

低地球軌道環境のシミュレーション を目指して



研究ノート

田川 雅人*

Simulation of spacecraft environment in low earth orbit

Key Words : atomic oxygen, low earth orbit, space engineering,
spacecraft environment

1. はじめに

高度 300～500km の低地球軌道 (low earth orbit : LEO) は宇宙ステーションの建設など今後の宇宙開発において非常に重要な役割を担う高度領域である。LEO に建設される構造物は 30 年から半永久的な利用が考えられており、スペースシャトル (STS) には求められていなかった長期間の連続使用に耐えるだけの高い信頼性と耐久性が要求されている。LEO における環境は温度、放射線、紫外線など材料にとって劣悪なものであることは 1960 年代から飛翔体を使った観測により明らかにされてきた。しかし、STS の初フライトによって宇宙船の進行方向の表面 (ram surface) が著しい劣化を受けていることが明らかとなった。これはカーゴベイの内側など大気圏再突入時の熱の影響を受けない表面が得られ初めて認識されるようになったものである。その後、ram surface における材料劣化の原因は高層大気組成の主要成分である原子状酸素との衝突によるものであることが明らかにされ、現在 LEO 環境の中で最も懸念されている影響の一つとなっている。STS や LDEF あるいは EOIM 等、軌道に打ち上げられたプラットホームによってこれまでに行わ

れてきた LEO 上における曝露実験結果からは一部の金属、炭素材料、コーティング膜、各種高分子材料等の劣化が特に激しいことが報告されている¹⁻³⁾。宇宙ステーションのように長期間軌道上で原子状酸素に曝露される場合にはその影響はさらに深刻なものになると予想され、事前に各種宇宙用材料への原子状酸素の影響を評価しておく必要があると考えられている。

地上において原子状酸素と材料との反応性をシミュレートするための原子状酸素発生装置の製作は米国においては NASA を中心とするプログラムにそって 1983 年頃から始まっているが、LEO における原子状酸素の反応を研究するための原子状酸素発生装置には、(1) LEO 上の flux (10^{17} atoms/m²s) を越える原子状酸素を発生すること、(2) 原子状酸素には宇宙船の飛行速度に相当する 8km (5eV) の運動エネルギーを付与すること、の 2 点が要求されている。これらの条件を同時に満足する原子状酸素発生装置の作製は困難であり、多くの場合 (2) を犠牲としてエンジニアリングデータの収集が行われ、原子状酸素による各種材料の劣化に関するデータベースの構築が急がれている。これは NASA の基本的なスタンドポイントが基礎的な研究よりもむしろ材料の耐原子状酸素性を評価したデータベースの作成に重点をおいたものであるためである⁴⁾。すなわち、現在まで米国で開発されている原子状酸素発生装置はその必要とされる 2 つのスペックのうち加速試験を行うための大 flux の達成が優先される傾向があり、ビームの運動エネルギーについては目を

*Masahito TAGAWA

1962年 3月 4日生

1988年大阪大学大学院工学研究科

後期課程精密工学専攻修了

現在、大阪大学工学部精密工学科

梅野研究室、助手、工学博士、表

面工学

TEL 06-877-5111(内線 4618)



つむるという方針がとられてきた。これは原子状酸素の反応が運動エネルギーに依存していないと言う仮定の上に成り立っている。しかしながら、多くの材料における原子間結合エネルギーはLEO上の原子状酸素の運動エネルギーとほぼ同程度であることから、反応には運動エネルギーの寄与の可能性が指摘されており、原子状酸素の素反応を解明する上からも、データベースの信頼性を確保する上からも、原子状酸素の反応に対する運動エネルギーの影響を早急に明らかにすることが望まれている。

そこで本研究では独自に開発した原子状酸素発生装置を用いて宇宙用材料に種々の運動エネルギーを有する原子状酸素を照射し、その反応効率や表面反応の差異等についての基礎的なデータを収集し、原子状酸素と材料の相互作用に関する基本的な知見を得ることを目的としている。

2. 実験装置

試作した原子状酸素発生装置はイオンビーム型、レーザーブレイクダウン型の2種類であり、その概略をそれぞれ図1,2に示している⁵⁾。イ

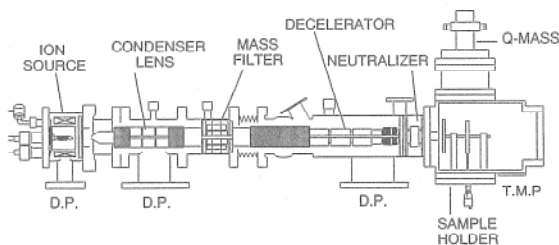


図1 イオンビーム型原子状酸素発生装置

オンビームによる方法は酸素イオンビームを所定のエネルギーまで減速した後に中性化を行なう方法で、fluxは小さいものの任意の運動エネルギーを原子状酸素に付与できるという特徴を有する。質量分析管をビームラインに持つためにピュアでエネルギーの揃った原子状酸素ビームを得ることができ、そのfluxも高度500kmにおける実際のfluxと同程度の 8×10^{16} atoms/ m^2s を実現できていることから原子状酸素の素反応を研究する上できわめて有効な装置であると考えられる。またレーザーブレイクダウン法

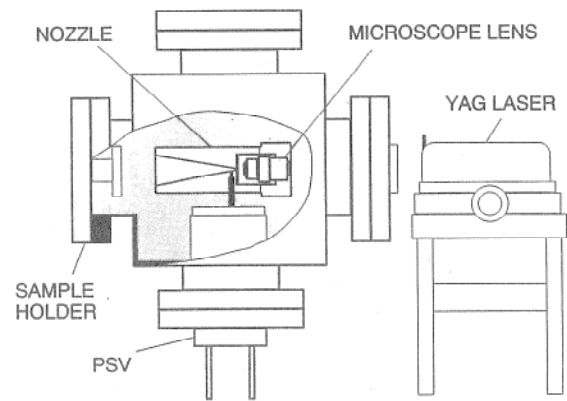


図2 レーザーブレイクダウン型原子状酸素発生装置

は超音速分子線バルブから導入された酸素ガスにYAGレーザーを集光する事により酸素プラズマを発生させ、原子状酸素ビームを発生させる方法である。この方法の特徴はパルス動作であり、エネルギー的にブロードな原子状酸素ビームである反面、fluxは 1.1×10^{17} atoms/ m^2s とイオンビーム型原子状酸素発生装置に較べ大きい上、非常にコンパクトかつ操作が簡単で長時間の照射実験が可能である点である。これら2つの原子状酸素発生装置を用いて二硫化モリブデン単結晶とポリイミド薄膜に対する照射実験を行った結果について紹介する。

3. 照射実験結果

3.1 二硫化モリブデン

宇宙用潤滑材料として有望な二硫化モリブデン(MoS_2)の原子状酸素に対する特性を把握するため、 MoS_2 単結晶基底面に 3.5×10^{21} atoms/ m^2 の原子状酸素を2, 5, 50eVの運動エネルギーで照射した後、X線光電子分光法(XPS)を用いて分析を行った。原子状酸素照射前後での表面原子組成比を表1に示す。SとOはMo量を

表1 原子状酸素を照射した二硫化モリブデン表面の定量分析結果

ELEMENT	UNEXPOSED	EXPOSED			
		ION BEAM		LASER	
		2eV	5eV	50eV	5eV
Mo*	26-31	31	29	36	45
S/Mo	2.2-2.8	1.6	1.8	1.5	0.7
O/Mo	0	0.7	0.6	0.2	0.6

* UNIT: ATOMIC PERCENT

基準とした相対比で示している。いずれの試料においても原子状酸素照射後にはOの濃度が上昇しているが、その濃度は運動エネルギーが高いほど低くなるという結果が得られた。これは原子状酸素のMoS₂基底面への固着確率や、スパッタリングレート、反応レートなどが運動エネルギーに依存しているためではないかと考えられる。5eVに設定したレーザーブレイクダウン法におけるO/Moの値もイオンビーム法5eVの場合と全く同じであることがわかる。しかしS/Moの値は0.7とイオンビーム法に比べて小さくなっており、表面のS量はより減少しているものと考えられる。これはレーザーブレイクダウン法の方が、より多くのSが反応して表面から失われたことを示しており、レーザーブレイクダウン法で発生される原子状酸素の方が、イオンビーム法に比べて高い反応レートを有している事が示唆されている。

次に各々の試料から得られたO1sスペクトルを図3に示す。O1sスペクトルのピーク位置

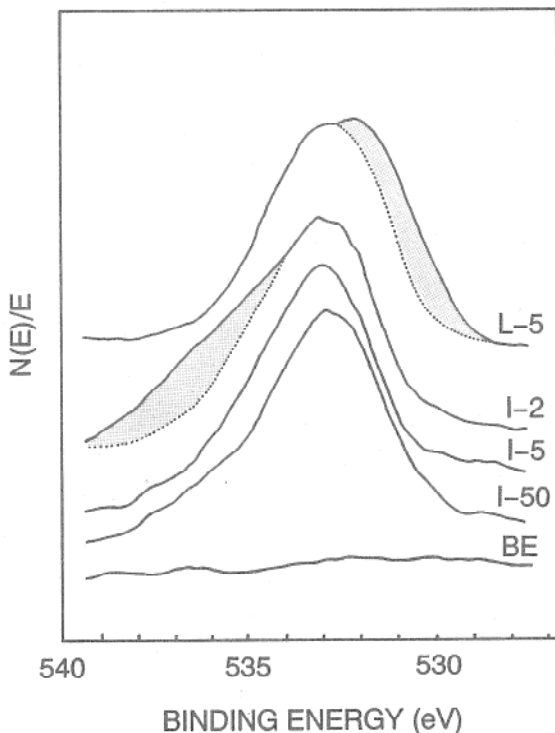


図3 原子状酸素を照射した二硫化モリブデン表面のXPSスペクトル
I-2:イオンビーム型(2eV),
I-5:イオンビーム型(5eV),
I-50:イオンビーム型(50eV),
L-5:レーザーブレイクダウン型(5eV)
BE: before exposure

については4つの試料とも大きな差異は観察されず、表面にはSO₂またはSO₃が生成されているものと考えられる。しかしながらピークの高エネルギー側の裾の形状には明かな差異が観察され、5eVと50eVの場合ピーク形状はほぼ同一であり、原子状酸素によって形成された表面酸化物の組成も同様のものではないかと推察されるのに対し、2eVの場合には異なる結合状態にあるOが存在していることが示唆されている。またレーザーブレイクダウン法の場合にはピークの高エネルギー側の裾は5eVの場合と同じであり、生成された硫黄酸化物はイオンビーム法の場合とほぼ同様であると考えられるのに対して、低エネルギー側にはMo酸化物のピークが531eVに確認された。Moの酸化はSの高い反応レートと共にレーザーブレイクダウン法にのみ観察される現象である。これらの原因については原子状酸素の励起状態が異なるのか、あるいは過剰に存在するO₂の影響なのか現状では明かではない。

運動エネルギーが低い場合にMoS₂表面での原子状酸素の固着確率が大きくなり、またその結合状態も異なるという実験結果は、LEO上においては材料表面での非弾性散乱効果を考えることが重要であることを示唆している。またMoS₂膜は酸素雰囲気においてはその潤滑性能が低下するというのが現在までの定説であるが、一方、ごく最近、MoS₂膜が一定の酸素分圧においてULF(超低摩擦)と呼ばれる極めて優れた潤滑特性を示す事実が報告がなされている⁹⁾。LEOでの酸素分圧はMoS₂膜がULFを示す圧力範囲に相当しているものの、その組成は酸素分子ではなく原子状酸素である。MoS₂表面が原子状酸素に対してどの程度の再結合速度定数を持っているかがトライボロジー特性を支配する一因となるかもしれない。

3.2 ポリイミド薄膜

ポリイミド薄膜は太陽電池パドルや、衛星の温度制御材として機体の表面各部に広範に利用されている高分子材料である。STS-8およびSTS-41による軌道上における曝露実験の結果から、最も原子状酸素による影響を受ける材

料の1つと考えられている¹⁻³⁾。実験では膜厚25 μ mのポリイミドフィルム(商標名Kapton-H)に2, 5, 50eVの原子状酸素を 3.5×10^{21} atoms/m²照射し, その表面の変化をXPSを用いて解析した。本実験によってXPSで得られたC1s, O1sスペクトルをピーク分離した結果とGolubらによって報告されているSTS-8によるLEOでの曝露サンプルのXPS分析結果⁷⁾は非常に似かよったものとなり, LEOと同様の反応が実験室で再現できたことを示している。またイオンビーム型およびレーザーブレードダウン型原子状酸素発生装置を用いて原子状酸素を照射した場合, ポリイミド表面ではPMDAの減少とケトン基(RR-C=O)の形成が顕著であることが示された。これらの解析結果からポリイミド薄膜の原子状酸素による劣化は主としてPMDAの部分で主鎖の酸化, 切断が生じることによるものであるという結論を得た⁸⁾。この解析結果は1993年6月にNASAとNASDAから公表されたEOIM-3(1992年8月にSTS-46, U.S.S. Atlantisにて打ち上げ)の解析結果と一致するものであった⁹⁾。ポリイミド薄膜の場合, LEOでは表面形状が大きく変化するにもかかわらず, 照射前後でのXPSスペクトルにあまり差が見いだせないことから, 酸化速度よりもスパッタアウトされる速度の方が大きいのではないかと推察される。今後, ポリイミドフィルムの質量変化をin-situかつ高精度で測定することにより, 酸化速度とスパッタリングイールドの運動エネルギー依存性を明らかにすることがポリイミドのLEOでの表面反応を理解する上で重要になるものと思われる。

4. おわりに

以上, 宇宙用材料が軌道上で原子状酸素によって受ける劣化を模擬するためのグラウンドベースの原子状酸素発生装置とこれまでに得られた2, 3の結果について紹介した。LEO環境として

は原子状酸素の他にも真空紫外線や放射線, 電磁環境, スラスタファイヤリングやフラッシュエバポレーター等による粒子環境など多くの要素がある。これらを総合的に取り扱う飛翔体環境科学と呼ばれる学問分野は未だ研究の緒に付いたばかりである。この分野の研究は宇宙用材料の選定や科学計測のデータ解釈等の理工学的な応用だけにとどまらず, プラズマ物理, 天体物理など科学的研究としての側面をも有している。今後, 新たな発見をも含めて多くの知見がこの分野から得られ, 人類の宇宙進出を支える基盤的学問として社会的な役割を果たすようになるであろう。

参考文献

- 1) Peters P. N., Linton R. C. and Miller E. R., Geophysical Research Letters Vol. 10, No.7, 1983, pp.569-571.
- 2) Zimcik D. G. and Maag C. R., Journal of Spacecraft and Rockets Vol.25, No.2, 1988, pp.162-168.
- 3) Leger L. J., Visentine J. T. and Schliesing J. A., AIAA paper 85-0476, Jan. 1985.
- 4) Papper S. V. (NASA Lewis Research Center), private communication.
- 5) Tagawa M, Tomita M, Umeno M and Ohmae N, AIAA Journal, accepted for publication.
- 6) Wheeler D. R. (NASA Lewis Research Center), private communication.
- 7) Golub M. A., Wyderen T. and Cormia R. D., Polymer Communications, Vol.29, No.10, 1988, pp.285-288.
- 8) 田川雅人ら, 第9回宇宙ステーション講演会講演集, 日本航空宇宙学会, 東京, (1993-4) pp121.
- 9) EOIM-3 成果報告会資料(1993).