

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18007

研究課題名(和文) 複雑形状近傍の超臨界熱流動における温度場解像度を飛躍的に向上させる数値解法の開発

研究課題名(英文) Numerical method for capturing the thermal boundary of supercritical fluid flows around complex geometries

研究代表者

古澤 卓 (Furusawa, Takashi)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：80637710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：超臨界水や超臨界二酸化炭素は産業界での利用が急速に拡大している。化学工学における溶媒や発電システム、熱交換機における冷媒などでの利用例では、複雑な流路形状を持ち、壁面近傍において加熱および冷却を伴う。本研究では前処理法と熱物性値算出パッケージを用いた超臨界流動解析手法に直交格子法とメッシュレス法に基づくハイブリッド手法を導入し、複雑形状内外の壁面加熱のある超臨界流体の熱流動解析を行った。二次元および三次元流動に適用し、デンプルなど形状による渦や熱伝達を評価することが可能であることを示した。また、超臨界二酸化炭素のみならず、超臨界水や超臨界メタンへの応用が可能であることを示した。

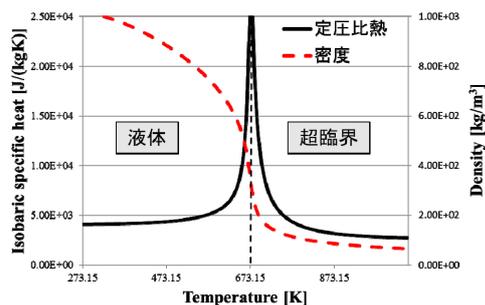
研究成果の概要(英文)：We had developed the numerical method for simulating supercritical fluids flows with the preconditioning method and PROPATH. In this study, we developed the coupling method of preconditioning method with a Cartesian mesh and a gridless method to simulate the supercritical fluid flows in/around complex geometries. The hybrid method is applied to natural and forced convection of CO<sub>2</sub> in 2D geometries. The numerical results in a supercritical condition showed that the thermophysical properties affected the temperature contours in the cylinder due to the rapid change of density and the higher value of specific heat. Next, we applied these methods to simulate three-dimensional forced convection of supercritical CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. The supercritical fluid flow in the serpentine channel was strongly disturbed by the unsteady vortexes generated from the curved wall and the outlet temperature in the serpentine channel was much higher than that in the straight channel.

研究分野：数値流体力学

キーワード：数値流体力学 超臨界流体 直交格子法

### 1. 研究開始当初の背景

近年、超臨界二酸化炭素や超臨界水は発電システムの作動流体や熱交換器での使用に留まらず、微粒子生成や抽出、薄膜生成など化学プロセスにも広く使用され、エネルギー効率や環境面の優位性からさらなる利用の拡大が期待されている。一方で、下図に示すように臨界点近傍では密度や定圧比熱などの熱物性値が急激かつ連続的に変化することが知られており、通常とは大きく異なる流動となることが予想されているものの、高压高温条件のために超臨界流体の熱流動はほとんど明らかになっていない。一方で、超臨界二酸化炭素を用いたブレイトンサイクルにおける熱交換器や化学工学における反応器や微細空間積層では三次元構造や接合部等の複雑な形状を持つ。また、壁面から加熱や冷却が行われるためにこれらを考慮した流動解析が必要不可欠である。特に臨界点近傍では温度境界層が薄くなることが知られており、微小な温度変化であっても密度や定圧比熱、粘性係数が急激に変化するために温度境界層を正確に再現することが超臨界流体の熱流動解析では求められており、複雑形状内部の超臨界流体の熱流動を高精度解析可能な計算手法の確立が急務となっている。



臨界点近傍の熱物性値の変化

### 2. 研究の目的

複雑物体形状近傍の温度境界層の解像を飛躍的に向上できる高精度熱流動解析手法を提案し、実流路内の超臨界流体の熱流動を明らかにすることを目的とする。

まず、直交格子法とメッシュレス法に基づく温度境界層の解像を向上させる計算手法の二次元での計算手法の提案および実装を行う。次に超臨界流体へ拡張することで複雑な実形状を考慮した超臨界流体のための高精度熱流動数値解法を提案する。さらに、大規模流動計算に向けて並列計算が可能なコードを構築し、超臨界水および超臨界二酸化炭素の熱流動を十分な格子点数で解析可能にすることで、工業利用されている実流路内の超臨界流体の熱流動現象を解明することを目指した。

### 3. 研究の方法

まず、物体近傍の温度場解像のために直交

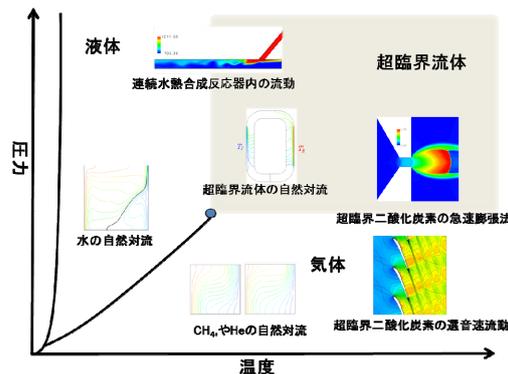
格子法とメッシュレス法を用いたハイブリッド手法を提案し、常圧条件、超臨界条件のそれぞれにおいて壁面加熱を伴う熱流動の数値計算を行い、従来の手法および実験等と比較し、本手法の優位性を確認する。特にこれらでは計算手法の妥当性を検討するために二次元コードの開発を先行して行う。これらの計算手法の妥当性の評価は主に常圧環境下における実験などと比較することで行う。

次に上記の計算手法の妥当性が十分に検討された上で三次元コードの開発および並列計算が可能なコードを構築し、超臨界水および超臨界二酸化炭素の熱流動を計算する。十分な格子点数で解析可能にすることで、RANSに基づく乱流熱伝達モデルを導入し、三次元熱流動の解明を目指す。壁面内の熱伝導を考慮した数値解析手法を構築する。

最後にボイラや熱交換器内部流動における超臨界流体の流動および超臨界流体のマルチフィジックス流動における問題と組み合わせることで実際の流動における諸問題の解決を図る。

### 4. 研究成果

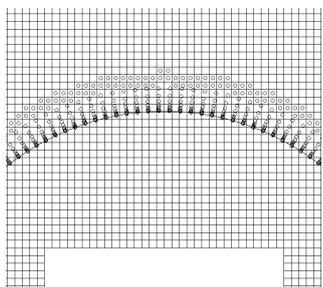
これまでに著者らは下図に示すように圧縮性 NS 方程式に前処理法を導入することで、密度変化の大きな臨界点近傍の自然対流や熱流動の数値計算を行ってきた。さらに PROPATH などの熱物性値算出パッケージを導入することで正確な熱物性値変化を考慮した超臨界流体、液体、気体の熱流動解析を行い、熱物性値変化が流動に与える影響を評価している。これらの結果から超臨界流体の流動は非圧縮や定圧比熱一定の仮定、相似則の適用はできず、すべての熱物性値の正確な評価が必要不可欠であることを示した。



これまでの前処理法+PROPATH の計算結果 (境界適合格子)

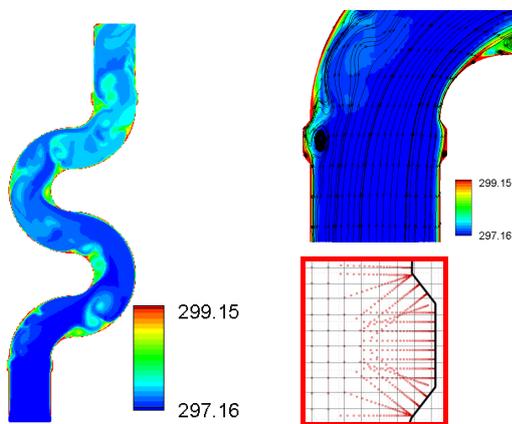
本研究では上記の数値計算手法に対して、直交格子法とメッシュレス法を導入し、複雑形状周りの熱流動の計算を可能にするものである。壁面再現において、まず数値手法の妥当性の検討のために二次元流動解析コードを作成した。領域全体に直交格子を配置し、その上で壁面の垂直方向に対してメッシュレスポイントを定義することで境界内に温

度境界層を捉える点を配置している。常圧条件において二次元水平円柱内部の自然対流問題に提案した手法を適用し、それぞれの結果を比較したところ、提案した手法を用いることで曲率を持つ円管内部の自然対流を十分に評価することができることが確認できた。



直交格子と Meshless ポイントの例

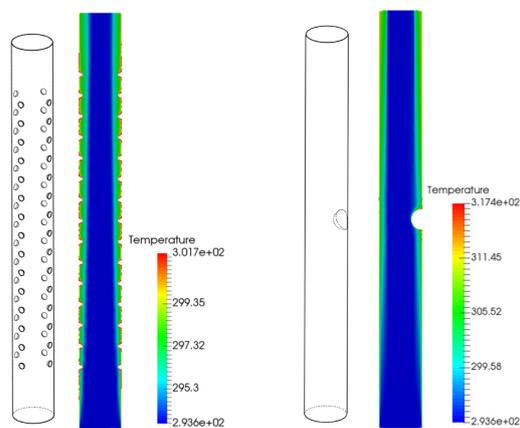
また臨界点近傍の条件、超臨界条件について計算を行い、それぞれの結果を比較した。また、加熱および冷却を伴う直管および湾曲管内における超臨界二酸化炭素の強制対流の熱流動の計算を行い、臨界点近傍における密度変化による浮力の影響を評価した。下図は微細な凹みのある湾曲管路内の超臨界二酸化炭素流動である。湾曲管による非定常な熱流動および凹みによる渦を捉えることができることを示している。



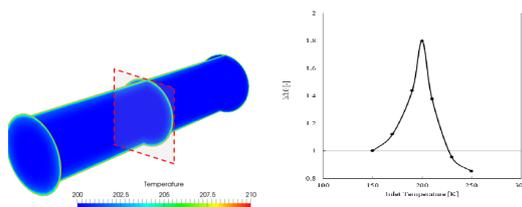
二次元コードによる超臨界二酸化炭素の熱流動

次に三次元コードの開発を行い、常圧水の加熱壁面近傍の熱流動解析を行い、温度分布を理論値と比較した。結果は理論値とよく一致し、本数値解法の妥当性を示した。次に直交格子法による階段状物体表現が熱流動に与える影響を評価するため、物体境界が直交格子に対して斜めになる条件で同様の比較を行った。Gridless 法を導入した計算結果は理論値とよく一致した一方、直交格子法のみでは加熱壁面近傍で誤差が生じる結果となった。また、下図に示すような三次元円管内強制対流問題に適用し、超臨界二酸化炭素の熱流動解析を行った。壁面温度が擬臨界温度を超える条件では急激な密度低下により、壁面近傍において流速が大きなピークを持つ結

果となった。壁面温度が擬臨界温度を下回るでは流速分布にピークは確認されなかった。また、ディンプルを複数配置した形状でもそれらの影響を考慮した熱流動解析を簡単に行うことができることを示した。これらの手法をさらにメタン流動にも適用し、様々な物質の臨界点近傍の熱流動解析を行うことができることを示した。



ディンプルの大きさによる熱流動の評価



超臨界メタンの熱流動

上記のような複雑形状周りの熱流動解析を計算可能であることを示したうえで、超臨界流体流動でよく問題となるマルチフィジックス問題への適用も計画した。超臨界流体では化学反応や流動の中で粒子や液滴が生じることが多くあり、これらのモデル化が必要不可欠である。上記のような実際の形状の問題に対して数値計算可能にするために、それらのモデルの高精度化を行った。残念ながら通常の境界適合格子での数値計算に留まったものの、今後これらモデルを直交格子法およびメッシュレス法に導入することで実際の複雑形状内外の反応、粒子生成、非平衡凝縮などの知見が得られることが期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

- ① Takashi Furusawa, Satoru Yamamoto, "Mathematical modeling and computation of high-pressure steam condensation in a transonic flow," Bulletin of JSME, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有り,

- 12-1, (2017), pp.1-11.
- ② Takashi Furusawa, Kenji Kagaya, Satoru Yamamoto, “Numerical Simulation of Three-dimensional Internal flows of Transcritical Fluid with Cartesian Mesh Method,” Proc. of 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 査読有り, TFEC9-1092, (2017), pp. 1-5.
- ③ Takashi Furusawa, Masaaki Tange, Satoru Yamamoto, “Numerical Simulation of Thermal Convection in a Supercritical State with Cartesian Mesh Method,” Proc. the 4th International Forum on Heat Transfer, 査読有り, IFHT2016-1939, (2016), pp. 1-6.

[学会発表] (計 3件)

- ① Hironori MIYAZAWA, Takashi FURUSAWA, Satoru YAMAMOTO, “Numerical Investigation of Transonic Supercritical CO<sub>2</sub> Flows with Nonequilibrium Condensation in a Laval Nozzle” , 6<sup>th</sup> International Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycle Symposium, 2018年3月26-30日, ピッツバーグ.
- ② 古澤卓, 宮澤弘法, 森口昇太, 山本悟, “高圧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”, 第31回数値流体力学シンポジウム, 2017年12月12-14日, 京都.
- ③ Takashi Furusawa, Henrike Erhard, Hironori Miyazawa, Satoru Yamamoto, “Numerical Simulation of Transonic Nozzle Flows with Nonequilibrium Condensation,” 13th International Conference on Flow Dynamics, 2016年10月10-12日, 仙台.

[その他]

ホームページ等

<http://www.caero.mech.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古澤 卓 (FURUSAWA TAKASHI)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：80637710

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

山本 悟 (YAMAMOTO SATORU)

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：90192799