

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04261

研究課題名(和文) 臨界点を跨ぐ超臨界流体中におけるマルチフィジックス熱流動のメカニズム解明

研究課題名(英文) Numerical study of multiphysics flow mechanism in supercritical fluid flow crossing the critical point

研究代表者

山本 悟 (Yamamoto, Satoru)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90192799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、臨界点を跨ぐ超臨界流体の熱物性を正確に計算する数値モデルを開発し、さらに超臨界流体中で発生する非平衡凝縮や吸熱反応を再現する新たな数値モデルを構築した。これらマルチフィジックス熱流動の数値モデルを用いて、ノズルを通る超臨界二酸化炭素の非平衡凝縮流れ、超臨界急速膨張法の超臨界二酸化炭素流れの非平衡凝縮ならびに溶質の核生成、超臨界二酸化炭素発電技術に用いられる遠心圧縮機内部の非平衡凝縮を伴う超臨界二酸化炭素流れ、そして再利用型宇宙輸送機のエンジン冷却に用いる超臨界炭化水素の吸熱反応流れのシミュレーションを行い、既存の実験結果との比較することで、その妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非平衡凝縮や吸熱反応など複雑な物理を伴う超臨界流体を正確に計算するための数値モデルを提案して、4種類の具体的な問題に応用した。その中で、超臨界CO₂発電技術、再利用型宇宙輸送機の炭化水素再生冷却技術は、将来の実用化が期待されている技術である。前者では、既存の蒸気タービンと同等の出力を得るのに、そのサイズを百分の1以下にすることができ、後者は宇宙輸送機の燃料貯蔵タンクを格段に小型化することができる画期的な技術である。本研究で開発したシミュレーション技術は、それらマルチフィジックス熱流動のメカニズムを正確に解明することができる画期的な手法である。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a mathematical model which can accurately simulate the thermophysical properties of supercritical fluid crossing the critical point and the study further developed a model approximating nonequilibrium condensation and endothermic reaction in supercritical fluids. These models were applied to multiphysics flow problems: nonequilibrium condensation of supercritical CO₂ flow in a nozzle, nonequilibrium condensation of supercritical CO₂ flow through RESS process and the crystallization of the solute, nonequilibrium condensation of supercritical CO₂ flow in a radial compressor utilized for supercritical CO₂ power plant, and endothermic reaction of supercritical hydrocarbon flow for the cooling system of reusable space plane. The simulated results were compared with the existing experimental results and the reliability was discussed.

研究分野：数値流体力学

キーワード：超臨界流体 マルチフィジックス 非平衡凝縮 シミュレーション 数値モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物質の圧力と温度を臨界点以上に上昇させると超臨界流体になるが、特に臨界点近傍では、熱物性が特異に変化することが知られており、その非線形性から、理想気体の状態方程式は熱物性を正確に評価できない。CO₂の臨界点における圧力、温度は、それぞれ、7.38MPa、304.21Kであり、臨界圧力、臨界温度と呼ばれる。これよりも圧力と温度が高い領域において、CO₂は超臨界流体になる。したがって、実在気体効果が考慮できる一般状態方程式を導入する必要がある。研究代表者らの研究グループでは、熱流動の数値解法と熱物性データベースを完全にリンクする超臨界流体の数値解法を提案した(1)。その際、REFPROPなど熱物性データベースから、まず各熱物性の参照テーブル(look-up table)を作成した上で、そこから値を補間して計算に用いることで、計算時間の大幅な短縮を図っている。ところが、超臨界流体が減圧により飽和蒸気圧曲線を跨いで非平衡凝縮する際の圧力と温度は、そのままREFPROPから引用できない。なぜならば、非平衡凝縮は飽和蒸気圧曲線を跨いでさらに圧力と温度が低下した際に初めて起こるからである。いわゆる過冷却の状態から起こる。

2. 研究の目的

本研究では、臨界点を跨ぐ超臨界流体の熱物性を正確に計算する数値モデルを開発して、さらに超臨界流体中で発生する非平衡凝縮や吸熱反応を再現する新たな数値モデルを構築する。これらマルチフィジックス熱流動の数値モデルを用いて、ノズルを通る超臨界CO₂の非平衡凝縮流れ、超臨界急速膨張法の超臨界CO₂流れの非平衡凝縮ならびに溶質の核生成、超臨界CO₂発電技術に用いられる遠心圧縮機内部の非平衡凝縮を伴う超臨界CO₂流れ、そして再利用型宇宙輸送機のエンジン冷却に用いる超臨界n-オクタンの吸熱反応流れのシミュレーションを行い、既存の実験結果との比較することで、その妥当性を検証する。超臨界CO₂発電技術、再利用型宇宙輸送機の炭化水素再生冷却技術は、将来の実用化が期待されている技術である。前者では、既存の蒸気タービンと同等の出力を得るのに、そのサイズを百分の1以下にすることができ、後者は宇宙輸送機の燃料貯蔵タンクを格段に小型化することができる画期的な技術である。本研究で開発したシミュレーション技術は、それらマルチフィジックス熱流動のメカニズムの詳細を解明することができる画期的な手法と成り得る。

3. 研究の方法

本研究ではまず、REFPROPを参照しながら過冷却状態における圧力と温度を正確に求める手法を開発した。高圧環境では古典凝縮論に基づく核生成モデルが正確ではないことが指摘されており、その理由の一つには、液滴の自由エネルギーが理想気体の仮定で導出されていることがあげられる。本研究では、実在気体効果を考慮した一般状態方程式の仮定を導入して、高圧環境における核生成モデルを再構築した。その際に、圧縮係数を導入して次式のような関係式を導出した。

$$p = \rho_{real}RT = \phi\rho_{ideal}RT$$

ただし、 $\phi = \rho_{real} / \rho_{ideal}$ 。 ρ_{ideal} 、 ρ_{real} はそれぞれ理想気体を仮定した場合の密度と、一般状態方程式より得られた密度を示す。この関係式を用いることにより、凝縮液滴の臨界核半径 r^* は次式のように再構築された。

$$r^* = \frac{2\sigma_{lm}}{\phi k_B T \ln S}$$

この式は結果的に、理想気体の場合の臨界核半径と圧縮係数以外はまったく同じ形をしており、高圧環境による影響を簡単に考慮することができる。本研究の成果は、J. Fluid Science and

Technology(2017)(2), ならびに2019年に開催されたGPPS国際会議で報告した(3)。本研究ではこの手法に基づき、具体的な4種類の問題、ノズルを通る超臨界CO₂の非平衡凝縮流れ、超臨界急速膨張法の超臨界CO₂流れの非平衡凝縮ならびに溶質の核生成、超臨界CO₂発電技術に用いられる遠心圧縮機内部の非平衡凝縮を伴う超臨界CO₂流れ、そして再利用型宇宙輸送機のエンジン冷却に用いる超臨界n-オクタンの吸熱反応流れのシミュレーションに応用した。

4. 研究成果

(1) 超臨界CO₂熱流動の数値シミュレーション

超臨界ではないものの,MITの研究グループがノズル内部で発生する高圧CO₂流れの非平衡凝縮を実験的に捉えることに成功したので,本研究ではその実験条件に合わせてシミュレーションを行い,本手法の妥当性を検証した。ノズル入口全圧,全温を5.8MPa, 310Kとした場合の実験による可視化結果と,計算により得られた非平衡凝縮に伴うCO₂液滴の質量分率を図1に示す。いずれにおいても,ノズルスロート後方部分からCO₂液滴が発生していることが示されている。図2に計算により得られたノズル内部の圧力を実験結果と比較した。まず,理想気体を仮定した場合には,非平衡凝縮に伴い放出される潜熱に起因する圧力上昇をまったく捕獲することができなかった。一方,実在気体効果を考慮することにより,この圧力上昇を再現することができた。実験結果との乖離は若干あるものの,高圧環境の非平衡凝縮を捕獲するためには,少なくとも実在気体効果を考慮する必要があること示している。本研究の成果は,2018年ノルウェーで開催されたASME Turbo Expo 2018(4)で発表した。

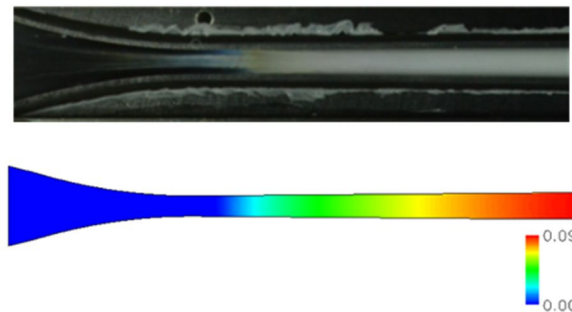


図1 上図: 高圧 CO₂ 流れの非平衡凝縮 (MIT による実験結果), 下図: シミュレーション結果

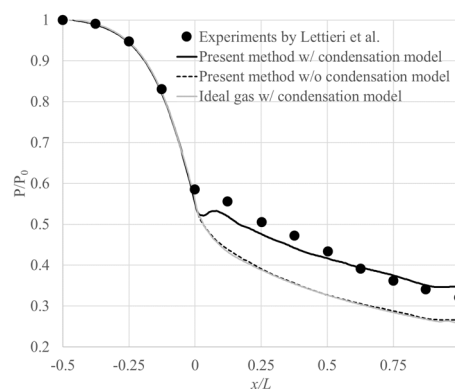


図2 ノズル中心の圧力分布を実験とシミュレーションで比較

さらに本手法は,超臨界急速膨張法(Rapid Expansion of Supercritical Solution, 以下RESS)による高分子ポリマー粒子生成の数値シミュレーションに応用した。RESS は,高分子ポリマーを溶解した超臨界CO₂を微小径のノズルから噴出して,その際の急速膨張により微小粒子を生成する技術である。比較的単純な機構にもかかわらず,超臨界CO₂がノズル出口で膨張して超音速になり衝撃波を形成するとともに,CO₂自体が非平衡凝縮する。一方,溶解した高分子ポリマーもノズル内外のいずれかの場所で核生成して微小粒子化する。これまで過去には,この一連のフィジックスのシミュレーションに成功した事例はなかったが,

本研究ではCO₂の非平衡凝縮と高分子ポリマーの粒子生成を同時にシミュレーションすることに成功した。この研究成果は、英国化学会で高く評価されて、関連研究の著書を分担執筆するに至った(5)。その際にまず、超臨界CO₂流れはノズル内で超臨界状態から気体へと変化して、ノズルから噴出する際には超音速流れになり、後方でマッハディスクを形成する。さらに超音速域では急速な膨張により、CO₂気体が非平衡凝縮する。一方、高分子ポリマーは超臨界CO₂が超臨界から気体へと変化する際に、溶解度の急激な減少にともない核生成する。その後、流動にともない微小粒子が成長しながら、CO₂気体とともにノズルから噴出する。特に本研究では、ノズル入口条件によっては超臨界CO₂がノズル内で気体に変化するという結果が得られた。この場合、ノズル内で高分子ポリマーの微小粒子が生成されてしまうため、ノズル閉塞の原因につながる恐れがあることが示唆される。

(2) 超臨界CO₂発電技術への応用

将来実用化が期待されている超臨界CO₂発電では、閉じた系の超臨界CO₂が断熱圧縮 (Compressor, a-b) 等圧加熱 (Heating, b-c) 断熱膨張 (Turbine, c-d) 等圧冷却 (Cooling, d-a) を繰り返すBrayton サイクルによる発電が想定されている。圧縮機入口で臨界点近傍の圧力、温度が設定されることにより、わずかな仕事で大きな圧縮率が得られることから、圧縮機ならびにタービンを従来の蒸気タービンに比べて桁違いのサイズにコンパクト化できることが期待されている。また、間接加熱方式であり、太陽熱、地熱、排熱など広範囲の熱源が利用できる可能性がある。図3に示すサンディア国立研究所で設計された実験用遠心圧縮機について、本研究で開発した手法を応用した。この圧縮機内部では、凝縮など相変化を起こさないように超臨界領域で作動させているが、局所的に凝縮している可能性が指摘されている。図4に典型的な条件において、シミュレーションした場合に得られた遠心圧縮機内部流路の圧力分布を示す。超臨界圧のCO₂流動が遠心圧縮機動翼列を通り、さらにディフューザーを通過していることが示されている。本条件における計算では、動翼前縁付近で流れの加速に伴い、局所的に圧力が低下して飽和蒸気圧曲線を跨ぎ、CO₂が非平衡凝縮することがわかった。その妥当性についてはまだ検証が必要であるが、今後超臨界CO₂発電技術を開発する上で、極めて重要な知見である。本研究に関連した研究成果は、2019年にInt. Gas Turbine Congress(6)で発表した。



図3 サンディア国立研究所の遠心圧縮機

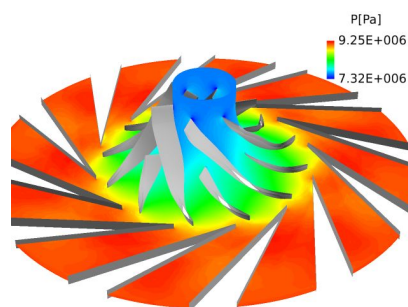


図4 シミュレーション結果

(3) 超臨界炭化水素流れへの応用

JAXAでは二段式再使用型宇宙輸送システムのエンジン冷却に、燃料である炭化水素を用いる再生冷却法に関する実験研究が進められている。再生冷却法ではエンジン燃焼室壁内部に設置された冷却管に燃料を流すことで冷却を行う。その冷却過程で炭化水素は加熱されることにより、液体から超臨界流体へと相変化する。さらに高温になると、炭化水素が部分的に低分子の炭化水素に分解される。その際、吸熱反応が起こる。本研究では、これまで開発した手法にさらに、炭化水素の吸熱分解反応が考慮できる数値シミュレーション技術を開発して、現在JAXAで実施している実験に応用した。JAXAで設計された実験装置の作動流体は炭化水素の一つであるn-オクタンであり、供給部、予熱部、供試部、冷却プール、回収部、ガス採取部の6つのセクションから構成されている。中でも供試部は予熱された試料をさらに加熱し、吸熱分解が起こる温度ま

で昇温する区間であり、本研究で計算対象とするのはこの供試部内部における熱流動である。図5にシミュレーションにより得られた流路内部の温度分布を示す。計算は軸対象を仮定して行われたため、赤で示されている高温部分が加熱部分に当たる。加熱部分により加熱されたn-オクタンの温度を予測することが、エンジン冷却性能を評価する上で重要であるが、結果的に入口温度が比較的低い場合には、実験値と良い一致を示した。しかしながら、入口温度が高温の場合では、実験値とは必ずしも一致しないため、今後さらなる改良が必要であることがわかった。本研究の成果は、2019年サンフランシスコで開催されたASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference(7)で発表した。

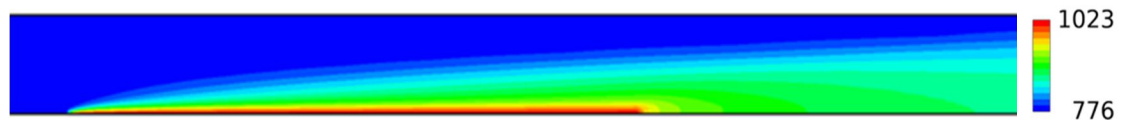


図5 シミュレーションにより得られた温度分布[K]

参考文献

- S. Yamamoto, T. Furusawa, and R. Matsuzawa, Numerical Simulation of Supercritical Carbon Dioxide Flows across Critical Point, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 54-4 (2011), 774-782.
- T. Furusawa and S. Yamamoto, Mathematical Modeling and Computation of High-pressure Steam Condensation in a Transonic Flow, *Journal of Fluid Science and Technology*, 12-1 (2017), 1-11.
- T. Furusawa, S. Moriguchi, H. Miyazawa and S. Yamamoto, Real Gas Simulation for High-pressure and Low-pressure Nonequilibrium Condensation in Transonic Flows, *Proceedings of Global Power and Propulsion Society, Beijing Conference 2019, GPPS-BJ-2019-009*, (2019), 7 pages.
- T. Furusawa, H. Miyazawa and S. Yamamoto, Numerical Method for Simulating High Pressure CO₂ Flows with Nonequilibrium Condensation, *Proc. ASME Turbo Expo 2018, GT2018-75592*, (2018), 10 pages.
- S. Yamamoto and T. Furusawa, Mathematical Modelling and Computation for Rapid Expansion of Supercritical Solutions (Chapter 13), *Supercritical and Other High-pressure Solvent Systems* (ed. by T. M. Attard and A. J. Hunt), Royal Society of Chemistry, (Aug. 2018). DOI: 10.1039/9781788013543.
- T. Furusawa, J. Hao, S. Moriguchi, H. Miyazawa and S. Yamamoto, Numerical Investigation of Supercritical CO₂ Flow in a Radial Compressor with Real Gas Model, *Proceedings of International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo, IGTC-2019-106*, (2019), 6 pages.
- T. Furusawa, N. Taki, S. Yatsuyanagi, S. Yamamoto, T. Miyaura and S. Tomioka, Numerical Simulation of Supercritical Octane Flows in a Heated Circular Tube with Simple Thermal Cracking Model, *Proc. ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, AJKFluids2019-4797*, (2019), 8 pages.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takashi Furusawa, Hironori Miyazawa, Satoru Yamamoto	4. 巻 GT2018-7559
2. 論文標題 Numerical Method for Simulating High Pressure CO2 Flows with Nonequilibrium Condensation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 ASME Turbo Expo, Lillestrom	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） なし	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 Takashi Furusawa, Noriyuki Taki, Shuto Yatsuyanagi, Satoru Yamamoto, Takuto Miyaura, Sadatake Tomioka	4. 巻 AJKFLUIDS2019-4797
2. 論文標題 Numerical Simulation of Supercritical Octane Flows in A Heated Circular Tube With Simple Thermal Cracking Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME - JSME - KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019	6. 最初と最後の頁 1-8
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 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 Hironori Miyazawa, Takashi Furusawa, Satoru Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Investigation of Transonic Supercritical CO2 Flows with Nonequilibrium Condensation in a Laval Nozzle	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 6th International Supercritical CO2 Power Cycles Symposium	6. 最初と最後の頁 1-13
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 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 Takashi FURUSAWA, Hironori MIYAZAWA, Shota MORIGUCHI, Satoru YAMAMOTO	4. 巻 GT2018-75592
2. 論文標題 Numerical Method for Simulating Supercritical CO2 Flows with High Pressure Nonequilibrium Condensation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME Turbo Expo 2018: Turbine Technical Conference and Exposition	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） なし	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 Takashi Furusawa, Kenji Kagaya and Satoru Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Simulation of Three-dimensional Internal Flows of Transcritical Fluid with Cartesian Method Method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 1-6
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 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 Takashi Furusawa, Satoru Yamamoto	4. 巻 12
2. 論文標題 Mathematical Modeling and Computation of High-pressure Steam Condensation in a Transonic Flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-11
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 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 Takashi Furusawa, Hironori Miyazawa, Satoru Yamamoto	4. 巻 GT2016-56431
2. 論文標題 Numerical Method for Simulating Flows of Supercritical CO2 Compressor with Nonequilibrium Condensation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME Turbo Expo 2016, Seoul	6. 最初と最後の頁 1-9
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 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 Takashi Furusawa, Jianming Hao, Shota Moriguchi, Hironori Miyazawa, Satoru Yamamoto	4. 巻 IGTC-2019-106
2. 論文標題 Numerical Investigation of Supercritical CO2 Flow in a Radial Compressor with Real Gas Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo	6. 最初と最後の頁 1-6
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 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 Takashi Furusawa, Shota Moriguchi, Hironori Miyazawa, Satoru Yamamoto	4. 巻 GPPS-BJ-2019-009
2. 論文標題 Real Gas Simulation for High-pressure and Low-pressure Nonequilibrium Condensation in Transonic Flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Global Power and Propulsion Society, Beijing Conference 2019	6. 最初と最後の頁 1-7
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 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 山本悟	4. 巻 88-6
2. 論文標題 数値タービンのスーパーコンピューティング, 特集「回転翼にまつわる最新技術動向」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 化学工学会誌	6. 最初と最後の頁 337-339
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 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 山本悟, 古澤卓	4. 巻 47-6
2. 論文標題 非平衡凝縮を伴うマルチフィジックス熱流動のシミュレーション技術, 特集「マルチフィジックスシミュレーションの進展」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 389-395
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 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18件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Takashi Furusawa, Hironori Miyazawa, Shota Moriguchi, Satoru Yamamoto
2. 発表標題 Transonic Flow Simulation of High Pressure CO2 with Nonequilibrium Condensation
3. 学会等名 Asian Congress on Gas Turbines (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Furusawa, Hironori Miyazawa, Shota Moriguchi, Satoru Yamamoto
2. 発表標題 Numerical Investigation of Real Gas Effect in High Pressure Flows with Nonequilibrium Condensation
3. 学会等名 15th Int. Conf. on Flow Dynamics, Sendai (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古澤卓, 宮澤弘法, 森口昇太, 山本悟
2. 発表標題 高圧二酸化炭素のラバルノズル内非平衡凝縮流動解析
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古澤卓, 宮澤弘法, 森口昇太, 山本悟
2. 発表標題 遷臨界条件下における三次元ラバルノズル内の非平衡凝縮シミュレーション
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoru Yamamoto
2. 発表標題 A Free Energy Perspective on Homogeneous Nucleation Model
3. 学会等名 2018 ASME Turbo Expo (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本悟
2. 発表標題 超臨界CO2流れのシミュレーション技術
3. 学会等名 日本ガスタービン学会ガスタービンセミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古澤卓, 宮澤弘法, 山本悟
2. 発表標題 臨界点近傍条件における遷音速ノズル内部流動シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Furusawa, Hironori Miyazawa, Shota Moriguchi and Satoru Yamamoto
2. 発表標題 Numerical Analysis of High Pressure CO2 Flows with Nonequilibrium Condensation
3. 学会等名 14th Int. Conf. on Flow Dynamics, Sendai (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松岡敬, 神保智彦, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 前処理法に基づく超臨界流体の熱流体シミュレーション(レイリーベルナル対流)
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神保智彦, 松岡敬, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 前処理法に基づく超臨界流体の熱流体シミュレーション(正方形キャピティ内自然対流)
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古澤卓, 宮澤弘法, 森口昇太, 山本悟
2. 発表標題 高压条件における二酸化炭素のラバルノズル内部非平衡凝縮シミュレーション
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takashi Furusawa, Henrike Erhard, Hironori Miyazawa, Satoru Yamamoto
2. 発表標題 Numerical Simulation of Transonic Nozzle Flows with Nonequilibrium Condensation
3. 学会等名 13th Int. Conf. on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 古澤卓, 宮澤弘法, 山本悟
2. 発表標題 凝縮を伴う超臨界二酸化炭素の遷音速流動シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2016年度年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 古澤卓, 宮澤弘法, 山本悟
2. 発表標題 高压条件における水蒸気のノズル内部の非平衡凝縮シミュレーション
3. 学会等名 第30回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Satoru Yamamoto
2. 発表標題 Modeling and Simulation of Thermophysical Flows with Nonequilibrium Condensation
3. 学会等名 14th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hao Jianming, 森口昇太, 宮澤弘法, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 超臨界二酸化炭素の遠心圧縮機内部流動シミュレーション
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 八柳秀門, 古澤卓, 山本悟, 志牟田晃大, 富岡定毅
2. 発表標題 熱分解反応を考慮した超臨界オクタンの加熱円管内部流動シミュレーション
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 Shuto Yatsuyanagi, Takashi Furusawa, Satoru Yamamoto, Sadatake Tomioka
2. 発表標題 Numerical Investigation of Octane Flows with Pyrolysis under Supercritical Pressure
3. 学会等名 16th Int. Conf. on Flow Dynamics
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Thomas M. Attard, Andrew J. Hunt (分担執筆 Chapter 13, S. Yamamoto and T. Furusawa)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 678
3. 書名 Supercritical and Other High-pressure Solvent Systems	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	古澤 卓 (Furusawa Takashi) (80637710)	東北大学・情報科学研究科・准教授 (11301)	
連携 研究者	阿尻 雅文 (Ajiri Tadafumi) (60182995)	東北大学・材料科学高等研究所・教授 (11301)	
連携 研究者	塚田 隆夫 (Tsukada Takao) (10171969)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	富岡 定毅 (Tomioka Sadatake) (50358553)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主幹研究員 (82645)	
連携研究者	小寺 正敏 (Kodera Masatoshi) (30358551)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究員 (82645)	
連携研究者	小野寺 卓朗 (Onodera Takuo) (10358541)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究員 (82645)	