パイロット火炎及び保炎器により安定化された
乱流予混合火炎の数値シミュレーション*稲毛 真一^{*1}, 小林 成嘉^{*1}A Numerical Simulation of Turbulent Premixed Flame
Stabilized by a Pilot Flame and Bluff Body

Shin-ichi INAGE and Nariyoshi KOBAYASHI

A numerical simulation of a turbulent premixed flame stabilized by a pilot flame and bluff body was performed using the LES turbulent model and a new turbulent combustion model. In the previous work, the authors evaluated a local quenching effect due to a flame stretch and proposed a new combustion model including turbulent effects. The model also includes the temperature effect of unburned gas and the pressure effect in a combustor. First, the flame propagation to the premixed gas from the pilot flame was estimated. Due to the strong velocity gradient through the boundary layer between the premixed gas and the pilot flame, local quenching occurred around the top of the boundary layer. Thus, the ignition point of the premixed gas was located below the boundary region, where the velocity gradient was decreased. Next, the stable premixed flame after the flame propagation was estimated. Due to the strong organized motion created by the bluff body and the boundary layer between the premixed gas and the pilot flame, we could see fluctuations of the premixed flame. Further more, the distributions of the time averaged temperature and the intensity of the temperature fluctuation were compared with the experiment data. The calculated results were in good agreement with the experimental ones.

Key Words: Turbulence, Combustion Model, Numerical Simulation, Flame

1. 緒 言

近年、環境規制の強化及び燃焼機器の高効率化に伴い、燃焼の解明が精力的になされており、実験及び理論的解明に加えて、新たな解析技術として数値シミュレーションが期待されている。乱流予混合燃焼において、特に重要な因子は乱れによる燃焼速度の増大効果及び火炎伸長による消炎効果である。火炎伸長による消炎効果の本質は、速度勾配の存在、それに伴う流線の拡がりである。乱流場には渦による速度勾配が存在し、乱れの強度が強くなるほど速度勾配も大きくなる。そのため、ある程度までは乱流燃焼速度を増大させるが、乱れが非常に大きい場合には火炎伸長により消炎に至る。例として、保炎器により安定化された火炎の場合、保炎器付近に強いせん断流が存在するため、火炎伸長の影響を受けやすい。著者らは、乱れによる燃焼速度の増大及び火炎伸長による消炎効果、さらに

は予混合気温度や燃焼器内圧力の影響を考慮した新たな乱流燃焼モデルを提案してきた。既報において、著者らのモデルを保炎器廻りの予混合火炎に適用し、解析した。その結果、保炎器下流の温度分布や軸方向流速分布を高精度に予測できることを確認している。本研究では、さらに著者のモデルを保炎器及びパイロット火炎により安定化された予混合火炎に適用した。パイロット火炎と予混合気間にせん断境界層が存在する場合、境界層中に形成される予混合火炎は火炎伸長の強い影響を受ける。また、保炎器に安定化された予混合火炎とパイロット火炎間の干渉も全体の燃焼場に大きな影響を与えると考える。本研究では、パイロット火炎による予混合気体の着火及び火炎安定化機構を数値計算により評価することを目的とする^{1),2),3)}。

2. 主な記号

A_0 : 空気中の酸素の質量分率 (-)

c : 反応進行度 (-)

* 原稿受付 1996年11月27日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所電力・電機開発本部(〒312 ひたちなか市堀口 832-2)。

C : 時間平均の反応進行度 (-)

C_p : 定圧比熱 (J/(kg · K))

D : 拡散係数 (Pa · s)

D_t : 乱流拡散係数 (Pa · s)

E : 活性化エネルギー (J/mol)

f : 予混合度 (-)

M : 分子量 (kg/mol)

Pr_t : 乱流プラントル数 (-)

R : 気体定数 (J/(K · mol))

S_u : 層流燃焼速度 (m/s)

T : 温度 (K)

x : 流れ方向の距離 (m)

Y : 化学種の質量分率 (-)

α : 頻度因子 ((mol/m³)^{1/2}/s)

δ : 層流火炎帯の厚み (m)

δ_t : 乱流火炎帯の厚み (m)

λ : 熱伝導率 (W/(m · K))

λ_t : 乱流熱伝導率 (W/(m · K))

μ_t : 渦粘性係数 (Pa · s)

ρ : 密度 (kg/m³)

τ : 発熱パラメータ (-)

ω : 反応速度 (kg/(s · m³))

添 字

b : 既燃焼気体の物理量を示す。

F_u : 燃料に関する物理量を示す。

i : 反応進行度が0.5の状態の時の物理量を示す。

O : 酸素に関する物理量を示す。

st : 理論化学量論比に関する物理量を示す。

u : 未燃焼気体の物理量を示す。

3. 乱流燃焼モデル

詳細は参考文献^{1),2)}に譲るが、以下に乱流予混合燃焼モデルの概略を示す。用いたモデルは、著者らが開発してきた乱流予混合燃焼モデルであり、当量比、未燃焼混合気体の温度、燃焼器内の圧力が燃焼に与える影響、さらに火炎伸長効果による消炎を考慮したモデルである。反応進行度輸送式における乱流予混合燃焼モデル ω は以下のように与えられる。

$$8\rho_u \frac{Su_0}{\delta_0} I^2 c^2 (1-c) \quad (I > 0.7)$$

$\omega =$

$$0 \quad (I \leq 0.7)$$

..... (1)

ここに、 Su_0 : 層流燃焼速度、 δ_0 : 火炎帯の厚み、 c : 反応進行度、 ρ_u : 未燃焼予混合気体の密度である。また、 I は火炎伸長の程度を表わすパラメータであり、以下の超越方程式の解として得られる。

$$\frac{1}{Ka_0} = -\left(\frac{\rho_0}{\rho_u}\right) \frac{1}{4I^2} \ln(1-I) \quad Ka_0 = \frac{g\delta_0}{Su_0} \quad \dots \dots (2)$$

ここに、 g : 流れ場中の速度勾配、 ρ_0 : 室温、大気圧下の未燃焼ガス密度、 ρ_u : 解析条件での未燃焼ガスの密度である。また、層流燃焼速度と火炎帯の厚みは以下の関係式により結ばれる。

$$Su_0 = \frac{4\lambda_t}{C_p \rho_u \delta_0} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、添字 i は未燃焼予混合気体温度と断熱火炎温度の平均温度での値を示す。層流燃焼速度は、実験的に与えても、以下のような理論式を用いても良い。

$$\rho_u Su_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega dx = \bar{\omega} \delta \quad \dots \dots (4)$$

但し、

$f < f_{st}$ の場合、

$$\bar{\omega} = \frac{\alpha \rho_u^2 A_0}{4M_O} \left\{ (1-f) \frac{1}{\tau^2} \left(\frac{T_b}{E_0} \right)^2 + \left(1 - \frac{f}{f_{st}} \right) \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_u}{E_0} \right) \right\} \times \exp \left(-\frac{E}{RT_b} \right)$$

$f \geq f_{st}$ の場合、

$$\bar{\omega} = \frac{\alpha \rho_u^2}{2M_{Fu}} \left\{ \frac{f}{\tau^2} \left(\frac{T_b}{E_0} \right)^2 + \left(1 - \frac{1-f}{1-f_{st}} \right) \frac{1}{\tau} \left(\frac{T_u}{E_0} \right) \right\} \times \exp \left(-\frac{E}{RT_b} \right) \quad \dots \dots (5)$$

ここに、 $E_0 = E/R$ である。式(5)を用いて層流燃焼速度に対する予混合気体温度の影響を評価する。式(3)~(5)より、本モデルによる層流燃焼速度には密度の依存性がなく、温度の影響は専ら発熱パラメータ τ を通じて与

Fig. 1 Effect of Temperature of Premixed Gas on Flame Speed

Fig. 2 Effect of Pressure on Flame Speed

えられる。発熱パラメータは断熱火炎温度と予混合気温度により決定される。断熱火炎温度は熱平衡計算により求めた。各予混合気温度の発熱パラメータを用いて計算した理論層流燃焼速度を測定値との比較を図1に示す。図より、理論値は測定値の誤差範囲内で測定値と一致することがわかる。これより、式(5)は予混合気温度の影響を正しく反映できる層流燃焼速度の式と考える。次に、層流燃焼速度に対する燃焼器内圧力の影響を評価する。断熱火炎温度への圧力依存性はほとんどない。式(5)には密度依存性がないため、圧力の影響は評価できない。そこで、層流燃焼速度への圧力効果を従来の考え方同様に以下の式で与えることにする。

$$Su(P) = Su_{P_0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha \quad \dots \dots (6)$$

ここに、 Su_{P_0} ：大気圧での燃焼速度。また、圧力の指数 α は当量比1.0に対してはAndrewsによりおよそ $\alpha = -0.5$ と見積もられている。本研究ではEgolfpoulosらの実験結果⁷⁾を用いて指数 α を当量比 ϕ の関数として以下のように見積もった。但し、 $\phi \leq 1.0$ とする。

$$\alpha = -(2.26 - 3.439\phi + 1.686\phi^2) \quad \dots \dots (7)$$

式(4)～(7)より導出した圧力及び当量比をパラメータとした層流燃焼速度と測定値との比較を図2に示す。図より、本モデルは比較的良く測定値を再現できることがわかる。このように、式(5)は当量比、未燃焼混合気体の温度、燃焼器内の圧力が燃焼に与える影響を正しく評価できることがわかる。

4. 解析方法

4.1 基礎式 本研究で用いる基礎式を以下に示す。

連続式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad \dots \dots (8)$$

運動量輸送式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} + R_{ij} + L_{ij} + C_{ij}) \quad \dots \dots (9)$$

$$R_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \rho K_{SGS} \delta_{ij}$$

$$L_{ij} + C_{ij} = -\rho \frac{\Delta^2}{12} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$\mu_t = \rho (c_s \Delta)^2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$K_{SGS} = \frac{\mu_t^2}{(c_k \rho \Delta)^2}$$

$$\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3}$$

エンタルピー輸送式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho h u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (S_j) \quad \dots \dots (10)$$

$$S_j = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j}$$

反応進行度輸送式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho C u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (S_{Cj}) + \omega \quad \dots \dots (11)$$

$$S_{Cj} = \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C}{\partial x_j}$$

上式で、 Pr_t ：乱流プラントル数、 Sc_t ：乱流シュミット数、 c_s 、 c_k ：モデル定数である。各化学種の質量分

率は、反応進行度分布より求められる。また、乱流モデルには密度加重フィルタ平均したLES(Large Eddy Simulation)を用いた。又、反応進行度輸送式中の反応項には、前章で述べた著者らの乱流予混合燃焼モデルを用いた。

4.2 解析体系 パイロット火炎を模擬した高温既燃焼気体及び保炎器により安定化された乱流予混合火炎に関する小林らの実験を対象とする⁹⁾。図3のように、燃焼器入口部はセパレータにより上下に分離され、上側からは300(℃)、当量比0.6のプロパン-空気予混合気が21.5(m/s)で、下側からはパイロット火炎を模擬した1250(℃)既燃焼気体が53.0(m/s)でそれぞれ供給される。既燃焼気体は上部より供給される予混合気同様に、当量比0.6の予混合気を燃焼させたものである。上部入口下流側には保炎器が設置される。保炎器背面に形成される循環流により高温既燃焼気体が予混合気体側へ供給される。高温気体により火移しされた後、火炎は循環流により安定化される。化学反応は以下の一段総括反応を仮定した。

また、メッシュ数は $x \times y \times z = 60 \times 100 \times 10 = 60000$ である。z方向には、10メッシュであり、三次元計算としては、メッシュ数が不十分と考えられるが、z方向に周期境界条件を課すことにより、三次元性を模擬した。

4.3 境界条件 上記の基礎式に対する境界条件は以下のように与えた。解析体系出口では全ての物理量に対し境界に垂直な勾配をゼロとする。入口では、予混合気の流速、温度及び当量比はそれぞれ上記の固定値を与える。壁面では流速及び乱流量に壁法則を適用し、温度及び反応進行度は壁に垂直な勾配をゼロを適用した。また、既燃焼気体の反応進行度の境界条件は、気

体温度は1250℃と低い、完全燃焼気体を考えているので、セパレータ上部からの既燃焼気体には $c=1.0$ を与える。セパレータ下部から供給される未燃焼気体に対しては $c=0$ を与える。

4.4 計算方法 解析アルゴリズムはSMA C (Simplified Marker And Cell)法であり、圧力に関するポアソン方程式の解法にはI C C G(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient)法を用いた。基礎式の離散化手法には差分法を用いた。その際、運動量の移流項には2次精度の中心差分を適用し、また各基礎式の時間積分には2次精度のAdams-Bashforth法を用いた。また、式(2)によりIを算出するために、各メッシュごとの流速勾配 g が必要になる。本計算では du/dx 、 dv/dy 、 dw/dz の最大値を各メッシュの代表速度勾配 g として用いた。

Fig. 4 Flame Propagation from Burned Gas to Premixed Gas

Fig.3 Calculation Domain

5. 結果及び結果の検討

パイロット火炎～予混合気体への火炎伝ば時の燃焼器内温度分布を図4に示す。図で、火炎伝ばを模擬するために、まず上側セパレータより300(℃)の空気のみを供給し、発達した乱流場を得た後に上側セパレータの入口条件を予混合気に変えた。図4 a)～c)は、入口条件を予混合気に変えてから計算を進め、予混合気がセパレータ端部に到達した状態である。しかし、セパレータ端部付近ではパイロット火炎との間に形成されるせん断流による強い速度勾配が存在するため、端部付近では予混合気は完全燃焼はしておらず、1350(℃)程度に抑制され、完全燃焼(完全燃焼時の断熱火炎温度は1550(℃)程度)には到らない。図4 d)～f)により、境界層厚みが厚くなり、相対的に速度勾配が弱い領域において予混合気が着火され、温度が1550(℃)の断熱火炎温度まで上昇している領域が認められる。着火点を中心に、燃焼は予混合気側へ進行し、その高温既燃焼気体を保炎器背面に形成される循環流が巻き込むことにより、

Fig.5 Temperature Distribution of Each Time

Fig. 6 Time Averaged Temperature Distribution

保炎器背面にも安定な火炎が形成されることがわかる。このように、せん断層に形成される火炎は速度勾配による火炎伸長効果により、セパレータ端面の下流側にて形成され始める。それ故、火炎伝ばに重要な因子はせん断層中の火炎の形成位置、乱流燃焼速度及び保炎器背面に形成される循環流の長さである。特に、上記の火炎形成位置は火炎伸長に基づく消炎効果により決るので、せん断層中の速度勾配に強く依存し、既燃焼気体及び予混合気速度そのものには強く依存しないと考える。以上より、良好に火炎伝ばを行うには既燃焼気体-予混合気間のせん断層中の速度勾配を小さくする、保炎器背面の循環流長さを長くする等によればよいと考える。次に、着火後、十分に計算を進めた後の燃焼器内の非定常温度分布を図5に示す。予混合火炎が保炎器から放出される大規模渦構造と既燃焼ガス-予混合気体せん断層間に形成される大規模渦の運動が連動して保炎器背面の火炎、特に比較的下流の火炎を大きく変動させることがわかる。燃焼器内の非定常解析結果の時間平均温度分布を図6に示す。図より、時間

Fig. 7 Comparison of Temperature Distribution

Fig.8 Comparison of Temperature Intensity

平均として既燃焼気体-予混合気体間のせん断層中に形成される火炎は、セパレータ端面より約50~60(mm)離れた位置より形成されていることがわかる。これは、せん断層中の速度勾配によって、火炎伸長による消炎効果が生じているためである。従来の燃焼モデルには火炎伸長による消炎効果が含まれていないため、火炎がセパレータ端面から形成されるという課題があった。提案したモデルは、上記のように火炎伸長効果を正しく反映したモデルになっており、従来モデルの課題を解決する。セパレータから63(mm)下流位置における断面内時間平均温度分布を図7に示す。図でセパレータ位置を原点とする。図より、実験においてもセパレータ付近に低温領域が見られ、火炎形成位置がセパレータ端面よりも下流側にあることがわかる。解析結果は、 $x=20\sim30$ (mm)付近で多少の差異があるものの、他は実験値の誤差範囲内で実験値を再現する。次に、セパレータから63(mm)下流位置における断面内温度変動強度分布を図8に示す。図より、定量的には二倍程度、解析値が実験値よりも大きく見積もっている。しかし、定性的にはセパレータ位置を挟んで温度変動強度に二つのピークが現われる等の結果を良く再現できていることがわかる。

6. 結 言

新たな乱流燃焼モデルを用いてパイロット火炎により安定化された保炎器廻りの予混合火炎を解析した。その結果として、以下のような知見を得た。

(1) LESを用いた非定常解析により、パイロット火炎から予混合気への火炎伝ば機構を明らかにした。

(2) 燃焼器内の平均温度分布は、実験結果を良く再現する。温度変動強度に関しても、セパレータ直後での消炎による温度低下領域を再現できた。

(3) 以上より、本モデルが乱流燃焼場の数値計算モデルとして定性的、定量的に十分な解析精度を有していることを確認した。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、英国 Imperial College of A.M.K.P Taylor博士及びCambridge大学のR.S Cant博士より有益な御討論を頂いた。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 稲毛真一、大塚雅哉、機論B編、61巻586号
- 2) 稲毛真一、大塚雅哉、機論B編、63巻609号
- 3) 稲毛真一、Perez Vincent、小林成嘉、機論B編、63巻612号
- 4) Andrews, G.E., and Bradley, D., Combustion & Flame. 19(1972), 133.
- 5) Dixon-Lewis, G.E., Williams, F.A, 11th Symp. (Int.) on Combustion, The Comb. Inst.(1967), 951.
- 6) Abdel-Gayed, R.G. et al. 20th Symp. (Int.) on Combustion, The Comb. Inst.(1984), 505.
- 7) Egolfopoulos, F.N et al., Combust. Flame, 76(1989), 377.
- 8) Ryden, R et al. ASME 93-GT-157.
- 9) 大塚ほか、第22回ガスタービン定期講演会講演論文集、(1994.5), 41.