

超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS) の運用結果について



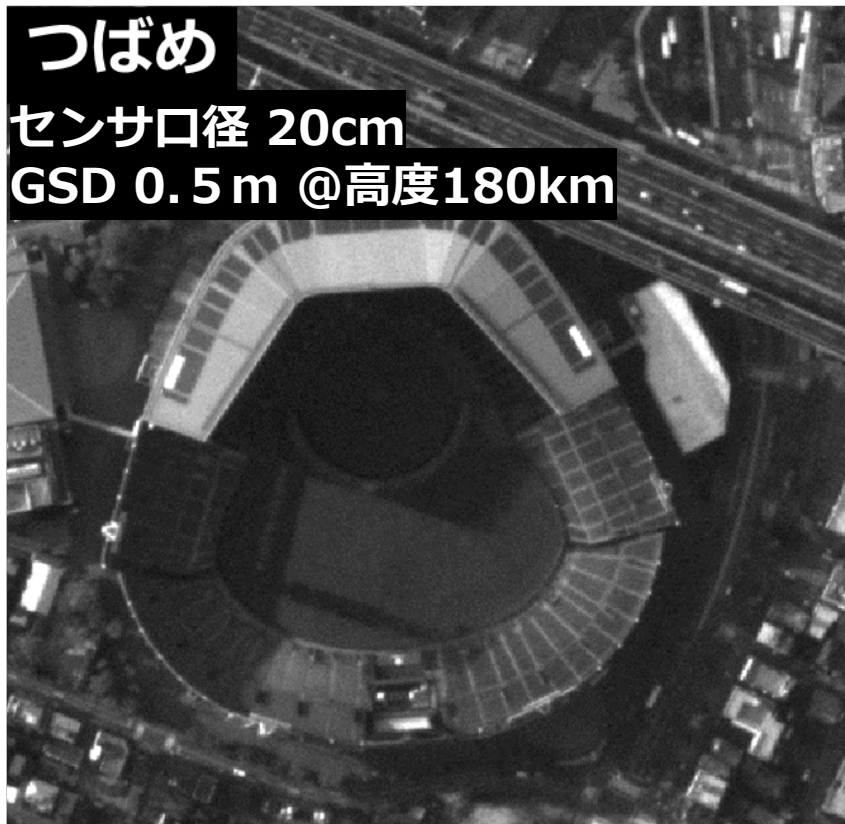
2020年 1 月 24 日

JAXA 第一宇宙技術部門 SLATS プロジェクトチーム
プロジェクトマネージャ
佐々木 雅範

1. はじめに
2. SLATS 運用概要
3. サクセスクライテリアの達成状況
4. SLATS 運用成果
5. まとめ

超低高度（300km以下）からの地球観測で今までにない新たな利用を目指す試験機。2017年12月23日打上げ。2019年10月1日に運用完了。

「低空飛行」すると分解能が向上し、衛星の小型・低コスト化も可能。



「つばめ」 軌道高度 252km

「だいち」 軌道高度 692km

阪神甲子園球場付近の衛星画像

- 記録名 : Lowest altitude by an Earth observation satellite in orbit
 最も低い地球観測衛星の軌道高度
- 記録数値 : 軌道高度167.4km
- 記録詳細 : The lowest altitude by an Earth observation satellite in orbit is 167.4 km (104 mi) and was achieved by JAXA's TSUBAME (JAPAN) during its mission from 23 December 2017 to 1 October 2019.

注 : 軌道高度 = 平均軌道長半径 - 赤道半径



ギネス世界記録®認定証授与



167.4kmからの撮像 米ボストン

2. SLATS 運用概要 (目的/主要諸元)

SLATS は超低高度軌道からの地球観測を実証することで、地球観測における新たな利用の可能性を拓くことを目的とする。

SLATS のミッション

① 超低高度衛星技術の実証

イオンエンジンによる軌道保持などの衛星運用を軌道上実証。

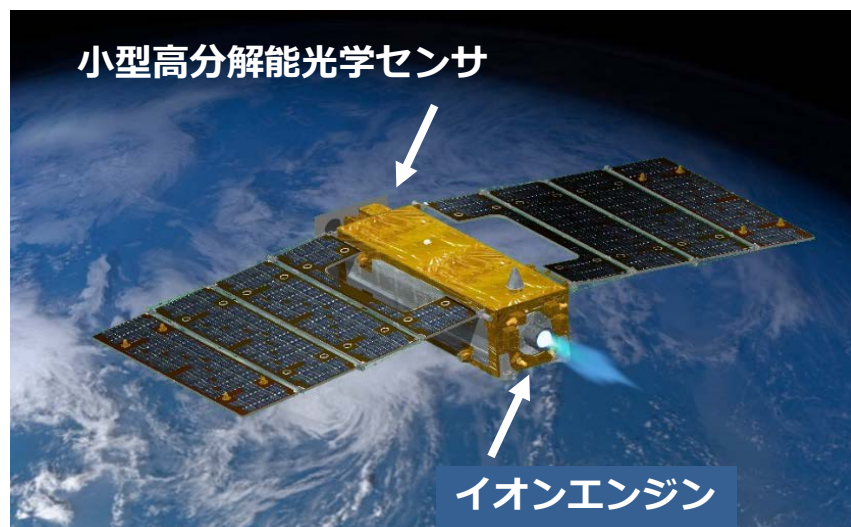
② 大気密度・原子状酸素に関するデータの取得

衛星軌道の変動に基づく大気密度データ，原子状酸素 (AO) の環境や材料劣化に係るデータを取得し，大気密度モデルの精度向上や原子状酸素への対策など将来の超低高度衛星を実現するための設計基準への反映。

③ 小型高分解能光学センサによる撮像実験

大きな大気抵抗やイオンエンジン推力が作用する状態での撮像実験。

<SLATS外観図>



<SLATS主要諸元>

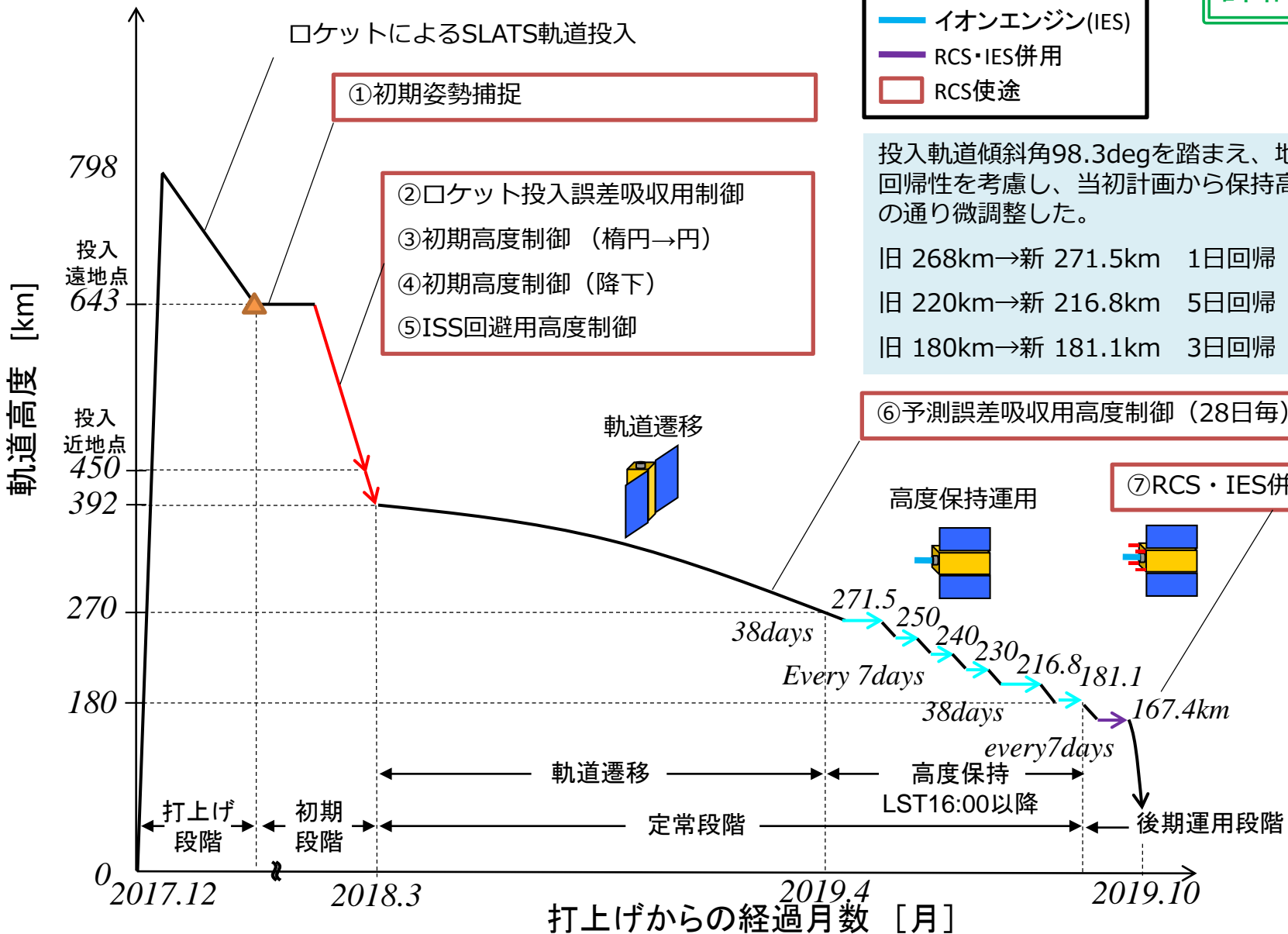
項目	諸元
軌道	投入軌道から 272km にかけて大気抵抗等を利用し軌道変更する。 271.5~167.4 km にてイオンエンジンを用いた軌道保持を行う。167.4kmではガスジェットも使用する。
サイズ	軌道上 X 2.5 m × Y 5.2 m × Z 0.9 m 打上げ時 X 2.5 m × Y 1.1 m × Z 0.9 m
発生電力	1174W以上
打上げ質量	383 kg (Xe 13.3kg, N ₂ H ₄ 34.5kg)
設計寿命	2年以上
小型高分解能光学センサ	口径：20 cm 質量：19.4 kg 光学部径：27cm×27cm×54cm 電力：33W (ヒータ含む) GSD：0.6m @ 軌道高度220km
打上げ	平成29年12月 23日 H-2Aにて打上げ

詳細は No.2

- 化学推進系(RCS)
- イオンエンジン(IES)
- RCS・IES併用
- RCS使用

投入軌道傾斜角98.3degを踏まえ、地上の観測回帰性を考慮し、当初計画から保持高度を以下の通り微調整した。

- 旧 268km→新 271.5km 1日回帰
- 旧 220km→新 216.8km 5日回帰
- 旧 180km→新 181.1km 3日回帰



3. サクセスクライテリアの達成状況 (1/3)

◆ 超低高度衛星技術の実証

ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
<p>超低高度軌道への投入が成功すること</p> <p>【判断時期: 高度271.5km 到達時点】</p> <p>【結果】判断基準である高度271.5kmへの投入を実施した。</p>	<p>①高度216.8kmにおいて、27日間以上、自律的に高度保持を実施し、高度保持精度±1km(1σ)を満足すること</p> <p>【結果】イオンエンジンを用いた高度216.8kmの保持運用を38日間実施した。軌道保持精度+121m/-119mを達成した。</p> <p>②異なる高度から光学センサにより撮影できること</p> <p>【結果】高度271.5kmから181.1kmの高度保持運用期間を含め、異なる高度から光学センサによる撮像を実施した。</p>	<p>緊急高度上昇運用の有用性を示せること</p> <p>【結果】高度167.4kmの高度保持運用にて、大気抵抗の増加により、イオンエンジンでは軌道が保持できない際にガスジェットが自律的に動作することで、緊急高度上昇運用に相当する軌道保持運用を実施し、その有用性を確認した。</p>

◆ 大気密度データの取得

ミニマムサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
<p>高度271.5kmより高い高度において、大気密度に関するデータを取得できること</p> <p>【判断時期: 高度271.5km 到達時点】</p> <p>【結果】判断時期である高度271.5km到達時点まで大気密度に関するデータを取得した。</p>	<p>高度271.5kmから181.1kmにおいて、90日間 大気密度に関するデータを取得できること</p> <p>【結果】高度271.5kmから181.1kmにおいて、イオンエンジンを用いた軌道保持運用を104日間実施し、6段階の保持高度にて大気密度に関するデータを取得した。</p>	<p>①高度271.5kmから181.1kmにおいて、90日間を超えて大気密度に関するデータを取得できること</p> <p>【結果】高度271.5kmから181.1kmにおいて、軌道保持運用を104日間実施し、6段階の保持高度にて大気密度に関するデータを取得した。</p> <p>②高度181.1kmより低い高度において、大気密度に関するデータを取得できること</p> <p>【結果】高度167.4kmの軌道保持を含め、181.1kmより低い高度において大気密度データを取得した。</p>

3. サクセスクライテリアの達成状況 (2/3)

◆ 原子状酸素データの取得

ミニマムサクセス		フルサクセス		エクストラサクセス	
<p>原子状酸素衝突フルエンスセンサが正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】</p> <p>【結果】判断時期として設定した打上げ3ヶ月後まで正常にデータを取得した。</p>	○	<p>高度271.5kmから181.1kmにおいて、90日間の原子状酸素衝突フルエンス(F_{AO})を計測できること</p> <p>【結果】高度271.5kmから181.1kmにおいて軌道高度遷移期間を含め合計141日間にてF_{AO}を計測した。</p>	○	<p>①高度271.5kmから181.1kmにおいて、90日間を超えてF_{AO}を計測できること</p> <p>【結果】高度271.5kmから181.1kmにおいて軌道高度遷移期間を含め合計141日間にてF_{AO}を計測した。</p> <p>②高度181.1kmより低い高度において、F_{AO}を計測できること</p> <p>【結果】高度167.4kmの軌道保持を含め、181.1kmより低い高度においてF_{AO}を計測した。</p>	○
<p>材料劣化モニタ機器の全機能が正常に動作すること 【判断時期: 打上げ3ヶ月後】</p> <p>【結果】判断時期として設定した打上げ3ヶ月後まで正常にデータを取得した。</p>	○	<p>高度181.1km以上において、材料劣化状況を原子状酸素衝突フルエンスと共に取得できること</p> <p>【結果】高度271.5kmから181.1kmの高度保持運用期間を含め、高度181.1km以上において、材料劣化状況を原子状酸素衝突フルエンスと共にデータ取得した。</p>	○	<p>原子状酸素による材料劣化について新たな知見が得られること</p> <p>【結果】超低高度ならではの世界初の知見として、原子状酸素フルエンスに応じた2種類の材料劣化現象を捉えた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・耐 AO コート/ポリイミドフィルムについて、特定の原子状酸素フルエンスにて急激に表面劣化が進行する現象。 ・FEP フィルム/Ag について、原子状酸素が直接衝突しない裏面Ag層が、浸食を受ける現象。 	○

3. サクセスクライテリアの達成状況 (3/3)

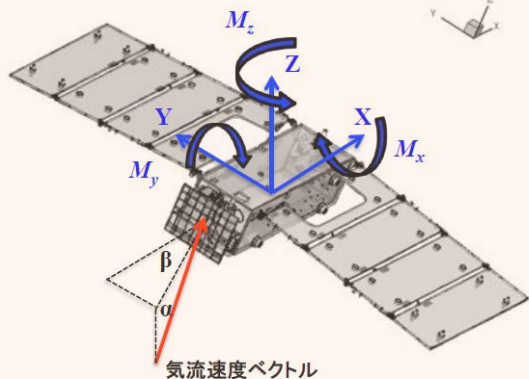
◆ 小型高分解能光学センサによる高分解能撮像

ミニмумサクセス	フルサクセス	エクストラサクセス
<p>○ 小型高分解能光学センサが正常に動作し、撮像ができること</p> <p>【判断時期: 打上げ3ヶ月後】</p> <p>【結果】判断時期として設定した打上げ3ヶ月後までセンサは正常に動作し、撮像した。</p>	<p>○ ①分解能 1 mの高分解能撮像ができること</p> <p>【判断時期: 高度271.5km 到達時点】</p> <p>【結果】分解能1mを満足する画像として、高度291.1km から撮像し、GSD 79cmにて画質仕様 (MTF 0.08、SNR 25) を満足する、MTF 0.13 AT / 0.14 CT、SNR 109の画像を取得した。</p>	<p>○ 高度271.5kmより低い高度において、一定の画像品質を備えた高分解能撮像ができること</p> <p>【結果】高度271.5kmより低い高度において、一定の画像品質を示す画質仕様 (MTF 0.08、SNR 30) を満足する撮像として、高度181.1kmからの撮像にて、GSD 56cm、MTF 0.10 AT/ 0.14 CT、SNR 70 の画像を取得した。また、高度167.4kmからの撮像にて、GSD 49cm、MTF 0.09 AT/ 0.14 CT、SNR 63 の画像を取得した。</p>

4. SLATS 運用成果

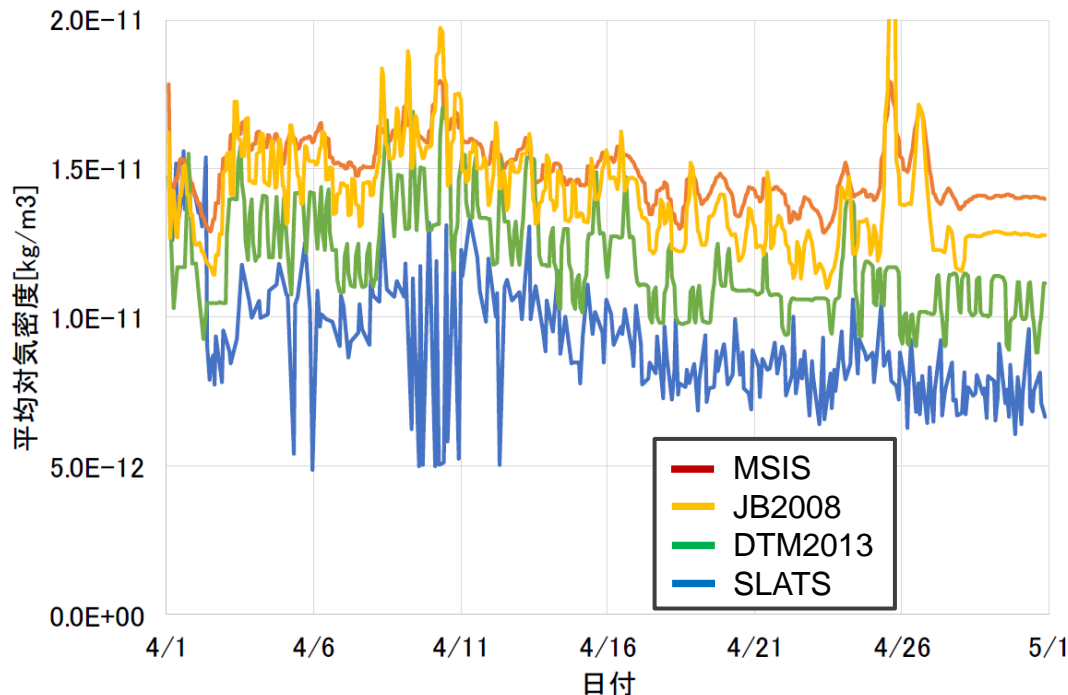
4.1 大気密度データの取得

詳細は No.3,4



空力解析モデル

空力解析モデルを用いて解析した空力抵抗係数、GPSR TLM データから得られる大気抵抗力及び衛星速度等に基づいて、1周回ごとの大気密度を評価。



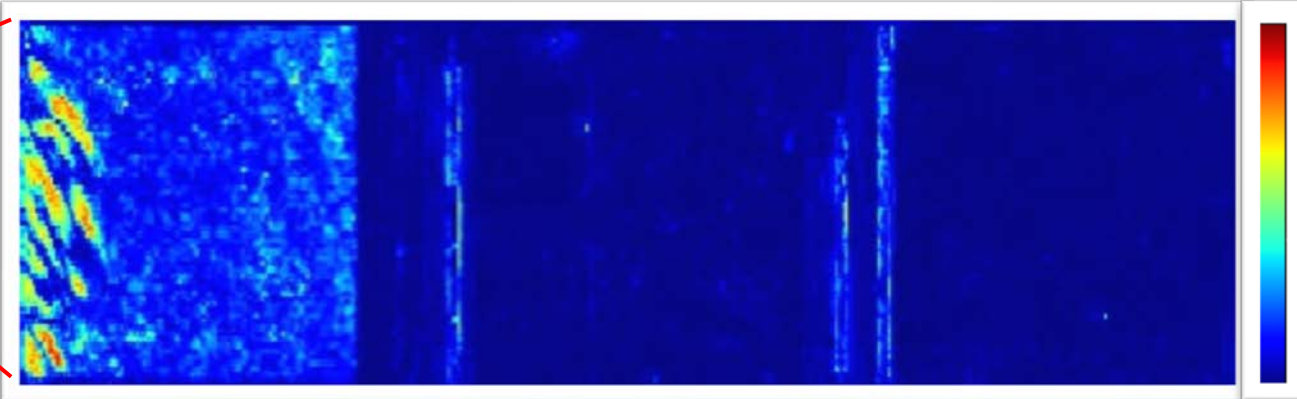
高度271.5kmの保持期間中の大気密度評価

- 大気モデルの精度向上を研究中。
- データの一例として、高度271.5kmの軌道保持期間における1周回ごとに算出した大気密度の評価において、軌道上データは、大気モデル（NRL-MSISE-00）にて予測した値に比べ30%程度低い結果が得られている。
- 得られた成果に基づいて、さらなる衛星の小型化や長寿命化を図ることで、**超低高度衛星の活躍領域をさらに拡大**できると期待される。

詳細は No.8

原子状酸素（AO）による搭載材料試料（全13種）の劣化状況を光学カメラでモニタする。

評価例：3種類のポリイミドフィルムについての1.7年間の変化量 変化量



搭載材料試料の画像
打上げ1.7年後(2019/9/4)

耐 AO (SQ) コート
Polyimide (Apical/AH)

耐 AO 性
Polyimide (BSF30)

UV 遮蔽コート付き耐 AO
性 Polyimide (BSF30)

材料劣化の新規
知見を獲得

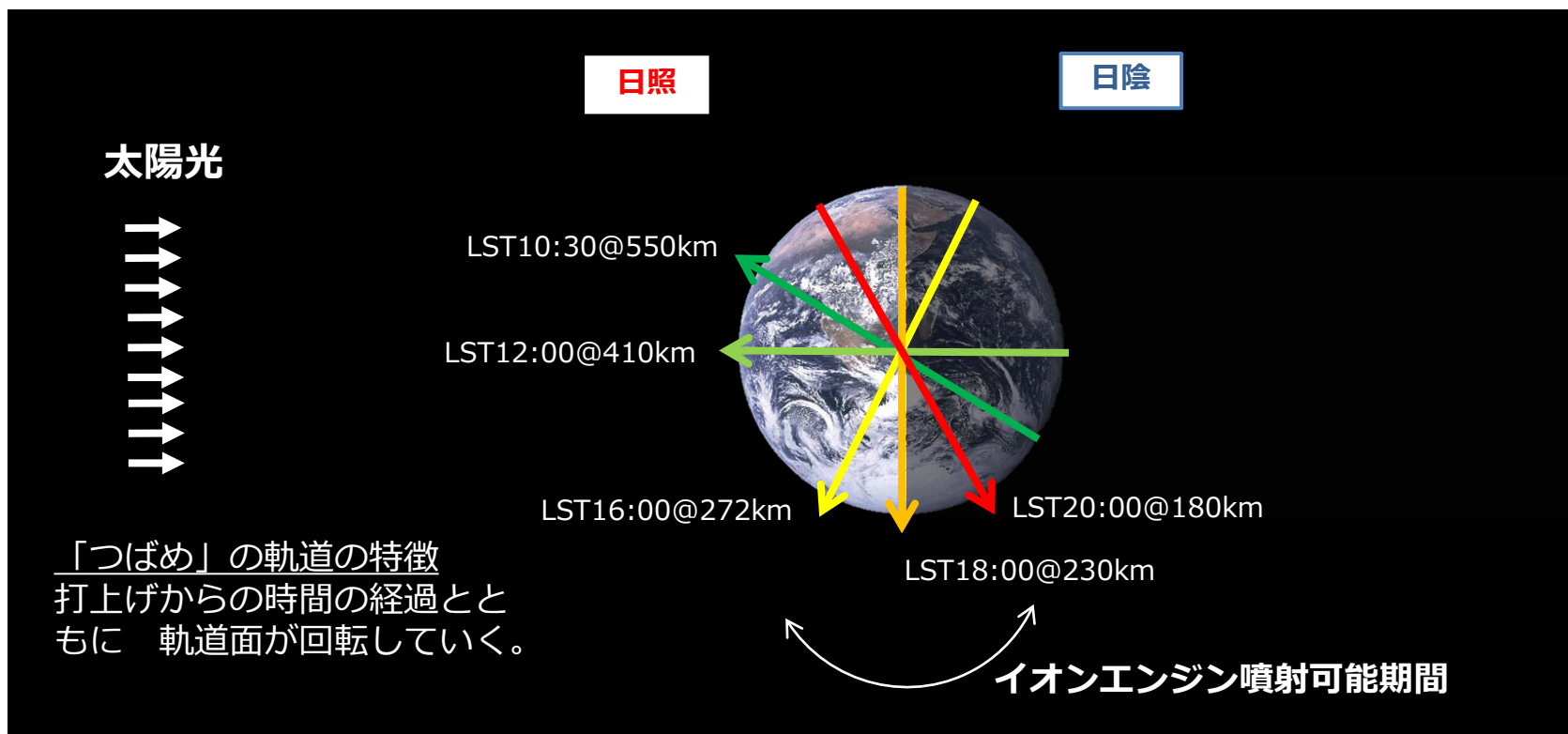
JAXA開発素材のAO に対する
高い耐久性を実証

- 高度 300 km 以下での大気曝露による材料劣化の観測は**世界初**。
- 評価の一例として、**ある入射AO量を超えると、急激に劣化が進行する事象**を捉えることができた。
- 世界に先駆けて取得した知見を活かし、**我が国発の耐AO設計指針**や**我が国独自の新材料創成に発展**させることが期待される。

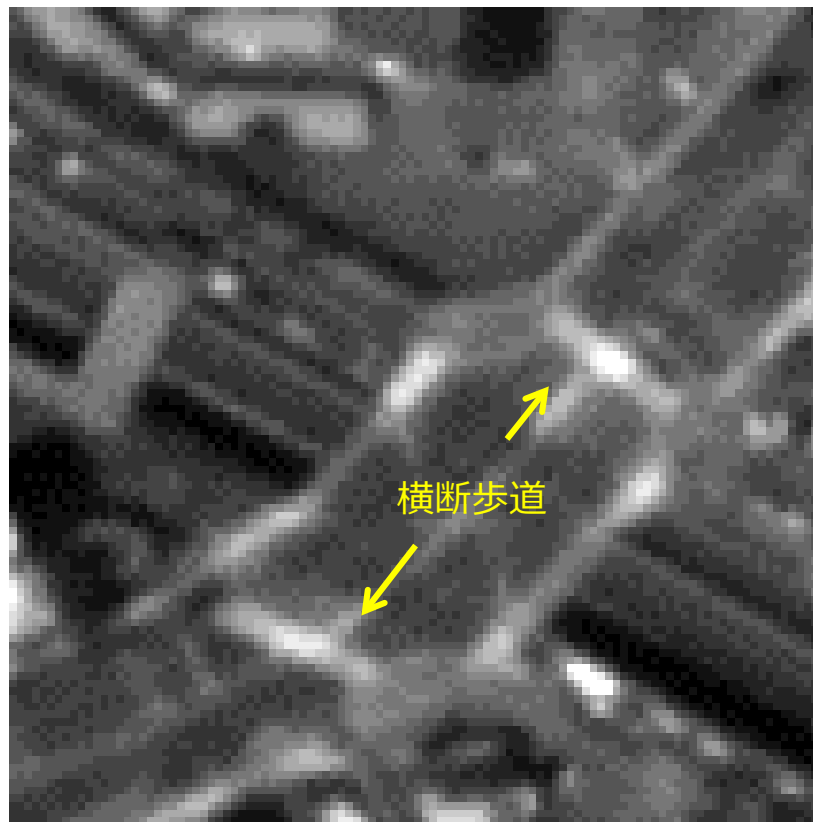
高分解能撮像に関するトピック

- ① 軌道高度低下による分解能向上.
- ② イオンエンジン噴射による影響がないこと.
- ③ 完全回帰軌道（軌道高度271.5km）からの連日の定点観測
- ④ 異なる撮像時刻（LST）にて撮像.
 （軌道面が太陽に対して回転していく軌道. 下図参照）

詳細は No.10

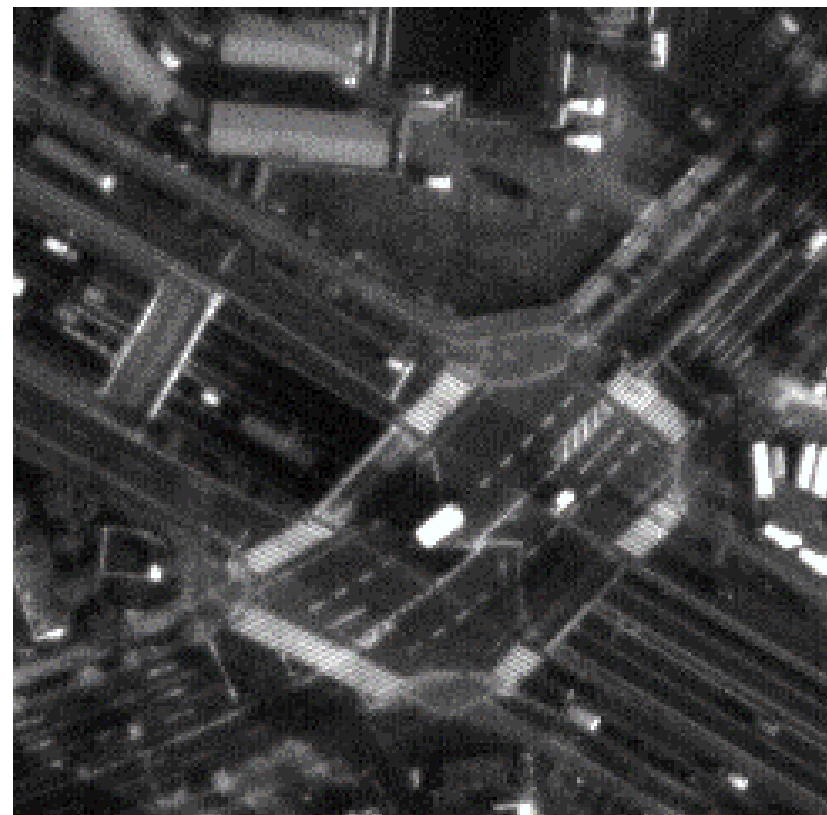


◇ 210kmの高度低下の例（大阪市浪速区/西成区 中開3丁目北交差点）



約120m

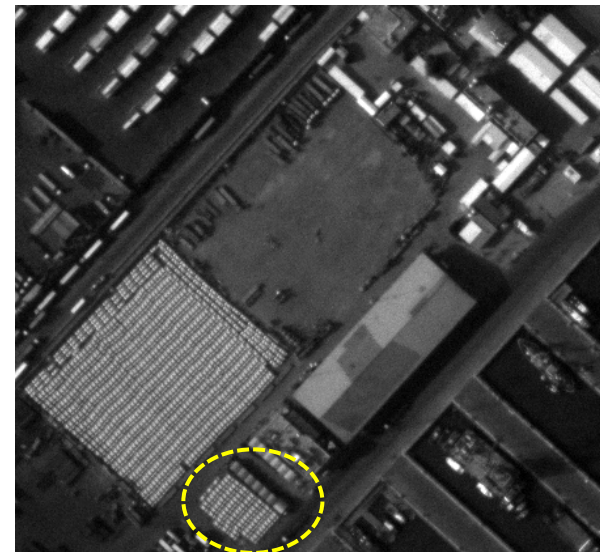
GSD 106 cm @366.2km 2018/9/19 13:40



約120m

GSD 47 cm @155.5km 2019/10/1 7:03

- 高度低下により、高画質の画像が得られることを確認した。
- 高度低下に伴う大気抵抗増やイオンエンジン噴射によって画像が劣化する事象は確認されておらず、超低高度においても良好な画質を取得できた。
- 高度155kmからの画像では、45cm 間隔の横断歩道の白線を1本1本識別可能。



2019/4/10 16:28

2019/4/11 16:29

2019/4/12 16:30

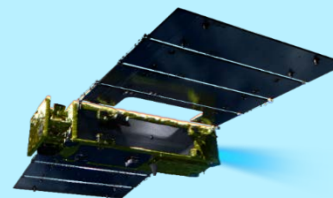
- 港湾に停泊した船舶上や敷地に置かれたコンテナや自動車等の貨物の配置や数量の変化を連日同じ視点から観察が可能。
- 衛星画像を用いた高頻度の各種数量計測と地上のビッグデータとの組み合わせなど、新しい地球観測利用への展開が期待される。

詳細は No.12,13,14

共同研究による「つばめ」成果拡大

- FY2016に研究テーマを公募・選定
- FY2017から実施中
- ⇒ 超低高度衛星技術に係る設計基準等に成果を反映

JAXA/SLATS



大気データ
材料劣化データ

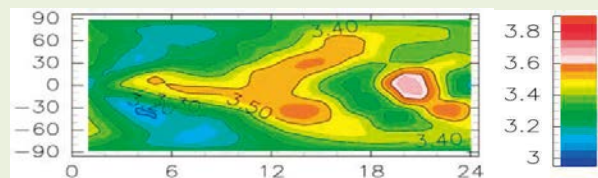


設計基準
への反映

< 超高層大気環境分野 >

九大・理 三好 准教授

衛星データを用いた超高層大気密度推定の研究

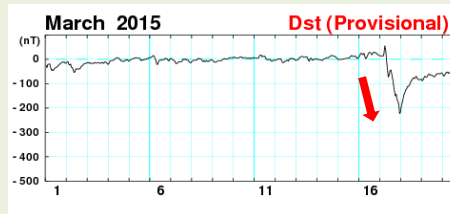


例 中性大気密度の緯度分布
(高度200km, 10^{-10}kg/m^3 , 秋分, F10.7=200)

詳細は No.6

名大・宇宙地球環境研究所 能勢 准教授

Dst指数で計量した磁気嵐の規模と中性大気密度変化量の関係の統計解析



詳細は No.5

< 宇宙材料分野 >

神戸大・工 横田 助教

超低軌道環境における中性ガス衝突誘起材料劣化現象メカニズムの解析



軌道上カプセル

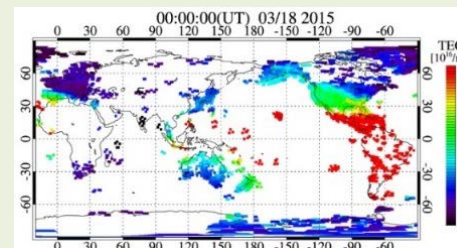


AO環境実験装置
©神戸大

詳細は No.9

京大・理 齊藤 准教授

SLATS観測データと電離圏観測データとの比較による標準高層大気モデルの検証



全電子数TEC©NICT

超低高度衛星に関わる基盤的な技術・ノウハウを獲得。

世界初 イオンエンジンを用いた超低高度からの光学画像観測運用

世界初 超低高度での長期間の原子状酸素データ取得

① 空力解析に基づいた超低高度における軌道制御技術

航空機のように空力データベースを構築した。

取得したGPSデータを用いて、従前の大気モデルとの差を定量的に把握した。

超低高度においても高精度に軌道予測・決定する技術を実証した。

② イオンエンジンを用いた軌道制御アルゴリズム

高精度の軌道保持を実証した。

運用ノウハウを蓄積した。

③ 原子状酸素 (AO) 対策

長期間のAOデータを取得した。

AOの環境評価技術や対策方法を実証した

④ 超低高度からの撮像の有用性 (分解能向上, 様々な観測時刻, 定点観測)

小型光学センサによる高分解能の画像取得にて、撮像の有用性を実証した。

今後、将来の超低高度衛星の開発に必要な設計基準類を整備する予定。
 その成果を将来衛星の実現に確実につなげていく。

超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS)は計画したすべてのミッションを良好に達成して、10/1に運用を完了しました。

将来の実用となる超低高度衛星の実現には、電気推進の運用性向上、大気モデルの予測精度の向上、原子状酸素対策、空力抵抗削減のための小型化や省電力化の徹底などが求められます。JAXAではこれらの技術の獲得を推進してきました。

今後、JAXAは「つばめ」で獲得した超低高度衛星技術をさらに発展させ、衛星画像を利用した各種ビジネスへの展開や風速観測ミッションによる航空機の燃費向上など、科学技術の発展や社会的課題の解決に向けて貢献していきたいと考えております。

詳細は No.15,16,17