

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420847

研究課題名(和文) 高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料周りに生ずる極めて強い発光現象の解明

研究課題名(英文) Intense Radiation around Si-based Ultrahigh-temperature Heat-resistant Materials in High-enthalpy Flows

研究代表者

船津 賢人 (FUNATSU, Masato)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：50323332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、先進的な空間的・時間的発光分光計測技術により、高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料周りに生ずる極めて強い発光現象を解明することである。主な研究成果は、次のとおりである。(1) 高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料の加熱試験における強い発光現象を複数の波長フィルターと汎用ビデオカメラにより空間的・時間的な発光強度分布を取得した。これらの発光強度分布の強度比からケイ素系超高温耐熱材料の温度分布を推定した。(2) 高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料の加熱試験における強い発光現象を二波長分光光学系により空間的・時間的な発光強度分布を取得した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we make clear intense radiation around Si-based ultrahigh-temperature heat-resistant materials in high-enthalpy flows by using an advanced spatial-temporal emission spectroscopic measurements. Main results of this research are as follows. (1) We obtained intense radiation around Si-based ultrahigh-temperature heat-resistant materials in high-enthalpy flows by using several kinds of narrow band-pass filters and general-purpose video cameras, and we estimated temperature distributions of the materials in the high-enthalpy flows by means of the radiation intensity ratio. (2) We obtained intense radiation around Si-based ultrahigh-temperature heat-resistant materials in high-enthalpy flows by using the spatial-temporal two-wavelength spectroscopic system.

研究分野：高速高温流体力学

キーワード：ケイ素系超高温耐熱材料 分光計測 高エンタルピー流 アブレーション 炭化ケイ素 極超音速反応性流体力学 高速高温流体力学 航空宇宙工学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年のアメリカ合衆国スペースシャトルの退役により、ロシア連邦のソユーズ宇宙船が国際的な有人輸送を唯一広く担っている。そのような背景から、我が国独自の有人輸送機による地上 - 宇宙間の定期的で安全な移動が社会的要請となりつつある。有人宇宙機に関連する研究は、世界各国で精力的に行われているが、我が国では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の HTV (宇宙ステーション補給機) による無人宇宙輸送が行われ、現在では HTV-R (回収機能付加型 HTV) による安全確実な帰還・回収技術を実証・確立するための研究が継続的に行われている。特に、地球大気圏再突入では有人輸送を視野に入れた高精度な空力加熱予測と確実に人命を守る革新的な耐熱材料開発が求められる。

(2) 応募者はこれまでに、高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料周りに生ずる複雑な流れ場に関係する研究を数値的実験的に系統的に行ってきた。応募者は、これらの研究を踏まえ、高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料の損耗が炭素系材料に比べて著しく小さい (1/6 ~ 1/10 程度) ことを明らかにした (船津, 伊東ほか 2009)。さらに、ケイ素系超高温耐熱材料周りに生ずる極めて強い発光現象を高速ビデオカメラにより撮影し (Funatsu, M., Ozawa, M., et al. 2011)、その発光を局所的に分光計測した (Ozawa, M., Funatsu, M., et al. 2012)。これより空間的な耐熱材料の非正常挙動を把握でき、またおおまかな原子線や分子線を検出することができた。これらは当該分野における独創的な数少ない研究成果である。

(3) しかし、高精度空力加熱予測に寄与する精緻な構成化学種の同定や流れ場の温度推定、ひいては物理化学モデルの構築にはいたっていない。そこで、応募者は、先進的な空間的・時間的な発光分光計測技術を駆使し、この複雑な流れ場を紐解くキーとなる極めて強い発光現象を解明するという着想に至った。

## 2. 研究の目的

2011年のスペースシャトル退役を背景に、我が国独自の有人輸送機による地上 - 宇宙間の定期的で安全な移動が社会的要請となりつつある。特に地球大気圏再突入では有人輸送を視野に入れた高精度な空力加熱予測と確実に人命を守る革新的な耐熱材料開発が求められる。本研究は、高エンタルピー流中の損耗が炭素系材料に比べ著しく小さいケイ素系超高温耐熱材料に着目し、気流と材料損耗の相互作用に関わる未解明の極めて強い発光現象に焦点をあてる。先進的な空間的・時間的な発光分光計測技術により、化学種同定や温度推定を行い、高精度空力加熱予測に大いに関与する極めて強い発光現象を解明する。

## 3. 研究の方法

(1) 複数波長フィルター同時利用高感度高速度ビデオカメラシステムの設計・構築

既存設備である高波長分解分光器による局所的な発光分光計測結果に加え、非定常計測にも対応可能な小型分光器による局所的な分光計測をもとに、検出された特徴的な原子線や分子線に対応する波長フィルターを準備する。

極めて強い発光現象と現有設備である高感度高速度ビデオカメラの間に二波長分光光学系を設置し、空間的・時間的な二波長分光画像を取得する。

(2) 設計・構築した複数波長フィルター同時利用による高感度高速度ビデオカメラシステムを活用し、現有の超小型プラズマジェット発生装置を用いて高エンタルピー流を発生させ、ケイ素系超高温耐熱材料周りに生ずる極めて強い発光現象を特徴的な多数の波長フィルターにより空間的・時間的な発光強度分布を系統的に取得する。本研究で使用する高エンタルピー流は、従来の研究 (澁澤, 船津ほか 2010; 久保田, 船津ほか 2008) から、約 10,000K の並進温度を持ち、地球大気圏再突入環境を模擬可能な大きな熱流束値が期待できる。

(3) 空間的・時間的な発光強度比分布から、強度比法により温度推定する計算機プログラムを開発する。

(4) 継続的に取得した空間的・時間的な発光強度分布から開発した計算機プログラムを活用し、温度分布を推定する。

(5) 得られた膨大な発光強度分布および推定温度分布をもとにケイ素系超高温耐熱材料の極めて強い発光現象を高速高温反応性流体力学の先駆的研究を踏まえて物理化学モデルを構築する。

## 4. 研究成果

(1) 群馬大学大学院理工学府所有の超小型プラズマジェット発生装置を用いて高エンタルピー流を発生させ、現有の高波長分解分光器を用いて気流中のケイ素系超高温耐熱材料周りに生ずる極めて強い発光現象を空間的に局所的に発光分光計測した。また、非定常計測にも対応可能な小型分光器により空間的に局所的な発光分光計測を行い、それらをもとに特徴的な原子線や分子線に対応する複数の波長フィルターを選定した。

(2) プラズマフリージェットなどの発光現象と汎用ビデオカメラの間に簡易的な二波長分光光学系を設置し、空間的・時間的な二波

長分光画像を取得した。

(3) 簡易的な二波長分光光学系を利用し、高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料の加熱試験に先駆けて、炭素材料周りに生ずる強い発光現象を複数の波長フィルターと汎用ビデオカメラにより空間的・時間的な発光強度分布を取得した。これらの発光強度分布の強度比から炭素材料の見かけの表面温度を推定した。

(4) 高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料の加熱試験における強い発光現象を複数の波長フィルターと汎用ビデオカメラにより空間的・時間的な発光強度分布を取得した。これらの発光強度分布の強度比からケイ素系超高温耐熱材料の表面温度を推定した。プラズマフリージェット中の耐熱材料の表面温度は 2,000K ~ 3,000K であり、分光計測から得られた推定表面温度と同程度であった。

(5) 高エンタルピー流中のケイ素系超高温耐熱材料の加熱試験における強い発光現象を二波長分光光学系により空間的・時間的な発光強度分布を取得した。局所的ではあるが、これらの発光強度比から見かけの表面温度を推定することができた。

#### 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1件)

Funatsu, M., Konishi, K., Kawada, M., Ozawa, M., and Takakusagi, F., Visualizations of SiC Ablations in Air Plasma Freejets, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, 12, 2014, Po\_2\_45-Po\_2\_50.  
[http://dx.doi.org/10.2322/tastj.12.Po\\_2\\_45](http://dx.doi.org/10.2322/tastj.12.Po_2_45)

[学会発表](計25件)

橋本真、Nurul Malisa、矢島颯大、森岡元、船津賢人、二種類の狭帯域フィルターを用いたケイ素系耐熱材料周りの温度推定、平成 28 年度衝撃波シンポジウム、2017 年 3 月 9 日、ヴェルク横須賀(神奈川県横須賀市)。

Nurul Malisa、橋本真、戸叶和宏、福田健吾、船津賢人、プラズマ加熱による炭素系材料の耐熱試験、平成 28 年度宇宙航行の力学シンポジウム、2016 年 12 月 20 日、JAXA 宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)。

船津賢人、戸叶和宏、福田健吾、森岡元、プラズマ加熱により損耗する炭素系材料の耐熱試験、日本機械学会 2016 年度年次大会、2016 年 9 月 13 日、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)。

船津賢人、森岡元、戸叶和宏、深谷朱美、二波長分光系を利用したケイ素系耐熱材料周りの放射測定、平成 27 年度衝撃波シンポジウム、2016 年 3 月 7 日、熊本大学黒髪南地区(熊本県熊本市)。

船津賢人、森岡元、戸叶和宏、深谷朱美、二波長分光系によるケイ素系耐熱材料周りの温度推定、平成 27 年度航空宇宙空力シンポジウム、2016 年 1 月 23 日、指宿いわさきホテル(鹿児島県指宿市)。

戸叶和宏、森岡元、深谷朱美、船津賢人、プラズマフリージェット中のケイ素系耐熱材料周りの放射測定、平成 27 年度宇宙航行の力学シンポジウム、2015 年 12 月 10 日、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(神奈川県相模原市)。

Funatsu, M., Morioka, G., Tokano, K., Fukaya, A., Konishi, K., and Ozawa, M., Radiation Measurements of SiC Ablations with Two-wavelength Spectroscopic Systems, 5th International Sympo. Element Innovation, 2015 年 11 月 30 日, Kiryu City Hall, Kiryu, Gunma, Japan.

船津賢人、森岡元、戸叶和宏、二波長分光系によるケイ素系耐熱材料周りの放射測定、日本機械学会 2015 年度年次大会、2015 年 9 月 15 日、北海道大学工学部(北海道札幌市)。

Morioka, G., Tokano, K., Konishi, K., Ozawa, M., and Funatsu, M., Radiation Measurements of SiC Ablations with Several Kinds of Narrow Band-pass Filters, 30th Int. Sympo. Space Technology and Science, 2015 年 7 月 8 日, Kobe Convention Center, Kobe, Japan.

凌楊、森岡元、船津賢人、大気圧プラズマフリージェットの放射測定、平成 27 年度日本分光学会国際シンポジウム・年次講演会、2015 年 6 月 1 日、東京工業大学デジタル多目的ホール(東京都目黒区)。

凌楊、森岡元、船津賢人、窒素プラズマフリージェットの放射計測、平成 26 年度衝撃波シンポジウム、2015 年 3 月 10 日、ホテル天坊(群馬県渋川市)。

戸叶和宏、森岡元、船津賢人、空気プラズマフリージェット中のケイ素系耐熱材料の観察、平成 26 年度衝撃波シンポジウム、2015 年 3 月 10 日、ホテル天坊（群馬県渋川市）。

森岡元、戸叶和宏、船津賢人、空気プラズマフリージェット中のケイ素系耐熱材料周りの放射測定、平成 26 年度衝撃波シンポジウム、2015 年 3 月 9 日、ホテル天坊（群馬県渋川市）。

船津賢人、森岡元、戸叶和宏、狭帯域フィルターを用いたケイ素系耐熱材料周りの放射測定、平成 26 年度航空宇宙空力シンポジウム、2015 年 1 月 24 日、皆生グランドホテル天水（鳥取県米子市）。

戸叶和宏、森岡元、レホアンラム、船津賢人、プラズマジェット中のケイ素系耐熱材料周りの放射測定 - 狭帯域フィルターを用いた温度推定 -、平成 26 年度宇宙航行の力学シンポジウム、2014 年 12 月 18 日、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（神奈川県相模原市）。

船津賢人、森岡元、小西健太、小澤正裕、狭帯域フィルターによるケイ素系耐熱材料周りの放射測定、日本機械学会第 92 期流体力学部門講演会、2014 年 10 月 26 日、富山大学五福キャンパス（富山県富山市）。

Funatsu, M., Morioka, G., Konishi, K., and Ozawa, M., Radiation Measurements of SiC Ablations with Narrow Band-pass Filters, 4th Int'l Sympo. Element Innovation, 2014 年 10 月 24 日、群馬大学桐生キャンパス（群馬県桐生市）。

森岡元、小西健太、小澤正裕、船津賢人、狭帯域フィルターを用いた炭化ケイ素アブレーションの放射測定、日本機械学会 2014 年次大会、2014 年 9 月 10 日、東京電機大学東京千住キャンパス（東京都足立区）。

宮内明祐美、森岡元、小西健太、小澤正裕、船津賢人、窒素プラズマフリージェットのスペクトル特性、平成 26 年度日本分光学会年次講演会・国際シンポジウム、2014 年 5 月 26 日、理化学研究所和光キャンパス（埼玉県和光市）。

森岡元、小西健太、小澤正裕、船津賢人、狭帯域フィルターを用いた炭素系アブレーションの放射測定、日本機械学会関東学生会第 53 回学生会卒業研究発表講演会、2014 年 3 月 14 日、東京農工大学小金井キャンパス（東京都小金井市）。

⑲ 小西健太、川田光宏、森岡元、小澤正裕、船津賢人、プラズマフリージェット中のケイ素系耐熱材料の観察、平成 25 年度宇宙航行の力学シンポジウム、2013 年 12 月 5 日、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所（神奈川県相模原市）。

⑳ 船津賢人、川田光宏、小西健太、森岡元、宮内明祐美、プラズマジェット中のケイ素系耐熱材料周りの放射測定、第 91 期日本機械学会流体力学部門講演会、2013 年 11 月 9 日、九州大学伊都キャンパス（福岡県福岡市）。

㉑ Funatsu, M., Ozawa, M., Onozawa, R., Konishi, K., Kawada, M., and Takakusagi, F., Observations of Si-based Heat-resistant Materials in Air Plasma Freejets, 3rd Int'l Sympo. Element Innovation, 2013 年 9 月 9 日、Kiryu, Gunma, Japan.

㉒ Funatsu, M., Ozawa, M., Onozawa, R., Konishi, K., Kawada, M., and Takakusagi, F., Experimental Study of Intense Radiation around Si-based Heat-resistant Materials in Air Plasma Freejets, 29th Int'l Sympo. Shock Waves, 2013 年 7 月 18 日、Madison, Wisconsin, U.S.A..

㉓ Funatsu, M., Konishi, K., Kawada, M., Ozawa, M., and Takakusagi, F., Visualizations of SiC Ablations in Air Plasma Freejets, 29th Int'l Sympo. Space Technology and Science, 2013 年 6 月 4 日、Nagoya, Aichi, Japan.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

アウトリーチ活動情報

(1) 【日本学術振興会 ひらめき ときめきサイエンス】宇宙工学への扉 2016～再突入カプセルを高温環境からまもる技術を体験しよう！～

<http://www.jsps.go.jp/hirameki/ht28000/ht28062.pdf>

(2) 【日本学術振興会 ひらめき ときめきサイエンス】宇宙工学への扉 2015～地球大気圏再突入体の熱防御技術～

<https://www.jsps.go.jp/hirameki/ht27000/ht27061gaiyou.pdf>

(3) 【日本学術振興会 ひらめき ときめきサイエンス】宇宙工学への扉 2014～地球大気圏再突入体の熱防御技術～

<http://www.jsps.go.jp/hirameki/ht26000/HT26049.pdf>

ホームページ情報

<http://www.fluid.mst.st.gunma-u.ac.jp/HART/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

船津 賢人 (FUNATSU, Masato)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：5 0 3 2 3 3 3 2

### (2) 連携研究者

北川 一敬 (KITAGAWA, Kazutaka)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：5 0 2 7 8 2 3 0

松原 雅昭 (MATSUBARA, Masaaki)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：1 0 2 4 1 8 6 1