

R6年度 地盤工学会北陸支部
土質力学講座(1回目)

土の基本的性質と浸透

新潟大学工学部 社会基盤工学プログラム

金澤 伸一

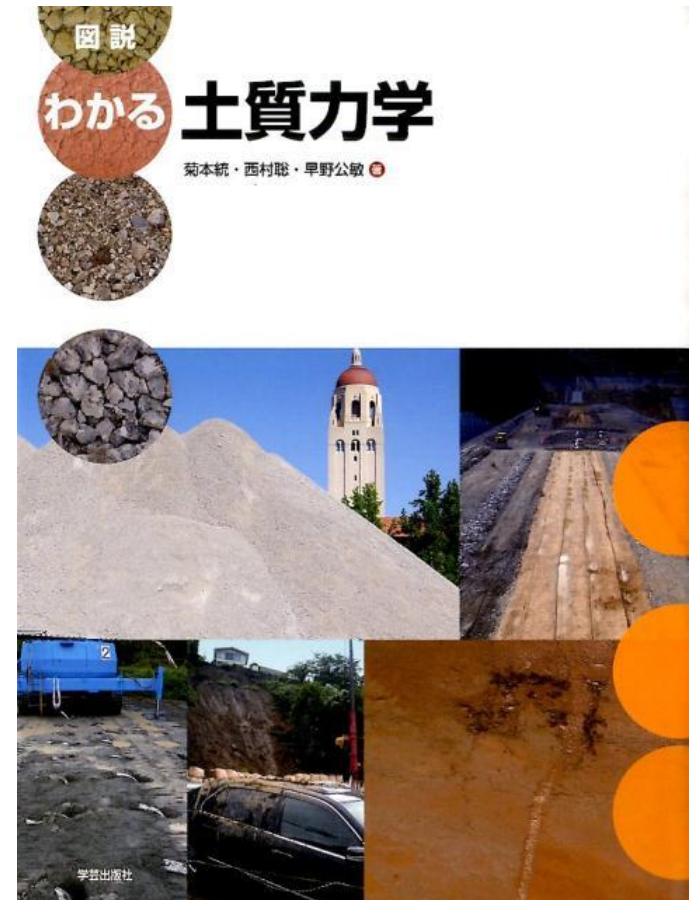
土の基本的性質(前半)

- 物理特性
- 粒度分布

土質力学の参考書

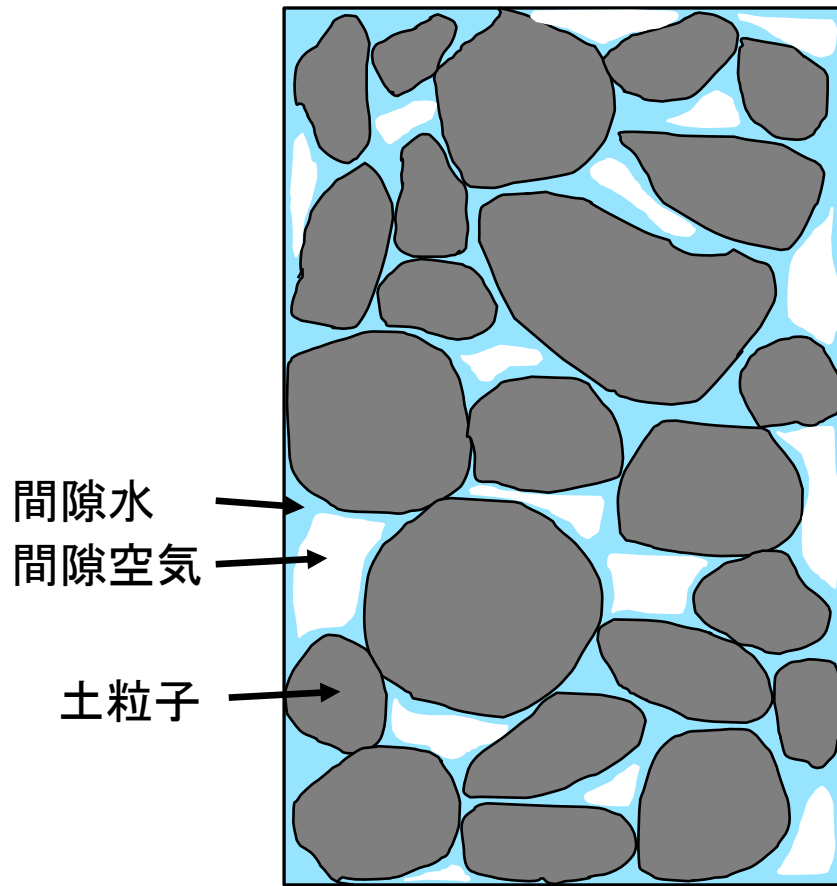


- 石原研而: 土質力学(第2版), 丸善, 2001

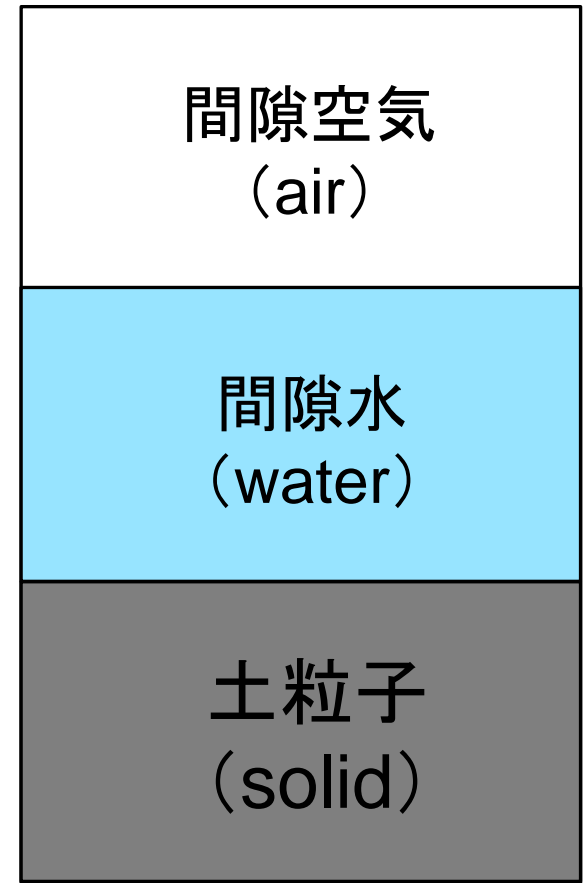


- 菊本統, 西村聡, 早野公敏:
図説わかる土質力学, 学芸出版社, 2015

土の組成（土粒子，水，空気）



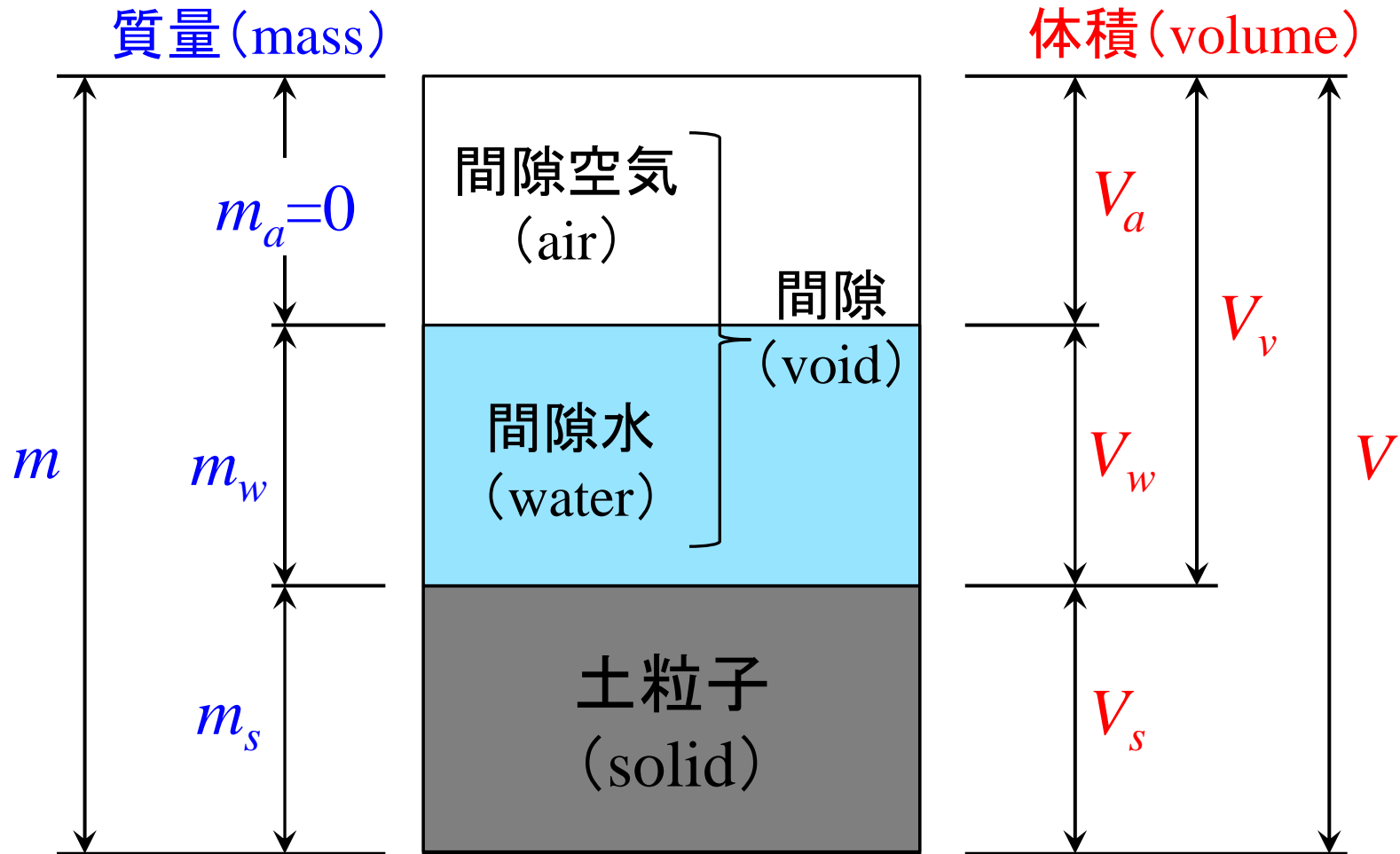
間隙空気，
間隙水，
土粒子
にわける



示相図

土の組成 (土粒子, 水, 空気)

➤ 密度(単位体積重量)で考えたいので, 質量(重量)と体積で考える



示相図

土の基本物理量（質量と重量）

- 質量：物体そのものの量 m [kg, t]
- 重量：物体に働く重力の大きさ $W = m \times g$ [N, kN]



体重計は体重計に作用する重力を測っている

地球上では

1kg → 9.8N

1t → 9.8kN

地球

月

重力加速度 g 9.8m/s²

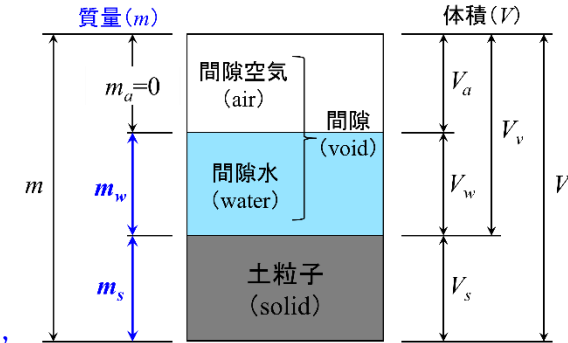
1.62m/s²

土の基本物理量 (1)

質量に関する諸量

□ 含水比 w (water content)

土粒子の質量 m_s に対する間隙水の質量 m_w の割合



$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 (\%)$$

比の基準は土粒子

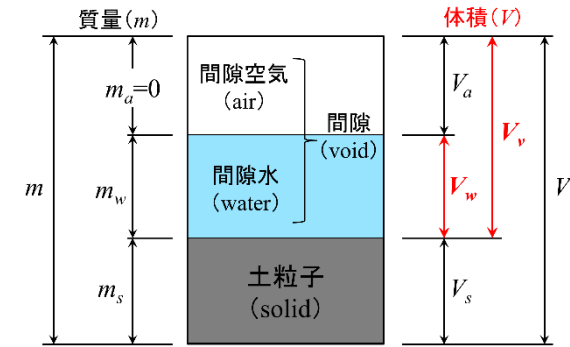
含水比は最大値がない！！

土の基本物理量 (2)

体積に関する諸量

□ 間隙比 e (void ratio)

土粒子の体積 V_s に対する間隙の体積 V_v の割合



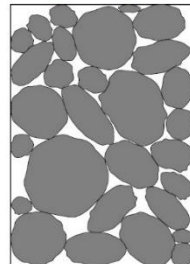
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

土の詰まり具合を示す

比の基準は土粒子

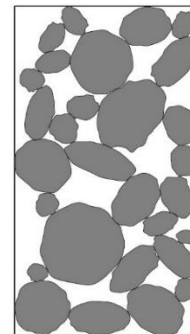
密詰め(ギチギチ)

$e = \text{小}$



緩詰め(スカスカ)

$e = \text{大}$

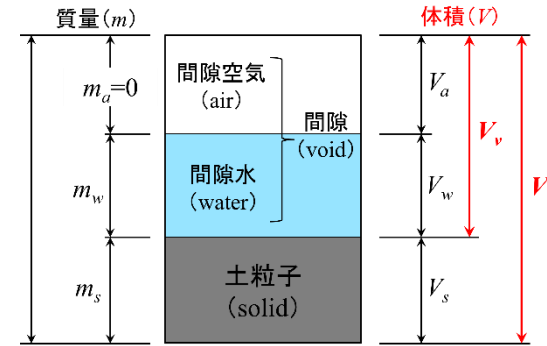


土の基本物理量 (3)

体積に関する諸量

□ 間隙率 n (porosity)

全体積 V に対する間隙の体積 V_v の割合



$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$

率の基準は全体

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{V_v/V_s}{1 + V_v/V_s} = \frac{e}{1 + e}$$

➤ 間隙比と間隙率との区別, 関係の理解

土の基本物理量 (4)

体積に関する諸量

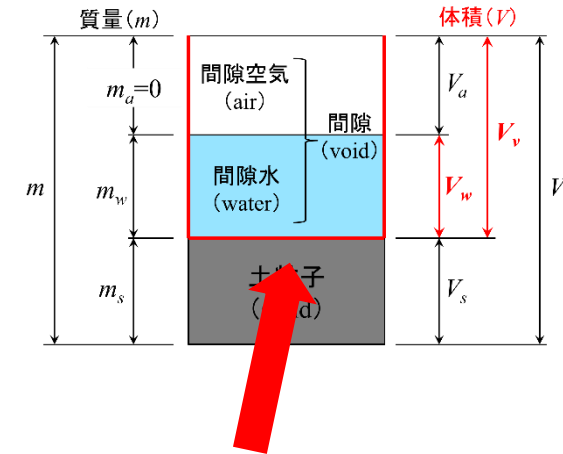
□ 飽和度 S_r (degree of saturation)

全間隙 V_v に対する間隙水の体積 V_w の割合

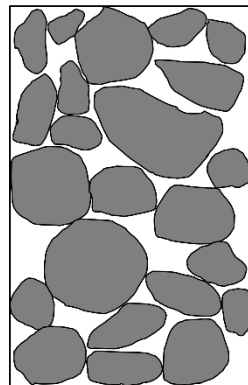
※ 間隙空気の重さ = 0 なので、体積で

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

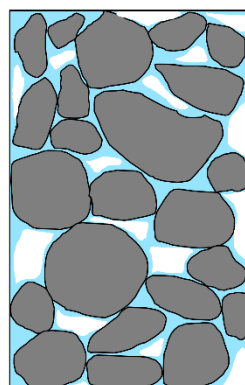
⇒ 全間隙 (コップ) の中に
占める水の体積



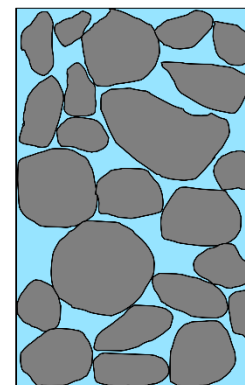
$S_r=0$
乾燥土



$0 < S_r < 100$
不飽和土



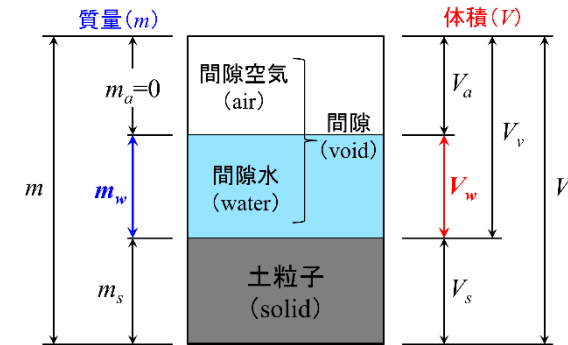
$S_r=100$
飽和土



土の基本物理量 (5)

$$W = m \cdot g$$

重量 = 質量 × 重力加速度



水の物性値

□ 水の密度 ρ_w (water density)

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} = \frac{W_w}{g \cdot V_w} = \frac{\gamma_w}{g} = 1.00 \text{ g} / \text{cm}^3$$

□ 水の単位体積重量 γ_w (water unit weight)

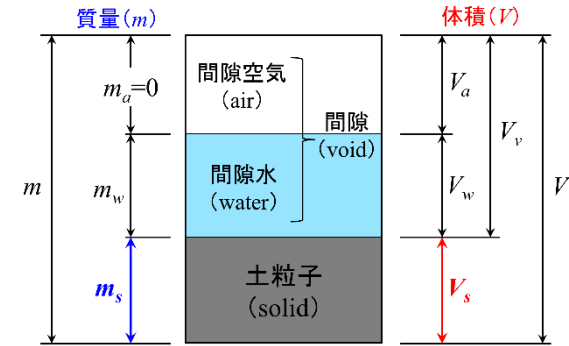
$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 1.00 \text{ gf} / \text{cm}^3 = 9.81 \text{ kN} / \text{m}^3$$

土の基本物理量 (6)

土粒子の物性値

□ 土粒子の密度 ρ_s (density)

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{W_s}{g \cdot V_s} = \frac{\gamma_s}{g}$$



□ 土粒子の単位体積重量 γ_s (unit weight)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{m_s \cdot g}{V_s}$$

□ 土粒子の比重 G_s (specific gravity): 水の密度に対する土粒子の密度

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

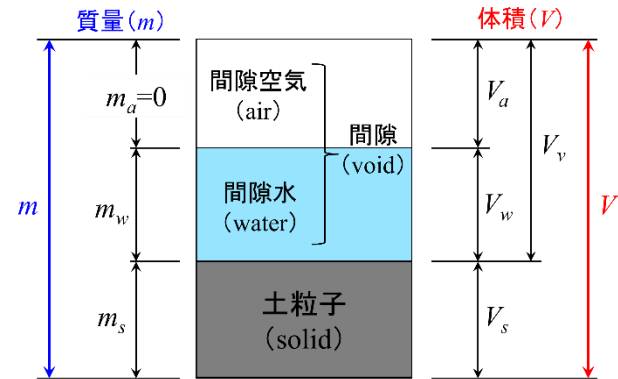
土の基本物理量 (7)

質量と体積を結ぶ単位体積重量

- 湿潤密度 ρ_t (wet density), (湿潤単位体積重量 γ_t)
全体積中の全質量

$$\rho_t = \frac{m}{V}$$

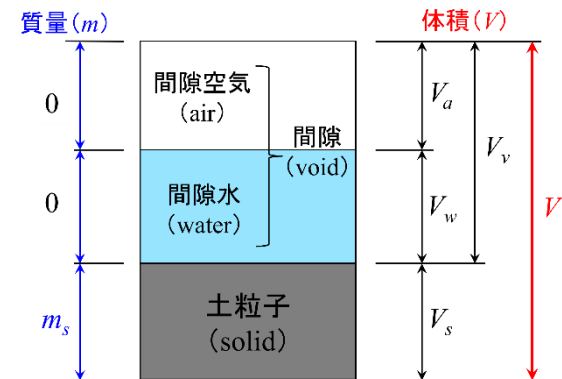
$$\left[\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{m \cdot g}{V} \right]$$



- 乾燥密度 ρ_d (dry density), (乾燥単位体積重量 γ_d)
全体積中の土粒子の質量

$$\rho_d = \frac{m_s}{V}$$

$$\left[\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{m_s \cdot g}{V} \right]$$



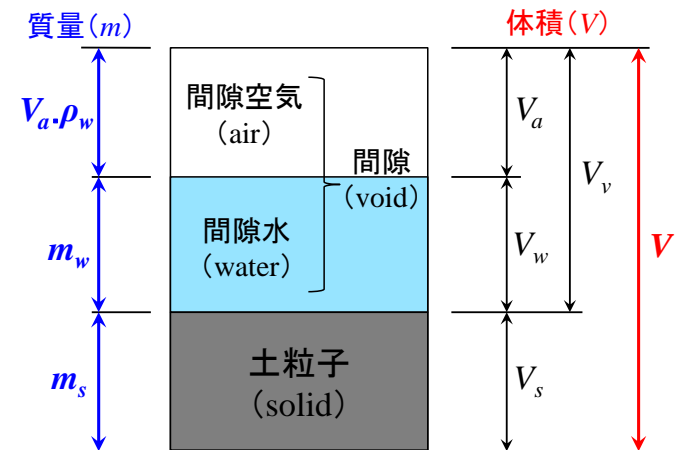
土の基本物理量 (8)

質量と体積を結ぶ単位体積重量

- 飽和密度 ρ_{sat} (saturated density), (飽和単位体積重量 γ_{sat})
全体積中の飽和時の全質量

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + m_w + V_a \rho_w}{V}$$

$$\left[\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w + V_a \gamma_w}{V} \right]$$



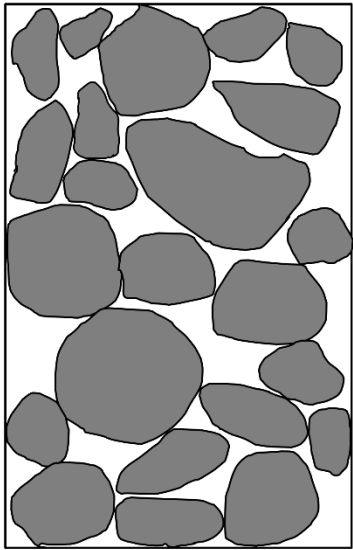
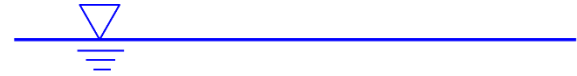
- 水中密度 ρ' (submerged density), (水中単位体積重量 γ')
地下水面より深い浮力 (ρ_w) を引いた密度

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$$

$$\left[\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \right]$$

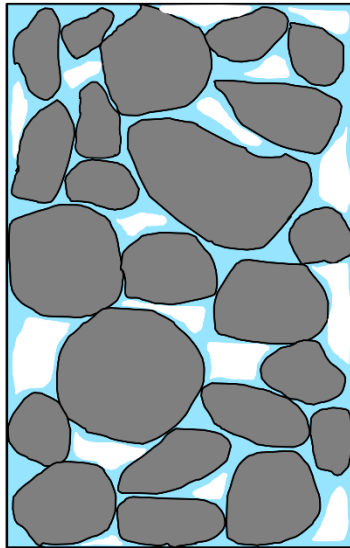
土の基本物理量 (11)

質量と体積を結ぶ単位体積重量のイメージ



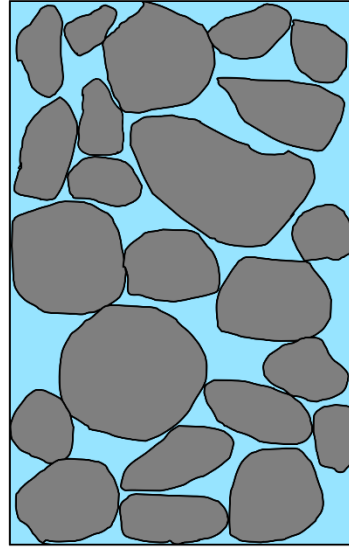
γ_d

乾燥単位体積重量



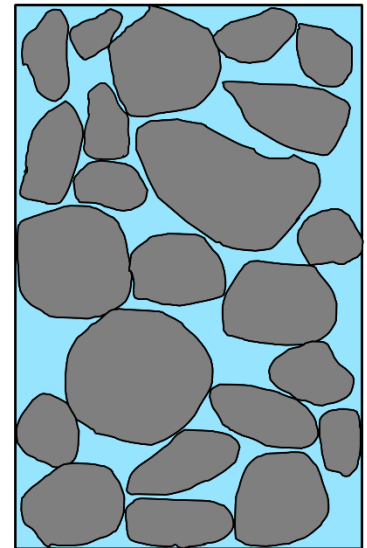
γ_t

湿潤単位体積重量



γ_{sat}

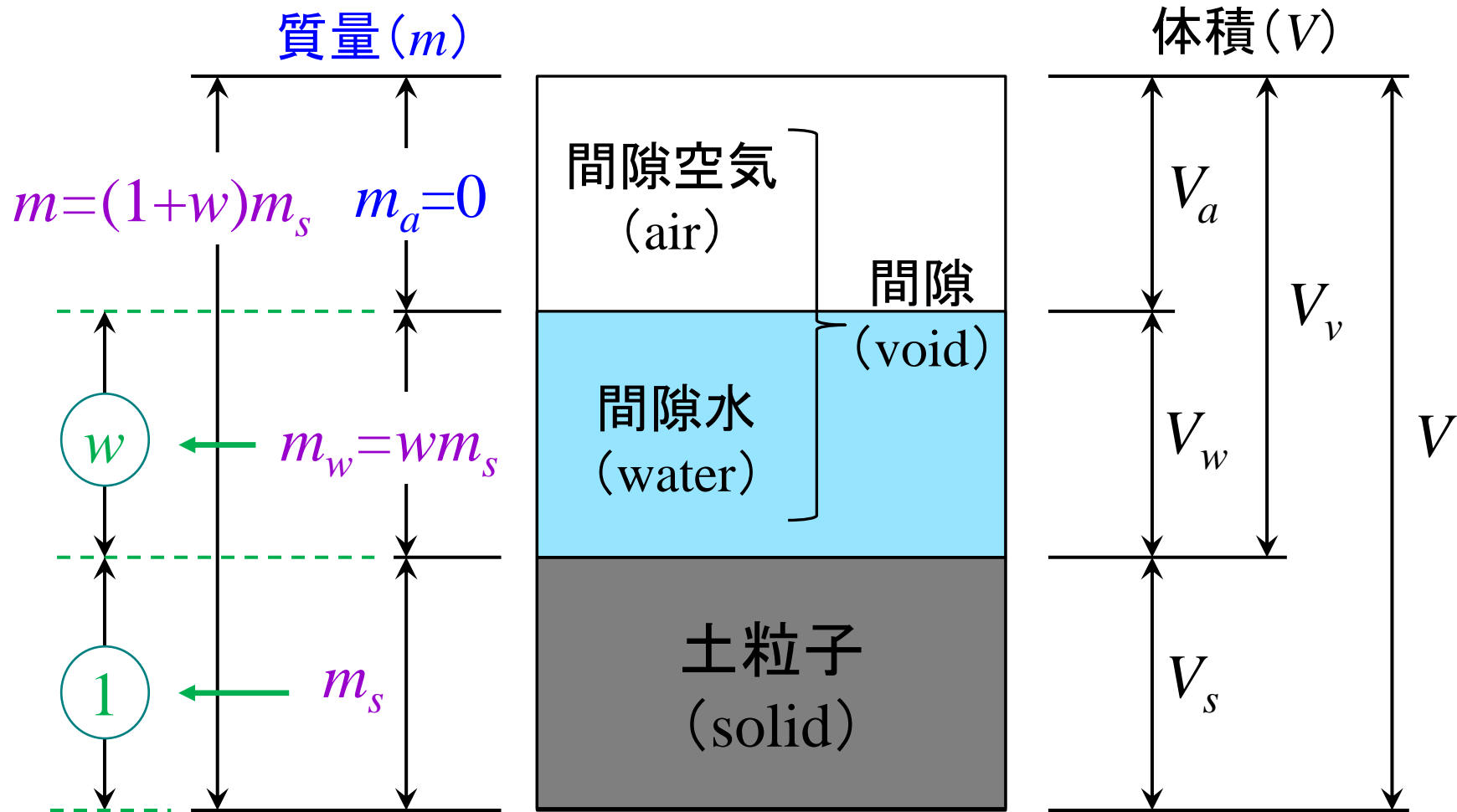
飽和単位体積重量



γ'

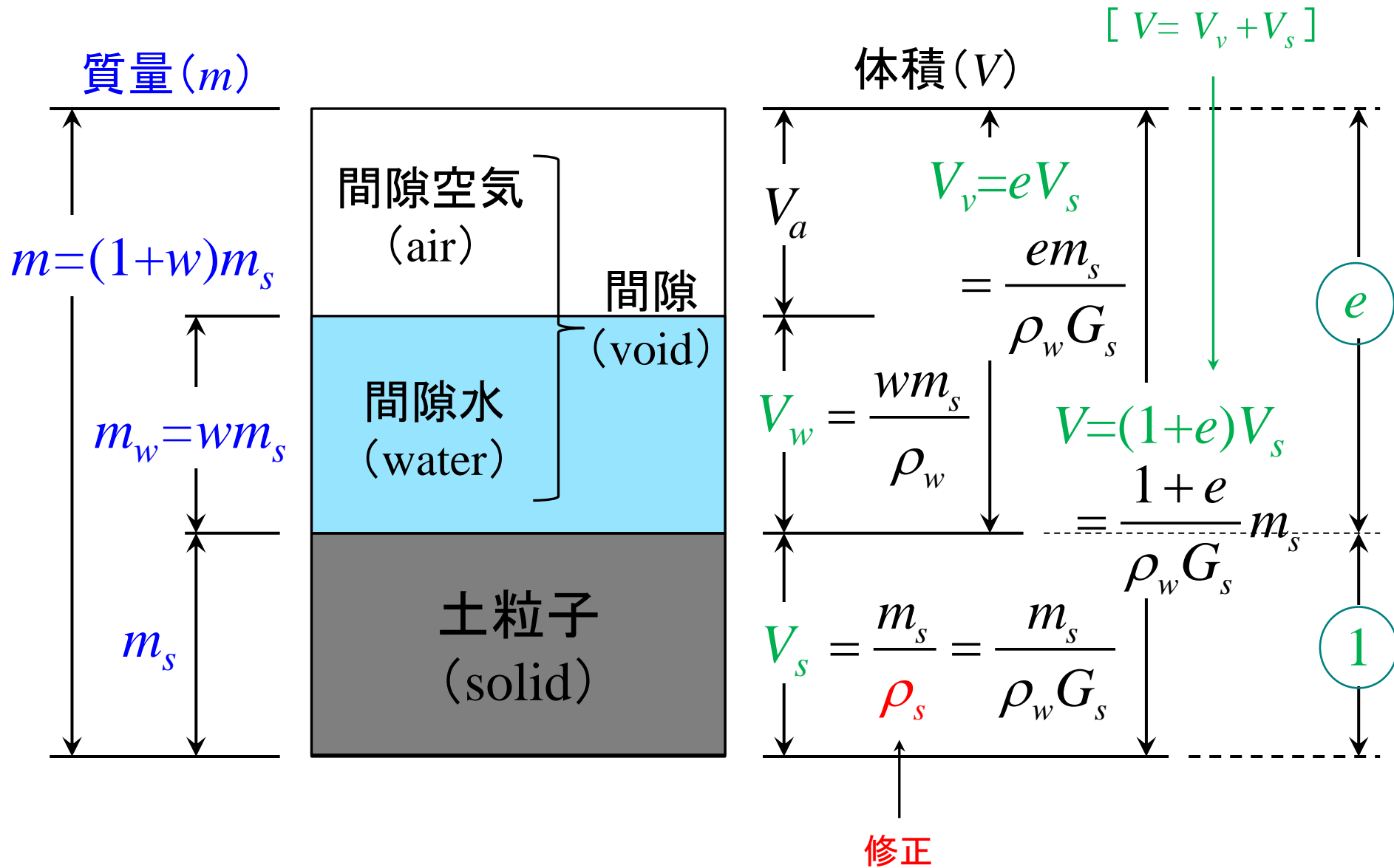
水中単位体積重量

物理量同士の関係 (1)



[m_s を消す] $\left[w = \frac{m_w}{m_s} \text{より} \right]$

物理量同士の関係 (1)

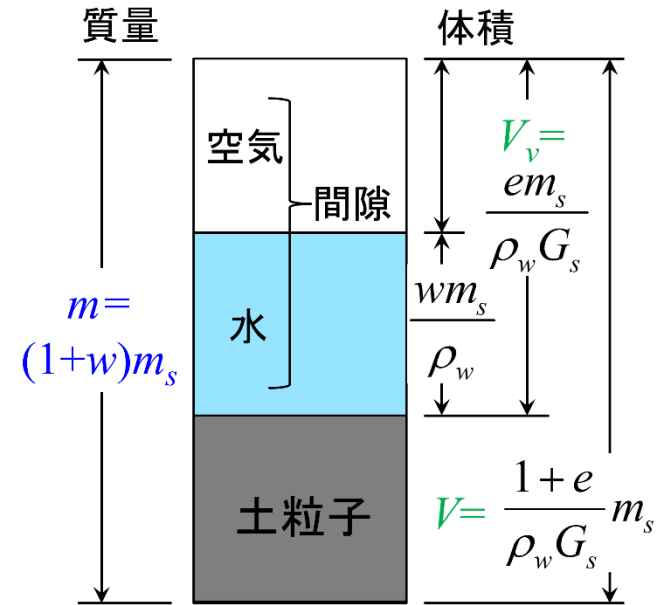


物理量同士の関係 (3)

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{wG_s}{e}$$

$$\rho_t = \frac{1+w}{1+e} G_s \rho_w$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{wm_s}{\rho_w G_s}}{\frac{em_s}{\rho_w G_s}} \\ \rho_t = \frac{m}{V} = \frac{(1+w)m_s}{\frac{1+e}{\rho_w G_s} m_s} \end{array} \right.$$



↓ wを消去する

$$\rho_t = \frac{G_s + S_r e}{1+e} \rho_w$$

$S_r=0$ の時⇒乾燥密度

$$\rho_d = \frac{G_s}{1+e} \rho_w$$

$S_r=1$ の時⇒飽和密度

$$\rho_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \rho_w$$

水中密度 $\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$

$$\rho' = \frac{G_s - 1}{1+e} \rho_w$$

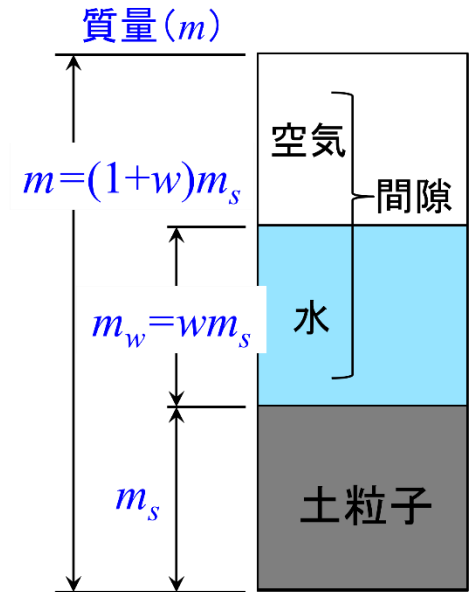
物理量同士の関係 (4)

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1+w}$$

$$\left(\begin{aligned} \rho_d &= \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{\frac{m}{\rho_t}} = \frac{m_s}{(1+w)m_s} \\ &= \frac{\rho_t}{1+w} \end{aligned} \right)$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

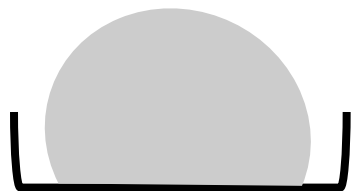
$$\left(\begin{aligned} e &= \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 = \frac{\frac{m}{\rho_t}}{\frac{m_s}{\rho_s}} - 1 \\ &= \frac{\frac{(1+w)m_s}{\rho_t}}{\frac{m_s}{\rho_s}} - 1 = \frac{(1+w)\rho_t}{\rho_s} - 1 \end{aligned} \right)$$



土の基本物理量 (物理量の測定)

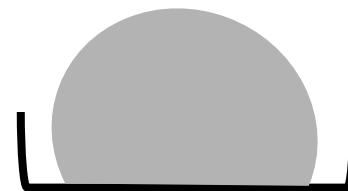
(1) 含水比

湿潤土 $W = W_s + W_w$



24h乾燥
110°Cの乾燥炉

乾燥土 $W = W_s$



シャーレ W_p

全体の重量

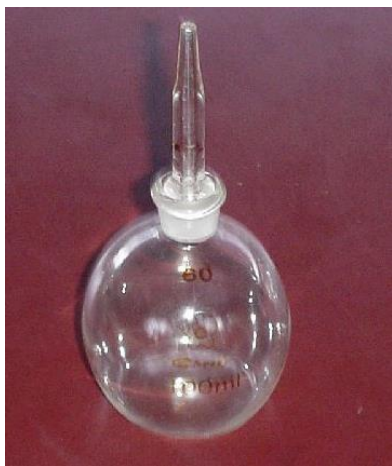
$$W_1 = W_s + W_w + W_p$$

$$W_2 = W_s + W_p$$

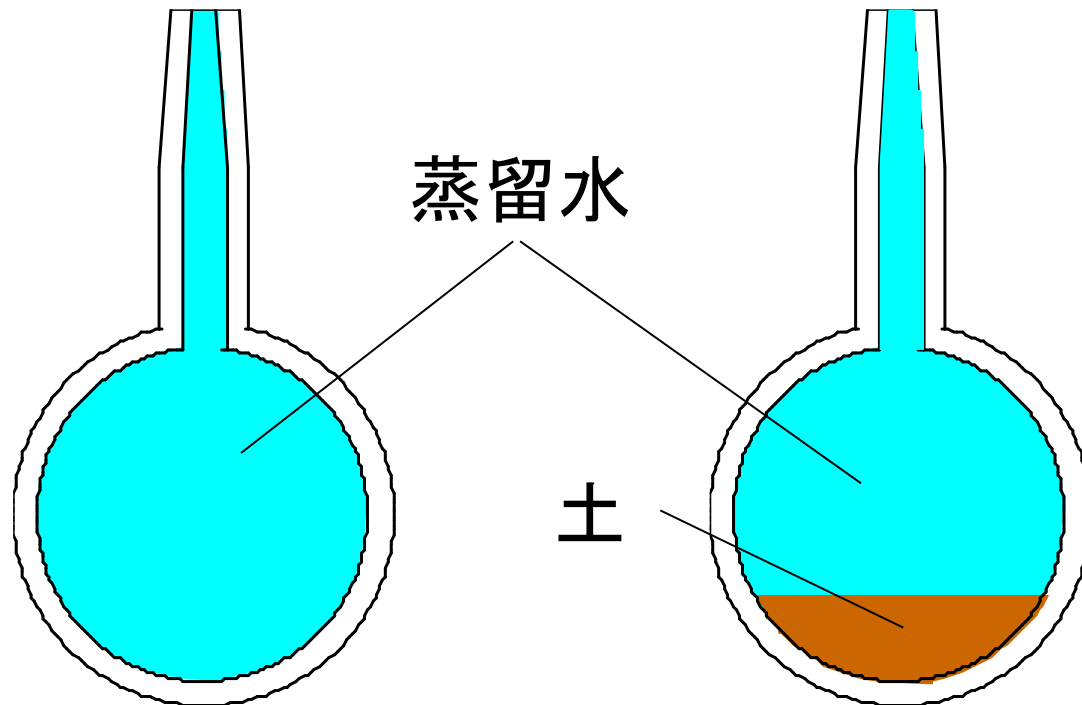
$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_p} \times 100 (\%)$$

土の基本物理量 (物理量の測定)

(2) 土粒子比重



ピクノメーター
(容積 V_p 重量 W_p)



$$W_1 = W_p + \gamma_w V_p$$

$$W_2 = W_p + W_s + \gamma_w (V_p - V_s)$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} = \frac{W_s}{W_s + W_1 - W_2}$$

体積を測る必要がない

土の基本物理量 (物理量の測定)

(3) 単位体積重量

- 直接測定: 試料を成型して直接体積を測定



- 置換法: 密度の分かる物に置き換えて体積を測る



土の基本物理量 (まとめ)

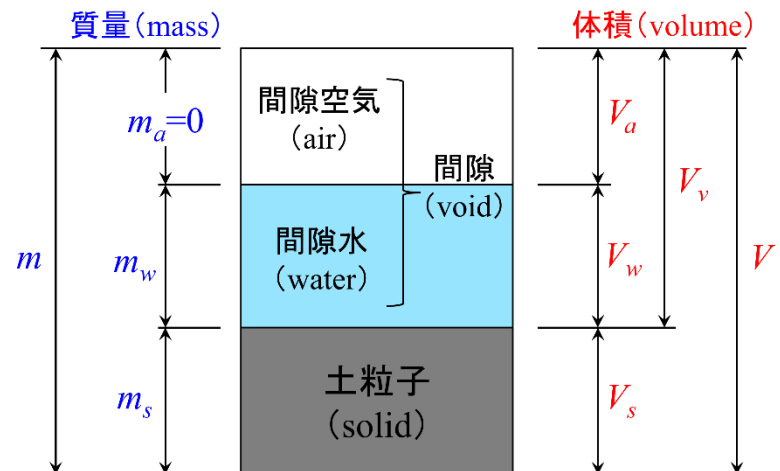
- 密度: 単位体積当たり質量 $\rho = \frac{m}{V}$ [g/cm³, t/m³]
 - 単位体積重量: $\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$ [N/cm³, kN/m³]
 - 比重: 水の密度に対する物体の密度の比
-
- 土粒子密度: $\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$
 - 土粒子比重: $G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$

水の密度 $\rho_w = 1.0(\text{g/cm}^3), 1.0(\text{t/m}^3)$

土の基本物理量 (まとめ)

質量に関する諸量

a) 含水比 (Water content) $w = \boxed{} \times 100 (\%)$



土の基本物理量 (まとめ)

体積に関する諸量

a) 間隙比 (Void ratio)

$$e = \boxed{}$$

b) 間隙率 (Porosity)

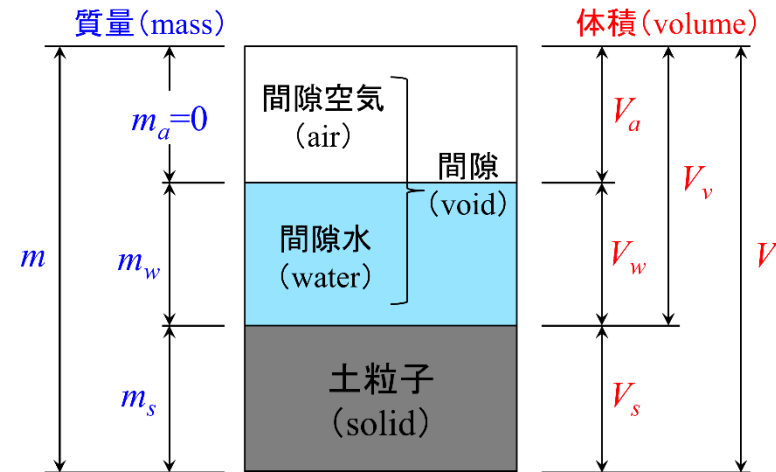
$$n = \boxed{}$$

c) 飽和度 (Degree of saturation)

$$S_r = \boxed{} \times 100 (\%)$$

$S_r = 100 (\%)$ 飽和土

$S_r < 100 (\%)$ 不飽和土



土の基本物理量 (色々な単位体積重量の表し方)

a) 湿潤単位体積重量 $\gamma_t = \frac{W}{V}$ (kN/m³, N/cm³)

b) 乾燥単位体積重量(固体部分の重量のみ)

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \text{ (kN/m}^3, \text{N/cm}^3\text{)}$$

c) 飽和単位体積重量(間隙が水で満たされた状態)

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + \gamma_w V_v}{V} \text{ (kN/m}^3, \text{N/cm}^3\text{)}$$

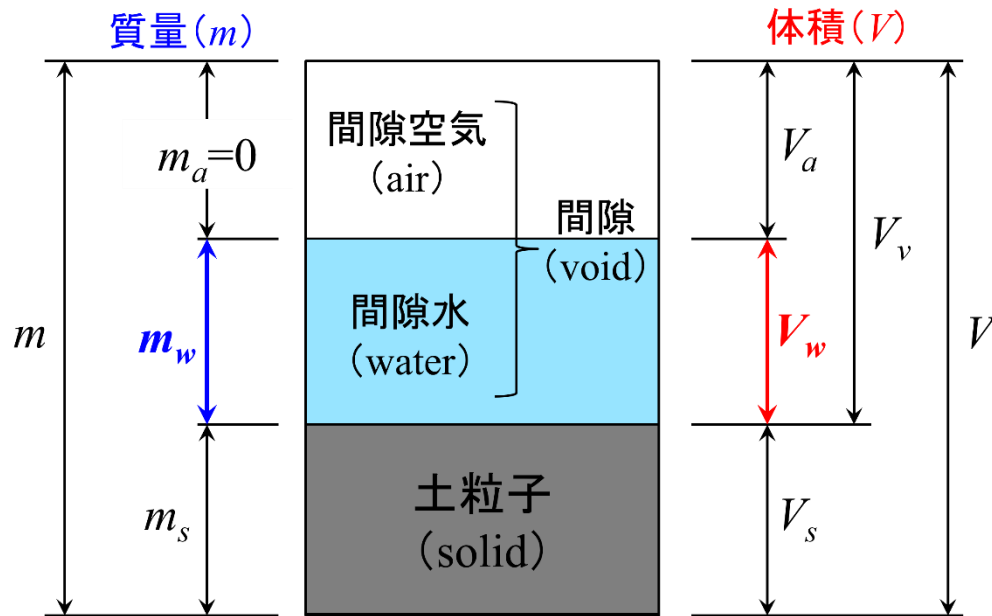
d) 水中単位体積重量(浮力を差し引いたもの)

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \text{ (kN/m}^3, \text{N/cm}^3\text{)}$$

水の単位体積重量	$\gamma_w = 9.8 \text{ (kN/m}^3\text{)}$
----------	--

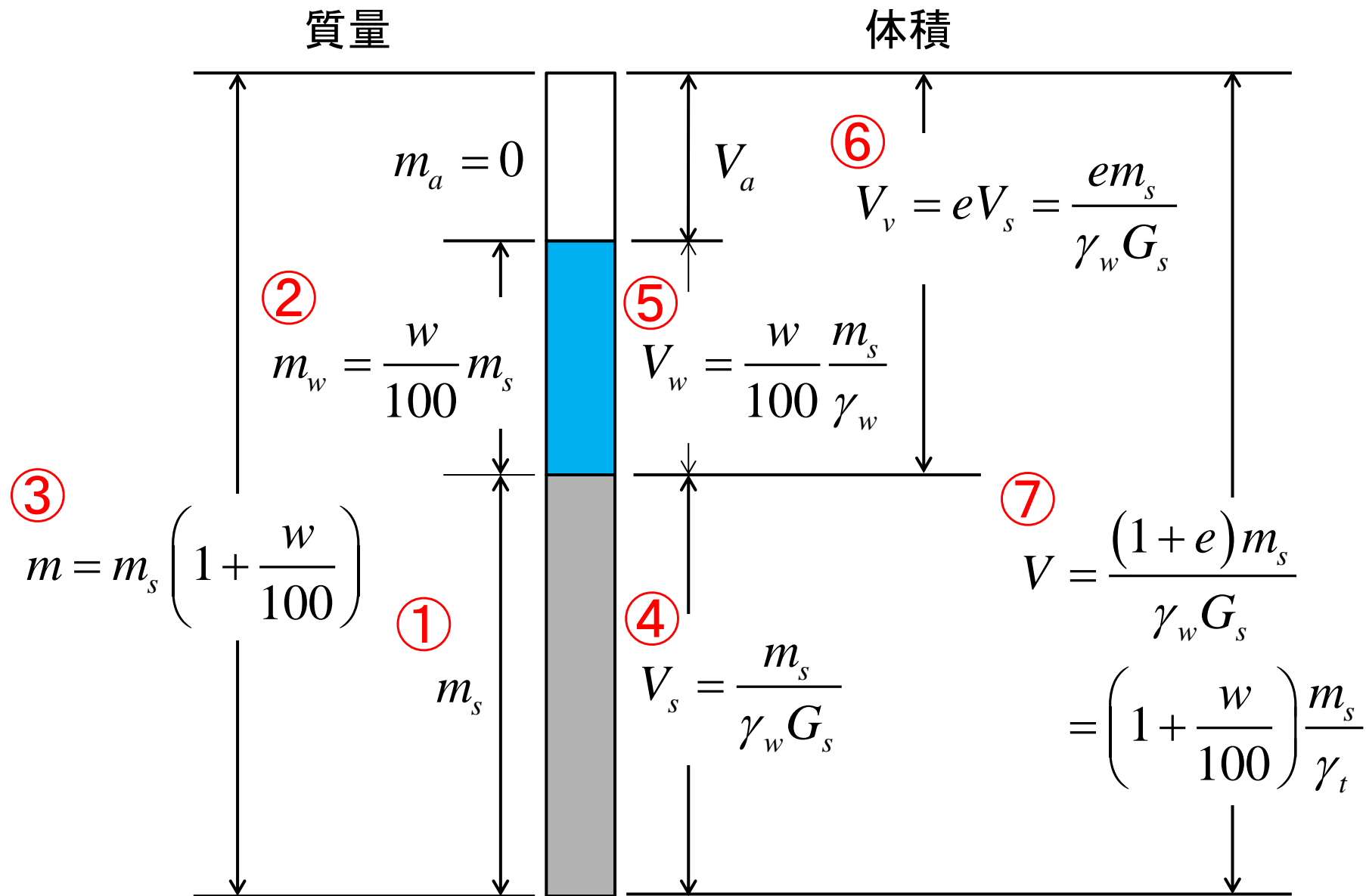
土の基本物理量 (物理量同士の関係)

- 測定できる項目: m , V , m_s
- 算出できるもの: w , G_s , γ_t



$(w, \gamma_t)(m_s, G_s, e)$
を使って書き改める

土の基本物理量 (物理量同士の関係)



土の基本物理量 (様々な公式)

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{\textcircled{1}}{\textcircled{7}} = \frac{\rho_w G_s}{1+e} = \frac{\rho_t}{1+w/100}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{\textcircled{7}}{\textcircled{4}} - 1 = \frac{1+w/100}{\rho_t} \rho_w G_s - 1 = \frac{\rho_w}{\rho_d} G_s - 1$$

$$\rho_t = (1+w/100) \rho_d$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{\textcircled{5}}{\textcircled{6}} \times 100 = \frac{wG_s}{e}$$

土の基本物理量

□ よく使う物理量

含水比 w , 間隙比 e , 飽和度 S_r , 湿潤単位体積重量 γ_t ,
乾燥単位体積重量 γ_d , 飽和単位体積重量 γ_{sat} , 比重 G_s)を求められる。

□ それぞれの物理量同士の関係

含水比 w , 間隙比 e , 飽和度 S_r , 湿潤単位体積重量 γ_t ,
乾燥単位体積重量 γ_d , 飽和単位体積重量 γ_{sat} , 比重 G_s の関係

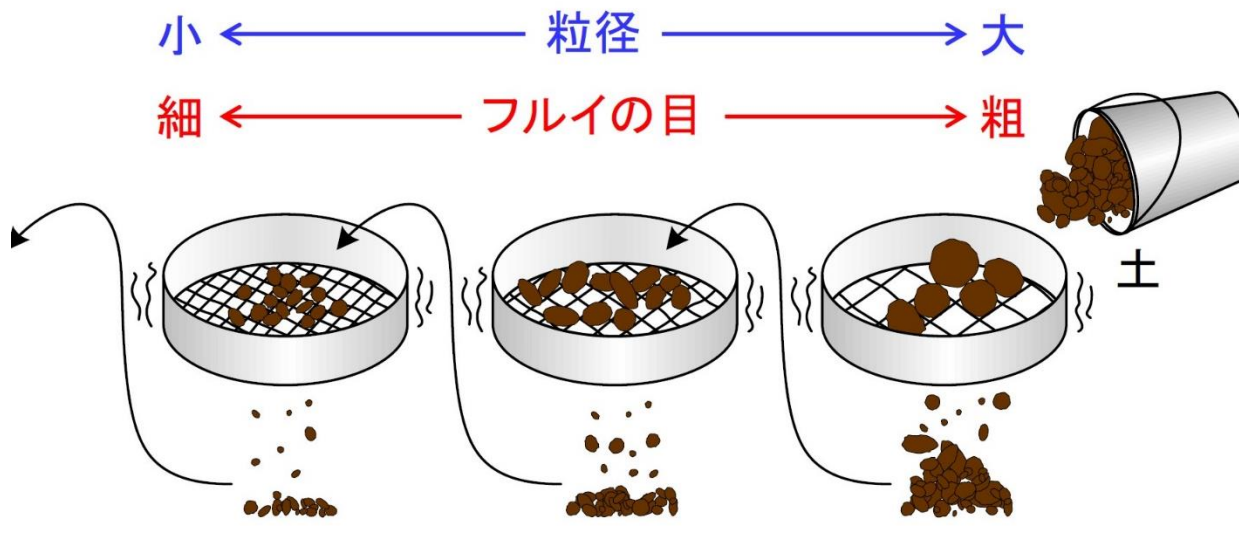
例えば, w , γ_t , G_s から間隙比 e , 飽和度 S_r , 乾燥単位体積重量 γ_d を算出

土の基本的性質(前半)

- 物理特性
- 粒度分布

土の粒度分布

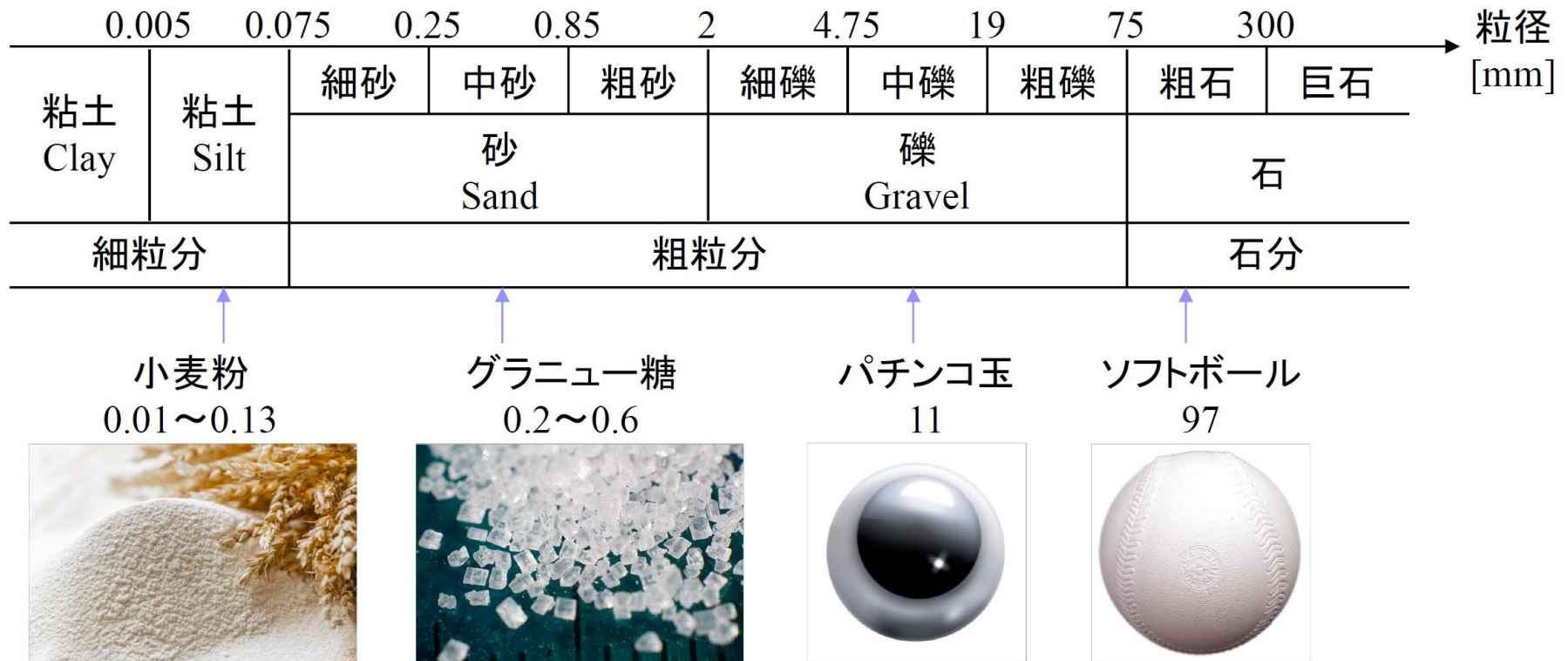
- いろいろな土～粒の大きさ(粒径)や形, 集まり方, 硬さ
- 粒度(土の粒子の大きさ別の分布)に着目!



- 粒径と工学的性質の違い
 - 粒径が大きい礫質土は変形しにくい
 - 粒径が小さい粘性土は変形しやすい

土の粒度分布

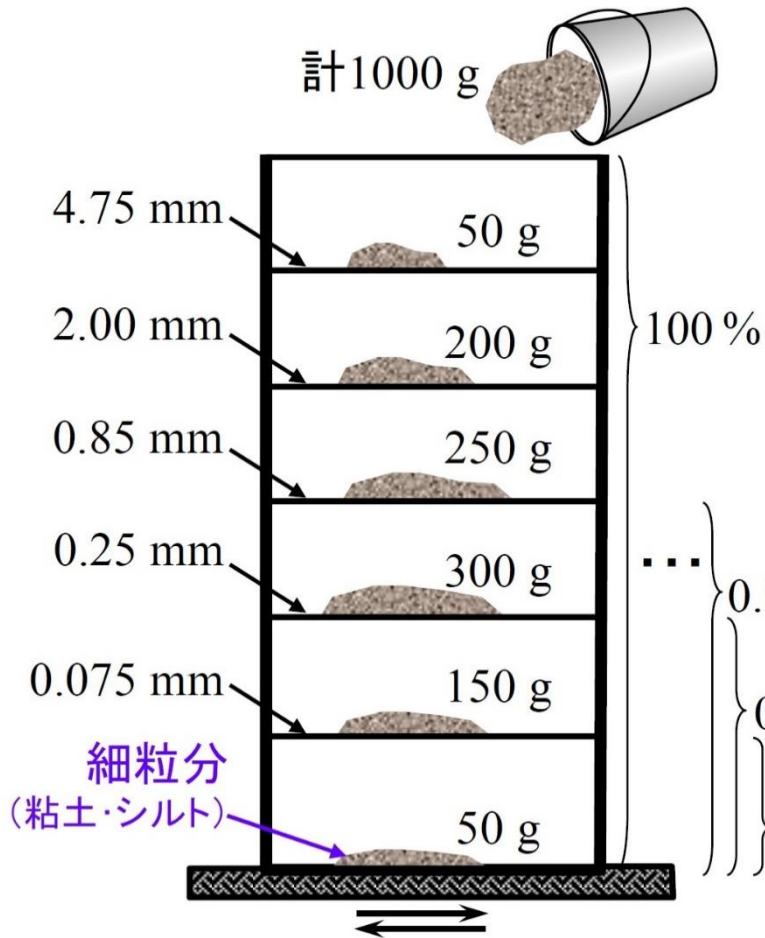
粒径による区分



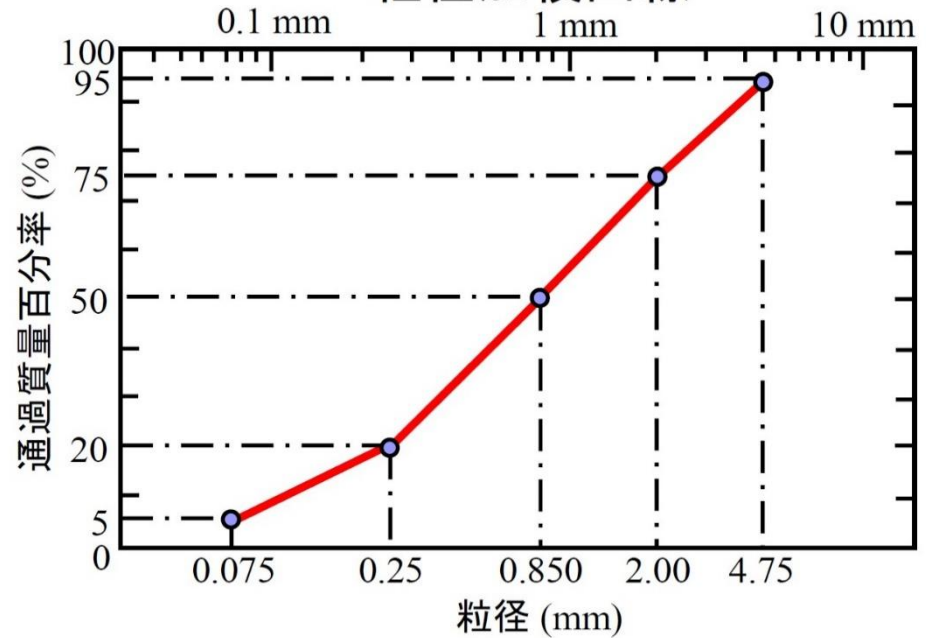
※具体的な閾値まで記憶する必要はない

土の粒度分布

ふるい分け試験



粒径加積曲線



0.850 mm以下: $\frac{50 + 150 + 300}{1000} = 50\%$

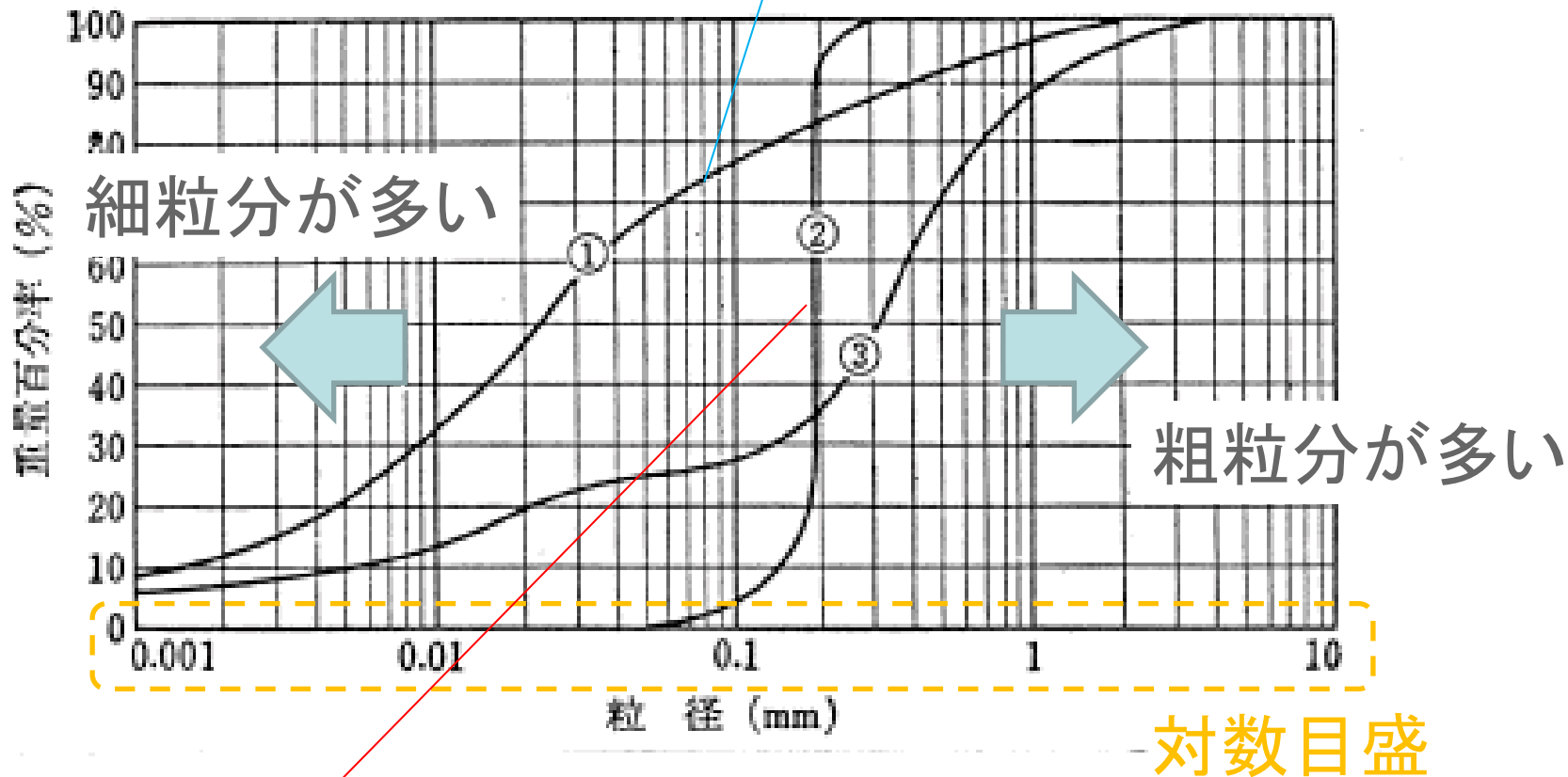
0.250 mm以下: $\frac{50 + 150}{1000} = 20\%$

0.075 mm以下: $\frac{50}{1000} = 5\%$

土の粒度分布

粒径加積曲線

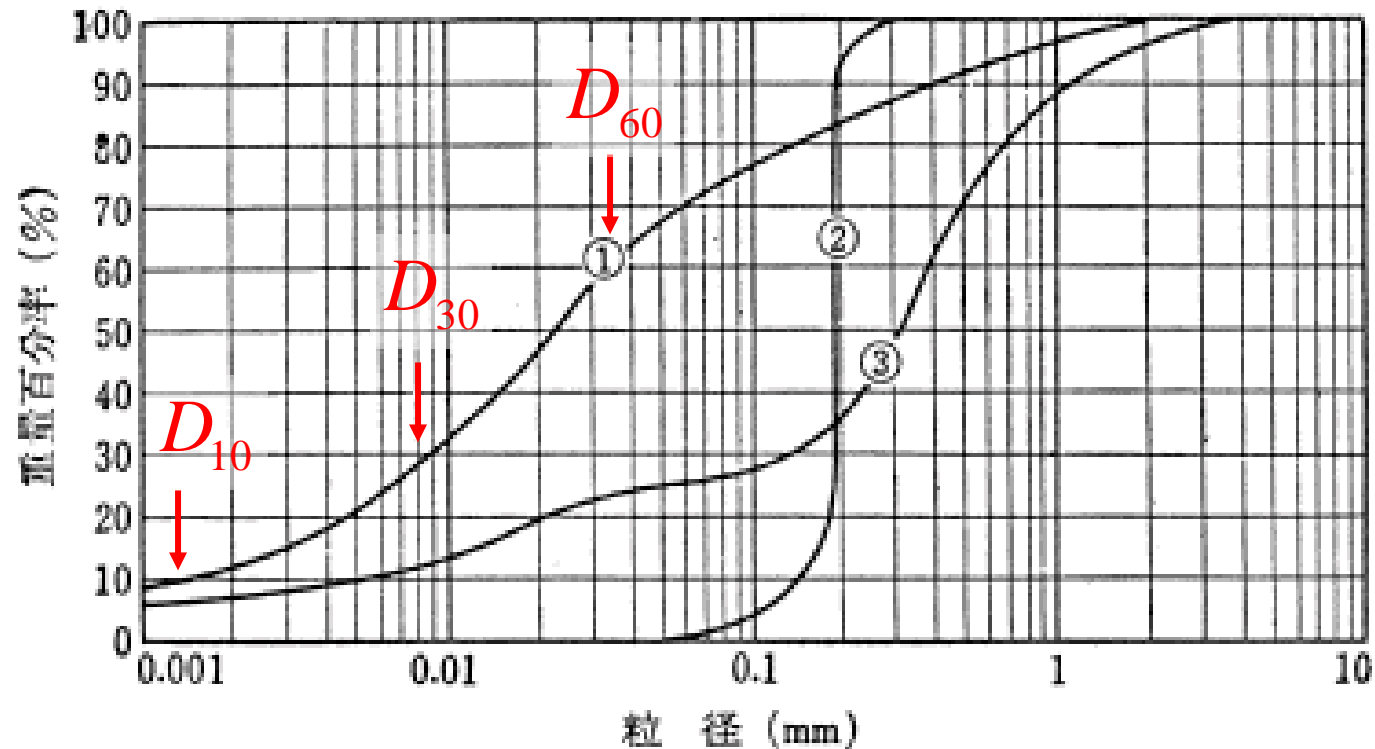
良配合：詰まりやすい



貧配合：詰まりにくい

土の粒度分布

粒度を表す係数



均等係数

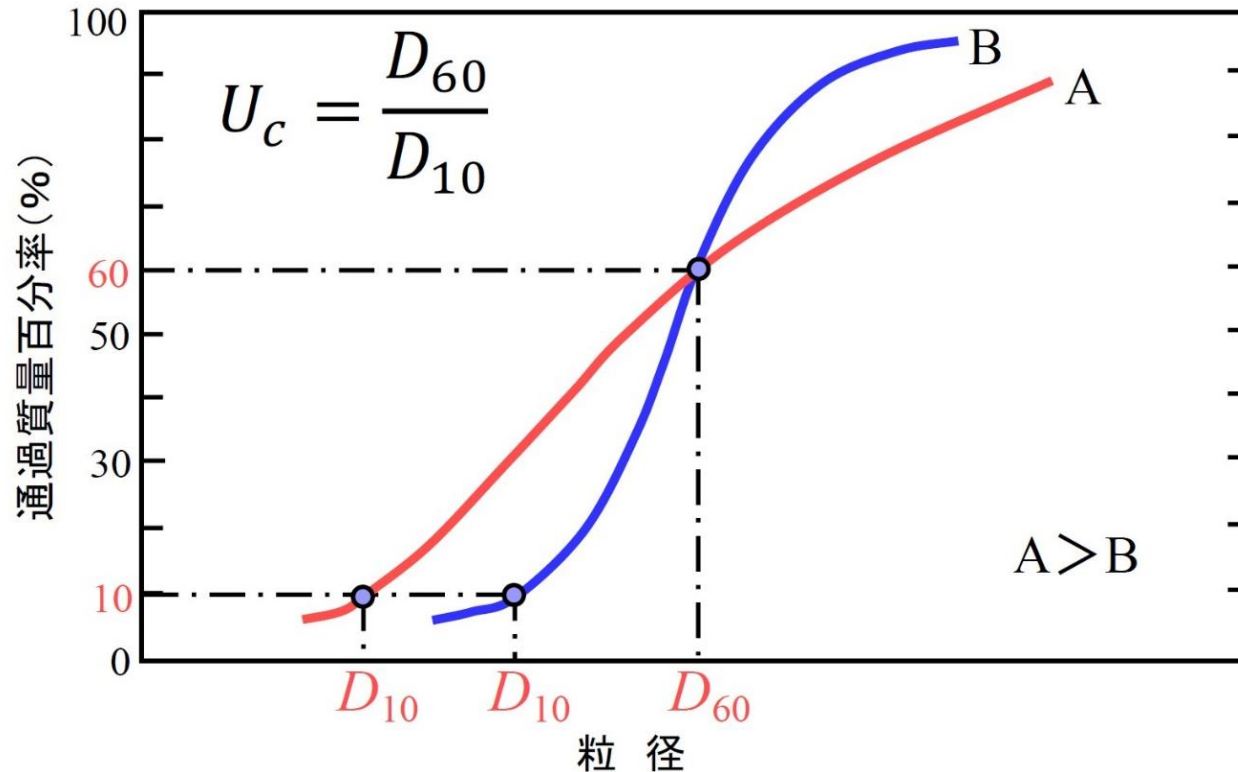
$$U_c = D_{60} / D_{10}$$

曲率係数

$$U'_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

均等係数10以上, 曲率係数1~3:よく詰まる土とみなせる

土の粒度分布

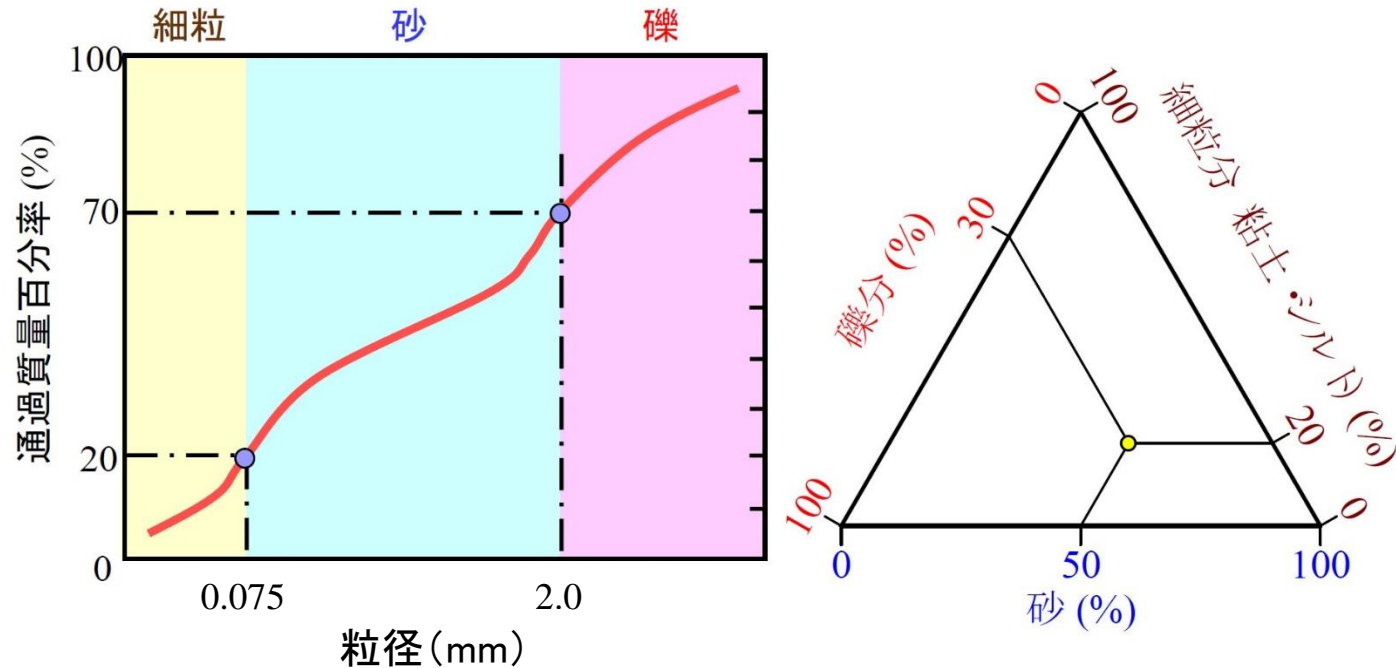


$U_c = \text{大}$ (良配合, well graded): 締固めると密度増加, 非常に強い土になる (粒子同士の接触点が増えて回転・移動しにくくなり安定する).

$U_c = \text{小}$ (貧配合, poorly graded): 締固めても粒子同士の接触点あまり増えず, 密度も増加しにくい. 強い土にはならない.

土の粒度分布

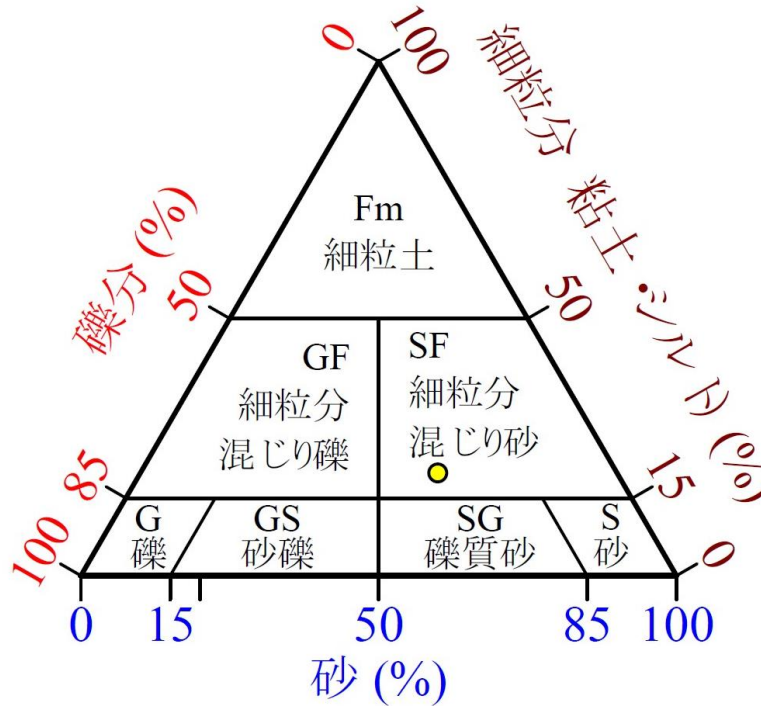
三角座標による中分類



粒径を礫・砂・細粒分の含有割合で区分, 三角座標にプロット

土の粒度分布

三角座標による中分類



領域ごとに分類が決まる

ご清聴ありがとうございました