

低軌道宇宙環境下での材料曝露試験高度化のための原子状酸素収束化技術の開発

神戸大学 田川雅人、横田久美子

Atomic oxygen concentrators for advanced material exposure tests in LEO space environment

Masahito Tagawa and Kumiko Yokota

Kobe University, Rokko-dai, Nada, Kobe, Hyogo 657-8501

E-Mail: tagawa@mech.kobe-u.ac.jp

Abstract: Atomic oxygen concentrator was designed and tested in order to increase the atomic oxygen flux. In the ground test using laser detonation atomic oxygen source, which gave intense atomic oxygen beam pulse, the concentration factors of 2-3 are obtained. However, it is suggested that the low concentration factor observed is due to the recombination reaction of atomic oxygen into molecular oxygen by the high peak flux in the pulsed atomic oxygen beam. The flux-limit of concentration factor is not a case in real low earth orbit space environment, and the concentration factor over 40 is expected in the real low Earth orbit atomic oxygen condition.

Key words; Atomic oxygen, Concentration, Material Exposure Test, Space Environmental Effect,

はじめに

低地球軌道（LEO）上に存在する原子状酸素は極めて活性であり、宇宙用材料に対する影響が大きいことから、ESEM、SM/SEEDをはじめとして、軌道上材料曝露試験が行われてきた。しかし、これまで宇宙環境要因を人為的に制御する技術はなく、軌道上加速環境試験は不可能であった。そこで本研究では軌道上において原子状酸素フラックスを増加できる収束器を開発し、軌道上加速試験の実現、コンタミネーションリスクの低減、原子状酸素を酸化剤として利用する新たな応用技術の展開、を目標とした実験をおこなった。そのために、最適設計のための原子状酸素散乱シミュレーションコードの作成、地上実験装置を使った原子状酸素収束器の試作と評価、実験データから演繹した軌道上での性能見積り、の3つのステップにより、軌道上で使用可能な原子状酸素収束器の設計方針の確立とその基本性能の推定を行った[1-3]。

原子状酸素散乱シミュレーション

原子状酸素の反射面での散乱特性を記述するモデルとして Hard-Cube Model を用いた計算を行った。Hard-Cube Model は、立方体で構成される表面と、剛体球である入射分子との弾性衝突を考慮する表面散乱モデルで、入射粒子の質量、平均運動エネルギー、入射角、温度、表面原子の有効質量をパラメーターとして散乱分子の平均反射角を算出することができる。このうち、表面原子の有効質量は経験的に決定する必要があるが、Minton らにより報告されている Si - F 系の実験データと比較することによって決定した。計算結果は単純な系での実験により検証を行い、実験結果を再現できることを確認した。

原子状酸素収束器

高効率の原子状酸素収束器を実現するためには、原子状酸素を収束点方向に偏向すると同時に、酸素分子への再結合反応を抑制する必要がある。収束器内部での原子状酸素の再結合を抑えるためには、収束点付近での過度の密度上昇を防ぐと同時に、反射面での原子状酸素の再結合を抑える材質の選定、ならびに反射回数の低減が重要である。本研究では、直径の異なる数種類のリング状反射表面を組み合わせることにより、原子状酸素密度の高い収束点付近に固体表面が存在せず、かつ反射面との1回の衝突で収束点へ反射する多重リング型収束器を設計した。本収束器の直径は 72mm、焦点位置は入射面から 50 mm であり、理論的な収束倍率は 64.5 倍である。Hard-Cube Model を用いて、本器の反射板表面での散乱方向を計算した結果を Fig.1 に、また、試作した収束器のカットモデルを Fig.2 に示す。

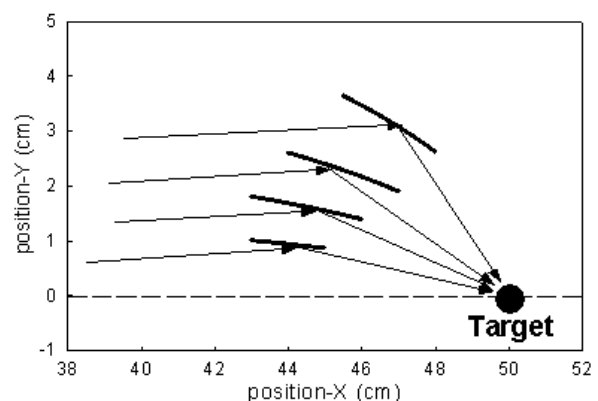


Fig.1 Trajectories of scattered atomic oxygen at the concentrator surfaces.

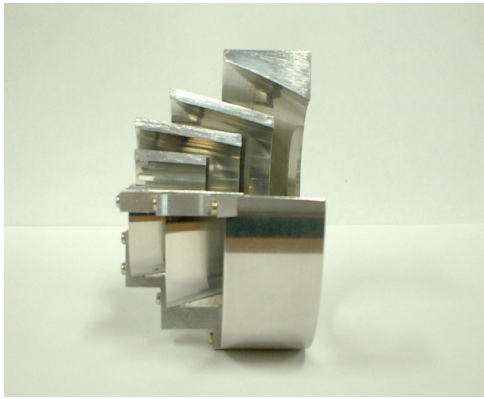


Fig.2 Multiple ring-type concentrator

実験結果

原子状酸素環境を模擬するために用いた原子状酸素発生装置はレーザーデトネーション方式と呼ばれるもので、低軌道における宇宙機と原子状酸素の相対衝突速度 8 km/s を地上で再現することができる。多重リング収束器のフラックスによる収束特性の変化を調べた結果、Fig.3 に示すように、収束倍率は入射フラックスが減少するにつれて大きくなり、収束倍率は酸素原子間での再結合反応により律速されていることが確認された。この解析結果から、原子状酸素間の再結合による制限がなければ、多重リング収束器の収束倍率は約 40 倍（収束効率 62%）に達するものと推定された。

今回の地上評価実験と低軌道における原子状酸素環境の最も大きな相違点は原子状酸素フラックスの脈動である。本実験で使用したレーザーデトネーション型原子状酸素発生装置はパルス状の原子状酸素を発生するが、宇宙環境では原子状酸素フローは連続的であるため瞬間的なフラックスには差異が生じる。軌道上での原子状酸素フラックスは本実験における試料位置での瞬間的な値より約 4 桁小さいことから、軌道上での瞬間フラックスでは原子状酸素の再結合反応は無視できると思われる。

結論

以上の結果より、本研究で試作した原子状酸素収束器を実際の低軌道宇宙環境で使用した場合には、その収束倍率は 40 倍に達するものと推定される。地上における連続フローの原子状酸素発生装置では低軌道での相対衝突エネルギーを模擬できないことから、地上実験装置を用いたこれ以上の本収束器の評価実験は困難である。

本研究の結果をうけて、「きぼう日本実験棟船外

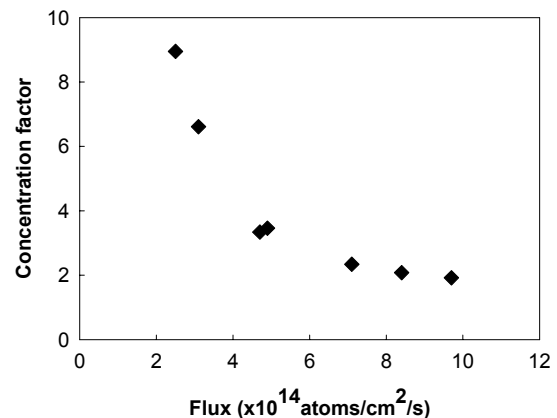


Fig.3 Concentrate factors as a function of atomic oxygen flux.

プラットフォーム第 2 期利用に向けた候補ミッション」での軌道上実証試験を提案したが、不採択に終わった。現在では、本研究の結果を極低軌道用イオンエンジンの開発や次世代軌道上材料曝露試験へ応用することにより、新たな宇宙工学の発展を目指している。

謝辞

本研究は日本宇宙フォーラム平成 17 年度宇宙環境利用に関する公募地上研究の支援により行われたものである。

参考文献

1. “Atomic oxygen concentration using reflecting mirrors”, Tagawa M., Matsumoto K., Doi H., Yokota K. Ohmae N., Protection of Materials and Structures from the Space Environment, Ed. J. I. Kleiman, Springer, Dordrecht, 2006, pp.417.
2. “Atomic Oxygen concentration for material exposure acceleration tests in low earth orbit”, Tagawa M., Doi H., Yokota K., Proceedings of 10th International Symposium on Materials in Space Environment, 8th International Space Conference, Protection of Materials and Structures from the LEO Space Environment, Collioure, France, June 19-23, ESA-SP616, 2006, in CD-ROM.
3. “Computer simulation and its experimental verification of atomic oxygen concentration”, Tagawa M., Matsumoto K., Doi H., Yokota K., J. Spacecraft and Rockets, Vol.43, No.5 (2006) 999.