

京都大学	博士（工学）	氏名	藤田 彰利
論文題目	Numerical Simulations of Spray Combustion and Droplet Evaporation (噴霧燃焼および液滴蒸発に関する数値シミュレーション)		
(論文内容の要旨) 本論文は、数値シミュレーションにより、噴霧燃焼挙動の詳細な特性を調べるとともに、噴霧燃焼のための拡張 Flamelet モデルを提案し、その適用性を検討すること、さらに単一液滴に着目し、蒸発を伴う液滴と周囲気体との間の物質および熱の輸送メカニズムを調べる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、燃焼による反応を Arrhenius 式を用いて直接解く噴流噴霧火炎の2次元直接数値計算(DNS)を実施することにより、当量比、燃料液滴粒径、および輻射伝熱が噴霧火炎構造に与える影響を検討している。本計算では、燃料に <i>n</i>-デカンを用い、その反応機構として一段総括反応を採用している。輻射モデルとしては気液間の輻射伝熱を厳密に考慮するために Discrete ordinate 法を採用している。燃料液滴については、ラグランジアン的に追跡し、液滴の位置、速度、温度および質量の情報を、全ての液滴に対して求めている。その結果、噴霧火炎は拡散火炎と予混合火炎が混在する複雑な構造を呈しており、その構造が当量比や噴霧液滴粒径の影響を強く受けること、極端に大きな当量比の場合を除いて当量比もしくは燃料液滴粒径が小さいほど予混合燃焼の寄与率が大きくなること、さらに、その予混合燃焼の寄与率は火炎上流側で大きく、下流に行くにしたがって減少することを明らかにしている。また、輻射伝熱は噴霧火炎領域のピーク温度を低下させる作用をもつことを明らかにしている。さらに、燃焼モデルとして、燃料液滴と周囲気体間の物質および熱の移動までも考慮することができるように従来の Flamelet モデルを改良した拡張 Flamelet モデルを本研究で提案している。この拡張 Flamelet モデルを用いた噴霧燃焼の DNS を実施し、燃焼場におけるガス温度分布などの結果を上述の Arrhenius 式を用いた DNS の結果と比較することにより、本モデルの噴霧燃焼への適用性について検討を行っている。その結果、当量比および燃料液滴粒径に関わらず、つまり予混合燃焼の寄与率に関わらず、拡張 Flamelet モデルが噴霧燃焼場を概ね予測できることを確認している。また、輻射伝熱の効果についても拡張 Flamelet モデルを用いて予測可能であることを確認している。 第3章では、前章において噴霧燃焼への適用性について確認された拡張 Flamelet モデルを3次元 Large-Eddy Simulation (LES) に適用することにより、本モデルの3次元噴霧燃焼場への適用性と、噴流噴霧火炎の詳細挙動について検討している。上述の2次元 DNS とは異なり、本 LES では実際のジェットエンジンで利用されている Jet-A を燃料として用い、化学種数 181、反応数 1195 の反応を考慮している。また、計算コストを削減するために、燃料液滴については複数の液滴を一つのパーセルとして扱うパ			

一セルモデルを用いている．本計算では，実際の系を対象とし，既往実験による結果と比較を行うことにより，計算結果の検証を行っている．その結果，3次元 LES により得られた火炎および燃料液滴の分布は実験と定性的に一致することを確認している．しかしながら，定量的に良好な一致は得られていないことから，今後，実験条件および計算条件の再検討が必要であることを示唆している．

第4章では，単一液滴内外部の流れ場の3次元 DNS と風洞を用いた単一液滴の蒸発実験を併用することにより，蒸発を伴う液滴と周囲気体との間の熱移動メカニズムを詳しく調べるとともに，上述の噴霧燃焼の計算で用いた蒸発モデルである非平衡 Langmuir-Knudsen モデルの精度検証を行っている．その結果，蒸発量は液滴前部において最大となり，後方に行くに従って蒸発量が減少していくこと，またその傾向は粒子レイノルズ数が大きいほど顕著に現れることを明らかにしている．また，蒸気の雰囲気濃度が極めて低い場合には，周囲気体が液滴の温度より高い条件下においても液滴温度は低下すること，また，蒸気の雰囲気濃度は，液滴の Sherwood 数や Nusselt 数には大きな影響を与えないことを確認している．加えて，非平衡 Langmuir-Knudsen モデルを用いた場合の計算結果は，Fick の式を用いて局所の蒸発量を直接解いた計算結果に比べて，蒸発量をわずかに過少評価するものの，噴霧燃焼場に十分適用可能であることを確認している．さらに，固体粒子周りの流れ場に対して，流体の温度変化に伴う物性（密度，粘性）の変化を考慮した3次元 DNS を実施した結果，粒子の温度が周囲気体よりも高い場合には抗力係数が増加する一方で，粒子の温度が周囲気体よりも低い場合には抗力係数が減少することを明らかにしている．このことから，気流中の粒子運動をより正確に予測するためには，粒子と周囲気体の温度差までもを考慮することができる新しいモデルの開発が必要であることを示唆している．

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、数値計算による噴霧燃焼特性および液滴蒸発特性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. 噴流噴霧燃焼の2次元直接数値計算(DNS)により、当量比、燃料液滴粒径、および輻射伝熱が噴霧火炎構造に与える影響について検討した。その結果、噴霧燃焼場におけるガス温度や燃料液滴の分布および予混合燃焼の寄与率が当量比と燃料液滴粒径の影響を強く受けること、また、輻射伝熱が噴霧火炎領域のピーク温度を低下させる作用をもつことを明らかにした。さらに、本研究で提案した噴霧燃焼のための拡張 Flamelet モデルの噴霧燃焼への適用の妥当性を検討することにより、拡張 Flamelet モデルは上記の影響を正確に捉えることができる有効なモデルであることを明らかにした。

2. 上記の拡張 Flamelet モデルを用いた噴流噴霧火炎の3次元 Large-Eddy Simulation (LES)により、拡張 Flamelet モデルの3次元 LES への適用性について検討した。その結果、得られた火炎および燃料液滴の分布は実験結果と定性的に一致し、拡張 Flamelet モデルは3次元 LES に対しても有効なモデルであることを示した。

3. 単一液滴内外部の流れの3次元 DNS と風洞を用いた単一液滴の蒸発実験を併用することにより、液滴と周囲気体との間の熱移動メカニズムを詳しく調べた。その結果、蒸気の雰囲気濃度は液滴の温度変化や蒸発量に大きな影響を与えるものの、液滴の Sherwood 数や Nusselt 数には大きな影響を与えないことを明らかにした。また、粒子の抗力係数が粒子表面ごく近傍の気体の密度や粘性係数の影響を強く受けることを明らかにし、燃焼流中における燃料液滴の運動をより正確に予測するためには、液滴と周囲気体の温度差までをも考慮した新しい抗力係数モデルの構築が必要であることを示した。

以上、本論文は、噴霧燃焼場における燃焼挙動の更なる解明、および LES などの高精度数値計算手法の噴霧燃焼場への適用促進、ひいては噴霧燃焼を用いる工業機器の熱効率や環境性能の向上に進歩をもたらすものであり、学術上、實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23年2月21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。