

水理実験演習 演習資料

テーマ-2

跳水現象実験

跳水実験の目的と内容

跳水とは？

射流の流れが、常流の流れに大規模なエネルギー散逸により水面形状が遷移する時に生じる水面形状。
ダムや堰下流で生じる激しい流れ。

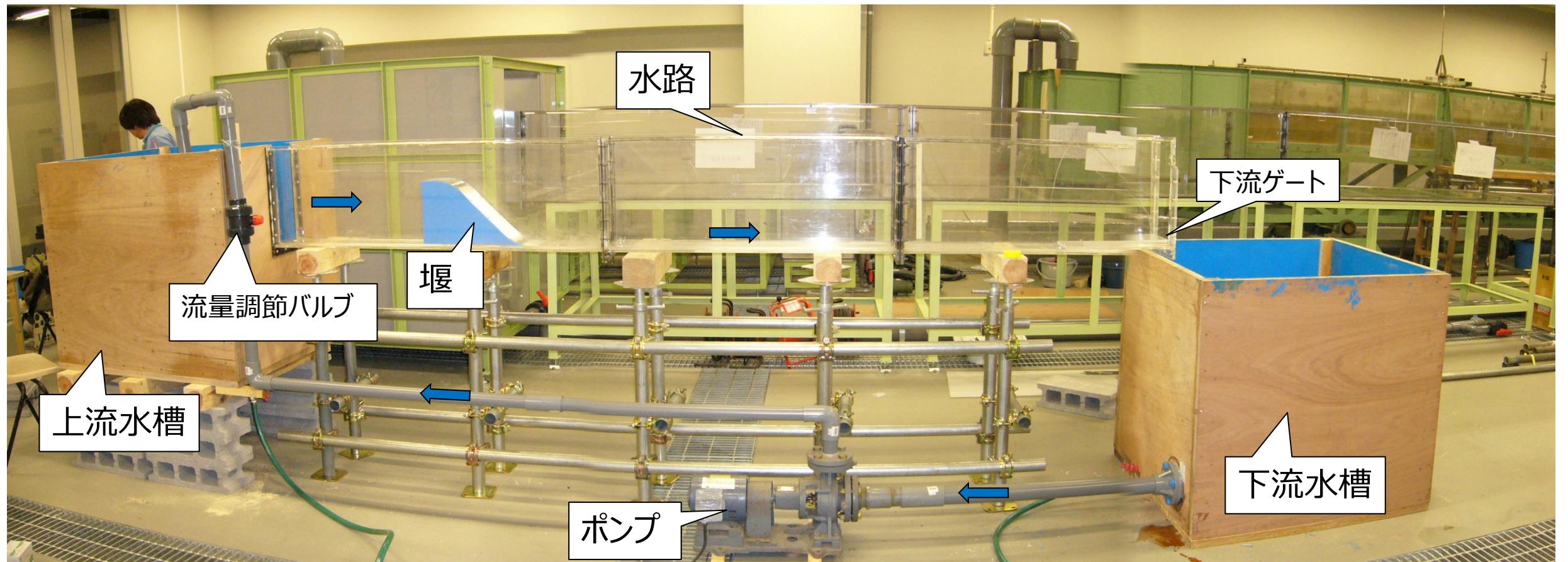
ダム下流の放流状況 令和元年10月台風19号



実験の目的

- 跳水現象を理解する。
- 常流と射流の流れの現象の違いを理解する。
- 限界水深、比エネルギーの現象を理解する。
- 跳水によるエネルギー散逸状況の把握。
- ベルヌーイの定理を用いた流速計測法（ピトー管）の原理を理解する。
- 計測した水位を用い、流速などから算出した流量によりエネルギー変化を検証し、通過流量を推定する。

実験装置



跳水現象

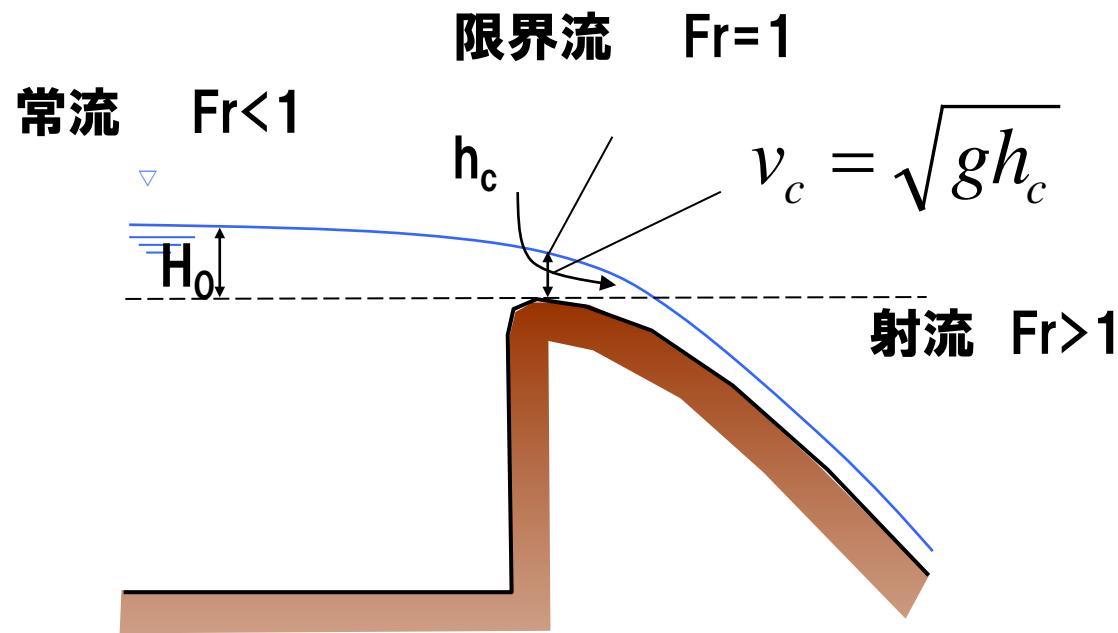


跳水現象

跳水は下流の水深により跳水の位置が変動する。

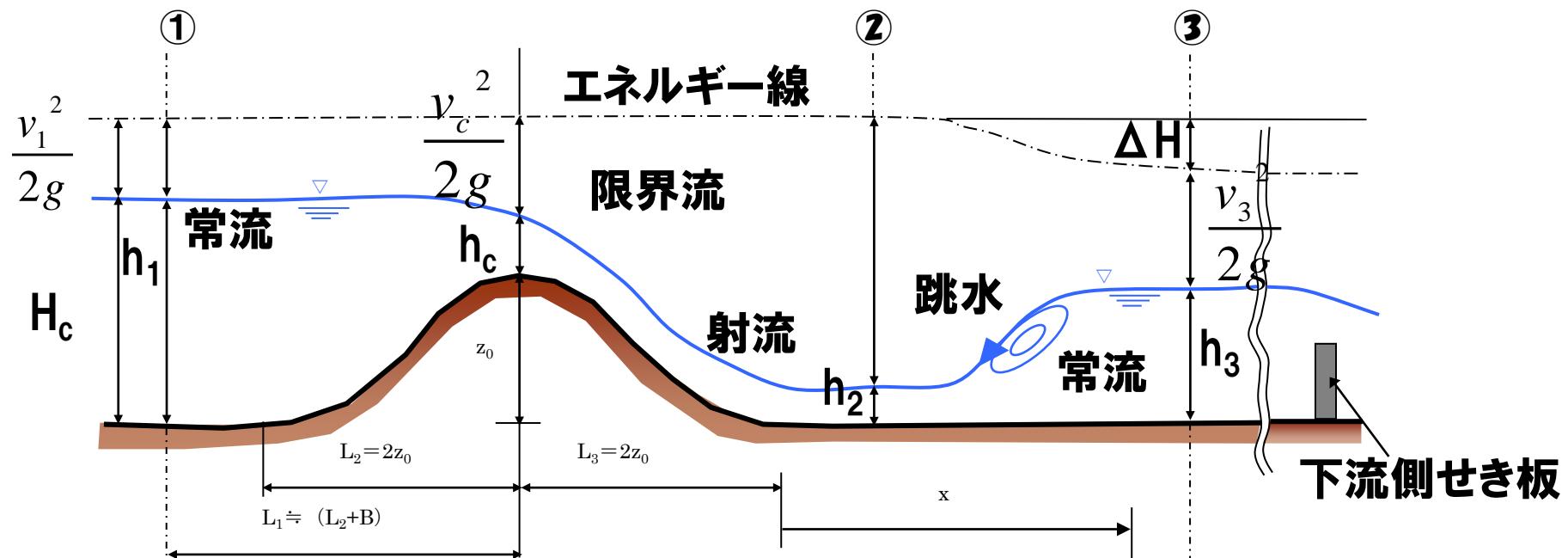


跳水と堰越流部の流れ



フルード数

$$Fr = v / \sqrt{gh}$$

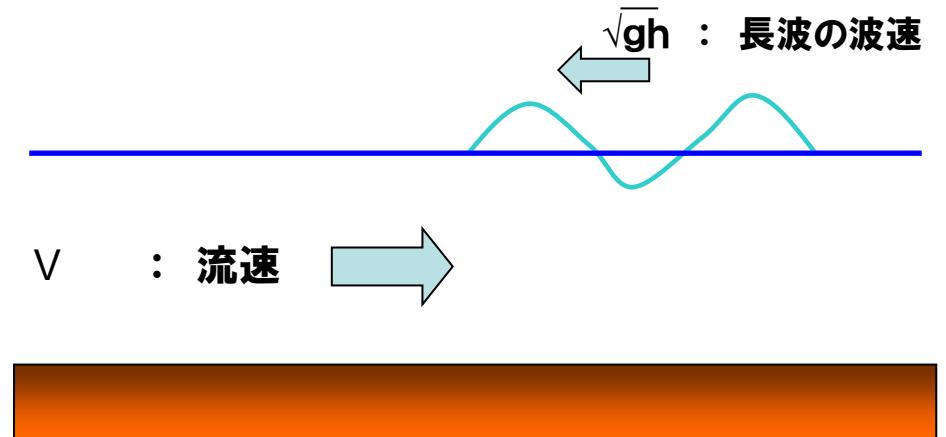


フルード数

フルード数 $Fr = v / \sqrt{gh}$

\sqrt{gh} : 長波の波速

v : 流速



フルード数は長波と呼ばれる波の速度と流体の流速の比率を示している

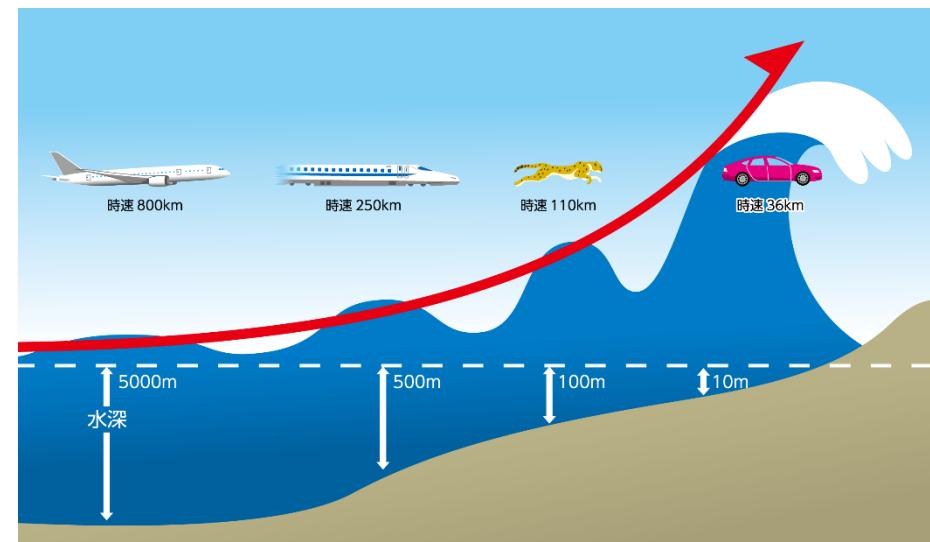
長波の波速 > 流速 → $Fr < 1$: 常流

長波の波速 < 流速 → $Fr > 1$: 射流

津波も長波の一種

・太平洋の水深4000mとすると時速700km/hrで津波はチリから伝播する。

・日本の近海に近づくと、大陸棚の水深200mでは速度は160km/hr、水深50mでは80km/hrと減速するため、後ろから来た波が重なることで急激に津波高が増大する。



気象庁HPより

限界水深（フルード数が1の特異な流れ）

$$\text{フルード数} = 1 \Rightarrow \frac{V_c}{\sqrt{g \times h_c}} = 1 \Rightarrow V_c = \sqrt{g \times h_c}$$

V_c : 限界流速

h_c : 限界水深

Q : 流量

B : 水路幅

q : 単位幅流量

$$\begin{aligned} Q &= A \times V = B \times h \times V = B \times h_c \times V_c \\ &= B \times h_c \times \sqrt{g \times h_c} \end{aligned}$$

$$q = \frac{Q}{B} = g \times \sqrt[3]{h_c}$$

限界流状態では水深のみで
単位幅流量が決定される

限界水深の発生状況、常流・射流の流れ

限界水深の位置

常流の波が消えて射流の流れとなる境界の位置が限界水深が発生している位置



限界水深の発生状況、常流・射流の流れ

常流

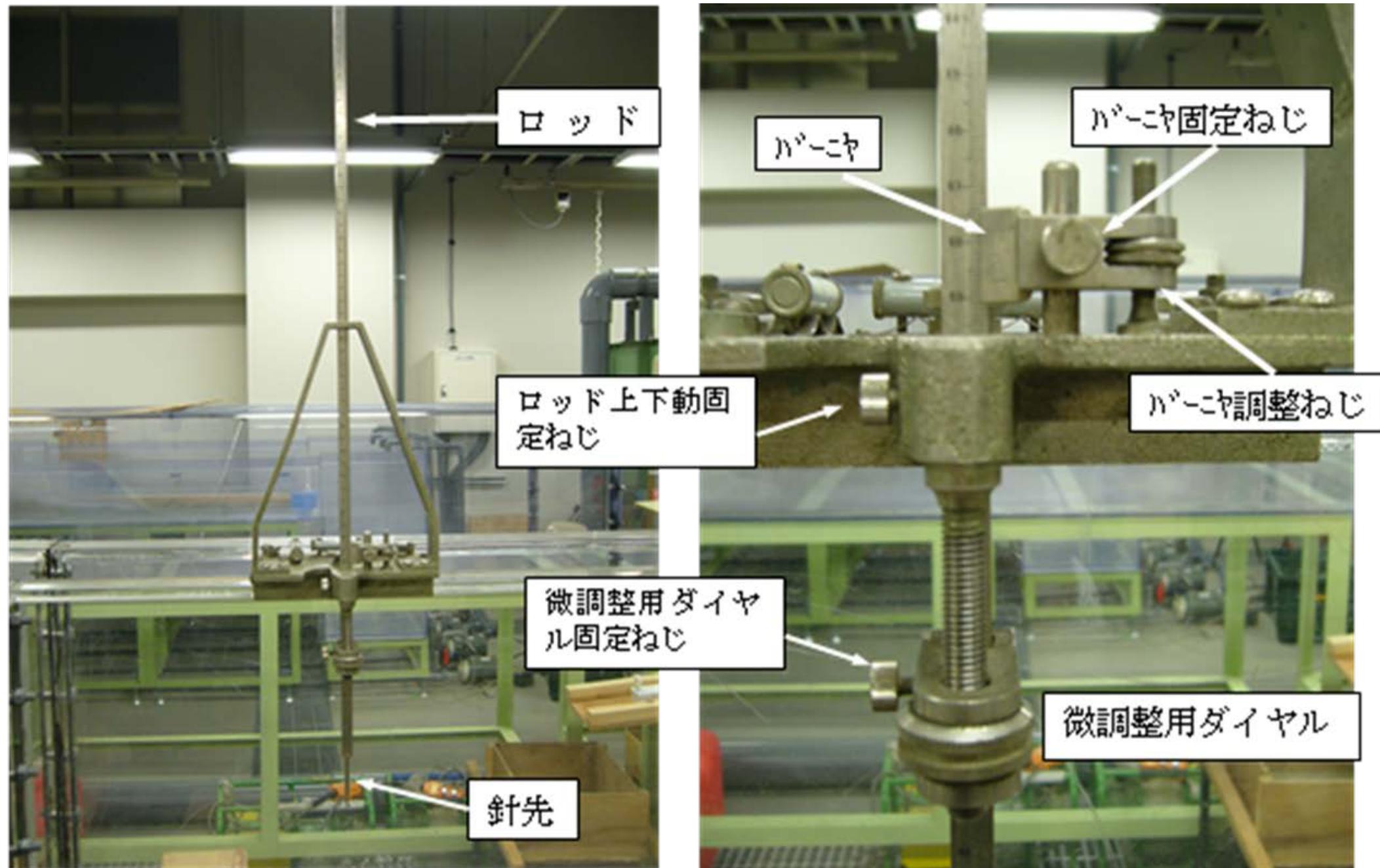


射流



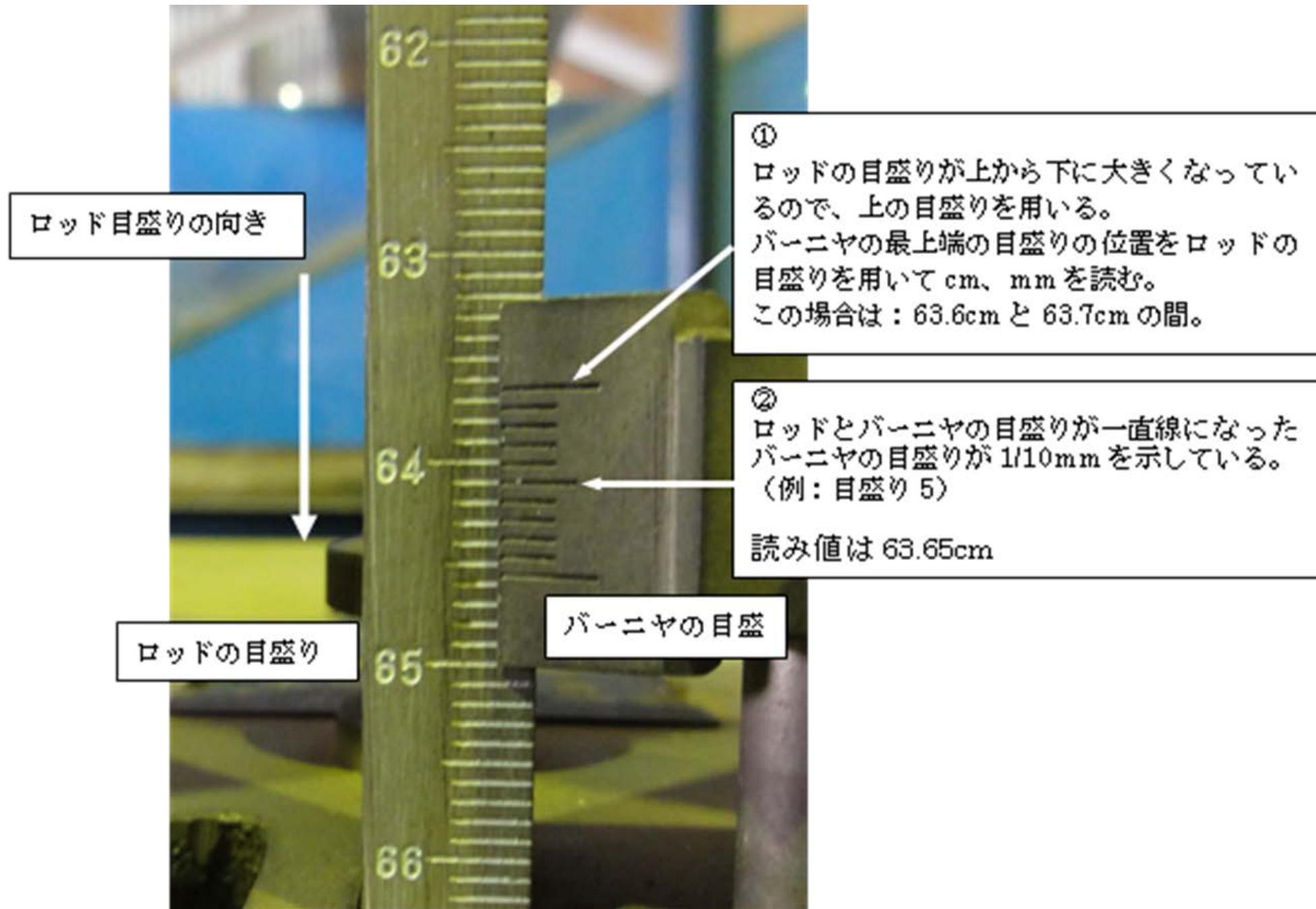
水位の計測 (ポイントゲージ)

水理実験で水深を計測する器具。(古典的な器具であるが、1/10mm精度で移動が容易に観測できるため、現在も広く活用されている。)



水位の計測 (ポイントゲージ)

バーニヤの読み方



ロッドについている目盛りの向きに注意して読み取る。

水位の計測 (ポイントゲージ)

河床高の計測



水面高の計測



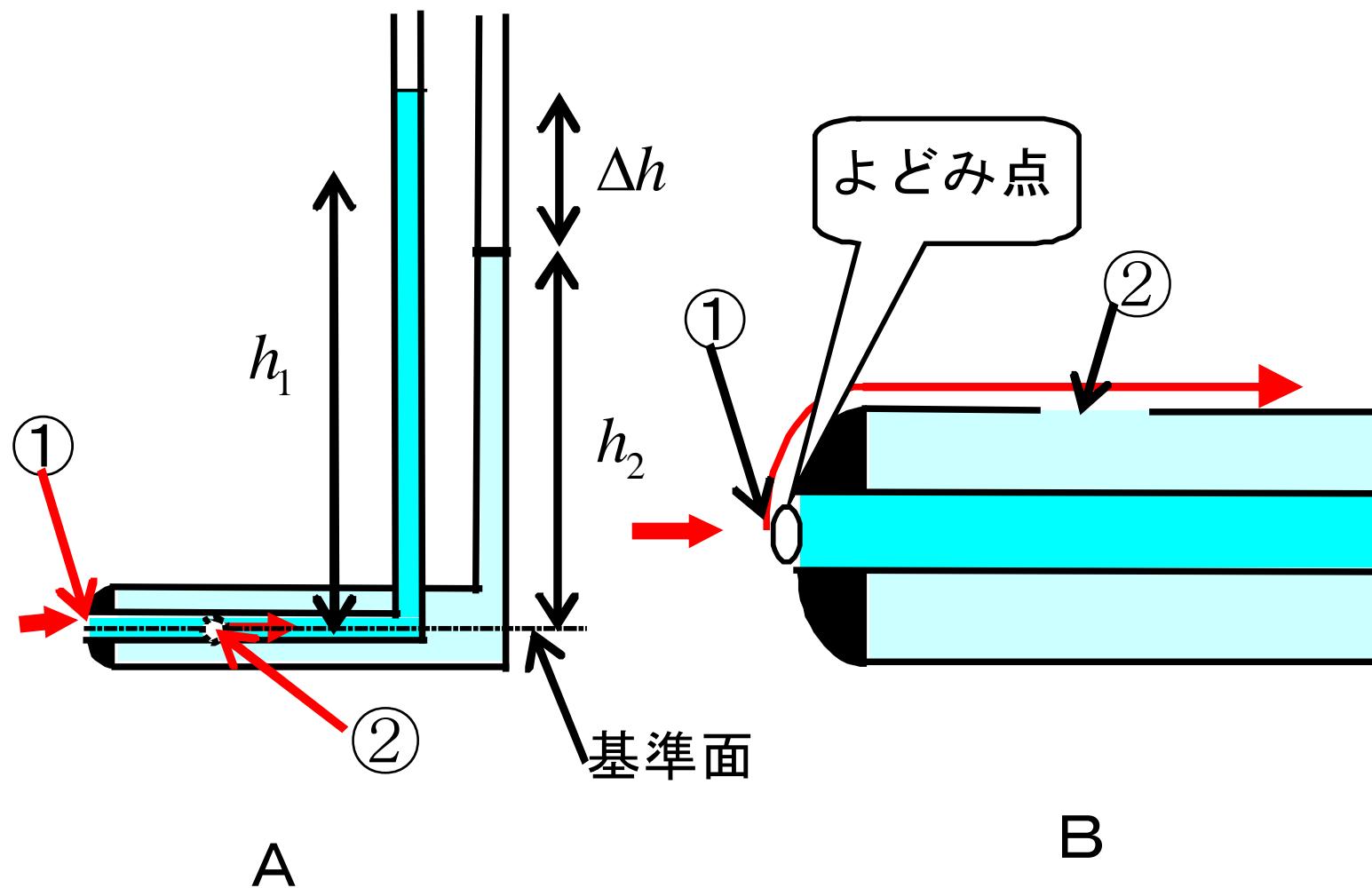
水位の計測（ポイントゲージ）

水面が揺動、振動してる水面の計測

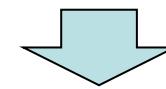


ピトー管 (流速計測の原理)

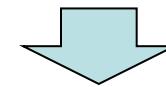
- ①の地点はよどみ点と呼ばれ、流速 $V = 0$ となるが動圧と静水圧を受け、圧力 P_1 は高い値となる
- ②の地点は流れの影響を受けないので、静水圧のみを検知



$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{w} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{w}$$

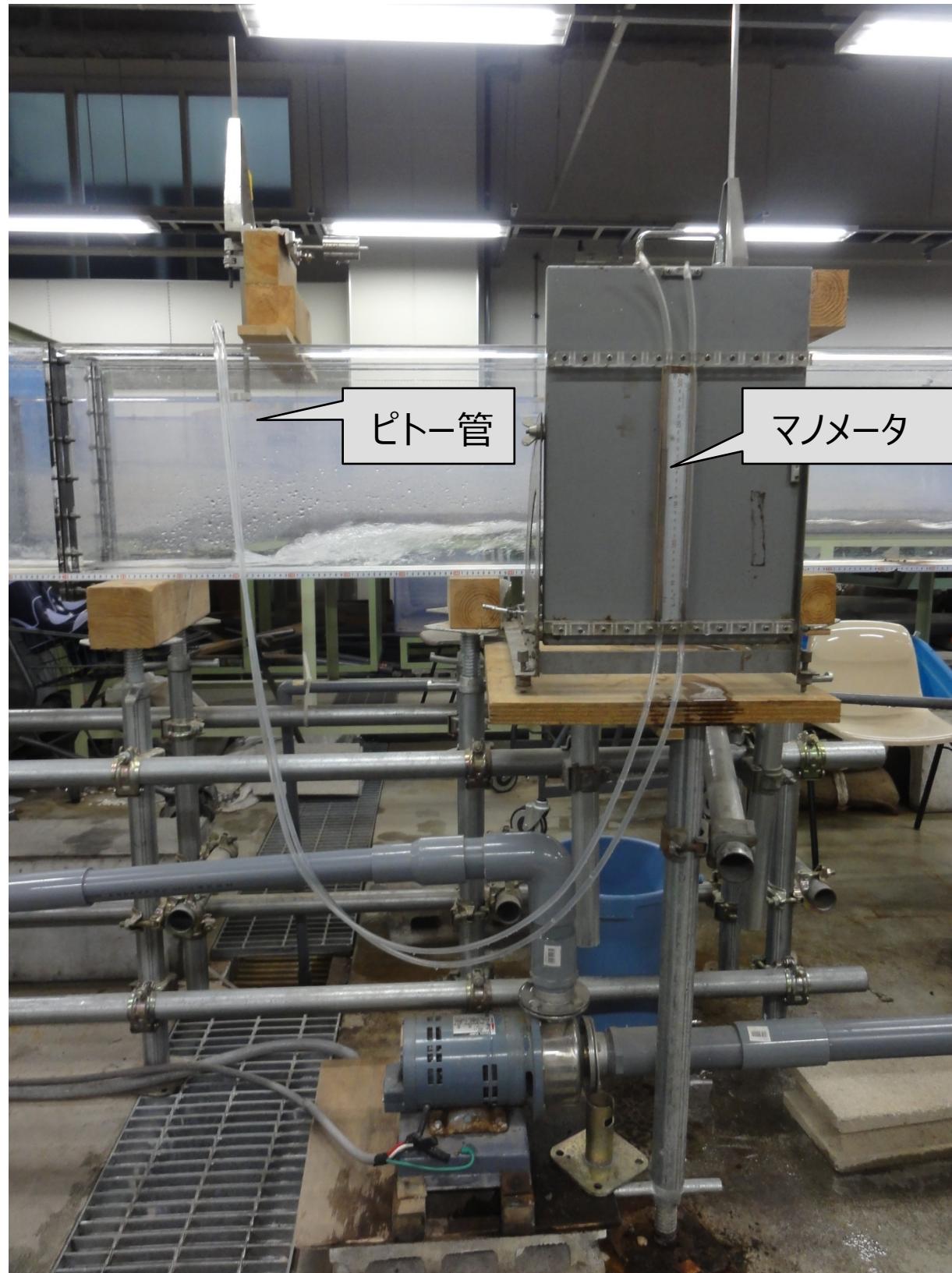


$$\frac{v_2^2}{2g} = \frac{p_1}{w} - \frac{p_2}{w} = \Delta h$$



$$V = \sqrt{2 \times g \times \Delta h}$$

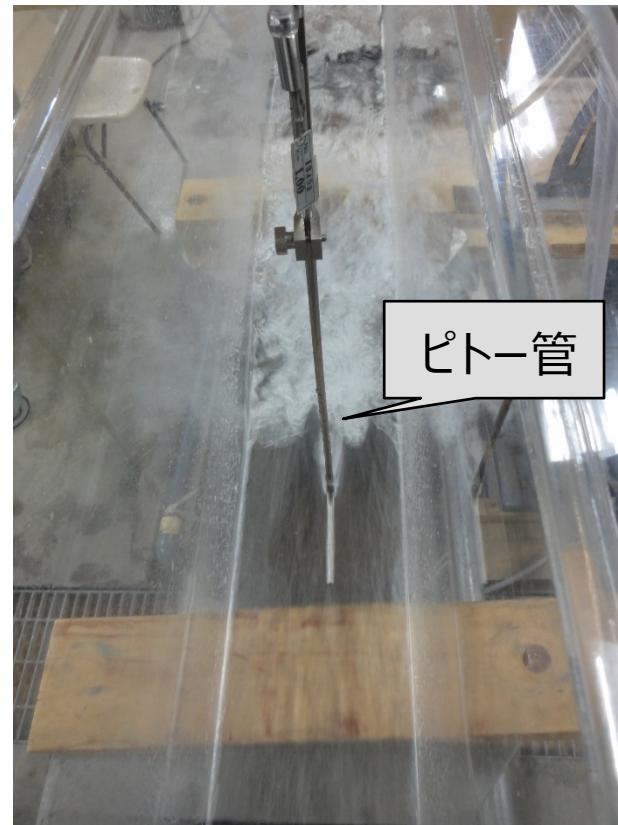
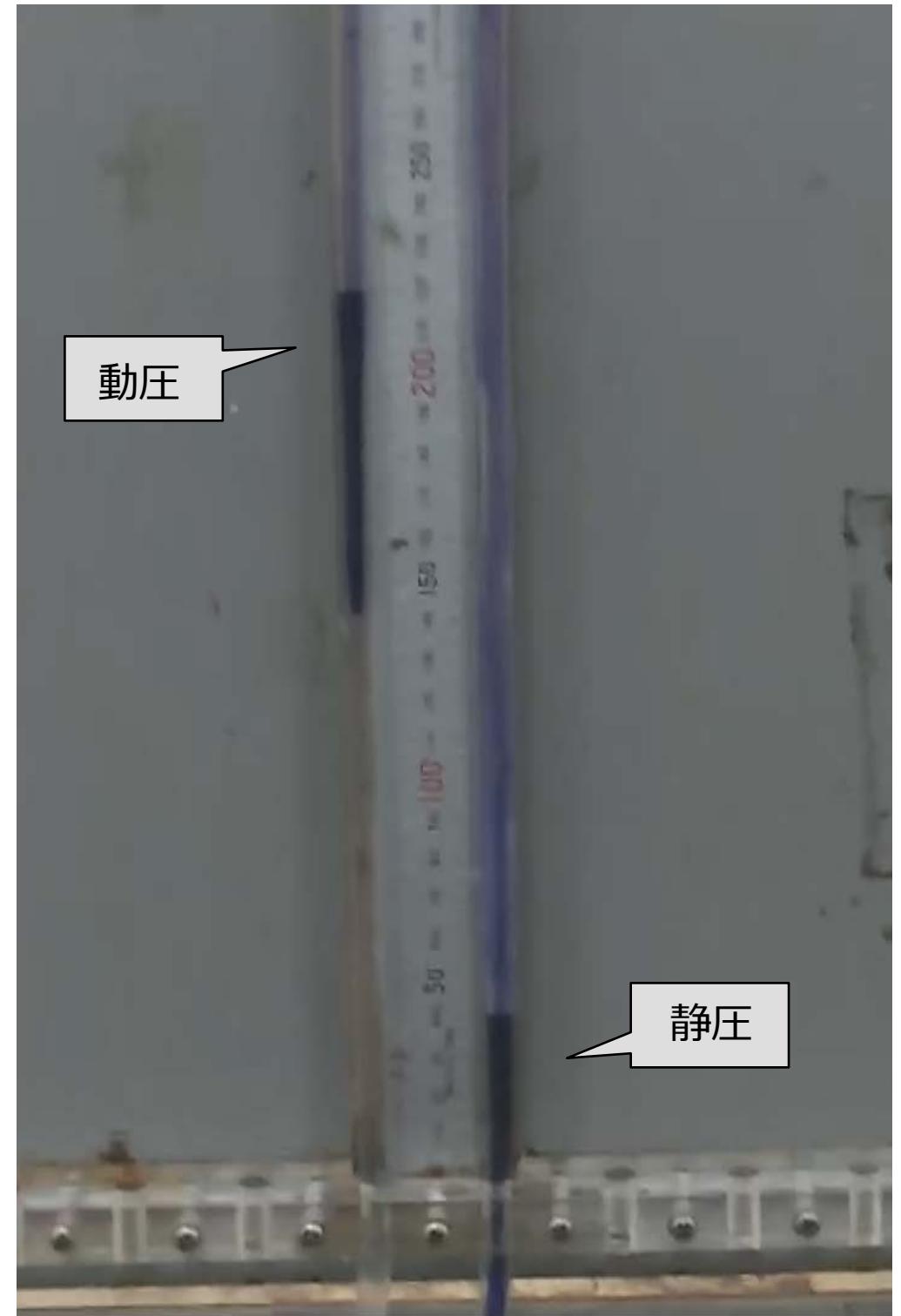
ピトー管（ベルヌーイの定理を用いた流速計測器）



ピトー管 (ベルヌーイの定理を用いた流速計測器)



ピトー管のマノメーターの計測の状況



ピトー管（流速計測の原理）

実際の活用（航空機に対する対気流に対する相対速度の計測）

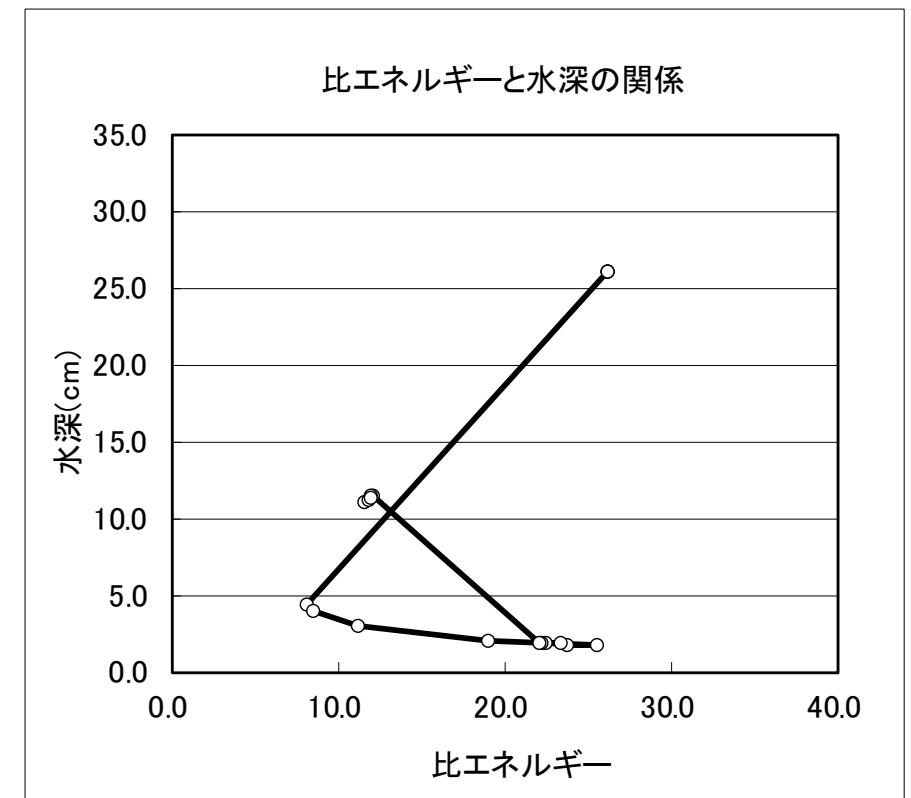
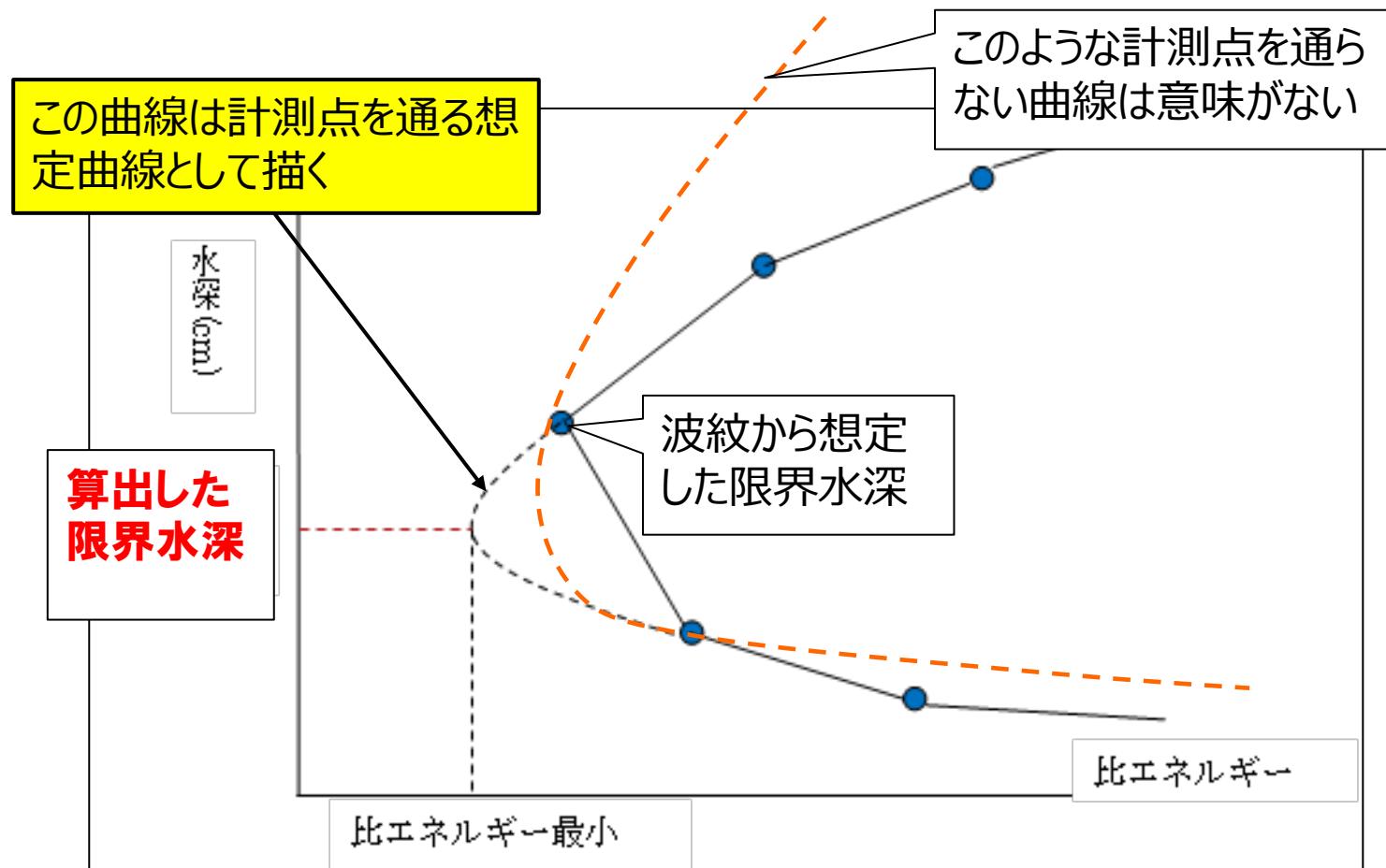
気流の中の飛行機の相対速度の把握は、飛行機の揚力の算出に不可欠。
GPSなどの計測は、対地速度であり、揚力の算出はできない。



比エネルギーと限界水深

➤ 限界水深の算出

- 流況の観察から限界水深発生位置を計測するが、その地点が限界水深発生地点とは限らない。
- 波紋の形状から限界水深を決めるのは、水理学に詳しい人でも難しい。
- そこで、計測した水深とエネルギー(速度水頭) から水深と比エネルギーの点をプロットし、そのプロットした線が滑らかにつながる線を想定し、比エネルギーが最小となる点を推定する。
- 想定する曲線は、計測した比エネルギーの点を必ず通過する曲線を想定する。
- 水深と比エネルギーのグラフは、計測した水深と比エネルギーを水深でソート(昇順か降順)してプロット。(ソートしないで描くと下記のように交差するグラフになるので注意。

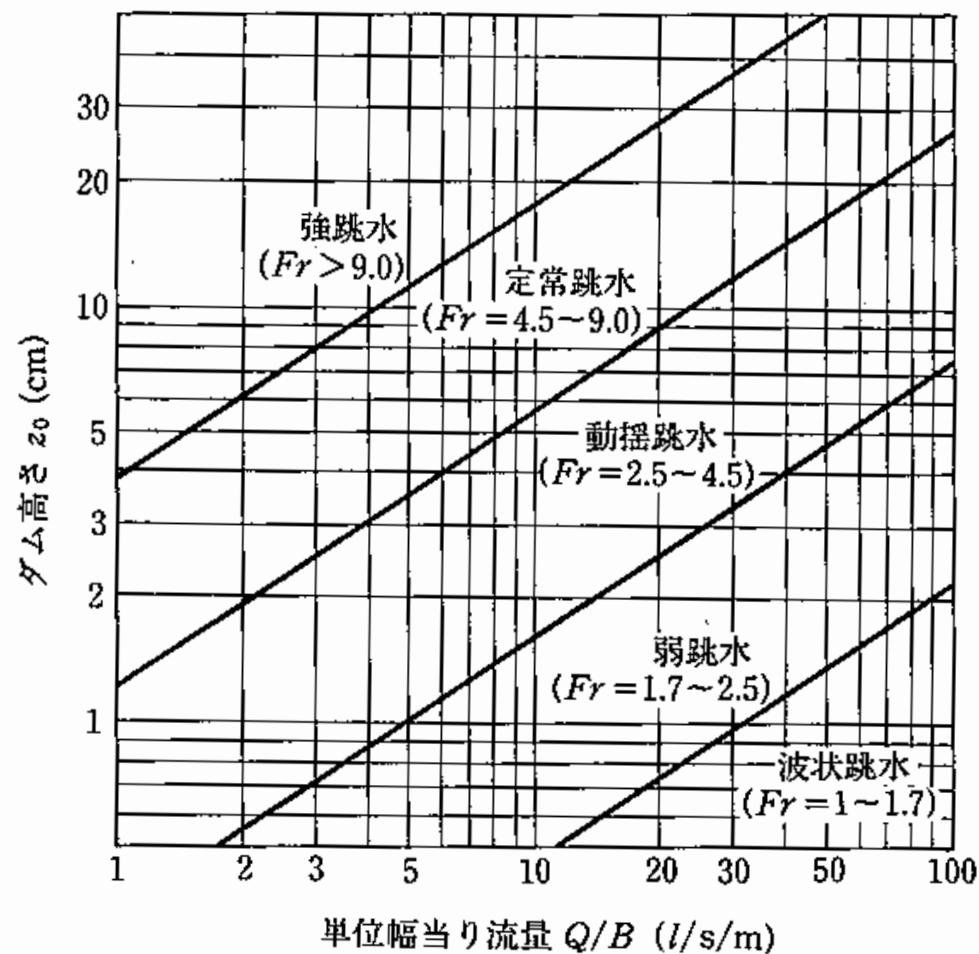


計測値した比エネルギーから算出する限界水深

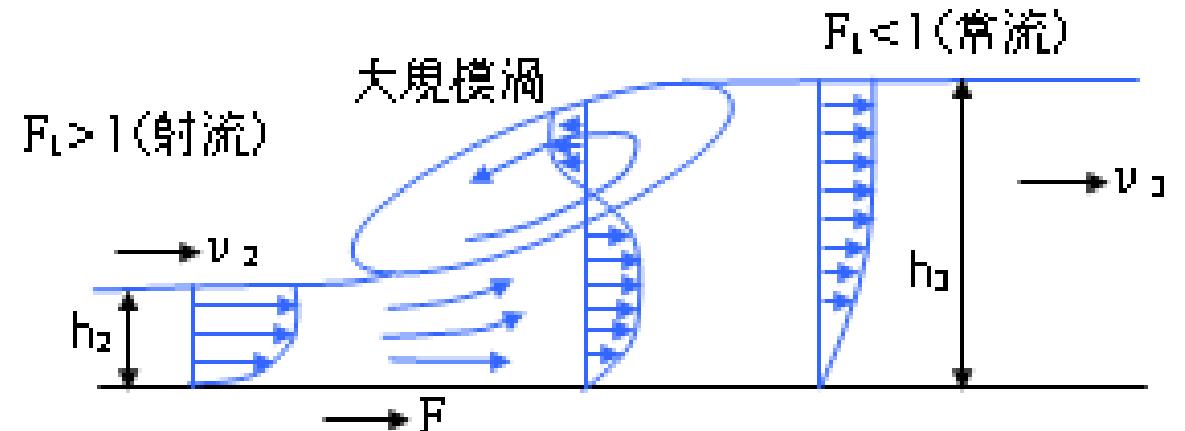
跳水現象の分類

跳水現象の分類

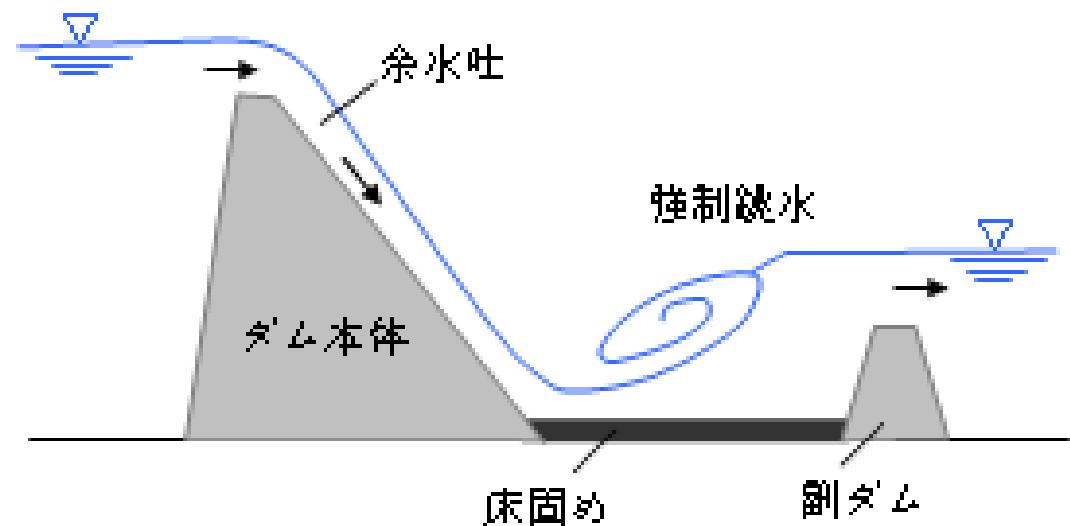
- 波状跳水(undular jump): フルード数 = 1~1.7で生じ、表面渦は形成させず、水面は波状となる
- 弱跳水(weak jump): = 1.7~2.5で跳水の表面に一連の小さい表面渦が形成される。
- 動揺跳水(oscillating jump): = 2.5~4.5で生じ、流入ジェットがあるときは水路床に沿い、場合によっては表面に沿うなど時間的に動揺して不安定である。
- 定常跳水(steady jump): = 4.5~9.0で生じ、跳水は安定し下流水面も比較的静穏である。
- 強跳水(strong jump): >9.0では跳水の内部の激しい渦のために、下流側に顕著な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



ダム高さと跳水の種類



水平床の跳水の現象

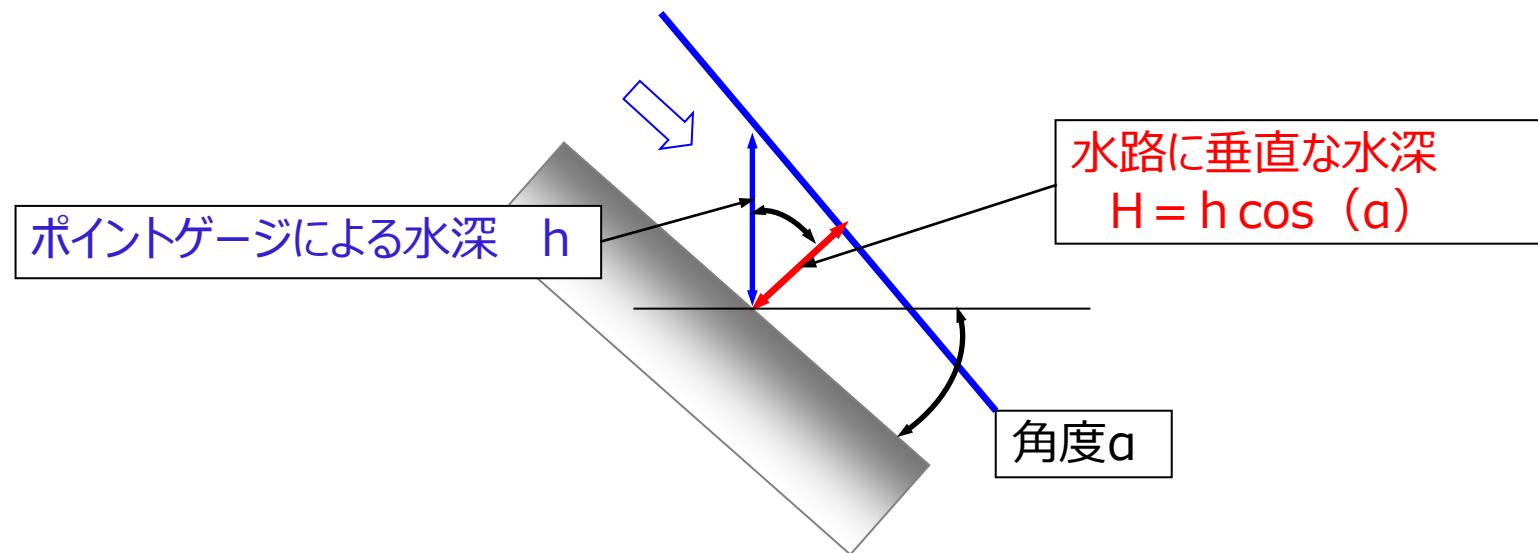


ダム下流の跳水の現象

水深の補正

➤ 水深の補正

- ・ポイントゲージによる水深の計測は鉛直方向の計測(図中の青)
- ・しかし、運動エネルギー（速度水頭）の算出に用いる水深は水路に垂直な方向の水深（図中の赤）
- ・そこで、斜面の勾配を計測して、ポイントゲージで計測した水深を補正する。



流速算出の水深

NO	距離	河床高	水深 (h)	角度	水深 (H)	水位	流速	速度水頭	全水頭
④	0.0	17.8	4.40	5.0	4.38	22.20	85.2	3.70	25.90
⑤	13.0	17.6	4.00	8.0	3.96	21.60	94.3	4.53	26.13
⑥	18.5	14	3.40	30.0	2.94	17.40	126.8	8.20	25.60
⑦	29.0	6	2.90	45.0	2.05	8.90	182.1	16.91	25.81
⑧	42.0	0.3	2.00	30.0	1.73	2.30	215.5	23.70	26.00

水位の算出の水深

計測結果の記録

水深の計測

- 計測地点の縦断位置、水路の河床高をスタッフを用いて計測する。
- ポイントゲージを用いて水深を計測する。
- 堰部の斜面では計測地点の水路の勾配も計測する。
- 今回は、中央部のみのデータで整理を行う。

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															

レポートの作成・提出について

- 計測結果の整理については、今回は実際に計測を行っていないが、これまでに計測されたデータを用いて、レポートの作成を行う。
- 授業資料、計測データ、提出用ファイルは、Scombにアップしているのでダウンロードする。授業の資料は随時アップするので、授業の前にチェックする。
- 提出は②のWordファイルを用いて作成し、Pdfファイルに変換してScombにて提出する。（Pdf化できなければWordファイルでの提出も可能）
 - ① 授業資料_跳水資料（テーマ2） Pdfファイル
 - ② 計測データ_跳水実験データ 班別のデータ Pdfファイル
 - ③ 提出用_跳水実験（テーマ2） Docファイル
- **レポートは、次の実験演習の1週間前までにメールで提出。内容に不備がある場合、再提出をメールで連絡する。（次のWEB授業でレポート内容の不備な個所について説明を行う）**
- 授業の内容、レポート作成で不明な点などの質問は**下記のメールアドレスへ問い合わせ。**

質問メール : **件名は「水理実験質問」**

メールには、実験名、班名、名前を明記し、質問の内容を分かりやすく記載。資料などを添付し、どこがわからないか、何を聞きたいかがわかるように。何を聞きたいのか不明なメールが多いので注意。

メールアドレス : **kenichirou.hamaguchi@tk.pacific.co.jp**

計測結果の整理

流速の計測

- ピトー管の計測位置は、堰下流部の水平床で水深を計測する地点と同じ位置で計測。
- ピトー管を用いて流速を計測する。

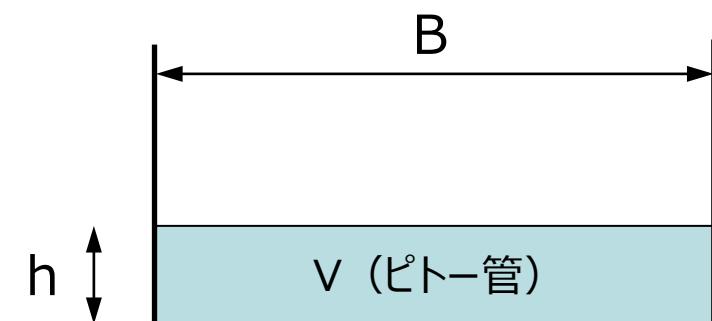
区間	No.	左岸部				中央部				右岸部			
		マンメーター		圧力差	流速	マンメーター		圧力差	流速	マンメーター		圧力差	流速
		静水圧	動水圧			静水圧	動水圧			静水圧	動水圧		
堰下流	⑨												
	⑩												
	⑪												
	⑫												
	⑬												

流量の算出

- 水深と流速から流量を算出する。

区間	No.	平均流速(V)	平均水深(h)	流量
堰下流	⑨			
	⑩			
	⑪			
	⑫			
	⑬			
断面流量		-	-	

$$Q = A \times V = B \times h \times V$$



計測結果の整理

計測地点の縦断距離水路高、計測水深にピトー管の流速から算出した流量Qを用いて、速度水頭、全水頭、比エネルギーを算出する。

計測データの入力

B:水路幅 15cm

		流量 :		5.6 リットル/s							
	NO	距離	河床高	水深 (h)	角度	水深 (H)	水位	流速	速度水頭	全水頭	比エネルギー
堰上流	①	-30.0	0	26.00	0.0	26.00	26.00	14.4	0.11	26.11	26.11
	②	-20.0	0	26.00	0.0	26.00	26.00	14.4	0.11	26.11	26.11
	③	-10.0	0	26.00	0.0	26.00	26.00	14.4	0.11	26.11	26.11
堰部	④	0.0	17.8	4.40	5.0	4.38	22.20	85.2	3.70	25.90	8.08
	⑤	13.0	17.6	4.00	8.0	3.96	21.60	94.3	4.53	26.13	8.49
	⑥	18.5	14	3.40	30.0	2.94	17.40	126.8	8.20	25.60	11.15
	⑦	29.0	6	2.90	45.0	2.05	8.90	182.1	16.91	25.81	18.96
	⑧	42.0	0.3	2.00	30.0	1.73	2.30	215.5	23.70	26.00	25.44
堰下流	⑨	60.0	0	1.80	0.0	1.80	1.80	207.4	21.95	23.75	23.75
	⑩	70.0	0	1.82	0.0	1.82	1.82	205.1	21.47	23.29	23.29
	⑪	80.0	0	1.86	0.0	1.86	1.86	200.7	20.55	22.41	22.41
	⑫	90.0	0	1.87	0.0	1.87	1.87	199.6	20.34	22.21	22.21
	⑬	100.0	0	1.88	0.0	1.88	1.88	198.6	20.12	22.00	22.00
跳水下流	⑭	140.0	0	11.50	0.0	11.50	11.50	32.5	0.54	12.04	12.04
	⑮	150.0	0	11.00	0.0	11.00	11.00	33.9	0.59	11.59	11.59
	⑯	160.0	0	11.40	0.0	11.40	11.40	32.7	0.55	11.95	11.95
	⑰	170.0	0	11.20	0.0	11.20	11.20	33.3	0.57	11.77	11.77
	⑱	180.0	0	11.30	0.0	11.30	11.30	33.0	0.56	11.86	11.86

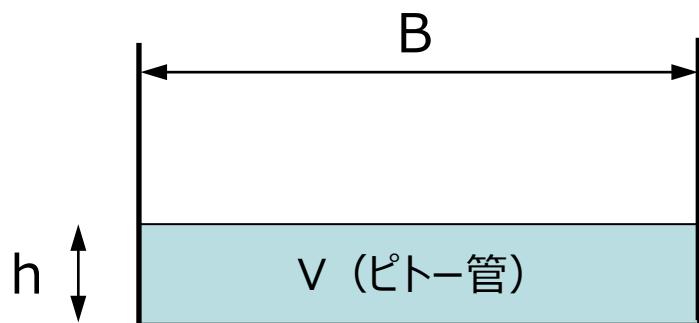


計測結果の整理

各手法で算出した流量を整理する。

	流量の算出方法	備考
Q1	ピトー管の流速と水深から算出した流量	計測断面で流量は変動している。結果は平均値を用いているが、変動幅があることを理解する。
Q2	実験の波紋から求めた限界水深として計測した水深を用いて流量を算出	限界水深の位置を波紋の状況から把握するのは難しい。長波が消えても、衝撃波や表層回転渦と呼ばれる別の波が形成されている。
Q3	比エネルギーのグラフから求めた限界水深を用いて流量を算出	比エネルギーのグラフから想定しているので、人により異なる可能性もある。

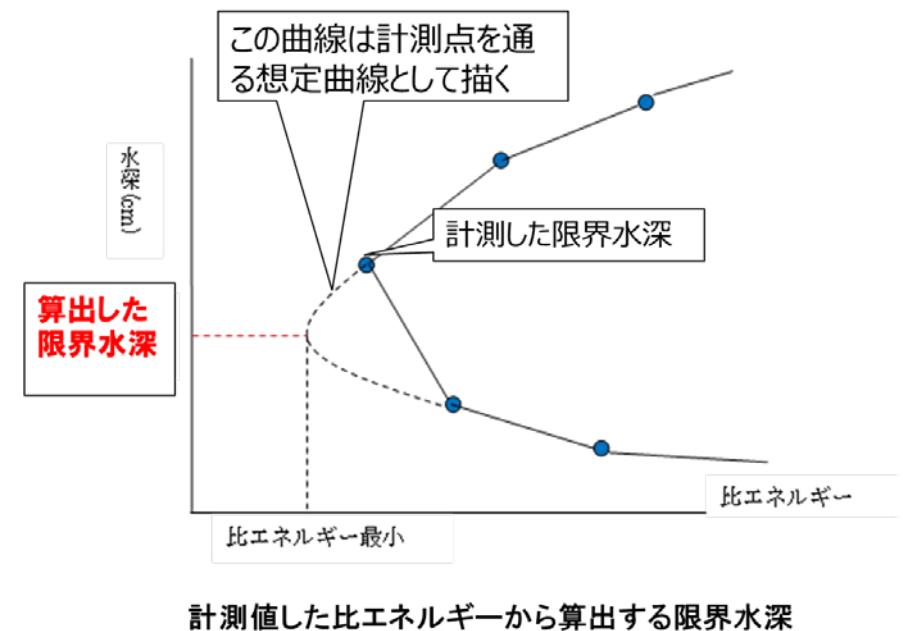
$$Q = A \times V = B \times h \times V$$



Q1の算出



Q2の算出

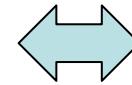


Q3の算出

考察（全水頭から流量を推定する）

□ Q1, Q2, Q3の流量による全水頭の縦断的な変化状況からから、適切な流量を想定する。

流量を大きくする ⇒ 流速が増加 ⇒ 全水頭が増大

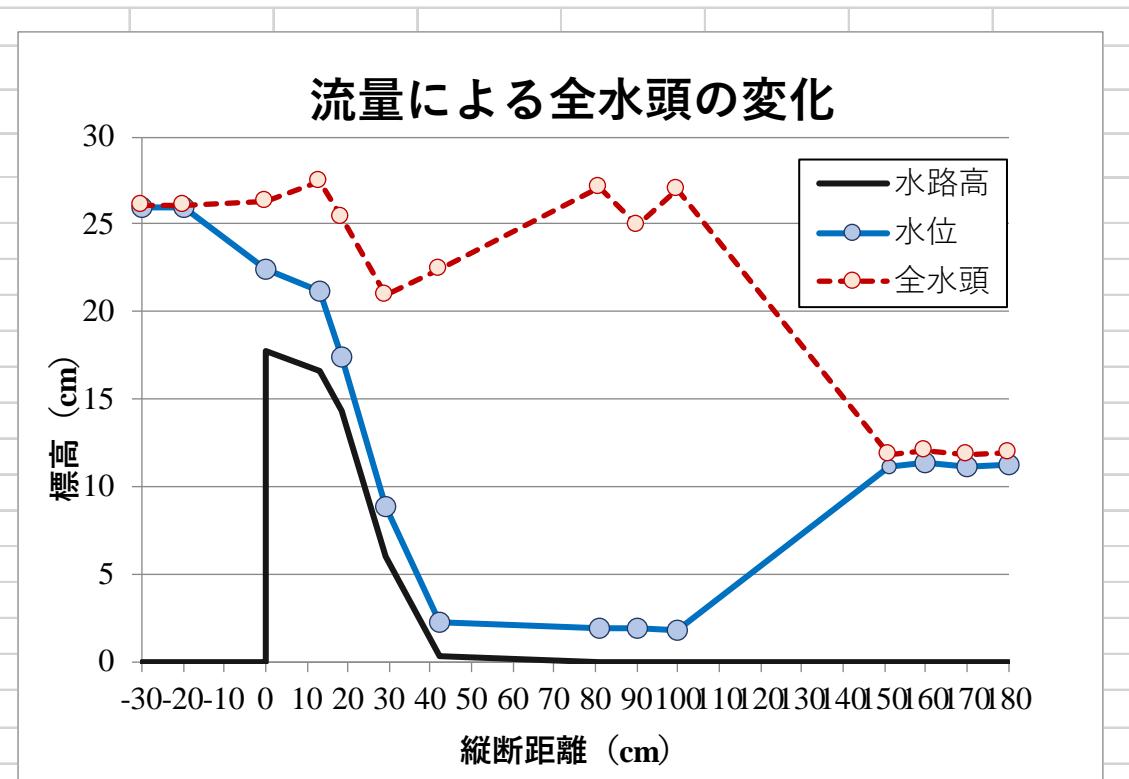


流量を小さくする ⇒ 流速が減少 ⇒ 流量が低減

適切な流量による全水頭の変化

- 跳水が生じるまでは摩擦による全水頭の現象は小さい
- 下流の全水頭は上流の全水頭を上回らない
- 跳水によりエネルギーは減少し、全水頭が急激に低下

流量Q	6 L/s							
		mm→cm ³ 乗						
縦断距離	河床高	水深 h	水深 H	水位 河床高+h	流速V m/s	速度水頭 V ² /2g	全水頭 水位+速度水頭	エネルギー
-30	0	26	26	26	15.4	0.12	26.12	26.12
-20	0	26	26	26	15.4	0.12	26.12	26.12
0	17.8	4.6	4.6	22.4	87.0	3.86	26.26	8.46
13	17.6	3.6	3.6	21.2	111.1	6.30	27.50	9.90
18.5	14	3.4	3.2	17.4	125.0	7.97	25.37	11.17
29	6	2.84	2.6	8.84	153.8	12.08	20.92	14.68
42	0.3	1.95	2.01	2.25	199.0	20.21	22.46	22.22
81	0	1.88	1.8	1.88	222.2	25.20	27.08	27.00
90	0	1.88	1.88	1.88	212.8	23.10	24.98	24.98
100	0	1.8	1.8	1.8	222.2	25.20	27.00	27.00
151	0	11.2	11.2	11.2	35.7	0.65	11.85	11.85
160	0	11.4	11.4	11.4	35.1	0.63	12.03	12.03
170	0	11.2	11.2	11.2	35.7	0.65	11.85	11.85
180	0	11.3	11.3	11.3	35.4	0.64	11.94	11.94



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

- ・結果を整理し、各流量によるエネルギー縦断図を作成する。
- ・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。
- ・推定流量に決めるに至った過程、その根拠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、ここに考察する。

2. 跳水現象(実験での跳水の分類を示す)

- ・跳水現象のフルード数の分類から今回の実験の跳水を分類する。
- ・ダム高と跳水の種類を図に今回の実験をプロットして評価する。

3. 下記の用語について調べる

(資料のコピペではなく、今回のテーマに即した内容を記載する)

- フルード数
- 運動量保存の法則
- 比エネルギー
- 共役水深