

氏名	武藤 大貴
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博甲第420号
学位授与の日付	平成28年 9月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	超臨界圧力下における極低温同軸噴流の流れ構造
論文審査委員	主査 教授 坪井 伸幸 " 橘 武史 " 梅景 俊彦 准教授 豊田 和弘 教授 林 光一

## 学位論文内容の要旨

液体ロケットエンジンにおいて広く利用されている同軸型の噴射器では、噴射された燃料の混合構造がエンジン性能と信頼性を大きく左右する要素となっている。液体ロケットエンジンにおける噴流の大きな特徴として、推進剤が極低温であり、かつ圧力が噴射燃料の臨界点を越えた超臨界圧力に達する点が挙げられる。超臨界圧下では特有の熱力学特性が噴流挙動に影響することが知られているが、噴流構造や噴射条件の効果に関する知見は未だ十分でない。本論文では、数値流体解析を用いて、超臨界圧下の同軸噴流における噴流構造と、それに対する噴射条件と噴射器形状の効果について研究を行った。

第1章では、液体ロケットエンジン噴射器における噴流の観点から、超臨界圧下の流体の熱力学的特性や噴流の特徴についてこれまでの理解と動向をまとめて課題を抽出し、本研究の位置づけと目的を述べている。

第2章では、本研究で構築した数値解析法について説明している。基礎方程式に圧縮性 Navier-Stokes 方程式を使用し、超臨界圧かつ極低温流体の特有の熱力学的特性を考慮するために、実在気体の状態方程式である Soave-Redlich-Kwong (SRK) 状態方程式を導入した。さらに、噴流における乱流構造を解像するとともに、噴射器内部の壁面乱流境界層の効果を考慮した計算を行うため、Implicit Large-Eddy Simulation (ILES) と Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 計算を組み合わせたハイブリッド ILES/RANS 法を構築した。

第3章では、構築した数値解析法により超臨界圧・極低温自由噴流の数値解析を行った結果を述べている。計算結果は実験値とよく一致し、これより構築した解析法が超臨界圧噴流における乱流混合と熱力学的効果を十分な精度で予測することが可能である。

ことを示している。

第4章では、超臨界圧下における平行平板噴流の2次元数値解析を行っている。噴射器形状として内側噴射口のリセス長さ・ポスト高さに、噴射条件として運動量流束比に着目し、この3つのパラメタの影響を包括的に調べている。リセス形状の付与は、内側噴流長さの減少と混合促進の効果があることを示した。このリセス付き噴射器における混合促進は、(i)リセス領域の上下壁面による外側噴流の内側噴流への貫入の促進、(ii)リセス領域における境界層と渦構造の干渉、の2点によるものであることを明らかにしている。さらにリセス付き噴射器では、内側噴流に大規模な正弦構造が形成されることを示した。この大規模構造の形成は、リセスの付与による外側噴流の深い貫入と、壁面の流れの閉じ込め効果に起因する正弦不安定性の誘起によるものであると考察している。また、リセス長さと運動量流束比の混合への効果を定量的に評価し、リセス効果の運動量流束比への依存性を定量的に示した。次に、ポスト高さを変化させた計算により、ポスト高さが増加するほど内側噴流の長さが大きく減少することを示している。さらに、ポスト高さとリセス長さの2つのパラメタの間に依存性は小さいことを示し、噴射器形状を設定する上ではそれぞれを独立して決定できるものと結論づけている。

第5章では、超臨界圧下における極低温同軸噴流の3次元数値解析を行った結果を述べている。流れ場の可視化から、内側/外側混合層における渦構造や、高密度の内側噴流の表面で形成される薄膜状の大規模構造について調べるとともに、内側混合層における大規模構造や内側/外側噴流の干渉による混合構造を示した。また、噴流の可視化や固有直交分解を用いた支配的な構造の抽出により、噴流における軸対称渦輪やヘリカル渦構造の形成について議論している。そして、運動量流束比と内側噴流長さの関係について、過去の研究との包括的な比較を行うことで、内側噴流と外側噴流が同種流体の同軸噴流であっても、実際の異種流体の同軸噴流における混合の予測が可能であることを示唆した。さらに、運動量流束比が小さいと内側噴流長さの変動が大きくなることを示し、この結果を基に、液体ロケットエンジンにおける燃焼不安定が内側酸化剤噴流の流動変動に起因する可能性を議論している。続いてリセス付き同軸噴射器の計算を行い、(i)リセスの付与により若干の混合促進の効果が得られること、(ii)外側混合層に大規模な渦構造が形成されること、の2点を示した。この渦構造の形成や混合促進は、リセス領域における境界層と内側混合層の干渉に起因することを明らかにした。

第6章では、本研究で得られた成果を、超臨界圧の同軸噴流における流れ構造、噴射条件と噴射器形状の効果の観点で総括している。

以上のように、本論文では超臨界圧力下における同軸噴流について、数値解析により噴流構造の詳細と混合の機構を解明した。さらに噴射条件と噴射口形状が噴流に及ぼす効果について、流れの物理から理解することで普遍的な知見を得た。

## 学位論文審査の結果の要旨

液体ロケットエンジンにおいて広く利用されている同軸型噴射器では、噴射された燃料の混合はエンジン性能を大きく左右する。液体ロケットエンジンにおける噴流の大きな特徴は、混合が極低温かつ超臨界圧力下で行われる点である。超臨界圧下では特有の熱力学特性が噴流挙動に影響することが知られているが、噴流構造や噴射条件の効果に関する知見は未だ十分でない。本論文では、数値流体解析により超臨界圧下の同軸噴流における流れの構造と、噴射条件および噴射器形状の効果について評価した。

本研究の数値解析法では、基礎方程式に圧縮性 Navier-Stokes 方程式を使用し、超臨界圧かつ極低温流体に特有の熱力学的特性を考慮するために、実在気体の状態方程式である Soave-Redlich-Kwong (SRK) 状態方程式を導入している。さらに、噴流における乱流構造を解像しつつ噴射器の乱流境界層の効果を検討した計算を行うため、Implicit Large-Eddy Simulation (ILES) と Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 計算を組み合わせたハイブリッド ILES/RANS 法を構築した。構築した数値解析法の検証のため、超臨界圧における極低温自由噴流の数値解析を行っており、本解析法が超臨界圧の自由噴流における流れ場や熱力学的効果を十分な精度で予測することが可能であることを示している。

まず、超臨界圧下における平行平板噴流の2次元数値解析を行い、噴射器形状として内側噴射口のリセス長さ・ポスト高さ、噴射条件として運動量流束比の3つのパラメータに着目し、これらの影響を幅広い条件で調べている。これより、リセス形状を付与することは混合を促進する効果があることを示し、(i)リセス領域の上下壁面による外側噴流の内側噴流への貫入の促進、(ii)リセス領域における境界層と渦構造の干渉によるものであることを明らかにしている。また、リセスの付与の効果は、運動量流束比へ依存することをはじめて定量的に示した。続いてポスト高さを変化させた計算結果から、ポスト高さの増加に伴い混合が大きく促進されることを示した。さらに、ポスト高さとしリセス長さの2つのパラメータの間に依存性は小さく、噴射器形状を設定する上ではそれぞれのパラメータを独立して決定できるとして提案している。

次に、超臨界圧下における極低温同軸噴流の3次元数値解析を行い、流れ場の詳細な調査により、噴流の渦構造や、混合層どうしの干渉による流動構造の詳細を明らかにした。また、運動量流束比と内側噴流長さの関係について過去の研究との包括的な比較を行い、内側噴流と外側噴流が同種流体の同軸噴流であっても、実際の異種流体の同軸噴流における混合の予測が可能であることを示唆した。さらに、運動量流束比が小さいと内側噴流長さの変動が大きくなることを示し、この結果から、液体ロケットエンジンにおける燃焼不安定が酸化剤噴流の流動変動に起因する可能性を示した。続いてリセス付き同軸噴射器の計算を行い、(i)リセスの付与により若干の混合促進の効果が得られること、(ii)外側混合層に大規模な渦構造が形成されること、の2点を示した。この渦構造

の形成について、リセス領域における壁面境界層と内側混合層の干渉に起因する一連の機構を明らかにした。

以上のように、本論文では超臨界圧力下における極低温同軸噴流について、数値解析により噴流構造の詳細と混合の機構を解明した。さらに噴射条件と噴射口形状が噴流に及ぼす効果について、流れの物理から説明することにより新たに普遍的かつ重要な知見を得ることができ、本論文の成果は機械工学、特に流体力学分野の発展に大きく寄与することが示された。

本論文に関して審査委員及び公聴会出席者から、研究の位置づけ、計算結果の妥当性、計算結果と実験データとの差異、2次元計算と3次元計算の比較の意義など、多くの質問があったが、いずれも著者の的確な説明により質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。