

長方形管内気液二相流の研究 (第4報)

摩擦圧力損失の整理方法の検討

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 4)

Considerations on the Correlations of Frictional Pressure Drop

Hirohisa MATSUMURA and Hideo IDE

In the previous reports, the experimental results of frictional pressure drop in channels with rectangular cross section were discussed to compare with the correlations of frictional pressure drop in pipes with circular cross section in air-water two-phase flow. The frictional pressure drop and the flow behaviour in two-phase flow were inquired into the effects of the geometric shapes of the cross section and the inclined angle of test section.

In this paper, the experimental results of the frictional pressure drop and the flow behaviour in channel with rectangular cross section which has larger aspect ratio are added to the preceding results. The correlations of frictional pressure drop in two-phase flow are investigated experimentally in detail.

1. 緒 言

これまでの報告^{1),2),3)}では、水平、15°傾斜、45°傾斜および鉛直における長方形断面管路内の空気-水二相流の摩擦圧力損失と流動現象について、縦横比が一定の場合および水力相当直径が一定の場合の検討がなされた。さらに、管路断面の幾何学的形状(縦横比、横長・縦長、水力相当直径)および傾斜角が気液二相流の摩擦圧力損失におよぼす影響についても考察が行なわれ、管路内の気体体積率および肉眼観察による流動様式との関係も加えられた。

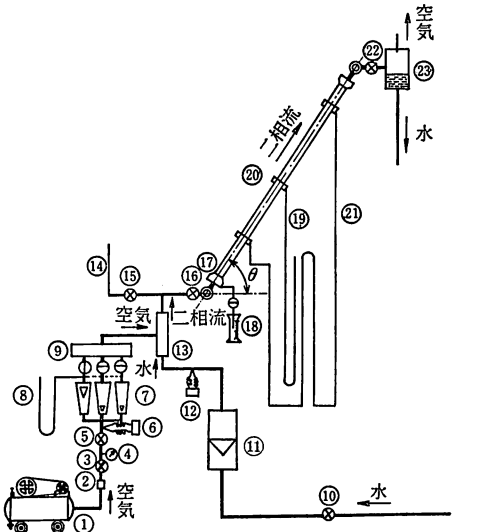
引き続き本報では、さらに縦横比の大きい長方形断面管路の実験を加え、Lockhart-Martinelli⁴⁾の整理法および赤川⁵⁾の整理式による実験結果の整理法を検討している。とくに縦横比の大きい時は縦横比が4以下の管内流れと異なっているので、写真的観察も行なっている。そして、摩擦圧力損失ならびに流動現象におよぼす上述の影響について、これまでの報告の総括を行なっている。さらに気体体積率と重量流量比の関係から実験式を得ている。

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。実験に使用した測定管は、透明アクリル樹脂で製作され、その種類および主要寸法は、表1に示す通りである。測定管の傾斜角 θ は、0°(水平)、15°、45°および90°(鉛直)の4種である。なお、水平管および傾斜管において、測定管の横断面の長辺を水平方向に設置した場合を横長、短辺を水平方向に設置した場合を縦長とした。

流体の流動経路について、オーバフロータンクからの水は、水流量調節弁⑩より水流量計⑪を通過して、気液混合部⑬に流入する。また、空気圧縮機①から供給された空気は、ストレーナ②、減圧弁③を経て、空気流量調節弁⑤より空気流量計⑦、サージタンク⑧を通過して、気液混合部⑬の水中に噴出される。気液混合部で気液二相流となった流体は、測定管⑭を通過して、気水分離器⑮にはいる。ここで気液二相流体は空気と水に分離され、外部に排出される。

測定管内の圧力損失は逆U字マノメータ⑯で、測定管内静圧および空気流量計内静圧は水銀マノメータ⑰



- ① 空気圧縮機 ⑨ サージタンク ⑬ 絞り管
- ② ストレーナ ⑩ 水流量調節弁 ⑭ 水銀測定用メシリング
- ③ 減圧弁 ⑪ 水流量計 ⑮ 水銀マンメータ
- ④ ブルドン管圧力計 ⑫ 熱電対 ⑯ 測定管
- ⑤ 空気流量調節弁 ⑬ 気液混合部 ⑰ 逆U字マンメータ
- ⑥ 熱電対 ⑭ バイパス回路 ⑱ 電磁弁
- ⑦ 空気流量計 ⑮ 電磁弁 ⑲ 気水分離器
- ⑧ 水銀マンメータ ⑯ 電磁弁

図1 実験装置概略

と⑧で測定した。平均気体積率は、縮切法によって管路内の水容積を測定し、その容積と管路容積の比から算出した。水および空気の温度は、それぞれの流量計の下流に設置してある銅-コンスタンタン熱電対と電位差計⑮と⑥によって計測した。気液二相流の流動様式は肉眼にて観察した。

表1 測定管の種類

| 管 | 長辺×短辺 (mm) | 水力相当直径 (mm) | 縦横比 | 管長 (mm) | 測定部長 (mm) |
|---|------------|-------------|------|---------|-----------|
| 1 | 14.6×14.6 | 14.6 | 1.0 | 2500 | 1400 |
| 2 | 21.8×10.8 | 14.4 | 2.0 | 2500 | 1400 |
| 3 | 29.0×9.7 | 14.5 | 3.0 | 2500 | 1400 |
| 4 | 36.4×9.3 | 14.8 | 3.9 | 2500 | 1400 |
| 5 | 14.0×6.9 | 9.2 | 2.0 | 1000 | 600 |
| 6 | 32.3×16.0 | 21.4 | 2.0 | 1800 | 900 |
| 7 | 80.0×7.9 | 14.2 | 10.1 | 4300 | 1400 |

3. 実験結果の整理および考察

3.1 L-M法による整理

実験結果を Lockhart-Martinelli⁴⁾ の整理法 (L-M法), すなわち、摩擦圧力損失比の平方根 ϕ_L とマルチネリ・パラメータ X_{LL} の関係で整理したのが図2から図4である。ただし、

$$\phi_L = \left[\frac{(\Delta P_f)_{LP}}{(\Delta P_f)_{LO}} \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$X_{LL} = \left(\frac{W_L}{W_G} \right)^{0.9} \left(\frac{\gamma_G}{\gamma_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0.1} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L} \right)_{LO} = \lambda_L \left(\frac{\gamma_L \cdot u_{LO}^3}{2g \cdot D_e} \right) \quad (3)$$

ここに、

D_e : 水力相当直径,

g : 重力加速度,

$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L} \right)_{LO}$: 水単相流における単位長さ当りの摩擦圧力損失,

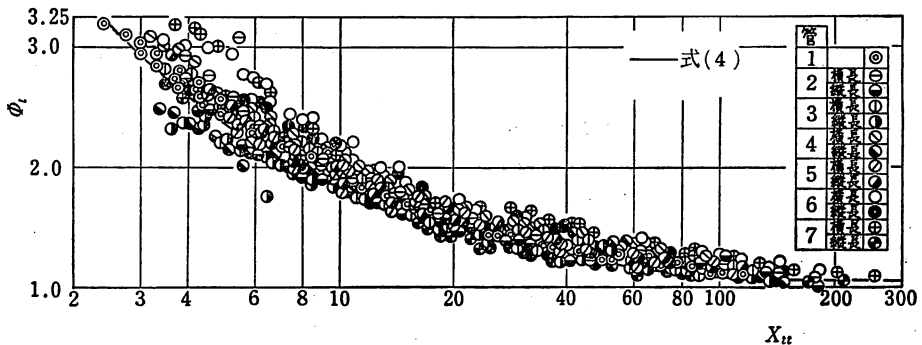


図2 ϕ_L と X_{LL} の関係 (水平管)

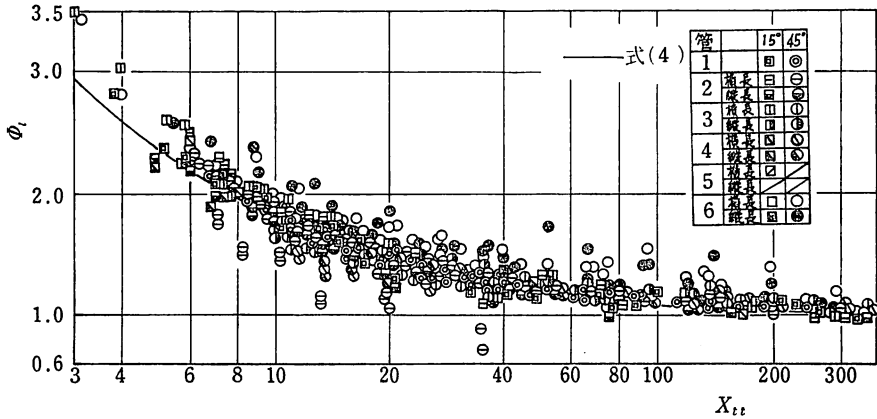


図3 ϕ_i と X_{ii} の関係（傾斜管）

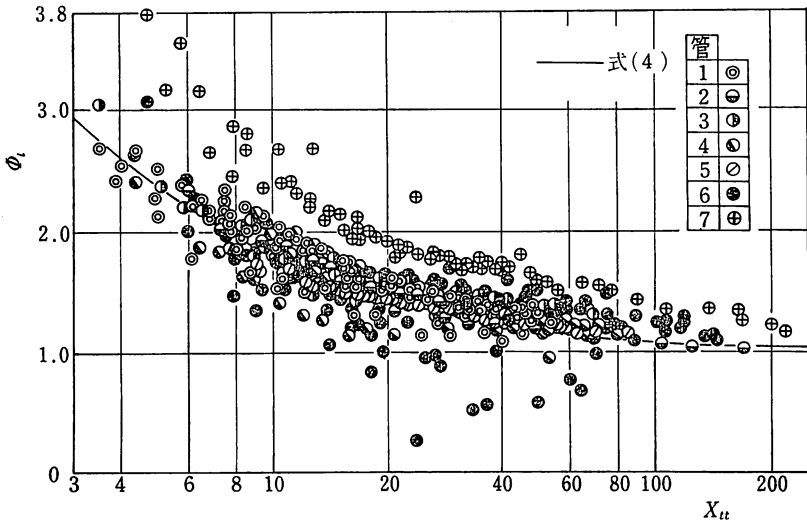


図4 ϕ_i と X_{ii} の関係（鉛直管）

$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{tp}$: 二相流における単位長さ当りの摩擦
圧力損失,

u_{i0} : 二相流体の水のみが管路を満して流
れると仮定した場合の水相当流速,

W_g, W_l : 空気および水の重量流量,

X_{ii} : 気相および液相乱流の場合のマルチ
ネリ・パラメータ,

γ_g, γ_l : 空気および水の比重量,

λ_l : 水単相流における管摩擦係数,

μ_a, μ_g : 空気および水の粘性係数,

ϕ_i : 摩擦圧力損失の平方根,

である。

図2は水平管，図3は傾斜管および図4は鉛直管の
実験結果を整理したもので，これらの図には Chisholm
ら⁶⁾ が円管の実験結果から得た関係式(4)を実線で
表わしている。

$$\phi_i = \left[1 + \frac{21}{X_{ii}} + \left(\frac{1}{X_{ii}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

これらの図によると，実験結果は式(4)と定性的
な一致を示しているが，傾斜角が大きくなるほど，定
量的に良好な整理法とはいえない。傾斜角が大きい場
合は，二相摩擦圧力損失が水単相摩擦圧力損失に近い
か，あるいはそれ以下になることもある。これは水相
当流速が比較的小さい場合のスラグ流から遷移流（流
動様式の説明は後の3.3節でする。）において，管路

内壁付近の水が局部的に逆流現象を示すためだと考えられる。この現象は水力相当直径が大きい程顕著となっている。

傾斜角が小さい場合は、同じ X_{iL} の値にたいする摩擦圧力損失は、管路断面の横長の方が縦長より大きい値を示している。これは X_{iL} の小さな範囲において、水力相当直径および縦横比が大きい程顕著となっている。とくに、図4に見られるように、縦横比が大きい管7の鉛直上向流における二相摩擦圧力損失は、同一 X_{iL} において、他の管よりも大きい値となっている。この場合の管内流れは他の管内流れに比べて非常にかく乱しており、他の管における流動現象とは異なっているためである。このことについては後の3.4節で述べる。

3.2 摩擦圧力損失比と気体体積率の関係

二相摩擦圧力損失の整理法について、赤川⁵⁾ はつぎの関係式を得ている。

$$\phi_i^2 = (1 - f_g)^{-Z} \tag{5}$$

ここに、

f_g : 気体体積率,

$(1 - f_g)$: 液体体積率,

である。指数 Z は管路の傾斜角および表面粗さなど

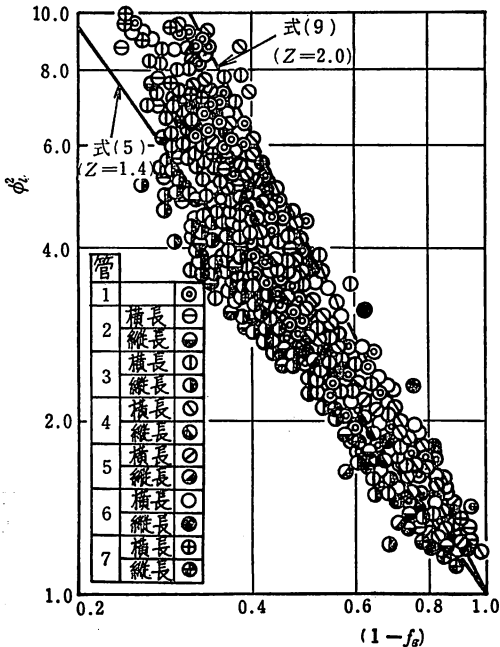


図5 ϕ_i^2 と $(1 - f_g)$ の関係 (水平管)

によって定まり、 Z の値は水平管で1.4、30°傾斜管で1.9、60°傾斜管で1.7、鉛直管で1.5を与えている。本実験結果を摩擦圧力損失比 ϕ_i^2 と気体体積率 f_g の関係で整理したのが図5から図7である。図5は水平管、図6は傾斜管および図7は鉛直管であり、これらの中には式(5)を実線で表わしている。

また、筆者の一人⁷⁾ はつぎのような仮定から同様な関係式(9)を導いている。すなわち、管路断面は空気の占める面積だけ縮小すると考える。水流量一定における水単相流の流速は管路断面の縮小により、その割合だけ大きくなるので、その流速における水単相流の摩擦圧力損失を気液二相流の摩擦圧力損失と仮定する。縮小した管路断面の水流速を u_i' とすると、仮定した二相流の摩擦圧力損失は、

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{i,p} = \lambda_i \left(\frac{\gamma_i u_i'^2}{2g \cdot D_o}\right) \tag{6}$$

これに、仮定によるつぎの関係式(7)

$$u_i' = \frac{u_{i0}}{(1 - f_g)} \tag{7}$$

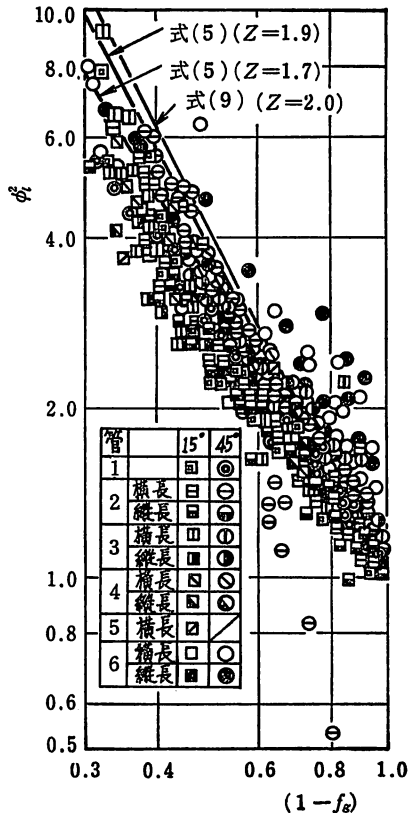


図6 ϕ_i^2 と $(1 - f_g)$ の関係 (傾斜管)

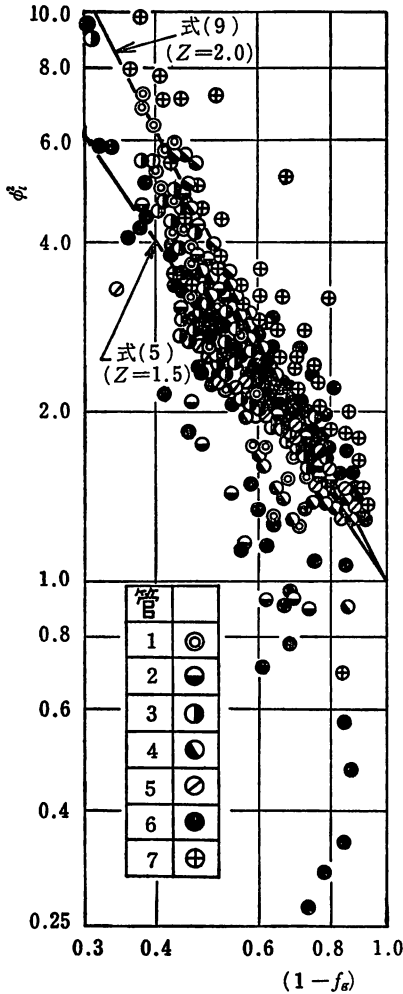


図7 ϕ^2 と $(1-f_g)$ の関係 (鉛直管)

と式(3)を代入すると,

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{\nu_p} = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{i_0} \left(\frac{1}{1-f_g}\right)^2 \quad (8)$$

となり, 式(1)から

$$\phi^2 = \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{\nu_p} / \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{i_0} = (1-f_g)^{-2} \quad (9)$$

この式(9)も図5から図7に実線で加えてある。

これらの図によると, 式(5)および式(9)は良好な整理を与えていない。傾斜角が小さい場合は, 管路断面の横長・縦長の影響がみられ, 傾斜角が大きい場合は, 水相当流速の比較的小さい時の局所的な水の逆流現象を示す領域で, 式(5)および式(9)の関係と異なった傾向を表わしている。

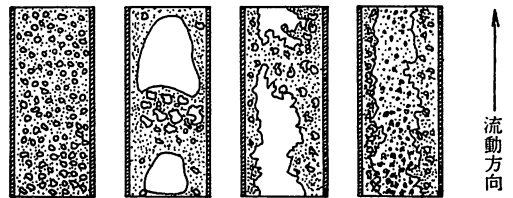
3.3 気体体積率と重量流量比の関係

傾斜角が小さい場合の水平管および15°傾斜管にたいする流動様式は, 図8のように, 気ほう流(B), 気ほうスラグ流(BS), スラグ流(S), 遷移流(F), 分離流(Sep)の5形式に, また傾斜角が大きい場合の45°傾斜管および鉛直管にたいする流動様式は, 図9のように, 気ほう流(B), スラグ流(S), 遷移流(F), 環状流(A)の4形式に分類している。

図10から図12は, 気体体積率 f_g と重量流量比 W_o/W_i の関係で実験結果を整理したものである。図10は水平管, 図11は傾斜管および図12は鉛直管であり, 図中の一点鎖線は, 次式から算出したすべり比 S を表わしている。

$$S = \left(\frac{W_o}{W_i}\right) \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g}\right) \left(\frac{1-f_g}{f_g}\right) \quad (10)$$

流動様式は肉眼観察で判別しているために, 流速が大きくなると, 流動様式のそれぞれの境界は明確に判別しにくくなるので, これらの図にはおおよその境界を破線で示している。



気ほう流(B) スラグ流(S) 遷移流(F) 環状流(A)

図9 45°傾斜管および鉛直管内における流動様式の分類

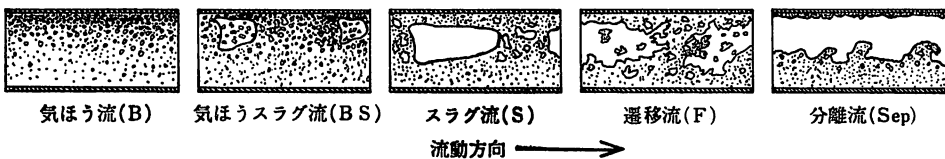


図8 水平管および15°傾斜管内における流動様式の分類

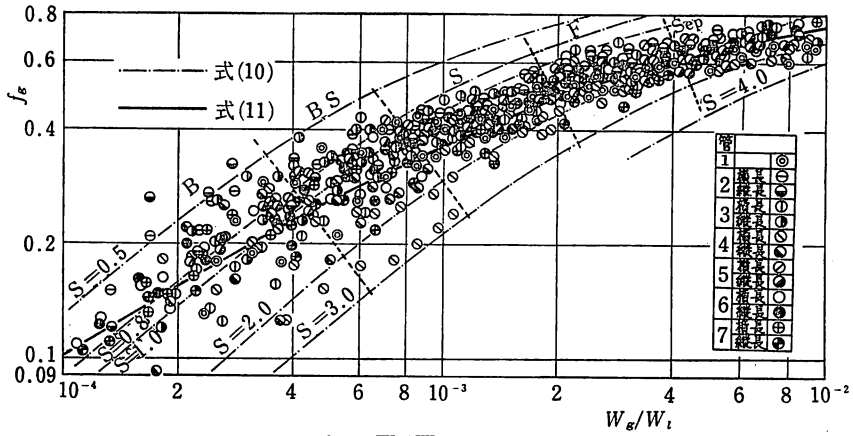


図10 f_g と W_g/W_l の関係 (水平管)

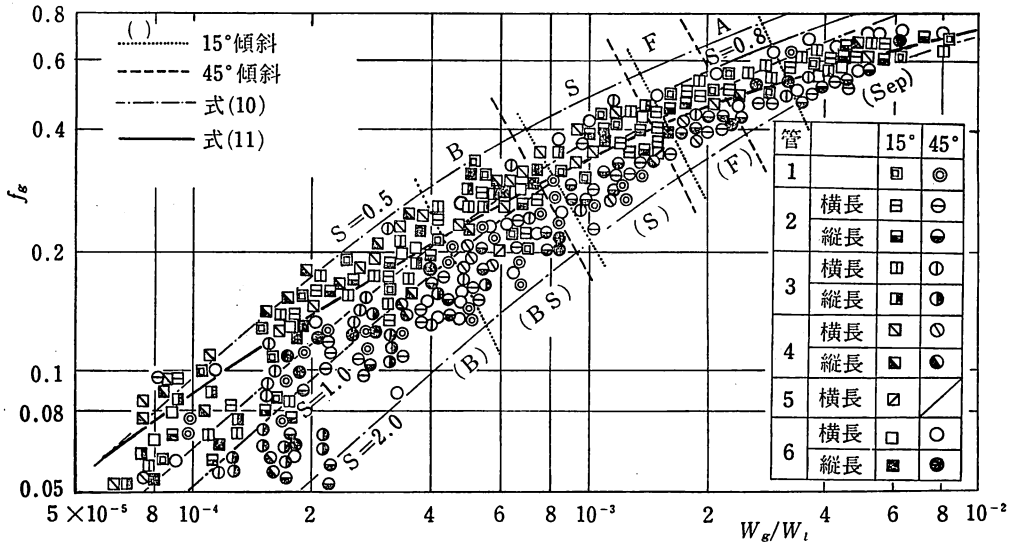


図11 f_g と W_g/W_l の関係 (傾斜管)

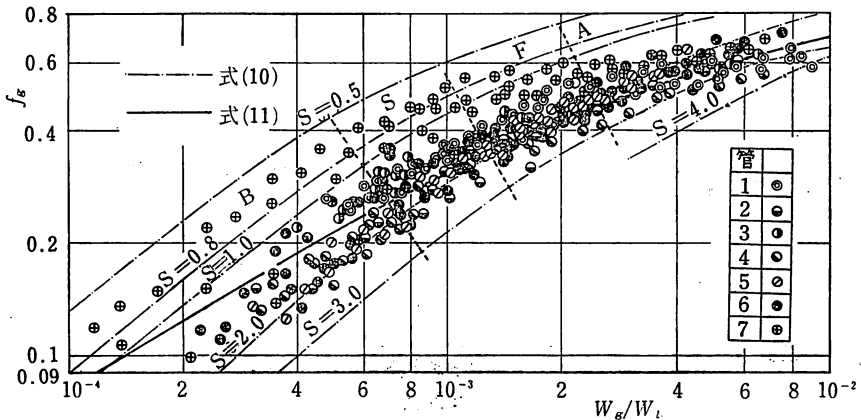


図12 f_g と W_g/W_l の関係 (鉛直管)

これらの図によると、傾斜角が大きくなるにつれて、流動様式のそれぞれの境界はいくらか気体体積率の小さい方にずれており、すべり比は大きくなっている。そこで、それぞれの図に実線で示しているように、実験結果を一本の曲線で表わしてみると、つぎの関係式が得られた。

$$f_g = \left[1 + A \left(\frac{W_g}{W_l} \right)^{-0.7} \right]^{-1} \quad (11)$$

ただし、 A は実験係数であり、水平管は 0.014、傾斜管は 0.016、鉛直管は 0.018 である。

3.4 縦横比の大きい場合の流動現象

3.1 節で述べたように、鉛直上向流において、管路断面の縦横比がとくに大きい管 7 の場合、図 9 で分類

されているような流動様式は観察されるが、管内の流れは非常にかく乱しており、他の管における流動現象とはかなり異なっている。図 13 は管 7 の流動の写真例を示している。この図は水流量一定として、空気流量を増加させた場合の流動現象を表わしている。気ほうおよび気体スラグがだ行しながら上昇したり、あるいは気ほうによる大きな渦（図中の矢印）がほぼ周期的に流動したりして、管内流のかなりかく乱しているのが認められる。

4. 結 言

長方形断面をもつ水平管、15°傾斜管、45°傾斜管および鉛直管における気液二相流の摩擦圧力損失につい

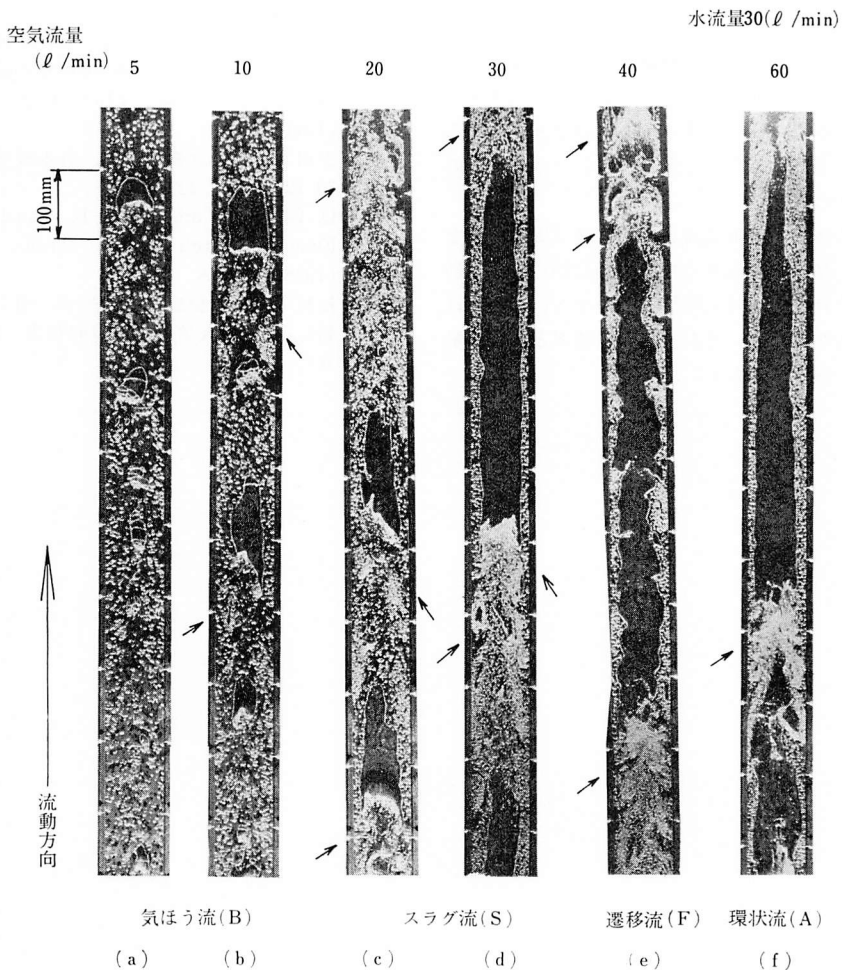


図13 縦横比の大きい場合の流動現象（鉛直管7）

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の影響ならびに流動現象との関連を実験的に調べ、実験結果の整理法を検討したことから、つぎのような知見が得られた。

(1) 二相摩擦圧力損失について、L-M 法では実験結果のすべてを良好に整理できない。とくに、傾斜角が大きい場合の局部的に水の逆流現象を与える領域については、実験結果のまとまりが悪く、傾斜角の小さい場合でも X_{fi} の小さい範囲では、管路断面の横長・縦長の影響が残っている。

(2) 摩擦圧力損失比と気体体積率の関係で実験結果を整理すると、式 (5) および式 (9) とは定量的に一致しない。ことに、傾斜角の大きい場合で、水相当流速の比較的小さい時の局部的な水の逆流現象を示す領域では、式 (5) および式 (9) の関係と異なった傾向を表わす。

(3) 鉛直管について、縦横比が10の場合は、縦横比が4以下の流動現象と異なって、気ほうや気体スラッグのただ行ならびに気ほうによる大きな渦などが認められ、流れはかなりかく乱しており、このような流れの摩擦圧力損失は大きい。

(4) 気体体積率と重量流量比の関係で実験結果を整理すると、傾斜角が大きくなるにしたがって、流動様式のそれぞれの境界は気体体積率の小さい方にずれ、すべり比は大きくなる。また、気体体積率と重量流量比の関係を実験式で表わすと、

$$f_g = \left[1 + A \left(\frac{W_g}{W_l} \right)^{-0.7} \right]^{-1}$$

ここに、 A は実験係数で、水平管は 0.014、傾斜管は 0.016、鉛直管は 0.018 である。

終わりに、本実験に協力を得た田内博夫、長山 勉、秀島信也の各氏に謝意を表わします。

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) 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.
- 5) 赤川：気水混合物の流動，日本機械学会論文集，23-128（1957-4），292.
- 6) D. Chisholm and A. D. K. Laird: Two-Phase Flow in Rough Tubes, Trans. ASME, 80-2 (1958-2), 276.
- 7) 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.