

層流燃焼速度を揃えた低温度希薄水素予混合火炎の火炎構造

橋本 淳*

城戸秀樹**

福田昌准*

Flame Structure of Low Temperature Flames of Premixed Lean Hydrogen Mixtures Having nearly the Same Laminar Burning Velocity

Jun HASHIMOTO, Hideki KIDO and Masanori FUKUDA

In this study, combustion characteristics and flame structures of low temperature flames of lean hydrogen mixtures are investigated by chemical kinetics computations. Several mixtures having nearly the same laminar burning velocities of 15, 25 and 35cm/s are prepared by adding nitrogen to hydrogen-oxygen mixtures with equivalence ratios ranging from 0.3 to 0.9. Initial pressures are varied from 1 to 4 atm at the initial temperature of 298K. As a result, it is clarified that low temperature reactions (R05: $H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$, R06: $H+HO_2 \rightleftharpoons OH+OH$, R04: $H_2+OH \rightleftharpoons H_2O+H$) are dominative in these flames regardless of the initial pressures, however, there are differences in flame structures and combustion characteristics depending on the equivalence ratio.

Key Words: Hydrogen, Premixed Combustion, Lean-Burn Engine, Low Temperature Flame, Chemical Kinetics

1. はじめに

高効率かつクリーンな次世代エンジンとして、水素燃焼機関が着目されている。水素-空気予混合燃焼は CO_2 フリーであるものの、その高い燃焼温度により NO_x 排出の問題が残る。そのため、希薄燃焼の利用、もしくはある種のガスで高度に希釈し、燃焼温度を低下させることによって NO_x 排出量を低減する必要がある。これらの条件においては、当量比の低下、希釈度の増加に伴い層流燃焼速度は低下する。層流燃焼速度は機関性能を支配する乱流燃焼速度の基本因子^[1-3]と考えられ、その基礎的性質、火炎構造を把握することは重要な課題である。

著者らはこれまで、気体燃料に対する乱流燃焼速度計測実験^[4]、また火炎伝ば特性の実験的な解析^[5]を行い、層流燃焼速度を揃えた希薄水素予混合気の場合、選択拡散効果により乱流燃焼特性改善効果が得られること、また、当量比が小さいほどその効果は大きいことを明らかにしてきた。優れた拡散特性を持つ水素は乱流火炎面において局所燃焼速度を増加させ、乱流燃焼速度や消炎限界に大きな影響を及ぼす。一方、城戸・中原らによる近年の研究^[6, 7]から、より希薄な領域においてはその改善効果が低下すること、また、異なる乱流火炎形状を有することが示された。当量比 0.5 程度を境に局所燃焼速度は減少傾向に転じており、選択拡散効果、Markstein 数の観点から検討が試みられている。また、燃焼機構変化

の可能性についても指摘されている。

化学反応は温度に強く依存した現象である一方、水素火炎の伝ばは次のような過程を持つとされている。火炎帯内の素反応機構は 1000K 程度を境に大きく二分され、低温部における収支はほぼ " $2H_2+O_2=2H_2O$ "、高温部における収支は " $3H_2+O_2=2H_2O+2H$ " と表される。すなわち、高温部で大量に生成する H 原子が低温部に拡散して化学エネルギーを輸送し、火炎伝ばが継続する。一方、低温度の火炎ではこのバックサポート効果が減少する可能性がある。バックサポート効果が減少した低温度火炎の場合、素反応に立ち入らず、また量論比近辺の火炎構造に基づき議論されてきた従来の手法では、乱流火炎の伝ば機構、燃焼の安定性等を説明できない可能性がある。

そこで、本研究では非常に希薄、もしくは大量に希釈された、低温度希薄水素予混合火炎の基礎的性質を素反応的観点から整理するため、対空気、また窒素希釈により層流燃焼速度を揃え、当量比を変化させた水素火炎に対し、反応動力学計算を実施する。一次元予混合伝ば火炎および対向流予混合火炎に対する解析結果より、低温度希薄水素予混合火炎の燃焼機構、また初期圧力や火炎伸張が燃焼特性に及ぼす影響について考察する。

2. 計算方法

2.1 一次元予混合伝ば火炎

一次元予混合伝ば火炎の計算には PREMIX^[8]を用いた。定常一次元火炎の支配方程式(質量, エネルギー, 化学種の保存式および理想気体の方程式)を次

原稿受付 平成 16 年 8 月 31 日

*津山工業高等専門学校 機械工学科

**宇部工業高等専門学校 機械工学科

に示す。

$$l = \rho u A \quad (1)$$

$$l \frac{dT}{dx} - \frac{1}{C_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) + \frac{A}{C_p} \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k = 0 \quad (2)$$

$$l \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) - A \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (3)$$

$$f = \frac{P \bar{W}}{RT} \quad (4)$$

ここで、 x は空間座標、 \dot{M} は質量流束、 ρ は密度、 u は速度、 T は温度、 Y_k は k 成分化学種の質量分率、 W_k は分子量、 \bar{W} は混合気のみ分子量、 R は一般ガス定数、 C_p は混合気の定圧比熱、 h_k はエンタルピー、 λ は熱伝導率、 $\dot{\omega}_k$ は化学種の正味生成速度、 V_k は拡散速度、 A は火炎断面積を表す。拡散速度はフィックの法則により求めた。多成分系拡散係数 D_{km} 、比熱、熱伝導率等の熱力学物性値はCHEMKIN^[8]により算出した。また、層流燃焼速度は冷境界における流速として定義される。水素-酸素を任意量の窒素で希釈しながら計算を行い、所定の燃焼速度を有する混合気組成を決定、火炎構造の整理を行った。

2.2 対向流予混合火炎

本研究では火炎伸張が低温度希薄水素予混合火炎に与える影響を明らかにするため、対向流予混合火炎の数値計算を実施した。計算にはOPPDIF^[8]を用いた。火炎の模式図を図1に示す。上下のバーナから同組成の予混合気を噴出することにより、よどみ面側に伸張を受けた双子火炎が形成される。本研究はこの一方を解析対象とした。OPPDIFでは流れはポテンシャル流とし、対称軸に沿って相似変換により得られた、質量、運動量、エネルギー、化学種の一次元保存方程式を解く。本研究ではノズル間距離を2cmとし、ノズル出口の流速を変化させることによって火炎伸張率を制御した。物性値は一次元

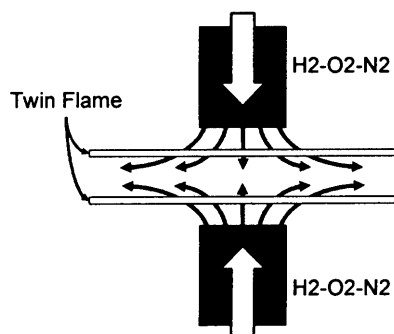


Fig. 1 Schematic of Counter Flow Burner Configuration

予混合伝ば火炎と同様にCHEMKINにより算出した。

なお、すべての計算は初期温度298Kにて実施した。また、輻射は考慮していない。

2.3 素反応機構

本研究では、 H_2 、 O_2 、 H_2O 、 H 、 O 、 OH 、 HO_2 、 H_2O_2 、 N_2 の9化学種を考慮し、GUTHEIL^[9]、越^[10]、辻村^[11]らによる素反応機構を用いて解析を行った。GUTHEILらの機構を表1に示す(頻度因子等のパラメータについては省略する)。

各素反応の反応速度定数 k_{fi} は次の修正アレニウスの式により求められる。

$$k_{fi} = A_i T^{\beta_i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad (5)$$

ここで、 A_i は i 番目の素反応における頻度因子、 β_i は温度次数、 E_i は活性化エネルギーであり、逆反応の速度定数 k_{ri} は平衡定数より算出する。なお、圧力依存性を有する反応に対してはLINDEMANNの手法を適用した。

図2に、各素反応機構を用いてPREMIXにより求めた希薄水素-空気予混合気の層流燃焼速度を当量

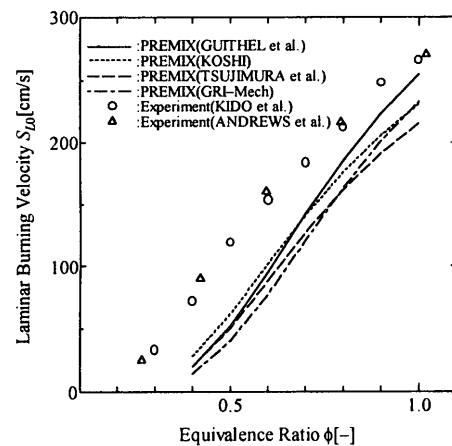


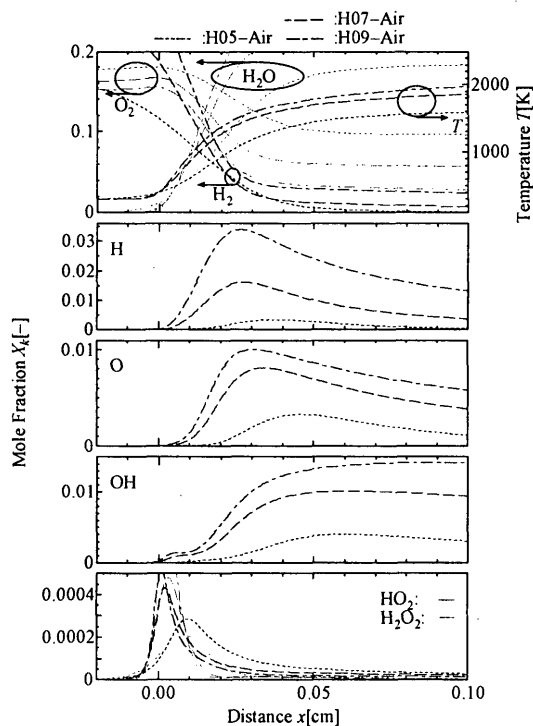
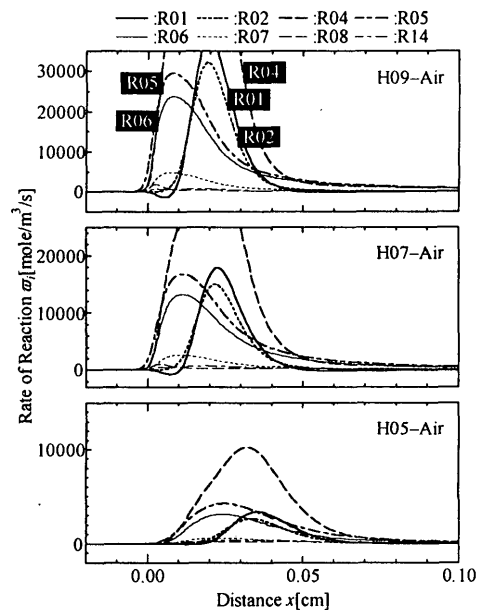
Fig. 2 Calculated and Experimental Results of Laminar Burning Velocities (H_2 -Air Mixtures, $P_0=1\text{atm}$)

Table 1 Reaction Mechanism

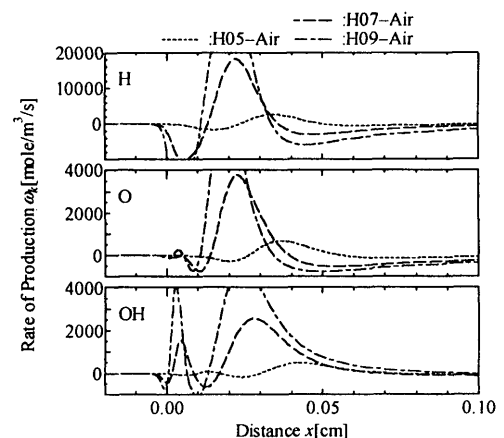
R01 $H+O_2 \rightleftharpoons OH+O$	R11 $HO_2+HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2+O_2$
R02 $H_2+O \rightleftharpoons OH+H$	R12 $H_2O_2+M \rightleftharpoons OH+OH+M$
R03 $H_2O+O \rightleftharpoons OH+OH$	R13 $H_2O_2+OH \rightleftharpoons H_2O+HO_2$
R04 $H_2+OH \rightleftharpoons H_2O+H$	R14 $O+HO_2 \rightleftharpoons OH+O_2$
R05 $H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$	R15 $H+HO_2 \rightleftharpoons O+H_2O$
R06 $H+HO_2 \rightleftharpoons OH+OH$	R16 $H+O+M \rightleftharpoons OH+M$
R07 $H+HO_2 \rightleftharpoons H_2+O_2$	R17 $O+O+M \rightleftharpoons O_2+M$
R08 $OH+HO_2 \rightleftharpoons H_2O+O_2$	R18 $H_2O_2+H \rightleftharpoons H_2O+OH$
R09 $H+H+M \rightleftharpoons H_2+M$	R19 $H_2O_2+H \rightleftharpoons HO_2+H_2$
R10 $H+OH+M \rightleftharpoons H_2O+M$	R20 $O+OH+M \rightleftharpoons HO_2+M$
	R21 $H_2+O_2 \rightleftharpoons OH+OH$

Table 2 Properties of Mixtures

Mixture		ϕ [-]	Mole Fraction x_k [-]			S_{L0} [cm/s]	T_b [K]	η_0 [mm]	Le [-]	C_p [J/mol/K]
			H ₂	O ₂	N ₂					
Group I	H05-Air	0.50	0.174	0.174	0.653	52.53	1644.6	0.065	0.471	29.155
	H07-Air	0.70	0.227	0.162	0.610	142.80	2020.2	0.027	0.535	29.137
	H09-Air	0.90	0.274	0.152	0.573	223.70	2302.6	0.019	0.593	29.121
Group II	H03-15N	0.30	0.138	0.230	0.631	15.01	1381.6	0.209	0.431	29.177
	H05-15N	0.50	0.137	0.137	0.727	15.02	1375.3	0.207	0.430	29.159
	H07-15N	0.70	0.136	0.097	0.767	15.03	1372.4	0.207	0.430	29.151
	H09-15N	0.90	0.135	0.075	0.790	15.01	1367.7	0.206	0.430	29.147
	H03-25N	0.30	0.150	0.251	0.599	25.01	1469.6	0.129	0.444	29.177
	H05-25N	0.50	0.149	0.149	0.702	25.02	1466.4	0.129	0.444	29.158
	H07-25N	0.70	0.148	0.106	0.746	25.02	1464.4	0.128	0.444	29.150
	H09-25N	0.90	0.147	0.082	0.771	25.02	1457.3	0.128	0.443	29.145
	H03-35N	0.30	0.161	0.268	0.572	35.01	1543.5	0.095	0.455	29.178
	H05-35N	0.50	0.159	0.159	0.682	35.02	1540.9	0.094	0.455	29.157
	H07-35N	0.70	0.158	0.113	0.728	35.03	1538.6	0.094	0.455	29.148
	H09-35N	0.90	0.157	0.087	0.755	35.02	1531.2	0.094	0.454	29.143

Fig. 3 Mole Fraction (Group I Mixtures, $P_0=1$ atm)Fig. 4 Rate of Reaction (Group I Mixtures, $P_0=1$ atm)

比に対して示す。図には、ANDREWS^[12]および城戸^[13]らによる実験結果、また、天然ガスを対象とした反応機構 (GRI-Mech 3.0^[14]) により求めた計算結果も併せて掲載した。図から、計算値は実験値に比べて全体的に低い値を示すものの、定性的にはその傾向を捉えていることがわかる。また、反応機構によって大きな差異は見られない。本研究で得られた主要な知見についても、越、辻村いずれの機構を用いた場合にも同様の傾向が見られたため、以下ではGUTHEILらの機構に基づいて議論する。

Fig. 5 Rate of Production (Group I Mixtures, $P_0=1$ atm)

3. 解析対象

表 2 に、本研究で用いた水素予混合気を示す。表中、 ϕ は当量比、 x_k はモル分率、 S_{L0} は層流燃焼速度、 T_b は EQUIL^[8]により求めた断熱火炎温度、 η_0 は温度伝達率と層流燃焼速度から概算される予熱帯厚さ、 Le_0 は不足成分に基づくルイス数である。

Group I は当量比を 0.2 刻みで変化させた対空気（酸素-空気）予混合気であり、0.4 より小さな当量比では収束解を得ることができなかった。一方、Group II は水素-酸素を任意量の窒素で希釈することにより、層流燃焼速度を 15, 25 および 35cm/s に揃えた混合気である。表から、平面火炎の解析により層流燃焼速度を揃えたこれらの混合気では、初期の酸素量はほぼ変わらず、酸素：窒素比が大きく変化していることがわかる。また、ルイス数はほぼ同一値を示しており、断熱火炎温度にも大きな差異は見られない。

4. 計算結果および考察

4.1 対空気混合気 (Group I)

表 3~5 に Group I 混合気の化学種分布、主要な素反応の反応速度、H, O, OH の正味生成速度を示す。図から、当量比の減少により火炎温度が低下するに連れて、火炎構造が大幅に変化していることがわかる。

まず、量論比近辺の対空気火炎においては、火炎後部の高温部において R01-R02-R04 からなる高温反応連鎖担体である H 原子を大量に生成、火炎前面で拡散により後流から供給された H 原子によって、

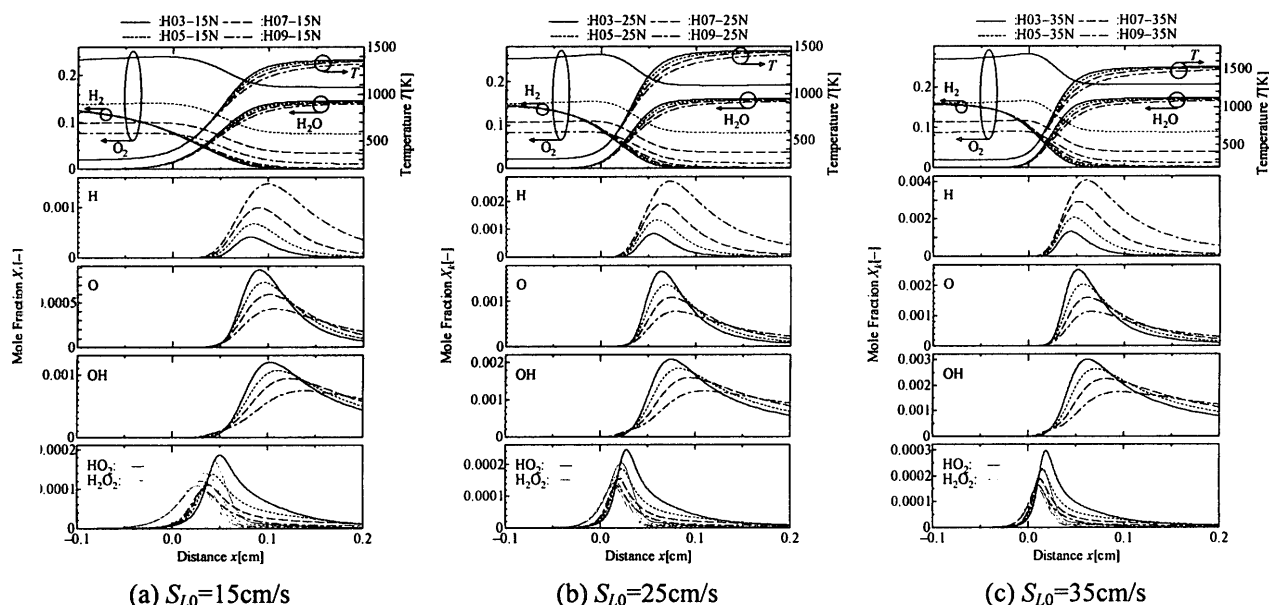
R05-R06-R04 からなる低温反応が保持されている。

しかしながら、図 4 に見られるように、当量比 0.7 程度を境に両機構の分離が明確でなくなり、低温反応機構の支配性が増していることがわかる。また、図 5 から、当量比 0.5 においては H, O, OH の正味生成速度分布が極端に低下していること、他の当量比において観察される OH の二段反応性（正味生成速度）が低下していることがわかる。これは、火炎前面への H 原子供給量が不足しているためと推察される。

4.2 等層流燃焼速度混合気 (Group II)

図 6 に Group II 混合気における化学種分布を示す。図から、これらの混合気は各層流燃焼速度においてほぼ等しい断熱火炎温度を有するにもかかわらず、その温度履歴はやや異なった過程を示すことがわかる。当量比が小さいほど、火炎帯内における温度上昇率が高い。また、O および OH は当量比が低いほど高いピークを持つ一方、その分布幅は減少している。火炎を支えるべき H 原子は、当量比の低下に伴い、ピーク値、また分布幅共に大幅に減少していることがわかる。

ここで、図 6 から、本研究の範囲では層流燃焼速度によらず、その火炎構造は定性的にほぼ同様の傾向を示すことがわかる。そこで、以下では層流燃焼速度を 15cm/s に揃えた場合の解析結果に基づいて考察する。図 7, 8 に当量比 0.3 および 0.9 の場合について、主要な素反応の反応速度および正味生成速度を示す。図から、いずれの当量比においても低温反応 (R05-R06-R04) が支配的である一方、H09-15N では比較的幅広い領域で反応が進行し、H03-15N では短い区間で急速に進行している様子がわかる。こ

Fig. 6 Mole Fraction (Group II Mixtures, $P_0=1\text{atm}$)

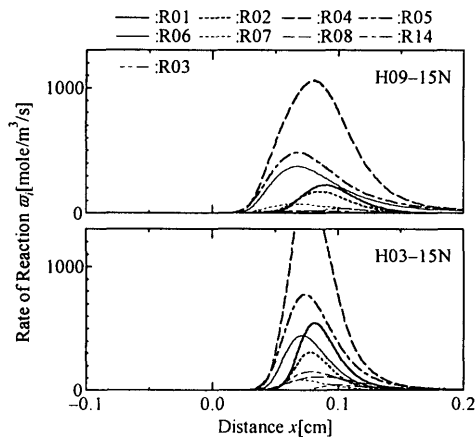


Fig. 7 Rate of Reaction

(Group II Mixtures, $P_0=1\text{atm}$, $S_{L0}=15\text{cm/s}$)

れは、酸素濃度の高い希薄側においては、酸素濃度に依存する R05 の速度が大きくなり、結果として低温反応機構のラジカル消費・生成サイクルが活性化するためと考えられる。



R05 はこの領域で最も高い発熱量を有するため、温度履歴に差異が生じる。ただし、R05 は水素原子濃度にも依存する。H03-15N では R05-R06、さらには温度上昇後の R01 により急速に H 原子を消費するため、図 8 に示すように系内への蓄積量が少ない。一方、H09-15N においては、比較的広範囲において H 原子を生成し、高い拡散速度により火炎前面に到達する。そのため、幅広い領域で反応が進行していると考えられる。また、H09-15N では低温側で若干 OH 生成速度のピークが確認される。このことから、低当量比での H 原子不足が推測できる。なお、H03-15N においては、R08 および R14 も比較的活性化しており、R05 により生成された豊富な HO_2 を介した反応が活発になっていることがわかる。一方、本稿には掲載していないが、火炎最前面においては R11、すなわち HO_2 から H_2O_2 への反応が盛んになっており、高い発熱速度を示した。

乱流燃焼場においては乱れが火炎に影響を及ぼす。乱れのスケールと層流火炎帯厚さに関する検討は DAMKÖHLER^[15] に始まり、KLIMOV^[16]、WILLIAMS^[2, 17, 18]、BALLAL^[19-22]、ABDEL-GAYED^[23] ら等により行われ、火炎モデルが分類されている。そこで、本研究では乱流燃焼モデルの基本パラメータである層流燃焼速度を揃えた Group II 混合気に対して、火炎帯厚さに関する検討を行った。図 9 に、

(6) 式で定義される火炎帯厚さ η_L と、H および HO_2 分布のピーク間距離 η_p および半値幅 η_{hw} から (7) 式で定義した中間生成物帯厚さ η_m を示す。

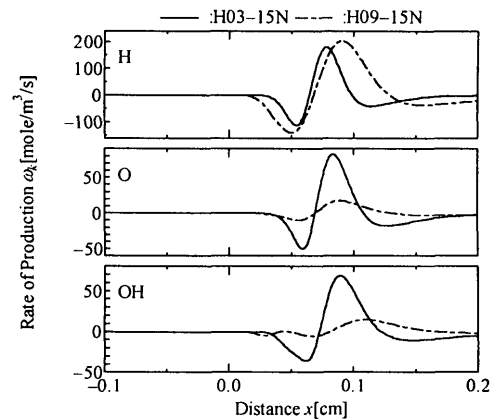


Fig. 8 Rate of Production

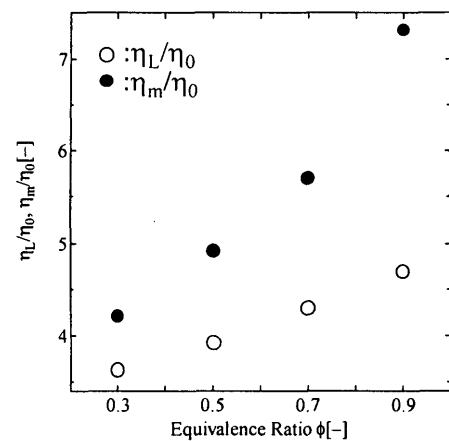
(Group II Mixtures, $P_0=1\text{atm}$, $S_{L0}=15\text{cm/s}$)

Fig. 9 Flame Thickness

(Group II Mixtures, $P_0=1\text{atm}$, $S_{L0}=15\text{cm/s}$)

$$\eta_L = \frac{T_b - T_u}{\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\max}} \quad (6)$$

$$\eta_m = \eta_p + \frac{\eta_{hw,H} + \eta_{hw,HO_2}}{2} \quad (7)$$

ここで T_u は未燃混合気温度、 $(dT/dx)_{\max}$ は温度勾配の最大値であり、PREMIX により計算された温度分布から求めた。各値は予熱帯厚さで無次元化した。

図から、 η_L 、 η_m 共に熱理論から概算される予熱帯厚さ η_0 に比べて大きな値を示すことがわかる。また、表 2 に示すように、予熱帯厚さはこれらの混合気間でほぼ等しい値を有するにも係わらず、 η_L 、 η_m いずれも当量比の増加に伴い増大する傾向があること、特に η_m は η_L に比べてより増大する傾向があることがわかった。

4.3 初期圧力の及ぼす影響

次に、初期圧力が等層流燃焼速度混合気の燃焼速度変化および火炎構造に及ぼす影響について調べた。図 10 に、初期圧力を増加させた場合の燃焼速度変化

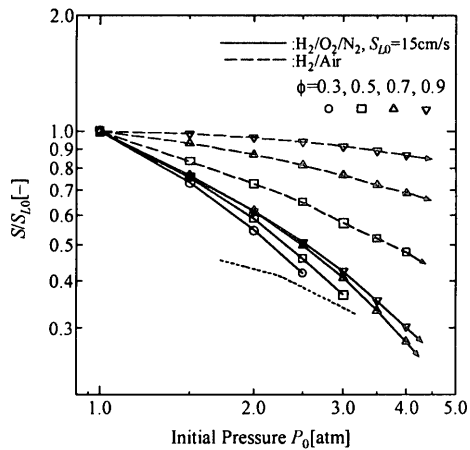


Fig. 10 Effect of Pressure on Burning Velocity

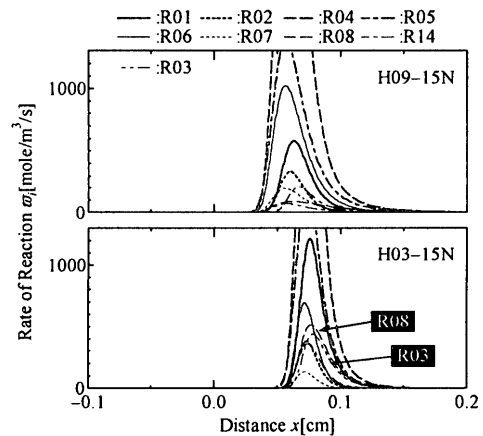


Fig. 12 Rate of Reaction
(Group I Mixtures, $P_0=2.5\text{atm}$, $S_{L0}=15\text{cm/s}$)

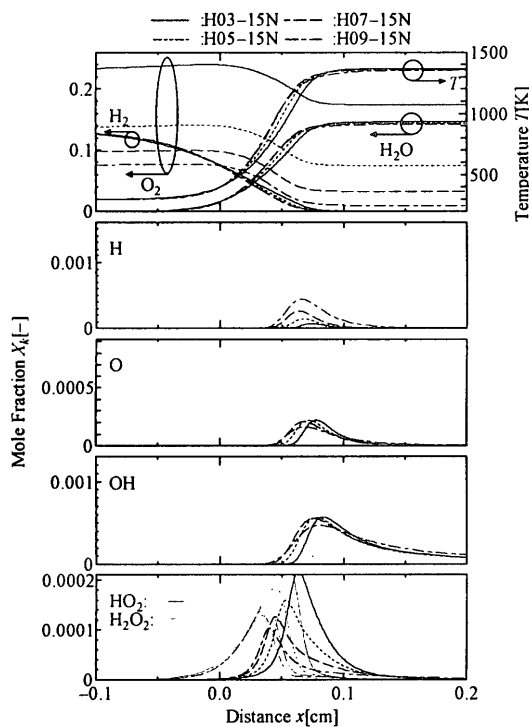


Fig. 11 Mole Fraction
(Group II Mixtures, $P_0=2.5\text{atm}$, $S_{L0}=15\text{cm/s}$)

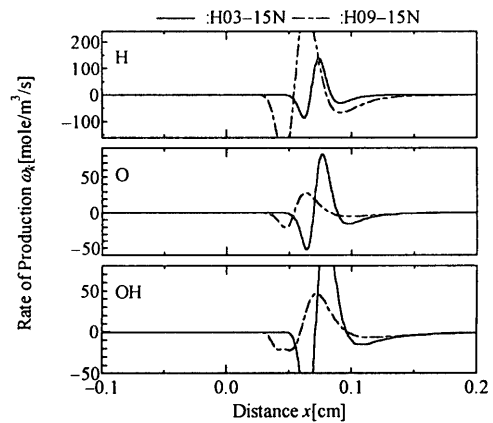


Fig. 13 Rate of Production
(Group II Mixtures, $P_0=2.5\text{atm}$, $S_{L0}=15\text{cm/s}$)

をす。各圧力での燃焼速度 S は大気圧下の値により次元化した。図から、Group II 混合気は Group I 混合気比べて燃焼速度の減少率が大きいこと、また、Group II 混合気間においては、当量比が 0.7 以下において減少率が增大し、火炎が維持可能な範囲が縮小されていることがわかる。

Fig. 11~13 に、初期圧力 2.5atm における化学種分布、主要な反応速度および H, O, OH の正味生成速度を示す。図 11 から、圧力上昇に伴い H, O, OH の分布量は減少、 HO_2 , H_2O_2 の分布量は若干増加する傾向が見られる。反応速度は基本的には大気圧下と同様の傾向が見られる一方、反応機構の分離性がより低下し、低温反応の支配性が増していることがわかる。H 原子の正味生成速度は、大気圧下に比べ

て差異がより拡大しており、連鎖担帯が不足していると推察される。また、当量比 0.3 においては R03 の速度が大きく増加し、R08 と共に OH を介して HO_2 を消費する傾向が見られた。

4.4 火炎伸張の及ぼす影響

多くの燃焼機関では乱流燃焼が用いられている。乱流場では火炎は乱れにより伸張効果を受ける。また、乱れが存在しない場合にも、球状伝ば火炎においては火炎の伝ばに伴い伸張が生じる。城戸・中原らは層流場における球状伝ば火炎の解析⁶⁾から、層流燃焼速度を揃えた希薄酸素系混合気の場合、当量比 0.5 程度を境に Markstein 数が変化し、伸張による燃焼速度変化が増加から減少に転じることを示した。そこで、本研究では OPPDIF を用いて対向流予混合火炎に対する計算を行い、火炎伸張率が層流燃焼速度混合気の燃焼速度変化に及ぼす影響について調べた。

図 1 に示す上下のバーナから、大気圧下、298K において Group II 混合気を噴出させる。ノズル出口の速度は 25cm/s から 530cm/s まで変化させた。伸張火

炎における火炎面，また燃焼速度の定義には曖昧さが残る^[24]．本研究では発熱速度最大の位置を火炎面と定義して解析を行った．伸張火炎の燃焼速度 S は次式で求めることができる．

$$S = \frac{\rho_b u_b}{\rho_u} \quad (8)$$

ここで， u_b は火炎面において既燃ガスに相対的な流速， ρ_b はその場所の混合気密度， ρ_u は未燃混合気の密度である．また，伸張率は火炎面における速度勾配より求め，平面火炎の温度分布から求めた火炎帯厚さと層流燃焼速度により無次元化した．

Group II 混合気に対する解析結果を図 14 に示す．図中， S ， T は伸張を受けた火炎の， S_{L0} ， T_0 は平面火炎の燃焼速度および最高温度である．伸張率が高い領域では双子火炎が接近し，不完全燃焼が発生，最高温度は低下する．図から，いずれの混合気においても火炎伸張率 K の増大に伴い燃焼速度は増加すること，また，不完全燃焼性の小さい低伸張率領域においては，当量比が小さいほど若干高い燃焼速度を示すことがわかる．表 2 に示すように，平面火炎で設定した Group II 混合気間ではほぼ等しい Le を有するため，Markstein 数は同等の値を持つと考えられる．しかしながら，当量比変化に対する層流燃焼速度感度が異なるため，このような差異が生じていると考えられる．一方，城戸・中原らにより球状火炎の解析結果^[6]から示された，当量比 0.5 以下での燃焼速度増加率の低下は見られない．これについては，実火炎での不安定性や燃焼速度計測法等の要因が推察される．また， T/T_0 値により簡易に定義される燃焼率は，特に当量比 0.9 において異なる傾向を示すことがわかる．これは，当量比の増加に伴い火炎帯厚さが増大するためと考えられる．

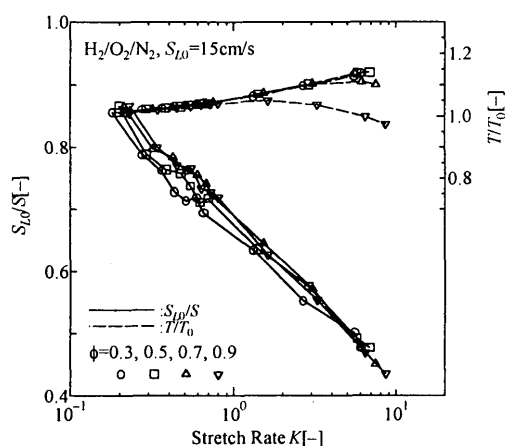


Fig. 14 Effect of Flame Stretch on Burning Velocity

5. 結論

本研究では，対空気，また窒素希釈により層流燃焼速度を揃えた低温度希薄水素予混合火炎に対する反応動力学計算を行い，その基礎的性質について検討した結果，以下の結論を得た．

(1) 対空気混合気では，当量比 0.7 程度を境に火炎構造が大きく変化し，低温反応の支配性が増す．

(2) 窒素希釈により層流燃焼速度を揃えた混合気の場合，本研究の範囲では初期圧力によらず，反応の過程は主として低温反応に支配される．

(3) 一方，これらの混合気間においても，当量比によってその火炎構造，圧力依存性には差異が見られる．

(4) 同一層流燃焼速度混合気では初期水素量がほぼ等しいにも係わらず，当量比が小さいほど，水素原子の系内保有量が減少する．

(5) 火炎伸張が燃焼速度へ及ぼす影響には特徴的な傾向は見られない．ただし，燃焼率は異なった傾向を示す．

謝辞

終わりに，本研究の一部は，平成 15 年度ウエスコ学術振興財団研究助成により実施した．ここに記し，謝意を表す．

参考文献

- [1]STREHLOW, R. A., Combustion Fundamentals, McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [2]WILLIAMS, F. A., Combustion Theory, 2nd Ed., The Benjamin/Cummings, 1985.
- [3]LEWIS, B. and VON ELBE, G., Combustion, Flames, and Explosions of Gases, 3rd Ed., Academic Press, 1987.
- [4]KIDO, H., NAKAHARA, M. and HASHIMOTO, J., A Turbulent Burning Velocity Model Taking Account of the Preferential Diffusion Effect, Proceedings of the 4th International Symposium COMODIA 98, pp. 249-254, 1998.
- [5]KIDO, H., NAKASHIMA, K., NAKAHARA, M. and HASHIMOTO, J., An Experimental Study on the Local Configuration of Premixed Turbulent Flame, JSME International Journal, Ser. B, Vol. 46, No. 1, pp. 92-99, 2003.
- [6]中原，城戸，中島，澄川，希薄水素混合気の乱流燃焼速度特性に関する実験的検討，第 17 回内燃機関シンポジウム前刷集，pp. 297-302, 2002.
- [7]城戸，中原，中島，末廣，澄川，水素予混合乱流燃焼場での平均局所燃焼速度特性，第 41 回燃焼シンポジウム講演論文集，pp. 115-116, 2003.
- [8]KEE, R. J. et al., Reaction Design, Inc., San Diego, CA, 2003.

- [9] G. THEIL, E., BALAKRISHNAN, G. and WILLIAMS, F. A., Structure and Extinction of Hydrogen-Air Diffusion Flames, Reduced Kinetic Mechanism for Applications in Combustion Systems (Eds. Peter, N. and Rogg, B.), Springer-Verlag, pp. 177-195, 1983.
- [10] 水素の高圧燃焼シミュレーション, 燃焼の科学と技術, Vol. 17, pp. 153-162, 2000.
- [11] 村, 徳永, 千田, 藤本, 水素の詳細素反応モデルの適用性に関する研究, 日本機械学会論文集, B編, 70巻, 689号, pp. 2-222, 2004.
- [12] DREWS, G. E. and BRADLEY D., Determination of Burning Velocity by Double Ignition in a Closed Vessel, Combustion and Flame, Vol. 20, pp. 77-89, 1973.
- [13] 戸, 中原, 井上, 水素混合気の乱流燃焼時における選択拡散の効果, 日本機械学会論文集, B編, 62巻, 600号, pp. 98-3204, 1996.
- [14] Lerman, C. T. et al., Gas Research Institute, <http://euler.me.berkeley.edu/gri-mech/>, 2000.
- [15] KMKÖHLER, G., "Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasmischungen", Z. Elektrochemie., Vol. 46, 1940, pp. 601-626.
- [16] DIMOV, A. M., "Laminar Flames in a Turbulent Flow", *Shurnikiye Mekh. Tekhn. Fiz.*, Vol. 3, 1963, pp. 49-58
- [17] WILLIAMS, F. A., "A Review of Some Theoretical Considerations of Turbulent Flame Structure", *Proc. of AGARD Conf.*, 1975, No. 164.
- [18] WILLIAMS, F. A., "Criteria for Existence of Wrinkled Laminar Flame Structure of Turbulent Premixed Flames", *Combust. Flame*, Vol. 26, 1976, pp. 269-270.
- [19] BALLAL, D. R. and LEFEBVRE, A. H., "The Structure and Propagation of Turbulent Flames", *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A* 344, pp. 217-234, 1975.
- [20] BALLAL, D. R., "The Structure of Premixed Turbulent Flame", *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A* 367, pp. 353-380, 1979.
- [21] BALLAL, D. R., "The Influence of Laminar Burning Velocity on the Structure and Propagation of Turbulent Flame", *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A* 367, pp. 485-502, 1979.
- [22] BALLAL, D. R., "Future Development of the Three-Region Model of a Premixed Turbulent Flame, I Turbulent Diffusion Dominated Region 2", *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A* 368, pp. 267-282, 1979.
- [23] ABDEL-GAYED, R. G. and BRADLEY, D., "Combustion Regimes and the Straining of Turbulent Premixed Flames", *Combust. Flame*, Vol. 76, 1989, pp. 213-218.
- [24] 石塚, 定常火炎における火炎伸張とその静的特性, 燃焼研究, 116巻, pp. 49-70, 1999.