

京都大学大学院 学生員 奥田晃久 京都大学工学部 正 員 中川博次
 京都大学工学部 正 員 村上正吾 京都大学大学院 S. Makhana

1. はじめに わが国は、その地質条件、地形条件、気候条件のため山地斜面の崩壊、侵食現象が活発で土砂生産、流出が著しい。さらに人工的な宅地、造成地からの土砂流出によっても様々な問題が起きている。例えばダム貯水池・河川における濁水問題は近年の環境問題への関心の高まりで、より広範囲の人々の関心を引いている。また、河川の長・短期的な河床変動解析における上流での境界条件を決定するうえでも、裸地、山地斜面での流砂現象を力学的に検討しておく必要があり、これまで多くの実験的、解析的な研究が行われてきた。本報は近年土砂水理学の分野で培われてきた流れや流砂モデルの基本的な知見をこうした場における土砂輸送問題への適用性について論じたものである。

2. 実験方法と人工降雨の特性 実験は人工降雨発生装置を上方に有する可変勾配式の斜面を用いて行った。人工降雨装置は16個の箱よりなり、それぞれの箱には水滴の落下する2mmの穴が40mm間隔で180個あけられている。メッシュ径1.5mmの金網を挿入することによって雨を均一に降らせ、かつ水圧のために早くなった雨滴速度を減速できるようにした。この降雨装置により発生させられた模擬定常降雨による流送土砂は斜面の最下端に設けた採砂箱に補足され、その量が測定された。また土砂輸送と密接な関係に有るとと思われる雨滴の運動エネルギーの評価のため、雨滴径、雨滴速度をストロボ撮影された写真をもとに計算した。実験降雨の平均雨滴径と降雨強度との関係は図-1に示すように必ずしもObolenskij¹⁾ & Hudson²⁾による野外観測の結果とは一致しない。図-2は単位時間当たり雨粒1個の面積当たりに投入される雨滴の運動エネルギーを計算した結果であり、間接的に推測される野外での雨滴の運動エネルギーと通常の雨滴強度の範囲では同一オーダーであり、衝突エネルギーに関わる現象については、本装置による実験は意味あるものと期待される。

3. 斜面上の土砂輸送について 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変化する非定常流によって規定されるため、必然的に非平衡な流砂過程になる。したがって、土砂輸送量を算定するのに通常用いられる平衡流砂量式が、どの程度の斜面長と角度であれば適用可能であるかを知る必要がある。kinematic wave法を適用すると、一定強度 r_0 の降雨による長さ L の斜面上の平衡状態での掃流力分布は $\tau_0 = \rho g h \sin \theta$,

$$h(x) = (r_0 x / \alpha)^{1/m} \cdots (1) \text{ で与えられる。ここで、 } \alpha = \sqrt{8/f \cdot g \cdot \sin \theta}, m = 2/3, f: \text{摩擦損失係数, } \theta: \text{斜面角度である。}$$

こうした非一様な掃流力に対する非平衡掃流砂 $q_b(x)$ は、 $q_B(x) = A_3 d / A_2 \int_0^x p_s(x') \exp[-(x-x')/\Lambda] dx' \cdots (2)$ で与えられる。ただし p_s : pick-up rate, Λ : 平均step length, $A_2 = \pi/4, A_3 = \pi/6$ で、step lengthの分布は指数分布を仮定した。

一方、各点での掃流力に対して定まる平衡流砂量 $q_{be}(x)$ は、 $q_{be}(x) = (A_3 d / A_2) p_s \Lambda \cdots (3)$ で与えられる。図-3は斜面長 L 、角度 θ 、降雨強度 r を変化させて非平衡流砂量 q_b と平衡流砂量 q_{be} の比の変化を流下方向に示したものである。

図-4は今回の実験条件において q_b と q_{be} を比較したものである。計算にあたって、pick-up rateは中川・辻本式³⁾を適用し、 $\Lambda = 100d$ と仮定した。 f の評価は後述する式(6)で行った。図より斜面角度が大きいほど、斜面長が長いほど速やかに q_b/q_{be} は1に近づくものの、室内実験においては十分な長さを得られない場合もあり、得られた流砂量を平衡値として扱うことには注意する必要があることがわかる。ただし、ある程度以上の斜面長であれば、少なくとも下流端でのそれは平衡流砂量式で代用しても差し支えないことがわかる。今回の実験の斜面長 $L = 250(\text{cm})$ 、降雨強度の場合はこうした場合に相当する。実験によって得られた流砂量はほぼ平衡流砂量と考えられるので、式(3)より簡便な式形の流砂量式としていわゆるSwiss公式⁴⁾の限界掃流力の項を勾配補正式(5)した $q_{B^*} = 8(\tau_* - \tau_{*c0})^{3/2} \cdots (4)$ を用いて、実験値との比較を行うことにする。ここで $q_{B^*} = q_{be} / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}$, $\tau_* = u_*^2 / \{(\sigma/\rho - 1)gd\}$ である。

$$\frac{\tau_{*c0}}{\tau_{*c0}} = \frac{\sigma/\rho \cdot \sin(\theta_s - \theta) - \cos \theta \sin \theta_s}{(\sigma/\rho - 1) \sin \theta_s} \quad (\text{転動脱離}) \quad (5)$$

ここで τ_{*c0} : 平坦河床時の限界掃流力, θ_s : 抜け出し角。図-5は実験結果と式(4)、(5)に基づいて計算された結果を比較したものである。実験値と一致するように決められた $\tau_{*c0} = 0.01$ は、単に勾配補正した値 $\tau_{*c0} = 0.031$ より小さく、実験時の観察に基づく、これは雨滴衝撃による初期移動の促進効果と推測される。すなわち、降雨による土砂移動機構としては、雨滴衝撃によるpick-upと、表面流によるpick-upと輸送といった2つのサブシステムを考慮する必要があると示唆される。

摩擦速度 u_* の評価に必要な抵抗則は、次の辻本ら⁵⁾による急勾配れき床水路に対する摩擦損失係数 f の実験式を形

$$\text{式的に適用した。} \quad \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{1.22h}{d} + 5.5 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{1}{4.34} \frac{h}{d} \right) \right\} - \frac{q_{\max}}{\sqrt{gd^3 i_b}} \cdot \frac{1}{\sqrt{h/d}} \quad (6)$$

ここで κ :カルマン定数, $q_{\max}$:斜面下流端での流量, h :水深である。図-6は芦田ら⁶⁾の実験値に対して上式を適用した結果を示したもので、用いた抵抗則がほぼ妥当であることが認められた。

4. おわりに 降雨による斜面上の流砂現象は非定常流によって規定される非平衡な流砂過程であるが、十分に長く、比較的急な斜面では、少なくとも斜面下流端では平衡流砂式が適用できることがわかった。また斜面上の流れの抵抗則は、急勾配れき床水路のそれが適用できることが推測された。今後の課題は、流れの抵抗則の決定とともに、雨滴衝撃の流砂量に与える影響を明らかにした上で人工降雨と自然の降雨による土砂輸送現象の相似則の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Obolenskij, Nikandrov : Moskva, 1970., 2) Hudson, N : Soil Concentration, London, 1973., 3) 移動床流れの水利. 1987, 4) Meyer-Peter, E. and R. Muller , *Proc. 2nd LAHR Congr.*, Stockholm, 1948., 5) 辻本・細川. 土論第411号, 1989., 6) 芦田・奥村・田中: 斜面侵食に関する実験的研究,

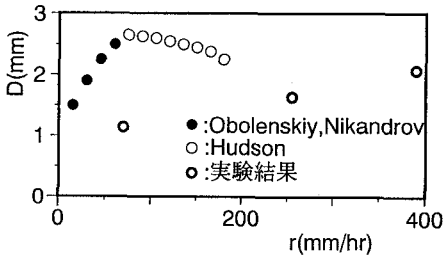


図-1 平均雨滴径と降雨強度の関係

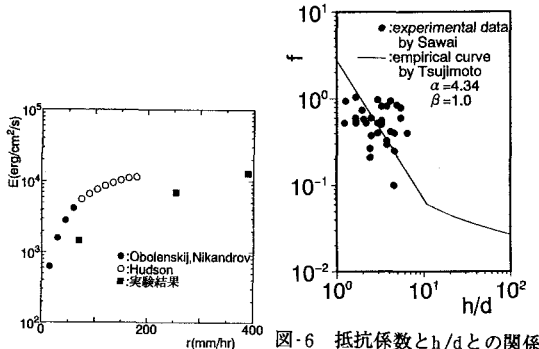


図-2 運動エネルギーと降雨強度の関係

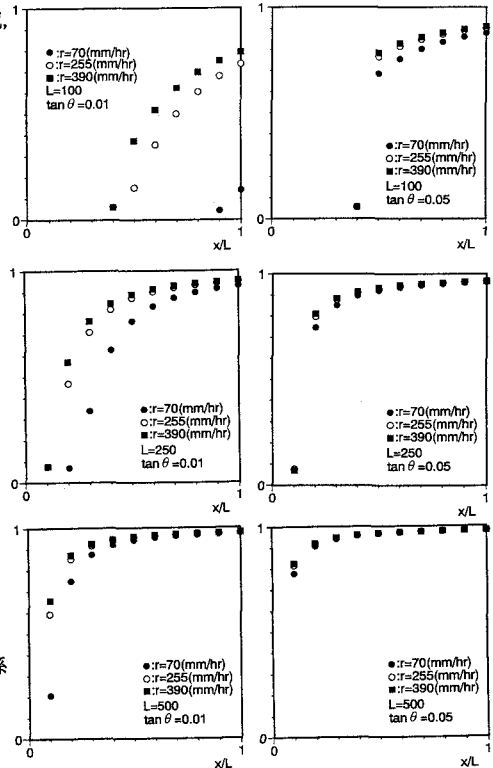


図-3 q_b/q_{be} の流下方向の変化

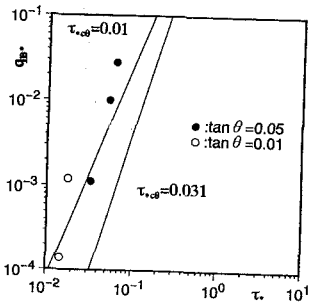


図-5 Swiss公式と実験結果

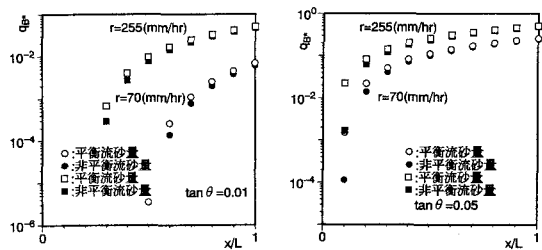


図-4 q_{be} と q_b の流下方向の変化