

階段式魚道における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

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

鬼束幸樹*・秋山壽一郎**・飯國洋平***・川良典彰****・木内大介*****

Kouki ONITSUKA, Juichiro AKIYAMA, Yohei IIGUNI, Noriaki KAWARA and Daisuke KIUCHI

*博 (工) 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**Ph.D 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科

***学 (工) 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻

****学 (工) (株) 松尾設計 (〒805-0061 北九州市八幡東区西本町 2 丁目 5-5)

*****修 (工) 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒550-0004 大阪市西区靱本町 14-12)

Fishways are river constructions which facilitate migration of fish. The pool-and-weir fishway is typical type. There are three types of flow regimes in pool-and-weir fishways such as a plunging flow, streaming flow and intermixed flow of plunging and streaming flows. 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. From the point of view of the engineering, it is necessary to predict the flow pattern roughly and easily with a few parameters. If effects of some parameters on the flow regime are small, such parameters may be neglected. In this study, order comparison of each parameter was conducted. As a result, the strength of effects of each four parameter on the flow regime is made clear. A new criterion formula, which can predict the flow regime in the pool-and-weir fishways with three parameters, was suggested.

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

キーワード: 階段式魚道, プランジングフロー, ストリーミングフロー

1. はじめに

我が国では治水, 利水を目的として多くのダムや堰が設けられてきた。これらの構造物によって, 河道内の水面が流下方向に不連続となるため, サケ, アユ, ヨシノボリおよびウナギなどの通し回遊魚の遡上・降下が困難になっている。この問題を解決する目的として, 魚道が設けられている。魚道とは「河川に魚類の移動を困難または不可能にする障害があるとき, 移動の目的が達せられるように造られた水路または装置の総称」であると長田¹⁾によって定義されている。魚道の種類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, リフトあるいはエレベータータイプなどに分類される²⁾。プールタイプはさらに階段式, バーチカルスロット式, 潜孔式等に分類される。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いる^{2,3)}。階段式魚道は, 一説には我が国の既設魚道の 90% 以上を占めると言われている⁴⁾。

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を有することが指摘されている。隔壁からプールへと流入した後に流下方向に位相を有する定在波が発生する場合があること⁵⁾, 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⁶⁾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った不安定な状態になる場合があること^{7,8)}などである。ここに, プランジングフローとは図-1(a)に示すように, 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。ストリーミングフローとは図-1(b)に示すように, 落下流がプール内に潜り込まずに水面付近を流下し, 下流側隔壁を越流する流れのことである⁹⁾。中村・和田⁹⁾は全面越流型魚道の中央部に非越流部を設け, アイス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。林田ら¹⁰⁻¹²⁾, 高嶋・中村¹³⁾, 高須ら¹⁴⁾および鬼束ら¹⁵⁾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。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は, Rajaratnam *et al.*⁹⁾によって検討されている。

Rajaratnam *et al.*⁹⁾は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ついて, 運動量式と抵抗則を利用して検討を行った。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を導出し, 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をプール長で代用しており、得られた式の物理的な意味が明確でない。実際、VOF法を用いて階段式魚道の流況を再現した前野ら¹⁶⁾、前野・小川¹⁷⁾および浪平・後藤¹⁸⁾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.*⁹⁾の基準では発生理由を説明できない。さらに、浦ら¹⁹⁾が現地計測で観察したプランジングフローについても、Rajaratnam *et al.*⁹⁾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.*⁹⁾の基準に問題があることを示唆している。近年、鬼束ら²⁰⁾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、この仮定が妥当かどうかは検証されていない。

本研究は、鬼束ら²⁰⁾の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。

2. 理論的考察

2.1 プランジングフローに関する理論展開

河川に設置されている全面越流型階段式魚道には多くの場合、片側切り欠きあるいは交互切り欠きが設置されている。さらに、切り欠きの対岸側寄りの隔壁に潜孔が設置されることが多い。また、魚道全幅に対する切り欠き幅は魚道によって様々である。以上の背景から実際に河川に設置されている全面越流型階段式魚道の形態をすべて網羅する幾何学条件を実験的に設定することは不可能といわざるを得ない。本研究では研究の第一歩として、切り欠きおよび潜孔のない横断方向に一樣な二次元流れを対象とする。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 $\vec{u} \equiv U + u$ 、 $\vec{v} \equiv V + v$ 、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 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水面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1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 θ 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と想像される。水路勾配が変

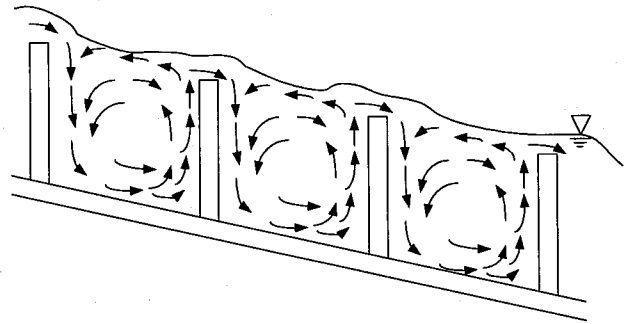


図-1(a) プランジングフロー

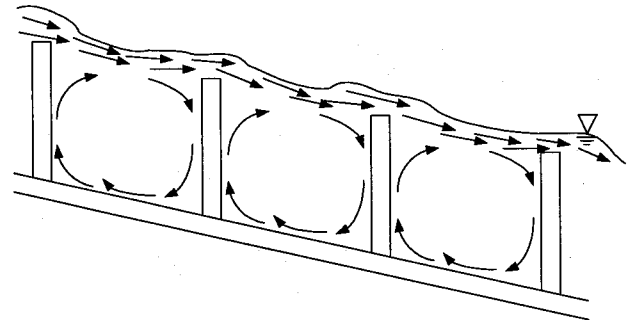


図-1(b) ストリーミングフロー

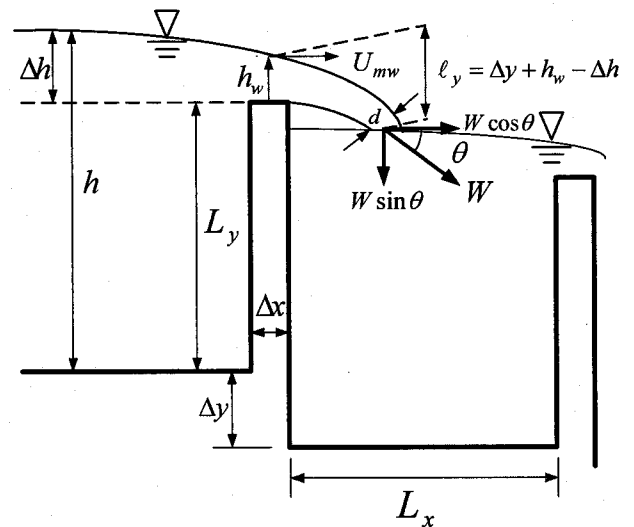


図-2 プランジングフローの概要

化すると流れの形態が変化することが予想されるが、この場合は流入角度 θ 、流脈幅 d および流速 W の変化として捉えることができる。

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 θ 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、 ρ は水の密度である。ここで、流入角度 θ 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 ℓ_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 θ 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。

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

式(6), (7), (9)より運動量 dW^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 θ および運動量 pdW^2 であるが、式(8)および(10)に見られるように、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、ここで用いるフルード数 Fr の物理的意味は極めて乏しい。

2.2 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上述の4つであるが、これらのパラメータを系統的に変化させて流れの形態

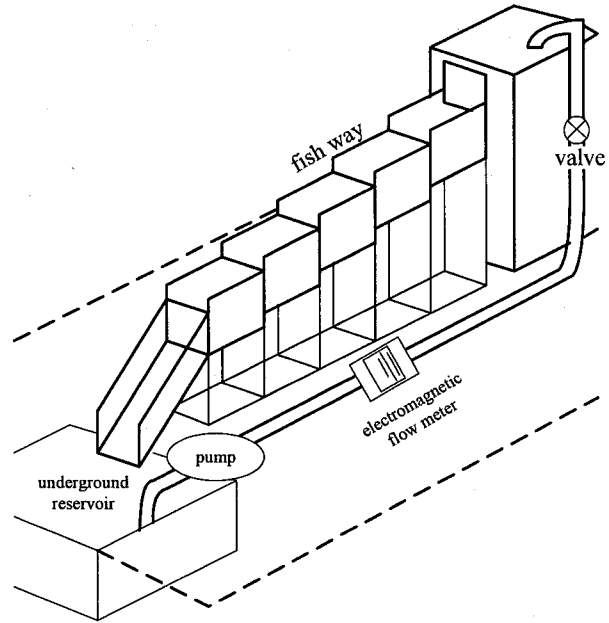


図-3 実験水路の模式図

を観察することは極めて困難である。なぜなら、プール間落差 Δy 、プール長 L_x およびプール高 L_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 Δh を目的の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 θ および運動量 pdW^2 に及ぼす影響が容易に把握可能であるが、それぞれのパラメータの変化しうる範囲を把握しなければならない。実河川に設置された魚道におけるデータをj得ることが理想であるが、フルード数 Fr や相対水深 $h/\Delta y$ が記載されている資料はほとんどない上、流れの形態がプランジングフローあるいはストリーミングフローに属しているかを記載している資料は皆無といって良い。そこで4つのパラメータの変化範囲を調べるため次のような室内実験を行った。

3.1 実験条件および計測項目

実河川に設置された魚道におけるフルード数 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 $\Delta h/\Delta y$ の変化範囲は不明であるが、唯一、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ については既存写真から目視による推定が可能である。廣瀬・中村²⁾、中村³⁾、和田²¹⁾の出版した文献に掲載された階段式魚道の写真を観察すると、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ は約1以上の値であることおよびその最大値はかなり大きな値となることが理解される。ただし、アスペクト比 $L_x/(L_y + \Delta h)$ がある程度以上大きくなった場合のアスペクト比の増加は、事実上プール長の増加を意味する。プール内を流下する流れが下流壁にぶつくと上流側に影響を与えるが、十分にプール長が長

表-1 実験条件

Flow L_x/L_y	$h/\Delta y$	Plunging (ℓ/s)	Streaming (ℓ/s)	Streaming to Plunging (ℓ/s)	Plunging to Streaming (ℓ/s)
1.0	21.3~22.8	0.4~1.0	1.5~10.0	1.1	1.3
1.5	14.1~15.6	0.4~1.0	1.5~10.0	1.1	1.3
2.0	10.5~11.9	0.4~1.0	1.5~10.0	1.1	1.4
2.5	8.5~9.8	0.4~1.0	1.8~10.0	1.2	1.5
3.0	7.0~8.4	0.4~1.0	2.0~10.0	1.2	1.6
3.5	6.2~7.8	0.4~1.0	2.0~10.0	1.3	1.6
4.0	5.5~7.3	0.4~1.0	2.0~10.0	1.3	1.7
1.0	10.2~11.1	0.4~1.1	4.0~10.0	1.1	2.4
1.5	7.0~7.8	1.0~4.0	5.0~10.0	2.9	3.7
2.0	5.3~6.1	1.0~3.5	5.4~10.0	4.2	4.7
2.5	4.3~5.1	1.0~4.0	6.0~10.0	4.4	5.1
3.0	3.7~4.5	1.0~4.0	7.0~10.0	4.7	5.6
3.5	3.2~3.7	1.0~5.0	7.5~10.0	5.6	7.1
4.0	2.8~3.8	1.0~6.0	8.4~11.0	6.8	8.0
1.0	7.0~7.7	0.4~1.0	4.0~10.0	1.5	2.9
1.5	4.7~5.6	1.0~5.0	8.0~15.0	6.0	6.4
2.0	3.5~4.6	1.0~5.0	9.0~15.0	7.0	8.0
2.5	2.9~3.8	1.0~7.0	10.0~15.0	8.6	9.2
3.0	2.3~3.5	1.0~8.0	12.0~15.0	9.7	10.8
3.5	2.1~3.2	1.0~10.0	12.0~15.0	11.1	11.5
4.0	1.8~2.5	1.0~15.0	—	—	—
1.0	5.3~5.8	0.4~1.0	4.0~10.0	1.9	3.5
1.5	3.6~4.3	1.0~7.0	9.0~15.0	7.5	8.5
2.0	2.7~3.5	1.0~10.0	12.0~15.0	10.8	11.5
2.5	2.4~3.0	5.0~13.5	14.5~17.0	13.8	14.2
3.0	2.1~2.8	5.0~16.5	17~17.8	16.5	16.8
3.5	1.6~2.1	1.0~15.0	—	—	—
4.0	1.4~2.0	1.0~15.0	—	—	—

い場合はこの影響は上流壁には到達しない。そのため、プール長がある程度以上長くなった場合、アスペクト比は流れの形態にほとんど影響を与えないと考えられる。そのため、本研究ではプール長 L_x とプール高 L_y の比を1~4の範囲に限定した。

実験には図-3に示すようなプール長 L_x が0.4m、プール幅 B が0.4mのプールを5個つなげ、隔壁厚 Δx が0.08mの隔壁を設けたものを使用した。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。それぞれの幾何学形状の状態で流量を0.4~17.8 ℓ/s の範囲内でランダムに変化させ、262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に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-1

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あるいはストリーミングフロー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)および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)の流量もそれぞれ同表に示している。なお、表-1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。

前野¹⁶⁾および前野・小川¹⁷⁾はVOF法を用いて切り欠きおよび潜孔のない階段式魚道の数値計算を行った。その結果、上流から2つ目までのプール内における流況は各プールで異なるが、3つ目以降のプール内流況はほぼ一定であることを解明した。本研究では上流から4番目のプールにおいて以下の計測を行った。

階段式魚道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のいずれが発生した場合でも微細な気泡が発生するので流れがいずれの形態に属しているかは容

表-2 パラメータの変化範囲

プール形状 L_x/L_y	アスペクト比 $L_x/(L_y+\Delta h)$	相対水深 $h/\Delta y$	相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$	フルード数 Fr
1	0.88~0.94	21.3~22.8	0.45~1.95	0.001~0.026
1.5	1.29~1.42	14.1~15.6	0.53~1.95	0.002~0.046
2	1.69~1.90	10.5~11.9	0.60~1.95	0.003~0.069
2.5	2.04~2.36	8.5~9.8	0.61~1.98	0.005~0.092
3	2.38~2.85	7.0~8.4	0.63~2.00	0.006~0.116
3.5	2.57~3.22	6.2~7.8	0.61~2.18	0.007~0.130
4	2.76~3.64	5.58~7.3	0.60~2.35	0.009~0.145
1	0.90~0.98	10.2~11.1	0.16~1.10	0.001~0.027
1.5	1.27~1.42	7.0~7.8	0.29~1.10	0.005~0.047
2	1.64~1.89	5.3~6.1	0.30~1.12	0.008~0.066
2.5	1.97~2.32	4.3~5.1	0.31~1.08	0.011~0.092
3	2.23~2.72	3.7~4.5	0.36~1.16	0.014~0.106
3.5	2.57~3.17	3.2~3.7	0.40~1.14	0.018~0.143
4	2.66~3.59	2.8~3.8	0.29~1.26	0.021~0.151
1	0.86~0.95	7.0~7.7	0.15~0.84	0.001~0.025
1.5	1.19~1.42	4.7~5.6	0.22~1.12	0.005~0.062
2	1.45~1.90	3.5~4.6	0.30~1.38	0.008~0.083
2.5	1.78~2.34	2.9~3.8	0.27~1.17	0.011~0.112
3	1.90~2.86	2.3~3.5	0.30~1.47	0.015~0.124
3.5	2.11~3.20	2.1~3.2	0.30~1.30	0.018~0.145
4	2.65~3.67	1.8~2.5	0.28~0.98	0.022~0.204
1	0.86~0.95	5.3~5.8	0.11~0.66	0.001~0.025
1.5	1.16~1.40	3.6~4.3	0.20~0.95	0.005~0.059
2	1.43~1.89	2.7~3.5	0.21~1.06	0.008~0.081
2.5	1.67~2.34	2.4~3.0	0.16~1.03	0.011~0.115
3	1.78~2.76	2.1~2.8	0.15~1.15	0.014~0.142
3.5	2.35~3.15	1.6~2.1	0.13~0.66	0.018~0.171
4	2.47~3.59	1.4~2.0	0.18~0.81	0.021~0.184

易に判定できる。そのため、目視により流れの形態の判定を行った。続いて、デジタル式ポイントゲージを用い水路中央の $z/B=0.5$ において水深 h を計測した。水面は水平でないため、流下方向に30点程度で水深 h を計測し、これらの平均値を実験値とした。さらに、求めた水深 h からプール高 L_y を差し引くことで越流水深 Δh を算出した。これらの計測および幾何学条件より、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 $\Delta h/\Delta y$ が判明する。ただし、これらの4つのパラメータを系統的に変化させてはいない。また、流れの二次元性を確認するために、電磁流速計を用いて $z/B=0.25, 0.5, 0.75$ の3断面について、 x 方向に6点、 y 方向に8点の格子点における流速 U および V を計測した。プランジングおよびストリーミングフローの両状態で計測を行い、流速計測間隔および計測時間はそれぞれ0.1sおよび40.96sとした。

3.2 実験・解析結果および考察

室内実験を行った結果を表-2に示す。4つのパラメータの変化範囲がそれぞれ以下であることが判明した。

$$0.86 \leq L_x/(L_y + \Delta h) \leq 3.67 \quad (11.a)$$

$$0.001 < Fr \leq 0.204 \quad (11.b)$$

$$1.39 < h/\Delta y \leq 22.8 \quad (11.c)$$

$$0.11 < \Delta h/\Delta y \leq 2.35 \quad (11.d)$$

まず、(1)で流れの二次元性の確認を行う。次に(2)および(3)では式(11)の範囲において、それぞれのパラメータを5段階に変化させて流入角度 θ および運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ に及ぼす影響を検討する。

(1) 流れの二次元性

図-4(a)に $z/B=0.25, 0.5, 0.75$ の3断面におけるプランジングフローの流速ベクトル $\sqrt{U^2+V^2}$ を $\sqrt{g\Delta h}$ で無次元化したものを示す。なお、プール形状 L_x/L_y が2で流入流量 Q は 0.27 l/s である。横断方向の変化による流速の違いはほとんど観察されない。よってプール内の流れは側壁の影響を受けていない二次元的な流れと判断できる。こうした結果は図-4(b)に示した、プール形状 L_x/L_y が2で流入流量 Q が 0.65 l/s のストリーミングフローでも確認できる。したがって、水路中央の $z/B=0.5$ の結果を代表

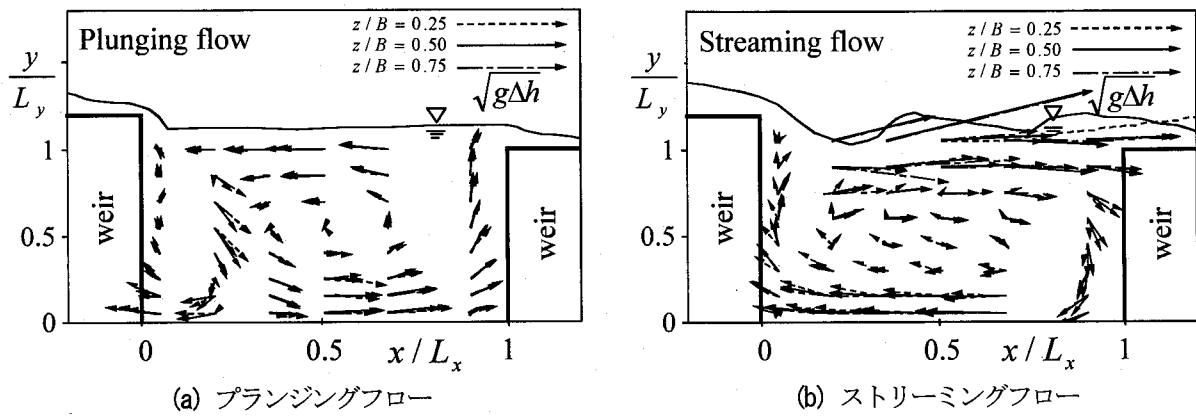


図-4 流速の横断方向変化

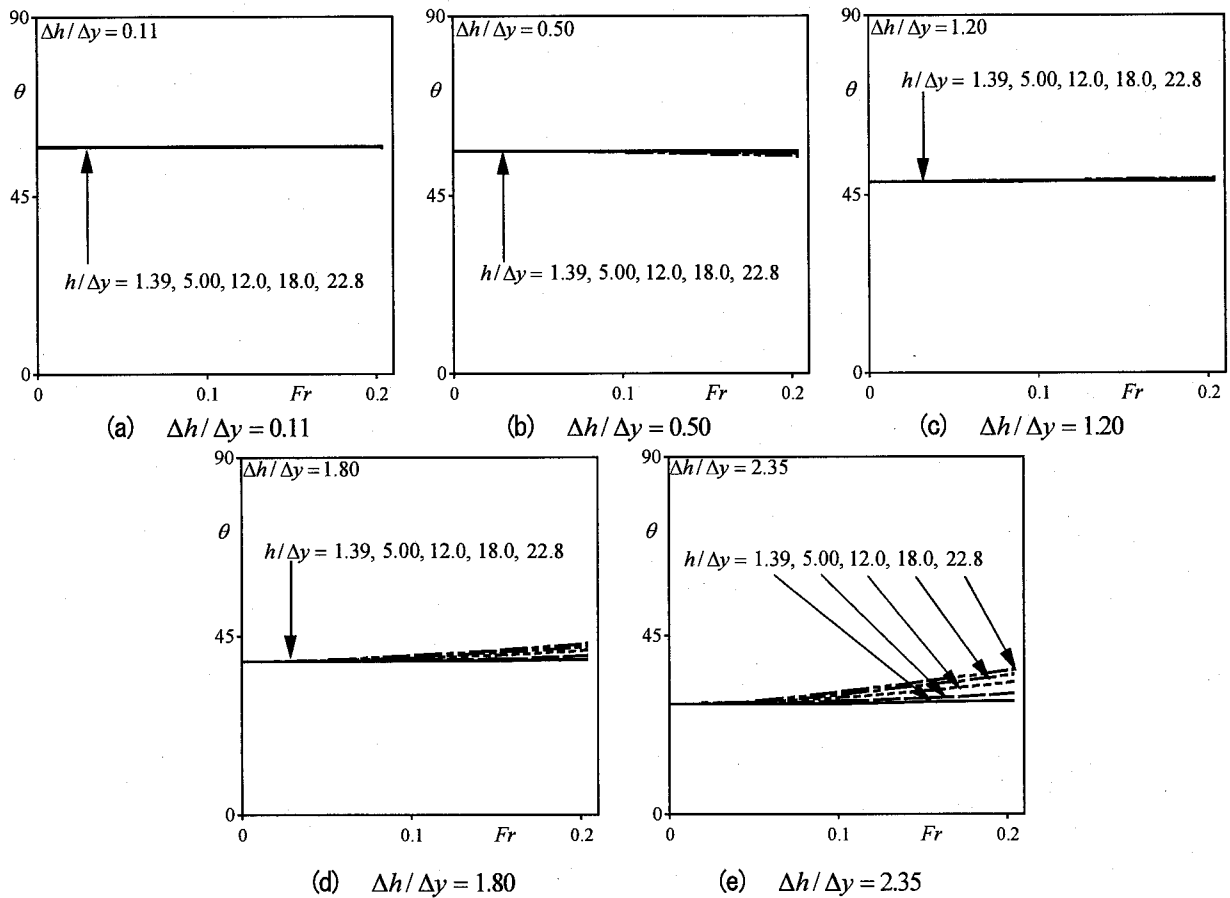


図-5 角度 θ とフルード数 Fr との関係

値として使用することが適切と判断される。

(2) 各パラメータが流入角度に及ぼす影響

式(11)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 θ に及ぼす影響を式(8)より算出し、図-5～図-7にそれぞれ示す。図-7より相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ が変化すると流入角度 θ が大幅に変化することは観察されるが、図-5、6よりフルード数 Fr および相対水深 $h/\Delta y$ の流入角度 θ に及ぼす影響は微小であり、後者の2つの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

$$r_{\theta 1} = \{\theta(Fr = Fr_{\max})\} / \{\theta(Fr = Fr_{\min})\} \quad (12)$$

相対水深 $h/\Delta y$ が最大時と最小時との流入角度の比を

$$r_{\theta 2} = \{\theta(h/\Delta y = h/\Delta y_{\max})\} / \{\theta(h/\Delta y = h/\Delta y_{\min})\} \quad (13)$$

と定義する。図-8、9に流入角度比 $r_{\theta 1}$ 、流入角度比 $r_{\theta 2}$ をそれぞれ示す。流入角度比の最大値と最小値の差をそれぞれ比較すると、僅かながら $r_{\theta 1}$ の差が大きいことがわかる。

(3) 各パラメータが運動量に及ぼす影響

式(11)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 $\Delta h/\Delta y$ が運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ に

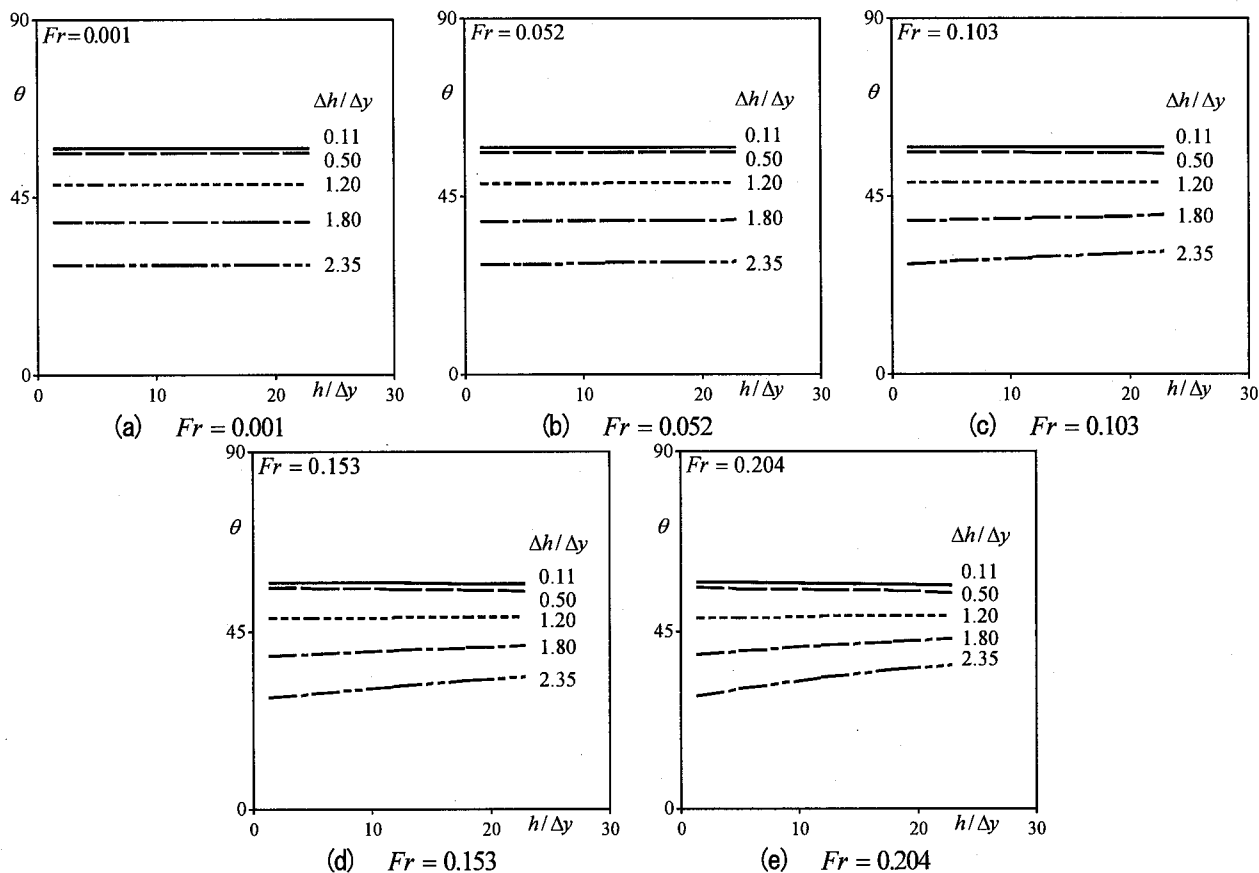


図-6 角度 θ と相対水深 $h/\Delta y$ との関係

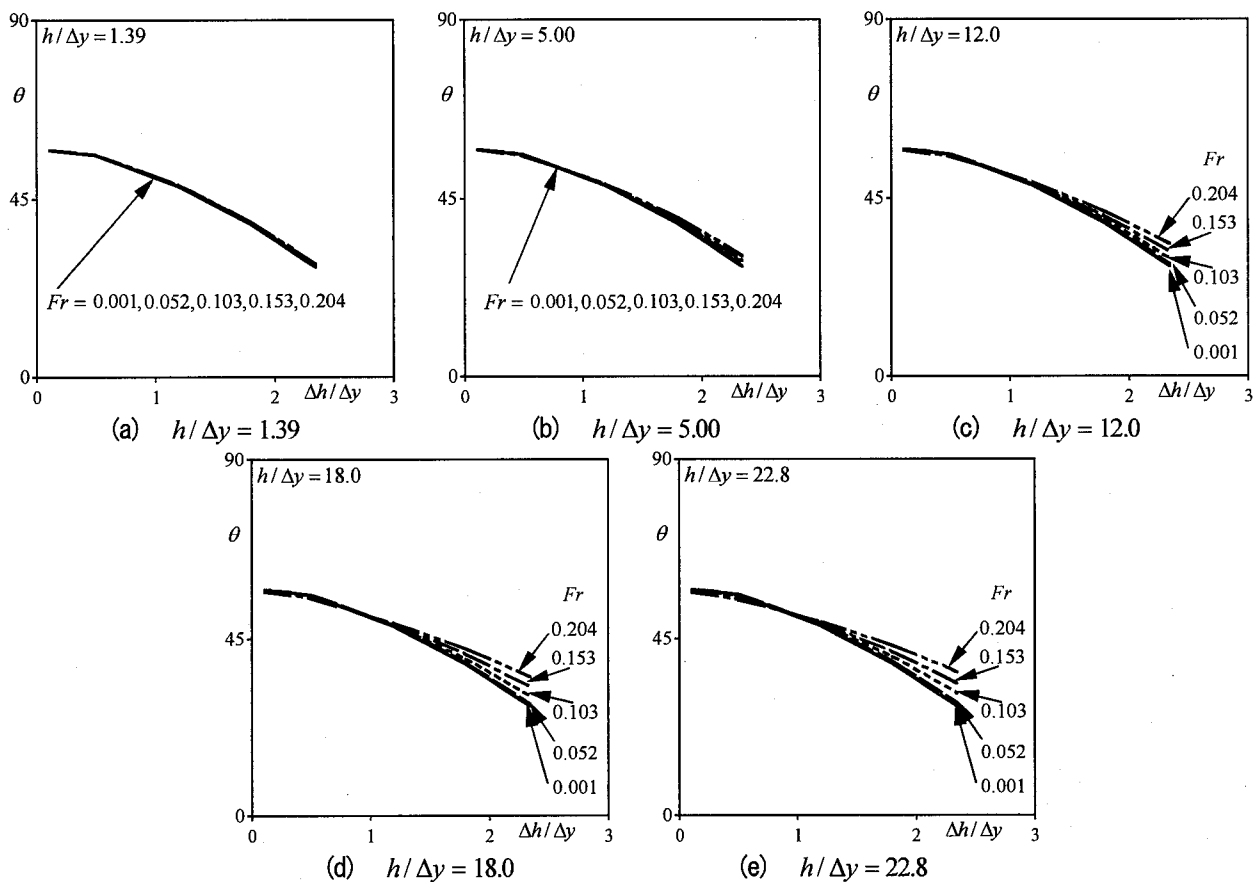


図-7 角度 θ と相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ との関係

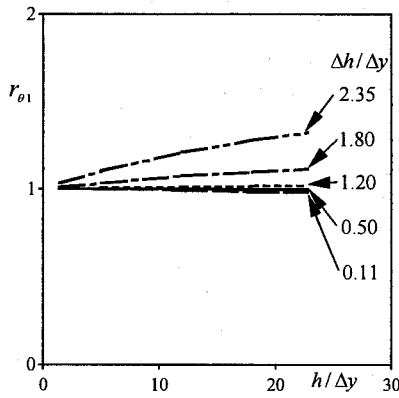


図-8 Fr に関する流入角度比 $r_{\theta 1}$

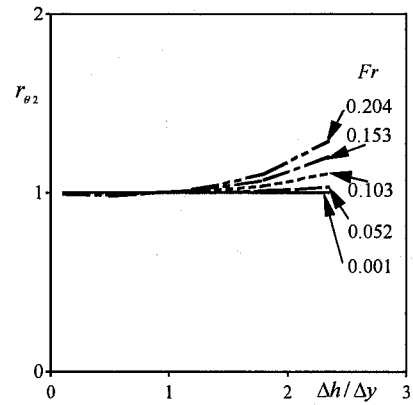
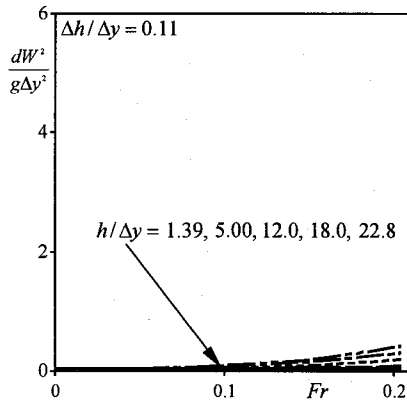
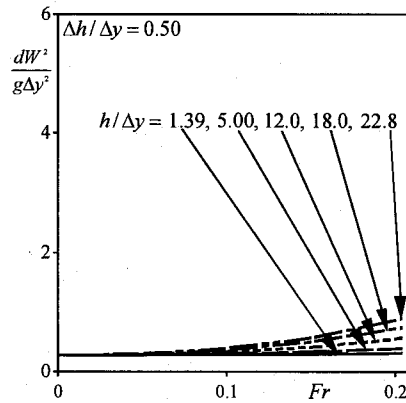


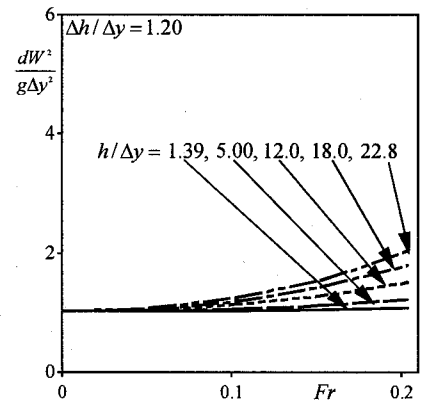
図-9 $h/\Delta y$ に関する流入角度比 $r_{\theta 2}$



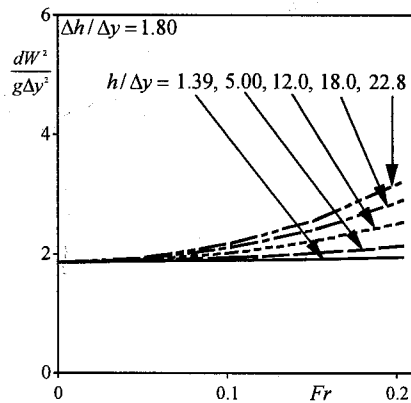
(a) $\Delta h/\Delta y = 0.11$



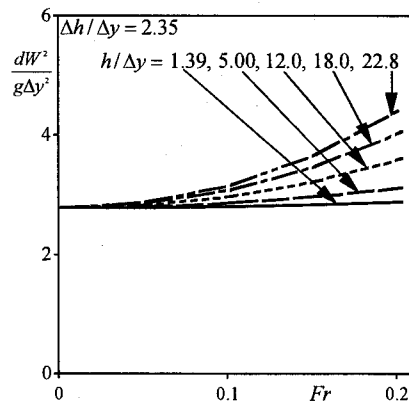
(b) $\Delta h/\Delta y = 0.50$



(c) $\Delta h/\Delta y = 1.20$



(d) $\Delta h/\Delta y = 1.80$



(e) $\Delta h/\Delta y = 2.35$

図-10 運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ とフルード数 Fr との関係

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 θ に及ぼす影響解析と同様な解析を行う、図-10～図-12 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 $\Delta h/\Delta y$ が運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ に及ぼす影響をそれぞれ示す。図-12 より相対プール高落差 $\Delta h/\Delta y$ が変化すると運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ が大幅に変化していることは観察されるが、図-10, 11 よりフルード数 Fr および相対水深 $h/\Delta y$ の運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ 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運動量の比を

$$r_{m1} = \left\{ dW^2/dy^2 (Fr = Fr_{\max}) \right\} / \left\{ dW^2/dy^2 (Fr = Fr_{\min}) \right\} \quad (14)$$

相対水深 $h/\Delta y$ が最大時と最小時との運動量の比を

$$r_{m2} = \left\{ dW^2/dy^2 (h/\Delta y = h/\Delta y_{\max}) \right\} / \left\{ dW^2/dy^2 (h/\Delta y = h/\Delta y_{\min}) \right\} \quad (15)$$

と定義する。図-13, 14 に運動量の比 r_{m1} 、 r_{m2} をそれぞれ示す。3.2(2)と同様に、運動量の比の最大値と最小値を比較すると r_{m1} の差が大きいたことがわかる。よって、3.2(2)

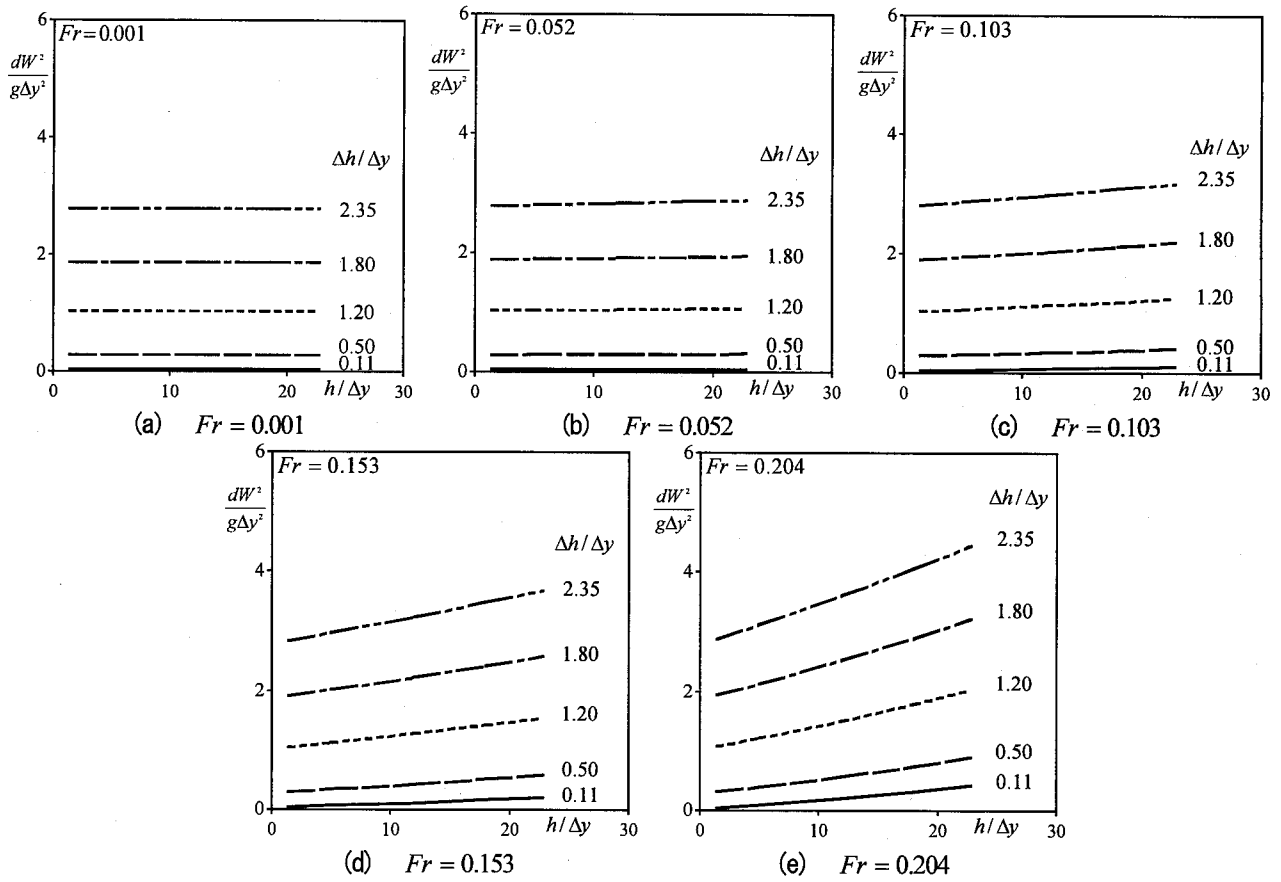


図-11 運動量 $dW^2 / g\Delta y^2$ と相対水深 $h / \Delta y$ との関係

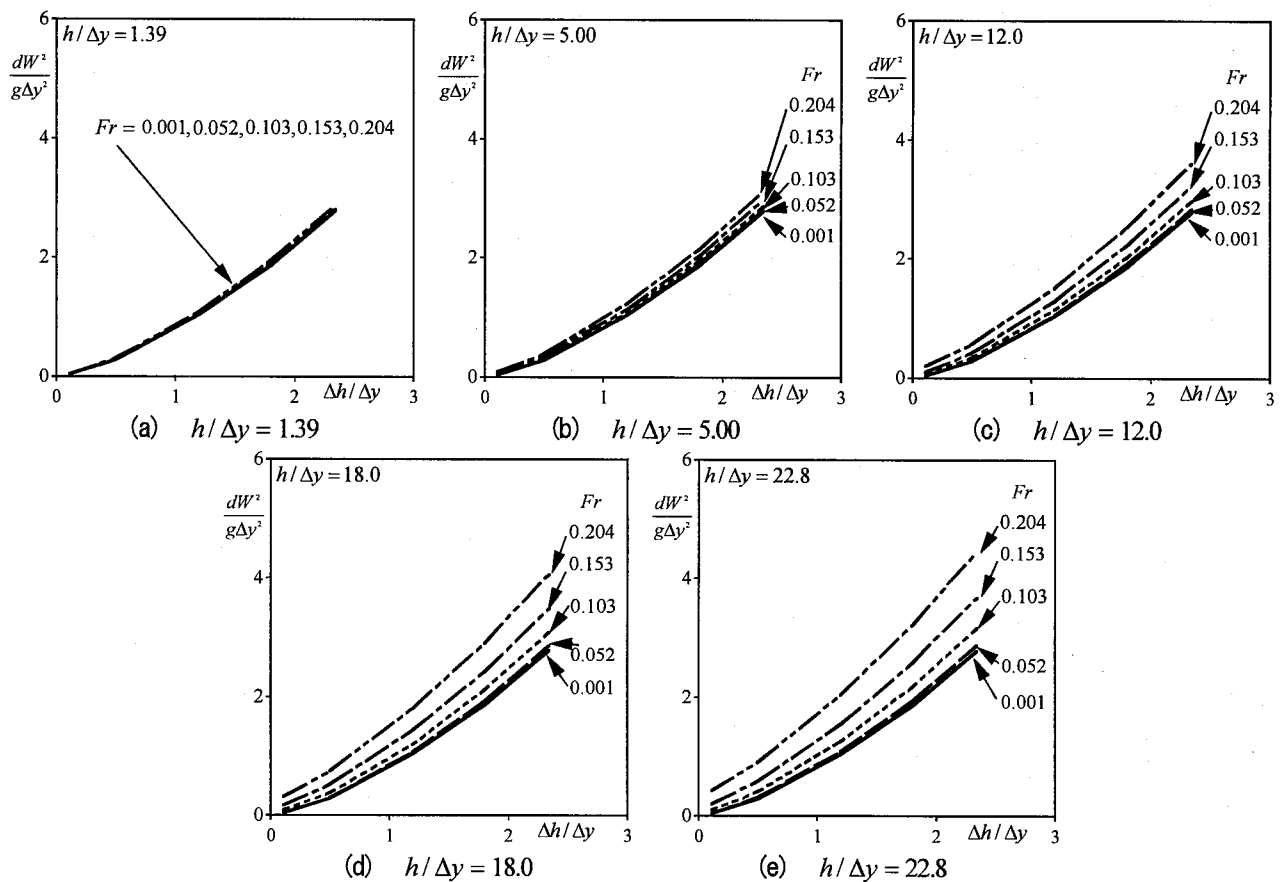


図-12 運動量 $dW^2 / g\Delta y^2$ と相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ との関係

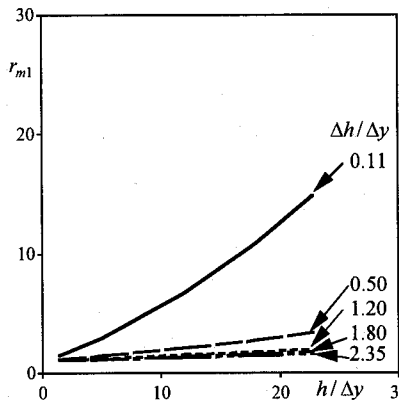


図-13 Fr に関する運動量の比 r_{m1}

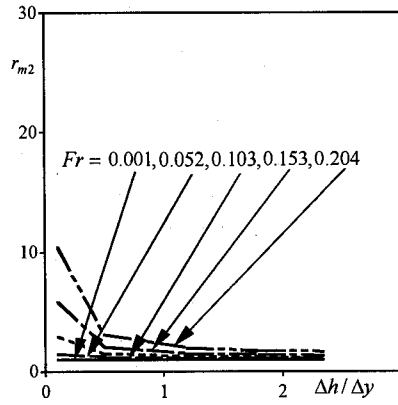


図-14 $h/\Delta y$ に関する運動量の比 r_{m2}

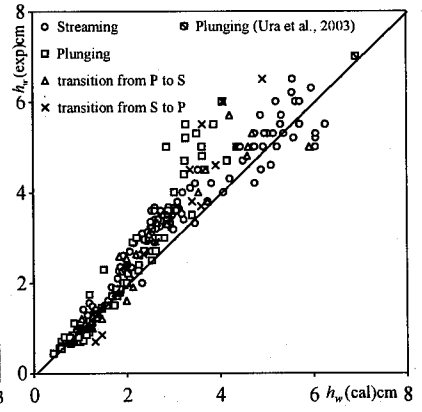


図-15 h_w の実験値と計算値との比較

の結果と総合すると、相対水深 $h/\Delta y$ よりフルード数 Fr の方が卓越パラメータであるといえる。

以上のことから、落下流の流入角度 θ および運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ 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、次いでフルード数 Fr の影響が大きく、相対水深 $h/\Delta y$ の影響は最も影響を与えないことがわかった。よって、流入角度 θ および運動量 $dW^2/g\Delta y^2$ への影響が最も小さい相対水深 $h/\Delta y$ 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の解明

4.1 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。

$$h_w(\text{cal}) = (hFr^2 + 2\Delta h)/3 \quad (16)$$

図-15 に本実験で得られた堰上水深 h_w の実測値 $h_w(\text{exp})$ と、式(16)によって求められた計算値 $h_w(\text{cal})$ との関係の流れの形態ごとに示す。同図には、浦ら¹⁹⁾の現地計測結果も示している。それぞれの値を比較してみると、計算値が実測値を下回っているものが見て取れる。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、その誤差率は平均すると14%程度であり、この程度の誤差を許容するのであれば2.1, 2.2における堰上での限界流近似を使用してもよいと判断される。

4.2 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

3.2 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つであることが解明された。しかし、3.1 で示した実験において、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10階層にデータをグループ化した。図-16(a)～(f)に $0 \leq Fr < 0.02$, $0.02 \leq Fr < 0.04$, $0.04 \leq Fr < 0.06$, $0.06 \leq Fr < 0.08$, $0.08 \leq Fr < 0.10$ および $0.10 \leq Fr < 0.12$ 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した。同図より、すべてのフルード数 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。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。

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} = a \cdot \frac{L_x}{L_y + \Delta h} + b \quad (17)$$

図中の境界線でおおよそ両状態が区分できることがわかる。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-17 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

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} \geq (115Fr + 1.85) \frac{L_x}{L_y + \Delta h} - 7Fr + 0.77 \quad (18.a)$$

・ストリーミングフローの発生条件

$$\frac{\Delta h}{\Delta y} \leq (115Fr + 1.85) \frac{L_x}{L_y + \Delta h} - 7Fr + 0.77 \quad (18.b)$$

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

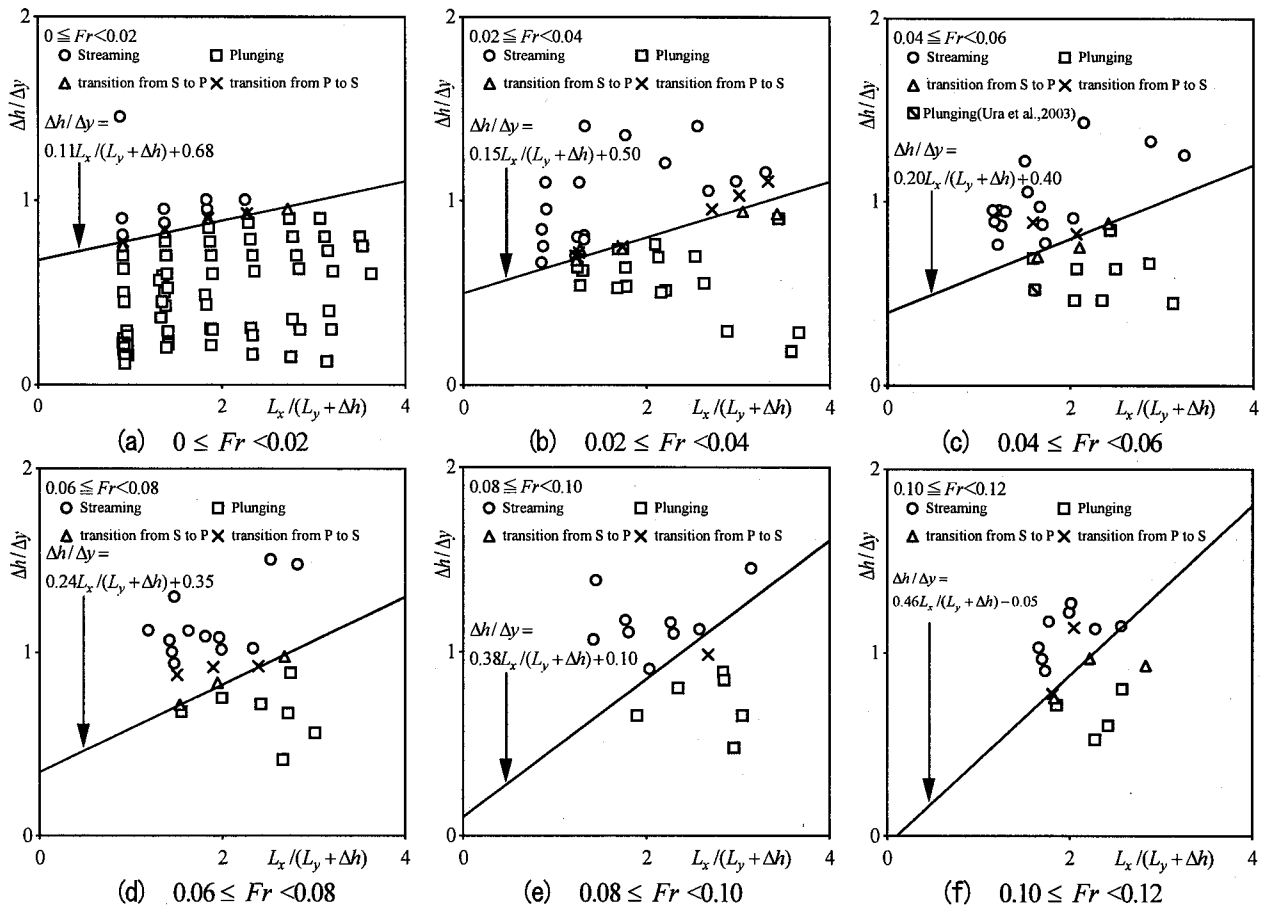


図-16 相対プール高落差 $\Delta h / \Delta y$ とアスペクト比 $L_x / (L_y + \Delta h)$ との関係

本研究は、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である。

- (1) 鬼束ら²⁰⁾の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、すなわち、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限界流近似は14%程度の誤差率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(18)のように提案した。
- (4) 今回の研究では切り欠きの有無、位置および魚道全幅に対する切り欠き幅、潜孔の有無、レイノルズ数の影響等を考慮していない。本研究で得られた知見はこれらの因子による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：鬼束幸樹)の援助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 長田正男：魚道及魚梯，水研誌，11(1)，pp.1-36，1916。
- 2) 廣瀬利雄，中村中六：魚道的设计，山海堂，1991。
- 3) (財)ダム水源環境整備センター編：最新 魚道の

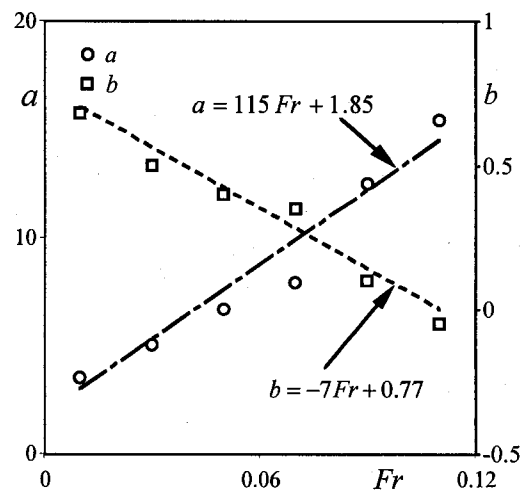


図-17 3個のパラメータに基づく流れ形態の予測

設計 一魚道と関連施設一，信山社サイテック，1998。

- 4) 農林水産省農村振興局整備部設計課監修：よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針，社団法人農業土木学会，2002。
- 5) 中村俊六：魚道のはなし，山海堂，1995。
- 6) 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，pp.207-215，1995。
- 7) 中村俊六：魚道的设计，水工学に関する夏期講習会，

A-6-1～A-6-24, 1991.

- 8) Clay, C.H.: Design of fishways and other fish facilities, the Department of Fisheries of Canada, 1961.
- 9) Rajaratnam, N., 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.
- 10) 林田寿文, 本田隆秀, 萱場祐一, 島谷幸宏: 階段式魚道のプール内流況とウグイの遊泳行動, 水工学論文集, 第44巻, 2000.
- 11) 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.
- 12) 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3つの流況に対するウグイの遊泳行動, 土木技術資料, 43-10, pp.20-25, 2001.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 浦 勝: 水位落差の大きな階段式魚道に設置されたスロープが遡上率に及ぼす効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.1579-1584, 2004.
- 16) 前野詩朗, 尾上博則, 宮内洋介: VOF法による階段式魚道の流れの数値解析, 水工学論文集, 第45巻, pp.421-426, 2001.
- 17) 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.
- 18) 浪平篤, 後藤真宏: 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.
- 19) 浦 勝, 山口秀和, 鬼束幸樹, 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.
- 20) 鬼束幸樹, 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.
- 21) 和田吉弘: 言いたい放題 魚道見聞録, 山海堂, 2003.
(2007年4月12日 受付)