

平成 22 年 6 月 16 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760553
 研究課題名（和文） 熱防御システム評価技術向上に向けた材料表面触媒性の高精度モデル化
 研究課題名（英文） High fidelity modeling of surface catalysis of materials toward improvement of evaluation method of thermal protection system
 研究代表者
 鈴木 俊之（SUZUKI TOSHIYUKI）
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部未踏技術研究センター・研究員
 研究者番号：20392839

研究成果の概要（和文）：

熱防御システムに使用される耐熱材料の表面触媒性について、発光分光法により触媒性を定量化するプラズマ発生装置を開発した。また実験装置内部の耐熱材料周囲の希薄プラズマ流を解析するために、モンテカルロ直接法に基づく数値解析コードを開発し、不均一系触媒性理論に基づく表面反応モデルを導入した。発光分光法（実験）と希薄プラズマ解析（数値解析）との融合により、材料表面触媒性を定量化する手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

The laboratory equipment was developed to produce oxygen or nitrogen dissociating plasma flow around thermal protection system test piece. Direct simulation Monte Carlo code with the heterogeneous catalysis model was also developed to analyze the flowfield around the test piece. By integrating the measurement and the numerical analysis, the new method was developed to quantify the surface catalysis of thermal protection system materials.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学，表面触媒性，発光分光，数値流体力学，プラズマ流れ

1. 研究開始当初の背景

大気圏突入カプセル等の宇宙機は 10km/s を超える速度で大気圏に突入するため、機体の前方に強い離脱衝撃波が生じる。衝撃層内部では気体の温度は 8,000K を超え、酸素分子や窒素分子は解離、電離し、機体は強い空力加熱にさらされる。このような厳しい空力加熱から機体を守るため、機体の熱防御システムとして CFRP 等のアブレータやシリカ

等の耐熱タイル、ガラスコーティングを施した C/C 材や SiC 材等が採用されている。空力加熱は衝撃層内の高温気体からの熱流束によって生じるが、機体表面の性質の一つである触媒性は解離した気体の再結合を促すため、その触媒効率が高くなると発熱反応である再結合反応が促進され、その結果として機体表面への熱の流入が増大することが知られている。従って大気圏突入時の空力加熱量

を正確に予測し、大気圏突入機体の熱防御システムの形状・重量・厚さ等の重要パラメータを最適に設計するには、熱防御材表面での触媒性を正しく評価することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では気流の発光強度比分布を計測することにより材料の触媒効率を推定する手法を応用し、原子の触媒性再結合反応の触媒特性を解明する手法を開発・実証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) プラズマ発生装置の整備, 改良

幅広い実験条件に対応するため、高電力電源をプラズマ発生装置に取り付ける。しかしながら高電力投入により装置ガラス管の温度上昇が避けられない。そのため、装置ガラス管の必要部位に水冷機構を取り付ける。これら2つの改良により、本プラズマ発生装置を用いて安定な窒素プラズマを実現することができる。

(2) 酸素原子同士, 窒素原子同士の触媒性再結合反応の触媒効率を求める

まず酸素（あるいは窒素）と少量のアルゴン混合気体を導入し、誘導加熱によりプラズマ化する。次に熱防御材試験片周囲の酸素原子（あるいは窒素原子）とアルゴン原子の発光強度比を計測し、原子間の触媒性再結合反応の触媒効率を得る。この作業を様々な温度、圧力条件下で実施し、触媒効率の温度依存性、圧力依存性を明らかにする。

(3) 計測システム信頼性向上のため、装置内部の流れ場を数値解析により明らかにする

誘導加熱による気体のプラズマ化を記述するため、数値流体力学を援用し電磁場と流れ場との連成解析手法を構築する。本手法を用いて熱防御材試験片周囲の化学種濃度分布の変化の様子を解析し、(2)及び(3)で得られた分光試験結果と比較することにより、プラズマ発生装置とその計測システムの妥当性を検討する。

(4) 触媒性再結合反応のモデル構築, 検証

不均一系触媒性理論に基づく触媒性再結合反応の数値モデルを構築し、(2)及び(3)で得られた様々な温度、圧力条件下における触媒効率と比較することでモデルの妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) プラズマ発生装置について、酸素分子や窒素分子を十分解離させることができるよう高電力化を行うとともに(図1)、発光分光により原子種発光強度の空間分布を取得できる仕立てを開発した(図2)。また発光分光計測により耐熱材料試験片周囲の原子種発光強度分布を測定し、原子濃度分布との関係

から材料表面で生じる触媒性再結合反応の触媒効率を定量化する手法を構築した。

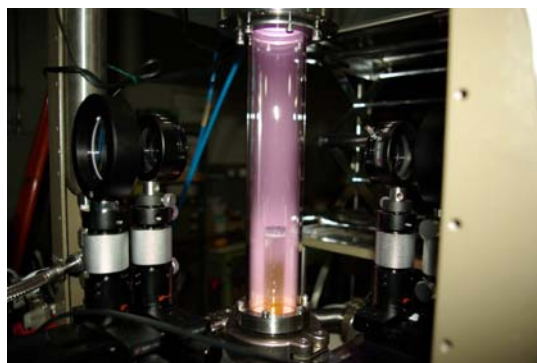


図1 高電力化を施したプラズマ発生装置と発光強度分布を計測するための光学装置

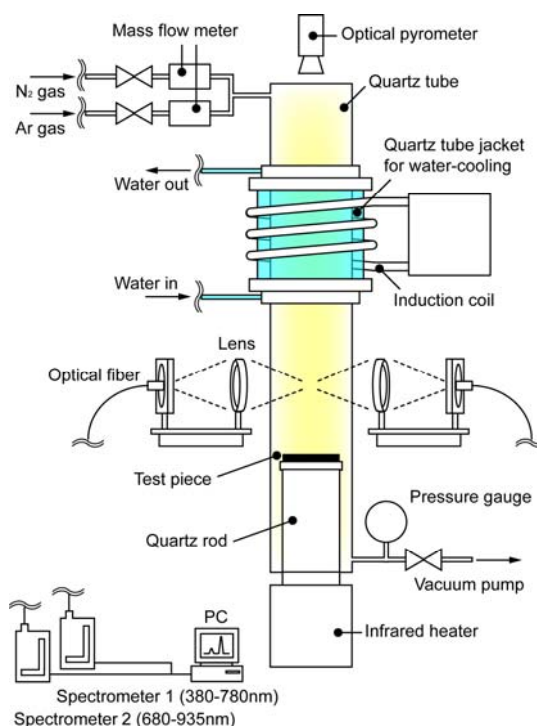


図2 発光強度の空間分布取得方法

(2) プラズマ発生装置内部の希薄プラズマ流れ場を解析するため、モンテカルロ直接法に基づく数値解析コードを開発するとともに動作検証を行った(図3, 図4)。また材料表面や実験装置内壁に衝突した原子の脱励起、その後の再励起を考慮するため、数値解析コードに現象論的電子励起モデルを導入し、発光分光データとの比較を通して衝突後の再励起に必要な電子衝突数を評価した(図5, 図6)。更に耐熱材料表面における触媒性再結合反応を考慮するため、原子の吸着、熱脱離、衝突脱離、Eley-Rideal 再結合反応、Langmuir-Hinshelwood 再結合反応等といった不均一系触媒性理論に基づく触媒性再結合反応モデルを数値解析コードに導入した(図7)。

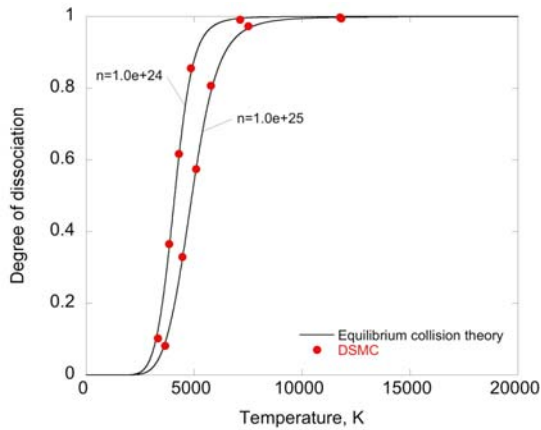


図 3 モンテカルロ直接法計算コードの動作検証の一例 (平衡計算)

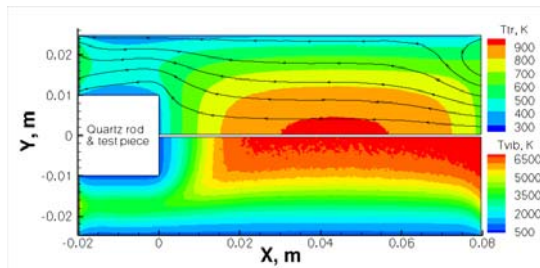


図 4 モンテカルロ直接法を用いたプラズマ発生装置内部流れ場の数値解析例

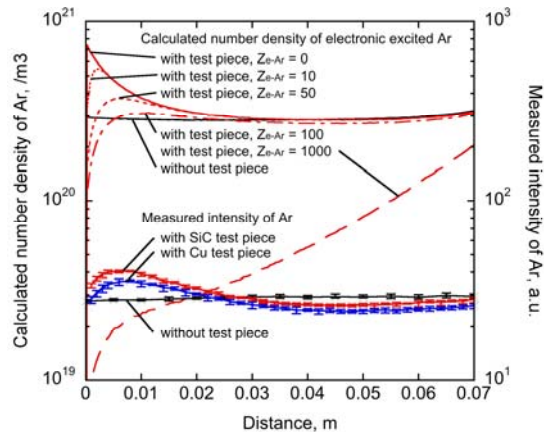


図 5 電子励起衝突数の違いが電子励起状態にあるアルゴン原子数密度へ与える影響、及び発光強度データとの比較

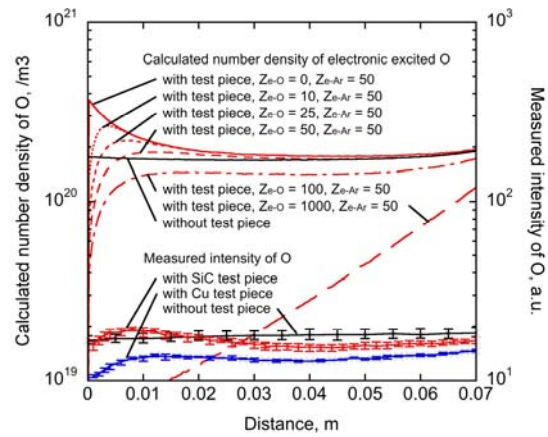


図 6 電子励起衝突数の違いが電子励起状態にある酸素原子数密度へ与える影響、及び発光強度データとの比較

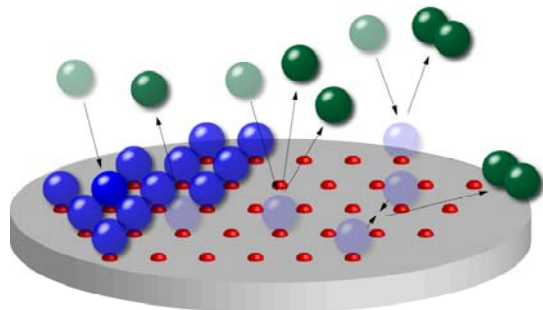


図 7 不均一系触媒性理論に基づく表面触媒性再結合反応モデルの概要 (原子の吸着、熱脱離、衝突脱離、Eley-Rideal 再結合反応、Langmuir-Hinshelwood 再結合反応を考慮)

(3) 数値解析結果と実験結果とを比較することにより、両者の融合による新しい触媒性評価手法を開発した (図 8, 図 9)。また本解析を実施するにあたり不確定なパラメータである吸着係数、衝突脱離断面積、単位面積当りのアクティブサイトの感度を調べ、それらが触媒効率に与える影響が小さいことを見極めた (図 10, 図 11, 図 12)。最後に本手法を用いてシリコンカーバイドや銅の表面触媒性を評価した。得られた結果から本手法の妥当性が示された。

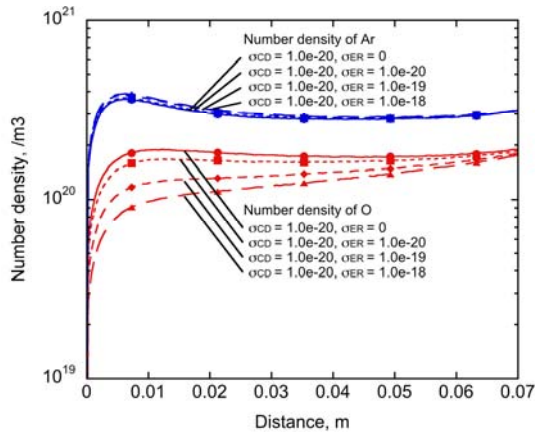


図 8 Eley-Rideal 再結合反応断面積の違いが原子数密度分布に与える影響

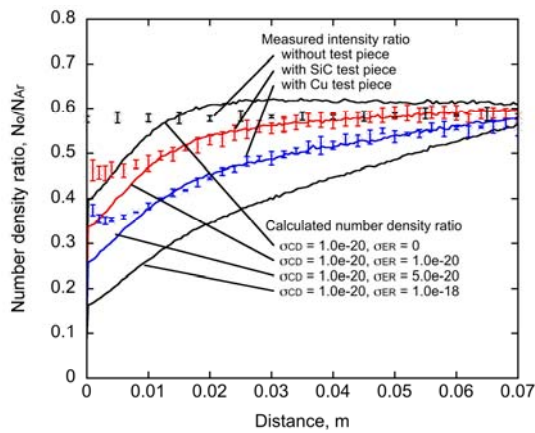


図 9 実験結果との比較による Eley-Rideal 再結合反応断面積の評価

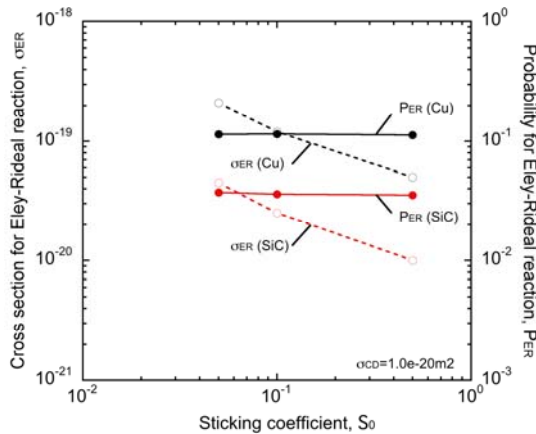


図 10 吸着係数の影響

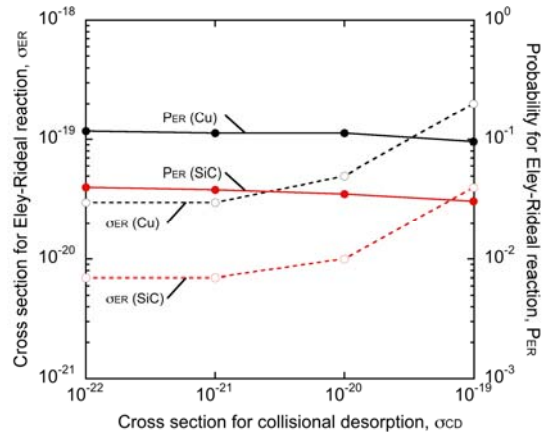


図 11 衝突脱離断面積の影響

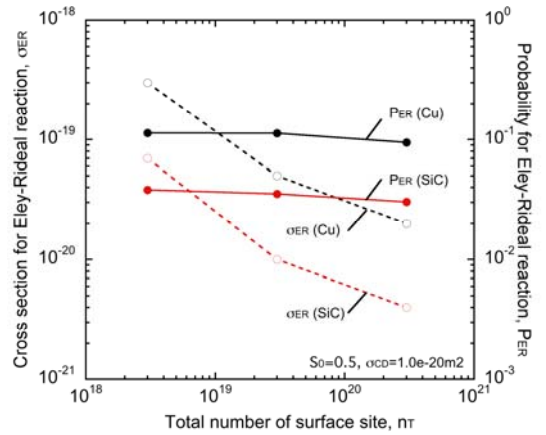


図 12 単位面積当りのアクティブサイト数の影響

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 2 件)

- ① Suzuki, T., Fujita, K., Osawa, H., Sawada, K., Numerical Analysis of Rarefied Oxygen Flow Around Catalytic Material, The ISTS special issue of Transactions of JSASS, Space Technology Japan, 査読有, Vol. 未定, No. 未定.
- ② Takayanagi, H. Bauer, C., Osawa, H., Suzuki, T., Komurasaki, K., Translational Temperature Distribution in an Inductively Coupled Plasma Flow for Catalytic Efficiency Measurements, The ISTS special issue of Transactions of JSASS, Space Technology Japan, 査読有, Vol. 未定, No. 未定.

[学会発表] (計 9 件)

- ① Suzuki, T., 他 5 名, Numerical Analysis of Rarefied Oxygen Flow Around

- Catalytic Materials, 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009年7月9日, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba
- ② Osawa, H., Suzuki, T., 他4名, Experimental and Numerical Investigation of Catalytic Efficiency of Atomic Oxygen Recombination on TPS Surfaces, 41st AIAA Thermophysics Conference, 2009年6月23日, Grand Hyatt, San Antonio, TX, USA
- ③ Suzuki, T., 他5名, Numerical Calculation of Rarefied Oxygen Flow for Surface Catalysis Measurement, 41st AIAA Thermophysics Conference, 2009年6月23日, Grand Hyatt, San Antonio, TX, USA
- ④ 大澤弘始, 鈴木俊之, 他4名, 壁面触媒性再結合確率の高精度評価に向けた実験的数値的研究, 第41回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2009, 2009年6月18日, 宇宙航空研究開発機構調布航空宇宙センター
- ⑤ 鈴木俊之, 他5名, 触媒性再結合反応モデル構築に向けた触媒性計測装置内部希薄流れ場の数値解析, 第41回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2009, 2009年6月18日, 宇宙航空研究開発機構調布航空宇宙センター
- ⑥ Osawa, H., Suzuki, T., 他4名, Reevaluation of Catalytic Efficiency of Atomic Nitrogen Recombination for SiC Material Surfaces, Reevaluation of Catalytic Efficiency of Atomic Nitrogen Recombination for SiC Material Surfaces, 2009年1月5日, Orlando, Florida, USA
- ⑦ 鈴木俊之, 他3名, 触媒性計測装置内部流れ場の数値解析, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008年12月17日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑧ 大澤弘始, 鈴木俊之, 他3名, 窒素原子表面触媒性再結合確率評価に向けた実験的数値的研究, 平成20年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2008年12月4日, JAXA宇宙科学研究本
- ⑨ 鈴木俊之, 他3名, SiC表面上の窒素原子触媒性再結合反応に関する実験的数値的研究, 日本流体力学会年会2008, 2008年9月6日, 神戸大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 俊之 (SUZUKI TOSHIYUKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部未踏技術研究センター・研究員