

# 67 降雨による斜面からの土砂流出

国立環境研究所 ○村上正吾  
 金沢大学工学部 辻本哲郎  
 建設省 奥田晃久

## 1. はじめに

近年のリモートセンシング技術と地理情報システムの発展による流域内の土砂輸送に関わる外力の空間的・時間的な変化の評価の精度の向上は、必然的に流域内の土砂動態の予測・管理の精度の向上に結びつく。この時、これに対応する形で土砂輸送に関わるサブシステムの精度を上げる必要がある。本報では、幾つかのサブシステムの内、土砂生産の素過程の一つである降雨による裸地斜面上の土砂輸送機構についての検討を進める。土砂輸送モデルの展開に当たっては流域内で一貫していることが望ましいとの観点から、河川流砂におけるモデルの便宜的な援用でなく、枠組みを同一とするモデルで記述することを試みる。

## 2. 土砂輸送モデルの概要<sup>1)</sup>

降雨による斜面上の土砂輸送のモデルの展開としては、降雨衝撃に注目した方法と表面流に着目したものとがあり、両者を同時に考慮したモデルは数少ない。ここでは、降雨衝撃と表面流による離脱現象をpick-up rateで表現し、輸送過程はstep lengthの確率特性で表現することにする。降雨衝撃によるpick-up rate  $p_{sr}$  と表面流によるpick-up rate  $p_{sf}$  とは互いに独立と仮定し、輸送過程は流れによるものが卓越すると、局所流砂量分布は次式で表される。

$$q_B(x) = (A_3 d / A_2) \int_0^x \{p_{sr}(x') + p_{sf}(x')\} \int_{x-x'}^{\infty} f_x(\xi) d\xi dx' \quad \dots (1)$$

ここで、 $A_2$ 、 $A_3$ ：砂粒の2、3次元の形状係数、 $f_x(\xi)$ ：step length ( $\xi$ ) の確率密度関数である。このモデルの枠組みでは、pick-up rateとstep lengthが降雨強度、斜面の傾斜角、砂粒径に対して定式化されることが必要であるが、これらの特性は緩勾配移動床流れにおける特性とは異なることが予想され、急勾配流れの特徴を取り込んだモデル化が必要となる。

## 3. 雨滴衝撃によるpick-up rate推定式

深田ら<sup>2)</sup> が展開した一個の水滴と湛水面との衝突による砂粒の離脱量に関する力学モデルに雨滴径分布を考慮すると、雨滴衝撃によるpick-up rate推定式は次のように書ける<sup>1)</sup>。

$$p_{sr} = p_{sr} \sqrt{d(\sigma/\rho - 1)g} = 1/7200 \cdot r / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd} \cdot \{1 - (h_*/3h_{*c})\}^4 \quad \dots (2)$$

ここで  $r$ ：降雨強度、 $\sigma/\rho$ ：砂の比重、 $d$ ：砂粒径、 $h_* = h/H_{max}$ 、 $h$ ：表面流水深、 $H_{max}$ ：水滴と水面の衝突時に形成される空気方の直径、 $E_0$ ：水滴の落下運動エネルギーである。図-1に計算例を示す。図より、 $h_* \rightarrow 3$ で衝撃の効果が急激に失われることがわかる。式の妥当性は模擬降雨装置による実験で検証されている<sup>1)</sup>。

## 4. 急勾配流れによるpick-up rate推定式

急勾配流れは相対水深  $h/d$  が小さいことで特徴付けられ、 $h/d$  の大きい流れの平均流速分布から変化、即ち対数則型流速分布における積分定数の減少する。この時、砂粒に作用する流体力も変化し、pick-up rateも変化することになる。この積分定数  $Br$  の変化を辻本・細川<sup>3)</sup> は式(3)のように表している。この点を考慮して緩勾配におけるpick-up rate推定式の修正を行った結果を式(4)、(5)および図-2に示す。

$$B_r = 3 + 5.5 \{1 - \exp(-1/4.34 \cdot h/d)\} \quad \dots (3)$$

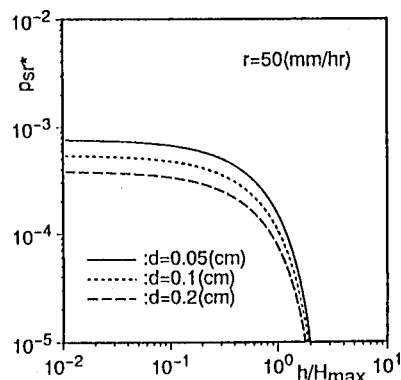


図-1 雨滴衝撃によるpick-up rate

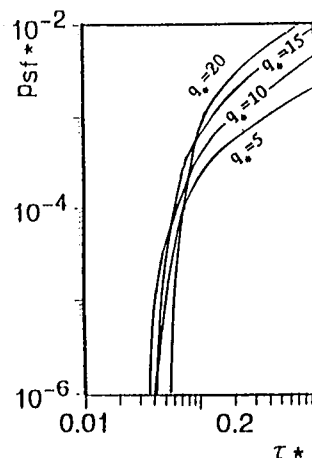


図-2 薄層流場におけるpick-up rate

$$p_{sf} = F_0 / \Psi(\theta) \cdot \tau_c \cdot \{1 - k_2 \Psi(\theta) \tau_{c0} / \tau_c\}^3 \dots (4); \quad \Psi(\theta) = 10^{1.72 \tan \theta} \dots (5)$$

表面流の抵抗則が $h/d$ の関数となるため、単位幅流量 $q$ の無次元量 $q^* (= q / \sqrt{gd^3})$ が $p_{sf}$ のパラメーターとなるのが、急勾配流れでの $p_{sf}$ の特徴である。

### 5. 急勾配流れ場の平均step length

薄層流の場合、移動速度を支配する底面付近の速度が大きく変わるが、床面の凹凸の確率特性が変化しないと考えると差し支えないので、その分布は緩勾配流れと同様指数分布に従うと考えられ、その平均値が特に影響を受けるものと推測される。運動している砂粒の停止に強く関わる平均床面高さより突出した砂粒の配置が一定間隔と見なすと平均step lengthは式 $\Lambda = L_0 / \{(1 - p_{suc}) \cdot p_0^n\} \dots (6)$ で評価できる<sup>4)</sup>。ここで、 $L_0$ : micro step長の平均値、 $p_{suc}$ : 運動継続確率、 $p_0^n$ : 静止砂粒が $n$ 個ズレ動く確率である。図-3がその結果で緩勾配のstep lengthよりも急勾配のそれが短いことが力学的には確認される。

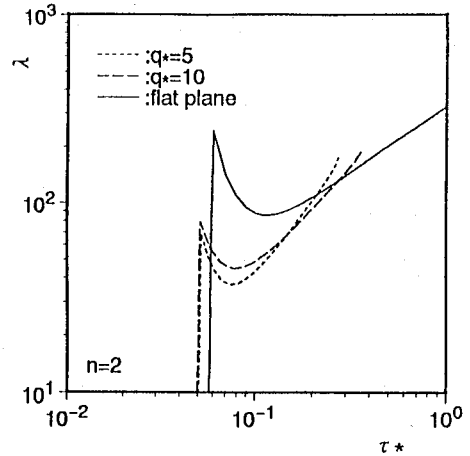


図-3 薄層流場における平均step length

### 6. 土砂輸送モデルの適用

降雨実験装置の下に、表面流のみの通水も可能な上流側に貯水タンクを取り付けた長さ1.8(m)、幅0.3(m)の木製の可変勾配水路を設置して、模擬降雨を発生させて下流端で流砂量を計測する降雨流実験と、降雨流での下流端流量( $q_{max}=rL$ )を上流のタンクから通水して、下流端流砂量を測定する等流実験を行った。実験結果は図-4に示すとおりで、掃流力の観点からすると、少なくとも等流実験の流砂量は雨滴を伴わずに流量の空間変化率が同一の流れにおける流砂量より大きいはずにも関わらず、結果は図に示すとおり、降雨流実験における流砂量の方が大きい値を示し、雨滴衝撃の効果は顕著であることを示している。図中の実線は本報で提案した土砂輸送モデルと降雨衝撃と流れによるpick-up rate推定式を用いて計算された結果で、図-5は降雨流による土砂流出量の計算値と実験値との比較で、これらよりモデルの妥当性が認められる。平均step lengthとしては、通常値(100d程度)より小さくなると推測されることから、50dとし指数分布に従うとした。

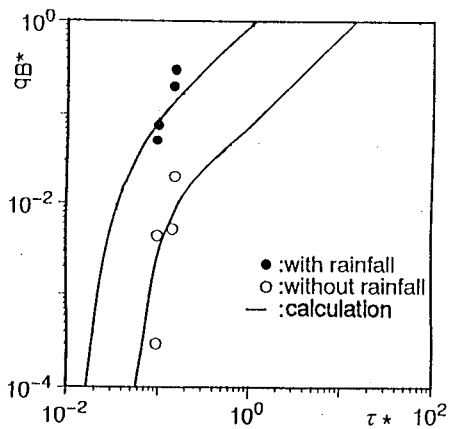


図-4 降雨流れと等流における流砂量

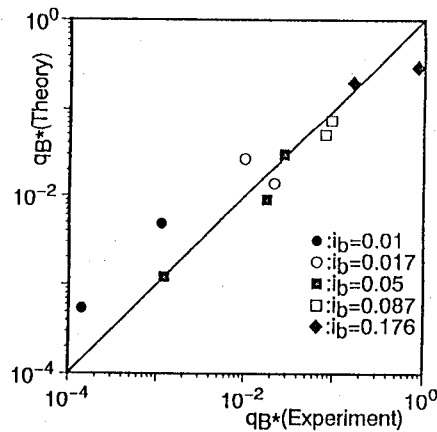


図-5 モデルの適用結果

#### 参考文献:

- 1) 村上・辻本・中川・Makhanu: 第40回水工学論文集, 1996. , 2) 深田・藤原・日下: 農業土木学会論文集, 第165号, 1993. , 3) 辻本・細川: 土木学会論文集 第411号/II-12, 1989. , 4) 中川・辻本: 移動床流れの水利, 技報堂出版, 1986.