

# 長方形管内の気液二相スラグ流

— 傾斜角の影響について —

松村 博久・井手 英夫・上蘭 秀行  
石川 正義\*

(受理 昭和62年5月30日)

## GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW IN A RECTANGULAR CHANNEL — On the influence of the inclination angle —

Hirohisa MATSUMURA, Hideo IDE, Hideyuki UEZONO  
and Masayosi ISHIKAWA\*

The experimental studies of the motion of long bubbles for two-phase, air-water slug flows have led to a better understanding of the influence of the inclination angle on bubble behavior in a rectangular channel.

Correlations have been developed for predicting void fractions in an inclined channel. Subsequently, a comparison between the simplified model predictions and the experimental measurements shows a positive agreement in the frictional pressure drop.

### 1. 緒 言

気液二相流における傾斜円管内の流動機構については、これまでに多くの研究<sup>1)~6)</sup>が報告されている。しかし、非円形断面管路の傾斜角をパラメータにした整理方法に関する報告はほとんどみあたらない。

本研究は、非円形断面管路としての長方形管内における気液二相スラグ流に着目して、管路の傾斜角が気体スラグの挙動にどのような影響を及ぼすかを調べ、その流動機構の解明を目的としている。

長方形管路内の気液二相流の流動においては、水力相当直径、アスペクト比、管路断面の縦長及び横長などの幾何学的形状が問題になる。ここでは管路断面の縦長と横長の差違による流動機構の影響を取り上げている。さらにスラグ流における摩擦圧力損失の定性的傾向を簡単なモデルより解析し、その解析結果と実験値の比較を行なっている。

### 2. 実験装置及び実験方法

本研究の実験装置の概略を図1に示している。

ヘッドタンクから供給される水は、水流量調節弁⑧及び水流量計⑨を経て気液混合部⑩に流入する。また空気圧縮機①から供給される空気は、貯気圧力タンク②、ストレーナ③、減圧弁④、空気流量調節弁⑤、空気流量計⑥及びサージタンク⑦を通り気液混合部⑩に流入する。ここで水と空気は混合され、気液二相流となって測定管路⑫に入る。測定管路⑫から流出した気液二相流は、気水分離器⑬を経て外部へ排出される。

測定管路は無色透明なアクリル樹脂製で、断面積が36.4mm×9.4mm、アスペクト比が3.9、水力相当直径が14.9mmの長方形断面をしており、管路長さは、2500mmである。測定管路は水平位置より任意の角度に傾斜することができる。測定管路内の静圧は水銀マノメータ⑭及び逆U字マノメータ⑮で測定する。

平均気体体積率は、電磁弁⑩及び⑬による瞬間締切り法を用いて計測した。空気及び水の温度は、銅—コニスタンタン熱電対⑯及び⑰で測定した。

\*川崎重工業株式会社

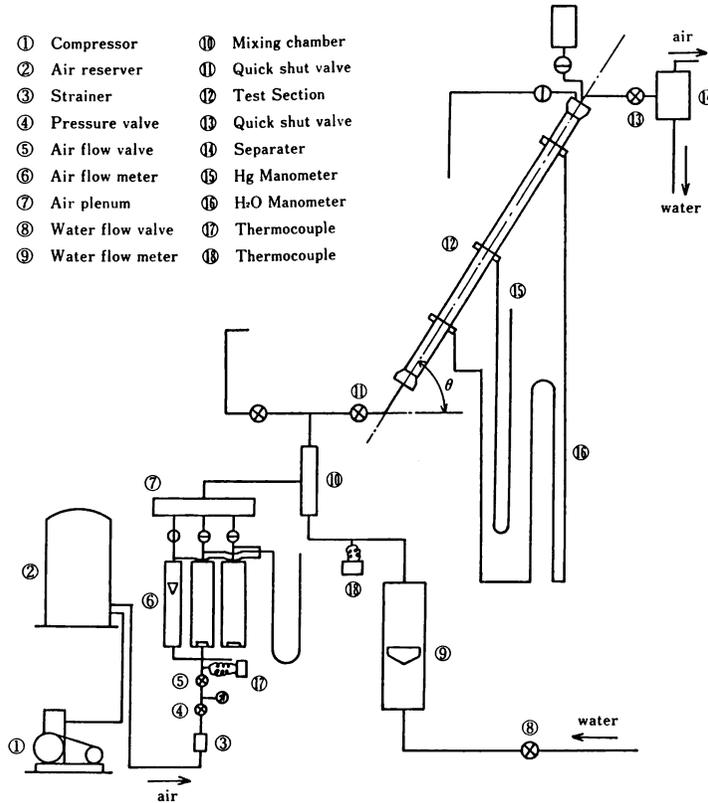


図 1 実験装置の概略

気体スラッグの挙動は、スラッグ流の流動現象を流しカメラのフィルム及びビデオテープレコーダに撮影し、その拡大映像から解析した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 気体スラッグの平均速度

気体スラッグの平均速度は、ストロボ光源を用いた流しカメラにより撮影した写真及びビデオテープレコーダの拡大映像の計測から算出した。水平管路における管路断面が縦長の場合の流し写真について、水相当流速が $1.44\text{m/s}$ 、空気相当流速が $0.84\text{m/s}$ のときを図2及び図3に例示する。図2はストロボ発光回数が $900\text{rpm}$ 、図3はストロボ発光回数が $6000\text{rpm}$ である。

傾斜する管路内の気体スラッグの平均速度 $v_{gs}$ と二相流相当流速 $(v_{go} + v_{eo})$ の関係について、管路断面の縦長の場合を図4に、管路断面の横長の場合を図5に示す。図中の線は次式(1)を表わしている。

$$v_{gs} = 1.2(v_{go} + v_{eo}) + v_b \quad (1)$$

ここに $v_b$ は式(2)で与えられ、管路の傾斜角の関数として式(3)及び図6のように表わされる。図には参考のために鉛直管上向流について、円管の場合のNicklinら<sup>7)</sup>及び長方形管の場合の勝原ら<sup>8)</sup>の実験値を示している。

$$v_b = F(\theta) \sqrt{gDe} \quad (2)$$

$$v_b / \sqrt{gDe} = Fr = F(\theta) \quad (3)$$

管路断面の縦長の場合は、

$$F(\theta) = 4.4(2\theta/\pi) - 3.6(2\theta/\pi)^2 \quad (4)$$

管路断面の横長の場合は、

$$F(\theta) = 2.7(2\theta/\pi) - 1.9(2\theta/\pi)^2 \quad (5)$$

ここに、 $De$  : 管路の水力相当直径, m

$Fr$  : フルード数, 無次元

$g$  : 重力加速度,  $\text{m/s}^2$

$v_{go}$  : 空気相当流速,  $\text{m/s}$

$v_{eo}$  : 水相当流速,  $\text{m/s}$

$\theta$  : 管路の傾斜角,  $^\circ$

$\pi$  :  $180^\circ$

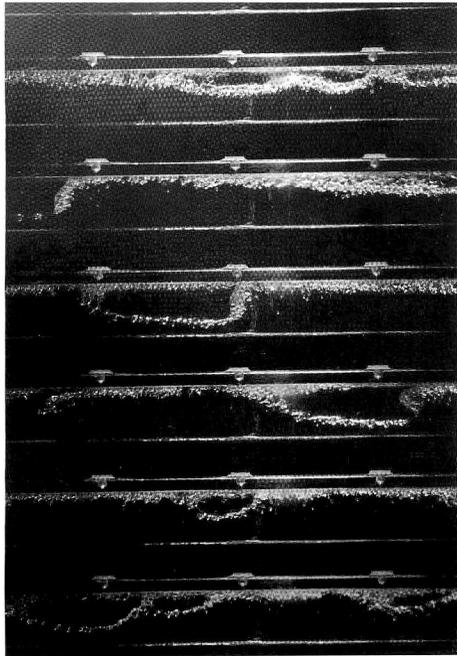


図2 流し写真の例(ストロボ発光回数900rpm)

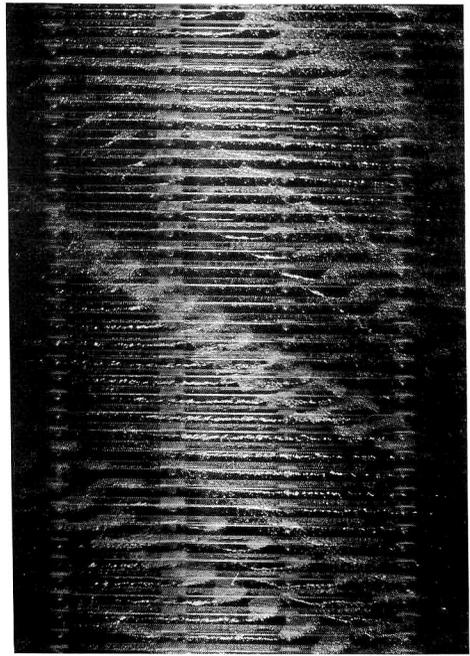


図3 流し写真の例(ストロボ発光回数6000rpm)

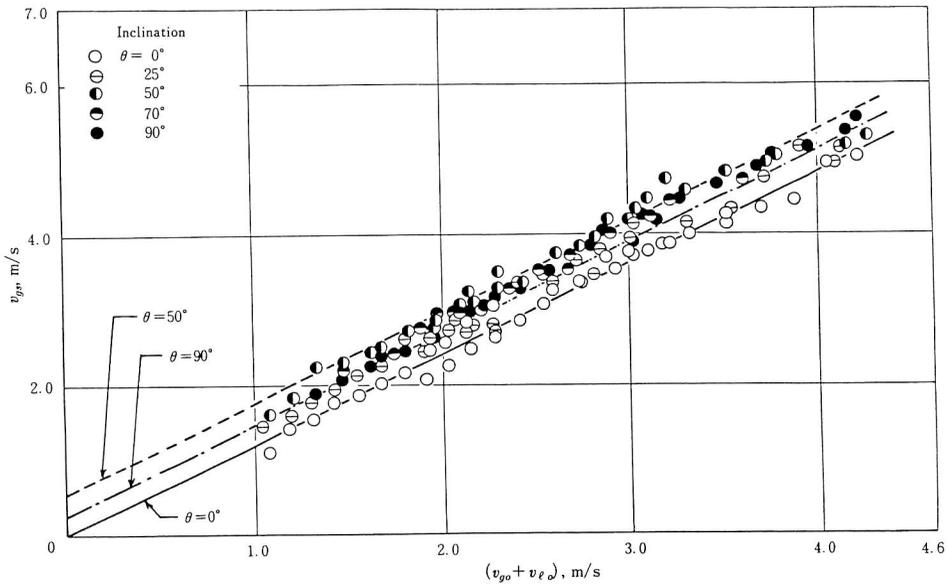


図4 気体スラグの平均速度 (管路断面の縦長の場合)

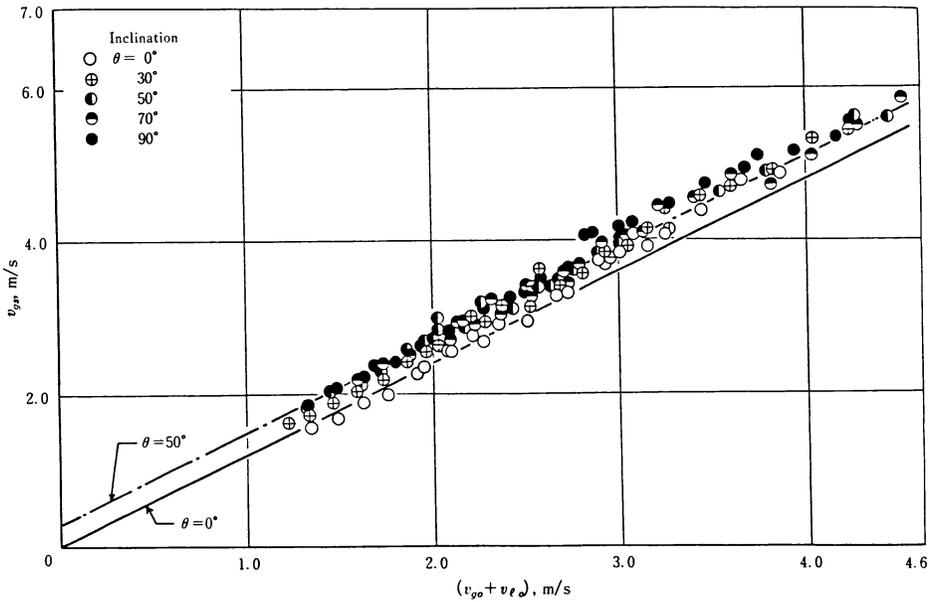


図5 気体スラグの平均速度 (管路断面の横長の場合)

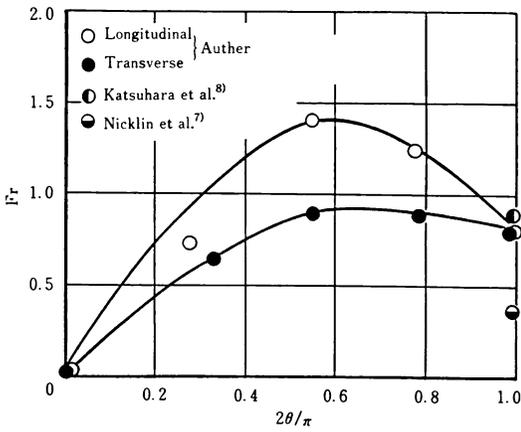


図6 管路の傾斜角の影響

3.2 気体スラグ平均長さ及び液体スラグ平均長さ  
 気液二相スラグ流における気体スラグ及び液体スラグの形状に使用した寸法記号を図7に示す。気体スラグ平均長さ  $L_s$  及び液体スラグ平均長さ  $L_w$  と空気相

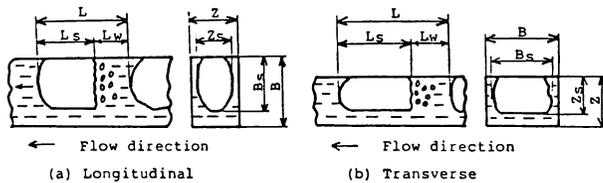


図7 スラグ形状の寸法記号

当流速  $v_{g0}$  及び水相当流速  $v_{e0}$  との関係について、鉛直管上向流の場合を図8に示している。図中の実線は、赤川ら<sup>9)</sup>の鉛直円管上向流における実験結果を表わしている。図にみられるように、本実験の長方形管における気体スラグ平均長さ及び液体スラグ平均長さは、円管の実験結果と定性的に一致している。そして液体

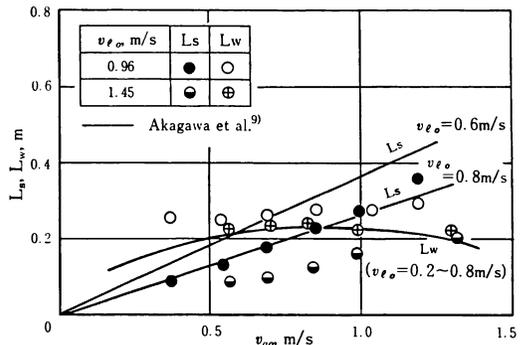


図8 気体スラグ及び液体スラグの平均長さ (鉛直管上向流の場合)

スラグ平均長さは、空気相当流速及び水相当流速にあまり依存せずにはほぼ一定の値をとっている。

図9及び図10は、それぞれ管路断面の縦長及び横長の場合におけるスラグ平均長さ  $L = (L_s + L_w)$  と  $L_s$  の比にたいして、空気と水の質量流量比  $W_g/W_l$  の関係で表わしてある。これらの図には管路の傾斜角の影響がみられる。同一の質量流量比において、管路断面の縦長及び横長ともに傾斜角が50°から70°付近で  $L_s/L$  は最も小さくなっている。また同一の傾斜角において、 $L_s/L$  は  $W_g/W_l$  が増加すると大きくなっている。管路断面の縦長及び横長の両者について、同一の曲線で表わしてみると式(6)の関係で整理できる。

図中の実線は式(6)の関係を表わしている。

$$\frac{L_s}{L} = \left\{ 32 - 22.5 \left( \frac{2\theta}{\pi} \right) + 16 \left( \frac{2\theta}{\pi} \right)^2 \right\} \left( \frac{W_g}{W_l} \right)^{0.6} \quad (6)$$

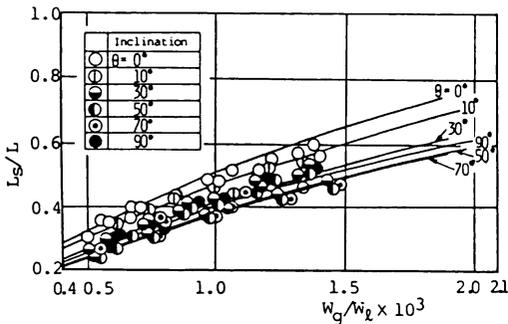


図9  $L_s/L$  と  $W_g/W_l$  の関係 (管路断面の縦長の場合)

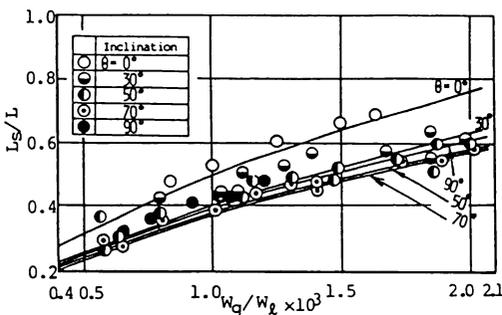


図10  $L_s/L$  と  $W_g/W_l$  の関係 (管路断面の横長の場合)

### 3.3 気体スラグ平均幅及び平均厚さ

気体スラグ平均幅  $B_s$  は管路断面の長辺  $B$  との比  $B_s/B$ 、気体スラグ平均厚さ  $Z_s$  は管路断面の短辺  $Z$  との比  $Z_s/Z$  の無次元で表わす。

気体スラグ平均幅比  $B_s/B$  と質量流量比  $W_g/W_l$  との関係は、管路断面の縦長及び横長についてそれぞれ図11及び図12に示す。これらの図によると、管路断

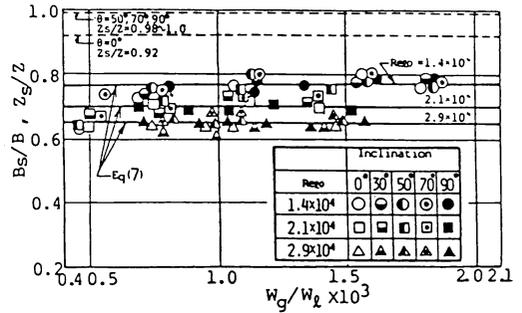


図11 気体スラグ平均幅と平均厚さ (管路断面の縦長の場合)

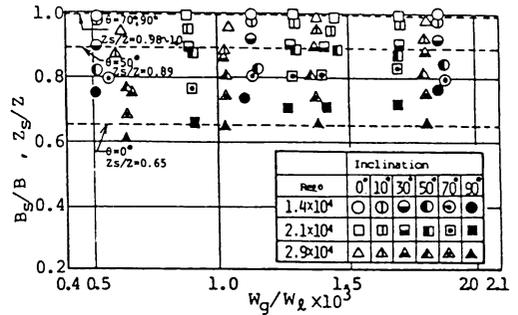


図12 気体スラグ平均幅と平均厚さ (管路断面の横長の場合)

面の縦長及び横長のいずれの場合も、同一質量流量比において液体レイノルズ数  $Re_l$  が大きくなると、気体スラグ平均幅はともに小さくなっている。また管路傾斜角の影響は管路断面の縦長の場合にはほとんどみられない。

管路断面の横長の場合における液体レイノルズ数と管路傾斜角の関係を図13に示す。図中の実線は気体スラグ平均幅と液体レイノルズ数の関係であり、管路断面の縦長及び横長の両者ともに同一の関係式で表わしてみるとつぎの近似式(7)となる。

$$B_s/B = 1 - C(\theta) Re_l^{0.5} \quad (7)$$

ここに管路断面の縦長の場合は、

$$C(\theta) = 0.002 \quad (8)$$

管路断面の横長の場合は、

$$C(\theta) = 1.9 \times 10^{-3} (2\theta/\pi) + 1.0 \times 10^{-4} \quad (9)$$

気体スラグ平均厚さ  $Z_s$  は、次式(10)の関係から得られる。

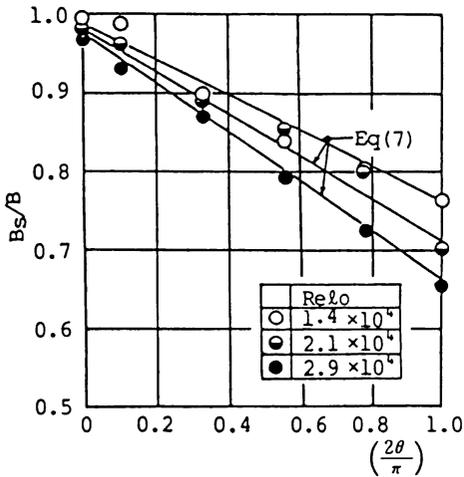


図13 液体レイノルズ数と傾斜角の関係 (管路断面の横長の場合)

$$f_g := \frac{v_{g0}}{v_{gs}} = \left(\frac{L_s}{L}\right) \left(\frac{B_s}{B}\right) \left(\frac{Z_s}{Z}\right) \quad (10)$$

ここに、 $f_g$  は液体スラグ中に小気ほうを含まないと仮定したときの平均気体体積率である。図11及び図12には  $Z_s/Z$  の値を破線で表わしている。これらの図に示しているように、管路断面の縦長及び横長のどち

らの場合においても、管路傾斜角が大きいとき  $Z_s/Z$  は、0.9から1.0の間の値をとっている。

### 3. 4 平均気体体積率

平均気体体積率  $f_g$  と質量流量比  $W_g/W_e$  の関係について、管路傾斜角  $\theta$  をパラメータとした場合、水相当流速が0.96m/s, 1.45m/s, 1.94m/s ならびに管路断面の縦長及び横長のそれぞれについて図14から図19に示している。なお図中の記号は流動様式の区分を表わし、破線は流動様式のおおよその境界を示している。

流動様式は肉眼及び写真観察で判別し、区分したものであり、ここではスラグ流[S]だけを示せばよいが、参考のために気ほう流[B]、気ほうスラグ流[BS]、フロス流[F]も表わしてある。

水平管内流では気相部分が管路頂上部に偏って流れる傾向にある。鉛直管上向流においては、円管内スラグ流のように気体スラグが管路断面全体を満して流動することは少なく、先行気体スラグの後流の影響により、いくらかとがった気体スラグの頭が左右にふれながら上昇していくのが観察された。傾斜管内上向流では、水平管と比較して管路傾斜角が50°から60°の時、気体スラグの頭は一番細くなる傾向がみられた。

これらの図によれば、平均気体体積率は、管路傾斜

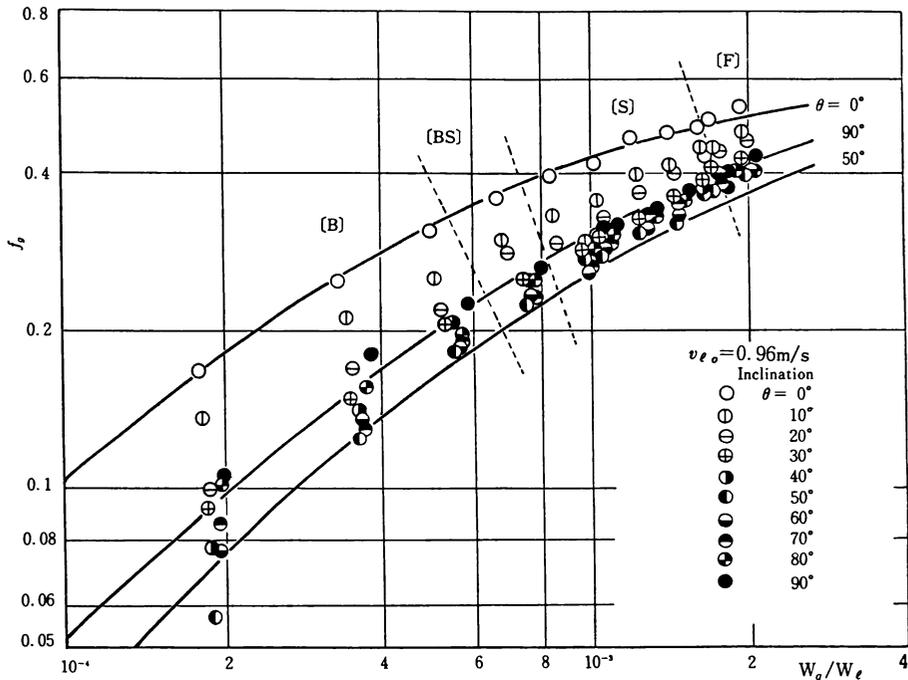


図14 平均気体体積率 (管路断面の縦長の場合)

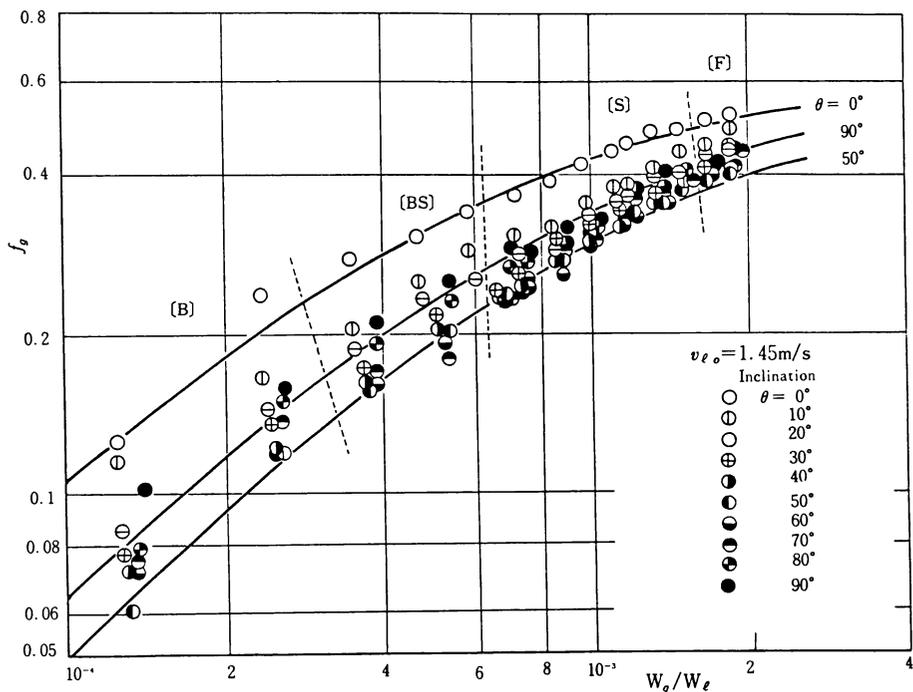


図15 平均気体体積率（管路断面の縦長の場合）

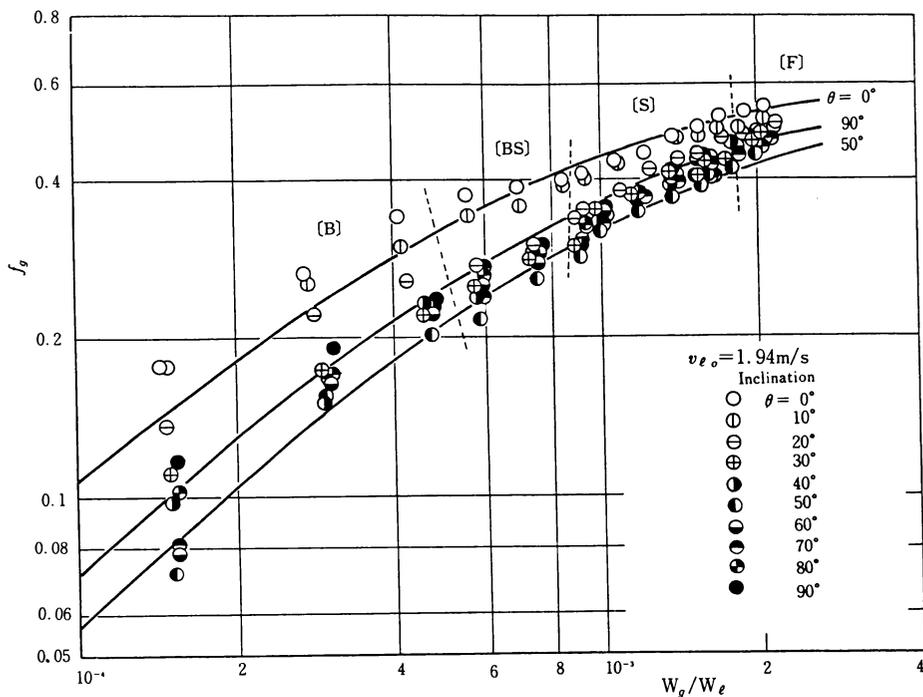


図16 平均気体体積率（管路断面の縦長の場合）

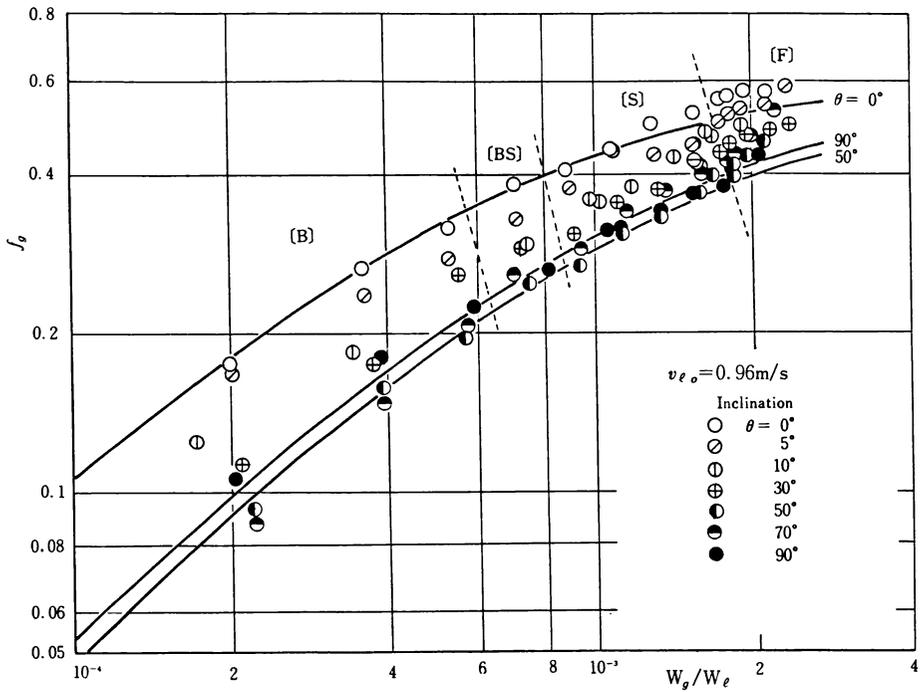


図17 平均気体体積率 (管路断面の横長の場合)

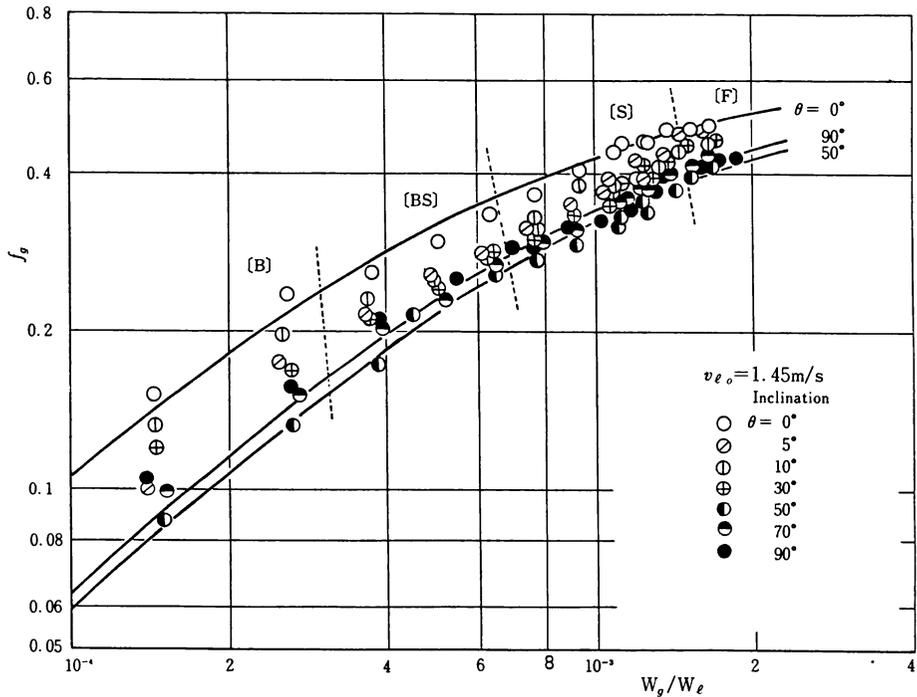


図18 平均気体体積率 (管路断面の横長の場合)

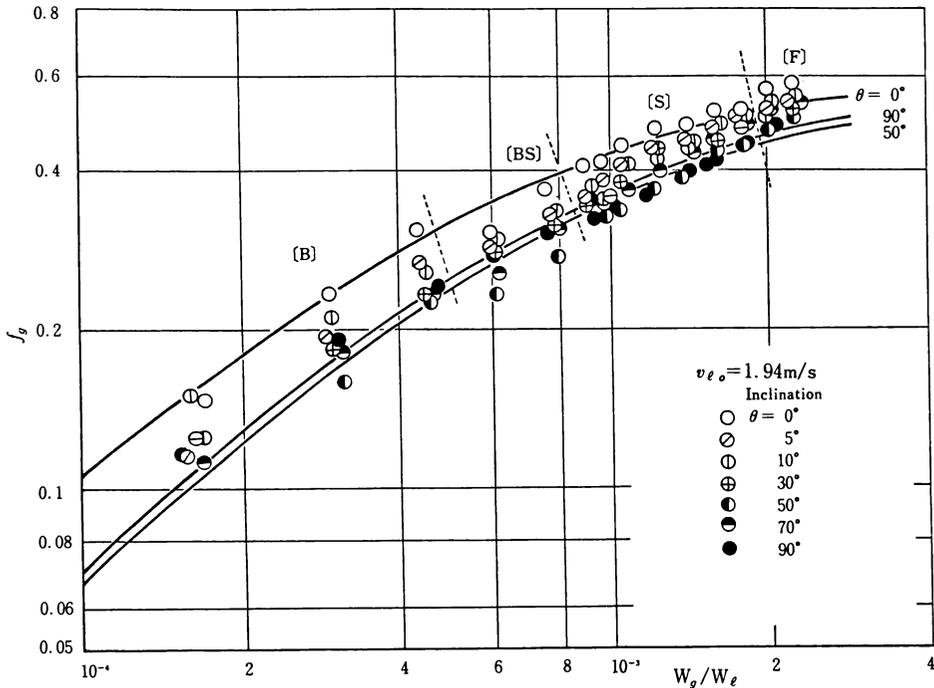


図19 平均気体体積率（管路断面の横長の場合）

角の増大とともに減少し、管路傾斜角が50°から60°で最小となる。さらに管路傾斜角がこの角度から鉛直に近づくにつれて平均気体体積率は逆に増加し、鉛直の場合は管路傾斜角が20°から30°の値と同じになっている。同一質量流量比における水相当流速の影響は、水平管の場合にみられないが、傾斜管及び鉛直管の場合には明らかに認められる。とくに管路傾斜角が50°から60°でこの影響は顕著となっている。

### 3.5 摩擦圧力損失

図7に示した気体スラグの形状モデルを用いて、つぎの仮定によるスラグ流における摩擦圧力損失の算定を試みた。

- (1) 空気相と管路壁面による摩擦抵抗は、水相と管路壁面による摩擦抵抗に比較して著しく小さい。
- (2) 気体体積率は平均気体体積率とし、液体スラグ中に含まれる小気ほうは無視できる。
- (3) 液体スラグ平均幅は近似的に管路幅と等しい。
- (4) 水相の管摩擦係数  $\lambda_{e0}$  は図20に示しているように Blasius の式(11)で表される。

$$\begin{aligned} \lambda_{e0} &= 0.316 (v_{e0} D_e / \nu_e)^{-0.25} \\ &= 0.316 Re_{e0}^{-0.25} \end{aligned} \quad (11)$$

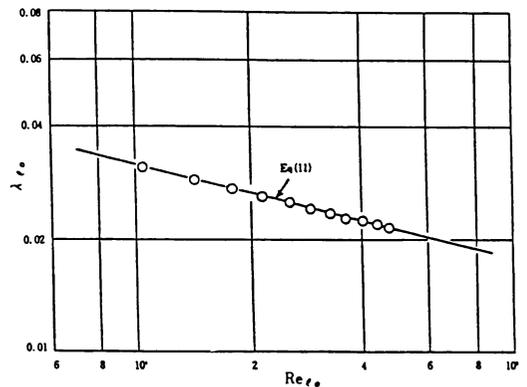


図20 水単相流における管摩擦係数

ここに、 $D_e$  は水力相当直径 ( $= 2BZ / (B + Z)$ )、 $\nu_e$  は水の動粘性係数である。

スラグ流における管摩擦係数  $\lambda$  は、上述の仮定により、水単相流における管摩擦係数  $\lambda_{e0}$  に比較して気体スラグの管路壁面に接する面積分だけ小さくするとしているので、

$$\lambda = (S_e / S) \lambda_{e0} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} S &\text{はスラグ長さ} L \text{の接している管壁面積で、} \\ S &= 2L(B + Z) \end{aligned} \quad (13)$$

$S_e$  は水相の接している管壁面積で、

管路断面の縦長の場合は、

$$S_e = S - L_s(Z + 2B_s) \tag{14}$$

管路断面の横長の場合は、

$$S_e = S - L_s(B + 2Z_s) \tag{15}$$

とする。

管路長さ  $\Delta L$  の区間における摩擦圧力損失  $\Delta P_f$  を求めると、

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = \lambda \frac{1}{D_e} \frac{\rho_e v_m^2}{2} \tag{16}$$

ここに、 $v_m$  は平均流速 ( $=v_{go} + v_{eo}$ )、 $\rho_e$  は水の密度である。

したがって、

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta L} = 0.316 \left\{ 1 - \frac{K}{2} \left( \frac{T}{T+1} \right) \left( \frac{L_s}{L} \right) \right\} Re_{e0}^{-0.25} \left\{ \frac{\rho_e (v_{go} + v_{eo})^2}{2D_e} \right\} \tag{17}$$

ここに、 $T$  は管路断面のアスペクト比  $B/Z$ 、 $K$  はつぎの関係式で与えられる。

管路断面の縦長の場合は、

$$K = 1/T + 2(B_s/B) \tag{18}$$

管路断面の横長の場合は、

$$K = 1 + (2/T)(Z_s/Z) \tag{19}$$

図21は式(17)により算出された計算値  $(\Delta P_f/\Delta L)_{cal}$  と本実験値  $(\Delta P_f/\Delta L)_{exp}$  の比較を行なっている。計算値がいくらか大きくなっているのは、液体スラグ中に小気ほうを含まないと仮定していることなど、実際の流動現象と気体スラグの形状モデルによる解析との差によるものであるが、単純なモデルとしては比較的良好な一致をみている。

#### 4. 結 言

長方形断面管路における空気—水二相流の傾斜管内上向流について、管路断面の縦長及び横長の幾何学的形状ならびに管路傾斜角が気体スラグ及び液体スラグの挙動に及ぼす影響を実験的に解析した結果、つぎのようなことがわかった。

- (1) 気体スラグ平均速度は、管路傾斜角に依存しており、管路傾斜角がほぼ50°から70°付近で最も大きくなる。

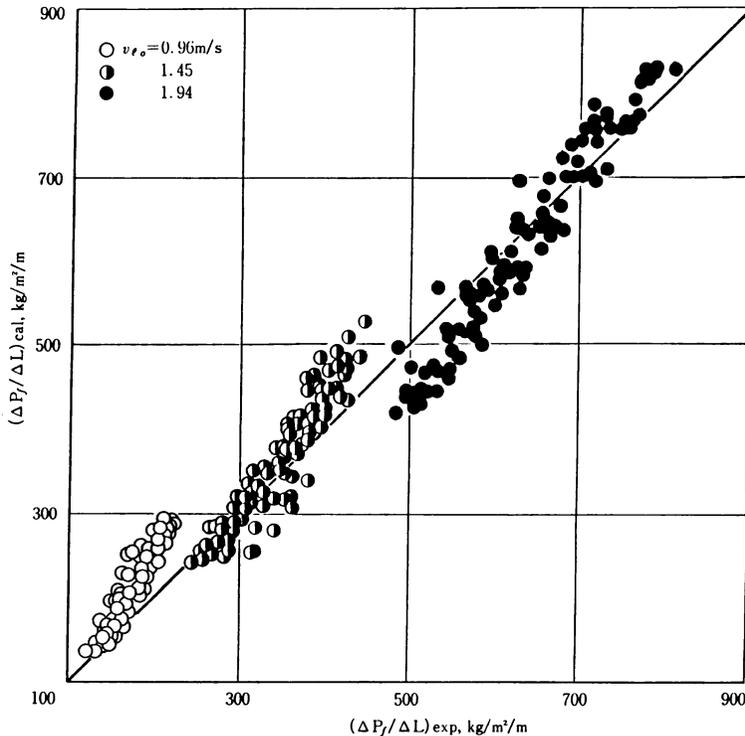


図21 摩擦圧力損失の計算値と実験値の比較

(2) スラグ平均長さにたいする気体スラグ平均長さの比は、同一質量流量比において管路断面の縦長及び横長ともに管路傾斜角の影響を受け、管路傾斜角が $50^\circ$ から $70^\circ$ 付近で最も小さくなる。

(3) 液体スラグ平均長さは、空気相当流速及び水相当流速にあまり依存せず、ほぼ一定の値となる。

(4) 気体スラグ平均幅は、管路断面の縦長及び横長の管路において液体レイノルズ数の影響がみられ、同一質量流量比において液体レイノルズ数が増加すると小さくなる。また、管路断面の横長の場合は管路傾斜角に依存しており、鉛直管上向流における気体スラグ平均幅が最も小さい。

(5) 気体スラグ平均厚さは、管路断面の縦長及び横長のいずれにおいても、管路傾斜角が大きい時には管路短辺長さにはほぼ等しい値となる。

(6) スラグ流の摩擦圧力損失について、スラグ流モデルからの計算値と実験値とを比較した結果は良好な一致をみた。

## 文 献

- 1) 赤川浩爾, 気水混合物の流動 (第2報), (第3報), 日本機械学会論文集, 23巻, 128号, pp.285-298 (1957)
- 2) E. E. Zukoski, Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes, *J. Fluid Mech.*, Vol. 25, Part4, pp.821-837 (1966)
- 3) G. Singh and P. Griffith, Determination of the Pressure Drop Optimum Pipe Size for a Two-Phase Slug Flow in an Inclined Pipe, *Trans. ASME, J. Engineering for Industry*, pp.717-726 (1970)
- 4) R. H. Bonnecaze, W. Erskine Jr. and E. J. Greskovich, Holdup and Pressure Drop for Two-Phase Slug Flow in Inclined Pipelines, *AIChE. J.*, Vol. 17, No.5, pp.1109-1113 (1971)
- 5) 林 太郎, 長方形流路内の気流二相流の流動と圧力損失, *流体工学*, Vol. 10, No. 4, pp.28-33 (1974)
- 6) E. J. Greskovich and W. T. Cooper, Correlation and Prediction of Gas-Liquid Holdups in Inclined Upflows, *AIChE. J.*, Vol. 21, No. 6, pp.1189-1192 (1975)
- 7) D. J. Nicklin, J. O. Wilkes and J. F. Davidson, Two-Phase Flow in Vertical Tubes, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, Vol. 40, No. 1, pp.61-68 (1962)
- 8) 勝原哲治, 安田嘉明, 垂直長方形管内の気液二相流の流動に関する実験的研究, 九工大研究報告, No. 32, pp.11-19 (1976)
- 9) 赤川浩爾, 坂口忠司, 気液二相流のボイド率変動特性に関する研究 (第2報, 小気ほうを考慮した流動状況の解明), 日本機械学会論文集, Vol. 31, No. 224, pp.594-600 (1965)