

長方形管内気液二相流の研究 (第5報)

摩擦圧力損失の整理式についての一考察

松村 博久・井手 英夫

(受理 昭和53年5月31日)

STUDIES ON TWO-PHASE GAS-LIQUID FLOW IN RECTANGULAR CHANNELS (Report 5)

A Study of the Correlation of Frictional Pressure Drop

Hirohisa MATSUMURA and Hideo IDE

In the previous papers, the effects of the geometric shapes of the section and the inclined angle of test section on the flow behaviour and the frictional pressure drop of air-water two-phase flow in rectangular channels were investigated experimentally. The frictional pressure drop in two-phase flow were discussed in detail.

In this report, the correlations of frictional pressure drop which is connected with void fraction and the ratio of mass flow rate for air to water are considered. Assuming that the two phases can have different properties and velocities, the separated flow model is introduced and the correlation of frictional pressure drop is obtained by its model. The correlation agrees well with experimental results.

1. 緒 言

長方形管内気液二相流の圧力損失についての実験結果は、これまでの報告^{1)~4)}で述べてきた。これらの実験結果は従来から円管内流れに使用されている Lockhart-Martinelli⁵⁾の整理法および赤川⁶⁾の整理式によって、満足な整理が得られなかった。そのことは管路断面の幾何学的形状(縦横比, 横長・縦長, 水力相当直径)および傾斜角などの影響が十分に考慮されていないからである。そこで、本報においては、流動現象の影響をも結びつけた摩擦圧力損失の整理法を検討し、長方形管内分離流モデルから摩擦圧力損失にたいする整理式を導びいている。この得られた整理式は実験結果を良好にまとめている。

2. 記号の説明

本報で用いられた記号は次の通りである。

A : 管路断面積,
 a : 管路断面の長辺の長さ,

B : 式(39)における修正係数,
 b : 管路断面の短辺の長さ,
 C : Blasius の式における定数,
 D : 管路の水力相当直径,
 F : 管路のぬれぶち長さ,
 f_g : 気体体積率,
 $(1-f_g)$: 液体体積率,
 g : 重力加速度,
 $\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)$: 単位長さ当りの摩擦圧力損失,
 Re : レイノルズ数,
 T : 管路の縦横比(= a/b , または b/a),
 u : 平均流速,
 W : 重量流量,
 γ : 比重量,
 η : 式(6)における修正係数,
 λ : 管摩擦係数,
 μ : 粘性係数,
 ν : 動粘性係数,
 ξ : 式(5)における修正係数,
 ϕ : 摩擦圧力損失比 $\left(= \sqrt{\frac{(\Delta P_f / \Delta L) t p}{(\Delta P_f / \Delta L)}} \right)$,

X_{ii} : 気相および液相ともに乱流の場合のマルチネリ・パラメータ ($= (W_i/W_0)^{0.9} (\tau_0/\tau_i)^{0.5} (\mu_i/\mu_0)^{0.1}$),

添字

- g : 気体 (空気),
- g_0 : 気体 (空気) 単相流,
- l : 液体 (水),
- l_0 : 液体 (水) 単相流,
- lg : 二相流,

3. 整理法の検討

これまでの報告^{1)~4)} で検討したように, Lockhart-Martinelli⁵⁾ の整理法および赤川⁶⁾ の整理式では, 長方形断面管路における摩擦圧力損失の実験結果は傾斜角が小さい時の X_{ii} の小さい範囲および傾斜角が大きい時の水相当流速の比較的小さい範囲について, 良好に整理されなかった. 一方, 摩擦圧力損失と流動現象の関係および気体体積率と重量流量比の関係を詳細に検討した. それらの結果を考察してみると, 摩擦圧力損失比に大きな影響を与える因子は, 気体体積率と重量流量比であると考えられる. そこで, 縦軸に摩擦圧力損失比の平方根をマルチネリ・パラメータで割った値 ϕ_i/X_{ii} と横軸に液体体積率 ($1-f_g$) を取って, 実験結果を整理したのが図1から図3である. 図1は水平管, 図2は傾斜管および図3は鉛直管であり, これらの図によると, 実験結果は曲線的関係でほぼまとまって表わされる. したがって, 管路断面の幾何学的形状 (縦横比, 横長・縦長, 水力相当直径) および管路の傾斜角などによる影響は無視できるものと考えて, 実験結果を直線で近似すると, つぎの実験式を得る.

$$\frac{\phi_i}{X_{ii}} = 0.008 (1-f_g)^{-4.1} \quad (1)$$

図1から図3には, この式の関係を実線で示している.

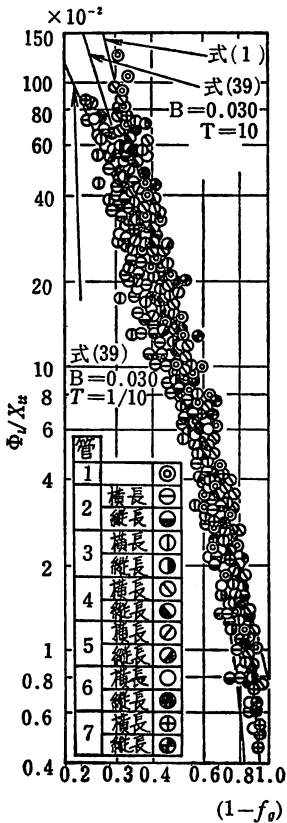


図1 ϕ_i/X_{ii} と $(1-f_g)$ の関係 (水平管)

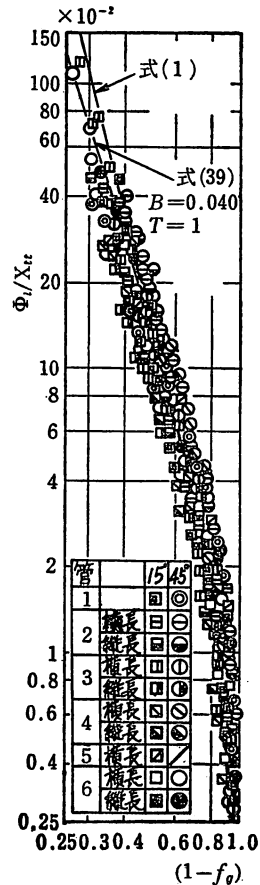


図2 ϕ_i/X_{ii} と $(1-f_g)$ の関係 (傾斜管)

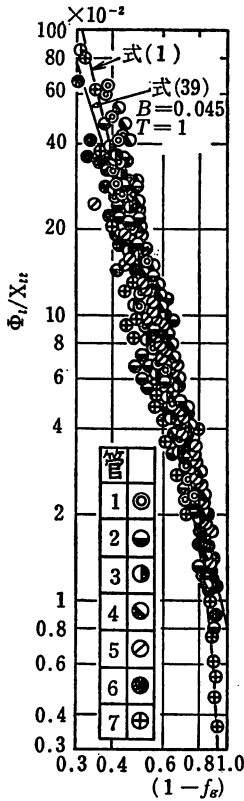


図3 ϕ_i/X_{ii} と $(1-f_g)$ の関係 (鉛直管)

しかし、これらの図の実験結果を詳細に調べていくと、管路の幾何学的形状や傾斜角の影響がみられる。これらの点については次節で考察する。

4. 整理式の誘導

摩擦圧力損失に関する整理式を誘導するために、つぎのような長方形断面管内分離流モデルを仮定する。

図4に示すような長方形断面管路において、管路の縦横比 T および水力相当直径 D は、

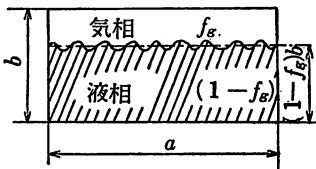


図4 長方形管内分離流モデル

$$T = a/b \tag{2}$$

$$D = 4A/F \tag{3}$$

ただし、

$$A = ab, \quad F = 2(a+b) \tag{4}$$

管路は空気-水二相流体で満たされているので、空気と水はそれぞれ分離して流れると仮定すれば、管路横断面の水および空気の占めるそれぞれの部分にたいする水力相当直径は、

$$D_g = \xi A_g / F_g \tag{5}$$

$$D_l = \eta A_l / F_l \tag{6}$$

ただし、 ξ, η は長方形断面管を円管に置きかえるための修正係数である。そして、

$$A = A_g + A_l \tag{7}$$

の関係より、

$$1 = \frac{A_g}{A} + \frac{A_l}{A} \tag{8}$$

となるから、

$$\frac{A_g}{A} = f_g, \quad \frac{A_l}{A} = (1-f_g) \tag{9}$$

である。したがって、管路断面における気相および液相の占めるそれぞれの部分のぬれぶち長さを

$$F_g = 2(a + f_g b) \tag{10}$$

$$F_l = a + 2(1-f_g)b \tag{11}$$

と定義すると、式(5)および式(6)は

$$D_g = \frac{\xi f_g A}{2(a + f_g b)} = \frac{\xi f_g ab}{2(a + f_g b)} \tag{12}$$

$$D_l = \eta \frac{(1-f_g)A}{[a + 2(1-f_g)b]} = \eta \frac{(1-f_g)ab}{[a + 2(1-f_g)b]} \tag{13}$$

一方、管路横断面内で静圧が一定であるとする、つぎの関係が成立する。

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{i,p} = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_g = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_l \tag{14}$$

気相および液相の平均流速は

$$u_g = u_{g0}/f_g \tag{15}$$

$$u_l = u_{l0}/(1-f_g) \tag{16}$$

であるので、気相および液相のそれぞれの摩擦圧力損失は

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_g = \lambda_g \frac{1}{D_g} \frac{u_g^2}{2g} \tau_g \tag{17}$$

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_l = \lambda_l \frac{1}{D_l} \frac{u_l^2}{2g} \tau_l \tag{18}$$

となる。式(17)および式(18)において、気相および液相の流れがいずれも乱流である時、 λ_g, λ_l が Blasius の式で表わされるとすれば、

$$\lambda_g = C_g \cdot R_e^m \quad (19)$$

$$\lambda_l = C_l \cdot R_e^n \quad (20)$$

ただし,

$$R_{e_g} = u_g \cdot D_g / \nu_g \quad (21)$$

$$R_{e_l} = u_l \cdot D_l / \nu_l \quad (22)$$

であり, C_g, C_l および m, n は定数である. また, 気液二相流における空気あるいは水だけが管路を満して流れると仮定した場合のそれぞれの摩擦圧力損失は,

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{g0} = \lambda_{g0} \frac{1}{D} \frac{u_{g0}^2}{2g} \gamma_g \quad (23)$$

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{l0} = \lambda_{l0} \frac{1}{D} \frac{u_{l0}^2}{2g} \gamma_l \quad (24)$$

ここに,

$$\lambda_{g0} = C_g \cdot R_{e_{g0}}^m \quad (25)$$

$$\lambda_{l0} = C_l \cdot R_{e_{l0}}^n \quad (26)$$

ただし,

$$R_{e_{g0}} = u_{g0} \cdot D / \nu_g \quad (27)$$

$$R_{e_{l0}} = u_{l0} \cdot D / \nu_l \quad (28)$$

よって, 式(17) および式(18)に式(19)から式(28)を代入すると,

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_g = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{g0} \left(\frac{D_g}{D}\right)^{m-1} f_g^{-(m+2)} \quad (29)$$

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_l = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{l0} \left(\frac{D_l}{D}\right)^{n-1} (1-f_g)^{-(n+2)} \quad (30)$$

また, 摩擦圧力損失比およびマルチネリ・パラメータは, つぎのように定義されている.

$$\phi_g^2 = \frac{(\Delta P_f / \Delta L)_{l,p}}{(\Delta P_f / \Delta L)_{g0}} = \left(\frac{D_g}{D}\right)^{m-1} f_g^{-(m+2)} \quad (31)$$

$$\phi_l^2 = \frac{(\Delta P_f / \Delta L)_{l,p}}{(\Delta P_f / \Delta L)_{l0}} = \left(\frac{D_l}{D}\right)^{n-1} (1-f_g)^{-(n+2)} \quad (32)$$

$$X_{ll}^2 = \frac{(\Delta P_f / \Delta L)_{l0}}{(\Delta P_f / \Delta L)_{g0}} = \frac{\phi_l^2}{\phi_g^2} \quad (33)$$

ここで, 一般に, $m = n = -0.25$ であるから

$$\phi_g^2 = \left(\frac{D_g}{D}\right)^{-1.25} f_g^{-1.75} \quad (34)$$

$$\phi_l^2 = \left(\frac{D_l}{D}\right)^{-1.25} (1-f_g)^{-1.75} \quad (35)$$

$$X_{ll}^2 = \left(\frac{D_g}{D_l}\right)^{-1.25} \left(\frac{f_g}{1-f_g}\right)^{-1.75} \quad (36)$$

したがって, 式(1)の関係と結びつけて,

$$\left(\frac{\phi_l}{X_{ll}}\right)^2 = \left(\frac{D_l^2}{D \cdot D_g}\right)^{-1.25} \left[\frac{(1-f_g)^2}{f_g}\right]^{-1.75} \quad (37)$$

あるいは,

$$\frac{\phi_l}{X_{ll}} = \left(\frac{D_l^2}{D \cdot D_g}\right)^{-0.625} \left[\frac{f_g}{(1-f_g)^2}\right]^{-0.875} \quad (38)$$

式(3), 式(4), 式(12) および式(13)を式(38)

に代入すると,

$$\begin{aligned} \frac{\phi_l}{X_{ll}} &= \left\{ \frac{\eta^2}{\xi} \cdot \frac{(1-f_g)^2}{f_g} \right. \\ &\quad \cdot \left. \frac{(a+b)(a+f_g b)}{[a+2(1-f_g)b]^2} \right\}^{-0.625} \left\{ \frac{f_g}{(1-f_g)^2} \right\}^{0.875} \\ &= \left(\frac{\eta^2}{\xi} \right)^{-0.625} \left\{ \frac{(a+b)(a+f_g b)}{[a+2(1-f_g)b]^2} \right\}^{-0.625} \\ &\quad \left\{ \frac{f_g}{(1-f_g)^2} \right\}^{1.5} \\ &= B \cdot \left\{ \frac{(T+1)(T+f_g)}{[T+2(1-f_g)]^2} \right\}^{-0.625} \left\{ \frac{f_g}{(1-f_g)^2} \right\}^{1.5} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\text{ただし, } B = (\eta^2/\xi)^{-0.625} \quad (40)$$

である. ここで導かれた整理式(39)と実験結果との比較から, 修正係数 B の値は, 水平管が 0.030, 傾斜管が 0.040 および鉛直管が 0.045 である. 図1から図3に整理式(39)を実線で加えてあるが, 式(39)は実験結果を良好に表わしている.

5. 結 言

長方形管内気液二相流における圧力損失と流動現象についての実験結果の検討から, 摩擦圧力損失の整理法を考察した. その結果, つぎのようなことがわかった.

(1) 摩擦圧力損失比は気体体積率の関数として従来から取扱われてきたが, これに重量流量比の関係を付加すると, 実験結果を良く整理できた.

(2) 管路断面の幾何学的形状および管路の傾斜角の影響を無視した場合の実験式

$$\frac{\phi_l}{X_{ll}} = 0.008(1-f_g)^{-4.1}$$

を得た. しかし, この式は幾何学的形状や傾斜角等の影響が少し残り, 実験結果の定量的なまとまりがいくぶんなかった.

(3) 管路断面の幾何学的形状および管路の傾斜角などの影響を加味した整理式

$$\frac{\phi_l}{X_{ll}} = B \left\{ \frac{(T+1)(T+f_g)}{[T+2(1-f_g)]^2} \right\}^{-0.625} \left\{ \frac{f_g}{(1-f_g)^2} \right\}^{1.5}$$

を分離流モデルから導いた. ここに, B の値は水平管で 0.030, 傾斜管で 0.040, 鉛直管で 0.045 である. この整理式は実験結果を良好に表わした.

本報告の一部は日本機械学会九州支部宮崎地方講演会(1977-5)にて講演したことを付記する.

文 献

- 1) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究（第1報），鹿児島大学工学部研究報告，第17号（1975-9），25.
 - 2) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究（第2報），鹿児島大学工学部研究報告，第18号（1976-12），55.
 - 3) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究（第3報），鹿児島大学工学部研究報告，第19号（1977-11），35.
 - 4) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究（第4報），鹿児島大学工学部研究報告，第20号（1978）.
 - 5) R. W. Lockhart and R. C. Martinelli: Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Component Flow in Pipes, Chem. Engng. Progr., 45-1 (1941-1), 39.
 - 6) 赤川：気水混合物の流動，日本機械学会論文集，23-128（1957-4），292.
-