

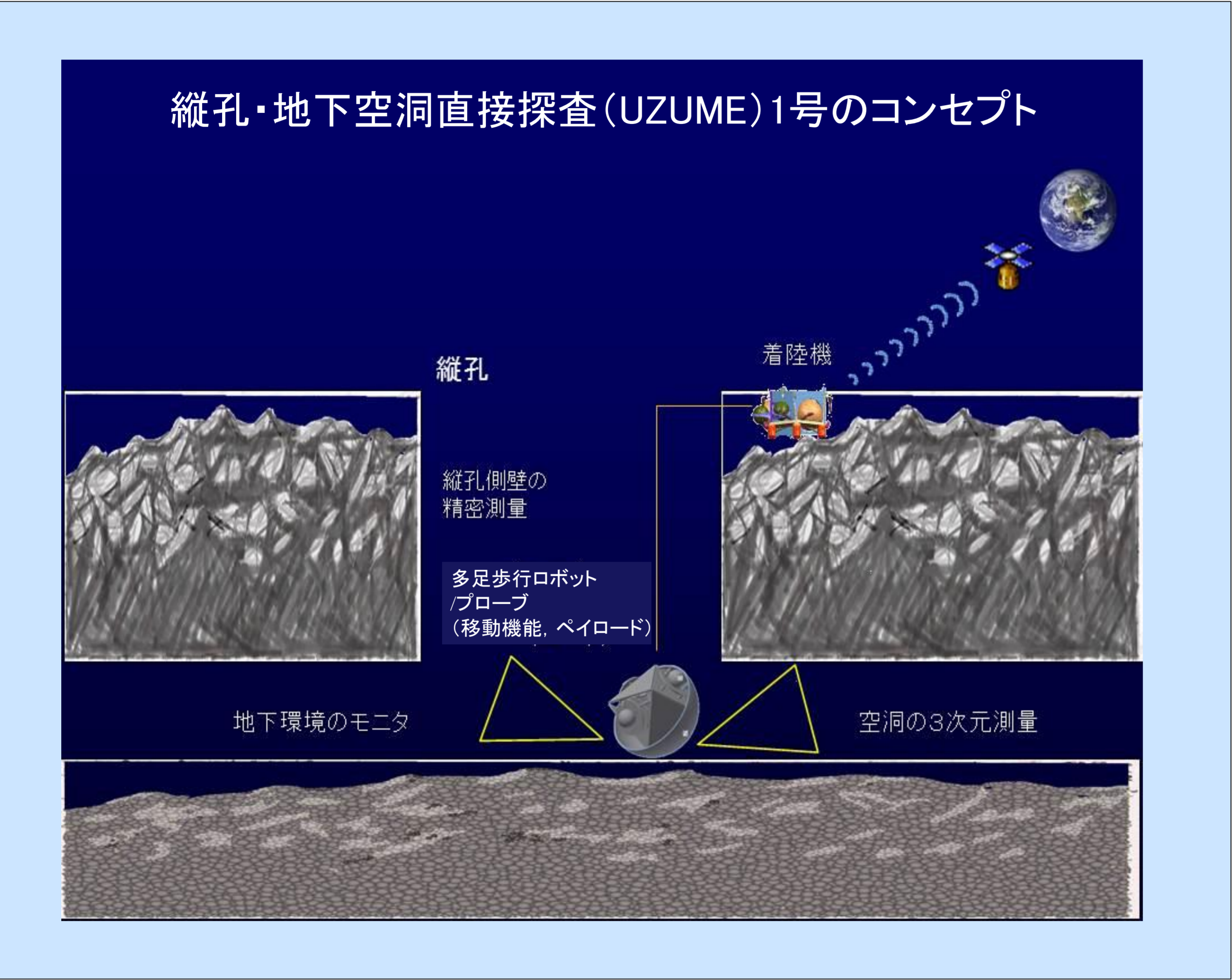


# P-076 月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ(UZUME)計画 ミッション検討状況

西堀俊幸, 春山純一, 河野功, 山本幸生, 岩田隆浩(JAXA), 諸田智克(名古屋大), 古谷克司(豊田工大), 大山英明(AIST)

## 1. 世界初の地下空洞直接探査計画 (UZUME)

人類初となる月の縦孔・地下空洞探査計画(UZUME)の初号機は、SELENEの観測データにより発見された月の縦孔と、それに続いて存在すると考えられる地下空洞を世界で初めて直接探査するミッションである。UZUMEは日本が得意とするロボット技術を駆使し、月の縦孔に降下して将来の月面基地として有望な縦孔や地下空洞内部の形状測量と縦孔環境科学データを観測するミッションである(下図)。



## 2. 縦孔/地下空洞直接探査の必要性

表1に月の縦孔が持つ探査対象としての魅力を挙げた。月の縦孔や地下空洞は、隕石による破壊や角礫岩化、太陽風による変成、ダスト嵐による攪拌効果を受けない貴重な場所であり、縦孔は月面で唯一、月の火山活動の新鮮な堆積物が観察できる露頭である。従って、従来明らかにされていなかった科学的課題解決の新たな糸口が見つかる可能性がある。

表1: 月の縦孔が持つ探査対象としての魅力

魅力	内容
① 月の火成活動の新鮮な堆積物が直接観察できる唯一の露頭	風化を受けていない縦孔側壁の積層構造、溶岩チューブの表面や内部構造は、地球以外の火成活動情報を得るための優れた露頭であり、縦孔の側壁を近傍から撮影することで月のレゴリスの厚さや鉛直構造を明らかにすることができる。
② 太陽風由来の揮発性物質の存在	月面のケイ酸塩と太陽風による水素イオンから水酸基が作られ、常時影となる縦孔の底や溶岩チューブに捕獲されている可能性があり、太陽風由来の揮発性物質の存在量を明らかにすることができる。
③ 縦孔内部固有の環境学	月表面と太陽風プラズマとの電気力学的相互作用による縦孔内部の静電環境の違いと帯電ダストの挙動など、 <u>縦孔内部固有の環境学</u> が解明出来る。
④ 将来の有人活動の拠点になる天然のシールド	縦孔や溶岩チューブ内部の環境が、隕石衝突、宇宙線被曝、極端な温度変化等から免れるためにシールドとして機能するため、将来の観測拠点や有人活動の拠点として非常に魅力的な環境である可能性がある。

## 3. 縦孔/地下空洞直接探査のミッション機器

表2に現段階で考えられるUZUME-1のミッション機器案を示す。観測機器の候補としては、1) 縦孔周囲や地下空洞内部の3次元測量を行う小型のステレオカメラとレーザ距離計、2) 縦孔と地下空洞内部の温度環境を測定する温度センサ、3) 縦孔と地下空洞内部の放射線環境を調査するための放射線モニタを挙げている。

ミッション機器はミッションコンセプトを受けてISASのWGの活動として科学目的を達成するための手段として選定され、具体化がなされるだろう。但し、UZUME-1で使う観測機器は超小型かつ軽量で開発が容易でなければならない。

表2: 地下空洞直接探査のミッション機器案

観測項目	ミッション機器	性能要求
暗環境における縦孔内部の撮影	2眼ステレオカメラ＋フラッシュライト	縦孔壁面、縦孔内部の全周の立体画像を降下(前中後)で撮影する【新規開発】 目標分解能: ~10m@100m, ~10cm@10m
縦孔内部の3次元測量	レーザスキャナ(走査型ToFタイプ)	縦孔壁面、縦孔内部、溶岩チューブの3次元精密測量を降下(前中後)で行う 距離精度: ~10mm 観測可能距離: ~1km【新規開発】
温度	白金抵抗温度センサ	縦孔内部の温度(機器の温度を含む)と時間変化を知る
表面温度分布	非冷却赤外検出器	縦孔内部や溶岩チューブ側壁の温度分布とその時間変化を知る【小型化が必要】
放射線	シリコンフォトダイオード	縦孔内部の放射線環境を知る。特に人体への被ばく量を評価するため、宇宙放射線のLET分布を測定する【小型化が必要】

### 地下空洞(暗環境)内部の撮影:カメラと投光器

LED光源を持つCMOSカメラ(WINDS他搭載モニタカメラ、明星電機)

GoPro HERO (動画撮影/シネマカメラ、4KフルHD動画)

【目標性能】  
縦孔内部のフルHDステレオ画像  
照射距離: 約10m@10m, 5m@10m  
1000万画素以上、フルHD動画撮影  
高精度LEDフラッシュライト付きステレオカメラ

【目標性能】  
縦孔壁面、縦孔内部の全周の立体画像を降下(前中後)で撮影する  
距離精度: ~10mm  
観測可能距離: ~1km

### 2軸走査型MEMSミラーを用いた3次元レーザスキャナ(案)

【目標性能】MEMS技術を用いた2軸スキャニングMEMSミラーを用いた、走査型レーザ距離計の構築  
光學2次元走査(数10度)で、高精度に計測対象の3次元形状を実現させる  
測定距離: ~1km  
測定精度: ~10cm

創RLR MLR-1000  
測定可能距離: 25m-50m  
測定精度: 1mm@10m  
距離分解能: 2cm  
消費電力: 1.5W  
質量: 131g  
寸法: 34×54×8mm  
動作温度: -40~+85℃  
保存温度: -55~+85℃

2D MEMS Mirror  
Focusing Mirror  
Beam Splitter  
APD  
LD  
レーザ距離計の測定イメージ  
レーザスキャナの測定イメージ  
2軸MEMSミラー(パナソニック)  
2D LiDAR sensor  
2D LiDAR sensor: 2軸MEMSミラーにより、4x10度の走査、7.5mの測定距離と3mmの分解能を用いたTOF式の小型スキャナ

### 地下空洞の測量: 三次元レーザスキャナ

レーザによる計測対象物に照射されたレーザ光が往還する時間を計測することで、3次元空間の形状を計測する。同時に、レーザ光の反射率を測定することで、計測対象物の材質を推定する。また、レーザ光の反射率を測定することで、計測対象物の材質を推定する。また、レーザ光の反射率を測定することで、計測対象物の材質を推定する。

3Dレーザスキャナにより縦孔側壁や空洞内部の3次元形状データを取得することができる。1秒間に約2000点のデータ(XYZ座標、強度)を取得でき、10分程度で全周の計測が完了する。壁面が4%の反射率であれば350mの計測が可能。

### 地下空洞の測量: パターン投影法

【目標性能】縦孔内部の簡易測量  
パターン投影用高輝度LEDプロジェクター、LCD、CCDカメラ  
投影精度: 約0.1mm@1.5m  
カメラは1台、プロジェクター1台でよい。距離精度はステレオカメラより良好。遠距離には向かない。3次元レーザスキャナのバックアップとして。

パターン投影法は、カメラで撮影されたパターンの交点が、プロジェクターから投影されたパターンの交点と一致する。この交点を結ぶことで、縦孔の形状を推定する。また、パターンの交点を結ぶことで、縦孔の形状を推定する。

### 地下空洞表面温度分布の撮影: 赤外線カメラ

非冷却赤外検出器: CIRCO (マイクロボロメータカメラ)

【目標性能】  
赤外線カメラによる温度分布の撮影  
測定距離: 約10m  
測定精度: 約0.1℃

【目標性能】  
赤外線カメラによる温度分布の撮影  
測定距離: 約10m  
測定精度: 約0.1℃

### 地下空洞の環境計測: 温度、放射線

【縦孔内部の環境温度】  
GOODRICH社 MODEL 0110MF  
白金抵抗温度センサ、-269~+400℃、0.1%  
(宇宙用として多くの実績)

RTD: Model 0110F and Space qualified instrumentation amplifier

【縦孔内部の放射線ドーズ量】  
シリコンフォトダイオードセンサ

【月面上宇宙放射線のLET分布測定】  
実時間型放射線計測装置 RRMW-X

RRMWD-X: 人体への被ばく量を評価するため、宇宙放射線のLET分布を測定する。測定はDouble-sided Silicon Strip Detector(DSSD)と高精度な検出器を用いる。測定LETは人体の被曝線量に相当する0.2~700keV/μm-waterとする。(2.6kg, 7.6W, 明星電機 GOSAT搭載)

SPM: フォトダイオードによるシリコン半導体センサにより、プロトン、電子(電子)等のドーズモニタを行う。  
(28kg, 422W, 明星電機 UNISEC-1搭載)

## 4. 縦孔/地下空洞直接探査のサクセスクライテリア

現段階で考えられるUZUME-1ミッションのサクセスクライテリアを表3に示した。ミッションコンセプトはISASのWG活動として科学目的を達成するための手段の具体化がなされるだろう。

表3: 地下空洞直接探査のサクセスクライテリア案

達成レベル	クライテリア
ミニマムサクセス	<b>MS1:</b> 縦孔内部に環境調査プローブを降下させることに成功し、降下中の縦孔側壁の撮影と降下後に縦孔底内部の立体撮影を行う <b>MS2:</b> 縦孔降下中の温度と放射線環境の変化を計測する
ノミナルサクセス	<b>NS1:</b> 縦孔底内部の全方位の立体画像を撮影する <b>NS2:</b> 縦孔底内部の温度環境と放射線環境を27日以上測定する <b>NS3:</b> 降下位置から縦孔底と内部の3次元精密測量に成功する
フルサクセス	<b>FS1:</b> 球形プローブ等、縦孔内部での簡易移動ローバ等の移動により、縦孔内部の異なる場所における撮影と温度及び放射線環境を得る <b>FS2:</b> 降下位置から縦孔に繋がる溶岩チューブの空間内部の3次元測量に成功する