

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

### 月の縦孔探査用全方位カメラの検討

A Study on Omnidirectional Camera for Lunar Vertical Hole Exploration

池谷 広大, 三田 信, 春山 純一, 三宅 互, 田中 真

IKEYA Kodai, MITA Makoto, HARUYAMA Junichi, MIYAKE Wataru and TANAKA Makoto

2024年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目次

概要	1
1. はじめに	1
2. 観測ロケット実験と全方位カメラの概要	2
3. 全方位カメラの環境試験の概要と結果	3
3.1. 振動 / 衝撃試験について .....	3
3.2. 温度試験について .....	7
3.3. 真空試験について .....	8
4. 考察と今後の開発について	9
5. まとめ	9
謝辞	10
参考文献	10

# 月の縦孔探査用全方位カメラの検討

池谷 広大<sup>\*1,2</sup>, 三田 信<sup>\*3</sup>, 春山 純一<sup>\*2</sup>, 三宅 互<sup>\*1</sup>, 田中 真<sup>\*1</sup>

## A Study on Omnidirectional Camera for Lunar Vertical Hole Exploration

IKEYA Kodai<sup>\*1,2</sup>, MITA Makoto<sup>\*3</sup>, HARUYAMA Junichi<sup>\*2</sup>, MIYAKE Wataru<sup>\*1</sup>, TANAKA Makoto<sup>\*1</sup>

### Abstract

Explorations of insides of vertical holes discovered on the Moon or Mars are expected to provide important information on formation factors of vertical holes and volcanic eruption history, as well as on lunar base construction. Omnidirectional (360°) camera, which is compact, lightweight and can capture images of the surrounding environment in a single frame, is considered as one of the optical instruments to be install on a lunar hole explorer. Compact omnidirectional cameras that are Commercial Off-The-Shelf products (COTS products) have been used in the space environment, and such a COTS omnidirectional camera is planned to be used as one of the onboard instruments of the S-520-33 Sounding rocket scheduled for launch in 2023. The camera has been confirmed to have sufficient functionality for the launch environment of the sounding rocket through environmental tests. In this paper, by comparing the launch environment of the sounding rocket with that of the lunar hole exploration, we study the factors necessary for the development of the omnidirectional camera for future lunar vertical hole exploration.

**Keywords:** Moon, Lunar Hole, Omnidirectional Camera, Sounding Rocket

### 概要

月や火星で発見されている縦孔の内部を探査することで、縦孔の形成要因や火山活動史を解明するための情報や基地建設のための重要な情報が得られると期待されている。月の縦孔探査機に搭載する光学機器の一つとして、小型軽量で、周囲の環境を1フレームで撮影できる全方位(360°)カメラが検討されている。全方位カメラは宇宙環境での利用実績もあり、2023年度に打ち上げ予定の観測ロケット S-520-33号機の搭載機器の一つとして民生品(COTS品)のそうした小型全方位カメラが利用される予定である。観測ロケットの環境試験によりこのCOTS品全方位カメラは、観測ロケット打ち上げ環境に対して十分な機能をもつことが確認された。本稿では、観測ロケットの打ち上げ環境と縦孔探査における環境を比較することで、今後の縦孔探査用全方位カメラの開発に必要な要素を検討する。

### 1. はじめに

2009年に、月周回衛星 SELENE「かぐや」の地形カメラで観測された画像データから、縦孔が発見された<sup>1,2)</sup>。そして月周回衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)の斜め観測に

\* 2023年11月30日受付 (Received November 30, 2023)

<sup>\*1</sup> 東海大学大学院 工学研究科 機械工学専攻  
(Course of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tokai University)

<sup>\*2</sup> 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系  
(Department of Solar System Science, Institute of Space and Astronautical Science)

<sup>\*3</sup> 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系  
(Department of Spacecraft Engineering, Institute of Space and Astronautical Science)

よって、その縦孔の底から水平方向に空間が広がっていることが確認された<sup>3)</sup>。こうした空間は、例えば、地球に見られる火山活動起源の溶岩チューブのようなものが考えられる<sup>1-3)</sup>。縦孔は、月だけでなく火星にも発見されている<sup>4)</sup>。

月の縦孔や地下空間を探索することで、縦孔の形成要因や月の火山活動史を解明するための情報や基地建設のための重要な情報が得られると期待されている<sup>5,6)</sup>。現在日本では、月惑星の縦孔・地下空間の探索計画として Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration (UZUME) が計画されている。その最初の探索では月の縦孔に探査機が直接侵入していく過程で、光学カメラによる縦孔や地下空間の撮影が検討されている<sup>5-7)</sup>。

縦孔探索における探査機搭載用光学カメラの一つとして全方位(360°)カメラが検討されている。全方位カメラは、魚眼レンズを用いたカメラが2つ背中合わせに配置され、2つのカメラで撮影した画像を処理することで、全方位(360°)を視野とした1つの画像を取得できる機器である。このような全方位カメラは小型な光学撮像システムで、周囲の環境を1フレームで撮影できるため、多くの分野で利用されている。国際宇宙ステーションの船外や観測ロケット実験などで使用された全方位カメラもあり<sup>8,9)</sup>、サイズや重量を抑えながら、多くの視覚情報を得られるという特徴が活かされている。また2023年度に打ち上げ実験予定の観測ロケットS-520-33号機の搭載機器の1つとして、民生品(COTS品)の全方位カメラを用いた装置が開発されている<sup>10)</sup>。

縦孔探索においては、重量やサイズ、データ通信量など限られた撮影条件で縦孔とそれに付随する地下空洞の構造を把握することが要求されている。

本稿では、将来の月の縦孔探査機に搭載する全方位カメラの開発を目的に、S-520-33号機の搭載の全方位カメラの環境試験を通して評価したCOTS品全方位カメラの機能について報告し、今後の研究開発要素について検討する。

## 2. 観測ロケット実験と全方位カメラの概要

S-520-33号機は2023年度打ち上げ実験が計画された観測ロケットであり、複数の搭載機器(Payload Instrument; PI)の弾道飛行中の実証実験を行う。S-520-33号機に搭載されるPIの一つにPIデータ収集装置(PI Data Collector; PDC)と呼ばれる機器がある<sup>10)</sup>。PDCは、機上での様々なPIのデータの取扱いを簡便にし、効率良くデータを送るためのシステムであり、観測ロケット飛翔中の実証実験として各種センサからのデータ収集/伝送実験をする。PDCは主に4つの機器、PDC-MAIN、PDC-EX、PDC-PROBE、PDC-CAMで構成される。PDC-MAINは実験機器(PI機器)からEthernetなど取り扱いやすい方法でデータを収集し、デジタル信号(LVDS)で観測ロケット側に送る仲介の処理を行う。PDC-MAINに入力されるPIからのデータを模擬するための機能確認用機器(ダミーPI)として、PDC-EX、PDC-PROBE、PDC-CAMが搭載される。PDC-PROBE、PDC-CAMは、観測ロケットS-310-45号機に搭載した小型プローブと全方位/伸展カメラの改良版でありそれぞれ2機ずつ搭載される。PDC-EXは、PDC-PROBE、PDC-CAMを制御するほか、画像やセンサーデータなど様々なタイプのデータを生成、処理し、PDC-MAINへ送る機器である。

PDC-CAMは、COTS品であるShenzhen Arashi Vision社製の小型全方位カメラデバイス「Insta360 air」とそのカメラを支持するアームを伸展させる機構からなる機器であり、S-520-33号機の頭胴部に2機搭載される。PDC-CAMのフライト品を図1に示す。PDC-CAMは、打ち上げ実験では、ロケットが打ち上げ後、宇宙空間で伸展(ロンチロック解除)し、動画と静止画の撮影をそれぞれ行う。

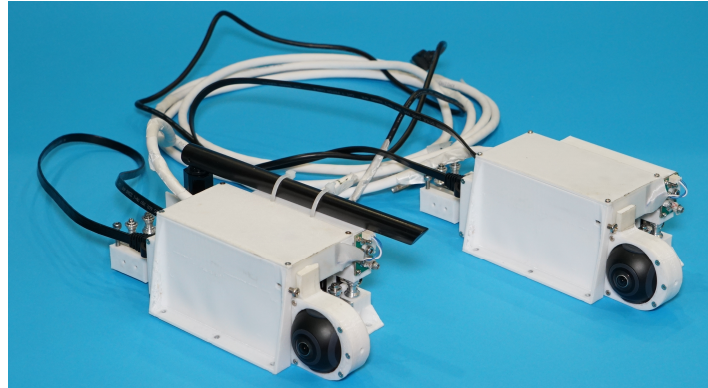


図1. PDC-CAM のフライトモデル (左：PDC-CAM1, 右：PDC-CAM2)

### 3. 全方位カメラの環境試験の概要と結果

PI には、ロケット飛行中のさまざまな環境に耐えられる強度/剛性が必要であり、その環境に PI が耐えられるかどうかを各種環境試験により事前確認しておく必要がある<sup>11)</sup>。環境試験は PI 単体で行う単体試験と頭胴部組立状態で行う噛合せ試験に分けられる。単体試験では、実際のフライト時と同等の電源投入状態で、観測ロケットユーザーハンドブック<sup>11)</sup>に示された機械的環境試験(振動/衝撃試験)、温度試験、真空試験を実施し、その耐環境性や設計成立性を確認する必要がある。噛合せ試験ではロケットの頭胴部にすべての PI を組み込んだ状態で動作確認と機械的環境試験を行う。PDC-CAM に対して、観測ロケット S-520 型の搭載機器における規定の環境試験(振動/衝撃試験、温度試験、真空試験)を以下表 1. の日程で行った。

表 1. PDC-CAM の環境試験の実施日程

試験内容	試験日
振動/衝撃試験	2023 年 7 月 19 日
温度試験	2023 年 7 月 25 日
真空試験	2023 年 7 月 31 日

#### 3.1. 振動/衝撃試験について

PDC-CAM に対して実施した、振動/衝撃試験における試験目的、試験内容、試験結果をそれぞれ以下に示す。

##### 試験目的：

観測ロケットの固体ロケットモータの着火時や燃焼中に発生する大きな衝撃や振動に耐えられる剛性/強度、設計成立性が PI に備わっているかを確認すること。また PDC-CAM には伸展する機構があるため、振動や衝撃により意図しない条件でロンチロックが外れないか確認すること。

##### 試験内容：

宇宙科学研究所の先端宇宙科学実験棟1階の小型振動衝撃試験装置を使用して、振動試験(正弦波掃引) および衝撃試験(正弦半波)を行う。S-520型の単体試験における振動/衝撃試験の条件をそれぞれ表2、表3に示す(観測ロケットユーザーハンドブックより引用<sup>11)</sup>)。加振中、各機器は、電源ONの状態ワイヤハーネスにて接続された状態である。振動/衝撃が発生するロケットモータの燃焼中にPDC-CAMによる動画の撮影が行われるため、本試験中においても動画の撮影を行う。

表 2. S-520 型ロケットの単体ランダム振動試験条件<sup>1)</sup>。

【PI 部】3 軸共通各一回

周波数	印加レベル	RMS 値	試験時間
10 Hz	0.025 G <sup>2</sup> /Hz	16.5 Grms	30 sec
10 ~ 50 Hz	0.3 dB/oct		
50 Hz	0.03 G <sup>2</sup> /Hz		
50 ~ 90 Hz	14.4 dB/oct		
90 Hz	0.5 G <sup>2</sup> /Hz		
90 ~ 500 Hz	-0.9 dB/oct		
500 Hz	0.3 G <sup>2</sup> /Hz		
500 ~ 2000 Hz	-5.9 dB/oct		
2000 Hz	0.02 G <sup>2</sup> /Hz		

\* PFT 条件, 試験公差: ±3 dB

表 3. S-520 型ロケットの単体低周波衝撃試験（半正弦波）試験条件<sup>1)</sup>。

3 軸共通各一回

作用時間	印加レベル
10 msec	40 G <sub>0-p</sub>

\* PFT 条件, 試験公差: ±10%

試験結果：

振動/衝撃試験の様子を図 2 に、試験結果を図 3~8 に示す。試験結果の各図左部分は振動試験の結果であり、左上図の横軸は周波数(Hz)、縦軸は印加レベル (G<sup>2</sup>/Hz)、左中図の横軸は時間(sec)、縦軸は加速度(G)をそれぞれ示している。試験結果の各図右部分は衝撃試験の結果であり、右上図の横軸は時間(sec)、縦軸は加速度(G)、右中図の横軸は周波数(Hz)、縦軸は加速度(G)、左下図は伝達関数をそれぞれ示している。どの軸も要求範囲に収まっているので正常に加振できたことがわかる。振動や衝撃による PDC-CAM の物理的損傷は見られず、振動や衝撃によってロンチロックが外れないことを確認した。また加振中に PDC-CAM で撮影した動画についてもそれぞれ不具合は見られなかった。更に振動試験前後に撮影された動画の確認した結果、異常や劣化は確認されなかった。

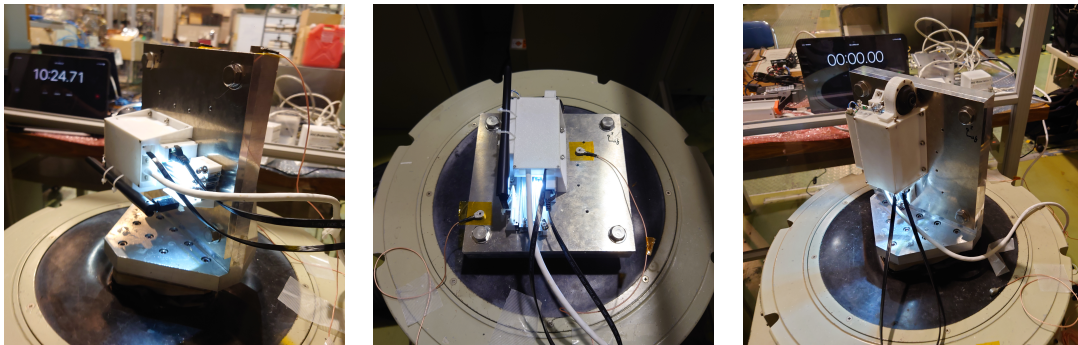


図 2. PDC-CAM の振動/衝撃試験の様子。左：X 軸 (PDC-CAM2)、中：Y 軸 (PDC-CAM1)、右：Z 軸 (PDC-CAM1)。



図3. PDC-CAM1 の振動/衝撃試験の結果 (X 軸)



図4. PDC-CAM1 の振動/衝撃試験の結果 (Y 軸)

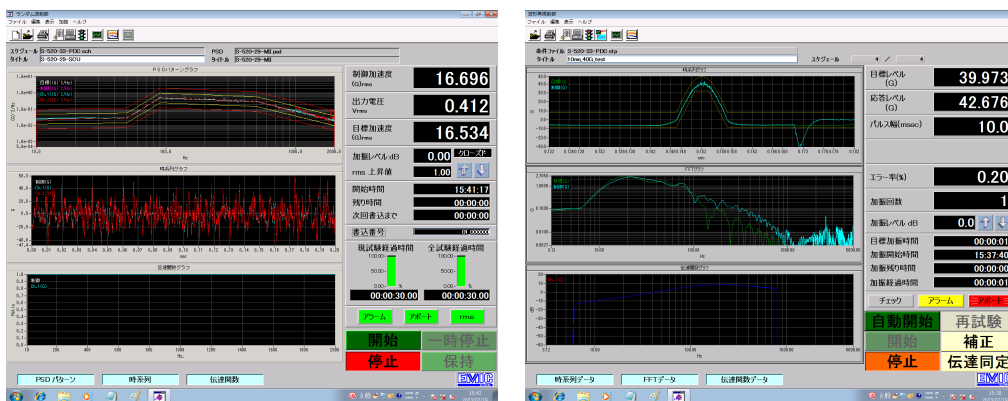


図5. PDC-CAM1 の振動/衝撃試験の結果 (Z 軸)

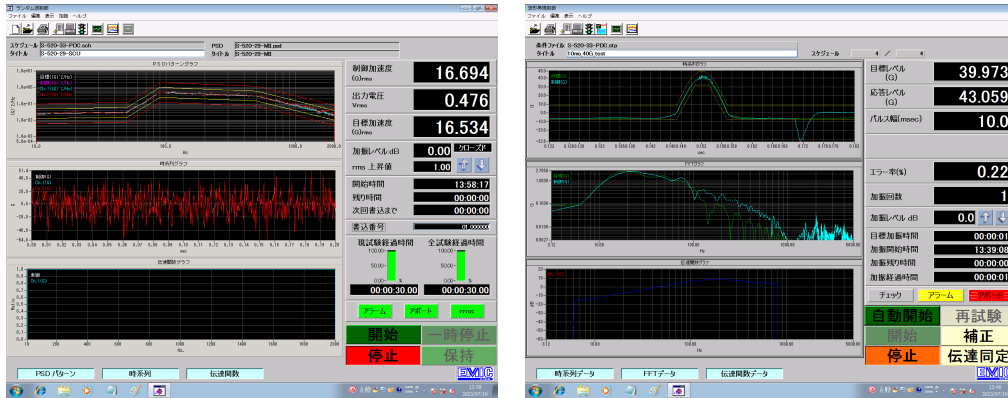


図 6. PDC-CAM2 の振動/衝撃試験の結果 (X 軸)



図 7. PDC-CAM2 の振動/衝撃試験の結果 (Y 軸)



図 8. PDC-CAM2 の振動/衝撃試験の結果 (Z 軸)



### 3.2. 温度試験について

PDC-CAM に対して実施した、温度試験における試験目的、試験内容、試験結果をそれぞれ以下に示す。

#### 試験目的：

ロケットが飛行中のノーズコーンの空力加熱による温度上昇や太陽輻射による温度環境で機器が正常に動作するか確認すること。

#### 試験内容：

ESPEC 社製小型環境試験器 SU-642 を用いて試験を行う。温度試験の要求を以下に示す（観測ロケットユーザーハンドブックより引用<sup>11)</sup>）。

機器電源 ON の状態で、下図の通りの温度環境を印加。

主に、機体内部に搭載する機器に対して適用（機体外のアンテナ等には適用外）。

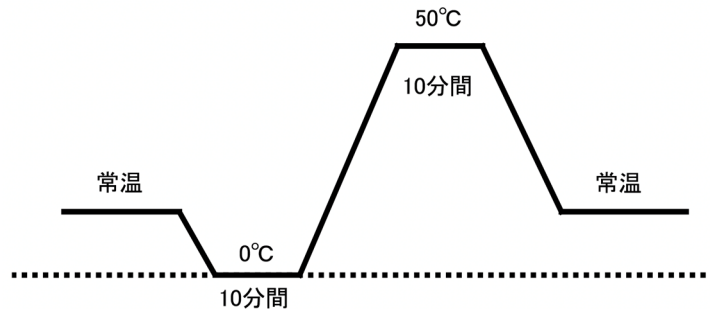


図9. 観測ロケットにおける温度試験の要求温度環境<sup>11)</sup>。

#### 試験結果：

試験の様子を図 10 に示す。機器電源 ON 状態で問題なく要求温度環境に耐えられることを以下のように確認した。

- ・温度試験前後で機器の状態や撮影された画像、動画を確認した結果、異常や劣化は確認されなかった。

- ・0°Cと50°Cのとき機器電源 ON 状態で各5分程度経過した後に PDC-CAM の動画撮影を実行した。0°Cの際は問題なく撮影が可能であった。一方で50°Cの状態では、44秒は正常な動画撮影が確認できたが、その後の動画データは保存されていなかった。試験後常温で再度 PDC-CAM を動作させたときには動画撮影の動作は正常に実行された。Insta 360 air 製品の動作温度は0~40°Cであることから、この結果は、製品に保護機能あり、動画撮影に伴う発熱により機器の温度が大きくなった結果、保護機能が正常に働いたことを示していると考えられる。これらの結果より、PDC-CAM は要求温度環境に耐えられる機能を有し、正常に動作することを確認した。



図10. 温度試験の様子. SU-642のモニターには試験器内の温度が表示されており, 要求温度を満たしていることがわかる. PDC-CAMと他のPDC機器と同時に試験をしている.

### 3.3. 真空試験について

PDC-CAM に対して実施した, 真空試験における試験目的, 試験内容, 試験結果をそれぞれ以下に示す.

#### 試験目的:

ロケットが高高度に到達した際の高真空環境で機器が正常に動作するか確認すること.

#### 試験内容:

実験室の小型真空チャンバを用いて試験を行う. 真空試験の要求は以下の通り.

機器電源ONの状態, 1mmHg(133.3Pa)以下, 20分以上.  
(観測ロケットユーザーハンドブックより引用<sup>11)</sup>)

各機器を真空チャンバ内に入れ, 真空引きを行い圧力が約 100Pa 状態において電源をONにして20分間の動作を確認する. 真空チャンバ内の圧力はEdwards社製の真空計APG-L-NW25 ST/STにて測定する. この際, PDC-CAMとPDC-PROBEのロンチロック解除の確認やPDC-CAMによる動画撮影を行う.

#### 試験結果:

試験の様子を図11に示す. 真空環境であっても問題なくロンチロック解除ができることを確認した. また, PDC-CAMが真空環境で撮影した動画についても問題がないことを確認した. なお, 真空試験前後に別途撮影された動画の比較も行い, 異常や劣化がないことを確認している.

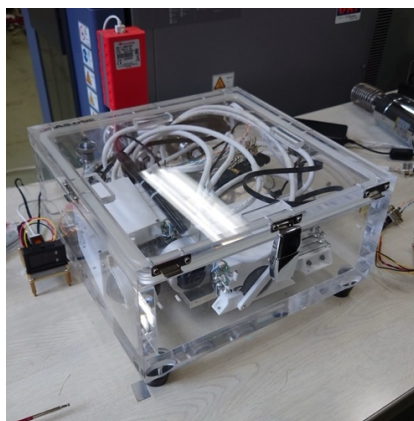


図11. 真空試験の様子. 真空チャンバ内にPDC-CAM1,2とPDC-EXを入れ試験を行った.

#### 4. 考察と今後の開発について

観測ロケット S-520 型の環境試験の結果より、PDC-CAM (COTS 品全方位カメラ Insta 360 air) は、観測ロケット打ち上げ環境 (振動/衝撃, 温度試験, 真空) での作動に必要な機能を有することが確認できた。今後の打ち上げ実験では、実際の打ち上げ環境での全方位カメラの機能確認がなされ、更に取得した動画、画像から全方位カメラの宇宙空間での感度や精度などの性能についても評価が可能であると考えられる。

一方で、観測ロケットの打ち上げ環境と月の縦孔探査における環境は異なる。本節では PDC-CAM に対して行った S-520 型ロケットの規定の環境試験の結果から評価した振動/衝撃環境, 温度環境, 真空環境の3つの点に着目し比較検討を行う。

観測ロケットの打ち上げの振動/衝撃環境と、月縦孔探査機を打ち上げると想定される日本の基幹ロケット (イプシロンロケット, H-II ロケット) の振動/衝撃環境は、打ち上げ重量や軌道, 固体ロケット, 液体ロケットの特性などの違いより単純に比較はできないが、例えば、観測ロケットの PI とイプシロンロケット打ち上げの CubeSat の振動/衝撃試験要求レベルを比較すると、観測ロケットの要求レベルのほうが高い<sup>11,12)</sup>。前節の観測ロケットの振動/衝撃試験の結果より、COTS 品全方位カメラの振動/衝撃に対する機械的性質は、基幹ロケットの打ち上げの要求を満たす可能性が十分高いと考えられる。

また、前節の真空試験の結果から、気圧の変化, 宇宙空間の圧力環境, 脱ガスなどに対する機械的性質も十分であることと言える。

一方、温度環境 (熱環境) は、観測ロケットの打ち上げ環境より、月縦孔探査における環境のほうが厳しいことが予想できる。探査機が月の縦孔の底に降下中や着陸後に全方位カメラで撮影をすることを考える。探査機の降下中や縦孔の底では、探査機や全方位カメラに太陽直達光または縦孔の壁や底からの反射光が入射することが考えられる。また着陸が想定されている、縦孔の内部に太陽直達光が入射する昼の時間帯では、縦孔の底の温度環境は、月面のそれに比べ高温になることがわかっている<sup>13)</sup>。前節の真空試験の結果より、20 分間の連続撮影動作による全方位カメラ自身の発熱による問題はなかったものの、地上環境での使用が想定されている COTS 品全方位カメラの使用は、前節の温度試験で示した保護機能などを考慮すると、月の縦孔への着陸時の高温環境での撮像運用は難しいことが考えられる。そのため今後の開発において熱対策やそれを考慮した撮像運用の検討が重要な要素と言える。

以上、今回の PDC-CAM に対して行った S-520 型ロケットの規定の3つの環境試験 (振動/衝撃, 温度試験, 真空) 結果より、COTS 品全方位カメラ Insta360 air は、月縦孔探査において必要な機械的性質を有する可能性が十分にあるといえる。一方で、熱的性質については不十分であり、今後の開発, 検討では、特に熱対策に重点を置く必要がある。

更に月への航行を考えると放射線試験や EMC 試験など今回行っていない試験は今後実施する必要がある。

また、環境に耐えうる機能だけでなく、月の縦孔と地下空洞を撮影し、それらの規模や構造を把握するという目的を達成するための性能についても評価が必要である。例えば、縦孔と地下空洞を適切に撮影するには、露光時間や輝度分解能などの設定や全方位カメラの空間解像度などの性能に関する評価、更に研究開発を行うことが求められる。

#### 5. まとめ

月の縦孔探査において、小型全方位 (360°) カメラの民生品 (COTS 品) の利用が検討されている。今回、COTS 品小型全方位カメラである Insta 360 air を利用した PI データ収集装置 (PI Data Collector ; PDC) について、S-520 型観測ロケット打ち上げ環境試験 (振動/衝撃, 温度試験, 真空) が実施され、当該カメラはこれらの環境に対して十分な耐性を有することがわかった。このことはすなわち、月縦孔探査機打ち上げに想定される日本の基幹ロケット (イプシロンロケット, H-II ロケット) の打ち上げの機械環境に対して、COTS 品の全方位カメラが十分な耐性を持つ可能性が示されたともいえる。今後はさらに、月縦孔探査での様々な特殊環境 (たとえば熱真空や放射線) に対する機能やミッション達成のための性能についての評価を実施するとともに、製品の選定や開発, 運用検討を行う。

## 謝 辞

本研究は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が提供する観測ロケットによる飛翔機会を利用している。

## 参考文献

- 1) J. Haruyama, et al.: Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *Geophysical Research Letters*, 36 (2009), L21206.
- 2) J. Haruyama, et al.: New Discoveries of Lunar Holes in Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii, 41st Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, LPI Contribution No. 1533, p.1285, 2010.
- 3) M.S. Robinson, et al.: Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits, *Planetary and Space Science*, 69 (1) (2012), pp. 18-27.
- 4) G. E. Cushing, et al.: THEMIS observes possible cave skylights on Mars, *Geophysical Research Letters*, 34 (2007), pp. L17201.
- 5) 春山純一ら, : UZUME 計画概要と現況, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3K01, 2021.
- 6) 庄司大悟, : UZUME-1 の理学ミッション, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3K02, 2021.
- 7) 角有司ら, : UZUME-1 のシステム構想, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3K10, 2021.
- 8) JAXA、リコー、宇宙空間で撮影した 360°の全天球静止画・動画を公開～国際宇宙ステーションから地球の撮影に成功～, 株式会社リコー,  
[https://jp.rioh.com/release/2019/1017\\_1](https://jp.rioh.com/release/2019/1017_1) (2019 年 10 月 17 日公開)
- 9) 福島, 三田, 観測ロケット S-310-45 号機実験計画・実験報告, JAXA-RM, 2021.
- 10) 観測ロケット S-520-33 号機の観測機器・実験装置, PI データコレクタ (PDC), 宇宙科学研究所観測ロケット実験グループ,  
<https://www.isas.jaxa.jp/home/kansoku/rocket/post/pi/PDC.html>
- 11) 宇宙科学研究所観測ロケット実験グループ, : 観測ロケットユーザー・ハンドブック, 2023 年度 6 月
- 12) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), : Epsilon Launch Vehicle ユーザーズマニュアル, 2018 年 7 月改訂.
- 13) T. Horvath, et al. : Thermal and Illumination Environments of Lunar Pits and Caves: Models and Observations From the Diviner Lunar Radiometer Experiment, *Geophysical Research Letters*, 49 (2022), e2022GL099710.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-23-006

JAXA Research and Development Memorandum

## 月の縦孔探査用全方位カメラの検討

A Study on Omnidirectional Camera for Lunar Vertical Hole Exploration

---

発行 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <https://www.jaxa.jp/>

発行日 2024年2月15日  
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

