

## Local Flame Structure in Thin Reaction Zones

○名田譲（東工大院），店橋護（東工大院），宮内敏雄（東工大院）

Yuzuru Nada, Mamoru Tanahashi and Toshio Miyauchi

\* Dept. of Mechanical and Aerospace Eng., Tokyo Inst. of Tech., Tokyo 152-8552, Japan

Direct numerical simulation of hydrogen-air turbulent premixed flames is conducted to investigate the local flame structure in thin reaction zones of the turbulent combustion diagram. The distribution of heat release rate shows sheet-like structure even in thin reaction zones though the distribution on a cross section seems to be isolated. The fluctuation and maximum value of the heat release rate increase in the region of low temperature and the maximum heat release rate exceeds 1.4 times of that of the laminar flame. The mechanism of increase of heat release rate is discussed based on the balance of elementary reactions. The reaction rates of HO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> increase 10 times of that in the laminar flame. Especially, the reaction rate of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> increases in the preheat zone and the region with high heat release rate, and its distribution shows the double layer structure.

## 1. 緒論

乱流予混合燃焼は最も基本的な燃焼形態のひとつであり、乱流予混合火炎の構造とその特性を解明することは、高精度乱流燃焼モデルを構築する上で必要不可欠である。Peters<sup>1)</sup>は、層流燃焼速度に対する乱流強度の比( $u'_{rms}/S_L$ )及び層流火炎厚さに対する乱流場の特性長さの比( $l/\delta_F$ )を用いて、乱流予混合火炎の形態を wrinkled flamelets, corrugated flamelets, thin reaction zones 及び broken reaction zones の4つに分類している。近年、乱流予混合火炎の直接数値計算(DNS)により、乱流燃焼ダイアグラム上のそれぞれの領域に分類される燃焼条件での火炎構造の詳細が明らかにされつつある。著者ら<sup>2,4)</sup>は wrinkled flamelets, corrugated flamelets 及び corrugated flamelets と thin reaction zones の境界に分類される水素・空気乱流予混合火炎の DNS を行い、実際の乱流予混合火炎は乱流燃焼ダイアグラムとは異なる火炎構造を示すことを明らかにした。その中で、thin reaction zones と corrugated flamelets の境界に位置する乱流火炎の構造は二層構造を示すことが明らかにされているが<sup>3)</sup>、さらに乱流強度の高い thin reaction zones に分類される乱流火炎の局所構造は未だ解明されていない。そこで、本研究では thin reaction zones に分類される水素・空気予混合火炎を対象として、詳細化学反応機構と輸送係数・物性値の温度依存性を考慮に入れた直接数値計算を行い、その局所構造を明らかにすることを目的としている。

## 2. 水素・空気乱流予混合火炎の直接数値計算

本研究では、以前の研究<sup>2,4)</sup>と同様な計算方法を用いて、thin reaction zones に分類される水素・空気乱流予混合火炎の DNS を行った。表1に計算条件を、図1に乱流燃焼ダイアグラムにおける計算条件の位置を示した。著者らにより以前に行われた DNS の条件<sup>2,4)</sup>は Case 1 から Case 3 であり、本研究で行った DNS の条件は Case 4 である。表中の  $Re_\lambda$  と  $Re_l$  はそれぞれ積分長( $l$ )とティラー・マイクロスケール( $\lambda$ )に基づくレイノルズ数であり、 $\delta_F$  は拡散係数と粘性係数から求まる層流

火炎厚さ、 $S_L$  は層流燃焼速度、 $u'_{rms}$  は二乗平均変動速度を示している。Case 1 から Case 3 は、それぞれ wrinkled flamelets, corrugated flamelets 及び corrugated flamelets と thin reaction zones の境界に位置している。すべての条件において、流入予混合気は予熱温度 700K、圧力 0.1MPa、当量比 1.0 に設定している。

## 3. 乱流予混合火炎の局所構造

図2は特徴的な断面における熱発生率分布を示している。図示した領域の大きさは 2.5mm×2.5mm である。熱発生率は乱流運動の影響により大きく変動しており、層流火炎の最大熱発生率( $\Delta H_L$ )より高い値を示す領域が形成されている。Case 3 と Case 4 では高熱発生率の島状構造が形成されており、図示した断面においては、熱発生率は不連続な分布を示している。著者ら<sup>3)</sup>はすでに Case 3 の乱流火炎においては、熱発生率は三次元的には連続したシート状の分布を示すことを明らかにしている。図3は Case 4 における熱発生率が  $1.0\Delta H_L$  と  $0.7\Delta H_L$  の等価面を示している。 $1.0\Delta H_L$  の等価面の場合、熱発生率の分布は分散して存在しているように見えるが、 $0.7\Delta H_L$  の等価面から Case 4 の熱発生率も Case 3 と同様にシ

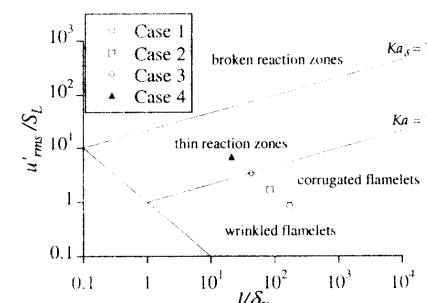


Fig. 1 Turbulent combustion diagram.

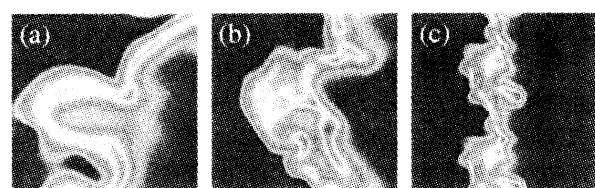


Fig. 2 Distributions of heat release rate for Case 2 (a), Case 3 (b) and Case 4 (c) on a typical plane.

Table 1 Numerical parameters for DNS of hydrogen-air turbulent premixed flames.

	$Re_\lambda$	$Re_l$	$l/\delta_F$	$u'_{rms}/S_L$
Case 1	37.4	143.6	168.6	0.85
Case 2	37.4	143.6	84.3	1.70
Case 3	37.4	143.6	42.2	3.41
Case 4	37.4	143.6	21.1	6.81

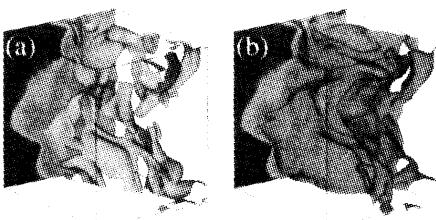


Fig. 3 Contour surface of heat release rate for Case 4 ((a):  $\Delta H = 1.0\Delta H_L$ , (b):  $\Delta H = 0.7\Delta H_L$ ).

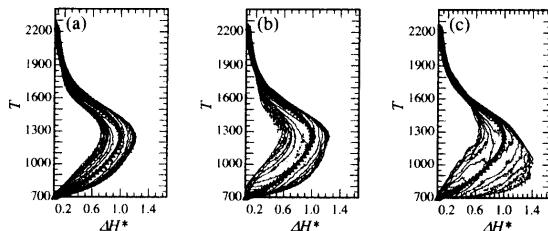


Fig. 4 Joint probability density functions of heat release rate and temperature for Case 2 (a), Case 3 (b) and Case 4 (c).

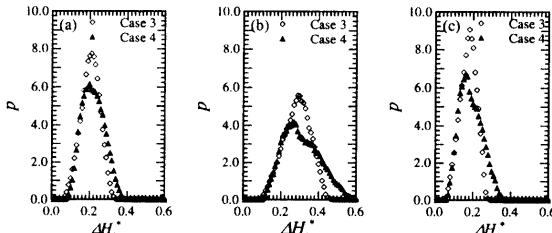


Fig. 5 Probability density functions of contributions of R3 (a), R6 (b) and R8 (c) on heat release rate.

一ト状の分布であることがわかる。

図4は温度と熱発生率の結合確率密度関数を示している。図中のシンボルは層流火炎における温度と熱発生率の関係を示しており、熱発生率は層流火炎の最大熱発生率で無次元化されている。乱流の強度が強くスケールが小さくなるに従って熱発生率の変動とその最大値は増加し、特にCase 4では1000K程度の低温領域で最大値は $1.4\Delta H_L$ 程度にまで達している。

低温領域における熱発生率増加の原因を明らかにするため、熱発生率に対する素反応の寄与について検討を行った。以前の研究<sup>5)</sup>から、熱発生率に対する寄与の大きい発熱反応は、R3:  $H_2 + OH \leftrightarrow H_2O + H$ , R6:  $H + O_2 + M \leftrightarrow HO_2 + M$ , R8:  $H + HO_2 \leftrightarrow OH + OH$ の3素反応であることが明らかにされている。図5はCase 3とCase 4の950Kから1050Kの領域における各素反応の寄与の確率密度関数を示している。各素反応の寄与は層流火炎の最大熱発生率で無次元化されている。素反応R3とR8の場合、両ケースの確率密度関数はほぼ同様であるのに対し、素反応R6の場合、Case 4の寄与はCase 3より高いことが分かる。

図6は素反応R6に関する化学種 $O_2$ と $H$ のモル濃度の確率密度関数を示している。確率密度関数は、図5の場合と同様に、950Kから1050Kの低温領域を対象としており、各化学種のモル濃度は層流火炎の最大値で無次元化されている。両ケースの $O_2$ の確率密度関数はほぼ同様な分布を示しているが、 $H$ の場合、Case 4においてCase 3より高い濃度を示す領域が多く存在している。このことから、1000K程度の低温領域において $H$ 原子濃度が増加したため、素反応R6が促進され熱発生率が増加することがわかる。図7は代表的な断面における熱発生率の分布と $H$ の輸送方程式における

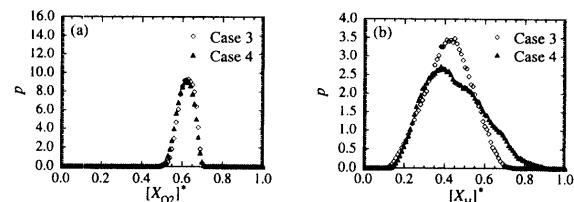


Fig. 6 Probability density functions of mole concentration of  $O_2$  (a) and  $H$  (b).

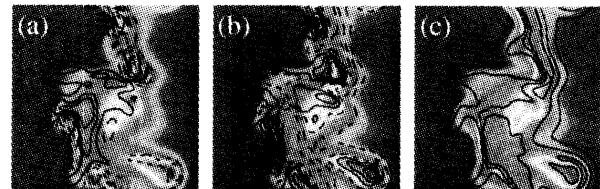


Fig. 7 Contour line of convection term (a), diffusion term (b) and reaction term (c) of  $H$ , and distributions of heat release rate.

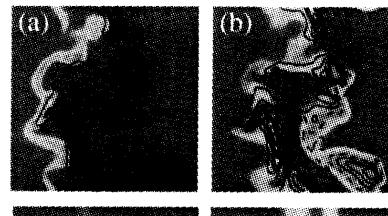


Fig. 8 Distributions of reaction rate of  $HO_2$  (a) and  $H_2O_2$  (b), and contour line of diffusion term of  $H$ .

対流項、拡散項及び反応項の等価線を示している。等価線の間隔は全ての項において等しく、正の値を実線、負の値を破線で示している。反応項の寄与は対流項及び拡散項よりも小さい。また、拡散項が高い値を示す1000K程度の領域において熱発生率も高い値を示していることから、低温領域における熱発生率の増加は拡散項の寄与によるものと考えられる。

図8は $HO_2$ 及び $H_2O_2$ の反応速度と $H$ の拡散項との関係を示している。図の下には比較のため層流火炎における各化学種の反応速度分布も示している。 $H$ の拡散により火炎前縁で素反応R6が促進されるため、 $HO_2$ の反応速度が層流火炎の最大反応速度の10倍程度まで増加していることがわかる。また、 $H_2O_2$ の反応速度は火炎前縁で同様に高い値を示しており、分離した二層構造が明確に現れている。

#### 4. 結論

本研究では、thin reaction zonesに分類される乱流予混合火炎の局所構造を明らかにするために、三次元一様等方性乱流中を伝播する水素・空気予混合火炎の直接数値計算を行い、次の結論を得た。

- (1) 热発生率は乱流運動の影響により大きく変動するが、三次元的にはシート状の分布を示す。热発生率の最大値は比較的の温度の低い領域において層流火炎の最大熱発生率の1.4倍程度まで増加する。
- (2)  $HO_2$ 及び $H_2O_2$ の反応速度は火炎前縁において層流火炎と比べて高い値を示し、 $H_2O_2$ の反応速度分布は分離した二層構造を示す。

#### 引用文献

- 1) N. Peters: *J. Fluid Mech.* 384 (1999) 107.
- 2) M. Tanahashi et al.: *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 529.
- 3) M. Tanahashi et al.: *Proc. Combust. Inst.* 29 (2002) 2041.
- 4) 名田, 他2名: 热工学講演会講演論文集 (2002) 21.
- 5) T. Miyauchi, M. Tanahashi, Y. Imamura and Y. Nada: *Proc. 1st ASPACC* (1997) 278.