

61 水素希薄予混合燃焼器の NO_x 排出特性と燃焼安定性

機関動力部 *岸 武行、平岡 克英、井亀 優、
春海 一佳、城田 英之、岡 秀行

1. まえがき

近年、地球環境負荷の低減のために、物流の輸送効率とエネルギー利用効率の向上、および低環境負荷化への要求が高まっている。そのため、船舶輸送分野においてもガスタービンエンジンの低 NO_x 性、運用性、小形高出力の特長を生かしたスーパーエコシップやTSLの開発計画が進められている。ガスタービンエンジンは、ディーゼルエンジンと比較すると低 NO_x 排出型エンジンであるが、さらなる低 NO_x 化のためには希薄予混合燃焼法の採用が技術的課題となる。

希薄予混合燃焼法は発電用ガスタービンエンジンではすでに実用化もされているが、燃焼安定性が悪く、燃焼振動や吹き消え、逆火等の不安定現象のため、運転範囲が狭いという問題が残されている。すなわち、希薄予混合燃焼の利用範囲を拡大するには、これら不安定燃焼の抑制が必要不可欠である。

本研究では、希薄予混合燃焼の基本的燃焼特性として、 NO_x 排出特性および燃焼安定性を実験用燃焼器を用いて調べる。

研究の第1段階として、基本的燃焼方式である急拡大保炎方式の予混合燃焼器を製作し、実験的燃料である水素を用いて希薄予混合燃焼の安定性、燃焼効率および NO_x 排出特性を調べた。特に逆火に関しては、予混合管出口壁面近傍の流れの性状が逆火に

深く影響していると考えられるため、空気噴流による壁面近傍流れの制御を試み、その逆火抑制効果を調べた。以下に実験結果を報告する。

2. 実験設備

2. 1. 実験装置

図-1に実験装置を示す。主燃焼用およびパイロット火炎用の水素の供給流量は、それぞれマスフローコントローラで制御されている。

燃焼器からの排気ガスはガスクーラ内の水冷格子によって、 500°C 以下にまで冷却されて NO_x 生成反応を凍結させると同時にかくはんされる。ガスクーラを通過後、排気ガスは排気ダクトの中心軸上で、 60°C の温水で冷却されているプローブによりサンプリングされる。

サンプルガスは最初 90°C に加熱されているラインを通じて NO_2/NO コンバータに送られる。コンバータ内でサンプルガス内の NO_2 は触媒反応により NO に変換される。この方法により、

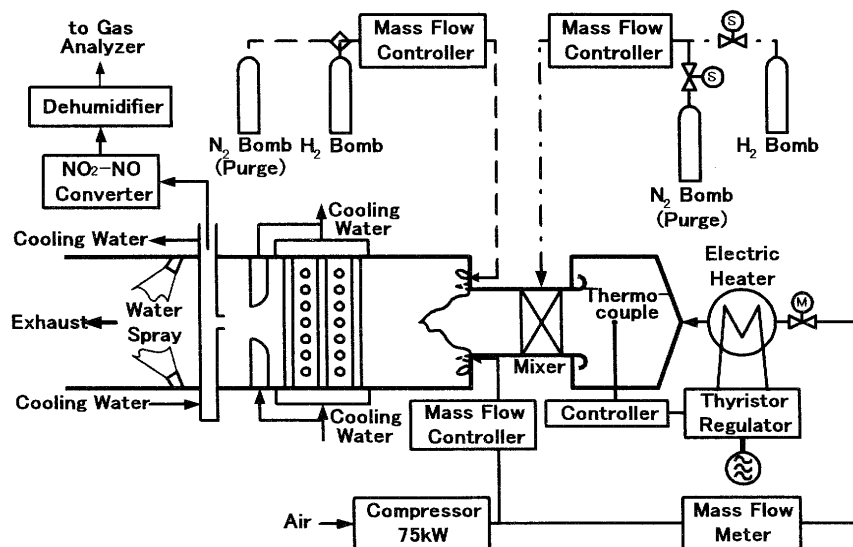


図-1 実験装置概要

次の除湿過程において生ずる凝縮水に NO_2 が吸収されて NO_x 濃度測定に誤差が生じるのを防ぐ。コンバータを通過後、サンプルガスは電子式クーラで除湿され、その後 NO_x 、未燃水素、酸素のそれぞれの濃度が測定される。

本報告での NO_x 排出濃度はドライベース、 $0\% \text{O}_2$ 換算値である。燃焼器の総括当量比は、燃料および空気の、流量計の読みからの計算値である。

2. 2. 実験用燃焼器

図-2に実験用燃焼器の断面を示す。燃焼器には、7つのベンチュリーと混合管からなる予混合器がある。

火炎は予混合器出口の周りにある、還流域の高温の燃焼ガスによって保炎される。燃焼室は目視観察のため石英ガラス管で出来ている。

火炎が予混合器内に逆火するのを抑制するのを目的に、予混合器出口において厚さ1mmの空気噴流で予混合気を囲んでいる。

パイロット火炎用水素は燃焼室の上流壁に設置されている4つのパイロット火炎用水素噴出孔から還流域に噴出される。4つのパイロット拡

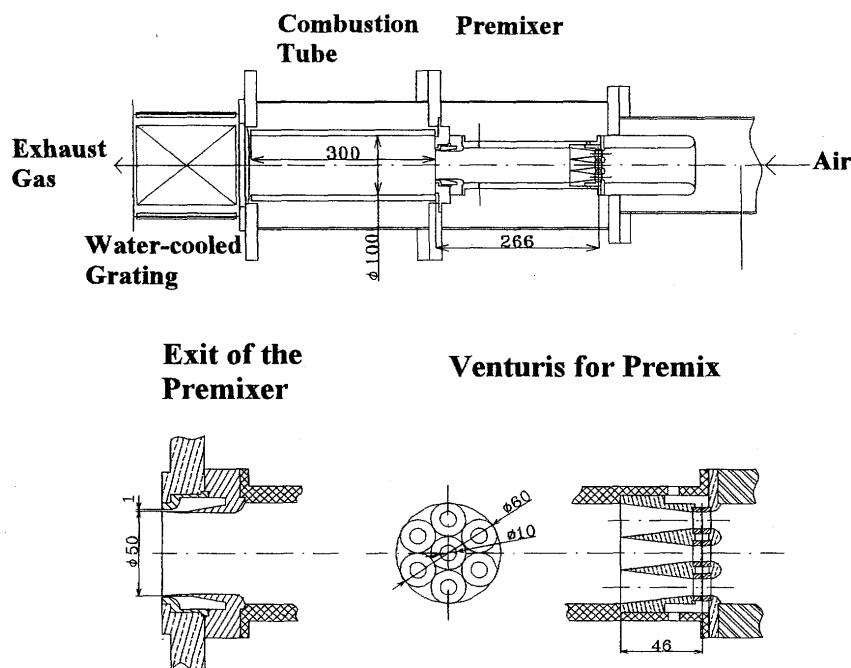


図-2 実験用燃焼器断面

散火炎は実験開始時の点火のみに用いている。

3. 実験結果および考察

3. 1. 逆火特性

実験は大気圧下で行い、当量比範囲は $0.24 - 0.5$ 、燃焼用空気温度範囲は $15 - 150^\circ\text{C}$ で行った。

写真-1は円錐形の安定な火炎を示している。当量比がおおよそ 0.4 を越えると、火炎が目視可能となる。当量比が高くなるに従い、円錐火炎は明るくなり、そして最終的には逆火がおこる。

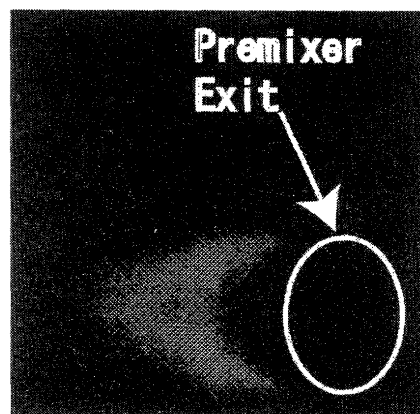
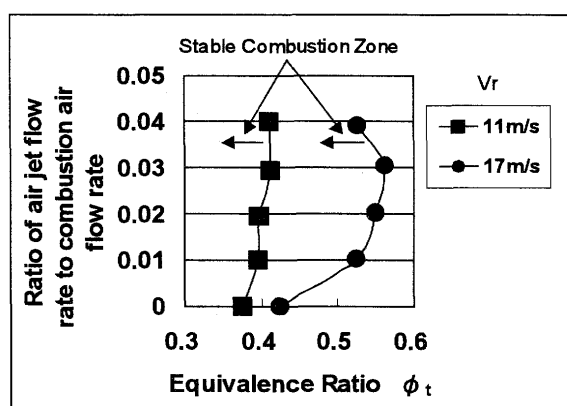


写真-1 安定な火炎

逆火時、円錐火炎が予混合器の壁面にそって上流へ向かうのが観察された。時としてフレイムティルト、すなわち、火炎が予混合器内に入り込んだのち、火炎がしばらくの間予混合器の出口付近に留まることもあった。

図-3は逆火が起こる当量比を示している。図-3内のシンボルは逆火が起こる最小の当量比(以下臨界当量比と呼ぶ)を示しており、安定燃焼領域はそれぞれのシンボルの左側として定義される。

図-3およびそれ以後の



図－3 逆火防止用空気噴流の効果

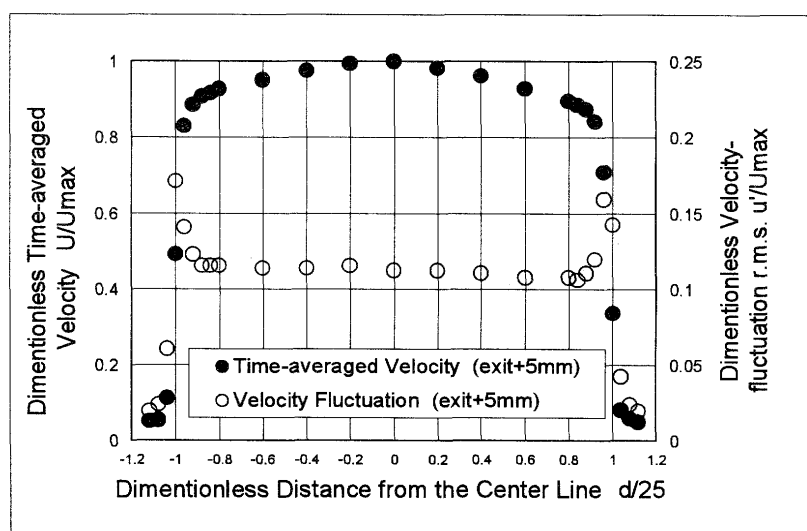
図中の V_r は予混合器出口の流速で、燃焼用水素および空気の流量計の読みから計算で求めている。

V_r が 11 m/s および 17 m/s の場合において、逆火防止用の空気噴流の効果を、空気噴流の流量を変化させることで調べた。空気噴流を流した場合、流さない場合に比べ、特に $V_r = 17 \text{ m/s}$ の場合において大幅に、安定燃焼領域が拡大された。空気噴流を流した場合、その流量が燃焼用空気流量の3%までは、 V_r が 11 m/s 、 17 m/s のどちらの場合も流量が大きくなるにつれ安定燃焼領域が拡大した。しかし、3%を越えると安定燃焼領域は狭くなった。

安定燃焼領域は空気噴流の流量に関わらず、 V_r が 17 m/s の時の方が 11 m/s の時よりも広い。これは流れが逆火に対し影響を及ぼすことを示唆するものであり、そのため流れ場の逆火に対する影響を調べる必要があると考えられる。

第1段階として、熱線風速計を用いて、予混合器出口から 5 mm 下流での、時間平均流速および乱流強度の分布を調べた。図－4 に逆火防止用空気噴流がなく燃焼用空気のみを流した場合における、軸方向の時間平均流速および二乗平均乱流

強度の分布を示す。時間平均流速および乱流強度は最大時間平均流速で無次元化している。中心軸からの距離は予混合器出口の半径、 25 mm で無次元化している。乱流強度は壁に極めて近い所で鋭いピークが認められる。このピークは境界層内にあるため、ピーク付近では一般的に時間平均流速は、断面平均流速に比べ遙かに遅い。燃焼速度は乱流強度が大きくなるに従い速くなる¹⁾。そのためこの乱流強度のピークの箇所で燃焼速度は最大になると考えられる。よってこのピーク付近で、燃焼速度が時間平均流速よりも大きくなり、逆火を引き起こすと考えられる。



図－4 時間平均流速および乱流強度の分布

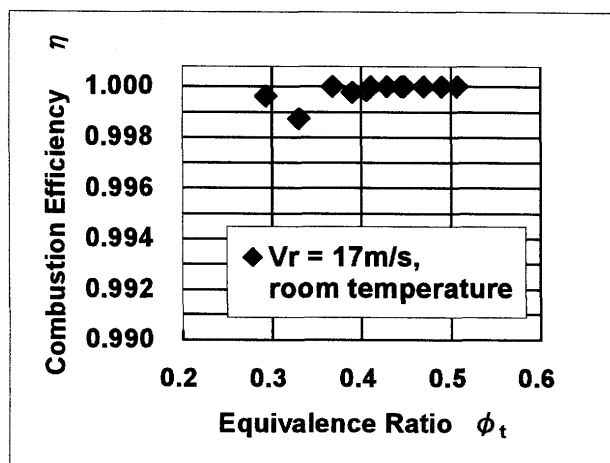
3. 2. 燃焼効率

燃焼効率を図－5に示す。この項以降で述べる実験結果は安定燃焼領域で得られたものである。

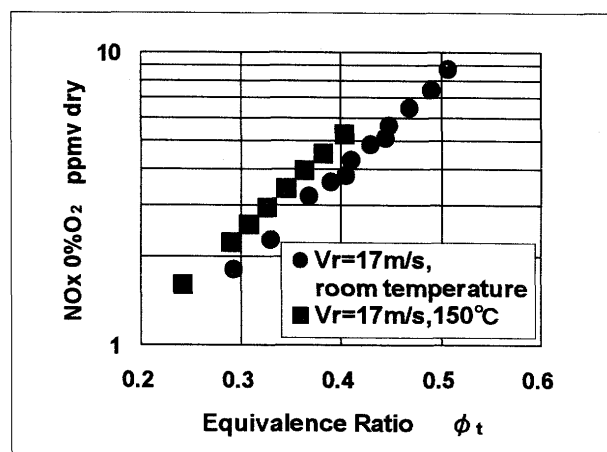
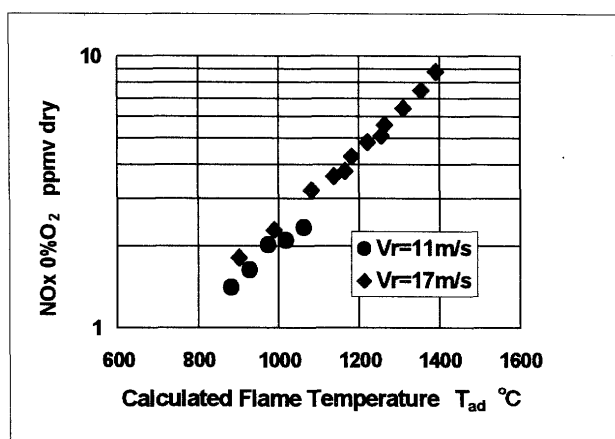
燃焼効率は当量比が約0.3以上の場合、99.8%以上であった。

3. 3. NO_x 排出特性

NO_x 濃度を図－6に示す。NO_x 濃度は当量比が大きくなるにつれ増加するが、計算上の断熱火炎温度が 1400°C 以下では 10 ppm 以下であった。燃焼用空気流の流量のNO_x 濃度に及



図－5 燃焼効率

図－7 燃焼用空気温度のNOx
濃度に及ぼす影響

図－6 NOx 濃度

ぼす影響は観られなかった。

図－7 に燃焼用空気の温度のNOx 濃度に及ぼす影響を示す。同じ当量比では、燃焼用空気の温度が高いほどNOx 濃度が高い。このNOx 濃度の増加は断熱火炎の上昇による効果で大方の説明が可能である。

4. 結論

実験用希薄予混合燃焼器を製作し、低NOx 排出特性と、逆火抑制のための空気噴流の効果を実証するため試験運転を行い、以下の結論を得た。

(1) 逆火防止用空気噴流は逆火を抑制し、運転

範囲の拡大に効果がある。しかし、空気噴流の流量が燃焼用空気の流量の3%を越えると、その効果は減少する。

(2) NOx 濃度は計算断熱火炎温度に対して指数関数的に増加する。断熱火炎温度が1400℃以下でNOx 濃度は10ppm (ドライベース、0%O₂換算) 以下である。

(3) 逆火が生じる時、円錐火炎が予混合器の壁面をつたって上流へ進むのが観察された。時としてフレイムティルト、すなわち、火炎が予混合器内に入った後、火炎がしばらくの間予混合器の出口付近に留まることが観察された。

本研究は文部科学省開放的融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」に基づき、知的乱流制御研究センターの研究活動の一環として行われた。

参考文献

1) Bernard Lewis and Guenther von Elve, Combustion, Flames and Explosions of Gases, New York, Academic Press, 1961.