

乱流予混合火炎における局所的現象の解明

古川 純一¹・吉田 泰子²・蕨 一実²・首藤 登志夫³

¹ 東京都立産業技術高等専門学校

² 東京都立産業技術高等専門学校専攻科

³ 首都大学東京

1. 緒論

乱流予混合火炎の構造や乱流燃焼速度は未燃焼混合気の乱流特性の影響を強く受け、乱れと火炎の相互作用によって決まると考えられる。したがって、乱れと火炎の相互作用を明らかにすることは、乱流予混合火炎における乱れの燃焼促進のメカニズムを明確にする上で本質的な問題となる。

このような観点に基づき、乱流予混合火炎の火炎面の挙動を詳細に調べてきた^{(1), (2), (3), (4)}。先の研究では、燃料希薄側と過濃側で層流燃焼速度が等しい混合気濃度のプロパン・空気乱流予混合火炎の火炎面の三次元挙動を詳しく調べた。その結果、プロパン・空気予混合火炎において、層流燃焼速度はほぼ等しいにもかかわらず、過濃なプロパン・空気乱流予混合火炎の火炎面の速度は、希薄なプロパン・空気乱流予混合火炎のそれに比べて、大きく、火炎面はバーナ外側に偏向して移動するという新しい事実を明らかにした^{(3), (4)}。これは、燃料分子と酸素分子の間の選択拡散に起因すると考え、以下のような仮説を設けた。

すなわち、過濃なプロパン・空気予混合火炎では、選択拡散により乱流燃焼速度が増加し、上流域における熱発生が増加し、流れの拡大(Flow Divergence)が著しくなるために、火炎面の速度が増加し、さらに、火炎面はバーナ外側に偏向して移動する⁽⁴⁾。このように考えることにより、現象を定性的に説明することができた。しかし、これらの仮説は定性的な説明のみで、過濃なプロパン・空気乱流予混合火炎において、Flow Divergenceが著しいという事実は実験的には明らかにされていない。これを明らかにするためには、過濃なプロパン・空気乱流予混合火炎では、上流域でFlow Divergenceが著しいことを実験的に確かめなければならない。

そこで本研究では、乱流予混合火炎における Flow Divergence を明らかにすることを目的として、レーザー流速計を使用して、乱流火炎帯における流れのようすを詳しく調べた。

2. 実験装置および方法

本研究では、内径 26mm のブンゼン型バーナを使用した。燃料にはプロパンを使用し、混合気の当量比 ϕ は希薄側と過濃側で層流燃焼速度が等しくなる 0.8 および 1.40 とし、バーナ出口における未燃焼混合気の平均流速は 4.0 m/s とした。

乱流火炎帯における流れのようすを調べるために、波長 491 (出力 100mW)、532 (出力 150mW) および 561 nm (出力 100mW) の三つの半導体レーザーを光源とする 3 波長・6 ビームの前方散乱方式のレーザー流速計システムを使用した。ガス流速の計測は、バーナ中心軸上で時間平均イオン電流が極大となる点を火炎の高さ H とし、 $2/4H$ および $3/4H$ の高さで行った。

3. 結果および考察

当量比が 0.8、高さが $3/4H$ 、バーナ中心軸より半径方向に $r=4\text{mm}$, 8mm および 12mm の点におけるガス流速の半径方向成分の頻度分布をそれぞれ図 1 に示す。ここで、 N はビン幅 0.01m/s ごとの頻度であり、全サンプル数 N_s で正規化して示し

た。 $r=4\text{mm}$ の点で計測される燃焼ガス流速の半径方向成分は未燃焼混合気の流速であると考えられる。半径が $r=8\text{mm}$ の点で計測される燃焼ガス流速の半径方向成分は、bimodal になっており、低速側のモードは未燃焼混合気の流速で、高速側のモードは燃焼ガスの流速を示していると考えられる。半径が $r=12\text{mm}$ の点で計測される燃焼ガス流速の半径方向成分は燃焼ガスの流速であると考えられる。このように、バーナ中心軸に近い乱流火炎帯の内側では、未燃焼混合気の流速のみが計測され、乱流火炎帯の中央付近では、未燃焼混合気と燃焼ガスのガス流速の両方が計測される。そして、バーナ中心軸から離れた乱流火炎帯の外側では、燃焼ガスの流速のみが計測される。

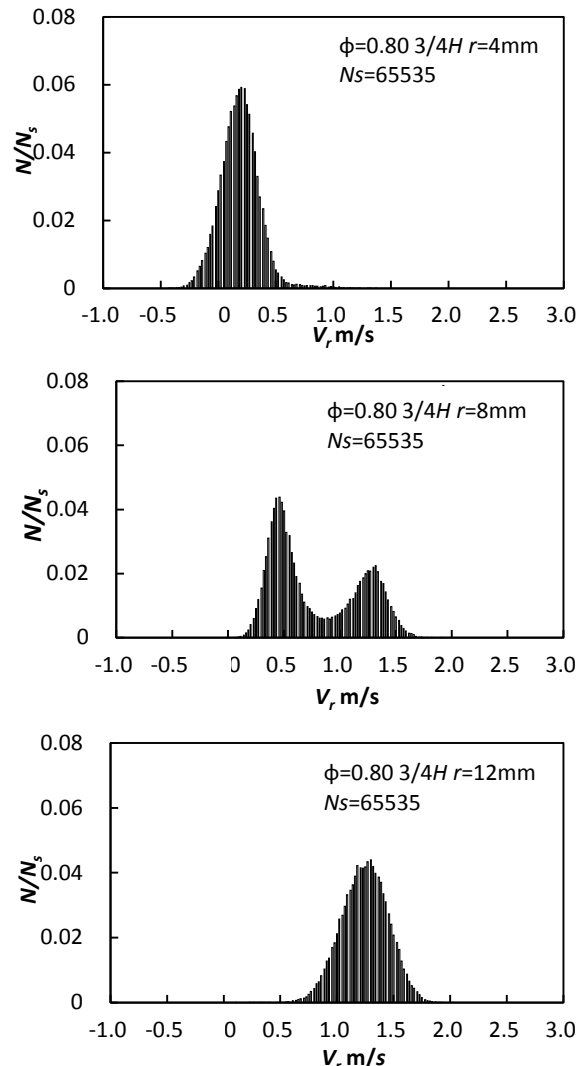


Fig. 1 Probability distribution of the radial component of the gas velocity for $\phi=0.80$ at the radial distance of 4 mm (upper), 8 mm (middle), 12 mm (lower)

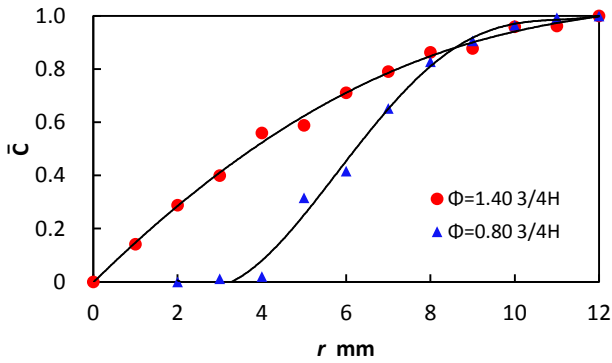


Fig. 2 Progress variables in the radial direction for $\phi=0.80$ and 1.40

ガス流速の半径方向成分の頻度分布から、式(1)により、 $3/4H$ の高さにおけるバーナ半径方向の反応進行度数 \bar{C} (Progress Variable) を求めた結果を図 2 に示す。

$$\bar{C} = \frac{N_{vb} \frac{\rho_u}{\rho_b}}{N_{vu} + N_{vb} \frac{\rho_u}{\rho_b}} \quad (1)$$

ここで、 N_{vu} 、 N_{vb} 、 ρ_u および ρ_b はそれぞれ、未燃焼混合気の流速のサンプル数、燃焼ガスの流速のサンプル数、未燃焼混合気の密度および燃焼ガスの密度である。また、図中に 5 次の多項式近似によるカーブフィッティングを併せて示した。これより、当量比が 1.40 の方が、 0.80 のときよりも、Progress Variable が広い範囲に分布することから、前者の方が後者より、乱流火炎帯が厚いことがわかる。

次に、当量比が 1.40 のとき、 $3/4H$ 、 $r=8\text{mm}$ の点における燃焼ガス流速の半径方向成分の頻度分布を図 3 に示す。図 1 に示した当量比が 0.80 、 $r=8\text{mm}$ のときの燃焼ガス流速の半径方向成分の頻度分布と比べると、当量比が 1.40 のときのガス流速の半径方向成分の頻度分布は、当量比が 0.80 のときのそれよりも、高速側に分布している。特に、燃焼ガスの流速と考えられる高速側のモードの平均値は、当量比が 0.80 の時は 1.95 m/s であるのに対し、当量比が 1.40 の時のそれは 2.15 m/s であり、後者の場合の方がガス流速のバーナ半径方向成分が大きく、Flow Divergence が著しいことがわかる。

よく知られているように、セル状不安定性は、燃料分子と酸素分子のうち拡散速度の大きな化学種が不足している場合、不足している化学種が火炎反応帯に選択的に拡散し、不足成分の濃度が局所的に高くなるために引き起こされる⁽⁶⁾。プロパンと酸素を比べると、酸素の窒素に対する二成分拡散係数は、プロパンのそれの約 2 倍である。過濃なプロパン・空気乱流予混合火炎では、図 4 に示すように、乱れにより誘起

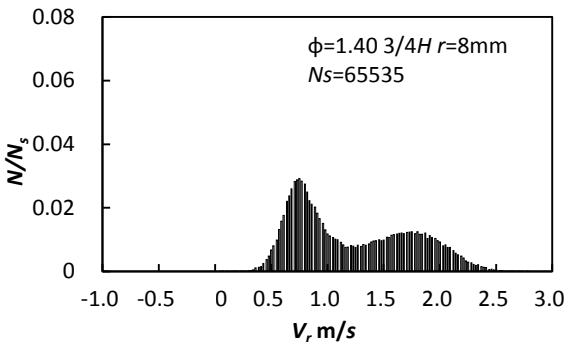


Fig. 3 Probability distribution of the radial component of the gas velocity for $\phi=1.40$

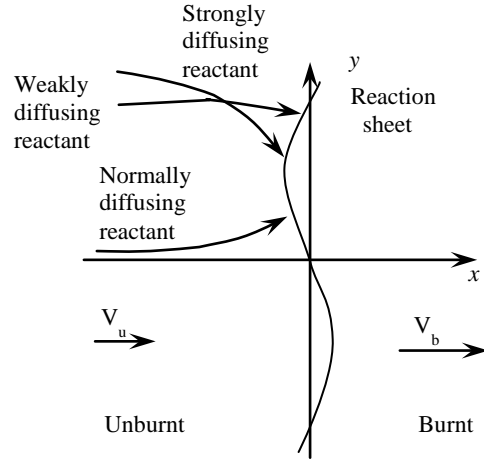


Fig.4 Schematic illustration of the mechanism of preferential diffusion

された火炎面の凹凸のうち、未燃焼混合気に凸な部分に酸素が選択的に拡散する。すると、その部分の酸素濃度が増加し、局所的な層流燃焼速度が増加する。その結果、乱流予混合火炎の凹凸が助長され、乱流燃焼速度が増加する。乱流燃焼速度が増加すると、上流域での熱発生が増加する。上流域における熱発生の増加は、流れの拡大 (Flow Divergence) を引き起こし、燃焼ガス流速のバーナ半径方向成分が増加する。その結果、火炎面の速度は増加し、更に、火炎面はバーナ外側に偏向して移動したと考えられる。本研究により、燃料分子と酸素分子の間の選択拡散に起因する乱流予混合火炎における流れの拡大が定量的に明らかにされたと考えられる。

4. 結論

本研究では、乱流予混合火炎における Flow Divergence を明らかにすることを目的として、レーザー流速計を使用して、乱流火炎帯における流れのようすを詳しく調べた。その結果、以下のような結論を得た。

プロパン・空気予混合火炎において、燃料過濃側と燃料希薄側の燃焼ガスの流速の半径方向成分を比べると、燃料過濃側で燃焼ガスの流速の半径方向成分が大きく、乱流予混合火炎における Flow Divergence が著しいことが明らかとなった。これらは、燃料分子と酸素分子の間の選択拡散により、乱流燃焼速度が増加し、上流域での発熱量が増加したためと考えられる。本研究により、当初の仮説の妥当性が示されたと言える。

5. 参考文献

- 1) 橋本英樹, 古川純一, 岡本京子, Williams F. A., 機論, 73 巻 735B 号 (2007), 2375-2380
- 2) 橋本英樹, 古川純一, 岡本京子, Williams F. A., 機論, 74 巻 740B 号 (2008), 936-9413) 橋本英樹, 古川純一, Williams F. A., 機論, 74 巻 740B 号 (2008), 942-948
- 4) 橋本英樹, 宋 明良, 富山明男, 古川純一, Williams F. A., 機論, 74 巻 744B 号 (2008), 1835-1842
- 5) 橋本英樹, 谷本 隆, 古川純一, Williams F. A., 機論, 75 巻 756B 号 (2009), 1685-1690
- 6) Williams F. A., Combustion Theory, 2nd Ed., (1985), pp. 349-365, Addison Wesley