

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14253

研究課題名(和文) レーザープラズマ中における分子解離選択抑制技術と火星エアブレーキング環境試験

研究課題名(英文) Inhibition of decomposition reaction on molecules in laser-induced plasma and environmental testing for aerobraking phase in upper atmosphere of Mars

研究代表者

横田 久美子 (Yokota, Kumiko)

神戸大学・工学研究科・助手

研究者番号：20252794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：火星軌道環境における材料劣化を地球上で地上試験するための技術開発を目的とし、デュアルガスシーケンシャルパフ方式に対応した新型パルスバルブシステムの開発を行った。本システムを用いてノズル中のプラズマ形成領域と爆轟波伝搬領域のガス組成を分離することによるビーム中の多原子分子の分解制御および、複数のターゲットガスからそれぞれ単独の超熱分子加速ビームの形成を行った。実験の結果、システムの正常動作、超熱原子ビーム形成が確認され、火星高層大気環境における探査機材料表面反応の地上試験技術を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：The upper Martian atmosphere mainly contains carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) 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 possibilities in Martian orbit, a method for ground-based Martian atmospheric simulation was investigated. A laser-detonation hyperthermal beam source was applied and newly designed pulsed supersonic valve (PSV) system, which contains two PSVs into one nozzle, was developed for the Martian atmospheric simulation experiments. It was confirmed that the two gases could be introduced from PSVs individually and successfully formed hyperthermal beams. This configuration allows increasing the freedom of hyperthermal beam formation by mixing two types of gases.

研究分野：宇宙環境工学

キーワード：宇宙環境 材料劣化現象 火星 高層大気

### 1. 研究開始当初の背景

火星探査には大気を持つ惑星の周回軌道への投入技術や軟着陸技術など、これまでに我が国が獲得していない多くの技術が必要になる。申請者らは長年にわたり低地球軌道における材料劣化現象を研究してきた。その中で、宇宙工学上の大きな問題となっている低地球軌道における材料劣化は原子状酸素の化学的な性質によるものばかりではなく、一部の材料は不活性ガス的高速衝突によって生じることを見出した。その結果、低地球軌道環境よりもシビアな高質量分子衝突環境となる火星探査機のエアロブレーキング時に機能性光学薄膜等の劣化が生じる可能性が見出され、本研究によりその検証と地上実験技術の獲得を意図した。

### 2. 研究の目的

本研究では火星探査の基盤技術として、事前の宇宙材料試験が不可能な火星探査機用材料試験を地上で可能にする技術を世界に先駆けて開発する。これまでレーザーデトネーション法では不可避と考えられてきたプラズマ中での分子解離を抑制する新しいアイデアについて実験的検証を行い、以下の点に関する解答を得ることを目的とする。

2種類のガスのノズル内への導入タイミングを正確にコントロールし、プラズマ形成領域と爆轟波伝搬領域のガス組成を変化させることによる(シーケンシャルパフ法)ビーム組成中の多原子分子の分解制御が可能であるか

二酸化炭素と原子状酸素の同時照射時による火星エアロブレーキング環境における材料劣化量はミッションクリティカルになり得るのか

本技術により、金星やタイタンなど太陽系以外の惑星(あるいは衛星)の大気環境における高度な宇宙環境試験ならびに宇宙科学研究を可能とする技術展開が可能となると期待される。

### 3. 研究の方法

本研究は申請者が専門とするレーザーデトネーション法による原子状酸素発生技術において、ノズル内のターゲットガス組成を空間的に変化させるという新たなパラメータを導入する(世界初)。これはレーザーデトネーション法においてはプラズマを発生させレーザーエネルギーを吸収するショック後方の高密度領域と、その前方に位置したガス分子衝突により強い電離および解離が促進される低密度領域が空間的に分離されていることから、これら2つの領域のガス組成を最適化することでビーム形成の自由度を飛躍的に大きくできるのではないかとこの着想である。マイクロ秒レベルでガス組成を変化させることは単一パルスシステムで

は不可能であることから、応答速度の速い小型パルスバルブを自作し、これを2台用いたシーケンシャルパフ方式(図1, 2)を完成させ飛行時間スペクトル測定により形成されたビームの評価を行った。

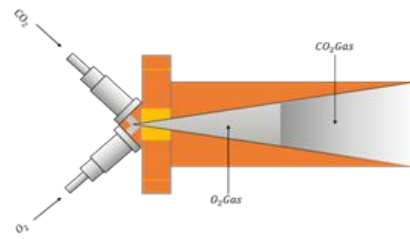


図1 シーケンシャルパフ方式を可能とするデュアルパルスバルブシステムの模式図



図2 試作したデュアルパルスバルブシステムの外観

本実験においては図3に示す回路において実験を行った。O<sub>2</sub>100%ガスとAr100%ガスをターゲットガスとしてレーザーデトネーション型分子ビーム照射装置に2つのPSVから導入し、TOFスペクトルを計測した。バルブへの印加電圧、ガスの背圧、バルブ開放時間、Laser Delay、これら4つのパラメータを変化させて、計測したTOFスペクトルのピークを観察し、ビーム評価を行った。

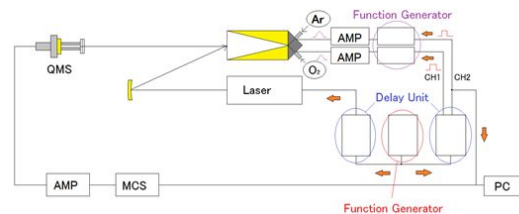


図3 デュアルパルスバルブシステムの制御回路ブロック図

### 4. 研究成果

(1) 固体惑星の周回軌道における大気環境を模擬するために、レーザーデトネーション型

分子ビーム照射装置に、先行研究において開発された新型PSVシステムを2台用いて形成されたデュアルパルスバルブシステムを取り付け、 $O_2$  ガスと Ar ガスを導入してレーザーを照射した。QMS で計測した TOF スペクトルを比較考察することで、ビーム組成中の多原子分子の分解制御が可能であるかを評価した。まず、レーザー照射やガス導入のタイミングの可変操作による2種類のガスからそれぞれ単独の超熱分子加速ビームの形成が可能であるかを評価した。デュアルパルスバルブシステムの各バルブからガスが正常に導入できることを確認した。

(2) デュアルパルスバルブシステムの各バルブからガスを導入すると、条件によってはノズル内でのガスの合流部で、先行のガスにより後発ガスの流入が抑制される現象が確認された。種々の条件での導入実験を行なった結果、図4に示すように、バルブ開放時間を700  $\mu s$  に設定し、背圧、タイミングおよび動作電圧を  $O_2$  側 0.3 MPa、100  $\mu s$ 、105 V、Ar 側は 0.6 MPa、850  $\mu s$ 、130 V に設定することにより、十分なガスが導入されることが明らかになった。

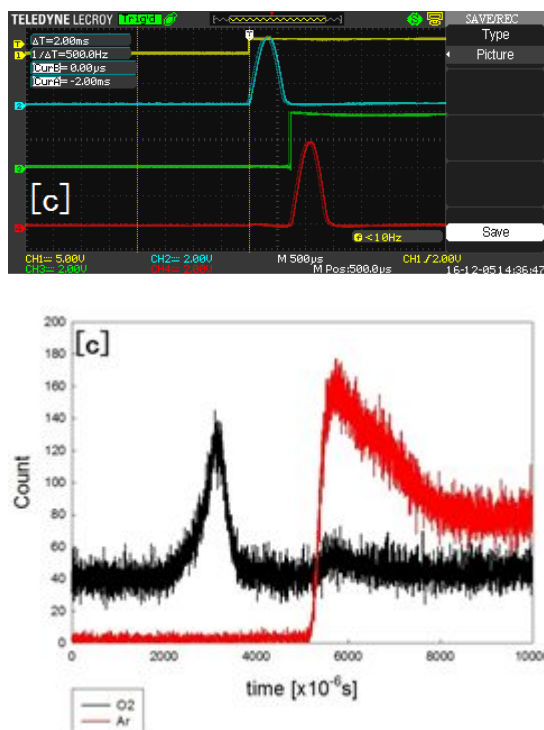


図4 デュアルパルスバルブシステムで設定したバルブ動作タイミングと計測された飛行時間スペクトル(黒:酸素、赤:アルゴン)、遅延時間750  $\mu s$ 、レーザー照射なし

(3) 2種類のガスを実験装置に導入し、レーザーを照射することによって、ともにプラズマ化させて加速させることは可能であった。測

定結果の一例を図5に示す。L.D. = 500  $\mu s$  において、レーザープラズマによるフォトンピークは図5のタイミングチャートの50  $\mu s$  に位置している。各分子のピークはレーザーピークの約200  $\mu s$ 後に現れているため、各分子はレーザー照射により加速されている。しかし、本研究においては  $O_2$  が解離しないことが望ましいが、飛行時間スペクトルには原子状酸素のピークも現れている。この条件では Ar のみをプラズマ化させ、 $O_2$  を押し進めることにより、 $O_2$  分子が解離することなく加速させることはできなかった。

本研究ではデュアルパルスバルブシステムが当初の意図通りに作動することが確認できたが、多原子分子の分解制御には、今後のパラメータ最適化が必要であることが示唆された。

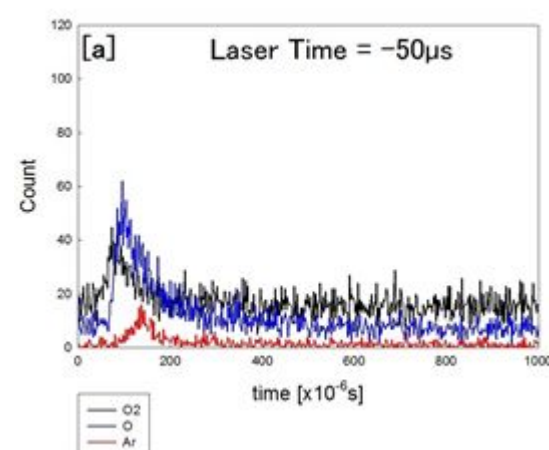
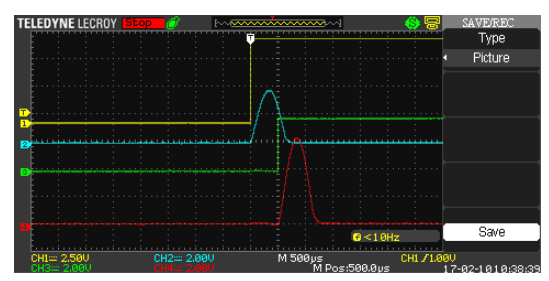


図5 デュアルパルスバルブシステムで設定したバルブ動作タイミングと計測された飛行時間スペクトル(黒:酸素、青:原子状酸素、赤:アルゴン)、遅延時間750  $\mu s$ 、レーザー照射あり(レーザーディレイ:500  $\mu s$ )

(4) デュアルパルスバルブシステムを用いて2種類のガスの干渉を防ぐため交互に1Hzで導入し、それぞれのガスに最適な条件でレーザーを照射することによって、2種類の超熱ビームを単一のノズルで形成することを試みた。結果を図6に示す。位相が180度ずれた1Hzの基準信号を発生し、これらにより各

パルスバルをとレーザーを駆動した(オルタネーションモード)の結果、2種類の超熱原子ビームを単一ノズルから交互に発生できることが確認され、火星高層大気環境における探査機と原子状酸素と二酸化炭素(あるいはアルゴン)の衝突現象を1本のビームラインで再現できることが実証された。

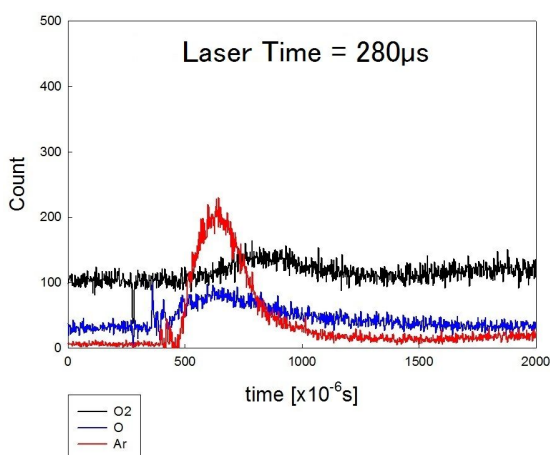
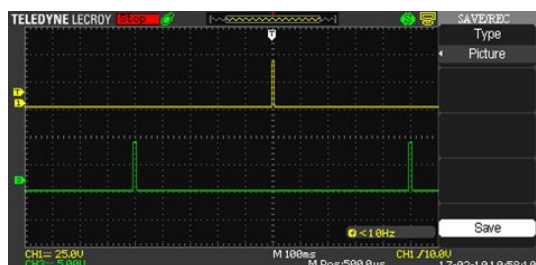


図 6 オルタネーションモードにおけるバルブ動作タイミングと計測された飛行時間スペクトル(黒:酸素、青:原子状酸素、赤:アルゴン)

以上の結果から、レーザーデトネーション型分子ビーム照射装置にデュアルパルスバルブシステムを取り付けることで、火星高層大気環境における探査機と分子の衝突現象を再現できる可能性が示唆され、ArをN<sub>2</sub>に変更することで超低地球軌道における衝突現象も再現できる可能性が示唆される。また、従来の単一パルスシステムとレーザーデトネーション型分子ビーム照射装置を2組用いていた、複数のガスのサンプルへの照射が、デュアルパルスバルブシステムとレーザーデトネーション型分子ビーム照射装置を1組のみで可能とする技術が確立された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

“Hyperthermal atomic oxygen beam irradiation effect on the hydrogenated Si-doped DLC film,” Kengo Kidena, Minami Endo, Hiroki Takamatsu,

Ryo Imai, Masahito Niibe, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, Yuichi Furuyama, Keiji Komatsu, Hidetoshi Saitoh, Kazuhiko Kanda, *Trans. Mat. Res. Soc. Japan, Vol40, No.4, (2015) pp.353-358.*

“Resistance of hydrogenated Ti-containing DLC film to hyperthermal atomic oxygen”, Kengo Kidena, Minami Endo, Hiroki Takamatsu, Masahito Niibe, Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Yuichi Furuyama, Keiji Komatsu, Hidetoshi Saitoh, Kazuhiro Kanda, *Metals, Vol.5, (2015) pp. 1957-1970.*  
doi:10.3390/met5041957

[学会発表](計20件)

“A pulsed supersonic valve aimed for Martian atmospheric simulation,” Ryota Okura, Minoru Iwata, Chee Sze Keat, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, 31<sup>st</sup> International Symposium on Space Technology and Science, June 3-9, 2017, Matsuyama, Japan

“A fast piezoelectric-driven pulsed supersonic valve using displacement enlargement mechanism for molecular beam applications,” Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Chee Sze Keat, 16th Joint Vacuum Conference, 14th European Vacuum Conference, June 6-10, 2016, Portoroz, Slovenia.

“A pulsed supersonic valve system for researches on collision-induced reactive thin film etching phenomena,” Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Tsubasa Yasukochi, Chee Sze Keat, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings and Interfaces, December 11-15, 2016, Kohala Coast, HI.

“Effect of high-energy inert gas collisions on the atomic oxygen-induced polymer erosion”, Masahito Tagawa, Kenta Ide, Yuki Yamasaki, Daiki Watanabe, Kumiko Yokota, 13th International Symposium on Materials in the Space Environment, June 22-26, 2015, Pau, France.

“Property of hyperthermal CO<sub>2</sub> beam formed by a laser-detonation facility for space environmental effect studies in upper Martian atmosphere,” Masahito Tagawa, Akimine Hatsuda, Kumiko Yokota, 13<sup>th</sup> International Conference on Laser Ablation, August 31 - September 4, 2015, Cairns, Australia.

“Laser-detonation facility for acceleration of gaseous materials: Etching and deposition of solid materials,” Kumiko Yokota, Kenta Ide, Junki Ohira, Yuki Yamazaki, Kaoru Morimoto, Hidetoshi Asada, Masahito Tagawa, 13<sup>th</sup> International Conference on Laser Ablation, August 31 - September 4, 2015, Cairns, Australia.

"原子状酸素誘起材料劣化地上試験に関わる複合効果について"

田川雅人、横田久美子

第60回宇宙科学技術連合講演会、2016年9月6日-9日(函館)

"変位拡大機構を用いた高速超音速分子線バルブ"

横田久美子、徐世傑、田川雅人

第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月13日-16日(新潟) on DVD.

"火星高層大気環境シミュレーションを目指した超熱混合分子ビーム形成の試み"

横田久美子、初田光嶺、田川雅人

第37回日本熱物性シンポジウム、2016年11月28日-30日(岡山) on DVD

"原子状酸素ビーム誘起エッチングにおける高質量原子混合効果"

田川雅人、山崎勇希、横田久美子

第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月13日-9月16日(名古屋) on DVD.

他 10 件

〔その他〕

神戸大学大学院工学研究科における宇宙環境研究のページ <http://www.space-environmental-effect.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

横田 久美子 (YOKOTA, Kumiko)

神戸大学・大学院工学研究科・助手

研究者番号：20252794

### (2)研究分担者

田川 雅人 (TAGAWA, Masahito)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10216806

### (3)連携研究者

寺岡 有殿 (TERAOKA, Yuden)

量子科学技術研究開発機構・量子ビーム科学研究部門・上席研究員

研究者番号：10343922

早川 基 (HAYAKAWA, Hajime)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：90167594

松本 康司 (MATSUMOTO, Koji)

宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・主幹研究員

研究者番号：10470072