

地球高層大気による衛星材料劣化地上試験の実際

田川雅人 Masahito TAGAWA・横田久美子 Kumiko YOKOTA

神戸大学大学院工学研究科

地球高層大気の主要成分である原子状酸素 (atomic oxygen, AO) が低軌道宇宙機用材料に大きな影響を与えることは広く知られており、今後開発が本格化する超低高度コンステレーション衛星群にとって最も重要な宇宙環境要因である。しかしながら AO 地上試験は世界でも実施できる施設に限られており、その実際についてはあまり知られていないようにも思われる。そこで、軌道上 AO と宇宙機材料反応に関わる部分は他の解説に譲り、本解説では AO 地上試験を実施する場合の実際的な留意点や限界について述べ、新たに AO 地上試験を実施することが必要となった読者に向けて、AO 照射試験を企画・実施する上で参考となるような情報提供を行う。

Key Words : Atomic Oxygen, Material Degradation, Ground Test, LEO, VLEO

記号の説明

E_y : エロージョンイールド (cm^3/atom)

1. はじめに

原子状酸素 (AO) は酸素分子が太陽紫外線で解離することにより生成され、高度 200–600 km における地球高層大気の主要成分である。低地球軌道 (LEO) を周回する宇宙機は約 8 km/s の速度で AO と衝突するため、宇宙機前面の材料は AO と直接反応することになる。1980 年代後半以降スペースシャトルや国際宇宙ステーションを用いて行われた実験から、多くの高分子材料や一部の金属材料は、AO 衝突による酸化反応により急速なガス化や酸化被膜の形成が確認されており^{1–3)}、ミッション期間 (あるいは AO 曝露量) によっては何らかの対策が必要となる。

AO 防御技術としては ITO などの無機コーティングの使用⁴⁾ や、高分子主鎖中に Si を含んだシロキサン高分子材料や塗布⁵⁾ などが検討されてきた。しかしながら、現在のところ決め手となる対処方法は開発されていない。このような中、近年の LEO における宇宙ビジネスの活性化に伴い、元来地上用途に開発された多様な機能性材料が宇宙環境中で使用されるケースが増えている。一部の材料は直接 AO に曝露されることも想定されることから、多彩な材料・機能性要求に対して耐 AO 特性の評価や地上試験への要求が高まっている。

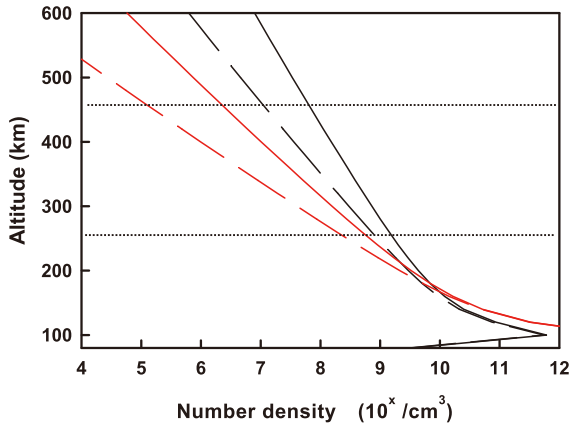
それに加えて、STARLINK に代表される低高度衛星コンステレーションシステムと低遅延通信への要求は、LEO よりもさらに高度の低い超低地球軌道 (VLEO) で

の衛星運用を志向する方向性を有しており、そのような宇宙機への AO 曝露量は従前に比べて桁違いに大きな値となる。それに伴い地上試験での要求曝露量も最近は過大なものとなる傾向があり、地上試験側での対応が困難なケースも多い。また、VLEO では AO 密度だけではなく N_2 密度も急速に高くなるため AO と N_2 の同時曝露環境となることで、材料のエロージョンメカニズムが変化する場合もあり、特別な試験環境が要求されることもある。

このような宇宙環境に起因する問題は低軌道宇宙機の信頼性を担保する上では避けて通れないが、案外、専門家以外には知られていないことも多い。LEO における AO を含む宇宙環境全般や材料劣化現象については日本語でもいくつかの解説や書籍があるので^{6–9)}、劣化事例やメカニズム等についてはそれらの解説に譲ることとし、本稿では AO 照射試験を企画・実施する上で必要となる具体的な情報について記述・解説する。

2. 低軌道中性大気環境

AO を含む中性ガス環境の地上試験を実施するには、まず模擬すべき環境を決める必要がある。AO と宇宙機の相対衝突速度は LEO では地球の自転等も考慮すると約 7.4 km/s 程度であることが多い (厳密には衛星軌道により変化する)。AO 密度は 11 年周期の太陽活動により大きく異なる点には注意が必要である。第 1 図は大気モデル NRLMSISE-00¹⁰⁾ を用いて計算した高度と AO および N_2 密度の例である。2009 年が太陽活動極小期、2015 年が太陽活動極大期である。高度 460 km の ISS 軌道における AO 密度は 2009 年には $1.0\text{E}+7$ 、2015 年には $6.2\text{E}+7$ atoms/cm³ であり、同じ高度でも太陽活動により 6 倍の差異がある。RAM 面での AO 曝露量は AO 密度に衛星軌道速度を乗ずることにより計算され、各々、 $7.4\text{E}+12$ 、 4.6E



第1図 原子状酸素（黒）と窒素分子（赤）密度の高度および太陽活動による変化. 実線：2015年，破線：2009年

+13 atoms/cm²/s となる。1カ月の曝露量では 1.9E+19, 1.2E+20 atoms/cm²/month である。ただし、2015年の太陽活動は比較的低調であり、2周期前の太陽活動極大期である1992年では高度460 kmで 1.7E+8 atoms/cm³の密度があった。その場合の1カ月での曝露量は 3.3E+20 atoms/cm²となる。したがって、2015年の 1.2E+20 atoms/cm²/month は長期的に見れば平均的な太陽活動での値に近いと思われる。このように衛星ミッションにおけるAO予想曝露量は太陽活動に大きく依存するが、たとえ太陽活動極小期に予定されているミッションであっても、打ち上げ遅延等によりミッション期間が数年ずれることも少なからずある。そのため太陽活動極大期でのAO曝露量に対応した対策を施しておけば安全である。

一方、高度が低下すると大気密度は指数関数的に増大する。第1図より高度460 kmと260 kmではAO密度は約10倍、N₂密度は約100倍になることがわかるが、厳密には緯度、経度、季節、対地高度などによっても変化する。また太陽フレアなどによる突発的な変化もある。また高度460 kmでは数パーセントにすぎなかったN₂密度が、高度200 km付近で大気組成の50%を超えるようになり、材料劣化メカニズムに影響を及ぼす可能性がある点には注意を要する。

これらの大気密度および組成を予測するためのモデルとしては、これまで NRLMSISE-00 が利用されることが多かったが、2021年にバージョンアップされ、現在は MSIS2.0 が用いられている¹¹⁾。NRLMSISE-00ではモデルによる大気密度の絶対値が実測値に比べて過大であるとの結果が多く報告されていることから^{12~14)}、最新の MSIS2.0の予測値は NRLMSISE-00よりも小さくなるように修正されている。しかしながら MSIS2.0の大気密度予測値の精度も十分に検証されているとは言えないので、過度に信用することは避けるべきである。

3. 軌道上材料劣化現象

LEOにおける材料劣化現象はスペースシャトル (STS) が実用化された1980年代後半に認識され、その後、今日



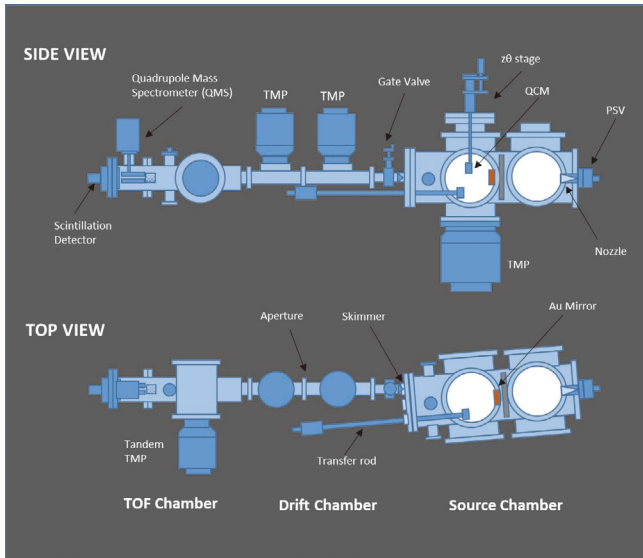
第2図 MISSE-1, PEC-1 パレット (Photo by NASA)

第1表 各種材料の MISSE-2 による曝露結果²⁴⁾

Material	Polymer abbrev.	MISSE-2 Mass-loss (g)	Density (g/cm ³)	Area (cm ²)	MISSE-2 Erosion yield (cm ³ /atom)
Acrylonitrile-butadiene-styrene	ABS	0.03386	1.05	3.4944	1.09E-24
Polyethylene	PE	0.102760	0.918	3.5489	3.74E-24
Polyvinyl-fluoride (Tedlar)	PVF	0.132537	1.3792	3.5737	3.19E-24
Polyoxy-methylene (Delrin)	POM	0.378378	1.3984	3.5119	9.14E-24
Polystyrene	PS	0.11597	1.0503	3.5043	3.74E-24
Polymethyl methacrylate	PMMA	0.194588	1.1628	3.5456	5.60E-24
Polyimide (PMDA)	PI (Kapton-H)	0.124780	1.4273	3.4590	3.00E-24
Polyether-etherketone	PEEK	0.107764	1.2259	3.4821	2.99E-24
Polyethylene terephthalate	PET	0.125187	1.3925	3.5432	3.01E-24
Fluorinated-Ethylene-propylene	FEP	0.012479	2.1443	3.4468	2.00E-25
Polytetra-fluoroethylene	PTFE	0.008938	2.1503	3.4841	1.42E-25

に至るまで STS および国際宇宙ステーション (ISS) を用いて数々のフライト実験が行われてきた。初めて本格的な軌道上曝露実験が行われたのは1983年の STS-8 であった¹⁵⁾。その後、STS-41の EOIM-2 ミッション¹⁶⁾ や STS-46の EOIM-3 ミッション¹⁷⁾、LDEF による大規模なデータ収集が行われている¹⁸⁾。ISS 時代に入ってからでは MISSE (第2図) に代表される曝露パレットを用いた曝露試験が繰り返し行われている^{19~21)}。日本でも ESEM⁶⁾ や SM-MPAC/SEED²²⁾、ExHAM²³⁾ などの実験が行われておりデータが公表されている。これらの軌道上曝露実験で計測された代表的な材料に関するエロージョンイールド (E_y) を第1表に示している²⁴⁾。多くの炭化水素系高分子材料は 3E-24 cm³/atom 程度の値であることがわかる。この E_y に AO 曝露量を乗ずれば推定膜厚減少量が計算できる。多くの高分子材料の膜厚減少量は前述の ISS 軌道で1カ月あたり数 μm 程度となる。この膜厚減少量はミッション期間に比例するため、長期ミッションでは材料の耐 AO 性への留意が必要となる。一方、高度低下に対しては AO 密度が指数関数的に増大するので、高度変化には十分考慮する必要がある。

軌道上曝露試験では質量減少は比較的精度良く測定でき



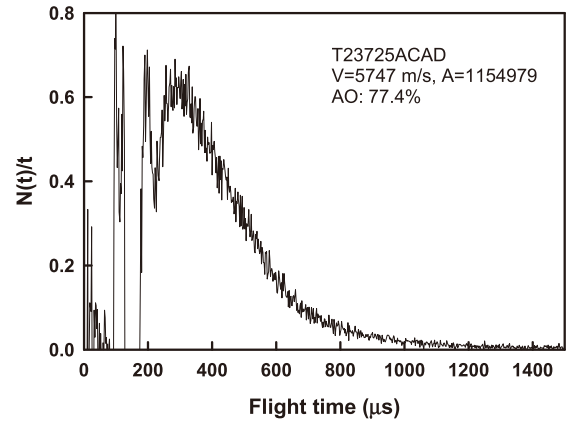
第3図 神戸大学における原子状酸素ビーム発生装置

るが、問題は AO 曝露量の正確な計測法が確立できていないことである。そのため多くの場合、AO 曝露量は NRLMSISE-00 などの大気モデルでの密度予測値に軌道速度を乗じて計算されることが多いが、前述のように大気モデルは精度が高くない。そのため、これらの絶対値は正確ではなく材料間の相対的な劣化耐性を示す数値として利用されるべきであり、あくまで目安として十分な安全率をもって利用すべき値である点には注意を要する。また、膜厚減少は酸化物形成と反応生成物のガス化反応によるものであるため、本特集の別解説にもあるように分子コンタミネーション源となりうる点にも注意する必要がある。

4. 地上試験の実験

前述の軌道上曝露試験は、実宇宙環境での劣化試験という意味で重要ではあるものの、コストの高さや準備期間の長さ、実験自由度の低さ、さらには実験機会の少なさという観点からみると、材料や衛星開発に気軽に使用できる評価方法ではない。そのため、AO 地上試験装置を用いた地上試験が一般的に行われている。軌道上の AO 環境の特殊性は、AO と宇宙機の相対衝突速度の大きさである。7-8 km/s の衛星軌道速度は軌道上の AO の熱速度よりはるかに大きく、これが AO の反応性に影響を与える。そのため、地上試験でも AO に軌道上に近い速度を与えることのできるレーザーデトネーション法を用いた実験が行われる。現在の技術では、これ以外の方法で 7-8 km/s の高強度 AO ビームを形成し、材料試験を実施することは現実的ではない。

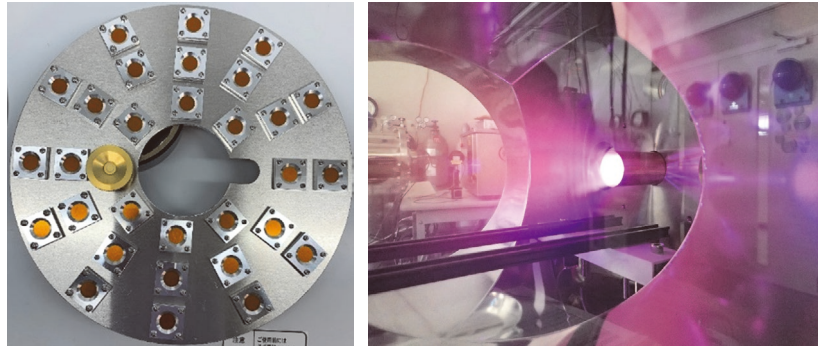
一例として第3図に神戸大学におけるレーザーデトネーション AO 発生装置の構成を示している。今日、地上試験用 AO 発生装置として用いられているレーザーデトネーション AO 発生装置は 1980 年代に米国 PSI 社で開発されたものである²⁵⁾。本システムは本来レーザー推進器として開発されていた技術をスピノフしたものであり、ジャイ



第4図 レーザーデトネーション法により形成された原子状酸素ビームパルスの飛行時間スペクトルの例

アントパルスによるレーザープラズマがレーザー入射方向に 8-10 km/s で進展することを利用している (第3図)。レーザーエネルギーのプラズマへの吸収には波長が長い赤外線が有利なこと、プラズマの加速には比較的長時間のレーザーパルスが有利なことから定格 5 J/pulse の炭酸ガスレーザーが用いられている²⁶⁾。一方、ターゲットガスとなる酸素ガスはパルスバルブから導入されるが、パルスバルブには高速動作 (200 μs) と高信頼性、集光したレーザー光への耐久性が要求されることから本グループでは自作のピエゾバルブを用いている。パルスバルブとレーザーを同期させることにより、真空排気系への負担を減らしながら AO プラズマを発生させることができる。第3図の左側には四重極質量分析管 (QMS) を備えたビーム診断装置が取り付けられている。これによりレーザープラズマから生成されるビームパルス中に含まれる粒子の組成と速度分布を計測することができる。AO 照射中はポリイミドをコートした水晶振動子微小天秤 (QCM) の共振周波数変化を常時モニターすることにより照射の安定性を、 $m/z=16$ の飛行時間スペクトル (TOF スペクトル、第4図) を計測することによりビームエネルギーの安定性を確認できる。最終的な AO 照射量はサンプル近傍の Kapton の質量減少から計算する (ホルダー上での AO 分布があるため)。このような Kapton witness サンプルを用いて AO フルエンスを定量化する方法は ASTM でも推奨されているが²⁷⁾、この規格が制定されてから 20 年以上が経過し問題点も指摘されている。とは言うものの、現状でそれを代替する方法が確立されているわけではなく、将来的な補正や修正に対応するためにも現在の標準的方法に従ったデータ取得を行った上で、詳細な実験条件の記録 (AO ビームエネルギー分布、ビーム組成等) を行っておくことが重要であろう。以下に AO 照射試験を実施する上で留意する点を列挙する。

4.1 サンプル 神戸大学のシステムの場合、サンプルは第5図に示す直径 220 mm のホルダー上に配置され、ビーム軸に対して垂直にセットされる。レーザー光路およびビーム速度計測用の中央部の穴と左側の QCM を除き自



第5図 神戸大学における原子状酸素ビーム照射用サンプルマウント (左) と原子状酸素ビームパルス (右)

由に配置が可能である。AOはサンプルホルダー正面中央460 mm手前の位置から放射状に照射される。ホルダー上には照射量の分布があり、中央付近と端部では約2倍の差が生じる。そのため、サンプルの近傍にAOフルエンス測定用のKaptonを配置しておくことが行われる。KaptonはAOに対して $Ey=3E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$ の反応率で反応し、気化することがスペースシャトル上のミッションで計測されており、ASTMではこのKaptonの質量減少量からAO照射量を検定することが推奨されている²⁸⁾。劣化量はサンプル質量減少量から算出するため、照射前後での質量測定(あるいは段差測定)が必要となる。サンプルの固定には第5図で示されるような $\Phi 10 \text{ mm}$ 、あるいは $\Phi 15 \text{ mm}$ の開口部を持つホルダーや類似のジグが用いられる。

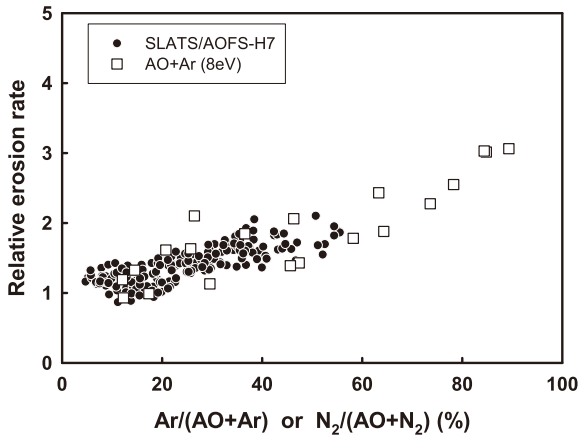
4.2 分析 AO照射によるサンプルの変化は、質量減少量、表面形状、表面組成を計測することで評価される場合が多い。質量減少量は分析天秤、表面形状は走査電子顕微鏡、表面組成はX線光電子分光法で計測されるのが普通である。8 km/sという速度(AOの運動エネルギーとしては5 eV)では、AOの表面からの侵入深さは無視でき、表面第一層での化学反応になる。そのため、深さ方向の分析分解能が低い測定法ではバルクの信号に埋もれてしまい変化が検出できない。そのためバルク高分子の化学状態分析に多用されるFT-IR等はAO照射サンプルの表面分析には向かない。一方、特殊な物性の変化を計測することが要求される場合には、その計測法に特化したサンプルを準備することが必要である。ただし、これらの測定はほとんどの場合サンプルを一旦大気に曝露した後に行われることから、大気中の水蒸気吸収による質量変化や吸着物には注意が必要である。

4.3 エネルギー AO地上試験においては軌道上でのAO相対衝突速度を地上で再現することが重要である。これがレーザーデトネーション法を地上試験で用いる理由であるが、レーザーデトネーション法でもエネルギー分布までは再現できない。軌道上ではAOは700–800 K程度の分子温度に相当するランダム運動をしており、そこに7.4 km/sの宇宙機が衝突する。700–800 Kでの分子速度はMaxwell-Boltzmann分布から約900 m/sであるので、AOの相対衝突速度は $7.4 \pm 0.9 \text{ km/s}$ 程度となる。一方、レー

ザーデトネーション法ではAOに並進速度を付与するため、その速度分布は第4図に示すように半値幅でも3.8–11 km/sの広い分布を持つ。したがって、AOの平均速度を7.4 km/sに合わせると、軌道上には存在しない高エネルギーAOがビーム中に含まれることになり、FEPのような衝突エネルギーに敏感な材料では地上試験で急速な劣化が生じることがある。

4.4 照射量 地上試験では全ミッション期間における予想AO曝露量を照射することが要求される場合が多いが、その値は $2E+20$ から場合によっては $1E+22 \text{ atoms/cm}^2$ に達する。レーザーデトネーション装置における照射レート(ビームフラックス)は $1E+15 \text{ atoms/cm}^2/\text{s}$ 程度であり、 $2E+20 \text{ atoms/cm}^2$ の照射量であれば20時間、 $2E+22$ では2000時間以上の照射が必要となるが、100時間を超えるような長時間の照射は非現実的である。AOの反応は表面でのガス化反応であるので、定常状態では一定レートでのエッチング反応となり、エッチング量は照射量(照射時間)に比例する。そのため、ある程度のAOを照射し、表面が定常状態に達した後のエロージョンイールド(エッチング速度)を測定できれば、データの外挿により、ミッション全体でのエッチング量(質量減少)を推定できる。また表面化学状態は定常状態になるとそれ以降は変化しないので、比較的初期に定常状態になる。ただし、表面形状や非線形な特性を有する物性については初期データのみから推定することは難しい。

4.5 複合効果 軌道上での宇宙環境はAOや紫外線、放射線などの複合環境場である。このような複合的な宇宙環境が材料劣化現象にどのような影響を与えるかという問題は、宇宙環境での材料劣化現象が明らかになって以来、過去数十年にわたり議論されてきた。その発端は軌道上ではあまりAOに対して劣化しないFEPが地上試験ではAOに対して急速に劣化することが報告されたことである²⁸⁾。当初はFEPに対してAOと紫外線(UV)照射の複合効果の存在が疑われたため、AOとUVを同時に照射できる大規模なシステムも構築されたが、近年では、この現象はレーザープラズマからのUVに起因するものではなく、地上試験のAOビーム中にLEOでは存在しない高エネルギー成分が含まれているためと考えられている^{29–31)}。



第6図 SLATS/AOFSで観察されたポリイミドの N_2 同時曝露効果(丸)とArを用いた地上実験結果(四角)³⁷⁾

地上試験でUVとAOの同時照射を研究した結果からは、FEPはAOとUVの両方で劣化を生じるものの複合効果は発現せず、両者の単純な加算で説明できるとされている³²⁾。一方、AO照射試験での基準材料とされているポリイミドはAOとUVの同時照射に対して複合効果(劣化増速)が観測されるが、その増速効果はAOに対するUVの相対強度に依存することが示されており、AOとUVの強度比を正しい状態に保った上で地上試験を実施しなければならない³³⁾。ただし、地上試験でAOとUVの強度比を軌道上環境と同じにすること(加速率を合わせることは)は実際上困難であることから、地上設備を用いた複合照射試験は実用材料を対象としてはあまり行われていない。

5. 最近の技術動向と将来展望

LEOでのAOの材料への影響は上記のように軌道上試験、あるいは地上試験で評価されてきた。しかしながら、今後の宇宙機運用が行われるであろうVLEOではISSのような軌道上インフラが存在しないため軌道上試験は不可能である。そのため、VLEO環境試験は地上試験装置を用いた試験に頼らざるを得ない。VLEOでは第1図で述べたように N_2 の割合が増大し、高度200 km付近では太陽活動によらずAOと N_2 の密度がほぼ50:50になる。 N_2 は質量が大きいため衝突エネルギーはAOの5 eVに対して約9 eVとなるが、9 eVの分子が同時衝突するとき、ポリイミドなどの高分子の質量減少速度が増大することが最近明らかになってきている³⁴⁾。レーザーデトネーション法を用いた地上試験では、AO誘起材料劣化に対する N_2 衝突の物理的な効果を再現するために、特殊なパルスバルブシステムによりArと O_2 の2種類のターゲットガスでレーザープラズマを生成し、ArとAOビームを独立に制御して照射することが行われる³⁵⁾。ここで軌道上の N_2 衝突効果を地上実験ではArを用いて再現するのは、加速に必要なレーザープラズマ中で N_2 はNに解離してしまうため、衝突エネルギーが低下するためである。実験の結果、ポリイミドの質量減少速度はArの衝突エネルギーに強く依存し、9 eVのArと5 eVのAOが50:50の場合で照

射された場合にはArが含まれていない場合に比べて、質量減少速度が2.3倍になることが示されている³⁶⁾。この結果は世界初の高度300-160 kmのVLEOにおけるポリイミドの劣化を実測したSLATS/AOFSの実測結果とも良い一致を示し(第6図)、レーザーデトネーション法においてArと O_2 ターゲットガスを用いたVLEO環境地上試験方法の妥当性が示されたと同時に、VLEO上ではKaptonなど炭化水素はAO密度の増加以上に増速劣化することを示している³⁷⁾。一方、フッ素系薄膜はAOに対して反応性が低いことが第1表から読み取れる。そのため、AO密度の高いVLEO環境での使用が期待されるが、フッ素系材料の劣化には衝突分子の反応性よりも衝突エネルギーが重要であることが明らかにされている³⁸⁾。すなわち、AOよりも高質量の N_2 分子が同じ相対速度で衝突するVLEOでは、 N_2 の高エネルギー衝突はフッ素系材料劣化の主要因であることが地上実験結果から示唆されている。したがって、 N_2 がほとんど存在しない環境であるISS軌道上での曝露実験結果を N_2 が50%を占めるVLEO環境にそのまま適用することは危険である。

最近明らかになった上記のような実験・観測事実は、AO誘起材料劣化現象はLEOでも高度によって異なること、高質量分子が存在する環境では複合効果が発生することを示している。このことはAOと CO_2 が共存する火星や金星軌道を周回する探査機がエアロブレーキングなど惑星大気を積極的に利用する場合の材料リスクとなる。

これまでの軌道上曝露試験や地上実験の結果は、個別に学術雑誌や国際会議プロシーディング等に発表されてきた。しかしながら、研究分野の成立から40年近くが経過すると研究者の世代交代、最新のデータベースへの更新や最新の研究成果を基にする再解析の必要性など、多くの問題を抱えるようになってきており、軌道上曝露試験データの散逸も危惧される状況である。特に軌道上曝露試験データは新たなデータを簡単には取得できないため、時間の経過とともに実験の詳細が失われると大気モデルのアップデートが行われた場合などにデータの再解析等が困難になる。そのため、米国では軌道上材料試験データ(地上試験を含む)の一元的な管理の動きが出始めており、地上実験技術の継承も含めて我が国でも遠からず問題が表面化するものと思われる。

6. ま と め

LEOにおけるAO環境での材料耐性評価は地球近傍での宇宙ビジネスの活性化とともに需要が大きくなりつつある。ISSでの軌道上曝露試験は機会が限られている上、長い準備期間、高コスト、実験自由度が低いことを考えると、完全な環境模擬は不可能ではあるものの地上試験装置を用いた評価が重要となる。またVLEOや他惑星環境などのように地上試験のみで材料リスク評価を行わなければならない場合もある。多様な宇宙環境での材料リスクを最小化するためには、よく規定された地上試験が不可欠である。

一方、日本国内では「AO試験したいがどこにコンタクトを取ればよいかわからない」という話も聞く。2023年時点で国内ではJAXA筑波宇宙センターと神戸大学で合計4台のレーザーデトネーション装置が稼働中である。この数字は実は米国、欧州よりも多く、地上実験を実施しやすい環境である。実際、海外からの受託試験の問い合わせも少なくない。ただし、AO試験には長時間のメンテナンスが必要な場合も多いので、AO地上試験を企画・実施される場合には、まずはJAXA研究開発部門や神戸大学担当者に問い合わせることがすべてのスタートとなる。本稿が宇宙環境への理解とAO地上試験を実施するための一助になれば幸いである。

本稿をまとめるにあたり、これまで数々の実験に関わってもらった学生諸氏、共同研究を実施してきたJAXA関係者に謝意を表するとともに、本研究の多くは日本学術振興会科学研究費補助金・助成金の支援により実施されたことを申し添える。

参 考 文 献

- Minton, T. K. and Garton, D. J.: Dynamics of Atomic-oxygen-induced Polymer Degradation in Low Earth Orbit, Dressler, R. A. ed., *Chemical Dynamics in Extreme Environments*, Advanced Series in Physical Chemistry, Vol. 11, World Scientific, Singapore, 2001, pp. 420-489.
- Srinivasan, V. and Banks, B. A.: *Material Degradation in Low Earth Orbit (LEO)*, TMS, 1990.
- 日本材料科学会：宇宙と材料，裳華房，1991.
- Banks, B., Lenczewski, M. and Demko, R.: Durability Issues for the Protection of Materials from Atomic Oxygen Attack in Low Earth Orbit, *IAC-02-15.02*, 2002.
- Ishizawa, J., Mori, K., Imai, F., Yamagata, I. and Suzuki, M.: Results of the Space-Environment Exposure Experiment "SM/MPAC & SEED" on the International Space Station (2) : Siloxane Coated Polyimide Films, and Silicone Based Paints and Adhesives, *Proceedings of the 10th ISMSE*, 2006, CD-ROM.
- 田川雅人：宇宙環境利用のサイエンス，裳華房，2000，pp. 222-233.
- 五家健夫：宇宙環境リスク辞典，丸善，2006.
- 木本雄吾，宮崎英治，石澤淳一郎，鳥村宏之：低軌道における宇宙用材料への原子状酸素の影響とその地上評価，*真空*，**52**，9 (2009)，pp. 475-483.
- 田川雅人：宇宙機の熱設計，名古屋大学出版会，2014，ISBN978-4-8158-0758-0.
- Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P. and Aikin, A. C.: NRLM-SISE-00 Empirical Model of the Atmosphere: Statistical Comparisons and Scientific Issues, *J. Geophys. Res.*, **107**(2002), SIA15.
- Emmert, J. T.: NRLMSIS 2.0: A Whole-Atmosphere Empirical Model of Temperature and Neutral Species Densities, *Earth and Space Science*, **8**(2021), pp. 1-37.
- Rapp, M., Gumbel, J. and Lübken, F.-J.: Absolute Density Measurements in the Middle Atmosphere, *Ann. Geophysicae*, **19** (2001), pp. 571-580.
- Emmert, J. T.: Thermospheric Mass Density: A Review, *Adv. Space Res.*, **56**(2015), pp. 773-824.
- Bruinsma, S. L., Doornbos, E. and Bowman, B. R.: Validation of GOCE Densities and Evaluation of Thermosphere Models, *Adv. Space Res.*, **54**(2014), pp. 576-585.
- Visentine, J. T., Leger, L. J., Kuminecz, J. F. and Spiker, I. K.: STS-8 Atomic Oxygen Effects Experiment, *AIAA-85-0415*, 1985.
- Zimcik, D. G. and Maag, C. R.: Results of Apparent Atomic Oxygen Reactions with Spacecraft Materials during Shuttle Flight STS-41G, *J. Spacecraft*, **25**, 2(1988), pp. 162-168.
- Brinza, D. E., Chung, S. Y., Minton, T. K. and Liang, R. H.: Final Report on the NASA/JPL Evaluation of Oxygen Interactions with Materials 3 (EOIM-3), *JPL Publication 94-31*, 1994.
- Papers in the Proc. LDEF 69 Months in Space, Third Post-Retrieval Symposium, *NASA CP-3725*, 1993.
- Pippin, G.: Technical Operations Support (TOPS) II Delivery Order 0011: Summary Status of MISSE-1 and MISSE-2 Experiments and Details of Estimated Environmental Exposures for MISSE-1 and MISSE-2, *AFRL-ML-WP-TR-2006-4237*, July 2006.
- de Groh, K. K., Banks, B. A., Asmar, O. C., Yi, G. T., Mitchell, G. G., Guo, A. and Sechkar, E. A.: Erosion Results of the MISSE 8 Polymers Experiment after 2 Years of Space Exposure on the International Space Station, *NASA/TM 2017-219445*, 2017.
- Dever, J. E., Miller, S. K., Sechkar, E. A. and Wittberg, T. N.: Space Environment Exposure of Polymer Films on the Materials International Space Station Experiment: Results from MISSE 1 and MISSE 2, *High Performance Polymers*, **20**(2008), pp. 371-387.
- Kimoto, Y., Ishizawa, J. and Shimamura, H.: Passive Space Environment Effect Measurement on JEM/MPAC & SEED, *Protection of Materials and Structures from the Space Environment*, Springer, Heidelberg, 2013, p. 73.
- Kogiso, N., Tanaka, H., Ikeda, T., Ishimura, K., Tagawa, M., Iwata, M. and Fujigaki, M.: Result of Exposure Experiment of Piezoelectric Actuators Using ExHAM, *Proceedings of the 33rd International Symposium on Space Technology and Science*, 2022.
- Visetine, J. T.: Atomic Oxygen Effects Measurements for Shuttle Missions STS-8 and STS-41G, *NASA TM-100459*, 1988.
- Caledonia, G. E., Krech, R. H. and Green, D. B.: A High Flux Source of Energetic Oxygen Atoms for Material Degradation Studies, *AIAA J.*, **25**, 1(1987), pp. 59-63.
- 田川雅人，横田久美子 分担執筆：最新実用真空技術総覧，エス・ティー・エス，東京，2019，ISBN978-4-86043-559-2.
- Standard Practices for Ground Laboratory Atomic Oxygen Interaction Evaluation of Materials for Space Applications, *ASTM E2089-00*, 2006.
- Weihls, B. and Eesbeek, M. V.: Secondary VUV Effects on Polymers in the ATOX Atomic Oxygen Exposure Facility, *Proc. ISMSE-6*, *ESA SP-368*, 1994, pp. 277-283.
- Tagawa, M., Yokota, K., Kishida, K., Okamoto, A. and Minton, T. K.: Energy Dependence of Hyperthermal Oxygen Atom Erosion of a Fluorocarbon Polymer: Relevance to Space Environmental Effects, *ACS Applied Materials Interfaces*, **2**, 7(2010), pp. 1866-1871.
- Tagawa, M., Ide, K., Yamasaki, Y., Watanabe, D., Hatsuda, A. and Yokota, K.: Effect of High-energy Inert Gas Collisions on the Atomic Oxygen-induced Polymer Erosion, *Proceedings of 13th International Symposium in Materials in a Space Environment*, 2015, CD-ROM.
- Tagawa, M., Yokota, K., Kishida, K. and Okamoto, A.: Origins of the Accelerated Erosion of Fluorinated Polymer in a Laser-detonation Ground-based Atomic Oxygen Facility, *Proc. 11th Int. Symp. Materials in a Space Environment*, Aix-en-Provence, September 14-18, 2009, CD-ROM.
- Tagawa, M., Abe, S., Kishida, K., Yokota, K. and Okamoto, A.: Synergistic Effect of EUV from the Laser-sustained Oxygen Plasma in the Ground-based Atomic Oxygen Simulation of Fluorinated Polymers, *Proceedings of the 9th International Conference on the Protection of Materials and Structures from the LEO Space Environment*, Toronto, Canada, 2008, pp. 170-184.
- Tagawa, M. and Minton, T. K.: Mechanistic Studies of Atomic Oxygen Reactions with Polymers and Combined Effects with Vacuum Ultraviolet Light, *MRS Bulletin*, **35**, 1(2010), pp. 35-40.
- Yokota, K., Tagawa, M., Fujimoto, Y., Ide, W., Kimoto, Y., Tsuchiya, Y., Goto, A., Yukumatsu, K., Miyazaki, E. and Imamura, S.: Effect of Simultaneous N₂ Collisions on Atomic Oxygen-induced Polyimide Erosion in Sub-low Earth Orbit: Comparison of Laboratory and SLATS Data, *CEAS Space Journal*, **13**, 3(2021), pp.

- 389-397.
- 35) Tagawa, M., Okura, R., Ide, W., Horimoto, S., Ezaki, K., Fujita, A., Shoda, S. and Yokota, K.: Laser-detonation Hypertemperature Beam Source Applicable to VLEO Environmental Simulations, CEAS Space Journal, **14**, 4(2022), pp. 757-765.
- 36) Yokota, K., Tagawa, M., Ide, W., Fujita, A., Horimoto, S., Nishioka, S., Ezaki, K., Tsuchiya, Y., Goto, A., Yukumatsu, K., Miyazaki, E. and Kimoto, Y.: N₂-acceleration Effect on Atomic Oxygen-induced Polyimide Erosion in Sub-LEO Observed by SLATS/AOFS, Proceedings of the 15th International Symposium on Materials in a Space Environment/13th International Conference on Protection of Materials and Systems from Space Environment, Leiden, The Netherlands, September 18-23, 2022.
- 37) Yokota, K., Tagawa, M., Fujimoto, Y., Ide, W., Kimoto, Y., Tsuchiya, Y., Goto, A., Yukumatsu, K., Miyazaki, E. and Imamura, S.: Effect of Simultaneous N₂ Collisions on Atomic Oxygen-induced Polyimide Erosion in Sub-low Earth Orbit: Comparison of Laboratory and SLATS Data, CEAS Space Journal, **13**, 3(2021), pp. 389-397.
- 38) Minton, T. K., Zhang, J., Garton, D. J. and Seals, J. W.: Collision-assisted Erosion of Hydrocarbon Polymers in Atomic-oxygen Environments, High Performance Polymer, **12**(2000), pp. 27-42.



田川 雅人 (正会員)

京都府出身。大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。大阪大学大学院工学研究科助手を経て神戸大学大学院工学研究科准教授。1994-1995 NASA-JPL 客員研究員。専門分野：宇宙環境工学（特に原子状酸素環境）、表面科学など、応用物理学会等会員。



横田 久美子 (正会員)

兵庫県出身。神戸大学農学部卒業。神戸大学大学院工学研究科助手。専門分野：宇宙環境工学（特に原子状酸素環境）、表面科学など、応用物理学会等会員。