

新 3421 乙 1724 博士（工学）

2002/7/18 倉田 修

クラタ オサム

91622-5

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

高予熱温度におけるガスタービン燃焼器の
保炎特性とNO_x抑制に関する基礎研究

A Fundamental Study on Flame Holding Characteristics and
Controlling NO_x Emission at Preheated Gas Temperatures
for Gas Turbine Combustors

申 請 者

倉田 修

Osamu Kurata

2002年7月

高い比出力性能を有するガスタービンは、航空機や大規模発電用の原動機として広く利用されているが、最近分散型電源の一形態である小規模コジェネレーション用の動力源としての応用が期待されている。しかしながら、このような用途の小型ガスタービンを実用化するためには、一層の熱効率の向上と低公害化が重要な技術課題とされている。

わが国では、これらの技術課題を解決するため、タービン入口温度を飛躍的に高めたセラミックガスタービン(CGT)の研究開発が国家プロジェクトとして1988年から1999年まで実施された。この研究開発において、CGTの主要な構成要素である燃焼器では、その入口ガス温度(CIT)の高温化によって燃焼ガス温度が上昇し NO_x の発生が増加することが懸念され、その対策として保炎の安定化と NO_x の抑制の両立を実現する燃焼法の確立が必要とされた。本論文は、同プロジェクトにおけるこのような課題に取り組んだ研究の成果をまとめたものであり、6章より構成されている。

第1章では、本研究の背景を説明し、ガスタービン燃焼器に関する従来の研究について詳しく調べて技術課題を明確にし、研究の目的と概要について述べている。

第2章では、研究対象とした高効率再生サイクルガスタービンに対して要求される CIT の範囲についてサイクルシミュレーションにより考察している。シミュレーションでは、CGTの燃焼器の入口条件を求める目的で、圧縮機、再生器、燃焼器、タービン各要素の入口と出口の温度、圧力、ガス組成を変数とし、タービン入口温度(TIT)と圧力比を変化させ、 CIT 、当量比(ϕ)、熱効率(η)を算出している。その際、 $TIT \leq 1623K$ 、 $\eta \geq 0.42$ の条件では、 $890K \leq CIT \leq 1130K$ の高温において、 $0.21 \leq \text{平均 } \phi \leq 0.3$ となるため、高予熱温度での燃焼特性の基礎データが不可欠であることを見出している。

第3章では、高い CIT で安定した保炎と NO_x 抑制を両立する燃焼法について検討を行い、それを実現する濃淡同軸燃焼器を提案し、その保炎特性を表す重要な変数である層流燃焼速度(S_u)の値に注目している。

まず、CGTの燃焼器入口、出口条件から予想される NO_x について、予混合燃焼と模擬拡散燃焼での生成特性を比較している。ここでは、メタン-空気希薄予混合火炎の NO_x は火炎面後流で生成されるサーマル NO_x で説明されるとして、14化学種と28素反応式を用い、流れ方向1次元で反応計算を行っている。その結果、 ϕ 一定で火炎面後流は断熱火炎温度(TB)と仮定したNO濃度値は滞留時間の増大に伴い増える傾向があることを明らかにしている。また、均一予混合燃焼と拡散燃焼を模擬した濃淡のある予混合気の燃焼とを比較し、前者では TB が低く抑えられ局所的に高温の燃焼領域がないため、 NO_x の抑制に有利であり、高い CIT でも、希薄予混合燃焼法により低 NO_x 燃焼が可能であることを確認している。

つぎに、高予熱温度において NO_x の抑制を実現する燃焼法を検討するため、ま

ず、種々の保炎器の特性が消炎の限界カルロビツ数で整理されることに着目している。その結果、保炎現象は反応速度項がアレニウス型で表されるため、比で表されるカルロビツ数よりも実際の保炎特性は大きく変化し、保炎器の形状設計は試行錯誤的になることを見出している。また、限界カルロビツ数と NO_x 生成特性には相関があり、低 NO_x 燃焼器には消炎の限界カルロビツ数のレンジが狭い保炎器が好ましいことから、濃淡同軸燃焼器を提案している。

さらに、保炎特性の整理には Su の値が必要であり、高予熱温度で燃焼器の保炎特性を整理するためにも、燃焼特性の基礎データの充実が必要であるとしている。

第 4 章では、上述の結果を踏まえて、保炎特性の重要な因子である Su に対する予熱空気温度 Tu の影響を調べ、バーナの保炎特性と関連づけて、従来の理論に対する高予熱温度の影響を検証している。

Su の測定に当たっては、従来の研究で欠落している 500K 以上の温度領域において、シュリーレン法で可視化した直管バーナーの内炎像に角度法および面積法を適用している。その結果、 Su に対する Tu の依存性を示す累乗の指数は 2 となり、従来の 500K までの温度で得られた飯島らの指数 1.6 に比べて高く、500K \leq Tu \leq 873K の高予熱温度条件では Tu の依存性が大きいことを明らかにしている。しかしながら、測定装置の耐熱性の限界から、 Su の測定における一層の高予熱温度化は難しいことを確認している。

そこで、数値計算コードを用いた予測値と実験値を比較した結果、高予熱温度で燃料が希薄な条件における Su の計算値は実験値と平均 9% の誤差でよい一致を示し、常温(303K) \leq Tu \leq 1073K における希薄メタンー空気の Su が数値予測できることを明らかにしている。

そのうえで、高予熱温度における保炎特性に対する Su などの影響を明確にするため、常温(303K) \leq Tu \leq 1073K, 0.1MPa \leq 圧力 \leq 0.4MPa, 0.5 \leq ϕ \leq 1.において予混合直管バーナの吹消えと逆火の特性を燃焼実験により調べている。その結果を Su や境界速度勾配との相関を図に整理し、従来から使われている経験式とも対比して、高温では吹消え速度に対する Tu の依存性を示す累乗の指数が -2.38 と従来の式の -1.5 に比べ低い値になることを確認している。また、逆火をリム近傍の消炎距離と熱理論を用いて整理した理論的な依存式は、 Tu や圧力に対する実験結果の傾向に一致し、573K \leq Tu \leq 873K の高予熱温度における逆火特性が予測可能であることを明らかにしている。さらに、高予熱温度においては吹消え速度や逆火速度は、 Su の 2 乗に比例し、吹消え流量に対しては TB の依存性が高く、数値計算では Su よりも TB を求める方が簡単であるため、 TB 依存性を利用するこことが燃焼器の設計上実用的であることを確認している。

第 5 章では、提案した濃淡同軸燃焼器の保炎特性と排気特性を調べ、解析結果と比較して、広い負荷範囲で NO_x が抑制されることを確認している。

まず、マルチ直管バーナの NO_x 濃度と燃焼負荷率を計算により推定した結果、

NO_x 濃度は大気汚染防止法で定められた排出基準値以下であり、燃焼負荷率は 10^6 (産業用)～ 10^8 kcal/m³・h・atm(航空用)の必要があるが、このバーナは、低 NO_x、高い燃焼負荷率と広い保炎範囲の要求特性に対し、必ずしも適切ではないことを見出している。

つぎに、提案した濃淡同軸燃焼器の吹消え特性に対する T_u の影響について常温 $\leq T_u \leq 673K$ 、大気圧で調べた結果、内管側と外管側とで火炎後流の温度 T_B を揃えた条件では、吹消えになる質量流量に T_u の影響は陽に表れないことを確認している。また、吹消え時の外管と内管の流量比はほぼ一定になり、外管流量を制御することで吹消えになる総流量を可変化することができるを見出している。

さらに、濃淡同軸燃焼器における NO_x と CO の排出特性を常温 $\leq T_u \leq 673K$ において調べた結果、常温での良好な燃焼状態では、NO_x 平均値 1.5～2ppm(16%O₂)、CO 平均値 5ppm(16%O₂)と両者ともにきわめて低い値を得ている。その際、NO_x は外管側で多く生成されるものの、低 NO_x である内管の火炎後流のガスにより急速に希釈され NO の生成反応が凍結する傾向があることを確認している。一方、CO、HC は外管リムの消炎層から排出され、高温のガスで酸化されることと、高い T_u における NO_x 値は、計算から予想されるように実験値も各 T_B と質量流量を揃えた火炎では T_u によらず同じ値になることを明らかにしている。したがって、内管側の当量比をできるだけ低く保って外管/内管流量比を制御すれば総当量比を低くして低 NO_x 濃度の燃焼を行うことが可能であるを見出している。

第 6 章では本研究を総括したうえで、得られた燃焼特性の基礎データの活用方法、濃淡同軸燃焼器の実用化における課題と対策、および小型コジェネレーション用ガスタービン燃焼器の将来的な発展の可能性について述べている。

以上、本論文において得られた成果は、ガスタービンの高温燃焼に関する有用な基礎データを提供したものであり、燃焼工学に対して大きく寄与するばかりではなく、高効率化と低公害化の要請に応える新しいガスタービン燃焼技術の可能性を提示した点で工業的価値はきわめて高く、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2002年7月

審査員（主査）早稲田大学教授		大聖 泰弘
早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	大田 英輔
早稲田大学教授		永田 勝也
早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	勝田 正文
早稲田大学助教授	博士（工学）早稲田大学	草鹿 仁
早稲田大学名誉教授		斎藤 孟