

衛星搭載用原子状酸素センサーのキャリブレーション法について

神戸大学 田川雅人、岸田和博、横田久美子

Calibration of Atomic Oxygen Sensors aboard Satellites

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

Abstract: Calibration of atomic oxygen sensor directly affects the accuracy of atomic oxygen fluence measured. Since atomic oxygen sensing is performed based on the material degradation by gasification reaction of solid materials, gasification rate of the material has to be carefully calibrated by the ground-based atomic oxygen facility. However, the atomic oxygen beam created by the laser detonation beam facility cannot fully simulate the atomic oxygen conditions in low earth orbit. Some points where should be considered on the calibration procedure are focused in this presentation.

Key words: Atomic Oxygen, Sensor, Calibration

1. はじめに

高度200km以下の超低軌道領域を開拓するための障害は非常に高い原子状酸素密度である。その影響を確認するため、超低高度技術試験機(Super Low Altitude Test Satellite: SLATS)では原子状酸素フラックス計測用センサーが開発される予定である[1]。また、世界的にも低軌道環境の原子状酸素計測を目的としたいくつかの衛星搭載用センサーの開発が進められている[2]。これらのセンサーはいずれも原子状酸素が特定の材料と反応して酸化物を形成することにより、材料特性に変化が生じることを検出するものである。したがって、軌道上の原子状酸素環境のもとで、材料と原子状酸素が反応する効率をあらかじめ規定しておく必要がある。そのための地上試験は原子状酸素照射装置を用いて行われるが、その原子状酸素環境は軌道上と必ずしも同じではない。その質的な差を考慮した上で、軌道上での材料の反応効率を規定する必要があるが、その方法論や考え方については十分考慮されているとは言えない。

そこで本研究では衛星搭載用原子状酸素センサーの地上キャリブレーション法について考察し、具体的な方法を提案する。

2. 原子状酸素環境地上模擬実験装置

原子状酸素地上試験に用いられるレーザーデトネーション原子状酸素環境模擬実験装置は、炭酸ガスレーザーとパルスバルブの組み合わせにより、軌道上における宇宙機との相対衝突速度をほぼ再現した上で、高フラックスの原子状酸素パルスを生成できる。本システムはレーザー推進の原理を応用したもので、米国 Physical Sciences Inc.により開発されたことから、PSI型原子状酸素発生装置とも呼ばれている[3]。図1には神戸大学で使用しているレーザーデトネーション原子状酸素環境模擬実験装置の写真を示す。このタイプの原子状酸素発生装置

は国内では現在のところ宇宙航空研究開発機構で1台と神戸大学で2台が稼動状態である。本装置が作り出す原子状酸素環境は、現在利用可能な技術としては最も現実の宇宙環境に近いものである。軌道上と同じ材料との衝突速度8km/sを実現でき、かつフラックスもほぼ軌道上の値に近い(ただし後者は高度による差が大きい)。実宇宙環境との違いを明確にするためには、発生させた原子状酸素ビームのキャラクタリゼーションが重要である。そのため、神戸大学の装置では原子状酸素ビームの組成と速度分布を238cm後方に設置された四重極質量分析管とシンチレーション検出器で解析できる[4]。

3. 模擬原子状酸素環境と実宇宙環境の差異

レーザーデトネーション原子状酸素発生装置で生成する模擬原子状酸素環境と低軌道における実際の原子状酸素環境との差異はセンサーのキャリブレーションを行う上で十分認識しておく必要がある。まず、第1のポイントは原子状酸素の衝突エネルギーである。プラズマアッシャー装置のように平均エネルギーが実際の環境と異なれば、温度依存性[5]や反応効率等が実際の宇宙環境と全く異なる

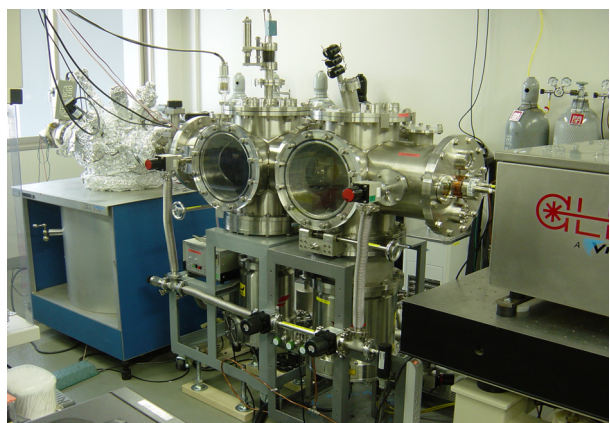


図1 神戸大学のレーザーデトネーション型原子状酸素環境模擬実験装置

ことが知られている。特に、Yokota らにより報告されているように、ポリイミドの反応効率は原子状酸素の運動エネルギーに敏感であるため[6]、衝突エネルギーが 5 eV からずれると、実際の宇宙環境と反応効率が異なる。また、平均エネルギーが同一でもエネルギー分布が異なれば、高エネルギーあるいは低エネルギー成分の寄与が無視できない。実際に、地上実験装置内での原子状酸素ビームの運動エネルギー分布は軌道上での運動エネルギー分布よりも大きいことが知られている。ポリイミドでは 8eV 以上の高エネルギー粒子が衝突した際に衝突励起脱離反応により見かけの反応効率が大きくなることが報告されている[7]。その他にも、酸素プラズマからの極端紫外線による光分解効果、酸素原子以外の粒子と寄与、ビーム中のイオン反応の寄与など多くの要素が材料の質量減少反応に影響を与える。これらの紫外線、中性粒子、イオンなどは、いずれも実際の宇宙環境にも存在する環境因子であることから、地上試験装置内と実宇宙環境との定量的な環境比較と、それが材料質量減少反応に与える影響を評価することが必要である。さらにこれらの環境因子が同時に作用した場合の複合照射効果（シナジー）にも注意する必要がある[8]。

4. キャリブレーション方法

現状の原子状酸素地上試験装置を用いて、可能な限り正確な衛星搭載用原子状酸素センサーのキャリブレーションを行う方法としては以下の手順に従うことが推奨される。

- a. グリッドを使いイオンを除去
- b. チョッパーにより紫外線を除去
- c. チョッパーによりエネルギー分布を狭域化
- d. N₂衝突を模擬するために Ne あるいは Ar ビーム（あるいは酸素との混合ビーム）を照射
- e. シナジー試験（主として紫外線）

これら一連の実験を行い、イオン、紫外線、高エネルギー原子状酸素、中性ガス成分の効果を定量的に評価することが必要である。そのために衛星搭載用原子状酸素キャリブレーション装置には阻止電位用グリッド、高速チョッパー、紫外線源、さらにリアルタイムで質量減少レートを測定できる水晶振動子マイクロバランス等が具備されていることが必要となる。これらのシステムは既に神戸大学では実用化されているが、多くの材料に一度に原子状酸素照射試験をするスクリーニング試験には適用することが困難である。まず、原子状酸素センサーの精度に直結するリファレンス材料に対する詳細研究から行うことが現実的である。

5. おわりに

現状の原子状酸素環境地上試験は、実宇宙環境とは異なる条件で行われており、それが衛星搭載用センサーのキャリブレーション結果に影響を与え、精度低下を引き起こす。地上試験環境と実宇宙環境の差異を明確にし、実験環境の差異を考慮したセンサーキャリブレーション手法を導入することで、センサーの精度を補償することが可能である。

参考文献

- [1] 白杵茂、五十嵐伸明、今村俊介、野田篤司、歌島昌由、安光亮一郎、山田浩之、首藤和雄：超低高度衛星技術試験機SLATSについて、第53回宇宙科学技術連合講演予稿集、(2009) on CD-ROM.
- [2] Osborne, J. J., Roberts, G. T., Chambers A. R., Gabriel, S. B., Review of Scientific Instruments, **70** (1999) pp.2500-2506.
- [3] Caledonia, G. E., Krech, R. H., Green, D. B.: A high flux source of energetic oxygen atoms for material degradation studies, AIAA Journal, Vol.25, No.1, (1987) pp.59-63.
- [4] Tagawa, M., Yokota, K., Kishida, K., Okamoto, A., Ishizawa, J., Minton, T. K.: Effect of ultraviolet emission from the oxygen plasma on the accelerated erosion phenomenon of fluorinated polymer in the atomic oxygen ground tests, High Performance Polymers, (2010) in press.
- [5] Yokota K., Tagawa M., Ohnae N.: Temperature dependence in erosion rates of polyimide under hyperthermal atomic oxygen exposures, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.40, No1 (2003) pp143-144.
- [6] Yokota, K., Tagawa, M.: Erosion properties of PMDA-ODA polyimide as a reference material for atomic oxygen fluence monitoring, The 27th International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, Japan, (2009) on CD-ROM.
- [7] Zhang, J., Garton, D. J., Minton, T. K.: Reactive and inelastic scattering dynamics of hyperthermal oxygen atoms on a saturated hydrocarbon surface, J. Chem. Phys., Vol.117 (2002) pp.6239-6251.
- [8] Yokota K., Ohnae N., Tagawa M.: Enhancement of atomic oxygen-induced erosion of spacecraft polymeric materials by simultaneous ultraviolet exposure, Protection of Materials and Structures from the Space Environment, Ed. J. I. Kleiman, Springer, Dordrecht, 2006, pp.141-152.