対向流場に形成された非予混合乱流火炎の観察 Observation of Non-Premixed Turbulent Flames Stabilized in an Opposed Jet Burner

○学 安 鐵朱 (阪大院) 正 赤松 史光 (阪大工) 正 香月 正司 (阪大工)

Chulju AHN, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka

Fumiteru AKAMATSU, Osaka University

Masashi KATSUKI, Osaka University

In order to study the interaction between turbulence and combustion, we observed the flame structure of non-premixed flames stabilized in an opposed jet burner, particularly paying a special attention on its similarity to that of premixed flames. Due to very rapid mixing in an intense turbulent field, flame appearances and fluctuating properties of the two types of flames resembled each other. Therefore, we will be able to simulate the fine flame structure of highly preheated air combustion in premixed type by a turbulent non-premixed flame of rapid mixing type. It suggests that the non-premixed combustion using highly preheated air can be a substitute for highly preheated premixed flames as far as the mixing time is shorter than the ignition delay. We plan to observe the effect of the change in chemical time on the flame structure by diluting pre-heated air with nitrogen.

Key words : Non-Premixed Flame, Turbulent Flame, Flame Structure, Opposed jet burner

1. 研究の背景及び目的

乱流火炎は、火炎構造に関する一連の研究により、乱れ強さ (u') と層流燃焼速度 (S_L) の比、及びコルモゴロフスケール (ℓ_k) と層流火炎の火炎帯厚さ (δ_f) の比で定義される Da 数によって分類できる。今までのほとんどの研究では、乱流特性時間 (ℓ_k / u') を短縮することで分散反応火炎を形成しており、化学反応の特性時間 (δ_f / S_L) を長くする方法で分散反応火炎を形成した例は多くなく、化学反応の特性時間が火炎構造に及ぼす影響は十分に検討されていない。化学反応の特性時間を変える方法として、混合気の予熱と酸素濃度の組み合わせが有望であるが、これを実現させるには、燃焼反応が起こる前に燃料と予熱空気の一様な混合気を作ることが必要となる。本研究では、予熱空気の実験に先だって、常温空気をを用いた場合の非予混合火炎の火炎構造を調べ、予混合火炎の火炎構造と比べて

2. 実験装置

化学反応の特性時間を変える方法として、燃焼用空気の窒素希釈と高温の予熱を組み合わせる。高温空気を供給する場合、燃料と空気の予混合はできないので、別々に供給した燃料と空気の混合を促進する工夫をこらした。本実験に用いたバーナを図1に示す。火炎の安定性を高めるため、供給管内にはインナーロッドが挿入され、非予混合火炎を形成する場合にはインナーロッドに空けた16個の直径0.5mmの穴から燃料を供給する。また、インナーロッドには2つの段を設け混合の促進をはかった。

3. 実験結果

A. 火炎安定限界及び火炎の様子

火炎は当量比 ϕ が0.9から1.2の間で安定し、安定範囲以外の当量比になると、火炎は振動し始め、上下いずれかの円盤に付着したあと、吹き消えにいたる。熱電対で計測可能な温度範囲を考慮し、表1に示す流量条件で実験を行った。燃料には13A都市ガスを用いた。

Table 1 Experimental conditions

$\phi=0.9$	Premixed			Non-premixed		
Q_a (L/min)	90	110	130	90	110	130
Flame name	P90	P110	P130	Np90	Np110	Np130

本研究で用いられるバーナで形成される火炎は図2の直接火炎写真から分かるように、内外2つの火炎が存在する。このことは後述の図6の中央半径方向平均温度分布からも容易に確認できる。便宜上、インナーロッドについている算盤の珠状の火炎を内部火炎、その外側のドーナツ状の火炎を外部火炎と呼ぶ。内部火炎はインナーロッドの径が6mmから3mmに小さくなるところに形成される循環流によって保たれ、外部火炎は供給管の流路が急激に拡大することによって上下両円盤側に付

Fig.1 Configuration of the burner and inner rod

Fig.2 Direct photographs of P130 flame(upper) and Np130 flame(lower)

着するように形成された循環流によって保たれると考えられる。混合気流量の増加により火炎の外径は単調に増加する。

B. 燃焼時の流れ場及び乱流特性

レーザトモグラフィ法による流れの可視化及び LDV による速度計測の結果(図3, 図4)から、未燃混合気流は半径6mmから9mmの間で強くぶつかり、半径方向に加速を受け、半径10mmから12mmの間で最大速度に達した後、徐々に減速することが観察された。その際、インナーロッド周り及び円盤にそって、循環流領域が形成される。可視化によれば内部火炎中には定在的な渦が充満しており、平均速度が小さくて、変動速度が大きいという特徴を持つことが観察された。図5に ℓ_r 及び ℓ_k の半径方向分布を示す。 ℓ_r 及び ℓ_k の算出には、測定点温度での空気の動粘性係数、LDV 速度計測の結果から求めた乱れの u' を用いた。 ℓ_r と ℓ_k の両方とも、最大速度を示す半径11mm近傍で最小の値を示す。

Fig. 3 Mean and rms. velocity contours for P110 flame

Fig. 4 Velocity profile in radial direction

Fig. 5 Turbulent scales

C. 平均温度及び変動温度の確率密度分布

火炎温度は R タイプ熱電対 (Pt-PtRh13%, 素線径 25 μ m) からの起電力をプログラム上で温度補償 (時定数 8ms) することによって計測した。その結果を図 6 に示す。図 7 に未燃混合気が流れる流線上に沿って測定した P110, Np110 火炎の変動温度の確率密度分布を示す。また、半径方向位置 $r=17$ mm で計測された平均温度、変動速度 u' 、乱れのスケールなどの値を表 2 にまとめて示す。

4. まとめ

本研究で用いられた対向流バーナに形成される非予混合火炎は、それと同じ当量比を持つ予混合火炎の火炎構造にきわめて近い。表 2 から分かるように、予混合火炎、非予混合火炎ともに分散反応領域から火炎片^{(1) (2)}までの火炎構造を有している。

参考文献

- (1) Peters, N., *Turbulent Combustion*, (2000), 79, Cambridge University Press.
- (2) Mansour, M.S., *Proc. of the Combustion Institute*, Vol. 27(1998), 767.

Fig. 6 Temperature profile in radial direction

Fig. 7 PDFs of temperature for P110(upper) and Np110(lower) flame

Table 2 Relevant parameters at $r=17$ mm, $z=0$ mm

Flame name	P90	Np90	P110	Np110	P130	Np130
T (°C)	1121	1203	885	875	747	930
Euler Scale (mm)	3.82	4.65	3.25	3.27	2.79	2.85
Taylor scale (mm)	3.34	3.21	2.26	2.08	1.74	1.75
Kolmogorov scale (mm)	0.299	0.254	0.18	0.158	0.131	0.131
u' (m/s)	2.078	3.038	2.861	3.36	3.364	4.459
u'/S_L	5.94	8.68	8.17	9.6	9.61	12.74
LE/ σ_F	6.38	7.77	5.42	5.46	4.65	4.76
Da	1.07	0.9	0.66	0.57	0.48	0.37
Ka	4	5.57	11.11	14.41	20.97	20.99