実験３．開水路水面形

1.　理論式と実験手順

1．1　開水路（跳水と水面形）の問題

河川や水路のデザインには，開水路水理学の知識が必要である．

雨が降るなどして，ある流量が発生して，開水路に流れ込む場合，水位がどこまで上がるのか，というのはデザインの上で基礎的な問題となる．それは単純な水路の設計だけではなく，多様な自然を配置しながら河道を設計する場合も，水深の推定が必要であることには変わりはない．また植物の配置によっても，抵抗によって水深は変わってくる．

本実験では，以下の３つについて，計算・確認を行う．

（1）限界水深の計算と流れの分類

水面形を考える際の基礎量として，「限界水深」がある．これより実際の水深が浅いか深いかによってある，２つの流れの状態を分類する．水深が浅くジェット的な「射流」と深く緩やかな「常流」と分ける．こうした流れの状態をいくつかの点から確認する．

（2）水面形の計測と，分類の確認

自然に流れが近づこうとする水深＝「等流水深」を計測する．これは日常的に必要な量である．そして水路上を徐々に水位が変化してゆく様子，水深分布＝「水面形」を計測し，「等流水深」「限界水深」を用いて水面形の分類を判定する．

（3）跳水の理論の確認

図-1.1 の下流区間の様に，浅い「射流」から，深い「常流」に変化する跳水の上下流の水深比 h_2/h_1 を計測し，理論値と比較する．

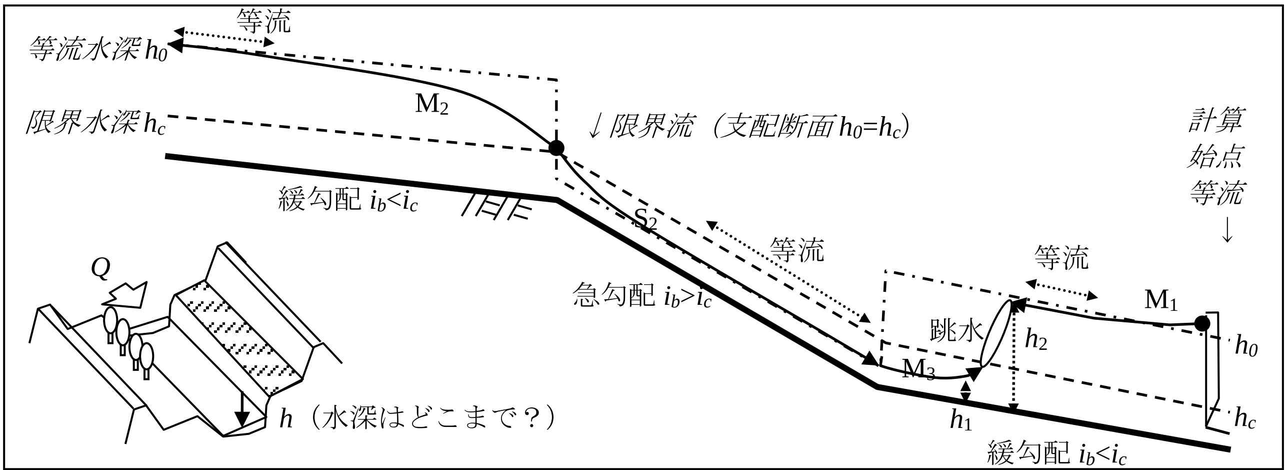


図-1.1　水路の水面形変化の例

１．２　実験装置の概要と計測方法

１．２．１　実験装置の概要

今回使用する実験装置は，図-1.2 に示すような，長さ 20m，幅 0.5m の大型水路である．本実験では，滑面路床で行う．流量は教員が PC の操作によりバルブを制御し，設定する．流量の計測はポンプ付近の電磁流量計を利用する．水面形は，水路の中ほど 15m の区間において，流下方向の座標 x と，そこでの水深 h を，0.1～1.0m 間隔で計測して得る．上流端と下流端にゲートが設けられており，境界水位を変えることができる．

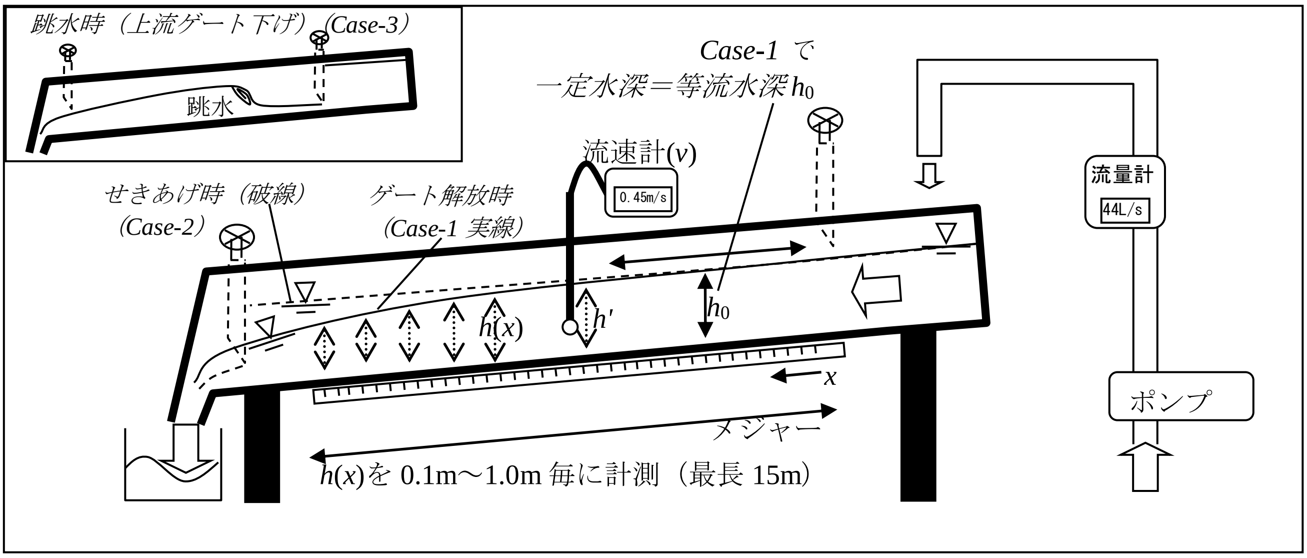


図-1.2　実験装置の概要

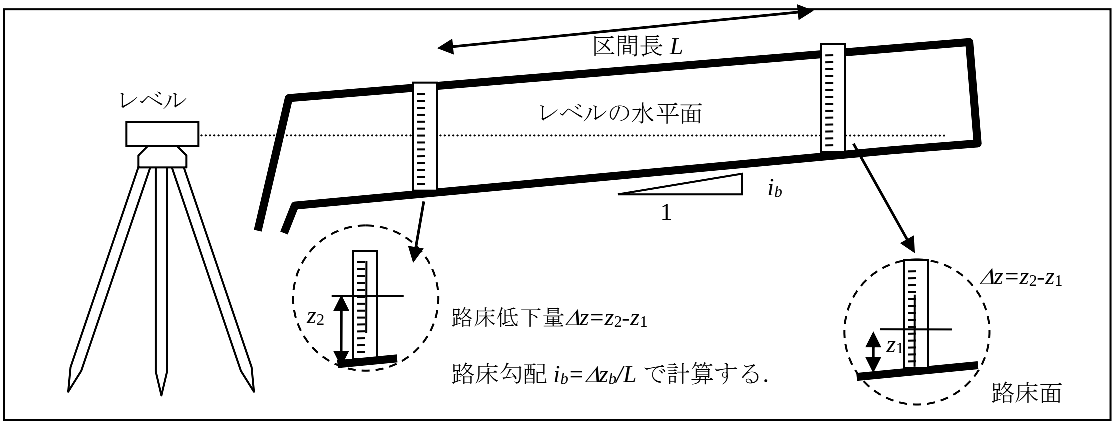


図-1.3　路床勾配の計測方法

１．２．２　計測手順と記録内容

（１）諸元の把握と計測

計測を始める前に，変化しない量（諸元）を把握しておく必要がある．

質問：それは何か？　答え：水路の＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

水路の＿＿＿＿＿＿＿（そのための＿＿＿＿＿＿＿＿と区間長 L）

水路の路床勾配 i_b は，図-1.3 の様に，レベル（水準器）を使って，2 点間の路床高の差Δz を計測し，これを区間長 L を用いて i_b=Δz /L として求める．

（２）各変量の計測

実験班によって流量は異なるが，一つの班では一つの流量だけで計測する．各班で以下の計測を行う．

(a)流量 Q と流速の計測

流量 Q は，給水ポンプ付近に流量計があるので，これを記録する．[L/s]の単位で示されているので，単位を m^3/s に直すこと．さらにこの時点で，単位幅流量 $q=Q/B(m^2/s)$を計算し，これを基礎量として扱うこと．

また，水路の中央付近の断面に，約 6 割の水深の位置に流速計を設置しておく．この平均流速 v(m/s)を読み取り，そこでの水深 h'および幅 B から求めた断面積 $A=Bh'$から，$Q'=vA$ によって得られる参考流量の値 Q'を求め，流量計の値 Q と比較せよ．

(b)限界水深 h_c の計算

4 ページの式（１）から，q を使って限界水深 h_c(m)を計算する．（単位に注意）

(c)等流水深 h_0 の計測，水路勾配の分類

水路開放状態での水路上流部に，水位一定の区間が現れる．ここでの流れを等流と仮定し，等流水深 h_0(m)を計測する（図-1.2）．　また，等流水深 h_0 と限界水深 h_c との大小関係から，5 ページの表-1.3 を参照し，水路が急勾配か緩勾配かを判定せよ．

(d)水面形の計測　上下流のゲートを操作して，3 種類の水面形を計測する．

Case-１：下流端ゲートを上げて開放した場合（水位が低い場合）（上流ゲート開放）

Case-２：下流端ゲートを下げてせき上げさせた場合（高い場合）（上流ゲート開放）

Case-３：ケース 1 の状態で上流ゲートを絞り，跳水させた場合

水面形の記録方法は，側面に貼り付けてあるメジャーの目盛を x 座標とし，0.1m～1.0m の間隔で位置を変えながら，位置 x と水深 h を記録する．また，Case-3 ではどこで跳水したのか，記録せよ．（例：表-1.1，図-1.2 参照）

(e)水面形の判定，擾乱の伝播

各ケースにおける水面形の記録と，等流水深 h_0，限界水深 h_c に基づき，表-1.3 を参考にして，水面形が M1～M3，S1～S3 のどれなのかを判定せよ．跳水の場合は 2 つある．

また，水面を乱して，擾乱が上流に伝播するかどうか（常流か射流か）確認せよ．

(f)跳水の共役水深（h_1，h_2）の計測（Case-3）

Case-3 において，跳水の上流水深 h_1 と下流水深 h_2 を計測する．

(g)上記の(d)(e)を，各 Case で繰り返す．

表-1.1　水面形データ（例）

Case-1		Case-2		Case-3	
下流ゲート開放		下流ゲート操作		下流ゲート開放	
上流ゲート開放		上流ゲート開放		上流ゲート操作	
水面形分類		水面形分類		水面形分類	
x(m)	h(m)	x(m)	h(m)	x(m)	h(m)
0.0	0.080	0.0	0.080	0.0	0.023
1.0	0.080	1.0	0.080	1.0	0.031
2.0	0.080	2.0	0.080	2.0	0.042
3.0	0.079	3.0	0.081	2.2	0.045
4.0	0.079	4.0	0.082	2.3	0.072
5.0	0.080	5.0	0.082	3.0	0.073
6.0	0.079	6.0	0.082	4.0	0.075
7.0	0.079	7.0	0.084	5.0	0.080
8.0	0.079	8.0	0.085	6.0	0.079
9.0	0.077	9.0	0.084	7.0	0.079
10.0	0.077	10.0	0.085	8.0	0.079
11.0	0.076	11.0	0.087	9.0	0.077
12.0	0.074	12.0	0.087	10.0	0.077
13.0	0.073	13.0	0.088	11.0	0.076
14.0	0.068	14.0	0.090	12.0	0.074
				13.0	0.073
				14.0	0.068
				跳水点x(m)	2.2
				上流水深h_1(m)	0.045
				下流水深h_2(m)	0.079

← M1～M3，または S1～S3 のどれか．水面形ﾃﾞｰﾀ，h_0，h_cにより，表-1.5から判定

→データシートを考えよ．(表-1.1，表-1.4 参照)

１．３　理論式と，実験後の整理方法・考察内容

本実験では，粗度係数の取り扱いの関係で，**すべてｍと sec（秒）の単位系で扱う**．

（１）限界水深 h_c（前回の復習）

限界水深 h_c は，ある断面形（この実験では，矩形）の水路に，ある流量で流した場合に，「射流」と「常流」の間の限界を決める水深である．（表-1.2 参照）　実験の矩形断面では，式（１）で表される．

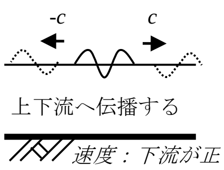
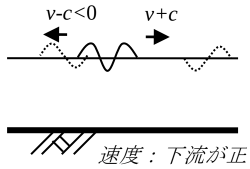
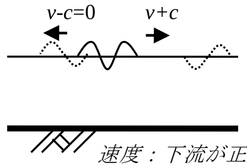
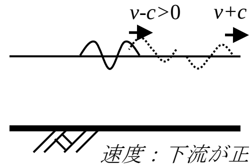
$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (1)$$

（矩形断面における限界水深の式）

限界水深 h_c は単位幅流量 q だけで決まる．実験では，この式から各（単位幅）流量に対する限界水深 h_c を計算して求める．（6 ページ表-1.4 に整理の例）　　　*（ここではまだ，確認事項はない.）*

＜解説＞
ある流量に対し，ある場所の水深がこの限界水深より深く，流れが緩やかだと「常流」，逆に浅く速い流れだと「射流」となる．常流では，下流の水位変化や波が上流に伝わるが，射流では伝わらない．擾乱で発生した波は上流と下流に伝わるが，流速がその伝播速度（$c=\sqrt{gh}$）を超えると伝わらなくなるからである．この分類を，表-1.2 で認識しておこう．その場所の流速 v と伝播速度 $c=\sqrt{gh}$ の比を Froude 数と呼び，これが 1 を超えると射流，下回ると常流となる.

表-1.2　流れの分類（常流と射流）

流れの状態	常流	限界流	射流
水深 h	$h > h_c$	$h = h_c$	$h < h_c$
フルード数 $Fr = \frac{q}{\sqrt{gh^3}} = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	$Fr < 1$	$Fr = 1$	$Fr > 1$
擾乱伝播速度 $c=\sqrt{gh}$ と流速との関係	$c=\sqrt{gh} > v$ （流速の方が小さい）	$c=\sqrt{gh} = v$ （流速と同じ）	$c=\sqrt{gh} < v$ （流速の方が大きい）
擾乱の伝播  静水中	 上流へも下流へも伝わる	 上流へ伝わろうとする波がその場にとどまる.	 下流へのみ伝わる.

（２）等流水深 h_0 と路床勾配の分類，および水面形の分類

等流水深 h_0 は，ある断面形のまま，ある粗度を持ち，ある勾配（傾き）のまま続く水路（河川）に，ある流量を流した時に，一定となって現れる水深である（図-1.5 参照）．長い区間ではこの水深に近づく．

等流水深 h_0 は，単位幅流量 q，粗度係数 n，水路の傾きである路床勾配 i_b によって変化する．路床勾配は直接計測が可能だが，粗度係数は直接計ることができないため，本実験では，等流状態（水深が一定の状態）を作って等流水深 h_0 を計測し，それから粗度係数 n を求め，一定となるかを調べる．広矩形断面での粗度係数は次式で得られる．

$$n = \frac{h_0^{5/3} i_b^{1/2}}{q} \qquad \text{（２）（粗度係数の計算式）}$$

ただし，諸量は次のとおり．

q：単位幅流量（m^2/sec)，（矩形断面水路では，$q=Q/B$，Q は流量(m^3/sec)，B は水路幅(m)

i_b：路床勾配（河床勾配） (無次元)　，　i_b＝路床高の区間低下量Δz_b／水路区間長 L

n：マニング（Manning）の粗度係数（$m^{-1/3}s$，式（２）の諸量はすべて m,sec の単位で与える）

等流状態（水位一定）の時の $h=h_0$（等流水深），路床勾配 i_b，単位幅流量 q から，粗度係数 n を得る．

＜解説＞

平均流速は，抵抗則によって，粗度，水深（水理径深），エネルギー勾配で決まる．抵抗則で有名なものは，次の Manning 則である．

$$v = Q/A = q/h = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \approx \frac{1}{n} h^{2/3} i_b^{1/2} \qquad \text{（３）}$$

A：流水の断面積(m^2)，矩形断面では $A=Bh$，I：エネルギー勾配だが，ここでは路床勾配（$I=i_b$）
S：潤辺長(m)，横断面内で水が壁面と接触する長さ．矩形断面では $B+2h$ だが，実験では $S≒B$ とする．
R：水理径深(m)，$R＝A/S$，ここでは上記から，$R=Bh/(B+2h)≒h$．
この式を変形すれば，予め粗度係数がわかっている場合には，等流水深が予測できる．

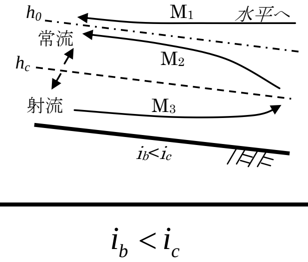
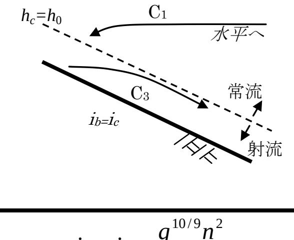
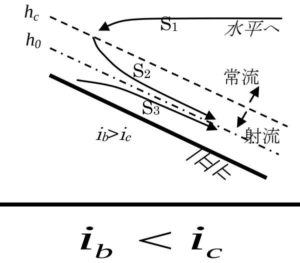
$$h_0 = \left(\frac{n^2 q^2}{i_b} \right)^{3/10} \qquad \text{（４）}$$

（本実験で不使用）（Manning 式が抵抗則の場合の矩形断面の等流水深の式）

（解説おわり）

ある流量 Q（単位幅流量 q）では，限界水深 h_c と等流水深 h_0 の大小関係で，路床勾配が分類される．

表-1.3　緩勾配と急勾配の区別　（太枠部は，レポート中，「理論」として必要）

勾配の名称	緩勾配	限界勾配	急勾配
限界水深・等流水深の関係	$h_0 > h_c$	$h_0 = h_c$	$h_0 < h_c$
図 h_0 と h_c の関係と水面形の分類 （各水路勾配で，３つのうちのどれかの水面形が現れる）			
勾配の関係※	$i_b < i_c$	$i_b = i_c \equiv \frac{g^{10/9} n^2}{q^{2/9}}$	$\boldsymbol{i_b < i_c}$

※表中，限界勾配 i_c とは，ある流量で，急勾配と緩勾配の境界となる勾配．

確認事項（考察すべき内容）

以下を確認する．(表-1.4，表-1.1 にまとめの例)

①水路中央に約 6 割の水深の位置設置した流速計の平均流速 v(m/s)，そこでの水深 h'および幅 B から求めた断面積 $A=Bh'$から，$Q'=vA$ によって得られる参考流量の値 Q'を求め，流量計の値 Q とおよそ一致するか比較せよ．

②一定の流量で等流状態を作り，水路の粗度係数 n を式（２）から計算し，いくらか確認せよ．河川では 0.02 以上であり，0.017 程度で滑面に相当する．これらの値と比較せよ．

HOWto②→式（２）での諸量の単位はすべて，m と sec に統一すること．

③式（１）で計算した限界水深 h_c と計測した等流水深 h_0 から，水路が緩勾配か急勾配かを判定する．

HOWto③→表-1.3 を参考に，限界水深 h_c と等流水深 h_0 の大小関係から，緩勾配か急勾配かを，各流量において判定する．

④各水面形について，実験の翌週の数値計算演習において、実験と理論のグラフを作成する。横軸に位置 x，縦軸に水深 h をとり，グラフに描け（図-1.8）．図中に限界水深 h_c を破線で，等流水深 h_0 を一点鎖線で併記せよ．そして，それらが表 1.3 の図のどの水面形に当たるか，各ケースに対して確認せよ．（表-1.1 に記入欄の例）

HOWto④→表-1.1 のデータをグラフ用紙に記入し，その時の限界水深 h_c（破線）と等流水深 h_0（一点鎖線）をグラフ上に一定値としてそれぞれ記入する（図-1.4，図-1.5）．そして，表-1.3 と比較し，緩勾配なら M_1〜M_3，急勾配ならば S_1〜S_3 のうち，どの分類かを判定する．

表-1.4　水面形以外のデータ整理の例

流量Q(m^3/s)=	0.0220	*計測*
水路幅B(m)=	0.500	*計測*
平均流速v(m/s)	0.494	*計測*
流速計部水深h'(m)	0.077	*計測*
流速からの流量Q'(m^3/s)	0.0190	*Q'=vh'B*
路床高さの差Δz(m)	0.030	*計測*
区間長L(m)	10.00	*計測*
路床勾配i_b=	0.003	*$i_b=\Delta z/L$*
単位幅流量q(m^2/s)=	0.044	*q=Q/B*
限界水深h_c(m)=	0.0582	*式(1)*
等流水深h_0(m)=	0.0810	*計測 (水路一定水深部)*
Manning粗度係数n=	0.0189	*式(2)*
勾配の分類	緩勾配	*表-1.3参照，h_c,h_0より*
Case-3　跳水上流水深h_1(m)	0.045	*計測*
Case-3　跳水下流水深h_2(m)	0.079	*計測*
Case-3　跳水上流側流速v_1	0.978	*$v_1=Q/(Bh_1)$*
Case-3　上流Froude数Fr_1	1.47	*式(5-2)*
実験値　跳水水深比h_2/h_1	1.76	
計算値　跳水水深比h_2/h_1	1.64	*式(5-1)*

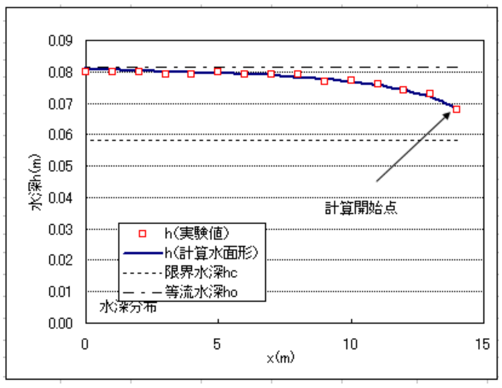


図-1.4　水面形（Case-1 の例）
（上記は M1 カーブの例）

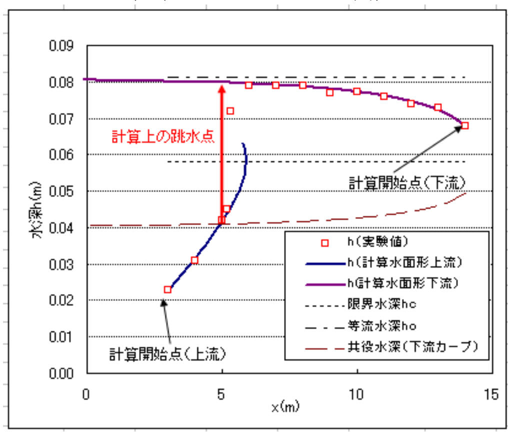


図-1.5　水面形（Case-3 の例）

（３）跳水の理論流れの分類

前回習ったように，図-1.6 のように上流水深 h_1 から跳水する場合下流水深 h_2 は限界水深より深くなる．この２つの水深は互いに「共役水深」の関係という．(h_2 は h_1 の共役水深)　運動量保存則（前回実験資料）から，次式のようになる．

$$\frac{h_2}{h_1}=\frac{-1+\sqrt{1+8Fr_1^{\,2}}}{2} \qquad （５－１）$$

$$Fr_1=\frac{q}{\sqrt{gh_1^{\,3}}}=\frac{v_1}{\sqrt{gh_1}} \qquad （５－２）$$

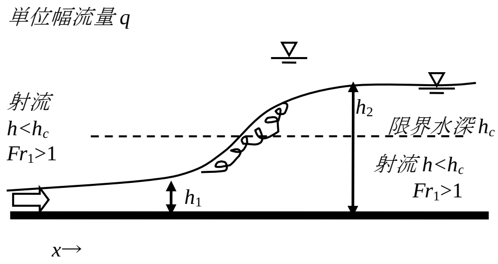


図-1.6　跳水

ここに

q：単位幅流量（m^2/sec），$q=Q/B$，Q：流量（m^3/sec），B：水路幅（m），$A=Bh$：断面積（m^2）
v_1：上流側の平均流速（m/sec），$v_1=q/h_1=Q/A_1$，Q：流量（m^3/sec），$A_1=Bh_1$：上流側断面積（m^2）
h_1：上流側水深(m)　　h_2：下流側水深(m)
Fr_1：上流側のフルード数(Froude 数)（無次元，跳水の上流側では「射流」で，1 より大きい．$Fr_1>1$）
g：重力加速度（9.8m/sec^2）

跳水の上下流では，流れが異なり，上流側では「射流」が現れ，下流側では「常流」が現れる．

ここでの確認事項は，以下のとおり．

⑤Case-3 の実験値から得られる共役水深比 h_2/h_1 と，理論値の h_2/h_1 とが一致するか確認する．

HOWto⑤→実験値の h_2/h_1 は，単純に計測値を割り算．h_2/h_1 の理論値は，式（５－１）から Fr_1 を計算し，これを用いて式（５－２）によって h_2/h_1 の理論値を得る．両者を比較する．表-1.4 を参照のこと．