

長方形管内気液二相流の研究 (第3報)

水力相当直径の流動と圧力損失への影響

松 村 博 久・井 手 英 夫

(受理 昭和52年5月31日)

STUDIES ON TWO-PHASE GAS-LIQUID FLOW IN RECTANGULAR CHANNELS (Report 3)

Effect of Hydraulic Equivalent Diameter on
Flow Behaviour and Pressure Drop

Hirohisa MATSUMURA and Hideo IDE

In the previous report, We investigated experimentally about the effects of the aspect ratio and the geometric situation which the width or the depth of cross section had long side on the frictional pressure drop and the flow behaviour of two-phase air-water flow in horizontal, inclined (15 degrees and 45 degrees from horizontal) and vertical channels with a constant hydraulic equivalent diameter.

In this report, the frictional pressure drop and the flow behaviour under the influence of hydraulic equivalent diameter are investigated experimentally on the rectangular channels with a constant aspect ratio. Then the considerations are taken on the relation between the above results and the setting angle and the geometric situation of the test section.

1. 結 言

本研究は非円形断面管路として長方形断面管路を選び、その管路内における気液二相流の圧力損失と流体各相の挙動の関係を実験的ならびに解析的に解明するために行なわれている。前報^{1),2)}では、水平、傾斜（水平から15°ならびに45°）および鉛直の各管路内における空気-水二相流の圧力損失と流動現象について、水力相当直径一定（14.6mm）で管路の縦横比および管路断面の横長・縦長の影響を実験的に調べた。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-Martinelli³⁾の整理方法において、円管の直径の代りに長方形管路の水力相当直径を用いて整理し、従来の円管の結果と比較検討した。また、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についても検討を加えた。

引き続き本報では、縦横比一定（2.0）で水力相当直径の異なる3種類の長方形断面管路を使用し、前報と同様の実験方法から、水力相当直径の圧力損失と流動現象への影響を調べている。そして、その影響と管

路の傾斜角ならびに管路断面の横長・縦長との関連についても考察している。

2. 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法は前報と同様であるので省略する。測定管は無色透明なアクリル樹脂製の長方形断面を有しており、本報で使用した測定管の種類を表1に示す。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ている。

表 1 測定管の種類

種類	長辺×短辺 (mm)	水力相当 直径(mm)	縦横比	管長(mm)	測定部 長さ(mm)
管5	14.0×6.9	9.2	2.0	1000	600
管2	21.8×10.8	14.4	2.0	2500	1400
管6	32.3×16.0	21.4	2.0	1800	900

(註. 管1, 管3, 管4は本実験に使用しなかったので省略してある.)

3. 実験結果および考察

3.1 気液二相流の摩擦圧力損失

実験結果を Lockhart-Martinelli の整理方法、す

なわち ϕ_l と X_{tt} の関係で整理したのが図1から図6である。ただし、

$$\phi_l = \left[\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L} \right)_{tp} / \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L} \right)_{t0} \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{W_l}{W_g} \right)^{0.9} \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L} \right)_{t0} = \lambda_l \left(\frac{\gamma_l \cdot U_{l0}^2}{2g \cdot D_e} \right) \quad (3)$$

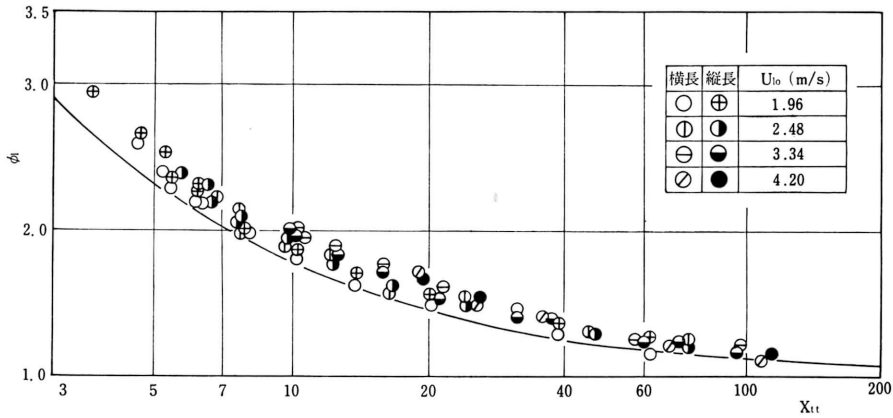


図1 ϕ_l と X_{tt} の関係 (管5, 水平)

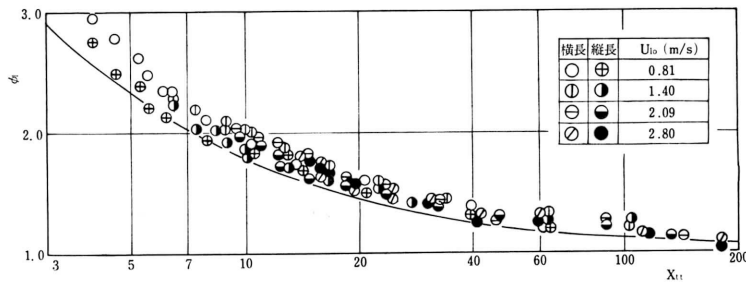


図2 ϕ_l と X_{tt} の関係 (管2, 水平)

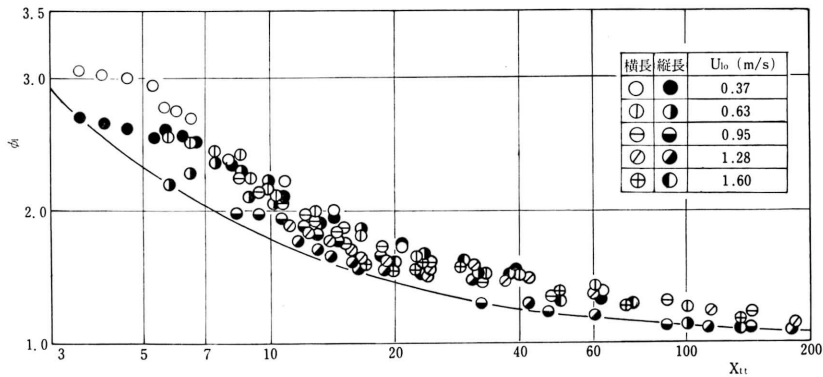


図3 ϕ_l と X_{tt} の関係 (管6, 水平)

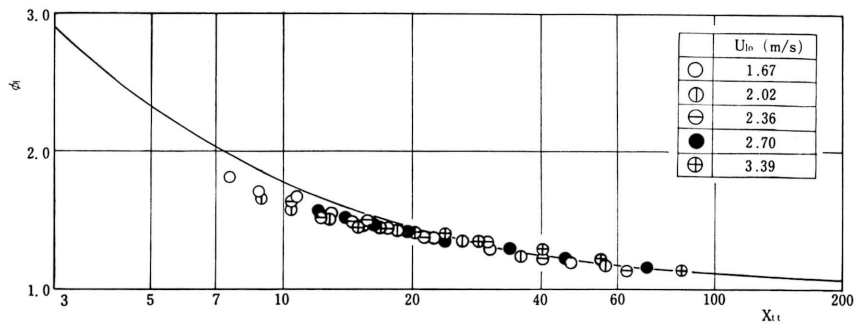


図4 ϕ_l と X_{ll} の関係 (管5, 鉛直)

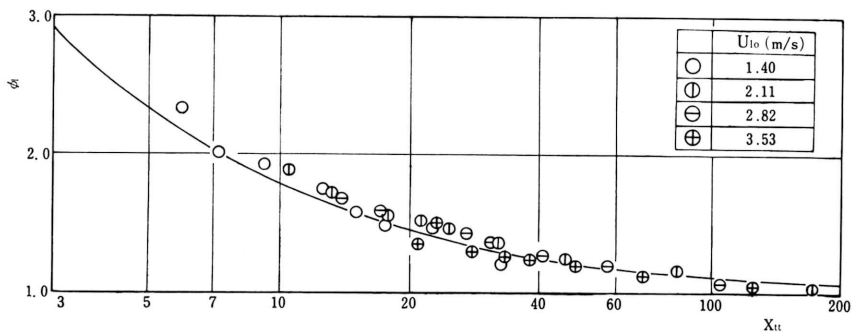


図5 ϕ_l と X_{ll} の関係 (管2, 鉛直)

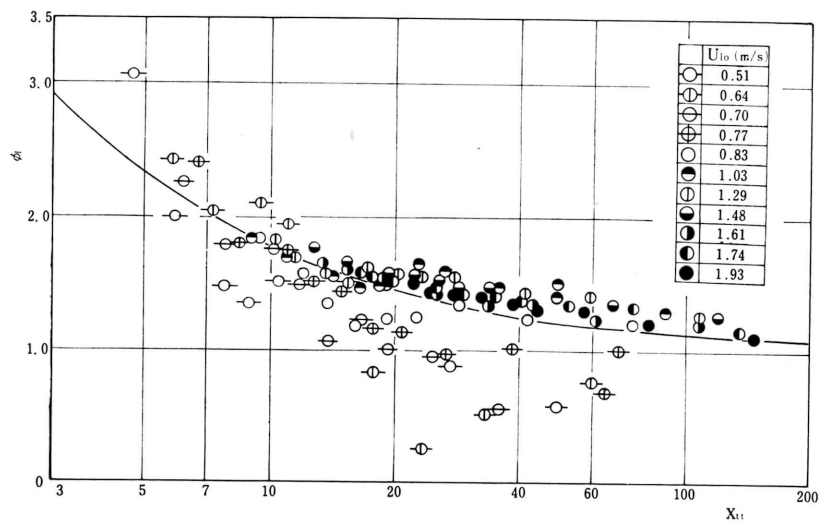


図6 ϕ_l と X_{ll} の関係 (管6, 鉛直)

ここに、

D_e : 水力相当直径,

g : 重力加速度,

$\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{t_0}$: 水単相流における単位長さ当りの
摩擦圧力損失,

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

U_{t0} : 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_{tt} : 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,

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_g, μ_l : 空気および水の粘性係数,

である。

図1から図3は管路を水平に設置した場合、図4から図6は管路を鉛直に設置した場合の水力相当直径の影響を調べるための実験結果である。なお、管路を水平から15°ならびに45°傾斜させた場合の実験も行ったが、前報で述べたように15°傾斜については水平管の実験結果に、45°傾斜については鉛直管の実験結果に近かったため、ここでは傾斜管の実験結果の図示を割愛する。

これらの図には、実験値を U_{t0} および横長・縦長に区別して示し、Chisholm ら⁴⁾ 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。

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

図1から図3の水平管において、水力相当直径が小さい場合には横長・縦長の影響は小さい。しかし、 X_{tt} の小さい領域、すなわち気体体積率が大きい範囲では、水力相当直径が大きくなると横長・縦長の影響が顕著となる。そして、同じ X_{tt} の値では横長の方が縦長より二相摩擦圧力損失は大きくなっている。

一方、図4から図6の鉛直管において、水力相当直径が大きくなると同じ X_{tt} の値での二相摩擦圧力損失は大きくなる傾向にある。とくに図6でわかるように、水相当流速が比較的小さい場合のスラグ流から遷移流においては、脈動を伴って管路内壁付近の水の一部が逆流を生ずるために、二相摩擦圧力損失が水単相摩擦圧力損失に近い、それ以下になることがわか

る。この現象は水力相当直径が大きい程明確に現われる。つぎに、一定の水力相当直径において管路の傾斜角の影響を調べてみると、すなわち、図1と図4、図2と図5および図3と図6を比較してみると、同じ X_{tt} における二相摩擦圧力損失は水平（および15°傾斜）の方が鉛直（および45°傾斜）よりもいくらか高い値を示している。この傾向は前報の結果と同様である。

また、図1から図6にみられるように、実験結果は式(4)と定量的に一致していないし、とくに水平管路における X_{tt} が小さい範囲および鉛直管路における U_{t0} の小さい値では定性的にも一致していない。そして、これらの範囲においては流動様式が大きく影響している。

3.2 流動様式と気体体積率

流動様式は、水平管（および15°傾斜管）にたいして、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、鉛直管（および45°傾斜管）にたいして、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7から図12には平均気体体積率 f_g と気体と液体の重量流量比 W_g/W_l の関係で表わしてある。図中における実線は次式のすべり比 S を示している。

$$S = \left(\frac{W_g}{W_l} \right) \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right) \left(\frac{1-f_g}{f_g} \right) \quad (5)$$

なお、流動様式は肉眼観察によっているもので、流速の大きいところでは流動様式のそれぞれの境界が明確に判別できないので、図中にはおおその境界を破線で表わしてある。

図7から図9の水平管については、管路断面の(a)横長の場合と(b)縦長の場合を別々に示している。流動様式のそれぞれの境界を横長と縦長で比較すると、水力相当直径が小さい場合には両者に差異がほとんどみられないが、水力相当直径が大きくなると横長の方が縦長よりも平均気体体積率の大きい方にずれている。

一方、図10から図12の鉛直管について、流動様式のそれぞれの境界は水力相当直径が大きくなるほど平均気体体積率の大きい方に移動している。

これらのことは前節で述べた二相摩擦圧力損失の差異を生ずる関係と対応している。また、一定の水力相当直径において管路の傾斜角の影響をみると、すなわち、図7と図10、図8と図11および図9と図12を比較すると、前報で述べたことと同様に、同一流量比

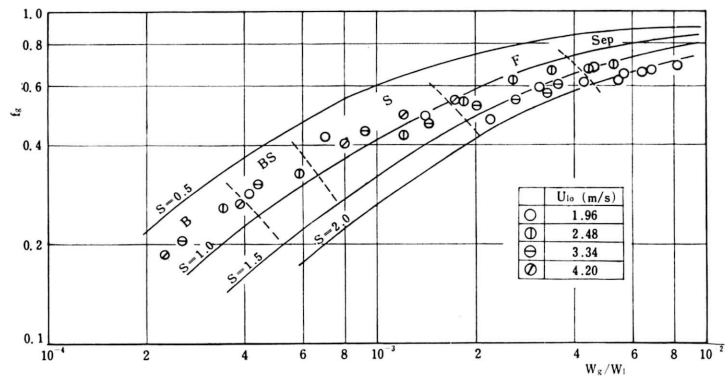


図7(a) 平均気体体積率と重量流量比の関係（管5，横長，水平）

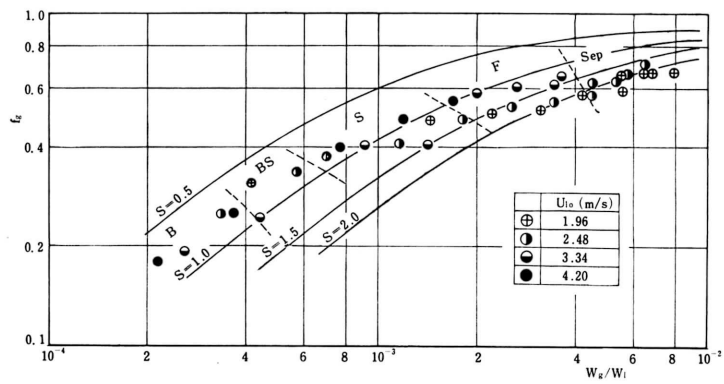


図7(b) 平均気体体積率と重量流量比の関係（管5，縦長，水平）

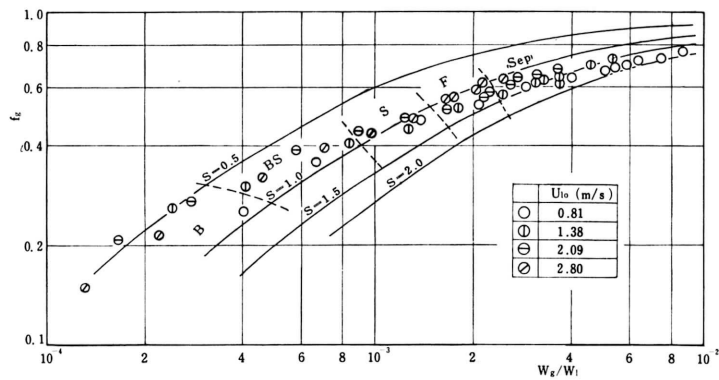


図8(a) 平均気体体積率と重量流量比の関係（管2，横長，水平）

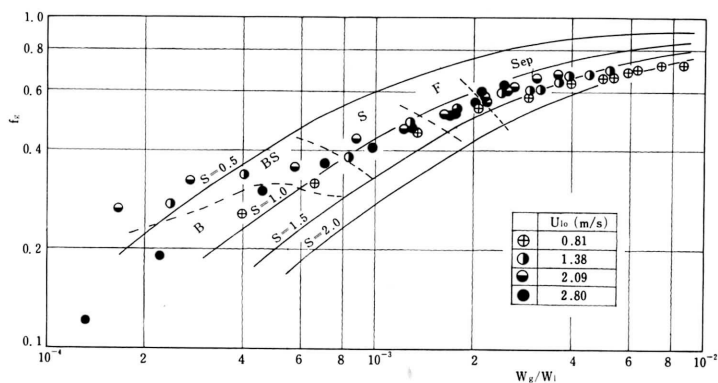


図8(b) 平均気体体積率と重量流量比の関係 (管2, 縦長, 水平)

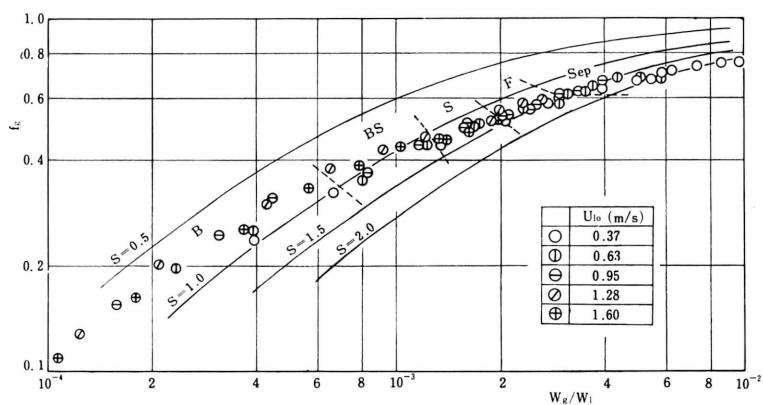


図9(a) 平均気体体積率と重量流量比の関係 (管6, 横長, 水平)

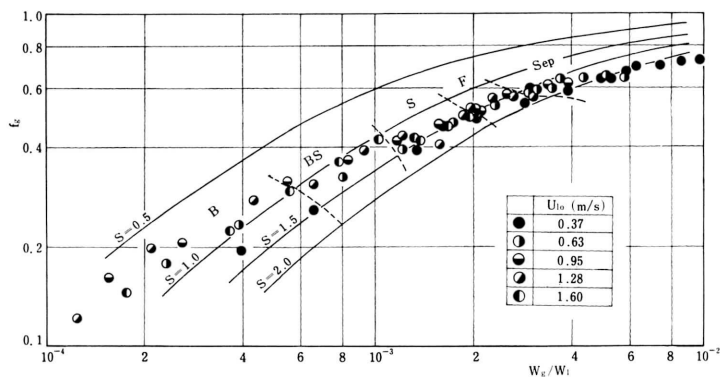


図9(b) 平均気体体積率と重量流量比の関係 (管6, 縦長, 水平)

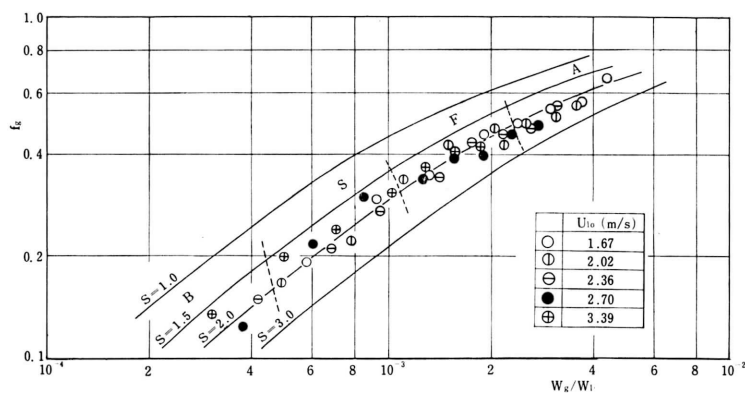


図10 平均気体体積率と重量流量比の関係（管5，鉛直）

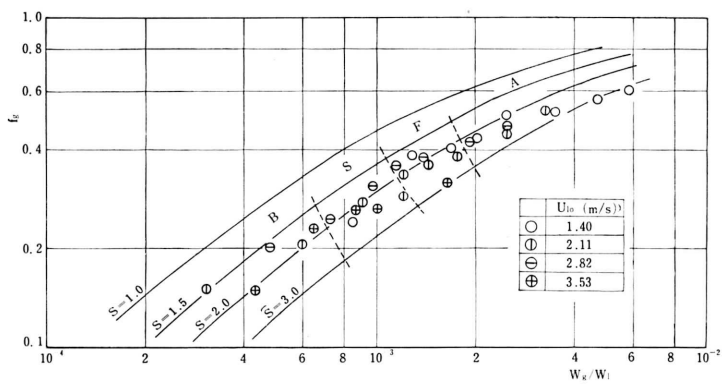


図11 平均気体体積率と重量流量比の関係（管2，鉛直）

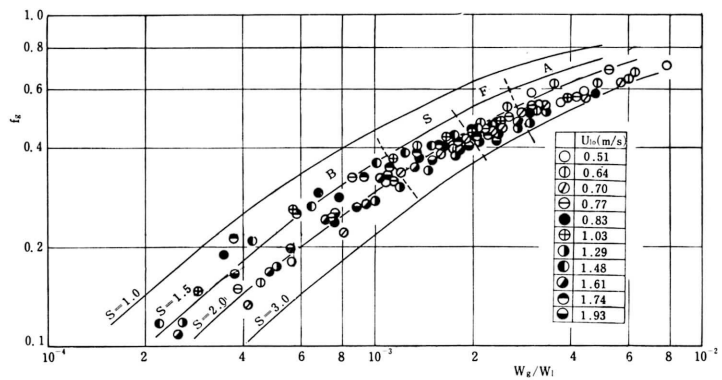


図12 平均気体体積率と重量流量比の関係（管6，鉛直）

における平均気体体積率は水平（および 15° 傾斜）の場合が鉛直（および 45° 傾斜）の場合より大きい。いかえると水平管よりも鉛直管の方がすべり比が大きくなっている。

4. 結 言

管路の縦横比一定 (2.0) における水力相当直径の圧力損失と流動現象への影響について、また、その影響と管路の傾斜角ならびに管路断面の横長・縦長との関連について、実験的に調べたことから、つぎのようなことがわかった。

1) Lockhart-Martinelli の整理方法では実験結果を良好に整理できない。とくに式 (4) と実験結果の比較では、水平管路の X_{tt} が小さい範囲および鉛直管路の U_{t0} が小さい値において、定性的にも定量的にも良い一致を与えない。

2) 水平管における管路の横長・縦長の影響は、水力相当直径が小さい場合には少くないが、水力相当直径が大きくなると顕著となり、二相摩擦圧力損失は縦長より横長が大きくなる。また、流動様式のそれぞれの境界は、水力相当直径が小さいと横長・縦長による差異はほとんどみられないが、水力相当直径が大きく

なると縦長よりも横長の方が平均気体体積率の大きい方にずれている。

3) 鉛直管において、水力相当直径が大きくなるほど二相摩擦圧力損失は大きくなる傾向にある。また、流動様式のそれぞれの境界も水力相当直径が大きくなるほど平均気体体積率の大きい方に移動している。

終わりに、本実験に協力を得た田内博夫、前田孝広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) 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.
- 4) D. Chisholm and A. D. K. Laird: Two-Phase Flow in Rough Tubes, Trans. ASME, 80-2 (1958), 276.