

## 審査の結果の要旨

氏名 都木 貴彦

修士（工学）都木貴彦提出の論文は「超臨界圧伝熱チャネル流れにおいて遷臨界物性が流れ場と熱伝達に与える影響」と題し、本文 5 章および付録から構成されている。

液体ロケットエンジンの再生冷却はエンジンの性能および信頼性を左右する要素であり、再生冷却流路の抵抗および伝熱量を正確に予測することが求められる。再生冷却流路の圧力が冷却剤の臨界圧を超える超臨界状態での伝熱は、高熱流束時に熱伝達率が低下する伝熱劣化など常圧と異なる現象が知られており、作動圧の高い液体ロケットエンジンにおいて超臨界状態での伝熱予測精度改善が設計上の課題となっている。特異な伝熱特性の原因としては、超臨界状態における状態方程式の非線形性、流体の膨張に伴う平均速度分布の変化や乱流特性の変化など様々な影響が指摘されているが、超臨界状態における乱流流れと熱伝達の詳細に論じた研究は少なく、超臨界物性と熱伝達との関連が整理されていない。現在のロケット設計は、乱流モデルのパラメータチューニングなど理論に基づかない経験的な伝熱予測手法に頼っている。

以上のような状況から、本研究では超臨界状態での乱流熱伝達を詳細に観察し、超臨界物性が流れ場に及ぼす影響を整理することで、再生冷却流路の伝熱予測精度向上につながる知見を得ることを目的としている。

第 1 章は序論であり、ロケットエンジン再生冷却や超臨界における物性の特徴を整理した上で、超臨界乱流熱伝達に関するこれまでの研究を概観し、本研究の目的を設定している。

第 2 章では、流れの基礎方程式を積分することで流体物性と壁面温度の関係を導くとともに、乱流モデルを用いた Reynolds-Averaged Navier-Stokes 方程式を用いて実機ロケットエンジン相当の条件での伝熱チャネルの数値解析を行い、無次元壁座標で壁から 300 程度の領域での乱流熱輸送が超臨界物性の影響で抑制されることが、伝熱劣化に関係していることを示した。

第 3 章では窒素の臨界圧を超える 4MPa 雰囲気中で、極低温窒素をチャネル流路に流して可視化するとともに、流体および壁面の温度分布と流体速度分布の

計測を行っている。その結果から超臨界の伝熱チャンネルでは流れ方向の密度変化が壁面垂直方向と比較して小さく、また明確な界面が存在しないため、単相流れとして扱えることを示している。

第4章では第2章の結果にもとづいて、無次元壁座標 300 までの領域を詳細に観察するために摩擦速度に基づくレイノルズ数 300 の超臨界乱流伝熱チャンネル流れの直接シミュレーションを行っている。解析結果から、遷臨界条件における急激な物性変化が生じる流れ場であっても乱流輸送のメカニズムは非圧縮流体と大きな違いはなく、平均速度分布は壁面からの平均密度分布の変化を考慮した Van-Driest 変換を用いることで非圧縮流体と同様にスケーリング可能であり、粘性底層内の温度分布はプラントル数の変化を考慮することで、また対数領域内の温度勾配は壁面からの密度と定圧比熱の変化を考慮することでスケーリングできることを示した。この結果から、流れ場内の平均物性分布を適切に考慮すれば、超臨界乱流境界層内の運動量輸送、熱輸送を非圧縮流体と同様に扱うことが可能であり、既存の乱流モデルを修正することで再生冷却流路内の超臨界熱伝達を定量予測できる可能性があるとしている。

第5章は結論であり、本研究で得られた知見および航空宇宙工学への貢献についてまとめている。

以上要するに、本研究は超臨界状態の液体ロケット再生冷却流路における伝熱に関わる基礎的な物理現象を整理するとともに、そこで得られた知見を元に壁面熱流束予測精度改善の可能性を示しており、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。