

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

部分予混合雰囲気中に形成された火炎の燃え拡がりの実験と解析

Experimental and Numerical Analysis on Flame Spread in Partially Premixed Atmospheres

山本 和弘^{1*}・東城 博之²・小沼 義昭²YAMAMOTO, Kazuhiro^{1*}, TOJYO, Hiroyuki², and ONUMA, Yoshiaki²

1 名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Nagoya University, Furo-Cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

2 豊橋技術科学大学 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1
Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibirigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

2004年11月17日受付；2005年3月7日受理／Received 17 November, 2004; Accepted 7 March, 2005

Abstract : In this study, we have numerically investigated flame spread over solid fuel in partially premixed atmospheres, which may occur under poorly ventilated conditions, forming the combustible mixtures of oxygen and fuel vapors. For simplicity, only gas phase is considered to simulate the flame spread, by moving the area of fuel injection at the solid surface. To confirm the validity of our numerical model, we have experimentally examined a non-premixed flame in the laminar boundary layer over a porous flat plate, from the surface of which fuel gas is injected uniformly. The plate of fuel injection is placed parallel to the ambient air flow. Methane is added in this ambient air to form the partially premixed mixture. Temperature measurement has been conducted. Results show that, the flame structure over the porous flat plate is well simulated, although the flame temperature is much overpredicted. In partially premixed atmospheres, the flame spread rate is increased, with the expanded high temperature region. This is because the fuel already exists in the upstream region to support the flame propagation. These results are very similar to our previous experiments using filter paper sheet as solid fuel.

Key Words : Flame Spread, Solid Fuel, Partially Premixed Combustion, Heat Transfer

1. 緒論

可燃性固体の代表的な研究として、ろ紙や PMMA を用いたものが挙げられる[1-7]。ろ紙や PMMA の組成はほぼ均一であり、密度や厚さなど特性の異なる試料を入手しやすいことから実験に適していると言える。これらの燃焼現象は、火災時の燃え拡がりを単純化したものとみなせるため、我々も試料にろ紙を用いた燃え拡がりを調べることで、周囲温度や酸素濃度の影響を詳細に調べてきた[8,9]。

従来の研究では、火災の燃え拡がりを防ぐという観点から、不活性ガスなどの希釈剤が燃焼場に及ぼす影響が主に検討されてきた[10]。しかしながら火災が延焼していく過程において、燃焼が完全でない場合には、まだ反応していない熱分解ガスが周囲空気と混合し、可燃性の雰囲気形成されることが考えられる。このような状況下での火災の

燃え拡がりを詳細に検討することも防災上重要であると思われるが、Ronneyらの実験と漸近解析が行われただけである[11]。

そこで我々は、まず可燃性固体の熱分解過程を明らかにするため、加熱炉型の熱分解装置とガスクロマトグラフを用いて、試料にろ紙を用いた場合の熱分解ガスの同定と定量化を行った。また、検出された炭化水素の中で比較的発生量の多かったメタンに着目し、希薄可燃限界以下の燃料を対向する空気に添加して、部分予混合雰囲気中の燃え拡がりを調べた[12]。その結果、①熱分解ガスには多くの炭化水素に加えて一酸化炭素や二酸化炭素が存在する、②部分予混合雰囲気中では先行する青炎が大きくなり高温の領域が拡大する、③添加するメタン濃度が高いほど燃え拡がり速度が増加する、などを明らかにした。また水素やプロパンを添加した実験も行っており、同様な傾向が得られている[13]。ただし、ろ紙の熱分解ガスに含まれる成分は非常に多いため、同定が完全にはできていない。また、火災の燃え拡がりは非定常の現象であるため、実験により現象

* Corresponding author. E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

を解析するには限界があった。

そこで我々は、多孔質平板より気体燃料を吹き出す層流平板境界層拡散火炎に着目する[14-18]。層流平板境界層拡散火炎は、固体あるいは液体表面上を燃え広がる火炎に類似した構造を持つ。可燃性固体表面上を伝播する火炎とは異なり定在火炎である。また可燃性固体の熱分解ガスではなく、多孔質平板から単一の燃料を吹き出すため、実験および解析に適している。本研究では燃料(メタン)を対向する空気に添加し、部分予混合雰囲気中における層流平板境界層拡散火炎の実験および数値解析を行った。また燃料の吹き出し領域を移動させることにより火炎の燃え拡がり現象を模擬し、燃料添加の影響を調べた。具体的には、実験により推定された可燃性ガスの発生温度により燃料の吹き出し位置を決定し、熱が火炎前方の上流域に輸送されるに伴い、燃料の吹き出し位置を移動させて火炎を燃え拡がらせることにした。

2. 実験装置

層流平板境界層拡散火炎の実験に用いた装置は、既に他の研究者により行われたものとはほぼ同じである[14-16]。我々の装置の概略を図1と図2に示す。対向する空気の流速を一定とするために風洞を用いた(図1)。出口の形状は80 mm × 80 mmの正方形であり、整流のため胴内部に、10, 20及び30メッシュの整流網を各1枚ずつ設置した。今回は対向する空気に燃料であるメタンを添加し、部分予混合雰囲気中の火炎の実験を行った。ただし、混合気自身の燃焼を防ぐため、希薄可燃限界以下の燃料濃度になるように設定した(本実験では体積濃度で3%以下)。なお対向流速は15 cm/s一定とした。一方、燃料は金属の多孔質平

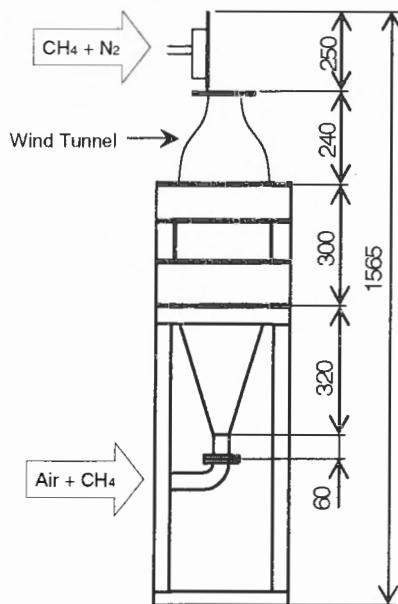


Fig. 1 Combustion chamber.

板から対向する空気に直角方向に噴出される(図2)。多孔質平板には80 × 40 mm、厚さ5 mmのステンレス製焼結金属(ろ過精度10 μm)を用いた。この多孔質平板は、250 × 200 mm、厚さ6 mmのステンレス板に、空気用の風洞出口より20 mmの位置に取り付けられている。

気相の温度測定は、Pt-Pt/13% Rhの熱電対を用いて行った。素線径は50 μmであり、熱電対の起電力は、分解能14 bit、最大サンプリング周波数50 kHzのカード型A-D変換器(KEYENCE, NR110)を介してパーソナルコンピュータに取り込み、温度の算出を行った。このとき輻射による温度補正を行っている[19]。ただし火炎温度が高すぎると熱電対の素線が切れてしまうため、実験では多孔質平板から吹き出される燃料に体積濃度で50%の窒素を添加した。

3. 解析方法

本研究では定在火炎と伝播火炎を解析する。定在火炎はいわゆる層流平板境界層拡散火炎である。非圧縮の質量保存の式、運動量保存の式、化学種保存の式、エネルギー保存の式を差分法により解くことで、流速、温度、化学種の濃度などを計算する[20]。境界層近似は行っていない。また詳細は後述するが、燃料の吹き出し領域を移動させることにより火炎の燃え拡がり現象を模擬した。

対象とする2次元の解析モデルの概略を図3に示す。実験では鉛直上向きに空気を吹き出しているが、計算では重力の影響を考慮しておらず空気が左側から流入する。定在火炎解析時の計算領域は、水平方向(X方向)に3 cm、垂直方向(Y方向)に2 cmとし、格子数は水平方向に301、垂直方向に201とした。

伝播火炎を解析する際は、火炎が移動することを考慮し

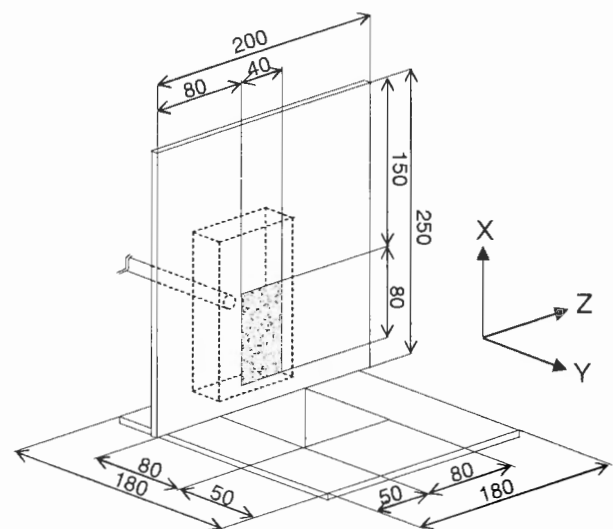


Fig. 2 Porous flat plate for fuel gas injection.

燃え拡がり方向 (X 方向) に 6 cm と計算領域を大きくした。このときの格子数は 601 × 201 である。したがって、いずれの場合も格子間隔は 0.1 mm である。対向する主流速度は実験と同じ 15 cm/s であり、その成分は空気及び、空気にメタンを添加した部分分子混合雰囲気とした。一方多孔質平板を想定した燃料の吹き出し部は右側の出口境界より 1 cm の範囲にある。簡略化のため反応は一段不可逆反応[21]を用いた。このときの反応定数、活性化エネルギー、燃料と酸素のべき乗の値はそれぞれ、 6.7×10^{12} , 2.0×10^5 , 0.2, 1.3 (単位はそれぞれ cm, K, s, J, mol) を用いた。熱伝導率や拡散係数などの物性値は一定、また浮力の影響は考慮していない。

また境界条件であるが、左側から実験時と同じ流速と組成の混合気が流入するものとし、上部は自由壁、下部は燃料吹き出し部前方ですべりなし条件、燃料の吹き出し部では燃料流速が 1.5 cm/s, また出口では温度などの各スカラ

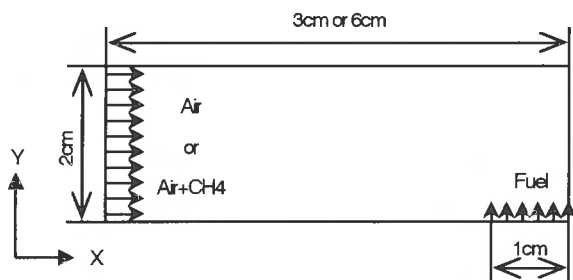


Fig. 3 Numerical model and coordinate.

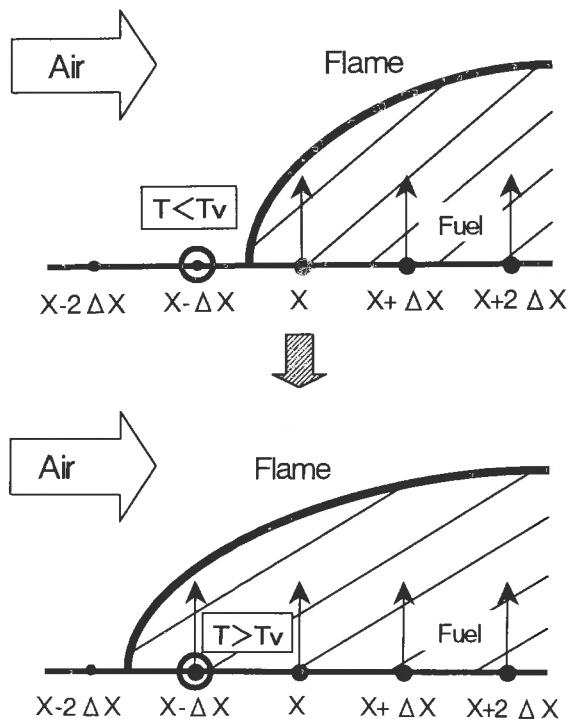


Fig. 4 Flame spread by moving flat plate for fuel.

一量の流れ方向の勾配をゼロとした。

ここで、火炎の燃え拡がりの計算方法を説明する。一般に可燃性固体の燃え拡がり現象では、まず火炎から熱を受けて固体が熱分解を起こし、放出された CO や炭化水素などの可燃性ガスが反応領域に輸送されることにより火炎伝播が維持される。つまり火炎からの熱により可燃性ガスが発生する領域が拡大していると言える。ここではこの現象を考慮し、可燃性ガスの吹き出し領域より上流側にある底部壁面において、火炎からの熱輸送によって温度がある一定値以上になった場合、その領域からも可燃性ガスを吹き出すという条件を加え、可燃性ガスが吹き出す領域を広げることとした。例えば、ある時刻で X より大きい領域 (X, X + ΔX, X + 2ΔX + ...) で燃料を吹き出しているとする (図 4)。時間が進むと火炎より上流に熱が輸送される。これにより、X - ΔX の点において温度 T が上昇する。そして、温度がいわゆる可燃性固体の気化温度 T_v に相当する値以上になると、X - ΔX の点でも燃料を吹き出した。これにより火炎は上流側へと移動し、火炎伝播が模擬される。火炎の燃え拡がり速度は燃料の吹き出し位置の時間変化で求められる。また T_v には、過去にろ紙で行った実験を参考に 700 K とした[12]。

4. 結果

4.1. 火炎外観と温度測定結果

まず燃料を添加した場合の火炎構造の変化を調べるため、火炎の写真撮影を行った。その結果を図 5 に示す。図 5(a) は燃料であるメタンを添加しない場合であり、図 5(b) はメタンを体積濃度で 3 % 添加したものである。燃料は写真右側より吹き出され、空気が上向きに流れているため、浮力は鉛直方向に働くことになる。この 2 つを比較すると、対向する空気に燃料を添加した右図の火炎では、青炎が厚くなり火炎の大きさが拡大している。またわずかではあるが火炎が形成される位置が上流側に移動した。

次に火炎先端付近の温度を測定し、温度場の変化を調べた。多孔質平板の中心線上において X 方向及び Y 方向の 2 次元分布を求めた。この結果を図 6 に示す。図において原点は、燃料を吹き出す多孔質平板の開始位置である。板表面の温度は熱電対が接触してしまうため測定できなかった。これによると燃料を 2 % 添加した場合は、火炎が上流側に拡大するのに伴い温度が上昇しはじめる位置が上流側に移動している。また高温の領域も拡がり、火炎帯付近の最高温度は約 100 K 程度増加することがわかった。

次により詳細に温度場の変化を検討するため、Y = 2, 4 mm において流れ方向 (X 方向) の温度分布を求め、比較した。この結果を図 7 に示す。これによると、燃料を添加することにより火炎先端の位置が明らかに上流側に移動していることがわかる。また両分布において温度の最大値も増加した。

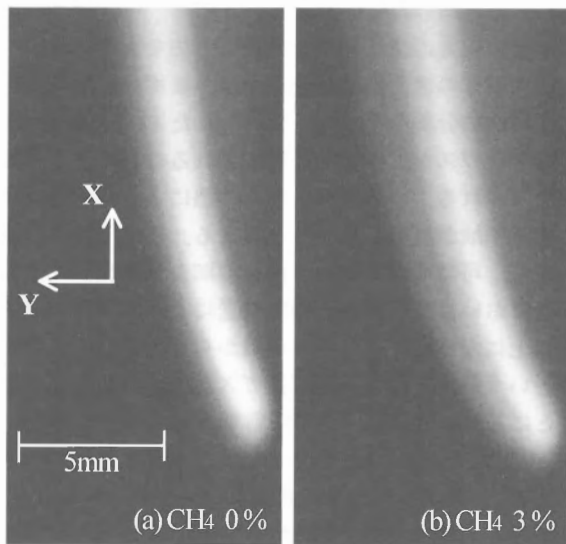


Fig. 5 Photograph of flames with methane addition.

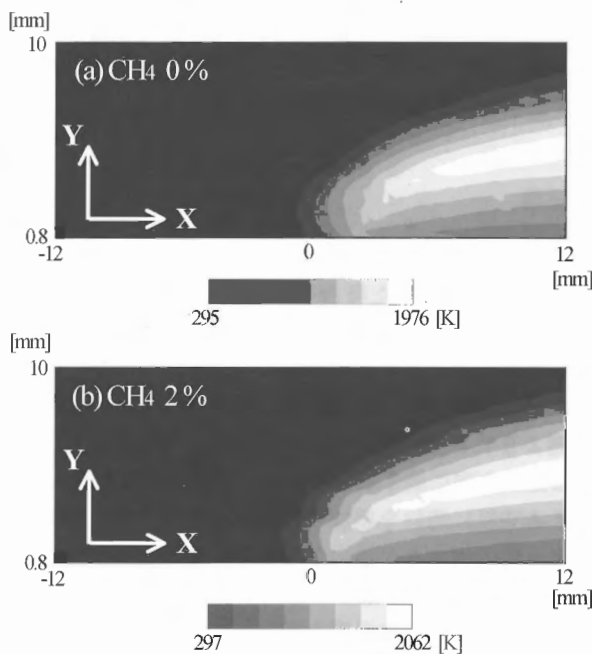


Fig. 6 Measured temperature field.

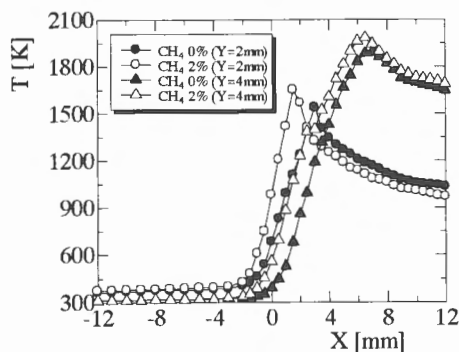


Fig. 7 Measured temperature profiles near flat plate.

4.2. 定在火炎の数値解析

実験と同様の条件で計算を行い、燃料添加の影響を計算によっても検討した。タイムステップは安定な計算が可能な値として 1×10^{-5} s に設定した。

まず燃料を添加しない場合の計算結果を図 8 に示す。ここでは、速度ベクトルと温度分布、メタンと酸素の質量分率分布、そして反応速度分布 ω (総括反応速度で単位時間、単位体積あたりの燃料のモル数) を示している。実験と同様、原点は燃料の吹き出し領域の開始位置であり、X が正の領域において燃料を吹き出している。これによると、左から流入してくる酸素と上向きに吹き出された燃料が高温の火炎帯で反応している様子がわかる。また火炎が形成される位置は燃料の吹き出し位置ではなく、わずかに上流側にある。反応領域は非常に薄く、典型的な拡散火炎の構造が本計算で再現されている。

次に、対向する空気にメタンを 1.5 % 添加した場合の温度分布と反応速度分布を図 9 に示す。図 8 の燃料を添加しない場合と比較すると、高温の領域がより上流側に広がっているものの、最高温度はわずかに高いだけである。また反応速度の最大値は小さくなっていることがわかった。

燃料添加による火炎への影響を更に詳しく検討するため、多孔質平板付近の温度場を調べた。メタン濃度が 0, 0.5, 1.0, 1.5 % において、平板からの距離 $Y = 1, 2$ mm における X 方向の温度分布を図 10 に示す。これによると、添加したメタンの濃度が高くなるにつれて高温領域が拡大していることが分かる。ただし、どの条件においても高温領域は上流側へと拡大しているものの、温度が最大となる位置より下流側での温度分布はほとんど変化していない。

次にメタンと酸素の濃度分布についても調べた。図 11 に平板からの距離 $Y = 2$ mm における X 方向分布を示す。これによると、燃料を添加したことにより上流側にも燃料が存在するが、 $X = -0.8$ mm から 0.1 mm の領域では反応により完全に燃料が消費されている。ただし、空気に添加した燃料は希薄可燃限界以下の濃度であるため、この範囲でも酸素濃度はゼロではない。添加する燃料濃度が高いと酸素がより大きく減少することになるが、 $X > 0.1$ mm では酸素濃度はほぼゼロであり、多孔質平板から吹き出される燃料のみが存在することがわかった。以上のことより、部分予混合雰囲気では、火炎前方に存在する燃料がまず反応し、高温領域が上流側へと拡大していることが推察された。

4.3. 伝播火炎の解析結果

最後に伝播火炎の解析を行った。まず燃料を添加しない場合について示す。図 8 を初期分布としてこのときの時間をゼロとし、燃え拡がり後の時間で 0.05 秒, 0.07 秒, 0.09 秒後の温度分布を図 12 に示す。これによると、燃料吹き出し領域を移動させることにより火炎は上流側へと移動していることがわかる。定在火炎の火炎構造と比較すると、伝播火炎では火炎先端がより鋭い形状になっている。これはおそらく、火炎が伝播することで火炎が受ける空気の相

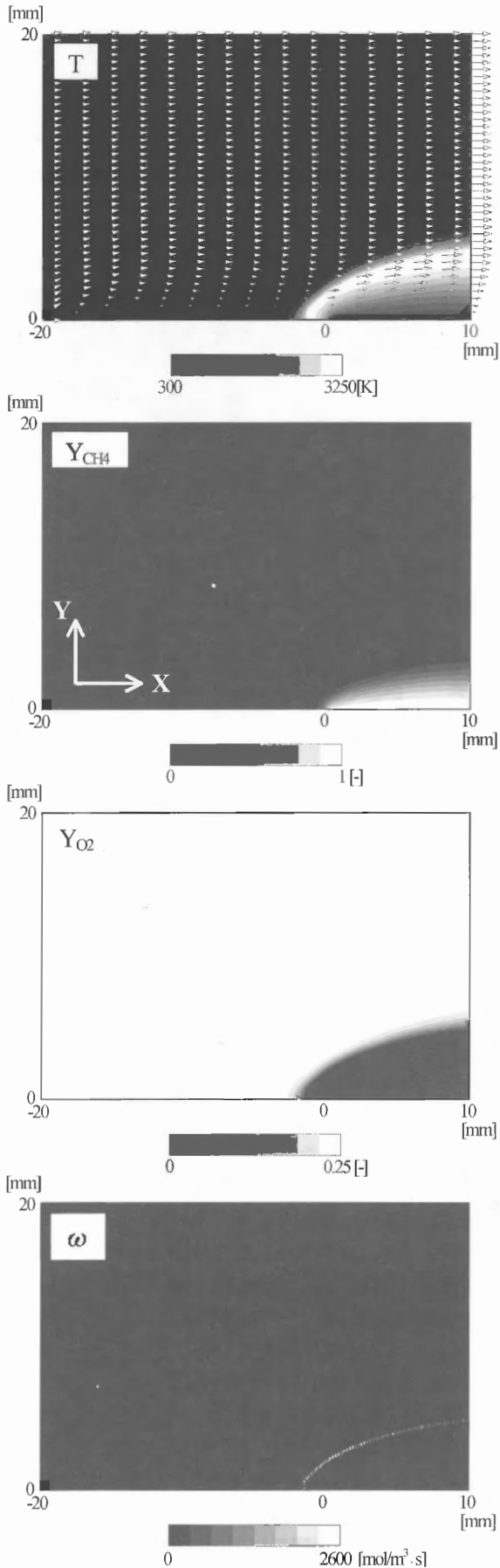


Fig. 8 Stationary flame without methane addition.

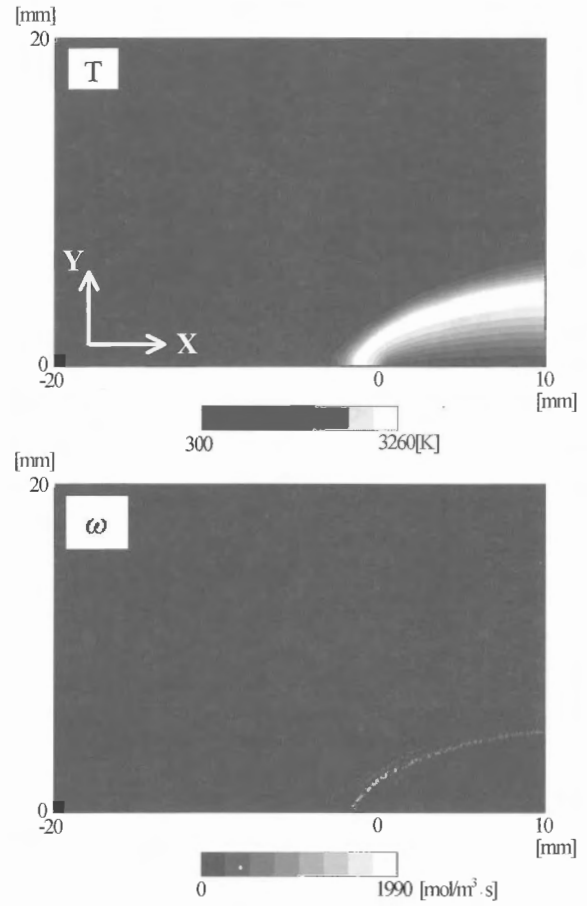


Fig. 9 Stationary flame with methane addition (CH₄ 1.5 %).

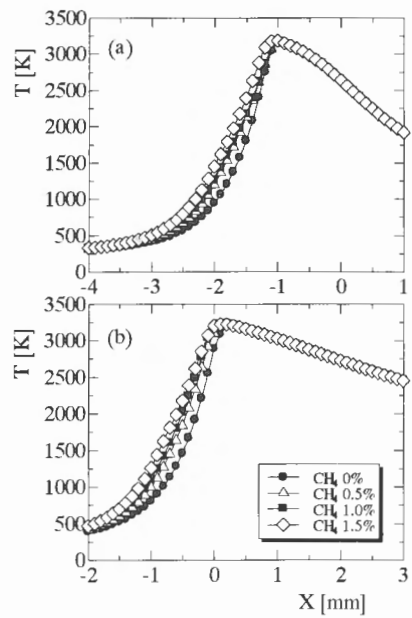


Fig. 10 Calculated temperature profiles near flat plate; (a) $Y = 1$ mm, (b) $Y = 2$ mm.

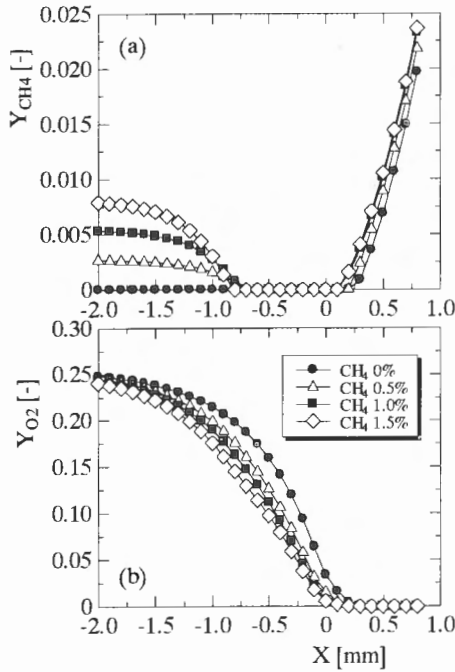


Fig. 11 Calculated concentration field at $Y = 2$ mm; (a) mass fraction methane, (b) mass fraction of oxygen.

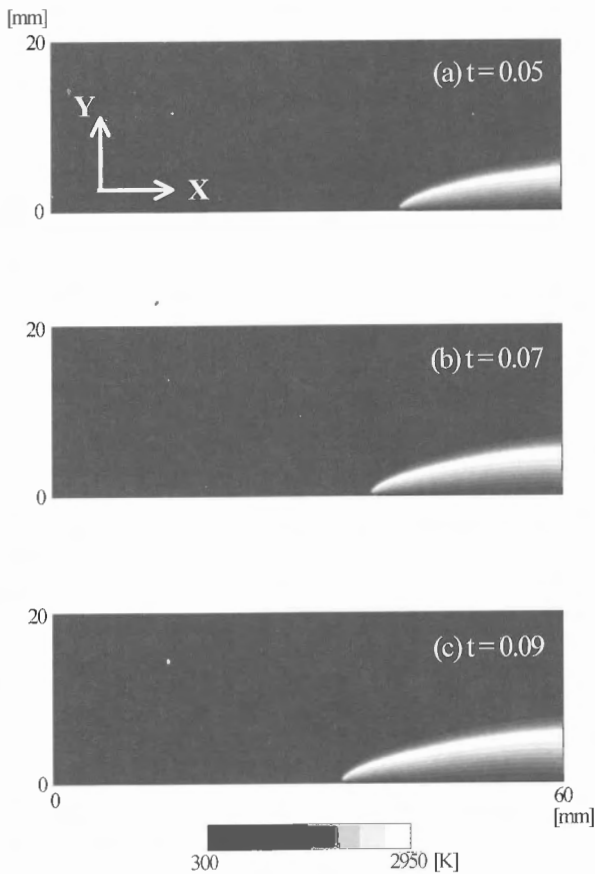


Fig. 12 Flame spread over flat plate without methane addition.

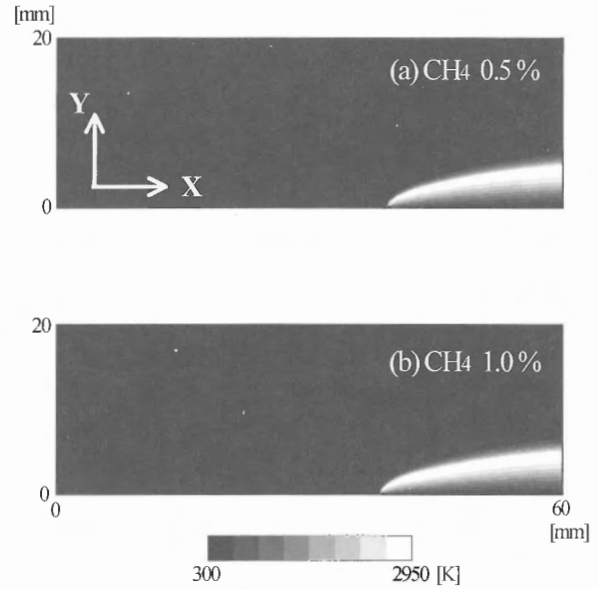


Fig. 13 Flame spread over flat plate with methane addition.

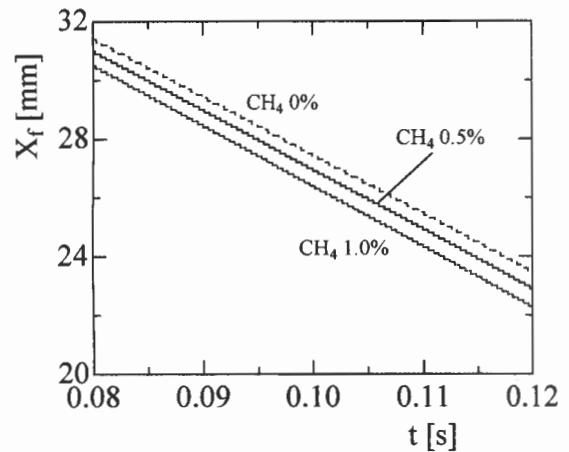


Fig.14 Position of fuel injection.

対速度が大きくなったためであると思われる。

次に、対向する空気流中に燃料を添加した部分分子混合雰囲気における燃え拡がりの解析を行った。添加したメタンの濃度を 0.5, 1.0 % としたときの温度分布を図 13 に示す。これらは燃え拡がり開始後 0.08 秒後の結果である。燃料を添加しても温度分布は非常に似ているが、燃料濃度が高いほど火炎がわずかに先行していることがわかる。すなわち、火炎の燃え拡がり速度が速くなっていることに対応する。そこで、火炎の燃料を吹き出している位置 (X_f) の時間変化を調べることで火炎の移動の様子を調べた。メタン濃度が 0, 0.5, 1.0 % の結果を図 14 に示す。燃料を添加していくと、火炎がより上流側に位置していることが明確にわかる。この位置の時間変化が燃え拡がり速度になるため、最小二乗法により燃え拡がり速度を算出した。その結果、添加したメタン濃度が 0, 0.5, 1.0 % のときの燃え拡がり

速度の値はそれぞれ, 198, 202, 206 mm/s であった。

ただし今回の火炎伝播モデルでは, 燃料吹き出し領域を火炎からの熱移動をもとに 1 格子ずつ移動させているため, 燃え拡がり速度が格子間隔に依存する可能性がある。そこで, 計算に用いる格子点の数を変えて計算を行った。その結果, 計算の格子間隔を半分の 0.05 mm にすると添加したメタンの濃度によらず燃え拡がり速度が 10 % 程度増加した。ただし, 燃料添加による火炎構造の変化はほぼ同じであった。したがって, ろ紙の燃え拡がりを調べた先の実験[12]と同様, 添加する燃料濃度を増やすと燃え拡がり速度が増加することが明らかとなった。

5. 考察

本研究では, 対向する空気流中に単一の気体燃料(メタン)を吹き出す層流平板境界層拡散火炎に着目し, 燃料の吹き出し領域を移動させることにより火炎の燃え拡がりを模擬した。また, 可燃性気体(メタン)を周囲空気流に添加した部分予混合雰囲気における火炎の燃え拡がりの解析を行い, 添加する燃料濃度を変化させたときの火炎構造と燃え拡がり速度の変化を調べた。またその妥当性を検討するために, 熱電対を用いた温度測定を行い, 解析結果と比較した。

まず実験と計算により得られた温度を比較すると, 実験で測定された火炎温度は計算で得られた値よりかなり低いものとなった。実験では燃料を窒素で希釈しているため, 単純にこれらの結果を比較することはできない。そこで, 多孔質平板から吹き出す燃料に同様に窒素を添加し, 流速などの条件は同じにして再度計算を行った。その結果, 約 300 K 程度火炎温度が下がったが, やはり計算により得られた値は実験よりも相当高いことがわかった。これはおそらく一段不可逆反応を用いていることによるものと思われる。すなわち一段反応では完全反応を仮定しているため, 一酸化炭素やラジカルなどの生成物を考慮していない。そのため, 発熱量を高く見積もることになる。また, 実際の火炎では二酸化炭素や水蒸気を介した輻射の熱損失がある[22]。また計算では考慮していない圧縮性や浮力の影響も考えられるため, 定量的な比較はできないものと思われる。

しかしながら実験においても, 対向する空気に燃料を添加すると火炎が拡大し, わずかではあるが計算でも最高温度が増加した。また, 温度が上昇し始める位置がより上流側にあった。この傾向は図 10 の定在火炎の計算でも観察されている。したがって伝播火炎の計算において, 燃料を添加することにより燃え拡がり速度が増加したことは, 火炎前方に存在する燃料が反応したことによる発熱量の増加で説明できるものと思われる。これは部分予混合雰囲気中のろ紙の燃え拡がり[12]において行った考察の妥当性を裏付けるものである。

ただし, 解析により求められた燃え拡がり速度は, ろ紙の燃え拡がり速度と比べて非常に大きな値であった。例えば, 鉛直下方へのろ紙の燃え拡がり速度は, 試料の厚さや

密度により異なるが, 約 1 mm/s から燃料を添加した場合でも 3 mm/s 程度である。一方, 本解析において得られた燃え拡がり速度は 2 桁ほど大きい値となっており, ろ紙の燃え拡がり速度に比べかなり大きい結果となった。

そこでまず, 両者の温度分布を比較することにした。例えば, ろ紙の厚さが 0.25 mm, 密度が 560 mg/cm³ の試料を用いた場合の火炎温度(青炎付近で観測される最高温度)は約 1900 K であったのに対し, 本計算で求められた伝播火炎の温度は約 3000 K であった。すなわち, 計算ではろ紙表面に形成される火炎温度よりも相当高い値となっている。この温度の違いにより計算では燃え拡がり速度がかなり大きく見積もられたものと思われる。

これに加えてろ紙の場合は, 試料が火炎から輸送される熱で熱分解する過程が必要であるが, 解析では多孔質平板に相当する部分から気体燃料を直接吹き出している。また可燃性固体から放出されるガスには二酸化炭素やさらに熱分解過程が必要な炭化水素も含まれる[12]。これらの要因により, 燃え拡がり速度が本計算でかなり大きくなったと思われるが, 燃料を添加することにより燃え拡がり速度が増加する現象を, 今回の計算でも再現できた。今後, 圧縮性や浮力, 輻射の影響を考慮した計算を行い, より定量的な検討を行っていく予定である。

6. 結論

本研究では, 層流平板境界層拡散火炎に着目し, 実験と数値解析を行った。特に, 燃料であるメタンを周囲空気流中に添加した部分予混合雰囲気における火炎構造を調べた。また, 燃料の吹き出し領域を移動させることにより火炎の燃え拡がりを模擬し, 燃料添加の影響を検討した。その結果, 以下のような結論を得た。

- ①定在火炎において解析結果と実験結果を比較すると, 計算で得られた火炎温度は測定された値より高くなったが, 火炎構造と燃料添加の影響はほぼ同じであった。
- ②燃料を空気に添加すると, 定在火炎の火炎構造は変化した。すなわち, 火炎が上流域まで拡大して高温の領域が拡がり, 火炎温度も増加した。
- ③計算で燃え拡がり速度を求めたところ, 燃料を添加することにより燃え拡がり速度が増加した。

上記の傾向は, 先に行ったろ紙の実験と同様であった。従来は, 部分予混合雰囲気における伝播速度の増加のメカニズムを, 火炎前方に存在する燃料が反応したことによる発熱量の増加で説明してきたが, 今回行った数値解析によりその妥当性を裏付けることができた。

References

1. de Ris, J. N., *Proc. of the Combustion Institute*, Vol.12, 241-

- 252, (1969).
2. Fernandez-Pello, A. C. and Williams, F. A., *Proc. Comb. Inst.*, Vol.15, 217-231, (1975).
 3. Fernandez-Pello, A. C., Ray, S. R., and Glassman, I., *Proc. Comb. Inst.*, Vol.18, 579-589, (1981).
 4. Hirano, T., Sato, K., and Tazawa, K., *Combust. Flame*, 26:191-200, (1976).
 5. Fernandez-Pello, A. C. and Hirano T., *Combust. Sci. and Tech.* Vol.32, 1-31, (1983).
 6. Di Blasi, C., *Combust. Flame*, 97:225-239, (1994).
 7. Suzuki, M., Dobashi, R., and Hirano, T., *Proc. of the Combustion Institute*, Vol.25, 1439-1446, (1994).
 8. Yamamoto, K. Mori, K., and Onuma, Y., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B68-672, 2437-2443 (2002) (in Japanese).
 9. Yamamoto, K. Mori, K., and Onuma, Y., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B69-680, 946-953 (2003) (in Japanese).
 10. Zhang, Y., Ronney, P. D., Roegner, E. V., Greenberg, J. B., *Combust. Flame*, 90: 71-83, (1992).
 11. Ronney, P. D., Greenberg, J. B., Zhang, Y. and Roegner, E. V., *Combust. Flame*, 100:474-483, 1995.
 12. Yamamoto, K. Seo, S., and Onuma, Y., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B69-684, 1951-1957 (2003) (in Japanese).
 13. Yamamoto, K. Seo, S., and Onuma, Y., *Journal of the Combustion Society of Japan*, V.45-131, 41-48 (2003) (in Japanese).
 14. Hirano, T. and Kanno, Y., *Proc. Comb. Inst.* 14, pp. 391-398 (1973).
 15. Ueda, T. and Mizomoto, M., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B52-483, 3787-3793 (1986) (in Japanese).
 16. Ueda, T., Ooshima, A., Saito, N., and Mizomoto, M., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B56-531, 3501-3507 (1990) (in Japanese).
 17. Liu, C., Suzuki, T., and Kawamata, M., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B66-647, 1636-1643 (2000) (in Japanese).
 18. Liu, C., Suzuki, T., and Kawamata, M., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B67-655, 826-834 (2001) (in Japanese).
 19. Kaskan, W. E., *Proc. Comb. Inst.* 6, pp. 134-143 (1957).
 20. Yamamoto, K., He, X., and Doolen, D. G., *J. Statis. Phys.*, Vol. 7, Nos.1/2, pp.367-383, (2002).
 21. Westbrook, C. K., Dryer, F. L., *Combust. Sci. Technol.* 27, 31-43 (1981).
 22. Ju, Y., Guo, H., Maruta, K., and Liu, F., *J. Fluid Mech.*, 342, pp. 315-334 (1997).