濃淡火炎の境界領域を制御した濃淡バーナの燃焼特性* (第 2 報, 実用燃焼領域に及ぼす境界領域制御用混合気および空気の効果)

安田 裕文^{*1}, 安里 勝雄^{*2}, 宮坂 武志^{*3}
宮下 高宏^{*1}, 榊原 大介^{*1}, 倉知 清悟^{*4}
羽木 敏^{*5}, 梅田 良人^{*5}

Characteristics of Combustion of Rich-Lean Burner Controlled Boundary Region between Rich and Lean Flames (2nd Report, Effects of Mixture and Air Supplied into Boundary Region on Practical Combustion Region)

Hirofumi YASUDA, Katsuo ASATO^{*6}, Takeshi MIYASAKA,
Takahiro MIYASHITA, Daisuke SAKAKIBARA, Seigo KURACHI,
Satoshi HAGI and Yoshito UMEDA

^{*6} Department of Human & Information Systems Engineering, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193 Japan

Effects of the velocity and the air ratio of the mixture and the air supplied into the boundary region between the rich and lean flames on the characteristics of the rich-lean combustion were investigated in order to develop a new type of a domestic boiling water heater and a warm heater with low emission of NO_x and high TDR. The characteristics of flame stabilization of the rich-lean combustion are improved even under the condition of the practical combustion when the stoichiometric, lean mixture and the air are supplied into the boundary region between the rich and lean flames. The stable combustion is achieved under the condition of 1.34 times of the normal load combustion by controlling the boundary region. The emission of NO_x is decreased when the air is supplied into the boundary region between the rich and lean flames. Especially, the effects of NO_x reduction are noticeable under the conditions of low load combustion. Therefore, it is possible to prevent combustion oscillation and combustion noise with low frequencies from occurring, and to develop the new type of burners with high performance of high TDR and further low emission of NO_x by supplying the mixture and the air into the boundary region between the rich and lean flames in the rich-lean combustion.

Key Words: Burner, Premixed Combustion, Energy Saving, Rich-Lean Combustion, Flame Stabilization, High TDR, Low Emission of NO_x

1. 結 論

給湯・暖房用ガス燃焼器の分野では, 燃焼機器の低 NO_x 化のため, 濃淡燃焼方式⁽¹⁻⁵⁾が採用されている。このような濃淡バーナの火炎安定化においては,

濃火炎と淡火炎の間の境界領域における火炎の挙動が重要であることが知られている^(3, 4)。前報において, 我々は, この境界領域における火炎の挙動に着目し, 市販の燃焼器を模擬した濃淡バーナを作成し, 濃淡火炎の境界領域を制御した場合の淡火炎と濃火炎の安定限界および火炎観察した結果を報告した⁽⁵⁾。

実用燃焼器では, 濃混合気用燃料ノズルと淡混合気用燃料ノズルとが個別に配置され, それぞれのノズルの開口面積によって燃料配分比が決定される。また, 濃混合気, 淡混合気および二次空気が供給される通路の流路断面積によって, それぞれの空気配分比が決定

* 原稿受付 2006 年 4 月 21 日。

^{*1} 正員, 岐阜大学大学院工学研究科(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)。

^{*2} 正員, 岐阜大学工学部。

^{*3} 岐阜大学工学部。

^{*4} 東邦ガス(株)基盤技術研究部(〒476-8501 東海市新宝町 507-2)。

^{*5} 正員, 東邦ガス(株)基盤技術研究部。

E-mail: asato@gifu-u.ac.jp

される。つまり、濃火炎と淡火炎の間の境界領域に供給される混合気の空気比および流速の設定条件も、自由に設定できるわけではなく、自ずと制限されることになる。前報⁽⁵⁾では、濃火炎と淡火炎の安定限界を明らかにするために、各々の通路に供給される混合気の空気比と流速を個別に制御したが、バーナ開発においては、それぞれの混合気通路に供給される燃料配分比率および空気配分比率を一定にして、実用燃焼器を想定した燃焼条件における火炎安定限界や排ガス特性を明らかにすることが重要となる。したがって、本報では、実用燃焼器を想定した濃淡火炎の境界領域を制御した濃淡バーナの安定限界および排ガス特性について実験を行い、実用燃焼領域に及ぼす境界領域制御用混合気および空気の影響を明らかにするとともに、振動燃焼の防止、低周波燃焼騒音の低減、及びTDR (Turn down ratio) の拡大の可能性について考察した。

2. 実験装置および実験方法

2・1 実験装置 使用した濃淡燃焼器の詳細は、前報⁽⁵⁾に示してあるので、ここでは簡単に述べる。燃焼器は、アスペクト比が8.5の矩形出口を有し、バーナ出口の流れ場は、二次元的に取り扱うことが可能である。図1に示すように、燃焼室の側面には観察窓が設けられている。空気は乾燥空気を使用し、燃料はメタンを使用した。燃料および空気はオリフィス流量計で測定され、混合室で均質に混合された後、濃火炎用、淡火炎用、および境界領域制御用混合気としてそれぞれ独立して燃焼器に導かれる。

図1には、排ガス測定のための実験装置の概略も示している。燃焼器の下流部には高温の排ガスを冷却するために熱交換器が設置されている。なお、熱交換器内の結露を防止するために、熱交換器には60℃の温水を流した。熱交換器の下流部には排ガス集合筒を設け、出口での排ガス濃度の均一化を図った。排ガスの採取には、石英ガラス製のサンプリングプローブを使用して、各成分の排ガス濃度(CO, CO₂, NO_xおよびO₂)を測定した。プローブによって吸引された採取ガスは、リボンヒータで保温されたテフロンチューブ内を通過し、アイスバスで排ガス中の水分を除去した後、排ガス測定器によってそれぞれの排ガス成分濃度が測定される。

バーナ出口下流部($x = 30, 60, 90$ mm)の燃焼ガス温度および燃焼ガス濃度を測定する際には、熱交換器を取りはずし、燃焼室側面に観察窓のみを設け、トラバース装置に設置した熱電対または、ガス採取プローブをバーナ出口下流部に移動させ、その位置の燃

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Detail of paths of lean mixture and air in practical burner

焼ガス温度および燃焼ガス濃度を測定した。燃焼ガス温度の測定には、白金-白金・ロジウム 13%熱電対を用いた。なお、白金-白金・ロジウム 13%熱電対は、メタン-空気予混合気に対する触媒作用を有しているため、酸化ケイ素の被膜を施した後使用した。燃焼ガスの採取には、外径3 mmの石英ガラス管を吸入口直径1 mmに加工したガス採取プローブを用い、燃焼ガス濃度(CO, CO₂, NO_xおよびO₂)を測定した。

2・2 実験条件の設定方法 実用燃焼器においては、濃火炎および淡火炎用流路に配置された燃料ノズルの孔径と、濃火炎および淡火炎用流路に供給される空気の流入面積があらかじめ決定されているため、濃火炎および淡火炎に供給される空気および燃料の比率が必然的に一定に保たれる。このような制限された実用燃焼条件のもとで、境界領域に混合気や空気を供給するには、図2に示すような方法が考えられる。濃淡火炎の境界領域に空気比 $\lambda_{BZ} > 1.0$ の混合気を流

Fig. 3 Definition of flame stability limit

すためには、濃混合気流路壁と淡混合気流路壁にバイパス用の穴 (図2の (1) および (2)) を設け、濃淡混合気の適量な量をバイパスすることによって実現できる。また、境界領域に空気を流すためには、濃混合気通路を横切って、二次空気流路との間にバイパス流路を設置する (図2の (3)) ことによって実現できる。市販バーナでは、成型したステンレス板金を重ね合わせて混合気通路を形成しているため、板金に凹凸や穴を設けること、あるいは、もう1枚板金を挟み込むことによって、このようなバイパス通路を設けることが可能となる。また、バイパス通路から供給される混合気または空気の流速は、濃・淡火炎用混合気流速と比較して小さく、境界領域制御用通路内で発生した乱れは十分減衰するので、濃淡火炎への乱れの影響は少ないと考えられる。各混合気流路に対する空気および燃料の比率が必然的に一定に保たれることを想定し、かつ、図2の (1) ~ (3) のバイパス通路のいずれから混合気または空気がバイパスされる実用燃焼器を想定した条件を今回の実験条件とした。即ち、総燃料流量、燃料配分比率 X_i (i は各流路)、および燃焼用空気配分比率 Y_i (i は各流路) を一定とし、総空気量 Q_a を変化させることによって総空気比 λ を変化させて火炎観察および排ガス測定を行った。

また、境界領域に空気を供給した場合の排ガス特性に及ぼす効果を明らかにするために、濃淡混合気の空気比 λ_R , λ_L および流速 V_R , V_L を一定とし、境界領域に供給する空気流速 V_{BZ} を変化させて火炎観察および排ガス測定を行った。

2・3 火炎安定領域に及ぼす境界領域制御用混合気の空気比および流速の測定方法 図3にバーナ出口部に形成される濃淡火炎を模式的に示す。図3 (a) に示すように、通常、濃火炎と淡火炎は境界領域制御用流路出口付近に互いに付着して安定している。前報⁽⁵⁾の結果からも明らかのように、境界領域に混合気を供給しない場合には、図3 (a) に示す状態から、淡混合気の空気比 λ_L または濃混合気の空気比 λ_R を小さく

Fig. 4 Flame stability region when mixture and air are supplied into boundary region

くすると、図3 (b) に示すように、濃淡火炎の火炎基部が浮き上がり、リフト火炎となる。この状態において、境界領域に混合気を供給すると、境界領域制御用混合気の流速および空気比のある範囲において、図3 (a) に示すような濃淡火炎の基部が安定した火炎となる。さらに、この状態から、境界領域制御用混合気の流速あるいは空気比を増加させると、図3 (c) に示すように、淡火炎の基部が吹き飛んだ状態の火炎となる。本報告においては、上述したような現象が起こった時の空気流量と燃料流量を読み取り、これにより求めた境界領域制御用混合気の流速と空気比を濃淡火炎基部の浮き上がり限界 (図3 (b)) および淡火炎基部の吹き飛び限界 (図3 (c)) とした。

3. 実験結果および考察

3・1 境界領域へ供給する混合気の流速および空気比の適用範囲 図4に火炎の安定化に及ぼす境界領域制御用混合気の適用範囲を示す。図中の▲, ●, ■は濃淡火炎基部の浮き上がり限界を示し, △, ○, □は淡火炎吹き飛び限界を示している。濃混合気および淡混合気の空気比 および 流速を一定とし、燃焼負荷 (Q_f [l/min]) を3種類、即ち、負荷1 ($Q_f = 5.2$ l/min, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 1.25$ m/s, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 3.5$ m/s), 負荷3/2 ($Q_f = 7.8$ l/min, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 1.87$ m/s, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 5.25$ m/s), および負荷1/2 ($Q_f = 2.6$ l/min, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 0.63$ m/s, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 1.5$ m/s) の場合について測定した。なお、負荷1 ($Q_f = 5.2$ l/min) および負荷3/2 ($Q_f = 7.8$ l/min) の条件において、境界領域へ混合気を供給しない場合には、濃淡火炎基部は浮き上がっていることを確認している。

図中、負荷1 ($Q_f = 5.2$ l/min) および負荷3/2 ($Q_f =$

7.8 l/min) の条件において、 $\lambda_{BZ}=1.0$ 付近に濃淡火炎浮き上がり限界 (曲線 1) が現れており、 $\lambda_{BZ}=1.0$ 以上で火炎が安定することがわかる。また、曲線 3 から分かるように、境界領域に空気比 $\lambda_{BZ}=1.0$ 以上のわずかの混合気を供給することによって、濃淡火炎基部が浮き上がっていた火炎を安定化させることができる。図中、負荷 1/2 ($Q_f = 2.6$ l/min) の条件では、曲線 1 で示す濃淡火炎浮き上がり限界が、 $\lambda_{BZ}=1.0$ よりわずかに小さくなっている。これは、負荷 1 ($Q_f = 5.2$ l/min) および負荷 3/2 ($Q_f = 7.8$ l/min) の条件と比較して、濃混合気および淡混合気の流速が小さく、各々の火炎が安定しやすくなっているためであると考えられる。

一方、空気比 λ_{BZ} が大きくなるほど、淡火炎基部の吹き飛び限界 (曲線 2) の流速 V_{BZ} は小さくなり、 $\lambda_{BZ} = \infty$ (空気) で最小となる。前報⁽⁵⁾でも述べたように、境界領域に混合気を供給した場合には、境界領域制御用通路出口の後流に平面状の火炎が形成され、この火炎の保炎効果によって、淡火炎が安定する。この平面状火炎は、濃混合気の余剰燃料と、境界領域に供給される余剰空気との混合によって、局所的な空気比が 1.0 に近い火炎が形成されているものと思われる。空気比 λ_{BZ} の大きな混合気中の余剰空気は、当然、空気比 λ_{BZ} の小さな混合気中の余剰空気よりも多いので、境界領域に供給する混合気の流量 (流速) を小さくしても火炎は安定化する。つまり、空気比 $\lambda_{BZ} = \infty$ (空気) の場合が最も小さい吹き飛び限界流速となり、空気比 λ_{BZ} を 1.0 に近づけるほど、この吹き飛び限界流速は大きくなる。また、燃焼負荷が大きくなるにしたがって、濃混合気中の余剰燃料量が多くなるため、火炎が安定化するためには、境界領域に供給する混合気中の余剰空気量を多く供給しなければならない。つまり、燃焼負荷の増加と共に、濃混合気の流速が大きくなり、それに伴って境界領域に供給する混合気の流速も大きくすることができ、淡火炎の吹き飛び限界流速が大きくなる。

3・2 排ガス特性 図 5 は、燃料流量 $Q_f = 5.2$ l/min において、境界領域を制御していない場合の総空気比 λ と排ガス成分濃度 (CO および NO_x) の関係を示す。図中の矢印 (a) は、濃火炎と淡火炎の基部が浮き上がった状態を示し (図 6 (a))、矢印 (b) は、通常の実用機の運転条件として仮定した条件を示し、その条件での火炎形状を図 6 (b) に示す。矢印 (c) は、濃火炎の二次空気側の火炎基部が浮き上がった状態を示す (図 6 (c))。矢印 (X) は、濃火炎および淡火炎基部の浮き上がり限界を示す。通常の実用機の運転条件と

Fig. 5 Characteristics of exhaust gas when mixture is not supplied into boundary region ($Q_f = 5.2$ l/min, $V_{BZ} = 0$ m/s)

Fig. 6 Flame appearance

仮定した矢印 (b) は、浮き上がり限界に非常に近い条件となっている。また、破線および一点鎖線は、実用機の開発目標とされる NO_x 排出ガス目標限界値 60 ppm, CO 排出ガス目標限界 200 ppm (両者とも O₂ = 0 % 換算値) を示す。なお、これらの目標限界値は、実用機における排ガス規制値に近い値となっている。

図中の矢印 (b) の条件 ($\lambda = 1.27$, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 3.5$ m/s, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 1.25$ m/s, $V_{a2} = 0.23$ m/s) における CO の排出量は微量であり、NO_x の排出量は規制値に近い値であるが、排ガス規制を考慮したとしても実用条件においては、設定可能となる。しかし、濃火炎と淡火炎の基部が浮き上がった状態に近い火炎になっているため、実用機においては、燃焼騒音の増大、あるいは、振動燃焼を起こす可能性が大きい条件となっている。従って、火炎が安定した状態で実用条件を設定する必要がある。

図7～9は、燃料流量 $Q_f = 5.2$ l/min において、境界領域を制御した場合の総空気比と排ガス成分濃度 (COおよびNOx) の関係を示す。図中の各矢印が示す条件は、図5と同様な内容を意味する。図7では、実用機の運転条件と仮定した矢印(b)の条件における境界領域制御用混合気の空気比 λ_{BZ} を、濃混合気の空気比 λ_R と淡混合気の空気比 λ_L との中間的な値(矢印(b)の条件における値 $\lambda_{BZ} = 1.0$)としている。これは濃混合気流路と淡混合気流路の一部からそれぞれの混合気を漏らして、境界領域制御用混合気を作り出すことを想定している(図2参照(1)と(2))。図8では、矢印(b)の条件における境界領域制御用混合気の空気比 λ_{BZ} を、淡混合気の空気比 λ_L と同じにしている。これは、淡混合気流路の一部から混合気を漏らして、境界領域制御用混合気を作り出すことを想定している(図2参照(2))。図9では、境界領域制御用混合気の空気比 $\lambda_{BZ} = \infty$ 、即ち空気を供給している。これは、二次空気の一部から空気を漏らして、境界領域制御用混合気を作り出すことを想定している(図2参照(3))。

図7における矢印(b)の条件 ($\lambda = 1.26$, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 3.4$ m/s, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 1.22$ m/s, $V_{2a} = 0.23$ m/s, $\lambda_{BZ} = 1.0$, $V_{BZ} = 0.1$ m/s), 図8における矢印(b)の条件 ($\lambda = 1.27$, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 3.2$ m/s, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 1.25$ m/s, $V_{2a} = 0.23$ m/s, $\lambda_{BZ} = 1.6$, $V_{BZ} = 0.1$ m/s) および図9における矢印(b)の条件 ($\lambda = 1.3$, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 3.5$ m/s, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 1.25$ m/s, $V_{2a} = 0.23$ m/s, $\lambda_{BZ} = \infty$, $V_{BZ} = 0.1$ m/s) では、共にCOの排出量は微量であり、NOxの排出量は規制値に近い値であるが、排ガス規制を考慮したとしても実用条件においては、設定可能となる。一方、濃火炎と淡火炎の基部浮き上がり限界(矢印X)は、図5の場合と比較して、空気比 λ の過濃側になっており、実用機として仮定した燃焼条件である矢印(b)では、火炎は安定している。なお、矢印(X)は、図7から図9の条件になるにしたがって、総空気比 λ の小さい側へ移行しており、火炎安定範囲がより広がっていることが分かる。このように、境界領域を制御することによって、実用機としての燃焼条件において、火炎安定範囲を空気比 λ の過濃側へ広げることが可能となる。特に境界領域に空気を供給した場合、その効果が著しい。

図10および図11は、燃料流量 $Q_f = 2.6$ l/min, すなわち燃焼負荷 1/2 における総空気比と排ガス成分濃度 (COおよびNOx) の関係を示す。図10は境界領域を制御していない場合、図11は境界領域に空気を供給した場合である。図10における矢印(b)

Fig. 7 Characteristics of exhaust gas when mixture is supplied into boundary region ($Q_f = 5.2$ l/min, $\lambda_{BZ} = 1.0$, $V_{BZ} = 0.1$ m/s at the point (b))

Fig. 8 Characteristics of exhaust gas when mixture is supplied into boundary region ($Q_f = 5.2$ l/min, $\lambda_{BZ} = 1.6$, $V_{BZ} = 0.1$ m/s at the point (b))

Fig. 9 Characteristics of exhaust gas when mixture is supplied into boundary region ($Q_f = 5.2$ l/min, $\lambda_{BZ} = \infty$, $V_{BZ} = 0.1$ m/s at the point (b))

の条件 ($\lambda = 1.26$, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 1.75$ m/s, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 0.61$ m/s) および図 11 における矢印 (b) の条件 ($\lambda = 1.26$, $\lambda_L = 1.6$, $V_L = 1.75$ m/s, $\lambda_R = 0.5$, $V_R = 0.61$ m/s, $V_{2a} = 0.23$ m/s, $\lambda_{BZ} = \infty$, $V_{BZ} = 0.05$ m/s) では、共に CO の排出量は微量であり、NO_x の排出量は規制値よりも小さく、実用条件においては、設定可能である。境界領域へ空気を供給した場合 (図 11 参照) は、空気を供給していない場合 (図 10 参照) と比較して、濃火炎と淡火炎の基部が浮き上がる条件 (矢印 X) は、空気比の過濃側になっている。また、総空気比 λ の大小に関わらず、NO_x の排出量が低下している。なお、境界領域へ淡混合気と濃混合気の中間的な空気比の混合気を供給した場合および淡混合気と同様な空気比の混合気を供給した場合には、境界領域を制御していない場合と比べて、NO_x はほとんど低減しない。また、燃焼負荷 1/3、即ち、燃料流量 $Q_f = 1.73$ l/min の場合においてもほぼ同様な傾向となることが確認されている。これらの結果から、燃焼負荷が少なくなるほど、境界領域へ空気を供給することによって、濃火炎と淡火炎の基部が浮き上がる条件を過濃側へ移行させるとともに、NO_x を低減させる効果があることが分かる。

図 12 は、境界領域に供給する空気の配分率と排ガス成分濃度の関係を示す。濃混合気の空気比 λ_R と淡混合気の空気比 λ_L とを一定とし、これらの流速 V_R と V_L とを比例的に変化させることによって、燃料流量を変化させている。燃料流量が小さくなるほど NO_x 排出量は少なくなっており、前述の結果と同様に、燃料流量が小さい方が NO_x 低減に効果があることが分かる。また、いずれの条件においても、境界領域へ供給する空気配分率を増加させていくと、NO_x 排出量は減少していくが、この空気配分量が総空気流量の 15% を超えると、CO 排出量が急激に増加することが分かる。このことから境界領域へ供給する空気配分率は 15% 以下としなければならない。

3・3 バーナ出口下流部の燃焼ガス温度分布および燃焼ガス成分濃度

図 13 に、バーナ出口下流部の温度および燃焼ガス成分濃度分布を示す。ただし、温度は実測値を示し、輻射などの補正は行っていない。バーナ出口から $x = 30$ mm の位置における境界領域を制御していない場合の淡火炎下流部の燃焼ガス温度が約 1573 K で、淡火炎の空気比 $\lambda_L = 1.6$ の断熱火炎温度 1740 K より低い値を示している。一方、濃火炎下流部の燃焼ガス温度は約 1520 K で、濃火炎の空気比 $\lambda_R = 0.5$ の断熱火炎温度 1500 K より高くなっている。これは濃火炎からの余剰燃料と二次空気とで作

Fig.10 Characteristics of exhaust gas when mixture is not supplied into boundary region ($Q_f = 2.6$ l/min, $V_{BZ} = 0$ m/s)

Fig. 11 Characteristics of exhaust gas when mixture is supplied into boundary region ($Q_f = 2.6$ l/min, $\lambda_{BZ} = \infty$, $V_{BZ} = 0.05$ m/s at the point (b))

Fig. 12 Characteristics of exhaust gas when the air is supplied into boundary region ($\lambda_{BZ} = \infty$)

られる外炎の温度を計測していることが原因である。境界領域に空気を供給すると、バーナ下流領域において、燃焼ガス温度の低下が見られ、 $V_{BZ} = 0.3 \text{ m/s}$ の場合、淡火炎下流で最大約 100 K の燃焼ガス温度の低下となっている。この条件における濃淡火炎長は、それぞれ5および 10 mm 程度であり、 $x \geq 30 \text{ mm}$ の領域は、火炎面の後流である。燃焼ガスの温度低下は、境界領域制御用通路から供給された空気と火炎面後流の燃焼ガスとの混合に起因していると考えられる。バーナ出口から $x = 60$ および 90 mm の位置では、境界領域を制御した場合の燃焼ガス温度は、制御していない場合に比べて、低い値を示しているが、その差は、 $x = 30 \text{ mm}$ の位置での温度差より小さくなっている。また、境界領域に流す空気流速の増加と共に、燃焼ガス温度は低下している。

バーナ出口からの各位置において、温度は濃火炎下流部より淡火炎下流部のほうが高いにもかかわらず、 NO_x 濃度は淡火炎下流部に比べ濃火炎下流部のほうが多い。これは、濃火炎下流部の NO_x 濃度は、サマル NO_x だけに起因するものではなく、プロンプト NO_x にも起因するためである。バーナ出口からの距離が大きくなっても、 NO_x 濃度およびその分布に大差は見られない。しかし、境界領域に空気を $V_{BZ} = 0.15 \text{ m/s}$ で供給すると、バーナ出口下流部の各位置において NO_x 濃度の低減が見られる。これは、境界領域へ空気を供給すると、燃焼ガス温度が低下するため、サマル NO_x の生成が減少することに起因している。この傾向は V_{BZ} が大きいほど顕著である。

一方、 CO 濃度はバーナ出口から 30 mm の位置において、淡火炎下流部では約 110 ppm 、濃火炎下流部では不完全燃焼が原因で $200 \sim 300 \text{ ppm}$ の値となっているが、バーナ出口からの距離が大きくなると、高温の燃焼ガス中の CO が淡火炎下流の余剰空気および二次空気からの酸素と反応し、 CO 濃度が減少する。境界領域に空気を供給すると、バーナ出口から 30 mm の位置における濃火炎下流部の CO 濃度が大幅に減少する。これは、境界領域に空気を供給することにより、濃火炎の不完全燃焼が緩和されるためである。しかし、バーナ下流部までに、 CO の大半が CO_2 へと反応するため、バーナ出口から 90 mm の位置における CO 濃度は、境界領域を制御していない場合とほぼ同様な値となっている。

3・4 燃焼良好範囲 図14は、各燃料流量 Q_f に対する総空気比 λ の燃焼良好範囲を示す。この図は、これまでの実験結果から、 NO_x と CO 目標限界値および濃淡火炎基部の浮き上がり限界から、燃料流量

Fig. 13 Profiles of temperature and burned gas composition at downstream position of burner exit

Fig. 14 Practical combustion region when mixture or the air are supplied into boundary region

毎に燃焼良好範囲を求めたものである。○, △および□印は CO 排出量および NO_x 排出量の目標限界曲線, ●, ■, ◆および▲印は、濃淡火炎の基部浮き上がり限界曲線を示している。また、括弧内の数値は、実用機の運転条件と仮定した場合の境界領域へ供給した混合気の空気比および空気の総空気量に対する配分比率を示している。■印は、境界領域に濃および淡混合気の中の空気比の混合気を供給した場合、◆印は、

境界領域に淡混合気と同様の空気比を供給した場合の濃淡火炎の基部浮き上がり限界曲線を示している。

図 14 から、CO の規制値と NOx の規制値で決定される排ガス濃度良好範囲は、燃焼負荷が大きくなると狭くなる。境界領域に混合気または空気を導入しない場合、燃料流量が 4.3 l/min 以上になると、排ガス濃度良好範囲内で、濃淡火炎基部の浮き上がりが現れ、実用上の安定燃焼良好範囲が急激に狭くなる。この燃料流量 4.3 l/min は、本研究で対象としている給湯器の市販バーナ 1 本当たりの最大燃料流量に対応し、図 14 の結果から、このような実用機における最大燃料流量が規定されていると考えられる。

一方、境界領域に混合気または空気を導入した場合には、この濃淡火炎基部の浮き上がり限界曲線が、NOx 排出規制値で決定される限界曲線よりも、空気比の過濃側で現れるようになり、排ガス濃度良好範囲を広く確保することが可能となる。また、実用燃焼器においては、着火後、燃料流量 Q_f の設定値に対する空気流量 Q_a の追従が遅れるために、空気比の小さい領域で燃焼する過程が生じる。そのため、NOx 排出規制値で決定される限界曲線よりも空気比の小さい側で燃焼することがある。このとき、濃淡火炎基部が浮き上がると、低周波燃焼騒音や振動燃焼が起きやすくなる。しかし、濃淡火炎基部の浮き上がり限界曲線が空気比の小さい領域まで拡大していれば、これが生じない。したがって、空気比の大きな混合気を境界領域へ供給するほど、低周波燃焼騒音や振動燃焼を防止する効果が大きくなる。図 14 の結果から、境界領域へ混合気を供給しない場合、約 $Q_f = 4.3$ l/min の燃料供給量が最大の定格燃焼負荷値 (実用燃焼器の設定基準) となるが、境界領域へ混合気を供給することによって、本実験範囲において、この約 1.34 倍の燃料流量を供給しても良好な燃焼が可能となることがわかる。

4. まとめ

濃淡火炎の境界領域を制御した濃淡バーナの実用運転条件における安定限界および排ガス特性について実験を行い、濃淡バーナの実用燃焼範囲に及ぼす境界領域制御用混合気の空気比および流速の影響を明らかにした。これらの実験により得られた結果をまとめると、以下ようになる。

(I) 境界領域に低流速の理論混合気、希薄混合気あるいは空気を供給した場合、濃淡火炎の浮き上がり限界が、実用器を想定した燃焼条件においても、淡火炎および濃火炎の過濃側に大きく拡大し、保炎特性が向上する。その結果、低周波燃焼騒音や振動燃焼の発生を

防止できる可能性が大きくなる。特に空気を供給した場合、保炎特性の向上が著しい。また、低空気比側へ定常燃焼条件を設定できるので、低空気比燃焼が可能となり、給湯・暖房機に搭載した場合、熱効率を高くすることが可能となる。

(2) 上記 (I) の結果は、燃料流量が大きい場合においても同様であり、これによって多くの燃料流量を供給することができる。従って、本実験範囲において、従来の定格負荷の 1.34 倍まで、燃焼負荷を拡大することができ、高 TDR 燃焼が可能となる。

(3) 境界領域に空気を供給することによって、NOx の排出量を低下させることができ、さらなる低 NOx 燃焼が可能となる。この効果は、特に、燃料流量の小さい燃焼負荷条件において顕著である。

このような結果から、濃淡火炎の境界領域を制御する技術は、従来よりも、さらに低 NOx で、高負荷かつ高効率な濃淡燃焼器の実現を可能にする燃焼技術であることが明らかにされた。

文献

- (1) Hase, K., *NENSHO KENKYU*, No.105 (1996), pp.39-50.
- (2) Sogo, S., Honma, R. and Hase, K., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.64, No.617(1997), pp.290-297.
- (3) Watanabe, T. and Nakajima, T., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.66, No.643 (2000), pp.904-910.
- (4) Koyamada, H. and Nakajima, T., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.68, No.674(2002), pp.2927-2934.
- (5) Yasuda, H., Asato, K. et al., *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.716(2006), pp.1081-1088.