

1. はじめに

例えば、水力発電所余水路減勢工において、発電停止時に余水が急勾配の管路内を自由水面を持った状態で高速に流下する場合、設計対象流量の2倍以上の多量の空気を連行するが、その際水路系の空気の連通性が確保されない、つまりスラグ(水塊と空気塊)が発生すると圧力脈動が発生し、非定常な流れとなる。本研究では、スラグの発生条件である分離流と間欠流の遷移条件のモデル化を行い、気液二相流実験で得られた流動様式との比較を行う。また、スラグ発生に伴って生じる管路への流入流量変動を調べ、その考察を行う。

2. 分離流と間欠流の遷移条件のモデル化

Mishima ら¹⁾は、有限振幅の波に不安定がおこれば、ある特別な波長の波が限界振幅になるまで成長を続けると考えた。そしてこの成長速度が最大となる波の波長を理論的に導き、スラグの発生条件式(1)を導いた。式(1)を用いてスラグの発生条件を導くためには、気相高さ h_G を知る必要がある。気相高さ h_G は、一般的な開水路の不等流の基礎方程式(2)を用いて得られる分離流における液相高さ $h_L(=H-h_G, H$; 流路高さ)から導かれる。よって $J_L(=Q_L/A, Q_L$; 液相体積流量)ごとに限界水深 h_c と等流水深 h_0 を導き、そして式(2)を用いて下流端からの距離 L での h_L を導く。そしてこれをスラグ発生条件の理論式(1)に代入し、 J_L に対応する $J_G(=Q_G/A, Q_G$; 気相体積流量)を求める。

$$U_G - U_L \geq 0.487 \sqrt{\frac{\rho_L g h_G}{\rho_G}} \left(U_G = \frac{Q_G}{A_G}, U_L = \frac{Q_L}{A_L} \right) \quad (1) \quad \frac{dh_L}{dX} = \frac{\sin \theta - \frac{n^2 Q_L^2 s_L^{4/3}}{A_L^{10/3}}}{\lambda \cos \theta - \frac{\alpha Q_L^2}{g A_L^3} \frac{\partial A_L}{\partial h_L}} \quad (2)$$

3. 水平円管路における流動様式図と遷移条件モデルの比較

本研究では管内径 $D100\text{mm}$ 、長さ $L19.496\text{m}$ の可変勾配気液二相流実験装置を用いた^{2),3),4)}。また、流動様式に関しては、管路出口が水塊(空気塊)発生へ及ぼす影響を明確にするため、分離流(Stratified & Wavy Flow)と間欠流(Plug & Slug Flow)の他に、それらの遷移領域として分離-間欠流遷移領域と称する流動様式を定義した。この分離-間欠流遷移領域[図-1]は、間欠流流動様式と同様に空気塊と水塊が発生するが、空気塊先端が出口に達した後、一瞬でも気液混合器から出口までの空気の連通が観察される流動様式である。

水平円管路における流動様式の実験結果と分離流と間欠流の遷移条件モデルの計算結果を図-2に示す。ここで計算結果は、管長 L とマンニングの粗度係数 n を変えて示した。これらによると、水塊の発生条件である分離流から水塊と空気塊が交互に通過する間欠流(間欠流および分離-間欠流遷移領域)への遷移の実験結果は、本実験装置に相当する管径比 $L/D=195$ の計算結果に良く一致する。また、分離-間欠流遷移領域から管路長さに関係せずに水塊と空気塊が交互に発生する間欠流への遷移は、 J_G が大きいほど、より大きい J_L で遷移する。

4. 水平円管路における流入流量変動とそのメカニズム

スラグ発生に伴って非定常な流れが生じる。ここでは、流動様式の相違が管路系全体の流量変動に与える影響を調べる。気相と液相の設定流量条件毎に得られた管路への流入流量の最大と最小の差を図-3に示す。

図-3より分離-間欠流遷移領域の場合に流入流量変動量が大きいことが分かる。そのメカニズムは図-4に示す流入液相体積流量 J_L と上流端の管内圧力 P 、水塊の発生と流出($X/D=28.0, 180.4$ の水位変動 h_w)の時系列から、以下のとおりと考えられる。すなわち、水塊終端が出口に達した瞬間 $[T_1]$ に分離-間欠流遷移領域における分離流様式が始まる。その後、管内の水面上昇が生じ、上部で水面が管路天端に達した瞬間 $[T_2]$ に水塊(空気塊)が発生し、水塊より上流側の管内圧力は急激に上昇し、その結果管路への流入量は減少する。その後、水塊が再び出口に達し、流出し始めると $[T_3]$ 、水塊と壁面との摩擦損失等の抵抗が減少するとともに管内

キーワード：気液二相流, スラッシング, 流動様式, 流量変動, 水平管路, 傾斜管路

連絡先：千葉県我孫子市我孫子 1646, Tel：0471-82-1181, Fax：0471-84-7142

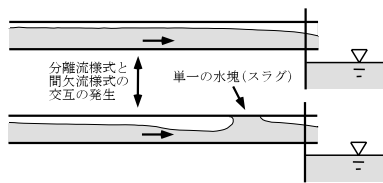


図 - 1 分離-間欠流遷移領域
[Stratified-Plug Transition Regime]

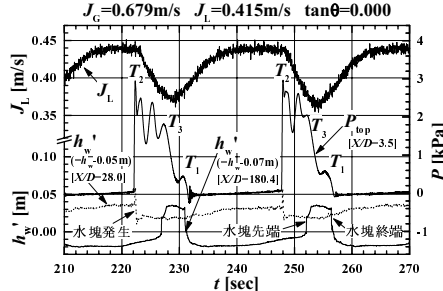


図 - 4 流入流量変動と圧力変動の時系列

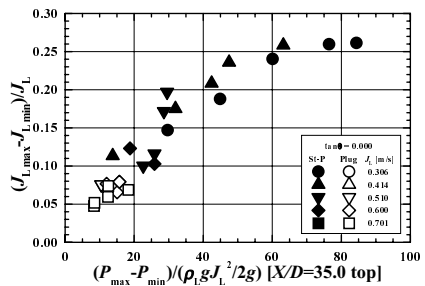


図 - 5 圧力変動と流入流量変動の関係

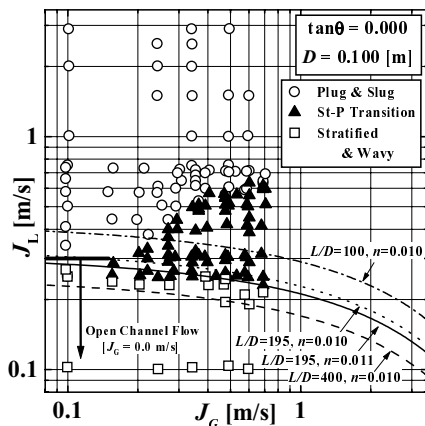


図 - 2 流動様式図 [\$\tan\theta=0.000\$]

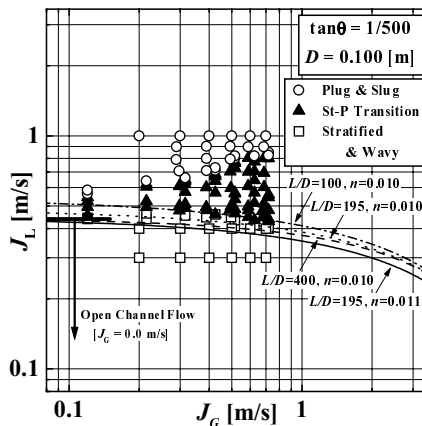


図 - 6 流動様式図 [\$\tan\theta=1/500\$]

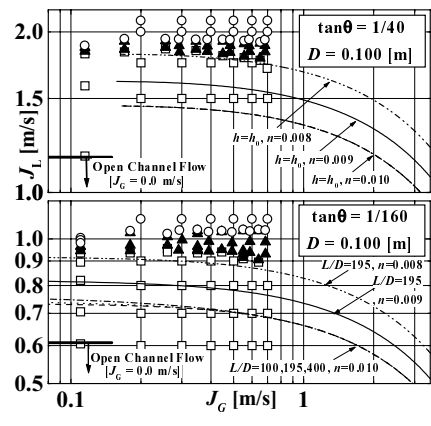


図 - 7 流動様式図 [\$\tan\theta=1/160, 1/40\$]

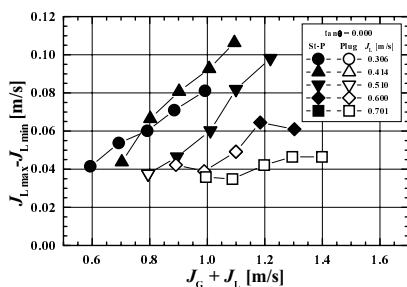


図 - 3 流入流量変動量 [\$\tan\theta=0.000\$]

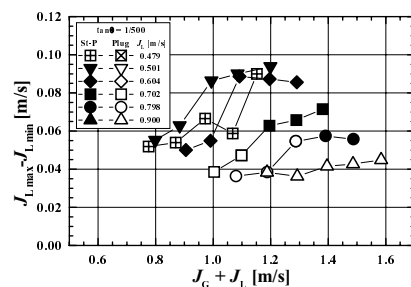


図 - 8 流入流量変動量 [\$\tan\theta=1/500\$]

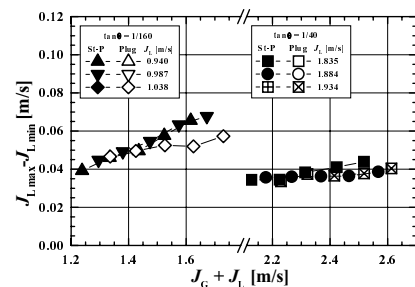


図 - 9 流入流量変動量 [\$\tan\theta=1/160, 1/40\$]

圧力は減少し、その結果流入量は再び増加する。一方、間欠流の場合の流入流量変動は大きくない。これは、流量変動の要因となる水塊は発生するが、分離流様式が生じないために定常的に水塊が存在し、管路入口の圧力が大きく減少しないこと、ならびに図-5に示すように圧力変動が相対的に小さくなるためと考えられる。

5. 傾斜円管路における流動様式と流入流量変動

傾斜円管路 [\$\tan\theta = 1/500, 1/160, 1/40\$] における流動様式の実験結果と計算結果、ならびに流入流量変動量を図-6~9に示す。これらより、勾配が急になるほど分離-間欠流遷移領域となる流量条件範囲は減少する。また、流入流量変動の絶対量は小さくなり、相対的にはほとんど無視できる変動となる。本実験での気相流量条件は液相流量に比較してそれほど大きくないが、\$\tan\theta = 1/40\$の実験結果は流入流量変動が気相流量にほとんど影響されないことを示し、さらに流入流量変動のメカニズムから考えると、勾配が急な場合には気相流量が液相流量の数倍であっても大きな流入流量変動は生じないと考えられる。

6. おわりに

本研究では、スラグ発生モデル化を行い、管内径 100mm、長さ 19.5m の水平および傾斜円管路気液二相流実験と比較を行った。また、分離流と間欠流の遷移領域において大きな流入流量変動が生じることを示し、そのメカニズムを明らかにするとともに、勾配が急なほど流入流量変動が生じにくいことを示した。

参考文献：1) Mishima, et al, Trans. ASME., Journal of Fluids Engineering, Vol.102, pp.441-445, 1980, 2) 佐藤, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.461-466, 1999.2, 3) 佐藤, 電中研研究報告, U99002, 1999.5, 4) 佐藤, 電中研研究報告, U99021, 1999.11