

Triple Flame の安定性および火炎構造に関する数値解析

Numerical Simulation on Stability and Flame Structure of Triple Flame

山下 博史*, 多田 章彦*

*名古屋大学大学院工学研究科機械情報システム工学専攻

Hiroshi Yamashita and Akihiko Tada

*Department of Mechanical Engineering, Nagoya University

E-mail:yamashita@mech.nagoya-u.ac.jp

1 緒言

Triple flame は、噴流拡散火炎の浮き上がり現象や局所的な消炎現象により燃料と酸化剤の混合が生じた位置で形成され、火炎安定性に対して重要であることが指摘されている[1]. また、Triple flame は非定常の乱流拡散火炎における重要な火炎要素となることも指摘されている[2]. 古くは Phillips[3], Liebman ら[4]の研究をはじめ、既にいくつかの実験的研究がなされてきた[5-8]. 一方、理論的研究としては、総括反応に基づく漸近解析[9], 相似解[10], DNS [11, 12]等による研究が行われており、混合分率の幅方向勾配や発熱による膨張の効果について検討されている. しかしながら、本来、Triple flame は燃料と酸化剤の幅広い混合状態の下で形成されるため、その火炎構造を正確に予測するためには素反応機構に基づく解析を行う必要がある. このような解析としては、Prasad ら[13]や Smooke ら[14]の数値計算による研究があり、さらに数値計算と実験との比較検討もなされてきている[15, 16]が、火炎構造についての詳細な検討はほとんどなされていない.

そこで、著者らは一連の燃料噴流拡散火炎に対する数値解析的研究[17-21]の一環として、既報[22]において、Smooke らが提案しているメタン・空気系の Skeletal Chemistry[23]を用いて、燃料噴流拡散火炎において形成される Triple flame について検討した. しかしながら、この研究では、燃料噴流と周囲空気流の下流側で適度な濃度場が形成されておらず、Triple flame の火炎構造を詳細に検討することが困難であった. このため、前報[24]では、過濃予混合気と空気の間で線形的に濃度が変化するような平行流を用い、その下流側で明確な Triple flame が形成される場合について、この予混合気の燃料の種類と当量比 ϕ が Triple flame の火炎構造に与える影響について検討を行った.

本報では、平行流下流に形成される Triple flame に関して、メタン燃料の場合について、前報[24]よりもさらに幅広い混合気の濃度分布に対して数値計算を行い、火炎構造に与える幅方向の予混合気濃度分布の影響について詳細に検討する. この際、評価パラメータとして、火炎の最大熱発生速度 q_{\max} および火炎先端部を通る流れ方向断面における流れ方向速度成分の減少割合 $(u_0 - u_{\min})/u_0$ を提案し、これらの指標を用いて火炎が流れ場に定在するときの流入

原稿受理 2003 年 11 月 1 日

速度（見掛けの燃焼速度） u_0 の特性を系統的に調べる．また，前報[24]の計算領域は，Triple flame の正確な挙動を調べる上で，必ずしも十分に広く取ることができていなかったため，メタンおよび水素燃料で典型的な Triple flame が形成される条件に対して計算領域の大きさを広くして計算を行い，境界条件の影響について検討する．さらに，二次元平行流の Triple flame の火炎構造に対する予混合気の濃度分布の影響を系統的に調べるために，過濃および希薄予混合気による対向流について，燃料をメタンとして，幅広いの濃度条件を設定した過濃および希薄予混合気を用いて，Triple flame の火炎構造について数値計算を行い検討する．

2 解析モデルおよび数値計算方法

2.1 解析モデル

本研究で用いた平面二次元平行流の解析モデルの概略を図 1 に示す．計算領域の左側から，メタン・空気系の過濃予混合気，純粋の空気あるいは希薄予混合気，およびそれらの間を濃度が線形的に変化する混合気からなる平行流を流入させ，その下流に Triple flame が形成されるようにする．Triple flame の先端の位置をほぼ原点 O とする二次元直角座標系を考え，流れ方向に x 座標，幅方向に y 座標をとる．入口側の p 点より下部を過濃予混合気（当量比 ϕ_0 ）とし，一様な速度 u_0 ，温度 T_0 ，濃度 $Y_{i,0}$ とする．一方， q 点より上部を空気あるいは希薄予混合気（当量比 ϕ_∞ ）とし， u_∞ ， T_∞ ， $Y_{i,\infty}$ とする．また p 点および q 点の間（距離 L_{pq} ）を濃度の線形的変化領域とする．圧力は大気圧，流入速度は $u_0 = u_\infty$ ($u_\infty/u_0 = 1$)，流入温度は室温で $T_0 = T_\infty = 300\text{K}$ ($T_\infty/T_0 = 1$) とする．

流入速度は，適当に与えた値の下で非定常計算を行い，Triple flame の先端がほぼ y 軸上に定在するように，微調整しながら定めた．なお，一次元平面火炎とは異なり，すべての予混合気が反応帯に流入するわけではないので，この流入速度を「見掛けの燃焼速度」と呼ぶ．

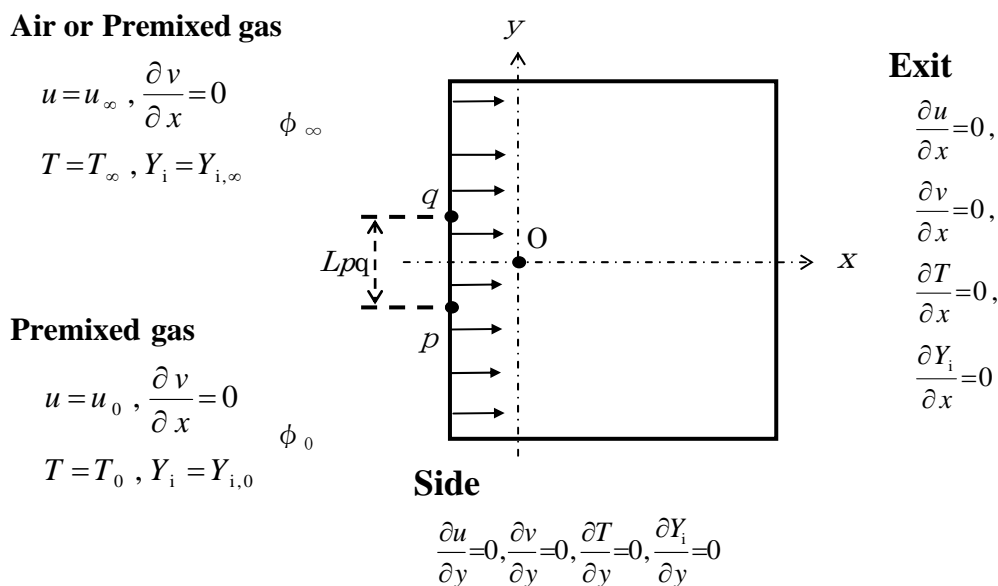


Figure 1: Analytical model and boundary conditions of two-dimensional co-flow

化学反応機構としては、メタンの場合には 16 個の化学種に対して 35 個の素反応を考慮する Smooke らの Skeletal Chemistry[23]を用いる。混合気は理想気体とし、物性値に関しては、熱力学定数については各化学種の定圧比熱を温度のみの関数と仮定し、JANAF table の値に対し、適当な温度範囲で最小二乗近似を施した温度の多項式で与える。輸送係数について Smooke らの Simplified Transport Model[23]を適用する。

基礎方程式は以下に示すような保存方程式である連続の式、ナビエ・ストークス方程式、エネルギー方程式および各化学種の連続方程式と、状態方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} u_m) - \nabla \cdot (\mu \nabla u_m) = -\frac{\partial P}{\partial x_m} - \rho g_m + \left(-\frac{\partial \mu}{\partial x_m} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) - \frac{1}{c_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \frac{1}{c_p} \frac{Dp}{Dt} - \frac{1}{c_p} \sum_i h_i w_i - \frac{\rho}{c_p} \sum_i (c_{p,i} Y_i \mathbf{v}_i \cdot \nabla T) \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) - \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) = w_i \quad (4)$$

$$p = \rho R^0 T \sum_i \frac{Y_i}{m_i} \quad (5)$$

混合気は理想気体とし、Soret 効果および Dufour 効果、圧力拡散の効果は無視する。また、外力を無視し、体積粘性係数 $\kappa = 0$ とする。エネルギー方程式において、粘性散逸は無視し、 Dp/Dt を無視する。

本研究で用いた平面二次元対向流火炎の解析モデルを図 2 に示す[25]。二つのノズルが距離 $L=15\text{mm}$ だけ離れて対向していると仮定する。左側ノズルからメタン・空気系の過濃予混合気もしくは純粋のメタン、右側ノズルから希薄予混合気もしくは純粋の空気が噴射される。この場合、過濃予混合火炎、拡散火炎および希薄予混合火炎から構成された Triple flame が形成される。計算条件は以下のようにする。 $u_0 = u_\infty = 0.25\text{m/s}$, $T_0 = T_\infty = 300\text{K}$, $Y_{i,0}$ と $Y_{i,\infty}$ は設定した当量比に対応して与える。本計算では、流れ場を平面二次元ポテンシャル流とし、温度場および濃度場において相似解が適用できるものと仮定する。化学反応機構としては、49 個の化学種について 279 個の素反応を考慮した GRI-Mech2.11[26]を用いる。

2.2 数値計算方法

保存方程式の離散化には有限体積法を用い、圧力と速度の連成には Patankar の SIMPLE 法[27]を適用した。対流項には一次風上法、時間展開には Euler の完全陰解法を適用し、時間刻みは $20\mu\text{s}$ とした。着火のために初期時刻に原点近傍に高温部を設け、十分安定した火炎が形成された後これを取り除いた。その後、さらに十分に時間が経過した後の定常解を求めた。各時間ステップにおいて、SOR 法による繰り返し計算を行い、緩和係数はすべての変数について、0.07 程度とした。計算領域の大きさは x 方向 40mm , y 方向 40mm とした。格子点の数は x 方向 y 方向ともに 401 とし、原点近傍で最も細くなる不等間隔格子とした。数値計算手法の詳細については文献[28]を参考にされたい。なお、比較のために行った平面二次

元対向流火炎では、相似解による一次元計算を行ったが、差分格子は等間隔で 201 点、時間刻みは $5\mu s$ とした。

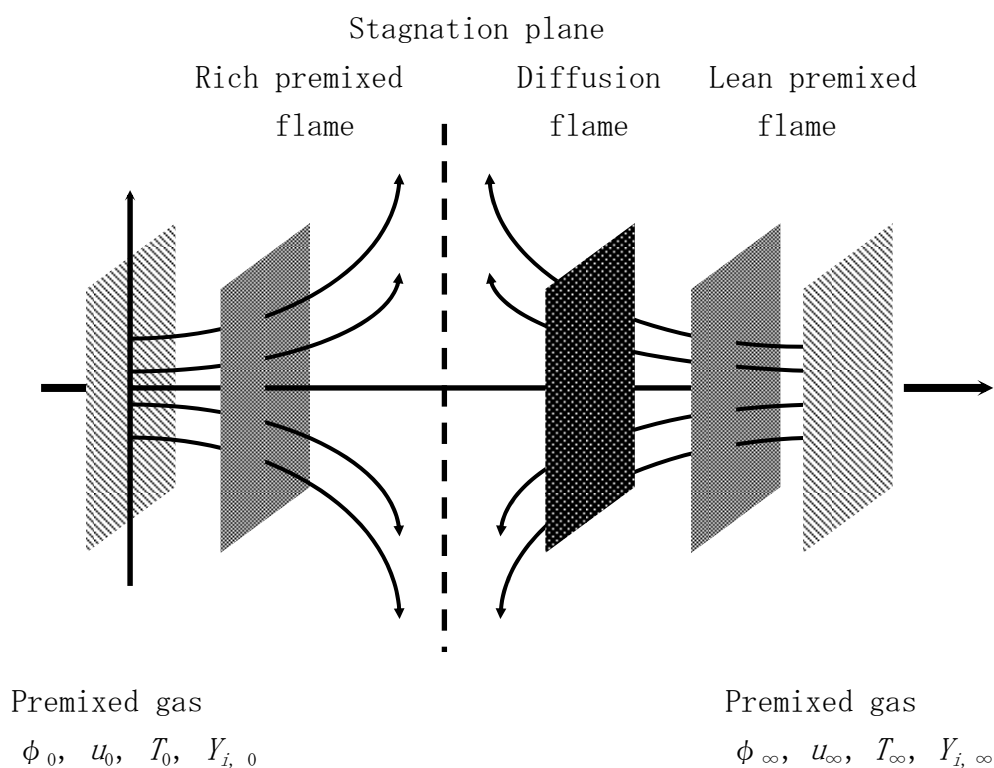


Figure 2: Analytical model and boundary conditions of counterflow

3 計算結果および検討

3.1 Triple flame の火炎構造

平面二次元平行流における Triple flame の火炎構造については、前報[24]において、一次元予混合火炎的な効果によって生じた凸形状部に、発熱による膨張に起因する流体力学的効果が重なることにより、さらに形状変化が促進されること、また、見掛けの燃焼速度が一次元予混合火炎の燃焼速度に対し、メタン・空気系では 2 倍強、水素・空気系では 3 倍程度となることを明らかにした。本報では、前報よりもかなり大きな計算領域による計算結果を示し、境界条件の影響を検討するとともに、Triple point のかなり下流側での火炎の挙動を明らかにした。

メタン燃料、 $\phi_p=4$ 、 $\phi_q=0$ 、 $L_{pq}=2\text{mm}$ の条件における熱発生速度 q/q_{\max} と速度ベクトル、温度および圧力の瞬間分布を図 3 に示す。前方では Triple flame が形成され、弱い拡散火炎分枝が過濃予混合火炎分枝側に存在する。火炎はこの後方で一度消炎して予混合化された後、再着火して非定常的に変動する Convection flame[4]を形成している。温度は拡散火炎部に相当する位置で高くなっている。また、圧力は、Triple point 前方で高くなり、火炎内部で高温になり加速されると低下し、さらに下流側の Convective flame の部分で変動している。ここで、本研究では温度が 1600K の等温線の最も凸に突き出している部分を Triple point と

した。

次に、水素燃料、 $\phi_p=10$, $\phi_q=0$, $L_{pq}=2\text{mm}$ の条件における熱発生速度 q/q_{\max} と速度ベクトル、温度および圧力の瞬間分布を図 4 に示す。この条件では、拡散火炎分枝が明確には確認できないが、希薄予混合火炎分枝の内側に存在する Triple flame となっている。この希薄予混合火炎分枝に沿って、下流側では渦が発生し非定常変動が生じている。これは水素燃料の場合には、平行流の流入速度が 10m/s と非常に速いためと考えられる。温度はメタンの場合と同様に拡散火炎部に相当する位置で高くなっている。また、圧力も同様に、Triple point 前方で高くなり、火炎内部で高温になり加速されると低下し、下流側では渦挙動に対応して変動している。

なお、メタン燃料および水素燃料ともに、Triple flame の火炎構造は、上流側の Triple point 近傍では、前報[24]で示した狭い計算領域における計算結果と一致しており、境界条件の影響はほとんどなかったと考えられる。今回の広い計算領域における計算結果により、下流側での火炎の挙動が明らかになった。

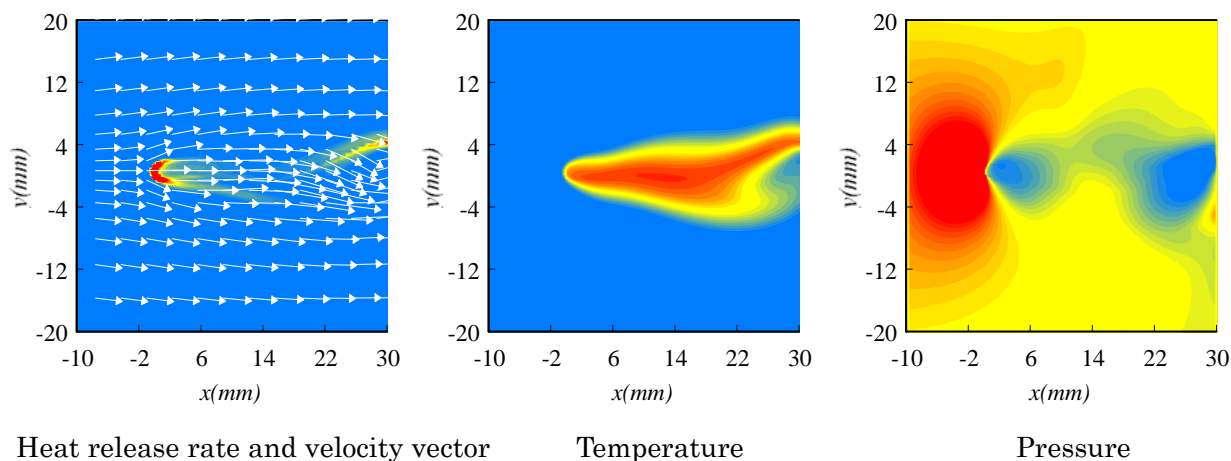


Figure 3: Flame structure of triple flame (CH_4 , $\phi_p=4$, $\phi_q=0$, $L_{pq}=2\text{mm}$)

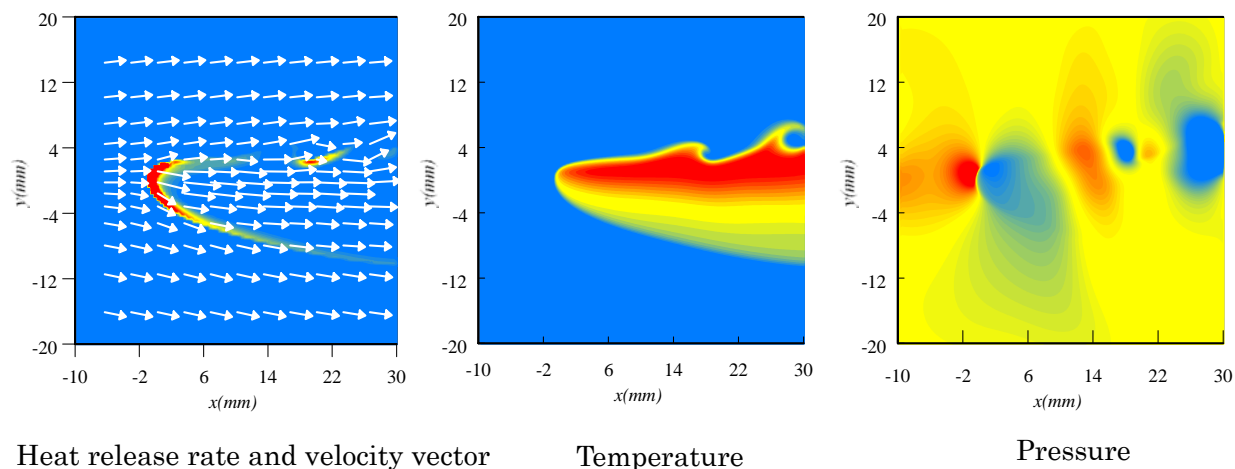


Figure 4: Flame structure of triple flame (H_2 , $\phi_p=10$, $\phi_q=0$, $L_{pq}=2\text{mm}$)

3.2 流入予混合気の濃度分布が火炎構造に与える影響

本報では、前報[24]よりも入口の混合気の幅方向の濃度分布を広範囲で変化させ、濃度分布が Triple flame の火炎構造に与える影響を系統的に調べた。その典型的な例として、メタン燃料、 $\phi_p=1.0, 1.5, 3.0, \phi_q=0, L_{pq}=2\text{mm}$ の場合について、図 5 に示す。上図には、入口における未燃予混合気の幅方向の当量比分布を赤線で、 $x=-0.6468\text{mm}$ 断面における当量比分布を黒線で示した。なお、この黒線について、一次元予混合火炎の可燃限界を緑色の薄い線で示した。また、各条件における Triple point の y 座標 y_{tp} を青線で示した。下図には Triple point 近傍の熱発生速度 q/q_{\max} の分布を示した。 $x=-0.6468\text{mm}$ の断面では q/q_{\max} の値が 0.001 程度で、燃焼反応速度が上昇を開始する直前の位置と考えられる。すべての条件において、黒線の方が赤線よりも当量比の勾配が緩やかになっている。これは混合気の拡散の効果と、入口側から流入した平行流が曲げられたことによる対流の効果のためと考えられる。 q/q_{\max} の分布を $x=-0.6468\text{mm}$ 断面における未燃予混合気の幅方向濃度分布を比較すると、反応の激しく起っている領域の幅方向の大きさは緑線で示した可燃限界内にある予混合気が分布している領域の幅にほぼ対応していることがわかる。また、可燃限界内にある予混合気の分布する領域のうち、勾配を有する領域では火炎は凸形状をもち、勾配のない領域では火炎は平面形状をもっていることがわかる。また、 q/q_{\max} 分布から反応が激しく起っている部分は、反応帯直前における未燃予混合気の幅方向濃度分布において当量比 1.0 付近が分布している領域の下流に位置しており、 $\phi_p=1.5$ および 3.0 のように火炎形状が凸に突き出している条件では、 y_{tp} は q/q_{\max} 分布で最も上流側に突き出している部分と一致している。

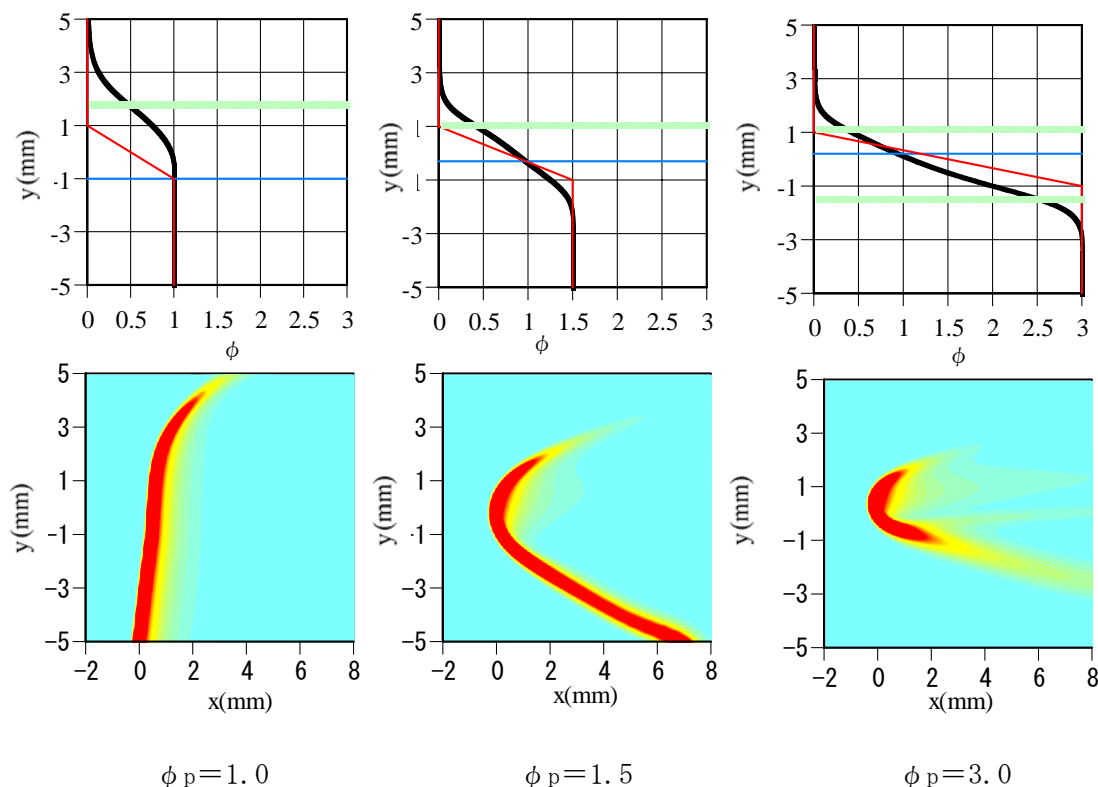


Figure 5: Effect of fuel equivalence ratio profile on flame structure
($\text{CH}_4, \phi_p=1.0, 1.5, 3.0, \phi_q=0, L_{pq}=2\text{mm}$)

3.3 Triple flame の火炎特性と見掛けの燃焼速度

入口における流入予混合気の濃度分布特性を表す指標として、従来から混合分率 Z の入口における幅方向勾配が用いられている。確かに、幅方向の濃度分布の変化が Triple flame の三つの分枝火炎を構成する原因ではあるが、Triple flame の燃焼反応の強さや火炎の大きさはこれだけではなく、平均の濃度レベルや当量比にも依存すると考えられる。したがって、層流燃焼速度 S_L と混合度 (Mixedness) Z_{F0} を用いて次式で定義される可燃予混合気の有効質量流量を考慮する必要がある。

$$\dot{m} \equiv \rho |Z_{F0}| S_L \quad (6)$$

ここで、混合度は燃料および酸化剤の質量分率 Y_F および Y_O と、単位質量の燃料を総括反応で完全燃焼させるのに必要な酸化剤の質量 j を用いて次式で定義される [20]。

$$Z_{F0} = \frac{Y_o}{j} \left(\frac{Y_o}{j} \leq Y_f \right) \quad \text{あるいは} \quad -Y_f \left(\frac{Y_o}{j} \geq Y_f \right) \quad (7)$$

流入予混合気の特徴を表す指標として、この可燃予混合気の有効質量流量の Triple point 近傍での「積分量」と「幅方向変化量」が重要と考えられる。本研究では、このような入口における流入予混合気の濃度分布特性を広範囲で変化させるために、過濃側および未燃側の予混合気の当量比を大きく変化させて、火炎構造に与える影響について検討した。

上述の流入予混合気の特徴を表す指標である可燃予混合気の有効質量流量の Triple point 近傍での「積分量」と「幅方向変化量」は、Triple flame 自体の火炎特性に関係している。本研究では、Triple flame 自体の火炎特性を表すために、前者に関連する指標として「最大熱発生速度 q_{max} 」を考えた。ここで、 q_{max} は Triple point 周りにおける熱発生速度の最大値であり、一次元予混合火炎的な「燃焼しやすさを表す指標」である。また、後者に関連する指標として、 $y = y_{tp}$ 断面における流れ方向速度成分の流入速度に対する「速度減少割合 $(u_o - u_{min})/u_o$ 」を考えた。ここで、 u_{min} はこの断面における流れ方向速度の最小値であり、通常、Triple point の直前で現れる。速度減少割合 $(u_o - u_{min})/u_o$ は上流側に凸の二次元火炎形状をもつ火炎における「流体力学的効果の大小を表す指標」である。この流体力学的効果は火炎面の形状と関係していると考えられるので、速度減少割合と「火炎形状を表す指標」である火炎面の Triple point における曲率 κ との関係を図 6 に示した。図から分かるように、火炎面の曲率 κ が 0.4mm^{-1} 程度の場合に流体力学的効果が最も大きくなる。これは曲率が大きくなりすぎると、流線が広がって速度が低下するという効果が小さくなり、一方、曲率が小さすぎると、平面火炎的になり流れは火炎面に向かって真直ぐに流入するためである。

Triple flame の安定性において重要な見掛けの燃焼速度 u_o について、火炎特性 q_{max} および $(u_o - u_{min})/u_o$ の影響を同時に検討するために、図 7 において、横軸に q_{max} 、縦軸に $(u_o - u_{min})/u_o$ をとり、 u_o の値を擬似カラーで示した。図から分かるように、 q_{max} および $(u_o - u_{min})/u_o$ がともに大きい場合において見掛けの燃焼速度は大きくなる。なお、幅広い入口濃度条件を設定したが、結果として得られた q_{max} と $(u_o - u_{min})/u_o$ の値は必ずしも幅広く分布せず、図のプロット点のように偏った分布となった。例えば、平面火炎では $(u_o - u_{min})/u_o$ がゼロとなるはずであるが、入口濃度分布を広範囲で変化させても $(u_o - u_{min})/u_o$ は 0.4 以上の値しか得られない。これは平面火炎は不安定で、現実には存在しにくいことを示している。

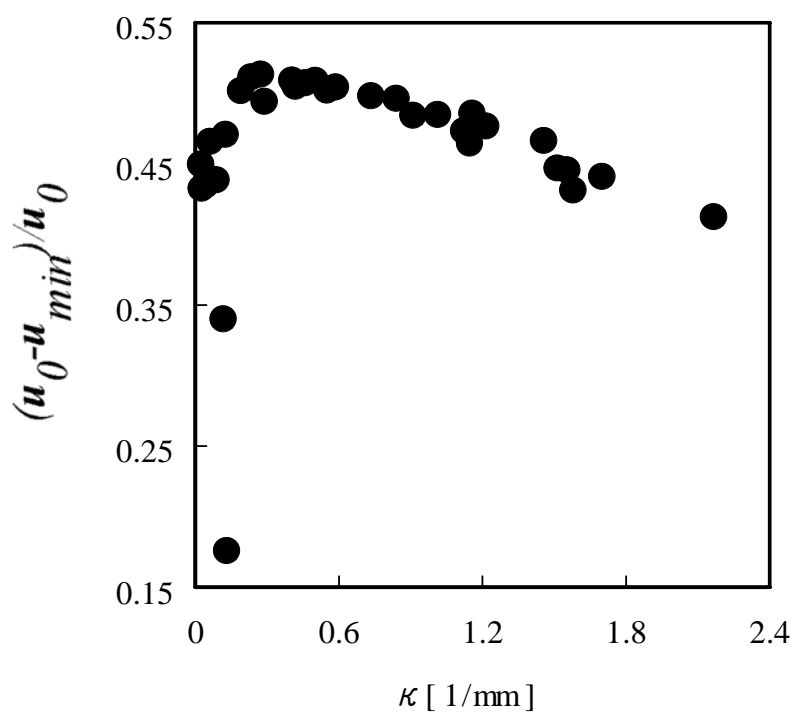


Figure 6: Relationship between κ and $(u_o - u_{min})/u_o$

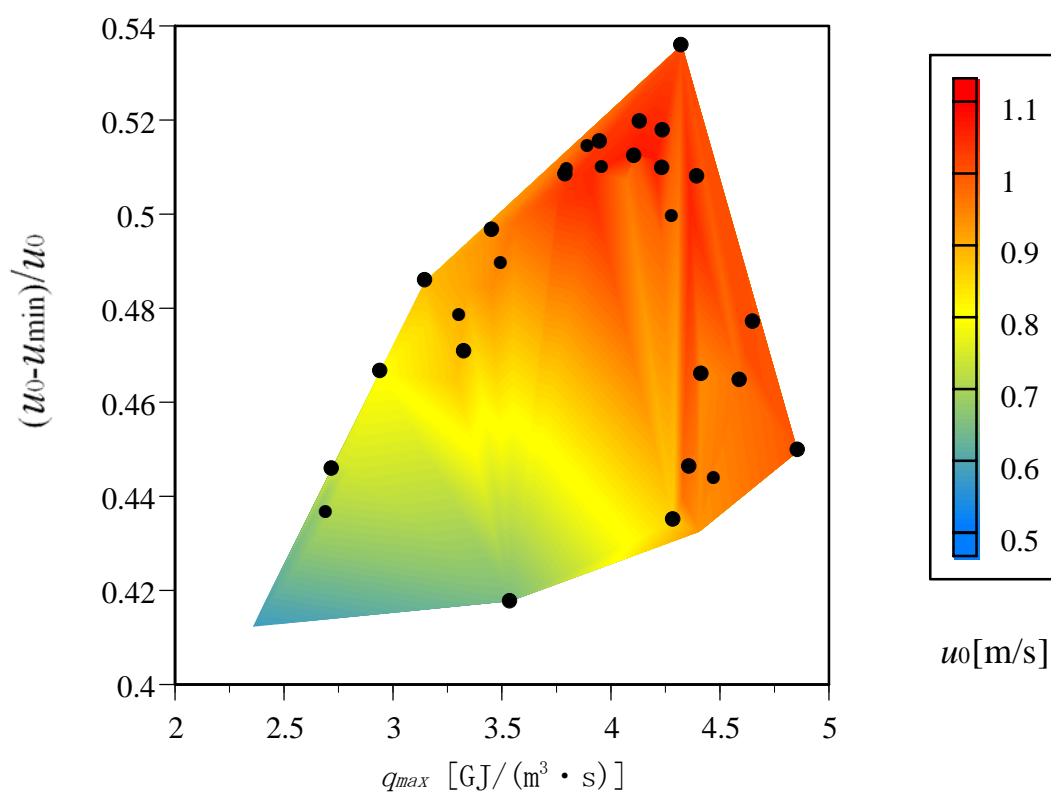


Figure 7: Effect of q_{max} and $(u_o - u_{min})/u_o$ on apparent burning velocity of triple flame

3.4 過濃および希薄予混合気による対向流における Triple flame の火炎構造

二次元平行流の Triple flame の火炎構造に対する予混合気の濃度分布の影響を系統的に調べるために、過濃および希薄予混合気による対向流における Triple flame について検討した。三つの火炎が比較的明確に現れる代表的な例として、過濃側の当量比 $\phi_{rich}=4$ 、希薄側の当量比 $\phi_{lean}=0.4$ の場合の火炎構造を図 8 に示す。横軸には軸方向座標 x をとり、熱発生速度 q/q_{max} を赤線、軸方向速度 u を黒線、温度 $T/2300$ を青線で示した。熱発生速度にはピークが三つあり、左側から過濃予混合火炎、拡散火炎、希薄予混合火炎に対応する。

過濃および希薄予混合気の当量比を幅広く変化させたときの火炎構造の変化について、 $\phi_{rich}=4$ 、 $\phi_{lean}=0\sim 0.6$ の場合を図 9 に、 $\phi_{rich}=1.5\sim\infty$ 、 $\phi_{lean}=0.4$ の場合を図 10 に示す。左図は熱発生速度、右図は温度の分布である。希薄側の当量比が大きくなり 1 に近づくと、希薄予混合火炎のピークは大きくなるが、過濃予混合火炎のピークは少しずつ減少し、その火炎位置は希薄側にずれる。また、拡散火炎のピークは 2 つ現れ、希薄側の予混合気を純粋の空気とした条件で最大となり、当量比を 1 に近づけるにつれてそのピークは減少する。一方、過濃側の当量比が小さくなり 1 に近づくと、過濃予混合火炎のピークは大きくなるが、希薄予混合火炎のピークは少しずつ減少し、その火炎位置は過濃側にずれる。

このような対向流における Triple flame の 3 つの火炎の挙動は、二次元平行流における Triple flame の場合にも同様であると考えられる。

4 結論

過濃および希薄予混合気の二次元平行流下流に形成される Triple flame に関して、かなり大きな計算領域を用いて、広範囲の予混合気濃度分布に対して数値計算を行い、この火炎の安定性および火炎構造について詳細な検討を行い、以下のような結論を得た。

(1) メタン燃料、 $\phi_p=4$ 、 $\phi_q=0$ 、 $L_{pq}=2\text{mm}$ の条件において、前方では Triple flame が形成されるが、火炎はこの後方で一度消炎して予混合化された後、再着火して非定常的に変動する Convective flame を形成する。水素燃料、 $\phi_p=10$ 、 $\phi_q=0$ 、 $L_{pq}=2\text{mm}$ の条件において、下流側では渦が発生し非定常変動が生じる。Triple flame の火炎構造は、上流側の Triple point 近傍では、前報で示した狭い計算領域における計算結果と一致しており、境界条件の影響はほとんどない。

(2) 入口における流入予混合気の濃度分布特性を表す指標として、層流燃焼速度 S_L と混合度 (Mixedness) Z_{p0} を用いて定義される可燃予混合気の有効質量流量の Triple point 近傍での積分量と幅方向変化量が重要である。火炎特性を表す指標として、最大熱発生速度 q_{max} と、流れ方向速度成分の流入速度に対する速度減少割合 $(u_0 - u_{min})/u_0$ を考え、前者は一次元予混合火炎的な「燃焼しやすさを表す指標」であり、後者は上流側に凸の二次元火炎形状をもつ火炎における「流体力学的効果の大小を表す指標」であり、「火炎形状を表す指標」である火炎面の Triple point における曲率 κ と関連していることを指摘した。また、火炎面の曲率 κ が 0.4mm^{-1} 程度の場合に最も流体力学的効果が大きくなる。

(3) Triple flame の安定性において重要な見掛けの燃焼速度 u_0 は、 q_{max} および $(u_0 - u_{min})/u_0$ がともに大きい場合において大きくなる。また、 q_{max} と $(u_0 - u_{min})/u_0$ の値は偏って分布し、平面

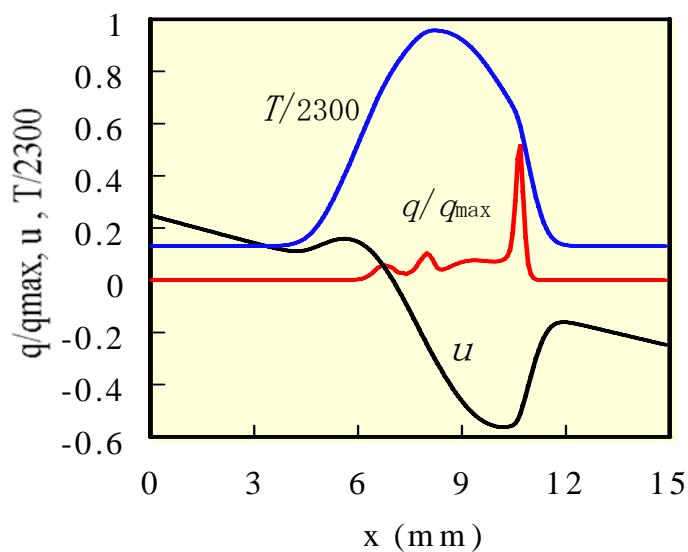


Figure 8: Flame structure of triple flame (Counterflow, $\phi_{rich}=4$, $\phi_{lean}=0.4$)

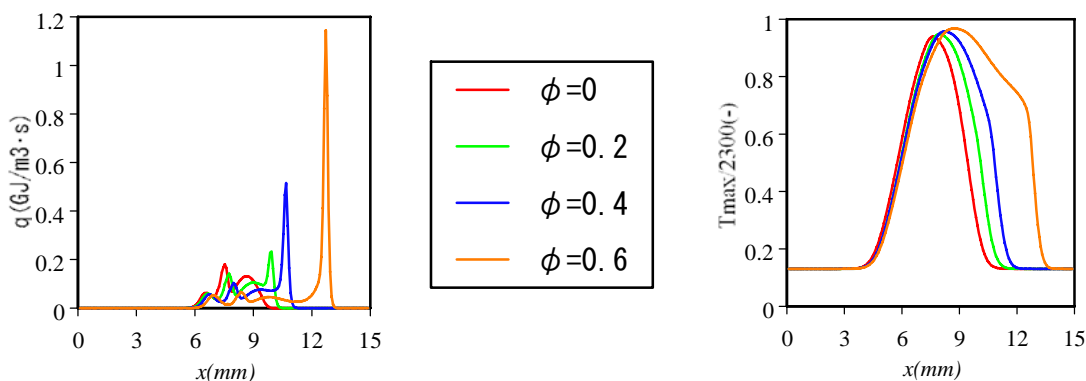


Figure 9: Flame structure of triple flame (Counterflow, $\phi_{rich}=4$, $\phi_{lean}=0 \sim 0.6$)

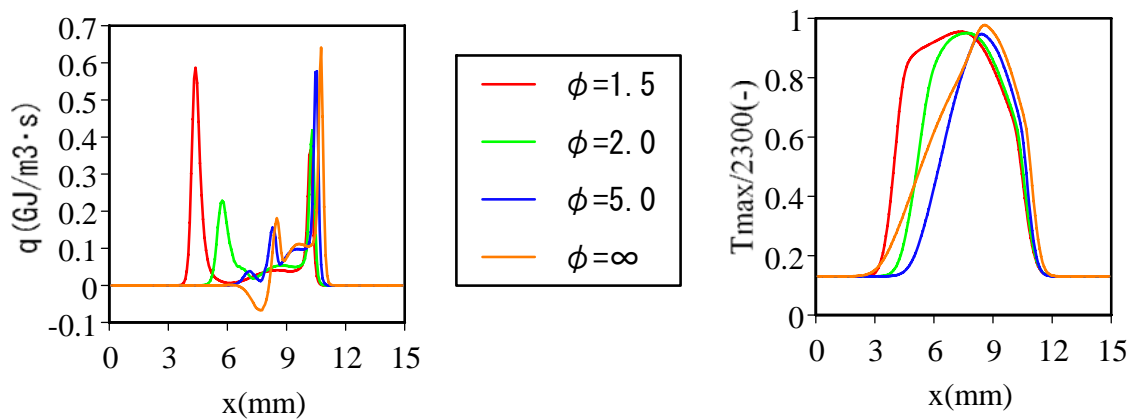


Figure 10: Flame structure of triple flame (Counterflow, $\phi_{rich}=1.5 \sim \infty$, $\phi_{lean}=0.4$)

火炎が現実には存在しにくい。

(4) 過濃および希薄予混合気による対向流における Triple flame において、希薄側の当量比が大きくなり 1 に近づくと、希薄予混合火炎のピークは大きくなるが、過濃予混合火炎のピークは少しずつ減少し、その火炎位置は希薄側にずれる。また、拡散火炎のピークは 2 つ現れ、希薄側の予混合気を純粹の空気とした条件で最大となり、当量比を 1 に近づけるにつれてそのピークは減少する。一方、過濃側の当量比が小さくなり 1 に近づくと、過濃予混合火炎のピークは大きくなるが、希薄予混合火炎のピークは少しずつ減少し、その火炎位置は過濃側にずれる。

参考文献

- [1] Muniz, L. and Mungal, M.G., “Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames”, *Combust. Flame*, Vol.111, (1997), 16-31.
- [2] Muller, C.M., Breitbach, H. and Peters, N., “Partially Premixed Turbulent Flame Propagation in Jet Flames”, 25th Symposium (International) on Combustion, (1994), 1099-1106.
- [3] Phillips, H., Proc. “Flame in a Buoyant Methane Layer”, 10th Symposium (International) on Combustion, (1965), 1277-1283.
- [4] Liebman, I., Corry, J., and Perlee, H. E., “Flame Propagation in Layered Methane-Air Systems”, *Combust. Sci. Technol.*, Vol.1, (1970), 257-267.
- [5] 廣田光智, 松尾亜紀子, 溝本雅彦, “濃度勾配を有する予混合気中を伝播する火炎の特性 (第 2 報)”, 第 36 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1998), 404-406.
- [6] 廣田光智, 松尾亜紀子, 溝本雅彦, “濃度勾配を有する予混合気中を伝播する火炎の特性 (第 3 報)”, 第 37 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1999), 403-404.
- [7] 廣田光智, 松尾亜紀子, 溝本雅彦, “濃度勾配を有する予混合気中を伝播する火炎の特性 (第 4 報)”, 第 38 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2000), 33-34.
- [8] 廣田光智, 松尾亜紀子, 溝本雅彦, “濃度こう配を有する予混合気中を伝ばする火炎先端領域の特性”, 日本機械学会論文集, 第 66 巻 646 号, B 編, (2000), 1557-1564.
- [9] Dold, J. W., “Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame”, *Combust. Flame*, Vol.76, (1989), 71-88.
- [10] Kioni, P.N. et al., “Flame Spread in Laminar Mixing Layers: The Triple Flame”, *Combust. Flame*, Vol.95, (1993), 276-290.
- [11] Ruetsch, G.R. et al., “Effects of Heat Release on Triple Flames”, *Phys. Fluids*, Vol.7, (1995), 1447-1454.
- [12] Domingo, P. and Vervisch, L., “Triple Flames and Partially Premixed Combustion in Autoignition of Non-premixed Turbulent Mixtures”, Proc. 26th Symposium (International) on Combustion, (1996), 233-240.
- [13] Prasad, K. and Price, E. W., “A Numerical Study of the Leading Edge of Laminar

- Diffusion Flames”, *Combust. Flame*, Vol.90, (1992), 155-173.
- [14] Smooke, M.D. et al., 24th Symposium (International) on Combustion, (1992), 813.
- [15] Plessing, T. et al., “An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame”, *Combust. Flame*, Vol.115, (1998), 335-353.
- [16] Kioni, P.N. et al., “Experimental and Numerical Studies of a Triple Flame”, *Combust. Flame*, Vol.116, (1999), 192-206.
- [17] Yamashita, H., Kushida, G. and Takeno, T., “A Numerical Study of the Transition of Jet diffusion Flames”, *Proc. R. Soc. London, Ser A431*, (1990), 301-314.
- [18] Yamashita, H., Kushida, G. and Takeno, T., “Characteristics of Turbulent Fluctuations in Jet Diffusion Flames”, 24th Symposium (International) on Combustion, (1992), 311-316.
- [19] 山下博史, 井戸田敏博, 竹野忠夫, “噴流拡散火炎の遷移に与える燃料の影響”, *日本機械学会論文集*, 第 62 卷 595 号, B 編, (1996), 1226-1233.
- [20] Yamashita, H., Shimada, M., Takeno, T., “A Numerical Study on Flame Stability at Transition Point of Jet Diffusion Flames”, 26th Symposium (International) on Combustion, (1996), 27-34.
- [21] Yamashita, H., Nishioka, M. and Takeno, T., “Prediction of NO_x Production Rate in the Turbulent Diffusion Flame”, *Journal of Energy Conversion and Management*, Ran95 Special Issue, Vol.38, No.10-13, (1997), 1343-1352.
- [22] 山下博史, “噴流拡散火炎における Triple Flame に関する研究”, 第 33 回燃焼シンポジウム講演論文集, (1995), 341-343.
- [23] Smooke, M.D., *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, (1991), 1-28, Springer-Verlag.
- [24] 山下博史, 堤谷進也, 崔 洛挺, “Triple Flame の火炎構造に与える燃料および当量比の影響”, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 65 卷 630 号, (1999), 775-782.
- [25] 岸本 衛, 趙 黛青, 山下博史, “酸素富化空気を用いた対向流火炎の火炎構造および NO_x 生成”, *日本機械学会論文集 (B 編)*, 69 卷 669 号, (2002), 1578-1585.
- [26] GRI, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, 1995.
- [27] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, (1980), McGraw-Hill.
- [28] 山下博史, “乱流火炎の数値解析プログラム”, *名古屋大学大型計算機センターニュース*, Vol.26, No.3, (1995), 194-215.