

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02361

研究課題名（和文）軽ガス銃による実飛行等価環境で検証された高精度・高信頼度の輻射加熱予測手法の開発

研究課題名（英文）Development of a Highly Accurate and Reliable Radiation Heating Prediction Method Verified by a Light Gas Gun in the Flight-Equivalent Environments

研究代表者

藤田 和央 (Fujita, Kazuhisa)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：90281584

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：先行研究を発展させた軽ガス銃の改修と運用条件の工夫によって、火星大気突入システムを模擬したプロジェタイル周りに、代表的な火星大気突入環境と等価環境を再現する技術確立した。また模型可視化システムの改良によって、模型の位置と姿勢を高精度で識別する可視化システムの開発に成功した。これらに加え、模型周りに生じる発光の分布を計測して分光することが可能なマトリクス分光システムを開発し、可視化システムと同期することによって、模型周りの高温大気および模型自身からの発光を取得し、これを分光するシステムの開発に成功した。これにより、地上実験によって飛翔体への輻射加熱率を計測する技術の開発に目途が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、世界で初めて火星大気突入環境と等価環境を地上に再現し、これを用いて世界で初めて実在気体空力係数を実測し輻射分布計測を行った、という点において、高い学術的意義を有する。欧米においては、高い費用をかけて火星ミッションを行い、飛行データを取得することによって、実在気体空力係数や輻射加熱に係る情報を得ているが、これらは機会が限られている上に費用対効果が著しく低い。本研究によって、火星大気突入環境と等価環境を地上に再現し、これを飛行試験として計測を行うことによって、費用対効果が極めて高い試験環境が地上に実現し、将来の火星大気突入ミッションにおける我が国の優位性が実現されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：By modifying the light gas gun and devising the operating conditions, we have established a technique to reproduce an environment equivalent to a typical Martian atmospheric entry environment around a projectile that simulates a Martian atmospheric entry system for future Martian landing missions. We also succeeded in developing a visualization system that identifies the position and attitude of the model with higher accuracy than before by improving the model visualization system developed previously. In addition, we developed a matrix spectroscopy system that can measure and spectroscopy the distribution of luminescence around the model, and succeeded in developing a system that acquires and spectroscopy the luminescence from the hot gas around the model and from the model itself by synchronizing with the visualization system. This has paved the way for the development of a technique to measure the heating rate of the radiation to the entry vehicle by ground-based experiments.

研究分野：大気突入システム

キーワード：火星探査 大気突入システム 実在気体効果 輻射加熱 非平衡

## 1. 研究開始当初の背景

現在、2030年以降のポストISSの新しい枠組みとして国際協働有人火星探査が、およびその前段階として月圏を利用した有人探査による技術獲得が米国によって提唱され、国際宇宙探査調整グループ(ISECG)によって検討が進められている。我が国はISSの主要な参加国として国際的に確固たる地位を占めており、月圏における有人探査や国際協働有人火星探査においても引き続き主要な役割を果たすことによって、技術立国としての我が国の国際的な地位を維持・発展させることができると期待される。国際協働有人火星探査を実現するために必要な技術は多岐にわたっているため、我が国がそのすべてにおいて高いレベルの技術を保有することは現実的ではなく、戦略的な選択と集中によって担当する技術領域における優位性を実現し、国際的な技術パートナーシップの中で存在感を示すべきである。米国の圧倒的な宇宙探査技術力の中にあっても、我が国は大気突入技術において国際的に高い評価を得ており、当該技術の国際的な優位性を維持・発展させ、国際協働有人火星探査においても当該技術で主要な役割を担うことを狙うべきである。文部科学省・宇宙開発利用部会の国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会においても、我が国が今後獲得すべき探査技術の4つの柱の1つとして「重力天体着陸技術」が識別されており、本研究はその構成要素技術である大気突入技術を大きく前進させ、国際競争力を高める研究である。

国際有人火星探査へ至る技術ロードマップによれば、大気突入技術の最も重要な課題の一つとして、火星大気中の極超音速飛行において、大気の主成分である二酸化炭素およびその生成物から放射される強い赤外線放射を高い信頼度で定量化し、この結果として大気突入機の熱防御システム(TPS)を最適設計・軽量化し、火星表面上へ輸送可能なペイロードを最大化すること、が挙げられている。火星への大気突入速度は一般に毎秒4km前後であり、想定される空力加熱は地球低軌道からの再突入と同等か、それよりも低いレベルである。しかし、火星大気の主成分である二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)と、その高温環境下で生成物される一酸化炭素(CO)は、赤外線領域に強い放射スペクトルを有するため、全加熱率に占める放射加熱率の寄与は大きく、特に大気突入機の背面においては9割以上になると推定されている。

放射は、大気突入機の前方に形成される衝撃波背後の温度上昇、これに伴うCO<sub>2</sub>の解離(COの生成)と分子の内部モード(回転・振動・電子励起モード)の励起、大気突入機を通過する流れの急膨張による温度の低下など、複雑な熱化学過程を伴う流体现象の結果として発生する事象である。このため、これらの複雑過程をすべて正確に理解しなければ放射加熱率を正確に予測することが困難であり、現状では予測精度が著しく悪い。この課題は地球への再突入においても同様であるが、地球では過去の膨大な飛行データから放射加熱の上限が経験的に予測されており、また空力加熱の大部分が高温ガスからの熱伝達であることから、放射加熱の予測誤差が重要となることはない。しかし火星においては、フライト環境における計測値がほとんど存在せず、大気突入機の背面において放射加熱の寄与が総加熱の大部分を占める。このため、先行する諸外国の火星探査における大気突入機においては、放射加熱予測の不確実性のため十分なマージンをもってTPSを設計せざるを得ず、大気突入機に占めるTPSの重量は依然として大きい。将来の国際協働火星探査においては、大気突入・着陸機の大型化が予想されるため、信頼性を維持しながらTPSの重量を極限まで削減することが必須であり、放射加熱の正確な予測が可能な信頼性の高い手法を新たに獲得することが極めて重要である。

## 2. 研究の目的

上記の課題を解決し、国際的な技術優位性を獲得するために、本研究では、大気突入機周りで生じる複雑な熱化学過程を伴う流体现象を正確に理解し、これを数理モデル化し、フライト等価環境によって検証・改善することによって、高精度で信頼性の高い放射加熱予測手法を獲得することを目的とする。これにより、世界で初めてフライト等価環境で検証された高信頼度の放射加熱予測手法が獲得され、火星大気突入・着陸機のTPSの最適・最軽量設計が可能となり、地上へ運搬可能なペイロードの重量最大化が実現し、大気突入技術における我が国の技術優位性が獲得される。その結果として、我が国が国際協働有人火星探査の大気突入・着陸機の開発において先導的な役割を果たすことが可能となり、国際探査の枠組みの中で確固たる地位を確立できる。

火星探査で先行する諸外国においても、放射加熱予測精度に係る課題は認識され、実験的・解析的な研究が実施され、数値流体・放射解析モデル等が開発されてきたが、未だに有効な解決策が存在しない。この大きな理由の一つが、フライト等価環境を地上で再現することが困難であるため、数値モデルの検証が不完全・不十分であり、信頼性を確保できないことにある。諸外国の研究では、衝撃波管、膨張波管、衝撃風洞、高エンタルピー風洞を用いた実験的手法を採用しているが、いずれもフライト等価環境を部分的に模擬できるに過ぎず、複雑な熱化学過程を伴う流体现象の結果として生じる放射がフライト環境と本質的に異なる。

これに対して研究代表者は、後述する先行研究の成果を発展させて、軽ガスにより射出される模型を用いてフライト等価環境を再現する計画であり、この点において独自性を有する。この手法は、1990年代にNASAにおいても実施されたことがあるため独創的であるとは言えないが、当時は熱化学過程を伴う流体现象や放射過程のモデリング精度が悪く、また計測機器の性能も高速移動する模型周りの現象を十分に解像することができなかったため、上記の課題を解決することが

できなかった。研究代表者らは、先行研究を発展させることにより当時の技術的な課題を克服し、極短時間赤外分光法やマルチポイント分光法など独創的な実験技術を導入することによって、世界で初めてフライト等価環境で検証された高信頼度の放射加熱予測手法を獲得することを、本研究の最終目標とする。

### 3. 研究の方法

本研究においては、まず軽ガス銃により射出される自由飛行模型周りに多様な火星フライト等価環境を再現する手法を確立する。また、軽ガス銃の観測部に極短時間赤外分光システムおよびマルチポイント分光システムを構築し、模型周りの高温ガスから放射される赤外線放射を分光学的に観測することにより、火星フライト環境で大気突入機に作用する放射加熱率を定量化する。これによって、火星フライト環境における放射加熱率が世界で初めて多様な飛行条件において定量化される。並行して、大気突入機周りで生じる複雑な熱化学過程を伴う流体現象と、CO<sub>2</sub> および CO の赤外放射過程を正確にモデル化し、衝撃波管・膨張波管の実験によって検証・改善を行う。最後に、上記の解析モデルを用い、試験条件において自由飛行模型周りの流体・放射解析を行い、数値解析により得られる放射強度の空間分布と実験結果を比較することによって解析モデルの検証を行い、誤差があれば解析モデルを改善し、これを反復的に実施することによって、最終的にフライト等価環境によって検証された高精度で信頼性の高い放射加熱予測手法を獲得する。以下に、研究方法の概要を示す。

まず、研究代表者らが所属する宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が所有する軽ガス銃の改修を実施し、火星大気中の極超音速飛行における実在気体効果を実測するために、大気突入機の代表的な最大動圧環境におけるフライト等価環境を再現する実験手法を獲得した。しかし、大気突入機への放射加熱は、高高度で低密度の大気中を高速で飛行する環境から、大気抗力による減速を経て、低高度で高密度の大気中を飛行する環境まで、広範囲の飛行条件において発生するため、本研究においては、上記の実験手法を拡張することが必要である。そこで、代表的な火星大気突入軌道に沿って放射加熱が重要となる複数のフライト条件を設定し、これらの火星フライト等価環境を再現できる軽ガス銃の作動条件を決定する。

また、同先行研究においては、射出される模型が自由飛行中に姿勢を変化させる様子を観測するために、姿勢変化を自由飛行中に観測できる系ガス銃の観測部とともに観測システムを開発した。これに加えて放射分布を計測するためには、模型の姿勢に対してマッピングする必要があるため、当該観測システムは本研究でも利用する必要があるが、既存の観測部では同時に放射スペクトル分布を観測することが困難である。そこで、新たに別位置から放射を計測する観測窓を有する観測部に設計・開発し、姿勢・位置観測システムと同期させながら放射分布の同時観測を行うことが可能な観測部を実現し、既存の可視分光装置を用いて観測部、姿勢観測システム、分光観測が適切に機能することを検証する。

並行して、先行研究の成果を発展させ、複雑な熱化学過程を伴う流体現象と CO<sub>2</sub> および CO からの放射モデリングの改善を行う。これらの先行研究においては、①CO<sub>2</sub> の解離速度係数に対する新しいモデル提案、②CO<sub>2</sub> 放射モデルの大幅な(従来比で誤差 1/4 以下の)精度改善が得られたが、模型背後の膨張流において従来の CO+O 再結合速度係数に大きな誤差がある可能性が発見されたものの、その定量化には至っていない。当該化学反応は、模型背後の CO<sub>2</sub> および CO からの放射強度に支配的な影響を与えるため、先行研究を発展させて再結合速度係数の定量化を行う。具体的には、既存の膨張波管の出口に膨張ダクトを新たに追加し、膨張流中での CO<sub>2</sub> および CO の放射スペクトル分布が取得可能な実験装置・観測システムを構築する。これを用いて膨張流におけるスペクトルの変化を観察し、比較解析として流体解析と放射解析を実施し、実験結果が再現できるように解離速度係数を調整することによって、新たな再結合速度係数をモデル化する。

次に、軽ガス銃へ設置する極短時間赤外分光法やマルチポイント分光法の開発を行う。先行して既存の可視分光装置を用いた実験システム・観測システム間の調整と機能検証は完了しており、同等の機能を有する赤外分光システムを開発し、可視分光装置への置き換えを行う。既に先行研究において、液体窒素冷却型遠赤外線 ICCD を検出器とし、遠赤外分光器と組み合わせた観測システムが開発済みであるため、これを適用して試験運用・機能検証を完了する。また赤外光学系を複数構築して、多地点のスペクトルを同時に取得可能なマトリクス分光システムを構築する。

最後に、上記の改善された複雑系流体解析および放射解析モデル、試験装置、および計測システムを用いて、選定された複数のフライト等価環境において実験を行い、模型周りの高温ガスから放射される赤外線放射を分光学的に観測することによって、火星フライト環境で大気突入機に作用する放射加熱率を定量化する。また、上記の解析モデルを用い、試験条件において自由飛行模型周りの流体・放射解析を行い、数値解析により得られる放射強度の空間分布と実験結果を比較することによって解析モデルの検証を行い、誤差があれば解析モデルを改善し、これを反復的に実施することによって、最終的にフライト等価環境によって検証された高精度で信頼性の高い放射加熱予測手法を獲得し、その成果を報告する。

### 4. 研究成果

#### (1) 軽ガス銃による火星大気突入等価環境の実現と模型可視化精度向上

先行研究の成果を発展させ、軽ガス銃の改良や試験条件の工夫・調整(隔膜の仕様改善、ドライバガス圧の高圧化、圧縮管ヘリウム充填圧の調整など)によって、代表的な火星大気突入環境の最

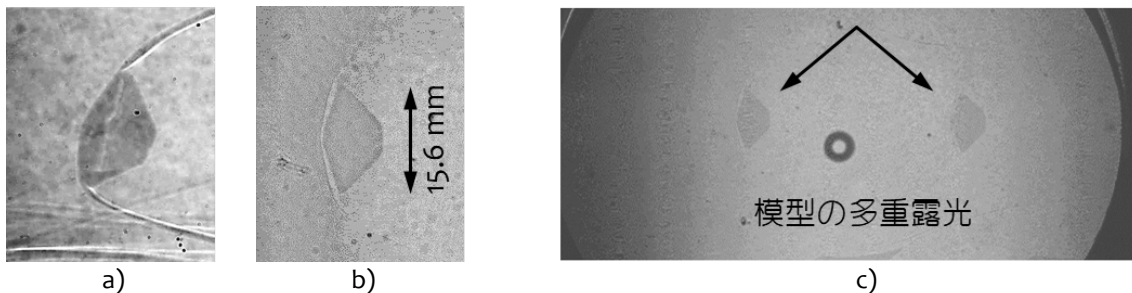


Fig.1 可視化システムの改善による模型姿勢識別精度の改善 (a: 旧来の可視化システム, b: 改善された可視化システム, c: 改善された可視化システムで模型を一定時間間隔で多重露光し, これにより従来比で 2 倍以上の精度で速度, 姿勢変化等が決定されるようになった).

大動圧点と等価環境となる条件で火星大気突入システムを模擬したプロジェクトイルを安定的に飛行させることができるようになり, 火星大気突入環境と等価環境を地上に再現する技術を確立した. 当該条件は, 直径 15.6 mm の模型を圧力 11 kPa 中の CO<sub>2</sub> 大気中に速度 4.2 km/s で飛行させる条件であり, 試験条件の改善によって模型速度は最大 4.7 km/s 程度までを実現可能である. また, 模型可視化システムの改善によって, Fig. 1a および 1b に示す通り, シャープな模型画像が取得できるようになり, 位置・姿勢の識別精度が従来比で 2 倍以上改善した. 現在, 模型周りの解像度は 0.1 mm 以下 (模型直径比で 0.6% 以下), ピッチ角誤差は 0.5° 以下である. これによって, Fig. 1c に示すように一定時間間隔で多重露光した模型の位置・姿勢の変化を高い精度で決定できるようになり, 実在気体空力係数も実用レベル (正確度 5% 以内) で計測できるようになった. この高い位置決定精度を用いて, 後述するマトリクス分光システムを同期させ, 正確に模型周りの発光分布を計測し, 分光できるようになった.

(2) 膨張ノズルを用いた赤外放射観測による CO<sub>2</sub> 熱化学状態量変化の計測

火星大気突入機背面への輻射にもっとも影響を与えるのは CO<sub>2</sub> の再結合反応 (CO+O→CO<sub>2</sub>) である. 火星大気突入機背面は急膨張により化学反応が非平衡状態にあると予想されるため, 再結合反応速度係数が平衡定数と乖離反応速度係数から決定されるという仮定は疑問があるため, 本研究では CO<sub>2</sub> の再結合反応速度係数を含む, CO<sub>2</sub> の熱化学状態量変化を, 膨張ノズルを用いた赤外放射観測によって観測することを試みた. 本研究の期間において, 膨張フェーズにおける CO<sub>2</sub> 熱化学状態量の変化を観測するための膨張ノズルを開発し, 赤外放射観測システムの開発も完了し, CO<sub>2</sub> 熱化学状態量の変化の観測を行っているところであるが, 定量的・確定的な結果を得るに至っていない. その最大の理由が, 計測システムの校正の難しさである. 赤外線分光システムであって, 衝撃波管内の膨張領域において, 膨張比が異なる 3 か所で観測を行うため, 公正にばらつきが生じてしまう. 現在, 本課題は継続して取り組むこととしており, 2023 年度以降に成功させたい.

(3) マトリクス分光システムによる高速飛行模型周りの輻射分布計測

試験部の当初設計では, カプセルの動的挙動を観測する可視化システムを水平方向から, 輻射計測は同じ軸方向位置で垂直方向から観測するような設計を行っていたが, 模型可視化のためにサボを垂直方向に分離するように設定することとしたため, 輻射計測についても水平方向から計測するようにシステムを改修した. Fig.2 は, 軽ガス銃における可視化システム (モーションキャプチャシステム) とマトリクス分光システム の概念図である.

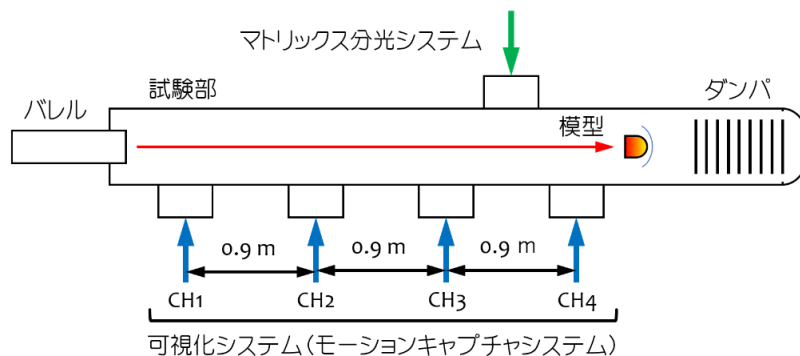


Fig.2 軽ガス銃における可視化システム (モーションキャプチャシステム) とマトリクス分光システム の概念図



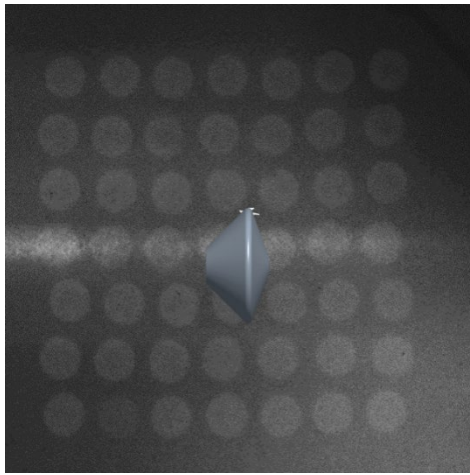


Fig.3 マトリクス分光の概念図(7x7 ファイバーマトリクスによる).

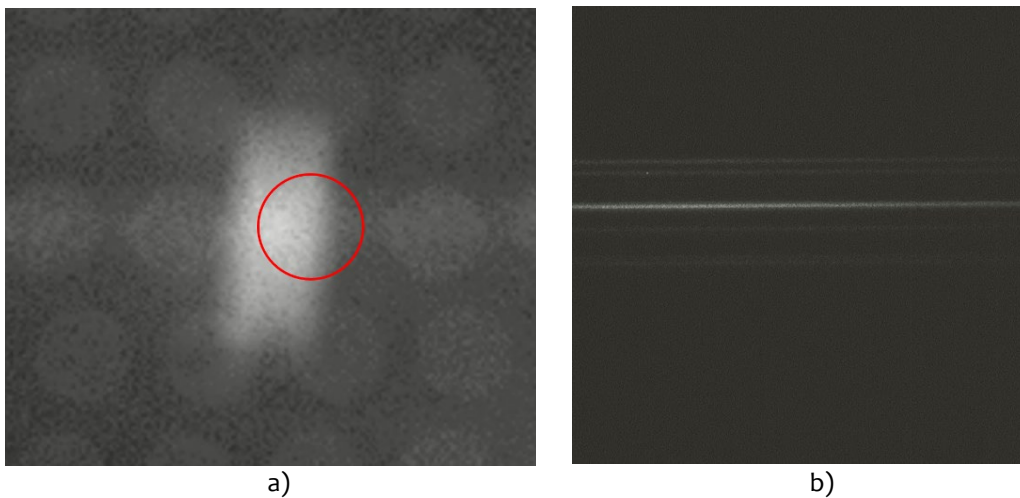


Fig.4 マトリクス分光法を用いた際の a) 発光イメージと b) 各エレメントにおけるスペクトル(各ラインが各光ファイバに対応し, 横軸は波長).

本研究ではマトリクス分光を行う. 49本の光ファイバを, 観測側では7x7の正方形マトリクスに配置し, 射出側ではこれを直列させ, 分光器のスリットへ導入する. カプセル模型および周辺プラズマの発光イメージを7x7の正方形マトリクス上に結像させ, これを分光器へ導入することによって, 原理的に49の視線方向について同時に分光することが可能となる. これを模擬的に示したのがFig.3である. この図は, 光ファイバのスリット側から光を入射して7x7のマトリクス形状をそのまま投影し, 採光される範囲を正確にマッピングしたものであり, 模型がこの位置にある場合は, 模型および模型周りの領域のうち, ○で示された領域からの発光すべてが対応する光ファイバへ導入される. なお, 本ケースでは空間解像度は観測位置で9mm程度である.

マルチポイント分光システムによって得られた結果の例をFig.4に示す. この例では, 速度3.9 km/sで射出した模型まわりの発光状態を高速カメラで撮像したもの(分光計測のために光ファイバで光を取得する範囲を重ね合わせている), および各ファイバを分光器へ投入した際に分光カメラ(intensified CCDカメラ)で取得されたイメージ(横方向に伸びる複数の帯はそれぞれの光ファイバのスペクトルを示し, 横軸は波長方向ピクセル)である. 発光は6つの光ファイバへ導入され, 分光カメラ上には6本の帯として結像している. このうちもっとも光量が多いのはFig.4の赤丸で示した光ファイバであり, これに対応する光ファイバが分光カメラ上に明確な帯を形成している. 以上の通り, 本研究においては, 当初の目標であるマトリクス分光システムは開発することに成功した.

以上まとめると, 先行研究を発展させた軽ガス銃の改修と運用条件の工夫によって, 火星大気突入システムを模擬したプロジェクトイル周りに, 代表的な火星大気突入環境と等価環境を再現する技術を確認した. また模型可視化システムの改良によって, 模型の位置と姿勢を高精度で識別する可視化システムの開発に成功した. これらに加え, 模型周りに生じる発光の分布を計測して分光することが可能なマトリクス分光システムを開発し, 可視化システムと同期することによって, 模型周りの高温大気および模型自身からの発光を取得し, これを分光するシステムの開発に成功した. 現時点ではまたマトリクス分光システムを用いた定量的な評価までは到達していないものの, それぞれの技術要素はすべて実証を完了しており, 本研究のこれまでの成果によって, 地上実験によって飛翔体への輻射加熱率を計測する技術の開発に目途が立ったと結論付けられる.

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 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Changela Hitesh G., Chatzitheodoridis Elias, Antunes Andre, Beaty David, Bouw Kristian, Bridges John C., Capova Klara Anna, Cockell Charles S., Conley Catharine A., Dadachova Ekaterina, Dallas Tiffany D., de Mey Stefaan, Dong Chuanfei, Ellery Alex, Ferus Martin, Foing Bernard, Fu Xiaohui, Fujita Kazuhisa, et al.,	4. 巻 20
2. 論文標題 Mars: new insights and unresolved questions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Astrobiology	6. 最初と最後の頁 394 ~ 426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1473550421000276	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 Dubuet Ulysse, Nomura Satoshi, Matsuyama Shingo, Lemal Adrien, Takayanagi Hiroki, Fujita Kazuhisa	4. 巻 34
2. 論文標題 Simulations of CO2-CO Infrared Radiation Measurements in Shock and Expansion Tubes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermophysics and Heat Transfer	6. 最初と最後の頁 725 ~ 732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.T5853	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

〔学会発表〕 計43件（うち招待講演 2件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 野村哲史, 水野雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 軽ガス銃を用いた火星カプセルの实在気体空力特性評価試験
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39回航空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 藤田和央, 野村哲史, 水野雅仁, 高柳大樹
2. 発表標題 CO2 の解離・再結合レート計測に向けた試験装置の開発
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39回航空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 藤田和央, 関根康人, 石上玄也, 白井寛裕, 関華奈子, 火星宇宙天気・気候・水環境探査計画ワーキンググループ, 着陸機による火星環境探査リサーチグループ
2. 発表標題 戦略的火星探査: 着陸実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査計画(MIM)
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白井寛裕, 関華奈子, 藤田和央, 岩田隆敬, 小澤悟, 関根康人, 石上玄也, 山崎敦
2. 発表標題 戦略的火星探査の概要
3. 学会等名 日本惑星科学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fujita, K., Sekine, Y., Ishigami, G., Usui, T., Seki, K., Nakatsuka, J., Toyota, H., Hatakenaka, R., Ozawa, T., Kimura, S., and Suzuki, S.
2. 発表標題 Mars Exploration and Planetary Protection
3. 学会等名 ISAS Planetary Exploration Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田和央, 山田和彦, 田邊宏太, EDL&Rチーム
2. 発表標題 将来の多様な大気突入ミッションを想定した横断的 EDL & R 研究開発
3. 学会等名 第 65 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村哲史, 板橋恭介, 水野雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 軽ガス銃を用いた火星実在気体空力特性の実験的評価
3. 学会等名 第 65 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 臼井寛裕, 関華奈子, 藤田和央, 岩田隆敬, 小澤悟, 関根康人, 石上玄也, 山崎敦
2. 発表標題 火星探査シナリオと日本の役割
3. 学会等名 第 65 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川真, 渡邊誠一郎, 杉田精司, 並木則行, 北里宏平, 田中智, 荒川政彦, 橘省吾, 岡田達明, 出村裕英, 池田人, 石黒正晃, 山本幸生, 藤田和央, 安部正真, 臼井寛裕, Ralf, J., Jean-Pierre, B., Matthias, G., Karl-Heinz, G., Jorn, H., Tra-Mi, H., Moussi, S. A., 中澤暁, 津田雄一
2. 発表標題 はやぶさ2のサイエンス成果ダイジェスト
3. 学会等名 第 65 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nomura, S., Itabashi, K., Mizuno, M., and Fujita, K.
2. 発表標題 Developments of Free-flight Testing Facility for Aerodynamic Assessment of Martian Entry Capsule
3. 学会等名 APISAT 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 板橋恭介, 野村哲史, 水野雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 火星大気突入等価環境における実在気体空力現象の解明
3. 学会等名 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関華奈子, 山崎敦, 藤田和央, 白井寛裕, 関根康人, 寺田直樹, 中川広務, 前澤裕之, 横田勝一郎, 松岡彩子, 笠原慧, 今村剛, 乙部直人, 杉田精司, 戸野倉賢一, 亀田真吾, MACO WG
2. 発表標題 MACO WG報告: MIMとの協働による火星宇宙天気・気候・水環境探査
3. 学会等名 第22回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白井寛裕, 関華奈子, 藤田和央, 岩田隆敬, 小澤悟, 関根康人, 山崎敦, 石上玄也
2. 発表標題 戦略的火星探査の概要および現在の検討状況
3. 学会等名 第22回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関華奈子, 山崎敦, 藤田和央, 白井寛裕, 関根康人, 寺田直樹, 中川広務, 前澤裕之, 横田勝一郎, 松岡彩子, 笠原慧, 今村剛, 乙部直人, 熊本篤志, 杉田精司, 戸野倉賢一, 亀田真吾, MACO計画検討WG
2. 発表標題 MIMとの協働による火星宇宙天気・気候・水環境探査
3. 学会等名 第23回 惑星圏研究会 (SPS2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Itabashi, K., Nomura, S., Mizuno, M., and Fujita, K.
2. 発表標題 Assessment of Martian Real-Gas Aerodynamic by Free-Flight Test Facility
3. 学会等名 33rd ISTS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fujita, K., Nomura, S., Suzuki, T., Ozawa, T., Takayanagi, H., Nishiyama, M., Noguchi, S., Iijima, T., Oki, J., Tanno, H., Yamada, T., and Nakazawa, S.
2. 発表標題 In-Situ Trajectory Reconstruction and Telescopic Tracking of HAYABUSA2 Sample Return Capsule by Ground and Airborne Observations
3. 学会等名 33rd ISTS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川建, 野村哲史, 高柳大樹, 松井信, 藤田和央
2. 発表標題 火星大気突入における赤外放射の実測に向けた検討
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 板橋恭介, 野村哲史, 水野雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 軽ガス銃による自由飛行を利用した火星実在気体空力計測への挑戦 — 続報 —
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村哲史、高柳大樹、水野雅仁、藤田和央
2. 発表標題 膨張波管気流計測によるCO-0再結合反応速度係数の推定
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高柳大樹, 野村哲史, 藤田和央
2. 発表標題 膨張波管気流中IR発光分光を用いた火星大気突入機周り流れ場
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白井寛裕, 関華奈子, 藤田和央, 着陸機による火星環境探査リサーチグループ
2. 発表標題 戦略的火星探査計画および国際協働探査Ice Mapper計画の検討状況
3. 学会等名 日本惑星科学会 2020年 秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白井寛裕, 関華奈子, 藤田和央, 着陸機による火星環境探査リサーチグループ
2. 発表標題 戦略的火星探査計画および国際協働探査Ice Mapper計画の検討状況
3. 学会等名 第21回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関華奈子, 山崎敦, 藤田和央, 臼井寛裕, 寺田直樹, 中川広務, 前澤裕之, 横田勝一郎, 松岡彩子, 笠原慧, 今村剛, 乙部直人, 熊本篤志, 大山聖, MACO WG
2. 発表標題 MACO WG報告: 周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査の科学戦略
3. 学会等名 第21回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎敦, 藤田和央, 小澤宇志, 中川広務, 前澤裕之, 笠原慧, 横田勝一郎, 松岡彩子, 熊本篤志, 寺田直樹, 臼井寛裕, 関華奈子, MACO WG
2. 発表標題 MACO WG報告: 火星探査にむけた搭載機器の惑星保護対応
3. 学会等名 第21回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田和央, 野村哲史, 水野雅仁
2. 発表標題 CO-0 再結合レート計測に向けた予備解析とノズル設計
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高柳大樹, 野村哲史, 藤田和央
2. 発表標題 調布航空宇宙センター設置の衝撃波管(HVST)、膨張波管(HVET)におけるこれまでの研究結果と今後の方針
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村哲史, 水野雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 実在気体空力特性取得のための軽ガス銃によるカプセル模型の自由飛行試験
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fujita, K.
2. 発表標題 JAXA 's EDL&R Mission Achievements and Future Plans
3. 学会等名 2nd International Conference on Flight Vehicles, Aerothermodynamics and Reentry Missions and Engineering (FAR2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田和央, 清水義仁, 野村哲史, 高柳大樹, 板橋恭介, 石川建, 松岡雅也
2. 発表標題 膨張ノズルを有する衝撃波管を用いた CO2 の解離・再結合レート計測
3. 学会等名 第54回流体力学講演会/第40回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川建, 高柳大樹, 野村哲史, 板橋恭介, 松岡雅也, 藤田和央, 松井信
2. 発表標題 軽ガス銃を用いた高速自由飛行模型の発光強度分布の計測
3. 学会等名 第54回流体力学講演会/第40回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 板橋恭介, 野村哲史, 水野雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 軽ガス銃を用いた火星大気突入等価環境における実在気体空力現象直接計測への試み
3. 学会等名 第54回流体力学講演会/第40回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田和央, 石上玄也, 関根康人, 白井寛裕, 関華奈子, 山崎敦, 火星EDL検討チーム
2. 発表標題 国際 Mars Ice Mapper に搭載する小型火星着陸機の検討
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水義仁, 野村哲史, 高柳大樹, 松岡雅也, 松井信, 藤田和央
2. 発表標題 ノズル付き膨張波管を用いたCO2再結合レートの計測
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川建, 高柳大樹, 野村哲史, 板橋恭介, 松岡雅也, 藤田和央, 松井信
2. 発表標題 自由飛行する火星カプセル模型を用いた輻射スペクトル計測
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 板橋恭介, 野村哲史, 水野雅仁, 藤田和央, 石川建
2. 発表標題 軽ガス銃を用いた火星大気突入等価環境における実在気体空力効果の実験的検討
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川建, 高柳大樹, 野村哲史, 板橋恭介, 清水義仁, 松岡雅也, 藤田和央, 松井信
2. 発表標題 自由飛行模型の分光装置の構築
3. 学会等名 令和4年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 板橋恭介, 野村哲史, 水野雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 二段式軽ガス銃による火星大気突入等価環境の再現と可視化
3. 学会等名 令和4年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水義仁, 野村哲史, 高柳大樹, 松岡雅也, 松井信, 藤田和央
2. 発表標題 IRセンサを用いた衝撃波管ノズル流れ場におけるCO2再結合レートの計測
3. 学会等名 令和4年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田和央, 石上玄也, 関根康人, 臼井寛裕, 関華奈子, 山崎敦, 火星 EDL検討チーム
2. 発表標題 Mars Ice Mapper へ搭載する小型火星着陸技術実証機 の概念検討
3. 学会等名 第23回 宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Itabashi, K., Nomura, S., Mizuno, M., Ishikawa, T., and Fujita, K.
2. 発表標題 Experimental Measurement of Martian Real-Gas Aerodynamics Using a Two Stage Light Gas Gun
3. 学会等名 AIAA SciTech Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関華奈子, 関根康人, 臼井寛裕, 山崎敦, 藤田和央, MACO WG
2. 発表標題 戦略的火星探査における国際MIM (Mars Ice Mapper) 計画の位置付けと検討状況
3. 学会等名 第24回惑星圏研究会 (SPS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 板橋恭介, 松岡雅也, 野村哲史, 水野 雅仁, 藤田和央
2. 発表標題 地上実験装置による自由飛行を通じた火星実在気体空力の実験的評価手法確立
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川建, 高柳大樹, 野村哲史, 板橋恭介, 清水義仁, 松岡雅也, 藤田和央, 松井信
2. 発表標題 高速自由飛行模型周りの多点分光計測手法の開発
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023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
研究 分担者	野村 哲史  (Nomura Satoshi)  (80709361)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員   (82645)	

	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 協力者	板橋 恭介  (Itabashi Kyosuke)		
研究 協力者	石川 健  (Ishikawa Tatsuru)		
研究 協力者	清水 義仁  (Shimizu Yoshihiro)		

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