加圧燃焼火炎特性に対する炉圧の影響*

萩原明房^{*1}, 東 康夫^{*2}, 鈴木富雄^{*3}

The Effect of Pressure on Flames in a Furnace

Akifusa HAGIWARA, Yasuo HIGASHI and Tomio SUZUKI

The effect of furnace pressure on flames was studied to gain basic understandings necessary for the prediction of pressurized flames based on atmospheric pressure test results. Three model burners for application to pressurized chemical plants were tested using a variable pressure, water cooled test furnace. Flame temperature, in flame gas concentration, NO_x emission and heat extraction to the furnace wall were measured. Also, two different methodologies for pressure condition change, the constant Reynolds number method and the constant residence time method, were tested. The test results revealed that flame patterns remain unchanged with pressure change for the constant Reynolds number method if Re is sufficiently large. On the contrary the constant residence time method showed a slight change in size for flames at $Re \sim 10^4$. A strong pressure dependence of NO_x emission could be observed for the constant Reynolds number method, while only a weak dependence exists for the constant residence time method. Gas emissivity data showed a similar pressure dependence regardless of the pressure change method.

Key Words: Combustion, Diffusion Burner, Pressurized Flame, NO_x emission, Flow Pattern, Emissivity

1. 緒 言

加圧燃焼火炎についての研究は、おもにガスタービン燃焼器の開発に関連して従来から行われている。一般に加圧燃焼器の開発に際しては、経済性などの問題から大気圧燃焼実験を行い、その結果から加圧燃焼特性を予測する手法が利用される。性能予測の方策としては、 NO_x やCOの排出値およびメタル温度、ガスふく射率等の火炎特性の圧力依存性に関して実験式を求め、その圧力依存性の関係を利用して加圧火炎の性能を予測するものである⁽¹⁾。ただし、これら相関式で記述される圧力依存性は燃焼器ごとに異なり、一次近似的に他の燃焼器における依存性を利用しながら大気圧燃焼試験から加圧燃焼状態を予測する場合には、大きな誤差を含む可能性をもっている。

このような相関式による記述と平行して、フローパターンなどの火炎性状への加圧燃焼の影響を直接測定することが必要と考えられるが、そのような検討は少

ない。また、加圧状態を模擬する大気圧条件の設定の仕方や、そのようにして設定された燃焼条件下で実施された大気圧実験を適正に解釈するための評価手法などの検討は、予測精度向上のために重要となるが、工業用規模の火炎に対する系統的な検討は少ない。

本研究は加圧燃焼器開発過程で実施される大気圧燃焼試験方法を確立することを目的としている。このため、化学プラントの加熱炉用加圧燃焼器について圧力を変化させながら燃焼試験を行い、火炎形状、 NO_x 特性、火炎ふく射等の火炎特性の圧力依存性を調査した。その際、圧力条件変化方法の評価を行うために、レイノルズ数一定法と滞留時間一定法のそれぞれの場合について測定を行い、比較検討を行った。

記 号

A: 火炉伝熱面積 m^2 Da : ダムケラー数 $= \tau r / \tau_c$

L: 炉の長さ m

N: 圧力依存性指数

P: 燃焼空気圧力 MPa

Q: 炉壁からの抽出熱量 kW

 Q_0 : 総熱入力量 kW Q_T : 総括伝熱量 kW

* 原稿受付 1994年9月21日。

^{*1} 正員、東京電力(株)エネルギー環境研究所(〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)。^{*2} (株)神戸製鋼所(〒651 22 神戸市西区高塚台1-5-5)。^{*3} 正員、(株)神戸製鋼所。

- Re : レイノルズ数 = 空気流速・相当直径/動粘度
 T : 温度 K
 x : 炉長手方向距離 m
 r : 炉半径方向距離 m
 α : 対流熱伝達率 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 ϵ : 放射率
 σ : ステファンボルツマン定数 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 τ : 滞留時間 = 火炎長/代表流速 ms
 τ_c : 化学特性時間 = 単位反応量/反応速度 ms

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置とバーナ構造 燃焼試験炉および供試バーナの構造を図1, 2に示す。試験炉は縦形で、内壁側に耐火材で内張りした水冷構造をもち、最大使用圧力は1.0 MPaの耐圧構造になっている。3種類の供試バーナは、いずれも燃焼空気流に旋回を付与した拡散燃焼式のもので、メタン供給流路と低カロリーガス($\text{H}_2=50\%$, $\text{CO}_2=50\%$: 図2中ではLCFと略す)供給流路を分離した構造をもつ。なお、各バーナは実機相当条件として運転圧力0.6 MPa、燃焼空気温度673 K、空気比1.2、燃焼量70 kW、LCF使用という条件のもとに設計した。

TYPE1バーナは中央にパイロットバーナ(試験中は不使用)をもち、実機相当条件で空気流のレイノルズ数は4100で混合が比較的緩慢なものである。TYPE2とTYPE3のバーナは、スロート直径を小さくして空気流速を高め、混合促進をはかったものである。断面積相当直径をもとにした実機相当条件下でのレイノルズ数は、それぞれ14000と23000である。

Fig. 1 Structure of the pressurized combustion test furnace

試験ではメタン専焼とLCF専焼の場合について、2.2節で述べる圧力条件変化方法に従い、炉内圧力を変化させその火炎性状に与える影響を調査した。なお、炉内圧力は煙道に設けられた調整弁によって大気圧から約0.75 MPaまで昇圧される。また、炉壁に設けられた測定孔(T1~T7)に油圧作動式トラバース装置を付けた加圧用プローブを装着することにより、炉内ガス温度測定とガスサンプリングを行った。

2.2 圧力条件変化方法 燃焼量 Q_0 を圧力変化に伴ってどのように変化させるのかが、モデル燃焼試験の計画では重要となる。本試験では燃焼量の決定方法を次式で一般的に記述する。

$$Q_0/P^N = \text{一定} \quad (1)$$

ここで、圧力の指数 N は $N=0, 0.5, 1, 2$ の値をとった場合、各条件はそれぞれレイノルズ数、圧力損失、滞留時間、ダムケラー数を一定にして、燃焼量を変化させたものと考えられる。これらのパラメータは現象の相似性の考察⁽²⁾⁽³⁾において、燃焼器設計上重要なものとして経験的に利用されている。

各変化方法における主要パラメータの圧力依存性を表1に示す。例えば、 $N=0$ のレイノルズ数一定法では、圧力損失が P^{-1} 、滞留時間が P 、ダムケラー数が P^2 に比例して変化することを示している。

工業火炎におけるレイノルズ数は一般に十分大きい場合が多く、このため反応は混合律速(ダムケラー数が大きい)となる。したがって、火炎形状の相似性を保持するために正確なレイノルズ数の一致を必要とせず、圧力変化方法によらず火炎の相似性が得られる可能性が高い。ただし、燃焼空間負荷を一定にできることから、レイノルズ数一定法を採用する場合がある。

しかし、ガスタービン燃焼器の場合はレイノルズ数は高いが、著しい高速混合が見られ、反応速度と混合速度が競合するような領域となるため、ダムケラー数一定法の採用が考えられる⁽⁴⁾。ここで考えているよう

Fig. 2 Test burner configurations

なバーナでは混合律速下であり、サーマル NO_x 排出量の予測などでは火炎形状と滞留時間を一致させる必要があり、滞留時間一定法の採用が合理的であると考えられる。

なお、圧力損失については圧力補正によりいずれの変化方法を使用した場合でも、流路抵抗を知ることにより、比較的確度の高い予測が可能と考えられる。

本実験では以上の検討より、圧力条件変化方法としてはレイノルズ数一定法と滞留時間一定法を比較検討することにした。

3. 実験結果および考察

3.1 火炎形状への炉圧の影響 レイノルズ数一

Table 1 Methodologies for pressure condition change and the pressure dependency of each parameter

Methodology	N	Pressure dependency			
		Re	dP	τ	Da
Constant Reynolds Number	0	P^0	P^{-1}	P	P^2
Constant Pressure Drop	0.5	$P^{0.5}$	P^0	$P^{0.5}$	$P^{1.5}$
Constant Residence Time	1	P	P	P^0	P
Constant Damköhler Number	2	P^2	P^3	P^{-1}	P^0

定法によって圧力条件を変化させた場合について、圧力が火炎形状に与える影響を考える。図3では各バーナ火炎における炉中心軸上での温度分布を測定したものを示している。ただし、ここでは燃料として低カロリーガスを使用している。図3からわかるように、高レイノルズ数バーナのTYPE3では温度分布がほとんど圧力に依存しないで一定なのに対して、低レイノルズ数燃焼器のTYPE1では炉内圧力の増加により燃焼ガスの高温領域が上流側へ移動している。TYPE2では、TYPE1ほど圧力の影響は顕著ではないが、圧力レベルに応じて多少分布に差異が見られる。

メタン燃焼時のTYPE3の火炎特性について図4、5に示すが、軸上温度分布、半径方向温度分布、半径方向酸素濃度分布とともに圧力依存性がほとんどないことがわかる。このようにレイノルズ数一定法では、火炎形状が圧力に依存しないことが確認された。ただし、レイノルズ数が低いバーナの場合には、火炎形状の相似性が成立しないことがわかった。

滞留時間一定法については、TYPE2とTYPE3を使用してメタン燃焼させた場合の例を図6に示す。図6は各バーナに対して、 $x/L=0.1$ の断面での温度と酸素濃度の半径方向分布を示している。全般に、ガス温度分布は圧力の影響を大きく受け、圧力増加に伴って温度レベルが増加する傾向が見られる。これは次の理由によるものと考えられる。まず、圧力の増加に伴って燃焼量を増加させるため、火炎寸法が圧力によらないとすれば単位空間あたりの燃焼ガス保有熱量が増加することになる(TYPE2の酸素濃度分布に見られ

Fig. 3 The effect of furnace pressure on flame temperature profiles on the axis when pressure conditions were changed based on the constant Reynolds number method (LCF firing)

るように火炎寸法の変化は炉内ふく射の観点からみれば非常に小さいと考えられる)。このとき、炉壁面への放熱はガス体積から面への熱放射が主体となるため放熱量にあまり差がないと考えれば、保有熱量に対する放熱量は相対的に低下することになり、炉内温度冷却が抑制されるものと考えられる(実際に常圧条件に対して加圧条件0.6 MPaでは、投入熱量は6倍になるが、炉壁からの放熱量は2~3倍程度である)。

TYPE 3の場合については、酸素濃度分布に見られるように $x/L=0.1$ の断面で燃焼はほとんど完結している。これに対して、TYPE 2では酸素濃度分布から燃焼反応がこの断面で生じていることがわかる。また、

Fig. 4 On-axis temperature profiles for the constant Reynolds number method: TYPE 3/Methane firing

$P=0.6$ MPaの場合に酸素濃度ピークが若干中心軸側にシフトしており、圧力のレベルによる分布の変化が見られるので、TYPE 2では滞留時間一定法での火炎寸法は変化しているものと考えられる。

Fig. 5 Radial profiles of flame properties for the constant Reynolds number method: TYPE 3/Methane firing: $x/L=0.1$

Fig. 6 The pressure dependence of flame properties for the constant residence time method: Methane firing $x/L=0.1$

また、TYPE 2 における火炎温度分布は TYPE 3 の場合と異なり、 $r/R=0.4$ より内側でほぼ同等な分布が見られる。これは、この領域では温度場の決定に混合が支配的な役割を担い、火炎ふく射の分布に与える影響は小さいためと考えられる。ただし、周囲のガス流れ ($r/R>0.4$) では TYPE 3 と同様に温度レベルは圧力レベルに大きく依存する。

換言するとレイノルズ数が $\sim 10^4$ 程度のバーナで滞留時間一定法を使用した場合、火炎寸法が圧力レベルにより変化する傾向があり、実際には滞留時間そのものが一定に保持されていない可能性がある。また、火炎領域周辺の炉内ガス温度は炉負荷に対応して相対的なふく射熱量が変化するため、その温度レベルが変化する傾向がある。

3・2 NO_x 排出特性 加圧燃焼器の NO_x 排出特

(a) Constant residence time method

(b) Constant Reynolds number method

Fig. 7 The effect of pressure on NO_x emission (O₂=7% basis)

性は、一般に圧力の指数乗に比例した特性を示すことが報告されている⁽¹⁾。本実験でのメタン燃焼および低カロリーガス燃焼のいずれの場合も、燃料 N 分が存在せず、空気比 1.2 の過剰空気比状態で燃焼が行われることから、通常の Zeldovich 機構⁽⁵⁾で説明されるサーマル NO_x が生成要因として考えられる。したがって、火炎ふく射熱損失や化学反応における非平衡性が無視できれば、NO_x 生成は滞留時間に直接比例するものと考えられる。

TYPE 2 と TYPE 3 のバーナについて、レイノルズ数一定法および滞留時間一定法により圧力条件を変化させた場合の排出特性を図 7 に示す。TYPE 3 のメタン燃焼時を除いて、全般に滞留時間一定法のほうが圧力依存性が低い傾向がある。これは、高レイノルズ数条件下で火炎の相似性が期待できることから、滞留時間を一定にすれば NO_x 生成量も一定になるといった傾向に合致するものと考えられる。ただし、火炎ふく射熱損失や非平衡性の影響は本質的に存在するため、滞留時間一定法でもある程度傾きをもったものと考えられる。

滞留時間一定法における TYPE 3 によるメタン燃焼時で圧力依存性が高くなったのは、燃焼負荷変化に伴う火炎温度の変化に起因するものと考えられる。このバーナは図 3 に示したように TYPE 2 と比較して急速に燃焼が完結しており、高温火炎がタイル内に形成されているものと考えられる。したがって、ふく射熱損失に起因する火炎温度の圧力依存性がより顕著に現れるため、NO_x 排出値の圧力依存性が大きくなったものと考えられる。これは、滞留時間一定法を使用した場合に火炎温度が高く、混合の速い燃焼器では強い圧力依存性があるため、注意を要することを示している。

3・3 ふく射伝熱特性 火炎からのふく射伝熱を見積もるため、水冷壁からの抽出熱量を求めた。この壁面からの抽出熱量測定をもとに、簡易モデルを用いて火炎のふく射率を計算することを試みた。このモデルでは、炉内の総括伝熱量 Q_T (火炎/燃焼ガスから面積 A の炉壁内面へ伝達される熱量) は次式で表される。

$$Q_T = \{ \phi_{wg}(E_g - E_w) + \alpha(T_g - T_w) + \phi_{wf}(E_f - E_w) \} \cdot A \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 ϕ : 炉形状および放射率から求まる係数、 $E: E = \sigma T^4$ を示す。なお、添字 g, f, w はそれぞれガス、火炎、壁を示す。 α は対流熱伝達率で炉内空筒速度をもとにレイノルズ数を算出してから求めた。 T_g, T_w はいずれも計測点において測定された温度の算術

(a) Constant residence time method

(b) Constant Reynolds number method

Fig. 8 The effect of pressure on gas emissivity of furnace gas (based simple model calculation)

平均値を使用した。なお、 T_g は炉中心軸上の温度で代表した。総括伝熱係数 Φ を用いて炉内伝熱を表すと次式のようになる。

$$Q_T = \{\sigma \Phi_{wg} (T_g^4 - T_w^4) + \alpha (T_g - T_w)\} \cdot A \quad \cdots (3)$$

伝熱面が無限同心円筒面で空間にガスが充満していると仮定すると、式(2)の第3項は無視できる。このとき、 Φ_{wg} とガス放射率 ϵ_g 、壁放射率 ϵ_w (耐火材放射率で一定と仮定) の関係は以下のように表される。

$$\Phi_{wg} = \phi_{wg}$$

$$(1/\phi_{wg}) = (1/\epsilon_g) + (1/\epsilon_w) - 1 \quad \cdots (4)$$

以上のモデルに基づいてふく射率を求めたものを図8に示す。燃料種、バーナ形式、圧力条件変化法にかかわらず、ふく射率は圧力に伴って大きくなる傾向が示された。圧力依存性を示す図8中直線の傾きは、特に有

意な差異は見られない。これは、ふく射率が炉内ガス自体の基本物性であることから、圧力変化方法に依存しないことを示すものと考えられる。

4. 結 論

燃焼空気流の吹出しレイノルズ数が異なる3種類の拡散バーナを用いて、燃焼特性に対する圧力の影響を調整し、試験条件設定時に使用する圧力変化方法の違いなどについて検討を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

(1) レイノルズ数一定法では空気流速が遅いTYPE1を除いて、火炎寸法の圧力依存性は見られなかった。滞留時間一定法では、圧力変化に対して火炎寸法が変化する傾向が見られた。また、この場合燃焼量を圧力に伴って増加させるため、火炎周辺温度のレベルが増加する傾向がある。

(2) NO_x 排出特性については、レイノルズ数一定法では滞留時間の増加により高くなる傾向がある。これに対して、滞留時間一定法では圧力依存性は低い。ただし、高レイノルズ数で火炎温度が高い条件での燃焼器では、強い圧力依存性が存在する。これは、ふく射熱損失による火炎温度への影響が顕著となるためと考えられる。

(3) 簡易モデルにより炉内ガスのふく射率を求め、圧力依存性を調べた。その結果、圧力増加に伴ってふく射率が増加する傾向が見られた。ただし、この圧力依存性については、圧力変化方法の違いによる差異は見られなかった。

(4) 大気圧燃焼試験の圧力変化方法としては、レイノルズ数一定法と滞留時間一定法などが適当と考えられるが、温度分布評価や NO_x 排出量評価の観点からはそれぞれの特性を十分加味した検討が必要である。

文 献

- (1) Sullivan, D. A., *J. Eng. Power*, (1977), 145.
- (2) Spalding, D. B., *Proc. 9th Symp. (Int) Combust.*, (1963), 833.
- (3) 定方正毅・広瀬靖夫・青木 清, 化学工学, **46** 5(1982), 274-281.
- (4) 田丸 卓, 第4回日本燃焼研究会 JERC 合同研究会資料, (1989), 1-10.
- (5) Hayhurst, A. N. and Vince, I. M., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **6**(1990), 35-51.
- (6) Chen, J. Y. and Kollmann, W., *Combust. Flame*, **88** (1992), 397-412.