

超低高度を利用する観測衛星“つばめ”

功刀 信*

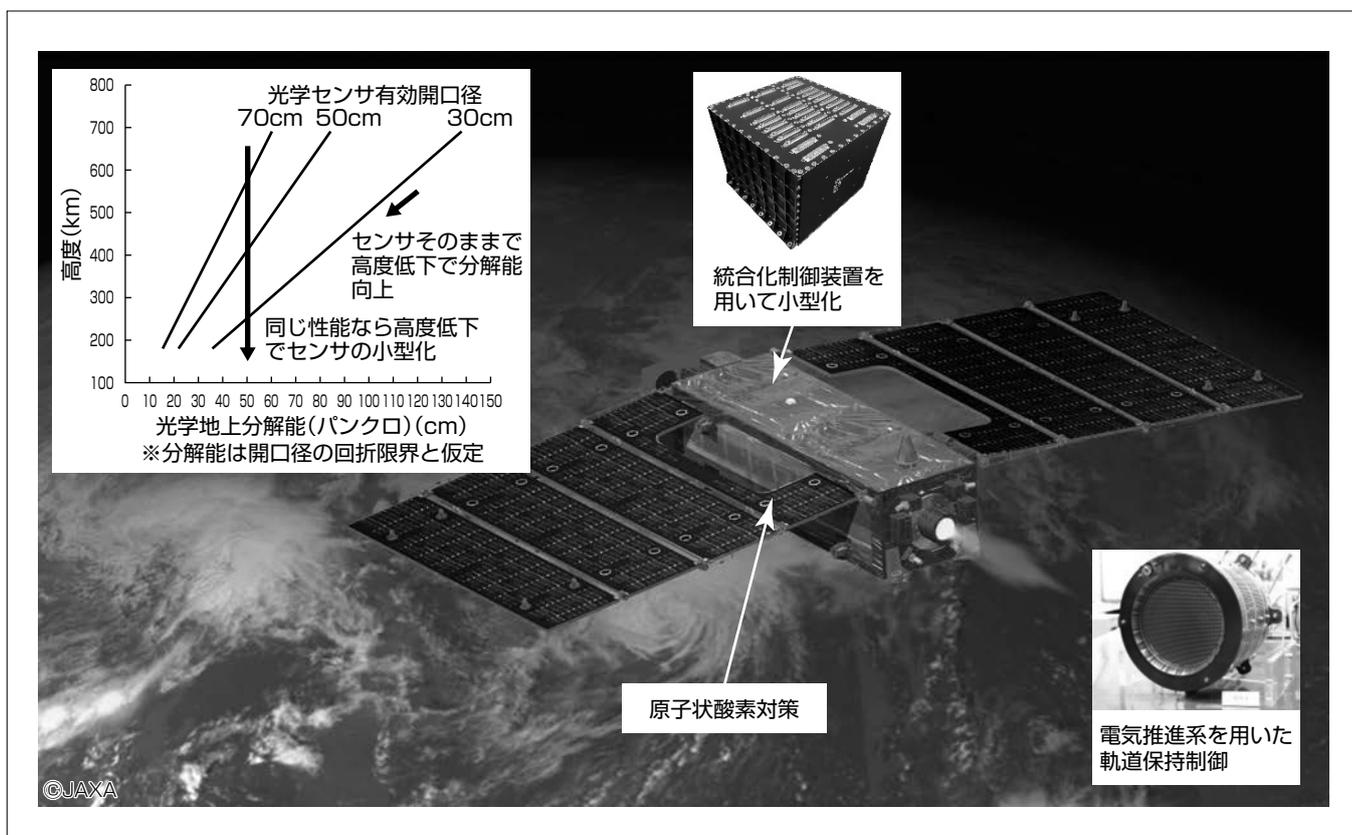
"TSUBAME" : Observation Satellite Using Super Low Altitude

Makoto Kunugi

要旨

“つばめ”(超低高度衛星技術試験機：Super Low Altitude Test Satellite(SLATS))は、2017年12月23日にH-II A37号機で打ち上げられた衛星で、今まで日本の衛星では使用していなかった超低高度(高度300km以下)を飛行する光学センサ等のミッションセンサを搭載した衛星である。通常の観測衛星は、高度600~800km程度を飛行する。超低高度を飛行することによって、同じ観測性能を確保するセンサを小型化できる利点があり、同様に衛星自体も小さくできる利点がある。しかし、高度が低いことで大気密度が高くて大気抵抗が大きくなるため、軌道を維持することが難しくなるほか、高層大気中の原子状酸素にさらされて衛星の表面が削られるという課題がある。その対策としてこの

衛星では衛星を小さくして大気抵抗を減らし、制御効率(比推力Isp：単位推力を発生する時間で評価する指標)が高いイオンエンジンを用いて高度の維持を図るとともに、原子状酸素の影響を受けにくい素材を用いることによって、超低高度の利用技術、運用技術などの技術習得を行う。また、小型高分解能光学センサを搭載しており、軌道高度の変化に対する光学センサ画像の確認を実施する。さらに、原子状酸素の流量計測の装置や材料の劣化を確認する装置を搭載しており、原子状酸素の分布や材料が劣化していく過程などのデータを取得することで今後の超低高度の利用拡大とそれに適した衛星の開発を促進することを目的としている。



観測衛星“つばめ(SLATS)”

中央に見えるのは、イオンエンジンである。上にある三角すい形状のものはSバンドアンテナで、原子状酸素対策のためゲルマニウムコーティングを施したポリイミドと呼ばれる素材の三角すい形状のカバーでアンテナを保護している。太陽電池パドルは固定翼であり、これを太陽方向に向ける姿勢を定常姿勢としている。太陽電池パドルは太陽電池セルの間を原子状酸素対策で目地埋めをするとともに裏面にSLI(Single Layer Insulation)と呼ばれる素材を施している。

*鎌倉製作所

1. ま え が き

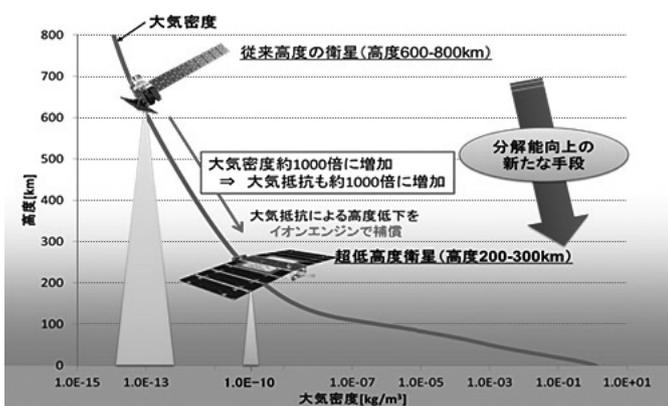
“つばめ(SLATS)”は、2008年にプロジェクトが立ち上がり、2009年に三菱電機がプライムメーカーとして受注をした衛星である。その当時は、“Smaller, Faster, Cheaper”という考えが宇宙開発に導入されていた時期であり、その後のベンチャー企業などが育っていった時期でもある。その中でSLATSは、高度300km以下の超低高度の利用を目的にその技術課題の克服、新たな知見、その後の利用拡大などを目的に開発が進められた小型の衛星である。超低高度では、大気密度が濃く空気抵抗が大きいいため、抵抗の小さい小型の構体、軌道維持のための効率の良い推進系の利用が必要であり、かつ原子状態の酸素による材料の劣化を防ぐ技術が必要となる。

本稿では、超低高度を利用するための課題を示し、それらを解決してきた開発内容について述べ、今後の超低高度の利用などについても述べる。

2. SLATSの概要

2.1 超低高度の利用

宇宙空間は、真空という言葉が使われるが、一般の観測衛星が利用する軌道高度約600km前後でも非常に希薄な大気は残っており、空気抵抗によって衛星の軌道が落ちていく。そのため、5年程度の軌道上寿命を持たせるため、化学推進系を用いた軌道維持を行っている。したがって衛星の寿命はその化学推進系の搭載推進量に依存する。また、この高度を利用している理由には観測の際の太陽光との関係や地球との距離を一定に保つのに都合が良いことが挙げられる。しかし、高度600km程度から詳細な観測を行う場合には、かなり分解能の高い観測機器を使用する必要がある。それに対して軌道高度約300km以下の軌道を利用できれば、同じ分解能で地球上の距離に換算した指標(Ground Sampling Distance : GSD)を小さくすることができ、より詳細な観測が可能になる。しかし、そのために



出典：JAXAホームページ
<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/>

図1. 高度と大気密度の関係

は、超低高度での課題の対策が必要になる。

2.2 超低高度での課題と対策

超低高度を利用するためには、幾つかの解決すべき課題がある。特に大気密度は急激に濃くなるため、高度600kmに比べて大気抵抗がおおよそ1,000倍になる(図1)。

この大気抵抗に逆らって軌道(高度)維持を行うことが必要であり、化学推進系では、すぐに推進薬が枯渇してしまうため、もっと効率の良い推進系によって軌道を維持する必要がある。SLATSでは、制御効率(比推力Isp^(注1))の大きい電気推進系(イオンエンジン)を使用して軌道高度の維持を図る。併せて、大気抵抗を受けにくい形状や小型化などを行い、軌道維持を図る。

また、もう1つの課題に原子状酸素の影響が挙げられる。高度300km以下の宇宙空間では、酸素が原子状化しており、通常人工衛星に使われている熱防御材等の材料が影響を受け、削られて破損していく。それに対して原子状酸素に耐性のある材料を表面に施したり、原子状酸素が内部に入って来ないように処置を施したりしている。特に外部に露出している太陽電池パドルの表面、通信用のアンテナのカバーなどに対策を行っている。

(注1) 単位推力を発生できる時間の指標、単位は秒。化学推進系ではおおよそ200~300秒、電気推進系(イオンエンジン)ではおおよそ1,000~2,000秒。

3. SLATSの開発

3.1 主要諸元

SLATSの主要諸元を表1に示す。

一般の観測衛星(約2,000kg)に比べて1/5程度の質量となっているほか、飛行中の前面形状は約60cmの矩形(くけい)となっており、空気抵抗を削減できる。

3.2 SLATSの構成

SLATSの機器構成を図2に示す。図に示すように通常の衛星とは異なり、冗長系を持つのは、電源系、通信系、姿勢制御系(制御器は冗長構成であるが、姿勢制御用のセンサ等のコンポーネントは単系)だけである。

冗長構成を持つ部分は少ないが、これらの機器を通常衛星より小さい構体の中に搭載しており、ハーネスの引き回

表1. SLATSの主要諸元⁽¹⁾

項目	仕様
主要ミッションセンサ	(1)原子状酸素(AO)モニタシステム (a)原子状酸素衝突フルエンスセンサ(AOFS) (b)材料劣化モニタ(MDM) (2)小型高分解能光学センサ(SHIROP)
サイズ	2.5(X) × 5.2(Y) × 0.9(Z) (m) (軌道上展開状態)
質量	400kg以下(暫定)
発生電力	1,140W以上(暫定)
設計寿命	2年以上
運用軌道	軌道高度 268~180km
打ち上げ年月日	2017年12月(予定)
打ち上げロケット	H-II Aロケットによる相乗り打ち上げ (主衛星：“しきさい(GCOM-C)”)

し、組立て時の治工具や組立て手順等にも工夫が必要となる。また、3.3節に示すようなコンポーネント数の削減、小型軽量化が必要となる。

3.3 小型軽量化

構体のサイズは、0.6×0.6×2.2(m)程度であり、この中に衛星で使用する機器を搭載するため、機器の小型軽量化が必要である。そのためSLATSでは、統合化制御装置として、図3に示すようなコンポーネントの統合を図って、小型軽量化を行っている。

この統合化制御装置によって衛星の姿勢軌道制御、データ記録、データ処理・通信を行う。

3.4 イオンエンジンの開発

大気抵抗が大きい超低高度での軌道維持のために制御効率の高い電気推進系(イオンエンジン)を搭載している(図4)。

このイオンエンジンを用いて、高度260~220km程度の

軌道維持を行う。

3.5 原子状酸素対策

原子状酸素対策としては、飛行中に前面となる部分に図4の機体のイオンエンジンと反対側に示すようなバンパを搭載し、原子状酸素が直接構体に当たることを防ぐとともにデブリの衝突の回避及び、衛星の放熱面を守る役割を持たせている。また、外部に出ている通信アンテナには、ゲルマニウムコーティングを施した熱防御材をレドームとして付けている。

太陽電池パドルの表面(太陽電池セル側)は、セル間の目地を原子状酸素に強い接着剤で埋めている。セルの裏面には、SLIと呼ばれるITO(Indium Tin Oxide)コーティングが施された熱防御材を施している。

3.6 ミッション機器

SLATSに搭載されているミッション機器は超低高度で

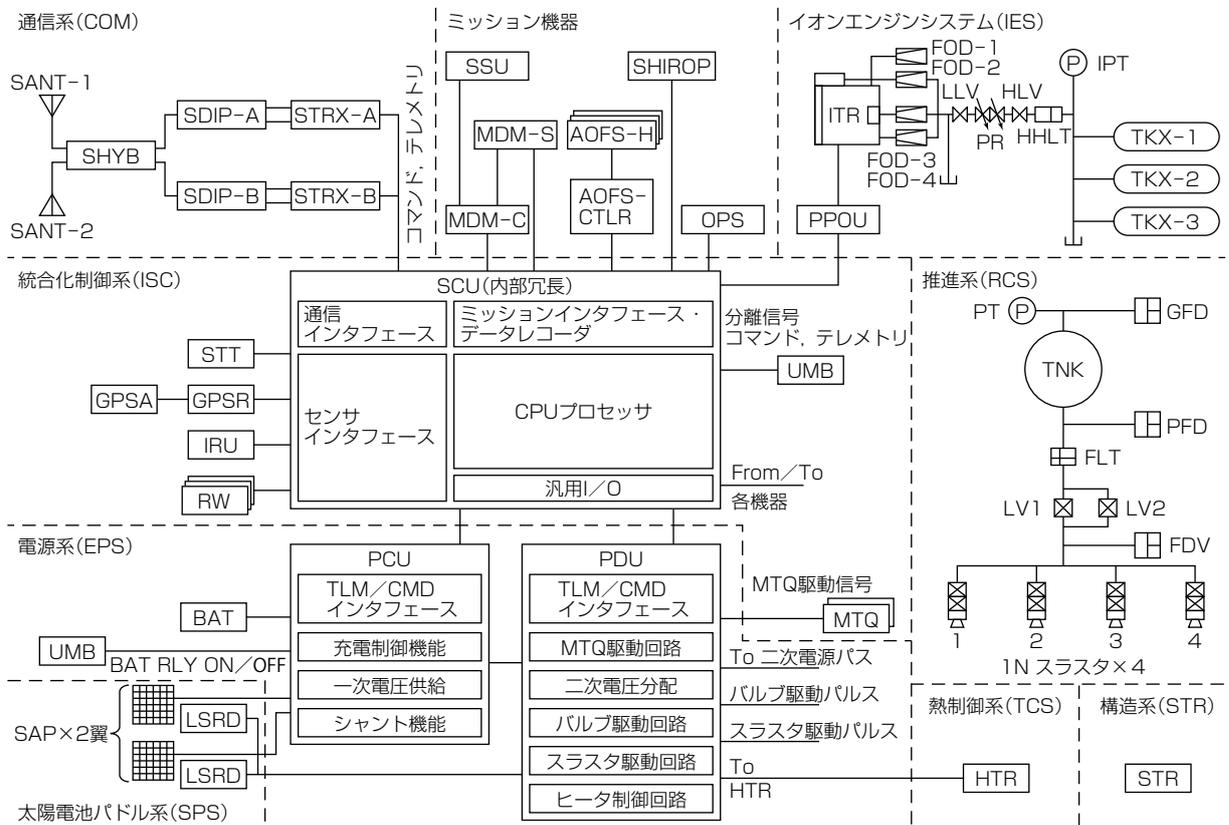


図2. SLATSの機器構成

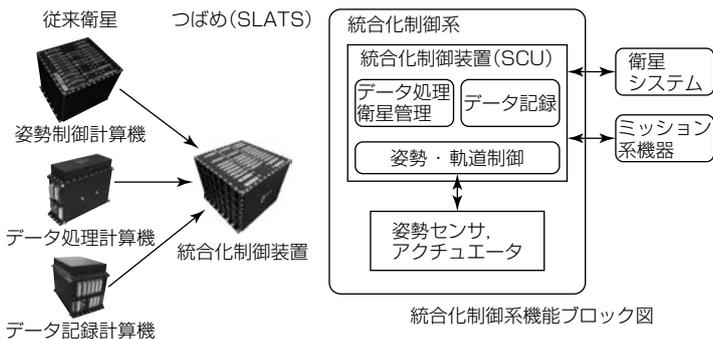


図3. 統合化制御系

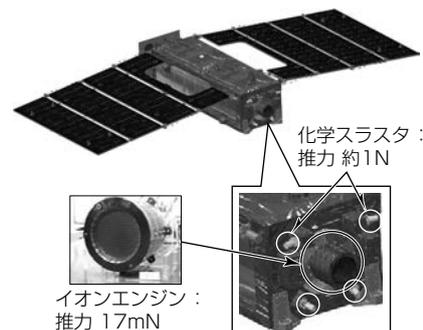


図4. イオンエンジン

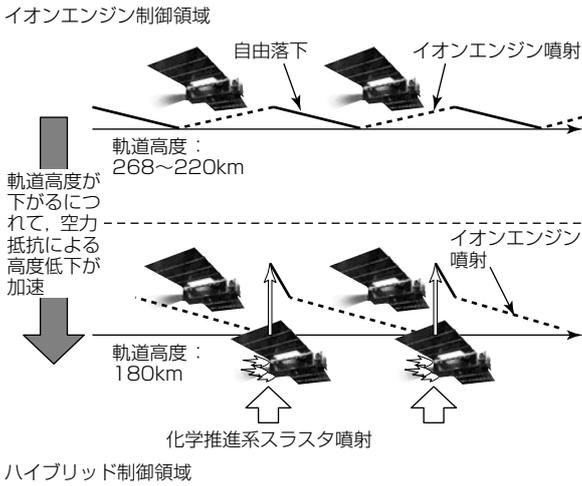


図5. 軌道保持制御のイメージ

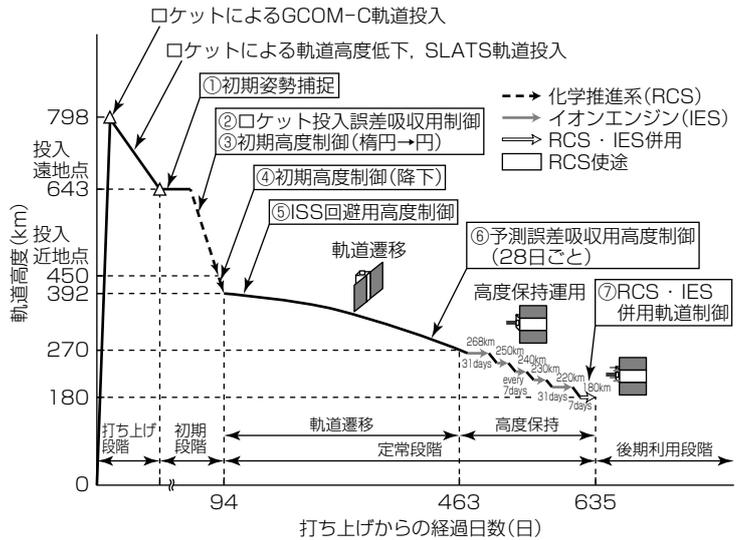


図6. SLATSの軌道運用

の観測を行う小型高分解能光学センサ(SHIROP)と原子状酸素衝突フルエンスセンサ(AOFS), 材料劣化モニタ(MDM)等である(図2)。SHIROPは、超低高度での観測性の確認を行う。AOFSは、超低高度での原子状酸素の振る舞いを観測する機器である。また、MDMは、原子状酸素によって材料が劣化していく状況をモニタして今後の超低高度利用の際の材料の開発等に役立っている。

3.7 軌道保持制御

軌道保持制御のイメージを図5に示す。SLATSでは、軌道高度180~268kmで、高度を保持する制御を試みる。軌道高度220~268kmでは、イオンエンジンだけで空力抵抗に打ち勝って高度の保持が可能である。地球観測を行っていない時間帯にイオンエンジンを噴射して高度を保持する。一方で、高度180kmまで低下すると、空力抵抗が更に増大し、イオンエンジンの噴射だけでは高度保持が難しくなる。そのため、イオンエンジンで極力高度低下を抑えつつ、所定の高度保持範囲を超えて低下した場合には化学スラスタを噴射して高度を上昇させるハイブリッド制御を実施する。

3.8 運用

SLATSは、相乗り衛星(しきさい：GCOM-C)とともに打ち上げられるため、一旦しきさいの運用軌道である、約800kmまで上がる。しきさいを分離した後、H-II A二段目の再着火によって高度を643×450km(遠地点高度643km, 近地点高度450km)まで下げた状態で分離される。そこからは、まず高度400km程度まで化学推進系を使用して高度を落とし、それ以降は、大気抵抗を利用してミッション運用軌道である270kmまで下がってくる運用を計画している(図6)。

空力抵抗を利用して軌道を落とす受動的な軌道制御を行うため、図7に示すように空力抵抗を大きく受けたり、小さく受けたりする姿勢制御を実施する。

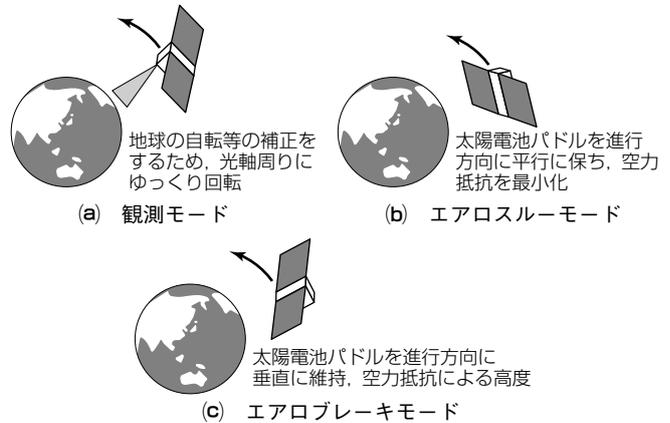


図7. SLATS特有の姿勢制御モード

4. むすび

“つばめ”は、先に述べたように今までにないコンセプトで設計を始め、新規要素の強い機能や性能、コンポーネントを搭載しており、今まで使用したことのない超低高度を飛行し、その利用のための技術的確認を行うとともに今後の超低高度利用のための知見を集めることを目的としている。“つばめ”は、2017年12月23日に打ち上げられ、現在初期チェックアウトを行っている。この後、運用を通じて軌道上で集められたデータから将来の超低高度の利用範囲の拡大を目指す予定である。

参考文献

- (1) JAXA SLATSホームページ, <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/>
- (2) 高畑博樹, ほか: 超低高度衛星技術試験機(SLATS)の研究開発状況, 第57回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1G09 (2013)