

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18912

研究課題名(和文)宇宙用フッ素系材料の原子状酸素誘起劣化現象：原子状酸素原因説の破綻と新理論

研究課題名(英文)Atomic oxygen-induced erosion of fluorinated polymers in LEO: its collapse and new mechanism

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) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：これまで地球高層大気による材料劣化現象は原子状酸素によるものと信じられてきた。この仮定のもとで全ての材料試験が行われてきたが、フッ素系材料など一部の宇宙用材料では軌道上での劣化現象と地上実験との間に不整合が生ずることが知られている。本研究ではこの未解決の問題に対して「フッ素系高分子材料の宇宙環境における劣化要因は、高エネルギー窒素分子の衝突によるもの」という新たな仮定を検証するものである。地上試験装置を用いた実験の結果、フッ素系高分子は軌道上N2同時衝突を模擬したA0+Arビームで炭化水素系材料より劣化が急速に進むことが確認され、Ar(軌道上ではN2)衝突の影響が大きいことが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで地球高層大気による材料劣化現象は原子状酸素によるものと信じられてきた。この仮定のもとで全ての材料試験が行われてきたが、フッ素系材料など一部の宇宙用材料では軌道上での劣化現象と地上実験との間に不整合が生ずることが知られている。本研究ではこの未解決の問題が窒素分子等の高エネルギー衝突を考えることにより説明できることを示し、この結果に基づく地上試験方法国際基準の改定の必要性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It has been widely believed that material degradation in LEO is due to atomic oxygen collision. However, ground based-simulation could not duplicate FEP erosion in LEO. This research proposed a new hypothesis that FEP is eroded mainly by N2 collision in LEO. We performed ground-based experiment using A0+Ar beam which simulates simultaneous A0 and N2 collision. It was discovered that FEP is eroded much more than that of hydrocarbon in A0+Ar exposure condition. Since the erosion of hydrocarbon is accelerated by the simultaneous Ar (or N2) collisions, the experimental result implies that effect of Ar (or N2) collision on FEP gave even more acceleration on erosion than that of hydrocarbons. The overall conclusion is that FEP erosion in LEO occurs not only by the atomic oxygen collision, but also N2 collision acts as being accelerative or independent.

研究分野：宇宙環境工学

キーワード：宇宙環境 原子状酸素 フッ素系高分子材料 高質量分子 材料劣化 窒素

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙用材料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。宇宙環境要因は多種多様であり、宇宙機の軌道によっても大きく異なる。これらの特性変化に関わる研究手段としては、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と地上設備を用いる地上実験が行われてきた[1-3]。軌道上試験では実験自由度が小さいためメカニズムに立ち入った評価が難しく、一方、地上試験では軌道上の環境を正確には再現できないという問題がある。この様な制限された研究条件からでも、これまでに多くの知見が得られているが、未解決の問題も多く残されている。その中でも最大の問題はフッ素系材料の地上試験結果が軌道上試験結果と大きく食い違うことである[4]。

本申請者らはこの点について世界で最も正確に軌道上の原子状酸素 (AO) 環境を再現可能なレーザーデトネーション装置を用いた実験的な研究を行ってきた。その結果、フッ素系材料に対する不整合の原因として、これまで有力視されてきた AO と紫外線の複合効果は存在しないこと[5]、フッ素系材料の質量減少は AO の衝突エネルギーに極めて敏感であること等を見出した[6]。これにより実際の宇宙環境では存在しない高エネルギーの AO が地上実験には含まれていることから、これがフッ素系材料の劣化原因である可能性が急浮上した。

一方、これまでの宇宙開発は N<sub>2</sub> がほとんど存在しない国際宇宙ステーションのような軌道環境 (高度 450km) から、AO 密度が 1000 倍、かつ N<sub>2</sub> 密度が 50% を超える超低高度環境 (高度 200km) へと広がりを見せている。もし、高エネルギーの粒子衝突 (N<sub>2</sub> は分子量が大きいため衝突エネルギーが AO の 1.8 倍になる) がフッ素系材料の主要な劣化要因であれば超低高度衛星は予想外の急激な材料劣化に見舞われることになる。フッ素系高分子は AO に耐性が高いとされてきたことから、2017 年 12 月打ち上げ予定の超低高度技術試験機「つばめ」の主要部材にも使用されており、もし、これが N<sub>2</sub> で劣化するのであれば宇宙工学上の大きな問題となり得る[7]。

## 2. 研究の目的

本研究ではこの未解決の問題に対して全く新しい仮説を導入することにより解決を図ることを目的とする。その仮説は、「FEP などのフッ素系高分子材料の宇宙環境における劣化要因は、これまで信じられてきた AO ではなく、高エネルギー N<sub>2</sub> の衝突によるものである」というものである。本研究では、この仮説を証明することと、この新理論に基づいた新しい宇宙環境地上実験に関わる国際基準を制定する道筋を作ることが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

レーザーデトネーション型超熱分子ビーム発生装置 (Fig. 1) を用いて宇宙環境を模擬した AO ビームならびに、AO と超低軌道環境での N<sub>2</sub> 衝突を模擬するための Ar+AO 混合ビームを形成し、フッ素材料を含めた各種宇宙用材料に照射し、サンプルの質量変化を計測した (N<sub>2</sub> はレーザープラズマ内で解離反応を生じる) [8]。AO 単独照射では O<sub>2</sub> ガスをターゲットガスとして用い、AO+Ar 同時照射実験では O<sub>2</sub>, Ar 混合ガス (Ar : O<sub>2</sub> = 50% : 50%) を用いた。単独ガスを用いた場合では、組成比として AO : 85%、O<sub>2</sub> : 15% 程度のビームを、混合ガスでは AO : 67%、Ar : 27%、O<sub>2</sub> : 5% 程度のビームを形成し実験に供した。Fig. 2 にビーム中の各コンポーネントの飛行時間 (Time-of-Flight, TOF) スペクトルを示す。平均エネルギーは AO が 6.3 eV、O<sub>2</sub> が 5.4 eV、Ar が 9.0 eV である。

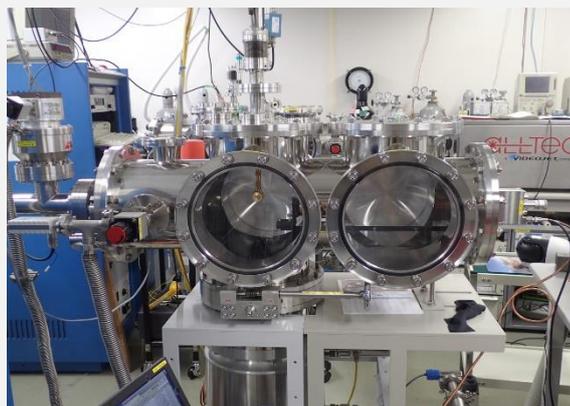


Fig. 1 Laser detonation beam source used in this study.

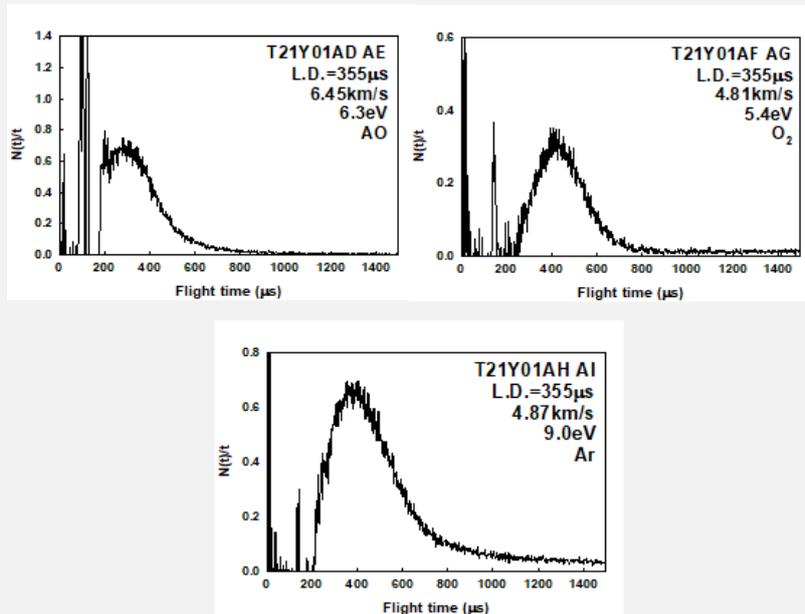


Fig. 2 TOF spectra of  $m/z=16$  (AO),  $m/z=32$  ( $O_2$ ) and  $m/z=40$  (Ar).

Fig. 3 に実験に用いたサンプルの写真を示す。サンプルとしては PEEK、PVDF、FEP、PTFE、Acetal、PVF、Mylar を用い、これらのサンプルを直径 210mm のホルダー上に配置し、ホルダー上の各所にリファレンス用の Kapton-H サンプルを配した。

照射前後におけるサンプル質量測定には分析天秤（精度  $\pm 20 \mu\text{g}$ ）を用いた。大気中におけるサンプルの吸湿を抑制するために、質量測定前にサンプルを真空デシケーターで 24 時間以上保管した。その後、真空デシケーターからサンプルを取り出すと同時にストップウォッチをスタートさせ、1 分毎に 5 分間質量測定を行い記録した。5 分間の質量測定結果を時刻 0 に外挿することで吸湿の影響を排除した。またフィルムの静電気が質量測定に影響を及ぼすことから除電器も併用した。



Fig. 3 Photograph of the samples mounted on the sample holder.

#### 4. 研究成果

Fig. 4 に AO 単独照射で算出した各材料の反応効率を示す。これらは Kapton-H の反応効率を  $3.0E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$  として規格化した数字である。これらの結果を ISS で行われた材料曝露実験 (MISSE-2) で測定された反応効率と比較すると、FEP、PTFE 以外のサンプルは軌道上と比較して約 0.69~1.86 倍程度の値となり、相対的に良い一致を示した[9]。一方、本実験で算出した FEP の

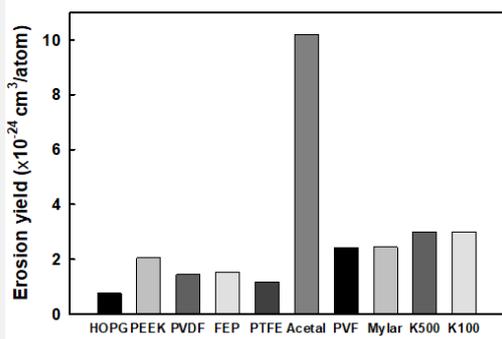


Fig. 4 Erosion yield of the samples by AO beam

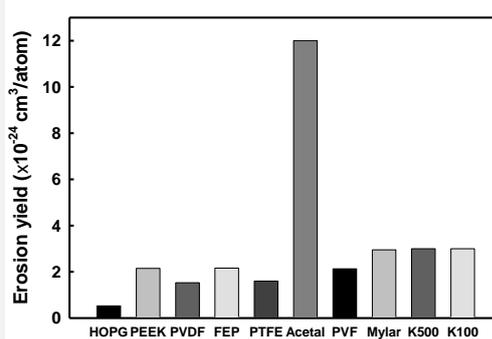


Fig. 5 Erosion yield of the samples by AO+Ar beam

反応効率は MISSE-2 の 7.60 倍、PTFE は 8.31 倍となり、FEP や PTFE は軌道上曝露試験と地上試験で結果に不整合が生ずることが再確認された。

$O_2 + Ar$  混合ガスを用いて同様の実験を行った場合の結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 も Kapton-H の反応効率を  $3.0E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$  として規格化した結果である。Fig. 4 と Fig. 5 を比較するとビーム中の Ar による大きな変化は見られない。そこで、各材料の反応効率の変化を比較したのが Fig. 6 である。これを見ると他の材料とは異なり、FEP ならびに PTFE がビーム中の Ar の存在により 40%程度反応効率が增大していることが示されており、フッ素系材料が Ar 衝突の影響を強く受けていることを示唆している。ただし、これは Kapton-H が Ar 照射の影響を受けないと仮定している点には注意を要する。本研究グループで実施した Polyimide を試料としたリアルタイム質量計測実験では、Fig. 7 に示す様に Polyimide はビーム中の Ar 割合に対して線形的に反応効率が增大することが示されている[10]。この特性を今回の実験結果に反映させるため、Fig. 6 に対して Fig. 7 の特性を組み込んだ。本実験において AO+Ar 同時照射における Ar の割合は TOF の解析結果から平均 27%であった。この条件での Ey は Fig. 7 より  $5.33E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$  と推定された。この値を用いて AO フルエンスを算出し、各サンプルの反応効率を計算した。その結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から AO+Ar に対する反応効率は全てのサンプルで AO 単独照射の結果を上回った。この結果から AO の衝突に加えて  $N_2$  分子の高エネルギー衝突が生じる超低地球軌道環境では本試験で用いた全サンプルについてエロージョンイールドが増加することが確認された。特に AO 耐性が高く、AO との反応効率の値が小さいとされてきたフッ素樹脂の FEP や PTFE の反応効率が Ar 添加によって大幅に増加した。このことから、FEP や PTFE は Ar 添加による AO, Ar 同時照射によって反応効率の増加が他のサンプルに比べてより顕著に表れることが確認された。

過去に行われた地上試験結果から、polyimide には AO と高質量粒子の同時衝突による劣化増速効果が確認されている[10]。これは、polyimide が AO の衝突によって酸化され、その酸化生成物の脱離が高質量粒子によって促進されると 2 段階のメカニズムであると考えられている。このメカニズムが正しければ、その他の炭化水素系高分子材料についても、polyimide と同様の高質量粒子による劣化増速効果が発現するものと思われる。その際に ASTM Standard に定められた Kapton witness sample を用いた比較方法[11]を適用すれば、高質量粒子の同時衝突による絶対的な質量減少量の増加は検出されず、見かけの AO 照射量（曝露量）が増加するのみである。一方、FEP や PTFE などのフッ素系材料の場合には、炭化水素系高分子でのエロージョン反応の前駆反応である酸化反応が生じず、主鎖結合が衝突エネルギーにより直接切

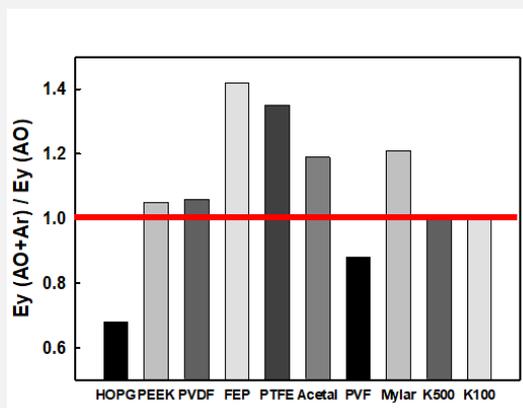


Fig. 6 Relative change of the erosion yields normalized by AO beam exposed PI ( $3.00E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$ )

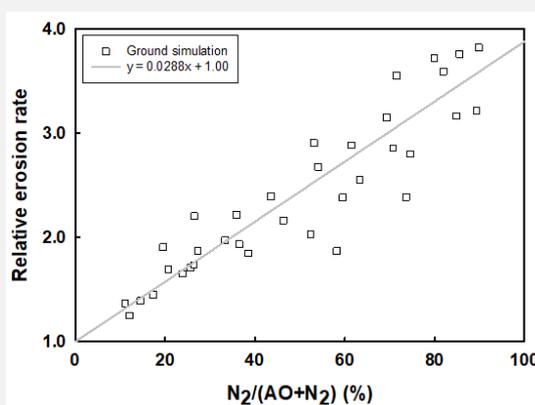


Fig. 7 Erosion yield of polyimides under various Ar fractions.

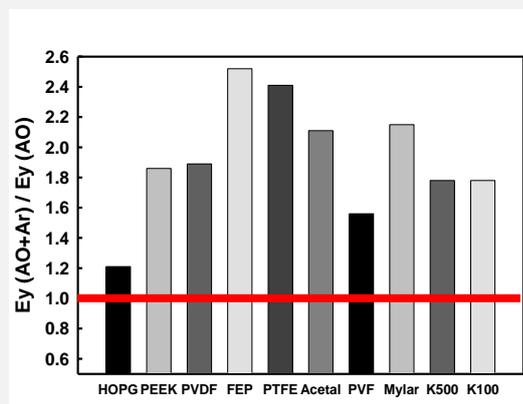


Fig. 8 Relative erosion yields of the samples normalized by AO+Ar beam exposed PI ( $5.33E-24 \text{ cm}^3/\text{atom}$ )

断されるものと推定されており、その場合には AO による主鎖切断と Ar による主鎖切断が並列的に生じる。特に Ar のエネルギーが大きいことにより、AO より Ar による主鎖切断が主たる要因になると推察される。以上のことから、FEP 等のフッ素系材料では Kapton 基準でも Ar 衝突効果が顕著に発現したものと推定された。以上のことから Kapton witness sample を使用する現状の標準的な試験方法は、FEP などの材料の試験方法としては不適當であるだけでなく、炭化水素系材料の材料リスクを過小評価することが示唆された。

本研究による結果から、軌道上試験と地上試験での FEP 劣化特性の不一致は、①基準材料である Kapton と反応メカニズムが異なり、Ar 衝突効果を Kapton よりも強く受けること、②軌道上では AO 衝突エネルギーの分布が小さく、高エネルギー成分が地上実験装置よりも少ないため FEP の主鎖切断が生じにくいこと、などが原因であると明らかになった。これらの結果から、FEP では AO による主鎖切断と Ar (N<sub>2</sub>) による主鎖切断は並行的に生じるため、超低地球軌道環境では N<sub>2</sub> に劣化が支配的になる可能性が高いことが示唆され、超低軌道環境での新たなリスク要因として認識された。また本研究の途中経過をコロナ前の 2018 年にフランスで開催された ISMSE で発表し、ASTM Standard の改定の機運が醸成された。

#### 参考文献

- [1] Visentine, J. T., Leger, L. J., Kuminecz, J. F. and Spiker, I. K., STS-8 Atomic Oxygen Effects Experiment, AIAA-85-0415, 1985.
- [2] Brinza D. E., Chung S. Y., Minton T. K., Liang R. H., Final report on the NASA/JPL evaluation of oxygen interactions with materials 3 (EOIM-3), JPL Publication 94-31 (1994).
- [3] Kimoto Y., Ishizawa J., Shimamura H., Passive space environment effect measurement on JEM/MPAC&SEED, Protection of materials and structures from the space environment, Eds. J. I. Kleiman, M. Tagawa, Y. Kimoto (Springer Heidelberg) 2013, pp.73.
- [4] Weihs B., Eesbeek M. V., Secondary VUV effects on polymers in the ATOX atomic oxygen exposure facility, Proc. ISMSE-6, ESA SP-368 (1994) 277-283.
- [5] Zhang, J., Lindholm, N. F. Brunsvold, A. L., Upadhyaya, H. P., Minton, T. K., Tagawa, M., Erosion of FEP Teflon and PMMA by VUV radiation and hyperthermal O or Ar atoms, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 1, No.3 (2009) 653-660.
- [6] Energy dependence of hyperthermal oxygen atom erosion of a fluorocarbon polymer: relevance to space environmental effect, Tagawa, M., Yokota, K., Kishida, K., Okamoto, A., Minton, T. K., ACS Advanced Materials and Interfaces, Vol.2, No.7 (2010) pp.1866-1871.
- [7] Kimoto, Y., Tsuchiya, Y., Miyazaki, E., Goto, A., Yukumatsu, K., Imamura, S., Kawasaki, H., Sasaki, M., Yokota, K., Tagawa, M., Ide, W., Fujita, A., Urakawa, S., Horimoto, S., Nishioka, S., Impact of neutral atmosphere environment on SLATS, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Materials in a Space Environment / 13<sup>th</sup> International Conference on Protection of Materials and Systems from Space Environment, Noordwijk, The Netherlands, May 15-20, 2022.
- [8] Tagawa, M., Okura, R., Ide, W., Horimoto, S., Ezaki, K., Fujita, A., Shoda, K., Yokota, K., Laser-detonation hyperthermal beam source applicable to VLEO environmental simulations, CEAS Space Journal (2022) in press
- [9] de Groh, K. K., Banks, B. A., MISSE PEACE Polymers Atomic Oxygen Erosion Results, NASA/TM-2006-214482
- [10] Yokota K., Tagawa M., Fujimoto Y., Ide W., Kimoto Y., Tsuchiya Y., Goto A., Yukumatsu K., Miyazaki E., Imamura S., Effect of simultaneous N<sub>2</sub> collisions on atomic oxygen-induced polyimide erosion in sub-low Earth orbit: comparison of laboratory and SLATS data, CEAS Space Journal, Vol.13, (2021) .
- [11] Standard practices for Ground Laboratory Atomic Oxygen Interaction Evaluation of Materials for Space Applications, ASTM E2089-00 (2006).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, Yusuke Fujimoto, Wataru Ide, Yugo Kimoto, Yuta Tsuchiya, Aki Goto, Kazuki Yukumatsu, Eiji Miyazaki, Shunsuke Imamura	4. 巻 13
2. 論文標題 Effect of simultaneous N2 collisions on atomic oxygen-induced polyimide erosion in sub-low Earth orbit: comparison of laboratory and SLATS data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CEAS Space Journal	6. 最初と最後の頁 389-397
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masahito Tagawa, Ryota Okura, Wataru Ide, Sasuga Horimoto, Keisuke Ezaki, Atsushi Fujita, Kosuke Shoda, Kumiko Yokota,	4. 巻 14
2. 論文標題 Laser-detonation hyperthermal beam source applicable to VLEO environmental simulations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CEAS Space Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計47件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 20件）

1. 発表者名 Sasuga Horimoto, Atsushi Fujita, Wataru Ide, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa
2. 発表標題 Accelerated A0-induced polyimide erosion in VLEO by simultaneous collisions of hyperthermal N2 molecules
3. 学会等名 1st International Symposium on VLEO Missions and Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahito Tagawa, Wataru Ide, Naoki Kano, Momoka Shimoi, Yuki Fukami, Kosuke Shoda, Taishi Kato, Kazuki Itatani, Atsushi Fujita, Sasuga Horimoto, Keisuke Ezaki, Shoma Taira, Yuki Jotaki, Kumiko Yokota
2. 発表標題 VLEO-related research activities at Kobe University
3. 学会等名 1st International Symposium on VLEO Missions and Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Sasuga Horimoto, Atsushi Fujita, Shohei Urakawa, Santa Nishioka, Wataru Ide, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa
2. 発表標題	Ground-based experiment for simultaneous N2 collision effect on atomic oxygen-induced polyimide erosion in sub-low Earth orbit
3. 学会等名	Proceedings of the 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Kumiko Yokota, Masahito Tagawa, Jacob I. Kleiman
2. 発表標題	Atomic Oxygen Exposure Test Capabilities at Kobe University: Its Performance and Limitations
3. 学会等名	Advanced Space Environmental Conference (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Masahito Tagawa, Ryota Okura, Kumiko Yokota
2. 発表標題	Reduced Dissociation of Molecules in Laser-Detonation-Driven Hyperthermal Beam
3. 学会等名	Advanced Space Environmental Conference (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Wataru Ide, Yusuke Fujimoto, Kim K. de Groh, Bruce A. Banks, Yuta Tsuchiya, Kazuki Yukumatsu, Aki Goto, Eiji Miyazaki Yugo Kimoto, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa
2. 発表標題	Kapton erosion yields in various flight environments
3. 学会等名	Joint Symposium of 32nd International Symposium on Space Technology and Science and 9th Nano-Satellites Symposium (国際学会)
4. 発表年	2019年

1 . 発表者名 K. Yokota, R. Shirakawa, M. Shimoi, W. Ide, N. Kano, M. Tagawa
2 . 発表標題 Effect of collision energy on oxidation of Si atoms embedded in polyimide by simulated low Earth orbit space environment
3 . 学会等名 18th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Tagawa, R. Shirakawa, M. Shimoi, W. Ide, N. Kano, K. Yokota
2 . 発表標題 Collision-induced erosion on polyimide in simulated low Earth orbit space environment
3 . 学会等名 18th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Naoki Kano, Ryo Shirakawa, Momoka Shimoi, Takashi Ozawa,
2 . 発表標題 Direct simulation Monte Carlo evaluation of hyperthermal molecular flow in air breathing ion engine
3 . 学会等名 Joint Symposium of 32nd International Symposium on Space Technology and Science and 9th Nano-Satellites Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Momoka Shimoi, Ryota Okura, Ryo Shirakawa, Naoki kano, Shunsuke Imamura
2 . 発表標題 Development of ionization gauge for in-orbit measurement of molecular density
3 . 学会等名 Joint Symposium of 32nd International Symposium on Space Technology and Science and 9th Nano-Satellites Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Shirakawa, Hideyuki Usui, Yohei Miyake, Masahito Tagawa, Kazutaka Nishiyama
2. 発表標題 Particle simulations of ECR plasma generation in air breathing ion engine
3. 学会等名 Joint Symposium of 32nd International Symposium on Space Technology and Science and 9th Nano-Satellites Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ozawa, Shunsuke Imamura, Masahito Tagawa, Kazuhisa Fujita
2. 発表標題 Study of rarefied aerodynamics for super low altitude satellites
3. 学会等名 Joint Symposium of 32nd International Symposium on Space Technology and Science and 9th Nano-Satellites Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Fujimoto, Ryota Okura, Kazuki Kita, Minoru Iwata, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa
2. 発表標題 A consideration of degradation of polymeric materials in sub-low Earth orbits space environment
3. 学会等名 15th Spacecraft Charging Technology Conference, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Okura, Yusuke Fujimoto, Kazuki Kita, Minoru Iwata, Chee Sze Keat, Yugo Kimoto, Kumiko Yokota, Masahito Tagawa
2. 発表標題 Development of a pulsed supersonic valve aimed for Martian atmospheric simulation
3. 学会等名 15th Spacecraft Charging Technology Conference, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Shirakawa, Hideyuki Usui, Yohei Miyake, Masahito Tagawa, Kazutaka Nishiyama
2. 発表標題 Plasma particle simulation of ECR plasma generation in Air Breathing Ion Engine (ABIE)
3. 学会等名 15th Spacecraft Charging Technology Conference, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kumiko Yokota, Kazuki Kita, Ryota Okura, Teppei Shimizu, Sze Keat Chee, Minoru Iwata, Masahito Tagawa
2. 発表標題 One-nozzle two-beam laser-detonation system
3. 学会等名 14th International Symposium on Materials in the Space Environment/12th International Conference on protection of Materials and Structures in a Space Environment, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahito Tagawa, Kazuki Kita, Ryota Okura, Yusuke Fujimoto, Ryo Shirakawa, Teppei Shimizu, Minoru Iwata, Kumiko Yokota,
2. 発表標題 Over-estimation of atomic oxygen fluences due to undecomposed oxygen molecules included in hyperthermal beams
3. 学会等名 14th International Symposium on Materials in the Space Environment/12th International Conference on protection of Materials and Structures in a Space Environment, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Z. Iskanderova, J. Kleiman, F. Bussieres, M. Tagawa, R. Ng, R. Sodhi
2. 発表標題 Enhancement of atomic oxygen resistance of charge dissipative ion beam treated polymers
3. 学会等名 14th International Symposium on Materials in the Space Environment/12th International Conference on protection of Materials and Structures in a Space Environment, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Minoru Iwata, Masahito Tagawa, Sumitaka Tachikawa, Issei Kato, Takayuki Hirose
2. 発表標題 Cultivation of research and project-support network for degradation of space-use materials -Concept of cluster type in-situ test facilities system-
3. 学会等名 14th International Symposium on Materials in the Space Environment/12th International Conference on protection of Materials and Structures in a Space Environment, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Alexandre Simon, Minoru Iwata, Masahito Tagawa, Sumitaka Tachikawa
2. 発表標題 Evaluation of vacuum transfer vessel performance to construct cluster type in-situ test facilities network
3. 学会等名 14th International Symposium on Materials in the Space Environment/12th International Conference on protection of Materials and Structures in a Space Environment, (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 最新実用真空技術総覧 編集委員会	4. 発行年 2019年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 1084
3. 書名 最新実用真空技術総覧	

〔産業財産権〕

〔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 <a href="http://www.space-environmental-effect.jp/index.html">http://www.space-environmental-effect.jp/index.html</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	田川 雅人  (Tagawa Masahito)  (10216806)	神戸大学・工学研究科・准教授    (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関