

土砂生産と流砂系

流域

降雨→(流出過程)→流量→河道水理現象(水深, 流速)・・・水循環(流域内)
山地・陸域 河川 海岸
土砂生産 流砂→移動床現象 →漂砂 ・・・・流砂系
(Sediment Yield Sediment Transport, Fluvial process)

土砂生産 固結したものが離散 ←生産場の地質の影響大

山腹崩壊 ←円弧滑りの発生
地滑り
裸地侵食 土壌剥離, ガリ浸食
表現→比生産土砂量

LQ式

生産土砂→流砂系への流入

浜床堆積層, 沖積層形成 (Bed material)

→貯累層 (Substratum)

(密度, 粒径分布: 粒系化石曲線, 中央粒径, 平均粒径, p%粒径)

土砂流送=流砂

分類: Bed material load (底質輸送流砂) 河床との交換あり
Wash load (ウォッシュロード) 河床との交換無し

運動形態:

掃流 (Bed load) 河床に沿って流れる (河床との摩擦や衝突)

浮遊 (Suspended load) 流れに乗って運ばれる (流れに乱れの影響 (乱流拡散))

輸送量=流砂量 (Sediment transport rate) 通過量実質体積/単位幅/単位時間

Bed material load=流れの営力に見合って運ばれる 力学的に確定

Wash load=供給分が運ばれる (水文学的) ←力学的には undeterministic

総流砂量推定=Bed material load 流砂量+Wash load

移動床過程

貯水池堆砂, 植生による捕捉, 河口への堆積

栄養塩輸送, 粒状有機物 (POM)

BML 総流砂量 (q_T) = 掃流砂量 (q_B) + 浮遊砂量 (q_S)

移動床過程 Fluvial process : 流砂→地形変化

支配方程式: 流砂の連続式

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{1-\rho_0} \left(\frac{\partial q_{Tx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Ty}}{\partial y} \right)$$

z =河床高さ, x, y =平面座標, ρ_0 =砂の空隙率

移動床水理の支配要素：

場：重力加速度(g)

流体：密度(ρ)，動粘性係数(ν)

土砂：密度(σ)，粒径(d)

流れ：摩擦速度(u_*)，水深(h)

流砂量(q_T)

→無次元支配要素

Shields 数(無次元掃流力) $\tau_* = u_*^2 /$

砂粒 Reynolds 数 $Re_* = u_* d / \nu$

相対水深 h/d

相対密度 σ/ρ

無次元流砂量 $q_{T*} \equiv q_T / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}$

流砂量式 (Bed material load 推定式)

掃流砂：Einstein 型 $q_B \propto p_s \Delta d$ (pick-up rate \times step length)

平衡状態 \rightarrow 河床面からの Pick-up = 河床面への落下率

Kalinske 型 $q_B \propto u_g v_g$ (砂粒速度 \times 運動砂粒密度)

Bagnold 型 $q_B \propto \tau U$ (Stream power)

掃流砂量式

Meyer-Peter \cdot Muller 式(スイス公式) $q_{B*} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2}$

芦田 \cdot 道上式 $q_{B*} = 17\tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right)$

限界掃流力 \leftarrow Shields ダイアグラム，岩垣公式 $\tau_{*c} = func(Re_*)$

浮遊砂 平衡濃度分布 $C(z) \leftarrow$ 沈降フラックス = 乱れによる巻き上げフラックス(乱流拡散)

$$w_0 C \quad \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z}$$

浮遊砂の拡散係数 $\varepsilon_s = \beta \nu$ $1/\beta =$ 乱流 Schmidt 数， $\nu =$ 渦動粘性係数

$$\frac{C}{C_a} = \exp\left[-\int_a^z \frac{w_0}{\varepsilon_s} dz\right]$$

対数則型(放物線型渦動粘性係数) \rightarrow Rouse 式

Boussinesq 型(水深平均渦動粘性係数) \rightarrow Lane-Kalinske 型(指数型)

$C_a =$ 基底濃度， $C_a w_0 =$ Entrainment rate

$$C_a = A_s \left(\frac{u_{*c}}{w_0}\right)^m \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^n$$

$u_{*c} =$ 移動限界摩擦速度， $A_s = 0.002$ ， $m = 2$ ， $n = 1.5$

$$\text{浮遊砂量} \rightarrow q_s = \int_a^h C(z)u(z)dz$$

※ 移動床過程の解析ではしばしば以下の式を用いる.

$$(1 - \rho_0) \frac{\partial z}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) + S_d - S_e$$

S_e =Erosion rate(平衡基底濃度×沈降速度)

S_d =Deposition rate(その地点の底面濃度×沈降速度)

↑ 浮遊砂の移流拡散方程式

混合粒径流砂と移動床過程

移動床過程 = 河床高変化 + 表層粒度構成(Fluvial sorting)

混合粒径の移動床解析 = 混合砂をサイズによってクラス分け, 交換層の概念

→ 粒径別流砂量式, 粒径別限界掃流力 ← Egiazaroff 式

河床形態 移動床の特徴的河床形態

自励的に形成される Sand wave

河床形状 ($z(x, t)$) ~ 水流(水深・流速 ~ 掃流力) ~ 流砂 ~ 地形変化(dz/dt) 位相差 to $z(x, t)$

→ 波形の伝播, 振幅の増減(不安定性)

二次元河床形状(小規模河床形態)

Ripples (砂漣) $Re_* < 20$ $L = (500 \sim 1000)d$

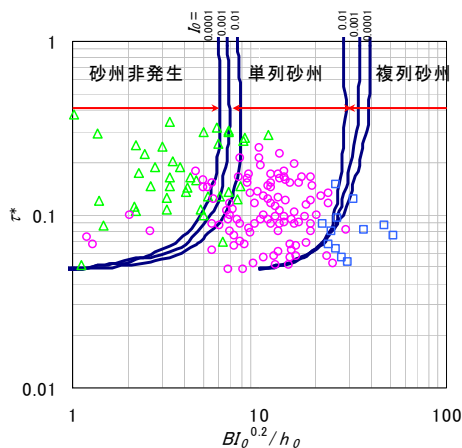
Dunes (砂堆) $Re_* > 20, Fr < 0.8$ (Lower regime) $L = (5 \sim 6)h$

Antidunes (反砂堆) $Fr > 0.8$ (Upper regime) $L = 2\pi h$

三次元河床形状(中規模河床形態) ← 河道満杯流量(低水路満杯流量 = 年最大洪水)

砂州 モード数 = Func($\tau_*, B/h, I$) 川幅・勾配が重要

交互砂州, 複列砂州, うろこ状砂州



河道形状 小規模 → 抵抗

移動床流水抵抗 = 砂粗度 + 河床波の形状抵抗 → 水深規定

→ 流砂量規定(有効総流力)

中規模 → 河道景観(瀬や淵) セグメント

セグメント分類

セグメント	M	I	2		3
			2-1	2-2	
地形区分	山間地	扇状地	谷底平野		デルタ
河床材料の代表粒径 d_R	さまざま	2 cm 以上	3 cm ~ 1 cm	1 cm ~ 0.3 mm	0.3 mm 以下
河岸構成物質	河床海岸に岩が出ていることが多い。	表層に砂、シルトが乗ることがあるが薄く、河床材料と同一物質が占める。	下層は河床材料と同一、細砂、シルト、粘土の混合物。		シルト・粘土
勾配の目安	さまざま	1/60~1/400	1/400~1/5000		1/5000~水平
蛇行程度	さまざま	曲がりが少ない。	蛇行が激しいが、川幅水深比が大きいところでは8字蛇行または島の発生。		蛇行が大きいものもあるが、小さいものもある。
河岸侵食程度	露岩によって水路が固定されることがある、沖積層の部分は激しい。	非常に激しい。	中：河床材料が大きいほうが水路はよく動く。		弱：ほとんど水路の位置は動かない。

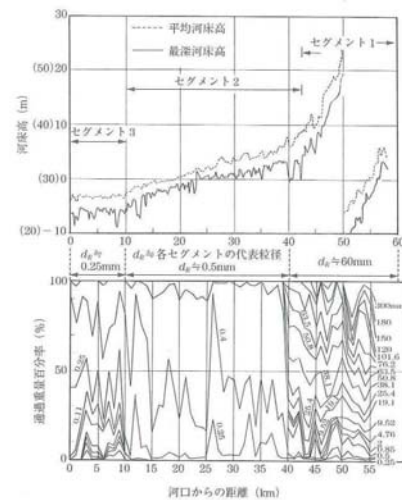


図 5.1 木曾川の河床高と河床材料の縦断方向変化 (建設省技術研究会編, 1974 より作成)

さまざまな河床変動

堰下流の河床低下

Rotational degradation

Parallel degradation

Armoring

湾曲部の河床形状

二次流 Secondary flow

流砂量への流向, 横断勾配の効果

円柱(橋脚)周辺の局所洗掘

局所流と二次流

循環保存則

静的洗掘 (Clear water scour) と動的洗掘 (Scour with continuous sediment motion)