

論文の内容の要旨

論文題目 Cooling Heat Transfer of Supercritical Carbon Dioxide (超臨界二酸化炭素の冷却伝熱に関する研究)

氏名 党 超鋌

地球温暖化防止とオゾン層保護などの要請から代替冷媒の研究と冷凍空調システムの省エネ化は重要な課題となっている。その中で、1990年代よりヨーロッパを中心に、自然冷媒の研究が盛んに行われるようになった。特に二酸化炭素は毒性、可燃性が無いなどのメリットがあり、給湯器、カーエアコンの冷媒として従来の冷媒並みの効率があるため、注目を集めている。二酸化炭素ヒートポンプサイクルの特徴の一つとして挙げられるのは、高压側が臨界点を超えて遷臨界サイクルになることである。ガスクーラ内の冷却過程には相変化が無いにも関わらず、擬臨界点付近での冷媒物性値の急激な変化により、今までの二相凝縮伝熱或いは定物性冷却と異なる特性を持つため、詳細な検討が必要である。

そこで本研究は管径 1mm~6mm の四種類の伝熱管を対象として、質量流束、圧力と熱流束をパラメータとして広い範囲での熱伝達率と圧力損失の実験測定を行い、各パラメータによる伝熱特性を把握し、伝熱相関式の作成を試みた。そして、数値計算により理論解析をするため、いくつかの乱流モデルの超臨界圧冷却伝熱への適用性について検討した。更に、ガスクーラ内での伝熱予測を念頭に少量な潤滑油の混入が超臨界伝熱に与える影響を詳しく実験的に把握し、潤滑油により伝熱の低下を明らかにした。

本研究の主要な結果は以下のようにまとめた。

(1) 実験測定から各パラメータの熱伝達率と圧力損失への影響について検討した。

図 1~4 に各パラメータの熱伝達率の影響を示した。比較のため、JL の低レイノルズ数 $k\text{-}\epsilon$ モデルを用いた数値計算結果も合わせて示している。

図 1 に示しているように、一定の圧力、質量流束条件では、膜温度（バルク温度と壁面温度の平均値）が擬臨界温度近くになる時に熱伝達率が最大値を取る。これは、擬臨界点が壁面付近の乱流境界層中の遷移層に存在する時に熱伝達率が大きい値をとることを意味している。質量流束が大きくなるに従って、乱れの程度が大きくなるため、熱伝達率が上がる。

図 2 に熱伝達率への圧力の影響を示す。膜温度を横軸にすると、各圧力条件での熱伝達率のピークはそれぞれの擬臨界温度に現れるのが特徴である。また圧力が高くなると、熱伝達率の最大値が急激に低下している。

図 3 に熱伝達率への熱流束の影響を示す。熱流束が高くなると、熱伝達率の最大値は少し低くなっている。これは熱流束が高くなるに従って、管壁面から中心までの温度差が大きくなり、比熱の大きい値をとる領域の管断面に占める割合が小さくなるため。また、擬臨界温度より低温側では熱流束が熱伝達率にあまり影響しないように見え、高温側では熱流束が高くなるほど熱伝達率は高い値をとる。この傾向も断面内での物性分布、特に壁面付近の熱伝導率と定圧比熱の影響のつりあ

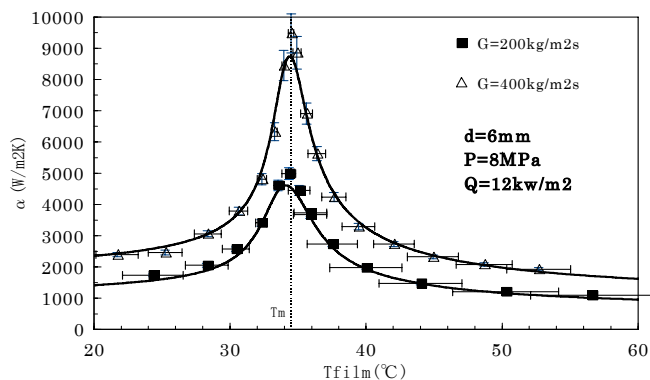


Fig.1 Effect of mass flux on heat transfer coefficient

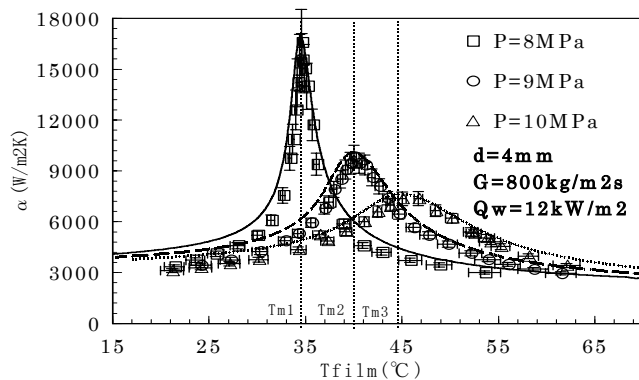


Fig.2 Effect of pressure on heat transfer coefficient

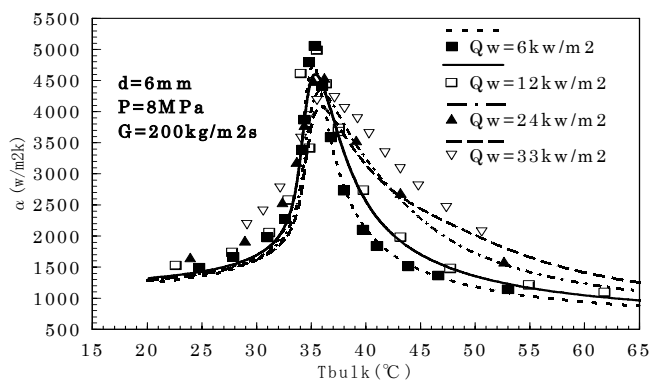


Fig.3 Effect of heat flux on heat transfer coefficient

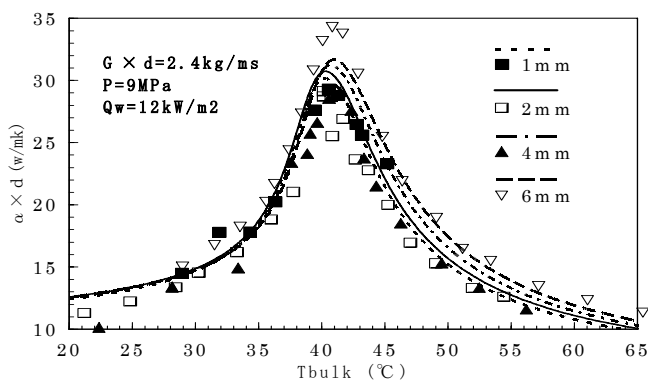


Fig.4 Effect of tube diameter on heat transfer coefficient

いによるものである。

図 4 に熱伝達率に対する伝熱管管径の影響を示す．縦軸はヌッセルト数の代わりに有効熱伝達率 ($\alpha \times d$) を用い、内径の異なる伝熱管が擬臨界温度より低温側では定物性伝熱と同様に、有効熱伝達率は管径と無関係のように見えるが、高温側では有効熱伝達率は管径が細いほど小さくなる傾向が見える

尚、圧力損失については、2mm 管と 1mm 管についてのみ得られた．細管の場合、比較的熱伝達率が高く、管内での壁面と中心部の温度差が小さいため、定物性の摩擦損失相関式が近似的にそのまま使えることが実験より明らかになった．さらに、擬臨界温度より低温側では超臨界流体が液体のような性質を示し、摩擦圧力損失が圧力によらず、ほぼ一定の値になる．一方、擬臨界温度より高温側では、圧力が高くなると摩擦圧力損失が小さくなり、気体のような振る舞いを示している．

(2) 熱伝達率の実験結果と従来の相関式と比較すると、両者のずれが大きいことから、定物性条件でよく使われている Gnielinski の式を修正し、適切な代表温度を選ぶことで新たな式を提案した．この式を用いて、本研究で測定した 474 個の有効測定値の 95% は相関式による結果とのずれが $\pm 20\%$ 以下におさまった．

(3) いくつかの乱流モデルを超臨界圧流体冷却伝熱に対して応用する場合について検討した．

混合距離モデル (BR モデル) と三つの低レイノルズ数 $k-\epsilon$ モデル (JL モデル, LS モデルと MK モデル) を用いて定物性条件、超臨界加熱条件及び超臨界冷却条件で比較した．LS モデルは壁面付近での減衰関数 f_w が小さいため、定物性条件の高プラントル数流体に対して予測値が小さいことを以前から指摘されている．図 8 に四つの乱流モデルを用いて超臨界圧二酸化炭素加熱条件での測定

値（田中ら，1967）と比較した結果を示した．また，図9に超臨界圧二酸化炭素冷却条件での測定値と比較した結果を示した．四つの計算モデルは定性的に同じ傾向を示しているが，LSモデルの計算結果は実験値よりかなり小さい．更に加熱状態と比べ，冷却状態ではこのずれが大きくなる．これは主に壁面付近での粘性の分布によるものと考えられる：超臨界流体の粘性は温度に対し反比例するため，冷却状態では壁面付近の f_{μ} が小さいほど乱流エネルギーの生成が抑えられ，壁温が降下する．それに従って壁面付近での粘性が増加し，乱流エネルギーの生成が更に遅くなる．このような正のフィードバックにより，加熱状態と比べ冷却状態のほうがLSモデルは他モデルよりかなり小さく熱伝達率を評価するものと考えられる．

JLモデルでは壁座標 y^+ のような物性で無次元化したパラメータを含んでいないため，変物性伝熱へ適用する際に特別な考慮は要らない．一方，BRモデルとMKモデルでは f_{μ} の中に y^+ がパラメータとして含まれている．冷却条件では，壁面より離れる方向に密度と動粘性が小さくなるため，BRモデルとMKモデルで予測した乱流エネルギーの成長は定物性状態より速くなる傾向がある．この影響は，熱流束が大きいほど顕著である．図7にMKモデルで求めた熱伝達率への熱流束の影響を示す．擬臨界温度付近では実験値と異なった傾向が見られる．実験結果もJLモデルの予測結果も熱流束が増加するに従って，熱伝達率は少し下がる傾向が見られたが（図3），MKモデルでは熱流束が高いほど熱伝達率が上がる傾向を示している．この矛盾はGoldmannの理論（ y^+ を求めるとき局所的な物性ではなく，壁面からの積分で計算する手法）を利用してある程度緩和できる．図8にこの結果を示す．Goldmannの理論を用いて計算すると，MKモデルは熱流束の増加に従って熱

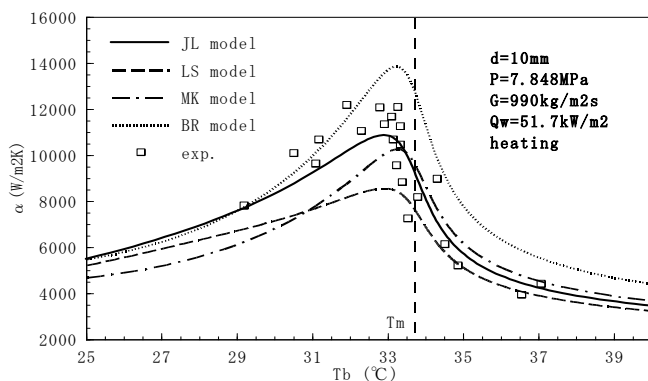


Figure 5 Comparison of heat transfer coefficients calculated by different turbulence models at heating condition.

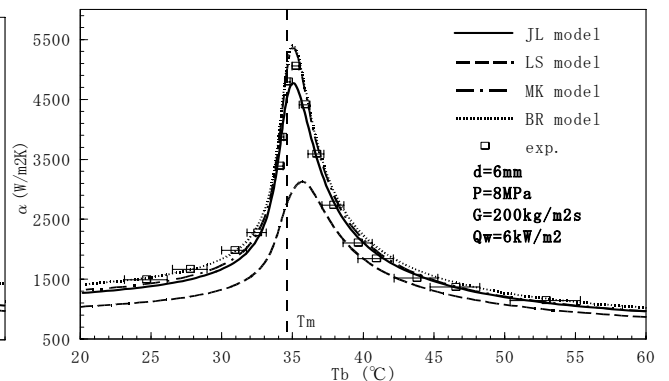


Figure.6 Comparison of heat transfer coefficient calculated by different turbulence models at cooling condition.

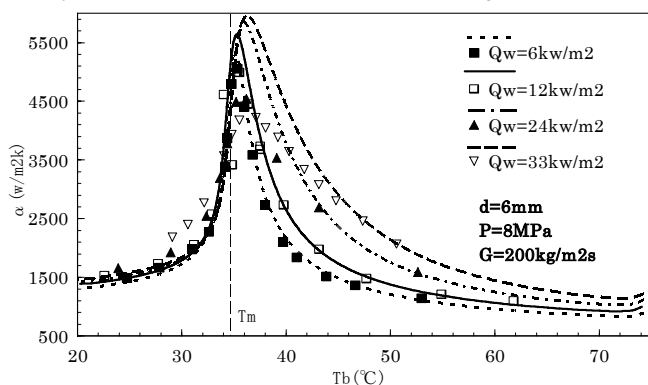


Figure 7 Effect of heat flux on heat transfer coefficient (MK model)

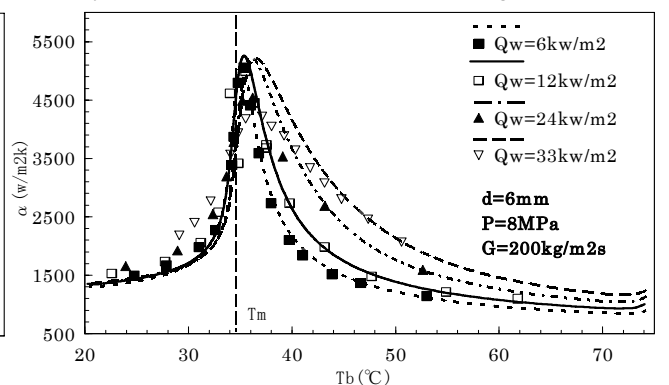


Figure 8 Effect of heat flux on heat transfer coefficient (MK model with Goldmann's theory)

伝達率のピークが低下し、実験と一致する結果を示した。BR モデルでも同じ傾向を見られる。

なお、熱伝達率への乱流プラントル数 Pr_t の影響を調べるため、MK の乱流プラントル数モデルを用いて計算した。 Pr_t に一定値(0.9)を与えた場合の熱伝達率の計算結果と比較すると、両者の差は3%程である。更に、Reynolds のアナロジーを用いて Pr_t に 1.0 を与えて計算した結果、 $Pr_t=0.9$ の計算結果とは最大 4%の差より、本研究の計算条件範囲では乱流プラントル数の影響が小さいことが分かった。

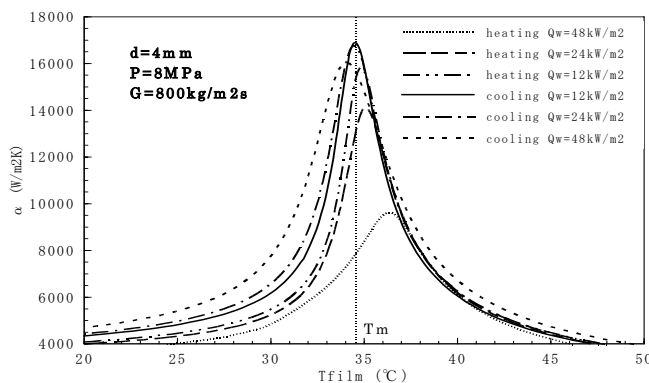


Figure 9 Comparison of heat transfer coefficients between heating and cooling conditions with heat flux as parameters.

(4) JL の低レイノルズ数 k - ϵ モデルを用いた数値計算から、熱伝達率の値は管断面内での擬臨界温度の位置と緊密に関係していることを明らかにした。擬臨界温度は管断面温度境界層内の遷移層に存在するとき、遷移層の乱流温度伝導度が大きい値をとるため、熱伝達率が最大値をとる。この遷移層の温度は膜温度を用いて表現すれば、近似的に膜温度が擬臨界温度になる断面では熱伝達率が大きい値をとると推定できる。図 9 に冷却条件と加熱条件での熱伝達率の比較を示した。冷却条件では壁面付近の熱伝導率が加熱条件のそれより大きいから、熱伝達率は加熱条件のそれより大きい。更に熱流束の熱伝達率への影響では、熱流束の絶対値が大きくなる時、冷却条件での熱伝達率は少し低下すると比べ、加熱条件では激しく低下する傾向が見られる。

(5) 熱伝達率および圧力損失に対する潤滑油の影響は、少量の潤滑油 (0.5%) の混入で熱伝達率が平均的に 20-30%低下し、擬臨界温度付近では最大 50%の伝熱低下が発生する。ただし、この程度の潤滑油の混入は圧力損失にはあまり影響を示さなかった。CO₂-オイル混合物の粘性が油濃度 0.5%の場合約 0.7%しか増加しないため、熱伝達率の低下は壁面付近を流れる油層の熱抵抗によるものと考えられる。油層に流れるオイル流量は CO₂ 中混入したオイル流量の 5%として与え、数値計算によりオイル混入状態での熱伝達率をおおよそ予測できた。この結果を図 10 に示した。更に、油層内の流動は層流であるため、油層の厚みを計算するモデルを構成し、この油層の熱抵抗と CO₂ 側の熱伝達率をそれぞれ計算することで、実用的な場合におけるオイル混入状態での熱伝達率の予測手法を提案した。

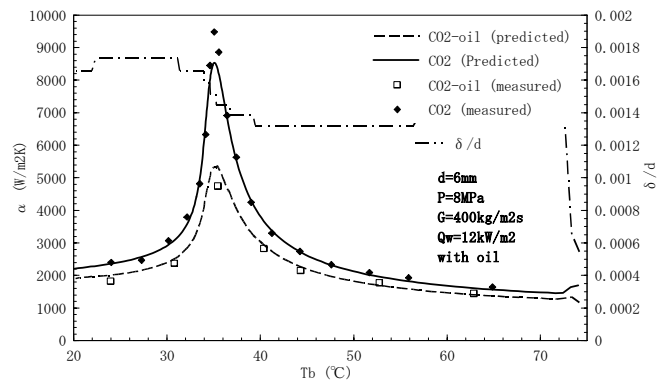


Figure 10 Effect of oil on heat transfer coefficient.

なお，本論文は7章からなっている．

第一章：緒言

第二章：実験装置

第三章：実験条件とデータの整理方法

第四章：実験結果と考察

第五章：超臨界圧流体の数値計算

第六章：熱伝達率と圧力損失への潤滑油の影響

第七章：結論