

河川流域内農林地域における 土砂動態モデルに関する基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON MODELLING OF SEDIMENT ROUTING THROUGH FOREST AND AGRICULTURAL AREA IN WATERSHED

村上正吾¹・林誠二²・亀山哲³・渡辺正孝⁴

Shogo MURAKAMI, Seiji HAYASHI, Satoshi KAMEYAMA, Masataka WATANABE

¹正会員 工博 国立環境研究所室長 水土壤圏環境部 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 国立環境研究所主任研究員 水土壤圏環境部 (同上)

³正会員 農博 国立環境研究所研究員 水土壤圏環境部 (同上)

⁴正会員 Ph.D 国立環境研究所部長 水土壤圏環境部 (同上)

In order to preserve and manage the water environment and landscape in the watershed, the sediment control from upstream to downstream is one of indispensable managements. The watershed consists of river network and various kind of land use. In this paper we propose the numerical model to predict the sediment runoff in forest and agricultural area due to rainfall runoff from the viewpoint of constructing the future sediment routing model in the whole watershed.

By applying the proposed model to the Kutyoro river catchment flowing into Kushiro Mire, we explain that the stream wise variation of watershed land use has a significant influence on both the sediment yield and the concentration of suspended solids through the watershed.

Key Words : *sediment routing, sediment yield in forest and agricultural area, riverbank erosion*

1. まえがき

近年, 土砂災害防止, 河川環境整備, 海岸保全のために, 流域源頭から海岸までを一体として定義された『流砂系』の総合的な管理の必要性が唱えられ, これに対応した形で, 上流域山地河道部での土砂動態を予測する土砂水理学に基づく機構モデル¹⁾, 流域全体に対するモデル²⁾が提案されている. 日本の場合, 上流域から中流域への移行に伴い, 中間山地帯の農林地域が出現する. こうした地域での土砂生産は上流山地域での土砂生産と相俟って, より下流域での土砂問題を引き起こす可能性がある.

本研究で対象とする釧路湿原に流入する久著呂川流域では1960年代後半から80年代前半にかけ, 流域内農業開発が進められた. 上流域では伐採が容易な領域での伐

採の結果, パッチ状の森林域が出現した. 中流域では森林伐採後に進められた農地の保全と洪水災害防止のため, 部分的な河道改修が行われた. 下流域では湿原を埋め立てるとともに農業排水路網整備, 蛇行河道の固定化と直線化が進められた. その結果, 森林域の減少と農地拡大とが相俟って増大した流出土砂は, 疎通能力の向上した河川を通じて釧路湿原に流入, 氾濫堆積し, 湿原の乾燥化という問題を引き起こしている³⁾. 本研究では, 湿原管理にとって必須となる久著呂川流域での土砂動態予測と『流砂系』における河川流域内農林地域での土砂動態予測のため, 土砂流出モデルの構築を行い, 提案したモデルに基づき, 久著呂川流域での土地利用の流下方向変化にともなう土砂生産量変化についての検討を行った.

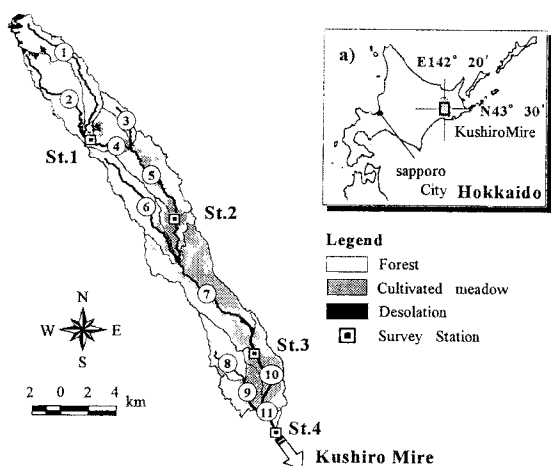


図-1 久著呂川流域概要図

2. 久著呂川流域の概要

(1) 久著呂川流域の概要

対象とした久著呂川の流域図および植生状況を図-1に示す。久著呂川は阿寒湖周辺の山地を源流とし、丘陵帯をぬって河岸段丘を形成、下流域の高層湿地帯を通過、釧路湿原に流入する。その流域面積は約123km²、主流路長は約48km、総流路長は約95kmである。流域の表層地質は、雌阿寒岳の火山灰堆積物より成る未熟黒ボク土である。図中のSt.1～St.4は後述する観測点で、釧路湿原への流入部からの距離はそれぞれ約30、20、5、0 kmである。図-2に1995年と1965年（本川のみ）の縦断面図を示す。流域内での農業開発は主に現在の縦断面距離30 km付近（St.1）から下流域で行われた。図は、開発に伴う河川改修の対象区間で区間長は2/3程度に短縮化、勾配は約1.5倍増加したことを示している。図-3に河床砂の中央粒径 d_{50} と幾何標準偏差 σ_g の調査結果を示す。10km付近の粒径の不連続については現在検討中であり、18km付近に設置された落差工を含めてこの区間での水理構造物との関連性の検討が今後必要であろう。なお、10kmより下流は1995年、15～20km区間は2000年の調査結果である。図-4は流域内土地利用割合の流下方向変化を示したもので、図-1の植生図とあわせ、下流に向かい森林域と荒れ地（主に森林伐採地）の割合が減少するのに伴い、農地（主に牧草地）の割合が増加することがわかる。また、河道の捷水路工事、護岸施工等の改修は主に10kmより下流で行われた。

(2) 久著呂川の土砂流出状況

図-5は18kmより下流の5断面での河道断面面積の変化を示しており、図より18km付近の河床高変化は上流からの土砂流入の影響が大きい。18km～6kmの区間は洗掘傾向、これより下流では堆積傾向にあることが分かる。図

-4より18kmより30kmまでは農地開発の影響とより上流を含む自然河川特有の構造が拮抗する河道区間と判断される。

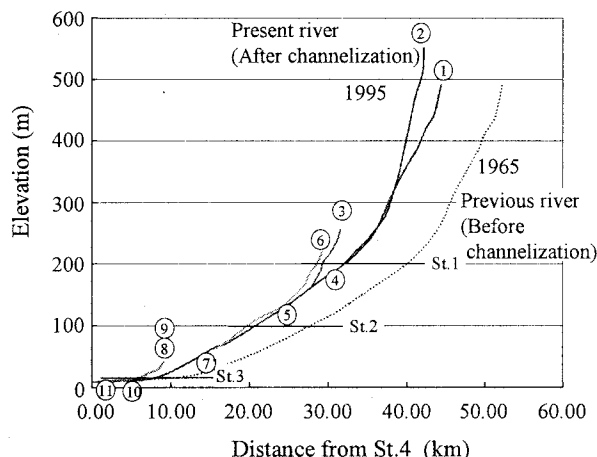


図-2 久著呂川水系縦断面図

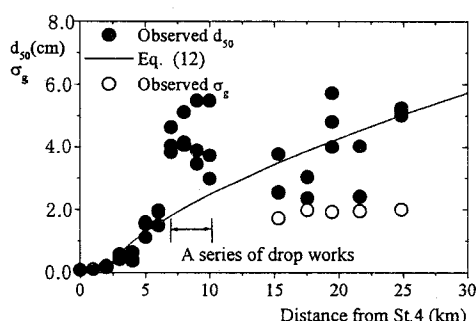


図-3 中央粒径の縦断方向変化

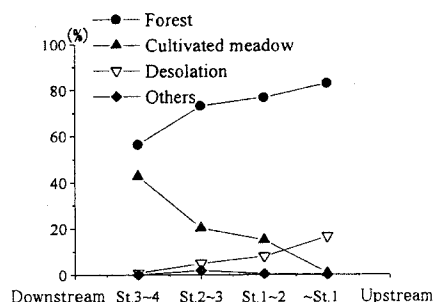


図-4 土地利用割合の縦断方向変化

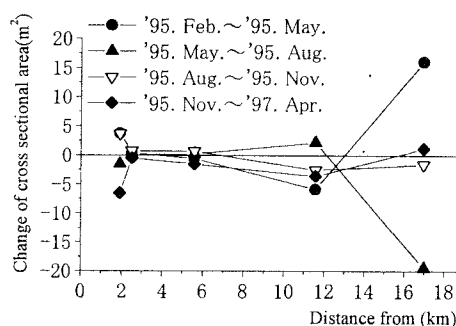


図-5 河床高の縦断方向の変化傾向

著者の1人は、久著呂川の土砂流出と土地利用との関係の検討のため^{9,7)}、1995年9月より1996年8月まで1年間、久著呂川に4箇所の定点観測点を設け、各観測点において水位・濁度の測定を行った。浮遊砂とwash loadの分離は、直接採水した濁水から懸濁有機物を除去した懸濁無機物を篩い、106 μ m以下をwash load、106 μ m以上2mm以下を浮遊砂とした。両者の比率とデジタル濁度計の濃度値との関係の校正曲線を出水時毎に求め、水位-流量曲線と合わせ、浮遊砂とwash load輸送量の時系列を推定した。

St.1は流域開発のほぼ最上流地点に位置し、これより上流では開発の影響は少なく、土砂生産の面源としては伐採域が考えられた。また、30km前後の踏査結果より、1/100程度より急勾配の河道では側岸侵食が土砂生産場となっている可能性が認められた。St.1~2は、農地開発は進んでいるものの、護岸の施工区間は短く、河岸侵食が認められた。また、開発農地における排水路等も下流地域に比較して未整備で、農地由来の流出土砂の川への流入可能性が認められた区間である。St.2~3は区間中間地点より下流部で捷水路工事、護岸施工が行われた。それよりやや上流の20~13km区間では側岸侵食が激しい区間が存在した。農地においても圃場整備が進む地域に移行する。St.3~4は河道改修および農地の圃場・排水路が最も整備された地域である。

表-1は1995年9月27日~9月30日にかけての降雨時(図-6)の各観測点での浮遊砂量 Q_s 、wash load量 Q_{ws} (重量ton表示)と区間での収支(ΔQ_s 、 ΔQ_{ws})を表しており、wash loadの生産量が下流に向かい増加することを示している。

表-1 9月末降雨による濁度の観測結果(単位: ton)

	Q_{ws}	ΔQ_{ws}	Q_s	ΔQ_s
St.1	350	430	480	-230
St.2	780	680	250	300
St.3	1460	-340	650	-490
St.4	1120		160	

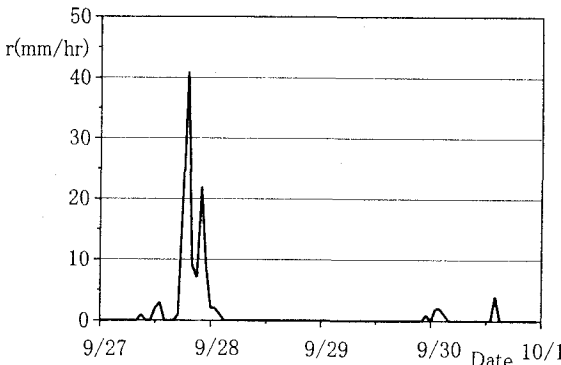


図-6 濁度観測時の降雨時系列

この生産源に関しての従来の調査によると、湿原に流入するwash loadの3割程度が農地由来⁸⁾とされているが、流域内での生産源と考えられている伐採地、農地および河岸の寄与率については不明で、久著呂川における土砂管理上、この検討が必要とされている。本研究では、土砂生産場を上記の3領域と特定し、久著呂川における3領域の流下方向の土砂生産への寄与について検討する。

3. 農林地域からの土壌流出モデル

(1) 流域面での土砂生産モデル

著者らは、対象流域の環境情報のデータベースを前提として、流域面での(i)降雨流出モデル、(ii)土砂生産場から河道への土砂輸送モデル、(iii)河川流モデル、(iv)河道での流砂モデルの4つのサブモデルより構成される土砂流出モデル⁹⁾を提案している。そのモデル中で考慮されていない伐採地からの土壌流出量 q_v は、伐採後の林床草本の残滓を植生被覆と見ること、農地からの土壌流出量と同じ形式で表示できる。

$$q_v = \varepsilon \cdot \gamma \cdot A_0 \{q \cdot I - (q \cdot I)_c\}^m \quad (1)$$

ここで、 $q_v = q_v / \{(\sigma / \rho - 1)gd^3\}^{0.5}$ 、 $q \cdot I = q / \{(\sigma / \rho - 1)gd^3\}^{0.5} \cdot I / (\sigma / \rho - 1)$ であり、 q : 斜面下端での表面流の単位幅流量、 g : 重力加速度、 σ : 土の密度、 ρ : 水の密度、 I : 斜面勾配で、黒ボク土に対しては、 $A_0=10$ 、 $m=5/3$ 、 $(q \cdot I)_c=0.008$ が適当である。また、 ε : 作物による被覆率、 γ : 保全対策による通減率であり、被覆率 ε は植え付け後経過日数 t の関数 $\varepsilon = \varepsilon_0 / \{1 + \exp(5.0 - E_0 t)\}$ で近似される。ここで、 ε_0 : 最終被覆率(植物により変化)、 E_0 : 成長時間に関わる定数で $E_0=0.20 \sim 0.32$ 程度である。

(2) 側岸侵食量の評価モデル

側岸侵食によって、河川流へ供給されるwash load q_{ws} は、側岸侵食量 q_{bp} と微細粒子の割合 p_f との積 $q_{ws} = p_f \cdot q_{bp}$ で表現される。

側岸上の潤辺方向掃流砂量分布 q_{bp} は次のように表される。

$$q_{bp} = q_B \tan \phi \quad (2)$$

ここで、 q_B : 河道中央部での掃流砂量、 ϕ は砂粒子の運動方向角で、底面付近での流れの偏倚が無いとき、

$$\tan \phi = -\Xi / \sqrt{\tau_*} \cdot \partial z_b / \partial y \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $\Xi = \{(2A_2 / (C_D A_3))^{0.5}$ 、 A_2 、 A_3 : 砂の2.3次元の形状係数、 C_D : 抗力係数、 z_b : 河床高、 y : 横断方向軸である¹⁰⁾。

側岸上の横断方向平均流砂量と河道中央部での掃流砂量との比は、適当な河岸形状を決めると、式(3)を潤辺方向に積分、平均化することで評価されるが、ここでは側岸部での平均底面せん断応力を与える位置での $\tan \phi$ で

代表させることとした。側岸横断形状¹⁰⁾および底面せん断応力分布を次式で仮定した。

$$z_b = H \cdot \exp(-y/\Delta) \quad (4)$$

$$\tau_b = \tau_{b0} \cdot \partial z_b / \partial y \cdot (1 - H/y) \quad (5)$$

ここで、 H ：水路中央部水深、 Δ ：形状係数、 τ_{b0} ：水路中央部での底面せん断応力である。

水際での砂礫の静止摩擦角を 45° と仮定し、 $H/\Delta=1.0$ ，さらに側岸幅 $B_s=B_0=4\Delta$ で与えると側岸での平均 $\bar{\tau}_b$ は、

$$\bar{\tau}_b = 0.67\tau_{b0} \quad (6)$$

で評価され、適当な河道中央部の掃流砂量式が与えられと側岸侵食量 q_{bp0} が評価される。ただし、平時の山地河道ではarmor coatが形成され、実際に側岸侵食が活発化するのはarmor coatの破壊後であり、次のように補正するのが適当とされている¹²⁾。

$$\begin{aligned} \bar{q}_{Bp} &= 0 & ; & \quad h \leq h_d \\ \bar{q}_{Bp} &= (h - h_d) / h \cdot \bar{q}_{Bp0} & ; & \quad h > h_d \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 h_d ：armor coatの破壊水深であり、混合砂礫の限界掃流力に関するEgiazaroff式を用いると

$$h_c = \left\{ \ln 19 / \ln (19d_{90} / d_m) \right\}^2 \tau_{cm} \left\{ (\sigma / \rho - 1) d_{90} / i_b \right\} \quad (8)$$

与えられる。ここで、 d_{90} ：90%粒径、 τ_{cm} ：平均粒径の無次元限界掃流力(=0.05)、 i_b ：河道勾配である。

(3) 河道特性量の推定

久著呂川流域を含めて中小河川の場合、詳細な河道特性量が既知情報として与えられることは少なく、こうした場合、数値標高データに基づいて構築される擬河道網より評価される河道勾配と、流量と水系内の既知データを組み合わせて、河道幅 B 、側岸幅 B_s 、河道中央部での最大水深 H 、 d_{50} ：50%粒径、混合砂の幾何標準偏差 σ_g を推定する必要がある、ここでは以下の推定式を用いた。

河道の形状特性スケールの推定については、次の藤田の式(m-s単位)を用いた¹³⁾。

$$B = 0.523d_{50}^{-12/32} Q^{9/16} \quad (9)$$

$$H = 0.239d_{50}^{1/16} Q^{3/8} \quad (10)$$

また、河岸幅は、式(16)の誘導の際の仮定と藤田の側岸形状の検討結果¹³⁾をもとに、

$$B_s = 4H \quad (11)$$

とした。ここで、流量 Q は、対象流域最下流端の流量を Q_{max} 、その流域面積を A とし、各河道の流入点における流域面積を A' として、 $Q = A'/A Q_{max}$ として与えた。

中央粒径 d_{50} は次の物部式で河道勾配と関係付けた^{3,14)}。

$$d_{50} = d_0 (i_b / i_{b0})^{2/3} \quad (12)$$

ここで、 d_0 、 i_{b0} は中央粒径、勾配の既知点での値である。

幾何標準偏差については実測値を内挿あるいは外挿することとし、対数正規分布型粒度分布を仮定することで、次式からarmor coatの破壊水深を規定する90%粒径 d_{90} を評価した。

$$d_{90} / d_m = \sigma_g^{1.64} d_{50} / \exp(\ln d_{50} + \ln^2 \sigma_g / 2) \quad (13)$$

(4) 河道内土砂輸送

河道内でのbed material loadの推定式としては、対象とする久著呂川では浮遊砂輸送も活発であるため、掃流砂量 q_B と浮遊砂量 q_s が分離された形式で与えられるLaursen¹⁵⁾の全流砂量式 q_T を用い、河道における河床高変化 Δz を次式で与えた。

$$\Delta z = -(1 - \rho_0)(\Delta t / \Delta x) \Delta q_T \quad (14)$$

ここで、 ρ_0 ：砂の空隙率である。従って、式(2)の側岸侵食量を与える河道部掃流砂量もLaursen式で評価される。

wash loadの流下過程については、河床構成砂礫との交換がないとの定義に従い、河道区間内での濃度変化を与える江頭らのモデルを採用する³⁾。

$$\partial c / \partial t = \{ Q_{SS} + (cQ)_{in} - (cQ)_{out} \} / (AL_R) \quad (15)$$

ここで、 c ：wash loadの濃度、 Q ：河川流量、 A ：流水断面積、 L_R ：河道長、 Q_{SS} ：単位時間当たりの流域斜面から河道への土砂供給量であり、ここでは、農地、伐採地、河岸よりの供給量の和として与えられる。

4. 土砂生産・流出モデルの適用

(1) 流域・河道特性量の推定

本節では、著者らの提案するモデルに基づいて、1995年9月27日～9月30日にかけての降雨に対する久著呂川流域の微細土砂の生産量の推定を試みる。

モデルの適用に当たっては、国土地理院発行の250mメッシュ数値標高データに基づき擬河道網を構築し、図-1に示す11河道区間に対応する単位流域を決定、国土地理院発行の土地利用データをもとに、GISソフト(Arc/Info)を用いて、森林、農地、荒れ地、その他の4範疇の流域斜面の勾配、面積、斜面長を計算した。斜面勾配の土砂流出量に及ぼす影響が大きいため、斜面を斜面角度 6° より急な斜面と緩い斜面の2つに分けた。気象データは気象庁のAMeDAS、地上気象観測原簿データおよび北海道開発局釧路開発建設部から提供された降水量データである。降雨流出モデルとしては、斜面流出モデルにStanford Watershed Modelを、河川内での洪水流は拡散波モデルをで表現した。この組み合わせの妥当性については、著者らによって確認されている⁹⁾。

次に、数値標高データから評価される河道勾配と既知情報から推定される河道特性量の推定法についての検討

を行う。図-7は、無次元側岸形状の推定式(4)の適用性を示した右岸の例で、久著呂川の場合、 $H/\Delta=0.5\sim0.7$ 程度が適当と判断される。図-8は河道幅の推定式(9)と観測値、図-9は水路中央最大水深の推定式(10)と観測値との対応を示したものである。この程度の乖離が最終的な土砂生産量評価にどの程度の影響を及ぼすかは不明であるが、これについては今後の検討課題としたい。なお、各河道に与える流量 Q を評価するための Q_{max} は下久著呂流量観測点(St.3)での年最大流量とし、 $Q_{max}=100(m^3/s)$ で与えた。中央粒径 d_{50} の推定式(12)の適用に当たって、 d_b 、 i_b は25km地点での観測値を与えた結果は、図-3より、落差工設置区間を除いてほぼ妥当と判断された。

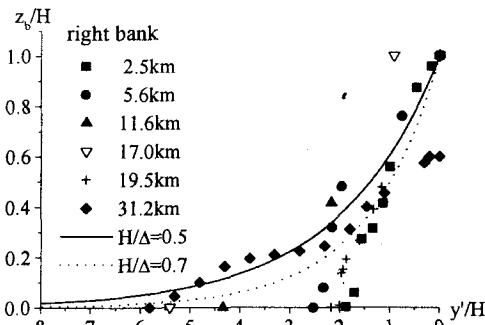


図-7 久著呂川河岸形状の無次元表示

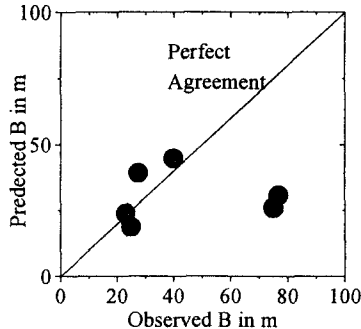


図-8 河道幅推定式の適合性

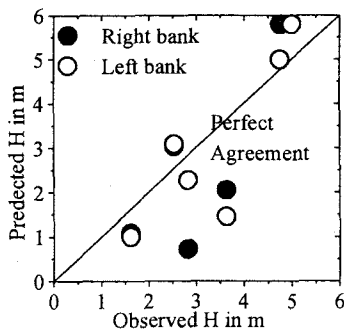


図-9 中央水深推定式の適合性

(2) 土砂生産・流出モデルの適用結果

モデルの適用に当たっては次の値を採用した。農地黒

ボク土は中央粒径 $d_{50}=0.02(cm)$ の一樣砂とし⁷⁾、伐採地も同様とした。牧草による被覆率は秋期播種後約30日経過後で、 $\epsilon=0.1$ とした。伐採地林床草本は密であると仮定、 $\epsilon=0.01$ とした。中村らの調査結果⁷⁾に基づき河岸土砂に含まれる微細粒子の割合は $p_f=0.14$ で、水系内で一定とした。中央粒径は各河道の平均勾配より式(12)で推定、河道区間内で一定とした。armor coatの破壊水深の評価に必要な幾何標準偏差は、図-3から上流域においても大きな変化はないと仮定し、 $\sigma_g=2$ で一定とした。また、河岸侵食調査の結果に基づき、河道番号1,2,3,4,7の侵食可能性のある区間長を3,3,2,1,6,1(km)とした。最上流端境界条件として、bed material loadの流入量は平衡流砂量とし、wash loadの流入量は零とした。

農耕地からの土壌流出量に大きな影響を与える圃場の土壌保全対策率 γ の評価は難しく、ここでは排水路、護岸整備率の高い地域は $\gamma=0.1$ 、低い地域は $\gamma=0$ とした。

これらの数値を仮定して計算されたSt.1でのwash loadの濃度の時間変化を図-10に示す。計算結果は、急激に立ち上がり、急激に減少するが、これは特に河岸侵食がarmor coatの破壊時、短時間に起こるためで、他の成分は低濃度で継続するものと考えられる。

図-11は、9月27日～9月30日の降雨・出水による久著呂川での、伐採地・農地・河岸の3領域からの土砂生産量と各河道区間での平均河床高変化を示している。計算された洗掘・堆積の縦断方向の傾向は、図-5の結果と類似しているものと判断される。また、計算結果によると、農地由来の微細土砂量は全微細土砂量の約40%を占め、これは宮地らが観測値をもとに推定した20～30%⁸⁾の2倍程度である。土地利用との関連では、上流域では伐採地と河岸が生産源になり、農地面積の増加とともに、農地が主な生産源になるものの、保全対策率の増加とともに減少する。また、河道の捷水路化・落差工設置の改修区間では、中流域ではあるものの河岸が土砂の生産源となっている。これらの結果は種々の仮定に基づいており、得られた結果は、一種の土砂生産ポテンシャルを表現しているものと判断している。

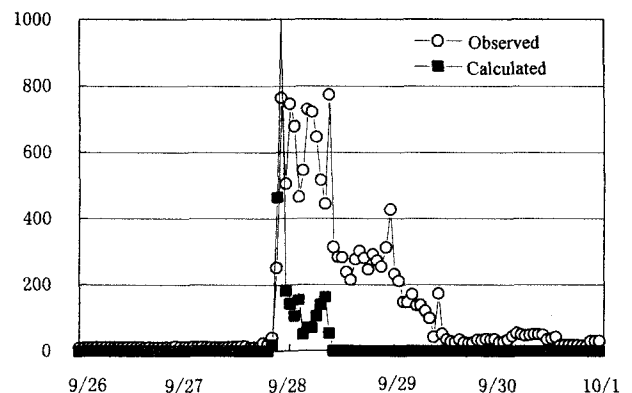


図-10 St.1における wash load 濃度の計算例

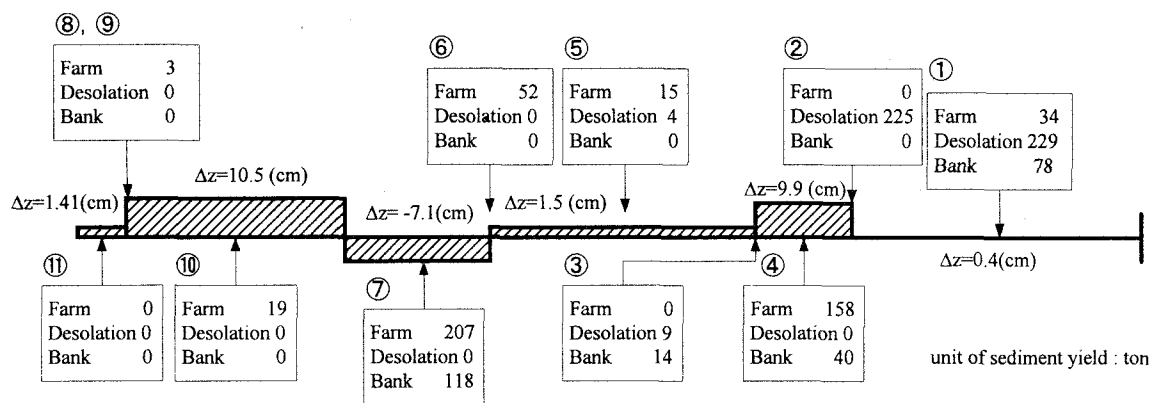


図-11 久著呂川流域の土砂生産量の推定

5. おわりに

本研究では、流域水環境管理のサブシステムを構成する土砂動態モデル構築の一環として、農林地域での土砂生産・流出モデルの枠組みの検討を行った。モデルはこれまでの土砂水文学の成果を統合化する方向で行い、オーダ的な意味での土砂収支評価の可能性を示した。農林地域における農地からの土壌流出については、排水路網を含む圃場管理システムが大きな影響を持つことより、本研究での土砂収支評価は、土砂生産場のポテンシャルを示すものと考えられ、今後、農地圃場管理についての検討を進める予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、水垣滋君（北海道大学大学院農学研究科博士課程）には資料提供、現地調査で協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集第44巻，pp.717-722，2000.
- 2) 江頭進治・松本敬：河道貯留土砂を考慮した流出土砂の予測法，水工学論文集第44巻，pp.735-740，2000.
- 3) 砂田憲吾・小松勝彦・小林弘：流域全体の土砂動態モデルに関する基礎的検討，水工学論文集第44巻，pp.729-734，2000.
- 4) 環境庁自然保護局：湿原生態系保全のためのモニタリング手法の確立に関する研究，1993.
- 5) 日本データサービス：平成9年度湿環境原保全対策調査報告書，pp.78-79，1998.
- 6) Nakamura, F., Sudo, T., Kameyam, S. and M. Jitsu : Influence of channelization on discharge of suspended sediment and wetland vegetation in Kushiro Marsh, northern Japan, Geomorphology, Vol.18, pp.279-289, 1997.

- 7) 中村太土：釧路湿原周辺の土地利用変化に伴う土砂流入と湿原植生の変化，文部省科学研究費 基盤研究(B)研究成果報告書（代表：中村太土），pp.119-130，1998.
- 8) 宮地直道・草場敬・小田認：釧路湿原流入土砂中の農耕地由来土砂の割合，土壤肥科学会講演要旨集，42，pp.210,1996.
- 9) 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.
- 10) Nakagawa, H., Tsujimoto, T., and Murakami : S. Non-equilibrium bed load transport along side bank, Proc. #d Int. Symp. River Sedimentation, Jackson, Mississippi, USA, pp.1029-1035, 1986.
- 11) Ikeda, S : Self-formed straight channels in sandy beds, Proc. ASCE, Vol.107, HY4, pp.389-406, 1981.
- 12) 金屋敷忠儀・芦田和男・江頭進治：山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究，第24回水理講演会論文集，pp.143-151，1980.
- 13) 藤田裕一郎：沖積河川の流路変動に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1980.
- 14) 安藝皓一：河川工学序説，pp.57-60，1952.
- 15) Laursen, E. M. : The total sediment load of streams, Proc. ASCE, Vol.84, No. HY1, pp. 1-36, 1958.

(2000. 10. 2受付)