

ラジカル表面反応を伴う燃焼現象の研究

名古屋工業大学大学院 工学研究科

齋 木 悠*

Study on Combustion Phenomena with Radical Surface Reaction

*Yu Saiki, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

*E-mail : saiki.yu@nitech.ac.jp

1 はじめに

燃焼は、熱機関における火炎と燃焼器壁面や、工業炉における火炎と被加熱物などに見られるように、壁面との干渉を伴いながら工業利用される機会が多い。身近には調理用ガスコンロなどもその一例と言える。ただし、壁面近傍の火炎は、壁の影響を強く受けることでその安定性や排出ガス特性が悪化することが懸念されており、この壁面の消炎効果(火炎を消す効果)の理解と制御が、種々の燃焼装置の一層の高効率化・低環境負荷化に向けて重要視されている^{1,4)}。図1に示すように、火炎に対する壁面の効果には、速度勾配による流体力学的効果、熱損失による熱的效果に加え、壁面で表面反応に起因する化学的效果が存在する⁵⁻¹³⁾。化学的活性の高い壁面材質として白金やパラジウムなどに代表される燃焼触媒が挙げられるが、より一般的で低活性な壁面においても、燃焼反応で生成された反応性の高い中間生成物(ラジカル)が、壁面で吸着・会合(再結合)反応を起こして消失する化学的な消炎が発生しうるとされている。しかしながら、化学的效果に関しては、実験計測による評価が難しいことから未だ不明な点が多い。本稿では、燃焼場における壁面の化学的效果について、これまでの研究例を交えながら解説するとともに、ラジカル表面反応の解明とモデル化に向けて著者らが進めてきた、薄膜技術と

レーザー計測による壁面近接火炎のラジカル濃度の評価^{9,10)}、プラズマ分子線散乱法によるラジカル吸着の直接的な定量化¹²⁾、について紹介したい。

2 燃焼場における壁面の化学的效果

火炎に対する壁面効果に関する研究は、Davy¹⁴⁾による白金網を用いた安全灯の製作過程で観察された消炎現象に端を発し、火炎を維持可能な流路の最小寸法として、平板流路では消炎距離、円管流路では消炎直径が定義されることにはじまる。消炎距離 d_q は、漸近解析から導かれる燃焼速度と熱損失を関係づける次の理論式から求めることができる。

$$\mu^2 = e^{-\beta H/\mu^2} = e^{-l/\mu^2} \quad (1)$$

ここで、 μ 、 β および H は、それぞれ、断熱燃焼速度で無次元化された燃焼速度、ゼルドビッチ数および全発熱量で無次元化した熱損失量である。式(1)の導出過程については、著者らの過去の解説論文¹⁵⁾を参照されたい。式(1)において、 $l(=\beta H) > 1/e$ では、 μ に解が存在しないことから、この条件で消炎に至ると考えられる。熱損失として壁への熱伝達を考慮すれば、 d_q は、

$$d_q = \sqrt{2e\beta\text{Nu}\delta_f} \quad (2)$$

で表される。ここで、 Nu および δ_f は、代表長さを d_q としたヌセルト数および断熱火炎厚さである。式(2)に基づけば、 d_q は、水素燃料で0.6 mm、炭化水素燃料では3 mm程度となる。壁面効果のうち、この熱的效果に関しては、壁面に垂直あるいは平行に火炎が伝播する際の壁面熱流束を評価したもの^{1,4)}や、振動火炎などの燃焼不安定の発生¹⁶⁾、排気熱の利用により熱的效果の抑制を図る超過エンタルピー燃焼¹⁷⁾など、多くの研究開発が進められてきた。これに対し、化学的效果に関する研究例は少ない。

表面反応は、気相中の化学種の壁面への吸着、表面拡散、会合反応、脱離の素過程で構成される。吸着反応速

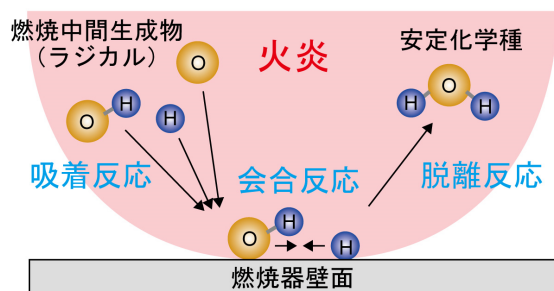


図1 燃焼場における壁面の化学的效果の模式図

度 W_a [s^{-1}] は、一般に、化学種の壁面への衝突頻度と吸着確率の積で表される Langmuir 型モデルにより、

$$W_a = \frac{p}{\Gamma \sqrt{2\pi M R_0 T_w}} \cdot (1 - \theta) S_0 \quad (3)$$

で記述される。ここで、 p , Γ , M , R_0 , T_w , θ および S_0 は、それぞれ化学種の分圧、表面サイト密度、分子量、一般気体定数、壁温、表面被覆率および初期吸着係数 (θ が 0 の場合の吸着確率) である。吸着後、吸着種同士が表面拡散により衝突して会合反応を起こすが、このメカニズムを Langmuir-Hinshelwood 機構と呼ぶ。反応物として A と B の 2 種類を仮定すると、会合反応速度 W_r [s^{-1}] は、

$$W_r = k_r \theta_A \theta_B \quad (4)$$

で表される。ここで、 k_r はアレニウス型の反応速度定数であり、 θ_A , θ_B はそれぞれ吸着種 A, B の被覆率である。なお、式(4)は、吸着種間に分子間力がなく自由に表面拡散する場合に成立する。また、脱離の反応速度についても、アレニウス型の式で記述される。

この表面反応と気相中の燃焼反応の干渉に関して、過去に、壁面近傍でのラジカル濃度計測⁹⁾などが行われたが、これらは燃焼触媒である白金に焦点を当てた研究であり、一般的な壁面材質に対する検討は限られる。Vlachos et al.⁹⁾は、触媒と異なり、反応性の高い気相中のラジカルのみが表面反応に寄与する低活性な壁面を想定し、壁面でのラジカル消失が燃焼特性に及ぼす影響を数値解析により検討した。そして、メタン火炎では、 H , O , OH , CH_3 が着火・消炎限界に強く作用することを明らかにしている。また、Miesse et al.⁹⁾は、異なる材質の平行平板流路において消炎距離を測定した。その結果、壁温が低い条件 (500 °C) では、材質による消炎距離の変化がなく熱的效果が支配的であるが、高壁温条件 (1000 °C) では、材質に応じて消炎距離が 10 倍以上変化することを示し、化学的效果の重要性を指摘した。

しかし、上述の研究では、壁面材質の影響を調べる際、異なる材質のバルクの基板を用いたため、熱伝導率が異なることにより熱的境界条件も影響を受けていることが懸念された。また、壁面近傍における火炎構造の情報は乏しく、そのため、壁面材質を考慮した詳細表面反応モデルも提案されてこなかった。

これらに基づき、著者らは、石英基板表面に異なる材質の薄膜を形成することで、熱的境界条件を等価に保ちながら、異なる材質の壁面近傍の火炎のラジカル分布を平面レーザー誘起蛍光法 (PLIF, Planar Laser-Induced Fluorescence) により測定し、化学的效果の評価を行ってきた^{9,10)}。さらに、超高真空中の非平衡プラズマを用いた分子線散乱計測により、ラジカル吸着反応の直接的な定量化を進めてきた¹²⁾。以降では、実験装置・モデリング手法、異なる壁面での計測・モデリング結果を示すとともに、今後の展望についても述べたい。

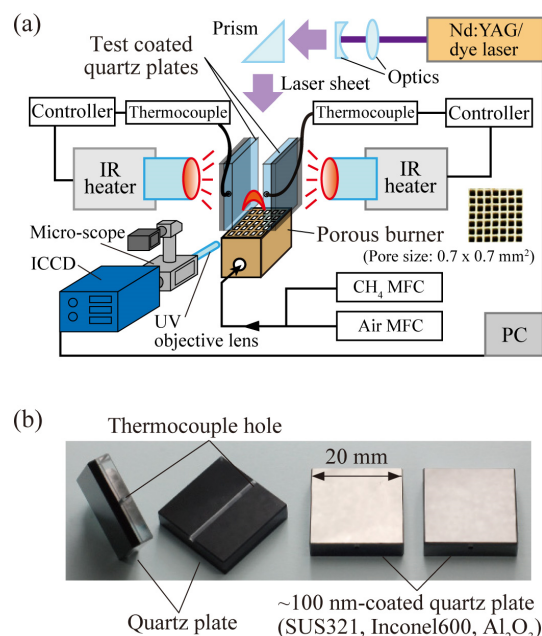


図2 壁面近接火炎の PLIF 実験装置: (a) 模式図, (b) 薄膜が蒸着された石英壁面

3 壁面近接火炎のラジカル濃度の PLIF 計測

3.1 実験装置・モデリング手法

図2に、壁面近接火炎テストベンチの模式図および石英基板を示す。薄膜を持つ2枚の石英基板が3~5 mm 間隔で平行に配置され、ポーラスバーナーにより石英板間にメタン・空気平面予混合火炎が形成される。石英板は、黒色石英板を融着した背面から赤外線ヒーターにより加熱し、壁面温度 T_w を所定の値に保った。

壁面材料には、アルミナ、白金、実用燃焼器で多用されるステンレス (SUS321) およびインコネル (Inconel600) を選択し、石英板表面に成膜した。アルミナの蒸着には原子層堆積法を、白金、ステンレス、インコネルの蒸着には真空アークプラズマガンを用いた。このとき、被膜の厚みを 100 nm と極めて薄くすることで、全ての壁面において熱的境界条件を等価とみなせるよう工夫を施した。そして、燃焼反応で重要とされる OH ラジカルの濃度分布を、異なる壁面近傍で PLIF により計測した。

実験を模擬した平行平板流路内火炎の数値解析を併行して実施した。壁面に等温条件を課し、表面反応による質量流束を定義した。気相反応機構には、GRI-mech3.0 (53 化学種, 325 素反応) を用いた。白金の触媒反応機構については、Deutschmann et al.¹⁸⁾ のモデルを用い、その他の壁面には、表1に示すラジカル表面反応の基礎モデル⁷⁾を適用した。このモデルでは、メタン火炎で重要な H , O , OH , CH_3 の吸着とこれらラジカルの会合による安定化学種 (H_2 , O_2 , H_2O , CH_4 , C_2H_6) の生成・脱離を考慮する。

ここで、本研究の燃焼条件において、式(3)から見積も

表1 ラジカル表面反応モデル⁷⁾.

Adsorption	Recombination & Desorption
1. $\text{H} + \text{B(s)} \rightarrow \text{H(s)}$	5. $2\text{H(s)} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{B(s)}$
2. $\text{O} + \text{B(s)} \rightarrow \text{O(s)}$	6. $2\text{O(s)} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{B(s)}$
3. $\text{OH} + \text{B(s)} \rightarrow \text{OH(s)}$	7. $2\text{OH(s)} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O(s)} + \text{B(s)}$
4. $\text{CH}_3 + \text{B(s)} \rightarrow \text{CH}_3\text{(s)}$	8. $\text{H(s)} + \text{OH(s)} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{B(s)}$
	9. $\text{CH}_3\text{(s)} + \text{H(s)} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{B(s)}$
(B(s) denotes bare site.)	10. $2\text{CH}_3\text{(s)} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{B(s)}$

られるラジカルの吸着反応速度は最大で 10^5 s^{-1} 程度である．一方，会合・脱離反応の反応速度定数の前指数因子 A_r は，遷移状態理論に基づけば，次式(5)で表される．

$$A_r = \frac{k_b T_w}{h} \quad (5)$$

ここで， k_b および h は，それぞれ，ボルツマン定数およびプランク定数である．式(5)より本燃焼場での A_r は， 10^{13} s^{-1} 程度と見積もられ，この値は吸着反応速度と比較し十分に大きく，化学的效果は吸着反応律速であると推測される．そこで，ここでは，実験と計算の OH 分布の比較から，吸着反応速度を支配する初期吸着係数 S_0 を各壁面に対し見積もることとした．また，再結合・脱離の反応速度定数は 10^{13} s^{-1} とした．

3.2 触媒反応を伴う燃焼場

はじめに，白金触媒反応を伴う燃焼場について説明する．なお，白金は表面反応機構が最も良く知られた材質であることから，本計算モデルの検証も目的の一つとしている．図3に， $T_w = 500, 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ における規格化した OH モル分率 χ_{OH} の PLIF・計算結果を示す．流路幅は 5 mm であり， $y=0, 5 \text{ mm}$ が壁面の位置に相当する．壁温の上昇に伴い熱的效果が抑制され，壁面近傍の χ_{OH} が上昇する様子が確認でき，この傾向は計算でもよく捉えられている．より詳細な比較のため，図4に，各壁温における χ_{OH} の壁垂直方向分布を示す．壁面の効果は， $y \leq 1.0 \text{ mm}$ の領域で強く現れ， χ_{OH} が壁に向かい急峻に減少する．計算結果は，全ての壁温条件において PLIF 結果とよく一致しており，これは本計算モデルにより，熱的效果を適切に再現できていることを示している．

壁近傍の χ_{OH} は，測定に用いた全ての壁面材質において白金で最も減少する．そこで，ラジカル吸着の影響を調べるため，白金の表面反応機構に含まれる $\text{H}, \text{O}, \text{OH}$ の吸着反応を仮想的に除いたモデルによる計算を行ったが，気相での火炎構造に変化は現れず，ラジカル吸着が χ_{OH} が減少する要因ではないことが明らかとなった．一方，図5に，白金壁面および不活性（表面反応がない）壁面近傍における CH_4, O_2 濃度の流れ方向分布の計算結果を

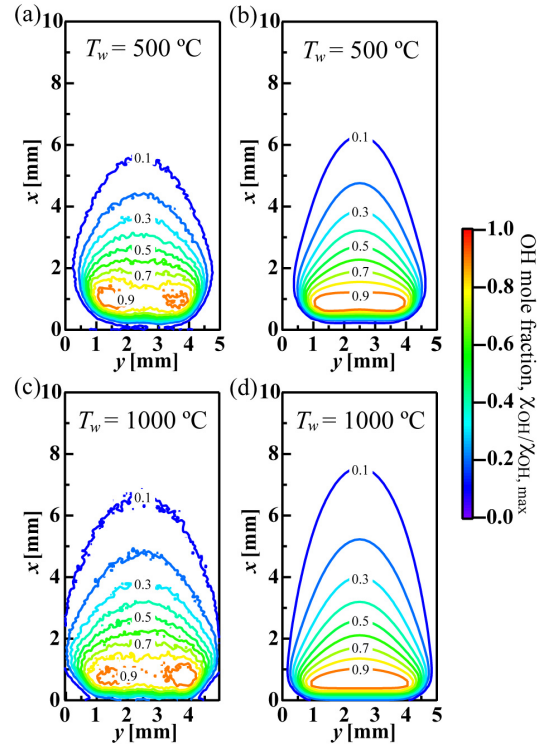


図3 異なる壁温 T_w における白金壁面に近接する火炎の OH 分布: (a) $T_w = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ (PLIF), (b) $T_w = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ (Sim.), (c) $T_w = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (PLIF), (d) $T_w = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (Sim.)

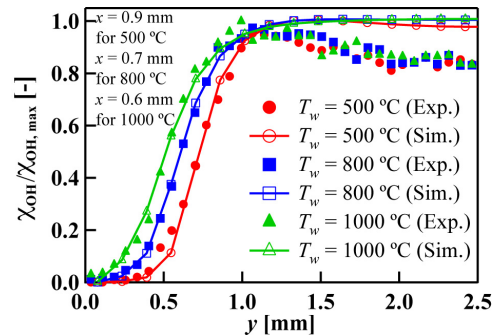


図4 異なる壁温での白金壁面近傍の OH 壁垂直方向分布

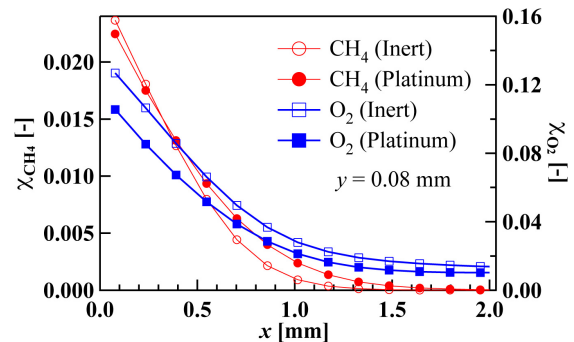


図5 白金および不活性壁面近傍での CH_4, O_2 濃度分布

示す．白金壁面近傍では，チャネル入口付近 ($x < 0.3 \text{ mm}$) において，触媒反応によりこれら反応物の濃度が減少することが分かる．すなわち，白金壁面で χ_{OH} が減少する理由は，触媒反応により反応物が減少し，気相反応が抑制

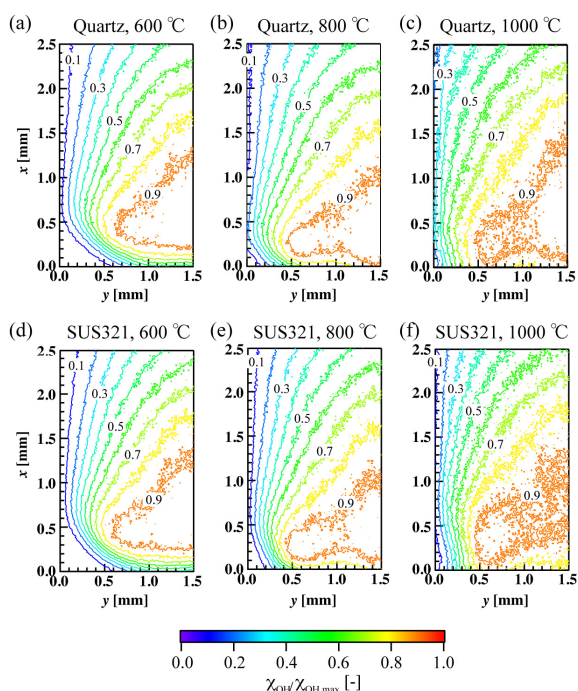


図 6 石英およびステンレス壁面近傍の OH 分布: (a-c) 石英, 600~1000 °C, (d-f) ステンレス, 600~1000 °C

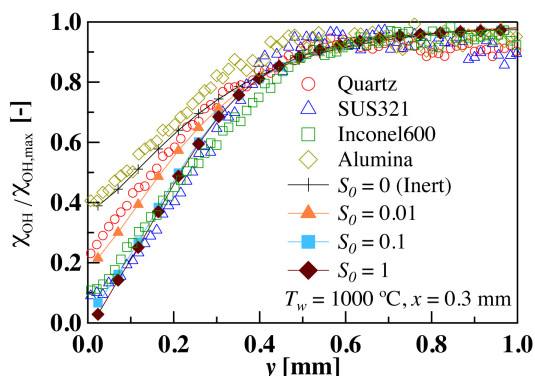


図 7 石英, ステンレス, インコネル, アルミナ壁面近傍における OH 壁垂直方向分布, および数値解析で取得した初期吸着係数 $S_0=0\sim1$ における OH 壁垂直方向分布

されるためと考えられる。なお、触媒反応の重量により燃料の酸化は促進されるため、燃焼反応自体は気相反応のみと比較し早期に完了することも確認している。

3.3 ラジカル表面反応を伴う燃焼場

一方、一例として図 6 に、PLIF により取得した、 $T_w=600, 800, 1000$ °C における、石英およびステンレス壁面近傍での χ_{OH} 分布を示す。チャンネル幅は 3 mm であり、 $y=0$ および 1.5 mm が、それぞれ、壁面およびチャンネル中心位置である。最も T_w が低い 600 °C では、各壁面近傍における χ_{OH} 分布の変化が小さく、熱的效果が支配的であると言える。これに対し、 $T_w \geq 800$ °C の条件では、熱的效果が抑制され化学的效果が顕在化し、石英壁面と比較し、ステンレス壁面近傍で χ_{OH} が低減する様子が分かる。

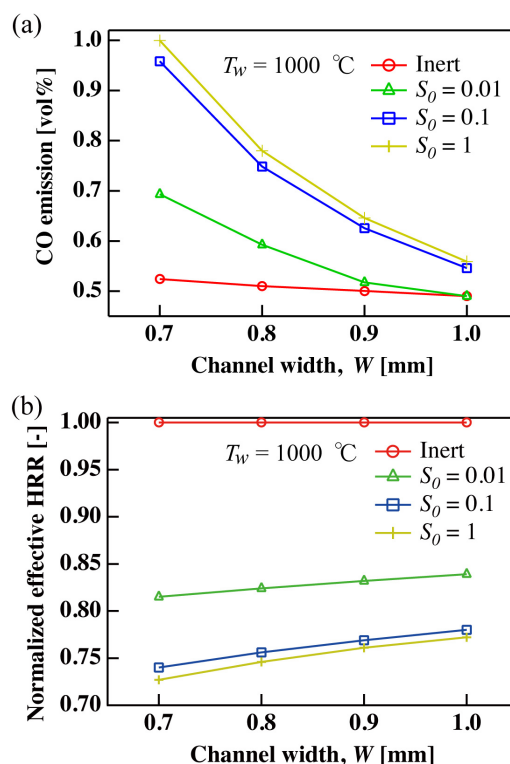


図 8 ラジカル表面反応が燃焼特性におよぼす影響: (a) CO 排出量の変化, (b) 総発熱量の変化

実験および計算で得られた χ_{OH} 分布に基づき、異なる壁面でのラジカルの初期吸着係数 S_0 を評価した。図 7 に、 $T_w=1000$ °C における、アルミナ、石英、ステンレスおよびインコネル壁面での χ_{OH} の壁垂直方向分布を示す。比較のため、 $S_0=0$ (不活性)、0.01, 0.1 および 1 における計算値を重ねてプロットしている。まず、アルミナの χ_{OH} 分布は $S_0=0$ の計算結果と良く一致し、本研究で用いたアルミナはほぼ不活性とみなせることが分かる。一方、石英の χ_{OH} 分布は $S_0=0.01$ の結果とほぼ一致し、このことは、従来は不活性と認識されてきた石英にも、微弱ながら化学的效果が存在することを示している。また、ステンレスおよびインコネルの χ_{OH} 分布は $S_0=0.1\sim1$ の結果とほぼ一致し、実機で多用されるこれら壁面は石英と比較しより強い化学的效果を有することが明らかとなった。

ここで、ラジカル表面反応がバルクの燃焼特性におよぼす影響を平行平板流路内の火炎を対象とした数値解析により検討した結果について示す。図 8a は、 $S_0=0\sim1$ における、異なるチャンネル幅 W に対する CO 排出量の変化を表している。チャンネル幅の減少に伴い CO 濃度に与える化学的效果の影響が強くなり、 $W=0.7$ mm では、 $S_0=0.01, 0.1$ および 1 において不活性壁に対し 35%, 85% および 90% 程度増加する。これは、CO の酸化に重要な OH ラジカルが表面反応により不足することに起因する。また、図 8b は、チャンネル全域での総発熱量の変化を示している。各総発熱量の値は、不活性条件のそれで規格化している。チャンネル幅の減少に伴い S_0 の値による影響は大

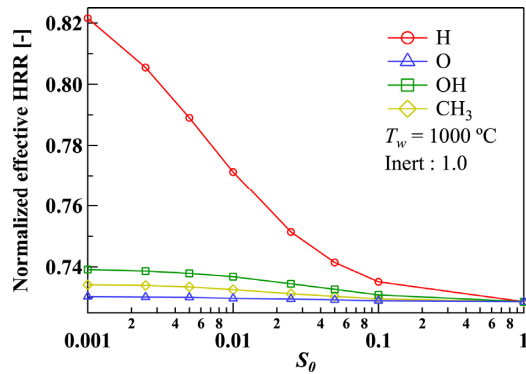


図9 各ラジカルの吸着反応に対する総発熱量の感度

きくなり、 $W=0.7\text{ mm}$ では、総発熱量が、 $S_0=0.01, 0.1$ および1において18%、26%および28%程度減少する。化学的效果により発熱量が減少する要因の一つは、前述したCOを主とした未燃成分の排出量増加にある。さらに、壁面に吸着したラジカルは、会合反応により安定化学種となり脱離するが、安定化学種が生成する際の反応熱は、壁を介して外部に失われることになり、これが、総発熱量が減少するもう一つの大きな要因である。

前述のモデリングでは、全てのラジカル(H, O, OH, CH₃)の S_0 を同一とみなしているが、実際には、各ラジカルの S_0 は異なる値を持つと予想される。図9は、1つのラジカルの S_0 を変化させ、他のラジカルの S_0 を1に固定した際の総発熱量の変化を示している。図より、Hラジカルの吸着が化学的效果に対して極めて高い感度を有していることが分かり、より詳細な表面反応モデルの構築には、Hの S_0 の評価が極めて重要と言える。なお、Hの影響が大きいのは、壁への拡散速度が大きいこと、また、Hの消失により連鎖分岐反応($\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$)が直接抑制され、他のラジカルも減少するためである。そこで、次章では、H吸着の直接的な定量化に向けて実施したプラズマ分子線散乱実験について紹介する。

4 プラズマ分子線散乱によるラジカル吸着の定量化

分子線散乱計測は、真空中を直進する分子流(分子線)を試料表面に照射し、散乱した分子の飛行時間分布を質量分析器により検知するものであり、衝突分子の吸着係数などを直接的に評価できる。本手法は主に化学的に安定な原子・分子に適用されてきたが、ここでは非平衡プラズマを利用することで、ラジカルの散乱測定を可能とした。図10に、プラズマ分子線散乱計測装置の模式図を示す。主室は、 10^{-9} Torr 台の超高真空状態に保たれている。ラジカル線は、主室に接続された差動排気室内に設置したRF電源およびPBN放電管から構成される非平衡プラズマ源を用いて生成される。化学的效果において最も重要なH吸着を定量化するため、高純度のH₂ガスを放電室に供給し、プラズマ分解することでHラジカル線

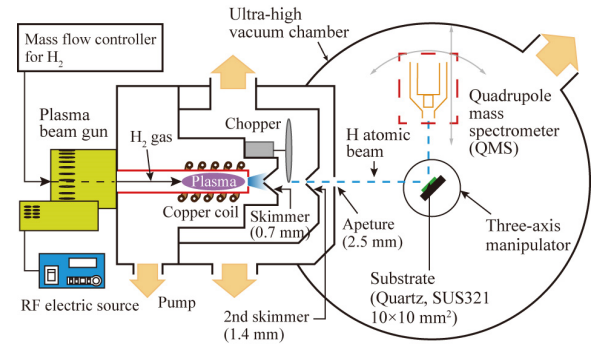
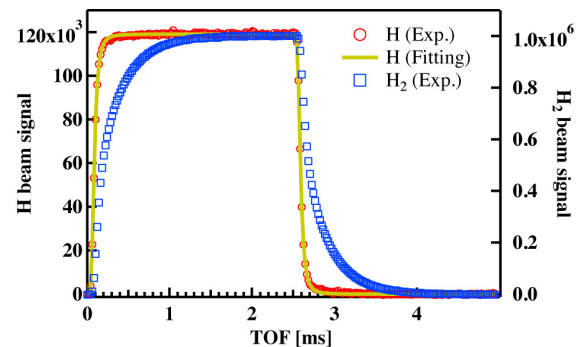
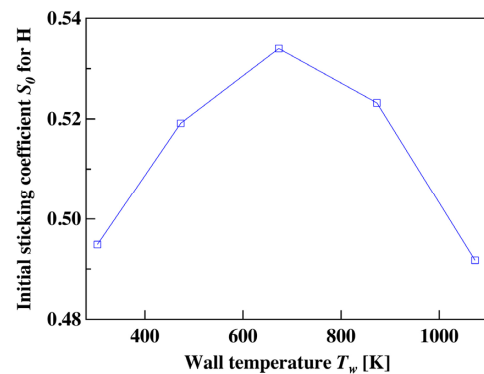


図10 プラズマ分子線散乱計測装置の模式図

図11 HおよびH₂入射線の飛行時間分布図12 ステンレスにおけるHラジカルの初期吸着係数 S_0

を形成した。Hラジカル線は、変調のための回転式チョッパーディスクを通過した後、主室中心部に置かれた試料表面に照射される。HおよびH₂の入射および散乱信号は、四重極質量分析器(QMS)により検出した。

はじめに、本装置で得られる入射線の特性について述べる。図11に、HおよびH₂入射線の飛行時間(TOF)分布を示す。適用したプラズマ源によりH₂が部分的に分解され、Hラジカル線を形成可能ことが確認できる。Shifted Maxwell-Boltzmann分布に基づく速度を持つ粒子群のTOF分布の理論式は、次のように表される。

$$I_f(t) = \text{const} \cdot \frac{L_{cd}^3}{t^5} \cdot \exp \left[-\frac{m}{2k_b T_{in}} \left(\frac{L_{cd}}{t} - u_{in} \right)^2 \right] \quad (6)$$

ここで、 L_{cd} , m , 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、並進温度および並進速度である。式(6)に基づき、H入射線の u_{in} および T_{in} を、測定したTOF

分布に対するフィッティングにより求めた。図 11 中に併せてプロット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、 u_m および T_m は、それぞれ、2348 m/s および 9 °C である。分子線散乱実験では、入射の平均並進エネルギー E_m が重要なパラメータの一つとなり、 E_m が過大あるいは過小であると、吸着挙動が実環境と大きく変わることが懸念される。得られた u_m および T_m から算出される E_m は約 100 meV であり、これは約 330 °C の気体分子の並進エネルギーに相当することから、本入射線は、壁面-火炎干渉における H 吸着過程を調べるのに過大でも過小でもないエネルギーを有すると考えられる。

図 12 に、取得した散乱信号から算出した $T_w = 30 \sim 800$ °C におけるステンレス壁面での H ラジカルの初期吸着係数 S_0 を示す。H ラジカルの S_0 は、温度依存性が小さく、 $T_w = 30, 200, 400, 600$ および 800 °C において、それぞれ、 $S_0 = 0.49, 0.52, 0.53$ および 0.49 である。これらは、先に述べたステンレス壁面の燃焼実験で得られた S_0 の値の範囲内 (0.1~1) であり、本計測を通じてより正確な値を得ることに成功したと言える。

5 おわりに

本記事では、これまで進めてきた表面反応が重畳する燃焼場に関する研究について解説した。現在は、紹介した内容に加え、プラズマジェットを用いた大気圧下でのラジカル吸着の評価¹⁹⁾、壁面よどみ火炎を用いたラジカル会合・脱離反応の計測²⁰⁾、などにも鋭意取り組んでいる。本研究による吸着・会合・脱離からなる一連のラジカル表面反応の解明とモデル化が、種々の燃焼装置の一層のクリーン高効率化に繋がることを期待したい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金 15H05508, 19H02075 および 22H01414 の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) Poinso, T. J., Haworth, D. C., Bruneaux, G.: Direct simulation and modeling of flame-wall interaction for premixed turbulent combustion, *Combust. Flame*, 95 (1993) 118–132.
- 2) Maruta, K.: Micro and mesoscale combustion, *Proc. Combust. Inst.*, 33 (2011) 125–150.
- 3) Ju, Y., Maruta, K.: Microscale combustion: technology development and fundamental research, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 37 (2011) 669–715.
- 4) Dreizler, A. and Bohm, B.: Advanced laser diagnostics for an improved understanding of premixed flame-wall interactions, *Proc. Combust. Inst.*, 35 (2015) 37–64.
- 5) Cattolica, R. J. and Schefer, R. W.: The effect of surface

- chemistry on the development of the OH in a combustion boundary layer, *19th Symp. (Int.) Combust.* (1982) 311–318.
- 6) Vlachos, D. G., Schmidt, L. D., Aris, R.: Ignition and extinction of flames near surfaces: combustion of CH₄ in air, *AIChE J.* 40 (1994) 1005–1017.
- 7) Raimondeau, S., Norton, D., Vlachos, D. G., Masel, R. I.: Modeling of high-temperature microburners, *Proc. Combust. Inst.*, 29 (2002) 901–907.
- 8) Miesse, C. M., Masel, R. I., Jensen, C. D., Shannon, M. A., Short, M.: Submillimeter-scale combustion, *AIChE J.*, 40 (2004) 3205–3214.
- 9) Saiki, Y., Suzuki, Y.: Effect of wall surface reaction on a methane-air premixed flame in narrow channels with different wall materials, *Proc. Combust. Inst.*, 34 (2013) 3395–3402.
- 10) Saiki, Y., Fan, Y., Suzuki, Y.: Radical quenching of metal wall surface in a methane-air premixed flame, *Combust. Flame*, 162 (2015) 4036–4045.
- 11) Wan, S., Fan, Y., Maruta, K., Suzuki, Y.: Wall chemical effect of metal surfaces on DME/air cool flame in a micro flow reactor, *Proc. Combust. Inst.*, 37 (2019) 5655–5662.
- 12) Saiki, Y., Kinefuchi, I., Fan, Y., Suzuki, Y.: Evaluation of H-atom adsorption on wall surfaces with a plasma molecular beam scattering technique, *Proc. Combust. Inst.*, 37 (2019) 5569–5576.
- 13) Fan, Y., Guo, J., Lee, M., Iki, N., Suzuki, Y.: Evaluation of wall chemical effect in hydrogen flame, *Proc. Combust. Inst.*, 38 (2021) 2361–2370.
- 14) Davy, H.: Some researches on flame, *Trans. R. Soc. Lond.*, 107 (1817) 45–85.
- 15) 齋木悠, 鈴木雄二: マイクロ燃焼場における壁面の熱的・化学的効果, 55 (2013) 138–146.
- 16) Fan Y., Suzuki Y., Kasagi N., Quenching mechanism study of scillating flame in micro channels using phase-locked OH-PLIF, *Proc. Combust. Inst.*, 33 (2011) 5569–5576.
- 17) Ahn, J., Eastwood, C., Sitzki, L. and Ronney, P. D.: Gas-phase and catalytic combustion in heat recirculating burners, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005) 2463–2472.
- 18) Deutschmann, O., Schmidt, R., Behrendt, F., Warnatz J.: Numerical modeling of catalytic ignition, *Proc. Combust. Inst.*, 26 (1996) 1747–1754.
- 19) Saiki, Y., Akao, T., Yoshinaga, A.: Investigation on wall chemical effect through radical generation with atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets, *Proc. 12th ASPACC*, (2019) 1128.
- 20) Saiki, Y., Iinuma, R., Sugimura Y., Yusa K., Evaluation of H-atom recombination rate on wall surfaces using a wall stagnation flame, *Proc. 13th ASPACC*, (2021) W1-09.