水素・空気乱流予混合火炎における火炎近傍の歪み速度特性 Characteristics of Strain Rates near Flame Front in Turbulent Hydrogen-Air Premixed Flames

○源 勇気 (東工大院) 正 名田 譲 (豊橋技科大)

正 店橋 護 (東工大院) 正 宮内 敏雄 (東工大院)

Yuki Minamoto, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Yuzuru Nada, Toyohashi University of Technology, Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Aichi

Mamoru Tanahashi, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Toshio Miyauchi, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Three-dimensional direct numerical simulations (DNS) with detailed kinetic mechanism have been conducted for statistically-planar, freely-propagating turbulent flame and turbulent V-flame of hydrogen-air mixture in relatively high Reynolds number turbulence. DNS of each configuration was performed in two numerical conditions which are characterized by the difference of Reynolds number. From these results, eigen values of strain tensor are evaluated to investigate characteristics of the strain field near the flame and alignment of the principal strain and flame. Strong dependency of turbulent-flame interaction on Reynolds number and convection are revealed. Interesting feature of high Reynolds number turbulent flame is described as well.

Key Words: 3D DNS, Turbulent Combustion, V-Flame, Principal Strain Rates

1. 諸論

乱流燃焼モデルは燃焼器内の CFD 解析の精度に大きな影響を与える。近年、より高精度な乱流燃焼モデルを構築するために様々な方法が提案されている。通常、開発されたモデルの検証は数値的方法と実験的方法により行われている。詳細化学反応機構を用いた直接数値計算 (DNS) は最も高精度な計算手法であるが、その一方で膨大な計算資源を必要とする。そのため、多くは二次元 DNS にとどまっている。しかし、乱流運動は本質的に三次元であり、乱流火炎の局所構造に大きな影響を与える歪み速度の固有値は平均的に 2 つの正值と 1 つの負値を有しているため、これらの性質を二次元 DNS で表現することはできない。

一方、実験的手法では、Stereoscopic PIV と PLIF を用いた複合レーザ計測⁽¹⁾により乱流火炎の様々な情報を得ることができるようになった。しかし、これらの手法を用いても得られるデータは二次元断面内に留まっており、モデルの検証にはこれらの二次元データが用いられている^(2,3)。

本研究では、詳細化学反応機構を考慮に入れた三次元 DNS を統計的に平面水素・空気乱流予混合火炎と V 型水素・空気乱流予混合火炎に対して行った。さらに、DNS 結果から歪み速度テンソルの固有値及び固有ベクトルを算出し、高 Reynolds 数乱流及び対流が乱流火炎の動的特性に及ぼす影響を明らかにした。

2. 水素・空気乱流予混合火炎の DNS

平面乱流予混合火炎の DNS には、以前の研究と同様な基礎方程式及び計算方法を用いた⁽⁴⁾。計算は圧力 0.1 [MPa]、当量比 $\phi=1.0$ 、予熱温度 700 [K]の条件を対象とした。平面乱流予混合火炎の DNS では 2 つの異なる Reynolds 数 ($Re_\lambda=60.8$ 及び 97.1) に対して DNS を行った。ここで、 Re_λ は Taylor microscale (λ)に基づく Reynolds 数である。表 1

Table 1 Numerical conditions

	Re_λ	$N_x \times N_y \times N_z$	$L_x \times L_y \times L_z$ [mm]	u'/S_L	l/δ_F
Planar	60.8	$513 \times 128 \times 128$	$10 \times 5 \times 5$	3.39	89.8
	97.1	$1025 \times 384 \times 384$	$7.4 \times 7.4 \times 7.4$	5.78	122
V-flame	60.8	$513 \times 257 \times 257$	$10 \times 5 \times 5$	3.39	89.8
	97.1	$769 \times 385 \times 385$	$10 \times 5 \times 5$	8.47	83.3

に平面乱流予混合火炎の計算条件を示す。ここで、 u' 、 S_L 、 l 及び δ_F はそれぞれ乱流強度、層流燃焼速度、積分長及び層流火炎厚さである。これらの計算結果から得られた反応進行変数 ($c=0.30$) の等値面を図 1 に示す。これらの結果は異なる Reynolds 数での火炎構造の特徴を示している⁽⁵⁾。

図 2 に V 型乱流予混合火炎の DNS の模式図を示す。V 型火炎の DNS では、前述の平面乱流火炎の場合と同様な支配方程式を用いたが、全方向に 4 次精度中心差分法を用いて離散化した。境界条件として、 x 方向と y 方向には NSCBC、 z 方向には周期境界条件を用いた。V 型火炎の計算条件も表 1 に示した。予混合気は圧力 0.1 [MPa]、当量比 $\phi=1.0$ 、予熱温度は 700 [K]とした。初期条件として最大温度が 2000 [K]のガウス分布型の温度分布をロッドの位置に与えることで着火させた後、ロッド表面の温度を 2000 [K]に保持し、火炎を維持させた。ただし、ロッド表面の流体速度はゼロとし、組成は既燃ガスとした。

流入速度を $u_{in}(y, z, t) = U_c + u'(y, z, t)$ と与えた。ここで、 U_c は平均流入速度、 $u'(y, z, t)$ は速度変動を示している。本研究では、速度変動としてスペクトル法を用いた DNS から得られた十分発達した一様等方性乱流の速度場を与えた⁽⁶⁾。ここで、各時刻の流入速度変動は、フーリエ空間内で位相をシフトさせることにより厳密に与えた。また、 U_c は平面乱流火炎の DNS では火炎面が計算領域の中央部に位置するように、V 型乱流火炎の DNS では $Re_\lambda=60.8$ 及び 97.1 でそれぞれ $10S_L$ 及び $20S_L$ とした。図 3 と図 4 は統計的に定

Fig. 1 Contour surfaces of reaction progress variable $c = 0.30$ for planar turbulent premixed flame (right: $Re_\lambda=60.8$ and left: $Re_\lambda=97.1$).

Fig. 2 Schematic of the flow geometry for DNS of turbulent V-flame.

Fig. 3 Volume rendering of reaction progress variable of turbulent V-flame for $Re_\lambda=60.8$ (view from z direction).

Fig. 4 Volume rendering of reaction progress variable of turbulent V-flame for $Re_\lambda=97.1$ (view from z direction).

常な時刻におけるボリュームレンダリングによる反応進行変数の分布を V 型火炎の場合について示している。これらの結果は Reynolds 数と対流速度の違いによる火炎構造の相違を示しており、その特徴の一部は同じ Reynolds 数の平面乱流火炎でも観察される。

3. 火炎面近傍での歪み速度

火炎面付近での歪み速度特性を検証するために歪み速度テンソルから主歪み速度を算出した。図 5 は平面乱流火炎 ($Re_\lambda=60.8$ 及び 97.1) と V 型乱流火炎 ($Re_\lambda=60.8$) で $c=0.20$ における主歪み速度の PDF を比較したものである。ここで、 α 、 β 及び γ はそれぞれ最大、中間及び最小主歪み速度であり、それぞれの主歪み速度は Kolmogorov length scale と Kolmogorov velocity scale で正規化されている。また、本研究では火炎面を定義するために、未燃予混合気温度及び既燃ガス温度で定義される反応進行変数を導入した。図 5 で示される PDF は、膨張、Reynolds 数及び対流による効果を明確に示している。Reynolds 数が異なる 2 つの平面乱流火炎の PDF を比較すると、Reynolds 数の増加とともに、主歪み速度の確率密度の分散が大きくなるのがわかる。これは、 $Re_\lambda=97.1$ の場合では $Re_\lambda=60.8$ に比べて乱流運動による歪み効果が顕著であることを示している。 $Re_\lambda=60.8$ の平面火炎と V 型火炎の結果を比較すると、PDF に大きな違いが観察される。V 型火炎ではより分散が大きくなっており、乱流運動による歪みがより顕著な影響を及ぼしている。さらに、同じ反応進行変数においても PDF がピークを示す値が異なり、V 型火炎では平面火炎に比べて歪みテンソルの固有値の中間値 β が 0 近傍に位置し、より 2 次元的な特性を示している。また、 α と γ の PDF がピークを示す値の絶対値は V 型火炎ではより増大している。これらは保炎用ロッド後方の伴流と火炎面が平均速度の方向と平均的に角度を有するためであると考えられる。すなわち、同じ Reynolds 数の乱流燃焼場であっても平均的な火炎面と平均流の幾何学的関係及び平均流の強さによって火炎面に作用する歪み速度の特性が変化すると考えられる。

乱流と火炎面の干渉機構の特性は主歪み速度と火炎面の配向特性に現われる。そこで、本研究ではこの干渉機構を解明するために歪み速度テンソルの固有ベクトルと火炎面の法線方向の配向特性についても検討した。火炎面法線方向と主歪みベクトルの内角の PDF を検討した結果、高 Reynolds 数乱流火炎では火炎面法線方向は歪みテンソルの最少固有値の固有ベクトルと平行になる傾向を持つことが

Fig. 5 PDF of the eigen value of strain rate tensor near the flame ($c=0.20$) for statistically planar turbulent premixed flame ($Re_\lambda=60.8$ and $Re_\lambda=97.1$) and turbulent V-flame ($Re_\lambda=60.8$).

分かった。これは高 Reynolds 数乱流火炎では乱流運動による歪み速度が燃焼による膨張効果に比べてより支配的であるためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、詳細化学反応機構を考慮に入れた三次元 DNS を統計的に平面な水素・空気乱流予混合火炎と V 型水素・空気乱流予混合火炎に対して、それぞれ異なる 2 つの Reynolds 数について行い、歪み速度特性及び主歪み速度と火炎面の配向特性を検討した。その結果、平均的な火炎面と平均流の幾何学的関係及び平均流の強さによって火炎面に作用する歪み速度の特性が変化することが示された。さらに、Reynolds 数が高くなるほど最大圧縮に対応する歪み速度と火炎面の配向は強くなることが分かった。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金若手研究(S) (No.2067 6004)により行われたものであり、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Tanahashi, M. et al., Proc. Combust. Inst. **30** (2005), 1665.
- (2) Shepherd, I. G. Proc. Combust. Inst., **26** (1996), 373.
- (3) Hartung, G. et al., Phys. Fluids, **20** (2008), 035110.
- (4) Tanahashi, M. et al., Proc. Combust. Inst., **29** (2002), 2041.
- (5) Nada, Y. et al. Proc. 5th Asia-Pacific Conf. Combust., (2005) 429
- (6) Tanahashi, M. et al., Proc. of 11th Symp. on Turbulent Shear Flow **1**, (1997), 4.