

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32714

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820062

研究課題名(和文) 壁面と火炎の相互干渉機構の数値解析による解明とその実験的検証

研究課題名(英文) Numerical simulation and experimental validation of interaction between wall and flame

研究代表者

林 直樹 (Hayashi, Naoki)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号：00377839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：数値解析と実験により火炎と壁面との干渉機構について明らかにした。特に、表面反応について着目し、平板間に形成される予混合火炎やよどみ流予混合火炎を用いた検討を行った。実験では、壁面材質や温度を変化させ、燃焼において重要な化学種であるOHラジカルの濃度場や温度場について検討を行った。結果として、まず、壁面近傍におけるOH濃度場や温度場が壁面の温度や材質による変化について明らかにし、数値解析と併用して、壁面近傍のOHラジカルが関与する素反応についても明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulation and experimental validation of interaction between wall and flame The flame-wall interaction is conducted. The influence of surface reaction in premixed stagnation flame by experiment (mainly PLIF for concentration of OH and thermocouples for temperature) and numerical simulation with surface reaction. For the investigation of influence on gas phase reaction, OH radical distribution is mainly discussed. The stagnation plate temperature and materials are changed. As a result, in the active wall conditions, OH concentration is decreased near stagnation plate due to the surface reaction, and decreases near stagnation plate. The elementary reaction related to OH radical is also discussed.

研究分野：燃焼工学

キーワード：壁面と火炎の干渉 数値解析 OH-PLIF

1. 研究開始当初の背景

近年燃焼器の開発，設計において数値シミュレーションが強力なツールとなりつつあり，燃焼反応に対する信頼性も向上している．一方，燃焼の数値シミュレーションにおいて，精度を向上させる必要がある事項として，“壁面近傍での燃焼現象”が挙げられる．一般的に燃焼器の多くは壁面に囲まれた形状をしている．この壁面近傍では，壁面と火炎の相互作用により，大気汚染物質の排出や燃焼効率の低下の要因となっていると考えられる．このため，“壁面近傍での燃焼現象”が明らかにされ，モデル化の手法が開発されることで，燃焼の数値シミュレーションの精度の飛躍的な向上，また，より高性能な燃焼器の開発に役立つものと期待できる．

壁面が火炎に影響を与える機構として，壁への熱損失による消炎(サーマルクエンチング)や，反応しやすい活性化学種が安定化学種へと変化する表面反応による消炎(ラジカルクエンチング)の二つが提唱されている．

の壁への熱損失は比較的研究が進んでいるが，表面反応の影響についての議論は文献[1]等において一部なされているものの，壁面の材質や性状，用いる燃料等への依存性が大きく未だその説明は不十分である．また，ラジカルクエンチングについては，燃焼場のスケールが小さくなるにつれてその影響が増大することが指摘されているため，スケールの影響についての検討も重要である．

申請者らはこれまでも，数値解析や実験により上記の壁面が火炎に与える影響について検討を行っている．この中で，実際に表面反応のモデルを数値シミュレーションに組みこみ，壁面上や壁面近傍の気相で起こっている反応について検討を行っている．このとき，熱発生速度の分布などに差異は見られたが，火炎全体の吹き飛びなどへ与える影響は上記の表面反応の有無よりものサーマルクエンチングが支配的であることを明らかにしている．また，実験においてはバーナ上部に壁面を設置した場において火炎先端と上部の壁面との干渉について検討などを行った．また，考慮した表面反応の反応モデルがまだ不完全なものであることから，実際の燃焼器に当てはめることが可能なモデルの構築も課題となっている．

2. 研究の目的

本研究では，ラジカルクエンチングを考慮した壁面と火炎の相互干渉に与えるスケールの効果および実際の燃焼器に適用場に対する解析を行うとともに，その結果を検証するためのレーザ計測を主とした実験を行う．

3. 研究の方法

表面反応を考慮した数値解析を主として行い，多種の壁面素材を用いた壁面と火炎の干渉の計測を比較のために行った．

実験と数値解析を直接比較できるように，平板間に設置されたノズルに形成される予混合火炎(図1)やよどみ流予混合火炎(図2)を用いた．

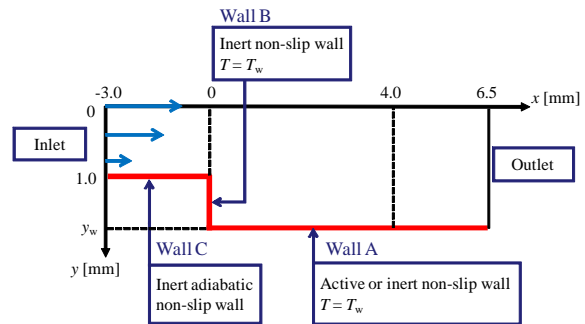


図1 平板間に形成される予混合火炎

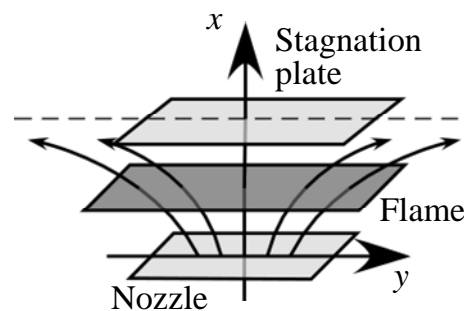


図2 よどみ流予混合火炎

まず，数値解析を用いて，雑誌論文で燃料をプロパンとした場合の壁面と火炎の干渉について検討を行った．

次に，学会発表，等で用いたよどみ流予混合火炎では，ノズルから当量比 0.9 のメタン - 空気予混合気を噴出させる．圧力は大気圧で，ノズル位置での温度は 300 K とした．また，よどみ板は 900 K の等温壁とする．噴出速度は火炎面がよどみ面から離れた位置に形成される 1.4 m/s とする．

気相の化学反応機構には GRI-Mech 3.0[2] から N に関する成分と素反応を除いたものを使用した．

平行平板やよどみ板は表面反応を考慮した等温の活性(Active)または考慮しない不活性(Inert)の等温の滑りなし壁面とする．活性壁上での表面反応には Raimondeau ら[3]の提案した反応機構を用いた．

また，計測では OH-PLIF 法による表面反応において重要な OH ラジカルの濃度分布や熱電対による温度計測をよどみ流予混合火炎に対して行った．よどみ板の材質として銅，ステンレス鋼，ニッケル基合金(INCONEL)を用いた．また，火炎と壁面間の温度分布について熱電対を用いて計測した．これらにより異なる材質の壁面近傍における蛍光強度分布や温度分布に着目し，壁面が近傍に及ぼす影響について検討を行った．

4. 研究成果

まず雑誌論文において、バーナ上に設置された平行平板間流路内に形成されるプロパン-空気予混合火炎において、壁面温度および壁面間距離を変化させて壁面の影響に関する表面反応を考慮した数値解析を行った。

- (1) 壁面間距離を小さくしていくと、火炎はバーナリム近傍に形成される斜め火炎、周期変動する非定常火炎、壁面近傍に形成される火炎、吹き飛びの順に変化する。また壁面温度が高温の場合、表面反応を考慮した条件では考慮しない条件に比べて吹き飛び際の壁面間距離は大きい。
- (2) 表面反応によるラジカルクエンチングは、燃料であるプロパンや酸化剤の質量消費速度には影響を与えない。しかし熱発生速度については壁面温度や壁面間距離に関わらず抑制される。そのため、ラジカルが壁面でクエンチングする際に生じた熱は直接壁面に与えられ放熱されるといえる。
- (3) OH や CH₃ の生成および消費速度ともに壁面間距離による変化はない。また OH については、活性壁条件では表面反応によって消費されるため、気相での消費は小さくなる。つまり OH は気相反応で消費される前に表面反応によってラジカルクエンチングされてしまう。一方、CH₃ はラジカルクエンチングにはほとんど寄与しない。また壁面温度が低温の場合には、壁面近傍でのラジカル濃度が小さいため、表面反応による効果は小さい。

次に学会発表、等においてよどみ流予混合火炎を用いて、実験および表面反応を考慮した数値解析を行い、壁面での吸着・脱離速度や壁面近傍での OH 濃度および OH の質量生成に関わる素反応を検討した結果、以下の知見を得た。

1. 数値解析の Active wall において OH 濃度は実験時と同様の傾向を示した。また、Inert wall と比較した際に表面反応による影響と考えられる OH 濃度の差が表れた。(図 3)
2. 表面反応による壁面での化学種の吸着・脱離速度は壁面温度が大きくなるにつれて増加し、壁面近傍での OH 濃度に影響を与えている。(図 4)
3. OH 濃度の変化によって、壁面近傍の気相側が影響を受けると考えられる。壁面近傍での OH の生成・消費に関する素反応において、表面反応の影響による変化に大きな違いがある。

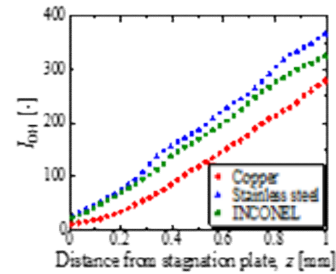


図 3 OH 蛍光強度分布

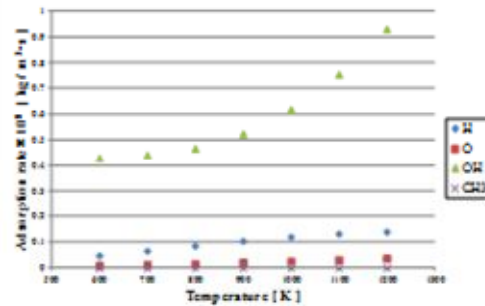


図 4 壁面温度と吸着速度の関係

<引用文献>

- [1] Aghalayam, P., and Vlachos, D. G., Role of thermal and radical quenching in emissions of wall-stabilized hydrogen flames, *AIChE Journal*, vol.44, 1998, pp. 2025-2034.
- [2] GRI-Mech. 3.0, <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>.
- [3] Raimondeau, S., Norton, D., Vlachos, D.G., and Masel R.I., *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 901-907.

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)

高鳥隼, 林直樹, 山下博史, プロパン-空気予混合火炎の燃焼特性に与える表面反応の影響に関する数値解析, *日本機械学会論文集*, 査読有, vol. 81(829), 2015, 15-00044

DOI: 10.1299/transjsme.15-00044

林直樹, 山下博史, Numerical study of influence of surface reaction and heat-loss on flame intensity of methane-air flames, *Journal of physics: Conference Series*, 査読有, Vol. 557, 2014, 012019

DOI:10.1088/1742-6596/557/1/012019

[学会発表](計 11 件)

辻祐矢, 林直樹, 山本和弘, 表面反応に関するよどみ流予混合火炎を用いた実験および数値解析, 第 54 回燃焼シンポジウ

ム, 2016年11月23日, 仙台国際センター(仙台市)

林直樹, メタン 空気予混合火炎における火炎と壁面の干渉に関する数値計算, 第54回燃焼シンポジウム, 2016年11月23日, 仙台国際センター(仙台市)

林直樹, Influence of Surface reaction on OH Distributions near Wall in Methane-air Stagnation Flow Premixed Flames, 36th International Symposium on Combustion, Work in Progress Poster, 2016年8月1日, ソウル(韓国)

林直樹, 高鳥隼, 山下博史, Numerical simulation of flame wall interaction of propane-air premixed flames, 10th ASPACC, 2015年7月19日, 北京(中国)

林直樹, 山下博史, Numerical study of influence of surface reaction and heat-loss on flame intensity of methane-air flames, The 14th International conference on Micro and Nanotechnology for power generation and energy conversion applications, 2014年11月18日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 直樹 (HAYASHI, Naoki)

神奈川工科大学・工学部機械工学科・准教授

研究者番号: 00377839