

G4

軌道上センチ級デブリ観測技術

Orbit centimeter class space debris observation technology

松本晴久、○上野遥、神谷浩紀、(宇宙航空研究開発機構)

Haruhisa Matsumoto, ○Haruka Ueno, Kohki Kamiya, (JAXA)

静止軌道衛星は、通信、放送、気象観測に使用されており、重要な社会インフラとなっている。センチ級デブリの衝突が静止軌道上で発生した場合、我々はこの軌道を使用することができなくなる。しかし、これらを追跡するために、地上のセンサからデブリを検出することは非常に困難である。本稿では、軌道上光学センサを用いた宇宙デブリ検出、破片回避システム、CMOSセンサの耐放射線性及び今後の計画について説明する。

The geostationary orbit satellites are used for communication, broadcasting, meteorological observation, etc. and have become important social infrastructures. If centimeter class debris collision has occurred in the geostationary orbit, we become unable to use this orbit.

However, it is very difficult to track or even to detect small objects from the ground-based sensors. In this paper we describe space debris detection with an optical sensor on-board satellite, debris avoidance system, radiation resistance of the CMOS sensor and future plan.



軌道上センチ級デブリ観測技術 Orbit centimeter class space debris observation technology

2016. 10. 20
第7回スペースデブリワークショップ

JAXA
研究開発部門 第一研究ユニット
松本晴久、○上野遥、神谷浩紀
Haruhisa Matsumoto, ○Haruka Ueno, Koki Kamiya,

Back ground



■ デブリ観測の現状

- デブリ情報：JSpOC の情報等、地上からのレーダー、光学観測
- 低軌道：レーダー観測。カタログ化されているのは約10cm以上
- 静止軌道：光学観測。カタログ化されているのは約1m以上
- 地上観測 → 静止軌道帯には1m以下の未カタログ物体が多く存在する可能性が分かってきている。



「現在及び将来に渡る宇宙活動の妨げとなるデブリ及びメテオロイドの脅威に対し、効率的な環境保全を実現」

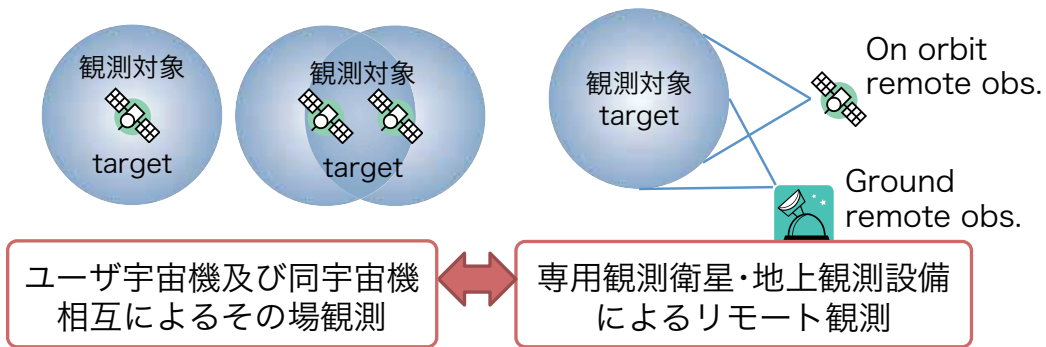


その第1段階として、利便性が非常に高く、かつ実用衛星が数多く運用される静止軌道に対するデブリ観測の早期実現が必要と考える。

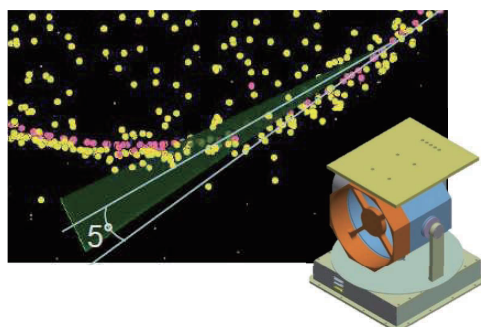
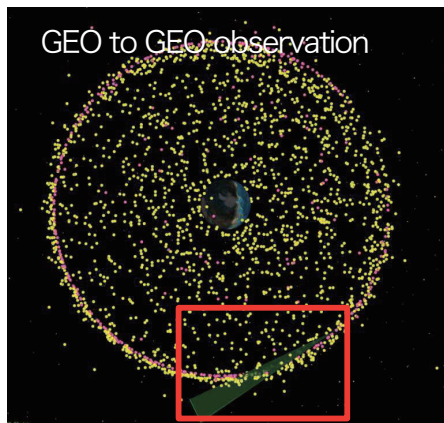
Centimeter class space debris observation

■ 研究進め方

- 第1目標：軌道上でデブリを検出する技術の確立
- 第2目標：地上連携で軌道を決定する技術の確立
- 最終目標
 - デブリ回避の実現。更には、軌道上での自律化運用。
 - 静止衛星にデブリ観測装置を搭載し、搭載衛星2km以内に接近する数cm以上のデブリを早く1ヶ月、遅くとも2週間前に検出し、自身の軌道情報を（時刻、位置3成分、速度3成分又は軌道6要素）を用いることで自律的にデブリ衝突を回避する。
 - 静止衛星（ユーザ宇宙機）自身による「その場観測」に寄与する。産業競争力にも貢献。



Specification of camera system

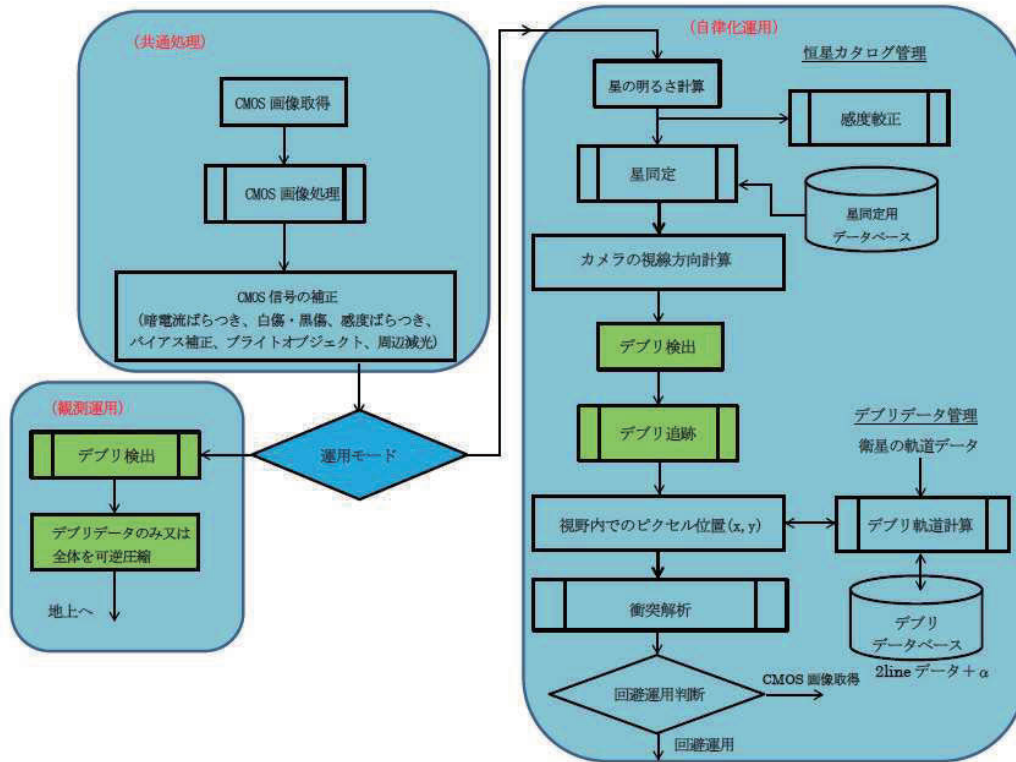


- 1cm以上のデブリを検出・軌道決定@GEO
- 衛星を回避させるシステム構築を最終目標とする。

Items	Camera Specification
Photodetector	7.1 μm ×7.1 μm pixel size : 1280×1024 CMOS
Focal length[mm]	50
F number	1.2
Field of view	8°×10°
Effective aperture	41.6 mm Φ
Wave length region ($\Delta\lambda$)	0.2 μm (450~650 nm, 基準波長:550 nm)
Transmittance	0.88
QE(%)	50
S/N (dB)	10 (目標 6)
Exposure time	0.1sec~1 sec
Read noise	2e-
Weight (kg)	3.8



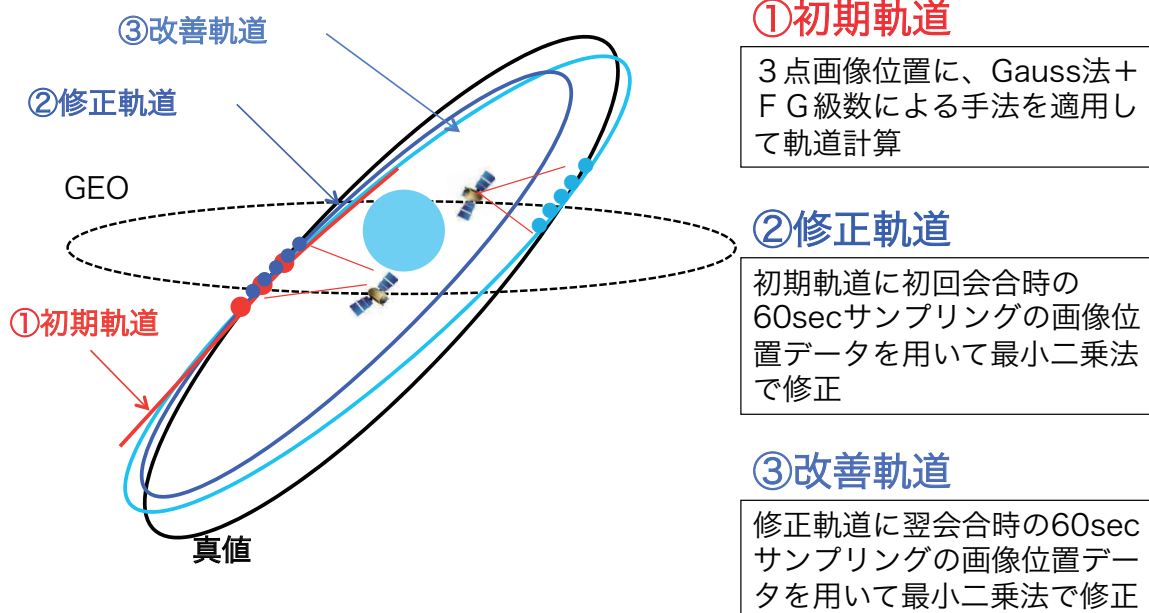
The way of operation



The detection of debris orbits



■ The way of estimation for debris orbit by the observation of 1 satellite



Verification example of orbit determination procedure

■ 良く決定できた例

- Satellite : JCSAT
 - Target Debris : TITAN 3C TRANSTAGE R/B
- ※ GTO軌道や初期の軌道傾斜角が合わないと良くない結果になることが多い。

	真値	初期軌道	修正軌道	改善軌道
Epoch	2013/09/28 10:32:00			
eccentricity	0.806	0.897	初期軌道でのCMOS画像差がCMOS分解以下	0.801
inclination	10.81	11.82		11.37
Semi-major axis	70691.8	70250.0		66247.9
distance	108701.3	107523.8		70361.5
会合開始	2013/09/29 13:02:00	2013/09/29 13:14:00		2013/09/29 13:02:00
会合終了	2013/09/29 14:37:00	2013/09/29 14:44:00		2013/09/29 14:38:00

CMOS画像からのデブリ観測方向の算出

↓

デブリ観測方向からのデブリ位置・速度の推定

↓

物体推定位置・速度からの平均軌道要素の計算

↓

ラグランジュの係数の級数展開式を利用

↓

推定平均軌道要素からのデブリ予測位置の算出

開発の進め方



■ 軌道決定技術の研究

- 撮像シミュレーションの整備
- デブリ弁別アルゴリズムの作成

■ 装置の実現性

- 素子の選定
- 耐環境性評価
- データ処理ソフトウェアの開発
- 実データの取得（短期間でも有効）

開発の進め方



■ 軌道決定技術の研究

- 撮像シミュレーションの整備
- デブリ弁別アルゴリズムの作成

■ 装置の実現性

- 素子の選定
- 耐環境性評価
- データ処理ソフトウェアの開発
- 実データの取得（短期間でも有効）

Imaging Simulation

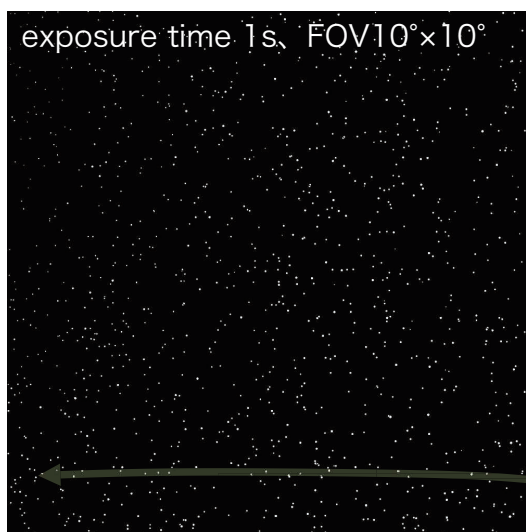


■ 目的

- 軌道上でデブリがどのように写るか把握する → デブリの軌道決定の可否を評価
- 現実に近い撮像を再現するツールを開発する

■ 機能

- 太陽が視野に入ることを考慮（50°以内）
- カメラの特性
 - 口径、Fナンバー、CMOSサイズ
 - イメージ劣化、光学透過率、QE特性 等
- デブリ
 - デブリ径
 - アルベド
 - 太陽光位相角

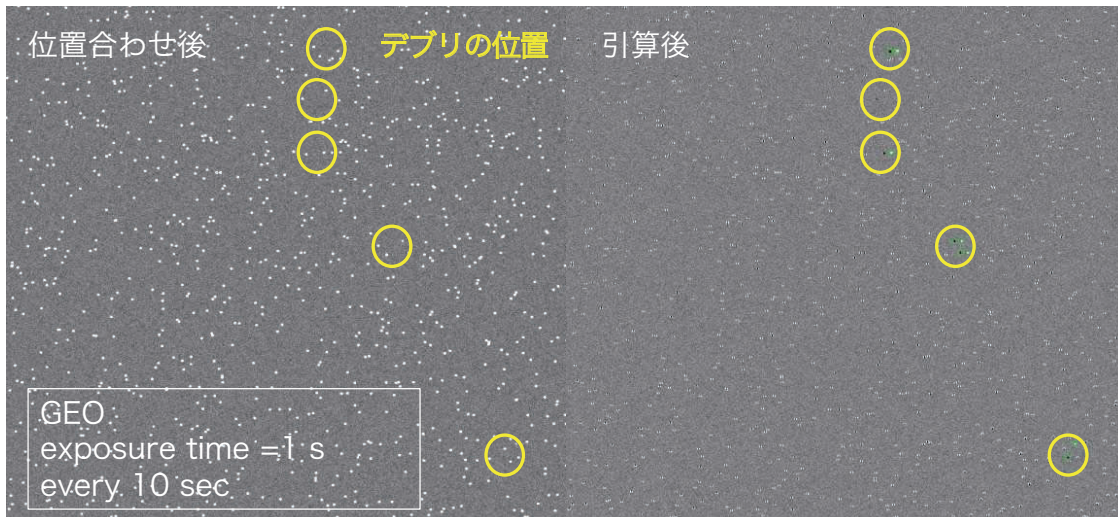


Debris Discrimination



■ 弁別方法

- 画像の位置合わせ、引算 → 恒星を除去し、無数の光源からデブリを検出



- 各画像では検出できないこともあるが、暗くない限り複数枚の画像で全く検出されないことはない。

開発の進め方



■ 軌道決定技術の研究

- 撮像シミュレーションの整備
- デブリ弁別アルゴリズムの作成

■ 装置の実現性

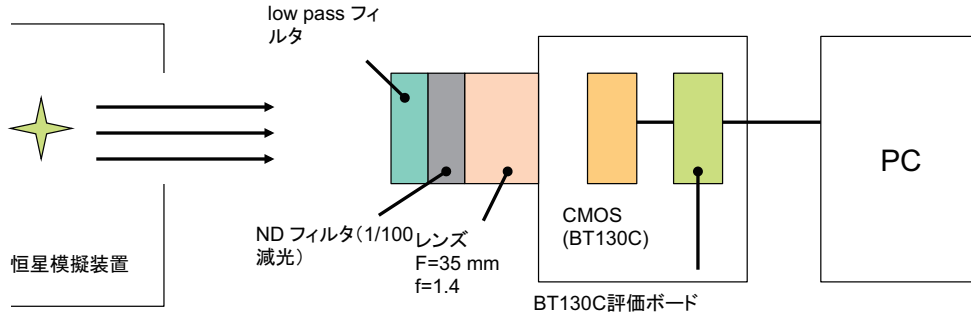
- 素子の選定
- 耐環境性評価
- データ処理ソフトウェアの開発
- 実データの取得（短期間でも有効）

The test of the detection of limit grade



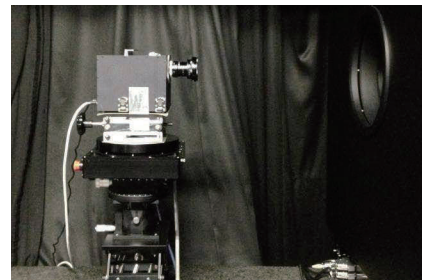
■ BT130C (EM) の観測限界等級数の検証試験

- Testing Device : Star Simulator @ ISAS. Magnitude : -2~6, Spectrum : G, M, K
- Set up



■ 試験条件

- 色温度 : G (5600 K)
- スペクトルが 900 nm以上でBlackbody からずれる
→ Low pass filter で対処
- 6等級以下での試験のために ND filter を使用
- Exposure time : 33 msec (Fixed、評価ボードの仕様)

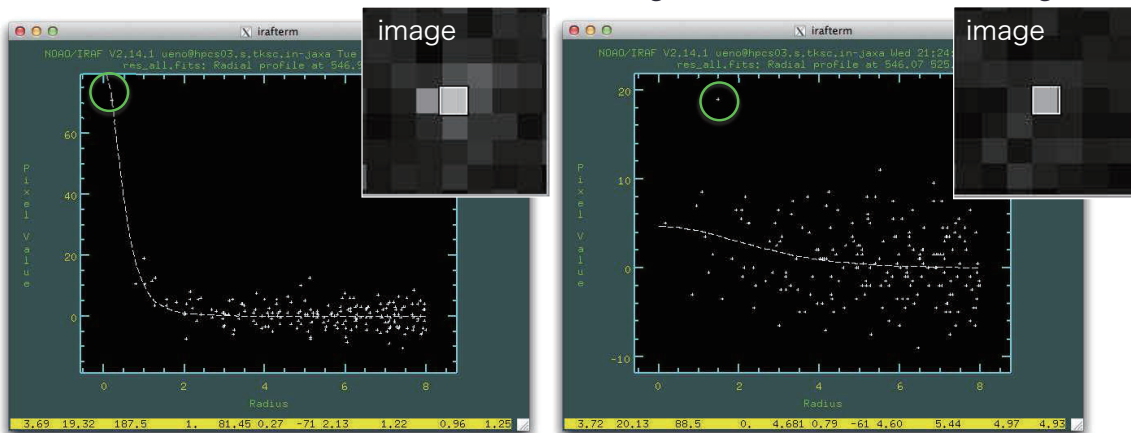


Results



■ The radius from the center of a image vs. ADC

- ① Magnitude 5+ND filter (= mag. 10)
- ② Magnitude 6+ND filter (= mag. 11)



- The detection of limit grade = **Magnitude 10-11**@Exposure time = 33 msec
- レンズとCMOSの特性から求めた限界等級数の理論値 : **magnitude 11.5**
– F=1.4, f= 35mm, S/N=0dB, noise 10 counts, Monochrome CMOS
- おおよそ理論値と一致するが、BT130C が color COMS であるため <11.5 になっていると推測できる。

Evaluation of the degradation from radiation

■ 放射線照射によるホットピクセルとノイズレベルの変化の評価

- 陽子照射の条件

	No.	Energy [MeV]	exposure time [s]	Fluence [$\mu\text{p}/\text{cm}^2$]
1	N04	70	1925	3.27×10^8
2	N10	70	3723	6.54×10^8
3	N38	46.93	1651	6.55×10^8

■ ホットピクセル数の変化

- ホットピクセル：素子内に生じる格子欠陥が原因→ 常に高いピクセル値
- Optical Black ピクセルで検証
 - ピクセル値のヒストグラム→ Gaussian でフィッティング → 中心値と σ を算出
 - ホットピクセルの定義
 - ピクセル値が中心値 + 3σ 以上であるピクセル座標を求める
 - 100フレームのうち90フレーム以上で共通するピクセルをホットピクセルとした。

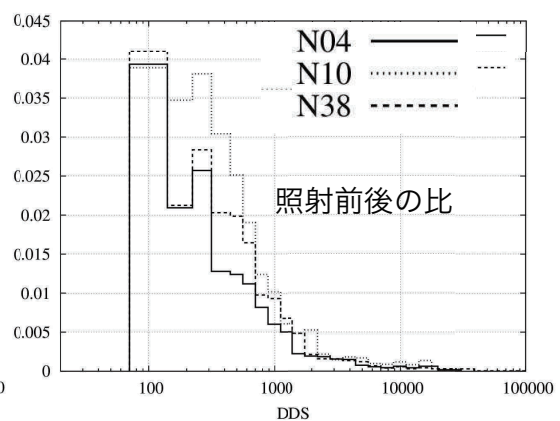
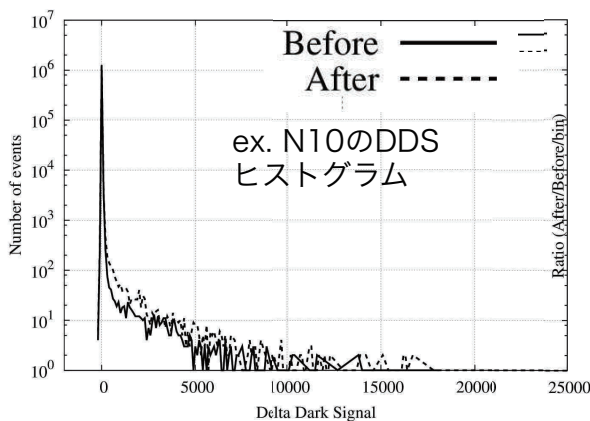
hot pixels	OB2(with photodiode)		
	N04	N10	N38
Before	14	11	26
After	21	26	40
Δ	+7	+15	+14

陽子照射によってホットピクセル数が増加
↓
宇宙線入射によるホットピクセルの増加を見込んだ設計が必要

Evaluation of the degradation from radiation

■ ノイズレベルの変化

- Photodiode の劣化に着目するため → OB without photodiode を対象
 - $N_1 = N_p + N_{amp}$, $N_2 = N_{amp}$
- ダークフレームを取得 → 有感領域のピクセル値との差 (Delta Dark Signal: DDS) のヒストグラムを照射前後で比較



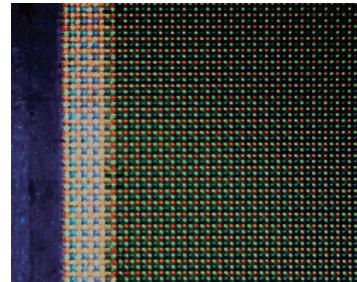
- 最も変化の大きいのは N10 ⇒ エネルギーが高く、フルエンスが高いと劣化が激しい
→ ただしサンプル数が一つずつであるため、さらなる検証が必要

Contamination



■ アウトガス試験

- CMOSセンサから出るアウトガスの量ならびに発生源を特定する
 - カバーガラスと本体を接着する際に必要な接着剤
 - フォトダイオードへ集光するためのマイクロレンズ
- 使用設備：筑波宇宙センター アウトガス測定装置



CMOS表面画像

■ 評価項目

- アウトガス質量：質量損失（TML）
- アウトガス成分評価（赤外分光解析）

■ 結果

- アウトガス質量：マイクロレンズ、接着剤部ともに基準である「TML \leq 1.0%」の値よりも一桁以上少ない値
 - アウトガス成分：検出無し
- コンタミについて問題ない判断できる。

Conclusion



- カメラの基本特性をシミュレーションソフトウェアに組み込み、デブリ弁別、軌道決定ソフトウェアを構築した。軌道決定方法については、更なる改善が必要である。また、デブリ弁別と軌道決定の一体化を図っていく。
- BT130を光学素子として選定し、限界等級等基礎データを取得した。ほぼ、理論値と同等の結果を得た。
- BT130M の特性評価として、放射線劣化、コンタミ評価を実施した。放射線劣化についてはDDSが増加する傾向が得られ、ホットピクセル数は増加が見られた。これらのカメラシステムに対する影響は今後評価する。主にマイクロレンズに起因するアウトガスによるコンタミは今回有意に検出されなかった。
- 今後は、搭載カメラのデータ処理部を作成し、軌道上で実現できるデブリ弁別ソフトウェアの検討を実施する。