

A111

## 二酸化炭素冷凍サイクル用膨張機内の漏れ流動特性 Leakage characteristics in expander for CO<sub>2</sub> refrigeration cycle

○ 金 春日 (静岡大院) 正 福田 充宏 (静岡大) 正 柳沢 正 (静岡大)

Jin Chun Ri, Mitsuhiro Fukuta and Tadashi Yanagisawa, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu

To recovering a throttling loss by an expander is effective to improve the performance of a CO<sub>2</sub> refrigeration cycle. Leakage in the expander is dominant factor on the expander performance, and it is to be estimated correctly by an analytical model. Since the leakage in the expander flows from super-critical region to two-phase region, i.e. the trans-critical flow, the flow characteristic is complicated. In this study, the flow characteristics of the trans-critical flow are examined experimentally and analytically. It is found that oil circulating with refrigerant is separated and stratified in a pipe under the super-critical condition. The position where the transition from super-critical to two-phase condition occurs is identified by observation in the leakage path. The calculated result by an analytical model taking account of the oil effect agrees well with the experimental one.

*Key Words:* Carbon dioxide, Refrigeration cycle, Expander, Leakage

### 1. はじめに

自然冷媒として注目されている二酸化炭素冷凍サイクル(以下、CO<sub>2</sub>サイクル)は膨張過程で発生する絞り損失が大きいため、サイクルの効率向上のためには膨張機などを用いた絞り損失回収技術の確立が大切である。著者らはCO<sub>2</sub>サイクルに適用する容積形膨張機の開発を試みているが<sup>(1)</sup>、CO<sub>2</sub>サイクル用膨張機は漏れ損失が全効率に与える影響が大きく、膨張機の体積効率をいかに高く保つかが重要となる。通常のCO<sub>2</sub>サイクル用膨張機では高压側が超臨界、低压側が二相域であり、膨張機内部の漏れ流れは遷移臨界漏れ流れとなるため、膨張器内の漏れ損失を低減させるためにその流動特性を把握し、漏れ流量を正確に見積もるための計算モデルが必要となる。

本研究ではCO<sub>2</sub>サイクル用膨張機内で発生する遷移臨界漏れ流れについて、微小すきまを有するモデル流路を用いて実験的にその流動特性を調査し、内部漏れを予測する計算モデルを検討した。漏れのモデル化においてはサイクルを冷媒とともに循環している潤滑油の影響も考慮した。

### 2. 実験装置および実験方法

図1に、膨張器内のすきま流路を模擬したモデルすきま流路を示す。流路はガラス面と鋼材研磨面で構成され、すきまの高さ $h$ およびすきま幅 $b$ は、鋼材研磨面とガラス板の間にスペーサとしてはさんだアルミ箔により設定し、流路に流した水の流量から、流れを層流と仮定して算出する。流路長さ $l$ の変更はモデル流路の鋼材本体を交換して行う。

実験はモデルすきま流路をCO<sub>2</sub>サイクルのガスクラウ出口に設置し、上流側を超臨界状態、下流側を二相状態にして行う。実験では流路内の様子をガラス面から観察するとともに、流路前後の圧力をブルドン管圧力計で測定し、流路上流温度はT形熱電対で測定する。また、すきま流路を通る流量はコリオリ式質量流量計を用いて測定する。さらにCO<sub>2</sub>サイクル内では数%の冷凍機油が冷媒とともに循環しているため、油循環量はすきま流路下流にてサンプリングをして測定する。

膨張器内の流れを推定する際、膨張機に供給される超臨界CO<sub>2</sub>に油が混入した場合の流動様式も把握しておく必要がある。そこで本研究ではモデル流路の直前にガラス管を設置し、油が混入した超臨界CO<sub>2</sub>の流動状態の観察も行った。超臨界CO<sub>2</sub>は非常に高压であるため、ガラス管の外側に高压室を設けてガラス管内外を均圧し、耐圧ガラスを通

してガラス管を観察した。

以上の実験を、流路の上流側圧力7.0~10MPa、温度30~40°C、下流側圧力4MPaで行い、ガラス管およびすきま流路内の流動様式を観察するとともに、測定流量を理論解析結果と比較する。

### 3. 理論解析

微小すきま流路を流れる流体は、{超臨界CO<sub>2</sub>+油}、または{CO<sub>2</sub>ガス+油が溶解したCO<sub>2</sub>液}のように、二酸化炭素の状態に応じて流路内で状態が変化する。本研究では、すきまが非常にせまいために各相は均質に混合すると仮定し、見かけの物性値を持った単相流として扱う。流路は以下に示すように入口部と摩擦流路部に分けて解析を行う。

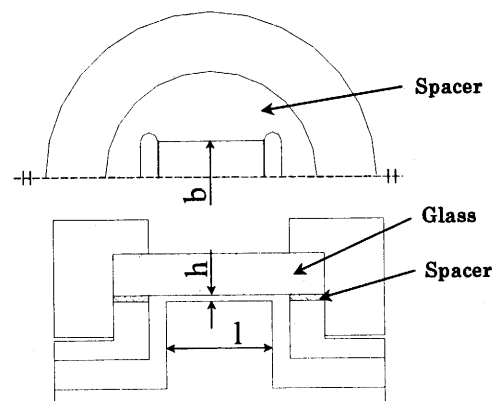
#### 3.1 流路入口部

流路入口は摩擦のないノズルと仮定し、流路入口後における圧力を仮定することにより流量を求める。通常の流動解析では断熱圧縮指数(比熱比)を用いて流量を計算するが、超臨界CO<sub>2</sub>に対しては断熱圧縮指数の決定も容易ではない。そこで等エントロピー条件の下で圧力に対応したエントロピーを求め、エントロピー差から流速を計算した。流体のエントロピーはCO<sub>2</sub>だけではなく油のエントロピーも考慮した。

#### 3.2 摩擦流路部

摩擦流路部では摩擦損失と加速損失を考慮する。流体の見かけの粘度はMcAdamsの式<sup>(2)</sup>を拡張した次式によって与えた。

$$1/\mu = \alpha_g/\mu_g + \alpha_l/\mu_l + \alpha_o/\mu_o \quad (1)$$



ここでは粘性係数,  $\alpha$  は質量分率であり, 添え字  $g, l, o$  は  $\text{CO}_2$  ガス,  $\text{CO}_2$  液, 油を表す. 超臨界  $\text{CO}_2$  は便宜的に全て液として扱う. 流路は断熱であると仮定し, 超臨界域では温度を, 二相域では  $\text{CO}_2$  のクオリティをエネルギー式より計算する.

### 3.3 計算方法

まず流路入口の圧力を仮定し, 流量を求める. 次に微小圧力降下に対応した微小摩擦流路長さを求め, 下流圧力まで流路長さを積分し, 実際の流路長さに一致するまで流路入口の圧力を仮定し直す. 計算の途中において, 圧力の降下に対して流路長さが 0 となる点が生じた場合には, その点が出口における臨界状態となる. 本研究では  $\text{CO}_2$  の物性値計算に Refprop<sup>(3)</sup> を用いた.

## 4. 結果および検討

### 4.1 流動様式

図 2 は超臨界域 (8.6MPa, 40.3°C) における流動状態を示す. 油混合率は 12% であるが, 油は管路の底部を分離して流れている様子が観察される.

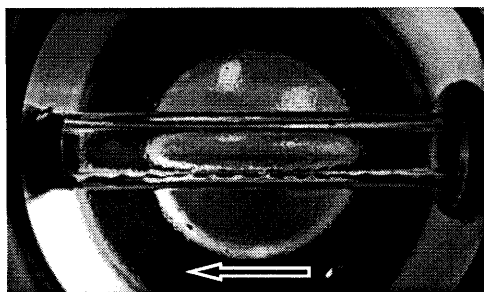


Fig.2 Flow pattern in supercritical region

微小すきま流路において超臨界状態から二相状態に変化する遷移臨界流れの様子を図 3 に示す. 流れは右から左に流れており, 上流側の圧力は 8.52MPa, 温度 35.3°C であり, 下流側は 4MPa である. 入口付近は無色透明であるが, 入口から 10mm ほど下流にいった辺りに明確な境界線が現れ, 境界線から下流は白くなって出口まで到達している. この境界線の位置で二相域に入っていると考えられる.

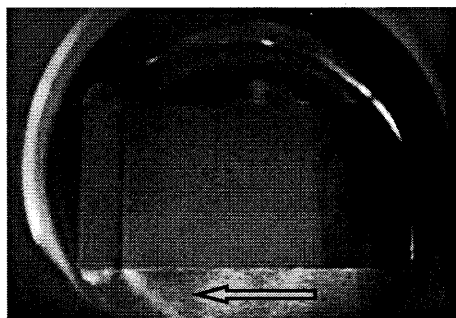


Fig.3 Trans-critical flow

### 4.2 計算結果との比較

図 4 に実験流量とそれぞれの条件に合わせて計算した計算値との比較を示す. 計算値は油の混入 (8%) を考慮した場合 (O) と考慮しない場合 ( $\Delta$ ) について示している. 図より油の混入を考慮した場合には粘度の増加により考慮しない場合に比べて流量が少なく, 実験値と良く一致していることがわかる.

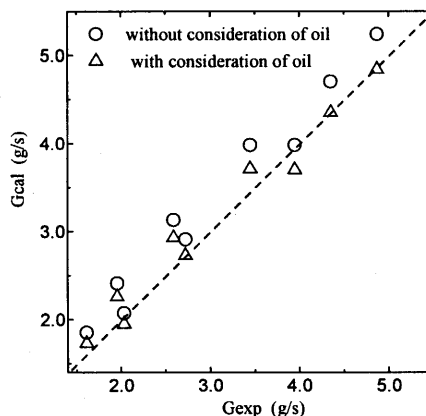


Fig.4 Comparison of experimental result and calculated one

図 5 に流路長さ 5mm, すきま高さ 14  $\mu\text{m}$  の流路において, 上流圧力 8.6MPa, 40.3°C, 下流圧力 3.9MPa, の場合の流路内の圧力と温度の分布の計算値を示す. 流路入口で約 0.6MPa 圧力が降下し, 2.0mm 付近で超臨界域から二相域になり, その後加速損失が大きくなって圧力降下が大きくなっている.

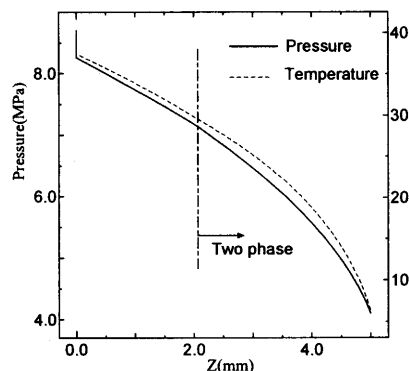


Fig.5 Pressure and temperature distribution

## 5. 結言

微小すきまモデル流路を用いて膨張器内で発生する遷移臨界流れについて検討した. その結果, 超臨界域管内流では油が分離して流れていること, また微小すきまにおける遷移流れでは超臨界域から二相域に入る位置で明確な境界線が現れることが観察された. 今回得られた計算モデルは, 油の影響を考慮することにより遷移臨界流れの流量を十分に予測することが出来た.

### 謝辞

本研究は平成 17 年度科学研究費補助金基盤研究 (C) 課題番号 16560181 の一部として行われたものである. ここに記して謝意を表す.

### 参考文献

- (1) M. Fukuta, T. Yanagisawa and R. Radermacher, Proc. of the 21st IIR Int. Congr. of Refrig., (2003), ICR251.
- (2) McAdams, W.H. et al., Trans. ASME, 64(1942), 193.
- (3) NIST: Thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixture, (2003).