

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14871

研究課題名（和文）表面効果による再突入ブラックアウトの低減化研究

研究課題名（英文）Study on Reduction of Reentry Blackout by Surface Catalysis Effect

研究代表者

高橋 裕介 (Takahashi, Yusuke)

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：40611132

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：惑星大気再突入時に宇宙機に現れる通信ブラックアウトは高精度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による通信ブラックアウト低減化技術の可能性を調べ、実験的な実証を行った。アーク加熱風洞と呼ばれる地上において再突入時の高温環境を模擬する装置を用いて再突入プラズマ中の通信状況を再現した。高触媒・低触媒材料の通信モデルによって比較試験を行い、高触媒ケースで通信状況が改善される結果を得た。加えて数値解析によってその状況を再現し、低減化に至るメカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙開発利用や小型衛星・超小型衛星の近年の進展から、宇宙から地上に資料などを持ち帰る需要や機会は増大していくと期待される。その際において地球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一つであり、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。本研究ではこの問題を緩和するために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。本成果はブラックアウト低減化だけでなくスピノフとして表面触媒によるプラズマ制御技術につながることも期待される。

研究成果の概要（英文）：The radio frequency (RF) blackout for telecommunications between a reentry vehicle and a ground station hinders the accurate prediction of landing sites and increases the recovery cost. A mitigation method of RF blackout has been demanded. In this study, I proposed and demonstrated the new mitigation method using the surface catalysis effects with numerical simulation approach and wind tunnel experiments. The communication situation in reentry plasma was experimentally reproduced by 1 MW arc-heated wind tunnel, which generates high-temperature flows on the ground. Comparative tests were performed by two test models with high and low catalysis material of surfaces. The results indicated that the test model having high catalysis improves the communication situation, that is, mitigation of RF blackout. In addition, the mechanism to mitigating the RF blackout was clarified by the use of numerical analysis.

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 アーク加熱風洞 通信ブラックアウト低減化技術 表面触媒性 空力加熱 プラズマ中の電磁波伝播

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

惑星大気再突入機の着地・着水点高精度予測は、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。再突入機は7.8 km/s以上の高い軌道速度を持つことから、再突入時において前方に強い衝撃波を生じ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(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ためである。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。

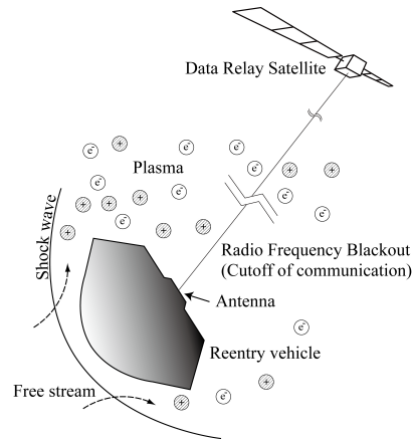


図1. 通信ブラックアウト概略

通信ブラックアウトは再突入機近傍の電子密度に強く影響される。そのためブラックアウトを低減化する上で電子をどのように低減させるかが鍵となる。これまでの研究において、印加磁場によってアンテナ近傍のプラズマ分布を変化させ、電磁波伝播経路を作り出す Magnet window[1]、大面積膜面を展開することで高高度での十分な空力減速を可能しプラズマ生成の低下を図る Inflatable vehicle 技術[2]などが提案されている。

2. 研究の目的

一般に、再突入機近傍に形成される衝撃層内は高温であることからN、Oなどの解離気体、N₊、O₊、e-などの電離気体が生じる。これら化学種が機体表面に触れるとき、表面材料が触媒として働き原子種の再結合(例: N+N→N₂)反応が生じる触媒性効果が現れる。Jungら[3]の数値計算では、表面触媒を与える再突入機後流において電子数密度が低下することが示唆されている。すなわち表面触媒効果が通信ブラックアウトを低減化する可能性が示されている。これは新しい通信ブラックアウト低減化技術になる可能性がある。よって表面効果が通信ブラックアウトに与える影響とメカニズムを明らかにし、低減化技術を提案することは重要な知見になり得る。以上より、本研究の目的を表面触媒効果による通信ブラックアウト低減技術の実証に設定した。

3. 研究の方法

表面触媒性を用いたブラックアウト低減技術を実証し、そのメカニズムを明らかにする上で、ロケットなど用いた打ち上げ・再突入試験が有効ではある。しかし、そのコストは極めて大きく実現するのは難しい。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し、低減化技術に関連した研究を行う。

3-1. 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ら[4]によって、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された。そのソフトウェア構成は、FaSTAR[5]をベースに再突入時の高エンタルピー流解析を実施できるよう改変したRG-FaSTARと、プラズマのような分散性媒質における電磁波伝播を再現するFD2TD法を実装した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。

3-2. 実験手法

アーク加熱風洞と呼ばれる地上において再突入時の高温環境を模擬するプラズマ風洞を用いる。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。



図2. 試験模型と通信モジュール:

左側が高触媒模型、右側が低触媒模型

4. 研究成果

4-1. 通信試験模型の作成・触媒材料の選定

通信試験模型の作成を行った。作成した試験模型を図2に示す。2つの違いは表面材料のみである。合わせて後流プラズマ密度の低下が期待できる触媒能（材料がもつ触媒性の高さである触媒性再結合係数）材料の選定を実施した。高触媒材料として銅を用いた模型（図中左）と、低触媒模型としてアルミナを用いた模型（図中右）を用意した。模型は直径50mm、長さ80mmの円筒形状で、水冷パイプに接続されている。これは試験時の高温プラズマからの熱ダメージを避けるためである。内部にはリンク周波数2.4GHzの送信機を格納している。

九州大学20kWアーク加熱風洞を用いてプラズマ気流を生成し、通信試験モデルの動作確認試験を実施した。ここでの目的はブラックアウト予測ツールの解析モデル検証、試験モデルの健全性（耐熱性・耐圧性など）のチェックとしている。風洞計測データ（気流圧力や表面熱流束）と数値解析結果を比較して、妥当性評価を実施した。

4-2. アーク加熱気流の気流診断

アーク加熱風洞はアーク放電と超音速膨張を利用して高温・高速の超音速気流（アーク加熱気流）を生成する装置である。これら複雑な現象を内包することからアーク加熱気流は空間的に強い非均一性を生じてしまう。この非均一性は、アーク加熱風洞を風洞として利用して質の高い実験を行う上で妨げとなる。そのため、予め気流診断を行い、その素性を明らかにしておく必要がある。

ここでは発光分光測定法によるNO分子の回転温度分布を明らかにした。さらに数値解析によって気流エンタルピーや諸量分布を明らかにした。この数値解析モデルは過去に行われたプローブ計測技術による衝突圧力、熱流束データ、さらに今回行った上記の回転温度からその妥当性を検証した。

図3は今回の試験で用いた1MWアーク加熱風洞におけるアーク加熱気流のエンタルピー半径方向分布である。数値解析によって得られた。

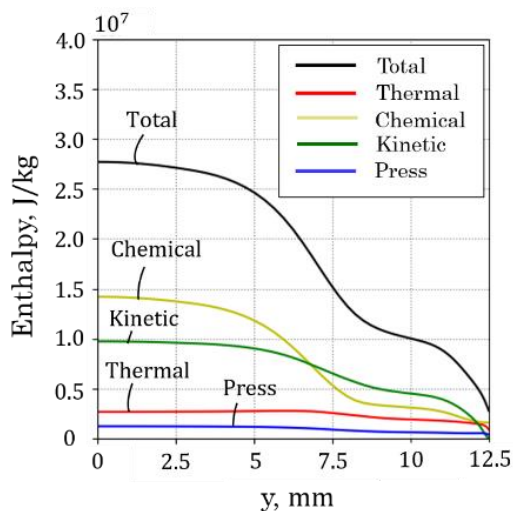


図3. 1MWアーク加熱気流の半径方向気流エンタルピー分布とその内訳（数値解析結果）

4-3. アーク加熱風洞を用いた実験的実証

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所に設置される1MWアーク加熱風洞を利用した。アーク放電を生じさせることで流入気体を加熱し、超音速ノズルを通ることによって高温・高速の超音速気流を生成するものである。宇宙機が大気再突入時に遭遇する環境とは厳密には異なるが、衝撃波背後の高温環境を再現することで再突入時の加熱環境を模擬する。1MWアーク加熱風洞は国内最大級のプラズマ風洞で、はやぶさサンプルリターンカプセルが経験した加熱環境を模擬できる。

実験条件を表1に示している。入力電流と入力質量流量が基本的な入力条件である。

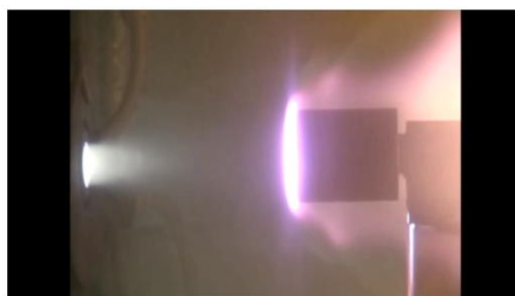


図4. 1MWアーク加熱風洞における加熱試験

表1. 1MWアーク加熱風洞のオペレーション条件

Input current, A	450
Input mass flow rate, g/s	18
Total temperature of gas	300
Gas	Air

図4に加熱試験時の様子を示す。ただしこの図は今回の模型を用いたものでないことを述べておく。ノズル出口から高温・高速気流が生成される。模型前方には衝撃波が形成され、その背後に高温のプラズマが形成されている。本実験では模型内部に送信モジュールを設置、および風洞外部に受信機を設置することで通信状況を計測している。

1MW アーク加熱風洞が作り出すプラズマ気流の中に先の述べた2つの通信模型を投入し再突入プラズマにおける通信環境を再現した。さらに、それぞれの通信状況を比較することによって触媒性による通信ブラックアウトの改善を調べた。通信状況の履歴を図5に示す。図中網掛けの領域が通信模型をプラズマに投入した区間である。プラズマ気流投入前後ではいずれも通信が維持されている。プラズマ気流に投入すると、低触媒材料では通信ブラックアウト(通信途絶)が生じるのに対し、高触媒材料では減衰は生じるものの送受信機の通信は継続しており通信ブラックアウトは生じなかった。すなわち表面触媒性による通信ブラックアウト低減が示された。

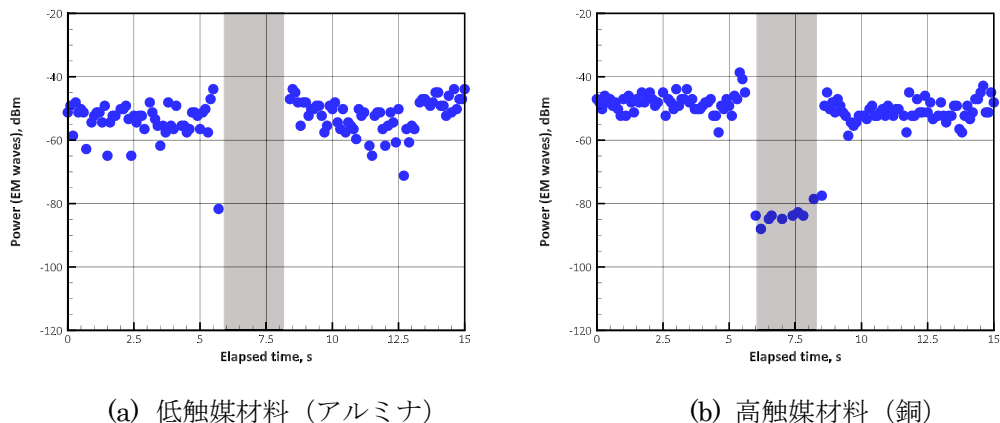
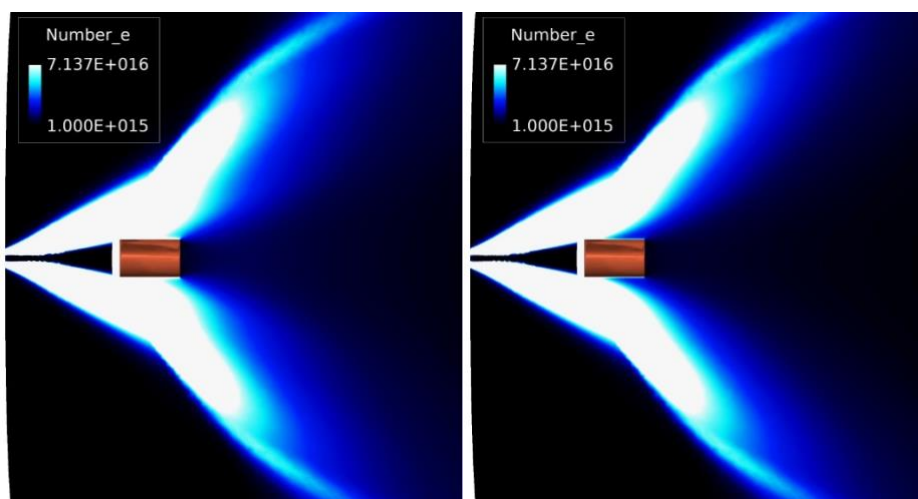


図5. 1MW アーク加熱風洞のプラズマ気流中における通信状況 (実験結果)

4-4. 数値解析を用いた低減効果メカニズムの解明

上記のプラズマ気流環境における電磁波伝播を数値解析的手法によって再現し、その低減化メカニズムを調べた。図6はアーク加熱気流中における通信模型周りの電子数密度分布である。アーク加熱気流の入り口条件は4-1で明らかにした半径方向プラズマ諸量分布を用いた。非触媒ケースと完全触媒のケースを比較している。これは数値解析における触媒性がゼロか最大であるかの極端なケースであるが、実験における低触媒・高触媒にそれぞれ対応している。通信模型前方には強い衝撃波が生じ、電子数密度が高くなる領域が現れる。衝撃層内の流れは側面を通過し、模型後方に流れる。通信模型は高密度の電子に囲まれている。通信模型の側面に注目すると、高触媒ケースにおいて電子が低減する領域があることが確認できる。実験での通信モジュールは模型側面部を窓として電磁波を発信していた。低触媒ケースではその近傍の電子が低減したことによって、電磁波伝播経路が形成され、外部の受信モジュールに電磁波が到達したと考えられる。



(a) 非触媒ケース (b) 完全触媒ケース

図6. 1MW アーク加熱気流における通信模型近傍の電子数密度分布 (数値解析結果)

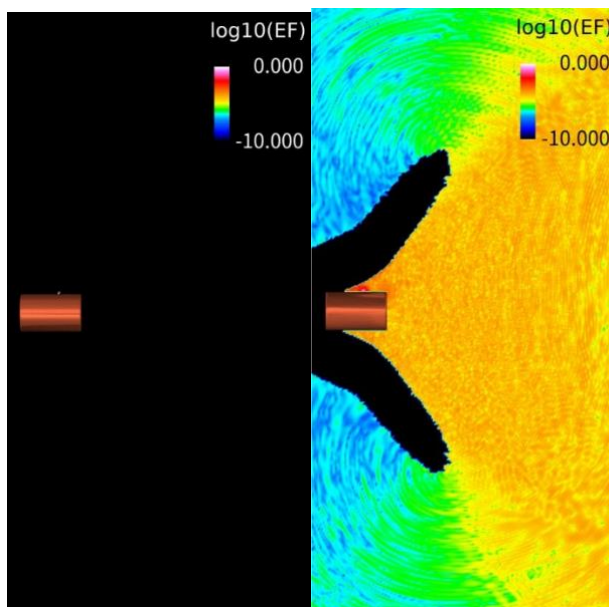
図7は数値解析によって得られた電磁波の伝播状況(電場の絶対値)である。プラズマ流解析によって得られたプラズマ諸量を電磁波解析の計算領域にマッピングし、電磁波伝播解析を実施した結果である。対象は非触媒ケースと完全触媒のケースである。通信アンテナは通信模型側

面部に設置している。

非触媒ケースではアンテナ上部に臨界電子数密度(ある周波数以下の電磁波が伝播できなくなる電子数密度)以上の電子が生じたため、電磁波発信はされなかった。すなわち通信ブラックアウトが生じている。

一方で完全触媒ケースでは電磁場は伝播し、通信ブラックアウトは生じない。模型前方と側面部から少し離れた領域には臨界電子数密度以上の領域が現れ、電磁波は伝播できなくなっている。通信模型後方ではプラズマが希薄化し、電子数密度が低減、すなわち電磁波伝播経路が形成される。この経路を通過して外部の受信モジュールに電磁波は到達した。

触媒ケースにおける電子数密度の低減について、化学反応を調べた結果、以下のメカニズムが示唆されている：(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。



(c) 非触媒ケース (b) 完全触媒ケース

図 7. 1MW アーク加熱気流における通信模型近傍の電磁波伝播状況 (数値解析結果)

<引用文献>

1. M. Kim, M. Keidar, and I.D. Boyd. “Analysis of an Electromagnetic Mitigation Scheme for Reentry Telemetry Through Plasma”. Journal of Spacecraft and Rockets, 45(6):1223- 1229, November-December 2008.
2. Y. Takahashi, K. Yamada, and T. Abe. “Examination of Radio Frequency Blackout for an Inflatable Vehicle during Atmospheric Reentry”. Journal of Spacecraft and Rockets, 51(2):430-441, March 2014.
3. M. Jung, H. Kihara, K. i. Abe, and Y. Takahashi. “Numerical simulation of plasma flows and radio-frequency blackout in atmospheric reentry demonstrator mission”. AIAA Paper 2017-3308, 2017.
4. Y. Takahashi. “Advanced validation of CFD-FDTD combined method using highly applicable solver for reentry blackout prediction”. Journal of Physics D: Applied Physics, 49(1):015201, 2016.
5. A. Hashimoto, K. Murakami, T. Aoyama, K. Ishiko, M. Hishida, M. Sakashita, and P.R. Lahur. “Toward the Fastest Unstructured CFD”. AIAA Paper 2012-1075, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahashi Yusuke, Matsunaga Manabu, Oshima Nobuyuki, Yamada Kazuhiko	4. 巻 56
2. 論文標題 Drag Behavior of Inflatable Reentry Vehicle in Transonic Regime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Spacecraft and Rockets	6. 最初と最後の頁 577-585
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.A34069	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, Yamada Kazuhiko	4. 巻 152
2. 論文標題 Aerodynamic heating of inflatable aeroshell in orbital reentry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 437 ~ 448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2018.08.003	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 OHASHI Tatsushi, TAKAHASHI Yusuke, TERASHIMA Hiroshi, OSHIMA Nobuyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Aerodynamic instability of flare-type membrane inflatable vehicle in suborbital reentry demonstration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JFST0020
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2018jfst0020	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 Jung Minseok, Kihara Hisashi, Abe Ken-ichi, Takahashi Yusuke	4. 巻 25
2. 論文標題 Reentry blackout prediction for atmospheric reentry demonstrator mission considering uncertainty in chemical reaction rate model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 013507 ~ 013507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5010713	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, Esser Burkard, Steffens Lars, Guelhan Ali	4. 巻 24
2. 論文標題 Plasma flow modeling for Huels-type arc heater with turbulent diffusion	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 123509 ~ 123509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5008909	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 該当する

1. 著者名 高橋裕介, 松永学, 大島伸行, 山田和彦	4. 巻 65
2. 論文標題 柔軟エアロシェル大気圏突入機の空力加熱解析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 370-376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14822/kjsass.65.12_370	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 Yusuke Takahashi, Taiki Koike, Nobuyuki Oshima, Kazuhiko Yamada	4. 巻 92
2. 論文標題 Aerothermodynamic Analysis for Deformed Membrane of Inflatable Aeroshell in Orbital Reentry Mission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Aerospace Science and Technology	6. 最初と最後の頁 858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ast.2019.06.047	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19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Naoya Enoki, Yusuke Takahashi, Nobuyuki Oshima, Kazuhiko Yamada and Kojiro Suzuki
2. 発表標題 Aerodynamics of Inflatable Nano-Satellite "EGG" in Low Earth Orbit and Reentry Duration
3. 学会等名 31st Internal Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018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

1. 発表者名 大橋達志, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行
2. 発表標題 観測ロケットを用いた再突入試験における柔軟構造体の空力安定性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 榎尚也, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行
2. 発表標題 表面触媒性効果を用いた大気圏再突入時の通信途絶現象低減化に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋裕介, 小池太輝, 大島伸行
2. 発表標題 柔軟構造再突入機の空力加熱について
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taiki Koike, Yusuke Takahashi, Nobuyuki Oshima, and Kazuhiko Yamada
2. 発表標題 Aerodynamic Heating Prediction of Flare-type Membrane Inflatable Reentry Vehicle from Low Earth Orbit
3. 学会等名 2018 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2018-0289), AIAA (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsushi OHASHI, Manabu MATSUNAGA, Yusuke TAKAHASHI, Hiroshi TERASHIMA, Nobuyuki OSHIMA
2. 発表標題 Aerodynamic Instability of Flare-type Membrane Inflatable Vehicle in Suborbital Reentry Demonstration
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoya ENOKI, Manabu MATSUNAGA, Yusuke TAKAHASHI, Hiroshi TERASHIMA, Nobuyuki OSHIMA, Kazuhiko YAMADA, Kojiro SUZUKI
2. 発表標題 Prediction of electromagnetic waves around an inflatable reentry vehicle in an atmospheric reentry mission
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Minseok Jung, Hisashi Kihara, Ken-ichi Abe, and Yusuke Takahashi
2. 発表標題 Numerical Simulation of Plasma Flows and Radio-Frequency Blackout in Atmospheric Reentry Demonstrator Mission
3. 学会等名 47th AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA AVIATION Forum, AIAA paper 2017-3308, AIAA (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋裕介, 小池太輝
2. 発表標題 大気再突入時における宇宙機の空力・空力加熱について
3. 学会等名 北海道大学-JAXA連携企画講演会・HASTIC学術技術講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小池太輝, 高橋裕介, 大島伸行, 山田和彦
2. 発表標題 展開型柔軟構造エアロセルの空力加熱解析
3. 学会等名 平成29年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎尚也, 高橋裕介, 大島伸行
2. 発表標題 柔軟構造再突入体に対する再突入ブラックアウト評価
3. 学会等名 平成29年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 榎尚也, 松永学, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行
2. 発表標題 柔軟構造体に対する再突入ブラックアウトの数値解析
3. 学会等名 第49回流体力学講演会 / 第35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 2017年

1. 発表者名 大橋達志, 松永学, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行
2. 発表標題 観測ロケットを用いた柔軟構造体の再突入試験における空力不安定性解析
3. 学会等名 第49回流体力学講演会 / 第35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 2017年

1. 発表者名 小池太輝, 高橋裕介, 大島伸行
2. 発表標題 大気圏再突入用柔軟構造エアロシェルの空力加熱解析
3. 学会等名 第49回流体力学講演会 / 第35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 2017年

1. 発表者名 Hideto Takasawa, Yusuke Takahashi, Nobuyuki Oshima, Hisashi Kihara,
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通信試験
3. 学会等名 和元年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2019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通信ブラックアウト低減化の数値シミュレーション
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 高澤秀人, 高橋裕介, 大島伸行
2. 発表標題 アーク加熱風洞における通信ブラックアウト低減化の数値解析
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37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 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高エンタルピー流解析ソフトウェア『RG-FaSTAR』の開発

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