

乱流対向流場に形成された

希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎

Local Quenching of Lean Premixed and Diffusion

Combined Flames Formed in a Turbulent Opposed Flow

川波 尊幸

Abstract

Local quenching and recovery mechanisms of lean premixed and diffusion combined flames formed in a turbulent opposed flow are investigated experimentally and numerically. One jet of the opposed flow is lean premixed methane air and the other is methane diluted by nitrogen. The formed flames are combined by a lean premixed flame and a diffusion flame.

The extinction limits can be divided into diffusion flame dominant extinction region (DFDE) and lean premixed flame dominant extinction region (LPFDE). In these two regions, the flame structures are different greatly. In the DFDE, the temperature has symmetrical profile. In this case, the diffusion flame helps the lean premixed flame by reducing downstream heat loss. On the other hand, in the LPFDE, the temperature has asymmetrical profile and the temperature peak leans to the lean premixed flame side. In this region, the lean premixed flame helps diffusion flame by preheating its oxidizer flow.

Two-dimensional local burning velocities (S_{F2D}) of turbulent combined flames are measured to determine onset of local quenching. S_{F2D} of turbulent combined flames are strongly affected by burnt gas width. When burnt gas width of turbulent flame are larger than laminar extinction limit, S_{F2D} is increasing with decreasing burnt gas width. When burnt gas width of turbulent flame are smaller than laminar extinction limit, S_{F2D} is decreasing rapidly with decreasing burnt gas width. This result means that extinction mechanisms of laminar combined flames can be applied to turbulent combined flames.

Three different local quenching events are observed: passive mode, active mode, and global extinction mode. In passive mode, local quenching occurs at outside of stagnation point. Local quenching is displaced by the diverged flow. In active mode, local quenching occurs including stagnation point. The flame recovers by edge flame propagation. In global extinction mode, local quenching occurs including stagnation point. The local quenching edge is transported to outward and whole flame has extinguished.

目次

記号

第1章 序論	1
1・1 緒言	1
1・2 従来研究	3
1・3 目的	5
1・4 本研究の特色	6
1・5 本論文の構成	7
第2章 層流希薄予混合拡散複合火炎の消炎機構	8
2・1 緒言	8
2・2 実験装置および方法	8
2・2・1 燃焼装置	8
2・2・2 テストセクションおよび座標系	9
2・2・3 空気, 窒素および燃料の供給系	9
2・2・4 測定装置および方法	12
2・2・5 数値計算方法	12
2・3 結果および考察	15
2・3・1 消炎限界	15
2・3・2 燃焼ガス幅, 層流燃焼速度と希薄予混合火炎-拡散火炎間隔	16

2・3・3	温度分布と熱発生率分布	19
2・3・4	希薄複合火炎の希薄予混合火炎-拡散火炎間の平均温度勾配	22
2・3・5	他の燃焼場との比較	23
2・3・6	希薄複合火炎の熱補完機構	26
2・4	結論	27
第3章	乱流希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎発生機構	28
3・1	緒言	28
3・2	実験装置および方法	30
3・2・1	燃焼器および流路系	30
3・2・2	測定装置	31
3・2・3	二次元局所燃焼速度計測法	33
3・3	結果および考察	37
3・3・1	二次元局所燃焼速度による局所消炎時期の特定	37
3・3・2	乱流強度が局所消炎発生時期に及ぼす影響	41
3・4	結論	44
第4章	乱流希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎回復機構	45
4・1	緒言	45
4・2	実験装置および方法	45
4・3	結果および考察	46
4・3・1	局所消炎とよどみ点	46

4・3・2	局所消炎回復確率に対する乱流強度と熱補完機構の影響	47
4・3・3	局所消炎外縁部の二次元局所燃焼速度	48
4・3・4	局所消炎回復機構	52
4・4	結論	53
第5章	結論	54
	謝辞	56
	参考文献	57
	本研究に関連する論文発表	60

記号

d	ノズル出口直径	[mm]
K	火炎伸張率	[s ⁻¹]
L	上下バーナ間隔	[mm]
Le	ルイス数	[-]
l_0	乱流積分スケール	[mm]
r	中心軸からの距離	[mm]
Re_t	乱流レイノルズ数($Re_t=l_0 \cdot u' / \nu_0$)	[-]
S_F	局所燃焼速度	[cm/s]
S_{F2D}	二次元局所燃焼速度	[cm/s]
$S_{F2D,M}$	二次元局所燃焼速度の最頻値	[cm/s]
S_L	層流燃焼速度	[cm/s]
S_{L0}	伸張を受けていない層流燃焼速度	[cm/s]
S_{LE}	消炎直前の層流燃焼速度	[cm/s]
S_T	乱流燃焼速度	[cm/s]
T_0	常温	[K]
T_{ad}	断熱火炎温度	[K]
T_{Max}	最高火炎温度	[K]
u_u	予熱帯前面の流速	[cm/s]
$u_{u,2D}$	予熱帯前面の二次元流速	[cm/s]
\bar{U}_0	ノズル出口の断面平均流速	[m/s]
u_0'	乱れ強さ	[m/s]
W	燃焼ガス幅	[mm]
W_{LE}	層流火炎の消炎直前の燃焼ガス幅	[mm]
W_{Min}	燃焼ガス幅の最小値	[mm]
y	下方バーナから鉛直上向きの距離	[mm]
α_p	火炎伝播方向	[°]
δ_{L0}	伸張を受けていない層流火炎帯厚さ	[mm]
η	コルモゴロフスケール	[-]
ϕ_L	予混合気の当量比	[-]
χ_U	燃料流の燃料濃度	[%]
$\triangle T$	希薄予混合火炎と拡散火炎の温度差	[K]
$\triangle y$	希薄予混合火炎と拡散火炎の間隔	[mm]

第1章 序論

1・1 緒言

消炎現象は、燃焼器の安定性や安全性を決定するため、燃焼研究の重要な課題のひとつである。燃焼場の火炎全てが消炎する現象を全体消炎、火炎の一部のみが消炎する現象を局所消炎と呼ぶ。実用燃焼器で多用される乱流燃焼場には、高負荷燃焼が可能という利点がある反面、局所消炎が発生しやすいという欠点がある。局所消炎の多発は火炎面積を減少させるため、燃焼負荷率を低下させる。また、局所消炎部位から流出した未反応燃料は、排気特性を悪化させると共に燃料の利用効率を低下させる。局所消炎は全体消炎に発展する可能性があることが指摘されており、実用燃焼器での全体消炎は、燃焼器の異常停止の原因となる。そのため、燃料の有効利用および環境負荷の低減には、実用燃焼場の局所消炎の発生および回復機構を明らかにする必要がある。

燃焼現象は、火炎に対する反応物質の供給方法によって、予混合燃焼と拡散燃焼の2つに大別できる。予混合燃焼では、燃料と酸化剤が予め均質に混合されてから火炎に供給される。予混合火炎は燃料と酸化剤の混合割合によって、酸化剤過剰な希薄予混合火炎と、燃料過剰な過濃予混合火炎に分類される。拡散燃焼では、燃料と酸化剤は個別に火炎に供給される。予混合燃焼と拡散燃焼では火炎の構造や特性が異なるため、消炎研究の多くは各燃焼形態に対して個別に行われてきた。しかしながら、実用場の燃焼現象の中には、燃焼形態を予混合燃焼と拡散燃焼のどちらか一方に明確に分類する事が困難な場も存在する[1]。そのひとつとして、燃料と酸化剤の混合割合が空間的に異なる非均質燃焼場が挙げられる。

図1・1(a)に非均質燃焼場の火炎構造のモデル図を示す。燃料と酸化剤の混合が十分に行われた予混合領域では予混合火炎が形成されるのに対して、混合が不十分な燃料と酸化剤領域の境界では拡散火炎が形成

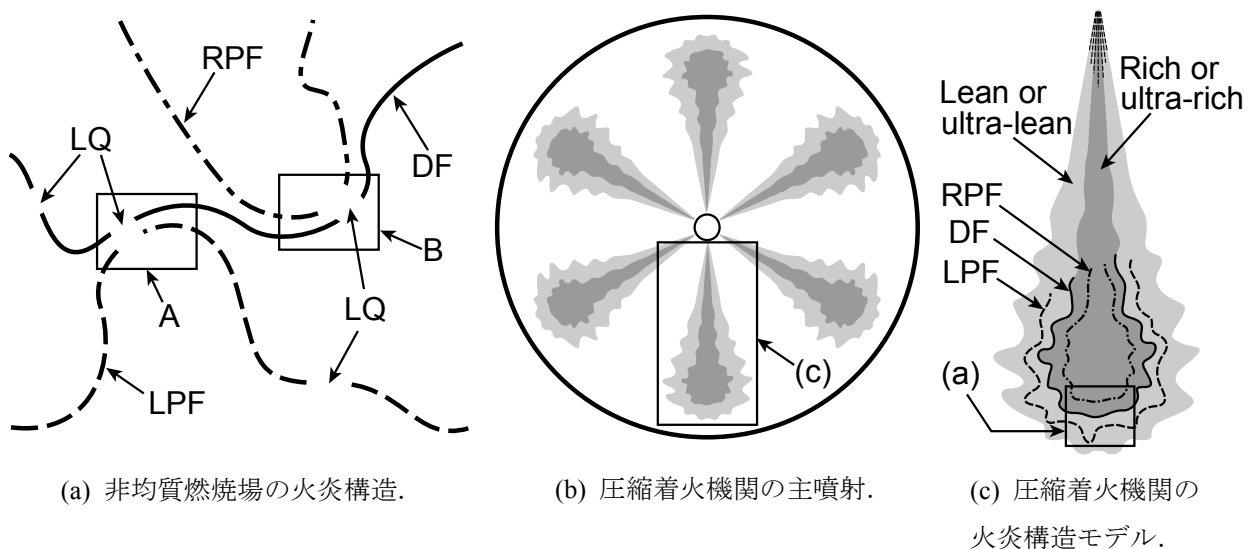


図1・1 非均質燃焼場と希薄予混合拡散複合火炎。(LQ: 局所消炎, LPF: 希薄予混合火炎, RPF: 過濃予混合火炎, DF: 拡散火炎, Lean: 希薄予混合気, Rich: 過濃予混合気)

されるため、非均質燃焼場は極めて複雑な火炎構造を持つ。非均質燃焼場の実例は多々あるが、そのひとつを挙げると複数回燃料噴射型の圧縮着火機関がある[2]。この機関では、まず燃焼室内の空気に対して微量の燃料を噴射する事で、希薄な燃料と空気の予混合気を形成する。そこに主噴射を行う事で燃焼が行われる。図1・1(b)は主噴射の直後の筒内のモデルである。図1・1(c)は、主噴射後に起こる燃焼過程での火炎構造モデルである。燃料と酸化剤の混合が乱流場で行われるため非均質燃焼場となる。図1・1(c)に”a)”と示した部位に対して図1・1(a)のモデルが適用できる。多様な実用燃焼場の局所消炎特性を把握するためには、予混合燃焼および拡散燃焼に加えて非均質燃焼場の局所消炎を明らかにする必要があるが、非均質燃焼場の局所消炎機構には未解明の部分が多い。その原因は、複雑な火炎構造に起因する局所消炎機構の多様性である。非均質燃焼場では、希薄予混合火炎、過濃予混合火炎および拡散火炎が混在することに加えて、乱流の効果によって火炎が大きく湾曲し二つの火炎が近接した部位では火炎同士の補完機構が働く。火炎同士の補完機構とは、二つの火炎の間の熱および物質輸送によって、火炎の反応に必要な熱や中間生成物を補い合うことである。補完機構の結果として、単独では燃焼不可能な弱い火炎も燃焼可能となる。非均質燃焼場では、火炎同士の補完機構が様々な火炎の組み合わせで働く可能性がある。例えば、図1・1(a)中の”A”の部位では希薄予混合火炎と拡散火炎が補完して燃焼しているのに対して、”B”の部位では過濃予混合火炎と拡散火炎が補完して燃焼している。そのため、”A”の部位と”B”の部位の局所消炎機構は異なると考えられる。上記のような多様な局所消炎機構を持つ非均質燃焼場の局所消炎を解明することは容易ではない。これを明らかにするためには、非均質燃焼場の局所消炎機構の多様性の要因である予混合火炎と拡散火炎の補完機構が働く火炎、すなわち予混合拡散複合火炎を単純な系で再現し、その局所消炎機構について詳細に検討することが必要である。

図1・2に示した2つの噴流を対向して衝突させた対向噴流場(対向流場)は、ほぼ平面状の火炎を形成することが可能で、座標系も二次元円筒座標と単純であることから、燃焼形態を問わず消炎や火炎構造の詳細な検討に多用されてきた。予混合拡散複合火炎を形成した際には、2つの噴流の組成を個別に制御することで、予混合火炎と拡散火炎の燃焼強度が消炎に与える影響を個別に調べることができる。また、2つの噴流の一方にのみ乱流を添加することで、予混合火炎側と拡散火炎側の乱流が消炎に及ぼす影響を個別に調べられる点からも、乱流対向流場は予混合拡散複合火炎の局所消炎の検討を行う場に適している。

そのため本研究では、乱流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎の発生および回復機構について実験、数値計算の両面から検討を加える。

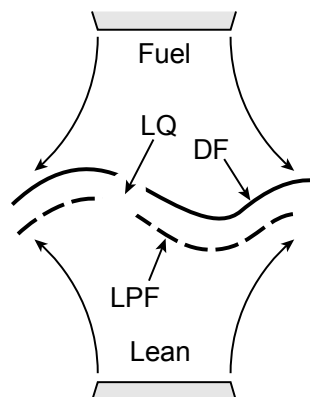


図1・2 対向流中の希薄予混合拡散複合火炎。(LQ：局所消炎，LPF：希薄予混合火炎，RPF：過濃予混合火炎，DF：拡散火炎，Lean：希薄予混合気，Fuel：燃料)

1・2 従来研究

以下では、1・1節で述べた非均質燃焼場で形成される様々な予混合拡散複合火炎の構造についてより詳しく説明する。予混合拡散複合火炎の例を図1・3に示す。図1・3(a)のような、酸化剤に対して燃料が不足した希薄予混合気と燃料の境界では、希薄予混合気中に希薄予混合火炎が形成され、そこから排出される余剰酸化剤と対向側の燃料が反応して拡散火炎が形成される。その結果、希薄予混合火炎と拡散火炎の複合火炎(希薄予混合拡散複合火炎)となる。図1・3(b)のような、酸化剤に対して燃料が過剰な過濃予混合気と酸化剤の境界では、過濃予混合気中に過濃予混合火炎が形成され、そこから排出された余剰燃料と対向側の酸化剤によって拡散火炎が形成されるため、過濃予混合火炎と拡散火炎の複合火炎(過濃予混合拡散複合火炎)となる。また、図1・3(c)のような希薄予混合気と過濃予混合気の境界では、希薄予混合火炎と過濃予混合火炎が形成され、それらの火炎から排出される余剰燃料および余剰酸化剤が反応して拡散火炎が形成される。その結果、希薄予混合火炎、拡散火炎、過濃予混合火炎の三重複合火炎となる。他にも、乱流などにより火炎が大きく湾曲した部位では、2つの希薄予混合火炎の複合火炎なども考えられる。非均質燃焼場の局所消炎を明らかにするためには、まずこれら各種複合火炎の消炎について個別に検討する必要がある。

上記のような背景から、乱流火炎に比べて実験および解析の容易な層流火炎を対象として、各種複合火炎の消炎に関する基礎的な研究が数多く行われている。これらの研究は、乱流火炎の局所構造は層流火炎と等しいとする Laminar Flamelet Concept[3]に基づいて、乱流火炎の局所的な特性を明らかにすることを目的としている。対象場としては、対向流場が多用される。対向流場は、座標系が単純な事、速度勾配の制御が容易な事、火炎の近傍に固体壁が存在しない事などの利点から、予混合燃焼および拡散燃焼の研究に古くから用いられてきた。複合火炎研究に用いる場合には、上記の利点に加えて、上下の噴流の組成を制御する事で予混合火炎と拡散火炎の燃焼強度を個別に制御できる利点がある。これらの研究では、複合火炎の消炎に対する火炎同士の補完機構の重要性が指摘されている。例えば、2つの希薄予混合火炎の複合火炎を対象にした研究[4-8]では、浜津ら[7]が火炎構造と消炎限界の関係について検討を加え、可燃限界以下の当量比の予混合気も消炎限界に対して影響を与える事、その影響の強さに対してはよどみ点の温度勾配が重要である事を示した。過濃予混合拡散複合火炎を対象にした研究[9-15]では、Tanoffら[11]が火炎構

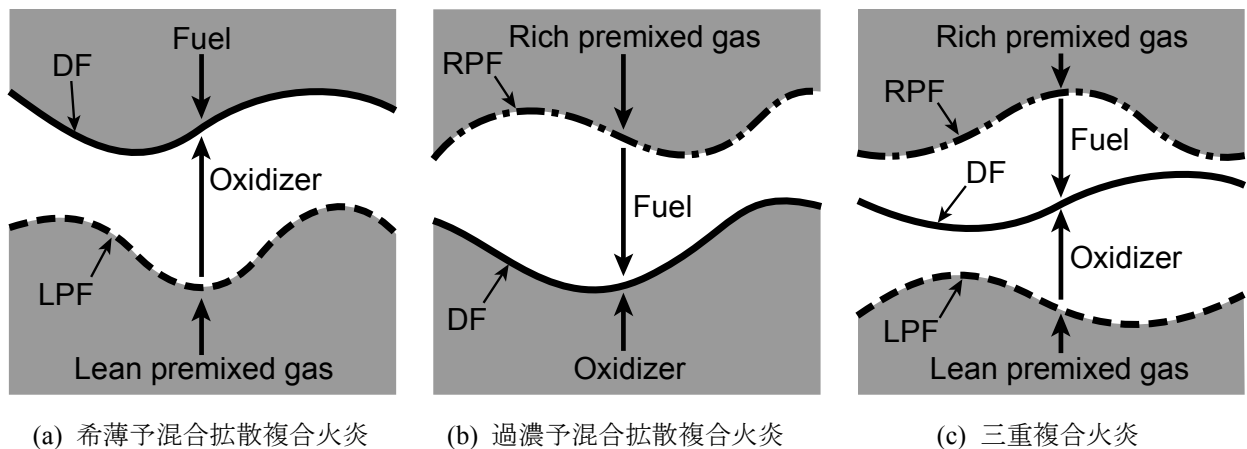


図1・3 予混合拡散複合火炎。(LPF：希薄予混合火炎，RPF：過濃予混合火炎，DF：拡散火炎)

造について検討を加え、2つの火炎の距離が速度勾配と燃焼速度により決定される事を明らかにした。三重複合火炎を対象にした研究[16-22]では、Wadaら[19]が消炎時の自発光の幅が燃料条件によらずほぼ一定になる事、および消炎に対して火炎帯でのCOの生成と消費の釣り合いが重要である事を示した。上記の3種の複合火炎に着目した研究と比較して、希薄予混合火炎と拡散火炎の複合火炎に着目した研究[23,24]は少ない。Seshadriら[16]は希薄複合火炎の消炎限界近傍の火炎構造について検討しているが、主に過濃複合火炎と拡散火炎との比較を行っており、希薄複合火炎の消炎限界と補完機構の関係については議論していない。

実用燃焼場の多くは乱流燃焼であるため、上記の層流複合火炎を対象とした研究と並行して、乱流複合火炎の局所消炎に対する、層流複合火炎の知見の適用性を明らかにすることも必要である。しかしながら、層流複合火炎に比べて乱流複合火炎を対象にした研究[25-34]は少ない。これらの研究は、対象場により大きく2つに大別できる。一方は、実機に近い非均質燃焼場を対象に局所的な火炎構造を調べる研究[29,30]である。他方は、対向流場などを用いて組成の異なる混合気を衝突させることで乱流複合火炎を形成する研究[28-31]である。非均質場を対象とした研究では、Jimenezら[26]は非均質プロパン空気予混合気の燃焼の直接数値計算を用いて局所的な火炎構造について詳細に検討した。その結果、一次火炎については、直接数値計算による火炎の熱発生率は、層流予混合火炎の特性に基づく火炎片モデルによる結果とよく一致することを明らかにした。Yahagiら[27]は乱流対向流場を用いて強度の異なる2つの希薄予混合火炎の複合火炎の消炎に対するルイス数の影響を調べた。その結果、 $Le > 1$ のプロパン混合気では消炎に対する2つの火炎の補完の影響が小さいのに対して、 Le が1に近いメタン空気混合気では可燃限界以下の希薄混合気も安定燃焼に寄与する事を明らかにした。過濃予混合拡散複合火炎を対象にした研究では、Bohmら[29]が乱流対向流場を用いて局所消炎の時系列的な可視化を行った。粒子画像流速計測法(PIV)とOH分子に対するレーザー誘起蛍光法(LIF)を同時に行うことで、局所消炎発生時の二次元温度分布および局所伸張率を計測した。その結果、長時間にわたって強い伸張が加えられた部位で局所消炎が発生することを明らかにした。希薄予混合拡散複合火炎に関しては乱流火炎の局所消炎と層流火炎の消炎の関係性を明らかにした研究は報告されていない。

局所消炎の発生が乱流燃焼場全体に及ぼす影響を明らかにするためには、上記の局所消炎発生機構についての検討に加えて、局所消炎発生後の回復機構を明らかにする必要がある。拡散火炎に対しては局所消炎回復機構について詳細な検討が行われている[35-40]。拡散火炎の局所消炎外縁部は三つ又火炎と呼ばれる構造になっており、前述の複数の火炎がほぼ平行して形成されている複合火炎とは異なった構造である。局所消炎領域の乱流渦が局所消炎外縁部の伝播速度に及ぼす影響などが議論されている[37]。冷却壁面に予混合気を衝突させた壁面よどみ流に対しても、局所消炎の空間スケール、およびよどみ点と局所消炎の位置関係が局所消炎回復におよぼす影響などについて検討が行われている[41-43]。複合火炎を対象に局所消炎回復機構を明らかにした研究[44-47]は、予混合火炎および拡散火炎に比べて少ない。Kostiukら[44,45]は、乱流対向流中に形成された2つの希薄予混合火炎の複合火炎の局所消炎に対して実験的に検討を加えた。彼らは、その結果に基づいて対向流れ場の対流輸送による局所消炎回復機構を提案した。予混合火炎と拡散火炎の複合火炎の局所消炎回復機構と補完機構について詳細な検討を行った研究は報告されていない。

1・3 目的

1・1節で述べたように、非均質燃焼場の局所消炎特性を解明するためには、その複雑な局所構造を各種の複合火炎に分解し、複合火炎の局所消炎について詳細に検討することが必要である。上記のような背景から、様々な複合火炎の消炎機構に対する検討が行われており、消炎に対する補完機構の重要性が指摘されている。しかしながら、1・2節で述べたように、希薄予混合火炎と拡散火炎の複合火炎は他の複合火炎に比べて研究例が少なく、局所消炎機構に関して未解明の部分が多い。各種複合火炎の局所消炎に関する知見を総合し、非均質燃焼場の局所消炎特性を明らかにするためには、希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎機構を明らかにする必要がある。対向流場は、希薄予混合火炎と拡散火炎に流入する未燃焼ガスの燃焼強度および乱流特性を個別に制御する事が可能なため、上記の検討を行う場に適している。そのため本研究は、乱流対向流中の希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎の発生機構および回復機構を明らかにすることを目的とする。

各種の複合火炎の消炎機構に対して火炎同士の補完機構が重要な役割を果たしている事が指摘されている。そのため、希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構に着目して、希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎発生機構に検討を加える。1・2節で述べたように、補完機構は、火炎帯の温度分布や反応物質濃度分布などの火炎構造と密接に関連していることが指摘されている。火炎構造の詳細な検討には、乱流場に比べて実験および解析が容易な層流場が適している。そこで本研究では、まず、層流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎を対象に消炎時の火炎構造について詳細に検討することで、補完機構に着目して局所消炎発生機構を明らかにする。

実用燃焼場の多くは乱流場であるため、層流火炎を用いて明らかにした局所消炎発生機構の乱流火炎に対する適用性を明らかにする必要がある。予混合火炎および拡散火炎に対しては、乱流火炎に対する層流火炎の適用性に関する研究が数多く行われており、その結果に基づいて各種の乱流燃焼ダイアグラムが提案されている。これに対して、1・2節で述べたように、複合火炎に対しては層流火炎の乱流火炎に対する適用性に関する研究は少ない。特に、希薄予混合拡散複合火炎に対しては、層流火炎の消炎機構の乱流火炎に対する適用性に関する研究は報告されていない。そのため本研究では、乱流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎発生時の火炎構造を層流火炎の消炎時の構造と比較することで、層流火炎の局所消炎機構の乱流火炎に対する適用性を明らかにする。

局所消炎は、全体消炎に発展する可能性があることが指摘されており、全体消炎は燃焼器の信頼性および安全性に大きな影響を及ぼすことから、局所消炎発生機構の検討に加えて、局所消炎の発生後の回復機構を明らかにすることも必要である。予混合拡散複合火炎に対しては、その特徴である予混合火炎と拡散火炎の補完機構が局所消炎回復機構に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。拡散火炎に対して乱流渦が局所消炎回復に重要な役割を果たしていることが指摘されていることから、予混合拡散複合火炎の局所消炎回復に対する乱流の影響を調べることも必要である。1・2節で述べたように、複合火炎の局所消炎回復現象を対象とした研究は、拡散火炎に比べて少なく、特に、希薄予混合拡散複合火炎に対しては局所消炎回復機構を明らかにした研究は報告されていない。そのため本研究では、希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構および乱流による影響に着目して、乱流対向流中の希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎回復機構について検討する。

1・4 本研究の特色

本節では、関連する先行研究と比較した際の本研究の特色を要約する。

- ・希薄予混合拡散複合火炎を対象としている点。

1・1節で述べた複合火炎を非均質燃焼場の微小要素と捉える理論は複数の先行研究で述べられている。本研究の特色は、上記のモデルに基づいて各種複合火炎の研究状況を独自に分析し、希薄予混合拡散複合火炎に着目した点である。非均質燃焼場の微小要素としての観点から考えると各種の複合火炎の重要性は等しいにも関わらず、希薄予混合拡散複合火炎は他の複合火炎と比較して研究例が非常に少ない。本研究では、非均質燃焼場の学術モデル完成の障害である希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎現象を明らかにする。

- ・予混合火炎単独の条件から拡散火炎単独の条件までを対象としている点。

複合火炎を扱った先行研究では、予混合気が伝播性を持たない条件、すなわち拡散火炎が支配的な条件を対象にする事が多い。複合火炎の特色は、予混合火炎単独から拡散火炎単独までの遷移過程である。本研究の特色は、予混合火炎単独から拡散火炎単独まで燃料条件を連続的に変化させて遷移過程を明らかにしている点、および遷移過程の検討に最適な対向流場を選択している点である。

- ・複合火炎を対象に層流火炎と乱流火炎の適用性を検証している点。

複合火炎の消炎を対象とした先行研究は層流場を対象とした研究がほとんどであり、それらの研究は乱流火炎の局所が層流火炎と同様であるとする層流火炎片理論に基づいている。予混合火炎単独および拡散火炎単独の条件では層流火炎片理論の検証が行われているのに対して、希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎現象については層流火炎と乱流火炎の適用性は検討されていない。層流複合火炎と乱流複合火炎の双方について検討し、その適用性について明らかにしている点が本研究の特色である。

- ・局所燃焼速度を用いた局所消炎計測。

多くの先行研究では、局所消炎の計測に火炎の中間生成物等を計測するレーザー誘起蛍光法が用いられている。カメラの感度およびレーザー出力の問題から、現在までに局所消炎の発生過程を時系列的に計測可能な時間分解能で行われた例は非常に少ない。本研究では、1msという高い時間分解能を持つ独自の局所消炎計測法を提案した。本研究で提案する計測法は、粒子画像流速計測法による局所燃焼速度計測を利用した方法である。この計測法を希薄予混合拡散複合火炎に対して適用することで、局所消炎の発生および回復機構を明らかにした。

1・5 本論文の構成

本論文は、5章から構成されている。

第1章では、緒言、本論文に関連した従来研究、目的および構成を述べる。

第2章では、層流対向流場の希薄予混合拡散複合火炎を対象に消炎時の火炎構造を詳細に調べることで、希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構に着目して、局所消炎発生機構を明らかにする。

第3章では、乱流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎発生時の火炎構造を層流火炎の消炎時の構造と比較することで、層流火炎の局所消炎発生機構の乱流火炎に対する適用性を明らかにする。

第4章では、希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構および乱流の影響に着目して、乱流対向流中の希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎回復機構を明らかにする。

第5章では、第2章から第4章までの議論を総合して、希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎の発生機構および回復機構に関する結論を述べる。

第2章 層流希薄予混合拡散複合火炎の消炎機構

2・1 緒言

第1章で述べたように二重希薄予混合複合火炎や三重複合火炎などでは、補完機構と消炎が密接に関連している事が指摘されている。具体的な補完機構としては、火炎間での熱輸送[7]や、中間生成物の輸送[18]が提案されている。希薄予混合拡散複合火炎については、研究例が少ないため、その補完機構と消炎の関係は明らかになっていない。本章では、実験および計算が乱流火炎に比べて容易なことから詳細な火炎構造の検討に適する層流場を対象に、希薄予混合拡散複合火炎の補完機構に着目して局所消炎発生機構を明らかにする。

2・2 実験装置および方法

2・2・1 燃焼装置

図2・1に対向する燃焼装置の一方を示す。混合室を抜けた混合気は、互いに対向する二つの入り口①から燃焼装置に流入する。燃焼装置に流入した混合気は、拡散筒③、内部にハニカム構造④をもつ爆発避け孔つき整流筒⑤、50メッシュのステンレス金網⑥、絞り比10.5の縮流ノズル⑦を経て、低乱れの様流となる。縮流ノズル出口には、乱流発生多孔板⑧を設置して、流れに乱れを添加できる構造になっている。

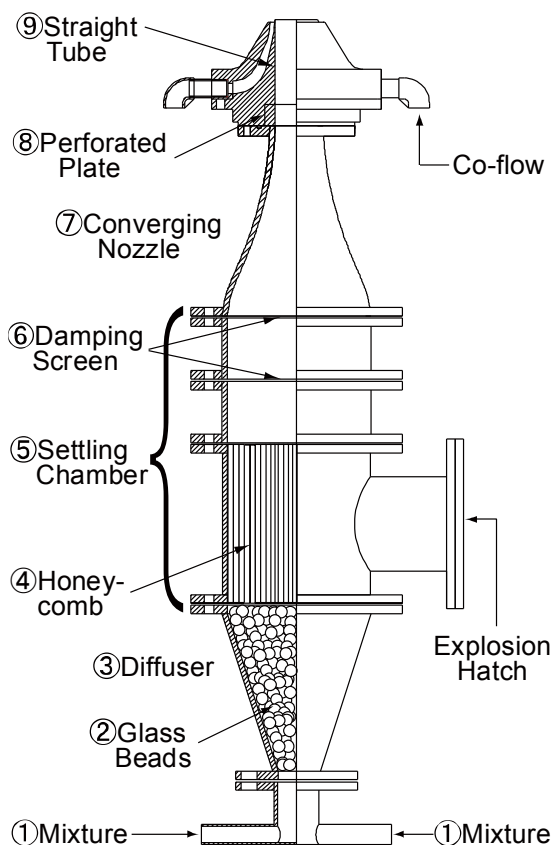


図2・1 燃焼装置

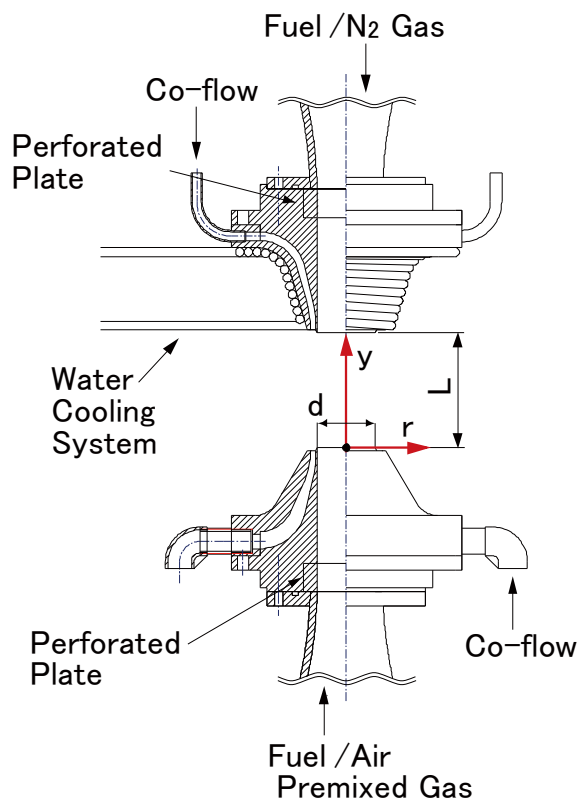


図2・2 テストセクション及び座標系

る。その際、乱れが十分に発達するように 100mm の直管部⑨を設けた。本章では、層流場を対象とするため、スぺーサ(P₀)を設置した。これを上下に対向させることで、燃焼装置全体とする。

2・2・2 テストセクションおよび座標系

図 2・2 に本研究で用いるテストセクションおよび座標系を示す。テストセクションは、上下一組の対向流バーナを用いた。ノズルの出口直径 d は 40mm，上下バーナ出口間隔 L は 80mm である。座標軸は下方バーナ出口を原点にとり，バーナ中心軸に沿って，上向きを y 軸，半径方向に r 軸とした。本実験ではノズル出口での混合気の断面平均流速(\bar{u}_0)は双方 1.0m/s もしくは 2.0m/s とした。よどみ速度勾配(Bulk Strain Rate : $2\bar{u}_0/L$)は $\bar{u}_0=2.0\text{m/s}$ の時 50.0s^{-1} である。図 2・3 は，この燃焼装置により形成した希薄予混合拡散複合火炎の直接写真である。

2・2・3 空気，窒素および燃料の供給系

図 2・4 に空気および燃料の供給経路を示す。空気の供給源としては，出力 3.7kW，最高圧力 7kg/cm^2 のオイルフリー型のレシプロ型コンプレッサ①（日立製作所製：PACKAGE OILFREE BEBICON PO-3.7P）を用いる。コンプレッサが送り出した圧縮空気は，油分および水分を除去するフィルターを通り抜けた後，圧力振動を抑えるためのリザーバタンク②へ送り込まれる。リザーバタンクから出た空気を二つに分岐し，一方は流量調整用バルブとマスフローメータ③で一定流量に調整し，燃焼装置の環状流ノズル④に送られる。他方は，マスフローコントローラ⑤で一定流量に調整し，混合室⑥に送られる。燃料の供給源としては高圧ボンベ⑦を用いる。ボンベから出た燃料は，減圧弁により二次圧を調整し，マスフローコントローラ⑧で一定流量に調整し，混合室⑥に送られる。混合室に送り込まれた空気および燃料はそこで十分に混合され，下方側の燃焼装置⑨に送られる。

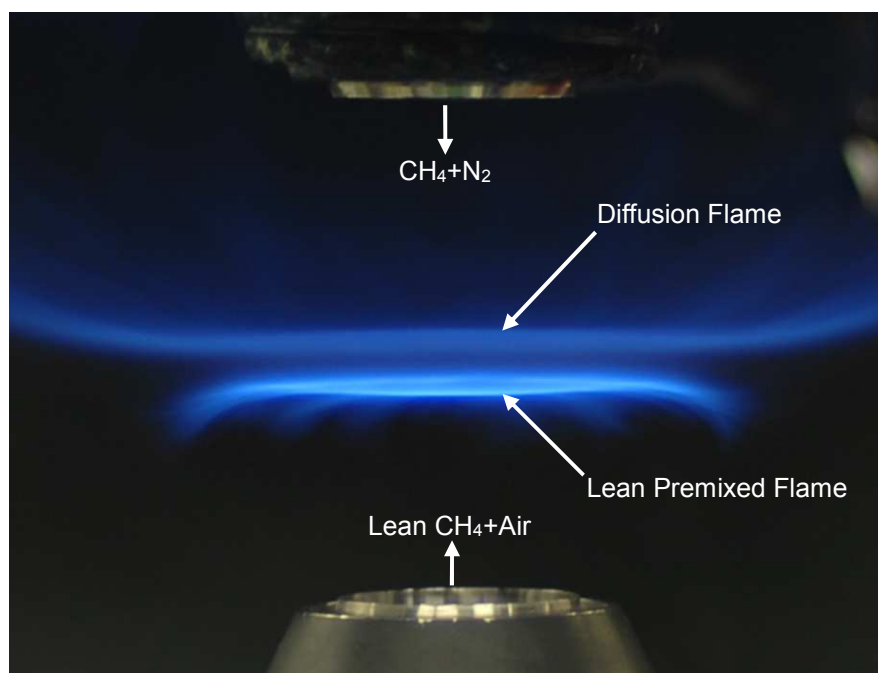


図 2・3 希薄予混合拡散複合火炎の直接写真。

上方側の燃焼装置⑩からは窒素で希釈した燃料流を噴出させる。窒素の供給源としては高圧ボンベ⑩を用いる。燃料と同様、ボンベから出た窒素は、減圧弁により二次圧を調整し、マスフローコントローラ⑭で一定流量に調整し、混合室⑮に送られる。また、燃料の供給源は下方側の燃焼装置と同様に高圧ボンベ⑦を用い、マスフローコントローラ⑬により一定流量に調整し混合室⑮に送られる。混合室に送り込まれた窒素および燃料はそこで十分に混合され、上方側の燃焼装置⑩に送られる。

上下どちら側も、流れの可視化を行なう場合、混合気に散乱粒子を添加するため、燃焼装置に入る直前で二つに分岐し、本流はそのまま燃焼装置へ送られる。支流は粒子添加装置⑰もしくは⑱を通過して本流と合流し、燃焼装置へ送られる。添加する粒子の量は、支流に取り付けられた流量調節弁により調節する。

環状空気の流量調整にはマスフローメータ (Model 3810 : コフロック) を用いる。下方側の主流空気および上方側の主流窒素の流量調整には、マスフローコントローラ (SEC-623 : STEC) を用いる。燃料の流量調整には、マスフローコントローラ (SEC-E50 : STEC) を用いる。マスフローコントローラおよびマスフローメータを PC で制御および情報表示するために A/D および D/A 変換を一括して行なうことのできるシステム (LabVIEW : 日本 National Instruments) を使用した。PC には、8 チャンネルの入力端子をもつデータ集録デバイス (PCI-6024) および 8 チャンネルの出力端子をもつデータ集録デバイス (PCI-6713) の二つを接続し、A/D 変換および D/A 変換を行った。

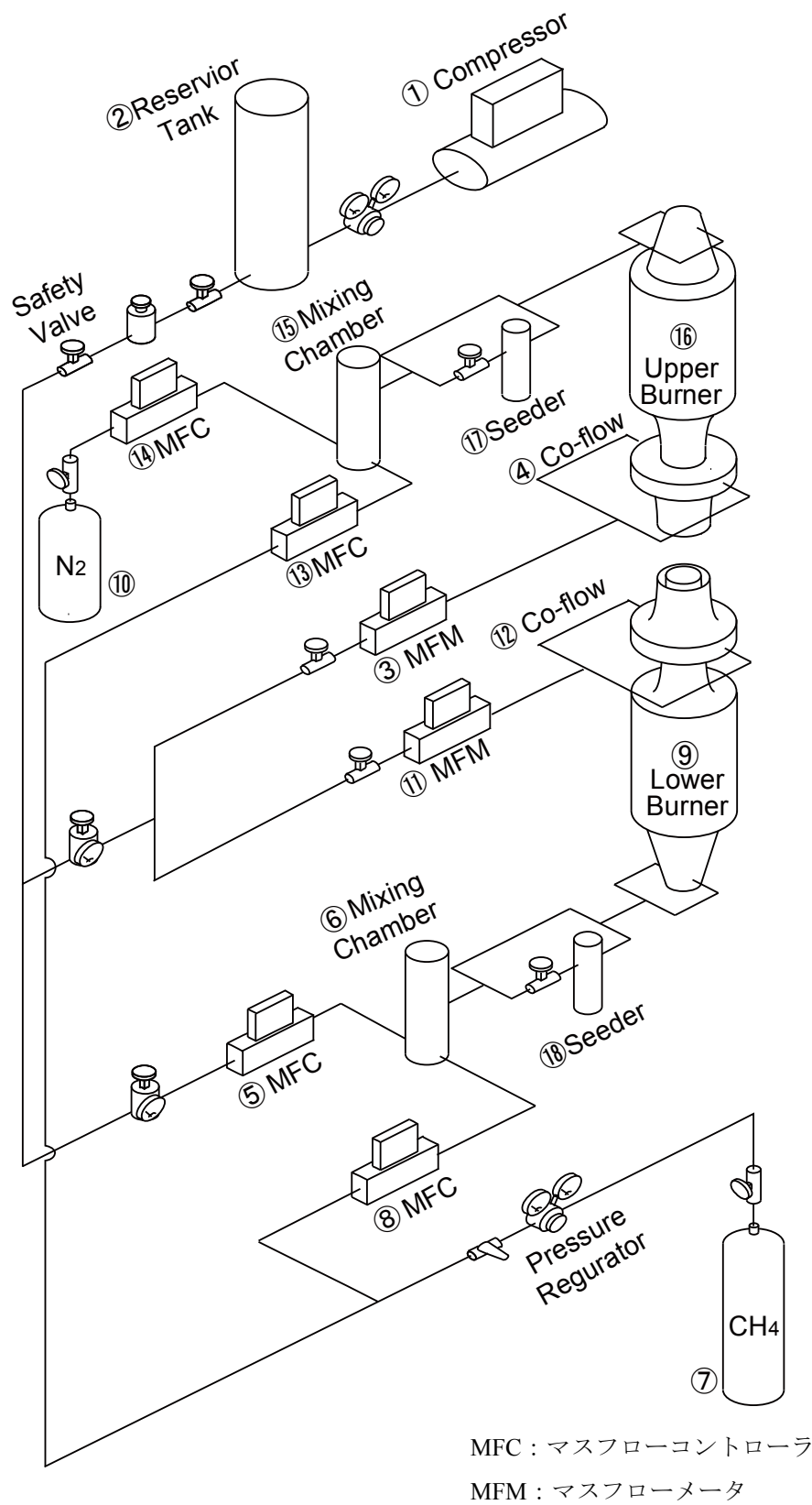


図 2・4 空気，窒素および燃料の供給系

2・2・4 測定装置および方法

火炎温度よりも沸点の低い液滴をトレーサー粒子として予混合気に添加し、液滴の蒸発現象を利用して希薄予混合火炎を可視化した。液滴にはシリコンオイル(公称沸点:300°C)を用いた。液滴添加はペニシリン散布用ネブライザーを用いて行った。液滴径は約1 μ mである。シリコンオイル添加が燃焼場の化学反応に影響しないことが確認されている。

上下の流れが衝突する衝突面を可視化するために、上方燃料流側にアルミナ粒子を添加した。アルミナ粒子は火炎を通過しても蒸発しないため、アルミナ粒子が存在する領域の境界から衝突面を可視化することができる。

光源には、Dual Pulse の Nd:YAG レーザー(SOLO II-30Hz: New Wave Research)を用いた。レーザーの出力は30mJ、波長は532nmである。画像の撮影には、画素数1008 \times 1018ピクセルのCCDカメラ(Megaplus Camera Model ES1.0:日本ローパー)を用いた。レーザーパルス間隔の制御は、パルスコントローラ(DG535: Stanford Research Systems)により行った。

2・2・5 数値計算方法

数値解析は、数値計算ソフトCHEMKIN IV, OPPDIF[48]を、また、化学種としてGRI-Mech3.0[49]を採用した。以下にその詳細について述べる。CHEMKINは、素反応セットと熱物性値のデータベースで構成される。素反応セットには、GRI-Mech3.0を使用した。GRI-Mech3.0には53個の化学種、325個の素反応式が含まれている。

OPPDIFは、実際に対向流場における淀み流線上の燃焼反応を計算するプログラムである。支配方程式に必要な情報は、CHEMKINおよびTRANSPORTから得られる。支配方程式は、1個の状態方程式、1個の運動量の保存式、53個のエネルギー保存式、53個の化学種の保存式で構成される。エネルギーと化学種の保存式が53個になるのは、GRI-Mech3.0を利用しているため、53個の化学種全てに対応する保存式が必要となるためである。OPPDIFでは、これらの式を連立方程式として解く。本研究では、メタンを燃料として用いた際の希薄予混合拡散複合燃焼を対象に対向流場の詳細反応数値解析を用いて検討を加える。従って、対向流場の詳細反応数値解析では、定常火炎、軸対称境界層近似を仮定している。その支配方程式は、以下に示す連続の式、運動量、エネルギー、化学種それぞれの保存式で表される。

連続の式

$$\frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \cdot \rho \cdot v) = 0 \quad (2.1)$$

運動量の保存式

(y 方向)

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial y} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left\{ \frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right\} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \mu r \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right\} \quad (2.2)$$

(r 方向)

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial y} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left\{ 2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right\} \right] + \frac{\partial}{\partial v} \left\{ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right\} + \frac{2\mu}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \quad (2.3)$$

エネルギーの保存式

$$\begin{aligned} \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial y} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \sum_{i=1}^v Y_i V_{i,x} c_{p,i} \frac{\partial T}{\partial y} \right) &- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho r \sum_{i=1}^v Y_i V_{i,x} c_{p,i} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \sum_{i=1}^v h_i \omega_i W_i \end{aligned} \quad (2.4)$$

化学種 i の保存式

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial y} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_i V_{i,x}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r Y_i V_{i,x}) + \omega_i W_i \quad (2.5)$$

ここで y , r は軸方向, 半径方向の座標, u [m/s], v [m/s], T [K] は混合気体の軸方向, 半径方向の速度および温度, p [N/m²] は圧力, ρ [kg/m³] は密度, c_p [kJ/(kgK)] は混合気体の定圧比熱である. μ [Pa·s], λ [mW/(m·K)] は混合気体の粘性係数, および熱伝導率である. Y_i , ω_i , W_i , $c_{p,i}$ はそれぞれ, 化学種 i の質量分率, 生成速度, 分子量および定圧比熱である. また, 各化学種は理想気体であると仮定し, 外力, 圧力拡散は無視できるものとする.

$V_{i,y}$ は化学種 i の y 軸方向の拡散速度であり, 以下の式で示される.

$$V_{i,y} = \frac{\sum_{i=1}^v Y_i}{X_i} \frac{W_i}{\sum_{i=1}^v W_i D_{im}} \frac{\partial X_i}{\partial y} - D_{im} \frac{k_{Ti}}{\rho Y_i T} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.6)$$

右辺第 1 項は濃度勾配に基づく物質拡散, 第 2 項は温度勾配に基づく物質拡散の項である. D_{im} [cm²/s] は混合気に対する化学種 i の拡散係数であり, k_{Ti} は化学種 i の温度拡散係数と拡散係数の比である. GRI-Mech3.0 に含まれる化学種は, 52 個であるため, D_{im} [cm²/s] は 52 個算出されることになる. 連続の式(2.1)を満足する次式で定義される軸対称の流れ関数 $\psi(y, r)$ を導入する.

$$\psi(y, r) = r^2 U(y) \quad (2.7)$$

ここで, U は y のみの関数であるので,

$$r \rho u = \frac{\partial \psi}{\partial r} = 2rU \quad (2.8)$$

$$r \rho v = -\frac{\partial \psi}{\partial y} r^2 \frac{dU}{dy} \quad (2.9)$$

となり, u [m/s], v [m/s]は式(2.8), (2.9)から次式で与えられる.

$$u = \frac{2U}{\rho} \quad (2.10)$$

$$v = -\frac{r}{\rho} \frac{dU}{dy} \quad (2.11)$$

温度 T [K], 化学種 i の質量分率 Y_i が y のみに依存することを考えると, 理想気体の状態方程式から密度 ρ [kg/m³]も y のみの関数となる. その結果, 粘性係数 μ [Pa·s], 熱伝導率 λ [mW/(m·K)], 拡散係数 D_{im} [cm²/s]等の輸送係数も y のみの関数となる.

$$T = T(y) \quad Y_i = Y_i(y) \quad \rho = \rho(y) \quad (2.12)$$

流れ関数を導入することによって, 式(2.1)~(2.13)は, 運動量の保存式

$$\frac{d}{dy} \left[\mu \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dU}{dy} \right) \right] - 2 \frac{d}{dy} \left(\frac{U}{\rho} \frac{dU}{dy} \right) + \frac{3}{\rho} \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 + H = 0 \quad (2.13)$$

エネルギーの保存式

$$dU \frac{dT}{dy} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dy} \left(\lambda \frac{dT}{dy} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_{i=1}^v Y_i V_i c_{p,i} \frac{dT}{dy} + \frac{1}{c_p} \sum_{i=1}^v h_i \omega_i W_i \quad (2.14)$$

化学種 i の保存式

$$2U \frac{dY_i}{dy} + \frac{d}{dr} (\rho Y_i V_i) - \omega_i W_i = 0 \quad (2.15)$$

式(2-17)のように書き表される.

ここで, 式(2.13)の H は半径方向の圧力勾配を表わす定数であり, 固有値として求められる.

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2.16)$$

境界条件は酸化剤吹き出し口中心に座標の中心をとると, 次のように与えられる.

$$y = 0: \quad u = u_O \quad v = 0 \quad Y_i \left(1 + \frac{V_i}{u} \right) = Y_{i,O} \quad T = T_O \quad (2.17)$$

$$y = L: \quad u = -u_F \quad v = 0 \quad Y_i \left(1 + \frac{V_i}{u} \right) = Y_{i,F} \quad T = T_F \quad (2.18)$$

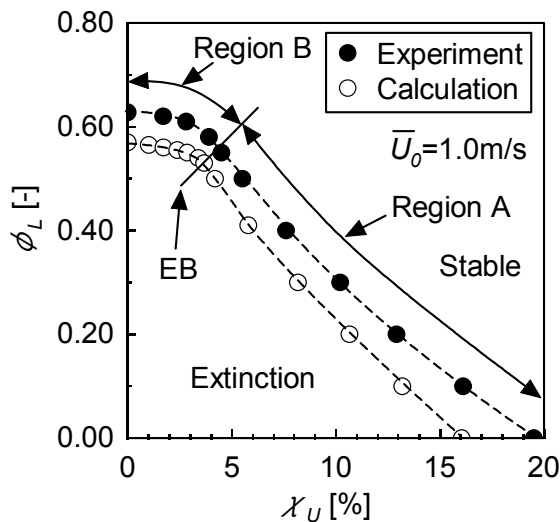
上記のようにして, 導出された方程式に状態方程式を加えた支配方程式を連立して解く.

2・3 結果および考察

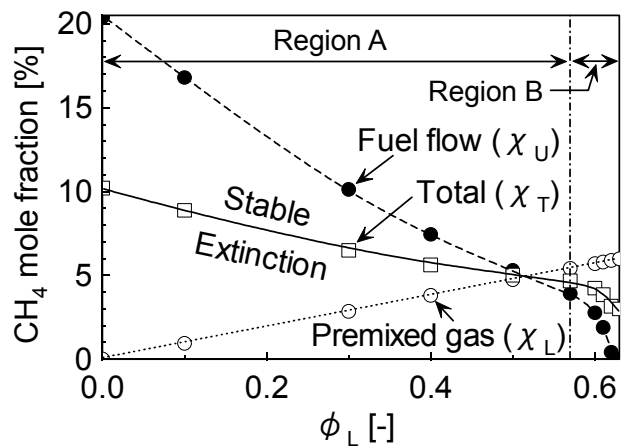
2・3・1 消炎限界

図2・5(a)は実験および数値計算により求めた層流希薄複合火炎の消炎限界である。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。消炎限界はEB (Extinction Boundary)を境界として消炎に対する ϕ_L と χ_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、 χ_U の減少に伴って消炎時の ϕ_L が増加する。この傾向は ϕ_L もしくは χ_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 ϕ_L と χ_U に補完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完関係が一定であることを意味している。Region Bでも ϕ_L と χ_U の補完関係は存在するが、 χ_U が減少するにつれて ϕ_L の増加率が減少している。つまり、 χ_U による ϕ_L の補完効果が減少しており、この領域の消炎限界は主に ϕ_L によって決定される。図2・5(b)は実験により求めた消炎時の全体燃料濃度(χ_T)である。 χ_T は上下流の燃料濃度の平均値と定義した。図中の□プロットは χ_T 、○プロットは希薄予混合気の燃料濃度(χ_L)、●プロットは燃料流の燃料濃度(χ_U)をそれぞれ示す。図中の一点鎖線は図2・5(a)に示したRegion AとRegion Bの境界である。 ϕ_L が高いほど低い χ_T で燃焼可能である。これは、燃料流に比べて予混合気の燃料の方が燃焼領域拡大に効果的な事を示している。Region Aでは χ_L の増加に伴ってほぼ線形的に χ_U が減少するのに対して、Region Bでは χ_L の増加に対する χ_U 減少率が増加する。

消炎限界が2つの領域に分けられるという結果は、EBで希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構が変化していることを示唆している。次項以下では、消炎時の火炎構造を調べることで、消炎限界と補完機構の関係について検討を加える。



(a) ϕ_L と χ_U の関係。



(b) χ_T と ϕ_L の関係。

図2・5 希薄複合火炎の消炎限界。EB : Extinction Boundary。

2・3・2 燃焼ガス幅, 層流燃焼速度と希薄予混合火炎-拡散火炎間隔

燃焼ガス幅(W)とは, 上下の流れが衝突する衝突面と希薄予混合火炎の間隔である. 拡散火炎は燃焼ガス中の衝突面近傍に形成されるため, 希薄予混合火炎と拡散火炎の間の熱および物質の輸送は燃焼ガス中で行われる. W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. 希薄予混合火炎位置は伝播性によって変化するため, W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および S_L について検討した.

図2・6は ϕ_L の変化に伴う消炎限界近傍のW(W_{LE})と S_L (S_{LE})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_{LE} は ϕ_L を固定して χ_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とした. Region Aでは, ϕ_L が変化しても W_{LE} , S_{LE} 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火炎の基本特性と異なっているため, 拡散火炎の影響が加味されていると考えられる. Region Bでは, ϕ_L の増加に伴って W_{LE} が著しく増加し, S_{LE} もほぼ同様な増加傾向を示した. ϕ_L の増加に伴って S_L が増加するという結果は, 単独の予混合火炎の特性であるため,

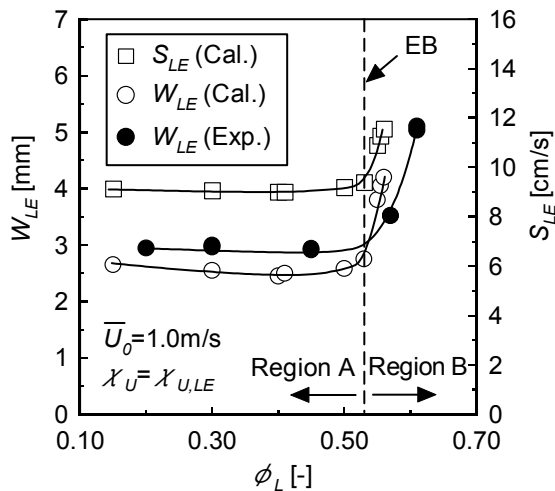


図2・6 燃焼ガス幅(W)および層流燃焼速度(S_L). Cal.: 計算, Exp.: 実験.

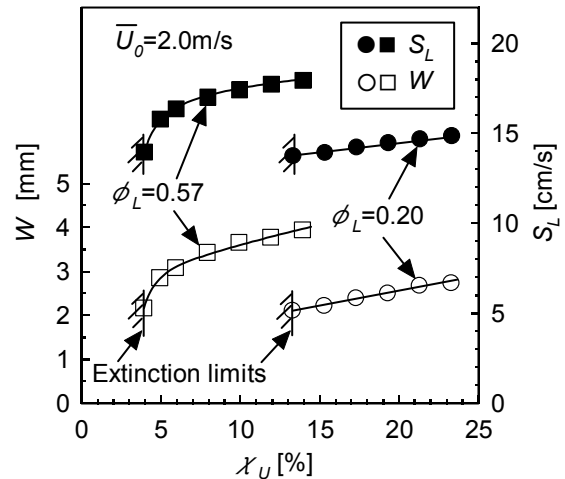
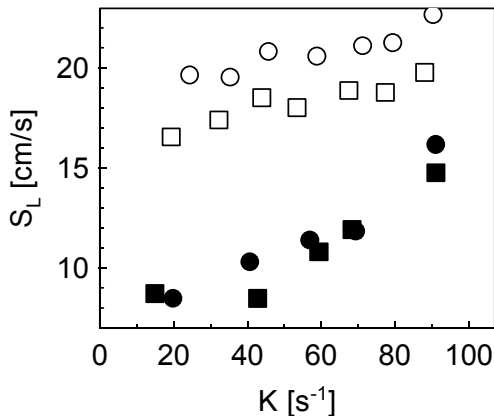
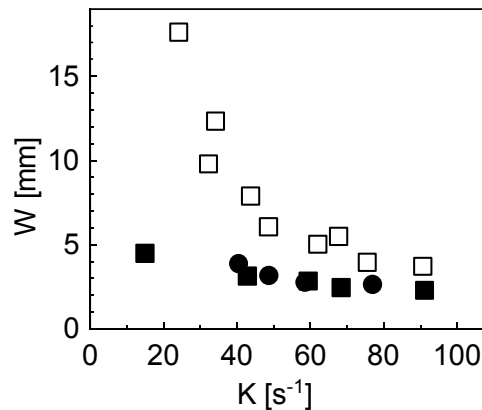


図2・7 消炎に至るまでの燃焼ガス幅(W)と層流燃焼速度(S_L)の変化. 計算.



(a) $S_L - K$



(b) $W - K$

図2・8 層流燃焼速度(S_L)および燃焼ガス幅(W)に対する伸張率(K)の影響. 実験.

○: $\phi_L=0.73, \chi_U=0.0\%$ □: $\phi_L=0.69, \chi_U=3.0\%$ ●: $\phi_L=0.30, \chi_U=13.2\%$ ■: $\phi_L=0.10, \chi_U=21.0\%$.

Region B の希薄複合火炎は予混合火炎の特性を強くもっていることを示している。Region B での W_{LE} の変化の原因として、 ϕ_L によって S_{LE} が変化し、その結果希薄予混合火炎位置が変化したためであると考えられる。

Region A で ϕ_L によらず S_{LE} が一定になるという図 2・6 の結果の原因として、消炎限界に沿って燃料条件を変化させるために ϕ_L の減少に伴って χ_U を増加させており、この χ_U の変化が S_L に影響を及ぼした可能性を考えた。そこで、 ϕ_L を固定して χ_U を消炎限界近傍 ($\chi_{U,LE}$) まで減少させた際の W と S_L の数値計算結果を図 2・7 に示す。固定した ϕ_L の値は Region A の 0.20 と、Region A 中の EB 付近の 0.57 である。 ϕ_L が一定であっても χ_U の減少に伴って S_L が減少しており、複合火炎の S_L は ϕ_L だけでなく χ_U の影響も受ける事が分かる。Region A で S_{LE} が ϕ_L によらず一定になった原因は、 ϕ_L の減少による S_L の減少を χ_U の増加が補完したためであると考えられる。

乱流燃焼場では乱流運動によって火炎の局所的な伸張率は変動するため、伸張率が複合火炎に及ぼす影響を調べる必要がある。図 2・8(a) は、LPF 側の未燃焼ガス流速の勾配から定義した伸張率 (K) と S_L の関係である。 \bar{u}_0 を 0.5~2.0m/s の範囲で変化させることで K を可変した。対象とした燃料条件は、Region A の $\phi_L=0.10, \chi_U=21.0\%$ および $\phi_L=0.30, \chi_U=13.2\%$ 、Region B の $\phi_L=0.69, \chi_U=3.0\%$ 、比較対象とする LPF 単独の $\phi_L=0.73, \chi_U=0.0\%$ である。□プロットで示した Region B では、 K の増加による S_L の増加率は○プロットで示した LPF 単独の条件とほぼ等しい。これに対して、●および■プロットで示した Region A では、 K の増加による S_L の増加率は LPF 単独の条件よりも大きい。図 2・8(b) は、 K による希薄複合火炎の W の変化である。対象とした全ての条件で K の増加に伴って W は減少している。この結果は、 K が増加するほど補完強度が強くなることを示唆している。これが図 2・8(a) で示した K の増加による S_L 増加の原因と考えられる。Region A の方が Region B に比べて K の増加による S_L の増加率が大きいにも関わらず、 K の増加による W の減少率が小さい点が興味深い。

それぞれの火炎に対して CH 濃度が極大となる位置を火炎位置と定義すると、希薄予混合火炎および拡散火炎を境界として W を 3 つの距離に分割できる。すなわち、シリコンオイル消失面 (SOV) と希薄予混合火炎の間隔、希薄予混合火炎および拡散火炎の間隔 (Δy)、拡散火炎と IS の間隔である。これらの距離はそれぞれ、予混合気と希薄予混合火炎、希薄予混合火炎-拡散火炎間、拡散火炎と燃料流との輸送現象に

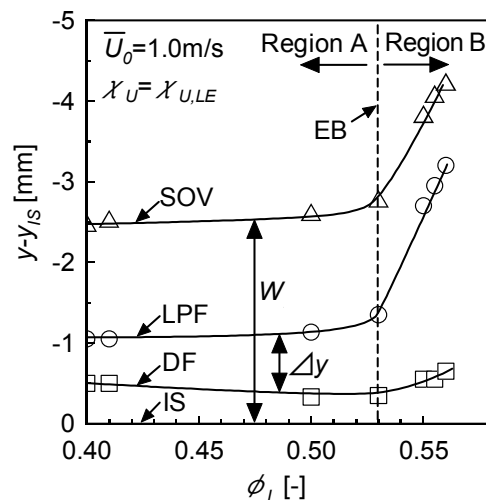


図 2・9 火炎間隔 (Δy) および燃焼ガス幅 (W). $y-y_s=0$ は衝突面。計算。

関連する。W と Δy の関係を検討する事で、W の変化に伴う 3 つの距離の変化の割合を明らかにする事ができる。図 2・9 は消炎限界近傍の希薄予混合火炎および拡散火炎の位置、IS および SOV である。SOV と IS の間隔が W であり、希薄予混合火炎と拡散火炎の間隔が Δy である。縦軸の $y-y_{IS}$ は IS からの相対位置である。 ϕ_L が変化しても W が一定な Region A では、 Δy は一定となる。これは、希薄予混合火炎および拡散火炎の位置が変化しないためである。 ϕ_L の増加に伴って W が増加する Region B では、 Δy は W と同様に变化する。これは、W が変化しても、SOV と希薄予混合火炎の間隔および拡散火炎と IS の間隔はほとんど変化しない事を示している。つまり、W と Δy には正の相関があり、W を調べる事で Δy の傾向を明らかにする事ができる。

2・3・3 温度分布と熱発生率分布

他の複合火炎では、火炎間の熱輸送による補完が消炎に対して大きな影響を与えていることが指摘されている。本項では、温度分布および熱発生率の結果から Region A および Region B の熱補完機構の変化について考察する。

希薄予混合火炎-拡散火炎間の熱輸送は、前節で議論した W と Δy に加えて希薄予混合火炎-拡散火炎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[18]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。

図 2・10 は Region A の代表的な条件の $\phi_L=0.30$, $\chi_U=8.17\%$, および Region B の代表的な条件の $\phi_L=0.55$, $\chi_U=2.85\%$ の数値計算結果を示す。図中には温度、熱発生率、CH モル分率の分布を示す。図中の白丸および黒丸プロットは CH 濃度が極大となる位置から定義した希薄予混合火炎および拡散火炎の位置であり、 \times プロットは最高温度(T_{Max})の位置を示す。図 2・10 (a-1)に示した Region A では、希薄予混合火炎に比べ拡散火炎の方が高温である。図 2・10(a-2)に示したように、熱発生率および CH 濃度の極大値も希薄予混

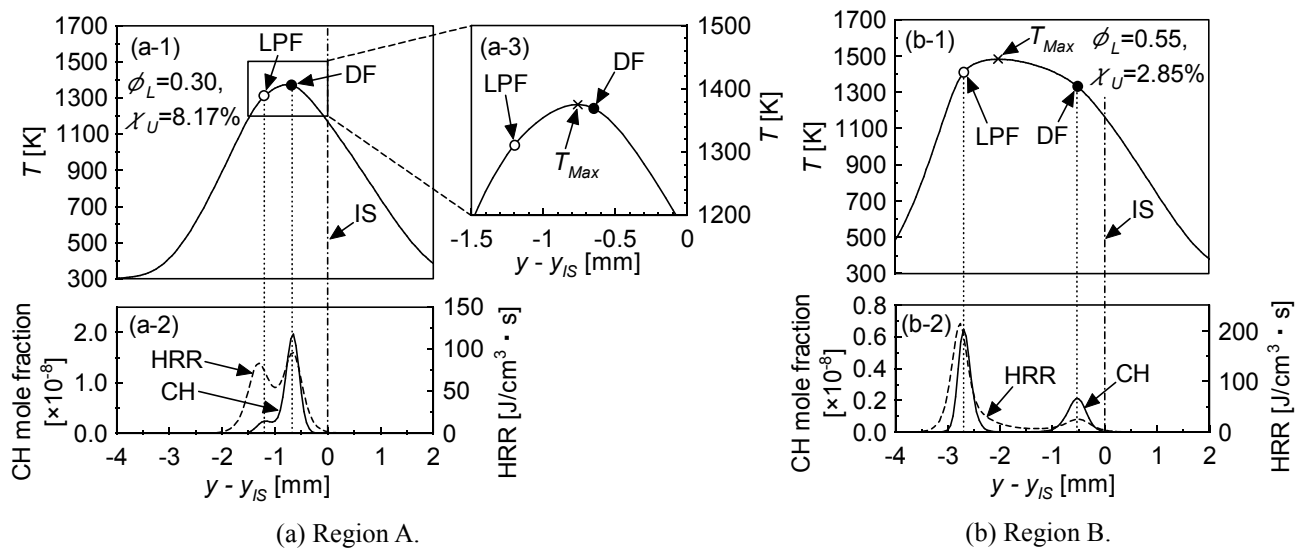


図 2・10 Region A と Region B の典型的な温度分布，熱発生率および CH モル分率分布。HRR：熱発生率。

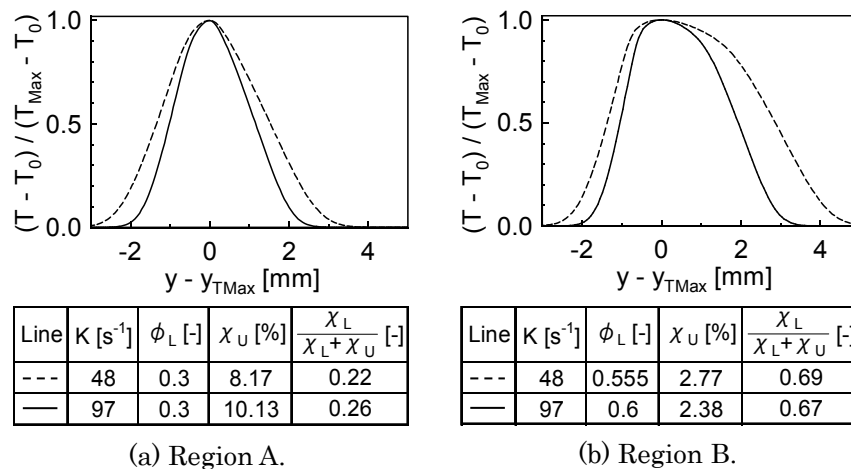
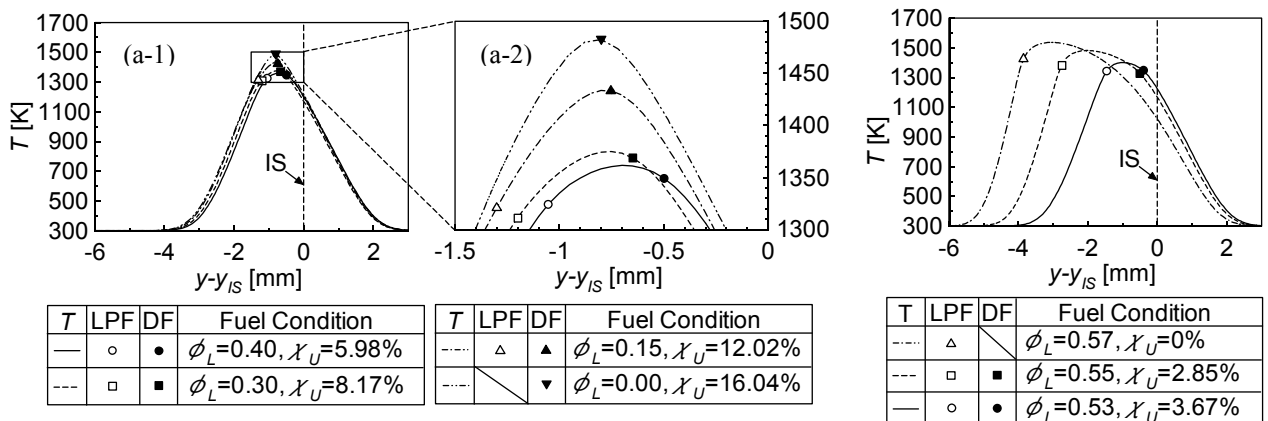


図 2・11 消炎限界近傍の無次元温度分布。計算。

合火炎に比べ拡散火炎の方が高い。希薄予混合火炎-拡散火炎間にも CH は存在しており、その間で発熱反応も生じている。その結果、図 2・10 (a-3)に示すように T_{Max} は希薄予混合火炎-拡散火炎間に存在する。 T_{Max} が希薄予混合火炎-拡散火炎間に存在することから、希薄予混合火炎および拡散火炎は T_{Max} の位置から熱を供給されていると考えられる。したがって、希薄予混合火炎および拡散火炎の双方の火炎が熱的な補完により存在する事を示している。希薄予混合火炎-拡散火炎間の温度勾配は T_{Max} の拡散火炎側より希薄予混合火炎側の方が急である。希薄予混合火炎側の温度勾配が急な事は拡散火炎よりも希薄予混合火炎の方が熱的補完の強度が強い事を示している。他方で、図 2・10 (b-1)に示した Region B では、拡散火炎に比べ希薄予混合火炎の方が高温である。図 2・10 (b-2)に示したように熱発生率および CH 濃度の極大値も希薄予混合火炎の方が高くなる。Region A と同様に T_{Max} は希薄予混合火炎-拡散火炎間に存在するが、 T_{Max} の位置が中心よりも希薄予混合火炎側に存在している点が異なる。したがって、温度勾配は T_{Max} の希薄予混合火炎側より拡散火炎側の方が急である。拡散火炎側の温度勾配が急な事は希薄予混合火炎よりも拡散火炎の方が熱的補完の強度が強い事を示している。図 2・11 は、伸張率(K)が温度分布に及ぼす影響である。図 2・11 (a)は Region A, 図 2・11 (b)は Region B である。図 2・11 (a), (b)共に、K を変化させても温度分布の基本形状は変化しない。この結果は、熱補完の基本的な機構は火炎伸張によって変化しないことを示している。

図 2・12 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 2・12(a)は Region A の温度分布である。図 2・12 (a-1)は火炎帯全体を、図 2・12 (a-2)は最高温度付近を拡大した結果をそれぞれ示す。図 2・12 (b)は Region B の温度分布である。ただし、図 2・12 (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方向(予混合気側)、正の方向が上方バーナ方向(燃料流側)を示している。図中の白プロットは希薄予混合火炎位置、黒プロットは拡散火炎位置を示している。図 2・12(a-1)より、Region A では、 ϕ_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。温度分布は拡散火炎付近を最高温度としたほぼ対称な形状であり、拡散火炎のみを形成した条件(図中の二点鎖線)に類似している。図 2・12(a-2)に示した希薄予混合火炎-拡散火炎間の温度分布に着目すると、 ϕ_L が減少し χ_U が増加するにつれて拡散火炎の温度が増加し、希薄予混合火炎-拡散火炎間の温度勾配が増加している。これは、燃料条件に応じて希薄予混合火炎-拡散火炎間の熱輸送量に変化している事を示している。拡散火炎に比べて希薄予混合火炎の方が熱的補完を強く受けている事から、この領域では希薄複合火



(a) Region A (拡散火炎支配領域).

(b) Region B (希薄予混合火炎支配領域).

図 2・12 消炎時の温度分布. 計算.

炎の消炎に対して拡散火炎が支配的であると考えられる。そのため、Region A を拡散火炎支配領域と定義する。図 2・12(b)に示した Region B では、Region A とは異なり ϕ_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、 ϕ_L を増加させるにつれて希薄予混合火炎位置が予混合気側に移動し、分布は非対称となる。分布の形状は希薄予混合火炎のみを形成した条件(図中の鎖線)とほぼ相似である。希薄予混合火炎に比べて拡散火炎の方が熱的補完を強く受けている事から、この領域の希薄複合火炎の消炎に対して希薄予混合火炎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領域と定義する。

2・3・4 希薄複合火炎の希薄予混合火炎-拡散火炎間の平均温度勾配

前項では、希薄予混合火炎支配領域と拡散火炎支配領域では希薄予混合火炎と拡散火炎が受ける熱的補完の相対強度が異なる点と、拡散火炎支配領域では ϕ_L に応じて希薄予混合火炎-拡散火炎間の温度勾配が変化している点が明らかになった。それらを定量化するために、本項では希薄予混合火炎-拡散火炎間の平均温度勾配($\Delta T/\Delta y$)について検討した。以下の(2.19)式は $\Delta T/\Delta y$ の定義式である。

$$\frac{\Delta T}{\Delta y} = \frac{T_{DF} - T_{LPF}}{y_{DF} - y_{LPF}} \quad (2.19)$$

ここで、 y_{DF} および y_{LPF} は拡散火炎および希薄予混合火炎の火炎位置、 T_{DF} および T_{LPF} はそれぞれの火炎位置での温度を表している。 $\Delta T/\Delta y$ の符号は希薄予混合火炎に比べて拡散火炎の方が高温な勾配を正とした。

図2・13は消炎限界近傍での $\Delta T/\Delta y$ ($\Delta T/\Delta y|_{LE}$)を示す。 $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ についても W_{LE} と同様にEBで傾向の変化が見られるが、その変化は W_{LE} とは逆である。拡散火炎支配領域では $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ は ϕ_L の増加に伴って線形的に減少する。この結果は ϕ_L が高いほど希薄予混合火炎が受ける熱的補完が少ない事を示している。この領域では、 ϕ_L によって W_{LE} が変化しないにも関わらず、 $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ が変化する点が興味深い。この原因は、図2・12(a-2)に示したように ϕ_L および χ_U の変化によって希薄予混合火炎と拡散火炎の温度差が変化するためである。希薄予混合火炎支配領域では $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ がほぼ一定になる。 $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ は負の値、すなわち希薄予混合火炎の方が高温な勾配である。これは拡散火炎が受ける熱的補完が一定であることを示している。 ϕ_L の増加に伴って W_{LE} が増加するにも関わらず $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ が一定になった原因は、希薄予混合火炎と拡散火炎の温度差の変化である。すなわち、 ϕ_L の増加に伴う希薄予混合火炎と拡散火炎の温度差の増加が、 W_{LE} の増加と釣り合うために $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ が一定になったと考えられる。

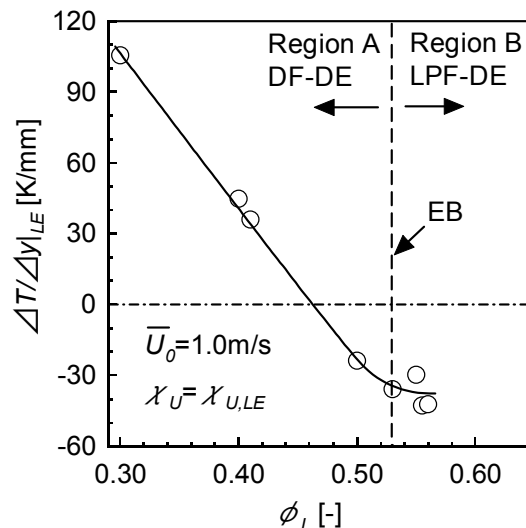


図2・13 希薄予混合火炎と拡散火炎の間の平均温度勾配($\Delta T/\Delta y|_{LE}$)。LPF-DE：希薄予混合火炎支配領域，DF-DE：拡散火炎支配領域。計算。

2・3・5 他の燃焼場との比較

本節では、消炎に対する熱補完機構の影響がすでに明らかになっている他の燃焼場と比較する事で、希薄複合火炎の補完機構を明らかにする。

図2・12(b)に示したように、希薄予混合火炎支配領域では希薄予混合火炎の方が高温であるため、希薄予混合火炎から下流への熱損失が存在する。熱損失量は、拡散火炎の発熱により衝突面近傍の温度が上昇する事で、拡散火炎が存在しない条件と比較して減少していると考えられる。上記の拡散火炎の発熱による希薄予混合火炎の下流熱損失の低減効果が消炎に与える影響を明らかにするために、当量比の異なる希薄 CH₄+Air 予混合気同士を衝突させた場(Twin LPFs)を基準として希薄複合火炎と比較する。図2・14は Twin LPFs と希薄複合火炎の消炎限界の比較である。横軸の x_U は、希薄複合火炎では上方燃料流の燃料濃度を示し、Twin LPFs では上方希薄予混合気流の燃料濃度を示す。縦軸の ϕ_L は、希薄複合火炎, Twin LPFs 共に下方希薄予混合気流の当量比である。希薄複合火炎の希薄予混合火炎支配領域では消炎限界は若干の差はあるが Twin LPFs とほぼ一致している。この結果は、希薄予混合火炎支配領域の希薄複合火炎の拡散火炎が消炎に及ぼす影響は Twin LPFs の上方希薄予混合火炎と等しい事を示している。Twin LPFs では希

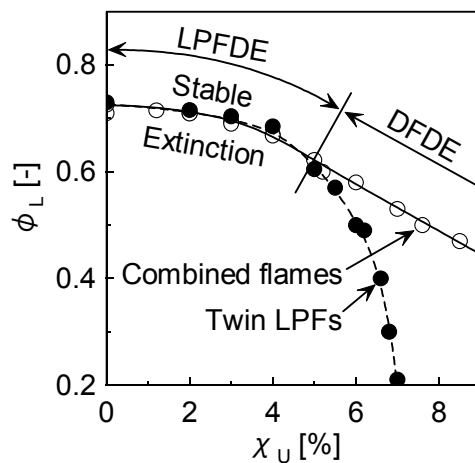
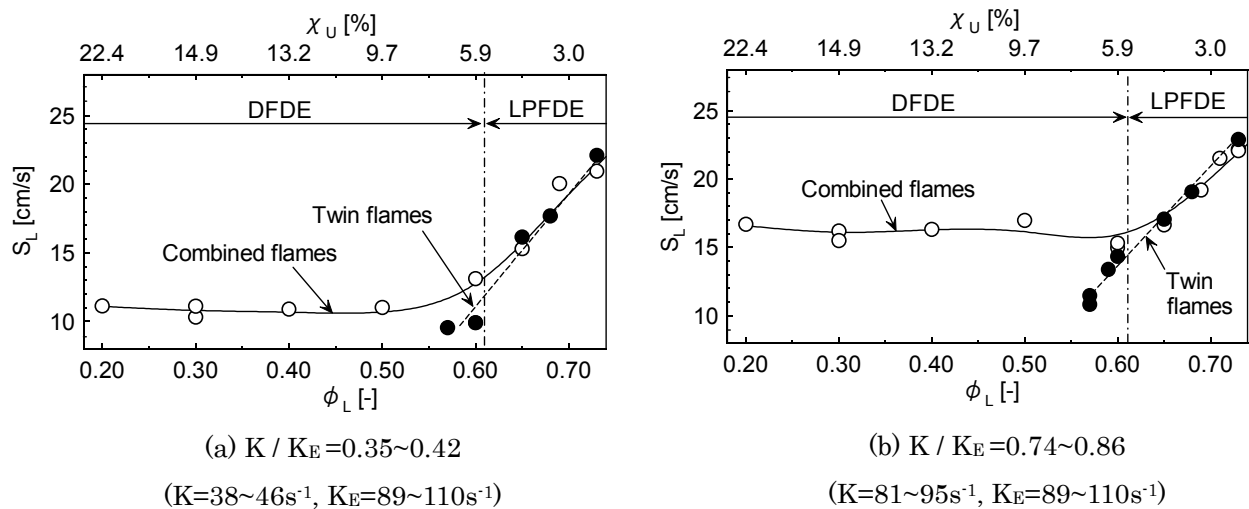


図2・14 希薄複合火炎と双子希薄予混合火炎の消炎限界。実験。



(a) $K / K_E = 0.35 \sim 0.42$

($K = 38 \sim 46 \text{ s}^{-1}$, $K_E = 89 \sim 110 \text{ s}^{-1}$)

(b) $K / K_E = 0.74 \sim 0.86$

($K = 81 \sim 95 \text{ s}^{-1}$, $K_E = 89 \sim 110 \text{ s}^{-1}$)

図2・15 複合火炎と双子火炎の層流燃焼速度の比較。実験。

薄予混合火炎の下流熱損失が消炎に対して重要である事が指摘されている事から[7], 希薄予混合火炎支配領域では希薄複合火炎の拡散火炎は希薄予混合火炎の下流熱損失を低減する事により希薄予混合火炎を熱的補完していると考えられる。

図2・15はTwin LPFsと希薄複合火炎の層流燃焼速度(S_L)の比較である。図2・15(a)は安定領域の $K/K_E=0.4$, 図2・15 (b)は消炎限界近傍の $K/K_E=0.8$ の結果である。 K_E は消炎時の K である。複合火炎では, 下横軸は ϕ_L , 上横軸は χ_U である。双子火炎では上下流の当量比は ϕ_L である。希薄予混合火炎支配領域では, 図2・15 (a), (b)共に複合火炎と双子火炎の S_L はほぼ一致している。この結果は, 複合火炎の衝突面が断熱に近い条件になっている事を示している。このことは, 希薄予混合火炎の下流熱損失が拡散火炎により低減されているという2・3・3節の結果と対応している。拡散火炎支配領域の複合火炎では, ϕ_L によらず S_L がほぼ一定になっている。この結果は, ϕ_L の減少による S_L の減少が拡散火炎により補完されていることを示している。これは, 拡散火炎支配領域では希薄予混合火炎に比べて拡散火炎の方が強く熱補完を受けているという2・3・3節の結果と対応している。

図2・16の ϕ_L を固定して χ_U を変化させた際の消炎燃焼ガス幅(W_E)および消炎局所速度勾配($K_{S,E}$)の変化から, 希薄複合火炎の拡散火炎が消炎に及ぼす影響を希薄予混合火炎と比較する。希薄複合火炎とTwin LPFsの W_E と $K_{S,E}$ はほぼ一致している。この結果は, 図2・15と同様に希薄予混合火炎支配領域の希薄複合火炎の拡散火炎が消炎に及ぼす影響は希薄予混合火炎と等しい事を示している。Twin LPFsでは希薄予混合火炎の下流熱損失が消炎に対して重要である事が指摘されている事から, 希薄予混合火炎支配領域では希薄複合火炎の拡散火炎は希薄予混合火炎の下流熱損失を低減する事により希薄予混合火炎を熱的補完していると考えられる。

図2・12(a)に示したように, 拡散火炎支配領域では, 希薄複合火炎の温度構造は拡散火炎単独の条件に近いが, 拡散火炎に流入する酸化剤は希薄予混合火炎の発熱によって予熱されている。この領域の希薄複合火炎の熱補完機構としては, 希薄予混合火炎の発熱による拡散火炎の酸化剤予熱効果が考えられる。また, 酸化剤の一部は希薄予混合火炎に消費されるため, 拡散火炎に流入する酸化剤流の酸素濃度は低下している。そこで, 拡散火炎による酸化剤予熱効果と酸化剤濃度低減効果の消炎に対する相対的な影響度を

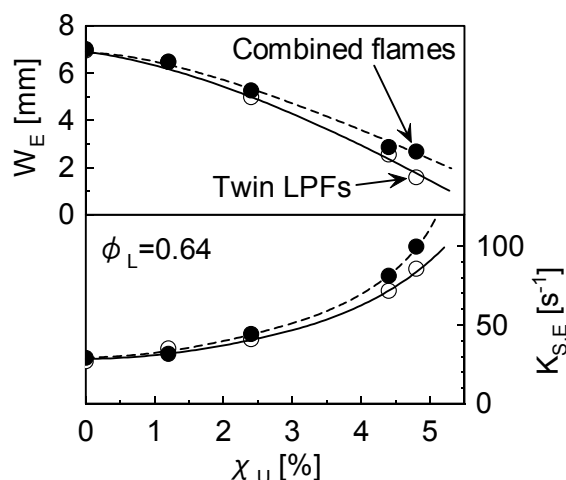


図2・16 複合火炎と双子予混合火炎の消炎時の燃焼ガス幅(W_E)および伸張率($K_{S,E}$)の比較。実験。

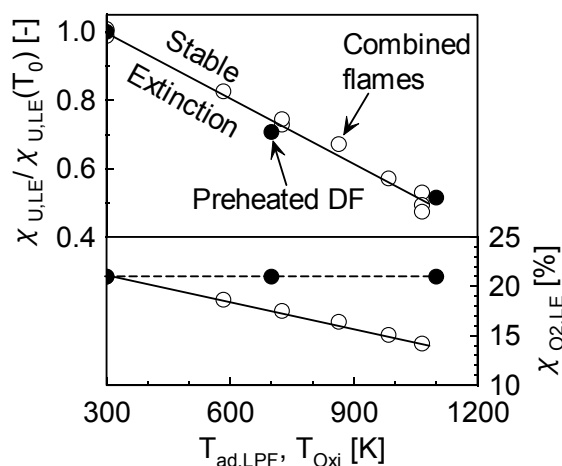


図2・17 希薄複合火炎と酸化剤予熱拡散火炎[5]の消炎時の燃料($\chi_{U,LE}$)および酸化剤($\chi_{O2,LE}$)のモル分率。

明らかにするために、酸化剤予熱拡散火炎と希薄複合火炎の消炎限界を比較した。希薄複合火炎の希薄予混合火炎による酸化剤予熱効果の指標として、CEARUN[50]により求めた希薄予混合火炎の断熱火炎温度($T_{ad,LPF}$)を用いる。予熱拡散火炎の消炎限界は浜津ら[49]の計算結果を用いた。図2・17は、希薄複合火炎の $T_{ad,LPF}$ と拡散火炎の酸化剤温度(T_{Oxi})が消炎限界に及ぼす影響である。左縦軸は、常温(T_0)の酸化剤の拡散火炎の消炎 χ_U で無次元化した消炎 χ_U である。右縦軸は、予熱拡散火炎の酸素濃度およびCEARUNによる希薄複合火炎の希薄予混合火炎の残留酸素濃度である。希薄複合火炎と予熱拡散火炎では、酸素濃度が異なるにも関わらず、無次元消炎 χ_U はほぼ一致する。この結果は、希薄予混合火炎が希薄複合火炎の消炎に及ぼす影響として酸化剤濃度減少効果に比べて酸化剤予熱効果が大きい事を示している。

2・3・6 希薄複合火炎の熱補完機構

2・3・2節から2・3・5節で明らかにした消炎時の火炎構造を整理すると表2・1のようになる。表では ϕ_L を増加させた際の W_{LE} 、 S_{LE} 、 $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ の変化を、増加、一定、減少の3つに分類した。 W_{LE} および S_{LE} の変化と $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ の変化が対照的である。拡散火炎支配領域では、 W_{LE} および S_{LE} は ϕ_L によらず一定なのに対して、 ϕ_L の増加に伴って $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ は減少する。一方で希薄予混合火炎支配領域では、 ϕ_L の増加に伴って W_{LE} および S_{LE} は増加するのに対して、 $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ は ϕ_L によらず一定である。

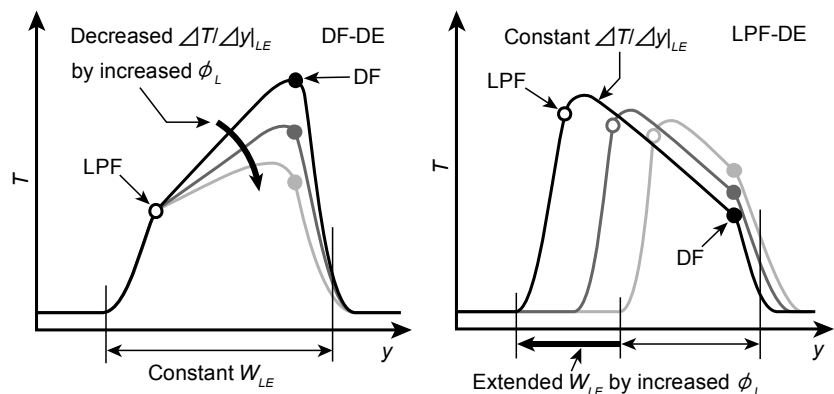
以上の結果に基づいて、図2・18に示す拡散火炎支配領域と希薄予混合火炎支配領域の消炎限界近傍の火炎構造モデルを提案する。

図2・18(a)の拡散火炎支配領域モデルでは、 W_{LE} は一定である。この結果は、このモデルの適応領域では消炎に対して希薄予混合火炎と拡散火炎の間の距離が重要であることを示している。具体的には、希薄予混合火炎に比べて拡散火炎の方が高温であるため、拡散火炎に比べて希薄予混合火炎が希薄予混合火炎-拡散火炎間から受ける熱的補完は大きい。熱的補完によって、 ϕ_L が希薄可燃限界以下であっても希薄予混合火炎は燃焼可能になる。ただし、熱的補完によって S_{LE} は ϕ_L が変化してもほぼ一定となる。すなわち、 ϕ_L が減少するほど $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ が増加するため、希薄予混合火炎-拡散火炎間から希薄予混合火炎への熱輸送量が増加し、 S_L の減少が補完されたと考えられる。

図2・18(b)に示した希薄予混合火炎支配領域モデルでは、 ϕ_L の増加に伴って W_{LE} は増加する。その主な原因は ϕ_L による S_{LE} の変化である。拡散火炎に比べて希薄予混合火炎の方が高温であるため、希薄予混合火炎に比べて拡散火炎が希薄予混合火炎-拡散火炎間から受ける熱的補完は大きい。その結果、拡散火炎は単独では燃焼できない χ_U でも燃焼可能になる。従って、 $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ が一定であるという結果はこのモデルの希薄複合火炎の消炎機構に対して希薄予混合火炎-拡散火炎間から希薄予混合火炎および拡散火炎への熱輸送量が重要であることを示している。

表2・1 ϕ_L の増加による W_{LE} 、 S_{LE} および $\Delta T/\Delta y|_{LE}$ の変化。

	Region A DF-DE	Region B LPF-DE
W_{LE}	→	↗
S_{LE}	→	↗
$\Delta T/\Delta y _{LE}$	↘	→



(a) 拡散火炎支配領域.

(b) 希薄予混合火炎支配領域.

図2・18 消炎時の火炎構造モデル.

2・4 結論

層流対向流場を用いて希薄予混合拡散複合火炎を形成し、その消炎時の火炎構造から希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構に着目して局所消炎発生機構について検討した結果、以下の事項が明らかになった。

1. 希薄複合火炎の消炎限界は2つの領域に分けられる。一方は拡散火炎側の燃料濃度(χ_U)の増加による希薄予混合火炎側の当量比(ϕ_L)の減少率が一定な拡散火炎支配領域であり、他方は χ_U が増加するほど ϕ_L の減少率が増加する希薄予混合火炎支配領域である。
2. 拡散火炎支配領域の火炎構造は、拡散火炎付近を最高温度とした対称な温度分布であり、 ϕ_L を変化させても対称性は保たれる。希薄予混合火炎に比べて拡散火炎の方が高温であるため、希薄予混合火炎は希薄予混合火炎-拡散火炎間からの熱的な補完によって維持されている。 ϕ_L が増加するほど希薄予混合火炎-拡散火炎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。この領域の希薄複合火炎の消炎限界は、酸化剤を予熱した単独の拡散火炎の消炎限界に対応することから、希薄予混合火炎の反応によって拡散火炎に流入する酸素濃度が低減する効果に比べて、酸化剤を予熱する効果の方が消炎に対して影響が大きい。これらの結果から、希薄予混合火炎はその発熱によって拡散火炎の酸化剤を予熱することで熱的に補完している事が明らかになった。
3. 希薄予混合火炎支配領域では、希薄予混合火炎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。拡散火炎に比べて希薄予混合火炎の方が高温であるため、拡散火炎は希薄予混合火炎-拡散火炎間からの熱的な補完によって維持されている。 ϕ_L によって希薄予混合火炎-拡散火炎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 ϕ_L が増加するほど増加する。この領域の希薄複合火炎の消炎限界は、二重希薄予混合火炎の消炎限界と対応していることから、拡散火炎はその発熱によって希薄予混合火炎の下流熱損失を低減する事により熱的に補完している事が明らかになった。

第3章 乱流希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎発生機構

3・1 緒言

第2章では、層流希薄複合火炎の補完機構に着目して局所消炎発生機構を明らかにした。実用燃焼場の多くは乱流燃焼であるため、層流希薄複合火炎の消炎機構の乱流希薄複合火炎の局所消炎に対する適用性を明らかにする必要がある。1・2節で述べたように、火炎同士の補完機構に対しては火炎構造が重要な事が指摘されているため、乱流火炎の局所消炎時と層流火炎の消炎時の火炎構造を比較する事で局所消炎機構の適用性を明らかにできる。この比較を行うためには、乱流希薄複合火炎の局所消炎発生時期を特定する必要があるが、これは容易ではない。局所消炎は発生から数ms~数十msという極めて短い時間で回復するため[41]、その発生時期の特定には、数kHzの繰り返し速度で乱流燃焼場の局所的な化学反応速度を計測する必要がある。

局所的な化学反応速度の計測方法の例としては、レーザー誘起蛍光法(LIF)がある。CHなどの滞留時間の短い中間生成物を対象とすることで、火炎の反応帯を可視化する事ができるため、局所消炎の特定が可能である。しかしながら、これまでに報告されたCHを対象にしたLIF計測は、繰り返し速度は数十Hz程度がほとんどである。数十Hz以上の繰り返し速度で行われた研究例としては、Tanahashiら[52,53]は、数十Hzの時間分解能を持つCH-LIFシステムを2系統用いて、2系統の位相をずらすことで、 $30\mu\text{s}$ から $200\mu\text{s}$ の間隔でCH-LIF計測を行った。この研究は、乱流予混合火炎の局所燃焼速度の計測を目的に行われたため、局所消炎の発生過程を明らかにするために必要な数msの間隔での連続計測は行われていない。

数kHzの時間分解能を持つ火炎の可視化法としては、第2章で用いたレーザートモグラフィー法があるが、局所消炎の定義に以下のような問題点がある[41]。図3・1は局所消炎前後の火炎構造のモデルである。図3・1(a)に示すように燃焼状態では希薄予混合火炎と拡散火炎が連続的に形成されている。図3・1(b)の破線で示すように局所消炎が発生しても、トモグラフィー法は等温線を可視化しているため火炎が存在する部分と区別できない。局所消炎の結果として図3・1(c)に示すように上下の未燃焼ガスの衝突が発生する。局所消炎時期の火炎構造を明らかにするためには、図3・1(b)の局所消炎発生時期を特定する必要がある。第2章で明らかになったように、希薄複合火炎は希薄予混合火炎と拡散火炎が相互に補完して燃焼しているため、一方の火炎のみが消炎する事はない。したがって、一方の火炎の局所消炎を特定することで希薄複合火炎全体の局所消炎を特定できる。乱流予混合火炎の局所的な化学反応速度は、局所的な燃焼速度に対応する。局所燃焼速度とは、湾曲した乱流予混合火炎面の各部が未燃焼予混合気に対して移動

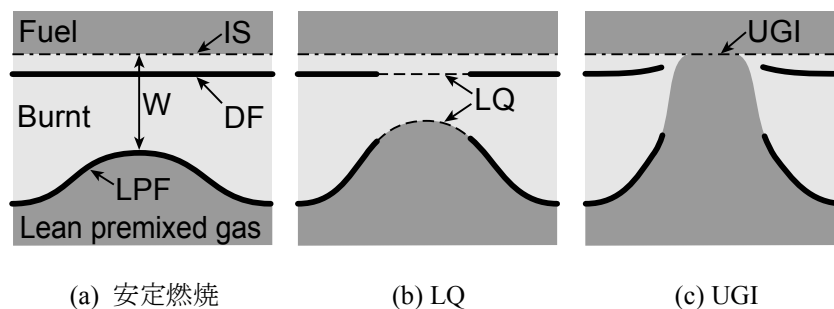


図3・1 上下の未燃焼ガスの衝突(UGI)と局所消炎(LQ). (LPF: 希薄予混合火炎, DF: 拡散火炎, IS: 衝突面).

する速度である。局所消炎が発生していない場合、図 3・2(a)に示すように乱流により湾曲した希薄複合火炎の予混合火炎はそれぞれ伝播している。局所消炎が発生すると図 3・2(b)に示すように局所消炎部位のみが伝播性を失う。したがって、乱流希薄複合火炎を構成する希薄予混合火炎の局所燃焼速度を計測することで、乱流希薄複合火炎の局所消炎時期を特定することが可能であると考えられる。

そこで本章では、局所燃焼速度計測を行うことで局所消炎発生時期を特定し、その時点の火炎構造を層流火炎の消炎時と比較する事で、第 2 章で明らかにした層流火炎の局所消炎機構の乱流火炎に対する適用性を明らかにする。

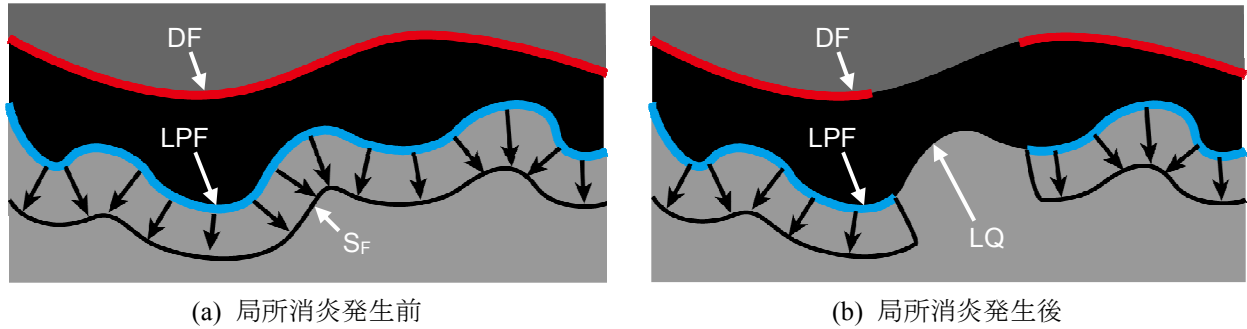


図 3・2 局所消炎発生前後の局所燃焼速度。

(LPF : 希薄予混合火炎, DF : 拡散火炎, LQ : 局所消炎, S_F : 局所燃焼速度)

3・2 実験装置および方法

3・2・1 燃焼器および流路系

燃焼器は第2章で用いたものと同じであるが，上下のノズル出口から100mmの位置に乱流発生多孔板を設置して乱流を添加した．図3・3に乱流発生多孔板の平面図を示す．乱流発生多孔板はいずれも，外径60mm，厚さ20mmである．表3・1にそれぞれの多孔板の穴径(d_0)，穴間隔(d_p)および乱流発生多孔板によって得られるノズル出口での混合気の乱れ強さ(u'_0/\bar{U}_0)，積分長さスケール(l_0)，乱流レイノルズ数(Re_t)を示す．ここで， l_0 は，以下の式で表される．

$$l_0 = \bar{U}_0 \cdot \int_0^{\infty} R_u(\tau) d\tau \dots\dots\dots(3.1)$$

ただし， \bar{U}_0 ：断面平均流速 τ ：遅延時間 $R_u(\tau)$ ：自己相関係数

また，自己相関係数($R_u(\tau)$)は，熱線流速計により測定した速度の変動波形をFFTアナライザ(CF-5210:小野測器)で演算して求めた．なお，積分区間の上限は， $R_u(\tau) = 0$ となる最小の τ で打ち切った．この式によって計算される l_0 は，変動が相関を持ちうる距離を表す代表値であり，乱流の渦運動における渦の大きさの目安として考えられる．乱流レイノルズ数(Re_t)は，以下の式から求めた．

$$Re_t = \frac{l_0 \cdot u'}{\nu_0} \dots\dots\dots(3.2)$$

ただし， ν_0 ：常温における空気の動粘性係数

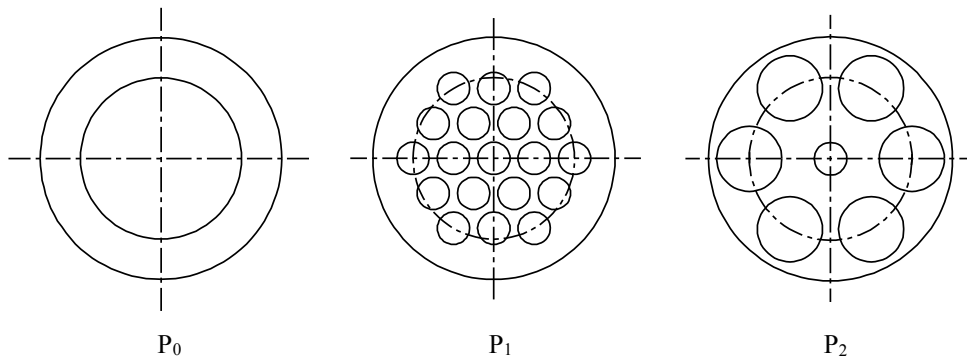


図3・3 乱流発生多孔板

表3・1 各乱流発生多孔板の乱流特性($\bar{U}_0 = 2.0 \text{ m/s}$, $y = 0$)

Perforated Plate	d_0 [mm]	d_p [mm]	u'_0 [m/s]	u'_0/\bar{U}_0 [%]	l_0 [mm]	Re_t [-]
P ₀	—	—	—	—	—	—
P ₁	8	10	0.17	9	2.7	27
P ₂	16	20	0.37	18	2.2	52

P_1 および P_2 によって形成される乱流燃焼場は、Petersの予混合乱流火炎構造のダイアグラムではWrinkled flameletの領域にあたり、しわ状層流火炎の内でも比較的乱れが弱い条件である。

3・2・2 測定装置

乱流希薄複合火炎の瞬間的なトモグラフィ像の撮影には、2章で用いた光学系を用いた。

局所燃焼速度の計測には、数kHzの時間分解能で流れ場を計測する必要があるため、下記の高繰り返しPIVシステムを用いた。

図3・4に本章で使用したPIVシステムの実験装置図を示す。光源は、ハイスピードYLFレーザー(DM10-527: Photonics Industries)を用いた。レーザーの出力は2kHz@7mJであり、波長は527nmである。ハイスピードレーザーはコントロールユニットに接続されており、レーザーの周波数や出力を調節することができる。また、レーザーはチラーを用いて冷却水を循環し、レーザー温度を15.6°Cで一定に保つ。このレーザーにより可視化した画像をハイスピードカメラ(Fastcam-1024PCI 100K: Photron)を用いて撮影した。ハイスピードカメラに搭載されている撮像素子はC-MOSイメージセンサである。このカメラの最大解像度は1024×1024ピクセルであり、濃度表現は10Bitのグレースケールである。本研究では2000fpsで撮影を行った。PIV解析を行なう場合は、2枚で1組のデータとなるため、PIV解析のフレームレートは1000fpsとなる。検査面積は20×20mmとした。このハイスピードカメラはパーソナルコンピュータ(以下、

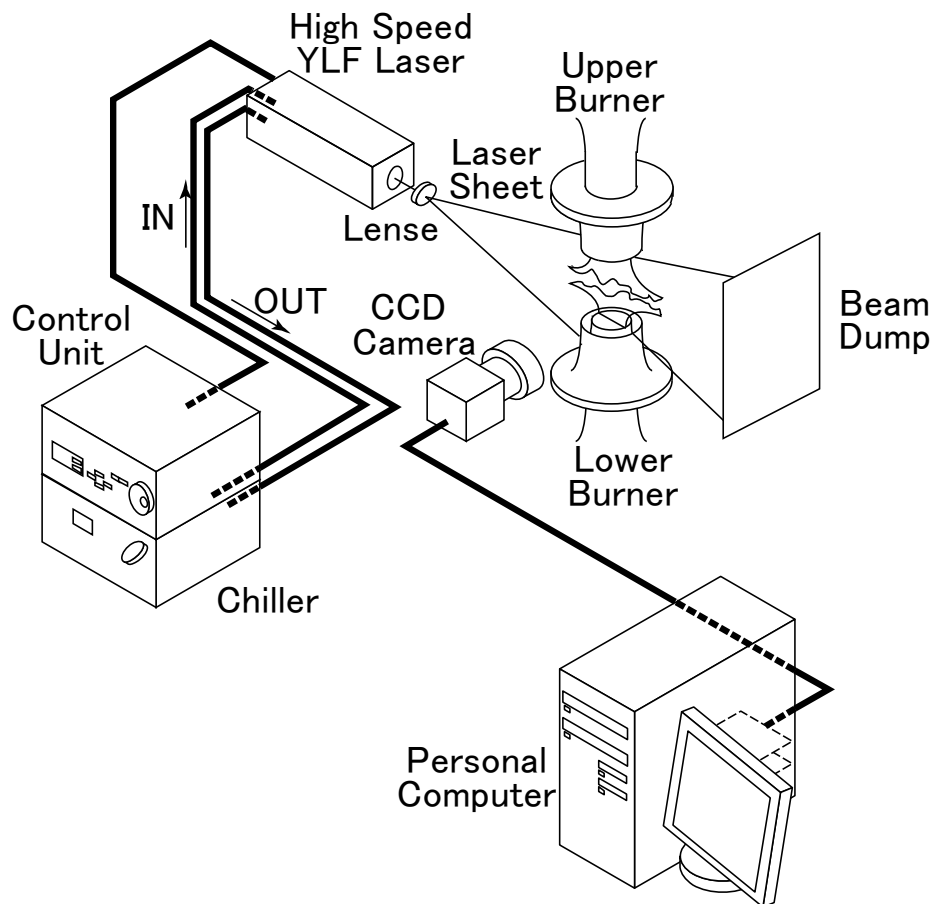


図3・4 PIV実験装置

パソコンとする)に接続されていて、実験中は撮影タイミングなどの制御をパソコンで行なった。撮影した瞬間断面像は、ハイスピードカメラ内のメモリに格納され、ギガビット LAN を用いてパソコンへと送る。トレーサー粒子は、第2章と同様に、希薄予混合気側にシリコンオイル液滴を、拡散火炎側にアルミナ粒子をそれぞれ用いた。

3・2・3 二次元局所燃焼速度計測法

(1) 計測方法

図 3・5 は S_{F2D} の計測方法である。火炎面の下方が予混合気であり、平均的には上方に向かって流れている。時系列二次元 PIV を用いて、図 3・5(a) のような火炎形状および予混合気の流れ場を Δt の時間間隔で計測する。図 3・5(b) のように、 $S_F=0$ と仮定した場合に Δt 後に火炎が対流輸送される位置を予測する。図 3・5(c) のように、この $S_F=0$ を仮定した火炎面と、実際の $t=t_0+\Delta t$ の火炎面の差が火炎伝播距離である。この 2 つの火炎面の距離を Δt で除することで S_{F2D} を求めた。

(2) 三次元計測と二次元計測の幾何学的相違

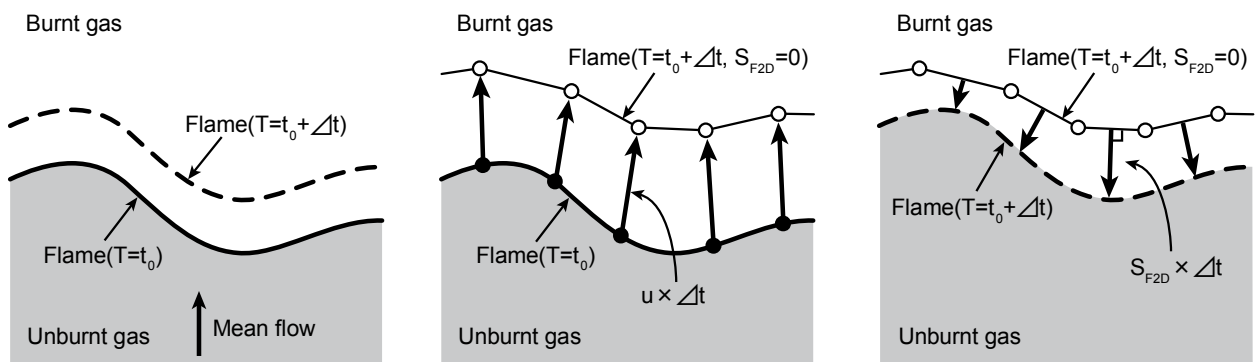
三次元円筒座標 (y, r, θ) で起きている三次元現象の局所燃焼速度 (S_F) と同じ現象を二次元円筒座標 (y, r) で捉えた二次元局所燃焼速度 (S_{F2D}) の相違について幾何学的に調べた。y 軸に対して傾斜した定在平面火炎を対象に、図 3・6(a) に示す $\theta=0^\circ$ 方向の y-r 断面上の二次元局所燃焼速度 (S_{F2D}) を求める。図中に "Flame" と示した火炎の下側が未燃焼ガスであり、上側が燃焼ガスである。未燃焼ガス流速は、y 方向成分を u_y 、 $\theta=0^\circ$ の r 方向成分を u_{r2D} とする。火炎と r 軸の正方向が成す角を α_{2D} とする。火炎が定在している場合、 S_{F2D} は火炎に垂直な方向の未燃焼ガス流速に等しいため、 S_{F2D} は式(3.3)になる。

$$S_{F2D} = u_y \cdot \cos \alpha_{2D} - u_{r2D} \cdot \sin \alpha_{2D} \quad (3.3)$$

次に、火炎が移動している場合の S_{F2D} を求める。観察者から見た火炎の移動速度、すなわち火炎伝播速度は、y 方向成分を v_y 、 $\theta=0^\circ$ の r 方向成分を v_{r2D} とする。火炎が移動している場合、 S_{F2D} は火炎に垂直な方向の未燃焼ガス流速と火炎伝播速度の差であるため、 S_{F2D} は式(3.4)になる。

$$S_{F2D} = u_y \cdot \cos \alpha_{2D} - u_{r2D} \cdot \sin \alpha_{2D} - (v_y \cdot \cos \alpha_{2D} - v_{r2D} \cdot \sin \alpha_{2D}) \quad (3.4)$$

次に、同じ場を図 3・6(b-1) に示すように三次元的に捉えた際の局所燃焼速度 (S_F) を求める。図 3・6(b-2) は、図 3・6(b-1) を y 軸正方向から y 軸負方向に向かって見た図である。火炎の傾きは、図 3・6(b-2) に示す r- θ 面上での火炎傾きの方位角 β と、図 3・6(b-1) に示す $\theta=\beta$ 方向の y-r 面上での火炎傾きの仰角 α で



(a) 二次元時系列 PIV を用いて Δt の時間間隔で火炎形状と予混合気流速分布を計測する。

(b) $T=t_0$ の火炎形状と流速分布から $S_{F2D}=0$ の場合の Δt 後の火炎形状を予測。

(c) (b) の予測の火炎形状と実際の $T=t_0+\Delta t$ の火炎形状を比較し、 S_{F2D} を求める。

図 3・5 二次元 PIV による二次元局所燃焼速度 (S_{F2D}) 計測法。

表す。図 3・6(b-2)に示すように、未燃焼ガス流速の r 方向成分を u_r とし、 u_r と r 軸正方向が成す角を θ_u とする。同様に、火炎伝播速度の r 方向成分を v_r とし、 v_r と r 軸正方向が成す角を θ_v とする。図 3・6(b-2)に示すように、 u_r の $\theta = \beta$ 方向成分を $u_{r\beta}$ とする。同様に、 v_r の $\theta = \beta$ 方向成分を $v_{r\beta}$ とする。 $\theta = \beta$ 方向の y - r 面について式(3.4)と同様に考えると、 S_F は式(3.5)になる。

$$S_F = u_y \cdot \cos \alpha - u_{r\beta} \cdot \sin \alpha - (v_y \cdot \cos \alpha - v_{r\beta} \cdot \sin \alpha) \quad (3.5)$$

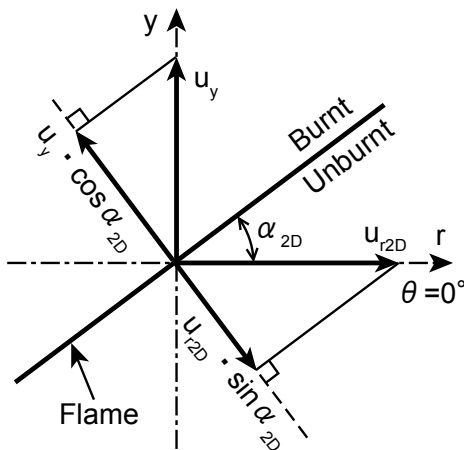
u_r と $u_{r\beta}$ の関係、および v_r と $v_{r\beta}$ の関係はそれぞれ、

$$u_{r\beta} = u_r \cdot \cos(\beta - \theta_u) \quad (3.6)$$

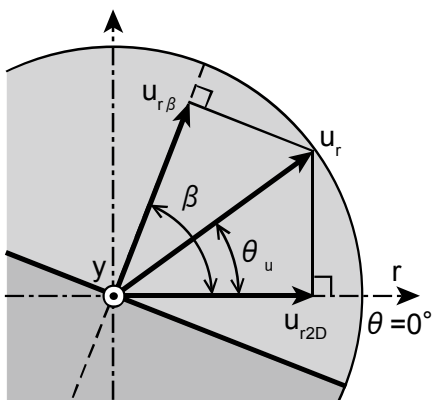
$$v_{r\beta} = v_r \cdot \cos(\beta - \theta_v) \quad (3.7)$$

である。式(3.5)に式(3.6)と式(3.7)を代入すると、

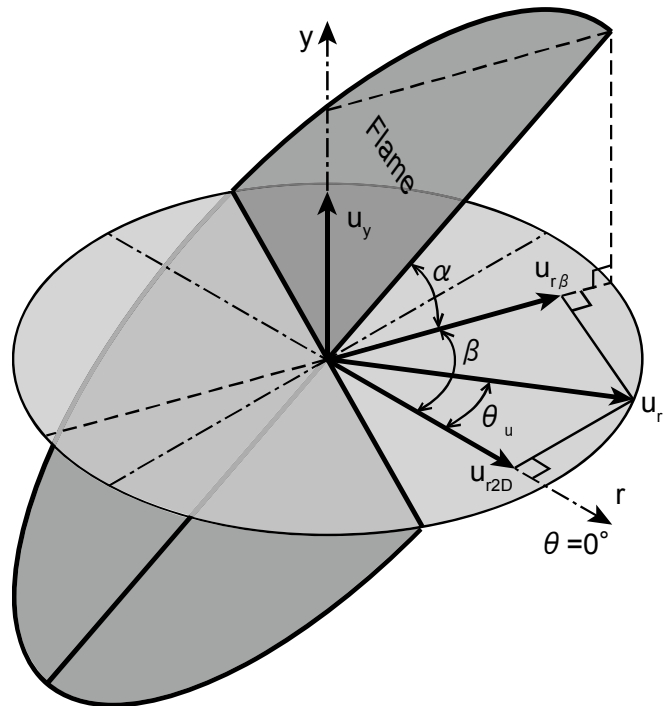
$$S_F = u_y \cdot \cos \alpha - u_r \cdot \cos(\beta - \theta_u) \cdot \sin \alpha - \{v_y \cdot \cos \alpha - v_r \cdot \cos(\beta - \theta_v) \cdot \sin \alpha\} \quad (3.8)$$



(a) 二次元局所燃焼速度.



(b-2)局所燃焼速度.



(b-1)局所燃焼速度.

図 3・6 局所燃焼速度と二次元局所燃焼速度の幾何学的な相違.

となる. α , u_r , v_r とそれぞれの $\theta=0^\circ$ 方向成分(α_{2D} , u_{r2D} , v_{r2D})の関係は,

$$\alpha_{2D} = \tan^{-1}(\cos \beta \cdot \tan \alpha) \quad (3.9)$$

$$u_{r2D} = u_r \cdot \cos \theta_u \quad (3.10)$$

$$v_{r2D} = v_r \cdot \cos \theta_u \quad (3.11)$$

である. 対向流中の乱流火炎の α および u_r を計測し, 式(3.6)および式(3.7)を用いて乱流燃焼場における二次元計測誤差の見積もりを行った. α は, レーザートモグラフィ法により可視化した火炎面の $r < 1\text{mm}$ の区間の近似直線の傾きとした. 近似区間の幅は, 積分スケール大の火炎のしわを捉えられるように決定した. u_r は, PIV により求めた中心軸上の火炎直前の r 方向流速とした. トレーサー, 光源およびカメラは α の計測と同様である. 図 3・7 は, $\phi=0.75$ における乱流条件 P_1 と P_2 の中心軸上の α の PDF である. 図 3・8 は, 図 3・7 と同じ条件の中心軸上の u_r の PDF である. u_r は同燃料条件の層流火炎の燃焼速度(S_L)で無次元化した. 図 3・7 および図 3・8 に基づいてモンテカルロ法により二次元誤差の見積もりを行った. S_F は S_L で一定であると仮定した. α , β , u_r , θ_u は確率的に独立であると仮定した. 図 3・7 の α の PDF は, 同じ標準偏差をもつ正規分布により近似し, ボックス・ミュラー法により乱数を生成した. 図 3・8 の u_r の PDF は, 同じ標準偏差をもつ対数分布により近似し, 逆関数法により乱数を生成した. β および θ_u は軸対称を仮定し一様分布とした. 上記の方法で α , β , u_r , θ_u のそれぞれについて 10000 組の乱数

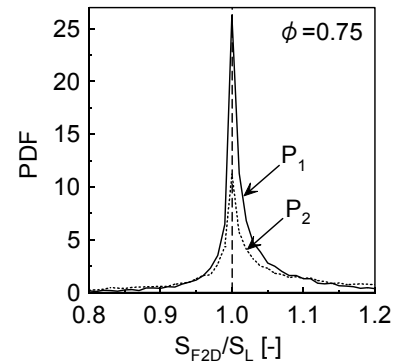
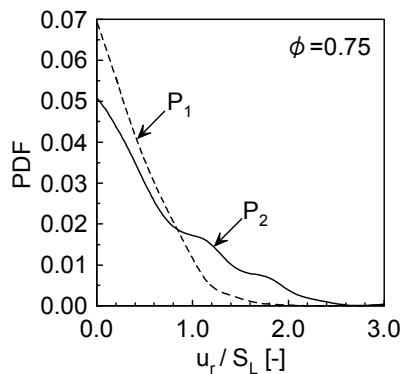
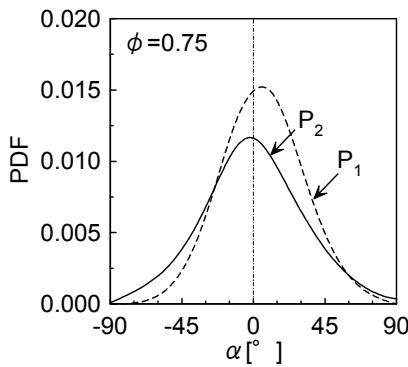


図 3・7 $r < 1\text{mm}$ の平均 α の計測結果. 図 3・8 層流燃焼速度(S_L)で無次元化した中心軸上の u_r の計測結果. 図 3・9 モンテカルロ法による S_{F2D} (S_F は S_L で一定と仮定).

表 3・2 モンテカルロ法により求めた, 乱流条件および ϕ による S_{F2D} の変化.

Turbulence	ϕ [-]	α [°]	u_r/S_L [-]	S_{F2D}/S_L [-]				
		Standard deviation	Average	Average	Mode	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
P_1	0.69	21.0	0.63	1.03	1.00	0.12	0.82	5.41
P_1	0.75	21.2	0.53	1.03	1.00	0.11	0.91	5.60
P_1	1.00	28.5	0.54	1.06	1.00	0.18	1.39	6.31
P_2	0.65	56.3	0.86	1.21	1.00	0.73	2.02	12.45
P_2	0.75	50.8	0.97	1.18	1.00	0.67	1.82	11.02
P_2	1.00	38.2	0.58	1.10	1.00	0.33	1.68	9.24

を生成し、式(3.7)に代入して S_{F2D} を求めた。図 3・9 は S_{F2D}/S_L の PDF である。乱流条件 P_1 , P_2 共に、最頻値は $S_{F2D}/S_L=1$ である。 $S_{F2D}/S_L<1$ に比べて $S_{F2D}/S_L>1$ となる確率が高い正の歪度をもつ分布である。特に P_2 条件は歪み顕著である。表 3・2 は、他の ϕ 条件での α , u_r/S_L , S_{F2D}/S_L を整理した結果である。 S_{F2D}/S_L の最頻値が 1.00 である点と、 S_{F2D}/S_L の歪度が正である点は全ての条件で共通している。 S_{F2D}/S_L の正の歪みの結果として、 S_{F2D}/S_L の平均値は正になる。 S_{F2D} 計測結果から S_F の平均値を推定する際には、 S_{F2D} の平均値ではなく最頻値を用いるべきであると考える。

3・3 結果および考察

3・3・1 二次元局所燃焼速度による局所消炎時期の特定

3・1節で述べたように、乱流火炎の局所消炎時と層流火炎の消炎時の火炎構造を比較することで、局所消炎発生機構の適用性を明らかにできる。火炎構造の内でも W は、第2章で明らかになったように希薄予混合火炎支配領域と拡散火炎支配領域で顕著な違いがある上に、乱流火炎に対しても層流火炎と同様な方法で計測可能な事から、この検討に適している。局所消炎時には局所燃焼速度は0であると考えられるため、 W による局所燃焼速度の変化について検討した。

図3・10は、乱流変動による W の変化が S_{F2D} に及ぼす影響である。実験条件は、 P_0/P_1 , $\phi_L=0.60$, $\chi_U=6.2\%$ である。図中の白線は、トモグラフィ画像より特定した希薄予混合火炎位置を示している。希薄予混合火炎上に示したベクトルの長さはそれぞれの位置での S_{F2D} の値を示している。 S_{F2D} は3・2・3項で述べた方法で計測した。中央部分の W が5~6mm程度の図3・10(a)($t=0ms$)では、 S_{F2D} は20cm/s程度である。 W が3mm程度まで減少した図3・10(c)($t=11ms$)では、 S_{F2D} は30cm/s程度まで増加している。図3・10(d)($t=30ms$)では衝突面が上方へ移動し希薄予混合火炎から離れるために、再び W が増加する。このとき、 S_{F2D} は再び20cm/s程度まで減少している。この結果は、 W が減少するほど S_{F2D} が増加する傾向を示している。乱流による W の変化に応じて乱流複合火炎の S_{F2D} は上記のような変動を繰り返している。続く図3・11では、局所消炎が発生していると考えられる上下の未燃焼ガスの衝突が起こる直前の S_{F2D} に着目する。

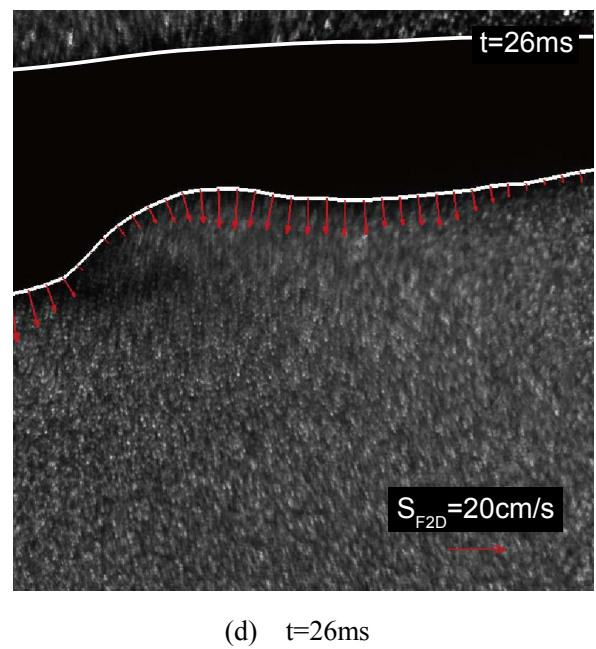
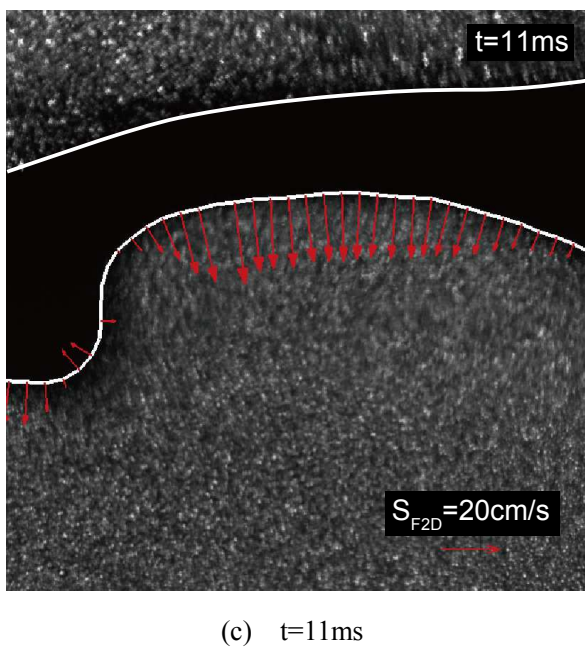
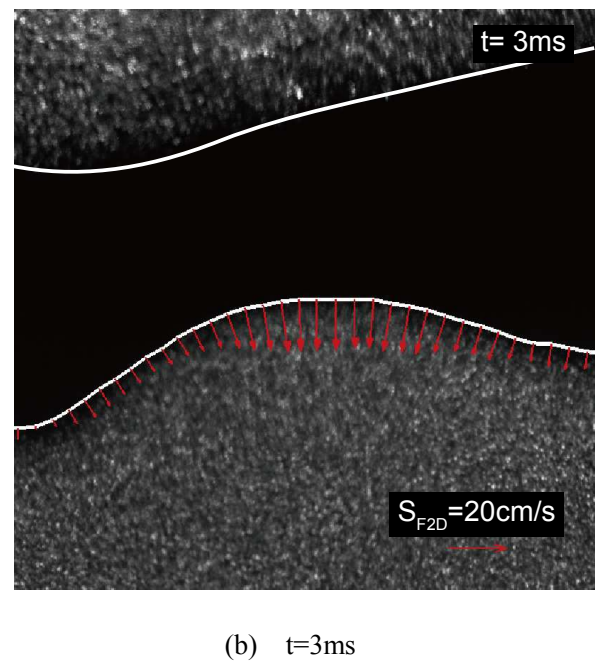
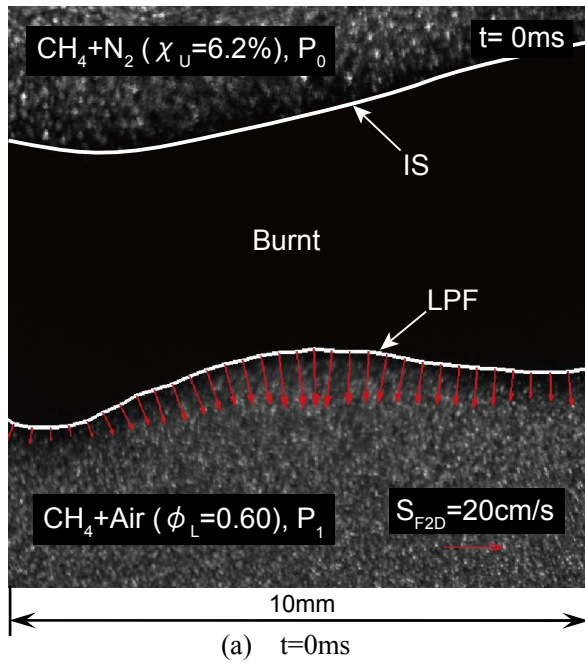


図 3・10 二次元局所燃焼速度(S_{F2D})の空間的な分布. LPF は希薄予混合火炎, IS は衝突面, Burnt は燃焼ガス領域をそれぞれ示す.

図3・11は上下の未燃焼ガスの衝突直前の W と S_{F2D} の変化である。 S_{F2D} は未燃焼ガスの衝突が発生する約0.8mmの領域の平均値である。 W は W_{LE} で無次元化した。 $\tau=0ms$ は上下の未燃焼ガスの衝突時点である。 W が W_{LE} を下回った $\tau=-5ms$ 前後から S_{F2D} は急激に減少し、 $\tau=-3ms$ 以降では S_{F2D} にはばらつきが見られるが、ほぼ0になっている。この S_{F2D} の減少は $W < W_{LE}$ での局所消炎の発生を示している。

S_{F2D} の減少が始まる W を特定するために、1000組のPIVデータを対象に S_{F2D} の最頻値($S_{F2D,M}$)と W の関係について検討した。図3・12にその結果を示す。 $S_{F2D,M}$ は、 W を複数の区間に分割し、各区間での S_{F2D} の最頻値とした。 W によってデータ数が異なるため、 W の確率密度関数(PDF)も同時に示した。 $W/W_{LE}=1$ を境界として $S_{F2D,M}$ と W の関係は大きく異なる。 $W > W_{LE}$ では、 W が減少するほど $S_{F2D,M}$ が増加する傾向がある。一方で $W < W_{LE}$ では、 $S_{F2D,M}$ は18cm/s程度から急激に減少し、 $W/W_{LE}=0.5$ では3cm/s程度になる。 $W/W_{LE} < 0.5$ では $S_{F2D,M}$ がばらついているのは、 W のPDFから分かるように、この領域ではデータ数が少ないためである。

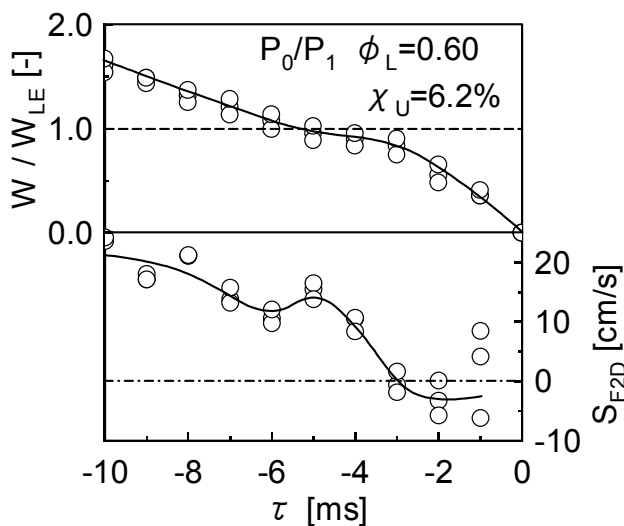


図3・11 上下の未燃焼ガス衝突直前の S_{F2D} と W 。

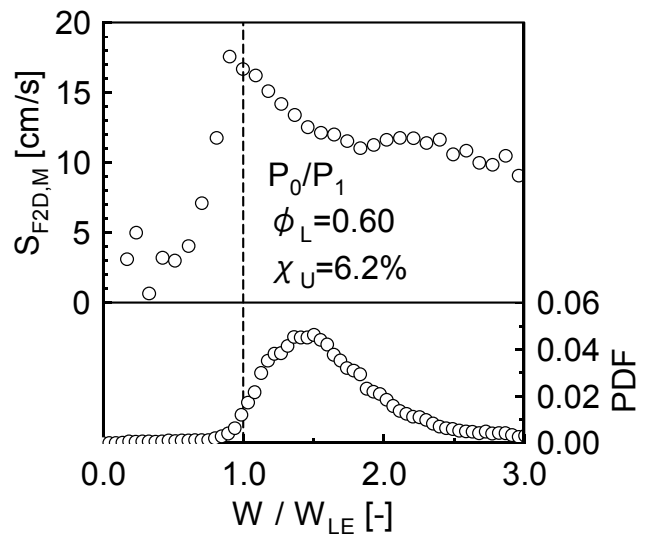


図3・12 W による S_{F2D} の最頻値の変化。

図3・13は、図3・12に基づいた S_F と W の関係のモデルである。図3・13(a)に示す $W > W_{LE}$ の範囲では、 W が減少するほど S_F が増加する。これは W が減少するほど希薄予混合火炎と拡散火炎が接近し、希薄予混合火炎が拡散火炎から熱的な支援を受け反応が促進されたと考えられる。そのため、この範囲では局所消炎は発生していない。図3・13(b)に示すように、 $W < W_{LE}$ の範囲では S_F は急激に減少して0になる。これは、局所消炎の発生を示している。局所消炎の原因は S_F の急激な減少が始まる時点にあると考えられるため、その時点を経路消炎の発生時期と定義すべきである。 S_F の減少が始まる W が W_{LE} とほぼ等しいことから、乱流条件 P_1 においては、乱流希薄複合火炎の局所消炎時の火炎構造は、層流希薄複合火炎の消炎時の構造と等しいと考えられる。このことは、乱流希薄複合火炎の局所消炎に対しても、2章で議論した熱補充に基づく消炎機構が適用可能なことを示している。

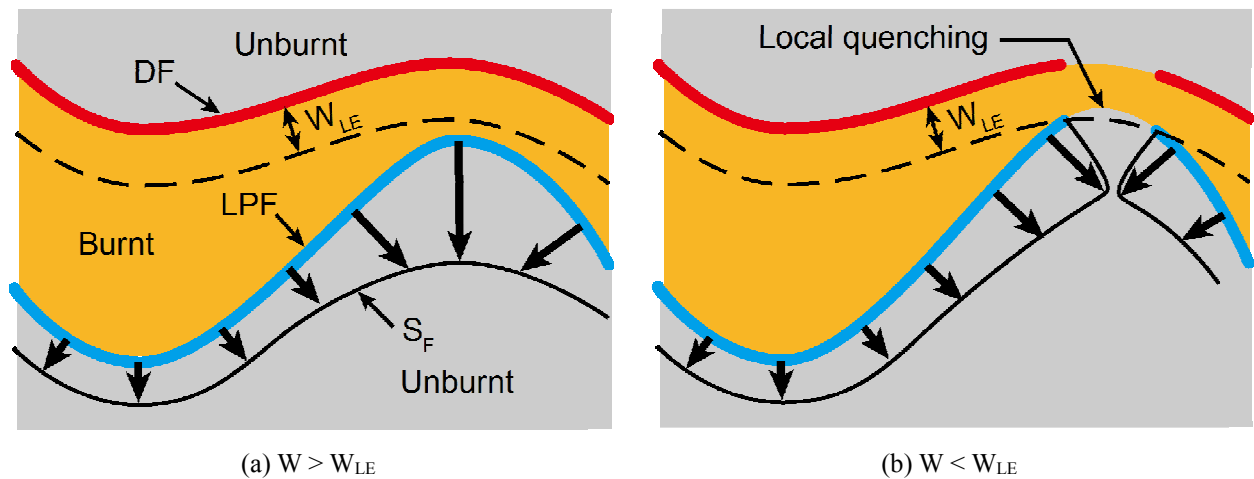


図3・13 乱流複合火炎の局所燃焼速度と燃焼ガス幅の関係。

3・3・2 乱流強度が局所消炎発生時期に及ぼす影響

本節では、3・3・1 項で対象とした P_1 に比べて乱流強度が強い P_2 の局所消炎時期を明らかにすることで、3・3・1 項で明らかにした適用性に対する乱流強度の影響を明らかにする。

図 3・14 は予混合火炎側に P_2 の乱れを添加した際の $S_{F2D,M}$ と W の関係である。図 3・12 と同様に、 $W < W_{LE}$ の領域で W の減少に伴って S_{F2D} が減少する傾向はみられるが、その減少割合は P_1 の結果に比べて緩やかであるため、局所消炎の発生と断定することは難しい。この原因は、 P_2 では P_1 に比べて火炎面の湾曲が大きくなるために、 S_{F2D} の二次元計測誤差が増大したためと考えられる。そのため、以降では W の確率密度関数と局所消炎頻度の関係から局所消炎時期を明らかにし、層流火炎の消炎時と比較する。

まず、図 3・15 に示す W の PDF から局所消炎時期について検討する。図中の黒丸プロットは 3・3・1 項で局所消炎時期を明らかにした P_0/P_1 , $\phi_L=0.60$, $\chi_U=6.2\%$ の条件である。 $W/W_{LE} < 1$ の領域で PDF がほぼ 0 になっているのは、 W_{LE} で局所消炎が発生し、その直後に上下の未燃焼ガスの衝突が発生するためである。そのため、 $W < W_{LE}$ の領域の PDF を比較する事で他の条件でも W_{LE} で局所消炎が発生しているかを明

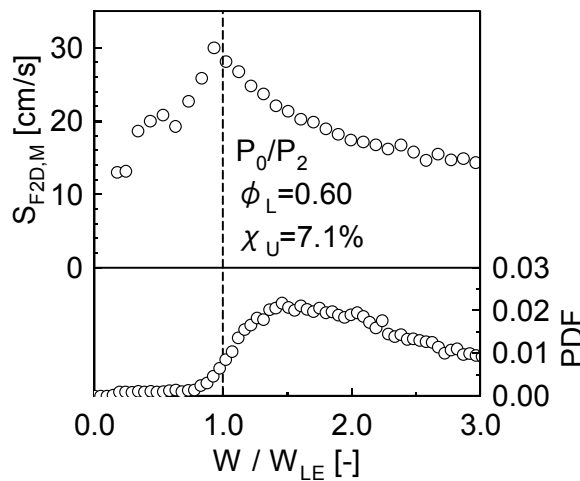
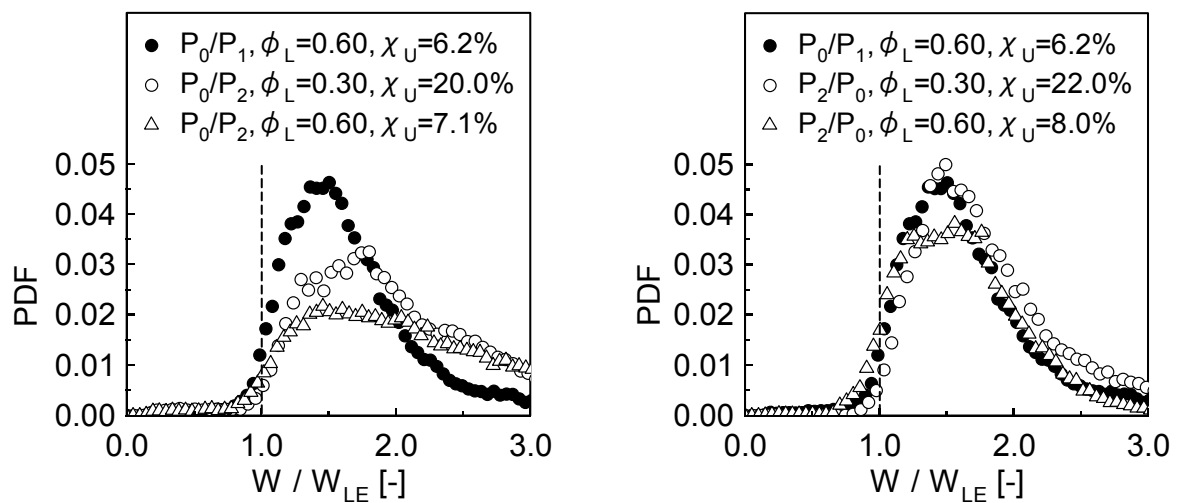


図 3・14 W による S_{F2D} の最頻値の変化。



(a) 希薄予混合火炎側に乱流添加(P_0/P_2).

(b) 拡散火炎側に乱流添加(P_2/P_0).

図 3・15 乱流火炎の W の確率密度関数と層流火炎の消炎 $W(W_{LE})$ の比較。

らかにする事ができる。図中の $\phi_L=0.60$ の条件は希薄予混合火炎支配領域であり、 $\phi_L=0.30$ は拡散火炎支配領域である。図 3・15(a)に示した希薄予混合火炎側に P_2 の乱流を添加した条件(P_0/P_2)では、 $\phi_L=0.30$ 、 $\phi_L=0.60$ 共に P_1 を添加した条件に比べて W が大きい範囲まで PDF が分布しているが、 $W/W_{LE}<1$ で PDF がほぼ 0 になる点は P_1 の条件と同様である。これは、 P_0/P_2 でも、 P_1 の乱れを添加した条件と同様に W_{LE} で局所消炎が発生する事を示している。また、 $\phi_L=0.30$ と 0.60 で上記の傾向が変化しない事は、希薄予混合火炎支配領域と拡散火炎支配領域の両方で W_{LE} から局所消炎時期を特定できる事を示している。図 3・15(b)に示した DF 側に P_2 の乱流を添加した条件(P_2/P_0)でも、(a)と同様に $W/W_{LE}<1$ では W の PDF はほぼ 0 になっている。これは P_2/P_0 の条件についても希薄予混合火炎支配領域と拡散火炎支配領域の両方で $W=W_{LE}$ で局所消炎が発生している事を示唆している。

乱流希薄複合火炎の局所的な W は乱流の影響により、時間的空間的に変化している。乱流希薄複合火炎の局所消炎発生時と層流希薄複合火炎消炎時の火炎構造が等しい場合には、乱流火炎の変動する局所 W の最小値が層流火炎の消炎時の W を下回った際に局所消炎が発生すると考えられる。そこで、乱流希薄複合火炎の局所 W の最小値(W_{Min})と局所消炎頻度の関係を調べた。

図 3・16 は、 ϕ_L を固定して χ_U を減少させた際の W_{Min} および局所消炎頻度(N_{LQ}/N_0)の変化である。図 3・16 (a)は希薄予混合火炎支配領域の $\phi_L=0.60$ で固定した結果を、図 3・16 (b)は拡散火炎支配領域の $\phi_L=0.30$

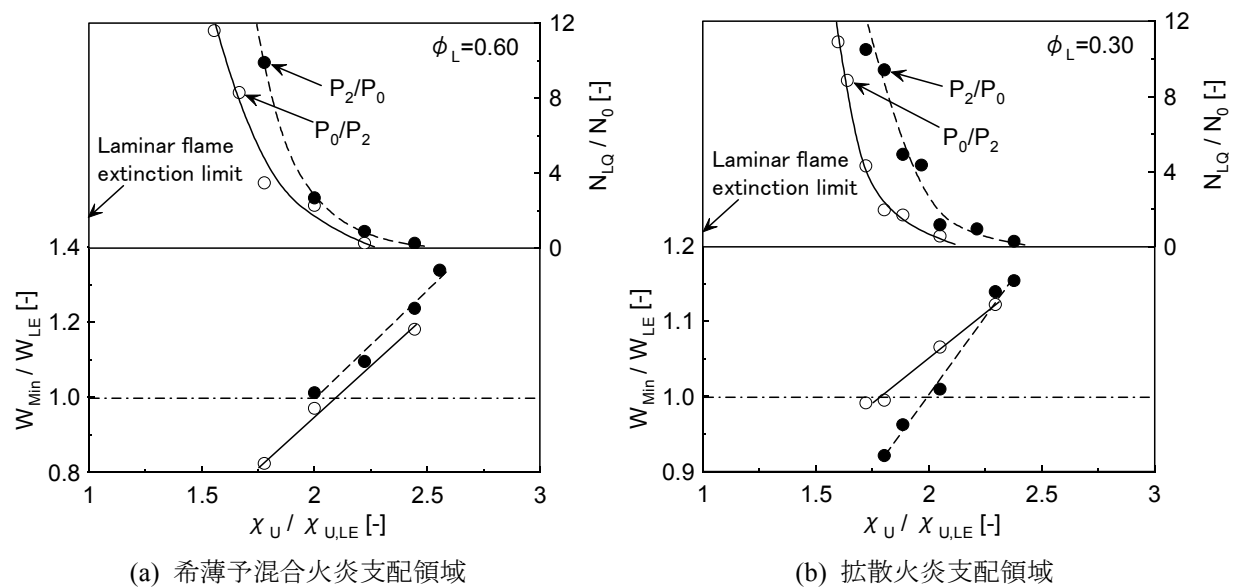


図 3・16 χ_U による W_{Min} と局所消炎頻度の変化

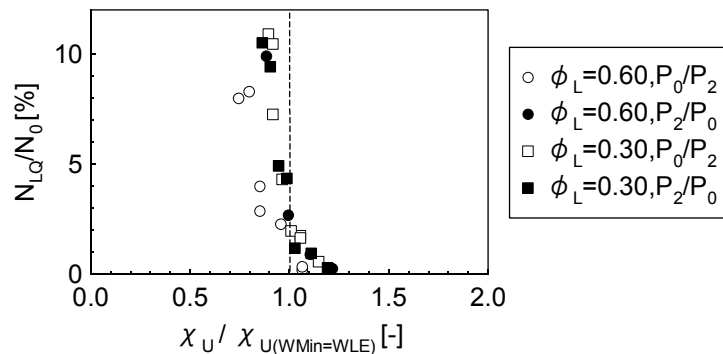


図 3・17 W_{Min} と局所消炎頻度の関係.

で固定した結果を示す。 χ_U は同じ ϕ_L での層流火炎の消炎時の $\chi_U(\chi_{U,LE})$ で無次元化した。 また、 W_{Min} は同じ燃料条件の W_{LE} で無次元化した。 まず、 図 3・16(a) の希薄予混合火炎支配領域の結果に着目すると、 $\chi_U / \chi_{U,LE} = 2$ 付近で局所消炎頻度が急増している。 この時の W_{Min} の変化に着目すると、 χ_U の減少に伴ってほぼ線形的に減少している。 この傾向は層流火炎と同様であり、 χ_U の低下によって局所燃焼速度が低下したためと考えられる。 χ_U の減少によって W_{Min} が減少した結果、 $\chi_U / \chi_{U,LE} = 2$ 付近で W_{Min} が W_{LE} を下回っており、 この χ_U は局所消炎頻度が急増した χ_U とほぼ一致している。 図 3・16(b) の拡散火炎支配領域でも同様な W_{Min} と局所消炎頻度の関係が見られた。 局所消炎頻度が急増する $\chi_U / \chi_{U,LE}$ は、 P_2/P_0 では 2 程度、 P_0/P_2 では 1.8 程度であり、 これは各乱流条件で W_{Min} が W_{LE} を下回る $\chi_U / \chi_{U,LE}$ と対応している。

図 3・17 は、 図 3・16 に示した 4 条件の局所消炎頻度の横軸の χ_U を $W_{Min}=W_{LE}$ となる $\chi_U(\chi_{U(W_{Min}=W_{LE})})$ で無次元化して整理した図である。 対象とした全ての条件で W_{Min} が W_{LE} を下回ると局所消炎頻度が急増することを示している。 この結果は、 乱流希薄複合火炎の局所的な W が W_{LE} を下回ると局所消炎が発生する事を示している。 すなわち、 P_2 条件の乱流希薄複合火炎に対しても層流希薄複合火炎の消炎時の火炎構造が適用可能であることを示している。

3・4 結論

乱流希薄複合火炎に対する層流希薄複合火炎の消炎機構の適用性を明らかにするために、乱流希薄複合火炎の局所消炎発生時と層流希薄複合火炎の消炎時の火炎構造を比較した。対象とした乱流条件は、予混合火炎では層流火炎片領域に分類される P_1 および P_2 の 2 条件である。 P_1 の乱流特性は、乱れ強さ: 0.17m/s 、積分長さスケール: 2.7mm 、積分スケールに基づく乱流レイノルズ数: 27 である。 P_2 の乱流特性は、乱れ強さ: 0.37m/s 、積分長さスケール: 2.2mm 、積分スケールに基づく乱流レイノルズ数: 52 である。比較した火炎構造は、層流場で補完機構によって顕著な違いが現れた、燃焼ガス幅(W)である。乱流希薄複合火炎の局所消炎の発生時期の特定は、二次元局所燃焼速度(S_{F2D})の時系列計測により行った。 W の確率密度関数と局所消炎頻度の関係から、乱流強度が局所消炎と補完機構の関係に及ぼす影響を検討した。その結果、以下の事項が明らかになった。

1. 乱流条件 P_1 における乱流希薄複合火炎の S_{F2D} と W の関係は、同じ燃料条件の層流希薄複合火炎の消炎 $W(W_{LE})$ を境界として大きく変化する。 $W > W_{LE}$ の範囲では W の減少に伴って S_{F2D} は増加するのに対して、 $W < W_{LE}$ の範囲では S_{F2D} は急激に減少し 0 になる。 $W = W_{LE}$ から S_{F2D} の急激な減少が始まるという結果は、局所的な W が W_{LE} を下回ると局所消炎が発生することを示している。また、 $W < W_{LE}$ の領域の W の確率密度関数はほぼ 0 になる。この結果は、 $W = W_{LE}$ の時点で局所消炎が発生し、その直後に上下の未燃料ガスの衝突が発生することを意味している。上記の結果は、予混合火炎支配領域および拡散火炎支配領域の両方に適用可能である。また、予混合火炎側と拡散火炎側のどちらに乱流を添加しても同様な特徴を示す。
2. 乱流条件 P_2 でも、 $W < W_{LE}$ の範囲では W の確率密度関数がほぼ 0 であることから $W = W_{LE}$ の時点で局所消炎が発生していると考えられる。また、燃料濃度の減少に伴って W の最小値が減少し、 W の最小値が W_{LE} を下回った際に局所消炎頻度が急増することも明らかになった。この結果も、 $W = W_{LE}$ で局所消炎が発生することを示している。

これらの結果は、本研究で対象とした乱流強度の範囲では、乱流火炎の局所消炎発生時の火炎構造は層流火炎の消炎時と等しいことを示しているため、乱流火炎の局所消炎に対しても層流火炎の熱補完に基づく局所消炎発生機構が適用可能なことが明らかになった。

第4章 乱流希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎回復機構

4・1 緒言

第2章では、層流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎を対象に消炎時の火炎構造について詳細に検討を加え、希薄予混合火炎と拡散火炎の熱的な補完機構が消炎に対して重要な役割を果たしていることが明らかになった。第3章では、乱流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎を対象に、二次元局所燃焼速度や燃焼ガス幅の確率密度から消炎時の火炎構造について検討を加え、第2章で明らかにした熱補完に基づく局所消炎機構が乱流火炎に対しても適用可能である事を明らかにした。

希薄複合火炎の局所消炎が乱流非均質燃焼場に与える影響を明らかにするためには、上記の局所消炎発生機構に関する知見に加えて、局所消炎からの回復機構についての知見も必要である。特に、熱的補完機構が局所消炎発生に対して大きな影響を与えていることから、熱補完機構が異なる希薄予混合火炎支配領域と拡散火炎支配領域での局所消炎回復機構の違いを明らかにする必要がある。また、拡散火炎に対しては酸化剤側の乱流と拡散火炎側の乱流が局所消炎に対して与える影響が異なることが指摘されていることから、希薄予混合拡散複合火炎に対しても希薄予混合火炎側と拡散火炎側の乱流が局所消炎回復機構に及ぼす影響を調べる必要がある。そのため本章では、乱流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎を対象に、補完機構および乱流の影響に着目して局所消炎回復機構を明らかにする。

4・2 実験装置および方法

第3章で用いたものと同じ装置を用いて実験を行った。局所消炎回復機構に及ぼす乱流の影響を調べるために、乱流強度が強い P_2 を用いた。局所消炎回復機構の検討には、時系列的な可視化が必要なため、計測装置は第3章の二次元局所燃焼速度計測に用いた 2000fps の PIV システムを用いた。

4・3 結果および考察

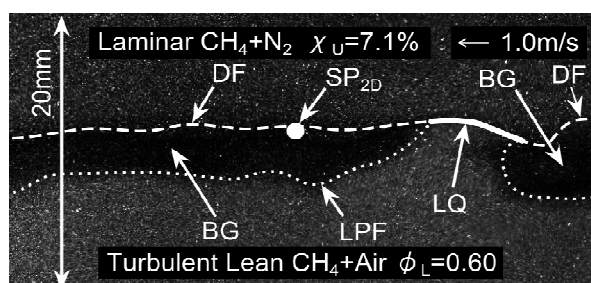
4・3・1 局所消炎とよどみ点

対向流場では火炎の安定点は基本的にはよどみ点にあるため、よどみ点と局所消炎の関係を調べることは重要である[40,42].

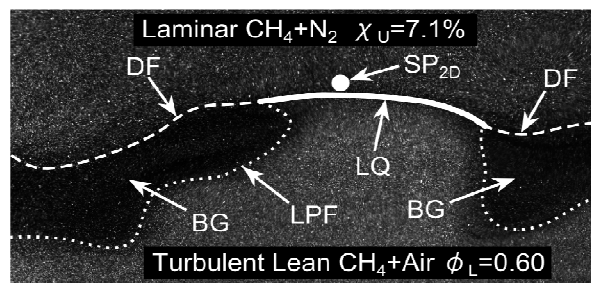
局所消炎は、よどみ点との位置関係から、図4・1(a)および(b)に示す2種類に分類できる.

図中のIS, BG, SP_{2D}, LQは、それぞれ上下の流れの衝突面、燃焼ガス領域、二次元よどみ点、局所消炎領域を示す. 図4・1(a)および(b)では、希薄予混合気側に乱流を添加した. 図4・1(a)に示すように、局所消炎が二次元よどみ点を含まずに発生した場合には、局所消炎領域はよどみ点から離れる方向に対流輸送されるため、火炎は高い確率で局所消炎から回復することができる. 一方で、図4・1(b)に示すように、局所消炎がよどみ点を含んで発生した場合には、局所消炎領域は対向流流れ場によって拡大される. この場合には火炎は局所消炎から回復することが難しく、局所消炎は全体消炎に発展する可能性が高い.

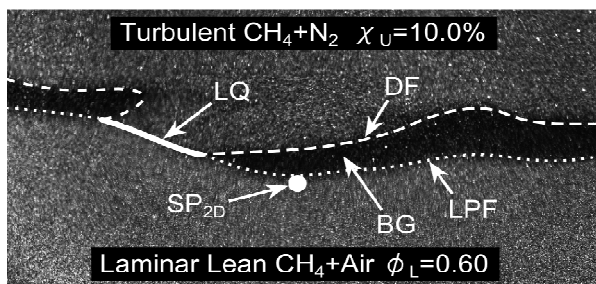
図4・1(c)および(d)に示すように、拡散火炎側に乱流を添加した際にも同様に、二次元よどみ点を含んだ局所消炎と二次元よどみ点を含まない局所消炎に分類できる. 局所消炎発生後の消炎領域の挙動も同様な特徴を示した. しかしながら、局所消炎領域の上下の未燃焼ガスの挙動に着目すると、希薄予混合気炎側に乱流を添加した条件では、下方の希薄予混合気が上昇することで上方の燃料流に衝突しているのに対して、拡散火炎側に乱流を添加した条件では、上方の燃料流が下降することで下方の希薄予混合気流に衝突している点異なる. この事は、乱流添加方法によって局所消炎領域の未燃焼ガスの組成が異なり、局所消炎外縁部の火炎構造が変化していることを示唆している.



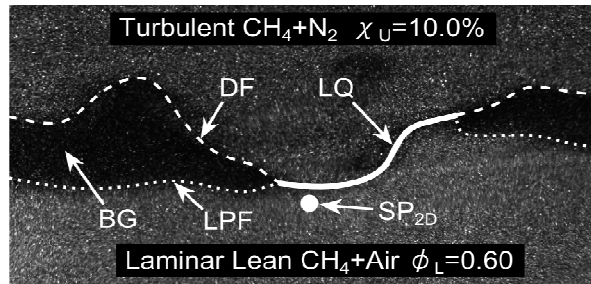
(a) 二次元よどみ点を含まない局所消炎.
希薄予混合気炎側に乱流添加.



(b) 二次元よどみ点を含んだ局所消炎.
希薄予混合気炎側に乱流添加.



(c) 二次元よどみ点を含まない局所消炎.
拡散火炎側に乱流添加.



(d) 二次元よどみ点を含んだ局所消炎.
拡散火炎側に乱流添加.

図4・1 局所消炎とよどみ点の位置関係. LPF, DF および BG はそれぞれ希薄予混合気炎, 拡散火炎, 燃焼ガス領域をそれぞれ示す. IS および LQ は衝突面および局所消炎領域を示す. SP_{2D}は、二次元 PIV により計測した二次元よどみ点である.

4・3・2 局所消炎回復確率に対する乱流強度と熱補完機構の影響

本項では、局所消炎および全体消炎の発生頻度の比較から、熱補完機構および乱流添加方法が局所消炎の回復確率に及ぼす影響を明らかにする。

図 4・2 は、局所消炎および全体消炎頻度に及ぼす乱流条件の燃料条件の影響を示している。熱補完機構の影響を調べるために、燃料条件は、希薄予混合火炎支配領域($\phi_L=0.60$)と拡散火炎支配領域($\phi_L=0.30$)を対象とした。希薄予混合火炎側の乱流と拡散火炎側の乱流の影響を個別に調べるために、乱流は上下流のどちらか一方にのみ添加した。 χ_U は消炎限界の近傍の条件とした。全体消炎の直前2秒間(4000フレーム)の動画撮影を、各条件について2回ずつ行ったため各条件の合計画像数は8000フレームである。図4・2は8000フレーム中の局所消炎および全体消炎の発生回数を示している。

まず、図 4・2 中の①および②の拡散火炎支配領域の結果に着目すると、①の拡散火炎側が乱流の条件に比べて②の希薄予混合火炎側が乱流の条件の方が局所消炎頻度が高い。全体消炎頻度は同じであることから、この結果は、希薄予混合火炎側に乱流を加えた方が局所消炎から回復する可能性が高いことを意味している。すなわち、乱流は局所消炎を誘発する反面、乱流添加方法によっては局所消炎の回復を支援する効果を持つことを示している。

図 4・2 中の③および④に示した希薄予混合火炎支配領域の結果では、希薄予混合火炎側が乱流の条件の局所消炎頻度は、拡散火炎側が乱流の条件の約5倍であり、乱流添加方法による局所消炎確率の違いが顕著である。特に、希薄予混合火炎側が乱流の条件では、二次元よどみ点を含んだ局所消炎からも回復可能である。これら結果は、拡散火炎支配領域に比べて希薄予混合支配領域の方が、より効果的に乱流が局所消炎回復を支援することを示している。

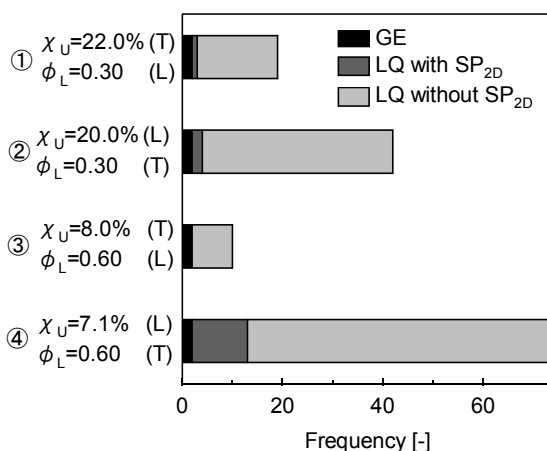


図 4・2 局所消炎および全体消炎の発生頻度。T：乱流， L：層流。

4・3・3 局所消炎外縁部の二次元局所燃焼速度

4・3・1 項で述べたように乱流添加方法によって局所消炎領域の未燃焼ガスの組成は異なると考えられるため、4・3・2 項で明らかにした乱流添加方法による局所消炎回復確率の変化の原因は、局所消炎外縁部の構造の変化であると考えられる。拡散火炎支配領域に比べて希薄予混合火炎支配領域の方が乱流添加方法による局所消炎回復確率の変化が大きいことは、局所消炎外縁部の伝播が局所消炎の回復に対して重要であることを示唆している。そこで、局所消炎外縁部の S_{F2D} 計測を行い、局所消炎の回復と火炎伝播の関係について検討した。

図 4・3 は、局所消炎の発生から回復までの時系列的な S_{F2D} 計測の結果である。図中の上方の白線が拡散火炎、下方の白線が予混合火炎である。予混合火炎に示した赤いベクトルは二次元局所燃焼速度(S_{F2D})を、青いベクトルは未燃焼ガス流速(U_{u2D})をそれぞれ示す。時間 t は局所消炎が発生した時点を中心とした。図 4・3(b) $t=0ms$ の時点で発生した局所消炎は、(c)から(d)にかけて拡大する。この局所消炎拡大期間における図中左側の局所消炎外縁部に着目すると、 S_{F2D} に比べて U_{u2D} の方が速い。その結果として局所消炎外縁部が外側へ対流輸送され、局所消炎部が拡大したと考えられる。(e) $t=25ms$ の時点でも局所消炎の拡大は続いているが、その拡大速度が減少する。この原因は、(d)までは $10cm/s$ 以下であった S_{F2D} が(e)の時点では $20cm/s$ 程度まで増加していることであると考えられる。(f) $t=35ms$ では、乱流運動により局所消炎外縁部の U_{u2D} が右方向へ変化する。 S_{F2D} と U_{u2D} が共に右方向になった結果、(g)から(h)では局所消炎外縁部は消炎領域を収縮させる方向へ移動し、局所消炎は回復する。図 4・3 は局所消炎外縁部の挙動に対する火炎伝播と対流輸送の重要性を示している。そのため、続く図 4・4 および図 4・5 では、局所消炎外縁部の S_{F2D} と U_{u2D} についてより詳細に検討する。

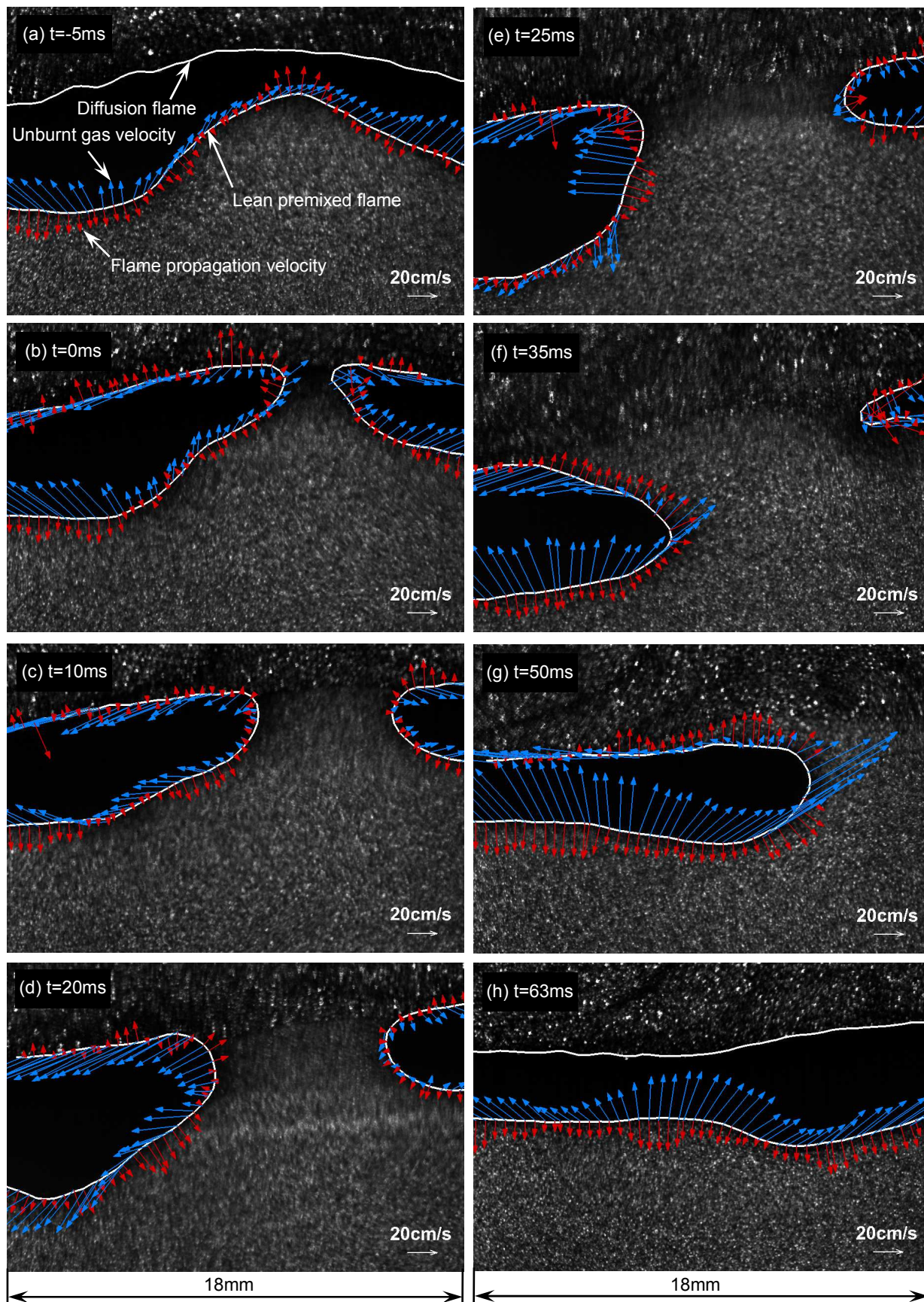


図 4・3 局所消炎回復過程における二次元局所燃焼速度(S_{F2D})および未燃焼ガス流速(u_{u2D}).

図 4・4 は局所消炎外縁部の火炎構造である。実線は燃焼ガスと未燃焼ガスの境界を示す。破線は局所消炎領域を示す。希薄予混合火炎と拡散火炎の境界を特定することは困難なため、y 軸から 180° の範囲の伝播速度を計測した。火炎伝播方向と y 軸のなす角(α_P)は図 4・4 のように定義した。各 α_P における火炎伝播速度と対向する未燃焼ガス流速をそれぞれ S_{F2D} および u_{u2D} と定義した。

図 4・5 は各 α_P における S_{F2D} と u_{u2D} を示す。 S_{F2D} および u_{u2D} は $\alpha_P=0\sim 180^\circ$ の範囲で計測した。図中の実線は S_{F2D} の移動平均を、破線は u_{u2D} の移動平均をそれぞれ示す。図 4・5(a)および(b)は、ひとつの局所消炎回復現象の局所消炎領域の拡大期間と縮小期間の結果をそれぞれ示している。局所消炎拡大期間は、

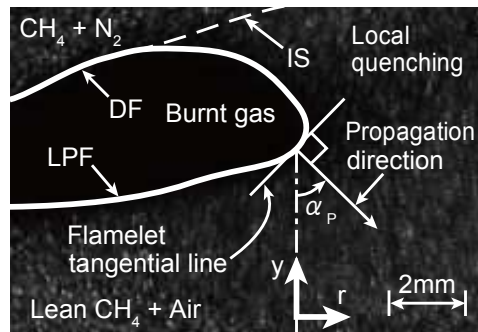


図 4・4 局所消炎外縁部の構造と伝播方向(α_P)の定義。IS：衝突面，DF：拡散火炎，LPF：希薄予混合火炎， α_P ：伝播方向。

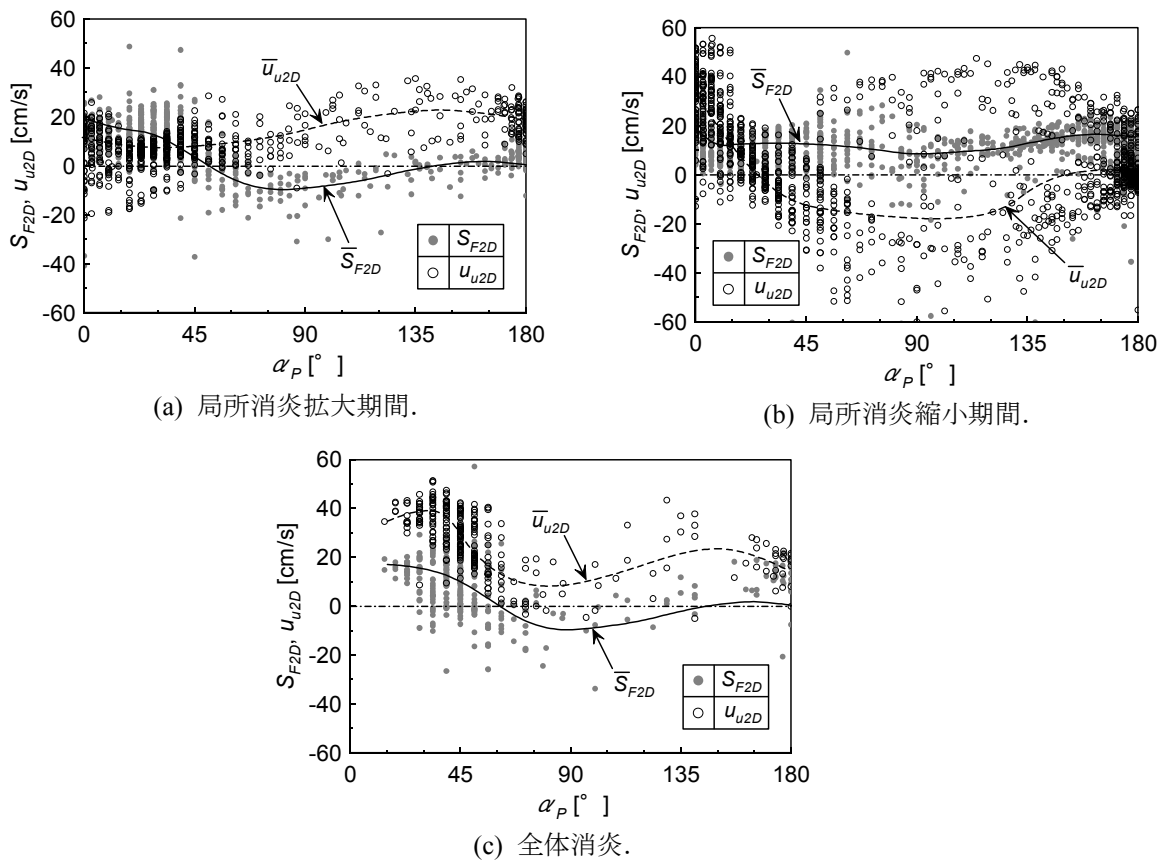


図 4・5 局所消炎外縁部の二次元局所燃焼速度(S_{F2D})および未燃焼ガス流速(u_{u2D})と伝播方向(α_P)の関係。

局所消炎の発生から縮小の直前までの 20ms 間の 40 フレームと定義した。縮小期間は、局所消炎発生から 20~50ms 後の 60 フレームと定義した。図 4・5(c)は、局所消炎が全体消炎に発展する過程の結果である。この例では、局所消炎発生から 17ms 後(34 フレーム)に全体消炎が発生した。図 4・5(a)に示した局所消炎の拡大期間では、 α_P が 60~120° の範囲では S_{F2D} は負の値になっているおり、平均 S_{F2D} は平均 u_{u2D} に比べて遅い。そのため、局所消炎外縁部が対向流場によって対流輸送され、局所消炎領域が拡大したと考えられる。これに対して、図 4・5(b)に示した局所消炎の縮小期間では、 S_{F2D} の平均値のほとんどは 10cm/s 以上であり、 u_{u2D} よりも速い。このことは、局所消炎外縁部は局所消炎領域へ向かって伝播可能であることを示している。この場合では、 α_P が 30~130° の範囲では u_{u2D} は負の値になっている。この負の u_{u2D} の原因は乱流運動である考えられる。したがって、 S_{F2D} の増加および乱流運動による u_{u2D} の減少によって、 S_{F2D} が u_{u2D} に比べて速くなった事が、この局所消炎回復の原因であると考えられる。図 4・5(c)に示した局所消炎が全体消炎に発展する際の平均 S_{F2D} は平均 u_{u2D} よりも遅い。また、 $\alpha_P=90^\circ$ の位置では S_{F2D} が負の値になっている。この傾向は、図 4・5(a)に示した局所消炎の拡大期間と同様である。この例では、図 4・5(b)に示したような S_{F2D} および u_{u2D} の変化が生じなかったために、局所消炎領域が拡大し全体消炎にいたったと考えられる。

上記の結果から、局所消炎から回復するか全体消炎に発展するかを決定する因子は、局所消炎発生後の局所消炎外縁部の局所燃焼速度と未燃焼ガス流速のバランスであると考えられる。

4・3・4 局所消炎回復機構

本項では、4・3・1項から4・3・3項の議論に基づいて局所消炎回復機構について考察する。

これまでの議論から、図4・6に示す Passive mode (P), Active mode(A)および Global extinction mode(G)の3つの局所消炎回復機構が考えられる。図4・6(a)に示した P mode は、局所消炎が二次元よどみ点を含まずに発生するモードである。この場合には、局所消炎領域は対向流場の外へ向かって対流輸送され、局所消炎は回復する。図4・6(b)に示した A mode では、局所消炎は二次元よどみ点を含んで発生する。局所消炎外縁部の S_{F2D} が u_{u2D} に比べて速いため、局所消炎領域が回復する。図4・6(c)に示した G mode では、局所消炎が二次元よどみ点を含んで発生する点は A mode と同様であるが、局所消炎外縁部の S_{F2D} が u_{u2D} に比べて遅い点異なる。その結果、局所消炎領域が拡大し、全体消炎に至る。火炎が流れ場によって燃焼器外に対流輸送された結果として全ての火炎が燃焼場から消失しているため、この全体消炎現象は吹き飛び現象と捉えるべきであると考えられる。

A modeによる局所消炎回復と G modeによる全体消炎への発展の違いは、 S_{F2D} と u_{u2D} のバランスである。4・3・1項で示したように、局所消炎発生後には乱流を添加した側の未燃焼ガスが隆起し、対向側の未燃焼ガスと衝突する。そのため、希薄予混合火炎側に乱流を添加した場合には、局所消炎領域の未燃焼ガスの組成は希薄予混合気近く、局所消炎外縁部の伝播性が強いと考えられる。一方で、拡散火炎側に乱流を添加した際には、局所消炎領域内にはほぼ燃料流が満たされているため、局所消炎外縁部の伝播性は弱いと考えられる。その結果として、希薄予混合火炎側に乱流を加えた条件の方が拡散火炎側に乱流を加え

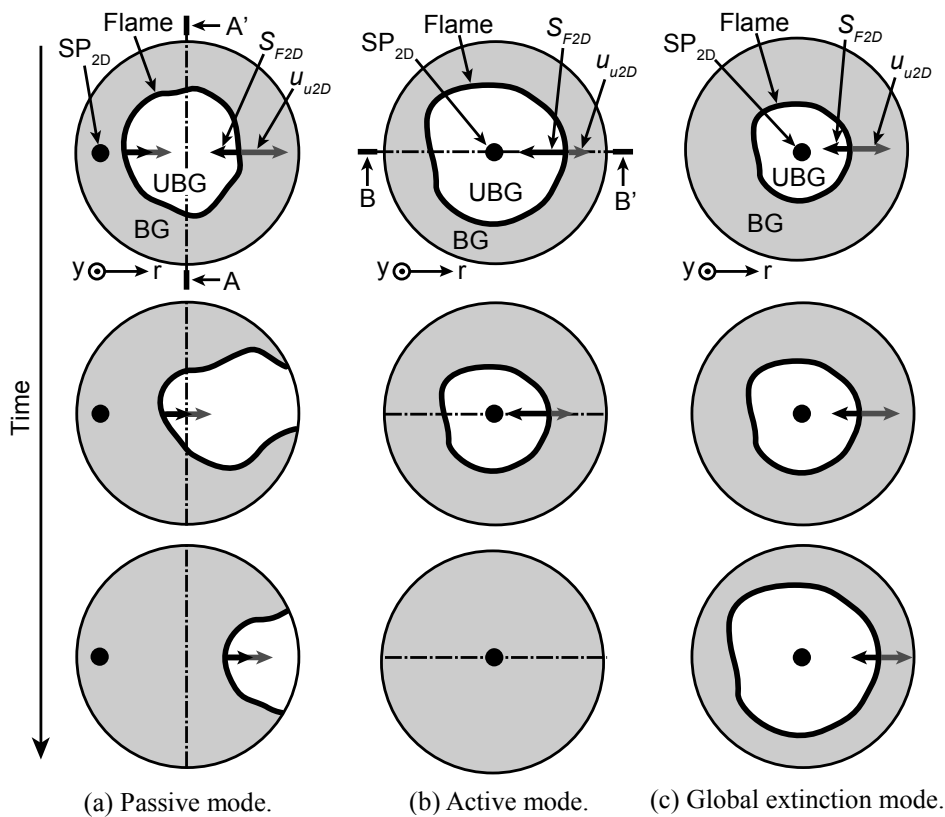


図4・6 局所消炎回復機構。BG：燃焼ガス，UBG：未燃焼ガス，LPF：希薄予混合火炎，DF：拡散火炎，SP_{2D}：二次元よどみ点， S_{F2D} ：二次元局所燃焼速度， u_{u2D} ：未燃焼ガス流速。

た条件に比べて局所消炎回復確率が高くなったと考えられる。また、第1章で明らかになったように、拡散火炎支配領域に比べて希薄予混合火炎支配領域の方が消炎時の層流燃焼速度が速い。そのため、上記の乱流添加方法による局所消炎外縁部の伝播性の変化は希薄予混合火炎支配領域の方が顕著であると考えられる。その結果として、拡散火炎支配領域に比べて希薄予混合火炎支配領域の方が乱流添加方法による局所消炎回復確率の差が大きくなったと考えられる。

4・4 結論

乱流対向流場中の希薄予混合拡散複合火炎を対象に、熱補完機構および乱流添加方法の影響に着目して、局所消炎回復機構に検討を加えた。局所消炎の可視化画像、局所消炎および全体消炎頻度、局所消炎外縁部の二次元局所燃焼速度を調べた結果、以下の事項が明らかになった。

1. 拡散火炎側に乱流を添加した条件に比べて、希薄予混合火炎側に乱流を添加した条件の方が局所消炎から回復する確率が高い。特に、希薄予混合火炎支配領域ではその傾向が顕著であり、希薄予混合火炎側に乱れを加えた条件では、拡散火炎支配領域に比べて約5倍の確率で局所消炎から回復する。
2. **Passive mode**、**Active mode**、**Global extinction mode** の3つの局所消炎回復機構が考えられる。**Passive mode** では、局所消炎は二次元よどみ点を含まずに発生し、局所消炎領域は未燃焼ガスの流れにより対流輸送され回復する。**Active mode** では、局所消炎は二次元よどみ点を含んで発生し、局所消炎外縁部の未燃焼ガス流速に比べて局所燃焼速度が速いために、局所消炎領域が縮小し回復する。**Global extinction mode** では、局所消炎は二次元よどみ点を含んで発生し、局所消炎外縁部の未燃焼ガス流速に比べて局所燃焼速度が遅いために、局所消炎領域が拡大し全体消炎に発展する。

第5章 結論

本研究では、希薄予混合火炎拡散複合火炎の局所消炎の発生機構および回復機構について、希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構に着目して検討した。希薄予混合火炎と拡散火炎の燃焼強度を個別に制御可能なことから、補完機構の検討に適している対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎を対象とした。希薄予混合拡散複合火炎の補完機構と消炎に関する研究は、他の複合火炎に比べて少ないため、層流場でも明らかになっていない。そこで本研究では、まず、層流対向流場の希薄予混合拡散複合火炎を対象に消炎時の火炎構造を詳細に調べることで、希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構に着目して、局所消炎発生機構を明らかにした。次に、乱流対向流場に形成された希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎発生時の火炎構造を層流火炎の消炎時の構造と比較することで、層流火炎の局所消炎発生機構の乱流火炎に対する適用性を明らかにした。最後に、希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構および乱流の影響に着目して、乱流対向流中の希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎回復機構を明らかにした。

I. 層流希薄予混合拡散複合火炎の消炎機構

層流対向流場を用いて希薄予混合拡散複合火炎を形成し、その消炎時の火炎構造から希薄予混合火炎と拡散火炎の補完機構に着目して局所消炎発生機構について検討した結果、以下の事項が明らかになった。

1. 希薄複合火炎の消炎限界は2つの領域に分けられる。一方は拡散火炎側の燃料濃度(χ_U)の増加による希薄予混合火炎側の当量比(ϕ_L)の減少率が一定な拡散火炎支配領域であり、他方は χ_U が増加するほど ϕ_L の減少率が増加する希薄予混合火炎支配領域である。
2. 拡散火炎支配領域の火炎構造は、拡散火炎付近を最高温度とした対称な温度分布であり、 ϕ_L を変化させても対称性は保たれる。希薄予混合火炎に比べて拡散火炎の方が高温であるため、希薄予混合火炎は希薄予混合火炎-拡散火炎間からの熱的な補完によって維持されている。 ϕ_L が増加するほど希薄予混合火炎-拡散火炎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。この領域の希薄複合火炎の消炎限界は、酸化剤を予熱した単独の拡散火炎の消炎限界に対応することから、希薄予混合火炎の反応によって拡散火炎に流入する酸素濃度が低減する効果に比べて、酸化剤を予熱する効果の方が消炎に対して影響が大きい。これらの結果から、希薄予混合火炎はその発熱によって拡散火炎の酸化剤を予熱することで熱的に補完している事が明らかになった。
3. 希薄予混合火炎支配領域では、希薄予混合火炎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。拡散火炎に比べて希薄予混合火炎の方が高温であるため、拡散火炎は希薄予混合火炎-拡散火炎間からの熱的な補完によって維持されている。 ϕ_L によって希薄予混合火炎-拡散火炎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 ϕ_L が増加するほど増加する。この領域の希薄複合火炎の消炎限界は、二重希薄予混合火炎の消炎限界と対応していることから、拡散火炎はその発熱によって希薄予混合火炎の下流熱損失を低減する事により熱的に補完している事が明らかになった。

II. 乱流希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎発生機構

乱流希薄複合火炎に対する層流希薄複合火炎の消炎機構の適用性を明らかにするために、乱流希薄複合火炎の局所消炎発生時と層流希薄複合火炎の消炎時の火炎構造を比較した。対象とした乱流条件は、予混

合火炎では層流火炎片領域に分類される P_1 および P_2 の 2 条件である。 P_1 の乱流特性は、乱れ強さ: 0.17m/s 、積分長さスケール: 2.7mm 、積分スケールに基づく乱流レイノルズ数: 27 である。 P_2 の乱流特性は、乱れ強さ: 0.37m/s 、積分長さスケール: 2.2mm 、積分スケールに基づく乱流レイノルズ数: 52 である。 比較した火炎構造は、層流場で補完機構によって顕著な違いが現れた、燃焼ガス幅(W)である。 乱流希薄複合火炎の局所消炎の発生時期の特定は、二次元局所燃焼速度(S_{F2D})の時系列計測により行った。 W の確率密度関数と局所消炎頻度の関係から、乱流強度が局所消炎と補完機構の関係に及ぼす影響を検討した。 その結果、以下の事項が明らかになった。

1. 乱流条件 P_1 における乱流希薄複合火炎の S_{F2D} と W の関係は、同じ燃料条件の層流希薄複合火炎の消炎 $W(W_{LE})$ を境界として大きく変化する。 $W > W_{LE}$ の範囲では W の減少に伴って S_{F2D} は増加するのに対して、 $W < W_{LE}$ の範囲では S_{F2D} は急激に減少し 0 になる。 $W = W_{LE}$ から S_{F2D} の急激な減少が始まるという結果は、局所的な W が W_{LE} を下回ると局所消炎が発生することを示している。 また、 $W < W_{LE}$ の領域の W の確率密度関数はほぼ 0 になる。 この結果は、 $W = W_{LE}$ の時点で局所消炎が発生し、その直後に上下の未燃焼ガスの衝突が発生することを意味している。 上記の結果は、予混合火炎支配領域および拡散火炎支配領域の両方に適用可能である。 また、予混合火炎側と拡散火炎側のどちらに乱流を添加しても同様な特徴を示す。
2. 乱流条件 P_2 でも、 $W < W_{LE}$ の範囲では W の確率密度関数がほぼ 0 であることから $W = W_{LE}$ の時点で局所消炎が発生していると考えられる。 また、燃料濃度の減少に伴って W の最小値が減少し、 W の最小値が W_{LE} を下回った際に局所消炎頻度が急増することも明らかになった。 この結果も、 $W = W_{LE}$ で局所消炎が発生することを示している。

これらの結果は、本研究で対象とした乱流強度の範囲では、乱流火炎の局所消炎発生時の火炎構造は層流火炎の消炎時と等しいことを示しているため、乱流火炎の局所消炎に対しても層流火炎の熱補完に基づく局所消炎発生機構が適用可能なことが明らかになった。

III. 乱流希薄予混合拡散複合火炎の局所消炎回復機構

乱流対向流場中の希薄予混合拡散複合火炎を対象に、熱補完機構および乱流添加方法の影響に着目して、局所消炎回復機構を検討を加えた。 局所消炎の可視化画像、局所消炎および全体消炎頻度、局所消炎外縁部の二次元局所燃焼速度を調べた結果、以下の事項が明らかになった。

1. 拡散火炎側に乱流を添加した条件に比べて、希薄予混合火炎側に乱流を添加した条件の方が局所消炎から回復する確率が高い。 特に、希薄予混合火炎支配領域ではその傾向が顕著であり、希薄予混合火炎側に乱れを加えた条件では、拡散火炎支配領域に比べて約 5 倍の確率で局所消炎から回復する。
2. **Passive mode**, **Active mode**, **Global extinction mode** の 3 つの局所消炎回復機構が考えられる。 **Passive mode** では、局所消炎は二次元よどみ点を含まずに発生し、局所消炎領域は未燃焼ガスの流れにより対流輸送され回復する。 **Active mode** では、局所消炎は二次元よどみ点を含んで発生し、局所消炎外縁部の未燃焼ガス流速に比べて局所燃焼速度が速いために、局所消炎領域が縮小し回復する。 **Global extinction mode** では、局所消炎は二次元よどみ点を含んで発生し、局所消炎外縁部の未燃焼ガス流速に比べて局所燃焼速度が遅いために、局所消炎領域が拡大し全体消炎に発展する。

謝辞

本研究は、芝浦工業大学工学部矢作裕司教授のもとに進められたものであり、終始熱心な、そして、暖かいご指導を賜りましたことをここに記し、深く感謝の意を表します。

東北大学環境保全センター牧野育代准教授には、研究全般にわたり、適切な御助言をいただき、研究が円滑に遂行できましたことをここに記し、深く感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、実験に協力していただいた、芝浦工業大学学生の安達龍君、川手彬嗣君、松本慶彦君、星野陽介君、荒川幸広君、柏木駿伸君、高武伸宏君、小山宏一君に感謝の意を表します。

時系列 PIV 計測を行なうにあたり、日本カノマックス株式会社、田中康恵氏、株式会社フォトロン、内野真喜氏より有益な技術協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費により助成をいただきましたのでここに感謝の意を表します。

参考文献

1. Takagi, Y., "A New Era in Spark-Ignition Engines Featuring High-Pressure Direct Injection", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.27 (1998), pp.2055-2068.
2. Bizon, K., Continillo, G., Leistner, K.C., Mancaruso, E., and Vaglieco, B.M., "POD-Based Analysis of Cycle-to-Cycle Variations in an Optically Accessible Diesel Engine", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.32 (2009), pp.2809-2816.
3. Peters, N., "Laminar Flamelet Concept in Turbulent Combustion", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.21 (1985), pp.1231-1250.
4. Ishizuka, S., and Law, C. K., Proceedings of the Combustion Institute, Vol.19 (1982), pp. 327-335.
5. Chung, S.H., Kim, J.S., Law, C.K., "Extinction of interacting premixed flames: Theory and experimental comparisons", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.21 (1986), pp.1845-1851.
6. 矢作裕司, 竹内正雄, "対向流中に形成される超希薄予混合火炎の消炎と構造", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 65, No. 631 (1999), pp.1108-1114.
7. 浜津邦仁, 矢作裕司, 竹内正雄, "超希薄予混合気が希薄予混合火炎の消炎に与える影響", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 67, No. 656 (2001), pp.1058-1064.
8. Smooke, M.D., Crump, J., Seshadri, K., and Giovangigli, V., "Comparison between experimental measurements and numerical calculations of the structure of counterflow, diluted, methane-air, premixed flames", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.23 (1990), pp. 463-470.
9. Yamaoka, I. and Tsuji, H., Proceedings of the Combustion Institute, Vol.16 (1977), pp. 1145-1154.
10. Rogg, B., Behrendt, F., and Warnatz, J., "Turbulent non-premixed combustion in partially premixed diffusion flamelets with detailed chemistry", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.21 (1986), pp. 1533-1541.
11. Tanoff, M.A., Smooke, M.D. "The Sensitive Structure of Partially Premixed Methane-Air", Proceedings of the Combustion Institute, (1996).
12. Sohrab, S.H., Law, C.K. "An Experimental Investigation on Flame Interaction and The Existence of Negative Flame Speeds", Proceedings of the Combustion Institute, (1984).
13. Lin, T.H., and Sohrab, S.H., "On the transition of diffusion to premixed flames in conserved systems", Combustion and Flame, Vol.68 (1987) pp.73-79.
14. Law, C.K., Zhu, D.L., Li, T.X., Chung, S.H., Kim, J.S., "On the structure and extinction dynamics of partially-premixed flames: theory and experiment", Combust. Sci. Technol., Vol.64 (1989), pp.199-232.
15. Seiser, R., Truett, L. and Seshadri, K., "Extinction of partially premixed flames", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29 (2002), pp.1551-1557.
16. Seshadri, K., Puri, I., Peters, N., "Experimental and Theoretical Investigation of Partially Premixed Diffusion Flames at Extinction", Combustion and Flame, Vol.61 (1985), pp.237-249.
17. Smooke, M.D., Seshadri, K., and Puri, I.K., "The structure and extinction of partially premixed flames burning methane in air", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.23 (1988), pp. 1555-1563.
18. Lockett, R.D., Boulanger, B., Harding, S.C., and Greenhalgh, D.A., "The Structure and Stability of the Laminar Counter-flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame", Combustion and Flame, Vol.119 (1999), pp.109-120.
19. Wada, T., Mizomoto, M., Yokomori, T., and Peters, N., "Extinction of Methane/Air Counterflow Partially

- Premixed Flames”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.32 (2009), pp.1075–1082.
20. Aggarwal, S.K., “Extinction of laminar partially premixed flames”, Progr. Energy Combust. Sci., (2009).
 21. Franzelli, B., Ribet, E., Laurent Y.M. Gicquel, Thierry Poinso. “Large Eddy Simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame”, Combustion and Flame Vol.159 (2012), pp.621-637.
 22. Bayley, A.E., Hardalupas, Y., Taylor, A.M.K.P., “Local curvature measurements of a lean, partially premixed swirl-stabilised flame”, Exp Fluids, Vol.52 (2012), pp.963–983.
 23. Yamaoka, I., Tsuji, H., and Harigaya, Y., “Extinction and Structure of Methane Very Lean Methane-Air Counterflow Diffusion Flames”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.21 (1986), pp.1837-1843.
 24. Seshadri, K., and Bai, X.S., “Rate-Ratio Asymptotic Analysis of the Structure and Extinction of Partially Premixed Flames”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.31 (2007), pp.1181–1188.
 25. Haworth, D.C., Blint, R.J., Cuenot, B., Poinso, T.J., “Numerical simulation of turbulent propane–air combustion with non-homogeneous reactants”, Combustion and Flame, Vol.121 (2000), pp.395-417.
 26. Jimenez, C., Cuenot, B., Poinso, T., Haworth, D., “Numerical simulation and modeling for lean stratified propane-air flames”, Combustion and Flame, Vol.128 (2002), pp.1-21.
 27. Yahagi, Y., Nihei, H., “Extinction behavior and structure of ultra-lean premixed flame formed in opposite turbulent flow”, Proceedings of the Second Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute (2001), pp.1-7.
 28. Yahagi, Y., Katahara, K., “Local flame structure and extinction of turbulent methane non-premixed flames impinging with ultra-lean premixed gas”, The proceedings of the 6th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (2007), pp.1-6.
 29. Bohm, B., Heeger, C., Boxx, I., Meier, W., Dreizler, A., “Time-resolved conditional flow field statistics in extinguishing turbulent opposed jet flames using simultaneous high speed PIV/OH-PLIF”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.32 (2009), pp.1647–1654.
 30. Mastorakos, E., Taylor, A.M.K.P. and Whitelaw, J.H., “Extinction of turbulent counter flow flames with reactants diluted by hot products”, Combustion and Flame, Vol.102 (1995), pp.101-114.
 31. Coriton, B., Frank, J.H., Hsu, A.G., Smooke, M.D., Gomez, A., “Effect of quenching of the oxidation layer in highly turbulent counter flow premixed flames”, Proceedings of the Combustion Institute Vol.33 (2011), pp.1647–1654.
 32. 北川敏明, 城戸裕之, 金奎成, 藤岡和孝, “成層混合気中を希薄領域へ伝播する火炎の対向流火炎による検討”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 69, No. 682 (2003), pp.1515-1520.
 33. Coriton, B., Smooke, M.D., Gomez, A., “Effect of the composition of the hot product stream in the quasi-steady extinction of strained premixed flames”, Combustion and Flame, Vol.157(2010), pp.2155-2164.
 34. Domingo, P. and Vervisch, L., “Triple flames and partially premixed combustion in autoignition of non-premixed turbulent mixtures”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.26 (1996), pp. 233–240
 35. Cabra, R., “Lifted methane–air jet flames in a vitiated coflow”, Combustion and Flame, Vol.143 (2005), pp.491–506.
 36. Mastorakos, E., “Ignition of turbulent non-premixed flames”, Progress in Energy and Combustion Science Vol.35 (2009), pp.57–97.
 37. Steinberg, A.M., Boxx, I., Arndt, C.M., Frank, J.H. and Meier, W., “Experimental study of flame-hole

- reignition mechanisms in a turbulent non-premixed jet flame using sustained multi-kHz PIV and crossed-plane OH PLIF”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33 (2011), pp.1663-1672.
38. Hegetschweiler, M., Zoller, B.T., Jenny, P., “Reactive parametrized scalar profiles (R-PSP) mixing model for partially premixed combustion”, *Combustion and Flame*, Vol. 159 (2012), pp.734-747.
 39. Wu, C.Y., Li, Y.H., Chang, T.W., “Effects of CO addition on the propagation characteristics of laminar CH₄ triple flame”, *Combustion and Flame*, Vol.159 (2012), pp.2806-2816.
 40. Mulla, I.A., Chakravarthy, S.R., “Propagation velocity and flame stretch measurements in co-flowing partially premixed flames with widely varying premixedness”, *Combustion and Flame* Vol.160 (2013), pp.1345-1356.
 41. Yahagi, Y., Ueda, T., Mizomoto, M., “Extinction mechanism of lean methane/air turbulent premixed flames in a stagnation point flow”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.24 (1992), pp.537-542.
 42. Yahagi, Y., Ueda, T., Mizomoto, M., “Interaction of a non-adiabatic wall and local quenching process of lean turbulent premixed flame”, *Proceedings of 15th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive System* (1995), pp.114-117.
 43. 矢作裕司, 植田利久, 溝本雅彦, 冷却壁近傍に形成される希薄乱流予混合火炎の局所消炎, *日本機械学会論文集(B編)*, Vol.63, No.616 (1997), pp.262-268.
 44. Kostiuk, L.W., Bray, K.N.C., Cheng, R.K., “Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams part II – reacting flow field and extinction”, *Combustion and Flame*, Vol.92 (1993), pp.396-409.
 45. Kostiuk, L.W., Shepherd, I.G., Bray, K.N.C., “Experimental study of premixed turbulent combustion in opposed streams. part III—spatial structure of flames”, *Combustion and Flame*, Vol.118 (1999), pp.129-139.
 46. Korusoy, E., Whitelaw, J.H., “Extinction and relight in opposed flames”, *Experiments in Fluids*, Vol.33 (2002), pp.75–89.
 47. Ayoola, B.O., Balachandran, R., Frank, J.H., Mastorakos, E., Kaminski, C.F., ”Spatially resolved heat release rate measurements in turbulent premixed flames”, *Combustion and Flame*, Vol.144 (2006), pp.1–16.
 48. Andrew E. Lutz, Robert J. Kee, Joseph F. Grcar and Fran M. Rupley, “OPPDIF: a FORTRAN Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames”, Sandia National Laboratories Report, No. SAND96-8243 (1997).
 49. Frenklach, M., Bowman, T., Smith, G., and Gardiner, B., “GRI-Mech 3.0”, GRI-Mech Home Page, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/ (accessed 2013-09-14).
 50. NASA, ”CEARUN”, <http://cearun.grc.nasa.gov/>.
 51. 浜津邦仁, 矢作裕司, 竹内正雄, 中原伸悟, “酸化剤予熱と理論混合分率の変化が対向流 CH₄-O₂-Ar 拡散火炎の消炎に与える影響”, *日本機械学会論文集(B編)*, Vol.72, No.716 (2006), pp.1052-1059.
 52. Tanahashi, M., Taka, S., Shimura, M. and Miyauchi, T., “CH double-pulsed PLIF measurement in turbulent premixed flame”, *Experiments in Fluids*, Vol.45 (2008), pp.323–332.
 53. Tanahashi, M., Taka, S., Hirayama, T., Minamoto, Y. and Miyauchi, T., “Local Burning Velocity Measurements in Turbulent Jet Premixed Flame by Simultaneous CH DPPLIF/OH PLIF and Stereoscopic PIV”, *14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, (2008), pp.1-11.

本研究に関連する論文発表

I. 公刊論文

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) 78巻 789号 pp.1118-1126, (2012.5.25).

II. 国際会議

1. Yahagi, Y., Kaminishi, R., Kawanami, T., Makino, I., Local Quenching Recovery Mechanisms of Interacting Lean Premixed and Diffusion Turbulent Flames, Fall Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute 2009, 09F-60, pp.1-8, (2009.10.26).
2. Makino, I., Kawanami, T., and Yahagi, Y., Three Local Quenching Recovery Mechanisms in opposite Turbulent Premixed and Diffusion Combined Flames, Abstract of Works in Progress Posters the 33rd Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (2010.8.1).
3. Makino, I., Kawanami, T., and Yahagi, Y., Local Quenching Recovery Processes of Premixed and Diffusion Interacting Flames in a Turbulent Opposed Flow, Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference, (2011.3).
4. Yahagi, Y., Kawanami, T., Takeda, H., and Makino, I., Local Quenching Recovery Mechanisms and Flamelet Structures in a Heterogeneous Combustion, 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, pp.48-53, (2011.7.28).
5. 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).
6. Kawanami, T., and Yahagi, Y., Effects of turbulence and flame propagation on the local quenching, 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, pp.67-70 (2013.5.19).

III. 口頭発表等

1. 川波尊幸, 矢作裕司, 乱流予混合拡散複合火炎の不安定要素と局所消炎発生機構, 第47回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.58-59 (2009.12.2).
2. 川波尊幸, 矢作裕司, 希薄予混合拡散複合火炎の燃焼ガス幅と消炎, 第48回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.416-417 (2010.12.3).
3. 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, p.238-239 (2011.12.6).
4. 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, p.196-197 (2012.12.6).
5. 田原沙裕理, 川波尊幸, 矢作裕司, 層流予混合火炎背後の渦が燃焼速度に与える影響, 第50回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.200-201 (2012.12.6).
6. 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).
7. 濱石恭宥, 川波尊幸, 矢作裕司, 対向流複合火炎の伝播性に及ぼすノズルオフセットの影響, 第53回燃焼シンポジウム講演論文集, (2015.11.16).
8. 高武伸宏, 藤川随守, 川波尊幸, 矢作裕司, 脈動噴流による希薄予混合火炎の消炎と回復に及ぼす燃料添加の影響, 第53回燃焼シンポジウム講演論文集, (2015.11.17).