

降雨による裸地斜面の土壌侵食に関する基礎的研究

Fundamental Study on Soil Erosion along Bare Slope
by Rainfall Impact and Overland Flow

村上正吾*・辻本哲郎**・中川博次***・S. Makhanu****

By Shogo MURAKAMI, Tetsuro TSUJIMOTO

Hiroji NAKAGAWA and Sibilike MAKHANU

The sediment transport process on the steep slope caused by rainfall and its runoff process can be divided into two: I. process caused by rainfall impact and II. process by overland flow. However, it was very rare to deal with two processes simultaneously, and some equilibrium sediment discharge equations were proposed by emphasizing either of two processes. In this study, we have proposed a unified model which includes the effects of rainfall impact and overland flow, and examined the validity of the model by the experiment. Especially, we clarified the contribution of the rainfall impact to the non-equilibrium process of sediment transport.

Keywords: slope erosion by rainfall, rainfall impact, overland flow
pick-up rate, step length

1. はじめに

わが国では、その地質条件、急峻な地形条件、台風、梅雨と言った気候条件による降水量の多さのため、山地自然斜面の崩壊、侵食現象が活発で、種々の土砂災害の問題が出現する。また、農学の分野では傾斜地に多く作られる農地において、降雨による土壌侵食流亡による農地の肥沃性の低下、排水路堆積に伴う農地災害を引き起こす事例が数多く見られる。従って、その機構と防止法の研究の歴史は古いものの、土砂の流失問題の出現の形は多岐に亘り、しかも各々の現象が多様な要因から成り立つため、素事象としては同じでありながらも、統一的に論じることが難しい。それ故、工学、農学の分野でのアプローチはやや異なるようである。しかしながら、近年は、流域内の治水・利水に加えて流域の水環境全体の積極的な整備が指向されており、流域内の様々なスケールの土壌流出問題を個々のスケールと形態に応じて処理するのでは、水域としての一体性に齟齬が生じる場合があるものと思われ、共通の枠組みと各々のモデルの精度が一致するといっ

* 正会員 工博 京都大学助手 大学院環境地球工学専攻
(〒606-01 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科
(〒720 金沢市小立野2-40-20)

*** 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部環境システム工学科
(〒525 滋賀県草津市野路町1916)

**** 学生員 工修 京都大学大学院環境地球工学専攻博士課程

た意味での水系一貫した土砂輸送モデルの確立が望まれる。降雨による斜面土壌侵食の問題は1930年代の水文学の創始と共に始まり、Hortonは自らの降雨流出モデルと組み合わせて土壌流出量の算定を試みた¹⁾。わが国における土砂移動の力学的機構に基づくモデルの展開は、岩垣・土屋²⁾によって始められ、降雨衝撃が掃流力と掃流砂量との関係に影響を及ぼすことを実験的に示した。その後の研究は、雨滴衝撃の効果を無視し、土砂の連続式に含まれる離脱率（剥離率、pick-up rate, detachment rate）と堆積率（deposit rate）を、その力学機構に基づいて精度良く記述しようとの方向にあったように思われる（澤井³⁾、金屋⁴⁾）。深田・藤原・日下⁵⁻¹⁰⁾は雨滴衝撃による砂粒の剥離量の力学モデルを提案し、それに基づく流砂量公式を提案している。

本研究は、pick-up rateとstep lengthを構成要素とする土砂の確率モデルを適用することで、山地、農地斜面からの土砂移動と河川におけるそれとを同一の枠組みで記述しようとするものである。

2. 土砂移動モデルの枠組み

降雨による急斜面からの土砂生産機構は大きく分けて以下の2つの機構より構成される。I. 雨滴の衝撃による剥離作用、II. 表面流による剥離及び流送作用である。Iでは雨滴の降下運動エネルギーが表面水をフィルターとしてどの程度砂面に伝達されるか、IIでは表面流の摩擦抵抗特性と的確な流砂モデルの選択が問題となる。

本研究では、降雨衝撃に伴う土砂の離脱・剥離量をpick-up rate p_u として考慮し、表面流によるpick-up rate p_s とは独立と仮定、両者の和が全離脱量 $p_s (=p_u + p_s)$ に等しいとみなす。一方、一旦離脱した砂粒は離脱型式に関わらず、表面流によって輸送されるものとする。ところで、降雨による斜面上の流砂現象は、表面流の発生位置から斜面方向に発達する流れによって規定されるため、流砂量がゼロとなる位置が存在し、必然的に非平衡な流砂過程になる。こうした場への適用が合理的と考えられる中川・辻本¹¹⁾の非平衡掃流砂モデルを適用すると流出土砂量 q_B 、deposit rate p_d 、斜面路床高の時間変化率 $\partial z / \partial t$ は次のように書ける。

$$q_B(x) = \frac{A_3 d}{A_2} \int_0^x \{p_u(x') + p_s(x')\} \int_{x-x'}^{\infty} f_x(\xi) d\xi dx' \quad (1)$$

$$p_d(x) = \int_0^x \{p_u(x') + p_s(x')\} f_x(x-x') dx' \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = A_1 d \{p_d(x) - p_s(x)\} \quad (3)$$

ここで、 A_1 、 A_2 、 A_3 ：砂粒の1、2、3次元の形状係数、 $f_x(\xi)$ ：step length $\{\xi\}$ が従う確率密度関数、 z ：斜面高である。対象斜面が十分長く、斜面下端付近で表面流の水深が充分に厚く、雨滴衝撃の効果が無視できる場合には表面流による効果のみを考えれば充分で、次のような平衡掃流砂量式が成り立つ。

$$q_{Be} = \frac{A_3 d}{A_2} p_s \Lambda \quad (4)$$

ただし、 Λ ：平均step lengthである。なお、これまでのpick-up rateとstep lengthに対する力学的・実験的検討によると、水理条件・流れの構造の変化に対するpick-up rateの応答は鋭敏であるのに対し、床面の凹凸によって規定されるstep lengthの応答は鈍いことが知られており¹¹⁾、本研究では雨滴の衝撃による分も含めpick-up rateの変化についてのみ考えることとする。

3. 雨滴衝撃による砂粒の離脱

3.1 雨滴の運動特性の評価

雨滴衝撃による離脱量を推定する場合、雨滴の運動エネルギーの推定が第1であり、そのためには雨滴径の確率的な特性と落下速度の評価が必要となる。

自然降雨の雨量強度 r (mm/hr)、平均雨滴径 D_m (cm) とその分布の関係については多くの野外観測が行われている。図-1に平均雨滴径についてのObolenskijら¹²⁾、Hudsonら¹³⁾の観測結果と、式(5)で表されるMarshallら¹⁴⁾の式を示す。一方、降雨エネルギーの測定面からWischmeier¹⁵⁾、Hudsonは $r \geq 76 \sim 100$ (mm/hr) で平均雨滴径はほぼ一定で変化しなくなると報告している。図-1より $r \leq 100$ (mm/hr) では式(5)を、それ以上の降雨強度で

は一定値をとると考えると、 r と D_m の関係はほぼ定式化される。

$$D_m = 4/41 \cdot r^{0.21} \quad (5)$$

一方、分布形についてはHorton¹⁶⁾、Lawsら¹⁷⁾、Marshallら¹⁴⁾の野外観測結果に、平均雨滴径 D_m で規格化された雨滴径 η ($= D/D_m$) が従う確率密度関数 $f_{D_m}(\eta)$ として、式(6)で表されるgamma分布を適用すると、自然降雨に対しては形状係数 k が1～4程度のgamma分布で近似され、図-2にその一例を示した。

$$f_{D_m}(\eta) = \frac{k(k\eta)^{k-1}}{\Gamma(k)} \cdot \exp(-k\eta) \quad (6)$$

ここに、 $\Gamma(\cdot)$: gamma関数である。

自然の雨滴は十分高い上空で形成された後、重力により自由落下し、ある一定の速度(終端速度 w_t)に至る。終端速度に関しては、幾つかの経験式が提案されているが、自然降雨に対しては良い近似になり得ても、室内実験での高さの制限を考えると適用は難しく、雨滴の落下運動の力学に立ち戻る必要がある。この運動を規定する運動方程式は次式で与えられる。

$$\rho_a \left(\frac{\rho}{\rho_a} + C_M \right) A_3 D^3 \frac{dw}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_a A_2 D^2 w^2 - \rho_a \left(\frac{\rho}{\rho_a} - 1 \right) g A_3 D^3 \quad (7)$$

ここで、 ρ_a : 空気の密度、 ρ : 水の密度、 C_M : 仮想質量係数、 w : 雨滴の落下速度、 C_D : 抗力係数、 g : 重力加速度である。抗力係数の形を次式で与える。

$$C_D = C_{D\infty} + \frac{24}{Re}; Re = \frac{wD}{\nu_a} \quad (8)$$

ここで、 Re : 雨滴の落下速度に関わる雨滴粒子のReynolds数、 ν_a : 空気の動粘性係数、 $C_{D\infty}$: Reynolds数が十分大きいときの抗力係数である。式(7)を初期条件 $t=0$, $y=0$, $w=0$ の下で解くと、時間 t 、落下距離 y 、落下速度 w について解析解が得られ、例えば、落下距離 y と落下速度 w の関係は次のように書ける。ただし、それぞれ、 $\hat{y} = y/D$, $\hat{w} = w/\sqrt{gD}$, $\hat{t} = t\sqrt{g/D}$ と無次元表示してある。

$$\hat{y} = \frac{\hat{w}}{\sqrt{K}} \ln \left(\frac{\sqrt{K} + b + 2a\hat{w}}{\sqrt{K} + b - 2a\hat{w}} \cdot A_0 \right) - \frac{1}{a} \ln \left[(1 + A_0) \left\{ 1 - \frac{a}{\sqrt{K}} (\hat{w}_f - \hat{w}) \right\} \right] \quad (9)$$

$$K = b^2 + 2a \quad , \quad a = \frac{C_{D\infty} A_2}{2A_3} \cdot \frac{\rho_a}{\rho} \quad , \quad b = \frac{12\nu_a A_2}{A_3 \sqrt{gD^3}} \cdot \frac{\rho_a}{\rho} \quad (10)$$

ここで、 $\hat{w}_f = (-b + \sqrt{K})/2a$, $A_0 = (\sqrt{K} - b)/(\sqrt{K} + b)$ である。

雨滴の運動特性は、雨滴径 D と抗力係数 $C_{D\infty}$ によって規定されることが上式より理解される。すなわち、 $C_{D\infty}$ の値を評価する必要がある。ところで、Laws¹⁸⁾は室内降雨実験によって、雨滴径別に落下距離 y [m]と落下速度 w (cm/s)の関係を得ている。雨滴径に関わりなく $C_{D\infty}=0.53$ 程度にとると、任意の落下距離 y における速度 w のLawsの実験値と式(9)、(10)にもとづく計算値とは図-3に示すように良好な一致を見せる。

以上の関係を用いると、ある降雨強度に対する雨滴の落下の運動エネルギーの推定が可能となる。

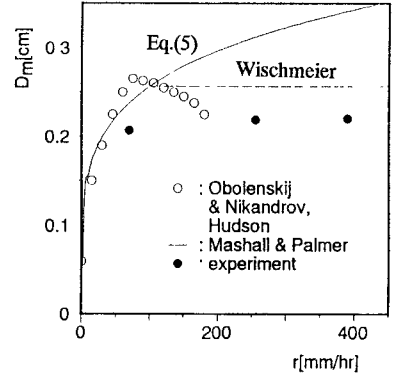


図-1 降雨強度と平均雨滴径との関係

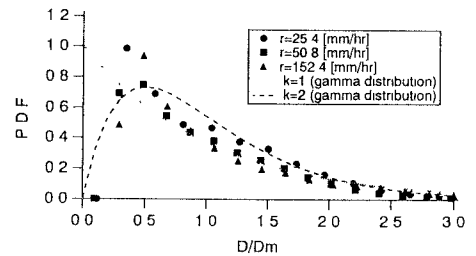


図-2 降雨強度と分布形状との関係 (Lawsの野外観測結果)

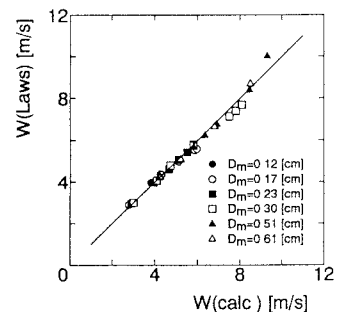


図-3 式(9)の検証

3.2 雨滴衝撃による pick-up rate 推定式

深田・藤原・日下⁷⁾は、高速度カメラ撮影により、水滴が静止水面に衝突するときに形成される空気泡の体積変化に伴う圧力が砂面に作用して静止砂粒の離脱を生起させ、空気泡の直径 $H_{\max}$ と水深 h との比率 h ($\equiv h/H_{\max}$)によって、圧力の作用の仕方が異なることを明らかにしている。すなわち、 $0 < h < 1/3$ では空気泡が急激に膨張する際の正圧力が、 $1/3 < h < 1$ では空気泡が急激に収縮する際の負圧力が砂粒の離脱に関わり、 $h=1$ 程度で雨滴衝撃による砂粒の離脱は急激に減少することを確認している。次に、深田ら⁹⁾は、雨滴との衝突によって静止水中に誘起される流れをポテンシャル流理論を用いて解析、空気泡の直径 $H_{\max}$ の変化に伴って底面に作用する圧力の変化に関する式を誘導するとともに、その妥当性を水滴衝突による静止水面の水圧変動を直接測定することによって検証した。さらに、深田ら⁷⁾は、作用圧力の積分値とその領域に存在する砂粒の水中重量との釣り合いより、与えられた湛水深に対する一個の水滴による砂粒の離脱個数 N_0 を力学的に評価し、図-4に示すように、その適用性を実験的に明らかにしている⁸⁾。図中の実線は式(11)で表される正圧力による離脱個数(水中重量表示)に関する式である⁷⁾。前述したように、 h の変化に伴って離脱の駆動力は変化するが、実際には正圧力のみを考慮した式を $h=1$ 程度まで援用した結果は負圧を考慮した結果の良い近似となること、また実験値との対応もよいことから、本研究では $0 < h \leq 1$ にわたる簡単な式形である次式を用いる。

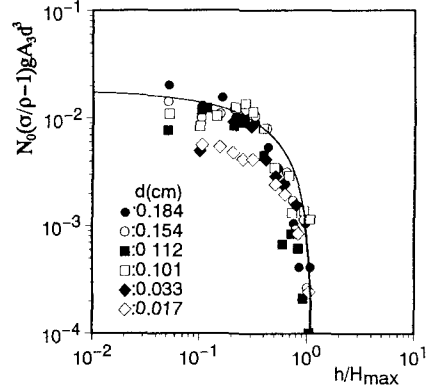


図-4 水滴による砂粒の離脱量
(深田らの実験結果)

$$N_0 = \frac{72K_0}{(\sigma/\rho-1)} \cdot \left(\frac{H_{\max}}{d}\right)^3 \cdot (0.38 - 0.79I_{*c}^{1/3}h^{2/3} + 0.33I_{*c}^2) \quad ; I_{*c} = I_c / \left(\rho\sqrt{gH_{\max}^3}\right) \quad (11)$$

ここで、 σ : 砂の密度、 ρ : 水の密度、 K_0 : 実験定数 (≈ 0.00067)、 d : 砂粒径、 I_{*c} : 無次元離脱限界力積であり、図-4より微細砂を除いて粒径に関わらず $I_{*c}=0.141$ と一定値にとれば十分と判断された。空気泡の直径 $H_{\max}$ は水滴の水面に衝突直前速度 w_{imp} の運動エネルギー E_0 と結びつけて次のように与えられる⁶⁾。

$$H_{\max} = \left(\frac{2E_0}{\pi\rho g}\right)^{1/4} \quad ; E_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho A_3 D^3 w_{imp}^2 \quad (12)$$

上式は、あくまでも静止水に落下した水滴一個による離脱個数を表したものであるが、本研究ではこれが流水中でも有効であると仮定し、流砂モデルに組み込むために単位時間に粒子一個の面積当たりの飛び出し個数 (pick-up rate) に変換する。

降雨強度が r (mm/h)である時、単位面積・単位時間あたりに落下してくる平均雨滴個数は v_r は $v_r = r/36000/A_3D^3$ (個/cm²/s)で与えられるので、単位面積当たりの裸地に雨滴1個が落下してくる平均時間間隔 T は $T=1/v_r$ となる。時間 T 内に単位面積当たりに含まれる砂粒数 $n=1/(A_3d^2)$ のうち N_0 が飛び出すから雨滴衝撃による pick-up rate p_{sr} は $p_{sr} = N_0 A_3 d^2 v_r$ で、 $\bar{p}_{sr} = \bar{p}_{sr} \sqrt{d/(\sigma/(\rho-1)g)}$ と無次元化すると次のように書ける。

$$\bar{p}_{sr} = \frac{1}{36000} \cdot \frac{r}{\sqrt{(\sigma/(\rho-1)gd)}} \cdot \frac{A_3}{A_3} \left(\frac{d}{D}\right)^3 N_0 = \frac{1}{36000} \cdot \frac{r}{\sqrt{(\sigma/(\rho-1)gd)}} \cdot \bar{p}_{sr0} \quad (13)$$

pick-up rate $\bar{p}_{sr}$ に及ぼす雨滴径の大小の影響は有意なものと考えられ、3.1で述べた雨滴径の分布 $f_D(D)$ を考慮した pick-up rate p_{sr} は、 $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$ を雨滴の最小、最大径として次のように書ける。

$$p_{sr} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \bar{p}_{sr}(D) f_D(D) dD \quad (14)$$

雨滴衝撃による砂粒の離脱の程度を直接的に示すため、降雨強度の項を除いて式(14)に基づいて p_{sr0} と h との関係を計算した結果を図-5に示す。計算に当たり、 $d=0.088$ (cm)、 $D=0.2$ (cm)として形状係数を $k=1, 2$ と変化させた。また、より自然降雨の分布に近い $k=2$ の場合(図-2参照)の結果を近似し、式(1)~(3)の土砂流出

モデルへの適用が簡単な形式の雛形として次式を提案する。

$$p_{sr} = \frac{1}{3600} \cdot \frac{r}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd}} \left(1 - \frac{h_*}{k_1 h_{*c}}\right)^s \quad (15)$$

ここで、 k_1 ：雨滴径が分布する効果を示す定数(=1.2)、 h_{*c} ：限界相対水深(=1)、 $s=3$ である。室内実験では雨滴の速度は最終速度に至らないことが多いが、自然降雨では平衡に至っていると考えて良い。この時、雨滴の最終速度、運動エネルギーは雨滴径 D のみで決まり $D \geq 0.1\text{cm}$ の範囲では D と H_{max} の関係は $H_{max}/D=4.1$ と一定となる。この関係を用いると自然降雨に対する p_{sr} の推定式として、より簡単な表示式 $p_{sr}=r/[3600\{(\sigma/\rho-1)gd\}^{1/2}] \cdot (1-0.2h/D_m)^3$ が得られる。

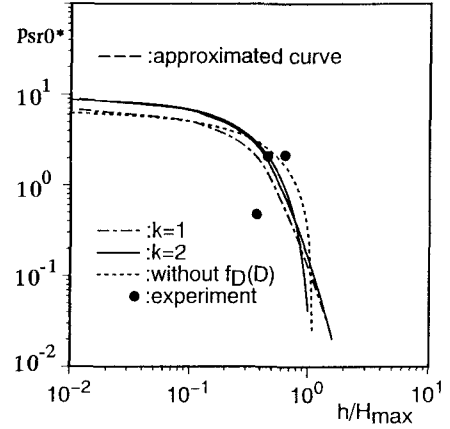


図-5 雨滴によるpick-up rate p_{sr}

4. 表面流による砂粒の離脱

4.1 表面流による pick-up rate 推定式

急勾配斜面上の降雨流れは、自由表面における雨滴の衝撃と相対水深が小さいという2点で特徴づけられる。澤井、久保田¹⁹⁾は粗面、滑面ともに乱流領域においては雨滴衝撃の摩擦抵抗に及ぼす影響は無視できることを実験的に示しており、後者の特性のみを考えれば十分と推測される。相対水深の小さい流れに対して、辻本・細川²⁰⁾はその積分定数を相対水深の関数とした次のような対数則型の流速分布式を提案している。

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{k_s} + B_r \quad (16)$$

$$B_r = B_{r0} + (B_{rmin} - B_{r0}) \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{1}{k_B} \frac{h}{d} \right) \right\}^m \quad (17)$$

ここで、 u_* ：摩擦速度、 κ ：Karman定数、 k_s ：等価砂粗度(=d)、 h ：水深、 B_{rmin} ：実験定数(=3.0)、 B_{r0} ：実験定数(=8.5)、 k_B ：実験定数(=4.34)、 m ：実験定数(=1)である。

いま砂粒の斜面からの離脱を滑動型式で代表させると粗砂に対するpick-up rate 推定式は次のように書ける。

$$p_{sf} = \frac{F_0}{\Psi(\theta)} \cdot \tau_* \left\{ 1 - \frac{k_2 \Psi(\theta) \tau_{*c0}}{\tau_*} \right\}^m \quad (18)$$

$$\Psi(\theta) = \cos \theta \left\{ 1 - \frac{\sigma/\rho}{\sigma/\rho-1} \cdot \frac{\tan \theta}{\mu_s} \right\} \left(\frac{B_{r0}}{B_r} \right)^2 \quad (19)$$

ここで、 θ ：斜面角度、 τ_* ：無次元掃流力(= $u_*^2/[(\sigma/\rho-1)gd]$)、 τ_{*c0} ：平坦路床の場合の無次元限界掃流力、 F_0 ：平坦路床の場合の実験定数、 μ_s ：静止摩擦係数(=1)で、粗砂の場合 $F_0=0.03$ 、 $k_2=0.7$ 、 $\tau_{*c0}=0.05$ 、 $m=3$ である。式(18)は緩勾配水路に対するpick-up rate 推定式の修正(式(19)の $\Psi(\theta)$)は限界掃流力の項にとどまらず、 F_0 にも及ぶことを示唆している。ところで、水山²¹⁾、Graf・Suzuka²²⁾らは実験的に路床勾配の変化に対する無次元限界掃流力の変化式を提案している。これは辻本・細川が式(16)、(17)が示す流れ構造の変化による間接効果と重力成分の直接効果との相対関係に起因して限界掃流力が増加することを示した解析結果に一致している。ここでは、簡単のため、上式の $\Psi(\theta)$ を例えば水山の式を用いて次のように表すことにする。

$$\Psi(\theta) = 10^{1.72 \tan \theta} \quad (20)$$

4.2 底面せん断応力の推定

表面流による砂粒の離脱率の評価、step lengthの評価に当たっては流れの底面せん断応力の評価が必須である。本研究では簡単のため降雨強度 r は一定であり、しかも流れは定常に達していることを仮定している。こうした状況に対して岩垣・土屋は横流入を考えた不等流の運動方程式から誘導した疑似等流の式に基づい

て底面せん断応力を推定している。この方法は実質的には等流の抵抗則を仮定するkinematic wave法と等しいことから、より簡単な式形の次式で表される後者の解を用いて底面せん断応力の推定を行う。

$$\tau_b(x)=\rho g \sin\left(\frac{rx}{\alpha}\right)^{2/3};\alpha=\sqrt{\frac{8}{f}}g \sin\theta \tag{21}$$

ここで、 f : Darcy-Weisbachの摩擦損失係数であり、式(16)より決まる次の抵抗則が適用される。

$$\sqrt{\frac{8}{f}}=\frac{1}{\kappa}\ln\frac{h}{d}+B_r-\frac{1}{\kappa} \tag{22}$$

式(22)には本来なら未知の h/d が含まれているため、実際の計算に当たっては、与えられた斜面勾配 $\sin\theta$ 、単位幅流量 q 、粒径 d に対して摩擦損失係数 f と h/d とが同時に求められることになる。所与条件である $\sin\theta$ 、 q 、 d を用いると、 $\sqrt{8/f}=q_* / \sqrt{\sin\theta \cdot (h/d)^3}$ が得られる。ただし、 $q_* = q / \sqrt{gd^3}$ である。 q が斜面上の表面流の抵抗則に関わるパラメータであるため、積分定数 B_r の関数である $\Psi(\theta)$ を介して、こうした場におけるpick-up rate p_{sf} は図-6に示すように q をパラメータとして変化することになる。なお、降雨流の場合、単位幅流量は流れ方向に変化するが、本研究では便宜的に斜面下流端での流量 $q_{max}=rL$ (L : 斜面長)を用いて摩擦損失係数 f を推定する。室内実験程度の斜面長では図-7に示すようにその対応は良いことが分かる

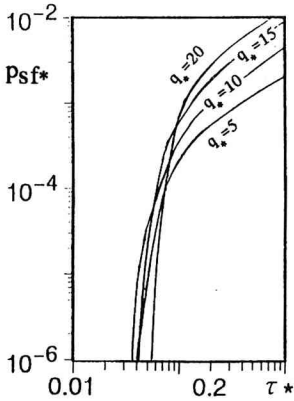


図-6 pick-up rate p_{sf} (q : パラメータ)

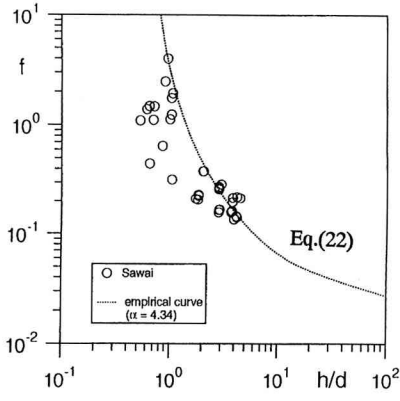


図-7 摩擦損失係数評価式（澤井の実験結果）

5. 降雨による斜面からの土砂移動に関する実験

実験は写真-1に示すような長さ3m、幅2.5mの領域に散水可能な人工降雨装置を用いて行われた。模擬雨滴のストロボ写真から読みとられた雨滴粒径の分布特性は、降雨強度にほぼ関係なく平均粒径 $D_m=0.2(\text{cm})$ 、形状係数が4のgamma分布であった。降雨装置の高さの制限のため、雨滴が平衡速度に達していないため、ストロボ写真から読みとられた位置と速度に式(9)を適用して初速度を推定し、次に衝突直前の速度、運動エネルギーを推定した。抗力係数は $C_{D\infty}=0.53$ とした。実験の降雨強度は70、250、390(mm/hr)であったが、これは単位時間・面積当りに落下してくる自然降雨の運動エネルギーに換算するとそれぞれ25、100、150(mm/hr)に相当する降雨強度で、これは砂面との衝突時の速度差に起因するものである。

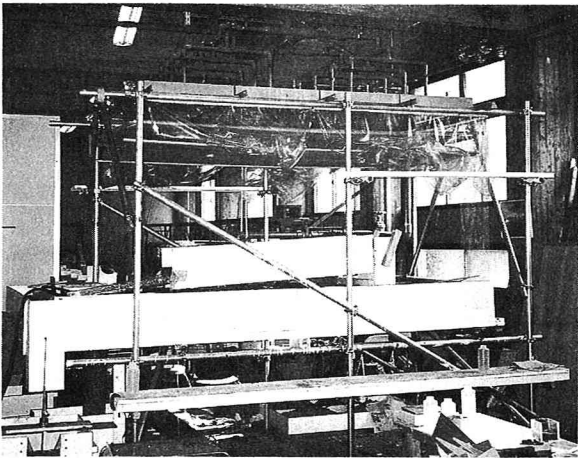


写真-1 降雨実験装置全景

雨滴によるpick-up rateに関する実験は図-8に示すような装置を降雨装置の下に置いて、中央のマスから単位時間あたりに周囲のマスに飛散した砂粒の個数を数えることからpick-up rateを求めた。実験には粒径 $d=0.088(\text{cm})$ の一樣砂を用いた。実験条件は降雨強度を70, 250, 390(mm/hr)、水深は3mmとした。図-5に示した実験結果($p_{\text{pick-up}}$ 表示)とpick-up rateの理論式との対応は式(15)の適用性を示すものと判断される。

流砂量に関する実験は降雨装置の下に、表面流のみの通水も可能にするため、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(図-9参照)を設置して行った。表-1に実験条件を示す。

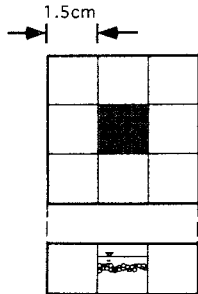


図-8 pick-up rate p_{SR} 測定用実験装置

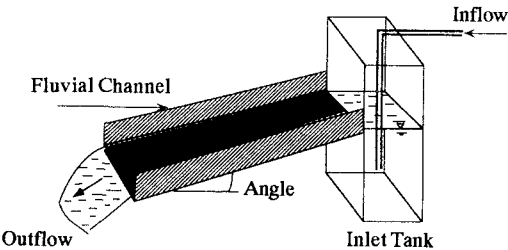


図-9 流砂量測定用実験水路

降雨流は降雨により雨滴衝撃を伴いながら流下方向に流量、水深が変化する流れであり、降雨衝撃の効果を抽出するには、雨滴衝撃を伴わずに流量の空間変化率が同一の開水路流れをつくり、流砂量の差を検討する必要がある。しかしながら、こうした流れを作ることが難しいため、本実験では、下流端流量が等しくなるような降雨流と等流における流砂量の比較を試みた。先ず模擬降雨を発生させて下流端で流砂量を計測する実験(A)を行い、次に、降雨による下流端での流量($q_{\text{max}}=rL$)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(B)を行った。図-10に、実験(B)とそれに対応する実験(A)の、無次元掃流力 τ_* と無次元流砂量 q_B との関係を示した。少なくとも、実験(B)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であるから、結果は雨滴衝撃の効果が顕著であることを示している。図中には、平均step lengthを50dとして、式(1)を用いて計算された流砂量が併示してある。ただし、表面流だけの場合は勾配補正を行ったpick-up rate p_{pr} (式(18))を、降雨流の場合には雨滴衝撃を考慮して、pick-up rateを $p_{\text{r}} (=p_{\text{pr}}+p_{\text{r}})$ としている。また、水深、掃流力の評価にはkinematic wave法の解を用いた。

図-11に、降雨を伴う流れの下流端での無次元掃流力 τ_* と無次元流砂量 q_B に関する実験結果を示した。図中の実線は q_* として今回の実験における平均値である $q_*=1.96$ を用いた場合の τ_* と q_B の関係式を示している。厳密には斜面上の降雨流による τ_* と q_B 関係は無次元単位幅流量 q_* によって変化するので、図-12に雨滴衝撃を考慮して提案された非平衡土砂輸送モデルによる計算結果と実験結果との比較を示した。

図-10~12の結果から、提案した斜面上の非平衡土砂輸送モデルは降雨の有無を問わず、その妥当性は十分に検証されたものと考えられる。

表-1(a) 実験(A)条件表

Run	$\tan\theta$	r (mm/hr)
A - 1	0.010	255
2		390
A - 3	0.017	255
4		390
A - 5	0.050	70
6		255
7		390
A - 8	0.087	255
9		390
A - 10	0.176	255
11		390

表-1(b) 実験(B)条件表

Run	$\tan\theta$	q (cm ² /s)	equivalent
B - 1	0.087	1.25	A - 8
2		1.95	9
3	0.176	1.25	10
4		1.95	11

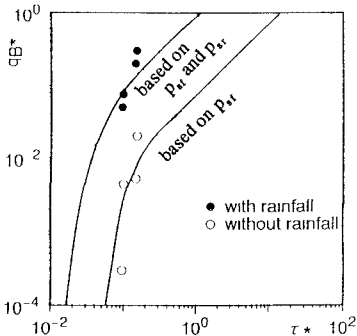


図-10 雨滴衝撃の流砂量への影響

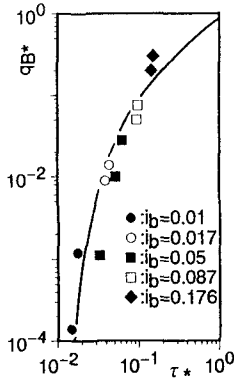


図-11 降雨流による土砂流出量

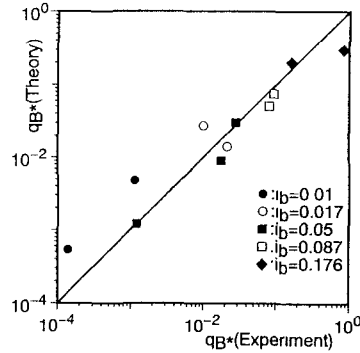


図-12 土砂流出モデルの検証

6. おわりに

本研究では、斜面上の降雨による侵食現象を取り扱う際に、従来、個別に取り扱われることが多かった雨滴衝撃と表面流による土砂移動現象を同時に考慮した非平衡土砂輸送モデルを提案し、その妥当性を人工降雨装置を有する急勾配移動床水路を用いた実験より検証した。今後は、雨滴衝撃によるpick-up rate、流砂量への効果について、さらに定量的な評価を進める。また、面状侵食からリル・ガリ侵食へのモデルの拡張、土壌侵食防止方法等への応用を試みる予定である。

本研究の実験、解析にあたり、京都大学大学院生奥田晃久君、新橋秀樹君の熱心な協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

1. Kirkby, M.J.: 新しい水文学 (邦訳 日野幹夫ら), 朝倉書店, 1983.
2. 岩垣雄一・土屋義人: 水滴による地面侵食に関する二、三の実験, 土木学会論文集, 第35号, pp.55-63, 1956
3. 澤井健二: 粘性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究, 京都大学学位論文, 1977.
4. 金屋敷忠儀: 山地流域における微細土砂の生産・流出機構と流出予測法に関する研究, 京都大学学位論文, 1981.
5. 深田三夫・藤原輝男: 湛水土壤面における雨滴作用の写真解析—雨滴侵食の基礎的研究(I), 農業土木学会論文集, 第143号, pp.21-29, 1989.
6. 深田三夫・藤原輝男: 湛水面への水滴落下衝突による水中ドームに挙動と水圧変動特性—雨滴侵食の基礎的研究(II), 農業土木学会論文集, 第146号, pp.43-55, 1990.
7. 深田三夫・藤原輝男・日下達朗: 水圧力積の考え方による湛水土壤面での土粒子のモデル化—雨滴侵食の基礎的研究(III), 農業土木学会論文集, 第158号, pp.17-28, 1992.
8. 深田三夫・藤原輝男・日下達朗: 水滴衝突による正圧力積で剥離された土粒子の測定—雨滴侵食の基礎的研究(IV), 農業土木学会論文集, 第159号, pp.37-43, 1993.
9. 深田三夫・藤原輝男・日下達朗: 雨滴衝撃を伴う流れによる土粒子の剥離および輸送に関する考察, 農業土木学会論文集, 第165号, pp.9-22, 1993.
10. 深田三夫・藤原輝男・日下達朗: 雨滴衝撃の加わる流出土砂量の測定, 農業土木学会論文集, 第165号, pp.23-32, 1993.
11. 中川博次・辻本哲郎: 移動床流れの水理, 新体系土木工学23, 技報堂出版, 1986.
12. Obolenskij and Nikandrov: Inzhenerniye metody rascheta: prognoza vodnoy eroziyi, Moskva, 1970.
13. Hudson, N.: Soil Conservation, BT Batsford Ltd, London, 1973.
14. Marshall, J.S. and Palmer, W.M.: The distribution of raindrops with size, *Jour. Meteor.*, Vol.5, pp.1265-1266, 1948.
15. Wischmeier, W.H. and Smith, D.D.: Rainfall energy and its relation, *Trans. AGU*, 39, 1958.
16. Horton, R.E.: Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bull. G. Am.* 56, pp.275-370.
17. Laws, J.O. and Parsons, D.A.: Relation of raindrops - size to intensity -, *Trans. Amer. Geophys. Union*. Vol. 24, pp.453-460, 1943.
18. Laws, J.O.: Measurement of the fall-velocity of water-drops and raindrops, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Part 3, pp.709-721, 1956.
19. 久保田稔: 傾斜農林地の開発に伴う自然災害の防止に関する研究, 文部省科学研究自然災害特別研究成果報告書 (代表: 河村三郎), pp.39-43, 1980.
20. 辻本哲郎・細川達男: 急勾配水路における礫の限界掃流力と流砂量, 土木学会論文集 第411号/II-12, pp.127-134, 1989.
21. 水山高久: 山地河川の掃流砂に関する研究, 京都大学学位論文, 1977.
22. Graf, W.H. and Suzuka, L.: Sediment transport in steep channels, *Jour. of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.5, No.1, pp.11-26, 1987.