

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

エンタルピー一定条件下における高温予混合火炎の固有不安定性に関する数値シミュレーション

Numerical Simulation on the Intrinsic Instability of High-Temperature Premixed Flames Under the Constant-Enthalpy Conditions

門脇 敏^{1*}・八幡 将史²・小林 秀昭³KADOWAKI, Satoshi^{1*}, YAHATA, Masafumi², and KOBAYASHI, Hideaki³¹ 長岡技術科学大学大学院技術経営研究科 〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1
Graduate School of Management of Technology, Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Niigata 940-2188, Japan² 長岡技術科学大学大学院工学研究科 〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1
Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Niigata 940-2188, Japan³ 東北大学流体科学研究所 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1
Institute of Fluid Science, Tohoku University, Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

2010年5月7日受付; 2010年6月29日受理/Received 7 May, 2010; Accepted 29 June, 2010

Abstract : The effects of the unburned-gas temperature on the intrinsic instability of high-temperature premixed flames under the constant-enthalpy conditions were studied by two-dimensional unsteady calculations of reactive flows. A sinusoidal disturbance with sufficiently small amplitude was superimposed on a planar flame to obtain the relation between the growth rate and wave number, i.e. the dispersion relation. The growth rate increased as the unburned-gas temperature became higher, which was due to the increase in burning velocity of a planar flame. The linearly most unstable wave number, i.e. the critical wave number, was almost constant, indicating that the cell size was independent of the unburned-gas temperature. To elucidate the characteristics of cellular flames induced by intrinsic instability, a sinusoidal disturbance with the critical wave number was superimposed. The superimposed disturbance evolved, and a cellular-shaped front formed. As the unburned-gas temperature became higher, the behavior of cellular flames became milder, even though the growth rate increased. This was because that the difference in temperature between burned and unburned gases decreased owing to the constant-enthalpy conditions.

Key Words : High-temperature premixed flame, Intrinsic instability, Cellular flame, Numerical simulation

1. はじめに

社会全体として合理的なエネルギー利用体系を築く観点から、燃焼によるエネルギー変換時のエクセルギー損失を抑制する術が注目されている。燃焼は本質的に不可逆であり、その過程における一定のエクセルギー損失は不可避である。しかし、常温の反応物をそのまま燃焼させるのではなく、燃焼の前にその温度を上昇させることで、燃焼過程におけるエクセルギー損失を大幅に低減することが可能である[1-2]。このような燃焼過程の例として、超過エンタルピー燃焼や高温空気燃焼が挙げられる。超過エンタルピー燃焼は熱再循環を伴う燃焼過程であり、通常よりも低い燃

料濃度の混合気を燃焼させることができる[3-6]。また、高温空気燃焼は熱再循環と物質再循環を併用するものであり、燃焼前温度が高く酸素濃度が低いガスによる特殊な燃焼が実現されている[7-10]。未燃ガス温度を高くして混合気を燃焼させる手法は、エクセルギー損失の低減に直結する。そして、省エネルギーや低環境負荷に大きく貢献するものである。従って、未燃ガス温度が高い予混合火炎の基本特性を調べることは、学術的のみならず実用的にも重要である。

ここでは、未燃ガス温度が高い予混合火炎(本論文では高温予混合火炎と呼ぶものとする。)の基本特性を、未燃ガスのエンタルピーが一定の条件下において、つまり既燃ガス温度が一定の条件下において調べるものとする。未燃ガス温度を変化させると共に既燃ガス温度を変化させる

* Corresponding author. E-mail: kadowaki@mech.nagaokaut.ac.jp

と、活性化エネルギーが大きいため、現象は主に既燃ガス温度に支配される。そして、未燃ガス温度の影響は二次的になる。それゆえ、未燃ガス温度の影響に焦点を当てて現象を精査するには、既燃ガス温度を一定にする必要がある。つまり、高温予混合火炎の基本特性に及ぼす未燃ガス温度の影響を明らかにするには、既燃ガス温度を一定にして解析を行う必要がある。

本研究では、高温予混合火炎の数値シミュレーションを遂行し、予混合火炎の重要な基本特性である燃焼速度と固有不安定性を調べる。そして、未燃ガス温度が燃焼速度と固有不安定性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、固有不安定性に起因して形成されるセル状火炎の特性を明確にする。

記号

- a 無次元振幅, δ で無次元化
 a_i 無次元初期振幅, δ で無次元化
 B 無次元頻度因子, S_{u0}/δ で無次元化
 C_p 定圧比熱 [J/kgK]
 c_0 通常の平面予混合火炎における未燃ガスの音速 [m/s]
 D 拡散係数 [m²/s]
 E 無次元活性化エネルギー, RT_0 で無次元化
 e 無次元全エネルギー, p_0 で無次元化
 k 無次元波数, $1/\delta$ で無次元化
 k_c 無次元特性波数, $1/\delta$ で無次元化
 Le ルイス数 [-]($=\alpha/D$)
 M 燃焼速度のマッハ数 [-]($=S_{u0}/c_0$)
 Pr プラントル数 [-]($=\nu/\alpha$)
 p 無次元圧力, p_0 で無次元化
 p_u 未燃ガスの無次元圧力, p_0 で無次元化
 p_0 通常の平面予混合火炎における未燃ガスの圧力 [Pa]
 Q 無次元発熱量, $C_p T_0/Y_0$ で無次元化
 R 一般気体定数 [J/molK]
 S_{cf} セル状火炎の無次元燃焼速度, S_{u0} で無次元化
 S_u 平面火炎の無次元燃焼速度, S_{u0} で無次元化
 S_{u0} 通常の平面予混合火炎における燃焼速度 [m/s]
 T 無次元温度, T_0 で無次元化
 T_b 既燃ガスの無次元温度, T_0 で無次元化
 T_u 未燃ガスの無次元温度, T_0 で無次元化
 T_0 通常の平面予混合火炎における未燃ガスの温度 [K]
 t 無次元時間, δ/S_{u0} で無次元化
 u, v 無次元速度, S_{u0} で無次元化
 x, y 無次元座標, δ で無次元化
 Y 燃料の無次元質量分率, Y_0 で無次元化
 Y_u 未燃ガス中の燃料の無次元質量分率, Y_0 で無次元化
 Y_0 通常の平面予混合火炎における未燃ガス中の燃料の質量分率 [-]
 α 熱拡散率 [m²/s]
 γ 比熱比 [-]

- δ 通常の平面予混合火炎における予熱域厚さ [m]
 ($=\alpha/S_{u0}$)
 λ 無次元波長, δ で無次元化
 λ_c 無次元特性波長, δ で無次元化
 ν 動粘性係数 [m²/s]
 ρ 無次元密度, ρ_0 で無次元化
 ρ_u 未燃ガスの無次元密度, ρ_0 で無次元化
 ρ_0 通常の平面予混合火炎における未燃ガスの密度 [kg/m³]
 ω 無次元増幅率, S_{u0}/δ で無次元化

2. 支配方程式

本研究では、未燃ガス中の燃料濃度は充分低く、化学反応は主に燃料濃度に依存し、酸化剤などの濃度には依存しないものとする。そして、化学反応は一段不可逆の発熱を伴う反応で、反応速度はアレニウスの法則に従うものとする。また、ガスは理想気体の状態方程式を満たし、その輸送係数と比熱は全領域で一定であるとする。外力、ソレ効果、デュフル効果、圧力勾配拡散、体積粘性、および熱損失は無視する。燃焼による熱膨張の効果(固有不安定性における流体力学的効果)を考慮するために、支配方程式として、化学反応を含む二次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式を採用する。デカルト座標を用い、ガスの主流方向を x 方向とし、火炎面の接線方向を y 方向とする。

本数値シミュレーションで用いる二次元非定常反応流れの支配方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

支配方程式中のベクトルは、

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \\ \rho Y \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + \frac{p}{\gamma M^2} - Pr \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \rho uv - Pr \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ (e+p)u - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \rho Y u - \frac{1}{Le} \frac{\partial Y}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv - Pr \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \rho v^2 + \frac{p}{\gamma M^2} - Pr \left(\frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ (e+p)v - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\partial T}{\partial y} \\ \rho Y v - \frac{1}{Le} \frac{\partial Y}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\gamma}{\gamma-1} QB \rho Y \exp(-E/T) \\ -B \rho Y \exp(-E/T) \end{pmatrix}$$

である.

理想気体の状態方程式は,

$$p = \rho T \tag{2}$$

である.

3. 数値シミュレーション

本数値シミュレーションでは, 通常の平面予混合火炎として, 燃焼速度が 3.93 m/s ($M = 0.01$) で, 断熱火炎温度が 2086 K ($T_b = 7.0$) である火炎を想定する. このとき, 流れ場のマッハ数が充分小さいので, 火炎の燃焼速度を変化させても無次元化した結果は変わらない[11]. つまり, 数値シミュレーションで得られる結果は, 燃焼速度のマッハ数が充分小さい予混合火炎に対して適用可能である. 無次元パラメータの値は, $Le = 1.0$, $Pr = 1.0$, $\gamma = 1.4$, $Q = 6.0$, $E = 70$ とする. 頻度因子の値は, 平面予混合火炎の燃焼速度が設定した値になるように定めるものとする.

高温予混合火炎の基本特性に及ぼす未燃ガス温度の影響を調べるために, $T_u = 1.0 \sim 3.0$ とする. 本研究では, 未燃ガスのエンタルピーが一定 (既燃ガス温度が一定) の条件を考えているので, 次の関係が成立する.

$$T_u + Y_u Q = T_b = 7.0 \tag{3}$$

ゆえに, T_u の値に対して Y_u の値は一義的に決定する. また, 本数値シミュレーションでは未燃ガスの圧力が一定の場合を考える ($p_u = 1.0$). このとき, 温度の上昇と共に密度は低下する.

計算スキームとして, 時間および空間の両方において二次精度をもつ陽的マッコーマック法を用いる. 計算領域としては, x 方向へは予熱域厚さの 100 倍, y 方向へは擾乱の一波長分とする. 格子数は 501×65 とする. 計算領域の上流側と下流側では, 流れ変数の x 方向の勾配を零とする. なお, 未燃ガスの流入速度は平面火炎の燃焼速度と一致させ, T_u と Y_u は設定値と一致させる. また, y 方向の境界では, 周期境界条件を用いる.

分散関係とセル状火炎の計算では, 定在の平面火炎の上に, y 方向に周期的な正弦波状の擾乱を加え, それを初期条件として計算を遂行する. 擾乱を平面火炎に加えることによる火炎面の x 方向への変位は,

$$a_i \sin(2\pi y / \lambda) \tag{4}$$

である. 擾乱の初期振幅の値は, 分散関係の計算では $a_i = 0.1$ とし, セル状火炎の計算では $a_i = 1.0$ とする.

本数値シミュレーションは, 東北大学流体科学研究所の「SGI Altix 3799Bx2」を用いて遂行した.

4. 結果および考察

4.1. 平面火炎

平面火炎の数値シミュレーションを行い, 火炎構造 (流れ変数の分布) と燃焼速度に及ぼす未燃ガス温度の影響を調べる. なお, 未燃ガス温度と未燃ガス中の燃料の質量分率の関係は式 (3) の通りであり, T_u の値が大きくなると Y_u の値は小さくなる.

図 1 は, $T_u = 1.0$ & 3.0 ($Y_u = 1.0$ & 0.67) における火炎構造を示したものである. 流れ場のマッハ数が充分小さく圧力が全領域でほぼ一定であるので, 温度と速度の分布は相似である. また, 既燃ガス温度が一定であるので, 未燃ガス温度が高くなると, 現象に対する熱膨張の効果は弱くなる. 火炎帯の厚さに着目すると, 温度の上昇と共に薄くなる. これは, 未燃ガスの質量流束密度 ($= \rho_u S_u$) が大きくなるからである. なお, $T_u = 1.0$ & 3.0 における質量流束密度は, $\rho_u S_u = 1.00$ & 1.67 である.

図 2 は, 平面火炎の燃焼速度に及ぼす未燃ガス温度の影響を示したものである. 未燃ガス温度が高くなると共に, 燃焼速度は大幅に増加する. これは, 未燃ガスの質量流束密度が大きくなることに加え, 未燃ガスの圧力が一定のため温度の上昇と共に密度が低下するからである. また, 図中の実線は理論解析 (漸近解析) により求められた燃焼速度である[12]. 数値シミュレーションの結果と理論解析の結果は, ほぼ一致している.

4.2. 分散関係

高温予混合火炎の固有不安定性を調べるために, 微小擾乱 ($a_i = 0.1$) を平面火炎に加え, 擾乱の発達の様子をシミュレートする. 火炎に加えられた微小擾乱は, 固有不安定性

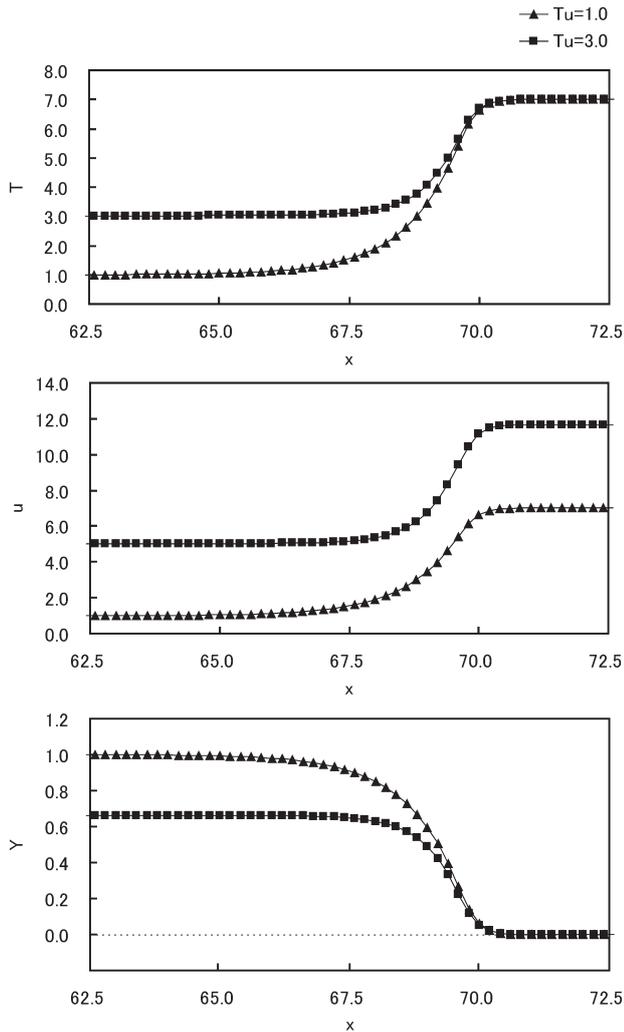


Fig.1 Distributions of flow variables in planar flames at $T_u = 1.0$ & 3.0 .

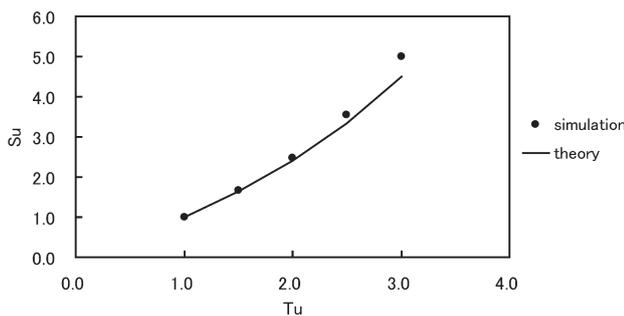


Fig.2 Burning velocities of planar flames, depending on the unburned-gas temperature; the solid line denotes the results of theoretical analyses on the burning velocity.

により、時間と共に指数的に増大する。

$$a = a_i \exp(\omega t) \tag{5}$$

このような擾乱の挙動は、微小擾乱を取り扱った理論解析でも示されている[13-15]。なお、擾乱が指数的に増大する

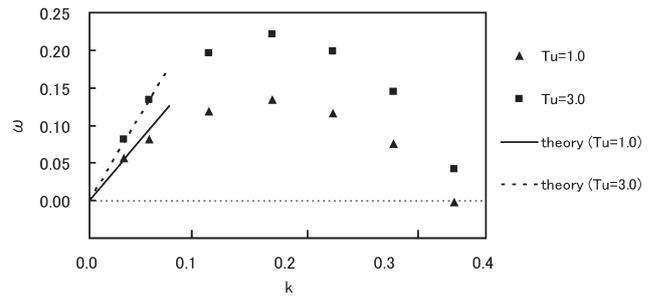


Fig.3 Dispersion relations at $T_u = 1.0$ & 3.0 ; the solid and broken lines denote the results of theoretical analyses on the dispersion relation.

挙動は、その振幅が充分小さいときにのみ生じる。振幅がある程度大きくなると、増幅率は徐々に小さくなり、振幅が時間と共に指数的に増大することはなくなる。

平面火炎に加える擾乱の波長を変化させて計算を行い、各波数 ($k = 2\pi/\lambda$) における擾乱の増幅率を求める。そして、増幅率と波数の関係、つまり分散関係を求める。ここでは、ルイス数を 1.0 に設定しているため、固有不安定性は流体力学的効果に支配される[16]。

図3は、 $T_u = 1.0$ & 3.0 における分散関係を示したものである。未燃ガス温度が高くなると、増幅率は増大する。これは、燃焼速度が増加するからである(図2参照)。また、増幅率が最大となる波数(特性波数)が存在し、その値は未燃ガス温度が変化しても不変である。このことは、固有不安定性に起因するセルの大きさが未燃ガス温度に依存しないことを示している。図中の実線と破線は、理論解析により求められた増幅率と波数の関係である[12]。理論解析の結果は、波数が充分小さい領域において有効である。この領域において、数値シミュレーションと理論解析の結果はほぼ一致している。

4.3. セル状火炎

固有不安定性に起因して形成されるセル状火炎の特性を調べる。このとき、平面火炎に加える擾乱の初期振幅は、 $a_i = 1.0$ とする。また、その波長は分散関係から得られる特性波長 ($\lambda_c = 2\pi/k_c$) と一致させる。

図4は、 $T_u = 1.0$ & 3.0 における擾乱の振幅の時間履歴を示したものである。計算開始後、擾乱は流体力学的効果により増大する。このとき、 $T_u = 3.0$ における増幅率の方が大きいので、振幅は短時間で増大する。そして、振幅がある程度大きくなると、その値はほぼ一定となる。このとき、 $T_u = 3.0$ における振幅の方が小さくなっている。これは不安定現象に対する熱膨張の効果が弱くなるからである。

図5は、時間毎の火炎面形状を示したものである。火炎に加えられた擾乱が発達し、セル状の火炎面が形成される。セル状火炎形成の後、火炎は上流側へ向かって移動する。これは、火炎面が平面状からセル状に変化するから火炎面積が増大し、その結果として燃焼速度が増加するからであ

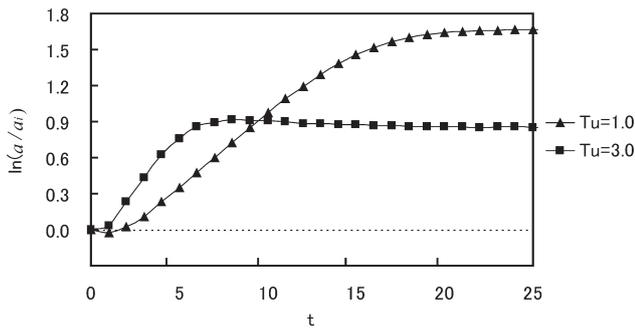


Fig.4 Time histories of amplitude at $T_u = 1.0$ & 3.0 ($t = 0$ through 25).

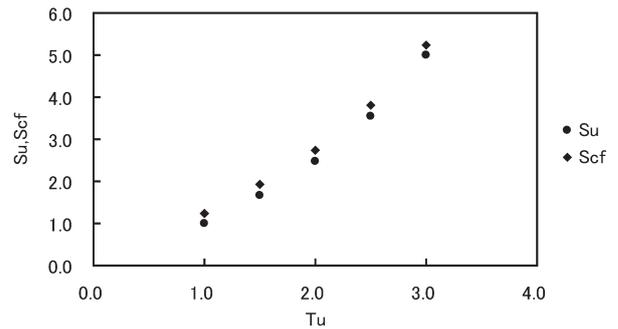


Fig.6 Burning velocities of planar flames and cellular flames, depending on the unburned-gas temperature.

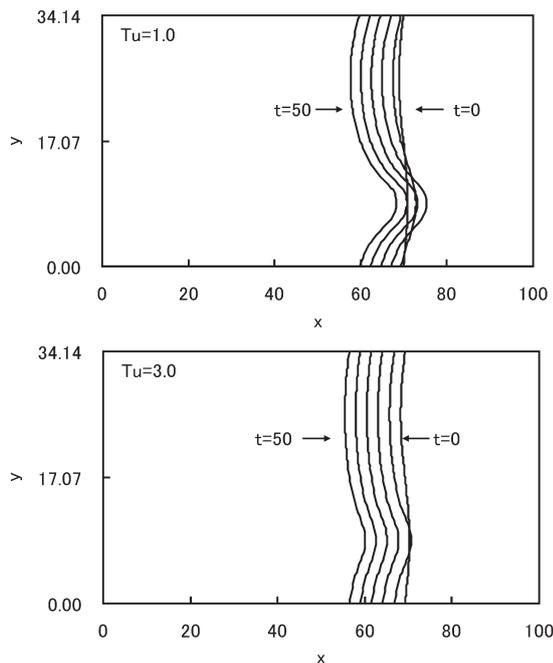


Fig.5 Shapes of flame fronts at $T_u = 1.0$ & 3.0 ($t = 0, 10, 20, \dots, 50$).

る。そして、火炎の上流側への移動速度は、燃焼速度の増分 ($= S_{cf} - S_u$) に相当する。燃焼速度の増分は、 $T_u = 1.0$ & 3.0 において、 0.24 & 0.25 である。未燃ガス温度が変化しても、燃焼速度の増分が大きく変わることはない。また、火炎面の挙動に着目すると、未燃ガス温度が高くなると安定的になる。

図 6 は平面火炎とセル状火炎の燃焼速度を示したものである。未燃ガス温度が高くなると共に、両火炎の燃焼速度は大幅に増加する。これは、質量流束密度が大きくなること、並びに未燃ガスの密度が減少することによるものである。また、両火炎の燃焼速度を比較すると、未燃ガス温度が高くなると共に燃焼速度の増分は若干大きくなり ($T_u = 1.0$ のとき 0.24 , $T_u = 2.5$ のとき 0.27)、さらに温度が高くなるとそれは若干小さくなる ($T_u = 3.0$ のとき 0.25)。加えて、セル状火炎の燃焼速度と平面火炎の燃焼速度の比は、未燃ガス温度が高くなると共に単調に小さくなる。これは火炎の不安定性における熱膨張の効果が弱くなるからである。

5. おわりに

本研究では、高温予混合火炎の数値シミュレーションを遂行し、予混合火炎の重要な基本特性である燃焼速度と固有不安定性を調べた。そして、未燃ガス温度が燃焼速度と固有不安定性に及ぼす影響を明らかにした。さらに、固有不安定性に起因して形成されるセル状火炎の特性を明確にした。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 平面火炎の燃焼速度は、未燃ガス温度が高くなると共に大幅に増加する。これは、未燃ガスの質量流束密度が大きくなることに加え、未燃ガスの圧力が一定のため温度の上昇と共に密度が低下するからである。また、平面火炎の燃焼速度に関する数値シミュレーションと理論解析の結果は、ほぼ一致する。
 - 2) 平面火炎に加えられた微小擾乱は、固有不安定性により、時間と共に指数的に増大する。そして、未燃ガス温度が高くなると、増幅率は増大する。これは、平面火炎の燃焼速度が増加するからである。また、増幅率が最大となる特性波数が存在し、その値は未燃ガス温度が変化しても不変である。さらに、分散関係に関する数値シミュレーションと理論解析の結果は、波数が充分小さい領域においてほぼ一致する。
 - 3) 特性波長をもつ擾乱を平面火炎に加えると、それは固有不安定性により発達する。そして、セル状の火炎面が形成される。セル状火炎の燃焼速度は、火炎面積が大きいので、平面火炎のそれより大きくなる。そして、燃焼速度の増分は、未燃ガス温度が変化しても大きく変わることはない。火炎面の挙動に着目すると、未燃ガス温度が高くなると共に安定的になる。これは、火炎の不安定性における熱膨張の効果が弱くなるからである。
- 以上の様に、高温予混合火炎の燃焼速度と固有不安定性を調べ、未燃ガス温度が現象に及ぼす影響を明らかにしている。本数値シミュレーションでは、ルイス数を 1.0 に設定しているので、固有不安定性の要因としては流体力学的効果のみを考慮している。一方、拡散・熱的効果は、流体力学的効果と共に固有不安定性の重要な要因である。今後は、ルイス数を変化させて数値シミュレーションを遂行し、高

温予混合火炎における拡散・熱的効果を調べる予定である。

References

1. Yoshizawa, Y., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 50: 111-117 (2008).
2. Nishida, K., Takagi, T., and Kinoshita, S., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers B* (in Japanese) 68: 2643-2649 (2002).
3. Weinberg, F. J., *Nature* 233: 239-241 (1971).
4. Takeno, T., Sato, K., and Hase, K., *Proceedings of the Combustion Institute* 18: 465-472 (1981).
5. Yoshizawa, Y., Sasaki, K., and Echigo, R., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 31: 311-319 (1988).
6. Hanamura, K., Echigo, R., and Zhdanok, S. A., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 36: 3201-3209 (1993).
7. Katsuki, M. and Hasegawa, T., *Proceedings of the Combustion Institute* 27: 3135-3146 (1998).
8. Niioka, T., *Proceedings of the Fifth ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference*, AJTE99-6301 (1999).
9. Kobayashi, H., *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers* (in Japanese) 105: 598-599 (2002).
10. Cavaliere, A. and de Joannon, M., *Progress in Energy and Combustion Science* 30: 329-366 (2004).
11. Kadowaki, S. and Hasegawa, T., *Progress in Energy and Combustion Science* 31: 193-241 (2005).
12. Kadowaki, S., *Journal of Thermal Science and Technology* 5: 1-10 (2010).
13. Sivashinsky, G. I., *Annual Review of Fluid Mechanics* 15: 179-199 (1983).
14. Clavin, P., *Progress in Energy and Combustion Science* 11: 1-59 (1985).
15. Sivashinsky, G. I., *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 332: 135-148 (1990).
16. Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 349-365 (1985).