流体力学的不安定性と拡散・熱的不安定性に起因する三次元セル状予混合火炎 (未燃ガス温度と熱損失の効果)

門脇 敏^{*1}, 野上 雅人^{*2}, トエ トエ アウン^{*3}, 勝身 俊之^{*4}, 山崎 渉^{*4}, 小林 秀昭^{*5}

Three-dimensional cellular premixed flames generated by hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities (Effects of unburned-gas temperature and heat loss)

Satoshi KADOWAKI^{*1}, Masato NOGAMI^{*2}, Thwe Thwe Aung^{*3}, Toshiyuki KATSUMI^{*4},
Wataru YAMAZAKI^{*4} and Hideaki KOBAYASHI^{*5}

^{*1}Department of System Safety, Nagaoka University of Technology

1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

^{*2, *4}Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology

1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

^{*3}Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science, Japan Atomic Energy Agency

4002 Narita-cho, Oarai, Higashiibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan

^{*5}Institute of Fluid Science, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8577, Japan

Received: 7 July 2019; Revised: 22 August 2019; Accepted: 23 October 2019

Abstract

We dealt with three-dimensional cellular premixed flames generated by hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities to elucidate the effects of unburned-gas temperature and heat loss. To obtain the dispersion relation, a sinusoidal disturbance with sufficiently small amplitude was superimposed on a planar flame. As the unburned-gas temperature became lower and the heat loss became larger, the growth rate decreased and the unstable range narrowed, owing to the decrease of the burning velocity of a planar flame. Using the preheat zone thickness and burning velocity of a planar flame, the dispersion relation was normalized. With a decrease of unburned-gas temperature, the normalized growth rate increased and the normalized unstable range widened, which was because the temperature ratio of burned and unburned gases became larger. With an increase of heat loss, instability phenomena became noticeable, which was because diffusive-thermal instability became stronger. To investigate the characteristics of cellular flames generated by hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities, we superimposed a disturbance with the critical wave number corresponding to the maximum growth rate. The superimposed disturbance evolved, and a hexagonal cellular flame formed. The obtained cellular fronts were qualitatively consistent with the experimental results. The cellular fronts became deeper as the unburned-gas temperature became lower, even though the growth rate decreased, which was due to the strength of thermal-expansion effects. As the heat loss became larger, the burning velocity of a cellular flame normalized by that of a planar flame increased. This was because diffusive-thermal effects became stronger owing to the increase of apparent Zeldovich number caused by the decrease of flame temperature.

Keywords : Premixed combustion, Three-dimensional cellular flame, Hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities, Unburned-gas temperature, Heat loss

No.19-00274 [DOI:10.1299/transjsme.19-00274], J-STAGE Advance Publication date : 31 October, 2019

^{*1} 正員, フェロー, 長岡技術科学大学 大学院技術経営研究科 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

^{*2} 長岡技術科学大学 大学院工学研究科

^{*3} 正員, 日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター (〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002)

^{*4} 正員, 長岡技術科学大学 大学院工学研究科

^{*5} 正員, フェロー, 東北大学 流体科学研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

E-mail of corresponding author: kadowaki@mech.nagaokaut.ac.jp

1. 緒 言

近年、二酸化炭素などの排出による地球温暖化や窒素酸化物などの排出による大気汚染など、種々の環境問題が発生している。これらの主な要因の一つが石炭や石油などの化石燃料の燃焼であることから、環境問題の解決に結び付く燃焼手法が注目されている。化石燃料の燃焼に起因する環境負荷物質を低減する手法の一つとして、バイオマス由来の水素やメタンを用いた希薄予混合燃焼が挙げられ、現在この燃焼手法は衆目を集めている。燃料である水素やメタンが酸化剤である空気より軽いことから、希薄予混合火炎は固有不安定性により不安定な挙動を示すことが知られている。それゆえ、水素-空気やメタン-空気の希薄予混合燃焼をスマートコントロールして、種々の分野で幅広く実用化するためには、予混合火炎の不安定挙動のメカニズムを解明し、それを制御する知見を得る必要がある。

水素-空気やメタン-空気の希薄予混合火炎では、固有不安定性が常に生じており、様々な不安定挙動が観察されている (Strehlow, 1985; Hertzberg, 1989; Gorman et al., 1994; Qin et al., 2000; Kim et al., 2013; Okafor et al., 2014; Nakahara et al., 2015)。固有不安定性の主な要因は、火炎面を通しての熱膨張による流体力学的不安定性、並びに物質拡散と熱拡散の相互作用による拡散・熱的不安定性である。前者は固有不安定性において本質的な不安定性であり、後者は水素-空気やメタン-空気の希薄予混合火炎の不安定性において非常に重要である。両者に加えて、外力 (重力など) に起因する不安定性が大スケールの火炎において顕著になることが述べられている (Williams, 1985)。これまで、予混合火炎の固有不安定性について数多くの研究が為されており、そのメカニズムが詳細に調べられている (Clavin, 1985; Law, 1988; Sivashinsky, 1990; Kadowaki and Hasegawa, 2005)。従来の研究で得られた知見は、予混合火炎のスマートコントロールにおいて有用なものとなっている。

極低温環境 (南極など) における燃焼では低温の未燃ガスを取り扱い、エクセルギー損失の低減を目指した燃焼では高温の未燃ガスを取り扱っている。これらの条件下における予混合火炎では、未燃ガス温度が不安定性において重要な役割を演じている。これまでに、不安定現象における未燃ガス温度の効果が調べられており、未燃ガス温度の変化による熱膨張の割合の変化が流体力学的不安定性に影響を及ぼすことが明らかになっている (門脇他, 2016)。つまり、未燃ガス温度が低いとき、熱膨張の割合が大きくなることで流体力学的不安定性は強くなり、その結果火炎は不安定化する。一方、未燃ガス温度が高いとき、流体力学的不安定性は弱くなり、火炎は安定化する。

多くの燃焼では放射タイプやニュートンタイプの熱損失が常に生じているので、予混合火炎の不安定性を調べる上で熱損失の効果を考慮することは不可欠である。これまでに、固有不安定性に及ぼす熱損失の効果が子細に調べられており、基本的なメカニズムが明らかになっている (Joulin and Clavin, 1979; Bechtold et al., 2005; Kadowaki, 2005)。また、低温および高温の未燃ガスの予混合火炎における熱損失の効果についても、二次元反応流れを対象とした数値計算により調べられている (Thwe Thwe Aung et al., 2017)。そして、熱損失は拡散・熱的效果をより顕著にすることが示されている。つまり、ルイス数が1より小さいとき、熱損失は火炎を断熱の場合より不安定にし、ルイス数が1より大きいとき、火炎を安定にする。

数値計算を通して実際の燃焼現象を把握するには、三次元流れを取り扱う必要がある。従来の反応流れに関する数値計算では、多くの場合二次元流れが取り扱われていた (Denet and Haldenwang, 1992; Bychkov et al., 1997; Daumont et al., 1997)。しかし、近年は計算機の劇的な発達に伴って、三次元流れが主流となっている (Shim et al., 2013; Yenerdag et al., 2015; Minamoto et al., 2018)。著者らは、三次元反応流れの数値計算を遂行し、火炎の固有不安定性やセル状火炎の特性に及ぼす未燃ガス温度の効果を調べてきた。そして、未燃ガス温度が低下すると不安定性が顕著になることを示してきた (Kadowaki et al., 2015)。しかし、熱損失は考慮されておらず、その影響は未だ不明瞭である。

火炎の不安定挙動に及ぼす未燃ガス温度と熱損失の効果を調べることは、現象のメカニズムを明らかにする観点から工学的に重要であると共に、工業炉などにおける火炎制御の観点から工業的にも興味深いものである。そこで、本研究では、火炎不安定現象のメカニズムを解明することを目的として、流体力学的不安定性と拡散・熱的不安定性に起因する三次元セル状予混合火炎を取り扱い、それに及ぼす未燃ガス温度と熱損失の効果を調べる。三次元反応流れの数値計算を遂行して火炎の不安定挙動をシミュレートし、増幅率と波数の関係 (分散関係) を

求め、セルのサイズと強い関連性がある特性波長を決定する。そして、三次元セル状予混合火炎の火炎面形状やその燃焼速度に及ぼす未燃ガス温度と熱損失の効果を精査し、火炎の制御に関する知見を得るものとする。

2. 支配方程式

本数値計算で取り扱う予混合火炎については、次の仮定を置くものとする。未燃ガス中の燃料濃度は十分低く、その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。また、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。さらに、ガスの輸送係数と比熱は全領域で一定であり、外力、ソレ効果、デュフール効果、圧力勾配拡散、及び体積粘性は無視するものとする。なお、ここでは輸送係数一定を仮定しているため、ルイス数は未燃ガス温度を変化させても不変である。

本数値計算では、放射タイプの熱損失を用い、その量はガス温度と未燃ガス温度に依存するものとする。ニュートンタイプの熱損失を用いても、定性的には同様の計算結果を得ることができる。なお、定量的には異なる計算結果となる。

燃焼による熱膨張を考慮し、流体力学的不安定性を精査するために、支配方程式として、化学反応を含む三次元圧縮性ナビエ・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 - z 方向とする。流れ場の変数は、室温・大気圧条件下における層流燃焼速度、予熱域厚さ（熱伝導率を質量流速密度と定圧比熱で除したもの）、未燃ガスの圧力と温度を用いて無次元化する。本計算で用いる三次元非定常反応流れの方程式は、以下の通りである。

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

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

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + \frac{p}{\gamma M_0^2} - Pr \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \rho uv - Pr \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \rho uw - Pr \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ (e + p)u - \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \rho Yu - \frac{1}{Le} \frac{\partial Y}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv - Pr \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \rho v^2 + \frac{p}{\gamma M_0^2} - Pr \left(\frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \rho vw - Pr \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ (e+p)v - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\partial T}{\partial y} \\ \rho Yv - \frac{1}{Le} \frac{\partial Y}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho uw - Pr \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \rho vw - Pr \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho w^2 + \frac{p}{\gamma M_0^2} - Pr \left(\frac{4}{3} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ (e+p)w - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{\partial T}{\partial z} \\ \rho Yw - \frac{1}{Le} \frac{\partial Y}{\partial z} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\gamma}{\gamma-1} \{ QB\rho Y \exp(-E/T) - A(T^4 - T_u^4) \} \\ -B\rho Y \exp(-E/T) \end{pmatrix}$$

ここで, ρ は密度, u, v, w は x, y, z 方向の速度, e は全エネルギー (内部エネルギー+運動エネルギー), Y は未燃ガスの質量分率, T は温度, p は圧力, γ は比熱比, M_0 はマッハ数, Pr はプラントル数, Le はレイス数, Q は発熱量, B は頻度因子, E は活性化エネルギー, A は熱損失パラメーターである. また, 理想気体の状態方程式は, 次の通りである.

$$p = \rho T \quad (2)$$

3. 数値計算

本数値計算では, スキームとして, 時間と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 ($L_x \times L_y \times L_z$) は, x 方向へは予熱域厚さの 800 倍 ($L_x = 800$), y - z 方向へは一波長分 ($L_y = \lambda_y$, $L_z = \lambda_z$)

とする．なお，実際の燃焼現象においては，ハニカム状のセル状火炎が形成されることから， λ_z は λ_y の $\sqrt{3}$ 倍とする (Christopherson, 1940)．計算格子としては等間隔格子を用い， x 方向の格子間隔は予熱域厚さの $1/10$ とする．そして，格子数は $8001 \times 65 \times 112$ とする．計算領域の上流側と下流側では，流れ場の変数の勾配が零であるとし，流入速度は平面火炎の燃焼速度と一致させる．また， y - z 方向の境界では，周期境界条件を用いる．

未燃ガス温度は $T_u = 0.8, 1.0, 1.2$ とする．このとき，平面火炎における既燃ガス温度は $T_b = 6.8, 7.0, 7.2$ となる．ここで， $T_u = 0.8, 1.0, 1.2$ は $-34.6, 25.0, 84.6$ °C に相当する．計算で用いるパラメーターの値は， $Le = 0.5$ ， $\gamma = 1.4$ ， $M_0 = 0.01$ ， $Pr = 1.0$ ， $Q = 6.0$ ， $E = 70$ とする．頻度因子の値は， $T_u = 1.0$ における平面火炎の燃焼速度が 1.0 となることから求める．また，初期圧力は全ての場合において 1.0 と設定する．

平面火炎の燃焼速度 S_u は，未燃ガス温度と熱損失パラメーターに強く依存する．図 1 は，各未燃ガス温度における燃焼速度と熱損失パラメーターの関係を示したものである．未燃ガス温度が上昇すると，燃焼速度は増加する．また，熱損失パラメーターが増大すると，燃焼速度は単調に減少し，ある値 $A_{\max}$ より大きくなると平面火炎は消炎に至る．

定在する平面火炎に， y - z 方向に周期的な正弦波状の擾乱を加え，それを初期値として計算を遂行する．分散関係の計算では，微小擾乱を用いる必要があるため，擾乱の初期振幅を $a_i = 0.1$ とする．なお，初期振幅の値を半分または二倍として計算を行っても同じ分散関係が得られる．一方，セル状火炎の計算では，計算時間短縮の観点から $a_i = 1.0$ とする．なお， $a_i = 0.1$ として計算を行っても同じセル状火炎が得られる．

Fig. 1 Burning velocities of planar flames at $T_u = 0.8, 1.0$ and 1.2 , depending on the heat-loss parameter.

4. 結果と考察

4・1 分散関係

分散関係を求めるために，微小擾乱を平面火炎に加え，擾乱の発達の様子を計算する．擾乱はその振幅が十分小さいとき，時間と共に指数的に増大する．ここでは，増幅率 ω を次の様に定義する．

$$\omega = \frac{d}{dt} \left(\ln \frac{a}{a_i} \right) \quad (3)$$

ここで， a は擾乱の振幅である．また，平面火炎に加える擾乱の波長を変化させて計算を行い，増幅率 ω と波数の絶対値 k ：

$$k = \sqrt{k_y^2 + k_z^2} \quad (4)$$

との関係，つまり分散関係を求める．ここで， k_y は y 方向の波数 ($= 2\pi / \lambda_y$)， k_z は z 方向の波数 ($= 2\pi / \lambda_z$) である．

図2は，断熱条件下 ($A=0$) における分散関係を示したものである．本計算で得られた三次元火炎の分散関係は，二次元火炎の分散関係 (門脇他, 2016) とほぼ一致している．未燃ガス温度が上昇すると，増幅率は大きくなり，増幅率が正の領域である不安定領域は広がる．一方，未燃ガス温度が低下すると，増幅率は小さくなり，不安定領域は狭くなる．これらは，平面火炎の燃焼速度が増加または減少するからである．また，増幅率が最大となる波数，つまり特性波数 k_c が存在する．この特性波数は，流体力学的不安定性と拡散・熱的不安定性に起因して形成されるセル状火炎のセルサイズと密接な関係がある．特性波数は，未燃ガス温度が上昇すると大きくなるので，セルサイズは小さくなる．一方，未燃ガス温度が低下すると小さくなるので，セルサイズは大きくなる．これらは，平面火炎の燃焼速度が増加または減少して，予熱域厚さが薄くまたは厚くなるからである．

Fig. 2 Dispersion relations at $T_u = 0.8, 1.0$ and 1.2 under the adiabatic conditions.

Fig. 3 Normalized dispersion relations at $T_u = 0.8, 1.0$ and 1.2 under the adiabatic conditions.

増幅率と波数は、燃焼速度と予熱域厚さに依存し、予熱域厚さは質量流束密度に依存する。燃焼速度と質量流束密度は、未燃ガス温度に依存するので、この依存性を取り除いて増幅率と波数の関係を精査する。標準化した増幅率 ω^* と波数 k^* は、次の通りである。

$$\omega^* = \frac{\omega}{m_u S_u}, \quad k^* = \frac{k}{m_u} \quad (5)$$

ここで、 m_u は質量流束密度 ($=\rho_u S_u$) である。

図3は、標準化した増幅率と波数の関係を示したものである。未燃ガス温度が上昇すると、標準化した増幅率は小さくなり、不安定領域は狭くなる。一方、未燃ガス温度が低下すると、標準化した増幅率は大きくなり、不安定領域は広くなる。これらは、主に、既燃ガスと未燃ガスの温度の比が減少または増加し、熱膨張の効果が弱くまたは強くなるからである。これに加えて、未燃ガス温度が上昇または低下すると、ゼルドヴィッチ数 β (新岡, 2004) :

$$\beta = E \frac{T_b - T_u}{T_b^2} \quad (6)$$

が小さくまたは大きくなり、レイス数が一定である場合でも、凹凸の火炎面における局所的燃焼速度の変化が隠微または顕著になる (Sivashinsky, 1977)。つまり、拡散・熱的不安定性は未燃ガス温度の影響を受けることになる。このことも上記の要因の一つである。

Fig. 4 Dispersion relations at $T_u = 0.8$ and 1.2 under the adiabatic and non-adiabatic conditions.

Fig. 5 Normalized dispersion relations at $T_u = 0.8$ and 1.2 under the adiabatic and non-adiabatic conditions.

分散関係に及ぼす熱損失の効果を示したのが図4 ($T_u = 0.8, 1.2$)である。熱損失パラメーターが増大すると、増幅率は小さくなる。これは、平面火炎の燃焼速度が減少するからである。また、標準化した分散関係を示したのが図5 ($T_u = 0.8, 1.2$)である。熱損失パラメーターが増大すると、標準化した増幅率は大きくなる。これは、見かけのゼルドヴィッチ数が大きくなるためと考えられる。つまり、熱損失が存在することにより火炎面の温度が低下し、未燃ガス温度と火炎面温度、並びに活性化エネルギーから評価される見かけのゼルドヴィッチ数が大きくなり、拡散・熱的不安定性が断熱の場合より顕著になるためと考えられる。

4・2 セル状火炎

次に、流体力学的不安定性と拡散・熱的不安定性に起因して生じる三次元セル状予混合火炎の特性を調べるために、平面火炎に加える擾乱の波長を特性波長と一致させて計算を行う (Kadowaki and Hasegawa, 2005)。このとき、 λ_z は λ_y の $\sqrt{3}$ 倍と設定する。

図6は、断熱条件下 ($A=0$) と非断熱条件下 ($A=A_{\max}$) における火炎面形状を示したものである ($T_u=0.8, 1.2$)。火炎に加えられた微小擾乱は固有不安定性により発達して、セル状の火炎面が形成される。ここで、火炎面は反応速度が最大のところであり、図に示した領域は $3\lambda_y \times 2\lambda_z$ である。ガスは図の下方から上方へ流れている。未燃ガス温度が低い (高い) とき、固有不安定性により生じるセルの深さは深く (浅く) なる。これは、熱膨張の効

Fig. 6 Shapes of cellular flame fronts at $T_u = 0.8$ and 1.2 under the adiabatic and non-adiabatic conditions.

Fig. 7 Ratios of cell depth to cell width at $T_u = 0.8$, 1.0 and 1.2 under the adiabatic and non-adiabatic conditions.

Fig. 8 Burning velocities of cellular flames at $T_u = 0.8, 1.0$ and 1.2 under the adiabatic and non-adiabatic conditions.

Fig. 9 Normalized burning velocities of cellular flames at $T_u = 0.8, 1.0$ and 1.2 under the adiabatic and non-adiabatic conditions.

果が強く（弱く）なること，並びに凹凸の火炎面における局所的燃焼速度の変化が顕著（隠微）になることによるものである．また，非断熱条件下におけるセルの深さは，断熱条件下におけるそれより大きくなっている．これは，見かけのゼルドヴィッチ数が大きくなり，拡散・熱的不安定性が断熱の場合より顕著になるためと考えられる．

図7は，セルの深さ D とセルの幅 λ_y の比を示したものである．両者の比は，未燃ガス温度が高くなると共に減少する．また，非断熱条件下における値の方が断熱条件下より大きくなっている．これは，標準化した分散関係（図5）で説明した要因によるものである．

セル状火炎形成の後，火炎は上流へ向かって（下方へ向かって）移動する．この移動は，セル状火炎の燃焼速度が平面火炎のそれより大きくなることによるものであり，火炎の移動速度は燃焼速度の増分に相当する．図8は，セル状火炎の燃焼速度 S_{cf} を示したものである．ここで，セル状火炎の燃焼速度は，反応速度を計算領域全域で積分して積分値を求め，それを $T_u=1.0$ の平面火炎の積分値で割ることにより求めている．セル状火炎の燃

焼速度は未燃ガス温度の下降と共に減少する。加えて、熱損失が存在すると、燃焼速度は減少する。図9は、標準化したセル状火炎の燃焼速度 S_{cf}/S_u を示したものである。未燃ガス温度の下降と共に、標準化したセル状火炎の燃焼速度は増加する。これは、分散関係の節で述べた二つの要因によるものである。

本研究では、水素-空気やメタン-空気の希薄予混合火炎を注視する観点から、流体力学的不安定性と拡散・熱的不安定性に起因するセル状火炎を取り扱っている。そして、両方の不安定性を考慮するために、 $Le = 0.5$ と設定している。流体力学的不安定性のみに起因するセル状火炎に着目した場合、つまり $Le = 1.0$ と設定した場合と比較すると、火炎の挙動は不安定であり、燃焼速度の増加は顕著である (Kadowaki et al., 2015)。これは、拡散・熱的不安定性がセル状火炎の不安定挙動に主要な役割を演じているからである。

5. お わ り に

本研究では、三次元反応流れの数値計算を遂行し、三次元セル状予混合火炎に及ぼす未燃ガス温度と熱損失の効果を調べ、それらが固有不安定性や燃焼速度に及ぼす影響を精査した。数値計算を通して得られた知見は以下の通りである。

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、未燃ガス温度が低下し熱損失が増大すると共に、増幅率は小さくなり、不安定領域は狭くなる。これは、主として、平面火炎の燃焼速度の減少によるものである。増幅率と波数を平面火炎の燃焼速度と質量流束密度で標準化すると、未燃ガス温度の低下と共に、標準化した増幅率は大きくなり、不安定領域は広くなる。これは主に、既燃ガスと未燃ガスの温度の比が増加し、熱膨張の効果が強くなること、並びに、ゼルドヴィッチ数が大きくなり、凹凸の火炎面における局所的燃焼速度の変化が顕著になることによるものである。また、熱損失が増大すると、不安定現象は顕著になる。これは、拡散・熱的不安定性が強くなるからである。

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し、セル状の火炎面が形成される。標準化したセル状火炎の燃焼速度は、未燃ガス温度の低下と共に増加する。また、熱損失が増大すると標準化したセル状火炎の燃焼速度は増加する。これは、熱損失が拡散・熱的不安定性において重要な役割を演じているからである。

今後は、詳細な化学反応を考慮して数値計算を遂行し、活性化学種などが火炎の不安定現象に及ぼす影響を調べる。また、火炎面のフラクタル解析を行い、その複雑さを定量的に精査する。さらに、圧力の影響を考慮して計算を遂行し、予混合火炎のダイナミクスを明らかにする予定である。

文 献

- Bechtold, J. K., Cui, C. and Matalon, M., The role of radiative losses in self-extinguishing and self-wrinkling flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30 (2005), pp. 177-184.
- Bychkov, V. V., Golberg, S. M., Liberman, M. A., Kleev, A. I. and Eriksson, L. E., Numerical simulation of curved flames in cylindrical tubes, *Combustion Science and Technology*, Vol. 129 (1997), pp. 217-242.
- Christopherson, D. G., Note on the vibration of membranes, *The Quarterly Journal of Mathematics*, Vol. 11 (1940), pp. 63-65.
- Clavin, P., Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 11 (1985), pp. 1-59.
- Daumont, I., Kassner, K., Misbah, C. and Valance, A., Cellular self-propulsion of two-dimensional dissipative structures and spatial-period tripling Hopf bifurcation, *Physical Review E*, Vol. 55 (1997), pp. 6902-6906.
- Denet, B. and Haldenwang, P., Numerical study of thermal-diffusive instability of premixed flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 86 (1992), pp. 199-221.
- Gorman, M., el-Hamdi, M. and Robbins, K. A., Experimental observation of ordered states of cellular flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 98 (1994), pp. 37-45.
- Hertzberg, M., Selective diffusional demixing: occurrence and size of cellular flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 15 (1989), pp. 203-239.

- Joulin, G. and Clavin, P., Linear stability analysis of nonadiabatic flames: diffusional-thermal model, *Combustion and Flame*, Vol. 35 (1979), pp. 139-153.
- Kadowaki, S., The effects of heat loss on the burning velocity of cellular premixed flames generated by hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities, *Combustion and Flame*, Vol. 143 (2005), pp. 174-182.
- Kadowaki, S. and Hasegawa, T., Numerical simulation of dynamics of premixed flames: flame instability and vortex-flame interaction, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.31 (2005), pp. 193-241.
- 門脇敏, 鷲尾泰佑, トエトエアウン, 山崎渉, 勝身俊之, 小林秀昭, 高・低温度環境において流体力学的不安定性と拡散・熱的不安定性により生じるセル状予混合火炎の不安定挙動, *日本機械学会論文集*, Vol. 82, No. 835 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00522.
- Kadowaki, S., Yanagioka, T., Yamazaki, W. and Kobayashi, H., The intrinsic instability of three-dimensional premixed flames under the low- and high-temperature conditions: effects of unburned-gas temperature on hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities, *Combustion Science and Technology*, Vol. 187 (2015), pp. 1167-1181.
- Kim, W. K., Mogi, T. and Dobashi, R., Fundamental study on accidental explosion behavior of hydrogen-air mixtures in an open space, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38 (2013), pp. 8024-8029.
- Law, C. K., Dynamics of stretched flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 22 (1988), pp. 1381-1402.
- Minamoto, Y., Yenerdag, B. and Tanahashi, M., Morphology and structure of hydrogen-air turbulent premixed flames, *Combustion and Flame*, Vol. 192 (2018), pp. 369-383.
- Nakahara, M., Abe, F., Tokunaga, K. and Ishihara, A., Effect of dilution gas on burning velocity of hydrogen-premixed meso-scale spherical laminar flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35 (2015), pp. 639-646.
- 新岡嵩, 燃焼現象の解析 (2004), p. 1, 東北大学出版会.
- Okafor, E. C., Hayakawa, A., Nagano, Y. and Kitagawa, T., Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen-methane-air, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39 (2014), pp. 2409-2417.
- Qin, X., Kobayashi, H. and Niioka, T., Laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames at elevated pressure, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21 (2000), pp. 58-63.
- Shim, Y. S., Fukushima, N., Shimura, M., Nada, Y., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Radical fingering in turbulent premixed flame classified into thin reaction zones, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34 (2013), pp. 1383-1391.
- Sivashinsky, G.I., Diffusional-thermal theory of cellular flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 15 (1977), pp. 137-146.
- Sivashinsky, G. I., On the intrinsic dynamics of premixed flames, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 332 (1990), pp. 135-148.
- Strehlow, R. A., *Combustion Fundamentals* (1985), p. 292, McGraw-Hill, New York, NY.
- Thwe Thwe Aung, Katsumi, T. and Kadowaki, S., The effects of unburned-gas temperature on intrinsic instability of premixed flames at high Lewis numbers under the adiabatic and non-adiabatic conditions, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 4, No. 2 (2017), DOI:10.1299/mej.16-00477.
- Williams, F. A., *Combustion Theory*, Second Edition (1985), p. 349, Addison-Wesley, Reading, CA.
- Yenerdag, B., Fukushima, N., Shimura, M., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Turbulence-flame interaction and fractal characteristics of H₂-air premixed flame under pressure rising condition, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35 (2015), pp. 1277-1285.

References

- Bechtold, J. K., Cui, C. and Matalon, M., The role of radiative losses in self-extinguishing and self-wrinkling flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30 (2005), pp. 177-184.
- Bychkov, V. V., Golberg, S. M., Liberman, M. A., Kleev, A. I. and Eriksson, L. E., Numerical simulation of curved flames in cylindrical tubes, *Combustion Science and Technology*, Vol. 129 (1997), pp. 217-242.
- Christopherson, D. G., Note on the vibration of membranes, *The Quarterly Journal of Mathematics*, Vol. 11 (1940), pp. 63-65.
- Clavin, P., Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 11 (1985), pp. 1-59.
- Daumont, I., Kassner, K., Misbah, C. and Valance, A., Cellular self-propulsion of two-dimensional dissipative structures and spatial-period tripling Hopf bifurcation, *Physical Review E*, Vol. 55 (1997), pp. 6902-6906.

- Denet, B. and Haldenwang, P., Numerical study of thermal-diffusive instability of premixed flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 86 (1992), pp. 199-221.
- Gorman, M., el-Hamdi, M. and Robbins, K. A., Experimental observation of ordered states of cellular flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 98 (1994), pp. 37-45.
- Hertzberg, M., Selective diffusional demixing: occurrence and size of cellular flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 15 (1989), pp. 203-239.
- Joulin, G. and Clavin, P., Linear stability analysis of nonadiabatic flames: diffusional-thermal model, *Combustion and Flame*, Vol. 35 (1979), pp. 139-153.
- Kadowaki, S., The effects of heat loss on the burning velocity of cellular premixed flames generated by hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities, *Combustion and Flame*, Vol. 143 (2005), pp. 174-182.
- Kadowaki, S. and Hasegawa, T., Numerical simulation of dynamics of premixed flames: flame instability and vortex-flame interaction, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.31 (2005), pp. 193-241.
- Kadowaki, S., Washio, T., Thwe Thwe Aung, Yamazaki, W., Katsumi, T. and Kobayashi, H., Unstable behaviors of cellular premixed flames caused by hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities under high- and low-temperature environment, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 82, No. 835 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00522.
- Kadowaki, S., Yanagioka, T., Yamazaki, W. and Kobayashi, H., The intrinsic instability of three-dimensional premixed flames under the low- and high-temperature conditions: effects of unburned-gas temperature on hydrodynamic and diffusive-thermal instabilities, *Combustion Science and Technology*, Vol. 187 (2015), pp. 1167-1181.
- Kim, W. K., Mogi, T. and Dobashi, R., Fundamental study on accidental explosion behavior of hydrogen-air mixtures in an open space, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38 (2013), pp. 8024-8029.
- Law, C. K., Dynamics of stretched flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 22 (1988), pp. 1381-1402.
- Minamoto, Y., Yenerdag, B. and Tanahashi, M., Morphology and structure of hydrogen-air turbulent premixed flames, *Combustion and Flame*, Vol. 192 (2018), pp. 369-383.
- Nakahara, M., Abe, F., Tokunaga, K. and Ishihara, A., Effect of dilution gas on burning velocity of hydrogen-premixed meso-scale spherical laminar flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35 (2015), pp. 639-646.
- Niioka, T., *Analysis of Combustion Phenomena* (2004), p. 1, Tohoku University Press (in Japanese).
- Okafor, E. C., Hayakawa, A., Nagano, Y. and Kitagawa, T., Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen-methane-air, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39 (2014), pp. 2409-2417.
- Qin, X., Kobayashi, H. and Niioka, T., Laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames at elevated pressure, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21 (2000), pp. 58-63.
- Shim, Y. S., Fukushima, N., Shimura, M., Nada, Y., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Radical fingering in turbulent premixed flame classified into thin reaction zones, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34 (2013), pp. 1383-1391.
- Sivashinsky, G.I., Diffusional-thermal theory of cellular flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 15 (1977), pp. 137-146.
- Sivashinsky, G. I., On the intrinsic dynamics of premixed flames, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 332 (1990), pp. 135-148.
- Strehlow, R. A., *Combustion Fundamentals* (1985), p. 292, McGraw-Hill, New York, NY.
- Thwe Thwe Aung, Katsumi, T. and Kadowaki, S., The effects of unburned-gas temperature on intrinsic instability of premixed flames at high Lewis numbers under the adiabatic and non-adiabatic conditions, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 4, No. 2 (2017), DOI:10.1299/mej.16-00477.
- Williams, F. A., *Combustion Theory*, Second Edition (1985), p. 349, Addison-Wesley, Reading, CA.
- Yenerdag, B., Fukushima, N., Shimura, M., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., Turbulence-flame interaction and fractal characteristics of H₂-air premixed flame under pressure rising condition, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35 (2015), pp. 1277-1285.