

氏 名	青 木 秀 之
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 3 月 27 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	噴霧燃焼における乱流拡散現象のシミュレーション 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 只木 楨力 東北大学教授 鈴木 睦 東北大学教授 松本 繁

論 文 内 容 要 旨

燃焼によるエネルギーは古来より人類社会にとって多大な貢献をしており、現代では高度文明の支えとなっている。その一方で燃焼時に排出される NO_x や SO_x, ばい塵等により地球的規模での環境破壊問題が深刻化している。さらに天然資源保護の立場から難燃焼性燃料の使用及び高効率かつ環境汚染物質排出量の低減を目指した燃焼操業の確立が望まれている。近年のコンピュータの急速な進歩により各種のシミュレーション法が注目され、ガスや固体燃料に対する燃焼に関してもシミュレーションが盛んに行なわれており、燃焼状態推算に成果を挙げている。しかし特C重油などの難燃性液体燃料及び輸送や貯蔵面から最近注目されているスラリー燃料に対するシミュレーションに関する検討はほとんど皆無であり、燃料の多様化に応える燃焼技術の立ち後れが問題となっている。そこで本論文では従来提案された各種モデルの予測性能の検討やモデルの開発を行うことで、上記の液体燃料に適用可能な噴霧燃焼シミュレーション法を確立することを目的とする。

第 1 章 緒 論

炉内噴霧燃焼挙動をシミュレーションで表現するためには各過程に関するモデル化が必要となる。本章では乱流、噴霧流、ガス燃焼反応、液滴・粒子燃焼反応、輻射伝熱、NO 及びすす生成モデルに関する既往の研究を示し、モデルの特徴や適用法を検討した。

第2章 非燃焼空気流動特性の解析

燃料滴や粒子、燃焼ガスの反応や熱及び物質移動は燃焼空気の流動によって支配されている。従って燃焼の制御を行なう上で炉内の流動状態を正確に把握することが極めて重要となる。本章では乱流モデルの中で最も使用例が豊富でかつ信頼性のあると思われる $k-\epsilon$ 二方程式モデルを使用し、炉内燃焼操作で一般によく用いられる旋回流、二段燃焼空気流及び旋回流発生装置内の空気流動を実験・解析することにより解析手法や乱流モデルの予測性能について検討を行なった。その結果として、旋回流に対する乱流モデルの予測性能を比較した結果、標準的な $k-\epsilon$ 二方程式モデルに修正を施すことが必要であることが示された。また、二段燃焼用空気を炉内接線方向に円筒三次元的に導入した結果、流れ場は三次元的挙動を示すため、円筒軸対称解析では炉内流動を予測することは不可能であった。さらに旋回流式燃焼器で一般に使用されるサーキュラー・タイプ・スワラー (CTS) の旋回流発生効率、スワール数の増加と共に低下するため、CTS を有する燃焼器使用の際にはスワール数の補正して評価する必要性を確認した。

第3章 C重油噴霧燃焼特性の解析

従来噴霧燃焼シミュレーションに関する研究は灯油などの高揮発性の燃料に限られ、さらに乱流燃焼反応や輻射伝熱及び NO 生成に関する総合的なシミュレーション適用例はほとんど見られない。そこで本章では難燃性液体燃料の噴霧燃焼シミュレーション法の確立の基礎として、C重油噴霧燃焼シミュレーション法を開発し、実験結果と比較・検討した。その結果、重油滴の蒸発速度に関して実験結果と多少差が見られるもの、炉内温度、酸素及び NO 濃度に関して両者の良好な一致が得られた。本シミュレーション法により C重油噴霧燃焼をほぼ正確に推算可能であることが示された。

第4章 CWM 噴霧燃焼特性の解析

石炭が固体燃料であることによる輸送、貯蔵などのハンドリングの困難さを解決する手段として、微粉炭を水と混合させてスラリー化する石炭のスラリー燃料 (CWM) が有望視されている。しかし水分を含むことに起因する着火遅れの燃焼時の不安定性、火炎温度の低下及び灰中未燃分の増加等の問題が生じている。そこで本章では CWM 滴の単一滴燃焼実験を行い CWM 滴の燃焼挙動を観察することにより CWM 燃焼反応モデルを提案した。さらに CWM 燃焼反応モデルを組み込んだ CWM 噴霧燃焼シミュレーション法を開発し、スワール数及び噴霧特性を変更した場合の噴霧燃焼実験結果と比較・検討した。スワール数の小さい条件では燃焼空気流の軸方向速度が大きく、高温領域における燃料滴の滞在時間が短いため未燃率が増加した。一方スワール数の大きい条件では燃焼用空気が炉壁に沿って流れるため、燃料の燃焼に必要な O_2 の供給が不十分となって燃焼性が悪化することが示された。また、ザウター平均径 (d_{32}) の大きい噴霧条件では噴霧粒径が大きくても燃料初速度が小さく、液滴の水分蒸発及び燃焼に必要な炉内滞在時間が十分に得られるため、未燃率が比較的上流部から減少した。一方 d_{32} の小さい場合には、燃料初速度が大きく、炉内の高温領域を短時間で通過し水分蒸発及び燃焼に必要な滞在時間に達しなかった。このため燃料滴の d_{32} が小さくても未燃率が増加し、燃焼効率の低下を引き起こすことが示された。

第 5 章 PWM 噴霧燃焼特性の解析

ピッチは原油の減圧残油熱分解プロセスから副生し、鉄鋼用特殊粘結剤が主な用途であったが、その後特殊な分解技術のもとで分解し、炭素繊維の原料としての利用や微粉碎して燃焼させる微粉燃焼法が開発され、産業用ボイラで用いられている。また、石炭と同様の理由からスラリー化したピッチ・水スラリー燃料が実用化されている。本章では PWM 燃焼挙動を把握し、CWM と同様に噴霧燃焼シミュレーション法を開発することを目的とした。さらに 2 章において二段燃焼空気導入時の流れの非対称性により円筒三次元解析の必要性を示したが、ここでは円筒三次元的に二段燃焼空気を導入した場合の PWM 噴霧燃焼実験を行なった。実験結果と二次元軸対称及び円筒三次元座標系での解析結果を比較することにより、PWM 噴霧燃焼特性に及ぼす旋回流及び二段燃焼空気流の影響を検討した。その結果として、PWM 単一滴燃焼実験より PWM 滴の燃焼挙動は CWM 滴と同様の過程で表された。しかし、揮発分放出過程における滴径の線膨張率は、CWM が微粉炭粒子の凝集の結果生じた間隙から内部の揮発分が放出するため 1.5 と小さいにもかかわらず、PWM の場合はピッチの微粉の凝集と同時に液滴表面の軟化溶解を伴うため、3 倍と非常に高い値を示した。また、PWM 噴霧二段燃焼の二次元軸対称及び円筒三次元解析結果は炉内温度や酸素濃度場が全く異なるにもかかわらず、排出 NO 及びばい塵濃度はほぼ同様の傾向を表し、実験結果と定性的な一致を示した。従って PWM 噴霧燃焼シミュレーションの目的を排出口における NO 及びばい塵濃度に限るならば二次元軸対称解析でも十分推算可能であり、本二段燃焼空気導入法に相当する燃焼炉の解析において、計算時間や記憶容量の節約が可能であることが示された。

第 6 章 実用燃焼炉における噴霧燃焼特性の解析

実用燃焼炉では NO 排出量の抑制対策として二段燃焼法、低 NO_x バーナの使用あるいは排ガス再循環などが併用され効果を挙げている。しかし一方で燃焼効率の低下、排出ばい塵濃度の増大を余儀なくされているのが現状である。さらに通常の発電用ボイラでは燃焼性が不良で高 N、S 分を含有する燃料を使用するため、安定操業の上で高効率で環境汚染物質排出量の少ない操業条件を決定することは容易ではない。本章では実用燃焼炉内燃焼解析の基礎として行なった非燃焼空気流動実験及び解析、C 重油、CWM 及び PWM 噴霧燃焼実験及び解析に基づき、実用燃焼炉の噴霧燃焼シミュレーション法を開発した。二段燃焼空気の一部を燃焼炉の炉底部から導入し、その空気量を変更した場合の排出 NO 及びばい塵濃度及び炉内水管硫化腐食の原因となる H₂S 濃度に及ぼす影響を検討した。その結果として、NO 排出濃度に関して解析結果は実験値と良好な一致を示した。また、炉底部の最大 H₂S 濃度の推算値は炉底部からの二段燃焼用空気導入により急激に減少した。この傾向は実験結果と一致し、水管硫化腐食の防止対策として本空気導入法は有効であることが示された。また、二段燃焼空気の一部を炉底部から導入する操作のみでは NO とばい塵排出量の同時低減は困難であり、他の方法との組合せにより同時低減を図る必要があることが示された。

第 7 章 結 論

本章は各章の総括であり、本研究に関する意義、目的ならびに検討結果を再記した。

以上のように本研究では噴霧燃焼操作に伴う環境汚染物質排出量の低減を目的として、炉内の噴霧燃焼特性を推算可能な噴霧燃焼シミュレーション法を開発した。実用燃焼炉内の噴霧燃焼特性の推算を行なった結果、本シミュレーション法により炉内燃焼状態や環境汚染物質排出特性の推算が十分可能であることが示された。

審査結果の要旨

現在、燃料の燃焼時に発生する環境汚染物質による環境破壊や資源有効利用の点から、燃焼の高効率化と環境汚染物質排出量の抑制が要求されている。この背景から本論文は、従来十分に検討されていない噴霧燃料に対してシミュレーション法を確立したものであり、全編7章より構成される。

第1章は緒論であり、研究の背景や目的、既往の研究を示している。

第2章では各種燃焼装置内の空気流動特性について実験・解析を行っている。その結果、旋回流場の解析は $k-\epsilon$ 二方程式モデルに修正を施す必要があること、二段燃焼空気を円筒炉内接線方向に導入する場合には三次元解析が必要となること、スワラーの旋回流発生効率 η はスワール数の増加と共に低下し、発生効率を考慮する必要があることを明白にしている。

第3章ではC重油の噴霧燃焼実験・解析を行ない、噴霧燃焼シミュレーション法を開発している。結果として、解析結果は実験値と一致し、解析モデルの妥当性を確認している。

第4章では石炭・水・スラリー（CWM）の単一滴燃焼実験を行い、燃焼モデルを提案している。さらに噴霧燃焼実験・解析を行い、燃焼特性に及ぼす旋回強度及び噴霧特性の影響を検討している。解析結果は実験結果の傾向と良好に一致し、スワール数や噴霧条件のNO及びばい塵排出特性に及ぼす影響を解明している。

第5章ではピッチ・水・スラリー（PWM）の単一滴燃焼実験を行ってPWM燃焼燃焼速度係数を測定し、燃焼モデルを提案している。さらに噴霧燃焼実験・解析を行い、燃焼特性に及ぼす二段燃焼空気導入割合の影響を二次元軸対称及び円筒三次元座標系で検討している。その結果PWM滴の燃焼特性が明かとなり、シミュレーションの目的を排出NO及びばい塵濃度の推算に限れば二次元解析でも可能であり、計算時間や記憶容量の節約が可能であることを示している。

第6章では実用燃焼炉の排出NO及びばい塵濃度の推算を行い、実験値と比較・検討している。結果として、解析結果は実験値と良好な一致を示し、炉底部の最大 H_2S 濃度の推算値は炉底部からの二段燃焼空気により減少するため、水管硫化腐食の防止対策として有効であることを明白にしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、乱流燃焼炉におけるガス及び噴霧流動、伝熱及び反応現象を解析できる三次元噴霧燃焼シミュレーション法を開発し、実操業時の高効率化及び環境汚染物質排出量の低減操作・設計に有用な情報を提供するものであり、化学工学の発展に寄与する所が少なくない。

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。