

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06208

研究課題名(和文) オフセット対向流を用いた希薄火炎の渦運動による局所消炎とその回復機構の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental investigations for the vortex motion on the local quenching and recovery mechanisms by nozzle offsetting opposite flow

研究代表者

矢作 裕司 (Yahagi, Yuji)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：60265973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：希薄乱流予混合燃焼では、火炎の一部が消炎する局所消炎が同時多発的に発生し、未燃焼ガスの放出や全体的消炎に発達する負の面がある。しかしながら、条件によっては、高い確率で局所消炎から回復し、燃焼の継続が可能である。そのために、燃焼可能範囲が拡大する意外性と利点がある。その鍵は、乱流中の渦により熱と反応物が輸送され、局所消炎から回復させためであるとの仮説を立てた。本研究は、非定常な希薄乱流燃焼で生じる局所消炎からの渦輸送による局所消炎からの回復を実験的に再現するためのモデルとして「オフセット対向流火炎」を用いて、燃焼ガス中の渦が熱と反応物を輸送することにより局所消炎から回復させる機構を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：オフセット対向流は申請者が考案した基礎燃焼の実験モデルであり、その基本的特性と有用性が明らかになることにより、他の研究が利用することが期待できる。従来の乱流火炎の研究では、未燃焼ガス中の特性をベースに議論が行われ、火炎背後の燃焼ガス中の渦から火炎特性を解明する試みは実施されていない。本研究は、局所燃焼速度や火炎端部の振動現象など微細構造と特性を解明して、熱と反応物の渦輸送による局所消炎とその回復機構の解明に貢献した基盤研究である。社会的意義：局所消炎とその回復機構の解明は、実機で多く採用されている希薄乱流燃焼の限界値を高めるために必要な基本条件を提供することに役立つ。

研究成果の概要(英文)：In turbulent lean premixed combustions, the flame front is locally quenched due to the turbulence motion. The local quenching phenomena will lead to combustion instabilities. In the worst case, the local quenching will be developed to whole flame extinction event. However, the local quenching is not always to developed whole flame extinction. In most cases, the flame can recover from the local phenomena. In some condition, the whole flame extinction limits for turbulent premixed flames can be extend than laminar flame extinction limits. In the present study, we propose a simplified experimental model named the offsetting counter flow flames to elucidate the complicated local quenching phenomena in the turbulent combustion and investigate how the vortex behind the flame zone works the flame for the local quenching phenomena with a two-dimensional laser optical diagnostic.

研究分野：熱工学

キーワード：燃焼 予混合燃焼 火炎伸張

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱機関は部分負荷条件で運転されることがほとんどである。そのため、ディーゼル機関やガソリン機関などは、筒内に燃料を直接噴射することで全体的に燃料が超希薄となる非均質乱流予混合燃焼を採用している。乱流強度を増加させて限られた小空間で短時間に燃焼を完結させることと、燃料希薄化でエクセルギー損失の減少を目指すことは、安定な燃焼と相反する要求である。最大の問題点は強い乱れにより火炎の一部[火炎片]が局所的に消炎して、安定な燃焼を阻害し、有害未燃排出物を放出することである。直感的に考えると、乱流強度の増加で局所消炎の頻度が増加し、火炎安定性も低下する。しかしながら、局所消炎が生じて直ちに全体の消炎に発展する訳ではなく多くの場合はそこから回復することが明らかとなっている。筆者らの実験結果では、乱流強度を増加させると、より希薄な燃料濃度まで消炎限界を引き延ばすことが可能となり、乱流燃焼を利用したさらなる燃料希薄化が期待できる。ただし、その局所消炎回復機構の全容は解明されていない。この課題に対する取り組みは、主に2つの方法で実施されている。①「実機と同様な乱流燃焼場を DNS[直接数値計算]や時系列光学計測などで3次元微細構造を直接解明する方法」：直接解明可能な利点がある反面、時間的空間的に非定常な現象を直接取り扱う複雑性のため膨大な計算時間が必要なことや光学計測精度が完全に確立されていないなど不利な点もある。②「乱流火炎を火炎片として時間的空間的に微分し、その火炎構造をモデル化して実験的に解明する方法」：実験モデルが適切で的を絞れば、3次元かつ同時多発的に生じる複雑な局所消炎現象を定量化できる。本研究は、②の立場から2次元かつ再現性のある時空間微分型実験モデルを用いて局所消炎とその回復機構を明らかにする。

2. 研究の目的

燃料希薄化の追求が著しい乱流予混合燃焼では、乱れの影響により火炎の一部が消炎する局所消炎が同時多発的に発生し、未燃焼ガスの放出や全体的消炎に発達する負の一面がある。しかし、乱れの条件によっては高い確率で局所消炎から回復し、燃焼可能範囲が拡大する意外性と利点がこれまでの筆者らの研究で明らかとなっている。その鍵は、乱流中の渦による熱と反応物の輸送機構であると申請者は予見している。本研究は、非定常な希薄乱流燃焼で生じる局所消炎回復機構の研究課題で残された「渦輸送回復機構」を再現できる新実験モデル「オフセット対向流火炎」を用いて、燃焼ガス中の渦が熱と反応物を輸送することにより局所消炎から回復させる機構を定量的に解明する。本研究の学術的最終目標は、乱流の渦輸送機構の利点を解明して希薄乱流燃焼の限界を伸ばすための基盤モデルを完成させることである。

3. 研究の方法

図1にオフセット対向流バーナの概略を示す。オフセット対向流バーナは、ノズル出口直径10 mm、出口間隔20 mmであり、周囲雰囲気とのせん断による乱れを防ぐための環状流を流す二重構造のノズルである。上下ノズルの断面平均流速(U_0)および環状流は、1.0 m/sに設定する。混合気には、希薄 C_3H_8 /air を用いた。座標系は下方バーナ出口の中心を原点とし、鉛直上方向に y 軸、水平方向を r 軸とする。上方ノズルを固定して、下方ノズルを中心軸からずらした値をオフセット率 r_{off} [-]とする。

流れ構造は Ar イオンレーザを光源とする時系列トモグラフィにより可視化する。撮影は高速ビデオカメラ(解像度:1024×1024pix)を用いる。トレーサ粒子は、上方側には液滴径約 $1\mu m$ のシリコンオイル液滴(公称沸点 $300^\circ C$)を用い、下方側には公称粒径 $1\mu m$ のアルミナ粒子を用いる。

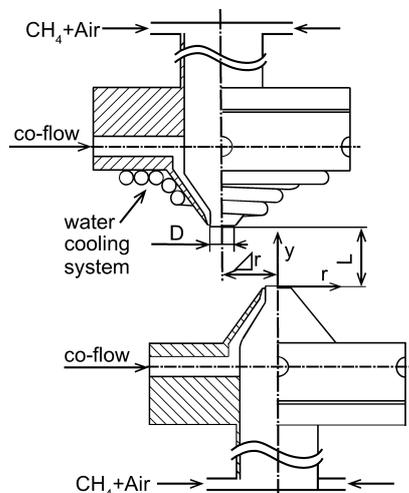


図1 オフセット対向流バーナ

4. 研究成果

4・1 消炎特性

図2は、各オフセット率 r_{off} に対する C_3H_8 /air および CH_4 /air 火炎の希薄消炎限界を示す。

オフセット率に従って、火炎構造は背後に渦が形成されるか否かが決まる。基本火炎構造ぞうは、スラント火炎と双曲線状火炎の2つに大きく分類される。さらに、双曲線状火炎には、火炎端が振動する条件と振動しない条件の2つに分類される。まとめると、 $r_{off} < 0.40$ のスラント火炎(領域Ⅰ)、 $0.40 < r_{off} < 0.85$ の火炎端に振動を伴う双曲線状火炎(領域Ⅱ)、 $0.95 < r_{off}$ の振動なしの双曲線状火炎(領域Ⅲ)の3つに分類される。なお、領域ⅡとⅢの間である $0.85 < r_{off} < 0.95$ は、それらの遷移領域に対応する。3つの領域の分類と境界 r_{off} 値は C_3H_8/air と CH_4/air 火炎ではほぼ同じ値を示すが、消炎当量比の値の変化は異なる。

基準値であるオフセットなし($r_{off} = 0.00$)の消炎当量比 ϕ_{ext} は、 CH_4/air 火炎が 0.58 であり、 C_3H_8/air 火炎は 0.65 となる。その値を基準として領域Ⅰでは、 CH_4/air 火炎、 C_3H_8/air 火炎のいずれも r_{off} の増加に従い緩やかに増加する。前報で述べたように、 r_{off} の増加に従い消炎当量比が増加する理由は、オフセットによる火炎伸張率の増加が原因である。領域Ⅰで CH_4/air 火炎の消炎当量比が C_3H_8/air 火炎に対して小さい理由は、ルイス数効果により CH_4/air の火炎強度は希薄条件で増加するのに対して、 C_3H_8/air 火炎では減少するためである。

消炎限界の結果で最も興味深い点は、領域ⅠからⅡの間で生じる。領域Ⅱでは、火炎背後に渦が形成される双曲線状火炎と火炎構造が大きく変わる。それと同時に CH_4/air 火炎の消炎当量比はステップ状に増加する。それに対して C_3H_8/air 火炎の消炎当量比は逆に減少する。結果的には、両者の消炎当量比はほぼ同じ値になる。このことは、火炎背後の渦が、 CH_4/air 火炎の燃焼強度を減少させて消炎しやすい方向に働いたのに対して、 C_3H_8/air 火炎では渦が燃焼強度を高める方向に働いたことを示している。領域Ⅱでは、 CH_4/air と C_3H_8/air のいずれの場合でも火炎振動する現象が観察されたが、 CH_4/air は消炎限界直前でその振動は停止する。しかしながら、 C_3H_8/air では振動を伴いながら消炎に至る。

領域Ⅲの火炎端に振動を伴わない場合は、 CH_4/air 火炎の消炎当量比はさらに増加して、結果的に C_3H_8/air 火炎の消炎当量比より大きい値となる。基本的な流れ構造は、両者でほぼ同じであるのに、渦ありの領域Ⅱおよび領域Ⅲで消炎限界に領域Ⅰと逆の傾向が現れることは、火炎背後の渦と CH_4/air と C_3H_8/air のルイス数効果の違いが重要な役割を果たしていると考えられる。

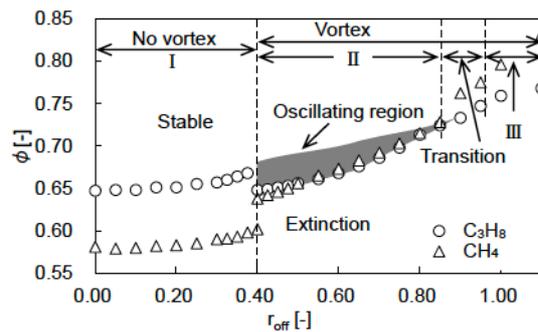


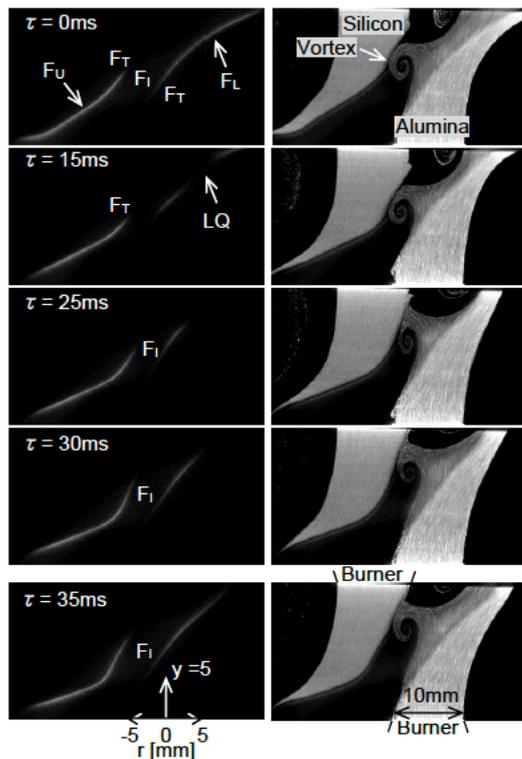
図2 消炎限界

4・2 振動火炎の構造

図3は、領域Ⅱの $r_{off} = 0.80$ の消炎限界近傍で観察される C_3H_8/air 火炎の直接写真とトモグラフィ画像を時系列的に示す。振動の1周期は約42msである。 $r_{off} = 0.80$ ではオフセット量が大きいために画面上では下方バーナの火炎(F_L)が画面上部に形成され、上方バーナの火炎(F_U)が画面下部に形成される。アルミナを添加している F_L 側は、粒子の数密度変化が火炎帯を境に明確に確認できる。すなわち、バーナ出口からの明るい箇所が未燃焼ガス領域であり、渦を含む輝度が暗い箇所が燃焼ガス領域である。 F_U 側では、シリコンオイル液滴を使用しているために、火炎帯通過後の Mie 散乱光は消滅する。 $\tau = 0ms$ では、ほぼ同じ大きさの双曲線状の火炎が形成されている。双方の火炎端が最も接近した場所に、双方の火炎背後の熱の授受を行う相互干渉領域(F_I)が存在する。渦の背後に火炎が存在しないことが、直接画像とトモグラフィ画像を照らし合わせることで確認できる。 $\tau = 15ms$ では、 F_L の一部に LQ が観察される。LQ は CH_4/air では $F_U \cdot F_L$ 同時に発生したが、 C_3H_8/air ではいずれか片方のみで発生する。LQ で分断された上部の火炎片は吹き飛び、 $\tau = 25ms$ では消滅するが、 F_I 領域は増加していることが見て取れる。 $\tau = 30ms$ では、 $\tau = 15ms$ でほぼ消滅しかかった F_I が成長し、 $\tau = 35ms$ では F_L は LQ からほぼ回復している。従って、火炎の振動現象は LQ が原因である。LQ からの回復ができない場合には、次節で述べる全体消炎に LQ が発展する。

4・3 全体消炎に至る時系列挙動

図4は全体消炎に至るまでの火炎挙動を-30ms まで遡り時系列で示す。全体消炎までの過程は、LQ 後の渦挙動に強く支配されている。-30ms から渦は、徐々に楕円率が増加する。その原因は、LQ から回復できない火炎は、反応面が減少するために、 $F_U \cdot F_L$ 間の形成される高温の燃焼ガス領域が減少する。その結果、未燃焼ガスの運動量に負けるように渦が押し潰されると考える。火炎端(F_T)と渦の関係に着目すると F_T は巻き込まれる渦に常に接していることが見て取れる。渦成分は対向側の火炎の燃焼ガスであるため、 F_T の断熱性は他の位置と比較して高いと考えられる。従



(a) Direct images. (b) Tomographic images.

図3 振動現象

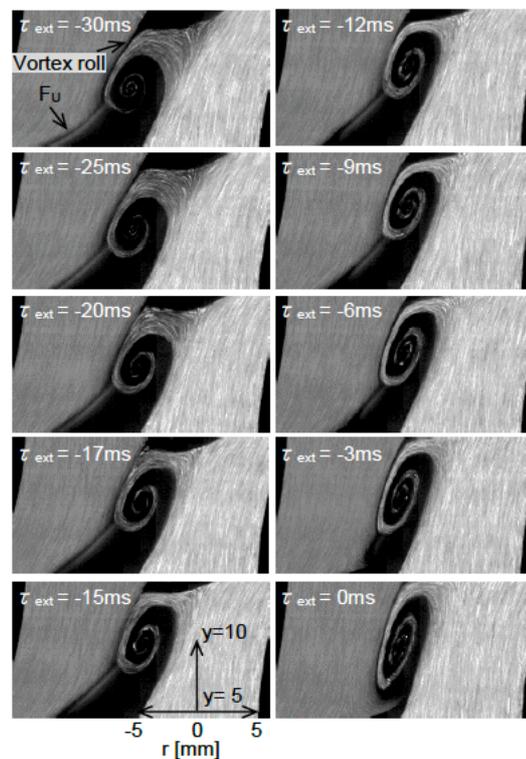


図4 全体消炎に至る火炎挙動

って、 F_T の渦との相互作用は全体消炎への発展に極めて重要な働きをする。特に、LQ後は、 F_I 領域がほとんどなくなるために F_T と渦の関係が保炎に重要な役割を果たす。しかしながら、 F_U 側の燃焼ガス領域に着目するとその領域は F_L の縮小に伴い縮小していることが見て取れる。-15ms後には、火炎帯による高温・低温境界が明確に確認できないことから、-20ms ~ -15ms間で F_L は消炎したと見るのが妥当である。その後は、 F_T を低温の未燃焼ガスが削り取るように反応を停止させ、最終的に全体消炎を引き起こす。

4・4 まとめ

- オフセット率に従って、火炎構造は背後に渦が形成されるか否かが決まる。基本火炎構造ぞうは、スラント火炎と双曲線状火炎の2つに大きく分類される。さらに、双曲線状火炎には、火炎端が振動する条件と振動しない条件の2つに分類される。
- 混合気を持つレイ数により火炎背後に形成される渦が消炎特性に影響を及ぼす。火炎背後に渦が形成されない条件では、 C_3H_8 /air の消炎濃度は CH_4 /air に対して濃い、火炎背後に渦が形成されることにより、 C_3H_8 /air は CH_4 /air より消炎限界が向上する。
- 消炎限界近傍では、局所消炎による流れの不安定化が引き金となり火炎が振動する現象が観察される。
- 全体消炎は基本的にいずれか一方の火炎が局所消炎して、その局所消炎がその火炎の消滅に発展することにより、対向側の火炎端への熱供給が停止して生じる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 川合友輝, 矢作裕司	4. 巻 -
2. 論文標題 オフセット希薄プロパン/空気予混合火炎の消炎特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第57回燃焼シンポジウム講演論文集	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 無
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 1.Yuji Yahagi1, Hirotoshi Shibagaki1 and Ikuyo Makino	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of vortexes behind flame zone on the lean premixed flames extinction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference	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 川上 大地, 矢作 裕司	4. 巻 -
2. 論文標題 脈動燃料噴流により局所消炎した希薄予混合火炎の回復機構	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第55回燃焼シンポジウム講演論文集	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 無
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 川上 大地, 矢作 裕司
2. 発表標題 脈動燃料噴流により局所消炎した希薄予混合火炎の回復機構
3. 学会等名 日本燃焼学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuji Yahagi1, Hirotoishi Shibagaki1 and Ikuyo Makino
2. 発表標題 Effects of vortexes behind flame zone on the lean premixed flames extinction
3. 学会等名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川合友輝, 矢作裕司
2. 発表標題 オフセット希薄プロパン/空気予混合火炎の消炎特性
3. 学会等名 日本燃焼学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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