

学 位 論 文 題 名

小型ガスタービンの制御と低公害燃焼器に関する研究

学位論文内容の要旨

ガスタービンが工業的に実用化され始めた歴史はわずか60年程度であるが、この間、軽量・小型で大出力という長所を活かし航空機用原動機として圧倒的シェアを占めるとともに、極めて高い信頼性を要求される産業用（発電用）においても前述の長所に加え、使用燃料の多様化への適応性、低振動、低騒音、優れた排気清浄性、および高効率という利点を活かし着実に発展してきている。従来は比較的大出力機（ $10^4 \sim 10^5$ kW）の用途が多かったが、近年は 10^3 kW以下の小型エンジンの分野においても特長を活かした利用が増加し始めている。これまで小型ガスタービンの実用化を妨げていた理由の一つである熱効率の低さに関しては、材料の進歩・冷却技術の革新などによりタービン入口温度を高め飛躍的な熱効率向上を図る試みが続けられている。またガスタービンの長所は車両用としても極めて魅力的であるが、とくに乗用車用は小出力で部分負荷利用頻度が高いため、実用熱効率を上げることが格段に困難になる。そこでセラミックを用いた無冷却エンジン、すなわちセラミックガスタービンエンジン（CGT）の研究が日米欧で精力的に進められている。

この小型ガスタービンには二つの大きな課題が存在する。

第1の課題は、エンジン負荷変動率増大への対応である。この負荷変動率の増大は、エンジンの小型化に伴い駆動（もしくは電力を供給）する機器の数が減少する傾向を見せ、各機器の始動・停止のエンジン定格出力に占める割合が増えることから発生する特徴である。車両用原動機として利用する場合は、車両という単一負荷を変化の激しい走行状況に対応させる必要上、この特徴が著しく現われる例といえる。この課題は技術的に見れば制御上の課題となり、動的モデルの作成・シミュレーションという制御手法の新たな技術的課題の検討が不可欠となる。負荷変動率が大きい新たなエンジンシステムの評価を行なう上で、種々のエンジン形式にわたりシステムの応答性と定常性能の優劣を比較検討するための妥当な検討手法が必要とされる。

第2の課題は、高度な環境適合性、すなわち排気の清浄性への対応である。ガソリンエンジンでは3元触媒を用いた排気の清浄化が主流であるが、ガスタービンのような排気に酸素を多く含む機関ではこの3元触媒を用いたNO_x低減は不可能である。そこで小型ガスタービンでは、燃焼そのものの改善により低公害性を実現する必要がある。一方エンジンの高効率化のために排気熱を回収する熱交換器を備える必要があり、この結果極めて高い燃焼器入口温度となってサーマルNO_xの生成が著しく促進される。また前述した負荷変動率の増大から頻繁で急激な燃焼条件変化が前提としてあり、これが低公害な燃焼条件の維持を阻害すると考えられる。このように小形ガスタービン用低公害燃焼器は、多くの課題に対応することが求められている。しかし高効率熱交換器を持つ小形ガスタービンの条件下で厳しい排気規制を満たす燃焼器設計に必要とされる燃焼方式の選定手法、適用時の技術課題、各技術課題に対する具体的対応策に関してはこれまで全く知見がなく、詳細な検

討が望まれている。

このような現状に基づき、本論文では制御上の課題に関して広くエンジンに適用可能な過渡システムの検討手法に必要とされるモデル化に関し詳細な検討を実施するとともに、低公害燃焼器設計に必要とされる事項全般にわたり詳細な基礎実験およびシミュレーションを行ない、その成果について論述した。

本論文は、8章より構成されている。第1章においては、研究の背景と従来の研究動向、および本研究の目的と意義について述べている。

第2章においては、ガスタービンの動的モデルの作成を行ない、検討例として具体的制御課題である周波数制御性能に関し燃費性能とのバランスも含めた評価を実施した。この検討において、動的モデルとNichols線図を用いた手法がエンジンの即応性に関する比較において有用であることを明らかにした。また解析効率の優れた熱交換器のモデル化を実施し、長時間負荷変動パターンのシミュレーションにも適用可能なことを示した。

第3章においては、小型ガスタービン用低公害燃焼器に適用する燃焼方式の検討を実施した。3種類の有力な低公害燃焼方式、すなわちRich-Lean 2段燃焼、拡散燃焼器の1次燃焼領域希薄化、および予蒸発予混合希薄燃焼について基礎燃焼実験を行ない排気特性を実験式化して想定燃焼条件での排気性能を推定した。その結果、予蒸発予混合希薄燃焼方式のみが最も厳しい排気規制であるガソリン乗用車規制値をも後処理なしで満足できる可能性のあることを明らかにした。

第4章においては、第3章の結果を受けて予蒸発予混合希薄燃焼器を検討する際の技術課題を明らかにした。また液体燃料の予蒸発予混合技術を検討し、必要な予蒸発予混合性能を得るための微粒化性能を実験および解析的に明らかにした。また予蒸発管入口にスワラヤールーバを付加し乱流混合を促進することが予蒸発予混合性能向上に極めて効果的であることを実験により検証した。

第5章においては、過渡運転時の排気制御技術について、最も厳しい排気規制であるガソリン乗用車用規制（モード走行）を例に取り上げ小形ガスタービンを適用した際の課題および対応策に関して検討を実施し、熱交換器の熱容量による応答遅れにより発生する燃料制御の制約と、希薄燃焼部の目標空気比を維持する上での可変機構の応答性の影響をエンジンシミュレーションモデルを用い明らかにした。

第6章においては、セラミック材料の適用技術をセラミック燃焼器の構造信頼性確保の観点から検討した。セラミック燃焼器の構造信頼性を確保する上で不確定な機械的応力の発生原因を排除することの重要性を示すとともに具体的構造例を明らかにした。また信頼性設計手法として静疲労寿命モデルを燃焼器に適用する際の構造例、一般的検討手法および実験手法について、解析および実験的に明らかにした。

第7章においては、以上（第4章～第6章）の検討で得られた設計手法を利用して、実際に100kW自動車用CGTのセラミック製予蒸発予混合希薄燃焼器を設計、製作し、燃焼実験を行なった結果を示した。燃焼実験の結果、予測された燃焼性能が得られ、本論文で確立した設計手法の有用性が実証された。また入口温度1200Kレベルでの逆火特性を初めて明らかにするとともに、その抑止技術に関し実験結果を基に対応技術を確立した。

第8章は結論であり、本研究において得られた結果を要約して述べており、小形ガスタービンの制御に関し得られた結果はエンジン過渡運転時における問題を解明する上で広く適用可能なものであることを述べるとともに、低公害燃焼器においても高効率小形ガスタービンのみならず、広く低公害連続燃焼研究に対し、重要な今後の指針を与えることを述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 献 一

副 査 教 授 宮 本 登

副 査 教 授 鵜 飼 隆 好

副 査 教 授 土 谷 武 士

学 位 論 文 題 名

小型ガスタービンの制御と低公害燃焼器に関する研究

本研究は、セラミック小型ガスタービンエンジンの設計において重要な技術課題となる制御手法と燃焼器設計に関する検討結果をまとめたものである。近年、1000kW以下の小型ガスタービンにおいても、セラミックスを用い、タービン入口温度を高め、飛躍的な熱効率向上を図る試みがなされている。この小型ガスタービンには二つの大きな課題が存在する。一つは、エンジン負荷変動率増大への対応である。また、第二の課題は、高度な排気清浄性への対応である。しかし、高効率の熱交換器をもつセラミック小型ガスタービンの条件下での制御手法、ならびに厳しい排気規制を満たす燃焼器設計に必要な燃焼方式の選定手法とそれに伴う各種技術課題に対する対応策に関してこれまで全く知見がなく、詳細な検討が望まれている。

本研究は、エンジン制御上の課題に関しては適応可能な過渡システムの詳細なモデル化に関する検討を行うとともに、低公害燃焼器設計に必要な事項全般の詳細な基礎実験およびシミュレーションの結果をまとめたもので、8章より構成されている。

第1章においては、研究の背景と従来の研究動向、および本研究の目的と意義について述べている。

第2章においては、ガスタービンの動的モデルの作成を行ない、検討例として具体的制御課題である周波数制御性能に関し燃費性能とのバランスも含めた評価を実施した。この検討において、動的モデルとNichols線図を用いた手法がエンジンの即応性に関する比較において有用であることを明らかにした。また解析効率の優れた熱交換器のモデル化を実施し、長時間負荷変動パターンのシミュレーションにも適用可能なことを示した。

第3章においては、小型ガスタービン用低公害燃焼器に適用する燃焼方式の検討を実施した。3種類の有力な低公害燃焼方式、すなわちRich-Lean 2段燃焼、拡散燃焼器の1次燃焼領域希薄化、および予蒸発予混合希薄燃焼について基礎実験を行ない排気特性を実験式化して想定燃焼条件での排気性能を推定した。その結果、予蒸発予混合希薄燃焼方式のみが最も厳しい排気規則であるガソリン乗用車規制値をも後処理なしで満足できる可能性のあることを明らかにした。

第4章においては、第3章の結果を受けて予蒸発予混合希薄燃焼器を検討する際の技術課題を明らかにした。また液体燃料の予蒸発予混合技術を検討し、必要な予蒸発予混合性能を得るための微粒化性能を実験および解析的に明らかにした。また予蒸発管入口

にスワラやルーバを付加し乱流混合を促進することが予蒸発予混合性能向上に極めて効果的であることを実験により検証した。

第5章においては、過渡運転時の排気制御技術について、最も厳しい排気規制であるガソリン乗用車用規制（モード走行）を例に取り上げ小形ガスタービンを適用した際の課題および対応策に関して検討を実施し、熱交換器の熱容量による応答遅れにより発生する燃焼制御の制約と、希薄燃焼部の目標空気比を維持する上での可変機構の応答性の影響をエンジンシミュレーションモデルを用い明らかにした。

第6章においては、セラミック材料の適用技術をセラミック燃焼器の構造信頼性確保の観点から検討した。セラミック燃焼器の構造信頼性を確保する上で不確定な機械的応力の発生原因を排除することの重要性を示すとともに具体的構造例を明らかにした。また信頼性設計手法として静疲労寿命モデルを燃焼器に適用する際の構造例、一般的検討手法および実験手法について、解析および実験的に明らかにした。

第7章においては、以上（第4章～第6章）の検討で得られた設計手法を利用して、実際に100kW自動車用CGTのセラミック製予蒸発予混合希薄燃焼器を設計、製作し、燃焼実験を行った結果を示した。燃焼実験の結果、予測された燃焼性能が得られ、本論文で確立した設計手法の有用性が実証された。また入口温度1200Kレベルでの逆火特性を初めて明らかにするとともに、その抑止技術に関し実験結果を基に対応技術を確認した。

第8章は結論であり、本研究において得られた結果を要約して述べており、小形ガスタービンの制御に関し得られた結果はエンジン過渡運転時における問題を解明する上で広く適用可能なものであることを述べるとともに、低公害燃焼器においても高効率小形ガスタービンのみならず、広く低公害連続燃焼研究に対し、重要な今後の指針を与えることを述べている。

これを要するに、著者はセラミック小形ガスタービンの制御解析手法を確認し、さらに燃焼器の詳細設計に有用な新知見を得たものであり、次世代エンジン技術開発、ならびに燃焼工学および内燃機関工学の発展に貢献するところ大である。

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。