

### 3. 堰越流部の流れ、跳水現象測定（テーマー 2）

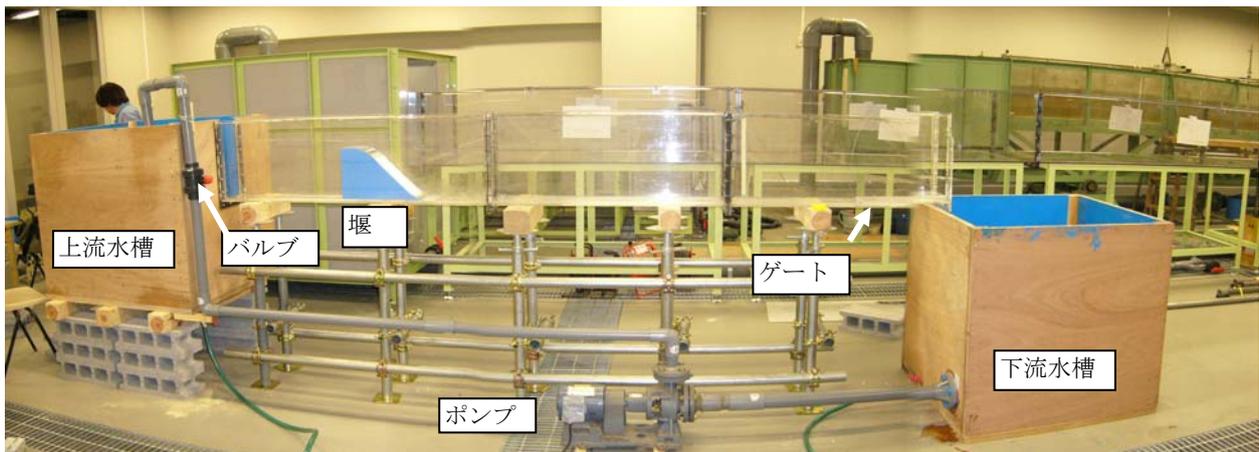
#### 3-1. 実験の目的

開水路において生じる漸変流の水面形状について観察し、常流と射流の流れの差異を把握するとともに、射流下端の水位条件を変化させた場合の跳水現象について把握する。実験では水路上流に設置した越流堰を流下する流れ、堰下流の射流状態、下流の堰による跳水の状況を観測し、限界水深の発生状況、エネルギー勾配を把握し、跳水による大規模な乱れによりエネルギーが損失する状況を把握する。

- ★ 跳水現象の把握
- ★ 常流と射流の流れの把握
- ★ 限界水深、比エネルギーの把握
- ★ エネルギーの散逸状態の把握

#### 3-2. 実験装置

跳水実験装置：低水槽→ポンプ→バルブ→上流水槽→堰→下流端ゲート→低水槽



実験装置

#### 3-3. 堰越流流れ、跳水現象

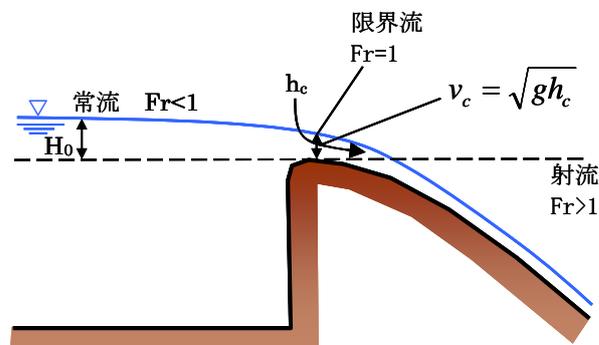
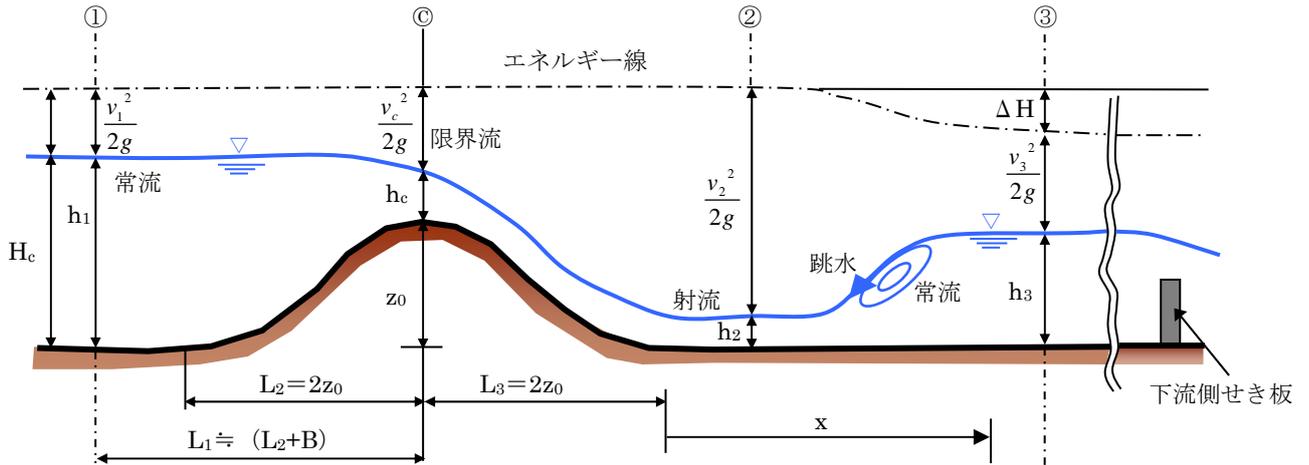


図 越流堰付近の流れ

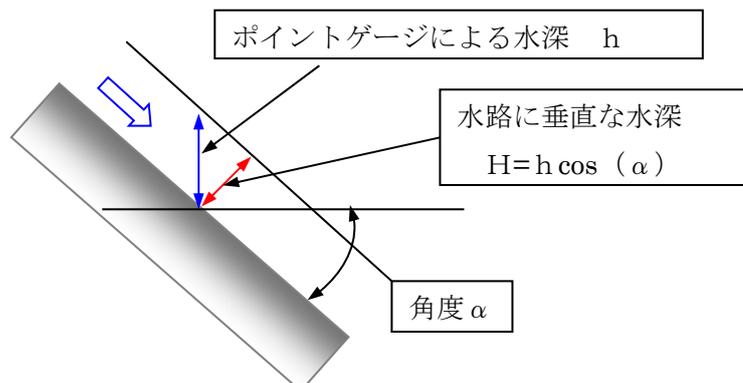


- ① バルブが開になっていることを確認し、ポンプの電源を入れる。
- ② 水路下流のゲートは全開状態で通水を行った後、ゲートを調整することで跳水の位置が変化することを確認する。
- ③ その後、若干ゲートを起立させゲート水路中央部で跳水が生じように調整する。
- ④ 射流部分に障害物を置いても上流水位が影響しないことを確認する。
- ⑤ ポイントゲージの針を用いて限界水深の発生地点を調べる。
- ⑥ 堰の上流、堰頂部、堰下流（射流部）、跳水箇所まで水深を計測する。（初めに河床までポイントゲージの針先を降下させ、ポイントゲージの値を読んだ後、水面にポイントゲージの針を接触させ水面高を計測し、差分から水深を計測する。距離の原点は堰の上流面とする。（下流を+、上流を-で表示）
- ⑦ ピトー管を用いて高速な流れの流速を計測し、流速×水深×水路幅で流量を算出する。
- ⑧ バルブを調整、追加ポンプを起動して流量を変化させ、②～⑧を2回繰り返す、計測する。

### 3-4. 実験結果の整理

#### (1). 水面形状の整理

計測シートを整理し、各断面での平均水深を算定する。堰斜面部では斜面に直角方向の水深の算定を行う。



水路床の高さ、堰からの距離をプロットして水路縦断形状を図化する。

水路縦断図に、水面形、エネルギー線をプロットし、水面がどのように変化しているか、エネルギー線（全水頭）がどのように変化しているかを把握する。

## (2). ピトー管の流速測定の整理

ピトー管を用いて計測した堰下流の射流区間で流速を整理する。計測は断面方向に各3点を平均し、断面平均流速を算出する。縦断方向の5地点の結果について整理する。

## (3). 比エネルギーの整理

各地点において算定した水深から流速 ( $v = Q/A$ ) を逆算し、エネルギー線を算定する。

算定した水深、流量を用いて比エネルギーを算出し、水深と比エネルギーの関係について整理する。

- a. 流水断面積  $A = Bh$
- b. 断面平均流速  $v = Q/A$
- c. 速度水頭  $H_v = \alpha v^2/2g$
- d. 比エネルギー  $H_s = H_v + h = \alpha v^2/2g + h$
- e. 全水頭  $H = H_s + z = \alpha v^2/2g + h + z$
- f. 比力  $F_s = Q^2/(gA) + Ah/2$
- g. フルード数  $Fr = v/\sqrt{gh}$

### ● 比エネルギー図

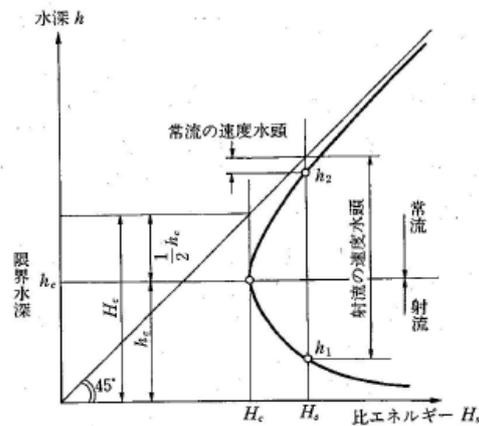


図-5.1.4 比エネルギーと水深の関係

- 1) 長方形断面の水平水路における長波(水路を伝わる表面波)の伝搬速度(波速)  $c$  は  $c = \sqrt{gh}$  と表される。したがって水路の流速を  $v$  とすると、常流ではフルード数  $Fr = v/\sqrt{gh} < 1$ 、射流:  $Fr = v/\sqrt{gh} > 1$ 、限界流:  $Fr = 1$  となる。すなわち、限界流速を  $v_c$  とすれば、 $v_c = \sqrt{gh_c}$  と表すことができ、これは流速が流量  $Q$  や壁面粗度などに一切関係なく、水深のみの関数として一義的に定まることを示している。

2) 跳水前後の水深  $h_2, h_3$  ( $h_2 < h_3$ ) とフルード数  $Fr$  の関係、跳水によるエネルギー損失水頭  $\Delta H$  は以下のように表される。

$$\frac{h_3}{h_2} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$Fr_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gh_2}} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\Delta H = \frac{(h_3 - h_2)^3}{4h_2h_3} > 0 \dots\dots\dots (3.3)$$

上式から明らかなように、共役水深の差 ( $h_3 - h_2$ ) が小さければエネルギーの損失は少なくなり、強い表面渦が発生せず水面は波状となる。これを波状跳水という。

3) 堰の高さ  $z_0$  と単位幅あたりの流量  $Q/B$  の関係によって、跳水の規模を図-5.1.6 のように概略推定することができる。

- ・ 波状跳水(undular jump): フルード数  $Fr = 1 \sim 1.7$  で生じ、表面渦は形成させず、水面は波状となる
- ・ 弱跳水(weak jump):  $Fr = 1.7 \sim 2.5$  で跳水の表面に一連の小さい表面渦が形成される。
- ・ 動揺跳水(oscillating jump):  $Fr = 2.5 \sim 4.5$  で生じ、流入ジェットがあるときは水路床に沿い、場合によっては表面に沿うなど時間的に動揺して不安定である。
- ・ 定常跳水(steady jump):  $Fr = 4.5 \sim 9.0$  で生じ、跳水は安定し下流水面も比較的静穏である。
- ・ 強跳水(strong jump):  $Fr > 9.0$  では跳水の内部の激しい渦のために、下流側に顕著な波動が生じる。

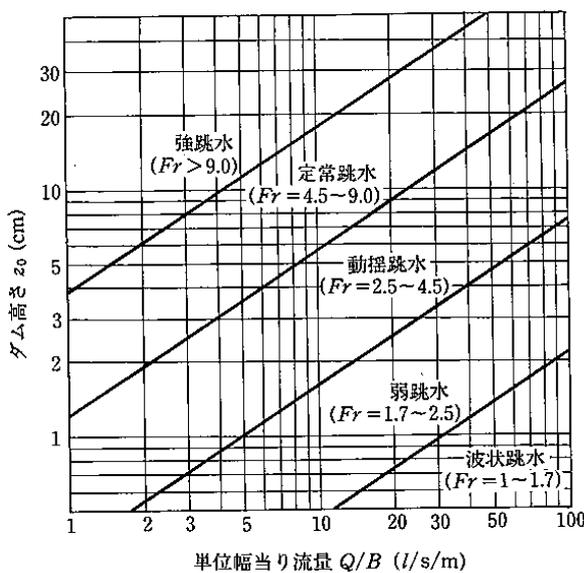
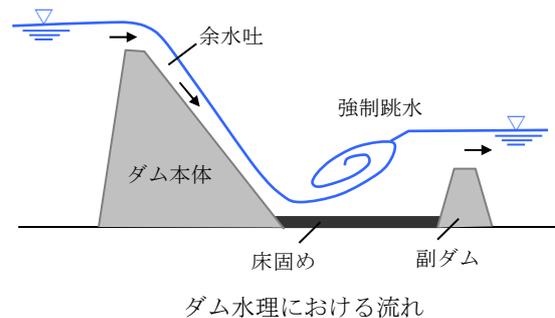
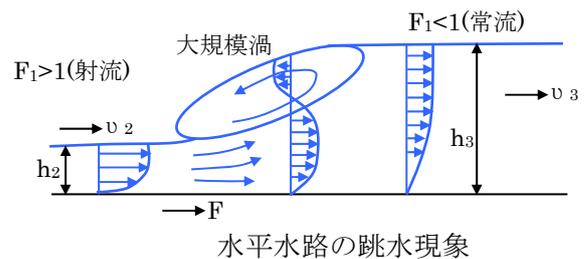


図-5.1.6 ダムの高さと跳水の種類



ダム水理における流れ

### 3-5. レポートの作成

レポートは下記の内容を記述して提出。

- ① 表紙に、グループ名、学籍番号、氏名、実験名、実験日時を必ず記入。
- ② 記録シートを整理して、各測線での水深を算定する。堰斜面部では堰勾配を考慮して斜面に垂直の水深を計算。
- ③ 全水頭の計算では、水位は河床高+ポイントゲージの水深、流速を計算する時の水深は水路に垂直な水深で算定。 $(V=Q / (B \cdot H))$
- ④ 計測した水深から断面平均水深を算定し、その水深を用いて全水頭、比エネルギーを算定する。  
(表-1)
- ⑤ 図-1に示すように水位と全水頭の縦断図、図-2の比エネルギー・水深関係図に結果を図化する。
- ⑥ 図-2の比エネルギー・水深関係図から限界水深を読み取る。
- ⑦ 読み取った限界水深、実験で観測した限界水深、流量から算定する限界水深を整理する。(表-2)
- ⑧ 計測したピトー管の値から流速を計算し平均流速を算定する。平均流速を用いて水深、水路幅より流量を算定する。
- ⑨ 限界水深発生地点ではフルード数が1であることを用いて、限界水深より流量を算定する式を導き出し、限界水深より流量を算定する。
- ⑩ P3-4の3.1~3.3の式を用いてフルード数と水深の変化、エネルギー損失について算定し、実験結果と比較する。また、実験での跳水について分類する。
- ⑪ 考察について記述する。
  - ・ 下記の3手法から算出した流量について、どの流量が適した流量であるか水位・エネルギー線をプロットし、流量別のエネルギー線の形状からどの流量が妥当であるかを算出する。
    - (1) ピトー管から算出した流速に断面積を掛け算出した流量
    - (2) 観測で計測した限界水深から算出した流量
    - (3) 比流量から算出した限界水深を用いて算出した流量

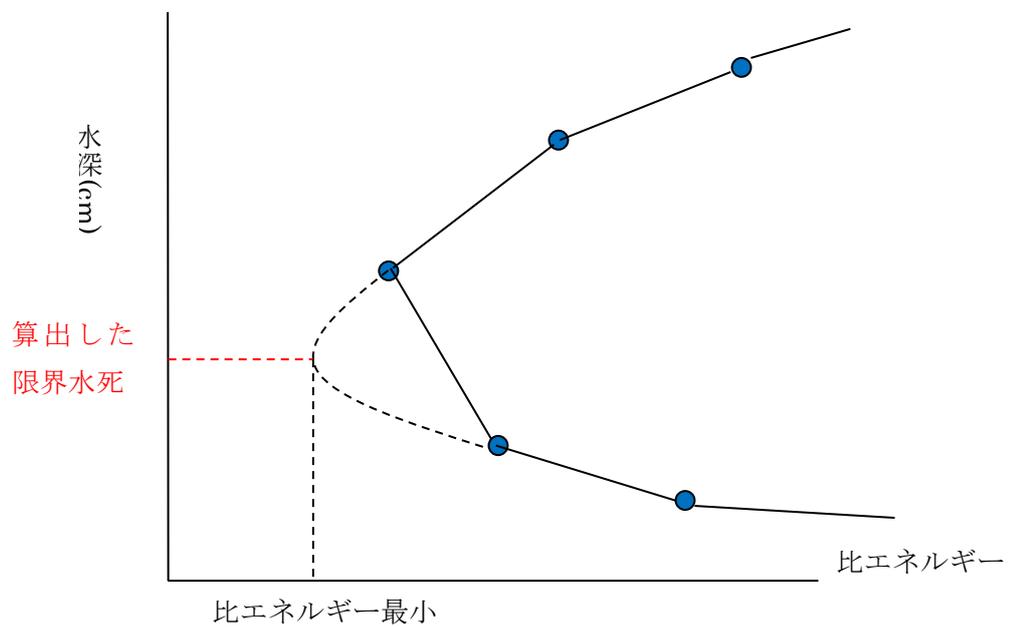


図-3 比エネルギーから限界水深の算出 (各ケース)

- 提出するのは、「水理実験演習提出レポート」の部分  
計測データのシートは提出しなくてよい。(計測値は計測結果整理表で提出)

●計測 1 回目

・水深の測定

区間	No.	堰からの距離	河床高	左岸				中央				右岸				平均水深
				ポイントゲージ		角度	水深	ポイントゲージ		角度	水深	ポイントゲージ		角度	水深	
				(河床)	(水面)			(河床)	(水面)			(河床)	(水面)			
堰上流	①															
	②															
	③															
堰部	④															
	⑤															
	⑥															
	⑦															
	⑧															
堰下流	⑨															
	⑩															
	⑪															
	⑫															
	⑬															
跳水下流	⑭															
	⑮															
	⑯															
	⑰															
	⑱															

流速の測定

区間	No.	左岸部				中央部				右岸部			
		マンノメーター		圧力差	流速	マンノメーター		圧力差	流速	マンノメーター		圧力差	流速
		静水圧	動水圧			静水圧	動水圧			静水圧	動水圧		
堰下流	⑨												
	⑩												
	⑪												
	⑫												
	⑬												

区間	No.	平均流速	平均水深	流量
堰下流	⑨			
	⑩			
	⑪			
	⑫			
	⑬			
断面流量		—	—	

# 水理実験演習提出レポート

(土木実験Ⅰ、Ⅱ)

堰越流部の流れ、跳水現象測定 (テーマー 2)

提出者	
班番号	
学籍番号	
実験日	
提出種別	新規提出    再提出    (どちらかを○で囲む)
レポート提出日	
再提出日	

表-4 計測結果の整理表

流量:  $\text{O}_{\text{ト}}/\text{s}$

距離	河床高	水深(h)	水深(H)	水位	流速	速度水頭	全水頭	比エネルギー
-30.0	0	26.00	26.00	26.00	14.4	0.11	26.11	26.11
-20.0	0	26.00	26.00	26.00	14.4	0.11	26.11	26.11
0.0	17.8	4.60	4.60	22.40	81.2	3.36	25.76	7.96
13.0	17.6	3.60	3.20	21.20	116.7	6.94	28.14	10.14
18.5	14	3.40	2.60	17.40	143.6	10.52	27.92	13.12
29.0	6	2.84	2.01	8.84	185.7	17.60	26.44	19.61
42.0	0.3	1.95	1.80	2.25	207.4	21.95	24.20	23.75
81.0	0	1.88	1.88	1.88	198.6	20.12	22.00	22.00
90.0	0	1.80	1.80	1.80	207.4	21.95	23.75	23.75
100.0	0	1.80	1.80	1.80	207.4	21.95	23.75	23.75
151.5	0	11.20	11.20	11.20	33.3	0.57	11.77	11.77
160.0	0	11.40	11.40	11.40	32.7	0.55	11.95	11.95
170.0	0	11.20	11.20	11.20	33.3	0.57	11.77	11.77
180.0	0	11.30	11.30	11.30	33.0	0.56	11.86	11.86

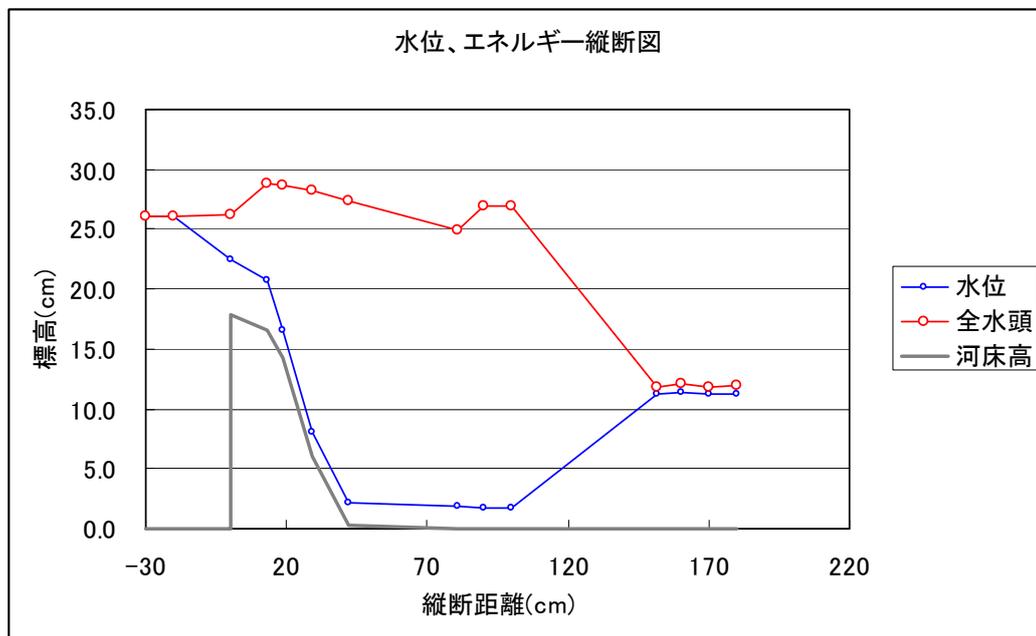


図-1 水位・エネルギー縦断図 (各ケース)

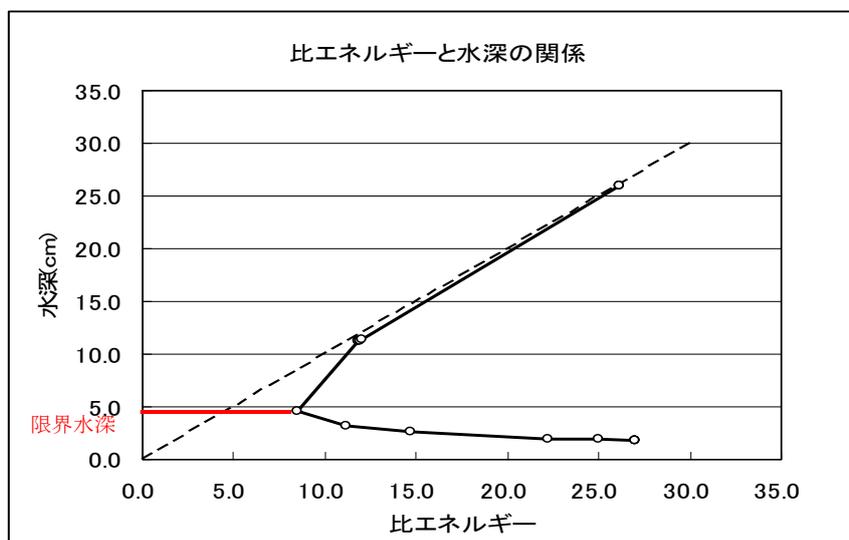


図-2 比エネルギー・水深関係図 (各ケース)

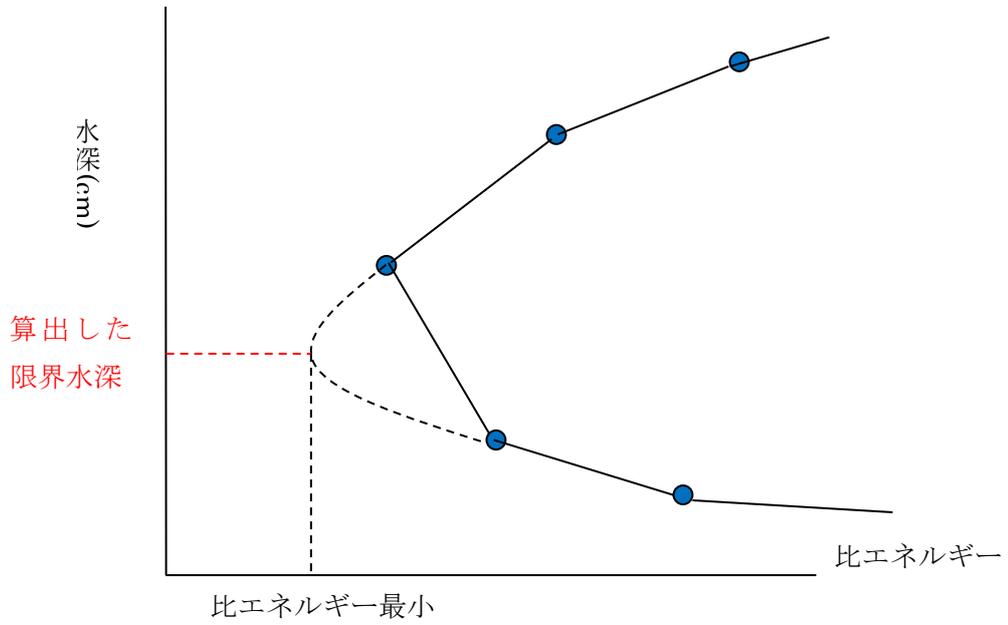


図-3 比エネルギーから限界水深の算出

表-1 ピトー管による流速から流量算定

NO.	流速			平均流速	水深	流量
	左岸	中央	右岸			
⑨						
⑩						
⑪						
⑫						
⑬						
断面流量	—	—	—	—	—	Q 1

断面流量：  $Q = B \cdot H \cdot V$  で算定

表-2 限界水深・流量表

実験で波紋から求めた限界水深	左記の限界水深から算出した流量 (Q2)

表-3 限界水深・流量表

比エネルギーから求めた限界水深	左記の限界水深から算出する流量 (Q3)

【考察】

1. エネルギーの縦断分布から見た実験流量の推定

Q 1	Q 2	Q 3	推定流量

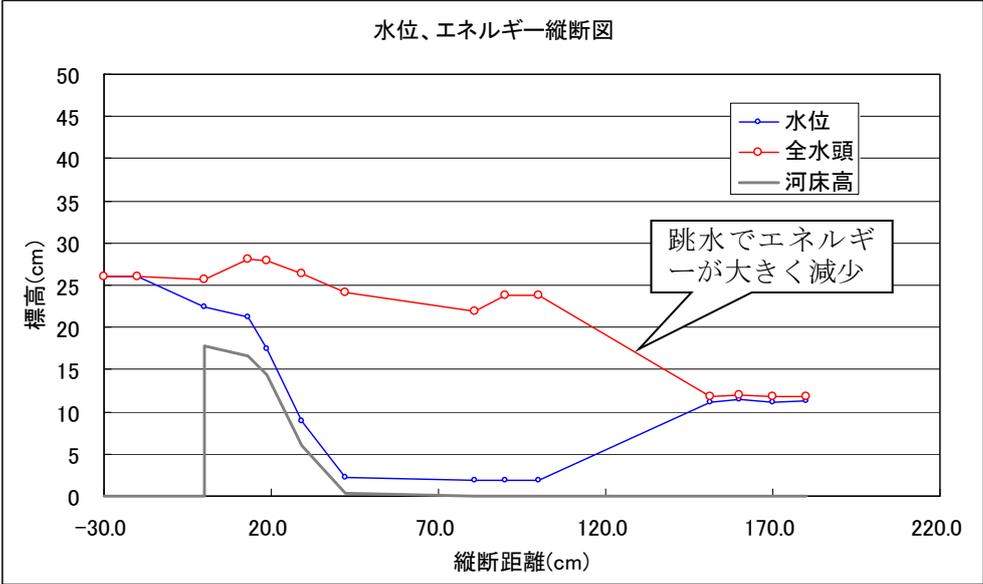
- エネルギー縦断図について示す。
- 各流量の水位・エネルギー縦断図形状から、適切な流量を推定する。
- 流量を推定した過程について分かりやすく記述する。
- Q 1、Q 2、Q 3の流量と推定流量との差が生じた要因について考察する

2. 下記の用語について調べる

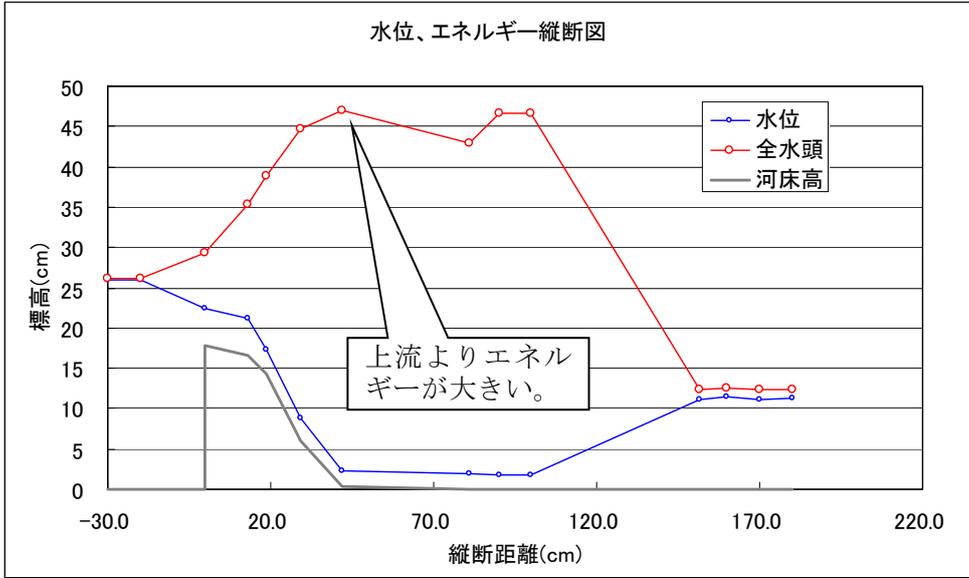
- 跳水現象(実験での跳水の分類を示す)
- 運動量保存の法則
- 比エネルギー
- 共役水深

# 参考

流量が適切と考えられる全水頭線



流量が過剰と考えられる全水頭線



流量が過小と考えられる全水頭線

