

表面侵食モデルによる嘉陵江流域の土砂生産量推定 —長江（揚子江）上流域を対象として—

APPLICATION OF SURFACE EROSION MODEL TO ESTIMATING SEDIMENT YIELD
IN JIALINGJIANG WATERSHED UPSTREAM OF CHANGJIAN WATERSHED, CHINA

村上正吾¹・林 誠二²・渡辺正孝³・徐 開欽⁴・陳 中原⁵

Shogo MURAKAMI, Seiji HAYASHI, Masataka WATANABE, Kaiqin XU, Zhongyuan Chen

¹正会員 工博 国立環境研究所 流域圏環境管理研究プロジェクト 総合研究官 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

²正会員 工博 国立環境研究所 水土壌圏環境研究領域 主任研究員 (同 上)

³正会員 Ph.D 国立環境研究所 水土壌圏環境研究領域 領域長 (同 上)

⁴正会員 工博 国立環境研究所 流域圏環境管理研究プロジェクト 主任研究員 (同 上)

⁵非会員 Ph.D 華東師範大学環境科学院 院長 (200062, 上海, 中国)

T Controlling the sediment inflow to Three Gorges Dam reservoir is indispensable to managing its performances and water environments. Since it is indispensable for this purpose to grasp sediment runoff in Jianlinjiang river watershed that is one of the main sources of sediment yield upstream of Changjiang river, we studied which types of erosion and yield models can be used for the future modeling of sediment runoff. In this study firstly we selected three types of surface erosion models; modified USLE model, surface flow erosion model and riverbank erosion model. Secondly, we applied them to Jianlinjiang river watershed in 1987, and examined their features, applicability and limitations. Though this watershed is so wide that the sediment runoff is thought to be much influenced by multi-sales of space and time, the surface erosion type of three models can explain the annual and monthly sediment yields to some extent.

Key Words : surface sediment erosion, modified USLE, riverbank erosion, Jianlinjiang river watershed

1. まえがき

三峡ダム(Three Gorges Dam)の湛水が2003年6月より開始され、ダム湖では、既に流入する微細土砂が沈降し、流入水の濁りに比べて湖内水が澄んでいることが報告されている。土砂の堆積は、ダム湖の貯留量を減少させることで洪水防御機能を低下させ、同時に多量の栄養塩も沈降・堆積させることで富栄養化等の原因となる等、流域環境管理上、流入土砂量についての検討は必須である。三峡ダム築造地点 30km 下流に位置する宜昌(Yichang)観測点では1950～1985年の年平均で5.3億 tonの土砂輸送量が報告されている。この量は長江河口の上海(Shanghai)より500km上流に位置する大通水文観測点(南京 Nanjing)の年平均輸送量4.72億 tonの1.12倍で、宜昌～南京間の堆積状況より、長江の土砂生産源は宜昌より上流の長江上流域にあるとされている¹⁾。この長江上流域の約100

万 km²では、この40年間で植生被覆率は22%から11%に半減、土壌流失面積は36万 km²から56万 km²に、その侵食量は22.4億 ton/yearに達すると推定されており、中国の重点土壌保全区域に指定されている。実際には、長江上流全域が均一な土砂生産域ではなく、特に土砂生産が激しい金沙江(Jinsha river)と嘉陵江(Jianlinjiang river)の特定地域7万 km²で宜昌地点の通過量の43%に及ぶ土砂が生産されていると推測されている¹⁾。従って、こうした集中生産地区での土砂動態を検討することが、三峡ダム湖へ流入する土砂の管理を進める上で、必要となる。

本報告では、三峡ダム湖への土砂流入量に占める割合が高い嘉陵江流域での土砂動態を明らかにする第一歩として、土砂輸送量と外力である降雨・表面流出流・河川流とが1対1に対応する3形式の表面侵食型モデルを用いて、大規模流域での土砂生産量の推定を試み、その適用性と問題点についての検討を行った。

2. 嘉陵江流域の概要

嘉陵江は流域面積 16 万 km² で、河川延長は 1120km に及ぶ長江水系の第 3 位の大支川であり、三峡ダム上流 600km に位置する重慶(Chongqing)で長江に流入する(図-1)。流域全体として、気候帯は亜熱帯に近く、年平均気温は 16~18℃、年平均降水量は 1000mm で、降雨期は夏と秋で、特に 4~10 月で年降水量の 70%に及ぶという特徴を持っている。また、嘉陵江流域の地形的特徴は上流が山地域であるのに対し、下流域は極めて平坦である。こうした水文地理的特徴を持つ嘉陵江流域からの流出土砂の特性把握のため、中国長江水利委員会は流域内で日単位の河川流量と浮遊土砂濃度の計測を実施している。

本報告では、長江に多量の土砂を供給する嘉陵江から流出土砂の検討のため、河道位数が 1 でダム等の水理構造物が設置されていない源流域での流量と土砂濃度の観測値から流出土砂量を推定、これを流域土砂生産量と仮定し、生産量とその時間的変化を記述するため、表面侵食を土砂生産の主要機構とするモデルの適用を試みた。

表面土壌侵食モデルの検証のため、水文地形的特性が異なる 4 流域(流域 I, II, III, IV とする)を対象とした(図-2, 表-1)。流域の規模は降雨流出過程を再現するための単位応答スケールとした。流域面積 A の最大値は 8400km² で淀川流域にほぼ等しく、流路長 L は 168km と淀川の 2 倍程度である。流域面の平均角度 θ は上流山地流域 I, II で大きく、下流流域 III は平坦、流域 IV はその中間である。図-3 は各流域の畑地が耕作されている斜面の流域内での割合で、各流域の斜面形状の概観を示している。平均標高 H、河床勾配 i_b 、低水時河道幅 B_{min} から洪水時幅 B_{max} への変化からも、山地河道と沖積地河道の差が認められる。本研究は 3 形式の表面侵食モデルを適用して土砂生産量を推定する事を目的としているが、虫明²⁾はモンスーンアジア地域の土砂生産では山腹崩壊、地滑り等の不連続的な生産機構が重要であると指摘している。Peltier³⁾は化学的風化強度と物理的風化強度を指標として、mass movement 発生領域を分類している。図-4 は一部修正された領域図⁴⁾に対象とした 4 流域の年平均気温と年降水量(1987 年)をプロットした結果である。流域 I, II は比較的発生しにくい領域、流 IV は発生しやすい領域で、表面侵食モデルの適用は I, II では可能性が高く、IV では可能性が小さいことを領域図は示している。

3. 表面土壌侵食モデルの概要

(1) 日下・藤田式(修正 USLE 式)

農地からの土壌流出式である USLE(Universal Soil Loss Equation)は集中豪雨や長期降雨に対する適用性は十分ではなく^{2),5)}、日下・藤田⁵⁾は試験圃場と室内実験に基づき

短時間降雨に対する USLE の改良式を提案し、さらに木本ら⁶⁾は 1 時間当たりの流出土砂量式として表現した。

$$q_b = aK_e(L/19.7)^a(\sin\theta)^bfr \quad (1)$$

ここで、 q_b =単位幅当りの流出土砂量、 K_e =侵食係数、 L =斜面長(m)、 θ =斜面角度、 r =1 時間雨量(mm/hr)、 f =流出係数、 a, α, β =経験定数であり、裸地に対しては $K_e=1, a=1.06, \alpha=1.2, \beta=0.7$ とされている。

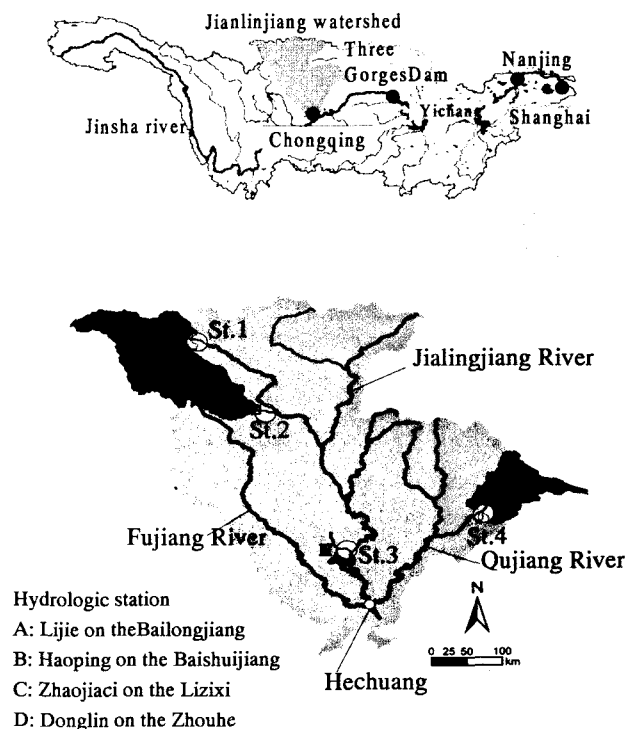


図-2 嘉陵江流域内での対象 4 流域の位置

表-1 対象流域の地形特性

Basin	A(km ²)	H(m)	$\theta(^{\circ})$	L(km)	i_b	$B_{max}(m)$	$B_{min}(m)$
I	8403	1540	12.9	167.9	0.0098	50.3	21.4
II	8148	898	16.2	177.9	0.0096	51.1	35.3
III	464	17	0.0	30.0	0.0006	178.0	0.8
IV	6374	287	8.4	162.4	0.0074	143.0	35.5

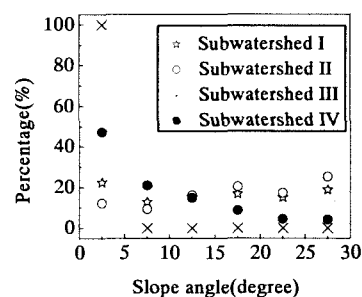


図-3 畑地斜面角の流域内での割合

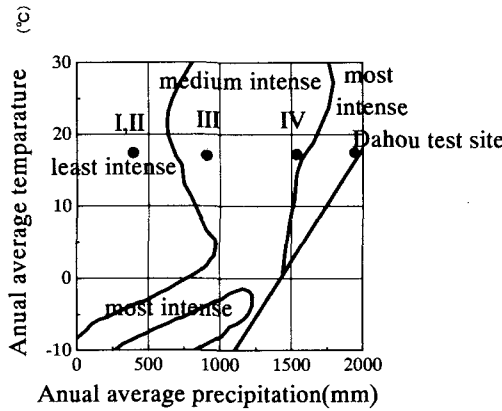


図-4 mass movement 発生強度の分類

(2) unit stream power 形式の表面流侵食式

降雨流では流量が流域斜面方向に変化するが、土砂輸送量は速やかに平衡に達するものと仮定し、河道に流入するあるいは斜面末端での流砂量は平衡流砂量式が適用できるとの考えから、著者ら⁷⁾は既に降雨時の斜面からの土砂流出に関する室内実験と野外実験に基づいて、unit stream power 形式の土砂流出の経験式を提案した。土壌侵食が表面流によって生起することより、雨滴衝撃に伴う限界掃流力の急激な減少に違いはあるものの、その式形は掃流砂量式と等しいことを指摘した。提案した経験式の適用範囲は実験の斜面角度内に規定されるため、掃流力表示の掃流砂量式と unit stream power 型土砂流出式とを比較することで、適用範囲の拡張を図る。流砂量推定式の一般形は次のように書ける⁸⁾。

$$q_B = K_0 / \Psi(\theta_r) \cdot \{\tau_* - \tau_{*c}(\theta_r)\}^n \quad (2)$$

$$\Psi(\theta) = \tau_{*c}(\theta_r) / \tau_{*c0} \quad (3)$$

ここで、 $q_B = q_B / \{(\sigma\rho - 1)gd^3\}^{0.5}$ 、 τ_* は無次元底面せん断応力、 $\tau_{*c}(\theta_r)$ は勾配 $\tan\theta_r$ の河床での無次元限界掃流力、 τ_{*c0} は緩勾配河床での無次元限界掃流力である。

無次元底面せん断応力 τ_* は表面流量 q と斜面勾配 $I(=\tan\theta)$ を用いて $\tau_* = (q\phi/\phi)^{3/2}$ と書ける。 ϕ は流速係数で流れの平均流速 U と摩擦速度 u_* との比 U/u_* を表す。これを式(2)に代入することで、流れの仕事量 $\tau_* U (= \rho g q I)$ に相当する単位重量当りの仕事量 qI (unit stream power) 表示の流砂量式が得られる。降雨流による土砂移動では、雨滴衝撃のため限界掃流力は十分小さくなり、 $q \cdot I_* \gg (q \cdot I)_c$ であることを仮定すると次式のように近似できる。

$$q_B = A_0 \cdot (q \cdot I)^{2n/3} \quad (4)$$

ここで、 $A_0 = K_0 / \phi^{2n/3}$ 、 $q = q / \{(\sigma\rho - 1)gd^3\}^{0.5}$ 、 $I_* = I / (\sigma\rho - 1)$ 、 d = 代表粒径、 I = 斜面勾配、 q = 単位幅流量、 $(q \cdot I)_c$ = 無次元移動限界 unit stream power である。 K_0 、 n の特定に当たっては、急斜面での降雨流の強度は十分に強く、土砂輸送は浮遊形式の割合も高いものと考え、式(2)は掃流砂と浮

遊砂を含む全流砂推定式に近いと仮定した。従来提案されている平坦河床での流砂量式(例えば Brown 式)と比較すると、 K_0 は 10 程度、 n は 5/2 となる⁹⁾。一方、急勾配の効果は流れの構造変化を生み、流速係数 ϕ が大きく変化する。すなわち、流速係数 ϕ は相対水深が大きい緩勾配流れでの 15~30 程度から、表面流の水深が極めて小さい急勾配斜面では 1~5 程度にまで減少する。このことを考慮すると、急勾配斜面流の流砂量式では $K_0 / \phi^{2n/3} = 1 \sim 10$ 、 $m = 2/3n = 5/3$ となる。一方、無次元移動限界値 $(q \cdot I)_c$ は、平坦河床での値 $(q \cdot I)_c = 0.224$ から $(q \cdot I)_c = 0.034 \{\Psi(\theta)\}^{3/2}$ 程度に変化する。ただし、降雨流では雨滴衝撃により移動限界が非常に減少することを考慮し、急斜面上の降雨流の場合には $\Psi(\theta)$ の効果を陽に式(4)中に入れず、本報告では、 $A_0 = K_0 / \phi^{5/3}$ = 一定として土砂輸送量を推定する。

式(4)は、単一の土地利用、被覆状況、対策工も等高線に沿って施工されるような単純な流域斜面を想定した場合の土砂輸送量式であり、実際の流域面に適用する場合には、土地利用状況等を勘案して次のように拡張される。

$$Q_B = \sum_i q_{Bi} \cdot L_{wi} \quad (5)$$

$$= \sum_i \varepsilon_i \cdot \pi_i \cdot \gamma_i \cdot A_0 \cdot \{(q \cdot I)_i - (q \cdot I)_c\}_i^{5/3} \cdot L_i$$

ここで、 Q_B = 流域面末端での無次元侵食量、あるいは河道に流入する土砂、 L_{wi} = 流出斜面幅、下付き添え字 i = 個々の土地利用・土地被覆、 ε = 植生被覆による減少率、 γ = 対策工による減少率、 π = 耕作形態による減少率である。

式(4)は室内および野外実験値での検証は行われているものの⁷⁾、流域規模での適用性の検討は行われていない。ここでは、木本ら⁹⁾が、長江支流の貢水流域に設置している大獲(Dahou)試験地(9000m²)での流出土砂観測結果に適用する。なお、Peltier の分類では最も発生し易い領域となる(図-4)。ここでの表面流出は Horton 型で、斜面角度 $\theta = 37.5^\circ$ と急勾配で、式(4)の検証には適当と判断される。図-5 より $A_0 = 1.01$ とした計算値は全般的に観測値に比べて小さいものの、流出土砂量のオーダーは提案した式で説明しえると判断できる。

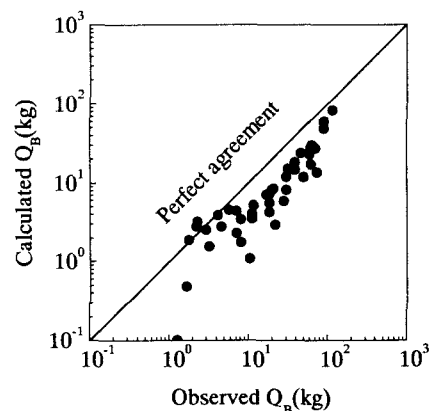


図-5 表面流モデルの検証

(3) 河岸堆積土砂の pick-up モデル

土砂の生産源・供給源として、芦田・江頭ら¹⁰⁾は河岸侵食の重要性を指摘しており、流域からの総流出土砂量は斜面由来の生産量と河岸由来の生産量との和となる。従って、河岸堆積土砂表面の侵食・pick-up による土砂流出量推定の検討が必要となる。芦田・江頭らが想定したような土粒子凝集体としての粘着性土砂が河岸に十分な厚さで堆積している状況を設定する。このとき、ある規模以上の洪水流によって単位長さ当たり、河岸堆積土砂表面より pick-up される土砂量 q_B は次式で表される。

$$q_B = A_f d \cdot p_s \cdot \Delta B \quad (6)$$

ここで、 A_f =土砂の1次元形状係数(球形粒子なら $A_f=1$)、 ΔB =河道単位長さ当たりの河岸堆積土砂幅、 p_s =粘着性土砂の単位時間、面積当たりの pick-up rate で、次式で与えられる¹¹⁾。

$$p_s = p_s \sqrt{d / \{(\sigma / \rho - 1)g\}} = F_0 \cdot \sqrt{\tau_c} \cdot \{1 - (k\tau_{cc} / \tau_c)\}^{m_0} \quad (7)$$

ここで、 F_0 : 実験定数 ($\approx 1 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-3}$ 程度)、 τ_{cc} =粘着性土砂の無次元掃流力、 $k=0.4$ 、 $m_0=3$ である。

4. 表面土壌侵食モデルの嘉陵江源流域への適用

(1) 降雨流出モデルの適用

著者らは、長江流域での流出過程を模擬するための流出水文モデルとして Stanford Watershed Model を採用し、1987, 1988 年を対象に良好な再現計算結果を得ている¹²⁾。このモデルは長期・短期の流出過程に適用可能で表面侵食モデルにおいて重要な表面流生起が表層土壌水分の長期変化と kinematic wave 理論に基づき評価されており、表面侵食モデルとの結合上、望ましい構造となっている。

1987 年を対象に Stanford Watershed Model を嘉陵江に適用し、対象 4 流域において河道に流入する表面流、河川流量の再現計算を行った。数値標高データ(DEM)は 1km の解像度 Global Land One-km Base Elevation (GLOBE) Project のデータを用いた¹³⁾。数値河道網は中国科学院地理資源研究所が 5 万分の 1 および 10 万分の 1 の地形図より作成したものをを用いた。土地被覆データセットは、中国科学院遙感応用研究所が Landsat TM データを用いて作成した 1990 年代初期のものをを用いた。なお、被覆状況は農地、森林、低木、高密度草地、低密度草地の 5 分類とした。入力用の気象データとして、全球スケールの水文気象データセット、ISLSCP Initiative I CD-ROM Set の $1^\circ \times 1^\circ$ の 6 時間降水量、気温、風速、露点温度、短波放射量の各グリッドデータを、サブ集水域が各グリッドに占める面積割合からサブ集水域単位の分布値へ変換した。さらに、計算時間ステップを 1 時間とし、各気象データについて、降水量は均等分割、その他は線形補間により 1 時間データに換算して適用した。また、モデルパラメー

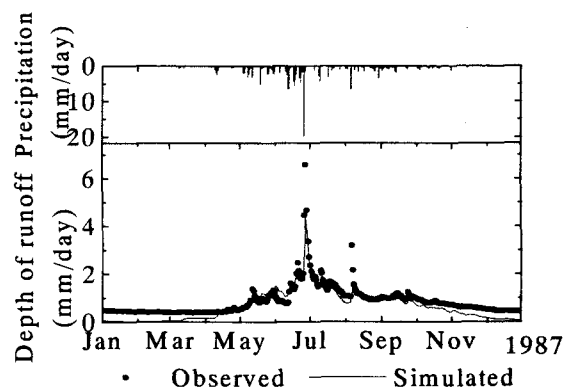


図-6 降雨流出モデルの検証 (流域 II, St.2)

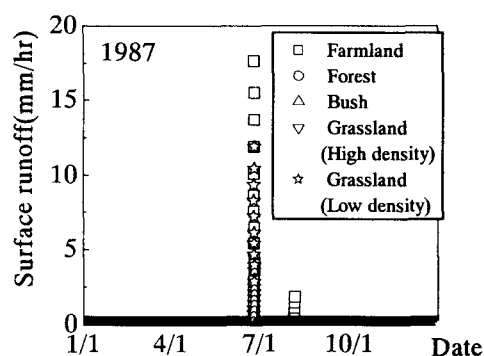


図-7 表面流の発生状況の計算結果 (流域 II)

タの初期設定値の影響を除くため、この 2 年間の気象データを 2 回繰り返して与えた後、本計算を行った。

図-6, 7 は、流域 II における河川流量および表面流量の計算結果例である。土壌表層の浸透能が高く、短期間の集中的な降雨時以外、表面流は発生しにくいことを示しており、長江上流の流域斜面での土砂生産は降雨期に集中するという特徴に対応した結果となっている。

(2) 表面土壌侵食モデルのパラメータ

1987 年の嘉陵江源流域での土砂生産量推定に用いられた 3 種のモデル中のパラメータとしては次の値を用いた。

土地利用等による減少率評価に当たっては、植生被覆効果のみを考慮することとし、 $\gamma=1$ 、 $\pi=1$ 、畑地では $\varepsilon=0.3$ 、森林では $\varepsilon=0.005$ 、低木では $\varepsilon=0.01$ 、高密度草地では $\varepsilon=0.005$ 、低密度草地では $\varepsilon=0.01$ とした^{14),15)}。代表粒子径は $d=0.0025(\text{m})$ とした。

日下式(1)に式(5)と同様に植生被覆効果を考慮すると、 $Q_B = \Sigma a \cdot \varepsilon_i K_i (L_i / 19.7)^{1.2} \cdot (\sin \theta_i)^{0.7} \cdot L_{wi} \cdot f \cdot r$ とし、被覆毎に生産量を計算した。流出係数は、Higgit ら¹⁶⁾の嘉陵江流域での観測結果より、 $f=0.5$ (一定値)とした。

unit stream power 形式の表面流侵食式では、 $K_0=10$ 、 $\phi=4$ とし $A_0=K_0 / \phi^{5/3}=1.01$ とした。単位幅流量 q は流出モデルからの計算値を与えた。

河岸堆積土砂の pick-up モデルでは、含水比が低い土粒

子凝集体を仮定し、 $F_0=8 \times 10^{-3}$ とした。 $(qJ_s)_c$ は流量と浮遊土砂量の観測結果にもとづき、 $Q_B=10(\text{kg/s})$ 程度に相当する流量を限界流量とすることで概算した。無次元限界掃流力表示で、流域Ⅰでは $\tau_{cc}=0.17$ 、流域Ⅱでは $\tau_{cc}=0.145$ 、流域Ⅲでは $\tau_{cc}=0.0023$ 、流域Ⅳでは $\tau_{cc}=0.080$ であった。河岸に土砂は最大幅と最小幅の半分程度の領域に堆積すると仮定し、 $\Delta B=(B_{max}-B_{min})/2$ とした。各流域の河道長、河道勾配、河道最大・最小幅は表-1 に示す値を用いた。

(3) 表面土壌侵食モデルの適用結果

提案したモデルでは河道流入土砂量は流域斜面と河岸に由来する生産量の和として推定され、USLE 形式の日下モデルでは斜面由来の土砂が流入推定値となる。

図-8は嘉陵江の対象4流域の1987年における年総流出土砂量の観測値と、表面流侵食モデルと河岸土砂侵食モデル、および日下モデルによる総生産量の計算値と生産源毎の計算値とを比較したものである。図-8は、侵食外力を降雨流と河川流、雨滴侵食を主要外力とする何れのモデルでも、年単位の生産量推定は可能であることを示している。ただし、提案したモデルによる計算値は観測値より大きく、流域斜面と河岸に由来する生産量の推定値を見ると、それぞれが観測値と同一のオーダーであり、流域斜面で生産された土砂が河道に流入する過程において、河道付近に向かって斜面勾配が減少し堆積・貯留、あるいは河岸土砂への供給機構等の導入の必要性が示唆される。一方、雨滴侵食を主外力とする日下モデルでは、流出土砂量の計算結果は表面流発生状況を表現すると考えられる流出係数 f の評価に大きく依存し、その結果、特に低平な流域Ⅳで観測結果との差が大きくなったものと推測される。こうした点を回避するために、降雨流出モデルとの結合が必要と考えられる。

次に、侵食外力と土砂生産量に対応する表面侵食型モデルの適用範囲検討のため、mass movement 発生領域図において、発生可能性が小さい流域Ⅱと大きい流域Ⅳの計算結果を比較した。

図-9(a)、(b)は、月別流出土砂の観測値と計算値とを比較したものである。斜面由来の土砂生産量の推定においては、表面流を外力とするモデルでは表面流を発生させる強い降雨が集中する雨期にのみ土砂生産が行われるのに対し、雨滴侵食モデルでは年間を通じて生産が行われることになる。しかしながら、両モデルとも観測値の月別傾向を十分には説明しているとはいえず、年間を通じての変動を再現するためには、生産源としての河岸の取り扱いが重要であることを示している。河岸堆積土砂侵食モデルは、年間の月別変動を概ね再現しており、特に春～夏の増加傾向の再現性は他のモデルより高い。しかし、秋期降雨以降の観測値の逡減を十分に表現できておらず、この原因の検討のため、日単位の流出土砂の観測値と計算値とを比較したものが図-10(a)、(b)である。図-10から、山地流域Ⅱでは夏期降雨に対しても変動パ

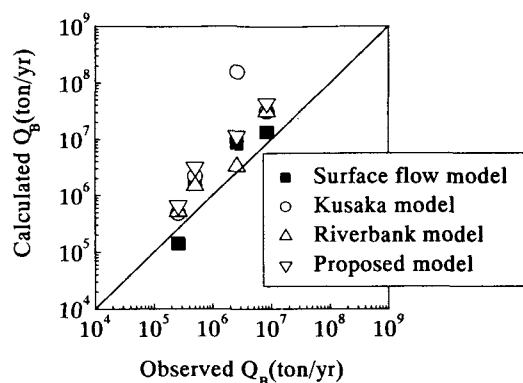
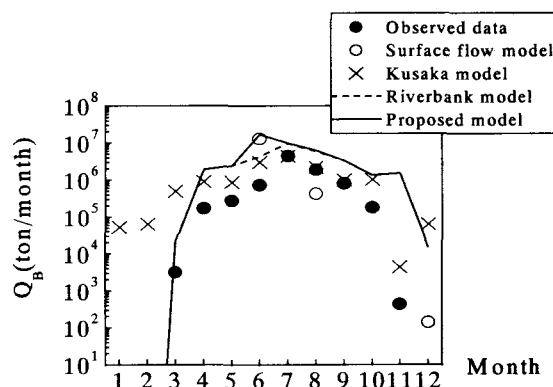
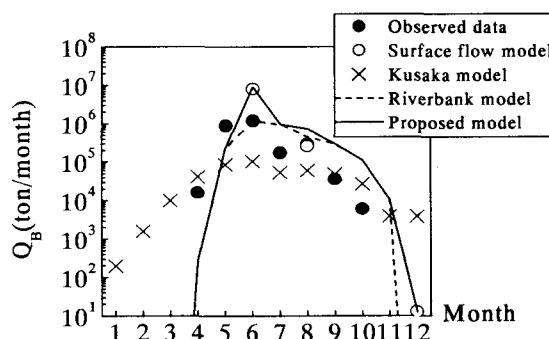


図-8 表面侵食モデルの検証
(年間総流出土砂量 1987年)



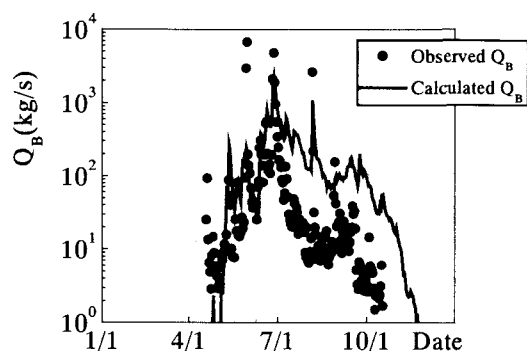
(a) 流出土砂量の月変動 (流域Ⅱ, St.2)



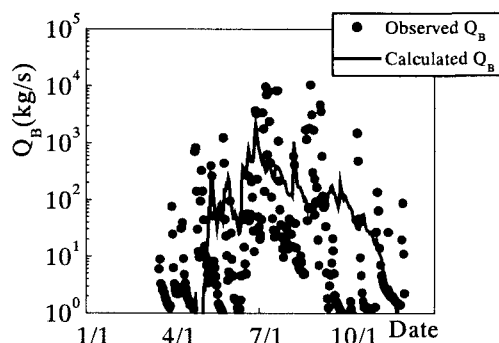
(b) 流出土砂量の月変動 (流域Ⅳ, St.4)

図-9 表面侵食モデルの検証
(月別流出土砂量の変化 1987年)

ターンは再現できているものの、量的に顕著な差が認められる。一方、流域Ⅳでは夏期降雨以後、観測値と計算値の変化に位相のズレが認められる。これは、河岸堆積土砂侵食モデルでは河岸に十分な土砂が存在し、輸送外力(掃流力)に対応した量が pick-up されることを仮定していることによるものと考えられる。すなわち、流域Ⅱについては、表面流侵食モデルが示すように夏期降雨による大量の生産土砂は河岸域への到達時間だけ生産と供給



流出土砂量の日変動 (流域Ⅱ, St.2)



(b) 流出土砂量の日変動 (流域Ⅳ, St.4)

図-10 河岸堆積土砂 pick-up モデルの検証

との間に時間的な遅れが生じるため、夏期以降の降雨では十分な堆積土砂というモデルの仮定が崩れる。一方、この時期に生産された土砂は夏期以降の降雨により河川域に供給され、モデルの仮定が成立すると推測される。

一方、流域Ⅳは図-4に示すように mass movement の可能性が高い流域で、夏期に集中する降雨のため表層土壌が飽和、不安定化し、比較的強度の弱い事後降雨時に崩壊し、河岸に到達、pick-up されるものと推測される。すなわち、観測値と計算値の位相のズレは非定常性の強い土砂生産形態に起因し、外力-輸送量関係の一意性に基づく表面侵食モデルでは再現が難しいと考えられる。

以上の計算結果から、嘉陵江源流域では mass movement の発生領域区分に関わらず、表面侵食モデルで年単位および月単位では、流出土砂量の推定はある程度可能と考えられる。ただし、月単位の推定精度の向上と日単位の変動までの再現のためには、1) 斜面生産土砂の河岸に至るまでの連続性と時間的な遅れを考慮した斜面からの供給タイミングについてのモデル化、2) 非定常性が強い土砂生産を如何に取り込むか、の検討が必要と考えられる。

5. おわりに

本研究では、三峡ダム湖に流入する土砂量推定を最終目的として、主要な生産源である嘉陵江流域の生産量推定モデルの検討を行った。本研究では、適用が容易な表

面侵食形式のモデルに基づく検討を行い、年・月単位の推定への可能性は認められたが、今後は流砂系としての連続性を考慮したモデル化の必要性が浮き彫りにされた。

参考文献

- 1) 向治安・喻学山・劉載生・陳時岩：長江土砂の来源、輸送と堆積特性についての分析、第13回日中河川会議論文集、pp.211-228, 1998.
- 2) 虫明巧臣：モンスーンアジアにおける総合的水管理/流域管理と日本の経験の発信、水循環シンポジウム講演集、pp.5-12, 2003.
- 3) Peltier, L.: The geographical cycle in periglacial regions, *Ann. Assoc. Amer. Geogr.* 40., pp.291, 1950.
- 4) 砂防学会監修：砂防学講座第3巻、斜面の土砂移動現象、pp.86, 1992.
- 5) 日下達朗・藤田則之：土壌流出量推算法の現地圃場への適用性について、農業土木学論文集第128号、pp.67-74, 1987.
- 6) 木本秋津・内田太郎・水山高久・李昌華：負荷花崗岩荒廃山地における流出土砂量の算定、砂防学会誌、Vol.52, No.4, pp.13-18, 1999.
- 7) 村上正吾・林誠二・渡辺正孝：降雨による農地斜面からの土壌流出モデルに関する基礎的検討、水工学論文集第44巻、pp.699-704, 1999.
- 8) 辻本哲郎・細川迭男：急勾配水路における礫の境界掃流力と流砂量、土木学会論文集、No.411/II-12, pp.127-134, 1989.
- 9) 中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理、新体系土木工学、技報堂出版、pp.125-127, 1986.
- 10) 芦田和男・江頭進治・加本実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1)、京都大学防災研究所、第25号B-2, pp.349-361, 1982.
- 11) 村上正吾・林誠二・渡辺正孝・亀山哲：凍結融解現象を考慮した積雪寒冷地における土砂動態のモデル化、水工学論文集第46巻、pp.653-653, 2002.
- 12) Hayashi, S., Murakami, S., Watanabe, S. and Xu Bao-Hua : HSPF simulation of runoff and sediment loads in the upper Changjiang river basin, China, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 2003(in press).
- 13) GLOBE Task Team.: The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0., National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 1999.
- 14) Pham, T. N., Yang, D., Kanae, S., Oki, T. and K. Mushiale : Application of RUSLE model on global soil erosion estimate, 水工学論文集第45巻、pp.811-816, 2001.
- 15) 北原 曜：植生の表面侵食防止機能、砂防学会誌、Vol.54, No.5, pp.92-101, 2002.
- 16) Higgitt, D. L. and X. X. Lu : Sediment Delivery to the three gorges: 1. Catchment controls, *Geomorphology*, 41, pp.143-156, 2001.

(2003. 9. 30 受付)