

# 博士論文（要約）

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

都木 貴彦

ロケットエンジン燃焼室の再生冷却はエンジン寿命だけでなく、エンジンサイクルの成立にも関わる重要な設計要素である。そのため再生冷却流路の熱設計では熱伝達率や圧力損失などの値を正確に予測する必要がある。しかし再生冷却の流れ場は熱設計を難しくする様々な特徴を有しており、高精度な予測を達成するためにはそれぞれの特徴が冷却剤流れ場に与える影響の現象理解が必要となる。本研究では再生冷却の冷却剤流れ場が超臨界圧下かつ遷臨界条件の流れ場であることに着目して、超臨界圧伝熱チャンネル流れ場内の遷臨界物性が流れ場と熱伝達に与える影響について論じている。

超臨界流体の加熱流れ場では低熱流束時に熱伝達率が改善（伝熱改善）し、高熱流束時に熱伝達率が低下（伝熱劣化）するという特異な熱伝達特性を示すことが知られている。現在、再生冷却の熱設計に用いられているヌッセルト数の相関式はこの伝熱改善や伝熱劣化といった超臨界流体の熱伝達に対する予測精度が低いため、より精度の高い予測手法の確立が求められている。そのためには超臨界熱伝達の現象理解が必要となる。

超臨界流体の特異な熱伝達特性には超臨界流体の物性変化が関わっていると考えられている。超臨界流体は特定の温度領域において沸騰に近い大きな物性変化が生じる。この物性変化は擬沸騰と呼ばれており、擬沸騰が生じる条件は遷臨界条件と呼ばれている。前述の伝熱改善、伝熱劣化といった熱伝達特性はこの遷臨界条件で発生することが過去の実験から明らかになっているため、擬沸騰による物性変化が原因であると考えられている。そのため、擬沸騰の物性変化が流れ場や熱伝達に与える影響に関する研究が盛んに行われている。

過去の研究からは擬沸騰の物性変化が流れ場や熱伝達に与える様々な影響が報告されている。しかし、流れ場内の熱伝達を予測する上で重要な流れ場の時間平均速度分布、時間平均温度分布に対して、擬沸騰の物性変化がどのように影響しているのかは分かっていない。そこで本研究では遷臨界条件の流れ場において、擬沸騰の物性変化が時間平均速度分布と時間平均温度分布に対してどのように影響しているのかを明らかにすることを研究目的とした。上記目的を達成するために遷臨界条件のチャンネル流れ場の実験と数値解析を以下の三段階に分けて実施した。

第一段階では遷臨界条件の物性変化が流れ場や熱伝達に与える影響を議論する上で着目すべき流れ場の特徴と領域を明らかにすることを目的として、遷臨界条件の加熱流れ場の特徴の一つである伝熱劣化の数値解析を行った。この解析では超臨界水素の加熱チャンネル流れを Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程式を解く RANS 解析によって解析した。この解析結果とエネルギー方程式を二回積分することで得られる温度の恒等式を用いた議論から伝熱劣化における壁面温度の上昇は壁面から  $y^+ = 300$  程度までの領域における乱流熱輸送の低下が原因であることが明らかになった。このことから遷臨界条件の物性変化が流れ場や熱伝達に与える影響を議論するには壁面から  $y^+ = 300$  程度までの領域において壁面垂直方向の物性変化が乱流熱輸送に与える影響について明らかにする必要があることが分かった。

第二段階では遷臨界条件の流れ場に数値解析で用いられる单相流れの仮定に矛盾する特徴がないか確認することを目的として、極低温窒素を用いた遷臨界条件の加熱流れ場の実験を 4MPa の圧力条件下で行った。また、前述の RANS 解析結果で得られた結論に実際の遷臨界条件の加熱流れ場と矛盾する点がないか確認を行った。流れ場の可視化はバックライト法によって行い、流体温度の計測は K 型のシース熱電対を流れ場内に直接入れることによって行った。可視化結果に対しては輝度値勾配を用いて画像を二値化処理することで流れ場内の流速分布を相互相関 Particle Image Velocimetry (PIV)によって計測した。この実験では超臨界窒素の加熱流れ場をバックライト法によって可視化した場合、单相流れを否定する特徴は観察されなかった。この結果を元に 4MPa 以上の圧力下であれば、超臨界窒素は单相流れを仮定できると判断した。また温度計測、流速計測から遷臨界条件の加熱流れ場は壁面垂直方向の密度変化が大きく、流れ方向の密度変化は壁面垂直方向と比較して小さいことが明らかになった。

第三段階では第二段階での RANS 解析の結果を受けて、壁面から  $y^+ = 300$  程度までの領域において擬沸騰による物性変化が時間平均速度分布、時間平均温度分布に与える影響を明らかにするために、平板間に温度差を付けた平行平板チャンネルの Direct Numerical Simulation (DNS)解析を超臨界窒素を作動流体として実施した。この DNS 解析結果から遷臨界条件の流れ場の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のスケーリング則に乗ることが分かった。平均温度分布については摩擦温度を用いた従来の手法ではスケーリングできないが、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、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が明らかになった。また、遷臨界条件の流れ場でも混合長仮説や乱流プラントル数一定の仮定は成り立つことが明らかになった。これらの結論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のものと大きな違いはないことが明らかになった。そのため、平均流速分布と平均温度分布には流れ場内の平均物性の変化のみが影響していることが明らかになった。また、平均物性変化を考慮することで非圧縮流体と同じスケーリング則で平均流速分布と平均温度分布は整理できることが明らかになった。

以上のように本研究では遷臨界条件の流れ場において擬沸騰時の物性変化が時間平均速度分布、時間平均温度分布にどのように影響するのかを明らかにすることを目的として遷臨界条件のチャンネル流れ場の実験と数値解析を実施した。これらの実験と数値解析から遷臨界条件の流れ場は擬沸騰が生じることで壁面垂直方向に大きな物性変化が生じるという特徴を有しているが、乱流輸送のメカニズムは非圧縮流体のものと大きな違いはないことが明らかになった。そのため、平均流速分布と平均温度分布には流れ場内の平均物性の変化のみが影響していることが明らかになった。また、平均物性変化を考慮することで非圧縮流体と同じスケーリング則で平均流速分布と平均温度分布は整理できることが明らかになった。本研究の結論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ることが示された。  
この結果から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  
測できる可能性を示すことができた。