



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



火炎の燃焼・熱伝達特性およびその構造の解明に関する研究（第3報，
相似噴流火炎に及ぼす燃焼室内の圧力の影響について）

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 媚山, 政良 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/801

火炎の燃焼・熱伝達特性およびその構造の解明に関する研究 (第3報, 相似噴流火炎に及ぼす燃焼室内の圧力の影響について)

媚 山 政 良

A Study on the Characteristic of Combustion and Heat Transfer of a Flame (3rd Report, The Effect of the Ambient Pressure to the Analogic Jet Flame)

Masayoshi Kobiyama

Abstract

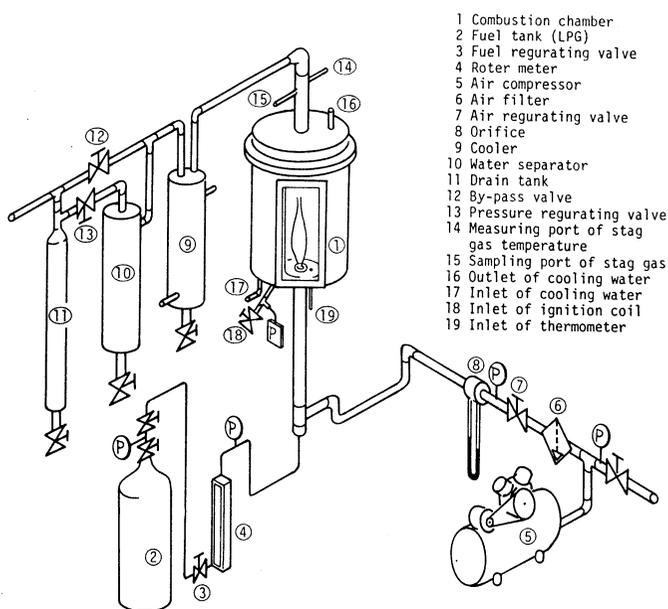
In this report, the effects of the ambient pressure, that is the pressure in the combustion chamber, on the characteristics of the jet flames were examined with a new pressured combustion chamber to observe the variation of the flame length, temperature, combustion efficiency and so on. The experiment was performed with diffusion flames of air and propan gas fuel through a simple gas burner pointed upward and with the experimental conditions set up to form the analogic jets of which characteristics were not affected by the ambient pressure at the inlet of combustion chamber. The experimental results of flame length and combustion efficiency show that the region of air and fuel velocity ratio is divided into two that is a region affected ambient pressure and did not affected one.

1. 緒 言

炭化水素系燃料の燃焼特性は、雰囲気圧力により強く影響を受けることは良く知られている。しかし、過給ボイラのように定常燃焼を行ない、火炎からの熱伝達を積極的に利用する立場からの研究は少なく、雰囲気圧力の影響が火炎の特性に及ぼす影響を系統的に調べておく必要がある。^{1,2)}加圧雰囲気下における定常火炎の特性研究の一例として、第2報³⁾においてプロパンガスを燃料とする小型過給ボイラーの燃焼・熱伝達特性を示した。この報告では、過給圧、過給量の変化に伴う壁面熱負荷の分布、燃焼効率の変化などを示すとともに、過給ボイラーに適したバーナの改良例を示し、過給ボイラーの熱設計に必要ないくつかの資料の提供を行なった。しかし、加圧雰囲気下での火炎の形状や輝度の変化など実際の燃焼状態を観察し、また、燃焼特性に及ぼす圧力の影響のみを整理しておくことも燃焼室の形状の設計や熱設計に必要なことである。したがって、本報では可視化が可能な加圧燃焼器を作成し、プロパンガス-空気からなる最も基本的な燃焼形態の一つである空気旋回角および噴射角が零度のバーナを使用した同軸流定常拡散

火炎を用い、燃料-空気速度比、燃料流量をパラメータとし、炉内入り口条件において燃焼室内の圧力によらず空力的特性が同一となる相似な火炎を形成させ、燃焼室内の圧力が火炎の寸法、温度、燃料効率に及ぼす影響を実験的に調べたので報告する。

2. 実験装置および実験方法



- 1 Combustion chamber
- 2 Fuel tank (LPG)
- 3 Fuel regulating valve
- 4 Rotameter
- 5 Air compressor
- 6 Air filter
- 7 Air regulating valve
- 8 Orifice
- 9 Cooler
- 10 Water separator
- 11 Drain tank
- 12 By-pass valve
- 13 Pressure regulating valve
- 14 Measuring port of stag gas temperature
- 15 Sampling port of stag gas
- 16 Outlet of cooling water
- 17 Inlet of cooling water
- 18 Inlet of ignition coil
- 19 Inlet of thermometer

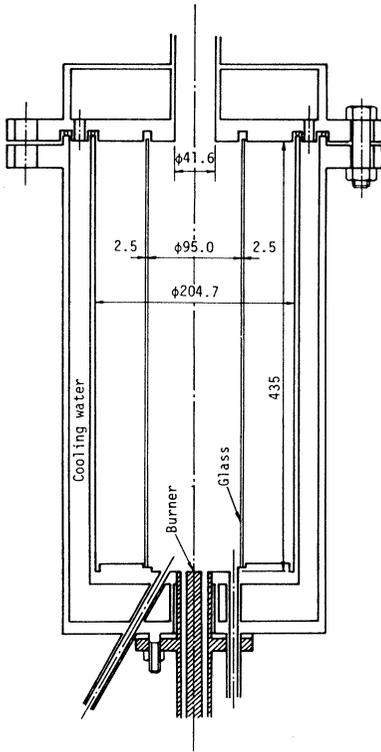
図-1 装置全体図

側壁となっており縦型円筒形の燃焼室を形成している。また、中央の鋼管で燃焼室の圧力を受け、この管と外側の鋼管の間を冷却水を流し冷却する構造となっている。また、バーナタイル中心上には図2に示すプロパンガスを燃料とする噴射角零度の上向きバーナを配し同軸流定常拡散火炎を形成させるようにしてある。なお、空気流流出口には流れの整流のため板を配してあるが、その傾は空気流と平行である。さらに、燃焼室前面には耐熱ガラスおよびアクリル板を重た矩形の窓が設けてあり、火炎の外部からの観測が可能となっている。

燃焼室内のガスおよび火炎の温度は半径方向、鉛直方向の任意の二次元位置に移動が可能な温度測定装置を炉内に配し、径の異なる三種類 (0.1mm, 0.3, 0.5) の裸熱電対 (Pt-PtRh 13%) の同一箇所の測定値から表面積が零となる点での値を外挿、校正し測定温度とした。火炎内温度の測定例を図3に示す。横軸は0.3mmの熱電対での測定結果であり、縦軸は上述の校正温度である。同図一点鎖線より上方では熱電対からの放熱により実測値は校正値よりも低い値を示してい

加圧、過給ボイラでの燃焼状態を観察するため、本報では第2報とは異なる加圧燃焼器を作成し、用いた。装置全体図を図1に示す。実験装置の全体は壁面の熱負荷の測定系を除けば第2報におけるとほぼ同一であり、燃焼用給気は往復動式圧縮機により加圧され、導管、オリフィス、バーナを経て燃焼室へ供給され、炉内圧は煙道に設けた圧力調整弁により設定している。燃焼器本体およびバーナ部を図2に示す。燃焼器本体は3重管構造になっており、内側の管は耐熱ガラス製で燃焼室の

火炎の燃焼・熱伝達特性およびその構造の解明に関する研究(第3報, 相似噴流火炎に及ぼす燃焼室内の圧力の影響について)



(a) 燃 焼 器 本 体

図-2 燃焼器本体およびバーナ

る。排ガス中の酸素量はガスクロマトグラフィ (MC5A) を用い測定し, 燃焼効率は, 排ガス中の残存酸素量と空気過剰係数との関係から求めた。火炎の長さは写真および肉眼により測定し, バーナタイルから輝炎の先端までとした。

なお, 系は煙道ガス温度および冷却水温度が一定となった時, 定常とみなし測定を行ない, また, 火炎温度, 火炎長さは振動を示したが, その平均値を採った。

3. 実験条件の設定

本報では火炎の燃焼特性に及ぼす燃焼室内の圧力の影響を調べるため, 燃焼室入り口において圧力によらず空力学的特性が同一の噴流となる条件を与える。

同軸噴流のバーナ部の座標を図4に示し, その等価直径 d_e^* , 等価速度 Ve^* , 等価 Reynolds 数 Re^* および Thring-Newby 数 θ^* を次式により与える。

$$d_e^* = \frac{2\sqrt{\rho_m}}{\sqrt{\pi}\sqrt{\rho_m}} \left(\frac{m_f + m_a}{\sqrt{M_f + M_a}} \right), \quad Ve^* = \frac{\rho_m}{\rho_M} \left(\frac{M_f + M_a}{m_f + m_a} \right), \quad (1)$$

$$Re^* = \frac{V_c^* d_c^*}{\nu_{af}}, \quad \theta^* = \frac{m_f + m_a}{D\sqrt{M_a}\pi\rho_f}$$

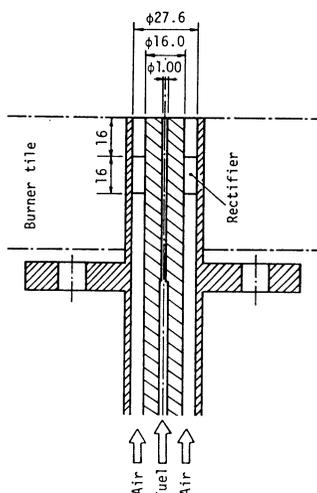
なお, 等価直径は同軸噴流の完全発達領域における相似性を示し, 等価 Reynolds 数は同軸噴流の乱流への遷移条件を与える。また Thring-Newby 数は自由噴流に対する拘束噴流の特性変化を規定する値である。式(1)において, m, M は質量流量, 運動量を示し, ρ, ν は密度, 動粘性係数である。また, 添字 a, f はそれぞれ空気, 燃料を示し, af は均一混合流としての値, m, M は m, M に対応している。動粘性係数は圧力に反比例することから次の置き換えを行なうと式(1)は式(3)と書かれる。

$$\mu = V_a/V_f, \quad \delta = A_a/A_f, \quad \sigma = \rho_a/\rho_f \quad (2)$$

$$d_e^* = d_1 \frac{\sqrt{1 + \delta\mu^2\sigma^2}}{(1 + \delta\mu\sigma^2)} \frac{(1 + \delta\mu\sigma)^2}{(1 + \delta\mu^2\sigma)}, \quad Ve^* = V_f \left(\frac{1 + \delta\mu\sigma^2}{1 + \delta\mu^2\sigma^2} \right) \left(\frac{1 + \delta\mu^2\sigma}{1 + \delta\mu\sigma} \right)^2, \quad (3)$$

$$Re^* = C(\mu, \delta, \sigma, d_1, \mu_0, R, T_0) V_f P_f, \quad \theta^* = \frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{D} \right) \left(\frac{1 + \delta\mu\sigma}{\sqrt{\delta\mu^2\sigma}} \right)$$

ここで, V, A はおのおの入り口流速, 面積である。また, μ_0, R, T_0 は粘性係数, ガス定数, 入



(b) バーナ部

り口温度で P_F は入り口圧力、すなわち燃焼室内圧力である。したがって、与えられた燃料の種類、燃料流速およびバーナ、燃焼室の幾何学形状に対し、 de^* , Re^* , θ^* を圧力 P_F によらず一定値とするには空気-燃料速度比 μ を一定に保ち、また、 $V_f P_F$ すなわち燃料流量 $G_f (= V_f A_f P_F / R_f T_0)$ を一定とすればよいことがわかる。なお、本報で取り扱う燃焼室は入り口でステップを有し、バーナタイル側にダクト内流れとは異なる種類の再循環流領域が形成されるため、拘束噴流としての諸特性が Thring-Newby 数を用いて整理されるかはさらに検討を要するが、ここでは実験条件を整える上での一つの代表値として用いた。

以上の検討より、系の幾何学性を一定に保ち、燃料流量 G_f および G_a を設定値とし、燃焼室内圧力をパラメータとして実験を行なった。なお、圧力の変化に伴う設定値の変動は該当する操作弁を動かし補正し、また、各実験条件下での測定はコールドスタートからの少なくとも二回以上の実験から得られた値の平均値とした。

図5 (a) の条件下で約 0.79×10^4 , (b) で 0.65×10^4 , (c) で 0.90×10^4 程度であり、対象とした火炎は層流ないしは遷移域にある。このような条件下においても、速度比 μ (空気過剰係数 λ) が高くなるにつれ燃焼室内の圧力の影響を受けにくくなり、いわゆる乱流火炎の相似性の適応の可能性が認められる。しかし、本実験の範囲では燃料-空気速度比ないしは空気過剰係数の低い領域では火炎の長さには及ばず雰囲気圧力の影響は大きく、また、肉眼によれば圧力を高めるに従い、この条件下では酸素欠乏状態での燃焼に類似し、ある雰囲気圧力までは輝炎化傾向が顕著であるが、さらに圧力を増すと赤燈色の輝度の低い火炎

4. 実験結果と検討

4.1 火炎の長さ

火炎の長さ L_F と空気-燃料速度比 μ (空気過剰係数 λ に比例) の関係を燃焼室内圧 P_F をパラメータとして図5に示す。 L_F は μ の増加に伴い低圧域では単調減少、高圧域では単調増加し一定値に漸近する傾向を示している。また、燃料流量が多くなるにつれ、 L_F は若干増加するが、その値は大気圧下での実験から推測される。本実験範囲での Re^* は図5 (a) の条件下で約 0.79×10^4 , (b) で 0.65×10^4 , (c) で 0.90×10^4 程度であり、対象とした火炎は層流ないしは遷移域にある。このような条件下においても、速度比 μ (空気過剰係数 λ) が高くなるにつれ燃焼室内の圧力の影響を受けにくくなり、いわゆる乱流火炎の相似性の適応の可能性が認められる。しかし、本実験の範囲では燃料-空気速度比ないしは空気過剰係数の低い領域では火炎の長さには及ばず雰囲気圧力の影響は大きく、また、肉眼によれば圧力を高めるに従い、この条件下では酸素欠乏状態での燃焼に類似し、ある雰囲気圧力までは輝炎化傾向が顕著であるが、さらに圧力を増すと赤燈色の輝度の低い火炎

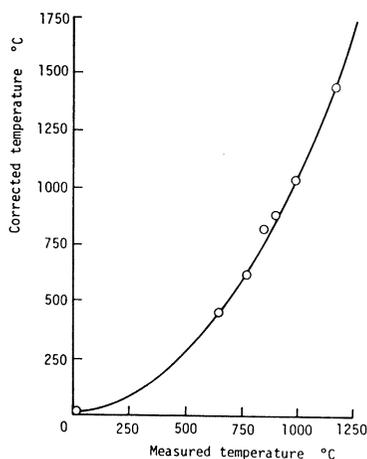
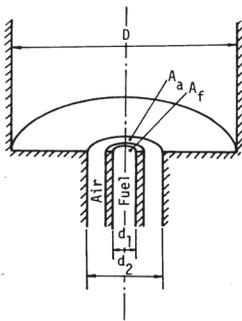


図-3 火炎内温度の測定例

図5 (a) の条件下で約 0.79×10^4 , (b) で 0.65×10^4 , (c) で 0.90×10^4 程度であり、対象とした火炎は層流ないしは遷移域にある。このような条件下においても、速度比 μ (空気過剰係数 λ) が高くなるにつれ燃焼室内の圧力の影響を受けにくくなり、いわゆる乱流火炎の相似性の適応の可能性が認められる。しかし、本実験の範囲では燃料-空気速度比ないしは空気過剰係数の低い領域では火炎の長さには及ばず雰囲気圧力の影響は大きく、また、肉眼によれば圧力を高めるに従い、この条件下では酸素欠乏状態での燃焼に類似し、ある雰囲気圧力までは輝炎化傾向が顕著であるが、さらに圧力を増すと赤燈色の輝度の低い火炎

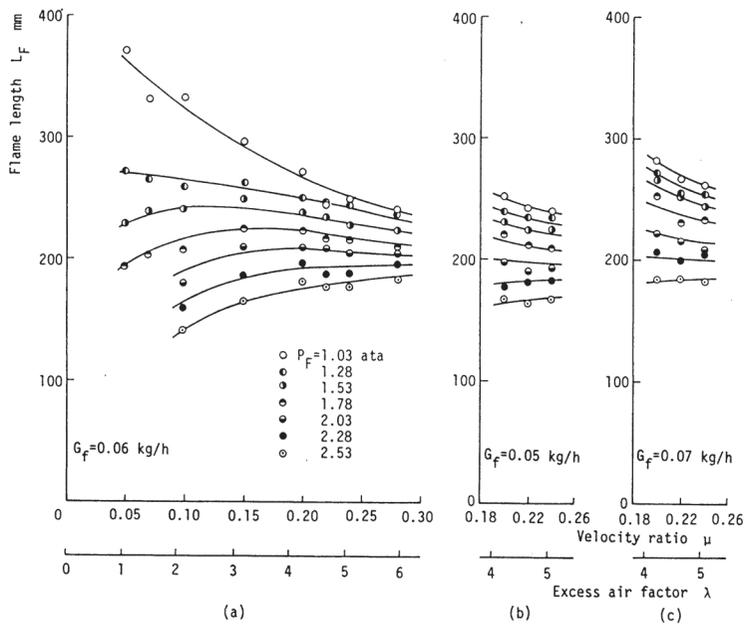


図一四 バーナ部近傍の座標

となってくる。

4.2 火炎の最高温度

火炎の最高温度 T_M と速度比 μ の関係を図6に示す。燃焼室内圧力 P_F が高くなるにつれ T_M は低下し、その傾向は燃料流量の少ない場合の方が顕著である。 μ に対し T_M は $\mu=0.22$ 付近で最大値を示す。この変化は後述の燃焼効率の μ に対する変化よりも急であり、 μ の高い領域では火炎後端部での余剰空気の同伴による温度低下であり、 μ の低い領域では輝炎化による放熱量の増加、燃焼効率の低下および火炎温度の平坦化によるものと考えられる。なお、最高温度を示す位置は燃料流量、速度比および燃焼室内圧力によらず、火炎の先端から約

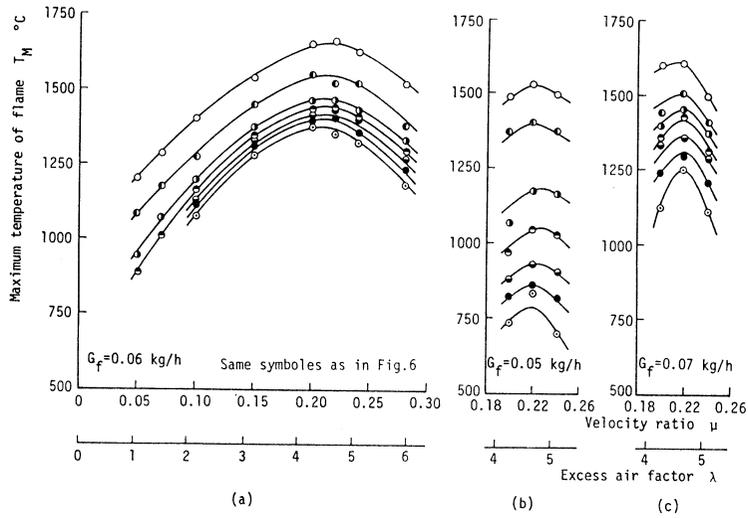


図一五 火炎の長さ

100mm下方であった。

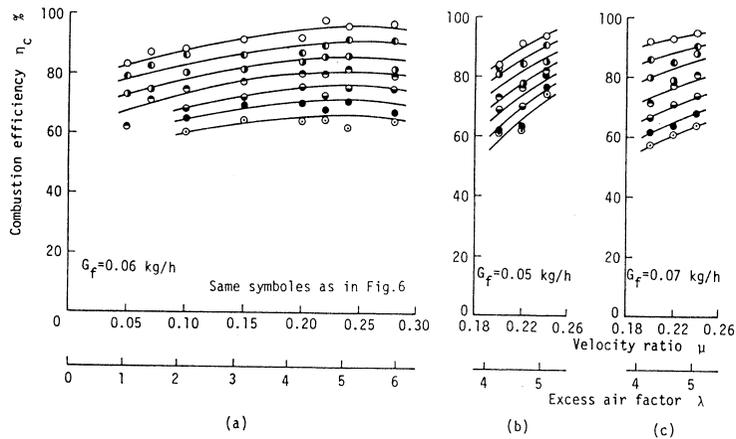
4.3 燃焼効率

燃焼効率 η_c と速度比 μ の関係を図7に示す。 η_c は燃焼室内圧力 P_F に比例して減少する傾向がみられた。また、 $G_f=0.06\text{kg/h}$ の測定範囲では、ゆるやかではあるが極大値をもつ傾向を示した。なお、排ガス中に含まれる煤の量の測定も行ったが、定量的な検討に供せるまでには至らなかった。しかし、定性的には煤の発生量は必ずしも燃焼効率とは比例した関係にはなく、加圧



図一六 火 炎 の 最 高 温 度

霧開気下での燃焼現象の複雑性を示した。

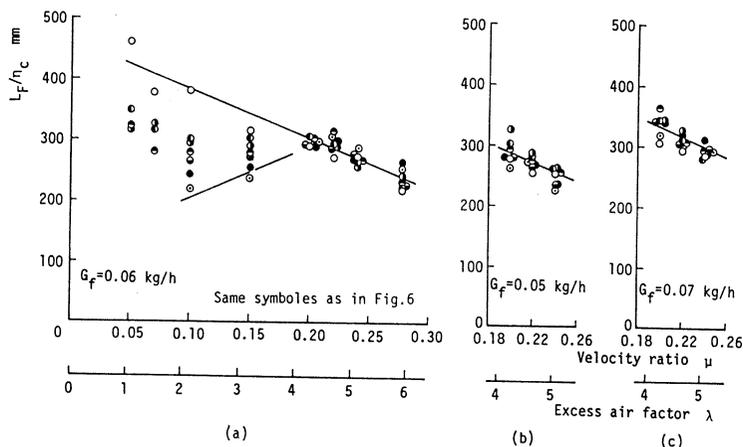


図一七 燃 焼 効 率

4.4 総合的な検討

火炎の長さ L_F と燃焼効率 η_c の関係を調べるため両者の比 L_F / η_c の値を求め図8に示す。同図(a)より速度比 $\mu = 0.2$ 付近を境とした μ による L_F / η_c の傾向の違いがわかる。すなわち、 $\mu = 0.2$ 以上では同図(b), (c)からも L_F / η_c は燃焼室内圧力 P_F によらずほぼ直線的に関係づけられるのに対し、これ以下では P_F による整理も同時に必要となることがわかる。 $\mu = 0.2$ 以上でのこの傾向は、見掛け上の燃焼量と火炎の寸法に圧力によらない関係があることを示し、前述の乱

火炎の燃焼・熱伝達特性およびその構造の解明に関する研究(第3報, 相似噴流火炎に及ぼす燃焼室内の圧力の影響について) 流火炎の相似性を示すものである。なお、この領域での μ と L_F/η_c の関係は燃料流量 G_f によらずほぼ同一の勾配を示すが、絶対値は G_f に比例している。 $\mu=0.2$ 以下では圧力の上昇に伴い、燃焼効率、すなわち、見掛け上の燃焼量の低下よりも火炎寸法の縮小の方が早くなることを意味しており、これは分子拡散が支配的であるこの条件下では、加圧下での分子の衝突確率の増加により、バーナ直後で相対的に燃焼反応が盛んになり高温となるが、それと同時に酸素の供給が不足する状態を招き、結果としてこのような現象が表われたものと思われる。



図一八 火炎の長さ/燃焼効率

5. 結 言

本報では、プロパンガス-空気から成る同軸流定常拡散火炎(噴射角, 空気旋回角はともに零度)を用い、燃料流量および燃料-空気比をパラメータとし、また、非燃焼時には雰囲気圧力によらず同一の空力学的特性を有する噴流となる条件を与え実験を行ない、燃焼室内圧力が燃焼状態に及ぼす影響を明らかとする事を試み、その結果を基に火炎の寸法等が圧力の影響を直接受ける条件とそれ以外の条件を明らかとし、また、その差異をきたす原因について検討を行ない、次の結果を得た。

- (1) 燃焼器およびバーナを同一とし非燃焼時には雰囲気圧力によらず同一の空力学的特性を有する噴流とするには、燃料-空気速度比(ないしは、空気過剰係数)および燃料(重量)流量を圧力によらず同じくする条件を設定すればよい。
- (2) 燃料流量および燃料-空気比を一定として燃焼室内の圧力を高めると火炎は短くなる。これは全般的に圧力上昇に伴う不完全燃焼によるものであるが、とくにこの傾向は速度比の低い領域において顕著である。しかし、大気圧下での燃焼とは異なり、燃焼室内の圧力を高めると、速度比の増加に伴い火炎の長さは単調に増加し、一定の値に漸近する傾向を示

す。

- (3) 火炎の最高温度および燃焼効率は、燃料流量、速度比が一定であれば燃焼室内の圧力が高くなるにつれ低下する。しかし、同一圧力下においては両者ともある速度比で最高値を示す。
- (4) 火炎の長さや燃焼効率の関係を調べるため両者の比の値を求め検討した結果、速度比0.2付近を境としてその値に傾向の違いが表われた。すなわち、速度比0.2以上ではその値は燃焼室内圧力によらずほぼ直線的に関係づけられるのに対し、これ以下では燃焼室内圧力による整理も同時に必要となることがわかり、速度比0.2以上では見掛け上の燃焼量と火炎の寸法に圧力によらない関係すなわち乱流火炎の相似性を示した。

本研究を行なうに当たり、日本工学院 水野忠治先生のご指導を得、また、本学卒業生 青山英樹、小野寺正史、佐藤和彦、津野修一の諸兄の協力を得た。付記し、謝意を表わす次第である。

(昭和60年5月20日 受理)

参 考 文 献

- 1) 媚山・他3名, 機講論, 802-1(1980), 82.
- 2) 媚山・他3名, 機講論, 842-3(1984), 86.
- 3) 媚山・水野, 室蘭工業大学研究報告(理工編), 10-5(昭58), 733.