや温度装置などの測定装置が露出していない部分に施す。

測定装置は縦孔内部を直接測るために露出している。電源と縦孔内部での電源は、餅号内部に内蔵するエボルタ電池を使用する。

餅号は縦孔内部に、電源などで排出するガスなどを、撒き散らかさないなど縦孔内部の環境を汚さないことに留意した設計でしている。

## 2.3 メインミッション手順

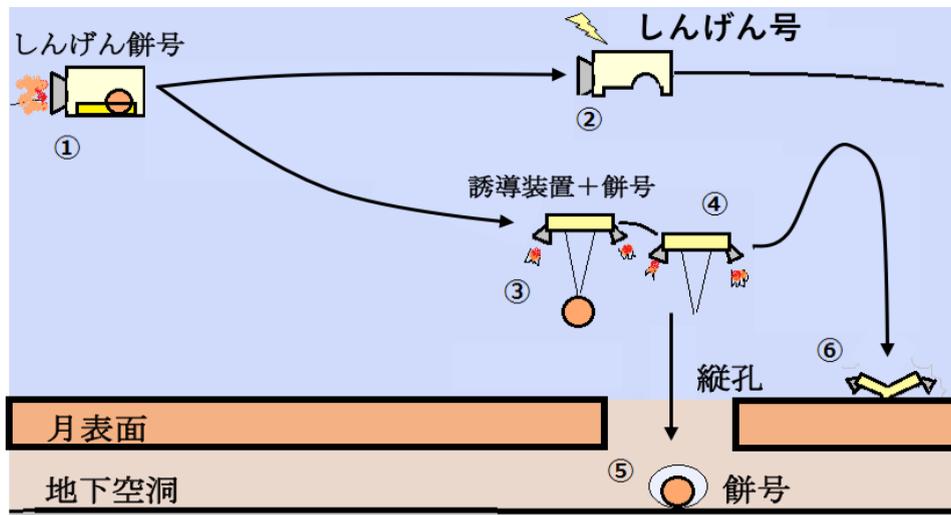


図4しんげん餅号の航路図

(1)地球からH-2Aロケットで打ち上げる。

打ち上げ後、月周回軌道に入り縦孔を、縦孔を赤外線カメラ確認。(図4-①)

静かの海の縦孔周辺が夜直前になるのを待つ。昼だと明るすぎて、着陸するとき画像参照航法に不向きなため。夜だと反対に $-150^{\circ}\text{C}$ の温度にエアバックが耐えられないため、夜直前から直後に実行する。

夜直後、SLIMの画像参照航法を用いて、縦孔に月面高度15kmまでに接近する。

(2)しんげん餅号から着地点までの誘導装置がついた餅号を分離し、(図4-③)の状態では縦孔に接近する。(図4-③)

その後しんげん号は、中間通信機器として運用し、月周回軌道を周回する。(図4-②)

(3)着地点までの誘導装置は縦孔真上50mまで接近する。接近後、縦孔の真上で着地点までの誘導装置から、餅号を切り離す。(図4-④)

誘導機は、縦孔内部に燃料などの化学物質を撒き散らかさないようにするため、縦孔内部には入らない。月の地表に落下させる(図4-⑥)。

(4)餅号はエアバックを展開し、機器を包み込み、衝撃から守りながら縦孔内部に着陸する(図4-⑤)。縦孔内部では、餅号内部に搭載されている電池を使用する。

ここまでのメインミッションが成功したら、サブミッションを行う。

誘導装置の推進剤は、

1. 着陸機と餅号を分離
2. 推進系で着陸機と餅号の速度を落とし落下(月の重力と遠心力の差が落ちる力)
3. 大体100秒以内くらいのオーダーで月地表に到達、この時に推進系で水平速度の速度を落とし、垂直方向は衝突しないよう減速しながら縦孔に向かう。
4. 縦孔の上空から餅号を落とす。縦穴の地面に衝突して跳ね返ってくる餅号の高さが縦穴より低くなるように、落とす高さやエアバックの性能を設定。  
ところで使用する。

## 3. サブミッション及び使用機器

縦孔内部の温度、放射線測定及び内部撮影を行う。それぞれ得たデータを地球へ送る。

・縦孔内部の温度測定では、近赤外分光計を使用する。

惑星表面で散乱された太陽光を波長ごとに分け波長1.8~3.2ミクロンの間の光の強度を測ることで温度を測定する。(写真1)

縦孔内部の空間温度を測定し、入口と奥部の温度の差や途中地点の温度の違いや、月表面との温度変化の差を、測定する技術実証を行う。

また、補助的な温度測定として、非接地型熱電対K,Eを使用する。予想する温度の範囲内なら測定可能だ

が、測定不可能な範囲だと測定できないため、補助的な温度測定装置とする。  
こちらは、地表面を測定することが可能なので、地表面の探査を行う際に、使用する。

また、最近別の研究で、かなり厚い砂の層があるかもしれない、ということが分かりつつある。  
この研究では、空洞の広がり次第で、底の温度変化が変わることが予想され、温度変化は、現在考えられている、予想と違うことがありえる。

そのため、温度の時間変化を探査し現在分かっている砂の厚みの調査資料と組み合わせることで、縦孔の底の砂の厚さ、空洞の広がりをもっと詳しく推定するデータになり、月の地下空洞マップが作成しうるのではないかと、考えている。

・縦孔内部の放射線量の測定では、粒子線検出器(PS)を使用する。

粒子線を測定することで宇宙に降り注ぐ放射線の大部分を測定する。(写真2)

縦孔内部の放射線量を測定し、温度同様に、入口と奥部の温度の差や途中地点の放射線量の違いや、月表面との放射線量の差を、測定する技術実証を行う。

研究では、空洞奥は厚い天井により、紫外光やガンマ線などの放射線は、おそらく到達しないと考えられているが、一方、縦孔底、その周辺の空洞では、放射線環境はまだ分かっていない。

この研究では、プロトン(陽子)や電子は、縦孔内に張り込んだ後、蓄積や移動し、その結果、新たな電磁場を形成します。この電磁場に応じて、プロトンや電子の流入もまた変わっていく、という「相互作用」が発生し結果としての電磁場やイオンや電子の分布、流れが生じることになると考えられている。

実際にその場での計測し、研究の実証の照明ができると思った。

また、ガンマ線などはまた他の放射線とは異なり、縁を一部透過してきたり、他の放射線レベルの粒子をたたき出すという予測や、凹凸があると予想される壁での反射も複雑にあるとの予測の裏付けの探査も行う。

温度計測実証と放射線測定実証は、ある程度予想はつくものの、実際には予想外の要素が考えられる。特に、放射線環境は、観測機器、そして移住の候補地として人体への影響を考えると、その場での観測の優先度は高い。

・縦孔内部の撮影では、可視光カメラ、赤外線カメラを使用する。

可視光カメラは光の届く場所で使用する。

赤外線カメラは画像照合航法で使用したカメラを使用する。可視光カメラの使用できない場所で使う。

2種類のカメラを使うことでより正確な内部の様子を調査することができる。

可視光カメラで孔口周辺の光が届く場所までを撮影し、内部の様子を地球に届ける。

光が届かなくなったら、赤外線カメラに切り替え奥部の様子まで探査し、技術実証を行う。

・餅号が孔内部で使用する電力は、非充電式の乾電池エボルタ電池を使用する。(写真3)

エボルタ電池は耐久温度が縦孔内部で予想する温度に対応しないため、ヒーターで温度を保ちながら使用する。エボルタ電池は外部に使用後に排出されるものがないため、環境を変化させない配慮を行うことができる。

宇宙で使用されたことはないが、エボルタチャレンジなどで電車や飛行機などを動かしているため、餅号の動力にもなると考えた。

孔内部で餅号は、6つに分けたエボルタ電池燃料を搭載し、6つのうち2つを探査に使用し、片方で奥部まで行き技術実証を行い、片方で孔の真下まで戻り、残りの3つのうち1つで、しんげん号に探査で得たデータを送信する。残り3つのうちひとつは、予備、残りは追加調査の必要が出た時に使用する。

・通信に使用する機器では、レーザー通信機、電波通信機を使用する。

レーザー通信機と電波通信機を使用する。縦孔内部では電波が反射する可能性があるため、しんげん号一餅号間ではレーザー通信機を用いて通信を行う。一方、大気圏ではレーザーが弱まるため、しんげん号一地球間では電波通信機を用いる。

静かの海の縦孔は、孔底から地球が見えてダイレクト通信が可能と考えられているが、データを確実に獲得するため、中間通信機器しんげん号を中継して、データを地球に送信する。

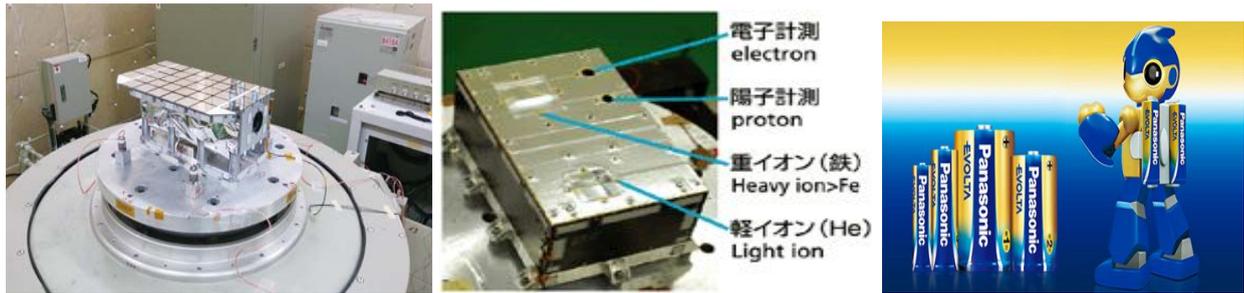


図5 左から赤外分光器[8], 粒子検出器[4], エボルタ電池[12]

・使用する機器や航法については既に宇宙空間で実証及び検討がされているため、それを応用する。

#### 4. 主張したい独創性または社会的効果

##### 主張したい本ミッションの独創性

考案した技術実証が、ほかのどの縦孔探査機計画でも行っていないことである。

・縦孔内部に直接着陸させる技術

画像参照航法と誘導機を用いて、静の海の縦孔の直径100mほどの孔でも地球から指示を送ることなく、機器自らが判断し危険物を避けて縦孔を目指すことができる。

上記以外にも、未開拓である縦孔内部の環境を汚染しないことに留意している。

分離後は縦孔内部や宇宙空間に、排出物や廃棄物を出さない探査機に設計している。

##### 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

・縦孔直接着陸技術

火星の縦孔探査や他惑星にも応用できると考える。

この技術を用いて火星の縦孔内部に探査機を送り込めば火星内部の様子を初めて知ることができる。

これにより火星への縦孔を使った移住計画がより具体化するので、社会にとって有益である。

最終的には本ミッションが将来の火星移住に繋がるのが期待できる。

・月縦孔内部のデータ

解明されていなくて調査の乏しい月の縦孔内部だが、調査することができればそれ自体も貴重なデータとなり、月の誕生の様子や縦孔がどのようにできたかの解明に貢献できると考えられる。

#### 5. 参考資料

(1)Wikipedia 火星の植民

<https://ja.m.wikipedia.org/wiki/%E7%81%AB%E6%98%9F%E3%81%AE%E6%A4%8D%E6%B0%91>(2017/3参照)

(2)火星 Wikipedia<https://ja.m.wikipedia.org/wiki/%E7%81%>(2017/3参照)

(3)SLIM公式ホームページ<http://www.isas.jaxa.jp/home/slim/SLIM/about.html#what>(2017/3参照)

(4)月周回衛星「かぐや(SELENE)」 [http://www.kaguya.jaxa.jp/ja/equipment/cps\\_j.htm](http://www.kaguya.jaxa.jp/ja/equipment/cps_j.htm)(2017/3参照)

(5)世界最大のロケットSLSが運ぶ、世界最小の月着陸機 JAXA「OMOTENASHI」とは一

[http://www.mitsubishielectric.co.jp/me/dspace/column/c1608\\_1.html](http://www.mitsubishielectric.co.jp/me/dspace/column/c1608_1.html) (2017/3参照)

(6)城野隆～光が宇宙での通信を変える～

[http://www.jaxa.jp/article/interview/no18/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/article/interview/no18/index_j.html)(2017/3参照)

(7)河野功,月惑星の縦孔・地下空洞探査システムの研究,第58宇宙科学技術連合講演会講演集,2014

(8)ISASコラムはやぶさ <http://fanfun.jaxa.jp/countdown/hayabusa2/instruments.html>(2017/3参照)

(9)UZUMホームページ [http://kazusa.net/uzume/?page\\_id=11](http://kazusa.net/uzume/?page_id=11) (2017/3参照)

(10)UZUM公式ホームページ <http://kazusa.net/uzume/>(2017/7参照)

(11)乾電池エボルタEVOLTA <http://panasonic.jp/battery/drycell/evolta/>(2017/10参照)

(12)エボルタチャレンジ <http://panasonic.jp/battery/challenge/>(2017/10参照)

(13)月の地下空洞を確認 <http://www.isas.jaxa.jp/topics/001156.html>(2017/10参照)

(14)熱電対 <https://www.keyence.co.jp/ss/recorder/labo/thermometry/thermocouple.jsp> (2017/10参照)