

側岸における非平衡流砂過程
Non-Equilibrium Bed Load Transport Process on a Side Slope

京都大学工学部 正 員 中 川 博 次
金沢大学工学部 正 員 辻 本 哲 郎
○京都大学工学部 正 員 村 上 正 吾

1. まえがき

河川水衝部での洗掘，河川蛇行流路の平面・河床形状の問題解明に際して，側岸侵食の機構を明らかにすることが不可欠であり，そのためには横断勾配が存在する条件での非平衡流砂機構，具体的には横断方向流砂量分布を明らかにせねばならない。側岸上の流砂過程は，たとえその横断方向の掃流力分布が一樣であったとしても非平衡な現象となる。横断方向流砂量分布を求めるための砂粒の運動方程式にもとづいた解析は，すでに平野¹⁾，長谷川²⁾らによって行なわれており，流砂の連続式と組み合わせることにより，横断面の変形過程の追跡が可能なることを示しているが，本研究では，平坦河床で，非平衡流砂現象に対して適用，実績の蓄積されてきた pick-up rate と step length より構成される stochastic model を用いた，より合理的な横断方向流砂量分布予測を目的としている。すなわち，初期移動および流送過程の代表特性量である pick-up rate, step length をそれぞれの力学的機構にもとづいて合理的に評価する。次に両者を組み合わせて流下・横断方向の非平衡流砂過程の記述方法を明らかにし，実験室規模の側岸流砂現象に適用するとともに，これらについて，実験的検証を行った。

2. 側岸土砂の流送過程の基本モデル

図-1 のように流下方向に x 軸，潤辺に沿った方向に p 軸をとり，いま (x_0, p_0) を出発した粒子の軌跡 T_2 ， (x_A, p_A) を通る粒子の出発点を連ねた曲線 T_1 (図-1 参照) を考えるとそれらはそれぞれ次のように書ける。

$$T_2 : x - x_0 = \psi_0 (p - p_0) \quad \dots\dots\dots (1)$$
$$T_1 : x_0 = x_A - \hat{\psi}_A (p_A - p_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-1 定義図

ψ_0 は p_0 によって， $\hat{\psi}_A$ は p_A によって決まる関数である。非定常性 (粒子が平衡速度に達する迄の時間) が無視でき， x 方向の場の一様性が仮定されると ψ_0 と $\hat{\psi}_A$ は同じ関数となる。また， (x_0, p_0) を出発し (x_A, p_A) に達する迄の粒子の運動距離 s は，

$$s(p_A, p_0) = \int_{p_0}^{p_A} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dp}\right)^2} dp \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられるから，点 (x_0, p_0) における pick-up rate を $p_s(x_0, p_0)$ とすると， (x_A, p_A) 点での deposit rate は次式で与えられる。

$$p_d(x_A, p_A) = \int_{p_{in}}^{p_A} p_s(x_0, p_0) f_S(s(p_0, p_A)) dp_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $f_S(s)$ は砂粒子の step length の確率密度関数である。すなわち，step length を運動軌跡に沿って定義できると考えている。流砂の連続式よりこの点で河床高 ζ (図-1 参照) の時間的変化は，

$$\partial \zeta(x_A, p_A) / \partial t = A_1 d [p_d(x_A, p_A) - p_s(x_A, p_A)] \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。さらに点 (x_0, p_0) を出発した砂が点 (x_A, p_A) を通過する確率は， $F_S(s(p_0, p_A)) \equiv \int_s^\infty f_S(\xi) d\xi$ であり，その砂のその点での運動方向角 $r_A(p_A, p_0)$ は，

$$r_A(p_0, p_A) = \arctan [1 / (d\psi_0/dp)_{p=p_A}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。したがって (x_A, p_A) での x 方向及び p 方向の流砂量は，

$$q_{Bx}(x_A, p_A) = \frac{A_3}{A_2} d \int_{p_{\min}}^{p_A} p_s(x_0, p_0) F_S(s(p_A, p_0)) \cos \{r_A(p_A, p_0)\} dp_0 \quad (7)$$

$$q_{Bp}(x_A, p_A) = \frac{A_3}{A_2} d \int_{p_{\min}}^{p_A} p_s(x_0, p_0) F_S(s(p_A, p_0)) \sin \{r_A(p_A, p_0)\} dp_0 \quad (8)$$

で与えられる。ここに、 A_1, A_2, A_3 は砂の形状係数、 d は砂の粒径であり、 $p_{\min}$ は軌跡 T_1 上で $x_0 = 0$ (x 軸の原点は移動床の始点) となる p の値、または $p = 0$ (水際) である。 $p_s(x_0, p_0)$ の x_0 は (x_A, p_A) がわかっていると p_0 と結びつけることができる。一方、 ρ_0 を空隙率とすると、流砂の連続式は、

$$\partial \zeta / \partial t = - \{ 1 / (1 - \rho_0) \} \{ (\partial q_{Bx} / \partial x) + (\partial q_{Bp} / \partial p) \} \quad (9)$$

と書け、これに式(7)、(8)を代入することは式(5)と原理的に同値である。

平均 step length が pick-up rate などと比べると掃流力に対する変化が鈍いということから、step length は掃流力よりもむしろ砂面との接触 (巨視的な表現をすると摩擦過程) に依っているであろうと推定され、よって運動軌跡に沿って step length を考えると、平坦河床の場合とその性質はほとんど変わらないと期待できるだろう。すなわち、

$$f_S(\xi) = (1/A) \exp(-\xi/A) \quad (10)$$

で、平均 step length A は粒径 d の 80~250 倍程度と考えて良い。

スケールの大きな流路の側岸の中央部で、しかも流下方向に一樣な場を考えると、 $p_s(x, p) = \text{const.}$, $\theta(x, p) = \text{const.}$, $\tau(x, p) = \text{const.}$ とおいて第一近似を得ることができる。このとき、砂粒運動の非定常性を無視すると、 $\psi_0, \hat{\psi}_A$ に相当するものとして、

$$x - x_0 = (u_{gx} / v_p) (p - p_0) \quad (11)$$

が書ける。 u_{gx}, v_p は砂粒運動速度の x, p 方向成分である。 $p = p_0$ から出発、 $p = p_A$ に落ち着いた砂の step length $s(p_A, p_0)$ は

$$s(p_A, p_0) = \int_{p_0}^{p_A} \sqrt{1 + \left(\frac{u_{gx}}{v_p}\right)^2} dp = \sqrt{1 + \cot^2 \varphi} (p_A - p_0) \quad (12)$$

となり、 φ は砂の運動方向の x 軸となす角で $\tan \varphi = v_p / u_{gx}$ である。式(12)を式(4)に代入、式(10)を用いると、deposit rate は次式で与えられる。

$$p_d(x_A, p_A) = \int_0^{p_A} p_s \cdot \frac{1}{A} \cdot \exp \{ -\sqrt{1 + \cot^2 \varphi} (p_A - p_0) / A \} dp_0$$

$x \rightarrow -\infty$ の場合、 $p_{\min} = 0$ であり、結局、

$$p_d(p_A) = \{ p_s / \sqrt{1 + \cot^2 \varphi} \} \{ 1 - \exp [-\sqrt{1 + \cot^2 \varphi} p_A / A] \} \quad (13)$$

で表わされ、 ζ 方向の侵食速度は、

$$\frac{d\zeta}{dt} = -A_1 d p_s \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2 \varphi}} [1 - \exp \{ -\frac{\sqrt{1 + \cot^2 \varphi}}{A} p \}] \right) \quad (14)$$

となる。すなわち、 $p \rightarrow \infty$ での Δt 時間内の侵食量 $\Delta y (= \Delta \zeta \cdot \sin \theta)$ は次のようになる。

$$\Delta y = p_s A_1 d [1 - 1 / \sqrt{1 + \cot^2 \varphi}] \sin \theta \cdot \Delta t \quad (14')$$

なお、非定常性を無視したときの粒子速度 u_{gx}, v_p は次のような側岸における粒子運動を支配する方程式より求められる。

$$\frac{1}{2} C_D \rho (u_d - u_{gx}) \sqrt{(u_d - u_{gx})^2 + v_p^2} A_2 d^2 - \rho (\sigma / \rho - 1) g A_3 d^3 \mu_{fd} \frac{u_{gx}}{\sqrt{u_{gx}^2 + v_p^2}} = 0 \quad (15)$$

$$\rho (\sigma / \rho - 1) g A_3 d^3 (\sin \theta - \mu_{fd} \cos \theta \frac{v_p}{\sqrt{v_{gx}^2 + v_p^2}}) - \frac{1}{2} C_D \rho v_p \sqrt{(u_d - u_{gx})^2 + v_p^2} A_2 d^2 = 0 \quad (16)$$

$u_{gx} = u_g \cos \varphi$, $v_p = u_g \sin \varphi$ とおくと、 φ は前述の砂の運動方向の x 軸となす角で、 $\tan \varphi$ は次の方程式の解として得られる。

$$\tan \varphi \sqrt{\tan^2 \theta + \mu_{FD}^2 - 2\mu_{FD} \tan \theta \cdot \tan \varphi \cdot \cos \varphi} = (2A_3/A_2 C_D) (\tan \theta / A_*^2 \tau_*) \quad (17)$$

ただし、 ρ ：水の密度、 σ ：砂の密度、 μ_{FD} ：砂の動摩擦係数、 τ_* ：無次元掃流力、 $A_* \equiv u_d/u_*$ ； u_d ：掃流粒子近傍の流速、 u_* ：摩擦速度、 C_D ：抗力係数である。上式より求められた φ を用いて、 u_g （合速度）が次のように求められる。

$$u_g / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd} = A_* \sqrt{\tau_*} \cdot (\sin \theta - \mu_{FD} \cos \theta \cdot \sin \varphi) / (\sin \theta \cdot \cos \varphi) \quad (18)$$

3. 側岸土砂のpick-up rateの推定

図-2に示すように、横断方向に θ だけ傾いた側岸での非粘着性粒子に作用する力を考える。流下方向に x 軸をとり、流れの方向の x 軸からの偏りを r とする。作用力の合力方向をI-I'軸とすると、それに直交する力の釣り合い式よりI-I'軸と p 軸のなす角 β が次式のように決定される。

$$\tan \beta = \Xi_0 \cdot \cos r \cdot \tau_* / \{ \sin \theta + \Xi_0 \sin r \cdot \tau_* \} \quad (19)$$

$$\Xi_0 \equiv \epsilon_0 (C_D A_2 / 2 A_3) A_*^2 \sigma \quad (20)$$

ただし、 $A_{*0} \equiv u_b/u_*$ 、 u_b ：河床粒子近傍流速、 ϵ_0 ：いわゆる遮蔽係数である。上式により $\beta \sim \tau_*$ 関係が計算され、その結果は図-3に示される。

I-I'軸方向の力、すなわち合力 F の大きさを求め、砂粒の水中重量 W で無次元化すると、

$$F/W = \Xi_0 (\sin \beta' \cos r + \sin r \cos \beta + k_L \mu_f) (\tau_* - \psi/\Xi_0) \quad (21)$$

$$\psi \equiv (\mu_f \cos \theta - \sin \theta \cos \beta) / \{ k_L \mu_f + \sin(\beta + r) \} \quad (22)$$

となる。ここに μ_f ：砂の静止摩擦係数、 k_L ：揚力と抗力の比である。 $F=0$ はいわゆる移動限界に対応し、これより横断勾配が θ である側岸の砂粒の無次元限界掃流力 $\tau_{*c\theta}$ が次のように求められる。

$$\tau_{*c\theta} \equiv \frac{\mu_f \cos \theta - \sin \theta \cos \beta_{c\theta}}{\Xi_0 \{ k_L \mu_f + \sin(\beta_{c\theta} + r) \}} \equiv K(\theta) \cdot \tau_{*c\theta} \quad (23)$$

$$\beta_{c\theta} = \arcsin \left[- \frac{\cos r \sin \theta}{\sqrt{(k_L \sin \theta + \sin r \cos \theta)^2 + (\cos r \cos \theta)^2}} \right] \quad (24)$$

ここに $\tau_{*c\theta} (\equiv \mu_f / \{ \Xi_0 (k_L + 1) \})$ は平坦河床の砂の無次元限界掃流力で、 $K(\theta)$ はslope factorと呼ばれる。上式の計算結果が図-4に示される。

さて、 $F > 0$ のとき、河床や側岸にある砂粒子は加速されて離脱する。この時の粒子の得る加速度 $\dot{v}_s$ は次のように求められる。

$$\dot{v}_s / g = \Xi_0 \{ (\sigma/\rho - 1) / (\sigma/\rho + C_M) \} \cdot \{ \sin(\beta + r) + k_L \mu_f \} \cdot f(\tau_* | \theta) \quad (25)$$

$$f(\tau_* | \theta) \equiv \tau_* - \psi / \Xi_0 \quad (26)$$

粒子が沈降速度で粒径分の距離だけ運動する時間に比例する代表時間内の粒子の平均離脱速度を求め、これによって粒径分だけ移動する時間を1個の粒子が河床から離脱するのに要する平均時間と考える。いわゆるpick-up rateをその逆数として定義できると考えれば、結局次式を得る。

$$p_{s*} \equiv p_s / \sqrt{d/(\sigma/\rho - 1)g} = \{ k_1 \Xi_0 / (\sigma/\rho + C_M) \} \{ \sin(\beta + r) + k_L \mu_f \} \cdot f(\tau_* | \theta) \quad (27)$$

ただし、 C_M ：付加質量係数である。平坦河床であれば、

$$p_{s*0} = \{ k_1 \Xi_0 / (\sigma/\rho + C_M) \} \cdot (k_L \mu_f + 1) \cdot f(\tau_* | 0) \quad (28)$$

であり、 $f(\tau_* | 0) = \tau_* - \tau_{*c0}$ となることから、

$$p_{s*0} = B_1 (\tau_* - \tau_{*c0}) ; \quad B_1 \equiv k_1 \Xi_0 / (\sigma/\rho + C_M) \quad (29)$$

と書ける。ところで一般に流体力は変動するため、 $\tau < \tau_c$ 以下でも砂が動かし、 $\tau \approx \tau_c$ では上式で予想され

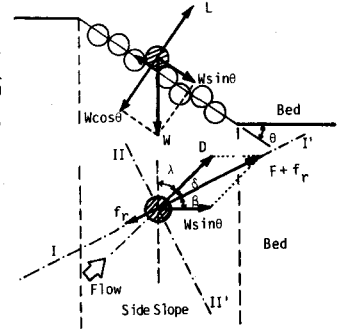


図-2 定義図

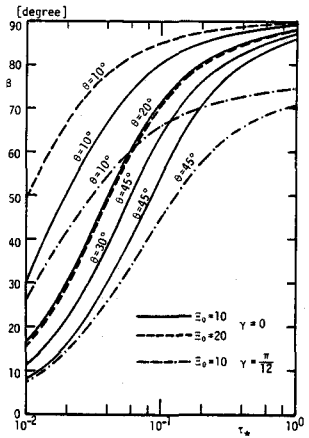


図-3 $\beta \sim \tau_*$ 関係（理論）

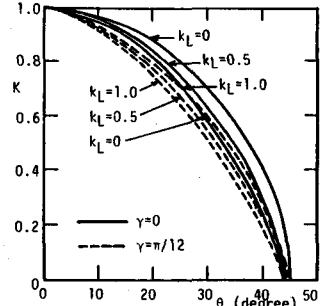


図-4 側岸土砂の限界掃流力

る p_s より大きい p_g が具現する。 $\tau \gg \tau_c$ では上式の予想はほぼ成立しよう。このような流体力変動の効果を取り入れると、

$$p_{s*}(\tau_*) = B_1 \tau_* \{ 1 - (k_3 \tau_{*c} / \tau_*) \}^m \tag{30}$$

といった表現が有用である。中川ら³⁾の平坦河床での理論及び実験によると、 $B_1 = 0.03$ 、 $k_3 = 0.7$ 、 $m = 3$ とすると上式の適用性は良好である。側岸土砂に対しても同様の形でこのような流体力変動の効果を加味できるとすると、

$$p_{s*\theta}(\tau_*) = B_1 \cdot G_*(\tau_*) \cdot \tilde{f}(\tau_* | \theta) \tag{31}$$

$$G_*(\tau_*) \equiv [\sin \{ \beta(\tau_*) + \gamma \} + k_L \mu_f] / (1 + k_L \mu_f) \tag{32}$$

$$\tilde{f}(\tau_* | \theta) \equiv \tau_* [1 - k_3 \varrho(\tau_*) \tau_{*c0} / \tau_*]^m \tag{33}$$

$$\varrho(\tau_*) \equiv \Psi(\tau_*) / [\Xi_0 \tau_{*c0}] = [\mu_f \cos \theta - \sin \theta \cos \beta(\tau_*)] / [\mu_f G_*(\tau_*)] \tag{34}$$

となる。 $\varrho(\tau_{*c\theta}) = K(\theta)$ である。側岸土砂の流送においては平坦河床の場合の τ_{*c0} を単に $\tau_{*c\theta}$ に置き換えるだけではすまないことに注意すべきである。すなわちみかけ上 $\{ \varrho(\tau_*) / K(\theta) \}$ の率で、 τ_* により変化する。上式によって計算された $p_{s*} \sim \tau_*$ 関係を図-5に示した。計算では $\mu_f = 1.0$ 、 $\gamma = 0$ とし、 k_L と ε_0 を $\tau_{*c0} = 0.05$ (粗砂に対する値) となる組み合わせにおいていくつか変化した。

4. 側岸砂粒の離脱過程に関する実験

図-6に示すように、実験水路(長さ9m、幅33cm)の片側のみ側岸を作って実験を行った。装置の一部を移動床とし(他の部分は同一粗度の固定床粗面仕上げ)、この領域からの砂粒の離脱過程を上方からビデオ撮影し、画像解析システムにより特性量の計測を行った。一方、径3mmの小型プロペラ流速計を用いて断面内流速分布を詳細に測定、最終的には壁面の法線に沿う流速プロファイルに粗面対数則を適用して側岸、床面に沿う掃流力分布を求めた。図-7には得られた流路断面内等流速線とともに側岸に沿った掃流力分布の例を示した。図には

$$\tau_0 = \rho g R (h/h_0) I \cos \theta \tag{35}$$

で与えられる簡便式による推定値も併示した。ここに、 R は次のように決めた河床掃流力にかかわる平均的な径深である。 $R = A/P$:、 A : 流水断面積、 P : 潤辺である。実測速度プロファイルからの推定値と上記の簡便法による推定値の対応はおおむね良好である。

pick-up rateはビデオフィルム

よりある時間内のある領域からの離脱個数を数えることにより求め、 p_{s*} と無次元化、先に実測された τ_* との関係性を調べた。これが図-8に示され、式(31)で計算される理論曲線と比較してある。実験資料と理論曲線の間にはほぼ満足すべき合致が見られる。

さらに離脱時の砂の運動方向についてもビデオポジションアナライザーを用いて調べ、前章の初期移動モデルの検証に供した。図-9に示すように離脱後最初の位置への変位 (dx 、 dp) を計測すると、これはほぼ

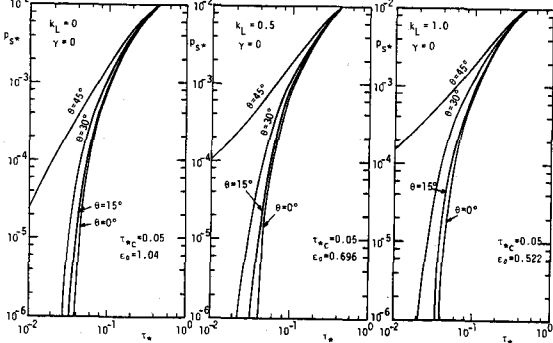


図-5 側岸土砂の pick-up rate

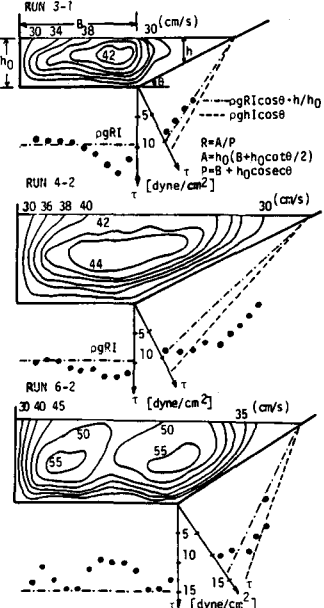


図-7 側岸に沿う掃流力分布

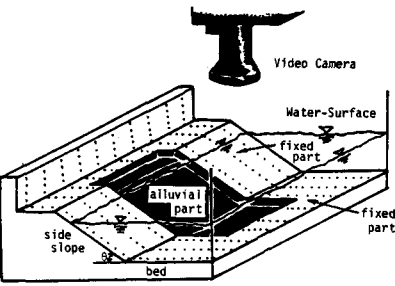


図-6 実験装置略図

ビデオの1コマの間の時間（初期移動はこの1コマの間の時間で生じており必ずしも正確にとらえられず Δt は1コマの時間間隔を最大値とするあいまいな量である）の変位である。 x, p 方向の運動方程式は次式で与えられる。

$$M \cdot [2 \Delta x / (\Delta t)^2] = D - f_r \sin \beta$$

$$M \cdot [2 \Delta p / (\Delta t)^2] = -f_r \cos \beta + W \sin \theta$$

(36)

これらより Δt を消去して次式より離脱角を求めることができる。

$$\beta = \tilde{\beta} + \arcsin \left\{ \frac{D \cot \tilde{\beta} - W \sin \theta}{f_r \sqrt{\cot^2 \tilde{\beta} + 1}} \right\}$$

(37)

ただし、 $\tan \tilde{\beta} \equiv \Delta x / \Delta p$ であり、また抗力 D 、摩擦係数 f_r は次式で与える。

$$D = (1/2) C_D \rho \{ (u_d - \Delta x / \Delta t)^2 + (\Delta p / \Delta t)^2 \} A_2 d^2$$

(38)

$$f_r = \mu_{fd} (\sigma / \rho - 1) \rho g A_3 d^3 \cos \theta$$

(39)

このようにして得られた $\beta \sim \tau_*$ の関係を図-10 に示し、式(19)で与えられる理論曲線と比較した。これも良好な合致を呈している。

5. 側岸での横断方向流砂分布の算定とその実験的検証

図-11 に示すように離脱過程の実験に用いた装置の中央部1mを移動床とし、河床から2cmの所に長さ4cm幅3cmの独立した横断方向流砂量採取箱を流下方向にならべ、横断方向流砂量の流下方向変化を測定した。斜面傾斜角 θ は、

26.57度であり、使用砂は平均粒径 $d = 0.16 \text{ cm}$ のほぼ一様砂である。移動床部

においてはほぼ等流とみなせるよう調整し、底面せん断応力は離脱過程の実験と同様の方法で求め、水深を変化させることで、採取箱上端の底面せん断応力を変化させた。図-12 は、流下方向 x と横断方向流砂量 q_{B^*p} の実測値と stochastic model

を用いて計算された理論曲線とを描いたものであり、量的な評価は必ずしも充分とは言えなく、今後、測定方法を改良して実測データをより多く収集するとともに、モデルについての再検討も行って誤差を解消してゆきたい。図-13 は、横断方向流砂量の潤辺方向分布の流下方向に平衡に至る変化過程を示したものであり、藤田⁴⁾

が実験的に得た横断流砂量分布式より計算された曲線も併示してある。以下に、計算方法について概説する。砂粒の運動方程式は次式で表わされる。

$$M \cdot d v_x / dt = D \cos \psi - \mu_{fd} W \cos \theta \cdot \cos \varphi$$

(40)

$$M \cdot d v_p / dt = D \sin \psi + W (\sin \theta - \mu_{fd} \cos \theta \cdot \sin \varphi)$$

(41)

$$D = (1/2) C_D \rho \{ (u_d - v_x)^2 + v_p^2 \} A_2 d^2$$

(42)

ψ, φ はそれぞれ抗力の作用方向、砂粒の運動方向を示し、

$$\tan \psi = -v_p / (u_d - v_x); \quad \tan \varphi = v_p / v_x$$

(43)

で与えられる。砂粒の運動方程式が非線型であるため、図-1の (x_A, p_A) 点に対し、そこに入ってくる砂粒

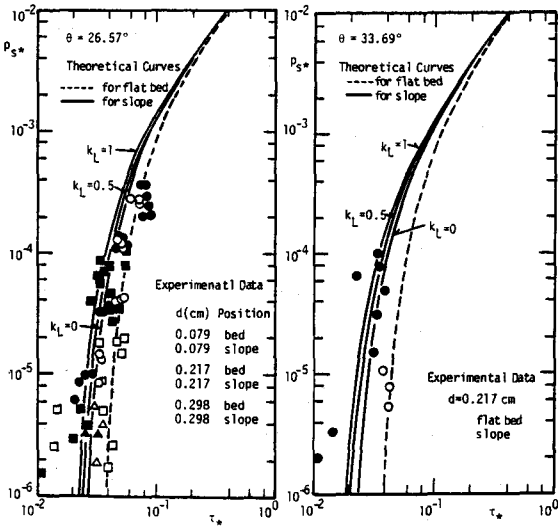


図-8 $p_{s^*} \sim \tau_*$ (実験データ)

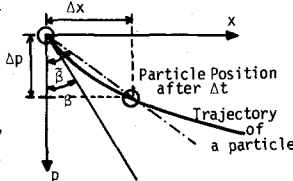


図-9 記号図

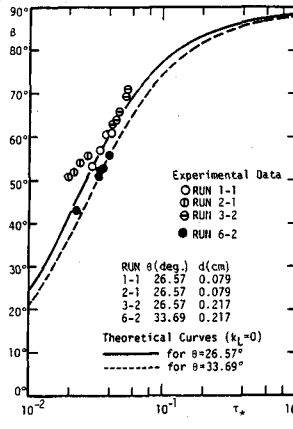


図-10 $\beta \sim \tau_*$ 関係 (実験値)

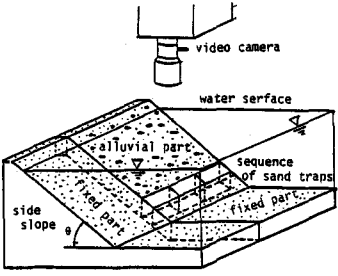


図-11 実験装置略図

の出発点 (x_0, p_0) 、運動軌跡長及び運動方向角を求めることは相当に困難であるが、その非定常項が砂粒運動の本質からみて重要な項であるから、ここでは、離脱位置 (x_0, p_0) から計算を進める。すなわちある点 (x_A, p_A) における流砂量は離脱位置ごとの通過量の寄与分の総和で与えられると解釈し、非線型項を無視することなく数値シミュレーションによって流砂量分布を求めた。ここで流れは定常等流とみなす。まず図-14のように x, p 軸方向をそれぞれ $\Delta x, \Delta p$ のメッシュに分割する。運動方程式は $\Delta x, \Delta p$ を平衡砂粒速度で移動する時間よりも小さい Δt で数値計算で解き、各メッシュの代表点 (x_i, p_j) より出発した砂粒の軌跡を求める。 (x_i, p_j) の掃流力 $(\rho g h l \cos \theta)$ で評価、 h は $p=p_j$ の水深)

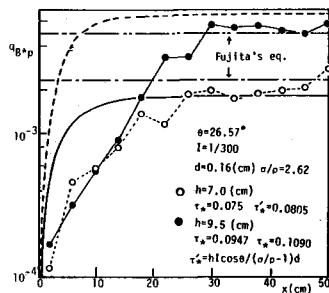


図-12 $q_{B*} \sim x$ 関係 (実験値)

に対する pick-up rate は先述のように算定できるので、軌跡に沿って step length を定義し、その分布関数を決めると $x > x_i, p > p_j$ なるメッシュ要素での離脱点の条件付の deposit rate が計算できる。また、メッシュを形成する各格子線で、出発点の条件付の流砂量成分が定義される。これらについて、離脱点に関する条件を開放することで、縦横断流砂量分布、deposit rate の場所的分布を知ることができる。また、さらに、砂面変形量、すなわち側岸侵食量も評価される。なお、砂粒運動軌跡の離散化の都合で格子点を交差する場合などは、deposit rate、流砂量の両隣り成分への配分を考慮した。

図-15は、運動方程式による軌跡の計算と、先述の実験水路でビデオ解析によって計測された砂の運動軌跡との比較で、方程式中の定数を適切に選ぶことで、充分に現象記述が可能と判断される。step length の分布を粒径の100倍とする指数分布として計算を実行した。

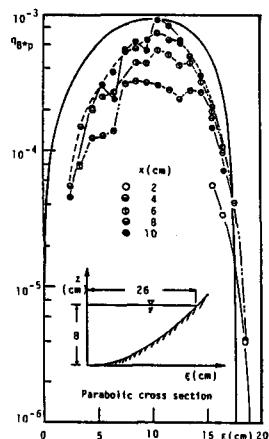


図-13 $q_{B*} \sim p \sim x$ 関係

6. あとがき

以上の様に、側岸上の非平衡流砂過程を記述するために、pick-up rate と step length より構成される stochastic model の適用を推奨し、各々の構成要素を力学的機構にもとづいて評価した。これらの有意性及び妥当性については基礎的な実験を行って検証に努めた。側岸侵食現象を解明するためには、掃流力の横断方向分布の正確な評価及び斜面の崩落機構を明らかにしておくことが必要で、今後の研究課題としたい。

本研究は一部昭和59年度文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)「洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究」(代表: 村本嘉雄京都大学防災研究所教授)の補助を受けた。また、実験の遂行に当っては、京都大学大学院生村山一啓君の協力を得た。

参考文献

- 1) 平野宗夫: 土木学会論文報告集, 第210号, 1973, pp. 13~20
- 2) 長谷川和義: 土木学会論文報告集, 第316号, 1981, pp. 37~38
- 3) 中川博次・辻本哲郎: 土木学会論文報告集, 第244号, 1975, pp. 71~80
- 4) 村本嘉雄・藤田裕一郎: 土木学会第30回年次講演会概要集, 1974

図-14 記号図

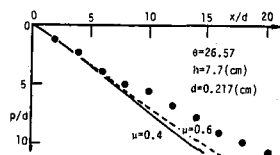


図-15 砂粒運動軌跡図