

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560242

研究課題名(和文)対向乱流場を用いた予混合拡散複合燃焼の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 study of local quenching and recovery mechanisms for premixed diffusion combined combustion in an opposite turbulent 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) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：非均質燃焼場では、超希薄燃焼が可能である。しかしながら、乱流場では局所的に火炎が消炎し、燃焼効率や排出物特性を悪化させる。本研究では、対向流場を用いて、全体消炎クライテリアおよび局所消炎とその回復機構モードに検討を加えた。その結果、次の点が明らかになった。希薄予混合火炎と拡散火炎の間の熱的な補完関係により希薄複合火炎の消炎限界は拡散火炎支配領域と予混合火炎支配領域2つの領域に分類できる。局所消炎現象には、パッシブモード、アクティブモード、全体消炎モードの3つが観察された。その時の局所消炎の位置と火炎伝播速度は消炎とその回復機構に重要な役割を果たす。

研究成果の概要(英文)：In a heterogeneous combustion, an ultra-lean combustion is possible. However, the flame local quenching occurs at the turbulent condition. The local quenching will lead to decline the burning rate and to emit the unburnt hydrocarbon. In the present study, effects of turbulence and flame propagation on the local quenching and its recovery events have been studied experimentally by using opposed flows. As the results, the extinction criteria can be divided into two regimes depending on the thermal interpolation mechanisms. One is diffusion flame controlling condition and the other is premixed flame controlling condition. Three different local quenching events are observed: passive mode, active mode, and global extinction mode. Then, the quenching position, the turbulence and the propagation speed for the premixed flame side play important roles for the quenching and its recovering.

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：燃焼 消炎 対向流

### 1. 研究開始当初の背景

実用燃焼器内の燃焼現象は、均質燃焼よりパルク的に超希薄燃焼が可能な非均質燃焼場を多く採用していることが知られている。ここでは、強い乱れと急な温度勾配により、局所的に火炎が消炎し、燃焼効率や排出物特性を悪化させる要因となることが知られている。局所消炎現象の解明は乱流燃焼の重要な課題であり、大きく分けて2つの面から実施されている。1つは、実機あるいはそれと同様な高压容器内を用いた全体的な現象の解明である。このアプローチは、直接実機に適応できる利点がある反面、空間的・時間的に非定常な現象をそのまま取り扱う複雑性のため微細な火炎構造の解明には不利である。もう一つは現象を微視的に再現するモデルを提案して微細構造を明らかにするアプローチであり、主にDNS(直接数値計算)などの手法で実施されている。しかしながら、この場における微細構造モデルを提案した実験的な取り組みは非常に少ない。その理由は、空間的に非均質であり、時間的にも非定常で実際の場を実験モデルとして再現する困難さと現象を測定する難しさである。学術的な基盤研究として実験的に詳細な検討を加えるためには、非定常非均質燃焼場の時空間微分構造モデルとなる火炎を作る必用がある。

### 2. 研究の目的

上述の問題を克服する実験モデルとして申請者は対向流場を提案する。対向流火炎を非均質燃料濃度の乱流燃焼に適応する際に、乱れと反応物組成を上下の2つのバーナーで独立に可変できる点、レーザー計測が有利に行える点などの利点がある。以上の点から、予混合拡散燃焼の局所消炎とその回復機構を実験的に解明することで、実機の非定常非均質乱流燃焼で頻発する局所消炎による未燃焼ガスの排出とそれが誘発する全体的な消炎の問題の学術的な基盤を提供することが可能であると着想した。対向流場の非均質燃料濃度の乱流火炎に対して、全体消炎クライテリアについての検討、局所消炎とその回復機構モードの分析、局所消炎機構の解明を行う。

### 3. 研究の方法

実用燃焼器内の燃焼現象は、均質燃焼よりパルク的に超希薄燃焼が可能な非均質燃焼場を多く採用していることが知られている。ここでは、強い乱れと急な温度勾配により、局所的に火炎が消炎し、燃焼効率や排出物特性を悪化させる要因となることが知られている。この場における微細構造モデルを提案した実験的な取り組みは非常に少ない。学術的な基盤研究として実験的に詳細な検討を加えるためには、非定常非均質燃焼場の時空間微分構造モデルとなる火炎を作る必用がある。上述の問題を克服する実験モデルとして申請者は対向流場を提案する。対向流火炎を非均質燃料濃度の乱流燃焼に適応する際に、乱れと反

応物組成を上下の2つのバーナーで独立に可変できる点、レーザー計測が有利に行える点などの利点がある。対向流場の非均質燃料濃度の乱流火炎に対して、全体消炎クライテリアについての検討、局所消炎とその回復機構モードの分析、局所消炎機構の解明を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 乱流予混合拡散燃焼の全体消炎クライテリア

① 消炎限界 図1は実験および数値計算により求めた消炎限界である。図中の黒プロットが実験結果を、白プロットが計算結果をそれぞれ示す。実験的には、安定して形成される火炎の $\phi_L$ を一定に保ったまま $\chi_U$ を徐々に減少させ、両方の火炎が消炎した時の燃料条件を消炎限界とした。ただし、消炎の際には上下2つの火炎が消失しており、一方の火炎のみが消失する現象は目視では観察できなかった。 $\chi_U=0\%$ の条件だけは $\phi_L$ を変化させて消炎限界を測定した。計算では燃焼による温度上昇が確認される $\phi_L, \chi_U$ に燃料条件を設定し、 $\phi_L$ を一定に保ったまま $\chi_U$ を0.01%間隔で減少させ、燃焼による温度上昇が確認されなくなった条件を消炎と定義し、温度上昇が確認された最も低い $\chi_U$ の値を消炎限界とした。図中の $\phi_L=0$ および $\chi_U=0\%$ の条件では、それぞれDFもしくはLPFが単体で形成されている。実験および数値計算の結果は同様な傾向を示す。消炎限界はEB(Extinction Boundary)を境界として消炎に対する $\phi_L$ と $\chi_U$ の影響度が異なるRegion AとRegion Bの2つの領域に分けられる。Region Aでは、 $\chi_U$ の減少に伴って消炎時の $\phi_L$ が増加する。この傾向は $\phi_L$ もしくは $\chi_U$ のどちらか一方を増加させる事で他方を減少させても燃焼状態が維持できる事、すなわち $\phi_L$ と $\chi_U$ に補充関係がある事を示している。また、消炎限界が線形である事は上記の補充関係が一定であることを意味している。Region Bでも $\phi_L$ と $\chi_U$ の補充関係は存在するが、 $\chi_U$ が減少するにつれて $\phi_L$ の増加率が減少している。つまり、 $\chi_U$ による $\phi_L$ の補充効果が減少しており、この領域の消炎限界は主に $\phi_L$ によって決定される。

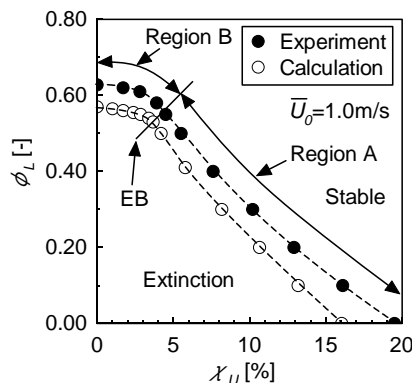


図1 消炎限界

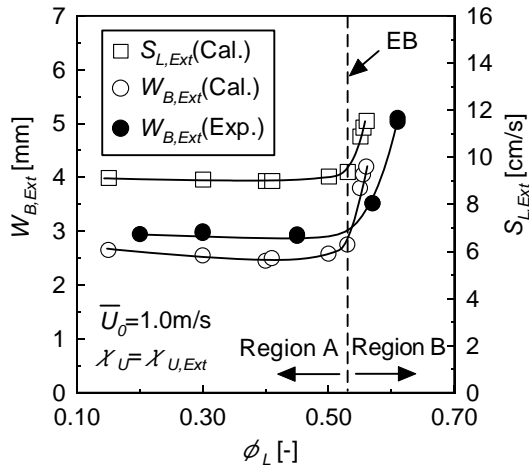
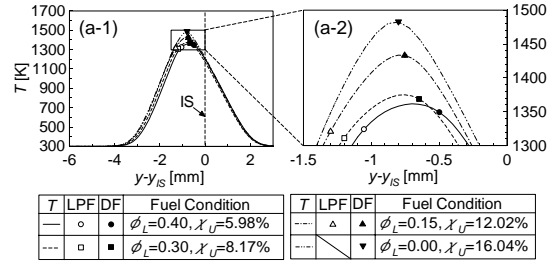


図 2 消炎限界の燃焼ガス幅と層流燃焼速度. (Cal.: 計算, Exp.: 実験)

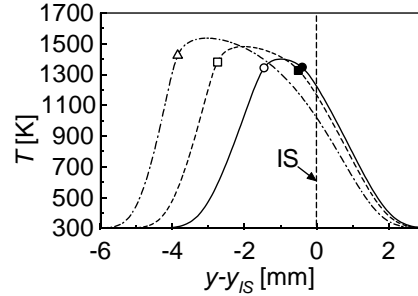
② 燃焼ガス幅と層流燃焼速度 燃焼ガス幅 ( $W_B$ ) とは、上下の流れが衝突する衝突面 (Impinging Surface : IS) と LPF の間隔である。DF は燃焼ガス中の IS 近傍に形成されるため、LPF と DF の間の熱および物質の輸送は燃焼ガス中で行われる。  $W_B$  を検討する事で、この輸送現象が起こる領域の空間スケールを特定できる。 LPF 位置は伝播性によって変化するため、  $W_B$  は層流燃焼速度 ( $S_L$ ) によって変化すると考えられる。そこで、消炎限界近傍の  $W_B$  および  $S_L$  について検討した。

$W_B$  は以下の方法で定義した。 下方の予混合気流にはシリコンオイル液滴 (公称沸点: 300°C) が添加されており、シリコンオイルの消失面 (Silicone Oil Vaporized point : SOV) から LPF 位置を特定する。 上方の燃料流にはアルミナ粒子 (公称粒径: 1  $\mu$  m) が添加されており IS を特定する。 SOV と IS の間隔を  $W_B$  と定義した。 光源には YAG レーザー (New Wave Research SOLO II -30Hz, 出力: 30mJ/pulse) を、画像の撮影は CCD ビデオカメラ (Megaplus Camera ES1.0, 解像度: 1008  $\times$  1018pix, 検査面積: 20  $\times$  20mm) をそれぞれ用いた。 数値計算により  $W_B$  を求める際には、SOV を 300°C の等温面、IS を y 方向流速が 0 になる位置とそれぞれ定義した。  $S_L$  は、LPF の予熱帯前面の y 方向流速の極小値と定義した。

図 2 は  $\phi_L$  の変化に伴う消炎限界近傍の  $W_B$  ( $W_{B,Ext}$ ) と  $S_L$  ( $S_{L,Ext}$ ) の変化である。 図中の黒プロットは実験結果、白プロットは数値計算結果である。  $W_{B,Ext}$  は  $\phi_L$  を固定して  $\chi_U$  を消炎が発生するまで徐々に減少させた際の消炎直前の  $W_B$  とした。 Region A では、  $\phi_L$  が変化しても  $W_{B,Ext}$ 、  $S_{L,Ext}$  は共にほぼ一定になる。 この結果は当量比によって  $S_L$  が変化するという予混合気流の基本特性と異なっているため、火炎の相互干渉の影響が加味されていると考えられる。 Region B では、  $\phi_L$  の増加に伴って  $W_{B,Ext}$  が著しく増加し、  $S_{L,Ext}$  もほぼ同様な増加傾向を示した。 Region B での  $W_{B,Ext}$  の変化の原因として、  $\phi_L$  によって  $S_{L,Ext}$  が変化し、その結果 LPF 位置が変化したためであると考えられる。



(a) Region A.



(b) Region B.

図 3 消炎限界の温度構造.

③ 温度分布 LPF-DF 間の熱輸送は、前節で議論した  $W_B$  と  $\Delta y$  に加えて LPF-DF 間の温度勾配や流速などが複合して決定される。例えば、Wada ら (Proc. Comb. Inst. 2009) は対向流中の Triple Flame の火炎間の濃度勾配から化学種輸送を議論している。それを参考に、希薄複合火炎でも温度勾配から熱輸送の方向および量を考察すると以下ようになる。 図 3 は消炎限界に沿って燃料条件を変化させた際の温度分布の変化である。 図 3(a) は Region A の温度分布である。 図 3(a-1) は火炎帯全体を、 図 3(a-2) は最高温度付近を拡大した結果をそれぞれ示す。 図 3(b) は Region B の温度分布である。 ただし、 図 3(b) 中の実線は EB の条件である。 図の横軸は IS からの距離 ( $y-y_{IS}$ ) で、負の方向が下方バーナー方向 (予混合気側)、正の方向が上方バーナー方向 (燃料流側) を示している。 図中の白プロットは LPF 位置、黒プロットは DF 位置を示している。 図 3(a-1) より、Region A では、  $\phi_L$  を変化させても温度分布の全体的な形状は変化しない。 温度分布は DF 付近を最高温度としたほぼ対称な形状であり、DF のみを形成した条件 (図中の二点鎖線) に類似している。 図 3(a-2) に示した LPF-DF 間の温度分布に着目すると、  $\phi_L$  が減少し  $\chi_U$  が増加するにつれて DF の温度が増加し、LPF-DF 間の温度勾配が増加している。 これは、燃料条件に応じて LPF-DF 間の熱輸送量に変化している事を示している。 DF に比べて LPF の方が熱的補完を強く受けている事から、この領域では複合火炎の消炎に対して DF が支配的であると考えられる。 そのため、Region A

を拡散火炎支配消炎 (DF Dominant Extinction : DF-DE) 領域と定義する. 図 3(b) に示した Region B では, Region A とは異なり  $\phi_L$  によって温度分布の全体的な形状が大きく変化する. すなわち,  $\phi_L$  を増加させるにつれて LPF 位置が予混合気側に移動し, 分布は非対称となる. 分布の形状は LPF のみを形成した条件 (図中の鎖線) とほぼ相似である. LPF に比べて DF の方が熱的補完を強く受けていることから, この領域の複合火炎の消炎に対して LPF が支配的であると考えられる. 従って, Region B は希薄予混合火炎支配消炎 (LPF Dominant Extinction : LPF-DE) 領域と定義する.

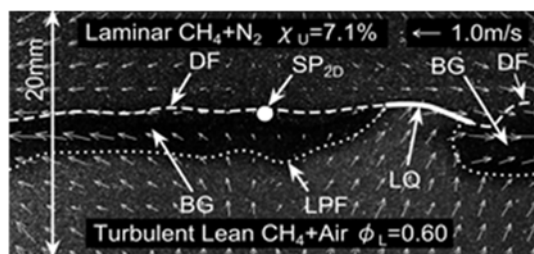
④ まとめ 希薄予混合火炎 (LPF) と拡散火炎 (DF) から構成される希薄予混合拡散複合火炎 (複合火炎) に層流対向流場を用いて形成した. その消炎限界近傍の火炎構造について検討した結果, 以下の事項が明らかになった. 複合火炎の消炎限界は 2 つの領域に分けられる. 一方は DF 側の燃料濃度 ( $\chi_U$ ) の増加による LPF 側の当量比 ( $\phi_L$ ) の減少率が一定な拡散火炎支配消炎 (DF-DE) 領域であり, 他方は  $\chi_U$  が増加するほど  $\phi_L$  の減少率が増加する希薄予混合火炎支配消炎 (LPF-DE) 領域である. DF-DE 領域と LPF-DE 領域の火炎構造とその  $\phi_L$  依存性には以下のような相違点がある. DF-DE 領域では, DF 付近を最高温度とした対称な温度分布であり,  $\phi_L$  を変化させても対称性は保たれる. LPF に比べて DF の方が高温であるため, LPF は LPF-DF 間からの熱的な補完によって維持されている.  $\phi_L$  が増加するほど LPF-DF 間の温度勾配は減少するのに対して, 層流燃焼速度と燃焼ガス幅は変化しない. LPF-DE 領域では, LPF 付近を最高温度とした燃料側に比べ予混合気側の温度勾配が急な非対称な温度分布である. DF に比べて LPF の方が高温であるため, DF は LPF-DF 間からの熱的な補完によって維持されている.  $\phi_L$  によって LPF-DF 間の温度勾配は変化しないのに対して, 層流燃焼速度と燃焼ガス幅は  $\phi_L$  が増加するほど増加する.

## (2) 局所消炎構造モデル解明

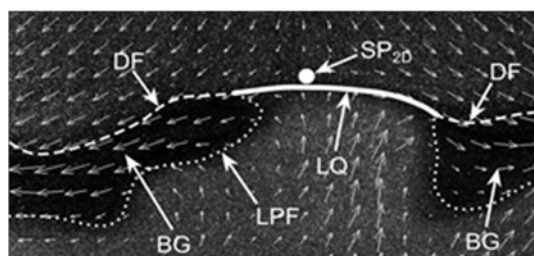
① 局所消炎現象 図 4(a) と (b) は, 二次元相互相関 PIV により可視化した 2 つの局所消炎モードを示している. 撮影には, 高速度カメラ Photoron Fastcam-1024PCI 100K を用いた. 解像度は 1024×1024 であり, 撮影速度は 2000 frame/sec である. 40mm×40mm の範囲の撮影を行ったが, 図 4 には 20mm×40mm の範囲を示した. 散乱粒子として, 上下のノズルに粒径 1  $\mu\text{m}$  のアルミナ粒子を添加した. 出力 20mJ, 繰り返し速度 2kHz の Q スイッチ YAG レーザー (Photonics Industries DC 10-527) を光源として用いた. 図中の IS, BG, SP<sub>2D</sub>, LQ はそれぞれ, 衝突面, 燃焼ガス, 二次元よどみ点, 局所消炎領域を示す. 下方流は乱流であり, 上方流は層流である. この 2 つの画像の主な相

違点は, 局所消炎が SP<sub>2D</sub> を含むかいないかである. 乱流条件でも, 火炎の安定点は基本的にはよどみ点付近に存在するため, 対向流場の局所消炎の議論ではよどみ点が重要である. 例えば, 図 4(a) に示すように局所消炎が SP<sub>2D</sub> を含まずに発生した場合, 局所消炎領域は SP<sub>2D</sub> から外側へ流され, 火炎は局所消炎から回復することができる. この場合には, 火炎は高い確率で局所消炎から回復することができる. しかしながら, 局所消炎が SP<sub>2D</sub> を含んで発生した場合, 局所消炎領域は火炎全体に向けて拡大し, 火炎は局所消炎から回復することが困難である. 最終的には, 火炎全体が消炎する.

図 5 は 4 つの乱流条件および燃料条件が局所消炎および全体消炎頻度に及ぼす影響を示している. 対象とした条件は, 予混合気が自己伝播性を持つ条件 ( $\phi_L=0.60$ ) および持たない条件 ( $\phi_L=0.30$ ), 乱流が予混合火炎側に添加された条件および拡散火炎側に添加された条件である. 全ての条件は消炎限界近傍で計測した. 消炎限界は着火から 2 秒以上燃焼可能な条件と定義した. 全体消炎を終了トリガーとして 4000 フレームの動画の撮影を行った. 各条件で上記の撮影を 2 回行ったため, 条件ごとに 8000 フレーム, 4 秒間の画像の撮影を行った. この図は, 流れと燃料の条件によって局所消炎頻度が大きく異なることを示している. 例えば, 図 5① に示す, 予混合火炎が層流であり, 自己伝播性がある条件 ( $\phi_L=0.60$ ) では, 局所消炎から回復する確率が低い. このことは, 予混合気側が層流の条件では, 火



(a) LQ occurs without SP<sub>2D</sub>.



(b) LQ occurs with SP<sub>2D</sub>.

図 4 二次元 PIV により可視化した局所消炎現象. 撮影範囲: 20mm×40mm. LPF, DF, BG はそれぞれ予混合火炎, 拡散火炎, 燃焼ガスを示す. IS と LQ は衝突面と局所消炎を示す. SP<sub>2D</sub> は二次元よどみ点を示す.

炎は局所消炎から回復する可能性が低いことを示している. この条件では, 局所消炎が  $SP_{2D}$  を含んで発生した場合には, 局所消炎回復現象が観察されなかった. 図 5②に示す, 拡散火炎側が乱流で, 予混合火炎が伝播性を持たない条件 ( $\phi_L=0.30$ ) のほうが上記の条件に比べて局所消炎回復確率が高い原因は不明である. それに対して,  $\phi_L=0.60$  で予混合火炎が乱流の条件では, 局所消炎と回復の発生確率は 5 倍である. 予混合火炎側の乱流は局所消炎を誘発する反面, 乱流は局所消炎回復を助ける働きもする. 特に, 予混合火炎が伝播性をもつ条件 ( $\phi_L=0.60$ ) では, 局所消炎が  $SP_{2D}$  を含んで発生していても火炎は局所消炎から回復する可能性が高い. ひとつの仮説としては, 局所消炎の発生確率はすべての条件で等しいと考えられる. 局所消炎の主要な要因は局所的な火炎伸張と熱損失である. しかしながら, 局所消炎回復現象に対しては乱流と火炎伝播の影響も存在し, これら影響がない場合には局所消炎は全体消炎に発展する.

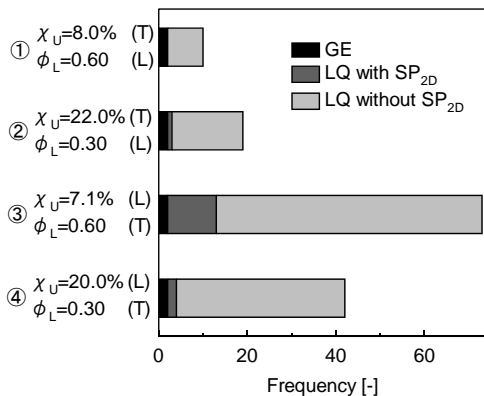


図 5 局所消炎および全体消炎頻度. T: 乱流, L: 層流.

② 局所消炎端部伝播特性 PIV 動画から分析したように, 局所消炎回復機構に対して, 局所消炎発生位置と局所消炎端部の構造および伝播速度が重要な役割を果たしている. 局所消炎回復機構の仮説として, 局所消炎端部が消炎により発生した未燃焼ガスに向かって伝播する可能性が考えられる. 図 6 は局所消炎部位と端部の局所構造を示している. 実線は燃焼ガスと未燃焼ガスの境界を示している. 破線は局所消炎を示している. 予混合火炎の境界を特定することは困難である. そのため,  $y$  方向から  $180^\circ$  の範囲の火炎伝播速度の計測を行った. 火炎伝播方向および伝播角度 ( $\alpha_p$ ) は図 6 に示すように定義した. 局所火炎伝播速度および未燃焼ガス流速は, それぞれ  $S_{F2D}$  および  $u_{u2D}$  と定義した.

図 7 は, 局所火炎伝播速度 ( $S_{F2D}$ ) および未燃焼ガス流速 ( $u_{u2D}$ ) を示している.  $S_{F2D}$  および  $u_{u2D}$  は  $\alpha_p=0^\circ$  から  $180^\circ$  まで計測した. 図 7(a) は, 局所消炎の発生から縮小開始までと定義した局所消炎拡大期間での  $S_{F2D}$  および  $u_{u2D}$  を示している. 局所消炎拡大期間は 40 フレーム,

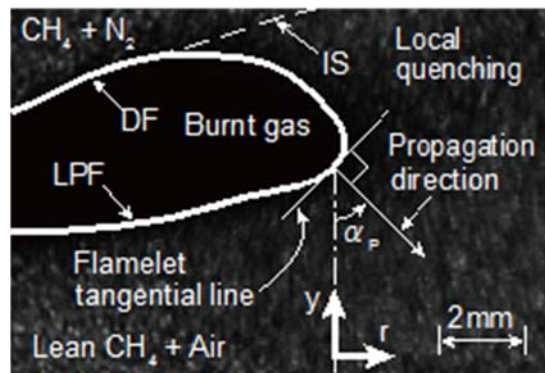
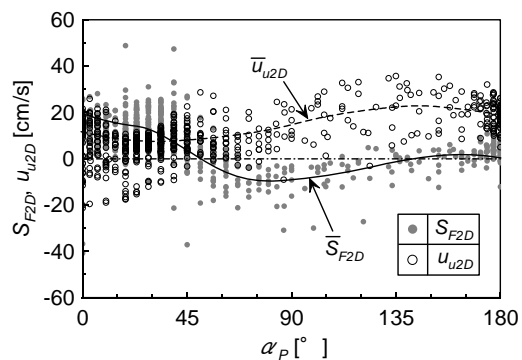
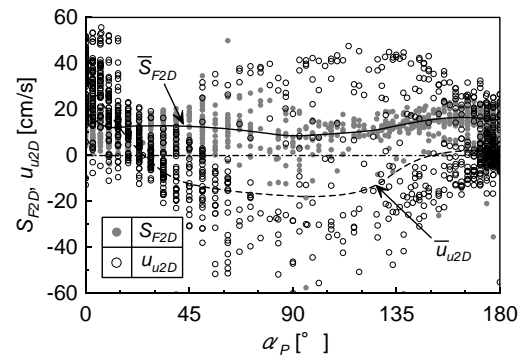


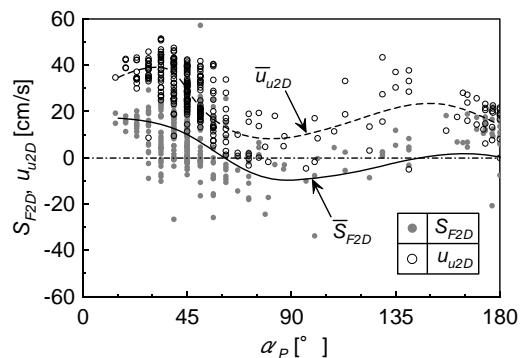
図 6 局所消炎端部の構造と伝播方向の定義. IS: 衝突面, DF: 拡散火炎, LPF: 予混合火炎,  $\alpha_p$ : 伝播方向.



(a) 局所消炎拡大期間.



(b) 局所消炎縮小期間.



(c) 全体消炎.

図 7 局所消炎端部の局所火炎伝播速度 ( $S_{F2D}$ ) と未燃焼ガス流速 ( $u_{u2D}$ ).

20ms である。平均  $S_{F2D}$  の多くは  $u_{u2D}$  よりも低い。それに加えて、 $60^\circ < \alpha_p < 120^\circ$  の範囲では  $S_{F2D}$  は負の値である。この負の速度バランスが局所消炎を拡大する原因である。図 7(b) に示す局所消炎回復モードでは、計測の開始時点は局所消炎の収縮開始である。局所消炎収縮期間は局所消炎発生から 20~50ms 後である。 $S_{F2D}$  のほとんどは 10cm/s よりも速く、 $u_{u2D}$  よりも速い。このことは火炎端部が局所消炎領域に伝播可能であることを示している。この例では、 $\alpha_p = 30^\circ \sim 130^\circ$  の範囲で  $u_{u2D}$  が負の値となっている。この乱流運動による負の  $u_{u2D}$  と未燃焼ガス中の燃料の混合による火炎端部の伝播速度の増加が原因となって、局所消炎の回復が発生する。一方で、図 7(c) に示す全体消炎発生モードでは、 $S_{F2D}$  は  $u_{u2D}$  よりも遅い。ここでは、 $S_{F2D}$  と  $u_{u2D}$  は局所消炎開始から全体消炎発生まで計測を行った。計測期間は 17ms、34 フレームである。この動画は局所消炎が r 方向に拡大し、全体消炎に発展する過程を示している。この現象は吹き飛び現象とも考えられる。 $\alpha_p = 90^\circ$  付近に着目すると  $S_{F2D}$  が負の値となっていることが分かる。

③ まとめ 対向流場に形成された希薄予混合火炎と窒素希釈拡散火炎の乱流複合火炎の局所消炎現象と回復機構を提案した。局所消炎は局所的な火炎伸張と熱損失を原因として発生する。火炎の安定点は基本的には最小流速点の近傍に存在する。局所消炎が最小流速点を含んで発生すると局所消炎は高い確率で全体消炎に発展する。しかしながら、局所消炎が最小流速点を含んで発生しても、局所消炎端部が未燃焼ガスに向かって伝播可能な場合には、局所消炎から回復することが可能である。それに対して、最小流速点を外れて局所消炎が発生する場合もある。そのため、A モードと P モードの 2 つの局所消炎回復モードと 1 つの全体消炎モードの可能性がある。Passive モードでは、局所消炎領域は未燃焼ガス流動によって輸送される。Active モードでは、火炎伝播速度は未燃焼ガス流速よりも速い。火炎が局所消炎から回復できない場合には全体消炎に発展する。

## 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 1 件)

- ① 川波尊幸、矢作裕司、希薄予混合拡散複合火炎の消炎限界近傍の火炎構造、日本機械学会論文集 (B 編)、査読有、78 巻 789 号 pp.1118-1126, (2012).

[学会発表] (計 5 件)

- ① 川波尊幸、柏木駿伸、矢作裕司、希薄複合火炎の熱補完機構と伝播特性、第 51 回燃

焼シンポジウム講演論文集, pp.198-199, (2013.12.5), 大田区産業プラザ Pio.

- ② Kawanami, T., and Yahagi, Y., Effects of turbulence and flame propagation on the local quenching, 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, p.67 (2013.5.19), Gyeongju Hilton Hotel, South Korea.
- ③ 川波尊幸, 矢作裕司, 希薄複合火炎の熱補完機構と消炎燃焼ガス幅, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.196-197, (2012.12.6), 愛知県産業労働センター.
- ④ Kawanami, T. and Yahagi, Y., Effective Extinction Triggers of Lean Premixed and Diffusion Combined Flames, Abstract of Works in Progress Posters the 34th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, p.80 (2012.7.31), Warsaw University of Technology, Poland.
- ⑤ 川波尊幸, 矢作裕司, 燃焼ガス幅と局所燃焼速度に基づく乱流複合火炎の局所消炎発生時期, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.238-239, (2011.12.6), 慶應義塾大学日吉キャンパス.

## 6. 研究組織

### (1) 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