

潤滑油が混入した超臨界二酸化炭素の管内冷却熱伝達率に関する研究

66807 杜 学寧
指導教員 党 超鋌 講師

It was reported that compared to pure carbon dioxide (CO₂) condition, with lubricating oil entrained the heat transfer coefficient decreased and the pressure drop increased. In this research, in order to clarify the heat transfer mechanism of supercritical CO₂ with oil, visualization experiments were conducted using a sight glass in a tube with an inner diameter of 2.4 and 6 mm. From visual observation it is confirmed that this heat transfer deterioration are due to the forming of oil-rich layer along the inner wall of the test tubes. In addition, cooling heat transfer coefficient and pressure drop of CO₂ with small amount of oil in several internally finned tubes were measured. Comparing these finned tubes to smooth one, the ratio of increase of heat transfer coefficient is larger than that of pressure drop. This paper also presents measurements of solubility of CO₂ with lubricating oil at different pressures and temperatures.

Key words: CO₂, Supercritical, Lubricating oil, Heat transfer coefficient, Solubility

1. 緒言

二酸化炭素（以下 CO₂）ヒートポンプには大きな期待が寄せられており、超臨界二酸化炭素の冷却熱伝達の研究は多くなされているが^{1) 2)}³⁾、実機において、サイクルに混入する圧縮機用オイルが熱伝達特性に与える影響についての知見が不足している。本研究では、サイトグラスを用いて、平滑管内の CO₂-oil 混合物の流動を可視化し、オイル混入時の熱伝達率のデータ³⁾と比較することで、オイルの与える影響について考察した。また、高性能熱交換器として期待されている内面溝付管内の熱伝達率、圧力損失を測定した。最後に、CO₂-oil 混合物の流動様式を解明するために、CO₂ はオイルへの溶解度も測定された。

2. 実験装置

2.1 オイル混入の熱伝達率の測定

オイル混入実験は圧縮機サイクルを用い、測定を行う。Fig.1 が実験サイクルの概略図である。サイクルはメインループとテストループから成り立つ。太線で囲んだメインループは通常のヒートポンプである。メインループで所定の温度、圧力に調節した冷媒を適当な流量に分流しテストループに入れる。テストループのサイトグラスで CO₂-oil 混合物の流動状態を撮影し、サン

プリングセクションでオイル濃度を測定する。オイル混入条件は圧縮機サイクルを用いた。圧縮機サイクルの概略図を Fig.1 に示す。本実験ではオイルポートから供給されるオイルの体積流量と密度を測定することでオイル流量を測定した。また圧縮機から CO₂ と共に排出されるオイルは圧縮機出口のオイルセパレータで分離され圧縮機入口に戻される。テストセクションで熱伝達率、圧力損失を測定し、サンプリングセクションでオイル濃度を測定した。

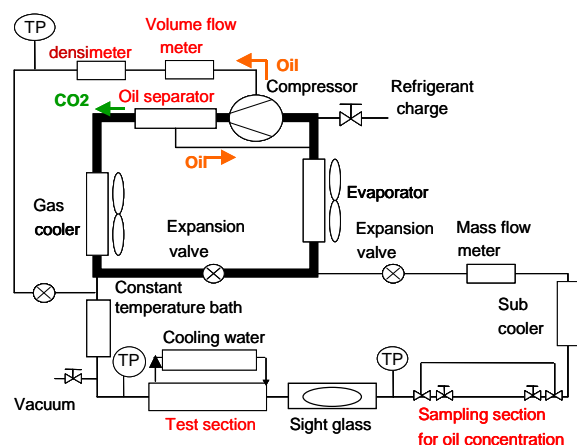


Fig.1 Schematic diagram of compressor cycle.

2.2 純冷媒の熱伝達率の測定

純冷媒実験はポンプサイクルを用い、測定を行う。Fig.2 が純冷媒サイクルの概略図であ

る。サイクルはギアポンプ、質量流量計、インタークーラ、入口温度調節用恒温水槽、テストセクション、クーラ（恒温水槽）で構成されている。冷媒はギアポンプにより循環させ、流量計を通して流量を測定した後、恒温水槽でテストセクションの入口温度を調節する。テストセクションで二酸化炭素の熱伝達率と圧力損失を測定した後、クーラで更に5℃まで温度を下げ、ポンプに戻される。サイクル内の圧力は二酸化炭素の充填量で調節し、流量はポンプの回転数で制御する。また、流量の微調整用にポンプ入口と出口間にバイパス回路を設けた。

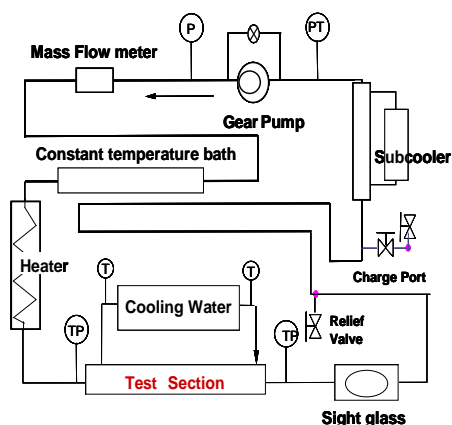


Fig.2 Schematic diagram of pump cycle.

2.3 ストセクション

テストセクションの概略図を Fig.3 に示す。内側の伝熱管は銅製の内面溝付管である。実験で用いた内面溝付管の仕様を Table 1 に示す。テストセクションは長さ 800mm（冷却部 500mm の前に 300mm の助走区間を設けた）の二重管式対抗流熱交換器であり、熱伝達率測定のために CO₂ の入口と出口、冷却水の入口と出口、伝熱管の外表面温度を測定した。

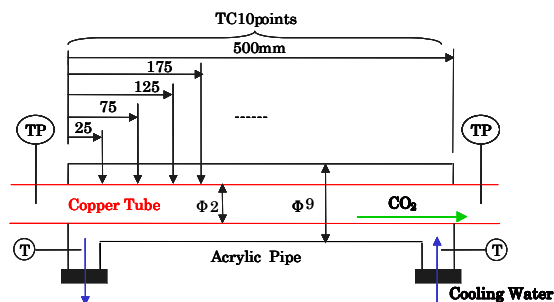


Fig.3 Schematic diagram of test section.

Table 1 Fin tube specification.

外径	内径	フィン高さ	溝数	リード角	面積拡大率
2.646mm	1.996mm	0.117mm	40	0 °C	2

2.4 溶解度測定方法

実験装置の概略図を Fig.4 に示す。まず、サイクルを真空に引いて、CO₂ とオイルを平衡注入し、ポンプで CO₂ とオイルの混合物を循環させた。密度計、圧力計が安定な値になってから、混合物は平衡状態に到達すると判定し、それから、サンプリングして溶解度を測定した。

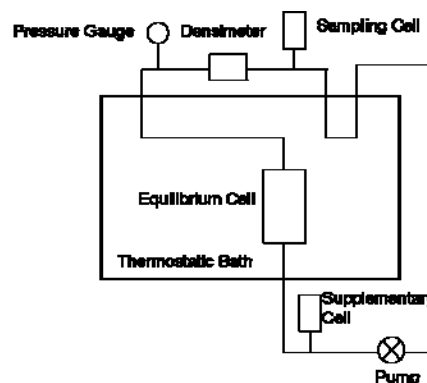


Fig.4 Schematic diagram of solubility cycle

2.5 オイルと CO₂ の流量比と存在比の測定

実験装置の概略図を Fig.5 に示す。メインループ、テスト回路から成り立つ。オイルの流量を測定するためにオイルループを付け加えた。圧縮機のオイルポートから出たオイルは体積流量計、密度計を通り、温度、圧力を測定した後、テスト回路に入れる。オイルの流量はテスト回路直前の流量調節ニードルバルブで調節する。圧縮機から冷媒と共に排出されるオイルは圧縮機出口に設けたオイルセパレータで冷媒と分離され、圧縮機入口に戻される。

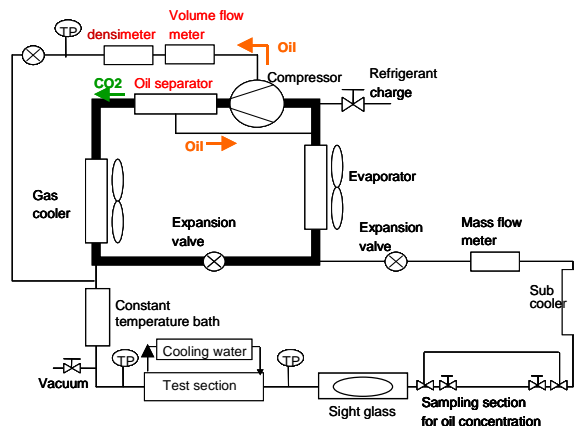


Fig.5 Schematic diagram of pump cycle. (For oil rate and abundance rate)

3. 結果と考察

3.1 実験条件

実験条件を Table 2 に示す. 数字が示す意味は, (4) ~ (12) が熱伝達率, (13) ~ (18) が圧力損失である. 純冷媒実験はポンプサイクル, オイル混入実験は圧縮機サイクルで実験を行った.

Table 2. Experimental conditions.

ID (mm)	Mass Flux (kg/m ² s)	Heat Flux (kW/m ²)	Oil concentration (%)	Pressure (MPa)		
				8	9	10
2	400	24	0, 1, 3, 5	4	5	6
	800			7 (13)	8 (14)	9 (15)
	1200			10 (16)	11 (17)	12 (18)

3.2 純冷媒熱伝達率実験と圧力損失結果

熱伝達率のグラフは, 横軸に伝熱管内の CO₂ 主流温度, 縦軸に熱伝達率をとって作成した. 圧力損失のグラフは, 横軸に伝熱管内の CO₂ 主流温度, 縦軸に圧力損失をとって作成した. それに, 濃いマークと薄いマークはそれぞれリード角 0° 溝付管とリード角 6.3° 溝付管の結果である. グラフ上のエラーバーは伝熱管入口から出口温度までの温度変化を表しており, エラーバーにあるドットは伝熱管入口温度と出口温度の平均である. 熱伝達率はこの温度範囲での平均熱伝達率であり. 0%(cal)の実線で示された値は本研究室の先行研究で提案された純冷媒の平滑管における伝熱相関式に実験条件を代入して得られた計算値を 2 倍 (面積拡大率) したものである. 凡例の 1, 3, 5% はサンプリング法で測定したオイル存在比であり, カッコ内はその条件でのリード角度を示す.

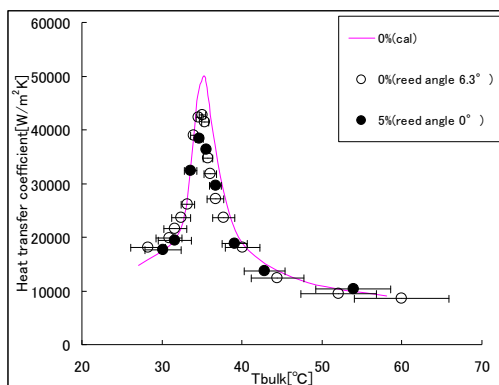


Fig.6 Heat transfer coefficient vs. temperature

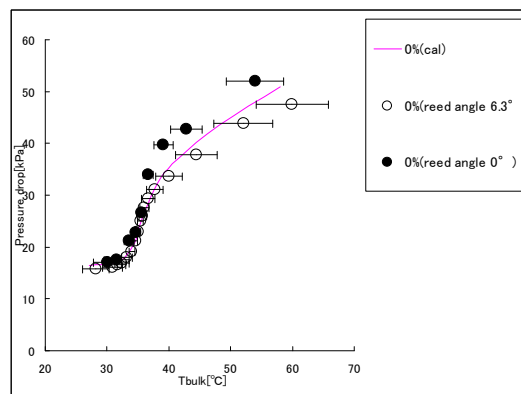


Fig.7 Pressure drop vs. temperature. (d = 2mm, P = 8MPa, G = 1200kg/m²s)

純冷媒の場合, リード角 0° 内面溝付管とリード角 6.3° 内面溝付管の熱伝達率の実験値が平滑管の計算値の約 2 倍になっている. それに, 測定のばらつきがあるが, リード角 0° 内面溝付管とリード角 6.3° 内面溝付管の圧力損失も同じとなり, 平滑管の計算値に比べて約 2 倍となった. それは, リード角による圧力損失の影響があまりないと考える.

3.3 オイル混入熱伝達率実験と圧力損失結果

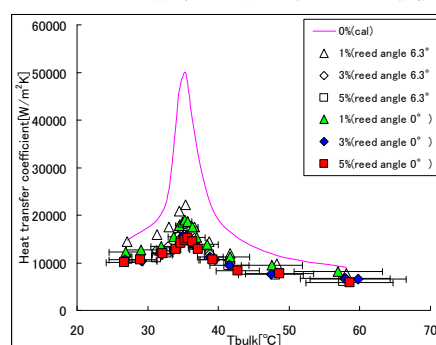


Fig.8 Heat transfer coefficient vs. temperature

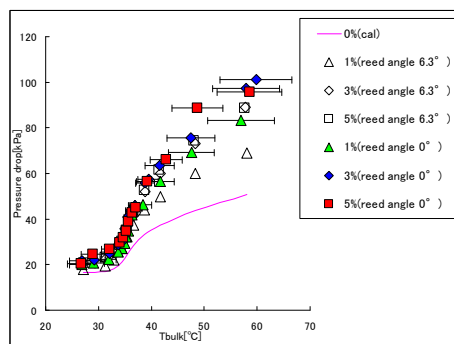


Fig.9 Pressure drop vs. temperature. (d = 2mm, P = 8MPa, G = 1200kg/m²s)

リード角 0° 溝付管とリード角 6.3° 溝付管は、オイルの混入によって、熱伝達率の低下となったのは、管内壁面に形成されたオイル膜が熱抵抗となり、 CO_2 の強制対流熱伝達性能を障害したからである。2種類の溝付管とも、オイル濃度1%の場合、擬臨界温度よりも低温側と高温側は、低温側の方がオイルの影響による熱伝達率の低下が小さくなる傾向があった。それは、 CO_2 温度が擬臨界温度よりも低温になると、 CO_2 のオイルへの溶解度が上昇し、オイルの粘性が低くなり、管壁面との表面張力が小さくなり、オイル液膜が形成されにくくなる。低温側における熱伝達率が上昇するのは、熱抵抗となるオイル液膜の厚さが薄くなっているためであると考えられる。逆に、擬臨界温度より高温になると、オイル膜が薄くなる。

オイル濃度1%の場合、擬臨界温度より高温側内に、リード 0° 内面溝付管とリード 6.3° 内面溝付管の実験値は大きな違いはない。一方、擬臨界温度より低温側内に、リード角 6.3° 内面溝付管のほうが高い熱伝達率を持つ。それは、擬臨界温度より低温側は、 CO_2 はオイルへの溶解度が大きいいため、オイルの粘性が小さくなり、管壁面との表面張力も小さくなり、バルク領域に飛ばされやすく、管壁面に付着するオイルの膜が薄くなる。リード角がある影響で、 CO_2 の流れが管断面方向の乱れが生じ、さらにオイル膜の形成を障害し、リード 6.3° 内面溝付管はリード 0° 内面溝付管よりオイル膜が薄くなる。リード 6.3° 内面溝付管のほうが熱伝達率は高くなったと考える。

3.4 オイルと CO_2 の存在比と流量比の結果

存在比と流量比の結果は、横軸にオイルと CO_2 の存在比、縦軸にオイルと CO_2 の流量比をとって作成した。

スリップ比は1というのは、オイルと CO_2 の速度が同じあること。スリップ比が1の直線に近づくほど、オイルの平均スリップ比(CO_2 の速度に対するオイルの速度の比)が大きくなり、バルク領域を流れるオイル液滴の割合が増え、壁面のオイル膜は薄くなっていると考えられる。グラフから、圧力が高い、質量流速が大きいほうがオイルの平均スリップ比は大きくなることわかる。

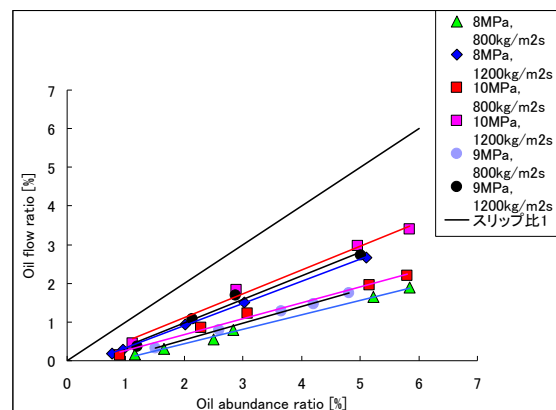


Fig.10 Oil flow ratio vs. oil abundance ratio.

3.5 溶解度実験測定結果

溶解度測定方法の正確性を確認するために、冷媒 R134a とオイル POE を用いて、 40°C において、比較実験を行った。その結果を Table 3 に示す。

Table 3 Mass fraction of R134a in POE

圧力 (MPa)	0.4	0.5	0.7	0.7	0.9
質量比 (文献値) %	13.0	16.0	23.0	26.0	45.0
質量比 (実験値) %	11.7	15.7	22.3	26.1	44.1

4. 結論

- ① 純冷媒の場合、熱伝達率と圧力損失はリード角による影響がない。
- ② オイルが混入の場合、リード角の影響で、 CO_2 の流れが管断面方向の乱れが生じ、リード角 6.3° 溝付管の熱伝達率が高い。
- ③ リード角 6.3° 溝付管はリード角 0° 溝付管より優れる伝熱管と結論を得た
- ④ 圧力が高い、質量流速が大きいほうがオイルの平均スリップ比は大きくなることわかる。
- ⑤ 溶解度実験装置の妥当性を確認できた。

文献

- 1) 党超鋈, 飛原英治: 日本冷凍空調学会論文集, Vol.20, No.2, 163-173(2003).
- 2) 飯野 康二: 東大院, 修士論文, 2007.
- 3) 長浜 邦雄, 大和 圭太: 日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集, 185-188 (2001)
- 4) Kenneth N. Marsh, Mohamed E. Kandil, "Fluid PhaseEquilibria", 199(2002), 319-334