乱流予混合燃焼の直接数値シミュレーションとモデリング DNS and Modeling for Turbulent Premixed Combustion

○正 錦 慎之助 (名工大院)

正 長谷川 達也 (名大)

ロラン ボルギ (マルセイユ第2大学)

正 姫野 龍太郎 (理研)

Shinnosuke NISHIKI, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, 466-8555 Japan

Tatsuya HASEGAWA, Nagoya University, Furo-cho, Chigusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

Roland BORGHI, ESM2-Université d'Aix-Marseille II and LMA-CNRS, 13402 Marseille cedex 20 France

Ryutaro HIMENO, RIKEN, 2-1, Hirosawa, Wako-shi, 351-0198 Japan

Fully developed turbulent premixed flames were directly simulated in different cases $\rho_u/\rho_b=7.53, 2.50$ while u'/u_L was close to unity. Analysis of the Favre-averaged transport equation for turbulent kinetic energy showed pressure concerning terms produced kinetic energy in flame brush, and mean pressure gradient term, pressure dilatation term and additional dissipation components were modeled. Analysis of the Favre-averaged transport equation for turbulent scalar flux showed pressure concerning terms and velocity-reaction rate correlation term were sources for counter-gradient diffusion, and mean pressure gradient term, fluctuating pressure term, dissipation terms and velocity-reaction rate correlation term were modeled.

Key Words: Turbulent Premixed Combustion, DNS, Combustion Modeling.

1. はじめに

実用的な燃焼器を乱流モデルや燃焼モデルを用いずに数値シミュレーションを行うことは現在の計算機の能力では非常に難しいため、それらのモデルを用いて数値シミュレーションを行う必要があるが、燃焼モデルの精度は十分と言える状態には至っていない。

本研究では、乱流予混合燃焼場の直接数値シミュレーションを行い、そのデータベースに基づいた高精度の新しい乱流予混合燃焼モデルを開発することを目的としている。これまでに、燃焼前後の密度比が異なるケースについて十分に発達した乱流予混合燃焼のデータベースを直接数値シミュレーションによって構築し、乱流エネルギー、乱流スカラー流束の輸送方程式の解析から各項の振る舞いを明らかにして、燃焼に関連する項のモデル化を行った。^[1-3]

2. データベースの構築

本研究では、圧縮性、粘性および発熱反応を考慮した三次元の流れ場の直接数値シミュレーションを行った。^[1-3] 計算領域は $8\text{mm} \times 4\text{mm} \times 4\text{mm}$ の直方体で、長さ 8mm の方向を流れ方向とし、一様等方性乱流の速度場を持った未燃焼ガスを計算領域に流入させ、燃焼の後、下流側に向かって燃焼ガスが流出する(Fig.1)。本研究で行った燃焼前後の密度比が異なる 2 つのケースについての火炎の特性を Table 1 に、また、流入する一様等方性乱流および初期の乱流場の特性を Table 2 にまとめた。

Fig. 1 Simulation domain and coordinate system.

Table 1 Properties of Flame.

	Case H	Case L
ρ_u/ρ_b	7.53	2.50
T_a	2260 K	750 K
u_L	0.6000 m/s	0.4162 m/s
e_L	0.217 mm	0.158 mm

e_L : Flame Thickness, l_i : Integral length scale.

Table 2 Properties of Turbulence.

	Case H	Case L
u'/u_L	0.88	1.26
l_i/e_L	15.9	21.8
Re_{li}	95.5	95.5

3. 乱流エネルギーの輸送方程式

ファール平均が施された乱流エネルギーの輸送方程式を用いて各項の詳細な解析を行った。

$$\frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_i} = \underbrace{\frac{\rho u''_i u''_i}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}}_{(I)} + \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho u''_i u''_i}{\partial x_i}}_{(II)} - \underbrace{\frac{u''_i}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}}_{(III)} - \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} u''_i \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x_i}}_{(IV)} + \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} u''_i \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{(V)}$$

ここで、(I) は平均速度勾配による生成項、(II) は乱流拡散項、(III) は平均圧力勾配による生成項、(IV) は圧力作用項、(V) は粘性による拡散および散逸項である。このうち、圧力作用項 (IV) は圧力拡散項 (IV1) と圧力膨張項 (IV2) に変形することができる。また同様に、粘性による拡散および散逸項 (V) は散逸の項 (V1)、燃焼に起因する項 (V2) と (V3)、およびその他の微小項の和 Δ に変形することができる。

$$-\frac{1}{\bar{\rho}} u''_i \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x_i} = -\underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x_i} u''_i}_{(IV1)} + \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} \bar{p}' \frac{\partial u''_i}{\partial x_i}}_{(IV2)}$$

$$\frac{1}{\bar{\rho}} u''_i \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = -\underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} \mu \frac{\partial u''_i}{\partial x_i} \frac{\partial u''_j}{\partial x_j}}_{(V1)} + \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho}} u''_i \frac{\partial (\mu \frac{\partial u''_j}{\partial x_j})}{\partial x_i}}_{(V2)} - \underbrace{\frac{2}{3} \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial (\mu \frac{\partial u''_i}{\partial x_i})}{\partial x_i} u''_i}_{(V3)} + \Delta$$

各項を時間平均した分布は Fig. 2, 3 のようになった。このうち、(III), (IV2) および (V2)+(V3) の項を Table 3 のようにモデル化した。モデルと DNS データの比較を Fig. 4 に示す。

4. 乱流スカラー流束の輸送方程式

ファール平均が施された乱流スカラー流束の輸送方程式を用いて各項の詳細な解析を行った。

$$\frac{\partial \rho u''_j \bar{c}''}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u''_j c'' u''_i) = -\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u''_j c'' u''_i)}_{(A)} - \underbrace{\rho u''_j u''_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i}}_{(B)}$$

$$-\underbrace{\rho c'' u''_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}}_{(C)} - \underbrace{c'' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j}}_{(D)} - \underbrace{c'' \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x_j}}_{(E)} + \underbrace{u''_j \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right)}_{(F)} + \underbrace{c'' \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{(G)} + \underbrace{\rho u''_j \bar{\omega}}_{(H)}$$

ここで、(A) は乱流輸送項、(B) は平均進行度変数の勾配による生成項、(C) は平均速度勾配による生成項、(D) は平均圧力勾配による生成項、(E) は圧力変動による生成項、(F) は拡散による散逸項、(G) は粘性による散逸項、(H) は速度変動と平均反応速度の関係する項である。各項を時間

平均した分布は Fig. 5 のようになった。このうち、(D)、(E)、(F)+(G)、(H) の項を Table 4 ようにモデル化した。モデルと DNS データの比較を Fig. 6, 7 に示す。

5. まとめ

本研究では、十分に発達した定在する乱流予混合火炎のデータベースを構築し、これらのデータベースに基づいて乱流エネルギーと乱流スカラー流束の輸送方程式の解析を行った。乱流エネルギーの輸送方程式の解析から、圧力に関する項が火炎領域内で乱流エネルギーを増加させており、密度比の高いケースでは平均圧力勾配による生成項、低いケースでは圧力作用項が最も重要な役割を果たしていること、一方、乱流スカラー流束の輸送方程式の解析から、圧力の関係する項と速度変動と平均反応速度の関係する項が本研究の計算で支配的な逆勾配拡散の発生の要因となっていることが分かった。また、輸送方程式中の燃焼の影響を受ける項について精度良くモデル化を行った。ただし、乱流スカラー流束の輸送方程式のモデル化で、密度比が異なる場合でもモデル定数の値が同じになるようにモデルの精度を向上させる必要がある。

Fig.2 Transport equation for kinetic energy.

Fig.3 Transport equation for kinetic energy. Term (IV) and (V).

Fig.4 Comparing models to DNS. Solid lines: DNS, dashed line.

Table 3 Model for Turbulent kinetic energy.

Term	Model	Model constant	
		Case H	Case L
(III)	$-C_m \left(\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_a} \right) \frac{\rho u_i'' c''}{\bar{p}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$	1.0	1.0
(IV2)	$C_{IV2} \tilde{\omega} u_i^2 \left(\frac{\rho_a}{\rho_b} - 1 \right)^2$	0.35	0.34
(V2)+(V3)	$-C_{adv} \tilde{k} v_{u_i} (\rho_a / \rho_b - 1) \tilde{\omega}$	0.29	0.25

謝辞

本研究は、平成 12-14 年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費 No. 2054）により行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1. 錦慎之助ほか, 第 17 回生研 NST シンポジウム講演論文集(2001), p. 80.
2. 錦慎之助ほか, 日本燃焼学会誌, 44-127(2002), p. 47.
3. Nishiki, S. et al., Proc. of the Combustion Institute, 2A11, Vol. 29(2002), 印刷中.

Fig.5 Transport equation for turbulent scalar flux.

Fig.6 Comparing models to DNS. Solid lines: DNS, dashed line.

Fig.7 Comparing model to DNS for (E).

Solid lines: DNS, dashed line.

Table 4 Model for Turbulent scalar flux.

Term	Model	Model constant	
		Case H	Case L
(D)	$-C_D \bar{p} \tilde{c} \left(\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_a} \right) \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j}$	0.79	0.80
(E)	$\frac{-C_{E-c} \tilde{E}}{\tilde{k}} \frac{\rho u_i'' c''}{\bar{p}}$	C_{E-c}	
	Model 1	0.67	0.68
	$+C_{E-a} \bar{p} u_i \left(\frac{\rho_a}{\rho_b} - 1 \right) \tilde{\omega} (1 - \tilde{c})$	C_{E-a}	
(F)+(G)	Model 2	1.0	0.70
	$-C_{FG} \bar{p} u_i \left(\frac{\rho_a}{\rho_b} - 1 \right) \tilde{\omega}$	0.48	0.39
(H)	$C_H \bar{p} (\phi_m - \tilde{c}) \tilde{\omega} \frac{\rho u_i'' c''}{\bar{p} \tilde{c} (1 - \tilde{c})}$	C_H	ϕ_m
		1.50	0.69
		1.42	0.80