

# 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予測式の提案

鬼東 幸樹<sup>1\*</sup>・秋山 壽一郎<sup>1</sup>・川良 典彰<sup>2</sup>・飯國 洋平<sup>3</sup>・木内 大介<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州工業大学工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

<sup>2</sup>（株）松尾設計（〒805-0061 北九州市八幡東区西本町2-5-5）

<sup>3</sup>九州工業大学大学院工学研究科建設社会工学専攻（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

<sup>4</sup>東亜建設工業株式会社 土木本部設計部（〒550-0004 大阪市西区鞠本町1-4-12）

\* E-mail: onitsuka@civil.kyutech.ac.jp

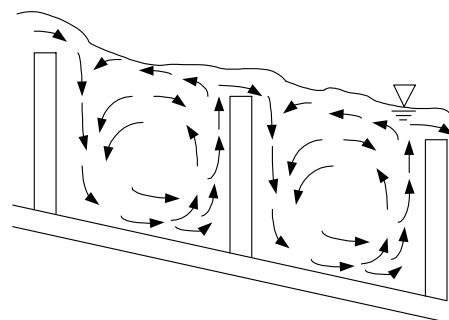
階段式魚道ではプランジングフロー、ストリーミングフローおよび両者が時間的に交互に発生する3形態が存在する。プランジングフローはプール内で反時計回りの渦が発生する流れで、ストリーミングフローは、時計回りの渦が発生する流れである。魚の遡上には前者が適しているといわれている。Rajaratnam *et al.*<sup>4)</sup>は流れの形態の予測式を提案しているが、式展開において越流水深をプール長で代用しており、信頼性が薄いと思われる。鬼東ら<sup>1)</sup>は階段式魚道の流況を決定するパラメータを理論展開によって解明した。本研究は、魚道の現地調査によって、流況を決定するパラメータの範囲を求め、パラメータのオーダー比較を行い、室内実験に基づく流れの形態の予測式の提案を行ったものである。

**Key Words :** pool-and-weir fishway, plunging flow, streaming flow

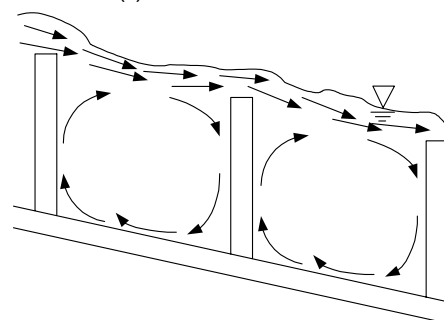
## 1. はじめに

魚道はその水理学的メカニズムの違いから、プールタイプ、水路タイプ、閘門タイプ、エレベータータイプなどに分類される<sup>1)</sup>。我が国では、アユのように比較的遊泳能力の高い魚種を対象とする場合、必要とされる流量が少なくてもよいなどの利点から、プールタイプの階段式魚道が多く設置されており、我が国の既設魚道の90%以上を占めると言われている<sup>2)</sup>。

プールと隔壁とで構成される階段式魚道は次のような欠点があると指摘されている。横断方向に位相を有するセイシュが発生する場合があること<sup>3)</sup>およびプランジングフローとストリーミングフローが交互に発生し、プール内の渦の回転方向が時間的に変化するという不安定な状態になる場合があること<sup>2)</sup>などである。図-1(a)にプランジングフロー、図-1(b)にストリーミングフローの概要図を示す。前者は隔壁を越流した流れが一度プール底面付近まで潜り込み、下流側隔壁に衝突することで再び水面付近に上昇する流れのことである。後者は落下流がプール内に潜り込まずに水面付近を流下し、下流側隔壁



(a) プランジングフロー



(b) ストリーミングフロー

図-1 階段式魚道内の流れの模式図

を越流する流れのことである<sup>4)</sup>。中村・和田<sup>3)</sup>は全面越流型魚道の中央部に非越流部を設け、アイスハーバー型にすることで側壁付近に強い鉛直流を発生させ、セイシュの抑制に成功した。高嶋・中村<sup>5)</sup>、高須ら<sup>6)</sup>、林田ら<sup>7)</sup>は、魚の遡上にはプランジングフローが適していると指摘した。Rajaratnam *et al.*<sup>4)</sup>はプランジングフロー、ストリーミングフローおよび両状態が交互に発生する条件について検討している。彼らは運動量式と抵抗則を利用して発生条件の検討を行った。すなわち、プランジングフローでは堰上で限界流になることを利用して流量と越流水深との関係の導き出し、彼らの提案した無次元流量が0.25よりも大きな場合にストリーミングフローが発生し、逆に小さい場合にプランジングフローが発生すると指摘した。しかし、式変形を行う上で越流水深=プール長という仮定を用いているため、得られた式の物理的な意味が明確ではない。実際、浦ら<sup>8)</sup>が現地計測で観察したプランジングフローについて、Rajaratnam *et al.*<sup>4)</sup>の基準では発生理由を説明できない。さらに、階段式魚道の流況をVOF法を用いて再現した前野・小川<sup>9)</sup>および浪平・後藤<sup>10)</sup>の数値計算結果では、プランジングフローとストリーミングフローの両者が発生しているが、Rajaratnam *et al.*<sup>4)</sup>の基準では発生理由を説明できない。これらの結果はRajaratnam *et al.*<sup>4)</sup>による発生条件に問題があることを示唆している。近年、鬼束ら<sup>11)</sup>は階段式魚道の流れの形態を決定しているパラメータが、フルード数、相対水深(=水深/プール間落差)、アスペクト比(=プール長/水深)および相対プール高落差(=越流水深/プール間落差)の4つであることを理論的に解明した。さらに、アスペクト比と相対プール高落差の2つのパラメータを用いて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を定式化しているが、その際にフルード数および相対水深の影響は微小との仮定を用いている。ところが、この仮定についての検証は不十分である。また、現地魚道においてこれらのパラメータの変化範囲を調査し、流れの予測に反映させたものは皆無である。

本研究では現地調査を行い、上述した流れに影響を与えるパラメータの内、容易に得ることが可能な相対水深、アスペクト比および相対プール高落差の変化範囲を把握した。ただし、フルード数および流れの形態については測定が困難であったので調査項目から除いた。次に現地データと同様のパラメータの変化範囲で室内実験を行い、現地計測では得ることが困難なフルード数の変化範囲を解明すると共に、すべての計測条件における流れの形態がプランジングフローまたはストリーミングフローに属しているかを調査した。続いて、各パラメータが流入角度および運動量へ与える影響をオーダー比較により求め、パラメータを減ずることを試みた。最終的に、プランジ

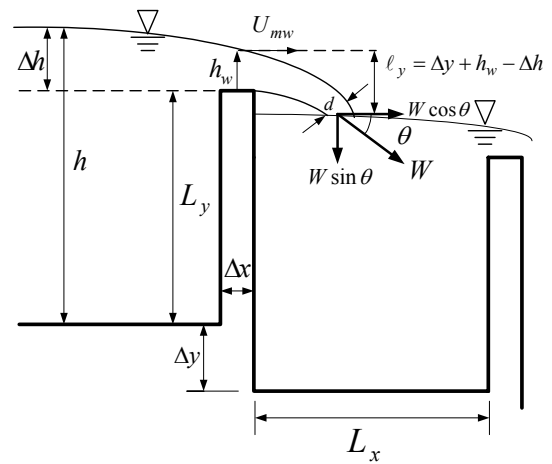


図2 プランジングフローの概要

ングフロー、ストリーミングフローの発生条件の予測を行った。

## 2. 理論的考察

### (1) プランジングフローに関する理論展開

図-2に全面越流型階段式魚道においてプランジングフローが発生した状況の模式図を示す。プール底面に沿って流下方向に $x$ 軸を、鉛直上向きに $y$ 軸を、横断方向に $z$ 軸をとり、 $x$ および $y$ 軸方向の瞬間流速を $\tilde{u} \equiv U + u$ 、 $\tilde{v} \equiv V + v$ 、時間平均流速を $U$ 、 $V$ 、変動成分を $u$ 、 $v$ とした。プール長を $L_x$ 、プール高を $L_y$ 、隔壁厚を $\Delta x$ 、プール間落差を $\Delta y$ 、水深を $h$ 、越流水深を $\Delta h$ 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 $\theta$ とし、隔壁上での諸量には添字 $w$ をつけて表す。ここで、プール内の流れの形態を決定する支配パラメータが何であるかを考える。同一の流入角度および流速であってもプール水深やプール長が変化すると流れの形態が変化することは容易に想像できる。したがって、プールのアスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta h)$ が支配パラメータの一つであると判断される。続いて、同一のアスペクト比であっても流入角度 $\theta$ が異なれば流れの形態が変化することが考えられる。また、流入する際の流脈幅 $d$ および流速 $W$ も流れの形態を決定していることが想像される。したがって、階段式魚道内の流れの形態を支配している直接的なパラメータは、アスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta h)$ 、流入角度 $\theta$ および流入時の運動量 $\rho d W^2$ の3つと考えられる。ここに、 $\rho$ は水の密度である。ただし、流入角度 $\theta$ および運動量 $\rho d W^2$ は流れの情報そのものを有しているために、これらを予測することが困難である。そのため、流入角度 $\theta$ および運動量 $\rho d W^2$ と幾何学形状との関係を求める。

プール内水面と隔壁水面との間でベルヌーイの定理を

適用する。

$$\Delta y + h + \frac{U_m^2}{2g} = \Delta y + L_y + h_w + \frac{U_{mw}^2}{2g} \quad (1)$$

ここに、 $U_m$  は断面平均流速、 $g$  は重力加速度である。堰上で流れが限界流になると仮定すると、堰上水深  $h_w$  および堰上流速  $U_{mw}$  は次式となる。

$$h_w = (hFr^2 + 2\Delta h) / 3 \quad (2)$$

$$U_{mw} = \sqrt{g(hFr^2 + 2\Delta h) / 3} \quad (3)$$

堰上の水面と次のプールとの鉛直落差  $\ell_y$  は幾何学的に次式となる。

$$\ell_y = \Delta y + h_w - \Delta h \quad (4)$$

式(4)に式(2)を代入し、自由落下理論を利用すると、落下時間  $t$  は次式となる。

$$t = \sqrt{2(hFr^2 - \Delta h + 3\Delta y) / (3g)} \quad (5)$$

落下流が水面に到達した時の流速ベクトルの大きさを  $W$  とする。鉛直下向き流速  $W \sin \theta$  は自由落下理論および式(5)を利用すると次式となる。

$$W \sin \theta = \sqrt{2g(hFr^2 - \Delta h + 3\Delta y) / 3} \quad (6)$$

堰を離れた流れの水平方向の挙動が等速運動と仮定すると、 $W \cos \theta$  は式(3)と同値となる。

$$W \cos \theta = \sqrt{g(hFr^2 + 2\Delta h) / 3} \quad (7)$$

式(6)および(7)より流入角度  $\theta$  が求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{2 + \frac{6(1 - \Delta h / \Delta y)}{h / \Delta y \cdot Fr^2 + 2\Delta h / \Delta y}} \quad (8)$$

続いて、堰上の流量  $h_w U_{mw}$  と落下点との間に連続の式を立てて、流速  $W$  を代入すると落下流の流脈幅  $d$  が得られる。

$$d = \sqrt{(hFr^2 + 2\Delta h)^3 / (3hFr^2 + 6\Delta y) / 3} \quad (9)$$

式(6)、(7)、(9)より無次元運動量  $dW^2 / g\Delta y^2$  は次式となる。

$$\frac{dW^2}{g\Delta y^2} = \frac{1}{9} \sqrt{\left( \frac{h}{\Delta y} Fr^2 + 2 \frac{\Delta h}{\Delta y} \right)^3 \cdot \left( 3 \frac{h}{\Delta y} Fr^2 + 6 \right)} \quad (10)$$

以上のように、流れの形態を直接決めているのはアスペクト比  $L_x / (L_y + \Delta h)$ 、流入角度  $\theta$  および運動量  $\rho dW^2$  であるが、式(8)、(10)および上記の考察より、これらを決定するパラメータは、フルード数  $Fr$ 、相対水深  $h / \Delta y$ 、アスペクト比  $L_x / (L_y + \Delta h)$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  の 4 つである。なお、プール内では逆流が生じるため、フルード数  $Fr$  の物理的意味は極めて乏しい。

## (2) ストリーミングフローにおける理論展開

ストリーミングフローは堰上で限界流にならないため、理論展開が困難である。しかし、仮に堰上で限界流に近い状態であれば、式(1)～式(10)の理論を代用できる。こ

の場合、ストリーミングフローにおける流れの支配パラメータはプランジングフローと同様に、フルード数  $Fr$ 、相対水深  $h / \Delta y$ 、アスペクト比  $L_x / (L_y + \Delta h)$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  の 4 つとなる。この仮定が妥当かどうかは後に検証する。

## 3. パラメータのオーダー比較

流れの形態を決定するパラメータはフルード数  $Fr$ 、相対水深  $h / \Delta y$ 、アスペクト比  $L_x / (L_y + \Delta h)$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  の 4 つであるが、これらのパラメータを系統的に変化させる実験を行うことは困難なことである。なぜなら、プール長  $L_x$ 、プール高  $L_y$  およびプール間落差  $\Delta y$  を目的の値に設定することは容易であるが、水深  $h$  や越流水深  $\Delta h$  を予め想定している値に設定することは困難であり、そのためフルード数  $Fr$  の制御も困難だからである。

一方で、工学的には多くのパラメータを用いて高精度な流れの形態の予測を行うことよりも、少ないパラメータで流れの概略を予測することが求められる。式(8)および式(10)よりフルード数  $Fr$ 、相対水深  $h / \Delta y$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  が流入角度  $\theta$  および運動量  $\rho dW^2$  に及ぼす影響が容易に計算可能である。ただし、それぞれのパラメータの変化しうる範囲を把握する必要がある。ところが、魚道の幾何学条件であるプール長  $L_x$ 、プール高  $L_y$ 、プール間落差  $\Delta y$  を既存資料から求めることはある程度可能であるが、水深  $h$ 、越流水深  $\Delta h$ 、流量を記載した資料はほとんどなく、そのため、フルード数  $Fr$ 、相対水深  $h / \Delta y$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  を既存資料から求めることは困難である。現地計測を行えばこれら 4 つのパラメータの変化範囲を把握することが可能である。ただし、フルード数  $Fr$  を把握するには多点流速計測を行い断面平均流速を求める必要があるが、こうした計測には多大な労力が必要である。

そこで、まず現地調査を行い、実際に設置されている階段式魚道においてフルード数  $Fr$  以外のパラメータである相対水深  $h / \Delta y$ 、アスペクト比  $L_x / (L_y + \Delta h)$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  の変化範囲を求めた。次に現地データと同様のパラメータの変化範囲で室内実験を行い、階段式魚道における流れの再現を行った。室内実験であれば、魚道に流入させる流量を把握することが容易であるので流速計測を行うことなくフルード数  $Fr$  を容易に得られる。ここで得られたフルード数  $Fr$ 、相対水深  $h / \Delta y$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  のデータを用い、流入角度  $\theta$  および運動量  $\rho dW^2$  への寄与率のオーダー比較を行い、パラメータ数を減ずることを試みた。

表-1 魚道現地調査の結果

河川名	板櫃川								紫川	
河口からの位置(km)	1.0	3.5	5.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	4.0	4.0
プール番号	-	-	-	1	2	3	4	5	1	2
水深 $h$ (m)	0.34	0.28	0.30	0.92	0.72	0.60	0.42	0.58	0.66	0.72
プール間落差 $\Delta y$ (m)	0.30	0.13	0.15	0.12	0.20	0.25	0.25	0.15	0.23	0.22
プール長 $L_x$ (m)	1.80	0.73	1.76	1.90	1.90	1.88	1.89	1.52	2.40	2.40
プール高 $L_y$ (m)	0.30	0.25	0.25	0.85	0.63	0.43	0.18	0.39	0.59	0.60
プール幅 $B$ (m)	2.0	2.1	4.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	4.0	4.0
越流水深 $\Delta h$ (m)	0.04	0.03	0.05	0.07	0.09	0.17	0.24	0.19	0.07	0.12
アスペクト比 $L_x/(L_y+\Delta h)$	5.3	2.6	5.9	2.1	2.6	3.1	4.5	2.6	3.6	3.3
相対水深 $h/\Delta y$	1.1	2.2	2.0	7.7	3.6	2.4	1.7	3.9	2.9	3.3
相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$	0.1	0.2	0.3	0.6	0.5	0.7	1.0	1.3	0.3	0.5

表-2 実験条件

$L_x/L_y$	$h/\Delta y$	$\Delta h/\Delta y$	$Fr$	$P(\ell/s)$	$S(\ell/s)$	$SP(\ell/s)$	$PS(\ell/s)$	$Re$
1	10.2~11.1	0.16~1.10	0.001~0.027	0.4~1.1	4.0~10.0	1.1	2.4	1000~25000
1.5	7.0~7.8	0.29~1.10	0.005~0.047	1.0~4.0	5.0~10.0	2.9	3.7	2500~25000
2	5.3~6.1	0.30~1.12	0.008~0.066	1.0~3.5	5.4~10.0	4.2	4.7	2500~25000
2.5	4.3~5.1	0.31~1.08	0.011~0.092	1.0~4.0	6.0~10.0	4.4	5.1	2500~25000
3	3.7~4.5	0.36~1.16	0.014~0.106	1.0~4.0	7.0~10.0	4.7	5.6	2500~25000
3.5	3.2~3.7	0.40~1.14	0.018~0.143	1.0~5.0	7.5~10.0	5.6	7.1	2500~25000
4	2.8~3.8	0.29~1.26	0.021~0.151	1.0~6.0	8.4~11.0	6.8	8	2500~27500
1	7.0~7.7	0.15~0.84	0.001~0.025	0.4~1.0	4.0~10.0	1.5	2.9	1000~25000
1.5	4.7~5.6	0.22~1.12	0.005~0.062	1.0~5.0	8.0~15.0	6	6.4	2500~37500
2	3.5~4.6	0.30~1.38	0.008~0.083	1.0~5.0	9.0~15.0	7	8	2500~37500
2.5	2.9~3.8	0.27~1.17	0.011~0.112	1.0~7.0	10.0~15.0	8.6	9.2	2500~37500
3	2.3~3.5	0.30~1.47	0.015~0.124	1.0~8.0	12.0~15.0	9.7	10.8	2500~37500
3.5	2.1~3.2	0.30~1.30	0.018~0.145	1.0~10.0	12.0~15.0	11.1	11.5	2500~37500
4	1.8~2.5	0.28~0.98	0.022~0.204	1.0~15.0	—	—	—	2500~37500
1	5.3~5.8	0.11~0.66	0.001~0.025	0.4~1.0	4.0~10.0	1.9	3.5	1000~25000
1.5	3.6~4.3	0.20~0.95	0.005~0.059	1.0~7.0	9.0~15.0	7.5	8.5	2500~37500
2	2.7~3.5	0.21~1.06	0.008~0.081	1.0~10.0	12.0~15.0	10.8	11.5	2500~37500
2.5	2.4~3.0	0.16~1.03	0.011~0.115	5.0~13.5	14.5~17.0	13.8	14.2	12500~42500
3	2.1~2.8	0.15~1.15	0.014~0.142	5.0~16.5	17~17.8	16.5	16.8	12500~44500
3.5	1.6~2.1	0.13~0.66	0.018~0.171	1.0~15.0	—	—	—	2500~37500
4	1.4~2.0	0.18~0.81	0.021~0.184	1.0~15.0	—	—	—	2500~37500

また、アクリル製の透明なプールを用いているため、微細な気泡を目視することで流れの形態を容易に判定できる。これにより、プランジングフロー、ストリーミングフローおよびその遷移状態の発生条件を予測することが可能になる。

### (1) 現地計測

北九州市近隣の河川における魚道現地調査の結果を表-1に示す。調査を行った河川は二級河川の板櫃川および紫川である。計測項目は水深 $h$ 、プール間落差 $\Delta y$ 、プール長 $L_x$ 、プール高 $L_y$ 、プール幅 $B$ 、越流水深 $\Delta h$ である。いずれの魚道も全面越流型階段式魚道である。プール番号のあるものはプールごとに形状が異なる魚道のデータである。調査日は2007年4月12日である。な

お、4月6日から4月12日までの1週間、それぞれの河川における雨量について計測地点に近い仙房橋観測所および桜橋観測所のデータを参照したところ、いずれもゼロであった。また、同様に水位変化についても参照したところ、変化はほとんど見られなかった。よって今回の現地計測のデータはそれぞれの河川における平常時のデータとみなすことができる。

表-1より、現地河川における階段式魚道の流況を支配するパラメータのうち相対水深 $h/\Delta y$ 、および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の変化範囲が以下のものであることが判明した。

$$1.1 < h/\Delta y \leq 7.7, \quad 0.1 < \Delta h/\Delta y \leq 1.3 \quad (11)$$

この条件に基づき室内実験で流れを再現し、フルード数 $Fr$ の変化範囲を求め、流入角度 $\theta$ および運動量

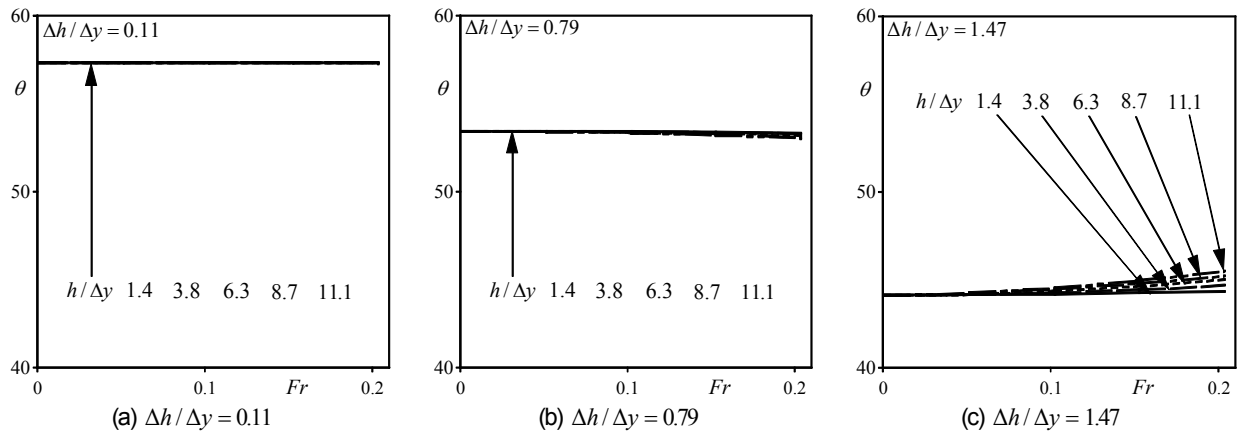


図-3 角度 $\theta$ とフルード数 $Fr$ との関係

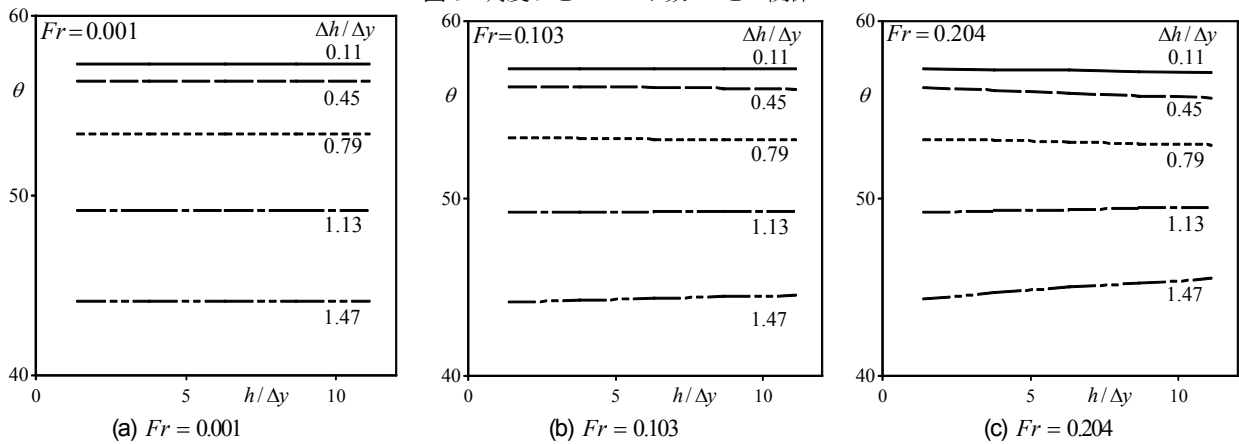


図-4 角度 $\theta$ と相対水深 $h/\Delta y$ との関係

$\rho dW^2$ への寄与率のオーダー比較を行う。

## (2) 室内実験

3.(1)で求めた式(11)とほぼ同様な条件を室内実験で再現した。実験条件を表-2に示す。実験に用いた水路はプール長 $L_x$ が0.4m、プール幅 $B$ が0.4m、プール高 $L_y$ が0.4mのプールを5個つなげ、隔壁厚 $\Delta x$ が0.08mの隔壁を設けたものである。なお、この水路は現地魚道を約1/3程度縮小させたものである。プール幅 $B$ およびプール長 $L_x$ を上記の値に固定し、プール高 $L_y$ を0.1~0.4mの範囲内で7通り変化させることで $L_x/L_y$ を1~4の範囲に変化させた。また、 $\Delta y$ を4, 6, 8に変え、傾斜角度を変化させた。それぞれの幾何学形状の状態での流量を0.4~17.8ℓ/sの範囲内でランダムに変化させ、192通りの実験を行った。実験を行う際には各幾何学形状において流量を系統的に増加あるいは減少させ、流れが時間的に安定したと考えられる5~20分程度の時間が経過した後、後述する計測を行った。流れが安定する時間は流量に依存し、流量の減少に伴い流れが安定に要する時間が増加した。表-2には流量を増加させたときおよび減少させたときの両条件でプランジングフロー(表中 P)あるいはストリーミングフロー(表中 S)になった場合の流量の範囲をそれぞれ示している。また、流量を徐々に増加させてプランジングフローからストリーミングフローにな

った直後(PS 遷移直後と称す)、流量を徐々に減少させてストリーミングフローからプランジングフローになった直後(SP 遷移直後と称す)の流量およびレイノルズ数 $Re \equiv hU_m/\nu$ を同表に示している。なお、表-2中の数字の無い欄は、実験装置の制約上実験できなかったケースを示している。

計測項目は目視による流れの形態の判定および水位計測である。まず、目視で微細な気泡を観察することにより、プランジングフロー、ストリーミングフローおよび遷移状態のいずれに属しているかを判定した。続いて、ポイントゲージを用いて水深を計測した。水深はプール内で変化しているため、流下方向の約30点で水深を計測し、平均値を水深 $h$ とした。さらに水深 $h$ からプール高 $L_y$ を差し引くことで越流水深 $\Delta h$ を算出した。なお、同一形状の水路における流れの2次元性は鬼束ら<sup>11)</sup>によって証明されているため、計測は $z/B = 0.5$ で行った。また、各実験条件における流量および水深からフルード数を算出した。

室内実験におけるフルード数 $Fr$ 、相対水深 $h/\Delta y$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の変化範囲がそれぞれ以下のようになることがわかった。

$$0.001 < Fr \leq 0.204, 1.4 < h/\Delta y \leq 11.1, 0.11 < \Delta h/\Delta y \leq 1.47 \quad (12)$$

室内実験で得られた相対水深 $h/\Delta y$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ の変化範囲が現地調査のものと同程度

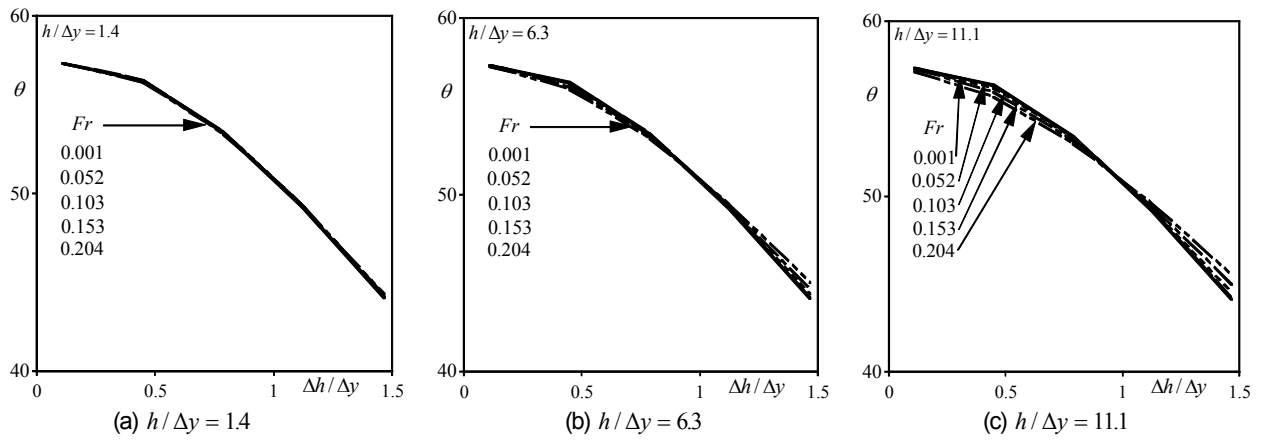


図-5 角度 $\theta$ と相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ との関係

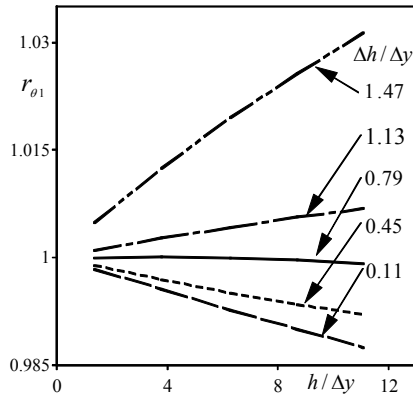


図-6  $Fr$ が最大, 最小時の流入角度の比 $r_{\theta 1}$

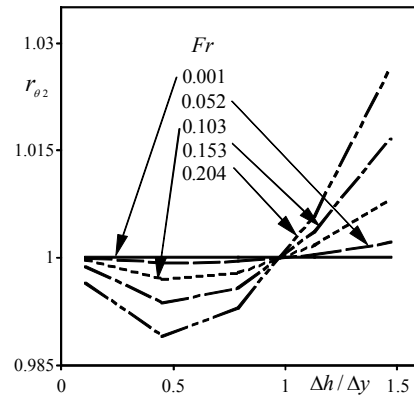
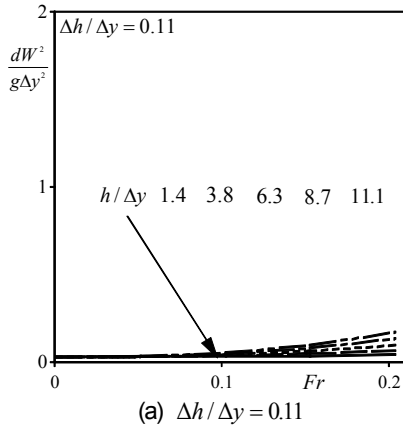
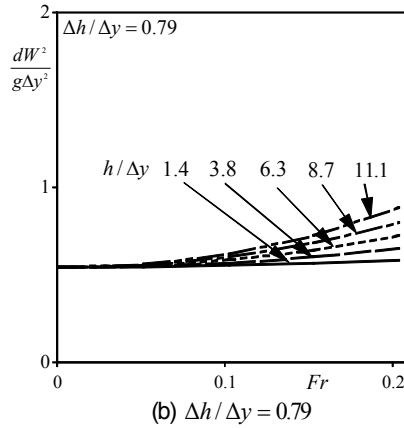


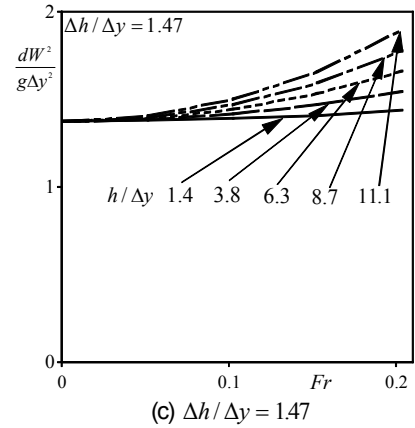
図-7  $h/\Delta y$ が最大, 最小時の流入角度の比 $r_{\theta 2}$



(a)  $\Delta h/\Delta y = 0.11$



(b)  $\Delta h/\Delta y = 0.79$



(c)  $\Delta h/\Delta y = 1.47$

図-8 無次元運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ とフルード数 $Fr$ との関係

ている。この理由として、現地でプール間落差 $\Delta y$ がプールごとに異なる魚道があったのに対し、室内実験で用いた水路では各プール間落差 $\Delta y$ を固定していたため、ずれが生じたと考えられる。

### (3) 各パラメータが流入角度に及ぼす影響

式(12)の範囲において、フルード数 $Fr$ 、相対水深 $h/\Delta y$ および相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ が流入角度 $\theta$ に及ぼす影響を式(8)より算出し、図-3～図-5にそれぞれ示す。図-5より相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ が変化すると流入角度 $\theta$ が大幅に変化することがわかる。図-3, 4よりフルード数 $Fr$ および相対水深 $h/\Delta y$ の流入角度 $\theta$ に及ぼす影響は微少であり、どちらが卓越パラメータかは明

瞭でない。そこで、フルード数 $Fr$ が最大時と最小時との流入角度の比を

$$r_{\theta 1} = \{\theta(Fr = Fr_{\max})\} / \{\theta(Fr = Fr_{\min})\} \quad (13)$$

相対水深 $h/\Delta y$ が最大時と最小時との流入角度の比を

$$r_{\theta 2} = \{\theta(h/\Delta y = h/\Delta y_{\max})\} / \{\theta(h/\Delta y_{\min})\} \quad (14)$$

と定義する。図-6に流入角度比 $r_{\theta 1}$ を、図-7に流入角度比 $r_{\theta 2}$ を示す。それぞれの流入角度比の最大値と最小値の差を比較すると、 $r_{\theta 1}$ の差が大きいことがわかる。このことから、フルード数 $Fr$ の方が相対水深 $h/\Delta y$ よりも影響が大きいことが窺える。

### (4) 各パラメータが運動量に及ぼす影響

式(12)の範囲において、フルード数 $Fr$ 、相対水深

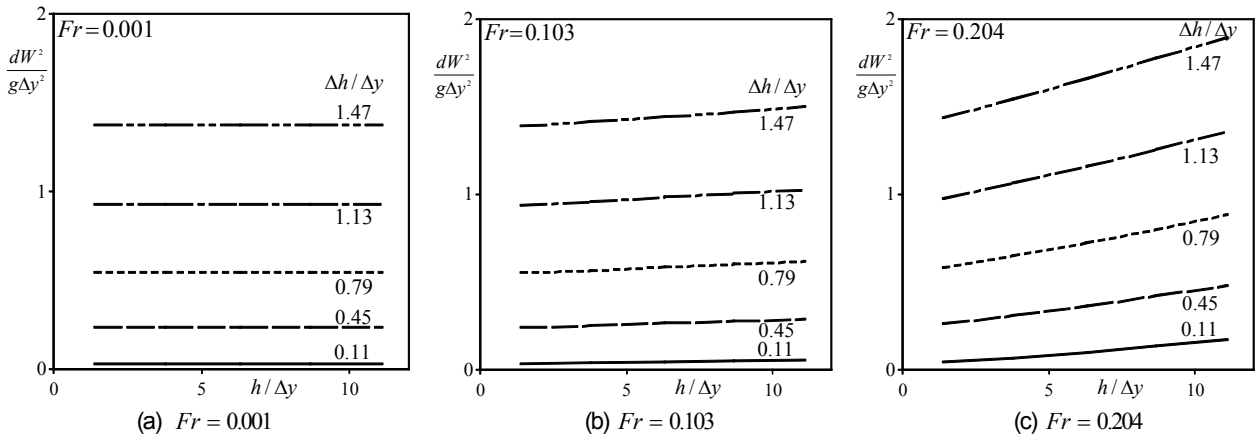


図-9 無次元運動量  $dW^2 / g\Delta y^2$  と相対水深  $h / \Delta y$  との関係

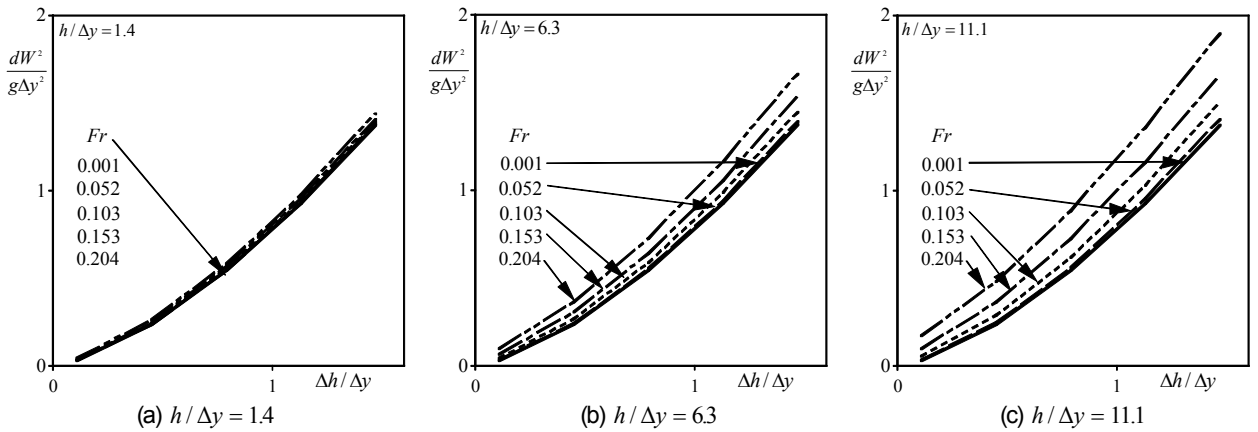


図-10 無次元運動量  $dW^2 / g\Delta y^2$  と相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  との関係

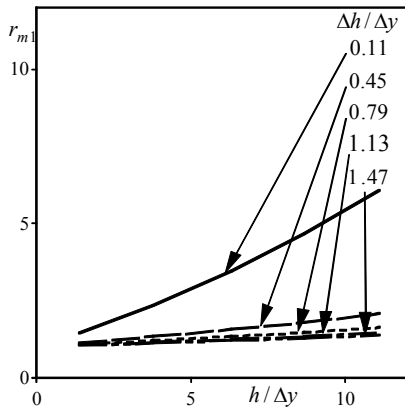


図-11  $Fr$  が最大, 最小時の  $r_{m1}$

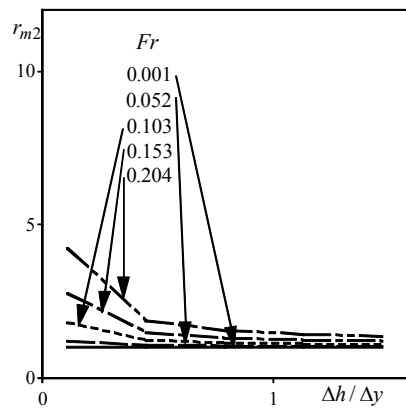


図-12  $h / \Delta y$  が最大, 最小時の比  $r_{m2}$

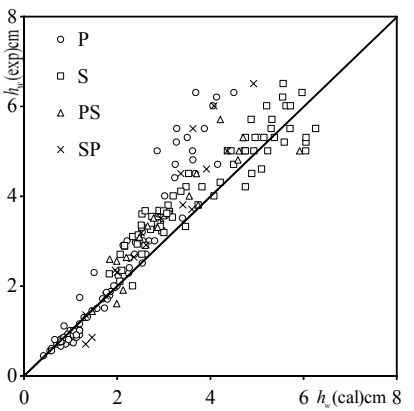


図-13  $h_w$  の実験値と計算値との比較

$h / \Delta y$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  が運動量  $\rho dW^2$  に及ぼす影響を式(10)より算出した。各パラメータが流入角度  $\theta$  に及ぼす影響解析と同様な解析を行う。図-8～図-10 にフルード数  $Fr$ 、相対水深  $h / \Delta y$  および相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  が無次元運動量  $dW^2 / g\Delta y^2$  に及ぼす影響をそれぞれ示す。図-10 より相対プール高落差  $\Delta h / \Delta y$  が変化すると無次元運動量  $dW^2 / g\Delta y^2$  が大幅に変化していることは観察されるが、図-8、9 よりフルード数  $Fr$  および相対水深  $h / \Delta y$  の無次元運動量  $dW^2 / g\Delta y^2$  に及ぼす影響に関しては、どちらが卓越パラメータであるかは明瞭でない。フルード数  $Fr$  が最大時と最小時との

無次元運動量の比を

$$r_{m1} = \left\{ dW^2 / dy^2 (Fr = Fr_{\max}) \right\} / \left\{ dW^2 / dy^2 (Fr_{\min}) \right\} \quad (15)$$

相対水深  $h / \Delta y$  が最大時と最小時との無次元運動量の比を

$$r_{m2} = \left\{ dW^2 / dy^2 (h / \Delta y = h / \Delta y_{\max}) \right\} / \left\{ dW^2 / dy^2 (h / \Delta y_{\min}) \right\} \quad (16)$$

と定義する。図-11 に無次元運動量の比  $r_{m1}$  を、図-12 に無次元運動量の比  $r_{m2}$  を示す。先ほどと同様に、それぞれの無次元運動量の比の最大値と最小値の差を比較すると、 $r_{m1}$  の差が大きいことがわかる。

以上のことから、落下流の流入角度  $\theta$  および運動量  $\rho dW^2$  に最も大きな影響を及ぼすパラメータは相対プ

ール高落差 $\Delta h/\Delta y$ で、続いてフルード数 $Fr$ の影響が大きく、相対水深 $h/\Delta y$ が最も影響を与えないことが解明された。したがって、流入角度 $\theta$ および運動量 $\rho dW^2$ への影響力が最も小さな相対水深 $h/\Delta y$ を無視すると、流れの形態を支配しているパラメータは、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ 、相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ およびフルード数 $Fr$ の3つとなる。

#### 4. プランジングフローおよびストリーミングフローの発生条件

##### (1) 堰上での限界流近似の妥当性

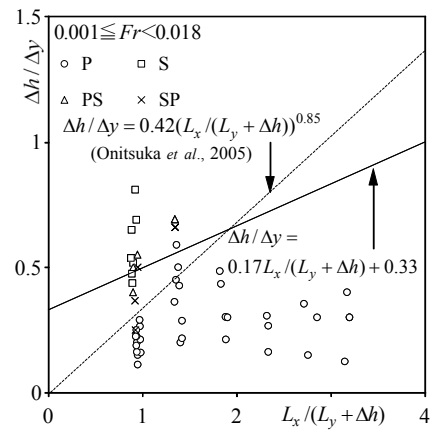
堰上で流れが限界流になると、堰上水深 $h_w(cal)$ は式(2)で計算される。

$$h_w(cal) = (hFr^2 + 2\Delta h) / 3 \quad (17)$$

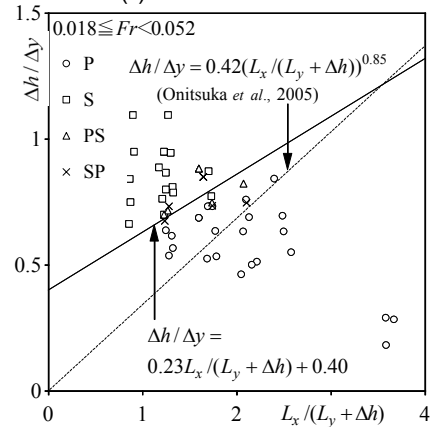
図-13に本実験で得られた堰上水深 $h_w$ の実測値 $h_w(exp)$ と、式(17)によって求められた計算値 $h_w(cal)$ との関係の流れの形態ごとに示す。それぞれの値を比べてみると、計算値が実測値を下回っているものが見受けられる。これは、計算上では堰上でフルード数が1となると仮定しているのに対し、実際には堰上でフルード数が1以上となるために生じたものである。しかし、その差異は平均的には15%程度であるので、この程度の誤差を許容するのであれば、2. (1), (2)における堰上での限界流近似が可能である。

##### (2) プランジングフローおよびストリーミングフローの発生条件の定式化

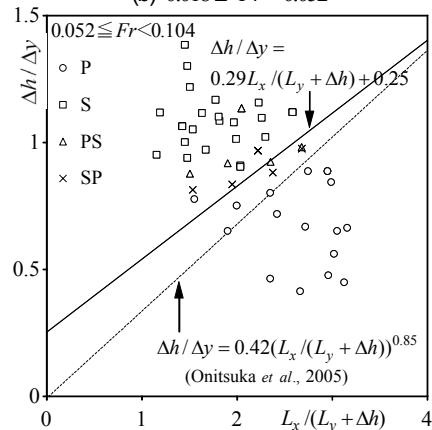
3. (4)から、流れの形態を決定している支配的なパラメータは、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ 、相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ およびフルード数 $Fr$ の3つであることがわかった。しかし、表-2で示した実験条件において、これらの3つのパラメータは系統的に変化していない。3つの各パラメータの影響を独立に評価するため、フルード数 $Fr$ を基に4階層にデータをグループ化した。図-14(a)~(d)に $0.001 \leq Fr < 0.018$ 、 $0.018 \leq Fr < 0.052$ 、 $0.052 \leq Fr < 0.104$ 、 $0.104 \leq Fr < 0.204$ における相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ とアスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ との関係を示す。同図には、プランジングフロー、ストリーミングフロー、PSおよびSP遷移状態をそれぞれ異なる記号でプロットすると共に、前報<sup>1)</sup>で提案したプランジングフローおよびストリーミングフローの発生条件の予測式を点線で示した。同図より、全てのフルード数 $Fr$ において、プランジングフローおよびストリーミングフローが発生する場合の相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ およびアスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ の範囲がおおよそ区別されることがわかる。また、両状態の境界付近にPSおよびSP遷移状態が位置していることも観察される。また、前報<sup>1)</sup>で



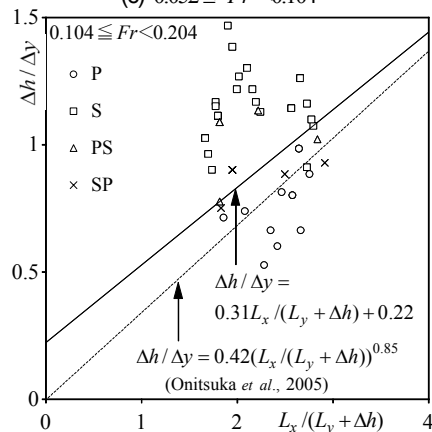
(a)  $0.001 \leq Fr < 0.018$



(b)  $0.018 \leq Fr < 0.052$



(c)  $0.052 \leq Fr < 0.104$



(d)  $0.104 \leq Fr < 0.204$

図-14 相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ とアスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ との関係



提案した点線はプランジングフローおよびストリーミングフローをおおよそ分離しているが、必ずしも適切に分離していない。そこで、プランジングフローおよびストリーミングフローを区分する境界線を図中に実線で示した。

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} = a \cdot \frac{L_x}{L_y + \Delta h} + b \quad (18)$$

図中の境界線でおおよそ両状態が区分できる。また、前報<sup>11)</sup>で導出した予測式より、高精度に区分できていることがわかる。得られた境界線の傾き  $a$  および切片  $b$  はフルード数  $Fr$  の一価関数である。

図-15 に傾き  $a$  および切片  $b$  とフルード数  $Fr$  との関係を示す。図中の直線を求め、プランジングフローおよびストリーミングフロー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

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} \leq (0.87Fr + 0.19) \frac{L_x}{L_y + \Delta h} - 1.0Fr + 0.37 \quad (19.a)$$

・ストリーミングフローの発生条件

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} \geq (0.87Fr + 0.19) \frac{L_x}{L_y + \Delta h} - 1.0Fr + 0.37 \quad (19.b)$$

以上の式によって、アスペクト比  $L_x/(L_y + \Delta h)$ 、相対プール高落差  $\Delta h/\Delta y$  およびフルード数  $Fr$  の式(11)で求めた条件を与えれば、実際に設置されている階段式魚道においてプランジングフローあるいはストリーミングフローのいずれが発生するかを予測可能となった。

## 5. おわりに

本研究は、現地河川に設置されている階段式魚道内に形成される流れの形態の予測を目的として行ったものである。得られた知見は以下のようなものである。

- (1) 前報<sup>11)</sup>で導出した階段式魚道の流れの形態を決定している4つのパラメータ(フルード数, 相対水深, アスペクト比および相対プール高落差)が流入角度および運動量に及ぼす影響をオーダー比較した結果, 最も影響の小さいパラメータは相対水深であることが判明した。
- (2) 理論展開における堰上での限界流近似は15%程度の誤差を許すのであれば使用可能である。
- (3) (1)および(2)の結果に基づき, プランジングフローおよびストリーミングフローの発生条件を予測する式を式(19)のように提案した。前報<sup>11)</sup>では4つのパラメータの内, 2つのパラメータを無視し, 残る2つのパラメータを用いて予測式を求めていたが, 2つのパラメータが無視できるかどうかの証明を行っていなかった。本研究ではパラメータのオーダー比較を行った上で, パラメータを3つに絞り, 予測式を提案した。この予測式は前報<sup>11)</sup>で提案した予測式よりも高精度であることが示された。
- (4) 本研究で採用した隔壁天端形状は直角型であるが, この形状が異なれば流れの形態も変化するため<sup>12)</sup>, 今後, 他の形状においても同様な検討が必要である。また, 越

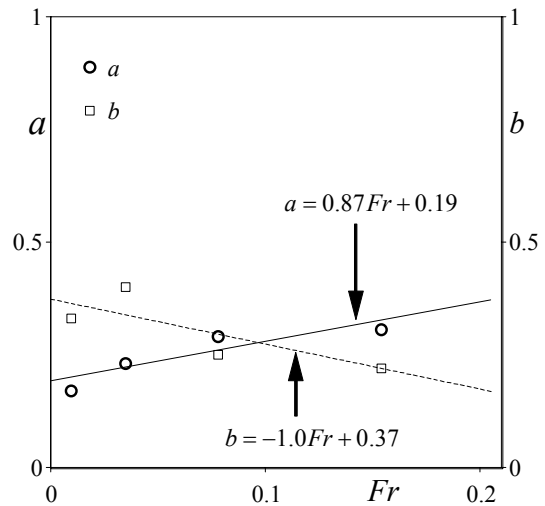


図-15 傾き  $a$  および切片  $b$  とフルード数  $Fr$  との関係

流部を有する模型実験を行う場合, 越流水深が0.08m以上にすることが推奨されているが<sup>13)</sup>, 本実験では実験装置の制約上必ずしもこれを満たすことができなかった。そのため, 表面張力などの影響も含んでいると考えられる。さらにレイノルズ数の影響, 潜孔の有無などについても考慮していない。本研究で得られた知見はこれらの影響を無視した限定的な結果である。今後, これらの因子が流れの形態に及ぼす影響を解明していきたい。

謝辞: 本研究を実施するに当たり, 科学研究費補助金若手研究(B)19760343(代表: 鬼東幸樹)の援助を受けた。また, 現地調査を行うに当たり, 多大な協力を頂いた本学大学院生の山本晃義および赤木慶喜の両氏に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 廣瀬利雄, 中村中六: 魚道の設計, 山海堂, 1991.
- 2) 中村俊六: 魚道のはなし, 山海堂, 1995.
- 3) 中村俊六, 和田清: 全幅越流型階段式魚道内における横波の発生とその制御, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp207-215, 1995.
- 4) Rajaratnam, N. and Katopodis, C. and Mainali, A.: Plunging and streaming flows in pool and weir fishways, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, pp.939-944, 1988.
- 5) 高嶋信博, 中村俊六: 魚道内のアユの挙動に関する実験的研究, 第28回水理講演会論文集, pp.353-358, 1984.
- 6) 高須修二, 箱石憲昭, 村岡敬子, 田中和浩, 尾寄佳史: 階段式魚道の水理特性に関する研究, 水工学論文集, 第38巻, pp.351-356, 1994.
- 7) 林田寿文, 本田隆秀, 萱場祐一, 島谷幸宏: 階段式魚道における落下流と表面流の発生特性とウグイの遊泳行動, 環境システム研究論文集, Vol.28, pp.333-338, 2000.
- 8) 浦勝, 山口秀和, 鬼東幸樹, 秋山壽一郎: 水位落差の大きな魚道の流況改善について, 水工学論文集, 第47巻, pp.769-

- 774, 2003.
- 9) 前野詩朗, 小川信: プールタイプ魚道の流れの数値解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.421-426, 2002.
- 10) 浪平篤, 後藤眞宏: 階段式魚道における汎用的な流況予測のための数値解析手法, 応用力学論文集, Vol.9, pp.833-841, 2006.
- 11) 鬼東幸樹, 秋山壽一郎, 木内大介, 川良典彰: 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研究, 水工学論文集, 第49巻, pp.817-822, 2005.
- 12) Wada, Y.: Relation between the ascending path of ayu and fishway structure, *Proc. of the International Symp. on Fishways '90 in Gifu, Japan*, pp.445-450, 1990.
- 13) 須賀堯三: 水理模型実験, 山海堂, 1990.
- (2007. 5. 25 受付)

## Prediction of hydrological regime, plunging and streaming flows, in pool-and-weir fishways

Kouki ONITSUKA<sup>1</sup>, Juichiro AKIYAMA<sup>1</sup>, Noriaki KAWARA<sup>2</sup>, Yohei IIGUNI<sup>3</sup> and Daisuke KIUCHI<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil Engineering, Kyushu Institute of Technology

<sup>2</sup>MATSUO Consultants Co., LTD.

<sup>3</sup>Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Kyushu Institute of Technology

<sup>4</sup>Toa Corporation

Fishways are river constructions which help fish migrating. The pool-and-weir fishway is the most typical type in Japan. There are three types of hydrological regimes in pool-and-weir fishways such as a plunging flow, streaming flow and intermixed flow of plunging and streaming flows. Rajaratnam *et al.*(1984) clarified that the streaming flow is generated when the normalized discharge is higher than 0.25 and also the plunging flow is generated when the normalized discharge is lower than 0.25. However they substituted the pool length for the overflow depth above the weir, when deriving the normalized discharge from the momentum equation. Such a substitution has a physical problem. Onitsuka *et al.*(2005) found that the number of parameters of the plunging flow are four. However, it is quite difficult to conduct the systematically experiments. In this study, order comparison of each parameter was conducted based on field data of fishway. As a result, effects of each four parameter on the hydrological regimes was elucidated. New criterion formulas, which can predict the flow regime in the pool-and-weir fishways with three parameters, were suggested.