

学 位 論 文 題 名

衝撃波による混合問題の解明に関する数値的手法の開発

学位論文内容の要旨

宇宙工学の分野では、スペースプレーンの動力として超音速燃焼ラムジェット（スクラムジェット）の研究が進められている。これは、超音速で流入する作動流体を超音速を保ったまま燃焼させるもので、作動流体が燃焼器内に滞留する時間が非常に短いことから、従来型とは全く異なる迅速な混合法が必要となる。衝撃波による混合は燃焼気体界面の密度勾配と衝撃波の圧力勾配の干渉によって生じる渦度を利用して混合を促進するものであり、上記の問題への適用が期待されている。

衝撃波による混合についての従来の研究は現象の観察に主眼が置かれており、混合促進という観点からなされた研究例はあまり知られていない。

一般に、混合を効果的に促進できる流れ場の構造として混合流体界面の「折り畳み・引き延ばし」の構造が知られている。衝撃波による混合過程についてもこの構造を出現させ、またこれを複雑化させることができれば、混合をより有効に促進できるものと考えられる。本研究ではこのような観点から、衝撃波による混合の数値シミュレーションを行い、反射衝撃波を利用した混合促進の有効性を示している。

衝撃波による混合の流れ場では、流れの変動が平均的に分布せず、変動の激しい領域が局所に集中したり、あるいはそのような領域が移動する。このような流れ場の数値シミュレーションを行う場合、必要のない領域にも細かい計算格子を使用することで計算精度を保つアプローチが取られることが多く、一般に非常に大きな記憶容量と計算時間が必要とされる。この問題に対して近年注目を集めているのが、解適合格子法というアプローチである。これは、得られた解の状態に応じて計算格子を変化させていくもので、計算精度を犠牲にせずに効率のよいシミュレーションを行うことが可能となる。しかし、解適合格子の使用に際しては複雑なプログラムを作成する必要があるが、この複雑さの増大に伴ってエラーの増加など保守性の問題が深刻になる。また、衝撃波による混合の実験は通常二種類の気体の混合として行われており、実験条件に合せたシミュレーションを行う場合には、化学種の混合を扱えるような拡張を施す必要があるが、複雑なプログラムでは、一度作成したプログラムの拡張や再利用が一般に困難である。

そのような問題点に対する解決策として、ソフトウェア工学の分野ではオブジェクト指向プログラミングが知られているが、数値流体工学の分野ではその効率の悪さから普及には至っていない。本研究では、共通プログラミングといわれる手法を応用して流れ解析プログラムの開発を行い、効率を悪化させずにオブジェクト指向プログラミングの利点を有効に利用する手法を提案している。

本論文は第1章から第6章までの全6章で構成されている。各章の内容は以下のとおりである。

第1章は序論である。ここでは、衝撃波による混合過程に関する従来の研究を紹介し、本研究の動機と目的について述べている。あわせて、その数値解析に伴う問題点についても説明している。

第2章では、本研究で扱う圧縮非粘性流れの基礎方程式を示すとともに、衝撃波による混合ならびに本研究で用いた数値解析法に関して、その基礎となる圧縮性流れの性質について説明している。

第3章は、本研究で取り扱った種々の数値解析法に関する説明である。ここでは、計算格子とその生成法、解適合格子法、有限体積法を用いた風上化解法、化学種を考慮した場合の解法について、その詳細を述べている。

第4章では、共通プログラミング手法を応用した流れ解析プログラムの開発について述べている。従来型のプログラミング手法の問題点を具体例を挙げて指摘し、再利用性、保守性、汎用性に優れ、かつ計算効率も損なわないプログラミング手法を提案している。また、適用例を示すことで本手法の有効性を実証している。

第5章では、衝撃波に関する数値シミュレーションを行っている。まず、2次元流れ場における密度差のある空気塊の非定常混合のシミュレーションを行い、衝撃波入射のタイミングが混合の促進に大きな影響を与えることを明らかにしている。さらに、3次元流れ場における化学種の混合を考慮した数値シミュレーションを行い、反射衝撃波を利用した混合に関して実際の工学的応用への可能性を示している。

第6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 井 上 良 紀
副 査 教 授 木 谷 勝
副 査 助 教 授 小 河 原 加 久 治

学 位 論 文 題 名

衝撃波による混合問題の解明に関する数値的手法の開発

衝撃波による混合は、衝撃波のもつ強い圧力勾配と混合気体境界の密度勾配との干渉で生じる渦度により誘起される現象であり、超音速流れにおける混合促進法として注目されている。しかしながら、従来の研究では現象の観察あるいは数値的手法の開発に主眼が置かれ、混合促進の観点からなされた研究は数少ない。また、この流れ場は移動する不連続現象により特徴づけられる、数値解析上困難なものであり、その克服のために解析プログラムが大規模化・複雑化するという、プログラム開発上の問題を抱えている。

本論文は、混合気体境界の形状変化に着目し、反射衝撃波を利用した境界形状複雑化による混合促進の可能性を検討している。また、共通プログラミング手法を応用した流れ解析プログラム開発手法を新たに提案し、上記問題の解決を図っている。

本論文では以下のような結論を得ている。

(1) 共通プログラミング手法を応用した流れ解析プログラム開発法を新たに提案した。これは、

- ・ 計算効率の低下を伴わずにオブジェクト指向プログラミングの長所を取り入れることに成功している、

- ・ 流れ解析を構成する種々の要素を部品として取り扱うことができ、また各要素が高い独立性を有するため、従来型のプログラミング手法と比較した場合、保守性、汎用性および拡張性の面で飛躍的に優れている、

という特徴を持つ。また、この手法を用いて実際にいくつかのプログラムの開発を行い、プログラム開発の効率化や柔軟性についてその有効性を実証した。

(2) 衝撃波による混合について、

- ・ 反射衝撃波を利用することで、単一衝撃波による混合よりさらに効果的な混合促進が可能であることを示した。

- ・ 反射衝撃波の入射時期が混合促進効果に大きく影響することを示した。

- ・ 反射衝撃波の入射時期による混合過程の変化の詳細を解明し、特に卓越した混合促進効果が得られるのは、効率的な混合促進における典型的な構造である「折り畳み・引き伸ばし」構造が混合気体境界形状にあらわれた場合であることを明らかにした。

以上のように、著者は反射衝撃波による混合促進の機構を解明し、その工学的応用に対する指針を示している。同時に、流れ解析プログラムの開発についてその大規模化・複雑化に伴う問題点を克服しうる開発手法を示している。このことは流体力学のみならず数値解析を取り扱う多くの分野に対して寄与するところが大いである。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あるものと認める。