

超臨界圧流体の管内層流熱伝達率整理式に関する検討

山下 徹*

Study on Heat Transfer Correlation for Supercritical Pressure Fluid in Vertical Laminar Flow

Tohru Yamashita*

Abstract In this study, dimensionless parameters such as Nusselt number and Prandtl number were examined for the heat transfer correlation for supercritical pressure fluid in vertical laminar flow, based on the data obtained by numerical calculation. From the examination, following results were obtained. (1) Nusselt number has a peak when the bulk temperature is slightly below the pseudo-critical temperature. (2) Relation of ratio of Nusselt number and ratio of Prandtl number can be divided into two regions. (3) At the region where bulk temperature is below the temperature of the peak $Nu_w/4.36$, Nusselt number can be described only with the ratio of Prandtl number.

キーワード : 超臨界圧, 層流熱伝達, 熱伝達整理式

Keywords : Supercritical Pressure, Laminar Flow, Heat Transfer Correlation

1. 研究背景および研究目的

超臨界流体とは、臨界圧力 P_{cr} 、臨界温度 T_{cr} ともに超えた流体をいう。特に、臨界圧力のみを超えたものは超臨界圧流体とよばれる。

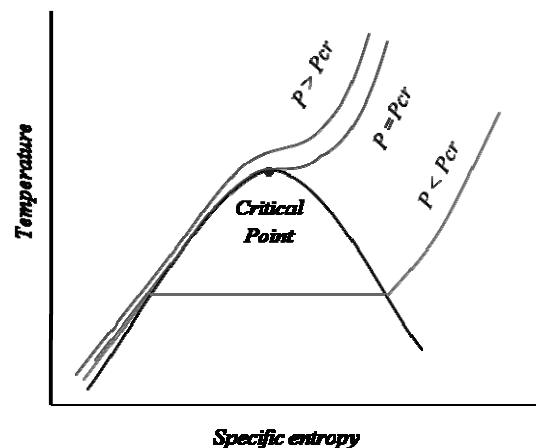
近年、超臨界流体の持つ高い流動性、拡散性（浸透性）および溶解性が注目されている。特に水 ($P_{cr}=22.12$ MPa, $T_{cr}=620.35$ K) と二酸化炭素 ($P_{cr}=7.38$ MPa, $T_{cr}=304.25$ K) は環境面に優れることから、従来の有機溶剤を用いてきた工業洗浄や食用特定成分の抽出など様々な技術分野での利用が期待され、また、さらなる利用拡大のために広い工業分野での研究および技術開発が行なわれている⁽¹⁾。

著者は、熱交換器による超臨界流体の製造および利用に関連した超臨界圧流体の熱伝達特性について、前報において超臨界圧流体の垂直上昇層流熱伝達に関する数値計算を行ない、その熱伝達特性を明らかにした⁽²⁾。本報では、数値計算で得られた結果に基づいて超臨界圧流体の層流熱伝達の整理式について検討を行なったので、これを報告する。

2. 超臨界圧流体について

図 1 は圧力の違いによる状態変化の違いを温度と比エンタルピーに対して示したものである。例えば大気圧におけ

る水のような臨界圧力より低い圧力 ($P < P_{cr}$, 以下、亜臨界圧と称する) で圧縮水を等圧で徐々に加熱すると、水はその圧力に対応した飽和温度で蒸発をはじめ、さらに加熱を続けると、飽和温度のまますべての水が蒸発し、過熱蒸気となって温度は再び上昇する。以上のように、亜臨界圧 (図中 $P < P_{cr}$) では水と蒸気が共存する飽和域が存在し、飽和温度において液体から気体へと温度に対して不連続に状態変化する。飽和温度は圧力の上昇にしたがって高くなり、これに伴って飽和域となる比エンタルピー範囲も小さくなり、ある圧力において水と蒸気が共存する飽和域が消滅する (図中 $P = P_{cr}$)。この圧力を臨界圧力といい、臨界圧力以上の超臨界圧領域では、物体は液体から気体へと連続的な

図 1 $T-s$ 線図

* 機械知能システム工学科
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering,
2627 Hirayama, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

状態変化を見せる（図中 $P > P_{cr}$ ）。

図2は、超臨界圧 26 MPa における水の温度に対する物性値を示したものである。図より分かるように、超臨界圧における物性値は比較的狭い温度領域で急激にかつ連続的に水の状態から蒸気の状態へ変化することがわかる。これは臨界圧力より低い圧力域にみられる飽和域の名残と考えられ、特に、定圧比熱が極大値をとる温度を擬臨界温度という。擬臨界温度は臨界温度より高く、また、圧力が高くなるほど高くなる。そのため臨界圧力を超えかつ臨界温度を超えた流体である超臨界流体とは、超臨界圧流体の中でも、物性値が急激な変化を示す擬臨界温度付近を含んだ領域の流体ということになる。なお、近年開発が進められている超臨界流体の利用技術の多くは、擬臨界温度近傍において急激に変化する物性値の中でも特に密度の変化がもたらす浸透性（物質への入りやすさ）と溶解性（物質の溶かしやすさ）の変化が大きいこと、およびこれらの特性が圧力および温度の調整によって容易かつ連続的に制御できることを活用したものである。

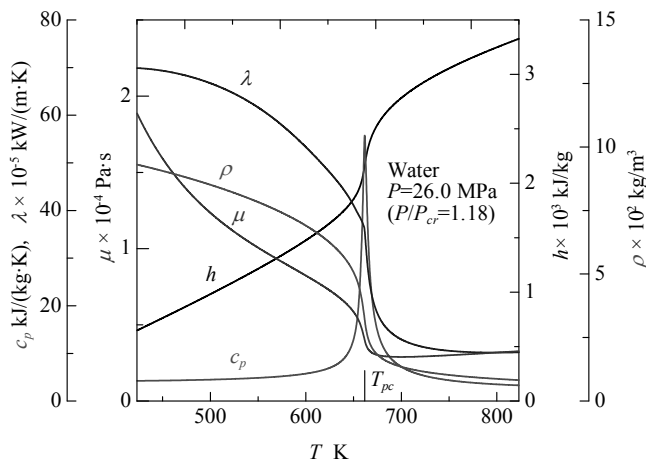


図2 超臨界圧水の物性値

3. 超臨界圧流体の層流熱伝達特性

超臨界圧流体の熱伝達については、主に 1950 年代から 1980 年代にかけて火力発電用ボイラの超臨界圧化やロケット燃料など大型機器を対象とした研究が進められ、強い物性値の温度依存性に起因した擬臨界温度近傍での熱伝達率の極大点の発生や、高熱流束条件においてみられる亜臨界圧でのバーンアウト現象にも似た熱伝達劣化現象など、超臨界圧流体特有の熱伝達特性が知られている⁽³⁾。しかしながら、これらの研究は大型機器を対象とすることから乱流についての事例が多く、層流熱伝達に関する超臨界圧流体の知見はいまだ不足している。そのためここでは、前報にて得られた数値計算による超臨界圧流体の層流熱伝達特性に

ついて説明する。

図3は、超臨界圧 26 MPa の水が管内径 0.1 mm、質量速度 300 kg/(m²·s) ($Re_b = 400 \sim 1040$) で流れるときの管内層流熱伝達特性について、主流体温度（以下、バルク温度と称す）に対する熱伝達率を、熱流束をパラメータとして示したものである。数値計算には HSMAC 法を用い、非圧縮性円筒流れの連続の式、ナビエ・ストークス方程式およびエネルギー式を物性値計算プログラム NIST REFPROP ver. 7.0⁽⁴⁾ と組み合わせることで温度による物性値変化を考慮している。なお図中には、定物性流れの熱伝達率として、式(1)で示される熱流束が一定である場合の管内強制対流熱伝達整理式⁽⁵⁾において、十分発達した流れとしたとして $x \rightarrow \infty$ としたときのヌセルト数 $Nu = 4.36$ に基づいて算出した熱伝達率を 2 点鎖線で示している。

$$Nu_x = 5.36 \times \left[1 + \left(\frac{70.0x/D}{RePr} \right)^{-1.11} \right]^{0.3} - 1.0 \quad \dots(1)$$

図より、超臨界圧における熱伝達特性は、定物性流れ、つまり亜臨界圧における熱伝達特性と似た傾向を示す。特にこの傾向は、ヌセルト数の定義式から分かるように、熱伝達率の変化によるものである。しかしながら、定物性流れではみられない超臨界圧特有の特性として、乱流と同様に擬臨界点近傍において熱伝達率が極大値を持つ傾向がみられる。熱伝達率の極大点は熱流束が増えるにつれて低バルク温度側に移動するとともに、その値が大きくなる傾向を示す。なお、層流においては、乱流にて知られている熱伝達劣化現象が発生する質量速度に対する熱流束 q/G の条件⁽⁶⁾においても、乱流の様な急激な熱伝達劣化の発生はみられないが、極大点となるバルク温度をやや超えた領域において、定物性流れの場合の熱伝達率を下回る、すなわち緩やかな熱伝達劣化の傾向が見られた。

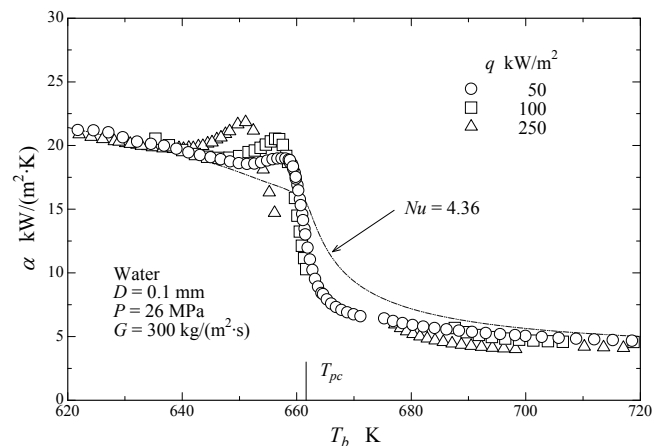


図3 バルク温度に対する熱伝達特性

図4は、異なる熱流束条件の数値計算で得られた熱伝達率がそれぞれ極大値を示すときの管断面における速度、温度、定圧比熱および熱伝導率の分布を示したものである。

図より、いずれの熱流束条件においても管壁近傍で定圧比熱が極大値となる時熱伝達率は極大値となる。また同図より高熱流束になるほど管中心までの高い熱伝導率の分布がみられ、これが熱流束が高くなるほど熱伝達率の極大値が増加する1つの要因と考えられる。

4. 熱伝達整理式に関する検討

前節に示したとおり、超臨界圧流体の熱伝達では、流れに垂直な方向の断面における物性値変化の影響が大きいため、垂臨界圧のような定物性流れを対象とした熱伝達整理式はもはや適用することができない。そこで本研究では、超臨界圧流体の管内層流熱伝達に適用可能な熱伝達整理式を提案することを目標に、十分発達した流れを対象として整理に用いるパラメータの検討を行なった。なお、超臨界圧においても例えば熱流束が極めて小さく温度境界層内での温度変化が微小の場合、熱伝達特性はほぼ定物性流れとみなすことができる。したがって、本研究で検討する熱伝達整理式については、定物性流れにおけるヌセルト数 $Nu = 4.36$ に対して、関連する無次元数または物性値の定物性流れの場合と管断面での物性値変化を考慮した場合の比からなる修正項を加えることで、超臨界圧流体の層流熱伝達整理式への拡張することを整理するうえでの指針とする。

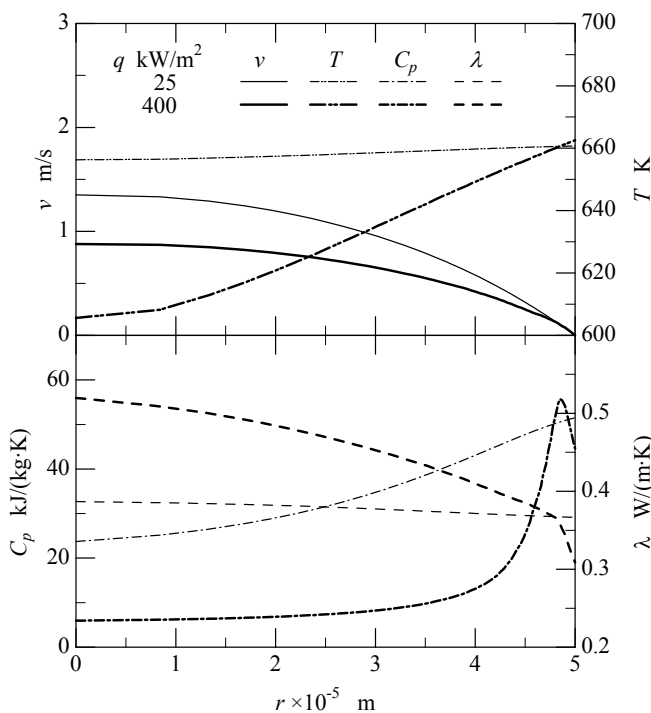
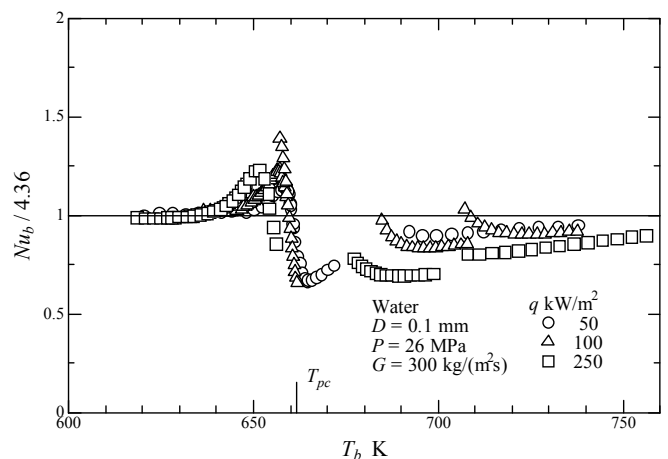
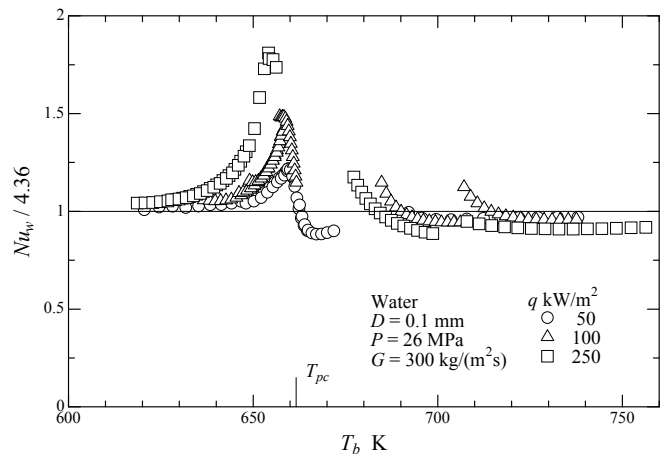


図4 熱伝達率の極大点における速度・温度・物性値変化

図5は、物性値をバルク温度基準で求めた場合と管壁温度基準で求めた場合のヌセルト数を、定物性流れにおける値4.36との比（以下、ヌセルト数比と称す）とし、バルク温度に対して熱流束をパラメータとして示したものである。図より分かるように、ヌセルト数比は、いずれの温度から算出した場合でも、管断面における物性値変化が顕著な擬臨界温度近傍において定物性流れに対して大きな偏差を示す。また、擬臨界温度より十分高い温度の領域では、バルク温度を用いた場合のヌセルト数は熱流束の違いによって大きなばらつきが見られるのに対して、管壁温度を用いた場合のヌセルト数は、バルク温度を用いた場合に比べて熱流束に対するばらつきが小さい。これは、この領域における超臨界圧流体の層流熱伝達が、通常の管内単相熱伝達と同様に流速の小さい管壁温度付近では熱伝導による伝熱が支配的であるためと考えられる。以上のことから、超臨界圧流体の管内層流熱伝達整理式においては、管壁温度より算出されるヌセルト数を用いることが望ましいと考えられる。なお、それぞれの場合のヌセルト数を次式に示す。



(a) バルク温度基準のヌセルト数を用いた場合



(b) 管壁温度基準のヌセルト数を用いた場合

図5 バルク温度に対するヌセルト数比の関係

なお、式中の添え字 b はバルク温度, w は管壁温度を表す.

$$Nu_b = \frac{\alpha D}{\lambda_b} \dots\dots\dots (2)$$

$$Nu_w = \frac{\alpha D}{\lambda_w} \dots\dots\dots (3)$$

擬臨界点近傍における熱伝達率の極大点発生には、管断面での定圧比熱、すなわちプラントル数が大きく影響する. 図6は、管壁温度を考慮した3種類のプラントル数のバルク温度に対する変化を熱流束をパラメータとしてそれぞれ示したものである. 上図は、プラントル数に含まれる定圧

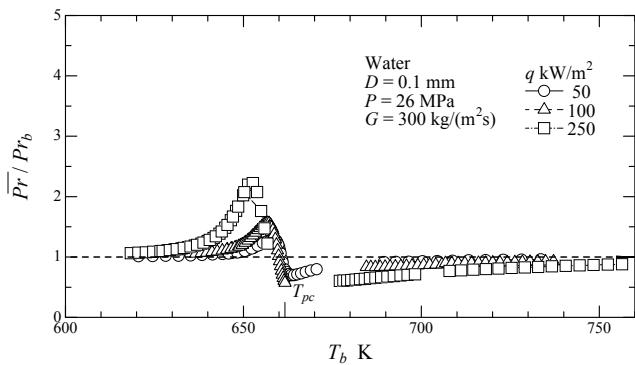
比熱の算出に式(4)に示す積分平均定圧比熱を用い、熱伝導率および粘性係数をバルク温度基準で求めた場合 (式(5)), 中図は、全ての物性値を管壁温度基準で求めた場合 (式(6)), 下図は、定圧比熱を管壁温度基準で求め、その他をバルク温度基準で求めた場合 (式(7)) で、それぞれバルク温度基準で求めたプラントル数との比 (以下、プラントル数比と称す) で示している.

$$\bar{c}_p = \frac{1}{T_w - T_b} \int_{T_b}^{T_w} c_p dT = \frac{h_w - h_b}{T_w - T_b} \dots\dots\dots (4)$$

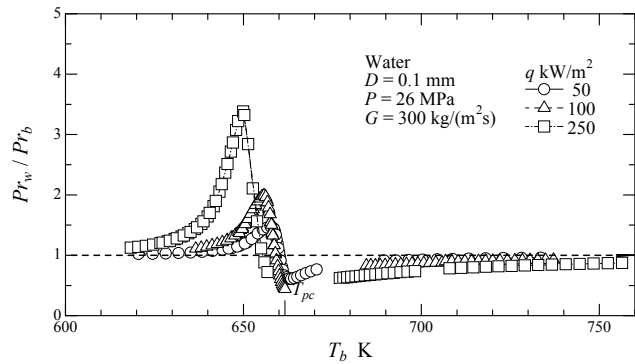
$$\frac{\bar{Pr}}{Pr_b} = \frac{\mu_b \bar{c}_p}{\lambda_b} \dots\dots\dots (5)$$

$$Pr_w = \frac{\mu_w c_{pw}}{\lambda_w} \dots\dots\dots (6)$$

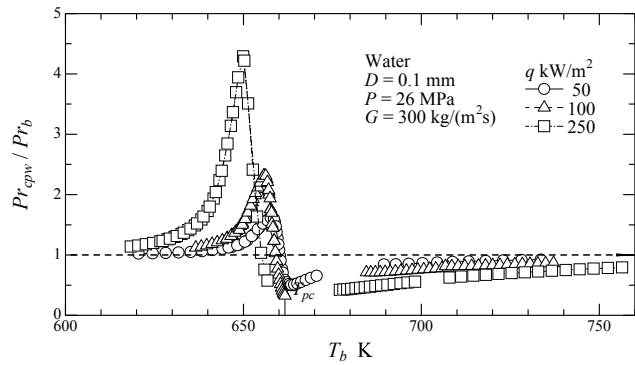
$$Pr_{cpw} = \frac{\mu_b c_{pw}}{\lambda_b} \dots\dots\dots (7)$$



(a) 積分平均定圧比熱を用いた場合



(b) 全て管壁温度基準で求めた場合



(c) 定圧比熱のみ管壁温度基準で求めた場合

図6 バルク温度に対するプラントル数比の関係

図より、プラントル数比の大きさに違いはあるものの、いずれの場合もヌセルト数比と同様に擬臨界温度近傍において定物性流れに対して偏差が見られる. また、その傾向がヌセルト数比に類似していることから、層流において超臨界圧流体が擬臨界温度近傍でみせる特異な伝熱現象が、流れに垂直な方向におけるプラントル数、特に定圧比熱の変化を主たる要因としていることが分かる.

表1は、図6に示したそれぞれのプラントル数比が極大となる点のバルク温度を示したものである. 表中には、ヌセルト数比が極大となる点のバルク温度も併記している. 表より、物性値の算出方法によって、極大となる点のバルク温度に違いがみられる. その中で、積分平均定圧比熱を用いた場合のプラントル数比は、他のプラントル数比に比べてヌセルト数比に良く一致している. 以上のことから、以降、本研究では管断面方向の物性値変化を積分平均定圧比熱で考慮したプラントル数比を用いて、データ整理を行った.

図7は、管壁面温度基準のヌセルト数比に対する積分定圧比熱を用いたプラントル数比の関係を熱流束をパラメータとして両対数軸で示したものである. 図より、プラント

表1 バルク温度に対するプラントル数比の関係

T_b [K]	q [kW/m ²]		
	50	100	250
$Nu_w/4.36$	659.7	657.0	654.6
Pr/Pr_b	658.7	656.9	652.2
Pr_w/Pr_b	657.8	655.8	649.7
Pr_{cpw}/Pr_b	658.1	656.0	649.8

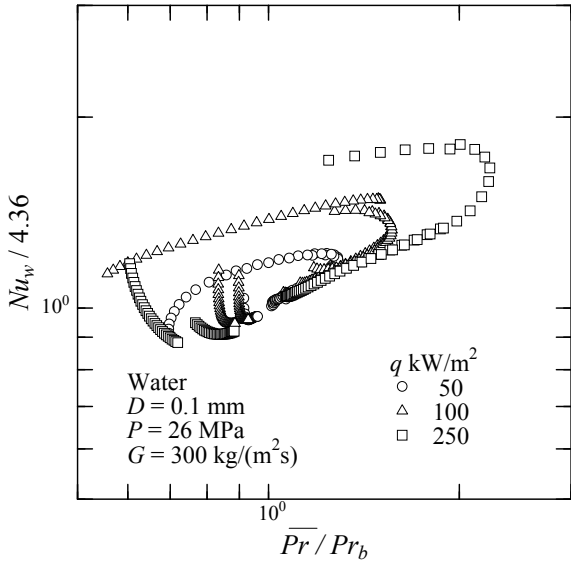


図7 ヌセルト数比に対するプラントル数比の関係

ル数比に対するヌセルト数比は、各熱流束条件ともに輪状の分布を示すことが分かる。熱流束が大きいほど分布は広くなるが、これは、熱流束が大きいほどバルク温度と管壁温度の差が大きくなり、バルク温度でのプラントル数と管断面での温度変化を考慮したプラントル数に顕著な差が生じるためである。本研究では、得られた分布について、図3と比較した結果、図7の分布が以下に示す2つの領域に分類されることがわかった。

(1)下弦側の領域

この領域は、熱伝達率が極大となるバルク温度以下の温度領域に該当する。この領域では、プラントル数比に対するヌセルト数比の関係が熱流束によらずほぼ一定かつ指数関数的となる。つまり、等しい流量条件であれば、ヌセルト数比はプラントル数比のみの関数として整理することができる。

(2)上弦側の領域

この領域は、熱伝達率が極大となるバルク温度以上の温度領域に該当する。この領域においてもプラントル数比の変化に対するヌセルト数比の変化の傾向は、熱流束によらずほぼ同程度の指数関数で表される。しかしながら、熱流束が大きくなる程、ヌセルト数比が大きくなる傾向がみられ、つまり、整理する上で、プラントル数比以外のさらなるパラメータを必要とする。

なお、今回の研究では、(1)の下弦側の領域を対象として、整理式の検討を行なったところ、式(8)に示すように、ヌセルト数比 $Nu_w/4.36$ は、プラントル数比 \overline{Pr}/Pr_b の0.4821乗に比例する結果となった。

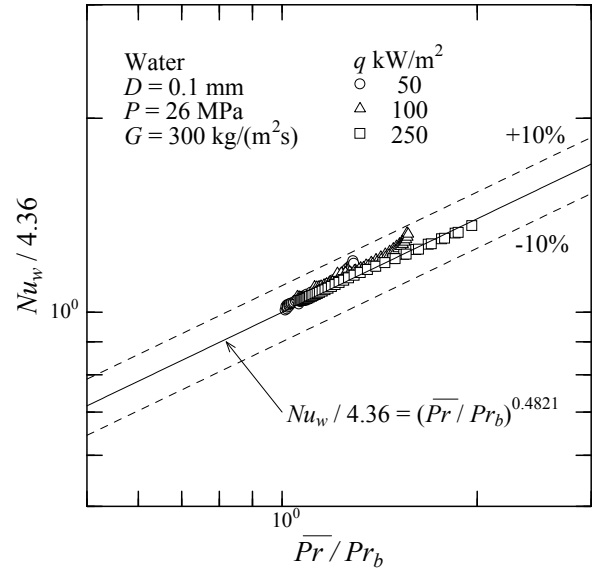


図8 ヌセルト数比に対するプラントル数比の関係

$$\frac{Nu_w}{4.36} = \left(\frac{\overline{Pr}}{Pr_b} \right)^{0.4821} \dots\dots\dots (8)$$

図8は、図7における下弦側領域のデータのみを抽出し示したものである。図中、本研究で得られた式(8)の計算値について実線および式(8)の計算値の±10%については破線で示している。図より分かるように、今回整理に用いたデータは、±10%の範囲内で全てが含まれる。なお、次式で定義される標準偏差は2.3%となり、比較的良好一致がみられた。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Nu_w - Nu_{weq}}{Nu_{weq}} \times 100 \right)^2}{n}} \dots\dots\dots (9)$$

4. 結論と今後の展望

超臨界圧流体の層流熱伝達について、過去に数値計算より得られた結果に基づいて、熱伝達整理式についてのパラメータ検討を行なった。以下に結論を示す。

- ヌセルト数は、主に擬臨界点近傍で大きく変化し、極大点を示す。また、管壁温度を基準とした場合が、バルク温度を基準とした場合に比べてデータのまとまりが良く、整理する上で適切である。
- バルク温度に対するヌセルト数比とプラントル数比の関係は、擬臨界温度近傍での傾向に類似点がみられる

など、高い相関性がある。また、プラントル数の算出については、積分平均定圧比熱を用いた場合が極大点となるバルク温度に最も高い一致がみられる。

- ヌセルト数比との相関性擬臨界温度を境界として低温側と高温側にその傾向が大きく二分される。そのうち、低温側は、熱流束の違いによる差異が小さく、ヌセルト数比はプラントル数比のみの関数として表すことができる。

今後は、擬臨界温度より高温側についての整理を行なうとともに、異なる質量流量条件での数値計算を行ない、得られた結果にもとづいて更に一般化された熱伝達整理式の提案、さらには伝熱実験による測定値との比較検証を行なう必要がある。

(平成 24 年 9 月 25 日受付)
(平成 24 年 10 月 25 日受理)

参考文献

- (1) 例えば T. Adschiri et. al. : “Noncatalytic Conversion of Cellulose in Supercritical and Subcritical Water”, J. Chem. Eng. Jpn., Vol.26, No.6, pp.676 - 680 (1993).
- (2) 山下 徹 : 「超臨界圧流体の垂直上昇層流熱伝達に関する数値計算」, 八代高専紀要, 第 30 号 pp.13 - 29 (2008).
- (3) J. D. Jackson and W. B. Hall : “Forced Convection Heat Transfer to Fluids at Supercritical Pressure”, Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles edited by S. Kakaç and D. B. Spalding, Hemisphere Pub., Vol.2, pp.563 - 611 (1979).
- (4) E. W. Lemmon et al.: “NIST Reference Fluid Thermo-dynamic and Transport Properties (REFPROP) Ver.7.0”(2002).
- (5) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第 4 版, 丸善 (2003).
- (6) K. Yamagata et al. : “Forced Convective Heat Transfer to Supercritical Water Flowing in Tubes”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.15, No.12, pp.2575 - 2593 (1972).