

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

酸化剤酸素濃度が急速混合型管状火炎燃焼の安定性に及ぼす影響

Effects of Oxygen Concentration in the Oxidizer on the Stability of Rapidly Mixed Type Tubular Flame Combustion

石 保禄・小割 達也・松田 脩平・下栗 大右・石塚 悟*

SHI, Baolu, KOWARI, Tatsuya, MATSUDA, Shuhei, SHIMOKURI, Daisuke, and ISHIZUKA, Satoru*

広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1
Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan

2012年4月17日受付; 2012年6月20日受理/Received 17 April, 2012; Accepted 20 June, 2012

Abstract : Oxygen-enriched combustion has the potential to save energy, hence, reduce carbon dioxide emissions. In this study, an inherently safe technique of rapidly mixed type tubular flame combustion has been experimentally examined to extend it to higher oxygen concentrations. Results show that when the oxygen concentration of the oxidizer is less than about 40%, stable tubular flame combustion can be obtained. Above 40%, however, oscillatory combustion occurs. With an increase of the oxygen concentration, the oscillatory combustion becomes stronger and its lower limit in the overall equivalence ratio becomes smaller. Further decrease in the equivalence ratio, however, results in stable tubular flame combustion and subsequent extinction. For pure oxygen, stable tubular flame combustion can be obtained in the range of the equivalence ratio from 0.11 to 0.18. With an increase of oxygen concentration the equivalence ratio at extinction decreases gradually, while the fuel concentration at extinction takes an almost constant value of 4.7%. The process leading to the oscillatory combustion is different from that in the conventional premixed type tubular flame combustion; under higher oxygen concentrations, diffusion flames are anchored at the slit exits, which inhibit mixing of fuel and oxidizer, resulting in an intense combustion downstream in a strong swirling flow.

Key Words : Laminar flame, Diffusion flame, Tubular flame, Oscillatory combustion, Oxygen-enriched combustion, Burner

1. 緒言

地球温暖化問題の深刻化に伴い、二酸化炭素の排出削減が急務の課題となっている。対応策として、二酸化炭素の分離・固定化、再生可能エネルギーや原子力エネルギーの利用、天然ガスへの燃料転換などがあるが、省エネルギーやエネルギー利用率の向上も大きな役割を期待され[1]、これを可能とする新しい技術の創成が、燃焼の分野でも求められている。

ところで、燃焼では、通常、酸化剤に空気を用い、高温を必要とするガラス産業などでは純酸素を使用しているが、空気に酸素を添加した酸素富化燃焼は、酸素濃度を数%高めるだけでエネルギー利得が増加し[2]、また、メタンに対する試算では、利用可能エネルギー1kJを得るためのメタンの必要量は、空気に比べ酸素濃度30~40%で2~3割の削減、燃焼炉/廃熱回収装置系で考えると約5割の省エネルギー効果となり[3]、二酸化炭素排出削減を支える省エネルギー

技術として大いに注目に値する。

しかし、酸素富化燃焼は、酸素濃度を高めていくと、いろいろな技術的問題がおきる。まず、予混合燃焼では逆火や爆発の危険性が高まる。これを避けるため、拡散燃焼にすると、高温部は火炎帯に限られるため、燃焼ガス側の広い範囲で様な温度が得られる予混合燃焼に比べ、加熱や材料合成などに利用できる空間が制限されることとなる。また、拡散燃焼は、その名の由来が示すとおり燃料と酸素の拡散過程が律速となるため、燃焼強度(単位時間・単位体積当たりの反応量)が予混合燃焼に比べ格段に弱まり、加熱や溶断などの用途に支障をきたすこととなる。従って、酸素富化燃焼では、これらを克服した一段の技術革新が望まれる。

しかるに、最近の基礎燃焼学の成果の一つに管状火炎がある[4,5]。中でも、燃料と酸化剤を別々に管内に接線方向に吹き出して得られる“急速混合型管状火炎燃焼”は、原理的に逆火が起きない上に、均一な温度場も得られ、種々のプロトタイプのバーナが開発されている[6-8]。

* Corresponding author. E-mail: satoruishizuka@hiroshima-u.ac.jp

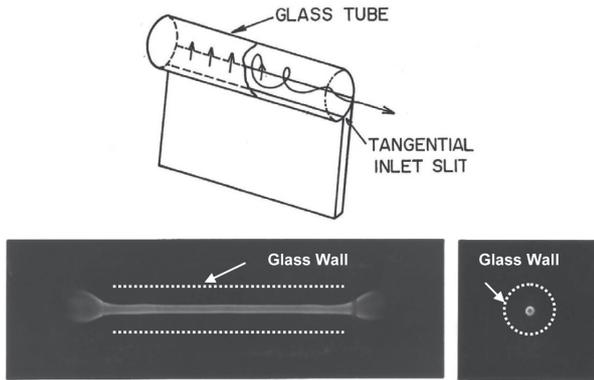


Fig. 1 A swirl-type tubular flame burner and the appearance of flame (inner diameter: 14.3mm, length: 120mm) [4].

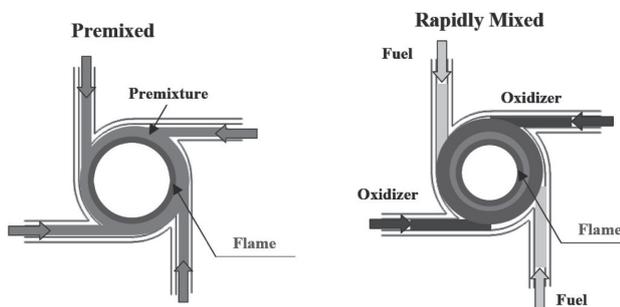


Fig. 2 Premixed (left) and rapidly mixed (right) type tubular flame combustion [6].

そこで、本研究では、空気を対象として開発された急速混合型管状火炎燃焼を、一般の酸素富化燃焼に拡張すべく、酸素を添加して酸化剤酸素濃度を高めた場合の急速混合型管状火炎燃焼の安定性について実験的に調べることにした。

2. 実験装置および実験方法

管状火炎は、可燃性混合気をスリットからガラス管内に接線方向に吹き出して点火すると形成される。内径 13.4 mm、長さ 120 mm のガラス管内に幅 3 mm のスリットからメタン/空気混合気を吹き出したときに形成される管状火炎の外観を、図 1 に示す[4]。断面は円筒状で、その直径は管軸方向に一定の、まさに管状の火炎である。

この火炎は、外側は常温の未燃ガス、内側は高温の燃焼ガスとなっており、燃焼ガスはバーナ両端から排出される。温度分布の対称性からいわれる火炎背後への熱損失が少なく、また、火炎外部は密度の大きい未燃ガス、火炎内部は密度の小さな高温燃焼ガスとなっているため、流れの回転運動に対し空気力学的にも安定である。そのため、実用に供する火炎として注目され、一端を閉じ片側のみから吹き出す実用タイプの管状火炎バーナが開発された[9,10]。

さらに、また、予混合燃焼の場合に懸念される逆火を回避するために、図 2 に示すような、燃料と空気を別々のスリットから吹き出し、バーナ壁に沿って急速混合させて燃

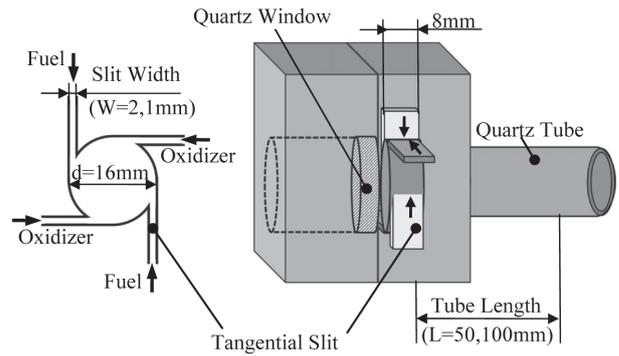


Fig. 3 Schematic of rapidly mixed type tubular flame burner.

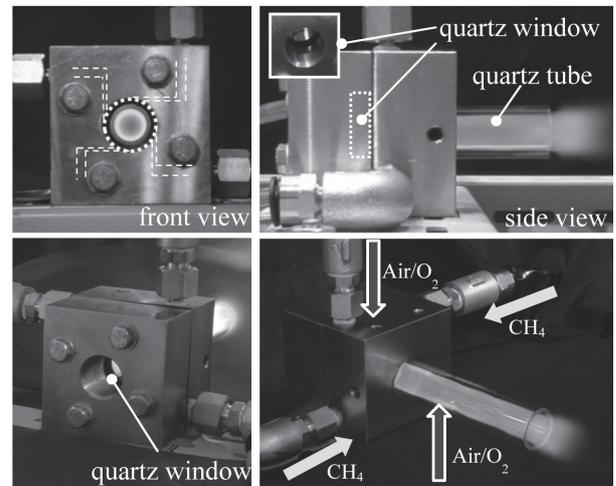


Fig. 4 Rapidly mixed type tubular flame burner.

焼させる急速混合型の管状火炎バーナが考案され[6]、管径 12 インチ、熱出力 2 MW のバーナをはじめ各種プロトタイプのバーナが開発されている[7,8]。

今回は、この急速混合型管状火炎バーナの酸素富化燃焼への適用性を調べるため、空気に酸素を添加し酸化剤の酸素濃度を高めた場合の燃焼安定性を調べた。酸素濃度 100 % の純酸素燃焼時は、かなり激しい燃焼が予想されるため、バーナ径は 16 mm に留めた。これに対し、図 3 に模式的に示すように、長さ 8 mm、幅 W としては 2 mm あるいは 1 mm の矩形スリットが燃料用、酸化剤用に 2 個ずつ 90°毎に交互に取り付けられたステンレス製の急速混合型管状火炎バーナを製作し使用した。その外観を図 4 に示す。なお、バーナ形状から簡易的に算出されるスワール数[4]はスリット幅 2 mm では約 6.3、1 mm では 12.6 で、一様な管状火炎が得られるスワール数 5 以上の条件[6]を満足している。また、観察用に閉端には石英窓が設けられおり、開放端には内径 16 mm、長さ $L = 50$ mm あるいは 100 mm の石英管を取り付けて実験を行った。燃料には天然ガスの主成分であるメタン、酸化剤には空気に酸素を添加した混合気を用いた。これらのガスは、浮き子式流量計で流量を測定

後バーナへ供給される。実験は、実用的観点から、燃料希薄側を主に行った。

なお、酸素濃度が高くなると、振動燃焼が多々発生したため、参考に、圧力センサー (PCB, HM102A06, 最大圧 68.95 MPa, 応答時間 1.0 μ sec) とデジタルオシロスコープ (IWATU, Wave Runner, 64kwords x 4 channels) を用いて圧力振動の測定も行った。

3. 実験結果

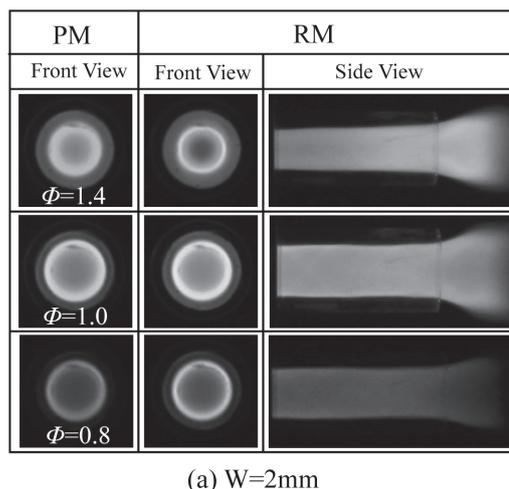
3.1. 空気を酸化剤に用いた場合

はじめに、空気を酸化剤に用い、本実験で用いるバーナの特性を調べた。予備実験の結果、スリット幅 1 mm のバーナでは、流量 15 $\text{m}^3/\text{N/h}$ あたりを超えると流れがチョークすることが分かったので、空気流量 $Q_{\text{Air}} = 10 \text{ m}^3/\text{N/h}$ 一定のもとで燃料流量による火炎外観の変化を調べた。図 5 は、代表的な当量比 ϕ における予混合時と急速混合時の火炎外観を比較して示す。なお、流れの回転方向速度をほぼ同一にするため、予混合気を吹き出す場合は、対向する 2 つのスリットから吹き出し、他の 2 つのスリットは閉じて使用した。PM (Premixed) は予混合, RM (Rapidly Mixed) は急速混合であることを示す。なお、急速混合時の当量比は、燃料と酸化剤の完全混合を仮定した総括当量比である。また、参考に、急速混合時は、バーナ側面から撮影した画像も示す。

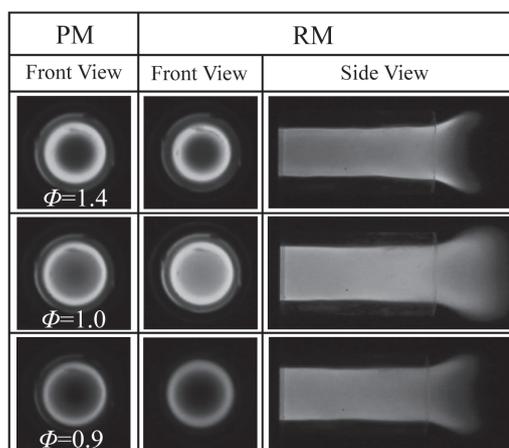
まず、スリット幅 $W = 2 \text{ mm}$ のバーナで、予混合気を燃料過剰な当量比で吹き出し着火すると、発光の一様な管状の火炎が形成される (図 5(a) 上段左)。燃料流量を減らし当量比を小さくしていくと、火炎の直径は増加するが、当量比 1 あたりで最大となり (図 5(a) 中段左)、さらに当量比を小さくしていくと、火炎直径は減少に転じる (図 5(a) 下段左)。この火炎直径が当量比 1 付近で最大となり、希薄・過濃になるほど火炎直径が減少するのは、管状火炎は半径方向の未燃ガス流速と燃焼速度が釣り合う位置に形成されるためである[4,5]。

さて、急速混合の場合の火炎 (図 5(a) 中・右) を見ると、予混合の場合 (図 5(a) 左) とほぼ同様の均一な火炎が形成されることがわかる。但し、燃料過剰側 (図 5(a) 上段中) では、火炎直径は予混合時 (図 5(a) 上段左) に比べ 2 割ぐらい小さくなっているほか、側面からの撮影によれば (図 5(a) 上段右)、火炎発光もバーナ端から燃焼管出口に向かって、徐々に青色が薄く (白黒印刷では濃く) なり、軸方向に分布のあることがわかる。

次に、スリット幅 $W = 1 \text{ mm}$ のバーナの場合であるが、まず、予混合時の火炎 (図 5(b) 左) をスリット幅 2 mm の予混合火炎 (図 5(a) 左) と比較すると、いずれの当量比でも火炎直径が若干大きくなっていることがわかる。次に、急速混合時の火炎 (図 5(b) 中) と予混合時の火炎 (図 5(b) 左) を比較すると、直径がほぼ同等な火炎が形成されていることがわかる。特に、スリット幅 2 mm では、過濃混合気の場合、急速混合時の火炎直径は予混合時に比べかなり小さ



(a) $W=2\text{mm}$



(b) $W=1\text{mm}$

Fig.5 Appearances of flame in the rapidly mixed type tubular flame burner (PM: premixed, RM: rapidly mixed, (a) $W=2\text{mm}$, (b) $W=1\text{mm}$, $Q_{\text{Air}} = 10 \text{ m}^3/\text{N/h}$).

くなったが (図 5(a) 上段左・中)、スリット幅 1 mm では、その差は縮小傾向にある (図 5(b) 上段左・中)。

以上、総じて、本バーナにおいても、急速混合時、予混合時に近い燃焼状態が得られることがわかった。このことは、今回使用したバーナが、予混合燃焼と同等の火炎が得られる 5 以上の巡回強度の条件[6]を満足していることから妥当であると考えられる。

次に消炎限界を調べた。その結果を、当量比 ϕ と空気流量 Q_{Air} で図 6 に示す。図中破線は、メタンの可燃限界を示す[11]。長さ $L = 100 \text{ mm}$ の石英管を装着した場合、予混合時の希薄限界は空気流量に対しほぼ一定で希薄可燃限界値 ($\phi = 0.5$) にほぼ等しいが、過濃限界での当量比は 1.5 で過濃可燃限界値 ($\phi = 1.68$) より小さく、これは、ルイス数の影響であると考えられる[4,5,8]。一方、急速混合では、希薄側で若干当量比が小さくなるものの、過濃側では予混合とほぼ同じ当量比で消炎している。

石英管長さが 50 mm と短い場合、希薄限界での当量比の値は予混合、急速混合いずれの場合も空気流量の増加と

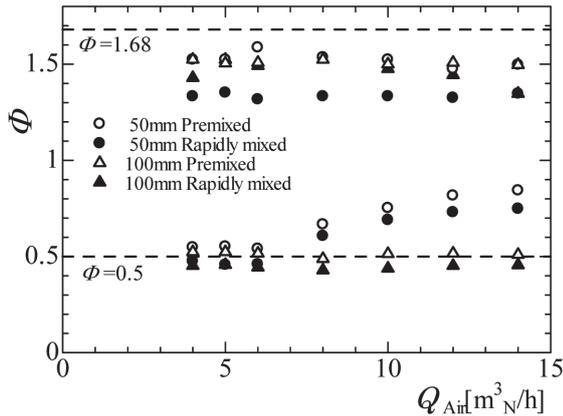


Fig.6 Extinction limits of methane/air flame (W=2mm).

もに大きくなる。観察によると、強い旋回により周囲空気が石英管内に引き込まれており、この空気の冷却効果により希薄限界での当量比の値が増加したものと考えられる。一方、過濃限界での当量比の値は、急速混合時の値が他に比べ小さくなっているが、空気流量に対しほぼ一定である。考えるに、過濃混合気の場合、石英管出口では周囲空気と余剰燃料間で高温燃焼ガスが生成されており、これが旋回により石英管内に引き込まれても冷却作用は起きず、そのため、過濃限界での当量比の値は空気流量に対してほぼ一定となったと思われる。

以上、今回用いたバーナでは、石英管長さが50mmと短い場合、周囲空気の巻き込みによる冷却のため可燃範囲が狭くなることがあるものの、石英管長さを100mmと長く取れば、通常の希薄可燃限界から過濃可燃限界にわたる広い当量比の範囲で、予混合ならびに急速混合時、安定な管状火炎が形成されることが確認された。

3.2. 空気に酸素添加した酸化剤を用いた場合

次に、空気に酸素を徐々に加え、酸化剤の酸素濃度を大きくしていった場合の急速混合時の火炎を観察した。図7は、スリット幅2mm、石英管長さ50mmのバーナを用い、空気流量 Q_{Air} と酸素流量 Q_{O_2} の和である酸化剤流量 $Q_{Oxidizer}$ を $14 \text{ m}^3/\text{h}$ 一定のもとで、メタンの流量を $1 \text{ m}^3/\text{h}$ から徐々に減らしていった場合の火炎外観の変化を示す。ここで、酸素濃度としては、次式で定義される酸化剤中の酸素のモル分率 β をとる。

$$\beta = \frac{0.21Q_{Air} + Q_{O_2}}{Q_{Air} + Q_{O_2}} \quad (1)$$

酸化剤中の酸素濃度 β の値がおよそ0.4以下では、空気と同様、円形断面の管状火炎が形成され、メタンの流量を減らして総括当量比を小さくしていくと火炎直径は徐々に減少し、ついには消炎した(図7最左列)。

しかし、酸素濃度を大きくして $\beta = 0.55$ とすると、メタンの流量が大きいところでは振動が発生し、断面も楕円形

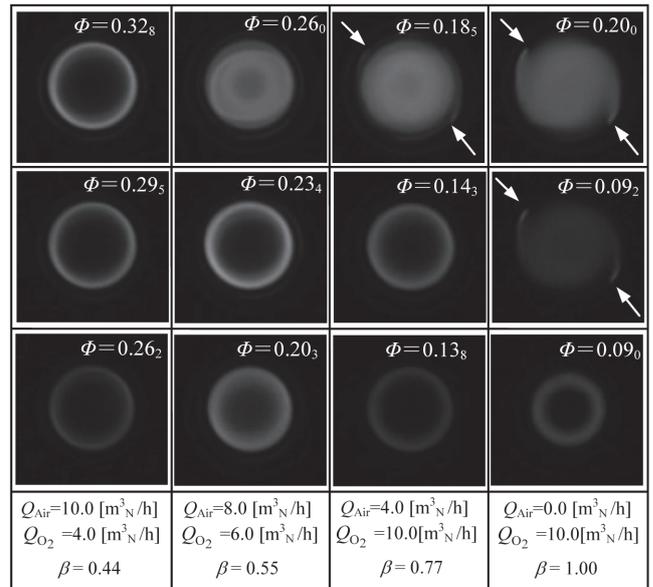


Fig.7 Appearances of methane/oxygen-air flames in the rapidly mixed type tubular flame burner (W=2mm, L=50mm).

状に変形した(図7:2列目上段)。このとき、楕円状の青炎の内部に、ぼやけた円筒状の発光が見られたが、側面あるいは石英管下流側からの観察によると、スリット下流で発光を伴った燃焼が起きており、これが正面からの撮影では円筒状に映ったものと考えられる。しかし、メタンの流量を減らしていくと、中心部の発光は消失して管状火炎のみとなり(図7:2列目中段)、その直径は徐々に減少し(図7:2列目下段)、ついには円形断面を保ったまま消炎した。

酸素濃度をさらに増加させ $\beta = 0.77$ とすると、振動燃焼は激しさを増し、中心部の発光強度が増す(図7:3列目上段)。参考に、圧力変動を測定したところ、酸素濃度 $\beta = 0.868$, $Q_{O_2} = 10.0 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{Air} = 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{CH_4} = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Phi = 0.192$ では、 $\pm 4 \text{ kPa}$ 程度、デシベル値にして110~150 dBの圧力変動が測定された。注意深く観察すると、燃料スリット出口に火炎(図中矢印で示す)が付着しているのがわかる。しかし、メタンの流量を減らすと、付着火炎は消失して円形断面の管状火炎が形成され(図7:3列目中段)、さらに燃料流量を減らすと、火炎直径・発光ともに減少し(図7:3列目下段)、やがて円形断面を保ったまま消炎した。

空気の供給をやめ、完全に純酸素 ($\beta = 1.00$) を酸化剤として使用した場合、広い当量比範囲で激しい振動燃焼が起きた。特筆すべきは、燃料流量を減らし総括当量比を小さくしても執拗にスリット出口に火炎が付着して形成されることである(図7:最右列上・中段、矢印)。しかし、燃料流量をさらに減らすと、消炎限界直前には管状火炎が形成された(図7:最右列下段)。

以上、酸化剤酸素濃度が大きくなると、振動燃焼が発生すること、しかし、当量比を小さくすると安定な管状火炎燃焼に移行し、この管状火炎の状態で消炎することが明らかになった。

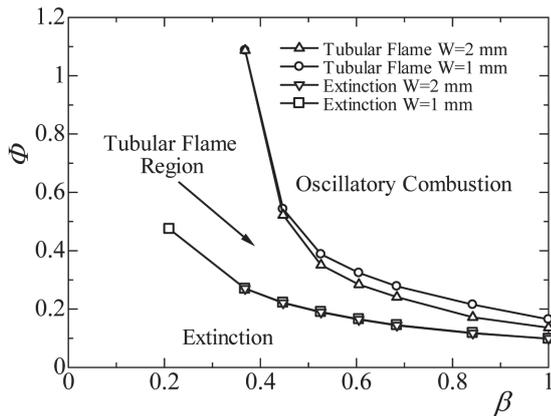


Fig.8 Mappings of various combustion regions in the rapidly mixed type combustion ($L=100\text{mm}$).

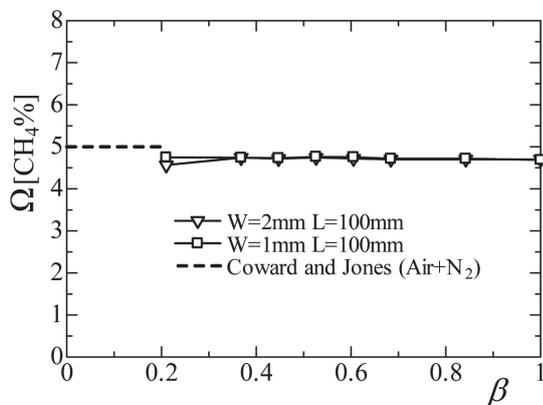


Fig.9 Variations of fuel concentration at lean limit with the oxygen mole fraction β .

そこで、周囲空気の巻き込みによる冷却効果のない長さ 100 mm の石英管を装着し、スリット幅 2 mm と 1 mm のバーナを用いて、酸化剤流量 $10\text{ m}^3/\text{N/h}$ 一定のもとで、振動燃焼から管状火炎への移行時、並びに、管状火炎が消炎する時の当量比 Φ の値を酸素濃度 β に対して求めてみた。その結果を図 8 に示す。

β の値が約 0.4 以下では、広い当量比の範囲で安定な管状火炎が形成される。しかし、それ以上の酸素濃度では振動燃焼が発生する。この振動燃焼は、 β 一定のもとで当量比を減らすと安定な管状火炎燃焼に移行するが、その当量比は β の値の増大につれ減少し、つまり、振動燃焼範囲は拡大する。この範囲は、スリット幅 1 mm に比べスリット幅 2 mm の方が広がっている。

一方、管状火炎の状態で当量比を小さくしていくと消炎するが、この消炎限界での当量比は、スリット幅が 2 mm でも 1 mm でもほとんど同じで、 $\beta = 0.21$ の空気では 0.475 と希薄可燃限界に近い値を取り、酸素濃度の上昇につれ徐々に減少し、 $\beta = 1.00$ (純酸素) では $\Phi = 0.10$ となる。

ところで、希薄限界における燃料濃度は、空気に窒素を加えて希釈した場合でも純酸素を酸化剤に用いた場合もほ

ぼ一定で約 5 % となり、その理由として、余剰物質 (窒素や酸素) の比熱がほぼ等しいことが知られている[11]。そこで、参考に、図 8 のデータから消炎限界における燃料濃度 $\Omega (= Q_{\text{CH}_4} / (Q_{\text{CH}_4} + Q_{\text{Air}} + Q_{\text{O}_2}))$ の値を求めてみた。その結果を、図 9 に示す。

消炎限界における燃料濃度は、スリット幅 2 mm も 1 mm も β の値に対してほぼ一定で 4.7 % であった。図中、破線は、空気に窒素を加えたときの希薄可燃限界での燃料濃度を示し、ほぼ 5.0 % である。また、管径 2 インチの上方伝播火炎で決定された希薄可燃限界での燃料濃度の値は 5.15 % [11] である。これらに比べ、本結果は若干小さいが極めて近いこと、また、 β に対してほぼ一定であること、が明らかとなった。

3.3. 純酸素を酸化剤に用いた場合

最後に、純酸素燃焼の場合について詳しく調べた。スリット幅 2 mm、石英管長さ 50 mm のバーナを用い、酸素流量 $Q_{\text{O}_2} = 2.0\text{ m}^3/\text{N/h}$ 一定のもとでメタン流量 Q_{CH_4} による火炎外観の変化を調べた。その結果を図 10 に示す。

メタンの流量が少なく $Q_{\text{CH}_4} = 0.2\text{ m}^3/\text{N/h}$ の場合 (図 10 左)、吹き出し流速の遅い燃料スリット出口に拡散火炎が安定化される。燃料のほとんどは、この拡散火炎帯で消費され、わずかな残量が巴型の発光の尾として下流に伸びる形で写っている。

メタンの流量を $Q_{\text{CH}_4} = 0.4\text{ m}^3/\text{N/h}$ に増やすと、やや騒音を伴った振動燃焼状態となる。燃料スリットの出口には執拗に拡散火炎が付着し、その火炎帯は薄く鋭くなり、巴型の尾は太く伸びるほか、中心部に強い発光帯が現れる (図 10 中)。考えるに、拡散火炎帯で反応する燃料や酸素の量は拡散流速で限定されるため、残りは下流の強旋回流中で燃焼し、これが中心部の強い発光帯として写しだされたものと考えられる。

さて、さらにメタンの流量を増やし $Q_{\text{CH}_4} = 1.0\text{ m}^3/\text{N/h}$ 、すなわち、総括当量比を $\Phi = 1.0$ とすると (図 10 右)、振動燃焼はいよいよ激しさを増す。よく観察すると、酸化剤スリット出口にも拡散火炎が付着・安定化され (矢印参照)、中心部の発光もますます強度を増す。また、発光は全体的に赤みを帯びるが、これは燃焼ガス温度が高いため、石英ガラスが赤熱したためと思われる。

メタンの流量を増やすと中心部に強い発光帯が現れ (図 10 中)、さらにメタンの流量を増やすとその領域が増加し (図 10 右)、これに呼応して、燃焼騒音が激しさを増したので、中心部に現れる発光帯中での燃焼、すなわち、スリット下流の強旋回流中で起きている燃焼が振動燃焼の元凶になっていると思われる。

なお、参考に圧力変動を測定したところ、純酸素燃焼時は特に大きくなり、たとえば、 $Q_{\text{O}_2} = 4.0\text{ m}^3/\text{N/h}$ 、 $Q_{\text{CH}_4} = 0.3\text{ m}^3/\text{N/h}$ で当量比の値が 0.15 と小さいときでも、優に $\pm 10\text{ kPa}$ を越える圧力変動が観察された。

引き続き、酸素流量を $Q_{\text{O}_2} = 8.0\text{ m}^3/\text{N/h}$ と大きくし、また、

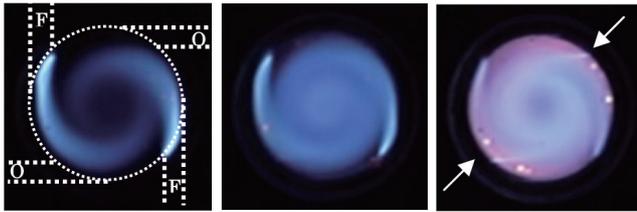


Fig.10 Appearances of methane/oxygen flames (W=2mm, L=50mm, $Q_{O_2} = 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{CH_4} = 0.2$ (left), 0.4 (center), 1.0 (right) m^3/h).

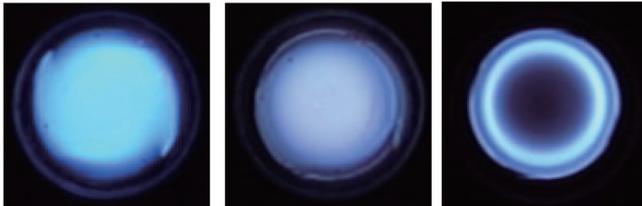


Fig.11 Appearances of methane/oxygen flames (L=50mm, $Q_{O_2} = 8.0 \text{ m}^3/\text{h}$, left: W=2mm, $Q_{CH_4} = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, center: W=1mm, $Q_{CH_4} = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, right: W=1mm, $Q_{CH_4} = 0.65 \text{ m}^3/\text{h}$).

スリット幅 1 mm のバーナについても観察を行った。その結果を図 11 に示す。

スリット幅 2 mm, メタン流量 $Q_{CH_4} = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ でも、酸素流量を $Q_{O_2} = 8.0 \text{ m}^3/\text{h}$ に増やすと、図 10 右で見られた酸化剤スリット出口付近の拡散火炎は消失する (図 11 左)。さらに、スリット幅を 1 mm と狭くすると、燃料スリット出口付近の拡散火炎もほとんど消失する。しかし、中央部には激しい発光塊が見られる (図 11 中)。この状態で燃料流量を減らすと、スリット出口付近に安定化されていた火炎は完全に消失し、と同時に、管状火炎が形成された (図 11 右)。

参考に、スリット幅 $W = 1 \text{ mm}$, 石英管長さ $L = 100 \text{ mm}$ のバーナにおいて、酸素流量 $Q_{O_2} = 6.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 一定のもとで燃料流量をわずかに増減させ、激しい振動燃焼状態から安定な管状火炎燃焼へ遷移する様子を正面と斜め側面から撮影した画像を図 12 に示す。

燃料流量が大きい場合 (図 12 上段, $Q_{CH_4} = 0.55 \text{ m}^3/\text{h}$), 激しい振動燃焼が発生する。この様子は、正面の画像では薄い円筒状の青炎とやや赤味がかかった中央部の発光として認識され、斜め側面の画像では、円錐状の尾を引いた円筒状の強い発光帯として撮影される。

燃料流量を少し下げると (図 12 下段, $Q_{CH_4} = 0.50 \text{ m}^3/\text{h}$), 火炎帯の薄い管状火炎に移行し、正面の画像では円筒状の青炎が、斜め側面の映像では、若干縞の入った管状の青炎として撮影される。この状態から燃料流量を減らすと、火炎直径は減少し消失する。

管状火炎バーナでは、従来、8 インチや 12 インチといった大きなバーナ径でしかも大出力時に振動燃焼が起き、予混合気を用いた実験では、周方向モードが関与する高周波の振動であることが知られている [12]。しかし、今回観察

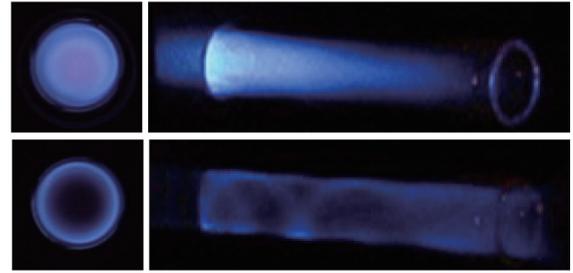


Fig.12 Appearances of methane/oxygen flames (W=1mm, L=100mm, $Q_{O_2} = 6.0 \text{ m}^3/\text{h}$, upper: $Q_{CH_4} = 0.55 \text{ m}^3/\text{h}$, lower: $Q_{CH_4} = 0.50 \text{ m}^3/\text{h}$).

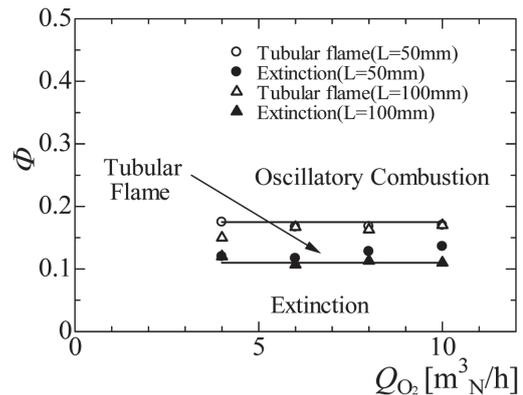


Fig.13 Methane/oxygen tubular flame regions (W=1 mm, L=50, 100 mm).

された振動燃焼は、発生過程、並びに、燃焼形態が、従来のものとはかなり異なるものと考えられる。

すなわち、酸素濃度が高い場合、燃料流と酸化剤流の境界面で拡散燃焼が起き、これがスリット出口近傍で安定化されるため、燃料と酸素の急速混合が阻害され、大部分の燃料と酸素は、下流の強旋回流中で激しく燃焼し、これが振動燃焼を引き起こしたと思われる。

最後に、スリット幅 1 mm, 石英管長さは 50 mm と 100 mm のバーナを用い、振動燃焼から管状火炎燃焼に遷移するときの当量比、ならびに、管状火炎が消失するときの当量比の値を酸素流量に対して求めてみた。その結果を、図 13 に示す。

$L = 50 \text{ mm}$ の石英管を用いた場合、希薄限界での当量比の値は酸素流量とともにやや増大し、前述の空気の巻き込みによる冷却効果が認められるが、 $L = 100 \text{ mm}$ ではほぼ一定となり、非常に狭い範囲ではあるが、当量比 0.11~0.18 の範囲で酸素流量にかかわらず管状火炎が安定に形成されることがわかる。

4. 考察

そもそも、管状火炎は、燃焼速度と未燃ガスの半径方向速度が釣り合った位置に形成される。したがって、混合気を燃焼速度以上の速度で半径方向に吹き出せば、流体力学

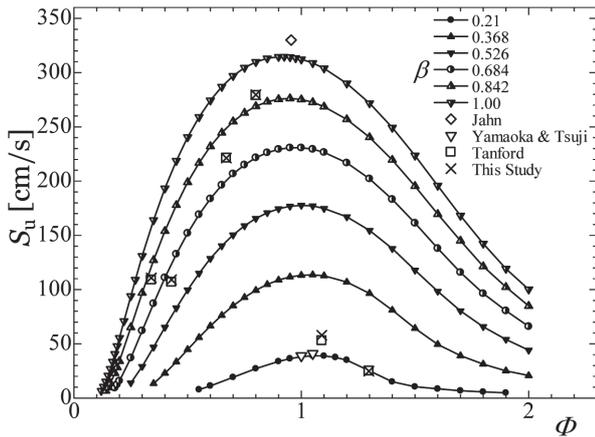


Fig. 14 Variations of burning velocity S_u with the equivalence ratio Φ using the oxygen mole fraction β as a parameter.

上はバーナ内に管状火炎が形成され、吹き出し速度を大きくしたり、あるいは、混合気の燃焼速度を小さくしたりすれば、火炎直径は減少することになる[4,5].

そこで、酸素濃度により燃焼速度がどのように変化するかを、多成分系の輸送特性を考慮した Chemkin Premixed Code [13,14]と 53 の化学種、325 の素反応過程を考慮した GRI-Mech 3.0 の素反応機構[15]を用いて数値計算で求めてみた。図 14 に、酸素濃度 β をパラメタとし、燃焼速度 S_u を当量比 Φ に対してプロットした結果を示す。

本計算によれば、最大燃焼速度は、酸化剤に純酸素を用いた場合は当量比 0.925 で 314.6 cm/s、空気を用いた場合は当量比 1.064 で 39.06 cm/s となった。これらの値は、Jahn [16]が純酸素で得た最大燃焼速度の値 (当量比 0.955 で 330 cm/s) や Yamaoka & Tsuji [17]が空気で得た最大燃焼速度の値 (当量比 1.05 で 41 cm/s) に非常に近い。また、Tanford [18]の測定と同条件の酸素濃度・当量比に対して数値計算で求めた燃焼速度の値 (\times) は測定値 (\square) とほとんど一致する。これから、本計算結果は妥当なものと考えられる。

さて、図 8 に示すように、酸素濃度 $\beta = 0.368$ では 1 付近の当量比まで管状火炎が安定に形成された。一方、数値計算では $\beta = 0.368$ の場合、最大燃焼速度は約 110 cm/s である。ということは、この実験条件では、燃焼速度が 110 cm/s 程度と速くなっても、広い当量比範囲で安定な管状火炎が形成可能なのがある。ところが、同じ吹き出し条件でも、例えば純酸素燃焼時 ($\beta = 1.0$) では、当量比 0.18 以上、つまり、燃焼速度でいうと 40 cm/s 以上で振動燃焼が発生し、安定な管状火炎が得られなくなった。

この様子を詳しく吟味するため、図 8 の安定な管状火炎が形成される範囲における燃焼速度の値を調べてみた。その結果を図 15 に示す。

$\beta = 0.368$ では、 $S_u = 10 \sim 110$ cm/s の広い燃焼速度の範囲で管状火炎が形成されるが、 $\beta = 0.447$ では $S_u = 10 \sim 85$ cm/s、 $\beta = 0.526$ では $S_u = 10 \sim 60$ cm/s と燃焼速度の上限値が小さくなっている。スリット幅が 2 mm の場合、この上限値は

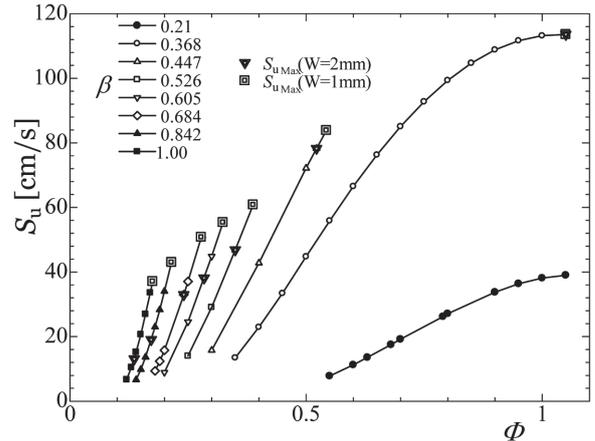


Fig. 15 Burning velocities of the mixtures which sustain tubular flame in the rapidly mixed type combustion.

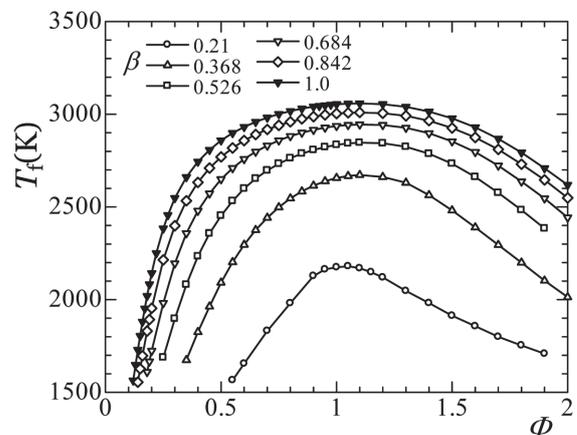


Fig. 16 Adiabatic flame temperatures T_f as a function of equivalence ratio Φ using the oxygen mole fraction β as a parameter.

スリット幅 1 mm に比べさらに小さくなる。

このことは、酸素濃度が高くなると拡散火炎がスリット出口に安定化され易くなり、これが燃料と酸化剤の混合を阻み、ひいては、下流の強旋回流中で激しい振動燃焼を引き起こすとする前述の仮説を裏付けている。

したがって、酸素濃度が高い場合、安定な急速混合型管状火炎燃焼を得るには、燃焼速度と半径速度の釣り合いという流体力学的な条件を満たすだけでは不十分で、燃料と酸化剤間に形成される拡散火炎の形成を抑制することが必要不可欠となることが明らかになった。

最後に、断熱火炎温度を計算した結果を図 16 に示す。本バーナでは、 $\beta \leq 0.4$ であれば広い当量比に対して安定な管状火炎が形成されるので、2700 K 程度の高温度は問題なく得られることがわかる。しかし、さらに高い温度を得ようと酸素濃度を上げると振動燃焼が起き、例えば純酸素燃焼では、当量比 0.18 以上、温度的には 2000 K 以上で振動燃焼が発生する。

もっとも、酸素富化燃焼では、空気に比べエネルギー利得

の増加が著しい酸素濃度 40 % 以下を用いることが多いので[2], この範囲であれば, 現行バーナでも実用上問題ないと思われる。しかし, 2700 K 以上の高温を得るには, スリット幅をさらに小さくして拡散火炎の形成を抑制するなどの振動燃焼対策が必要である。

5. 結論

空気を対象として開発された急速混合型管状火炎燃焼を, 一般の酸素富化燃焼に拡張すべく, 酸化剤酸素濃度を高めた場合の急速混合型管状火炎燃焼の安定性について実験を行った。以下に主な結論を記す。

- (1) 約 40 % 以下の酸素濃度では, 空気の場合と同様, 安定な管状火炎燃焼が得られる。
- (2) 40 % 以上の酸素濃度では振動燃焼が発生する。この振動燃焼の起きる当量比範囲は, 酸素濃度が増えるに従い増加するが, いずれの酸素濃度でも, 当量比を小さくすれば安定な管状火炎燃焼へ移行し, さらに当量比を小さくすれば消炎する。
- (3) ちなみに, 安定な管状火炎が得られる当量比範囲は純酸素燃焼では 0.11~0.18 であった。また, 酸素濃度の増加とともに管状火炎が消炎する当量比の値は減少するが, 燃料濃度の値はほぼ一定で 4.7 % であった。
- (4) 今回発生した振動燃焼は, 従来の予混合型管状火炎燃焼で報告されたものとは異なり, 酸素濃度の増加により吹き出しスリット出口に拡散火炎が安定化され, これが燃料と酸化剤の混合を阻害し, 下流の強旋回流中で激しく燃焼することに起因するものと考えられる。
- (5) したがって, 酸素濃度が高い場合, 安定な急速混合型管状火炎燃焼を得るには, 燃焼速度と半径速度の釣り合いという流体力学的な条件を満たすだけでは不十分で, 燃料と酸化剤間に形成される拡散火炎の形成を抑制することが必要不可欠となる。
- (6) ちなみに, 断熱火炎温度を求めた結果から推察すると, 本バーナでは 2700 K 以下であれば安定な管状火炎燃焼で得られるが, それ以上高温を得るために酸素濃度を上げると激しい振動燃焼が起き, スリット幅をさらに小さくするなど拡散火炎の形成を抑制する対策が必要となる。

References

1. IEA, Energy Technology Perspective 2010, Figure ES.1, 2010.
2. Baukal, C. E., Jr., Heat Transfer in Industrial Combustion, CRC Press, Boca Raton, p.46 (2000).
3. Nishimura, M., Suyari, M., Suzuki, T., and Takagi, T., Studies on Fuel Savings and NO_x Reduction Related to Oxygen-enriched Air Combustion, Kobe Steel Engineering Reports, vol.51, No.2, pp.8-12 (2011).

4. Ishizuka, S., Twentieth Symp. (Intern.) on Combustion, The Combustion Institute, pp.287-294 (1985).
5. Ishizuka, S., *Prog. Energy Combust. Sci.* 19, pp.187-226 (1993).
6. Ishizuka, S., Motodamari, T., Shimokuri, D., *Proc. Combust. Inst.* 31, pp.1082-1092 (2007).
7. Ishioka, M., Okada, K., and Ishizuka, S., *J. Combust. Soc. of Japan*, (in Japanese) vol.48, No.145, pp. 250-256 (2006).
8. Ishizuka, S., Shimokuri, D., Ishii, K., Okada, K., Takashi, K., and Suzukawa, Y., *J. Combust. Soc. of Japan*, (in Japanese), vol.51, No.156 pp.104-113 (2009).
9. Ishizuka, S., Hagiwara, R., Suzuki, M., Nakamura, A., and Hamaguchi, O., *JSME Trans. B.* (in Japanese), vol.65, No.639, pp.3845-3852 (1999).
10. Hagiwara, R., Okamoto, M., Ishizuka, S., Kobayashi, H., Nakamura, A., and Suzuki, M., *JSME Trans. B.* (in Japanese), vol.66, No.652, pp.3226-3232 (2000).
11. Cowards, H. F. and Jones, C. W., Limits of Flammability of Gases and Vapors, US Bureau of Mines, Bulletin 503 , p.44 (1952).
12. Shimokuri, D., Shiraga, Y., Ishizuka, S., Ishii, K., and Toh, H., *JSME Trans. B.* (in Japanese), vol. 75, No.753 pp.1197-1204 (2009).
13. Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A. A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames, Sandia National Laboratories Report SAND85-8240 (1985).
14. Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E., and Miller, J. A., A FORTRAN Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Multicomponent Transport Properties, Tech. Rep. SAND86-8246, Sandia National Laboratories, 1986.
15. Smith, G., Golden, D., Frenklach, M., Moriarty, N., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson, R., Song, S., Gardiner, W., Lissianski, V., and Qin, Z., GRI-Mech. — An Optimized Detailed Chemical Reaction Mechanism for Methane Combustion, Tech. Rep. available at http://www.me.berkeley.edu/gri_mech, Gas Research Institute, 1999.
16. Jahn, G., *Der Zündvorgang in Gasgemischen* (Dissertation), Oldenbourg, Berlin, 1934.
17. Yamaoka, I. and Tsuji, H., Twentieth Symp. (Intern.) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1883-1892 (1985).
18. Tanford, C., Third Symp. on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, Williams & Wilkins, pp.140-146 (1949).