

機関番号：82110
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2008～2010
課題番号：20760142
研究課題名（和文） 直接数値シミュレーションによる超臨界圧流体の乱流熱伝達メカニズムに関する研究
研究課題名（英文） R&D of turbulent heat transfer of supercritical fluid with numerical simulation
研究代表者
関 洋治（SEKI YOHJI）
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職
研究者番号：00469793

研究成果の概要（和文）：平行平板間乱流において物性値変化を考慮した直接数値シミュレーションを実施することにより、超臨界圧水の乱流統計量を取得するだけでなく、その知見をもとに汎用流体コードにも変物性コードを組み込み、擬臨界点を越す計算を達成した。これにより、基礎学術分野の超臨界熱流動現象を理解するだけでなく、発電用核融合炉の冷却材の流れへの応用や有効物質の抽出分離技術にて必要とされるデータを提供できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：Direct numerical simulation of the turbulent heat transfer in a channel flow with changing various properties has been performed to obtain turbulence statistics of supercritical water. Moreover, the function of changing properties was also installed with a commercial code by using the knowledge obtained from Direct numerical simulation. The results lead to understand the flow phenomenon of supercritical water in the basic scientific field. In this study, it indicates the possible of contributing to the application to the coolant flow of the nuclear fusion reactor for power generation and the extraction separation technology of an effective substance.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2009年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2010年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：対流、超臨界圧流体

1. 研究開始当初の背景

超臨界圧流体は、環境への負荷が少なく、化学的に安定・安全であり、低コストである。現在、固有な特徴を活かした工業分野への応用が急速に進んでいる。有用物質の抽出において、不燃性で溶解力の大きい超臨界圧二酸化炭素を抽出溶媒とすることは、環境にやさしく、グリーンサステナブルケミストリーの視点から注目を集めている。原子力の分野では、超臨界圧水を冷却材とするスーパー高速炉の研究が進行中である。さらに、将来の核融合炉でも高い発電効率が取得可能なため、有力な設計概念の一つとなっている。学術分野においては、実験や理論から、擬臨界点付近の伝熱劣化や乱流熱伝達現象の把握が進んでいる。しかしながら、正確な計測が困難な物理量に関しては、未だ経験則の域を脱していない。また、支配方程式にモデル化を施した乱流モデルや Large Eddy Simulation (LES) による数値計算での研究も行われている。特に、乱流モデルの解析(塚越ら、機論 B(1994))では、伝熱劣化が、超臨界圧流体の特異な物性変化に影響された乱流熱伝達現象であることを報告し、伝熱劣化の起因の一つである单相流説を有力にした。しかし、乱流モデルでは、経験式を含むため、精度の信頼性に欠けるのが実情である。他方、モデルを用いない直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS)は、高精度な結果を取得できる。近年、大型計算機の発展により、様々な乱流熱伝達の DNS が行われているが、急激な変物性に伴う数値不安定性や多大なコスト等の理由から、超臨界圧二酸化炭素の DNS は極少数のみで、超臨界圧水の DNS の例はない。現状では、

(1) 実験での計測が困難な温度変動の散逸率など、乱流統計量が不足。

(2) DNS の解析例が少なく、乱流統計量の DNS データベースが構築されていない。などの問題があり、工業分野に超臨界圧流体が普及するなかで、乱流モデルの高精度化のみならず、乱流熱伝達現象の理解のためにも、早急な DNS の実施が望まれている。

そこで、超臨界圧流体の数値シミュレーションにより、以下の事項を実施することが可能となる。

(1) 急激な物性変化を伴う擬臨界点付近の、乱流熱伝達のメカニズムの詳細な理解。

(2) 温度乱れのエネルギー収支など、乱流統計量の DNS データベースの構築。

これにより、過去の実験値や整理式との比較、乱流熱伝達現象と伝熱劣化の解明、汎用性の高い乱流熱輸送モデルに資することが可能となる。

過去の研究で、熱輸送を伴う乱流モデルの改良が行われている (Turbulence, Heat and

Mass Transfer 4, 569, 2003)。しかし、乱流モデルの構築過程には、DNS の乱流統計量との比較が重要となるのだが、水を対象とした高解像度 DNS が存在していなかった。その後、高速計算機の発展に伴い、水(液体)を対象とした乱流熱伝達の高解像度 DNS が実施された(機論, B 編, 72-724, 2856, 2006)。これにより、乱流モデルでは、乱流プラント数を 1.1 の一定値としているが、高解像度 DNS により壁面近傍の値は 1.1 よりも顕著に大きいことが示された。同様に超臨界圧流体の乱流モデルの改良には DNS データベースが欠かせないが、未だ存在しない。

そこで、乱流熱伝達の詳細なメカニズムの理解に資するデータベースを構築するために、平行平板間や円管を流れる超臨界圧流体の流体解析コードの研究開発が重要課題としてあげられている。

2. 研究の目的

超臨界圧水を対象とし、変物性を考慮した单相流の直接数値シミュレーション(DNS)を実施することによって、以下の事項を実施する。

(1) 擬臨界点付近

物性変化が著しい擬臨界点付近の流体計算を達成する。

(2) 擬臨界点を越した超臨界圧流体

超臨界圧流体の乱流モデル構築に必要な平均温度分布や温度変動の r. m. s. 値等の乱流統計量の取得を目指す。

3. 研究の方法

(1) 平行平板間乱流(図 1)における超臨界圧水を対象とし、壁面摩擦速度、動粘性係数、平行平板半幅で無次元化したレイノルズ数で 180 とする。作動流体(水)は 25 MP、温度 350 ~ 400 °C の範囲で計算を実施する。

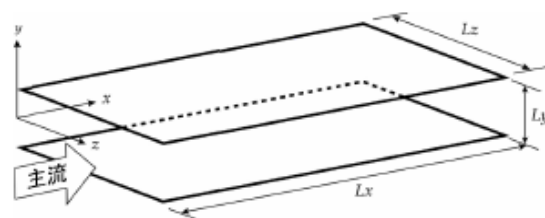


図 1 解析対象

(2) 物性値は、九州大学が研究開発した物性値コード (PROPATH) や JSME Steam table (1999) 等の関数を流体計算中に導入し、図 2 に示す変物性を達成する。

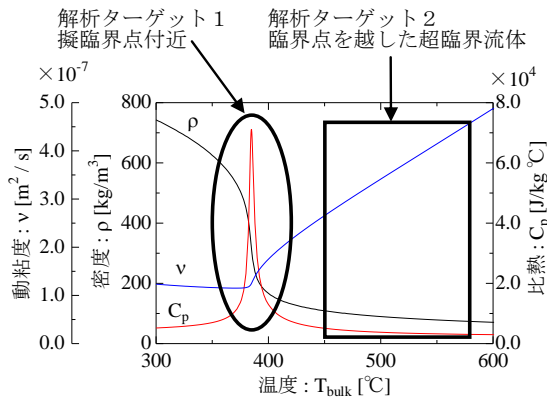


図 2 超臨界圧 (25MPa) における水の物性値

(3) 表 1 に解析領域と格子サイズを示す。変物性の厳しい計算の達成を第一目的に設定しているため、格子サイズは低次乱流統計量が精度良く取得可能な程度に設定し、計算領域も流れ方向に乱流特有のストリーク構造の自己相関が残らない程度に設定した。

表 1 解析領域と格子サイズ

| 領域 | Lx | Ly | Lz | (x × y × z) |
|-------|---------------|-----------|--------------|-------------------|
| 解析領域 | $12\pi\delta$ | 2δ | $2\pi\delta$ | $48\pi^2\delta^3$ |
| 格子サイズ | 768 | 190 | 123 | 17,948,160 |

(4) 速度場および温度場にはドライバー領域は設定せず、周期境界条件を適用した。速度場の壁面上は Non-slip 条件を適用した。図 3 に示すように、温度境界条件には加熱領域 (壁温: 400°C) と、冷却領域 (壁温: 350°C) を設定した。

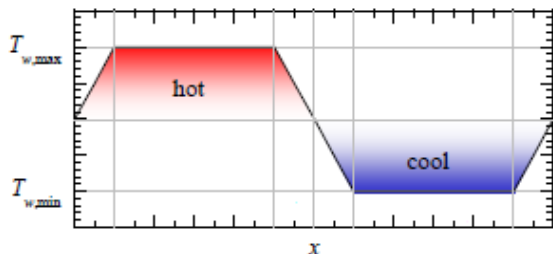


図 3 温度境界条件

4. 研究成果

(1) 物性変化が著しい擬臨界点付近においても直接数値シミュレーションを達成した。図 4 に示す様に勾配の大きい密度分布が加熱壁近傍において発生しており、物性値変化の再現に成功していることがわかる。

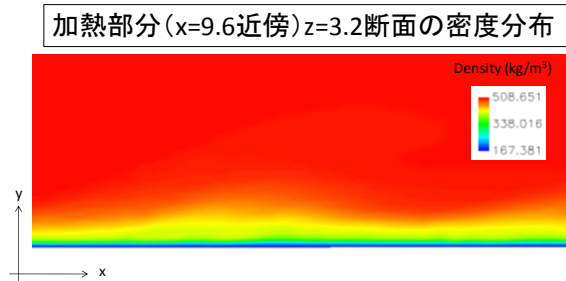


図 4 加熱壁近傍における瞬時の密度分布

(2) 加熱領域、中間領域、冷却領域のそれぞれについて、平均温度分布や温度変動の r.m.s. 値 (図 5 と 6) 等の各種乱流統計量を取得し、超臨界圧流体の乱流モデル構築に必要なデータベースの取得に寄与した。

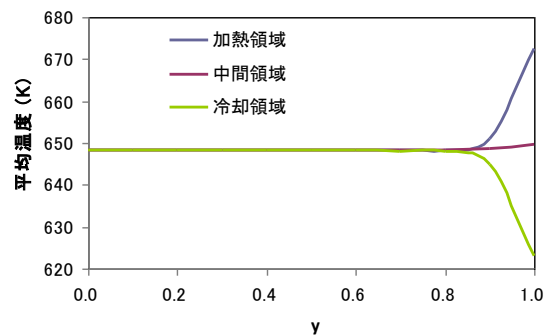


図 5 平均温度分布

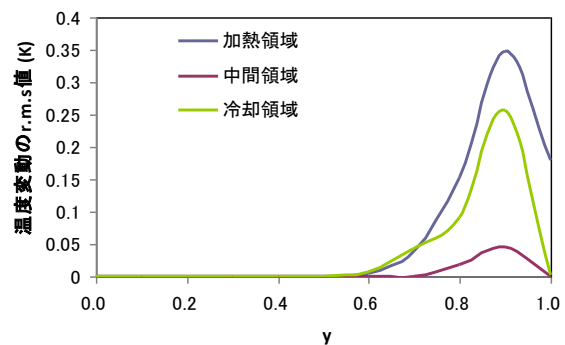


図 6 温度変動の r. m. s. 値分布

(3)当初の目的である DNS を実施するだけにとどまらず、最終目標である産業に貢献するためのツール作りにも着手した。本研究で実施した DNS の知見をもとに汎用流体コードにも変物性コードを組み込み、図7の円管内乱流場の解析を乱流モデル(RANS)で実施した。超臨界圧水(図8)だけでなく、超臨界二酸化炭素においても擬臨界点を越す計算を達成した(図9)。

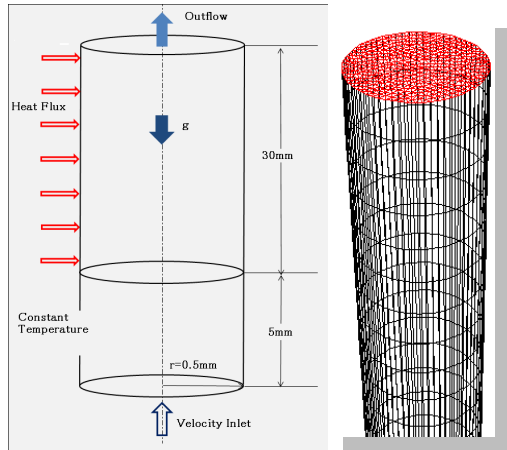


図7 乱流モデルにおける3次元解析対象
(左図：概略図、右図：メッシュ図)

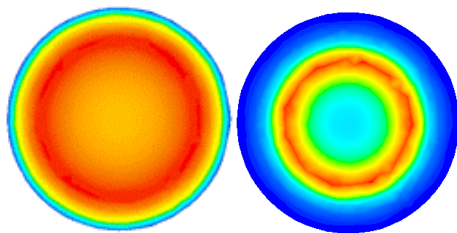


図8 超臨界圧水の擬臨界点付近における管軸方向垂直断面分布。左図：速度分布(赤色 0.7 m/s~青色 0 m/s)、右図：密度分布(赤色 6.4E+4 J/kgK~青色 3.2E+3 K J/kgK)

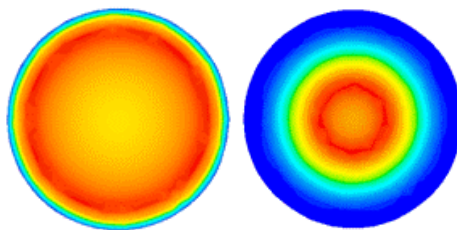


図9 超臨界圧二酸化炭素の擬臨界点付近における管軸方向垂直断面分布。左図：速度分布(赤色 0.4 m/s~青色 0 m/s)、右図：密度分布(赤色 3.2E+4 J/kgK~青色 1.3E+3 K J/kgK)

(4)汎用流体コードの活用により、以下に示す様々な分野にて必要とされるデータを提供可能な産業や社会に貢献できる可能性を示した。

①スーパー高速炉及び発電用核融合炉の冷却材流れへの応用

次世代原子炉の冷却材として大きく注目される超臨界圧水の伝熱流動特性の研究が現在盛んに行われている。しかし、実験で取得困難な乱流統計量や強制対流熱伝達に対する実験式の修正は、発展途上である。そこで、本研究により構築されたDNSコードを用いることにより、超臨界圧水の伝熱特性に対して、乱流場の可視化による定性的評価と乱流統計量による定量的評価の両面からアプローチし、新たな熱伝達の修正整理式を提示することが可能となる。これにより、スーパー高速炉や発電用核融合炉の設計時に、より信頼性のある安全性評価が可能となる。

②有効物質の抽出分離への応用

超臨界圧二酸化炭素抽出法は、使用済み核燃料からウランやプルトニウムの分離・回収、天然物質中の薬効成分やコーヒーやお茶の脱カフェイン等の生化学物質の回収・分離等、幅広く応用されている。抽出溶媒が安全で抽出速度が速く、抽出プロセスで汚染された廃液が生じないことが利点である。本研究で作成した外部関数コードと汎用流体コードを組み合わせた超臨界圧二酸化炭素の計算により、抽出プロセスにおける予熱部の設計と見積りに寄与することが大きく見込める。

以上の通り、超臨界圧流体のDNSやRANSの実施により、基礎学術分野だけでなく、他の研究分野に対しても大きな期待と将来性を示すことができた。

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)

[学会発表](計1件)

関 洋治, 核融合炉ブランケット設計におけるFACの予測と課題, 日本原子力学会 材料/水化学部会合同 第1回 構造材-水相互作用勉強会, 2011年1月27日, 東京, 日本

6. 研究組織

(1)研究代表者

関 洋治 (SEKI YOHJI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

核融合研究開発部門・研究職

研究者番号: 00469793