

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 22 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289326

研究課題名(和文) 二酸化炭素の大気を有する惑星へ突入する探査システムに作用する非平衡輻射の解明

研究課題名(英文) Nonequilibrium Radiation Heating Acting on Atmospheric Entry Systems for Planets with CO₂ Atmosphere

研究代表者

藤田 和央 (Kazuhisa, Fujita)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主幹研究開発員

研究者番号：90281584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：既存の衝撃波管を改良して膨張波管とし、火星大気突入模擬環境において大気突入システムの模型を試験する装置を開発した。また、ゲート機能付き赤外線カメラを調達し、極短時間の赤外分光システムを開発した。これらによって、国内では唯一の、火星大気突入環境の赤外輻射スペクトル分布を計測可能な実験系を開発し、世界で初めて火星大気突入カプセル周りの赤外スペクトル分布を計測することに成功した。試験結果に基づいて、世界最高精度の高温 CO₂ に係る輻射データベースを開発し、輻射加熱を予測する数値コードの精度を、従来の 50% 程度から 90% まで大幅に改善することに成功した。これは現時点で世界最高の精度である。

研究成果の概要(英文)：An existing shock tube facility has been modified into an expansion tube, in which atmospheric entry conditions for Mars exploration can be realized around test models. In addition, an instantaneous infrared spectroscopy system has been developed by using an infrared CCD camera having a gating function. Above all, an infrared spectroscopic measurement system for Martian atmospheric entry systems, which is the only facility in the nation, has been developed, and the world's first results of infrared spectra distribution around a Martian entry capsule have been obtained successfully. Based on the experimental results, the world's most accurate database for infrared CO₂ radiation has been developed. Using this improved database, accuracy of the radiation prediction code is successfully improved from the past value of 50% into 90%, which is currently the world's greatest.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：宇宙航空流体力学 二酸化炭素 大気突入 輻射加熱 赤外線分光 火星探査

1. 研究開始当初の背景

現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) を中心とする国内の惑星科学コミュニティにおいて、火星、金星等を対象とした次期惑星探査が検討されている。次期惑星探査では、従来実現できなかった高度な科学ミッションを実現するために、エアロキャプチャを用いた惑星軌道投入やエアロブレーキを用いた軌道遷移によって探査機のミッション機器重量比を増加すること、また空気力を利用した大気突入システムの誘導制御により着陸機を地理学的に重要な目標地点へ高い精度で着地させることなど、高度な極超音速空力技術の導入とシステムの軽量化が要求されている。これらの空力技術を実現するためには、探査機周りの複雑な流れ場を解明し、探査機の空力特性や空力加熱率を高精度で予測できる解析モデルの開発が必要不可欠である。

しかし現状では解析モデルの飛行環境予測精度が、上記の極超音速空力技術を実現するためにいまだ十分とは言えない。現在の予測精度が十分でないのは、探査機周りの流れの速度が熱的緩和や化学反応の速度よりも著しく高く、流れが強い非平衡状態にあり、幾つかの重要な熱化学過程や輻射エネルギー輸送過程が明らかになっていないためである。最も重要な課題の一つが、高速 CO₂ 気流における遠赤外輻射エネルギー輸送のモデル化である。遠赤外光は波長が長く、光子あたりのエネルギーが真空紫外光に比べて低いため、大気突入機の熱空力現象では全エネルギー輸送への寄与が小さいと長年考えられてきた。しかし Mars Exploration Rover や Mars Science Laboratory などの NASA の火星探査機における機上計測や、申請者らによる火星エアロキャプチャ技術実証機をケーススタディとした飛行環境研究によって、遠赤外光により輸送されるエネルギーの絶対量は小さいものの、探査機の背面 (風下側) においては高温ガスの熱伝導によるエネルギー輸送量よりも圧倒的に大きく、探査機背面の熱設計において支配的なパラメータとなることが分かってきた。

探査機を軽量化しミッション機器重量比を増加させ、その信頼性を向上するためには、背面の空力加熱率を正確に予測することが必須であり、エネルギー輸送を支配する遠赤外輻射を正確にモデル化することが必要である。このような背景から、本研究では、先行研究である CO₂ 大気再突入飛行環境予測モデル化の成果を発展させ、探査機背面の熱設計において支配的となる遠赤外輻射エネルギー輸送過程の解明と高精度モデル化を目的とした実験的、解析的研究を行う。

2. 研究の目的

本研究では、特に火星・金星探査のキー技術である遠赤外輻射エネルギー輸送が顕著となる高速 CO₂ 流れ場の解明を狙い、高速衝

撃波管に発生させた強い衝撃波により探査機周りの高温衝撃層流れ場を模擬し、極短時間の遠赤外分光計測と流体・輻射解析を融合させた総合的な手法により、高速 CO₂ 気流における輻射エネルギー輸送と流体现象が連成した複雑系流れ場を世界に先駆けてモデル化し、これによって探査機の輻射加熱率予測精度を改善させることを目的とする。

3. 研究の方法

現存する CO₂ や CO の遠赤外輻射モデルは主として燃焼学の領域で培われたものであり、その適用温度範囲はたかだか 4,000K である。一方、惑星探査機の大気突入ではガス温度は 10,000K にもなるため、既存のモデルでは無視されている回転・振動励起の高準位からの遷移による放射を考慮しなければならない。そこで本研究ではまず、(1)CO₂、CO 分子の回転・振動遷移を高精度にモデル化する。次に(2)極短時間遠赤外分光システムを開発し、衝撃波管等によって静的輻射モデルの検証を行う。実際の探査機周りの現象は非平衡化学反応を伴う高速現象であるため、(3)衝撃波管を膨張波管へ改修して模型周りに火星大気突入環境を再現する試験環境を実現し、極短時間の遠赤外分光計測によってスペクトルを取得する。並行して(4)流れ場と輻射を融合させた総合的なモデル化を行い、これを(3)の結果にもとづいて検証・改善することによって、目標とする(5)輻射エネルギー輸送と流体现象が連成した複雑系流れ場のモデル化を世界に先駆けて実現し、輻射加熱率予測精度の改善を実現する。

4. 研究成果

当初計画に従って、CO₂ および CO 分子の回転・振動遷移に伴う赤外スペクトルの高精度モデルの開発を行った。従来、CO₂ および CO の回転・振動放射は、主として燃焼学の領域で培われた HITEMP などのデータベースが主流であり、その適用温度範囲はたかだか 4,000K であるため、火星大気突入のようにガス温度が 10,000K にもなる場合には、高励起準位のデータが不足しており、精度が悪い。図 1 に一例として示したのは、CO₂ を作動ガスとする衝撃波背後で観測された赤外スペクトル (Cruden et al.) と、HITEMP データベースを用いて数値解析により再現したもの (HITEMP) を比較したものであるが、解析値は実験結果より大きく下回っていることがわかる (精度は約 50%)。この理由は、HITEMP データベースには、回転・振動の高励起準位からの遷移が欠落しているからである。そこで本研究では、CSDS データベースを中心として多くの文献からデータを集積し、また後述するように実験による検証・改善を重ねて、新しいデータベースを開発した。これを用いた結果 (図 1, CSDC) は、実験結果よりやや過小評価であるものの、大幅な精度の改善が実現している。他のケー

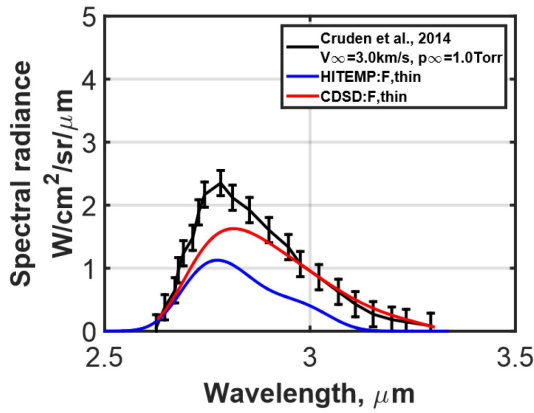


図 1 CO₂の赤外スペクトルモデル改善結果

スも含めると、平均して実験結果を 90%の精度で再現することが確認された。これは 2017 年 5 月現在、世界で最も精度の高い CO₂ 赤外スペクトルの数値解析精度である（発表論文[4,5]など）。

次に、ゲート機能付きの赤外線 CCD カメラおよび赤外分光器を調達し、赤外用集光光学系を準備し、高速パルスジェネレータと合わせて極短時間遠赤外分光システムを開発し（発表論文[6]など）。黒体ランプによって正確に絶対強度校正をおこなった。また、火星大気突入を模擬した試験環境を開発するために、既存の衝撃波管に改修を加えて膨張波管とし、これを安定して運用する技術確立した（学会発表[24,29,32,34,37]など）。

開発された火星大気突入模擬試験装置に模型を投入して、模型周りの赤外スペクトルの分布を世界で初めて取得することに成功した（発表論文[2]）。図 2, 3 に示したのは、火星大気突入模擬試験装置内に設置された火星大気突入カプセル模型周りの CO₂ の輻射分布と、代表的な点で得られた赤外スペクトルである。従来検討の対象としてきた真空紫外から可視の輻射はカプセルの前方で極

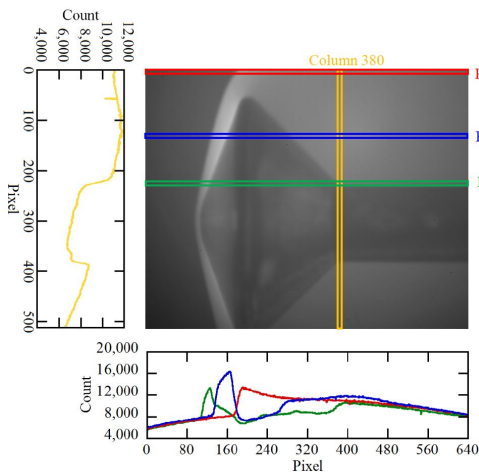


図 2 火星大気突入カプセル模型周りの CO₂ 赤外放射強度の分布

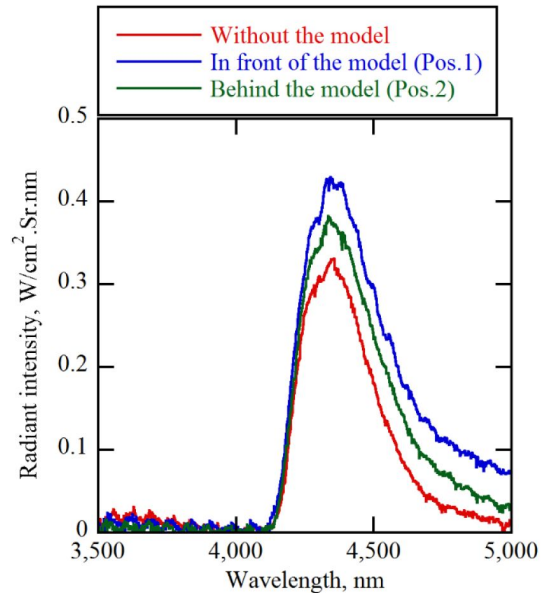
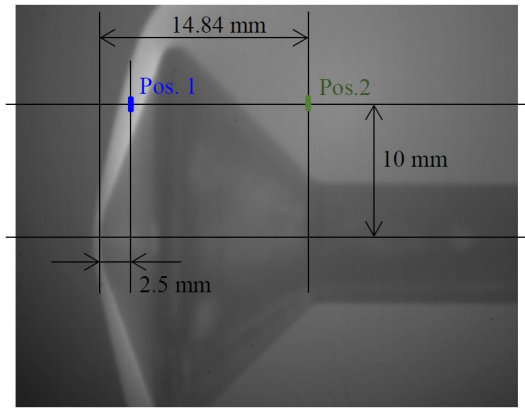


図 2 火星大気突入カプセル模型周りの代表的な点における CO₂ 赤外スペクトル。

めて強く、カプセル背後では非常に弱いため、カプセル前面への輻射のみを考慮すれば十分であった。一方で、火星のような CO₂ 大気においては、カプセル後方においても赤外輻射が強く、またその分布もカプセル背面の中心軸付近が強いなど、特徴的であることが、実験的に初めて確認されたことになる。

上記の実験結果を用いて、新たに改善された CO₂ の赤外輻射解析コードおよびデータベースを検証・改善し、最終的には従来 50%程度であった赤外輻射予測精度が 90%程度までに改善された。最後に、改善された赤外輻射解析コードを火星大気突入システムの概念設計に応用し、精度の改善に伴い熱防御システムの設計マージンを低減することが許容されることによって、熱防御システムの重量をどの程度低減できるかどうかの検討を行った。その結果、900 kg の火星大気突入システム（ローバを着陸させるシステム）を想定する場合、背面のエアロシェル重量を 50%近く低減することが可能であり、火星表面へ運搬可能な重量を 22 kg、および科学観測機器 2 つを新たに追加することが可能とな

るなど、本研究の成果が将来の火星探査ミッションに大きく寄与することが確認された。以上により、本研究は当初の目標を達成したと結論付けられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

- [1] Fujita, K., Ishigami, G., Hatakenaka, R., Takai, M., Toyota, H., Ogawa, N., Haruki, M., Takeuchi, H., Nonomura, T., Yamada, K., Takayanagi, H., Ozawa, T., Matsuyama, S., Oyama, A., Suzuki, T., Yamagishi, A., Kameda, S., Miyamoto, H., and Satoh, T., “Japan’s Mars Rover Mission – System Design & Development Status –,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (under review).
- [2] Takayanagi, H., Nomura, S., Lemal, A., and Fujita, K., “Measurements of CO₂ Nonequilibrium Infrared Radiation in Shocked and Expanded Flows,” Journal of Thermophysics and Heat Transfer (under review).
- [3] Suzuki, T., Aoki, T., Ogasawara, T., and Fujita, K., “Non-Ablative Lightweight Thermal Protection System for Mars Aeroflyby Sample Collection Mission,” Acts Astronautica, Vol.136, pp.407-420, Jul. (2017).
- [4] Lemal, A., Bando, K., Nomura, S., Takayanagi, H., and Fujita, K., “Prediction of Nonequilibrium Peak Radiation during Earth’s Atmosphere Suborbital Reentry,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* (in press).
- [5] Lemal, A., Takayanagi, H., Nomura, S., and Fujita, K., “Simulations of CO₂ Equilibrium Infrared Radiation Measurements,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* (in press).
- [6] Takayanagi, H. and Fujita, K., “VUV and IR Radiation Measurement in Mars Simulant Gas with Hyper Velocity Shock Tube,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Aerospace Technology Japan, Aerospace Technology Japan, Vol.12, No.ists29, pp.Po_2_1-Po_2_6 (2014).

[学会発表](計41件)

- [1] 山田透, Adrien Lemal, 松山新吾, 野村

哲史, 高柳大樹, 藤田和央, 松井信, “膨張波管の試験気流推定に向けた数値解析,” 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, ヴェルクよこすか(横須賀市立勤労福祉会館), 2017 年 3 月。

- [2] 野村哲史, 伊藤夏青, 松山新吾, 藤田和央, “軽ガス銃を用いた火星カプセル全機周りの可視化,” 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, ヴェルクよこすか(横須賀市立勤労福祉会館), 2017 年 3 月。
- [3] 野村哲史, 西村沙也香, 河上泰斗, ルマルアドリアン, 藤田和央, “プリカーサ現象のモデル化に向けた VUV 分光計測,” 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, ヴェルクよこすか(横須賀市立勤労福祉会館), 2017 年 3 月。
- [4] Higuchi, Y., Pierre, L., Lemal, A., Matsuyama, S., and Fujita, K., “Physico-Chemical Parameters Governing the Convective and Radiative Heating from a CO₂-Based Mixture,” AIAA Paper 2017-1368, AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2017, January 2017.
- [5] Takayanagi, H., Nomura, S., Lemal, A., and Fujita, K., “Measurement of Carbon Dioxide Infrared Radiation in the Afterbody of a Mars entry Capsule,” AIAA Paper 2017-1369, AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2017, January 2017.
- [6] ルマルアドリアン, 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, “地球の環境下リエントリーにおける非平衡プラズマの予測,” 平成 28 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2016 年 12 月。
- [7] ルマルアドリアン, 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, “火星侵入時における CO₂ 平衡および非平衡放射の予測,” 平成 28 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2016 年 12 月。
- [8] 野村哲史, 河上泰斗, 西村沙也香, 藤田和央, “衝撃波前方における静電プローブを用いた電子温度および電子密度計測,” 平成 28 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2016 年 12 月。
- [9] 山田透, Lemal Adrien, 松山新吾, 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, 松井信, “膨張波管により生成した気流の熱化学非平衡下での一次元計算,” 平成 28 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2016 年 12 月。
- [10] Bando, K., Lemal, A., Nomura, S., Takayanagi, H., and Fujita, K., “Prediction of nonequilibrium peak radiation for Earth entries,” 7th International Workshop on High

- Temperature Gas Radiation workshop, Stuttgart, Germany, November 2016.
- [11] Lemal, A., Nomura, S., Takayanagi, H., and Fujita, K., “Investigation of unknown radiative phenomena by optical diagnostics,” 7th International Workshop on High Temperature Gas Radiation workshop, Stuttgart, Germany, November 2016.
- [12] Lemal, A., Nomura, S., Takayanagi, H., and Fujita, K., “Simulation of air VUV radiation measurement behind a shock wave,” 7th International Workshop on High Temperature Gas Radiation workshop, Stuttgart, Germany, November 2016.
- [13] Lemal, A., Nomura, S., Takayanagi, H., and Fujita, K., “Simulation of CO₂ infrared radiation measurement behind a shock wave,” 7th International Workshop on High Temperature Gas Radiation workshop, Stuttgart, Germany, November 2016.
- [14] Fujita, K., Tanno, H., Mizuno, M., Suzuki, T., Takayanagi, H., Ozawa, T., Nomura, S., and Lemal, A., “JAXA Aerothermodynamics Capabilities in Support of Human Space Flight and Exploration Missions,” 7th International Workshop on High Temperature Gas Radiation workshop, Stuttgart, Germany, November 2016.
- [15] Nishimura, S., Lemal, A., Nomura, S., Takayanagi, H., Fujita, K., and Matsui, M., “VUV Air Radiation Measurements at Shock Speeds Exceeding 12 km/s,” 7th International Workshop on High Temperature Gas Radiation workshop, Stuttgart, Germany, November 2016.
- [16] 野村哲史, 西村沙也香, ルマルアドリアン, 高柳大樹, 藤田和央, “プリカーサ現象のモデル化に向けた衝撃波管における電子密度計測,” 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館アリーナ, 北海道函館市, 2016 年 9 月 .
- [17] 藤田和央, 石上玄也, 臼井寛裕, 火星着陸 RG, “将来の火星着陸探査に求められる輸送系技術と研究開発の現状,” 平成 28 年度月・惑星シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2016 年 7 月 .
- [18] 高柳大樹, アドリアンルマル, 野村哲史, 藤田和央, “火星大気突入機における背面赤外線輻射強度計測,” 第 48 回流体力学講演会/第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 金沢歌劇座, 石川県金沢市, 2016 年 7 月 .
- [19] 西村沙也香, Lemal Adrien, 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, 松井信, “超高速大気圏再突入時の衝撃波背後の輻射加熱の衝撃波管を用いた研究,” 第 48 回流体力学講演会/第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 金沢歌劇座, 石川県金沢市, 2016 年 7 月 .
- [20] 野村哲史, 高柳大樹, アドリアンルマル, 藤田和央, “超高速大気突入条件における衝撃波前方の電離反応評価,” 第 48 回流体力学講演会/第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 金沢歌劇座, 石川県金沢市, 2016 年 7 月 .
- [21] 野村哲史, 山田透, 伊藤夏青, 高柳大樹, 藤田和央, “軽ガス銃における超音速飛翔体周りの可視化と更なる高速化に向けた検討,” 第 92 回風洞研究会議, 栃木県宇都宮市, 2016 年 5 月 .
- [22] Lemal Adrien, 野村哲史, 高柳大樹, 松山新吾, 西村沙也加, 藤田和央, “Simulation of nonequilibrium effects behind a shock wave for application to planetary entry missions,” 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 熊本大学, 熊本県熊本市, 2016 年 3 月 .
- [23] 高柳大樹, 野村哲史, Lemal Adrien, 藤田和央, “二酸化炭素衝撃波背後の赤外線発光スペクトル計測,” 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 熊本大学, 熊本県熊本市, 2016 年 3 月 .
- [24] 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, “膨張波管における加熱率および圧力分布計測,” 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 熊本大学, 熊本県熊本市, 2016 年 3 月 .
- [25] 藤田和央, 高柳大樹, 野村哲史, Lemal Adrien, “CO₂ 大気突入における輻射加熱評価のための解析的・実験的研究,” 平成 27 年度 航空宇宙空力シンポジウム, 鹿児島県指宿市, 2016 年 1 月 .
- [26] Lemal, A., Nishimura, S., Nomura, S., Takayanagi, H., Matsuyama, S., and Fujita, K., “Analysis of VUV radiation measurements from high temperature air mixtures,” AIAA Paper 2016-0740, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, January 2016.
- [27] Nishimura, S., Lemal, A., Takayanagi, H., Nomura, S., Matsuyama, S., and Fujita, K., “Analysis of CO₂ Plasma Infrared Radiation Measurements,” AIAA Paper 2016-0739, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, January 2016.
- [28] 西村沙也香, 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, 松井信, “真空紫外域発光分光計測による超高速大気突入時の輻射加熱評価,” 平成 27 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2015 年 12 月 .
- [29] 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, “膨張波管における模型周りの圧力および加熱率計測,” 平成 27 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県

- 相模原市, 2015 年 12 月 .
- [30] Nishimura, S., Takayanagi, H., Nomura, S., Fujita, K., and Matsui, M., “Speeding up of Shock Wave for Future Missions and Spectroscopic Measurement of Strong Shock Wave,” ISTS-2015-e-32, 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe Convention Center, Hyogo, Japan, July 2015.
- [31] Fujita, K., Takayanagi, H., Matsuyama, S., Nishimura, S., Yamada, K., and Abe, T., “Experimental and numerical assessment of aerothermal environments about Jupiter Trojan sample return capsule,” The 30th International Symposium on Shock Waves (ISSW30), Tel Aviv, Israel, July 2015.
- [32] 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, “膨張波管の特性評価と熱流束計測,” 第 47 回流体力学講演会 / 第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 東京大学, 東京都目黒区, 2015 年 7 月 .
- [33] 西村沙也香, 高柳大樹, 野村哲史, 藤田和央, 松井信, “将来のサンプルリターンミッションのための高速衝撃波背後気流の評価,” 第 47 回流体力学講演会 / 第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 東京大学, 東京都目黒区, 2015 年 7 月 .
- [34] Nomura, S., Takayanagi, H., Fujita, K., and Tanno, H., “Radiative Heat Flux from Metallic Species in Free Piston Shock Tunnel HIEST,” AIAA Paper 2015-2514, 45th AIAA Thermophysics Conference, Dallas, Texas, June 2015.
- [35] 西村沙也香, 高柳大樹, 野村哲史, 藤田和央, 松井信, “衝撃波速度の高速度化と衝撃波背後の分光計測,” 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, ホテル天坊, 群馬県渋川市, 2015 年 3 月 .
- [36] 藤田和央, “火星着陸探査に向けた空力研究の現状と課題,” 平成 26 年度 航空宇宙空力シンポジウム, 皆生グランドホテル天水, 鳥取県米子市, 2015 年 1 月 .
- [37] 野村哲史, 高柳大樹, 藤田和央, “火星大気突入環境を模擬した膨張波管における熱流束計測,” 平成 26 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市, 2014 年 12 月 .
- [38] 高柳大樹, 藤田和央, “将来のサンプルリターンミッションのための高速衝撃波管における発光分光計測,” 第 46 回流体力学講演会 / 第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 弘前文化センター, 青森県弘前市, 2014 年 7 月 .
- [39] Fujita, K., Takayanagi, H., Matsuyama, S., Yamada, K., and Abe, T., “Assessment of Convective and Radiative Heating for Jupiter Trojan Sample Return Capsule,” AIAA Paper 2014-2673, 11th AIAA-ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Hyatt Regency Atlanta, Atlanta, Georgia, June 2014.
- [40] Takayanagi, H., Fujita, K., Ishida, H., Yamada, K., and Abe, T., “Radiation intensity measurement in VUV wavelength region behind strong shock wave for future sample return missions,” AIAA Paper 2014-2965, 11th AIAA-ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Hyatt Regency Atlanta, Atlanta, Georgia, June 2014.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

藤田 和央 (Kazuhisa Fujita)
宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主幹研究開発員
研究者番号 : 90281584

(2)研究分担者

高柳 大樹 (Hiroki Takayanagi)
宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (研究者番号 : 70513422)

野村 哲史 (Satoshi Nomura)
宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員 (研究者番号 : 80709361)

鈴木 俊之 (Toshiyuki Suzuki)
宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員 (研究者番号 : 20392839)

小澤 宇志 (Takashi Ozawa)
宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (研究者番号 : 70567544)

(3)連携研究者

ルマル アドリエン (Adrien Lemal)
宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・宇宙航空プロジェクト研究員 (研究者番号 : 70770668)

(4)研究協力者

西村 沙也香 (Sayaka Nishimura)
静岡大学大学院・総合科学技術研究科

山田 透 (Toru Yamada)
静岡大学大学院・総合科学技術研究科

バンドー キヒロ (Kihiro Bando)
Ecole Polytechnique, France