

07

AOFSにて観測された超低高度環境における 原子状酸素(Atomic Oxygen : AO)

2020.1.24

第5回 超低高度衛星の利用に向けたワークショップ

土屋 佑太 (JAXA)

TKP新橋カンファレンスセンター

問題点a: 原子状酸素(AO: Atomic Oxygen)は材料を劣化させる

問題点b: 超低軌道によるAO量の定量評価例が少ない

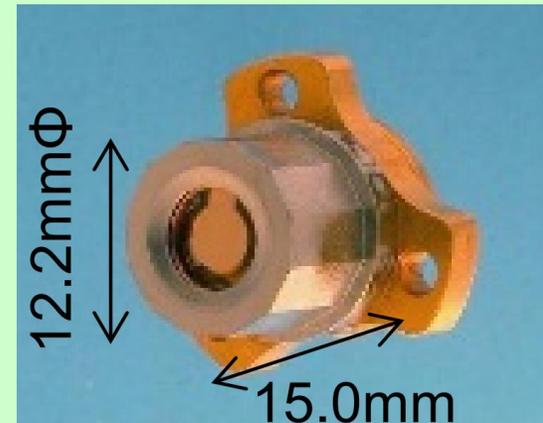
MDM (Material Degradation Monitor)



13種類の材料サンプルをカメラにより定期的に撮像。劣化や破れの有無をモニタ

原子状酸素による材料劣化把握

AOFS (Atomic Oxygen Fluence Sensor)



QCMセンサ
※QCM Research社 MK24
水晶振動子の上にポリイミド薄膜を形成し、AOによる質量損失をモニタ

原子状酸素 (AO: Atomic Oxygen) の定量評価

工学的成果

衛星設計標準へ反映



JERG-2-141「宇宙環境標準」
JERG-2-320A「構造設計標準」

4. 3. 15 軌道上環境による材料劣化

構体、サブシステムおよび搭載機器の設計において、必要な場合は軌道上環境(原子状酸素、太陽放射線、太陽紫外線、銀河宇宙線等)による材料の侵食、劣化を考慮すること。可能な限り実績のある材料を使用するか、適切な試験や軌道上実証で侵食、劣化の傾向を確認した材料を使用すること。必要な場合はコーティング等により材料を保護すること。(注1~2)

(注1) 原子状酸素は高分子材料(プラスチックや複合材のエポキシ樹脂など)を急速に侵食するが、通常、金属では問題とはならない。紫外線および電子(または陽子)と同時に原子状酸素に曝される場合、高分子材料の侵食を早める。

原子状酸素は地球まわりの低い高度で高密度であり、低軌道ミッションでは表面後退率を無視できる材料を選ぶか、寿命末期の厚さを設計上考慮しておく必要がある。なお、原子状酸素については進行方向前面側が問題となる。

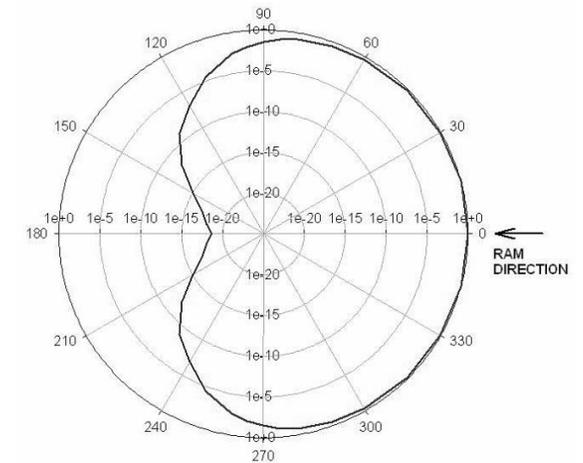
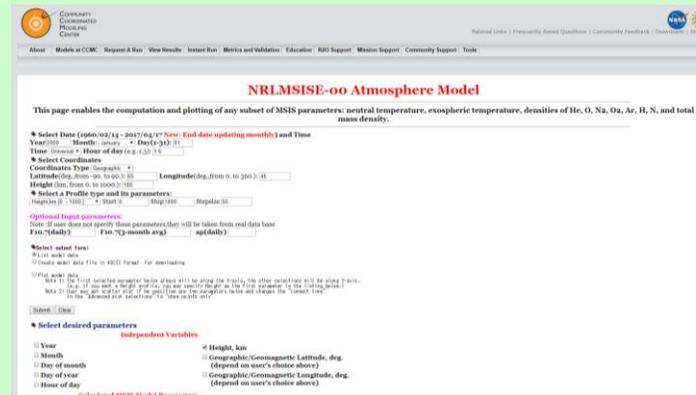
また、侵食によって引き起こされるコンタミネーションについても考慮が必要である。

理学的成果

大気組成モデルの検証



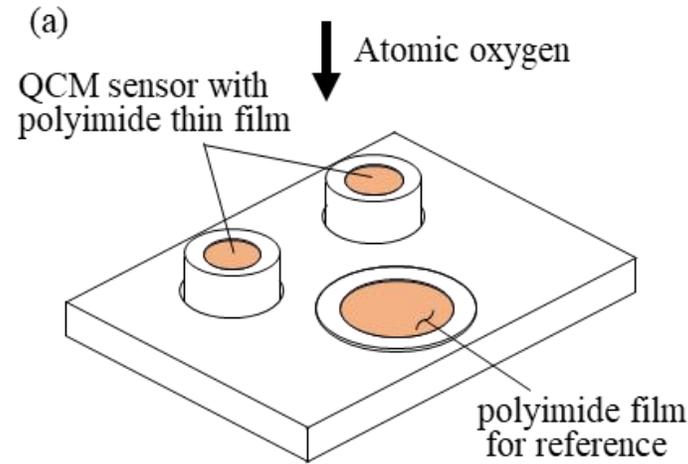
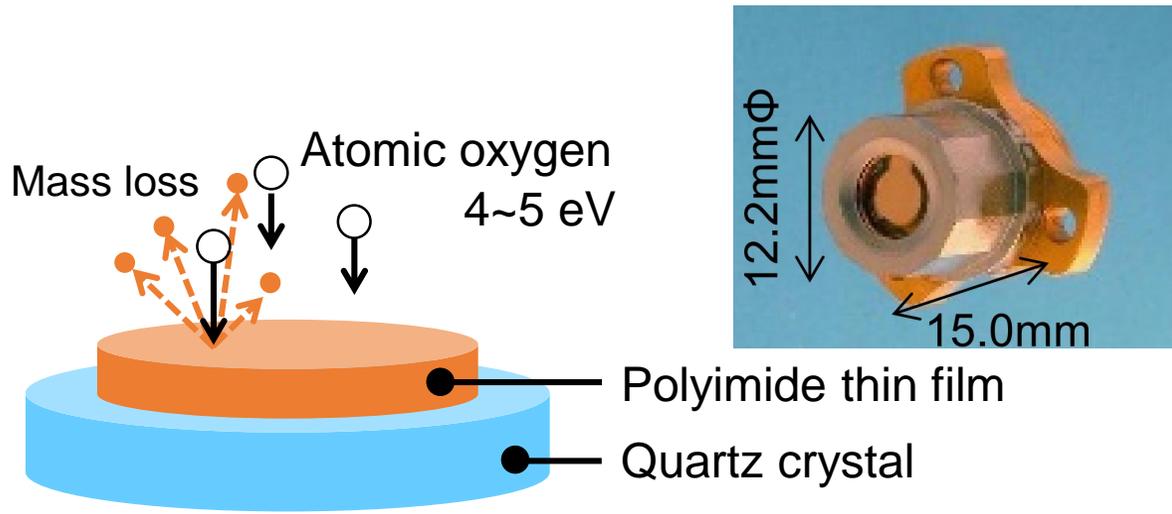
MSIS Thermosphere Model



引用左: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>

引用右: B.A. Banks, "Low Earth Orbital Atomic Oxygen Interactions with Materials," AIAA

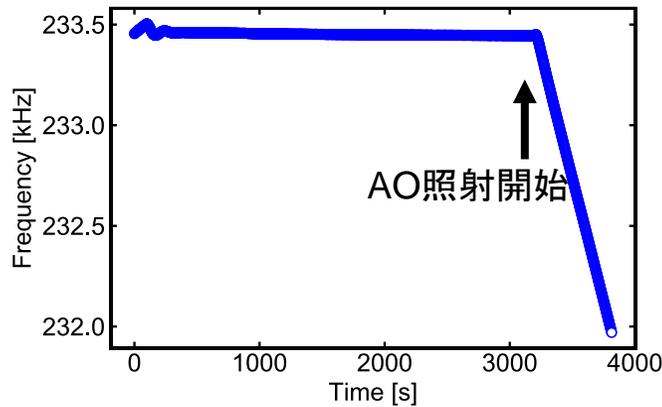
AO測定原理 (QCMセンサ/ポリイミドマスロス法)



AOFS感度校正試験コンフィグレーション

$$\alpha = \frac{\Delta m}{A \rho R_e \Delta F} \Rightarrow F_{AO} = \alpha \times \Delta F$$

F_{AO}	: AOフラックス/フルエンス	[/cm ² /s]
Δm	: 質量減少量	[g]
A	: AO照射面積	[cm ²]
ρ	: ポリイミド密度	[g/cm ³]
R_e	: ポリイミド/AO反応効率	[cm ³]
ΔF	: AOFSセンサ周波数変化量	[Hz]
α	: AOFS感度係数	[/cm ² /Hz]

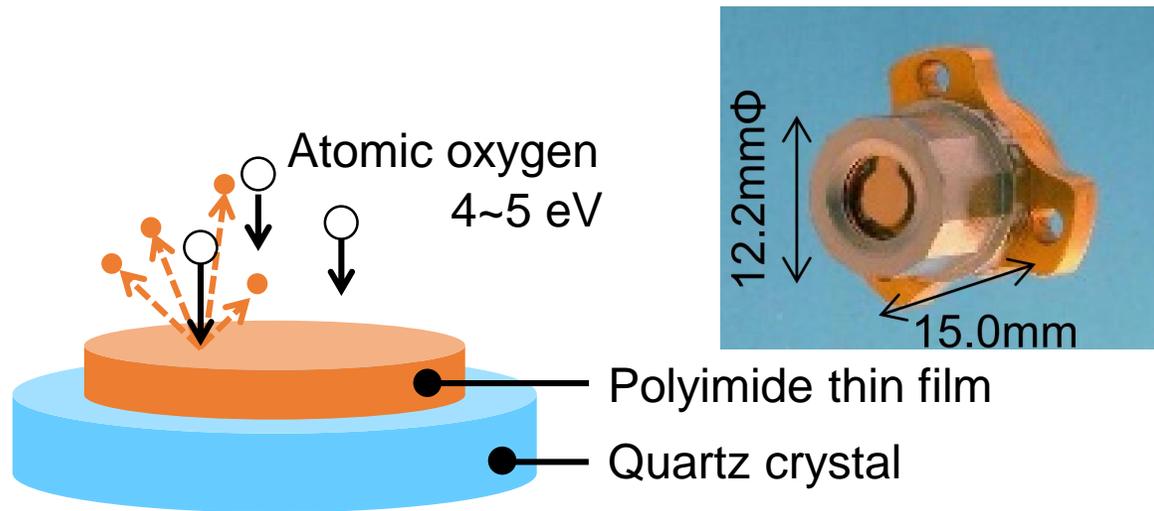


感度校正試験時の周波数変化

計測誤差約±9.2% (1σ)

※主な誤差要因はポリイミドフィルムの質量減少量 (Δm) の計測誤差

AO測定原理 (QCMセンサ/ポリイミドマスロス法)



$$\alpha = \frac{\Delta m}{A \rho R_e \Delta F} \Rightarrow F_{AO} = \alpha \times \Delta F$$

F_{AO}	: AOフラックス/フルエンス	[/cm ² /s]
Δm	: 質量減少量	[g]
A	: AO照射面積	[cm ²]
ρ	: ポリイミド密度	[g/cm ³]
R_e	: ポリイミド/AO反応効率	[cm ³]
ΔF	: AOFSセンサ周波数変化量	[Hz]
α	: AOFS感度係数	[/cm ² /Hz]

センサ番号	AO感度係数 (α) (atoms/cm ² /Hz)
ポリイミド薄膜付AO測定用	
AOFS-H1	1.92×10^{15}
AOFS-H2	6.97×10^{14}
AOFS-H3	7.08×10^{14}
AOFS-H4	6.86×10^{14}
AOFS-H5	6.68×10^{14}
AOFS-H7	6.26×10^{14}
コンタミネーション測定用	
AOFS-H6	—
AOFS-H8	—

表1 AOFSセンサ構成

センサ番号	衛星搭載位置	ポリイミド薄膜の有無	シャッター搭載有無
ポリイミド薄膜付AO測定用			
AOFS-H1	+Z面	有り	無し
AOFS-H2	-Y面		無し
AOFS-H3	-X面		無し
AOFS-H4	構体内部		無し
AOFS-H5	MDM +X方向		有り
AOFS-H7	+X方向		有り
コンタミネーション測定用			
AOFS-H6	MDM +X方向	無し	無し
AOFS-H8	+X面		無し

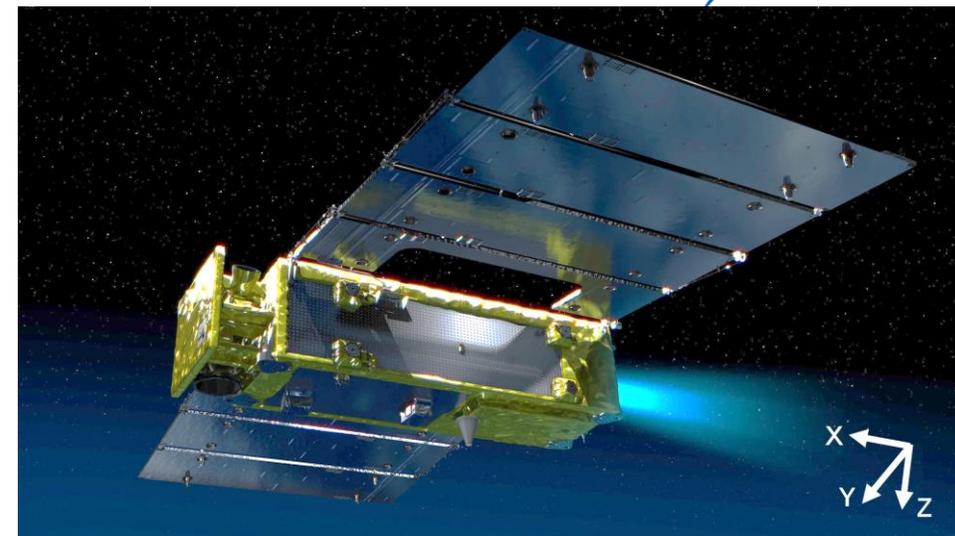


図1 SLATS衛星と衛星座標軸

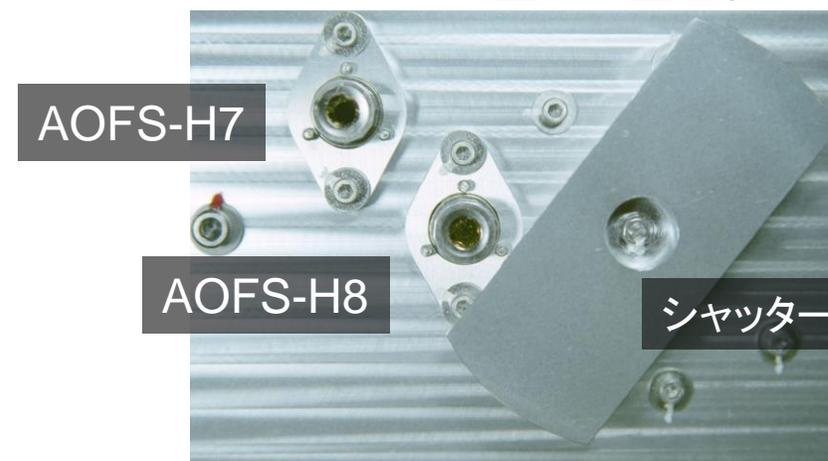
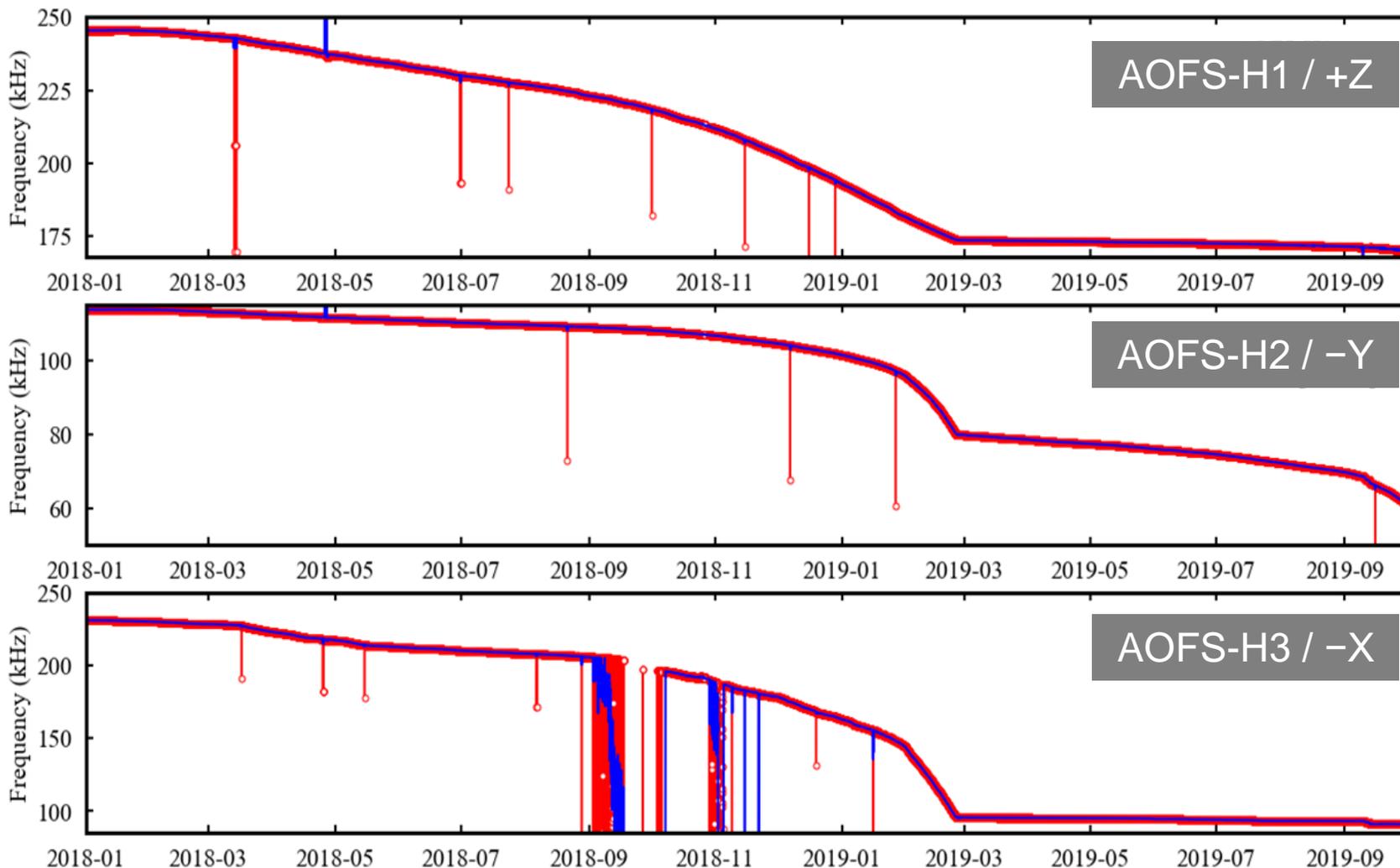


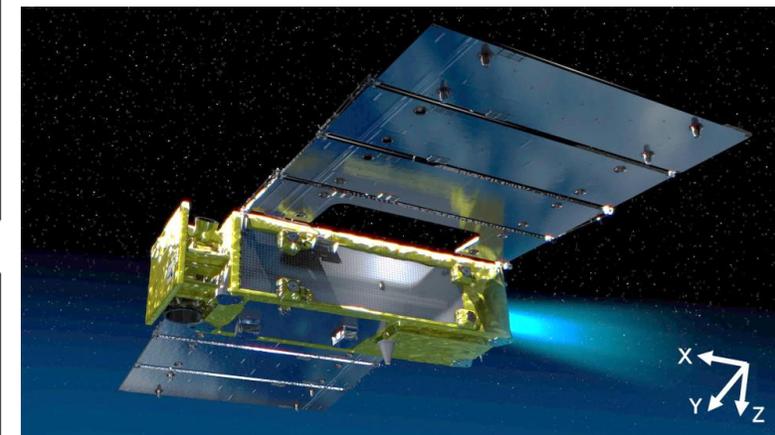
図2 衛星+X面に取付けられたAOFS-H7と AOFS-H8

AOFS軌道上評価データ

AOFSデータ概要



AOFSセンサトレンド (2018年1月1日 ~ 9月30日)



どのセンサも超低高度でポリイミドが削られている。

衛星に対する回り込み、側面、後方からのAO浸入も考えられる。

AOFS-H3から求めた1周回毎のAOフルエンス

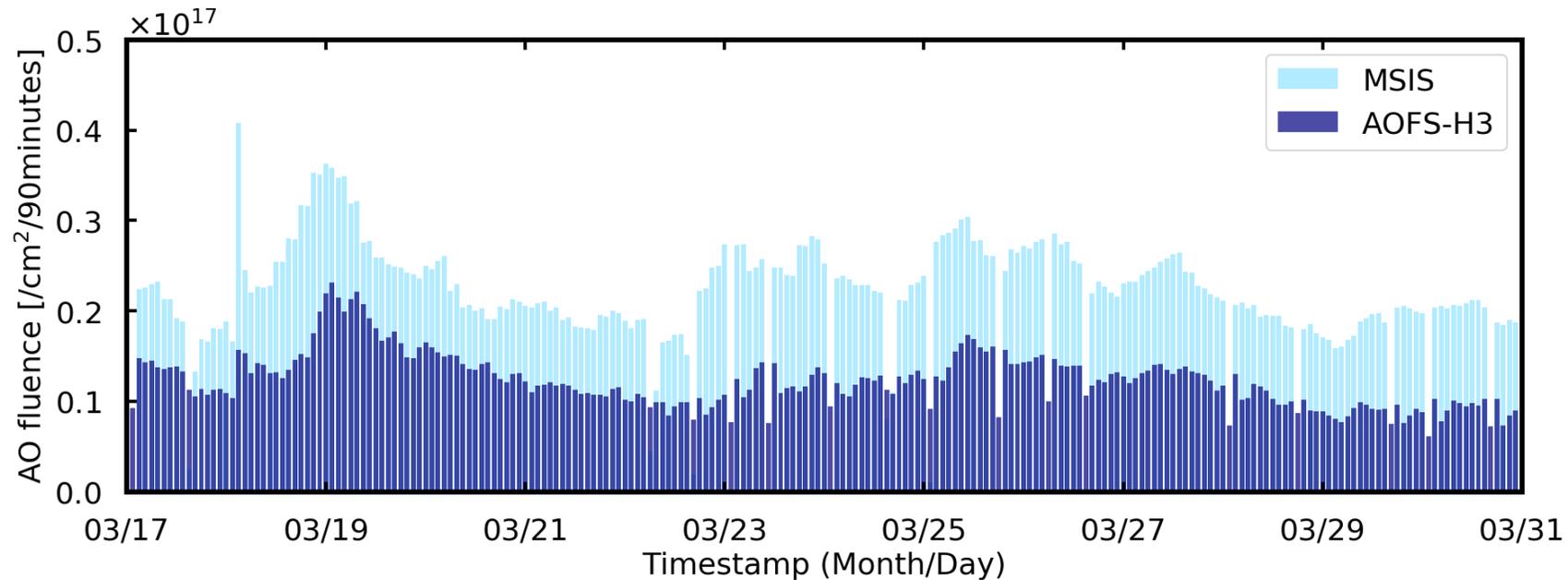
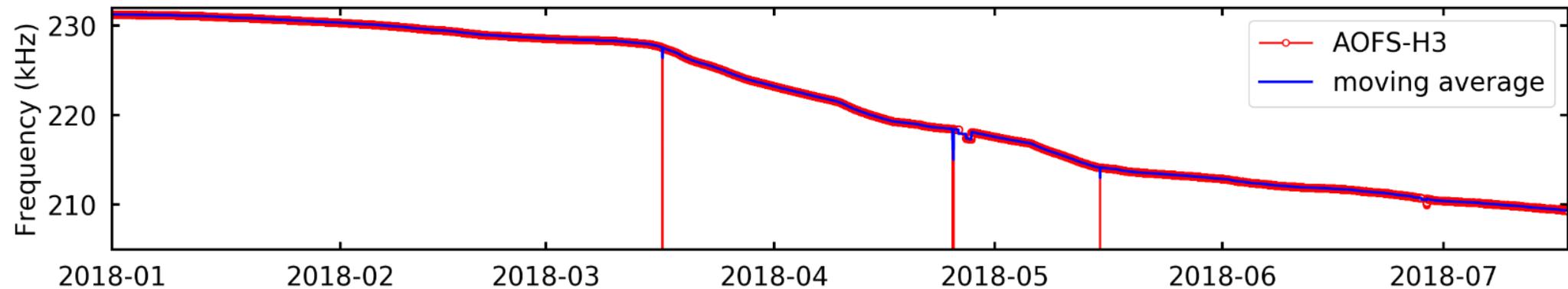
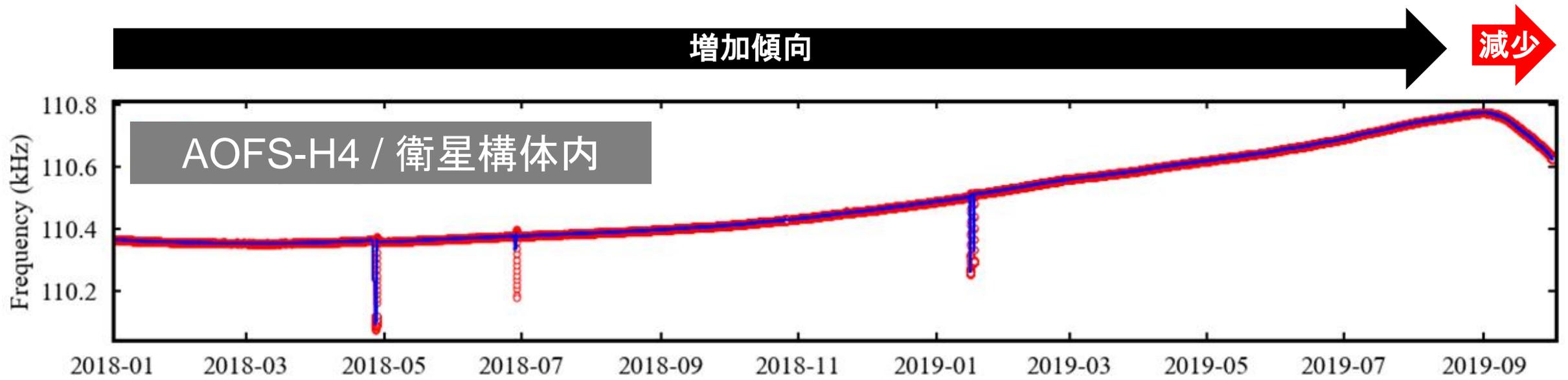


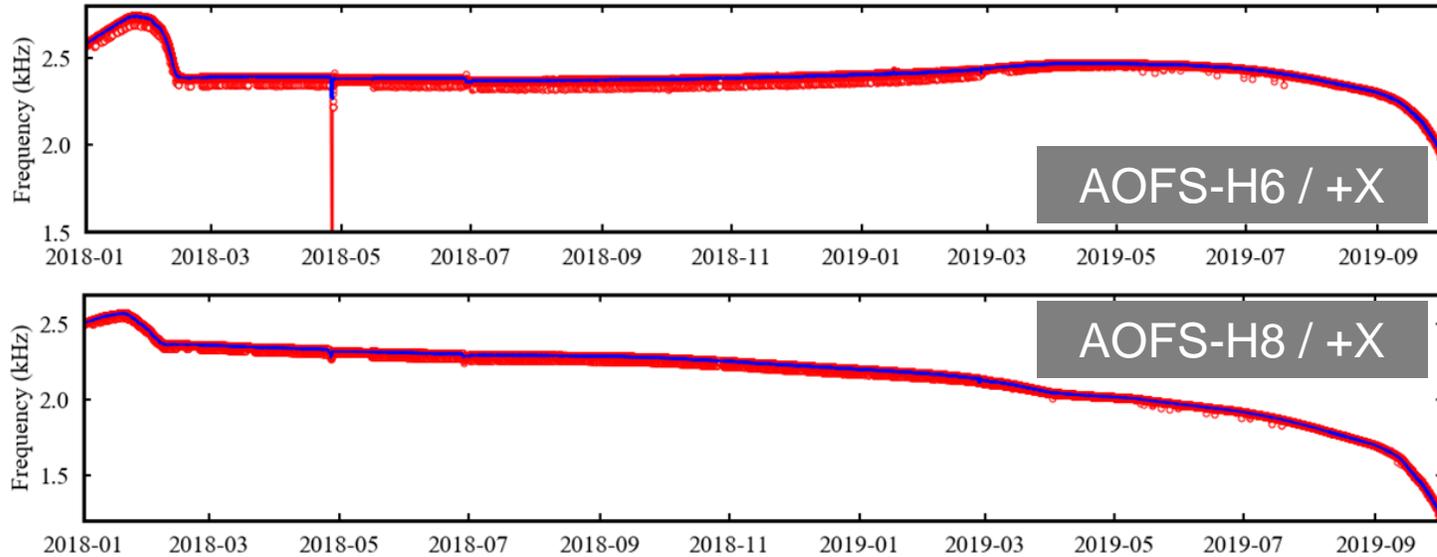
図9 AOFS-H3 (衛星-X面) におけるAOフルエンス
(90分単位での比較) : 2018/3/17 ~ 3/31



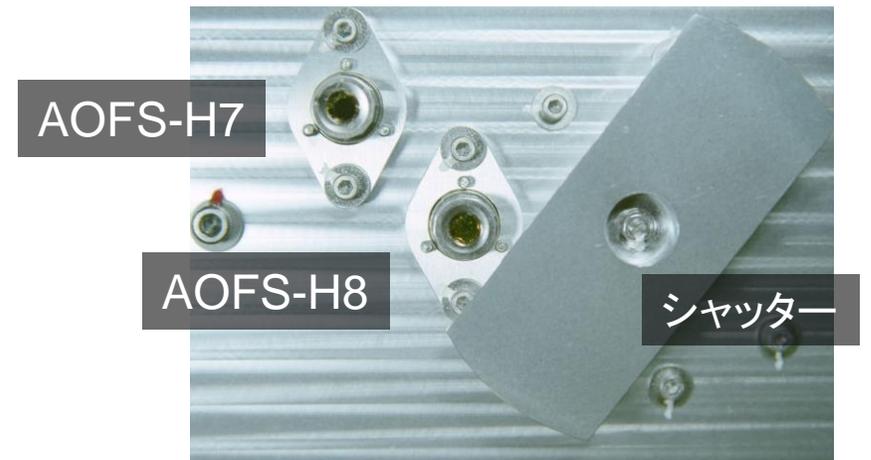
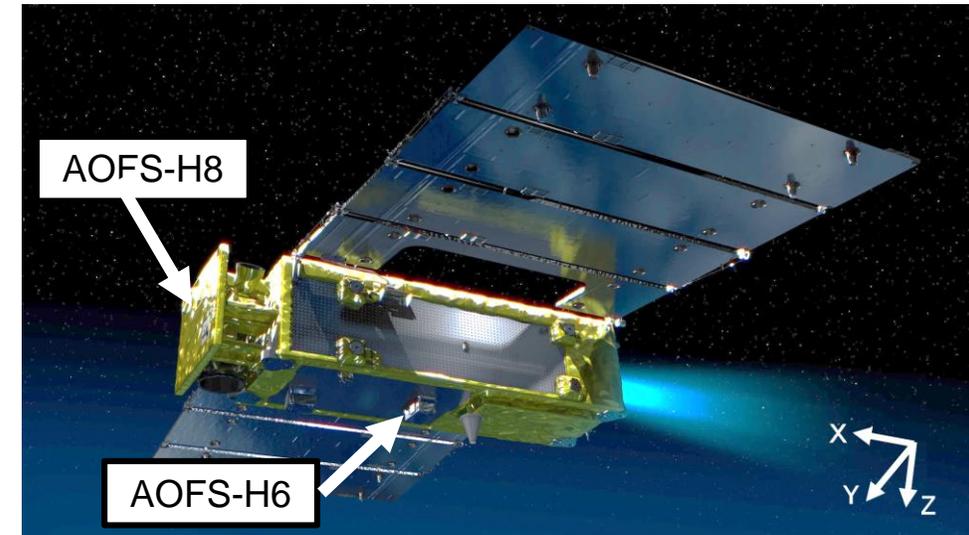
AOFSセンサトレンド (2018年1月1日 ~ 9月30日)

- 衛星コンタミネーションの付着の可能性
- 9月以降AO密度が多くなり、その影響で減少に転じている可能性
⇒衛星内部へのAO浸入や圧力上昇の影響などが考えられる
- 衛星構体内温度など他の環境条件含めて解析中

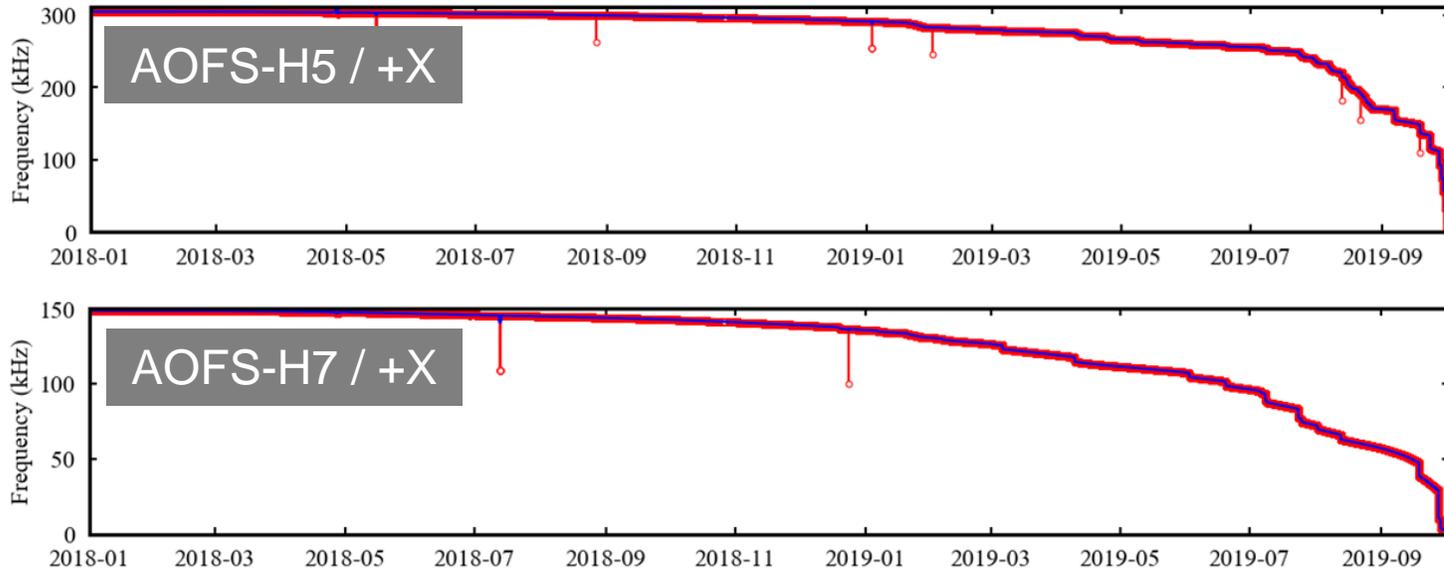
AOFSデータ概要



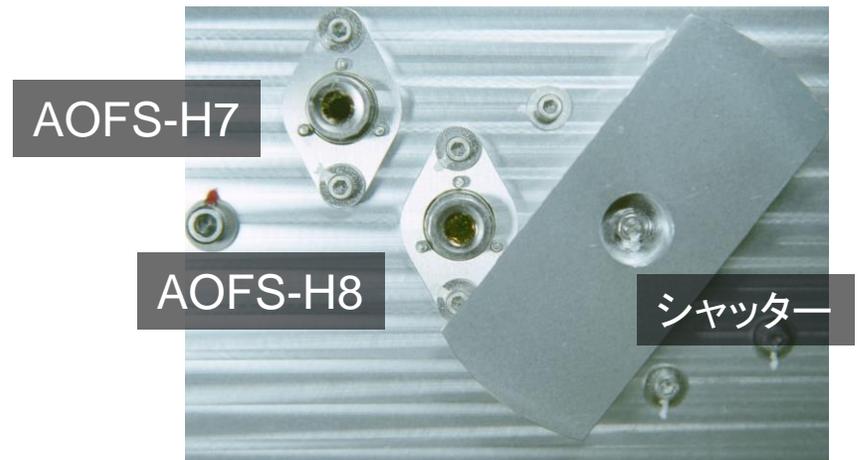
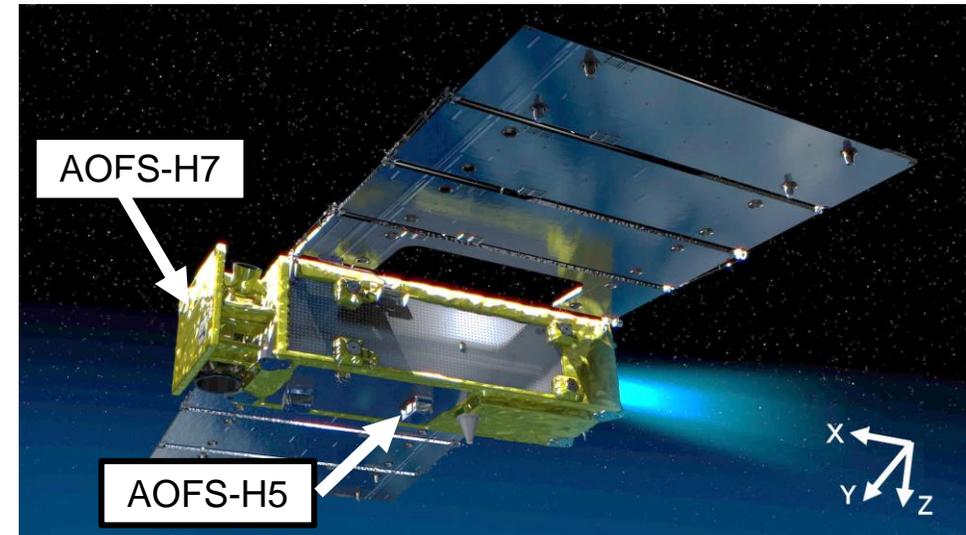
- AOFS-H6/H8はポリイミド薄膜なし (リファレンス用途)
- 超低高度域において、センサ出力周波数の減少
- 金電極もしくは、センサ内部の導電性接着剤の浸食の可能性



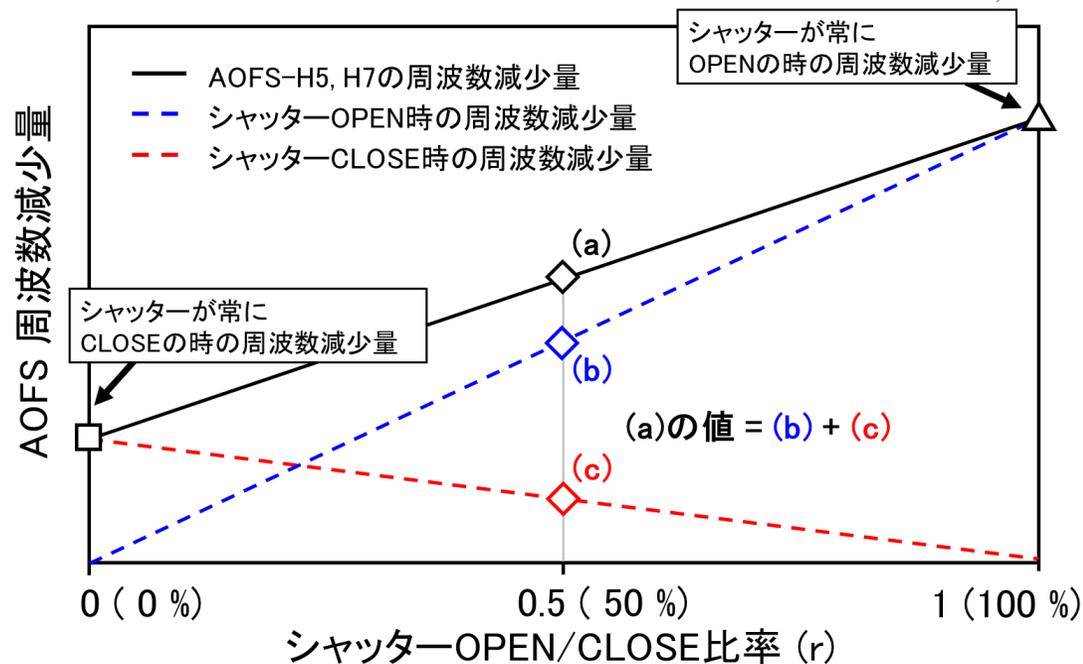
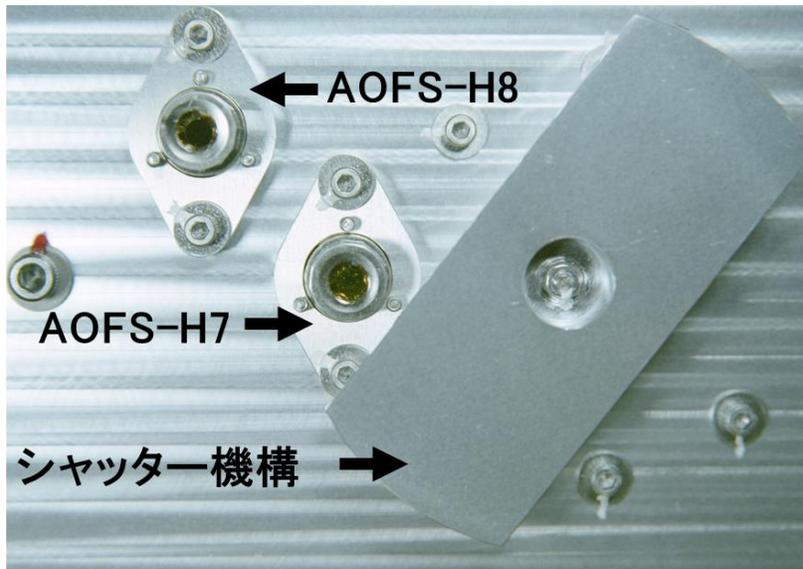
AOFSデータ概要



- AOFS-H5/H7は超低高度でちょうど寿命が尽きるようにシャッターを制御
- 超低高度域において、センサ寿命を考慮し、OPEN/CLOSE Dutyを制御



シャッター付きAOFSセンサ解析手法



シャッターによる遮蔽効果を考慮した解析

$$F_{AO} = \alpha \cdot \Delta f(1.0) \quad \text{シャッターなしの場合}$$

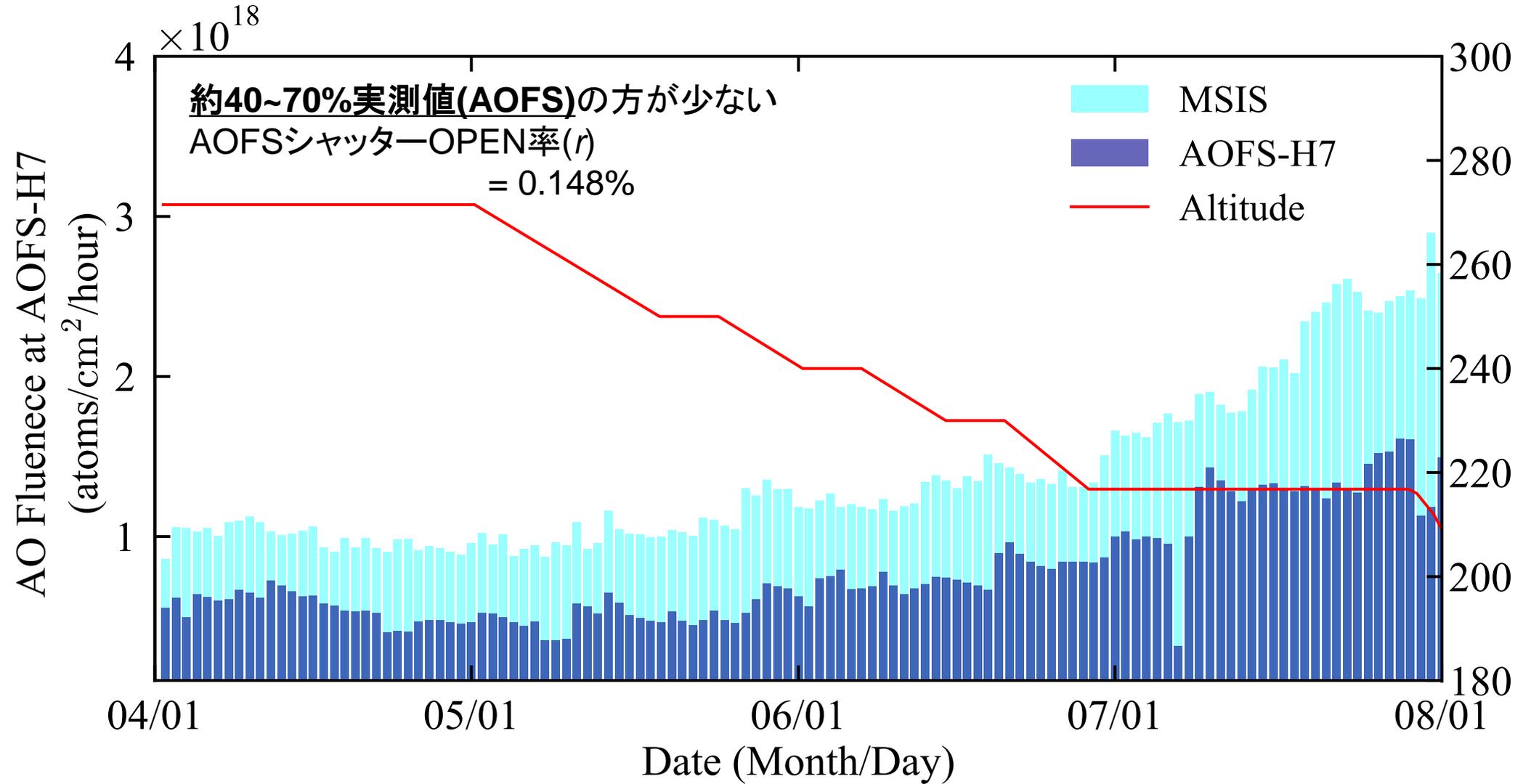


$$F_{AO} = \alpha \cdot \Delta f(r) \cdot \frac{1}{(1-r)\frac{1}{R} + r} \quad \text{シャッターありの場合}$$

$$\text{ここで } R = \frac{\Delta f(1.0)}{\Delta f(0.0)}$$

- F_{AO} : AOフルエンス ($/\text{cm}^2/\text{s}$)
- α : AOFS感度係数 ($/\text{cm}^2/\text{Hz}$)
- ΔF : AOFSセンサ周波数変化量 (Hz)
- r : シャッターOPEN/CLOSE比率
- $\Delta f(r)$: シャッターOPEN/CLOSEが" r "の時のAOFS周波数変化量 (Hz)

AOFS-H7で計測したAO密度



AOFSにて観測された超低高度環境における原子状酸素(Atomic Oxygen : AO)

まとめ

- 超低高度まで連続したAO計測を達成 (計測誤差約 $\pm 9.2\%$ (1σ))
- モデル (NRLMSISE-00)と比較し, AO密度実測値は低い
- 3分間隔のAO密度計測を達成し, 高度/緯度/経度依存性を議論できるデータを取得

今後の方針

- AOFSそれぞれのセンサの計測値の関連性 \Rightarrow 衛星に対するAO進入角度依存の解析
- 太陽活動指数, 地磁気指数とAO密度の関連性
- 衛星コンタミネーション評価
- 大気モデル (NRLMSISE-2000)や大気密度計測結果との比較