

## 学位論文題名

## 迅速混合モデルの開発と乱流拡散流れ場への応用

## 学位論文内容の要旨

近年、地球環境問題やそれに対する人類の健康問題への懸念から、乱流中における物質拡散や化学反応現象を解明し制御することは、重要かつ緊急の研究課題となっている。このような現象は工場などからの汚染物質の環境中への拡散や、大気中での化学反応による汚染物質の生成などに見られ、また、低公害で高効率な燃焼器などの工業装置の最適設計と関連して、工学的にも重要である。しかしながら、このような問題を数値的に予測しようとした場合、いくつかの困難に遭遇する。それは、乱流と化学反応との相互作用が重要であるため、乱流現象そのものを正しく解析する必要があること、さらに化学反応を取り扱うには反応と流れを特徴づける時間スケール、あるいは素反応間での時間スケールの大きな相違に起因する「スティフネス」の問題があること、数値解法としてオイラー的な手法を用いることからくる、数値拡散誤差による計算の破綻の可能性などを配慮しなければならない。したがって、実用性・汎用性の高い数値解析法は未だ確立されていないのが現状である。このような、複雑に変形する界面での現象を精度良く解析しようとする場合には、むしろラグランジュ的手法、特に流体粒子の運動により乱流拡散現象を直接的に表すラグランジアン粒子的手法の方がより適している。しかしながら、ラグランジアン粒子的手法による反応性乱流解析に関する研究はあまり知られていない。そこで、粒子的手法により物質混合を記述できるような新しい数値解法を開発する必要性と乱流拡散現象の確率的表現法としての確率拡散モデルの開発が望まれている。

本研究の主目的は、これまでオイラー的な観点から成されてきた様々な流れ場への数値解析上の問題点を指摘すること、その解決策として空間分解能に優れ、数学的取扱も容易なラグランジアン粒子の特徴を有する新たな物質混合モデルである「迅速混合モデル」を提唱し、いくつかの特徴的な乱流拡散流れ場に対しその適用条件および有効性を調べるための基礎的研究を行うことである。

本論文は第1章から第8章までの全8章で構成されている。各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、化学反応を伴う乱流に関する従来の実験的および数値解析的研究の紹介と乱流拡散現象の知見およびそのモデリングについて説明するとともに本論文の目的を述べている。

第2章では、従来の確率混合モデルを紹介すると共に、本研究で新たに開発した迅速混合モデルの概念の解説、確率論的考察を行い、物質拡散過程や化学反応過程への適用方法について述べている。迅速混合モデルとは、あるスカラーをもつ流体要素同士が、ラグランジュ的運動によりある設定した距離以内に接近すると、直ちにスカラーの混合が起こり、それぞれが平均化されるというモデルである。

第3章では、迅速混合モデルの定量的精度とモデルを支配する任意パラメータによる特性を評価するため、主流のない乱流拡散場における物質拡散問題のシミュレーションを行っている。そして、得られた濃度分布を拡散方程式の厳密解である誤差関数と比較し、モデルの妥当性について考察している。その結果、混合可能距離などのパラメータを適切に設定することにより、所定の拡散係数を有する物質拡散場を実現できることを明らかにしている。

第4章では、迅速混合モデルの適用可能性を例示するため、異なる化学種を含む流体の界面における物質拡散が重要な、大規模渦構造を特徴的に取り上げ、本モデルを用いて大規模渦がロールアップしていく中での化学反応シミュレーションを行っている。ここで用いた化学反応機構は  $A+B \rightarrow P$ 、および連鎖反応系  $A+B \rightarrow M$  (反応速度定数  $k_1$ )、 $M+B \rightarrow P$  (反応速度定数  $k_2$ ) であり、乱流混合と化学反応の時間スケールの比で表されるダムケラー数に対して、流体の運動が反応速度に及ぼす影響を生成物濃度分布などにより定性的に調べ、本モデルの有効性を検討している。

第5章では、まず既知の乱流統計量を基にした確率的手法によって統計的性質を満足するような乱れ速度を生成する方法を示し、それを用いて二次元せん断層での物質拡散および化学反応過程に対し迅速混合モデルによるシミュレーションを行っている。そして、反応速度定数や lean-to-rich リアクトant比の影響、混合層におけるエントレインメントの非対称性による効果を調べるための flip 条件 (高速流側と低速流側の化学種を入れ替える条件) の影響のそれぞれについて、平均濃度分布、変動濃度強さ分布、濃度の確率密度関数を比較し、それらが生成物濃度へ及ぼす影響について Masutani らの実験データに基づいた定性的・定量的検討をし、良好な結果を得ている。

第6章では、迅速混合モデルを乱流境界層へ拡張するためのシミュレーションを行っている。計算対称を定温加熱壁をもつ二次元チャンネル内乱流における乱流熱拡散問題とし、差分法によって求められた温度分布と迅速混合モデルを用いて求められた温度分布とを比較し、与えられた乱流熱拡散場を実現するための混合可能距離などの各種パラメータの設定条件を調べている。本章では、流体要素の乱流拡散には時間相関を考慮したランジュバンモデルを使用している。

第7章では、迅速混合モデルの密度変化を伴う圧縮性乱流場への適用方法について述べている。これは、流体の運動が化学反応に及ぼす影響を探るだけでなく、反応に起因する発熱による密度変化の影響を流れ場に反映させるためにも重要である。ここでは、ラグランジアン粒子法の一つとしての迅速混合モデルと有限体積法による圧縮性流れ解析との組合せ方法を検討しており、簡単な流れ解析を行うことによって、その適用例を示している。

第8章は本論文の結論であり、本研究で得られた主要な結果および今後の展望についてまとめている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 飯 田 誠 一  
副 査 教 授 木 谷 勝  
副 査 教 授 井 上 良 紀  
副 査 助 教 授 小 河 原 加 久 治

学 位 論 文 題 名

## 迅速混合モデルの開発と乱流拡散流れ場への応用

大気中における汚染物質の拡散や化学反応，高効率で低公害な燃焼器の最適設計等，乱流中における物質拡散および化学反応現象を精度良く予測し，解明することは重要な課題である。しかしながら，化学反応過程をも配慮した乱流拡散問題を数値的に正しく予測することは困難であり，実用性の高い数値解析法は未だ確立されていない。また，複雑に変形する界面での乱流拡散や化学反応との相互作用を精度良く解析するには，流体粒子の運動によって乱流拡散を直接的に表現するラグランジアン粒子的手法の方が適していると考えられているが，このような手法により反応性乱流を扱った研究はあまり知られていない。

本論文は，空間分解能に優れ，数学的取扱も容易であるラグランジアン粒子の特徴を有する物質混合モデル（迅速混合モデル）を新たに開発し，化学反応を含むいくつかの特徴的乱流拡散流れ場に対して，その適用条件および有効性を検討している。

本論文では，以下のような結論を得ている。

(1) ラグランジアン粒子的混合モデルである「迅速混合モデル」を新たに開発した。これは，流体要素がスカラー量の履歴を保持しながら運動を続けるため，化学反応を扱うのに適していること，確率密度関数を容易に得ることができること等を特徴とする。

(2) 拡散方程式の厳密解との比較により，迅速混合モデルの定量的精度および混合可能距離などの各パラメータの依存性を詳細に検証した。そして，本モデルが所定の拡散係数を有する物質拡散場を再現可能であることを明らかにした。

(3) 二次元乱流せん断層内での化学反応シミュレーションを行い，反応速度定数，lean-to-rich リアクタント比，flip条件等が反応生成物濃度に及ぼす影響を調べた。そして，同様の実験データとの比較から，本モデルを用いたシミュレーションが物理現象を定性的および定量的に表現できることを示した。また，本モデルが乱流混合の影響により反応速度が抑制される現象を考慮できること，瞬間反応仮定では得られない低ダムケラー数の反応性流れを効果的に扱えることを確認した。

(4) 乱流境界層流れへの適用条件を調査するため，壁からの乱流熱拡散問題を取り上げ，その応用に際しての問題点を明らかにした。そして，モデルの改良を行うことにより本モデルが所定の乱流熱拡散場を実現できることを示した。

(5) 反応熱などによる密度変化が流れ場へ及ぼす影響を考慮できるようにするため，迅速混合モデルを圧縮性乱流拡散場に適用する方法についての基礎的研究を行った。

以上のように，本論文は，簡便なラグランジュ的混合モデルによって，複雑な乱流拡散流れ場における物質混合問題を精度良く解析する手法およびその可能性を提示しており，各種特徴的な

流れ場をシミュレーションすることにより、その適用条件や有用性を検討している。このことは、流体工学、環境工学のみならず他の学問分野においても寄与するところが大きい。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のあるものと認める。