

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 超臨界二酸化炭素の強制対流熱伝達に対する可視化計測による研究

氏名 桜井克巳

昨今、超臨界圧水を冷却材に用いた新型炉の開発に伴い超臨界流体の熱伝達特性の解明が進められている。一般に、高温、高压化することでタービンの熱効率は一見上昇すると見込まれ、既に火力発電では超臨界圧での実用化が果たされている。

超臨界領域においては物質は密度、定圧比熱などの物性値が液相の通常状態に比べて温度、圧力に依存して連続的に大きく変動する。これを利用し、温度圧力を制御パラメータにすることで様々な工学分野で応用が可能である。熱工学的には、前述のように熱伝達率の増大、あるいは劣化現象が注目されている。特に臨界近傍では定圧比熱は急激に変動し、擬臨界点と呼ばれる、通常流体での飽和蒸気点に対応する温度でピークを持つ。水や二酸化炭素などは、この領域では低い熱流束に対して大幅な伝熱促進が起こり、また、熱流束が高くなるにつれ伝熱劣化が生じてくることが実験的に判明している。

既往の研究ではステンレスの円筒内を流れる試験流体に対して温度、圧力など熱的な測定を中心に行われたものや、閉じ切り容器内での伝熱、可視化計測の実験は多く行われてきたが、いわゆる流れの可視化技術が適用された例は強制対流に限って言えば極めて少ない。超臨界現象を可視化画像で観測することは、一般に超臨界流体が高温高压で実験上取扱いが困難なことや、密度などの物性値の過大な変動により光学手法が用いにくいこともあった。本研究では、超臨界流体強制対流計測用の可視化テストセクションを用い、可視化計測を行なった。試験流体として二酸化炭素を用い、擬臨界点近傍温度にして、矩形流路を垂直上昇させながら片面加熱する強制対流熱伝達の条件にした。これに対しシャドウグラフ、シュリーレン干渉計を適用し、流路内の密度分布を光強度分布画像として取得した。また、得られた画像に対して相互相関法を適用し、流速分布測定を試みた。

実験装置は、二酸化炭素を超臨界圧状態にして流動させる二酸化炭素ループ装置と流路、可視化窓、ヒーターから成るテストセクションである。図1に二酸化炭素ループの模式図を示す。ループはメインタンク、冷却システム、ダイヤフラムポンプ、熱媒槽、コントロールバルブなどから成り、各部に温度、圧力計測用の計器が設置されている。これにより二酸化炭素を循環させる。二酸化炭素の臨界点は7.4MPa、31.1°Cであり、本実験装置では圧力を最大12MPa、温度を最大100°Cまで変化させることが可能である。図2にテストセクションの側面図を示す。テストセクションは伝熱面が長さ600mmの垂直矩形流路であり、流路面積は10 x 20 mm、片面が銅板のヒーターによる伝熱面となっている。流路3/4の位置に直径23mmで耐高温高压仕様のULEガラスを用いた透過可視化窓が設置されており、そこを通し光学的可視化計測を行なった。ここで伝熱面での温度は最高で200°Cほどにまでなるが、この温度の変化に対して用いたULEガラスは熱による体膨張が充分小さく、光学計測の際にガラス内の屈折率分布変化が与える影響は無視できる。テストセクション内には入口、可視化部、出口に熱電対が設置され、流体温度を計測した。また、ヒーター内にも熱流束計測のため熱電対が内挿されているが、本装置においてはテストセクション外に逃げる熱量が大きく信頼度が低いため、熱流束の指標としてはヒーターの出力から求めた値を参考として用いた。

擬臨界点近傍における強制対流熱伝達流れにシャドウグラフを適用して可視化を行なった。シャドウグラフでは流体内部密度分布の二次微分値が輝度分布となって現れるが、これにより臨界点近傍で壁面から暗部の層が発生していることがわかった。これは温度、圧力が擬臨界点近傍であるときや、熱流束が一定以上大きいときのみに現れる現象であることがわかった。

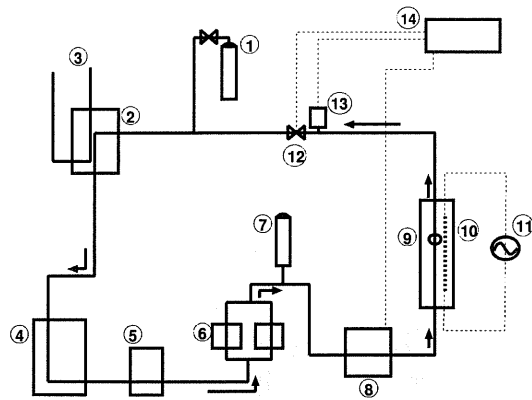
この現象を詳細に調べるため特に 8、9MPa での擬臨界点近傍で熱流束などを変化させ、これをシュリーレン干渉計を適用して可視化し、画像を 1000frame/s の高速度カメラを用いて撮影した。これにより特定の条件下において流体内に固有の密度勾配分布の変動をもつ流体塊が発生していることを発見した。図 3 にシュリーレン干渉計による計測例を示す。白色部分は光源に用いた He-Ne レーザーのビーム径であり、右側に伝熱面がある。シュリーレン干渉計では流体の密度勾配場が輝度分布として表現されており、本実験では暗部が密度が周囲に比べ高温により著しく低くなっている部分である。したがって干渉計画像で伝熱面近傍で暗部として表現されている部分が低密度の流体塊である。この流体塊は 1-2mm 程度の幅、高さを持ち、伝熱面近傍で一定の周期で発生し、主流に流され上昇していることがわかった。超臨界圧化では二相流は存在し得ないため、この流体塊と周辺流体との間に気泡のような界面は存在しないが、連続的ではあるが極めて大きな密度差を持った一定の大きさを持つ流体塊である。これは亜臨界の単相流での気泡とは画像上の見かけも異なり、超臨界流体における固有の現象であると思われる。

温度、圧力、流量、熱流束をパラメータにして流体塊の発生を調べると、擬臨界点近傍で流体内の局所密度が大きく差をとるような条件で強く傾向が見られた。特に温度、圧力が擬臨界点近傍の条件の際には流体の密度勾配が極めて大きくなるため、同じ熱流束に対しても流体塊のサイズは大きくなり、周辺流体との密度差も大きくなる。また、同一の温度、圧力、流量条件においては熱流束に比例して流体塊のサイズ、密度差は大きくなることわかった。この流体塊の発生は対象流れにおける自然対流の度合、即ちグラスホフ数で評価できる。そこでグラスホフ数を  $10^{15}$  オーダーの値で統一し、バルク温度と入熱は大きく異なる条件で実験したところ、グラスホフ数が近ければ入熱などの条件が全く異なっても密度場の状態がさほど変わらないことがわかった。

また、可視化計測で得た画像を相互相関法により解析した。相関法は微小時間で分布が移動した 2 枚の画像の輝度分布に対しパターンマッチングを行なう手法で、流れの構造に対応した輝度分布の移動量が求められる。干渉計などで得た画像から定量的に密度分布を求めることは不可能だが、流体塊やスペckルパターンなどが微小時間においては流れに追従して移動していると仮定すれば流速を推定することが可能である。

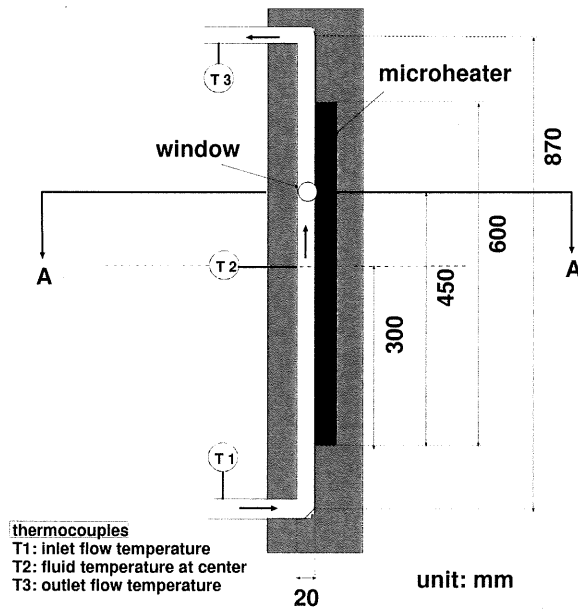
測定によって得た画像は高速度カメラによる 1000frame/s の時間分解能を持ち、これは流体の速度と比較して十分に速いため、連続画像として相互相関法に適用できる。これにより流速マップを計算した。このような超臨界流体の強制対流に対する画像流速測定は初の試みである。ここで、窓面の汚れ、光学計測の精度の限界などから画像情報に雑音が大きく乗っているため、流量計から得た平均流速から測定結果が遅れる誤差が見られた。そこで画像のノイズ除去のための定点での輝度分布の時間分散を基にしたバックグラウンド処理を施し、流体の移動が示す信号の精度を上げ、流速測定を改良して流路内の二次元流れの分布を得た。図 4 に 4 秒間 1000 枚の平均ベクトルの y 成分の例を示す。これらから、熱流束の上昇に伴って壁面近傍で流体の y 方向流速は上昇し、数 mm の位置でピークを持ちつつ移動していくことがわかった。これは壁面近傍で流体温度が高い部分は浮力の影響により加速されていることを示しており、既往の研究での予測と一致する。

以上のように本研究では超臨界流体の強制対流熱伝達流れに対し可視化測定を行なうとともに、流速分布計測を実行した。これにより超臨界流体中での強制対流内で高温低密度の流体塊が発生していることを示した。この流体塊は壁面とバルク温度の差で発生し、特に擬臨界点近傍条件で見られ、熱流束に比例して大きさ、密度差が増すことがわかった。このような密度場の変動に対して、一定のグラスホフ数である程度予測が可能であることを示した。これらの現象を示したことにより超臨界流体の伝熱現象に新たな知見を加えることができた。また得られた画像に対して相互相関法を適用し、流体の二次元速度場を取得した。超臨界流体の強制対流への画像計測手法適用はこれが初めての試みである。これにより流体内の速度分布が壁面で加速していることなどを確認した。

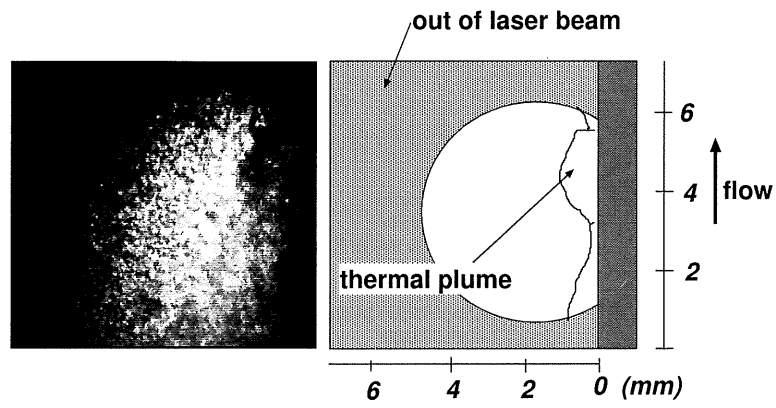


- |                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| 1 : CO <sub>2</sub> supply | 8 : Heating bath    |
| 2 : Condenser              | 9 : Test section    |
| 3 : Coolant water line     | 10 : Microheater    |
| 4 : Main tank              | 11 : Power supply   |
| 5 : Chiller unit           | 12 : Control valve  |
| 6 : Diaphragm pump         | 13 : Pressure gauge |
| 7 : Buffer tank            | 14 : Control unit   |

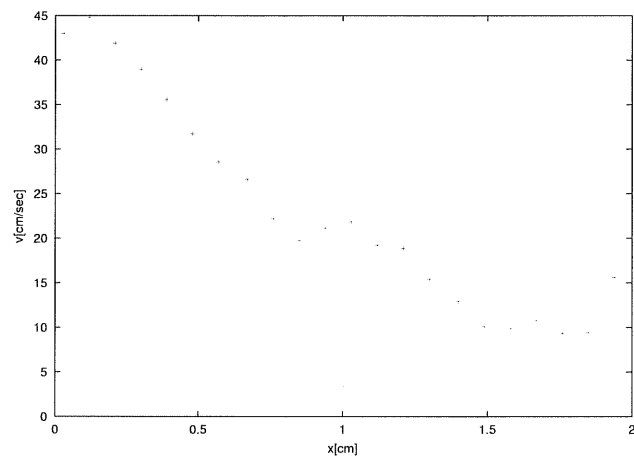
☒ 1: Schematic view of CO<sub>2</sub> loop



☒ 2: Schematic view of test section



☒ 3: Visualized image at supercritical pressure ( $P=9.0\text{MPa}$ ,  $T_{bulk}=42^\circ\text{C}$ ,  $q=210\text{kW/m}^2$ )



☒ 4: Background-processed mean velocity