

セラミックガスタービンエンジン用高温燃焼器の 低エミッション化に関する研究

学位論文内容の要旨

ガスタービンエンジンは小型・軽量・大出力という特徴を活かし、航空機用原動機や発電用コンバインドサイクルなどのエネルギーソースとして様々な分野で利用されている。近年注目される分散化電源、コジェネレーション用途などに出力 100 kW 以下のガスタービンエンジンが用いられる機会も増えてきたが、これら小型のガスタービンエンジンを高効率化、低公害化する技術に対する期待は大きいものの従来の大型ガスタービンエンジンに用いられてきた手法が適応できるとは限らない。

小型ガスタービン機関の普及を妨げる要因の一つである熱効率の低さについては、排気熱の回収（再生サイクル方式の採用）、各構成コンポーネントの効率向上によって改善が図られてきた。特に 1980 年代以降コンポーネント材料のセラミックス化に関する研究が進められ、タービン入口温度を 1600K 以上まで高めることによって実用熱効率の飛躍的な改善が可能となった。

一方で、小型ガスタービン機関の普及を妨げるもう一つの要因は排気の低公害性である。ガスタービンエンジンは排気中に多量の O_2 を含むため、現在レシプロガソリン機関などで主流となっている 3 元触媒を用いた排気浄化方法が適用できない。また、大型プラントに用いられるようなアンモニアと触媒を用いた脱硝等の後処理方法は、システムの大型化を招くため、小型ガスタービンエンジンへの適応は難しい。これらの理由から、小型ガスタービンエンジンでは燃焼そのものの改善によって低公害性を実現する必要がある。

一般にガス燃料は液体燃料と比較して低公害燃焼を実現しやすいと言えるが、分散化電源、コジェネレーションなどの定置用途の場合、燃料を隣接して備蓄することを考えると液体燃料に対する要求は強く、また自動車などの移動体への適応まで考慮すると可搬性の観点から液体燃料は必須となる。これらの点を考慮すると、液体燃料による低公害燃焼の実現が必要であると考えられる。

自動車用ガスタービンエンジンの低公害燃焼コンセプトについては既に 1970 年代より研究が始まっているが、熱効率を改善するためコンポーネントのセラミックス化を図り、燃焼器入口温度が 1300K に達する条件下で、燃焼器の燃焼性能や排気性能を説明したものは見当たらない。

そこで、本研究は挑戦的な課題（液体燃料、1300K に到達する燃焼器入口温度、過渡条件を含む厳しい排気規制値、コンパクト化）を有する乗用車用セラミックガスタービンエンジン（以下、CGT と略記）を対象として、その高温燃焼器の低エミッション化技術の確立ならびに実証を目的とするものである。

論文は以下の 8 章から構成した。

第 1 章は序論であり、研究の背景について述べるとともに、本研究の目的および得られた結果について論述した。また、自動車用ガスタービンエンジンの研究動向を紹介した。

第 2 章では、ガスタービンエンジンを低エミッション化する際に主体となる NO_x 低減手法を紹介するとともに、自動車用排気規制値（10・15 モード）とその際の車両走行条件とから NO_x 排出目標値を設定し、実燃焼器を用いた燃焼試験によって拡散燃焼法、2 段（Rich-Lean）燃焼法、希薄予混合燃焼法の各燃焼方式の排気特性を比較評価した。その結果、唯一 NO_x 排出量の目標値を達成した希薄予混合燃焼法を採用することとした。

第 3 章では、先ず燃焼器を主要な 6 要素に分割し、希薄予混合燃焼方式を採用する燃焼器を乗用車へ適応するに当たって各要素に必要となる技術課題を明らかにした。次に、実験および数値シミュレーションにより検討した結果とその解析から、上記各課題を解決するための技術要件を明らかにした。

第 4 章では、予蒸発予混合希薄燃焼器を成立させる際、特に重要になると考えられる液体燃料の蒸発・混合促進技術について、実験および数値シミュレーション結果を用いて解析・検討した。その結果から、予蒸発管の設計手法ならびに蒸発・混合促進手法を明らかにした。

第 5 章では、予蒸発予混合希薄燃焼のキー課題でありなおかつ他に参考となる研究事例の無い逆火・自己着火現象について、ここまでの知見に基づいて設計・試作した 100 k WCGT 用燃焼器を用いた燃焼実験によりその現象を観察した。逆火発生メカニズムの考察から逆火抑止策を検討し、燃焼実験による対応策の効果確認を行った。この結果、逆火・自己着火への対応技術要件を明らかにするとともに、自己着火限界を推定するための実験式を提案した。

第 6 章では、逆火特性の改善によって当初計画の燃焼範囲を確保した燃焼器を用い、燃焼器単体および、100 k W-CGT 実装状態で当初目標とした自動車用排気規制値（10・15 モード）を達成できることを確認した。

第 7 章では、上記燃焼器の排気性能以外の諸性能について計測した結果の解析を行い、燃焼室容積の設計手法などを明らかにした。

第 8 章は本研究の結論であり、得られた結果の概要を記述した。

以上、本研究において小型ガスタービンエンジンに関する基礎的な検討ならびに実験の結果から予蒸発予混合希薄燃焼器の低エミッション化に関わる技術を蓄積し、その結果を用いて小型ガスタービンエンジン用低公害燃焼器の実例として自動車用 100 k WCGT の低エミッション予蒸発予混合希薄燃焼器を構成した。その燃焼性能ならびに排気性能を実証することによって、高温燃焼器の低エミッション化技術を明らかにできた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 近 久 武 美

副 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 小 川 英 之

副 査 教 授 藤 田 修

学 位 論 文 題 名

セラミックガスタービンエンジン用高温燃焼器の 低エミッション化に関する研究

ガスタービンエンジンは小型・軽量・大出力という特徴を活かし、航空機用原動機や発電用コンバインドサイクルなどのエネルギーソースとして様々な分野で利用されているが、100kWクラスの小型ガスタービンエンジンを高効率化、低公害化する技術は開発されていない。

自動車用ガスタービンエンジンの低公害燃焼コンセプトについては既に1970年代より研究が始まっており、熱効率を改善するために排気熱の回収（再生サイクル方式の採用）やコンポーネントのセラミックス化が図られてきた。特に1980年代以降コンポーネント材料のセラミックス化に関する研究が進められ、タービン入口温度を1600K以上まで高めることによって実用熱効率の飛躍的な改善が可能となった。しかし、ガスタービンエンジンは排気中に多量の O_2 を含むため、現在レシプロガソリン機関などで主流となっている3元触媒を用いた排気浄化方法が適用できず、燃焼改善のみによって、次第に強化されつつある排気ガス規制に対応しなければならない。さらに、自動車などの移動体への適応を考慮すると、可搬性の観点から液体燃料を用いる必要がある。したがって、きわめて高い燃焼室入口空気温度条件で予蒸発室での逆火や自己着火を生じない安定した燃焼を実現し、しかも低エミッションを達成する技術の開発が求められる。

そこで、本研究は液体燃料を用い、1300Kに到達する燃焼器入口温度条件の下で、過渡条件を含む厳しい排気規制値を満足するような、コンパクトな乗用車用セラミックガスタービンエンジンを開発することを目指し、その高温燃焼器の低エミッション化技術の確立ならびに実証を目的としている。

まず、ガスタービンエンジンを低エミッション化する際に主体となる NO_x 低減手法を調査し、自動車用排気規制値（10・15モード）とその際の車両走行条件とから NO_x 排出目標値を設定し

ている。そして、実燃焼器を用いた燃焼試験によって拡散燃焼法、2 段 (Rich-Lean) 燃焼法、希薄予混合燃焼法の各燃焼方式の排気特性を比較評価している。その結果、セラミックスガスタービンエンジンに従来型の拡散燃焼を適用した場合の NOx 排出量は目標値の 50 倍以上となってしまうこと、したがって、この目標値を達成するには希薄予混合燃焼法の採用以外に無いことを示している。なお、希薄予混合燃焼をセラミックスガスタービンに適用した場合には、予混合室内での自己着火ならびに燃焼室から予混合室への逆火が生じやすくなり、この防止技術の開発が重要課題となる。

そこで、液体燃料に適用可能な予蒸発予混合希薄燃焼器を対象とし、液体燃料の蒸発・混合促進手法について、実験および数値シミュレーション結果を用いて解析・検討している。その結果、セラミックスガスタービンで特に重要なカーボン析出の防止を達成しながら、液体燃料を十分に予混合化出来る予蒸発管の設計手法ならびに蒸発・混合促進手法を明らかにしている。

次に、予蒸発予混合希薄燃焼の最重要課題であり、かつ他に参考となる研究事例の無い逆火・自己着火現象について、100 kW セラミックスガスタービン用燃焼器を用いた実験を行っている。逆火発生メカニズムを解明し、その知見に基づいて逆火抑止策を検討している。燃焼実験による対応策の効果確認を行った結果、逆火・自己着火に対応するための燃焼器条件を明らかにするとともに、過渡運転を含む NOx 排出量の推定式を提案している。

最後に、実際の 100 kW セラミックスガスタービンを試作し、本研究で提案された燃焼器を実装して、燃焼性能ならびに排気性能の確認を行っている。その結果、当初目標とした自動車用排気規制値 (10・15 モード) を十分に達成できることを確認している。

以上、本研究において小型ガスタービンエンジンに関する基礎的な検討ならびに実験の結果から予蒸発予混合希薄燃焼器の低エミッション化に関わる燃焼室構造と気流条件を明らかにしている。次にその知見に基づいて自動車用 100 kW セラミックスガスタービンを試作し、その良好な燃焼性能を確認するとともに開発当初の NOx 値を 50 分の 1 以下に低減し得ることを実証している。

これを要するに、著者は、セラミックスガスタービンの低エミッション燃焼法について、液体燃料の適切な予蒸発技術と逆火防止技術に関する新知見を得たものであり、燃焼工学および自動車工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。