

## 審査の結果の要旨

氏名 本江 幹朗

修士（工学）本江幹朗提出の論文は、「酸化剤流旋回型ハイブリッドロケット内の燃焼を伴う流れの数値シミュレーション (Numerical Simulations of Combustive Flows in a Swirling-Oxidizer-Flow-Type Hybrid Rocket)」と題し、6章からなっている。

近年、ハイブリッドロケット特有の低燃料後退速度の問題を改善できる方式として、酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットが注目されている。燃焼実験によって、従来の軸流噴射方式の三、四倍高い燃料後退速度が得られることが知られているが、一方、燃焼室内流れが旋回乱流と拡散燃焼の複雑さを有するため、その挙動が十分に把握されているとは言い難く、ロケットの実用化に向けた課題として残されている。筆者は、酸化剤流旋回型ハイブリッドロケット内の燃焼を伴う流れの特徴として、旋回流特有の乱流拡散と、化学非平衡を伴う拡散燃焼を取り上げ、これらを適切に扱うことのできる数値シミュレーション手法を既存の実験結果と比較・検証した上で提案し、その手法を酸化剤流旋回型ハイブリッドロケット内の燃焼を伴う流れの数値シミュレーションに適用し、燃焼室内の流れの挙動を解明することを試みている。

第1章は序論であり、研究の背景、酸化剤流旋回型ハイブリッドロケット内の燃焼を伴う流れの数値シミュレーションに関する過去の研究をまとめ、本研究の目的と概要について述べている。

第2章では本研究で用いた数値解析手法を詳細に解説している。まず、流体現象の支配方程式である圧縮性ナビエ・ストークス方程式に関して、多成分流体と乱流の扱い方について述べ、レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を用いた乱流シミュレーション(RANS)とラージ・エディ・シミュレーション(LES)の2つの方法について定式化している。他方、拡散燃焼解析には、流れの特性時間に比べて化学反応の特性時間が短い場合に有効とされるフレイムレット(Flamelet)・アプローチを採用し、混合分率の輸送方程式を定式化し、混合分率とその空間勾配の情報から化学種の組成を得るためのフレイムレット・テーブル

ルを作成する手法について述べている。空間の離散化手法は有限体積法で、高次精度化手法として MUSCL 法、WENO 法、及び WENO-Z 法を定式化し、それらの解像度を比較・検証した上で 5 次精度 WENO-Z 法を主たる方法として採用している。対流項数値流束には広いマッハ数領域に適する SLAU スキームを採用し、時間積分法は RANS と LES の各々の解析目的に対して適切な陽的又は陰的手法を採用している。

第 3 章は、RANS と LES の 2 つの手法に関して、旋回乱流への適用性に関して議論している。旋回乱流の特徴である渦粘性係数の非等方性に着目し、これに関する標準  $k-\varepsilon$  モデルの不備を改善するために提案された多重時間スケール  $k-\varepsilon$  モデルを取り上げ、これを複数の旋回流実験のシミュレーションに適用した結果、その効力が確かに見られるものの、十分とは言えないことを示している。さらに LES を複数の旋回流実験に解析した事例を示し、良好に実験結果を模擬できることを確認した上で、本研究における解析手法として LES を選定している。

第 4 章は、拡散燃焼を伴った旋回乱流に適する解析手法に関して議論している。燃焼モデルとしてフレイムレット・アプローチを用い、乱流モデルに陰的 LES を用いて CFD 解析コードを作成した上で、このコードの妥当性を検証する目的で、シドニー大でデータベース化されている旋回乱流火炎バーナーの実験のシミュレーションを実施している。その結果、境界条件を適切に与えれば、このコードで実験を妥当に再現する計算結果が得られることを確認している。

第 5 章は、上記の CFD 解析コードを用いて、酸化剤流旋回型ハイブリッドロケット内の燃焼を伴う流れを解析し、その結果から、渦と火炎の構造、化学種の分布、燃料グレイン先端での局所加熱等、燃焼と流動に関する新たな知見について述べている。

第 6 章は結論であり、本研究の成果をまとめ、今後の課題を述べている。

以上、要するに、本論文は、旋回乱流と拡散燃焼を適切に扱うことのできる数値解析手法を提案し、それを適用することで酸化剤流旋回型ハイブリッドロケットの燃焼を伴う流れの現象に関して新たな知見をもたらしており、またその成果のもとになった乱流拡散燃焼の数値シミュレーションのハイブリッドロケット設計開発分野への応用を切り開いた点で航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。