200mm管における気液二相流実験^{*}

Two-Phase Flow Study Using 200mm Diameter Pipe

亀 田 泰 武^{**}
KAMEDA Yasutake

森 田 泰 治 郎[†]
MORITA Taijiro

Abstract A two-phase flow experiment was conducted using a 200mm diameter, 100m long straight pipe with adjustable gradient. A steel pipe with transparent plastic parts was used. Superficial water and air velocities were from 0 to 1.5m/s and 0 to 10m/s. Pipe gradients were horizontal, 0.2% up, 0.8% up and 0.5% down. Test results were as follows, 1. Observed flow pattern in horizontal and inclined pipe was almost the same as that of the preceding 300mm pipe experiment. Flow pattern is extremely sensitive to pipe gradient. 2. Intermittent flow pressure loss was relatively low by comparison with that reported in the literature on the matter. Its pressure loss was between the mixed flow model pressure loss and the separated flow model pressure loss. An empirical formula of pressure loss was obtained. 3. Void fraction of intermittent flow was also relatively low compared with other reports. It was concluded that low up-gradient did not affect the void fraction but down-gradient did. An empirical formula of void fraction was obtained. 4. Up-gradient flow showed an air lift effect which was consistent with the void fraction.

Keywords : Two-Phase Flow Experiment, 200mm Diameter, Adjustable Gradient, Void, Pressure Loss, Flow-Pattern

1. はじめに

大口径管の二相流流動状況、圧力損失、ボイド率などは小口径管と異なると言われているがこれまで実験の報告は少なかった。今回、300mm管の実験[1]に引続き200mm管の実験とその状況の回帰分析を行ったものである。データのばらつきが大きいと、200mm管では実験条件、平均データの取扱い方など改善を図った。

2. 実験装置の概要

2. 1 実験施設および施設能力の概要

循環式管路流実験装置[1]を基本とし、二相流流れの基本となる水平管に加え、順勾配管および逆勾配管の実験を実施した。

①下り勾配0.5% ②上り勾配0.8% ③上り勾配0.2% ④水平管

見かけ速度は、 $J_L = 1.5\text{m/s}$ 、 $J_A = 10\text{m/s}$ を最大値とした。

2. 2 測定方法

2. 2. 1 圧力測定

実験本管9箇所に、ピエゾメータを取り付

* 1993.4.2 受付

** 建設省都市局流域下水道課
〒110 千代田区霞ヶ関2-1-3 TEL(03)3580-4311

† (株)モリメ

けて圧力をマノメータに導き、圧力水頭を測定した。ピエゾメータは内径4mmで、マノメータは内径100mmの透明円筒を用いた。この内径の差により、サージタンク効果が生じるため、圧力の変動による誤差を小さくすることができた。

2. 2. 2 ボイド率

実験本管の内側に容量式波高計センサー部を取り付け、本管内部の水位変動を測定し、その水面の位置からボイド率を算出した。

また、実験本管透明部分での目視観察による水面測定値とセンサー出力と照合し、必要に応じて補正した。

2. 2. 3 流況（フローパターン）観察

液相(水)を着色し、ビデオ撮影を各ケース1～5分間行った。また、目視にてフローパターンを判定し、記録した。

2. 2. 4 液相(水)流量

J I Sに基づく四角堰により、堰越流水深を計測し、J I S公式を用いて流量を求めた。越流水深は、1/10mmパーニヤ目盛り付きのポイントゲージで測定した。

2. 2. 5 気相(空気)流量

熱線式デジタル風速計を、気液分離槽に取り付け、管路を通り過ぎてきた空気量を大気圧(760mmHg)で測定した。

3. 流動様式

3. 1 水平管

Fig. 3.1に実験によって得られた流動状況を示す。図にはBaker及びWeismanが与えた流動様式境界線を示した。分離流と間欠流が主体であるが、高流速域では噴霧流への遷移域が見られる。

$J_A = 0.1 \text{ m/s}$ では例外的に 0.6 m/s くらいまで分離流を示すが、 J_A が 0.2 m/s 以上のケースでは分離流と間欠流の境界線は、 $J_L = 0.26 \sim 0.3 \text{ m/s}$ に並んでいる。

前回の300mm管[1]で得られた流動様式境界を式(3-1)に示す。

Fig. 3.1 Flow pattern in horizontal flow.

$$J_A / (g \cdot D)^{1/2} = 0.25 (J_A / J_L) \quad (3-1)$$

この式を200mm管にあてはめると $J_L = 0.28 \text{ m/s}$ となるが、この値は、今回の実験結果とはほぼ一致する。Weisman[2]は、分離流と間欠流の境界式として、Taitel-Dukler式を参考に、次式を得た。

$$J_A / (g \cdot D)^{1/2} = 0.25 (J_A / J_L)^{1.1} \quad (3-2)$$

Fig. 3.2に横軸を J_A / J_L 、縦軸を $J_A / (g \cdot D)^{0.5}$ とした流動様式について実験結果と式(3-1)、(3-2)の対応を示す。

式(3-1)は、実験結果及び式(3-2)と同様な傾向を示している。

3. 2 上り勾配管

0.2%、0.8%管とも分離流はなく、間欠流が支配的であった。勾配の微妙な変化で流動様式が変化するのは、分離流の状況が水平勾配付近で非常に不安定であることを示す。

3. 3 下り勾配管

Fig. 3.2 Flow pattern in horizontal flow.

Fig. 3.3 Flow pattern in pipe gradient 0.5% down flow.

Fig. 3.3に0.5%下り勾配の流動状況を示した。300mm管と同様に間欠流と分離流の境界線が相当高流速に移動していることが示される。 J_A が10m/s程度になると境界線が下がり水平管と同じ程度までになる。Fig. 3.3にはボイド率の状況、圧力損失状況から推定した境界線を示す。これらは、 J_A が増加して、それまで一定値であったものが変化を開始する境界である。これらの境界線は流動様式境界線と近いが、分離流よりも位置している。

4. 圧力損失

4. 1 満管流

4. 1. 1 圧力損失の基本式

圧力損失算定式はDarcy-Weisbach式を基本として考えていくことができる。このうち摩擦係数 λ について各種のものが用いられているが、大口径管においては Re 数が大きくなる関係から、一定とも考えられる。また、河川、上下水道における大口径水路ではManning式が多く用いられている。

a. Darcy-Weisbach式 (以後D-W式という)

圧力損失は

$$dP_f/dz = \lambda / 2D \cdot V^2 \cdot \rho \quad (4-1)$$

これを、水頭損失勾配 I で表すと

$$I = \lambda / 2D \cdot V^2 / g \quad (4-2)$$

圧力損失勾配 I は、水柱高として表された

圧力変化を長さで割った値である。

このうち、摩擦係数について次式が提出されている。

a. 1 Blasius式

$$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (4-3)$$

a. 2 Moody簡略式[3]

$$\lambda = 0.0055 \{ 1 + (20000 \varepsilon / D + 10^6 / Re)^{0.5} \} \quad (4-4)$$

ここで ε : 等価粗さ[m]である。

b. Manning式

下水道など開水路で一般に使用されているManning式は次式となる。

$$dP_f/dz = n^2 \cdot V^2 \cdot g \cdot \rho / R^{4/3} \quad (4-5)$$

ここで、 n は粗度係数で、滑らかな場合0.01~0.013となり、 R は径深(断面積/潤辺)である。上式をD-W式に換算すると同じ管径では λ が一定となる。

4. 1. 2 データおよび各式の比較

これらの式とデータの比較を行う場合、圧力損失は流速の二乗にほぼ比例するため、流速が小さい場合と大きな場合で差が非常に大きくなり、広い範囲での比較が難しくなる。このため、D-W式の管摩擦係数 λ に換算して比較を行った。

これを換算摩擦係数 λ_c とし、次式により求める。

$$\lambda_c = dP_f/dz \cdot 2 \cdot D / (J_T^2 \cdot \rho)$$

この結果、気相容積流束、液相容積流束が一桁以上違う場合でもグラフ化がしやすい。ここで、二相流の場合、容積流束は $J_A + J_L$ で、密度は二相の平均密度($J_A \cdot \rho_A + J_L \cdot \rho_L$) / ($J_A + J_L$)で表すと上式は次式となる。

$$\lambda_c = (dP_f/dz) \cdot 2D / \{ (J_A \cdot \rho_A + J_L \cdot \rho_L) \cdot (J_A + J_L) \} \quad (4-6)$$

4. 1. 3 液相单相流での実験値との比較

单相流のデータを、各式および係数の比較

を行った。

二相流の実験データは液相単相のデータを出発点とし、気相流量が増加していくにつれ変化していくことから二相流のデータ解析に重要である。

λ_c は0.024~0.027と高い値となり、これは鋼管を使用し、相対的に管表面が粗いためである。各式の係数をデータにあわせて示してある。図中、Moody式において ϵ は0.3mmとし、Manning式における粗度係数は0.011とした。Fig. 4-1に実験データから算出した λ_c と各式から算出した λ_c を示している。

Blasius式など、 λ を Re 数だけで推算される値はデータよりも小さい値を示す。このことから管の滑らかさの状態を把握しないと二相流の圧力損失、流速などの推計に大きな誤差がでることを示している。実験データからそれほど離れておらず、計算が比較的簡単なため、Manning式を主に考えて解析を行った。

4. 2 水平管二相流圧力損失算定モデル

4. 2. 1 圧力損失の推算

大口径長距離二相流では送水のためのエネルギー・コストが大きいと、経済的な検討が重要である。送水エネルギーは流速の2乗に比例するため、今回の実験範囲以上の流速はエネルギーが大きくなり過ぎ実用的ではない。このため、圧力損失の推定の検討は間欠流を中心に行うこととした。

300mm管実験では回帰式として次の式を得ている[1]。

$$I_{TP} = I_{LO} \cdot (1 + J_A^2/J_L^2) 0.3 \quad (4-7)$$

I_{LO} ：水単相流の圧力損失勾配

上式は J_A が増えていくと合わないことが想定されるため、今回はより実態に近いと考えられる回帰式を考えた。Lockhart-Martinelli[4]は、ほぼ大気圧下の空気-液系断熱二相流の測定結果に基づいて、摩擦損失とボイド率を予測するL-M相関法を提案している。この方法では二相流の摩擦損失を、液相成分だけが、あるいは気相成分だけが単

相流として流れたときの摩擦損失勾配に対する比として表している。ただし、その比の差は大きい。

4. 2. 2 圧力損失回帰モデル

次の2種類のモデルを考えた。

a. 気液が混合して流れる状態のモデル (Mモデル)

完全に混合した単相流で、水と空気の実流速が同じと考える。その密度 ρ_{TP} は気液二相の合成であるとした。Manning式は、水の自然流下の計算に用いられている式であるが、今回は気相についても適用することにした。ただし、密度についての項が必要であり、次式とした。

$$I = R_A^{(-4/3)} \cdot n^2 \cdot J_{TP}^2 \cdot \rho_{TP} / \rho_L \quad (4-8)$$

摩擦損失係数はBlasius型の場合は粘性係数 μ の関数となり、4通りの表し方[5]があるとされている。①クオリティ比で重み付けする(Cicchittiによる)、②容積流束の比で重み付けする(Duklerによる)、③平均密度に似た形で重み付けする(McAdamsによる)、④水の粘性係数とする。

J_A/J_L が10のとき、 λ は粘性係数の1/4乗になるため②は④の6割程度である。

Moodyの流速式では、 Re 数の計算で μ は②型と考える。

Mモデルは完全混合と考えたが、実際の二相流は空気が速く水が遅く流れるため、圧力損失の主体である水の断面積が大きくなって、流速が少なくなり、圧力損失はもっと小さいものとなる。

b. 気液が二層に分離して流れる状態のモデル (Sモデル)

気液二相が層状流のように分離して、お互いに影響を与えることなく流れる状態を考える。この場合二相の圧力損失が同じで流れるものとする。

この分離流のついて2つのモデルを構築した。

b. 1 置き換えモデル (S₁モデル)

第一の考え方は、空気を水で置き換えるも

のである。空気流を同じ流下面積で同じ圧力損失となる水に換算し、全体を水としての単相流で考えるものである。これにより、換算液相流速を計算する。この考え方は、分離流といっても、計算は単相流に近いものとなる。また、気相実速度が液相実速度より大きいことによる液相の加速や境界面の乱れによる圧力損失が加味されないこととなる。

分離流の空気の摩擦損失は、

$dP_A/dz = \lambda_A/2D_A \cdot V_A^2 \cdot \rho_A$ となり、これを水で置き換えると、

$$dP_L/dz = \lambda_L/2D_A \cdot V_L^2 \cdot \rho_L \text{ となる。}$$

この際、流下断面積および圧力損失が同じとする。

$dP_A/dz = dP_L/dz$ の条件から、

$\lambda_A \cdot V_A^2 \cdot \rho_A = \lambda_L \cdot V_L^2 \cdot \rho_L$ となり、Manning 式では $\lambda_A = \lambda_L$ と考えられるので、大気圧の場合は次の値となる。

$$J_{cL} = 0.0346 \cdot J_A \quad (4-9)$$

Moody 式の場合、換算が複雑になるが、 Re 数が非常に大きいので λ が一定に収束すると考え、同じ方式で計算することとする。

置き換え型の流れは、完全な分離流であるが、管周の摩擦損失は二相がホールドアップの割合に応じて負担することとなる。また気相は液相に置き換えられているので、二相の境界で流速の違いによる摩擦損失は単一流の乱れのなかでしか考慮されず独自の形では存在しない前提となる。

b. 2 完全分離モデル (S_2 モデル)

第二に、空気及び水が完全に分離して流れるのは同じであるが、二相別々に圧力損失計算を行い、その際、二相の断面形状、潤辺を考慮するモデルが考えられる。分離流のモデルで現実的とされているように、空気の潤辺には水と接している面を含み、水の潤辺は、水と管の接している部分だけとする。つまり、水面を壁面と同じように空気にとって抵抗があるものと考え、空気の潤辺には水と接している面も含めるものとする。圧力損失は、Manning 式を用いる。このほか D-W 式を用

い、円形管でない形状を円形管と同じように考える方法もある。径深は円形管の場合直径の 1/4 であることから、径深の 4 倍を D-W 式の直径相当と考え計算するものである。このモデルは、Johannessen[6]によって、層状流、波状流の圧力損失、ボイド率を予測するモデルとして提案され、データに適合するとされている。

以上二つの分離流モデルを考えたが、実際では空気流が速いため、二相の乱れを生じると共に、空気流が水流を加速する。また間欠流などのように管周の摩擦損失の負担も異なると考えられる。

4. 2. 3 間欠流の圧力損失推算式 (合成モデル TP)

実際の間欠流を中心とした二相流は混合モデルと分離モデルの間にあることが実験データにより示されている。また、圧力損失が流速の 2 乗に比例することから次の式を考えた。

$$\lambda_{CT} = \lambda_{CM}^m \cdot \lambda_{CS}^{(1-m)} \quad (4-10)$$

ここで、 λ_{CT} : 合成の λ_C 、 λ_{CM} : 混合流のときの λ_C 、 λ_{CS} : 分離流のときの λ_C 、 $0 \leq m \leq 1$ とすると、圧力損失は、次式 (4-11) となる

$$dP_f/dz = (\lambda_{CT}/2D) \cdot \{(J_A \cdot \rho_A + J_L \cdot \rho_L) \cdot (J_A + J_L)\} \quad (4-11)$$

合成モデルは J_A ないし J_L が 0 に近付くと、単相流の状態の式となる。重み付け係数 m を

Fig. 4.1 $J_L - \lambda_c$ (converted friction coefficient) in single-phase water flow.

以下のように考えてみる。管径が数mmと小さい場合、水と空気は交互に流れ、その圧力損失は、気液が混合して流れるモデル（Mモデル）と、ほぼ同様の摩擦損失となる。管径が大きくなり間欠流で空気スラグが流れると、フィルム部分を生じるようになる。フィルム部分は分離流に近い状態と考えられる。このことは水の流れが相対的に遅くなっていくこと、および圧力損失が小さくなることを意味する。これから、圧力損失に支配的な影響を持つと考えられる液相の流速は小口径管では大きく、大口径管では小さくなっていくと考えられ、重み付け係数 m は小口径管では大きく、口径が大きくなるにつれ小さくなるものと思われる。 m を実験値から求めた。Manning式によるTP1モデルの係数 m は、分離流を除いた200mm管水平管の実験データから0.62という値が得られたので200mm管のモデルでは0.6を用いて比較することとする。

300mm管の係数 m は0.3内外であった。なお、Moody式を用いた場合の200mm管の係数 m は0.81で、300mm管では0.5内外であった。Fig. 4.2に水の容積流速 J_L が1 m/sの場合のManning式の計算式の比較を示す。 λ_c （D-W式の摩擦係数に換算する）で表している。この場合、分離流及び合成モデルは置換型 S_1 とTP1、完全分離型 S_2 とTP2の二種を示している。 J_A が小さいとき混合型と分離型の差は小さく、 J_A の増加と共に差が広がり、30m/s位で混合型は S_1 型の7倍、 S_2

Fig.4.2 $J_A - \lambda_c$ (converted friction coefficient) in $J_L=1.0$ m/s).

Fig.4.3 $J_A - \lambda_c$ (converted friction coefficient) in $J_L=1.0$ m/s.

型の5倍程度となる。 S_1 型は J_A が小さいときは S_2 型より大きく、0.2m/sくらいで2割程度の差があるが、 J_A がそれより大きくなると差が縮まって4m/s位で同じ値となり、以後逆転する。

Moody式の場合、混合モデルMの摩擦係数は J_A の増加によって多少下がるがManning式と同じ様な傾向を示す。

合成モデルは分離流の影響を受ける。Fig. 4.3に同じケースの各種の合成モデル（TP1型）及びL-M相関を示す。D-W式で粘性係数のMcAdmas、Cicchitti型、Moody型、L-M相関、 λ 一定の0.026としたものを示す。 λ を一定にしたものはManningとほぼ一致しデータを代表するものである。管の粗さによって調整できるManning型及びMoody型を除き、他の推算値はデータより低い値となっている。ただし、 J_A の増加による換算摩擦

Fig.4.4 $J_A - I$ (water head loss gradient)in horizontal flow.

Fig.4.5 J_A - λ_c (converted friction coefficient) in horizontal flow.

係数の変化はほぼ同じであり、水単相流の λ_c が一致していれば、あまり差がないことがいえる。L-M相関は実験データに比較して小さめに算定されている。これも基本の摩擦係数を小さく与えているからであり、基本の摩擦係数が合う300mm管の間欠流では実験データより大きい値となっている。L-M相関は基本的にMモデルに近い値を示す。

分離流モデルは、原理的およびデータとの近似性は S_2 の方がよいようであるが、計算が非常に複雑になることと、あまり差がないことから実験データとの比較は S_1 モデルを主に用いることとする。

4. 3 実験データとの比較

Fig. 4.4に200mm水平管の実験結果と合成モデルの比較を示す。

合成モデルの流速式はManning式を用いている。ここでは分離流（層状流）状態も含め J_L の小さい状況のものも示している。また合成モデルとあわせ分離流に合う分離モデルも示している。

換算摩擦係数 λ_c で表したグラフをFig. 4.5に示す。 λ_c のデータは、おおむね右下がりになっているが、データのばらつきのせいか J_A が3m/s位の所で高い値を示すものが多い。また、分離流と層状流の区分が読み取れる。

5. ボイド率

5. 1 ボイド率の回帰式

これまでの文献では気相流速 V_A は全容積流束 $J_T = J_L + J_A$ に比例するものが多く、ボ

イド率は J_T に対して一定の値をもつこととなる。今回の実験データは、 V_A に対して J_L が数倍の影響要素があることを示しており、別の回帰式を考えた。

実験結果の分布から、圧力損失と同じように間欠流が混合流と分離流の中間に位置すると考えた。

①混合流の場合

ボイド率 α_M は次のように表せる。

$$\alpha_M = J_A / (J_A + J_L) \quad (5-1)$$

②分離流の場合

a. 置き換え型

分離流のボイド率 α_s は、二層に分離して流れることから、便宜的に空気を同じ断面積で同じ圧力損失で流れる水に置き換えてみる。ここで摩擦損失は流れる物質の密度に比例するとした。潤辺などの要素を無視すると、

$$\rho_A \cdot (J_A / \alpha_s)^2 = \rho_L \cdot (J_{AL} / \alpha_s)^2$$

ここで J_{AL} は空気流を同じ断面積、かつ同じ圧力損失で流れる置き換えた水の容積流束である。式(4-12)と同様に、 α_s は次式となる。

$$\alpha_s = 0.0346 \cdot J_A / (0.0346 \cdot J_A + J_L) \quad (5-2)$$

b. 分離型

上と下に分かれた二相の圧力損失が同じとなるようなボイド率を求める。この場合、二相の占める断面積に応じて径深を求めて、圧力損失が等しくなるような両相の流量を計算していくことになる。

分離型は層状流の状況を表すものであるが、計算方法が複雑になる。

③合成モデル

Fig. 5.2に J_L が0.3~0.8m/s、Fig. 5.3に J_L が0.8~1.5m/sときの混合流と分離流のボイド率を示す。

曲線は混合、分離モデル両方とも同じパターンのS字状になる。また間欠流のボイド率の実験データは混合流と分離流の中間に位置し、そのS字曲線のパターンも似ていることから、

ボイド率の回帰式として次式を基本に考えた。

$$V_A = J_A + J_L \cdot k_L + 0.35 \cdot (g \cdot D)^{0.5} \quad (5-3)$$

k_L : 液相流量換算係数

気相流速はこれまでの一般式と同様に容積流速に応じて増加する第一、第二項と、静水中気泡の上昇速度の第三項で構成するものとした。これから、次式が考えられる。

$$\alpha = J_A / (J_A + J_L \cdot k_L + 0.35 \cdot (g \cdot D)^{0.5}) \quad (5-4)$$

下り勾配管においても分離流でなく間欠流になると、下流の方が低い圧力を示すようになり、同じ様に気泡の下流への移動があり上式が適用されると考えた。式(5-3)で第三項の速度は0.49m/sと実験範囲の V_A と比較して小さいので、 J_L と J_A の比が一定ならばボイド率はほぼ同じとなる。

5. 2 データの解析

5. 2. 1 気相流速

データから V_A の回帰式を求める。この際、分離流とばらつきの多い、ボイド率5%未満のデータははずした。データは水平管と上り勾配管2種を用いた。

回帰式は、 $V_A = b_1 \cdot J_L + b_2 \cdot J_A + b_3$ とし、係数の値を求めた。Table 1に結果を示す。

b_3 を $0.35 \cdot (g \cdot D)^{0.5}$ とすると0.49m/sとなる。

b_3 を回帰式で求めた場合は0.34~0.86m/sとなる。これから k_L を3としてデータと比較することとした。300mm管の場合 k_L は4と推定される。

気相流速は J_T の1.2倍という結果が多い。これは20mm~50mm管の実験が、これまで主であったためと思われる。今回のボイド率の回帰式は J_L を何倍か重み付けする点で、これまでの結果と異なる。ただし、Thom[7]

Table 1 Coefficients of correlation.

Coefficient	Horizontal	0.2%up	0.8%up	Total
b_1	3.53	1.84	2.98	2.71
b_2	1.03	1.09	1.01	1.05

による蒸気-水系の式は今回の実験に合う。管径が違う場合の V_A を考えた場合、直径数mmの時は流れをみると気相と液相が交替で流れ、空気流にフィルムを生じない間欠流が主で V_A は J_T と同じと考えられ、口径20~50mmの時に J_T の1.2倍の滑りがおきること、また圧力損失の解析より液相の実速度がこれまで考えられているよりも遅いことを考えると、口径200~300mm管で J_L の3倍位の滑りがあってもそう無理はないと考えられる。

5. 2. 2 水平管および上り管のボイド率実験結果

Fig. 5.1は200mmの水平、0.2%上り勾配、0.8%上り勾配管のボイド率と J_A の関係を示す。 J_L の範囲はグラフを見やすくするため、低いエリアである0.1m/s~0.27m/sとしている。

水平管の分離流と見なされる部分を除き、一定の傾向を示している。

Fig. 5.1に200mm管の実験データと回帰モデルの値を合わせて示す。回帰モデルは、 J_L

Fig.5.1 J_A -void fraction α ($J_L=0.10\sim0.27$ m/s).

Fig.5.2 J_A -void fraction α ($J_L=0.30\sim0.80$ m/s).

Fig. 5.3 J_A -void fraction α ($J_L=0.80\sim1.50\text{m/s}$).

が0.12, 0.23, 0.27 m/sのケースを示す。水平管では J_L が小さいとき分離流を示す。このボイド率は分離流のモデルと同じ傾向を示す。

分離流モデルは、 J_L が0.12 m/sのケースを示す。Fig. 5.2、Fig. 5.3に同じく回帰モデルの値を示す。

300mm管実験結果[1]では上り勾配があるとボイド率が下がる傾向を示したが、200mm管ではデータの精度は向上したものの勾配による差が認められなかった。このため、300mm管の実験データをビデオテープでチェックしたところ、二相流の流速が増加して間欠流の度合いが進むと、ボイド率が低く示される傾向があることがわかった。再検討の結果、300mm管でも下り勾配では勾配の影響を受けるが、緩い上り勾配でボイド率が下がることは言えないという結果となった。別途実施した300mm管の45度上り勾配実験では、流速が上昇し、ボイド率が20%ほど低下することが実験結果のエアリフト解析から推定される。

5. 2. 3 下り勾配のボイド率

Fig. 5.4に0.5%下り勾配の実験データと式を示す。下り勾配管では J_L が小さいときはいわゆる自然流下の状況になる。勾配に見合った流速になるよう水位が決まる。回帰式では開水路のManning式による断面式からボイド率を計算している。

空気流量が増えてきて、分離流のバランスが乱れると摩擦損失が増加する。この部分は間欠流に移行する領域のようである。この境

Fig. 5.4 J_A -void fraction α in pipe gradient 0.5% down flow.

界は間欠流のボイド率回帰式線である。この境界に達すると一定であったボイド率が急に変化するようになるが、圧力損失の方も、それまで下り勾配の損失に一致して一定であったものが、上昇を示すようになる。別の表現をすると、下り勾配のボイド率は自然流下と間欠流のボイド率の高い方を示し、一致するところが分離流と間欠流の境界線と考えることができる。流動様式 (Fig. 3.3) に、流動様式から判定した分離流と間欠流の境界線 (FLOW PAT.)、ボイド率から算定した境界線 (VOID.)、摩擦損失から算定した境界線 (FR. LOSS)、摩擦損失にエアリフト効果 (この場合マイナスになる) を加えた損失から算定した境界線 (FR. LOSS + AF. EFF)、を示す。

ボイド率から算定した境界線は、 J_L が小さいとき、境界線 (FR. LOSS + AF. EFF) と同じ線上にあり、少し分離流の方に入り込んでいる。各境界線は傾向は似ているが一致したり離れたりしている。この範囲が遷移領域であるためと想定される。

300mm管の0.5%下り勾配実験結果も200mm管と、ほぼ同じような結果を示した。

6. 勾配のある管の圧力損失

6. 1 上り勾配管の圧力損失とエアリフトポンプの理論

上り勾配管の中では、空気の流れが水の落下を食い止める働きを示す。これは、エアリフトポンプの概念であり、この面からの解析

を行った。エアリフトの中の流れは、その構造から垂直の二相流となる。Reinemann 他[8]によれば、管内の摩擦損失を無視して、管内流の平均密度をもとにエアリフトポンプの圧力バランスを考えると、

$$\rho \cdot g \cdot Z_s = \rho \cdot g \cdot (1 - \alpha) \cdot (Z_s + Z_1) \quad (6-1)$$

ただし、 Z_1 =リフト高(ポンプの揚程)、 Z_s =浸水高(水中部分の長さ)である。

管内の圧力損失を無視すると、エアリフト効果率はボイド率と同じ値となる。

実際には圧力バランスの上で、管内に取り込まれる水の加速のため、および管内の摩擦損失のための圧力降下を考えなくてはならない。ただし、延長の長い直管では、管内に入ってくる水の加速のための圧力降下は少ない。

以上は垂直管のエアリフト効果についての考えであるが、管が傾斜した状態を考えてみる。この場合圧力のバランスは、傾斜管の垂直成分についてみると垂直管とおなじように考えられる。Stanislav 他[10]は、間欠流の圧力損失の計算の際、傾斜による圧力勾配変化の式として $\rho_{TP} \cdot \sin \theta$ を与えており、この値はボイド率によるエアリフト効果と同じである。Kokal 他[9]は25.8mm、51.2mm、76.3mmの3種類の口径の管を用いて、水平、±1度、5度、9度の勾配の実験を行い、圧力損失とボイド率を測定しているが、上り勾配のケースで、 J_L が小さい場合に、 J_A が大きくなるにつれて圧力損失が本来大きくなるころなのに、逆に小さくなっていきエアリフト効果を示している。

6. 2 エアリフト効果算出式

傾斜管の場合、その高さ変化のため流れの位置エネルギーも圧力測定の要素となってくる。満管流のとき、上り管では下流が上流との水位差分だけ圧力が高くなる。

このため圧力変化は、水位差分を換算して計算する。二相流の場合は、混合液の比重が変わるため水位差より、ボイド率の分だけ実際の高さによる圧力差は小さくなる。これを

エアリフト効果と呼ぶことにする。摩擦損失を無視した場合は、エアリフト入口の圧力と位置エネルギーの合計よりエアリフト出口の圧力と位置エネルギーの合計の方が大きくなっており、圧力損失で考えるとエアリフト効果はマイナスの値となる。エアリフト効果は上り勾配で働く。下り勾配では複雑な表れ方をし、層状流の状態では表れず、間欠流に移行すると逆に、圧力損失が大きくなる方に働くと考えられる。エアリフト効果を算定する上でボイド率は重要な役割を示す。ボイド率は、実験結果から求められた回帰式(5-4)を用い、実験結果と比較することにする。

6. 3 傾斜管のデータとの比較

二層スラグ流のボイド率の式が与えられ、またボイド率からエアリフト効果が大まかに求められることから、これまで関連付けがないうまま、独立して扱っていた、ボイド率と圧力変化のエアリフト効果を連動して考えることができる。各ケースのエアリフト効果について実測値と比較することにする。

6. 3. 1 上り勾配管(0.8%、0.2%)

0.8%上り勾配管の圧力損失勾配をFig. 6.1に示す。なお、図中の数値は、 J_L の値である。データとモデル式の傾向は、おおむね合っている。また、エアリフト効果をFig. 6.2に示す。0.2%上り勾配管の圧力損失勾配は、式とデータが合っていない。測定精度のためと考えられる。300mm管では最大3%までの実験を行っているが、勾配が大きいほど圧力損失データから計算したエアリフト効果とモデル式と合っている結果を示した。

6. 3. 2 下り勾配管 (0.5%)

Fig. 6.3に圧力損失水頭を示した。データの圧力損失は、 5×10^{-3} より小さいものはない。

水平流であれば間欠流であっても、 5×10^{-3} より小さい摩擦損失で流れる場合もあるが、下り勾配管では、水が勾配による位置エネルギーを全て消費し、結果的に大きな圧力水頭損失を示す。ただし、この圧力損失は水についてであって、空気の摩擦損失はこれに

Fig.6.1 J_A/J_L - I (Water head loss gradient).
in pipe gradient 0.8% up flow.

Fig.6.2 J_A/J_L -effect of airlift in pipe gradient
0.8% up flow.

Fig.6.3 J_A/J_L -effect of airlift in pipe gradient
0.5% down flow.

較べて少ないと推定される。同じ J_L のもとで J_A が増加し分離流の流れが保持できなくなった状態で間欠流に移行するとともに圧力損失勾配も 5×10^{-3} を超える。データ、算定式とも、間欠流になった後の J_A の増加に対する圧力水頭損失の増大の傾きは大きい。データの圧力損失から水平管圧力算定値を引いた値と、エアリフト効果算定値との比較をしてみると、データのばらつきは大きい、プラス（エアリフト効果としてはマイナス）の性格を示している。この傾向は、300mm管においても示されている。

7. 結論

前回の300mm管に続いて口径200mm管の水・空気二相流の実験を行い、以下の結論を得た。

7. 1 摩擦による圧力損失

本実験データと文献値を比較すると、

- ① 分離流の圧力損失は同じ傾向を示す。
- ② 間欠流と、水単相流との圧力損失の比は本実験データの方が低い傾向を示す。

間欠流において圧力損失は、次のモデルの間に位置するものとして回帰モデルを検討した。

①混合流モデル ②分離流モデル

二相流の摩擦損失は、密度が大きく、摩擦損失が高くなる液相の流速に主として支配されるものと大まかに考えられる。大口径の二相流では、ボイド率の実験結果が、これまで言われているものよりも小さいことから、液相の平均流速が低くなり摩擦損失が小さくなるものと推定される。これから、間欠流の摩擦損失は、管径が小さい場合、混合流に近づき、管径が大きくなっていくと分離流に近づくと考えられる。200mm管および300mm管の間欠流は、混合流モデルと分離流のモデルの合成モデルにより圧力損失データを回帰することができた。分離流の摩擦損失データは、分離流モデルによる計算式で回帰することが出来た。

7. 2 ボイド率

間欠流のボイド率は、圧力損失同様に、文献値より低めの傾向を示した。空気平均流速は水容積流速の3～4倍、空気容積流速の1倍の影響を受け、これよりボイド率の回帰式が得られた。分離流のボイド率データは、分離流モデルによる計算値と合う結果を示した。間欠流のボイド率も管径の影響を受け、小口径管では混合流に近く、管径が大きくなるにつれ分離流に近づくと考えられる。

7. 3 勾配による影響

上り勾配では、ボイド率から計算した平均密度を持つ流体と位置エネルギー関係が同じ状態となる。摩擦による圧力損失にこれを加えて勾配管の圧力が表される。

下り勾配管では、一定の気相流速までは自然流下、間欠流としての摩擦損失勾配計算値が、下り勾配を超えると間欠流の状況になり、摩擦損失勾配は上り勾配管と同じように計算できる。

自然流下の状態のボイド率は、開水路の断面計算で概ね表すことが出来る。

Nomenclature

A	: 面積	[m^2]
D	: 直径	[m]
e	: 浸水率 (エアリフト)	[—]
g	: 重力加速度	[m/s^2]
I	: 水頭損失勾配	[—]
J	: 容積流速	[m/s]
n	: Manningの粗度係数	[$m^{-1/3}/s$]
P	: 圧力	[Pa]
dP_f/dz	: 圧力損失	[Pa/m]
R	: 径深	[m]
Re	: レイノルズ数	[—]
V	: 流速	[m/s]
Z_s	: 浸水深	[m]
Z_l	: リフト高	[m]
α	: ボイド率	[—]
ϵ	: 等価粗さ (Moody式)	[m]
θ	: 傾斜角	[deg]
k_L	: 液相流量換算係数	[—]

λ	: 摩擦係数	[—]
λ_c	: 換算摩擦係数	[—]
μ	: 粘性係数	[$Pa \cdot s$]
ρ	: 密度	[kg/m^3]

添字

A	: 気相
C	: 換算
L	: 液相
$L0$	: 水単相流
M	: 混合流モデル
S, S_1, S_2	: 分離流モデル
T, TP	: 二相

参考文献

- [1] 亀田泰武、森田泰治郎、混相流、4巻、3号、219-249(1990)。
- [2] Weisman J., Flow Pattern Identification in Co-Current Vapor-Liquid Flow, Proc. Japan-Us Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, Kobe(1979)。
- [3] 井上宇市、空気調和ハンドブック、丸善、1982。
- [4] R.W.Lockhart and R.C.Martinelli, Chemical Engineering Progress, Vol. 45, No. 1, Jan., 39-48(1949)。
- [5] 日本機械学会、気液二相流技術ハンドブック、コロナ社、1989。
- [6] Thorbjorn Johannessen, A Theoretical Solution of the Lockhart-Martinelli Model for Calculating Two-Phase Flow Pressure Drop and Hold up, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, pp. 1443-1449, Pergamon Press (1972)。
- [7] Thom, J.R.S, Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling Water, Int. J. Heat Transfer, 10, p1767-1778(1967)。
- [8] D.J.Reinemann et., Theory of Small-Diameter Airlift Pumps, Int. Journal, Multiphase Flow, Vol. 16, No. 1 pp. 113-122(1990)。
- [9] J.F.Stanislaw, S.Kokal and M.K.Nicholsen, Gas Liquid Flow in Downward and Upward Inclined Pipes, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 64, p881-890(1986)。
- [10] S.L.Kokal and J.F.Stanislaw, An Experimental Study of Two-Phase Flow in Slightly Inclined Pipes-2. Liquid Holdup and Pressure Drop, Chemical Engineering Science, Vol. 44, No. 3, pp681-693(1989)。
- [11] 秋田県 (財団法人建設技術研究所受託)、秋田湾・雄物川流域下水道圧送管実験委託 (勾配管・水平管) 報告書(1992-3)。