

## ■原著論文/ORIGINAL PAPER■

## 気体燃料と高温予熱酸化剤との急速混合により形成される乱流予混合火炎の希薄消炎限界および火炎特性

## Lean Limit of Global Flame Quenching and Flame Characteristics of Turbulent Premixed Flames Formed by Rapid Mixing of Fuel and Highly Preheated Oxidizer

安 鐵朱<sup>1\*</sup>・赤松 史光<sup>1</sup>・香月 正司<sup>1</sup>・北島 暁雄<sup>2</sup>・鳥飼 宏之<sup>3</sup>AHN, Chulju<sup>1\*</sup>, AKAMATSU, Fumiteru<sup>1</sup>, KATSUKI, Masashi<sup>1</sup>, KITAJIMA, Akio<sup>2</sup>, and TORIKAI, Hiroyuki<sup>3</sup><sup>1</sup> 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 吹田市山田丘2-1  
Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 〒305-8569 つくば市小野川16-1  
National Institute of Advanced Industrial and Science Technology, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan<sup>3</sup> 弘前大学理工学部 〒036-8561 弘前市文京町3  
Hirosaki University, 3 Bunkyo, Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan

2007年9月17日受付; 2008年1月7日受理/Received 17 September, 2007; Accepted 7 January, 2008

**Abstract** : We designed a reverse flow burner adopting a rapid mixing nozzle, which enables us to create high-preheat premixed flames. Lean limit of global flame quenching and flame characteristics of turbulent premixed flames formed on this burner were investigated changing preheat temperature, oxygen and fuel concentrations. As a result, the lean limit of global flame quenching extended to extremely low oxygen and fuel concentration conditions with an increase in preheat temperature, and we successfully formed the flame with extremely low density ratio of 1.15 between burnt gas and unburned mixture, hence mild heat release rate. OH-LIPF and temperature measurements showed that the turbulent flames formed with lean and diluted mixture have unique characteristics, such as (1) low mean and fluctuating temperatures, (2) non-continuous and well-stirred like OH distribution, (3) weak optical and sound emissions.

**Key Words** : Reverse Flow Burner, Rapid Mixing Nozzle, High Temperature Mixture, Premixed Turbulent Combustion, Well-Stirred Reactor, Flame Structure, High Temperature Air Combustion

## 1. 緒言

近年、燃焼ガスの廃熱を回収し、燃焼用空気を高温に予熱する燃焼技術[1-4]が注目を集めており、省エネルギーとそれに伴う二酸化炭素排出量の低減を実現すると同時に、極めて低いNO<sub>x</sub>排出を実現している。この高温予熱空気燃焼では、(1) 炉内温度分布および酸素濃度分布などスカラー分布の勾配が緩やかで広い空間で静かな燃焼反応がおこる(マイルド燃焼:mild combustion [3])、(2) 目視可能な明確な火炎面が存在しない(無炎酸化反応:flameless oxidation [2])、(3) 高温予熱空気を供給しているにもかかわらず、多量の炉内既燃ガスと燃料および燃焼用空気が予混合される結果、酸素濃度が低い条件下で燃焼するため、火

炎温度が低くサーマルNO<sub>x</sub>の排出が極めて少ないなどの特徴が挙げられる。

高温予熱空気を用いる燃焼を燃料と空気の供給法の観点から分類すると非予混合燃焼に属するが、実際の炉内においては燃焼反応がおこる前に、炉内に存在する既燃ガスと新たな燃料あるいは空気の混合が進行し、高温の既燃ガスによる希釈と予混合化がある程度進んだ混合気の燃焼が重要な役割を果たしていると考えられる。したがって、高温空気燃焼炉内では局所的には化学反応の特性時間が乱流特性時間より大きい低ダムケラー火炎が形成されることもあると考えられる。高温空気燃焼炉内の燃焼形態を詳細に理解するために、一方では、複雑な混合と希釈過程を明らかにし、形成される混合気の温度と組成の出現確率を知るとともに、他方では、組成を整えたいうえて高温に予熱された予混合乱流火炎の燃焼形態や火炎構造がどのようなものに

\* Corresponding author. E-mail: ahncj@combu.mech.eng.osaka-u.ac.jp

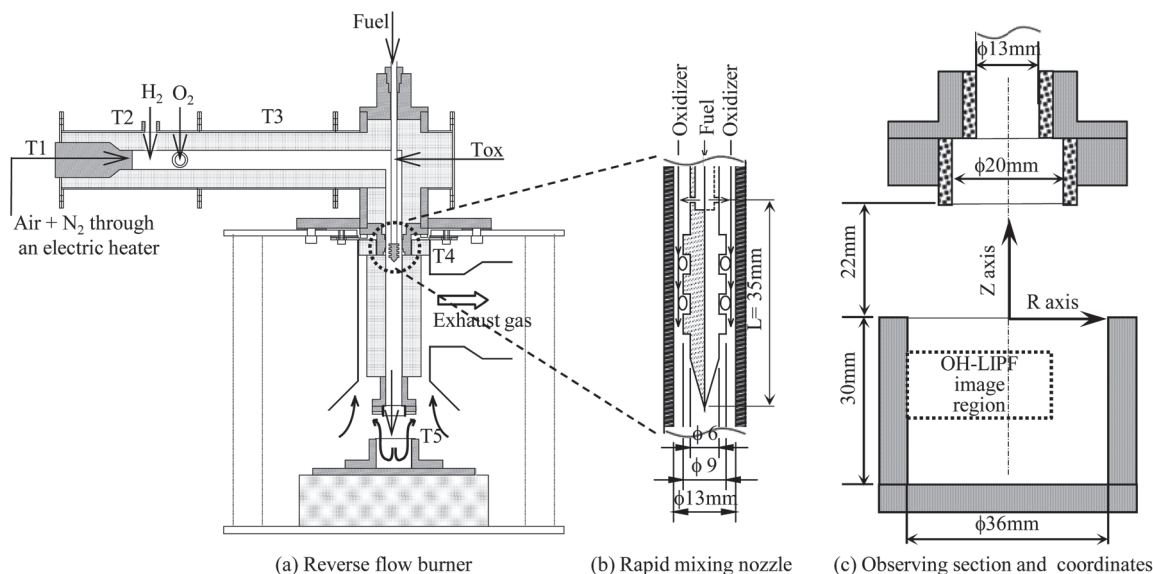


Fig.1 Details of reverse flow burner, mixing nozzle and coordinates

なるかを調べることが必要である。そのためには均一な組成と温度を持つ高温の予混合気を形成する必要がある。しかし、金属容器内における予混合気の自着火実験[5]から分かるように、量論予混合気の最低自着火温度は、メタンに対して 900 K、プロパンに対して 770 K 程度であり、通常の方法では高温空気燃焼炉内で形成される 1200 K 程度の高温予熱予混合気の状態を実現することは容易ではない。

著者らは燃料と空気を極めて短時間で急速混合する特殊な形状のノズル (以下急速混合ノズルと記す) を考案し、このノズルを用いることで、燃料と空気の混合時間が極めて短時間であるにもかかわらず、容器内で十分な時間をかけて混合された完全な予混合気による火炎と同様の諸燃焼特性を示す火炎が形成できることを報告している[6]。本研究では、高温空気中に燃料を吹き込んだ際に、燃料の着火遅れ時間内に急速混合させて予混合気を形成する方法を取り上げた。高温予混合気形成法として上述の急速混合ノズルが有効であることを確認するとともに、急速混合ノズルを組み込んだ高温予混合燃焼バーナ (以下リバースフローバーナ) によって形成される乱流予混合火炎に関して、予混合気温度、酸素濃度、燃料濃度の変化による希薄消炎限界と高温希薄希釈予混合気による乱流火炎の諸特性を調べた。

## 2. 実験装置

### 2.1. リバースフローバーナ

図 1 に本研究に用いられたリバースフローバーナと急速混合ノズルの概略図を示す。実験装置は酸化剤の予熱部、酸化剤と燃料の予混合部および火炎の観測部によって構成される。酸化剤 (燃焼用空気) および予混合気の保温のため、実験装置の内壁はガラス繊維断熱材 (カオウール) およびセ

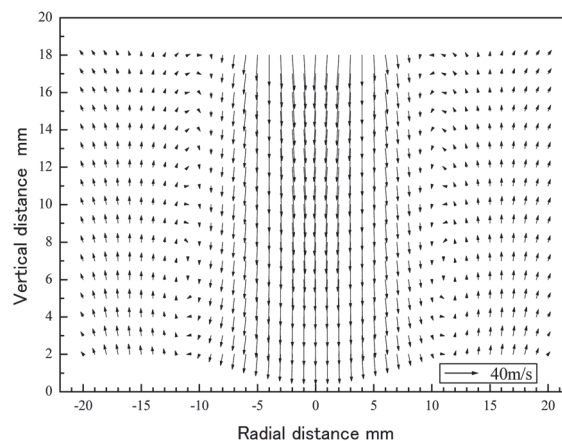


Fig.2 Velocity vector field in non-reacting flow at  $T_{ox} = 1173K$

ラミック管で内張りした。燃料は急速混合ノズルに設けられた 12 個の噴孔 (直径 0.5 mm) から酸化剤流に対して垂直に噴射された後、ノズルに設けた 3 段のラビリンスによって混合が促進され、高温の予混合気形成される。また、着火遅れ時間が許す範囲内で混合ノズルは長い方がよく、燃料噴孔から供給管出口までの距離を 130 mm と長くしている。形成された高温の予混合気は供給管出口より大気中へ下向きに噴射され、下方 52 mm の位置に置かれた円筒容器 (ステンレス, 内径 36 mm, 深さ 30 mm) の中央に衝突し、流れが上向きに変えられる。

図 2 に火炎観測部の非燃焼時の流速計測結果から求めた平均速度ベクトル図を示す。図 2 から酸化剤流主流の流れと主流を囲んで上向きに流れる周囲流が確認できる。燃焼時には燃焼後の排ガスが、噴流外周を上方へ逆流して供給

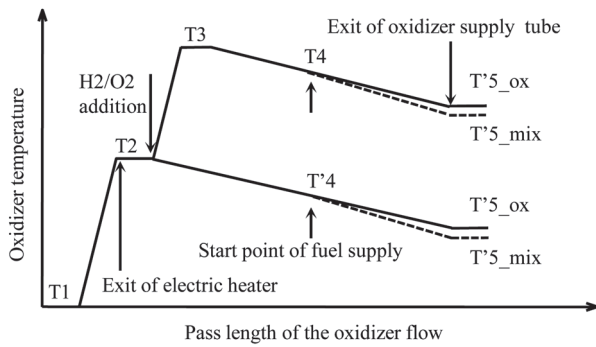


Fig.3 Schematic temperature history of oxidizer flow

管外周に設けられた環状排気ダクトへ吸引されるので、既燃ガスが外気と予混合気を隔てるエアカーテンの役割を果たし、外気により予混合気の温度および酸素濃度に変化することが抑えられる。また、バーナに付着した安定な噴流火炎が吹き飛ぶ条件になっても、円筒容器内底部にできる循環流によって保たれる非付着火炎が安定に保持され、極めて低い当量比での燃焼が可能となる。メタン予混合気温度が 1173 K (酸素濃度 19.4 %) の場合、円筒容器のない単純な噴流火炎では当量比 0.8 で火炎が不安定になり吹き飛ぶが、円筒容器を設けた場合には当量比 0.25 まで安定した非付着火炎が容器内部に形成されることを確認している。本実験装置の火炎観測領域は、大気開放火炎の場合と同様、種々の光学計測の適用に便利である一方、燃焼反応は主に予混合気供給管出口と円筒容器の間の空間で行われ、燃焼後の排気が火炎を包むように上向きに流れるため、炉内の既燃ガスに囲まれて燃焼する状況を模擬することができ、前述の通り、冷たい外気の影響を受けることなく、さまざまな混合気温度および酸素濃度の火炎が観察できる。

## 2.2. 酸化剤および予混合気の温度調整

図 3 は酸化剤流がたどる温度変化を模式的に表したものである。燃焼用空気 ( $T_1$ ) は電気ヒータにより予熱される。電気ヒータ出口 ( $T_2$ ) における燃焼用空気の最高温度は約 1073 K (800 °C) であるが、流路における熱損失のため、バーナ出口における燃焼用空気の温度はそれより数百度低い温度となる。電気ヒータを 1073 K に設定し、バーナ出口における予熱温度が定常状態になるまで運転した場合、バーナ出口における予熱空気の温度 ( $T'_{5,ox}$ ) は約 830 K 程度で、本実験で目指す燃料の自着火温度域での実験には不十分である。そこで量論比の酸素と水素を電気ヒータ出口近傍に供給し、燃焼させることによってさらに高温 ( $T_3$ ) まで酸化剤流 (燃焼用空気) の温度を上げる方法を採用した。供給された水素は流路内で完全に燃焼し過熱蒸気になる。電気ヒータのゲインと水素と酸素の流量を変化させることによって酸化剤 (燃焼用空気) の予熱温度を 373 K から 1273 K (燃料の自着火温度以上) まで変えることができる。

Table 1 Flow rate of each gas for varying oxidizer temperature

$T_{ox}$ K	Heating method	Flow rate of gas				Resulting oxygen conc. %
		H <sub>2</sub> L <sub>N</sub> /min	O <sub>2</sub> L <sub>N</sub> /min	N <sub>2</sub> _balance L <sub>N</sub> /min	Air L <sub>N</sub> /min	
373~773	Electric heater only	0.00	0.00	5.00	60.00	19.40
873	Electric heater + Stoichiometric H <sub>2</sub> flame	0.50	0.25	4.50	60.00	19.40
973		2.00	1.00	3.00	60.00	19.40
1073		3.50	1.75	1.50	60.00	19.40
1173		5.00	2.50	0.00	60.00	19.40

Table 2 Typical examples of gas flow rate for varying oxygen concentration

Oxygen conc. %	H <sub>2</sub> O+N <sub>2</sub> _balance	Air	N <sub>2</sub> _dilution	Total flow rate
	L <sub>N</sub> /min	L <sub>N</sub> /min	L <sub>N</sub> /min	L <sub>N</sub> /min
19.4	5	60	0	65
12.9	5	40	20	65
6.5	5	20	40	65

酸化剤の温度 (酸素濃度 19.4 %) を変化させる場合の各気体の供給流量を表 1 に示す。表 1 に示された酸化剤温度 ( $T_{ox}$ ) はバーナ出口において熱電対により計測した値である。773 K 以下では電気ヒータ単独で予熱し、873 K 以上に予熱したい場合には水素と酸素を供給した。また、バランスガスとして窒素ガスを用い、その流量 (0~5 L<sub>N</sub>/min) を調整することによって酸化剤中の酸素濃度を 19.4 % に保つように調整した。この高温酸化剤流に、常温の燃料を混入して予混合気とするので、混合気形成後の混合気温度 ( $T_{mix}$ ) は酸化剤温度 ( $T_{ox}$ ) よりやや低い温度 (10 K 以内) となるため、電気ヒータのゲインをあげることで実験条件の予混合気温度になるように調整した。このような操作を行い、予混合気温度 ( $T_{mix}$ ) および酸化剤温度 ( $T_{ox}$ ) を目的温度の ±5 度以内になるように調整した。

## 2.3. 酸化剤の酸素濃度調整

酸化剤の酸素濃度を変化させた場合の各気体の供給流量を表 2 に示す。酸化剤中の酸素濃度を 19.4 % 以下にする場合には、空気と希釈用窒素の合計流量 ( $Q_{air} + Q_{N_2\_dilution}$ ) を 60 L<sub>N</sub>/min になるようにし、空気あるいは希釈用窒素流量の割合を変化させることによって目的の酸素濃度になるように調整した。また、酸化剤の温度を 773 K 以上に予熱する場合、供給された水素と酸素は過熱蒸気になるが、酸化剤の設定温度により過熱蒸気量が変わる。そのため、バランス用の窒素を加え、過熱蒸気とバランス用の窒素 ( $Q_{H_2O} + Q_{N_2\_balance}$ ) の合計流量を 5 L<sub>N</sub>/min になるよう調整した。表 2 に示す酸素濃度は酸化剤流 ( $Q_{ox} = Q_{air} + Q_{N_2\_dil} + Q_{N_2\_bal} + Q_{H_2O} = 65$  L<sub>N</sub>/min) 中の酸素のモル濃度を示す。

## 2.4. 計測装置

温度測定には、触媒反応を防止するため SiO<sub>2</sub> 被覆を施した素線径 25 μm の R タイプ (Pt/Pt・Rh13%) 熱電対を用いた。熱電対の起電力はローパスフィルタ (5 kHz) で高周

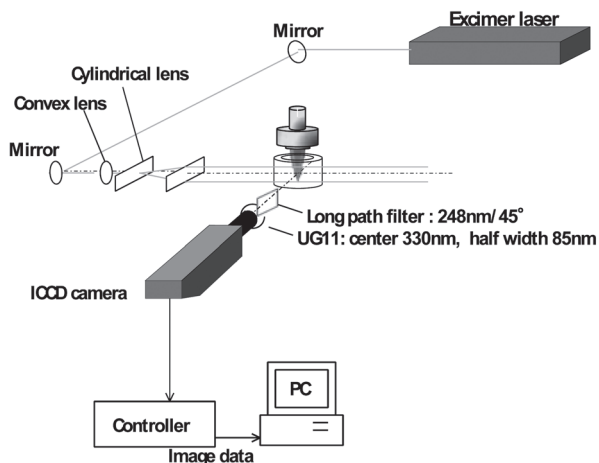


Fig.4 OH-LIPF measurement system

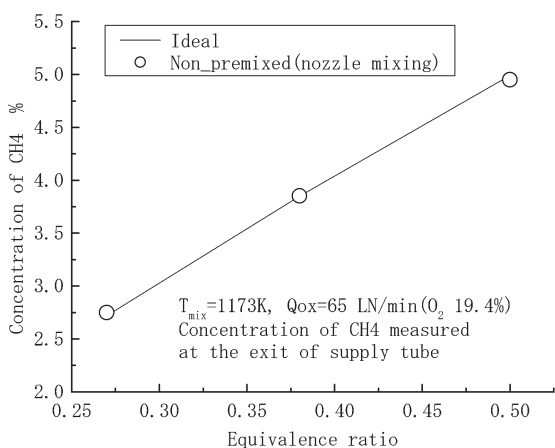


Fig.5 Fuel concentration in unburned mixture

波ノイズを取り除いた後, A/D コンバータを介して, パーソナルコンピュータに取り込んだ. 記録された熱電対の起電力信号は, 計算機上で一次遅れ補償ならびにふく射損失補正が行われ, 温度信号に変換される. 測定はサンプリング間隔  $20 \mu s$  で 1.4 秒間とした.

図 4 にレーザー励起前期解離法 (Laser Induced Pre-dissociative Fluorescence) による OH 濃度場の 2 次元断面計測に用いられた測定系の概要を示す. OH-LIPF 計測の際には図 1(c) の円筒容器を石英ガラスにして容器の中の OH 分布を計測した. LIPF 用励起光源には Kr-F Excimer レーザ (Lambda Physik, Compex 150T) を用い, 励起波長は LIF 蛍光に衝突失活の影響がない前期解離波長である P2(8)line,  $248.457 \text{ nm}$  とした. また, ガラス容器からの反射光を低減し, シート光 (厚さ約  $0.2 \text{ mm}$ ) により励起された OH 蛍光発光を捉えるために, ロングパスフィルタと UG11 フィルタ (中心波長  $330 \text{ nm}$ , 半値幅  $85 \text{ nm}$ ) を用いて背景光を除去した後, イメージインテンシファイア付きの CCD カメラにより撮影した.

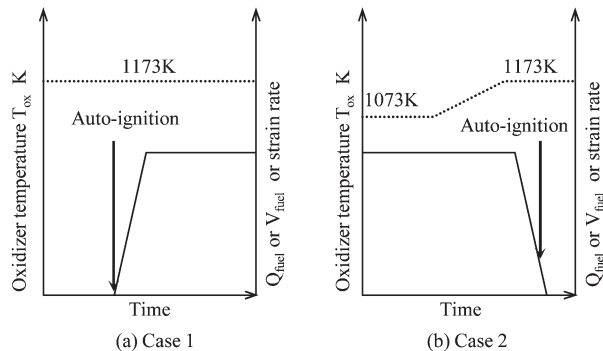


Fig.6 Schematic illustration of auto-ignition behavior

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 予混合気濃度計測

メタン-空気予混合気温度を  $1173 \text{ K}$  に設定し, 供給管出口 ( $z = 20 \text{ mm}$ ,  $r = 0 \text{ mm}$ ) においてステンレス製プローブ (内径  $0.5 \text{ mm}$ ) により採集された未燃予混合気を TCD (Thermal Conductivity Detector) 検出器をもつガスクロマトグラフ (カラム充填材: モレキュラーシーブ 5A) により組成分析を行った結果を図 5 に示す. 横軸は当量比, 縦軸は各当量比に対する予混合気中のメタン濃度であり, 図中の実線で示すメタンの理論空気量 ( $9.524 \text{ m}^3 \text{ N} / \text{m}^3 \text{ N}$ ) から算出される理論値と一致していることが分かる. また, 混合気温度が  $1173 \text{ K}$  である場合は水蒸気によりメタンが改質され, 水素となることが懸念されたが, 混合時間が短時間であり, 予混合気中に水素は検出されなかった.

#### 3.2. 燃料の自着火特性および火炎挙動

本実験に用いられたバーナにおいて実験可能な予混合気の温度範囲を調べるために, さまざまな燃料の自着火温度を調べた. メタンを燃料にした場合, 酸化剤温度  $T_{ox}$  (酸素濃度  $19.4 \%$ ) が  $1273 \text{ K}$  ( $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) になるとノズル孔近傍で自着火し, 供給管内で激しく燃え, 燃料ノズルの焼損を引き起こした. そのため, メタンを燃料とする場合, 予熱された予混合気の最高温度は  $1173 \text{ K}$  ( $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) までとした. プロパンの場合, 酸化剤の温度が  $1173 \text{ K}$  ( $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 程度でメタンの場合と同様にノズルの焼損が起こるため, プロパン予混合気の最高予熱温度は  $1073 \text{ K}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ) とした. ただし, 上記の予混合気温度はバーナ出口で計測された温度 (図 3 の  $T_{5,ox}$ ) であり, 実際に燃料が流入する噴孔近傍 (図 3 の  $T_4$ ) の酸化剤温度は上記の温度よりやや高い温度であることを指摘しておく必要がある. Fotache ら [7-8] によればメタンとプロパンに対して観測された自着火温度 (伸張率  $300 \text{ s}^{-1}$ ) はそれぞれ  $1310 \pm 25 \text{ K}$ ,  $1185 \text{ K}$  であり, 本実験での結果とおおむね一致している.

13A 都市ガス ( $\text{CH}_4: 88.9 \%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6: 6.8 \%$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8: 3.1 \%$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}: 1.2 \%$ ) の自着火現象は燃焼用空気の酸素濃度, 燃料供給量および酸化剤加熱プロセスによって図 6 に示すよう

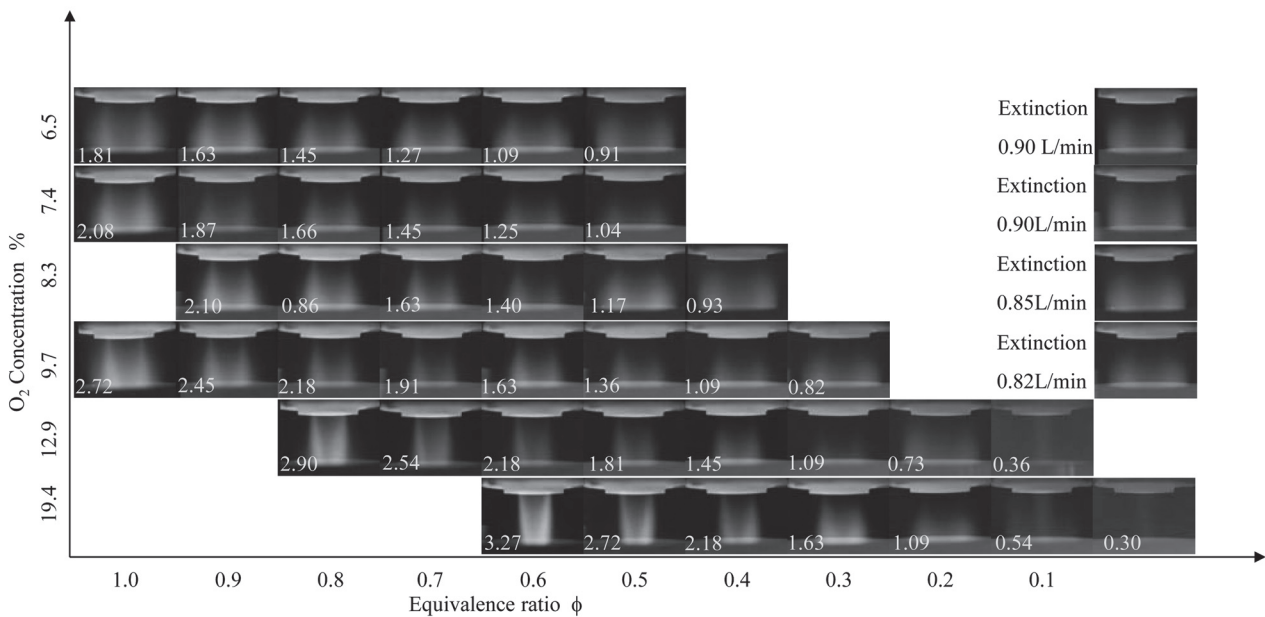


Fig.7 Direct photographs of city gas flames at  $T_{mix} = 1173K$ ; the figures in the photographs indicate the fuel flow rates (L<sub>N</sub>/min)

な複雑な振る舞い (ヒステリシス) を示した。13A 都市ガスにおいては酸化剤温度  $T_{ox}$  が 1173 K 以上で酸素濃度が 9.7 % 以上の場合に自着火が起きた。13A 都市ガスの自着火現象を調べるため、酸化剤温度を 1173 K 一定に保ち、燃料を供給し始める (図 6(a) Case 1) と酸素濃度が高い場合 ( $Y_{O_2} = 19.4\%$ , 12.9%), 燃料を流し始めた直後に噴孔および供給管内で自着火した ( $Y_{O_2} = 12.9\%$  以下では自着火しない)。一方、自着火が起こらない温度で (酸化剤温度を 1073 K) 燃料をある一定以上の流量に流しておいたまま、空気の温度を 1173 K まで加熱する (図 6(b) Case 2) と自着火は起こらない。しかし、この状態のまま、燃料の流量を徐々に下げていくとある限界流量以下では噴孔および供給管内で自着火した (図 7 の当量比 0.1 の火炎)。同じ温度や酸素濃度でも、燃料の供給流量 (流速) によって供給管内で自着火するかしないかが決まり、現段階では詳しいメカニズムは解明されていないが、自着火温度は燃料混合部における混合過程の影響を受けると考えられる。また、13A 都市ガスのような多成分燃料の自着火温度は、各燃料成分中もっとも低い自着火温度をもつ燃料成分の自着火温度に支配されることが分かる。すなわち、13A 都市ガスの主成分はメタンであるが、自着火温度はメタン (1310 K) ではなく、エタン (1150 K) やプロパン (1185 K) の自着火温度に近い値を示す [7-8] (i ブタンに対する最低自着火温度は 1270 K, n ブタンに対しては 1225 K)。

図 7 に予混合気温度が 1173 K (図 6(b) Case 2 による) の場合に形成された 13A 都市ガス予混合火炎の直接火炎写真を示す。それぞれの温度条件において酸素濃度が高く当量比が 1 に近い場合、火炎は通常のブンゼンバーナ火炎に類似しており、はっきりした火炎形状が確認できる。しか

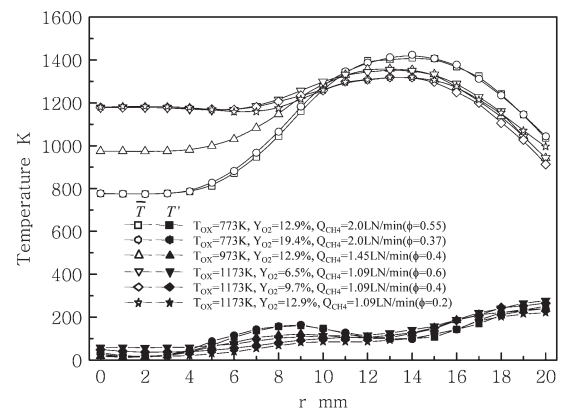


Fig.8 Mean and fluctuation temperature of city gas flames near lean limit of flame quenching

し、酸素濃度と当量比が低下し、火炎全体の消炎に至る希薄消炎限界に近くなるに伴い、はっきりした噴流火炎の形状が確認できなくなり、容器内の非付着火炎と思われる部分が半径方向に広がり、分厚い反応領域を有する静かな燃焼となる。図 8 に都市ガスを燃料とし、さまざまな予混合気温度および酸素濃度条件において希薄限界近傍で計測した平均および変動温度の半径方向分布 ( $z = 10\text{ mm}$ ) を示す。希薄消炎限界近傍の火炎平均温度の最高値は 1350 K から 1400 K 程度であり、大気温度下における通常の都市ガス空気火炎と比較すると平均温度は極めて低く、変動温度も小さい値を示している。特に、未燃予混合気温度が 1173 K の場合、平均温度の最高値は 1350 K 程度で、未燃領域と既燃領域の密度比が 1.15 と極めて低い密度比の火炎が形成さ

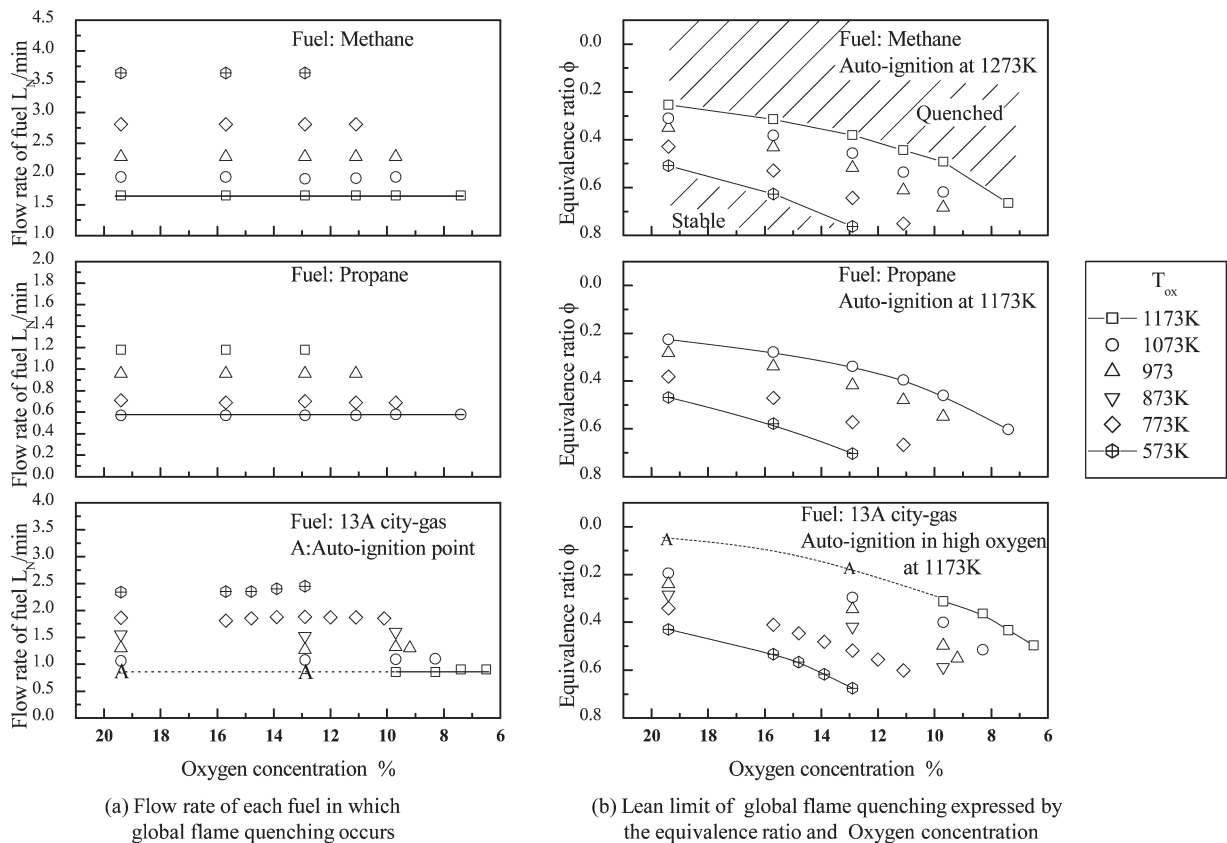


Fig.9 Lean limit of global flame quenching with increasing mixture temperature; symbol A in figure denotes auto-ignition point

れる。以上のことから本実験装置において形成される希薄消炎限界近傍の火炎は平均温度が低く、温度変動も小さい[9]高温空気燃焼炉における火炎と類似の火炎特性を示していることが分かる。

### 3.3. 予混合気温度と酸素濃度による希薄消炎限界

プロパン、メタン、13A 都市ガス火炎に関して、混合気温度と酸化剤中の酸素濃度に対して火炎全体が消炎する希薄消炎限界 (lean limit of global quenching) の燃料流量を図 9(a) に示す。また、図 9(b) に希薄消炎限界の燃料流量を酸化剤中の酸素濃度基準に当量比変換した図を示す。

希薄消炎限界の燃料流量の測定は酸化剤の流量  $Q_{Total}$  ( $Q_{Total} = Q_{Air} + Q_{N_2} + Q_{H_2O} = 65 \text{ LN/min}$ ) と酸素濃度を固定し、燃料の供給流量を減少させ、安定した火炎が 5 分以上保持できず、火炎全体の消炎にいたる流量を希薄消炎限界燃料流量とした。図 9(b) から、予混合気温度の上昇につれ、希薄消炎限界の燃料流量が少なくなり、希薄消炎限界は低酸素側と低当量比側へ広がることが分かる。

また、図 9(a) から同一の予混合気温度において、酸素濃度が異なる場合でも消炎にいたる燃料の流量はほぼ一定であり、希薄側消炎限界は初期予混合気温度と燃料量により決まることが分かる。

図 10 にメタン予混合気の初期温度と消炎時の燃料濃度

から決まる断熱火炎温度および、図 11 に予混合気の初期温度を 1173 K とし、さまざまな酸素濃度において、燃料濃度による層流燃焼速度と断熱火炎温度を計算した結果を示す。数値計算コードには、1 次元予混合火炎の汎用コード PREMIX (Ver. 2.5) コード[10]を、また、メタンの化学反応機構には、GRI-Mech3.0[11]を用いた。

図 10 から予混合気の初期温度が高くなるにしたがって、消炎限界の燃料濃度は単調に減少するが、一方、消炎限界における断熱火炎温度は 1700 K 程度で一定であり、消炎の希薄限界は  $(T_{mix}, Y_{CH_4})$  で決まる火炎温度に依存することが分かる。また、図 11 から予混合気温度と燃料濃度が一定である場合、酸素濃度の低下に伴い、層流燃焼速度が低下し、化学反応の特性時間は長くなることが分かる。通常のブンゼンバーナ火炎においては酸素濃度が低下していくと燃焼速度が低下し、吹き飛びが生じるが、本バーナに形成される火炎は円筒容器内に生じる循環流と外周部を還流する既燃ガス流に支配されており、既燃領域の熱および活性化学種が未燃領域に再循環し、また未燃予混合気が高温度領域に十分長い時間滞留するため、吹き消えによる消炎は容易には生じず、安定した燃焼反応が持続すると考えられる。また、実際の消炎時の火炎温度は、円筒容器への熱損失があるため、予混合気の断熱火炎温度より 300 K 程度低く、メタン予混合気の燃焼限界火炎温度に近い 1400 K

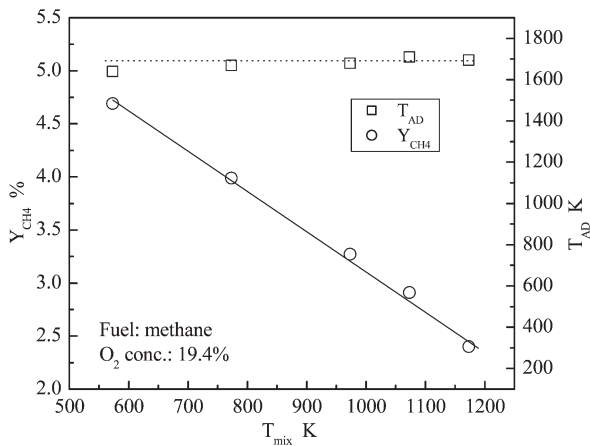


Fig.10 Adiabatic flame temperature calculated for the condition of global flame quenching

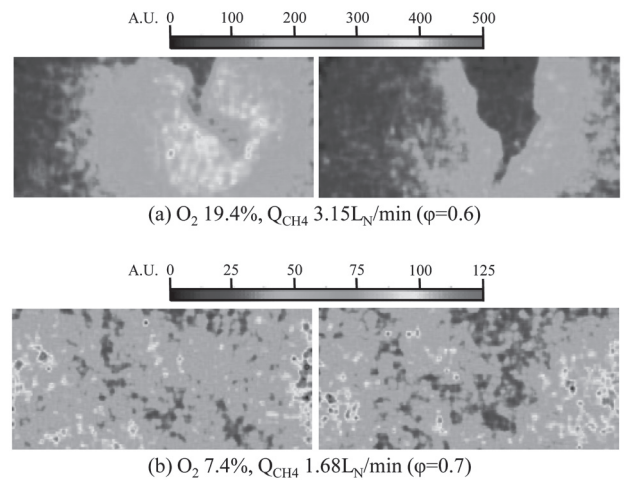


Fig.12 Instantaneous OH-LIPF images ( $T_{mix} = 1173K$ ).

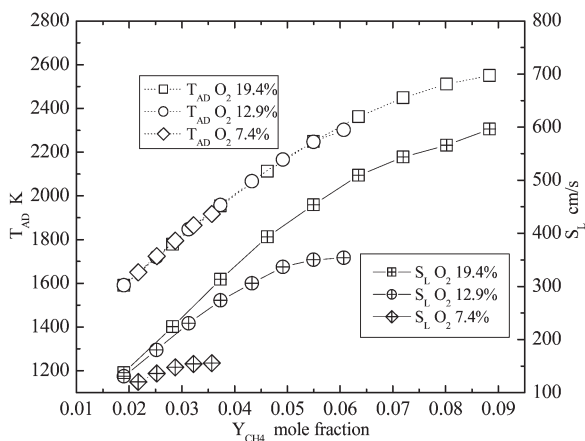


Fig.11 Laminar burning velocity and adiabatic flame temperature in  $T_{mix} = 1173K$  at various oxygen concentration

程度である。

このことから、希薄消炎限界近傍の条件においては、火炎伝ば速度が予混合気流の速度にくらべてはるかに小さい値であり、通常の火炎伝ばによる定在火炎が存在するのではなく、燃焼容器内で、既燃ガスと予混合気とが混合しながら燃焼反応が持続する well stirred reactor の燃焼状態を呈すると考えられる。

### 3.4. 高温希薄希釈予混合火炎の OH 濃度分布

図 12 にメタン火炎に対する OH-LIPF 撮影結果の一例を示す。OH-LIPF 計測の際には図 1(c) の円筒容器を石英ガラス製にし、容器内の OH 濃度を計測した。撮影領域 ( $r = -18 \sim 7.6$  mm,  $z = -6 \sim -18$  mm) は図 1(c) 中に示しており、25.6 mm width  $\times$  12 mm height (空間分解能: 0.038 mm/pix) の大きさである。

図 12 (a) から燃料濃度と酸素濃度が高い場合は円筒容器の底に達する前に燃焼反応が終了し OH 反応帯が連続した

面を形成しており、しかも OH 濃度勾配が急であることから安定した噴流火炎において燃焼反応が薄い火炎面内で起こっているしわ状層流火炎が形成されていることが確認できる。

それに比べ、希薄希釈されている図 12(b) の OH 分布は、Plessing ら[12]および Özdemir ら[13]により FLOX バーナにおいて観測された高温空気燃焼時の OH 分布と類似していることが確認できる。つまり、連続した OH 反応帯は確認できず、島状に存在する OH や未燃予混合気の小塊が多数発生し、未燃予混合気と OH が入り混じった分布となっており、燃焼反応が薄い火炎面ではなく広い空間に分布して起こる well stirred reactor の火炎構造を示していることが分かる。

## 4. まとめ

本研究では、高温空气中に燃料を吹き込んだ際に、燃料が自着火するまでにかかる着火遅れ時間内に急速混合させて予混合気を形成することができる急速混合ノズルを利用したりバースフローバーナを用いて、高温予混合気の燃焼を実現し、予混合火炎の予混合気温度、酸素濃度、燃料濃度の変化に対する希薄消炎限界と、高温希薄希釈予混合気による乱流火炎の諸特性を調べ、以下の知見を得た。

- (1) 予混合気温度の上昇に伴い、希薄消炎限界領域が著しく広くなるため、低酸素濃度、低当量比での燃焼が可能となり、未燃予混合気と既燃ガスの密度比が 1.15 程度の極めて低い密度比の火炎が形成できた。
- (2) 火炎全体が消炎に至る希薄消炎限界は混合気の初期温度と燃料濃度で決まる火炎温度に支配される。本バーナにおける流れ場と燃焼は循環流に支配され、既燃ガスからの熱および活性化学種が未燃領域に激しく再循環するかく拌反応器の燃焼形態を示すので、希薄消炎限界では、既燃ガス中に十分な高温の酸素が残存する

ことと, 未燃予混合気が高温領域に十分長い時間滞留するため, 希薄消炎限界に対する酸素濃度の影響は小さいことが明らかとなった。

- (3) 消炎限界近傍の高温希薄希釈された予混合気による火炎は低ダムケラー火炎であり, 既燃と未燃領域の密度比が小さい静かな燃焼で, 平均温度は低く温度変動も小さい。また, 連続した火炎面が存在せず, 未燃予混合気と OH が入り混じった分布となっており, 燃焼反応が薄い火炎面ではなく広い空間に分布して起こる well stirred reactor の火炎構造を呈することが明らかとなった。

## 謝辞

本研究を実施するにあたって, OH-LIPF 計測に産業技術総合研究所の竹内正雄主任研究員のご協力を戴いた。ここに記して謝意を表す。

## References

1. Katsuki, M., Hasegawa, T., "The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air", *Proc. Combust. Inst.* 27: 3135-3146 (1998).
2. Wüning, J. A., Wüning, J. G., "Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation", *Prog. Energy Combust. Sci.* 23: 81-94 (1997).
3. Flamme, M., "Low NOx Combustion Technologies for High Temperature Applications", *Energy Conversion and Management* 42: 1919-1935 (2001).
4. Milani, A., "Mild Combustion Technique Applied to Regenerative Firing in Industrial Furnaces", *Proceedings of the 2nd International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnaces*, Jan. 17-18, 2000, Jernkontoret-KTH, Stockholm, Sweden.
5. Kong, D., Eckhoff, R. K., Alfert, F., "Auto-ignition of CH<sub>4</sub>/air, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air, CH<sub>4</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air and CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/air using a 11 ignition bomb", *J. of Hazardous Materials* 40: 69-84 (1995).
6. Ahn, C-J, Akamatsu, F., Katsuki, M., "Flame Structure of Turbulent Quasi-Premixed Flames Produced by Rapid Mixing", *J. of the Combustion Soc. of Japan* (in Japanese) 48-143: 128-135 (2006).
7. Fotache, C. G., Kreutz, T. G., Law, C. K., "Ignition of Counterflowing Methane versus Heated Air under Reduced and Elevated Pressures", *Combustion and Flame* 108: 442-470 (1997).
8. Fotache, C. G., Wang, H., Law, C. K., "Ignition of Ethane, Propane, and Butane in Counterflow Jets of Cold Fuel versus Hot Air under Variable Pressures", *Combustion and Flame* 117: 777-794 (1999).
9. Choi, G-M., Katsuki, M., "Advanced low NOx Combustion Using Highly Preheated Air", *Energy conversion and Management* 42: 639-652 (2001).
10. R.J. Kee, J.F. Grcar, M.D. Smooke, J.A. Miller, E. Meeks, *Sandia National Laboratories Report*, SAND85-8240 (1985).
11. G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner, V.V. Lissianski, Z. Q., [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)
12. Plessing, T., Peters, N., Wüning, J. G., "Laser-optical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation", *Proc. Combust. Inst.* 27: 3197-3204 (1998).
13. Özdemir, I. B., Peters, N., "Characteristics of the reaction zone in a combustor operating at mild combustion", *Experiments in Fluids* 30: 683-695 (2001).