

断熱燃焼温度を揃えた 水素・メタン・プロパン予混合火炎に対する火炎伸張の影響

早川晃弘*

橋本 淳**

A Study on Responses of Premixed Flames of Hydrogen, Methane and Propane having the same Adiabatic Flame Temperature to Flame Stretch

Akihiro HAYAKAWA and Jun HASHIMOTO

Recently, a development of the combustor having higher efficiency and being more clean has been required from the viewpoint of environmental problems. In a development process of such a combustor, computer simulation is an effective method for cost reduction. Large Eddy Simulation (LES) is one of the simulation technique of Fluid Dynamics. In recent years, it is attracting a lot of attention in the reason which can reproduce unsteady phenomena. When LES is applied to the flow field with combustion phenomena, it is necessary to give an appropriate combustion model. The flamelet existing in a flow field is affected by hydrodynamic strain. Burning velocity of such stretched flame changes from the value of laminar burning velocity by molecular and thermal diffusion effects. However, the combustion model which can evaluate such an effect adequately is not suggested till now. In this study, a response of burning velocity concerning flame stretch is examined by chemical kinetics computations. Especially, from a point of view of engineering, investigations are performed for premixed flames of hydrogen, methane and propane having the same adiabatic flame temperature. As a result, it is clarified that sensitivities to flame stretch of burning velocity can be explained approximately with mixture properties and ratio of those. Furthermore, in some mixture conditions, it becomes clear that the critical Lewis number play an important role in estimation of response.

Key Words : Premixed Combustion, Internal Combustion Engine, Adiabatic Flame Temperature, Flame Stretch, Markstein Number, Lewis Number, Chemical Kinetics

1. はじめに

近年、石油燃料の枯渇や種々の地球環境問題に対する解決策として、高効率かつクリーンな燃焼器の開発が求められている。そのような非従来型燃焼機の開発コストを削減するためには、計算機を用いたシミュレーションは非常に有効な手段である。現在用いられている主なシミュレーション手法には、RANS (Reynold's Averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation), DNS (Direct Numerical Simulation) がある。RANS は計算に要する時間が短いものの、非定常現象を再現することはできない。一方、DNS は支配方程式を物理現象に関連した最小スケールまで直接計算する。そのため、現象の厳密な理解には有効であるものの、現在の計算機性能では計算に膨大な時間を要し、実機スケールにおける評価は不可

能である。そこで近年、実機スケールにおいて非定常現象が再現可能な LES の有効利用が注目されている。LES においては、エネルギースペクトルに普遍性の観られる領域については格子を設けず、乱れに適切なモデルを与えて計算を行う。このような手法を燃焼場へ適用する場合、設定格子サイズ以下の領域において火炎に作用する乱れの効果を適切にモデル化し、与える必要がある。実用燃焼器内で見られる乱流燃焼場では、化学反応と乱れが干渉し、火炎面は面積増加効果に加え、歪や曲率の影響（火炎伸張）を受け、火炎強度、すなわち混合気の消費特性が変化する。そのため、これらの効果に対する火炎強度の応答特性を整理することは重要な課題となる。現在、主な燃焼モデルとして、Flamelet Concept や渦消散の概念を基本とした種々のモデルが提唱されている¹⁾。しかしながら、非量論まで含めた混合気条件において、伸張に対する燃焼速度の応答特性を適切に評価可能な燃焼モデルは見あたらない。

そこで本研究では、特に工学的観点から、断熱燃焼温度を揃えた希薄気体燃料予混合火炎に対して反

原稿受付 平成 18 年 8 月 31 日

*九州大学 工学部 機械航空工学科 機械工学コース

**津山工業高等専門学校 機械工学科

応動力学計算を行い、火炎伸張が局所的な燃焼速度特性に及ぼす影響について整理を試みる。

2. 計算および解析方法

本研究では、次世代燃料として注目されている水素、天然ガスやバイオガスの主成分であるメタン、気体燃料の範囲においてはその性質が最もガソリンに近いと考えられるプロパンを解析対象燃料とした。また、1章で述べたように、燃料-酸素を希釈することによって断熱燃焼温度を揃えた火炎を作成し、解析を実施する。希釈剤には大気の主成分である窒素を用い、混合気組成は EQUIL²⁾を用いた平衡計算により決定した。ここで、設定する断熱燃焼温度は NO_x の基礎的生成特性に基づき、1500K、1700K および 2000K に設定した。これは、文献³⁾および予備計算結果から、本研究で対象とする希薄予混合火炎においては Thermal NO_x が主要な NO_x 生成機構であり、特に 1700~1800K 以上の高温においてその生成が顕著となるためである。

表1に、本研究で用いた燃料-酸素-窒素混合気の組成を示す。ここで、 ϕ は当量比、 T_b は断熱燃焼温度、 D は多成分系拡散係数であり、添え字の f は燃料成分、 O は酸素を示す。 Le_f は不足成分（本研究の範囲では燃料）の多成分拡散係数に基づくルイス数である。 S_{L0} は PREMIX²⁾により求めた燃焼速度（冷境界流速）、 $\rho_u/\rho_b = T_b/T_u$ （定圧火炎の場合）は火炎前後の密度比を表す。

伸張を受けていない火炎の計算には一次元平面伝ば火炎を対象とした PREMIX²⁾を、伸張を受けた火炎の計算には対向流予混合火炎を対象とした OPPDIF²⁾を用いた。図1に、対向流予混合火炎の模式図を示す。本研究では、上下のノズルから同一組成の混合気を同一流速で噴出させることにより、よどみ面両側に伸張を受けた双子火炎を形成した。火炎に作用する伸張率は、ノズル出口流速を制御することによって変化させた。また、化学反応機構としては、53 化学種、325 段の素反応を考慮した GRI-Mech 3.0⁴⁾を用い、物性値は CHEMKIN²⁾により求めた。

伸張火炎の燃焼速度 S は、酸素の消費速度に基づ

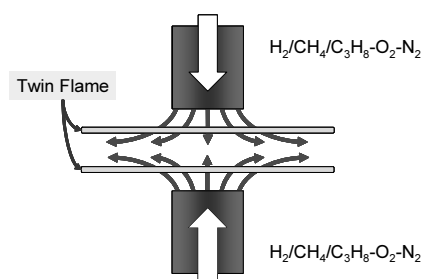


Fig.1 Schematic of Counter Flow Burner Configuration

き (1) 式のように定義し、算出した⁵⁾。

$$S = - \int_1^2 w_{O_2} dx / \rho_1 / (Y_1 - Y_2) \quad (1)$$

ここで、 w_{O_2} は酸素の消費速度、 ρ は密度、 Y は酸素の質量分率を表し、添え字の1はノズル出口、2はよどみ面を表す。また、火炎伸張率は、火炎前面の最大軸方向速度勾配として定義した。

火炎伸張が燃焼速度に及ぼす影響については、CLAVINらの漸近解析により、次の線形性が示されている⁶⁾。

$$S = S^0 - Lk \quad (2)$$

ここで、 S^0 は伸張を受けていないときの燃焼速度、 L はマークシュタイン長さ、 k は火炎伸張を表す。(2)式は、伸張を受けた状態における特性時間を用いて無次元化することにより、次のように変形される。

$$S^0/S = 1 + MaKa \quad (3)$$

ここで、 Ka は無次元伸張であるカーロビッツ数、 Ma はマークシュタイン数であり、無次元伸張に対する燃焼速度の応答感度を表す。本研究では、カーロビッツ数をおおむね0.1から0.4の線形性が観られる範囲内で変化させ、(3)式に基づいてマークシュタイン数を算出した。

3. 結果および考察

3.1 非伸張火炎の燃焼速度特性

Table 1 Properties of Mixtures

Fuel	T_b [K]	ϕ [-]	Mole Fraction x_i [-]			S_{L0} [cm/s]	Le_f [-]	D_f/D_o [-]	ρ_u/ρ_b [-]
			Fuel	O ₂	N ₂				
H ₂	2000	0.4	0.228	0.285	0.487	125.5	0.420	3.791	6.711
		0.7	0.225	0.161	0.614	117.8	0.421	3.605	6.711
		1.0	0.225	0.112	0.663	112.0	-	3.542	6.711
	1700	0.4	0.183	0.228	0.589	51.6	0.399	3.613	5.705
		0.7	0.181	0.129	0.689	49.3	0.400	3.497	5.705
		1.0	0.181	0.090	0.729	49.9	-	3.454	5.705
	1500	0.4	0.154	0.193	0.653	22.1	0.385	3.525	5.034
		0.7	0.153	0.110	0.737	21.1	0.385	3.438	5.034
		1.0	0.153	0.076	0.771	21.6	-	3.406	5.034
	2000	0.4	0.079	0.396	0.525	38.1	0.856	1.184	6.711
		0.7	0.078	0.223	0.699	30.6	0.857	1.138	6.712
		1.0	0.078	0.156	0.765	19.7	-	1.123	6.711
CH ₄	2000	0.4	0.062	0.308	0.630	14.6	0.862	1.148	5.705
		0.7	0.061	0.174	0.765	11.8	0.862	1.118	5.705
		1.0	0.061	0.122	0.818	6.3	-	1.106	5.705
	1700	0.4	0.051	0.256	0.693	5.6	0.865	1.129	5.034
		0.7	0.051	0.145	0.804	4.6	0.865	1.106	5.034
		1.0	0.051	0.101	0.848	1.7	-	1.097	5.034
	1500	0.4	0.032	0.400	0.568	45.9	1.607	0.591	6.712
		0.7	0.032	0.225	0.743	37.0	1.598	0.577	6.711
		1.0	0.032	0.158	0.810	25.7	-	0.573	6.711
	2000	0.4	0.025	0.310	0.666	19.7	1.622	0.582	5.706
		0.7	0.025	0.175	0.800	16.2	1.614	0.572	5.704
		1.0	0.024	0.122	0.853	9.8	-	0.569	5.705
C ₃ H ₈	2000	0.4	0.020	0.256	0.723	8.6	1.631	0.577	5.033
		0.7	0.020	0.145	0.834	7.2	1.624	0.570	5.033
		1.0	0.020	0.101	0.878	-	-	0.567	5.033

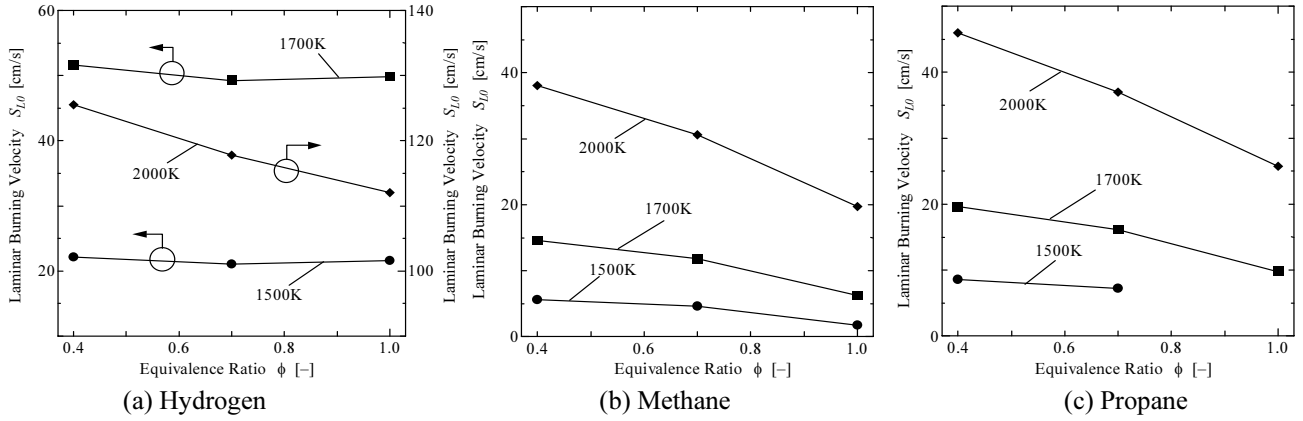
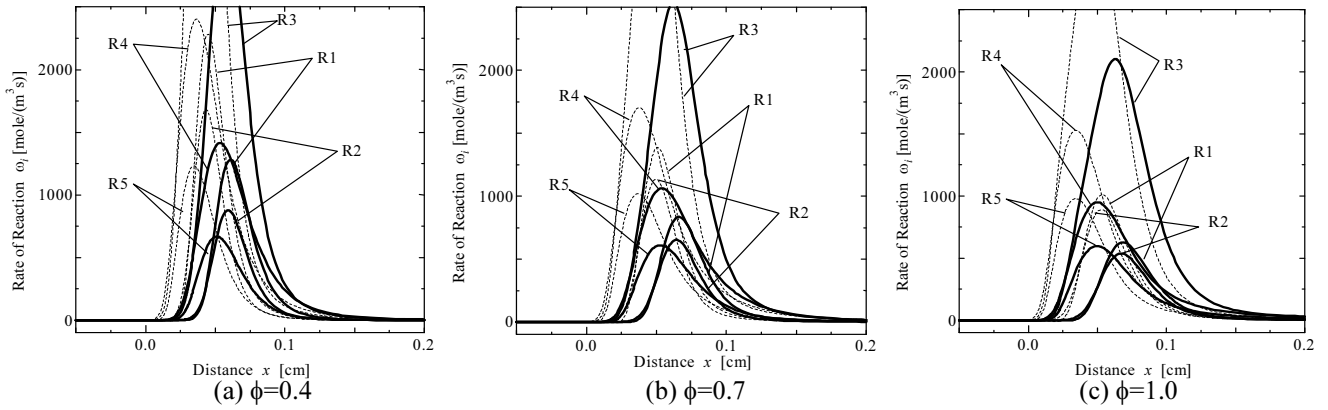
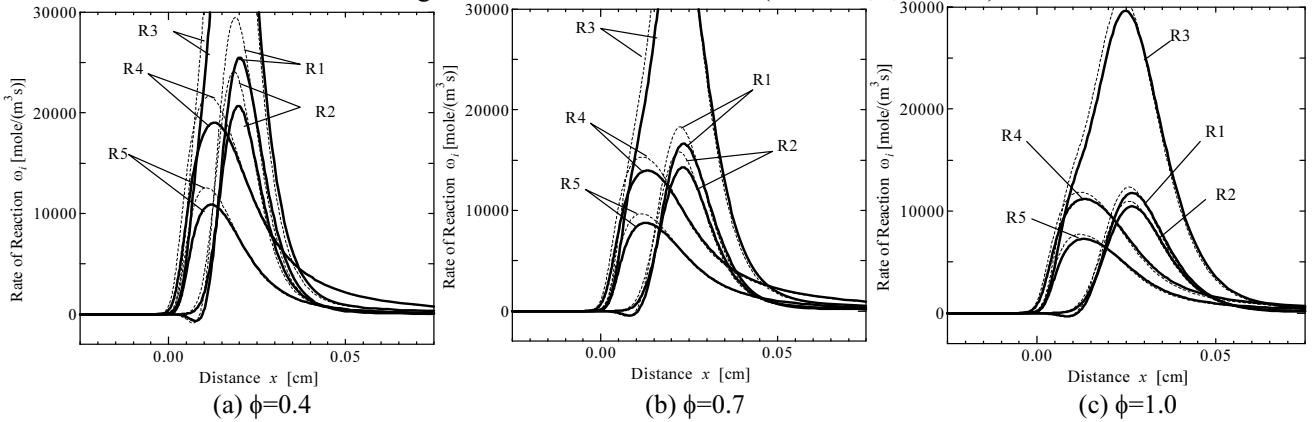

Fig.2 Variation of Laminar Burning Velocity S_{L0} with Equivalence Ratio ϕ

Fig.3 Profiles of Rate of Reaction ($H_2/O_2/N_2, T_b=1500K$)

Fig.4 Profiles of Rate of Reaction ($H_2/O_2/N_2, T_b=2000K$)

図2に、非伸張火炎の燃焼速度計算結果を当量比に対して示す。図から、水素火炎においては、断熱燃焼温度 $T_b=2000K$ の条件では、当量比の増加に伴い燃焼速度が大きく低下することがわかる。しかしながら、設定燃焼温度の低下に伴い、当量比に対する燃焼速度の減少率が低下し、概ね一定の燃焼速度を有する傾向がみられる。一方、炭化水素火炎においては、いずれの条件においても当量比の増加に伴い単調に燃焼速度が減少する傾向がみられる。

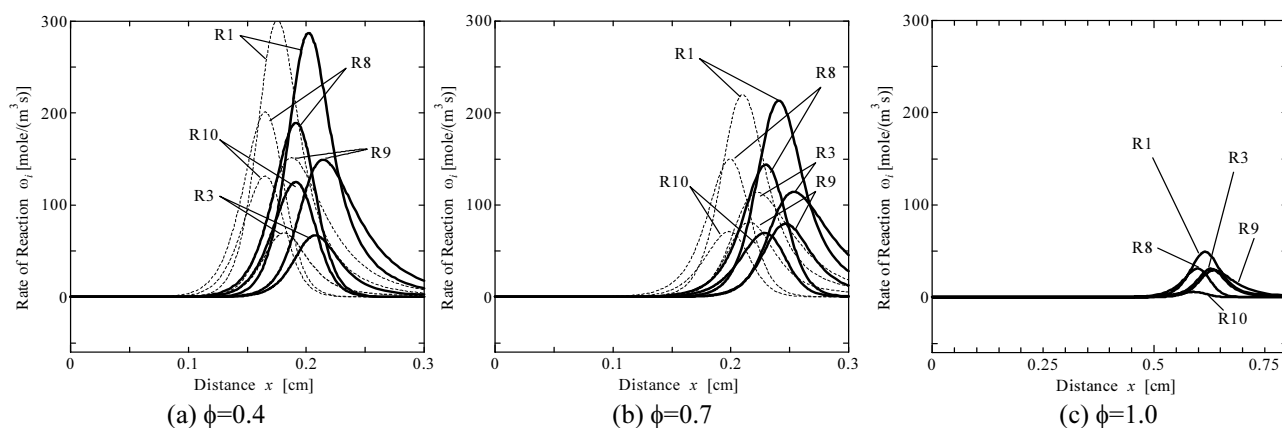
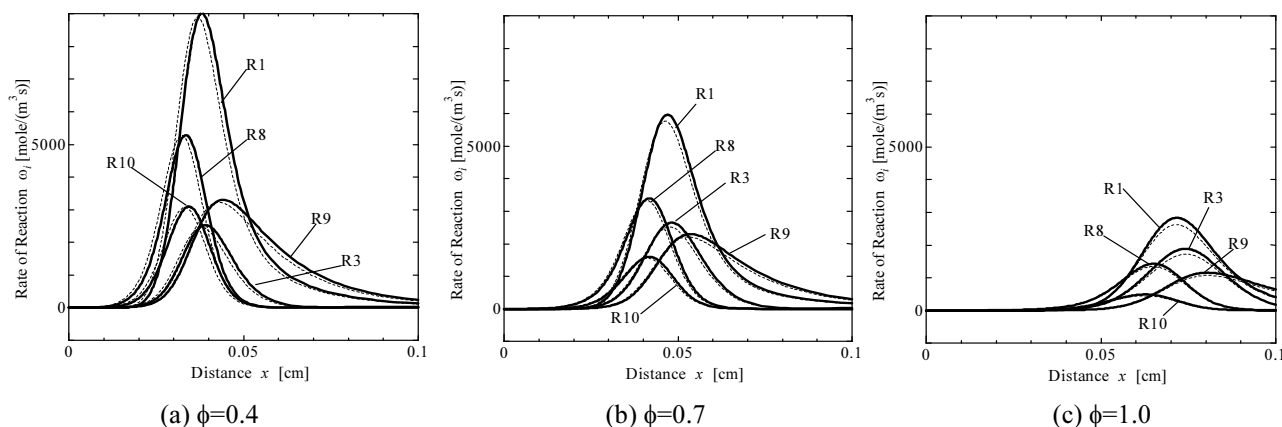
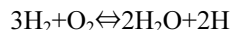
これらの性質について、反応動学的な観点から考察する。まず水素火炎に対する結果について述べる。図3および図4に、 $T_b=1500K$ および $2000K$ における主要素反応の反応速度 ω_i を示す。図は、ガス温度が $400K$ となる点を基準点($x=0cm$)として整理

してあり、実線は伸張を受けていない場合、破線は無次元伸張 $Ka \approx 0.3$ の場合を表している。なお、後者については3.3節で述べる。ここで、図中の反応番号に対応した素反応は以下に示すとおりである。



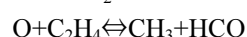
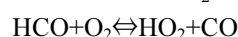
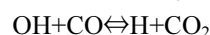
水素火炎の燃焼過程はおよそ $1100K$ を境として大別され、それぞれ低温領域反応群と高温領域反応群より構成されることが知られている⁷⁾。低温および高温部における反応の収支は次のように表される。



Fig.5 Profiles of Rate of Reaction ($\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2, T_b=1500\text{K}$)Fig.6 Profiles of Rate of Reaction ($\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2, T_b=2000\text{K}$)

すなわち水素火炎においては、高温側で余剰に生成された H 原子が低温側へ拡散し、化学エンタルピーを輸送することによって火炎が維持されている。ここで、図 3 および 4 から、特に高温領域における反応 R1 および R2 の反応速度が当量比の増加に伴い減少していることがわかる。このことから、高温領域反応群の支配性が強い $T_b=2000\text{K}$ の水素火炎では、当量比の増加に伴い大きく燃焼速度が低下したと考えられる。一方、 T_b が小さな水素火炎についても、同様に高温領域における反応の強度が低下する傾向がみられる。しかしながら、これらの設定条件では低温領域で進行する反応、すなわち活性化エネルギーの小さい反応群の支配性が強いいため、高温領域反応群の反応速度低下が火炎全体に及ぼす影響が小さくなるものと推測される。そのため、断熱燃焼温度の低下に伴い、当量比に対する燃焼速度減少率が低下する。

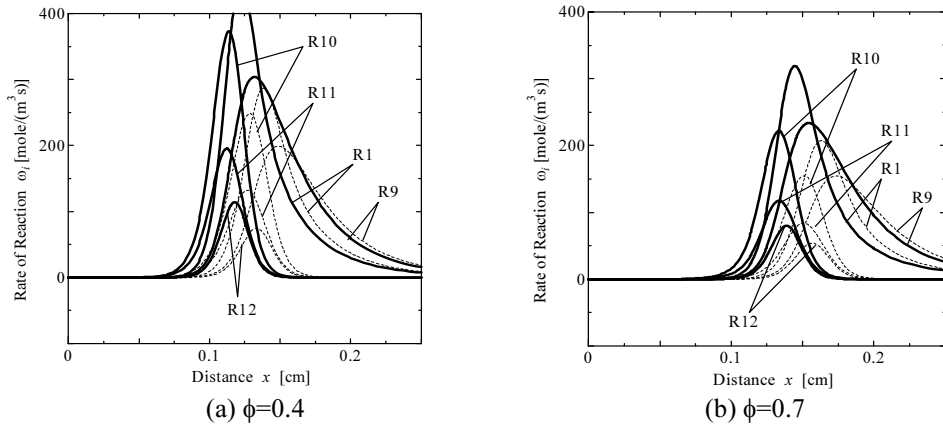
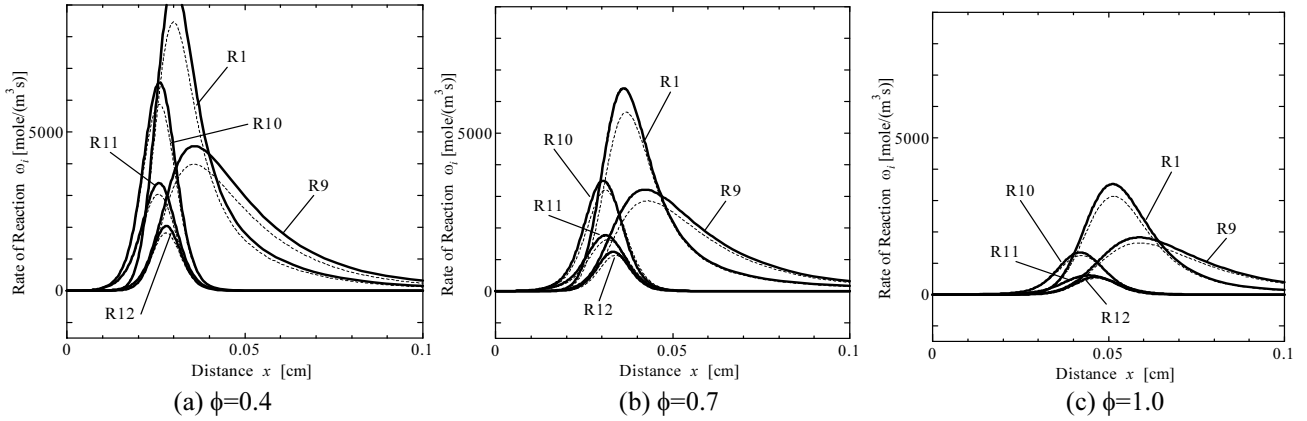
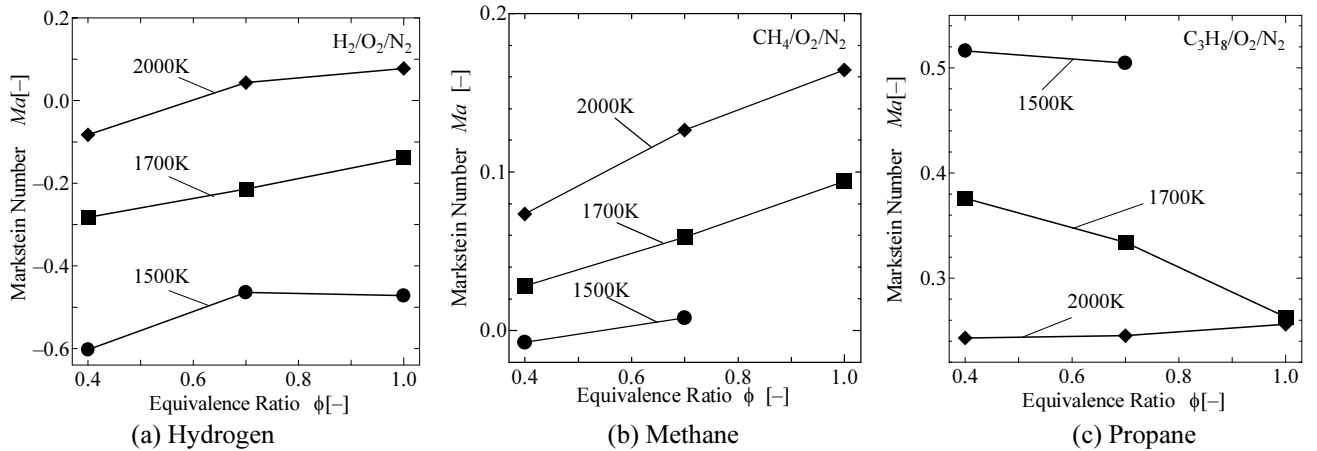
次に、炭化水素火炎における燃焼速度特性について考察する。図 5 および 6 にメタン、図 7 および 8 にプロパン火炎の、 $T_b=1500\text{K}$ および 2000K の条件における主要素反応の反応速度を示す。ただし、 $T_b=1500\text{K}$ 、当量比 1.0 のメタン伸張火炎については収束解を得ることができなかった。ここで、図中の反応番号に対応した素反応は次のとおりである。



炭化水素燃料の燃焼過程において、燃料成分は C_1 、 C_2 経路等を経由して分解・酸化され、最終的には CO_2 となる。この過程を最終段階まで進行するためには、O 原子が必要とされる。そのため、以上の反応群において、O 原子を生成する反応 R1 が炭化水素火炎の律則反応となる⁸⁾。R1 の正方向反応速度は酸素濃度に依存する。図 5～8 からは、当量比の増加、すなわち酸素濃度の減少に伴い R1 の反応速度が低下する様子が確認できる。そのため、炭化水素火炎では当量比の増加に伴い、燃焼速度は減少したと考えられる。

3.2 マークシュタイン数

図 9 に、2 章で述べた手法により解析した、伸張火炎の燃焼速度に対する応答感度係数であるマークシュタイン数 Ma を当量比に対して示す。図から、水素およびメタン火炎においては、設定断熱燃焼温度の低下に伴いマークシュタイン数は低下する傾向が見られる。一方、プロパン火炎については増加する傾向にある。また、当量比の変化に対しては、その減少に伴い、水素およびメタン火炎においてはマ

Fig.7 Profiles of Rate of Reaction ($C_3H_8/O_2/N_2, T_b=1500K$)Fig.8 Profiles of Rate of Reaction ($C_3H_8/O_2/N_2, T_b=2000K$)Fig.9 Variation of Markstein Number Ma with Equivalence Ratio ϕ

ークシュタイン数が減少、プロパン火炎においては増加する傾向が見られる。

まず、同一当量比において、設定断熱燃焼温度を変化させた場合の結果について考察する。表 1 から、同一当量比条件においては、水素火炎では断熱燃焼温度の低下に伴い不足成分（ここでは燃料）の拡散係数に基づくルイス数 $Le_f = a/D_f$ (a は熱拡散係数) が減少、メタン・プロパン火炎では増大している。伸張を受けた火炎においては、ルイス数が大きい条件ほど物質の拡散に比べて熱の拡散特性が相対的に増大し、火炎強度が低下する。火炎に作用するこのような効果をルイス数効果という。水素火炎におい

ては、断熱燃焼温度の低下に伴い、ルイス数効果によって火炎面からの熱の拡散（損失）が相対的に減少し、マークシュタイン数が低下する。一方プロパン火炎においては、熱の拡散が相対的に増大したため、マークシュタイン数は増加傾向を示したものと考えられる。

次にメタン火炎においては、設定断熱燃焼温度を低下させるとルイス数は増加するものの、マークシュタイン数は減少傾向を示しており、水素およびプロパン火炎とは異なった傾向が見られる。すなわち、単純にルイス数の大きさおよびその定性的な傾向のみでマークシュタイン数の評価を行うことができない

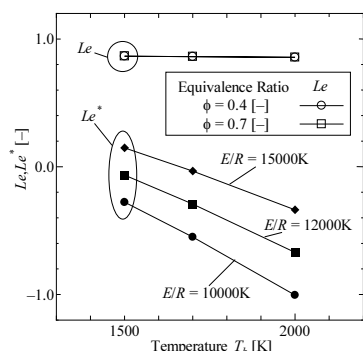


Fig.10 Critical Lewis Number vs. Temperature

い可能性がある。そこで、マークシュタイン数の定性的傾向について、臨界ルイス数 Le^* を用いて考察を試みる。CLAVIN らは、非常に限定された混合気・反応条件においてはああるものの、次のようなマークシュタイン数評価式を導出している⁹⁾。

$$Ma_t = \frac{\sigma}{\sigma-1} \ln \sigma + \beta \frac{Le-1}{2} \frac{1}{\sigma-1} \int_0^{\sigma-1} \frac{\ln(1+x)}{x} dx \quad (4)$$

ここで、 $\sigma = \rho_u / \rho_{bd} = T_{bd} / T_u$ (定圧火炎の場合) は膨張比、 x はダミー変数、 β は無次元活性化エネルギーを表すゼルドヴィッチ数であり、(5) 式で定義される。

$$\beta = \frac{E}{R} \frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \quad (5)$$

E は総括反応における活性化エネルギー、 R は一般ガス定数である。(4) 式によれば、マークシュタイン数の正負には、第二項の Le が影響を及ぼす。 $Ma_t=0$ となる条件におけるルイス数を臨界ルイス数 Le^* と定義すれば、 $Le < Le^*$ の条件では、伸張率の増加に伴い燃焼速度は増加、一方、 $Le > Le^*$ の条件では減少することになる。そこで、(4) 式を Le^* について整理すると、次のように変形される。

$$Le^* = 1 - 2 \frac{\sigma \ln \sigma}{\beta} \left/ \left\{ \int_0^{\sigma-1} \frac{\ln(1+x)}{x} dx \right\} \right. \quad (6)$$

図 10 に、(6) 式を用いて評価を行った Le^* の計算結果を示す。 β の計算式における E/R の値は、10000K から 1000K おきに 15000K まで値を与えた。また、 $T_1 = T_u = 298K$ 、 $T_2 = T_b$ とし、 σ における燃焼後の温度 T_{bd} は、 T_b として計算を行った。図には、当量比 0.4 および 0.7 のメタン火炎におけるルイス数も掲示してある。図から、上記仮定値に基づいて (6) 式により評価した Le^* は非常に小さな値であることがわかる。しかしながら、臨界ルイス数は定量的には 1 より少し小さい値であろうとされている⁹⁾。また、図 10 および表 1 から、断熱燃焼温度の上昇に伴う Le^* の変化は、 Le の変化より比較的大きいことがわかる。そこで、臨界ルイス数を 1 より少し小さい値であると仮定し、特にルイス数との定性的関係にのみ注目

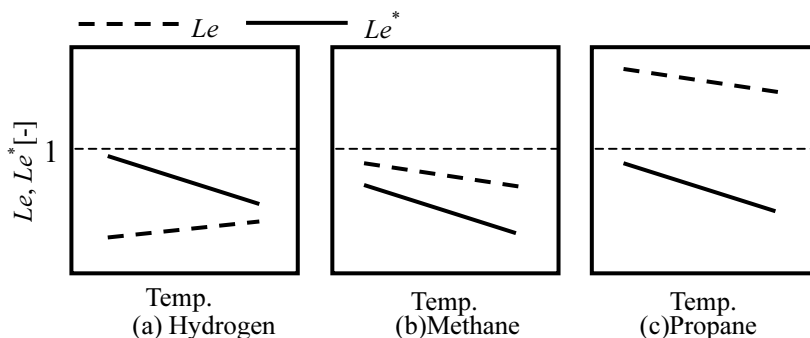


Fig.11 Schematic of Relationship between Critical Lewis Number and Lewis Number

して整理した概念図を図 11 に示す。この定性的な関係に基づき、メタン火炎の結果について考察する。表 1 から、ルイス数の値は 0.86 程度であり、これらの値は臨界ルイス数と同程度の値であるものと推測される。ただし、マークシュタイン数の値が正であることから、実際にはルイス数の値が若干臨界ルイス数を上回っているものと考えられる。そのため、メタン火炎の場合には Le と Le^* の差は設定断熱燃焼温度の増加に伴い増大してゆくものと推測される。以上の推察、臨界ルイス数の定義および(4)式から、高温側では両者の差の増大に伴い、マークシュタイン数が増大したのものと考えられる。

同様の考察を、水素およびプロパン火炎に対しても行った。表 1 から、水素火炎のルイス数は 0.4 程度であり、臨界ルイス数が 1 程度の値であるとすれば、 Le は Le^* に比べて相対的に小さな値であると考えられる。さらに、図 11 から設定断熱燃焼温度の上昇に伴い臨界ルイス数とルイス数の差は減少するものと推測される。このことは、断熱燃焼温度の上昇に伴い、マークシュタイン数が増大する傾向と一致している。次に、プロパン火炎においては、メタン火炎と同様に設定断熱燃焼温度の増大にともないルイス数と臨界ルイス数の差が大きくなっていると推測される。これは、図 9 の (c) で示したプロパン火炎におけるマークシュタイン数とは異なる傾向であり、単純に Le と Le^* の差の絶対値の傾向が直接マークシュタイン数の傾向を示しているとは言えない。ここで、プロパン火炎のルイス数に着目すると、その値は 1.6 程度であり、1 のオーダーと考えられる臨界ルイス数に対して、かなり大きな値となっている。メタン火炎の場合は、ルイス数と臨界ルイス数の値が同程度であるため、臨界ルイス数による影響が大きく現れたものと推測される。一方、本来ルイス数と臨界ルイス数の値が比較的離れている水素およびプロパン火炎においては、臨界ルイス数による影響は比較的小さく、単純なルイス数効果の影響が支配的に作用したものと推測される。

次に、同一断熱燃焼温度を持つ混合気について、

当量比を変化させた場合の結果について考察する。表 1 から、同一断熱燃焼温度の条件では、ルイス数は当量比の減少に伴い水素火炎では減少、メタン火炎ではその変化は小さく、プロパン火炎では増加している。ここで、燃料成分と酸素の拡散係数それぞれに基づいたルイス数の比 $Le_o/Le_f=D_f/D_o$ に着目する。予混合火炎の前面には濃度勾配が存在する。伸張火炎のように、火炎面に対して流線がある角度を持つ場合、拡散特性の大きな成分は、流線とは異なる濃度勾配の大きな方向へ選択的に拡散する。その結果、局所的な火炎強度が変化する。このような作用を選択拡散効果という。本研究では、未燃混合気内の各反応物の拡散係数に基づいたルイス数の比、すなわち D_f/D_o を、各成分の選択拡散効果評価基準として用いる。表 1 から、全混合気条件において、同一断熱燃焼温度条件では当量比の減少に伴い D_f/D_o が増加していることがわかる。すなわち、希薄水素火炎においては、ルイス数効果に加えて不足成分である燃料成分の選択拡散効果が、また希薄メタン火炎では主に後者が強められた結果、火炎強度が相対的に強化され、マークシュタイン数が減少していると考えられる。一方、プロパン火炎においては、 D_f/D_o の増加に伴いマークシュタイン数は増大しており、水素およびメタン火炎と異なった傾向が見られる。これは、プロパン火炎では当量比変化に伴うルイス数の変化がより顕著であるため、選択拡散効果よりルイス数効果の影響が大きく表れたためであると推測される。

3.3 伸張火炎の各燃料における特徴的傾向

図 9 から、低温度条件における水素およびメタン火炎、高温度条件におけるプロパン火炎においては、マークシュタイン数の当量比に対する変動が、比較的小さい傾向にある。これら各燃料における特徴的な傾向に関しての理解を深めるため、反応速度の観点から考察を試みる。本研究における燃焼速度の定義式である (1) 式から、燃焼速度に影響を及ぼす因子としては、分子の反応速度、分母の $\rho_1(Y_1-Y_2)$ の項がある。本論文では省略するが、火炎に作用する伸張の有無により、 $\rho_1(Y_1-Y_2)$ の項はほとんど変化しないことが確認されている。そのため、燃焼速度は分子の酸素の消費速度に大きく影響すると考えられる。

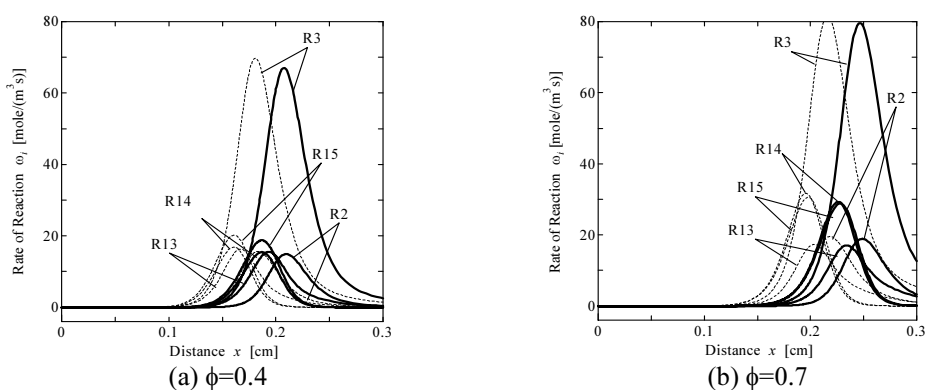
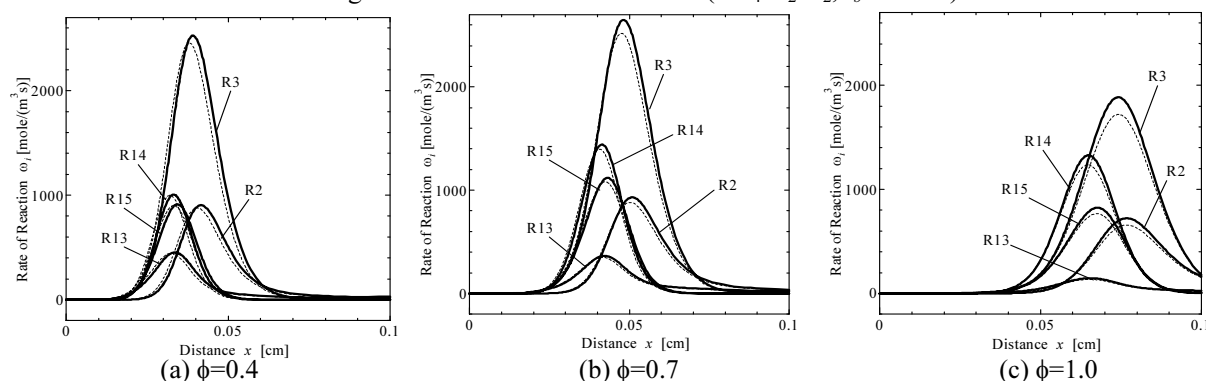
まず、水素火炎について考察する。3.1 節で、非伸張火炎において、当量比の増加に伴い、高温領域反応群の反応速度が大きく低下することに着目し、その支配性の観点から燃焼速度特性を考察した。図 3, 4 より、伸張火炎の場合、選択拡散効果およびルイス数効果により、火炎強度は全温度領域で全体的に強められている。そのため、高温水素火炎では高温領域反応群の、低温水素火炎では低温領域反応群の支配性は保たれていると推測される。したがって、

伸張火炎の場合においても、非伸張火炎と同様の議論が可能であると考えられる。すなわち、高温水素火炎では高温領域反応群の反応速度変化がその応答特性に大きく影響し、当量比に対するマークシュタイン数の変動が大きいと推測される。一方、低温水素火炎では高温領域反応群の及ぼす影響は小さいと推測されるため、マークシュタイン数の変動が小さいものと考えられる。

次に、メタン火炎について考察する。伸張の作用により、 $T_b=2000\text{K}$ のメタン火炎は、全体的に反応速度が低下している傾向が見られる。ここで、炭化水素燃料における律速反応である R1 に着目する。本研究では希薄火炎を対象としているため、酸素分子は豊富に存在する。したがって、R1 の反応が活性化するためには、H 原子の十分な供給が重要な要素となる。H 原子は、主にメタン火炎における中間生成物である H_2 分子より生成されると考え、 H_2 分子の消費、生成に係る素反応を調査した。その結果、特に反応速度が大きく、重要な役割を担うと考えられたものは R2 および R3、さらに、以下に示す各素反応であった。



これらの素反応について、特に断熱燃焼温度による性質の差異を調べるために、 $T_b=2000\text{K}$ と 1500K の条件について反応速度の比較を行った。その結果を図 12, 13 に示す。図から、伸張が作用することによって $T_b=1500\text{K}$ の条件においては全体に反応速度が増加している。一方、 2000K の条件においては全体に反応速度が低下していることがわかる。ここで、上記反応群の中において最も反応速度が大きく、R1 に及ぼす影響が大きいと推察される R3 に着目する。図 12, 13 より、伸張が作用することで、R3 の反応速度は $T_b=1500\text{K}$ の条件では増加、 2000K では低下している。このため、R1 の反応速度は 1500K では伸張の作用により増加、 2000K では低下したものと推測される。したがって、 $T_b=2000\text{K}$ の場合、3.2 節で述べた選択拡散効果に加え、R3 の影響による R1 の反応速度低下という二つの伸張による効果が生じる。一方 1500K の条件では、選択拡散効果によりマークシュタイン数は増加するものの、伸張により R3 の速度が増加することにより、R1 の反応速度が増加する。すなわち、 1500K の火炎は 2000K の火炎に比べて、R3 反応速度の増加により R1 反応速度が増大した効果により火炎強度が増した結果、マークシュタイン数増加が抑制されたと考えられる。その結果、 2000K の条件と異なり単純なマークシュタイン数増加ではなく、改善効果が作用した分、設定断熱燃焼温度 1500K のメタン火炎は当量比を増加させた場合

Fig.12 Profiles of Rate of Reaction ($\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2, T_b=1500\text{K}$)Fig.13 Profiles of Rate of Reaction ($\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2, T_b=2000\text{K}$)

のマークシュタイン数変化が小さいと考えられる。

プロパン火炎に関しては、伸張を受けることによりいずれの条件においても、反応速度は低下する傾向が見られた。しかしながら、このことからプロパン火炎における特徴的な傾向である、断熱燃焼温度が大きい条件においてプロパン火炎のマークシュタイン数の変化が小さい原因を明らかにすることはできなかった。この点は今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、断熱燃焼温度を揃えた気体燃料予混合火炎について反応動力学計算を行い、基礎的燃焼特性、また、火炎に伸張が作用した場合の燃焼速度応答特性について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 層流燃焼速度は、設定断熱燃焼温度の上昇および当量比の減少に伴い増加する傾向がある。これらは、反応動力学観点から概ね説明できる。
- (2) 伸張に対する燃焼速度の応答感度係数であるマークシュタイン数は、水素およびメタン火炎では、断熱燃焼温度の低下および当量比の減少に伴い減少、すなわち燃焼速度特性は改善される傾向にある。一方、プロパン火炎については増大する傾向が見られる。
- (3) マークシュタイン数の傾向は、メタン火炎において設定断熱燃焼温度を変化させた場合を除き、ルイス数、およびその比である D_f/D_o とい

った値により概ねその傾向を整理することが可能である。断熱燃焼温度を変化させたメタン火炎においては、従来行われてきたように単純にルイス数のみで評価することはできず、臨界ルイス数の影響を考慮する必要がある。

謝 辞

終わりに、本研究の一部は第15回地球環境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) 水谷幸夫:燃焼工学第3版, 森北出版, (2002) 96-100
- 2) KEE, R.J. et al.: Reaction Design, Inc., San Diego, CA, (2003)
- 3) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一: 燃焼現象の基礎, オーム社, (2001) 259-262
- 4) BOWMAN et al.: Gas Research Institute, <http://euler.me.berkeley.edu/gri-mech/>, (2000)
- 5) POINSOT et al.: Theoretical and Numerical Combustion, wards, (2001)
- 6) CLAVIN, P.: Progress in Energy and Combustion Science, 11(1), (1985) 1-59
- 7) 日本機械学会:燃焼の数値計算, 日本機械学会, (2001) 64-70
- 8) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一: 燃焼現象の基礎, オーム社, (2001) 156-158
- 9) 石塚悟:定常火炎における火炎伸張とその静的特性, 燃焼研究 116号, (2000) 217-220