

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760163

研究課題名(和文) 様々な材質の壁面と火炎の相互干渉に関する数値シミュレーションおよびレーザー計測

研究課題名(英文) Numerical simulation and laser measurement for interaction between flame and walls of various materials

研究代表者

林 直樹 (Hayashi, Naoki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00377839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：壁面と火炎の干渉について数値シミュレーションおよび実験により、検討を行った。まず、数値シミュレーションでは、火炎を抑制する表面反応機構を組み込んだ数値解析を行った。その結果表面反応や壁面の温度が火炎に与える影響について明らかにした。また、実験では超小型燃焼器の多孔体流入壁のように、火炎とその未燃側に位置する壁面との干渉について、表面に種々の材質を蒸着させることにより表面材質の影響について検討をおこなった。

研究成果の概要(英文)：We investigated about flame-wall interaction by numerical simulations and experiments. The wall effects are caused by heat loss and surface reaction. The surface reaction on many common materials may weaken or quench the flames, although those for a catalytic wall can strengthen the flames. As a numerical result, the quenching distance for the active wall conditions is larger than that for inert wall conditions, and the main reason of "the quenching" is heat loss to the wall, but the surface reaction affect the flame behavior in the immediate vicinity (less than quenching distance) of the wall. Experimental results also show that the difference among wall surface materials can affect distributions of chemical species, but flame properties, such as the flame position and the velocity when flame extinction, do not change when the wall is located in front of or behind the flame.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：表面反応 予混合燃焼 壁面と火炎の干渉

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、①壁への熱損失による消炎(サーマルクエンチング)や、②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。①の壁への熱損失は比較的研究が進んでいるが、②表面反応の影響についての議論は文献1や2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。例として図1に表面反応を考慮した場合および考慮しない場合の発熱速度の計算結果を示す。その結果、この燃焼場の大きさでは熱発生速度の分布などに差異は見られるが、火炎全体の吹き飛びなどへ与える影響は上記②の表面反応の有無よりも①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ー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、①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②実際の燃焼器に適用可能な表面反応機構の検討の2点を主な目的とする。特に本申請では数値シミュレーションを主とし、通常の数値計算のような通常スケールではあまり大きな影響を受けなかった場と比較してより小さな燃焼場を

検討対象とし、上記検討を行った。また、数値解析における表面反応のモデルの精度はまだ不十分であると考えられるため、申請者らがこれまでに培ってきたレーザ計測を主とした数値解析と直接比較可能な実験を併せて行い、実際の燃焼器に適用可能な表面反応機構の開発を目指した。

3. 研究の方法

(1)数値シミュレーション

数値計算に主に用いた解析モデルを図1に示す。図左側のようなバーナー上に設置された平行平板の幅を狭めることで消炎距離を求める手法を用いて、表面反応を考慮した数値解析を行い、メタン、空気、プロパン-空気予混合気の消炎距離に与える表面反応の影響について検討を行った。

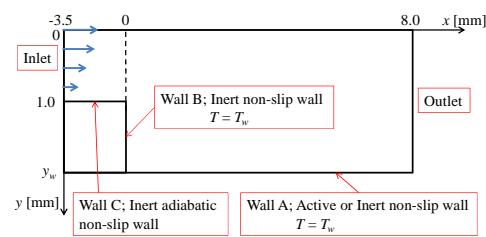


図1 解析モデル

(2)実験的検討

超小型燃焼器の多孔体流入壁を想定し、メタン-空気予混合火炎とその未燃側に位置する壁面との相互作用について実験的に検討することを試みた。バーナー出口に多孔体としてハニカムを設置した平面火炎バーナーを用いて、混合気の平均噴出速度とハニカムの表面材質を変化させた。

表面材質としてはステンレス鋼、アルミニウム、酸化ケイ素の3種類を用いた。

4. 研究成果

(1)メタン火炎の消炎距離に与える壁面材質および壁面温度の影響

図1に一例として、表面反応を考慮しない不活性壁の場合における熱発生速度分布を壁面温度 $T_w = 500$ K、平均流入流速 $u_m = 0.5$ m/s、壁面位置 $y_w = 1.6$ mm および $T_w = 1200$ K、 $u_m = 0.8$ m/s、 $y_w = 1.6$ mm の条件について図2に示す。両条件とも平板間の中央付近では通常の前混合火炎が形成されていることがわかった。また、壁面近傍では、やや高温の壁面である $T_w = 1200$ K の場合にはやや小さい発熱が見られるが、低温の壁面である $T_w = 500$ K の場合においても平板間中央に比べて非常に弱い気相において発熱反応が存在していることがわかった。ここで、 $T_w = 500$ K の壁面近傍で起こっている反応は低温酸化反応であり、通常の前混合火炎とは異なる。一方、 1200 K の場合には平板間中央とほぼ同じ反応経路となった。

次に、表面反応を考慮した活性壁の場合

について、図2と同じ T_w , u_m , y_w の条件について図3に示す。図に示すように、活性壁の条件では、壁面近傍における発熱は抑制されていることがわかった。

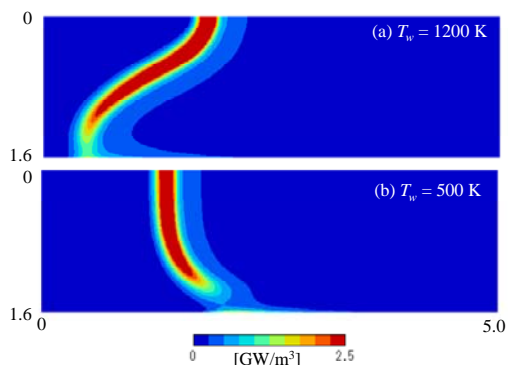


図2 熱発生速度分布 (不活性壁)

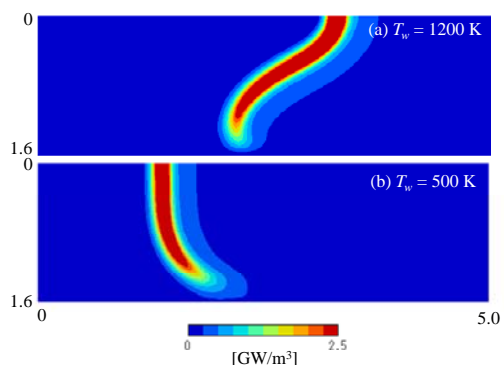


図3 熱発生速度分布 (活性壁)

さらに平板間距離を狭くすると火炎は消滅した。この時の消滅時の平板間距離 y_w と表面反応、壁面温度との関係を示す。壁面の温度が低い場合、平板間距離で定義される消滅距離は、不活性壁面と活性壁面で差はなかった。また、壁面の温度が高い場合、消滅距離に差が生じた。しかしその差はあまり小さくなく、壁面への熱損失が主要因であると考えられる。表面反応によるラジカルクエンチングは壁面近傍での反応を抑制することにより消滅近傍の状態に影響を与えられられる。

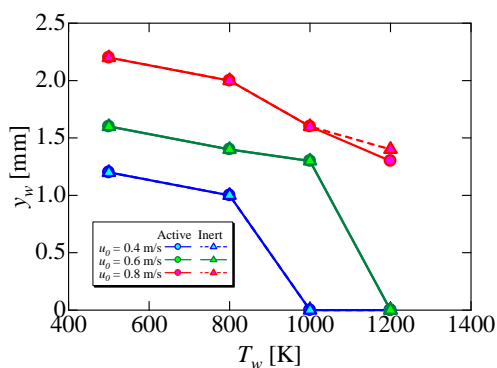


図4 消滅距離

(2) 実験的検討

超小型燃焼器の多孔体流入壁を想定し、メタン-空気予混合火炎とその未燃側に位置する壁面との相互作用についての実験的検討を試みた。ノズル出口にハニカムを設置した平面火炎バーナ上に形成されるメタン-空気予混合火炎に対して、燃焼形態の観察や OH 蛍光強度の計測を行った。混合気の噴出速度やハニカムの表面材質を変え、ハニカムによる火炎の安定化や、表面材質の違いが火炎に与える影響について考察した結果、以下の知見を得た。

図5に表面材質がステンレス鋼の場合の火炎写真を示す。噴出速度の増大に伴い、平面火炎、一部浮き上がり火炎、浮き上がり火炎へと燃焼形態は遷移する。燃焼速度を下回っても逆火や消滅は起こらないことに加え、吹き飛び限界も大きく、噴出速度の広い範囲に渡ってハニカム下流側で火炎は保持される。これよりハニカムによる火炎の安定化が確かめられた。また、表面材質によらず噴出速度 0.03 m/s の条件では、火炎の外縁部が振動した。

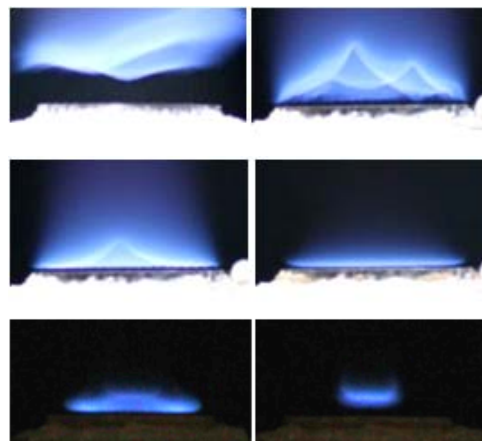


図5 Pictures of flame for stainless steel

噴出速度を小さくしていくと火炎はハニカムに近づく。噴出速度が一定値以下になると火炎は一定距離で保持され、更に噴出速度が小さい条件では火炎はハニカムから離れる。一方、OH 蛍光強度は噴出速度の減少に伴い単調減少する。噴出速度を減少させると火炎はハニカムに近づき、壁面の影響を強く受けるようになる。また、混合気流量の減少に伴い火炎の反応速度が低下することで、相対的に熱損失の影響が大きくなるためであると考えられる。

ハニカム内壁温度 T_b は、 $v = 0.10$ m/s 前後で極大値をとる。これに対して、 $v < 0.10$ m/s の条件では火炎の熱発生速度の低下により T_b は低下し、 $v > 0.10$ m/s の場合は火炎が壁面から離れることにより低下すると考えられる。また、表面材質によって差が見られ、アルミニウム、酸化ケイ素、ステンレス鋼の順に大きくなる。

各材質に対する OH 蛍光強度の最大値

$I_{OH,max}$ と噴出速度 v の関係を図 6 に示す。
OH 蛍光強度最大値は、噴出速度が大きい条件ではハニカム内壁温度 T_h と同様、アルミニウム、酸化ケイ素、ステンレス鋼の順に大きい。表面材質が火炎に化学反応的影響を及ぼしている可能性が示唆された。一方、噴出速度が小さい条件では、酸化ケイ素、ステンレス鋼、アルミニウムの順に大きい。 $v = 0.08 \sim 0.10$ m/s を境に化学反応的影響が異なるためと考えられる。

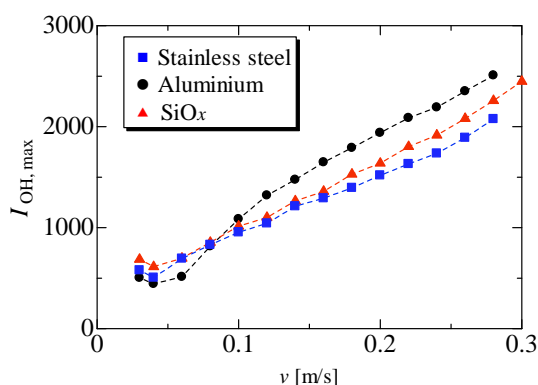


図 6 OH 蛍光強度最大値と流速の関係

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 0 件)

* 現在執筆中である。

[学会発表] (計 10 件)

- ① 林直樹, Influence of wall temperatures and surface reactions on the flame-wall interaction of a hydrogen-air mixture by numerical simulation, 34th symposium on combustion, 2012 年 7 月 21 日, ポーランド
- ② 林直樹, Numerical Investigation of Influence of Surface Reaction and Heat-loss on Quenching Distance in Methane-air Mixture, The 9th ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON COMBUSTION, 2013 年 5 月 13 日, 韓国
- ③ 林直樹. メタン予混合気の消炎距離に与える表面反応の影響に関する数値解析, 2012 年 12 月 6 日, 名古屋
- ④ 林直樹, 狭い平行壁面間に形成されるメタン火炎の消炎距離に与える壁面材質および壁面温度の影響に関する数値解析, 第 50 回伝熱シンポジウム 2013 年 5 月 29 日, 仙台

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 直樹 (HAYASHI, Naoki)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：00377839