

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

移動する非予混合エッジフレームの局所伸長率

Local Stretch Rates at Non-stationary Non-premixed Edge Flames

滝田 謙一*・細川 淳一・望月 宏朗

TAKITA, Kenichi*, HOSOKAWA, Junichi, and MOCHIZUKI, Hiroaki

東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉 6-1-1
Tohoku University, 6-1-1 Aoba, Aramaki, Sendai 980-8579, Japan

2009年7月31日受付; 2009年10月17日受理/Received 31 July, 2009; Accepted 17 October, 2009

Abstract : An experimental study about effects of unsteadiness on extinction behavior of counterflow non-premixed edge flame was conducted. The counterflow non-premixed edge flame was established in the flow field with non-uniform stretch rate distribution between inclined counterflow slot-jet burners. Changes in the flow velocity, fuel volume ratio and fuel mass flux at the burner exit resulted in propagation of the edge flame. The propagation velocity of the flame edge was measured and the local stretch rate at the flame edge of the non-stationary edge flame was compared to that of the stationary edge flame. Experimental results showed the propagation velocity of the edge flame was in proportion to the rate of change in flow conditions. There was no difference between ignition mode in which the edge flame propagated toward a high stretch side and extinction mode in which the edge flame propagated toward a low stretch side. The local stretch rate at the flame edge of the non-stationary edge flame was the same as that of the stationary edge flame in all experimental conditions. It was noted that these results were obtained in the flow field with a relatively small rate of change in the flow condition.

Key Words : Edge flame, Local extinction, Stretch rate, Methane

1. 緒言

乱流燃焼解析に用いられるフレームレットモデル[1]では、乱流火炎を微小な定常層流火炎の集合体と考え、混合分率やスカラ消散率等をパラメータとしてデータベース化した火炎片ライブラリを参照して、各火炎片の物理量を算出し乱流火炎全体を構築していく。データベースとして一様な伸長を受ける定常対向流火炎の計算結果が用いられることが多いが、時間的、空間的に変動する乱流火炎の火炎要素として、どの程度の乱流強度まで妥当なモデルであるかは必ずしも明らかではない。Shay and Ronney [2]は乱流火炎における火炎面に沿う伸長率の変化率が伸長率自身と同程度の大きさになりうることを示し、伸長率が空間的に変化する対向流場でのエッジフレームの消炎伸長率を測定し、伸長率勾配の影響を調べている。著者らも同様な伸長率勾配を有する対向流場に形成されたエッジフレームのエッジ部火炎構造やエッジ部局所伸長率を調べてきた[3-5]。乱流燃焼場においては、時間的にも火炎近傍の濃度

場、速度場が激しく変動しており、それらの変動が火炎片に及ぼす影響を調べることはフレームレットモデルの改良、適用範囲の拡大に重要となる。従って、空間的に一様な伸長を受ける対向流平面火炎を対象に、流速(伸長率)変動[6-8]や燃料濃度の変動[9]に対する火炎の応答性が多く研究されている。同様に、一様な伸長を受ける対向流火炎に局所的な噴流を衝突させることなど[10-15]により、局所消炎を起こし、エッジ火炎を形成させて、局所火炎構造やエッジフレームの伝播速度[13-15]を調べる試みが近年なされている。そのような動的な火炎片の性質において、「変動に伴い、火炎片が移動(伝播)している場合に、その火炎片の消炎伸長率が定常な火炎片の消炎伸長率に等しいか異なるのか」は大変興味深い問題であり、本研究の主題である。

本研究では、伸長率勾配を有する場において非予混合エッジフレームを形成した後、バーナ出口流速または燃料濃度を変化させて、エッジ部を移動(伝播)させ、エッジフレームの動的挙動の解明をめざした。形成された非定在エッジフレームのエッジ部の移動速度を計測し、さらにエッジ部の局所伸長率を算出し、定在エッジフレームの局所伸長率と比較した。

* Corresponding author. E-mail: takita@scrj.mech.tohoku.ac.jp

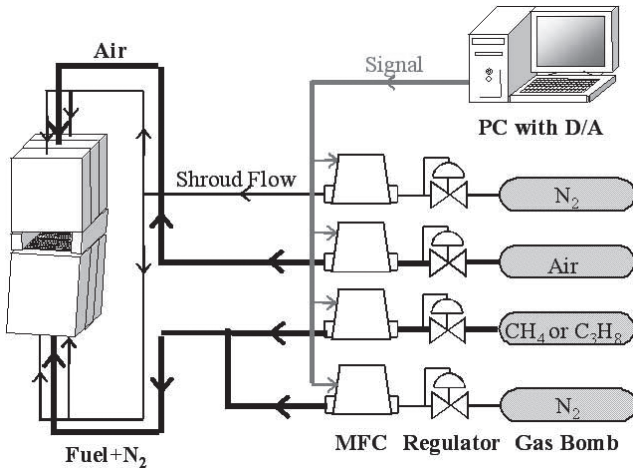


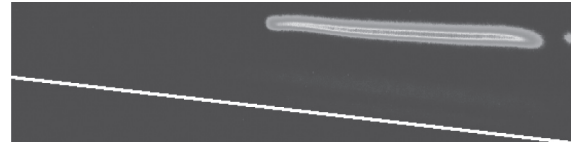
Fig.1 Experimental apparatus

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験装置の概略を示す。実験に用いたバーナは出口断面が寸法 10 mm x 50 mm の矩形で、厚さの異なる固定治具により傾斜角をつけて対向させた。上側バーナから空気、下側バーナからは窒素で希釈した燃料流を同流速で流出、衝突させた。バーナ内には整流のためガラスビーズおよびハニカムが装入されている。バーナ長手方向の流れは治具により遮断されている。2 つのバーナ間の傾斜角 (θ) は 3, 6, 9 度の 3 種類とし、傾斜角によらず左側治具 (高伸長率側) の厚さ (バーナ間距離) は 5 mm となるようにした。上下主流バーナの両側面には外部空気との二次燃焼を避ける目的で副流として窒素を主流と同流速で流した。各ガスの流量はパソコンにより制御されたマスフローコントローラにより調整した。

本実験では着火器を用いて着火、定在する定常非予混合エッジフレームを形成した後、3 種類の方法でバーナ出口条件を変化させてエッジフレームを移動させ、動的挙動を調べた。まず、下側バーナから流出する燃料の体積分率 R [%] を一定にし、バーナ出口流速 U [cm/s] を線形的に変化させた。バーナ出口流速の変化は伸長率の変化をもたらす。流速変化率 (加速度) a [cm/s²] の最大値は ± 0.60 cm/s² に設定した。次に、バーナ出口流速を一定とし燃料体積分率を線形的に変化させた。この場合、燃料流の密度変化による影響は極めて小さく伸長率は一定と考えられ、混合分率のみが変化することになる。最大の燃料体積分率の変化率は ± 1.0 [%/s] に設定した。さらに、火炎面への燃料質量流束 q_f [kg/m²s] が一定になるように、バーナ出口流速と燃料体積分率を同時に変化させる実験も行った。この場合、バーナ出口流速の増加に伴い、燃料体積分率を減少させた。

バーナ間に流れ方向にほぼ一樣なエッジフレームが形成され、それを CCD カメラで撮影、記録した。バーナ出口面の延長線上の交点からの距離をエッジ部の位置 r として求め、その時間履歴からエッジ部移動速度を算出した。さ

Fig.2 Image of direct emission from stationary edge flame ($R=30\%$, $U=17.5$ cm/s)

らに移動するエッジ部の局所伸長率 S_e [1/s] を測定し、定在エッジフレームの局所伸長率と比較した。局所伸長率はバーナ出口流速、エッジ部におけるバーナ間隔 d_e [cm]、下側、上側バーナそれぞれから流出する気体の密度 ρ_l [kg/m³], ρ_u [kg/m³] から、以下の式[16]で求めた。

$$S_e = U \left[1 + (\rho_l / \rho_u)^{1/2} \right] / d_e \quad (1)$$

なお、エッジ部から固定治具への熱損失の影響が無視できるようにエッジ部と左側治具面との距離が 1.0 cm 以上離れている場合のみをデータとして採用[3]した。

3. 実験結果および考察

3.1. 定在エッジフレームの特性

本節では、移動 (伝播) するエッジフレームの特性を調べる前に、比較対象とする定在 (静止) しているエッジフレームの性質を調べる。

3.1.1. 火炎エッジ部形状

図 2 にバーナ傾斜角 6 度、バーナ出口流速 $U = 17.5$ cm/s におけるメタン燃料 ($R = 30\%$) の定在エッジフレームの自発光を撮影した直接写真から求めた輝度分布を示す。図中の直線は下側バーナ外縁を示している。本研究の実験範囲における量論混合分率 (Z_{st}) の値は常に 0.5 より小さいため、火炎は常に空気側に形成される。バーナ間隔の狭い高伸長率側 (左側) に形成されているエッジ部は伸長による消炎、低伸長率側 (右側) に形成されるエッジ部は固定治具への熱損失により消炎がもたらされたものである。本研究の対象とするのは伸長により消炎する左側エッジ部である。エッジ部においてはわずかに輝度値の減少が見られるものの、他の火炎部分と比較して大きな変化は見られなかった。燃料レイス数の異なるプロパンのエッジ火炎についてもほぼ同様な結果であった。予混合エッジフレームでは、燃料レイス数によって火炎形状が異なることが報告[3,5,17,18]されており対照的な結果となった。また、火炎形状に関してはバーナ傾斜角の影響は現れなかった。

3.1.2. エッジ部局所伸長率

定在する火炎エッジ部における局所伸長率を測定した。図 3 にはメタンのエッジフレームのエッジ部局所伸長率への燃料体積分率の影響を各バーナ傾斜角に対して示した。

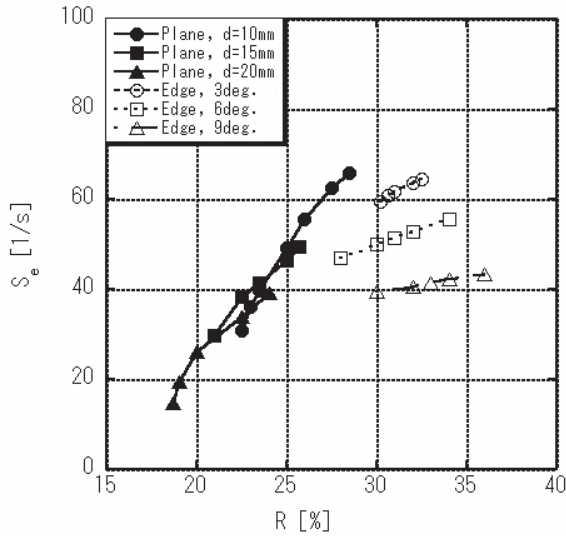


Fig.3 Comparison of extinction stretch rates for planar counterflow flames and local stretch rates at flame edge of edge flames

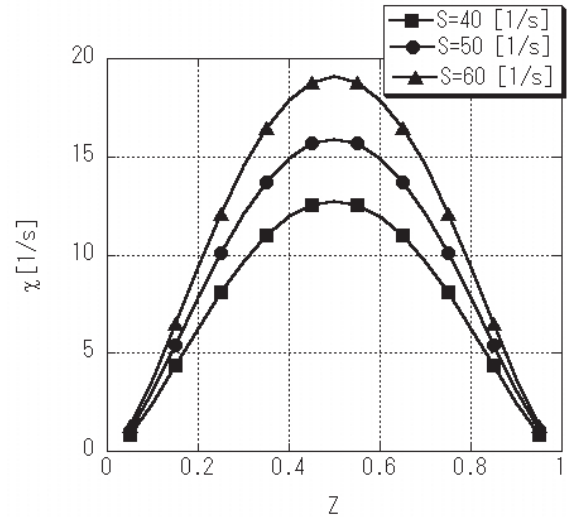


Fig.4 Relation between mixture fraction (Z) and scalar dissipation rate (χ)

同時に傾斜角を 0 度とした平面对向流火炎の消炎伸長率 (図中, plane) についても示してある. バーナを傾斜した場合と条件を同じにするため, 傾斜角度が 0 度の場合もバーナ両端を固定治具で支えた. 平面对向流火炎の消炎伸長率はバーナ間隔 (d) によらず, 燃料体積分率に対してほぼ一定値となる. 一方, エッジ火炎のエッジ部局所伸長率は平面火炎の消炎伸長率カーブの延長線より小さめの値となり, さらに, バーナ傾斜角が小さいほど大きい結果となった. バーナ傾斜角へのエッジ部局所伸長率の依存性が現れたが, その理由は十分にわかっていない. 火炎安定性への伸長率勾配の影響が現れたことや流れ場における圧力分布の影響等考えられるが, 本研究の目的が移動 (伝播) している場合と静止している場合のエッジ部の局所伸長率の比較であるため, 詳細は別報で調査するものとする.

伸長率場, 濃度場の変動に伴い移動するエッジフレームの性質を調べる前段階として, 平面对向流火炎の消炎について考察する. 非予混合の平面对向流火炎についての解析的研究[1]において, 各化学種の拡散係数 (D) が等しい, ルイス数が 1 である等の近似を行うことにより, 次のようなスカラ消散率 (χ) が火炎片の消炎を決定する重要なパラメータであることが明らかにされている.

$$\chi(Z) = 2D|\nabla Z|^2 \tag{2}$$

$$\chi(Z) = S \cdot \exp\left(-2\left[\operatorname{erfc}^{-1}(2Z)\right]^2\right) / \pi \tag{3}$$

上式で S は伸長率, erfc は補誤差関数である. 火炎面における混合分率の値 $\chi(Z_{st})$ が臨界値 (χ_q) に達すると消炎に至ると考えられる. Z_{st} は以下のように求められる.

$$Z_{st} = \left[1 + \nu Y_{F,1} / Y_{O,2}\right]^{-1} \tag{4}$$

上式において, ν は量論混合比における燃料/酸素質量比, $Y_{F,1}$, $Y_{O,2}$ は燃料流中の燃料質量分率, 酸化剤流中の酸素質量分率である. 結局, 消炎伸長率は伸長率と混合分率の関数として表される. (3) 式より, 伸長率つまりはバーナ出口流速の増加はスカラ消散率を増加させるため, 消炎時のスカラ消散率が一定であるならば, バーナ出口流速を増加させるとエッジ部は低伸長率側つまりはバーナ間隔が大きい側に移動する. この移動モードを消炎モードと定義する. 逆にバーナ出口流速を減少させると, 高伸長率側つまりはバーナ間隔が小さい側に移動する. この移動モードを着火モードと定義する.

図 4 に式 (3) より S を一定として, Z と χ の関係を計算した結果について示す. S の値には本実験における代表値を代入した. 本実験においては, 常に $Z < 0.5$ で火炎は空気側に形成されるが, そのような条件では Z の減少は χ の減少をもたらす. (4) 式より燃料濃度 $Y_{F,1}$ の増加が Z_{st} の減少をもたらすため, 結局, 燃料濃度の増加により χ は減少する. 消炎時の χ_q が一定であるなら, 燃料濃度の増加により消炎伸長率の許容値が大きくなり, 消炎伸長率が大きくなる. 従って, 燃料濃度の増加によりエッジ部は高伸長率側に移動する着火モードを呈し, 燃料濃度が減少する場合には, 消炎モードとなる.

定在するエッジフレームのエッジ部局所伸長率の燃料体積分率, バーナ出口流速への依存性を調べた結果を図 5, 図 6 に示す. 本実験装置においては, エッジ部局所伸長率は燃料体積分率, バーナ出口流速の増加と共に増加する正の相関結果が得られた. 結局, 火炎面に流入する燃料質量流束に依存することがわかった. 図 7 は燃料質量流束に対して各実験のエッジ部局所伸長率をプロットしたものである. 燃料質量流束をパラメータとすることにより, バーナ出口流速を一定にして燃料体積分率を変化させた実験, 燃

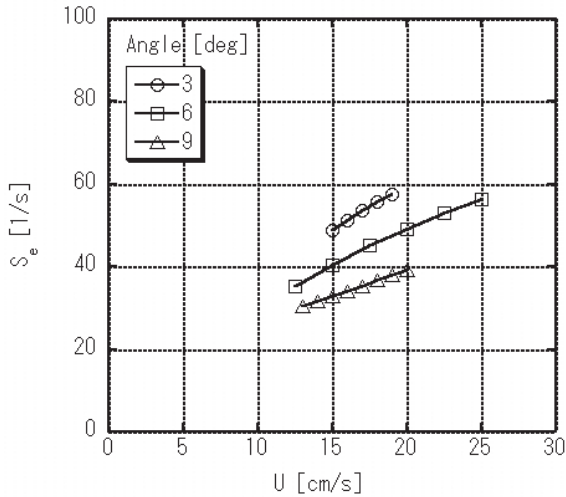


Fig. 5 Relation between exit flow velocity (U) and local stretch rate (S_e) at flame edge of stationary edge flame

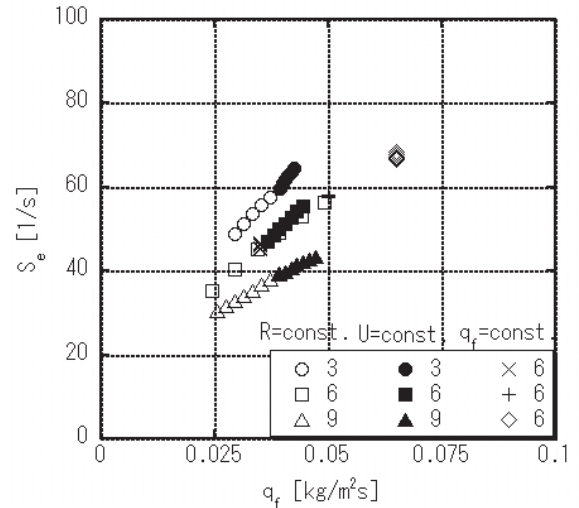


Fig. 7 Relation between fuel mass flux (q_f) and local stretch rate (S_e) at flame edge of stationary edge flame

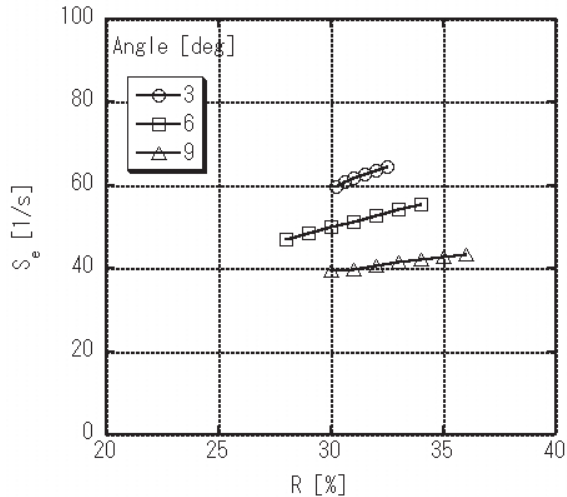


Fig. 6 Relation between fuel volume ratio (R) and local stretch rate (S_e) at flame edge of stationary edge flame

料体積分率を一定にしてバーナ出口流速を変化させた実験、および燃料質量流束が一定となるようにそれらを同時に変化させた実験の消炎曲線が、バーナ傾斜角が同じならば1本の曲線に整理できることがわかった。以上の傾向は、燃料ルイス数の異なるプロパンに対しても全く同様であった。

3.2. 非定在エッジフレームの特性

本節では、バーナ出口流速、燃料体積分率、燃料質量流束等を時間的に変化させてエッジフレームを移動させ、移動するエッジフレームの火炎エッジ部の特性を調べた。バーナ出口流速、燃料体積分率の変化は式(3)で表されるように平面火炎の消炎の因子である伸長率、量論混合分率の変化をもたらす、それらがエッジ部局所伸長率にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

3.2.1. 火炎エッジ部形状

図8、図9に移動するエッジフレームのエッジ部を瞬間的に撮影した直接写真から求めた輝度分布を示す。図8は消炎モード、図9は着火モードの結果であり、静止したエッジフレームの結果である図2と同じバーナ傾斜角度6度、メタン燃料濃度 $R = 30\%$ である。それぞれバーナ出口流速を加速度 0.60 cm/s^2 、 -0.60 cm/s^2 で線形的に変化させてエッジフレームが移動している時に撮影を行っている。図2の静止するエッジフレームと比較して、火炎形状、エッジ部輝度分布にほとんど変化が無い結果となった。着火モードと消炎モードにおける差異も現れなかった。プロパンを燃料としたエッジフレームについても同様の傾向であった。

3.2.2. 非定在エッジフレームの移動速度

バーナ出口流速、燃料体積分率、燃料質量流束を一定加速度で変化させた時のエッジ部移動速度を測定した。図10はバーナ出口流速を変化させた時のエッジ部位置の時間履歴である。メタンの燃料濃度 $R = 30\%$ 、バーナ傾斜角度6度の結果である。バーナ出口流速の変化に遅れなしにエッジ部の移動が開始しているのがわかる。バーナ出口流速が増加していく正の加速度の場合、エッジ位置は増加つまりは低伸長率側に移動する消炎モード、負の加速度に対してはエッジ位置は減少つまりは高伸長率側に移動する着火モードを示す。加速度が大きいほど移動速度も大きく、またほぼ一定の速度で移動しているのがわかる。実験においては移動開始と移動終了時におけるバーナ出口流速の条件を固定して行ったため、各加速度の実験に対して、少しのオーバーシュート、アンダーシュートは見られるものの、同じ位置で火炎が静止している。燃料体積分率、燃料質量分率の時間変化に対しても同様に一定速度でエッジ部が移動し、その変化率が大きいほど、移動速度も大きくなる結果となった。

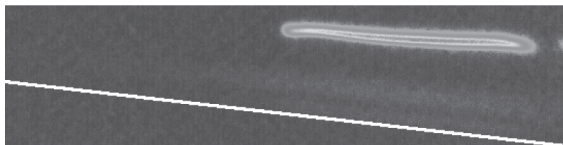


Fig.8 Image of direct emission from non-stationary edge flame in extinction mode ($R=30\%$, $\theta=6$ deg., $a=0.60\text{cm/s}^2$)

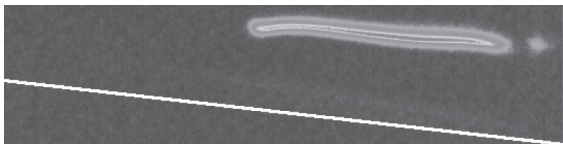


Fig.9 Image of direct emission from non-stationary edge flame in ignition mode ($R=30\%$, $\theta=6$ deg., $a=-0.60\text{cm/s}^2$)

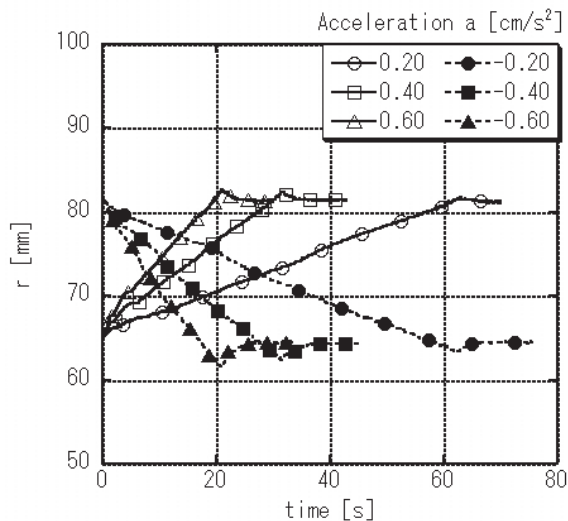


Fig.10 Time histories of edge flame positions under constant fuel volume ratio ($R=30\%$, $\theta=6$ deg.)

図 11 には図 10 に示されるようなエッジ部位置の時間履歴から算出したエッジ部移動速度と加速度の関係を示す。図から、エッジ部移動速度はバーナ出口速度の加速度にほぼ比例するのがわかる。また、着火モードと消炎モードにおける移動速度の大きさに差は見られない。バーナ傾斜角に対しては、傾斜角が小さいほうが移動速度がやや大きくなる傾向が見られた。これらの特性はプロパンを燃料とした同様の実験でも同じであった。図 12 には燃料体積分率を変化させた実験におけるエッジ部移動速度のバーナ傾斜角への依存性を示す。エッジ部移動速度が燃料体積分率の変化率 (dR/dt) に比例する点、着火モードと消炎モードで移動速度の大きさに差がない点についてはバーナ出口流速を変化させた実験と同じである。バーナ出口流速を変化させた場合に比べて、バーナ傾斜角への依存性がより明確に現れている。傾斜角が小さいほど、エッジ部移動速度は大きくなる傾向となった。

傾斜角のない一様伸長場に形成されたエッジフレームの

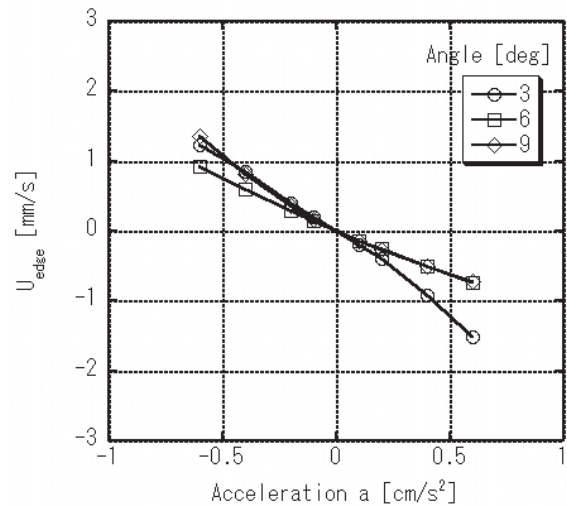


Fig.11 Dependence of velocity at flame edge on acceleration under constant fuel volume ratio ($R=30\%$)

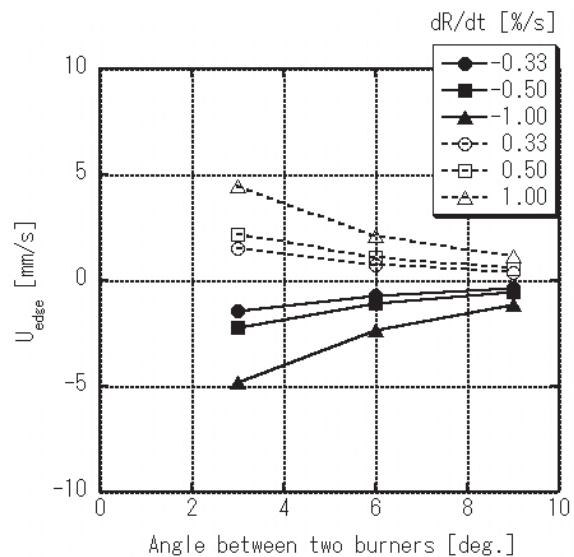


Fig.12 Velocities at flame edge under constant exit flow velocity ($U=20.0$ cm/s)

伝播速度計測においては、着火モードと消炎モードに差があることが報告[14,15]されており、特に消炎モードにおける伝播速度が極端に大きくなることが報告されている。本研究においては、伸長率勾配の存在がそのような大きな伝播速度を妨げていると考えられる。傾斜角が小さいほど、一様伸長場に近づき、移動速度が大きくなることが予想される。

3.2.3. 非定在エッジフレームの局所伸長率

移動するエッジフレームのエッジ部局所伸長率を測定し、定在するエッジフレームのエッジ部局所伸長率と比較した。図 13 はバーナ出口流速を変化させた場合、図 14 は燃料体積分率を変化させた場合の燃料質量流量に対するエッジ部局所伸長率を示す。燃料はメタン、バーナ傾斜角

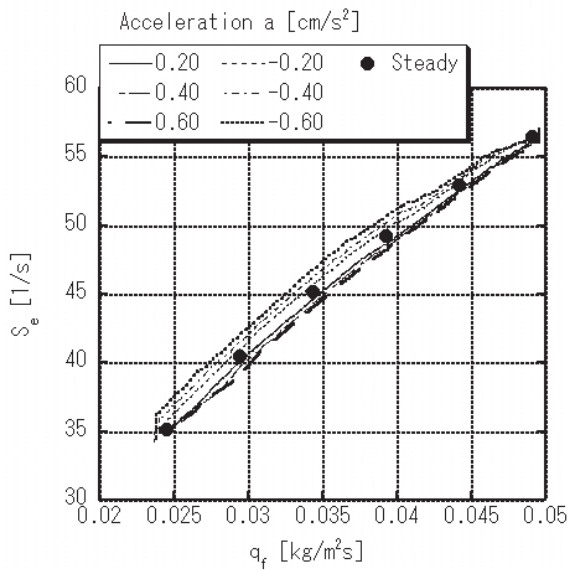


Fig.13 Comparison of local stretch rates at flame edge between stationary and non-stationary edge flames under constant fuel volume ratio (R=30%)

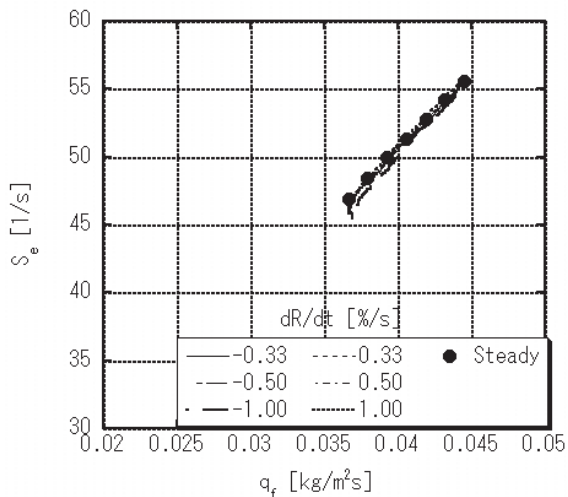


Fig.14 Comparison of local stretch rates at flame edge between stationary and non-stationary edge flames under constant exit flow velocity (U=20.0cm/s)

は6度である。●のデータは定在エッジフレームのエッジ部局所伸長率である。図から、本実験におけるバーナ出口流速の変化率、燃料体積分率の変化率において、エッジ部局所伸長率は定在エッジフレームの値と差がないことがわかる。また、着火モードと消炎モードとの差も現れなかった。図15は燃料質量流束を一定に保ちながら、エッジフレームを移動させた場合のエッジ部局所伸長率をバーナ出口流速に対してプロットしたものである。燃料質量流束を一定にすると、エッジ部局所伸長率も一定値となる。図15においても、エッジ部局所伸長率がバーナ出口流速の加速度の値によらず、定在エッジフレームの局所伸長率に一致

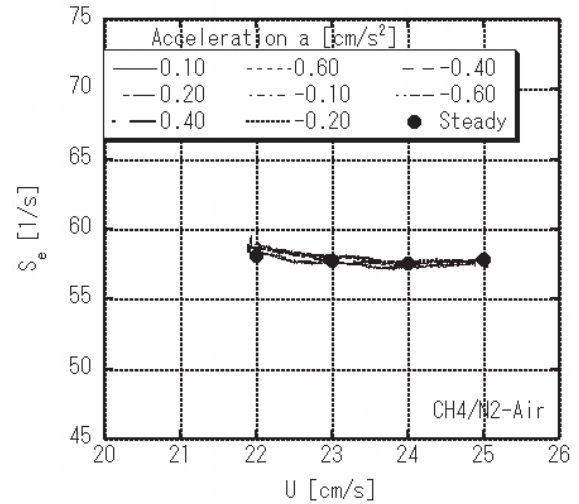


Fig.15 Comparison of local stretch rates at flame edge between stationary and non-stationary edge flames of CH₄ fuel under constant fuel mass flux ($q_f=0.050\text{kg/m}^2\text{s}$, R=30%)

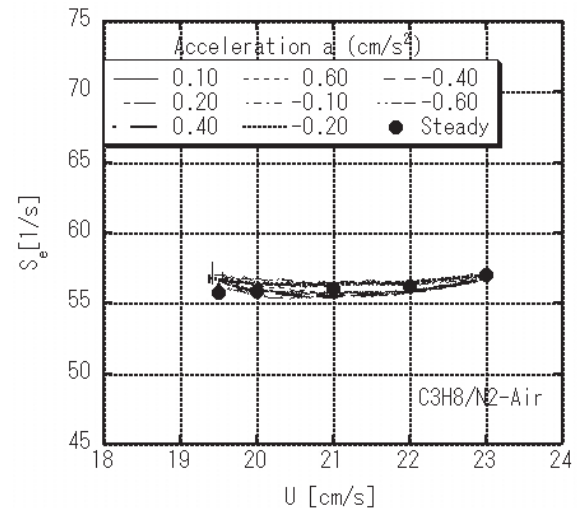


Fig.16 Comparison of local stretch rates at flame edge between stationary and non-stationary edge flames of C₃H₈ fuel under constant fuel mass flux ($q_f=0.070\text{kg/m}^2\text{s}$, R=15%)

した。図16は図15と同様な実験を燃料をプロパン (R = 15%) として行った場合のエッジ部局所伸長率の測定結果である。燃料をプロパンとした場合も、メタン同様、移動するエッジフレームのエッジ部局所伸長率は静止しているエッジフレームの値に等しく、モードへの依存性も現れなかった。

上記のように本実験で設定したバーナ出口流速、燃料体積分率の変化率においては、移動するエッジフレームのエッジ部局所伸長率と定在しているエッジフレームのエッジ部局所伸長率は等しいという結果であった。

本研究におけるバーナ出口流速や燃料体積分率の変化率を見積もる。バーナ出口流速を変化させた場合の局所伸長率の変化率は式(1)から、以下のように求められる。

$$dS/dt = a \left[1 + (\rho_1/\rho_0)^{1/2} \right] / d \quad (5)$$

一方, 燃料体積分率を変化させた場合のエッジ部局所伸長率の変化率の導出には以下のような近似を適用する.

$$dS_e/dt = \Delta S_e / \Delta t = (\Delta S_e / \Delta R) \cdot (dR/dt) \quad (6)$$

(6) 式における $\Delta S_e / \Delta R$ の値は 図 6 の結果を線形と仮定し代入する. (5),(6) 式に本研究の変化率を代入して, 大よその伸長率の変化率を求めると, 傾斜角度 6 度の場合, バーナ出口流速を変化させた場合の最大変化率が $\pm 2.0 \text{ s}^{-2}$, 燃料体積分率を変化させた場合の最大変化率が $\pm 1.5 \text{ s}^{-2}$ 程度であった. 単位時間当たりの伸長率の変化率の局所伸長率に対する比 $\Delta S/S_e$ はそれぞれ, $\pm 5.7\%$, $\pm 3.1\%$ 程度であった. $\Delta S/S_e$ の最大値はプロパン燃料を用いて傾斜角度を 9 度に設定した実験で得られるが, それでも $\pm 8\%$ 程度であった. 対向流火炎の非定常特性を調べる研究[6-8]では, 本研究よりもはるかに大きな伸長率の変化率に対する火炎の応答性が調べられている. エッジ部の移動方向は火炎面方向であり, 通常の対向流火炎の実験と一概に比較することは困難であるが, 例えば文献[7]における速度変化率を見積もると $O(10^2)[\text{s}^{-2}] \sim O(10^4)[\text{s}^{-2}]$ であり, $O(10^2)[\text{s}^{-2}]$ の変化率に対しても非定常性が現れている. $O(10^2)[\text{s}^{-2}]$ 程度の大きな変化率に対して, エッジ部の挙動を調べることが次のステップである.

また, 著者らの予混合エッジフレームの実験[18]においては, 速度変化率が本研究と同程度であったにもかかわらず, 予混合エッジフレームの消炎伸長率は着火モードでわずかに増加, 消炎モードでわずかに減少するという結果が得られており, 対照的な結果となった.

4. 結論

本研究では比較的小さい変動量で流入条件が変化する流れ場中を移動する非予混合エッジフレームのエッジ部の特性を調べ, 定在エッジフレームと比較した. 得られた結論は以下のものである.

- (1) バーナ出口条件の変化に対して, エッジフレームは遅れなしに応答し, その移動速度は変化率に比例した.
- (2) 移動するエッジフレームのエッジ部局所伸長率は, 定在するエッジフレームのエッジ部局所伸長率と同じ値であった.
- (3) 本実験のような伸長率勾配のある流れ場を移動するエッジフレームにおいては, 高伸長率側に移動する着火モードと低伸長率側に移動する消炎モードにおいて伝播速度等に差はなかった.
- (4) 非予混合エッジフレームの場合, エッジ部の火炎形状, 伝播特性等に燃料ルイス数の影響は現れなかった.

変動量を大きくしてエッジフレームの応答を調べること, 本研究で現れたバーナ傾斜角への依存性を調べることが今後の課題である.

謝辞

本研究にご助言頂いた東北大学 升谷五郎教授, 河内俊憲助教に感謝します.

References

1. Peters, N., *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
2. Shay, M. L. and Ronney, P. D., *Combust. Flame*, 112: 171-180 (1998).
3. Takita, K., Sakaguchi, S., Masuya, G., *Combust. Flame*, 132: 343-351 (2003).
4. Takita, K., Sado, M., Masuya, G., Sakaguchi, S., *Combust. Flame*, 136: 364-370 (2004).
5. Cho, S. J., Takita, K., *Combust. Flame*, 144: 370-385 (2006).
6. Saitoh, T., Otsuka, Y., *Combust. Sci. Tech.*, 12: 135-146 (1976).
7. Kistler, J. S., Sung, C. J., Kreutz, T. G., Law, C. K., Nishioka, M., *Proc. Comb. Inst.*, 26: 113-120 (1996).
8. Hirasawa, T., Ueda, T., Matsuo, A., Mizomoto, M., *Proc. Comb. Inst.*, 27: 875-882 (1998).
9. Suenaga, Y., Kitano, M., Yanaoka, H., Fujita, N., *J. Combustion Society of Japan*, 134: 229-237 (2003) (in Japanese).
10. Takagi, T., Yoshikawa, Y., Yoshida, K., Komiyama, M., Kinoshita, S., *Proc. Comb. Inst.*, 26: 1103-1110 (1996).
11. Takagi, T., Yoshida, K., *Proc. Comb. Inst.*, 27: 685-692 (1998).
12. Takagi, T., Nakajima, I., Kinoshita, S., *Proc. Comb. Inst.*, 29: 1573-1579 (2002).
13. Carnell Jr., W. F., Renfro, M. W., *Combust. Flame*, 141: 350-359 (2005).
14. Matsumura, Y., Takagi, T., Kinoshita, S., Takeishi, K., *Trans. JSME Ser.B*, 72: 790-796 (2006) (in Japanese).
15. Cha, M. S., Ronney, P. D., *Combust. Flame*, 146: 312-328 (2006).
16. Seshadri, K., Williams, F. A., *Int. J. Heat. Mass. Trans.*, 21: 251-253 (1978).
17. Liu, J. B., Ronney, P. D., *Combust. Sci. Tech.*, 144: 21-46 (1999).
18. Yamazaki, S., Hosokawa, J., Takita, K., Hirota, M., Masuya, G., *Proc. 44th Symp. (Japanese) Combust.*: 382-383 (2006) (in Japanese).