

氏 名	古 畑 朋 彦
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 化学工学専攻
学 位 論 文 題 目	噴霧燃焼プロセスの解析モデルと その応用に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 三浦 隆利
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 三浦 隆利 東北大学教授 鈴木 睦 東北大学教授 松本 繁

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

ガスタービンコージェネレーションシステムは、その高いエネルギー利用効率が注目され各所で熱電併給システムとして導入されている。このシステムには、より一層の熱効率向上のための燃焼ガス温度の高温化と、燃料の多様化を目指した液体燃料の導入が求められている。しかし、それらの要求はいずれも排出 NO_x 量の増加につながることから、現在はそれらの要求を満たしつつ低 NO_x 化を実現するガスタービン燃焼器の開発が精力的に進められている。

従来燃焼器の開発は、燃焼実験における測定データに基づき行われてきた。しかしガスタービン燃焼器の場合、容器内に格納され高圧で運転されていることから、測定は困難を極め、採取できるデータも限定されていた。

そこで、燃焼実験を行うことなく燃焼器の燃焼特性を把握することが可能な、コンピュータを用いた燃焼シミュレーション法が注目されている。燃焼シミュレーションは、燃焼実験に要する時間、費用を削減できるばかりでなく、実験で採取し得るデータよりも詳細なデータを得ることができるという利点を有している。

しかし、ガスタービン燃焼器内の燃焼状況は極めて複雑であり、現在のところ燃焼器内で生じている現象を数値計算で忠実に再現することは不可能であるため、個々の現象をモデル化した数値モデルを組み合わせるにより燃焼シミュレーションを構築せざるを得ない。ところが、数値モデルは実際の現象をモデル化(簡略化)したものであるために、その組み合わせにより構築された燃

焼シミュレーションで再現される燃焼状況は、必然的に誤差を含むことになる。従って予測精度の優れた燃焼シミュレーションを開発するためには、個々の数値モデルについてその予測精度を検討し、より優れた数値モデルを選択することが極めて重要になる。また必要であれば、予測精度向上のための改良も行わなければならない。さらにモデル化の行われていない現象については、その数値モデルを開発することも必要になる。

以上の観点から、本研究ではガスタービン燃焼器における噴霧燃焼を対象とした燃焼シミュレーションの開発を前提として、噴霧燃焼プロセスを記述する乱流モデル、噴霧流解析モデル及びNO生成モデルについて、予測精度の検討、予測精度向上のための改良及び新たなモデルの開発を行い、さらにそれらを総合して噴霧燃焼シミュレーションを開発した。そしてシミュレーション結果と詳細な測定結果との比較を通してその予測精度を検討し燃焼器開発におけるシミュレーションの有用性を示すと共に、シミュレーションを用いてガスタービン燃焼器内の噴霧燃焼場におけるNO生成挙動を解明することを目的とした。

第2章 ガスタービン燃焼器内等温空気流動解析

本章では燃焼器内の燃焼ガス流れを記述する乱流モデルについて検討を行った。ガスタービン燃焼器内のガス流れは、旋回噴流に多数の直交噴流が導入されるという極めて複雑な様相を呈している。乱流モデルとしては予測精度と計算時間の兼ね合いから、現在のところk- ϵ 二方程式モデルが妥当であると考えられ、旋回噴流に対する予測精度向上のために修正モデルが数多く提案されている。そこで本章では、ガスタービン燃焼器を模擬した旋回噴流に4本の直交噴流が導入される等温（非燃焼）流れ場を対象に、修正k- ϵ 二方程式モデルの予測精度を検討した。修正モデルによる解析結果と測定結果を比較した結果、直交噴流が導入される流れ場に対しては、旋回流に対する乱流エネルギー消散率（ ϵ ）の修正がむしろ予測精度を悪化させることが明らかになった。そこで修正を施さない標準k- ϵ 二方程式モデルを用いて解析を行った結果、修正モデルに比べ予測精度が良好であることも明らかになった。現在ではより進んだ乱流モデルとしてレイノルズ応力モデルが提案されているが、単純な旋回噴流に対しても予測精度は不十分であり、計算時間もk- ϵ 二方程式モデルに比べ増加することから、ガスタービン燃焼器の燃焼シミュレーションに対しては標準k- ϵ 二方程式モデルが適しているとの結論を得た。

第3章 噴霧流解析手法の比較・検討

噴霧流の解析は噴霧燃焼シミュレーションに不可欠である。噴霧流解析手法には、噴霧滴相の取扱いの違いから、大別してラグランジュ法とオイラー法と呼ばれる2種類の手法が提案されている。両者の予測精度については従来から比較されているが、対象とされた流れ場はいずれも自由噴流、管内流といった単純な流れ場である。そこで、本章では噴霧燃焼シミュレーションの開発という立場から、制限空間内の再循環流を含む旋回、非旋回二相噴流を解析及び実験の対象として、ラグランジュ法とオイラー法の予測精度及び計算時間について検討を行った。ただし解析を簡略化するために、実験では液体噴霧の代わりにプラスチック粒子を使用した。解析結果と測定結果を比較した

結果、旋回、非旋回噴流のどちらの場合でも、 $30\mu\text{m}$ 粒子を含む二相噴流の場合にはオイラー法の、 $70\mu\text{m}$ 粒子を含む場合にはラグランジュ法の予測精度がより優れていることが明らかになった。これは、ラグランジュ法では気相の乱流変動成分の評価法に、オイラー法では粒子相の乱流粘度の評価法に問題があることがそれぞれ原因として推察された。また計算時間については、非旋回二相噴流の場合にはオイラー法の計算時間が短い、旋回二相噴流の場合には両者の差が見られなくなることも明らかになった。 $100\mu\text{m}$ をこえる粒子を含む場合にも計算を試みたが、オイラー法では収束結果が得られない（発散）ことも明らかになった。以上の結果を踏まえて、実際の燃焼器における噴霧燃焼を考えた場合、燃料噴霧には $100\mu\text{m}$ 以上の噴霧滴が数多く含まれていること、さらに保炎のために旋回噴流が採用されていることから、噴霧燃焼シミュレーションにはラグランジュ法が適しているとの結論を得た。

次に $30\mu\text{m}$ 粒子を含む二相噴流に対するラグランジュ法の予測精度を改善するために、気相の乱流変動成分の評価法に改良を加えた。従来気相の乱流変動成分は等方性乱流として評価されていたが、本章では新たに非等方性を考慮する手法を開発した。その手法によりラグランジュ法の予測精度が改善されることを示した。

第4章 NO生成モデルの検討

窒素分を含まない炭化水素燃料火炎ではサーマルNOとプロンプトNOと呼ばれる生成過程の異なる2種類のNOが生成する。このうちサーマルNOについては、その生成機構がゼルドビッチ機構で説明され、乱流拡散火炎に対する解析法も数多く報告されている。しかしプロンプトNOについては、乱流火炎における生成挙動の解析を試みた例が報告されていない。これはプロンプトNOの生成モデルが未だ提案されていないためである。そこで本章では乱流拡散火炎におけるプロンプトNO生成挙動を解析するために、HCNを中間生成物とするプロンプトNO生成モデルを開発した。そのモデルでは燃料と空気中の N_2 からHCNが生成する速度を表わす総括反応速度式中にモデルパラメータを導入したが、その値は高城らによるプロパン乱流拡散火炎におけるNOとHCN濃度分布の測定結果と解析結果を比較することにより最適化した。assumed P. D. F. モデルにより乱流燃焼場における温度、濃度変動を考慮しつつ、プロンプトNO生成モデルとサーマルNO生成モデルを用いてプロパン乱流拡散火炎におけるHCNとNO生成挙動の解析を行い、火炎内のHCNとNOの分布を良好に再現できることを示した。

第5章 ガスタービン燃焼器噴霧燃焼シミュレーション

本章では第2章から第4章までの研究成果を総合し、ガスタービン燃焼器内の噴霧燃焼を対象とした噴霧燃焼シミュレーションを開発した。またシミュレーションの妥当性を検討するために、燃焼器内の燃焼特性（温度及び化学種濃度分布）の詳細な測定を行い、測定結果とシミュレーション結果の比較を行った。その結果、シミュレーション結果は測定結果から推察される燃焼状況を良好に再現し、本章で開発した燃焼シミュレーションがガスタービン燃焼器の燃焼特性を把握する手段として有効であることを示した。ただし、燃焼ガス流れの予測誤差に起因すると推測される温度及

び化学種濃度分布の予測誤差も存在し、予測精度改善のためには燃焼ガス流れの予測精度を向上する必要があることを指摘した。

次にシミュレーションを用いて燃焼器内のNO生成挙動解明を行った。HCN及びNO濃度分布のシミュレーション結果を用いて、一次燃焼領域では主にプロンプトNOが生成し、より下流（2次、希釈領域）ではサーマルNOの寄与が高くなるというNO生成挙動を明らかにした。また燃料流量が少ない場合にはプロンプトNO生成量が減少し、全体としてサーマルNOの割合が増加することも示した。この知見は第4章で開発したプロンプトNO生成モデルを用いることにより明らかになったものであり、本シミュレーション法が低NO_xガスタービン燃焼器の開発において極めて有用であることを示した。

第6章 結 論

本章では各章で得られた成果を総括して述べた。

審査結果の要旨

本論文は、燃焼器の燃焼特性を把握する新たな手法として注目されているコンピュータを用いた燃焼シミュレーション法について、その開発の基礎として噴霧燃焼プロセスを記述する数値モデルに関する検討を行い、さらにガスタービン燃焼器における噴霧燃焼を対象とした燃焼シミュレーション法を開発し、その妥当性を検討したもので全編6章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的及び数値モデルに関する既往の研究について述べている。

第2章では、燃焼器内のガス流動を記述する乱流モデルについて、現在のところ燃焼シミュレーションに適していると考えられる $k-\epsilon$ 二方程式モデルの予測精度について検討し、旋回噴流に対する予測精度を改善する目的で修正された $k-\epsilon$ 二方程式モデルは、ガスタービン燃焼器のように旋回噴流に複数の直交噴流が導入する場合には適切でないことを明らかにし、修正を施さない標準 $k-\epsilon$ 二方程式モデルがより適していることを示している。

第3章では、噴霧燃焼シミュレーションに不可欠な噴霧流解析手法について、ラグランジュ法とオイラー法という異なる手法の比較検討を、制限空間内の再循環流を伴う旋回及び非旋回二相噴流を対象として行い、噴霧燃焼シミュレーションにはラグランジュ法が適しているとの結論を得ている。さらに、ラグランジュ法の予測精度改善を目的として、気相の乱流変動成分の評価において乱れの非等方向性を考慮する手法を開発し、予測精度が向上することを明らかにしている。

第4章では、火炎中で生成する NO の生成モデルについて、炭化水素燃料火炎で重要なプロンプト NO の生成挙動を予測し得るプロンプト NO 生成モデルの開発を行っている。従来炭化水素燃料の乱流拡散火炎におけるプロンプト NO の生成挙動を解析した例は報告されていないが、その生成モデルの開発により生成挙動の推算を可能にしている。

第5章では、第2章から第4章までの研究成果を総合してガスタービン燃焼器における噴霧燃焼を対象とした燃焼シミュレーション法の開発を行っている。同時に燃焼器内の温度及び化学種濃度分布の測定も行い、測定結果とシミュレーション結果の比較を通してシミュレーションの妥当性を示している。さらに、シミュレーションを用いてガスタービン燃焼器内の NO 生成挙動について検討を行い、NO 生成挙動と燃焼ガス流れ、温度及び化学種濃度分布との関連、プロンプト NO とサーマル NO の生成挙動の差異を明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、噴霧燃焼プロセスを記述する数値モデルに詳細な検討を加えることで噴霧燃焼シミュレーション法を確立し、ガスタービン燃焼器に適用することにより低 NO_x 燃焼器の開発に有用な知見および燃焼シミュレーション法を提供したものであり、燃焼工学ならびに化学工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。