

## 3D03 SLATS 搭載原子状酸素モニタ機器の開発状況について

○木本雄吾、青山和広、宮崎英治、今村俊介（宇宙航空研究開発機構）

Development Status of the Atomic Oxygen Monitor for the SLATS  
Yugo Kimoto, Kazuhiro Aoyama, Eiji Miyazaki, and Shunsuke Imamura (JAXA)

Key Words: Super Low Altitude, Environment, AO, Material, Thermal Control, Films

### Abstract

JAXA proposed a brand-new concept of low-Earth-orbit (LEO) satellites, super-low-altitude satellites which orbit at an altitude of under 250 km. High resolution optical observation and reduced emission power of active sensors such as radar are expected in Earth observation from the super-low-altitude orbit. A super low altitude test satellite (SLATS) has been developed as the first demonstration satellite at this altitude. The Atomic Oxygen Monitor (AMO) is one of the missions of the SLATS and comprises two missions: the Materials Degradation Monitor (MDM) and the Atomic Oxygen Fluence Sensor (AOFS). The MDM will observe the degradation of candidate materials for use as super-low-altitude satellites in future. AOFS will obtain AO environment data while in SLATS orbit. The results thus obtained by the AMO will be used to develop future super-low-altitude orbit satellites. This paper presents a summary of the AMO mission development status.

### 1. はじめに

超低高度域（高度 250km 以下）で運用される宇宙機の課題の一つとして原子状酸素(Atomic Oxygen : AO)がある。AO は高層大気中の酸素分子が太陽からの紫外線により分解され、酸素原子となったものであり、高度が低いほど高濃度である。AO は衛星の熱制御材やケーブル被覆などに多用されている有機材料に衝突すると、これらを浸食することが知られている<sup>1)</sup>。

しかし、従来の軌道より桁違いに AO が多いと予測される超低高度軌道を想定した場合、これらの衛星の構成材料の損傷量を見積もるための地上での AO 照射試験は非現実的な長期試験となる。また、AO 環境については、超低高度軌道でのデータを直接観測した例は極めて少なく、将来の実用超低高度衛星の設計に資する貴重な実測データとして必要である。

現在 JAXA が開発中の超低高度衛星技術試験機 (Super Low Altitude Test Satellite : SLATS)は、高度 250 km 以下の超低高度軌道での衛星技術の実証を目的とした衛星<sup>2-4)</sup>であり、ここで得られた成果は、将来の低高度軌道で運用される衛星の設計に活かされる。SLATS には、AO 環境とその影響を観測するミッションとして、AO モニタ (Atomic oxygen Monitor: AMO) が搭載される計画である<sup>5,6)</sup>。AMO の目的は、

①AO による材料劣化の確認、②SLATS が運用される軌道の AO 環境の計測、の二つである。本稿では、AMO ミッションの開発状況の概要を解説する。

### 2. AMO の概要

AMO は、材料劣化モニタ (Material Degradation Monitor: MDM) と原子状酸素フルエンスセンサ (Atomic Oxygen Fluence Sensor: AOFS)の 2 つの機器で構成される。AMO は SLATS の運用期間中、MDM による材料の劣化状況のモニタと、AOFS による AO 環境の計測を行なうシステムである。現在の計画では、SLATS の運用期間中、高度 250 km 以下の超低高度軌道で運用されるのは約 3 ヶ月間である<sup>4)</sup>。

#### 2.1 材料劣化モニタ (MDM)

MDM は、衛星に使用する材料が AO によってどのように劣化していくのか、画像観測によって定性的にモニタリングするシステムである。MDM は主に材料サンプルを搭載する MDM-S(図 1)とこれを撮影する MDM-C(図 2)の 2 つのコンポーネントで構成される。両コンポーネントは SLATS 衛星構体の +Z 面パネルに搭載される(図 3)。MDM-S は材料サンプル搭載面が衛星進行方向である +X 面方向に搭載され、衛星進行方向からの AO 衝突による材料劣化を評価する。

表 1 MDM 搭載サンプル

試料名	用途
耐 AO コーティング/ポリイミドフィルム (UPILEX-R) /Al	MLI
耐 AO 性ポリイミドフィルム (BSF-30) /Al	MLI
UV 遮蔽コーティング/耐 AO 性ポリイミドフィルム (BSF-30) /Al	MLI
ITO コーティング/ポリイミドフィルム (カプトン) /Al	MLI
ベータクロス/Al	MLI
Expanded PTFE ケーブル	配線
ETFE ケーブル	配線
ITO コーティング/FEP フィルム (5mil) /Ag	OSR
FEP フィルム (1mil) /Ag	OSR
FEP フィルム (5mil) /Ag	OSR

搭載サンプルは、主にサーマルブランケット等の熱制御材料に使用されるフィルム類を 8 種類、衛星構体外面に曝露される太陽電池パドル等の電線ケーブルを 2 種類選定している (表 1)。フィルム類は SLATS に搭載されているものを含め、今後の超低高度軌道衛星実用機への搭載が見込まれるものを中心に選定しており、耐 AO コーティングの有効性やベースフィルム自体の AO 耐性等に関するデータを取得する。また、電線ケーブルは太陽電池パドル面などで太陽電池セルからの電力ラインに使われることを想定し、被覆材の肉厚減少を観察する。これらの結果は、今後の超低高度軌道衛星実用機の外部露出電線に必要な被覆厚さの把握や、AO 対策の要否検討に用いることができる。

MDMには実験サンプルの他にAO衝突量を把握するためのモニタ材料を搭載する。モニタ材料は、厚みの異なるポリイミド材が、AOの浸食により順次消失していく様子を観察できるように加工したサンプルを搭載する。これにより、MDM サンプル搭載面に衝突した AO 量を半定量的にモニタする。

AOによる材料劣化は、まずピンホールの様な穴が開き、そこを起点として破れが拡大することで進行すると予想される。MDMの搭載サンプル観測には、このような劣化の様子を観察できる性能を有する38万画素以上のCCDカメラで行う。MDMの材料サンプル撮影は、MDM搭載照明を用いることで、安定した照明条件により行う計画である。照明は正面からのものに加え、背面からのものも搭載し、フィルムの劣化初期に生じると見込まれる微細な孔を観察できる設計としている。撮影間隔は正面光、背面光での撮影を1週間ごとに行う。

軌道上で撮影した画像は地上に送信し、画像解析することにより、破れ、めくれの生じた部分の面積の増加傾向を数値化し、材料の劣化データとする予定である。

MDMは各コンポーネントの設計審査を終了し、製造中である。EM(図4)を製造し、各種環境試験(熱真空試験、振動・衝撃試験)を実施している。

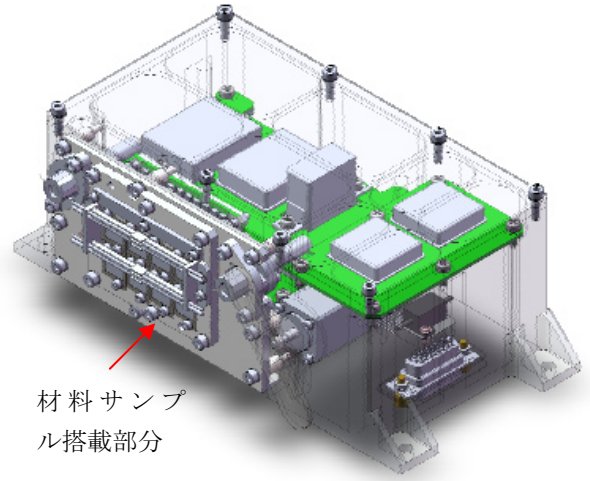


図 1 MDM-S 概観図

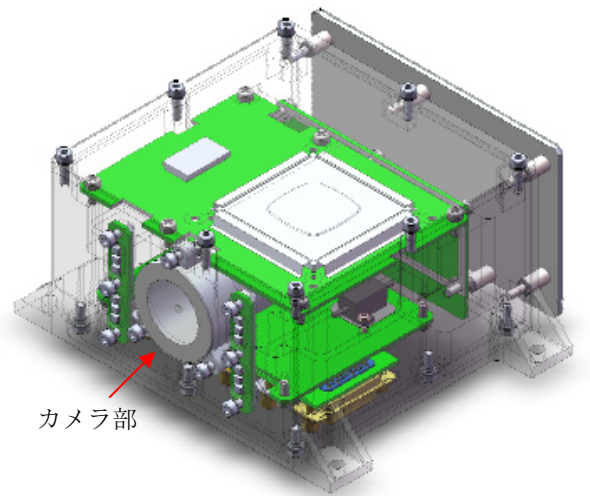


図 2 MDM-C 概観図

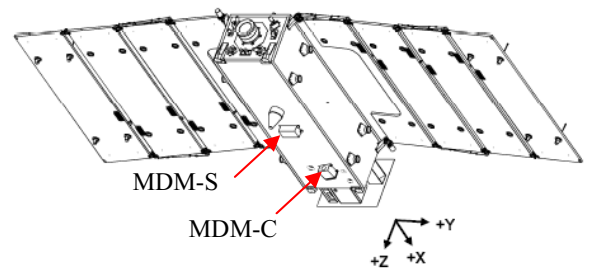


図 3 MDM システム配置図



図4 MDM (EM) 外観写真

また、MDMの撮像機能について、現在想定している設計で開発仕様を満たすことができるか、試作装置により撮像実験を行った。実験装置はフライトと同等性能のCCDを用いて同一処理の試作回路により構成した。その結果、背面光により100 $\mu$ mのピンホールでの識別が可能であることが確認でき、検出精度について開発仕様を満たすことができる見込みであることを確認した(図5)<sup>7)</sup>。

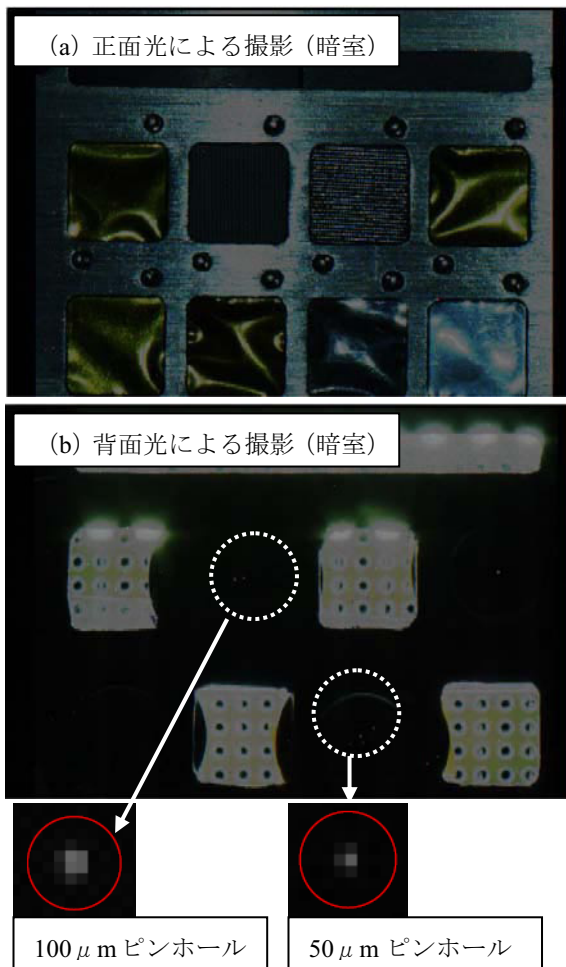


図5 MDM 撮像部試作実験結果

## 2.2 原子状酸素フルエンスセンサ (AOFS)

AOFSは、衛星運用中のSLATSに衝突するAOの衝突量を計測するシステムであり、衛星内外の8カ所にセンサを設置する。

AOFSでは、AOが物質を浸食することに伴う微小な質量変化からAOの衝突量を計算し、計測する方式をとっており、センサとして水晶振動子微小天秤(Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance: TQCM)による計測方法を採用している。TQCMは、水晶の電極表面に付着した物質の微小な質量変化を定量的に計測するセンサであり、水晶振動子を任意の温度に設定できる。AOFSでは、TQCMの水晶振動子電極面にポリイミド膜を形成させ、これがAOとの反応によりガス化し質量が減少する現象を応用してAO衝突量の計測を行う。

ポリイミドに対して酸素原子1個が衝突した際の浸食量は「反応効率[ $3 \times 10^{-24}$  cm<sup>3</sup>/atom]」としてデータが有るため、TQCMで計測された質量変化から、ポリイミド膜が被曝したAOフルエンスを計算可能である。こうしたポリイミドを被浸食材料として用いたセンサは、JAXA等のAO照射装置で使用実績がある<sup>8)</sup>。質量の変化は、周波数の変化としてテレメトリデータが得られる。

しかし、TQCMに付着させられるポリイミド膜の質量には限界があり、そのままAO環境に曝露した場合、AOフルエンス $1.0 \times 10^{20}$  [atoms/cm<sup>2</sup>]程度までの計測しかできないため、SLATS運用期間中のAO衝突量(+X面で $2.6 \times 10^{22}$  [atoms/cm<sup>2</sup>]と予測)の観測が不可能である。そこで、AOFSのTQCMセンサーでは、AO計測用のTQCMの前面に開閉式のシャッター機構を設け、AO衝突量を制限させながら計測できる構造とする(図6)。

なお、AOFSに搭載するAO計測用のTQCMセンサーは、衛星進行方向からのAO衝突量を計測できる位置に搭載し、汚染物質の付着を予防するため、周囲温度よりも高温に保温できる仕様としている。さらに、シャッター付きのポリイミド膜TQCMセンサ近傍に、何も付着させないTQCMを設置し、コンタミネーションの影響も観測する。

地上校正実験を真空複合環境試験設備<sup>8)</sup>で実施した。センサ部分をインハウスで製作し、75℃に保持した状態でAO照射を行った。AO照射中の出力周波数変化を記録するとともに、周波数シフト量とモニタ材のAOフルエンス値から、センサの感度係数

(1Hz 変化したときの AO 衝突フルエンス) を求めた。