

203 ガス-コンデンセート二相流の圧力損失相関とエントレインメント

Pressure Drop Correlation and Entrainment in Gas-Condensate Two-Phase Flow

○福井俊哉 (日立) 飯塚真二 (富士フィルムメディカル) 川上益弘 (芝浦工大院)

島田和典 (芝浦工大院) 正 白井健介 (芝浦工大)

Syunya FUKUI, Hitachi, Ltd.

Shinji IIZUKA, Fujifilm Medical Co.

Masuhiro KAWAKAMI, Shibaura Institute of Technology.

Kazunori SHIMADA, Shibaura Institute of Technology.

Kensuke USUI, Shibaura Institute of Technology, Fukasaku 307, Saitama-shi, Saitama

Experimentation and analysis were made on pressure drop and entrainment for horizontal gas-condensate two-phase flow. Data were obtained in air-water gas-liquid flow with low liquid holdup in tubes with i.d. of 16 and 24 mm. Those data for pressure drop and entrainment were correlated approximately using parameter X_s obtained from analysis for thin liquid film flow.

Keywords : Gas-Condensate Two-Phase Flow, Pressure Drop Correlation, Entrainment Correlation

1. まえがき

天然ガスは環境にやさしいエネルギー源として有望であり、アジアにおける長距離天然ガスパイプライン網の敷設が急がれる。天然ガスの採掘においては、コンデンセートと呼ばれる沸点の高い炭化水素成分などが液体の形でガスとともに生産されることが多い。これを、そのままパイプラインによって、低ホールドアップの環状噴霧流状態で輸送できれば経済性が高い。その場合高精度の圧力損失および気相コア内に同伴される液滴流量の相関式が必要となる。これまで、低ホールドアップ流に対し従来発表されている圧力損失相関式の精度および垂直上昇流に対する解析等について報告してきた⁽¹⁾。本報告では、引き続き水平直管低ホールドアップ気液環状噴霧流の圧力損失および液滴流量に対し、検討を進めてきた結果について述べる。

2. 実験装置

実験流路は、管内径: $D=16, 24\text{mm}$ の2種類 (透明アクリル製)、試験部の長さは共に $L=10\text{m}$ 、姿勢は水平、流体は空気・水系、圧力はほぼ大気圧、温度は室温である。圧力損失はダイヤフラム式トランスデューサにより、気相コア中に同伴される液滴流量はポーラス管とスリットを組み合わせた液膜除去装置⁽²⁾によって液膜を除去し、全液体流量と液膜流量との差から求めた。なお、流れの観察は目視によった。

3. フローマップ

低ホールドアップ流の流動様式は、一般に高気相流速域では環状噴霧流、低気相流量域では波状流となる。そこでまず低ホールドアップ領域の流れに対し流動様式を観察した。図1はそのフローマップである。図中に示す太線は Mandhane et al.⁽³⁾ による波状流と環状噴霧流の境界線であるが、見かけの液相流速が約 $j_L > 0.15\text{ m/s}$ の領域では、管内径に係わらず実験結果とほぼ一致している。しかし、それより j_L が小さい領域では合わない。液相流量が小さくなると、液膜は下壁に極めて薄い三日月形状で存在し、かつ気相によるせん断力に対し表面張力効果が勝るため、液滴が発生しなくなる傾向がある。なおこの j_L が小さく、液膜の薄い領域では、管内径の小さな流路 ($D=16\text{mm}$) の方が、

大きな場合 ($D=24\text{mm}$) より、境界はより高 j_G 側に移動する傾向が見られた。これは管内径の小さな方が、液膜に対する表面張力効果が大きく、液滴の発生の原因となる擾乱波を抑制するためであると考えられる。

4. 圧力損失相関

Wallis⁽⁴⁾は環状噴霧流の圧力損失相関に対し、気相コア部を均質流で仮定して単相流同様な方法を試みている。ここでは流れが管軸対称となる垂直上昇環状噴霧流に対して、気液界面せん断応力、気相コア部密度、および気液界面の摩擦抵抗係数をそれぞれ次式で定義している。

$$\tau_i = f_i \frac{1}{2} \rho_{GH} j_G^2 \quad (1)$$

$$\rho_{GH} = \frac{\rho_G Q_G + \rho_L Q_{LE}}{Q_G + Q_{LE}} \quad (2)$$

$$f_i = 0.079 Re_{GH}^{-1/4} F[\Delta_F] \quad (3)$$

式(3)中の $F[\Delta_F]$ は、気液界面粗さの摩擦効果を無次元液膜厚さ $\Delta_F (= \delta_F / a)$ の関数で表したものである。

この $F[\Delta_F]$ に対し、Wallis⁽⁴⁾および Whalley et al.⁽⁵⁾は簡単な実験式を提案しているが、広範な物性値変化に対しての精度は悪い⁽¹⁾。そこで筆者らは $F[\Delta_F]$ に対し新たな解析⁽¹⁾を試みている。液膜の流れに対し指数速度分布(式(4))を適用し、平均液膜厚さと液膜流量の関係を求め、これと壁面と界面せん断応力に対する力の釣り合いを考慮すると水平環状噴霧流の $F[\Delta_F]$ として式(5)が得られる。ただし、水平環状噴霧流の液膜は管周方向に対し変化するが、本研究の対象としている流れは液膜が極めて薄いことを考慮し、管軸対称を仮定した。

$$u_r = B_r (y_r)^{1/m} \quad (4)$$

$$F[\Delta_F] = 8.95 \left(\frac{1+m}{B_F m} \right)^{2m/(1+m)} \frac{1-\Delta_F}{\Delta_F^2 X_s^2} \quad (5)$$

ここで、

$$X_S = \left(\frac{Q_G^+}{Q_{LF}^+} \right)^{7/8} \frac{v_{GH}}{v_L} \left(\frac{\rho_{GH}}{\rho_L} \right)^{1/2} (Q_{LF}^+)^{(7-m)/8(1+m)} \quad (6)$$

式(1)～(3)および(5)から圧力損失を求めるには、平均液膜厚さと気相コア中の液滴流量が既知である必要がある。垂直上昇流においては、無次元液膜厚 Δ_F さが、近似的にLockhart-Martinelli⁽⁶⁾のパラメータに類似な式(6)の関数になり、式(7)で表されることが確認されている⁽¹⁾。本研究の水平流においても、低ホールドアップの場合を対象としているから、垂直上昇流同様液膜厚さは近似的に次式で表されるものと仮定する。

$$\Delta_F = \alpha X_S^{-q} \quad (7)$$

以上より、圧力損失に関し次式が得られる。

$$\left(\frac{dp_F}{dz} \right)_{TP} \frac{a}{\rho_{GH} j_G^2} Re_{GH}^{1/4} = 0.707 \left[\frac{1+m}{B_F m} \right]^{1+m} \frac{1}{\alpha^2 X_S^{2(1-q)}} \quad (8)$$

ここで、右辺の係数および指数の部分は実験的に決定されねばならない。図2は水平環状噴霧流領域のデータに基づき、式(8)の左辺を X_S に対しプロットしたものである。ただし、式(6)中の指数 m の値は $m=7$ とした。図から分かるように、式(8)は水平流に対してもかなり良好な相関を与えており、この結果から実験的に次式が得られた。

$$-\left(\frac{dp_F}{dz} \right)_{TP} = 0.523 X_S^{-0.326} Re_{GH}^{-1/4} \frac{\rho_{GH} j_G^2}{a} \quad (9)$$

5. 液滴流量相関

ここで展開されている環状噴霧流の圧力損失に対するWallis⁽⁴⁾の方法は、気相コア中の液滴流量と液膜厚さが既知でなければならない。液膜厚さは式(8)により、 X_S の関数で近似されているが、液滴流量に対する相関式については不明である。ここでは、液膜流量（液相流量と液滴流量の差）を無次元の形 Q_{LF}^+ で、 X_S と無次元液相流量 Q_L^+ の関数として整理を試みた。その結果を、図3に示す。管内径に係わらず、比較的良好に相関付けられ、実験的に次式(10)が得られた。

$$Q_{LF}^+ = 6.0 X_S^{-0.20} Q_L^{+0.756} \quad (10)$$

6. まとめ

水平低ホールドアップ気液環状噴霧流に対し、液膜速度分布に指数則を適用した近似解析を行い、実験データを基に圧力損失相関式を得た。また液膜流量(液滴流量)についても、圧力損失の解析において得られたパラメータ X_S により相関を試みた。結果は陰関数の形を取ったが、ほぼ良好であった。

【記号】 a : 管半径, B_F : 係数, D : 管内径, dp_F/dz : 摩擦圧力勾配, f_i : 界面摩擦抵抗係数, F : 関数, j : 見かけの速度, L : 管長, m, q : 指数, Q : 体積流量, Q_G : 気相体積流量, $Q_G^+ = Q_G/(2\pi a v_{GH})$, Q_L : 液相流量, $Q_L^+ = Q_L/(2\pi a v_L)$, Q_{LF} : 液膜体積流量, $Q_{LF}^+ = Q_{LF}/(2\pi a v_L)$, $Re_{GH} = \rho_{GH} j_G D / \mu_G$, u_F : 液膜部流速, $u_F^* = (\tau_w / \rho_L)^{1/2}$, $u_F^+ = u_F / u_F^*$, X_S : 式(6), y_F : 壁面からの距離, $y_F^+ = u_F^+ y_F / \mu_L$, α : 係数, δ_F : 液膜平均厚さ, ρ : 密度, ρ_{GH} : 気相コア平均密度, $\Delta_F = \delta_F / D$, μ : 粘度, ν : 動粘度, $\nu_{GH} = \mu_G / \rho_{GH}$, τ : セン断応力

【Subscript】 G, L : (見かけの) 気体, 液体, LE : 液滴, LF : 液膜, GH : 均質ガスコア, i : 気液界面, TP : 二相流, W : 壁面

7. 参考文献

- (1) Usui, K. et al. : 4th ICMF 2001, [322] New Orleans, USA, (2001-5).
- (2) Usui, K. et al. : 2nd ICMF 95-Kyoto, JAPAN, (1995).
- (3) Mandhane, J.M. et al. : Int.J. Multiphase Flow, 1-4 (1974) 537.
- (4) Wallis, G.B. : Trans. ASME, J. Basic Eng., (1970), 59.
- (5) Hetsroni G. : handbook of multiphase sys., ((1982), 2-71.
- (6) Lockhart, R.W. & Martinelli, R.C. : Chem. Eng. Progr., 45[1], (1949), 39.

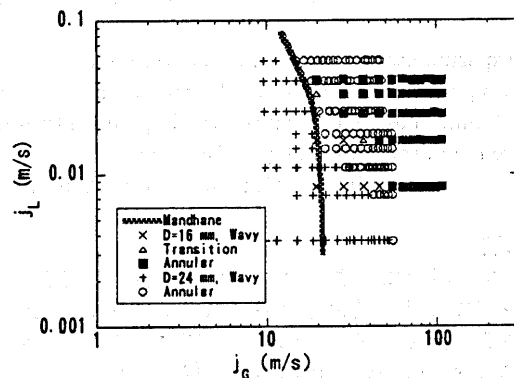


Fig.1 Flow map

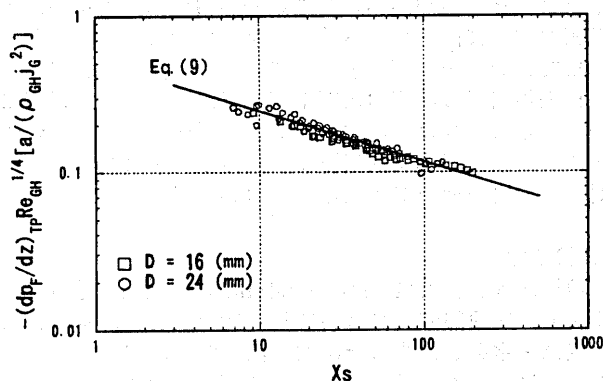


Fig.2 Pressure drop correlation

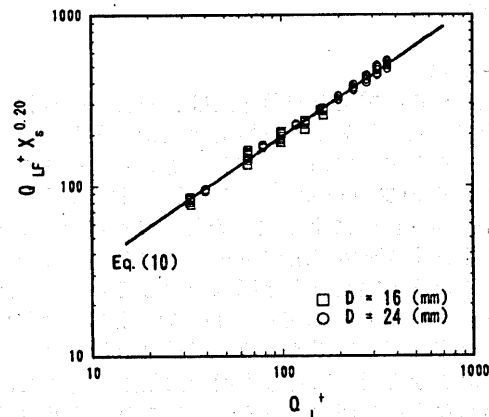


Fig.3 Liquid film flow rate correlation