

# ダム堆積土砂の流出及び下流への伝播特性に関する数値解析法の構築

竹林洋史\*

\* 京都大学防災研究所流域災害研究センター流砂災害研究領域

## 1. はじめに

ダムの堆砂対策及びダム下流域の物理環境の改善策の一つとして、置土がある。置土は、大規模な施設を必要とせず、予算に応じた規模で実施出来るため、ダムの堆砂対策として非常に有効な手段である。しかし、効果的な置土の形状、土量、場所等について、十分な知見は得られていないのが現状である。また、日本の河川の上流域及び中流域には、岩が河床から露出した区間が多い。図1に徳島県那賀川の上流域の写真を示す。写真左奥には、土砂が堆積して砂州が形成されているが、写真手前側は河床から岩が露出している。このような河川は他にも多く見られる。例えば、北海道では、石狩川上流部に軟岩が河床から露出した区間があり、関西でも、兵庫県の武庫川、京都府の桂川、木津川等が河川上中流域に岩露出域を有する。このような岩の露出域では、置土された土砂の下流への伝播特性が移動床河川とは異なることが予想される。しかし、岩露出域における土砂の伝播特性については、十分な知見が得られていないのが現状である。そこで、本研究では、岩露出域を考慮した一次元河床変動解析法を開発し、開発した解析モデルを用いて、流砂の下流への伝播特性を検討する。さらに、一般座標系の平面二次元の河床変動解析モデルを岩露出河床の流砂が取り扱えるように改良し、改良されたモデルを実河川で発生した置土の流出現象に適用し、モデルの再現性を確認する。さらに、開発した解析モデルを用いて置土の解析が容易に行えるように、RIC-Nays用に置土用xmlファイルを作成する。

本研究で対象とする河川は、徳島県的那賀川である。那賀川は、国内では最大の量の置土が予定されており、置土の効果を最も把握しやすい河川である。

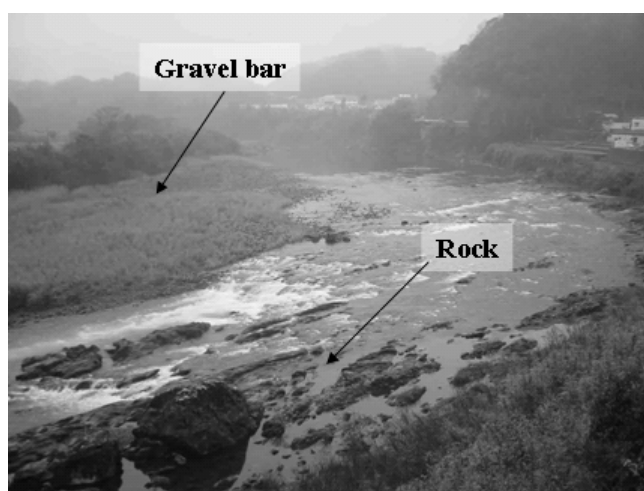


図1 那賀川上流域の岩露出域

## 2. 一次元河床変動解析

### 2.1 基礎方程式

流れの質量保存則および運動方程式は、以下のようである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial z}{\partial x} - gAI_e + \frac{\partial}{\partial x} (A\sigma_{xx}) \quad (2)$$

ここに、 $t$ は時間、 $x$ は流下方向の座標、 $A$ は本川の流水断面積、 $Q$ は本川の流量、 $g$ は重力

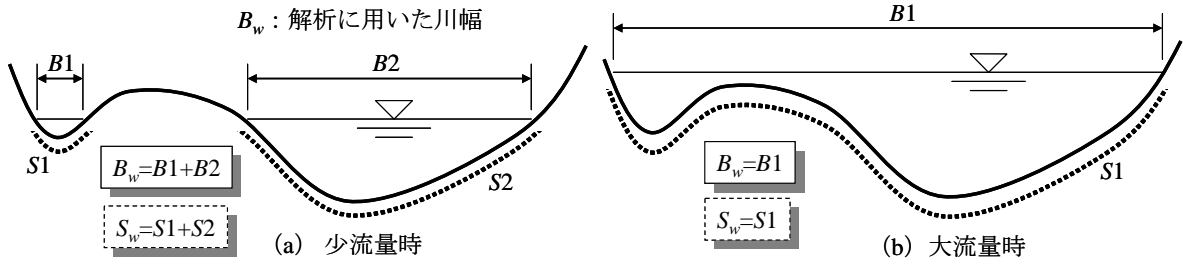


図2 解析に用いた川幅 ( $B_w$ ) と潤辺 ( $S_w$ )

加速度,  $\rho$ は水の比重,  $z$ は本川の水位,  $I_e$  は本川のエネルギー勾配であり, 以下のように Manning 則によって評価している.

$$I_e = \left( \frac{n_m Q}{R_w^{(2/3)} A} \right)^2 \quad (3)$$

ここに,  $n_m$ は Manning の粗度係数,  $R_w$ は径深である. 本解析では, 雨期と乾期の流れと流砂を評価するため, 河道の横断形状を考慮している. そのため, 流水川幅 ( $B_w$ ) と潤辺 ( $S_w$ ) は図2に示すように評価している.  $\sigma_{xx}$ は乱流応力であり, 以下のように評価している.

$$\sigma_{xx} = 2\nu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{A} \right) \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (5)$$

ここに,  $\nu$ は渦動粘性係数である. 流砂量は, 河床勾配が限界掃流力に与える影響を考慮した 芦田・道上式を用いる[9, 10, 11].

$$Q_{bk} = B_w 17 \sqrt{sgd_k^3} \tau_{*ck}^{3/2} \left( 1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right) \left( 1 - K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) f_{bk} r_b \quad (6)$$

ここに,  $s$ は土砂の水中比重,  $\tau_{*k}$ は  $k$ 粒径階に対する無次元掃流力であり, 以下の修正 Egiazaroff 式により算定した[9].

$$\tau_{*ck} = \tau_{*cm} \left[ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19 d_k / d_m)} \right]^2 \quad d_k / d_m \geq 0.4 \quad (7-1)$$

$$\tau_{*ck} = 0.85 \tau_{*cm} \frac{d_m}{d_k} \quad d_k / d_m < 0.4 \quad (7-2)$$

ここに,  $\tau_{*cm}$ は交換層内の土砂の平均粒径に対する無次元限界掃流力であり, 以下の岩垣式[12]により算定した.

$$d_m \geq 0.303 \quad (8-1)$$

$$0.118 \leq d_m < 0.303 \quad (8-2)$$

$$0.0565 \leq d_m < 0.118 \quad (8-3)$$

$$0.0065 \leq d_m < 0.0565 \quad (8-4)$$

$$d_m < 0.0065 \quad (\text{Unit : cm}) \quad (8-5)$$

$$\tau_{*cm} = u_{*cm}^2 / (sgd_m) \quad (9)$$

$\tau_{*ek}$ は  $k$ 粒径階に対する有効無次元掃流力であり, 以下の関係より求める<sup>6)</sup>.

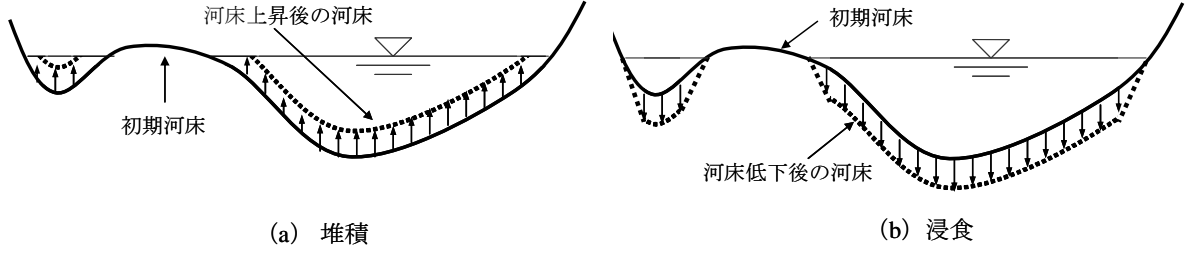


図3 河床変動による河床横断面形状の変化

$$u_{*em} = \frac{Q}{A \left( 6 + 2.5 \ln \frac{h}{d_m (1 + 2\tau_{*m})} \right)} \quad (10)$$

$$\tau_{*ek} = u_{*em}^2 / (sgd_k) \quad (11)$$

$K_c$ は限界掃流力の修正関数であり，以下の関係より求める[10, 11].

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_c} \left( \frac{\rho}{s} + 1 \right) \tan \theta_x \quad (12)$$

ここに， $\mu_c$ は静止摩擦係数， $\theta_x$ は流下方向の河床勾配である．河道横断面形状を考慮した一次元河床変動解析であるが，断面流砂量と断面内の流水域の河床材料の粒度は，それぞれ，一つの値としている． $f_{bk}$ は $k$ 粒径階に対する流水域の掃流砂層の土砂の存在率である．掃流砂層内の土砂の粒度は，以下の土砂の質量保存則により求める．

$$B_w \frac{\partial c_b E_b f_{bk}}{\partial t} + B_w (1 - \lambda) F_{bk} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_{bk}}{\partial x} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{bk} = f_{d1k}, \partial z_b / \partial t \leq 0, E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1 - \lambda} \\ F_{bk} = f_c, \partial z_b / \partial t \leq 0, E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1 - \lambda} \\ F_{bk} = f_{bk}, \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

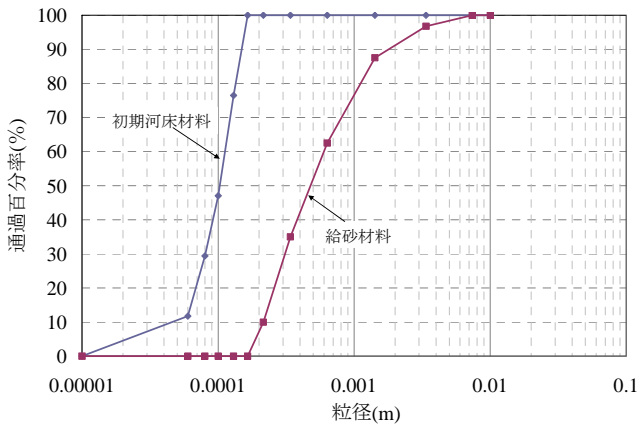
ここに， $\lambda$ は河床土砂の空隙率， $f_{d1k}$ は掃流砂層直下の堆積層（遷移層[11]）における $k$ 粒径階の土砂の存在率， $E_b$ は掃流砂層の厚さである．掃流砂層直下の堆積層における土砂の質量保存則は，以下のようである．

$$\frac{\partial E_{d1} f_{d1k}}{\partial t} - F_{dk} \frac{\partial E_{d1}}{\partial t} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{dk} = f_{d1k}, \partial z_b / \partial t \leq 0 \\ F_{dk} = f_{bk}, \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

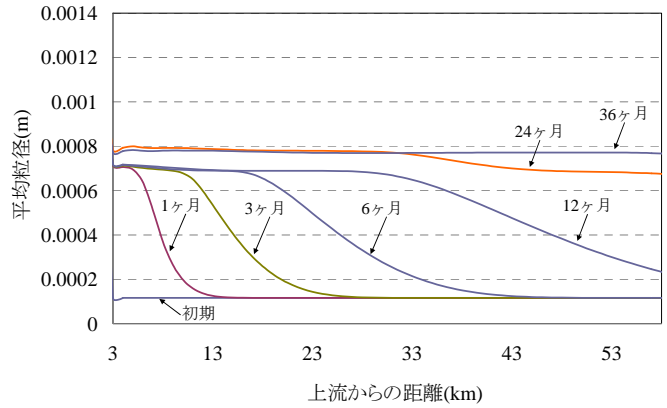
ここに， $E_{d1}$ は掃流砂層直下の堆積層の厚さ， $f_c$ は粘着性土砂の存在率， $f_{dmk}$ は $m$ 番目の堆積層における $k$ 粒径階の存在率， $c_b$ は鉛直平均の掃流砂の濃度， $E_{be}$ は平衡掃流砂層厚さであり，以下の関係より求める[8].

$$\frac{E_{be}}{d_m} = \frac{1}{c_b \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_{*m} \quad (15)$$

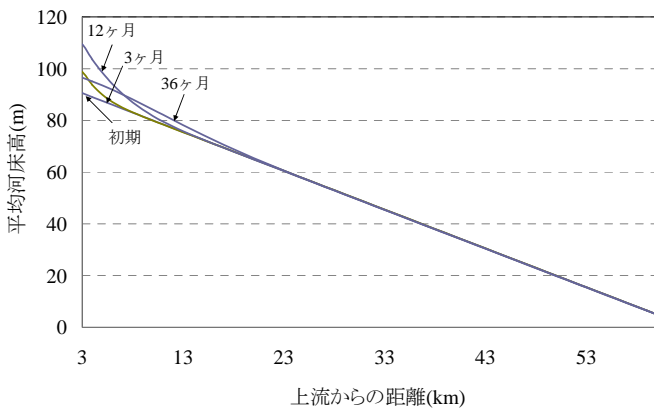
ここに， $\phi$ は安息角， $\tau_{*m}$ は平均粒径に対する無次元掃流力， $E_{sd}$ は粘着性土層上の非粘着性土の厚さ， $E_b$ は掃流砂層の厚さであり，以下のよう求める．



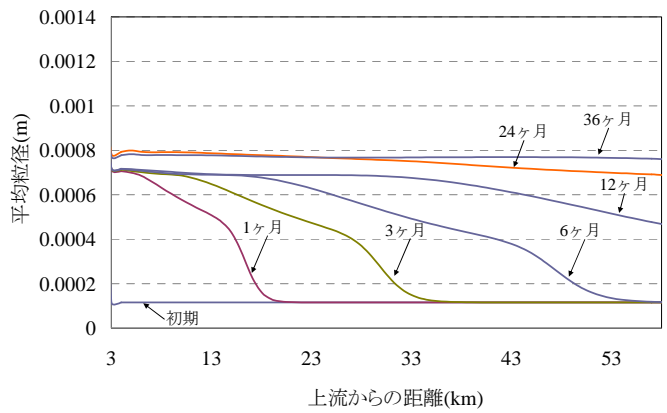
(a) 給砂・河床材料



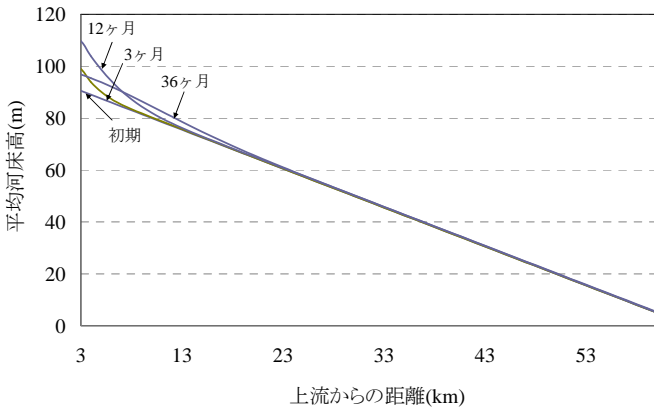
(d) 平均粒径 (Case1, 非粘着性)



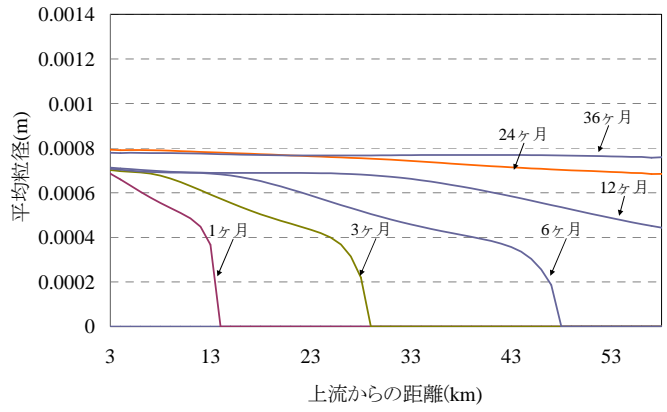
(b) 河床位 (Case1, 非粘着性)



(e) 平均粒径 (Case2, 粘着性)



(c) 河床位 (Case2, 粘着性)



(f) 平均粒径 (Case3, 岩盤)

図1 給砂・河床材料と河床上昇傾向の条件 (Case1~Case3) の解析結果

$$E_b = E_{be} \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (16-1)$$

$$E_b = E_{sd} \frac{1-\lambda}{c_b} \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (16-2)$$

$r_b$  は粘着性土層上の非粘着性土の量に関するパラメータであり、以下のように求める。

$$r_b = 1 \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (17-1)$$

$$r_b = \frac{E_b}{E_{be}} \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (17-2)$$

掃流砂層内の土砂の平均粒径は、以下の関係より求める。

$$d_m = \sum_{k=1}^n d_k f_{bk} \quad (22)$$

ここに、 $n$ は粒径階の数である。河床は図3に示すように、断面内の流水域のみ変化するとして以下の河床位方程式より求める。

$$B_w \frac{\partial(c_b E_b)}{\partial t} + B_w (1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial Q_{bk}}{\partial x} \right) = 0 \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (23-1)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + V_e = 0 \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (23-2)$$

粘着性土層の侵食速度( $V_e$ )は関根らの式[16]を修正した以下の関係より求める。

$$V_e = \alpha R_{wc}^{2.5} u_*^3 (1-r_b) \quad (24)$$

ここで、強固な岩露出域では、侵食速度( $V_e$ )をゼロとし、軟岩が露出している領域では、軟岩の侵食速度式を $V_e$ として適用する。

## 2. 2 解析条件

解析条件はCase1からCase5の5ケースである。初期河床は、砂礫による可浸食性河床 (Case1, Case4) , 粘着性土による難侵食性 (Case2, Case5) , 岩盤を想定した非侵食性河床 (Case3, Case6) の3種類である。給砂材料は全ての解析条件で非粘着性材料である。給砂量は、河床上昇傾向の河川における現象の検討として、1年目に平衡給砂量の8倍を給砂し、2年目以降は平衡給砂量を給砂する条件 (Case1, Case2, Case3) と、河床低下傾向の河川における現象の検討として、平衡給砂量の10%倍を給砂し続けたもの (Case4, Case5) の2種類である。河床材料の粒度分布を図4 (a) に示す。初期河床材料は平均粒径0.1mm程度の細かい土砂であり、Case1とCase4では非粘着性土砂として扱い、Case2とCase5では河床から離脱するまでは粘着性を示すものとした。給砂の平均粒径は、0.5mm程度であり、河床材料より粗く非粘着性材料として扱う。初期河床勾配は0.0015、川幅は200m、流量は83.1m<sup>3</sup>/sを定常的に与えた。

## 2. 3 結果と考察

ここでは、河床上昇傾向の解析結果である Case1~Case3 について、考察を進める。図4に、河床上昇傾向の条件 (Case1~Case3) の解析結果を示す。図4(b)と(c)を比較すると、初期河床が非粘着性の場合と粘着性の場合ではほとんど違いが無い。これは、河床上昇傾向の条件のため、両ケースで河床形状に大きな違いが出る河床侵食箇所がほとんど無いためである。ここでは示していないが、Case3の河床縦断形状もほぼ同様の結果である。しかし、平均粒径の時間変化には大きな違いが発生している。図4(d)と(e)を比較すると、粘着性河床の方が上流からの給砂材料による粗粒化の下流への伝播が速い。これは、非粘着性河床では、河床の細かい材料と交換しながら下流へ伝播するが、粘着性河床では給砂材料への細かい河床材料の取り込み量がわずかであり、容易に粗粒化するためである。Case3の岩盤河床の場合は、粘着性河床の場合に近い結果となっている。両者の相違は、河床からの粘着性材料の流出のみであり、粘着性河床のケースでは、0.2mm以下の土砂が先行して下流へ伝播していることが分かる。

### 3. 二次元河床変動解析

#### 3. 1 基礎方程式

デカルト座標系と一般座標系との関係は、以下のようである。

$$J = \frac{1}{\left( \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \right)} \quad (25-1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = J \frac{\partial y}{\partial \eta} \quad (25-2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = -J \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (25-3)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial y} = -J \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad (25-4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = J \frac{\partial x}{\partial \xi} \quad (25-5)$$

ここに、 $\xi$ と $\eta$ は一般座標系における流下方向と横断方向の座標であり、 $x$ と $y$ はデカルト座標系での座標である。表面流の計算は、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。ただし、浸透流の流入・流出も考慮している。水の質量保存則は以下のようである[1]。

$$\Lambda \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{h_g U_g}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{h_g V_g}{J} \right) = 0 \quad (26)$$

ここに、 $t$ は時間、 $z$ は水位である。表面流の水深は $h$ 、浸透流の水深は $h_g$ 、 $r$ は降雨強度である。 $U$ と $V$ は $\xi$ と $\eta$ 方向における表面流の反変速度成分であり、以下のように定義される。

$$U = \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v \quad (27)$$

$$V = \frac{\partial \eta}{\partial x} u + \frac{\partial \eta}{\partial y} v \quad (28)$$

ここに、 $u$ と $v$ は $x$ と $y$ 方向における表面流の流速成分である。 $U_g$ と $V_g$ は $\xi$ と $\eta$ 方向における浸透流の反変速度成分であり、以下のように定義される。

$$U_g = \frac{\partial \xi}{\partial x} u_g + \frac{\partial \xi}{\partial y} v_g \quad (29)$$

$$V_g = \frac{\partial \eta}{\partial x} u_g + \frac{\partial \eta}{\partial y} v_g \quad (30)$$

ここに、 $u_g$ と $v_g$ は $x$ と $y$ 方向における表面流の流速成分である。 $\Lambda$ は空隙率に関するパラメータであり、 $z \geq z_b$ の時 $\Lambda=1$ 、 $z < z_b$ のとき $\Lambda=\lambda$ である。ここに、 $z_b$ は河床位、 $\lambda$ は河床の空隙率である。浸透流は、平面二次元の飽和流れと仮定している。表面流の運動量保存則は以下のようである。

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( U \frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( V \frac{hU}{J} \right) \\
& - \frac{hu}{J} \left( U \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left( U \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) \right) \\
& = -gh \left( \frac{1}{J} \left( \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\xi}}{\rho J} - \frac{F_{v\xi}}{\rho J}
\end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{yx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{yx}) \\
& + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{yy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{yy}) \\
& \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( U \frac{hV}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( V \frac{hV}{J} \right) \\
& - \frac{hu}{J} \left( U \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right) - \frac{hv}{J} \left( U \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + V \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right) \\
& = -gh \left( \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left( \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{b\eta}}{\rho J} - \frac{F_{v\eta}}{\rho J}
\end{aligned} \tag{32}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{xx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{yx}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{yx}) \\
& + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} (h\tau_{xy}) + \frac{1}{J} \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} (h\sigma_{yy}) + \frac{1}{J} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \eta} (h\sigma_{yy})
\end{aligned}$$

ここに、 $g$  は重力、 $\rho$  は水の密度。  $\tau_{b\xi}$  と  $\tau_{b\eta}$  は  $\xi$  と  $\eta$  方向における表面流の反変掃流力成分であり、以下のように定義される。

$$\tau_{b\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \tau_{by} \tag{33}$$

$$\tau_{b\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial x} \tau_{bx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \tau_{by} \tag{34}$$

ここに、 $\tau_x$  と  $\tau_y$  は  $x$  と  $y$  方向における表面流の掃流力成分であり、以下のものである。

$$\tau_x = \tau_b \frac{u_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \tag{35}$$

$$\tau_y = \tau_b \frac{v_b}{\sqrt{u_b^2 + v_b^2}} \tag{36}$$

$$\frac{\tau_b}{\rho} = u_*^2 \tag{37}$$

ここに、 $u_*$  は摩擦速度である。  $u_b$  と  $v_b$  は  $x$  と  $y$  方向の河床近傍流速である。河床近傍の流速は、水深平均流の流線の曲率より、以下のように求められる。

$$u_b = u_{bs} \cos \alpha_s - v_{bs} \sin \alpha_s \tag{38}$$

$$v_b = u_{bs} \sin \alpha_s + v_{bs} \cos \alpha_s \quad (39)$$

$$u_{bs} = 8.5u_* \quad (40)$$

$$v_{bs} = -N_* \frac{h}{r} u_{bs} \quad (41)$$

ここに、 $\alpha_s = \arctan(v/u)$  であり、 $N_*$  は 7.0 である[2].  $r$  は流線の曲率であり、以下の関係より求められる[3].

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \left\{ u \left( u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left( u \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (42)$$

$\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{yy}$ ,  $\tau_{yx}$  等は、乱流応力であり、以下の関係から求めている.

$$\sigma_{xx} = 2\nu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (43)$$

$$\sigma_{yy} = 2\nu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (44)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (45)$$

ここに、 $\nu$  は渦動粘性係数、 $\kappa$  は Karman 常数、 $k_t$  は水深平均された乱れエネルギーである[4].  $F_{v\xi}$  と  $F_{v\eta}$  は  $\xi$  と  $\eta$  方向における植生の反変効力成分であり、以下のように定義される.

$$F_{v\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial x} F_{vx} + \frac{\partial \xi}{\partial y} F_{vy} \quad (46)$$

$$F_{v\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial x} F_{vx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} F_{vy} \quad (47)$$

ここに、 $F_{vx}$  と  $F_{vy}$  は  $x$  と  $y$  方向における植生の効力成分であり、以下のようである[5].

$$F_{vx} = F_v \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (48)$$

$$F_{vy} = F_v \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (49)$$

$$\frac{F_v}{\rho} = \frac{1}{2} C_{dv} \lambda_v (u^2 + v^2) h_w \quad (50)$$

ここに、 $C_{dv}$  ( $\doteq 1.0$ ) は形状効力係数、 $\lambda_v$  は植生密度である. 浸透流の運動量保存則は以下のようである.

$$u_g = -k_{gx} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \quad (51)$$



$$v_g = -k_{gy} \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \quad (52)$$

ここに、 $k_{gx}$ と $k_{gy}$ は $x$ と $y$ 方向の透水係数である。表面流の水深が、河床材料の平均粒径よりも小さいときは、式(7)と(8)において、圧力項と掃流力項以外の項は無視した[6]。

粒径階ごとの交換層と堆積層の質量保存則は、以下のものである[7]。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{c_b E_b f_{bk}}{J} \right) + (1-\lambda) F_{bk} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_b}{J} \right) + \left( \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{q_{b\xi k}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{q_{b\eta k}}{J} \right) + \frac{1}{J} w_k (c_{sbe k} - c_{sbk}) \right) = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{bk} = f_{d1k}, \quad \partial z_b / \partial t \leq 0, \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \\ F_{bk} = f_c, \quad \partial z_b / \partial t \leq 0, \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \\ F_{bk} = f_{bk}, \quad \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{array} \right. \quad (53)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{E_{d1} f_{d1k}}{J} \right) - F_{dk} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{E_{d1}}{J} \right) = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{dk} = f_{d1k}, \quad \partial z_b / \partial t \leq 0 \\ F_{dk} = f_{bk}, \quad \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{array} \right. \quad (54)$$

ここに、 $f_{bk}$ は交換層内の粒径階 $k$ の存在率、 $f_{d1k}$ は交換層底面から $m$ 番目の堆積層内の粒径階 $k$ の存在率、 $c_b$ は交換層内の土砂濃度である。 $q_{b\xi k}$ と $q_{b\eta k}$ は $\xi$ と $\eta$ 方向における粒径階 $k$ の反変掃流砂量成分であり、以下のように定義される。

$$q_{b\xi k} = \frac{\partial \xi}{\partial x} q_{bxk} + \frac{\partial \xi}{\partial y} q_{byk} \quad (55)$$

$$q_{b\eta k} = \frac{\partial \eta}{\partial x} q_{bxk} + \frac{\partial \eta}{\partial y} q_{byk} \quad (56)$$

$q_{bxk}$ と $q_{byk}$ は $x$ と $y$ 方向における粒径階 $k$ の反変掃流砂量成分であり、以下のように定義される[9, 10, 11]。

$$q_{bxk} = q_{bk} \cos \beta_k \quad (57)$$

$$q_{byk} = q_{bk} \sin \beta_k \quad (58)$$

$K_c$ は河床の局所勾配の影響による補正関数であり、以下のものである。

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} + 1 \right) \cos \alpha \tan \theta_x + \sin \alpha \tan \theta_y \right] \quad (59)$$

ここに、 $\alpha$ は以下のように、 $x$ 軸からの河床近傍流速の偏差角である。

$$\alpha = \arctan \left( \frac{v_b}{u_b} \right) \quad (60)$$

$\mu_s$ は静止摩擦係数。 $\theta_x$ と $\theta_y$ は $x$ と $y$ 方向における局所河床勾配である。これらの勾配は、以下のものである。

$$\theta_x = \arctan \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \quad (61)$$

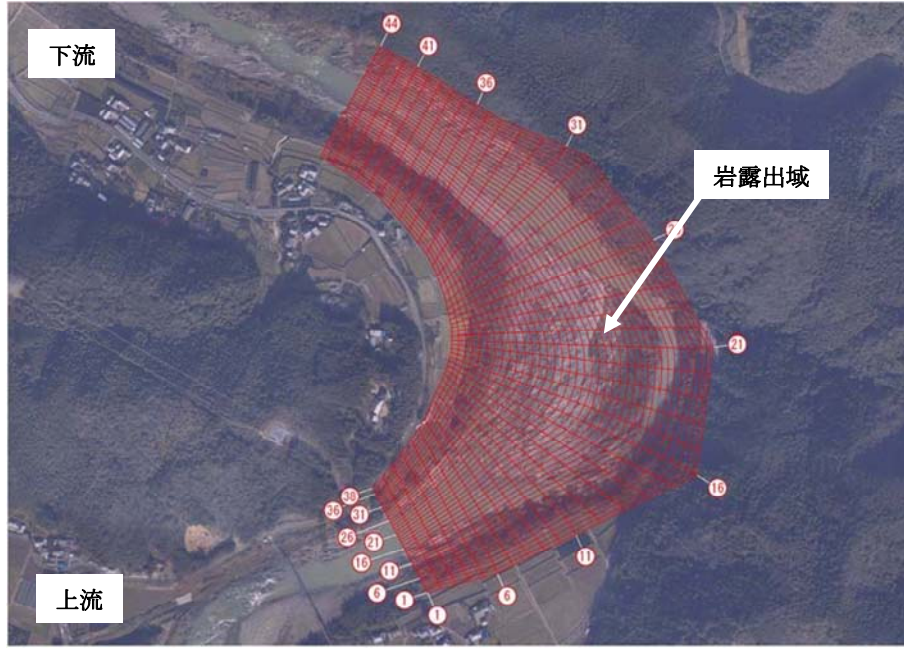


図5 置土流出に関する解析対象領域

$$\theta_y = \arctan \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \quad (62)$$

掃流砂の平均的な方向に対する局所河床勾配 ( $\theta$ ) は以下のように求める.

$$\sin \theta = \cos \beta_m \sin \theta_x + \sin \beta_m \sin \theta_y \quad (63)$$

粒径階  $k$  の掃流砂ベクトルの  $x$  軸からの偏差角  $\beta_k$  は以下の関係より求める.

$$\tan \beta_k = \frac{\sin \alpha - \Pi \Theta_y \left( \frac{u_{*ck}^2}{u_*^2} \right) \tan \theta_y}{\cos \alpha - \Pi \Theta_x \left( \frac{u_{*ck}^2}{u_*^2} \right) \tan \theta_x} \quad (64)$$

$$\Pi = K_{ld} + 1/\mu_s \quad (65)$$

$$\Theta_y = \frac{1}{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y} \quad (66)$$

$$\Theta_x = \Theta_y + \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \cos^2 \theta_x \quad (67)$$

ここに,  $K_{ld} (\cong 0.85)$  は抗力と浮力の比である. 浮遊砂の沈降速度 ( $w_{fk}$ ) は以下の関係より求める[13].

$$w_{fk} = \left( \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_k^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_k^3}} \right) \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_k} \quad (68)$$

基準面高さにおける  $k$  粒径階の平衡浮遊砂濃度 ( $c_{sбек}$ ) は以下のものである[14].

$$c_{sбек} = 5.55 \left( \frac{1}{2} \frac{u_*}{w_{fk}} \exp \left( -\frac{w_{fk}}{u_*} \right) \right)^{1.61} f_{bk} r_b \quad (\text{unit: ppm}) \quad (69)$$

浮遊砂濃度の鉛直分布が指数分布で仮定されるとき,  $k$  粒径階の水深平均浮遊砂濃度 ( $c_{sk}$ ) と基準面

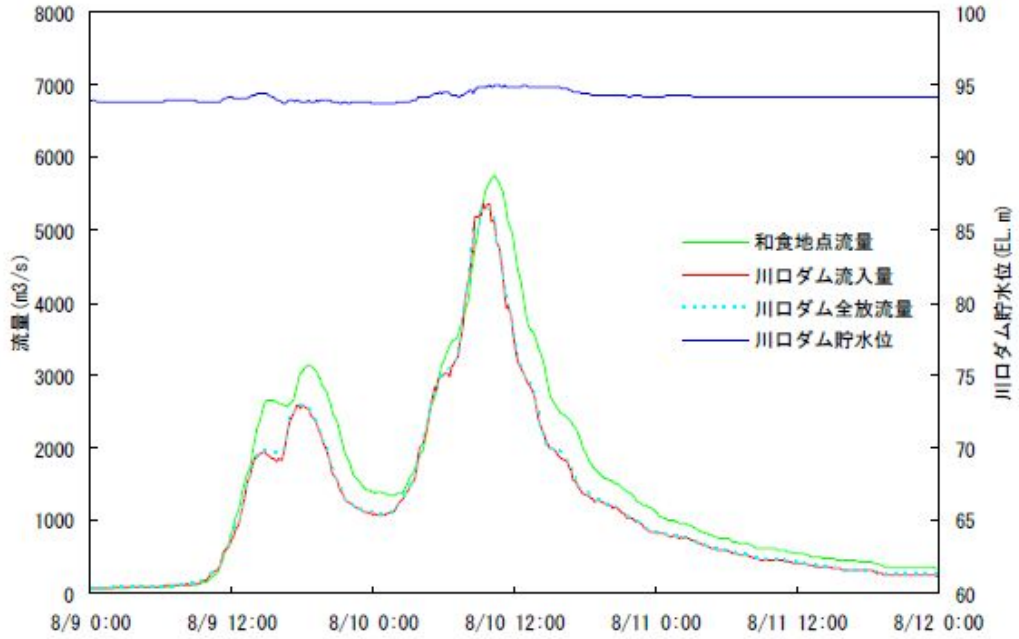


図6 和食地点および川口ダム地点の流量と水位  
高さにおける  $k$  粒径階の浮遊砂濃度 ( $c_{sk}$ ) との関係は以下のようなのである。

$$c_{sk} = \frac{c_{sbk}}{\beta_{sk}} (1 - e^{-\beta_{sk}}) \quad (70)$$

$$\beta_{sk} = \frac{w_{fk} h}{D_h} \quad (71)$$

ここに、 $D_h$  は水深方向の浮遊砂拡散係数であり、ここでは簡単のため  $v$  を用いている。  $k$  粒径階の水深平均浮遊砂濃度の質量保存則は以下のようなのである。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{hc_{sk}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( U \frac{hc_{sk}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( V \frac{hc_{sk}}{J} \right) \\ &= \frac{1}{J} w_{fk} (c_{sbk} - c_{sk}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \xi} h \left( \frac{1}{J} \left( D_x \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + D_y \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial c_{sk}}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left( D_x \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + D_y \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial c_{sk}}{\partial \eta} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \eta} h \left( \frac{1}{J} \left( D_x \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + D_y \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial c_{sk}}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \left( D_x \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + D_y \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial c_{sk}}{\partial \eta} \right) \end{aligned} \quad (72)$$

ここに、 $D_x$  と  $D_y$  は、それぞれ、流下方向と横断方向の浮遊砂拡散係数であり、簡単のため  $v$  を用いている。河床位方程式は以下のようなのである。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{c_b E_b}{J} \right) + (1 - \lambda) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_b}{J} \right) + \left( \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \sum_{k=1}^n \frac{q_{b\bar{k}}}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \sum_{k=1}^n \frac{q_{b\eta k}}{J} \right) + \sum_{k=1}^n \frac{1}{J} w_k (c_{sbk} - c_{sk}) \right) = 0 \\ & E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1 - \lambda} \end{aligned} \quad (73)$$

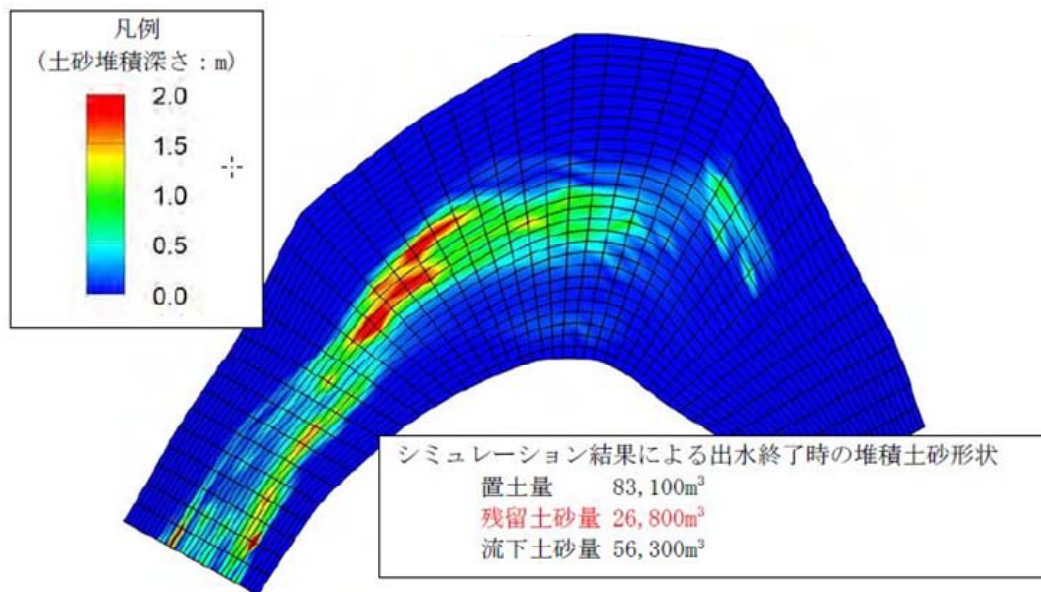
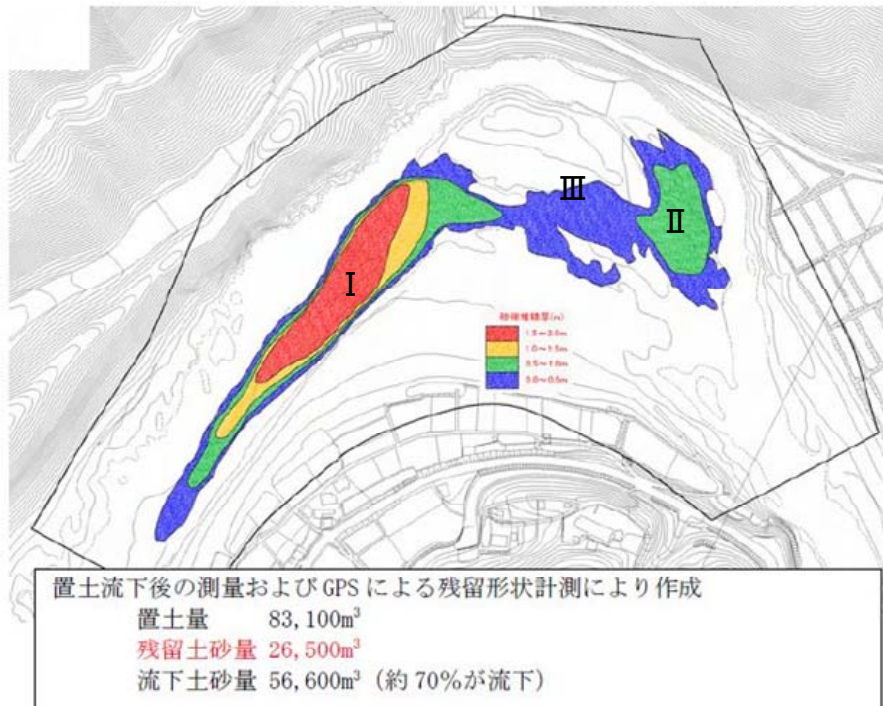


図7 出水後に、岩上に残った土砂の堆積厚（上が実測値，下が解析結果）

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_b}{J} \right) = 0 \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (74)$$

河床勾配が安息角以上となった場合、河床材料が非粘着性材料であれば、局所河床勾配が安息角以下となるように河床位を補正する[15].

### 3. 2 解析条件

図5に解析対象領域の航空写真を示す。解析対象領域は、川口ダム下流で最も置土量の多い朝生地点であり、左岸（内岸）の岩露出域に置土を実施した。置土量は、83,100m<sup>3</sup>である。



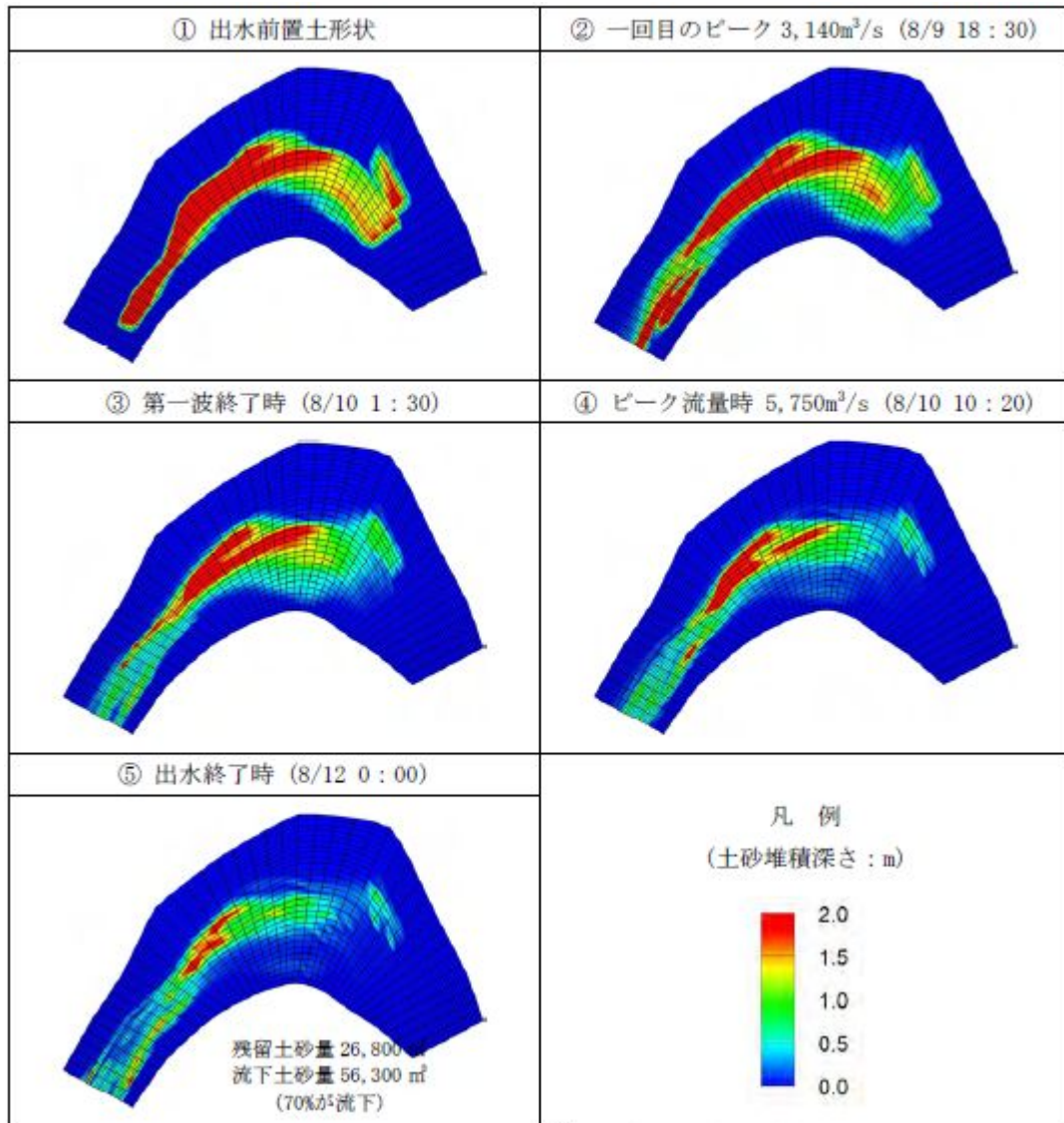


図8 置土された土砂の堆積厚の時間変化

解析対象出水は、平成21年8月9日～11日に発生した台風9号による出水である。図6に和喰地点および川口ダム地点の流量と水位データを示す。置土の粒径は、約7.5mmである。

### 3.3 結果と考察

図7に出水後に、岩上に残った土砂の堆積厚を実測した結果と、解析結果を示す。ここで、実測値は、平水時に陸域となっている岩露出域のみを対象に行っており、流路内の土層厚は測定されていないので、流路内の土層厚は表示されていないが、解析では、置土された土砂が流路内に輸送され、堆積したものも表示されている。これを考慮して、両者を比較すると、図中にIとして示された下流の流路沿いの堆積土砂の厚さが厚いこと、IIと示された上流域に土砂が堆積していることが良く表現されている。また、IとIIの間に堆積土砂量が少ないIIIの領域が両者にあり、洪水時の主流が③の部分の流れ、置土を下流へ流出させた事が理解出来る。図8に置土された土砂の堆積厚の時間変化を示す。流量の違いもあり、8/9の1回目の出水よりも8/10の2回目の出水で多くの置土が流出していることが分かる。また、初期(①)から1回目のピーク(②)、1回目のピーク(②)から1回目の出水終了時(③)を比較すると、減水時の方が多くの土砂が流出していることが分かる。これは、1回目の出水終了時(③)から2回目のピーク(④)、2回目のピーク(④)から出水終了時(⑤)を比較し

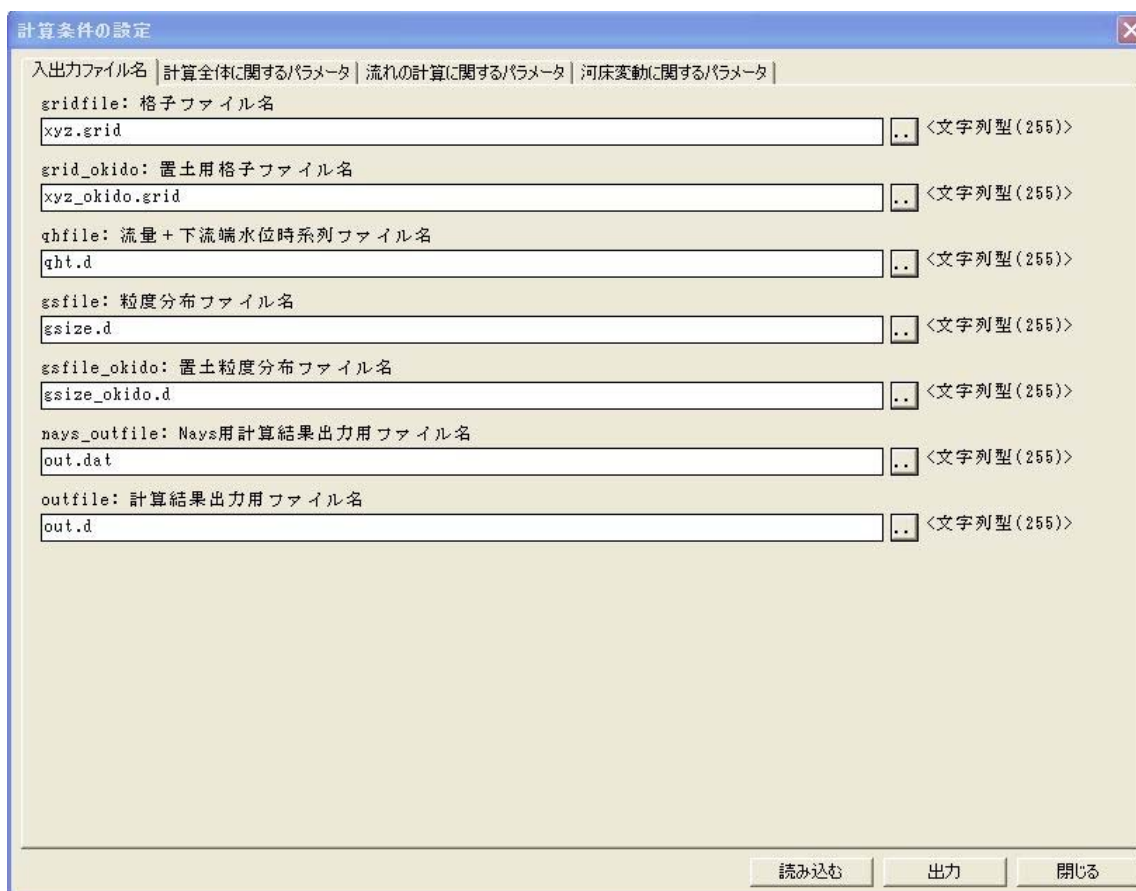


図9 置土解析用入力条件ウィンドウ

でも同様の傾向がある。

上記のような流出状況を考えると、置土は、ⅡからⅢの領域に多めに置く方が一度に多くの置土が下流へ流出することが分かる。

#### 4. RIC-Nays の置土バージョン

北海道河川防災研究センターでは、これまで、RIC-Nays と称する二次元河床変動解析のインターフェースを開発してきた。ここでは、RIC-Nays の条件入力用の xml ファイルを置土用に修正し、RIC-Nays でも置土の解析がスムーズに行えるようにした。図9に置土解析用入力条件ウィンドウを示す。置土の解析を行うには、置土前の河床形状と置土実施後の河床形状データを入力する必要がある。また、河床材料の粒度分布も元河床の粒度分布と置土の粒度分布が必要となる。置土実施後の河床形状データは、置土前の河床形状データと同フォーマットであり、「置土用格子ファイル」としてウィンドウの上から二番目のファイルとして読み込む。置土の粒度分布は、五番目のファイルである「置土粒度分布ファイル」として読み込むようにしている。ここで、河床内の堆積層の設定に若干工夫が必要となる。ここでは、元河床と置土の鉛直方向の境界（つまり、置土前の河床面）を堆積層と堆積層の境界に一致させている。また、置土内の堆積層厚と元河床以下の堆積層厚を等しくするとともに、初期遷移層の厚さに空間分布を与えることにより、置土表面において、層の境界と河床面が一致するようにしている。

#### 5. 結論

岩露出域を考慮した一次元河床変動解析により、流砂の下流への伝播特性を検討するとともに、一般座標系による平面二次元河床変動解析を用いて、那賀川中流域において、平成

21年8月9日～11日に発生した台風9号による出水による置土の流出現象を解析した。さらに、開発した解析モデルを用いて置土の解析が容易に行えるように、RIC-Nays用に置土用xmlファイルを作成した。本研究で得られた成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 河床上昇傾向の条件では、河床形状の時間変化について初期河床が非粘着性の場合と粘着性の場合ではほとんど違いが無い。
- (2) 粘着性河床の方が非粘着性河床よりも上流からの給砂材料による粗粒化の下流への伝播が速い。
- (3) 岩盤河床と粘着性河床の相違は、河床からの粘着性材料の流出のみである。
- (4) 岩露出域を考慮した一般座標系の平面二次元河床変動解析により、置土の流出過程が再現出来た。
- (5) RIC-Naysの条件入力用のxmlファイルを置土用に修正し、RIC-Naysでも置土の解析がスムーズに行えるようにした。

### 参考文献

- [1] 竹林洋史：河川中・下流域の河道地形，ながれ，第24巻，第1号，pp.27-36，2005.
- [2] Engelund, F. Flow and bed topography in channel bends. *Jour. of Hy. Div. ASCE*, Vol. 100, No. HY11, 1974.
- [3] Shimizu, Y. and Itakura, T. Calculation of flow and bed deformation with a general non-orthogonal coordinate system, *Proc. of XXIV IAHR Congress*, Madrid, Spain, C-2, pp.41-48, 1991.
- [4] Nezu, I. and Nakagawa, H. Turbulence in open channel flows, *IAHR Monograph, Balkema*, Rotterdam, The Netherlands, pp. 53-56, 1993.
- [5] 清水義彦，辻本哲郎：植生対を伴う流れ場の平面2次元解析，水工学論文集，第39巻，pp.513-518，1995.
- [6] 長田信寿：一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析，水工学における計算機利用の講演会講義集，土木学会，pp. 51-76，1999.
- [7] Takebayashi, H., Egashira, S. and Okabe, T. Braided streams formed on beds with non-uniform sediment, *Proc. 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, pp.787-798, 2003.
- [8] Egashira, S. and Ashida, K. Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, *Advances in Micromechanics of Granular Materials*, (Edited by H.H.Shen et al.) Elsevier, pp. 391-400, 1992.
- [9] 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972.
- [10] Kovacs, A. and Parker, G. A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels. *J. Fluid Mech. Vol. 267*, pp. 153-183, 1994.
- [11] B. Y. Liu Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels. *Thesis presented to Kyoto University*, 1991.
- [12] 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21，1956.
- [13] Rubey, W. W. Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *American J. of Science*, Vol. 25, pp. 325-338, 1933.
- [14] Lane, E. W. and Kalinske, A. A. Engineering calculation of suspended sediment, *Trans. A.G.U.*, Vol. 22, 1941.
- [15] 永瀬恭一，道上正規，檜谷治：狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算，水工学論文集，第40巻，pp.887-892，1996.
- [16] Sekine, M., Nishimori, K., Fujio, K. and Katagiri, Y. On erosion process of cohesive sediment and erosion rate formula, *Annual Journal of Hy. Eng. JSCE*, Vol. 47, pp. 541-546, 2003.