

報告番号	甲 第 13622 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 圧縮性乱流における物質混合過程の解明及びモデル化に関する研究  
(A study on elucidation and modeling of mixing process in compressible turbulence)

氏 名 邨 有名

## 論 文 内 容 の 要 旨

圧縮性乱流中の物質混合現象を数値シミュレーションで予測することは、特に工学分野及び自然科学分野において重要な役割を担っている。工学分野では高信頼性かつ経済的な数値計算手法を組み込んだ CFD ソフトウェアが自動車のガソリンエンジンと次世代の超音速旅客機のスクラムジェットエンジンの事前設計開発にとって有力なツールとなり得ることが一般的に認識されている。自然科学における応用は工業分野とは異なり、特に自然災害の 1 つである火山噴火による火山灰雲の形成・拡散に対する予測は数値計算手法によってのみ可能となる。このように圧縮性乱流中の物質混合過程を計算する実用的な数値計算手法を確立するために、流体の圧縮性が乱流中の物質混合に与える影響を解明することが重要となる。

近年の計算機性能の飛躍的な向上とともに、工業規模の反応性流体数値解析手法の高精度化・高効率化が強く求められている。反応性流体の数値計算は主に流体運動に対する計算と反応機構に対する計算からなる。流体運動を計算するための支配方程式には多くの空間微分項が含まれており、適切にスケール情報を計算することが必要とされている。また局所反応速度の計算には一点情報が必要とされている。一般的にスケール情報を計算するための離散化スキームは間隔が一定の計算格子との相性がよく、自由移動可能な仮想粒子は一点情報をもつため、格子と仮想粒子の二種類の計算要素を組み合わせた連成計算手法に関する研究が盛んに行われている。近年工業的な応用に向けて注目されている連成計算手法は大スケールの非定常乱流計算用の LES 法と確率密度関数の輸送方程式をラグランジュ的

に計算するモンテカルロ法を組み合わせた計算手法で、通称 LES/FDF 法と呼ばれている。この手法の先行研究では、特に乱流燃焼の高信頼性シミュレーションについて近年多くの研究実績がなされている。LES/FDF 法とは別に、LES・粒子法と呼ばれる連成計算手法も近年提案されている。確率過程論を導入していないため、LES・粒子法の粒子計算スキームでは LES/FDF 法に組み込まれた乱数生成の計算を省き、数値計算過程の簡便性が増したことで実用性がより高いと期待されている。しかしながら、LES・粒子法の先行研究では非圧縮性反応流に対する有効性しか確定されておらず、今後 LES・粒子法を工業用の反応性流体の数値計算に拡張するために、LES・粒子法の圧縮性乱流場に対する有効性を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、圧縮性乱流用の LES・粒子法を構成する要素スキームの確立を研究目的としている。圧縮性乱流中の物質混合を高精度かつ高効率に予測する LES・粒子法の要素スキームとして、格子を取り扱う Implicit Large Eddy Simulation 法 (陰的 LES 法) と仮想粒子を取り扱う分子混合モデルの一種である混合体積モデル(MVM)を圧縮性乱流中のパッシブスカラー混合過程に対してそれぞれ検証した。研究内容としてまず、圧縮性乱流場における詳細な物質混合機構の把握および目標値として扱えるデータベースの構築が必要なので、乱流の最小スケールまで正確に計算可能な Direct Numerical Simulation 法 (DNS 法) を利用し、種々の工学的な諸問題点と深い関連を持った基礎流れとして二次元自由噴流を幅広い噴流マッハ数を設定して計算した。DNS 計算結果ベースのアプリオリ(事前検証)テストを実施することで、混合体積モデル(MVM)の圧縮性乱流における分子混合拡散効果の予測に対する有効性をはじめて確立した。さらに DNS の計算結果と陰的 LES 法の亜音速・超音速二次元噴流に対する計算結果を比較し、格子スケール成分のパッシブスカラー散逸率とサブスケール成分のパッシブスカラー散逸率を分けて定量化する統計解析を行い、分子混合モデルに必要な格子場におけるパッシブスカラー散逸率の予測に対する陰的 LES 法の有効性を確立した。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第一章は緒論であり、反応性流体用の連成計算手法、陰的 LES 法と混合体積モデルの学術的意義やこれまでに行われてきた研究、その問題点についてまとめた。本論文では、圧縮性流体中の物質混合に対する陰的 LES 法と混合体積モデルの予測可能性を検証することを目指し、物質混合を伴う時間発展型圧縮性二次元噴流の直接数値計算(第二章)、陰的 LES 法による物質混合を伴う時間発展型圧縮性二次元噴流の数値計算(第三章)、分子拡散に対する混合体積モデル(MVM)のアプリオリテスト(第四章)を行った。以下に第二章、第三章、第四章で行った具体的な研究内容と結果を示す。

第二章ではパッシブスカラー混合を伴う圧縮性二次元噴流の直接数値計算(DNS 法)を行った。噴流レイノルズ数(14000, 32000)と噴流マッハ数(0.6, 1.6, 2.6)と組み合わせた4つの計算条件に対して計算が行われた。DNS データによる主な考察について、乱流が発達した領域における瞬時の温度場とパッシブスカラー場を可視化することで噴流マッハ数の増加に伴い、噴流広がり方向におけるパッシブスカラーの乱流拡散の抑制が強くなることがわ



かった。また、噴流レイノルズ数の増加に伴い、より小さいパッシブスカラー変動構造が現れることが確認された。噴流マッハ数の増加に伴い、噴流領域内部の温度増加および噴流領域周辺の Jet crackle 構造が顕著になる。また、温度場に対する噴流レイノルズ数の効果はパッシブスカラーのそれと定性的に等しいことがわかった。また、流れ方向速度場とパッシブスカラー場における半値幅の時間変化分布から、乱流が完全発達した時刻以降において半値幅の二乗が線形的に増加することが確認できた。また、噴流マッハ数の増加による半値幅の増加からもパッシブスカラーの乱流拡散が抑制されていることが確認された。正規化された平均速度、平均パッシブスカラー、速度 r.m.s. 値とパッシブスカラー r.m.s 値の噴流広がり分布から、本 DNS 法によって計算された圧縮性乱流噴流の自己相似性が確認できた。マッハ数の増加による r.m.s. 値の減少が見られた。流体圧縮性に関連した流体変形と流体圧縮性に無関係な流体変形によるスカラー(パッシブスカラーと温度)散逸率の生成項の PDF 分布から非圧縮性流体変形のうち compressive strain がスカラー散逸率の生成を促進する支配的な要因だとわかった。また、パッシブスカラーと温度散逸率の生成項の PDF 分布に強い相似性が見られた。本章で得られた結果より、微視的な分子拡散過程と熱拡散過程を同じ散逸の時間スケールでモデリングする可能性が示された。

第三章では、マッハ数 0.6 の亜音速噴流とマッハ数 2.6 の超音速噴流に対する数値計算を陰的 LES 法で行った。そのデータによる統計的な解析結果と前章の DNS 結果を比較することで、陰的 LES 法の有効性が確認できた。さらに、全スケールのパッシブスカラーバリエーションと乱流エネルギーの散逸率を格子成分とサブ格子成分に分解してそれぞれ解析した。格子成分の散逸率は DNS 法と同じ散逸項を差分スキームで計算され、サブ格子成分の散逸率は Selective フィルターと Shock capturing フィルターを組み合わせた陰的 SGS モデルの減衰関数で計算された。陰的 LES 法による瞬間散逸率の PDF を DNS 法の結果と比較し、小さい変動スケールに対する高散逸率は主に陰的 SGS モデルで支配され、大きい変動スケールに対する中間程度の散逸率は主に差分スキームで支配されることがわかった。また、本計算の陰的 SGS モデルはサブ格子スケールの乱流の高散逸効果を提供するだけでなく、擬似衝撃波のような圧力波による非物理的な振動の除去にも機能する。格子スケール成分のパッシブスカラー散逸効果とサブ格子スケール(SGS)成分のパッシブスカラー散逸効果をそれぞれ分けて定量化し、格子幅により両成分の寄与度が変化しても全体の散逸率が正確に予測できたので、本章の計算結果から格子数依存性の弱い陰的 LES スキームを確立した。

第四章では、非圧縮性流れの分子拡散項に対して考案された混合体積モデル(MVM)を圧縮性乱流中の分子拡散項へと拡張し、噴流マッハ数 0.6, 1.6, 2.6 の時間発展型二次元噴流の DNS データベースを用いたアプリオリ検証を行った。混合体積モデルを用いることでパッシブスカラーの分子拡散項を精度よく予測できることがわかった。過去に行われた非圧縮性流れ用に対する混合体積モデルの検証結果と同様に、分子拡散項において混合体積内の粒子密度の増加とともに混合体積モデルの予測精度が改善された。特に、乱流遷移領域に

における高精度な分子拡散の解析に必要な粒子密度の設定許容範囲が自己相似領域より厳しくなることが示された。本章では混合体積モデルの圧縮性移流拡散方程式における分子拡散項に対する計算妥当性が検証され、混合体積モデルを組み込んだ LES-粒子法の圧縮性流体の数値計算に拡張する可能性が示唆された。

以上の結論を以って、本研究で構築された陰的 LES スキームと混合体積モデルを利用した LES-粒子法が圧縮性反応流に対しても効率的に精度よく予測可能であることが期待される。これからの LES-粒子法でパッシブスカラーの移流拡散をラグランジュ的に解く際に、陰的 LES 法で計算された流れ場データでラグランジュ粒子の位置を計算し、パッシブスカラー場データで混合体積モデルにおける混合時間スケールを予測することで、物質混合を伴う圧縮性流れに対する LES-粒子法が確立できると期待される。