

7 ガスタービン用高温燃焼器の研究(第1報)

正 根 矢 清 (船舶技術研究所)
 正 *熊 倉 孝 尚 ()

1. はしがき

ガスタービンに低価油を用いるとタービン翼の汚損と腐食がおこるが、当所では、これの防止その他を目的とした特殊なガスタービンサイクルを考案し¹⁾、その実用化上の尚懸点について研究中である。

燃焼器については、一つの実物燃焼器を想定し、まず、燃料噴射弁の形式を選定するとともに燃焼器特性に及ぼす内筒側壁空気孔の影響を小形模型を用い常温常圧下で調べることにした。

ここでは、以上に関連し、現在までに得られた結果について述べる。

2. 想定した燃焼器の概要

研究に当っては、前記ガスタービンと蒸気タービンとの複合機関(出力 ≈ 7000 PS)を想定したが、これに用いる燃焼器の定格作動条件はつぎの通り。入口空気の温度(圧力、流量) $\approx 260^\circ\text{C}$ (6.7atm , $8.2\text{m}^3/\text{s}$)、出口ガス温度 $=1500^\circ\text{C}$ 、空燃比 ≈ 25 。

一方、同機関では、燃焼器を熱交換器と一体構造にすることが予想されるので(図-1)、燃焼器は1個の横置缶形、内筒構造は、容積・重量よりもカーボン生成と耐久性の点を重視して一た、直径 800mm の耐火材内張り式とした。これに伴い、内筒内の定格平均風速(入口状態換算)は約 $3.8\text{m}^3/\text{s}$ となる。

以下、上述の燃焼器を実物と仮称する。

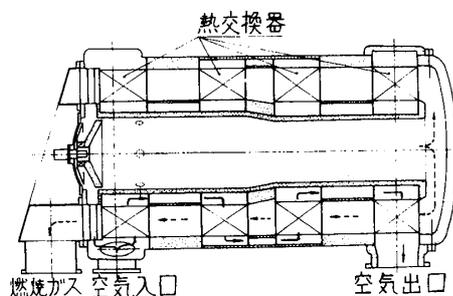


図-1 構造概念図

3. 燃料噴射弁形式の選定

おもに、燃焼性能に及ぼす噴霧特性(噴霧形状と微粒化特性)の影響を考慮して定めた。渦巻噴射弁の、高圧下の燃焼障害：渦巻噴射弁の欠点の一つは、高圧下では噴射弁近くの燃焼器中心部に燃料過濃な領域ができ燃焼効率が低下するとともに排煙が増すこと、である。

ここで重要な点は過濃領域の成因であり、成因として高圧下における油粒の貫通度の低下を挙げるものもいるが、筆者の一人は、高圧下における噴霧のしほみの増大も大きな成因と考えている。

なお、筆者の一人は、変圧下の噴霧特性を調べしほみの機構その他を明らかにした

が²⁾、それによると、中空円すい状噴霧は気体中ではしぼみ、しぼみ量は気体圧力が高いほど大きい。

望ましい噴霧形状：渦巻噴射弁が広く用いられている理由の一つは、噴霧形状が缶形の燃焼室に通していることであろう。実物燃焼器も缶形であるので、噴霧の全体形状は中空円すいに近いものにした。

前述の考之によれば高圧下の燃焼障害を防ぐには噴霧がしぼまないことが肝要であり、これを達成する方法の一つは噴霧を多孔式ホールノズルからの噴霧に類する構造にすることである。すなわち、この種の噴霧は、全体としては中空円すいに近いが個々の孔からの噴霧は通常互に隔離しているので、渦巻噴射弁の噴霧のしぼみの機構²⁾から類推すると高圧下でもほとんどしぼまないはずである。ただし、隔離が不十分ならばしぼむであろう。

微粒化特性：重油の微粒化には微粒化特性の点で二流体式が適している。これでは必然的に高圧の気体を要し、この点は、一般には短所とされるが、前述の複合機関では高圧蒸気源がすでにあるのでさほど向題にならない。

噴射弁の形式：前述の望ましい噴霧形状が得られる蒸気微粒化式には多孔式のYジェット形(図-3参照)その他があるが、燃料流量制御の点を考慮して一応、Yジェット形を選んだ。したがって、選定した噴射弁の形式は、個々の噴霧が十分隔離した多孔式Yジェット形蒸気微粒化式である。

4. 燃焼器特性に及ぼす内筒側壁空気孔の影響

4.1 内筒側壁空気孔に関する向題点

実物燃焼器のおもな特長は、空燃比が小さい、低價油を用いる、耐火材内張り式、多孔式噴射弁を用いる、などである。解決すべき向題点は多いが、ここでは、内筒側壁空気孔(以下、内筒空気孔と略称)に関するそれについてのべる。

一般に、低價油(障害防止剤の添加も考慮)を燃焼したとき耐火材表面が焼損することがあり、有効な防止策の一つは炎を表面から遠ざけることである。実物燃焼器では噴射弁が多孔式であるため個々の噴霧流の炎が内筒壁に觸れるおそれがあり、この場合の対策には、内筒壁からの空気噴流によって炎を偏向させることが考えられる。

しかし、内筒空気孔を他の観点からみると、内張り構造の耐久性の点ではこれを設けない方が望ましいと思われ、燃焼(それ自体)の点でも、主として空燃比が小さいことに関連してこれを設けずにすむ可能性がある。

このような事情により、内筒空気孔の有無による燃焼器特性(含・炎の状況、以下、同じ)の相違を調べることにした。

4.2 実験要領

小形模型を用い、常温常圧下で燃焼器特性と冷間ガス流れを調べた。

1) 燃焼実験

a. 実験装置

供試燃焼器： 実物に似た形の全金属製で、構造(ただし、内筒は空気孔つき)を図-2に示す。実験では、内筒の出口面積と図のしを変えた(詳細は後述)。

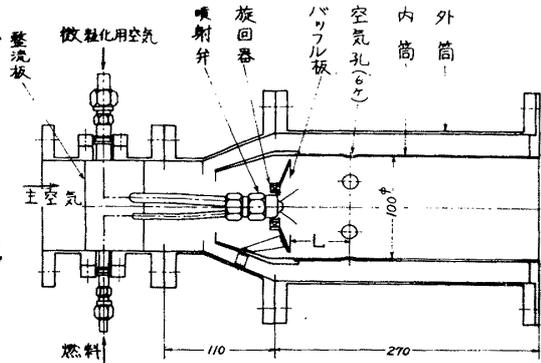


図-2 供試燃焼器(内筒は孔つきの図)

燃料系統： 比重(15/4℃)≒0.80, %H比≒6.2の灯油を空気で微粒化した。用いた噴射弁の構造と噴霧外観を図-3に示す。

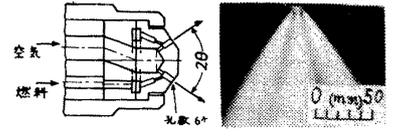


図-3 供試噴射弁
〔Yジェット形〕
a. 構造(2θ=70°) b. 噴霧外観
〔灯油, 1.0%, 静止大気中〕

主空気系統： これを図-4に示す。燃焼効率算定用の試料ガスは、絞り弁出口端から650mmの管内の一点から水冷式採取管を用いて採取した。

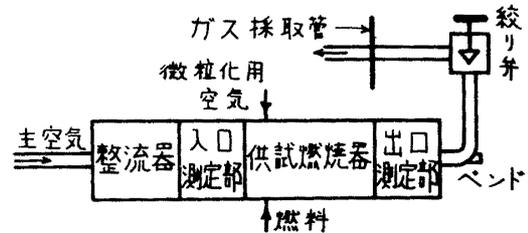


図-4 主空気系統図

b. 実験条件

内筒平均風速(入口状態)=3.8%_sの下で総空燃比を変えた。ただし、重量流量比(微粒化用空気/燃料)は常に0.8にした。空気孔を設けた内筒を用いる場合、これと噴射弁の噴霧孔との円周方向関係位置は対向形(正規)および嚙合形(参考用)とした(図-5)。

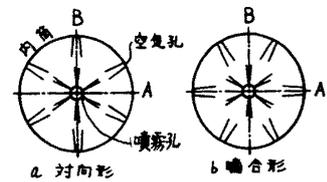


図-5 内筒空気孔と噴霧孔との円周方向関係位置

c. 特性の表示

燃焼効率： 試料ガス中のCO₂の量をオルザート分析計で調べ、次式から算定した。

$$\eta_b = \frac{[\text{実際に生じたCO}_2\text{の量}(\%)]}{[\text{完全燃焼したときに生ずべきCO}_2\text{の量}(\%)]}$$

その他： 炎の長さや燃焼音を測る場合は燃焼器出口を開放し、前者は出口端からの長さで表わし、後者は騒音計で測定した。

2) 冷間ガス流れ

供試燃焼器： 燃焼実験用とほぼ同一構造(ただし、透明)とし、燃料噴射の影響を調べるには、空気噴射器(2θ=70°, 6孔)を用いて空気を噴射した。

実験条件： 特殊な場合を除き、内筒平均風速を3.8%_sとし燃料(実験では空気)を噴射した場合としない場合を調べた。燃料噴射に際しては、燃料と主空気との流量比およびモーメント比を定格燃焼時(風速=3.8%_s, 空燃比=25)におけるそれら

に、それぞれ等しくした。

観測要領: 流れ模様は、くし形ストリーマを用い、多くの場合、2断面(図-5のA, B. 内筒空気孔がない場合もこれに準ず.)について調べた。内筒前半部にできる環状渦(図-7参照)内の速度分布は、渦の中心を通る内筒直径上で測定した。

4.3 実験結果および考察

1) 内筒の開口面積および内筒空気孔有無の影響

内筒の開口面積(以下、開口面積と略称)を大小2種に変え(表-1), 孔つき内筒ではL(図-2参照)を60mmにした。

表-1 内筒の開口面積

開口部	面積 [cm ²]		
	大	小	
噴射弁周りのスリット	0.8	0.4	
空気旋回器(旋回角=30°)	2.5	1.2	
孔つき内筒*	バッフル板周りのスリット	11.9	6.0
	空気孔(6ヶ分)	11.5	5.7
孔なし内筒*	バッフル板周りのスリット	20.9	10.3
計	孔つき内筒	26.7	13.3
	孔なし内筒	24.2	11.9

* 孔つき(なし)内筒: 側壁に空気孔を設けた(設けない)内筒

a. 冷風がス流れ

いずれの場合にも、内筒前半部には環状渦があり、流れ模様は全領域にわたり安定かつほぼ軸対称である。

i. 開口面積その他の影響

開口面積の影響: いずれの内筒でも、流れ模様は開口面積によって変わるが、その程度は、燃料を噴射しない場合は孔つき内筒の両断面(A, B)で、噴射した場合は啗合形のA断面で著しい。

図-6はその一例で、開口面積が大きいときは、噴射弁周りの円環状スリットからの噴流がおおむね軸平行流(順流)となり、これと逆流とによって死水域ができ、順流の周りが乱れている領域(以下、乱れ域と仮称)がある。しかし、面積が小さいときはこれが殆んど認められない。

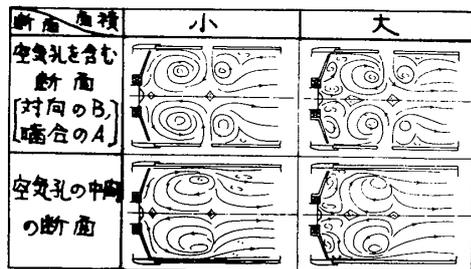


図-6 開口面積による流れ模様の変化 [孔つき内筒・噴射せず]

燃料噴射の影響: 開口面積が大きいときはいずれの内筒でも、流れ模様(とくに噴射弁近く)が燃料噴射によって変わる(図-7)。すなわち、

噴射しないときは噴射弁近くに乱れ域があるが、噴射するとこれが消滅する。この傾向は、開口面積の小さな孔なし内筒でも見られる。

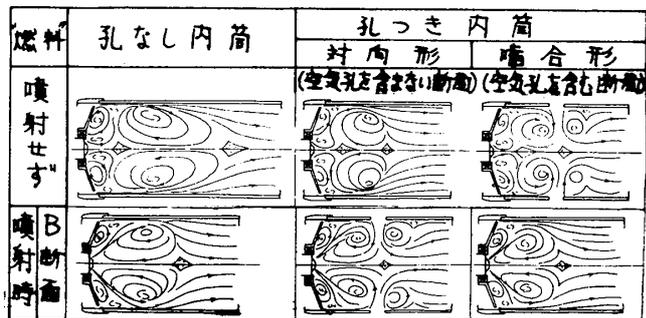


図-7 流れ模様にあつた空気孔有無の影響 [開口面積大]

一方、軸上の逆流速度は、噴射すると増す(図-8)。

ii. 内筒空気孔の有無その他の影響

開口面積の大きな3種の内筒(L=60mmの対向および啗合形, 孔なし) についての結果だけをのべる。

内筒空気孔有無の影響: 燃料を噴射しないときは, いずれの内筒でも同程度の規模の乱れ域があり(図-7), かつ軸上の逆流速度もほぼ等しい(図-8)。一方, 噴射したときは, いずれも乱れ域は消滅し逆流速度が増加するが, その程度は対向形で著しい。

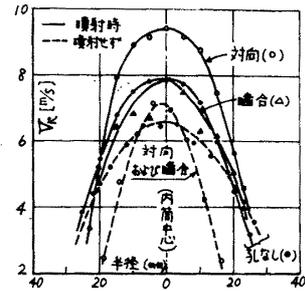


図-8 逆流速度 V_r に及ぼす空気孔有無の影響 [開口面積大, B断面]

内筒風速の影響: 燃料を噴射しない状態で内筒風速を1.9~7.6%に変えたが, いずれの内筒でも, 流れ模様は殆んど変わらない。

b. 燃焼器特性

炎の状況, 内筒の過熱, 燃焼音は定格空燃比付近だけをのべる。

i. 開口面積の影響

孔なし内筒: 個々の噴霧流は, 独立した放射状の青炎となって内筒側壁に近接し, その後は壁に沿う炎となるが, 壁に沿う炎は, 開口面積が小さいときはおおむね青炎, 大きいときは伸びた輝炎である。前者(面積が小)では, 炎が短かく η_b は高く内筒の過熱も著しくないが, $\mu_{b,0}$ は小さい(図-9a)。

孔つき内筒(対向形): 個々の噴霧流は全領域にわたって青炎であり, 一部は内筒側壁に近接している。開口面積が大きいときは, 壁に近接した炎が少なく, η_b は高く $\mu_{b,0}$ も大きい(図-9b)。

孔つき内筒(啗合形): 開口面積が大小いずれのときも, 壁に沿う長い輝炎を生じ, 炎の長さはほぼ等しい。しかし, 面積が大きいときは, 内筒の過熱が著しくなく, η_b は高く $\mu_{b,0}$ も大きい(図-9c)。

なお, いずれの内筒形式でも, 面積が大きいときは燃焼音は低く η_b は大きい($\mu_{b,0}$ は定格空燃比の約4倍)。

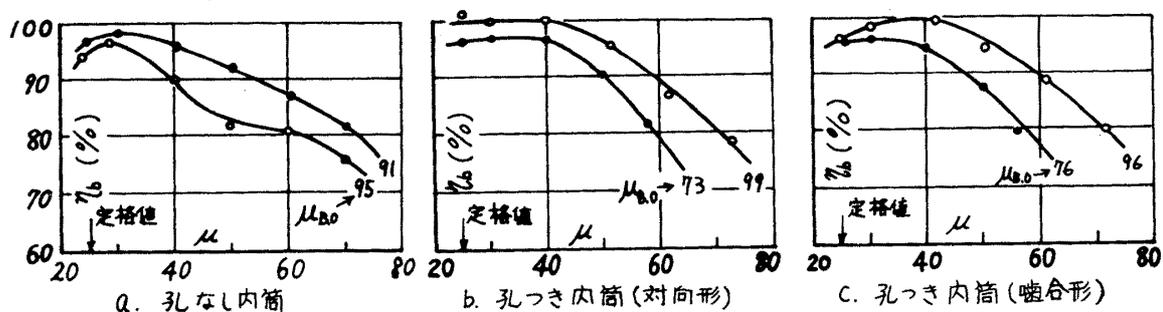


図-9 η_b および $\mu_{b,0}$ [・印: 開口面積小, ○印: 開口面積大]

ii. 内筒空気孔有無の影響

開口面積を2種に変えたときの燃焼器特性は, 孔なし内筒では面積が小さいときが, 孔つき内筒(対向, 啗合)では大きいときが優れている。これら3者の燃焼器特性を

比較すればつぎの通り。

嚙合形では壁に沿う長い輝炎を形成する。この傾向は、孔なし内筒でも僅かみられるが、対向形にはない。これに伴い、炎の長さは対向形がもっとも短い。ただし、内筒の一部はいずれも過熱する。

対向形は、空燃比の全領域にわたって η がもっとも高く M_{60} も大きい(図-9参照)。なお、燃焼音は対向形が、また圧力損失は孔なし内筒がもっとも大きい。

2) 対向形における内筒空気孔の軸方向位置の影響

開口面積の大きな対向形で、 L を4種(40~100mm)に変えた。

a. 冷間ガス流れ

L の値がいずれの場合にも、一次燃焼領域には環状渦があり、流れ模様は全領域にわたって安定かつほぼ軸対称である。

燃料を噴射しない場合には、噴射弁近くに乱れ域があるが、これと環状渦は L が大きいほど下流側へ移る(図-10)。なお、軸上の逆流速度 V_R^* は L が大きいほど小さい(図-12参照)。

一方、燃料を噴射すると、 L がいずれのときも環状渦の形や寸法、位置が変わり、乱れ域は消滅する。

b. 燃焼器特性

炎の状況、内筒の過熱および燃焼音は定格空燃比付近だけをのべる。

個々の噴霧流は独立した放射状の青炎となって内筒側壁近くに至るが、その後の壁に沿う炎は、 $L \leq 75$ のときは薄く短い青炎であり、 $L = 100$ のときは長い輝炎がこれに加わり内筒の過熱も著しい。

図-11は η と M_{60} を示し、 L が大きいほど燃焼音は低下するが、炎は長くなる。なお、カーボン析出はいずれの場合もみられない。

3) M_{60} と冷間ガス流れとの関連

前述のように、3種の内筒で開口面積を変えあるいは対向形で L を変えると、 M_{60} が変わる。一方、空燃比がかなり大きい場合の燃焼時のガス流れは、前述の冷間ガス流れのうちでは燃料を噴射しないときのそれに近い、と考えられる。

そこで、後者の流れ模様および内筒軸上の逆流速度 V_R^* と M_{60} との関連を調べてみた。³⁾
流れ模様との関連: 3種の内筒で開口面積を変えた場合、孔つき内筒では、面積

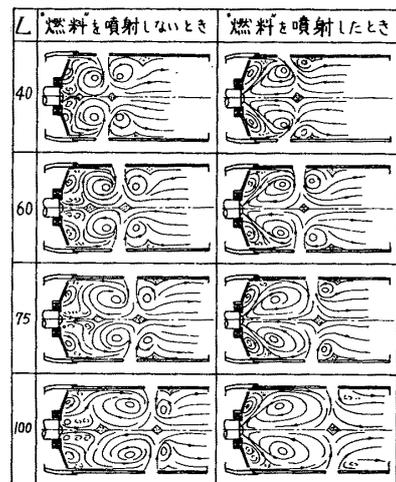


図-10 流れ模様にあつて空気孔位置の影響[対向形, B断面]

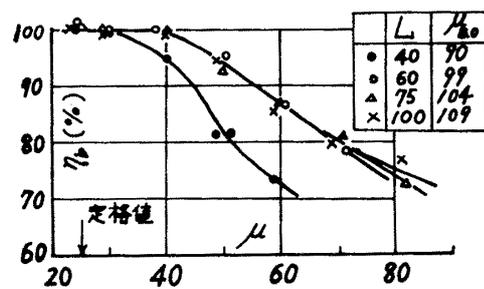


図-11 η および M_{60} [対向形]

が大きい(または小さい)ときは μ_{90} も大きい(小さい)が、これに対応する流れ模様の著しい相違は噴射弁近くにおける乱れ域の有(または、無に近い)である。一方、孔なし内筒では、面積の大小に関係なく μ_{90} が大きいくしかも両者で大差ないが、いずれの場合も噴射弁近くには酷似した乱れ域がある。

以上とは異なり、開口面積の大きな対向形で L を変えた場合、いずれも μ_{90} が大きいが、この場合にも乱れ域がある。ただし、 L が大きいほど μ_{90} が大きく乱れ域も軸方向に長い。

このように、乱れ域の有否とその大きさは μ_{90} の大小に大きな関係がある。

V_R^* との関連: 3種の内筒で開口面積を変えた場合、面積が大きいときは V_R^* が小さく、また対向形で L を変えた場合には、 L が大きいほど V_R^* が小さい。

これらの場合には、流れ模様がかなり異なるにも拘らず、 V_R^* と μ_{90} との関係は図-12のようになる。

なお、噴流と逆流とによってできる死水域の噴射弁からの距離は、 V_R^* が小さいほど大きくなり、増大の程度は V_R^* が約8%のときに著しい。

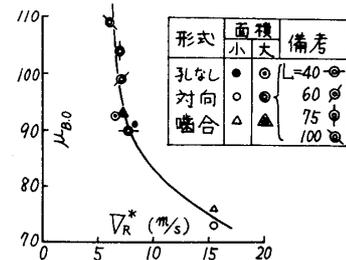


図-12 V_R^* と μ_{90} との関係

5. 結論

1) 燃料噴射弁形式の選定

想定した実物燃焼器の研究に当り、まず、燃料噴射弁の形式を選定することにした。これに関して、おもに燃焼性能に及ぼす噴霧特性の影響についての推論から、個々の噴霧が十分隔離した多孔式のYジェット形蒸気微粒化式とした。なお、数は1個である。

2) 燃焼器特性に及ぼす内筒側壁空気孔の影響

上記噴射弁を備えた実物燃焼器の細部構造のうち、内筒空気孔の要否決定に資するため、多孔式Yジェット形空気噴射弁を備えた小形模型による灯油燃焼実験および同模型内の空筒ガス流れ試験を常温常圧下で行ない、つぎの結果を得た。

開口面積の影響: 燃焼器特性(含・炎の状況、以下、同じ)は、孔なし内筒では、面積が小さいものが優れている(ただし、 μ_{90} と圧力損失を除く)。対向形および嚙合形の孔つき内筒では、面積が大きいものが優れている。

内筒空気孔有無の影響: 上記3種の内筒(開口面積は孔なし内筒では小、孔つき内筒では大)について燃焼器特性を比べてみると、対向形が優れている(ただし、燃焼音を除く)。

対向形における内筒空気孔の軸方向位置の影響: 内筒空気孔のバッフル板からの距離(L)には、優れた燃焼器特性が得られる適正範囲があり、その範囲は、おおよそ50~80mmと思われる。

これよりも L が小さいときは、燃焼音が増大し、空燃比が大きいときの η および β_0 が低下し、反対に、 L が大きいときは、内筒壁に沿う輝炎を生じ内筒の過熱が著しくなり、炎は伸びる。

β_0 と冷間ガス流れとの関連： V_R^* が小さくなるにしたがい、乱れ域が軸方向に伸び β_0 が大きくなる。

[文献]

- 1) K. MIWA, Papers of Ship Research Inst., No. 22 (1967-9).
- 2) 根矢, 佐藤, 校核学会誌, 70-581 (昭42-6), 817; K. NEYA, S. SATO, Papers of Ship Research Inst., No. 27 (1968-2).
- 3) 根矢, 熊倉, 内燃機関, 5-46 (昭41-4), 11; 根矢, 熊倉, 道見, 船舶技研報告, 4-1 (昭42-1), 11.