

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360380

研究課題名(和文)極低温超臨界流体における燃焼ダイナミクスの研究

研究課題名(英文)Research of Combustion Dynamics on Cryogenic Flow under Supercritical Pressure

研究代表者

坪井 伸幸 (Tsuboi, Nobuyuki)

九州工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40342620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：高圧条件下での超臨界燃焼流体に対する熱力学的特性・流体力学的特性を明らかにするために、(1)RANS解析(2)LES解析(3)実験を実施した。RANS解析では、単軸の極低温超臨界窒素噴流の密度分布について実験結果と比較し、妥当な結果が得られることを確認した。さらに、多化学種の質量保存式を含む流体対応の前処理法を開発し、非定常な低速酸素/水素剪断流における剪断層の不安定現象を捉えることに成功した。LES解析については、遷臨界混合層において擬臨界温度が乱流渦構造に与える影響は小さかった。実験については、極低温遷臨界窒素噴流における中心軸上の温度勾配は、擬臨界温度付近で緩やかになる傾向が見られた。

研究成果の概要(英文)：The numerical and experimental studies on the cryogenic flow under the supercritical pressure are performed in order to understand the thermodynamic characteristics and fluid dynamics. The averaged density distributions of the mono-axial nitrogen jet flow under the supercritical pressure using RANS simulations agree well with the experimental data. The preconditioning method including multi-species mass-conservation equations was developed to capture the unsteady feature near the shear layer in the low-speed H₂/O₂ shear flow. As for LES simulations, the cryogenic nitrogen/nitrogen mixing layers in ideal-gas and transcritical conditions were also simulated. The results show that the effects of the pseudo-critical temperature are small on the turbulent eddy structure. In the experiment for the cryogenic nitrogen jet under the transcritical pressure, the temperature gradient along the symmetric line becomes small near the pseudo-critical temperature.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：ロケット 宇宙工学 流体工学 熱工学 超臨界流体

1. 研究開始当初の背景

近年のガスタービンエンジンやロケットエンジンは、高い効率や推力を得るために燃焼室内を噴射燃料・酸化剤の熱力学的臨界点を越えた超臨界状態で作動するものが増加している。熱力学的臨界点（特に酸素の臨界圧 5.04MPa）を超えると、通常の液体や気体と異なり、液體的な高密度と気體的な高拡散性を有し、また臨界点近傍では比熱・熱伝導率が急激に変化するなどの特性を示す。このような条件では、常圧下での設計手法はほとんど役立たず、全く新しい設計手法に頼らざるを得ない。たとえば液酸液水ロケットエンジンについては、このような超臨界条件下での燃焼器中の保炎のメカニズムが明確にされておらず、ロケットエンジンの同軸型噴射器が焼損する例が数多く報告されている。同様の現象は JAXA の LE-7A でも開発段階ではよく見られた。また、近年のガスタービンエンジンの開発でも、高圧のために化学反応の特性が変化し、保炎が難しくなるという大きな問題もみられる。

このような超臨界条件下の水素の燃焼現象は、液体酸素と気体水素の拡散火炎を基本としている。この拡散火炎は LOX post の厚みや post の形状に大きく依存し、LOX post 付近で edge flame となる。そして、この拡散火炎は拡散律速、すなわち拡散により支配されているが、超臨界状態では常圧条件下とは以下の点で大きく異なる。

(1) 熱物性 (粘性, 熱伝導, 拡散, 状態方程式)

濃度勾配による質量拡散が減少し、温度勾配による熱拡散が支配的になる (Lewis 数が 1 より大きくなる)。このような条件では、高圧条件下の予混合火炎は脈動的不安定となることが示されている。

(2) 高圧燃焼反応 (高圧特有の化学反応)

反応不活性種の HO₂ から H₂O₂ および OH ラジカルが生じ、反応しやすくなる。一方で、層流火炎速度は圧力に反比例して 1/5 以下まで低下する。

(3) 流動特性 (低速・高圧縮流れ, 乱流)

Re 数の増大により乱流強度が増し、火炎の安定性を大きく変化させる。また、拡散火炎における火炎伸長度と Lewis 数との相関が火炎の構造・安定性に寄与するが、圧力により火炎伸長度が非線形的に大きく変化する。さらに、高圧縮流れも常圧に比べて火炎に大きな影響を及ぼす。

このように、超臨界状態の拡散火炎は常圧条件下に比べて上記の 3 つの点で特異なため、火炎の構造や保炎機構に与える影響がほとんど解明されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、超臨界燃焼流体における熱力学的特性・流体力学的特性・燃焼過程、中でも特に熱力学的・流体力学的特性を明らかにするために、以下の内容について研究を行った。

(1) RANS 解析

超臨界流体における拡散混合過程とリセスの影響を明らかにする。さらに、多化学種を含む反応流体解析に対応した前処理法を開発し、その効果を確認する。

(2) LES 解析

噴流における乱流による拡散過程や超臨界物性の影響を LES 解析により明らかにする。また、遷臨界近傍での流体力学的不安定現象を解明する。

(3) 実験

遷臨界・超臨界条件下での極低温窒素噴流の温度計測を行い、詳細なデータを取得する。

3. 研究の方法

(1) RANS 解析

SRK 状態方程式を組み込んだ 3 次元数値解析コードを用いて、①単軸 (120K) の極低温窒素噴流の解析を行い、実験結果と比較検討の実施、②極低温窒素同軸噴流 (120K, 300K) の解析を行い、リセス効果の把握を行った。また、低速流を解析可能とするために多化学種流体対応の前処理法の導入を行い、3 次元酸素剪断流の解析を実施した。さらに、高圧燃焼対応の UT-JAXA モデルの導入および実行した。

(2) LES 解析

擬臨界温度付近の物性を精度良く再現できる SRK 状態方程式を組み込んだ 3 次元数値解析コードを利用し、窒素 (臨界圧 3.4MPa) を用いて 4.5MPa の条件で以下の 3 通りの解析を実施した。①1 次元密度不連続および 3 次元平行混合層を対象として、エネルギー保存型基礎方程式と圧力発展型圧力方程式を比較してスキームの精度および安定性を検討、②3 次元平行混合層を対象として SRK 状態方程式と理想気体状態方程式を比較し、超臨界物性の影響を検討、③極低温窒素-ガス窒素の平行ジェットを対象として、液体ロケット噴射器で見られる同軸噴流の混合メカニズムを検討を行った。

(3) 実験

高圧試験装置を用いて雰囲気圧 4MPa の窒素ガス中に噴流温度 103K の極低温窒素を噴射し、中心軸上および半径方向温度分布の定量データを取得した。また、高速度カメラを用いたバックライト撮影により、混合メカニズムに関する定性的な検討を行った。

4. 研究成果

(1) RANS 解析

①単軸の極低温窒素噴流の解析

これまで改良してきた前処理法を用いる 3 次元 RANS 流体解析コードを使用して解析を実施した。Mayer らの実験結果との比較を図 1 に示す。計算結果は時間平均密度である。計算結果は概ね実験結果と一致することが分かる。このことから、本解析コードによる極低温噴流の解析が妥当であることが確認できた。

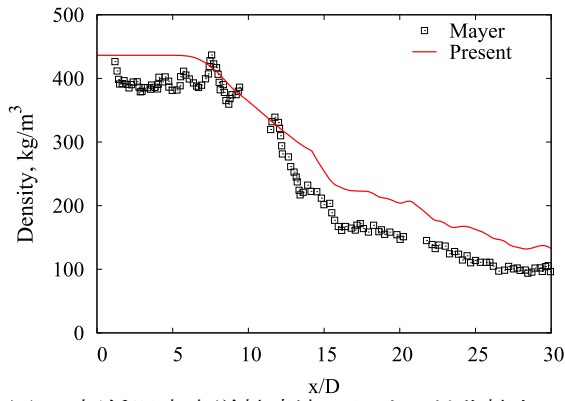
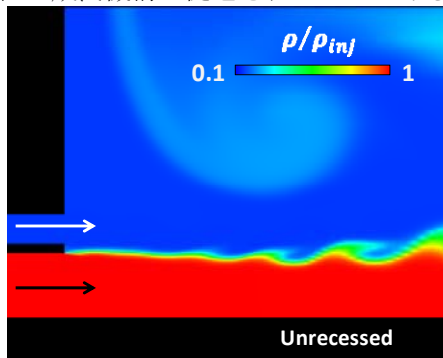


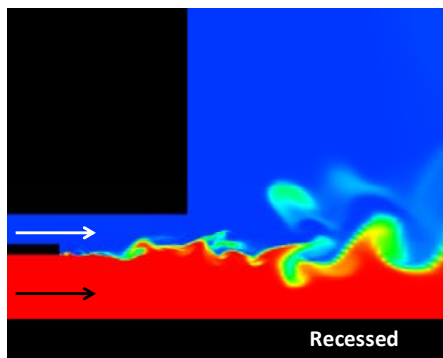
図 1 極低温窒素単軸噴流における対称軸上の平均密度分布の比較

②極低温窒素同軸噴流の解析

リセス効果を検討するために、噴射温度が 120K と 300K の 3 次元極低温窒素同軸噴流の解析を行った。図 2 に示す密度分布より、両者とも剪断層の流体力学的不安定性が確認できる。リセスありのケースに着目すると、下流ほど、界面での不安定性が成長した大きな渦構造が見られる。これは、リセス部の壁による流れの「閉じ込め」の効果により不安定性の成長機構が促進されたためである。



(a) リセスなし



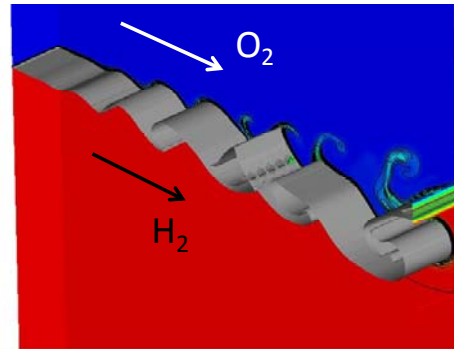
(b) リセスあり

図 2 極低温窒素同軸噴流におけるリセス効果 (密度分布)

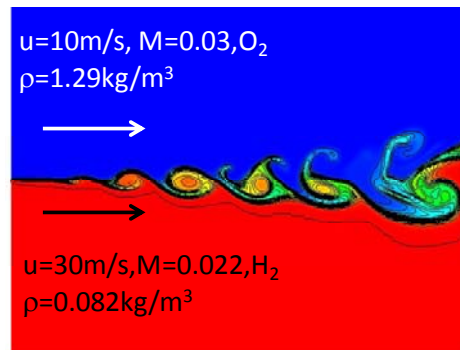
③多化学種流体対応前処理法の開発

最終的に極低温から 3000K までの幅広い温度範囲での圧縮性・低速・燃焼解析を効率的に実施するためには、固有値を操作する前処理法が必須である。本研究では、化学種の質量保存式を含む多化学種流体対応の前処理行列 Γ として、4 種類の行列を選定・評価し

た。状態方程式は完全気体としている。前処理行列を作る際、元になる基本変数を (p,u,T) または (p,u,h) の 2 種類を、また前処理行列の非対角成分に化学種の微分を考慮したものと考慮しなかったもの (添え字に 0) の 2 種類、計 4 種類 $(\Gamma_T, \Gamma_{T0}, \Gamma_h, \Gamma_{h0})$ を使用した。この 4 種類の前処理行列について時間精度の保持に関して比較した結果、 Γ_h が最も時間精度を保つための内部ループ数が 10 回程度と少なくでき、効率的な前処理行列であることが分かった。次に、図 3 に噴射温度 300K、噴射圧力 0.1MPa の層流の低速酸素水素剪断流の解析結果を示す。使用した前処理行列は Γ_{h0} である。Re 数は水素噴射速度基準で $2.7 \times 10^4 / m$ である。この結果より、剪断層の不安定が顕著に表れ、水素と酸素の混合拡散が促進される大規模な渦構造が発生することが示された。また、燃焼解析も試行し、選定した前処理行列を使用した低速流の酸素水素燃焼解析も可能であることを確認した。



(a) 上方からの図 (灰色は水素の質量分率が 0.5 の空間等値面)



(b) 側面図

図 3 前処理法を使用した低速酸素水素剪断流の解析結果 (水素質量分率)

(2) LES 解析

①数値解析スキームの精度および安定性に関する検討

超臨界極低温推進剤の乱流混合層において、エネルギー保存型と圧力発展型基礎方程式の双方の数値シミュレーション結果を比較することで、圧力発展方程式を用いることによる誤差の影響を評価した。乱流が十分発達した時刻におけるエネルギー誤差は、系にエネルギーを付加する方向に発生し、擬臨界

温度近傍で大きくなること判った。このエネルギー誤差の絶対値は、乱流によるエネルギー輸送の15-20%程度に達するが、エネルギー保存方程式と圧力発展方程式の間では速度・密度剪断層の発達に有意な違いは見られなかった。続いて、1次元問題を対象に保存型基礎方程式において数値流束スキームと補間スキームを比較検討した結果、AUSM系の数値流束スキームに、基礎量 (ρ, u, p) または (ρ, u, p) に基づく特性量による内挿の組み合わせが、他のスキームに較べて比較的安定になることを明らかにした。

② 平行乱流混合層における超臨界物性の影響

超臨界圧流体の熱力学的物性を考慮した条件の計算と、理想気体と仮定した条件の計算を密度と速度の初期分布を揃えて行い、両者の結果を比較した。その結果、遷臨界混合層においても支配的な乱流渦の形成位置は理想気体の混合層と同様に混合層上部に存在し、支配的な乱流渦の構造が変わらないため(図4)、運動量の乱流輸送の性質も理想気体の混合層とほとんど変わらないことが分かった(図5(a))。また、流れ方向速度の分布への熱力学的物性の影響はほとんど見られない事が示された。

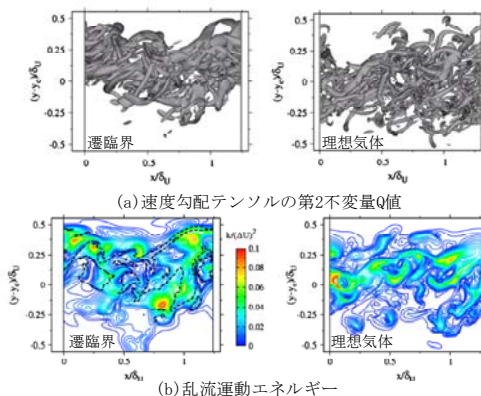


図4 平板混合層の混合メカニズムにおける比較

同様に、熱の乱流輸送の性質についても理想気体の混合層と変わらないため(図5(b))、比エンタルピーの分布への熱力学的物性の影響もほとんど見られず、乱流渦の構造にほとんど影響しないことを明らかにした。

さらに、数値解析結果と実験で観察された乱流混合層の特徴と比較し、実験結果が熱力学的物性の影響である高密度流体の挙動を示唆するものであることを確認した。

③ 超臨界平行混合ジェットの特徴と比較

超臨界平行混合ジェット解析により、支配的な流れ構造を調査した。その結果、(i) 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、(ii) それより下流からは内側/外側混合層の干渉で形成されるコヒーレント渦列の二つの支配的な流れ構造が存在す

ることがわかった。

次に、平面噴流の流れ場と実験の同軸噴流に関するデータを比較した結果、実験で見られた非定性は上記の二つの流れ構造の存在を示す特徴に起因することを確認した。特に、実験で見られた高密度流体の塊が千切れる現象は、後流のコヒーレント渦列が存在する可能性を示した。また、時間平均温度分布に関しても、擬臨界温度付近で温度が滞留する特徴も現れることを確認した。従って、本解析における平面噴流の支配的な流れ構造に関する考察が、同軸噴流にも適用できることを確認できた。

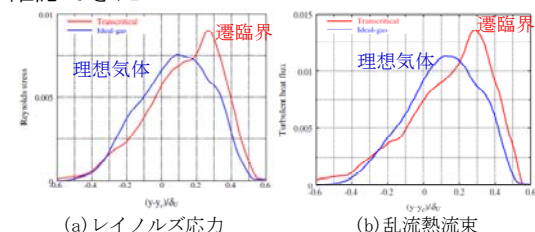


図5 平板乱流混合層における比較

(3) 実験

窒素の超臨界・遷臨界噴流の実験を実施し、噴流の中心軸方向、半径方向の温度、密度分布に関して以下の知見を得た。

まず、超臨界圧下の乱流混合層の特徴を調べた結果、気液二相混合層と同様に高密度流体の一部が巻上がり、液滴に分裂することなく、一様に拡散する特徴を持つことが示された。この周囲流と混合する過程は、気液二相混合層の場合と共通することも示された。

同軸噴流については、噴射器出口直後から極低温噴流の境界(内側剪断層)が波打つ不安定波が存在し、さらに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現象が観察できた。

さらに、雰囲気圧力 4MPa の実験では、中心軸上の温度分布の計測結果(図6(a))から、温度分布の勾配は噴流温度が擬臨界温度に達する $X/D=15$ 付近で緩やかになる一方、密度分布の勾配は噴流温度が擬臨界温度に達する付近で急になることが示された。

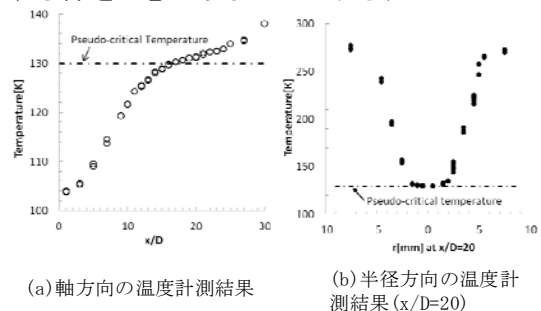


図6 極低温窒素噴流の温度計測結果

半径方向の温度分布については、中心温度が擬臨界温度に達する付近 $X/D=10$ 付近までは噴流内に放物型の温度分布が形成されるが、中心温度が擬臨界近傍の $X/D=10-20$ 付近(図6(b))では、半径方向に対してほとんど変化

しない平坦な分布になった。そして中心温度が擬臨界値近傍を超える $X/D > 20$ では、ガウス分布状の温度分布が形成された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① Hiroumi Tani, Susumu Teramoto, Nobuhiro Yamanishi, Koji Okamoto, A numerical study on a temporal mixing layer under transcritical conditions, Computers & Fluids, Vol. 85, pp. 93-104, 2013. 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compflu.2012.10.022>

[学会発表] (計 7 5 件)

- ① T. Toki, S. Yoshida, H. Tani, S. Teramoto, K. Yamaguchi, K. Okamoto, Temperature Distribution of a Cryogenic Nitrogen Jet Under Supercritical Pressure, 7th Tri-University Workshop on Aerospace Engineering 2014, Jeju Island, Korea, 2014. 3. 3.
- ② D. Muto, N. Tsuboi, H. Terashima, Numerical Study of Cryogenic Coaxial Jet under Supercritical Condition, SCITECH2014, AIAA paper 2014-0136, Maryland, USA, 2014. 1. 13.
- ③ Nobuyuki Tsuboi, Numerical Simulation on Unsteady Compressible Low-Speed Flow Using Preconditioning Method: Preconditioning Method Including Multi-Species Mass Conservation Equations, OS1-6, Tenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, 2013. 11. 26.
- ④ 都木貴彦, 吉田慎之介, 谷洋海, 寺本進, 山口和夫, 岡本光司, 超臨界霧囲気下における極低温窒素噴流の温度分布, 第 45 回流体力学講演会, 東京, 2013. 7. 5.
- ⑤ Hiroumi Tani, Susumu Teramoto, Takahiko Toki, Shin-nosuke Yoshida, Kazuo Yamaguchi, Koji Okamoto, Temperature measurement of cryogenic nitrogen jets at supercritical pressure, 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences, Munich, Germany, 2013. 3. 7.
- ⑥ 寺本進, 谷洋海, 極低温遷臨界流れの保存形高精度シミュレーション, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, C01-2, 東京, 2012. 12. 18.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪井 伸幸 (TSUBOI Nobuyuki)
九州工業大学・工学研究院・教授
研究者番号: 40342620

(2) 研究分担者

寺本 進 (TERAMOTO Susum)
東京大学・工学系研究科・准教授
研究者番号: 30300700

(3) 連携研究者

越 光男 (KOSHI Mitsuo)
横浜国立大学・環境情報研究院・客員教授
研究者番号: 20133085

林 光一 (HAYASHI A. Koichi)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 60156437

徳増 崇 (TOKUMASU Takashi)
東北大学・流体科学研究所・准教授
研究者番号: 10312662

津田 伸一 (TSUDA Shinichi)
信州大学・工学部・講師
研究者番号: 00466244

清水 和弥 (SHIMIZU Kazuya)
東京大学・工学系研究科・研究員
研究者番号: 80373447

寺島 (石原) 洋史 (TERASHIMA (ISHIHARA) Hiroshi)
東京大学・工学系研究科・特任准教授
研究者番号: 20415235

清水 太郎 (SHIMIZU Taro)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・
情報・計算工学センター・研究員
研究者番号: 00446600

谷 洋海 (TANI Hiroumi)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・
情報・計算工学センター・研究員
研究者番号: 80633784

朝原 誠 (ASAHARA Makoto)
青山学院大学・理工学部・助教
研究者番号: 40633045

森井 雄飛 (MORII Youhi)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・
情報・計算工学センター・研究員
研究者番号: 50707198