地盤材料の鉱物,その組成と分類法

実際の土、広範囲な粒径を持った土粒子の集合体：

地盤材料
- 岩石質材料（石分≧50%） Rm
- 石分混じり土質材料（0%<石分<50%） Sm-R
- 土質材料（石分=0%） Sm

※石分：75mm以上の材料

→ **[工学的分類]**

工学的特長が類似している土のグルーピング

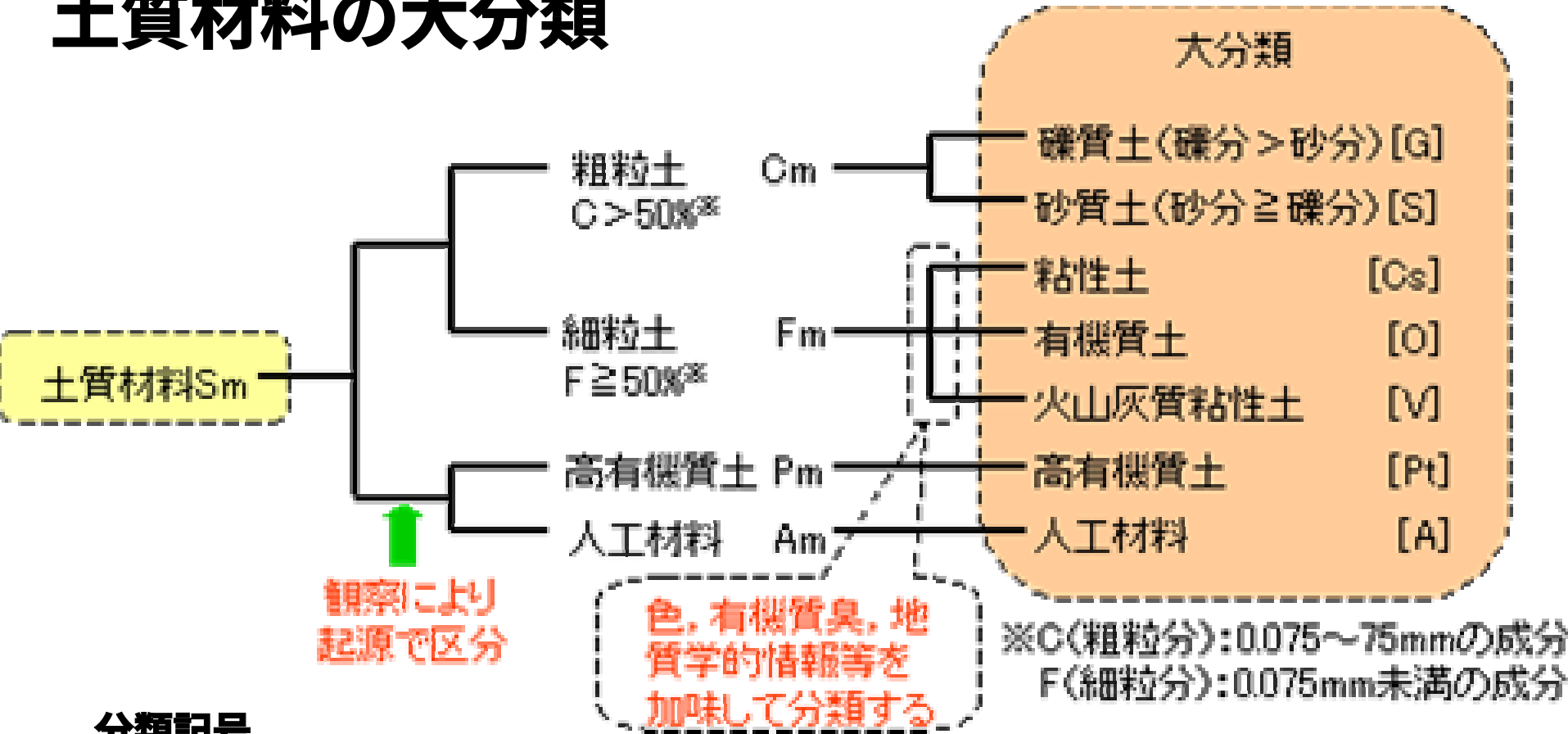
- **軟弱地盤の判定；**
- **工法・調査法の選定；**
- **強度や支持力といった設計定数の推定などに**

工学的分類に用いる試験：

粒度試験

液性・塑性限界試験

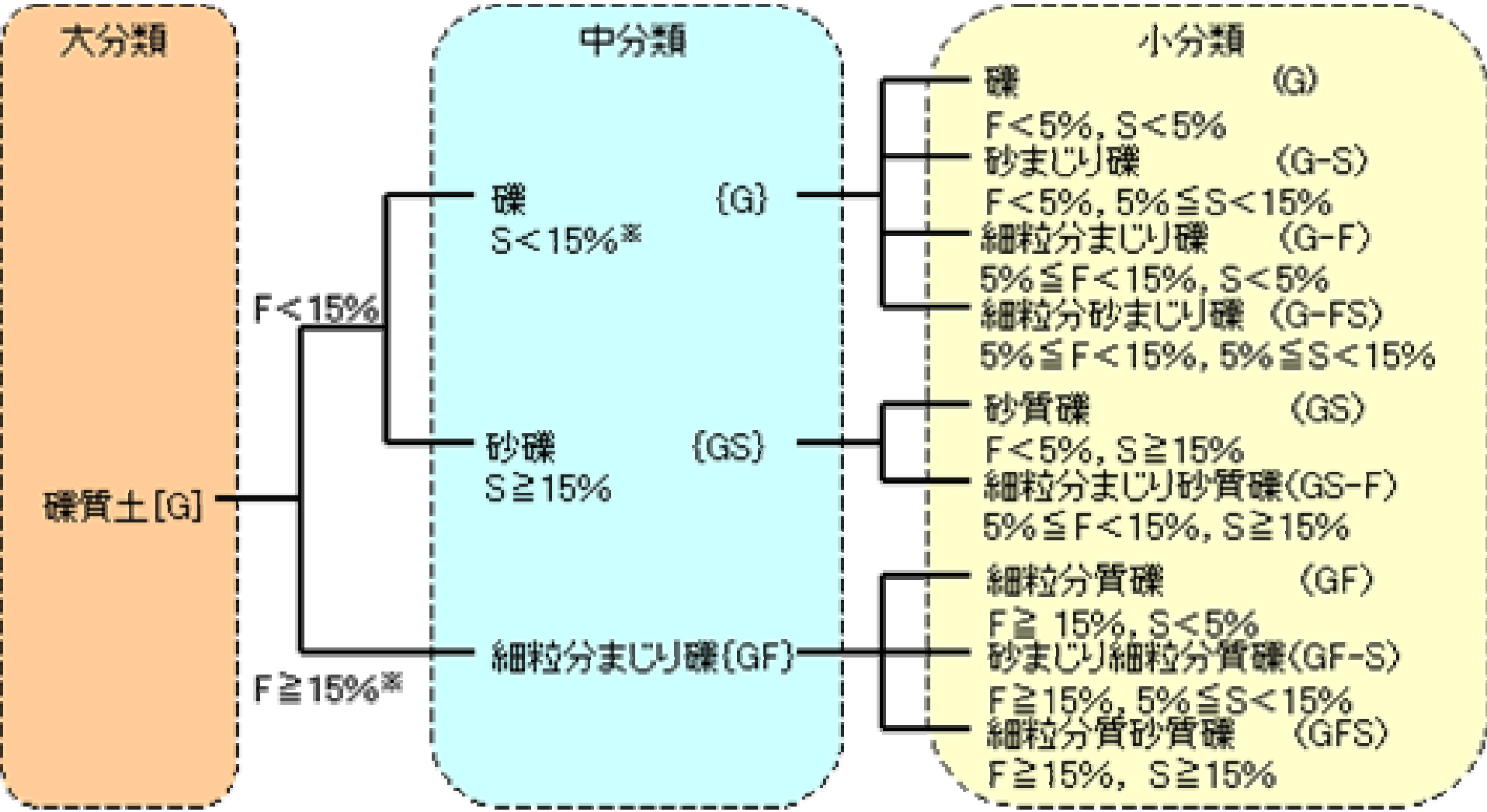
土質材料の大分類



分類記号

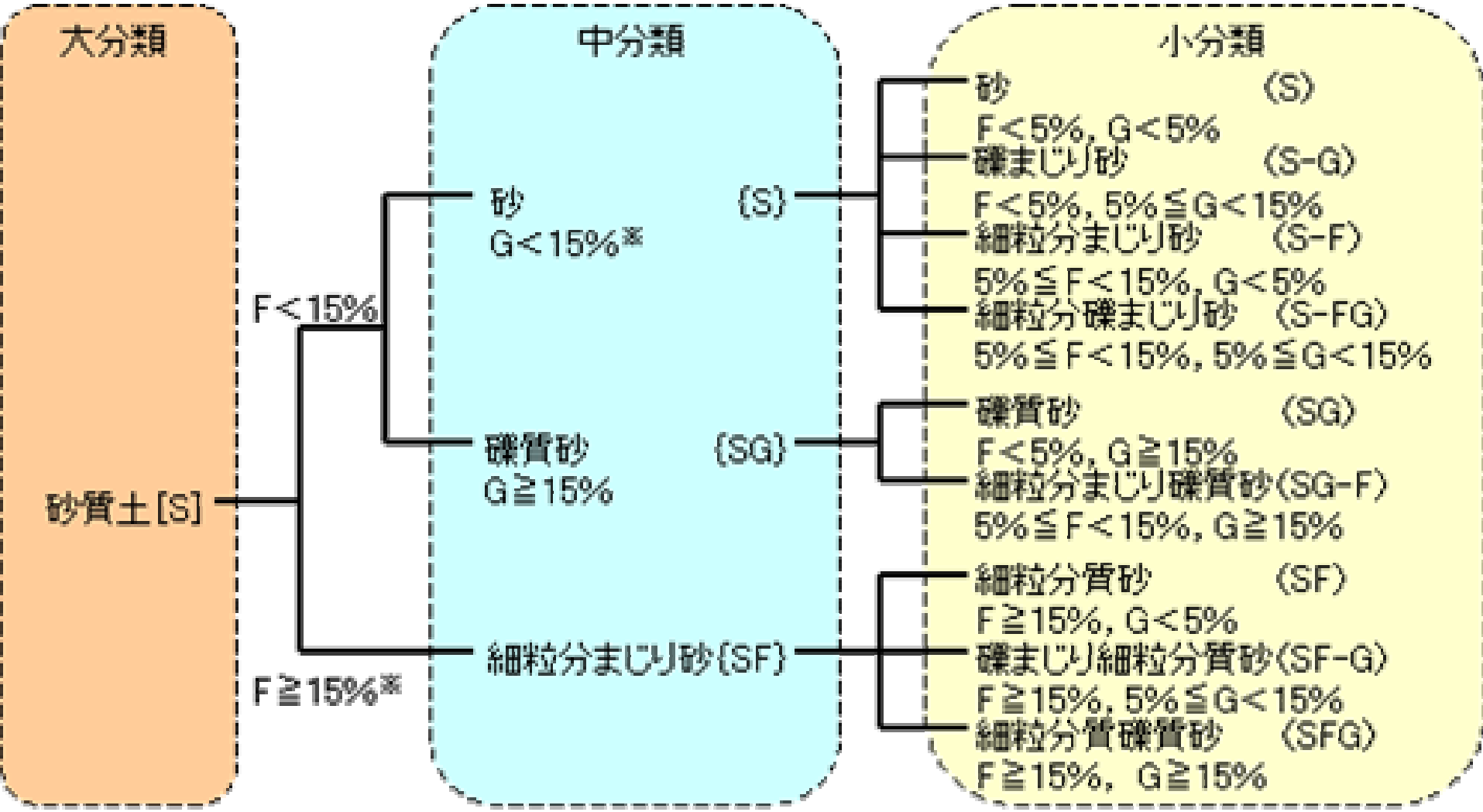
R	石 (Rock)	C	粘土 (Clay)
R1	巨石 (Boulder)	O	有機質土 (Organic Soil)
R2	粗石 (Cobble)	V	火山灰質粘性土 (Volcanic Cohesive Soil)
G	礫粒土 (G-Soil or Gravel)	Pt	高有機質土 (Highly Organic Soil) または泥炭 (Peat)
S	砂粒土 (S-Soil or Sand)	MK	黒泥 (Muck)
F	細粒土 (Fine Soil)	Wa	廃棄物 (Wastes)
Cs	粘性土 (Cohesive Soil)	I	改良土 (I-Soil or Improved Soil)
M	シルト (Mo：スウェーデン語)		

礫質土の中小分類



※ F(細粒分):0.075mm未満の成分
S(砂　分):0.075～2mmの成分

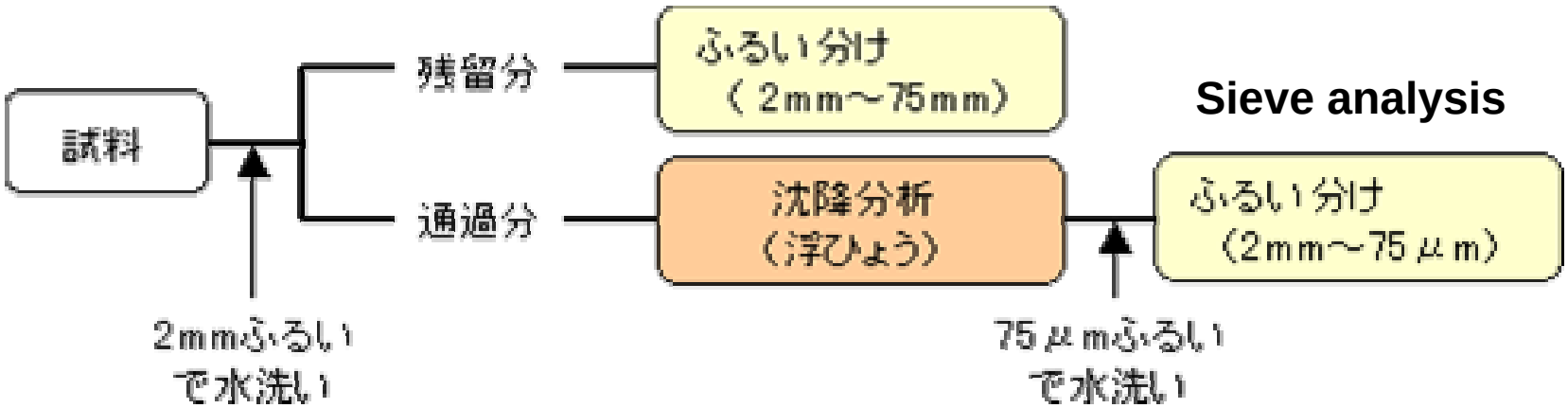
砂質土の中･小分類



※ F(細粒分):0.075mm未満の成分
G(礫　分):2～75mmの成分

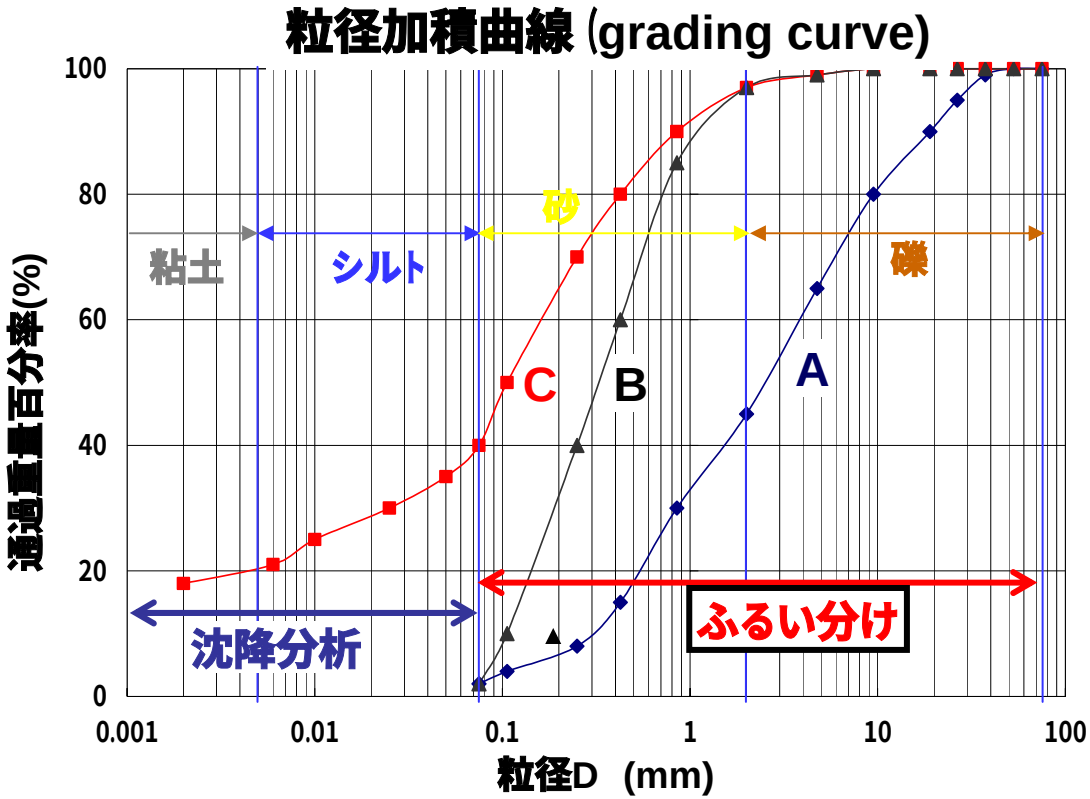
分類の基準:粒径サイズによって決まる土粒子分類

粒度試験(grain size analysis)

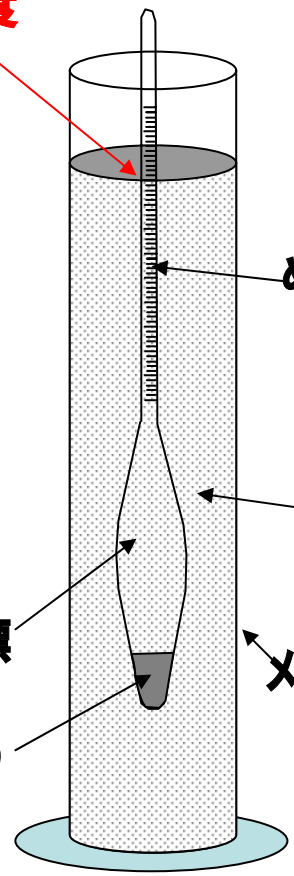


Sieve analysis

粒度試験用網ふるい
75mm ~75μm



沈降分析
(Hydrometer analysis)



Stokes' law:

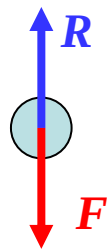
球体が静水中沈降する時に受ける抵抗力R:

$$R = 3\pi d \eta v$$

d:**球体直径**, η:**水の粘性係数**、
(η =1.0x10^{-3}kg/(sec・m)、N・sec/m^2)
v:**球体の沈降速度**

R=球体の自重から浮力を引いた力:F

$$F = \frac{\pi d^3}{6} g(\rho_s - \rho_w)$$



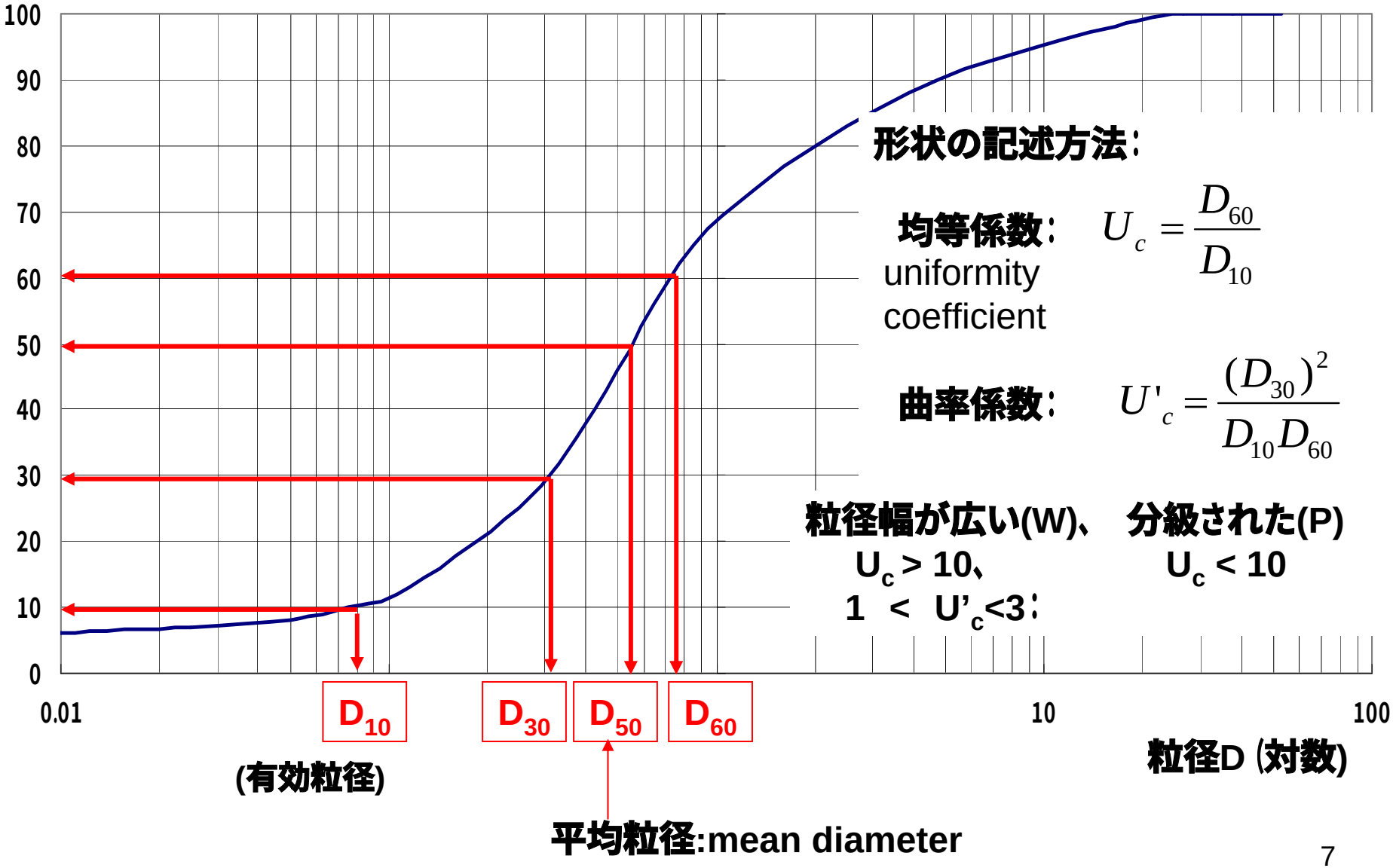
$$v = \frac{1}{18} \frac{g(\rho_s - \rho_w)}{\eta} d^2$$

試験開始 (一様分布) から(t)時間後の沈降深さ(L)

$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{g(\rho_s - \rho_w)} \frac{L}{t}}$$

L_iを液面から浮標の重心までの長さとすると、t_i時間後には,d_i以上の粒径の土粒子は重心位置には存在せず、密度(ρ_i)はそれ以下の土粒子と水によるもの。
これらの関係よりd_i以下の粒径の土粒子の重量を求める。

粒径加積曲線(grain distribution curve)



形状の記述方法：

均等係数： $U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

uniformity coefficient

曲率係数： $U'_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}}$

粒径幅が広い(W)、 $U_c > 10$、 $1 < U'_c < 3$：

分級された(P) $U_c < 10$

Why 粒度分布？

力学特性：（粒径、粒度分布に大きく依存）<＝物理的特性

- **詰まり具合（密度）　：U_c**
- **水の通しやすさ（透水性）　D_{10}**
- **締め固めさすさ（締め固め特性）：U_c, U'_c**
- **土としての強度（強さ）、剛性（変形のし難さ）：D_{50}, 密度**

液状化

粗粒土ではかなり相関、but not enough for 細粒土 ***why??***

•粘土粒径：5μm～分子サイズ（10 Å）の、沈降分析での計測限界：1μm（not enough)

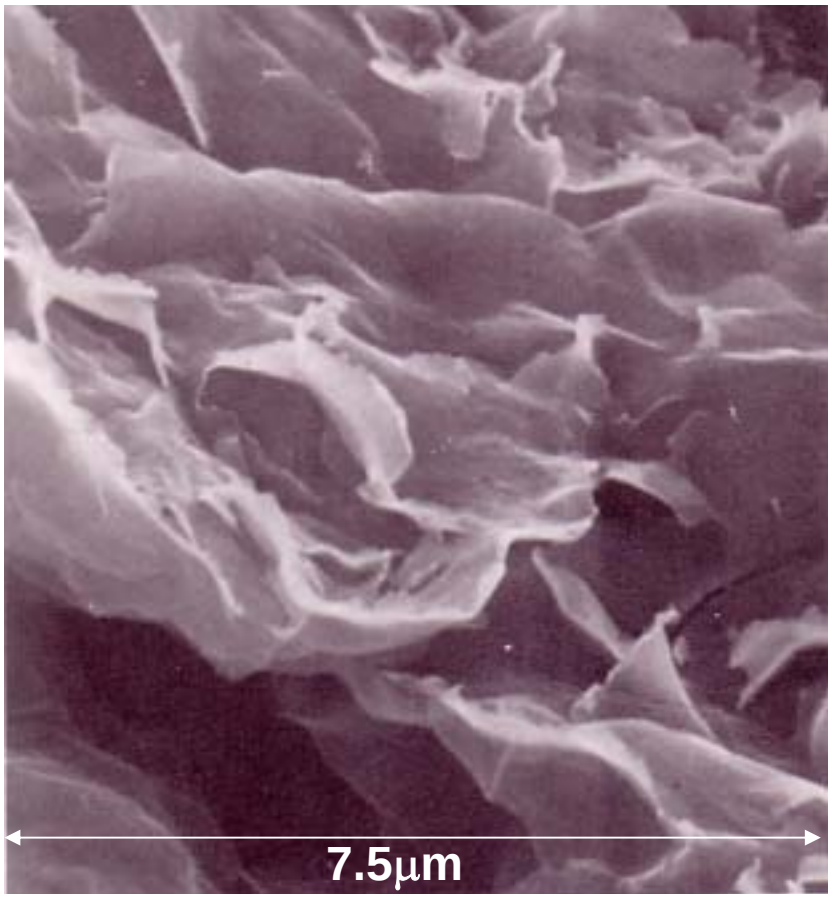
•強度、圧縮性、膨張性、可塑性の含水比の範囲：

化学特性（粘土鉱物＋吸着される陽イオン）に大きく依存

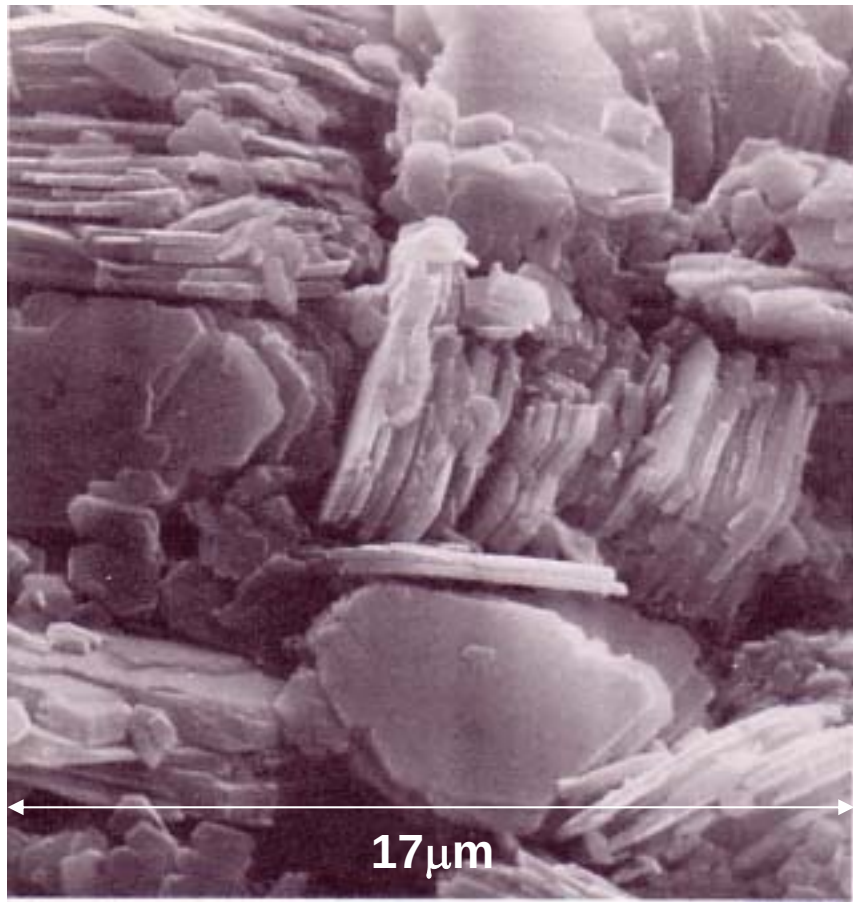
砂、シルト：母岩を構成する一次鉱物（e.g.,石英、長石、雲母、輝石）
粘土：化学的風化作用により生成された二次鉱物
（カオリナイト、イライト、モンモリロナイト）

粘土鉱物の電子顕微鏡写真

J.K. Mitchell “Fundamentals of Soil Behavior”(1976)

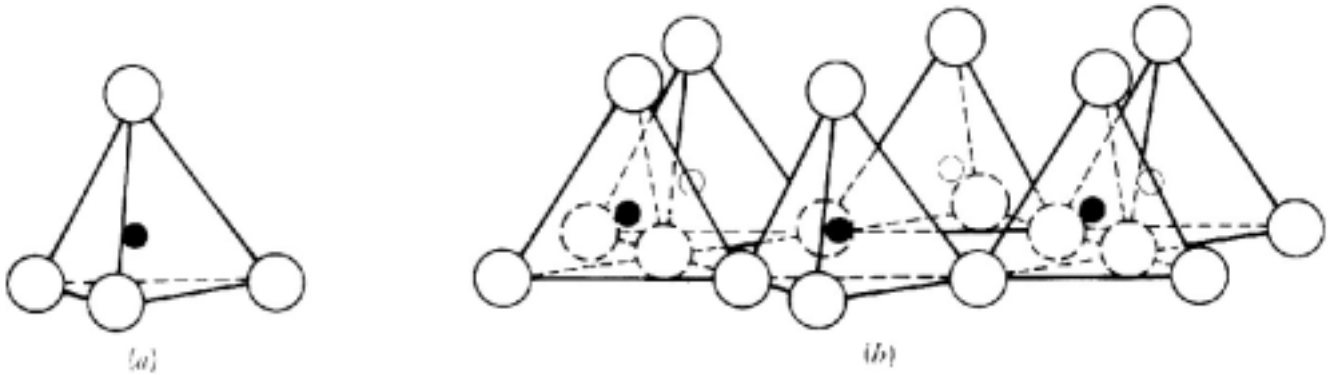


モンモリロナイト：Montmorillonite



カオリナイト：Kaolinite

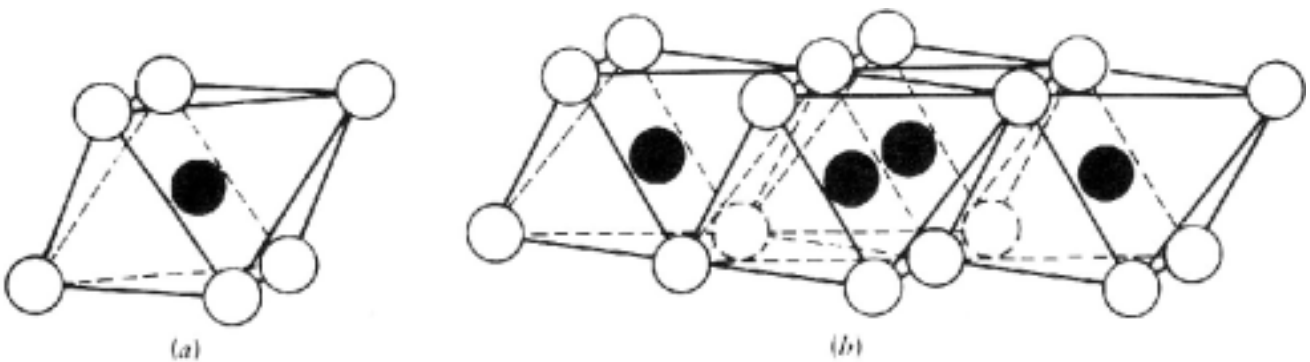
粘土鉱物と構造



シリカ層

and 酸素イオンO^{2-} and ケイ素イオンS_i^{4+}

シリカ正四面体(a)単位、(b)シート構造



G

ギブサイト層
(Al^{3+})

B

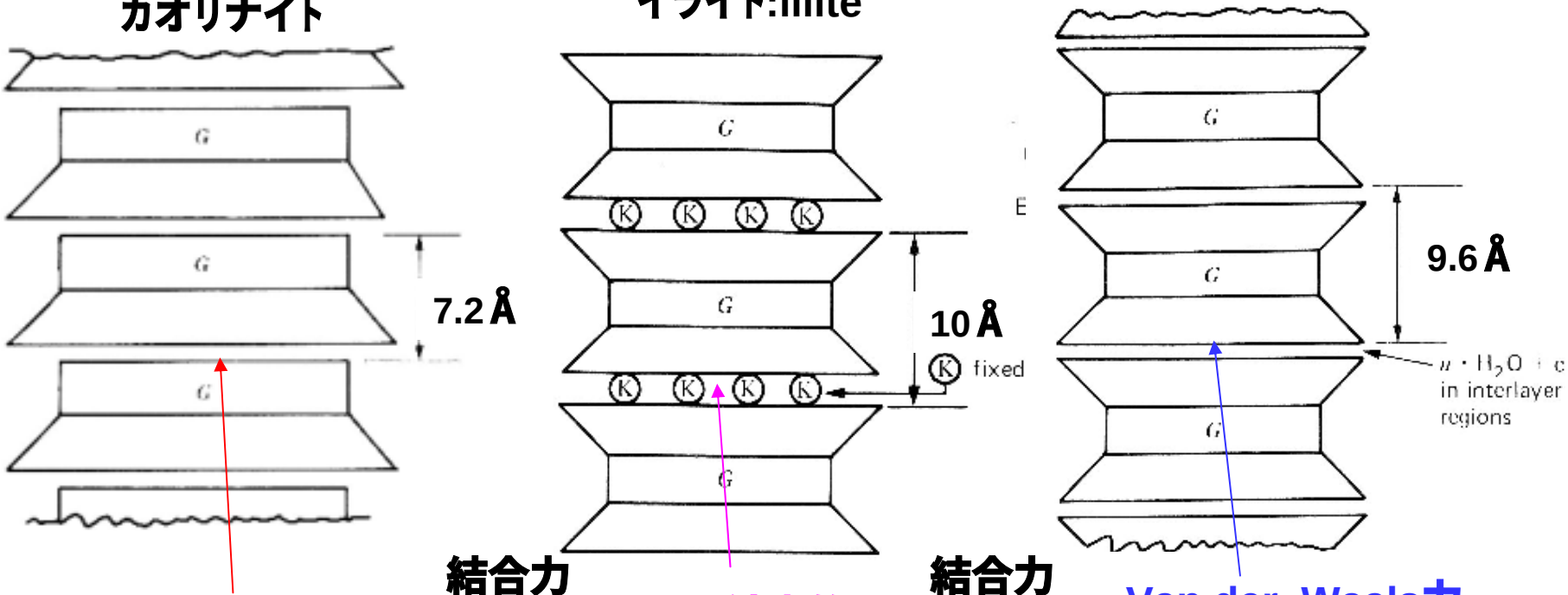
ブルサイト層
(Mg^{2+})

and 水酸基OH^- アルミ、マグネシウム等(Al^{3+},Mg^{2+})

正八面体(a)単位、(b)シート構造

粘土鉱物と構造

カオリナイト　　イライト:illite　　モンモリロナイト



結合力 O原子とOH基の水素結合 ＞ イオン結合的 結合力 ＞ Van der Waals力

粒子サイズ

カオリナイト	イライト:illite	モンモリロナイト
0.1 - 4μ ～3000×4000μ 50～200層	0.003 - 0.1μ ×up to 10μ 10-50層	>10Å ×up to 10μ 1-5層

比表面積 (Specific surface:m^2/g)

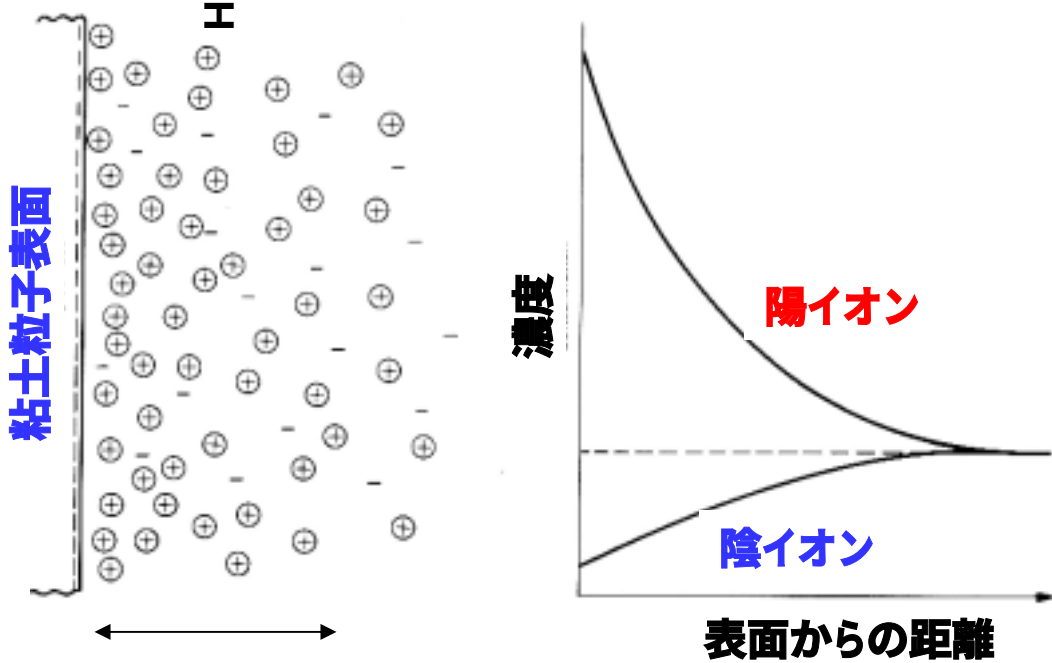
カオリナイト	イライト:illite	モンモリロナイト
10-20	65-100	50-120 700-840(interlayers)

粘土鉱物と構造

水分子：非対称構造

粘土粒子表面：負に帯電

1. 層構造の切れ目におけるO原子などの負の原子価
2. Si原子がAl原子に、Al原子がMg原子に同形置換されることによる原子価不足
3. アルカリ性水溶液内で粘土粒子は酸性物となりOH基が電離することによるH^+イオンの解離。



水分子、水和陽イオンの結合（吸着水層）：拡散二重層

(sorption layer): diffuse double layer

結合力：イオン電荷量が大きいほど、水和イオン半径が小さいほど大

$$Al^{3+} >> Ca^{2+} > Mg^{2+} >> NH_4^+ > K^+ > H^+ > Na^+ > Li^+$$

吸着水層の厚さ：この逆

単位質量の粘土粒子が保持しうる水分（界面効果）：f（比表面積、吸着水層の厚さ）

例えば、Naモンモリロナイト：w_L=700%

土のコンシステンシー

単位質量の粘土粒子が保持しうる水分：f（比表面積、吸着水層の厚さ）

↓

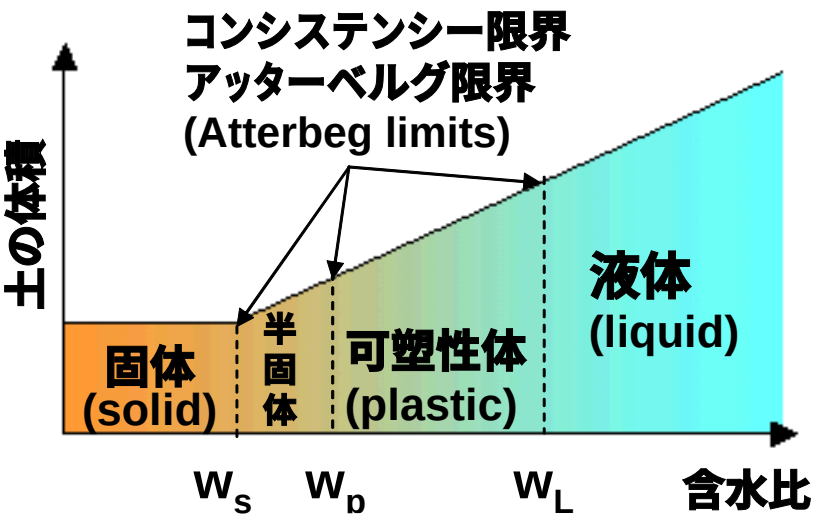
含水比が土の分類の指標となりうる

粘土に含まれている水：

①吸着水：粘性大、せん断抵抗あり

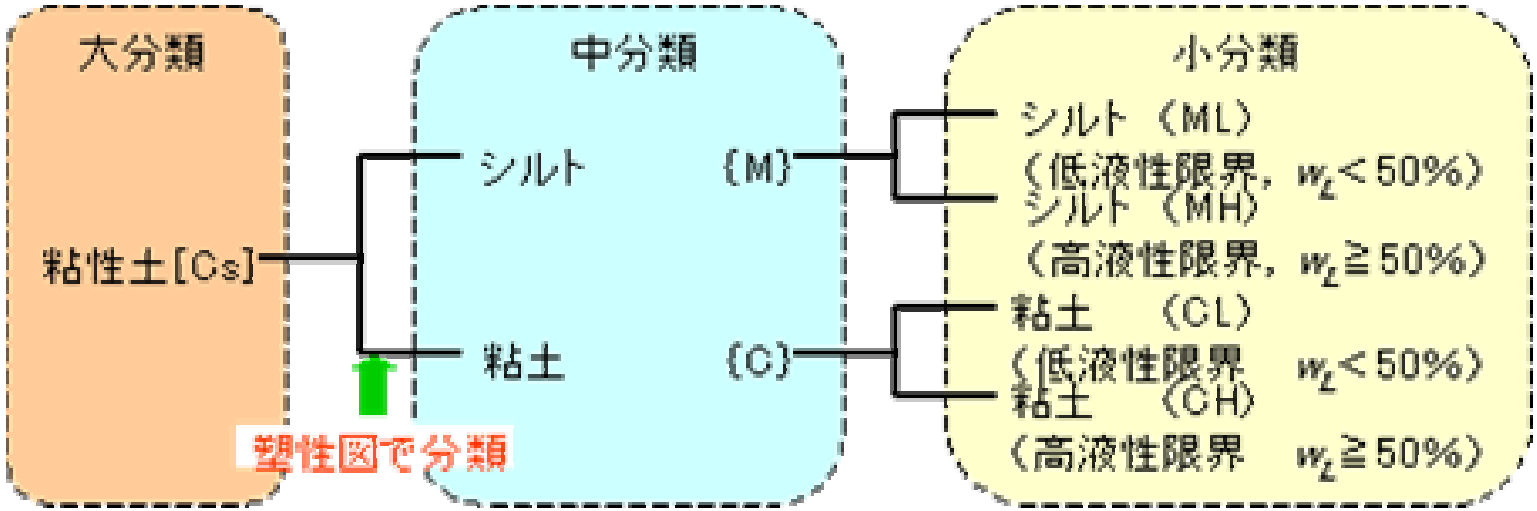
②自由水（吸着水の外側）：強度無し

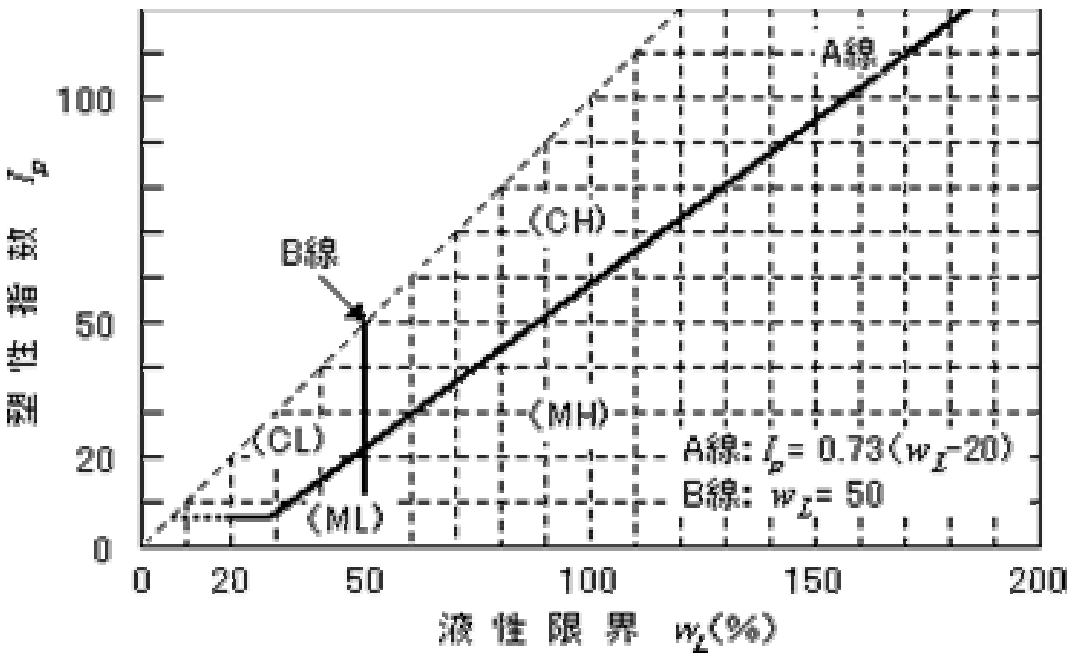
土のコンシステンシー：
水分量によって変化する土（細粒土）の変形や流動に対する抵抗の度合



- **液性限界：w_L** (liquid limit) — 液性限界試験
- **塑性限界：w_p** (plastic limit) — 塑性限界試験
- **収縮限界：w_s**

粘性土の中･小分類





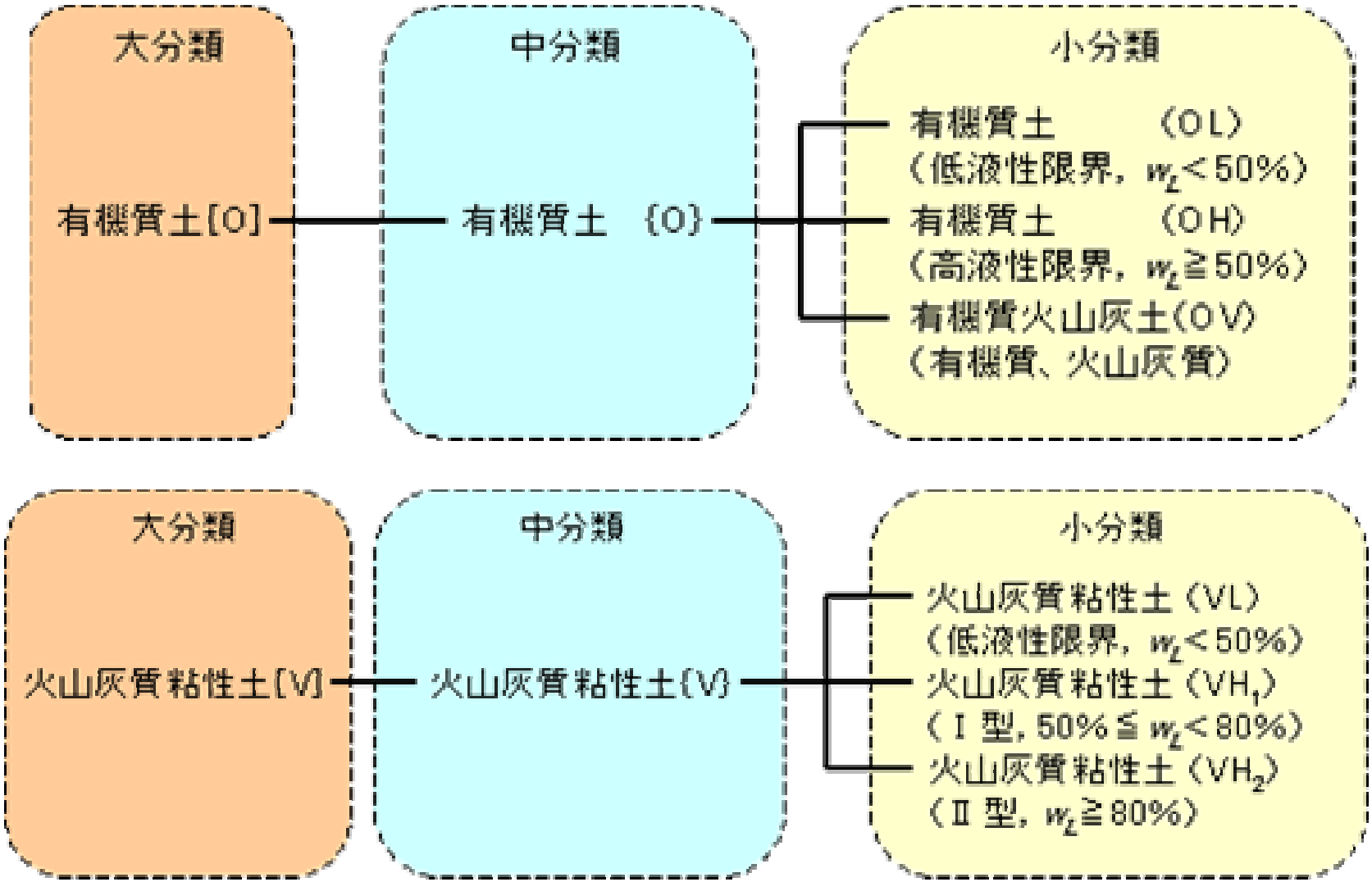
塑性図(plasticity chart)

塑性指数：$I_P=w_L-w_p$

(plasticity Index)

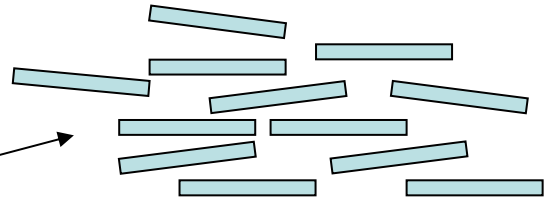
I_p大：可塑性の範囲大
(粘土分大)

有機質土と火山灰質粘性土の中･小分類

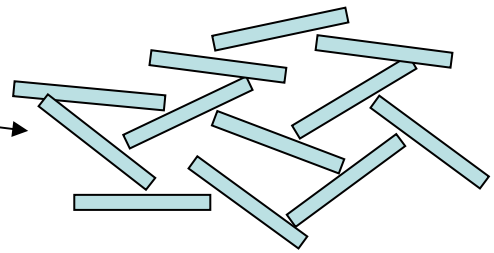


土の構造

懸濁状の粘土粒子の配列構造



•分散構造：粘土粒子に働く反発力が均一
(dispersion)　　平行に近い配列



•棉毛構造：電荷分布の不均一性：端－板接触
(flocculation)

•中間構造

粗粒土配列構造

粒度分布（粒径広範囲：密度大）
粒子の形、粗さ

土によって密度（間隙比）の範囲異なる

間隙比(e)の土のつまり具合を表す指標：
相対密度（D_r）
(relative density)

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (\%)$$

e_{max}：最大間隙比
e_{min}：最小間隙比

コンシステンシー限界と土の力学特性

土固有の性質

- w_L大：含水比大（水を多く含む） => 圧縮正大, 乾燥収縮大、膨潤大
- w_L、I_P大：粒径の細かな粘土分を多く含む => 透水性小

- 活性度（*A*）：(activity)

$$A = \frac{I_P}{2\mu m\text{以下の粘土分含有率}(\%)}$$

個々の粘土粒子の界面効果

自然含水比(w_n)の土の性質

- 液性指数（I_L）: (liquidity index)

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{I_P}$$

大きいほど、柔らか
1を超える場合がある => 鋭敏な土

- コンシステンシー指数（I_c）: (consistency index)

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{I_P}$$

本日のTechnical terms

粗粒土：**coarse soil; 細粒土**：fine soil；**粘性土**： **cohesive soil**；
有機土：**organic soil; 火山灰質粘性土**： **volcanic cohesive soil**；
粒度試験：**grain size analysis**； **ふるい分け**：**sieve analysis;**
沈降分析：**hydrometer analysis; 粒度分布**：**grading curve**；
平均粒径：**mean diameter; 均等係数**：**coefficient of uniformity**
カオリナイト：**kaolinite**； **モンモリロナイト**：**montmorillonite; イライト**：**illite**；
比表面積：**specific surface**；
コンシステンシー限界（アッターベルク限界）：**consistency limits (Atterbeg limits)**；
液性限界：**liquid limit**； **塑性限界**:**plastic limit; 収縮限界**：**shrinkage limit**；
塑性指数：**plasticity index**； **塑性図**：**plasticity chart**；
液性指数： **liquidity index; コンシステンシー指数**：**consistency index; 活性度**:**activity**；
分散：**dispersion**； **棉毛**：**flocculation**；
相対密度：**relative density**；

課題：
(1) p5の試料A,B,CのD_{50}、均等係数（U_c)はいくらか。
(2) 粗粒材試料A,B,Cの分類を何か？
(3) 液性限界w_L=100%、塑性限界w_p＝30%の粘性土の分類は何か？
(4) この粘土の自然含水比w_nが93%であったとして、液性指数はいくつか？