

火星高層大気環境シミュレーションを目的とした超熱混合分子ビーム形成の基礎研究

○初田光嶺, 緒方雄介, 横田久美子, 田川雅人
神戸大学大学院工学研究科

Abstract

The upper Martian atmosphere mainly contains carbon dioxide (CO₂) and atomic oxygen (O) depending on the altitude. Spacecraft orbiting in the Martian upper atmosphere encounters high-energy collision with these molecules. In order to evaluate a risk for material erosion possibilities in Martian orbit, a method for ground-based Martian atmospheric simulation was investigated. A laser-detonation hyperthermal beam source was applied in this study and beam formation properties of hyperthermal CO₂ beam was explored. A chopper wheel system was used to narrow the width of collisional velocity distribution of the formed beam. It was made clear that hyperthermal CO₂ beam with collisional velocity of 6.3 km/s was successfully formed, however, it contained CO₂ fragment such as C, O, and CO. This result suggested that CO₂ molecules are partially decomposed in the laser-induced plasma. The hyperthermal beam thus formed was sliced by the chopper wheel system to reduce the width of the energy distribution.

1. 目的および背景

低地球軌道(Low Earth orbit: LEO)において、原子状酸素(Atomic oxygen: O)が宇宙機材料表面に高速で衝突することにより、材料劣化現象を引き起こすことが知られている。この現象を解明するため、これまで多くの地上試験、また宇宙空間での実環境試験が行われてきた。また、近年 O だけではなく、窒素(Nitrogen: N₂)のような化学的に不活性な分子の高速衝突も、LEO での材料劣化に関与することが指摘されている。これら化学的に不活性な分子の衝突効果を検討する上では、分子の衝突エネルギーが重要となる¹⁾。

一方、火星の大気組成は地球と大きく異なり、火星高層大気中の分子組成は二酸化炭素(Carbon dioxide: CO₂)、O が主体である²⁾。最近まで、これらの原子、分子が火星探査機材料に衝突することにより与える影響は小さいものとして無視されてきた。その理由として、火星大気中の O 密度は地球に比べ非常に小さいこと、CO₂ が化学的に不活性であり、その衝突は材料劣化に寄与しないと考えられてきたこと、火星探査機の軌道周回速度は 3.5 km/s と地球軌道周回速度に比べて遅く、原子、分子の衝突エネルギーも小さくなることなどが挙げられる。しかし、探査機の火星軌道投入時に行われるエアロブレーキ

ング(火星大気抵抗を利用した減速)において、火星探査機は O 及び CO₂ の密度がより高い低高度域を、6 km/s 以上の高速で何百回も通過することになる。さらには前述のように化学的に不活性な分子の衝突も材料劣化に関与することが指摘されるようになり³⁾、火星探査機と O、CO₂ との相対衝突による材料表面の劣化現象を解明する必要が生じてきた。現在の技術では火星からのサンプルリターンを行うことはほぼ不可能であることから、火星での実環境試験は難しく、劣化現象の解明は地上試験によって行う必要がある。しかしこれまで、このような火星大気分子と材料の衝突現象を模擬する地上試験技術は開発されていない。

したがって本研究では火星大気中における大気原子、分子と火星探査機の衝突による探査機材料劣化現象の解明を目的とし、火星高層大気環境を模擬する地上試験技術の開発を目指した。

2. 火星高層大気環境

火星高層大気中の分子組成は、地球高層大気とは大きく異なる。地球大気組成の主要な分子は高度 800 km 以上では水素(Hydrogen molecule: H₂)、200~800 km では O、そして 200 km 以下では N₂ となる。一方、

火星大気組成は O、CO₂ が主体である。Fig. 1 に火星高層大気中における大気分子の高度別組成を示す²⁾。Fig. 1 はハッブル宇宙望遠鏡(Hubble Space Telescope: HST)、マリナー6号、7号(Mariner 6 and 7)、遠紫外線分光探査機(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer: FUSE)の観測結果により得られたものである。高度 250 km 以下では CO₂ が主体であるが、高度が 250 km 以上になると O が主体となってくるのがわかる。火星探査機は通常高度 300~500 km を周回し、この時大気中では O が主体となる。探査機の軌道周回速度は 3.5 km/s であり、O の衝突エネルギーは 1 eV となる。これは LEO における O の衝突エネルギーである 5 eV より小さい。しかしエアロブレーキング中において、火星探査機は更に低い高度をより高速で飛行することとなる。一例としてアメリカの火星探査機、マーズグローバルサーベイヤー(Mars Global Surveyor: MGS)はエアロブレーキングの際、CO₂ が主要分子となる高度 120 km を飛行している。この時、探査機は速度は 6 km/s を超える。CO₂ は化学的に不活性な分子であるが、分子量が 44 と大きく、O に比べより高い衝突エネルギーを有する。エアロブレーキング時の CO₂ 衝突エネルギーは 8 eV に達し、LEO での O 衝突エネルギーより大きくなる。したがって、エアロブレーキング時の探査機材料表面と CO₂ の衝突現象を再現することが本研究において重要となる。

火星大気と探査機材料の衝突現象を再現する上では、大気分子の衝突速度分布も重要となる。Fig.2 及び Fig.3 はそれぞれ、火星大気中と従来の地上試験法により形成されたビーム中の CO₂ 及び O の材料への衝突速度分布を示している。火星高層大気分子の分子温度は 350 K - 400 K であり、地球の 1500 K に比べ低くなっており、火星軌道での分子衝突速度分布は LEO に比べ狭くなる。実線で示された火星大気分子の衝突速度分布と比較して、実点で示されたレーザーデトネーション法を用いた地上試験によるビーム中の分子の衝突速度分布はより広い幅を持っている。したがって地上試験により形成されたビーム中には、実環境中には存在しない高速の分子が存在する。この高速分子により、実環境では発生しない劣化現象が地上試験では発生する可能性がある。本研究では、この地上試験特有の高速分子による材料劣化の影響を抑えるため、チョッパーホイールを用いてビームを速度ごとに切り分け、速度分布幅を狭くすることを試みた。

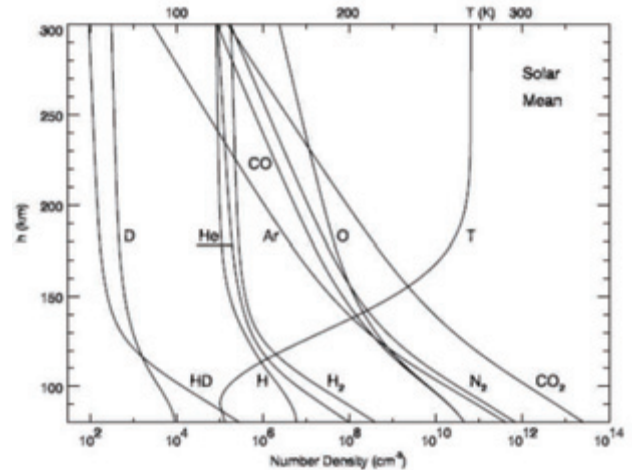


Fig. 1. Atmospheric composition of the upper Martian atmosphere²⁾.

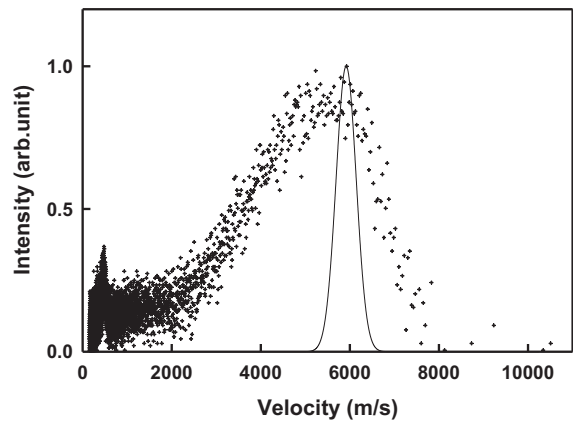


Fig.2. Velocity distribution of CO₂ in the hyperthermal beam formed by the laser detonation phenomenon. Collision velocity distribution in the Martian orbit is indicated by the solid line.

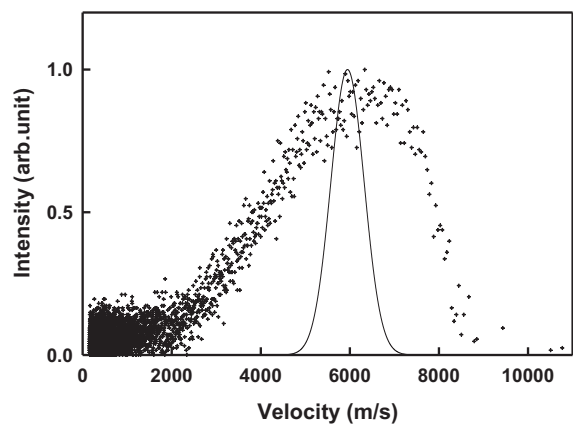


Fig.3. Velocity distribution of O in the hyperthermal beam formed by the laser detonation phenomenon. Collision velocity distribution in the Martian orbit is indicated by the solid line.

3. 実験装置および方法

本研究では、材料と CO_2 の衝突現象を再現するために、レーザーデトネーション型分子ビーム照射装置を用いて CO_2 を加速し、超熱分子ビームを形成することを試みた。本装置の基本的な技術は Physical Science Incorporation (PSI) によって開発され⁴⁾、LEO における材料劣化の研究に用いられている。Fig. 4 に本装置の外観、Fig. 5 に構成を示す。本研究では超熱 CO_2 分子ビーム形成のためターゲットガスとして、 CO_2 (99.99%) ガスを使用した。超熱 CO_2 分子ビームの形成過程を示す。まず CO_2 ガスを PSV (Piezo-driven pulsed supersonic valve) よりソースチャンバー内のノズルに導入する。ノズルに導入された CO_2 ガスに対しレーザーを集光することにより、 CO_2 ガスは爆轟波によって加速、超熱ビームとなる。使用したレーザーは TEA/ CO_2 レーザーであり、波長は $10.6 \mu\text{m}$ 、出力は $6.3\sim 6.7 \text{ J/pulse}$ である。ビームのエネルギーはレーザーディレイ (Laser Delay: L.D.) を変化させることにより調節可能である。レーザーディレイとは、ガスの導入からレーザー集光までの時間差を表す。Table 1 にビーム形成のための基本的なセッティングを示す。

本実験では形成したビームの速度分布幅を狭域化するため、レーザー動作と同期した 150 Hz のチョッパーホイールを用いた。Fig.6 にチョッパーシステム

の構成を示す。ビーム上流のアパーチャー (30 mm) でブロードビームを形成しサンプル直前に設置したチョッパーホイールのスリット (幅 5 mm) がビーム到達時刻にビームを横切るように設定することで、スリットを通過できるビームの速度分布がサンプル上での空間分布へと変換される。

形成された超熱ビームの分析は TOF (Time of flight) スペクトルを用いて行った。TOF 計測のシステムは四重極質量分析管 (Quadrupole mass spectrometer: QMS)、電子衝撃イオナイザー、シンチレーション検出器により構成される。TOF スペクトルより、ビームの平均衝突速度、分子組成を解析し、評価を行った。

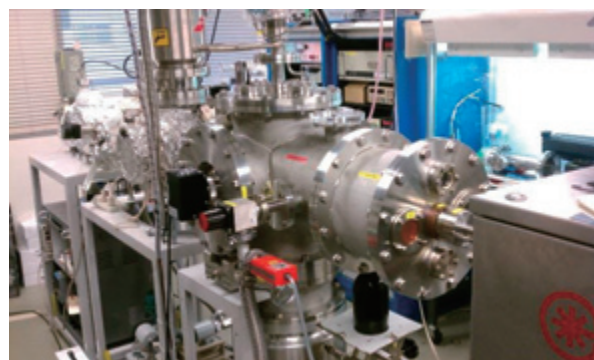


Fig. 4. Photograph of the laser detonation beam facility

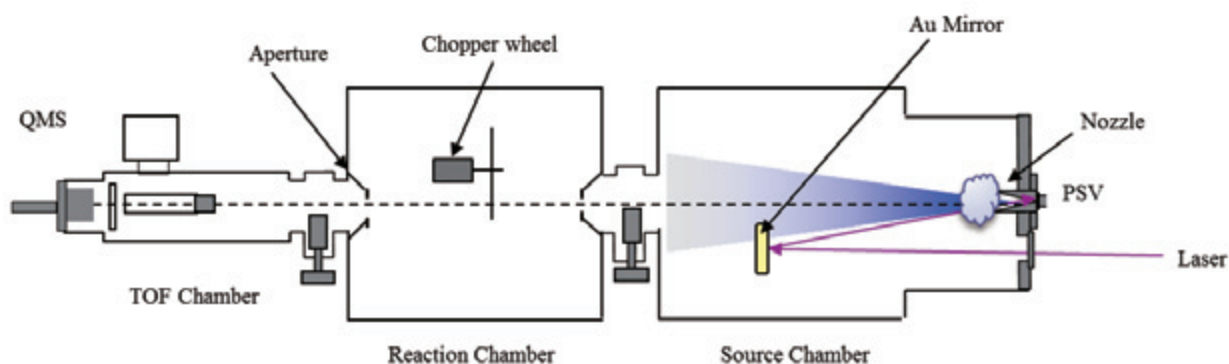


Fig. 5. Configuration of the laser detonation beam facility used in this study. Time-of-flight spectra are measured by the quadrupole mass spectrometer (QMS) with the electron impact ionizer.

Table 1. Beam formation settings for the experiment.

Back pressure (MPa)	Voltage (V)	PSV		Target gas	Laser		
		Valve opening time (μs)			wave length (μm)	Energy (J/pulse)	Laser Delay (μs)
0.6	900	200		CO_2	10.6	6.3~6.7	340

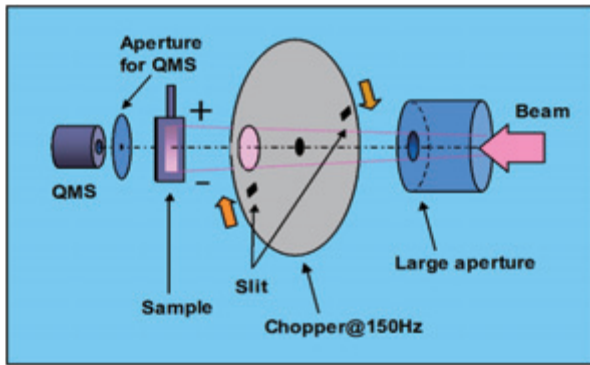


Fig. 6. Configuration of the chopper wheel system used in this study.

4. 実験結果

Fig. 7 にチョッパーホイールによって切り分けられ実際に形成されたビームの TOF スペクトルを示す。各スペクトルの右側に、サンプル上での位置を記してある。0 mm がサンプル中央である。Fig.7 より、チョッパーホイールによってビームが速度ごとに切り分けられていることがわかる。また、本実験では CO₂ (99.99 %) ガスを加速したにも関わらず、CO₂ だけでなく、一酸化炭素(Carbon monoxide: CO)、O、炭素(Carbon: C)、といった CO₂ フラグメントの検出が確認できる。CO₂ 以外の原子、分子が検出された原因として、ノズル内での CO₂ ガス加速の際、レーザー集光によりプラズマが誘起され、CO₂ 分子の解離が発生することが考えられる。また、QMS のアイオナイザーにおいて分子をイオン化する際にも、分子のクラッキングは発生する。レーザー誘起プラズマ内での CO₂ 解離は、実際にビームが照射されるサンプル表面での反応に影響を与えるのに対して、アイオナイザーでのクラッキングはサンプル表面の反応には影響しない。したがって、本研究では実際にサンプルに照射されるビームの組成を解析する必要があるが、その際アイオナイザーでのクラッキングの影響を除かなくてはならない。

Table 2 は QMS のアイオナイザーにおける各 CO₂ フラグメントの相対イオン化確率である。アルゴン (Argon: Ar) と O、O₂ の相対イオン化確率は本実験装置により測定された⁵⁾。一方、C、CO、CO₂ と Ar の相対イオン化確率は文献値を用いた^{6),7)}。Table 3 にアイオナイザーにおける CO、CO₂、O₂ のクラッキングパターンを示す。CO₂、O₂ のクラッキングパターンは本装置での CO₂ 及び O₂ ビーム照射試験により測定した。CO の値は文献値を参照した⁸⁾。これらより、レーザー誘起プラズマ内での解離及びアイオナイザーでのクラッキングを考慮し、式(1)–(5)を用いて実

際のビーム組成を計算した。

$$S_{\text{CO}_2} = 0.775a \quad (1)$$

$$S_{\text{CO}} = 0.101a + 0.966b \quad (2)$$

$$S_{\text{C}} = 0.046a + 0.034b + c \quad (3)$$

$$S_{\text{O}} = 0.078a + 0.014b + d \quad (4)$$

S は計測した TOF スペクトルの面積強度、 $a-d$ は実際にサンプルに照射される CO₂、CO、C、O の組成比を表す。

Fig. 8 にサンプル上各位置での形成したビーム中の分子強度及び CO₂ の衝突速度を示す。CO₂ の衝突速度はサンプル中央部で 6.4 km/s、-4 mm の位置で最大値 7.0 km/s、4 mm の位置で最小値 6.0 km/s となった。チョッパーホイールによってビームの速度ごとの切り分けができていていることがわかる。これらの速度はエアロブレーキング時の速度に達しており、衝突速度の点からは火星大気環境を再現可能であると言える。また、サンプル中央部に近づくほど、各分子のフラックスが増大することがわかる。これは PSV で形成されたビームがノズルから円錐状に広がるためである。実際にサンプルへのビーム照射を行う際には、このフラックス量の違いを考慮した解析を行う必要がある。Fig.9 はサンプル上の各位置でのビーム組成比である。形成したビームをチョッパーホイールで切り分けた場合、サンプル上の各位置によって分子の速度だけでなく、組成も変化することがわかる。このことから、ビーム自体のエネルギー、チョッパーホイールとレーザー動作のタイミングを調節することによって、火星高層大気環境再現に最適な組成を持つビームを形成できる可能性がある。

Fig. 10 及び Fig. 11 にチョッパーホイールを用いて形成されたビームを切り分けた場合、サンプル上+2 mm の位置に照射される CO₂ 及び O の速度分布を赤の実線で示す。図中の実線は実際の火星高層大気中で探査機に衝突する各原子、分子の速度分布、黒の実点がチョッパーを用いずに形成したビーム中の各原子、分子の速度分布である。Fig. 10、Fig. 11 より、チョッパーを用いてもビームの衝突速度分布幅はそれほど狭くなっておらず、実環境の速度分布幅に達していないことがわかる。したがって今後チョッパーのスリット幅を 5 mm から更に狭くするなどの改善策を講じる必要がある。

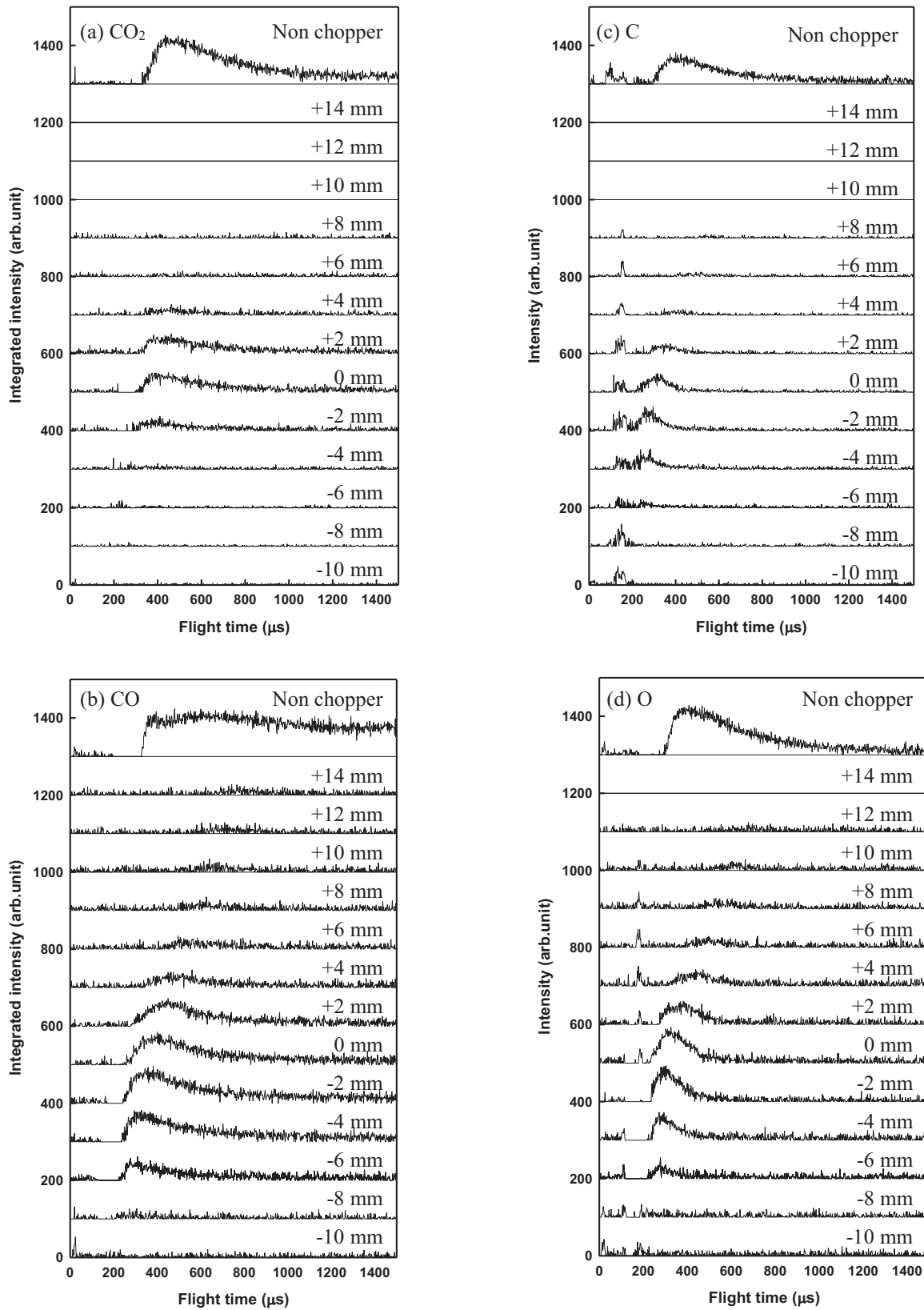


Fig. 7. TOF spectra of the fragmentation of the hyperthermal CO₂ beam. Signals are found in $m/z=44$ (a), 28 (b), 12 (c) and 16 (d).

Table 2 Relative ionization probabilities of the molecules included in the hyperthermal CO₂ beam at the electron impact ionizer of the QMS.

Gas	Relative ionization Probability
CO ₂	0.76
CO	0.80
C	0.51
O	0.27
Ar	1.00

Table 3 Cracking pattern of the molecules included in the hyperthermal CO₂ beam. Impact energy of electron is 100 eV.

Gas	Cracking probabilities			
	CO ₂	CO	C	O
CO ₂	0.775	0.101	0.046	0.078
CO	-	0.966	0.034	0.014
C	-	-	1.000	-
O	-	-	-	1.000

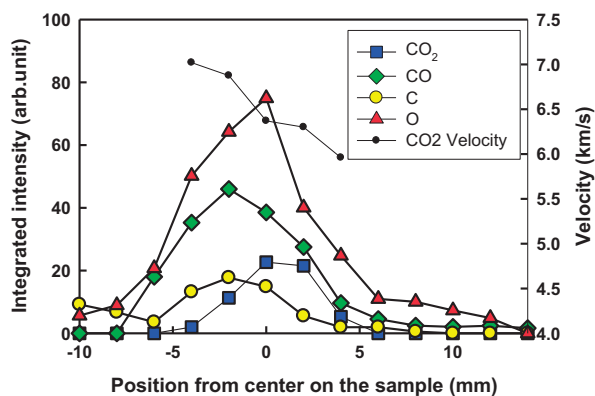


Fig. 8. The TOF spectra integrated intensity of molecules in the hyperthermal CO₂ beam and CO₂ collisional velocity at the various sample position.

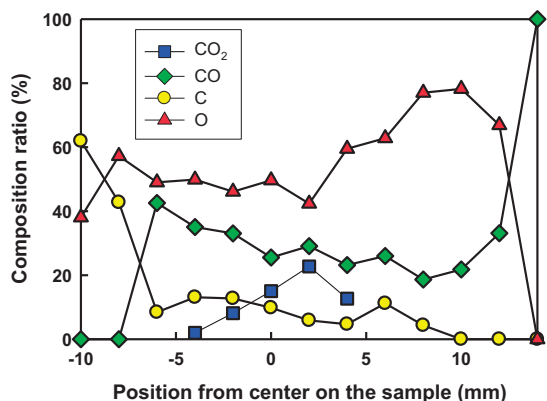


Fig. 9. Relative fraction in the hyperthermal CO₂ beam at the various sample position.

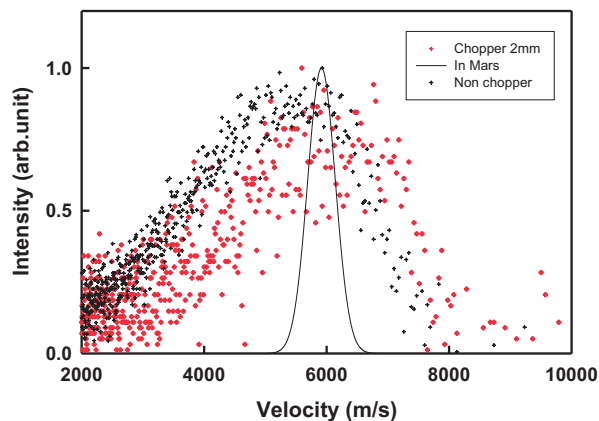


Fig. 10. Velocity distribution of CO₂ in the hyperthermal beam formed by the laser detonation phenomenon. Collision velocity distribution in the Martian orbit is indicated by the solid line.

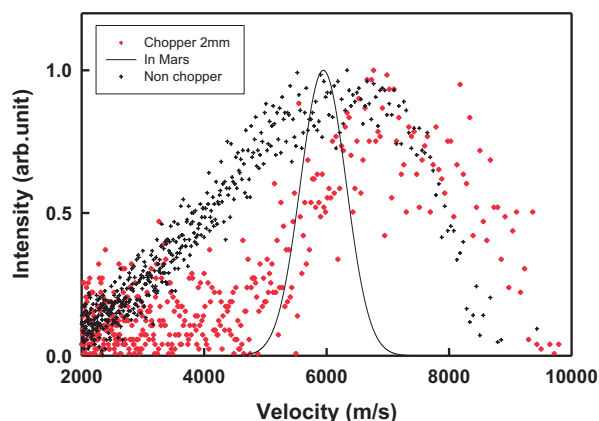


Fig. 11. Velocity distribution of O in the hyperthermal beam formed by the laser detonation phenomenon. Collision velocity distribution in the Martian orbit is indicated by the solid line.

5. 結論

火星高層大気中での探査機材料劣化現象を解明するために、レーザーデトネーション型分子ビーム照射装置を用いて超熱 CO₂ ビームの形成を行った。形成したビームをチョッパーホイールによって分子衝突速度ごとに切り分け、速度分布幅の狭域化を試みた。形成したビーム中の分子衝突速度は火星エアロブレーキング時の速度に達した。CO₂ ターゲットガス加速の際、CO₂ 分子の解離が発生し、形成されたビーム中には O、CO、C の CO₂ フラグメントが含まれることが確認された。チョッパーホイールを用いてのビームの速度ごとの切り分けには成功したが、衝突速度分布幅は実環境の分布幅まで狭域化できな

かった。今後チョッパースリット幅の調節、
ビームエネルギーの調整等を行い、より実環境に近いビームを形成する必要がある。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金・助成金 No. 25289307, 26289322, 15K14252, 15K14253 と、文部科学省宇宙科学研究拠点形成プログラムの助成により実施されたものである。

参考文献

- 1) Yang, J. C., de-Groh, K. K.: Materials research society, Vol.35, No1, 12-19, 2010.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Caledonia, G. E., Krech, R. H., Green, D. B.: A high flux source of energetic oxygen atoms for material degradation studies, AIAAJ, Vol.25, No1, 59-63, 1987.
- 5) Yokota, K., Yasuda, S., Mizutani, A., Tagawa, M.: Relative electron impact probabilities of O, O₂, and Ar components in laser-detonation hyperthermal beams, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.52, 2013.
- 6) Brook, E., Harrison, M. F. A., Smith, A. C. H.: Measurements of the electron impact ionization cross sections of He, C, O and N atoms, Journal of Physics, Vol 11, 1978.
- 7) Yoshida, H.: A survey of partial pressure standard, AIST Bulletin of Metrology, Vol 5, 2006.