

惑星高層大気環境模擬のための複合分子線実験装置の構築と 評価

Development of a pulsed supersonic valve system aimed for upper atmospheric simulation

○大倉 僚太 (神戸大学), 藤本 友介 (神戸大学), 北 一貴 (神戸大学),
岩田 稔 (九州工業大学), Chee Sze Keat (メカノトランスフォーマー), 木本 雄吾 (JAXA),
横田 久美子 (神戸大学), 田川 雅人 (神戸大学)

Ryota Okura (Kobe University), Yusuke Fujimoto (Kobe University), Kazuki Kita (Kobe University),
Minoru Iwata (Kyushu Institute of Technology), Sze Keat Chee (Mechano Transformer Corp.),
Yugo Kimoto (JAXA), Kumiko Yokota (Kobe University) and Masahito Tagawa (Kobe University)

Abstract: The upper Martian atmosphere mainly contains carbon dioxide (CO₂) and atomic oxygen (AO) depending on the altitude. Spacecraft orbiting in the Martian upper atmosphere encounters high-energy collision with these molecules. In order to evaluate a risk of material erosion possibility in Martian orbit, a method for ground-based Martian atmospheric simulation was investigated. A laser-detonation hyperthermal beam source was applied and a new pulsed supersonic valve (PSV) system was developed for the Martian atmospheric simulation experiments. Two PSVs were equipped with a nozzle in order to increase freedom of formation of hyperthermal beam with mixture of two types of gases. It is expected that two molecular beams are formed individually with this system.

Key Words: *pulsed supersonic valve, atomic oxygen, Martian atmosphere, material degradation, carbon dioxide*

1. 緒言

惑星高層大気において、原子状酸素(Atomic Oxygen: AO)による高エネルギー衝突が宇宙探査機の表面材料に著しい劣化を引き起こすことが知られており、この劣化挙動を明らかにする必要性が指摘されている。地上試験¹⁾や実機試験²⁾により、多くの材料劣化に関する研究が行われてきたが、最近の研究より、低地球軌道(Low Earth Orbit: LEO)における材料劣化は、AOの衝突だけではなく、科学的に不活性な分子の高エネルギー衝突によっても引き起こされることが明らかになりつつある³⁾。

地球周回軌道における大気組成は、高度によって異なるが、AOやN₂が中心である。一方、火星周回軌道においては、AOやCO₂が中心である⁴⁾。火星探査機はこれらの分子と約4 km/sで衝突するが、エアロブレーキング初期段階では衝突速度は8 km/s以上に達する。この高速度衝突により、化学的には不活性であるが、質量の大きなCO₂の衝突エネルギーが非常に大きくなり、地球軌道上とは異なる

材料劣化が生じる可能性がある⁵⁾。そこで本研究では、既存のレーザーデトネーション型分子ビーム照射装置に新たに開発したパルスバルブ(Pulsed Supersonic Valve: PSV)を組み合わせ、その評価を行う装置の構築と評価を行った。

2. 火星高層大気

地球と火星では高層大気の組成は大きく異なる。LEOでは主に、高度800 km以上ではH₂、200~800 kmではAO、200 km以下ではN₂により構成される。図1にマリナー6号や7号などの観測データや、ハッブル宇宙望遠鏡による光学観測データをもとに作成された、火星大気の鉛直密度分布モデルを示す⁵⁾。図1より、火星高層大気は主に、高度250 km以下ではCO₂、高度250 km以上ではAOにより組成されることが分かる。火星探査機は、主にAOにより組成される高度300~500 kmを飛行するが、エアロブレーキング時にはより低い高度を通過する。火星探査機の定常周回速度は3.5 km/sであり、AOとの平均衝突エネルギーは1 eVとなり、LEOにおけるAO

との平均衝突エネルギー(5 eV)より小さい。しかし、エアロブレーキングの初期段階では速度は6 km/sであることから、O₂の平均衝突エネルギーは7 eVに達するため、AOの衝突エネルギーよりも大きくなる。

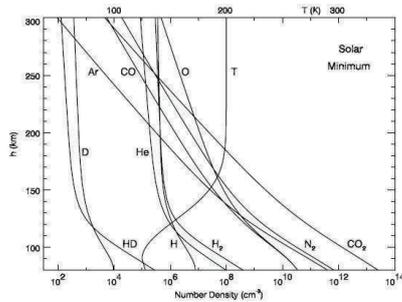


図1 火星大気鉛直密度分布モデル⁵⁾
Tは温度を示す。(上目盛)

3. 実験機器および実験方法

3.1. PSV

本研究では、火星高層大気のシミュレーションを行うために、新型のPSVを開発した。図2に本研究において新たに開発したPSVを、図3にはこのPSV2個を1つのノズルに装着したデュアルPSVシステムの外観を表している。これまで本グループで使用していた米国製のPSV⁶⁾は直径が72 mmであるのに対し、新型PSVは厚さが42 mmと薄くなったため、図3のように、1つのノズルに2つの新型PSVを取り付けることが可能となった。新型PSVには、変位拡大機構が組み込まれていることで、動作電圧が150Vに抑えられており、ピエゾの損傷を防止している。2つの新型PSVは独立に調整可能であるため、ノズル内のガス組成や密度を変化させることが可能になり、レーザープラズマ内でのCO₂の解離を抑制できる可能性がある。本装置は、火星高層大気シミュレーション実現へ大きな進歩をもたらすだけでなく、近年研究が活発となっているLEOより低高度のsub-LEOのシミュレーションで必要となるN₂の解離の抑制にも有効である。⁷⁾



図2 本研究で試作した新型PSVの外観



図3 デュアルPSV

4. 実験結果および考察

4.1. ガス導入タイミング可変実験

ビームライン中に設置された四重極質量分析管(QMS)によりガス分子の飛行時間スペクトル(TOFスペクトル)を計測し、デュアルPSVシステムの性能評価を行った。それぞれの新型PSVから、0.5MPaのArとO₂を個別に導入し際のArおよびO₂ビームのTOFスペクトルを図4に示す。TOFスペクトルにおいて、横軸は飛行時間、縦軸はQMSで計測された信号を表す。O₂、Arのガスのピークがはっきりと計測されていることから、それぞれの新型PSVからガスが正常に導入されることが確認できた。

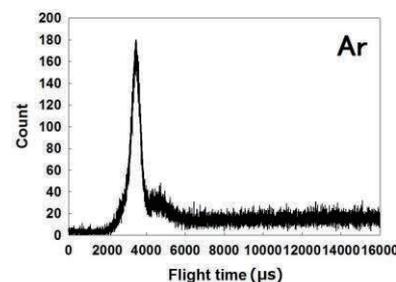
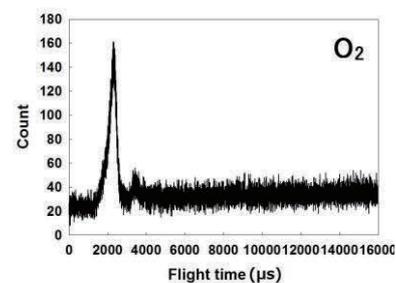


図4 デュアルPSVシステムで形成した分子ビームのTOFスペクトル

次に2つの新型PSVへの制御信号のタイミングを変化させ、導入されるガスの状態を観測した。図5に、本実験でのTOFスペクトルの一例を示す。先にO₂ガスを導入し、500 μs後にArガスを導入した。(a)の実験条件はPSV動作電圧が80 V (O₂)と130 V (Ar)、背圧が0.2 MPa (O₂)と0.6 MPa (Ar)である。一方、(b)はPSV印加電圧が105 V (O₂)と130 V (Ar)、背圧が0.3 MPa (O₂)と0.6 MPa (Ar)、ガス導入の時間差が750 μsである。いずれの場合もバルブ開放時間は300 μsに設定した。

分子ビームの平均熱速度は以下の式で表すことができる。

$$\frac{1}{2} \frac{M}{N_A} v^2 = \frac{3}{2} kT \quad (1)$$

分子量が大きいため、Arの平均速度はO₂より12%程度遅くなる。図5 (a)(b)において、O₂のピークは3150 μsに現れている。Arのピークは (a) では4100 μsあたりと5000 μsあたりの2ヶ所に、(b) では5500 μsあたりにのみ小さいものが現れている。(1) 式より、Arのピークは4030~4380 μsあたりに現れると予想できる。理論と同じ速度のArは(a)でのみ小さいピークが観測される。このことは先に導入されノズル内に存在するO₂により、後から導入されるArの導入が妨げられることが示唆されている。

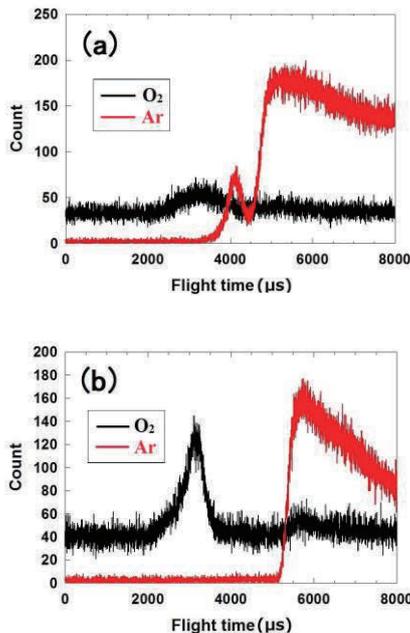


図5 時間差 ΔT=500μs、750μsでO₂、Arを導入した際のTOFスペクトル

- (a): O₂ 80V (0.2MPa), Ar 130V (0.6MPa), ΔT=500μs
- (b): O₂ 105V (0.3MPa), Ar 130V (0.6MPa), ΔT=750μs

4.2. デュアルPSVによる超熱分子ビームの生成

様々なレーザー照射条件においてCO₂レーザーパルスを導入し、超熱分子ビームの生成を試みた。図6にレーザーディレイ(L.D.) = 900 μsにおけるO₂、O、ArのTOFスペクトルを示す。これまでの実験と同様、O₂ガスの後にArガスを導入した。また、本実験において、レーザーパルスは横軸で350 μsに導入されている。800 μsに現れているArのピークはArの超熱分子ビームが生成されたことを示しているが、QMSではO₂やOの信号は感知できなかった。O₂とArのガスの導入の時間差は500 μsであるが、先に導入されたO₂分子はこの時間で250 mmの距離を飛行する。この距離はノズル長(100mm)より大きい。したがって、Arより先に導入されたO₂の大部分はレーザーパルスが導入された時には既にノズルから拡散したため、本実験の条件ではAOの超熱分子ビームが生成されなかったものと思われる。

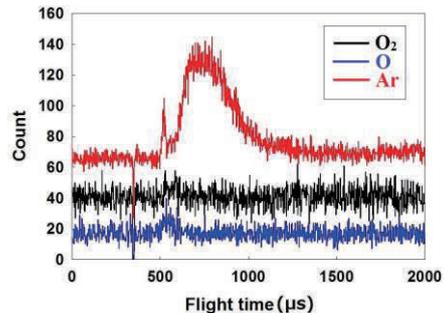


図6 超熱分子ビームのTOFスペクトル

4.3. 極端紫外線分光

デュアルPSVを用いて超熱分子ビームを生成する際に、レーザープラズマから発生する極端紫外線の波長を、斜入射型極端紫外線分光器⁸⁾を用いて測定した。図7にL.D.= 500 μsにおけるEUVスペクトル、図8にL.D.= 800 μsにおけるEUVスペクトルを示す。それぞれの実験条件はともに、PSV印加電圧が80V (O₂)と155 V (Ar)、背圧が0.2 MPa

(O₂)と0.3 MPa (Ar)である。ガス導入の時間差は500 μsである。計測されたピークとイオンに関する表を表1に示す。

2つのスペクトルを比較すると、図7のスペクトルではピーク値が飽和地に達しているため定量的な考察は不可能であるが、L.D.の増加に伴って全体的にピークが減少し、その中でもO⁺イオンのピークが顕著に減少した。一方、O⁶⁺やO⁷⁺のピークはL.D.の増加に伴って、微減または微増した。L.D.を増加させることでガスの導入からレーザーを照射するまでの時間が長くなり、Ar分子を加速しにくくなり、Ar分子のO₂分子への衝突エネルギーが低下する。そのため、O₂が解離し、イオン化が抑制されたものと思われる。また、L.D.の増加に伴ってO⁺イオンのピークが減少したことから、O⁺イオンは主にAr分子がO₂分子に衝突することによって生成されていることが示唆される。その一方、O⁺の多価イオンのピークが微減または微増したことから、O⁺の多価イオンはAr分子のO₂分子への衝突によって生成されたのではなく、O₂分子を解離させる別のプロセス(電子衝突による電離など)によって生成されたと考えられる。

表1 O⁺イオンに由来するEUVピーク

波長(mm)	イオン	波長(mm)	イオン
37.3	O ⁶⁺	39.6	O ²⁺
37.4	O ²⁺	40.1	O ⁺
37.6	O ⁺	40.6	O ²⁺
38.2	O ⁴⁺	40.8	O ⁷⁺

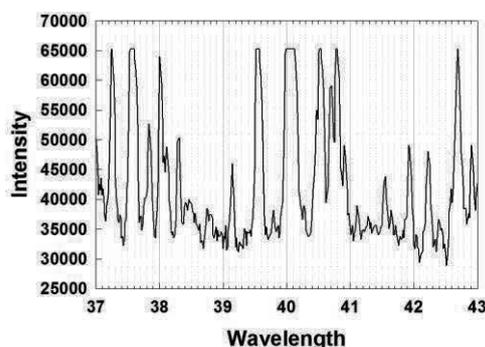


図7 O₂→Ar導入プラズマからのEUVスペクトル (L.D.=500μs)

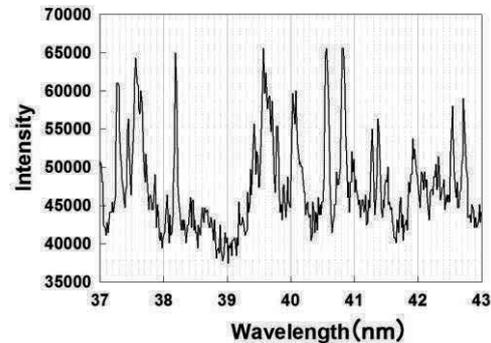


図8 O₂→Ar導入プラズマからのEUVスペクトル (L.D.=800μs)

5. 結言

本研究では火星高層における大気分子との衝突による探査機の表面材料の劣化現象を再現するため、デュアルPSVシステムの試作と評価を行った。本装置により、2つの新型PSVから2つのガスをそれぞれノズルに独立に導入することが可能になった。実験の結果、ガス導入は先に導入されるガスに強い影響を受ける(すなわち、分子衝突が無視できない)ため、デュアルPSVを用いることにより、ノズル内でのガス分子衝突を制御することで分子解離を促進、あるいは抑制できる可能性が示され、サイドプロダクトとしての多価イオン生成の制御などにも効果がある事が示された。

6. 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金#25289307、#26289322、#15K14252、#15K14253、および文部科学省宇宙航空科学技術推進委託事業「宇宙利用を支える宇宙材料劣化研究拠点の形成」の援助により行われたものである。

7. 参考文献

- 1). Tagawa, M., Ohyabu, T., Yasuda, S., Yokota, K., Okamoto, A.: *Impact of high-energy collision of inert gas on the material degradation in space environment –Erosion properties in the hyperthermal multiple composition beams*, 29th International Space Technology and Sciences, June 2-9, 2013.
- 2). Material Degradation Monitor on ExHAM,

https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/2015.html (2017年8月3日アクセス)

- 3). Yang, J. C., de-Groh, K. K.: *Materials research society*, Vol.35, No1, 12-19, 2010.
- 4). Krasnopolsky, V. A.: *Mars' upper atmosphere and ionosphere at low, Medium, and high solar activities: Implications for evolution of water*, Journal of Geophysical Research, Vol.107, No,E12, (2002) 5128.
- 5). Tagawa, M., Yokota, K., Kishida, K., Okamoto, A., Minton, T. K.: *Energy dependence of hyperthermal oxygen atom erosion of a fluorocarbon polymer: relevance to space environmental effect*, ACS Advanced Materials and Interfaces, Vol.2, No.7, 2010, pp.1866-1871.
- 6). 大倉僚太, ”惑星高層大気シミュレーションのための複合分子線システムの構築と評価”,神戸大学卒業論文(2017)
- 7). 安田茂, ”超低軌道宇宙環境における高質量不活性分子誘起材料劣化現象に関する研究”,神戸大学修士論文(2013)
- 8). T. Kita, T. Harada, N. Nakano, H. Kuroda, “Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grating-incidence spectrograph”, *Applied Optics*, Vol. 22, No.4 (1983), pp. 512-513.