

■原著論文／ORIGINAL PAPER■

部分予混合雰囲気中における可燃性固体の燃え拡がり

— 火炎先端への燃料の拡散の重要性 —

Flame Spread over Solid Fuel in a Partially Premixed Atmosphere

— The Role of Fuel Diffusion to Flame Front —

山本 和弘*, 瀬尾 哲, 小沼 義昭

YAMAMOTO, Kazuhiro*, SEO, Satoshi, and ONUMA, Yoshiaki

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

2002年10月16日受付, 2003年1月27日受理 / Received 16 October 2002; Accepted 27 January 2003

Abstract : Usually, depending on the initial mixing of fuel and oxidizer, combustion process is classified as either non-premixed or premixed burning. Although it may be useful to consider these two modes in theoretical manner, some examples show the intermediate state or coupling modes. For example, at the leading edge of a lifted flame, the "triple" flame could be observed by partial premixing between fuel and oxidizer. Recently, it has been recognized that partially premixing is a key technique to reduce pollutant emission from the diesel combustion chamber. Thus, fundamental understanding of partially premixed phenomena is needed in the variety of combustion conditions. In this study, we investigate the flame spread over solid fuel in a partially premixed atmosphere, which may occur under poorly ventilated conditions in fire, forming the combustible mixtures of oxygen and fuel vapors. The downward flame spread is examined in a duct with opposed low-speed flow to change the conditions of atmosphere. Hydrogen, methane, and propane are added in the ambient air to observe the partially premixing effect. The fuel concentration is kept below the lean flammability limit. Results show that, in the partially premixed atmosphere, the flame spread rate is increased, with larger high temperature region. Pyrolysis region is also expanded. This could be explained by the fuel diffusion to the leading flame edge to increase the heat release rate, causing a larger amount of combustible fuel vapors.

Key Words : Flame Spread, Partially Premixing, Solid Fuel, Diffusion, Heat Transfer

1. 緒言

通常、燃焼前の燃料と酸化剤の混合状態をもとに、予混合燃焼と拡散燃焼に分類することが一般的である。しかしながら浮き上がり火炎のように、燃料と酸化剤を別々に供給しても、火炎の基部では燃料と酸化剤の混合が進み、ある条件下では希薄予混合火炎、過濃予混合火炎、拡散火炎からなるトリプル火炎 (Triple Flame) が形成されることが知られており、この火炎に関して多くの研究が行われている (例えば, [1,2])。近年、あらかじめ燃料側 (もしくは酸化剤側) に一部の酸素 (もしくは燃料) を添加した場合を部分予混合燃焼と呼ぶようになったが、排気ガス中に含まれる NOx をこの部分予混合化により低減できることが報告され

ている[3,4]。これは気体が燃焼する場合であるが、液体燃料を用いるディーゼルエンジンやガスタービンでも、反応前に燃料が周囲の空気と部分的に混合することは起こりうる。実際のエンジンでも、このような部分予混合化により排気ガス中の粒子状物質 (PM) や窒素酸化物 (NOx) を低減させたクリーンで高熱効率のディーゼル機関が検討されている[5]。また最近行われた噴霧燃焼の研究において、燃料を空气中に噴き出す場合でも、液滴径が大きいと燃料蒸気が空気と部分的に混合して燃焼することが指摘された[6]。

一方固体燃焼において、部分予混合雰囲気に近い例としては、微粉炭燃焼のように気流中に固体燃料が分散して燃焼する場合が考えられる。このような固体粒子の気流層燃焼に関しては青木らが詳細な解説を行っている[7]。燃焼場を希薄な分散相とみなせる場合、CO や揮発分の燃焼は、空気との混合の度合いが反応速度を決定すると考えられるため、部分予混合化により前述のガス燃焼や噴霧燃焼と同

* Corresponding author. E-mail : yamamoto@mech.tut.ac.jp

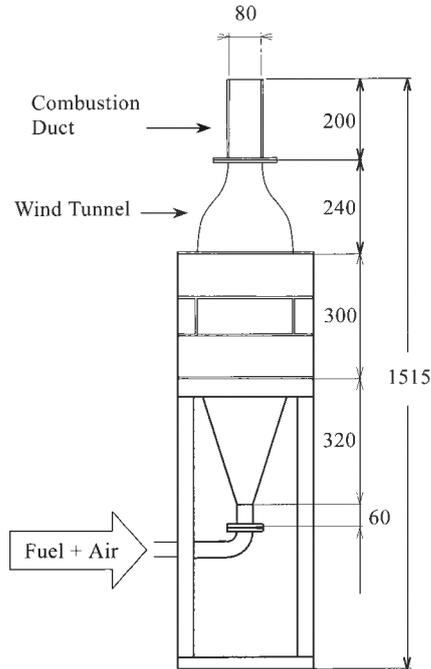


Fig. 1 Experimental apparatus.

様の現象が起こりうるものと思われる。

これに対し濃厚な固定相を考えた場合、可燃性固体は移動しないため、まず火炎から熱を受けて固体が熱分解し、放出された可燃性ガスと周囲に存在する酸素が拡散により反応領域に輸送される必要がある。代表的なものに紙やPMMAの燃焼がある。これらの燃焼は火災時の燃え拡がりを単純化したものとみなせるので、火災の基礎研究として古くから研究が行われてきた。特に、鉛直下方への燃え拡がり現象は解析が容易であるため、試料の厚さ・密度の違いや周囲雰囲気の影響が詳しく調べられている[8-15]。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炎の燃え拡がりを解析することも防災上重要であると思われるが、ほとんど研究例が行われていない[16]。

似たような場に可燃性液面に沿った火炎の燃え拡がりがある[17-20]。液体の温度が引火温度より高い場合、燃え拡がる火炎の前方に可燃範囲内の燃料と空気の混合層が存在するため、火炎は予混合火炎とみなされる。逆に液体の温度が引火温度より低い場合は、火炎前方にそのような予混合気は存在しない。この場合、燃料を蒸発させる必要があるため、火炎前方への熱移動が不可欠となる。固体燃焼の場合は後者に相当するため、火炎前方に予混合層が形成されているとは考えにくい。火炎の自己伝播性をもとに火炎先端が予混合火炎であるとした研究もある[21]。八島らは、可燃性固体上を伝ばする火炎の性質を明らかにするため、熱分解ガスの噴出し領域に着目して研究を行い、火炎

先端が拡散火炎の特性を持つことを報告した[22,23]。したがって、火炎前方に一部の燃料が存在する部分予混合雰囲気中の燃え拡がりを調べることは、火炎先端の特性と燃え拡がりの機構を明確にする上でも有用な知見が得られるものと思われる。

そこで本研究では、希薄可燃限界以下の濃度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可燃性固体の燃え拡がりを実験的に検討した。燃料による違いを明らかにするため、水素、メタン、プロパンの3種類の燃料を添加した。試料にはろ紙を用いた。

2. 実験装置

可燃性固体の燃え拡がり現象に及ぼす周囲雰囲気の影響について調べるため、図1に示すような実験装置を作製した[15]。燃料と空気は混合した後、整流装置(風洞)を通り燃焼ダクトに送られる。試料は燃焼ダクト内に鉛直方向と並行に設置されているため、試料表面に形成される火炎は対向する流れの中を鉛直下方に燃え拡がる。既に酸素濃度と周囲温度の影響を調べたが、このように対向する流れをつくることで、周囲雰囲気の状態を自由に変えることができる。本実験では燃料を添加した雰囲気中の燃え拡がりを調べたが、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設定した。この火炎伝播性のない混合気を部分予混合気と呼ぶ[16]。用いた燃料は、水素、メタン、プロパンの3種類である。表1に各燃料の発熱量 H 、希薄可燃限界(Lean Flammability Limit)、拡散係数 D_f の値を示す。なお、気流の条件は室温で25 cm/s一定とした。燃焼ダクトの寸法は、長さが200 mm、断面は80 mm×80 mmとし、火炎の燃え拡がりの様子を観察するために、一部を石英ガラスとした。

試料には厚さと密度が異なるろ紙を用いた。試料は図2に示すようなステンレス製のホルダーで燃焼ダクト内に固

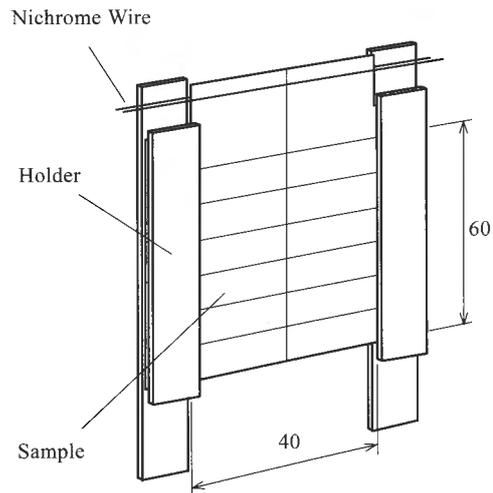


Fig. 2 Holder and sample sheet.

Table 1 Properties of added fuels.

Fuel	H kJ/mol	$L. F. L.$ vol%	D_f m ² /s
H ₂	242	4.0	7.5×10^{-5}
CH ₄	801	5.0	2.2×10^{-5}
C ₃ H ₈	2044	2.1	1.1×10^{-5}

Table 2 Physical properties of samples.

No. (Sample)	δ mm	ρ mg/cm ³	$\rho \delta$ g/m ²
A (7)	0.18	480	87
B (4A)	0.12	800	96
C (3)	0.23	490	113
D (2)	0.26	460	125
E (131)	0.25	560	140

定する。着火は試料に対し水平に取り付けたニクロム線にて一様に行った。試料の幅は任意に変えることが可能であるが、火炎が燃え拡がる際の2次元性を考慮し、試料の幅を40 mmとした。火炎の燃え拡がり速度は、図に示すようにあらかじめ中心線を試料上に書いておき、10 mm間隔で引いた水平線に火炎先端(先行する青炎)が到達する時間を測ることで求めた。また実験条件を一定にするため、試料を湿度25%以下のデシケータ内で48時間以上乾燥させたのちに使用した。表2に、これまでの実験で使用した5種類の試料の物性値を示す(試料番号AからE)。試料は東洋ろ紙社製であり、括弧内に製品番号を記している。ここで、 δ はろ紙の厚さ、 ρ はろ紙の密度である。なお予備実験として、室温において空気中の鉛直下方への燃え拡がり速度を測定した結果、燃え拡がり速度が $\rho\delta$ の逆数に比例した。したがって、ここに示した試料は熱的に薄い場合に相当する。今回は単位面積当りの重量の大きく異なる試料BとEを用いた。

3. 実験結果

3.1. 火炎の燃え拡がりの様子と変色領域の変化

まず、部分予混合雰囲気中の火炎の燃え拡がりの様子を観察した。メタンを添加したときの試料Eの火炎写真を図3に示す。絞りは2.8, シャッタースピードは1/250 sであり、燃料濃度 C_f (体積濃度)は0%と1%とした。これによると、正面から見た火炎の2次元性が非常によいことがわかる。周囲に燃料が存在すると火炎全体が拡大している。実験では燃料を4%まで添加したが、燃料濃度が高いほど先行する青炎も大きくなった。

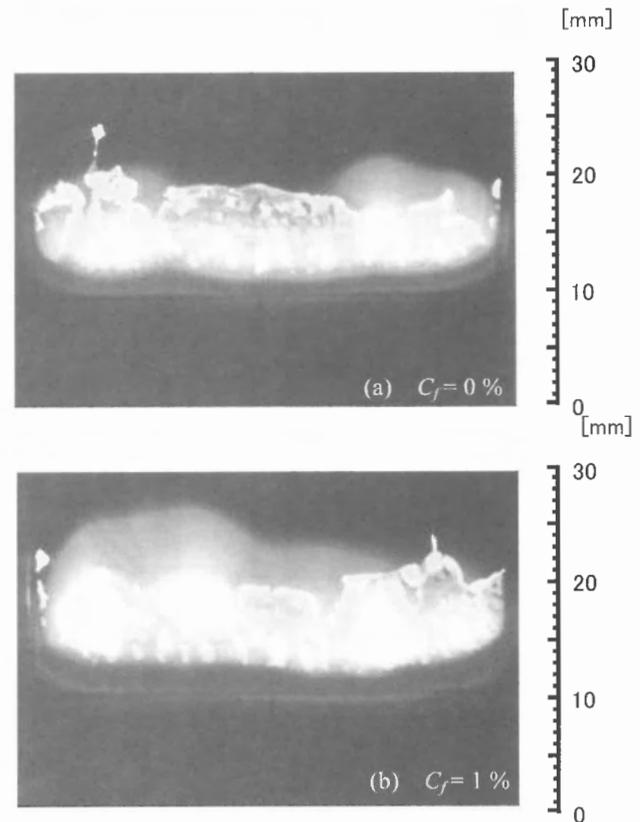


Fig. 3 Direct photograph of flames; No. E.

そこで、火炎先端付近の構造をより詳細に調べた。図4は同じ試料Eを用いた場合に、メタンを4%添加した火炎を側面から撮った写真である。写真の右側に火炎構造の模式図を示す。火炎が燃え拡がる場合、まず青炎が先行し、その後輝炎が続く。メタンの希薄可燃限界は5%であるが、このように燃料を可燃限界近くまで添加した場合は、図に示すように青炎がかなり後流まで続き、輝炎を覆うようにして存在した。試料表面では炭化層が赤く発光している領域が観察された。ただし、添加した燃料が少ないときは、青炎は火炎先端付近に限られた。また今回の測定範囲内では、拡散火炎と予混合火炎が同時に形成されるトリプル火炎のような構造は目視では観察されなかった。

次に、熱分解ガスが発生する領域について検討した。図3の写真では明確でないが、先行する青炎の下に試料表面が褐色に変色した領域が存在する。Satoらによれば、この変色領域で熱分解ガスが発生しており、この領域の大きさが火炎の燃え拡がり速度と密接な関係にあることが指摘されている[24]。そこで、直接写真およびビデオ画像を用いて、変色領域の鉛直方向の長さ L_p を求めた。燃料濃度を変化させた場合の結果を図5に示す。ここでは、試料中心において得られた5回の測定の平均値を示している。測定時のばらつきは最大で約10%あり、また露光条件により変色領域の幅が幾分変化するが、定性的な傾向を調べることは可能である。これによると、いずれの試料においても、

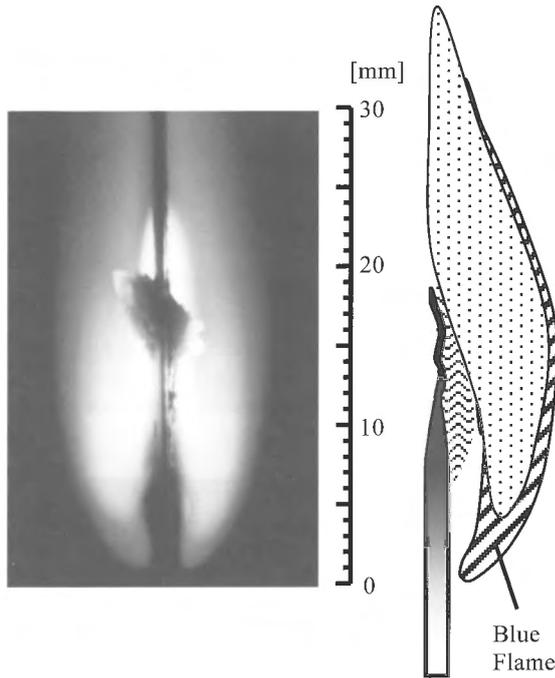


Fig. 4 Direct photograph of flame; $C_f=4\%$, No. E.

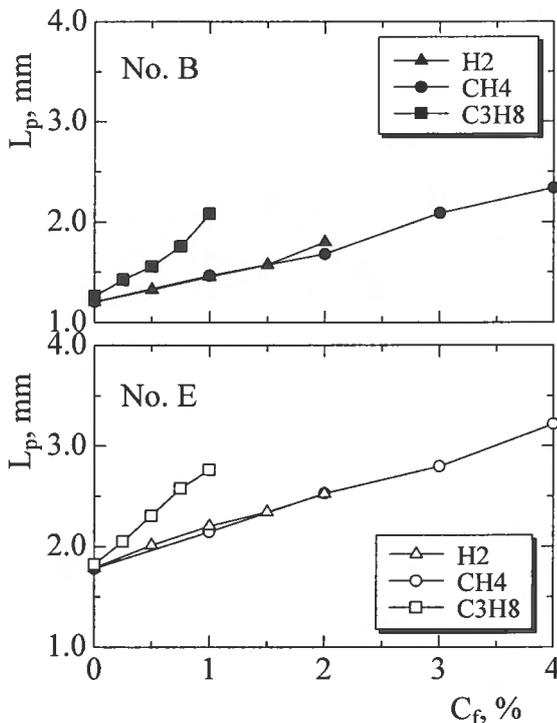


Fig. 5 Variations of pyrolysis region with fuel concentration.

燃料を添加することにより L_p は単調に増加した。したがって、周囲に燃料が存在すると、熱分解ガスが発生する領域も拡大することがわかった。

3.2. 火炎の燃え拡がり速度

次に、火炎の燃え拡がり速度について検討した。試料 B

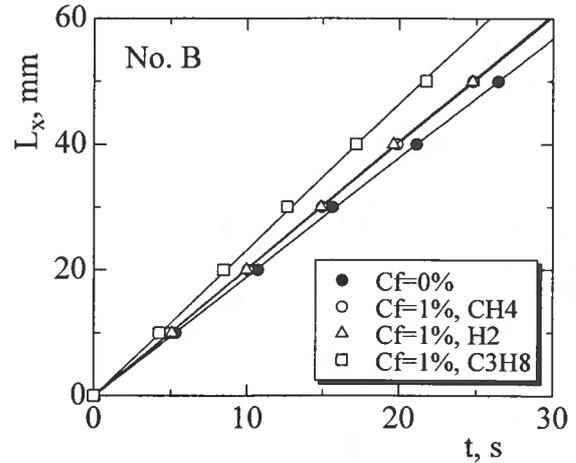


Fig. 6 Position of flame front: No. B.

を用いて水素、メタン、プロパンを 1% 添加したときの鉛直方向 (x 方向) の火炎位置 (L_x) の時間変化を図 6 に示す。比較のため、燃料を添加しない場合の結果も同時に示した。なお、着火の影響を避けるため、着火位置から下方 20 mm の位置 (図の原点に相当) で測定を開始した。これにより、いずれの場合も、火炎は時間とともにほぼ一定の速度で移動していることがわかる。これにより火炎が燃え広がっているときも、周囲雰囲気の状態がほぼ均一になっていることが推察された。ただし、燃料を添加すると火炎がより先行した。火炎の移動速度は火炎位置の時間変化で求められることから、燃料を添加すると燃え拡がり速度が大きくなることがわかった。

そこで、ここで示された直線の勾配から火炎の燃え拡がり速度 V を求め、燃え拡がり速度に及ぼす燃料添加の影響を定量的に調べた。図 7 は、試料 B および E に対して燃え拡がり速度を求めた結果である。測定は 5 回行い、その平均値を示しているが、データのばらつきは約 2% と小さかった。これによると、いずれの場合も燃料濃度を増加させると、燃え拡がり速度は単調に増加することがわかった。ただし、その増加割合はメタンと水素がほぼ同じであり、プロパンが一番大きいことがわかった。この傾向は図 5 の変色領域の長さの変化と非常に似ており、したがって、燃え拡がり速度と試料の変色領域の長さには密接な関係があることがわかった。

3.3. 温度場と予熱領域への熱流入量

燃料を添加した場合の火炎の燃え拡がり速度の増加について検討するため、火炎から試料への熱輸送に着目した。可燃性固体の燃え拡がりに関する研究は既に数多く行われており、火炎から試料への熱移動、特に予熱領域への熱流入量が重要であることが指摘されている[8,9]。紙の燃え拡がりの様子を模式的に示したものを図 8 に示す。図では、対向する気流速度を U 、火炎の燃え拡がり速度を V 、気相から試料への熱流入量を Q で示している。一般に火炎の燃

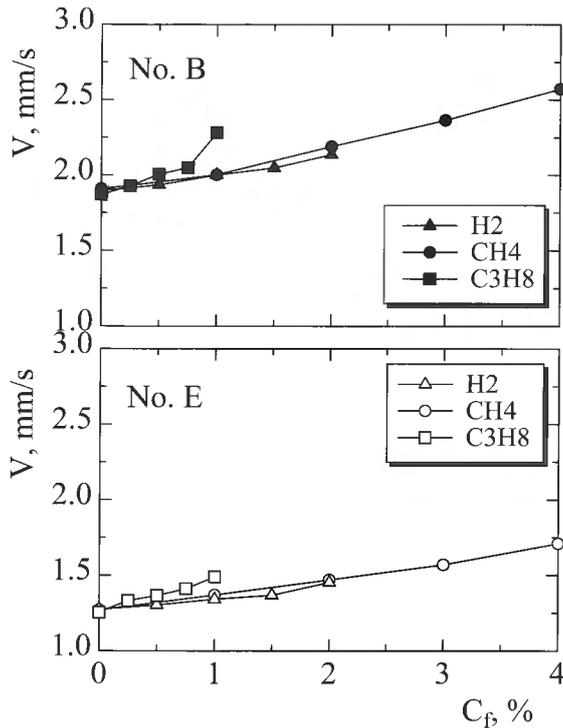


Fig. 7 Variations of flame spread rate with fuel concentration.

え拡がりには、まず火炎からの熱流入により可燃性の熱分解ガスが放出されること、次にこの熱分解ガスが周囲の酸素と反応すること、その結果火炎帯で熱放出が起こり、再び試料に熱が輸送されること、という機構が重要となる。ただし、あらかじめ燃料を周囲空気に添加した場合は、熱分解ガスがまだ十分に気化・拡散していない領域でも火炎が形成されることになるため、図3から図7で示したように、火炎の構造や燃え拡がり速度が大きく変化したものと思われる。

そこで、気相の温度場の測定を行い、燃料を添加した影響をさらに検討した。測定には熱電対(素線径は50 μm)を用いたが、複数の熱電対を挿入すると燃焼場に与える影響も大きくなる。そこで、2本の熱電対を用いて試料表面からの距離を変えて温度の時系列データを求め、火炎の燃え拡がり速度を用いて時間を座標に変換することで、別々の時刻に測定したデータから2次元の温度分布を作成した。熱電対が1本の場合は、時系列データを座標に変換する際にずれが生じる可能性があるが、2本の熱電対のデータを重複させて同地点のデータを重ねることにより、時系列データを各位置での温度に直す際のずれが修正できる。これによる温度誤差は最大で50 $^{\circ}\text{C}$ 程度である。試料Eにおいて得られた気相の温度分布を図9に示す。ここでは、燃料濃度が0%と4%の結果を比較している。座標系は鉛直上方を x 、試料に垂直方向を y とし、原点は試料表面の変色領域開始位置とした。 $x = -3 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$ 、 $y = 0 \text{ mm} \sim 7 \text{ mm}$ の範囲の温度分布であり、等高線は200 $^{\circ}\text{C}$ ごとに示した。これによると燃料を添加しない場合でも、 $x = 0 \text{ mm}$ の

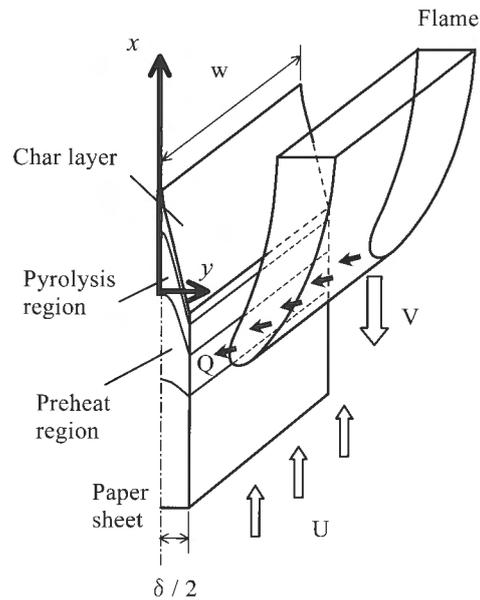


Fig. 8 Schematic of downward flame spread.

変色開始位置よりも先行して温度が上昇し始めていることがわかる。燃料を添加すると、さらに上流側で温度が上昇し始め、高温の領域も拡大することがわかった。またわずかではあるが、燃料を添加すると火炎先端の青炎付近の温度が増加した。

Campbell は可燃性固体上を燃え拡がる火炎について調べ、火炎から試料への熱輸送量について検討した。それによると火炎の燃え拡がり速度は、予熱領域に流入する熱量と密接な関係にあることが報告されている[9]。また Suzuki らは試料が熱的に厚い場合の実験を行い、予熱領域への熱流入量を求めて考察を行った[14]。今回のように試料が熱的に薄い場合は、固相内の熱移動が無視できることから、予熱領域に流入する熱量 Q_p は以下の式で求められる。

$$Q_p = \frac{1}{2} \rho \delta w V C (T_p - T_0) \quad (1)$$

ここで、 T_p K は固体燃料の熱分解温度、 T_0 K はその初期温度であり、 w は試料の幅、 C J/g \cdot K は比熱である(セルロースでは1.22 J/g \cdot K)。つまり、火炎が定常で伝ばしている場合、予熱領域に流入する熱量は、初期温度から熱分解温度まで上昇させるのに必要な熱量とつりあうことを意味している。

そこで本実験でも、この式により気相から予熱領域への熱流入量を見積ることとした。ここで、ろ紙の熱分解温度を345 $^{\circ}\text{C}$ とした[10]。図10に燃料濃度を变化させて Q_p の値を求めた結果を示す。試料BとEの結果を燃料ごとにまとめた。これによると、添加した燃料の種類による違いは見られるものの、燃料濃度が同じであれば、試料の厚さや密度が異なっても予熱領域に流入する熱量はほぼ同じ値になることがわかった。

4. 考察

部分予混合雰囲気中の可燃性固体の燃え拡がりを実験的に調べた。その結果、周囲雰囲気中に燃料が存在する場合は、高温の領域が拡大して熱分解ガスが生成される領域が大きくなり、燃え拡がり速度が増加することが明らかとなった。Ronney らも、燃料を添加した場合の火炎の燃え拡がりについて検討している[16]。彼らは当量比をもとに添加した燃料による違いを明らかにしている。それによると燃え拡がり速度を増大させる効果は、水素が一番大きく、メタンとプロパンは同程度であった。我々も図7を当量比で整理し直したところ、Ronney らの結果と同じ傾向が得られた。彼らは燃料添加の影響を明らかにするため、燃焼場を予混合火炎と拡散火炎の領域に分けて漸近解析を行ない、現象を説明した。しかしながら本実験のように、希薄可燃限界以下の燃料しか添加していない場合は、明確な予混合火炎が形成されないため、彼らのモデルを直接適用することはできない。そこで、試料への熱流入量をもとに燃料添加の影響について考察を行うことにする。

まず燃料の違いについて考える。図7によると、メタンと水素を添加した場合は、燃料濃度が同じであれば両者の燃え拡がり速度がほとんど一致した。表1でも明らかのように、メタンの方が水素よりも単位モル当りの発熱量は大きいから、同じ燃料濃度であればメタンを添加したほうが火炎帯での発熱量はより大きいので、燃え拡がり速度が大きくなるはずである。またプロパンの発熱量はメタンの約2.5倍であるが、燃料添加に伴う燃え拡がり速度の増加はメタンに比べてそれほど大きくない。したがって、単純に燃料の発熱量の大きさだけで燃料添加の影響を定量的に説明することはできない。

図10で明らかとなったように、式(1)により得られる予熱領域への熱流入量 Q_p は、試料の厚さや密度によらず一定となった。また燃料を添加すると、その値は増加した。そこで、燃料を添加しない場合をケース1、燃料を添加した場合をケース2として、予熱領域に流入する熱量の差 ($Q_{p,2} - Q_{p,1}$) を調べることで、燃料添加の影響を定量的に検討することにした。ただし、①火炎の燃え拡がり速度は先行する火炎先端の特性が重要であること、②火炎先端は試料表面近くに位置するが、そこでは対流による燃料の輸送量は小さいと推察されること、を考慮すると、燃料は対流ではなく拡散により火炎先端に運ばれ、このことが燃料添加による燃え拡がり速度の増加と密接に関係しているものと思われる。そこで、de Ris が行った理論解析[8]を参考に、燃料の拡散に着目して燃料添加の影響を考察することにした。de Ris によれば、輻射を無視した場合のエネルギーバランス式は以下ようになる。

$$\rho C \tau V (\partial T / \partial x) = \lambda (\partial T / \partial y) \tag{2}$$

ここで、 τ は燃料層の厚さである。本実験では試料面の対称性を考慮すると、 τ は試料厚さの半分 ($\delta/2$) となる。ここで、 x, y 方向の温度勾配をそれぞれ以下のように近似する。

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_p - T_0}{\Delta_x} \tag{3}$$

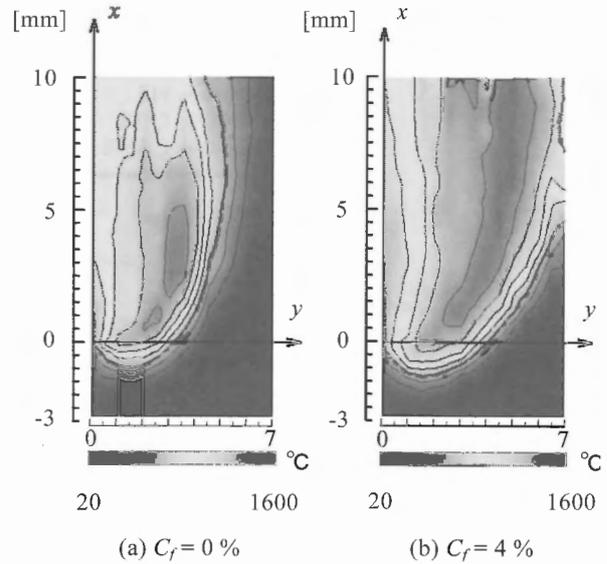


Fig. 9 Temperature distributions; No. E.

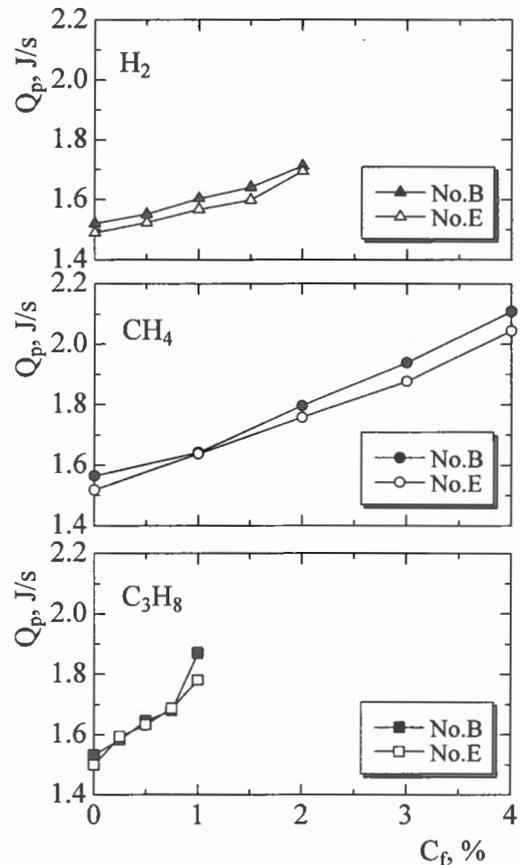


Fig. 10 Heat flow into preheat region.

$$\frac{\partial T}{\partial y} \approx \frac{T_f - T_p}{\Delta_y} \quad (4)$$

ただし、 T_f は火炎温度である。これらを用いて式 (2) を変形すると次のようになる。

$$\frac{\rho C \delta V}{2\lambda} \approx \frac{\Delta_x}{\Delta_y} \frac{T_f - T_p}{T_p - T_0} \quad (5)$$

式 (5) は、燃え拡がり速度を含む左辺の項が無次元温度に比例することを意味している。de Ris は式 (3) (4) のように勾配を近似して解析解を求めたわけではないが、結果として式 (5) の Δ_x/Δ_y に相当する部分を $\sqrt{2}$ とした。その後この値について Wichman らが再検討した結果、ダムケラー数が十分大きい (反応速度が大きい) 場合はこの値が 0.8 に漸近することを報告した[25]。また Delichatsios は理論的な解析により、この値が $\pi/4$ になると結論付けた[26]。予熱領域に流入する熱量 Q_p は、式 (5) の両辺に試料の幅 w をかけて整理することで導出される (ケース 1 に相当)。

$$Q_p = \frac{1}{2} \rho \delta w V C (T_p - T_0) = \lambda w (T_f - T_p) \frac{\Delta_x}{\Delta_y} \quad (6)$$

ケース 2 の燃料を添加した場合は、燃え拡がり速度が増加することから、式 (2) の右辺において燃料を添加したことによる増加分を Δ_f で表す。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho C \delta V_2 (\partial T / \partial x)_2 &= \lambda (\partial T / \partial y)_2 \\ &= \lambda (\partial T / \partial y)_1 + \Delta_f \\ &= \frac{1}{2} \rho C \delta V_1 (\partial T / \partial x)_1 + \Delta_f \end{aligned} \quad (7)$$

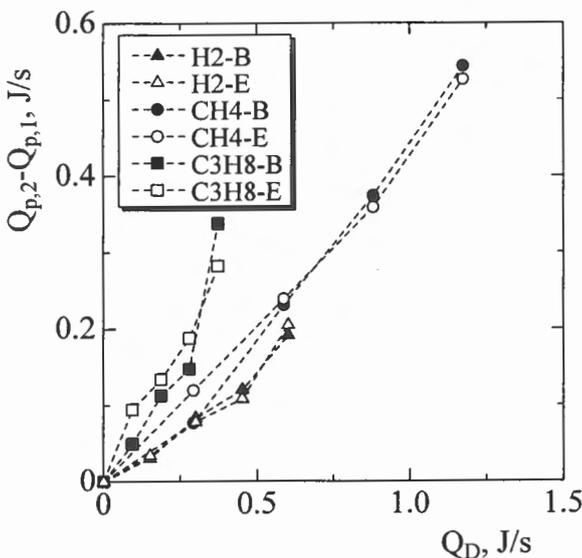


Fig. 11 Net heat flow into preheat region by fuel addition.

温度測定の結果、 x 方向の温度勾配は燃料を添加してもそれほど変化しなかったことから、式 (3) を用いて式 (7) を整理すると予熱領域への熱流入量の差 ($Q_{p,2} - Q_{p,1}$) は以下のようなになる。

$$Q_{p,2} - Q_{p,1} \approx \Delta_x w \Delta_f \quad (8)$$

ここで、拡散による火炎先端への燃料輸送について考える。いま燃料の拡散速度を V_D とし、Fick の法則に従って燃料が y 方向の濃度勾配に比例して輸送されると仮定する。このとき式 (7) の Δ_f は、拡散により輸送される燃料の発熱量に比例すると考えられるため、

$$\Delta_f \approx (H / M_f) \rho_g Y_f V_f = (H / M_f) \rho_g D_f \frac{\partial Y_f}{\partial y} \quad (9)$$

となる。ただし、 M_f は燃料の分子量、 Y_f は燃料の質量分率、 ρ_g は気相の密度である。また、式 (4) と同様に y 方向の濃度勾配を以下のように近似する。

$$\frac{\partial Y_f}{\partial y} \approx \frac{Y_{f,0}}{\Delta'_y} \quad (10)$$

ここで、 $Y_{f,0}$ は気相における燃料の初期質量分率である。式 (9) (10) を用いて式 (8) を整理することにより、

$$\begin{aligned} Q_{p,2} - Q_{p,1} &\approx (H / M_f) \rho_g D_f Y_{f,0} w \Delta_x / \Delta'_y \\ &\approx (H / M_f) \rho_g D_f Y_{f,0} w \equiv Q_D \end{aligned} \quad (11)$$

すなわち、燃料を添加したことによる熱流入量の増加量 ($Q_{p,2} - Q_{p,1}$) は、燃料が持つ発熱量の一部が予熱領域に輸送されることで生じる。ただし Δ_x/Δ'_y は未知の定数なので、今回は燃料の種類によらず 1 とした。

式 (11) の妥当性を検討するため、各燃料における Q_D の値を求め、($Q_{p,2} - Q_{p,1}$) に対してプロットした (図 11)。これによると、いずれの燃料でも Q_D が大きいほど予熱領域に流入する熱量の差 ($Q_{p,2} - Q_{p,1}$) が大きくなることがわかる。また、各燃料における結果を比較すると、それぞれの傾向は定性的には一致するものの、すべて同じ線上にあるわけではないことがわかった。

そこで、この理由について考えてみる。一般に、拡散速度が大きいものほど拡散の特性長さに相当する Δ'_y は大きくなるものと思われる。今回は式 (11) を導出する過程で Δ'_y の燃料への依存性を無視している。このため図 11 において、燃料による違いが若干出たものと思われる。拡散の特性長さの大小関係は、分子量が小さくより拡散しやすい順に水素、メタン、プロパンになるものと思われる。このことを考慮すると、水素の Q_D はより小さく、プロパンの Q_D はより大きくなり、それぞれのプロットが同じ線上にのる可能性がある。以上の結果から、燃料を添加したこと

による燃え拡がり速度の増加は、拡散により火炎に供給された燃料の発熱量で定量的に説明できることが示唆された。

5. 結言

本研究では、燃料に水素、メタン、プロパンを用い、燃料を対向する空気に添加することで部分予混合雰囲気中における可燃性固体の燃え拡がりについて検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①周囲に燃料を添加すると青炎の領域が拡大し、火炎も大きくなる。燃料を多く添加した場合は、青炎がかなり後流まで続き、輝炎を覆うようにして存在するが、添加した燃料が少ないときは青炎が火炎先端付近に限られた。また、拡散火炎と予混合火炎が同時に形成されるトリプル火炎のような構造は見られなかった。
- ②燃料を添加すると燃え拡がり速度は増加し、熱分解領域に相当する変色領域も拡大する。両者の変化の仕方はほぼ同じであり、燃え拡がり速度と熱分解領域の間には密接な関係があることがわかった。ただし、燃料によってこれらの値が異なっており、燃料濃度が同じ場合はメタンと水素がほぼ同程度であり、プロパンが最も大きくなった。ただし当量比で整理すると、燃料添加の影響は水素が一番大きく、メタンとプロパンは同程度であった。
- ③気相の温度測定を行った結果、燃料を添加することにより高温の領域が拡大した。また、火炎の形成位置も変色領域開始位置に対してより上流側に移動した。
- ④予熱領域に流入する熱量を実験式により計算したところ、燃料を添加すると予熱領域への熱流入量は単調に増加した。また、試料の厚さや密度が異なっても添加した燃料濃度が同じであれば、予熱領域に流入する熱量は等しくなる。燃料を添加した場合としない場合の予熱領域への熱量の差について検討した結果、拡散により火炎先端に供給された燃料の発熱量で、各燃料の違いが定量的に説明できる可能性があることがわかった。

したがって、部分予混合雰囲気中における可燃性固体の燃え拡がりでは、火炎先端へ輸送される燃料の拡散が重要であり、燃料の持つ発熱量により予熱領域への熱流入量が増加し、可燃性ガスの発生量が増えて燃え拡がり速度が増加したものと思われる。

References

1. Yamashita, H., Tsutsumitani, S., and Choi, N., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers* B65: 775-782 (1999) (in Japanese).
2. Hirota, M., Matsuo, A., and Mizomoto, M., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers* B67: 2353-2360 (2001) (in Japanese).
3. Lyle, K. H., Tseng, L. K., Gore, J. P., and Laurendeau, N. M., *Combust. Flame* 116: 627-639, (1999).
4. Onuma, Y., Yamauchi, T., Mawatari, M., Morikawa, M., and Noda, S., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers* B66: 579-584 (2000) (in Japanese).
5. Asami, Y., *J. Combustion Society of Japan* 44: 25-32 (2002) (in Japanese).
6. Reveillon J. and Vervisch, L., *Proceedings of the 18th Int. Colloquium on the Dyn. of Expl. and Reactive Systems*, 2001-7, #115.
7. Aoki, H., Suzuki, A., and Miura, T., *J. Combustion Society of Japan* 44: 33-40 (2002) (in Japanese).
8. de Ris, J. N., *Proc. Combustion Inst.* 12: 241-252, (1969).
9. Campbell, A. S., *Combust. Sci. Tech.* 3: 103-120 (1971).
10. Fernandez-Pello, A. C. Ray, S. R. and Glassman, I., *Proc. Combustion Inst.* 18: 579-589 (1981).
11. Hirano, T., Sato, K., and Tazawa, K., *Combust. Flame*, 26: 191-200, (1976).
12. Fernandez-Pello, A. C. and Hirano T., *Combust. Sci. Tech.* 32: 1-31 (1983).
13. Di Blasi, C., *Combust. Flame* 97: 225-239 (1994).
14. Suzuki, M., Dobashi, R., and Hirano, T., *Proc. Combustion Inst.* 25: 1439-1446 (1994).
15. Yamamoto, K. Mori, K., and Onuma, Y., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B68: 2437-2443 (2002) (in Japanese).
16. Ronney, P. D., Greenberg, J. B., Zhang, Y. and Roegner, E. V., *Combust. Flame* 100:474-483 (1995).
17. Akita, K., *Proc. Combustion Inst.* 14: 1075-1083, (1973).
18. Hirano, T., Suzuki, T., Mashiko, I., and Tanabe, N., *Combust. Sci. Tech.* 22: 83-91 (1980).
19. Ito, A., Masuda, D., and Saito, K., *Combust. Flame* 83: 375-389 (1991).
20. Konishi, T., Tashtoush, G., Ito, A., Narumi, A., and Saito, K., *Proc. Combustion Inst.* 28: 2819-2826 (2000).
21. Wichman, I. S., *Progress Energy Combust. Sci.*, 18: 553-593 (1992).
22. Yashima, M. and Hirano, T., *Combust. Sci. Tech.* 129: 371-391 (1997).
23. Yashima, M. and Hirano, T., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B63: 3396-3403 (1997) (in Japanese).
24. Sato, K., Suzuki, K., Sakai, Y., and Segi, S., *Fire Sci. and Tech. - Proc. of the Second Asia-Oceania Symposium*, 1995, pp.161-171.
25. Wichman, I. S. and Williams, F. A., *Combust. Sci. Tech.* 33: 207-214 (1983).
26. Delichatsios, M. A., *Combust. Sci. Tech.* 44: 257-267 (1986).