階段式魚道におけるプランジングフローとストリーミングフローの発生条件に関する実験的研究

九州工業大学工学部　学生員　○川良典彰
九州工業大学工学部　正会員　鬼束幸樹　秋山壽一郎
九州工業大学大学院　学生員　木内大介

１．はじめに

階段式魚道では,プランジングフロー，ストリーミングフローおよび両者が時間的に交互に発生する３状態が存在すると言われている[1]. 魚の遡上にはプランジングフローが適していると言われているが，３状態の発生条件を解明しなければ，遡上および降下に適した階段式魚道の設計は困難である.

本研究では，プランジングフローとストリーミングフローが発生する条件を，室内実験によって検討したものである.

２．実験装置および実験条件

図-1 に全面越流型階段式魚道でプランジングフローが発生した状況を示す．流下方向に x 軸，鉛直上向きに y 軸，横断方向に z 軸をとり，プール長を L_x，プール高を L_y，隔壁厚を Δx，プール間落差を Δy，水深を h，越流水深を Δh とする．また，隔壁を越流した流れが次のプールに到達したときの流入角度を θ とし，隔壁上での諸量には添字 w を付けて表す．プール内の流れの形態を決定するパラメータは，ストリーミング状態においても堰上の流れを限界流と見なす限界流近似およびフルード数の影響を無視できる低フルード近似の２つの近似が成立する場合，アスペクト比 $L_x/(L_y+\Delta y)$，相対水深 $h/\Delta y$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の３つとなる[2].

長さ 0.48m，幅 0.4m，高さ 0.4m のプールを５個つなげ，長さ 0.08m の隔壁を設けた水路を実験に用いた. 平均傾斜角度は 1/12 である．実験条件を**表-1** に示す．プール形状 L_x/L_y および流量 Q を変化させる実験を合計 70 ケース行った.

計測項目は水位計測および流速計測である．電磁流速計を用いて４番目のプール内の中央断面(z/B=0.5)において，x 方向流速 U および y 方向流速 V を計測した．ただし，プランジング状態のケース A2Q027 およびストリーミング状態のケース A2Q042 については，流れの２次元性を確認するために，z/B=0.25，0.5，0.75 の３断面について流速計測を行った.

３．実験結果および考察

(1)　流れの概況

流量が少ない場合は常にプランジング状態となっていた．徐々に流量を上げ，ある流量に達するとプランジング状態から

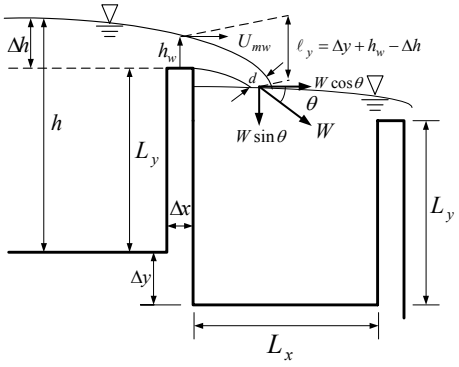

図-1　階段式魚道の概要

表-1　実験条件

Flow / L_x/L_y	Plunging (ℓ/s)	Streaming (ℓ/s)	Streaming to Plunging (ℓ/s)	Plunging to Streaming (ℓ/s)
1	0.4～1.1	4.0～10	1.05	2.35
1.5	1.0～4.0	5.0～10	2.90	3.68
2	1.0～3.5	5.4～10	4.20	4.65
2.5	1.0～4.0	6.0～10	4.36	5.14
3	1.0～4.0	7.0～10	4.65	5.64
3.5	1.0～5.0	7.5～10	5.55	7.06
4	1.0～6.0	8.4～11	6.78	8.00

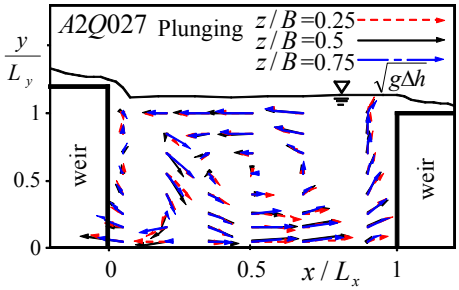

図-2 プランジングフロー概要

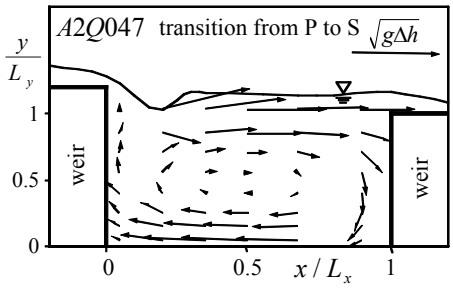

図-3 ストリーミングフロー概要

ストリーミング状態へと変化する．この変化を PS 遷移と呼称し，逆の変化を SP 遷移と呼称する．

図-2 にケース A2Q042 の z/B =0.25，　0.5 および 0.75 における流速 (U ，V)を $\sqrt{g\Delta h}$ で無次元化したベクトル図を示す．流れは側壁の影響を受けない２次元的な流れであると判断される．そのため，以下では水路中央(z/B =0.5)で得られた諸量のみで解析を行う．

(2)　ストリーミング状態における堰上での限界流近似の妥当性

図-3 にストリーミング状態の例を示し，**図-4** に堰上で得られた水深 h_w(exp) および堰上で限界流になると仮定して算出された水深 h_w(cal) を示す．同図には浦ら [3]によって得られた現地計測結果も示している．ストリーミング状態において，堰上で限界流近似がほぼ成立するといえる．従って，支配パラメータはアスペクト比 $L_x/(L_y+\Delta y)$，相対水深 $h/\Delta y$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の３つである．

(3)　プランジングおよびストリーミングの発生条件

得られたアスペクト比 $L_x/(L_y+\Delta y)$，相対水深 $h/\Delta y$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ は系統的に変化していない．３つの各パラメータの影響を独立に評価するため，相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ を基に 10 階層にデータをグループ化した．**図-5** に $0.6 \le h/\Delta y < 0.7$ におけるプランジング状態，ストリーミング状態，PS および SP 遷移状態をプロットした．プランジング状態およびストリーミング状態を分離する境界線を同図内に示した．他の相対水深 $h/\Delta y$ についても同様な境界線を求めた．すべての相対水深 $h/\Delta y$ において得られた境界線の傾き a および切片を b と $\Delta h/\Delta y$ の関係を**図-6** に示す．図中の直線を求め，プランジング状態およびストリーミング状態の発生条件の予測式を以下のように求めた．

・プランジングフローの発生条件

ⅰ）$\Delta h/\Delta y < 0.6$，　$2.8 \le h/\Delta y < 10.7$，　$L_x/(L_y+\Delta h) \ge 1.9$

ⅱ）$0.6 \le \Delta h/\Delta y < 0.9$，　$2.8 \le h/\Delta y < 10.7$，　$L_x/(L_y+\Delta h) \ge 1.9$

$$\frac{L_x}{L_y+\Delta h} \ge \left(0.045\frac{\Delta h}{\Delta y}-0.027\right)\frac{h}{\Delta y}+3\frac{\Delta h}{\Delta y}-0.62 \qquad (1)$$

・ストリーミングフローの発生条件

ⅰ）$0.6 \le \Delta h/\Delta y < 0.9$，　$2.8 \le h/\Delta y < 10.7$，　$L_x/(L_y+\Delta h) \le 1.3$

$$\frac{L_x}{L_y+\Delta h} \le \left(0.045\frac{\Delta h}{\Delta y}-0.027\right)\frac{h}{\Delta y}+3\frac{\Delta h}{\Delta y}-0.62 \qquad (2)$$

ⅱ）$\Delta h/\Delta y \ge 0.9$，　$2.8 \le h/\Delta y < 10.7$，　$L_x/(L_y+\Delta h) \le 1.3$

4．おわりに

本研究では，全面越流型階段式魚道においてプランジング状態およびストリーミング状態のどちらが発生するかを，アスペクト比 $L_x/(L_y+\Delta y)$，相対水深 $h/\Delta y$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ に基づき予測できる式(1)および(2)を提案した．

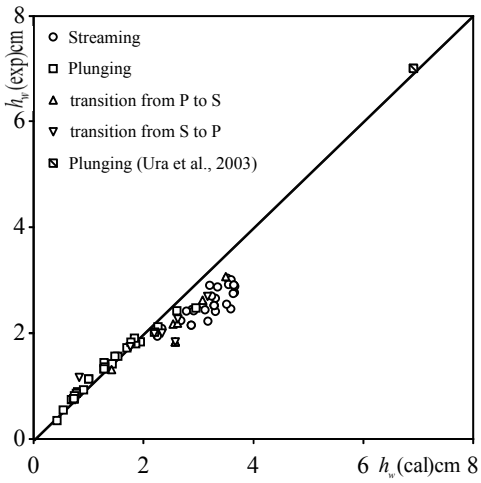

図-4　h_w の実験値と計算値との比較

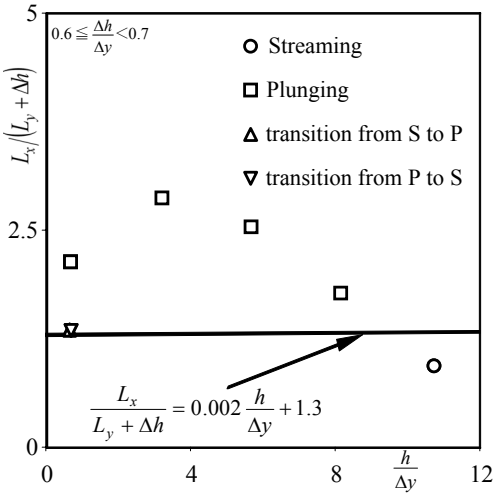

図-5　$\Delta h/\Delta y$ および $L_x/(L_y+\Delta y)$ によるプランジング，ストリーミングの差異

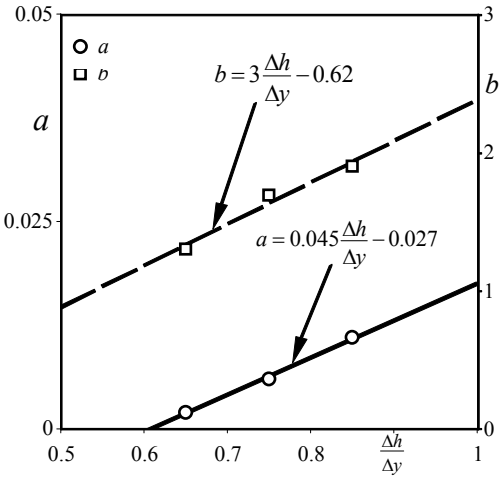

図-6　３個のパラメータに基づく流れ形態の予測

参考文献

1) Rajaratnam, N. and Katopodis, C. and Mainali, A., *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, pp.939-944, 1988.
2) 木内大介，鬼束幸樹，秋山壽一郎，川良典彰，平成16年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，II, 2005.
3) 浦　勝，山口秀和，鬼束幸樹，秋山壽一郎，水工学論文集，第 47 巻，pp.769-774，2003.