

UDC 629.73.067.5 :
629.73.048.7

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-199

航空機用ヒーターの燃焼器の開発実験

堀内正司・本間幸吉・矢萩恵一

1971年2月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-170	JR エンジン燃焼器に起きた振動燃焼	1970年2月	鈴木邦男, 石井浅五郎 山中国雅
TM-171	缶形燃焼器(低圧, 低温系)試験設備による 航空計器の氷結(着氷)試験	1970年3月	鈴木邦男, 相波哲朗 本間幸吉, 服部宣夫
TM-172	自動追尾型風向風速測定器	1970年3月	川幡長勝, 中谷輝臣
TM-173	FA-200 改機の動安定微係数	1970年3月	遠藤浩, 林良生 海老沼幸成, 中谷輝臣
TM-174	遷音速風洞動安定測定装置の構造と作動	1970年4月	小橋安次郎, 河野長正 西武徳, 宮沢政文
TM-175	NAL-16・31D 型ロケットの研究試作	1970年5月	五代富文, 近藤洋史 中井暎一, 田畑浄治
TM-176	非対称自由流線の一計算法	1970年5月	高橋 侖
TM-177	小型固体ロケットモータの振動燃焼実験 —パルス法による中周波振動燃焼の研究—	1970年5月	五代富文, 伊藤克弥 西村久男, 湯沢克宜 柴藤羊二
TM-178	大型低速風洞動安定微係数測定装置	1970年5月	広岡貫一, 遠藤浩 戸田亘洋, 岡部祐二郎
TM-179	風洞天秤の試作	1970年5月	金成正好, 北出大三
TM-180	ジェットエンジン燃焼器出口ガス流の乱れの 測定(II) —レーザのドップラ効果を利用する方法—	1970年5月	相波哲朗
TM-181	航空機の乗り心地について	1970年6月	幸尾治朗
TM-182	排気系障害板の模型実験	1970年9月	田辺義一
TM-183	ロケット模型の大型低速風洞試験	1970年9月	近藤洋史, 高橋 宏 桑野尚明
TM-184	金属線へ衝突する液滴の現象	1970年9月	田丸 卓, 乙幡安雄
TM-185	推進エンジン用空気取入口の予備実験	1970年9月	近藤 博, 石賀保正
TM-186	NAL-25・31型ロケットの試作と飛しょう試験	1970年11月	宇宙研究グループ
TM-187	推力300 kg ジンバル液体ロケットエンジンの 揺動特性(I)	1970年11月	橋崎哲二, 中野富雄 橋本亮平, 竹花真一郎
TM-188	自由飛行模型FFM-10の空力微係数におよぼ す機体弾性変形の影響について	1970年11月	河崎俊夫, 河本 徹 戸田 勸
TM-189	燃料蒸発管に関する研究(III) 管内の燃料—空気二相流への熱伝達	1970年12月	田丸 卓, 乙幡安雄 鈴木邦男
TM-190	NAL-25・31型ロケットのノズル部FRPライ ナーの接着剝離の検討	1970年12月	中井暎一, 五代富文 古田敏康, 大竹邦彦
TM-191	大型電子計算機プログラム・ライブラリ	1970年12月	戸川隼人, 磯部俊夫
TM-192	極超音速風洞M9ノズル較正試験	1971年1月	長洲秀夫, 橋本 登至 穂積弘一, 松崎 貴至
TM-194	航空機のSTOL 性に関する一考察	1971年1月	田辺義一
TM-195	曲面壁上の噴流に対する噴出孔形状, 配列の 効果について	1971年1月	西村英明, 白井 弘 井上重雄, 三村富嗣雄
TM-196	NAL-16H 型ロケットの研究試作	1971年1月	宇宙研究グループ
TM-197	二次元煙風洞について	1971年1月	高橋 宏, 戸田亘洋 白井正孝
TM-198	等高線を描かせるプログラム	1971年1月	磯部俊夫

航空機用ヒーターの燃焼器の開発実験*

堀内正司**・本間幸吉**・矢萩恵一***

概 要

航空機におけるキャビンの暖房および翼等の防水のために使用する加熱空気を、飛行中の動圧により空気を吸入し航空用燃料を燃焼して発生させる単純な形式のヒーターの燃焼器を開発した。燃焼器の実用化における問題点およびその解決方法を検討して、実験により三つの形式の燃焼器を選択し改良を加えて熱出力14 kcal/sec を満足するヒーターの燃焼器を得た。その他、開発実験において発生した現象も整理して示した。

1. ま え が き

最も簡単な小形の航空機を除いて、一般の航空機の航行範囲は非常に広く、高度、緯度および気象状態によって機外の空気圧力、温度は大幅に変化する。このため外気状態によって翼その他の場所に氷の付着を起すことがある¹⁾。このため航空機には機内の空気調整および翼等に氷や霜の付着を防ぐ対策として、空気を種々の方法で加熱、冷却および加圧する装置等を装備している^{2), 3)}。これらの装置も比較的付属装置を取り付け易い大形機を除いて、単純な装置を必要としている。このような単純な空気加熱装置として、航行時の空気の動圧を利用し機外から空気を導入して、航空用燃料を燃焼し解氷のための熱量を得るものの一つについて、そのヒーターの主要な構成部分である燃焼器の開発実験を行なった。その際開発に直接影響を与える要素のほか付随した問題も含めて考察し、資料とすることが有意義であると考え、これらを一括してまとめた。

2. ヒーターの概要および実験条件

ヒーターは図1に示すもので機体とともに製作される空気導入口および導入管を除くと、高温ガスを発生させる燃焼器と熱交換器の二つの部分から成っていて、燃焼器に与えられる空気と加熱器の目的とする通風空気の二つの流れは、同一の取入口から航行中の動圧によって導入される。このため航空機の高度、緯度および航行速度等によって空気温度、空気流量および空気密度等が変化する。実験条件は、これらを考慮して燃焼器出入口全圧差と発生熱量を関係づけて行なった。このような方法は米国のMIL規格においても採用されている⁴⁾。

この実験において、燃焼器の空気取入口、外筒および出口の寸法等はヒーター全体の設計・計画から決定されているので、一般の燃焼器の開発と同様に数個の燃焼器内筒の製作および改良によって燃焼空気の流入方向および流入量配分の変化を与えて、最良の内筒を得るための実験を行なった。燃料流量は燃料制御の簡素化のために、全作動状態を通じ噴射弁2個使用して全量（標準は2.35g/sであるが実験は2.05g/sも行なった。）もしくは噴射弁1個を使用して $\frac{1}{2}$ 量にかぎられた。

3. 実験装置、計測装置および計測方法

実験装置は当所原動機部の缶形燃焼器試験設備を使用した⁵⁾。試験はほぼ大気圧で行なったので常圧試験システムを使用した。この系統は最大空気圧力1.45kg/cm² abs, 最大風量1.25kg/sec まで得られる。

燃焼筒の性能評価および改良を行なうために実験は組込み実験、熱交換器入口管付実験および燃焼器単独実験の三つに分けて行なった。

3. 1. 組込み実験

この実験は燃焼器と熱交換器を組合せて行なった。計測装置を図2に示す。空気は前項の実験装置の整流

* 昭和45年12月10日受付

** 原動機部

*** 小糸工業(株)

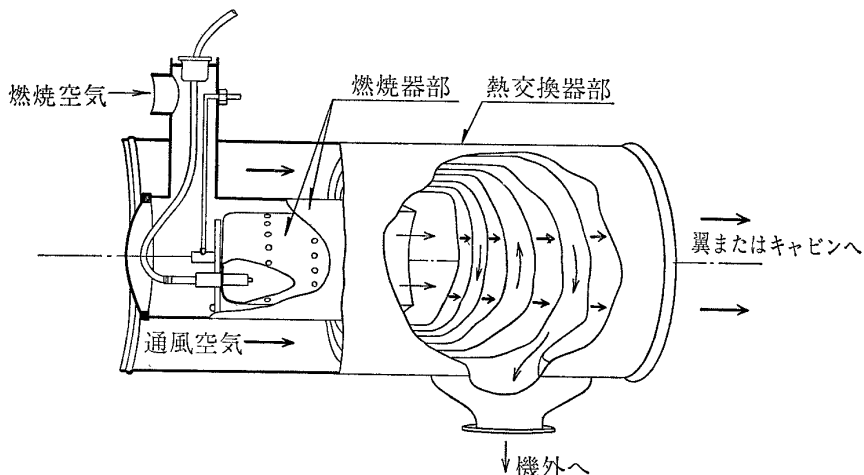


図 1 加熱器の概要

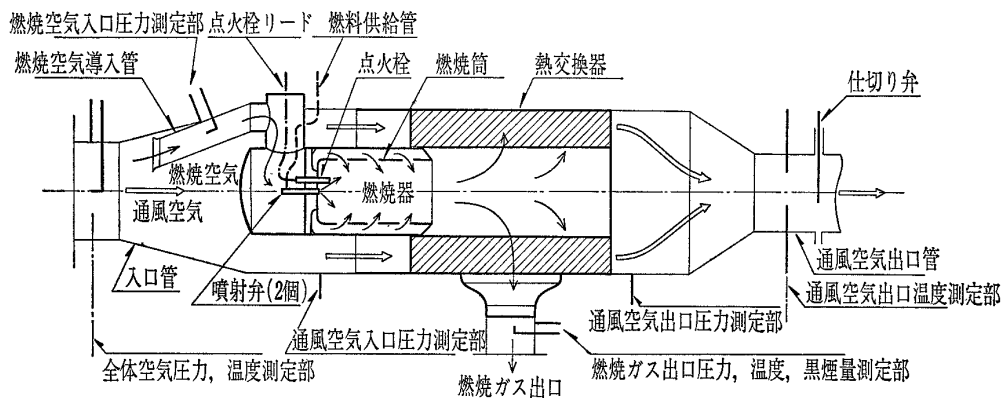


図 2 組み込み実験計測装置

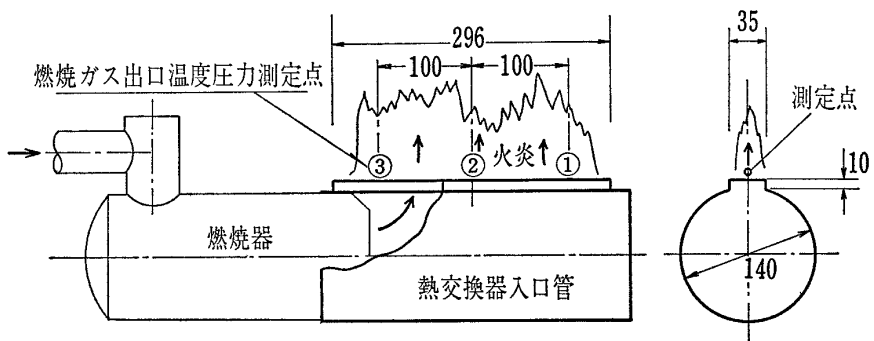


図 3 熱交換器入口皆付実験計測装置

器から導入して、燃焼ガスは大気中に放出した。計測項目および方法について以下に示す。

全体空気入口動圧：ピトー管によって入口管中央で計測する。

全体空気入口静圧：入口管壁面で計測する。

入口空気温度：入口管前流の整流器内で計測する。

通風空気入口静圧：熱交換器通風空気上流の壁面で計測する。

通風空気出口静圧：熱交換器通風空気下流の壁面で計測する。

通風空気出口温度：熱交換器の通風空気下流で I・C 熱電対によって 6 個所を計測し平均する。

燃焼空気入口動圧：燃焼空気導入管中心部にてピトー管で計測する。

燃焼空気入口静圧：燃焼空気導入管壁面で計測する。

燃焼ガス出口静圧：熱交換器の燃焼ガス出口管壁面で計測する。

燃焼ガス出口温度：熱交換器の燃焼ガス出口管内で I・C 熱電対により 1 個所計測する。

燃焼ガス出口黒煙の状態：熱交換器の燃焼ガス出口管から True-Spot Smoke Tester (BACHARACH社製) によって燃焼ガス 5 l 中の炭素粒子をろ過し、ろ紙の明度変化を 0~

9 までの数字で表わした。10 以上の場合は目測により小、中、大とした。

燃焼流量：燃料ポンプと燃料噴射弁の間で容積式流量計で計測した。

3. 2. 熱交換器入口管付実験

燃焼器の後に熱交換器の一部（流路がせまくなる部分まで）を取り付けて実験した。燃焼空気は組込み実験と同じ整流器から燃焼器へ導入した。燃焼器入口空気の計測は組込み実験と同様である。排気ガスは大気中に放出した。計測装置を図 3 に、計測項目と方法について以下に説明する。

熱交換器入口管出口ガス動圧：出口においてピトー管で 3 点計測し分布を求める。

熱交換器入口管出口ガス温度：出口において $I_r \cdot I_r - R_h(40\%)$ 熱電対によって 3 点計測し分布を求める。

熱交換器入口管出口火炎形状：出口において観察し 3 点の火炎長さを計測する。

3. 3. 燃焼器単独実験

計測装置は前項の熱交換器入口管付実験から熱交換器入口管を取り除いた装置である。排気は大気中に放出した。燃焼器入口空気の計測は組込み実験と同様である。計測装置を図 4 に示す。以下に計測項目と方法を示す。

燃焼器出口ガス温度：燃焼器出口中心部の温度を I_r

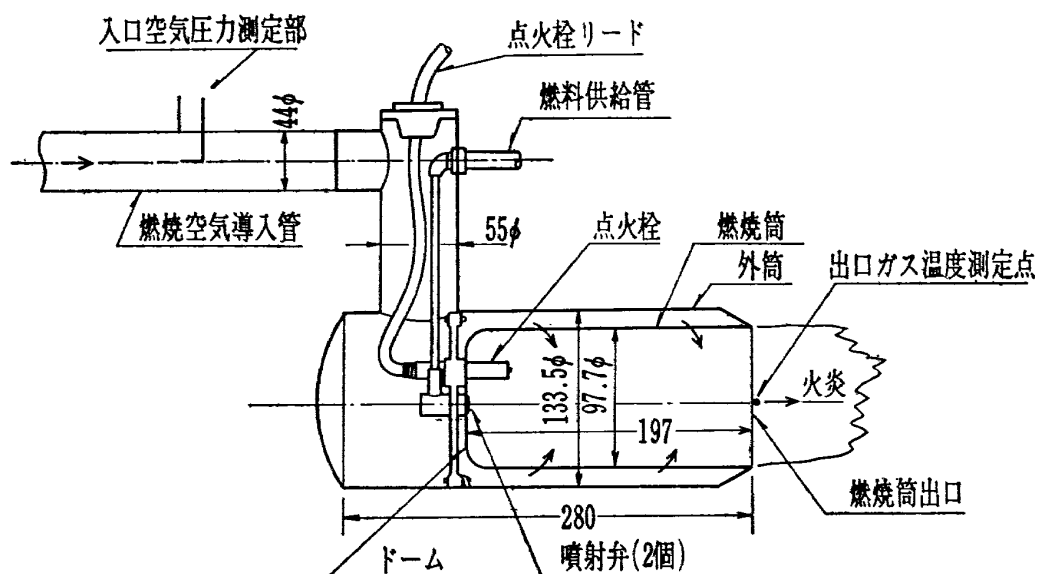


図 4 燃焼器単独実験計測装置

- $-I, R_h(40\%)$ 熱電対で計測する。
- 火炎長さ : 目測により火炎の先端を決定して、燃焼器出口端から先端までの距離を計測する。
- 炭素付着状態 : 5分間一定条件で燃焼した後、燃焼筒内壁に付着した炭素の場所、大きさ、厚さおよび形態について観察する。
- 燃焼状態および火炎の形状 : 燃焼器内の火炎の色、振動燃焼、乱れおよび出口から出ている火炎の形状を観察する。

4. 供試燃焼器

燃焼器は図4に示す様に空気導入口、点火栓、噴射弁、外筒、ドームおよび燃焼筒で構成されている。燃焼筒を含む全ての大きさは、先に述べたように既に決定されているので、実験の主目的はドームおよび燃焼筒の空気孔の大きさおよび配列の変化による性能を調べて、選別および改良することである。

使用した燃料噴射弁は噴霧角ほぼ 60° 、噴霧圧力 3.15 kg/cm^2 において流量 $1.55 \text{ cm}^3/\text{s}$ のもの2個である。燃料はJP-4(ジェット燃料規格)を使用した。

燃焼筒は内径 97.7 mm 、長さ 197 mm の円筒に種々の孔

を明けて製作した。この一例を図5に示す。これらは三つの系列に分けられる。

A系列燃焼筒：空気孔直径を小さくして孔数を多くした。第1列の孔は噴霧が最も多く吹きつけられる位置にした。これは主に噴霧燃料が壁に衝突する量を少なくするために決めた位置で、他の系列の燃焼筒も同じ位置である。

B系列燃焼筒：A系列より空気孔を大きくし、孔間隔を広くして空気が中心部まで到達するようにした。

C系列燃焼筒：空気孔を燃焼筒軸方向に配列したもので、B系列よりも空気が燃焼筒中心部まで到達し易い形式である。

以上各系列の特徴を述べたが、それらの改良された形式は、それぞれの良い点を採用したような中間的な特徴になった。

ドーム部分は、いずれの燃焼筒にも装着する。これは燃焼筒壁面に炭素堆積が出来ないように改造したものを含め3種類製作した。これらを巻末の付図24に集めて示した。

5. 記号、単位およびその説明

本文および図表に用いている記号とその算出方法を以下に示す。

(1) 通風空気出入口差圧： ΔP_{es} mmH_2O

$$\Delta P_{es} = (\text{通風空気入口静圧}) - (\text{通風空気出口静圧})$$

(2) 通風空気流量： m_{as} g/sec

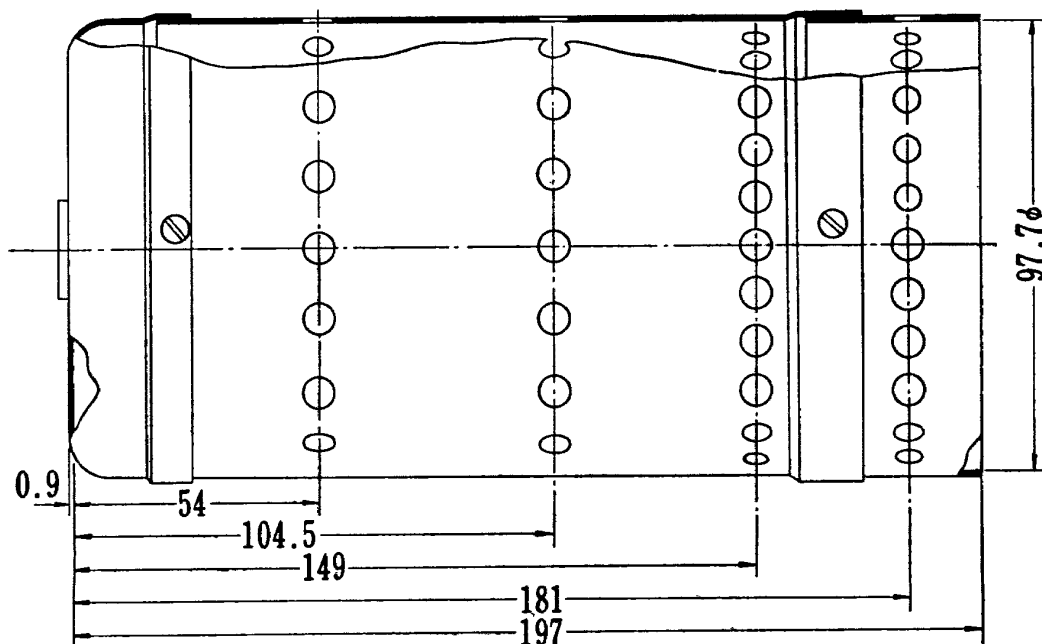


図5 A-0 燃焼筒

$$m_{ax} = (\text{全体空気流量}) - (\text{燃焼空気流量})$$

ここで全体空気流量は、全体空気入口における断面積、動圧、静圧および入口温度から算出した。

(3) 通風空気入口温度: T_{ex1} °C
入口空気温度を用いた。

(4) 通風空気出口温度: T_{ex2} °C

(5) 燃焼空気出入口差圧: ΔP_{cc} mmH₂O
 $\Delta P_{cc} = (\text{燃焼空気入口静圧}) - (\text{燃焼空気出口静圧})$

(6) 燃焼空気流量: m_{acc} g/sec
燃焼空気入口における断面積、動圧、静圧および温度から算出した。

(7) 燃焼空気入口温度: T_{cc1} °C
 T_{ex1} と同じ値である。

(8) 燃焼ガス出口温度: T_{cc2} °C

(9) 燃料流量: m_f g/s

(10) 熱交換量: H_{ex} kcal/s
 $H_{ex} = m_{ax}(i_2 - i_1)$ から計算した。この値は実際上の出力となる。

(11) 当量比: ϕ
 $\phi = (m_{acc}/m_f) / (\text{理論混合比の時の } m_{acc}/m_f)$

ここで理論混合比の時の m_{acc}/m_f を 14.74 とした。

(12) 総合効率: η_s %
$$\eta_s = \frac{H_{ex}}{10.25 \times m_f} \times 100$$

(13) 熱交換率: η_{th} %
$$\eta_{th} = \frac{(\text{熱交換された熱量})}{(\text{発生熱量})} = \frac{\eta_s}{\eta_c}$$

(14) 燃焼効率: η_c %
$$\eta_c = \frac{i_2 m_{ax} + i_3 (m_{acc} + m_f) - i_1 (m_{ax} + m_{acc})}{10.25 \times m_f} \times 100$$

ここで i_1 は入口空気 1g あたりのエンタルピー (kcal)。 i_2 は通風出口空気 1g あたりのエンタルピー。 i_3 は燃焼ガス出口でのガス 1g あたりのエンタルピーである。これらは各部の状態から田中敬吉らの表⁶⁾を用いて求めた。ただし $\phi < 1$ 時は $\phi = 1$ として求めた。

(15) 修正燃焼効率: η'_c %
これは当量比 1 以下の時の燃焼効率である。
 $\eta'_c = \eta_c / \phi$ ただし $\phi < 1$ である。

(16) 全圧損失係数: Ψ, Ψ_{cc}
 $\Psi = \Delta P_{cc} / (\text{燃焼空気入口動圧})$
燃焼器単独実験の場合は
 $\Psi_{cc} = \Delta P_{cc} / (\text{燃焼器出入口の差圧}) / (\text{燃焼空気入口動圧})$ とした。

(17) 黒煙量: s

3 項の燃焼ガス出口黒煙の状態において説明されている。

(18) 火炎長さ: l cm

(19) 特性火炎長さ: l'
各燃焼筒について ΔP_{ex} を変えた実験時の $(l \times \phi)$ の加算平均値を求めた。

6. 予備試験および側定値の整理方法

概略の特性を得るために、組込み実験によって予備試験を行ない、測定値の整理方法等を検討した。

燃焼筒 A-0, ドーム 1 を使用して通風空気出入口差圧を変化させて測定した。燃焼空気出入口差圧は全ての実験において、通風空気出入口差圧の 2 倍の値にした。通風空気の方は加熱装置から出た後に、解氷装置、キャビン等を通過してから機外に排出するため差圧を少なくしている。

実験項目および測定結果を表 1 に示す。一般の燃焼器の作動当量比がほとんど 1.5~15.0 の間にあることに比べて、この実験における当量比の値は 0.6~2.0 であって、1 より小さい値も含まれている。このような条件で燃焼器が作動している事は、非常に特殊なものと考えることができる。これは航空用ガスタービンの燃焼器の燃料噴射弁に近い領域 (一次燃焼領域とも云う) において、燃料が過濃である状態に似ている⁷⁾。このような状態になった原因は、次の二つの条件

- (1) 燃料制御は、燃料圧力一定で噴射弁 1 個、または 2 個使用の切り換えしか行わない。
- (2) 通風空気量が多い場合に、発生熱量 (交換熱量に相当する) を多く得るために、燃焼流量を多くしている。

による。燃料過濃の状態では、交換熱量は図 6 に示すように、通風空気差圧 100 mmH₂O 以下になると目標値よりも低くなった。低下した原因について検討を加えるために、当量比 1 以下で燃焼している場合を含めて、この実験に適合した評価を得る必要があった。以下評価をするために、測定値の整理方法を検討した。ここで交換熱量の目標値は表 2 に示す範囲である。

6. 1. 燃焼効率

当量比 1 以上の場合には一般に使用されている考え方および式を用いた。

当量比 1 以下の場合には混合気中に燃料を全量燃焼させる酸素が存在しないので、燃焼の度合を示すものとして酸素消費効率⁸⁾ もしくは、混合気中の酸素によって完全燃焼せられる燃料の発熱量を最大発熱量とした時の熱量的効率を採用している。どちらの方法も燃

表 1 予 備 試 験 の 結 果

実験番号 No.	燃焼筒 No.	ノズル No.	通風空気					燃焼空気					燃料流量 m_f g/s	交換熱量 H_{ex} kcal/s	当量比 ϕ	総合効率 η_s %	熱効 交換率 η_{ih} %	燃焼 効率 η_c %	修燃 正率 η'_c %	全損 係数 Ψ	黒煙 量 S	
			入口 静圧 mm H ₂ O	出口 静圧 mm H ₂ O	入口 温度 T_{ex1} °C	出口 温度 T_{ex2} °C	流量 m_{aex} g/s	入口 静圧 mm H ₂ O	出口 静圧 mm H ₂ O	入口 温度 T_{cc1} °C	出口 温度 T_{cc2} °C	流量 m_{acc} g/s										
1	A	1	2	721	375	21	113	765.8	755	740	21	387	67.2	2.30	17.15	1.98	72.65	72.36	100.4	—	6.54	2.5
2			2	427	192		182	472.0	432	427		467	44.0	2.30	18.79	1.30	79.60	77.49	102.7	—	8.48	8
3			2	258	122		198	357.6	266	262		479	30.4	2.32	15.73	0.89	66.23	79.60	83.2	93.5	10.48	中
4			1	211	98		130	360.3	213	209		310	29.7	1.14	9.54	1.76	81.32	80.65	100.8	—	8.71	3.5
5			2	190	96		184	328.6	205	202		434	23.4	2.32	13.21	0.69	55.62	82.25	67.6	98.0	13.47	大
6			1	170	86		146	322.6	175	172		322	28.4	1.16	9.77	1.66	82.27	81.01	101.6	—	7.81	4
7			2	144	68		176	269.6	155	153.5		393	20.4	2.36	10.30	0.59	42.58	82.02	51.92	82.0	13.95	大
8			1	142	67		172	269.6	148	145		366	21.1	1.18	10.04	1.22	83.26	83.25	100.0	—	12.08	大

表 2 交換熱量の目標値

通風空気差圧 (Δp_{ex}) mmH ₂ O	<50	50	76~312	375	375<
交換熱量 (H_{ex}) kcal/s	0	10.5	14.0	10.5	0

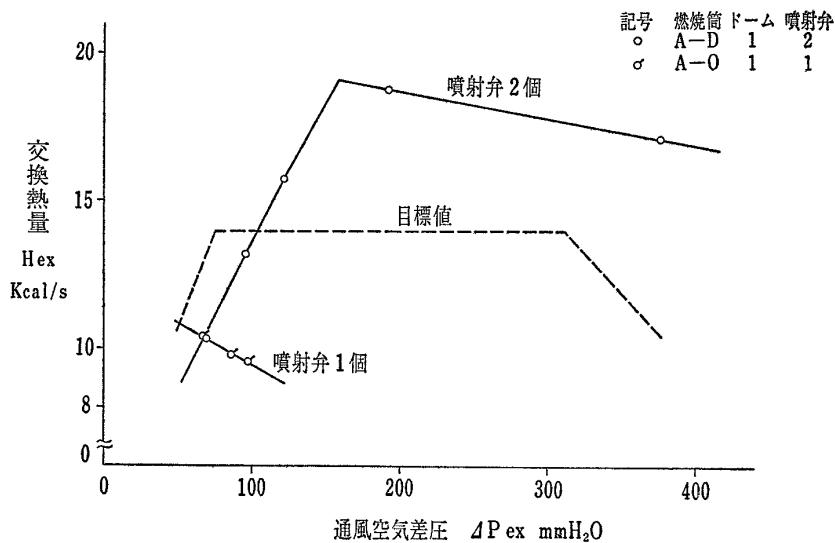


図 6 交換熱量

燃焼器内の温度その他の条件によって、 O_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 C および未燃燃料等の量的関係が定まらないので効率の決定に際して不確かさが残る。この実験においては計測の都合上および最終的に熱による出力を取り出すことを考慮して、後者を選んだ。各燃焼筒の比較検討をする場合には、実験条件もほとんど等しいので十分使用できる。結局、当量比1以下の場合の燃焼効率は、修正燃焼効率(η_c')として、次式によって計算された。

$$\eta_c' = \frac{i_2 \times m_{aex} + i_3 (m_{acc} + m_f) - i_1 (m_{aex} + m_{acc})}{10.250 \times m_f \times \phi} \times 100$$

$$= \frac{\eta_c}{\phi}$$

この効率を用いた予備実験の結果を図7に示す。

6. 2. 全圧損失係数

燃料過濃になりやすい燃焼器なので、圧力損失を少なくして空気流量を多くしなければならない。圧力損失の評価をする時に、一般の燃焼器の場合に、燃焼による温度上昇で生ずる容積増加（流速増加をとまなう。）を考慮して、燃焼器出入口温度比を導入する。そして、この温度比にリニアな関係として全圧損失係数を表わす。この実験において、燃焼器出口温度を測定できなかったため、燃焼効率から近似的に燃焼器出入口温度比に相当するものを次のように計算した。

燃焼効率は実際の発熱量と燃料の発熱量との比であることから

$$\eta_c = \frac{\Delta i (m_{acc} + m_f)}{10.25 \times m_f} \times 100$$

$$\Delta i = \bar{C}_p (T_{out} - T_{in})$$

ここで Δi : 燃焼器出入口エンタルピー差

T_{out} : 燃焼器出口ガス平均温度

T_{in} : 燃焼器入口空気温度

\bar{C}_p : T_{in} から T_{out} までの燃焼ガスの平均定圧比熱

となる。変形して

$$T_R = \frac{T_{out}}{T_{in}} = F(\eta_c, \phi) \times \frac{10.25}{1474 \times \bar{C}_p \times T_{in}} + 1$$

$$F(\eta_c, \phi) = \frac{\eta_c}{\phi} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{14.74 \times \phi}}$$

ここで T_R : 燃焼器出入口温度比

とする。 T_{in} と \bar{C}_p は実験範囲内では変化が少ないので一定値と仮定すると上式から T_R は関数 F とリニアな関係となる。

予備実験の結果を図8に示す。各点が直線上に並ばない理由は主に当量比1以下の場合に、 CO と H_2O の発生によって温度と容積がリニアに変化しない事および炭素粒子の発生による抵抗増加が考えられる。

6. 3. 熱交換効率

熱交換率は交換熱量を発生熱量で割った値で示した。図9に示すように燃焼空気量の増加（作動条件によって通風空気量も同時に増加する。）によって効率が低下して来る。交換器中の流れは Re 数 5.5×10^3 以上で、通路は非常に急角度で曲っているため乱流状態である。これから次の円管の乱流熱伝達の式が適用できる⁹⁾。

$$\alpha = \frac{0.027 Re^{0.8} Pr^{0.4} \lambda}{\alpha}$$

ここで α : 熱伝達率

kcal/m²h°C

λ : 流体の熱伝導率

kcal/mh°C

α : 管径

Pr : プラントル数

Re : レイノズル数

において物性値を、実験した範囲で全て一定であると

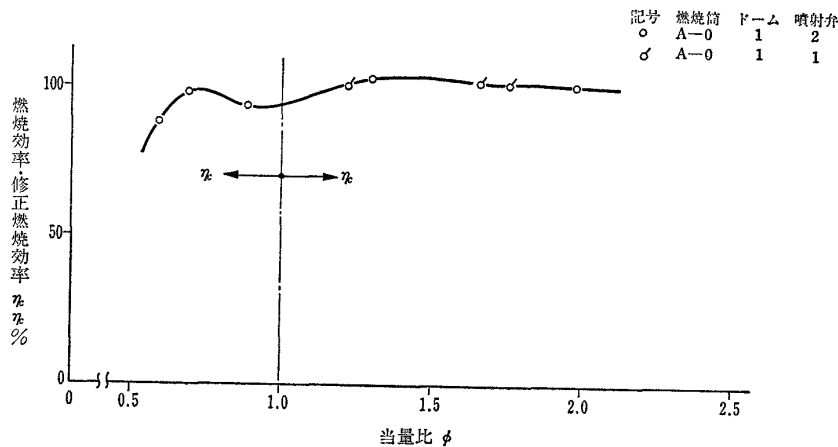


図7 燃 焼 効 率

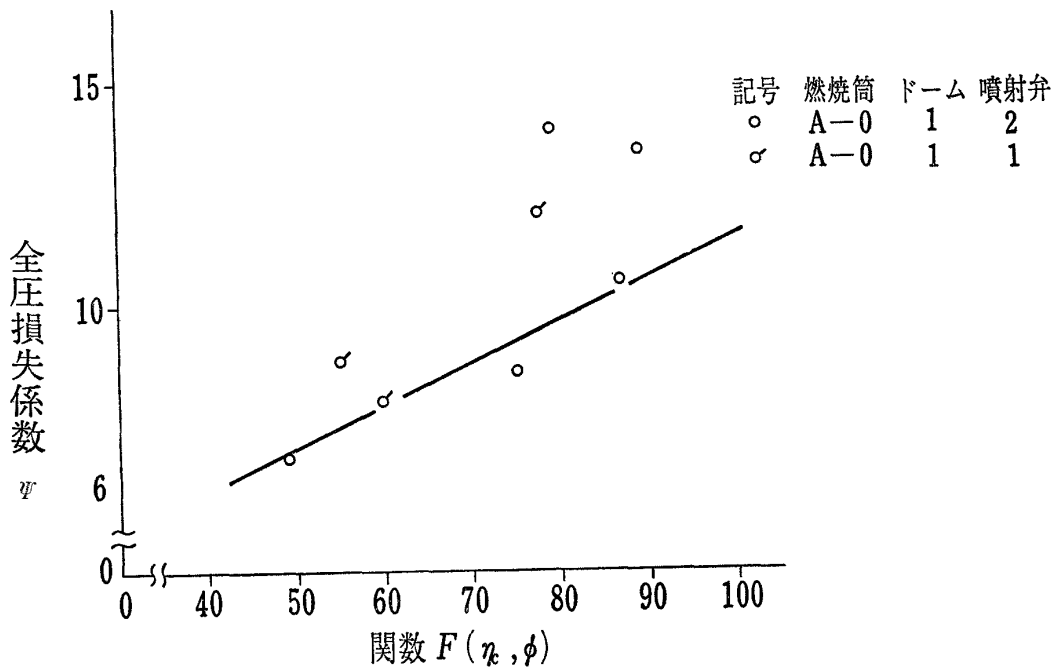


図 8 全圧損失係数

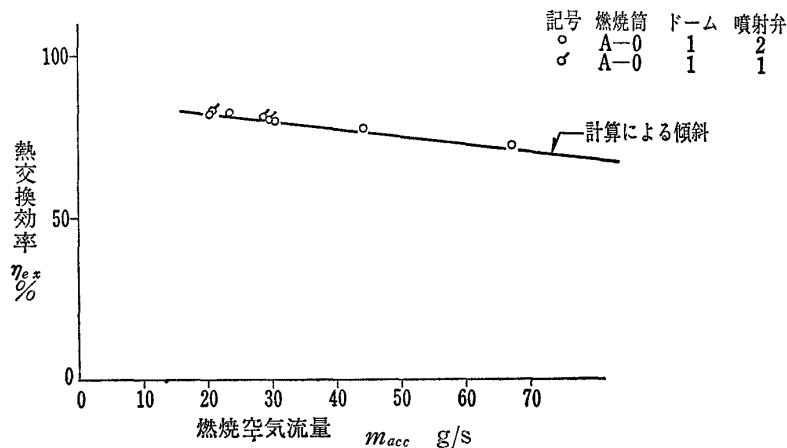


図 9 熱交換効率

すると

$$\alpha \propto m_{acc}^{0.8}$$

となり、交換器を通過する時間を考慮すると

$$\eta_{ex} \propto \frac{m_{acc}^{0.8}}{m_{acc}} = m_{acc}^{-0.2}$$

となる。この関係は平板の乱流熱伝達についても同様である。図 9 中にこの計算による傾斜を画くと、測定点と良く一致しているので、熱交換効率の変化の支配的要素は乱流の熱伝達と思われる。

6. 4. 黒煙の発生

予備実験中に熱交換器の燃焼ガス出口から黒煙の排出が見られた。当量比が 1.2 以下の時ボイラー等の一

般的燃焼器出口の黒煙を測定する計器においては、測定範囲を超えてしまった。このような場合には、ガスタービン燃焼器の一次燃焼領域で発生する炭素堆積物と同様なものが¹⁰⁾、燃焼筒壁面に付着した。この量は、5 分間の実験中に、最も堆積し易い条件では点火栓近くに 10~13mm 位の厚さに達する。

7. 燃焼器単独実験

この実験は、直接に作動中の燃焼状態を観察できること、および燃焼筒の交換が容易であることから、主に燃焼振動、内部燃焼状態、炭素の堆積、出口から延びている火炎の形状等を測定した。

7. 1. 圧力損失係数

燃焼器単独の圧力損失係数は、燃焼筒出口を大気開放にしているので、燃焼空気出入口差圧と燃焼空気入口動圧の比で求めた。この値は付表4に示すように2.0~2.6程度であり、熱交換器を含む圧力損失係数の値7~14に比べると $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{6}$ になっている。最も圧力損失が問題となるような、当量比が小さくて総合効率の低下する実験条件において、A-0燃焼筒は燃焼筒単独で、2.17、熱交換器を含む場合に13.95の値で、その比は0.155となる。C-1燃焼筒の場合は燃焼筒単独では2.0の値なので、燃焼筒の改良によって圧力損失を減ずる効果は1.5%程度、当量比の改善は0.75%程度である。このことから燃焼筒の圧力損失係数は、燃焼筒の評価においてそれほど直要な因子とはならない。

7. 2. 燃焼状態の観察

燃焼筒内部の火炎の色を付表4に示す。当量比の小さい所では、噴射弁に近い前流側はほとんどの燃焼筒で暗い色となっている。特にA-1およびA-2燃焼筒は、黒い色となり燃えていない。A-1燃焼筒は第1および第2列の空気孔面積が大きくて、前流への空気流入量が多くなるようであるが、実際には後の図14(a)に示すごとく、空気孔直径と孔数は噴射弁の方から来る流れを、せき止める効果をし、循環領域への流入空気は少ないので燃料過濃となり燃焼しないと見られる。A-2燃焼筒においても同様な効果が第2列目の千鳥配列によって起こり、燃焼し難いものと思われる。このように燃焼筒円周にそって壁状に空気孔が配列される場合は、燃焼状態は良くなかった。逆にC系統の燃焼筒はA-2燃焼筒と反対に循環領域へ入る空気量が多くなり

過ぎる傾向がある。また空気孔配列から考えても最も中心部まで空気が達するので、燃焼空気流量が多くなって来ると循環流の速度が増加して保炎性能が悪くなり、振動燃焼を起こす。このことは噴射弁近くの壁面に付く炭素堆積が振動燃焼の強さに関係していて、振動の強いものほど炭素堆積が少ないことから流れが早くなっていることが認められる。結局火炎の色からはA-4燃焼筒を除いたA系統のものおよびB-1は良い燃焼をしているとは云えない。また、C系統は振動燃焼をする。

7. 3. 炭素の堆積とその対策

燃焼筒の壁面に付着する炭素の形態は、硬く層状になる場合と、柔らかく堆積又は芝草状になる場合の二つに分けられる。5分間の実験中に生成し堆積する炭素は柔らかい場合が多く、燃焼筒出口付近では燃焼中に炭素が芝草状に成長して来るのが観察できる。これはガス状の燃料から分解生成されるものであろう。硬い炭素は長時間の実験により、柔らかい炭素ができる場所に塊り、または層状にできる。このような場合は液状燃料が分解してできるものと思われる。これらの炭素の堆積は、ガスの流れ、組成、温度、壁面の温度、壁への燃料の衝突および燃料の性状等によって影響される^{11),12)}。この実験では、全ての燃焼筒において、炭素の堆積は図10に示す代表的な例とほとんど同じ場所に付いた。噴射弁に近い所では流れのよどむ所であり¹³⁾、出口に近い所は燃料過濃ガスが高温で分解されるもので、各燃焼筒でこれらの条件があまり変らないものと思われる。

炭素を堆積させないようにする対策は、上にあげた

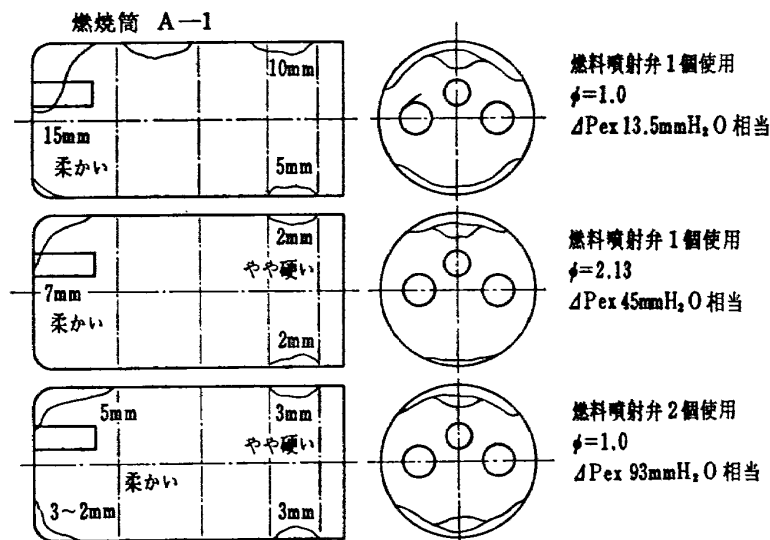


図 10-1 炭素堆積の例

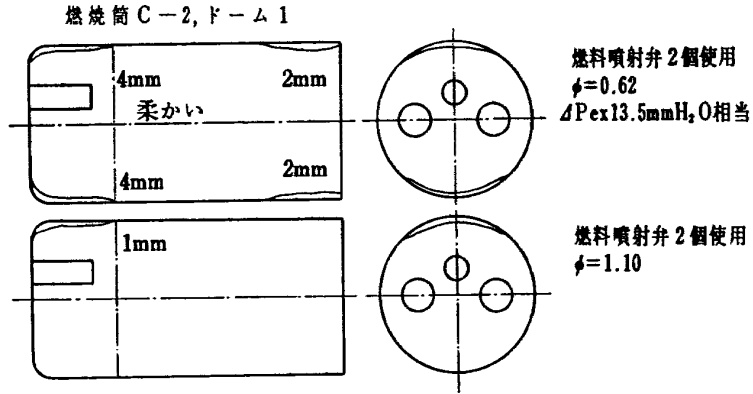


図 10-2

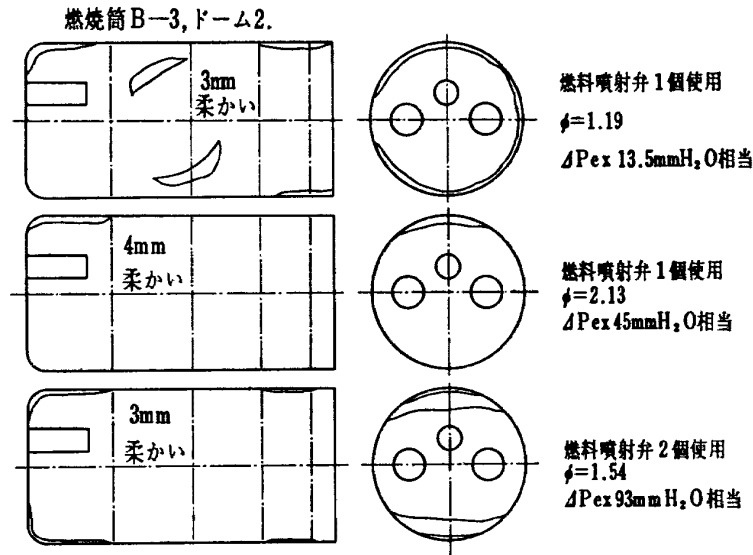


図 10-3

堆積に影響する因子を利用することである。付図24に示すドーム及び図11(a)に示す燃焼筒に直径 3mm の孔を明けて効果を調べた。その結果、図11(b), (c)に示すようにドーム付近に堆積する炭素は燃焼筒に孔を明けたものよりもドームに明けた方が効果があった。これはドーム付近の流れの因子が変わって炭素が堆積しなくなったものと思われる。一方燃焼筒出口近くに堆積する所ではガス流速が早いので、図11(d)に示すように孔を明けた部分から下流には付かなくなるが、ドーム付近のように全体的効果がないので燃焼筒 B-33 のように少し前流側に、孔の数を多く明けねばならなかった。したがってこの部分は、孔を明けるよりもルーバー形式のほうが良い。

この実験から炭素堆積は、壁面に小さな孔を明ける

ことにより解決された。

7. 4. 出口における火炎の形状

燃焼器の出口から出る火炎の長さは、一般の燃焼器では性能評価の重要な項目となる。この燃焼器では火炎の長さは付表 4 に示すように、15cm から 140cm まで燃焼器出口直径の 1.5 倍から 14 倍まで変化した。当量比が小さくて、火炎の長い場合には乱流拡散火炎で燃焼している単筒のバーナの現象に近い。乱流拡散火炎の場合、火炎長さはガス流速に関係しないで一定となる¹⁴⁾。この実験においても流速には、ほとんど関係しない。火炎長さは主として、図12に直すように $1/\phi$ (燃料濃度と考えられる値) と相関関係が非常に強いので、近似的に各燃焼筒ごとに、 $\phi \times l$ (当量比 \times 火炎長さ) の加算平均値を求めて燃焼筒の特性火炎長さ l' とし

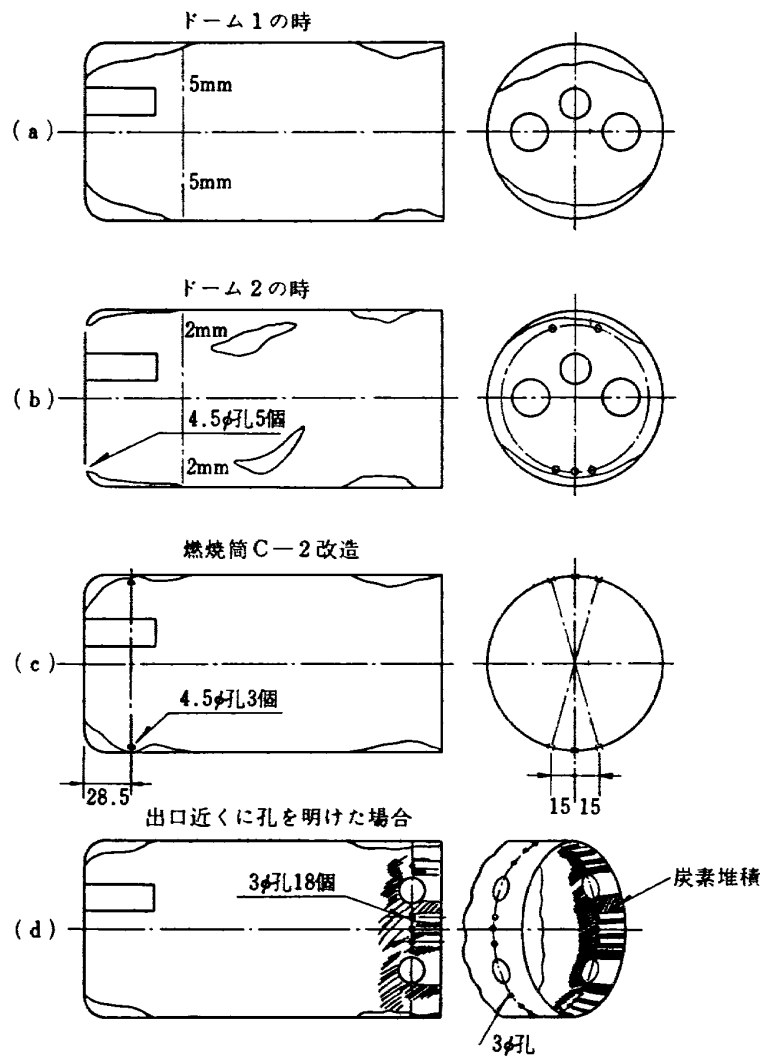


図 11 炭素堆積の対策と効果

た。

各燃焼筒の火炎形状を良く観察して見ると、当量比の大きな時に図13に示されるように三つのグループに分けられる。この違いは燃焼筒出口におけるガスの混合に関係している。また、混合は燃焼器後半から入る流入空気の貫通度に左右されるため、貫通度と特性火炎長さの相関を求めた。

空気孔からの空気の貫通度は次の実験式を利用した¹⁵⁾。

$$Y = 1.6 \left[\left(\frac{u_j}{u} \right) \left(\frac{\gamma_j}{\gamma} \right) - 1 \right]^{\frac{1}{2}} d_j \quad (1)$$

ここで u_j : 流入空気速度

u : 燃焼筒内を軸に平行に出口へ流れているガスの速度

γ_j : 流入空気比重量

γ : 燃焼筒内ガス比重量

d_j : 空気孔直径

Y : 流入空気貫通距離

燃焼筒内の流入空気の状態は、図14(a)に示されるように貫通すると考える。この図の記号で示される温度(T)を1800°K一定と考えると、

$$\frac{\gamma_j}{\gamma} = \frac{1800}{293} = 6$$

となる。 u_j/u の値は二つの仮定により定めた。一つは燃焼筒前半に入る空気量は全ての燃焼器で同じ量とした。図14(b)に示す断面(A_1)を燃焼ガスが通過するものと仮定すると、 u_j は各燃焼器でほとんど一定であるから

$$u_j = C_1 \text{ (一定値)}$$

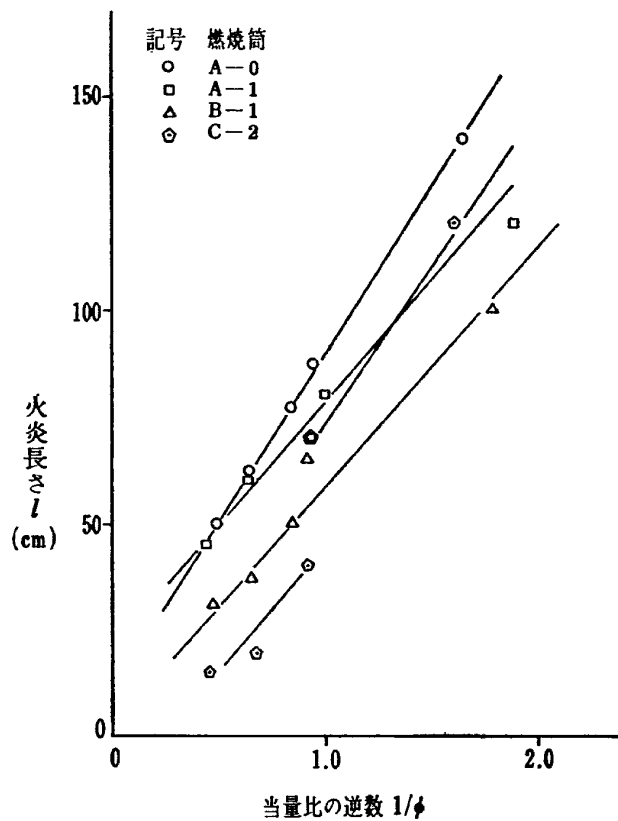


図 12 当量比の逆数と火炎の長さ

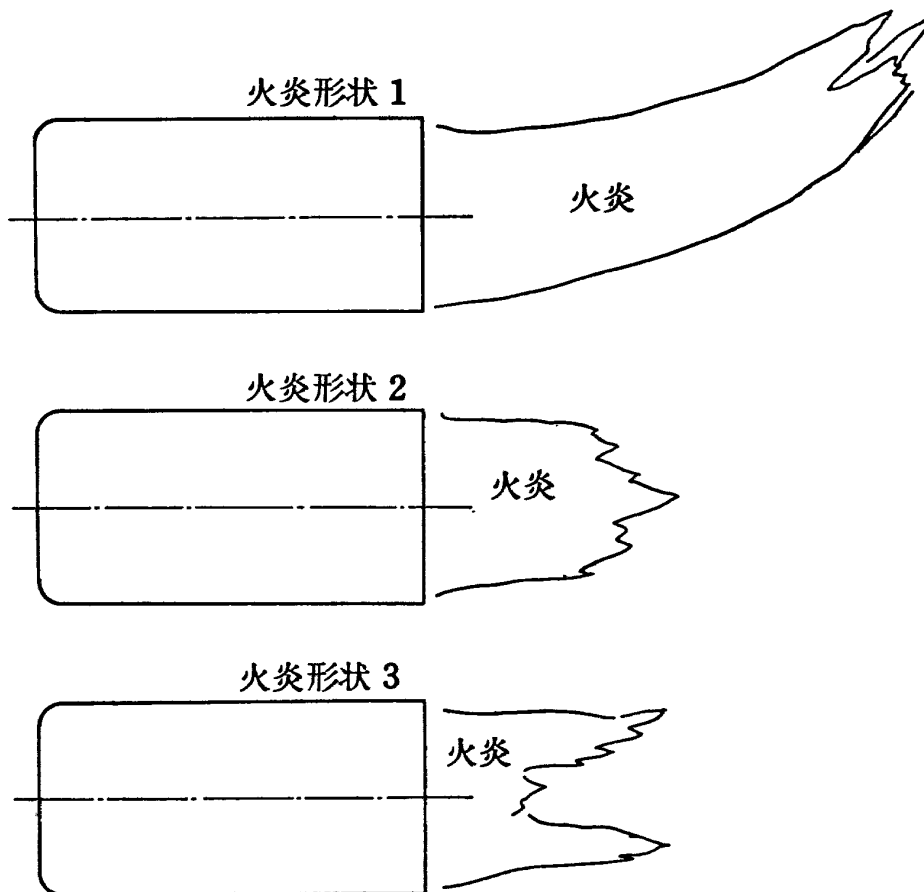


図 13 火炎の形状

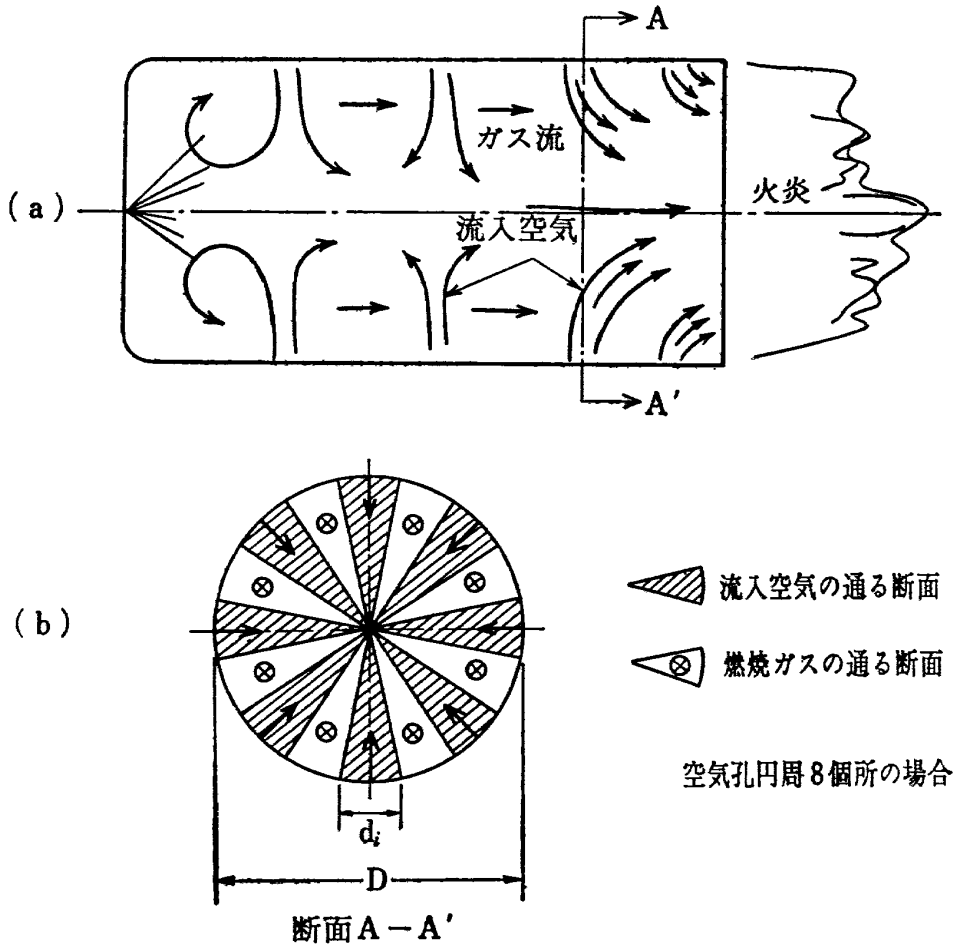


図 14 仮定した流入空気通路，燃焼ガス通路面積

$$u = \frac{C_2(\text{前半に入る空気流量})}{A_1} = \frac{C_2}{\frac{\pi D^2}{4} \times \frac{\pi D - d_j n}{\pi D}}$$

$$\frac{u_j}{u} \propto \left(1 - \frac{d_j n}{\pi D}\right)$$

ここで n : 円周上の流入空気孔個数

D : 燃焼筒直径

となり u_j/u の値は図14(b)のAの全断面積に対する断面積割合に比例する。 u_j/u の絶対値は 2~3 となるので r_j/r の値と合せて考えると Y に関する式の定数1は省略出来る。無次元表示のために D を導入すると

$$\frac{Y}{D} \propto P(D, d_j) = 1.6 \left[\frac{r_j}{r} \times \left(1 - \frac{d_j \times n}{\pi D}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{d_j}{D}$$

ここで関数 P は貫通度に比例する量として表示した。

が得られる。以上の変数の間の相関を図15に示す。 P

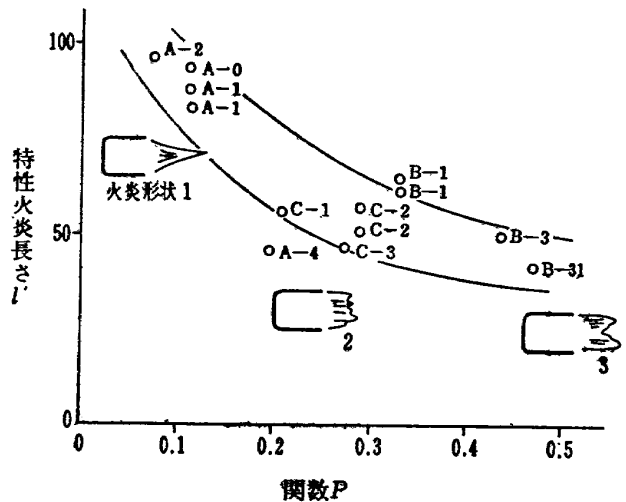


図 15 関数 P と特性火炎の長さ

の値が0~0.3までの間は相関が強いと考えられる。しかしこれ以上の値では火炎形状のグループから観察すると貫通空気は中心部に集まってしまっていて混合の度合いが一定値または、悪化してくるようであり、相関関係が少なくなる。実験点のばらつきは燃焼筒前半の混合の影響、火炎長さの測定誤差、特性火炎長さのばらつきおよび計算中の仮定等によって生じた。

以上のことは燃焼筒出口の中心部で測定されている温度にも影響を与えていて、図16に示すように燃料濃度と最高温度の関係が特性火炎長さによって決まってくる。

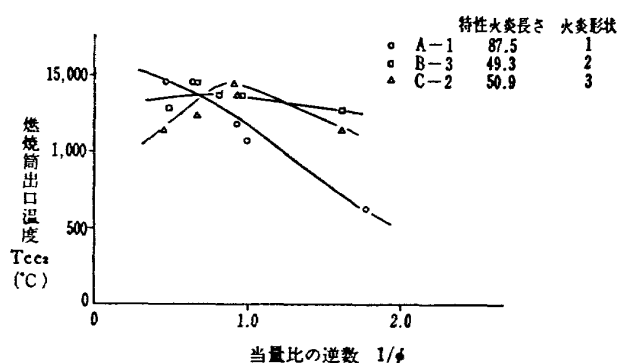


図 16 燃焼濃度と燃焼筒出口温度

8. 熱交換器入口管付実験

燃焼器単独実験において出口火炎の形状は三つのグループに分けられた。付表5に示す実験結果の中から各グループの比較をするために、A-0, B-3, B-31およびC-2燃焼筒について出口での温度、動圧および火炎形状を図17に示した。この図においてもC-2燃焼筒の特性は、前の実験と同様にA-0とB-3の中間的な特性になる。しかし火炎長さは各燃焼筒共に同程度である。この理由としては熱交換器入口管内で燃焼ガスの混合が相当に行われるためであろう。(図3参照)

ドームを付けて、ドーム付近の炭素堆積を少なくした場合は一般的に火炎中に炭素粒子の飛ぶ条件が、当量比の小さい方に移動する。またその量は少なくなってくる。

燃焼中の振動音は、燃焼器単独実験の時よりも出口に管状の装置が付いたためか生じ易くなった。

9. 組み込み実験

燃焼器単独実験の結果から系統ごとに二、三の燃焼筒を選び熱交換器に組み込んで試験をした。実験の都合で燃焼器単独実験、熱交換器入口管付実験および組み込み実験を一部で平行して行なったので、組み込み実験に

おいても燃焼筒は必ずしも系統ごとに改良されたものばかりではない。測定値および予備実験の項で示した整理方法によって得た結果を付表6に示す。以下これらの結果に検討を加える。

9. 1. 燃焼効率

図18に示すようにA-0, ドーム2を除いては各燃焼筒の効率はほとんど同程度であり、すべてのもので当量比0.65から2.5までの間は、完全に燃焼していると考えられる。これは燃焼領域として燃焼筒、熱交換器入口管および熱交換器通路まで含まれるために熱交換通路で燃焼ガスが冷却される以前に十分混合されるためであろう。このことは熱交換器入口管付実験においても火炎形状の比較(図17)において示されている。当量比0.65から0.55にかけて燃焼効率は非常に低下する。航空用ジェット・エンジンの燃焼器内の一次燃焼領域のガス分析においても当量比0.55になると急激に燃焼効率の低下することが観察されるので¹⁶⁾、この実験においてこれ以上の効率の上昇は望めないであろう。

9. 2. 全圧損失係数

全圧損失係数を前出の $F(\eta_c, \phi)$ と関係づけて示した図19中の実線によって、いずれの燃焼筒を使用した場合も同程度の値となっている。この図中において、平均的な直線より高い値を示す点は当量比が0.6以下の値で燃焼していた場合と、その直後に行なった実験で示された。原因は当量比が0.65以下になると炭素の発生が多くなって熱交換器内に炭素粒子が堆積し、空気力学的な抵抗を増加させることである。この堆積は次の実験においても燃焼ガス流速が遅いためか、吹き飛ばされずに残っていたものと思われる。

9. 3. 熱交換効率

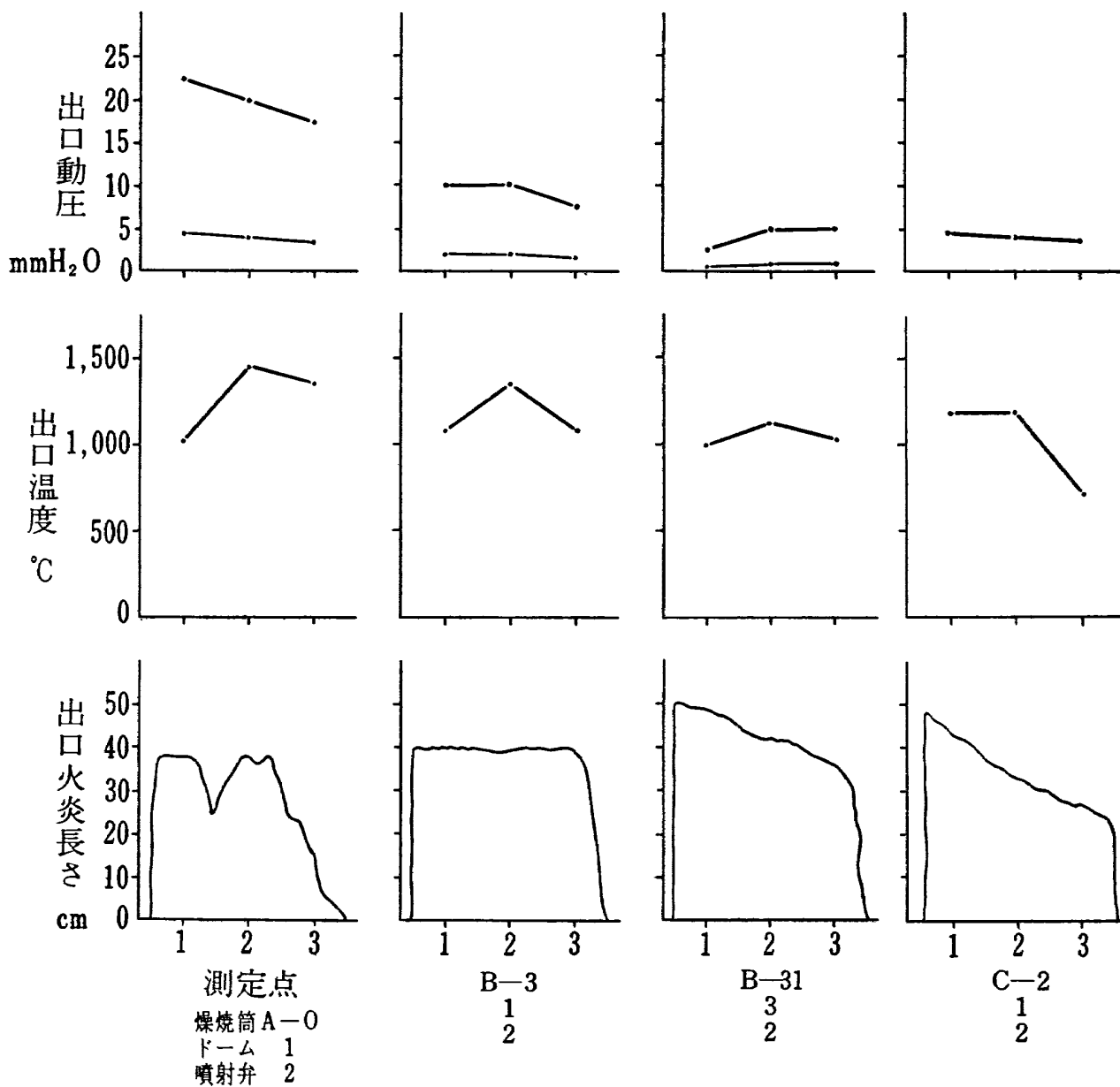
図20に示すように燃焼筒による違いはほとんど見られず、予備実験で示したように最も影響のある因子はガス流速であった。

一般に熱交換器は並流形と向流形で性能が異なるので、当熱交換器の十字流形式では入口温度分布、流速分布によって向流形に近い状態になると効率は並流形に近づくよりも上昇すると思われる¹⁷⁾。しかし熱交換器入口管付実験で示された出口分布の違い程度では効率に差がでなかった。

9. 4. 黒煙の発生

黒煙の量は、問題となる当量比0.5~0.7までの間を目測によったので明確な判定は得られなかったが、図21に示すような結果となった。いずれの燃焼筒でも当量比0.7以下に驗いては黒煙の発生が非常に多くなっ

通風空気相当出入口差圧 75mmH₂O



17-1 燃焼筒の違いによる出口測定値の比較

通風空気相当出入口差圧200mmH₂O

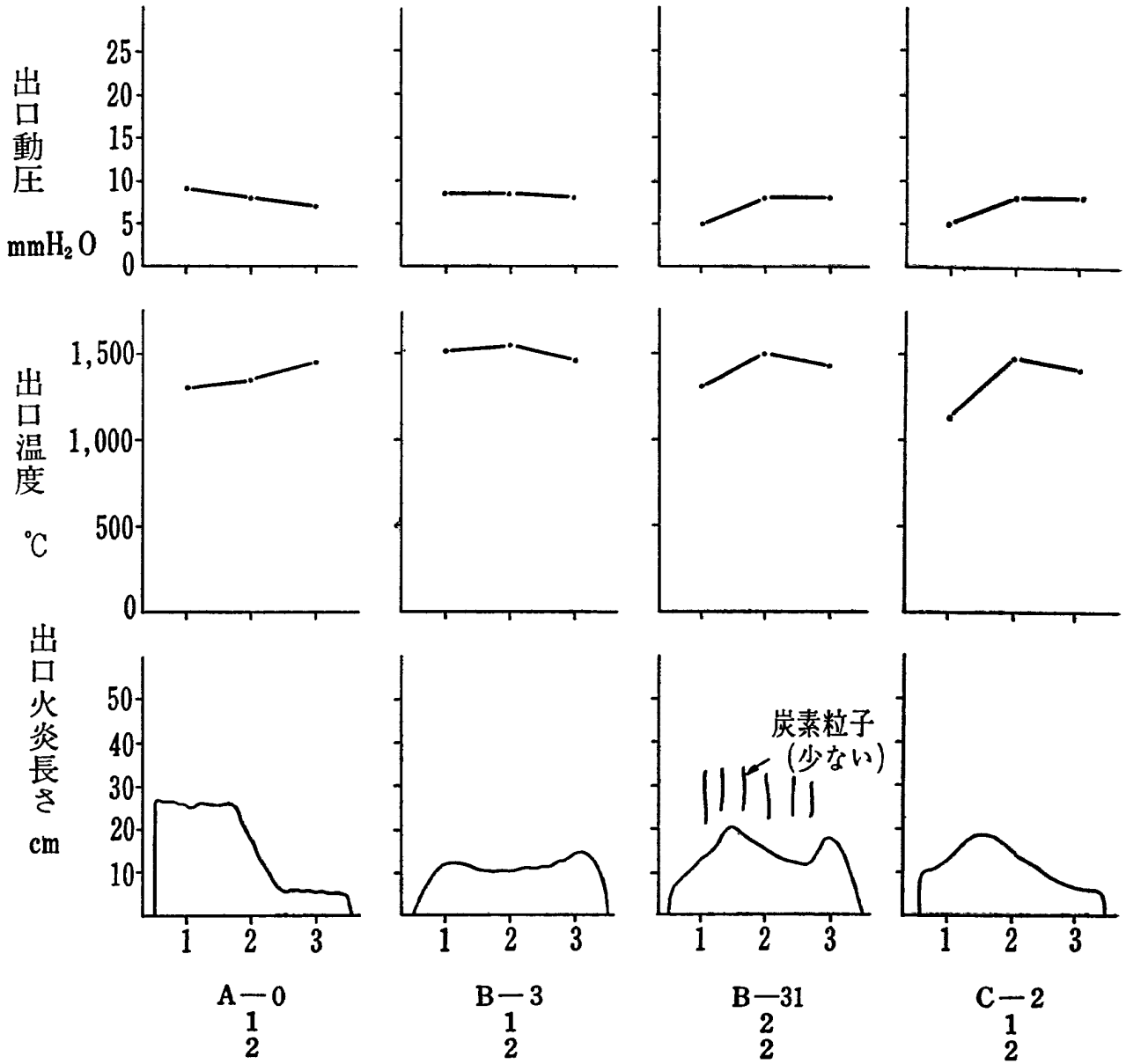


図 17-2

通風空気相当出入口差圧 250mmH₂O

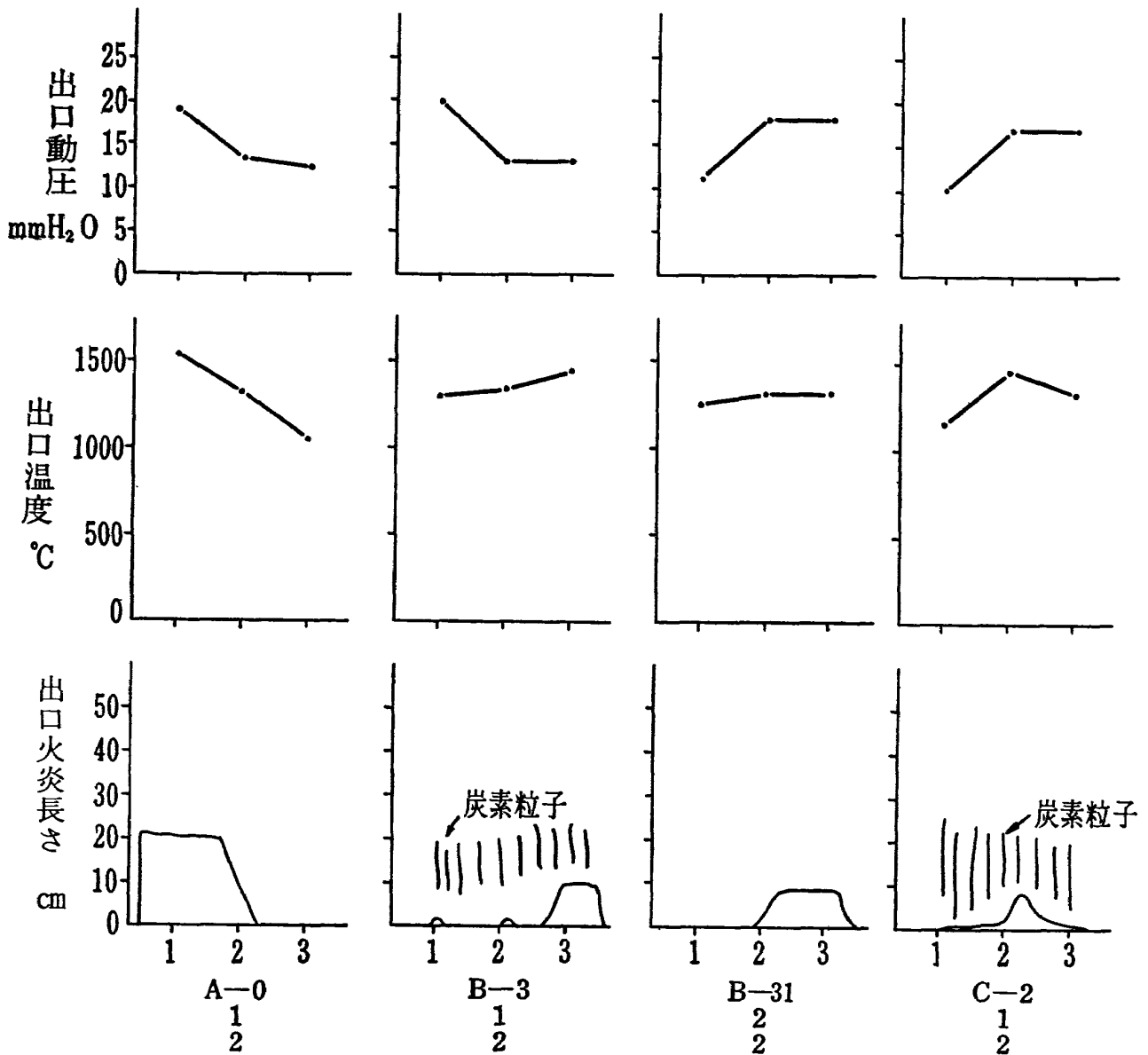


図 17-3

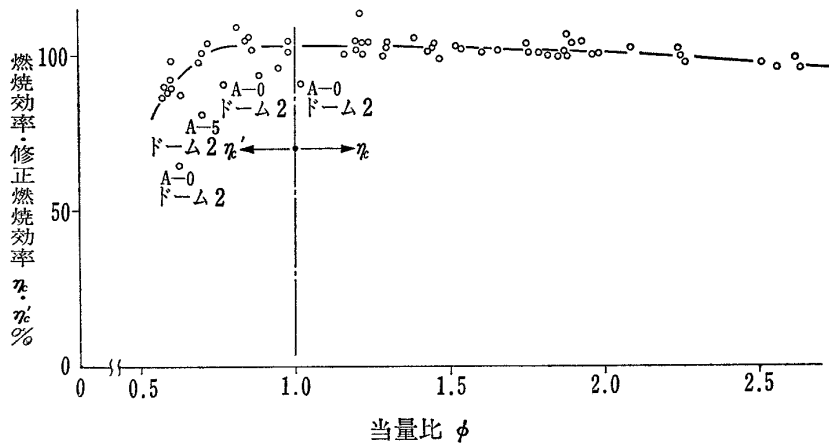


図 18 燃 焼 効 率

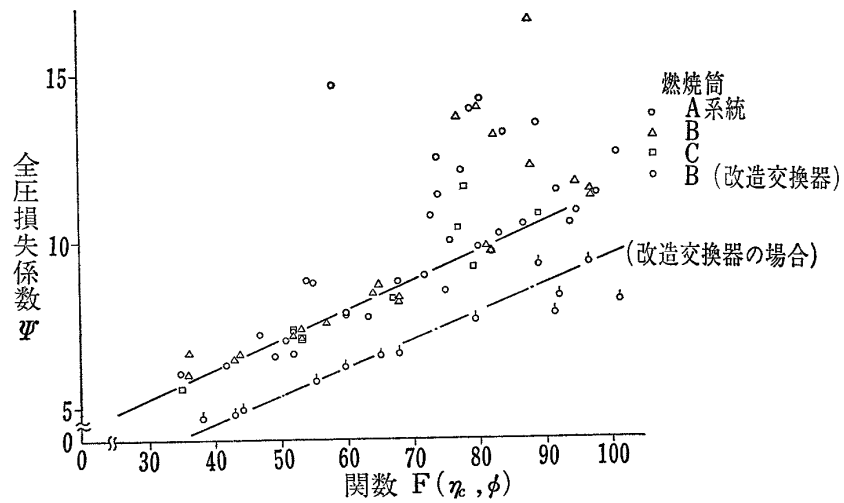


図 19 全 圧 損 失 係 数

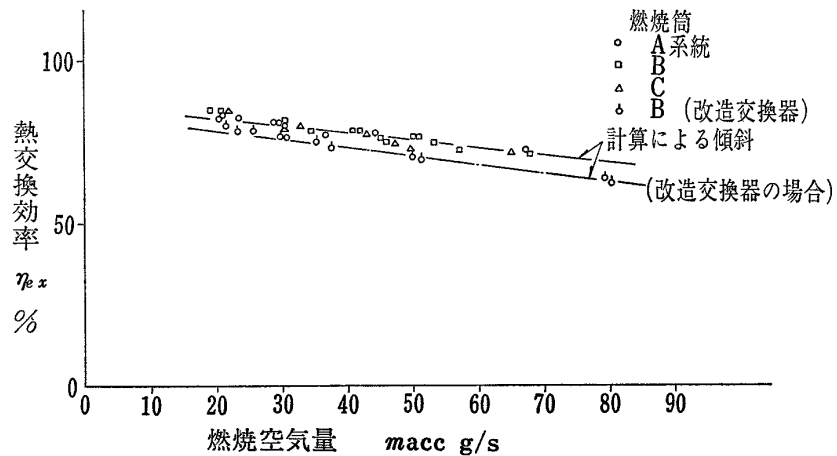


図 20 熱 交 換 効 率

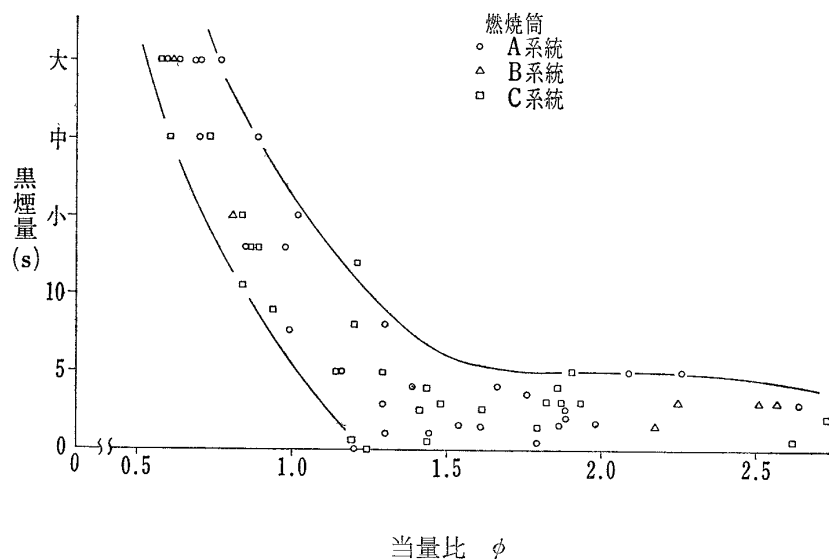


図 21 燃焼筒の系統による黒煙量

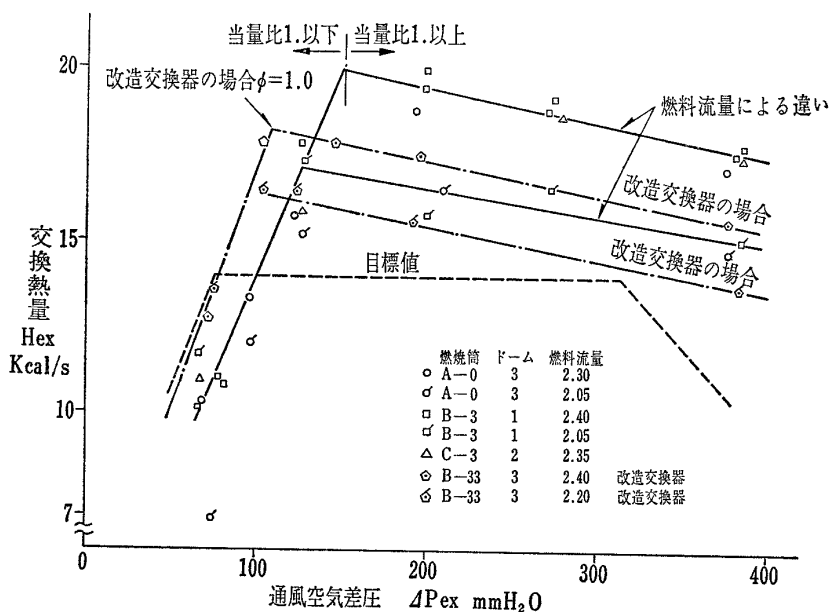


図 22 交換熱量

た。

9. 5. 交換熱量

交換熱量はヒーターの熱出力を表わす。各燃焼筒による値を図22の実線により示す。ここで当量比1以上と以下に分けて検討する。

当量比1以上の場合について、図中の値は各燃焼筒により少し違って来る。この値は実験時の燃焼流量の違いにより上下するので総合効率(ηs)と比較すると図23の実線で表わすようにほとんど差がなくなる。前に示したように燃焼効率も熱交換効率も各燃焼筒につい

てあまり差がないので、抵抗係数の違いが影響する程度であり、A系統燃焼筒よりB系統燃焼筒のほうがわずかに良い。これらの結果から当量比1以上の領域においては要求性能に対して特別な問題は生じない。

当量比1より小さい場合には炭素粒子の発生と交換熱量が量も主要な問題となる。特に当量比0.6以下になり炭素粒子の発生が多くなると熱交換器の抵抗が増加して、流入空気量が減少するのでますます当量比を低下させて悪循環を起し急速に性能を悪化させる。この領域の性能を改善するためには燃料を少なくする

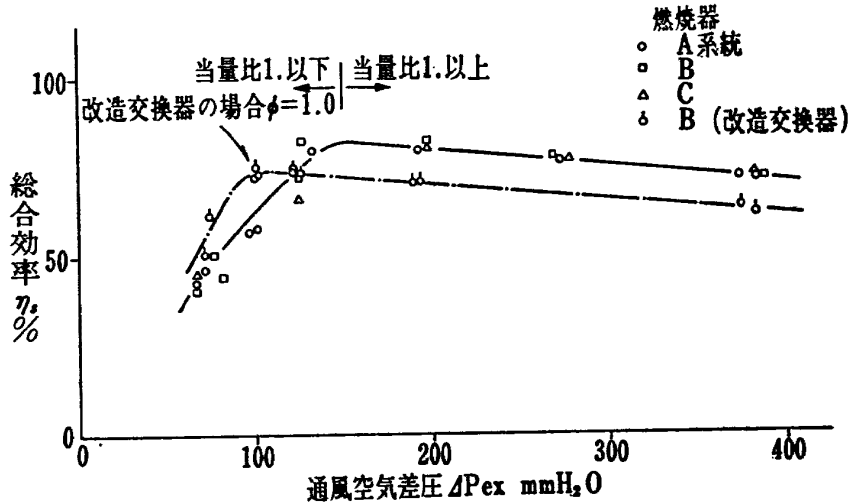


図 23 総合効率

ことおよび空気量の増加をはかることである。燃料を減ずる限界は通風空気出入口差圧312mmH₂Oの時交換熱量が14kcal/sになる様にする事である。空気量の増加は燃焼器以前の導入管路の抵抗および熱交換器の抵抗を減ずることにある。しかし交換熱量を目標値に達成するには全圧損失係数を40%減ずる必要がある。

10. 燃焼筒の選択

これまでの実験および検討をした範囲で、開発すべき燃焼器が必要とする性質を整理すると

- (1) 当量比の小さい状態においても確実に保炎して吹消えず、当量比の大きな場合でも振動燃焼を起こさないこと。
- (2) 排気中に炭素粒子を多量に発生させないこと。
- (3) 燃焼筒内面に炭素の堆積を起こさないこと。
- (4) 空気力学的な抵抗損失が少ないこと。
- (5) 燃焼効率が良いこと。

となる。これらの項目について各燃焼筒の比較評価を行なった。この結果表3に示すように B-33 燃焼筒にドーム2を付けたものが最も良いと判定された。

11. 改造熱交換器との組合せ実験

燃焼器の開発に関する、この報告の主目的ではないが熱交換量の目標値を満足させるために改造された熱交換器の性能を求めた(付表7)。改造された熱交換器は現在まで実験に使用して来た交換器に比べて、図19中の一点鎖線で示すように全圧損失係数が2~3(30~35%)小さな値となり空気量が増加する。逆に図20

表 3

燃焼筒	燃焼状態		燃焼筒壁面に堆積する炭素	空気量の少ない時の全圧損失係数	燃焼効率	評価順位
	保炎	振動				
A-0	少し悪い	無し	中位	2.17	少し悪い	6
A-1	悪い	無し	多い	2.43	良い	—
A-2	悪い	無し	—	2.69	—	—
A-4	普通	無し	中位	2.50	少し悪い	5
A-5	—	少し有り	—	—	良い	—
B-1	—	無し	中位	—	—	—
B-3	—	無し	少ない	—	良い	4
B-31	—	無し	非常に少ない	2.59	—	3
B-32	—	無し	非常に少ない	—	—	2
B-33	—	無し	非常に少ない	—	—	1
C-1	—	無し	中位	2.00	—	—
C-2	—	有り	少ない	1.13	—	—
C-3	—	有り	—	2.50	良い	—

に示すように全般的に熱交換効率は4~6%低下している。しかし空気流量の値が20g/sの条件では熱交換効率は低下しては、全圧損失係数の減少による空気量増加によって改造熱交換器の出力は図22に示すように目標値をほぼ満足する。特に燃料流量2.2g/sの場合は当量比も大きく(最小の条件でも0.7程度)排気中の炭素粒子も少なくなった。燃焼器入口の空気導入管付近の空気抵抗を少なくすることで交換熱量の目標値を達成できる。

ま と め

航空機に用いる単純な空気ヒーター燃焼器の開発を行なって次のような結果を得た。

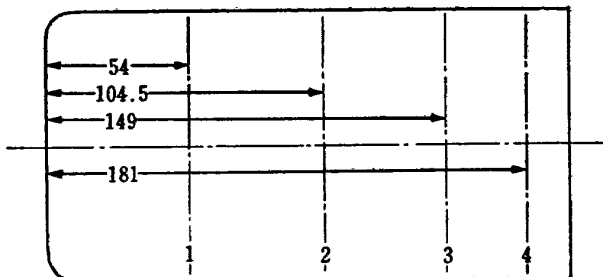
- (1) 当量比(空気過剰率) 0.65~2.24の範囲において、燃焼効率ほぼ100%、排煙の発生および燃焼器壁面への炭素堆積の少ない燃焼筒を開発した。
- (2) 当量比0.65以下においては炭素粒子の発生が著しく、熱交換器流路の抗抵を増加させるから作動範囲ではこれ以上にする必要がある。
- (3) 燃焼器出口に直接熱交換器が付いている構造においては、火炎が燃焼器出口から外に延びている場合でも熱交換器内部で燃焼するため燃焼効率を悪化させない。
- (4) 熱交換器入口における燃焼ガスの温度分布および流速分布が多少違ってても熱交換器の効率に与える影響はほとんど無い。
- (5) 当量比1以下においても燃焼器出口火炎長さは出口付近の空気孔配列で決定される。

終りにこの実験および資料作成に際し燃焼研究室鈴木邦男室長、小糸工業(株)平岡鉄吾氏および作道浩一氏に多々協力していただいた。

文 献

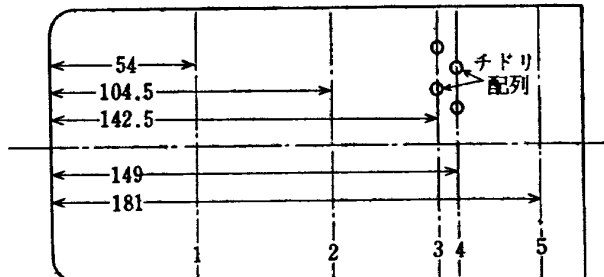
- 1) 古関昌次, 田寺木一, 泉日出夫, 太田幹雄, 峰岸正勝: 航空機の着氷気象条件について(I), 航技研究報告 NAL TR-101(1966年)
- 2) A“ Flight” Special feature : Protection Against Ice, Flight vol. 91 (1966), P71~767
- 3) 志賀正克: ボーイング727解説(2) 空気調整及び客室予圧系統, 航空技術 vol. 9 (1966), No. 3
- 3) MIL-H-5484C, Military Specification Heater : Air craft, Combustion Type, 23 March 1964
- 5) 航空技術研究所原動機部: 航空技術研究所のターボジェット・エンジン要素試験設備, 航技研究報告 TR-24 (昭和37年)
- 6) 田中敬吉, 出原清, 百合草三佐雄: ジェット・エンジンおよびガスタービンの燃焼ガスの状態量に対する新計算法ならびに値力学的特性, 日本機械学会論文集(第2部) 26巻 171号 (昭和35-11)
- 7) 大塚貞吉, 斎藤隆, 堀内正司, 本間幸吉, 宮坂彰: ガスタービン用缶形燃焼器における燃焼領域のガス組成と燃焼状態, 航技研資料 NAL TM-166 (1969)
- 8) 前出 7) の文献と同じ
- 9) 日本機械学会編: 伝熱工学資料, 日本機械学会 (1962)
- 10) Edmund R. Jonash, Jerrold D. Wear, and William P. Cooc : Effect of Fuel Variables on Carbon Formation in Turbojet-Engine Combustors, NACA Report 1352 (1958)
- 11) R. R. Hibbard and H. C. Barnett : Fuels for Turbojet Powered Aircraft, Selected Combustion Problems-II AGARD (1955) Butterworths Scientific Publications
- 12) 前出10) の文献と同じ
- 13) 西野宏: 逆流式環状燃焼室の研究, 機械の研究 vol. 13 No. 9 (1961)
- 14) Sakae Yagi and Kanjiro Saji : Problems of Turbojet Diffusion and Flame jet, Fourth Symposium (International) on Combustion 1953 The Williams & Wilkins Company
- 15) 鈴木邦男, 相波哲朗: 高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(I), 航技研資料 NAL TM-116 (1997)
- 16) 前出 7) の文献と同じ
- 17) 佐藤嘉信: 熱交換の理論とその応用, 産経技術研究所 (1963)

燃焼筒 A-0



空気孔列番	1	2	3	4
空気孔直径(mm)	6.4	6.4	6.4	6.4
空気孔数	19	19	30	30

燃焼筒 A-2



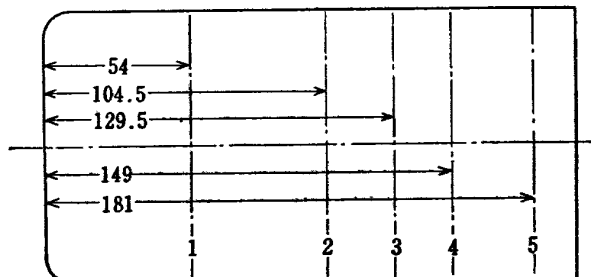
空気孔列番	1	2	3	4	5
空気孔直径(mm)	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
空気孔数	19	19	30	30	30

燃焼筒 A-1

(孔列の寸法はA-0と同じ)

空気孔列番	1	2	3	4
空気孔直径(mm)	9	9	6.4	6.4
空気孔数	19	19	30	30

燃焼筒 A-4

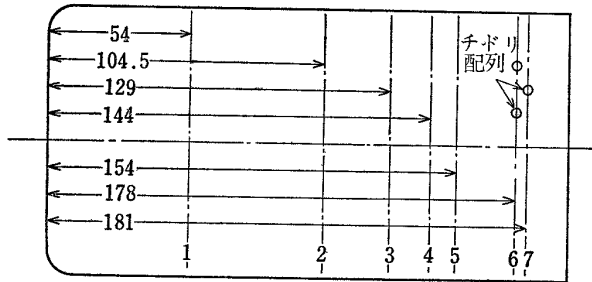


空気孔列番	1	2	3	4	5
空気孔直径(mm)	6.4	12.5	12.5	4.5	4.5
空気孔数	18	6	6	18	18

付図 24-1 燃焼筒空気孔寸法図

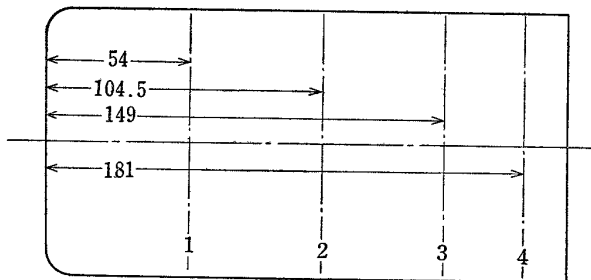
付図 24-2

燃焼筒 A-5



空気孔列番	1	2	3	4	5	6	7
空気孔直径	6.4	13	13	4.5	4.5	13	13
空気孔数	18	6	6	18	18	6	6

燃焼筒 B-1



空気孔列番	1	2	3	4
空気孔直径(mm)	9	12	12	12
空気孔数	9	9	9	9

燃焼筒 B-3

(孔列の寸法はB-1と同じ)

空気孔列番	1	2	3	4
空気孔直径(mm)	9	12	15	15
空気孔数	9	9	6	6

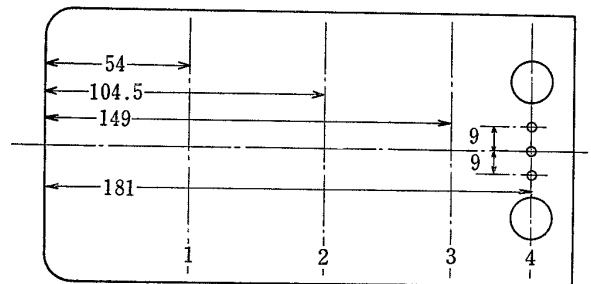
付図 24-3

燃焼筒 B-31

(孔列の寸法はB-1と同じ)

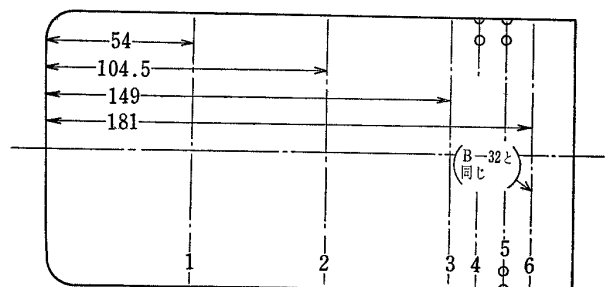
空気孔列番	1	2	3	4
空気孔直径(mm)	9	12	15	15
空気孔数	9	9	6	3

燃焼筒 B-32



空気孔列番	1	2	3	4
空気孔直径(mm)	9	12	15	15,3
空気孔数	9	9	6	6,18

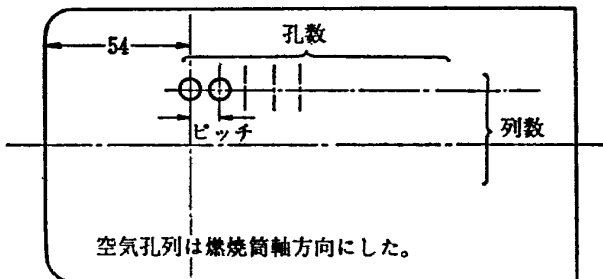
燃焼筒 B-33



空気孔列番	1	2	3	4	5	6
空気孔直径(mm)	9	12	15	3	3	15,3
空気孔数	9	9	6	3(上のみ)	6(上3下3)	6,18

付図 24-4

燃焼筒 C-1



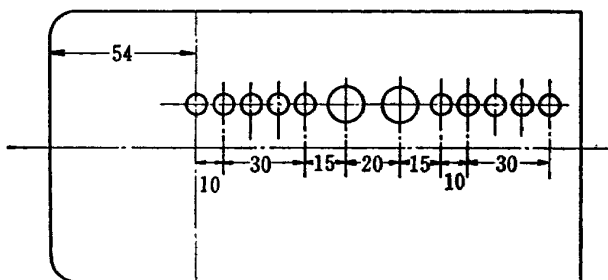
- 円周等配列数 8
- 空気孔直径(mm) 6.4
- 1列の孔数 13
- ピッチ(mm) 10

燃焼筒 C-2

(ドームと列最前孔までの寸法はC-1と同じ)

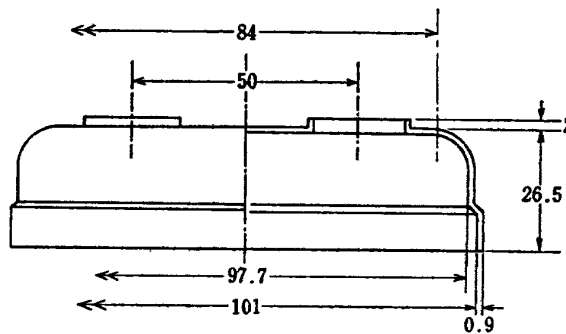
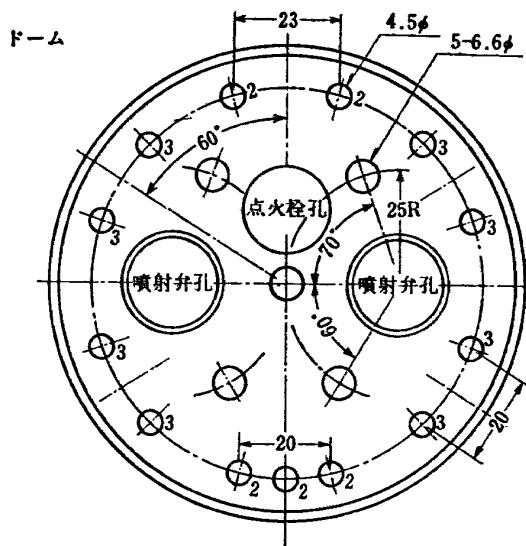
- 円周等配列数 6
- 空気孔直径(mm) 9
- 1列の孔数 9
- ピッチ(mm) 14

燃焼筒 C-3



- 円周等配列数 6
- 空気孔直径(mm) 6.5, 12.5, 6.5
- 1列中の孔数 5, 2, 5
- ピッチ(mm) 10, 20, 10

付図 24-5



- ドーム 1 4.5φ孔を全て明けないもの
- ドーム 2 4.5φ孔の内 2 の符号のもの 5 個所を明けたもの
- ドーム 3 4.5φ孔の内 2 と 3 の符号のもの 13 個所を明けたもの

付図 24-6

付表 4-1 燃 焼 器 単 独 実 験 結 果

実験 番号 No.	燃 焼 筒	ド ーム	噴 射 弁 個 数	通 風 空 気 相 差 % H ₂ O	当 圧 燃 焼 器 全 係 数 %	燃 焼 筒 の 火 色		当 量 比 φ	火 炎 長 さ l cm	特 長 性 火 炎 さ l' cm	出 口 温 度 °C	そ の 他 の 観 察 と 摘 要
						前 半	后 半					
9	A-0	1	2	75	2.17	青	暗	0.61	140	93.16	450	前半が少し燃えにくい。
10			1	75	2.23	輝	輝	1.19	77		1100	
11			2	200	2.32	紫	輝	1.01	87		860	
12			1	200	2.41	輝	輝	2.03	50		1320	
13			2	250	2.26	輝	輝	1.56	62		1070	
14	A-1	1	2	75	2.35	暗	輝	0.56	140	87.5	630	燃焼筒前半が良く燃えない、炭素の堆積も多い。
15			1	75	2.69	暗	輝	1.00	90		1070	
16			2	200	2.29	暗	輝青	1.07	80		1170	
17			1	200	2.25	輝	輝	2.13	50		1450	
18			2	250	2.27	輝	輝	1.54	50		1450	
19	A-1	2	2	75	2.50	青	輝	0.53	120	82.3	750	ドームにより炭素は減じた、燃え方も実験番号14より少々良くなった。
20			1	75	2.69	輝	輝	1.00	80		890	
21			2	200	2.29	輝	輝	1.07	70		1120	
22			1	200	2.28	輝	輝	2.24	45		1350	
23			2	250	2.29	輝	輝	1.54	60		1290	
24	A-2	1	2	75	2.69	暗	暗	0.50	135	96.3	980	前半はほとんど燃えない、炭素の堆積も多い。
25			1	75	2.69	暗	輝	1.00	88		1070	
26			2	200	2.22	暗	輝	1.10	90		1070	
27			1	200	2.18	輝	輝	2.24	51		1370	
28			2	250	2.18	輝	輝	1.61	70		1370	
29	A-4	1	2	75	2.50	青	輝	0.53	100	45.4	1170	
30			1	75	2.35	輝	輝	1.11	45		1370	
31			2	200	2.55	輝	輝	0.96	50		1470	
32			1	200	2.61	輝	輝	1.88	25		1370	
33			2	250	2.45	輝	輝	1.45	20		1370	

付表 4-2 燃 焼 器 単 独 実 験 結 果

実験 番号 No.	燃 焼 筒	ド ム No.	噴 射 弁 個 数	当 出 入 口 相 差 % H ₂ O	燃 損 失 係 数 % ψ _{cc}	燃 内 炎 の 色 燃 焼 筒 火 色		当 量 比 φ	火 炎 長 さ l cm	特 長 火 炎 さ l' cm	出 口 温 度 °C	そ の 他 の 観 察 と 摘 要
						前 半	后 半					
34	B-1	2	2	75	2.35	暗	青	0.56	120	64.3	1170	前半が良く燃えない。
35			1	75	2.35	輝	輝	1.11	55		1370	
36			2	200	2.25	輝	輝	1.09	60		1370	
37			1	200	2.22	輝	輝	2.21	30		1450	
38			2	250	2.27	輝	輝	1.54	40		1450	
39	B-1	1	2	75	2.35	青	輝	0.56	100	61.9	1170	
40			1	75	2.23	輝	輝	1.19	50		1370	
41			2	200	2.25	輝	輝	1.09	65		1470	
42			1	200	2.25	輝	輝	2.13	31		1370	
43			2	250	2.27	輝	輝	1.54	37		1520	
44	B-3	2	2	75	2.13	青	輝	0.62	95	49.3	1270	炭素堆積が少ない, 良く燃えている, 圧力損失が少ない。
45			1	75	2.13	輝	輝	0.81	45		1370	
46			2	200	2.36	輝	輝	0.96	53		1370	
47			1	200	2.36	輝	輝	0.48	17		1290	
48			2	250	2.27	輝	輝	0.65	27		1430	
49	B-31	1	2	75	2.59	青	輝	0.516	120	41.9	910	炭素堆積が少ない。
50			1	75	2.42	輝	輝	1.09	30		1250	
51			2	200	2.36	輝	輝	1.04	38		1410	
52			1	200	2.32	輝	輝	2.10	20		1170	
53			2	250	2.33	輝	輝	1.512	22		1370	
54	C-1	1	2	75	2.00	青	輝	0.65	100	55.3	1190	振動燃焼する。
55			1	75	2.00	青 輝	輝	1.29	57		1330	
56			2	200	2.41	輝	輝	1.20	60		1470	
57			1	200	2.36	輝	輝	2.07	20		1390	
58			2	250	2.31	輝	輝	1.53	23		1450	

付表 4-3 燃 焼 器 単 独 実 験 結 果

実験 番号 No.	燃 焼 筒	ド ー ム	噴 射 弁 個 数	通 風 空 気 相 差 %H ₂ O	当 圧 差 %H ₂ O	燃 焼 筒 の 火 色		当 量 比 φ	火 炎 長 さ l cm	特 長 火 炎 さ l' cm	出 口 温 度 °C	そ の 他 の 観 察 と 摘 要
						燃 焼 筒 全 係 数 %H ₂ O	燃 焼 筒 全 係 数 %H ₂ O					
59	C-2	1	2	75	2.13	青	輝	0.62	120	50.9	1130	炭素堆積が少ない, 振動燃焼する。
60			1	75	2.50	輝	輝	1.07	70		1370	
61			2	200	2.22	輝	輝	1.10	40		1370	
62			1	200	2.22	輝	輝	2.21	15		1140	
63			2	250	2.39	輝	輝	1.48	19		1230	
64	C-2	1	2	75	2.35	青	輝	0.56	125	57.4	1000	振動燃焼する, 炭素堆積が少ない。 (図11参照)
65	(改造)		1	75	—	輝	輝	0.87	85		1330	
66			2	200	2.36	輝	輝	1.04	50		1430	
67			1	200	2.36	輝	輝	2.07	25		1100	
68			2	250	2.33	輝	輝	1.51	26		1330	
69	C-3	1	2	75	2.50	青	輝	0.53	120	46.7	800	振動燃焼する。
70			1	75	2.50	輝	輝	1.07	46		1230	
71			2	200	2.36	輝	青	1.04	43		1370	
72			1	200	2.29	輝	輝	2.14	20		970	
73			2	250	2.33	輝	輝	1.51	22		1290	

付表 5-1 熱 交 換 器 入 口 管 付 実 験 結 果

実験 番号 No.	燃 焼 筒	ド ー ム No.	噴 射 弁 個 数	通 風 空 気 相 差 %H ₂ O	出 口 ガ ス 動 圧 %H ₂ O			出 口 ガ ス 温 度 °C			出 口 火 炎 長 さ cm			摘 要
					測 定 点			測 定 点			測 定 点			
					1	2	3	1	2	3	1	2	3	
74	A-1	1	2	75	4.5	4.0	3.5	1,025	1,455	1,355	38	38	10	
75			1	75	3.5	3.5	3.0	1,417	1,239	1,025	18	3	3	
76			2	200	9.0	8.0	7.0	1,335	1,375	1,197	27	27	6	
77			1	200	7.0	6.5	4.0	1,295	1,005	803	12	3	0	
78			2	250	19.0	13.5	12.5	1,535	1,317	1,045	20	10	0	

付表 5-2 熱交換器入口管付実験結果

実験 番号 No.	燃 焼 筒	ノ ム No.	噴 射 弁 個 数	通 風 出 入 空 気 口 相 差 %H ₂ O	出口ガス温度 %H ₂ O			出口ガス温度 °C			出口火炎長さ cm			摘 要
					測 定 点			測 定 点			測 定 点			
					1	2	3	1	2	3	1	2	3	
79	A-2	1	2	75	2.0	2.0	1.0	969	1,318	1,258	48	16	10	
80			1	75	2.0	1.5	1.5	1,219	1,239	913	23	23	5	
81			2	200	8.5	8.0	8.0	1,417	1,377	1,120	23	10	5	
82			1	200	8.0	7.0	6.5	1,278	1,025	856	12	3	0	
83			2	250	18.0	18.0	12.0	1,516	1,258	950	20	10	0	
84	A-4	1	2	75	3.0	4.0	2.5	1,160	1,160	1,160	35	30	5	
85			1	75	3.5	3.0	2.5	1,397	1,417	1,179	13	10	0	
86			2	200	9.0	8.0	7.0	1,456	1,496	1,476	14	13	3	
87			1	200	7.0	6.0	6.0	1,417	1,476	1,025	0	6	0	
88			2	250	18.0	20.0	12.0	1,476	1,535	1,377	10	6	3	
89	A-4	2	2	75	0.5	1.0	1.5	1,044	1,140	1,120	40	23	16	
90			1	75	1.0	1.5	2.0	1,044	1,318	1,298	8	17	10	
91			2	200	6.0	10.0	9.0	1,258	1,456	1,436	10	18	15	
92			1	200	4.5	6.5	7.0	950	1,239	1,100	0	10	8	
93			2	250	14.0	23.0	19.0	1,278	1,357	1,357	0	8	6	
94	A-5	3	2	75	2.5	4.0	4.0	1,120	1,397	1,100	42	30	16	少し振動音が出る。
95			1	75	2.0	3.0	3.0	1,100	1,140	1,219	20	12	18	
96			2	200	6.0	9.0	10.0	1,338	1,496	1,476	14	13	12	
97			1	200	4.0	6.0	6.5	1,180	1,025	1,006	1	2	5	
98			2	250	12.0	20.0	21.0	1,298	1,318	1,258	8	7	7	
99	B-3	1	2	75	2.0	2.0	1.5	1,080	1,355	1,080	40	40	40	
100			1	75	2.0	2.0	1.5	1,239	1,397	1,318	2	18	18	
101			2	200	8.5	8.5	7.0	1,515	1,535	1,455	12	12	14	
102			1	200	7.0	5.5	4.0	950	1,100	1,179	0	0	8	
103			2	250	20.0	13.0	13.0	1,295	1,335	1,435	0	0	10	炭素粒が燃えて飛ぶ。

付表 5-3 燃 焼 器 単 独 実 験 結 果

実験 番号 No.	燃 焼 筒	ド ム	噴 射 弁 個 数	通 風 空 気 相 差 %H ₂ O	出口ガス温度 %H ₂ O			出口ガス温度 °C			出口火炎長さ cm			摘 要
					測 定 点			測 定 点			測 定 点			
					1	2	3	1	2	3	1	2	3	
104	B-31	2	2	75	0.5	1.0	1.0	988	1,120	1,025	50	40	35	
105			1	75	0.5	0.5	0.5	1,081	1,219	1,199	12	22	15	
106			2	200	5.0	8.0	8.0	1,298	1,496	1,436	20	10	18	
107			1	200	2.5	4.5	4.5	988	1,179	931	0	2	10	
108			2	250	11.0	18.0	18.0	1,258	1,318	1,318	0	0	8	
109	C-2	1	2	75	4.5	4.0	3.5	1,179	1,179	1,140	48	25	22	
110			1	75	2.0	3.0	3.0	1,081	1,298	1,179	10	24	15	
111			2	200	5.0	8.0	8.0	1,141	1,496	1,417	15	18	5	
112			1	200	4.0	6.0	6.0	819	1,278	931	0	10	0	炭素粒が燃えて飛ぶ。
113			2	250	10.0	17.0	17.0	1,159	1,476	1,337	2	0	2	振動燃焼している。

付表 6-1 組 込 み 実 験 の 結 果

実験 番号 No.	燃 焼 筒	ド ム	噴 射 弁 個 数	通 風 空 気					燃 焼 空 気					燃 料 流 量 m _f g/s	交 換 熱 量 H _{ex} kcal/s	当 量 比 φ	総 合 効 率 η _s %	熱 効 交 換 率 η _{ex} %	燃 焼 効 率 η _c %	修 正 燃 焼 効 率 η' _c %	全 損 失 係 数 Ψ	黒 煙 量 S
				入口 静 圧 %H ₂ O	出口 差 圧 %H ₂ O	入口 温 度 T _{ex1} °C	出口 温 度 T _{ex2} °C	流 量 m _{acc} g/s	入口 静 圧 %H ₂ O	出口 差 圧 %H ₂ O	入口 温 度 T _{cc1} °C	出口 温 度 T _{cc2} °C	流 量 m _{acc} g/s									
114	A-0	3	2	719	376	21	98	780.9	756	742	21	349	69.1	2.08	14.76	2.26	69.35	71.24	97.35	—	6.24	5
115			2	421	209	21	152	514.5	435	430	21	413	46.5	2.05	16.52	1.54	78.47	76.99	101.93	—	7.68	2.5
116			2	256	126	21	189	366	266	263	21	464	31.0	2.05	15.19	1.02	72.15	79.45	90.81	—	10.12	小
117			2	183	96	21	173	319.6	198	197	21	420	23.4	2.05	11.99	0.77	56.95	81.51	69.87	90.74	13.13	大
118			2	131	75	21	111	310.9	149	145.9	21	338	19.1	2.07	6.84	0.63	32.31	79.34	40.72	64.64	14.6	大
119	A-4	2	2	701	385	20	111	785.8	759	744	20	406	64.2	2.32	17.29	1.88	72.80	72.31	100.67	—	7.22	2
120			2	516	272	21	144	611.9	551	541	21	447	49.1	2.32	18.42	1.43	77.32	76.21	101.46	—	8.73	1
121			2	414	194	21	184	474.4	432	428	21	485	41.6	2.35	19.12	1.20	79.28	77.92	101.75	—	9.73	0
122			1	330	141	21	93	479.5	333	325	21	271	45.5	1.17	8.49	2.64	70.84	74.28	95.37	—	6.02	3
123			2	252	121	21	225	345.8	264	261	21	491	29.2	2.34	17.57	0.85	73.30	81.49	89.95	105.82	11.35	小

付表 6-2 組込み実験の結果

実験 番号 No	燃 焼 筒 No	下 射 弁 個 数	通 風 空 気					燃 燒 空 気					燃 料 流 量 m_f g/s	交 換 熱 量 H_{ex} kcal/s	当 量 比 ϕ	總 合 効 率 η_s %	熱 効 交 換 率 η_{ex} %	燃 燒 効 率 η_c %	修 正 燃 燒 効 率 $\eta'c$ %	全 損 失 係 數 Ψ	黒 煙 量 S	
			入口 静 圧 m/m H ₂ O	出口 静 圧 m/m H ₂ O	入口 温 度 T_{ex1} °C	出口 温 度 T_{ex2} °C	流 量 m_{aex} g/s	入口 静 圧 m/m H ₂ O	出口 静 圧 m/m H ₂ O	入口 温 度 T_{cc1} °C	出口 温 度 T_{cc2} °C	流 量 m_{acc} g/s										
124	A-4	2	1	207	94	21	134	348.1	207	203	21	323	30.9	1.17	9.61	1.79	80.19	79.43	100.96	—	7.81	0.5
125		2		142	64	21	189	259.	151	149	21	375	20.2	2.35	10.45	0.58	43.3	83.10	52.10	89.80	14.19	大
126		1		136	64	21	185	257.5	141	138	21	361	22.5	1.17	10.45	1.30	86.93	83.20	104.48	—	9.86	1
127	A-5	3	2	697	382	21	98	811.2	757	751	21	414	64.9	2.11	15.25	2.09	70.7	69.25	102.09	—	7.15	5
128		2		412	195	21	162	499.2	430	427	21	480	43.3	2.11	17.32	1.39	80.0	75.89	105.41	—	8.90	4
129		2		153	132	21	204	380.0	273	270	21	503	30.4	2.11	17.29	0.98	79.9	80.38	99.40	101.43	10.80	小
130		2		198	100	21	222	314.7	205	202	21	476	25.3	2.12	15.77	0.81	72.5	81.61	88.83	109.67	11.54	中
131		2		145	71	21	169	279.2	150	148	21	360	21.8	2.12	10.19	0.70	46.8	82.46	56.76	81.08	11.35	大
132	A-5	3	2	719	377	20	114	774.8	757	738	20	437	67.1	2.45	17.59	1.86	70.00	70.14	99.81	—	6.59	1.5
133		2		430	198	20	181	488.0	436	432	20	517	42.0	2.45	19.32	1.16	76.88	76.63	100.39	—	9.60	5
134		2		256	126	21	214	359.5	266	261	21	512	30.5	2.41	17.29	0.86	69.92	79.87	87.55	101.80	10.44	小
135		1		205	97	21	128	361.3	207	202	21	323	32.7	1.18	9.43	1.88	78.08	78.26	99.77	—	6.97	2.5
136		2		186	101	21	196	333.1	199	195	21	441	24.9	2.41	14.46	0.70	58.47	82.44	70.93	101.32	11.47	中
137		1		163	87	21	144	330.0	168	163	21	334	27.8	1.17	9.90	1.61	82.35	81.89	100.56	—	7.76	1.5
138		2		145	67	21	167	271.4	152	149	21	362	21.0	2.41	9.77	0.59	39.63	80.94	48.96	82.99	12.42	大
139		1		143	67	21	170	268.7	147	145	21	372	22.3	1.17	9.86	1.29	81.89	82.03	99.83	—	10.70	3
140	B-3	1	2	706	383	21	98	803.3	759	748	21	375	67.7	2.05	15.10	2.24	71.91	70.52	101.97	—	6.56	—
141		2		515	271	21	126	633.9	547	540	21	410	53.1	2.06	16.23	1.75	76.88	74.48	103.22	—	7.50	—
142		2		422	199	21	148	507.1	436	433	21	443	44.9	2.08	15.77	1.47	74.09	75.24	98.48	—	8.33	—
143		1		342	153	21	79	510.3	345	338	21	243	48.7	1.04	7.35	3.17	68.88	72.70	94.74	—	5.45	—
145		2		262	126	21	217	356.2	272	271	21	502	29.8	2.05	17.38	0.98	82.55	80.80	102.17	104.25	11.27	—
146		1		205	93	21	115	356.0	203	200	21	281	34.0	1.03	8.15	2.25	77.42	77.92	99.36	—	6.45	—
147		2		145	66	21	204	257.2	153	152	21	403	21.8	2.05	11.70	0.72	55.57	74.14	74.95	104.10	11.69	—
148		1		133	59	21	164	255.8	131	130	21	319	23.2	1.03	9.00	1.52	84.92	82.80	102.56	—	8.63	—

付表 6-3 組込み実験の結果

実験 番号 No.	燃 焼 筒 No.	ノ ズ ル 個 数	通風空気					燃焼空気					燃料 流量 mf g/s	交換 熱量 H _{ex} kcal/s	当 量 比 φ	総 合 効 率 η _s %	熱 効 交 換 率 η _{ex} %	燃 焼 効 率 η _c %	修 正 燃 焼 効 率 η' _c %	全 損 失 係 数 Ψ	黒 煙 量 S	
			入口 静圧 % H ₂ O	出口 差圧 ΔP _{ex} % H ₂ O	入口 温度 T _{ex1} °C	出口 温度 T _{ex2} °C	流量 m _{aex} g/s	入口 静圧 % H ₂ O	出口 差圧 ΔP _{cc} % H ₂ O	入口 温度 T _{cc1} °C	出口 温度 T _{cc2} °C	流量 m _{2ex} g/s										
149	B-3	1	2	716	380	20	114	776.8	762	762	20	404	65.2	2.38	17.63	1.86	72.42	72.49	99.90	—	7.19	4
150			2	496	270	20	145	620.9	534	534	20	444	50.1	2.38	18.88	1.43	77.56	76.41	101.50	—	8.28	4
151			2	400	197	20	184	482.	419	419	20	486	41.0	2.28	19.47	1.22	83.48	78.48	106.37	—	9.74	0
152			1	325	152	20	92	491.6	337	337	20	272	44.4	1.17	8.60	2.57	71.65	74.91	95.46	—	6.61	3
153			2	149	81	20	177	294.3	160.5	160.5	20	379	20.7	2.35	10.74	0.60	44.53	82.99	53.65	89.42	13.96	大
154			1	141	75	20	166	295.15	150	150	20	356	20.6	1.17	10.54	1.20	88.22	84.59	104.29	—	13.04	8
155			2	143.5	77.0	20	168	299.2	157	157	20	368	18.8	2.13	10.98	0.60	50.18	84.99	59.04	98.41	16.54	中

157	B-3	1	2	725	384	20	117	762.1	758	738	20	415	64.9	2.41	17.83	1.82	72.10	72.22	99.84	—	7.03	3
158			2	523	273	20	153	592.1	556	535	20	453	50.9	2.38	19.18	1.45	78.79	76.05	103.6	—	8.11	0
159			2	422	197	21	192	470.1	436	431	21	491	41.9	2.39	19.93	1.19	81.36	78.07	104.22	—	9.58	0.5
160			1	333	146	21	98	471.5	333	323	21	277	45.5	1.18	8.91	2.62	73.89	74.75	98.85	—	5.98	0.5
161			2	268	125	21	225	351.1	278	274	21	488	29.9	2.43	17.87	0.84	71.80	81.45	88.15	104.95	11.42	10~11
162			1	218	98	21	137	351.0	216	212	21	320	30.0	1.18	9.93	1.90	82.22	79.12	103.91	—	7.31	0.5
163			2	146	66	21	178	260.7	152	150	21	379	20.3	2.44	10.12	0.57	40.53	82.34	49.22	86.36	13.64	大
164			1	144	66	21	200	260.	149	146	21	374	21.0	1.17	11.54	1.21	95.85	84.86	113.0	—	12.17	小

165	C-3	2	2	704	384	21	112	788.1	754	746	21	421	64.9	2.35	17.42	1.87	72.35	71.66	101.09	—	7.10	3
166			2	492	278	21	144	619.0	529	525	21	445	49.9	2.35	18.65	1.44	77.35	76.25	101.3	—	8.20	0.5
167			2	418	198	21	184	484.1	433	430	21	485	42.9	2.35	19.51	1.24	80.90	77.80	103.99	—	9.15	0
168			1	332	146	21	97	485.6	334	328	21	267	47.4	1.17	8.79	2.74	73.12	74.43	98.24	—	5.56	2
169			2	262	125	21	220	354.6	272	269	21	505	30.4	2.33	15.89	0.88	66.50	78.82	84.37	—	10.76	小
170			1	211	96	21	135	355.1	212	209	21	312	32.9	1.16	9.84	1.93	83.0	79.49	104.41	—	7.21	3
171			2	142	67	21	185	269.2	152	150	21	380	21.8	2.36	10.93	0.63	45.18	82.49	54.77	86.94	11.54	大
172			1	138	67	21	180	268.8	142	140	21	348	22.2	1.17	10.54	1.29	87.95	84.05	104.63	—	10.37	5

付表 7 改造熱交換器による組込み実験の結果

実験 番号 No.	燃 焼 筒 No.	下 射 弁 個 数	通 風 空 気					燃 焼 空 気					燃 料 流 量 m_f g/s	交 換 熱 量 H_{ex} kcal/s	当 量 比 ψ	総 合 効 率 η_s	熱 効 交 換 率 η_{ex} °C	燃 燒 効 率 η_c %	修 正 燃 燒 効 率 $\eta'c$ %	全 損 失 係 数 ψ	黒 煙 量 S	
			入 口 静 圧 $\frac{m}{m}$ H ₂ O	出 口 静 圧 $\frac{m}{m}$ H ₂ O	入 口 温 度 T_{es1} °C	出 口 温 度 T_{ex2} °C	流 量 m_{aes} g/s	入 口 静 圧 $\frac{m}{m}$ H ₂ O	出 口 静 圧 $\frac{m}{m}$ H ₂ O	入 口 温 度 T_{cc1} °C	出 口 温 度 T_{cc2} °C	流 量 m_{aes} g/s										
173	B-32	3	2	832	383	21	114	602.45	756	735	21	418	80.25	2.17	13.67	2.507	61.41	62.68	97.98	—	4.62	3
174		2	474	190	22	197	356.55	435	421	22	514	51.25	2.16	15.58	1.610	70.40	69.80	100.86	—	6.19	2.5	
175		2	246	122	22	288	244.59	270	264	22	512	36.61	2.165	16.49	1.147	74.31	76.84	96.71	—	7.54	5	
176		2	210	102	22	311	224.02	202	197	22	607	29.78	2.153	16.47	0.938	74.63	76.78	97.19	98.87	8.21	9.0	
177		2	154	74	22	310	185.72	145	139	22	532	23.18	2.165	13.59	0.726	61.24	79.89	76.65	—	9.27	中	
178	B-32	3	2	841	375	21	134	565.07	759	740	21	451	79.23	2.397	15.60	2.242	63.49	63.93	99.31	—	4.77	3
179		2	476	194	20	226	341.7	436	425	20	558	50.07	2.413	17.50	1.408	70.76	70.62	100.20	—	6.54	2.5	
180		2	291	125	21	316	238.58	268	260	21	636	35.42	2.413	17.82	0.996	72.06	74.16	97.17	97.56	7.89	7.5	
181		1	214	86	21	168	239.77	188	182	21	351	37.63	1.175	8.69	2.173	72.18	73.33	98.42	—	4.92	1.5	
182		2	212	102	22	320	235.19	201	195	22	595	29.71	2.420	17.85	0.833	71.95	78.46	91.70	110.08	8.13	小	
183		1	168	76	22	196	218.69	150	145	22	377	30.81	1.169	9.49	1.788	79.22	76.90	103.01	—	5.77	1.5	
184		2	152	71	21	287	186.85	143	138	21	525	23.35	2.420	12.56	0.655	50.62	78.55	64.45	98.40	9.2	大	
185		1	136	64	22	224	187.31	122	117	22	410	25.49	1.169	9.48	1.479	79.13	78.28	101.09	—	6.5	3	

航空宇宙技術研究所資料 199 号

昭和 46 年 2 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) 182

印刷所 第一印刷株式会社
東京都新宿区富久町 58
