

第5回 超低高度衛星の利用に向けたワークショップ

宇宙材料劣化研究における SLATS ミッションのインパクト

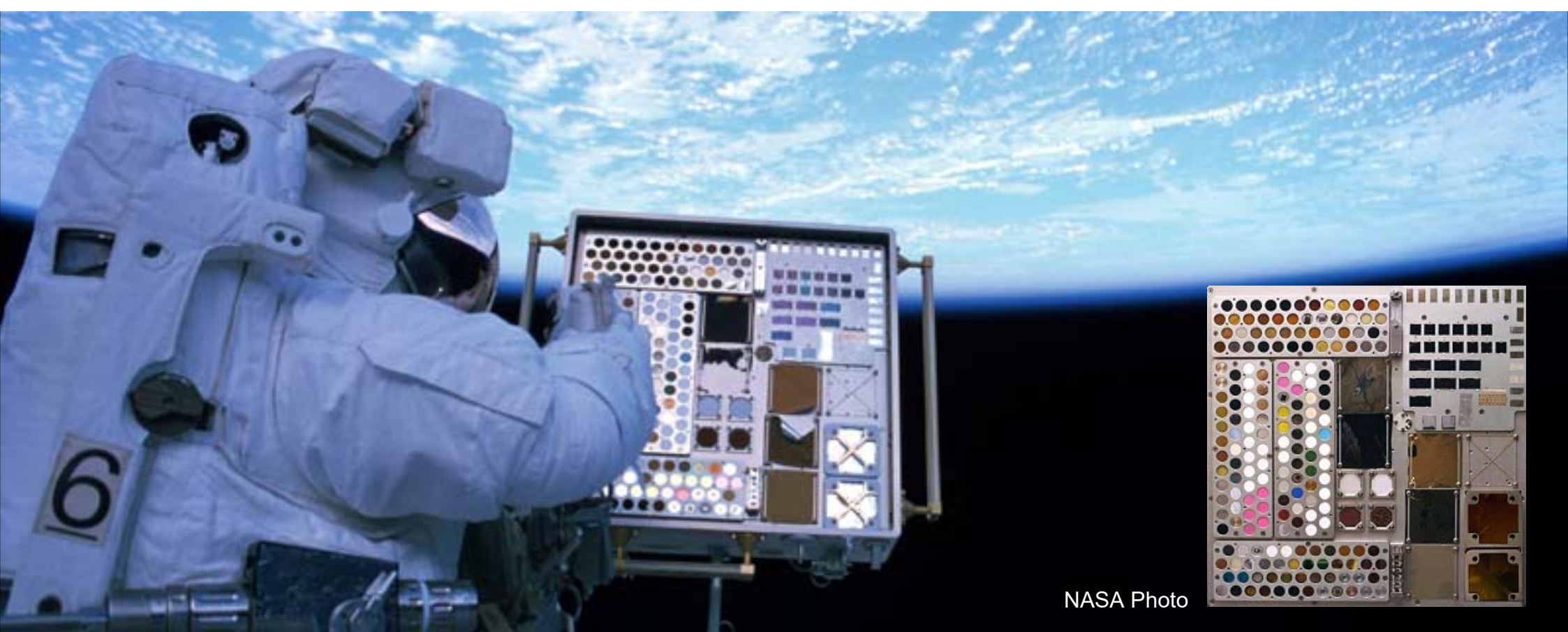
日時：2020年1月24日

場所：TKP 新橋カンファレンスセンター

横田 久美子、田川 雅人
(神戸大学)

発表内容

1. 宇宙環境による材料劣化現象
2. 宇宙材料劣化研究の現状と問題
 - a 軌道上曝露試験
 - b 地上試験
3. 宇宙材料劣化研究へのSLATSのインパクト
4. SLATS/AOFSデータ解析の現状
5. SLATS後継機への期待
6. 結論

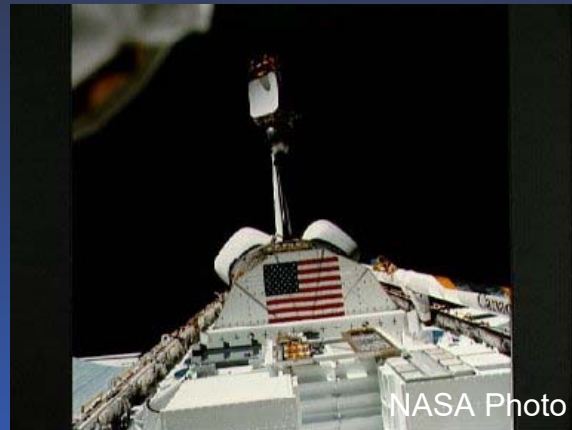


NASA Photo

米国MISSE-1 PEC1ミッションにおける1年曝露前後のサンプル写真

ISS軌道に比べてSLATSでは原子状酸素密度1000倍 → 劣化速度1000倍
材料劣化メカニズムの理解と防御が不可欠！

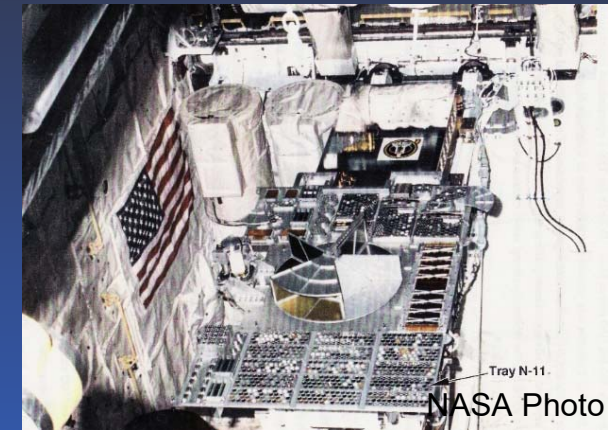
軌道上試験 (STS時代)



EOIM-1
(STS-8)



EOIM-2
(STS-41G)



EOIM-3
(STS-46)

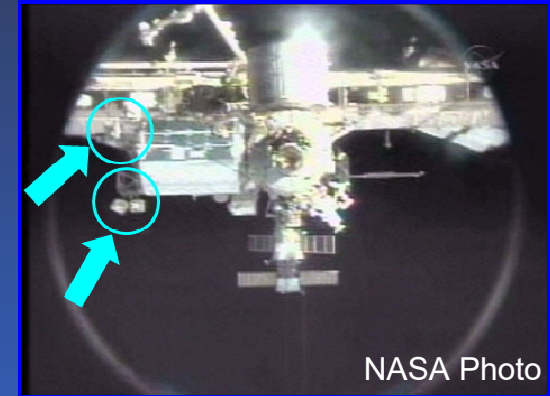
Marshall Space Flight Center (MSFC) has developed and implemented orbital atomic oxygen simulation facilities based on the physical characteristics of a low earth orbit environment. This capability is used to determine the long term exposure characteristics of objects launched into space. Previously, no means existed for examining the interaction of materials with orbital atomic oxygen. In November 1982, the Center first began studying this area via the Evaluation of Oxygen Interaction with Materials (EOIM)-1 on STS-8. Subsequent studies include EOIM-2 (August 1983); EOIM-3 (August 1992); the STS-41G Atomic Oxygen Interaction Experiment (October 1994); and the Long Duration Exposure Facility (LDEF) (April 1984 to January 1990).

軌道上試験 (ISS時代)

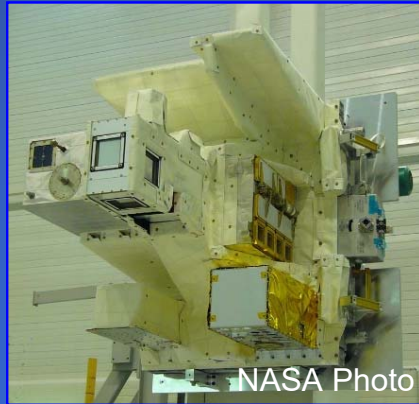


NASA Photo

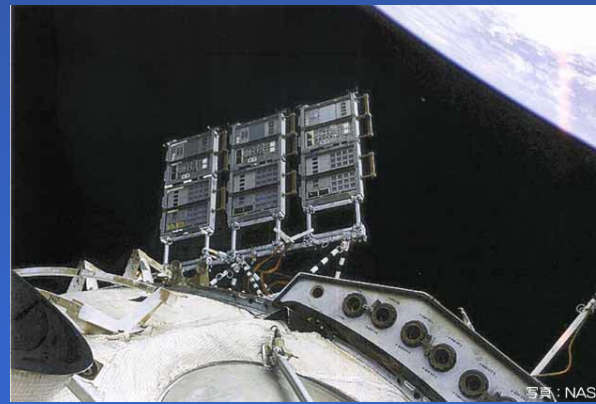
MISSE-1 PEC1 pallet



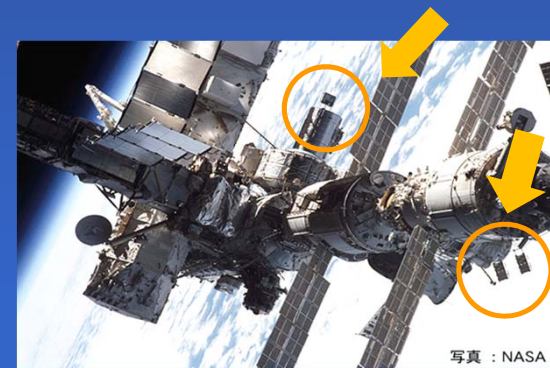
NASA Photo



MEDET



MPAC&SEED



写真：NASA

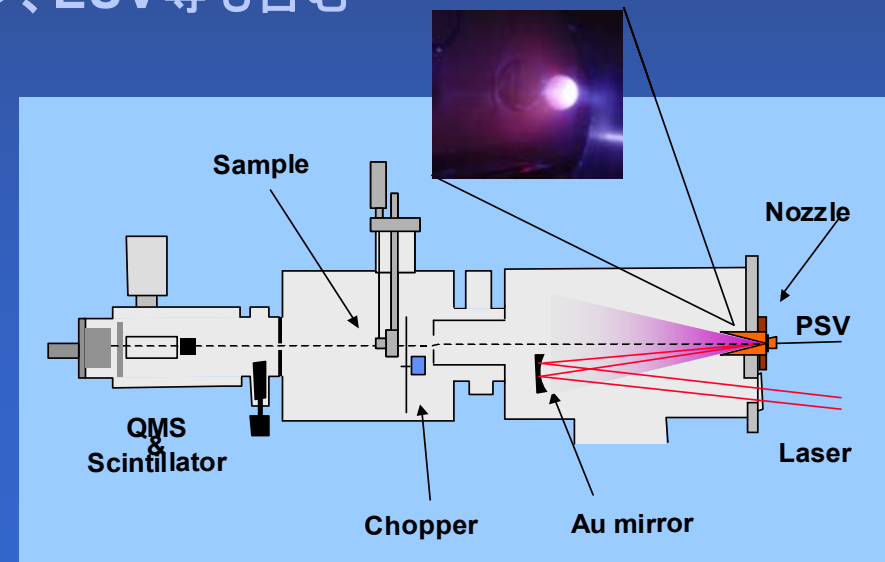
原子状酸素地上試験

原子状酸素地上試験は宇宙とは異なる環境で行われている！

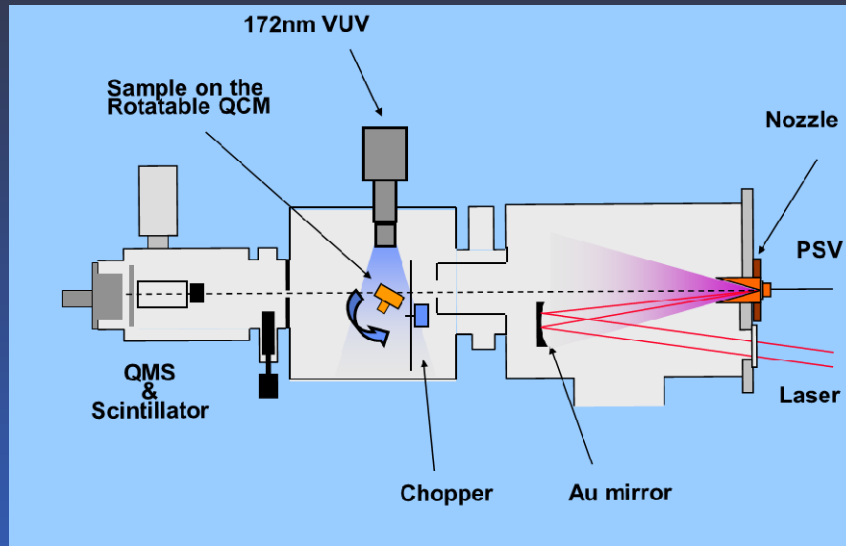
- (1) 原子状酸素平均並進エネルギー：ほぼ同じ(5eV)
- (2) 原子状酸素エネルギー分布幅大 (>5eV)
- (3) 原子状酸素100%ではない
 - 高エネルギー未解離酸素分子を含む (30-50%)
 - 低エネルギー未解離酸素分子も含む
 - 高エネルギーイオン、EUV等も含む
- (4) パルス動作

地上試験と軌道上試験の結果は
必ずしも一致しない

軌道上試験よりは環境コントロ
ールが容易



紫外線同時照射效果



-Excimer lamp:

172 nm,
0.044 mW/cm²

-AO beam:

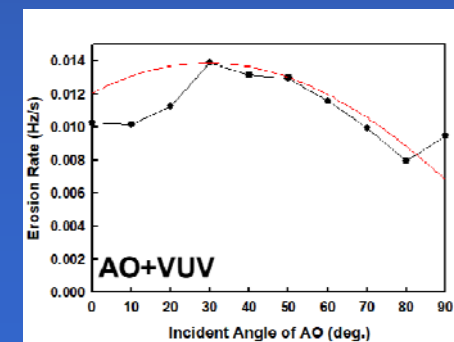
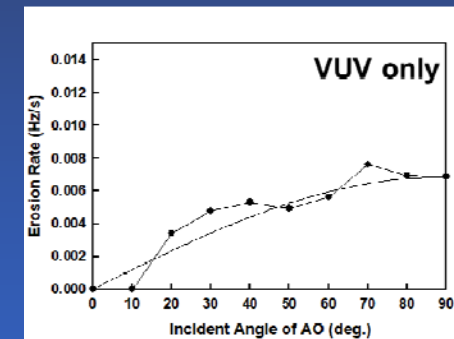
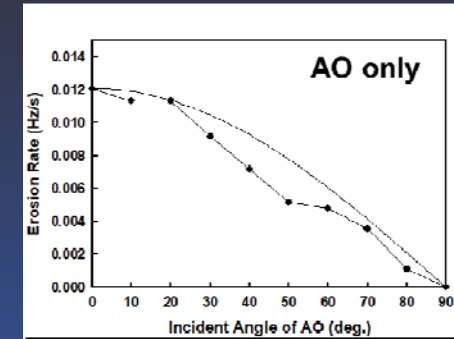
5.4 eV,
7.3x10¹³ AO/cm²s

-Sample:

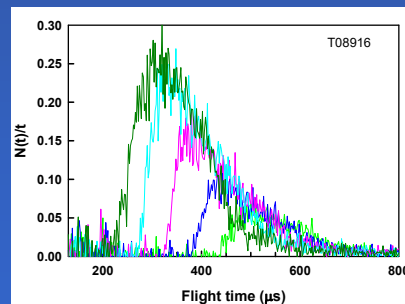
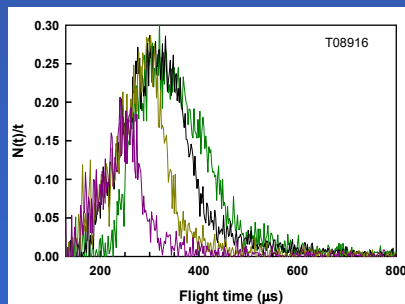
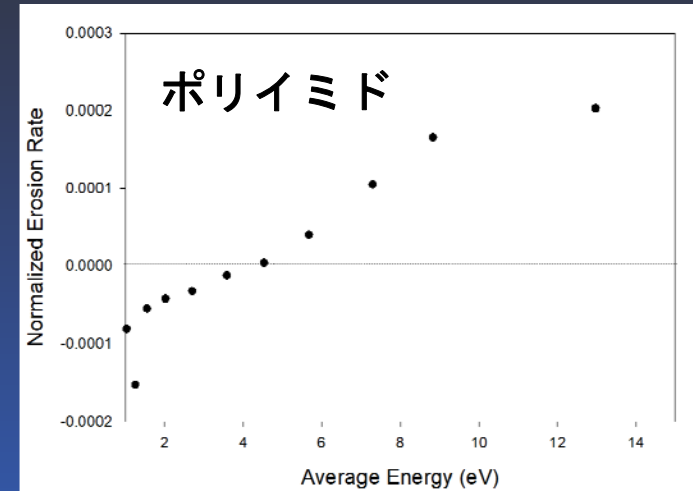
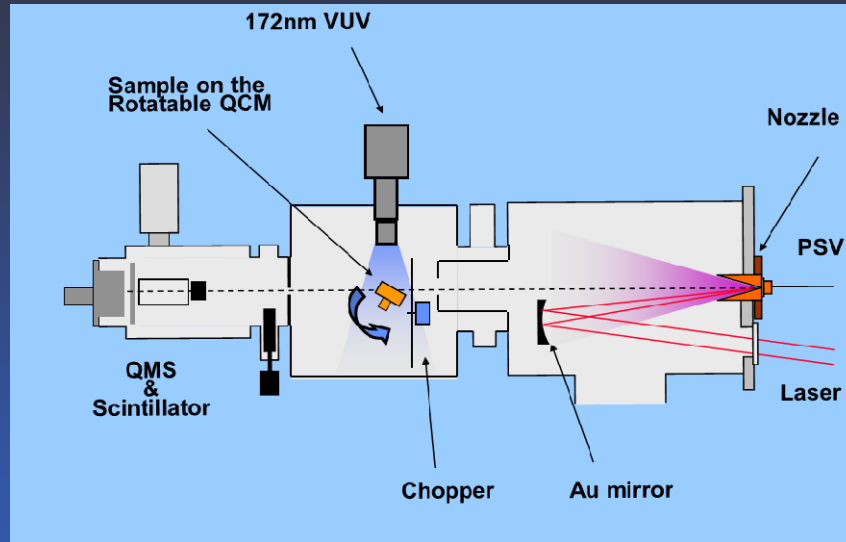
FP-QCM @ 24° C
98 cm from Nozzle

-Incident angle:

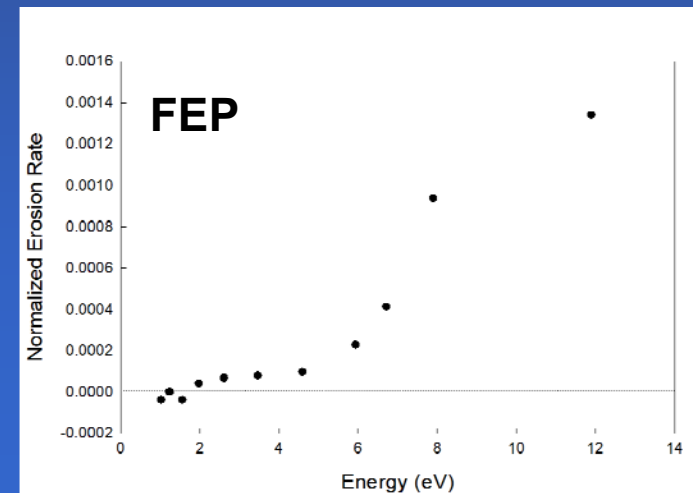
90 - 20°



衝突エネルギー効果

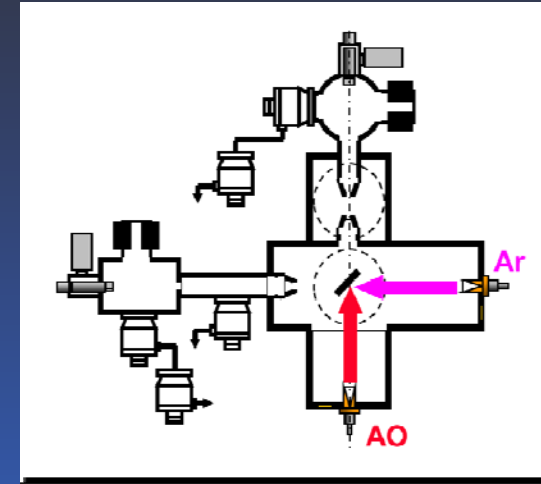
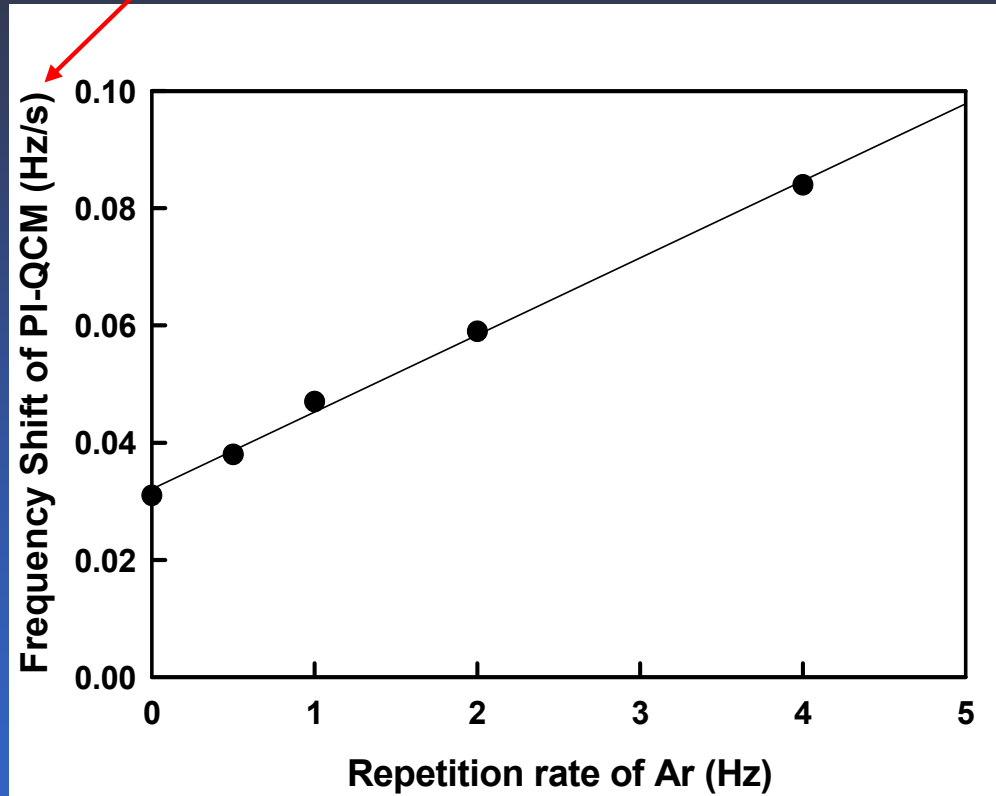


高速チョッパーによる衝突エネルギー選別



Ar(N₂)同時照射效果

Corresponding to E_y



AO

Energy: 2.4 eV

Flux: 4.2E+14

@ 1 Hz

Incident angle: 45

Rep. Rate: 1 Hz

Ar

Energy: 10.8 eV

Flux: 4.8E+13

@ 1 Hz

Incident angle: 45

Rep. Rate: 0-4 Hz

E_y of polyimide linearly increased with increasing Ar (N₂) flux.

→ E_y increases with lowering the altitude.

宇宙環境研究の困難さ

宇宙用材料は軌道上で劣化する。打上げ前に検証が必要!!

「曝露試験」

- ・ 軌道上曝露試験の機会は限られている
- ・ ISS利用の曝露試験では、軌道高度がほぼ一定のため、中性大気環境を大きく変化させることができない
 - 材料劣化の大気組成、密度依存性が検証できない
 - パッシブ試験では環境を制御できない（複合環境なのに）
 - 回収後分析のため、劣化量は期間全体の積分値
 - 宇宙環境は軌道によって大きく異なる

「地上試験」

- ・ 宇宙環境を正確に模擬できない
 - 環境条件を独立には変更できない

解決方法

軌道上で実験条件を十分コントロールできないのであれば、軌道上での様々な環境下で多くのデータを収集する！

- ・ ISS軌道以外でも軌道上実験する
- ・ 地球1周回でも宇宙環境は大きく異なる（日照条件など）

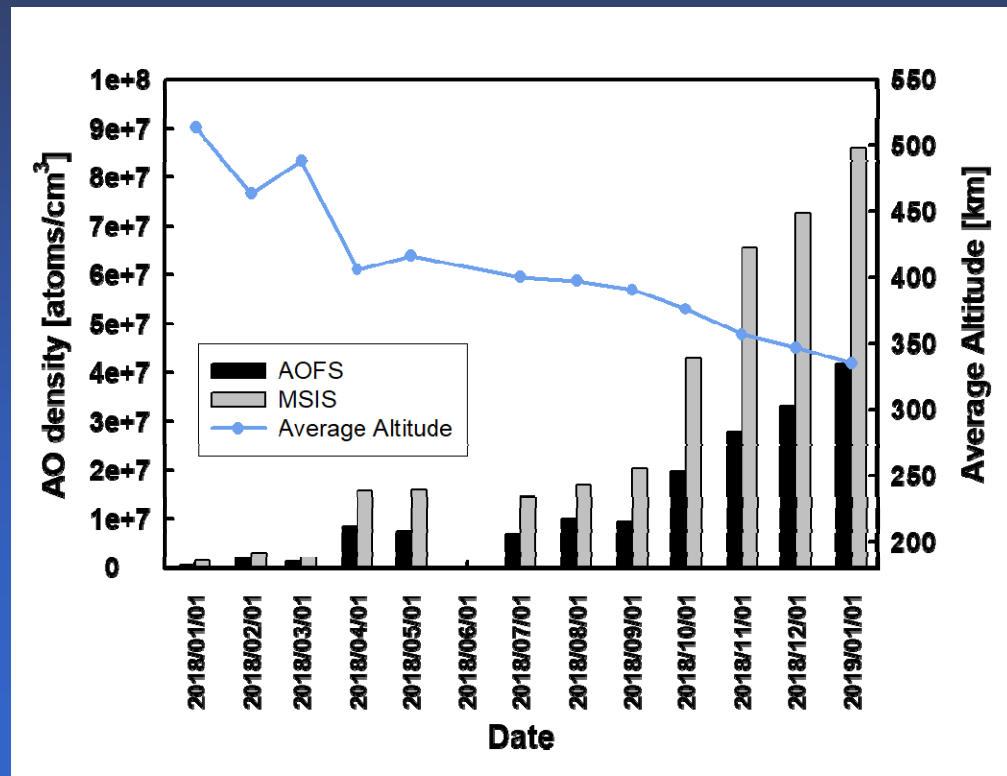
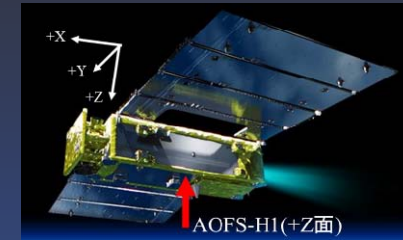


リアルタイム材料劣化（質量）計測
（1個のサンプルから様々なデータが得られる）

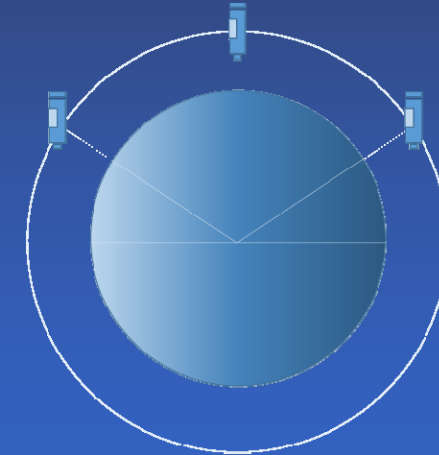
SLATS/AOFSデータ

AOFS-H1 (+Z面搭載)

機体X軸と速度ベクトルが±60° 以内 (高緯度から極域)



各月1日の1周回の平均AO密度 (2018.01 - 2019.01)



$$D_{AOFS} = \frac{\alpha \cdot \Delta F}{L}$$

D_{AOFS} : 軌道上AO密度[atoms/cm³]
 α : AOFS感度係数[atoms/(cm² · Hz)]
 ΔF : 出力周波数変化[Hz]
 L : AOFS搭載面移動距離[cm]

AOFS感度係数

The value of “ $E_y=3.0E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$ ” was firstly measured by

STS-8 (EOIM-1)

Mission period: 30 September – 5 October 1982

Altitude: 225 km

AO fluence: $3.5E+21 \text{ atoms/cm}^2$ *

* calculated by MSIS

MSIS calculated N_2 fraction is 33%

(Averaged value from 30/9/1982 to 5/10/1982 at 225 km)

E_y has evaluated by some other missions as well:

STS-5, STS-46, LDEF....

SLATSの宇宙材料分野への貢献

- ・ SLATS/AOFSではポリイミドのエロージョンイールド (E_y) が一定であることを前提に、ポリイミド劣化量から原子状酸素密度を算出した
- ・ AO以外の宇宙環境により基準材料であるポリイミドの原子状酸素誘起劣化に E_y の変化が生じるのであれば、軌道上試験データの再解析が必要
- ・ ポリイミドは材料劣化量計測の基準材料であり、すべての材料の劣化計測に影響を与える

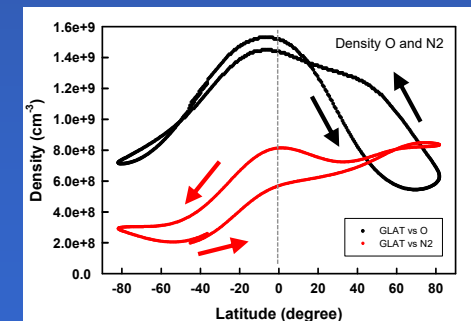
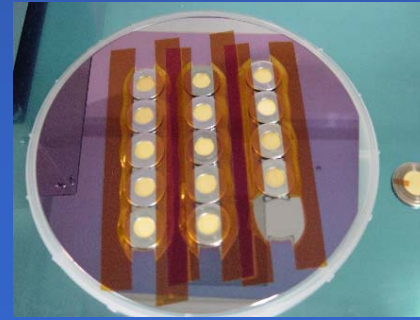
原子状酸素密度を材料劣化とは独立に計測することにより、ポリイミドの劣化現象における複合効果 (E_y の変化) を詳細に検証できる

計測の時間分解能を上げることにより、宇宙環境要因と材料劣化の相関を明らかにできる (宇宙環境は常に一定ではない)

SLATS後継機への期待

AOFSにより磁気嵐等がPI劣化挙動に影響を与えることが確認された。宇宙環境と材料劣化をリアルタイムで同時測定できるシステムを搭載することで、種々の宇宙環境での材料劣化特性を1個のサンプルで計測できる

宇宙環境計測：密度、大気組成、紫外線、放射線
衛星運用情報：高度、姿勢、位置、時刻
材料劣化計測：AOFSシステムによる質量変化



まとめ

宇宙では材料は劣化する。
地上試験は軌道上環境を完全には再現できない。

SLATSにより超低軌道環境における材料劣化現象を準リアルタイムで観測することができることが証明され、ISSにおける曝露試験では解明することが不可能な材料劣化メカニズムに関する知見を獲得できる道筋が確立された。

SLATS後継機により材料劣化現象と宇宙環境条件のリアルタイム計測が実現すれば、超低軌道ならびに低軌道における材料劣化現象についてのみならず、大気科学についても多くの有益な知見が得られるものと期待される。

謝 辞

本共同研究を遂行するにあたり、JAXA研究開発本部材料グループの皆様、第一宇宙技術部門SLATSプロジェクトの皆様にご多大なるご協力を得ました。ここに深謝いたします。本研究の一部は科学研究費補助金のご支援で実施されました。