

審査の結果の要旨

氏名 谷 洋海

修士(工学) 谷 洋海提出の論文は「液体ロケットエンジン噴射器を想定した超臨界圧下の極低温同軸噴流に関する研究」と題し、7章から成っている。

液体ロケットエンジン燃焼器にとって、噴射器近傍における推進剤の混合・燃焼は燃焼器性能を左右する重要な過程であるが、燃焼圧が推進剤の臨界圧を超える条件下における混合・燃焼過程の詳細は十分に理解されていない。その原因の一つとして、混合・燃焼過程の基礎を成す超臨界圧下の極低温同軸噴流（極低温流体とガスの同軸噴流）を支配する流れ構造が明らかでないことが挙げられる。超臨界圧極低温同軸噴流がガス/ガス同軸噴流や気液同軸噴流と根本的に異なる点は、噴射流体が超臨界流体特有の熱力学的物性を持つことである。ここでいう熱力学的物性の特徴とは、気液界面と表面張力が消失するという单相流的性質と、擬臨界温度で急激に物性値が変化するという二相流的性質の二つを兼ね備えることである。そのため、超臨界圧下の極低温同軸噴流において支配的な流れ構造を理解するためには、超臨界圧流体の熱力学的物性が流れ場に及ぼす影響を理解する必要がある。

本研究で著者は、基礎的な乱流現象の数値解析、噴射器流れを模擬した噴流の数値解析、数値解析結果の妥当性を検証するための高圧噴射実験を組み合わせる事で、全体として信頼性の高い解析に基づいて超臨界極低温同軸噴流を理解することを目指している。さらに、ロケットエンジン設計において超臨界流体の特性を反映しない解析手法が多用されていることを指摘した上で、その妥当性についても考察を行っている。

本論文は、第1章から第7章までの構成となっている。

第1章は緒言であり、研究背景、同軸噴流および超臨界流れに関する従来研究、そして本論文の目的が述べられている。

第2章では、高圧噴射実験について述べている。超臨界圧下での極低温流体の同軸噴射を実現するための実験装置および計測手法について説明したのち、高圧噴射実験から得られた知見として、超臨界圧下の混合層も気液混合層と同様に高密度流体が混合層内に巻き上がりその後一様に拡散することを明らかにしている。また、同軸噴流の特徴として、噴射器出口直後から極低温噴流の境界が波打つ不安定波が存在すること、極低温噴流の高密度領域の終端付近から高密度の塊が定期的に千切れること、中心軸上の温度分布には擬臨界温度付近で温度上昇が停滞する領域が形成されることを述べている。

第3章では、数値解析手法として、乱流混合層の解析に用いた Direct Numerical Simulation (DNS), 平面噴流の解析に用いた Large-Eddy Simulation (LES), Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), および超臨界流体の熱力学的物性値の評価方法について詳細を述べている。

第4章では、時間発展平面混合層のDNS解析を行うことで、超臨界流体特有の物性値が乱流輸送に及ぼす影響について述べている。超臨界圧下の混合層と理想気体の混合層を比較した結果として、乱流渦構造に対しては熱力学的物性の影響が小さく、運動量/熱乱流輸送の性質は理想気体の混合層とほとんど変わらないことを明らかにした。

第5章では、同軸噴流を模擬した平面噴流のLES解析について述べている。DNS解析との比較により手法の妥当性について検証を行ったのち、超臨界噴流の特徴について議論をおこなっている。その結果として、噴流において、外側噴流コア終端付近より上流では内側混合層の不安定波、それより下流では内側/外側混合層の干渉で形成されるコヒーレント渦列が支配的な流れ構造であることを明らかにし、さらにこれらの流れ構造が実験で観察された特徴と一致することを述べている。

第6章では、前章までに得られた知見に基づいて、ロケットエンジン設計で広く用いられているRANS解析の妥当性について議論している。まず、第3章で得られたDNS解析結果を用いて乱流モデルの修正を行い、適切なチューニングを行う事により超臨界圧下の乱流混合現象をRANS解析で再現可能であることを確認した。次に、支配的流れ構造への適用性を調べるため、平面噴流の非定常RANS解析を行った。その結果、通常の非定常RANS解析では支配的流れ構造のスケールと乱流渦スケールを分離できず、噴流後流のコヒーレント渦列を再現できないことがわかった。また、その影響は噴流後流の混合が抑制される形で現れることがわかった。さらに、実験の同軸噴流のRANS解析を行い、上記の結果が同軸噴流にも共通して現れることを確認した。

最後の第7章は結言であり、本研究から得られた知見をまとめている。

以上要するに、本研究は、液体ロケットエンジンの中核要素でありながら詳細な議論が行われていなかった超臨界極低温同軸噴流について基礎的な乱流現象、噴流の特徴、さらに設計現場で用いられる解析手法の妥当性まで幅広い知見を得ており、航空宇宙工学に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。