

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2022

課題番号：17KK0123

研究課題名（和文）大型プラズマ風洞を用いた再突入ブラックアウト低減化研究の深化と加速

研究課題名（英文）Advanced study on atmospheric reentry blackout mitigation using a large plasma wind tunnel

研究代表者

高橋 裕介（Takahashi, Yusuke）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：40611132

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,200,000円

渡航期間： 4.8ヶ月

研究成果の概要（和文）：大気再突入時に宇宙機に現れる通信ブラックアウト（通信途絶現象）は高精度な着地点予測の妨げや回収コストの増加をもたらすため、その低減化が求められる。本研究では表面触媒効果とエアフィルム効果による通信ブラックアウト低減化技術を提案した。その過程において本研究滞在先であったドイツ航空宇宙センター（DLR）研究者との共同研究および関連議論が重要な役割を担った。大型計算機と大型プラズマ風洞を用いて再突入環境を再現し、新しい技術の実現可能性や数値的・実験的実証を図るとともに、低減化に至るメカニズム解明を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の宇宙輸送手段の進展から、宇宙開発や小型衛星・超小型衛星の利用、宇宙から地上に資料などを持ち帰る需要・機会は大きく増大していくと期待される。これら宇宙ミッションにおいて大気再突入は避けて通れない過程である。再突入時において宇宙機は高速・高温の極限的環境に置かれ、強い空力加熱や空力不安定など様々な問題が生じる。通信ブラックアウトもその1つであり、高精度着地点予測の妨げになるとともに回収コストの増大を招く。本研究では新しいブラックアウト低減化技術を提案、実証し、メカニズム解明を行った。この成果は空力加熱低減化技術にも発展し可能性を有し、多様な宇宙ミッション創出に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：The radio-frequency (RF) blackouts that occur on spacecraft during atmospheric reentry hinder accurate landing-site prediction and increase recovery costs. Thus, it is important to reduce these blackouts. In this study, I proposed novel RF blackout reduction schemes based on the surface catalysis effect and the air film effect. Collaboration with researchers at the German Aerospace Center (DLR), where I was staying during this study, and related discussions played an important role in this process. The reentry environment was reproduced using a large computer and a large plasma wind tunnel to assess the feasibility of the novel technique and to conduct numerical and experimental verification, elucidating the mechanism leading to the reduction.

研究分野：高速流体・高温気体力学

キーワード：惑星大気再突入 通信ブラックアウト 空力加熱 プラズマ中の電磁波伝播 アーク加熱風洞 表面触媒効果 エアフィルム効果

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

惑星大気再突入における着地・着水点の高精度予測は、有人宇宙飛行やサンプルリターン、軌道上ステーション(ISS)貨物回収において、近年注目される課題の1つである。これは、着地着水点位置の分散を小さく抑えることを目指すものであり、再突入カプセルの迅速な回収および回収コスト低減化に寄与する。しかし、一般に再突入機は高い軌道速度(7.8 km/s以上)を有することから、再突入時において前方に強い衝撃波を生じ機体は高温プラズマに包まれる。このとき機体と地上局・中継衛星との間に通信途絶現象(通信ブラックアウト)が生じる。これは図1のように通信電磁波がプラズマによって反射や回折、減衰することでその進行が阻害され、受信先へ到達できなくなることによる。高精度着地点予測のために、リアルタイムで再突入機位置を把握することが望ましい。その一方で通信ブラックアウトが生じると、機体追跡が困難になり位置同定ができなくなる。そのため通信ブラックアウトを回避、あるいは低減することが必要となる。

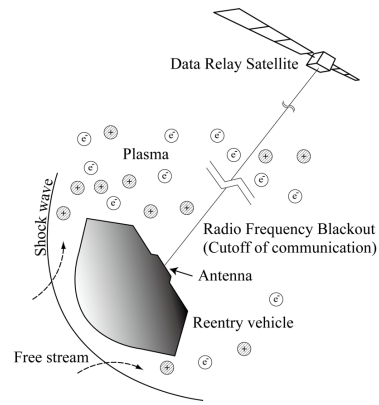


図1. 通信ブラックアウト概略

### 2. 研究の目的

通信ブラックアウト低減化の鍵は、機体近傍のプラズマ、とくに電子の密度をいかに効率的に減らすかにかかっている。Jungら[1]は、表面触媒性による機体後流プラズマ(電子密度)の低下とそれによる通信ブラックアウト低減化の可能性を示した(図2)。これは触媒性を持った材料を機体表面に貼り付け、表面再結合反応を利用して電子低減を図るものである。本研究では、プラズマ風洞と数値解析技術を用いて、再突入時における通信ブラックアウト環境の再現を行い、表面効果による低減化メカニズムと低減化技術の指針を見出すことを目的とした。

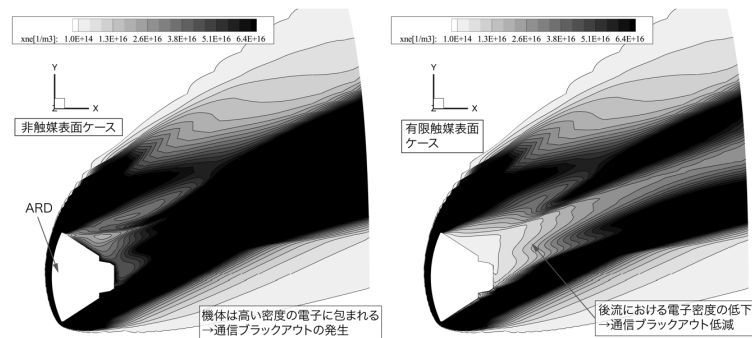


図2. 機体表面触媒性による後流電子数密度の低下[1]

研究開始当初では、Takahashi[2]が構築した数値解析技術とドイツ航空宇宙センター(DLR)設置の大型プラズマ風洞とを用いてより実際に近い再突入時における通信ブラックアウト環境の再現を行い、表面効果による低減化メカニズムと低減化技術の指針を見出すこと、および通信ブラックアウト低減化技術の提案を目的とした。しかしながら、本研究遂行期間において新型コロナウイルス感染症拡大防止対策に伴う海外移動制限が発生し、十分なDLR風洞実験機会を得ることが難しくなった。そのため本課題では、JAXA大型アーク加熱風洞を用いて再突入環境の再現を図ることとした。加えて、DLR研究者との議論を通してエアフィルム効果によるブラックアウト低減化技術の新規提案を行い、その実証も行った。

### 3. 研究の方法

新しいブラックアウト低減技術実証とそのメカニズムを明らかにするために、ここでは大型計算機を用いた数値解析手法とプラズマ風洞を利用した風洞実験によって再突入環境を再現、低減化技術に関連した研究を行う。

#### (1) 数値解析手法

プラズマ中における電磁波伝播の挙動を調べ、表面触媒性による低減化メカニズムの詳細を明らかにするために数値解析を用いる。Takahashi[2]は、数値流体力学・電磁波伝播解析手法を用いた再突入プラズマ中における数値解析モデルが開発した。そのソフトウェア構成は、高速気流ソルバーRG-FaSTARと電磁波伝播ソルバーArcflow/Arcwaveコードである。RG-FaSTARが大規模計算機にもよく適合しており、高い並列数でもそのスケーラビリティ(性能)を維持することが可能である。

#### (2) 実験手法

地上において再突入時の高温プラズマ環境を模擬するアーク加熱風洞(プラズマ風洞:図3)を用いる。触媒効果の比較試験を行うために高触媒材料・低触媒材

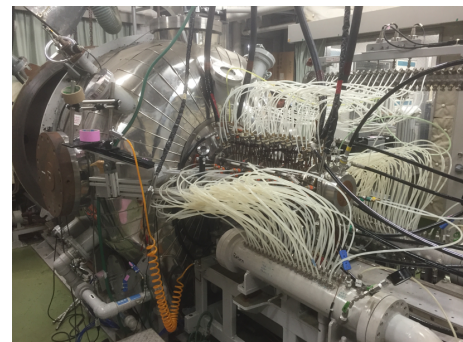


図3. JAXA アーク加熱風洞

料を採用した通信試験模型を用意し、それに通信モジュールを格納する。2つの通信模型をプラズマ気流に投入し、プラズマ中における通信環境を再現する。このときの通信状況を比較することによって、触媒性によるブラックアウト低減効果を明らかにする。加えて、エアフィルムによるブラックアウト低減化効果を実証するために、ガス噴出機構を備えた風洞模型を作成し、風洞気流に投入する(図4)。模型内部には通信機器を搭載している。プラズマ気流においてエアフィルムなし(噴き出しなし)・エアフィルムあり(噴き出しあり)の条件の通信状況を測定し、比較をすることで低減化効果を確認する。

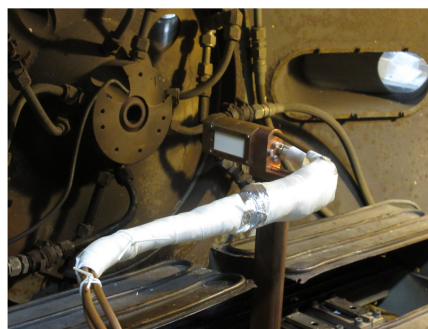
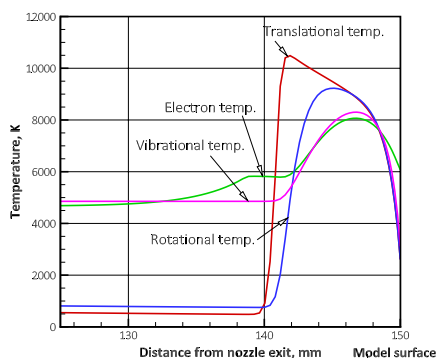


図4. 風洞実験セットアップ

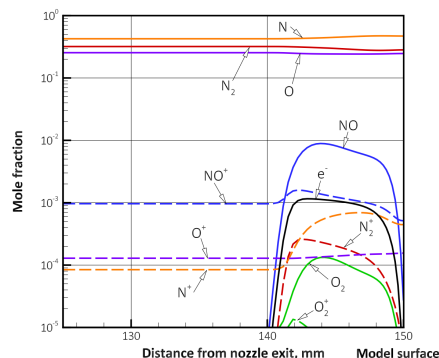
#### 4. 研究成果

##### (1) プラズマ風洞気流の気流診断

一般にアーク加熱風洞はアーク放電や超音速膨張などの複雑な現象を内包し、その風洞気流は強い空間非均一性を示す。風洞として利用する場合この特性は大きな問題となるため、数値解析とNO分子回転温度同定のための発光分光測定に基づく気流診断を行い、風洞気流の空間分布を調べた。この研究を通して、1MWアーク加熱風洞におけるアーク加熱気流の各流れ諸量半径方向分布[3]と衝撃層内における諸量[4](図5)を明らかにした。



(a) 温度



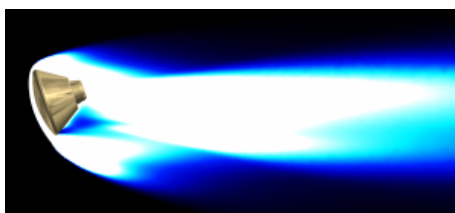
(b) 化学種モル分率

図5. ノズル中心軸上における流れ諸量分布

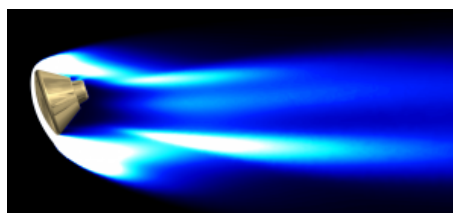
##### (2) 表面触媒効果によるブラックアウト低減化

プラズマ風洞実験と数値解析を用いて表面触媒効果によるブラックアウト低減化の詳細メカニズムを調べた。図6に表面触媒性による再突入カプセル後流電子密度の比較[5]を示している。これは典型的な再突入カプセル形状、再突入軌道を有するESAARD (European Space Agency Aerodynamic Reentry Decelerator) の再突入環境を数値解析によって再現した結果である。表面触媒性を考慮することにより後流の電子数密度が低下していることが示されている。さらに風洞実験結果[6]とも合わせて、表面触媒性によるブラックアウト低減化メカニズムを下記の通り示した:

- (1) 衝撃層内で生じたNやOなどの解離種は表面触媒反応によって分子に再結合する。
- (2) 一方で分子の増加が原子種の不足を招く。
- (3) 原子種を補う方向に電子の再結合反応が促進することで電子が低減する。
- (4) 電子の低減によって通信電波の伝播が緩和される。



(a) 表面触媒性なし



(b) 表面触媒性あり

図6. 表面触媒性による再突入カプセル後流電子密度の比較

### (3) エアフィルム効果によるブラックアウト低減化

Esser ら[7]は DLR アーク加熱風洞内部に設置した平板模型からガス噴き出し（エアフィルム）を行うことで高温気流から模型を冷却する実験システムを構築した。本研究ではこの実験系を踏襲し、エアフィルムによる電子数密度低減、すなわち通信ブラックアウト低減、の実現可能性に焦点を当て、数値解析によって実験環境を再現した。図7にエアフィルムの有無による DLR 風洞模型近傍の電子数密度分布比較[8]を示している。ガスを噴き出すことで平板上にエアフィルム冷却層が形成される。高温プラズマ中にこの低温で低電離のエアフィルム層が現れることによって電磁波伝播の通り道が形成される。加えてエアフィルム層が高温プラズマの模型への接近を抑制することで模型表面の加熱も局所的に低減される。

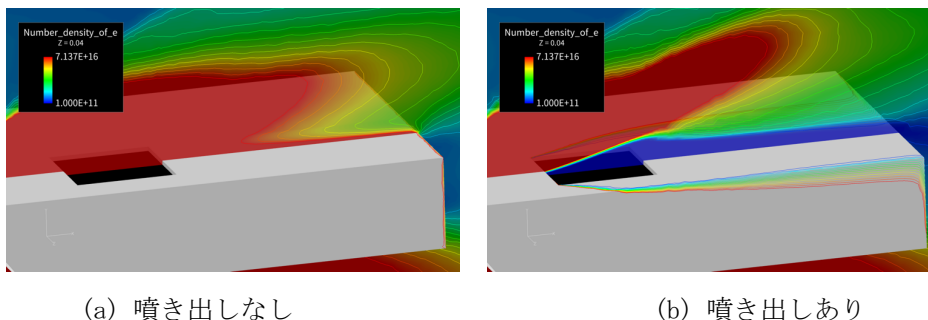


図7. エアフィルム（ガス噴き出し）による DLR 風洞模型近傍の電子数密度分布の比較

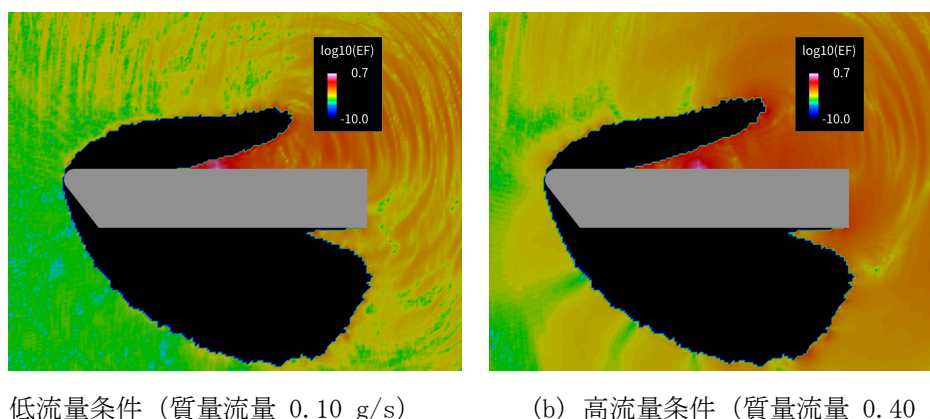
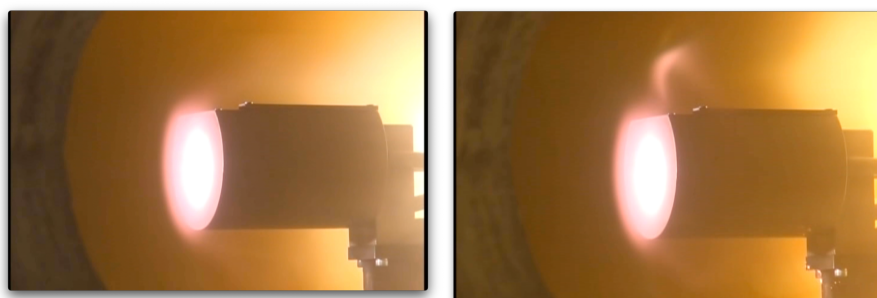


図8. 低・高流量エアフィルムにおける DLR 風洞模型近傍の電磁波伝播（電場絶対値の比較）

図8はエアフィルム低流量条件（0.10 g/s）および高流量条件（0.40 g/s）における DLR 風洞模型近傍の電磁波伝播の比較[8]である。エアフィルムが存在することによっていずれの噴き出し流量であっても模型表面近傍では電子密度の低下に伴う電磁波伝播が示されている。高流量条件のほうが高温プラズマをより模型表面から遠ざける結果となっており、電磁場の電場絶対値も領域全域にわたって高くなる傾向を示す。これはエアフィルム噴き出し流量が高いほどブラックアウト低減化がより効果的に働くことを示唆する結果である。ただし、実際の宇宙機搭載を考えた場合、装置質量・サイズの観点から低減化効果が同程度であるならば低流量条件の方が望ましい。この最適化問題は実際の再突入機や再突入軌道も考慮する必要があるものであり、数値解析・風洞課題のみでは解が得られない。したがって将来課題の1つである。

JAXA 1MW アーク加熱を用いてエアフィルムによるブラックアウト低減効果を実験的に調べた。図9は風洞気流投入時の風洞模型近傍の画像[9]である。模型前面には高温プラズマ気流の衝撃

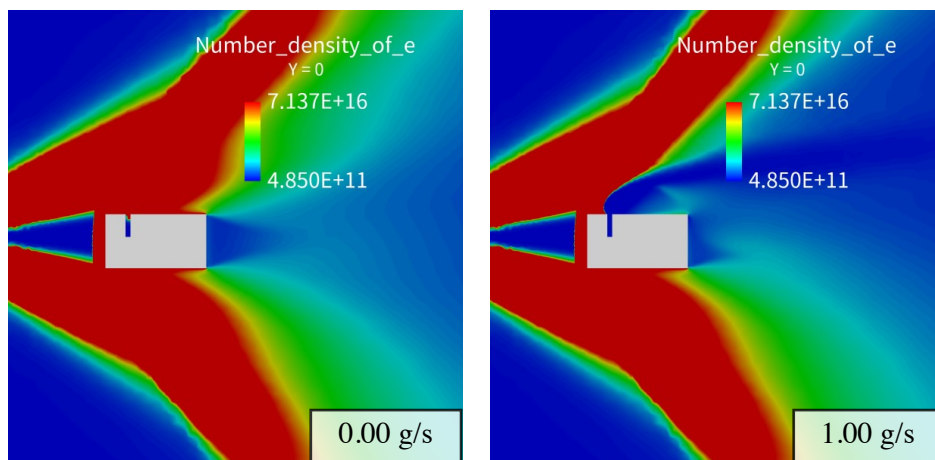


(a) 噴き出しなし（質量流量 0.00 g/s） (b) 噴き出しあり（質量流量 1.00 g/s）

図9. エアフィルム（ガス噴き出し）の有無による 1MW アーク加熱風洞模型近傍の画像比較

波が形成され、前面部は高温になっている。ガス噴き出しはこの画像において模型上部からなされている。エアフィルムが存在することによって、噴き出し口上部には2つ目の衝撃波形成に伴う高温領域が現れている。模型内部に搭載した送信機と風洞外部に設置した受信機間のシグナルを確認したところ、噴き出しなし（エアフィルムなし）の条件では信号がほぼ確認できなかったのに対し、噴き出しあり（エアフィルムあり）の条件では受信信号を確認することができた。すなわちエアフィルムなしでは通信ブラックアウトが発生しているのに対し、エアフィルムを用いることで通信ブラックアウトの低減が図られている。本研究を通してエアフィルムによるブラックアウト低減の実験的実証がなされたと言える。

次に数値解析を用いて JAXA 1MW アーク加熱風洞実験環境を再現し流れ場の詳細を調べた。図10はエアフィルムの有無による風洞模型近傍（断面）の電子数密度分布[9]である。この図においてガス噴き出し口は模型の切り込みのように見える領域である。ガス噴き出しを行うことによって低電離のエアフィルム層が形成されることが確認できる。実験において送信機は噴き出し口すぐ後方の模型内部に設置されていた。よって送信機から発した電磁波はエアフィルム層が存在しない場合、高密度プラズマによって伝播を阻害されてしまったのに対し、エアフィルム層が存在した場合その内部を通過して受信機に到達できたものと考えられる。以上よりエアフィルムによる通信ブラックアウト低減化は実験的実証に加えて数値的な実証も図られた。



(a) 噴き出しなし（質量流量 0.00 g/s）      (b) 噴き出しあり（質量流量 0.40 g/s）

図10. エアフィルム有無による1MWアーク加熱風洞模型近傍の電子数密度分布の比較

#### <引用文献>

1. M. Jung, et al., “Numerical simulation of plasma flows and radio-frequency blackout in atmospheric reentry demonstrator mission”. AIAA Paper 2017-3308, 2017.
2. Y. Takahashi, “Advanced validation of CFD-FDTD combined method using highly applicable solver for reentry blackout prediction”, Journal of Physics D: Applied Physics, Institute of Physics, Vol. 49, No. 1, 2016, 015201 (15pp).
3. Y. Takahashi, et al., “Flow Enthalpy of Non-equilibrium Plasma in 1 MW Class Arc-heated Wind Tunnel”, AIAA Journal, Vol. 59, No. 1, 2021. pp.263-275.
4. Y. Takahashi, et al., “Nonequilibrium Shock Layer in Large-Scale Arc-Heated Wind Tunnel”, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 55, No. 23, p. 235205, 2022.
5. Y. Takahashi, et al., “Surface catalysis effects on mitigation of radio frequency blackout in orbital reentry”, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 53, No. 23, 2020, 235203(13pp).
6. H. Takasawa, et al., “Experimental Demonstration and Mechanism of Mitigating Reentry Blackout via Surface Catalysis Effects”, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 54, No. 22, 2021. 225201(11pp).
7. B. Esser, et al., “Thermal qualification of transpiration cooling for atmospheric reentry”, Proceedings of the 1st CEAS European Air and Space Conference, 2007, pp. 3205-3210.
8. T. Miyashita, et al., “Study on Mitigation of Reentry Blackout by Effects of Air-film”, AIAA 2022-2150, AIAA SciTech Forum, 2022.
9. 宮下岳士、杉原祐二、高橋裕介、永田靖典、木原尚, 「1MWアーク加熱風洞におけるガス噴射を用いた通信ブラックアウト低減化実験」, 令和4年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takahashi Yusuke	4. 巻 58
2. 論文標題 Propagation path of radio waves in nonequilibrium reentry plasma around a nanosatellite with an inflatable aeroshell	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems	6. 最初と最後の頁 4070 ~ 4082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAES.2022.3158625	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 Takahashi Yusuke, Takasawa Hideto, Yamada Kazuhiko, Shimoda Takayuki	4. 巻 55
2. 論文標題 Nonequilibrium shock layer in large-scale arc-heated wind tunnel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 235205 ~ 235205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac5991	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 Takasawa Hideto, Takahashi Yusuke, Oshima Nobuyuki, Kihara Hisashi	4. 巻 54
2. 論文標題 Experimental demonstration and mechanism of mitigating reentry blackout via surface catalysis effects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 225201 ~ 225201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/abe746	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 -

1. 著者名 Takahashi Yusuke, Enoki Naoya, Koike Taiki, Tanaka Mayuko, Yamada Kazuhiko, Shimoda Takayuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Flow Enthalpy of Nonequilibrium Plasma in 1MW Arc-Heated Wind Tunnel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 263 ~ 275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J058407	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 Takahashi Yusuke, Enoki Naoya, Takasawa Hideto, Oshima Nobuyuki	4. 巻 53
2. 論文標題 Surface Catalysis Effects on Mitigation of Radio Frequency Blackout in Orbital Reentry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 235203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab79e0	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 -

1. 著者名 Enoki Naoya, Takahashi Yusuke, Oshima Nobuyuki, Yamada Kazuhiko, Suzuki Kojiro	4. 巻 2132
2. 論文標題 Aerodynamics of inflatable nano-satellite "EGG" in low earth orbit and reentry duration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings 2132	6. 最初と最後の頁 100002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5119597	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11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Takashi Miyashita, Hideto Takasawa, Yusuke Takahashi and Nobuyuki Oshima. Lars Steffens, Burkard Esser, Ali Guelhan
2. 発表標題 Study on Mitigation of Reentry Blackout by Effects of Air-film
3. 学会等名 AIAA SciTech Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮下岳士、高澤秀人、杉原祐二、高橋裕介、木原尚
2. 発表標題 1MWアーク加熱風洞におけるエアフィルム効果による通信ブラックアウト低減化通信試験
3. 学会等名 令和3年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮下 岳士, 高澤秀人, 高橋 裕介, 大島 伸行, Lars Steffens, Burkard Esser, Ali Guelhan
2. 発表標題 エアフィルム効果による再突入ブラックアウト低減化の数値的研究
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideto Takasawa, Yusuke Takahashi, Nobuyuki Oshima, Hisashi Kihar
2. 発表標題 Study on Mitigation of Reentry Blackout by Surface Catalysis Effects in Arc-Heated Wind Tunnel
3. 学会等名 Aerospace Europe Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高澤秀人, 高橋裕介, 大島伸行, 木原尚
2. 発表標題 1MWアーク加熱風洞における触媒再結合反応を用いた通信ブラックアウト低減化のメカニズム解明
3. 学会等名 令和2年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高澤秀人, 高橋裕介, 大島伸行, 木原尚
2. 発表標題 1MW アーク加熱風洞における触媒性再結合反応を用いた通信ブラックアウト低減化の通信試験およびメカニズム解明
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Toru TSURUMOTO, Yusuke TAKAHASHI, Hiroshi TERASHIMA and Nobuyuki OSHIMA
2. 発表標題 Numerical Analysis of Aerodynamic Instability for HAYABUSA Type Reentry Capsule
3. 学会等名 8TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋裕介
2. 発表標題 再突入ブラックアウト低減化に向けた数値的研究
3. 学会等名 日本学術会議第9回計算力学シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤雅弘, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行
2. 発表標題 超低軌道における膜面展開型超小型衛星のポストフライト解析
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋裕介, 山田和彦
2. 発表標題 大型再突入カプセルの空力加熱解析検討
3. 学会等名 第63回宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋裕介, 榎尚也, 木原尚, 山田和彦, 下田孝幸
2. 発表標題 ISAS 1MW アーク加熱風洞におけるアーク加熱気流について
3. 学会等名 平成30年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	グルハン アリ  (Guelhan Ali)	ドイツ航空宇宙センター・Supersonic and Hypersonic Technologies Department・Professor, Department Head	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ユーカーマン ベンヤミン  (Uekermann Benjamin)	シュトゥットガルト大学・Institute for Parallel and Distributed Systems・Junior professor	

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
---------	---------