



管内同軸噴流火炎の研究：
管径比の影響に対する検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 木本, 恭司 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00008087

管内同軸噴流火炎の研究

(管径比の影響に対する検討)

A Study on the Confined Double Concentric Turbulent Jet Flames

(The Influence of Outer and Inner Tube Diameter Ratio)

木 本 恭 司*

Kyoji KIMOTO**

(昭和53年9月1日受理)

要 旨

管径比が一定の場合の管内同軸噴流火炎については、すでに種々の角度から検討を加えてきた。本報告ではノズル内径を広範囲に変化させて管径比の影響に対する実験を行い、著者がすでに報告した解析による計算値と比較した。計算値は管径比の変化に対しても層流火炎に近い場合を除いて実験値に相当よく一致する。

1. 緒 言

管内同軸噴流火炎について、著者は一連の研究を行ってきた。まず積分法を応用した比較的簡単な解析を試み、ついで実験的研究を行い、解析により種々の燃焼条件のもとで実験結果をかなりよく説明できることを示した⁽²⁾。また混合の促進と燃焼の進行過程についても検討し、燃焼の制御を容易に行うことを示した⁽³⁾。ただ、これまでの研究では非燃焼時⁽⁴⁾、⁽⁵⁾と比較の意味から、外管と内管の管径比は $R/r_0=17.17$ ($2R=103\text{mm}$, $2r_0=6\text{mm}$) の一定値としてきた。しかし、非燃焼時とは異なって燃焼時には管内でのガスの熱膨張の影響は無視しえない。したがって、今までの議論をさらに一般化するためには管径比の影響について調査しておく必要がある。本報告では以上の観点から、ノズル内径を変化させた実験を行い、文献(1)による計算値と比較し、管径比の影響を実験的、理論的に検討することを目的としている。

実験方法としては、燃焼気流の特性を代表する量として、無次元の中心軸上全圧 p_{rc}^* ($=p_{rc}/p_{roc}$)、温度 T_c/T_e 、管内静圧 p_M^* ($=2p_M/\rho_0 u_{0c}^2$) の軸方向変化を選び、各実験条件に対して測定を行った。そして、その結果と解析による計算値とを比較した。

2. おもな記号

b, b^* : ノズル肉厚, およびその無次元量 $=b/2r_0$

$[L_f]_r, [L_f]^*$: 軸上最高温度位置で定義された火炎長さ, およびその無次元量 $= [L_f]_r / r_0$

M : 中心噴流の体積空燃比 $= Q_o / Q_f$

*機械工学科 **Department of Mechanical Engineering

- p_0 : ノズル出口での静圧
- p_M, p_M^* : 管内静圧, およびその無次元量
- p_T^* : 無次元全圧 $= (p_M + \rho u^2/2)/(p_0 + \rho_0 u_{0c}^2/2)$
- R : 外管半径
- r, r^* : 半径方向座標, およびその無次元量 $= r/r_0$
- r_0 : ノズル半径
- T : 絶対温度($^{\circ}K$)
- u : 軸方向速度
- u_0, u_{0c} : ノズル出口での中心噴流の平均速度, および中心軸上速度
- x, x^* : 軸方向座標, およびその無次元量 $= x/r_0$
- λ_m : 質量速度比 $= \gamma_e u_{0e}/\gamma_0 u_0$
- ρ : 密度
- σ, σ^* : 標準偏差, およびその無次元量 (変動率)

添字, その他

- c : 中心軸上の値
- e : 周囲流での値
- n : ノズル出口の中心噴流速度分布形の指数
- $*$: 無次元量

3. 実験条件と実験方法

3.1 実験条件

管径比 R/r_0 の影響を検討するためには, 他の実験条件を一致させておく必要がある. そこで, 基準の実験条件である中心噴流の体積空燃比 $M=5$, 無次元ノズル肉厚 $b^*=b/2r_0=0.83$, 中心噴流の平均流速 $u_0=8.63m/s$ の場合について, R/r_0 と λ_m を変化させて実験を行った. 実験条件を表-1に示す. またノズル形状をまとめて図-1に示す. 図に示されているように, ノズル径は3mm~8mmまで1mmおきに広範囲に変化させている. なお, ノズル径8mmの場合のみ, 工作の都合上, $b^*=0.75$ とした.

表-1 実験条件

No.	ノズル径 (mm)	質量速度比 (λ_m)	燃料流量 (l/分)	一次空気 流量(l/分)	中心噴流		周囲流		ノズル肉厚 (mm)	無次元ノ ズル肉厚
					流速(m/s)	$Re \times 10^3$	流速(m/s)	$Re \times 10^3$		
11	3.00 ($R/r_0=$ 34.3)	0.25	0.61	3.05	8.63	1.83	2.35	1.51	2.50	0.83
12		0.54					5.05	3.24		
13		0.72					6.78	4.35		
14	4.00 ($R/r_0=$ 25.8)	0.25	1.08	5.24		2.35	1.51	3.30		
15		0.54				5.05	3.24			
16		0.72				6.78	4.5			
17	5.00 ($R/r_0=$ 20.6)	0.25	1.69	8.47		2.35	1.51	4.15		
18		0.54				5.05	3.24			
19		0.72				6.78	4.35			
20	7.00 ($R/r_0=$ 14.7)	0.25	3.32	16.61	2.35	1.51	5.85			
21		0.54			5.05	3.24				
22		0.72			6.78	4.35				
23	8.00 ($R/r_0=$ 12.9)	0.25	4.34	21.69	2.35	1.51	6.00			
24		0.54			5.05	3.24				
25		0.72			6.78	4.35				

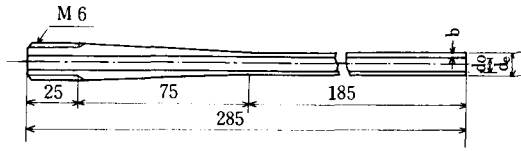


図-1 ノズル形状

$d_o=2r_o$	d_e	b
φ 3	φ 8	2.5
φ 4	φ 10.6	3.3
φ 5	φ 13.3	4.15
φ 7	φ 18.7	5.85
φ 8	φ 20	6

3. 2 温度変動の処理

温度の変動は特に下流域において大きいので、管径比などの影響を検討する場合には、電圧計の指針の読みだけでなく、変動そのものも記録しておくことが望ましい。そこで本報告では熱電対 ($Pt-Pt \cdot R_n$ 13%, 素線径 1mm) に生じた熱起電力をデジボルよりデジタル化し、パンチャコントローラ(HASK製)をとおして紙テープに自動的にさん孔するようにした。サンプリングタイムは約1秒である。

温度測定概略図を図-2に、またパンチャコントローラの仕様を表-2に示す。電子計算機(FACOM230-28)では、ディスクパック(DP)に表-2のさん孔フォーマットの形式の紙テープを一たん記憶させたのち、処理装置(CPU)への読みだしから、統計的処理まですべてプログラム上で一括処理される。なお、火炎は少しの外乱によってもふらつくので、それによって温度は大きく変動する。この変動と定常的な乱れによる温度変動とは区別する必要があるので、チェビシエフの不等式(6)を用い、平均値からのちらばりが $\sqrt{2}\sigma_T$ (σ_T :標準偏差) よりも大きいデータを除いた。

すなわち、

$$|t_i - \bar{t}_i| < \sqrt{2}\sigma_T \dots\dots\dots (1)$$

の範囲にあるデータのみ採用した。

ここで、 \bar{t}_i は n_i 個のデータの平均値、 σ_T は標準偏差で、次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} \bar{t}_i &= \sum_{i=1}^{n_i} t_i / n_i \\ \sigma_T &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_i} (t_i - \bar{t}_i)^2}{n_i}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

チェビシエフの定理により、データの確率分布がいかなる分布であろうとも、式(1)によって全データの50%以上のデータが採用されることになる。式(1)の範囲内にある n_i 個のデータについて、あらためて絶対温度の平均値($\bar{T}_i = \bar{t}_i + 273$)と標準偏差 σ 、ならびに変動率(絶対温度の平均値で無次元化した標準偏差) $\sigma^* = \sigma / \bar{T}_i$ が計算される。

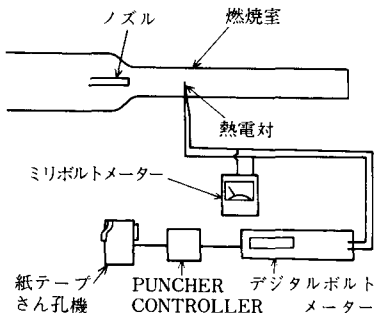


図-2 温度測定概略図

表-2 パンチャコントローラの仕様

入	力	BCD (1-2-4-8コード)
		パラレル入力
		TTLレベル
入	力	最大7桁
出	力	ASCIIコード(パリティ奇数)
さん孔	フォーマット	□□□□□□□C _R L _F

4. 実験結果とその検討

4.1 ノズル出口速度分布

燃焼実験にさきだち、中心噴流のノズル出口速度分布と乱れ強さの分布を熱線風速計と直線化増幅器（リニアライザ）を用いて測定した。実験は空気流で行い、燃焼実験の中心噴流の混合ガスの Re 数（表-1 参照）と空気流の Re 数を一致させて行った。また測定は熱線がノズル内壁に接触するのを防ぐために、ノズル出口後 0.5 mm の位置で行った。

$\phi 3$, $\phi 4$, $\phi 5$ の各ノズルでの速度分布と乱れ強さの分布を図3 (a) に示す。左縦軸はノズル出口の中心軸上速度で無次元化した速度 u/u_{0c} , 右縦軸は乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/u$ である。また、実線は層流速度分布、破線、および一点鎖線は $1/n$ 乗則であらわされる乱流速度分布で、それぞれ次式で示される。

$$f(r^*) = 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = 1 - r^{*2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$f(r^*) = \left(\frac{r_0 - r}{r_0}\right)^{\frac{1}{n}} = (1 - r^*)^{\frac{1}{n}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

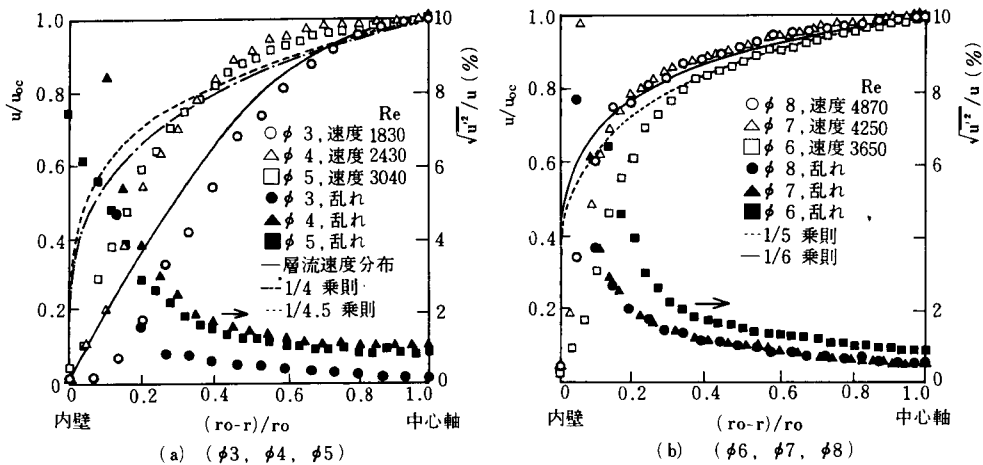


図-3 ノズル出口速度分布、および乱れ強さの分布

図より、 $\phi 3$ のノズル ($Re=1830$) のノズル出口速度分布は層流速度分布（放物線分布）に近い分布で妥当な結果を示していることがわかる。また $\sqrt{u'^2}/u$ も非常に小さく、ノズル内壁 $[(r_0 - r)/r_0 \rightarrow 0]$ を除けば 0.5% 以内におさまっている。なお、実験点がノズル内壁で層流分布よりも値が小さいが、これは内壁近くでは壁から熱線への冷却効果が大きくなることと、測定位置がノズル出口後で、内壁より外側には肉厚部分 (dead space) があるために、縮流効果のあることも考えられる。

つぎに、 $\phi 4$, $\phi 5$ のノズルでは、層流分布、あるいは $1/n$ 乗則の乱流分布などの単一の曲線では近似できず、層流から乱流への遷移域と思われる。 Re 数 (2430, 3040) からみても妥当である。なお、一点鎖線は式(4)で $n=4$, また破線は同じく $n=4.5$ としたときの近似曲線で、後述の計算値にはノズル出口速度分布としてこれらの曲線を用いた。図からわかるように、これらの場合 $1/n$ 乗則では速度分布の実験値を正確に近似できないが、計算上は分布全体の積分値が主として問題になる

ことと、数値計算の簡単化のためである。

つぎに、 $\phi 6$ 、 $\phi 7$ 、 $\phi 8$ の場合を図-3(b)に示す。 $\phi 6$ の場合($Re=3650$)には速度分布は式(4)で $n=5$ 、 $\phi 7$ ($Re=4250$)、 $\phi 8$ ($Re=4870$) の場合は同じく $n=6$ とおいた曲線にノズル内壁を除けば相当よく一致しており、これは従来からよく知られているとおりである(7)。

4. 2 実験結果および計算値との比較

4. 2.1 実験結果の全般的傾向

本項では燃烧気流の特性を代表する量として選んだ無次元の中心軸上全圧、温度、管内静圧が実験条件により一般にどのように変化するかをみておく。

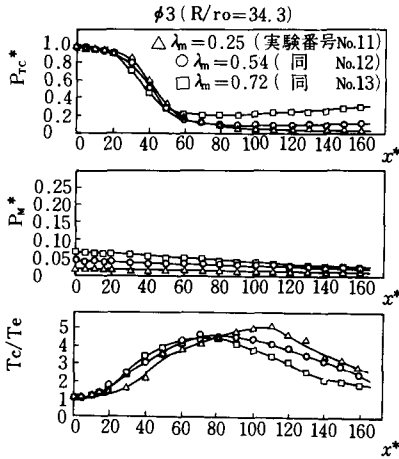


図-4 軸方向の各種分布($\phi 3$)

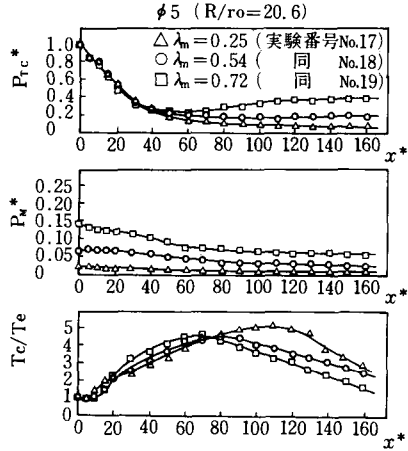


図-5 軸方向の各種分布($\phi 5$)

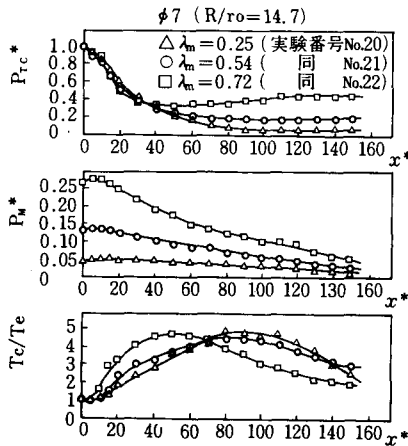


図-6 軸方向の各種分布($\phi 7$)

表-3 計算に用いたノズル出口速度分布の指数 n の値

ノズル径	Re	式(5-4)の指数 n
$\phi 3$	1830	層流分布
$\phi 4$	2430	$n = 4$
$\phi 5$	3040	$n = 4.5$
($\phi 6$)	3650	$n = 5$
$\phi 7$	4250	$n = 6$
$\phi 8$	4870	$n = 6$

まず表-1の実験条件の $\lambda_m=0.54$ を例にとり、ノズル径を $\phi 3$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 7$ に変化させた場合の火炎の様子を観察した。火炎写真、あるいは目視観察によると、 $\phi 3$ の場合は火炎の先端部を除いては乱れが非常に弱く、相当下流まで層流火炎に近い状態にある。一方、ノズル径が大きくなるにつれ（すなわち R/r_0 が小さくなるほど）、火炎が長く伸び、乱れも顕著でノズル出口のごく近傍を除いて全体に乱流火炎の様相を呈するようになる。

つぎに、 $\phi 3$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 7$ の各ノズルに対し、 λ_m を変化させた場合の軸方向の各種分布の実験結果を図-4～図-6に示す。

無次元の軸上全圧 p_{rc}^* 、管内静圧 p_M^* 、軸上温度 T_c/T_e の軸方向変化の特徴は、いずれのノズル径の場合も文献(2)の $\phi 6$ の場合と同じである。すなわち、 λ_m の増加につれて軸上の最高温度位置で定義された火炎長さ $[L_f]_r^*$ は短くなり、かつこの位置を境に p_{rc}^* は軸方向に減少から増加に転じる。また、その増加割合は λ_m が大きいくほど著しい。さらに、 p_M^* は λ_m の増加につれて全体に大きくなり、かつ軸方向への減少割合も大きくなる。

つぎに、 λ_m を一定にして管径比の影響をみると、 $\phi 3$ の場合が他と著しく異なっていることがわかる。すなわち、 p_{rc}^* 、 p_M^* 、 T_c/T_e はともに $x^*=x/r_0=15\sim 20$ 近くまでほぼ一定で、 $\phi 5$ 、 $\phi 7$ の場合にくらべてその区間は著しく長い。この原因は、この火炎が層流火炎に近いためと思われる。

また、 p_M^* はノズル径が大きくなるにつれて全体にその値が大きくなり、かつ軸方向への減少割合も大きくなる。それにつれて、 p_{rc}^* も最小値以後の増加の割合が大きくなる。この原因はいずれもノズル径が大きいくほど燃焼管内での燃焼ガス量が多くなるので、熱膨張による管内静圧の増加が著しくなるためである。

一方、 T_c/T_e はノズル径が大きくなるにつれて、上流域での立上がり急で、それにつれて軸上最高温度位置が上流側に移行する傾向がみられる。特に $\lambda_m=0.72$ の場合にはその傾向が明らかである。すなわち、火炎長さ $[L_f]_r$ そのものはノズル径が大きくなるにつれて長くなるが、ノズル半径で無次元化された火炎長さ $[L_f]_r^*$ はむしろ短くなる傾向にある。 λ_m が大きいくとそれが著しくなるのは、この場合には管径比の影響が大きくなるためと考えられる。すなわち、燃焼管（外管）の径は一定であるために、周囲流の広がりによって制限され、ノズル径が大きくなるほど中心噴流へのエントレインメント量（無次元流量増加率 Q^* ）が相対的に多くなり、周囲流速の速い場合にはその効果がより顕著になるためであろう。このことは、 λ_m が大きいくほど管内静圧に対するノズル径の影響がより大きくなり、軸方向への p_M^* の減少割合が著しく大きくなることから想像される。

このように、 λ_m が小さい場合には管径比の影響はさほど大きくないが、 λ_m が大きいくとその影響は大きくなり、単位容積あたりの燃焼率の増加にも大きく寄与するようになる。

4. 2. 2 実験と計算との比較

実験結果と文献(1)の解析による計算値との比較を図-7～図-16に示す。計算には文献(1)で用いた実験定数と全く同じ値を用いている。なお、ノズル出口速度分布の指数 n については、ノズル径の変化にあわせて4. 1項で述べた近似曲線を用いた。それらをまとめて表-3に示した。図-7～図-16の T_c/T_e の図中、○印は電圧計の指示目盛で読みとった温度（以後読取値と略記する）を、△印は3. 2項で述べた温度変動を処理した値（以後処理値と略記する）で、一点について100～150個のデータが平均化されている。これらの図をみると、読取値と処理値は全体に非常によく一致していることがわかる。なお、 $\phi 3$ の場合は4. 2. 1項で述べたように層流火炎に近いので他の場合と条件が異なっており、図は省略してある。

これらの図をみると、いずれのノズル径においても λ_m の増加につれて計算上の火炎長さ $[L_f]_r^*$ は短くなり、文献(2)の $\phi 6$ の場合と同様に実験の傾向を良く示している。また T_c/T_e の実験値と計算値

管内同軸噴流火炎の研究

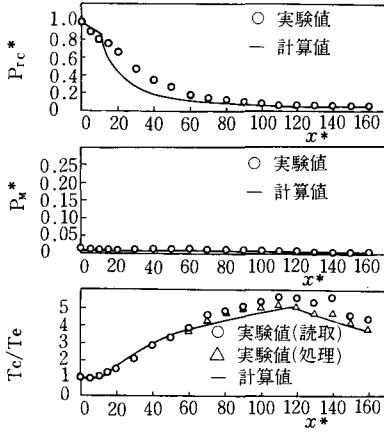


図-7 実験と計算との比較($\phi 4$, $\lambda_m=0.25$, 実験番号No.14)

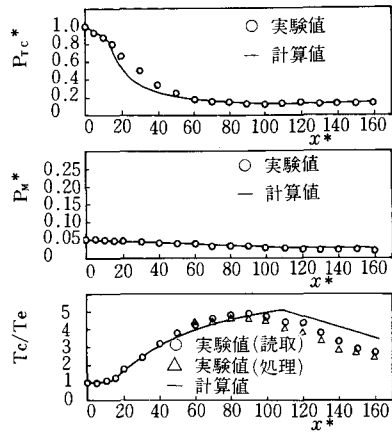


図-8 実験と計算との比較($\phi 4$, $\lambda_m=0.54$, 実験番号No.15)

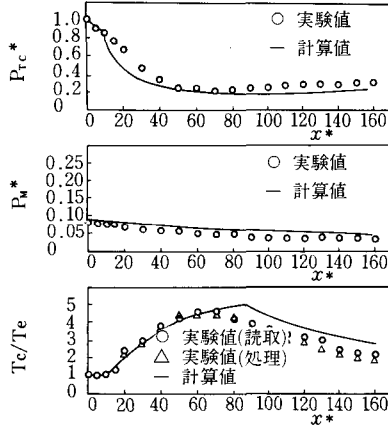


図-9 実験と計算との比較($\phi 4$, $\lambda_m=0.72$, 実験番号No.16)

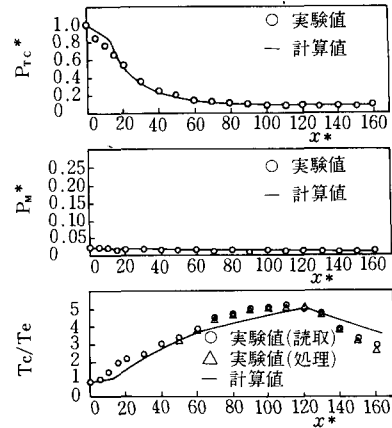


図-10 実験と計算との比較($\phi 5$, $\lambda_m=0.25$, 実験番号No.17)

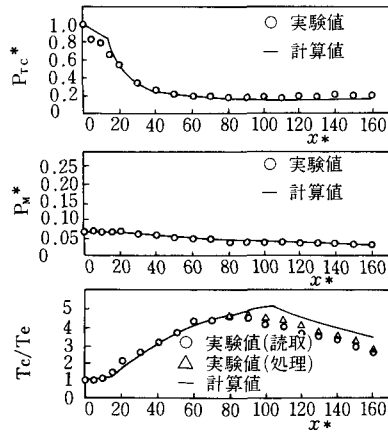


図-11 実験と計算との比較($\phi 5$, $\lambda_m=0.54$, 実験番号No.18)

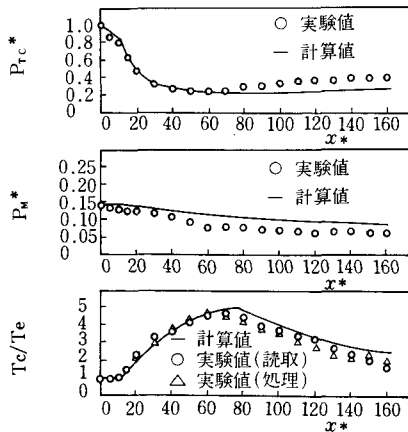


図-12 実験と計算との比較($\phi 5$, $\lambda_m=0.72$, 実験番号No.19)

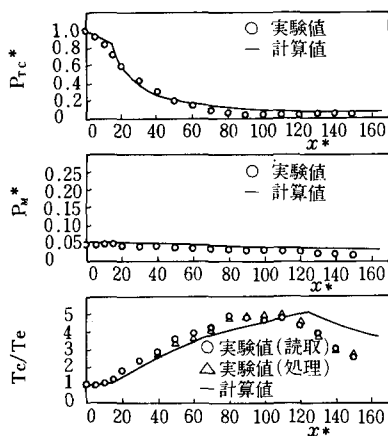


図-13 実験と計算との比較($\phi 7$, $\lambda_m=0.25$, 実験番号No.20)

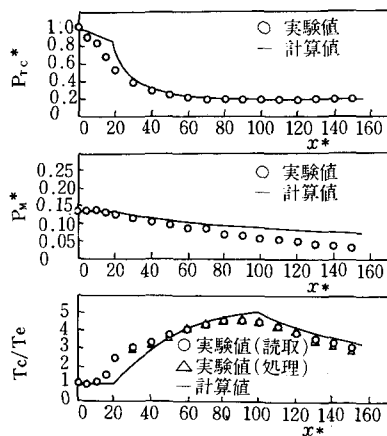


図-14 実験と計算との比較($\phi 7$, $\lambda_m=0.54$, 実験番号No.21)

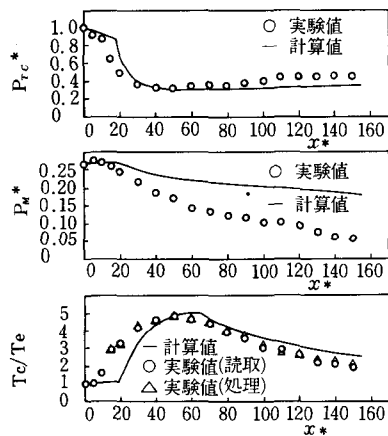


図-15 実験と計算との比較($\phi 7$, $\lambda_m=0.72$, 実験番号No.22)

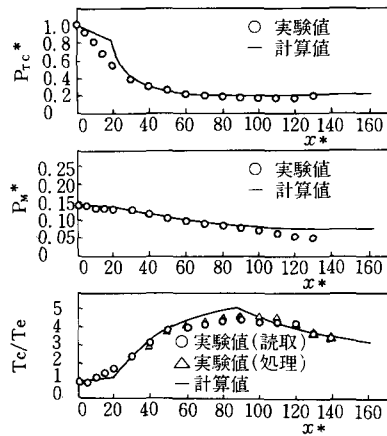


図-16 実験と計算との比較($\phi 8$, $\lambda_m=0.54$, 実験番号No.24)

はいずれの場合にも定量的に相当よく一致している。また p_w^* の計算値は、 λ_m の増加につれてその値が全体に大きく、かつ軸方向への減少割合も大きくなり、実験の傾向をよく示している。定量的にもよく一致しているが、ノズル径、 λ_m とともに大きい場合には (図-15)、計算値は実験値より大きくなるようである。

つぎに管径比の影響をみるために、 $\lambda_m=0.54$ について、図-8、図-11、図-14、図-16 の順に検討してみる。

まず T_c/T_e の計算値より、ノズル径が大きくなるにつれて最高温度位置が上流側に移行し、無次元炎長さ $[L_f]_r^*$ の計算値は短くなる傾向にあることがわかる。これはノズル径が大きくなるにつれて、計算上の無次元流量増加率 Q^* の軸方向への増加割合が大きくなるためで、4.2.1項での考察を裏付けている。さらに $\lambda_m=0.72$ の場合には (図-9、図-12、図-15)、 $[L_f]_r^*$ の計算値が短くなる傾向は一層顕著で、管径比の影響が大きくなることは明らかである。すなわち、 λ_m が大きいと管径比の影響が大きくなるという実験結果の傾向 (4.2.1項) が計算によってよく説明できることがわかる。

つぎに、 p_w^* の計算値はノズル径が大きくなるにつれて、値は全体に大きく、かつ軸方向への減

少割合も大きくなり、 T_c/T_e と同様に実験の傾向をよく説明している。同様に p_{rc}^* の計算値についても、ノズル径が大きくなるにつれて下流域でその値は大きくなっており、妥当な結果が得られている。

以上のように、 $\phi 4$ 以上のノズル径では実験値と計算値は管径比の影響を含めて相当よく一致しており、文献(1)の著者の解析により一般的に計算可能であることがわかる。

5. 結 言

本報告では、著者の既報告の研究(1)~(3)にひきつづき、ノズル径 $\phi 3 \sim \phi 8$ まで広範囲に変化させて管径比の影響に対する実験的、理論的な検討を行った。

実験結果をみると、火炎長さ $[L_f]_r$ そのものはノズル径が大きくなるにつれて（すなわち、管径比 R/r_0 が小さくなるにつれて）、長くなるが、ノズル半径で無次元化された火炎長さ $[L_f]_{r^*}$ はむしろ短くなる傾向にあり、 λ_m が大きいほどそれが著しい。この原因はノズル径が大きくなるほど、中心噴流へのエントレインメント量が相対的に多くなり、周囲流速の速い場合にはその効果がより顕著になるためである。

つぎに文献(1)の解析による計算結果と比較した。その結果、乱流輸送係数の式、および実験定数を含めて著者の解析による計算値は管径比の変化に対しても実験結果に相当よく一致することがわかった。ただし、 $\phi 3$ の場合は実験と計算で一致しないが、これは層流火炎に近く、解析の適用範囲外にあるためである。

本報告は京都大学審査学位論文の一節である。論文をまとめるに際し御懇篤な御指導頂いた京都大学佐藤俊教授、本研究のきっかけとなる助言を頂いた同学鈴木健二郎助教授に厚く感謝の意を表します。また、データ処理系の製作に御協力頂いた元本校技師山浦茂氏、並びに卒業研究として実験に御協力頂いた秋本富男、高岡実、山本泰生の諸氏と、日頃御指導頂いている神戸大学松本隆一教授に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 松本, 木本, 機械学会論文集, 43-365 (昭52-1), 257.
- (2) 松本, 木本, 機械学会論文集, 43-366 (昭52-2), 692.
- (3) 松本, 木本, 機械学会論文集, 43-375 (昭52-11), 4277.
- (4) 松本, 木本, 土本, 機械学会論文集, 38-311 (昭47-7), 1753.
- (5) 松本, 木本, 機械学会論文集, 43-366 (昭52-2), 617.
- (6) ガットマン・ウルクス共著, 石井・掘共訳, 工科系のための統計概論 (昭50-3), 78, 培風館.
- (7) 藤本, 流体力学, (昭43), 229, 養賢堂.