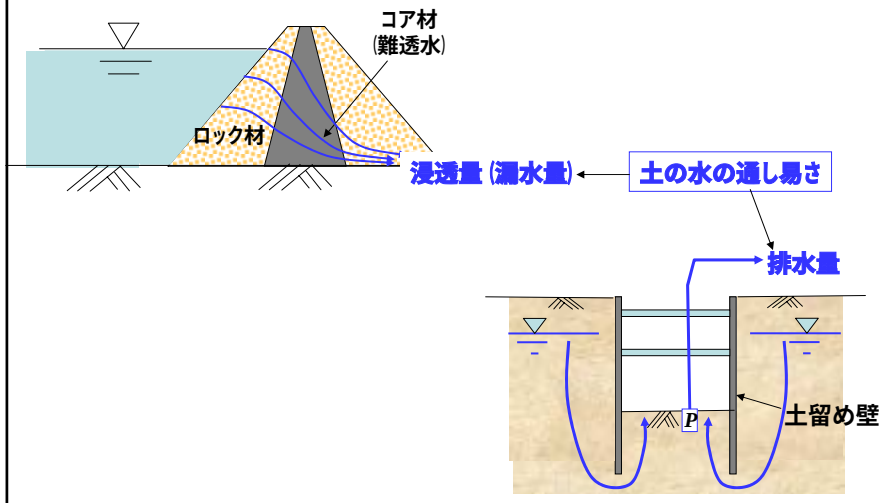
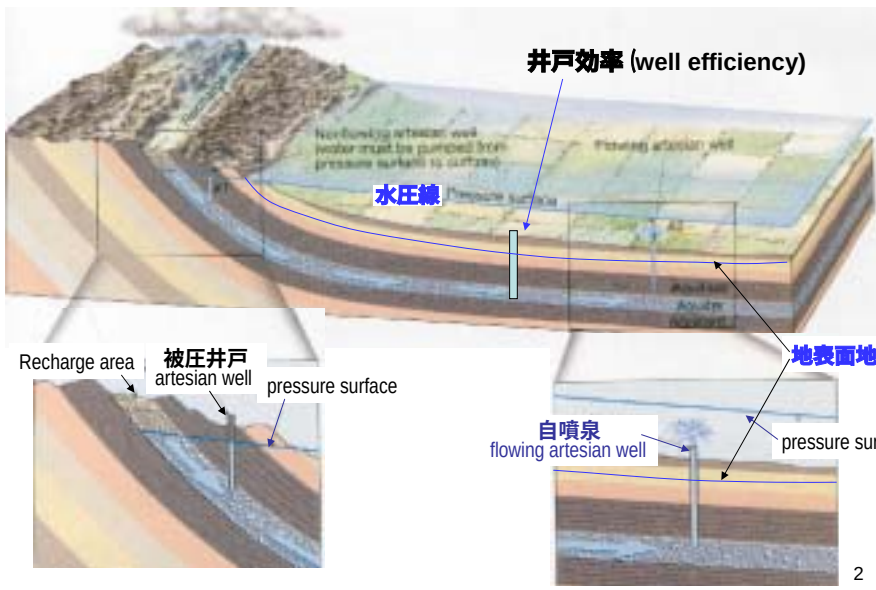
# 土中（地盤内）の水の流れ
## - 水頭、損失水頭、Darcy則 -

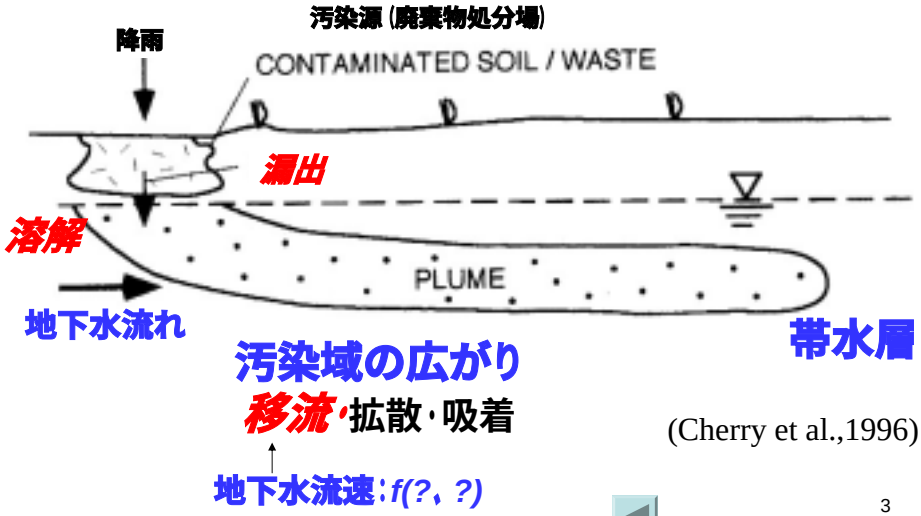





# 地下水
## (帯水層：aquifer) and 被圧状態(artesian condition)



# 汚染源からの汚染物質の地下水への拡大




汚染域の広がり

移流・拡散・吸着

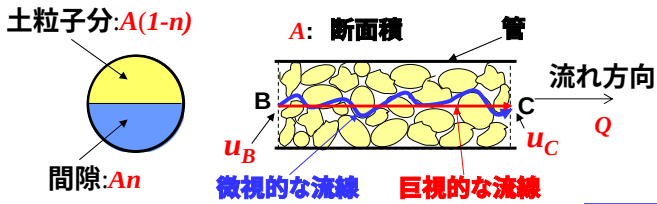
地下水流速：$f(?, ?)$

(Cherry et al.,1996)



# 土中の微視的な流れと巨視的な流れ

飽和した地盤中の仮想的な流管、又は管内に詰まった土の中の流れ




**計測可能なもの：**

①断面積：$A$

②断面内の平均的な水の面積：$An$

③単位時間当たりの流量：$Q$

*水の流量速度*：$v=Q/A$

*水の平均的な有効流速*：$v_{int}=Q/nA=v/n$

④水圧：$u_B$, $u_C$

**計測困難、不可能なもの：**

①断面内の水の面積の変化

②実際の水分子の動き

微視的な見方

**土中の流れを決めるものは？**

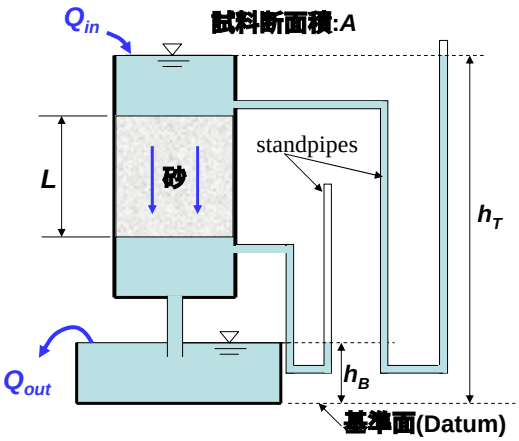
**水が土を流れる時、何が起きるか？**

巨視的な見方 → 流線、流管の位置：長さ、高さ

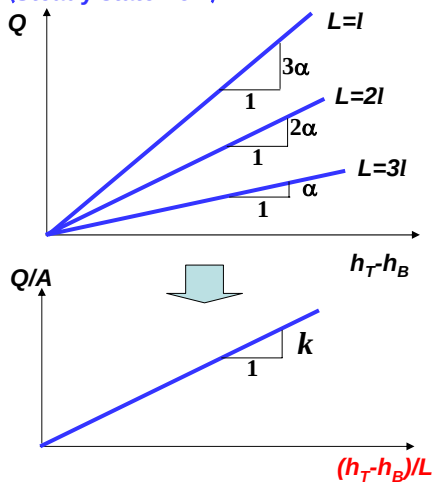
# Darcyの実験

1850年代
フランス人ダルシー(Darcy)

実験条件:
砂試料の高さ(*L*)
砂試料上端、下端の水圧(*h*)
試料断面積:*A*




定常流状態(=流量速度*Q*一定)下:
(Steady state flow)






# Darcyの実験

定常流状態(=流量速度*Q*一定)下:

Darcyの法則(Darcy's law)

$$Q = -k\frac{h_B - h_T}{L}A = kiA \qquad (1)$$

$$\frac{Q}{A} = v = ki \qquad (2)$$

*実験則*

*k*:定数(透水係数)
(coefficient of permeability,
hydraulic conductivity)

$h_T$:試料上面のスタンドパイプ内の水位
$h_B$:試料下面のスタンドパイプ内の水位
*A*:試料断面積

$i = -\frac{h_B - h_T}{L}$ :流れ方向のhの勾配x(-1)
(動水勾配)
(hydraulic gradient)

*v*: 流速(巨視的な) : flow velocity
discharge (Darcian) velocity,
specific discharge

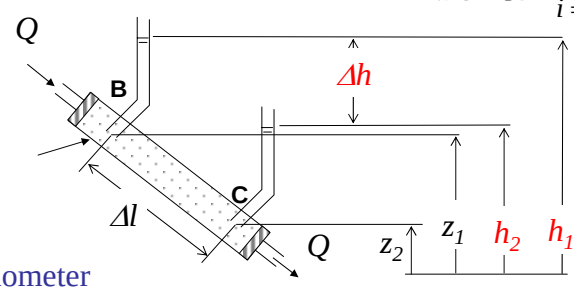
通常の土質力学でいう地盤内流速

# 土中 (多孔質体)の中の流れ

**Darcy's law:**

$$v = -k\frac{dh}{dl} = ki \qquad (2)$$

$v$: (流速) 流量速度
$k$: 透水係数
$h$: ピエゾ水頭
hydraulic head
(piezometric head)
$l$: 流管の長さ
$i$: 動水勾配 $i = -\frac{\Delta h}{\Delta l} = -\frac{dh}{dl}$




cross section A

Darcy manometer



# 全水頭と流れポテンシャル

**Potential:** "a physical quantity, capable of measurement at every point in a flow system, whose properties are such that flow always occurs from regions in which the quantity has higher value to those in which it has lower, regardless of the direction in space" by Hubbert(1940) "高いところから低いところへ"

例：電流 (*Ohm's law*) potential量：電圧
熱量 (*Fourier's law*) potential量：温度

透水(*Darcy's law*) potential:ピエゾ水頭

熱伝導度

$$q_t = k_t\frac{\Delta T}{\Delta L}A$$

$$I = \sigma_e\frac{\Delta V}{\Delta L}A$$

電気伝導度

$h$ = ?? + ??

# 多孔質体内の流れ：力学過程

流れを起こさせる力=
流体と土粒子との間の摩擦力（抗力：*drag force*）

B点からC点：　　水頭低下（$\Delta h$）

⇩

力学的エネルギー　=>　熱エネルギー
mechanical energy　　thermal energy.

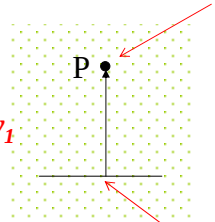
流れの方向：単位質量あたりの流体の力学エネルギー：
大きい地点　=>　小さい地点.

多孔質体内の流れを起こす流体ポテンシャル
＝ ***単位質量あたりの力学的エネルギー***



# 単位質量あたりの力学的エネルギー

単位質量の流体をP点の状態に
するために必要な仕事量




高さ位置: z
圧力:p
流速:v
密度:ρ
単位質量当り堆積:
$V=1/\rho$

**3つの成分**:

1. 位置エネルギー z=0 => z:　$w_1$

$$w_1 = mgz \qquad (3)$$

2. 運動エネルギー v=0 => v:　$w_2$

$$w_2 = mv^2/2 \qquad (4)$$

3. 流体の圧力を$p=p_0$ => pに
上昇せるために必要な仕事: $w_3$
（弾性エネルギー）

$$w_3 = m\int_{p_0}^{p} \frac{V}{m}dp = m\int_{p_0}^{p} \frac{dp}{\rho} \qquad (5)$$

**任意の基準状態**
高さ位置: z=0
圧力:$p=p_0$（大気圧）
流速:v=0
密度:$\rho_0$
単位質量当り体積:
$V_0=1/\rho_0$

# 流体ポテンシャル (Fluid potential) : Φ

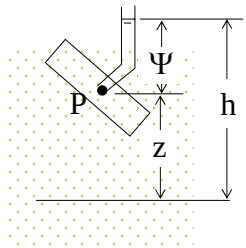
**単位質量** ($m$=1)**当りの力学的エネルギー**:

$$\Phi = (w_1 + w_2 + w_3)/m = gz + \frac{v^2}{2} + \int_{p_0}^{p} \frac{dp}{\rho} \quad (6)$$ ***Bernoulli equation***

- **土中流速：極端に小さい** => $v^2/2$**無視.**
- **水は非圧縮 (仮定)** =>**密度(ρ)一定.**

$$\Phi = gz + \frac{p - p_0}{\rho} \quad (7)$$

位置E　　圧力E




$$p = \rho g \Psi + p_0 = \rho g (h - z) + p_0 \quad (8)$$

$$\Phi = gz + \frac{[\rho g(h - z) + p_0] - p_0}{\rho} = gh \quad (9)$$



# 流体ポテンシャル: Φ 、ピエゾ水頭: h

**大気圧** $p_0$=0 => Eqs.(7) and (9)

$$\Phi = gz + \frac{p}{\rho} = gh \quad (10)$$ **ポテンシャル: 単位質量当りエネルギー**

$$h = z + \frac{p}{\rho g} = z + \Psi \quad (11)$$ **水頭: 単位重量当りエネルギー**

**ピエゾ水頭**]: $h$= **位置水頭**：elevation head: $h_z$ + **圧力水頭**pressure head: $h_p$

**全水頭**:total head: $h_T = h_z + h_p$+**速度水頭**velocity head: $h_v$ (12)

**土中の流れのほとんどのケース**:

$h = h_T$ ($v$=0.6m/min => $h_v$=0.005mm：**計測困難**)

# 地下水流れに関係する物理量
# 次元と一般的な単位

| | | SI 単位* | | 重力単位**: cgs 単位 | |
|---|---|---|---|---|---|
| パラメータ | Symbol | 次元 | 単位 | 次元 | 単位 |
| ピエゾ水頭 | $h$ | [L] | m | [L] | cm |
| 圧力水頭 | $h_p$ | [L] | m | [L] | cm |
| 位置水頭 | $h_e$ | [L] | m | [L] | cm |
| 流体圧力 | $p$ | [M/LT$^2$] | N/m$^2$, Pa | [F/L$^2$] | kgf/cm$^2$ |
| 流体ポテンシャル | $\Phi$ | [L$^2$/T$^2$] | m$^2$/s$^2$ | [L$^2$/T$^2$] | cm$^2$/s$^2$ |
| 密度 | $\rho$ | [M/L$^3$] | kg/m$^3$ | - | |
| 単位体積重量 | $\gamma$ | - | | [F/L$^3$] | gf/cm$^3$ |
| 流量速度（流速） | $v$ | [L/T] | m/s | [L/T] | cm/s |
| 透水係数 | $k$ | [L/T] | m/s | [L/T] | cm/s |

*SI 単位: 基本次元、長さ[L], 質量[M], 時間[T]

**重力単位: 基本次元、長さ[L], 力[F], 時間[T]



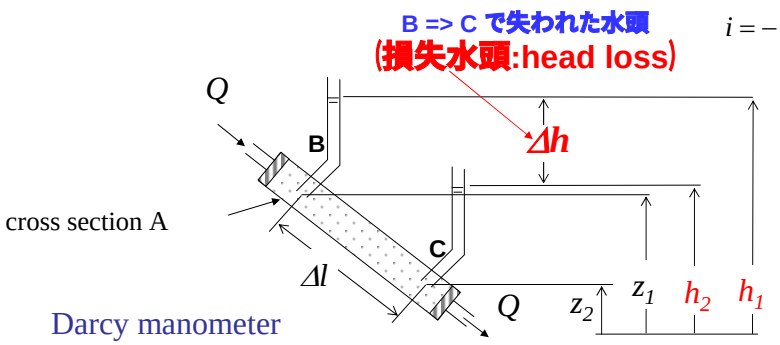
# 土中（多孔質体)の中の流れ

**Darcy's law:**

$$v = -k\frac{dh}{dl} = ki \qquad (2)$$

$v$: (流速) 流量速度
$k$: 透水係数
$h$: (ピエゾ) 水頭
$l$: 流管の長さ
$i$: 動水勾配

$$i = -\frac{\Delta h}{\Delta l} = -\frac{dh}{dl}$$

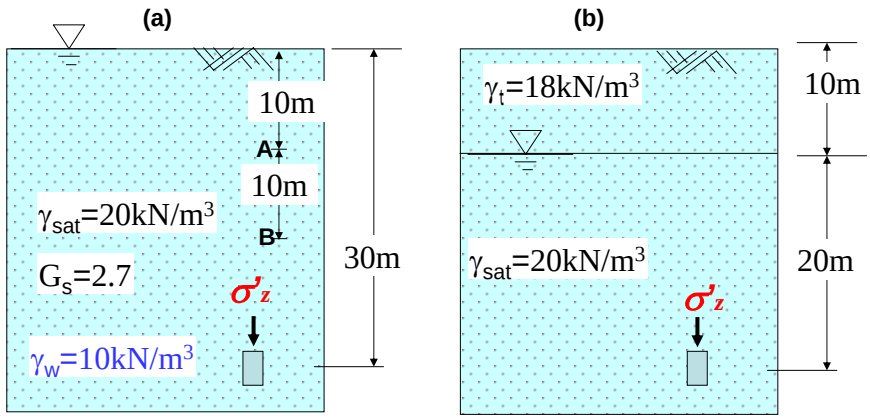


# 本日のTechnical terms

**帯水層**：aquifer； **被圧地下水**：artesian ground water;
**基準面**：datum; **定常流**：steady state flow;
**ダルシーの法則**：Darcy's (Darcian) law;
**地下水浸透**：ground water seepage;
**透水性**：permeability;
**動水勾配**：hydraulic gradient;
**透水係数**：coefficient of permeability (hydraulic conductivity);
**流量速度 (流速)**：discharge velocity, flow velocity, Darcian velocity;
**ピエゾ水頭**：piezometric head, hydraulic head;
**位置水頭**：elevation head;
**圧力水頭**：pressure head;
**損失水頭**：head loss



# 小テスト (6/4)




(1) (a)のような、平らな一様飽和砂地盤があり、この砂間隙比eはいくらか.
(2) 水圧は静水圧状態である。A点とB点の位置水頭、圧力水頭はいくらか？
ただし、基準面は地表面とせよ。
(3) (a)から(b)のように地下水位が地表面からZ=10mまで低下し,再び静水圧状態となった。この低下によって、z=30mの鉛直全応力と有効応力はそれぞれ幾ら変化するか ($\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma'_z$?)