

Title	気体燃料-空気同軸噴流の非定常乱流混合現象に関する数値計算手法の研究
Author(s)	古賀, 和樹
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96062
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (古賀和樹)

論文題名

気体燃料-空気同軸噴流の非定常乱流混合現象に関する数値計算手法の研究

論文内容の要旨

同軸噴流を用いて気体燃料(天然ガスや水素)と空気を混合させる燃焼方式の研究開発が進められている。この燃焼方式では乱流による混合促進が重要であり、現象を解明するには反応前の燃料と空気の混合状態や乱流を正しく再現できる非定常乱流計算手法が必要である。ノズル出口近傍の現象に着目すると、流速と濃度の分布が急勾配になる薄い層が噴流の外縁に形成される。高速同軸噴流の混合は、この層での分子拡散よりも、剪断層の不安定に続く乱流遷移が支配的である。また、乱流の影響を再現するために本研究ではLarge-eddy simulation (LES)を採用する。本研究では乱流領域の解析に照準を当てて計算格子を設定するため、分子拡散が及ぶスケールは最小格子幅より狭い。この場合、数値計算上では1メッシュ以内に分子拡散が及ぶ層をはさんで密度や比熱比の急勾配が発生し計算を不安定化させることが問題となるため、安定的に急勾配を捕獲する計算手法が必要となる。しかし、計算手法に起因する数値粘性が発生し、急勾配でない領域における小スケール渦を減衰させることが課題となる。本研究では急勾配捕獲と物理量の分布が急勾配でない領域における数値粘性の抑制を両立する低数値散逸スキームを構築した。また、LESは格子サイズ以下の小さい渦の影響を乱流モデルで近似的に与えるが、そこに数値粘性が加わると計算結果の信頼性を低下させる。そこで、急勾配を検知するセンサーを用いて数値粘性と乱流モデルによる渦粘性の付加領域の重なりを防ぐSemi-explicit LES (SeLES)を新たに考案し、気体燃料-空気の同軸噴流にて検証を行った。

第1章では、本研究の背景となる気体燃料と空気の同軸噴流場の解析の重要性を示すとともに、計算手法や二成分流体のLESに関する従来研究を踏まえて本研究の目的を明確にした。

第2章では、粘性および分子拡散がない二成分圧縮性流れに対する低数値散逸スキームの構築方法を示した。低数値散逸スキームは、速度急勾配と比熱比の急勾配を検知する混合センサーを用いて、数値粘性を含まない中心差分と二成分流体における急勾配捕獲スキームを組み合わせて構築した。急勾配スキームには空間高次精度化手法であるWeighted Compact Nonlinear Scheme (WCNS) 補間とHarten-Lax-van Leer Contact (HLLC) スキームを適用した。

第3章では、低数値散逸スキームの急勾配捕獲性能と低数値散逸性を検証するために粘性と分子拡散がない単成分・二成分圧縮性流れに対する検証計算を実施した。衝撃波管問題と物質界面移流問題では急勾配捕獲スキームの数値安定性の検証を行った。渦-衝撃波干渉問題では、低数値散逸スキームが急勾配を数値振動なく捕獲し数値粘性による渦の減衰を抑制できることを確認した。気泡-衝撃波干渉問題とTriple-point問題では、低数値散逸スキームが速度と比熱比それぞれの急勾配を数値振動なく捕らえ、急勾配でない領域において数値粘性の付加を抑制できることを示した。

第4章では、二成分圧縮性粘性流れに対して新たな乱流計算手法であるSeLESの構築方法を示した。陽的Sub Grid Scale (SGS) モデルにVreman渦粘性モデルを適用するが、渦粘性と数値粘性が同時に加わることは計算結果の信頼性低下を招く。急勾配でない領域のみにSGS渦粘性が作用することを意図して、急勾配センサーを用いてSGSモデルの渦粘性係数を修正し、急勾配を検知した領域では数値粘性、急勾配でない領域ではSGS渦粘性が加わる計算手法を構築した。

続いて第5章では、構築した計算手法の有効性を確認するために非反応の気体燃料-空気同軸噴流の検証計算を実施し、実験値や従来手法のMonotone Integrated LES (MILES)の計算結果と比較した。プロパン-空気同軸噴流の検証計算では、速度・混合分率分布に関して、全ての計算結果は実験値とよく一致した。乱流強度成分の分布のピーク位置はMILESよりSeLESの方が実験値に近いことが確認された。高マッハ数の水素-空気同軸噴流では、先行研究のMILESの計算結果ではポテンシャルコアの非物理的な消失が確認され、速度分布や質量分率分布は実験値と乖離していた。また、WCNSとHLLCによるMILESではポテンシャルコアは実験値よりも下流側に伸びることが確認された。SeLESではポテンシャルコア内の流速が一定に保たれ、速度や質量分率の減衰開始位置は実験値とよく一致した。SeLESでは急勾配でない領域で数値粘性を抑制しSGS渦粘性を付加するのでポテンシャルコア内の乱れを正しく再現できたと考えられる。

第6章では、構築した低数値散逸スキームとSeLESの要点をまとめ、計算結果について要約した。最後に、今後の課題や、本乱流計算手法による乱流燃焼モデル研究への将来展望について述べ、結言とした。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (古賀和樹)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主査	教授	竹内 伸太郎
	副査	教授	矢野 猛
	副査	教授	赤松 史光

論文審査の結果の要旨

気体燃料と空気を燃焼前に混合させる予混合燃焼では一般に有害成分の排出が少なく燃焼効率が高いという利点があり、均一な予混合気を生成することを目的として同軸噴流乱流による混合促進が用いられることがある。この混合方式では、噴流の円形ノズルとその周囲の環状領域からそれぞれ燃料と空気を噴出させ、ノズル出口近傍の剪断層における不安定現象を経て、乱流へ遷移する過程で気体を混合させる。それぞれの過程は化学反応の熱によって変調を受けることが予想されるが、化学種とエネルギーの輸送を伴う非定常乱流の計測は困難であるため、数値シミュレーションによる各過程の解明に対する期待が高い。

剪断層の不安定現象や気体の圧縮性、あるいは乱流渦の影響下における二成分気体の混合過程には幅広いスケールが混在する。このうち小さいスケールは、ノズル出口近傍における二成分気体の流速分布や濃度分布における急勾配を含むスケール、あるいは衝撃波の厚みであり、それらは乱流遷移までを扱うための計算格子幅よりも小さいため、不連続面として扱われる。多くの数値計算では不連続面近傍における非物理的な数値振動を抑制するために数値粘性を付加する。しかし、物理量の変動が穏やかで勾配拡散型の乱流モデルだけが作用すればよい領域でも過度な数値拡散を追加することになり、燃焼反応を伴わない二成分流れにおいて、定性的に実験結果と異なる速度分布や混合状態を予測する例が報告されている。

本論文は、多成分気体の混合過程から乱流遷移までを含む非反応流れの数値解析を確立するため、速度や物質濃度の急勾配領域とそれらの分布が緩やかな領域の双方で数値拡散を適切に制御した数値解析法の提案において、以下のような成果をとりまとめたものである。

1. 多成分流体の圧縮性流れに適した基礎変数の組と基礎方程式を選択し、物理量の急勾配を検知するスキームを提案している。また、急勾配を含まない領域における中心差分スキームとの組み合わせにより、全体として低数値散逸性を達成するスキームを提案している。
2. 標準的な参照データのある単成分単相流体と単成分多相流体、および二成分単相流体の圧縮性流れに対して、提案したスキームの急勾配捕獲性能と低数値散逸性能が両立することを検証している。
3. 二成分単相流体の乱流において、物理量の分布が緩やかな領域にのみ乱流モデルが作用するよう、急勾配検知モデルを用いた乱流モデルの修正を示している。
4. 燃料-空気混合気体の予混合過程における乱流噴流において、衝撃波の有無の場合について検証計算を実施し、実験結果との比較を通して提案手法の有効性を示している。

以上のように、本論文で提案された数値解法は、低マッハ数から高マッハ数の幅広い条件において適用可能な、多成分気体の混合過程と乱流における特徴的な流れの現象を捉える手法であり、予混合過程に対する再現性を高めたことにより下流の燃焼過程の精度向上にもつながり、総合的に予混合燃焼器における熱流動場の理解に寄与するものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。