

K7-85

超小型深宇宙探査機 EQUULEUS 搭載「月面衝突閃光カメラ DELPHINUS」の性能評価

Performance Test of "Lunar Impact Flashes camera system DELPHINUS" onboard Small Deep-space Cube-sat "EQUULEUS"

○増田陽介¹, 阿部新助², 布施綾太³, 柳沢正久⁴, 矢野創⁵, 船瀬龍⁶*Yosuke Masuda¹, Shinsuke Abe², Ryota Fuse¹, Masahisa Yanagisawa³, Hajime Yano⁴, Ryu Funase⁵

Abstract : "EQUULEUS (EQUilibrUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft)" will be the world's smallest spacecraft to explore the Earth-Moon Lagrange2 point (EML2). The spacecraft is jointly developed by the University of Tokyo and JAXA which will be launched by NASA's SLS (Space Launch System) EM-1 (Exploration Mission-1) in late-2019. "DELPHINUS (DEtection camera for Lunar impact PHenomena IN 6U Spacecraft)" onboard "EQUULEUS" is one of the scientific instruments onboard EQUULEUS to observe the Lunar impact flashes caused by meteoroids' impacts. In this research, we will summarize performance of the DELPHINUS EM (Engineering Model) system.

1. 概要

東京大学と JAXA が開発を進めている深宇宙探査機 EQUULEUS は、地球-月系ラグランジュ点(EML₂)への航行を通じて、6U サイズ(約 30×20×10cm)という超小型宇宙機による地球月圏(シスルナ空間)での軌道制御技術の実証と、複数の理学観測の達成を狙うプロジェクトである(Fig.1). EQUULEUS は 2019 年 NASA の新規開発ロケット SLS(Space Launch System)初号機(EM1)により打ち上げられる予定である。そして、月面衝突閃光や地球近傍小天体(NEO), 地球重力捕獲天体(TCO)を観測するために EQUULEUS に搭載される可視光域カメラ・システムが DELPHINUS である。

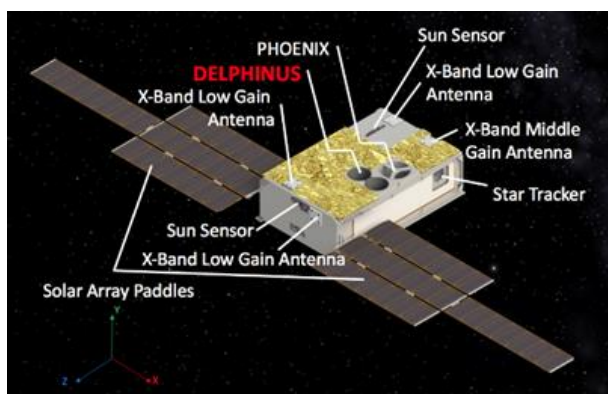


Figure 1 Appearance of EQUULEUS.

月面衝突閃光(Lunar Impact Flash)とは、直径 cm~m サイズの流星物質が月面に数 10km/s の超高速で衝突する際に可視近赤外で観測される短時間(0.01~0.1 秒)の発光現象である^[1](Fig.2) この月面衝突閃光の観測により、地上の光学・レーダーによる流星観測などで計測される直径 μm ~mmサイズのダストと、地上の望遠鏡で観測される直径数 m サイズ以上の小天体を繋ぐサ

イズ領域を埋め、シスルナ空間に流入する流星物質のサイズ分布と時間変化を明らかにすることができる。こうした評価は、今後、月面での有人活動や基地建設といった宇宙開発のリスク評価や月震計との共同観測による、月の内部探査への貢献に繋がると期待される。

2. DELPHINUS 設計概要

月面衝突閃光の観測には、月に太陽が当たらない夜側領域で行う。また、DELPHINUS には、地上観測において 9 等級に匹敵する月面衝突閃光が観測できる設計が必要である。そのため、DELPHINUS による月面衝突閃光の観測を実現させる設計要求として、

- センサ近傍に入射する月面の日照部及び太陽光、地球光の迷光を軽減し、月面衝突閃光を優位に検出するレンズ・システムを開発すること
- 短時間の発光現象である月面衝突閃光をオンボード処理し、月面衝突閃光イベントのみを地上ダウンリンクするハードウェア/ソフトウェア・システムを開発すること

などが挙げられる。そして、上記の要求に基づき、以下のような EM(Engineering Model)が設計された。(Fig.2)

- ✓ レンズ光軸に対して、太陽・地球離角 45 度まで太陽・地球からの直接光及び迷光が入らない、鏡筒と熱的に分離されたフードを有する
- ✓ 月昼側領域からの迷光を除去できる、CCD センサに隣接した遮光板を有するレンズ鏡筒
- ✓ 電気ノイズや宇宙線による閃光の誤検出を減らすため 2 台の CCD カメラを搭載

また、2 台のカメラは、FPGA と呼ばれる書き換え可能なハードウェア素子と CPU で制御している。現在宇

1: 日大理工・学部・航宇 2: 日大理工・教員・航宇 3: 日大理工・院(前)・航宇 4: 電気通信大学・教員 5: JAXA・教員 6: 東京大学・教員

宙線や CCD センサのノイズによる誤検出を減らし、本物の月面衝突閃光候補イベントの必要な部分のみをメモリに保存するようなアルゴリズムの開発・実装を進めている。Table.1 に DELPHINUS(EM)の諸元を示す。

Table 1. Specification of DELPHINUS (EM) and Observing field of view from the EML2 halo orbit.

Specification of DELPHINUS	
Effective pixels	659(H) × 494(V)
Total pixels	692(H) × 504(V)
Pixel size	7.4 μm × 7.4 μm
Lens(2 pieces)	f=50mm/F1.4
Lens aperture	35.7mm
Lunar impact flash mode	Exposure = 1/60sec
Asteroid observing mode	Exposure = 1/4000~34sec
Power consumption	0.8W
Mass	572g for 2 cameras+sensors
Pixel resolution	6km/pix (at 40000km)

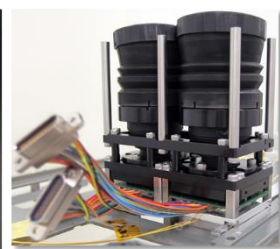
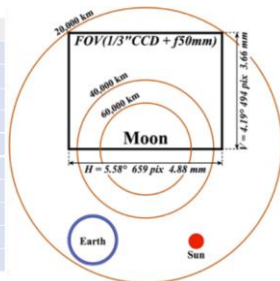


Figure 2. Lunar impact flash and DELPHINUS.

3. DELPHINUS 性能評価

DELPHINUS の光学系・検出器については、カメラ単体での性能評価を行い、設計通りの性能が得られているか検証していく。また、実際の運用における最適な観測パラメータを見積もるため、CCD センサのノイズレベルやゲイン特性の解析や、線形性(リニアリティ)の評価、そして、屋外での恒星撮像試験によるカメラの検出限界の調査を行っていく。本稿では、これまでにを行った検証結果について報告する。

I. EM 恒温槽試験

2017年3月に株式会社 COSINA にて、恒温槽試験を実施し、各温度で、CCD センサのダークフレームを取得した(Fig.3)。カウント値は無効画素域の OB(Optical Black)で減算していない結果である。この結果では、全ての温度で露光時間が長くなる、かつゲインが大きくなると、ノイズレベルも上がっていることが分かった。ただし、この試験では、正確な CCD センサの温度が得られていないので、今後 CCD センサの温度ごとのノイズレベルの調査を行う。また、現在、開発を進めている閃光検出アルゴリズムの実証用シュミレーターでは、ノイズの模擬画像に月面衝突閃光を模擬した点光源を加えて、誤検出率の評価や検出閾値の見積もりを行っている。そのため、シュミレーションの精度を詰めていく上で、恒温槽試験で解析したノイズレベルの結果

は、実測値の参考データとして、今後のシュミレーター開発にも貢献していくと考えられる。

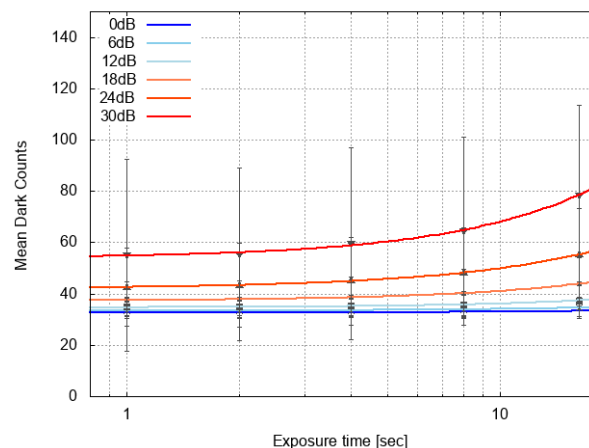


Figure 3. Dark counts as a function of CCD gain under exposure time of 1/60s and temperature of 40°C.

II. EM 真空試験

2017年7月中旬に本学理工学部(宮崎研究室)が所有する真空チャンバを使用し、2台のカメラの結像性能を調査した。その結果、屈折率の異なる真空下での試験前後で、2台のカメラの焦点距離の変動が 0.1%以下に抑えられていることが確認された。

III. EM 恒星撮像試験

2017年7月末に屋外での恒星撮像を実施し、光学レンズの PSF(Point Spread Function)を調査した。その結果、実際の恒星像でスポット径が設計通りの 5 ピクセル内に収まっていることを確認した。この実測データをもとに、先に述べたシュミレーター上で、月面衝突閃光の模擬画像を生成させる際の参考データとして反映させていく予定である。

4. 今後の方針

DELPHINUS 単体での試験項目として、(1)恒温槽を用いた温度毎の CCD センサのノイズレベル・ゲイン特性及び輝度特性の調査、(2)積分球を用いたフラット試験、(3)恒星撮像による限界等級・PSF・アライメントの調査、(4)熱真空試験による、2台のカメラのミスアライメントの変動と結像性能の調査、(5)月・太陽からの入射光を模擬した迷光評価などを予定している。

5. 参考文献

- [1] 布施綾太：「超小型深宇宙探査機"EQUULEUS"による月面衝突閃光の観測」, 卒業論文, 2016
- [2] 宮坂正大, 市川伸一：「市販冷却 CCD カメラの性能評価」, 国立天文台報, 第 4 巻, 59-73, p59~73, 1999