

(論文内容の要旨)

本論文は、噴霧火炎の 2 次元直接数値計算 (DNS) により、混相燃焼の燃焼特性を火炎片 (Flamelet) モデリングの観点から明らかにするとともに、混相燃焼に有効な燃焼モデルの提案を行うことを目的として行った研究の成果をまとめたものであり、5 章からなっている。

第 1 章は序論であり、本研究の目的およびその重要性について述べ、既往研究との関連性についても説明している。

第 2 章では、層流対向流場に形成される n -デカンの噴霧火炎を対象に、伸張率、噴霧粒径、当量比、および燃料種をパラメータとした 2 次元 DNS を実施し、噴霧燃焼場における混合分率 (Z) とスカラー消散率 (χ)、すなわち Flamelet の特性を明らかにすることを試みた。その結果、対向流噴霧火炎は対向流ガス拡散火炎と大きく異なり、火炎内部における油滴の蒸発 (すなわち Z の生成) により Z が火炎内部でピーク値をもつことや、この Z のピーク値の上流側と下流側で火炎温度や化学種濃度等の物理量は Z と χ に対して一意に定まらないことが明らかになった。この上流側と下流側における物理量の値の差異は、上流側の Z の生成速度と下流側の移流・拡散速度のバランスに依存しており、伸張率が低いほど、粒径が小さいほど、および当量比が大きいほど、顕著になることがわかった。また、 n -デカンよりも蒸発速度が速い n -ヘプタンの噴霧火炎についても計算を行うことにより、 n -ヘプタンの噴霧は火炎に突入する以前にその多くが蒸発するため予混合的火炎領域が拡大し、 Z のピーク値の上流側と下流側における物理量の値の差異が大きくなることがわかった。これらの結果から、噴霧火炎を対象とする Flamelet モデルには、 Z とは別に、反応や蒸発の挙動を適切に捉えることのできる新たな特性パラメータが必要であるとの結論を得るに至った。

第 3 章では、層流対向流場に形成される n -デカンの噴霧火炎を対象に、輻射伝熱を考慮した 2 次元 DNS を実施し、輻射伝熱が噴霧火炎挙動に及ぼす影響について明らかにすることを試みた。加えて、輻射伝熱が環境影響物質排出に及ぼす影響を調べるため、すすの生成挙動についても検討を行った。すすの生成量の予測には、その前駆体や酸化剤の濃度を評価するための Flamelet モデルと速度論に基づくモデルとのカップリング手法を用いた。その結果、輻射伝熱には火炎温度やすすの生成を低下させる作用があり、この作用は、未燃ガス

や燃料油滴の温度が火炎温度に比べて大幅に低いいため、輻射伝熱が熱を拡散させて火炎温度を低下させ、すすの核生成速度や表面成長速度を抑制するために生じることが明らかになった。また、輻射伝熱を無視した計算が、火炎温度やすすの濃度を過大評価する危険性があることを示すとともに、これらの噴霧火炎の燃焼やすすの生成を正確に予測するうえで、適切な輻射モデルの導入が不可欠であるという結論を得るに至った。さらに、すすは主に噴霧の拡散火炎領域において形成されること、すすの燃焼にともなう輻射のエネルギーは、当量比の増加にともなって劇的に大きくなることが明らかになった。この傾向は、実験において観察される輝炎の挙動と定性的に良く一致しており、本研究で用いたすす生成モデルは噴霧燃焼場のすす濃度を予測するうえで有効であるとの結論を得るに至った。

第4章では、噴霧火炎の Flamelet 特性を適切に表現するための新たなパラメータとして、連続（ガス）－分散（噴霧）相間の熱移動および輻射伝熱を考慮することが可能であるという優位性からエンタルピを取り上げ、エンタルピを反応進行変数として用いる改良 Flamelet モデル (Modified Flamelet / Progress - Variable Approach) を提案した。さらに、この改良 Flamelet モデルを輻射モデルとカップリングさせる手法を考案し、噴流噴霧火炎の2次元 DNS によりその有効性を検証するとともに、Arrhenius 式モデルに基づく燃焼モデルを用いた DNS 結果をリファレンスとし、輻射伝熱が噴流噴霧火炎挙動に及ぼす影響についても詳しく検討した。Arrhenius 式を用いた DNS 結果から、輻射伝熱は火炎温度や Z の時間平均値ばかりでなく r.m.s 値も低下させる作用があることが明らかになった。また、この Arrhenius 式を用いた DNS 結果と改良 Flamelet モデルを用いた DNS 結果との比較から、本研究で提案した輻射モデルのカップリング法は、噴霧火炎の Flamelet 特性と輻射伝熱の影響を良好に捉えることができる優れた手法であることを確認するに至った。

第5章は総括的な結論であり、本研究で得られた結果を要約するとともに、今後の研究課題についても言及している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、数値計算による混相燃焼の燃焼特性の解明とモデリングに関する研究の結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 対向流噴霧火炎の2次元直接数値計算(DNS)により、噴霧燃焼場における混合分率(Z)およびスカラー消散率(χ)の特性、すなわち火炎片(Flamelet)の特性について検討した。その結果、噴霧火炎はガス拡散火炎と大きく異なり、火炎温度や化学種濃度等の物理量が Z と χ に対して一意に定まらないことを明らかにした。この結果から、噴霧燃焼を対象とするFlameletモデルには、 Z や χ とは別に反応や蒸発の挙動を適切に捉える新たなパラメータが必要であるという結論を得るに至った。
2. 輻射を考慮した対向流噴霧火炎の2次元DNSにより、輻射が燃焼挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、輻射を考慮した場合に比べて、無視した場合には火炎温度やすすの濃度が大幅に過大評価されることを明らかにした。この結果から、噴霧火炎の燃焼やすすの生成を正確に予測するうえで、適切な輻射モデルの導入が不可欠であるという結論を得るに至った。
3. 噴霧火炎のFlamelet特性を適切に表現するための新たなパラメータとしてエンタルピを取り上げ、エンタルピを反応進行変数として用いる改良Flameletモデルを提案した。また、この改良Flameletモデルと輻射モデルをカップリングする手法を考案し、噴流噴霧火炎の2次元DNSにより本手法の有効性を検討した。この結果、本手法は、噴霧燃焼のFlamelet特性と輻射の影響を良好に捉えられる優れたものであることを確認した。

以上、本論文は、混相燃焼の詳細な燃焼特性を解明し、混相燃焼に有効な燃焼モデルの提案を行ったものである。Large-Eddy Simulation等の高精度数値計算手法の開発を促進するとともに、混相燃焼を用いる機器の熱効率や環境性の向上に貢献をもたらすものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年7月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。