開発許可申請などを対象とした設計計算セミナー

排水計画の考え方と計算方法

第２回　排水路の流下能力の算定

株式会社　綜合システム

はじめに

この度、「開発許可申請などを対象とした設計計算セミナー」を受講していただき、誠にありがとうございます。はじめに、本セミナーは次のような趣旨で開催させていただいております。予め、ご理解ご了承のほど、よろしくお願いいたします。

土地開発行為に関わる方や土木設計計算の基礎を学びたい方などを対象としています。特に、今まで設計計算などの実務経験がほとんどない、土木工学分野の学習機会がほとんどなかった方など**設計初心者の方を対象**としています。

本セミナーでは、**設計計算の流れ**と**設計計算の基礎的な考え方を理解**していただくことに観点をおいた内容としています。これにより、**設計者の判断や考察する力をつけて、技術的観点での説明ができる力**に繋げていただければという趣旨としています。

排水計画の考え方と計算方法

- 第１回　排水計画の概要と流出量の算定　[実施済]
- **第２回　排水路の流下能力の算定**
  - 流下能力を確認する必要性
  - 水の流れの基本
  - マニング式による平均流速の算定
  - 演習問題

流下能力を確認する必要性

排水計画の基本目標（復習）

流下能力の確認

排水計画の基本目標

排水計画・・・流れてくる水の量を
計画した断面で**溢れさせずに流しきれるか**を確認する

今回対象

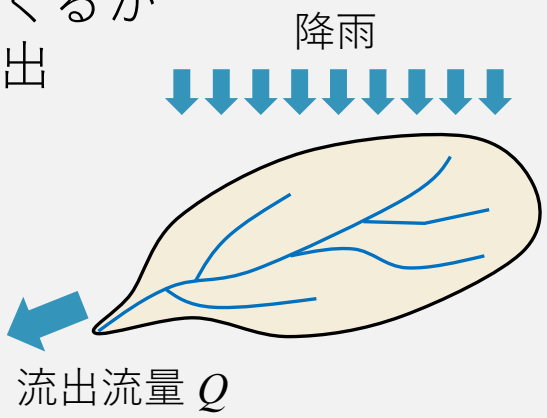
①流出流量（流れてくる水の量）

雨水量

降った雨がどれだけ流れてくるか
合理式にてピーク流量を算出

$$Q = \frac{1}{360} \cdot C \cdot I \cdot A$$

Q ：流出量(m^3/s)
C ：流出係数
I ：降雨強度(mm/hr)
A ：集水面積(ha)



汚水量

$$Q = \frac{p \cdot q}{24 \times 60 \times 60} \cdot A$$

Q ：計画時間最大汚水量(m^3/s)
p ：人口密度(人/ha)
q ：1人1日当たり
時間最大汚水量(m^3/日)
A ：排水面積(ha)

≦

②流下能力（流すことができる量）

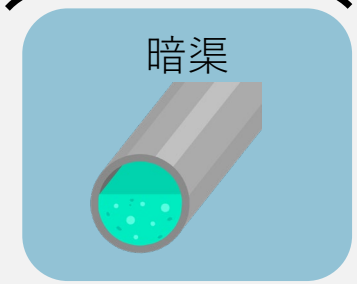
排水施設がどれだけ流せるか

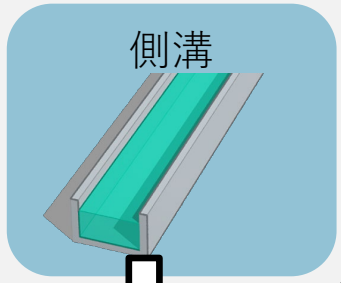
流量公式や**マニングの公式**で算出

$$Q = A \cdot v$$

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

A ：通水断面積（m^2）
v ：平均流速（m/s）
n ：粗度係数($sec/m^{1/3}$)
R ：径深(m)
I ：縦断勾配



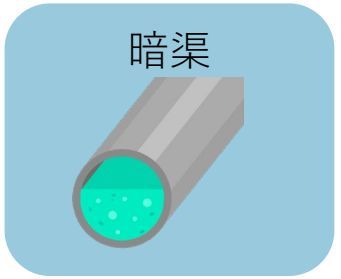


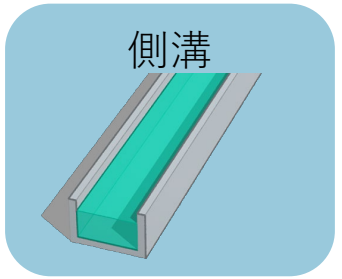
断面諸元を決定

流下能力の確認

～流下能力の確認とは～

流域から流出する計画流量を仮定した水路断面で流すことができるかを確認する。





～断面はどのように決定するか～

小さすぎる断面では、流出してくる流量を流すことができず、**溢れて災害**につながる。
大きすぎる断面では、流すことができるが、**コストの無駄**となる。
流出してくる流量（流入量）に対して、それを流すことができる**最適な断面**（大きさ・勾配等）を設定することが必要。
地形や構造物との取り合いから開水路（側溝）や暗渠（管、ﾎﾞｯｸｽ）を使い分ける場合もある。

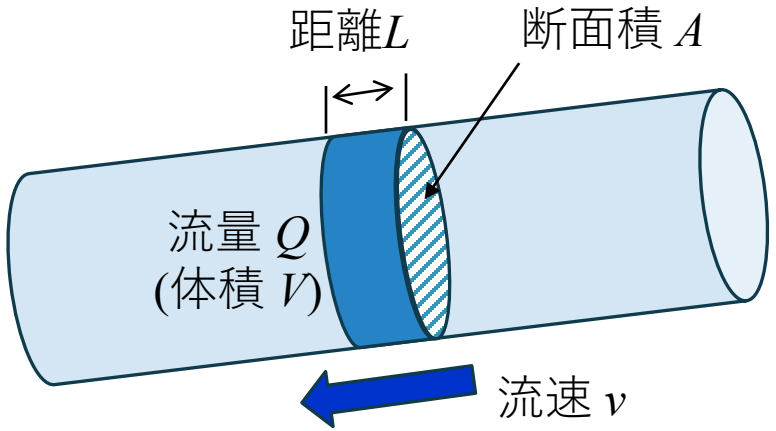
～流量の基本公式～

流量の基本公式は面積と流速の関係から求める。
流量は単位時間当たりにある断面を通過する「**水の体積**」を表す。

$$Q = A \cdot v$$

Q：流量（m^3/s）
A：通水断面積（m^2）
v：平均流速（m/s）

式の成り立ち
Q：流量(m^3/s)
＝水の体積V(m^3)／時間T(s)
＝断面積A(m^2)×流下距離L(m)／時間T(s)
＝断面積A(m^2)×流速v(m/s)



水の流れの基本

流れの分類と等流計算

常流・射流

開水路の水理量と平均流速の一般式

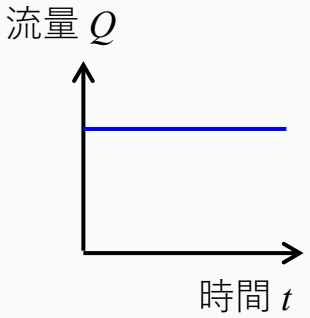
流れの分類

水路の計算

時間的変化による分類

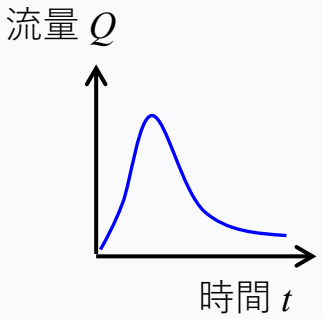
- **定常流(定流)**

  水路のある地点の**水深や流速が時間的に変化しない**流れ



- **非定常流(不定流)**

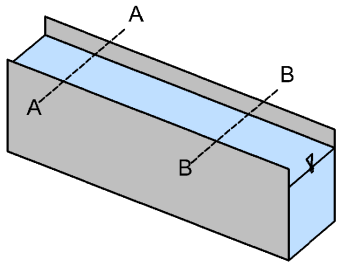
  ある地点の**水深や流速が時間的に変化する**流れ



場所的変化による分類

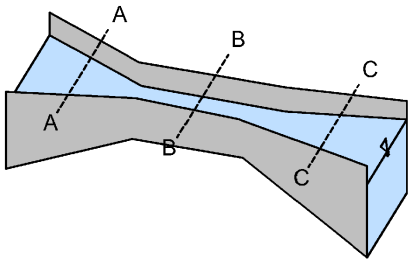
- **等流**

  流下方向に**水深や流速が変化しない**流れ



- **不等流**

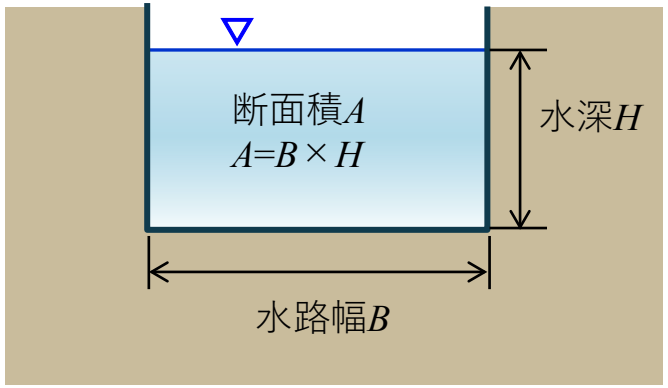
  流下方向に**水深や流速が変化する**流れ

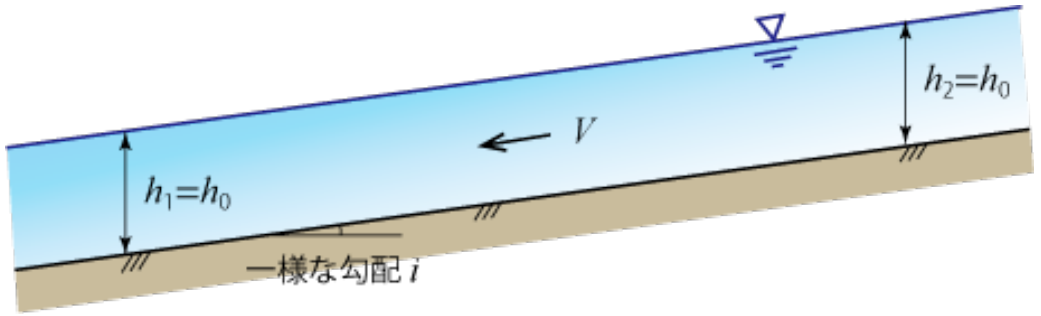


等流とは

～等流とは～

一様な流下断面で一定の流量であれば、水深や流速はどの断面でも同じになる流れ。
水路などでは、断面・勾配等が一定で、局所的な水位支配の影響が小さい区間を設計上、等流として扱う。



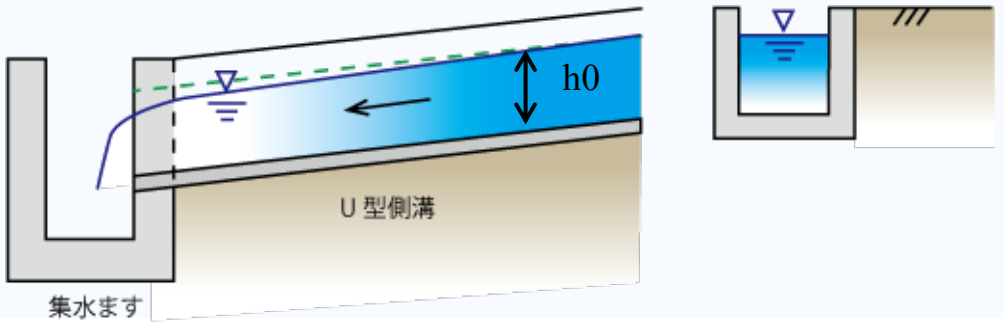


水路勾配 I ：一定
水路幅 B ：一定
粗度係数 n ：一定
流量 Q ：一定

⇒

水深 h ：一定
流速 v ：一定

道路側溝は、断面・勾配が一様で、下流端の集水桝があっても等流水深より高くならないことから等流と判断して計算。



常流・射流・限界流

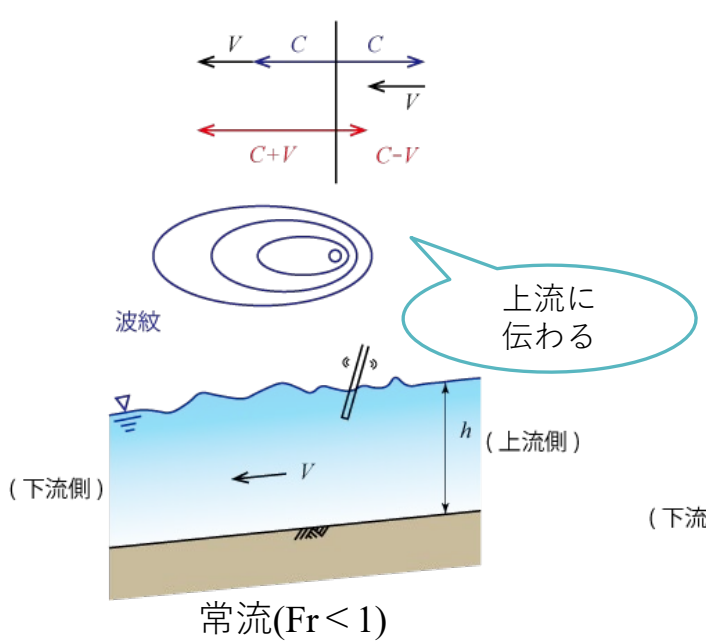
～流れ（常流・射流）の判定～

水面を有する開水路では流れの判定を
フルード数Frを用いて行う

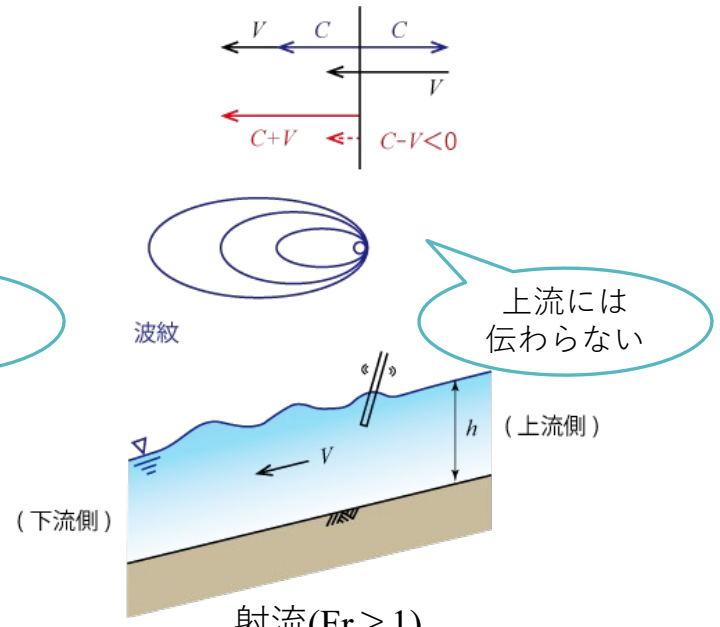
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

V：平均流速(m/s)
h：水深(m)
g：重力加速度(m/s²)

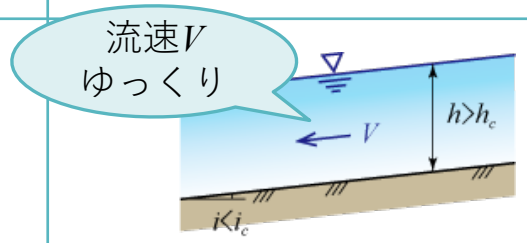
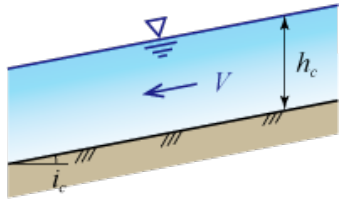
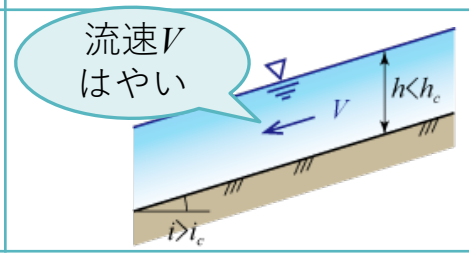
分母の$\sqrt{gh}$は長波の伝播波速C
⇒フルード数Frは、平均流速Vと
長波の伝播波速Cの比（無次元量）で定義
※これは慣性力$(m \cdot a)$と重力$(m \cdot g)$の比



常流(Fr＜1)



射流(Fr＞1)

分類	緩勾配	限界勾配	急勾配
フルード数	$Fr<1$　(常流)	$Fr=1$　(限界流)	$Fr>1$　(射流)
水深	$h>hc$	$h=hc$ (限界水深)	$h<hc$
状況図			

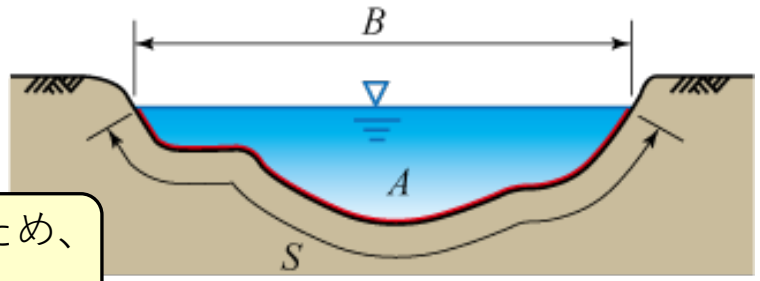
開水路流れの水理量と平均流速の一般式

開水路の水理量

$$Q = A \cdot v$$

$$R = \frac{A}{S}$$

Q：流量(m^3/s)
A：流水断面積（流積）(m^2)
v：平均流速(m/s)
R：径深(m)
S：潤辺(m)



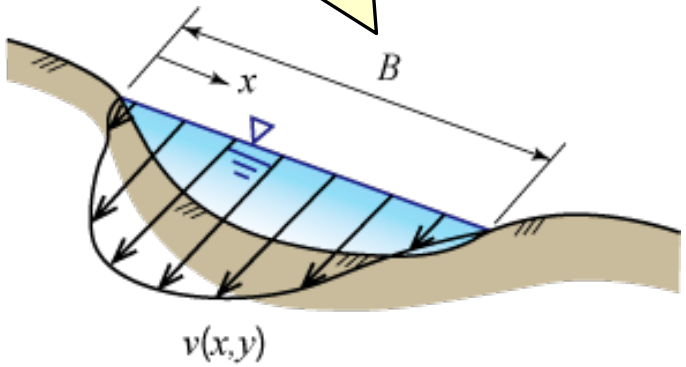
一般的な断面

流速分布が一定でないため、
平均流速で表現する

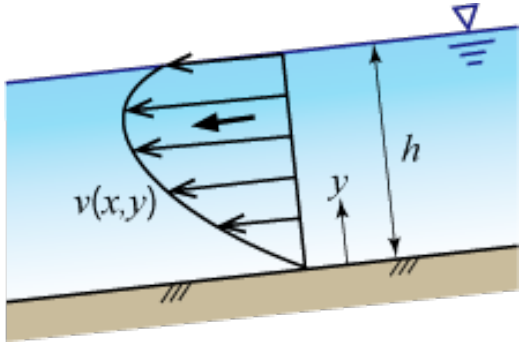
平均流速v(m/s)の一般式

$$v = \frac{1}{A}\iint_A v(x,y)dxdy$$

A　：流水断面積（流積）(m^2)
$v(x,y)$：xとyの2方向における流速(m/s)
dx　：断面のx方向における微小区間(m)
dy　：断面のy方向における微小区間(m)



x方向の流速分布



y方向の流速分布

ただし、平均流速の一般式はあまり実用的な式ではない
⇒「**マニングの式**」や「シェジーの式」などの平均流速公式により
実用的にかつ**簡易的**に**平均流速v**を求めることができる

マニング式による平均流速の算定

マニングの平均流速公式

粗度係数・径深・勾配

断面決定のポイント

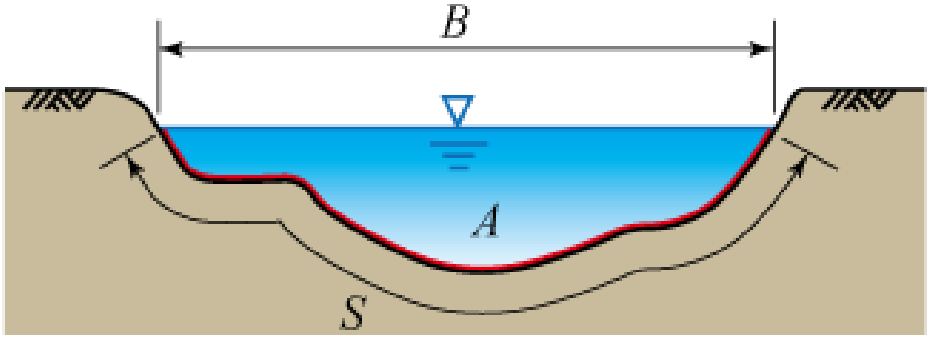
平均流速（マニングの流速公式）

～平均流速の求め方～

一般に平均流速はマニングの流速公式で求める。
マニングの流速公式は**等流の平均流速**を求める。

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

v：平均流速（m/s）
n：粗度係数（s/m$^{1/3}$）
R：径深（m）　$R=A/S$
I：勾配
A：流積（m^2）
S：潤辺（m）



～流速を決定する3要素～

マニングの式で流速は以下の3要素で決まる。

粗度係数 n	径深 R	勾配 I
粗度係数が大きいほど遅くなる ↘	径深が大きいほど速くなる ↗	勾配が大きいほど速くなる ↗

粗度係数①　n（マニングの式）

～粗度係数とは～

水路表面の粗さを表す指標で水路の摩擦抵抗となる係数。
粗度係数が大きいほど表面が粗く、流れにくいため、
流速が遅くなる。

一般的に係数は無次元（単位無）で表現されることが多いが、
マニングの粗度係数は次元をもつ。単位は（$s/m^{1/3}$）。

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$n = v^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$= (s/m) \cdot (m^{2/3})$$

$$= (s/m^{1/3})$$

nを求めるように式展開して
単位を考えると（$s/m^{1/3}$）

（重要）

マニングの粗度係数の単位が決まっているため、
マニングの公式の各要素の単位はそれぞれ
***v*（m/s）、*R*（m）**となることに注意。

マニングの粗度係数

水路の形式	水路の状況	nの範囲	nの標準値
カルバート	現場打ち コンクリート		0.015
	コンクリート管		0.013
	コンクリート 二次製品		0.013
	塩化ビニル管		0.010
ライニングした 水路	モルタル	0.011～0.015	0.013
	コンクリート コテ仕上げ	0.011～0.015	0.015
	コンクリート 底面砂利	0.015～0.020	0.017
ライニングなし 水路	土、直線、 等断面水路	0.016～0.025	0.022
	土、直線水路、 雑草あり	0.022～0.033	0.027
自然水路	整正断面水路	0.025～0.033	0.030
	非常に不正整な 断面、雑草多し	0.075～0.150	0.100

参考：「道路土工要綱」

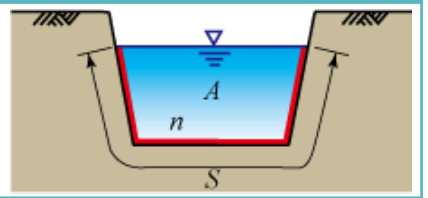
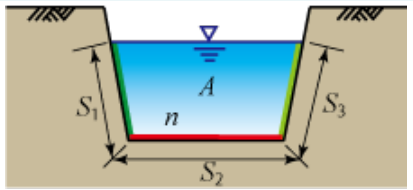
粗度係数②　n（平均流速公式のレベル）

～平均流速公式のレベル～

断面形状
- 単断面
- 複断面（高水部、低水部など）

粗度係数n(河床材料)
- 一様
- 変化（護岸、河床など）

平均流速の計算方法を「レベル」で分類

平均流速公式のレベル	条件	断面形状
レベル1	・単断面 ・潤辺の粗度係数nは一様 ・ﾌﾟﾚｷｬｽﾄ製品等	
レベル1a	・単断面 ・潤辺の粗度係数nは変化 ・側面がﾌﾞﾛｯｸ積みで底面がｺﾝｸﾘｰﾄとなるような水路等	

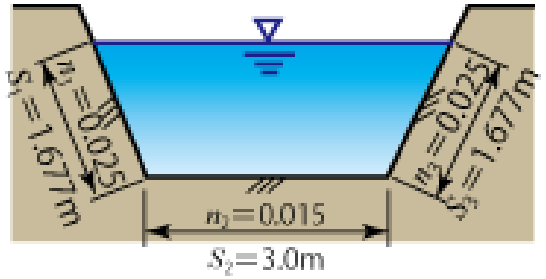
※レベル2以降は複断面で排水路とは異なるため省略

～合成粗度係数の求め方～

側面と底面で粗度係数が異なる場合、加重平均（潤辺長による重みづけ）で１つの粗度係数を求める。

$$\bar{n} = \left(\frac{\sum S_i \cdot n_i^{3/2}}{S} \right)^{2/3}$$

$\bar{n}$：合成粗度係数
S_i：各潤辺(m)
n_i：各潤辺ごとの粗度係数



部位	潤辺長S	粗度係数n	$S \times n^{3/2}$
左側面	1.677	0.025	0.007
底面	3.000	0.015	0.006
右側面	1.677	0.025	0.007
合計	6.354		0.019

合成粗度係数　(0.019÷6.354)^(2/3) ＝　0.021

径深　R

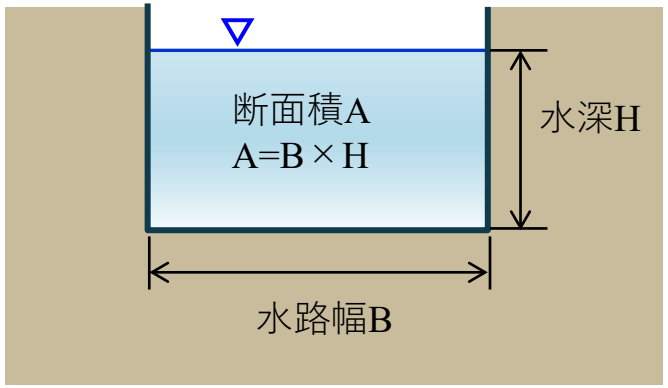
～径深とは～

どれだけ効率よく水が流れるかを表現。
マニングの式では**径深が大きいほど流速が速く**なる。

$$R = A/S$$

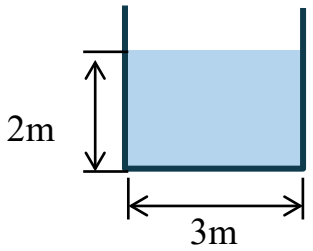
A：流積（水が流れる断面積）
S：潤辺（水が水路断面に触れる長さ）

$$S = B + 2H$$

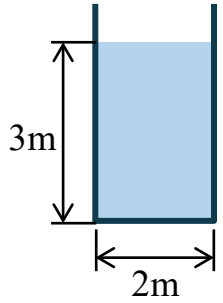


同じ断面積の水を流すとしたら
横長の側溝と縦長の側溝どちらが流速が速いか？

①横長（水深2m×幅3m）



②縦長（水深3m×幅2m）



①横長の場合
$A = 3 \cdot 2 = 6\mathrm{m}^2$
$S = 3+2 \cdot 2 = 7\mathrm{m}$
$R = 6/7 = 0.86\mathrm{m}$

②縦長の場合
$A = 3 \cdot 2 = 6\mathrm{m}^2$
$S = 2+2 \cdot 3 = 8\mathrm{m}$
$R = 6/8 = 0.75\mathrm{m}$

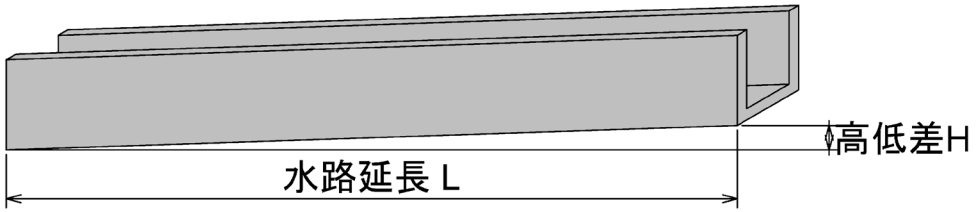
横長の方が**径深**が大きくなり
横長の方が流速が速い

勾配　I（マニングの式）

～勾配～

水路の等流計算では勾配を水路勾配で考える。

水路勾配　　$I = H/L$　(無次元)



表現方法の一例

1/200、0.5％、5‰などがあるが

⇒　I=0.005　としてマニング式に代入する

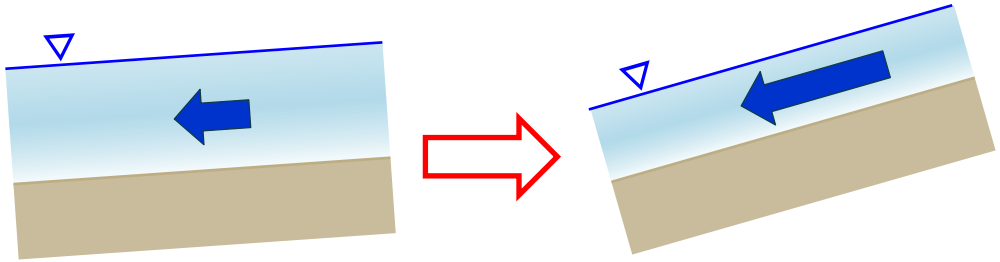
勾配が急になるほど流れが**速く**なる。

マニングの式

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

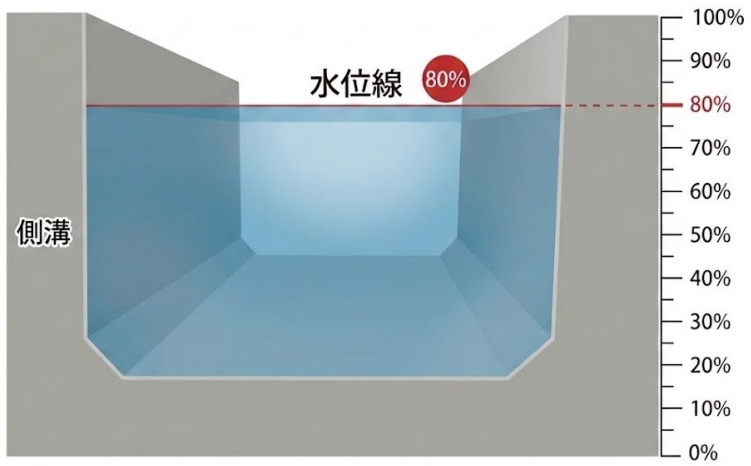
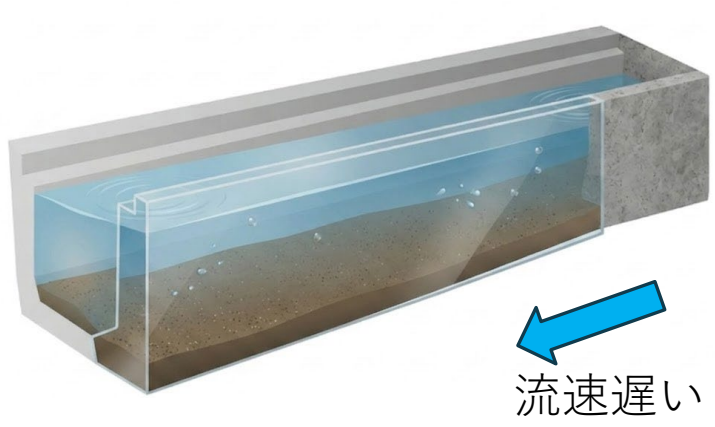
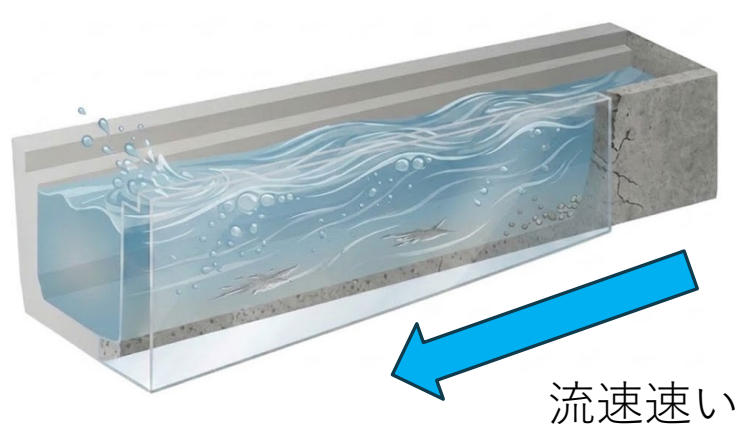
勾配が4倍になると流速2倍

※粗度、径深が同じ場合



断面決定のポイント

画像：Google Gemini により生成

水位は8割水深	流速が遅くなりすぎない	流速が速くなりすぎない
		
供用期間中に側溝内が**土砂堆積**する可能性がある	土砂が堆積しやすく想定する水路の機能を果たせない可能性がある	水路断面の**摩耗や洗掘**の恐れあり

※材料がコンクリートの側溝であれば、平均流速の範囲は0.6～3.0(m/s)、
石張りまたはブロックであれば、平均流速の範囲は0.6～1.8(m/s)が目安
（出典：道路土工要綱より）

演習問題

対象流域の面積0.30(ha)でそのうち1/6は路面(舗装)でC=0.825、1/3は勾配の緩い山地でC=0.300、1/2は田・水田でC=0.75とする場合の流出流量を求める。
平均降雨強度は次の君島式で求める。

$$I = \frac{b}{T^n + a}$$

なお、定数は右表の10年確率の値を用いることとする。
（和歌山県管内確率降雨強度の算定(H26.3)より）

流入時間はKerbyの式を用いて求めることとする。
水路へはアスファルト舗装面を流下し、流下長L＝10m、勾配S=1.5%とする。

$$t_1 = 1.445\left(\frac{n \cdot L}{\sqrt{S}}\right)^{0.467}$$

なお、設置する水路はH300-B300の側溝とし、水路勾配はI=1/100、
延長はL＝250m、8割水深で計画する。

設置する水路は対象流域における流下能力を満足できているか求めよ。

降雨強度式の定数

確率年	降雨強度式		
	n	a	b
1/2	0.713	5.704	876.0
1/5	0.697	6.900	1229.6
1/10	0.693	8.193	1560.0
1/20	0.701	10.868	2093.2
1/30	0.700	12.072	2383.5
1/50	0.711	15.447	3037.6
1/100	0.721	19.932	4031.4
1/200	0.750	30.384	6094.2

Kerbyの粗度係数

工種	粗度係数
アスファルト、コンクリート面	0.013
滑らかな不浸透面	0.02
滑らかな締固め土面	0.10
低密な芝地面、耕地	0.20
芝地牧草地	0.40
落葉樹林	0.60
針葉樹林	0.80

回答（流出係数の算出）

対象流域の面積0.30(ha)でそのうち1/6は路面(舗装)でC=0.825、1/3は勾配の緩い山地でC=0.300、
1/2は田・水田でC=0.75とする。

[流出係数Cの算出]

面積の割合から面積を計算し各要素の流出係数を定める。

土地利用状況	面積の割合	面積A(ha)	流出係数C	A×C
路面（舗装）	1/6	0.05	0.825	0.041
勾配の緩い山地	1/3	0.10	0.300	0.030
田・水田	1/2	0.15	0.750	0.113
合計		0.30		0.184

加重平均して流出係数Cを求める　0.184÷0.30 ＝ **0.613**

加重平均で算出　$\overline{C} = \dfrac{\sum C_i \cdot A_i}{A}$

回答（洪水到達時間の算出）

流入時間はKerbyの式を用いて求める。
水路へはアスファルト舗装面を流下し、流下長L＝10m、勾配S=1.5%とする。

$$t_1 = 1.445\left(\frac{n \cdot L}{\sqrt{S}}\right)^{0.467}$$

なお、設置する水路はH300-B300の側溝とし、水路勾配はI=1/100、
延長はL＝250m、8割水深で計画する。

Kerbyの粗度係数

工種	粗度係数
アスファルト、コンクリート面	0.013
滑らかな不浸透面	0.02
滑らかな締固め土面	0.10
低密な芝地面、耕地	0.20
芝地牧草地	0.40
落葉樹林	0.60
針葉樹林	0.80

[洪水到達時間Tの算出]

(1) 流入時間t_1の算出

Kerbyの式を用い、流下長L＝10m、勾配S=1.5%で
アスファルト舗装面(粗度係数n=0.013)を流下するので

$$t_1 = 1.445\left(\frac{n \cdot L}{\sqrt{S}}\right)^{0.467}$$

$$t_1 = 1.445\left(\frac{0.013 \cdot 10.0}{\sqrt{0.015}}\right)^{0.467} = 1.49(\text{min})$$

(2) 流下時間t_2の算出

設置する水路はH300-B300の側溝で
水路勾配はI=1/100、延長L＝250m、計画水深H＝0.24m
(8割水深)

面積　A=幅0.3m×(高さ0.3m×0.8)＝0.072 (m^2)
潤辺　S=(0.3×0.8)×2+0.3＝0.78 (m)
径深　$R = A/S$＝0.092 (m)

水路を流下する流速はマニングの公式より

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$v = \frac{1}{0.013} \cdot 0.092^{2/3} \cdot 0.01^{1/2} = 1.571(\text{m/s})$$

流下時間t_2は

$$t_2 = \frac{L}{60v} = \frac{250.0}{60 \cdot 1.571} = 2.65(\text{min})$$

(3) 洪水到達時間Tの算出

$$T = t_1 + t_2 = 1.49 + 2.65 = 4.14(\text{min})$$

洪水到達時間が10分以下のため、**<u>t=10分</u>**とする。

洪水到達時間の最小値10分

回答（降雨強度・流出流量の算出）

平均降雨強度は次の君島式で求める。
なお、10年確率の値を用いることとする。

降雨強度式の定数

確率年	降雨強度式		
	n	a	b
1/2	0.713	5.704	876.0
1/5	0.697	6.900	1229.6
1/10	0.693	8.193	1560.0
1/20	0.701	10.868	2093.2
1/30	0.700	12.072	2383.5
1/50	0.711	15.447	3037.6
1/100	0.721	19.932	4031.4
1/200	0.750	30.384	6094.2

[降雨強度の算出]

降雨強度式は君島式
洪水到達時間は10分
降雨強度は10年確率より

$$I = \frac{b}{T^n + a}$$

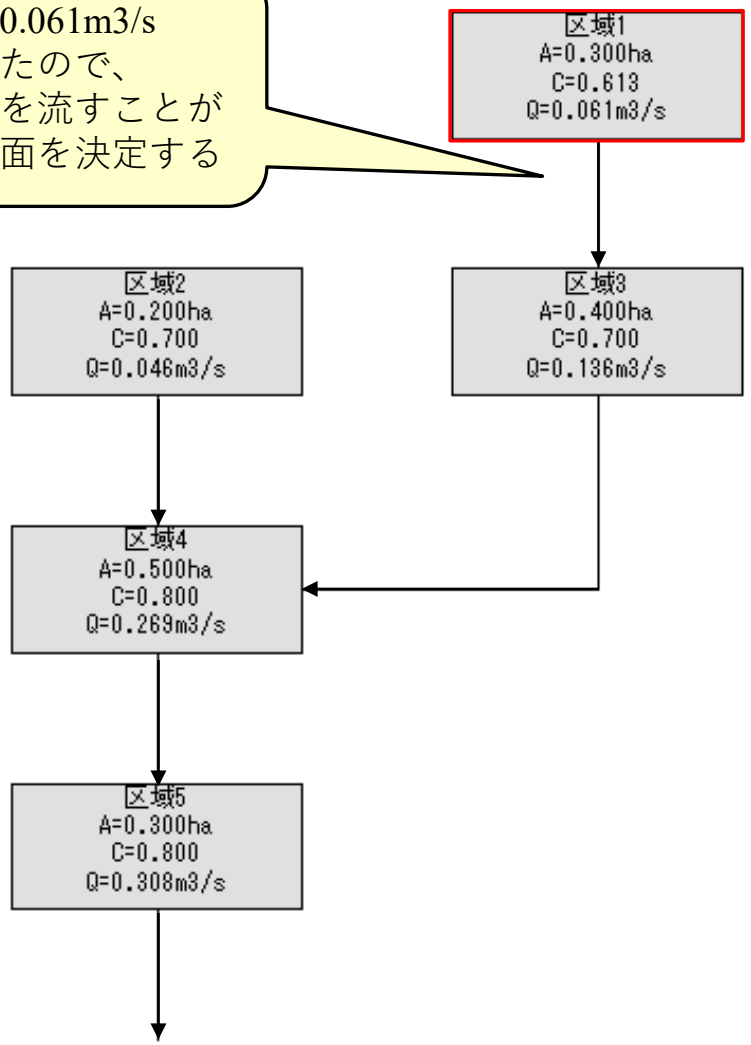
$$I = \frac{1560.0}{10^{0.693} + 8.193} = 118.86(\mathrm{mm/hr})$$

[流出流量の算出]

合理式により流出流量を求める。
C=0.613、I=118.86mm/hr、面積A=0.30haより

$$Q = 1/360 \cdot C \cdot I \cdot A = 1/360 \cdot 0.6125 \cdot 118.86 \cdot 0.30 = 0.061(\mathrm{m^3/s})$$

流出流量0.061m3/s
が求まったので、
この区間を流すことが
できる断面を決定する



回答（流下能力の確認）

設置する水路はH300-B300の側溝とし、水路勾配はI=1/100、
延長はL＝250m、8割水深で計画する。
設置する水路は対象流域における流下能力を満足できているか求めよ。

[通水断面の流速の算出]

設置する水路はH300-B300の側溝で
水路勾配はI=1/100、計画水深H=0.24m
(8割水深)

面積　$A=0.3\times0.8\times0.3=0.072\ (m^2)$
潤辺　$S=(0.3\times0.8)\times2+0.3=0.78\ (m)$
径深　$R=A/S=0.092\ (m)$

水路を流下する流速

$$v=\frac{1}{n}\cdot R^{2/3}\cdot I^{1/2}$$

$$v=\frac{1}{0.013}\cdot 0.092^{2/3}\cdot 0.01^{1/2}=1.571(m/s)$$

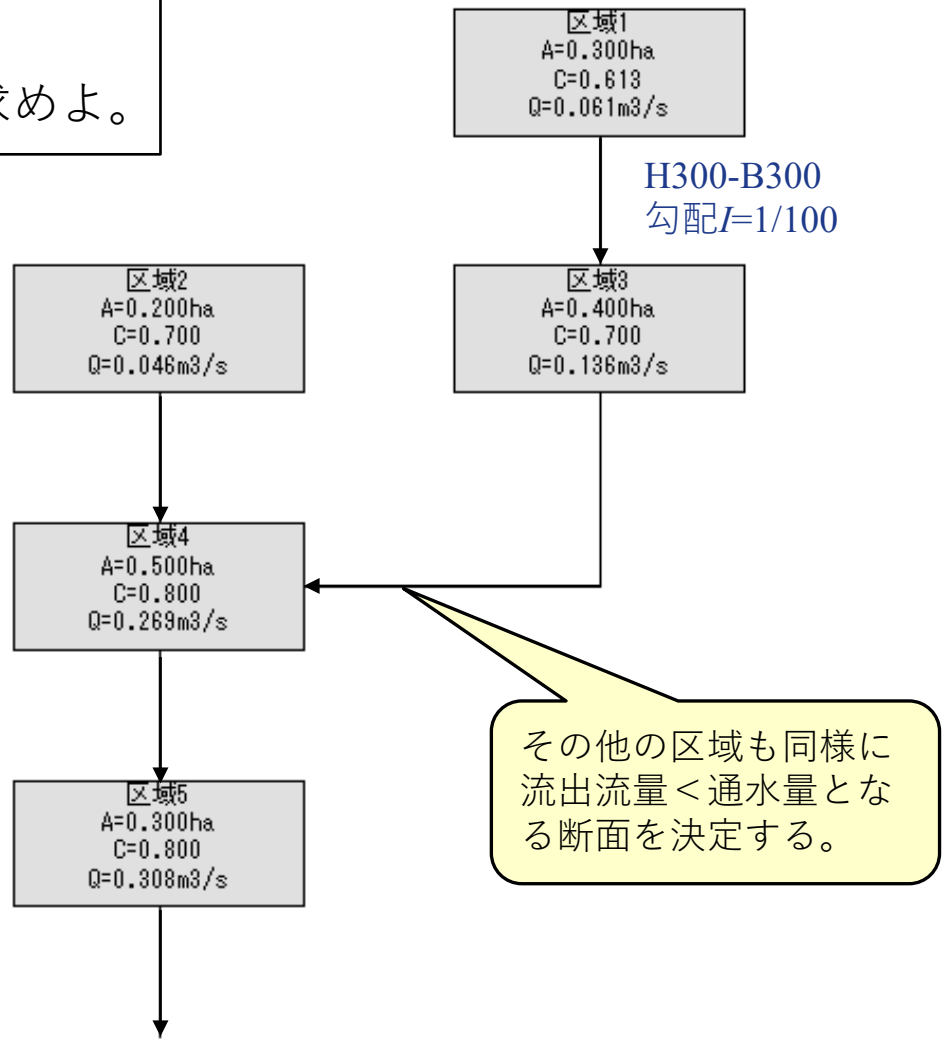
[通水量の算出]

流量の基本公式より通水量を求める。

$$q=A\cdot v=0.072\cdot 1.571=0.113(m^3/s)$$

[通水量の判定]

流出流量 0.061＜通水量 0.113よりOK



まとめ

排水計画の基本目標：流出流量 ≦ 流下能力 を確認し、溢れさせずに流しきれる断面にする

断面を仮定して計画流量を流すことができる断面をトライアルで算出

流出流量（流れてくる水の量）

- 合理式でピーク流量を算出　$Q = 1/360 \cdot C \cdot I \cdot A$

  C：流出係数（土地利用ごとの面積による加重平均）
  I：降雨強度（降雨強度式や洪水到達時間Tから算出）
  A：面積（対象区域の総面積）
  T：洪水到達時間　$T = T_1$(流入時間) $+ T_2$（流下時間）

流下能力（流すことができる量）

- 基本公式　$Q = A \cdot v$　（断面積×平均流速）
- マニング式　$v = 1/n \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$

  n：粗度係数　　n大 →遅い
  R：径深　　R大 →速い
  I：勾配　　I大 →速い

ご清聴ありがとうございました。