

【整番】 FE-03-TM-055	【標題】 断熱二相流の圧力損失計算法 : Duckler-Beggs & Brill 法
分類 : 流れ(気液 2 相流) / 種別 : 設計メモ	作成年月 : H21.4 / 改訂 : Ver0.0(21.5) 作成者 : N.Miyamoto

全 7 枚

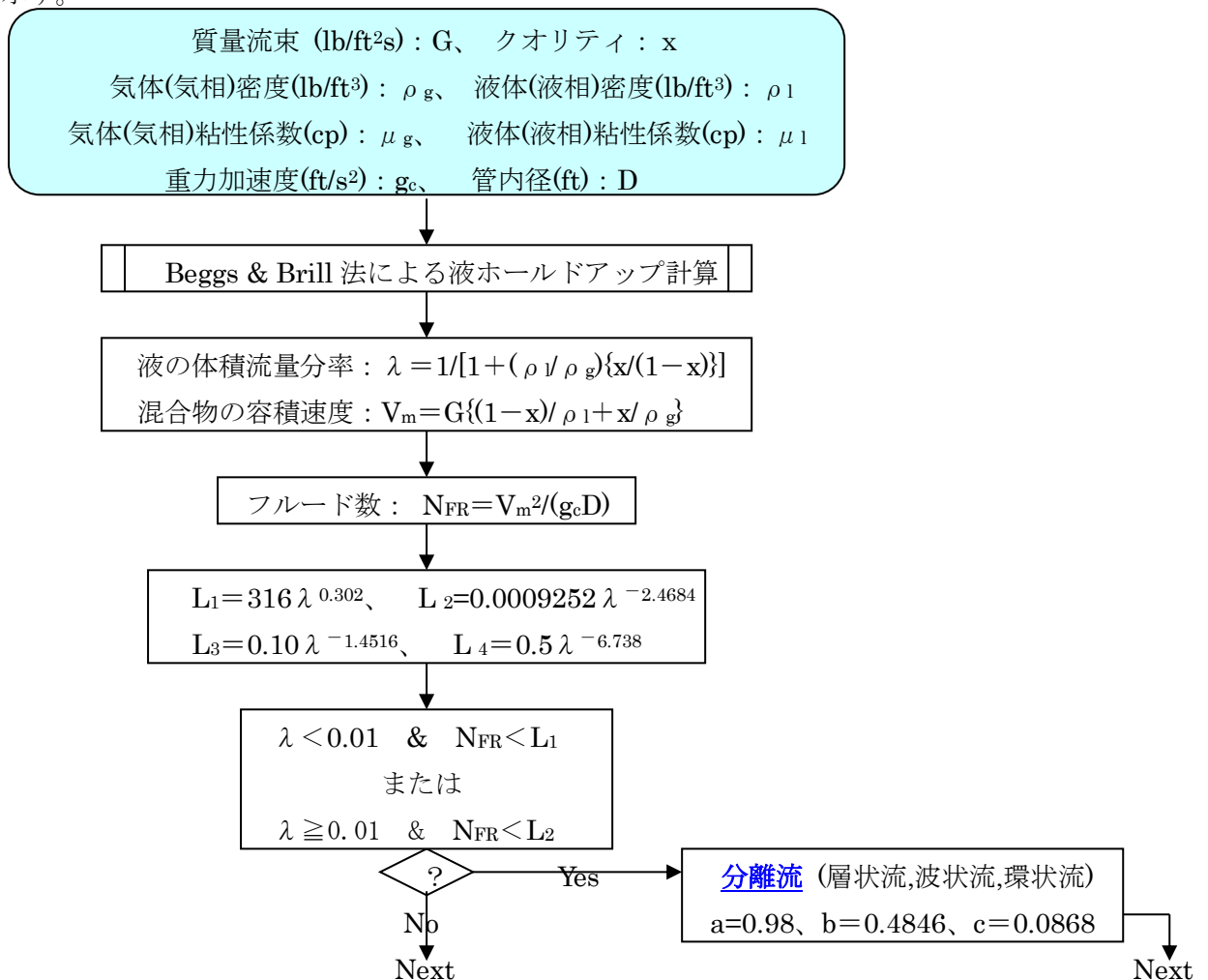
1. はじめに

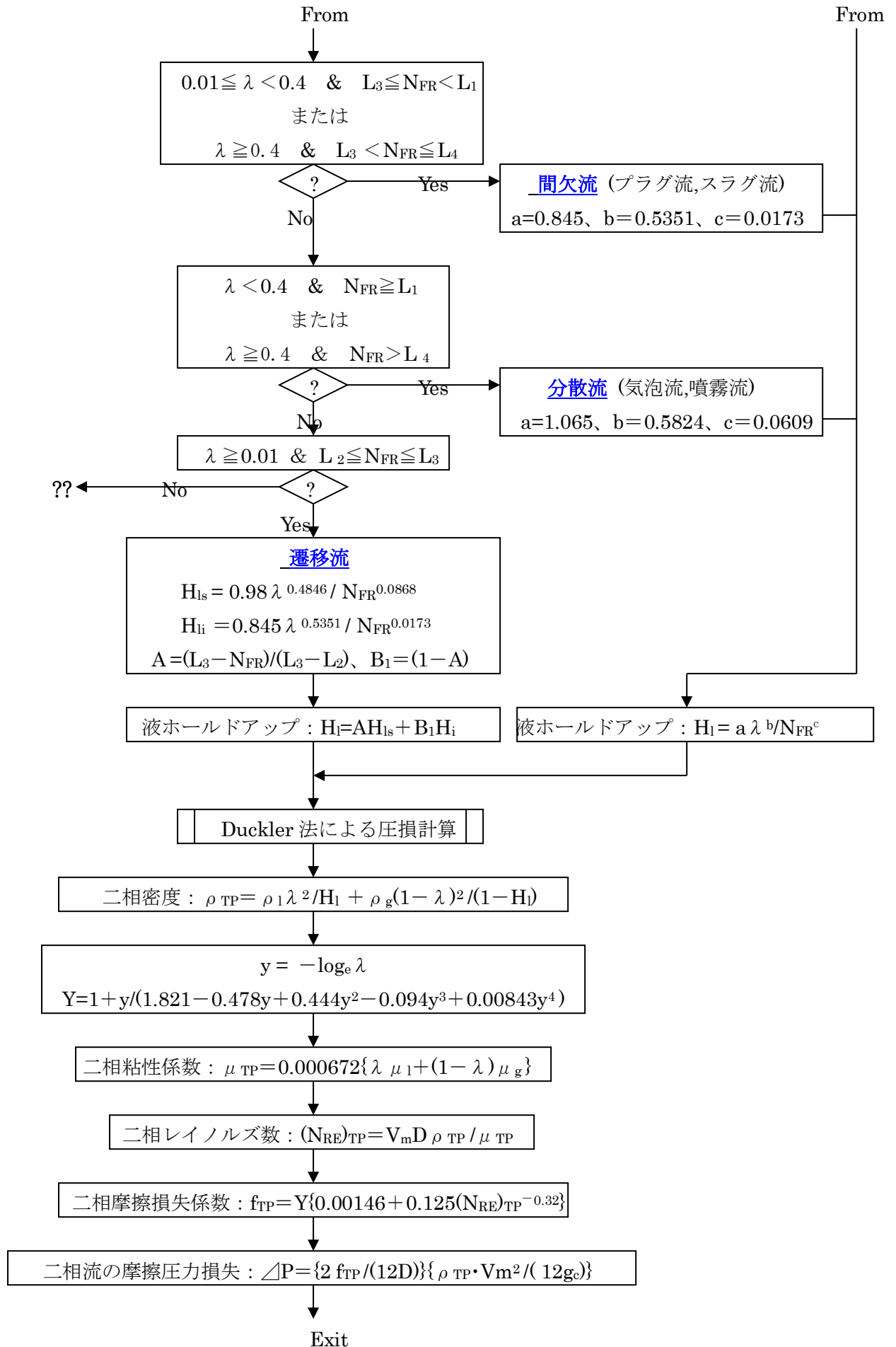
Duckler 法は、Hydro-carbon 系の生産設備、特に井戸元からの原油ギャザリングラインなどの設計によく使用されてきた二相流の圧力降下計算法である。二相流の圧損計算法には分離流モデルと均質流モデルの 2 系統がある。Duckler 法は後者の系統に属するが、純粹の均質流仮定の計算法ではなく、実際の流れを考えて補正が加えられている。この方法では液ホールドアップ量を必要とするが、この算定には通常、Beggs & Brill 法が用いられているようだ。従ってここでは **Duckler-Beggs & Brill 法** と呼ぶことにする。

Duckler-Beggs & Brill 法は基本的に水平管に適用されている。これは、適用対象である原油ギャザリングライン等がヤード水平面に広がるパイプラインであるためと思われる。従って立体的で垂直部分の多いプロセス配管には向いていない。しかし適用されているライン口径はある程度大きい筈であるから、二相圧損計算のグレイゾーンになると思われる中径/大径の水平管の圧損計算を、ある程度カバーできるのでは？という期待も残る。以下参考として、Duckler-Beggs & Brill 法の内容を紹介する。

2. 計算法

ラインの圧力降下計算の主要部分に当たる単位管長当りの摩擦圧力損失の計算法を以下、フローチャートの形で示す。





＜チャートの記号定義＞

ΔP = 単位管長当たりの摩擦圧力損失 (psi/ft)、 D = 管内径 (ft)、 g_c = 重力加速度 (32.2 ft/s²)、
 G = 質量流速 (lb/ft²s) [= M/A]、 M = 質量流量 (lb/s)、 A = 管路断面積 (ft²) [= $\pi D^2/4$]、
 V_m = 混合物の容積速度 (ft/s) [= $j_l + j_g$]、 j_l = 液相見掛流速 [= $(1-x)G/\rho_l$]、 j_g = 気相見掛流速 [= xG/ρ_g]、
 x = クオリティ (気体の質量流量分率) [= G_g/G]、 G_g = 気体質量速度 (lb/ft²s) [= xG]、
 λ = 液の体積流量分率 (-) [= $q_l/(q_l + q_g)$]、 q = 体積流量 (ft³/s)、
 H_1 = 液ホールドアップ (-) [= $1 - \alpha$]、 α = ボイド率 (気相容積率)、
 ρ = 密度 (lb/ft³)、 μ_g 、 μ_l = 気・液それぞれの粘性係数 (cp)、 μ_{TP} = 二相粘性係数 (lb/ft s)
 f = Fanning の摩擦損失係数 (-)、 N_{FR} = フルード数 (-)、 N_{RE} = レイノルズ数 (-)、
 サフィックス 1 → 液体 (液相)、g → 気体 (気相)、TP → 二相流、

3. 計算例

下記条件における単長当たりの圧損を求めよ。

$G = 105 \text{ lb/ft}^2 \text{ s}$ 、 $x = 0.1$ 、 $\rho_l = 37.5 \text{ lb/ft}^3$ 、 $\rho_g = 0.15 \text{ lb/ft}^3$ 、 $\mu_l = 3.0 \text{ cp}$ 、 $\mu_g = 0.02 \text{ cp}$ 、 $D = 0.5 \text{ ft}$

液の体積流量分率： $\lambda = 1/[1 + (\rho_l/\rho_g)\{x/(1-x)\}] = 1/[1 + (37.5/0.15)\{0.1/(1-0.1)\}] = \mathbf{0.035}$

混合物の容積速度： $V_m = G\{(1-x)/\rho_l + x/\rho_g\} = 105\{(1-0.1)/37.5 + 0.1/0.15\} = \mathbf{72.5 \text{ ft/s}}$

フルード数： $N_{FR} = V_m^2/(g_c D) = 72.5^2/(32.2 \times 0.5) = \mathbf{327}$

パラメータ： $L_1 = 316 \lambda^{0.302} = 316 \times 0.035^{0.302} = \mathbf{115}$

$L_2 = 0.0009252 \lambda^{-2.4684} = 0.0009252 \times 0.035^{-2.4684} = \mathbf{3.63}$

$L_3 = 0.10 \lambda^{-1.4516} = 0.1 \times 0.035^{-1.4516} = \mathbf{13}$

$L_4 = 0.5 \lambda^{-6.738} = 0.5 \times 0.035^{-6.738} = \mathbf{3.2 \times 10^9}$

$\lambda = 0.035 < 0.4$ & $N_{FR} = 327 \geq L_1 \rightarrow$ 分散流 $\rightarrow a = 1.065$ 、 $b = 0.5824$ 、 $c = 0.0609$

液ホールドアップ： $H_1 = a \lambda^b / N_{FR}^c = 1.065 \times 0.035^{0.5824} / 327^{0.0609} = \mathbf{0.106}$

パラメータ： $y = -\log_e \lambda = -\log_e 0.035 = \mathbf{3.35}$

補正係数： $Y = 1 + y/(1.821 - 0.478y + 0.444y^2 - 0.094y^3 + 0.00843y^4)$
 $= 1 + 3.35/(1.821 - 0.478 \times 3.35 + 0.444 \times 3.35^2 - 0.094 \times 3.35^3 + 0.00843 \times 3.35^4)$
 $= 1 + 3.35/2.73 = \mathbf{2.23}$

二相粘性係数： $\mu_{TP} = 0.000672\{\lambda \mu_l + (1-\lambda)\mu_g\} = 0.000672\{0.035 \times 3 + (1-0.035) \times 0.02\}$
 $= \mathbf{8.35 \times 10^{-5} \text{ lb/ft s}}$

二相密度： $\rho_{TP} = \rho_l \lambda^2 / H_1 + \rho_g (1-\lambda)^2 / (1-H_1) = 37.5 \times 0.035^2 / 0.106 + 0.15(1-0.035)^2 / (1-0.106)$
 $= 0.433 + 0.156 = \mathbf{0.59 \text{ lb/ft}^3}$

二相レイノルズ数： $(N_{RE})_{TP} = V_m D \rho_{TP} / \mu_{TP} = 72.5 \times 0.5 \times 0.59 / 8.35 \times 10^{-5} = \mathbf{2.56 \times 10^5}$

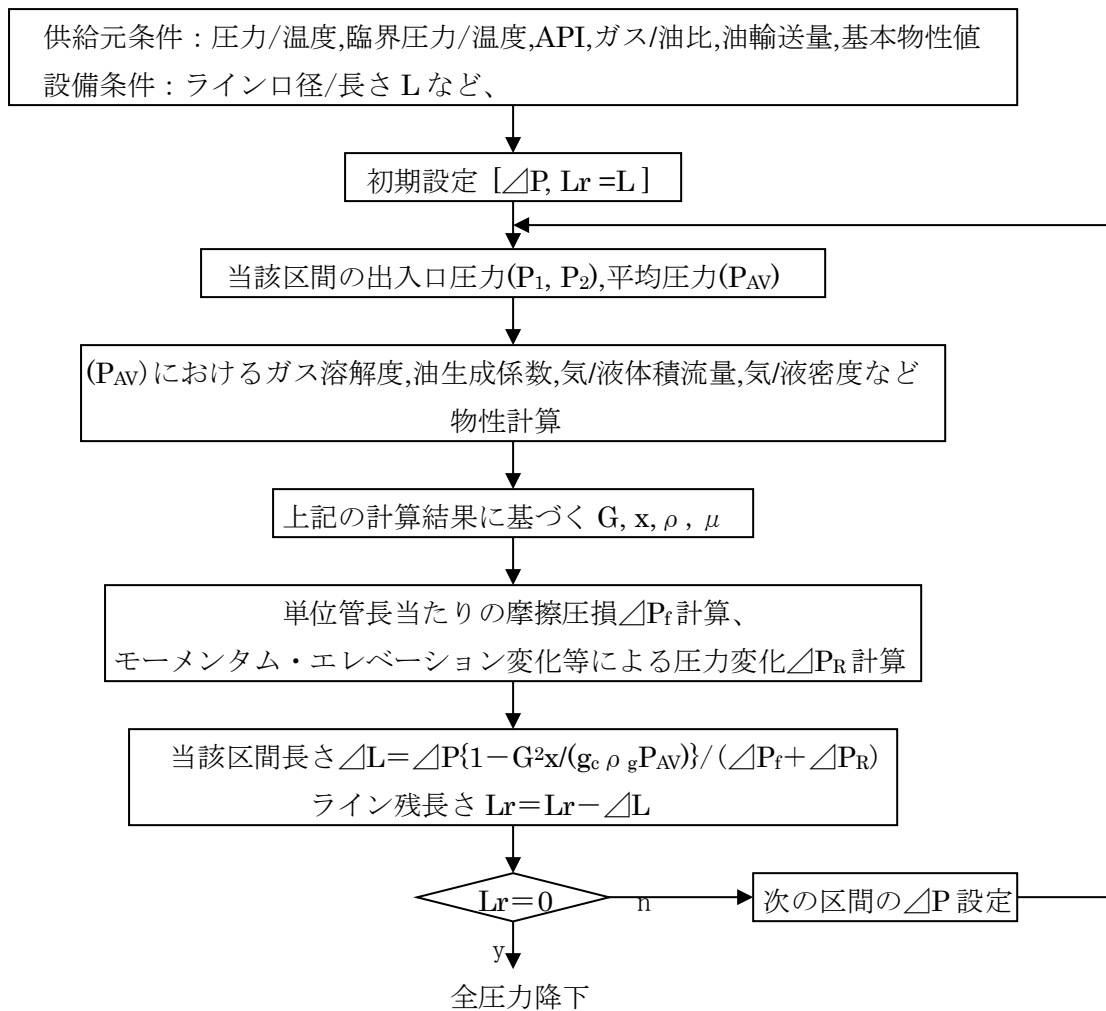
二相摩擦損失係数： $f_{TP} = Y\{0.00146 + 0.125(N_{RE})_{TP}^{-0.32}\} = 2.23\{0.00146 + 0.125 \times (2.56 \times 10^5)^{-0.32}\}$
 $= 2.23 \times 0.00378 = \mathbf{0.00844}$

二相流の摩擦圧力損失： $\Delta P = \{2 f_{TP} / (12D)\} \{ \rho_{TP} \cdot V_m^2 / (12g_c) \}$
 $= \{2 \times 0.00844 / (12 \times 0.5)\} \{ 0.59 \times 72.5^2 / (12 \times 32.2) \} = \mathbf{0.0226 \text{ psi/ft (15.8 mmAq/ft)}}$

通常の単相流れの2倍程度の圧損になっている。

【 解 説 】

1. 文献(1)によれば、Gathering ラインの全圧力降下計算は下図のような流れでなっているようだ。



即ち、ラインを区間の集合と考え、区間の圧損を予め設定しておいて、各区間の単長当たりの圧損を計算しそれで設定圧損を除いて区間長を求める。この計算をライン全長にわたって反復し全区間圧損を合計して、ラインの圧力降下とする。計算物性は圧力降下に応じて更新してゆき誤差が大きくなるようにする。Duckler-Beggs & Brill 法はこの流れの中で、最もウェイトの高い水平部分の摩擦圧損計算を分担している。

2. 各計算式はできるだけ、引用文献の記述に従っているが、多少変更した部分があるので、メモしておく。

液の体積流量分率(λ)は字句通り $\lambda = q_l / (q_l + q_g)$ で定義される。流量 q_l 、 q_g は $(1-x)GA / \rho_l$ 、 xGA / ρ_g であるから、 λ は次式で表わすことができる。

$$\lambda = \{(1-x)GA / \rho_l\} / \{(1-x)GA / \rho_l + xGA / \rho_g\} = 1 / [1 + (\rho_l / \rho_g)\{x / (1-x)\}]$$

なお、気体の体積流量分率は $(1-\lambda)$ であるから、

$$(1-\lambda) = 1 / \{1 + (\rho_g / \rho_l)\{(1-x) / x\}\} \rightarrow \text{いわゆる容積乾き度 } \beta$$

になる。通常は気体を重視して β を使うが、ここでは液体を重視して λ を主要なパラメータにしている。これはボイド率 $[\alpha]$ を使わず、液ホールドアップ $[H_L = (1-\alpha)]$ を用いていることにも通じる。

混合物の容積速度(V_m)は、二相流用語で全容積流束 j_T に当たる。 j_T は気液の見掛流速 j_l, j_g の和、即ち

$$j_T = j_l + j_g = G \left\{ \frac{1-x}{\rho_l} + \frac{x}{\rho_g} \right\} = G / \rho_H$$

で定義される ([FE-03-IG-051] 参照のこと)。 ρ_H はいわゆる均質流密度(ノースリップ密度)であるから V_m は均質流モデルにおける流速ということになる。

二相粘性係数(μ_{TP})は、 $\mu_{TP} = 0.000672 \{ \lambda \mu_l + (1-\lambda) \mu_g \}$ となっているが、[0.000672] は右辺の { } 内の単位 [cp] を左辺の単位 [lb/ft s] に換算する数値である。この式自身は Duckler のオリジナルか?

3. Duckler の式 $[\Delta P = \{ 2 f_{TP} / (12D) \} \{ \rho_{TP} \cdot V_m^2 / (12g_c) \}]$ を見てみよう。分母の 2 つの 12 はフィートをインチに換算するもの。従って原式は、

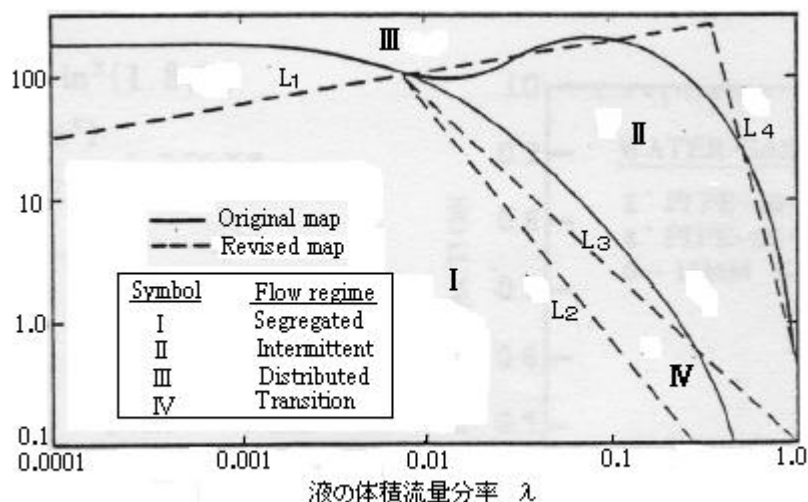
$$\Delta P = (2 f_{TP} / D) (\rho_{TP} \cdot V_m^2 / g_c)$$

これは周知のように、Fanning の摩擦損失係数 (Moody の摩擦損失係数の 1/4 に当たる) を用いた単長当たりの摩擦圧力損失式である。 V_m は前述のように均質流モデルの流速である。その場合、もし ρ_{TP} が均質流密度 $[\rho_H = \{ (1-x) / \rho_l + x / \rho_g \}^{-1}]$ であれば、この ΔP 式は均質流モデルに由るものと断定できる。然るに ρ_{TP} は $[\rho_{TP} = \rho_l \lambda^2 / H_1 + \rho_g (1-\lambda)^2 / (1-H_1)]$ で定義され、明らかに ρ_H と異なる。

結局、この式は、均質流モデルでもなく非均質流モデルでもない。 ρ_{TP} は Duckler のオリジナルとみていい。これは f_{TP} でも同じである。 $[f_{TP} = Y \{ 0.00146 + 0.125 (N_{RE})_{TP}^{-0.32} \}]$ 中の $(N_{RE})_{TP}$ にも $[\rho_{TP} \cdot V_m]$ が使われて、{ } 内のオリジナル摩擦損失係数の出処が不明確になっている。

恐らく Duckler 式は、均質流式からスタートして実際にマッチするよう実測データで補正されていった結果ではないかと思う。故にこの式は原油パイプライン用としてかなり特化されたものかも知れない。

4. 文献(2)によれば、Beggs & Brill 法では下図のような流動様式図が用いられているようである。



第2図 フローパターンマップ

オリジナルの境界線を対数グラフ上の直線で近似して、判定ライン (L_1, L_2, L_3, L_4) を作っていることがわかる。液ホールドアップ式は、フローパターンごとに与えられているが、Distributed flow の場合、極端には $\lambda = 1$ 即ち液相のみで流れることもある。そのときは $H_1 = 1$ であるから、

$$H_1 = 1.065 x 1^{0.5824} / N_{FR}^{0.0609} = 1 \rightarrow N_{FR}^{0.0609} = 1.065 \rightarrow N_{FR} = 2.81$$

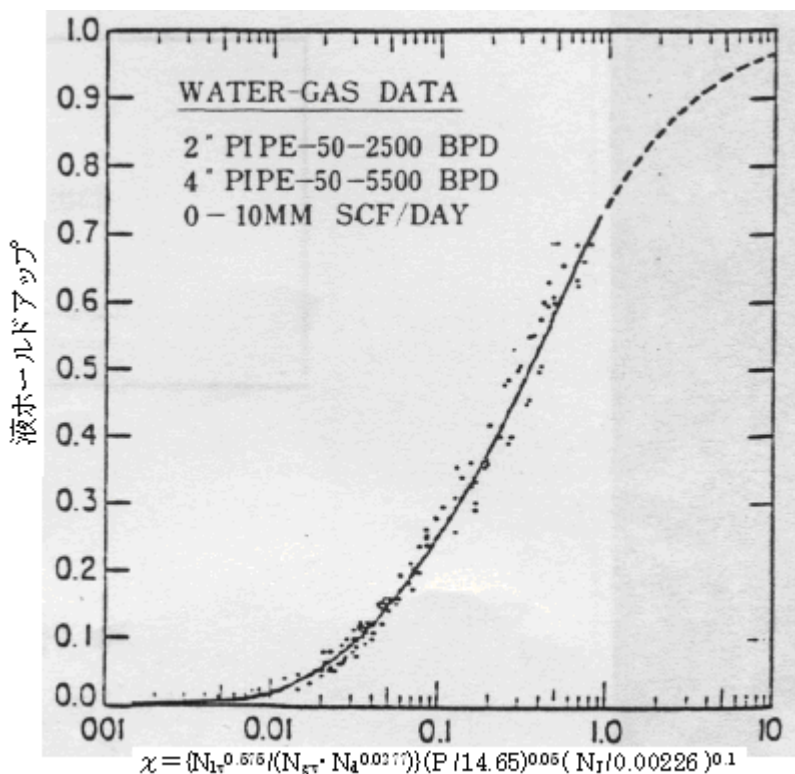
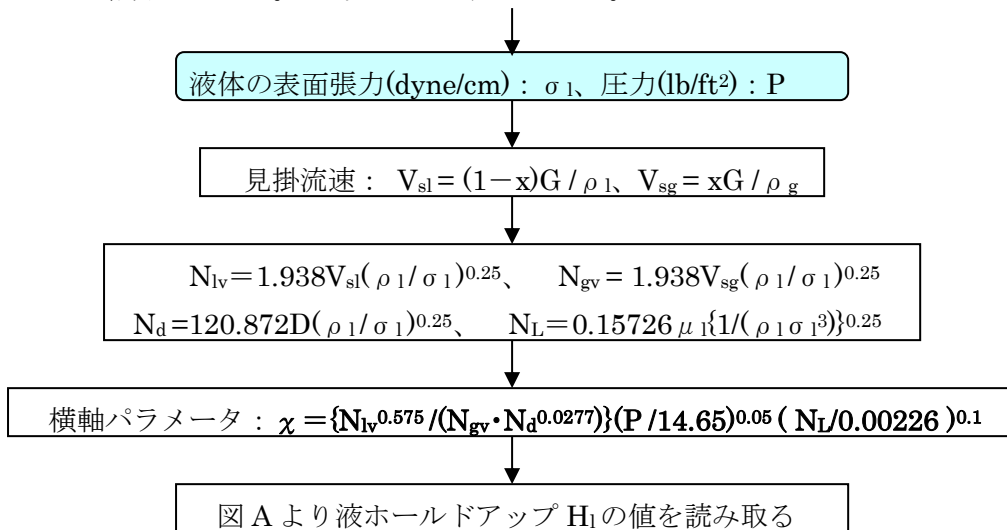
が、限界のフルード数になる。更に $V_m = N_{FR}(g_c D)^{0.5}$ であるから、例えば管径 1 inch、6 inch のときの限界流速 V_c は、

$$1 \text{ inch} : V_c = 2.81 \times (32.2 \times 1/12)^{0.5} = 4.6 \text{ ft/s (1.4 m/s)}$$

$$6 \text{ inch} : V_c = 2.81 \times (32.2 \times 6/12)^{0.5} = 11.28 \text{ ft/s (3.44 m/s)}$$

但し、全流量が液として流れる場合の流速である。これを大きく越える時は、式の適用を控えるべきと思うがどうだろうか？

なお、必ずしも Beggs & Brill 法によって、Duckler 式の液ホールドアップ量を算定する必要はないような気がする。例えば定評のある Smith の式でボイド率 α を求め、液ホールドアップを $[H_1 = 1 - \alpha]$ として算出しても差し支えないのかもしれない。文献(2)は代替として Eaton 法による液ホールドアップの求め方を紹介している。参考にこれを記しておく。



第3図 EATON法リキッドホールドアップ

5. Duckler 式のオリジナルはまだ見ていないが、もともと次の2つの構成になっている。

Case-1 → 均質流 (slip なし) の式、 Case-2 → 二相流 (slip あり) の式

Case-1 については、**Idsinga(1976)** のレビュー対象になっているが、実測データとの比較結果は余りよくないようである。本来、Case-1 はプレ的な用途 (例えば急ぎの見積計算) のものと思われる。実際には Case-2 が使用されているようである。

(引用文献)

1. “Program calculates pressure gradient in two-phase flow” by A.M.Hemeida
(Oil & Gas Journal , Mar.9,1987 36-38)
2. 「気液二相流パイプラインの圧力損失計算法」千代田化工・藤田 (配管技術 1986年6月)