

長方形管内気液二相流の研究 (第2報)

傾斜管内および鉛直管内の上向流における流動と圧力損失

松村 博久・井手 英夫

(受理 昭和51年5月31日)

STUDIES ON TWO-PHASE GAS-LIQUID FLOW IN RECTANGULAR CHANNELS (Report 2)

Flow Behavior and Pressure Drop with Air-Water Upward Flow
in Inclined and Vertical Channels.

Hirohisa MATSUMURA and Hideo IDE

In this report, the rectangular channels are chosen as the non-circular cross sections, and it is investigated that the effects of the geometric shape in the cross section and the inclined angle of setting channel are affected by two-phase frictional pressure drop and flow behavior.

The experimental data of pressure drop for two-phase air-water flow in inclined and vertical channels are arranged by the correlation which is relation between the ratio of the frictional pressure drop for two-phase flow to the single-phase water flow and the Martinelli's parameter, and the visual results of flow pattern are correlated to void fraction and ratio of mass flow rate for air to water.

1. 緒言

前報¹⁾では、非円形断面管路として長方形断面管路を選び、水平管内の空気-水二相流の圧力損失と流動現象を実験的に調べた。実験結果は、従来から使用されている水平円管内気液二相流の摩擦圧力損失にたいする Lockhart-Martinelli²⁾の整理方法において、円管の直径の代りに水力相当直径を用いて、円管の結果と比較検討した。そして、一定の水力相当直径における縦横比の影響および管路断面の横長と縦長による影響について調べた。また、気体体積率および肉眼観察による流動様式との関係についても検討し、管路断面の幾何学的形状の影響を解析的に考察した。

引き続き本報告では、前報と同様の長方形断面管路を使用し、15°傾斜管内、45°傾斜管内および鉛直管内の上向流における圧力損失と流動現象を実験的に調べている。そして、気液二相流の摩擦圧力損失ならびに流動様式にたいする管路の傾斜角、縦横比および管路断面の横長、縦長の影響について検討している。

2. 実験装置および実験方法

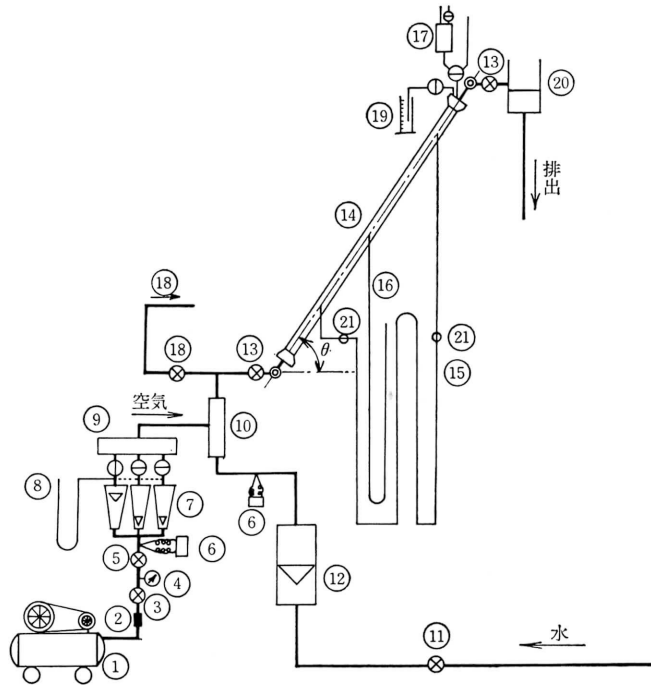
実験装置の概略を図1に示し、実験に使用した透明

アクリル樹脂製の測定管の種類を表1に示す。実験装置および実験方法は前報の場合と同様であるが、測定管⑭の傾斜角が自由に調節できる継手を加えてある。

オーバフロータンクから導かれた水は、水流量調節弁⑪で制御されて、水流量計⑫を通り気液混合部⑩に流入する。一方、空気圧縮機①からの空気は、ストレーナ②、減圧弁③を経て、空気流量調節弁⑤で調節され、空気流量計⑦、サージタンク⑨を通して、気液混合部⑩の水中に噴出される。気液混合部では水と空気が混合して二相流となり、測定管⑭にはいる。その後気水分離器⑳により空気と水に分離され、外部に排出される。管路内の圧力損失は逆U字マノメータ⑮で、管路内静圧および空気流量計における静圧は水銀マノメータ⑯と⑧で測定される。平均気体体積率の測定は締切法と気液交換法を併用して行った。すなわち、電磁弁⑬を急閉するとともに電磁弁⑱を

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	14.6	14.6	14.6	2500	1.0
管 2	14.4	21.8	10.8	2500	2.0
管 3	14.5	29.0	9.7	2500	3.0
管 4	14.8	36.4	9.3	2500	3.9



- | | | |
|--------------|------------|-------------------|
| ① 空気圧縮機 | ⑧ 水銀マンノメータ | ⑮ 逆U字マンノメータ |
| ② ストレーナ | ⑨ サージタンク | ⑯ 水銀マンノメータ |
| ③ 減圧弁 | ⑩ 気液混合部 | ⑰ 水タンク |
| ④ ブルドン管圧力計 | ⑪ 水流量調節弁 | ⑱ バイパス回路および電磁弁 |
| ⑤ 空気流量調節弁 | ⑫ 水流量計 | ⑲ メスシリンダ |
| ⑥ 熱電対および電位差計 | ⑬ 電磁弁 | ⑳ 気水分離器 |
| ⑦ 空気流量計 | ⑭ 測定管 | ㉑ マノメータ制振用および水逆止弁 |

図1 実験装置概略

急開し、測定部における水と空気の体積割合から求めた。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。なお、測定管の管路横断面について、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。

3. 実験結果および考察

3.1 気液二相流の圧力損失

気液二相流における管内静圧とマンノメータの読みとの関係を示したのが図2である。

ここに、図中の記号は、

Δh : マノメータの液柱差

ΔL : 測定区間の距離

P_1 : 位置1における静圧

P_2 : 位置2における静圧

W_g : 空気の重量流量

W_l : 水の重量流量

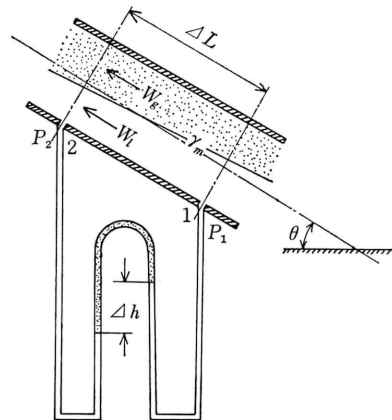


図2 静圧とマンノメータの読みとの関係

γ_m ：気液二相流体の平均比重量

θ ：水平面からの傾斜角

である。

静圧とマンローメータの読みとの関係より、気液二相流における単位長さあたりの全圧力損失は、水の比重量を γ_l とすると、

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{tp} = \frac{P_1 - P_2}{\Delta L} = \left(\sin \theta + \frac{\Delta h}{\Delta L}\right) \gamma_l \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 Δh は流路上流側のマンロー

メータの読みが高い場合を正、下流側が高い場合を負とする。

また、Bernoulli の式より

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{tp} = \left(\frac{\Delta P_a}{\Delta L}\right)_{tp} + \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{tp} + \left(\frac{\Delta P_g}{\Delta L}\right)_{tp} \quad (2)$$

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圧力損失

であり、添字 a, f および g はそれぞれ加速、摩擦お

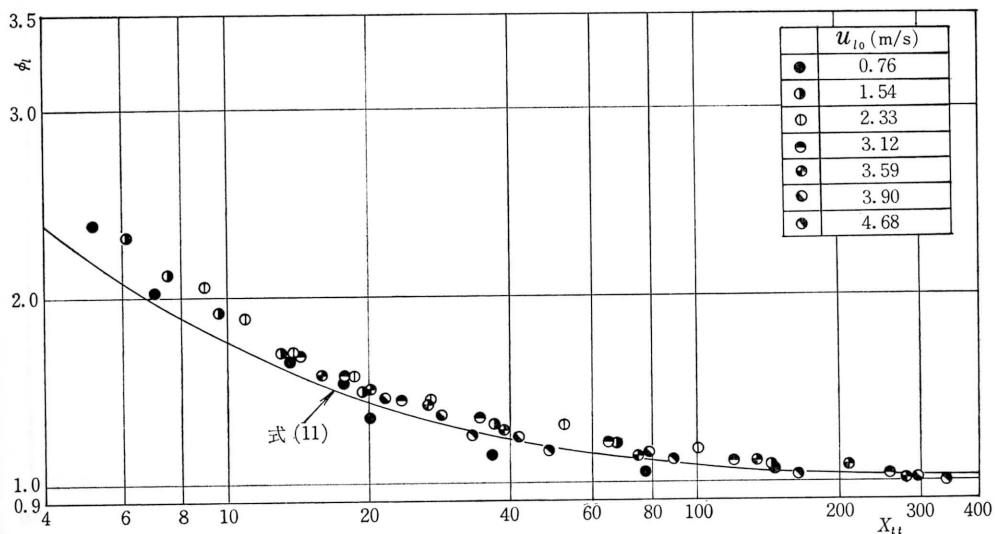


図3 ϕ_i と X_{tt} の関係 (管1, 15° 傾斜管)

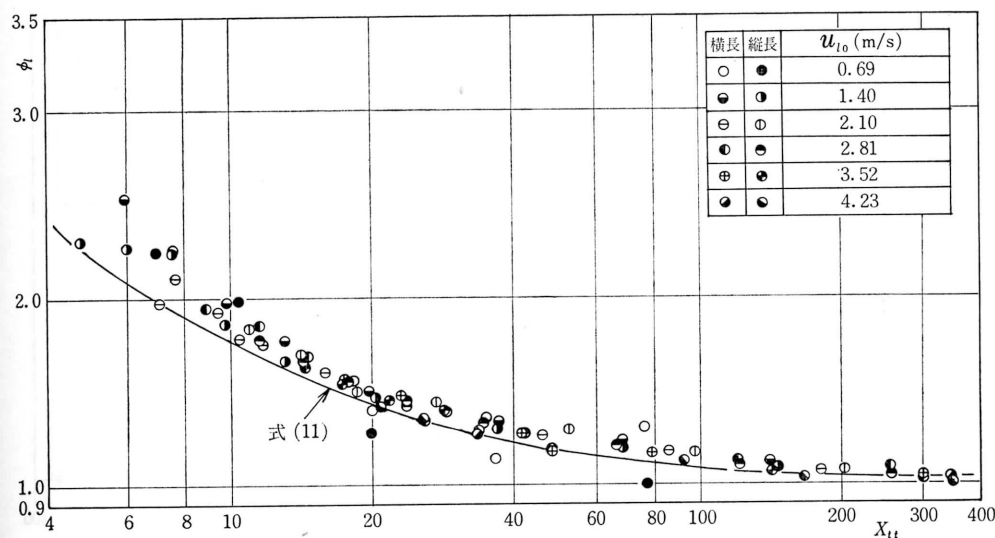


図4 ϕ_i と X_{tt} の関係 (管2, 15° 傾斜管)

よび重力によるものである。

ここでは、管路軸方向の気体体積率の変化が無視できるので、

$$\left(\frac{\Delta P_g}{\Delta L}\right)_{tp} \doteq 0 \tag{3}$$

また、気液二相流体の平均比重量を用いると、

$$\left(\frac{\Delta P_g}{\Delta L}\right)_{tp} = \gamma_m \cdot \sin \theta \tag{4}$$

この気液二相流体の平均比重量は、

$$\gamma_m = (1-f_g)\gamma_l + f_g\gamma_g \tag{5}$$

ここに、

γ_g : 空気の比重量

f_g : 平均気体体積率

であり、 $\gamma_l \gg \gamma_g$ より

$$\gamma_m \doteq (1-f_g)\gamma_l \tag{6}$$

したがって、気液二相流の摩擦圧力損失は、式(1)、

(2), (3), (4) および (6) より

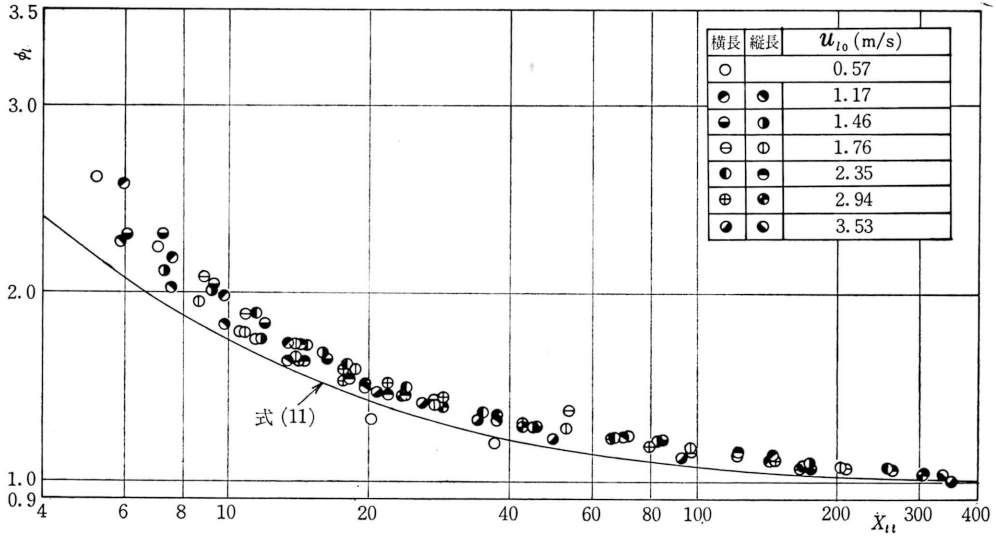


図5 ϕ_t と X_{tt} の関係 (管3, 15° 傾斜管)

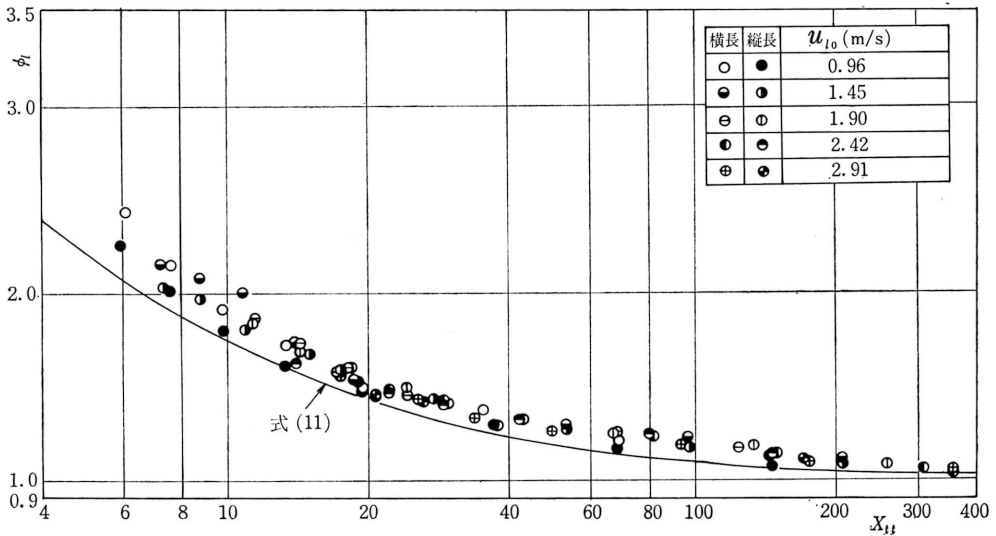


図6 ϕ_t と X_{tt} の関係 (管4, 15° 傾斜管)

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{lp} = \left(f_g \cdot \sin \theta + \frac{\Delta h}{\Delta L}\right) \gamma_l \quad (7)$$

となる。

3.2 気液二相流の摩擦圧力損失

実験結果を Lockhart-Martinelli の整理法、すなわち ϕ_l と X_{tt} の関係で整理したのが図3から図14であ

る。ただし、

$$\phi_l = \left[\frac{(\Delta P_f)_{lp}}{(\Delta P_f)_{lo}} \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{W_l}{W_g} \right)^{0.9} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{lo} = \lambda_l \left(\frac{\gamma_l \cdot u_{l0}^2}{2g \cdot D_e} \right) \quad (10)$$

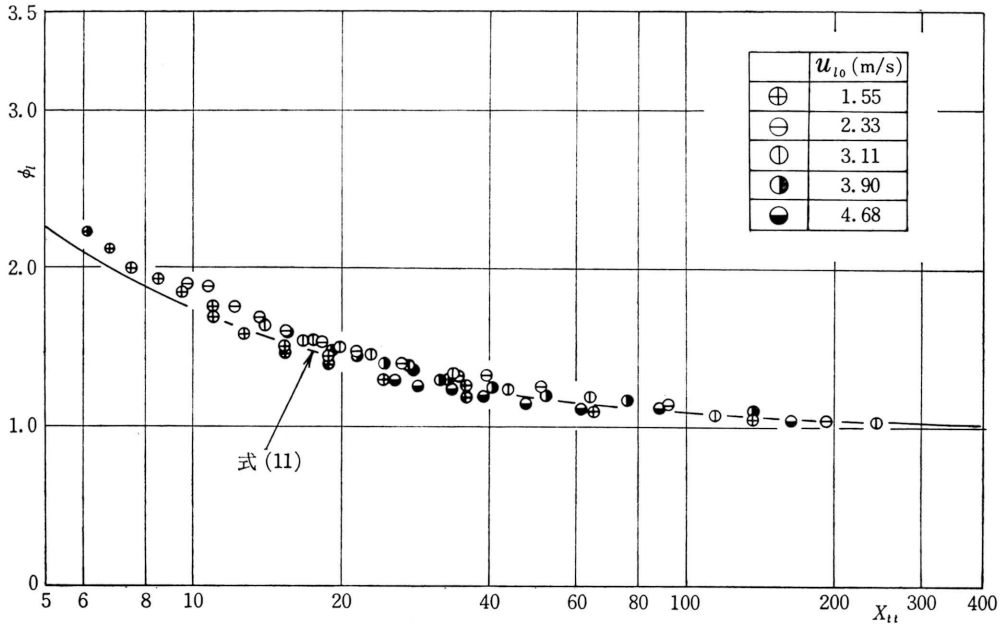


図7 ϕ_l と X_{tt} の関係 (管1, 45° 傾斜管)

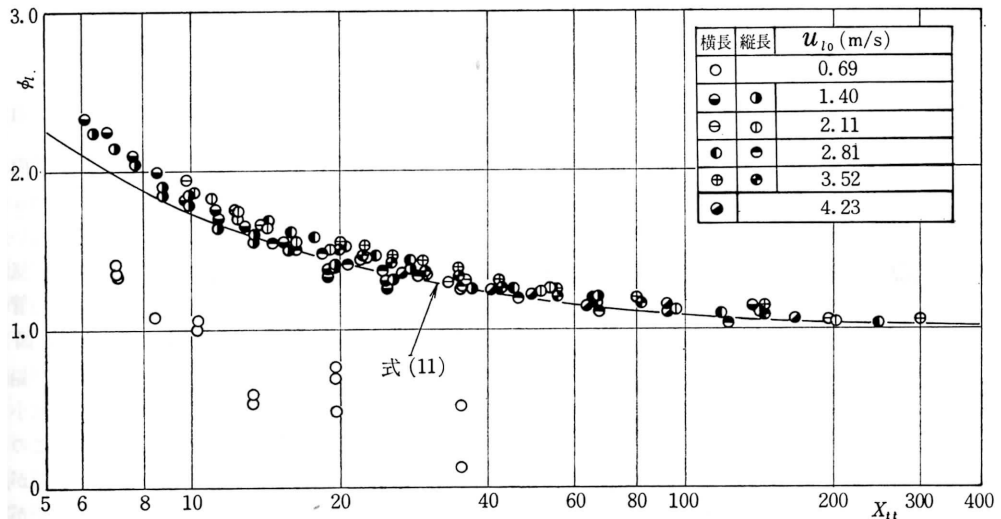
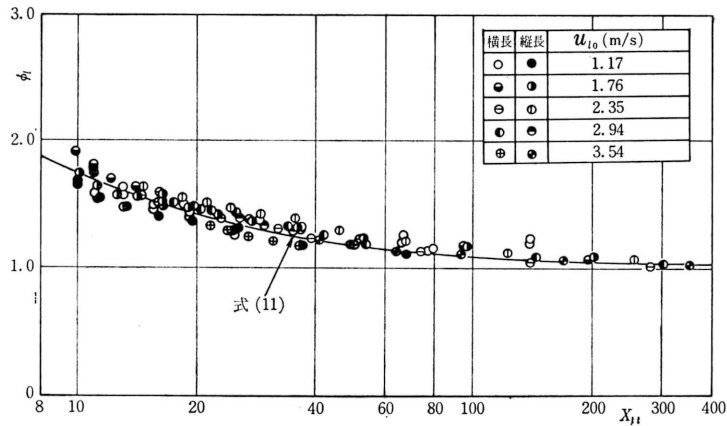
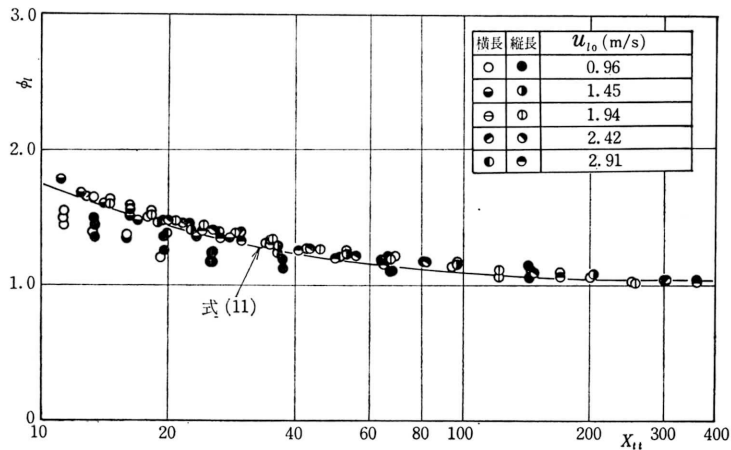


図8 ϕ_l と X_{tt} の関係 (管2, 45° 傾斜管)

図9 ϕ_i と X_{ii} の関係 (管3, 45° 傾斜管)図10 ϕ_i と X_{ii} の関係 (管4, 45° 傾斜管)

ここに,

D_e : 水力相当直径

g : 重力の加速度

u_{i0} : 二相流体中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

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

λ_i : 水単相流における管摩擦係数

μ_g : 空気の粘性係数

μ_l : 水の粘性係数

である。

これらの図には u_{i0} をパラメータで示し、実線は Chisholm ら³⁾ が円管の実験結果から得た関係式 (11) を表わしている。

$$\phi_i = \left[1 + \frac{21}{X_{ii}} + \left(\frac{1}{X_{ii}} \right)^{2 \cdot 0.5} \right] \quad (11)$$

これらの図から、15° 傾斜管内、45° 傾斜管内および鉛直管内の上向流における本実験結果は、 X_{ii} の小さい範囲では式 (11) と良好な一致がみられないが、 X_{ii} が大きくなるにともなって、すなわち、空気流量が少なくなるにともなって、Chisholm らの円管の結果と一致する傾向を示している。なお、図8、図12、図14に例示しているように、45° 傾斜管および鉛直管において水相当流速が比較的小さいとき ϕ_i は小さくなり、1 またはそれ以下になることがある。このことは松村⁴⁾ の報告にもあるように、水相当流速が比較的小さいときスラグ流から遷移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の水の

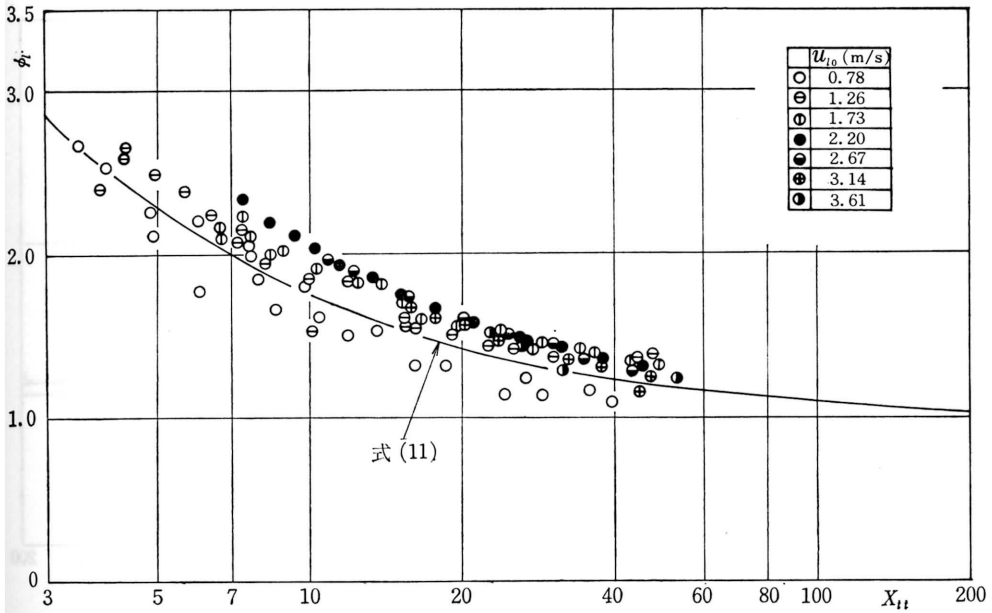


図11 ϕ_i と X_{tt} の関係 (管1, 鉛直管)

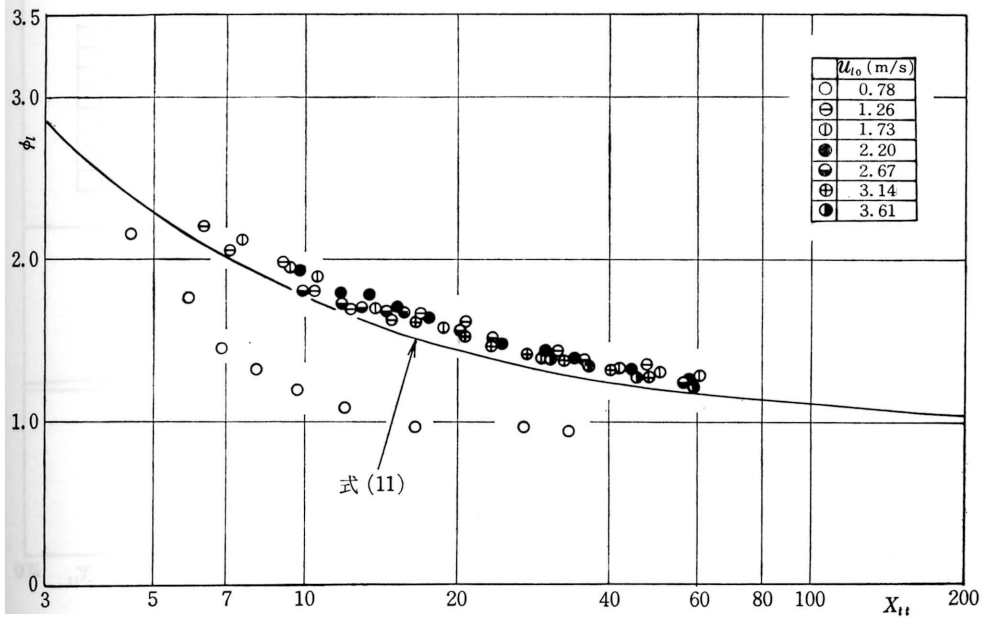


図12 ϕ_i と X_{tt} の関係 (管2, 鉛直管)

一部が逆流現象を生ずるためだと考えられる。したがって、この範囲においては Lockhart-Martinelli の整理法では良く整理ができないことがわかる。

図3から図14より縦横比の影響をみていると、そ

の影響は認められない。一方、管路断面の横長と縦長の影響については、縦横比2.0, 3.0, 3.9の場合、15°傾斜管では図4から図6に、45°傾斜管では図8から図10に示している。15°傾斜管の場合、 X_{tt} が小さい

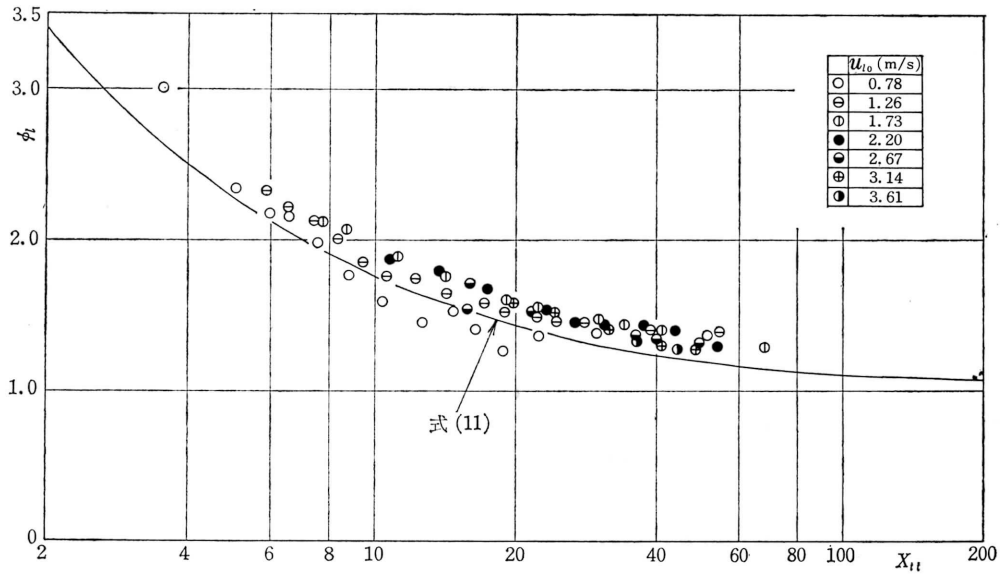


図13 ϕ_l と X_{lt} の関係 (管3, 鉛直管)

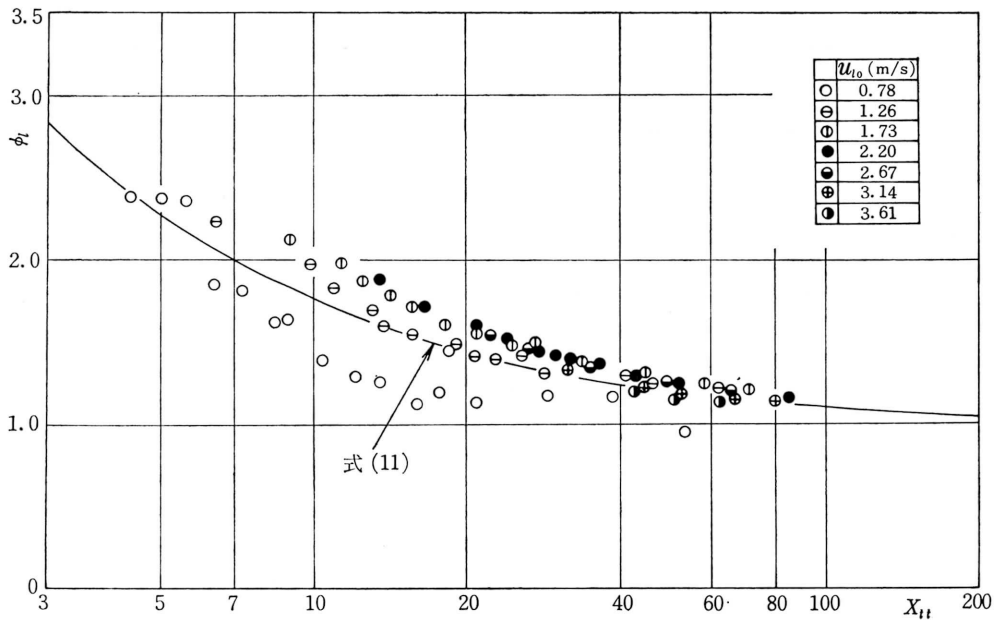


図14 ϕ_l と X_{lt} の関係 (管4, 鉛直管)

範囲において横長と縦長の ϕ_l にわずかな差異が認められる。すなわち、同じ X_{lt} にたいする摩擦圧力損失は横長が縦長よりいくらか大きい値をとっている。このことは水相当流速が小さいときに明確となっている。45° 傾斜管については、横長および縦長の影響は

認められない。そこで、15° 傾斜管についての図3から図6より、水相当流速を基準にして縦横比と横長・縦長をパラメータとして示したのが図15から図17である。図中の実線は式(11)を、破線は Wallis⁵⁾ の実験式(12)を表わしている。

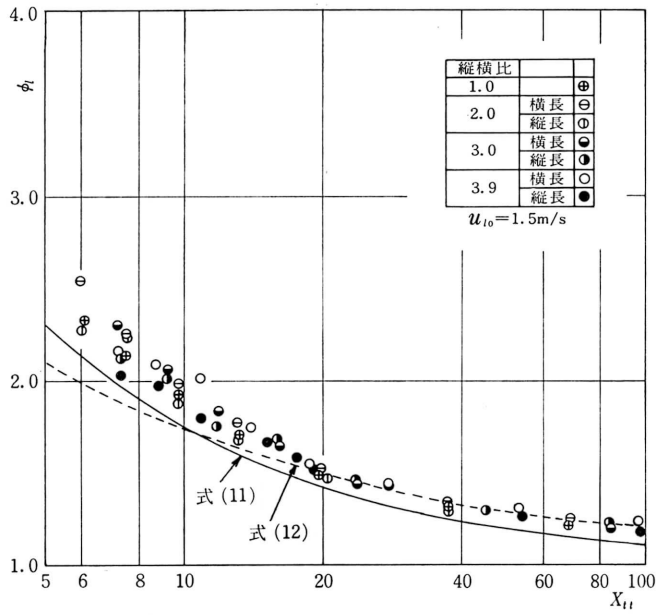


図15 ϕ_t と X_{tt} の関係 (15° 傾斜管)

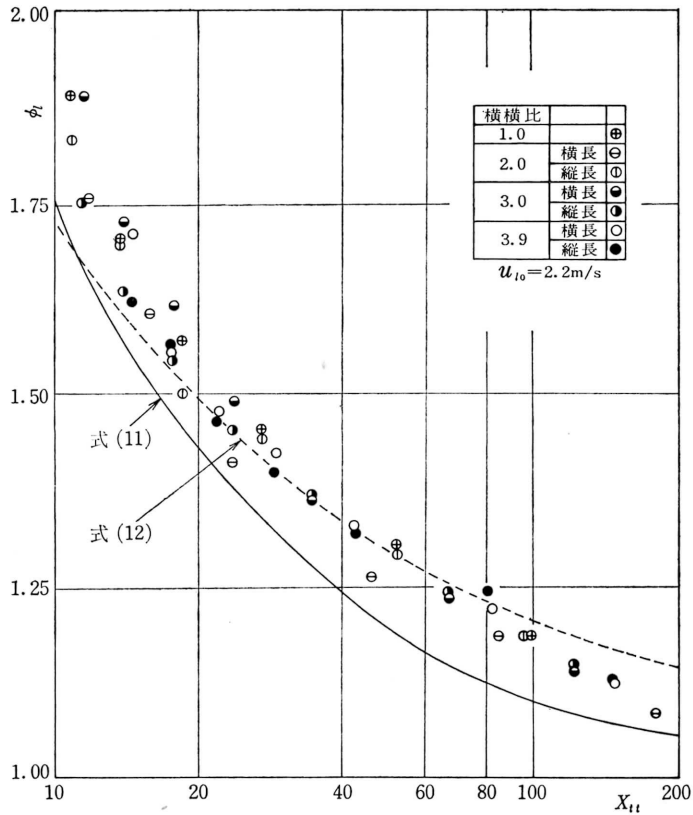


図16 ϕ_t と X_{tt} の関係 (15° 傾斜管)

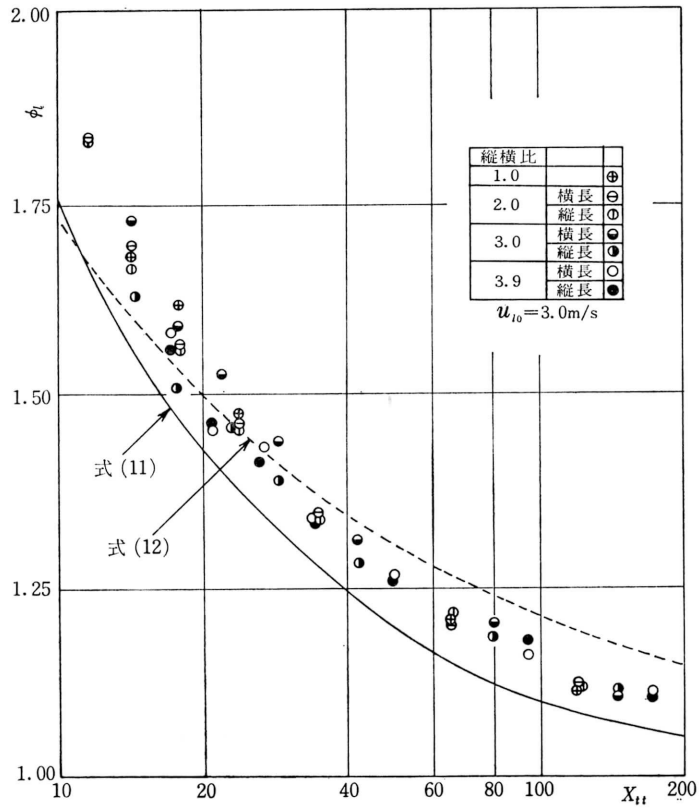


図17 ϕ_t と X_{tt} の関係 (15° 傾斜管)

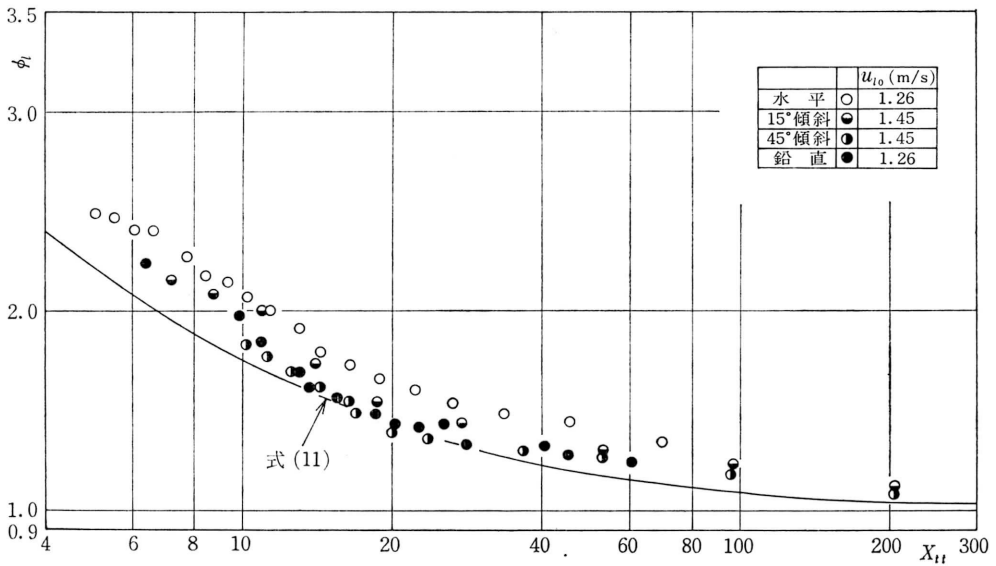


図18 ϕ_t と X_{tt} の関係 (管4, 横長)

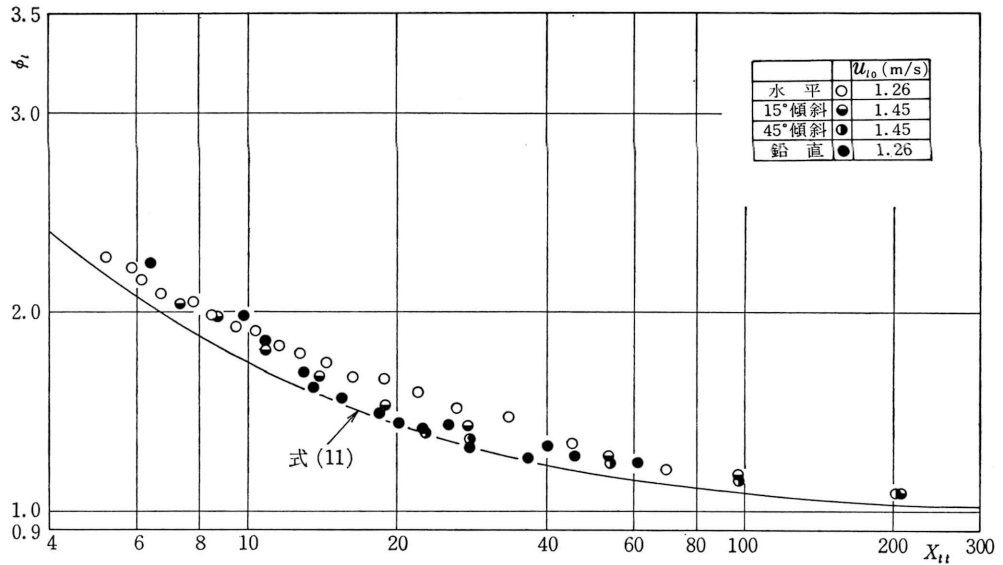


図19 ϕ_t と X_{tt} の関係 (管4, 縦長)

$$\phi_t = 1 + \frac{2}{\sqrt{X_{tt}}} + \frac{1}{X_{tt}} \quad (12)$$

つぎに、傾斜角の影響をみるために縦横比3.9の場合を一例として、図18および図19に示す。これらの図には水相当流速のほぼ等しいものを選び、前報の水平管の実験結果も加えてある。これらの図より、同一 X_{tt} の ϕ_t は傾斜角の小さい方が大きくなっている。しかし、45°傾斜管と鉛直管は差異が明確でない。た

だし、 X_{tt} のきわめて小さい範囲においては、傾斜角の影響がなくなる傾向にある。これは後述する流動様式に関係している。また、このことは他の管についても似たような傾向を示している。

3.3 流動様式と気体体積率

流動様式について、15°傾斜管にたいしては、図20のように、気ほう流(B)、気ほうスラグ流(BS)、スラ

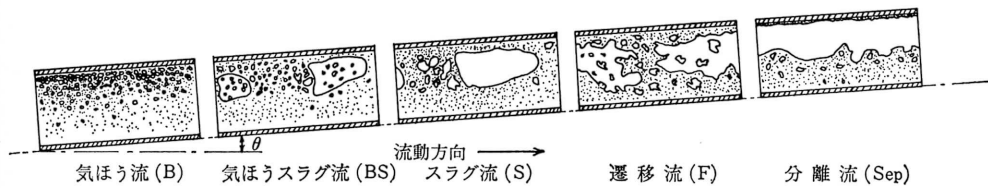


図20 15°傾斜管内における流動様式の種類

グ流(S)、遷移流(F)、分離流(Sep)の5形式に、45°傾斜管および鉛直管にたいしては、図21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。縦横比3.9の場合を例として、図22から図28に平均気体体積率 f_g と重量流量比 W_g/W_l の関係を示している。図中の実線は次式のすべり比 S を表わしている。

$$S = \left(\frac{W_g}{W_l} \right) \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right) \left(\frac{1-f_g}{f_g} \right) \quad (13)$$

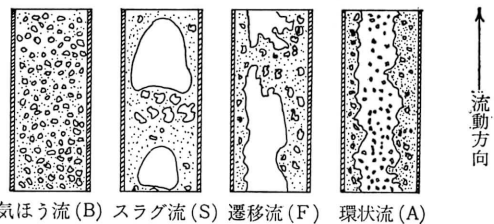


図21 45°傾斜管内および鉛直管内における流動様式の種類

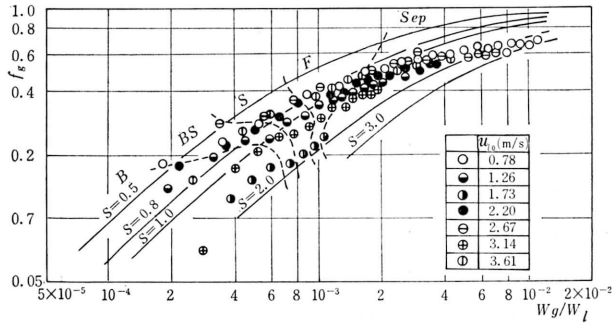


図22 気体体積率と流量比の関係 (管4, 横長, 水平管)

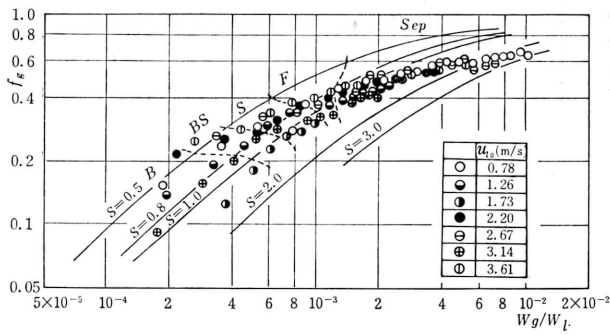


図23 気体体積率と流量比の関係 (管4, 縦長, 水平管)

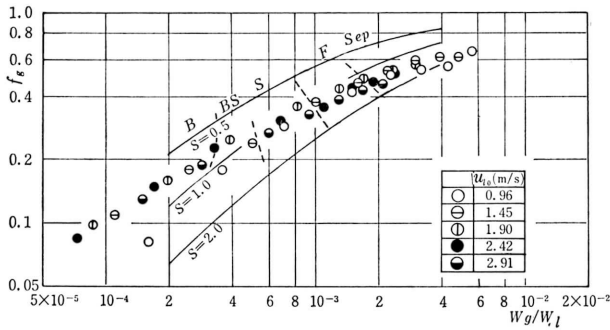


図24 気体体積率と流量比の関係 (管4, 横長, 15°傾斜管)

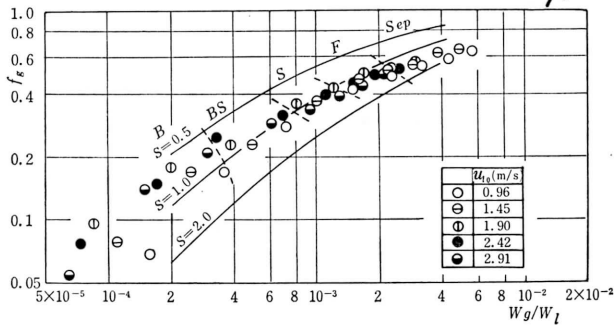


図25 気体体積率と流量比の関係 (管4, 縦長, 15°傾斜管)

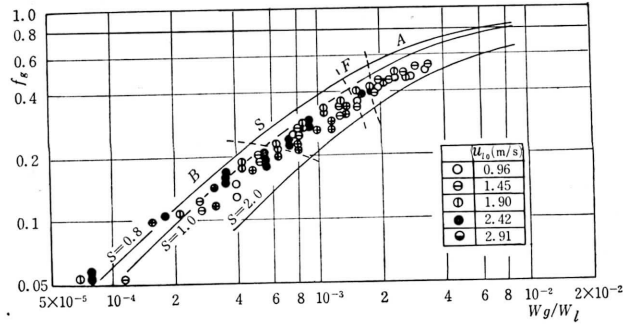


図26 気体体積率と流量比の関係（管4，横長，45°傾斜管）

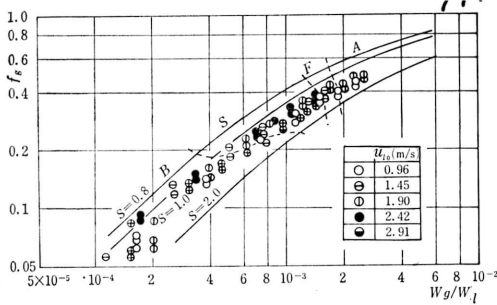


図27 気体体積率と流量比の関係（管4，縦長，45°傾斜管）

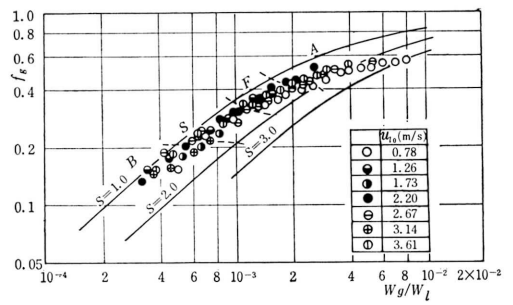


図28 気体体積率と流量比の関係（管4，鉛直管）

流動様式は肉眼観察により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を明確に判別しにくくなるので、これらの図には流動様式のおおよその境界を破線で表わしてある。

これらの図から、それぞれの傾斜管について、横長および縦長の影響をみると、15°傾斜管においては、同一流量比にたいして横長の場合が縦長の場合より平均気体体積率がいくぶん小さくなっている。これは水平管ほど明確でないが、水平管に近い傾向にあると考えられる。そして、45°傾斜管においては、横長および縦長の影響はみられず、鉛直管の関係とほぼ類似している。また、傾斜角の影響をみると、同一流量比にたいして水平管および15°傾斜管よりも45°傾斜管および鉛直管の方が平均気体体積率は小さくなっている。すなわち、すべり比が大きくなっていることがわかる。

4. 結 言

長方形断面をもつ15°傾斜管内、45°傾斜管内およ

び鉛直管内の上向流における空気-水二相流の圧力損失および流動現象について、管路の縦横比、管路断面の横長と縦長の影響ならびに傾斜角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) 管路の縦横比の影響はほとんど認められない。
- (2) 管路断面の横長および縦長の影響は、約15°以下の傾斜角において認められ、水流量が小さくて気体体積率の大きい場合に顕著となる。傾斜角が約45°以上では、この影響は認められない。
- (3) 同一流量比にたいして傾斜角の小さい方が摩擦圧力損失は大きい、傾斜角が約45°以上になると傾斜角の影響はみられない。ただし、流量比がとくに大きくなると傾斜角の影響はなくなる傾向にある。
- (4) 管路断面の横長および縦長の影響ならびに傾斜角の影響は、流動現象にも現われており、傾斜角が約15°以下では同一流量比にたいして平均気体体積率は小さくなる。また、傾斜角が小さい場合よりも大きい場合が同一流量比にたいして平均気体体積率は小さく、すべり比は大きくなる。

終わりに、本実験に際し協力を得た上田通智、中島
渉の諸君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) R. W. Lockhart and R. C. Martinelli：Proposed
Correlation of Data for Isothermal Two-Compo-
nent Flow in Pipes, Chem. Engng. Progr., 45-1
（1941-1），39.
 - 3) D. Chisholm and A. D. K. Laird：Two-Phase
Flow in Rough Tubes, Trans. ASME, 80-2
（1958），276.
 - 4) 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.
 - 5) G. B. Wallis：One Dimensional Two-Phase
Flow, (1969), McGraw-Hill.
-