

水理実験演習 演習資料

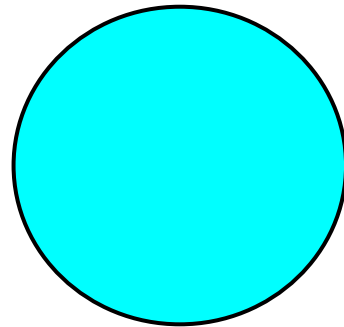
テーマ-1

管水路摩擦損失計測等実験

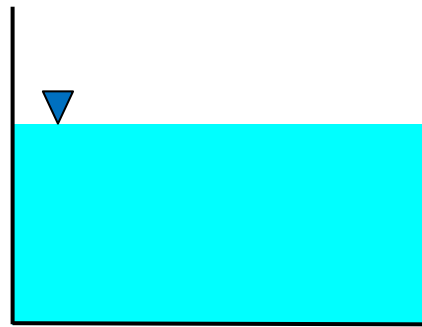
管路実験の目的と内容

管路流れとは？

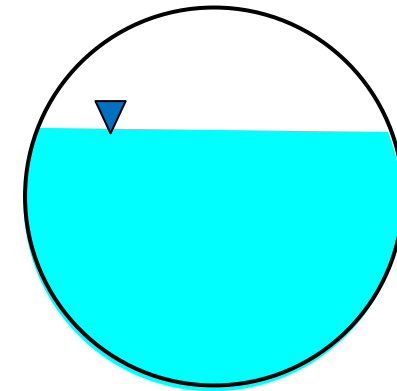
- 開水路流れのように水面（自由水面）を有しない流れのこと。
- 水路が円管の流れではない。



管路流れ



開水路流れ



実験の目的

- 管水路で生じる損失発生状況を計測することで、ベルヌーイの定理によるエネルギー損失について理解する。
- 管路の流れの形成に作用する大気圧について理解する。
- 管水路の流れのレイノルズ数の違いによる損失水頭の違いを理解する。
- ベルヌーイの定理から摩擦損失水頭について理解する。
- ベルヌーイの定理から屈曲部、急縮・急拡の損失水頭について理解する。

管路実験の目的と内容

管路流れ: 水面がない流れ

水管橋の例



川の対岸へ水を導水する施設
地盤高より高いところを導水できる

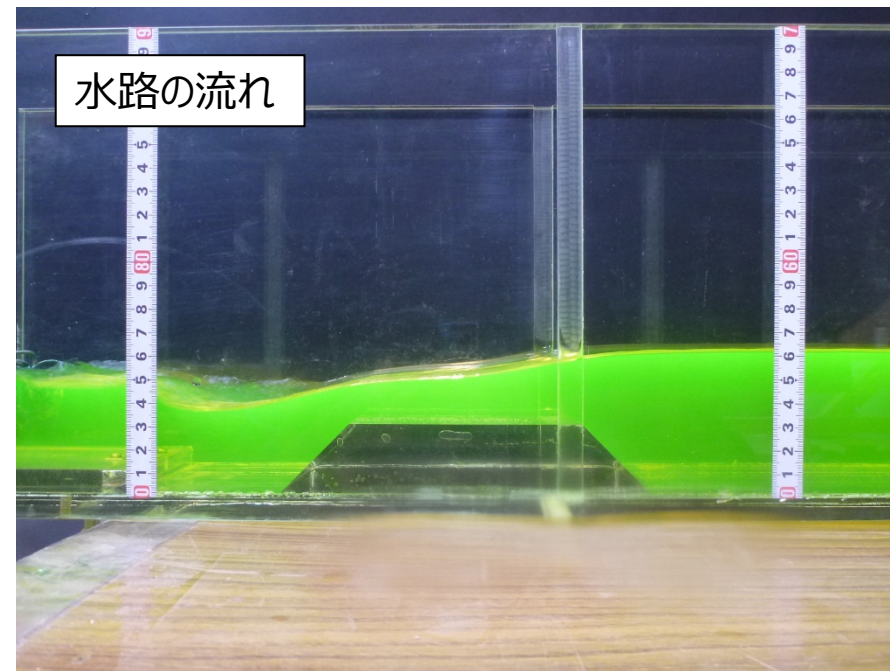


開水路流れ: 自由水面を有する流れ

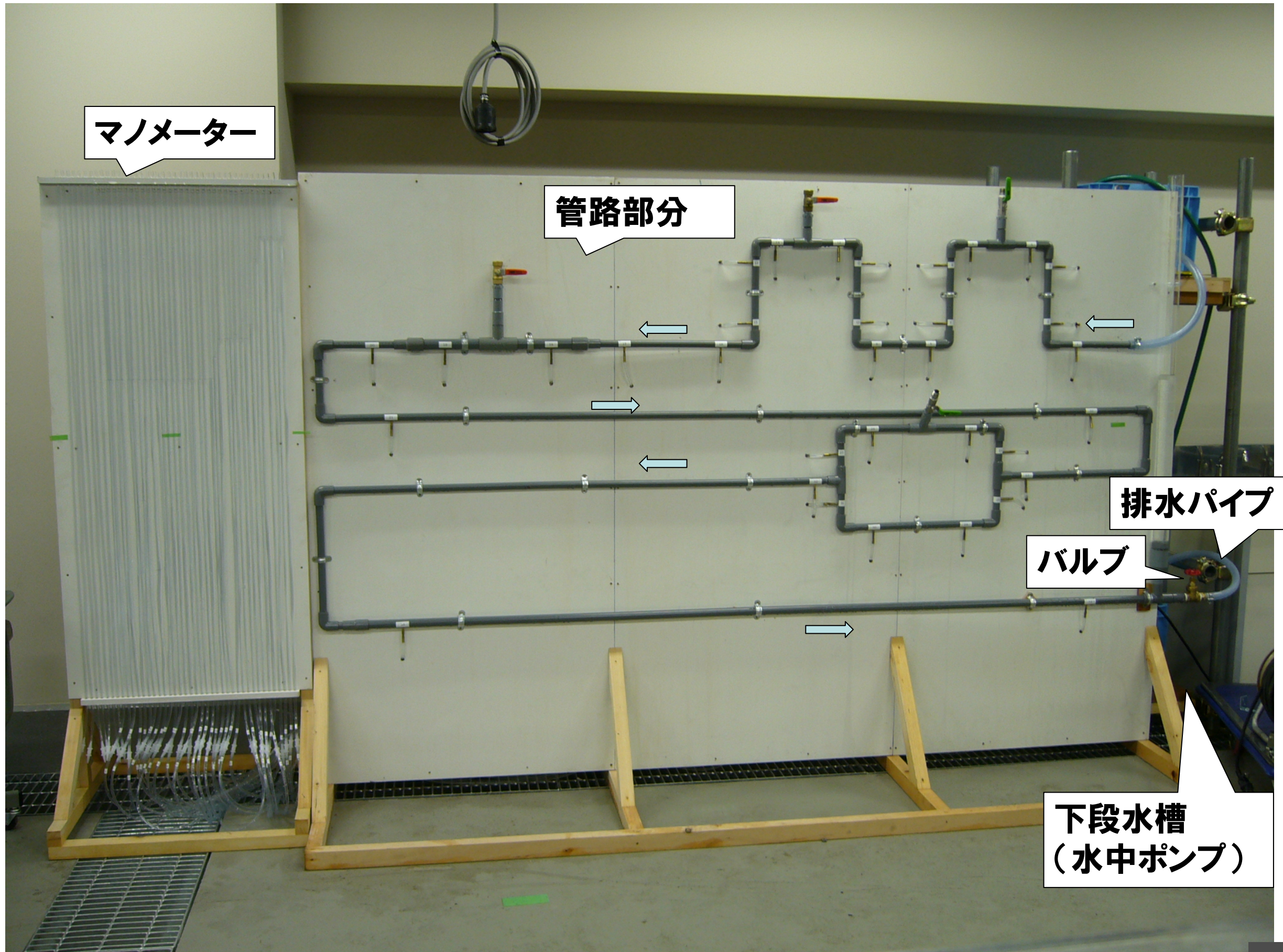
洪水時の流れ



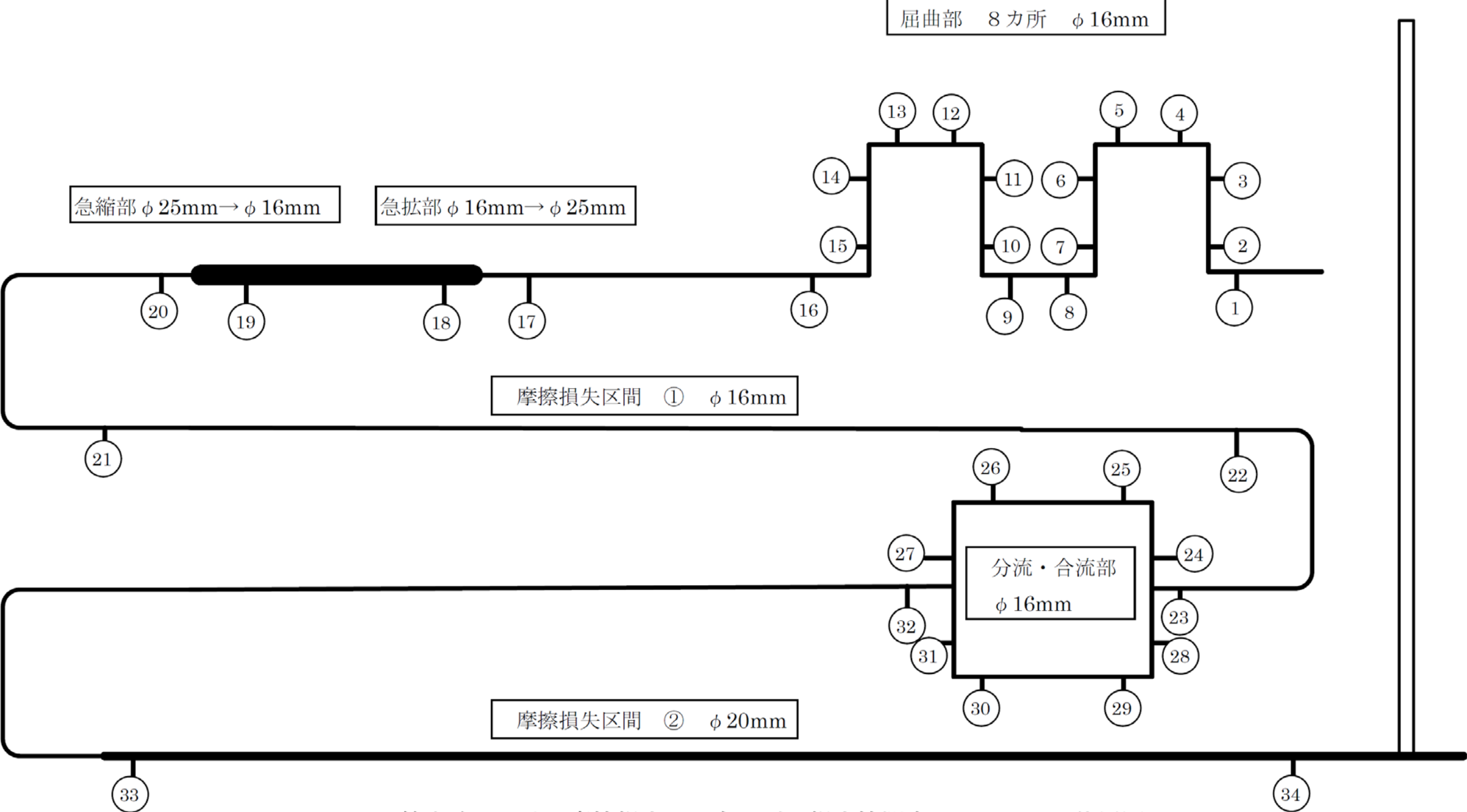
水路の流れ



管路実験模型



管路実験模型

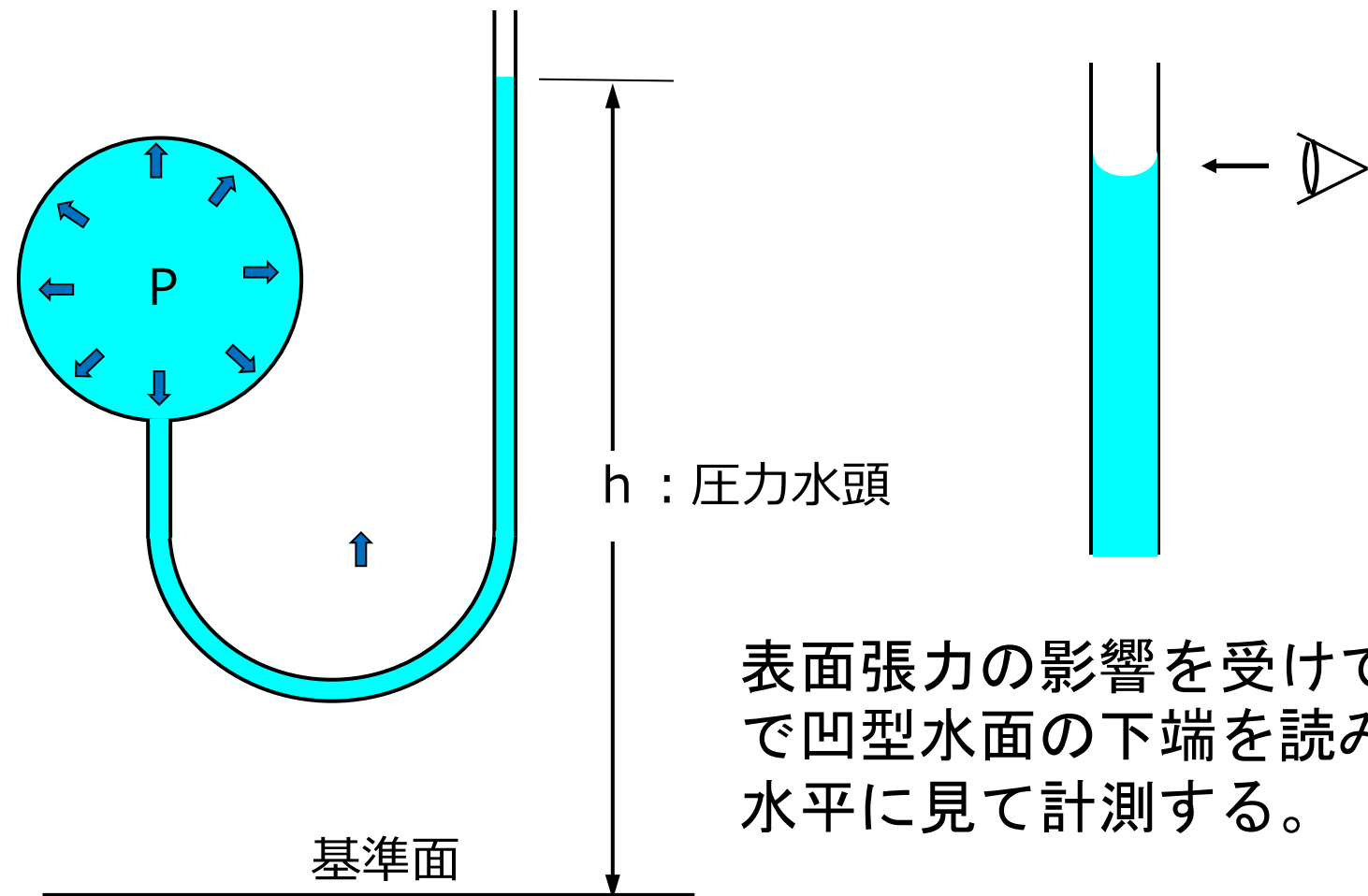
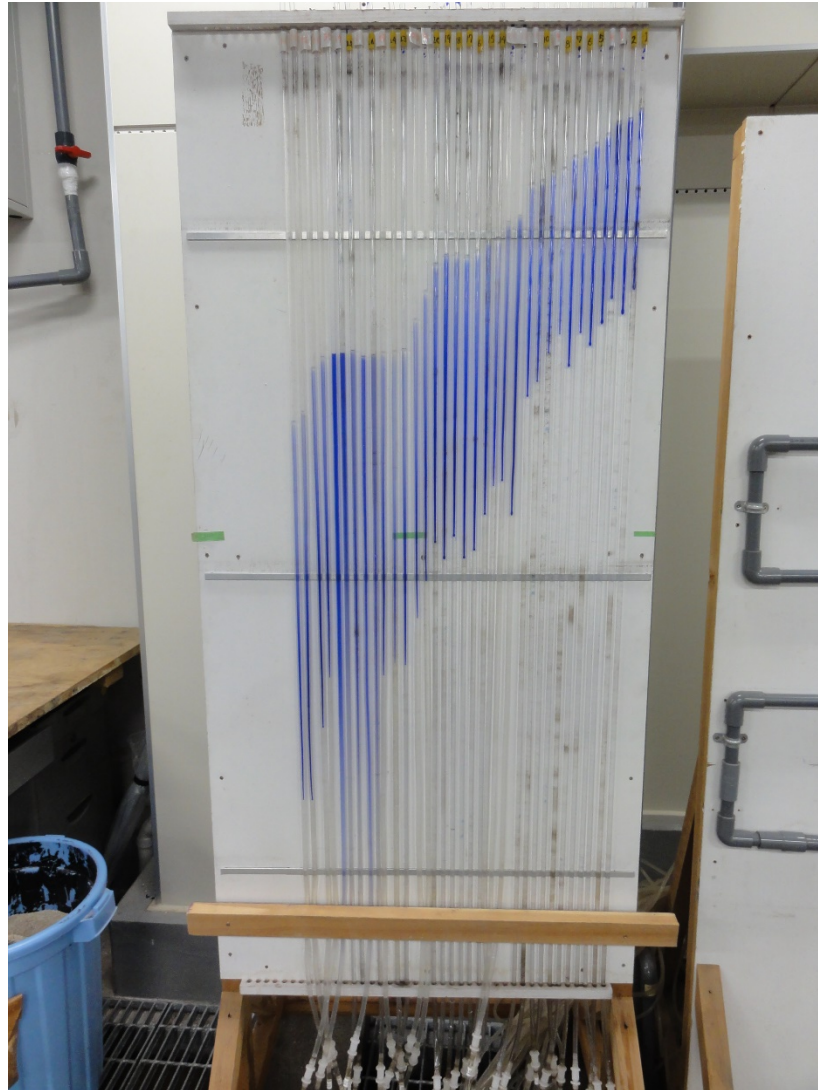


管水路における摩擦損失、エネルギー損失測定 マノメータ位置図

○はマノメータ設置位置、番号

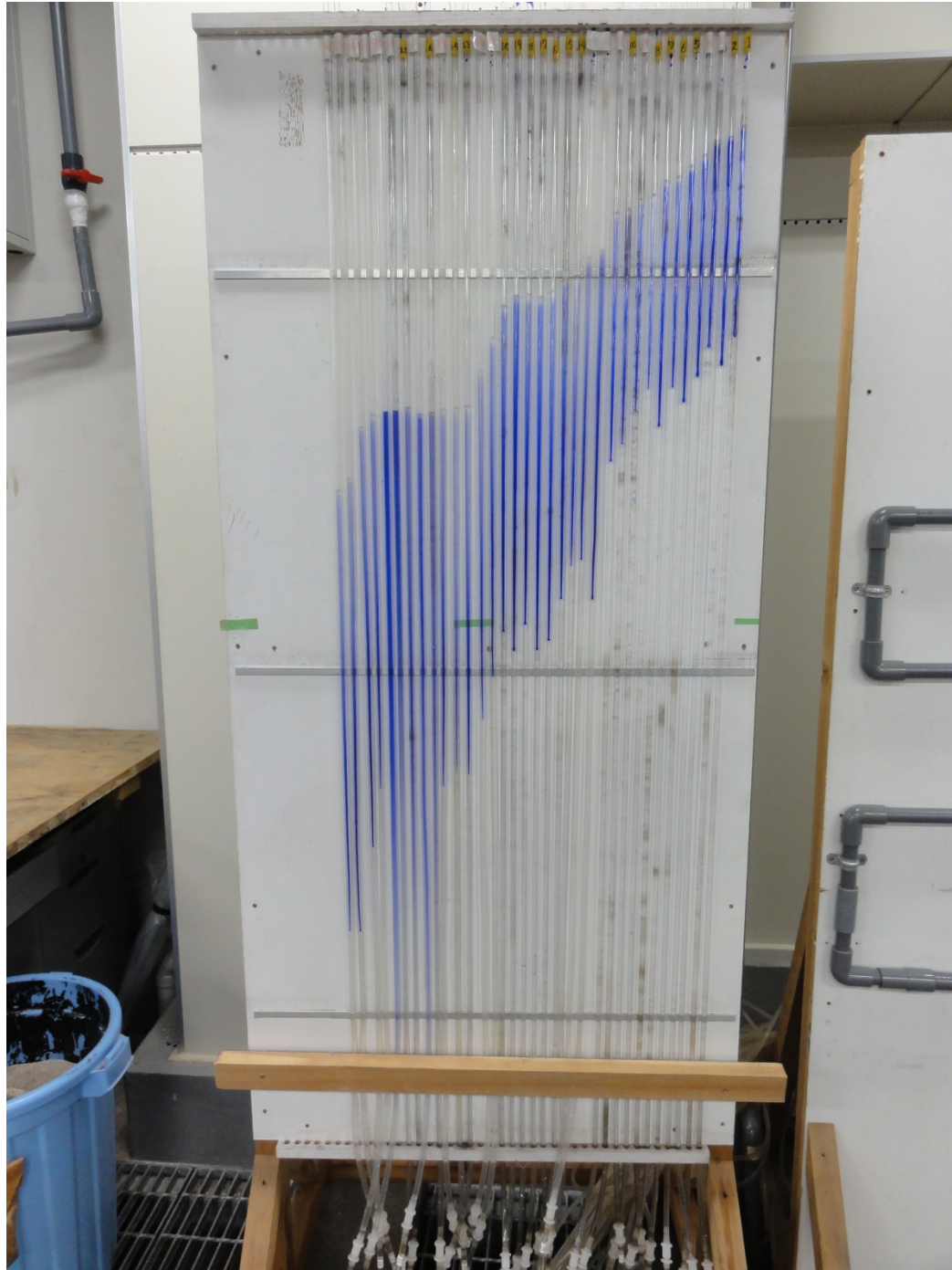
圧力水頭の計測 (マンノメーター)

マンノメーターとは

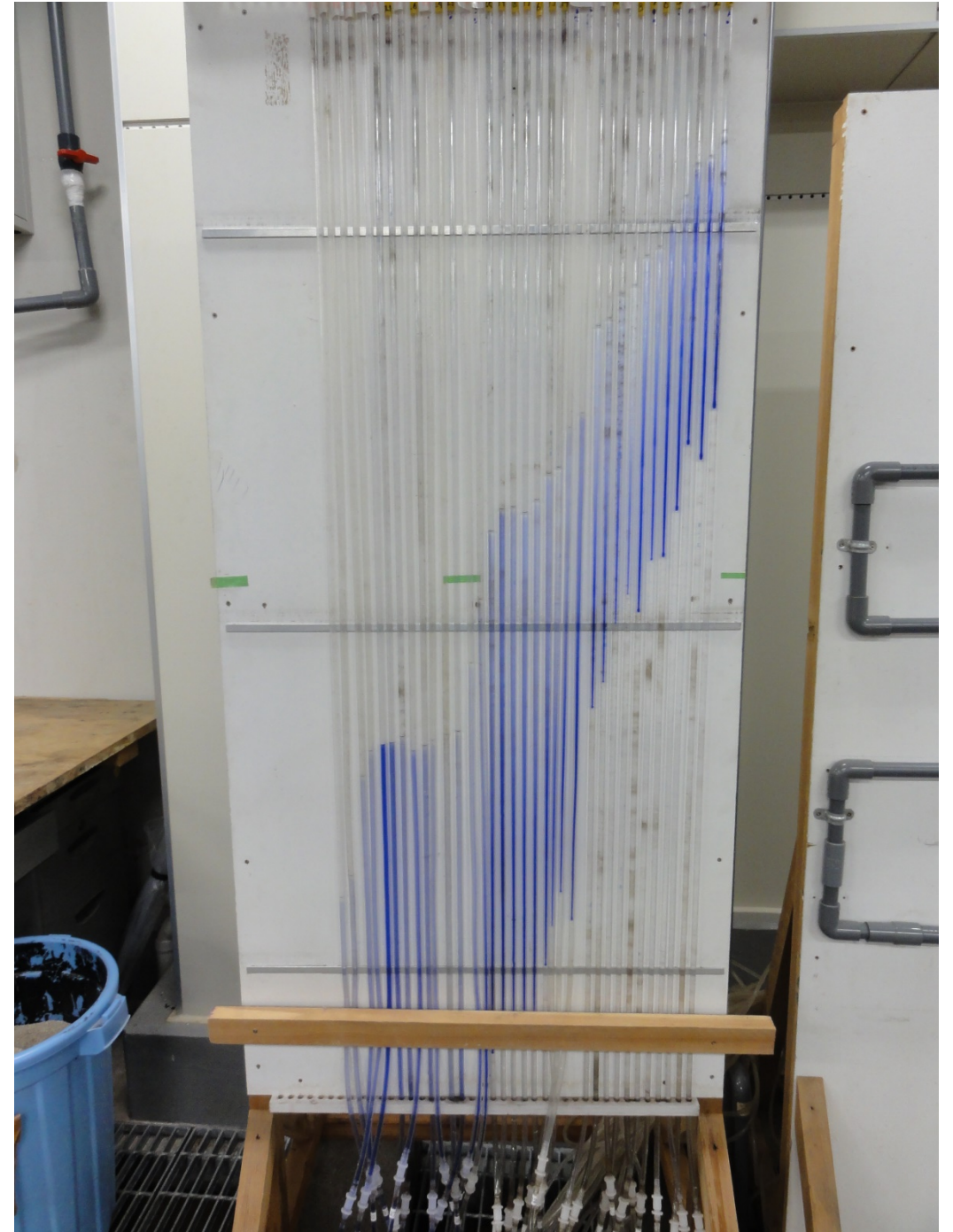


圧力水頭の計測 (マノメーター)

ケース-1

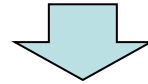


ケース-2

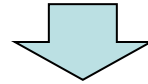


実験の手順

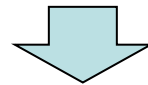
① 流端バルブを閉鎖し、下流端水位を上流端水位と同じとなるようにし、管路を水で満たす。



② 各マンメータの水位が同じ水位となっているか確認し、異なっている場合はマンメータ下部のコネクターを外し、マンメータ内の水を流下させ、管内に滞留している空気を排気させ、空気が入らないように注意して再度接続する。マンメータの水位が同じになっていることを確認する。



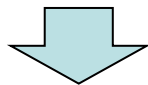
③ バルブを少し開放し、下流立管水位、マンメータ水位が安定するまで待つ。



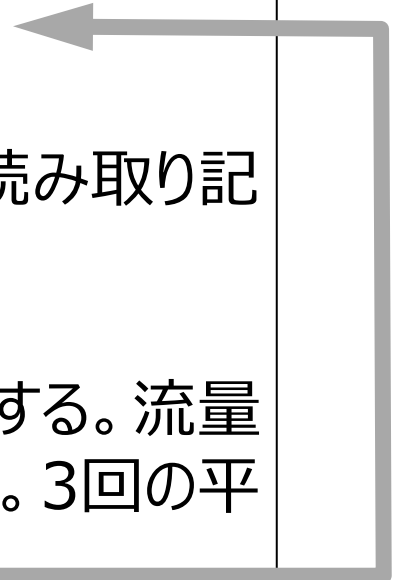
④ マンメータの水位が安定したら各マンメータの水位（1番から34番）を読み取り記録シートに記入する。



⑤ 下流排水パイプからの流下量をバケツで一定時間受け、流下量、水温を計測する。流量は3回計測する。3回の平均値が一定の精度で計測されていることを確認する。3回の平均値からの偏差が5%を上回っている場合は、追加計測を行う。

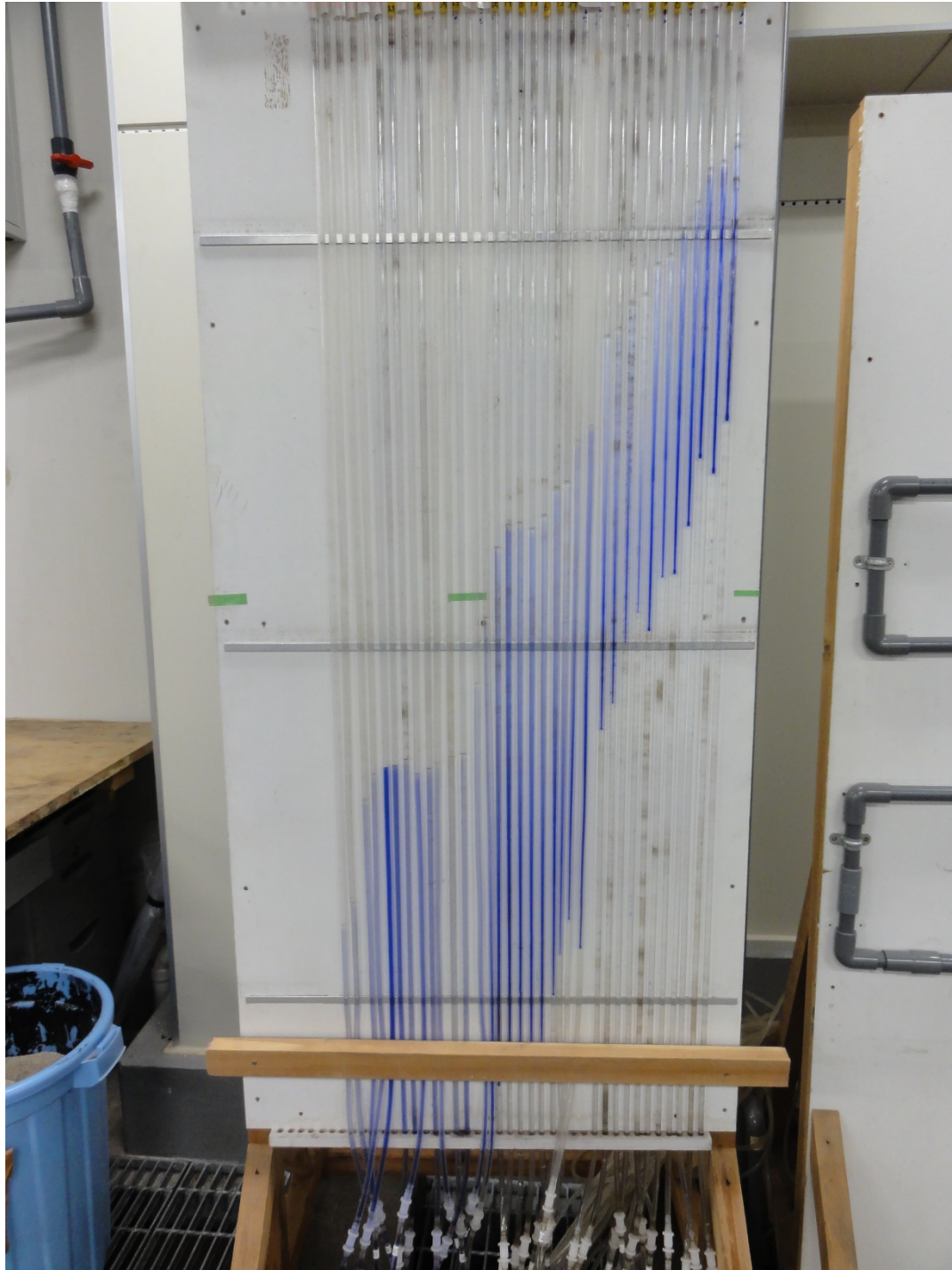


⑥ ④の水位設定を2段階繰り返す、流下量を変化させて2回の測定する。



圧力水頭の計測

- マノメーターの計測は下記のように、基準面からの高さを曲尺を用いてmm単位で計測する。
- 基準面の高さは、下流端のバルブの位置を0として設定する。
- 計測したマノメーターの値を記録用紙に記入する。

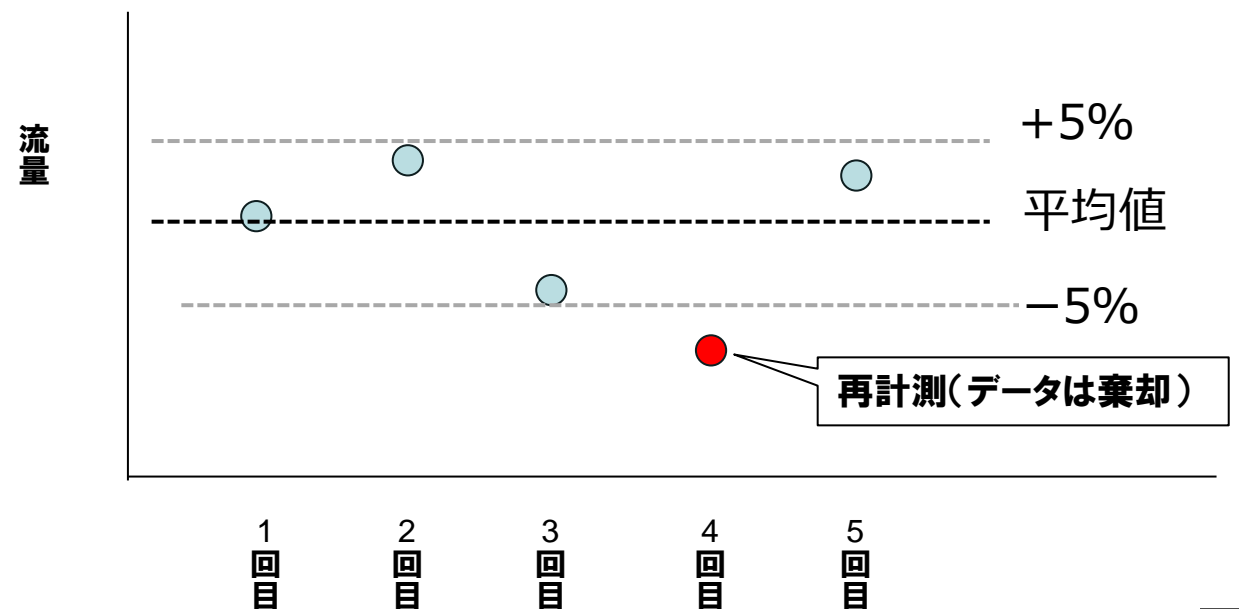


流量の計測

- 流量測定は、模型下流端の排水パイプからの流出水を、ジョウロ、バケツで受け、一定時間集水した後、メンスシリンダーで流下量を計測する。
- バケツで流出水を受ける時、終了時のタイミングで集水時間に誤差が生じるため、複数回（3回か5回）同じ作業を行い、その平均値から流下量を算出する。
- 平均流下量と観測した単位時間流下量との偏差を求め、その偏差の平均値に対する比率を算出する。
- その比率が最大で5%程度以内であるか確認する。5%を上回る場合は追加で観測を行い、5%を下回るまで追加計測を行う。



回数	計測時間 (秒)	流下量 cm ³	単位時間流下量 cm ³ /秒	平均値からの偏差 (%)
1回目				
2回目				
3回目				
4回目				
5回目				
平均				



流量の計測

- 流量を計測する方法は色々な手法があるが、正確に計測することは難しい。
- バケツで一定時間の水の容量を計測する原始的な方法であるが、長い時間集水できれば精度は高い。
- 集水時間が短い場合、漏斗の出し入れの計測時間に誤差が生じる可能性がある。



漏斗を用いて一定時間流出水をバケツで受け止める

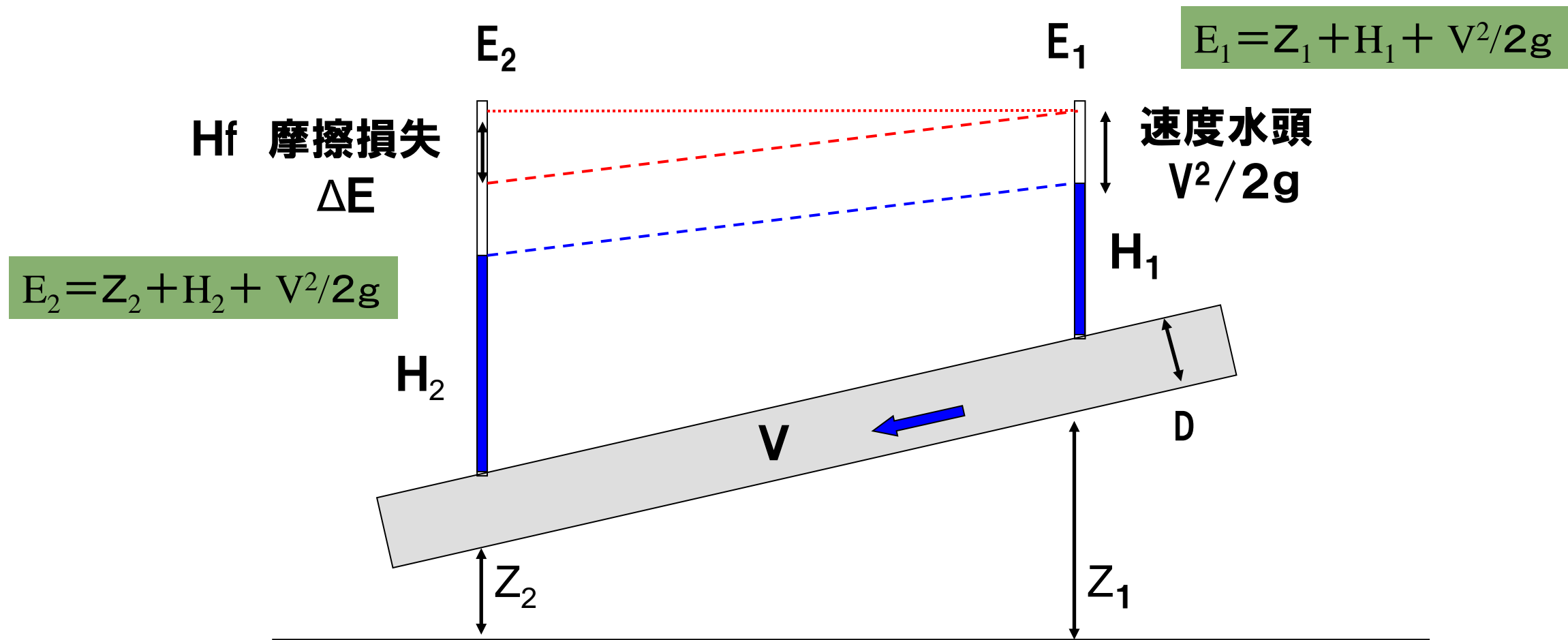


バケツで受け止めた量を計測する



メスシリンダーで計測する

ベルヌーイ定理の ($E_1 = E_2 + \Delta E$ $E = H + V^2/2g$)



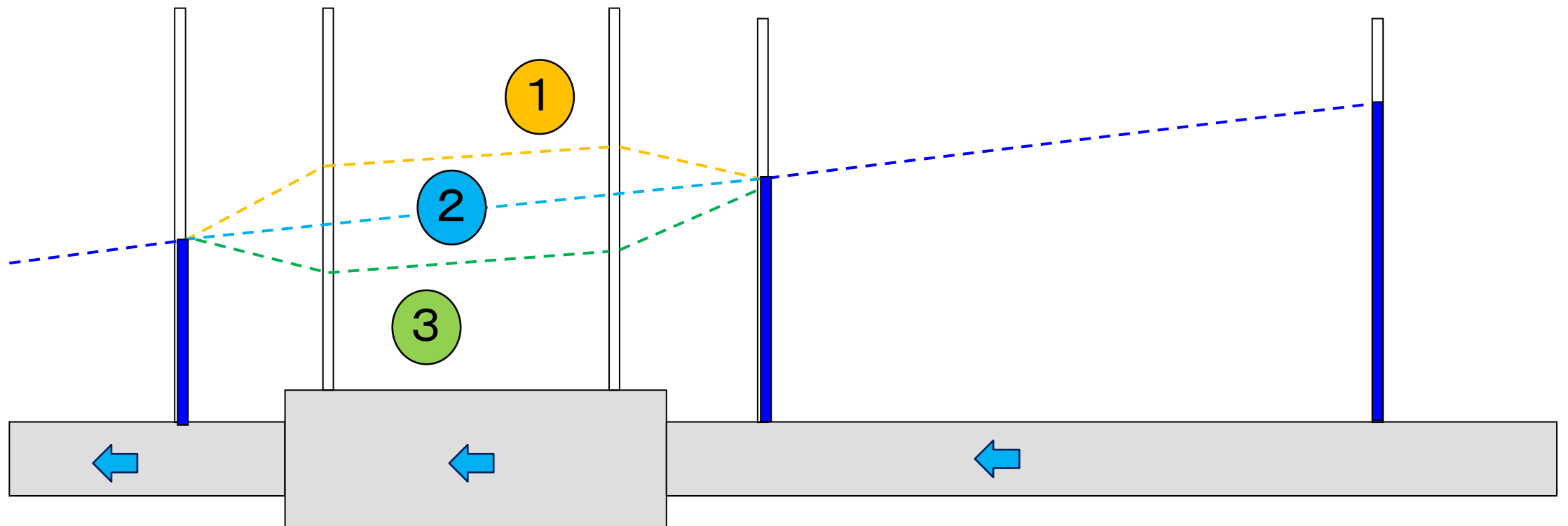
ベルヌーイの定理

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

2点間の、位置水頭 (Z)、圧力水頭 (H)、速度水頭 ($V^2/2g$) の差分は、2点間の間で失われるエネルギー損失と同じである。

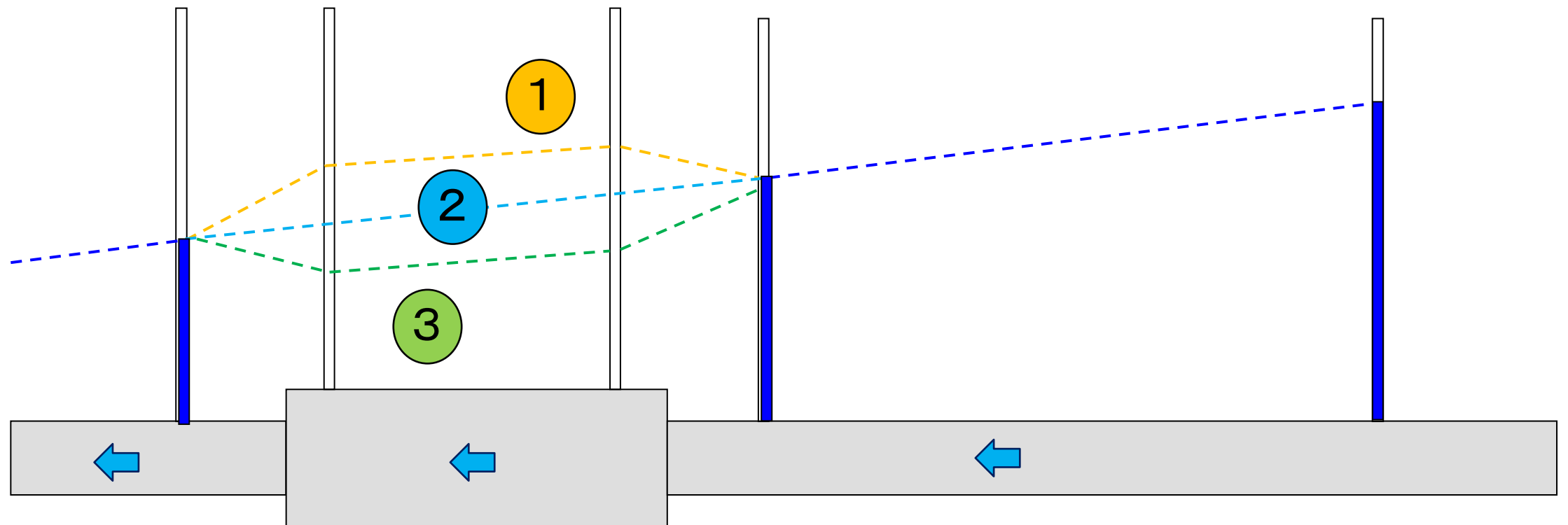
ベルヌーイの定理 ($E_1 = E_2 + \Delta E$ $E = H + V^2/2g$)

管路の一部の径が大きな管路での圧力水頭の変化で正しいのは？

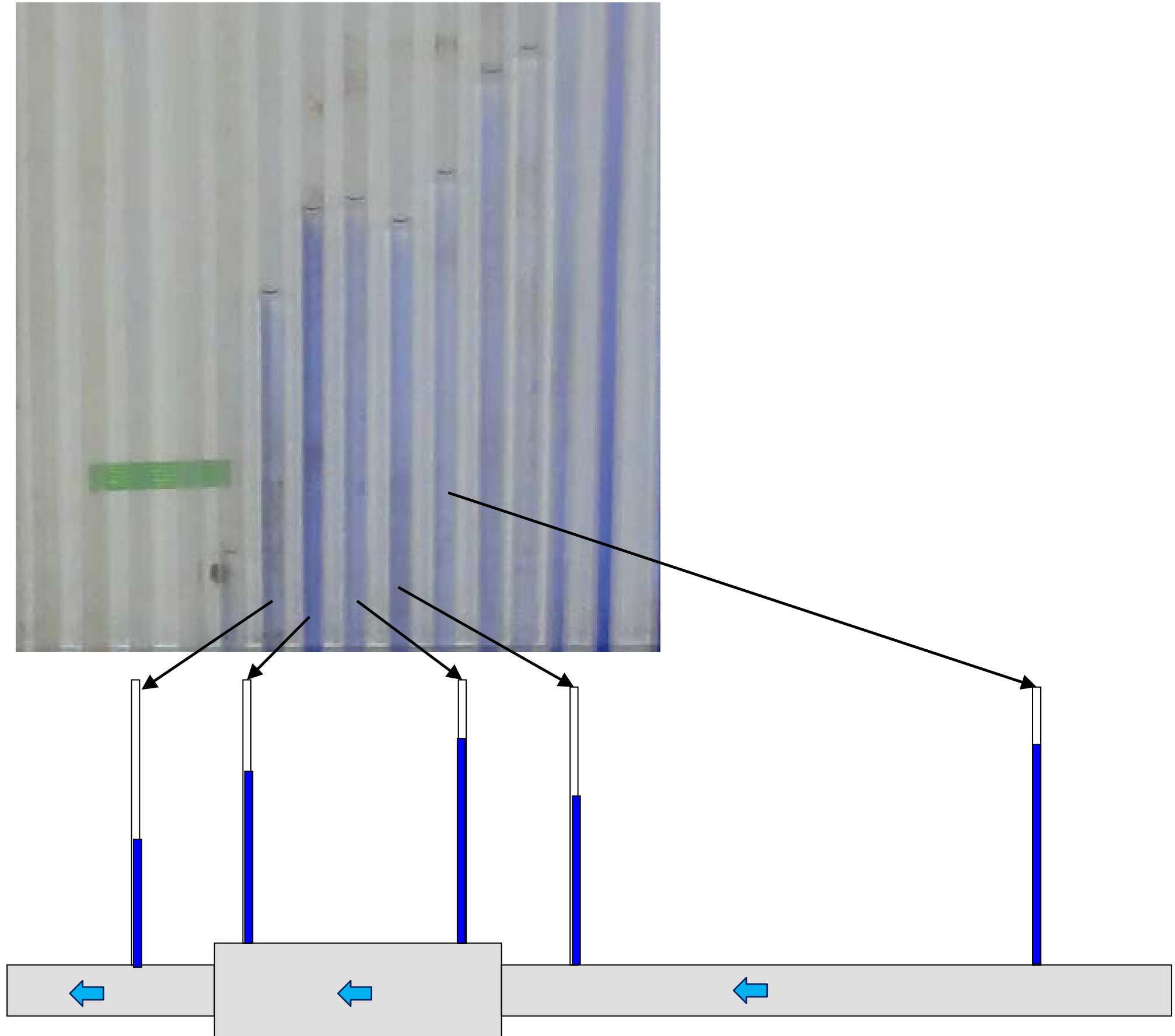


ベルヌーイの定理 ($E_1 = E_2 + \Delta E$ $E = H + V^2/2g$)

管路の一部の径が大きな管路での圧力水頭の変化で正しいのは？



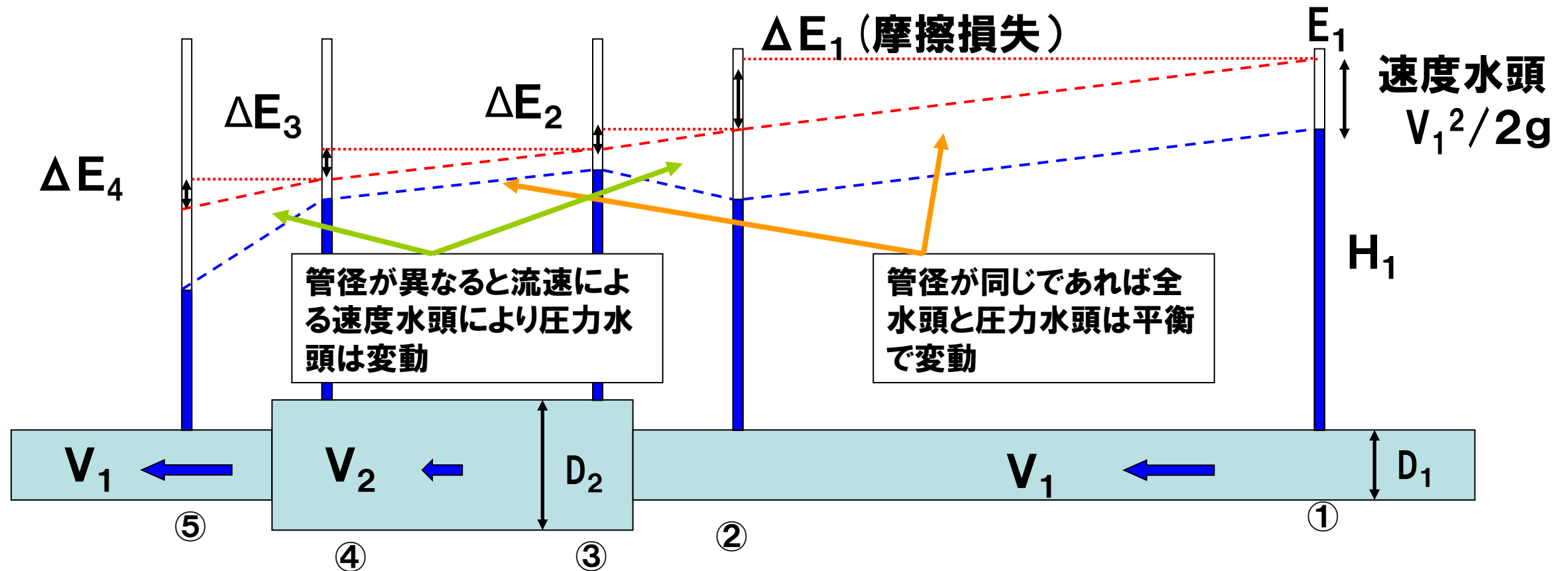
ベルヌーイの定理 ($E_1 = E_2 + \Delta E$ $E = H + V^2/2g$)



ベルヌーイの定理 (断面変化部の流れ)

全水頭(エネルギー) は低減しているが、管径が大きくなることで流速が低下し、速度水頭が小さくなることで圧力水頭が上昇している。

全水頭
 $E_1 = H_1 + V_1^2 / 2g$



③の速度水頭は②の速度水頭の1/6

$$D_1 : D_2 = 16 : 25 = 1 : 1.56$$

$$A_1 : A_2 = 1 : 1.56^2 = 1 : 2.43$$

$$V_1 : V_2 = 2.43 : 1$$

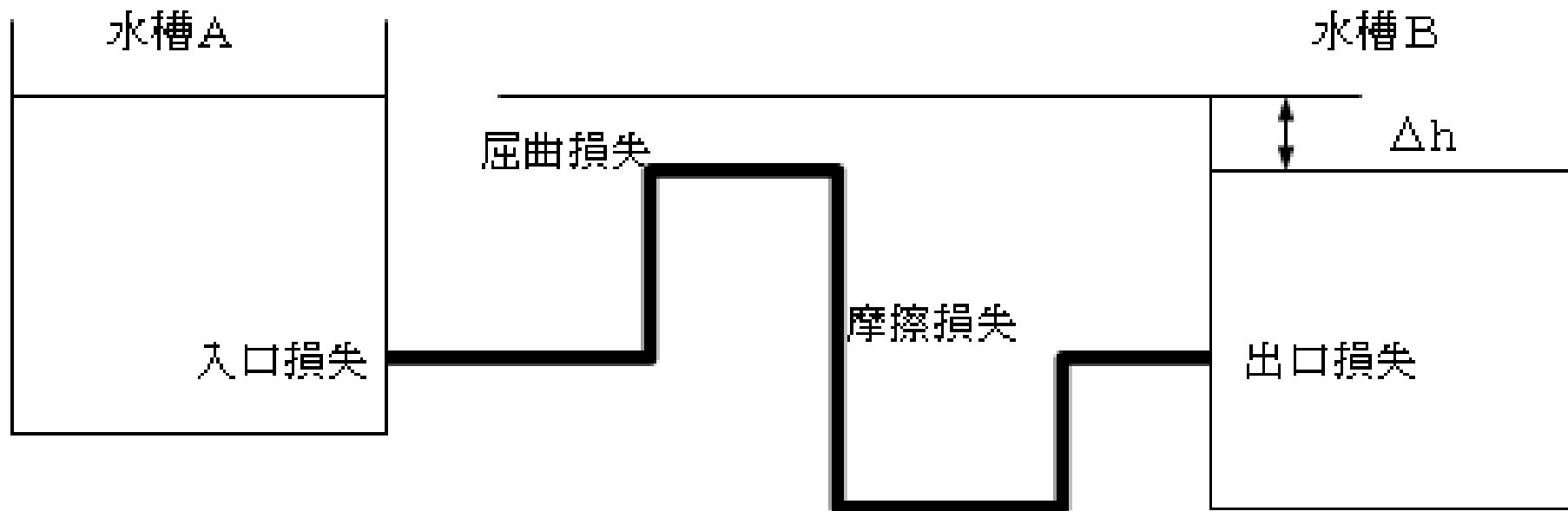
$$V_1^2 : V_2^2 = 2.43^2 : 1 = 5.90 : 1$$

$$\Delta E_1, \Delta E_3 \text{ 摩擦損失: } f \times L / D \times V^2 / 2g$$

$$\Delta E_2 \text{ 急拡損失: } f \times V^2 / 2g$$

$$\Delta E_4 \text{ 急縮損失: } f \times V^2 / 2g$$

管路の損失水頭の算出



$$\left(H_A + \frac{v_A^2}{2g} \right) - \left(H_B + \frac{v_B^2}{2g} \right) = \text{(管路における損失水頭の和)}$$

$$H = \left(\zeta_c + \sum \zeta_b + f \frac{l_1}{D} + \zeta_0 \right) \frac{v^2}{2g}$$

入口 曲がり 摩擦 出口

$$v = \sqrt{\frac{2gH}{\left(\zeta_c + \sum \zeta_b + f \frac{l}{D} + \zeta_0 \right)}}$$

$$f = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} = \frac{124.5n^2}{D^{1/3}}$$

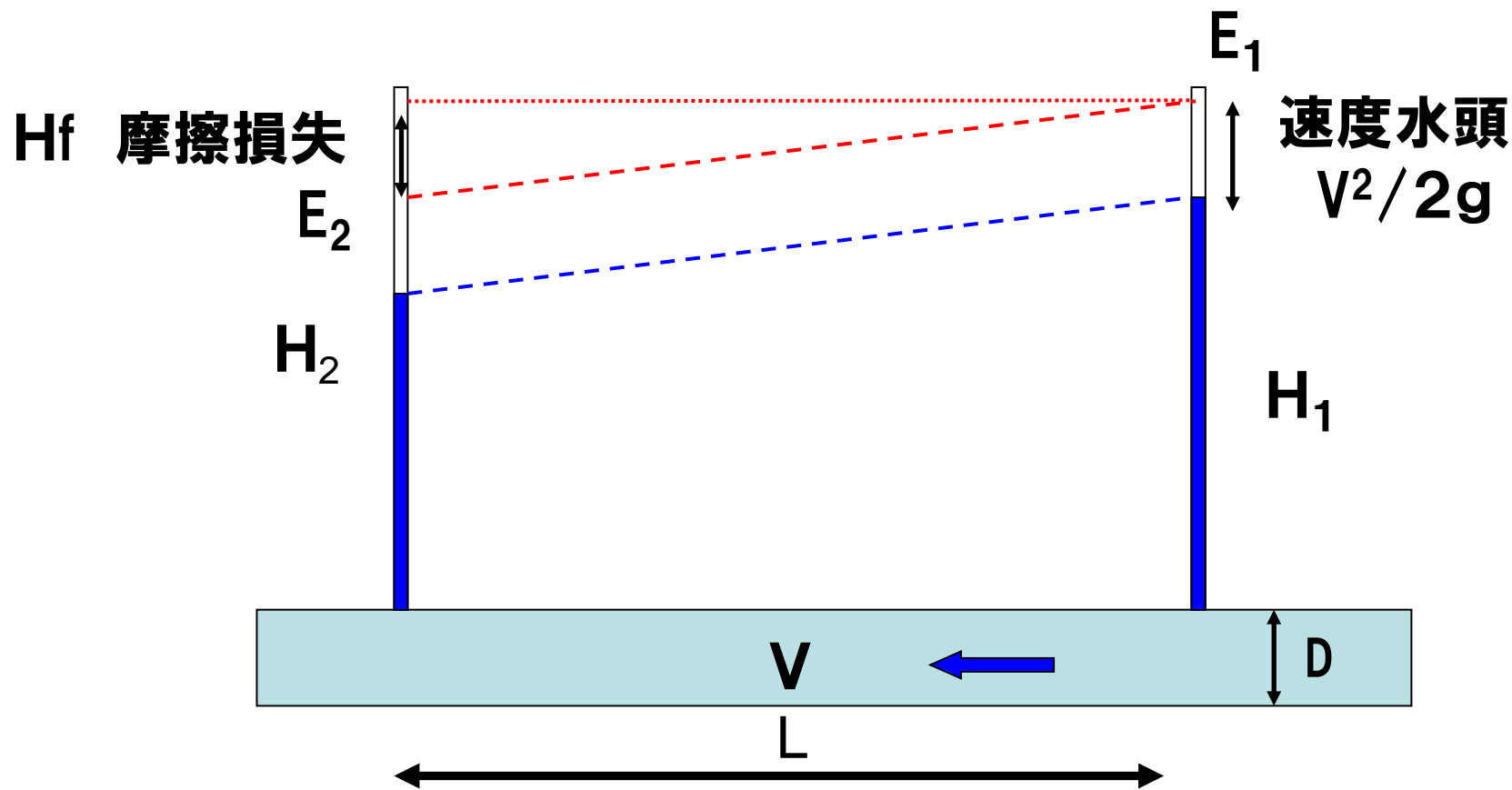
n : マニングの粗度係数

R : 径深

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 v$$

ベルヌーイの定理（摩擦損失係数の把握）

- 単一管路においては、摩擦損失により運動エネルギーが失われる。
- 圧力水頭+速度水頭の全水頭は、下式により速度、管路延長に従いエネルギーが減少する。
- 管路形状が一様であれば速度水頭は同じであるから、損失水頭は圧力水頭の差で表される。



h_f : 摩擦損失水頭

f : 摩擦損失係数

L : 区間長

D : 管路内径

V : 管内流速

$$h_f = f \times \frac{L V^2}{D 2g}$$

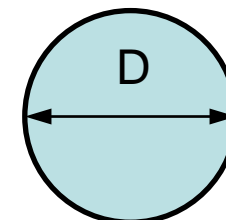
$$f = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} = \frac{124.5n^2}{D^{1/3}}$$

n : マニングの粗度
 R : 径深

径深 R : 断面積 (A) / 潤辺 (S)

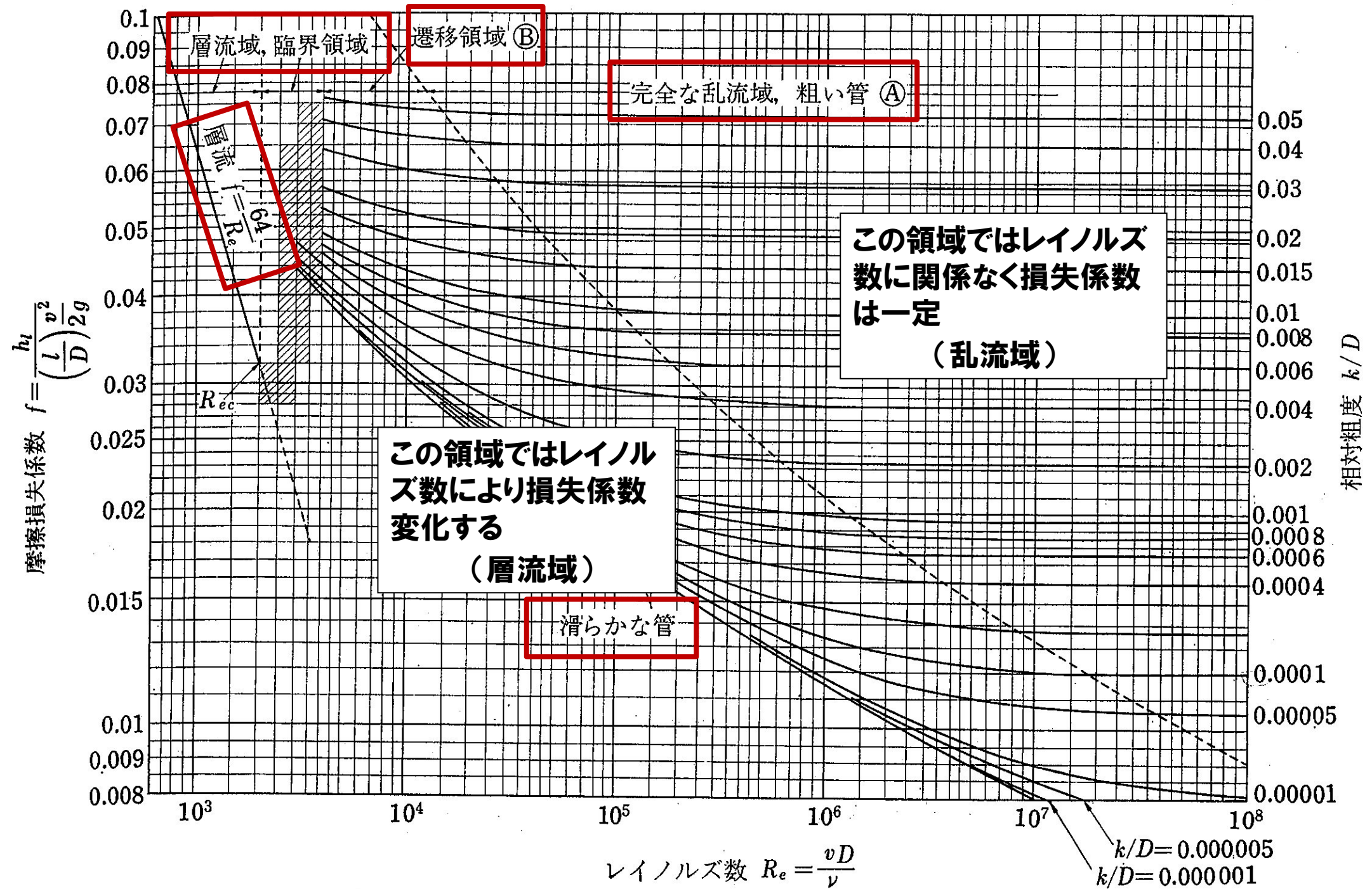
潤辺 S : 流水と接する長さ (管路の場合は円周長 $\pi \times D$)

$$R = (\pi \times (D/2)^2) / (\pi \times D) = D/4$$



Moody図表

- レイノルズ数による単一管路での摩擦損失係数の変化を示す。
- 乱流の領域では損失係数は一定であるが、層流の領域ではレイノルズ数に応じて変動する。
- 滑らかな管路では高レイノルズ数にならないと損失係数は一定になりにくい。



レイノルズ数

レイノルズ数 Re

水理学の2大無次元数の1つ、水の慣性力と粘性力の比

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Re:レイノルズ数

ν :動粘性係数

動粘性係数 (流体の動きやすさを示す係数)

温度	動粘性係数(cm ² /s) (水)	動粘性係数(cm ² /s) (空気)
0°C	1.794×10^{-2}	0.132×10^{-2}
5°C	1.520×10^{-2}	0.134×10^{-2}
10°C	1.310×10^{-2}	0.141×10^{-2}
15°C	1.146×10^{-2}	0.146×10^{-2}
20°C	1.011×10^{-2}	0.150×10^{-2}
25°C	0.897×10^{-2}	0.155×10^{-2}
30°C	0.804×10^{-2}	0.160×10^{-2}

流体では温度が高くなると低減する。
気体では、温度が高くなると増加する。

屈曲部の損失係数

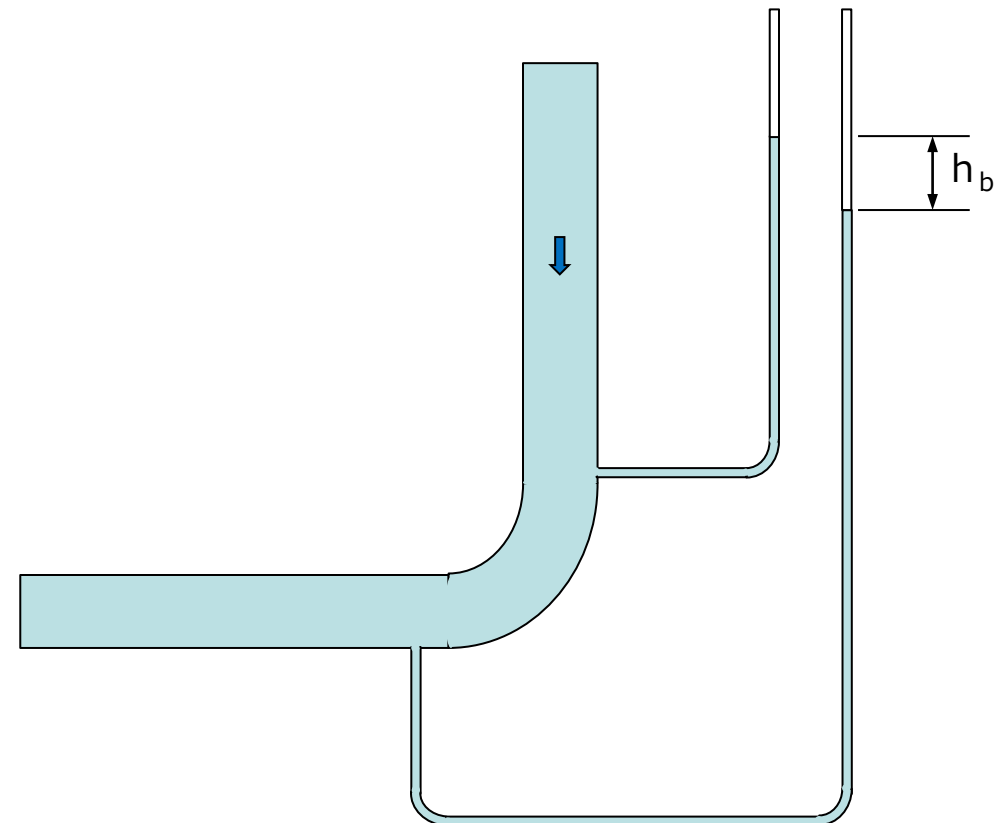
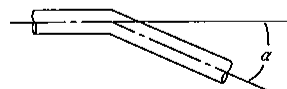
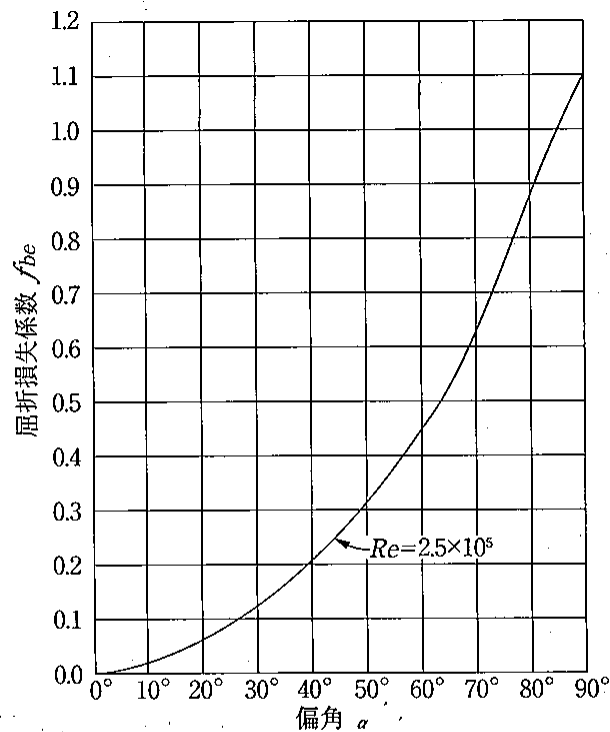
- 管路が屈曲することで流れが乱れることで、摩擦損失に加え屈曲による損失が発生する。
- 屈曲の曲がり具合に応じて損失係数は変化する。

$$h_b = \zeta_{b1}\zeta_{b2} \frac{V^2}{2g} = f_b \times \frac{V^2}{2g}$$

h_b : 屈曲部損失水頭

f : 屈曲部損失係数

V : 管内流速



注) 屈折曲管の損失水頭は、屈折個所数倍とする。

図-7.2.6 屈折損失係数

急拡・急縮の損失係数

- 管路径が異なる部分では、摩擦損失に加え局所的な損失が発生する。
- 急拡部では、流れの剥離に伴う渦、急縮部では流れの縮流による渦によりエネルギーが損失する。

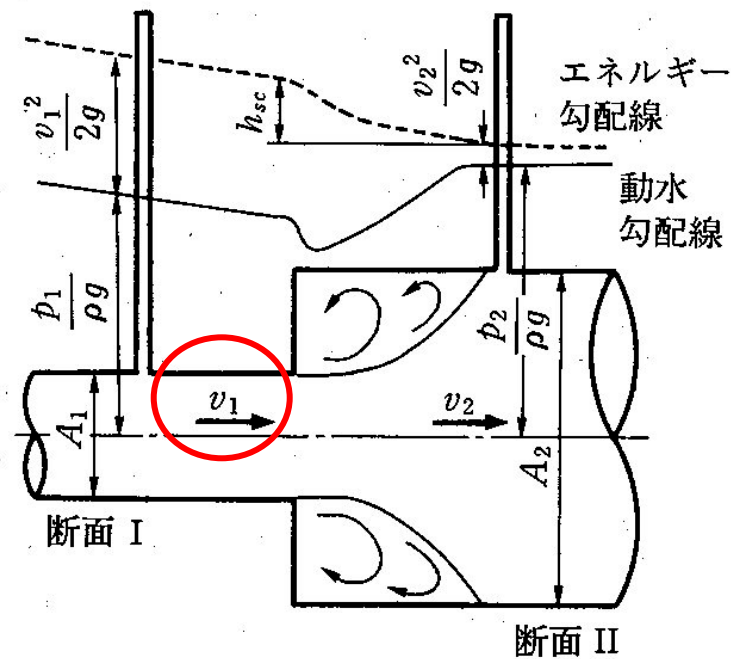


図-4.4.1 急拡の場合

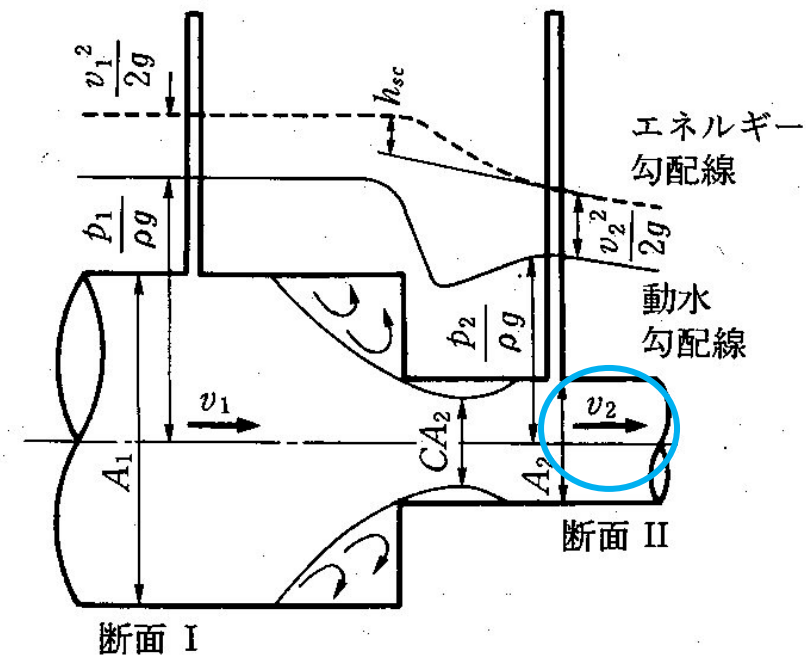


図-4.4.2 急縮の場合

$$h_{se} = \left\{ 1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right\} \times \frac{V_1^2}{2g} = f_{seb} \times \frac{V_1^2}{2g}$$

h_{se} : 急拡部損失水頭
 f_{seb} : 急拡部損失係数
 V_1 : 断面 1 の管内流速

(2.8)

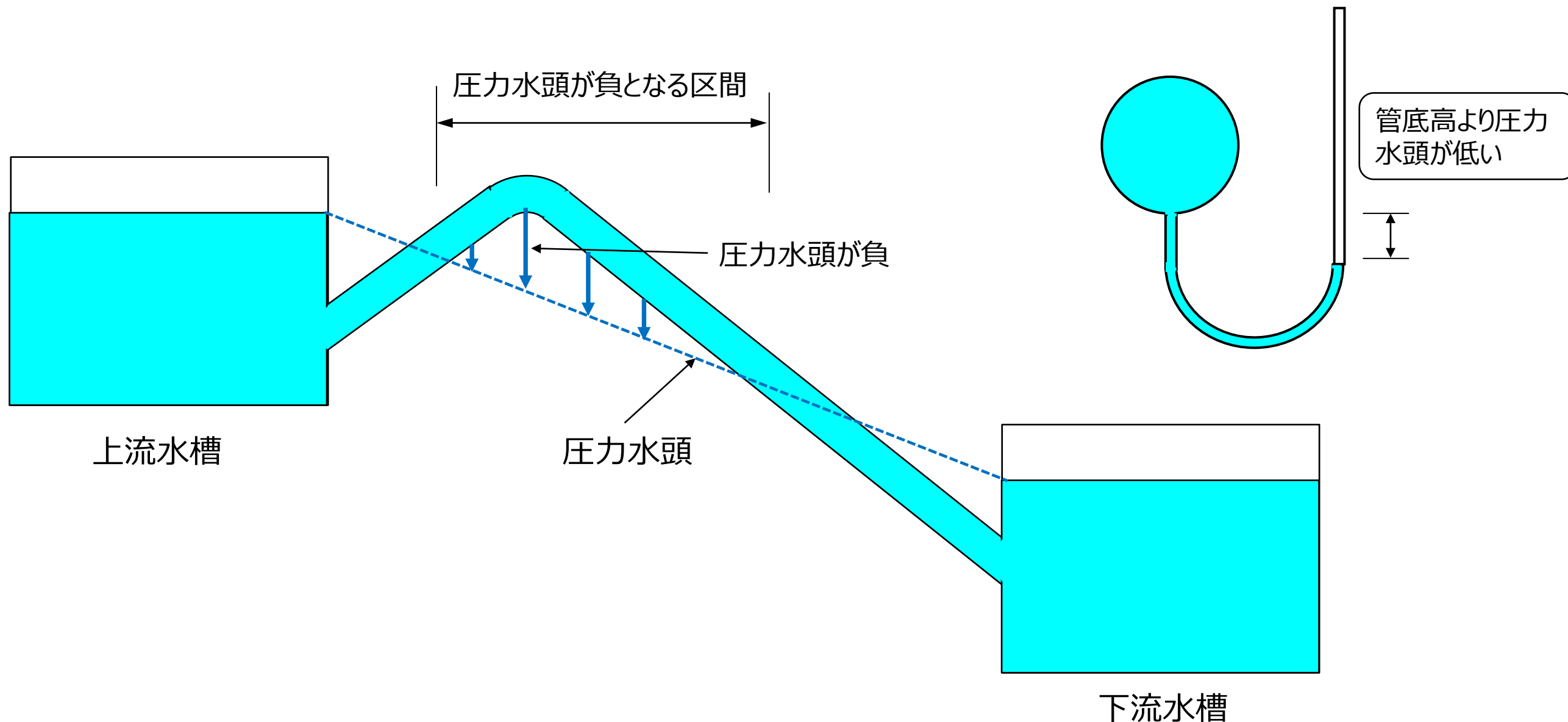
$$h_b = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} = f_b \times \frac{V_2^2}{2g}$$

h_b : 急縮部損失水頭
 f_b : 急縮部損失係数
 V_2 : 急縮部断面 2 の管内流速

(2.9)

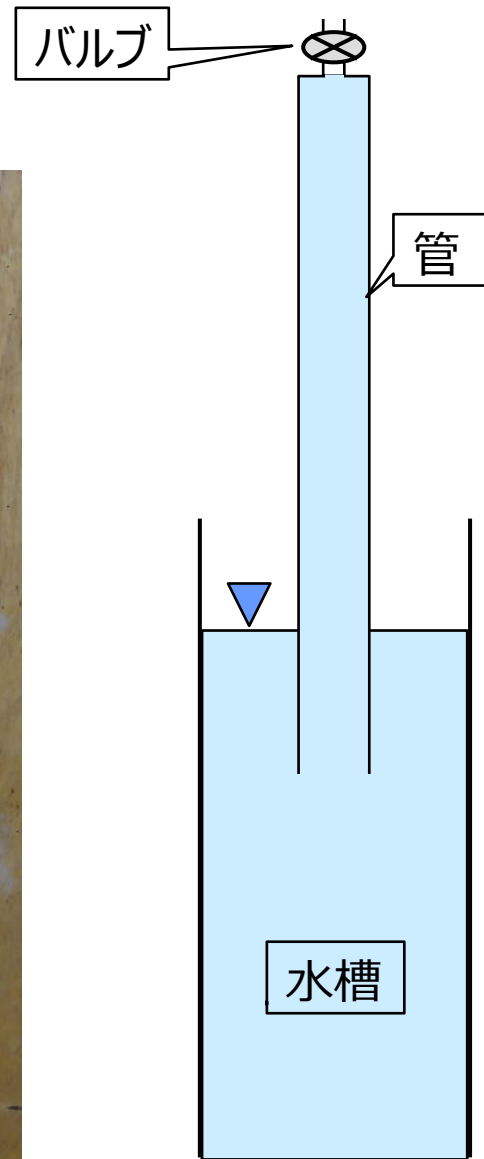
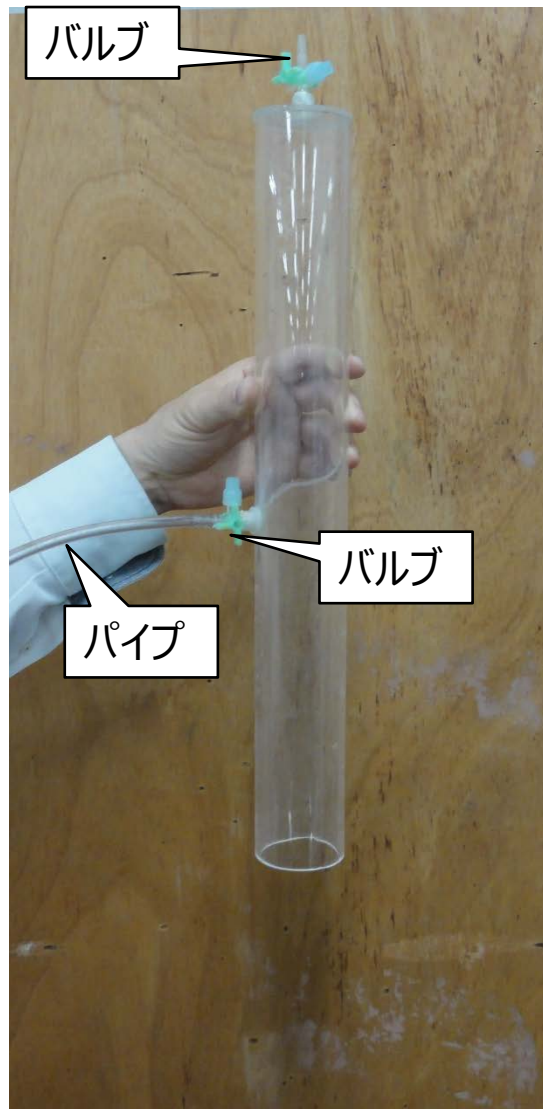
管路流れでの負圧の発生

- 管路流れでは下記のように、上流水槽より高い地点を通過して下流水槽に導水することが可能。このような形状をサイフォン形状と呼ぶ。
(開水路流れでは不可能、開水路では水は低いところから高いところへは流れない)
- 圧力水頭は上流水位から下流に向けて減少するようになり、管路高が高い地点では管内の圧力が負圧の状態となる。

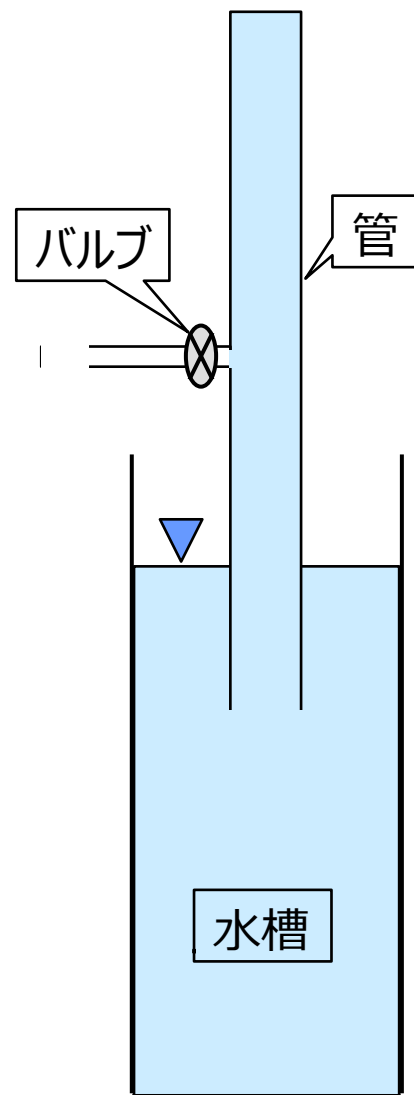


大気圧の作用

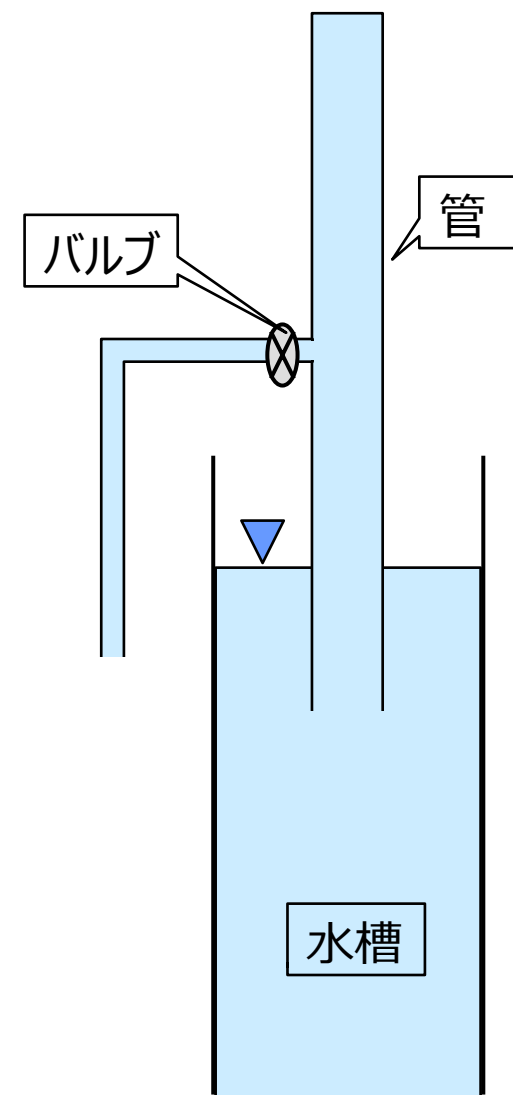
下記の各ケースでバルブを開けたら管の中の水はどのように動くか



ケース1：
管の上端部にバルブが
付いている

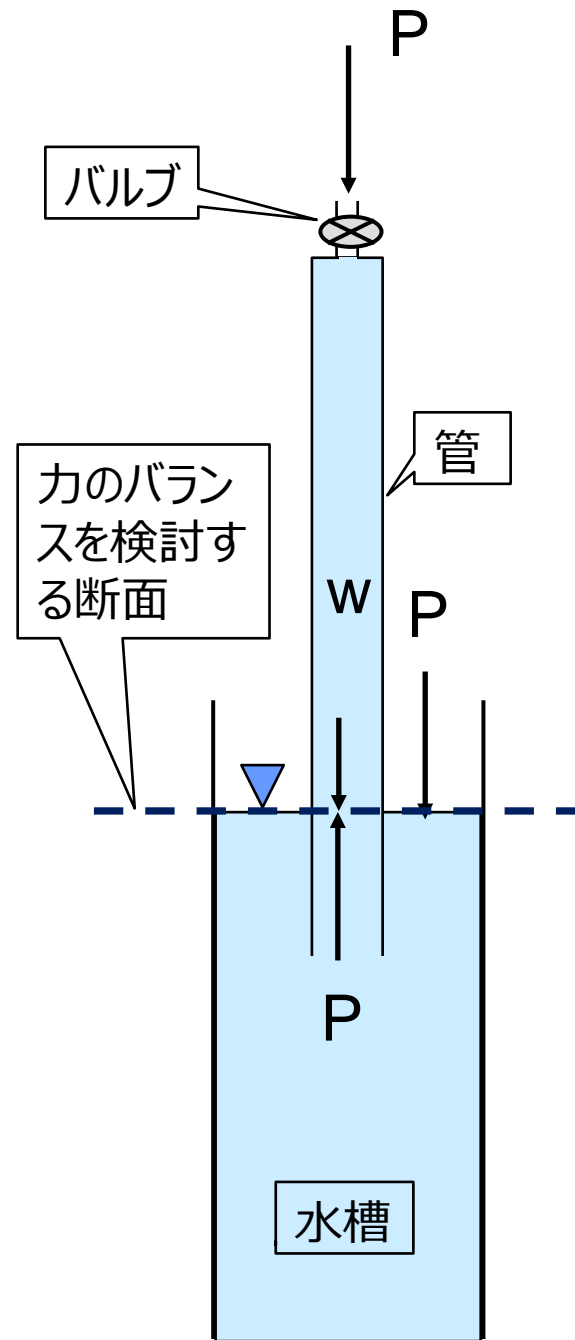


ケース2：
管の側壁にバルブ
が付いている



ケース3：
側壁の管には水が
満たされたている

大気圧の作用



➤ バルブを閉じた状態

管内の水に作用する力は水の重量 W
水槽に作用する大気圧はパスカルの原理
で検討する断面で上方に作用 P

上向き力 下向き力
大気圧 P > 水の重量 W

であるため、管内の水は動かない

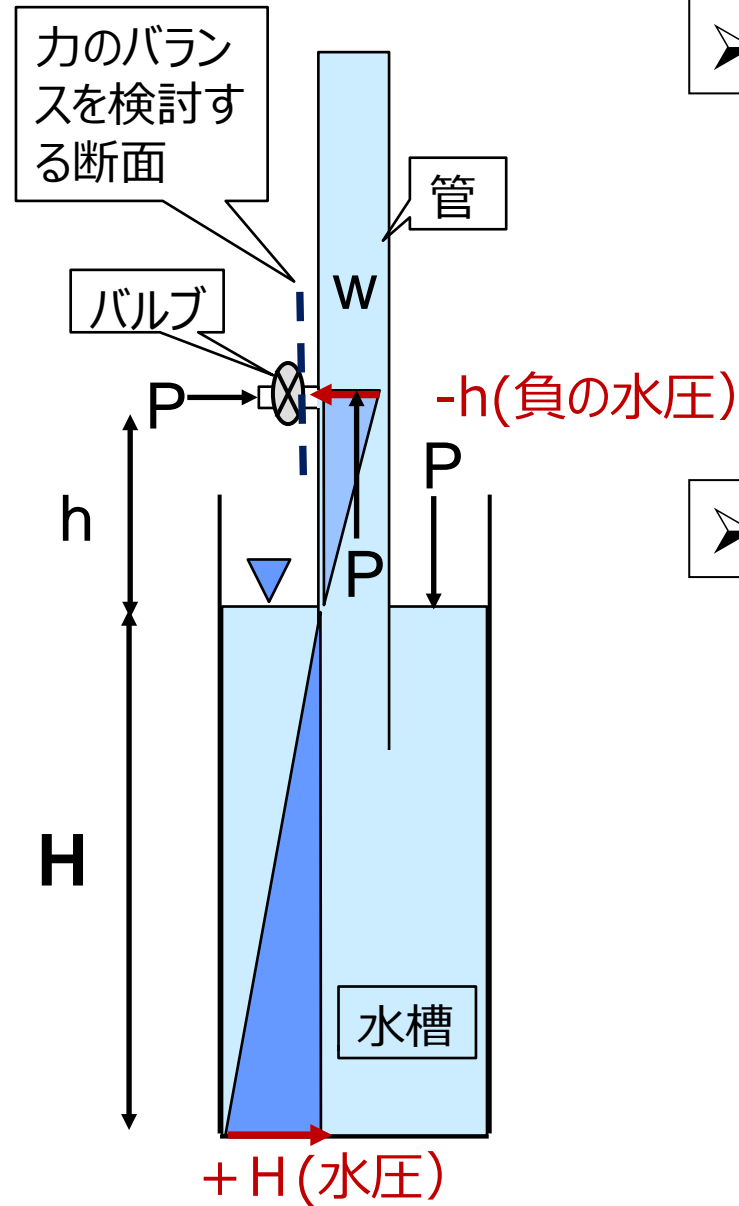
➤ バルブを開けた状態

管内の水に作用する力は水の重量 W に
加え大気圧 P
水槽に作用する大気圧はパスカルの原
理で検討する断面で上方に作用 P

上向き力 下向き力
大気圧 P < $P +$ 水の重量 W

となり、 $W=0$ となるまで水位が低下。
(水槽の水面と同じ水位)

大気圧の作用



➤ バルブを閉じた状態

ケース 1 と同様で管内の水は動かない

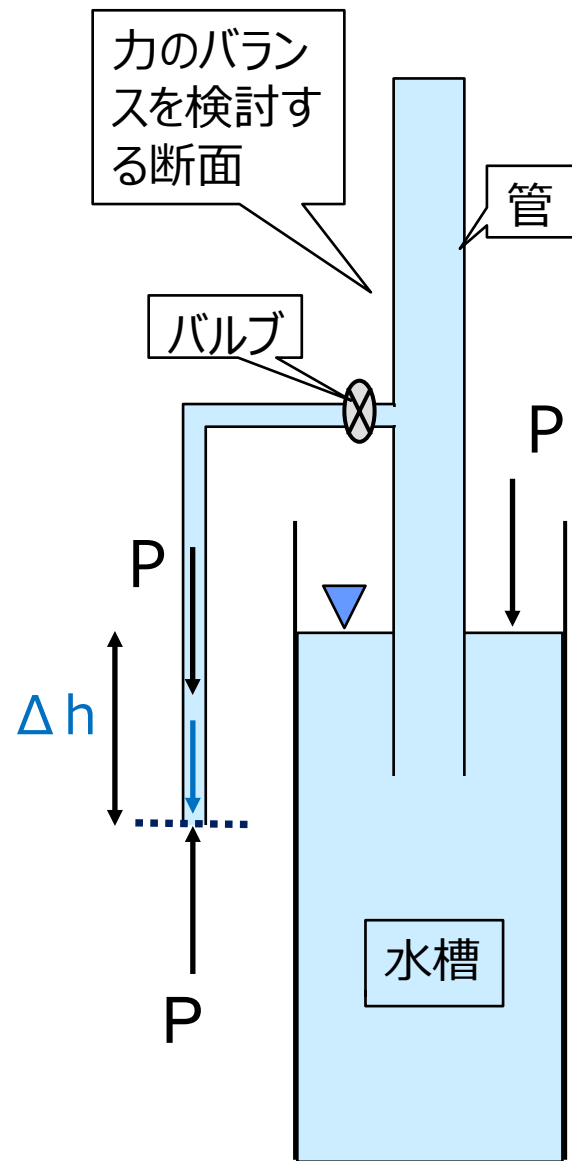
➤ バルブを開けた状態

管の内側から検討断面に作用する力
負の圧力 $-h$ + 大気圧 P
管の外側の力
大気圧 P

外側の力 内側からの力
 $P > P - h$

であるため、管内へ空気が入るが水は出ない。
後は1のケースと同じで水槽まで水位が下がる

大気圧の作用



➤ バルブを閉じた状態

ケース 1 と同様で管内の水は動かない

➤ バルブを開けた状態

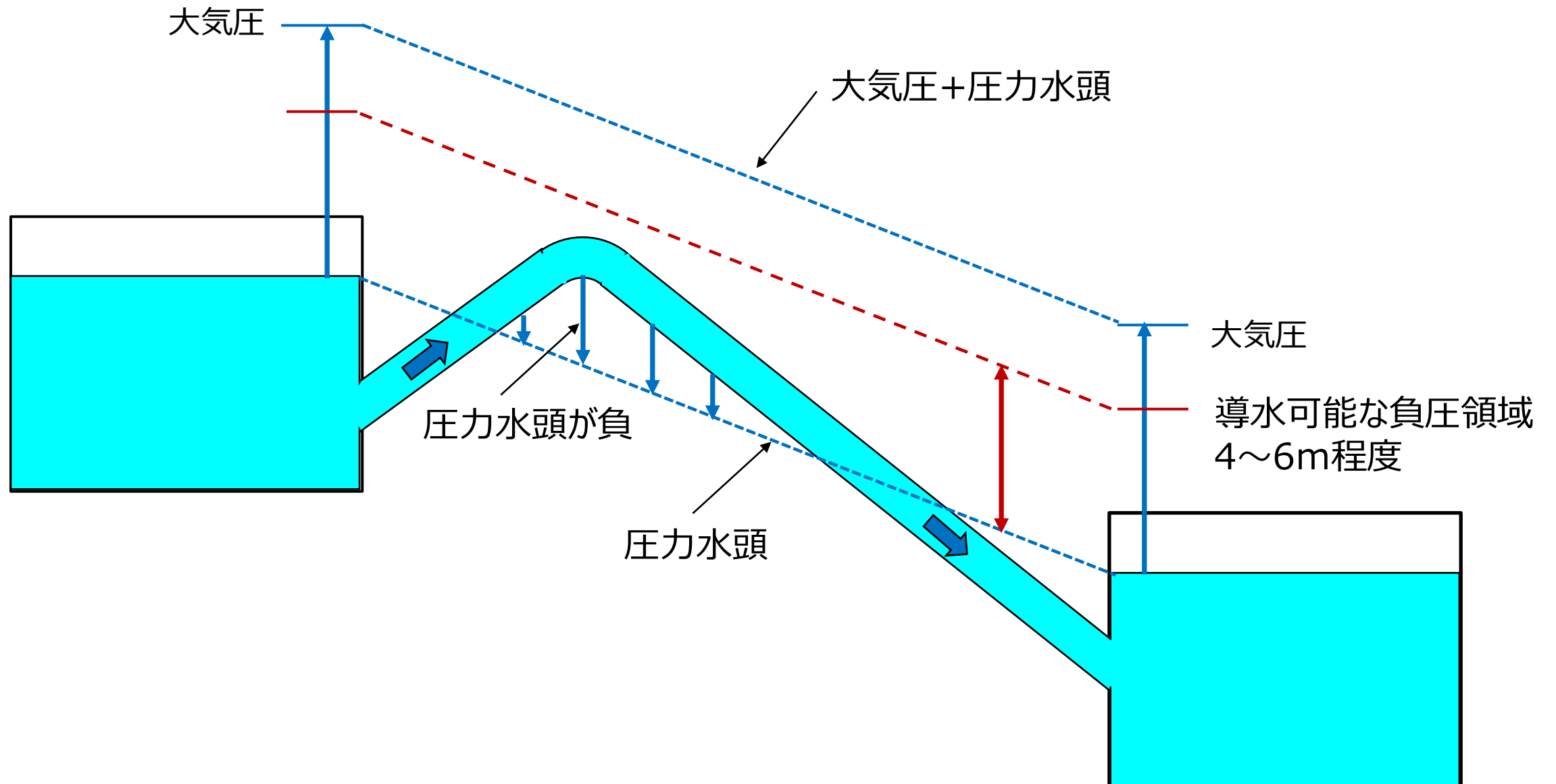
管の内側から検討断面に作用する力
大気圧 P + 水頭分 Δh
管の外側の力
大気圧 P

外側の力 内側からの力
 P $P + \Delta h$

であるため、管から水が排水される
排水により管の水位が下がることはなく、水槽
の水位が下がる

管路流れでの負圧の発生

- 管路流れでは大気圧の作用で示したように、上下流水槽へ作用する大気圧の作用により、上流水槽の圧力水頭より高い位置を通過して導水することが可能となる。
- 大気圧+圧力水頭のエネルギー以下であれば導水を行うことが可能。
- 大気圧は水中高で換算すると約10m（1気圧：1013 h Pa）
- 実際には、損失などから活用可能な高さは4～6m程度



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③のWordファイルを用いて作成し、Scombにて提出する。
 - ① 授業資料_管路資料 (テーマ1) Pdfファイル
 - ② 計測データ_管路実験データ 班別のデータ Pdfファイル
 - ③ 提出用_管水路摩擦損失等実験 (テーマ1) 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（流量の算出）

計測した流量を整理し、各ケースでの管路内流量を算出する。複数回計測した値から、異常値を棄却して正しいと思われる流量を算出する。

単位時間の流下量の平均値を算出し、その平均値に対する流下量の差分についての偏差を算出。

偏差が5%を上回る値を棄却して、残りの値を平均化する。

回数	計測時間 (秒)	流下量	単位時間 流下量	平均値からの 偏差 (%)
		cm ³	cm ³ /秒	
1回目	10	1498	149.8	2.9%
2回目	10	1482	148.2	1.8%
3回目	10	1350	135	-7.3%
4回目	10	1502	150.2	3.1%
5回目	10	1450	145	-0.4%
全体の平均値			145.6	
棄却後の平均値			148.3	

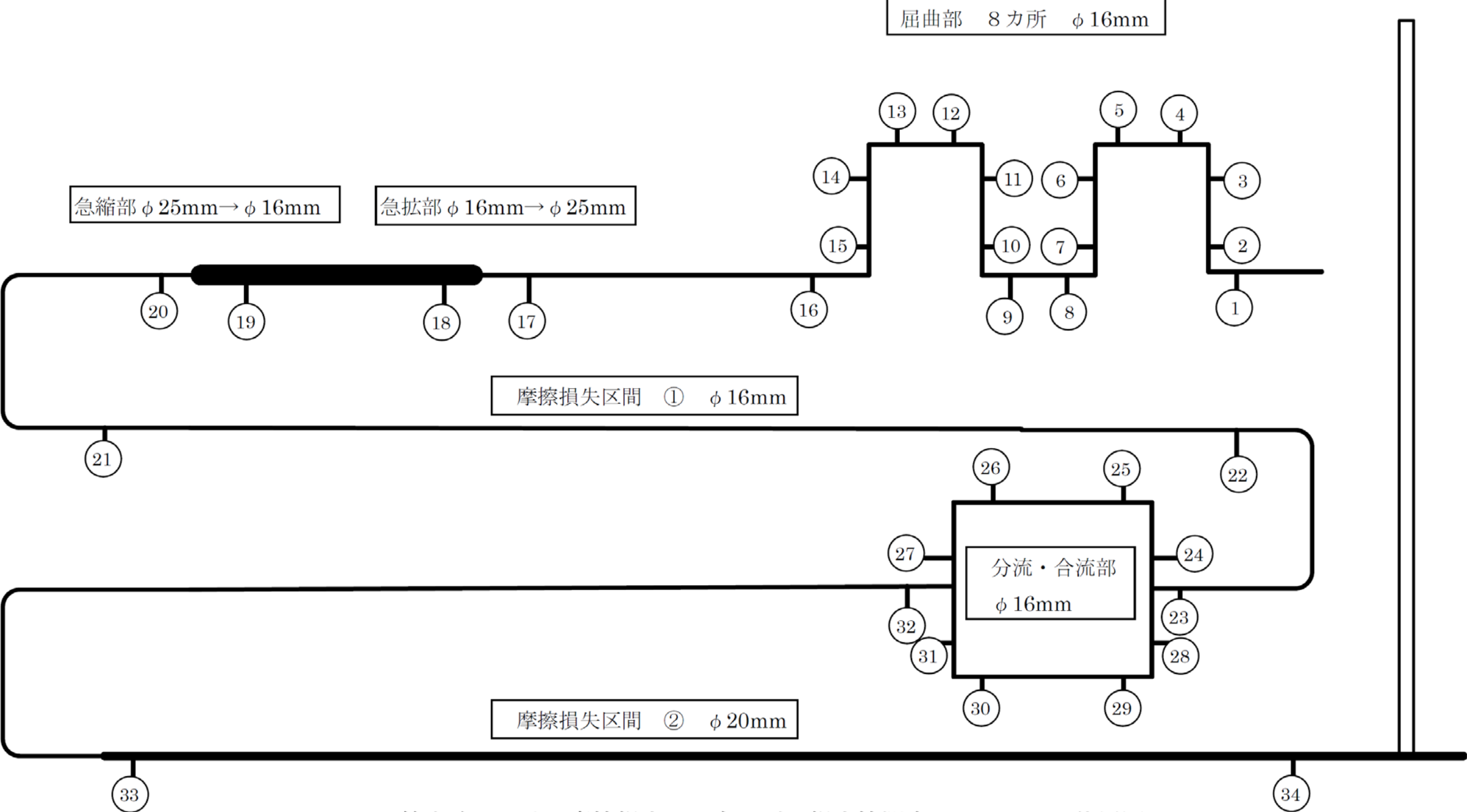
偏差が5%を上回る
値を棄却

計測結果の整理 (マノメーター)

①計測した流量、マノメーターの値を下表に入力。②計測した流量と管路徑から流速を算出。③速度水頭を求めマノメーターの値を加え全水頭を算出。④検討対象の区間の全水頭の差分から摩擦損失係数、局所損失係数を算出。

		流量 Q :		cc/s	温度 :		° c	動粘性係数:				
区間	No.	区間距離		管路高 (cm)	マノメータ (cm)	管路徑 (cm)	流速 (cm/s)	全水頭 (cm)	全水頭差 (cm)	摩擦損失係数	レイノルズ数	局所損失係数
		単(cm)	追加(cm)									
屈曲部損失係数区間	1	0	0	60		1.6						
	2	10	10	65		1.6						
	3	20	30	85		1.6						
	4	10	40	90		1.6						
	5	20	60	90		1.6						
	6	10	70	85		1.6						
	7	20	90	65		1.6						
	8	10	100	60		1.6						
	9	20	120	60		1.6						
	10	10	130	65		1.6						
	11	20	150	85		1.6						
	12	10	160	90		1.6						
	13	20	180	90		1.6						
	14	10	190	85		1.6						
	15	20	210	65		1.6						
	16	10	220	60		1.6						
急拡・急縮部	17	50	270	60		1.6						
	18	20	290	60		2.5						
	19	30	320	60		2.5						
	20	20	340	60		1.6						
摩擦損失区間	21	65	405	40		1.6						
	22	250	655	40		1.6						
分流・合流区間	23	85	740	20		1.6						
	24	10	750	25		1.6						
	25	15	765	35		1.6						
	26	40	805	35		1.6						
	27	15	820	25		1.6						
	28	15	750	15		1.6						
	29	10	765	5		1.6						
	30	40	805	5		1.6						
	31	10	820	15		1.6						
	32	20	835	20		1.6						
摩擦損失区間	33	190	1025	0		2.0						
	34	250	1275	0		2.0						

管路実験模型



管水路における摩擦損失、エネルギー損失測定 マノメータ位置図

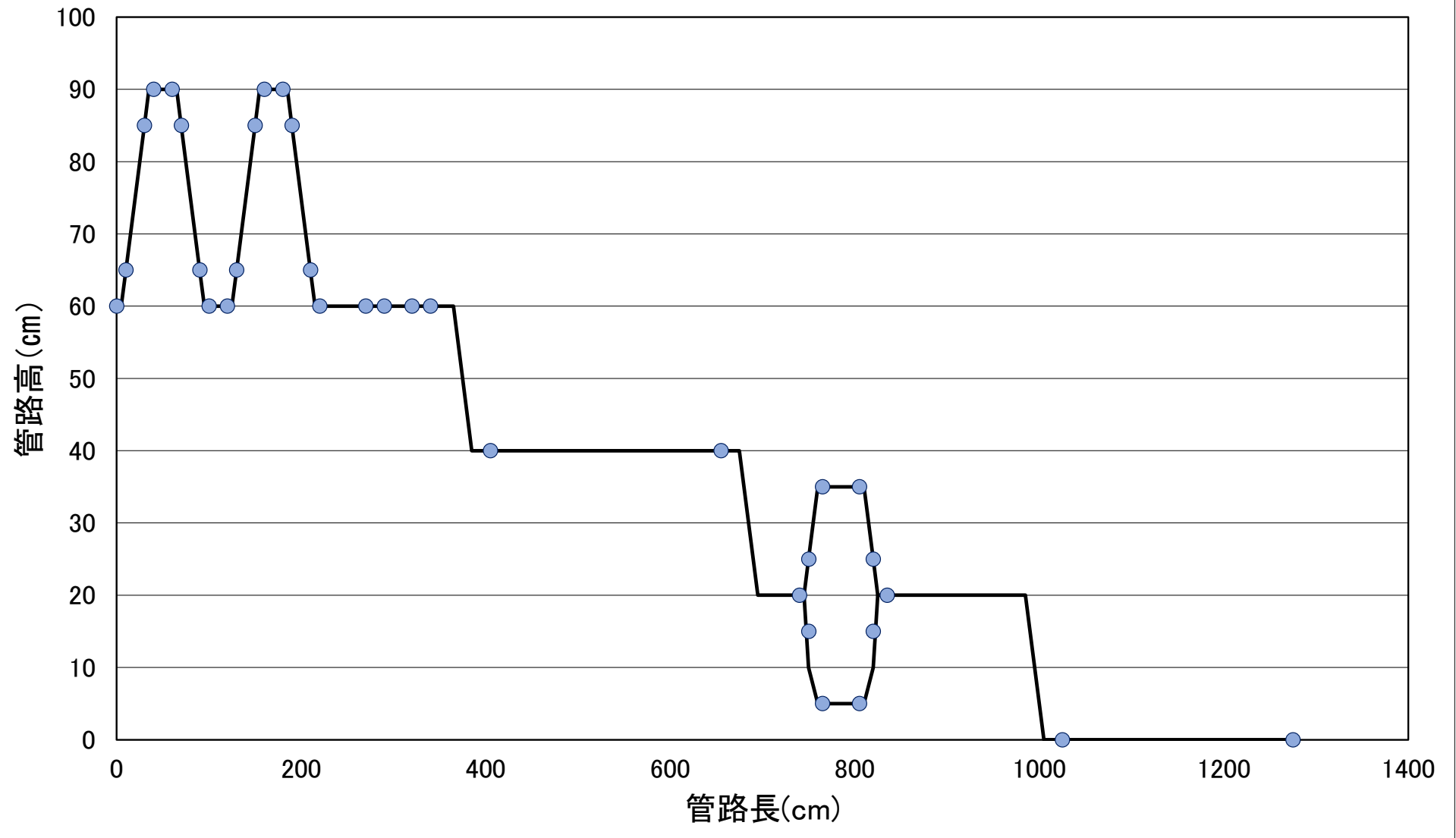
○はマノメータ設置位置、番号

計測結果の整理

➤ 表に示す管路長、管路高を用いて、管路形状を図化する。
 圧力水頭、全水頭をプロットする時、水平距離が同じだとグラフが重複すること、実験の折れ曲がった管路形状だとグラフが交差しわかりにくいので、下図のように少しモディファイしている。

No.	管路長		管路高
	単	追加	
1	0	0	60
	5	5	60
2	5	10	65
3	20	30	85
	5	35	90
4	5	40	90
5	20	60	90
	5	65	90
6	5	70	85
7	20	90	65
	5	95	60
8	5	100	60
9	20	120	60
	5	125	60
10	5	130	65
11	20	150	85
	5	155	90
12	5	160	90
13	20	180	90
	5	185	90
14	5	190	85
15	20	210	65
	5	215	60
16	5	220	60
17	50	270	60
	10	280	60
18	10	290	60
19	30	320	60
	10	330	60
20	10	340	60
	25	365	60
	20	385	40
21	20	405	40
22	250	655	40
	20	675	40
	20	695	20
23	45	740	20
	5	745	20
24	5	750	25
	10	760	35
25	5	765	35
26	40	805	35
	5	810	35
27	10	820	25
	5	825	20
28	5	750	10
	10	760	5
29	5	765	5
30	40	805	5
	5	810	5
31	10	820	10
	5	825	20
32	10	835	20
	150	985	20
	20	1005	0
33	20	1025	0
34	250	1275	0

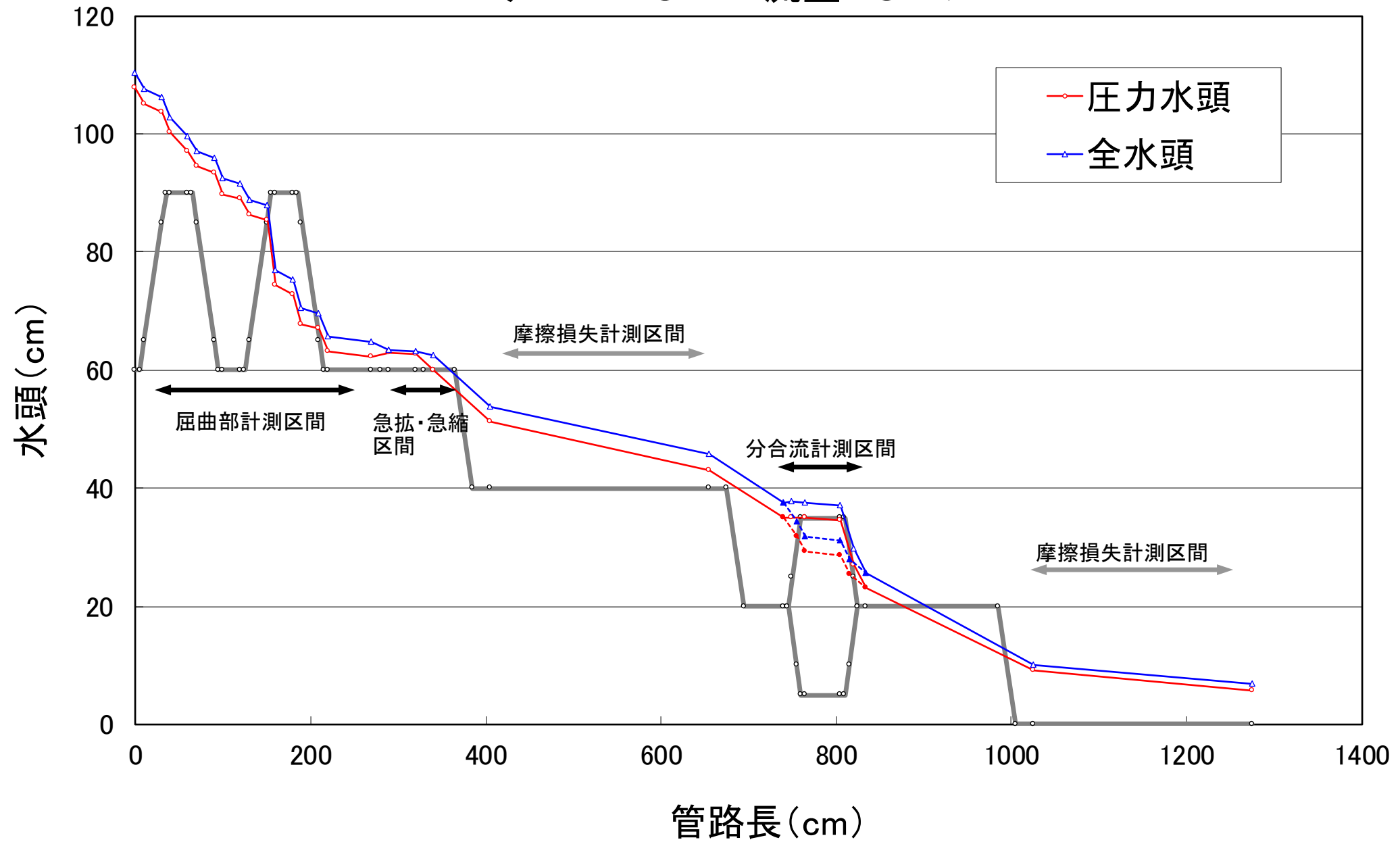
管路形状と計測地点



計測結果の整理

管水路－圧力水頭、全水頭縦断図

ケース－○ 流量 ○cc/s



計測結果の整理（流量の算出）

計測結果を下記のような整理表を用いて整理する。

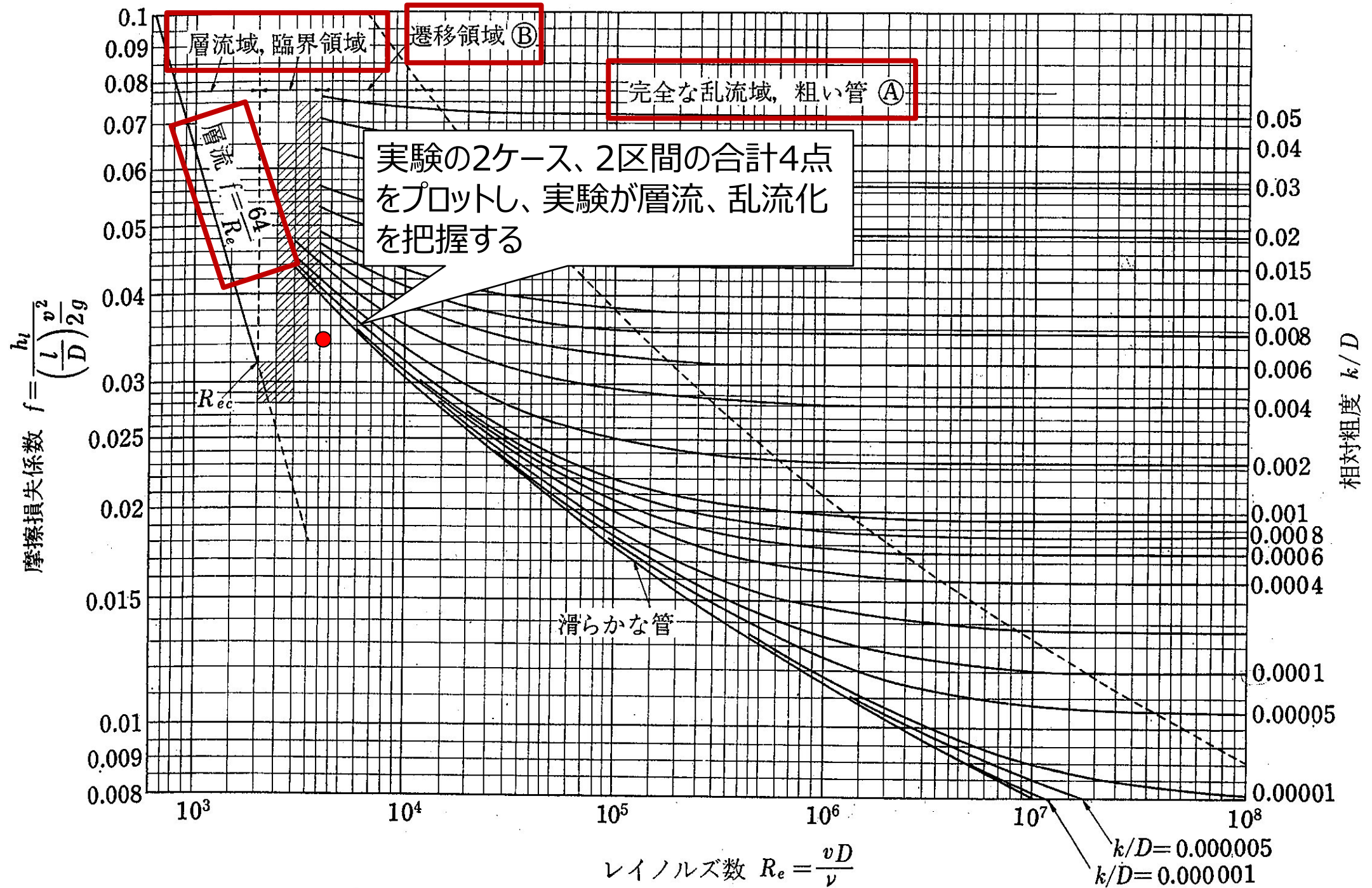
		レイブルズ数	摩擦損失係数	マンニングの粗度係数
ケースー 1	区間 ①			
	区間 ②			
ケースー 2	区間 ①			
	区間 ②			

	屈曲部損失係数			急拡部損失係数	急縮部損失係数
	最大	最小	平均		
ケースー 1					
ケースー 2					

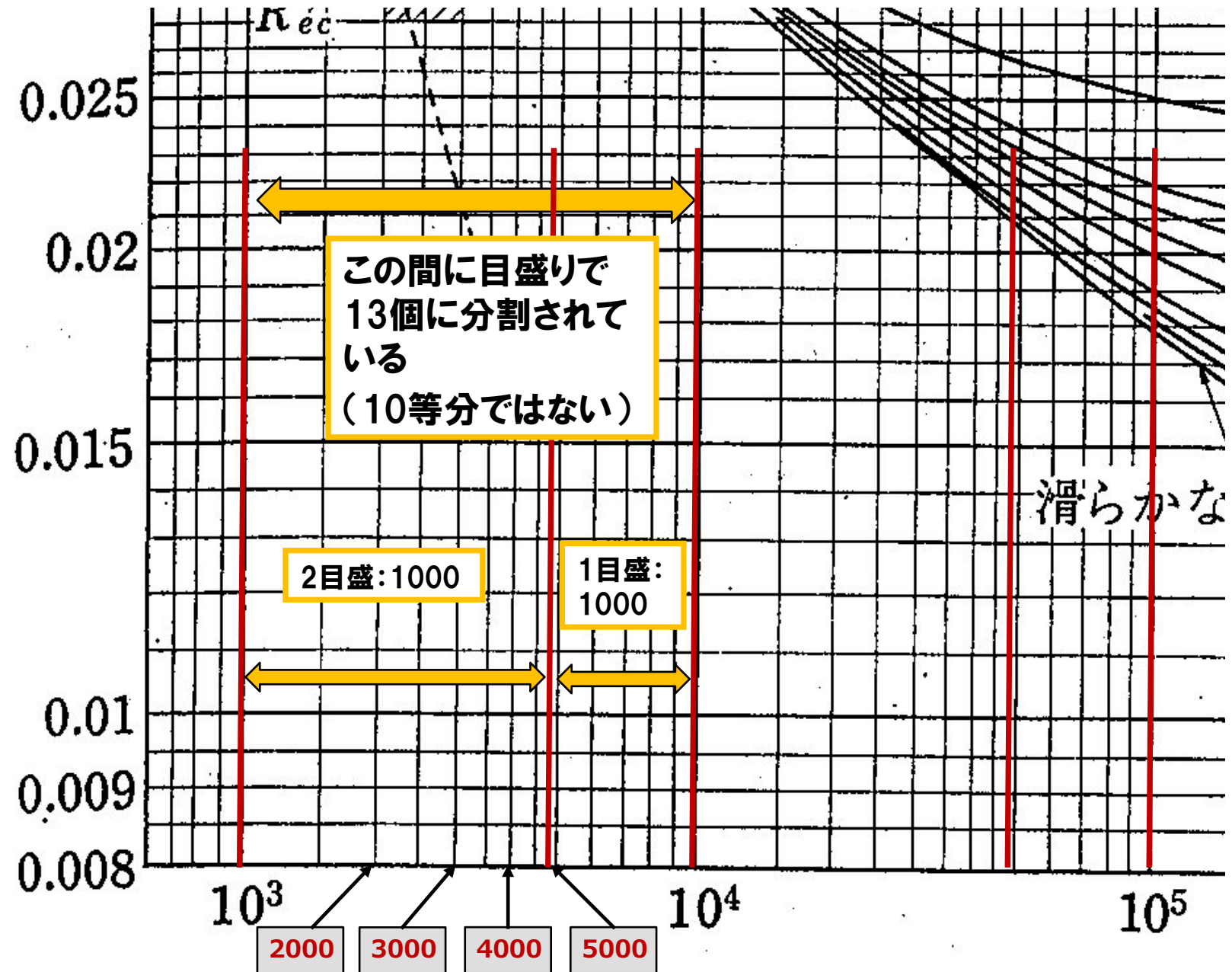
重要) 屈曲部損失係数の最大値は、異常値と思われる値を棄却した後の、平均値を算出する値の最大値を記入。

摩擦損失係数の算出

- 結果の整理表で算出した、摩擦損失係数をMoody図表にプロットする。
- 対数グラフへのプロットする場合の、目盛りの読み方に注意。



摩擦損失係数の算出



考察

1. 屈曲部での計測において、異常値と思われる個所を抽出し、なぜそのような異常値が生じてるかについて、その原因を想定する。同じ形状であれば損失水頭は同程度で生じているはず。

【例えば下記のように記載する】

何番と何番のマノメーターの値が……と較べて……のように異常である。これは、管路における損失水頭が……に影響されることを考慮すると、……の状態であるから、……が原因ではないかと想定される。

2. 分岐管路の上段水路と下段水路の流量の比率を算出する。

流量の比率を算出した方法、考え方も合わせ記載する。

対象はケース2のケース。

$$\text{上段水路} : \text{下段水路} = 1 : \square$$

【考え方】

上段と下段の通過流量を算出するのではなく、流量の比率を算出する。管路の形状が同じであれば損失係数は同じと考えられる。同一管路形状で生じる損失水頭の差は、管路内の流速の2乗に比例していることから、流量の比率を算出する。

3. 計測結果を用いて、次に示す管路の通過流量、損失水頭、必要な管路徑を算出する。

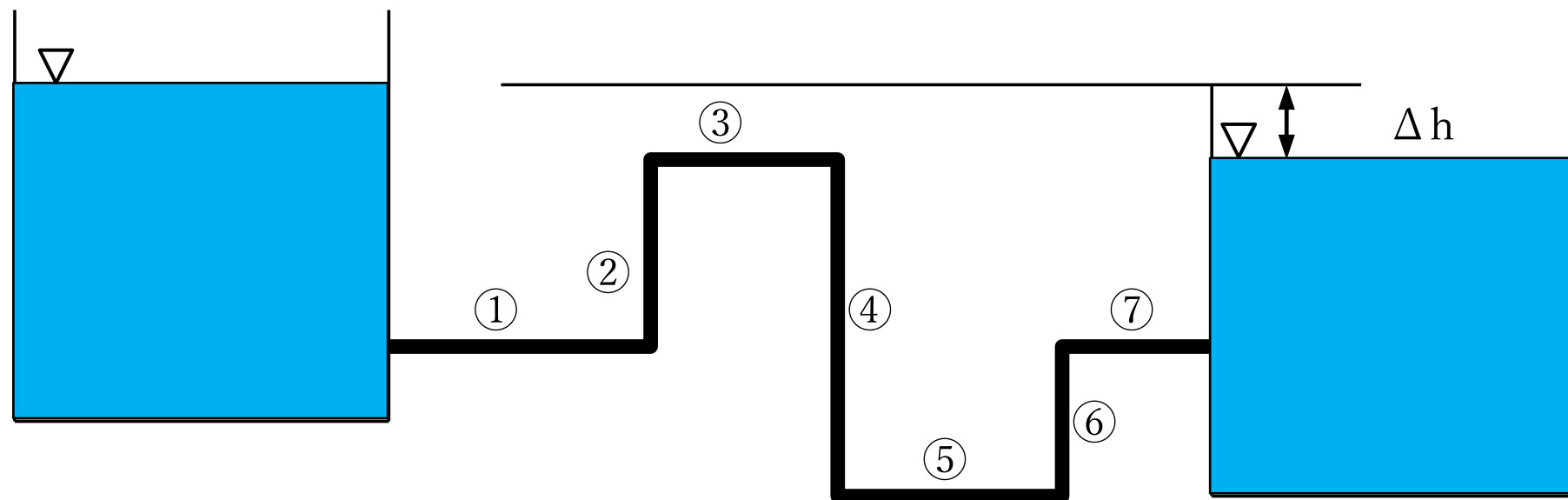
計算に用いるマンニングの粗度係数、屈曲部の損失係数、は実験結果のケース2の値を用いて算出する。ケース2のマンニングの粗度係数は、レイノルズ数の大きな方の係数を用い、別途示す入り口と出口損失も考慮して算出を行う。

☆3の必要管路徑の算出は、一義的な算出式が無いため、管路徑を仮定してトライアル計算。

考察

1. 下記に示す管路形状において、水頭差 $\Delta h = 1.0\text{m}$ の時、流れる流量を算出する。
2. 下記に示す管路形状において、流量が 50 ㍓/s の時、生じる水頭差 Δh を算出する。
3. 下記に示す管路形状において、水頭差 $\Delta h = 1.0\text{m}$ で流量 100 ㍓/s を流下させるのに必要な管路径を算出する。

☆必要管路径の算出は、一義的な算出式が無いため、管路径を仮定してトライアル計算。



管路	管路径	管路延長
①	20cm	5 m
②	20cm	3 m
③	20cm	2 m
④	20cm	5 m
⑤	20cm	3 m
⑥	20cm	2 m
⑦	20cm	2 m

損失係数

: 入口損失係数(0.5)

: 曲がり損失 (実験結果のケース2の平均値)

: 出口損失(1.0)

マンニングの粗度係数 (実験結果のケース2)

考察

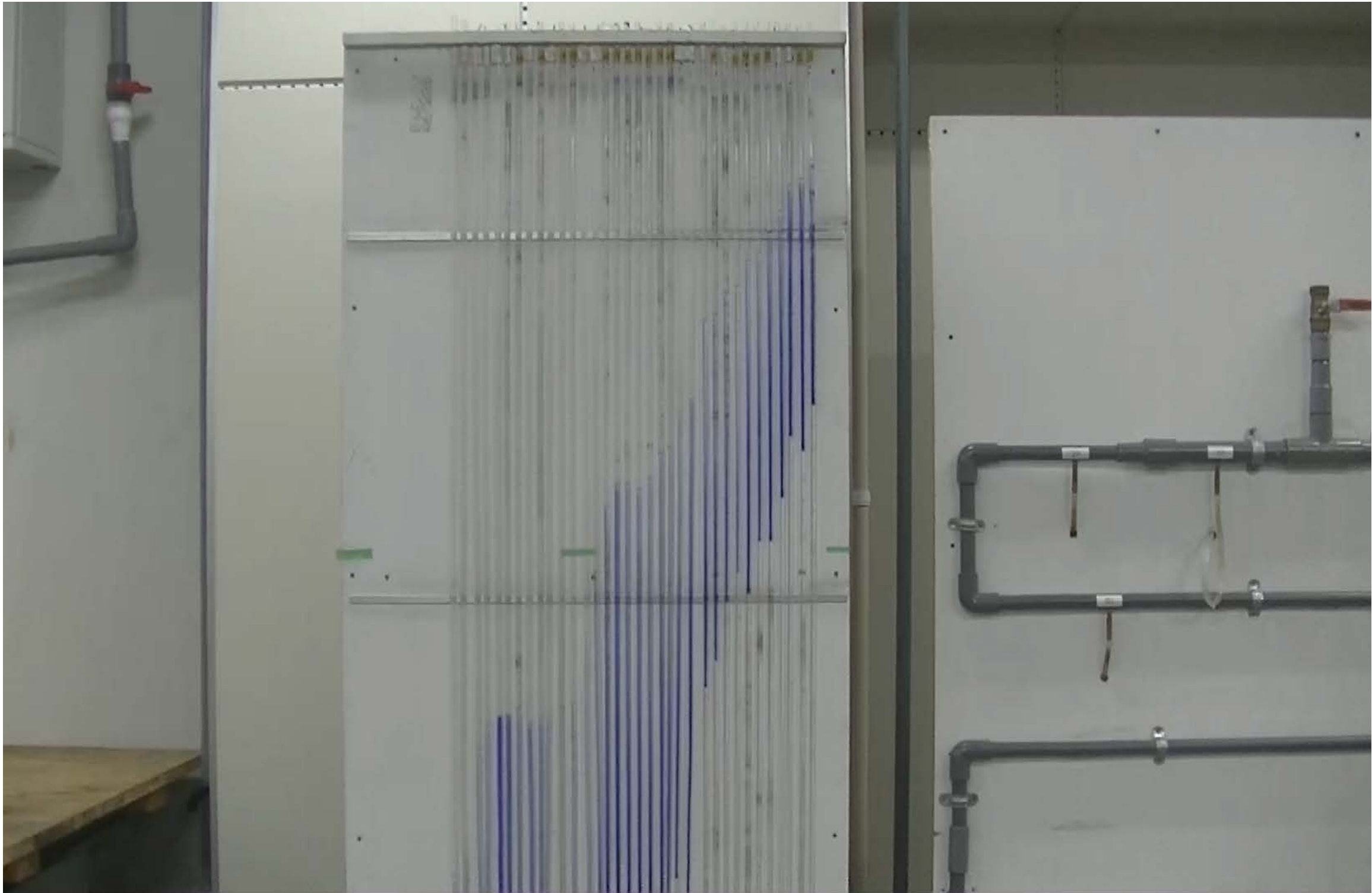
下記の用語について調べ、記述する。

資料のコピー・ペーストではなく、今回の実験の内容を考慮して記述する。

- 管路と開水路の流れの違い
- レイノルズ数とは
- 動粘性係数とは
- マニング式とハーゼンウィリアムズ式

(参考) 管路の急激な圧力水頭の変動 (サージング現象)

管路流れで生じる非定常な現象。下流の急激なバルブの閉鎖などで流れが急に停止すると、速度水頭が圧力水頭に変換され、その圧力変動が管内を往復する現象。摩擦で徐々に振動は減衰する。



(参考) 管路の急激な圧力水頭の変動 (ウォーターハンマー現象)

サージ現象より急激な変動により管内で生じる非定常な圧力変動現象。(水撃作用)
ウォーターハンマー現象は、管路端部のバルブの急閉塞により生じる急激な圧力変動により、管路が弾性体として高い圧力により変形する(管路径が少し膨張する)、管内の水が高い圧力により圧縮性流体として体積が縮小するなどの現象が生じる高い圧力変動が生じる現象。

- 小規模なウォーターハンマー現象は、大学構内やマンションなどの水道管でも生じる。開閉型のバルブを急激に閉じると、ドンというような音が生じる場合がある。
- 高圧力で運用されている水力発電所などでは発電機が急激に停止をすると高圧力のウォーターハンマー現象が生じ、管路が損傷する場合があります。途中に調圧水槽を設けてウォーターハンマー対策を行っている。



※調圧水槽とは、流れている水を急にせきとめたり、開いたりする際に生じる衝撃を緩和するために設けられている高い水槽、水塔のことです。

九州電力HPより