

2024年度(R06年度)

## 地下水盆管理学

福島大学 共生システム理工学類  
地球環境コース  
柴崎 直明

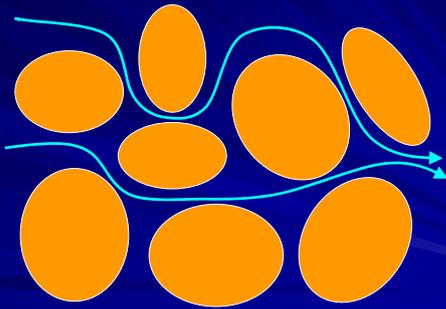
1

### 3. 地下水の流動



静岡県富士宮市にある、白糸の滝(2016年12月 柴崎撮影)

### 土粒子間の地下水の流動



### 地下水の定量化のためには...

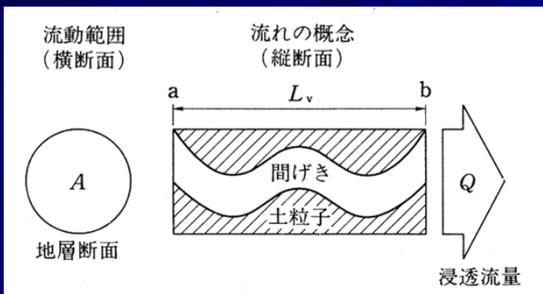
地下水の流量や流速を知る必要がある

地下水は、間隙と地層を構成する物質を含めた帯水層の全空間を流動しているものと仮定すると...

その流れは、実際の地下水の流速とは異なる

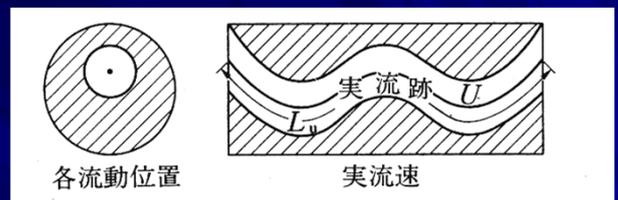
見かけの流れ = 擬流 = 浸透流

### 地下水の流速とは？



$Q$ は、 $A$ という地層断面を一定時間 $t$ の間に通過する浸透流量

### 地下水の実流速



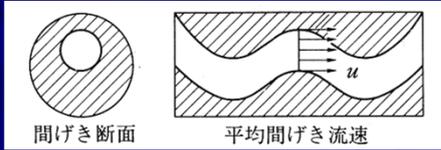
実際の水の動きは、粒子をよけながら $L_u$ のような距離を通過する

実流速 $U$ は、

$$U = \frac{L_u}{t}$$

## 地下水の平均間隙流速

均質な地層中でも、間隙の状態では流速は一律ではない。不均質な地層中では、数オーダー違う。それを平均したもの。

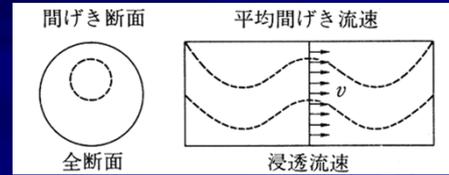


平均間隙流速  $u$  は、

$$u = \frac{L_v}{t}$$

## 地下水の浸透流速

地下水が帯水層の全空間を流れていると仮定した場合の流速



浸透流速  $v$  は、

$$v = \frac{Q}{A \cdot t}$$

## 浸透流速

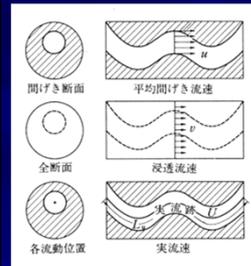
$$v = \frac{Q}{A \cdot t}$$

$$[L/T] = \frac{[L^3]}{[L^2] \cdot [T]}$$

一般に、地層断面に対する流路断面の比は、有効間隙率 ( $n_e$ ) に等しい

$$v = n_e \cdot u$$

## 地下水の流速の使い方



揚水試験や水収支の定量化

➡ 浸透流として扱う

トレーサーによる地下水追跡  
地下水汚染の検討

➡ 平均間隙流速が必要

## 流体ポテンシャル

流動する地下水は、運動エネルギーとポテンシャルエネルギーからなる力学的エネルギーをもつ

地下水の流動は遅いため、運動エネルギーは無視できる

流体の単位質量あたりの力学的エネルギーを、「流体ポテンシャル」と定義 (Hubbert, 1940)

## 流体ポテンシャルと地下水流動

地下水は、流体ポテンシャルの勾配に沿って流れる (Hubbert, 1940)

流体ポテンシャル ( $\Phi$ , ファイ) の式:

$$\Phi = gZ + \frac{p - p_0}{\rho}$$

$g$ : 重力加速度、 $Z$ : 基準面からの高さ、 $p$ : 圧力、 $p_0$ : 大気圧、 $\rho$ : 水の密度

## 流体ポテンシャル式の変形(1)

一般に、 $p$ は大気圧を基準にしてあらわすため、 $p_0=0$ となるから

$$\Phi = gZ + \frac{p}{\rho} = gh$$

流体ポテンシャルは、  
重力ポテンシャル(または位置ポテンシャル) $gZ$ と、  
圧力ポテンシャル  $p/\rho$  の和である

## 流体ポテンシャル式の変形(2)

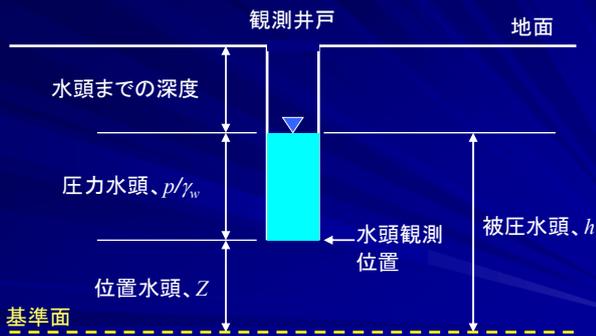
$$\Phi = gZ + \frac{p}{\rho} = gh$$

両辺を $g$ で割ると、

$$h = Z + \frac{p}{\rho g} = Z + \frac{p}{\gamma_w} = Z + \psi$$

$h$ : 水理水頭(=被圧水頭)、 $Z$ : 位置水頭、 $\gamma_w$ (= $\rho g$ ): 水の単位体積重量、 $\psi$ (プシー): 圧力水頭

## 位置水頭・圧力水頭・被圧水頭

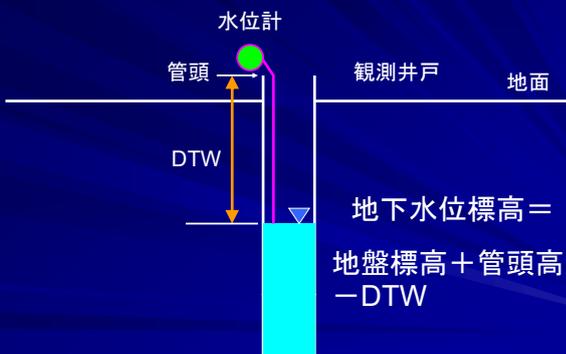


## 地下水位の測定

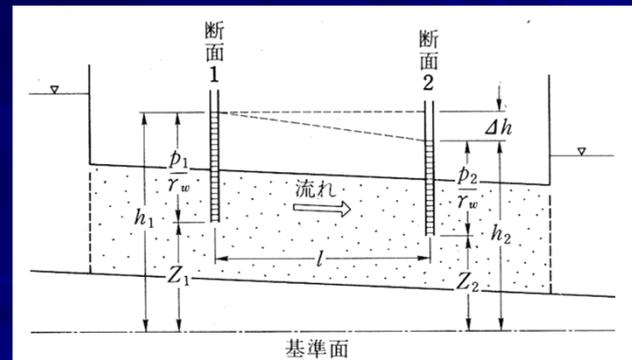
基準点(管頭高)から水面までの深度を測定



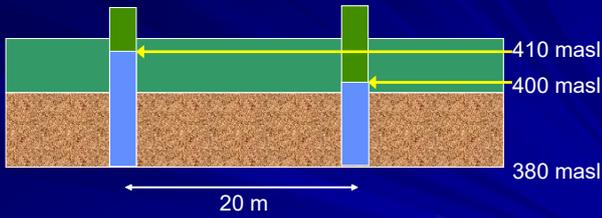
## 地下水位標高の算出



## 水頭差と地下水流動



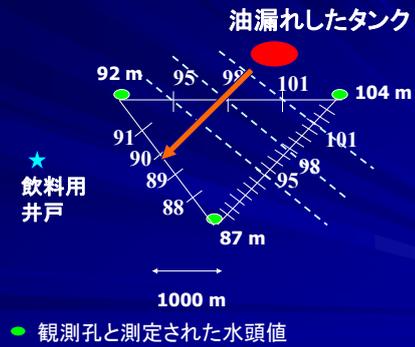
## 動水勾配



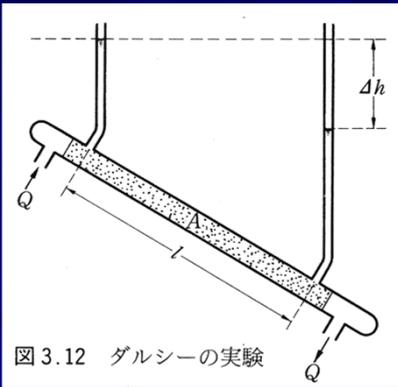
$$dl = 20 \text{ m}, dh = 10 \text{ m}$$

$$dh/dl = 0.5$$

## 地下水の流動方向



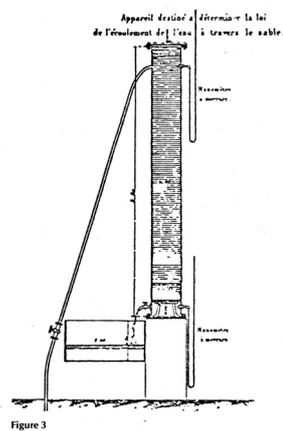
## ダルシーの実験



- $Q$ : 管内に流入・流出する水量
- $A$ : 管の断面積
- $l$ : 2点間の距離
- $\Delta h$ : 水頭差
- $\Delta h/l$ : 動水勾配

図 3.12 ダルシーの実験

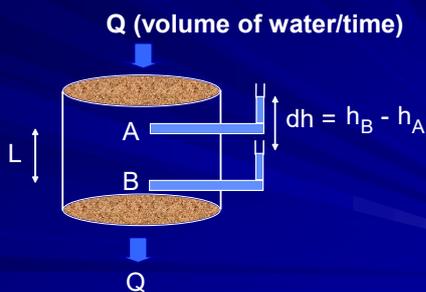
## ダルシーの実験装置



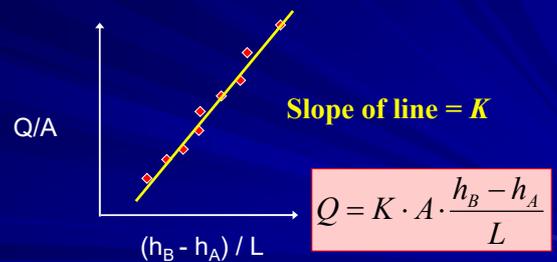
Henry Darcy (1856)  
Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris, 647p.



## ダルシーの法則 (Darcy's Law)



## 透水係数, $K$ (Hydraulic Conductivity)



## 代表的な地層の透水係数 (m/day)

粘土:	0.04
砂:	34.5
礫:	216
砂礫:	86
砂岩:	30
石灰岩・頁岩:	0.04
チャート・花崗岩:	0.004

## ダルシー式の変形

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{h_B - h_A}{L}$$

動水勾配を  $I$  で置き換え、両辺を  $A$  で割ると、

$$Q/A (= v) = K \cdot I$$

$Q/A$  は浸透流速  $v$  であるので、 $v$  は  $K$  を定数とする動水勾配の1次関数である

## ダルシーの法則の一般化

ダルシーの法則の比例定数は、帯水層の透水性に比例するばかりでなく、流体の性質にも依存する

$$v = \frac{C_K d^2 \rho g}{\mu} \cdot I$$

$d$ : 帯水層骨格の粒径、 $\rho$ : 流体の密度、 $\mu$ : 流体の粘性係数、 $g$ : 重力加速度、 $C_K$ : 比例定数

## 流体の浸透流速

$$v = \frac{C_K d^2 \rho g}{\mu} \cdot I$$

- 浸透流速は、密度に比例する
- 浸透流速は、粘性係数に反比例する

## 水の密度と粘性係数

表 3.3 水およびそのほかの流体の密度と粘性係数  
表 3.3 a 水 (東京天文台編<sup>1)</sup>による)

温度 (°C)	0	5	10	15	20	25	30	40
密度 (kg/m <sup>3</sup> ; * : 4°Cの値)	999.9	1000.4*	999.7	999.1	998.2	997.1	995.7	992.2
粘性係数 (×10 <sup>-3</sup> Pa 秒)	1.792	1.520	1.307	1.138	1.002	0.890	0.797	0.653
動粘性係数 (×10 <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup> /秒)	1.792	1.520	1.307	1.139	1.0038	0.893	0.801	0.658

- 温度が高いほど、密度  $\rho$  は小さい
- 温度が高いほど、粘性係数  $\mu$  は小さい

$$\text{動粘性係数} = \mu / \rho$$

- 温度が高いほど、動粘性係数が小さい

## 水の温度と浸透速度

表 3.3 水およびそのほかの流体の密度と粘性係数  
表 3.3 a 水 (東京天文台編<sup>1)</sup>による)

温度 (°C)	0	5	10	15	20	25	30	40
密度 (kg/m <sup>3</sup> ; * : 4°Cの値)	999.9	1000.4*	999.7	999.1	998.2	997.1	995.7	992.2
粘性係数 (×10 <sup>-3</sup> Pa 秒)	1.792	1.520	1.307	1.138	1.002	0.890	0.797	0.653
動粘性係数 (×10 <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup> /秒)	1.792	1.520	1.307	1.139	1.0038	0.893	0.801	0.658

- 温度が高いほど、密度が小さく粘性係数が小さいため、高温の水ほど浸透速度が大きくなる

## 有機塩素化合物の 密度と粘性係数

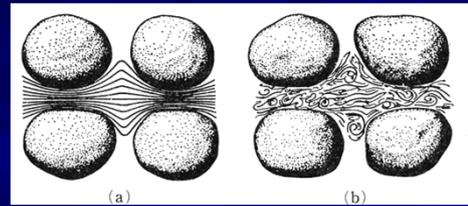
表 3.3 b 有機塩素化合物 (平田<sup>15)</sup>をもとに一部修正)

	水	トリクロロエチレン	テトラクロロエチレン	クロロホルム	1,1,1-トリクロロエタン	四塩化炭素
分子量 (t/m <sup>3</sup> )	18.016	131.39	165.83	119.38	133.41	153.82
密度 (g/m <sup>3</sup> )	0.99910 <sup>a</sup>	1.4762 <sup>a</sup>	1.6311 <sup>a</sup>	1.4985 <sup>a</sup>	1.3459 <sup>a</sup>	1.6037 <sup>a</sup>
蒸気圧 (mmHg)	12.788 <sup>a</sup>	47.31 <sup>a</sup>	18.47 <sup>a</sup>	194.8 <sup>a</sup>	120.7 <sup>a</sup>	115.2 <sup>a</sup>
溶解度 (mg/l)	—	1,100 <sup>b</sup>	150 <sup>b</sup>	8,150 <sup>b</sup>	1,320 <sup>b</sup>	770 <sup>b</sup>
粘性係数	1.138 <sup>a</sup>	0.566 <sup>b</sup>	0.932 <sup>a</sup>	0.596 <sup>a</sup>	0.903 <sup>a</sup>	1.038 <sup>a</sup>
動粘性係数	1.139 <sup>a</sup>	0.38558 <sup>b</sup>	0.57140 <sup>a</sup>	0.39773 <sup>a</sup>	0.67093 <sup>a</sup>	0.64725 <sup>a</sup>
表面張力 (N/m)	0.07275 <sup>b</sup>	0.02950 <sup>b</sup>	0.03286 <sup>a</sup>	0.02716 <sup>a</sup>	0.02617 <sup>a</sup>	0.02675 <sup>a</sup>

単位：粘性係数×10<sup>-3</sup>Pa 秒・動粘性係数×10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/秒；a：15°C；b：20°C；c：25°C

同じ動水勾配なら、トリクロロエチレンのような、密度が大きく粘性係数の小さな流体は、水に比べて浸透流速が大きい

## ダルシーの法則の適用範囲

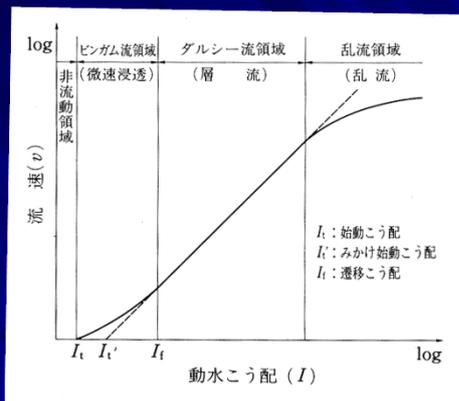


(a) 層流

(b) 乱流

ダルシーの法則は、層流のときに成立する

## ダルシーの法則の適用限界



## 参考文献

水収支研究グループ編  
「地下水資源・環境論—その理論と実践—」  
共立出版、1993年

Todd, D. K. & Mays L. W.: "Groundwater Hydrology 3rd Ed.", John Wiley & Sons, 2005年

それでは、また!!