

リフトジェットエンジン模型燃焼器の燃焼実験

辻 広
堀 守 雄

Combustion Experiments in Model Combustion Chamber of Lift Jet Engine

By
Hiroshi TSUJI and Morio HORI

Abstract: The experiments were made to study the combustion phenomena in the model combustion chamber equipped with quartz windows which corresponds to the one-twelfth sector of the annular type combustor of lift jet engine. The combustion performances such as the combustion efficiencies, the pressure losses and the blow-off limits of flames were measured for combinations of six kinds of swirlers and two kinds of perforated liners, and the combustion processes were examined by measuring the temperature distributions in the burning zone and by taking photographs of flames inside the combustion chamber. Also in this preliminary experiments in the model combustion chamber, it was confirmed that the combustion processes in the burning zone have a great influence on the combustion performances of the combustor.

概 要

V/STOL機用リフトジェットエンジンの高負荷環状燃焼器内の燃焼現象を詳しく解析し、各種パラメタの燃焼器特性に及ぼす影響を明らかにする目的で、環状燃焼器の1/12セクタに相当する箱型模型燃焼器を試作し、これを用いて一連の燃焼実験を行なった。使用した燃焼器は単式渦巻噴射弁1個を備え、側壁には石英ガラス窓がついている。実験は内筒二種類、旋回器六種類の各組合せについて行ない、燃焼効率、圧力損失、火炎の吹き消え限界などを測定すると共に、燃焼帯の温度分布の測定や火炎の状態の観察および写真撮影を行なって燃焼状態を調べた。

この実験によって各種パラメタの燃焼器特性に及ぼす影響や、燃焼器内の流速および空燃比を変えた場合の火炎の状態の変化を明らかにすることができ、これにより燃焼器特性に対する燃焼帯の燃焼状態の重要性が確かめられた。

しかしここに使用した箱型模型燃焼器においては燃焼器内の現象に及ぼす側壁の影響は著しく、燃焼現象を詳しく解析するためには、側壁の影響をできるだけ少なくした模型燃焼器について実験を行なう必要がある。

I. ま え が き

最近 V/STOL 機の試作が盛んになるにつれて、V/STOL 機用ジェットエンジンとして最

も特徴的なリフトジェットエンジンの開発が進められ、我国においても科学技術庁航空宇宙技術研究所において JR-100、また石川島播磨重工業株式会社において XJ-11 の開発がそれぞれ行なわれている [1][2]。リフトエンジンとしては、まず何よりも推力/重量比の大きいことが必要であり、従ってその開発においては、エンジン各部の性能向上および軽量化の努力が払われている。燃焼器についても小型、軽量、高負荷なもの開発が進められているが、現在推力/重量比が 16~20、燃焼器の燃焼負荷率が 1.5×10^8 kcal/m³·hr·atm 程度が目標とされている [3][4]。

さてエンジンの開発にあたって、圧縮機などの性能や効率は前もって計算である程度予測できるのに反して、燃焼器の設計においてその性能を計算などによって予測することは非常にむずかしく、従来燃焼器の開発はもっぱら試行錯誤法によっていたといっても過言ではない。これは燃焼器内の現象が非常に複雑で、現象を支配し性能に影響を与える因子も多種多様であるためモデル化がむずかしく、解析がきわめて困難であることにもとづいている。最近燃焼の学問は急速の進歩をとげ、単純な理想化された流れの場における火炎の伝ば、着火や保炎の機構などについては相当解明されてきたが、ジェットエンジンの燃焼器のように複雑な形状や複雑な流れをともなった燃焼器内の燃焼となると系統的な研究がむずかしくなり、従って知識やデータの集積も少なく、これが燃焼器を開発する場合の大きな障害となっている。すなわち学問としての燃焼の研究と燃焼器の開発との間には、大きなギャップが存在している。最近燃焼器の性能向上化にともない、燃焼器内での現象を解明するための研究の重要性が認識されるようになり、いろいろな面から研究が進められるようになってきた。

燃焼器内は大きく分けて二つの部分、すなわち燃料の霧化、蒸発、空気との混合、燃焼の行なわれる燃焼帯と燃焼ガスの稀釈部に分けられる。このうち燃焼帯での燃焼状態が性能を大きく支配していると考えられる。燃料の霧化、特に現在最も多く使用されているうず巻噴射弁による噴霧の特性については、理論的ならびに実験的に明らかにされているところが多い [5][6]。これについては更に効率の良い燃料噴霧機構を開発することが問題として残っている [7]。また噴霧の燃焼については、液滴や液滴列の燃焼の研究によって得られた知識 [8][9][10] を噴霧燃焼に応用し解析するための努力がなされている [11][12][13]。一方実際の燃焼器内の流れや燃焼についての研究は、主としていわゆる相似則を調べることに重点がおかれ [14]、燃焼器内の現象そのものをくわしく調べる基礎的な研究はあまり行なわれていない [15]。

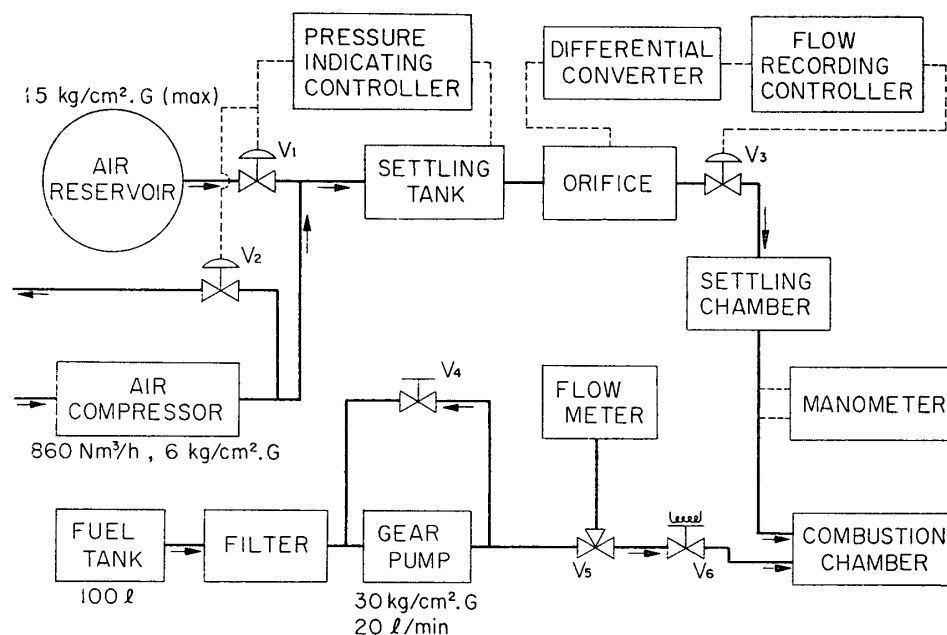
このような現状において、燃焼器の開発研究を行なう場合には燃焼器の各種のパラメタをいろいろに変えて、試行錯誤法によって実験を行ない、燃焼効率、圧力損失、出口温度分布などで目的に近い性能を持つ燃焼器を選定するという方法を採用することを余儀なくされる。しかしそれと並行して実際の燃焼器内の燃焼状態をできるだけ詳しく調べ、これにより各種のパラメタと燃焼器性能との関係を見出すことが、問題を解決する重要な手がかりを与えることは当然である。また負荷の大きな燃焼器では、燃焼器の長さをできるだけ短くしなければならぬので火炎を燃焼器内におさめるための火炎の長さが各種性能と共に大きな問題となり、このためにも燃焼状態を調べる必要がある。我々は V/STOL 機用リフトエンジンの燃焼器について研究するに当り、以上述べた点に留意して、燃焼帯における火炎の

状態や流れの状況の観察，温度分布や各成分の濃度分布の測定により燃焼状態を詳しく調べ，かつその現象を解析することに重点をおいた．現在我国で開発されているリフトエンジンの燃焼器はいずれも環状型であり，実機エンジンの燃焼器では燃焼状態を調べるための測定および観察が不可能に近く，また我々の実験設備の規模では実機の大きさの燃焼器について実験を行なうことはできない．よって我々は燃焼帯の燃焼状況を容易に観察できるように側壁に石英ガラス窓をつけた箱型のセクタ模型燃焼器を用いて，一連の実験を行なうことを計画し，まずその第一段階としてガラス窓を備えた JR-100 の燃焼器の 1/12 セクタの箱型模型燃焼器を試作し，これについて各種の測定を行なったので，その実験結果，特性の比較や今後の研究の問題点などについて述べる．

II. 実験装置

1. 空気および燃料供給系

実験は新たに改造設備された連続燃焼実験装置[16]を用いて行なった．この実験に使用した設備の系統図を第 1 図に示す．空気源としては一部を除いて，使用する空気流量の関係から超音速気流総合実験室の球形貯気槽[17]を使用した． V_1 、 V_2 および V_3 はそれぞれ空気圧作動式調節弁で， V_1 によりオリフィス上流の圧力を制御し， V_3 により燃焼器を流れる空気流量を任意に調節した．今回の実験ではオリフィス上流の圧力を $2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ とした．なお空気源として 120 kW の空気圧縮機を使用するときは，バイパス弁 V_2 によって圧力を制御した． V_3 を通った空気流は整流筒により整流され，ノズル出口で一様な速度分布となって燃焼器に入る．整流筒は $44 \text{ cm} \times 22 \text{ cm}$ の矩形断面で，その中に 40 mesh の damping screen が 3 枚そう入されている（第 2 図）．空気流量はノズル出口において総圧管および静



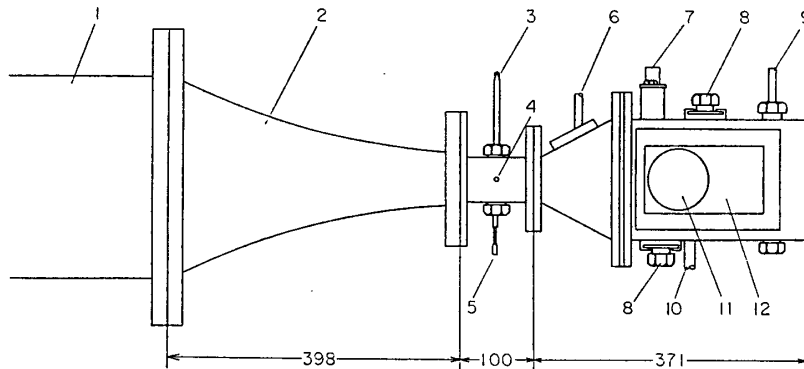
第 1 図 空気および燃料供給系統図

圧孔とマノメタにより動圧を測定し、断面平均風速と断面積 (5 cm×11 cm) から算出した。なお今回の実験に使用した空気流量は 0.4~0.8 kg/sec 程度である。

燃料は JP-4 を使用した。燃料はタンクからフィルター (40 mesh) を通り、ギヤポンプ (5.5 kW, 1450 rpm, 吐出圧力 30 kg/cm²・G, 吐出量 20 l/min) によって供給され、パイパス弁 V₄ により噴射圧が制御される。噴射圧は噴霧の状態が悪くならないように 5 kg/cm²・G 以上で使用した。燃料流量は三方コック V₅ を切換えて、燃焼測定ビュレットにより一定容積の燃料を消費する時間を測定し、これより算出した。実際に使用した燃料流量は 0.2~1.5 l/min 程度である。なお緊急の場合に燃料の供給を急速に停止できるように燃焼器の近くに電磁弁 V₆ を設置した。

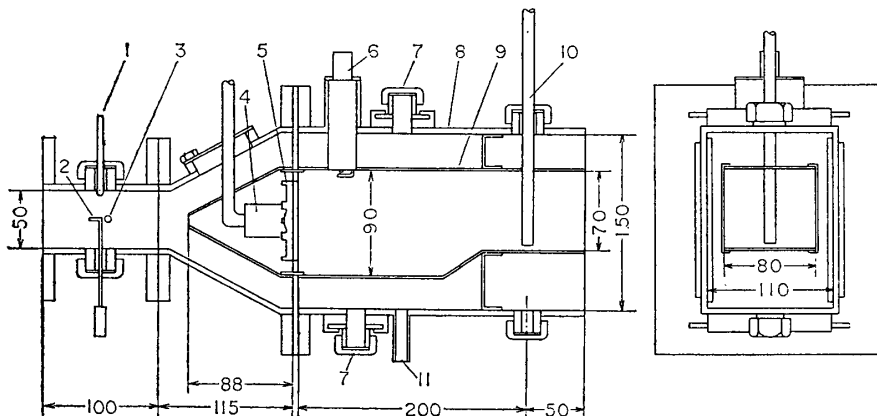
2. 燃 焼 器

今回の実験に使用した燃焼器は単式渦巻噴射弁 1 個を備えた箱型で、既に述べたように



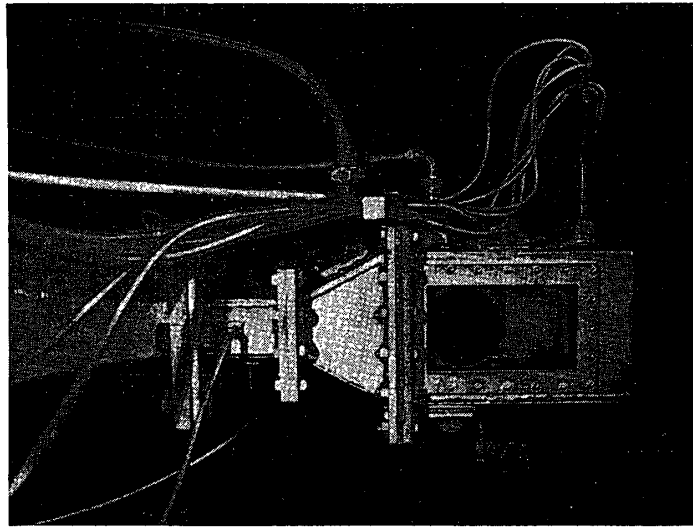
1. 整流筒 2. 整流筒ノズル 3. 温度計 4. 燃焼器入口静圧孔
5. 燃焼器入口総圧管 6. 燃料供給管 7. 点火プラグ 8. 熱電対
対そう入用台 9. 燃焼器出口総圧管 10. ドレン管 11. 内筒
ガラス窓 (80 mmφ) 12. 外筒ガラス窓 (160 mm×90 mm)

第 2 図 整流筒および燃焼器

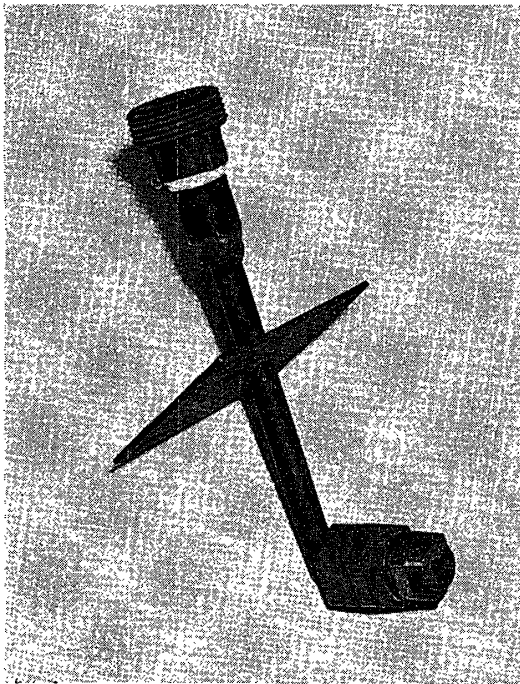


1. 温度計 2. 入口総圧管 3. 入口静圧孔 4. 燃焼噴射弁 5. 旋回器
6. 点火プラグ 7. 熱電対そう入用台 8. 外筒 9. 内筒 10. 出口総
圧管 11. ドレン管

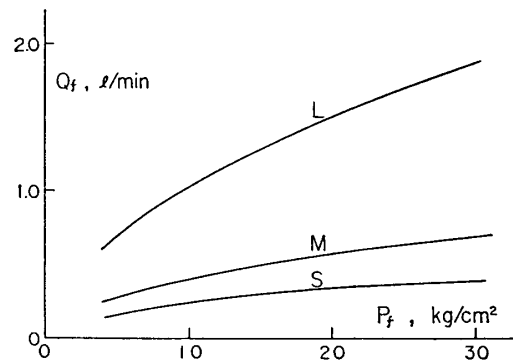
第 3 図 燃焼器概略図



第 4 図 燃 焼 器



第 5 図 燃料噴射弁

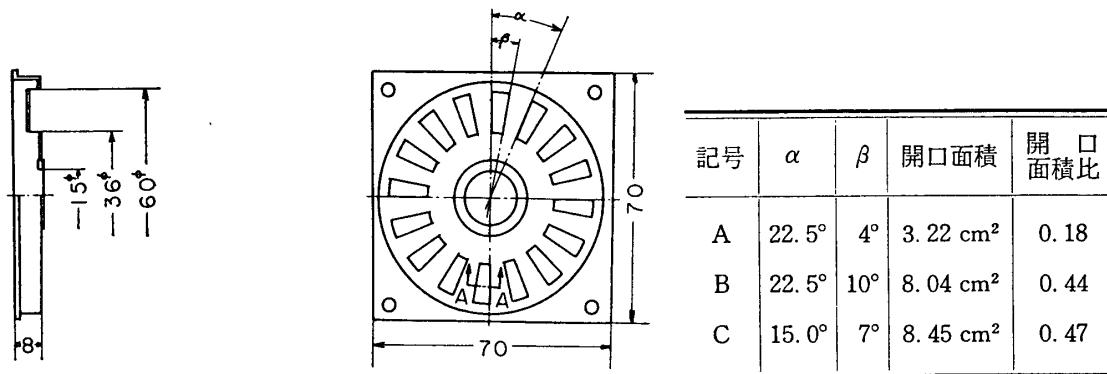


第 6 図 燃料噴射弁 燃料流量—噴射圧特性

JR-100 の燃焼器の 1/12 セクタをとった模型燃焼器である。その概略を第 2 図および第 3 図に、また外観を第 4 図に示す。燃焼器は出口大気開放で、ほぼ大気圧燃焼である。内筒、外筒共に矩形断面で、それぞれ側面に石英ガラス窓があり燃焼器内部の状態を観察することができ、また各種の写真撮影や光学的測定が可能である。

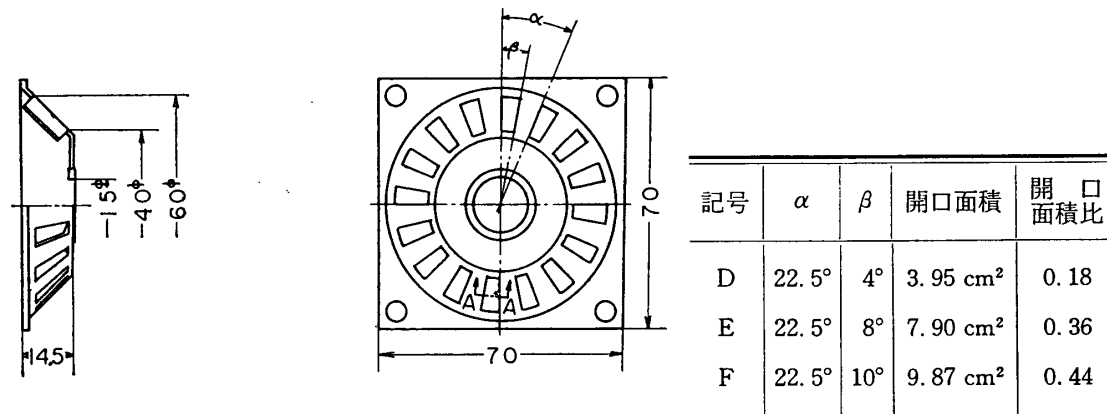
a) 燃料噴射弁

燃料噴射弁は単式うず巻噴射弁で広い流量範囲にわたって噴射圧を低下させずに噴霧が行なえるよう、うず巻室（ノズルチップ）を交換して使用する。ノズルチップは外径 10mm



A-A SECTION

第 7 図 軸流型旋回器 (A, B, C)



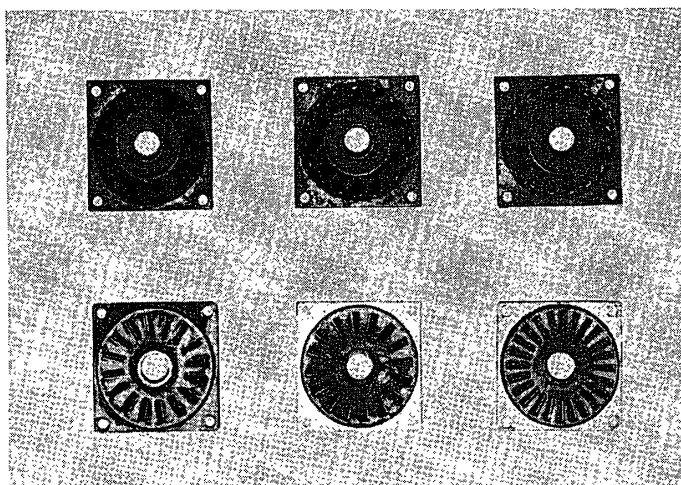
A-A SECTION

第 8 図 斜流型旋回器 (D, E, F)

で、出口直径 0.6 mm(S), 0.8 mm(M), 1.2 mm(L) の 3 種類のものを使用した。噴射弁の外観を第 5 図に、3 種類のノズルチップによる燃料流量—噴射圧特性を第 6 図に示す。流量が増加するにともないノズルチップを S→M→L と交換するために、交換の前後において噴霧の状態が変化し、燃焼効率に多少のばらつきを生じたが、これはほとんど無視できる程度のものであった。

b) 旋回器

燃料噴射弁周囲から空気流を旋回流入させる、いわゆる旋回器には 2 種類あり、空気流入孔が流れに垂直なものを軸流型、45° 傾いているものを斜流型と呼ぶことにする。この二つの型にはそれぞれに開口面積の異なるものが 3 個ずつある。軸流型および斜流型旋回器の形状、開口面積、開口面積比を第 7 図、第 8 図に示す。開口面積比は $\alpha = \beta$ のときを 1 として表わしている。また 6 個全部の旋回器の外観を第 9 図に示す。



第 9 図 旋 回 器

c) 外 筒

外筒には側面に 160 mm×90 mm, 厚さ 4 mm の石英ガラス窓がついている。その他点火プラグ, 総圧管, 熱電対そう入用の台およびドレン管が熔接されている(第 3 図)。

d) 内 筒

内筒側面には直径 80 mm, 厚さ 5 mm の石英ガラスの窓があり, 空気は上下の内筒壁からのみ入る。使用した内筒は 2 種類で, 上下壁それぞれに一次空気孔 2 個, 稀釈空気孔 2 個のもの(I), および一次空気孔 6 個, 稀釈空気孔 2 個のもの(II)である。第 10 図に 2 種類の内筒の空気孔形状, 開口面積および開口面積比を, 第 11 図に外観を示す。開口面積比は各空気孔面積の一次空気孔および稀釈空気孔の面積の和に対する割合で表わしている。空気孔には高さ 5 mm のシンブルがついており, 上下壁ともに対称の位置にあり, 大きさも同じである。また一次空気孔上流に点火プラグ孔 (22.4 mmφ) が, 内筒後端より 50 mm 上流に総圧管のための孔 (10 mmφ) があいている。内筒の材質は厚さ 1.2 mm の軟鋼であるため, 10 分以上の長時間の実験を行なうと, 特に上壁稀釈空気孔付近に変形を生じた。

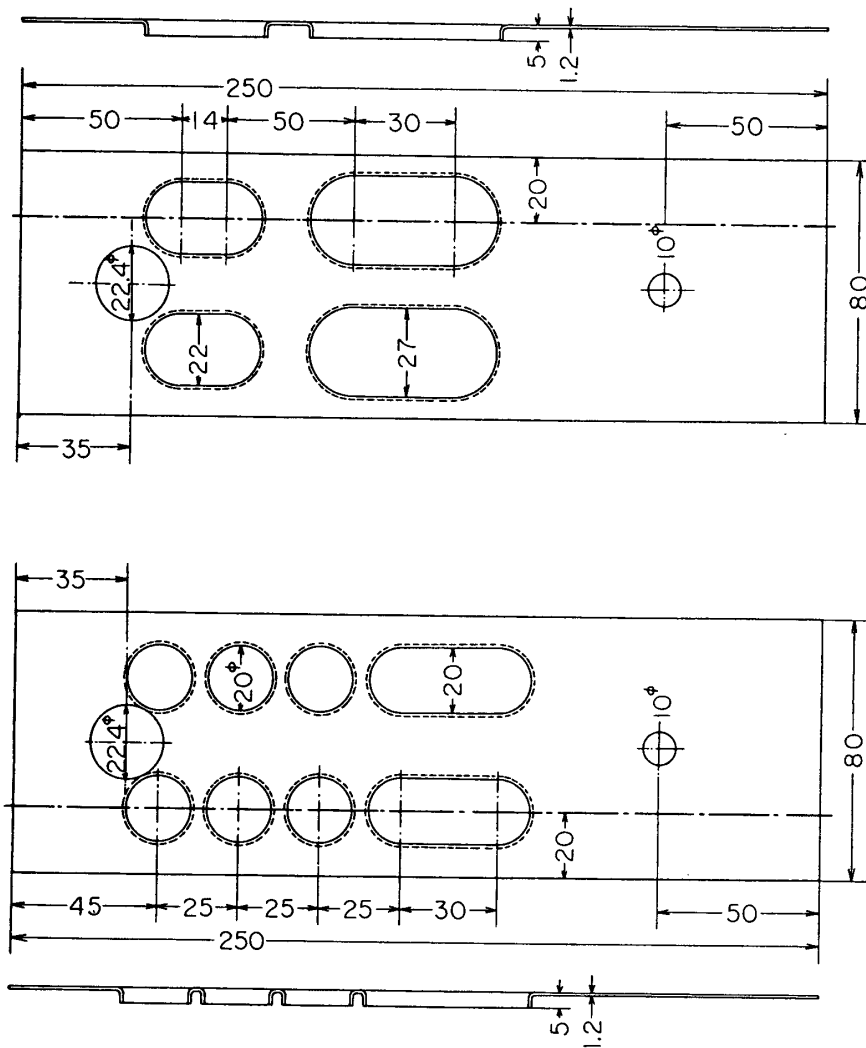
3. 測 定 装 置

今回の実験では次の 3 箇所的位置で測定を行なった。

まず燃焼器入口(整流筒ノズル出口)で断面の中心において総圧管により総圧を, 側壁静圧孔により静圧を, 上壁からそう入した棒状アルコール温度計により入口空気温度を測定した。

内筒内では噴射弁の 60 mm 下流, 上下壁の中央, 側壁より 20 mm の点を基準にとり, この点で 0.5 mmφ の白金・白金ロジウム 13% 熱電対により火炎温度を測定し, 燃焼状態を調べるための一つの目安とした。また燃焼帯の温度分布を詳しく調べるときには, この熱電対および噴射弁下流 120 mm にそう入した同じ熱電対を上下方向に微動して測定を行なった。

燃焼器出口付近では, 噴射弁下流 210 mm の位置で外径 10 mm のステンレス管の内側に外径 1 mm の管を 6 本そう入した総圧管により総圧を測定し, また噴射弁下流 260 mm の出



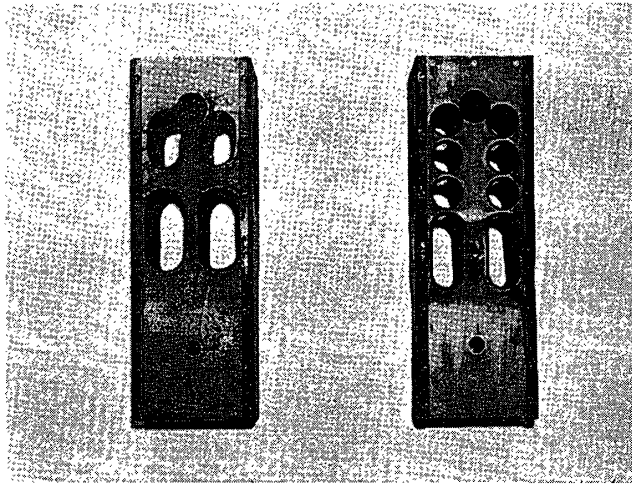
記号	一次空気孔		稀釈空気孔		総開口面積*
	開口面積*	開口面積比	開口面積*	開口面積比	
I	6.88 cm ²	0.33	13.86 cm ²	0.67	20.74 cm ²
II	9.42 cm ²	0.51	9.14 cm ²	0.49	18.56 cm ²

* 空気孔 1 列当たりの開口面積を示す。

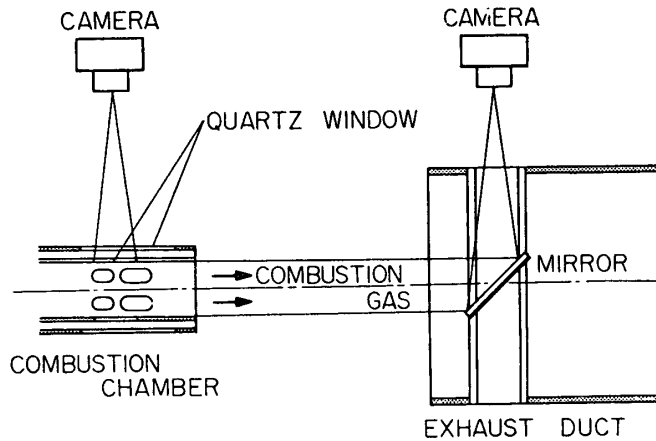
第 10 図 内筒 (上図: I, 下図: II)

口断面では 1 mmφ のアルメル・クロメル熱電対により上下壁間の中央で水平方向の出口ガス温度分布を測定した。

火炎の状態は、直接肉眼によって観察するほかに、燃焼器側面からと燃焼器出口下流からと同時にカラー写真を撮影し記録した。側面からは内、外筒の石英ガラス窓を通して簡単に撮影することができたが、下流からの撮影は高温燃焼ガスが流れるので平面鏡を使用した。すなわち第 12 図に示すように燃焼器出口から下流 85 cm の排気ダクト内に、流れの方向に 45° 傾斜した平面鏡をごく短時間そう入して撮影した。



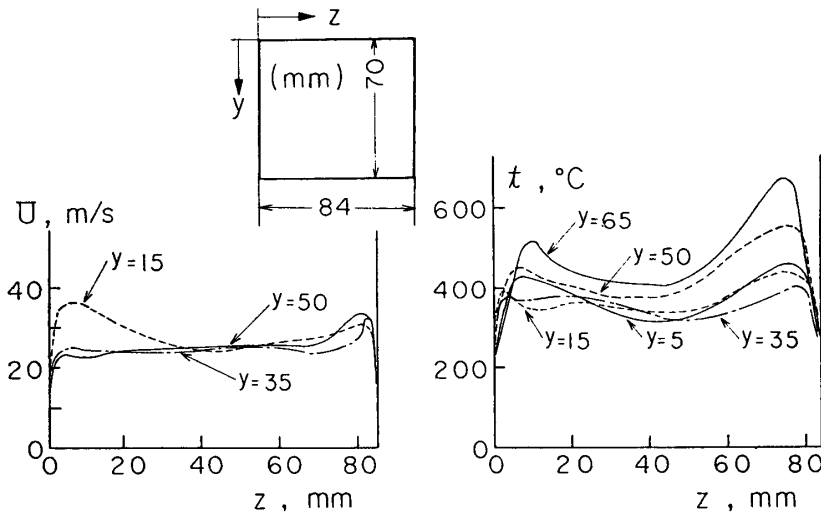
第 11 図 内 筒



第 12 図 写真撮影装置概略図

III. 実験方法

実験は最終的には燃焼器内の燃焼状況を詳しく調べることを目的としているが、実機燃焼器の 1/12 セクタの箱型模型燃焼器という特殊な燃焼器において、果してどの程度の燃焼効率が得られ、また圧力損失がどの程度になるかということは当然調べておかなければならない。そこで我々の実験においてもまず各種の内筒や旋回器の組合せについて、燃焼効率、圧力損失および吹き消え限界を測定し、かつ火炎の状態を写真撮影した。最大断面平均風速 U_0 (流入空気量と燃焼器最大断面積より求めた風速) を一定にし、燃料流量を変えることによって空燃比 λ を変化させ、それぞれの状態、すなわち U_0 は 20, 30 および 40 m/sec について、空燃比は約 160 以下吹き消えのおこるまでの範囲で各種の測定を試みた。なお空燃比の計算に当っては、燃料 JP-4 の比重は 0.765 一定として計算を行なった。実験開始時の点火にはネオントランスと高圧スパークプラグ (NGK, JY-9) の組合せを用い、空気流速が早いので、まず燃焼器内平均流速を 5 m/sec 以下にし、燃料流量最小で点火させ、以後空気流量と燃料流量を徐々に増加して所定の実験条件までもってゆく方法を採用した。



第 13 図 燃焼器出口断面での風速分布および温度分布の一例
(内筒Ⅱ, 旋回器 E, $U_0=20$ m/sec, $\lambda=130$)

燃焼器出口平均温度は、水平方向の温度分布から求めた平均温度と、あらかじめ行なった出口全断面にわたっての速度、温度分布から求めた補正係数とによって算出した。出口断面での風速分布、温度分布の一例を第 13 図に示す。速度分布はほぼ一様のところもあるが、どちらの分布も壁の近くでピークの表われることがわかる。この出口平均温度を求める方法は、各実験条件において火炎の状態は相似であるという仮定をしているため、多少の誤差はまぬがれないと思われ、今後の実験にはくし型熱電対の使用を計画している。なお熱電対測定温度には輻射補正等は行っていない。

燃焼効率 η の計算は、ガス表[18]から求めたエンタルピ i (kcal/kg) と温度 t (°C) との関係式

$$i = (65 + 0.233t + 2.8 \times 10^{-5}t^2) \times \left[1 + \left(\frac{0.725}{\lambda} + \frac{1.06}{\lambda^2} \right) (0.56 + 0.49 \times 10^{-4}t) \right] \text{ (kcal/kg)}$$

を用いて行なった[3]。出口のエンタルピ i_2 は出口平均温度 t_2 およびそのときの空燃比 λ より、また入口エンタルピは入口空気温度 t_1 および $\lambda = \infty$ として計算する。この i_1 , i_2 および空燃比から燃焼効率は次式により求めることができる。

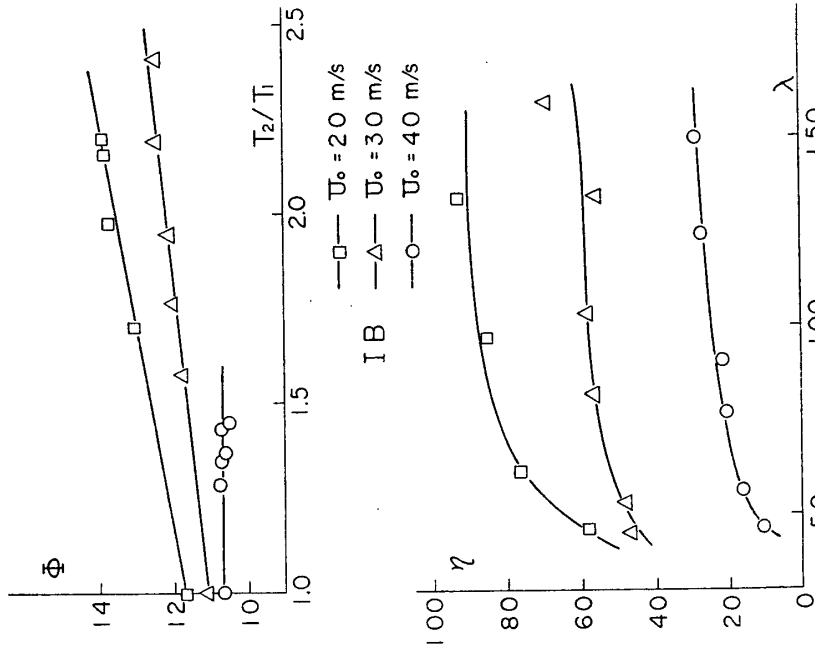
$$\eta = \frac{(\lambda + 1)i_2 - \lambda i_1}{H} \times 100 \text{ (\%)}$$

ただしここで H は燃料の発熱量で、JP-4 の発熱量は 10250 kcal/kg とした。

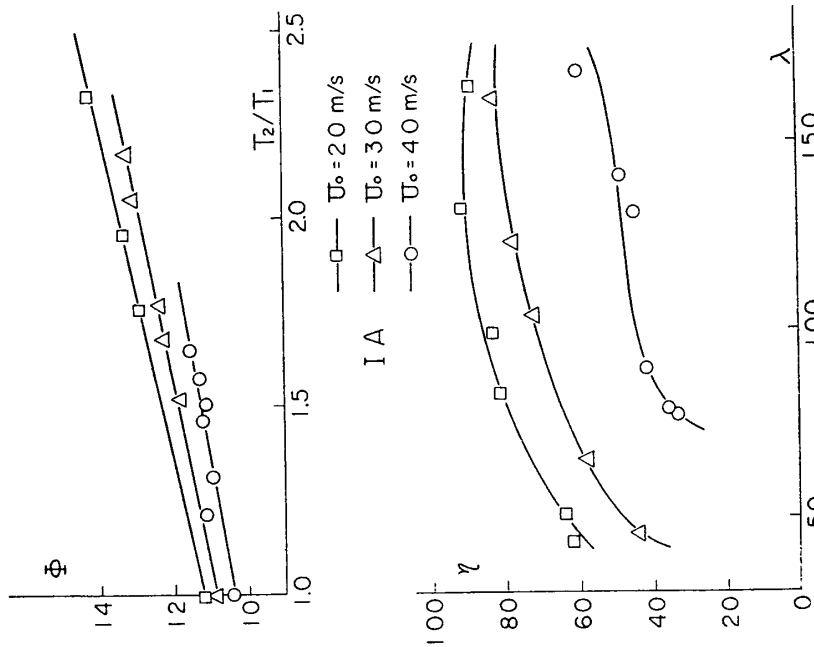
圧力損失は入口総圧と、出口平均総圧との差 ΔP および U_0 より総圧損失係数 Φ を、

$$\Phi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_0^2}$$

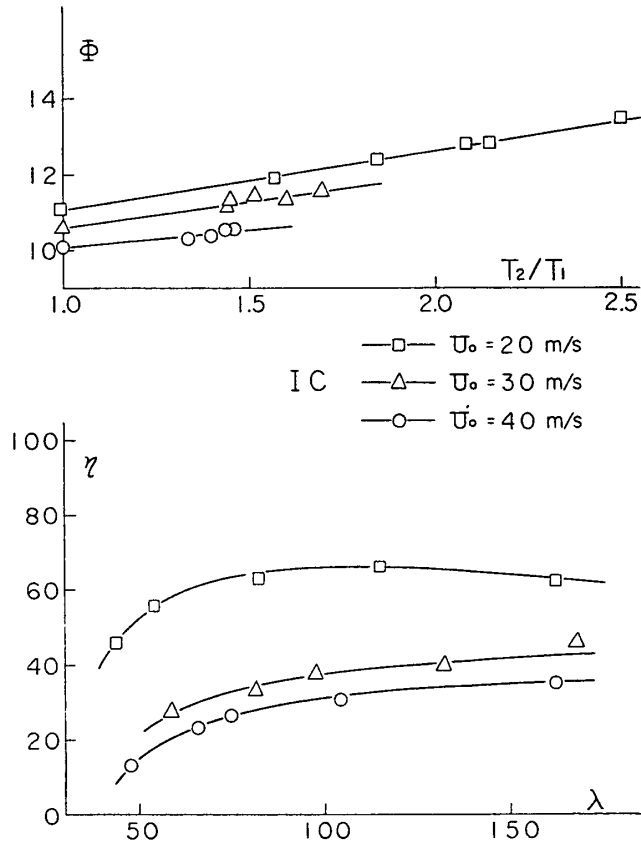
で定義し、無次元化して表わすことにする。ただしここで ρ は入口空気密度である。



第 15 図 燃焼効率および総圧損失係数



第 14 図 燃焼効率および総圧損失係数



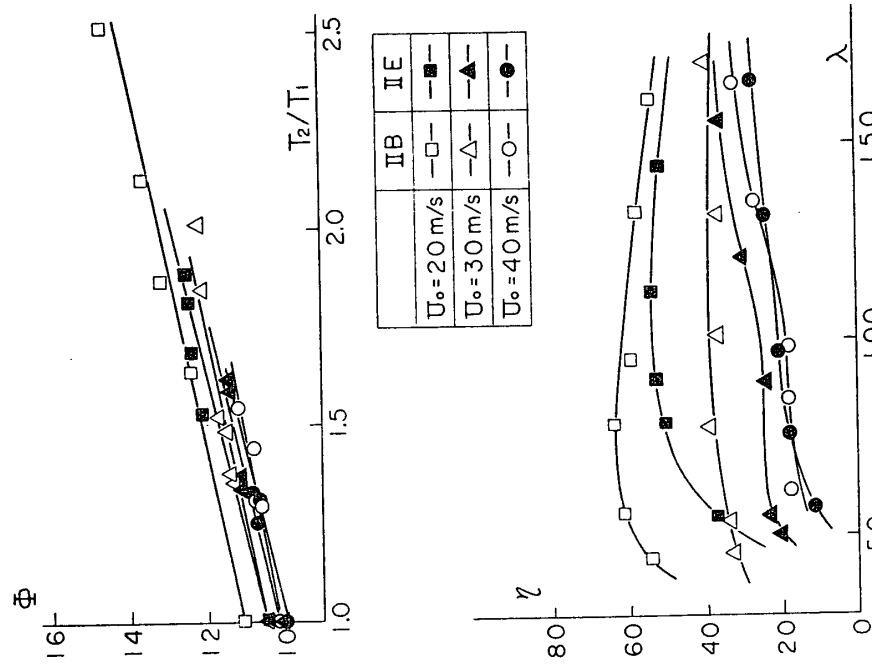
第 16 図 燃焼効率および総圧損失係数

IV. 実験結果および考察

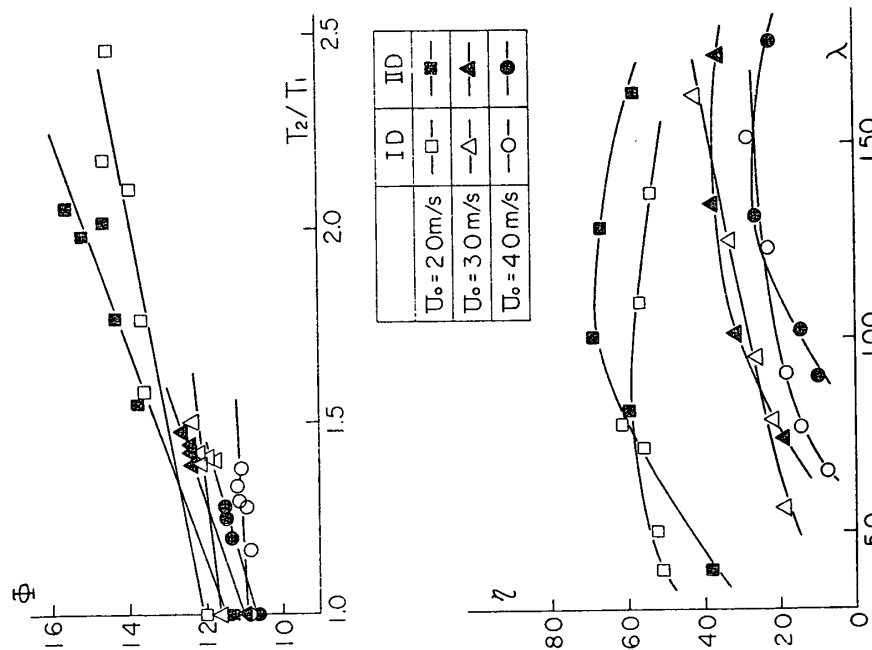
普通よく用いられる表示方式にならって、燃焼効率は空燃比に対し、総圧損失係数は入口空気絶対温度 T_1 (°K) と出口平均絶対温度 T_2 (°K) の比 T_2/T_1 に対しプロットして実験結果を表わすことにする。結果の一例として、I-A, I-B, および I-C の各組合せについて第 14 図, 第 15 図, および第 16 図に示す。一般的傾向として燃焼効率は U_0 が増すと、また空燃比が下がると低下し、総圧損失係数については、その値は良く直線にのっており、 U_0 が増すと低下するが、その直線の勾配は一部を除いて、一つの内筒、旋回器の組合せでは等しくなっているということは、注意する必要がある。

1. 内筒を変えた場合の結果

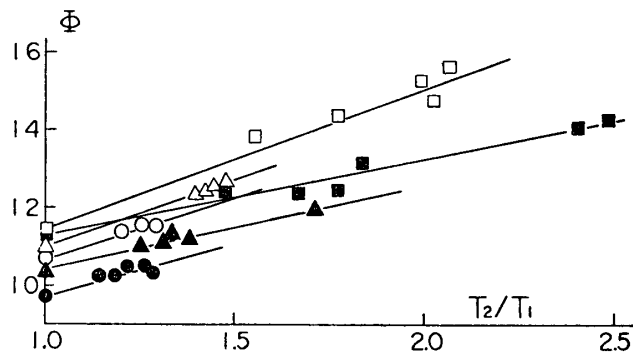
同じ旋回器を用い内筒を変えた場合の結果の一例として、I-D および II-D の組合せについて第 17 図に示す。燃焼効率は I の方が低空燃比での下がり方の少ないことが目立っている。これは一次空気孔面積では I が II より小さいけれども孔の配置、形状から一次空気孔から燃焼带上流に入る空気量は I の方が多いためと思われる、後で述べる過濃吹き消え限界の特性と一致している。つまり一次空気孔は開口面積の大小のみでなく、燃焼帯内の流れとの関係において適当な開口位置の存在することが分る。燃焼効率の絶対値については、旋回器 C, D の場合は高空燃比で II の方が高いものもあるが、その他の場合は全体にわたって I の



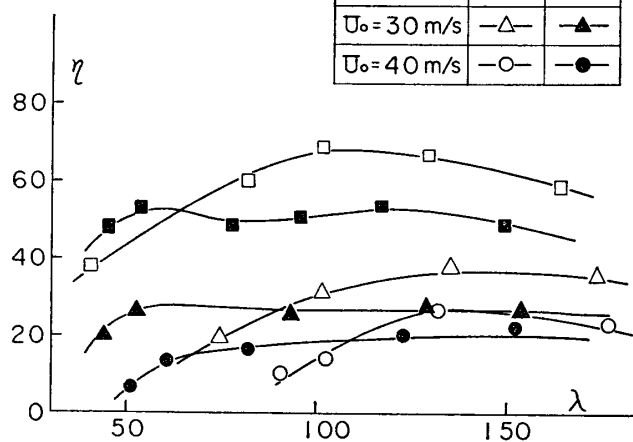
第 17 図 燃焼効率および総圧損失係数
——内筒による比較



第 18 図 燃焼効率および総圧損失係数
——旋回器種類による比較



	IID	IF
$U_0 = 20 \text{ m/s}$	—□—	—■—
$U_0 = 30 \text{ m/s}$	—△—	—▲—
$U_0 = 40 \text{ m/s}$	—○—	—●—



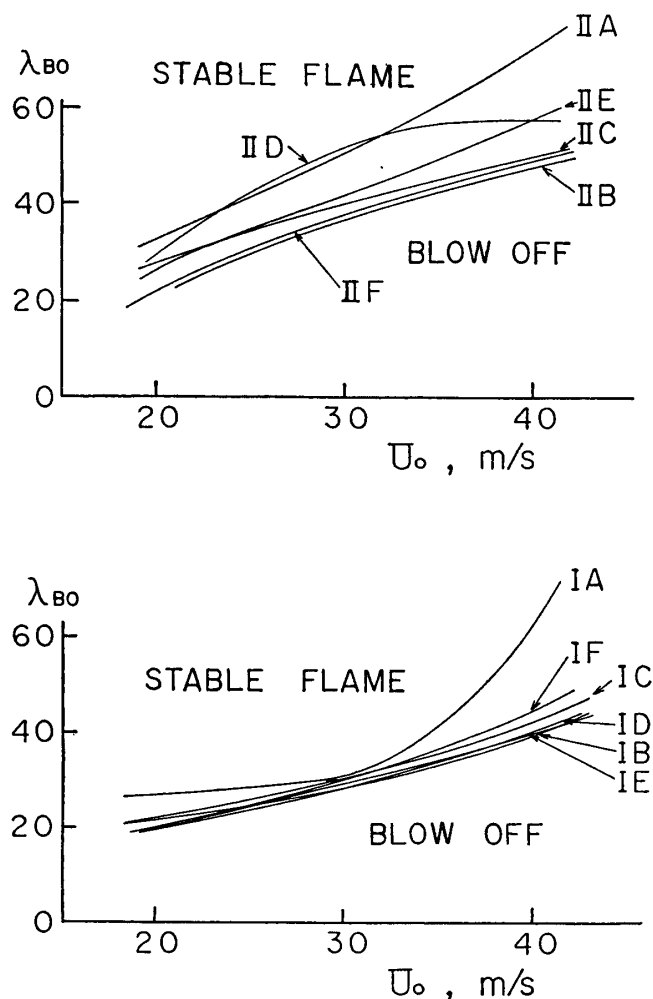
第 19 図 燃焼効率および総圧損失係数
——旋回器開口面積による比較

方が高くなっている。この効率の差は U_0 が増加すると減少し、風速の早い場合には内筒を変えても燃焼状態に大きな変化の起り得ないことを示している。一方総圧損失係数については内筒を変えたことによる明らかな相違は見られないが、全体の孔数が多く総孔面積の少ない II の方が T_2/T_1 に対する Φ の増加が大きくなっている。

2. 旋回器を変えた場合の結果

旋回器の種類によってほぼ同じ開口面積でも燃焼効率に差が生じる。軸流型 (A, B, C) の方が斜流型 (D, E, F) より効率は高く、その差は空燃比により変わるが、大きなところでは 20% 以上にも達する。II-B および II-E の組合せについて結果の一例を第 18 図に示す。斜流型の空気孔は空気の流れに対し 45° の角度をもっているため、同一開口面積でも流入空気量は直流型に比べて少なく、そのため低空燃比では特に効率の低下が大きく、また総圧損失係数も斜流型の方が高い傾向を示している。

旋回器開口面積を変えた場合の結果の一例を第 19 図に示すが、この開口面積による違いは予想されるように開口面積の大きい方が低空燃比での燃焼効率の低下は少なく、逆に高空燃比では開口面積の小さい方が高くなって、広い範囲にわたり効率を良くすることはむずかしい。総圧損失係数については、開口面積の小さい方が大きくなっている。



第 20 図 過濃吹き消え限界

3. 吹き消え限界

定常な燃焼状態になった後、 U_0 を一定に保って燃料流量をふやして火炎の吹き消えを起させ、このときの U_0 と吹き消え空燃比 ($\lambda_{B.0}$) との関係、すなわち過濃吹き消え限界を求めた。結果を第 20 図に示す。 U_0 が大きいほど吹き消え限界の $\lambda_{B.0}$ の値も大きくなり、安定範囲が狭くなることが分る。また内筒 I の方が $\lambda_{B.0}$ の値は II に比べて小さく、これは既に述べた空燃比の低下につれての燃焼効率の減少が少ないことと傾向は一致している。I では旋回器の違いによる測定点のばらつきは少ないが、II ではばらつきがかなり見られ、 $U_0=20$ m/sec で $\lambda_{B.0}=22\sim33$ 、 $U_0=30$ m/sec で $\lambda_{B.0}=37\sim52$ 、 $U_0=40$ m/sec で $\lambda_{B.0}=42\sim72$ の範囲内で変化する。一般に燃焼状態が不安定なほど吹き消え空燃比の判定にはばらつきが生じやすく、これが II の $\lambda_{B.0}$ のばらつきを大きくしている一つの原因である。旋回器の違いではいずれの内筒でも開口面積の小さい A が、また II ではやはり開口面積の小さい D が安定な燃焼範囲は狭くなっている。

過濃吹き消え限界については以上述べたごとくであるが、稀薄領域については使用した噴

射弁に最小のノズルチップをつけて実験したところ、 $U_0=20$ m/sec で $\lambda=324$, $U_0=30$ m/sec で $\lambda=487$, $U_0=40$ m/sec で $\lambda=640$ まで燃料流量を減らしても吹き消えは起らなかった。このような高空燃比では噴射弁周囲の狭い範囲に輝炎が残るだけであった。なお環状型模型による実験報告[19]によると、稀薄領域において $U_0=20$ m/sec で $\lambda=400$, $U_0=30$ m/sec で $\lambda=550$ 付近で吹き消えが起ったと報告されている。

4. 環状型燃焼器との結果の比較

ここで本実験の結果と環状型燃焼器による実験の結果[19]とを簡単に比較して、使用した箱型燃焼器の特徴を明らかにしたい。環状型燃焼器に使用している内筒、旋回器の形状と、本実験のものとは必ずしも同じではないが、全般的に次のことがいえる。JR-100 では、はじめ $U_0=40$ m/sec, $\lambda=55$ が設計点となっていたが [3][4], ここに用いたセクタ模型では全体にわたり燃焼効率は低く、上記の設計点では満足な燃焼が得られない。これは i) 1/12 セクタの箱型模型という特殊な燃焼器で実験を行なったため、燃料噴霧や空気流と側壁との干渉がきわめて大きい、ii) 噴射弁が1個であるため壁への熱の損失の割合が大きい、iii) 流入空気が常温であり、また大気圧燃焼であるため燃焼は著しく不利である、などによるものと思われる。

5. 火炎の状態

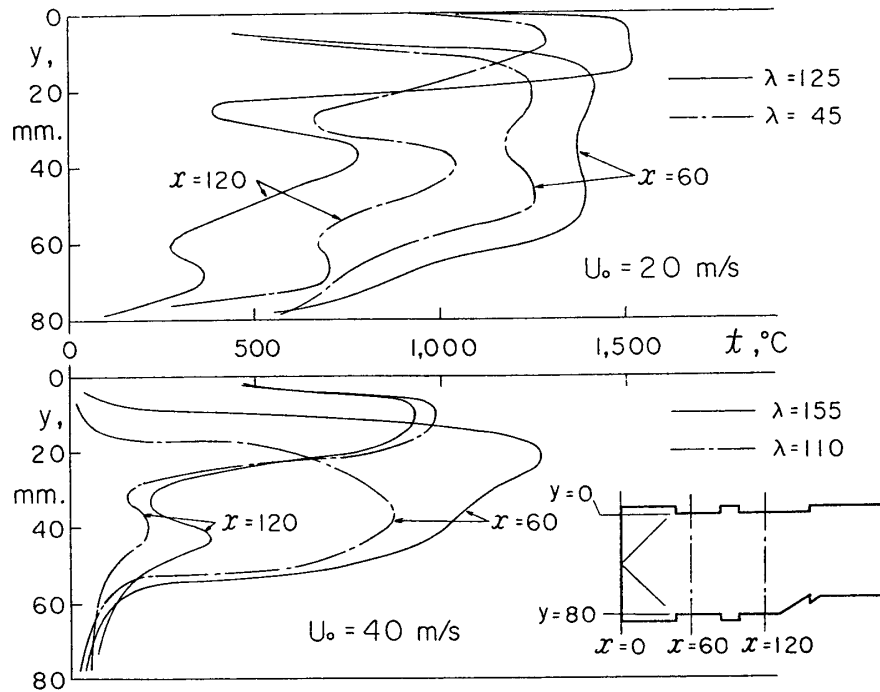
燃焼器内の流れは当然のことながら非常に乱れており、燃焼は完全な乱流燃焼といえる。燃焼器内の流れの様子は、ヨーメータを用いたり[20], 水流模型を用いたり[15]して調べられている。しかし大きな流れの様子は火炎の状態を観察することによってある程度判断することができる。既に述べたように我々は燃焼器の側面および下流から燃焼状態を観察したり、カラー写真を撮影したりして燃焼状態を調べた*。

燃焼帯中心部は旋回器により流れは大きな旋回流となり、この旋回流が火炎を保持していると思われる。旋回流に向って一次空気孔から空気が入るが、空気の侵入はシンプルのためかなり強く、カラー写真からの測定(II-D, $U_0=20$ m/s, $\lambda=160$ の場合)によれば、上下壁と約 55° の角度をなしてほぼ燃焼器中心まで達している。空燃比が高いときは中心部は旋回する渦状の輝炎によって占められ、その周囲、壁との間および一次空気孔下流は青色の火炎が占める。空燃比を下げてゆくと輝炎の範囲は狭くなり青色の火炎が広い範囲を占めるようになって、シンプルに付着する火炎が目立つようになる。この中心部に存在する輝炎は空燃比を高くしたとき最後まで残っているもので、旋回流と共に火炎の安定に重要な役割を果していると思われる。火炎の長さは同じ空燃比では U_0 の速い方が短くなるが、 $\lambda=80\sim 100$ 以下で燃焼器外まで伸びるようになる。 U_0 の速い場合は火炎の伸びは少ないが、燃料液滴が未燃のまま側壁に衝突したり、排気燃焼ガスと共に燃焼器出口から飛び出したりするようになる。吹き消え空燃比に近づくと、燃焼は不安定になり、燃焼ガスはアルデヒドのためと思われる刺激臭を持ち、また火炎が前後に移動して振動を起すことがある。

6. 燃焼帯の温度分布

燃焼器内の温度分布については、現在までのところ詳細な実験を行なっておらず、予備的

* 本報告ではカラー印刷ができないもので写真はのせないことにする。なお燃焼状態が複雑であるため、白黒写真からでは、ほとんどの有益な知識は得られない。



第 21 図 燃焼器内温度分布 (内筒 I, 旋回器 C)

実験を試みたにすぎないが、参考のため測定の一例を第 21 図に示す。測定は内筒空気孔から白金・白金ロジウム 13% 熱電対をそう入して行なったもので、側壁からの距離は 20mm である。一次空気孔付近(噴射弁からの距離 60 mm) では中心部に高温領域があり、上下壁に近づくと従って温度は低下する。燃焼状態が良好と思われるとき ($U_0=20$ m/sec, $\lambda=125$) には中心部約 50 mm にわたって温度はほとんど一様となる。下流(噴射弁からの距離 120 mm) ではこの一様分布はくずれ、温度のピークは 3 箇所現われる。中央のピークは燃焼ガスによるもの、上下壁付近のピークはシンプルに付着する火炎によるものと思われるが、上壁付近で特に高温になる原因は不明である。空燃比が下がると燃焼帯での温度は低下するが、下流において燃焼が起るため稀釈空気孔付近ではかえって温度が高くなる。 $U_0=40$ m/sec の場合は全体に温度は低くなり、中心部に一様な分布が見られなくなる。

V. あとがき

以上、リフトジェットエンジン用環状燃焼器の箱型模型燃焼器を用いて一連の燃焼実験を行ない、その実験結果について述べたが、得られたおもな結果をまとめると次のようになる。

1. 旋回器および一次空気孔から燃焼帯上流へ流入する空気量が増加すると、予想されるように設計空燃比付近の低空燃比での燃焼効率は改善される。内筒は I の方が燃焼効率、圧力損失共に良好であり、一次空気孔は開口面積と共に、その位置が特性を左右すると思われる。
2. 開口面積の小さい旋回器では過濃吹き消え限界の空燃比が高く、火炎の安定範囲は狭くなる。二種類の旋回器のうちでは、開口面積が同じ場合、軸流型の方が良い結果を示した。

3. 火炎は空燃比が 80~100 以下で燃焼器外まで伸びるようになる。特にこのような箱型燃焼器では火炎の形状に及ぼす側壁の影響が著しくなり、壁に沿って火炎が長く伸びる傾向があり、そのため燃焼器出口断面では壁の内側附近の温度が高くなる。

4. 燃焼帯での保炎は旋回流によるが、中心部を占める輝炎もまた火炎の安定に重要な役割を果しているように思われる。

5. 燃焼効率が高く、燃焼が安定している場合には、燃焼帯中央部の温度分布は一様になる。しかし、さらに下流ではこの一様な分布はくずれる。

この実験に用いた箱型模型燃焼器では予想外に燃焼器内の現象に及ぼす側壁の影響が著しく、燃焼効率の絶対値は環状燃焼器のものに比べてかなり低い。しかし内筒や旋回器の各種パラメータの燃焼器特性に及ぼす基本的傾向は、環状燃焼器におけるものと似ており、従ってこのような箱型模型燃焼器による実験結果は燃焼器の設計に対して改良の方向を示すという点で有用と思われる。また、この実験により燃焼帯の燃焼状態が燃焼器の特性に大きく影響していることがわかり、一般にいわれていることであるが、燃焼帯での現象の研究の重要性が確認された。

しかしセクタの模型燃焼器内の燃焼状態を、環状燃焼器内の状態に近づけて現象の解析を行なうためには、側壁の影響をできるだけ少なくした燃焼器を用いて実験を行なう必要がある。よって我々としては、次のような諸点を考慮して燃焼器を改造し、実験を進める予定である。すなわち、i) 側壁の影響を少なくするため、壁に沿って空気を流す、ii) 現象を更に観察しやすいようにガラス窓を大きくする、iii) 燃焼帯への各種プローベのそ入および微動ができるようにする、iv) 旋回器や内筒空気孔から流入する空気量を独立に調節できるようにする。このような条件のもとで燃焼状態を詳しく調べるため、温度分布、流速分布、成分の濃度分布などの測定を行ない、現象の細かい解析を進めたいと思っている。

最後に、この実験に際し終始協力をいただいた、山岡市郎、萩原行禧両君に謝意を表す。

1965 年 6 月 10 日 原動機部

参 考 文 献

- [1] 八田桂三, 松木正勝; V/STOL 機用エンジン, 日本機械学会誌, Vol. 67, No. 545 (1964), pp. 818/825.
- [2] 松木正勝; V/STOL 機用ジェットエンジンについて, 日本航空学会誌, Vol. 12, No. 125 (1964), pp. 188/193.
- [3] 鈴木邦男, 大塚貞吉, 広木強, 山中国雍; 高負荷燃焼器の研究, 日本機械学会 第 718 回航空原動機講演会前刷集 (1963), pp. 21/35.
- [4] 山崎恵造, 仲田哲朗, 広木強, 山中国雍; 高負荷燃焼器基礎実験, 日本機械学会 第 712 回講演会前刷集 (1963), pp. 27/30.
- [5] 棚沢泰, 小林清志; ポテンシャル理論による渦巻噴射弁の設計法, 日本機械学会論文集, Vol. 17, No. 58 (1951), pp. 107/111.
- [6] R.P. Fraser; Liquid fuel atomization, Sixth Intern. Symp. on Comb., Reinhold, N.Y. (1957),

- pp. 687/701.
- [7] A.H. Lefebvre; Progress and problems in gas-turbine combustion, Tenth Intern. Symp. on Comb., The Combustion Institute, Pittsburgh (1965), pp. 1129/1137.
- [8] S. Kumagai and H. Isoda; Combustion of fuel droplets in a falling chamber, Sixth Intern. Symp. on Comb., Reinhold, N.Y. (1957), pp. 726/731.
- [9] R. Reichenbach, D. Squire and S.S. Penner; Flame propagation in liquid-fuel droplet arrays, Eighth Intern. Symp. on Comb., Williams & Wilkins, Baltimore (1962), pp. 1068/1073.
- [10] K. Inuma; Flame propagation in liquid-fuel droplet arrays with forced convection, Comb. & Flame, Vol. 6, No. 2 (1962), pp. 127/129.
- [11] S. Kumagai; Combustion of fuel sprays, Sixth Intern. Symp. on Comb., Reinhold, N. Y. (1957), pp. 668/674.
- [12] C.C. Miesse; On the combustion of a liquid fuel spray, *ibid.*, pp. 732/738.
- [13] C.C. Miesse; A theory of spray combustion, Ind. & Eng. Chem., Vol. 50, No. 9 (1958), pp. 1303/1304.
- [14] M.V. Herbert and J. A. Bamford; Scale effect in a gas-turbine combustion chamber fitted with a swirl atomizer, Part 1 & 2, Comb. & Flame, Vol. 1, No. 3 (1957), pp. 360/378, & Vol 5, No. 1 (1961), pp. 35/43.
- [15] A.E. Clarke, A.G. Gerrard and L.A. Holliday; Some experiments in gas turbine combustion chamber practice using water flow visualization technique, Ninth Intern. Symp. on Comb., Academic Press, N.Y. (1963), pp. 878/891.
- [16] 辻 広, 岡野達夫, 堀 守雄, 山岡市郎; 新たに改造設備された連続燃焼実験装置について, 東京大学宇宙航空研究所報告に近く発表予定.
- [17] 超音速気流総合実験室建設委員会; 超音速気流総合実験室建設報告, 東京大学航空研究所集報, Vol. 3, No. 6 (B)(1963), pp. 391/618.
- [18] J.H. Keenan and J. Kaye; Gas tables, John Wiley and Sons Inc., N.Y. (1949).
- [19] 鈴木邦男ほか; JR-100 燃焼器アニュラ模型の実験結果, ジェットエンジン研究委員会第7回燃焼専門委員会資料 (1965).
- [20] 玉置琢磨; 高負荷燃焼器の基礎実験, 日本機械学会講演会前刷集, No. 111 (1964), pp. 39/42.