

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02349

研究課題名（和文）極低温高圧条件下における多成分流体の混合拡散燃焼機構の解明

研究課題名（英文）Investigation of Mixing, Diffusion, and Combustion Mechanism on Multi-species Fluid under Cryogenic High-Pressure Conditions

研究代表者

坪井 伸幸 (Tsuboi, Nobuyuki)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：40342620

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000 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、多成分流体解析及び実験を実施した。多成分流体解析については、エネルギー方程式と圧力発展方程式の両方を解くハイブリッド法を開発した。そして酸水素移流問題及び水素雰囲気中に噴出する酸素噴流に対して、数値的な不安定性を改善して解析することが可能となった。粗い計算格子では、エネルギー方程式では断熱混合、圧力発展方程式では等積混合の解に近いことが示された。実験については、極低温窒素噴流に対してバックライト法、PIV及びBOSを用い、断面内速度分布や噴流中心軸に対する非定常変動モードの定量的な計測が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロケットエンジンやガスタービンエンジンの高圧な流動現象を明らかにするために数値解析及び実験を行った。数値解析では計算が安定にできるように改良し、実現現象をより明確に把握することが可能になり、将来的にはより効率的なエンジンの設計に適用できることが期待される。また、数値解析単独では検証が不十分であることから、検証にも必要な定量的な実験データを取得することができた。そして新たな物理現象の存在を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The numerical and experimental studies on the cryogenic flow under the transcritical and supercritical pressures are performed to understand the thermodynamic characteristics and fluid dynamics. As for the multi-species flow simulations, the numerical method using a hybrid method between the energy equation and pressure equation is developed. The numerical simulations can perform with numerical robustness for the hydrogen/oxygen advection problem and oxygen jet injected into hydrogen. Adiabatic mixing solution with energy-based solver and isochoric mixing solution with pressure-based solver are obtained for the coarse grid. In the experiments, using PIV, BOS, and the backlight method for cryogenic nitrogen jets, quantitative measurements become possible such as velocity distribution on the cross-section and unsteady variation mode for the jet central axis.

研究分野：熱流体工学

キーワード：ロケット 航空宇宙工学 流体工学 熱工学 水素 超臨界流体

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 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や臨界点付近（遷臨界状態）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、液体的な高密度と気体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。液酸液水ロケットエンジンについては、このような遷臨界・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。また、近年のガスタービンエンジンの開発でも、高压の化学反応の特性が変わることで保炎が難しくなるという大きな問題がみられる。

このような遷臨界・超臨界条件下で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する。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、遷臨界・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り、火炎が不安定化。
- ・遷臨界では臨界温度付近での温度変化に停滞が発生

#### (2) 流動特性（低速・高压縮流れ、乱流）

- ・Re 数の増大により乱流強度が増し、火炎の安定性が変化
- ・拡散火炎の火炎伸長度が圧力比に対して非線形的に変化。
- ・熱物性が常温常圧と大きく異なるため、拡散火炎の増強のために採用されるリセスを有する噴射器の効果的な形状設計が困難。

#### (3) 高压燃焼反応（高压特有の化学反応）：

- ・反応不活性種の  $\text{HO}_2$  から  $\text{H}_2\text{O}_2$  および  $\text{OH}$  ラジカルが生じ、反応しやすくなる。一方、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。

このように、遷臨界・超臨界状態の拡散火炎は常圧条件下に比べて上記の 3 つの点で異なるため、流動構造、火炎の構造、および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、遷臨界・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) 多成分流体数値解析

超臨界・遷臨界流体における高密度比の接触面を有する拡散混合過程を Energy-base(完全保存系)と Pressure-base(圧力発展方程式を用いた準保存系)及びこれらのハイブリッド解析により明らかにする。そして、燃焼解析を見据えた手法を考案する。

#### (2) 実験

超臨界および遷臨界条件下における単軸および同軸噴流について、非定常の定量データを取得し、噴流内で発達する変動の特性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 多成分流体解析

擬臨界温度付近の物性を精度良く再現できる 2 成分流体対応の SRK 状態方程式を組み込んだ 1 次元及び 2 次元数値解析コードを使用した。計算条件は、1 次元の場合は移流速度が 200 m/s、圧力が 10 MPa と一様にし、酸素の温度は 100 K、水素の温度は 150 K の極低温条件とし、遷臨界温度条件となるように設定した。2 次元の場合は雰囲気圧力が 10 MPa で、酸素、水素の温度は 1 次元と同じとし、酸素が 30 m/s で水素中に噴射される条件の単軸噴射流れの解析を行った。計算手法については、数値流束は超臨界流体対応の SLAU2 に MUSCL で 2 次精度に van Albada limiter を用い、時間積分は 3 段階の TVD-Runge Kutta 法を使用した。

#### (2) 実験

実験に用いた装置の概要図を図 1 に示す。超臨界槽、極低温酸素供給配管、高压可視化容器、同軸噴射器で構成される実験装置を使用し、主に可視化により噴流を可視化した。光源として、

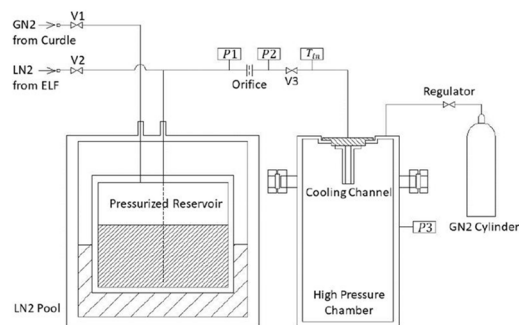


図 1. 実験装置概要図

ハロゲンランプ、レーザーシート、LED ライト、カメラとして複数の低速 CCD カメラ、高速カメラを用い、(Particle Image Velocimetry)PIV 法による流速測定、(Background-Oriented Schlieren)BOS 法による密度勾配測定、バックライトによる可視化をおこなった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 多成分流体解析

##### (a) 1 次元解析における MUSCL 補間変数の影響

完全保存系に対して、MUSCL 法の補間変数に  $(\rho, u, p, Y_i)$ ,  $(T, u, p, Y_i)$ ,  $(h, u, p, Y_i)$  の 3 通りの基本変数を適用し、 $O_2/H_2$  接触面を有する極低温超臨界圧の移流問題を実施した。図 2 に初期分布が step discontinuity の時刻  $t = 3.0$  [μs] の時の密度、温度、圧力および  $H_2$  の質量分率を示す。密度および  $H_2$  の質量分率は、3 つの補間変数で結果に違いは見られない。しかし、圧力については、 $O_2/H_2$  接触面から圧力振動が発生している。計算初期の大きな圧力振動を先頭に、接触面から発生した圧力振動が流体中を伝播している様子が確認される。また、この圧力振動に伴って、密度および温度にも波打った分布が現れる。一方で、圧力振動の大きさについては、補間変数によって大きな差異はない。また、温度分布には、 $H_2/O_2$  接触面近傍で補間変数による差が見られる。特に、 $(\rho, u, p, Y_i)$  の場合に 100 K を下回る温度や、右側の接触面上流で 150 K を超える温度が確認される。

温度分布について詳しく調べるために、 $H_2$  の質量分率と温度の関係を図 3 に示す。図 3 の(a)に Step discontinuity, (b)に  $C_\epsilon = 0.1$

( $C_\epsilon$  は接触面の厚さに関する定数)の結果を示す。(b)は初期の接触面が滑らかに設定されている。図 3 中の一点鎖線は、断熱混合(Adiabatic mixing)を仮定した温度分布を示す。保存系の Euler 方程式では、Ma らの研究では数値拡散によって温度分布が断熱混合となることを示している。図 3(a)より、補間変数  $(T, u, p, Y_i)$  と  $(h, u, p, Y_i)$  の場合、低温/高酸素濃度側で温度が 100 K よりやや低下し、その後、水素濃度の上昇とともに温度も上がるような断熱混合の温度分布と同様の特徴を示す。補間変数  $(\rho, u, p, Y_i)$  では、他の補間変

数  $(\rho, u, p, Y_i)$  では、他の補間変

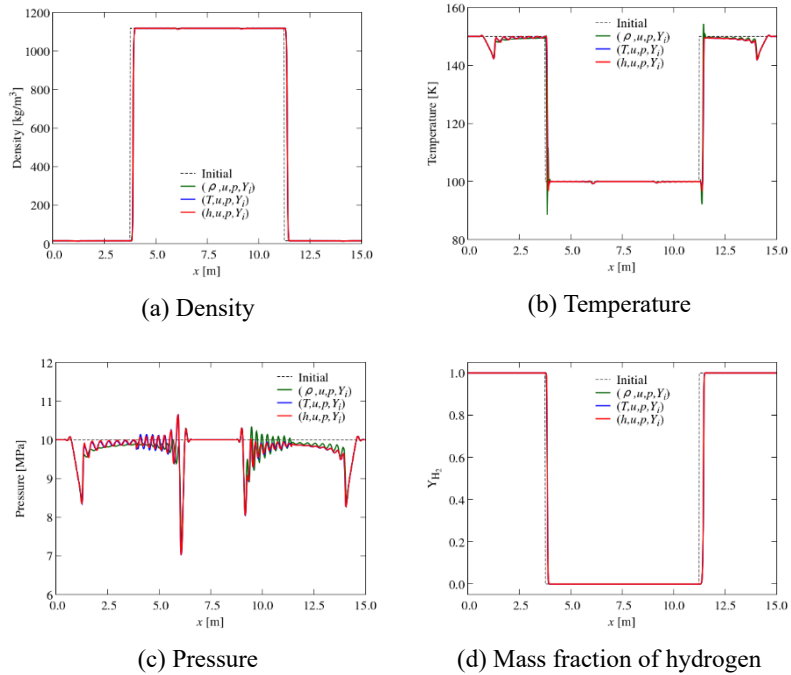


図 2.  $H_2/O_2$  接触面を有する遷臨界状態の移流問題における計算結果

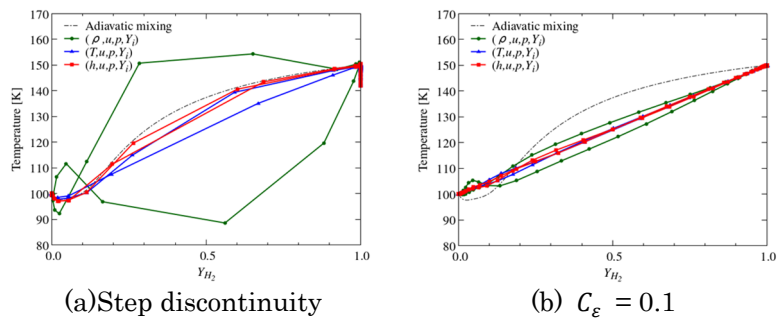


図 3.  $H_2/O_2$  接触面を有する遷臨界状態の移流問題における温度と水素の質量分率の関係及び補間変数の影響

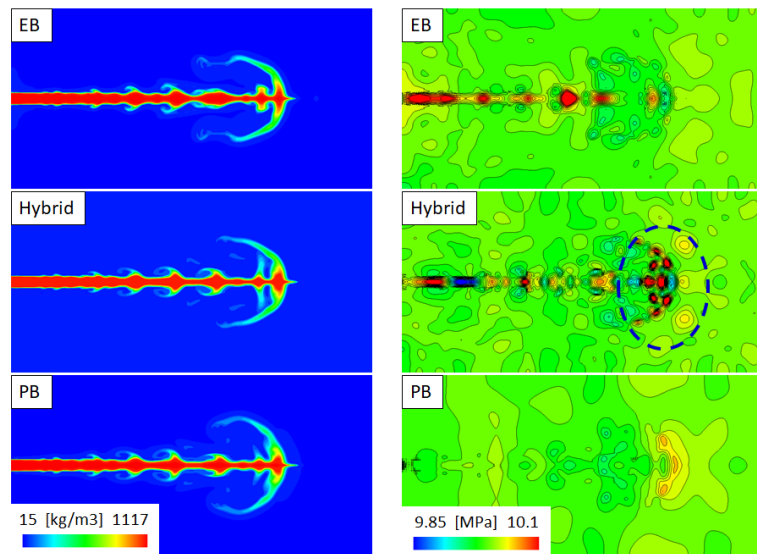


図 4. 瞬間の密度分布 (左) 及び圧力分布 (右) の比較

は初期の接触面が滑らかに設定されている。図 3 中の一点鎖線は、断熱混合(Adiabatic mixing)を仮定した温度分布を示す。保存系の Euler 方程式では、Ma らの研究では数値拡散によって温度分布が断熱混合となることを示している。図 3(a)より、補間変数  $(T, u, p, Y_i)$  と  $(h, u, p, Y_i)$  の場合、低温/高酸素濃度側で温度が 100 K よりやや低下し、その後、水素濃度の上昇とともに温度も上がるような断熱混合の温度分布と同様の特徴を示す。補間変数  $(\rho, u, p, Y_i)$  では、他の補間変

数や断熱混合で得られる温度分布と大きく異なる．図 3(b)では，初期分布である程度接触面が解像されているため，数値拡散が小さくなり，初期分布（Y と T の線形分布）から大きく変化しない．したがって，異なる補間変数による影響が小さくなる．なお，初期分布における接触面の解像度が小さい場合（ $C_\varepsilon = 0.05$ ），図 3(a)と(b)の中間の結果になる．

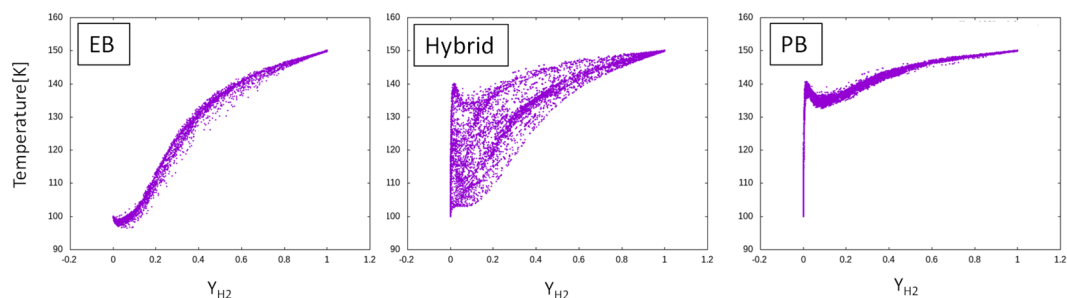


図 5. 水素の質量分率と温度分布の比較

### (b) 2次元解析における単軸噴流の計算結果

2次元単軸噴流の解析結果の一例を図 4 及び図 5 に示す．図中，EB, Hybrid, PB はそれぞれ Energy-base, EB-PB hybrid, Pressure-base の結果である．図 4 より，噴流(酸素)が左から噴射されるが，密度分布からは噴流先端にスパイクが少し出ているものの，3つの手法の違いはあまり見られない．一方，図 4 の圧力分布からは，一定圧力の雰囲気へ噴流が流入している状態の圧力が大きく違っていることがわかる．PB ではほぼ一定圧力であるものの，Hybrid では特に噴流の先端付近で圧力が高くなっている（図中，青の破線）．図 5 に水素の質量分率と温度分布の比較を示す．EB では断熱混合による解（図 3 に示されている）に近く，PB は等積混合の解に近く，そして Hybrid はその両者の中間の解となっている．なお，格子解像度が十分にあれば両者は一致する．今回使用した Hybrid は PB と EB の中間の結果であることから，本研究で行っている計算手法は概ね妥当であると考えられるものの，まだ改善する必要があると考えられる．

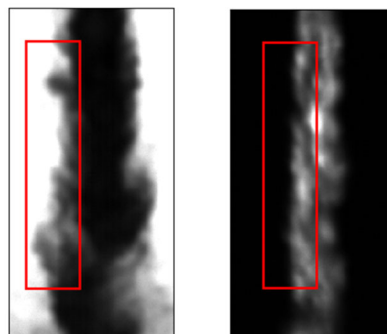


図 6. 超臨界同軸噴流の剪断層可視化結果（左：バックライト法，右：レーザーシート）

### (2) 実験

レーザーシートと従来のバックライト法による同軸噴流の可視化結果の比較を図 6 に示す．バックライト法ではジェット外側剪断層のみが可視化されているが，レーザーシートでは内側剪断層も可視化されている．さら

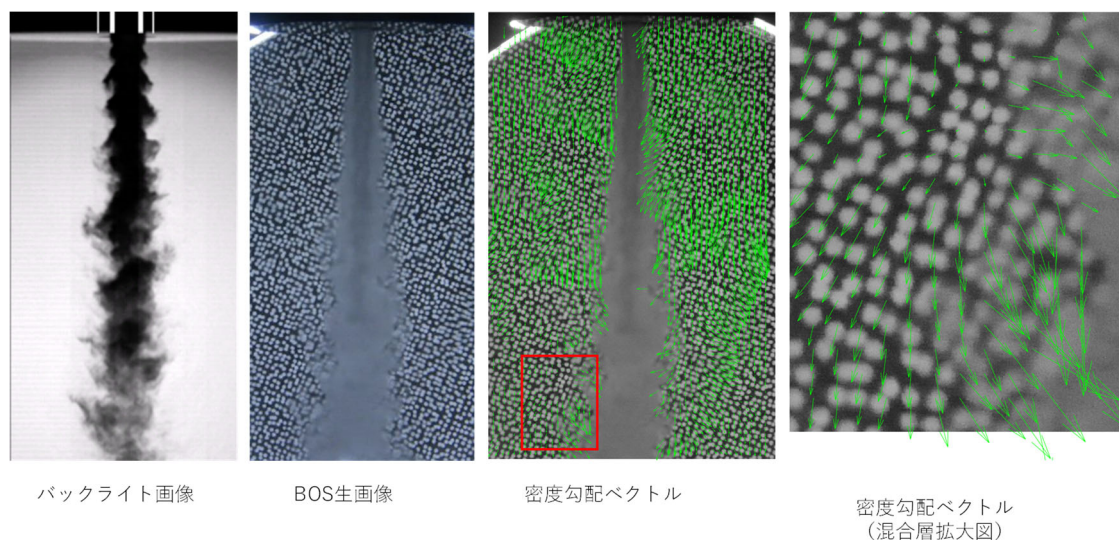
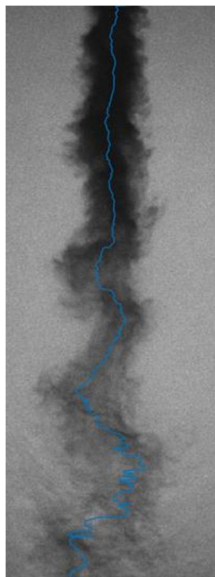


図 7. 超臨界窒素噴流の BOS 画像

に，可視化結果に対して PIV を適用することで，断面内速度分布も得ることができた．また，BOS 法を適用すると外側混合層における密度勾配ベクトルを取得可能であることがわかった（図 7）．そして，二方向から撮影したバックライト画像を重ね合わせることで，時間的に変動するジェット中心軸の様子を可視化し，下流側ではフラッピングと左右のヘリカル状の変動が非定常的に



出現していることが分かった (図 8). 外側混合層, 外側剪断層, 内側剪断層, 中心軸と, それぞれに適切な可視化手法を適用することでジェット全体について定量データを取得できることが明らかになった.



バックライト画像からの中心軸抽出

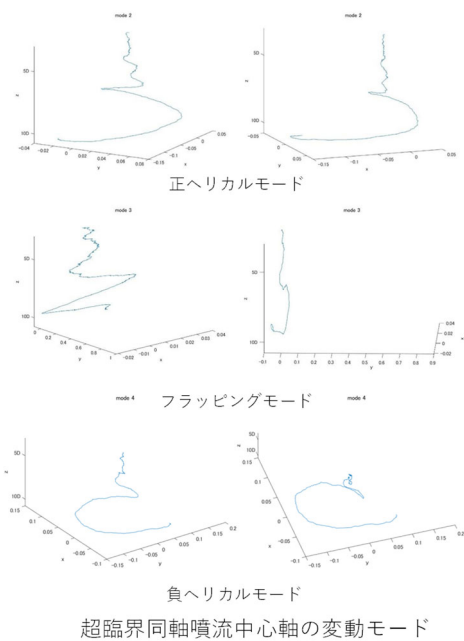


図 8. バックライト画像から抽出した超臨界同軸噴流中心軸の変動モード

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nagashima H., Tsuda S., Tokumasu T.	4. 巻 539
2. 論文標題 An evaluation of the self-diffusion coefficient of liquid hydrogen via the generic van der Waals equation of state and modified free volume theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 110952 ~ 110952
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemphys.2020.110952	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 D. Muto, H. Terashima, N. Tsuboi	4. 巻 62
2. 論文標題 Effects of a recess on supercritical co-flowing planar jets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.62.203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takahiko Toki, Susumu Teramoto and Koji Okamoto	4. 巻 36
2. 論文標題 Velocity and Temperature Profiles in Turbulent Channel Flow at Supercritical Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF PROPULSION AND POWER	6. 最初と最後の頁 3-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B37381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 津田 伸一	4. 巻 3
2. 論文標題 分子シミュレーションによる液体ロケット推進剤の超臨界熱物性推算	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 202-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Muto Daiki, Terashima Hiroshi, Araki Takahide, Tsuboi Nobuyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of a Recess on Coaxial Cryogenic Injections at Supercritical Pressure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Power	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.B38552	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 1. 中司智仁, 荒木天秀, 天野泰嗣, 坪井伸幸, 小澤晃平, 武藤大貴, 寺島洋史
2. 発表標題 超臨界圧下における極低温水素噴流に関する数値解析: 噴射口数の影響
3. 学会等名 日本機械学会九州支部九州学生会第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木天秀, 武藤大貴, 寺島洋史, 坪井伸幸
2. 発表標題 超臨界圧高密度比混合層分布の数値評価について
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Takahashi, N. Tsuboi, T. Tokumasu, S. Watanabe, S. Tsuda
2. 発表標題 Validation of a van der Waals Type Equation of State with Classical Mixing Rule for H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> Mixture System by Molecular Simulation Employing an Improved Ab-Initio Intermolecular Potential
3. 学会等名 The 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 竜二, 坪井 伸幸, 徳増 崇, 渡邊 聡, 津田 伸一
2. 発表標題 異種分子間相互作用の影響に注目した酸水素混合系に対するcubic型状態方程式の第一原理的検証
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nakatsukasa, T. Amano, T. Araki, H. Terashima, N. Tsuboi
2. 発表標題 Numerical Study of Cryogenic Hydrogen Jet in Crossflow under Supercritical Pressure: Effects of the Number of Injector Holes
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒木天秀, 寺島洋史, 坪井伸幸
2. 発表標題 超臨界圧極低温流れ解析における数値安定性向上について：MUSCL法補完変数の影響
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第75期 総会・講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系 反応流体力学研究室ホームページ  
<http://www.mech.kyutech.ac.jp/rfd/index.html>



## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	寺本 進  (Teramoto Susumu)  (30300700)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授    (12601)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林 光一  (Hayashi A.Koichi)	青山学院大学・理工学部・名誉教授	
研究協力者	徳増 崇  (Tokumasu Takashi)  (10312662)	東北大学・流体科学研究所・教授	
研究協力者	津田 伸一  (Tsuda Shinichi)  (00466244)	九州大学・大学院工学研究院・准教授	
研究協力者	永島 浩樹  (Nagashima Hiroki)  (00759144)	琉球大学・工学部・助教	
研究協力者	寺島(石原) 洋史  (Terashima Hiroshi)  (20415235)	北海道大学・大学院工学研究院・准教授	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関