水素-空気希薄予混合火炎の不安定挙動 (未燃ガス温度, 熱損失およびスケールの効果)

門脇 敏^{*1}, 内山 努^{*2}, 勝身 俊之^{*3}, トエ トエ アウン^{*4}, 小林 秀昭^{*5}

Unstable behavior of hydrogen-air lean premixed flames (Effects of unburned-gas temperature, heat loss and scale)

Satoshi KADOWAKI^{*1}, Tsutomu UCHIYAMA^{*2}, Toshiyuki KATSUMI^{*3}, Thwe Thwe Aung^{*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, *3} Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology
1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

^{*4} 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: 24 October 2019; Revised: 8 December 2019; Accepted: 20 February 2020

Abstract

Unstable behavior of hydrogen-air lean premixed flames was studied by numerical calculations of two-dimensional unsteady reactive flow to clarify the effects of unburned-gas temperature, heat loss and scale. We adopted the numerical model containing the detailed hydrogen-oxygen combustion with 17 elementary reactions of 8 reactive species and a nitrogen diluent, compressibility, viscosity, heat conduction, molecular diffusion, and heat loss of Newtonian type. A disturbance with sufficiently small amplitude was superimposed on a planar flame to obtain the relation between the growth rate and wave number, i.e. dispersion relation, and the linearly most unstable wave number, i.e. critical wave number. As the unburned-gas temperature became lower and the heat loss increased, the growth rate decreased and the unstable range narrowed. These were due mainly to the decrease of flame temperature and burning velocity. To study the characteristics of cellular flames, the disturbance with the critical wave number was superimposed. The disturbance developed owing to intrinsic instability, and then the cellular shape of flame fronts appeared. The burning velocity of a cellular flame normalized by that of a planar flame became larger as the unburned-gas temperature became lower and the heat loss increased. The burning velocity of a cellular flame became monotonically larger with an increase in scale. This was because that the long-wavelength components of disturbances affected the unstable behavior of cellular flames.

Keywords : Premixed combustion, Hydrogen flame, Unstable behavior, Unburned-gas temperature, Heat loss, Scale, Burning velocity

1. はじめに

我々は、二酸化炭素排出による地球温暖化や窒素酸化物排出による大気汚染などの環境問題に直面している。環境問題の要因の一つが化石燃料の燃焼によることから、環境負荷の低減に結び付く燃焼技術の確立が急務となっている。近年、環境負荷を低減する燃焼手法の一つとして、水素の希薄燃焼が注目されている。水素は二次エ

No.19-00401 [DOI:10.1299/transjsme.19-00401], J-STAGE Advance Publication date : 4 March, 2020

^{*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, 長岡技術科学大学 大学院工学研究科

^{*4} 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)

^{*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

エネルギーではあるが、再生可能エネルギーを活用した水素製造などが検討されており、次世代のエネルギー資源として期待されている。

水素の分子量は酸化剤である空気のそれより小さいことから、水素-空気希薄予混合火炎は固有不安定性により不安定になることが知られている。固有不安定性の主な要因は、流体力学的不安定性と拡散・熱的不安定性である (Williams, 1985)。流体力学的不安定性は、気体の熱膨張によるものであり、固有不安定性において最も本質的な不安定性である。拡散・熱的不安定性は、物質拡散と熱拡散の相互作用によるものであり、水素-空気希薄予混合火炎の不安定性において主要な役割を演じている。これまで、予混合火炎の不安定性について数多くの研究が為されており、不安定現象が詳細に調べられている (Clavin, 1985; Hertzberg, 1989; Sivashinsky, 1990; Kadowaki and Hasegawa, 2005)。さらに、水素火炎の不安定現象が実験的に調べられ、未燃ガス側に凸となるセル状の火炎面が観察されている (Qin et al., 2000; Kim et al., 2013; Okafor et al., 2014; Nakahara et al., 2015)。

予混合火炎の不安定性には、熱損失 (Joulin and Clavin, 1979; Kadowaki, 2005) とスケール (Kadowaki et al., 2005) が強く影響を及ぼしていることが、理論解析や数値計算を通して明らかにされている。加えて、未燃ガス温度も不安定性に影響を与えることが示されている (Kadowaki et al., 2015)。しかし、これまでの火炎不安定性に関する理論解析や数値計算は、主に一段反応を仮定した化学反応モデルを用いた方程式をベースとして為されており、詳細な化学反応は考慮されていない。一方、乱流予混合火炎の研究では、詳細な化学反応を考慮した数値計算が遂行され、乱流燃焼における活性化学種の振舞いが調べられている (Shim et al., 2013; Yenerdag et al., 2015; Minamoto et al., 2018)。しかし、火炎不安定性における未燃ガス温度などの効果に着目した数値計算は為されておらず、セル状火炎における活性化学種の分布などは未知のままである。

詳細な化学反応を考慮した上で、火炎の不安定性に及ぼす未燃ガス温度、熱損失およびスケールの効果を調べ、不安定性のメカニズムを明らかにすることは、工学的に重要である。また、得られる知見は、水素-空気混合気の希薄燃焼を実用化する上で必要不可欠である。著者らは、詳細な化学反応を考慮した数値計算を通して、火炎の不安定性に及ぼす熱損失の効果を示している (Kadowaki et al., 2019)。しかし、未燃ガス温度の効果については取り扱っておらず、未知のままとなっている。

本研究では、詳細な化学反応を考慮した非定常反応流れの数値計算を遂行し、固有不安定性による水素-空気希薄予混合火炎の不安定挙動を調べ、活性化学種の分布を明らかにする。広い空間における火炎の不安定挙動をシミュレートし、セル状火炎の燃焼速度を求める。そして、火炎不安定挙動に及ぼす未燃ガス温度、熱損失およびスケールの効果を精査する。

2. 基礎方程式

本研究では、9個の化学種 (H_2 , O_2 , H , O , OH , HO_2 , H_2O_2 , H_2O , N_2) と17個の素反応を考える (Westbrook, 1982)。各化学種の輸送係数は、分子動力学による理論計算により定める。そして、多成分系における輸送係数の値は、従来から提案されている近似式を用いて求める (Wilke, 1950a; Coffee and Heimerl, 1981; Wilke, 1950b)。気体は理想気体の状態式に従うものとし、外力、体積粘性、輻射、Soret 効果、Dufour 効果、圧力勾配拡散は無視する。また、狭い平板間等の狭窄空間を伝播する予混合火炎を想定し、熱損失は火炎から壁面への熱伝達によるものとして、ニュートンの冷却の法則に従う、つまり気体と未燃ガスとの温度差に比例すると仮定する。支配方程式として、二次元非定常の圧縮性 Navier-Stokes 方程式を採用する。デカルト座標を用い、気体の主流方向を x 方向とし、それと直交する方向を y 方向とする。

本数値計算で用いる二次元非定常反応流れの基礎方程式 (化学種保存の式、質量保存の式、運動量保存の式、エネルギー保存の式、状態式) は、以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho Y_i u - \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho Y_i v - \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) = w_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \rho u^2 + p - \mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho uv - \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \rho uv - \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho v^2 + p - \mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_t) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\rho e_t + p)u - \kappa \frac{\partial T}{\partial x} - \sum_i \left(h_i \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\rho e_t + p)v - \kappa \frac{\partial T}{\partial y} - \sum_i \left(h_i \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) \right\} = H(T - T_u) \quad (5)$$

$$p = \left(\sum_i C_i \right) RT \quad (6)$$

ここで、 ρ は密度、 Y は質量分率、 (u, v) は (x, y) 方向の速度成分、 p は圧力、 e_t は全エネルギー、 T は温度、 C はモル濃度、 D は拡散係数、 w は反応速度、 μ は粘性係数、 κ は熱伝導率、 h はエンタルピー、 H は熱損失パラメーター、 T_u は未燃ガス温度、 R は一般気体定数である。また、添字 i は、 i 番目の化学種を示している。

3. 数値計算手法

水素-空気予混合気の当量比は0.5、圧力は 1.013×10^5 Pa、未燃ガス温度は193, 298, 500 Kとする。数値計算手法として、時間・空間に対して共に二次精度である陽的MacCormack法(Anderson et al., 1984)を採用する。計算領域($L_x \times L_y$)としては、 x 方向には50 mmとし、 y 方向にはスケールの効果を調べるために擾乱の特性波長の1~12倍とする。計算格子は、 x 方向には不等間隔格子を、 y 方向には等間隔格子を用い、格子数は 1851×385 とする。ここで、 x 方向の最小格子間隔は0.02 mmである。時間ステップ間隔は10 nsとする。計算領域の上流側と下流側では、流れ変数の勾配が連続であるとする。未燃ガスの流入速度は、平面火炎の燃焼速度 S_0 (未燃ガス温度と熱損失パラメーターに依存)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。

予混合火炎の固有不安定性を調べるために、正弦波状の微小擾乱を平面火炎に加え、擾乱の発達の様子をシミュレートする。擾乱による火炎面の x 方向への変位は、以下の通りである。

$$A_0 \sin(2\pi y / \lambda) \quad (7)$$

ここで、 A_0 は擾乱の初期振幅、 λ は擾乱の波長である。初期振幅については、分散関係を求める際は $A_0 = 0.02$ mmと設定し、セル状火炎を求める際は $A_0 = 0.2$ mmと設定する。

4. 結果と考察

微小擾乱($A_0 = 0.02$ mm)を平面火炎に加えると、その振幅 A は時間と共に指数的に増大する。このような挙動は、予混合火炎の固有不安定性によるものである。ここでは、増幅率 ω を以下の様に定義する。

$$\omega = \frac{d}{dt} \ln(A/A_0) \quad (8)$$

なお、微小擾乱が時間と共に指数的に増大するのは、その振幅が十分小さいときのみである。振幅がある程度大きくなると、増幅率は次第に小さくなり、セル状火炎が形成される際にはほぼ零となる。これは、振幅が大きくなると火炎面の非線形効果が現象に影響を及ぼすからである。擾乱の波長を変えて計算を行い、各波長における増幅率を求める。そして、波数と波長の関係($k = 2\pi / \lambda$)を用いて、増幅率と波数の関係、つまり分散関係を求める。

図1は、分散関係に及ぼす熱損失の効果を示したものである。熱損失が大きくなると共に、増幅率は小さくなり、不安定領域（増幅率が正の領域）は狭くなる。これは、熱損失により熱膨張の効果が弱くなり、燃焼速度が減少するからである。図2は、非断熱条件下における分散関係に及ぼす未燃ガス温度の効果を示したものである。未燃ガス温度が高くなると共に、増幅率は増大する。これは主に、燃焼速度の増加によるものである。

Fig. 1 The dispersion relations at $T_u = 298$ K, depending on the heat-loss parameter.

Fig. 2 The dispersion relations at $T_u = 193, 298$ and 500 K, under the non-adiabatic conditions.

固有不安定性に起因して形成されるセル状火炎の挙動を調べるために、特性波長(最大増幅率に対応する波長) λ_c と等しい波長を持つ擾乱を平面火炎に加えて計算を行う。ここでは、擾乱の初期振幅を0.2 mmと設定する。この値より小さい振幅をもつ擾乱を加えて計算を行っても、得られる結果は同様である。スケールの効果を調べるために、y方向の計算領域を特性波長の1~12倍に設定して数値計算を遂行しており、 $L_y = \lambda_c$ のときは単独のセル状火炎が形成され、計算領域が広い場合は複数のセルが形成される。

図3は、 $T_u = 298$ K、 $L_y = \lambda_c, 4\lambda_c, 8\lambda_c$ における断熱予混合火炎の温度分布を示したものである。未燃ガスは、図の左方(上流側)から流入する。平面火炎に加えられた擾乱が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。 $L_y = 4\lambda_c, 8\lambda_c$ のときは、2つのセルと4つのセルが形成され、セルの凹凸が深くなっている。これは、スケールの効果と考えられる。また、未燃ガス側に凸の火炎の下流側で温度が高くなり、凹の火炎の下流側で温度が低くなっている。これは、拡散・熱的效果によるものである。

図4は、非断熱予混合火炎の温度分布を示したものである。断熱予混合火炎の場合と比較すると、 $L_y = 8\lambda_c$ において小さな5つ目のセルが見られるなど、火炎は不安定な振る舞いを示している。このことから、熱損失は火炎の不安定挙動をプロモートしていることが分かる。

Fig. 3 The distributions of temperature in the cellular flame at $T_u = 298$ K and $L_y = \lambda_c, 4\lambda_c$ and $8\lambda_c$ under the adiabatic conditions ($H = 0$ W/m³K).

Fig. 4 The distributions of temperature in the cellular flame at $T_u = 298$ K and $L_y = \lambda_c, 4\lambda_c$ and $8\lambda_c$ under the non-adiabatic conditions ($H = 1.325 \times 10^5$ W/m³K).

平面火炎に加えられた擾乱は、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が、火炎面の不安定挙動は空間スケールに依存する。図5は、 $T_u = 500$ K, $L_y = 12\lambda_c$ における断熱予混合火炎の温度分布と化学種分布を示したものである。この場合、5つのセルが形成されている。また、拡散・熱的效果により、未燃ガス側に凸の火炎（凹の火炎）の下流側で温度が高く（低く）なっている。それに伴い、H, OH, Oなどの活性化学種の濃度が高く（低く）なっている。

Fig. 5 The distributions of temperature and species (H_2 , O_2 , H_2O , H , OH , O and HO_2) in the cellular flame at $T_u = 500$ K and $L_y = 12\lambda_c$ under the adiabatic conditions ($H = 0$ W/m³K).

図6は、非断熱条件下における温度分布と化学種分布を示したものである。この場合、11個のセルが形成されている。断熱条件下の場合と比較すると、火炎面はより不安定に振舞っていることが分かる。また、火炎の下流において、水蒸気濃度が増大していることが示されている。これは、流れ場の圧力がほぼ一定であるので、熱損失による温度低下によって密度が増大し、単位体積当たりの水蒸気のマール数が増加するからである。

Fig. 6 The distributions of temperature and species (H_2 , O_2 , H_2O , H , OH , O and HO_2) in the cellular flame at $T_u = 500$ K and $L_y = 12\lambda_c$ under the non-adiabatic conditions ($H = 7.0 \times 10^5$ W/m³K).

Fig. 7 The distributions of temperature and species at $T_u = 193$ K, $L_y = 12\lambda_c$ and $H = 0$ W/m³K.

Fig. 8 The distributions of temperature and species at $T_u = 193$ K, $L_y = 12\lambda_c$ and $H = 0.55 \times 10^5$ W/m³K.

図7と図8は、 $T_u = 193\text{ K}$, $L_y = 12\lambda_c$ における断熱および非断熱条件下の温度分布と化学種分布を示したものである。図5と図6に示した $T_u = 500\text{ K}$ の場合と比較すると、不安定挙動がプロモートされている。これは、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からである。さらに、未燃ガス温度が低下するとゼルドヴィッチ数が大きくなり、実質的なルイス数が1より小さい水素-空気希薄予混合火炎では、拡散・熱的効果により、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も要因の一つである。

図9の左側は、断熱および非断熱条件下におけるセル状火炎の燃焼速度 S_{cf} の空間スケール依存性を示したものである。スケールの効果は火炎の不安定挙動に強く影響を及ぼす（図3と図4）ことから、燃焼速度は空間スケールに依存する。空間スケール (L_y/λ_c) が大きくなると共に、セル状火炎の燃焼速度は単調に増加する。これは、擾乱の長波長成分が火炎の不安定挙動に影響を及ぼし、より長い波長で深い凹凸のセルが形成され、火炎面の面積がより大きくなることによるものと考えられる。図9の右側は、平面火炎の燃焼速度で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。熱損失パラメーターが大きくなると、 S_{cf} と S_u は減少するが、両者の比 (S_{cf}/S_u) は増加する。これは、実質的なルイス数が1より小さい水素-空気希薄予混合火炎において、熱損失が不安定挙動をプロモートし、火炎面の面積が大きくなるからである。

セル状火炎の燃焼速度は未燃ガス温度が高く（低く）なると共に増加（減少）するが、標準化されたそれには逆の傾向がある。図10の左側は、断熱条件下における、標準化した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（低く）なると共に、標準化したセル状火炎の燃焼速度は減少（増加）する。この現象については、熱膨張の効果が弱く（強く）なること、並びに、ゼルドヴィッチ数が小さく（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隠微（顕著）になることが主な要因である。図10の右側は、非断熱条件下における、標準化したセル状火炎の燃焼速度を示したものである。熱損失がある場合、標準化したセル状火炎の燃焼速度は、断熱の場合より大きくなっている。つまり、熱損失は不安定挙動をプロモートしている。

Fig. 9 The burning velocities of cellular flames (left side) and normalized burning velocities of cellular flames (right side) at $T_u = 298\text{ K}$ under the adiabatic and non-adiabatic conditions, depending on L_y/λ_c .

Fig. 10 The normalized burning velocities of cellular flames at $T_u = 193, 298$ and 500 K under the adiabatic conditions (left side) and non-adiabatic conditions (right side), depending on L_y / λ_c .

5. おわりに

本研究では、二次元非定常反応流れの数値計算を遂行し、水素-空気希薄予混合火炎の不安定挙動に及ぼす未燃ガス温度、熱損失およびスケールの効果を精査した。詳細な化学反応を考慮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。

微小擾乱を平面火炎に加えると、その振幅は時間と共に指数的に増大する。熱損失が大きくなると共に、増幅率は小さくなり、不安定領域は狭くなる。これは、熱損失により熱膨張の効果が弱くなるからである。また、未燃ガス温度が高くなると共に、増幅率は増大する。これは主に、燃焼速度の増加によるものである。

特性波長と等しい波長を持つ擾乱を平面火炎に加えると、固有不安定性によりセル状火炎が形成される。未燃ガス側に凸の火炎（凹の火炎）の下流側で温度が高く（低く）なり、それに伴い、 H 、 OH 、 O などの活性化学種の濃度が高く（低く）なる。これは、拡散・熱的效果によるものである。

未燃ガス温度が高く（低く）なると共に、標準化したセル状火炎の燃焼速度は減少（増加）する。これについては、熱膨張の効果が弱く（強く）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隠微（顕著）になることが主な要因である。また、標準化したセル状火炎の燃焼速度は、熱損失が大きくなると共に増加する。さらに、空間スケールが大きくなると共に、セル状火炎の燃焼速度は単調に増加する。これは、擾乱の長波長成分が火炎の不安定挙動に影響を及ぼすからである。

今後は、圧力を変化させて計算を行い、予混合火炎の不安定挙動に及ぼす圧力効果を明らかにする予定である。

References

- Anderson, D. A., Tannehill, J. C. and Pletcher, R. H., Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer (1984), p. 482, Hemisphere Publishing, New York, NY.
- 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.
- Coffee, T. P. and Heimerl, J. M., Transport algorithms for premixed, laminar steady-state flames, Combustion and Flame, Vol. 43 (1981), pp. 273-289.
- 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., Suzuki, H. and Kobayashi, H., The unstable behavior of cellular premixed flames induced by intrinsic instability, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30 (2005), pp. 169-176.
- Kadowaki, S., Uchiyama, T., Katsumi, T. and Kobayashi, H., The scale effects on the dynamic behavior of hydrogen-air lean premixed flames under the adiabatic and non-adiabatic conditions, Proceedings of the 12th Asia-Pacific Conference on Combustion (2019), Paper No. ASPACC2019-1014.
- 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.
- 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., On the intrinsic dynamics of premixed flames, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Vol. 332 (1990), pp. 135-148.
- Westbrook, C. K., Hydrogen oxidation kinetics in gaseous detonations, Combustion Science and Technology, Vol. 29 (1982), pp. 67-81.
- Wilke, C. R., A viscosity equation for gas mixtures, Journal of Chemical Physics, Vol. 18 (1950a), pp. 517-519.
- Wilke, C. R., Diffusional properties of multicomponent gases, Chemical Engineering Progress, Vol. 46 (1950b), pp. 95-104.
- 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.