

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02075

研究課題名（和文）プラズマ技術と燃焼診断技術の融合による壁面の化学的効果の解明とモデリング

研究課題名（英文）Elucidation and modeling of wall chemical effect with plasma techniques and combustion diagnostics

研究代表者

齋木 悠 (Saiki, Yu)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：60550499

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、固体壁面近傍の燃焼メカニズムを理解する上で重要となる壁面の化学的効果に着目し、非平衡プラズマ技術と燃焼診断技術を融合した独自のラジカル表面反応評価手法を駆使することで、吸着・再結合・脱離からなる一連のラジカル表面反応素過程の解明・モデリングに取り組んだ。プラズマ分子線散乱計測および大気圧プラズマジェット壁面照射試験を通じて、化学的効果において支配的な役割を担うHおよびOラジカルの吸着反応挙動を異なる材質の壁面に対して初めて明らかにするとともに、壁面よどみ火炎を対象とした壁面近傍ガス組成分析・数値解析により、Hラジカル吸着後の再結合反応速度を見積もることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火炎に与える壁面の効果には、壁への熱損失に起因する熱的效果に加え、火炎内のラジカルが壁面に吸着し再結合して消失する化学的効果が存在する。しかし、化学的効果に関しては、ラジカル表面反応の評価が難しいことから、そのメカニズムは未解明のままにされてきた。本研究は、従来情報が少ないラジカルの表面反応過程をプラズマなどを活用した独自の技術により評価したものであり、種々の燃焼装置における壁面効果の解析手法の確立に大きく寄与すると言える。広く社会には、内燃機関の低環境負荷化、燃料改質器の高性能化、付加価値の高い超小型エネルギー源の創成などに関連して、持続型社会の構築とQOLの向上に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Prediction of flame-wall interaction is of great importance for development of downsized combustors. The solid wall imposes fluidic, thermal, and chemical boundaries affecting flame characteristics. In this study, wall chemical effect caused by radical adsorption and recombination on wall surfaces is investigated by using newly-developed two different types of plasma techniques as well as combustion diagnostics. Firstly, adsorption of H and O radicals, which play a key role in the wall chemical effect, are directly measured through molecular beam scattering technique using a non-equilibrium plasma-driven beam source with an ultra-high vacuum chamber. Non-equilibrium plasma jets are also employed to examine H and O adsorption at atmospheric-pressure. In addition, H radical recombination are evaluated using a wall stagnation flame. The near-wall H₂ concentration is analyzed by gas-chromatography and compared with numerical results using detailed gas/surface chemistry.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 壁面効果 表面反応 ラジカル プラズマ

1. 研究開始当初の背景

近年、自然エネルギーや燃料電池の導入が進められているが、燃焼は、一次エネルギーの変換手法として今もなお重要な位置を占めている。燃焼は、往復動式内燃機関やガスタービンで見られるように、壁面に囲まれた状況下で利用されるのが一般的である。しかし、壁面に近接して形成される火炎は壁の物理化学特性の影響を強く受け、排出ガス特性や安定性が著しく悪化することが知られており、この壁面の消炎効果の正確な予測と制御が、種々の燃焼装置における一層の低環境負荷化および小型化において重要視されている。壁面の消炎効果には、壁への熱損失に起因する熱的效果に加え、気相中のラジカルが、壁面で吸着し再結合反応を起こして消失する化学的效果も存在する。しかし、この化学的效果に関しては、ラジカルの表面反応の実験的評価が困難なことから、その消炎機構には依然として不明な点が多いのが現状である。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、従来の燃焼診断技術に加え、非平衡プラズマを活用した異なる2つのラジカル表面反応評価手法を駆使することで、異なる材質の壁面における化学的效果を解明することを目的とした。まず、独自に開発した超高真空下での非平衡プラズマを用いた分子線散乱計測法により、化学的效果において重要なラジカルの吸着反応を直接的に評価した。さらに、プラズマジェットによるラジカルのオンデマンド生成および壁面照射試験を通じて、大気圧下においてもラジカル吸着挙動を評価した。さらに、壁面よどみ火炎を用いた壁面ごく近傍に形成される火炎のガス組成分析・数値解析を通じて、ラジカル吸着後の再結合反応についての検討も行い、ラジカルの一連の表面反応プロセスの解明とモデリングを目指した。

3. 研究の方法

3.1. プラズマ分子線散乱計測装置

図1に、プラズマ分子線散乱装置の模式図を示す。主室はターボ分子ポンプにより排気し、 10^{-9} Torr 位の超高真空状態を保持した。本研究では、化学的效果において重要な役割を担う H および O ラジカルを計測対象とした。差動排気室へのラジカルの供給には、PBN 製円筒管および RF 電源から構成される非平衡プラズマ源を用いた。H₂ ガスを 250 W で駆動される PBN 放電室に導入し、プラズマ分解することで H を生成した。一方、O の生成には O₂ ガスを用い、放電室を 200 W で駆動した。第2段目排気室には分子線を変調するための回転式チョッパーディスクが設置されている。本実験では、十分な強度の散乱信号を得るため、矩形波変調を採用した。試料壁面には、合成石英基板上に、実用燃焼器で多用されるステンレス(SUS321)の薄膜を蒸着したものをを用いた。壁温 T_w は、PBN/PG ヒーターにより調整される。測定に先立ち、壁面を $T_w = 1073$ K でアニーリングすることで、吸着物を脱離させ清浄表面を確保した。H/H₂ および O/O₂ 散乱信号は、四重極質量分析器(QMS)により検出し、チョッパーディスクから QMS までの飛行時間分布(TOF 分布)を取得した。

3.2. 大気圧プラズマジェット壁面照射実験装置

非平衡プラズマジェットを活用することで、大気圧下でのラジカル吸着挙動の評価を進めた。図2に、プラズマジェット実験装置の模式図を示す。本装置は、石英円管に準安定励起準位を持つキャリアガスを流し、石英管に備えた2つの銅電極間に高電圧パルスを印加することで、自由空間に吹き出すジェット状の非平衡プラズマを形成できる。準安定励起電圧が高い He をキャリアガスとして採用し、H₂ および O₂ を He に微量添加してプラズマ分解することで、H・O ラジカルジェットの生成を試みた。電源には、高電圧パルスアンプを使用し、印加電圧は 10 kHz、18 kV_{pp} に設定した。また、プラズマ出力電圧電流波形をモニターすることで、実験の再現性を確保した。試料壁面には、合成石英基板とともに、アルミナと、耐熱コーティング剤の一つとして用いられる YSZ を異なる材質として選択した。同じ石英板に薄膜を蒸着させることで、アルミナおよび YSZ 壁面を得た。壁面は、赤外線ヒーターを用いて加熱した。ラジカルのプラズマ分解生成および吸着反応挙動は、分光器およびバンドパスフィルターを装着した ICCD カメラによるラジカル自発光計測により評価した。

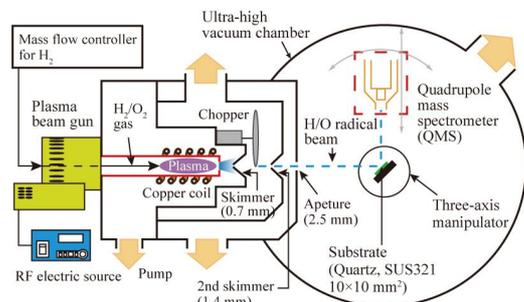


Fig. 1 A schematic of plasma molecular beam scattering apparatus.

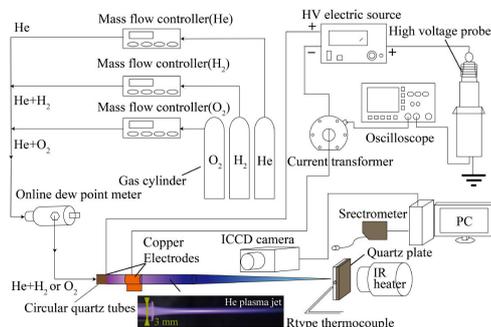


Fig. 2 A schematic of experimental setup for an atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jet.

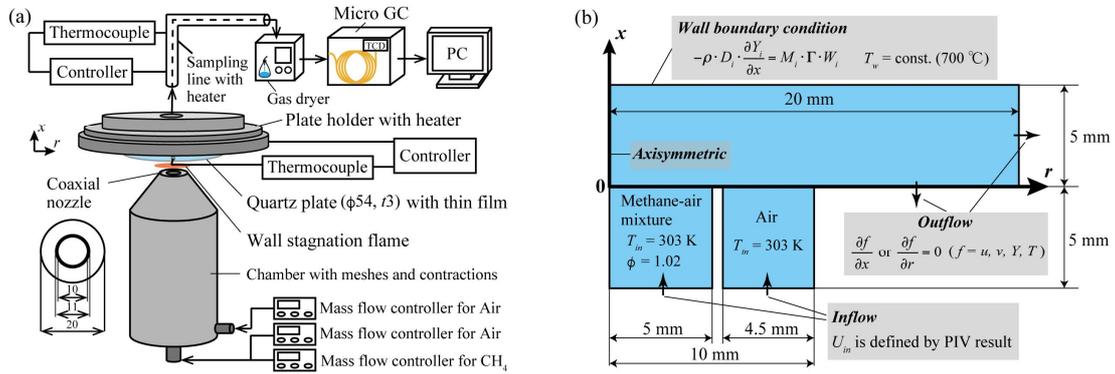


Fig. 3 Experimental setup and corresponding numerical model for a methane-air premixed wall stagnation flame: (a) a schematic of experimental setup, and (b) numerical model.

3. 3. 壁面よどみ火炎実験装置および数値解析モデル

ラジカルと壁面が定常的に干渉する場を形成可能な壁面よどみ火炎を用いることで、ラジカル吸着後のラジカル再結合反応速度の評価を試みた。

図 3a に、壁面よどみ火炎装置の模式図を示す。本装置は、同軸バーナー、加熱壁面、ガスクロマトグラフ装置から構成される。中心ノズルからメタンと空気の予混合気を、環状ノズルから空気を噴出した。合成石英円板をホルダーに取り付け、ノズル出口から 5 mm の位置に設置した。ホルダー内部のヒーターを用いて壁温 T_w を調整し、 $T_w = 973$ K とした。同じ石英板上に、SUS321 薄膜を蒸着し、膜厚を 300 nm と極めて薄くすることで、異なる材質でも熱的境界条件が等価となるようにした。壁面上での H の再結合反応を評価するために、壁面近傍の H_2 濃度をガスクロマトグラフで分析した。壁面近傍のガスは、石英板に設けられた直径 0.5 mm の穴から採取した。

図 3b に、実験系を模擬した数値解析モデルを示す。支配方程式は連続の式、ナビエ・ストークス方程式、化学種保存式、エネルギー保存の式、状態方程式である。グリッドサイズは 0.1×0.1 mm² とした。気相反応機構には GRI-mech3.0 を用いた。白金壁面の表面反応には Deuschmann et al. が提案した反応モデルを使用し、SUS および石英壁面には H, O, OH, CH₃ ラジカル吸着・再結合を考慮したモデルを適用した。ラジカル吸着速度は初期吸着係数 S_0 を用いた Langmuir 型モデルにより計算される。SUS および石英の S_0 は、吸着計測の結果を踏まえ、それぞれ 0.5 および 0.01 に設定した。一方、ラジカル再結合反応は Arrhenius 型の式を用いて計算し、前指数因子 A_r を変化させて得た計算結果を、実験結果と比較することで、各壁面での H 再結合反応速度定数を評価した。

4. 研究成果

4. 1. プラズマ分子線散乱計測による H・O ラジカル吸着反応の定量化

はじめに、入射分子線の特性を評価した。例として図 4 に、O/O₂ 入射線の TOF 分布を示す。適用した非平衡プラズマ源により O₂ が分解され O ラジカル線を形成可能なことが確認できる。ここで、Shifted Maxwell-Boltzmann 分布に基づく速度を持つ粒子群に対し、QMS で得られる TOF 分布 $I(t)$ は、

$$I(t) = \text{const} \cdot \frac{L_{cd}^3}{t^4} \cdot \exp\left[-\frac{m}{2k_b T_{in}} \cdot \left(\frac{L_{cd}}{t} - u_{in}\right)^2\right] \quad (1)$$

で表される。なお、 L_{cd} , m , k_b , T_{in} および u_{in} は、それぞれ、チョッパー・QMS 間距離、粒子質量、ボルツマン定数、並進温度および並進速度である。式(1)に基づき、H および O 入射ラジカル線の u_{in} および T_{in} を、Simplex 法を用いた TOF 測定値に対するカーブフィッティングにより求めた。図 4 中に併せて示したフィッティングカーブは実験結果を良く再現できており H ラジカル線は $u_{in} = 2348$ m/s および $T_{in} = 282$ K、O ラジカル線は $u_{in} = 1128$ m/s および $T_{in} = 253$ K である。得られた u_{in} および T_{in} から計算される H および O ラジカル線の E_{in} は、それぞれ、約 100 meV および約 170 meV であり、これは 873~1484 K の気体分子の E_{in} に相当することから、本入射線は、壁面-火炎干渉におけるラジカル吸着を調べるのに適したエネルギーを有すると考えられる。

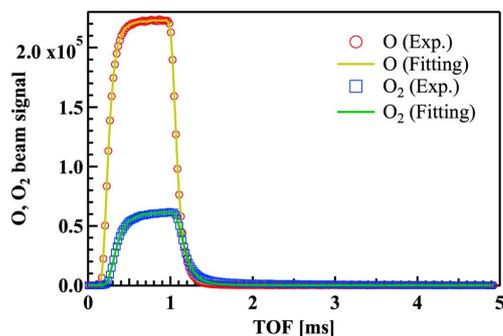


Fig. 4 Time-of-flight (TOF) distributions of O and O₂ with a square-wave beam modulation.

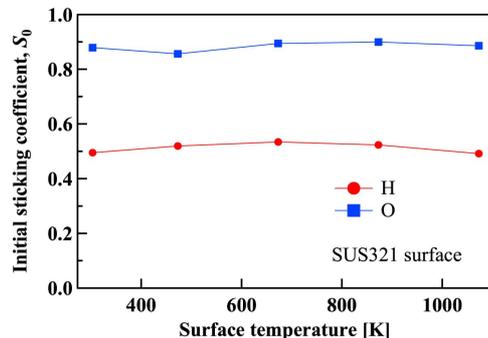


Fig. 5 Initial sticking coefficients S_0 for H and O radicals on SUS321 surface at $T_w = 293 \sim 1073$ K.

図5に、ラジカル線散乱実験により取得した、SUS壁面での、異なる壁温における S_0 を示す。HおよびOの S_0 は、それぞれ、 ~ 0.5 および ~ 0.9 であり、また、試験した壁温範囲($T_w = 293 \sim 1073$ K)において温度依存性は小さいことが初めて明らかとなった。SUSの S_0 は、研究代表者らの過去の燃焼実験で見積られた値(0.1~1)の範囲内であり、本計測を通じてより正確な値を得られたと言える。

4.2. 大気圧プラズマジェットによるH・Oラジカル吸着反応の評価

まず、プラズマジェットによるH・Oラジカルの生成特性を調査した。図6aに、ICCDカメラによって撮影した異なる H_2 添加量におけるH自発光の空間分布を示す。全ての条件において、Hが $x \sim 25$ mmの広い範囲に分布していることが見て取れ、Hの壁面照射実験が可能であることが分かる。また、H生成が最適化される添加量が存在する様子が分かり(図6a中A)、200 ppmで最大値を持つ。 H_2 添加量が過剰の際、Hの発光強度が低下するのは、 H_2 の存在によりHe原子と電子の衝突頻度が低下し、準安定励起準位の He^m によるペニング効果($He^m + H_2 \rightarrow He + 2H$)や二次電子による直接分解($e^- + H_2 \rightarrow 2H + e^-$)が抑制されるためと考えられる。同様に、図6bに、O自発光の空間分布を示す。添加後、Oは $x \sim 15$ mmの範囲に分布していることが見て取れる。また、Oの発光強度は400 ppmでピークを持ち、ピーク位置が上流側にシフトすることも分かる(図6b中B)。これは、Oの生成源が大気由来の O_2 から、添加した O_2 に変化したことを明確に示している。なお、添加量400 ppm以上でOの発光強度が低下するのは、Hと同様の理由と考えられる。

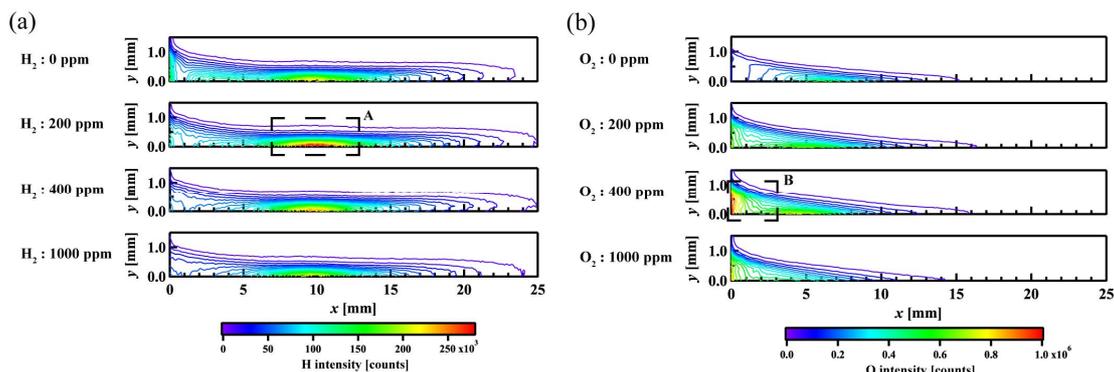


Fig. 6 Radical chemiluminescence intensity under different H_2 or O_2 contents: (a) spatial distributions of H intensity, and (b) spatial distributions of O intensity.

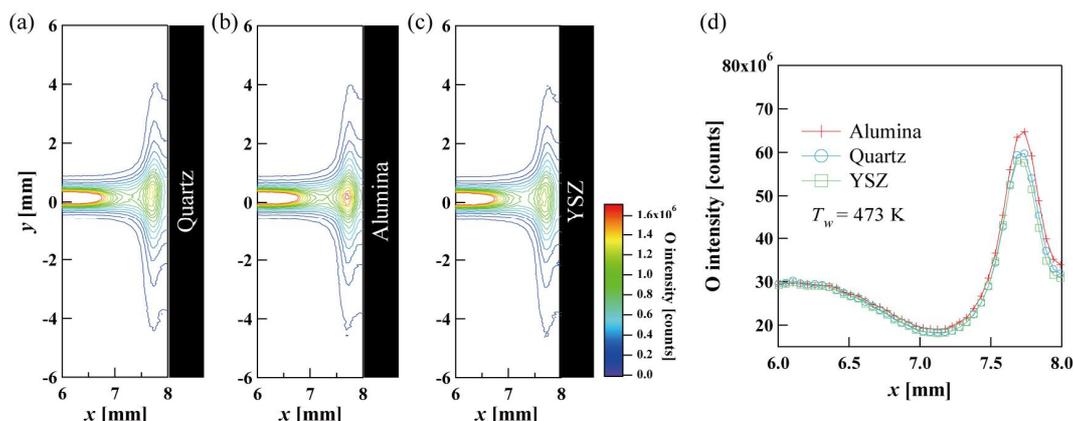


Fig. 7 O chemiluminescence distributions near quartz, alumina and YSZ surfaces at $T_w = 473$ K.

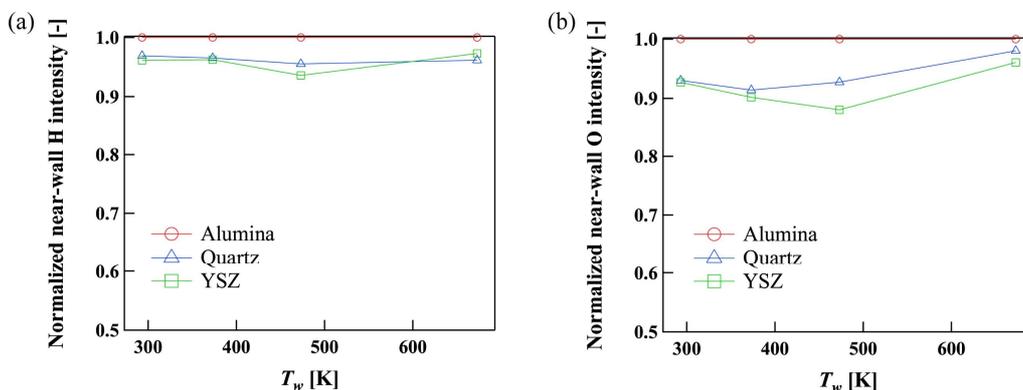


Fig. 8 Chemiluminescence intensities near quartz and YSZ surfaces normalized by those near alumina surface at $T_w = 293 \sim 673$ K: (a) H, and (b) O.

ラジカル生成実験の結果を踏まえ、H および O ラジカルの壁面照射試験を行った。H₂ および O₂ の添加量は、ラジカル生成が最も促進される条件として、それぞれ 200 ppm および 400 ppm に設定した。一例として、図 7 に、O₂ 添加条件における、 $T_w = 473$ K での各壁面近傍の O 発光強度の空間分布および壁水平方向に積算した発光強度の流れ方向分布を示す。プラズマジェットは壁面に到達後に沿面放電に発達するため、積算発光強度は壁面近くで急峻に上昇する。なお、各壁面における He 発光強度には変化が無いことを確認している。アルミナと比較し、石英および YSZ 上の O の発光強度が顕著に小さくなっていることが分かり、O が石英および YSZ 上で有為に吸着することが明らかとなった。また、H についても、O と定性的に同様の結果が得られた。温度依存性について検討するため、表面反応の影響が顕在化する壁面から約 0.3 mm の領域で積算したラジカル発光強度を評価した。図 8 に、 $T_w = 293 \sim 673$ K での、各壁面近傍における H および O 発光強度を示す。ここでは比較のため、図中の発光強度をアルミナのそれで規格化している。全ての壁温条件において、アルミナと比較し、石英および YSZ 壁面近傍の H および O 発光強度が低下することが分かり、試験した壁面の中では、アルミナが最も不活性な材質と言える。また、H および O 吸着の温度依存性は小さく、これは、材質は異なるものの、上述の分子線計測結果と定性的に一致する。

4. 3. 壁面よどみ火炎を用いた H ラジカル再結合反応速度の評価

図 9ab に、数値計算により得た、再結合反応速度定数 A_r を 10^1 から 10^{13} に変化させた際の、壁面近傍における H および H₂ の濃度を示す。ここでは、SUS 壁面を想定し、上述の分子線計測結果に基づき、初期吸着係数を $S_0 = 0.5$ としている。また、図 9c には、 $A_r = 10^1 \sim 10^{13}$ における H の被覆率を併せて示す。まず、 A_r が $10^1 \sim 10^2$ の場合、H の濃度は不活性壁面の条件と同じになる。これは、再結合反応が遅いため、表面サイトが吸着した H で占有されるためである。図 9c より、このときの H の被覆率は 80% 以上となることが分かる。一方、 A_r の上昇に伴い、空きサイトが増えることで、吸着・再結合が促進し、H 濃度は低減、H₂ 濃度は増加することが分かる。ただし、 $A_r = 10^5$ では、再結合反応速度が吸着反応速度を上回るため、H および H₂ の濃度に変化は見られなくなる。以上を踏まえると、H の表面反応は A_r の値により次の 3 つのパターンに分類されると考えられる。すなわち、 $A_r = 10^1 \sim 10^2$ において、壁面の化学的效果は再結合律速となるが、 $A_r = 10^3$ まで上昇すると、吸着と再結合が競合しはじめ、 $A_r = 10^5$ では吸着律速となると言える。

H ラジカルの再結合反応速度を評価するために、実験および計算で得られた H₂ 濃度を比較した。図 10 に、SUS および石英壁面における H₂ の壁水平方向分布の実験値と $A_r = 10^1 \sim 10^{13}$ ($S_0 = 0.5$ および 0.01) の計算値を示す。比較のため、不活性壁面での結果も併せてプロットしている。SUS および石英壁面近傍の H₂ 濃度は、H 再結合により、不活性壁面のそれに比べて高い値を示し、SUS 壁面では約 12%、石英壁面では約 8% の増加が見られる。SUS および石英壁面において実験値は $A_r = 10^5$ の計算値と良い一致を示しており、このことは、いずれの壁面においても H の再結合速度が速く、表面反応が吸着律速であることを表しており、化学的效果のモデリングにあたり極めて重要な知見が得ることに成功した。

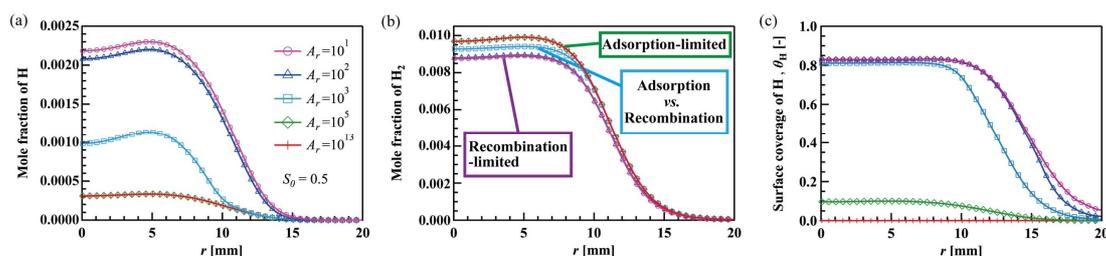


Fig. 9 Variations of near-wall H/H₂ concentration of H/H₂ concentration and surface coverage of H θ_H for different recombination constants A_r of $10^1 \sim 10^{13}$ s⁻¹: (a) near-wall H profiles, (b) near-wall H₂ profiles, and (c) surface coverage of H θ_H .

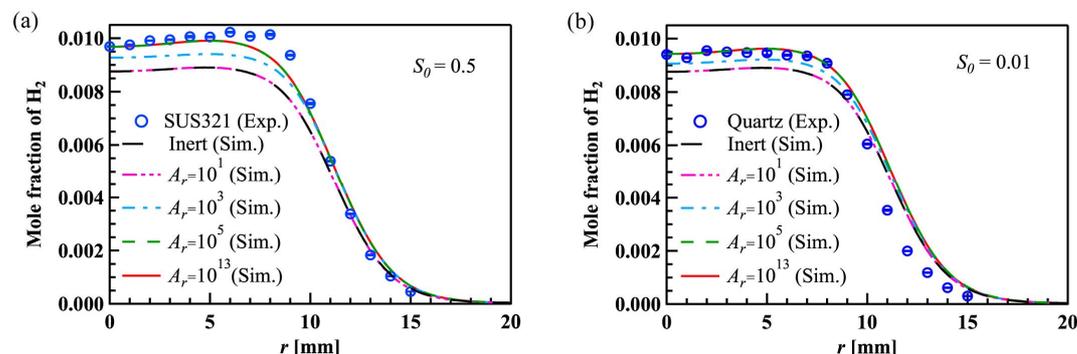


Fig. 10 Measurement data for near-wall profiles of H₂ concentration on SUS321 and quartz walls: (a) SUS321, and (b) quartz. The simulation data with different A_r are also plotted here.

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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Saiki Y., Sugimura Y., Yusa K.	4. 巻 39
2. 論文標題 Evaluation of H-atom recombination rate on SUS and quartz surfaces using a wall stagnation flame	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 WiPP abstract for 39th International Symposium on Combustion	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Saiki Y., Iinuma R., Sugimura Y., Yusa K.	4. 巻 13
2. 論文標題 Evaluation of H-atom Recombination Rate on Wall Surfaces Using a Wall Stagnation Flame	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 12th Asia-Pacific Conference on Combustion	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 齋木悠	4. 巻 63
2. 論文標題 プラズマ技術と燃焼計測技術による壁面の化学的効果の解明とモデル化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 101-108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20619/jcombsj.63.204_101	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 Saiki Y., Akao T., Yoshinaga A.	4. 巻 38
2. 論文標題 Evaluation of OH and H radical quenching on wall surfaces by using atmospheric-pressure plasma jets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 WiPP abstract for 38th International Symposium on Combustion	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 齋木悠	4. 巻 62
2. 論文標題 燃焼場における壁面の化学的効果の解明とモデリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 184-185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20619/jcombsj.62.201_184	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 范勇, 齋木悠, 万遂, 李敏赫, 鈴木雄二	4. 巻 62
2. 論文標題 レーザー誘起蛍光法 (LIF) を用いた燃焼計測の基礎	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌	6. 最初と最後の頁 132-142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20619/jcombsj.62.200_132	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 Saiki Y., Akao T., Yoshinaga A.	4. 巻 12
2. 論文標題 Investigation on wall chemical effect through radical generation with atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 12th Asia-Pacific Conference on Combustion	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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13件(うち招待講演 2件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Saiki Y., Sugimura Y., Yusa K.
2. 発表標題 Evaluation of H-atom recombination rate on SUS and quartz surfaces using a wall stagnation flame
3. 学会等名 39th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saiki Y., Iinuma R., Sugimura Y., Yusa K.
2. 発表標題 Evaluation of H-atom recombination rate on wall surfaces using a wall stagnation flame
3. 学会等名 13th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 駒澤圭悟, 村上文哉, 齋木悠
2. 発表標題 大気圧ヘリウムプラズマジェットによる水素・酸素原子の吸着反応の評価
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉村美明, 遊佐海人, 齋木悠
2. 発表標題 壁面よどみ流火炎を用いた異なる壁面での水素ラジカル再結合反応速度の評価
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遊佐海人, 飯沼稜斗, 杉村美明, 齋木悠
2. 発表標題 壁面よどみ火炎を用いた水素ラジカル表面再結合反応の評価
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Saiki Y., Akao T., Yoshinaga A.
2. 発表標題 Evaluation of OH and H radical quenching on wall surfaces by using atmospheric-pressure plasma jets
3. 学会等名 38th International Symposium on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋木悠
2. 発表標題 燃焼器の小型化に向けた壁面の化学的効果に関する研究
3. 学会等名 日本伝熱学会「東海支部伝熱セミナー&コロキウム」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木和樹, 鈴木健太, 駒澤圭吾, 齋木悠
2. 発表標題 大気圧プラズマジェットを活用した酸素原子の表面反応の調査
3. 学会等名 第58回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋木悠
2. 発表標題 燃焼場における壁面の化学的効果の解明とモデリング
3. 学会等名 日本燃焼学会研究討論会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹羽紘章, 飯沼稜斗, 杉村美明, 齋木悠
2. 発表標題 壁面よどみ火炎を用いた壁面の化学的効果の評価手法
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Saiki Y., Akao T., Yoshinaga A.
2. 発表標題 Investigation on wall chemical effect through radical generation with atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets
3. 学会等名 12th Asia-Pacific Conference on Combustion (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木和樹, 鈴木健太, 齋木悠
2. 発表標題 大気圧プラズマジェットによるOH およびH ラジカルの表面反応挙動の評価
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯沼稜斗, 丹羽紘章, 齋木悠
2. 発表標題 よどみ流予混合火炎における壁面の化学的効果の調査
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 范勇, 齋木悠, 鈴木雄二 (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 808
3. 書名 マイクロ・ナノ熱工学の進展	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>齋木 悠 准教授が、2019年度日本燃焼学会奨励賞を受賞しました。 https://www.nitech.ac.jp/honor/2019/post-56.html</p>

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	<p>杵淵 郁也 (Kinefuchi Ikuya) (30456165)</p>	<p>東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)</p>	

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