

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-143

高負荷燃焼器の一次燃焼領域の研究

大塚 貞吉・鈴木 邦男・相波 哲朗

石井 浅五郎・広瀬 健樹

1967 年 10 月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 既 刊 報 告

TR-120	航技研フライングテストベッドの姿勢制御方式の検討 Analytical and Simulation Studies on the Attitude Control System of the Flying Test Bed	1966年11月	武田 峻, 堀川 勇壮 小川 敏雄, 森 幹彦
TR-121	パルスレシオ変調回路およびその修正回路について Some Circuits for Pulse Ratio Modulation and their Modified Circuits	1966年11月	村 上 力
TR-122	失速が起こるような高い迎角で, 調和振動する二次元翼に働く空気力に対する半実験的理論 Semi-Empirical Theory to Estimate the Airforces Acting on the Harmonically Oscillating Two-Dimensional Wing at High Angle of Attack Where Separation Can Occur	1966年12月	磯 貝 紘 二
TR-123	姿勢制御用空気ジェットノズルの研究 Design and Experimental Study of Air Jet Nozzles for the Attitude Control of VTOL Aircraft	1966年12月	滝 沢 直 人, 西 村 博 史 藤 枝 郭 俊, 田 辺 義 一 渋谷 昭 義
TR-124	FM 多重テレメータの動特性 Dynamic Characteristics of FM Multi-channel Telemetry System	1966年12月	新 田 慶 治, 桜 井 善 雄 松 崎 良 継
TR-125T	Experimental and Calculated Results of Supersonic Flutter Characteristics of a Low Aspect-Ratio Flat-Plate Surfaces	Jan. 1967	Eiichi NAKAI, Toshiro TAKAGI, Koji ISOGAI, Toshiyuki MORITA
TR-126	高負荷燃焼器の箱形模型による実験 (II) Some Experiments on High Intensity Combustor with Partial Models (II)	1967年 2 月	大 塚 貞 吉, 福 田 広 相 波 哲 朗
TR-127	周波数変換による微小回転角の計測 Measurement of Small Rotating Angle by the Frequency Modulation Technique	1967年 3 月	大 月 正 男, 鈴 木 孝 雄 円 居 繁 治
TR-128	輻射加熱による固体の熱的物性値の測定法 Infra-red Radiation Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity of Solid Materials	1967年 3 月	小 川 鉦 一
TR-129	金属箔による円管流の熱絶縁 Thermal Insulation of Metal Foil for the Case of Circular Pipe Flow	1967年 3 月	井 上 建 二
TR-130T	An Experimental Study of Melting Phenomena in the Axisymmetric Stagnation Region of Thermally Highly-Conducting Materials	Mar. 1967	Yasuhiko AIHARA
TR-131	風があるときのロケットの運動の近似解析およびランチャ角修正法 An Approximate Analytical Solution for Dispersion of Unguided Rockets Due to Wind with its Application to the Calculation of Wind Compensation for Launching	1967年 4 月	毛 利 浩
TR-132	軸方向に補強されたパネルの最大軸圧縮力 (近似解) Ultimate Axial Forces of Longitudinally Stiffened Plate Panels	1967年 4 月	築 地 恒 夫

# 高負荷燃焼器の一次燃焼領域の研究\*

大塚 貞吉\*\*\*・鈴木 邦男\*\*・相波 哲朗\*\*

石井 浅五郎\*\*・広瀬 健樹\*\*

## Experimental Studies on the Primary Zone of High-Intensity Combustors

By Teikichi OTSUKA, Kunio SUZUKI, Tetsuro AIBA  
Asagoro ISHII and Tateki HIROSE

As a part of a general research programme for high-intensity combustors of turbo-jet engines, a series of experiments has been carried out to investigate the characteristics of the primary combustion zone.

To meet the requirements for a high-intensity combustor, a large quantity of fuel should be supplied at a state of high air-loading of the combustor; however, generally speaking, an increase of the supplied fuel in such a case tends to deteriorate the combustion efficiency. This lower efficiency is connected not only with the increase of thermal loading but also, in the authors' opinions, with the deficiency in holding a stable flame in the primary zone.

In order to attain high performance of an annular-type combustor by improvement of the air-swirler, therefore, the authors investigated several models of swirlers. The flow patterns and flame-holding characteristics behind the isolated swirlers under test were observed; and several tentative devices were applied to the model swirlers. Then a combined model with three swirlers was tested in order to examine the mutual interference between the swirlers, as well as the effects of the liner wall and the influence of air-holes of the liner on the swirler characteristics.

The information from these investigations was finally checked by tests of complete box-type and annular-type combustor models installed with these model swirlers: results showed that those preliminary investigations were most advantageous in developing high performance combustors.

### 1. は し が き

ガスタービン用高負荷燃焼器の研究の一環として、燃焼器の全体性能に大きな影響を与えている一次燃焼領域の性能に着目し、特に燃料噴射弁まわりから一次空気（燃焼用空気）を流入させるスワラの性能向上について実験研究を行なった。

一般に、高負荷燃焼器は、平均流速の大きな状態で使用するが、このとき空気-燃料重量流量比（以下、空燃比と呼ぶ。）を小さくしていくと燃焼効率の低下をともしやすく、この防止が問題となる。その対策のひとつとして、スワラの性能を向上し、一次燃焼領域

の保炎能力を増強することを試験した。スワラは、燃焼用空気を供給すると同時にその後流側で火炎を安定に保持するために必要な旋回流領域を形成するものであるが、著者らは、この旋回流領域の輪郭の形状、内部の流速、乱れなど保炎性能に影響を与えられと考える因子を検討して各種のスワラを試作し、その単独性能を調べ、性能向上の方法を研究した。また、実際の燃焼器に組み込んだ状態に合せるよう一次燃焼領域のみの部分模型を製作し、スワラを囲む壁面の影響、となり合うスワラの相互干渉および一次燃焼領域のライナ空気孔との関連などを調べた。

さらに、これらのスワラ単独および部分模型に取り付けた状態などの基礎実験結果を燃焼器としてまとめた箱形燃焼器模型および実物のアニュラ形燃焼器模型に取り入れて総合性能実験を行ない、基礎実験に

\* 昭和42年7月27日受付

\*\* 原動機部

\*\*\* ロケット部

において良好な成績を示すものは、総合性能においてもすぐれた成績をあげることを確かめた。

## 2. 一次燃焼領域の問題点

ガスタービン燃焼器は、一般に燃焼器の上流側で燃料を噴射し、下流に進むにしたがい空気と段階的に混合して燃焼させる方式を採用している。燃焼器内の流速は、全般に火炎伝ば速度にくらべて大きいから、火炎を保持する機構が必要であり、通常、ライナ前流側に流速の比較的小さい、安定な旋回流領域を維持して、ここで保炎を行なう。この部分を一次燃焼領域と呼ぶ(図 1)。

この領域に必要な性能として、つぎの事項があげられる：

(要求事項)

- (1) 広い作動範囲にわたって安定な保炎を行ない、振動燃焼や不規則な不安定燃焼を起こす原因をつくらないこと。
- (2) 旋回流領域内では、燃焼負荷率を高くとることがむずかしいから、燃焼器全体の負荷を高めるためには、この容積は、全有効燃焼領域のそれにくらべてなるべく小さくすること。
- (3) 高温の燃焼ガスを二次燃焼領域に供給すること。これは二次燃焼領域の燃焼を促進し、火炎長さを短縮し燃焼効率を高めるためには不可欠のことである。たとえ安定に燃焼しても、一次燃焼領域出口の温度が低くては燃焼効率を高めることがむずかしい。
- (4) 圧力損失が少ないこと。
- (5) 一次燃焼領域出口において、未燃焼燃料分の分布が良好であること。
- (6) 壁面に炭素などの堆積物を生じないこと。

これらに対し，実用上，つぎのことが問題になる：

(問題点)

- (a) ガスタービンの燃焼器には、良好な作動範囲を広く要求されるけれども、普通、燃焼器に流れる空気量の配分を可動装置によって制御することはせず、広い作動範囲にわたって燃焼領域内の空燃比を燃焼に有利な値に保つことが困難となる。
- (b) 燃料を増し、空燃比を低下して、出口温度を高めると一次燃焼領域では、流入空気量の減る傾向をもち、燃料過濃にもとづく火炎の吹消えが起きやすくなる<sup>1)</sup>。これは、特に、燃焼器内の温度上昇を高くとる場合、問題になるものである。
- (c) 高負荷燃焼器としては、一次燃焼領域に対してもできるだけ負荷を高めることが要求され、安定な保炎を行なうことに問題が生ずる。
- (d) 構造は、重量軽減、製作容易などの点からなるべく簡単にすることが要求され、設計上、問題となる。

一方、この領域の性能をきめられると思われる因子として、つぎのようなものが考えられる：

(因 子)

- (i) 燃料の性状
- (ii) 燃料噴射方法, 噴霧粒径, および粒度分布, 流量-噴霧粒径特性, 噴霧の運動量と貫通距離
- (iii) 噴霧角度 (うず巻噴射弁の場合)
- (iv) 燃料噴射方向
- (v) 一次燃焼領域に入る空気量, または全体の空気流量に対する割合
- (vi) 流入空気の流速および貫通距離
- (vii) 一次燃焼領域内の流れ模様
- (viii) 流れの中に含まれる乱れ
- (ix) 燃料噴霧と空気流との干渉
- (x) 壁面の形状 (おもに流れ模様に影響する)
- (xi) 壁面の温度

一次燃焼領域の性能改善を行なうには、これら因子の影響を調べればよいわけであるが、この中には相互

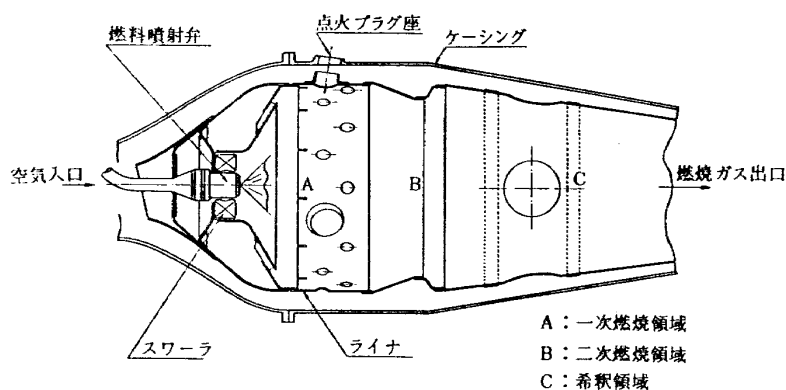


図 1 実用燃焼器の構造例 (かん形直流噴霧形燃焼器)



表 1 供試スワアラ (原型)

番 号	スワアラ名称	有効外径 mm	有効内径 mm	旋回角 deg	有効開口 面積 cm <sup>2</sup>	摘 要
1	S 10 (JR-0)	52	38	—	6.66	ルーバ形式に鋼板折曲げ
2	S 20 (JR-0)	52	38	45	7.00	鋼板植込み, 混流スワアラ
3	S 21 (JR-0)	52	38	35	8.11	鋼板植込み, 混流スワアラ
4	S 30 (JR-0)	45.5	23	45	8.56	鋼板植込み, 混流スワアラ
5	55/37, 45 (JR-100)	55	37	45	9.20	鋼板植込み, 混流スワアラ
6	55/43, 45 (JR-100)	55	43	45	6.53	鋼板植込み, 混流スワアラ
7	55/37, 60 (JR-100)	55	37	60	6.50	鋼板植込み, 混流スワアラ
8	55/37, 40 (JR-100)	55	37	40	9.95	鋼板植込み, 混流スワアラ
9	58/37, 45 (JR-100)	58	37	45	11.08	鋼板植込み, 混流スワアラ
10	60/37, 40 (JR-100)	60	37	40	13.40	鋼板植込み, 混流スワアラ
11	60/37, 45 (JR-100)	60	37	45	12.39	鋼板植込み, 混流スワアラ
12	54/37, 40 (JR-200)	54	37	40	9.29	鋼板植込み, 混流スワアラ

に影響をおよぼし合うもの、実験方法のむずかしいものなどが含まれ、すべてについて調べることは困難である。今回は、ジェットエンジン用燃焼器を対象にし、比較的容易に調べることでできる因子のみをとりあげた。おもに調べたものは、燃料噴射弁まわりのスワアラおよびその付近についてであって、これには、上記因子のうちの (v)~(x) が関係している。

### 3. スワアラによる保炎

#### 3.1 供試スワアラ

試験に用いたスワアラの原型を表 1 に示す。スワアラ S 10 は、その他のスワアラと旋回翼の構造がことなっている。また、スワアラ S 30 の軸流スワアラ以外は、ほぼ同一形状の混流型である。ただし、観察によると、流れの様子は軸流型に近い。有効外径の影響として 52~60 mm、旋回角として軸方向から 35~60°

の範囲のものである。原型に少し手を加えて改造したものもいくつかある。

#### (1) スワアラ S 10 (JR-0\*)

最初に用いたスワアラで、鋼板にルーバ形式の空気孔をあけて、旋回を与えるものである。この方式は、製作は容易であるが、精度が低下しやすく、均一性、

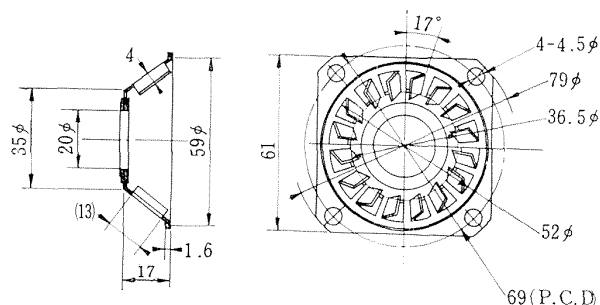


図 2 S 10 (JR-0)

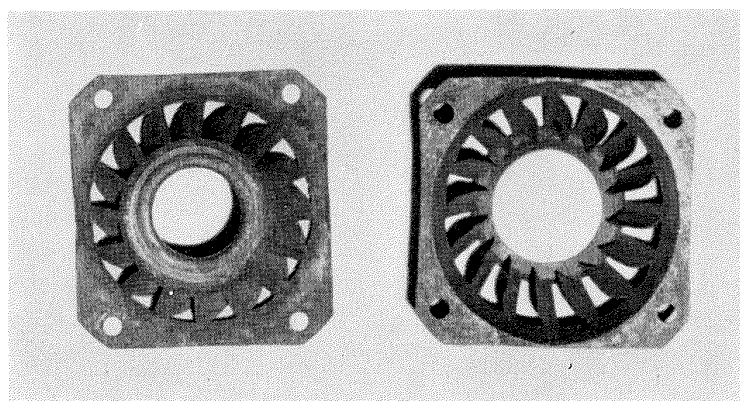


図 3 スワアラ S 10' (JR-0) (左: 前流側, 右: 後流側)

\* JR-100 の初期計画に基づいて製作したアナログ形燃焼器模型<sup>5)</sup>

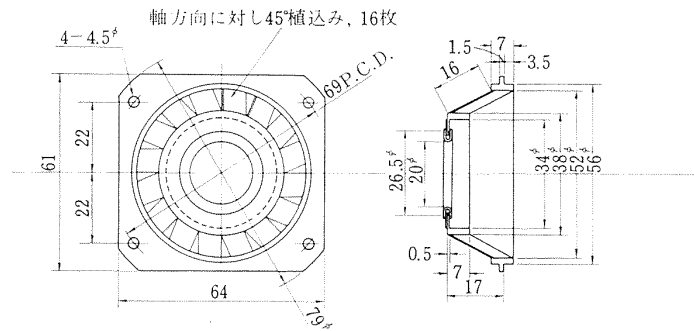


図 4 スワアラ S20 (JR-0)

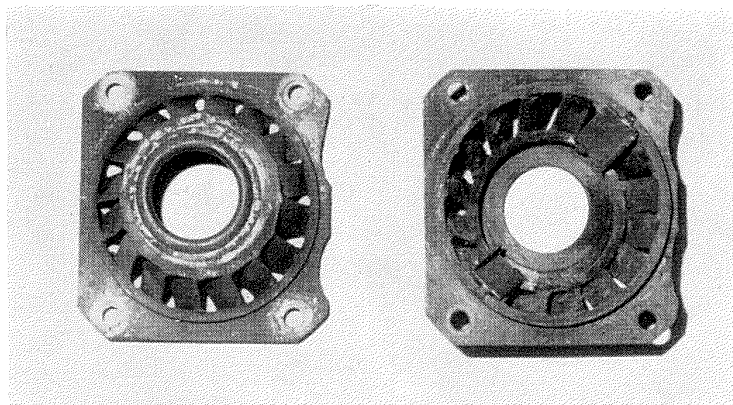


図 5 スワアラ S20, 2-8×2.5 h 付 (JR-0) (左: 前流側, 右: 後流側)

再現性の点に問題がある。また、旋回角として、明らかな数値を示すことができない、図 2 にこれを示す。

このスワアラのうち、ルーバ板の曲げを大きくし、多く空気が入るようにしたものを S10' と呼ぶ(図 3)。

#### (2) スワアラ S20 (JR-0)

幾何学的な旋回角度を明らかにするとともに再現性をよくするため、旋回羽根植込み型のスワアラを製作した。有効外径および内径は、S10 と同一である。実験の結果、比較的よい性能を示し、あとの JR-100 スワアラは、この型を発展したものである。図 4 にこれを示す。

スワアラ S20 の性能改善を目的として、スワアラ内径、外径間の半径方径に幅 8 mm~9 mm の板を渡したもの (h 付と呼ぶ) も試験した。この、スワアラ S20, 2 箇所, 幅 8 mm, 曲げ部分 2.5 mm h 付(以後 2-8×2.5 h 付と略記する) を写真で図 5 に示す。

#### (3) スワアラ S21 (JR-0)

スワアラ S20 の旋回角を 35° と少し、旋回角の影響を調べたもの。旋回角の変化分だけ、有効開口面積は増している。S20 と同様、h 付の試験も行なった。

#### (4) スワアラ S30 (JR-0)

完全な軸流スワアラで、有効開口面積は S20 など

にくらべて、だいぶ多くなっている。図 6 および図 7 にこれを示す。この型は、はじめ、図 6 に示すような、スワアラ中心側に、29 mmφ のふちはなく、23 mmφ のままであった。のち、燃焼実験の結果にもとづいて、このように修正したものである。

#### (5) スワアラ 55/37, 45\* (JR-100)

JR-100 エンジン用に製作したものの原型である。

構造は、スワアラ S20 (JR-0) と同じで、直径のみをかえた。図 8 および図 9 にこれを示す。このスワアラは、スワアラ内径寄りに盲リング(盲リング内径は、37 φ でスワアラ内径に一致)をつけて、流れ模様の調整を行なうことにより、よい性能を得た。図 9 に盲リ

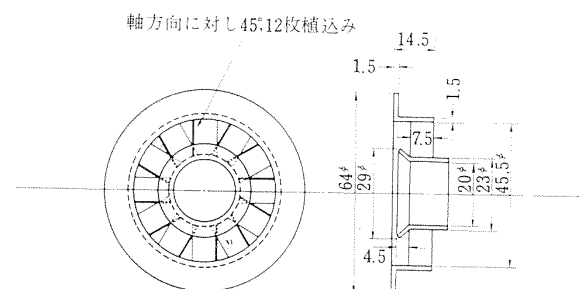


図 6 スワアラ S30 (JR-0)

\* スワアラの名称に用いた数字は、外径/内径、旋回角、盲リング外径その他の意味である。

ング付の状態を合せて示す。試験した盲リングの外径と開口面積比は、つぎの通りである：

盲リング外径	40 mm	開口面積比	15%
	41.5		22
	43		30
	45		40
	47		50

このほか、盲リングの内径側に隙間をあけたものや切欠をつけ、空気を入れるようにしたもの(図13参照)、S 20 と同様の h 付、逆流を促進するための逆流パイプ付(図10)、スワラ内径寄りに 8 箇所、1.5 mm $\phi$ の

孔あけを行なったもの(図 11 参照)などを調べた。

(6) スワラ 55/43, 45 (JR-100)

スワラ 55/37, 45 で 43 $\phi$ 盲付のものが、比較的良好であったため、スワラ有効内径を、これに合せたものである。試験の結果、期待通りの性能がでなかったため、改善をこころみて、スワラ内径に 8 箇所、3 mm $\phi$ の孔をあけた。この状態を写真で図 11 に示す。

(7) スワラ 55/37, 60 (JR-100)

旋回角の影響をみるため、JR-0 では、45° から 35° まで小さくしたものを試験したが、JR-100 では、60° と逆に大きくしたものを調べた。旋回角以外は、スワ

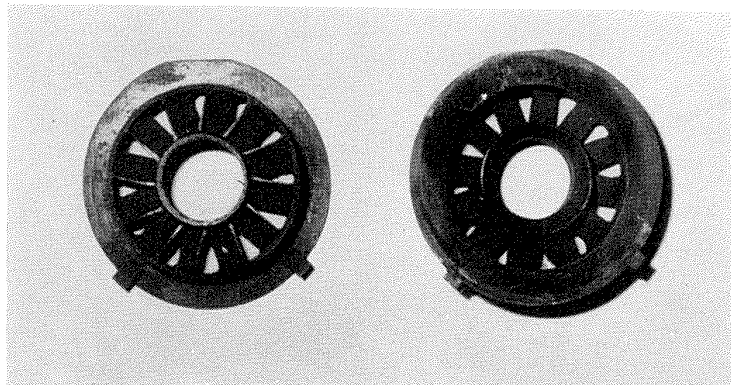


図 7 スワラ S 30 (JR-0) (左：前流側，右：後流側)

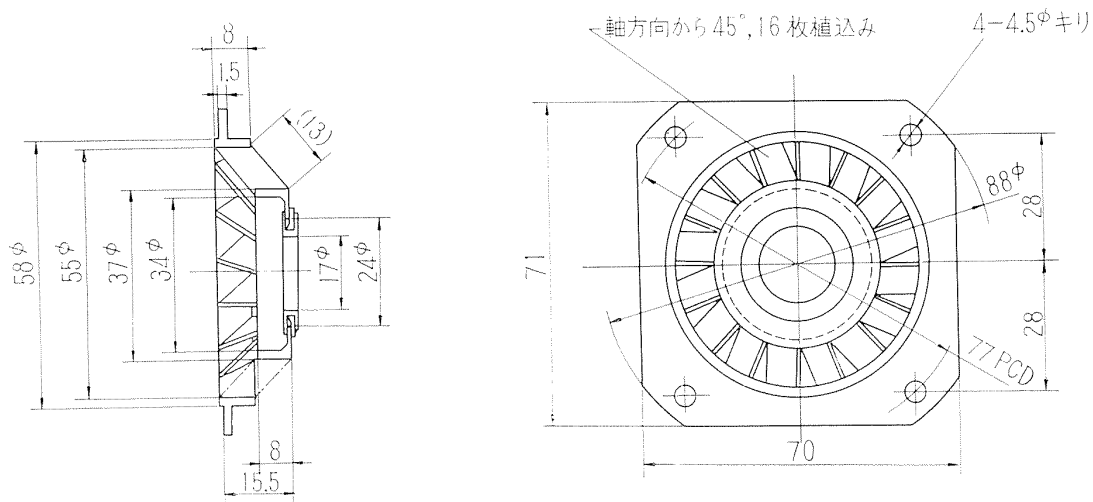


図 8 スワラ 55/37, 45 (JR-100)

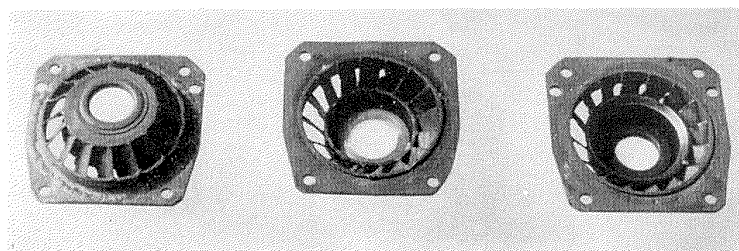


図 9 スワラ 55/37, 45 (JR-100) および 41.5 $\phi$  盲付 (右端)

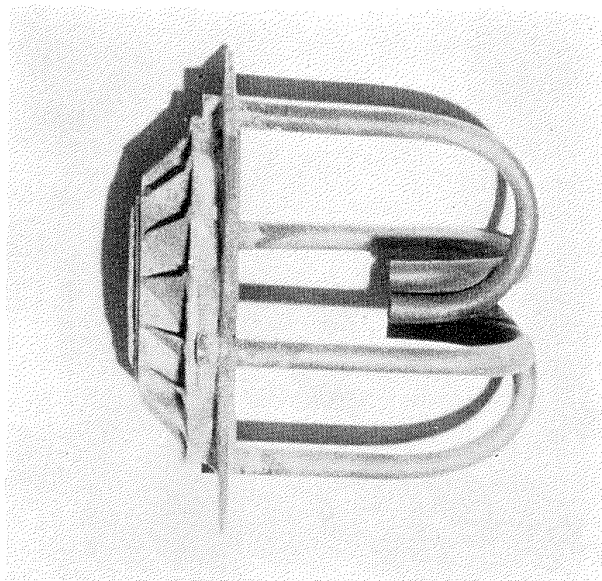


図 10 スワ－ラ 55/37, 45 逆流パイプ付  
(4-4  $\phi$ ), (JR-100)

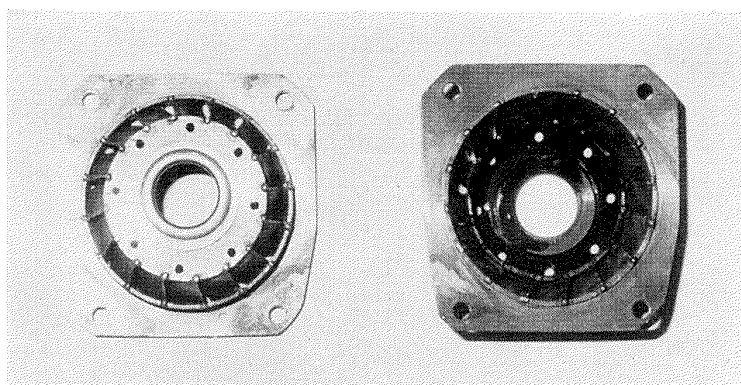


図 11 スワ－ラ 55/43, 45 (JR-100) 8-3  $\phi$  孔あけ

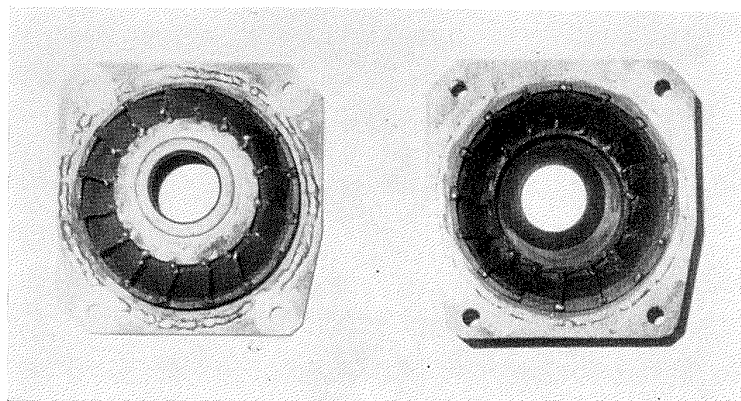


図 12 スワ－ラ 55/37, 60 (JR-100)

ーラ 55/37, 45 と同一である。これにともない、有効開口面積は減少し、流入空気量は、45° のものより少くなっている。図 12 にこれを示す。

(8) スワーラ 55/37, 40 (JR-100)

旋回角の大きさとして、35~60° の範囲の実験結果にもとづき、最良と思われる 40° にしたスワーラである。旋回角以外は、スワーラ 55/37, 45 と同一にした。盲リング付、h 付についても実験した。図 13 は、

43φ 盲リングに 8 箇所、2.5 切欠付の写真である。

(9) スワーラ 58/37, 45 (JR-100)

流入速度を増すことなしに、流入空気量を増すことを考え、有効外径を大きくしたもの。構造は、スワーラ 55/37, 45 に同じ。このスワーラは、はじめから流れ模様調整用の盲リングをつけ、盲リングなしのものは調べていない。図 14 にこのスワーラの写真を示す。

(10) スワーラ 60/37, 40 (JR-100)

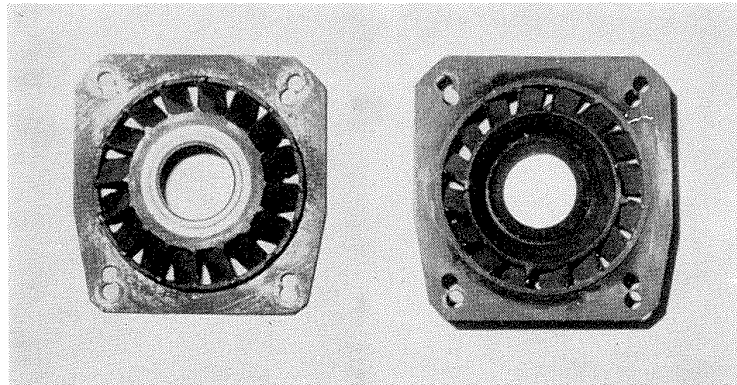


図 13 スワーラ 55/37, 40, 43φ 盲, 8-2.5 切欠付 (JR-100)  
(右, 盲リング内径寄りの切欠に注意)

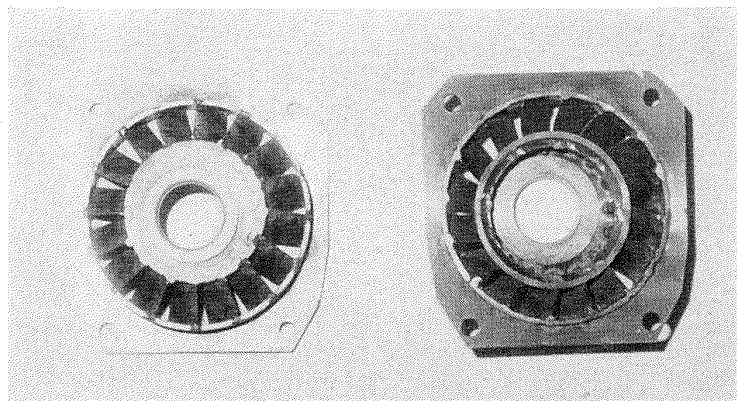


図 14 スワーラ 58/37, 45, 42φ 盲付 (JR-100)

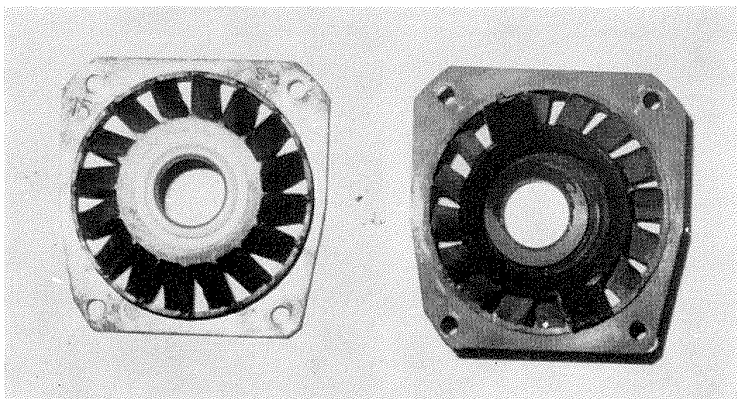


図 15 スワーラ 60/37, 40, 44φ 盲, 2-11×4 h 付 (JR-100) (右側の h に注意)

JR-100 燃焼器を対象にした場合の許容限界まで外径を大きくし、旋回角も  $40^\circ$  と少なめにしたもの。したがって、有効開口面積は、試験したスワラのうちでもっとも多くなっている。内径側に  $42\text{ mm}\phi$  (面積比 18%) 盲付,  $44\text{ mm}\phi$  (面積比 25%) 盲付, これに、さらに h 付としたものを調べた。図 15 は、 $44\phi$  盲,  $2-11\times 4\text{ h}$  付の状態を示したものである。

(11) スワラ 60/37, 45 (JR-100)

スワラ 60/37, 40 と同様の考え方で、流入空気量の増加を考慮して有効外径を大きくとり、旋回角の影響を調べるため、標準の  $45^\circ$  にしたものである。 $43\phi$  (面積比 22%) 盲付,  $45\phi$  (面積比 29%) 盲付などの試験も行なった。

(12) スワラ 54/37, 40 (JR-200)

JR-200 燃焼器は、噴射弁ピッチが JR-100 より小

さいため、スワラ有効外径も小さく押えた。旋回角は、空気流量の点を考慮して少なめにとり、有効開口面積が多くなるようにした。図 16 および図 17 にこれを示す。

盲リング外径	40 mm	開口面積比	15%
	41.5		23
	43		31

をつけた試験も合せて行なった。

### 3.2 保炎状態の観察

はじめ 1 個のスワラを用い、まわり大気開放のまま、スワラに火炎を付着させて、保炎状態を調べた。燃料には、プロパンガスをを用い、軸方向と直角におそい流速で管から噴き出した。位置は、火炎が比較的安定する所を選んだ。火炎の形状は、この管口の位置によっては、ほとんどかわらない。

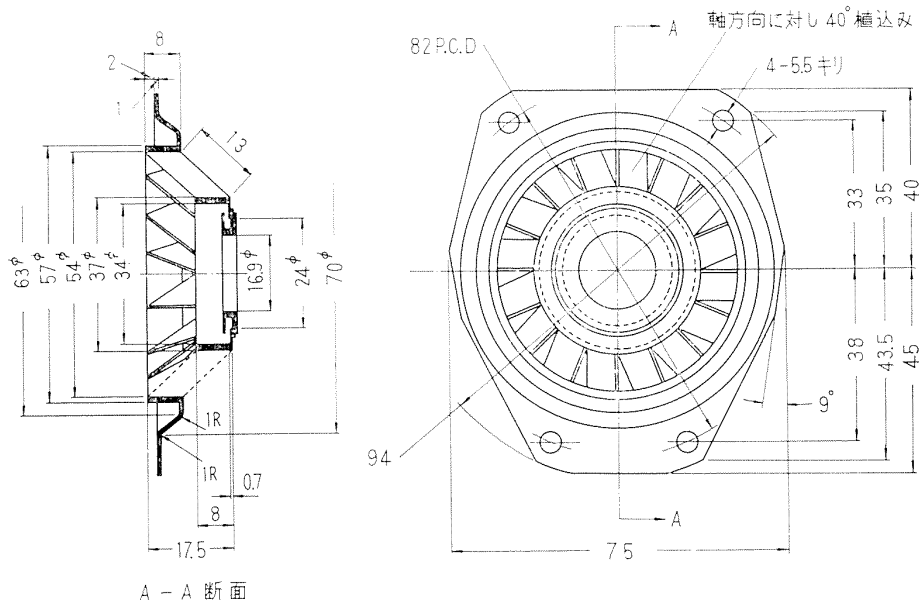


図 16 スワラ 54/37, 40 (JR-200)

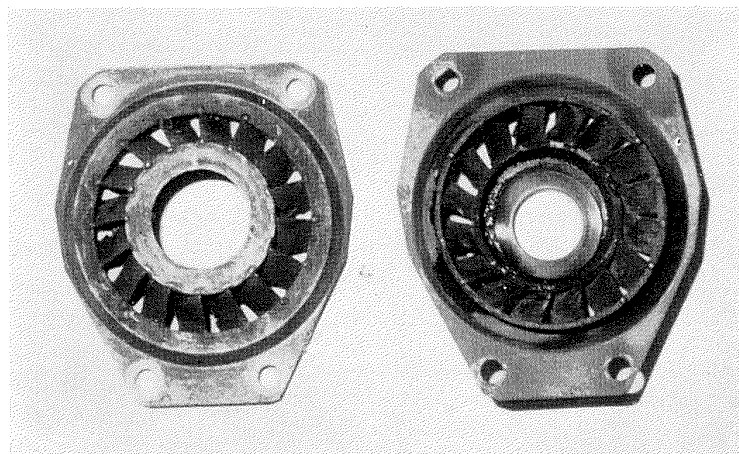


図 17 スワラ 54/37, 40 (JR-200) (左: 前流側, 右: 後流側)



これから、スワラ中心に生ずる旋回流領域の様子、すなわち逆流領域内の流速、乱れ、その形状および容積などが判明する。この領域を以後コアと呼ぶ。

この方法は、実際に燃焼器に組み込んで使用する状態からみると、コア内の流れ模様の傾向については、一致すると推定されるが、燃料の分布がことなり、火炎の様子については一致しない所もあると思われる。たとえば、旋回羽根に火炎が保持されるようなことは、プロパンガスの燃焼によっては得られなかった。また、この方式では、スワラの相互干渉、ライナ壁面やライナ空気孔の影響などについてもわからないが、もっとも基本となるスワラ自身の性質は、明瞭に現れる。これと、実際の場合との比較は、のちほど行なう。

### 3.2.1 スワラ S10 (S10') の保炎状態

スワラ S10 の火炎の様子を図 18 に示す。スワラ中心の直径約 30 mm の部分に火炎がつき、あと、

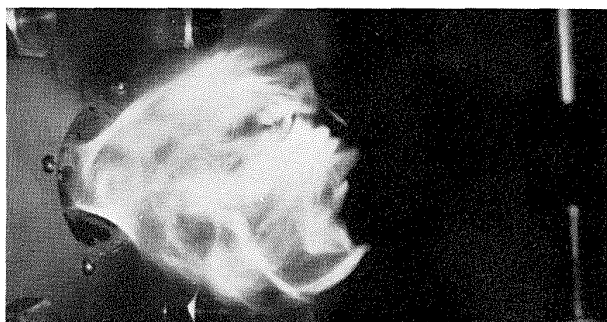


図 18 スワラ S10 (JR-0) の保炎状態

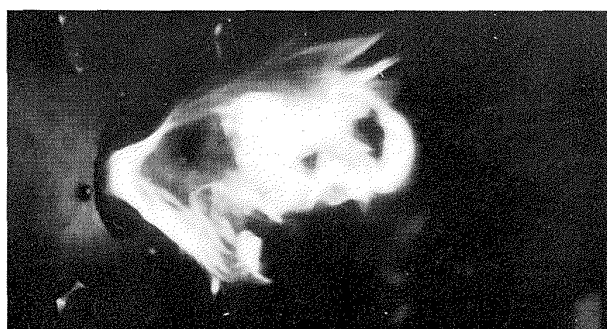


図 19 (a) スワラ S10' (JR-0) の保炎状態

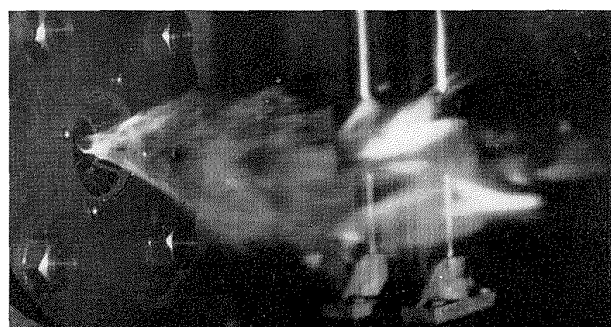


図 19 (b) スワラ S10'' (JR-0) の保炎状態

単双曲線回転面状に広がっている。このスワラ中心部分につく火炎は、燃料を多くすると、容易にはなれ、サイクロンバーナに似た火炎保持状態にかわる。

このコア内の逆流速度および流れに含まれる乱れは、ともに大きなものではない。

スワラ S10 のルーバの曲りを大きくした S10' の様子を図 19 (a) に示す。スワラ中心部分につく火炎の直径が、幾分減少した。しかし、安定性の点では、S10 とほとんどかわりない。参考までに、さらにルーバを曲げたものを S10'' として図 19 (b) に示す。火炎は、スワラ中心部分に、わずかつくのみで、これは非常に不安定であった。

スワラ S10 は、比較的容易にスワラから火炎がはなれ、これが一つの欠点とみられる。

### 3.2.2 スワラ S20 (S20 h 付) の保炎状態

スワラ S20 は、JR-0 燃焼器に用いて比較的良好な性能を示したものである。この燃焼状況を図 20 に示す。火炎は、スワラ中央部分 (約 38 φ) によく付着し、ここから、S10 に近い広がりをもってコアを形成している。スワラの羽根数に対応する線が、コアの表面にみられる。コア内の流速が S10 よりも大きく、逆流量が多くなっているようにみられる。

この S20 の性能改善を目的した S20 h 付のものを

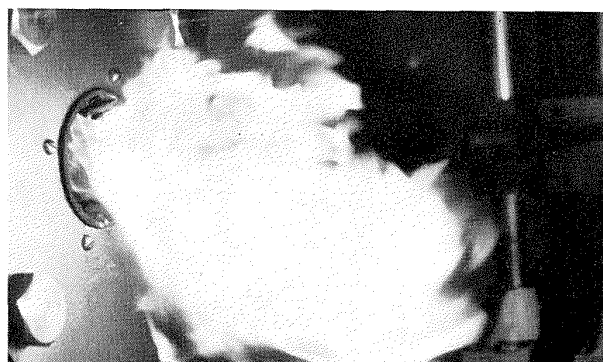


図 20 スワラ S20 (JR-0) の保炎状態



図 21 スワラ S20, 2-10×2.5 h 付 (JR-0) の保炎状態



図 22 スワラ S21 (JR-0) の保炎状態

図 21 に示す。この、スワラ単独の実験状態では、スワラに火炎がつかず、安定性が低下した。h 付によって、一次燃焼領域全体からみた流れ模様の改善を行なおうとする試みの良否は、燃焼器の形状その他の因子を含めた状態でないとわからないものである。

### 3.2.3 スワラ S21 (S21 h 付) の保炎状態

これは、前の S20 にくらべて特徴のあるコアを形成している。すなわち、スワラ後流で一度火炎が絞られ、のち、広がった形になる (図 22), これは、混流型という形状と旋回角の影響 (S20 の  $45^\circ$  から S21 の  $35^\circ$  に減少した影響) とみられる。この絞られた位置から前流側の火炎は、容積の小さなこと、絞られているため逆流量が少なくなることから吹き消えやすく、吹き消えたときは、S10 の場合と同様、サイクロンバーナの火炎の形状となる。

S21 は、有効開口面積の上では、多くて有利であるが、このようなコアの形状は、性能上不利なものと推定される。

S21 h 付は、S20 h 付の場合と同様、スワラ単独試験の結果では、火炎の安定性が悪くなった。

### 3.2.4 スワラ S30 の保炎状態

火炎の保持状態を図 23 に示す。火炎は、中央の  $29\phi$  リングによく付着し、ここから、S10 などにくらべて小さい角度で広がっている (頂角約  $45^\circ$ )。旋回角は、S20 と同じ  $45^\circ$  であるが、旋回羽根の枚数が少なく、実効の旋回角は幾分少なくなっているように思われ

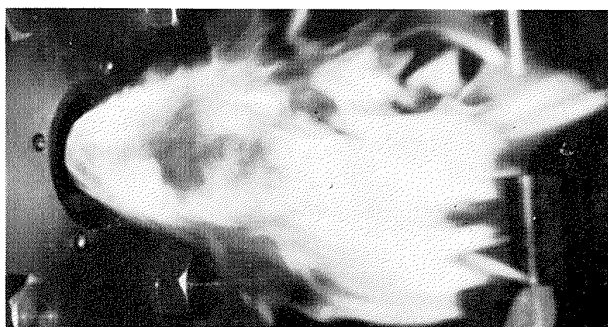


図 23 スワラ S30 (JR-0) の保炎状態

る。しかし、完全な軸流スワラであるから、スワラ後流でコアが一度絞られることは生じない。

コア内の燃え方は悪くない。ただ幾分乱れ不足とこの容積が S20 にくらべて小さいことが欠点といえる。

この中央の  $29\phi$  リングは、まだ不足で、さらに大きくすれば、コアの容積についてみた場合、性能向上が期待できる。

### 3.2.5 スワラ 55/37, 45 およびその盲付, h 付, 逆流パイプ付その他の保炎状態

#### (1) 盲リングの大きさの影響

スワラ内径寄りにつける盲リングの影響を図 24～図 29 に示す。

図 24 は、原型のもので、スワラ S20 (JR-0) に



図 24 スワラ 55/37, 45 (JR-100) の保炎状態

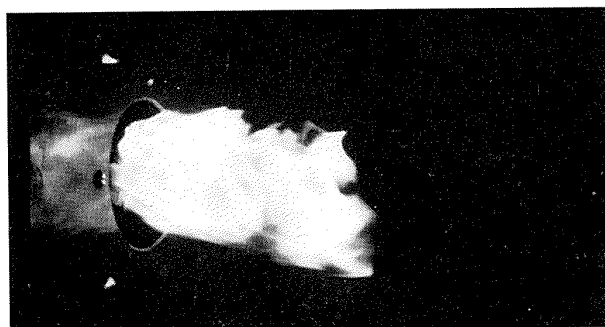


図 25 スワラ 55/37, 45,  $40\phi$  盲付 (JR-100) の保炎状態

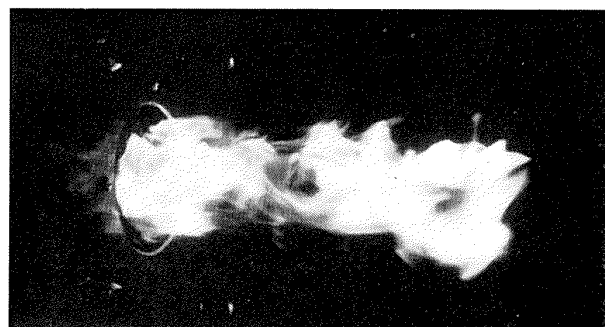


図 26 スワラ 55/37, 45,  $41.5\phi$  盲付 (JR-100) の保炎状態



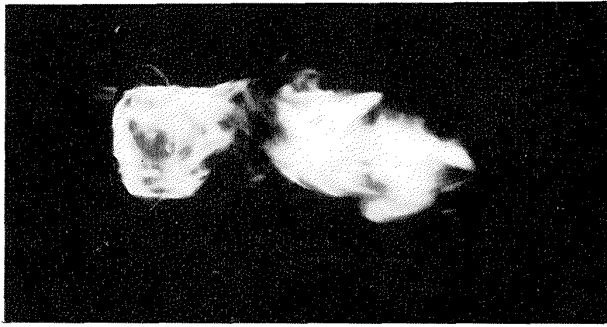


図 27 スワーラ 55/37, 45, 43 φ 盲付 (JR-100) の保炎状態

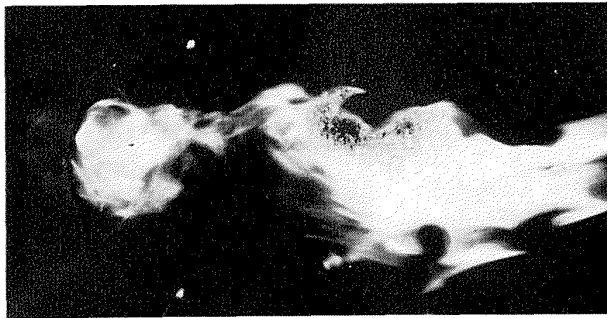


図 28 スワーラ 55/37, 45, 45 φ 盲付 (JR-100) の保炎状態

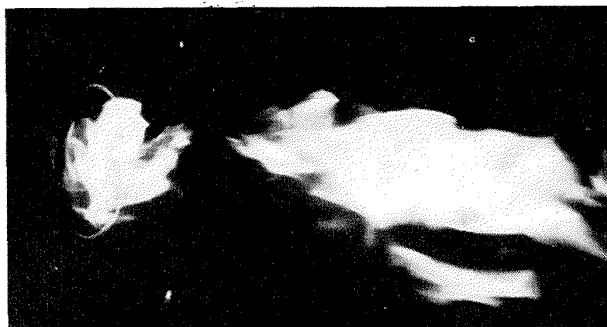


図 29 スワーラ 55/37, 45, 47 φ 盲付 (JR-100) の保炎状態

近い状態になっている。すなわち、火炎は直径 37 φ の中心部に付着し、ここから頂角 60° 程度で広がっている。中心部の逆流は、あまり強くない。そのため、火炎の付着しているスワーラのふちは、燃料過濃になりやすく、幾分すすを含む拡散炎になっている。コア内部の乱れも比較的少ない。

図 25 は、40 φ 盲リング（開口面積比 15%）をつけた状態である。盲リングの効果は、スワーラ後流の流れの広がりにも現われ、この程度の盲リングによっても、流れの広がりはずかになってしまふ。中央部分の逆流は強くなり、この部分の乱れも増す。コア内の燃料過濃にもとづく温度低下は、これによってだいぶ改善されるようである。

図 26 は、41.5 φ 盲リング（開口面積比 22%）の

もので、スワーラからの火炎は、ほとんど広がっていない。中心部の逆流の強さ、コア内の気流中の乱れの増大の傾向は、40 φ 盲リングの場合と同様である。

図 27 は、43 φ 盲リング（開口面積比 30%）の場合で、盲リングのふちからの火炎は、全く広がらず、軸に平行に円柱を形成している。逆流の強さおよび乱れは、相変わらず大きい。そして、スワーラから幾分はなれた所（50 mm～70 mm）の火炎がうすくなってくる。

図 28 は、45 φ 盲リング（開口面積比 40%）の場合で、43 φ 盲付のとき現れた、スワーラから少しはなれた位置の火炎のうすくなる現象が、強調されている。これは、流れ模様の変化にもとづくものとみられる。このような現象を示すようになると、コア内の逆流強さが減少し、コアの形状悪化から、火炎の安定性も低下する。また、盲リングによる有効開口面積の低下も大きくなる。盲リング過大の状態であるといえる。

図 29 は、47 φ 盲リング（開口面積比 50%）のときで、前記の途中で火炎の切れる現象は、さらにはっきり現れている。保炎性能は低下している。

盲リングの大きさにもとづく、旋回流領域の長さの変化を図 30 に示す。これは、プロパン管口の位置を移動し、火炎の吹き消える点から求めたものである。この図から、盲リングの径を大きくすると、長さの短くなる傾向がわかる。コアが絞られ、火炎が途中で切れる場合、旋回流領域の長さとしては、この位置より後流側になるが、プロパン管口を、絞られる位置から後流側に移すと、火炎は吹き消えやすくなる。

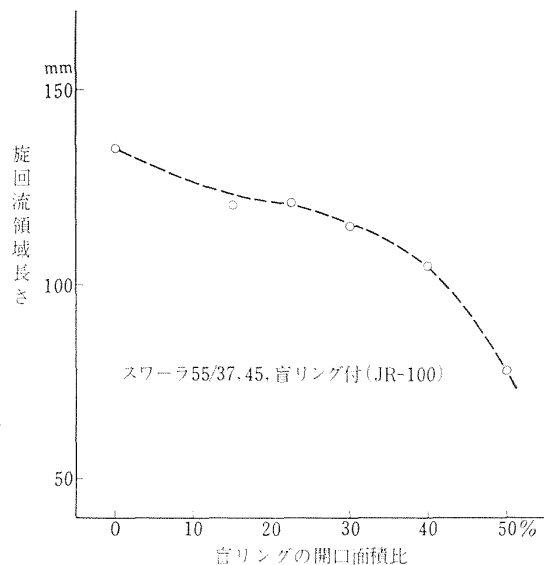


図 30 盲リングの大きさと旋回流領域の長さ（燃焼時）

## (2) 盲リングの内側から空気を入れるもの

盲リング付の状態でも、コア内が燃料過濃になる傾向は軽減されるが、まだ不十分で盲リングに付着する火炎の安定性をおとしているようにみられる。盲リングの内側から空気が入った場合、この空気が燃料過濃混合気に加わり、盲リングのふちに流れ、予混合炎としてもえる状態が得られた (図 31)。これは、盲リング上の炭素堆積の発生予防にも効果あるものと考えられる。このため、盲リング内側から積極的に空気を入れる方法を 2, 3 試験した。

## (a) 盲リング内径を、スワラ内径に一致させず、少し隙間をあけて取付けたもの。

外径 43φ 盲リングを用いた実験によると、この隙間は 0.5 mm 程度までがよく、これ以上にすると、盲リング付近が空気過剰になり、保炎性能が低下した。図 32 に、隙間 0.5 mm の場合の保炎状態を示す。この隙間によって、盲リングの効果が減少し、スワラ後流の火炎は、幾分広がるようになる。図 32 にて、スワラ付近の火炎のうすいのは、青炎になっているためである。

## (b) 盲リング内側に切欠をつけたもの

コア内の乱れを増す点を考慮すると、円周一様に隙間をあけることより、小孔または切欠としたほうが

よい。この保炎状態を図 33 に示す。図 33 は、43φ 盲リングの内側に、8箇所、2.5 mmφ 相当の切欠をつけたものである。切欠から入る空気噴流のため、乱れは増加し、予混合炎として燃える領域が多くなり、コア内は、青炎部分が多くなる。火炎の広がり、43φ 盲付のときより幾分大きくなる。写真では、この様子が明らかに示されないため、スケッチしたものを図 34 に示す。

## (c) スワラ内径側に孔あけをしたもの

スワラ内径側に 8箇所、1.5 mmφ 孔あけ (図 11 参照) をしたものについて調べた。

燃焼状態を図 35 に示す。これは、41.5φ 盲リング付



図 33 スワラ 55/37, 43φ盲, 8-2.5 切欠付 (JR-100) の保炎状態

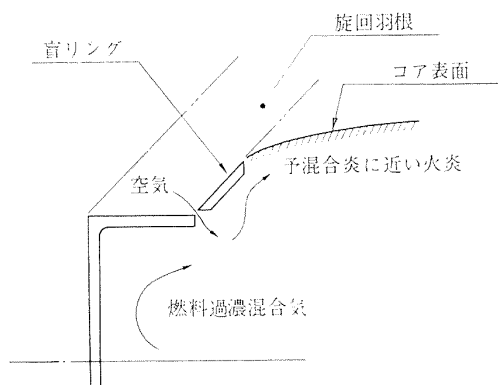


図 31 盲リング内側に空気を入れる効果

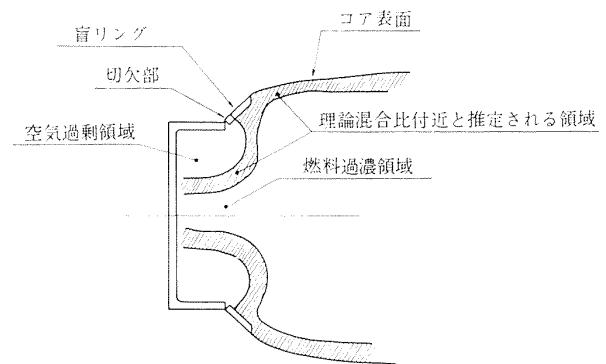


図 34 スワラ盲リング内側に切欠をつけたときの平均した様子

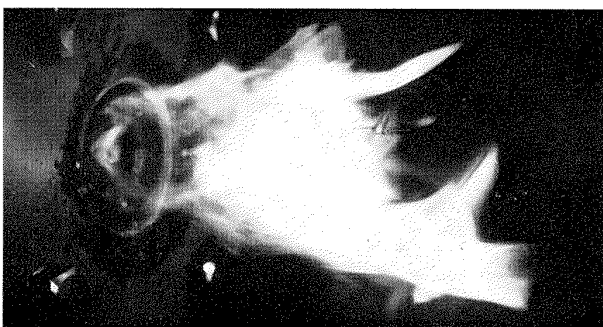


図 32 スワラ 55/37, 45, 43φ盲, 0.5 mm 隙間付 (JR-100) の保炎状態

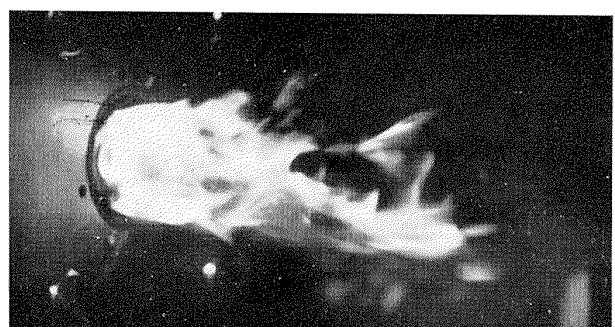


図 35 スワラ 55/37, 45, 41.5φ盲, 8-1.5φ 孔あけ (JR-100) の保炎状態

のもので、火炎は孔あけによってわずかに広がる傾向を示している。軸方向のドリル孔であるが、小さいため、この孔からの流れは、すぐに軸方向の速度成分を失なうて、スワララの旋回流にのってまわり、前記の盲リング切欠付のときに近い流れ模様（図 34 参照）を形成している。

### (3) h 付のもの

図 36 は、スワララ S 20, S 21 (JR-0) と同様の h 付にしたときのものである。火炎の安定性は低下しているが、流速をおとすと図のように比較的安定する。スワララ近くの h 板部分でコアの絞られる傾向および h 板につく火炎の様子が示されている。

### (4) 逆流パイプ付

スワララの旋回流から生ずる逆流では、どうしてもこれが弱く、燃料を多くした場合、コア内が燃料過剰になりやすい。そこで、積極的に逆流を強めるよう、逆流パイプをつけ空気を送るようにしたものを図 37 に示す。この場合、スワララ後流の火炎の広がりやむしろ大きなほうがよく、逆流の強化と共にコア内への流入空気量の増加、乱れの増加があり、コア内の負荷をだいぶ高めることができる。写真の状態では、コアは高温を示す桃色の火炎になり、安定性もよい。この管を、燃料蒸発管に利用することも可能であらう。ただし、実用化の場合、逆流パイプの焼損が問題になる。

パイプ孔の位置の影響については、後でべる。

### 3.2.6 スワララ 55/43, 45 および孔あけの保炎状態

図 38 にこの原型の保炎状態を示す。スワララ内径は、55/37, 45, 43φ 盲付の場合の盲リング外径と同一であるが、火炎は相当の広がりをもち、むしろ 55/37, 45 の盲リングなしの状態に近い。このスワララは、有効開口面積が減少しているため、盲リングをつけて火炎の広がりを少くし、逆流を強めることができない。そこで、図 11 のように孔あけをして、流入空気量を幾分でも増すと同時に、この空気孔からの軸方向の噴流の誘引によって逆流を強めるような対策をとった。この保炎状態を図 39 に示す。これは、スワララ内径側に 8 個、3 mmφ 孔あけをしたものである。3φ 空気孔からの噴流は、肉眼では明らかであるが、この写真でははっきりしない。写真中、2 本現れているのが辛うじてわかる。コアの形状は、孔あけによってほとんど変化しないが、乱れは増加し、火炎の状態は良い。しかし、燃焼中に騒音を発しやすく、燃焼器に組み込んだとき、振動燃焼を起こす危険性がある。この点から考えると、2φ より大きな孔あけは好ましくない。

### 3.2.7 スワララ 55/37, 60 の保炎状態

スワララ出口側の流れは、強い旋回によって大きく



図 36 スワララ 55/37, 45, 2-8.5×2.5 h 付 (JR-100) の保炎状態

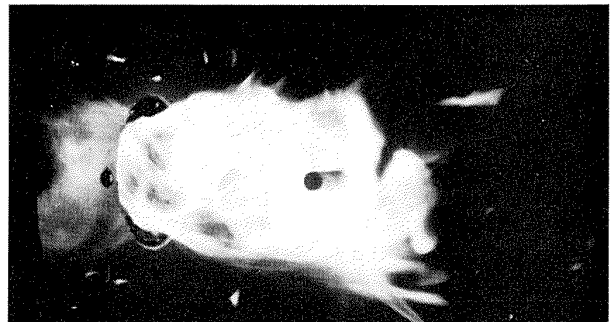


図 38 スワララ 55/43, 45 (JR-100) の保炎状態

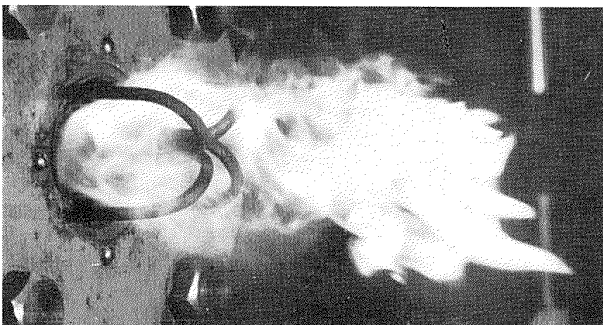


図 37 スワララ 55/37, 45, 4-4φ 逆流パイプ付 (JR-100) の保炎状態



図 39 スワララ 55/43, 45, 8-3φ 孔あけ (JR-100) の保炎状態

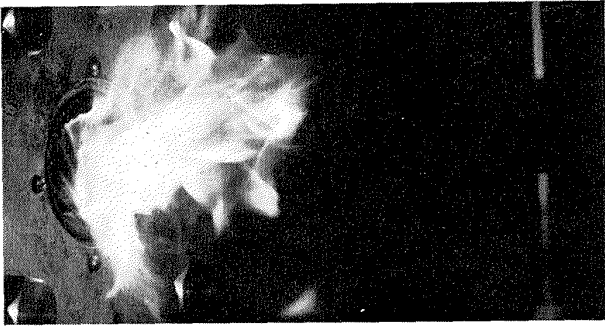


図 40 スワラ 55/37, 60 (JR-100)  
の保炎状態

広がり、ほとんどよどんでいるコアが生ずる。火炎の安定性は悪い。図 40 にこれを示す。有効開口面積も小さく、旋回角過多といえる。

### 3.2.8 スワラ 55/37, 40 およびその修正したもの の保炎状態

旋回角が  $40^\circ$  の場合、 $35^\circ$  のときのように一度コアが絞られるような傾向は示さず、 $45^\circ$  のときより幾分少ない広がりになっている。スワラ中心につく火炎の安定性は、 $45^\circ$  のときより少し低下しているようである (図 41)。コア内の乱れは、 $45^\circ$  の場合より少ない。

2 箇所、 $8 \times 2.5$  h 付の場合を図 42 に示す。h 付は、この場合もまた安定性をおとしている。



図 41 スワラ 55/37, 40 (JR-100)  
の保炎状態

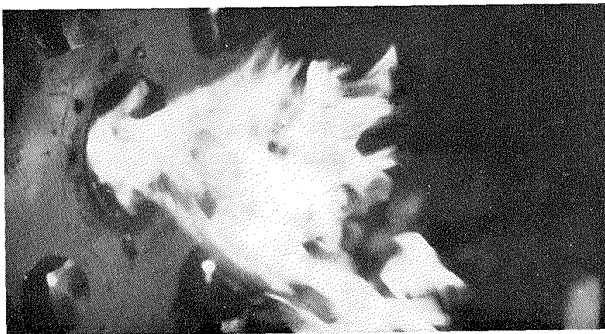


図 42 スワラ 55/37, 40,  $2-8 \times 2.5$  h 付  
(JR-100) の保炎状態

図 43 は、 $41.5\phi$  盲リング付のもので、 $45^\circ$  の場合と同様、火炎の広がりはいくらか減少し、コア内の逆流の増加、乱れの増加がみられる。ただし、この  $40^\circ$  の場合は、 $45^\circ$  のときより乱れが少いようである。

図 44 は、 $43\phi$  盲リングに切欠を入れたときのもので、盲リングのみに比べ、コア内の乱れは増加し、高温の火炎になっている。この火炎の様子は、図 34 とほぼ同様である。

### 3.2.9 スワラ 58/37, 45, $42\phi$ 盲付の保炎状態

図 45 に、この火炎の保持状態を示す。 $42\phi$  盲リング (開口面積比 20%) は、前の結果から適当と思われる大きさにしたものである。火炎は、まだ広がり気味であるが、逆流速度、乱れなどが過大にならず、コア内に高温の火炎を得ると同時に、その安定性も良くなっ

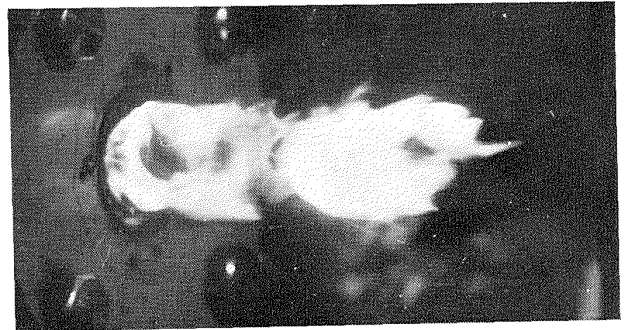


図 43 スワラ 55/37, 40,  $41.5\phi$  盲付  
(JR-100) の保炎状態

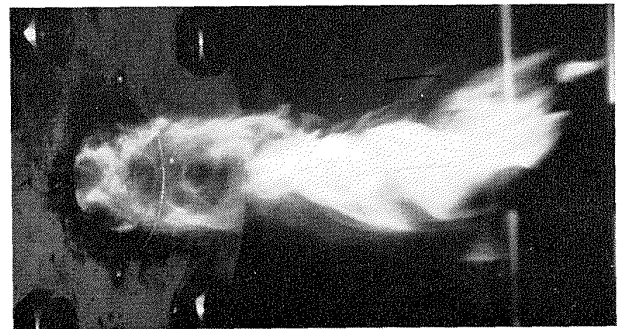


図 44 スワラ 55/37, 40,  $43\phi$  盲,  $8-2.5$   
切欠付 (JR-100) の保炎状態

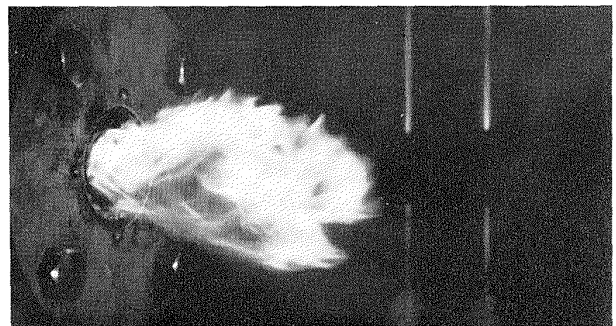


図 45 スワラ 58/37, 45,  $42\phi$  盲付  
(JR-100) の保炎状態

ている。スワラ 55/37, 45, 40 $\phi$  盲付 (図 25) 相当であるが, 55 $\phi$  スワラにくらべ, 開口面積の多くなっていることが, 実用上有効に働くと思われる。このスワラ内径に 8 箇所, 1.5 $\phi$  孔あけをしたものは, 55 $\phi$  の場合とことなり, 効果がみられなかった。これは, コアの大きさ, 空気量などが少し増しているためであるが, 1.5 $\phi$  の孔は大きくしても良い効果をもたらさず, 58 $\phi$  スワラでは, この孔あけの方法は, 好ましくないといえる。

### 3.2.10 スワラ 60/37, 40 その他の保炎状態

スワラからの空気を, 性能をおとさない範囲で, 最大にするよう考慮して試作したものである。この保炎状態を図46に示す。火炎の広がり, 55 $\phi$ , 40°の場

合より, 少なくなっている。これは旋回羽根の幅, 枚数が同じで, 外径のみを 60 $\phi$  と大きくしているため, この影響が, 旋回角を幾分減らした形になって現れたとみられる。しかし, スワラ出口で, 絞られる所までにはなっていない。比較的, 安定性は良い。

このスワラ 42 $\phi$  の盲リング (開口面積比 17%) 付のものを図 47 に, 44 $\phi$  盲リング (開口面積比 25%) 付のものを図 48 に示す。火炎の広がり, 55, 40° の場合, または, 60, 45° のときより劣るようである。

盲リングをつけた状態で, さらに h 付にしたものを図 49 に示す。盲リング付と同程度の風速では, 火炎



図 46 スワラ 60/37, 40 (JR-100) の保炎状態



図 49 スワラ 60/37, 40, 44 $\phi$ 盲, 2-11 $\times$ 4 h 付 (JR-100) の保炎状態

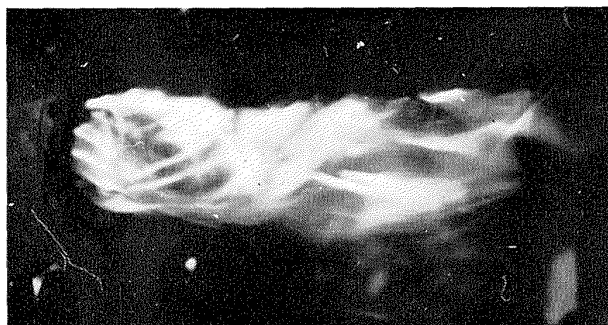


図 47 スワラ 60/37, 40, 42 $\phi$  盲付の (JR-100) 保炎状態



図 50 スワラ 60/37, 45 (JR-100) の保炎状態



図 48 スワラ 60/37, 40, 44 $\phi$  盲付 (JR-100) の保炎状態

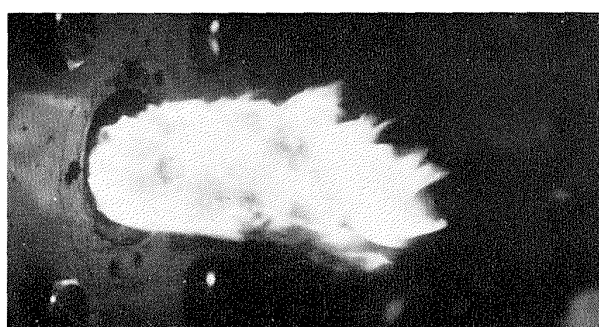


図 51 スワラ 60/37, 45, 43 $\phi$  盲付 (JR-100) の保炎状態





図 52 スワロー 60/37, 45, 45φ 盲付 (JR-100) の保炎状態

は安定してスワローにつかない。

### 3.2.11 スワロー 60/37, 45 およびその盲付の保炎状態

この原型の火炎の様子を図 50 に、43φ 盲リング (開口面積比 25%) 付の場合を図 51 に、45φ 盲リング (開口面積比 30%) 付の場合を図 52 に示す。盲リングなしの場合は、コア内の逆流が弱く、燃料を増すと、スワローに付着している火炎の部分が拡散炎に近づき、燃料過濃にもとづく吹きとびを起こしやすくなっている。これに対し、43~45φ 盲付のものは、火炎が広がらず、コア内の乱れも強くなり、燃焼性能が改善される。盲リングのこの効果は、旋回角 45° のスワローにおいて、いちぢるしい。図 50, 51 の比較は、その例である。

### 3.2.12 スワロー 54/37, 40 およびその盲付の保炎状態

この保炎状態は、外径の 1 mm 大きい 55, 40° の場合とほとんど同じである。

### 3.2.13 スワロー単独試験結果のまとめ

(1) スワロー S10 (JR-0) のルーバ形式は、流入空気量が少なく、多く入れるようになると、混流型であるため、空気はスワロー中心軸寄りの方向に流れ、コアの形状が悪化して保炎性能が低下する。

(2) この点、スワロー S30 (JR-0) のような軸流スワローがよい。ただし、S30 では、内径の 29φ が小さすぎるようで、大きくすれば、さらに性能向上が期待できる。

(3) 実験した混流型、植込み羽根式のスワローでは、軸流スワローに近い流れ方をするけれども、旋回角を 35° にすると、コアの一度絞られる傾向が起きる。したがって、旋回角は 40° 以上が適当と思われる。

(4) 旋回角を 60° にすると、有効開口面積の減少と共に、流れの広がりが大きくなり、コア内がよどんで性能が低下する。旋回角 60° の場合は、ライナ空気孔との組合せを上手に行なわぬ限り、性能向上が困難で

あろう。

(5) 旋回角 40°~45° の範囲においては、盲リング付のときのコア内の逆流速度、乱れの大きさ、火炎の安定性などの点で 45° のほうがよいけれども、流入空気量を多く望む場合は、40° のほうが適当になる。

(6) 旋回羽根幅および枚数を一定にして、外径を大きくすると、当然なことであるが、有効旋回角が幾分減少する傾向をもつ。

(7) スワロー有効内径、または盲リング付のときは盲リングの外径としては、コアの容積を考えた場合、JR-100, JR-200 級の使用状態に対して、スワロー S30 の 29φ では不足と思われ、JR-100 スワローなどの 37φ あればほぼよく、42φ 以上の必要はないと思われる。もちろん、大きなほど安定性は改善されるが、他との関連を考え合せると、大きなほど良いとはいえない。

(7) スワロー有効外径は、大きなほうが流入空気量を多くする点で有利になるが、流れの相互干渉(後出)によって押えられる。

(8) スワロー内径側の盲リングは、コアの広がりを押え、コア内の逆流、乱れを強める好ましい効果をもつ。この意味では、旋回角 40°~45° のスワローに対し、開口面積比にして 15%~20% で十分である。開口面積比が 30% をこすと、コアが一度切れる形になり、性能は低下する。

(9) この盲リングに切欠をつけるとか、スワロー内径側に小孔あけをして、少量の空気をコア内に入れると青色の混合炎をつくり、安定性増加に効果がある。また、炭素堆積の防止にも役立つものと考えられる。ただし、大きな孔あけは、燃焼時騒音を発し、振動燃焼を誘起しやすきすること、空気過剰による保炎性能の低下などがみられ好ましくない。

(10) スワローの半径方向に板を渡す h 付は、単独試験の状態では、火炎の安定性が低下する。

(11) 逆流パイプは、コア内に積極的に空気を入れ、逆流を強める点で、盲リング以上に効果がある。また、これを燃料蒸発管としても利用することができ、有望な方法であるが、この焼損が実用上の問題になる。逆流パイプをつけるときには、コアの容積が大きく、乱れの少ないスワローのほうがよく、盲リング付に用いると、乱れ過剰になり、かえって安定性が低下する。

## 3.3 スワロー後流と空気噴流との相互作用

前節に述べたように、スワロー単独のものについても、その大きさ、旋回角、盲リングその他を調節して保炎性能を向上させることができるが、さらに、スワ

ーラ付近のライナ空気孔からの空気流との相互作用によって、性能の改善が可能である。前記の逆流パイプ付は、その一つの例である。ここでは、その概要とみるため、1個のスワラーを用い、プロパンガスを供給して火炎保持を行なわせ、これに、空気噴流を各方向に吹付けて、保炎性能の変化を観察した。空気噴流は、圧力差 20~30 mmHg にして、ライナ空気孔からの場合に類似させた。

供試スワラーのおもなものは、55/37, 45, 41.5φ盲付である。

この結果、つぎのことが判明した。

(1) スワラー取付面から軸方向の距離を  $l$  として、 $l < 20$  mm のとき、どのような方向の噴流を入れても、噴流を弱くしても、小さなパイプ口からの噴流にしても、火炎は不安定になる。

(2)  $25 \text{ mm} < l < 30 \text{ mm}$  の間では、比較的小さなパイプからの噴流を、横方向からスワラーの旋回流を妨げないように入れると良い効果をもつ。ただし、旋回を強調するような方向はよくない(図 67 参照)。

(3)  $40 \text{ mm} < l < 80 \text{ mm}$  の間では、スワラー中心軸と直角に、コアまわりの空気流の層を貫通するような、大きなパイプから噴流を入れると効果がある。ただし、 $40 \text{ mm} < l < 50 \text{ mm}$  の範囲で、あまり多くの空気を送ると逆効果をもたらす。

(4)  $40 \text{ mm} < l < 80 \text{ mm}$  にて、スワラー中心に向け逆方向に噴流を入れると効果がある。 $l < 40 \text{ mm}$  では、噴流を極度に弱めないと火炎が不安定になる。

(5)  $l > 100 \text{ mm}$  では、強力な噴流を、スワラー中心に向け、逆方向に噴く場合をのぞき、噴流の効果は、ほとんどない。図 30 から、 $l = 100 \text{ mm}$  は、旋回流領域の長さに近いことがわかる。

(6) 以上の結果は、スワラー有効外径 52 mm~60 mm の範囲で、スワラー直径をかえても、盲リングの大きさをかえても、あまりかわらない。

### 3.4 スワラーの相互干渉およびライナ壁面の影響

#### 3.4.1 スワラーの相互干渉

スワラー出口側の流れの相互干渉を調べるため、スワラーを3個並べ、そのピッチとスワラー直径とをかえて燃焼状況を観察した。これは、スワラー出口の流れの様子によってかわり、流れの広がっているものは干渉しやすく、流れの広がらないもの、たとえば盲リング付、では干渉しにくい。また、燃焼状況によってもかわる。この実験は、最初プロパンガスを用いて行なったが、のち、実際の場合に近く、うず巻噴射弁を用いてジェット燃料 JP-4 を噴射した。これから、プ

ロパンガスでは干渉の現れにくかったものが、JP-4にして、明らかに現れるという傾向がみられた、JP-4のときは、燃料の霧化、蒸発の過程が加わり、これがスワラー付近の気流中の乱れの影響を受け、相互干渉など流れ模様の変化にともなう燃焼性能の差が大きくなるということにあらう。

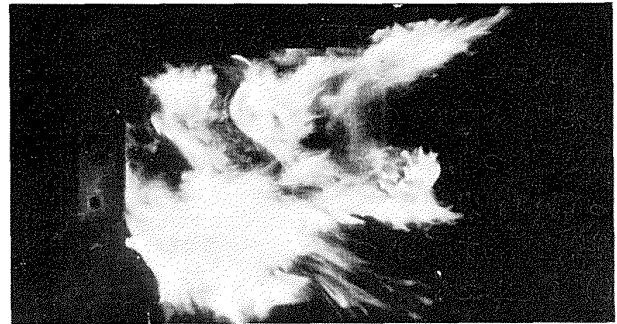


図 53 (a) スワラー相互干渉の少ないとき

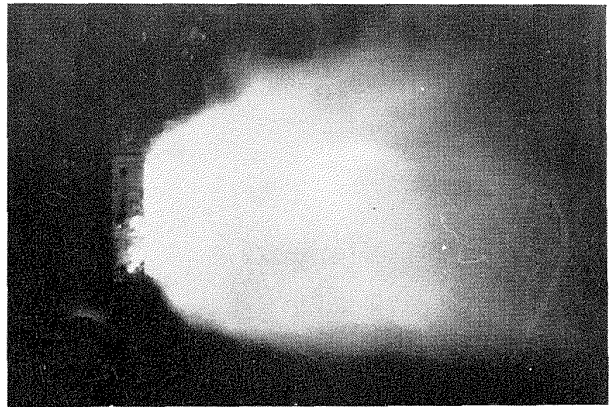


図 53 (b) スワラー相互干渉の少ないとき

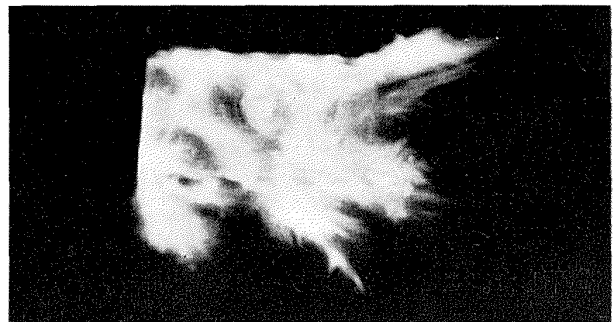


図 54 (a) スワラー相互干渉みとめられるとき

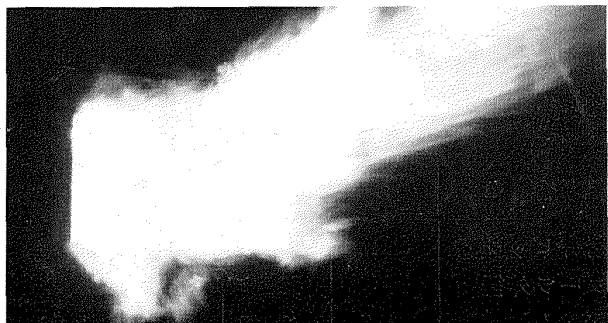


図 54 (b) スワラー相互干渉みとめられるとき

あとでのべる一次燃焼領域のみの模型で行なったこの実験例を図 53 (a) と (b), 図 54 (a) と (b) に示す。図 53 は, スワラ相互干渉の少ない場合で, 燃料を減らすと, 火炎のスワラに安定してついている様子が判明する (図 53 (a))。これから燃料を増し, 同時に空気量も増して負荷を高めた場合が図 53 (b) で, 火炎は短かく, 分布良く, 温度も高くなっている。図 54 は, スワラ相互干渉のある場合で, 火炎は安定してスワラにつかない (図 54 (a))。この燃料を増した場合が図 54 (b) で, 火炎はスワラを取付けた隔壁板につき, スワラ部分が抜けたような青炎になっている。火炎は長くのび, 分布も悪化している。

結果を要約すると, つぎのようになる:

(1) 実験したものは, 表 2 の組合せで, この結果, a は振動燃焼時をのぞき, 相互干渉はみとめられなかった。b は JR-100 級のエンジンに用いたときの使用範囲内では干渉はないが, これより空気量を多くすると現れてきた。c は, 使用範囲内でも, 干渉がみとめられた。これは, 3 個のスワラのうちのどれかの火炎が不安定になりやすいことから判断した。d は, 干渉が, いちぢるしく, 火炎が安定してスワラにつかない。これから, スワラピッチ  $p$  と直径  $d$  との比  $p/d$  の限界は,  $p/d \sim 1.4$  といえる。

この  $p/d$  値は, 実際の場合は, ライナ空気孔の相互作用も加わり, 一概にはいえないものであるが,  $p/d$  値を小さくすることは, 性能低下を招きやすいといえる。

(2) 上記 (1) とことなる見方からすると, となり合うスワラからの流れの接触する位置が, スワラ取付面から後流側 50 mm 以上離れていれば, あまり影響はないといえる。

(3) スワラ出口流れの干渉防止のため, スワラ間に仕切板をつけたものは, 火炎の安定性がおち, 性能が低下した。このとき, スワラのピッチ 74 mm, スワラ外径 55 mm, 仕切板の軸方向の幅は 67 mm であった。

### 3.4.2 ライナ壁面の影響

#### (1) 隔壁板の保炎作用

表 2 スワラ外径とピッチの組合せ

組 合 せ	a	b	c	d
噴射弁ピッチ $p$	85 mm	85 mm	74 mm	74 mm
スワラ外径 $d$	55	60	55	60
$p/d$	1.54	1.42	1.34	1.23

隔壁板 (スワラ取付板) のスワラを除いた部分にも, 火炎が保持され, この火炎が不安定になったり, 吹き消えたりすると, 全体性能の低下がみられる。安定な火炎を得るためには, ここに十分な容積 (隔壁板とスワラ気流との間にできる空間) をとること, および安定した流れ模様をつくる必要がある。流れ模様の改善に対しては, 小さな空気孔やルーバで十分調整できるようである。容積に対しては, スワラピッチの影響が大きい。

隔壁板に空気孔やルーバをつけていない現在のものでも観察すると, 隔壁板の保炎性能は, 燃料過濃によってスワラコアの火炎が消えると, かえって良好になるようである。しかし, スワラコアの容積に比較すれば, 火炎容積が小さく, 火炎長さの増加や振動燃焼を起しやすくするなどの欠点を示す。

#### (2) 外側, 内側ライナの影響

(a) スワラの上下に, 外側, 内側ライナに対応する板をつけると, スワラ出口の流れの様子は変化する。図 55 に盲リング付スワラを用いたプロパン燃焼の写真を示す。この流れ模様の詳細については, 後ほど述べるが, 上下壁面の存在によって隔壁板部分に, 二次的な逆流領域を形成することスワラからライナ壁にそう流れの生ずることが特徴である。この二次旋回流のあるときのほうが, 隔壁板上につく火炎の安定性は良い。

(b) この二次旋回流領域をかえるため, スワラ上下側の隔壁板にピッチ 10 mm, 4 個 4 mm $\phi$  孔をあけてみたものは, 効果があり, 二次旋回流が弱くなり, スワラからライナ壁面にそう広がる流れが少なくなった。しかし, 大気開放中の状態までには, ならなかった。この隔壁板孔あけのような方法で, 流れの調整を行ない, スワラの相互干渉を幾分防ぐことができる。

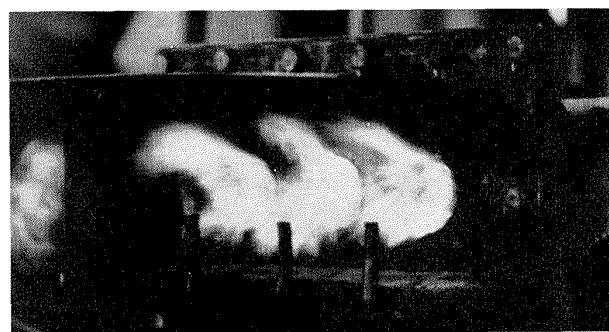


図 55 ライナ壁面の影響  
(プロパン燃焼: 下面から出ている 3 本の管が供給口)



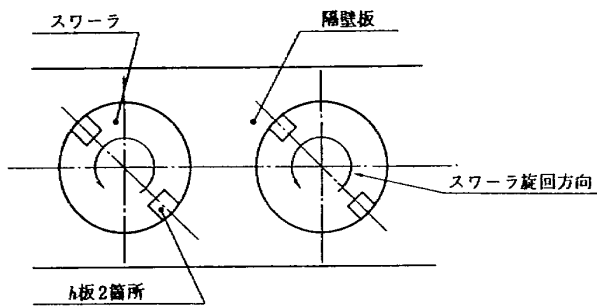


図56 スワアラ回転方向と板の方向

### 3.4.3 スワアラ h 付の性能

大気開放状態での単独試験においては、h 付の性能は低下した。しかし、ライナにかこまれた状態においては、後に述べるように、同一状態で、負荷を5%程度増すことができ、性能が向上した。この理由は、このかこまれた状態では、隔壁板上に安定した流れ模様をつくること、スワアラ中心からh板をつたう流れによって隔壁板付近に燃料を供給し、この領域の火炎の安定性を増すこと、また、h板にそう流れから、スワアラ中心部の逆流を幾分でも強めコア内の燃料過濃の傾向を防ぐことによるためと思われる。h付によって、燃料希薄側の性能は低下した。また、h板の取付方向は、図56に示す状態が良かった。

### 3.5 スワアラ出口の流れ模様

一次燃焼領域の研究に用いたスワアラのうち種類を選んで流れ模様を調べ、検討した。用いたスワアラは、S-20; 55/37, 45, 43φ盲付; 60/37, 45, 43φ盲付で羽根の植込み角はいずれも45°である。実験は(1)スワアラを単独に用いたとき、(2)スワアラを3個直列水平に並べ相互間のピッチをかえたとき、(3)2)の状態にさらに上下に燃焼器のライナに相当する板を取りつけたとき、について行なった。流れ模様の観察にはストリーマを用い<sup>2)</sup>、スワアラの入口側と出口側との間の静圧差を50~300 mmHgにとった。実際の箱形燃焼器では50~150 mmHgで使われている<sup>2), 3)</sup>。

#### 3.5.1 単独の場合の流れ模様

まわり開放状態でスワアラを板に単独に取りつけた際の流れ模様をスワアラの軸の中心断面で求めた。実験では、おもにスワアラの中心部後流に起こる逆流(スワアラコア)の大きさおよび流れの広がり方を調べた。それらの結果の例を図57および表3に示す。スワアラコアや流れの広がり角度に対する圧力差の影響は実験の範囲内では小さく、測定誤差の程度であり、各スワアラに特有な流れが図に示されているものと考えてよい。図では、旋回流の成分を示すことはできない

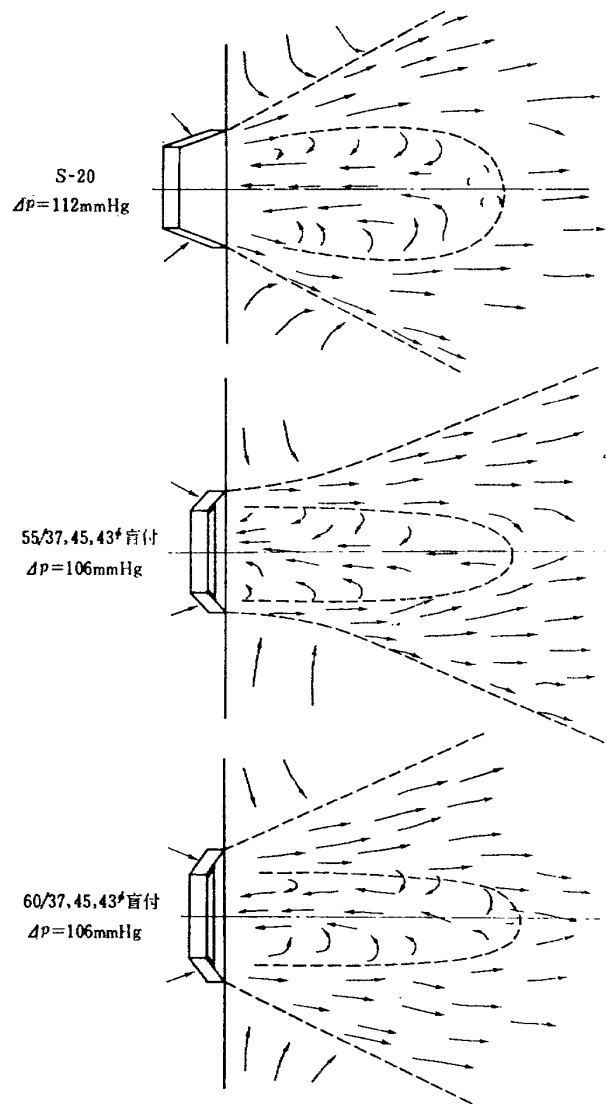


図57 スワアラ出口の流れ模様(単独の場合)

表3 スワアラからの流れ

スワアラの種類	流れの広がり角度	スワアラコアの長さ mm	スワアラコアの直径 mmφ
S-20	約 58	約 120	約 60
55/37, 45, 43φ盲	約 40	120~130	約 40
60/37, 45, 43φ盲	約 50	約 130	約 40

が、実際の流れではスワアラの軸を中心とした旋回流が存在する複雑な流れになっている。

S-20 は流れの広がり角が他の型に比較して最も大きく、スワアラコアは太くて短い。55/37, 45, 43φ盲付のスワアラは流れの広がり角度が下流に行くにしたがって大きくなり一定の値に近づくがその値は3種の中で最も小さく、スワアラコアの長さは長く、直径は約40 mmである。60/37, 45, 43φ盲付は流れの広がり角が前の二つの型の間で、スワアラコアの長さは長く、直径は約40 mmである。

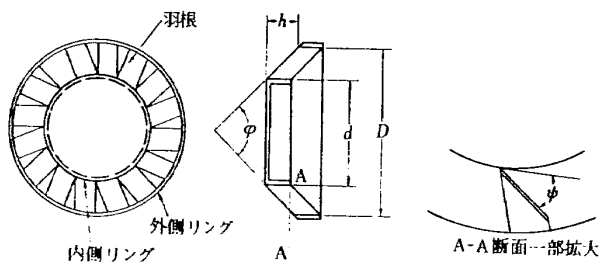


図 58 スワラの形状

これらの流れ模様の特徴をスワラの構造の点から以下に検討してみる。

使用したスワラは図 8 に示すように羽根の植込み角度が内側リングと外側リングのところで軸方向に対して  $45^\circ$  であるが、羽根の軸方向に全体としてコーン状になっている。このためコーン角度の影響が流れの旋回角度を変えるように作用する。スワラに流入する流れを軸方向と軸に垂直な断面とに分けた場合、コーン角度の変化は垂直断面の流れに対しては羽根の角度を変化させることに相当する。スワラの構造上、垂直断面の流れは外側リングから内側リングの方へ向い、その角度を、図 58 に示す流入角度  $\phi$  で表わすと、コーン角度  $\varphi$  と羽根植込み角度  $\theta$  との間にはつぎの関係が成立つ。

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \varphi / 2}{\tan \theta} \right)$$

式からわかるように一定の植込み角度  $\theta$  に対してコーン角度  $\varphi$  が小さくなると流入角度  $\phi$  も小さくなり、軸に垂直断面の流れは次第に軸の中心向きから円周方向へと向きかえる。コーン角度  $\varphi$  が小さくなると流入角度  $\phi$  が少さくなるのに伴い、スワラの隣接羽根相互間の垂直方向の間隔は狭くなる。その距離  $S$  を羽根の中央位置  $(C+d)/2$  で求めると近似的につぎの式で表わされる。

$$S = \frac{\pi(D+d)}{2n} \cdot \cos \theta \cdot \sin \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{\tan \varphi}{2} \right) \right\}$$

ここで  $D$ : スワラの外径 mm,  $d$ : スワラの内径 mm,  $n$ : 羽根の植込み枚数

$S$  の値は内側リングの近くでは外側リング側より小さく、内側リングのほうでは直径が小さくなるので羽根の幅との関係で相互の重なり合いの程度は大きくなる。羽根がスワラの円周上に植え込んであるため  $S$  の値は羽根の前縁側より後縁側で小さくなり、流れが一層軸の方へ曲げられる傾向にある。

またコーン角度が  $180^\circ$  では半径方向からの流入は考えなくてよいが、その値が小さくなるほど半径方向

から流入し易くなる。その程度をスワラ入口面積の軸方向への投影と半径方向への投影との比で表わされるものと考えたとコーン角度  $\varphi$  との間につぎの式が得られる。

$$A_{0r}/A_{0a} \doteq 1/\tan(\varphi/2)$$

ここで、 $A_{0r}$  は半径方向の、 $A_{0a}$  は軸方向の投影面積である。実際には内側リングと外側リングの軸方向の直線部分であるので流れは入口投影面積比の値より軸方向の成分が強くなる。

上述の流入角度  $\phi$  と入口投影面積比との関係からコーン角度  $\varphi$  を小さな値にすると、スワラの軸方向の流れに対して軸に垂直な断面での旋回流の成分が強くなり、実質的にスワラの旋回角度を増したことと同様な効果をもたらす。使用したスワラに対して上述のおもな寸法や角度を求めると表 4 のようになる。表中  $l$  は羽根の幅を示し、羽根の前縁と後縁を結ぶ最短距離を測った値である。

スワラ出口の流れがスワラの形状にしたがって流れるものとして流れの形状を求めると図 59 のようになる。この図を求める際には以下の仮定を設けた。流れは羽根に沿って  $\theta$  の角度で軸方向から流れその速さは  $v_1$  である。軸に垂直な断面では羽根に沿って  $\phi$  の角度で流れその速度は  $v_2$  である。スワラ出口ではこれらの角度で流れが直線状に出るものとし、スワラ羽根部は直径  $D$  の円周上に分布しているものとする。スワラ出口の速度を軸方向  $v_a$ 、半径方向  $v_r$ 、円周方向  $v_c$  の三成分に分けると、

$$v_a = v_1 \sin \theta$$

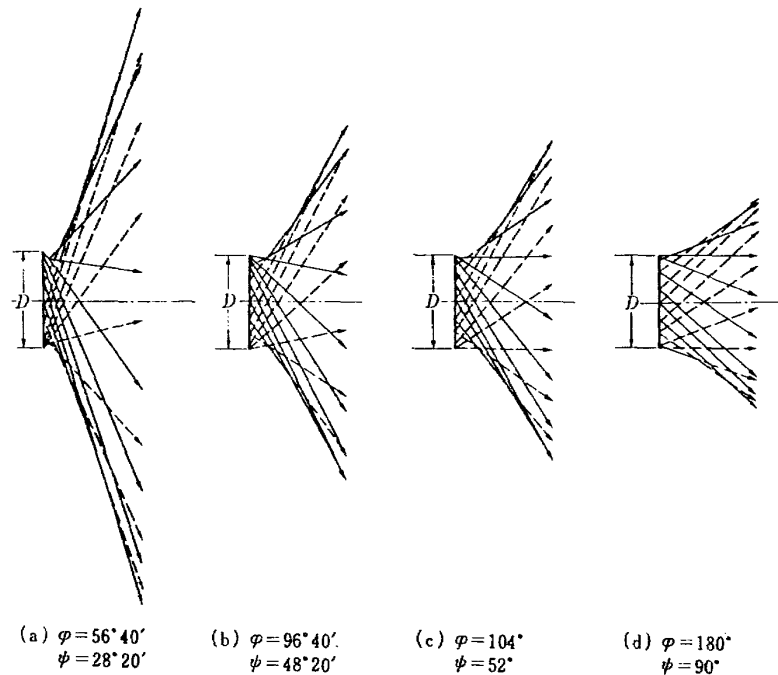
$$v_r = v_2 \sin \phi$$

$$v_c = v_1 \cos \theta + v_2 \cos \phi$$

で表わされる。ここで  $v_1$  と  $v_2$  との比をコーン角度

表 4 スワラの諸元

スワラの種類		S 20	55/37, 45,	60/37, 45,
$D$	mm	52	55	60
$d$	mm	38	37	37
$\theta$	度	45	45	49
$h$	mm	13	8	9
$n$	枚	16	16	16
$s$	mm	3.8	5.4	5.9
$l$	mm	8	9	10
$\varphi$	度	$56^\circ 40'$	$96^\circ 40'$	$104^\circ$
$\phi$	度	$28^\circ 20'$	$48^\circ 20'$	$52^\circ$
$A_{0r}/A_{0a}$		1.86	0.89	0.78

図 59 スワアラ出口の流れ模様  $\theta=45^\circ$ 

$\varphi$  に基づく軸方向と半径方向への羽根部入口面積の投影面積比に比例するものと考えたと

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{v \sin \frac{\varphi}{2}}{v \cos \frac{\varphi}{2}} = \tan \frac{\varphi}{2}$$

ただし、 $v$  は入口の代表速度とする。この値を代入すると

$$v_a \propto v \sin \frac{\varphi}{2} \sin \theta$$

$$v_r \propto v \cos \frac{\varphi}{2} \sin \phi$$

$$v_c \propto v \cos \frac{\varphi}{2} \cos \phi + v \sin \frac{\varphi}{2} \cos \theta$$

が得られる。

図 59 では (a) が S-20, (b) が 55,  $45^\circ$ , (c) が 60,  $45^\circ$  のスワアラに対して求めてあり, (d) はコーン角度  $\varphi$  が  $180^\circ$  のときで, 軸方向からのみ流れる場合である。(a) から (d) まで  $\theta$  が一定で次第にコーン角度  $\varphi$  が大きくなると流れの広がり方は狭くなる傾向にある。同一の  $\varphi$  や  $\theta$  に対して軸方向の速度  $v_1$  が  $v_2$  に比べて大きな割合になると, 流れの広がり方は上流側でゆるく次第に下流側へ行って  $\theta$  と  $\varphi$  とによって決まる一定の角度に近づく。内側リングと外側リングの存在は  $v_1$  を  $v_2$  より大きな割合にするように働らく。羽根相互間の距離  $S$  が大きく, 幅  $l$  が小さいと流れは羽根の角度  $\theta$  や  $\phi$  から外れやすくなり,

広がり角が狭くなったり流れが絞られたりする。これらの影響があるため実際の流れは図 59 に示す広がり角より狭くなっている。

S-20 はコーン角度  $\varphi$  の値が最も小さいこと, およびスワアラの羽根の軸方向の高さに比べて軸方向の流れを規制する内側リングと外側リングの軸方向の長さが短いため流れの旋回角度が最も大きくなる状態にある。このため実際の流れでも広がり角が最も大きくなっており, それに伴いスワアラコアが短くなっているものと考えられる。

55/37, 45, 43 $\phi$  盲付のスワアラは実際の流れの広がり角が約  $40^\circ$  で最も小さくなっている。この理由はスワアラの中心部に 43 $\phi$  の盲リングを取りつけたため流れが絞られ, スワアラ外側リングと盲リングとの間の半径方向の距離が 6 mm しかなく, 外側リングに沿って流れるようになること, および, 羽根部の高さ  $h$  が最も低くスワアラの外側リングと内側リングの影響を受けやすく, 半径方向には規制された流れとなっているためである。このためスワアラからすぐ下流では流れの広がり方が極めて小さく下流に行くにしたがってその角度が大きくなり一定の値に近づく。スワアラコアの長さや径が大きいのは, 流れが軸方向に向くよう半径方向には強く規制されたことに起因するものと考えられる。

60/37, 45, 43 $\phi$  盲付のスワアラは羽根相互間の垂直距離が 5.9 mm で最も長く, 有効旋回角度は最も小

さくなるはずであるが、スワラ外側リング (60φ) と盲リング (43φ) との間の距離が半径方向に 8.5 mm あり、55/37, 45, 43φ 盲付のスワラより外側リングと内側リングの影響が小さいので全体として 55/37, 45, 43φ 盲付スワラより流れの広がり角は大きくなっている。

燃焼実験で、S-20 と等しいコーン 角度  $\varphi$  で植込み角  $\theta$  を  $45^\circ$  から  $35^\circ$  に小さくしたとき流れが一旦絞られる形になったが、計算によって流れ方を求めると図 60 のように一旦絞られる形になることがわかる。 $\theta$  が小さいとき  $\varphi$  の値を小さくすると流れ方にこの傾向が出やすい。

### 3.5.2 3 個直列にならべた場合の流れ模様

55/37, 45, 43φ 盲付のスワラを 3 個直列になら

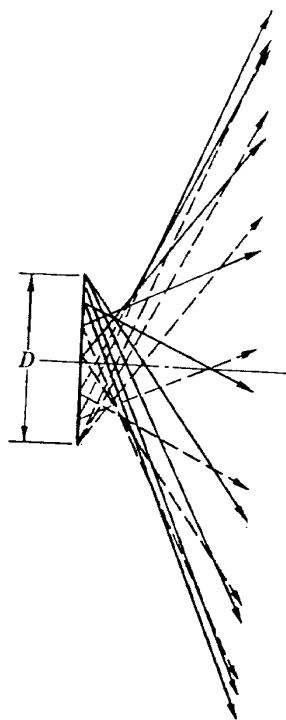


図 60 スワラ出口の流れ模様  
 $\theta=35^\circ$ ,  $\varphi=56^\circ 40'$ ,  $\phi=28^\circ 20'$

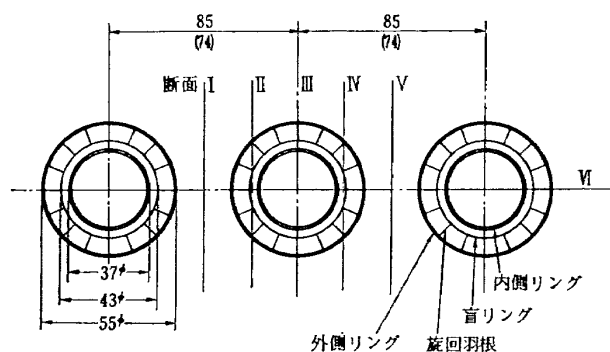


図 61 流れ模様の観察断面 (3 個直列の場合)

べ図 61 に示す各断面に対して流れ模様を求めた。断面 I と V はスワラ間の中央に、断面 III はスワラの中心軸上に、断面 II と IV はおのおの断面 I と III および III と V の中央にとった。断面 VI は 3 個のスワラの中心軸を通る面で断面 I ~ V とは直交する。実験においてはスワラ間のピッチを 74 mm と 85 mm にとった。この値はアニュラ形や箱形の燃焼器で採用したピッチに基づいている。得られた結果の一例を図 62 に示す。スワラの入口側と出口側の静圧差を約 50 mmHg と 100 mmHg にとって観察を行なったが、得られた結果に差異は認められなかった。以下に各断面の特徴を検討する。

断面 I はスワラ相互の中央位置であり、流れがスワラ相互の干渉のため旋回成分を失ない、スワラの軸の方向に向いている。断面 IV で観察した結果もこの位置では流れが軸方向に向うことを示しており、旋回流の成分は干渉のため上下左右とも打ち消された

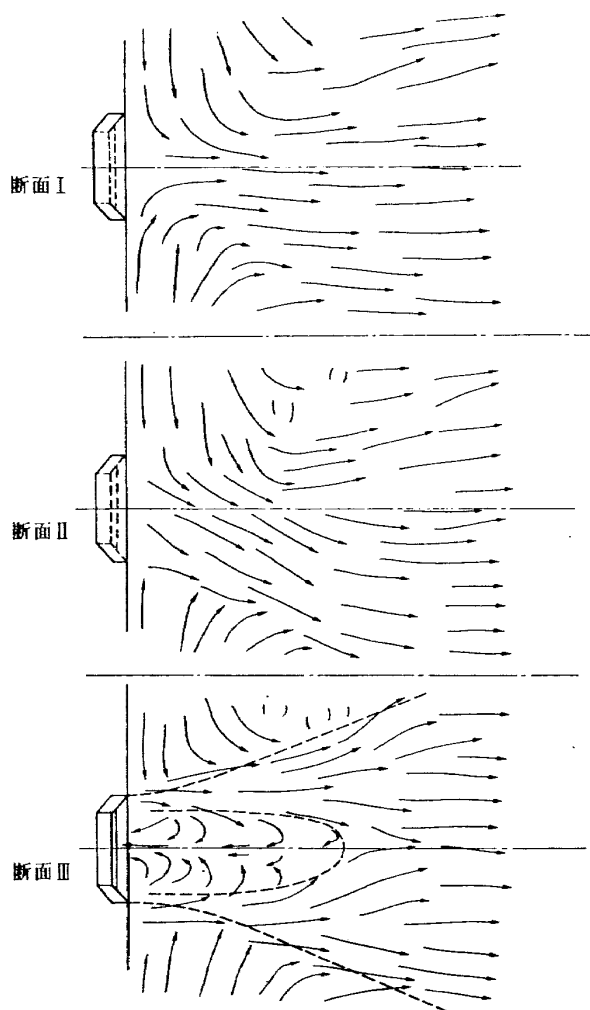


図 62 (a) スワラの流れ模様 (3 個直列の場合)  
55/37, 45, 43φ 盲付,  $\Delta P=100$  mmHg  
スワラ間ピッチ 85 mm

形になっている。スワラ間のピッチをつめるとスワラ相互の干渉が上流側から行なわれるようになり、この軸方向の流れは隔壁板に近い位置から認められる

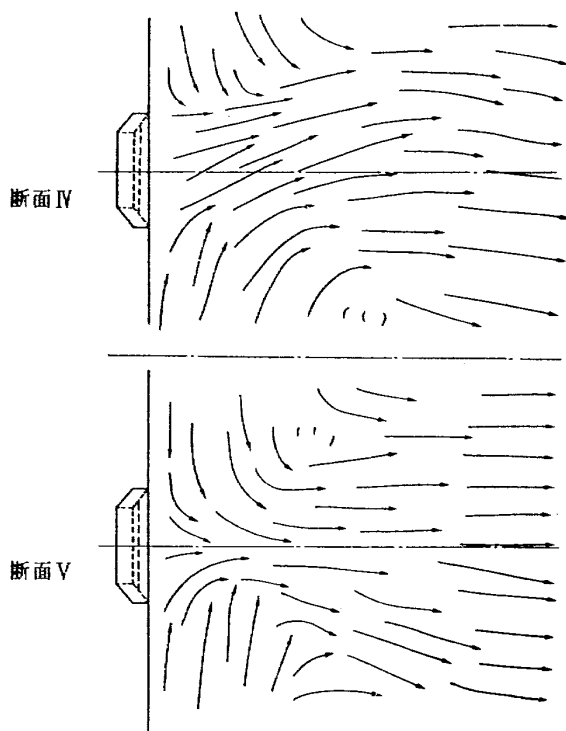


図 62 (b) スワラの流れ模様 (3 個直列の場合)  
55/37, 45, 43  $\phi$  盲付,  $\Delta P=100$  mmHg  
スワラピッチ 85 mm

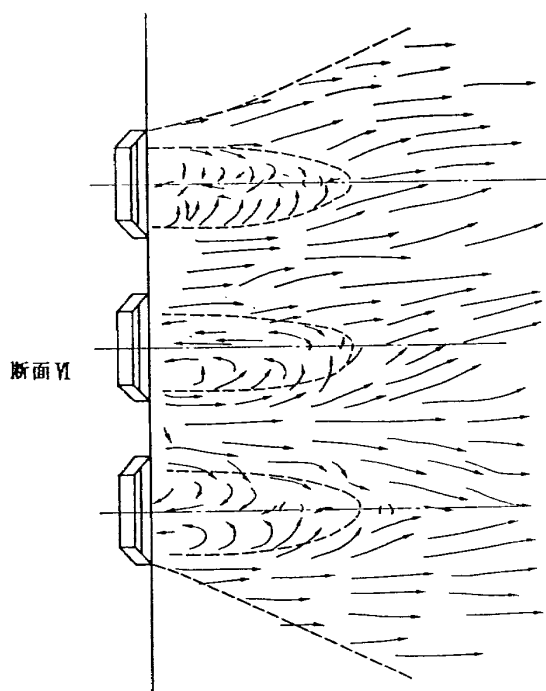


図 62 (c) スワラの流れ模様 (3 個直列の場合)  
55/37, 45, 43  $\phi$  盲付,  $\Delta P=104$  mmHg  
スワラピッチ 85 mm

ようになる。

断面 II は隔壁板の近くでスワラの旋回方向をはっきり示す。スワラ間のピッチを 74 mm につめたとき、中心線のところで旋回流の成分が強く、軸方向の成分の弱い流れが出現した。この流れの部分はスワラ間のピッチをつめたとき断面 II が相対的にスワラの中心軸に近ずき、盲リングの外径より中心軸側へ移動したとき認められ、これより中心軸側で逆流が存在しているを示す。

断面 III ではスワラコアがはっきり示されており、このコアの長さは 100~120 mm の範囲にあり、火炎保持状態から得た図 30 と一致している。スワラ間のピッチを 74 mm と 85 mm に変えても差異は大きくはない。またコアの径もこの程度のピッチの変化量ではあまり変わらないが、その大きさは単独の場合より長さも径も小さくなっている。

断面 IV ではスワラの旋回方向が逆な向きに現われる以外は断面 II と同様な傾向が得られた。

断面 V では断面 I と全く一致した傾向が示されている。

断面 VI は各スワラを直列にならべた状態の断面をとっており、ほぼ大きさの等しいスワラコアが 3 個形成されていて、その大きさは単独のスワラにおける大きさより小さくなっている。スワラ間の中間の位置ではスワラ相互の干渉のため軸方向に向う流れになっている。

各断面における流れ模様の観察結果によると、スワラから 150 mm 位下流側では旋回流の弱くなっていることが認められ、全般にスワラを 3 個直列に並べたため単独の場合に比べて旋回が妨げられ軸方向の流れが強くなること、スワラコアの大きさが小さくなることに特徴がある。実験を行なった 55/37, 45, 43  $\phi$  盲付スワラに比べて単独の流れ模様では流れの広がり角の大きかった S-20 や 60/37, 45, 43  $\phi$  盲付スワラに対しては、本実験と同一のスワラ間ピッチでも干渉の程度が強く、スワラコアの変化はより大きいものと思われる。全体に肉眼で観察した結果によると、スワラを 3 個直列にならべたために、流れが下流側から見て上側では左向きに、下側では右向きに向って流れる傾向が認められた。

### 3.5.3 3 個直列にならべ上下に側板を取りつけた場合の流れ模様

55/37, 45, 43  $\phi$  盲付スワラを 3 個直列水平にならべた 3.5.2 の状態に、さらに上下に燃焼器のライナ

に相当する側板をとりつけ、図 61 に示す断面の I ～ V までに対して流れ模様を求めた。上下側板の間隔は、隔壁板部分にて 85～120 mm の範囲内で流れ模様に大きな影響をもたない。側板が鉄板製であるため断面 VI に対する流れ模様は写真撮影が困難であり省略した。スワラ間のピッチは 74 mm とした。スワラの入口側と出口側の静圧差を 50 mmHg と 99 mmHg にとって観察したが差異は認められなかった。差圧 50 mmHg のときの流れ模様を図 63 に示し、各断面の特徴を以下に検討する。

全体に上下側板をとりつけた結果、側板に沿ってスワラの軸方向および軸に垂直な方向に流れる傾向が強く、側板のない場合に比べてスワラコアの径は大きく長さは短くなり、コーナ部にうずができる。

断面 I では上下にほぼ対称な流れが認められ、スワ

ーラをとりつけた隔壁板と上下側板とでつくられるコーナ部のうずはわずかに上側で大きく、スワラからの軸方向の流れは下向きになっている。これは上下に側板があって左右にはないため、断面 I では側板に沿って水平かつスワラ軸に垂直方向の流れが上側でスワラ 2 個分の流量、下側では 1 個分の流量となるため上側で多いからである。コーナ部のうずのためスワラからの流れはスワラより下流側 60～80 mm で上下側板の方へ向かい、さらに下流側では側板に沿う流れが強く中央部下流側の流れは弱くその向きは乱れる。

断面 II ではスワラ相互の干渉のため中心より上側に一部スワラコアの流れが認められ、上下側板をとりつけたためにスワラコアは側板の無いときに比べて左右に広がった状態になることを示している。スワラからの軸方向の流れは旋回方向の関係で下側の方が強く、コーナ部に存在するうずは断面 I よりその大きさが小さくなっている。

断面 III では側板をつけたため流れの広がり方が大きくなり、スワラコアが上下にも広がることを示しており、スワラコアはスワラの中心軸よりわずかな形状の差異などの影響によって上下どちらかへ動くが図では上側へ移動しているのが認められる。はっきり

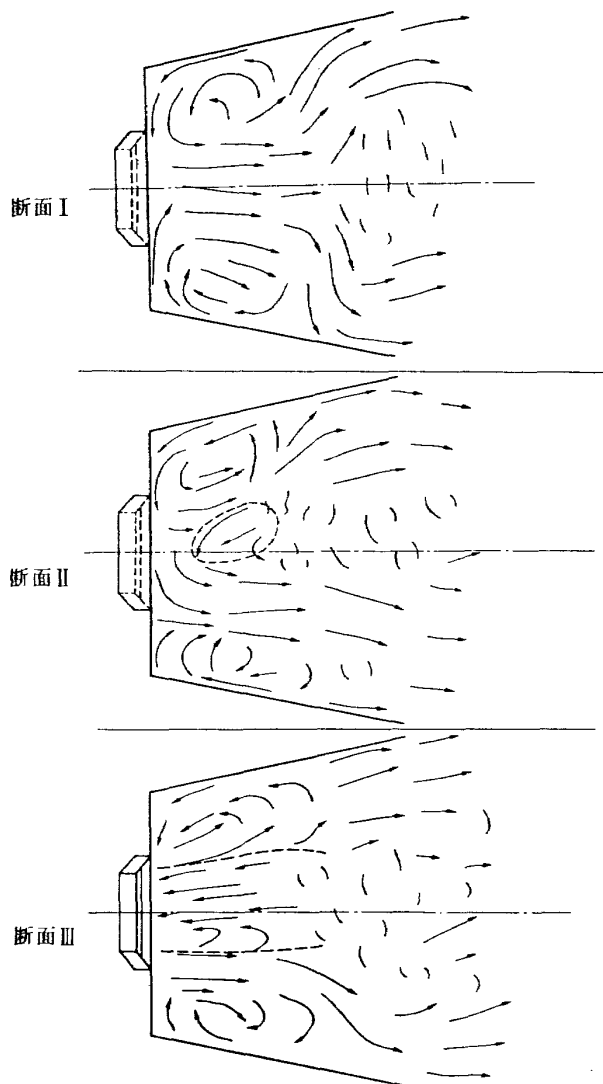


図 63 (a) スワラの流れ模様  
(3 個直列, 上下側板つき)  
55/37, 45, 43  $\phi$  盲付,  $\Delta P=50$  mmHg  
スワラ間ピッチ 74 mm

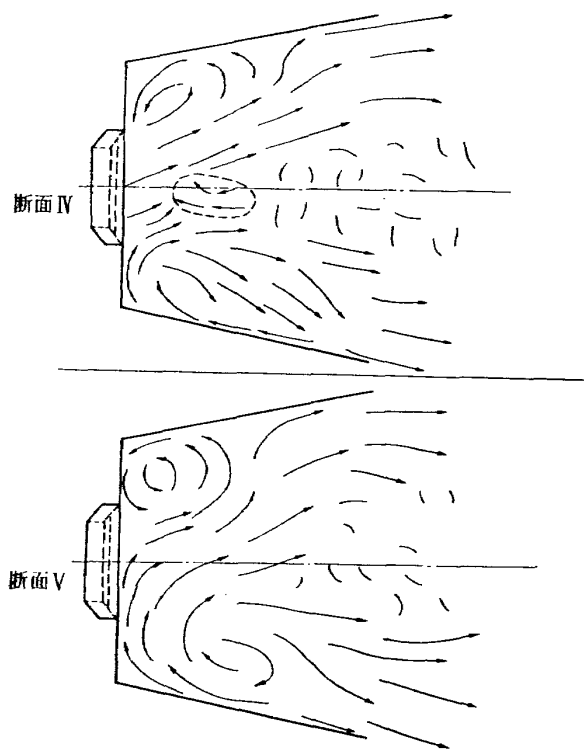


図 63 (b) スワラの流れ模様  
(3 個直列, 上下側板つき)  
55/37, 45, 43  $\phi$  盲付,  $\Delta P=50$  mmHg  
スワラ間ピッチ 74 mm

した逆流の認められる領域の長さは約 80 mm で側板のないときより短かく、その下流側は、方向の乱れた弱い流れであり、スワラコアの下流端の位置は明確でない。コーナ部のうずは他の断面と同様に存在するが、そのスペースは最も狭い。

断面Ⅳではスワラコアの一部が中心より下側に認められ、スワラからの流れが上側で強くなっているのは、ちょうど断面Ⅱと逆の傾向である。

断面Ⅴは断面Ⅰと同様なことが言え、下側コーナ部のうずのスペースが広く、軸方向の流れが上向きになるのは断面Ⅰとスワラ軸に関して対称な位置にあるためである。

### 3.5.4 スワラからの流れの強さと方向

3種類のスワラの代表的な流れに対してその強さと方向を求めたので以下に示す。スワラからの空気の流れは中心軸近くで逆流が存在してスワラコアを形成し、その周囲は次第に中心軸へ向う流れから外向きの流れへと向きが変わり、さらに速さも変わる複雑な流れである。

ここでは、スワラ羽根部から下流側へ向う流れの中で最も速度の大きい部分の動圧をとり出し、スワラ軸方向の距離に対するその方向や大きさの変化を調べた。

測定に際してはストリーマで流れ方向を求めるとともにピトー管で動圧の最も大きいところを求めてその位置で測定を行なった。測定した位置は図 64 に示すようにスワラの端面からの距離  $x$  と、スワラ軸に垂直な断面における軸の中心から測定点までの距離  $r$  で表示し、流れの方向は軸方向となす角度を  $\lambda$  とし軸に垂直な断面では図に示す角度を  $\mu$  として求めた。流れの強さはピトー管で動圧を測定して求めたが、差圧の表示には水銀マノメータを用い大気圧との差で読みとりを行なった。スワラの入口側と出口側との間の差圧を 50~300 mmHg に変えて各位置で測定した。測定方法がきわめて大まかであるのにもかかわらず、

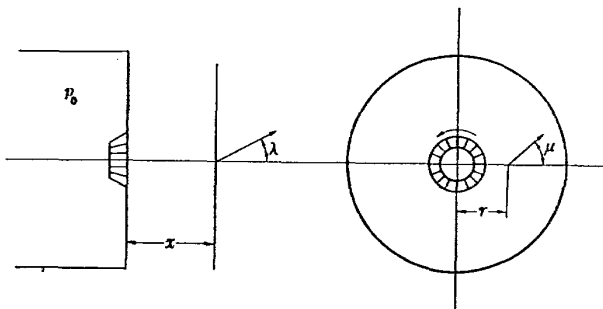


図 64 流れを測定した位置と角度

表 5 スワラからの流れの強さと方向

スワラ	$x$ mm	$r$ mm	$\lambda$ deg	$\mu$ deg	$P_d/P_0$	$v_a$	$v_c$	$v_r$
52/38, 45 (S 20)	10	26	40	60	0.75	0.72	0.60	0.35
	20	27	30	60	0.42	0.83	0.48	0.28
	50	32	25	70	0.13	0.90	0.42	0.15
	100	45	25	60	0.03	0.88	0.41	0.24
55/37, 45, 43 $\phi$ 盲付	10	26	30	115	0.85	0.86	0.50	-0.13
	20	27	20	115	0.68	0.94	0.34	-0.09
	50	31	25	90	0.26	0.90	0.42	0
	100	47	15	75	0.05	0.97	0.26	0.07
60/37, 45, 43 $\phi$ 盲付	10	26	35	110	0.88	0.88	0.56	-0.20
	20	26	35	100	0.60	0.82	0.57	-0.10
	50	26	35	100	0.20	0.82	0.57	-0.10
	100	33	20	95	0.07	0.94	0.34	-0.03

測定した動圧と方向からは一定の傾向が示された。以下にそれらの結果を表および図で示し検討する。

測定点の軸方向の距離  $x$ 、半径方向の距離  $r$ 、角度  $\lambda$  と  $\mu$  および動圧  $P_d$  とスワラ入口側と出口側との間の圧力差  $P_0$  との比  $P_d/P_0$  を表 5 に示す。同時にこれらの角度から得られたスワラの軸方向の速度  $v_a$ 、軸に垂直な断面の円周方向の速度  $v_c$  および半径方向の速度  $v_r$  の大きさを示す。ただし全体の流速  $v$  を 1 の大きさにとって無次元化した値で示してあり、 $v_r$  が正の値のときは中心軸より外側へ、負の値のときは逆の方へ向うようにとっている。速度  $v_a$ 、 $v_c$ 、 $v_r$  は角度  $\lambda$  と  $\mu$  からつぎの式で求めたものである。

$$v_a = \frac{v}{\tan \lambda \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \lambda} + \frac{1}{\tan^2 \mu}}}$$

$$v_c = \frac{v}{\sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \lambda} + \frac{1}{\tan^2 \mu}}}$$

$$v_r = \frac{v}{\tan \mu \sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \lambda} + \frac{1}{\tan^2 \mu}}}$$

縦軸に各点の動圧  $P_d$  とスワラ入口側と出口側との間の圧力差  $P_0$  との比  $P_d/P_0$  を、横軸に軸方向の距離  $x$  をとると図 65 のようになる。 $P_d/P_0$  の値は距離  $x$  に対してほぼ指数関数的に減衰することが認められる。 $x=100$  mm のところで直線から外れるのはスワラコアの長さがちょうどその辺までなので流れの場が変わるためと考えられる。スワラの羽根の間は理想状態では全体にほぼ  $P_0$  に等しい動圧で流れるが実際には羽根の表面近くで流れのはがれが起こったり境

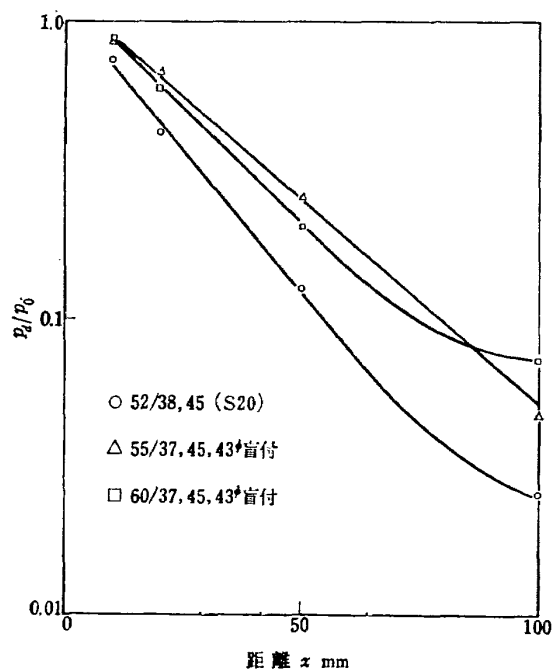


図 65 スワアラからの流れの強さ

界層ができるために、 $P_0$  が大きくなるほど各点の  $P_d/P_0$  の値が大きくなり、次第に一定の値に達する。図と表では  $P_d/P_0$  の値が一定の値に達してからのデータを採用している。 $P_d/P_0$  の値はスワアラからの流れの広がり方に逆比例するものと考えられ、流れ模様の観察で広がり角の小さかった 55/37, 45, 43φ 盲付スワアラではその値が大きく、広がり角の大きかった 52/38, 45 スワアラ (S20) では最も小さい値が示されている。

表 5 に示した速度  $v_a$ ,  $v_c$ ,  $v_r$  の値をプロットしたのが図 66 である。図に示すように  $v_a$  は三方向の速度のうち最も大きく下流側へ行くにしたがって 1 に近い値をとり、 $v_c$  は上流側で 0.5 付近の値を持ち下流側へ行くにしたがい低下する。 $v_r$  は 52/38, 45 スワアラでは常に正の値をとり流れがすぐ広がることを示すが、55/37, 45, 43φ 盲付と 60/37, 45, 43φ 盲付スワアラに対しては上流側で負の値をとり、強い流れがスワアラ中心軸の方へ向うことを示し、その程度は 60/37, 45, 43φ 盲付スワアラの方が強い。この現象は流れ模様の観察結果に対して検討したようにスワアラのコーン角度の大きさに基づくものである。

スワアラからの流れはピトー管で測定できる平均的な流れと時間的に変動する乱れからなっており、乱れの大きさは燃焼速度に大きな影響をおよぼす。スワアラからの流れの影響をより詳しく知るには乱れの測定が不可欠であり、熱線風速計を用いて乱れの測定を行なうことが今後の課題である。また、平均的な速度分

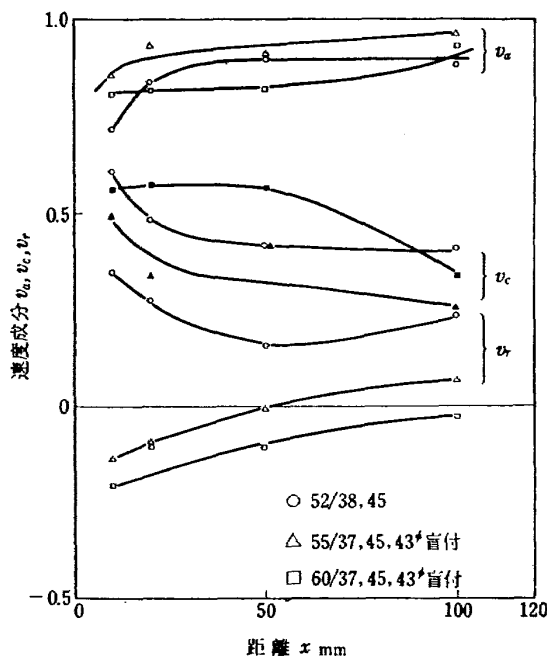


図 66 スワアラ出口の各方向の速度成分

布やスワアラ軸に沿った圧力分布も測定してスワアラコアの構成との関連を明らかにすることも必要である。これらの状態を明らかにした上でさらにスワアラ相互の流れの干渉、ライナにとりつけたときの流れ、ライナ空気孔からの流れとの干渉を定量的に明らかにするにはさらに多くの実験が必要であり、今回はその第一段階として最も単純な例に対して簡単な測定を行ない、その結果を示したものである。

#### 4. スワアラを用いた一次燃焼領域の性能

##### 4.1 スワアラ付近のライナ空気孔の設計

スワアラ付近のライナ空気孔の設計は、前節までの結果を利用すればよいわけである。空気孔をあければ、その大きさに比例した空気が入るものと仮定してみると、つぎのような空気孔配分が考えられる：

(1) スワアラ取付板 (隔壁板) から 20 mm 以内のライナに空気孔をあけるのは、よくない。25 mm 以上で小さな空気孔 (4~5 mmφ) をあけるのは良い。大気圧下の実験によると、保炎性能からみて、この小孔のピッチ  $p$  は、4 mmφ のとき  $p=15$  mm, 5 mmφ のとき  $p=20$  mm 程度が適当である。

(2) 比較的大きな空気孔 (15~20 mmφ) を、 $l$  (隔壁板からの距離) = 40~50 mm の所にあけるとよい。この孔は、案内筒なしの場合、空気流が後流側に向ってあまり効果がなく、高い案内筒を立て、貫通距離を増し、スワアラコアまで達するようにするのが効果的である。実際は、案内筒を立てても、前流側に戻る逆



流をつくるのは、小部分である。しかし、この所に、あまり多く空気を送るのは、冷却作用が大きくなって、好ましくない。

(3) この  $15\sim 20\phi$  空気孔のスワアラ軸方向からみた位置は、有効外径  $55\phi$  スワアラに対して、スワアラ中心から旋回を強める方向に  $5\text{ mm}$  以内 ( $0.1d$  以内)までであって、 $10\text{ mm}$  にすると、スワアラ中心に長くのびる、うずを巻くコアが生じた (旋回角  $45^\circ$  スワアラを使用)。また、旋回を弱めるようにあけてもよくない。これから、旋回角  $45^\circ$  程度のスワアラでは、スワアラ中心に合せておくほうが無難なようである。図 67 に空気孔中心位置の適当な範囲を示す。

(4) この  $15\sim 20\phi$  空気孔は、少くとも軸方向に 2 個並べてあけること。このように配置したときのほうが、前流側に戻る空気の割合が多いようにみられる。この 2 個は、ライナの強度が許すかぎり、つめておきたい。

(5) 積極的に逆流を形成するような、U字形やT字形のパイプをつけるのは、有効である (図 68)。例として内径  $9.5\text{ mm}$ 、パイプロー隔壁板間  $50\text{ mm}$  の U 字形逆流パイプで実験したところ、予想通りの良好な性能が得られた。このような長い管の冷却については、多くの問題があるけれども、この実験は、大気圧状態

で行なったため、冷却に関する状態はわからなかった (図 69)。

(6), (5)を除く以上の結果から、一次燃焼領域のライナ空気孔を設計した例を図 70 に示す。

#### 4.2 一次燃焼領域のみの模型による実験

燃料噴射弁 3 個をもつ、図 71 のような一次燃焼領域のみの模型を試作し、各種のスワアラ、ライナの性能を調べた。

この模型の大きさは、別に実験を行なっている箱形燃焼器模型<sup>3)</sup>の一次燃焼領域相当である。箱形燃焼器模型のとき、出口大気解放状態で、最大断面平均風速  $30\text{ m/s}$  が、空気流量  $2.1\text{ kg/s}$  に対応するから、設計

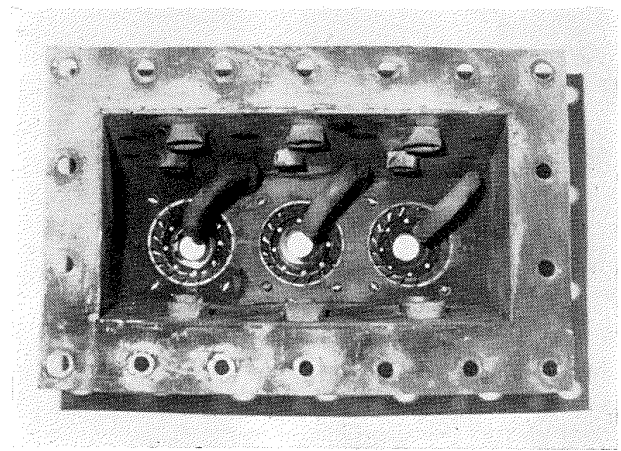


図 69 逆流パイプ付燃焼器 (II)

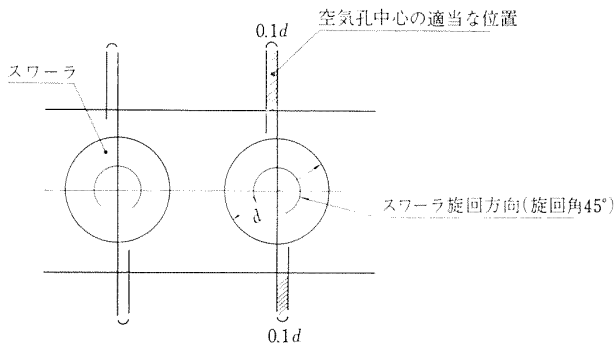


図 67 スワアラ旋回方向とライナ空気孔中心位置

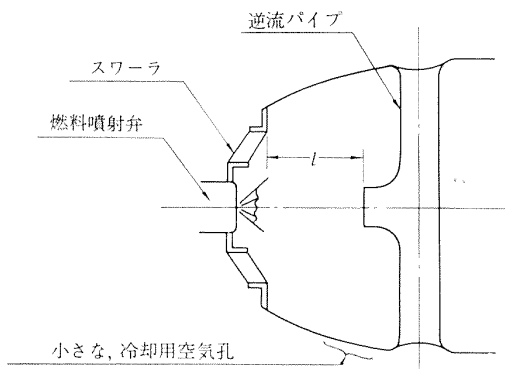
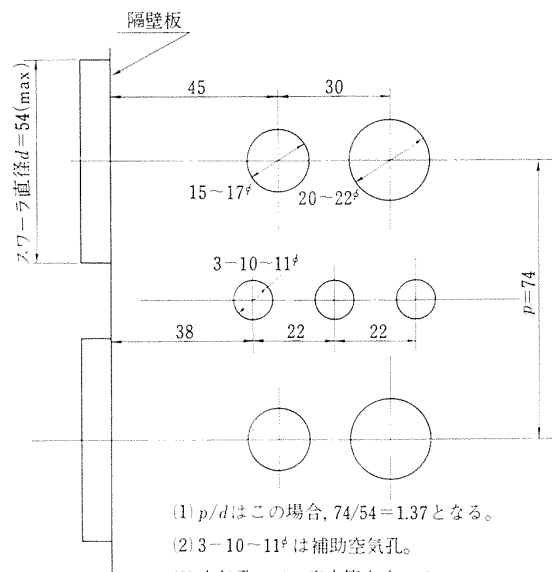


図 68 逆流パイプ付燃焼器 (I)



- (1)  $p/d$  はこの場合、 $74/54=1.37$  となる。
- (2)  $3-10-11\phi$  は補助空気孔。
- (3) 空気孔には、案内筒を立てる。
- (4) 隔壁板から  $25\sim 30\text{ mm}$  の所に  $4\sim 5\phi$  空気孔をあけてもよい。
- (5) 空気孔は、上下対称にする。
- (6) 上下ライナ間隔は、 $120\text{ mm}$  程度 (図 80 参照)。

図 70 一次燃焼領域のライナ空気孔配置例

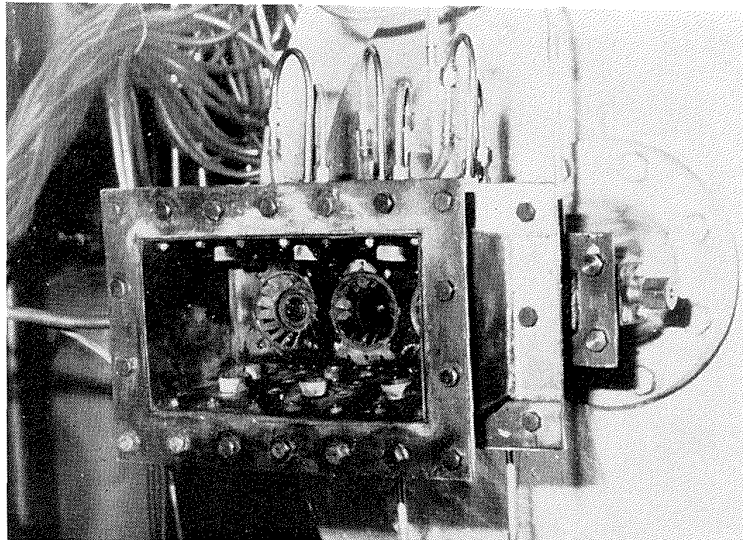


図 71 一次燃焼領域の模型

点の空燃比を 55 とし、一次燃焼領域の空燃比を 12 に仮定すると、全体の 21.8% すなわち 0.46 kg/s 程度の空気を一次燃焼領域に流す必要がある。燃料流量は、0.038 kg/s となる。この一次燃焼領域の空燃比 12 という値は、つぎのことから見積った。すなわち、液体燃料を噴射する燃焼器では、実験によると、空燃比 10 程度までほぼ安定にもえ、空燃比 7 になっても火炎の残ることがある。このことから、実際の作動状態では、空燃比は 10 を少し超す程度と考えられ、この模型の実験状態もほぼこれに合せた。ただし、燃料流量は、実験の都合上、幾分少な目の 0.035 kg/s に設定した。実験は、燃料流量を一定に保ち、空気流量をかえて状態の変化を調べた。観察項目はつぎの通りである：

- (a) スワラコア内の火炎の様子
- (b) スワラコアの広がり
- (c) 燃料噴霧のコーンがみえるかどうか
- (d) 隔壁板上で保炎しているかどうか
- (e) ライナ壁面上が、燃料によってぬれているかどうか
- (f) ライナ壁面上に、火炎がついているかどうか
- (g) ライナ壁面上の火炎の色、特に、燃料過濃に  
もとづくと思われる黄緑色の火炎があるかどうか
- (h) 横方向からみて、一次燃焼領域出口の火炎の  
色と長さの分布状態

この全項目を比較して示すのは困難であるから、実験結果として性能を示す一つの目安となる、空気流量を増した場合の火炎安定限界についてまとめて、表 6 に示す。ライナは、JR-100 相当の空気孔形状にしたものが多く、この場合、空気孔形状の影響のチェック

もかねて、空気孔を少しかえたものについても試験した。なお、表 6 中 JR-100 相当 (c) は、他のライナより空気孔面積を多くとっている。表 6 について、実用限界 A は、火炎がスワラおよびライナ壁面上によく分布して安定にもえる限界を示し、安定限界 B は、火炎がスワラコアのみに存在するか、または火炎の一部分が不安定になっているが、全体としては安定にもえる限界を示す。安定限界 B をこすと、一次燃焼領域全体にわたる火炎の不安定な振動がみられ、やがて吹き消える。吹消限界 C に 2 種の数字のあるのは、初めのものが 3 個の供試スワラのうち、1 個または 2 個が吹き消えた限界、後のものが、全部吹き消えた限界を意味する。( ) 内の数字は、推定値である。

表 6 から、つぎのような事柄が判明する：

- (i) 一次燃焼領域の空燃比を 12 以上とするには、表 6 の数値で 0.46 (kg/s) 以上が得られていればよいことになる。ほとんどのものが、A 限界でこれを満足している。
- (ii) 全般に、A 限界の大きなものは、燃焼効率が良いと推定され、A 限界と B 限界または C 限界のはなれているものは、安定していても火炎の分布が悪く、燃焼効率が低下するものと推定される。
- (iii) スワラ外径の影響を、スワラピッチ 85 mm の場合 (f) についてみると、外径 55 φ、58 φ、60 φ すなわち No. 31、No. 36、No. 41 では、58 φ がもっとも良い性能を示し、60 φ では少し低下している。スワラ単独試験からみて、60 φ スワラの性能低下は、相互干渉によるものとみられるが、火炎の観察ではほとんどわからない。

表 6 一次燃焼領域のみのモデルによる性能比較  
(数字は空気流量 kg/s を示す, 大きな数字のもののほうが, 安定性が優れている)

(a) スワローピッチ 74 mm, ライナ JR-100 相当 (a)

番号	スワロー名称	実用限界 A	安定限界 B	吹消限界 C	摘要
1	S 10 (JR-0)		0.61	0.75	
2	S 10' (JR-0)	0.44	0.54	0.66	
3	S 20 (JR-0)	—	—	—	火炎が安定せず測定中止
4	S 20, 2-9×2.5 h 付 (JR-0)	0.68	0.73	0.83	h の方向は, \
5	S 20, 2-9×2.5 h 付 (JR-0)	(0.50)	0.53	0.60	h の方向は, / (4) と逆向き
6	S 21, 2-9×2.5 h 付 (JR-0)	0.65	0.72	0.82	h の方向は, \
7	55/37, 45 (JR-100)	0.73	0.77	0.93	
8	55/37, 45, 41.5 φ 盲付 (JR-100)	0.60	0.70	0.78	
9	55/37, 45, 43 φ 盲付 (JR-100)	0.46	0.64	0.68	0.77
10	55/37, 45, 43 φ 盲, 8-2.5 切欠付 (JR-100)	0.53	0.59	0.71	安定限界前の火炎の様子は良好
11	55/37, 45, 2-9×2.5 h 付 (JR-100)	(0.57)	0.67	(0.85)	h の方向は, \ スワローの相互干渉が少しある
12	55/37, 45, 2-8×2.5 h 付 (JR-100)	0.58	0.67	0.80	h の方向は,
13	55/43, 45, 8-3 φ 孔あけ (JR-100)	0.52	0.57	0.61	火炎が不安定で振動しやすい
14	55/37, 40 (JR-100)	0.68	0.79	0.97	
15	55/37, 40, 2-9×2.5 h 付 (JR-100)	0.79	0.83	0.93	
16	60/37, 40, 42 φ 盲付 (JR-100)	—	—	—	スワローの相互干渉がいちぢるしく, 火炎安定せず

(b) スワローピッチ 74 mm, ライナ JR-100 相当 (b)

番号	スワロー名称	実用限界 A	安定限界 B	吹消限界 C	摘要
17	S 21, 2-9×2.5 h 付 (JR-0)	0.40	0.64	0.74	
18	55/37, 45, 2-9×2.5 h (JR-100)	0.69	0.78	0.87	
19	55/37, 45, 2-9×2.5 h' 付 (JR-100)	0.74	0.80	>0.93	h': h の取付方法を改善したもの
20	54/37, 40 (JR-200)	0.61	(0.75)		
21	54/37, 40, 40 φ 盲付 (JR-200)		0.77		

(c) スワローピッチ 74 mm, ライナ JR-200 相当

番号	スワロー名称	実用限界 A	安定限界 B	吹消限界 C	摘要
22	54/37, 40 (JR-200)	0.65			
23	54/37, 40, 40 φ 盲付 (JR-200)	0.65			
24	54/37, 40, 41.5 φ 盲付 (JR-200)	0.62			
25	54/37, 40, 43 φ 盲付 (JR-200)	0.50			

(d) スワローピッチ 74 mm, ライナ AB 型相当

番号	スワロー名称	実用限界 A	安定限界 B	吹消限界 C	摘要
26	55/37, 45, 41.5 φ 盲付 (JR-100)	0.50	0.57	0.66	火炎の様子は良好であるが, 安定限界の流量は少ない

表 6 のつづき

(e) スワーラピッチ 74 mm, ライナ AB 型相当, 9.5 $\phi$  逆流パイプ付

番号	スワーラ名称	実用限界 A	安定限界 B	吹消限界 C	摘 要
27	55/37, 45 (JR-100)	0.64	0.70	0.77	{空気流量の少ないとき, 特に火炎状態が良好
28	55/37, 45, 2-8 $\times$ 2.5 h 付 (JR-100)	(0.43)	(0.49)	0.58	
29	55/43, 45, 8-3 $\phi$ 孔あけ (JR-100)	(0.52)	(0.56)	0.73	

(f) スワーラピッチ 85 mm, ライナ JR-100 相当 (c)

番号	スワーラ名称	実用限界 A	安定限界 B	吹消限界 C	摘 要
30	S 30 (JR-0)		(0.72)		火炎が不安定で騒音を発する
31	55/37, 45, 43 $\phi$ 盲付 (JR-100)		1.09	1.20	
32	55/43, 45, 8-3 $\phi$ 孔あけ (JR-100)		(0.72)		
33	55/37, 40 (JR-100)		0.58		火炎の状態良好
34	55/37, 40, 43 $\phi$ 盲, 8-2.5 切欠付 (JR-100)		0.75		
35	55/37, 40, 2-8 $\times$ 2.5 h 付 (JR-100)		>0.93		
36	58/37, 45, 42 $\phi$ 盲付 (JR-100)	1.1	>1.42		火炎の安定性きわめて良好 火炎の安定性がもっとも良い
37	60/37, 40, 44 $\phi$ 盲付 (JR-100)		0.76		
38	60/37, 40, 44 $\phi$ 盲, 2-11 $\times$ 4 h 付 (JR-100)		>0.78		
39	60/37, 40, 44 $\phi$ 盲, 3-22 $\times$ 4 h 付 (JR-100)		0.71		h の方向は, \
40	60/37, 40, 44 $\phi$ 盲, 4-11 $\times$ 4 h 付 (JR-100)		0.69		
41	60/37, 45, 43 $\phi$ 盲付 (JR-100)	0.9	1.04	1.33	

(iv) スワーラ旋回角は, 40 $\sim$ 45 $^\circ$  では, 45 $^\circ$  のほうがすぐれている。

(v) スワーラ盲リングの影響としては, (c), No. 22 $\sim$ 25 に代表されるように, 盲リング径を大きくするほど, 限界値が低下して現われる。

(vi) h 付は, 旋回角 45 $^\circ$  よりも 40 $^\circ$  のとき, よい効果をもたらす。ただし, この方法は, ライナ空気孔形状の影響を受けやすいようである (たとえば, No.6 と No.17 の比較)。h 板の取付方向は, 図 56 の状態がよい。また, この幅は 10 mm 程度あれば十分で, あまり広いと性能が低下する。

(vii) 図 70 相当のライナ AB 型は, 他のものと比較して, A, B 限界とも大きくはない。しかし, A 限界で 0.46 以上にはなっている。

(vii) 逆流パイプ付の場合, パイプなしで良い性能を示すスワーラについては, 良い効果をもたらさない。

## 5. 箱形燃焼器模型による実験結果<sup>3)</sup>

試験したスワーラの一部を, 実際の燃焼器に近い箱形燃焼器模型に組み込み, 全体性能を調べた。この模型の外観を図 72 に示す。これは, JR-100 燃焼器(後述)を二次元におきかえ, 模型化したものである。

このライナは, スワーラ後流との干渉をさけるよう空気孔を配置したもので, スワーラの比較に対しては, 適当なものと思われる (図 73)。

おもに, 燃焼効率特性について比較すると, つぎのようになった:

(1) スワーラ 55/37, 45, 43 $\phi$  盲付 (JR-100)

図 74 に燃焼効率特性を示す。図中 D 点は, 空燃比 55, 燃焼効率 96% の目標値を示したものである。これからこの燃焼器の設計点の空燃比 55 付近の効率は, 84%程度と見積られる。実用的なアニュラ形模型の結果と比較すると, 箱形では, 両端板からの熱損失などにより, 85%以上の効率が得られていれば, 十分なようである。ただし, 80%以下では, 実用性はうす

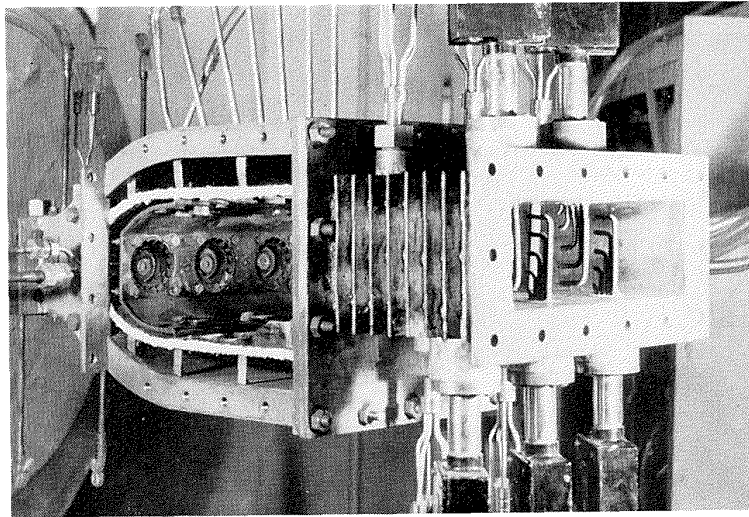
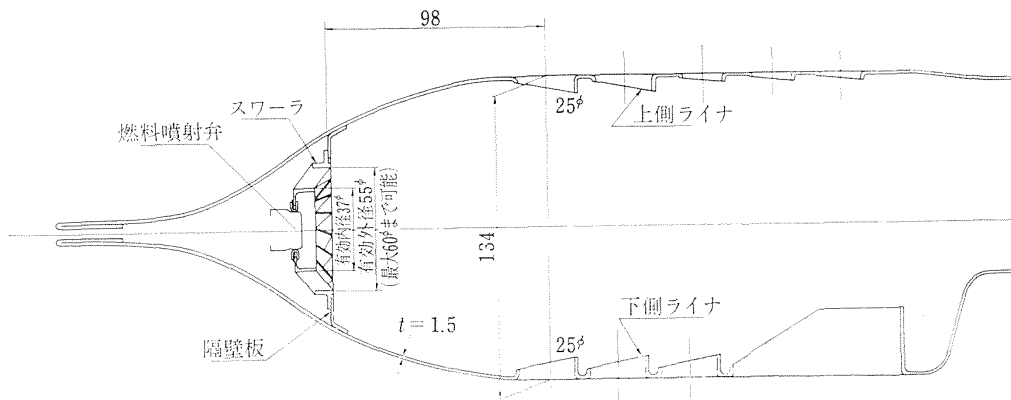


図 72 箱形燃焼器模型

図 73 箱形燃焼器模型 (ライナ  $I_3$ , JR-100 相当) 主要部分

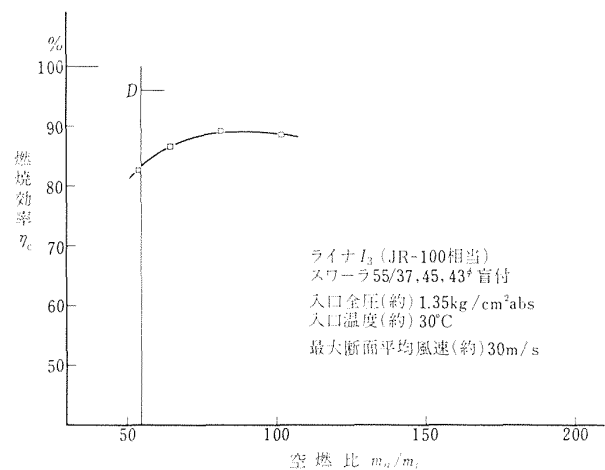
い。また、箱形模型は、アニュラ形にくらべ、空燃比の小さな所で、燃焼効率特性の低下が少くなる傾向を示している。

(2) スワーラ 55/37, 45, 2-8×2.5 h 付 (JR-100)

得られた結果を図 75 に示す。図 74 にくらべ、効率が 10% 程度低下し、空燃比 55 で約 75% になっている。しかし表 6 の No. 9 と No. 11 または No. 12 の燃焼効率と関連をもつ A 限界の比較では、43φ 盲付よりすぐれた結果を示している。この相違の理由として、一次燃焼領域のみの模型では構造上、スワーラから空気が多く入りやすい傾向を示すことおよびスワーラピッチの差 (74 mm と 85 mm) があげられるけれども、他の場合とくらべて例外と考えられるものである。なお、空燃比の影響は、設計点付近でも少なそうである。

(3) スワーラ 55/37, 40, 2-8×2.5 h 付 (JR-100)

このスワーラを用いたときの燃焼効率特性を図 76 に示す。設計点の空燃比約 55 において、効率の値は、

図 74 スワーラ 55/37, 45, 43φ 盲付の性能 (箱形燃焼器模型)<sup>3)</sup>

ほぼ 82% と (1) の場合より少し低い、(2) の場合より良い。このスワーラについて h なしまたは盲リング付の状態を実験していないため、直接の比較はできないが、図 76 と他のスワーラの結果との比較または表

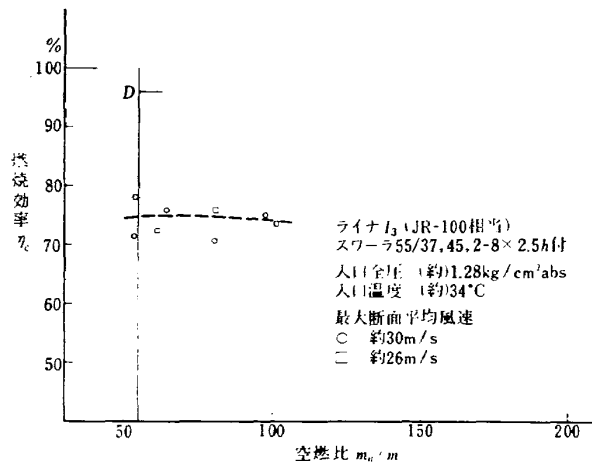


図 75 スワラ 55/37, 45, 2-8×2.5 h 付の性能 (箱形燃焼器模型)<sup>3)</sup>

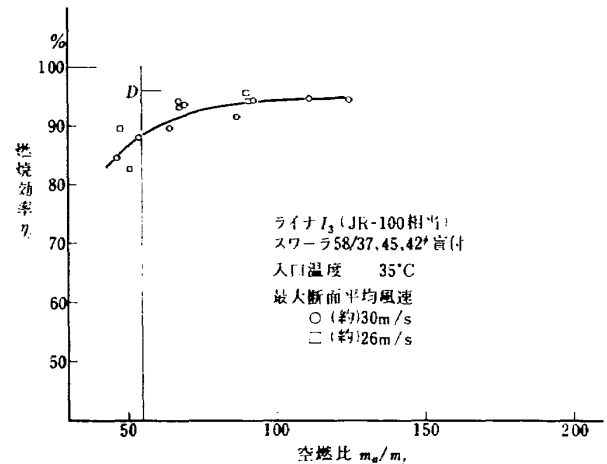


図 77 スワラ 58/37, 45, 42φ 盲付の性能 (箱形燃焼器模型)

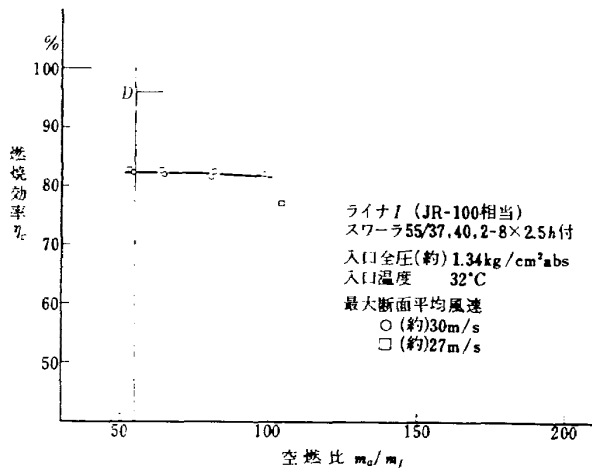


図 76 スワラ 55/37, 40, 2-8×2.5 h 付の性能 (箱形燃焼器模型)<sup>3)</sup>

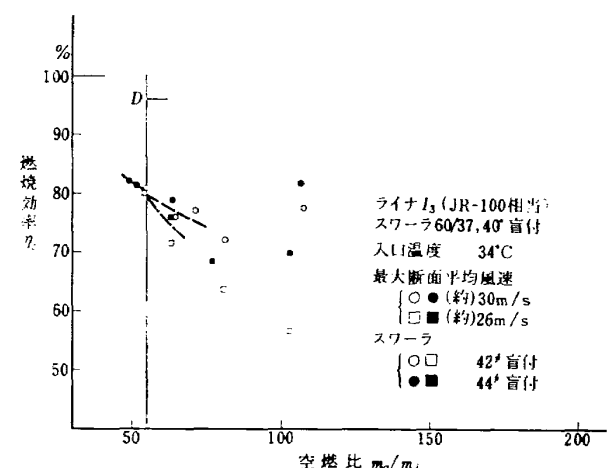


図 78 スワラ 60/37, 40° 盲付の性能 (箱形燃焼器模型)<sup>3)</sup>

6 から推定すると、このスワラでは、h 付にして、性能が向上するといえる。先の(2)の結果との相違は、スワラ旋回角の差にもとづくものである。空燃比の影響は、(2)と同様、実用範囲内で現われていない。

#### (4) スワラ 58/37, 45, 42φ 盲付 (JR-100)

図 77 に結果を示す。これによると、空燃比 55 付近で、効率の低下する傾向をもっているが、それでも 89% ともっとも良い性能を示し、他のスワラをアニュラ形模型に用いたときの値に近い。この理由は、ライナと組合せたとき、適当な流入空気量が得られ、相互干渉の少ない良好な流れ模様を形成しているためと思われる。このスワラは、スワラ単独試験の結果 (図 45 参照) もよく、表 6 の結果で、もっとも良好なものになっている。

#### (5) スワラ 60/37, 40, 42φ 盲付 (JR-100)

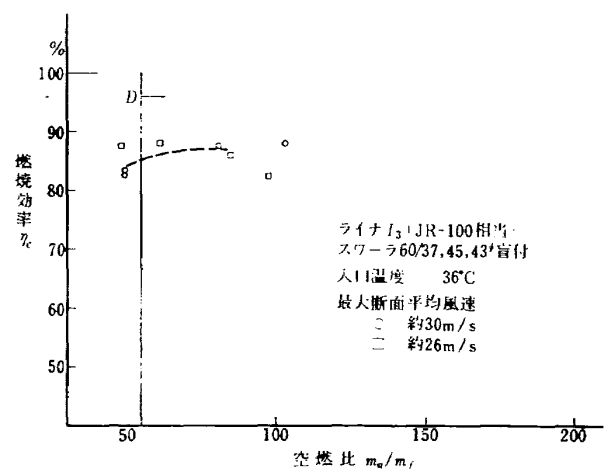


図 79 スワラ 60/37, 45, 43φ 盲付の性能 (箱形燃焼器模型)<sup>3)</sup>

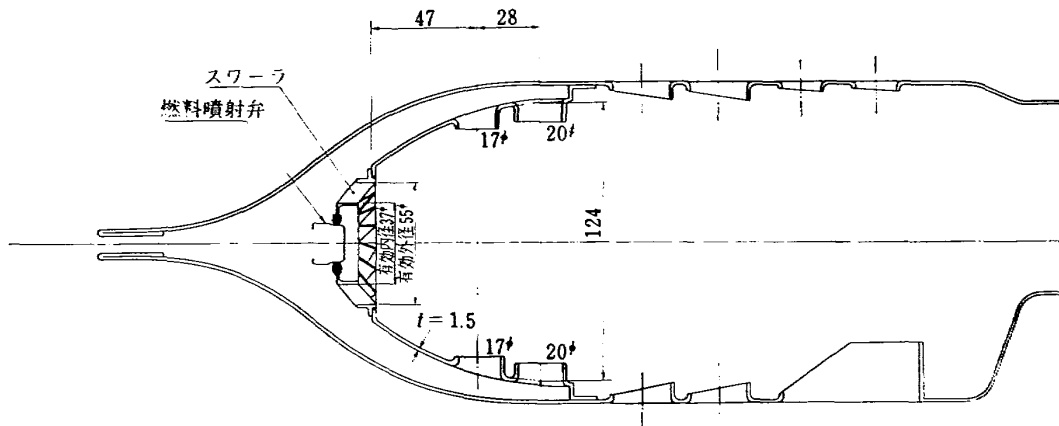


図 80 箱形燃焼器模型 (AB 型) 主要部分

この結果を図 78 に示す。スワール開口面積の増加によって、燃料の多い側で効率の上昇する傾向が現れたが、空燃比 55 で効率 80% と、あまり良い値ではない。空燃比を増すと、相当な効率の低下がみられ、空燃比 100 付近で再び上昇している。これは、他の実験結果にも現れることがあり、おもに最大断面平均風速の大きなときに起きる現象で、この場合、燃料はスワールコア内で大半がもえてしまうものと思われる。

#### (6) スワール 60/37, 40, 44φ 盲付 (JR-100)

(5)では、盲リングが小さいようであったため、外径を 2mm 増し、44φ にした。結果を図 78 に合せて示す。設計点付近の効率には差がなく、希薄側の効率の改善されていることが判明する。ただし、傾向はよく似ている。このスワールは、表 6 (f) の比較でも性能が劣っている。

#### (7) スワール 60/37, 45, 43φ 盲付 (JR-100)

図 79 にこれを示す。図 74, 77, 79 とくらべると、スワール外径の影響が判明する。有効開口面積は、それぞれ 6.53 cm<sup>2</sup>, 8.85 cm<sup>2</sup>, 9.64 cm<sup>2</sup> となっている。流れ模様は、55φ のものが盲リングの開口面積比が少し大きく幾分ことになっているほか、ほぼ同一といえる。図 79 の燃焼効率の性能は、図 74, 55φ のものと大差ないが、燃料の多い、空燃比の小さな側で低下が少なく、設計点で約 85% と少し良い。開口面積からみれば、上記のように相当な差はあるが、その影響は、あまり現れていない。図 79 と 58φ の図 77 とくらべると、60φ スワールでは、燃料の多い側で効率低下の割合は少ないが、効率の値自体は低い。これから、この 3 種のスワールについて、58φ がもっとも良いといえる。60φ のスワールでは、一次燃焼領域のみの模型試験結果と同様、スワールの相互干渉が、わずかではあるが、現れるようである。なお、60φ スワールを

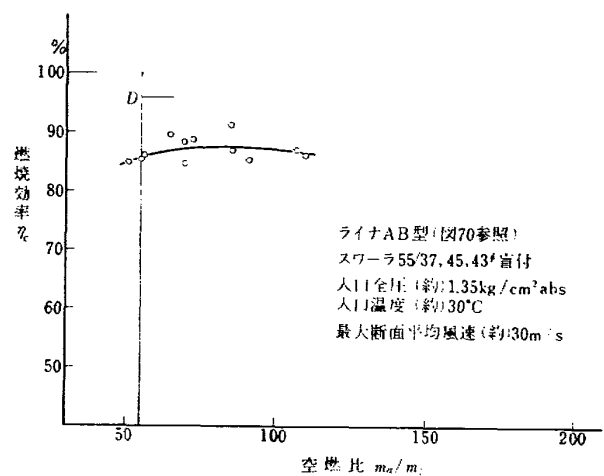


図 81 一次燃焼領域を改良したものの性能

使用したときの  $p/d$  値は 1.41 になっている。これら、スワール外径の影響は、表 6 に示された傾向とよく一致するものである。

#### (8) 図 70 の空気孔をもつライナの性能

スワールとライナ空気孔との関連性を調べた結果から導き出した図 70 の方式を用いて、箱形燃焼器模型の AB 型を設計した。図 80 にこの主要部分を示し、その燃焼効率特性を図 81 に示す。スワールは、図 74 のものと同じであるから、これと比較してみると、ライナの効果が判明する。図 81 から、空燃比 55 のとき、効率 86% と、ライナ JR-100 型にくらべて 2% ほど改善され、空燃比を 50 にしても、約 85% の効率を保ち、低下の傾向は少なく、空燃比 65 以下の実用上重要な意味をもつ範囲で、すぐれていることがわかる。空燃比の大きな側の性能も、低下していない。この AB 型模型の空気流量配分を測定した結果、先の、一次燃焼領域模型の相当部分に入る空気量は、全体の 24% 程度がよく、これを超すと振動燃焼の起きやすい

状態になった。これは、空気流量にして約  $0.5 \text{ kg/s}$  になり、表 6 (d) の A 限界と一致している。

(9) 箱形燃焼器の結果のまとめ

以上の結果をまとめてみると、スワラまたはライナについて、つぎのことが判明する。

- (a) 盲リングをつけるスワラは、旋回角  $40^\circ$  よりも  $45^\circ$  のほうがよく、スワラ外径は、干渉の起きない範囲で大きなものがよい。
- (b) 盲リングの大きさは、開口面積比にして、 $20 \sim 22\%$  以上にする必要はない。
- (c) h 付のスワラについては、旋回角  $45^\circ$  よりも  $40^\circ$  のほうがよい。空燃比を小さくしても効率の低下は少ないが、効率の値自体は、 $45^\circ$  盲付スワラより幾分低い。
- (d) スワラ後流との相互作用を考えたライナ空

気孔配置のものは、表 6 の結果では、特にすぐれたものになっていないが、箱形燃焼器模型としてまとめた形では、JR-100 型ライナよりも良好である。

- (e) スワラ 55/37, 45, h 付の場合をのぞき、一次燃焼領域のみの模型から得た A 限界の傾向と、箱形燃焼器模型から得た燃焼効率の性質は、定性的に一致している。

これらのことから、一次燃焼領域のみについて考えた場合、負荷の高い状態では、全体の燃焼効率を高く保つことと、安定な火炎を得ることとは相反し、表 6 の安定限界 B が良好なものは、燃焼効率の低下に注意しなくてはならない。ただし、類似した流れ模様をもつものについて、表 6 の限界の大きなものは、多量の空気を入れても火炎が安定しているという意味であるか

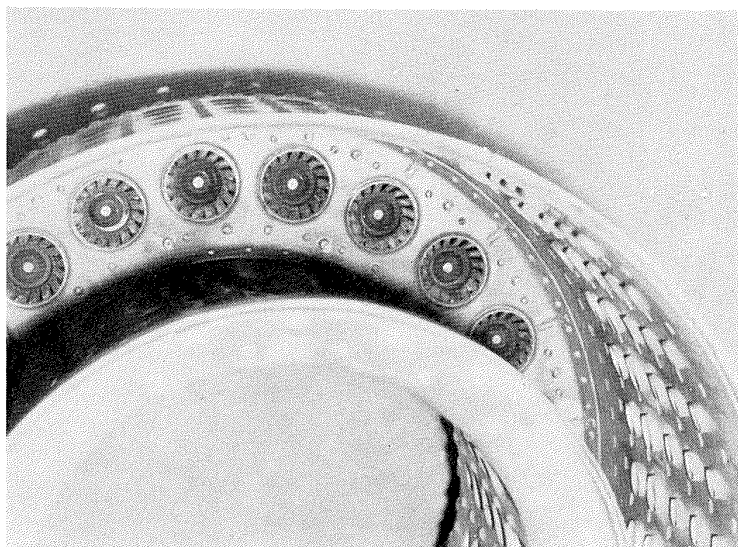


図 82 アニュラ形燃焼器のスワラ取付状態 (JR-200)

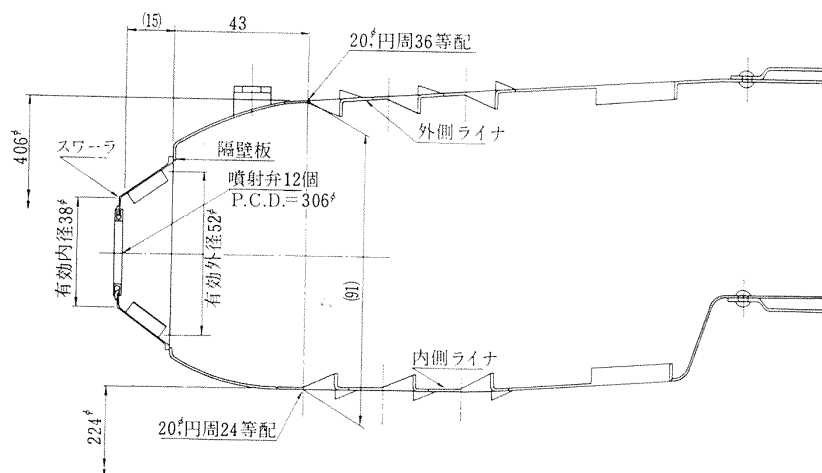


図 83 JR-0 燃焼器主要部分



ら、空燃比を小さくしたとき、性能低下の少ない、あるいは上昇するような傾向をもたせることができる。

実用の燃焼器を考える場合、設計点の空燃比または使用最小の空燃比を考え、この点まで安定な保炎を行ない得るようにすれば、あとは効率を高く保つよう心掛けるべきである。必要以上に燃料の多い側での保炎性能を良くすることは、効率の低下をもたらしやすい。

## 6. アニュラ形模型による実験結果

使用した模型は、JR-0、JR-100 および JR-200 の3系統のものである。これらの模型は、そのまま実用可能なものであり、したがって、この結果が実用上もっとも関係が深い。アニュラ形模型のスワラ取付状態を図 82 に示す。

### 6.1 燃焼効率について

#### (1) JR-0 模型<sup>5)</sup>

この燃焼器主要部分を図 83 に示す。実験結果からスワラの影響を調べてみるとつぎのようになる。

図 84 (a) と 84 (b) に、スワラ S10, S20,

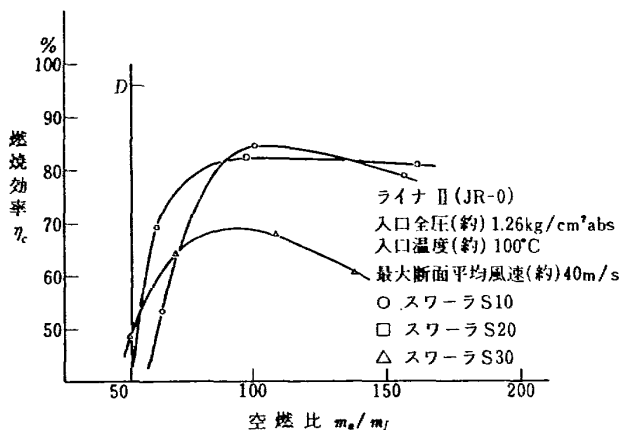


図 84 (a) スワラの影響 (JR-0) —— 燃焼効率<sup>5)</sup>

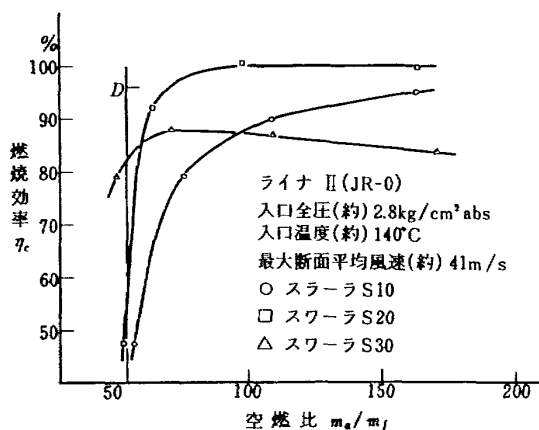


図 84 (b) スワラの影響 (JR-0) —— 燃焼効率<sup>5)</sup>

S30 の比較を示す。全般的にみて、S20 がもっともよく、空燃比の小さな側では、S30 がすぐれている。S10 は、空燃比の小さい範囲で、効率低下が他のスワラよりいちじるしい。これらの性能は、3.2 のことから推定できるものであり、スワラ単独試験結果の重要性を示している。

図 85 にスワラ S10 と S10' との比較を示す。ルーバを開くことによって流れ模様はあまりかわらないが、流入空気量が増加し、これにもとづく効率の改善が示されている。さらにルーバを開いた S10'' は、JR-0 模型で直接比較できる結果はないが、図 19 (b) から判断すると、性能が低下するものと思われる。

図 86 にスワラ S20 と S21, すなわち旋回角度の影響を示す。S21 は、旋回角が 35° と小さく、空気の流入量は、実質的に多くなっているが、空燃比の小さな所でも効率の改善はなく、スワラ後流側の流れ模様の悪化 (S21 のコアは、一度絞られた形になっ

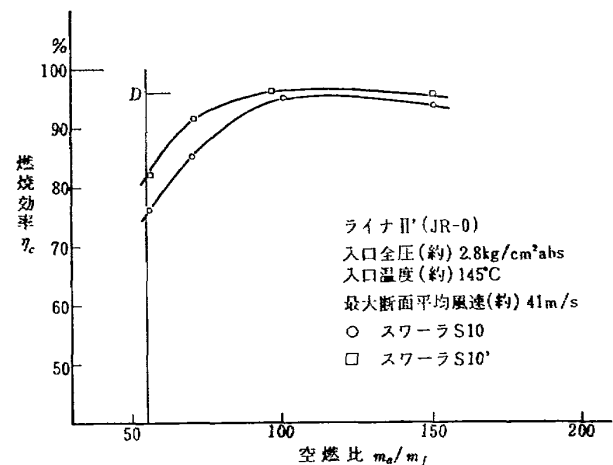


図 85 スワラ S10 と S10' の性能 (JR-0) —— 燃焼効率<sup>5)</sup>

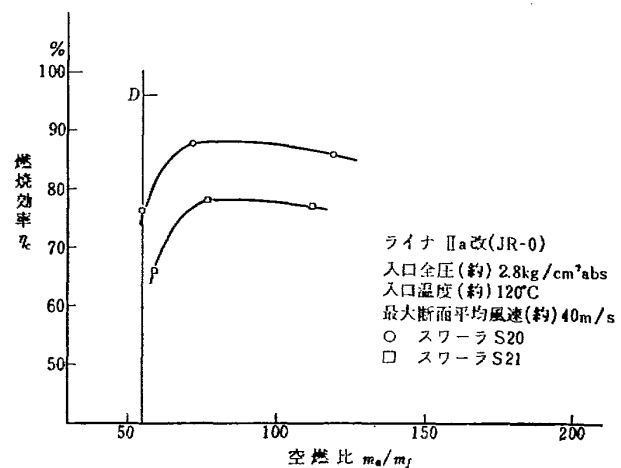


図 86 スワラ S20 と S21 の性能 (JR-0) —— 燃焼効率<sup>5)</sup>

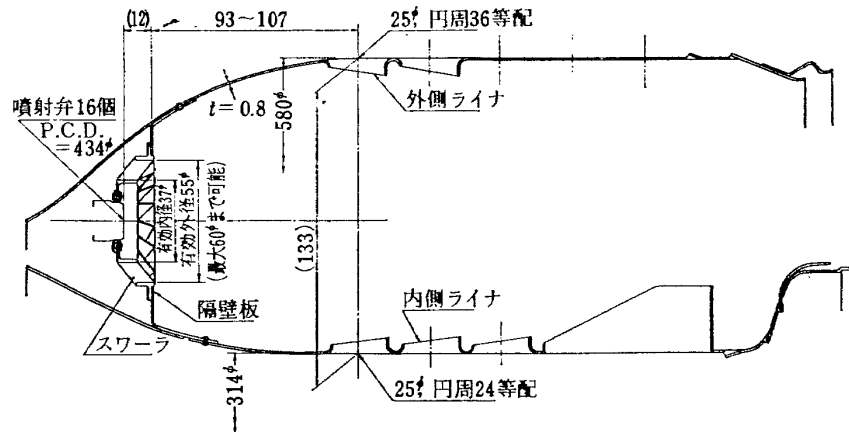
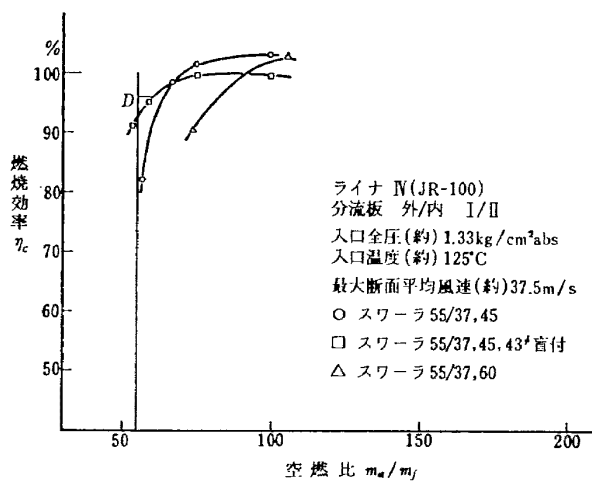
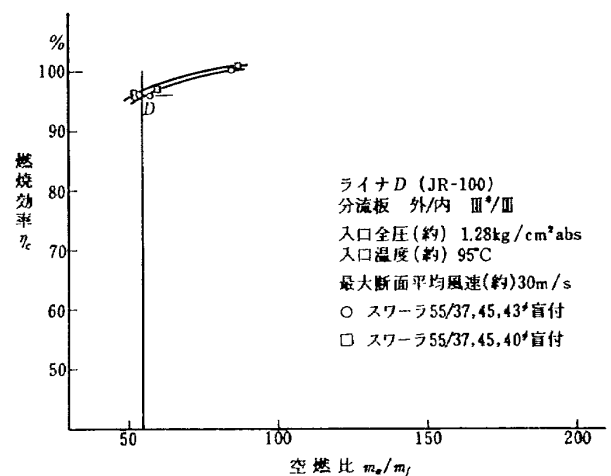


図 87 JR-100 燃焼器主要部分

図 88 スワラの影響  
(JR-100) — 燃焼効率<sup>6)</sup>図 89 (a) スワラの影響  
(JR-100) — 燃焼効率<sup>6)</sup>

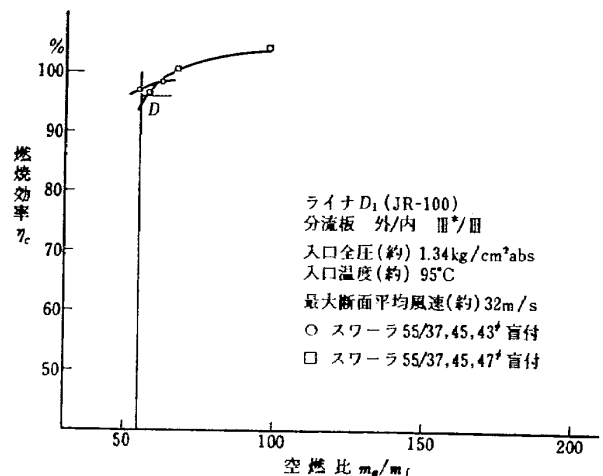
ていること)の影響は、大きなものである。

## (2) JR-100 模型<sup>6)</sup>

JR-100 燃焼器 ライナの主要部分を図 87 に示す。これは、図 83 の JR-0 燃焼器と同様な形状で、寸法的に大きくしたものである。この模型で得られた結果をいくつか示す。

図 88 は、スワラ 55/37, 45 とその 43φ 盲付および旋回角 60° の比較を示す。盲リング付による、燃料の多い側の効率改善は、明らかである。また、盲なしの原型の場合、出口温度分布が不均一になりやすく、効率が見かけ上 100% を超すような値もある。スワラ付近の火炎が不安定になると、火炎は長くのびやすく、盲リング付は、火炎長さの点でも改善の効果がある。旋回角 60° のものは、燃料を多くすると、いちぢるしく性能が低下した。これは、流入空気量の低下と共に、図 63 に示すような、よどみ領域の増加にもとづくものとみられる。

スワラ 55/37, 45° 盲付の最良点を探すため、盲

図 89 (b) スワラの影響  
(JR-100) — 燃焼効率<sup>6)</sup>

リング径をかえた実験結果を図 89 (a), 89 (b), 89 (c) に示す。図 89 (a) は、43φ と 40φ 盲付のもので、40φ 盲付のほうが、わずかに良い。これは、図 25 に示すように、40φ 程度の盲リングでも、流れ模様は

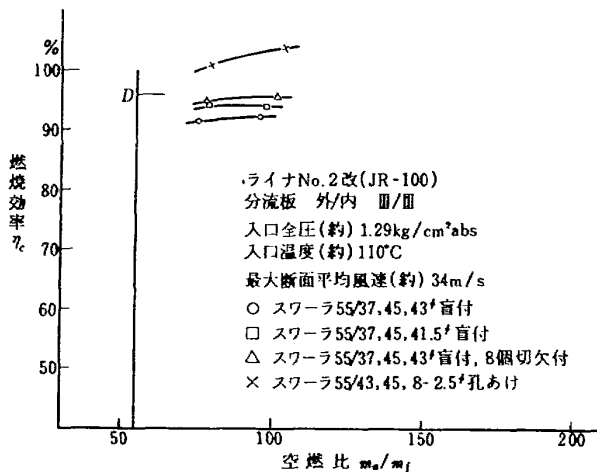


図 89 (c) スワローの影響  
(JR-100) — 燃焼効率<sup>6)</sup>

ほとんど改善され、盲リングの小さいだけに流入空気量も多く、この差が現われているものであろう。さらに盲リングの径を大きくしたものを図 89 (b) に示す。スワロー単独の流れ模様 (図 29 参照) でも、この 47φ 盲付は過大とみられたが、図 89 (b) でも空燃比の小さな側で性能低下が示されている。同様に、盲リング 41.5φ と 43φ 盲付の場合を図 89 (c) に示す。この比較では、41.5φ のほうが良く、この場合もまた、盲リング径は、流れ模様が改善できれば、なるべく小さなほうがよいことを示している。この図 89 (c) には、盲リングの内径側を切欠いたものも示してある。図上では、41.5φ 盲付よりよく、43φ 盲付のものと比較して約 3% の改善が得られている。この図では、空燃比 75 以下の使用上重要な範囲の性能は、わからないが、この後の実験から推定すると、空燃比 55 付近でも、切欠付は有利なようである。

図 89 (c) に、スワロー 55/43, 45, 8-2.5φ 孔あけのものも合せて示した。これは、出口温度分布の均一度が悪く、また振動燃焼を起しやすく、効率は高くでているが、実用上には問題がある。

スワロー 55/37, 45, 41.5φ 盲付に 8-1.5φ 孔あけしたものを図 90 に示す。図 90 の実験点には、ライナを部分的に改造した場合を含んでいるため、正確にはわからないが、定性的に、空燃比の小さな側でよい効果をもたらしていえる。ほかのライナの場合、双方とも効率が 100% 付近になったため、孔あけなしとの比較ができなかった。この結果から、孔あけによって、少なくとも効率の低下することはなさそうである。

図 91 は、h 付の性能である。実験点が少なく、明らかでないが、41.5φ 盲付より効率が低下している。

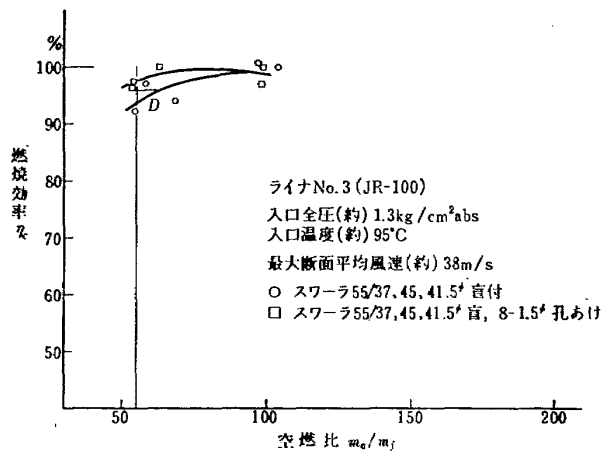


図 90 スワローの影響  
(JR-100) — 燃焼効率

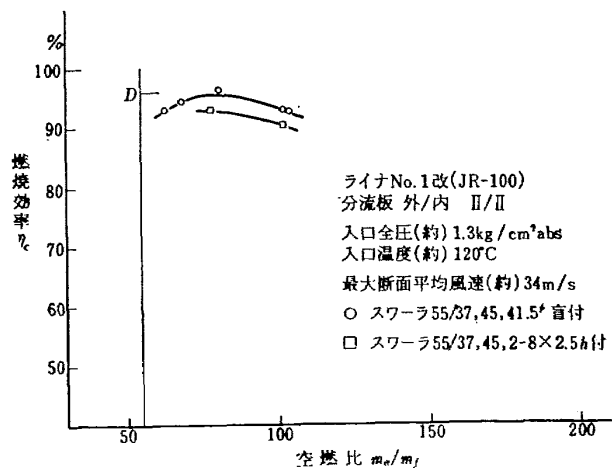


図 91 スワローの影響  
(JR-100) — 燃焼効率

この傾向は、箱形模型の図 74 と図 75 の比較と一致している。ただし、箱形模型のときのような、大きな低下はない。h 付の目的とした隔壁板付近の流れの調整は、箱形より端面板のないアニュラ形のほうに無理がなく、安定した流れ模様が得られるためであろう。

図 92 は、スワロー 55φ と 58φ との比較である。箱形模型でよい結果を得たスワロー 58/37, 45, 42φ 盲付は、アニュラ形模型でも、すぐれている。設計点付近の空燃比では、約 3% の改善がみられる。

図 93 にスワロー 60/37, 40, 44φ 盲付の性能を示す。これは、図 78 の箱形模型の場合と同様、効率が低い。空燃比の小さな範囲の効率低下の割合は、他のスワローの場合より幾分少ないようである。このスワローの h 付のものは、設計点に近い空燃比のとき、わずかなではあるが、効率改善の傾向を示す (図 93)。

JR-100 スワローで調べた盲リングは燃焼性能の点については良い効果をもたらすが、着火性能を低下さ

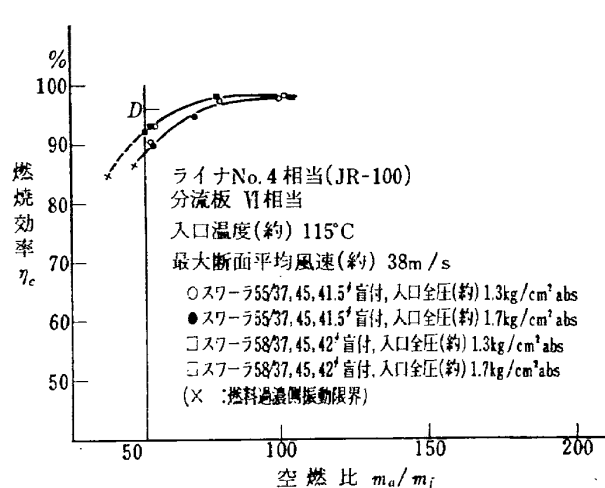


図 92 スワローの影響  
(JR-100) — 燃焼効率

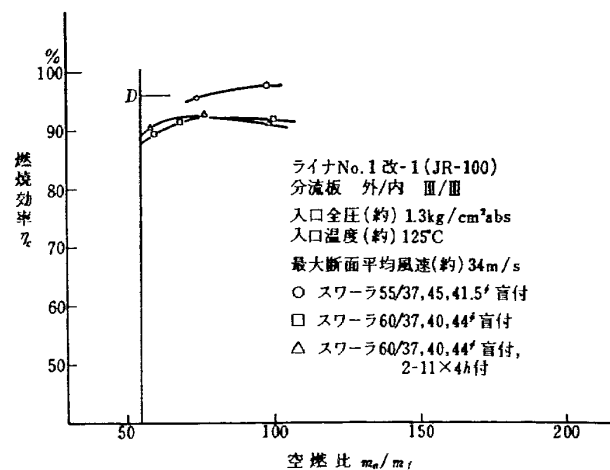


図 93 スワローの影響  
(JR-100) — 燃焼効率

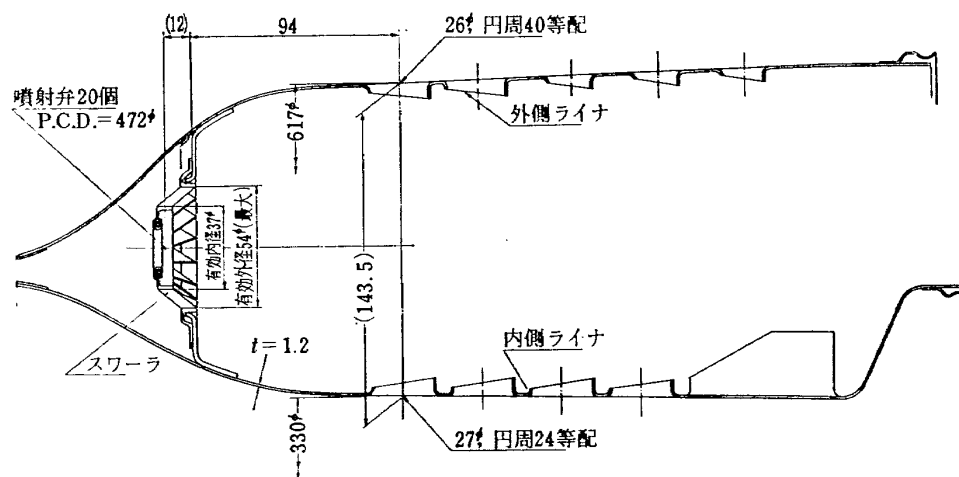


図 94 JR-200 燃焼器 (ライン No. 2) 主要部分

せることが実験から判明した。盲リングの外径を小さくしたとき、着火性能低下の割合が少なくなることから、盲リングによって、スワローコアの広がりを押え、点火プラグ付近に到達する燃料が少なくなるためとみられる。この点からも、盲リングは小さめのほうがよい。盲リングに切欠をつけたもの、スワロー内側に孔あけしたものなどは、コアの広がりが増し、相当する盲リング付のときにくらべ、着火性能がよい。また、h 付では、コアの広がり、ほぼ原型のときのままに保たれるため、着火性能はよい。

### (3) JR-200 模型<sup>7)</sup>

この模型の主要部分を図 94 に示す。これは、JR-100 模型と構造、空気孔配置などほとんどかわっていないが、幾分大型になっている。スワローの許容外径は、噴射弁のピッチから、JR-100 の場合より小さくなっている。JR-200 用スワロー 54/37, 40 の原型と

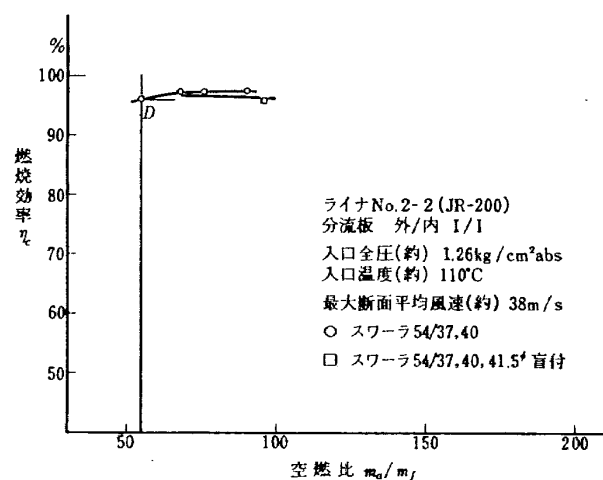


図 95 スワローの影響  
(JR-200) — 燃焼効率<sup>7)</sup>

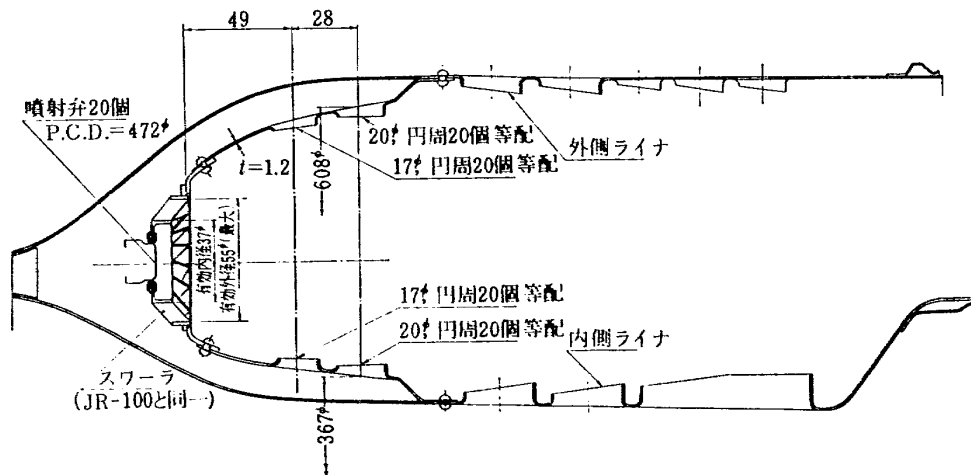


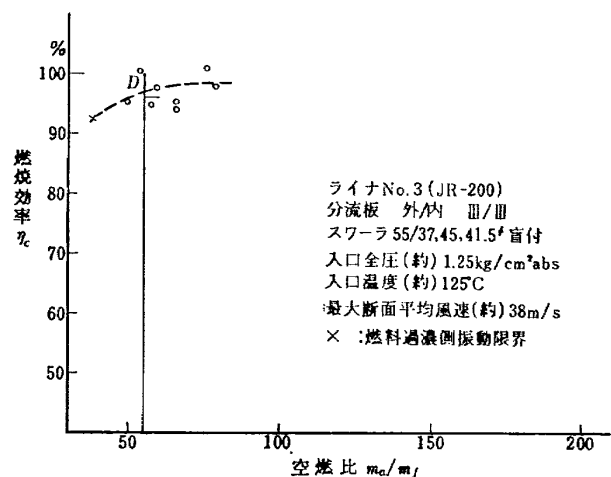
図 96 JR-200 燃焼器 (ライナ No. 3) 主要部分

その 41.5φ 盲付のものの比較を図 95 に示す。盲付のものは、空燃比の小さな状態で実験していないため、十分な比較はできないが、幾分低下しているとも思われる。このことは、先の一次燃焼領域のみの試験結果からもいえる。また JR-200 燃焼器の場合、一次燃焼領域の空気負荷の軽減というスワラ以外の因子が考えられる。すなわち、一次燃焼領域の試験を行なったときのようにスワラからの空気量が多くなく、このような場合は、スワラからの流れ模様が、特に悪化していない限り、流れ模様よりも流入空気量の影響のほうが大きいとみられる。スワラのみでの比較では、JR-200 用よりも JR-100 用の 55/37, 45° 盲付のほうがすぐれているにもかかわらず、全体の燃焼効率として図 95 に示すように、設計点付近でも効率低下が少なく、JR-100 よりすぐれていることもライナ側からの影響とみられる。

箱形模型の A B 型に相当する JR-200 用ライナを図 96 に、この性能を図 97 に示す。図 97 には、出口温度分布調整のため、ライナ空気孔を幾分かえたものまで含んでいて、実験点が散っているけれども、破線で示した性能が平均値と推定される。この性能は、JR-100 燃焼器の場合の図 90 相当であるが、燃料過濃側の振動限界が図 90 の場合より良好で（後述）、この付近の性能、すなわち空燃比 40~50 の範囲においてすぐれている。また図 92 と比較すると、効率特性は、空燃比にして 18 ずらした状態に一致し、空燃比の小さな側で性能が改善されていることを示している。

#### (4) アニュラ形燃焼器の実験結果のまとめ

(a) JR-0 模型について得られた燃焼効率特性は、スワラ単独試験の結果からよく説明できる傾向

図 97 燃焼効率  
(JR-200, No.3 ライナ, 参考データ)

を示している。

- (b) JR-100 模型について、スワラ 55/37, 45 の盲リングなしは良くないが、盲付の場合、開口面積比 15~47% の範囲で、小さいほど効率が良い。これは、スワラ単独試験または表 6 の示す傾向と一致している。また、着火性能上からみても、盲リングは小さなほうが良い。
- (c) 盲リングの内側に空気を入れる方法は、表 6 の結果と同様、盲リング付のみより良い傾向をもつ。
- (d) JR-100 模型について、スワラ外径は、55φ より 58φ がよく、また 60/37, 40, 44φ 盲付の効率の低下している点は、前記の各種の試験結果と同一である。
- (e) JR-200 模型では、一次燃焼領域の負荷が JR-100 模型にくらべて軽いとみられ、スワラの影響は効率特性に大きく現われない。この A B

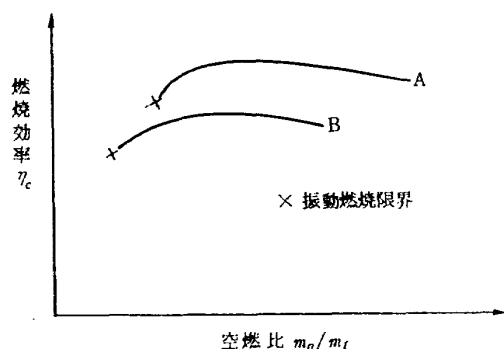
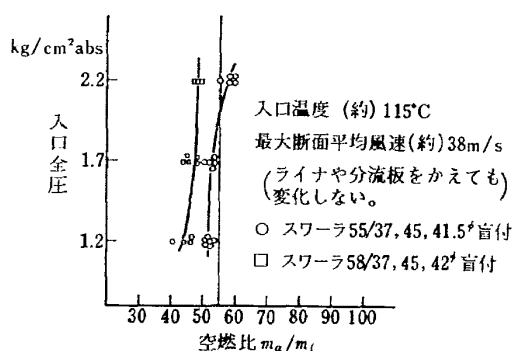


図 98 燃焼効率の傾向と振動燃焼限界

図 99 スワラの影響  
(JR-100) —— 燃料過濃側振動限界

型相当ライナは、データが十分でないが、JR-100 系統のものよりすぐれているようである。

## 6.2 燃料過濃側振動限界について

空燃比を低下させ、スワラの火炎が不安定になって起きる振動燃焼の限界空燃比は、空燃比の小さな側の性能を見積る一つの目安になる。もちろん、この限界が過濃側に寄っていても、効率の低い場合もあるが、この場合は、通常、火炎が長く、空燃比の増加と共に効率のよくなる割合が少ない。したがって、空燃比の大きな範囲でも効率の低い傾向をもっている。図98のBにこの傾向を示す。これから、空燃比の比較的大きな所、たとえば空燃比 65 程度で効率がよく、振動限界が過濃側に寄っていれば、十分な性能をもっていると推定できるものである。

### (1) JR-100 模型

スワラ 55/37, 45, 41.5° 盲付と 58/37, 45, 42° 盲付の限界を図 99 に示す。この限界は、再現性がよく、ライナや分流板による影響は少ない。図99から、入口圧力を高めると、限界は、幾分空燃比の多い側に寄るようにみられる。この傾向は、55° スワラのとときのほうが大きい。55° スワラでは、入口圧力 2.2kg/cm² abs で、すでに空燃比58程度になっている。しかし、このスワラを用いた JR-100 実機運転の

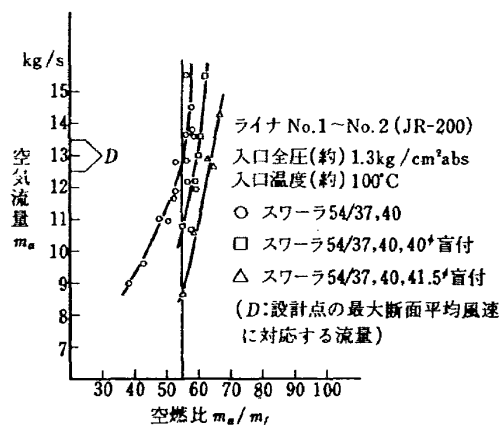
結果によると、入口圧力 4 kg/cm² abs 付近のとき、空燃比 53 でも振動燃焼を起さなかった。このことは、入口圧力の高いとき、スワラから火炎がはなれていても、安定してもえる状態のあることを示している。

スワラの比較として、燃焼効率の値は、58° のほうがよく(図 92 参照)、振動限界も空燃比にして 5 以上、58° スワラのほうが燃料の多い側に寄っている。すなわち、図 99 の範囲においては、58° スワラのほうがすぐれているといえよう。スワラ55/37, 45, 41.5° 盲付に 8 個、1.5° 孔あけのものは、燃焼効率の点で図 90 のように向上し、この振動限界でも図 99 の両スワラのほぼ中間に入るようになり、改善された。これに反し、スワラ 58° の場合は、8 個、1.5° 孔あけの効果がなく、このことはスワラ単独試験の場合と同様であった。

### (2) JR-200 模型

JR-200 スワラの盲リングの影響を図 100 に示す。図の縦軸は空気流量で、出口側をほぼ大気圧にして実験したものであるから、入口圧力はあまりかわらず、流量は、ほぼ最大断面平均風速に比例する。図中 D 点は、最大断面平均風速約 38 m/s の設計点状態を得る空気流量を示す。この図から、図 99 の JR-100 模型の場合より、限界の空燃比が大きくなっていること、盲リング付にしてスワラ開口面積を小さくすると、限界が空燃比の大きな側に寄っていくことがわかる。盲付の影響については、JR-100 模型の場合にも同様なことがみられた。ただし、JR-100 の場合、スワラ 55/37, 45 の盲リングなしのときは、限界が空燃比の大きな側に寄った。

JR-200 模型の場合、燃焼効率特性は、JR-100 模型より良いが、この振動燃焼限界の点では、幾分劣り、図 98 の傾向を考え合えると JR-100, JR-200 と一

図 100 スワラの影響  
(JR-200) —— 燃料過濃側振動限界

次燃焼領域の性能としては大差ないものと思われる。これに対し、JR-200 用として試作したライナ No.3 (A B型相当)では、振動限界の空燃比が約 38 で、他のどのライナの場合よりも空燃比の小さな側に寄っている。このライナは、前述のように燃焼効率特性も良好で、すぐれているといえる。

以上の、各模型について振動燃焼限界を比較すると、ほぼ大気圧、設計点付近の最大断面平均風速のとき、JR-100, 55φ スワアラで空燃比 52, 58φ スワアラで 44, JR-200 では、盲リングなしのとき 55, A B型相当にしたとき 38 ということになる。これから

- (a) スワアラについて、この振動限界を、空燃比の小さな側に移すには、なるべく開口面積を多くとることが必要である。ただし、スワアラ出口の流れ模様の悪いものは、これを改善しておかなくては行けない。スワアラ外径は、許容できる限り大きくとり、盲リングの径はなるべく小さくする。
- (b) スワアラ盲付のものについては、これに孔あけなどの加工をして、さらに改善することができる。
- (c) スワアラ出口流れとライナ空気孔との相互作用を考慮して設計すれば、さらに、燃料過濃側に寄せることができる。

という方針が判明する。

### 6.3 一次燃焼領域出口の温度分布について

一次燃焼領域の出口に、13% P R, 0.5φ 熱電対、先端露出の温度計を入れて測定したものは、目安程度であるが、参考になる結果を示した。

#### (1) JR-100 模型

測定例を図 101 に示す。この温度をみても、スワアラ 58φ は、55φ のときより高く、性能の良いことを示している。なお、この温度は、空燃比 80 付近まで、1,500°C 以上のほぼ一様な分布を示すから、温度の低下している部分は、燃料過多に起因しているものとみ

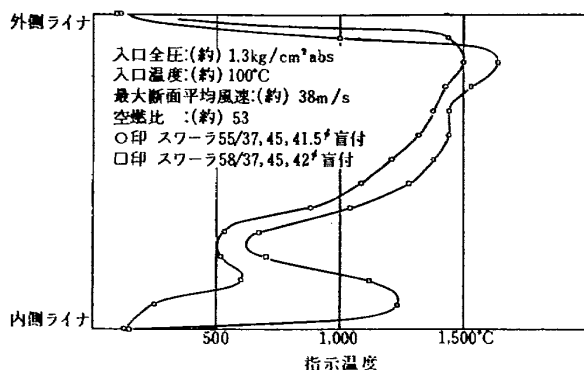


図 101 一次燃焼領域出口の温度 (JR-100)

られる。前記の、燃料過濃側の振動は、この指示温度が 1,000°C 以下になる部分が増すと起きる。図 101 のスワアラ 55φ のものは、測定中振動しなかったが、限界に近い状態のものである。

#### (2) JR-200 模型

JR-100 に相当する JR-200 模型の場合の例を図 102 に示す。空燃比を小さくすることにより、温度の低下する様子が表されている。図中、空燃比 54 のものは、

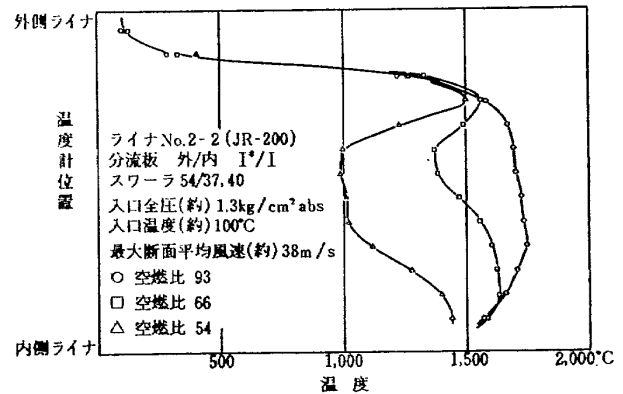


図 102 一次燃焼領域出口の温度 (JR-200)

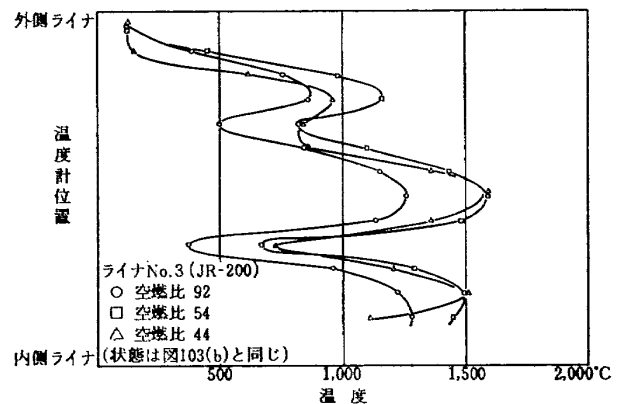


図 103 (a) 一次燃焼領域出口温度 (JR-200, ライナ No.3) ——スワアラ中心位置

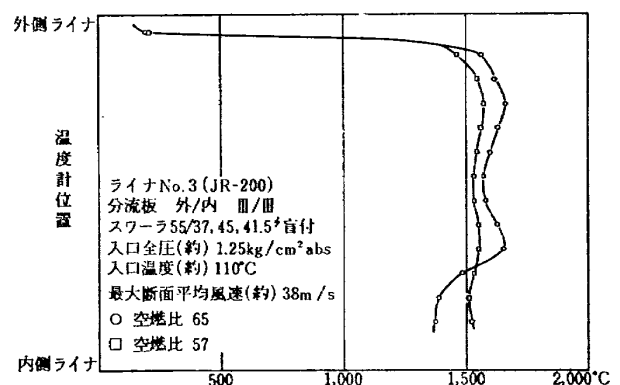


図 103 (b) 一次燃焼領域出口温度 (JR-200, ライナ No.3) ——スワアラ中間位置

振動燃焼を起こすすぐ前の状態である。この図は、スワラ中心軸位置のものであるが、スワラ中間位置の分布形も、ほとんど同一であった。

図 103 (a) と図 103 (b) は、JR-200 模型の A B 型相当の場合である。図 103 (a) のスワラ 中心位置では、前流側にある空気孔の影響を受けて、温度分布に谷ができていいる。空気は十分供給され、空燃比 54 のときでも、空燃比 94 の場合より高温で、空燃比 44 でも、ほとんど低下していない。図 103 (b) のスワラ中間位置では、空燃比 57 でも  $1,500^{\circ}\text{C}$  以上のほぼ様な温度分布を示し、まだ十分に高温を保っている。このような一次燃焼領域出口側の温度分布特性が、前述の燃料過濃側振動燃焼限界により効果をもたらしていると考ええる。

この一次燃焼領域出口の温度分布の変化から、JR-100 模型では、内側ライナ寄りの温度低下、JR-200 模型では、中央部分の温度低下の改善の必要性が判明する。これには、流入空気量と同時にその流速や流れ模様を改善することが大切であって、3.5 節のような測定が重要な意味をもつ。

JR-200, AB 型模型では、分布の変化は、ほぼ良いものと思われる。図 103 (a) の温度分布の凹みは、空気孔の影響で、燃料過濃にもとづくものとはことなっている。この流入空気による温度の低い部分の存在は、やむをえないが、全体の領域に対して、なるべく少ない割合にとどめるべきである。

燃料を多くして温度が低下した場合、すなわち、 $1,000^{\circ}\text{C}$  以下になる部分が増すと、スワラ付近の火災の不安定になることが観察され、振動燃焼が起きる。この状態では、火災がのびやすく、燃焼効率も低下しやすい。ただし、ライナ側の設計によって、この傾向は、明らかに現れないこともある。

一次燃焼領域出口側の温度を高く保つ方法として、スワラについては、前記の、燃焼効率を高く保つ方法などと同じである。

## 7. 結果の要約

高負荷燃焼器の一次燃焼領域の研究として、燃料噴射弁まわりにスワラを組み込んだ燃焼器をとりあ

げ、スワラの性能向上からはじめて一連の実験研究を行なった。その結果、つぎの事柄が判明した。

- (1) 燃焼効率特性において、一次燃焼領域の性能は全体性能に大きな影響をおよぼしている。
- (2) 振動燃焼限界も、一次燃焼領域の性能に大きく影響される。
- (3) スワラの性能は、一次燃焼領域の性能に大きな影響をおよぼすが、その性能は、単独、まわり開放状態の保炎性能試験ではほぼ判明する。性能改善方法では、開口面積比にして 15~20% の盲リングをつけることがもっとも有効であった。
- (4) スワラの相互干渉は、スワラコアの広がり少ないものについては起きにくい、それでも間隔を直径の 1.4 倍以上に保つことが干渉防止のために望ましい。
- (5) スワラ後流とライナ空気孔との相互作用を考慮したものは、スワラの改善のみの場合より、一次燃焼領域の性能をより多く向上することができる。

## 文 献

- 1) Graves, C. C. and Grobman, J. S.; NACA TR-1373, 1958.
- 2) 大塚貞吉, 福田 広, 相波哲朗; 高負荷燃焼器の箱形模型による実験 (II), 航技研報告 TR-126 (昭和42)
- 3) 大塚貞吉, 福田 広, 相波哲朗; 高負荷燃焼器の箱形模型による実験, 航技研報告 TR-118 (昭和41)
- 4) Zuyev and Skubachevskii; Combustion Chambers for Jet Propulsion Engines (1964)
- 5) 大塚貞吉, 鈴木邦男, 松木 宏, 石井浅五郎, 広木 強, 山中国雅; 高負荷燃焼器 (アキュラ模型) の実験結果, 航技研資料 TM-44 (昭和39)
- 6) 大塚貞吉, 鈴木邦男, 石井浅五郎, 山中国雅; 超軽量ジェットエンジン試作1号機 (JR-100) の燃焼器 (I), 航技研資料 TM-68 (昭和40) 「配布先限定」
- 7) 鈴木邦男, 大塚貞吉, 石井浅五郎, 広瀬健樹, 山中国雅; 軽量ジェットエンジン試作2号機 (JR-200) の燃焼器 (I), 航技研資料 TM-93 (昭和41) 「配布先限定」



TR-133	解離した極超音速流中での Teflon への熱伝達 の測定 Measurements of Heat-Transfer to Teflon in Dissociated Hypersonic Flow	1967年4月	野村 茂昭
TR-134	高速単段軸流圧縮機の研究 —二重円弧翼の性能— The Aerodynamic Performance of a Single- Stage Axial-Flow Compressor with Double- Circular-Arc Blades	1967年5月	藤井 昭一, 西脇 英夫 吉田 晃, 五味 光男 武田 克己, 菅原 昇
TR-135	同軸型電磁衝撃波管の作動機構 Driving Mechanism of an Electric Shock Tube with a Coaxial Gun	1967年5月	松崎 利一
TR-136	Nearly-Free-Molecule-Flow におけるオリフ イス型圧力管 Experimental Study of an Orifice-Type Pressure Probe in Nearly-Free-Molecule Flow	1967年5月	恩地 瑛, 山本 稀義
TR-137	梁, 板結合構造物の振動 (I) On the Natural Vibration of Plate-Beam Combination Structures (I)	1967年6月	越出 慎一, 林 洋一 塙 武敏
TR-138	変厚片持板の静撓みについて Deflection Analysis of Variable Thickness Cantilever Plate	1967年6月	塙 武敏, 越出 慎一
TR-139	多発動機付ヘリコプタの片発停止時における 最適着陸操作—前進速度0の場合— Optimal Vertical Descent Procedure with Partial Power of Multi-Engined Helicopters —The Case of Rejected Take-Off—	1967年8月	古茂田 真幸
TR-140	流線法によるダクト流れ Streamline-Curvature Approach to Duct- Flow Problems	1967年9月	藤井 昭一, 宇野 威信
TR-141	マトリクス内力法による半張殻構造の応力解 析について Semi-Monocoque Structures Solved Nu- merically by the Matrix Force Method	1967年10月	川島 矩郎
TR-142	動的模擬模型による姿勢のオンオフ制御実験 Experimental Studies on Some On-Off Attitude Control Systems Using a Dy- namic Model	1967年10月	樋口 一雄, 堀川 勇壮 村上 力, 小川 敏雄 真柳 光美

---

## 航空宇宙技術研究所報告143号

昭和42年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422) 44-9171 (代表)

印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2~27~12

---