

全流域型の土砂流出モデルの開発

Development on a Numerical Model for Watershed Sediment Transport

北海道大学工学研究科環境資源工学 ○ 学生員 ウォンサ・サニット (Sanit Wongsat)
 北海道大学工学研究科環境資源工学 正 員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. まえがき

河川流域は様々な地形・地質・植生などの特性を有しているため雨水流の挙動は究めて複雑である。もし、流域全体の流出量・生産土砂量の流出現象を精度よく再現できれば災害予測、土砂流動の予測などが可能になり、流域内の土砂災害防止、河川環境整備を行う上で非常に有用である。

本研究では、河道網を用いることより、流域全体を河道部と斜面部に分けて流量と土砂量を計算することが可能となる。流域全体での降雨から斜面流出への流れを kinematic wave 法を用いて追跡し、生産する土壌流出を評価できるような流域内の任意地点における流量および流砂量を降雨からセットで評価する降雨・土壌流出モデルを構築した。斜面部で生産された土壌は河道部に供給されて浮遊砂として流下するものとした。斜面の土壌流出モデルについて、斜面部から斜面流出とともに生産すると仮定し、同一斜面上から一様に流出する最も簡単なモデルを考えていた。そして本モデルを実流域に適用し、一洪水期間の降雨データより任意の斜面から流出量・生産土壌量、河道網内の氾濫流量・土砂量の時間的変化について、出水する際に実測された値および経験式とを比較し、検討した。

さらに本研究では、降雨からの土砂生産量の予測の可能性を探る目的で石狩川流域の地形図から河道網データを作成し、降雨・斜面侵食・土砂生産・土砂移動・堆積の過程を組み入れた計算モデルを構築し、石狩川流域への適用を行った。この結果、本モデルは石狩川流域の洪水流量・流砂量ともにある程度再現できた。

2. 基礎式

本モデルは河道部と斜面部から構成される。河道部での(1)河道網流モデル、(2)河道土砂流モデル、および斜面部での(3)斜面流出モデル、(4)斜面土壌流出モデル、(5)氾濫原流入・出量と土砂堆積モデル、の5つのサブモデルより構成されるものを提案している。

2.1 河道網流モデル

河道内の流れに対する連続式および運動方程式はそれぞれ(1)、(2)式を用いる。

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x} = q_L \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{\partial (Q_c^2/A_c)}{\partial x} + gA_c \left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f \right) = \frac{q_L Q_c}{gA_c^2} \quad (2)$$

ここで、 A_c は河道の流水断面積、 Q_c は流量、 q_L は単位流路長当たりの横流入・出量、 H は水位(H は $\eta_c + h_c$)、 η_c は河床高、 h_c は水深、 S_f は摩擦勾配、 g は重力加速度、 t は時間、 x は流下方向座標、下付き添え字 c は河道であることを示す。摩擦勾配は Manning-Strickler 則を適用すると、

$$Q_c = \frac{8.9\sqrt{g}}{d_m^{1/6}} A_c R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 R は径深、 d_m は土砂平均粒径である。

2.2 河道土砂流出モデル

本モデルでは粒径別浮遊砂濃度は指数型の分布式を採

用し次式で表される。

$$c_i = c_{bi} \exp(-\beta \zeta) \quad (4)$$

$$\text{ただし、} \beta = \frac{w_{fi} h_c}{\varepsilon}, \quad \zeta = \frac{z}{h_c}, \quad \varepsilon = \frac{\kappa u_{*i} h_c}{6}$$

ここで、 c_i は粒径別浮遊砂濃度、 w_{fi} は粒径別沈降速度(Rubeyの式)、 ε は水深平均の拡散係数、 u_{*i} は摩擦速度、 κ はカルマン定数 ($\kappa = 0.4$)、下付き添え字 i は混合粒径における粒径 d_i の粒子に対する物理量であることを示す。

(4)式を河床から水面まで積分するとにより水深平均の粒径別濃度 $\langle c_i \rangle$ が次式で表される。

$$\langle c_i \rangle = \frac{1}{h_c} \int_0^1 c_i d\zeta = \frac{c_{bi}}{\beta} \{1 - \exp(-\beta)\} \quad (5)$$

粒径別浮遊砂濃度の連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\langle c_i \rangle h_c) + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q_c \langle c_i \rangle)}{\partial x} = q_{sui} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_L c_{BLi}}{B} \quad (6)$$

ここで、 $\langle c_i \rangle$ は水深平均濃度、 B は川幅、 q_{sui} は浮上量、 p_i は比率、 q_{Bi} は掃流砂、 c_{bi} は基準濃度、 c_{BLi} は横流入・出の基準濃度である。

混合粒径における粒径別流砂の連続式は交換層における粒径別の流砂の交換、河床変動および河床変動に伴って新たに交換層に加わる粒径分布を考慮し次式で表される。

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + p_i \frac{\partial \eta_c}{\partial x} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi} B)}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_L c_{BLi}}{B} \right] = 0 \quad (7)$$

ここで、 δ は交換層厚(河床材料と流砂の交換が行われる層)の厚さ、 λ は空隙率($\lambda = 0.4$)である。

全流砂の連続式は全ての粒径の流砂の交換を考慮し次式で表される。

$$\frac{\partial \eta_c}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial \sum_i (q_{Bi} B)}{\partial x} + \sum_i (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) + \frac{\sum_i (q_L c_{BLi})}{B} \right] = 0 \quad (8)$$

ここで、 $\sum_i$ は粒径別の量を合計したことを示す。

掃流砂量芦田・道上の式を用いる。

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = p_i 17 \tau_{*i}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_{*i}} \right) \quad (9)$$

ここで、 d_i は砂粒子の粒径、 s は砂の水中比重、 τ_{*i} は粒径別無次元有効掃流力、 τ_{*i} は粒径別無次元掃流力、 τ_{*ci} は粒径別無次元限界掃流力、 u_{*i} は粒径別摩擦速度、 u_{*ci} は粒径別限界摩擦速度(岩垣の式)である。

粒径別限界摩擦速度は Egiazaroff・浅田の式を用いる。

$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \left[\frac{\log 23}{\log \left(21 \frac{d_i}{d_m} + 2 \right)} \right]^2 \frac{d_i}{d_m} \quad (10)$$

ここで、 u_{*cm} は砂粒径 d_m に対する限界摩擦速度(混合粒径における粒径 d_i の粒子に対する限界摩擦速度)である。

浮遊砂の河床から浮上量は板倉・岸の式で求め、遮蔽効果を考慮した沖・岸による式で与える。

$$q_{sui} = p_i K \left(\alpha_s \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{g d_i}{u_*'} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (11)$$

$$\Omega_i = \frac{\tau_{*i}}{B_{*i}} \frac{\int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}}{B_{*i} \eta_0} - 1 \quad (12)$$

$$\text{ただし、 } B_{*i} = \xi_i B_{*0}, \quad \xi_i = \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*ci0}}$$

ここで、 q_{sui} は粒径別浮遊砂の単位幅当たりの河床からの浮上量、 u_*' は有効摩擦速度、 $a' = B_{*i}/\tau_{*i} - 1/\eta_0$ ($\eta_0 = 0.5$ 、 $K = 0.008$ 、 $\alpha_s = 0.14$ 、 $B_{*i} = 0.143$) である。本研究では有効掃流力を全掃流力に等しいと仮定して τ_{*i} は τ_{*i} 、 u_*' は u_{*i} とする。

2.3 斜面流出モデル

斜面部における流出現象は直接流出と地下水流出がある。直接流出とは地表流と中間流のことであり、一洪水期間の斜面部から生産土壤に大きく影響するのは地表流のみと考えられる。本研究では再現性の高い表面流・中間流統合型 kinematic wave モデル¹⁾を用いる。斜面部での流れに対する連続式、運動方程式はそれぞれ(13)、(14)式を用いる。

$$\frac{\partial h_{sl}}{\partial t} + \frac{\partial q_{sl}}{\partial X} = r_e \quad (13)$$

$$q_{sl} = \begin{cases} k S_0 h_{sl} / \gamma & , 0 < h_{sl} < \gamma D \\ \alpha (h_{sl} - \gamma D)^m + k S_0 h_{sl} / \gamma & , h_{sl} \geq \gamma D \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 h_{sl} は水深、 q_{sl} は単位幅流量、 r_e は有効降雨強度、 k は浸透率、 γ は空隙率、 D は中間層厚さ、 α は $\sqrt{S_0}/n_{sl}$ 、 S_0 は斜面勾配、 n_{sl} はマニング粗度係数、 $m = 5/3$ 、 X は斜面流れ方向の座標、下付き添え字 sl は斜面であることを示す。

2.4 斜面土壤流亡モデル

斜面部の土壤流亡は単位面積当たりに生ずる運動量モデルを用いる。侵食過程について、生産された土壤は流亡するものの斜面高さは変化しないと仮定する。斜面部の土壤流亡の濃度、体積構成比率はそれぞれ(15)、(16)式で算出される²⁾。

$$\frac{\partial(c_i h_{sl})}{\partial t} + \frac{\partial(c_i q_{sl})}{\partial X} = D_{ri} + D_{fi} - D_{di} \quad (15)$$

$$\delta \frac{\partial p_i}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial(q_{Bi})}{\partial X} + D_{ri} + D_{fi} - D_{di} \right] = 0 \quad (16)$$

ここで、 c_i は土壤流亡濃度、 D_{ri} は降雨による土壤離脱率、 D_{fi} は表面流による土壤離脱率、 D_{di} は土壤沈降率である。降雨による単位面積当たり土壤離脱率は樹冠遮断損失を考慮した次式を用いる。

$$D_{ri} = \frac{k_r F_w}{\rho_s} (1 - C_g) [(1 - C_c) M_r + M_d] \quad (17)$$

ここで、 k_r は降雨による土壤離脱係数、 C_g は樹木地被覆率、 C_c は樹冠地被覆率、 F_w は水深補正係数、 M_r は降雨による単位面積当たり運動量、 M_d は樹冠落葉降雨による単位面積当たり運動量である。単位面積当たり運動量と降雨強度との関係は次式を用いる。

$$M_r = \alpha r^\beta \quad (18)$$

ここで、 r は降雨強度、 α および β はそれぞれ係数である。斜面上の水深が限界水深より深い場合、降雨エネルギーの

一部が遮断され、以下の補正係数を行った。

$$F_w = \begin{cases} \exp(1 - h_{sl}/D_m) & , h > D_m \\ 1 & , h \leq D_m \end{cases} \quad (19)$$

ここで、 D_m は平均降雨粒径である(Laws・Parsons の実験における平均降雨粒径は $D_m = 0.00124 r^{0.182}$)。

表面流による土壤離脱率は次式を用いる。

$$D_{fi} = \begin{cases} \frac{k_f}{\rho_s} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_{*i}} \right) & , \tau_{*i} > \tau_{*ci} \\ 0 & , \tau_{*i} < \tau_{*ci} \end{cases} \quad (20)$$

ここで、 k_f は表面流による土壤離脱係数である。

土壤沈降率は次式を用いる。

$$D_{di} = k_d w_{fi} c_i \quad (21)$$

ここで、 k_d は土壤沈降係数($k_d = 1.0$)、 w_{fi} は粒径別土壤沈降速度である。

2.5 氾濫原流入・出量と土砂堆積モデル

河道から氾濫原に流入・出する氾濫流量は横越流を仮定し、本間の式による横越流量は次式を用いる。

$$Q_0 = \begin{cases} C h_{f1} W \sqrt{2gh_{f1}} & , C = 0.36, h_{f2}/h_{f1} < 2/3 \\ C h_{f1} W \sqrt{2g(h_{f1} - h_{f2})} & , C = 0.91, h_{f2}/h_{f1} \geq 2/3 \end{cases} \quad (22)$$

ここで、 Q_0 は本間の式による横越流量、 h_{f1} および h_{f2} はそれぞれ堤外地および堤内地の水位、 W は氾濫原流入・出幅、 C は越流係数、下付き添え字 f は氾濫原であることを示す。

国道交通省の氾濫シミュレーションマニュアルでは、河道部から氾濫原に流入する氾濫流量は破堤口における横越流量を河床勾配で補正し、次式で与えるものとしている。

$$\frac{Q_f}{Q_0} = \begin{cases} K_1 \cdot K_2 & , (S_c > 1/1,580) \\ K_2 & , (1/1,580 > S_c > 1/33,600) \\ 1 & , (S_c < 1/33,600) \end{cases} \quad (23)$$

$$K_1 = \left[0.14 + 0.19 \log_{10} \left(\frac{1}{S_c} \right) \right] \quad (24)$$

$$K_2 = \cos \left[48 - 15 \log_{10} \left(\frac{1}{S_c} \right) \right] \quad (25)$$

ここで、 Q_f は氾濫流入・出量、 S_c は河床勾配である。

また、氾濫原での堆積土砂量は浮遊砂の浮上量は考慮せず、沈降量のみを考慮した次式を用いる。

$$\frac{\partial \eta_f}{\partial t} - \frac{1}{1-\lambda} \sum_i w_{fi} c_{bi} = 0 \quad (26)$$

3. 計算条件および計算手法

流域の標高データから石狩川流域の模擬河道網を作成し、その地形データを用いて降雨強度データから斜面部の流出・土壤流亡、河道部分の水流・土砂流出を予測の数値モデルを構築した(図-1)。計算手法について、河道部の水流は常・射流が混在する流れに再現性の良い CIP 法と土砂量は風上差分法により計算した。また、斜面部は斜面流出、土壤流亡、氾濫原流入・出量と土砂堆積モデルを風上差分法で計算した。境界条件では、上流と下流はそれぞれ流量と水位で与えた。流砂量の境界条件は掃流砂、浮遊砂共に動的平衡状態を仮定し、下流は自由流出と与えた。初期条件では、斜面部・氾濫原はゼロ水深を与え、流れが定常状態に達するまで繰り返し計算する。また、本計算は混合粒径で行ない d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} より河床材料の粒度分布に対する対数正規分布を仮定し、河床の粒度分布の初期条件として流域全体に与えた。計算時間ステップの Δt は CFL 条

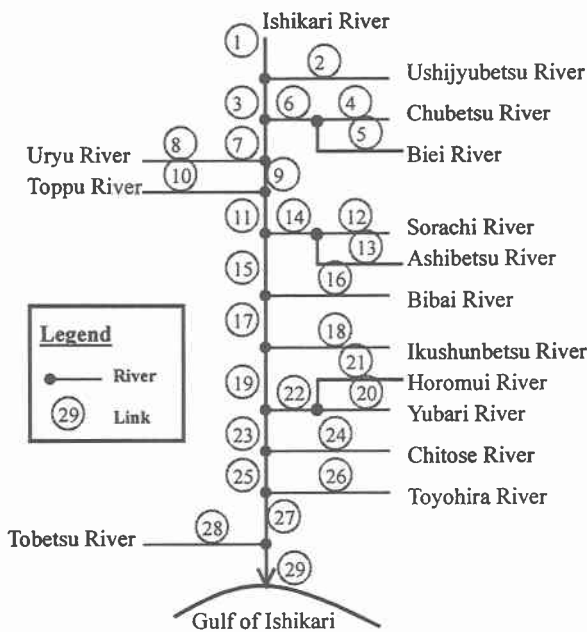


図-1 石狩川流域モデル



図-2 石狩川流域

件により決定した。計算手順は、斜面部での(1)水面形を求め、(2)生産する土壌流亡を計算し、河道部での(3) 水面形を求め、(4)掃流砂・浮遊砂の計算を行ない、河床高の時間的変化を計算する。この繰り返しで全流域を計算し、シミュレーション終了時間まで計算を継続する

計算条件は、河道部での $\Delta x = 1,000\text{m}$ 、河道部での $\Delta X = 200\text{m}$ 、 $n_{sl} = 0.5$ 、 $\gamma = 0.2$ 、 $D = 0.5$ 、 $n_{sl} = 0.5$ および時間ステップ $\Delta t = 2.0\text{s}$ を用いた。斜面土壌流亡モデルについて、 $k_r = 20.0$ 、 $k_f = 0.0005$ 、 $C_g = 0.9$ 、 $C_c = 0.9$ である。土砂粒径を最小 0.01mm から最大 400mm ままで 15 粒径に分割した。

4. 結果

4.1 石狩川流域の概要

対象とした石狩川の流域図を図-2 に示す。石狩川は大雪山周辺の山地を源流し、中流域の湿地および平野の石狩平野を通過、太平洋の石狩湾に流出する。その総面積は約 $14,330\text{km}^2$ 、主流路延長は約 268km である。流域の表層地質は、泥炭性軟弱地盤で構成される低平湿地である³⁾。また、石狩流域には 600km^2 の泥炭層の分布地域があり、特に下流部に 550km^2 が集中している。洪水氾濫抑制に関しては、開拓使設置以来開拓政策が行われてきた石狩平野は石狩川の氾濫原であって、その氾濫の地形、形状に即して石狩川の自由に蛇行した河道が形成されていた。近年にお

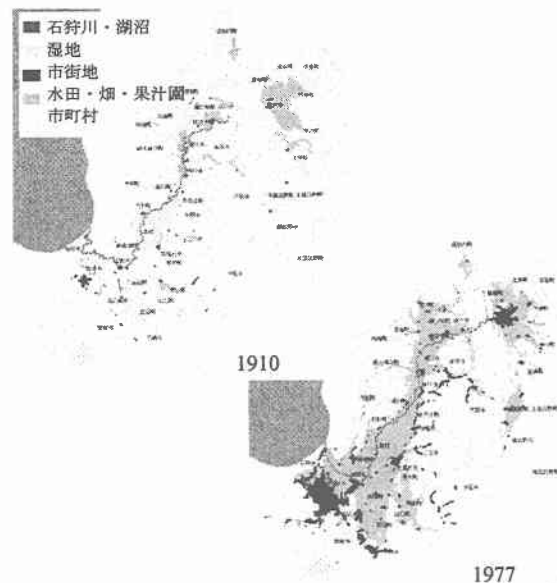


図-3 石狩川流域の土地利用変化



図-4 豊平川の洪水氾濫状況(1981年)

ける土地利用高度化において、流域内に市街地化の生活圈、さらには農地、工場、業務地などが数多く立地している。石狩川流域の主要な本・支川はすべて洪水防御の目的で直線化・築堤された(図-3)。

4.2 計算結果

著者らが提案するモデルに基づいて、1975、1981 年の大洪水期(図-4)の降雨に対する石狩川流域の洪水および土砂収支の推定を試みる。なお、すべての計算結果は石狩川大橋観測所を示すものである。

図-5 は時間変化の洪水流量の計算値と実測値の比較である。計算値は増水期には急激に立ち上がって実測値とほぼ一致するものの、ピーク流量を過ぎて実測値より早く減水する傾向が見られる。これは実際の石狩川流域内で沼地・氾濫原などが存在しており、より複雑な地形であることを示す。増水期について、斜面部から流出したものは一時的滞留してから再び河道部に流入し、減水期は氾濫原で滞留した洪水がゆっくりと河道部に流入すると解釈する。Nash・Sutcliffeの評価基準を用いれば、1975 および 1981 年の大洪水期はそれぞれ 0.92 および 0.93 である。また、ピーク洪水流量および到達時刻についてみると改善すべき点はあるものの、本研究の目的には十分ではないと思われる。図-6 は掃流砂、浮遊砂、全流砂の時間変化を示し、流出土砂量は降雨と流出洪水流量波形に対応しているのが分かる。同図には掃流砂のピークに到達時刻は浮遊砂より遅く、浮遊砂量は掃流砂量の約 5 倍程度大きい値となる。1981 年の大洪水期における土壌流亡、掃流砂、浮遊砂、全流砂の総

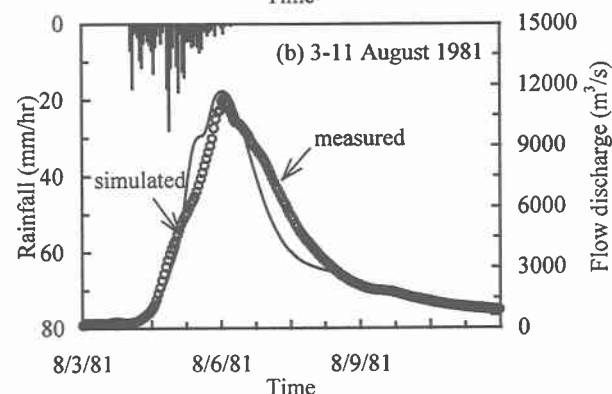
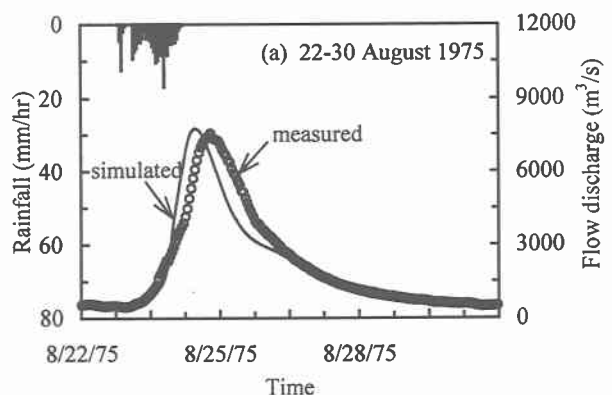


図-5 洪水流量の計算値と実測値の比較

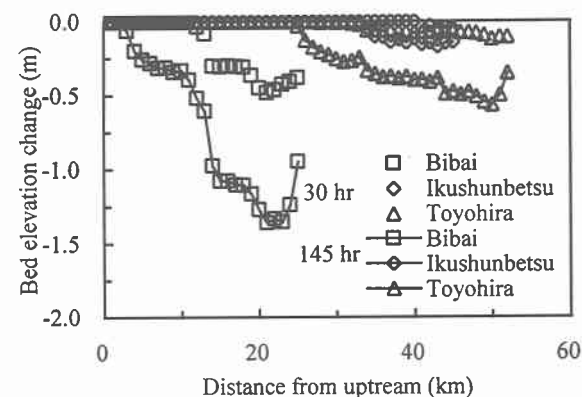


図-7 1981年の大洪水における河床低下

量はそれぞれ2、276、1,230、1,506トン、浮遊砂量経験式 ($Q_s = aQ^b$; $a = 4 \times 10^{-9}$, $b = 2.3526$) は1,423トンである。斜面部から生産した土壌流出量はほとんどウオッシュロードに寄与し、最下流の石狩湾まで運ばれた。図-7は1981年の大洪水期における河床高の時間変化を示す。本・支川の合流点付近で河床高が急激に低下し、上流域の急勾配山地河川および中・下流域の緩勾配河川はそれぞれ100、15cm程度の河床低下が生ずる。これらの期間内に様々な降雨・出水現象が含まれているため、一時的にはさらに大規模な河床変動が生じると考えられる。また、氾濫原内での土砂堆積高さは約5~30cmである(図-8)。計算結果によると、堆積土砂はほとんど微細粒子が占めている。蛇行流路・土地利用変化と土砂流量との関連では、今後に検討したい。

5. おわりに

本モデルは、河道部と斜面部から構成する全流域型を一括して計算する数値モデルを提案した。さらに、石狩川流域を対象にして一洪水期間の流出量・生産土壌量、河道網内の氾濫流量・土砂量の時間的変化の数値シミュレーションを行ない、1975、1981年の大洪水に出水する際に実測

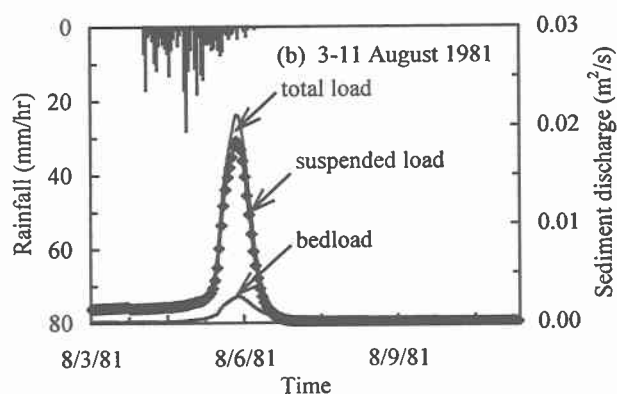
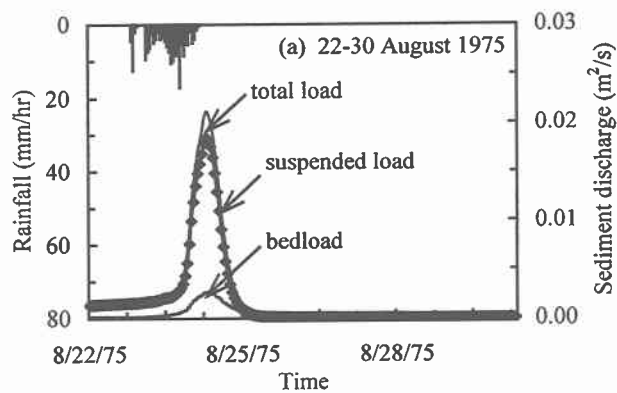


図-6 掃流砂、浮遊砂、全流砂量の計算値

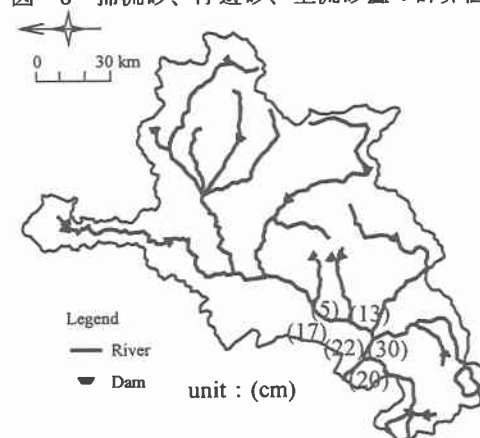


図-8 1981年の大洪水における氾濫原内の堆積高さ

値・経験式を比較した。その結果、計算値の流出量・土砂量は実測値・経験式とほぼ一致するものの、生産土壌量は実測値がないため直接に評価できない。今後は河道部の河岸侵食過程を考慮したモデルを構築したい。

謝辞：本研究を進めるにあたり、第一筆者に奨学金を支給していただいた(財)日立国際奨学財団、観測データを提供していただいた北海道開発局、水工リサーチ(株)の関係者に感謝致します。

参考文献

- 1)市川温、小鯨俊博、立川康人、椎葉充晴、宝薫：山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化、水工学論文集、第44巻、pp.145-150、2000。
- 2)Wongsa S., Shimizu Y.: Modelling pre-channelization and their impact on flood and sediment yield in Ishikari river basin、水工学論文集、第47巻、2003。(投稿中)
- 3)北海道河川防災研究センター：石狩川流域ランスケープ情報、1998。