水素-プロパン-空気希薄混合気の乱流燃焼速度に与える
局所燃焼速度特性の影響中原 真也^{*1}, 松尾 佳憲^{*2}, 大元 喜雄^{*2}, 佐伯 翼^{*2}, 阿部 文明^{*3}Effects of local flame displacement velocity on turbulent burning velocity
for lean H₂-C₃H₈-Air mixturesMasaya NAKAHARA^{*1}, Yoshinori MATSUO^{*2}, Yoshio OMOTO^{*2}, Tsubasa SAEKI^{*2}
and Fumiaki ABE^{*3}^{*1, *2} Ehime University, Graduate school of Science and Engineering
3 Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime 790-8577, Japan^{*3} Ehime University, Faculty of Engineering
3 Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime 790-8577, Japan

Received 12 June 2014

Abstract

This study was made to establish a prediction method of turbulent burning velocity for lean hydrogen-propane-air mixtures, with paying special attention to the importance of local burning velocity to turbulent burning velocity. In this study, lean hydrogen added propane air mixtures with different rates of addition of hydrogen δ_H and equivalence ratios Φ (0.5, 0.6 and 0.8) were prepared, where Φ includes fuel concentration below a lean flammability limit of propane-air mixtures. A two-dimensional sequential laser tomography technique was applied to obtain the relationship between the flame shape and the flame displacement in a constant-volume vessel. The local flame displacement velocity S_F of turbulent flames was quantitatively measured as a key parameter of local burning velocity. It was found that the mean values of S_F , $S_{F,m}$, at the same u'/S_{L0} tended to increase as hydrogen was added to lean propane-air mixtures with $\Phi=0.8$. The trends of $S_{F,m}$ against u'/S_{L0} also corresponded well to its turbulent burning velocities, regardless of δ_H and Φ . An attempt was also made to predict the turbulent burning velocity by some empirical equations. As a result, the predicted turbulent burning velocities, where the obtained $S_{F,m}$ was employed instead of S_{L0} as a local burning velocity, were in better agreement with experimental ones for lean hydrogen-propane-air mixtures.

Key words : Internal combustion engine, Premixed combustion, Hydrogen addition, Turbulent burning velocity, Local burning velocity, Lean propane combustion

1. 緒 言

近年の化石燃料の枯渇や地球温暖化問題の観点から、燃焼機器には、燃料消費量や有害排出ガスがより少なくかつ多種多様な燃料に対応できる燃焼方式が求められている(Richards, et al., 2001)(Chomiak, et al., 1989). これらの問題に対し、従来のガソリンや軽油の燃料に比べて単位発熱量当たりの二酸化炭素(CO₂)の排出量が少なく、油田や天然ガス田からの随伴または製油所から副生される液化石油ガス(LPG)の活用や、熱効率の向上や NOx 等の有害排出ガスの低減が期待できる希薄燃焼技術が注目されている(水嶋, 2010)(Huang and Yang, 2009).

しかし、希薄燃焼法を内燃機関に適用した場合に、主に希薄化にともなう炭化水素-空気混合気の層流燃焼速度の低下に起因したサイクル変動や失火等の問題が発生することが知られている. そこで、広い可燃範囲や高い

燃焼速度など優れた燃焼特性を有する水素を主燃料に添加することが提案されている(Kido, et al., 1994) (山本他, 1998) (Kawasaki, et al., 2003) (Kashir and Tabejamaat, 2013). さらに, 水素添加により炭化水素-空気の希薄可燃限界以下での超希薄燃焼も可能になる.

一方近年, 水素利用社会を目指し, 動力源としてその理論効率の良さから固体高分子型燃料電池(PEFC)が注目されているが, PEFC には高純度に生成した水素が必要である(福永, 2006). しかしながら, 燃焼機器に水素を使用する場合には, PEFC と異なり必ずしも純水素である必要はなく, 例えば水素製造法の一つである炭素系資源改質時に, 残留する炭化水素燃料等が混在したガスでも使用が可能である. またその改質時に, 水素と炭化水素を燃料とした燃焼を利用する場合もある. さらに今後, 廃棄物, バイオマスや石炭をガス化した燃料の発電等での利用の拡大が予測される(Richards, et al., 2001). したがって, 工業的には一般的に乱流燃焼が燃焼負荷の向上の観点から利用されていることから, いわゆる水素を主成分とした炭化水素燃料が混在した多成分燃料の乱流燃焼速度モデルを構築することは重要な課題である. さらに, これらのモデルの構築は, 燃焼機器を設計する上で重要であることに加えて, 例えば水素利用車両と従来の炭化水素系燃料を搭載した車両との火災事故などが発生した場合の被害の予測などの水素利用社会における安全面への応用も期待できる,

そこで, これまでに既報(Kido, et al., 2002)で層流燃焼速度を揃えた希薄および過濃の水素-炭化水素混合気の乱流燃焼速度特性について検討した. その結果, 水素添加が希薄か過濃により, さらには炭化水素燃料の種類により, 乱流燃焼速度特性に与える影響が異なることを明らかにした. そこでは, 反応物の分子拡散特性に起因した選択拡散効果により, 乱れにより湾曲した火炎面での実質的な燃焼速度である局所燃焼速度の平均値が層流燃焼速度から変化し, 乱流燃焼速度特性に大きく影響を与えることを定性的な議論により明らかにした. さらに, 既報(Nakahara, et al., 2009)では, この乱流燃焼場で重要となる局所燃焼速度特性を直接的かつ定量的な手法で検討を試み, ルイス数や Markstein 数との関係を議論した.

しかしながら, これらいわゆる多成分燃料-空気混合気の乱流燃焼速度特性に関しては未だ不明な点も多く, 特に炭化水素燃料の可燃限界付近での乱流燃焼速度を包括的に整理できるモデル式の構築は成されていない(Muppala, et al., 2009).

本研究では, 多成分燃料混合気の一つである LPG の主成分であるプロパンの希薄可燃限界以下の濃度を含む水素-プロパン-空気の希薄混合気を対象に, 乱流燃焼場の局所燃焼速度特性の重要性に着目し, 乱流燃焼速度特性を予測できるか検討することを目的とする. ここでは, 既報(Kido, et al., 2002, 2003) (Nakahara, et al., 2009)(中原他, 2012, 2013)で議論してきたように, 真の乱流燃焼場の局所燃焼速度ではないが, 乱流火炎の換算局所火炎変位速度を用いて局所燃焼速度特性について検討を試みる. そこで, しわ状層流火炎が存在するような比較的乱れの弱い領域での予混合乱流伝ば火炎を, 2 次元ではあるが連続断層写真として観測し, 未燃混合気に対する局所的な火炎の変位速度および火炎形状を定量化する. さらに, 乱流燃焼速度は, 一般的に, 連続した火炎面が存在する領域では層流燃焼時からの火炎表面積の増加率と火炎面の燃焼速度である局所燃焼速度の積で表せることが知られている(Andrews, et al., 1975)(Filatyev, et al., 2005)(Weiß, et al., 2008). そこで, 本研究で得られた換算局所火炎変位速度を局所燃焼速度と仮定し, この一般的な乱流燃焼速度式および既報(Kido and Nakahara, 1999)で提案する乱流燃焼速度整理式へ適用し, 水素-プロパン-希薄空気混合気の乱流燃焼速度の予測式としての可能性について検討する.

2. 実験装置および方法

2・1 実験方法

燃焼実験には既報(Nakahara, et al., 2009)(中原他, 2012)と同様の燃焼器および二次元連続火炎断層写真撮影システムを使用した. 燃焼器は, 図 1 に示す内径が約 100 mm の球形に近い定容燃焼器で, 向かい合う四面に直径 85 mm の観測窓, 他の二面には直径 90 mm の多孔板を有し, その後方の遠心ファンを回転させることにより燃焼室中心部に概ね等方的な定常乱れ場を発生できる. 火炎断層写真撮影システムは, 光源に連続発振 Nd:YAG レーザ(第二高調波 532 nm, 出力 5 W)を用い, 三枚のシリンドリカルレンズ(焦点距離: 15 mm, 480 mm, 1000 mm)にてシート光を燃焼室に照射でき, 混合気に添加された二酸化チタン粒子 (0.03~0.05 μm) の散乱光を高速度カメラ (Phantom V7: 512×512 画素, 8 bit, 2000~8000 fps, 露光時間 18 μs) で撮影できる. なお, 本研究は二次

Fig. 1 Cross-sectional view of combustion chamber.

Fig. 2 Measurements of laminar burning velocities and flammability limits of propane-air mixtures with hydrogen addition.

元の撮影ではあるが、火炎の三次元的挙動を極力排除するために、燃焼室内に照射されるシート光は、点火栓の中心位置を通過するようにしている。ここで、レーザビーム断面は円形で、最初の二枚のシリンドリカルレンズにてシート光になり、三枚目のレンズにて燃焼室中心に焦点を合わせ、シート光の厚さを絞り、その厚さは燃焼室観察窓付近で最大で 0.1 mm 程度となる。また、1 画素の大きさは実像上で 0.12 mm である。

実験は、各混合気（表 1 参照）を室温のもと大気圧充填し、所定の乱れ強さ u' の下で、燃焼室の中心で火花点火し外向きに伝ばする火炎を観測した。なお、空気は乾燥させるためにシリカゲルを充填した容器を通過させ燃焼器に供給し、点火エネルギーは約 2.0 J とした。本研究での乱流火炎の撮影は、各混合気に対してファン回転数を 1000 と 1400 rpm とし、すなわち u' が 0.35 と 0.49 m/s、 L_f は 2.8 と 3.0 mm で実施した(Kido, et al., 2002, 2003). 表 1 に、実験で使用した既報(Nakahara, et al., 2009)(中原他, 2012)と同様に混合気の動粘性係数を考慮した非燃焼場での乱流特性値を示す。表 1 中、 u' は乱れ強さ(ガス流速変動の二乗平均値)、 S_{L0} は層流燃焼速度(2・2 節参照)、 η_0 は予熱帯厚さ[$=a_0/S_{L0}$]、 L_f は縦方向積分尺度、 Da_1 はダムケラー数[$=L_f/u' \cdot S_{L0}/\eta_0$]、 Re_1 は L_f に基づくレイノルズ数[$=L_f \cdot u' / \nu$]、 a_0 は熱拡散係数および ν は動粘性係数である。なお、初期条件は常温(298±5 K)および常圧とし、乱流火炎の連続断層写真撮影は同一条件に対して 10 回ずつ行った。

2・2 混合気

本研究では、LPG の主成分であるプロパンの希薄可燃限界以下の濃度を含むプロパンー空気希薄混合気への水素添加が及ぼす乱流火炎の換算局所火炎変位速度特性への影響、およびその変位速度特性と乱流燃焼速度特性の関係を検討するために、表 1 に示す混合気を使用する。具体的には、図 1 の本燃焼器ではプロパンー空気混合気の希薄可燃限界以下である当量比 ϕ が 0.6 および 0.5 を、さらに可燃範囲である ϕ が 0.8 の希薄水素添加プロパン空気混合気を対象とした(図 2 中、黒塗記号)。なお、 ϕ は、二種類の燃料中の各炭素および水素分子数を基にした総合当量比[本報では、単に当量比と称す](Kido, et al., 2002)を表し、混合気組成を $\delta_H H_2 + (1-\delta_H) C_3H_8 + X_0(O_2 + 3.76N_2)$ とすれば、

Table 1 Properties of mixtures and test conditions.

Mixture	ϕ	Mole fraction in fuels		S_{L0} (cm/s)	a_0 (mm ² /s)	ν (mm ² /s)	Le	Fan Speed 1000rpm				Fan Speed 1400rpm			
		$H_2(\delta_H)$	C_3H_8					u'/S_{L0}	L_f/η_0	Da_1	Re_1	u'/S_{L0}	L_f/η_0	Da_1	Re_1
P05airN2H08	0.5	0.8	0.2	15.6	24.1	15.9	0.64	2.24	18.1	8.1	61.8	3.14	19.3	6.2	92.4
P05airN2H10	0.5	1.0	0.0	69.6	34.2	18.3	0.47	0.51	56.9	112.3	53.9	0.71	60.7	85.6	80.5
P06airN2H08	0.6	0.8	0.2	24.1	24.7	15.9	0.66	1.46	27.2	18.7	61.5	2.04	29.0	14.2	91.9
P06airN2H10	0.6	1.0	0.0	104.4	36.6	18.8	0.50	0.23	79.9	236.6	52.4	0.33	85.3	180.3	78.2
P08airN2H00	0.8	0.0	1.0	30.0	19.4	14.6	1.57	1.17	43.2	37.0	66.9	1.64	46.1	28.2	100.0
P08airN2H02	0.8	0.2	0.8	30.7	20.0	14.8	1.34	1.14	43.0	37.6	66.4	1.60	45.8	28.7	99.2
P08airN2H05	0.8	0.5	0.5	35.1	21.5	15.1	1.00	1.00	45.6	45.7	64.9	1.40	48.7	34.8	97.0
P08airN2H08	0.8	0.8	0.2	53.9	25.9	16.1	0.68	0.65	58.3	89.6	60.9	0.91	62.2	68.3	91.0

Fig. 3 Schematic illustration of determinations of local flame displacement velocity S_F , curvature $1/r$ and equivalent radii (R_L, R_A & R_C) of tomograms of turbulent flame.

Fig. 4 Variation of S_T/S_{L0} with u'/S_{L0} for $\delta_H H_2 - (1-\delta_H) C_3H_8$ -air mixtures.

$$\Phi = [1/2 \cdot \delta_H + 5 \cdot (1-\delta_H)] / X_0 \quad (1)$$

で計算ができる. ここで, δ_H は水素の混合割合で二種類の燃料ガス中に占める体積割合, X_0 は混合気中の酸素のモル数を表す. また, 表 1 中, S_{L0} は層流燃焼速度で, 既報(Kido and Nakahara, 1999) (中原他, 2012)と同様に, 点火後燃焼初期の燃焼室内圧力上昇が 0.01~0.02 MPa 範囲での圧力上昇率 dp/dt から算出(Lewis and Elbe, 1987)し, 火炎半径が 20 mm 程度で概ね伸長を有しない層流火炎の燃焼速度である. Le は不足成分の拡散係数 D_d に基づくルイス数 ($Le = a_0/D_d$) である. 本研究で利用した希薄二成分燃料混合気では, 不足成分が燃料であり, 燃料が二種類存在するため, 式(2)のような水素とプロパンの各燃料の多成分中での拡散係数に基づくルイス数 (Le_{H_2} および $Le_{C_3H_8}$) をモル割合で平均した値とした(Muppala, et al., 2009).

$$Le = (1-\delta_H) \cdot Le_{C_3H_8} + \delta_H \cdot Le_{H_2} \quad (2)$$

図 2 に, 本燃焼器で計測した Φ が 0.5, 0.6, 0.8 で δ_H を 0.0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0 と変化させた混合気の S_{L0} の変化を示す. 図 2 中, 記号がない混合気は本燃焼器では層流場でも燃焼しなかった条件を, また黒塗記号は本研究で乱流火炎の観測実験を行った混合気を表す. 図 2 から, Φ が 0.6 および 0.5 では, δ_H が 0.0 のプロパン-空気混合気は層流場でも燃焼しないが, それぞれ水素添加 δ_H を 0.2 または 0.5 まで増加すると燃焼することがわかる.

本研究の対象とした水素混合割合は, 表 1 および図 2 中に黒塗記号で示したように, Φ が 0.6 と 0.5 では火炎面形状が連続的であった δ_H が 0.8 と 1.0, Φ が 0.8 では燃焼速度の大きさに関わる燃焼器の安全上の理由から δ_H が 0.0~0.8 の範囲とした.

また, 表 1 の混合気の乱流燃焼速度特性を把握するために, 既報(Kido, et al., 1999, 2002) (中原 他, 2012)と同様に, 乱流燃焼速度 S_T は, $S_T/S_{L0} \approx (dp/dt)_T / (dp/dt)_{L0}$ の関係から算出した(Babkin, et al., 1978). ここで, 添え字 T は乱流燃焼, $L0$ は層流燃焼を表す.

2・3 局所火炎伝ば特性解析方法

本研究では, 乱流燃焼速度に与える乱流火炎の局所燃焼特性の影響を検討するために, 既報(Nakahara, et al., 2009)(中原他, 2012)と同様の手法で, まず火炎形状特性として局所火炎曲率 $1/r$ および火炎伝ば特性として局所燃焼速度と相関関係があると考えられる換算局所火炎変位速度 S_F の定量化を行った.

ここでは, 解析法の概略を次に示す. まず得られた連続火炎断層写真から着目している火炎面を離散点として検出し, 各解析点における $1/r$ を算出する. 本解析では, 未燃混合気側に凸な火炎曲率を正とした. 次に, 図 3(a)

に示すように、着目している火炎面 1 と、連続する火炎面 2 から、局所火炎伝ば速度(既燃ガスに関する局所火炎変位速度) V_F を算出する。ここで、二枚の画像の時間間隔が短いことから、火炎素面の移動方向は、火炎面 1 上の解析点から法線ベクトル方向に火炎が伝ばしたと仮定し、法線ベクトルと火炎面 2 が交わる点までの距離から V_F を算出した。さらに、換算局所火炎変位速度(未燃混合気に関する局所火炎変位速度) S_F は次式により求めた。

$$S_F = (\rho_b / \rho_u) \cdot V_F \quad (3)$$

ここで、 ρ_b , ρ_u は各々既燃ガス、未燃混合気の密度であり、 ρ_b は化学平衡計算による定圧断熱燃焼温度により算出した。なお、本研究で得られる S_F は、火炎の三次元的挙動を考慮すると小さく見積もっている可能性があるが、後述のように得られた火炎面に三次元的な挙動は観察されていないこと(図 5 参照)、および上述のように基本的に外向きに球状に伝ばする乱流火炎の中心断面を観察していることより、各火炎素面は法線方向に伝ばすると仮定し算出した。

また、これまでに既報(Nakahara, et al., 2009)(中原他, 2012)で議論してきたように、乱流火炎から得られた S_F は、概ね乱流火炎の局所燃焼速度特性を評価できる重要な因子の一つの値と考えられる。これは、本研究では等方的な定常乱れ場を得られる定容燃焼器を使用していること。また、得られた乱流火炎での V_F の平均値は、 u' の概ね 3 から 20 倍程度の値を示すことから、 S_F へ与える火炎面近傍の流れの影響は最大で 30%程度と推測できるが、上述のように等方的な乱れ場であるためにガス流速変動の影響と思われる火炎面が前進後進を繰り返すような挙動は観察されていない(図 5 参照)。しかしながら、真の局所燃焼速度の算出には火炎面近傍の流れ場を把握することが必要(Furukawa and Williams, 2003)であるが、本研究での乱れ場の計測は非燃焼場のみであり、 S_F には考慮していない。

さらに、火炎伝ば進行とともに上昇する燃焼室内圧力や火炎サイズの影響を取り除くため既報(Nakahara, et al., 2009)(中原他, 2012)と同様の手法を用いた。すなわち、 S_F の評価に際しては、火炎進行度(R_A/R_C)³ が約 0.018 となる、ほぼ同一の体積燃焼割合時の火炎面のみを解析対象とした(図 5 参照)。ここで、図 3(b)に示すように R_A および R_C (=7.79 cm) は各々火炎断層写真から得られる既燃部断面積および使用した燃焼室容積の各々の等価半径を表す。

なお、 S_F や $1/r$ に関する火炎断層写真の解析対象は、その対称性より燃焼室中央より上方のみとした。ただし、 S_F に浮力が影響することがわずかながら予測できるが、燃焼時間が数十 ms と短いことから本研究では考慮していない。また、10組の乱流火炎面から得られる解析点総数は、相対的な乱れ強度が弱い $u'/S_{L0}=0.23$ でも 2900 個以上になる。

3. 実験結果および考察

3・1 乱流燃焼速度特性

図 4 に、層流燃焼速度で無次元化した乱れ強度 u'/S_{L0} と乱流燃焼速度 S_T/S_{L0} との関係を示す。なお、 u'/S_{L0} は乱流燃焼特性に影響を与えることで知られる相対的な乱れ強度または化学反応特性時間と乱流混合特性時間の比を表す(Andrews, et al., 1975)(Filatyev, et al., 2005)(Weiß, et al., 2008)。また、図 4 中の誤差棒は標準偏差を表す。

ここで、以下で同一 u'/S_{L0} での実験値を議論する際は、例えば図 4 および表 1 からわかるように同一 u'/S_{L0} での S_T/S_{L0} 値は存在しないが、各混合気の二つの乱流火炎の実験値を一次近似(図 4 中の直線)しその近辺であれば線形的に外挿し議論できると仮定して、実験値から外挿した同一 u'/S_{L0} での値として検討する。

図 4 から、 S_{L0} を 25cm/s に揃えた混合気を使用した場合(Kido, et al., 2002)と同様に、少なくとも $\Phi=0.8$ では、外挿した同一 u'/S_{L0} での S_T/S_{L0} は、水素の添加量 δ_H が増えると増大する傾向にあることがわかる。さらに、 $\Phi=0.8$ では、 δ_H が 0.0~0.5 までに比べて δ_H が 0.5 から 0.8 へ水素添加量が増えた場合の方が、 u'/S_{L0} にともなう S_T/S_{L0} の増大量が大きい傾向にあることもわかる。

一方、図 4 で同じ $\delta_H=0.8$ の混合気で比較すると、外挿した同一 u'/S_{L0} での S_T/S_{L0} には、プロパン-空気混合気の希薄可燃限界以下の $\Phi=0.5$ と 0.6 では顕著な差異は観察できない。さらに、希薄可燃限界以下の $\Phi=0.5$ と 0.6 のプロパン-空気混合気でも、大量の水素の添加により燃焼可能となり、その乱流燃焼速度は少なくとも u'/S_{L0} が 3.0 程度まで線形的に増大し乱流燃焼速度特性も改善する傾向を示す。

Fig. 5 Temporal evaluations of upper part of flame front contours for turbulent flames

[Images photographed every: 0.5 ms for (a), and 0.25 ms for (b)&(c)].

3・2 換算局所火炎変位速度特性

図5に、得られた乱流火炎面の時系列に変化する等値面の一例として、当量比 $\Phi=0.8$ で水素添加量 δ_H が 0.0 と 0.8 の場合、 $\Phi=0.6$ で $\delta_H=0.8$ の場合の乱流火炎面の時系列変化をそれぞれ示す。図5中、ベクトルを示した火炎面は、 $(R_A/R_C)^3$ が約 0.018 であり、赤線は正曲率形状部分での、また青線は負曲率部分での火炎伝ばベクトルをそれぞれ示す。

図5から、 $\Phi=0.8$ の混合気で相対乱れ強度がほぼ等しい ($u'/S_{L0} \approx 1$) のに比べ、 u'/S_{L0} が 1.46 と大きな $\Phi=0.6$ の方が、火炎面がより大きく湾曲する傾向にあることがわかる。しかし、概ね連続した火炎面を有し、火炎面のまわり込みのような火炎の三次元的な挙動は観察されなかった。

図6に、解析した結果の一例として、図5と同じ条件の $\Phi=0.8$ で δ_H が 0.0 と 0.8 の場合、 $\Phi=0.6$ で $\delta_H=0.8$ の場合の混合気に対して、各 10 枚の火炎を解析し得られた、無次元火炎曲率 η_0/r の確率密度関数 pdf、および無次元換算局所火炎変位速度 S_F/S_{L0} を示す。なお図6中の横軸に関しては、 η_0 は (a_0/S_{L0}) で定義され、表1から a_0 値はプロパン混合気に比べ水素混合気の方が大きい、水素添加による S_{L0} の増大量の方が大きいことから、例えば $\Phi=0.8$ の場合、 δ_H が 0.0 から 0.8 に増大すると η_0 は小さくなる傾向にある。

図6から、少なくとも $\Phi=0.8$ の場合、 u'/S_{L0} が 1.0 程度と比較的乱れ強度が弱い領域でも、 δ_H によらず、既報(Kido, et al., 2005)と同様に、層流燃焼時と異なり、 S_F が S_{L0} の2倍程度までの広い範囲に分布する傾向にあることがわかる。すなわち、従来の多くの研究では層流燃焼時と同じであるとされていた乱流火炎の燃焼速度(Andrews, et al., 1975)は、比較的乱れの弱い領域でも層流時と異なる可能性があることが推測できる。さらに、図6(b)と(c)か

Fig. 6 Probability density function of η_0/r and distribution of S_F/S_{L0} for turbulent flames.

ら, u'/S_{L0} の増大にともない, S_F/S_{L0} 値がより広い範囲に分布する傾向にあることもわかる.

また, 図 6 の曲率分布の pdf から, 負曲率側に比べて正曲率側の解析点数が多い傾向が観測できる. なお, その比は小さいものでも 1.4 倍以上あった. すなわち, 2 次元の結果ではあるが乱流火炎の表面積比で考えると, 未燃混合気側に凸な火炎部分は, 既燃ガス側に凸な部分より広く, 乱流燃焼場を支配する重要な部分であると考えられる.

図 7 に, 表 1 の混合気および条件に対して得られた S_F の正曲率火炎部分の平均値 $S_{F,mu}$ および負曲率部分の平均値 $S_{F,mb}$ を S_{L0} で無次元化した値の u'/S_{L0} との関係, および $|S_{F,mu} - S_{F,mb}|/S_{L0}$ 値と u'/S_{L0} との関係を示す. なお, $S_{F,mu}$ および $S_{F,mb}$ は, 対象となる解析点数に基づく単純平均であり, 火炎面形状に著しく凹凸が発生したり, 火炎移動距離が大きくなると, 真の値より誤差が増大することが推測できる(Renou, et al., 2000).

図 7(a)より, 本実験範囲では, 正曲率すなわち未燃混合気側に凸な火炎部分の $S_{F,mu}$ が既燃ガスに凸な火炎部分の $S_{F,mb}$ より大きな値を有する傾向にあること, さらに図 7(b)から, その両者の差異 ($|S_{F,mu} - S_{F,mb}|/S_{L0}$) は, u'/S_{L0} が大きくなると全体的な傾向としては概ね増大していることがわかる. また, $\Phi=0.8$ の混合気では, 層流燃焼時を基点として u'/S_{L0} にともなう ($|S_{F,mu} - S_{F,mb}|/S_{L0}$) の増加率を考えると, δ_H が増大すると大きくなる傾向が観察される. なお, 同じ $\delta_H=0.8$ の混合気では, 外挿して同一 u'/S_{L0} で考えた場合, この差異 ($|S_{F,mu} - S_{F,mb}|/S_{L0}$) には, Φ に依存した顕著な違いは観測されなかった.

この $\Phi=0.8$ の場合に観測された現象について, ルイス数 Le の観点から検討してみる. 表 1 から, δ_H が増大するにともない Le は小さくなり, $0.0 \sim 0.5$ の範囲では $Le \geq 1$ であり, 一方, δ_H が 0.8 では $Le < 1$ になっている. この Le と上述の $\Phi=0.8$ の場合の傾向は, いわゆる Le 効果の概念(Williams, 1985)で説明できると考えられる. すなわち, $Le < 1$ の場合は拡散-熱的不安定性により, 未燃混合気側に凸な部分の燃焼速度が既燃ガスに凸な部分に比べて相対的に増大し, 火炎面の凹凸を発達させる傾向となる. 一方, $Le > 1$ の場合は基本的には火炎面の凹凸の不安定を安定化する方向に作用する. したがって, Le が小さくなるにともない火炎面の凹凸が発達し, すなわち $S_{F,mu}$ と $S_{F,mb}$ に差異が大きくなり, $\Phi=0.8$ の場合のような傾向が観察されたと推測できる. また, 同じ $\delta_H=0.8$ の混合気では, 表 1 から Φ が 0.8 から 0.5 へ変化しても Le は若干小さくなるものの 0.04 程度とその差異は小さく, Le に依存した図 7 のように $S_{F,mu}$ と $S_{F,mb}$ との差異が見られなかったと推測できる.

なお, 図 7 より, $\Phi=0.6$ と 0.5 の場合, 表 1 より Le は δ_H が 0.8 より 1.0 の方が小さいのに対して, 層流燃焼時を起点とした $|S_{F,mu} - S_{F,mb}|/S_{L0}$ の u'/S_{L0} に対する勾配を考えた場合に, その勾配には顕著な差異は観測できない. すなわち, $\Phi=0.8$ の混合気の場合と矛盾するようにも思われる. しかしながら, $\Phi=0.6$ と 0.5 の場合, $\delta_H=0.8$ では u'/S_{L0} が 1.4 以上で, $\delta_H=1.0$ では u'/S_{L0} が 0.5 以下と小さい. したがって, これは, 今後詳細に検討する必要があるが, 上述の Le 効果が顕著に現れる相対乱れ強度 u'/S_{L0} が存在する可能性を示唆していると考えられる.

また, 多成分燃料混合気に関してはいわゆる有効ルイス数(Addabbo, et al., 2002) (Law, et al. 2005)に基づき議論する試みがなされているが, 本研究では Le を単純に式(2)の二つの燃料のモル割合で定義したにも関わらず, 上述

Fig. 7 Variation of $S_{F,mu}/S_{L0}$ and $S_{F,mb}/S_{L0}$ with u'/S_{L0} as functions of Φ and δ_H .

Fig. 8 Variation of $S_{F,m}/S_{L0}$ with u'/S_{L0} as functions of Φ and δ_H .

Fig. 9 Relationship between u'/S_{L0} and $(R_L/R_A)^2$.

のように乱流火炎の換算局所火炎変位速度特性を概ね説明できた。

次に、得られた S_F の平均値 $S_{F,m}$ と u' を S_{L0} で無次元化した値との関係を図 8 に示す。図 8 中の短い直線は、図 4 と同様に、各混合気の二つの乱流火炎の実験値から求めた一次近似線である。

図 8 から、少なくとも $\Phi=0.8$ では、外挿した同一 u'/S_{L0} での $S_{F,m}/S_{L0}$ は、 δ_H が増えると増大する傾向にあること、また δ_H が $0.0 \sim 0.5$ までは比べて δ_H が 0.5 から 0.8 へ水素添加量が増えた時の方が、層流燃焼時を基点とした u'/S_{L0} にともなう $S_{F,m}/S_{L0}$ の増大量が大きい傾向にあることがわかる。さらに同じ $\delta_H=0.8$ で当量比による差異を比較すると、外挿した同一 u'/S_{L0} での $S_{F,m}/S_{L0}$ には、 $\Phi=0.5$ と 0.6 では顕著な差異がないこともわかる。これら図 8 の $S_{F,m}/S_{L0}$ の傾向と、上述の図 4 の乱流燃焼速度特性の S_F/S_{L0} が $\Phi=0.8$ で δ_H の増加とともに増大することや同じ $\delta_H=0.8$ で $\Phi=0.5$ と 0.6 で顕著な差異がない傾向は、概ね一致し、両者は良い相関関係にあることがわかる。したがって、 $S_{F,m}$ は、真の局所燃焼速度ではないが、乱流燃焼場において乱流燃焼速度を決定する重要な因子の一つであることが明らかである(Kido, et al., 2005,2009) (中原他, 2012)。

なお図 8 から、 $S_{F,m}/S_{L0}$ に、 $\Phi=0.8$ の $\delta_H=0.2$ と 0.5 の混合気では顕著な増大は観測されず、 $\delta_H=0.0$ すなわち $\Phi=0.8$ のプロパン-空気混合気では層流燃焼時の S_{L0} より乱流燃焼時の $S_{F,m}$ が若干低下する傾向にある。一方、 $\Phi=0.8$ の $\delta_H=0.8$ および $\Phi=0.5$ や 0.6 の混合気では $S_{F,m}/S_{L0}$ に顕著な増大が観測される。これは、上述した Le 効果および選択拡散効果の影響であると考えられる。すなわち、 $Le < 1$ では、相対的に熱拡散より物質拡散が支配的になる、すなわち、凹凸のある乱流火炎面では Le が小さいほど、希薄側での不足成分である燃料の分子拡散特性が重要となる。つまり、プロパンや酸素に比べ分子拡散特性に優れた水素が、その添加量が多く、さらに Le が小さいほど、選択拡散効果により、上述のように乱流燃焼場を支配する重要な部分となる未燃混合気側に凸な火炎面に相対的に多く拡散し局所燃焼特性が改善すると考えられる。一方、プロパンは酸素より分子量が大きく分子拡散係数が小さいので、プロパンを燃料とする希薄混合気では、未燃混合気側に凸な火炎面に、逆に選択拡散効果により燃料のプロパンより希薄混合気で過剰に存在する酸素が相対的に多く拡散し、当量比がより希薄方向に変化し燃焼速度が低下するため、局所燃焼特性が悪化すると推測できる。なお、ここでは、空気的主要組成である酸素と窒素はほぼ同一の分子拡散特性を有し、未燃混合気側では酸素と窒素の比は変わらないと考える(Kido and Nakahara, 1999)。

3・3 乱流燃焼速度の予測

最後に、本研究で対象にしたプロパン-空気混合気の希薄可燃限界以下を含む水素-プロパン-空気希薄混合気の乱流燃焼速度を予測できるかを既報(中原他, 2013)と同様に次の三手法により試みる。ここでは、乱流燃焼速度の基準値として、上述のように真の局所燃焼速度ではないが本研究で得られた $S_{F,m}$ に着目して検討する。

まず、一般的に、乱流燃焼速度は、消炎の影響がなく連続した火炎面が存在する領域では、乱れにより層流燃

焼時より増加した火炎表面積の増加率 A_T/A_{L0} と、従来は層流燃焼速度とされていた火炎面の燃焼速度 $S_{L,T}$ の積として次式で表されると考える(Andrews, et al.,1975)(Filatyev, et al.,2005)(Weiß, et al.,2008).

$$S_{T,U} = \frac{A_T}{A_{L0}} S_{L,T} \quad (4)$$

ここでは、式(4)の $S_{T,U}$ において、一つ目の手法として $S_{L,T}$ を従来の多くのモデル(Andrews, et al.,1975)と同じく層流燃焼時の S_{L0} とした場合を $S_{T,U0}$ とし、二つ目の手法として $S_{L,T}$ を本研究で乱流燃焼時の火炎の変位速度から得た $S_{F,m}$ とした場合を $S_{T,UF}$ とし算出する。

ただし、式(4)の A_T/A_{L0} 値は、火炎面の三次元性の影響(Tanahashi, et al., 2008)等の詳細な検討は必要ではあるが、既報(中原他, 2013)と同様に $(R_L/R_A)^2$ と仮定し算出する(Filatyev, et al.,2005)(Weiß, et al.,2008) (城戸他, 1998)。ここで、 R_L は二次元火炎断面写真から得られる既燃ガス部周長の等価半径[図3(b)参照]である。図9に、 u'/S_{L0} と得られた $(R_L/R_A)^2$ の関係を示す。なお、 $(R_L/R_A)^2$ は、層流火炎では基本的に1になり、火炎面が小さく湾曲するほど増大することになる。すなわち、 $(R_L/R_A)^2$ は、乱れによる火炎表面積増加率または火炎形状複雑度を表す。図9から、本実験範囲では、 u'/S_{L0} の増加にともない $(R_L/R_A)^2$ は概ね比例的に増大することがわかる。

次に、既報(Kido and Nakahara, 1999)で提案した、基準パラメータとして層流燃焼速度ではなく選択拡散効果を考慮し推定した乱流燃焼場の平均局所燃焼速度 S_L を用いた、次式の乱流燃焼速度整理式の適用を考える。

$$S_{T,M} = \left(S_L + \frac{\sqrt{2}}{2} \alpha \cdot u' \right) (1 - Ka_L^2) \quad \text{for } 0 < Ka_L \leq 0.5 \quad (5)$$

ここで、 α は形状補正係数 $[(L_f + \eta_L)/L_f]^2$ 、 Ka_L は S_L を考慮した Karlovitz 数 $[(u'/\lambda_g) \cdot (\eta_L/S_L)]$ 、 η_L は局所当量比を考慮した予熱帯厚さ $[=a_l/S_L]$ 、 L_f は縦方向積分尺度、 λ_g は Taylor 微細尺度、そして a_l は局所当量比を考慮した混合気の熱拡散係数を表す。なお、提案した式(5)は、基準パラメータとして層流燃焼速度ではなく乱流燃焼場の局所燃焼速度 S_L を用いることにより、燃料の種類の差異によらず包括的に乱流燃焼速度を整理できることを明らかにしている。この乱流燃焼速度整理式の考え方は、火炎片への乱れの影響として、右辺第一括弧の火炎表面積を増大させる燃焼速度の増加効果と右辺第二括弧の火炎伸長による燃焼速度の減少効果が存在し、この両効果のバランスにより乱流燃焼速度が決定され、さらに $Ka_L=1$ の時に消炎に至ると言う簡便なモデルを基にする。

ここでは、三つ目の手法として、式(5)の $S_{T,M}$ において、 S_L を本研究で得た $S_{F,m}$ と仮定し、 $S_{T,MF}$ として算出する。

図10に、上述の三手法で式(4)と(5)から算出した $S_{T,U0}$ 、 $S_{T,UF}$ および $S_{T,MF}$ を Φ が 0.5, 0.6, 0.8 とした場合をそれぞれ示す。なお、図10には実験で得られた S_T も合わせて示した。図10から、 $\Phi=0.8$ の $\delta_H=0.0 \sim 0.5$ では三手法による顕著な差異は観察できないが、それ以外では、同一 u'/S_{L0} では本研究で得られた $S_{F,m}$ を局所燃焼速度とした $S_{T,UF}$ および $S_{T,MF}$ は、ほぼ同等の値を示し、明らかに S_{L0} を基準とした $S_{T,U0}$ に比べて、実験値 S_T を定量的にもよく予測できてい

Fig. 10 Comparison of predictions with measurements of turbulent burning velocities for $\delta_H \text{H}_2 - (1-\delta_H) \text{C}_3\text{H}_8 - \text{air}$ mixtures.

るよう見られる. なお, $\Phi=0.8$ の $\delta_H=0.0\sim 0.5$ で三手法による顕著が観測できなかったのは, Le が1以上と大きく, 図8に示したように乱流燃焼時の S_{Fm} の値に層流燃焼時と顕著な変化がないことに起因している.

以上から, 既報(中原他, 2013)で検証した希釈ガスをアルゴンや窒素とした水素-希釈ガス-酸素理論混合気と同様に, プロパン-空気混合気の希薄可燃限界以下を含む水素-プロパン-空気希薄混合気の乱流燃焼速度は, 図10に示すように S_{L0} ではなく式(4)と(5)に本研究で得られた S_{Fm} を用いることにより, 簡便に予測できる可能性があることは明らかである. ただし, 式(4)で使用した火炎表面積の増加率に $(R_L/R_A)^2$ を用いたことによる誤差の発生, さらに S_{Fm} が真の局所燃焼速度ではない可能性があり, 今後更なる検討は必要である. しかしながら, 既報で提案した式(5)により乱流燃焼速度の予測が可能となれば, 乱流火炎の S_{Fm} に基づく局所燃焼速度特性のモデル化が前提となるが, 消炎限界や積分尺度等の乱れ特性値を考慮することが可能になり, 様々な燃焼器に適用できることが期待できる.

4. 結 論

プロパン-空気混合気の希薄可燃限界以下を含む水素-プロパン-空気希薄混合気の乱流燃焼速度に関して, 当量比 $\Phi(0.5, 0.6, 0.8)$ や水素添加量 δ_H さらに相対的な乱れ強度の u'/S_{L0} の影響に着目し, 二次元火炎断層写真撮影法を用いて乱流火炎の換算局所火炎変位速度 S_F を定量化し検討した. 得られた主な知見を以下に示す.

- (1) 乱流火炎から得られた S_F の平均値を S_{L0} で無次元化した S_{Fm}/S_{L0} は, $\Phi=0.8$ では, δ_H の増加にともない, 概ね増大する傾向を示すことがわかった.
- (2) また, プロパン-空気混合気の希薄可燃限界以下の $\Phi=0.5$ や 0.6 でも, 大量の水素を添加($\delta_H=0.8$)することにより, 乱流火炎の S_{Fm} は層流燃焼時に比べて増大し, その乱流燃焼速度は少なくとも u'/S_{L0} が3程度まで線形的に増大することがわかった.
- (3) S_{Fm}/S_{L0} は, Φ や δ_H さらに u'/S_{L0} の変化に対して, 得られた乱流燃焼速度を S_{L0} で無次元化した S_F/S_{L0} と良い相関関係にあることが確認できた. すなわち, 本研究で得られた S_{Fm} は, 真の局所燃焼速度でない可能性はあるが, 乱流燃焼速度を支配する重要な因子であることがわかった.
- (4) 水素-プロパン-空気希薄混合気の乱流燃焼速度における局所燃焼速度特性の重要性に関して検討するために, 乱流燃焼速度の一般的な定義式[式(4)]と既報(Kido and Nakahara, 1999)で提案する整理式[式(5)]を用いて実験値を予測できるか検証した. その結果, S_{L0} を基準とするのではなく, 本研究で乱流火炎から得られた S_{Fm} を基準値とすると, Φ や δ_H さらに u'/S_{L0} の変化に因らず, 実験値を概ね予測できることがわかった.

謝 辞

終わりに, 本研究の実験を行うにあたり, 愛媛大学院生・藤田侑士君, また愛媛大学技術職員・徳永賢一氏にご協力いただいた. ここに記し, 謝意を表す.

文 献

- Addabbo, R., Bechtold, J.K. and Matalon, M., Wrinkling of spherically expanding flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29 (2002) pp.1527-1535.
- Andrews, G.E., Bradley, D. and Lwakabamba, S.B., Turbulence and turbulent flame propagation - a critical appraisal, Combustion and Flam, Vol.24 (1975), pp.285-304.
- Babkin, V. S., Babushok, V. I. and Suyushev, V. A., Dynamics of turbulent gas combustion in a closed volume, Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol.13, No.3 (1978), pp.291-295.
- Chomiak, J., Longwell, J. P. and Sarofim, A.F., Combustion of low calorific values gases; problems and prospects, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.15(1989), pp.109-129.
- Filatyev, S.A., Driscoll, J.F., Carter, C.D. and Donbar, J.M., Measured properties of turbulent premixed flames for model assessment, including burning velocities, stretch rates, and surface densities, Combustion and Flam, Vol.141(2005), pp.1-21.
- 福永明彦, 石油系燃料を用いた家庭用燃料電池コジェネレーションシステムの開発状況, 日本エネルギー学会誌 85(12) (2006), pp. 948-952.

- Furukawa, J. and Williams, F. A., Flamelet effects on local flow in turbulent premixed burning flames, *Combustion Science and Technology*, Vol.170 (2003), pp. 1835-1858.
- Huang, Y. and Yang, V., Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.35, Issue 4 (2009), pp. 293-364.
- Kashir, B. and Tabejamaat, S., A numerical study on the effects of H₂ addition in non-premixed turbulent combustion of C₃H₈-H₂-N₂ mixture using a steady flamelet approach, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.38(2013), pp.9918-9927.
- 河崎澄, 塩路昌宏, 江口慎吾, 緒方健志, ガスエンジンにおける水素-天然ガス混合燃料の最適利用, 自動車技術会論文集, Vol.34, No.3 (2003), pp.11-16.
- 城戸裕之, 中原真也, 中島健四郎, 池田道彦, 選択拡散効果を考慮した乱流予混合火炎構造の検討, 自動車技術会論文集, Vol. 29, No.3 (1998), pp. 49-54.
- Kido, H., Huang, S., Tanoue, K. and Nitta, T., Improving the combustion performance of lean hydrocarbon, *JSAE Review*, Vol.15, No.2 (1994), pp.165-170.
- Kido, H. and Nakahara, M., A model of turbulent burning velocity taking the preferential diffusion effect into consideration, *JSME International Journal Series B*, Vol.41, No.3 (1999), pp. 666-673.
- Kido, H., Nakahara, M., Hashimoto, J. and Barat, D., Turbulent burning velocities of two-component fuel mixtures of methane, propane and hydrogen, *JSME International Journal Series B*, Vol.45, No.2 (2002), pp.355-362.
- Kido, H., Nakahara, M., Nakashima, K. and Hashimoto, J., Influence of local flame displacement velocity on turbulent burning velocity, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29 (2002), pp.1855-1861.
- Kido, H., Nakahara, M., Nakashima, K. and Hashimoto, J., An experimental study on the local configuration of premixed turbulent flame, *JSME International Journal, Series B*, Vol.46, No.1 (2003), pp.92-99.
- Kido, H., Nakahara, M. and Nakashima, K., A study on the local flame displacement velocity of premixed turbulent flames, *JSME International Journal Series B*, Vol.48, No.1 (2005), pp.164-171.
- Law, C.K., Jomaas, G. and Bechtold, J.K., Cellular instabilities of expanding hydrogen/propane spherical flames at elevated pressure: theory and experiment, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.30 (2005), p.159-167.
- Lewis, B. and von Elbe, G., *Combustion, Flames, and Explosion of Gases*, 3rd ed. (1987), pp.333-361, p.389, Academic Press.
- Muppala, S.P.R., Nakahara, M., Aluri, N.K., Kido, H., Wen, J.X. and Papalexandris, M.V., Experimental and analytical investigation of the turbulent burning velocity of two-component fuel mixtures of hydrogen, methane and propane, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34, No.22 (2009), pp.9258-9265.
- 水嶋教文, LPG-SI エンジンの燃焼特性の把握に基づく高効率化に関する研究, エンジンテクノロジーレビュー, Vol.2, No.5 (2010), pp.64-72.
- 中原真也, 西部祥平, 橋本淳, 阿部文明, 水素-酸素-希釈ガス予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に関する実験的検討, 日本機械学会論文集B編, Vol.78, No.785 (2012), pp. 162-171.
- 中原真也, 西部祥平, 松尾 佳憲, 大元 喜雄, 阿部文明, 水素-酸素-アルゴン理論混合気の乱流燃焼速度に与える局所燃焼速度特性の影響, 日本機械学会論文集B編, Vol.79, No.804 (2013), pp. 1675-1684.
- Nakahara, M., Shirasuna, T. and Hashimoto, J., Experimental study on local flame properties of hydrogen added hydrocarbon premixed flames, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.4, No.1(2009), pp.190-201.
- Renou, B., Boukhalfa, A., Puechiberty, D. and Trinité, M., Local scalar flame properties of freely propagating premixed turbulent flames at various Lewis numbers, *Combustion and Flame*, Vol.123 (2000), pp.507-521.
- Richards, G. A., McMillian, M. M., Gemmen, R. S., Rogers, W. A. and Cully, S. R., Issues for low-emission, fuel-flexible power systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.27(2001), pp.141-169.
- Tanahashi, M., Sato, M., Shimura, M. T. and Miyauchi, T., DNS and combined laser diagnostics of turbulent combustion, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 3, No. 3(2008), pp. 391-409.
- 山本和弘, 丸山昌幸, 小沼義昭, 希薄燃焼に及ぼす水素添加の効果, 日本機械学会論文集B編, Vol.64, No.622 (1998), pp. 1919-1924.
- Weiβ, M., Zarzalís, N. and Suntz, T., Experimental study of Markstein number effects on laminar flamelet velocity in turbulent premixed flames, *Combustion and Flame*, Vol.154 (2008), pp.671-691.
- Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., Benjamin/Cummings Publishing Co. (1985), p.349.

References

- Addabbo, R., Bechtold, J.K. and Matalon, M., Wrinkling of spherically expanding flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29 (2002) pp.1527-1535.
- Andrews, G.E., Bradley, D. and Lwakabamba, S.B., Turbulence and turbulent flame propagation - a critical appraisal, Combustion and Flame, Vol.24 (1975), pp.285-304.
- Babkin, V. S., Babushok, V. I. and Suyushev, V. A., Dynamics of turbulent gas combustion in a closed volume, Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol.13, No.3 (1978), pp.291-295.
- Chomiak, J., Longwell, J. P. and Sarofim, A.F., Combustion of low calorific values gases; problems and prospects, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.15(1989), pp.109-129.
- Filatyev, S.A., Driscoll, J.F., Carter, C.D. and Donbar, J.M., Measured properties of turbulent premixed flames for model assessment, including burning velocities, stretch rates, and surface densities, Combustion and Flame, Vol.141(2005), pp.1-21.
- Fukunaga, A., Development of PEFC cogeneration systems powered by petroleum fuels for residential use, The Japan Institute of Energy, 85(12) (2006), pp. 948-952 (in Japanese).
- Furukawa, J. and Williams, F. A., Flamelet effects on local flow in turbulent premixed burning flames, Combustion Science and Technology, Vol.170 (2003), pp. 1835-1858.
- Huang, Y. and Yang, V., Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.35, Issue 4 (2009), pp. 293-364.
- Kashir, B. and Tabejamaat, S., A numerical study on the effects of H₂ addition in non-premixed turbulent combustion of C₃H₈-H₂-N₂ mixture using a steady flamelet approach, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.38(2013), pp.9918-9927.
- Kawasaki, K., Shioji, M., Eguchi, S. and Ogata, K., Optimal use of hydrogen and natural-gas blended fuel in a gas engine, JSAE Transaction, Vol.34, No.3 (2003), pp.11-16 (in Japanese).
- Kido, H., Nakahara, M., Nakashima, K. and Ikeda, M., A study of turbulent flame structure in premixed mixtures taking the preferential diffusion effect into consideration, JSAE Transaction, Vol. 29, No.3 (1998), pp. 49-54 (in Japanese).
- Kido, H., Huang, S., Tanoue, K. and Nitta, T., Improving the combustion performance of lean hydrocarbon, JSAE Review, Vol.15, No.2 (1994), pp.165-170.
- Kido, H. and Nakahara, M., A model of turbulent burning velocity taking the preferential diffusion effect into consideration, JSME International Journal Series B, Vol.41, No.3 (1999), pp. 666-673.
- Kido, H., Nakahara, M., Hashimoto, J. and Barat, D., Turbulent burning velocities of two-component fuel mixtures of methane, propane and hydrogen, JSME International Journal Series B, Vol.45, No.2 (2002), pp.355-362.
- Kido, H., Nakahara, M., Nakashima, K. and Hashimoto, J., Influence of local flame displacement velocity on turbulent burning velocity, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29 (2002), pp.1855-1861.
- Kido, H., Nakahara, M., Nakashima, K. and Hashimoto, J., An experimental study on the local configuration of premixed turbulent flame, JSME International Journal, Series B, Vol.46, No.1 (2003), pp.92-99.
- Kido, H., Nakahara, M. and Nakashima, K., A study on the local flame displacement velocity of premixed turbulent flames, JSME International Journal Series B, Vol.48, No.1 (2005), pp.164-171.
- Law, C.K., Jomaas, G. and Bechtold, J.K., Cellular instabilities of expanding hydrogen/propane spherical flames at elevated pressure: theory and experiment, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.30 (2005), pp.159-167.
- Lewis, B. and von Elbe, G., Combustion, Flames, and Explosion of Gases, 3rd ed. (1987), pp.333-361, p.389, Academic Press.
- Muppala, S.P.R., Nakahara, M., Aluri, N.K., Kido, H., Wen, J.X. and Papalexandris, M.V., Experimental and analytical investigation of the turbulent burning velocity of two-component fuel mixtures of hydrogen, methane and propane, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.22 (2009), pp.9258-9265.
- Mizushima, N., A study on high efficiency of an LPG-SI engine based on understanding of its combustion characteristics, Engine technology review, Vol.2, No.5 (2010), pp.64-72 (in Japanese).
- Nakahara, M., Nishibe, S., Hashimoto, J. and Abe, F., An experimental study on local flame displacement velocity of hydrogen-oxygen-dilution gas premixed turbulent flames, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.78, No.785 (2012), pp.162-171 (in Japanese).
- Nakahara, M., Nishibe, S., Matsuo, Y., Omoto, Y. and Abe, F., Effects of local flame displacement velocity on turbulent burning velocity for stoichiometric H₂-O₂-Ar mixtures, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.79, No.804 (2013), pp. 1675-1684 (in Japanese).

- Nakahara, M., Shirasuna, T. and Hashimoto, J., Experimental study on local flame properties of hydrogen added hydrocarbon premixed flames, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.4, No.1(2009), pp.190-201.
- Renou, B., Boukhalfa, A., Puechiberty, D. and Trinité, M., Local scalar flame properties of freely propagating premixed turbulent flames at various Lewis numbers, *Combustion and Flam*, Vol.123 (2000), pp.507-521.
- Richards, G. A., McMillian, M. M., Gemmen, R. S., Rogers, W. A. and Cully, S. R., Issues for low-emission, fuel-flexible power systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.27(2001), pp.141-169.
- Tanahashi, M., Sato, M., Shimura, M. T. and Miyauchi, T., DNS and combined laser diagnostics of turbulent combustion, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 3, No. 3(2008), pp. 391-409.
- Yamamoto, K., Maruyama, M. and Onuma, Y., Effects of hydrogen addition on lean combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.622 (1998), pp. 1919-1924 (in Japanese).
- Weiß, M., Zarzalis, N. and Suntz, T., Experimental study of Markstein number effects on laminar flamelet velocity in turbulent premixed flames, *Combustion and Flam*, Vol.154 (2008), pp.671-691.
- Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., Benjamin/Cummings Publishing Co. (1985), p.349.