

令和元年5月23日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26289322

研究課題名(和文)高精度テラメイド宇宙環境試験のための非熱平衡系多成分高速原子ビーム形成技術

研究課題名(英文) Non-equilibrium multi-composition fast atomic beam formation for ground-based space environmental simulations

研究代表者

田川 雅人 (Tagawa, Masahito)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10216806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は世界に先駆けてサイエンスに立脚し広範な宇宙環境に適用可能な宇宙環境試験の基盤技術確立することを目標としたもので、多成分ビームを形成するために任意の組成の混合ガスを供給可能な高精度ガス混合器を適用し、地球高層大気中のN₂分子衝突の効果を再現する技術確立するとともに、混合プラズマからのEUV測定を行い、EUV抑制技術もあわせて開発した。さらに、単一ノズルから複数のビームを形成するOne-Nozzle Two-Beam法の技術実証を行い、火星高層大気の地上試験技術の獲得に成功した。これら一連の研究により、レーザーデトネーション法の適用範囲を大きく拡大することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

広範な宇宙環境での材料劣化現象を理解するには、これまで重視されてきた原子状酸素のみではなく、不活性高エネルギー分子衝突を再現できるシミュレーション技術が必要とされている。さらに実宇宙環境を完全には再現できない現状では、地上試験環境で定量性を担保するには表面科学をベースにした原理的な理解が不可欠である。そこで本研究では、世界初となる非熱平衡混合原子・分子ビームを発生させる技術開発、放射光などの先進表面分析の導入による複雑反応系における化学反応メカニズム解明・定量推定精度向上を通して、世界に先駆けてサイエンスに立脚した広範な宇宙環境に適用可能な軌道上曝露試験の基盤技術確立することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to establish a ground-based experimental techniques based on a science. This becomes important because the reproduction of space environment in a ground-based facilities are impossible in a current technology. A gas mixture system were installed for forming multiple composition hyperthermal beam in order to simulate sub-low Earth orbit environment. A method to reduce extreme ultraviolet emission from a laser-driven plasma was also explored. Martian atmosphere is successfully simulated by the one-nozzle two-beam method which is capable to reduce dissociation of N₂ in the nozzle. A series of experiments carried out in this project enlarged the application of laser detonation technique for simulating neutral gas environment which many planet probes may encounters in future mission.

研究分野：宇宙環境工学

キーワード：宇宙環境 原子状酸素 超低軌道 火星大気

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

宇宙用材料・システムは宇宙環境からの影響により特性が変化することが知られている。End-Of-Life における性能に影響を与える宇宙環境要因は多種にのぼり、宇宙機の軌道によって大きく異なる。これらの特性変化に関わる研究手段として、実際にサンプルを一定期間宇宙環境に曝露する宇宙環境曝露試験が行われてきた。これまでの宇宙環境曝露試験では、国際宇宙ステーション(ISS)を利用し一定期間材料を宇宙環境に曝露した後に回収し、地上で分析を行ってきた。しかしながら、2011年のスペースシャトルの引退でISSからの試料回収が困難になり、宇宙環境曝露試験の実施自体が極めて難しくなるという事態が生じている。このような事態に対処して、米国では既に MISSE-X によりデータテレメトリ機能を備えた非回収型材料試験装置を開発しているが、日本にはそのような計画はない。一方、宇宙環境地上試験における最大の問題は、宇宙環境を地上で完全には再現できない点である。そのため地上試験結果を100%信頼することはできず、宇宙ミッションは常にリスクを負っている。このリスクを低減するためには、地上試験ではエンジニアリングデータの取得のみではなく、宇宙環境における表面反応メカニズムの解明と定量的解析を行い地上実験とは環境の異なる実宇宙環境での材料劣化現象を予測する必要がある。

2. 研究の目的

広範な宇宙環境での中性粒子衝突による材料劣化現象を地上シミュレーションするには、これまでの原子状酸素のみの試験ではなく、異なるエネルギーで同時衝突する重元素を含んだ分子衝突を再現できるシミュレーション技術が必要である。さらに実宇宙環境を完全には再現できない現状では、地上試験環境で定量性を担保するには表面科学をベースにした原理的な理解が不可欠となる。本研究では、①世界初となる非熱平衡混合原子・分子ビームを発生させる技術開発、②先進表面分析の導入による複雑反応系における化学反応メカニズム解明と定量推定精度向上、さらに、③衛星搭載用センサーとその地上キャリブレーション法を同時開発することによる超小型衛星等を用いた高信頼性日本型非回収宇宙材料曝露試験法の確立を目指す。これらにより、世界に先駆けサイエンスに立脚した広範な宇宙環境に適用可能な軌道上曝露試験の基盤技術を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

非熱平衡混合ビームを宇宙環境工学に適用する技術開発を行うために、レーザーデトネーション装置(図1)に対してプレミックスターゲットガスを供給可能なシステムを追加し、1台の原子ビーム源からエネルギーの異なる複数種類の原子・分子ビームを同時に生成する世界初のシステムを開発した。さらにビーム形成の自由度を高めるために単一ノズルから2種類のビームを発生できる One Nozzle Two Beam 法を実用化した。これらの手法により、非熱平衡混合原子ビームの評価を行うために必要となる各原子の電子衝撃イオン化確率を計測し、混合ビームの成分毎のフラックスを相対評価する手法を確立した。これらの手法と最新の極表面分析により新しい化学スキームによる宇宙機表面反応の定量的理解を進めた。表面科学反応の反応速度論的な解析結果から地上試験環境とは異なる実宇宙環境における材料劣化量の予測精度向上と、適用範囲の拡大を進め、固体系内惑星大気環境シミュレーションへ展開を図った。また、宇宙用水晶振動子マイクロバランス(QCM)を導入し、その特性と限界について検討を行った。

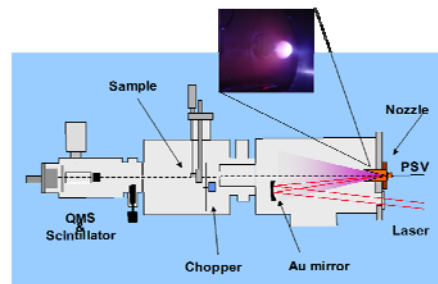


図1 レーザーデトネーション装置

4. 研究成果

(1) プレミックスガスタarget

図2に本研究で新たに構築したガス混合システムの構成図を示す。ガスボンベから供給されるガスは、ガス混合器 MAP Mix 9001 によって混合される。このガス混合器はダイヤフラムの両側にかかる比較圧力を使った比較式混合方式である。ダイヤフラムが入口側の圧力変化を吸収するため、流量変化のような混合条件の変化があっても精度よく混合することができ、混合比率 10~90% のとき誤差が±2%以下の精度が得られる。ガス混合器

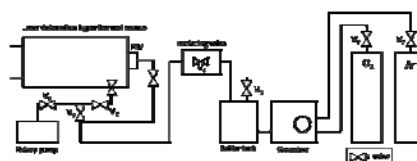


図2 MAP Mix9001 を用いた混合ガス供給システム

でつくられた混合ガスは、ガス混合器付属のバッファータンクに貯蔵され、バッファータンク内のガス圧力が一定の値以下になるとガス混合器からガスが供給される。バッファータンクから出たガスは減圧弁、配管用圧力調整器によって圧力調整され、レーザーデトネーション型超熱ビーム発生装置のPSVに供給される。

混合した混合ガスをレーザーデトネーション型超熱ビーム発生装置のPSVに導入し、PSVから噴出する混合ガスのTOFスペクトルを測定することで、ガス混合器の設定と実際に混合されたガスの混合比の関係について確認した。ビームの組成比はそれぞれのFlux-weighted TOFスペクトルの面積強度比とイオン化率 $AO:Ar:O_2=3.74:1:1.27$ により求めた。混合器により0~100%まで変化させた時の混合ガス中の O_2 の割合を図3に示す。バッファータンクのベント弁を開放することにより混合ガス中の O_2 の割合をおおよそ20~70%までの範囲でほぼ設定値通りに調整できることが示された。

調整されたガスに対してレーザーを照射し、TOFスペクトルを計測した。AOの平均エネルギーが約5eVになるように調整した際の超熱ビーム中のAOとArの組成比とターゲットガス混合比の関係を図4示す。一方、大気モデル(MSIS E-90)から計算された各高度における N_2 分子に対するAOの割合を図5に示す。図4と図5を比較することにより高度約120 kmから330 kmのsub-LEO環境における中性粒子割合(AOと N_2 を模したAr)を本システムで自由に再現可能であることが確認された。

(2) One-Nozzle Two-Beam 法

前述の混合ガスタargettを用いた場合にはAOとArのビームエネルギーを独立に制御することは不可能である。この問題を解消するため、単一ノズルに対してPSVを2個取り付けデュアルPSVシステムを構築した(図6)。この構成は2個のPSVから別々のターゲットガスを、時間差をつけてノズル内に導入することにより、2種類のガスに対するレーザー誘起解離反応を制御しようとするものである。これは、レーザーデトネーション法において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



図6 One-Nozzle Two-Beam システム

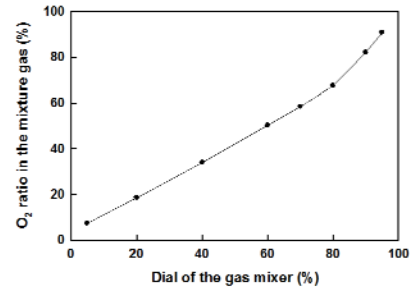


図3 混合比設定値と熱平衡ビームの組成計測結果

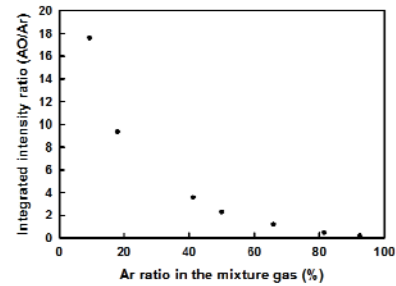


図4 ガス混合比と超熱ビームの組成計測結果

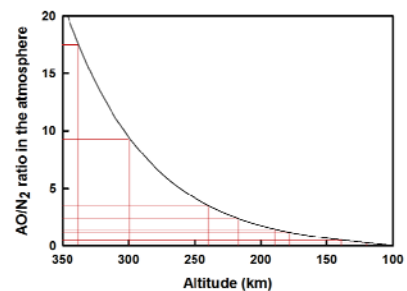


図5 地球高層大気組成

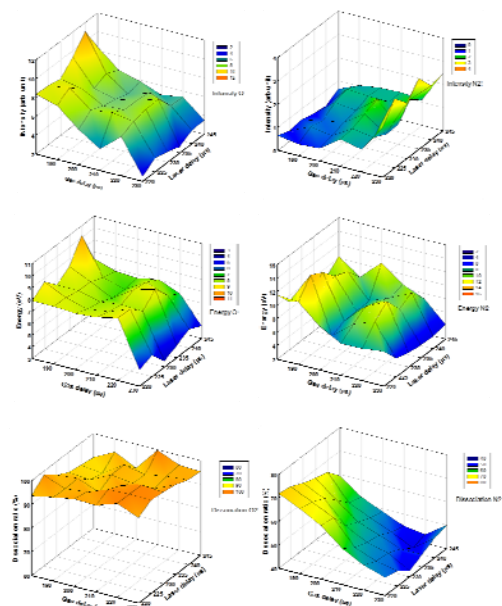


図7 One-Nozzle Two-Beam システムにおけるAO強度変化、 N_2 強度変化、AOエネルギー、 N_2 エネルギー、 O_2 解離率、 N_2 解離率

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、sub-LEO領域におけるAO+N₂環境、火星周回軌道環境模擬のためのAO+CO₂ビームの形成を行おうとするものである。

図7にFirst GasとしてN₂、Second GasとしてO₂を導入し、Gas Delay および Laser Delay を180-230 μs、220-245 μsの範囲で変化させた場合のAO強度変化、N₂強度変化、AOエネルギー、N₂エネルギー、O₂解離率、N₂解離率を示している。この結果より、First GasであるN₂の解離を抑えつつ、Second GasのO₂を解離することが可能である事が示されており、本方式はsub-LEOにおけるAO+N₂環境のみならず、火星や金星の高層大気環境であるAO+CO₂環境を再現するのに有効な方法であることが示された。

(3) 高エネルギー分子による加速劣化効果

レーザーデトネーション法ではO₂の解離は100%ではなく30%程度のO₂が残存しており、その衝突エネルギーは7eV程度となる。この残存O₂の効果を明らかにするため、平均エネルギー約5.0 eVの原子状酸素ビーム中に含まれる未解離酸素分子の衝突を模擬するためにアルゴンのエネルギーを酸素分子と同じ7.0 eV程度に設定し、原子状酸素とアルゴンビームの同時照射を行った。未解離酸素分子の割合とポリイミドの相対エロージョンレートの関係を図8に示している。横軸は原子状酸素ビーム中の未解離酸素分子の割合、縦軸は未解離酸素分子の割合が0の点を基準とした各割合におけるポリイミドコートQCM周波数変化率の増加倍率を表している。図8よりビーム中のO₂割合とエロージョンレートの間には比例関係が認められることから、ビーム中のO₂がポリイミドの質量減少に大きく影響していることが確認された。

(4) 宇宙用QCM

宇宙環境では日照時と日陰時で熱入力が大きく異なるため、外部環境に直接曝されるセンサーであるQCMも温度変化を生じる。QCMの共振周波数が温度変化によって受ける影響を小さくするため、本研究では明星電気社製の宇宙機搭載用QCMを用いた実験装置の構築を試みた。宇宙機搭載用QCMの外観図を図9に示す。宇宙機搭載用QCMには温度変化による発振周波数のドリフトを補正するためのリファレンス用水晶振動子が搭載されている。本システムは実際に「はやぶさ2」に搭載されて、宇宙環境下での動作が確認されている。実験では、ペルチェ素子と恒温循環水を併用した温度コントロールを行い、サンプルの温度を-5℃から80℃に変化させることを可能とした。本システムを用いて宇宙機搭載用QCMがAO照射中に周波数変化を検出できるか確認を行った。図10に宇宙機搭載用QCMの周波数応答の結果を示す。図10に示されているように、AOを照射すると電磁ノイズが発生し、発振周波数計測が不安定になる事象が認められた。これはAO照射時に真空チャンパー内に発生

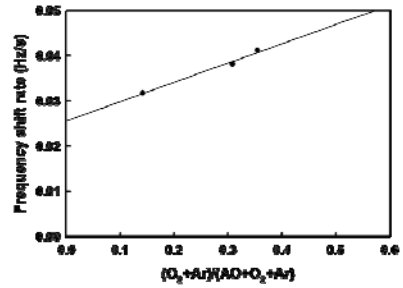


図8 ビーム中の高質量分子(O₂+Ar)割合と劣化レートの関係

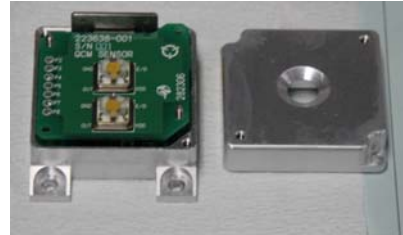


図9 衛星搭載用QCM

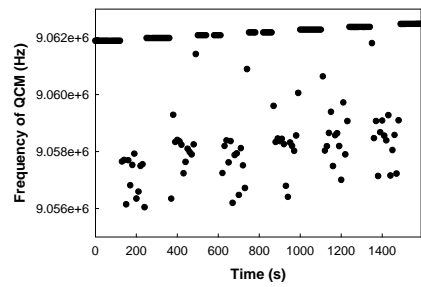


図10 AO照射中の周波数変化

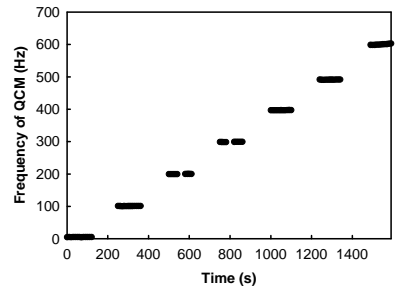


図11 間欠照射モードでのQCM周波数変化

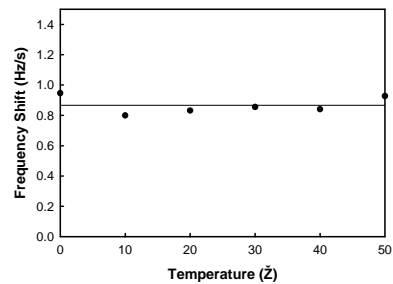


図12 ポリイミド劣化の温度依存性

するO₂プラズマから発生したイオンや電磁波が原因であると推測された。宇宙機搭載用QCMでは発振回路をQCMクリスタル直下に有するため、従来の発振回路を真空チャンバー外に持つ理化学用QCMシステムよりもノイズに弱いものと考えられ、EMI対策が必要となることが明らかになった。この問題を解決するため、AOを2分ごとに間欠照射し、非照射時の周波数の値のみを使用して周波数変化率を算出した。その結果を図11に示す。EMIによる不安定さを取り除くことができ、安定な計測が可能になっていることが示されている。原子状酸素の照射中に試料温度を0°Cから50°Cまで変化させた時の、試料温度とエロージョンレートの関係を図12に示す。横軸は10°C毎の試料温度、縦軸は宇宙機搭載用QCMの周波数変化を示している。図12より各温度でPIのエロージョンレートに大きな差は見られない。このことから、ポリイミドのエロージョンレートは試料温度に依存していないということが示されている。この結果は先行研究とも一致するものである。

本研究によりエレクトロニクスを真空チャンバー内に設置することになる宇宙用QCMを地上実験で実験する場合には、AO照射中の周波数同時測定はEMIのため困難であるが、AO照射を中断して発振することにより計測が可能となること、クリスタル実装時のコンタミネーション管理が重要であることなどが明らかになり、日本型宇宙環境その場試験に対する貴重な情報を得ることができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

Soft X-ray irradiation effect on the fluorinated DLC film, Hiroki Takamatsu, Makoto Okada, Masahito Niibe, XiaoLong Zhou, Kenji Komatsu, Hidetoshi Saito, Hiroki Akasaka, Akihiko Saiga, Koji Tamada, Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Yuichi Furuyama, Kazuhiro Kanda, *Diamond and Related Materials*, Vol.79 (2017) 14-20.

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.

Multiple-composition hyperthermal atomic beams formed by a laser-induced plasma for planetary environmental studies, Kumiko Yokota, Daiki Watanabe, Junki Ohira, Masahito Tagawa, *Physica Scripta*, Vol.T161 (2014) 013035.

A synchrotron radiation photoelectron spectroscopic study on the oxidation of Si in diamond-like carbon film by hyperthermal O-atom beam, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, Akitaka Yoshigoe, Yuden Teraoka, *Journal of Surface Analysis*, Vol.20 No.3 (2014) pp.221-225.

他 3 件

[学会発表] (計 51 件)

One-nozzle two-beam laser-detonation system, Kumiko Yokota, Kazuki Kita, Ryota Okura, Teppei Shimizu, Sze Keat Chee, Minoru Iwata, Masahito Tagawa, 14th International Symposium on Materials in the Space Environment/12th International Conference on protection of Materials and Structures in a Space Environment, 2018

Over-estimation of atomic oxygen fluences due to undecomposed oxygen molecules included in hyperthermal beams, Masahito Tagawa, Kazuki Kita, Ryota Okura, Yusuke Fujimoto, Ryo Shirakawa, Teppei Shimizu, Minoru Iwata, Kumiko Yokota, 14th International Symposium on Materials in the Space Environment/12th International Conference on protection of Materials and Structures in a Space Environment, 2018

A consideration on surface corrosion mechanism of fluoroethylenepropylene (FEP) films in sub-low earth orbit (LEO) environment, Kumiko Yokota, Yusuke Fujimoto, Ryota Okura, Kazuki Kita, Masahito Tagawa, 33rd European Conference on Surface Science, 2017

Collision-induced enhancement of polyimide corrosion in sub-low Earth orbit (LEO) space environment, Masahito Tagawa, Ryota Okura, Yusuke Fujimoto, Kazuki Kita, Kumiko Yokota, 33rd European Conference on Surface Science, 2017

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, 2016

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, 2016

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, 2015

Laser-detonation beam facilities for sub-LEO material erosion studies, Kumiko Yokota, Kenta Ide, Yuki Yamasaki, Akimine Hatsuda, Kaoru Morimoto, Masahito Tagawa, 13th International Symposium on Materials in the Space Environment, 2015

Ground-based neutral gas environment simulation related to material degradation phenomena in the orbital altitudes of 200-500 km, Masahito Tagawa, Takashi Oyabu, Junki Ohira, Daiki Watanabe, Yuki Yamasaki, Kumiko Yokota, COSPAR Scientific Assembly, 2014

Extreme ultraviolet emission from laser-induced plasma relevance to neutral gas environment simulation in LEO, Masahito Tagawa, Junki Ohira, Daiki Watanabe, Yugo Kimoto, Hiroaki Nishimura, Kumiko Yokota, COSPAR Scientific Assembly, 2014

Protection of materials from O-atom collision in low Earth orbit using thin oxide film grown in space, Kumiko Yokota, Akitaka Yoshigoe, Yuden Teraoka, Kazuhiro Kanda, Yuichi Furuyama, Koji Matsumoto, Masahito Tagawa, 13th European Vacuum Conference, 2014

Reduction of extreme ultraviolet emission from laser-induced oxygen plasma for atom-surface interaction studies in a simulated space environment, Masahito Tagawa, Junki Ohira, Yugo Kimoto, Hiroaki Nishimura, Kumiko Yokota, 30th European Conference on Surface Science, 2014

他 39 件

〔図書〕 (計 1 件)

田川雅人、横田久美子他 分担執筆、最新実用真空技術総覧、エヌ・ティー・エス、2019年 1084 (756-762)

〔その他〕

<http://www.space-environmental-effect.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：横田 久美子

ローマ字氏名：YOKOTA, Kumiko

所属研究機関名：神戸大学

部局名：大学院工学研究科

職名：助手

研究者番号 (8 桁)：20252794

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。