

気液二相流の圧力損失に関する研究 (第2報)

鉛直長方形管内上向流における水力相当直径と縦横比の影響

松村博久・野崎 勉・古武昭二

(受理 昭和48年5月26日)

STUDIES ON THE PRESSURE DROP FOR TWO-PHASE GAS-LIQUID FLOW IN CHANNEL (Report 2)

Effects of the Hydraulic Diameter and the Aspect Ratio on the
Pressure Drop of Vertical Rectangular Channels
with Upward Flow

Hirohisa MATSUMURA, Tsutomu NOZAKI and Shōji KOTAKE

There are many correlations on the pressure drop of the two-phase gas-liquid flow in pipes, but few in non-circular channels, then the experiments are arranged for the pressure drop of the two-phase air-water flow in the vertical rectangular channels with upward flow.

No effects of the hydraulic diameter and the aspect ratio are recognized, except for the case of a little flow rate of the water, in the relation between the ratio of the frictional pressure drop of the two-phase air-water flow to the single-phase water flow and the Martinelli's parameter.

1. 結 言

非円形断面管内の気液二相流における気体と液体の挙動と圧力損失の関係を調べるために、まず長方形断面管を選んでみる。

前報¹⁾では、水力相当直径 20mm、縦横比 2.0、管長 1150 mm の長方形断面管を用いて、鉛直上向きの空気-水二相流の摩擦圧力損失を実験的に調べ、従来の円管の結果と比較検討した。また Petrick²⁾ の長方形断面管 (水力相当直径 20mm、縦横比 4.0 および水力相当直径 6.0mm、縦横比 16 の 2 種類) の実験結果とも比較検討した。その結果、円管および Petrick の場合と実験結果は定性的に一致するが、定量的にはいくらか異なった傾向が認められた。

ここでは、前報に引続き数種類の長方形断面管を用いて、鉛直上向きの空気-水二相流の摩擦圧力損失を実験的に調べ、水力相当直径および縦横比の影響について検討した。そして流動様式と気体体積率についても考察を行なった。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図 1 に示す。ヘッドタンク①から供給される水は水流量調節弁②で制御され、水流量計③を通して気液混合部④に入る。空気圧縮機⑤から供給される空気は、ストレーナ⑥と減圧弁⑦を経て空気流量調節弁⑧で制御され、空気流量計⑨およびサージタンク⑩を通して気液混合部④に入る。水と空気は気液混合部で混合され、気液二相流となって鉛直に支持されている測定管⑪に入る。測定管を出た気液二相流は集水タンク⑬を経て外部に排出される。

測定管⑪は無色透明なアクリル樹脂製で、実験に使用された測定管の種類は表 1 の通りである。すなわち水力相当直径の影響を調べるには、縦横比 2.0 で水力相当直径 9.3mm、14.4mm および 21.4mm の 3 種類があり、縦横比の影響を調べるには、水力相当直径約 14.6mm で縦横比 1.0、2.0、3.0 および 3.9 の 4 種類がある。

気液混合部④はアクリル樹脂製で、その詳細は図 2 に示している。空気は円管の周囲にあけてある直径が

- ①ヘッドタンク ②水流量調節弁 ③水流量計
- ④気液混合部 ⑤空気圧縮機 ⑥ストレーナ
- ⑦減圧弁 ⑧空気流量調節弁 ⑨空気流量計
- ⑩サージタンク ⑪測定管 ⑫集水タンク
- ⑬電磁弁 ⑭電磁弁 ⑮電磁弁
- ⑯バイパス回路 ⑰排水管 ⑱マンメータ
- ⑲水銀マンメータ ⑳圧力計 ㉑熱電対

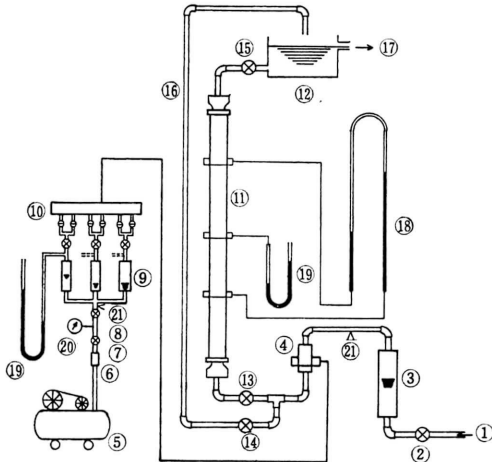


図1 実験装置概略図

表1 測定管の種類

種類	水力相当直径 (mm)	長辺の長さ (mm)	短辺の長さ (mm)	管長 (mm)	縦横比
管1	9.3	14.0	6.9	1000	2.0
管2	21.4	32.3	16.0	1800	2.0
管3	14.6	14.6	14.6	2500	1.0
管4	14.4	21.8	10.8	2500	2.0
管5	14.5	29.0	9.7	2500	3.0
管6	14.8	36.4	9.3	2500	3.9

0.8mmの8個の孔から管内の水流に吹き込まれる。

気体体積率の測定は締切り法で行なった。電磁弁⑬と⑮を閉じると同時に電磁弁⑭を開き、気液二相流体を測定管内に閉じ込め、測定管内の体積にたいする閉じ込めた空気体積の割合から平均の気体体積率を算出した。

水および空気の温度は、それぞれの流量計の近くに設置してある銅—コンスタンタン熱電対⑳と電位差計にて測定した。また測定管内の気液二相流の流動様式は肉眼にて観察した。

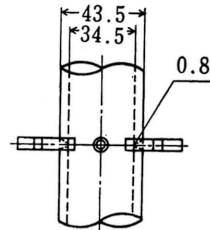
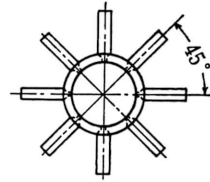


図2 気液混合部詳細図

3. 実験結果および考察

3.1 水単相流の摩擦圧力損失

水単相流の実験結果を管摩擦係数とレイノルズ数の関係で示したのが図3および図4である。ここで管摩擦係数 λ_i とレイノルズ数 Re_i は、次式のように定義してある。

$$\lambda_i = \frac{2gDe}{\gamma_i u_m^2} \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_i \quad (1)$$

$$Re_i = \frac{De u_m}{\nu_i} \quad (2)$$

ただし、

$$De = \frac{2ab}{a+b} \quad (3)$$

ここに、

- a: 測定管長方形断面の長辺の長さ、
 - b: 測定管長方形断面の短辺の長さ、
 - De: 水力相当直径、
 - g: 重力の加速度、
 - $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_i$: 水単相流における単位長さ当りの摩擦圧力損失、
 - u_m : 平均流速、
 - γ_i : 水の比重量、
 - ν_i : 水の動粘性係数、
- である。

図3は水力相当直径の影響を示し、図4は縦横比の影響を示している。水単相流の円管内乱流における管摩擦係数とレイノルズ数の関係は、例えば Blasius

の式

$$\lambda_l = 0.3164 Re_l^{-0.25} \quad (4)$$

で表わされるので、図3および図4には式(4)の関係も一点鎖線で加えてある。また、図3には参考のために表2のような水力相当直径が約20mmの長方形断面管を用いて実験を行なった他の研究者³⁾⁴⁾⁵⁾の結果も実線で示してある。

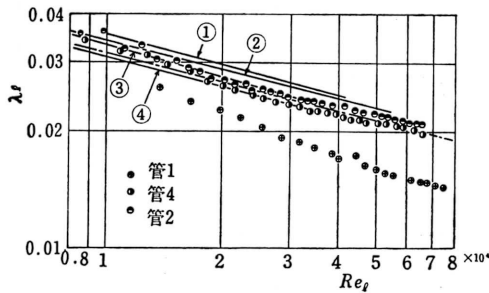


図3 水力相当直径の影響

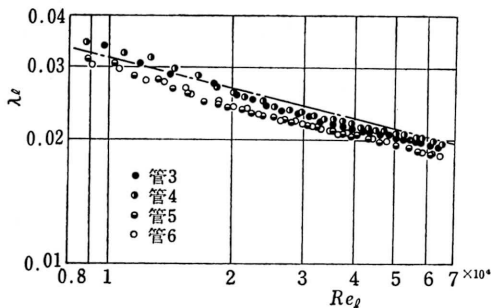


図4 縦横比の影響

表2 他の研究者の実験結果

記号	断面寸法 (mm) × (mm)	水力相当直径 (mm)	縦横比
① ³⁾	11 × 100	18.2	9.0
② ⁴⁾	15 × 30	20.0	2.0
③ ⁵⁾	19 × 19	19.0	1.0
④ ⁵⁾	14.2 × 28.5	19.0	2.0

水力相当直径の影響をみても、水力相当直径の小さい場合の9.3mmだけが他のものと比較して、同じレイノルズ数にたいする管摩擦係数は小さい値を示している。一方縦横比の影響は顕著でないことがわかる。

3.2 気液二相流の摩擦圧力損失

空気-水二相流の実験結果を Lockhart-Martinelli⁶⁾の整理方法で表わしたのが図5から図10である。図中のパラメータは管内を水だけが流れると仮定した場合の水相当流速 v_{lt} である。Lockhart-Martinelli は水平円管内の気液二相流にたいして、つぎの関係式を提示しているのので、この関係を図5から図10に破線で加えてある。

$$\phi_l = \sqrt{1 + \frac{21}{X_{lt}} + \left(\frac{1}{X_{lt}}\right)^2} \quad (5)$$

ただし、

$$\phi_l = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{tp}}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_l}} \quad (6)$$

$$X_{lt} = \left(\frac{W_l}{W_g}\right)^{0.9} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.1} \quad (7)$$

ここに、

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{tp}$: 気液二相流における単位長さ当りの摩擦

圧力損失、

W_g : 気体の重量流量、

W_l : 液体の重量流量、

μ_g : 気体の粘性係数、

μ_l : 液体の粘性係数、

である。

また、前報で得た関係式

$$\phi_l = \sqrt{1 + \frac{38}{X_{lt}} + \left(\frac{10}{X_{lt}}\right)^2} \quad (8)$$

も図5から図10に実線で表わしている。

図5から図10によると、前に報告¹⁾⁴⁾したように水相当流速が比較的小さい場合には、スラグ流から遷移流(フロス流)の範囲で流動が不安定となり、かなりの脈動をともなって管壁付近において水の一部が逆流現象を生ずるために、水相当流速が大きい場合よりも ϕ_l の値は小さく、時には ϕ_l の値が1よりも小さくなることもある。

図5、図6および図8から水力相当直径の影響を調べてみると、上述のことは水力相当直径が大きくなるにつれて顕著となっている。また図7、図8、図9および図10から縦横比の影響をみても、水相当流速の小さい場合を除いたらめだった差異は認められない。

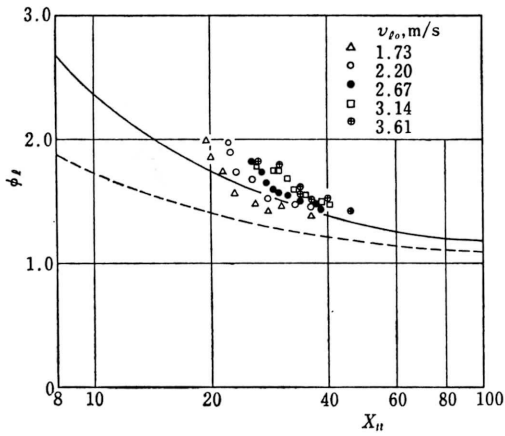


図5 $\phi_l - X_{ll}$ の関係 (管1)

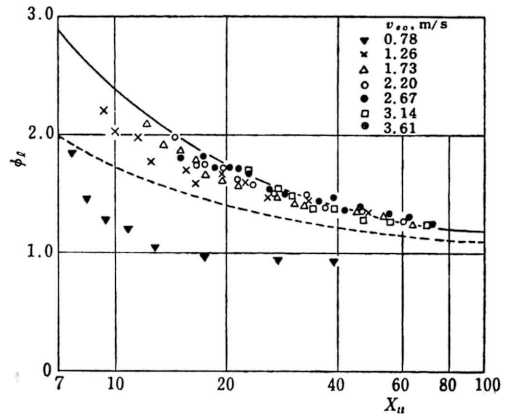


図8 $\phi_l - X_{ll}$ の関係 (管4)

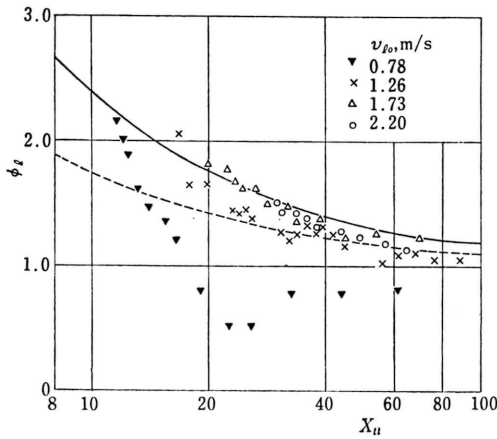


図6 $\phi_l - X_{ll}$ の関係 (管2)

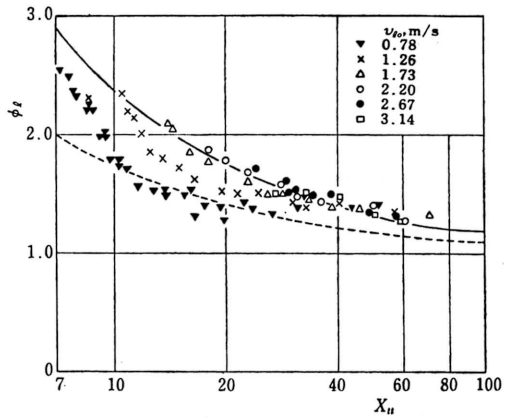


図9 $\phi_l - X_{ll}$ の関係 (管5)

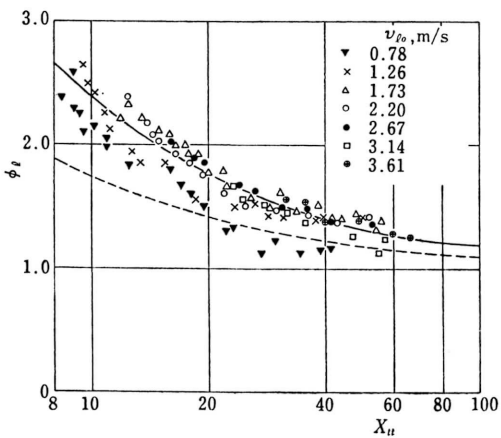


図7 $\phi_l - X_{ll}$ の関係 (管3)

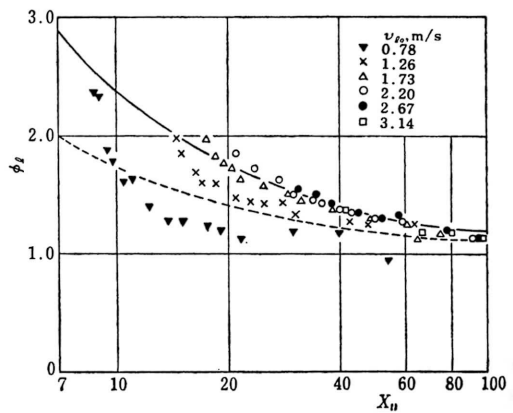


図10 $\phi_l - X_{ll}$ の関係 (管6)

以上のことから、水相当流速の比較的小さい場合、すなわちスラグ流から遷移流の範囲における局所的な水の逆流現象を生ずる領域を除外してみると、水力相当直径および縦横比の影響を考慮せずに、実験結果は近似的に関係式（8）で整理できることがわかる。

3.3 気液二相流の流動様式と気体体積率

空気-水二相流の流動様式は前報と同様に気ほう流、

スラグ流、遷移流および気柱流の4形式に分類する。図11および図12は肉眼観察によるそれぞれの流動様式の境界を水相当流速 v_{i0} と空気相当流速 v_{g0} の関係で表わしている。実線は気ほう流とスラグ流、一点鎖線はスラグ流と遷移流、そして破線は遷移流と気柱流の大体の境界である。図11は水力相当直径の影響を示し、図12は縦横比の影響を示している。ただし、図12には縦横比1.0と3.9の場合しか表わしていないが、縦横比2.0および3.0の場合は縦横比1.0と3.9の間にそれぞれの境界が存在するので書くのを省略した。

気体体積率 f_g と重量流量比 W_g/W_l の関係は図13から図18に示している。図中のパラメータは水相当流速で、それぞれの記号は図5から図10に示した記号と対応している。図13から図18より、水相当流速が大きくて気体体積率が小さい場合はすべり比がほぼ1であるが、水相当流速が小さくて気体体積率が大きい場合にはすべり比が約4になることが考察できる。

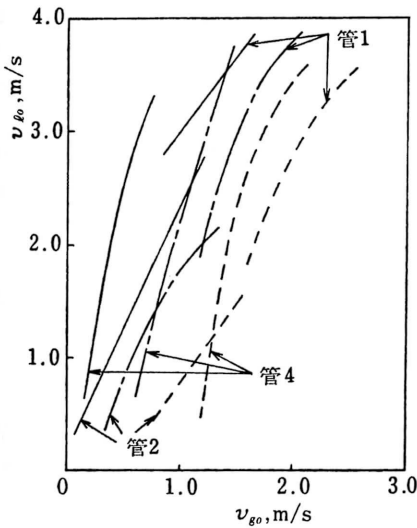


図11 水力相当直径の影響

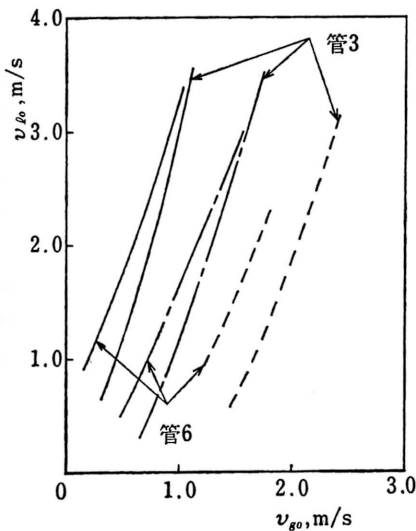


図12 縦横比の影響

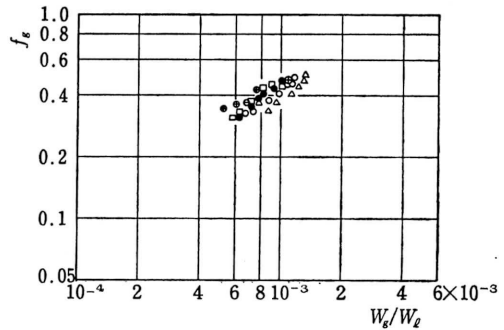


図13 気体体積率と流量比の関係（管1）

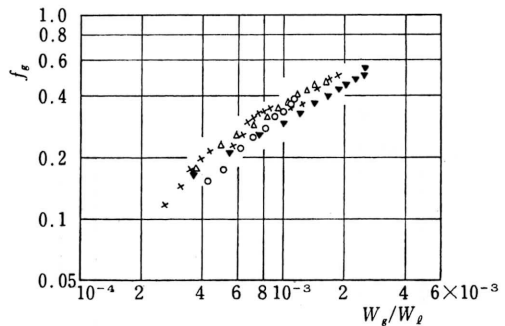


図14 気体体積率と流量比の関係（管2）

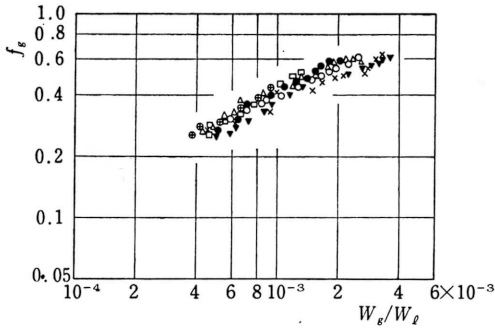


図15 気体体積率と流量比の関係(管3)

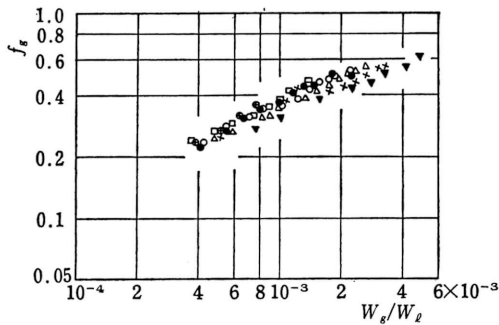


図16 気体体積率と流量比の関係(管4)

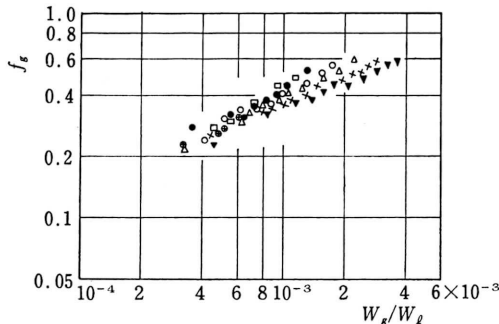


図17 気体体積率と流量比の関係(管5)

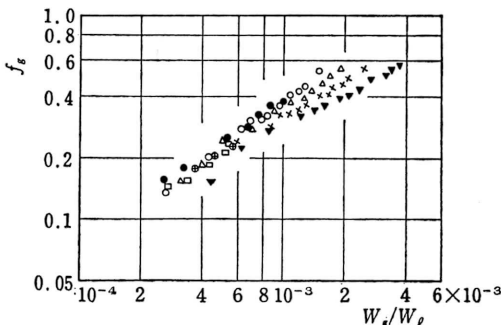


図18 気体体積率と流量比の関係(管6)

4. 結 言

鉛直長方形断面管内上向流における水単相流および空気-水二相流の摩擦圧力損失について、水力相当直径および縦横比の影響を実験的に調べた結果、つぎのようなことがわかった。

(1) 水単相流における管摩擦係数とレイノルズ数の関係において、水力相当直径の小さい場合を除いて、水力相当直径および縦横比の影響は認められない。

(2) 空気-水二相流における ϕ_L と X_{tt} の関係において、水相当流速の比較的小さい場合を除いて、水力相当直径および縦横比の影響は認められず、近似的に関係式(8)で整理できる。

(3) 空気-水二相流における流動様式と気体体積率について調べたが、理論的解析を行なうには気体と液体の挙動をもう少し詳細に考察する必要がある。これに関しては続報で取扱う予定である。

終りに、本実験に協力を得た中間信幸技官ならびに榎本隆一と野田あずさの両君に謝意を表する。

文 献

- 1) 松村：気液二相流の圧力損失に関する研究(第1報)，鹿児島大学工学部研究報告，第13号(1971-9)，17.
- 2) M. Petrick: Two-Phase Air-Water Flow Phenomena, ANL-5787 (1958-3).
- 3) 植松・狩野：空気による粉粒体の輸送に関する研究(第1報)，日本機械学会第38期通常総会講演会，前刷集 No. 43 (1961-4)，135.
- 4) 松村・横山：気液二相流の圧力損失に関する研究(第1報)，日本機械学会関西支部第222回講演会，講演論文集(1969-6)，92.
- 5) 井上・青木：管内二相流の圧力損失に関する基礎的研究(第3報)，日本機械学会論文集，36，288 (1970-8)，1358.
- 6) R. W. Lockhart & R. C. Martinelli: Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Component Flow in Pipes, Chem. Engng. Progr., 45, 1 (1941-1), 39.