

水理実験演習資料

(土木実験Ⅰ、Ⅱ)

2019年度版

芝浦工業大学 土木工学科

目 次

1. 計測機器の使用法	-----	1-1
2. 管水路摩擦損失等計測実験 (テーマ 1)	-----	2-1
3. 跳水現象計測実験 (テーマ 2)	-----	3-1
4. 開水路橋脚洗掘実験 (テーマ 3)	-----	4-1
5. 層流と乱流実験 (テーマ 4)	-----	5-1
6. 湾曲水路洗掘実験 (テーマ 5)	-----	6-1
7. 開水路水理現象把握実験 (テーマ 6)	-----	7-1

1. 計測機器の使用法

1-1. 水位計測

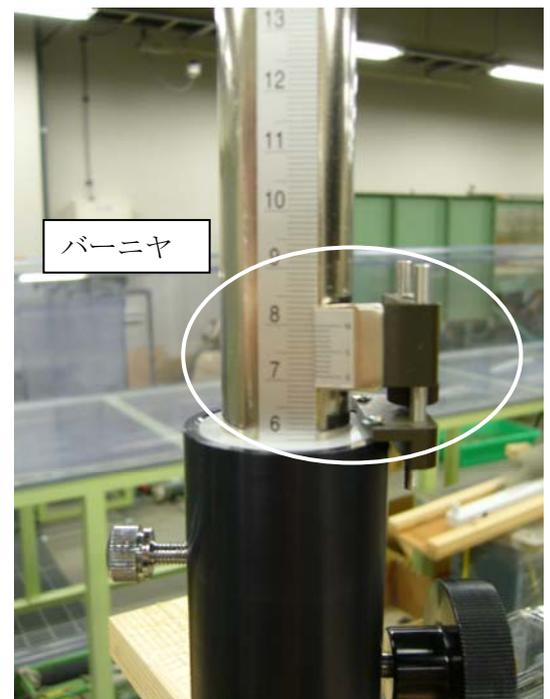
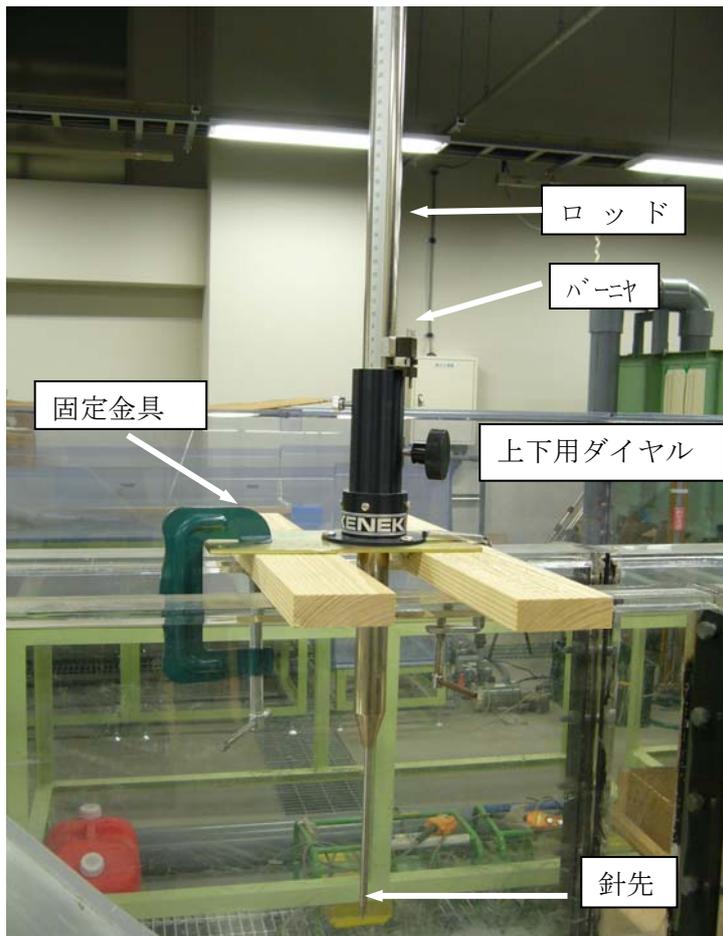
① ポイントゲージ

ポイントゲージの針先を河床に合わせ目盛りを読むことで河床高を測り、次に水面に針先を合わせることで水面の高さを測り、その差分から水深を計測する機器。

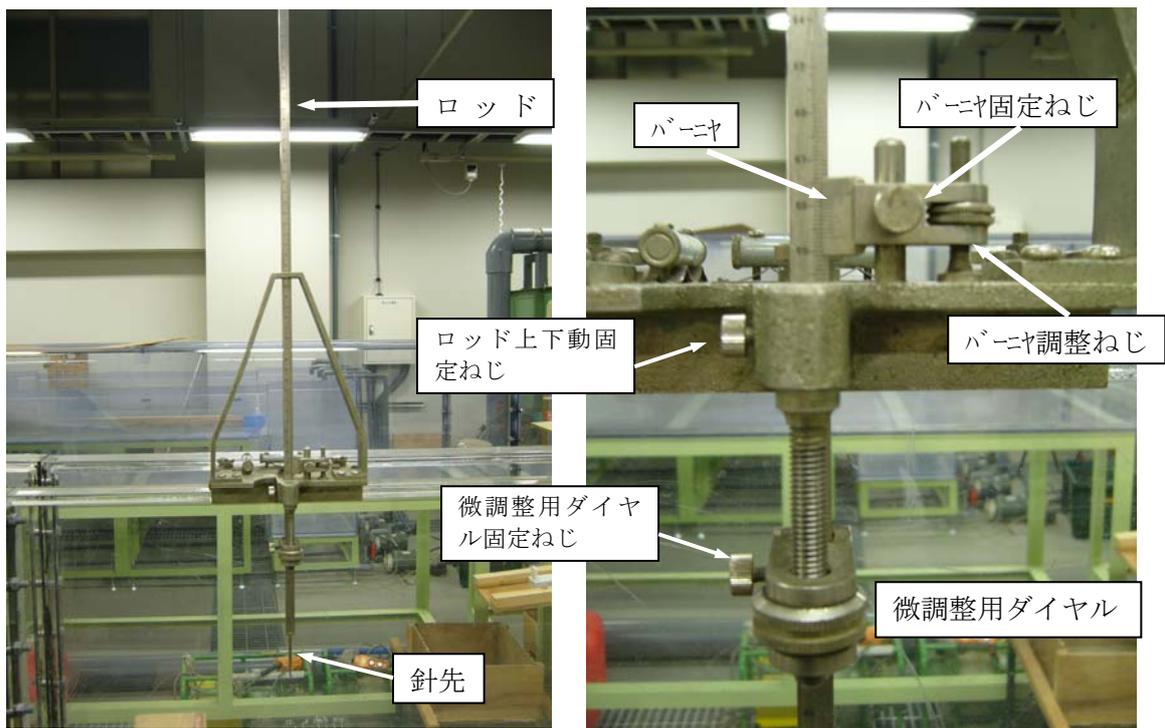
水面の高さは、水表面の表面張力の影響を考慮して4：6程度で水面に接している高さに針先を調整する。

ロッドに示される目盛りで mm 単位、バーニヤを用いて 1/10mm 精度で計測可能。

(タイプー1)

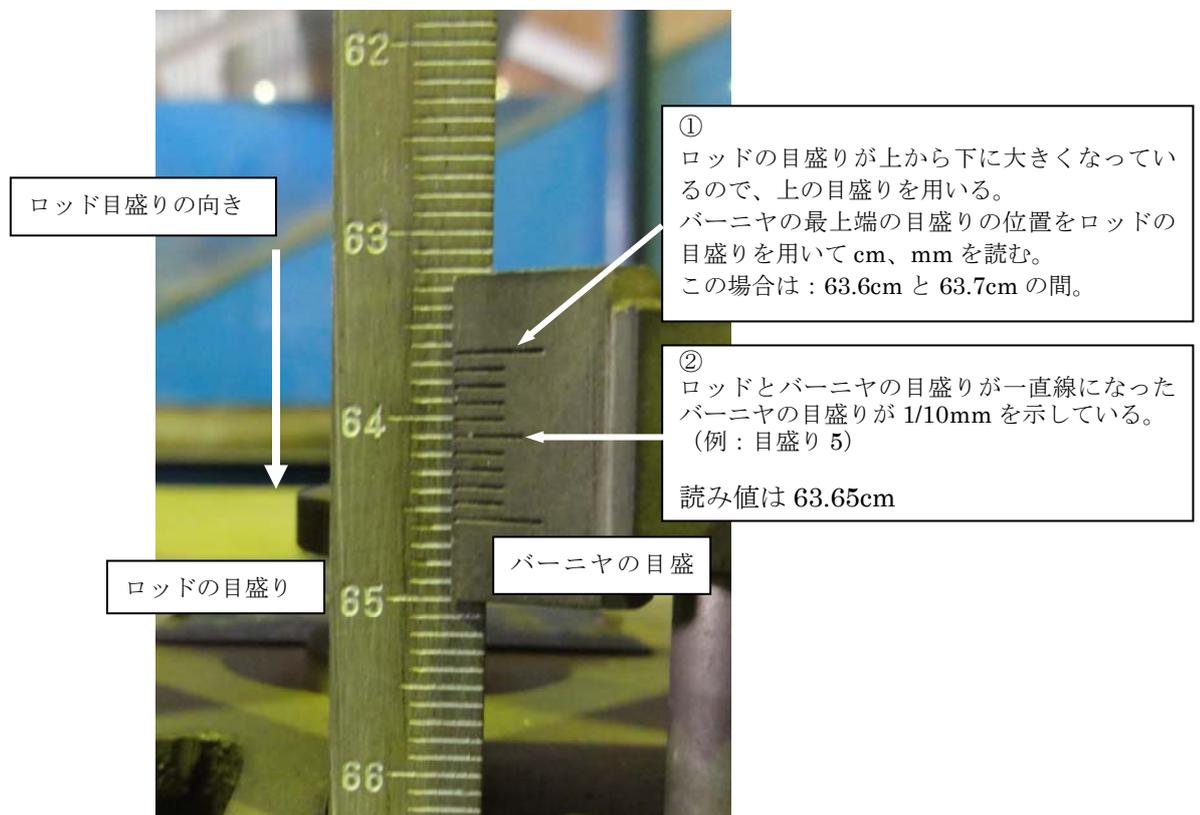


タイプ-2 (土研式ポイントゲージ)



【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
- ・ タイプ-1 とタイプ-2 では目盛りの向きが異なる。
- ・ バーニヤは目盛りはロッドの目盛りの小さい方がバーニヤの0点

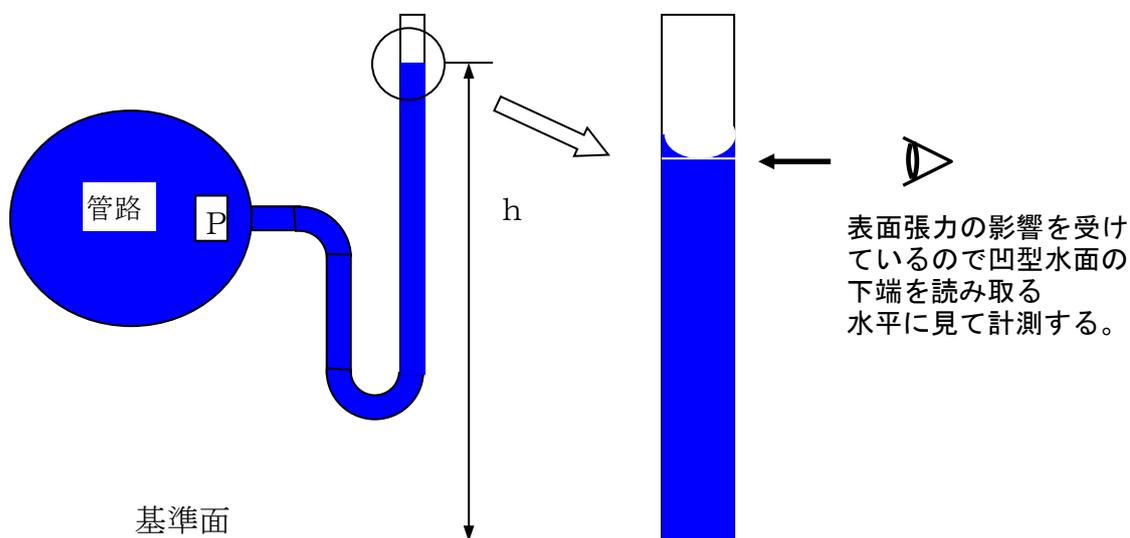


ロッドについている目盛りの向きに注意して読み取る。

② マノメーター

マノメーターは、水路底部・側壁に設置した小口径のパイプによりその地点の圧力水頭を計測する装置。圧力水頭（水位）の計測は一般的には透明パイプの水面高をメジャーを用いてその値を読むことでその地点の圧力水頭を計測する。

マノメータは開水路における水位計測にも用いられるが、ポイントゲージなどを用いることができない管水路において用いられることが多い。



マノメーターの原理

1-2. 流速計

① 電磁流速計

ロッドの先端の感知部（プローブ）に形成されている電磁界が流れによりひずみことで生じる電流を計測することで流速に換算する流速計。

可動部が無いので操作性に優れているが、高価である。

計測する指向性が定まっているので、計測時ロッドの向きを注意して設置することが必要。

流速は変動が大きいので、3回計測してその平均値を用いて算出。



センサー部（ロッドの先）は非常にデリケートで高価なので、機器を取り扱うときは十分注意する事。

【電磁流速計の原理】

ファラデーの電磁誘導の法則を活用して計測

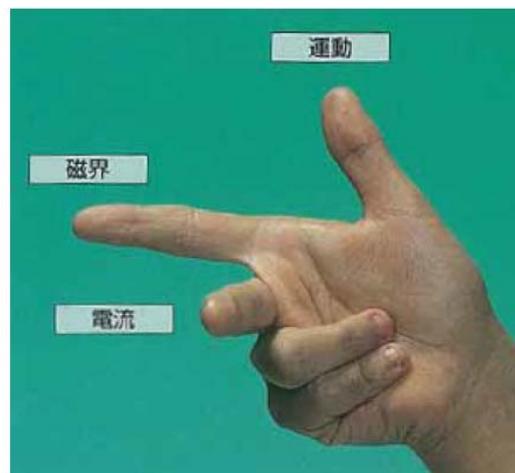
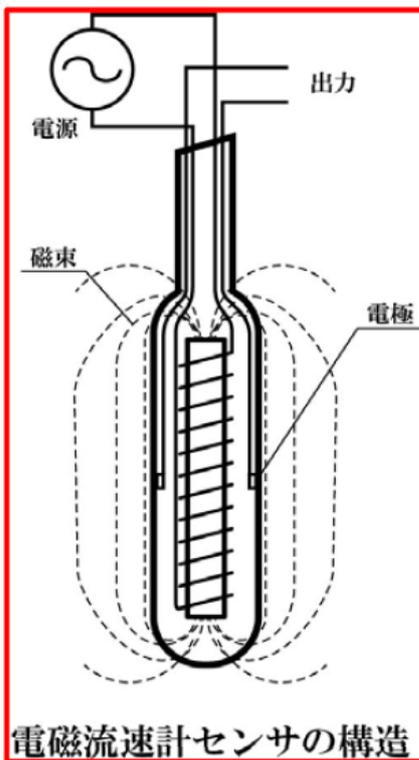
「磁界を電導体が横切って運動する時、その電導体には電圧が発生し電流が流れる」



電導体である水が流れている時、電磁流速計が作る磁界を水が横切ると、その流体には流速に応じた起電力が発生し、その起電力の大きさと流速は直線関係がある。



電磁流速計は先端のプロープ内に良導磁性体のコアを中心にコイルを巻き、発生した磁界の磁束が流体内を通ることで電圧が電極部に誘起され、その電圧を計測することで流速を計測している。



フレミングの右手の法則

② ピトー管

ピトー管による流速測定は、他の方法に比べ可動部がないことから取り扱いが容易なことから、水力発電所の流量測定、送風機の風量測定など高流速の計測に広く採用されている。

図の点①と点②の圧力、流速をそれぞれ、 P_1 、 P_2 、 V_1 、 V_2 とすれば、Beroulli の定理から、

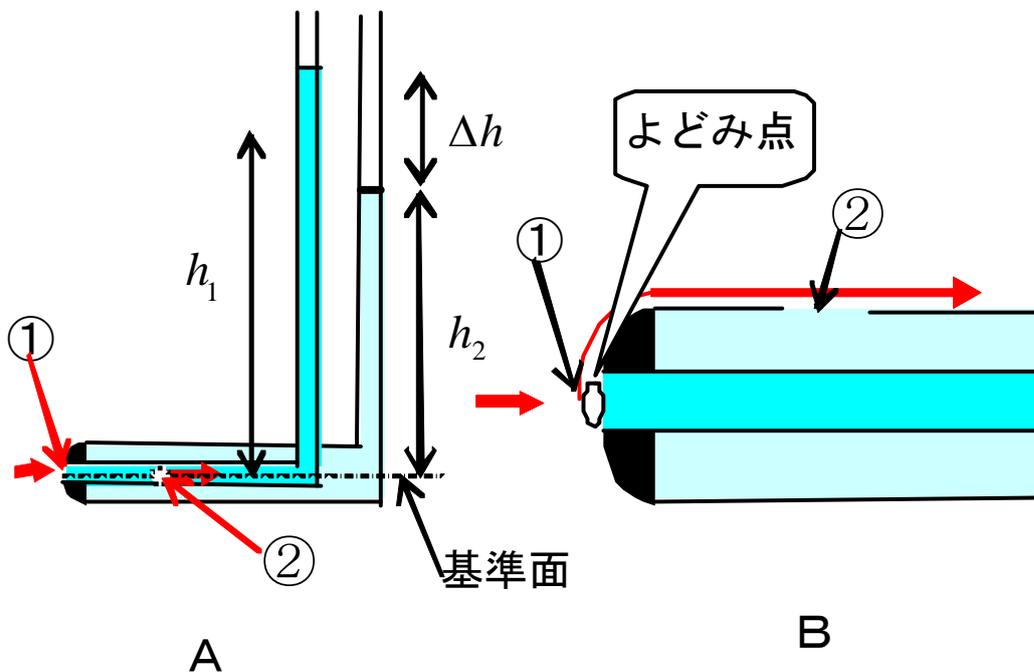
$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{w} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{w} \dots\dots\dots (1)$$

ピトー管を流れに対し正対して設置する。①の地点ではピトー管を設置した水深による静水圧と流れの流速エネルギーによる動圧を合わせた全圧が作用する。①の地点では流速 V_1 は0であり、よどみ点と呼ばれている。②の点では流れの影響を受けないため水深に応じた静水圧を受ける。

そこで、(1)式を変形すると(2)式となり、

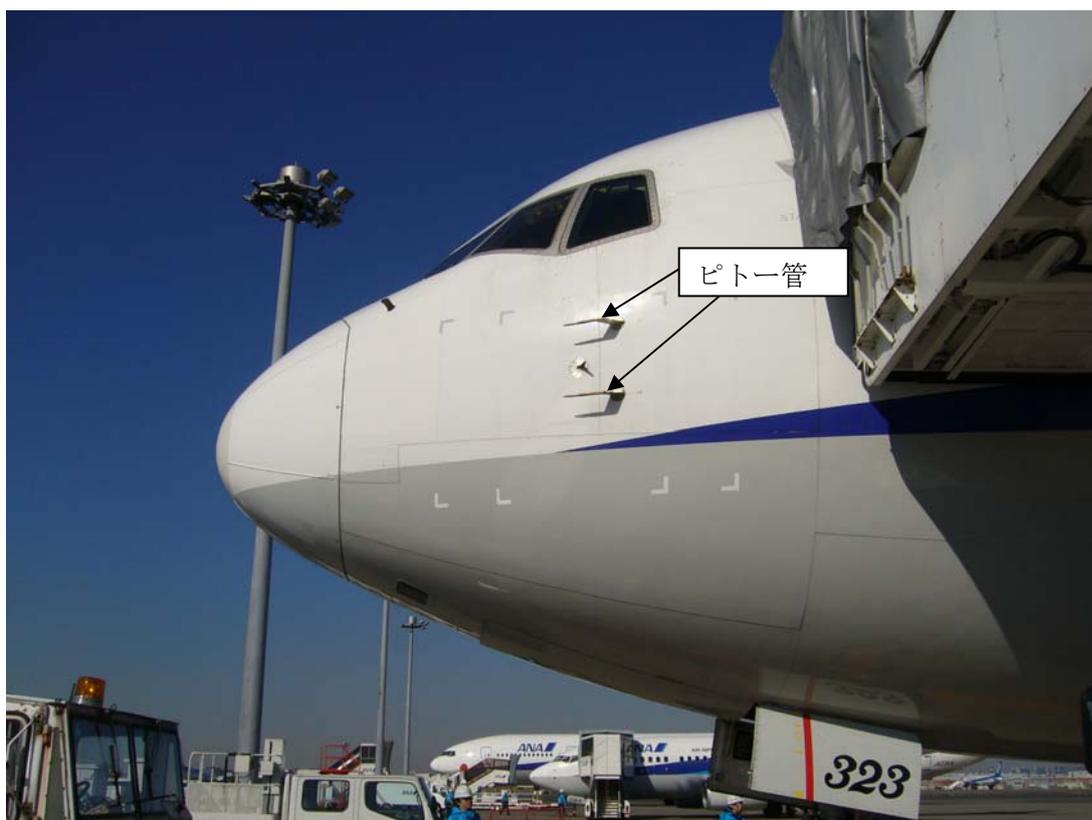
$$\frac{v_2^2}{2g} = \frac{p_1}{w} - \frac{p_2}{w} = \Delta h \quad v = \sqrt{2 \times g \times \Delta h} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式によりピトー管の水位差を計測することで、ピトー管設置位置の流速を計測する事が可能となる。



【ピトー管の実際の使用例】

- 飛行機の実速度計測の例



1-3. 流量測定

流量の測定方法は種々の方法があるが、実験演習では下記の方式により計測を行う。

- ① 流量測定堰
- ② ベンチュリーメータ
- ③ パケツで計る

① 流量測定堰

堰を越流する流れが限界水深を発生する事から水深により流量が 1 義的に定まることから、堰上流部の水深を測ることで越流量を測定する装置。水理実験での流量測定では、適応範囲が広いことから一般的に堰による流量測定が行われる。

切り欠き形により、全幅堰、四角堰、三角堰がある。(流量規模)

越流水深 h を計測し、下式(1)、(2)を用いて越流量を算定する。

演習では、刃形の上にポイントゲージを設置し、刃形の高さを読みとった後、ポイントゲージを移動して水位面の高さを読み取り、越流水深を計測して流量を換算する。

【四角せき (右図参照)】

●板谷・手島の式

$$Q = Cbh^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$C = 1.785 + \frac{0.00295}{h} + 0.237 \frac{h}{W} - 0.428 \sqrt{\frac{(B-b)h}{BW}} + 0.034 \sqrt{\frac{B}{W}}$$

..... (2)

ここに、 Q :越流量(m^3/s)、 b :切欠きの幅(m)、 h :越流水深(m)、 C :流量係数($m^{1/2}/8$)、 W :水路底面よりせき縁までの高さ(m)、 B :水路の幅(m)

単位がmであることを注意。

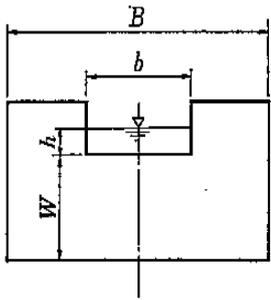


図 1.2 四角せき

【解説】 四角せきを越流する流れは側方および下方の三方向で収縮するため、流量係数は b/B および $h/(h+W)$ の影響を受ける。沖は b/B および $h/(h+W)$ の小さな完全収縮の場合を対象とした式を提案している。式 (1.2.a) は 1951 年に板谷・手島が Rehbock の全幅せきの流量式を基に提案したもので、JIS B8302 に採用されている。この式は b/B が比較的大きな不完全収縮を対象としており、適用範囲は、 $0.5m \leq B \leq 6.3m$ 、 $0.15m \leq b \leq 5m$ 、 $0.15m \leq W \leq 3.5m$ 、 $bW/B^2 \geq 0.06$ 、 $0.03m \leq h \leq 0.45 \sqrt{b} m$ である。

堰の参考寸法は図の記号を用いて表に示すとおりである。

表 四角せきの参考寸法

B(m)	B(m)	H(m)	Q(l/s)	L ₁ (m)	L ₃ (m)	L ₂ (m)	L(m)	W(m)	P ₁ (m)	P ₂ (m)
0.36	0.90	0.030~0.227	4~92	≥1.71	0.54	≥1.44	≥3.69	0.20	0.50	0.60
0.48	1.20	0.030~0.312	5~150	≥2.41	0.63	≥1.83	≥4.60	0.25	0.60	0.75

越流水深は図 1.8 に示すように、水路の側壁に設けた小孔によって連通しているウェル内の水位により測定する。水深による流量測定誤差を±1.0%とするため、全幅せきおよび四角せきでは越流水深の1/150、三角せきでは1/250以上の測定精度を持つ水面測定器を用いる。また、せきを越えて流下する水脈が、せき板の外面に付着しないよう留意する。特に全幅せきの場合、水脈の下側に通気が十分行われるよう配慮する。

(水理公式集 (土木学会))

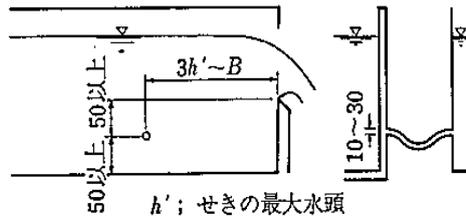
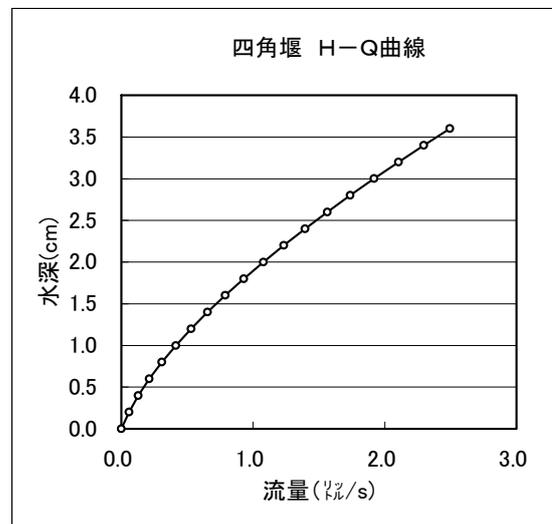


図 1.8 越流水深の測定方法 (mm 単位)

四角堰の水深－流量関係図

水路幅 B 0.45 m
 切欠幅 b 0.20 m
 堰高 W 0.20 m

水深(m)	係数	流量 (ℓ/s)	水深(cm)
0.000		0.00	0.0
0.002	3.281	0.06	0.2
0.004	2.533	0.13	0.4
0.006	2.280	0.21	0.6
0.008	2.150	0.31	0.8
0.010	2.072	0.41	1.0
0.012	2.018	0.53	1.2
0.014	1.979	0.66	1.4
0.016	1.949	0.79	1.6
0.018	1.926	0.93	1.8
0.020	1.906	1.08	2.0
0.022	1.890	1.23	2.2
0.024	1.877	1.40	2.4
0.026	1.865	1.56	2.6
0.028	1.855	1.74	2.8
0.030	1.846	1.92	3.0
0.032	1.839	2.10	3.2
0.034	1.832	2.30	3.4
0.036	1.825	2.49	3.6



② ベンチュリーメータ

開水路橋脚洗掘実験の直線水路の下部に設置されている給水管に取り付けられている装置。管路流れにベルヌーイの定理を適用して、2点の水頭差から流量を算出する装置。

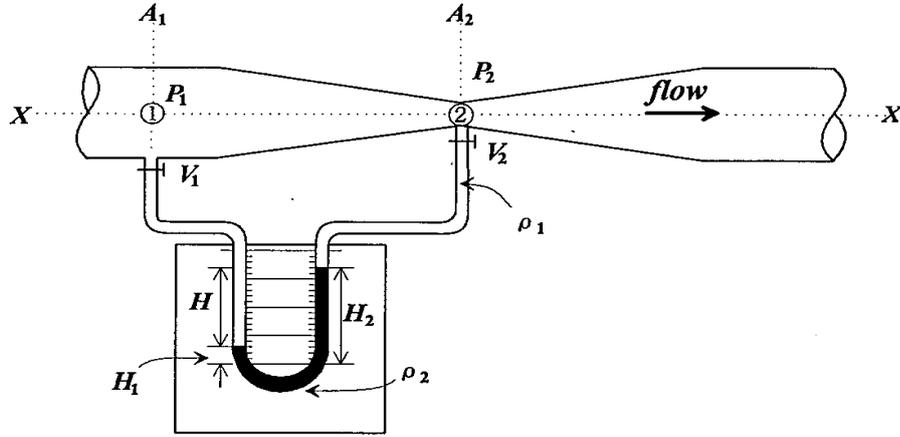


Figure 3-3 ベンチュリー模型

(3-12)と(3-13)式より

$$Q = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho_1 g}} \sqrt{P_1 - P_2} \quad (3-14)$$

(3-14)式は理論式である。実際には管路内の摩擦損失、流速分布などによって変化するので、これらを加味して流出係数を加えた。

$$Q = \mu \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho_1 g}} \sqrt{P_1 - P_2} \quad (3-15)$$

ここでは実験に用いるベンチュリー管について述べる。ベンチュリー管は測定管路内に絞り機構を挿入したもので、その上流側と下流側とは J.I.S.Z8762 と 8763 で形状、寸法、取り扱い方法が規定されている。企画と相似であり使用条件が同一であれば、実験によって流量が求められる。断面①と②にベルヌーイの定理を用いる。①、②断面での諸量に添字 1、2 を付す。尚 ρ_1 は水、 ρ_2 は水銀での密度であり、X-X は水平と考える。

Bernoulli の式は、

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3-12)$$

連立方程式は

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (3-13)$$

ただし、 $\frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{\frac{2g}{\rho_1 g}}$

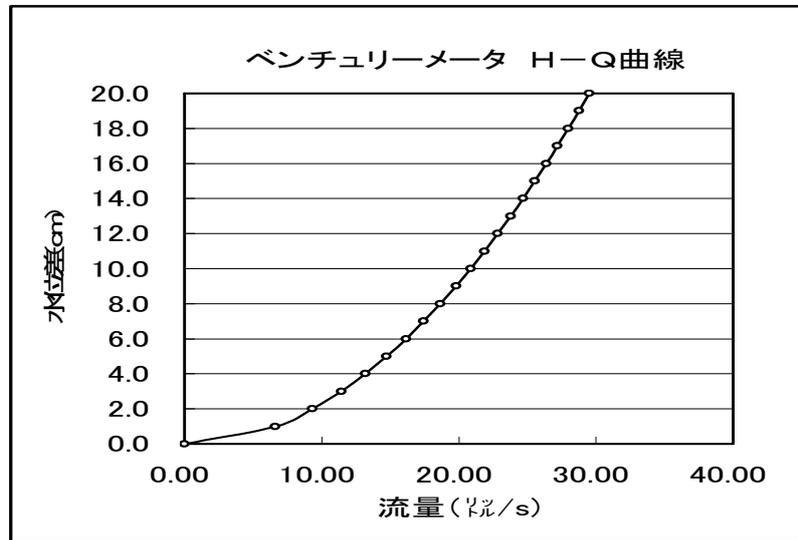
は、絞り機構の、流体の密度によって決定される定数であるので、流量は差圧 $P_1 - P_2$ の関数である。
 Fig.3-3 のようにマンメータに水銀を用いると $P_1 - P_2 = p_2 g H - p_1 g H$ であるので、(3-15)式は

$$Q = \mu \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2gH \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)} \quad (3-16)$$

但し、 μ : 定数 (0.95~1.00)、 $D_1=150\text{mm}$ 、 $D_2=73\text{mm}$ 、 $p_2/p_1=13.6$ 、 g : 重力加速度

μ	0.9744		
D1(cm)	15.0	A1	176.7146
D2(cm)	7.3	A2	41.85387
k	6596.629		

$\Delta h(\text{cm})$	流量 Q
0.0	0.00
1.0	6.60
2.0	9.33
3.0	11.43
4.0	13.19
5.0	14.75
6.0	16.16
7.0	17.45
8.0	18.66
9.0	19.79
10.0	20.86
11.0	21.88
12.0	22.85
13.0	23.78
14.0	24.68
15.0	25.55
16.0	26.39
17.0	27.20
18.0	27.99
19.0	28.75
20.0	29.50



ベンチュリーメータのH-Q曲線

③ バケツで計る

流量を計測する装置を用いずに、直接落下する水をバケツで一定時間受け、その容量を計測することで流量（単位時間あたりの流量）を計測する方法。

少量の流量計測では精度が最も良い。

使用する設備 : バケツ、ストップウォッチ、メスシリンダー

【計測上の注意点】

- ・ 流量を受ける時間が短いと流量計測の精度は悪い。
- ・ 流れてくる水を全てバケツで受け止めることが必要。
- ・ バケツで受ける始めと終わりの処理により精度が影響される。
- ・ 最低3回計測を行い、その平均値で流量を算出する。平均値と計測値の差（偏差）が5%以上の場合は再度計測し、5%以内の計測値で平均値を算出する。