

河川工学(第9,10,11回)

土砂の移動現象とその形態・土砂の生産
土砂の流送
河床変動

土砂の生産と移動

土砂生産, 土石流, 掃流砂, 浮遊砂, ウォッシュロード

河床形態

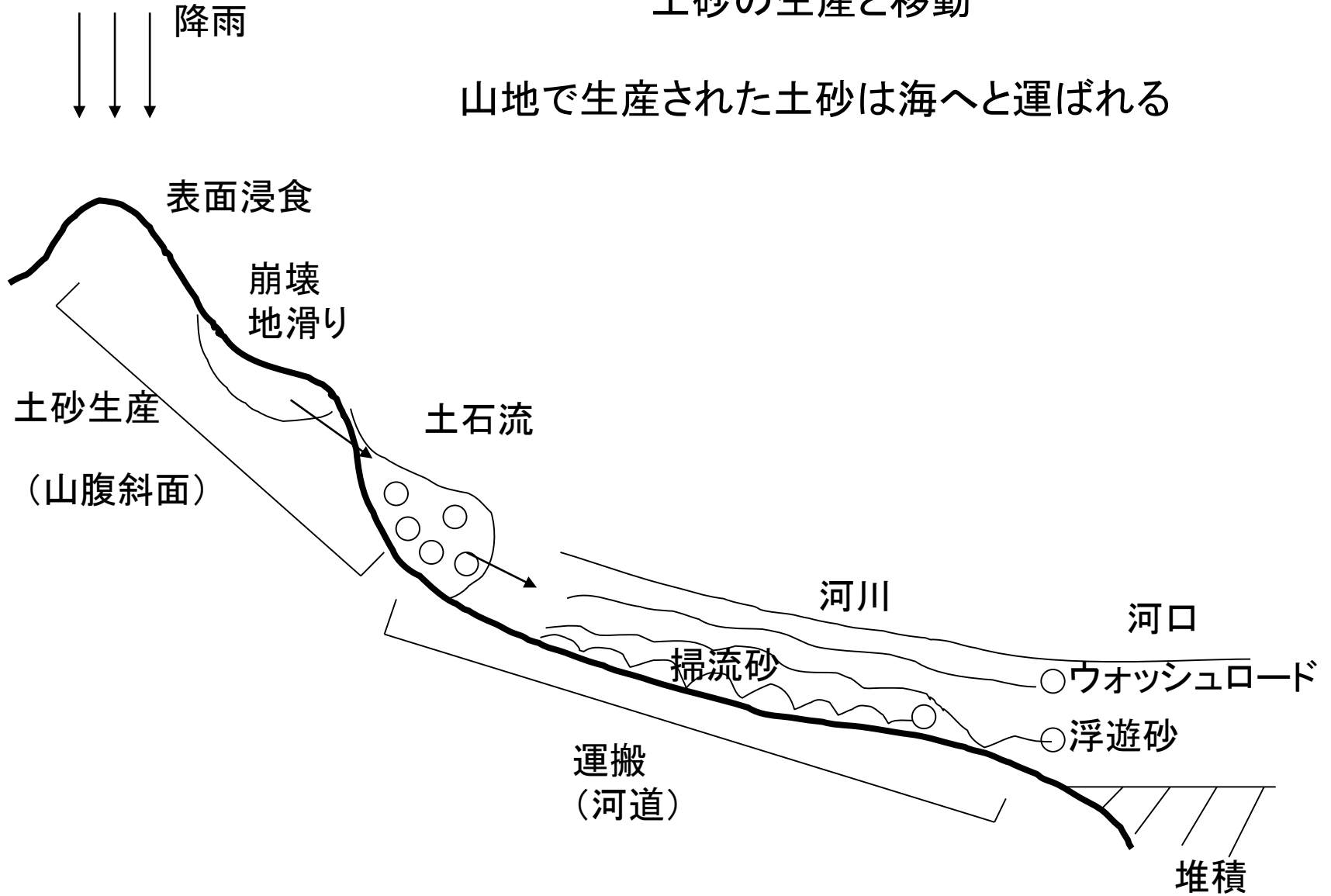
大規模河床形態, 中規模河床形態, 小規模河床形態

河床変動の予測

流砂量式, 河床変動予測の基礎式

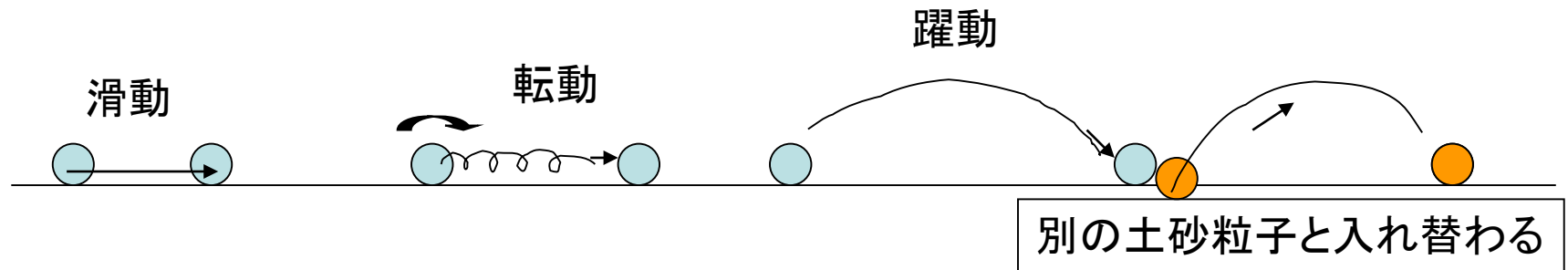
土砂の生産と移動

山地で生産された土砂は海へと運ばれる



土石流 (debris flow) : 山腹や川底の石や土砂が豪雨などにより水と一体となって流れ出す現象. 水と巨礫を含んだ土砂の集合状流動.

掃流砂 (bed load) : 河床近傍を移動する土砂粒子. 運動形態として滑動 (sliding), 転動 (rolling), 躍動 (salutation) がある. 流下していく土砂は河床にある土砂と入れ替わりながら流下する.



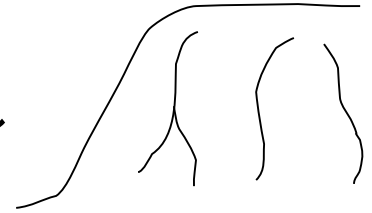
浮遊砂 (suspended load) : 河床から離れた細かい土砂が水中を浮流しながら流下する. 流れが弱くなると土砂は河床に沈降する (土砂の堆積). 流れが強くなれば再び浮遊する.

ウォッシュロード (wash road) : 土砂生産源から河川に流入し, 一度も河床の土砂と入れ替わりことなく流下するよう土砂. 濁水のような状態.

土砂生産

表面浸食 (surface erosion):

表面流により地表を浸食する。リル (rill) の形成。リルが発達しガリ (gully) になる。



リル: 斜面に形成される細い流路

崩壊 (collapse):

山地の平衡状態が降雨や地震によって破られ、山腹が滑りずり落ちる現象

地滑り (land slide):

傾斜角が緩やか ($5 \sim 20^\circ$) な斜面で長い時間をかけてゆっくりと滑動する。

土石流 (debris flow):

泥流型: 粘土、シルト、火山灰などの微細粒子が高濃度で流動するもの。

石礫質型: 大きな石礫を含んだもの。

小規模河床形態

低水流領域 (lower regime、流速が小さい(フルード数が0.8以下))で発生する現象

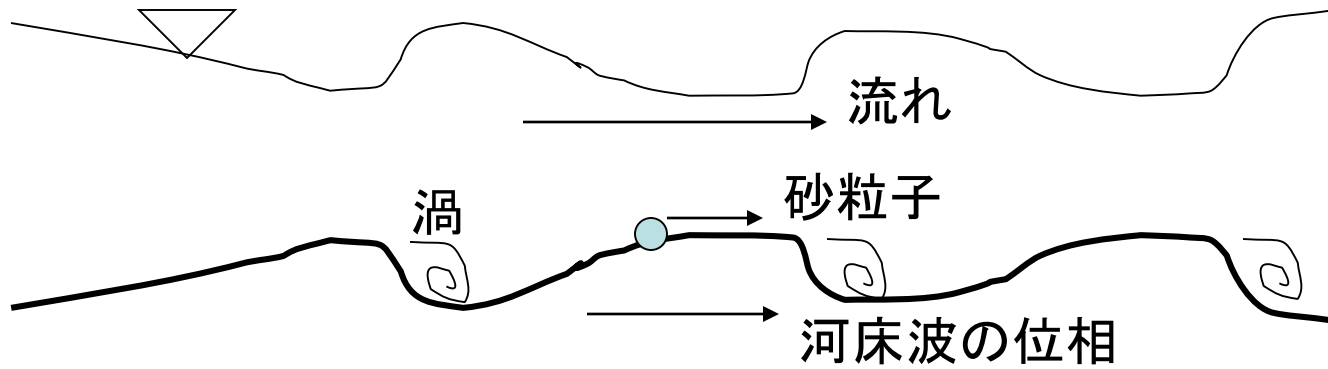
砂蓮 (ripple) : 波状をした河床形状。3次元的。土砂、位相とも下流側に移動。波長、波高が砂粒径と関係する。波長は砂粒径の約500~1500倍。

砂堆 (dune) : 砂蓮と同様であるが2次元的な河床波。波長、波高が水深と関係する。波長は水深の約4~10倍

高水流領域 (upper regime、流速が大きい状態(フルード数が1.0以上))

平坦河床 (flat bed) : 流速が大きくなると河床波の波高が低くなり、やがて平坦になった状態。

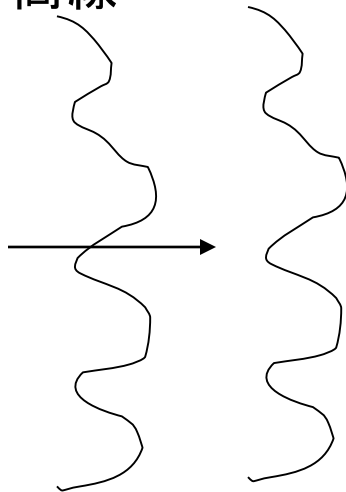
反砂堆 (anti dune) : フルード数1以上(射流)の状態が発生する砂堆。河床波はサイン曲線に近くなる。位相は条件によって下流、停止、上流へ移動する(多くの場合は上流へ移動)。ただし、砂粒子は下流へ移動している。



砂堆の側面図

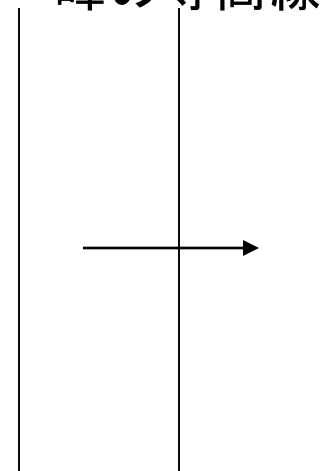
砂堆になると河床波の前面で渦が生じる。結果として流体抵抗が大きくなる。水面形状と河床形状は逆位相。

峰の等高線

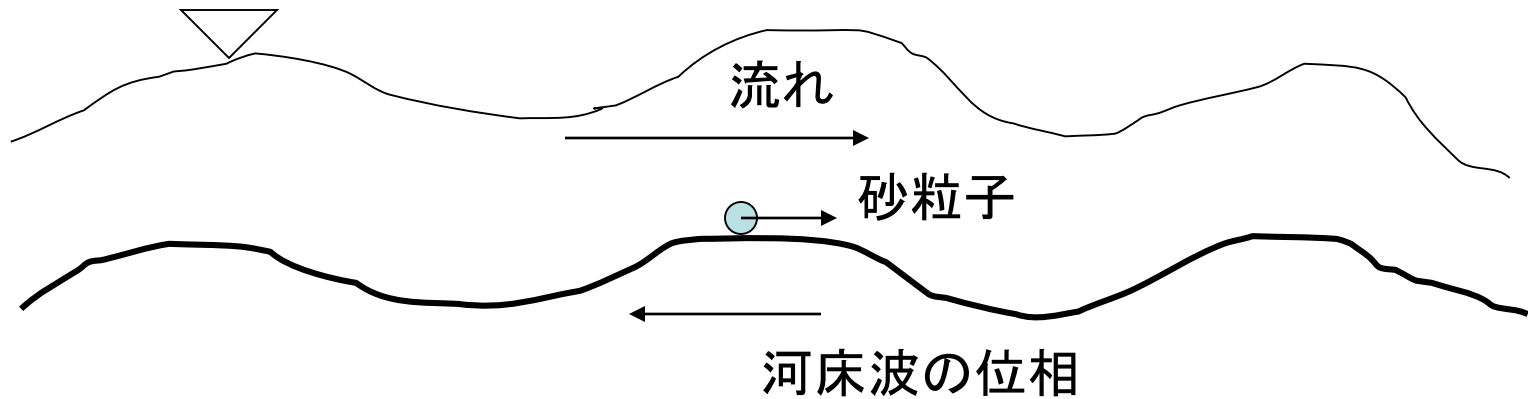


砂蓮の平面図

峰の等高線



砂堆の平面図



反砂堆の側面図

反砂堆では渦は生じず、流体抵抗は小さい。水面波と強い相互作用を持つ。水面形状と河床形状は同位相。

中規模河床形態 水路幅で規定される河床変動の形態

交互砂州(単列砂州), 複列砂州, うろこ状砂州(多列砂州)
固定砂州(河道の湾曲部)



交互砂州(那賀川)

河幅／水深が10~20程度のとき形成される

<http://www.skr.mlit.go.jp/nakagawa/>



複列砂州(斐伊川)

河幅／水深が70～100程度のとき形成される

<http://www.cgr.mlit.go.jp/izumo/homepage.htm>



うろこ状砂州(斐伊川)

河幅／水深が数100程度るとき形成される

<http://www.cgr.mlit.go.jp/izumo/homepage.htm>

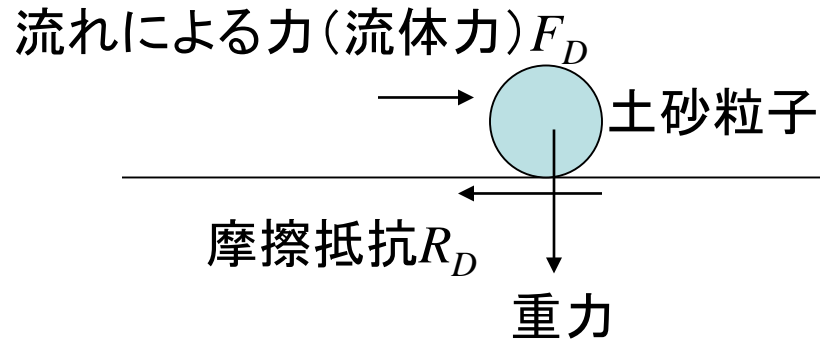
大規模河床形態

河道縦断形状の変化(河床位の増減)

河床の上昇:土石流や地滑りなどによる大量土砂生産により土砂が堆積し河床の地盤高が高くなる。

河床の低下:ダム建設により上流からの土砂補給がなくなり、河床高が減少する。

ダム堆砂:ダムの貯水池に土砂が流入・堆積し、貯水池底面高が高くなる。



ある流体力がある値以上になると摩擦抵抗にうち勝って土砂粒子が動き始める。

$$F_D \geq R_D$$

流体力は流速の二乗に比例する。また流速と摩擦速度 u_* も比例の関係にある。つまり流体力は底面せん断力 τ_* に比例する。

$$F_D \propto \rho u^2 \quad u \propto u_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} \quad F_D \propto \tau_*$$

粒子が動き始める瞬間の底面せん断力を τ_{*c} とし、これを限界掃流力という。

$$\tau_{*c} = f(\text{Re}_*) \quad \text{Re}_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad : \text{砂流レイノルズ数}$$

d : 土砂粒子の代表直径 ν : 動粘性係数

シールズ曲線、岩垣式などがある。

岩垣式

$$\text{Re}_* \geq 671 \quad : u_{*c}^2 = 0.05(\sigma / \rho - 1)gd$$

$$162.7 \leq \text{Re}_* \leq 671 \quad : u_{*c}^2 = \left[0.01505g(\sigma / \rho - 1) \right]^{25/22} \nu^{-3/11} d^{31/22}$$

$$54.2 \leq \text{Re}_* \leq 162.7 \quad : u_{*c}^2 = 0.034(\sigma / \rho - 1)gd$$

$$2.14 \leq \text{Re}_* \leq 54.2 \quad : u_{*c}^2 = \left[0.1235g(\sigma / \rho - 1) \right]^{25/32} \nu^{7/16} d^{11/32}$$

$$162.7 \leq \text{Re}_* \leq 671 \quad : u_{*c}^2 = 0.14(\sigma / \rho - 1)gd$$

$$\text{Re}_* = (\sigma / \rho - 1)^{1/2} g^{1/2} d^{3/2} \nu^{-1}$$

混合砂礫の場合はエキアザロフ(Egiazaroff)の式などがある。

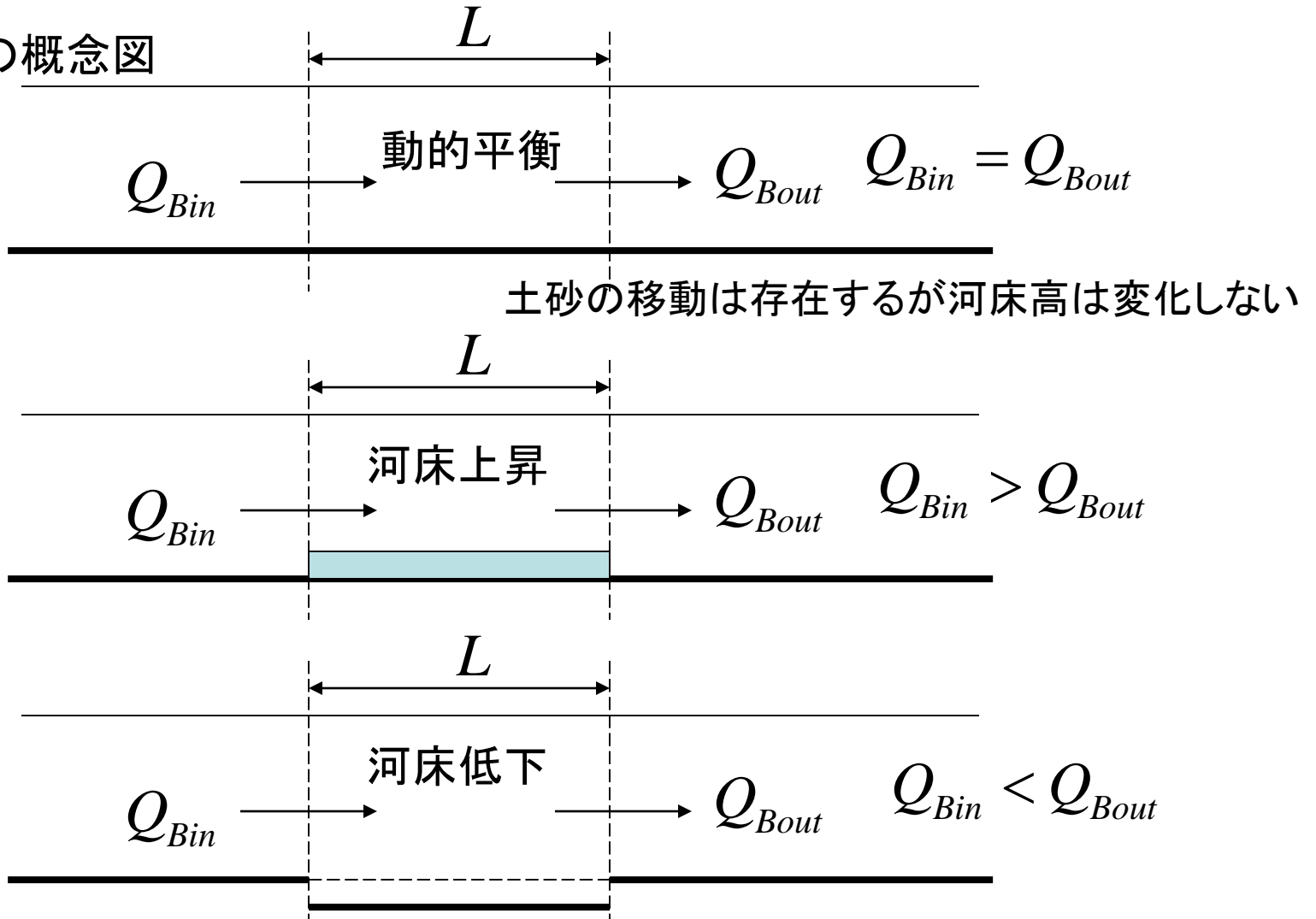
流砂量:

ある断面を単位時間当たりには通過する土砂の容積。

掃流砂量と浮遊砂量に区分されるが単に流砂量といえは両者の和をいう。

河床変動の概念図

流入土砂と
流出土砂は
同じものでな
くて良い



流砂の連続式(1次元の場合)

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial}{\partial x} (q_B B) = 0$$

z : 河床高

B : 河床幅

λ : 河床土砂の空隙率

q_B : 単位時間・単位幅当たりの流砂量

→ 流れの式と一緒に解けば河床変動の様子が分かる。

掃流砂量式(単一粒径土砂に対する流砂量式)

ブラウンの式、芦田・道上の式、M.P.M.式(スイス公式)、アインシュタインの式

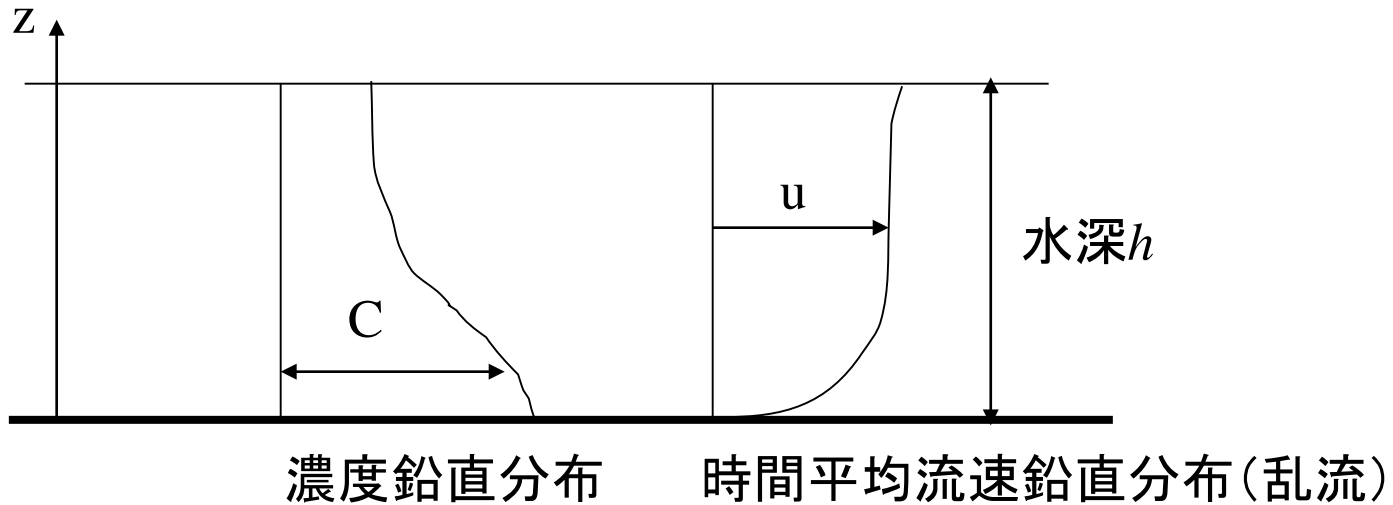
芦田・道上の式:

$$\frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right)$$

M.P.M(Meyer-Peter,Muller) 式

$$\frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}} = 8(\tau_{*e} - 0.047)^{3/2}$$
$$\tau_{*e} = \left(\frac{0.0192d^{1/6}}{n}\right)u_*$$

混合粒径(通常河, 床の土砂は流度分布を持つ)の場合は, 粒径別に流砂量式, 流砂の連続式を適用する.



$$Cw_f + v_d \frac{dC}{dz} = 0$$

W_f : 土砂の沈降速度
 v_d : 乱流拡散係数

土砂粒子の自重で沈降する
 単位時間当たりの土砂量

乱流によって鉛直方向に浮上
 する単位時間当たりの土砂量

上記のような場合濃度鉛直分布はRouse分布となる(詳細は教科書参照)。

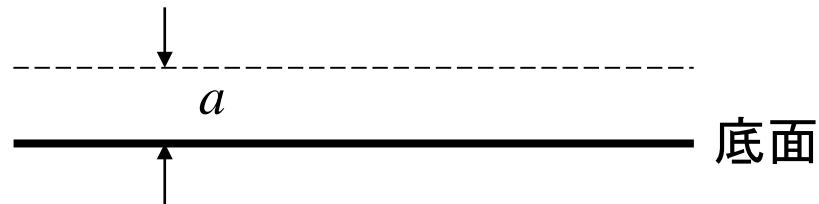
Rouse分布

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^{\frac{w_f}{\kappa u_*}}$$

κ : カルマン定数

a : 河床底面近傍の基準高

C_a : a における濃度



C_a , a をどのように評価するのが問題

a を水深の5%あるいは粒径の数倍とおくことが多い.

Lane, Kalinske (レーン・カリンスク) の式

$$q_s = q C_a P$$

$$C_a = 5.55 F(w_f) \left[\frac{1}{2} \frac{u_*}{w_f} \exp \left(- \left(\frac{w_f}{u_*} \right)^2 \right) \right]^{1.61}$$

$$P = \int_0^1 \left[1 + \frac{1}{\kappa \lambda_a} (1 + \ln \eta) \right] \exp \left(- \frac{6 w_f \eta}{\kappa u_*} \right) d\eta$$

$$F(w_f)$$

$$\eta = \frac{z}{h}$$

$$\lambda_a = \frac{U}{u_*} \quad \leftarrow \text{断面平均流速}$$

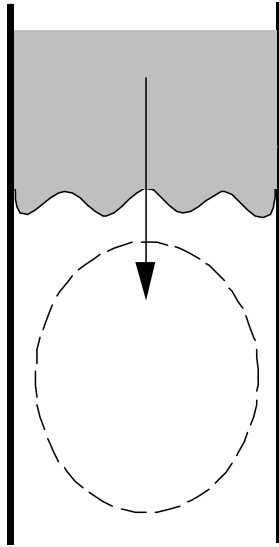
$F(w_f)$ の沈降速度を持つ粒子の粒径が河床の礫中にしめる割合 (%)

流砂量 $q_B = q_b + q_s$ として流砂の連続式を計算する。

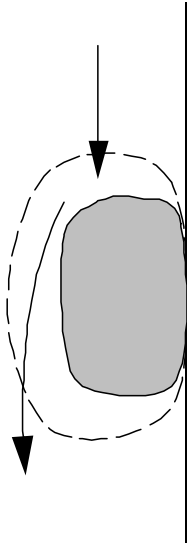
淵の形成

流れが河床面を浸食し淵が形成される。浸食された土砂は比較的近傍に堆積し瀬が形成される。

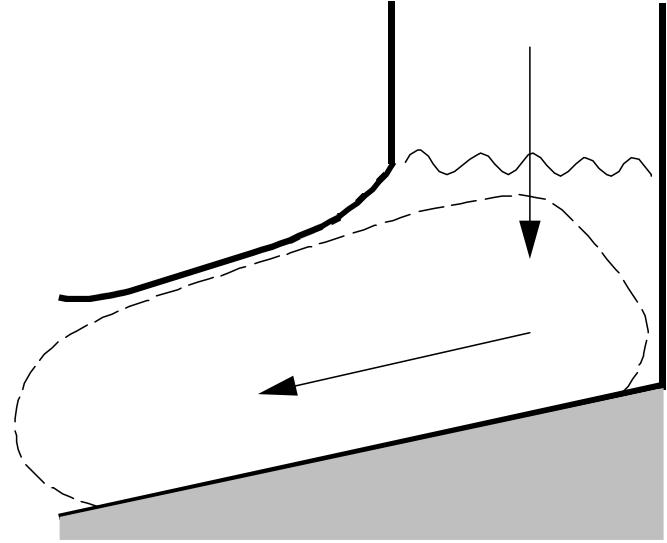
S型
Substance



R型
Rock



M型
Meandering



固い河床から柔らかい河床に移行した場合。
滝壺や段落ち流れ(落差のある流れ)など。

巨礫の周り
橋脚周りなど

河川の蛇行部

遠心力などの作用で強い螺旋流が生じ河床面土砂を浸食・運搬する。