

原子状酸素地上試験の高精度化について

神戸大学 横田久美子、岸田和博、田川雅人

Accuracy of Atomic Oxygen Ground-Based Experiment

Kobe University, Kumiko Yokota, Kazuhiro Kishida, Masahito Tagawa
-Email: yokota@mech.kobe-u.ac.jp

Abstract: An atomic oxygen beam created by the laser detonation beam facility cannot fully simulate the atomic oxygen conditions in low earth orbit. Difference in conditions of atomic oxygen causes uncertainty of evaluation on the reaction efficiencies of materials. Experimental methods to increase the accuracy of atomic oxygen ground testing are presented.

Key words: Atomic Oxygen, Ground-based Experiment, Accuracy

1. はじめに

宇宙機の表面には多くの機能性材料やシステムが実装されている。これらの材料やシステムは宇宙環境からの影響を直接受ける。低地球軌道(LEO)において、最も影響の大きな宇宙環境因子は原子状酸素である。化学的に活性な原子状酸素が高速(相対衝突速度 7.4 km/s)で衝突することで、酸化反応を誘起し、多くの高分子材料が劣化することが知られている[1]。原子状酸素による宇宙機熱制御材の劣化現象を地上試験するためには、現在レーザーデトネーション方式の原子状酸素発生装置が用いられており、その試験方法については ASTM において定められている[2]。しかしながら、本方式で生成される原子状酸素環境は実宇宙環境と異なっている点があり、近年、その差異が地上実験結果に影響を与えていることが明らかになってきた。FEP テフロンは ASTM Standard ではポリイミドと並びリファレンス材料と位置づけられているが、両者を比較した地上試験では、FEP はポリイミドに較べて宇宙実験の 100 倍を超える相対的な増速劣化が観察されている[3]。この現象は、地上実験では実宇宙環境に較べて FEP が増速劣化しているのか、ポリイミドの劣化が抑制されているのか、あるいはその両方なのか、はっきりした結論は得られていない。これは原子状酸素の絶対量を計測する方法が確立されていないためである。現段階で唯一確かなのは、宇宙環境での材料劣化現象は地上実験装置では完全には模擬できないという事実のみである。

このような現状を打破するためには実際の宇宙環境と地上試験環境の質的な差異を明確にした上で、地上試験の高度化を推進する以外に方法がない。これは宇宙曝露試験を独自に回収する手段を持たない日本にとって唯一の方法である。

本研究では、レーザーデトネーション型原子状酸素環境地上実験装置を用いた地上試験の高度化の方法論について考察する。なお、レーザーデトネーション型原子状酸素環境地上実験装置については、

田川による記述[4]があるので、ここでは割愛する。

2. 原子状酸素環境：宇宙と地上の差異

LEO 上での原子状酸素は、酸素分子が太陽からの紫外線により解離して生成したもので、高度 100-800 km 程度の地球高層大気の主成分である。国際宇宙ステーションが周回する高度 400 km 程度では、その密度は 10^9 atoms/cm³ 程度であるが、宇宙機の軌道速度が大きいと、表面への流量は 10^{14} atoms/cm²/s に達し、多くの高分子は 1 μm/day にも達する膜厚減少を示す。この原子状酸素と熱制御材との軌道上での化学反応の条件をまとめると以下のようなになる。

大気組成： O (90%) + N₂ (10%)

電子状態： O(³P)

衝突速度： 7.4 km/s

衝突方向： RAM 方向

フラックス： 10^{14} atoms/cm²/s

紫外線： 太陽紫外線 (昼間のみ)

このうち、フラックスは軌道高度で大きく変動する。これに対して、レーザーデトネーション法を用いた場合の原子状酸素照射条件をまとめると、

ビーム組成： O (50-90%) + O₂ (balance)

電子状態： O(³P)

平均速度： 7.4 km/s

衝突方向： 開き角 10 度のビーム

フラックス： 10^{14} atoms/cm²/s

ただし、パルスビーム

紫外線： 酸素プラズマに起因

イオン： 1%以下

となる。これらの条件を比較した場合、反応場を非常に良く再現していることがわかる。実際にこの装置を用いて、原子状酸素を高分子材料に照射した場合、shag carpet structure と呼ばれる独特の表面形状を宇宙同様に再現できることが知られており、これまで低軌道原子状酸素環境の地上シミュレーション方法として、日米欧で広く用いられている。

しかしながら、レーザーデトネーション法を用いた場合の原子状酸素照射条件は、いくつかの点で実宇宙環境とは条件が異なる部分がある。列举すると、

- a. 原子状酸素並進エネルギー分布幅
- b. 酸素分子の存在
- c. 高エネルギーイオンの存在
- d. 紫外線のスペクトルと強度
- e. パルスビーム（瞬間的な原子状酸素密度）

などである。このうち、原子状酸素並進エネルギー分布幅、酸素分子の存在、高エネルギーイオンの存在の3つは、実宇宙環境には存在しない高エネルギー粒子が地上実験中の化学反応へ寄与する可能性を与えるもので、衝突励起化学反応においては、Collision-induced desorption など材料損失に直接関わる反応経路を開き、定量性の低下につながる[5]。また、紫外線のスペクトルと強度は光化学反応を引き起こし、酸素原子の存在による自動酸化反応を誘起する可能性がある。一方、パルスビームによる瞬間的な原子状酸素密度の上昇は、瞬間的な表面酸素原子密度を宇宙環境の1000倍以上にしてしまうことから、原子状酸素の再結合反応に大きな影響を及ぼすと考えられる。

これら実験条件の差異は、今まであまり省みられてこなかったが、田川の発表[4]にもあるように、材料劣化反応をもとに宇宙環境を測定する衛星搭載用センサーなどの地上キャリブレーションに影響を及ぼすことから、高精度な宇宙環境計測には解決すべき問題である。そのため、原子ビームの並進エネルギー分布を小さくする高速メカニカルチョッパー等の利用[8]が考えられるが、紫外線や放射線など他の環境要因も実際の宇宙環境に近づける工夫が必要である。さらに超低高度衛星では原子状酸素フラックスも軌道上環境の1/10程度しか地上では再現できず、少ない照射量から軌道上での変化を推定する必要がある。物理化学的なバックグラウンドに裏打ちされた酸化モデルを構築することが影響評価には不可欠である。

3. 材料による差異

材料が異なれば、宇宙環境因子に対するレスポンスも異なる。その代表例が、前述のFEPテフロンである。この現象には原子状酸素の運動エネルギー分布や酸素分子の存在、イオン、紫外線などの効果が強く影響しているものと考えられている。高速チョッパーを用いて原子状酸素の速度分布幅（エネルギー分布幅）を小さくしたビームを用いて、FEPテフロンの質量減少に対する衝突エネルギーの効果を実時間計測した結果、フッ素系高分子と原子状酸素との反応効率は並進エネルギーに強く依存しており、6eV以上の並進エネルギーで原子状酸素が衝突すると急激に反応が進行することが明らかになっている[8]。このようなフッ素系モノマーと

原子状酸素とのエネルギー依存性は Troya らによる第一原理計算の結果[9]からも予測されたものである。

また、チョッパーを用いて酸素プラズマからの紫外線のみを遮断した場合、若干の反応レートの低下は認められたことから、通常ポリイミドでは無視される紫外線単独での光分解もFEPテフロンでは無視できないことが示されている。

4. 結言

宇宙環境シミュレーション分野で低軌道原子状酸素環境模擬に用いられているレーザーデトネーション型原子状酸素発生装置で生成される原子状酸素環境は、厳密には宇宙環境とは異なる。宇宙実験と地上実験における不整合は、これらの差異が材料表面での化学反応に影響を及ぼしているためである。現状の技術レベルでは宇宙環境を正確に実験室レベルで再現することは不可能であるため、これら実験環境の差異が実験結果に与える影響をモデル実験等により定量的に評価して、熱制御材など実際の材料実験結果に反映させることが必要となる。

REFERENCES

- [1] "宇宙環境利用のサイエンス", 井口洋夫監修、岡田益吉、朽津耕三、小林俊一編集、分担執筆、裳華房、東京、2000, pp.222.
- [2] ASTM E2089-00 Standard practices for ground laboratory atomic oxygen interaction evaluation of materials for space applications (2006).
- [3] B. Weihs, M. van Eesbeek, "Secondary VUV erosion effect on polymers in the ATOX atomic oxygen exposure facility", Proc. 6th International Symposium on Materials in a Space Environment, ESA SP-368, 1994, pp.277.
- [4] 田川雅人, 岸田和博, 横田久美子, 第26回宇宙利用シンポジウム, 講演番号M41 (2010)
- [5] T. K. Minton, J. W. Seale, D. J. Garton, J. Zhang, in Evolving and Revolutionary Technologies for the New Millennium, 44th International SAMPE Symposium and Exhibition, (1999) pp.1051.
- [6] M. Tagawa, K. Yokota, K. Kishida, A. Okamoto, "Origins of the accelerated erosion of fluorinated polymer in a laser-detonation ground-based atomic oxygen facility", Proceedings of the 11th International Symposium on Materials in Space Environment, Aix-en-Provence (2009) on CD-ROM.
- [7] D. Troya, G. C. Schatz, Theoretical study of reactions of hyperthermal O(³P) with perfluorinated hydrocarbons, Protection of Materials and Structures from Space Environment, J. I. Kleiman Ed., Springer, Leiden, The Netherlands, 2006, pp.365.