

流域規模での水・土砂動態のモデル化 及び実流域への適用

MODELING OF WATER AND SEDIMENT DYNAMIC IN THE BASIN SCALE AND ITS APPLICATION TO THE ACTUAL BASIN

守利 悟朗¹・椎葉 充晴²・堀 智晴³・市川 温⁴
Goro MOURI, Michiharu SHIIBA, Tomoharu HORI and Yutaka ICHIKAWA

¹学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学教授 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学助教授 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工博 京都大学助手 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

In this paper, an algorithm for long-term prediction of dynamic behavior of water and sediment in the basin scale using their physical process models was developed. In the algorithm, a basin is divided into the mountain watershed part and stream channel part and individual flow models are applied. Surface land slides and rainfall-runoff process from the mountain watershed are calculated by the kinematic wave model for subsurface-surface flow and slope stability analysis on a grid-based DEM (Digital Elevation Model). Sediment yield volume resulting from the surface land slides is calculated by slope stability analysis. Sediment transport and bed variation in the stream channel can be predicted by debris flow, bed-load, suspended-load and wash-load formulae. The new method was verified by applying to Yahagi-dam basin, Japan.

Key Words : rainfall runoff, sediment discharge, grid-based DEM, surface land slides, critical tractive force, sediment transport, water and sediment dynamic

1. はじめに

これまで河川流域における土砂問題は、山地流域、河川、ダム、河口沿岸部で個別の問題として取り扱われてきており、一定の成果が上げられている。しかし、個別の対応では限界があり、これらの問題に対して、一貫した土砂の運動領域を流砂系という概念で捉え、水系一貫とした土砂管理の視点が求められている。土砂動態は、山地での土砂生産から河道での流送・堆積へと至る現象である。しかも、生産源から供給された土砂が、その後の降雨イベントによって長期間にわたって下流に運搬されるという特徴がある。したがって、水系一貫した土砂動態を把握するためには個々の場での問題の境界条件となる山地での土砂生産量と流送力となる洪水流出量の両方を評価する必要がある。

土砂動態のモデルで基本となる土砂生産量の一般的な計算方法は確立されていない。したがって、実務では、河道への流入土砂量は、モデル化された河道条件(流路

幅、勾配)及び河床材料を用いて平衡流砂(掃流砂と浮遊砂)量式及び実績調査データより換算された補正係数に基づいて評価される事が多い。

本論文では、山地部(土砂生産・洪水流出モデル)と河道部(土砂移動モデル)において、個別の流れモデルを適用することにより、流域規模での水・土砂動態のモデル化を行った。すなわち、河道部ではダム・砂防堰堤等を想定し、ダム付近のエネルギー損失を取り入れやすいモデルとして、エネルギーの保存形で記述されている不等流モデルを用いた。山地河川のような急勾配河川を対象とした場合、常・射流が混在した流れが生じる為、MacCormack¹⁾法、CIP法²⁾、FDS法³⁾等の常・射流が混在した流れを扱う非定常流の計算方法が用いられる事もあるが、人工粘性等パラメータの設定により解が大きく変化するにもかかわらず、設定方法が確立されていない為、不等流モデルを用いるものとした。

山地部においては、水文学的手法を用いて、降雨から浸透流への変化過程を考慮し、土砂生産量と洪水流出量を評価するモデルとして、表面流・中間流統合型

kinematic waveモデル⁴⁾を用いた。このモデルは、洪水流出量とともに土砂生産量を評価する際に、地下水位算定モデルとしても機能する。

これまでも、流域規模で土砂動態を評価する試みがされている。例えば、土砂生産量について、降雨強度の関数として算出している研究⁵⁾や、降雨強度、崩壊地面積、河道長の関数として算出している研究⁶⁾がある。また、これらの研究では、土砂輸送の形態として掃流砂或いは土石流を対象としている。本論文では、土砂生産量の算定を無限長斜面安定解析による物理的なモデルを用いた。また、土砂輸送の形態として、土石流、掃流砂、浮遊砂、ウォッシュロードを対象とし、流域規模での土砂動態に関連した現象の全てを物理的なモデルに基づいて、長期的に予測するアルゴリズムを開発した。

2. 流域規模での水・土砂動態モデルの構成

流域を一貫して土砂移動をとらえる場合、土砂輸送を規定するさまざまな時間スケールの要因を認識することが重要である。土砂輸送を規定する要因としては、短期のイベントとして生じる斜面及び低次河道における崩壊・土石流に起因する土砂生産、その土砂の高次河道（下流域）での滞留、滞留土砂の不安定度に対応した再移動（再侵食・再堆積）、というマクロな空間・時間スケールの認識が重要である。本モデルでは、流域モデルを山地部（土砂生産・洪水流出）と河道部（土砂移動）のモデルで構成し、前述した流れのモデル化に加えて、土砂の発生・移動におけるタイムスケールにも着目して水・土砂動態のモデル化を行った。すなわち、山地部での土砂移動のタイムスケールは、河道での土砂移動のタイムスケールと比較して小さい為、表層崩壊した土砂は、そのまま河道に移動する事とした。本モデルの構成を図-1に示す。

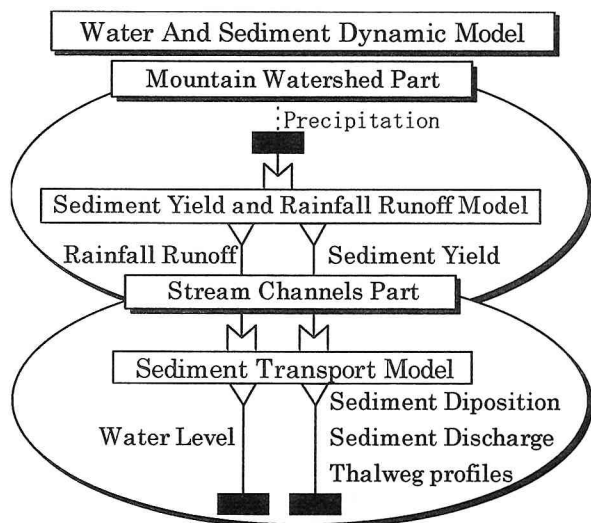


図-1 モデルの構成

(1) 土砂生産・洪水流出モデル

(a) 地形モデル

水・土砂動態モデルへの流域地形形状の効果を取り入れる為、デジタル形式の地理的情報から数値地形モデル(Digital Elevation Model, DEM)を作成した。国土数値情報のように、公開されているデジタルデータはグリッド形式である事が多いので、グリッド型DEM(Grid-based DEM)を用いて流域のモデル化を行った。山地部(土砂生産・洪水流出モデル)では対象流域を36の部分流域に分割し(部分流域の平均面積:14.0km²)、斜面素片と呼ばれる矩形の小斜面の集合体で表現した⁷⁾。斜面素片の大きさは、DEMを作成する際に使用した標高データのメッシュ間隔に対応する。本研究では、ソースデータとして、国土地理院数値地図50mメッシュ(標高)を使用した。河道部(土砂移動モデル)では、河道の水路形状を経年的に測量し河床が変動する幅を読み取り、河床の侵食はこの幅に限定されることとした。

本モデルを適用した矢作ダム流域の地形モデルを図-2に示す。

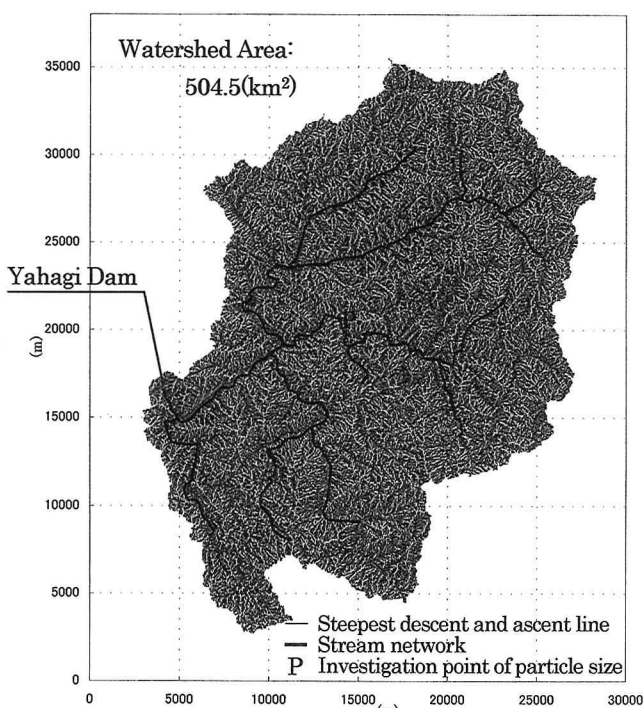


図-2 地形モデル(矢作ダム流域)

(b) 土砂生産現象のモデル化

土砂生産の形態は、表層崩壊、溪岸崩壊、地滑り、大規模崩壊等に大別することができる。土砂生産現象を発生させる原因の中でも、降雨は最も重要な誘因であり降雨により発生する代表的な土砂生産の形態は山腹斜面での表層崩壊である。また、対象流域の地質が花崗岩地帯であり、過去の調査・研究事例⁸⁾によっても、花崗岩地帯では、風化した花崗岩の表層が、崩壊する事例が報告されている点も考慮し、本研究ではこの表層崩壊に注目して土砂生産現象をモデル化した。その発生は山地斜面の表層にある軟弱な極めて透水性の高い土壌層が崩壊す

ることによる。雨水が表層に浸透することにより中間流が発生し、中間流の水位が上昇して間隙水圧が上昇する。その結果基礎土面におけるせん断抵抗が低下し、ある地下水位で底面での抵抗力よりせん断力のほうが大きくなると崩壊が起こる。このようにして起こる表層崩壊は滑り面の深さが1m内外、幅は数m～10m前後、長さが数十m程度であり⁹⁾、滑り面の深さに比較して滑り面の長さが大きいので、無限長斜面安定解析が適用できる。数値地形モデルを用いて表層崩壊を数値シミュレーションする研究¹⁰⁾¹¹⁾では崩壊のスケールに対応してメッシュサイズは10m～25mとする場合が多い。本研究で利用できた数値地図のメッシュサイズは50mであるが10m程度のメッシュサイズが必要であるとの研究もあることを考慮して、計算差分間隔は10m規模で行っている。

(c) 陸面斜面流出モデル

洪水流出モデルとして、中間流・表面流統合型 kinematic waveモデルを用いる。(a)で構成された地形モデル上で個々の斜面素辺ごとにkinematic waveモデルを適用する。このモデルは、A層における流下方向の水深分布を得ることが出来るので、表層崩壊予測のモデルでの地下水位算定モデルとしても機能する。

連続式

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = r \quad (1)$$

運動方程式

$$q = \begin{cases} ah, & h \leq d \\ \alpha(h-d)^m + ah, & h > d \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $a = k \sin \theta / \gamma$ 、 q : 斜面単位幅流量、 h : 流積、 d : 見かけのA層厚(= γD , γ は有効空隙率、 D はA層厚)、 α, m : 定数(Manning則を用いると $m = 5/3$ 、 $\alpha = \sin^{1/2} \theta / n$)、 n : Manningの粗度係数、 r : 降雨強度、 k : 透水係数、 θ : 斜面勾配、である。

(d) 土砂生産モデル

表層土構造を一次的に、無限長斜面として考えると、単位切片の表層土を崩壊させようとする基底面に働くせん断応力 τ は次のようになる。

$$\tau = \{\gamma_{sat} \cdot h' + \gamma_t \cdot (D - h')\} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (3)$$

それに、抵抗するせん断抵抗 τ_r は次のようになる。

$$\begin{aligned} \tau_r &= c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \\ &= c + \{\gamma_{sat} \cdot h' + \gamma_t \cdot (D - h')\} \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 c : 土の粘着力、 σ : 土粒子に加わる垂直応力、 u : 間隙水圧、 θ : 地表面の傾斜角、 ϕ : 土の内部摩擦角、 γ_{sat} : 土の飽和単位体積重量、 γ_w : 水の単位体積重量、 γ_t : 土の湿潤単位体積重量、 D : 表層土の厚さ、 $h' = h / \gamma$: 表層土内の地下水位の高さ、である。

よって、安全率SFは次式で計算できる。

$$\begin{aligned} SF &= \tau_r / \tau \\ &= \frac{[c + \{\gamma_{sat} \cdot h' + \gamma_t \cdot (D - h')\} \cos^2 \theta \cdot \tan \phi]}{[\gamma_{sat} \cdot h' + \gamma_t \cdot (D - h')] \cdot \sin \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (5)$$

各斜面素辺ごとに斜面安定解析を行う。kinematic waveモデルを差分展開して解くと、斜面素片の各計算断面で中間流水深が求められるので、各斜面素片で各計算断面ごとの安全率が得られることになる。これにより各斜面素片での崩壊土砂量Vは空間差分長さ Δx 、斜面素片の幅Bで決定される。

$$\begin{aligned} V &= \sum_{i=1}^n (\text{安全率 } SF < 1 \text{ の計算断面 } i \text{ と計算断面 } (i-1) \\ &\text{の間のA層厚 } DA \times \Delta x \times B) \end{aligned} \quad (6)$$

生産土砂量及び洪水流出量を土砂移動モデルの境界条件とする。

(2) 土砂移動モデル

各部分流域で計算された生産土砂量及び洪水流出量を部分流域に対応する河道区間の上流端から与えて河床変動計算をおこなった。河床変動計算には大きく分けて「流れの計算」と「河床変動量、流砂量、粒度分布の計算」の2つの内容が含まれる。ここでは、流れの計算に不等流の式を用いる。流砂量の計算では、河床の傾き θ に応じて土砂移動の形態を、 $\theta > 15^\circ$ の時には石礫型土石流¹²⁾、 $\theta < 15^\circ$ の場合には流掃力に応じ、掃流、浮遊、ウォッシュロードとした。掃流砂量を芦田・道上の式¹³⁾、浮遊砂量を芦田・道上の浮上量および拡散方程式¹³⁾、ウォッシュロード量¹³⁾は、流量の2乗に比例する関係を用いて評価した。また、一般的に河床材料は広い粒径分布を持つことから、混合砂礫モデル¹⁴⁾を用いて河床の遮蔽効果を取り入れた粒度分布の計算をした。

(a) 流れの計算

常射流混在流れを扱う非定常流の計算方法としてはMacCormack法、CIP法、FDS法等がある。本モデルでは、流れを非定常流ではなく時間についての微分項を落として定常状態とした不等流として扱う。これは次のような理由からである。河床変動を計算する際には、流れに比べて河床変動の変化が小さいことから流れの時間変化を無視できること、MacCormack法等では人工粘性等の設定をするが、その設定により解が大きく変わるにもかかわらず、設定方法が確立されていないこと、不等流の式はエネルギーの保存形で記述されるため、ダム付近のエネルギー損失を取り入れやすいことである。

連続式

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

運動方程式

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial H}{\partial x} + I_e = 0 \quad (8)$$

ここで、 x ：流下方向の座標軸、 Q ：流量、 A ：流積、 g ：重力加速度、 H ：水位、 h ：水深、 ρ ：流体の密度、 I_e ：損失エネルギー勾配であり、摩擦によるエネルギー損失を考える場合、マンニングの粗度係数を用いて次式のように評価される。

$$I_e = \frac{n^2 u^2}{R^{4/3}} \quad (9)$$

ここで、 u ：流速、 n ：マンニングの粗度係数、 R ：径深、である。

(b) 河床変動量・流砂量・粒度分布の計算

土石流・掃流砂・浮遊砂およびウォッシュロードが混在する河床変動の基礎式は、次式のように示される。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \left[\sum_{k=1}^{Nb} \left(\frac{B_s}{1-\lambda_b} \frac{\partial q_{deb,k}}{\partial x} + \frac{B_s}{1-\lambda_s} \frac{\partial q_{b,k}}{\partial x} + \frac{B_s(E_{sk} - D_{sk})}{1-\lambda_s} \right) + \sum_{k=Nb+1}^{Nd} \frac{B_s(E_{wk} - D_{wk})}{1-\lambda_w} \right] = 0 \quad (10)$$

ここで、添字 k ：粒径階の番号、 $q_{deb,k}$ 、 $q_{b,k}$ ：流路方向 x の粒径階 D_k の単位幅土石流或いは掃流砂量、 E_{sk} 、 D_{sk} ：粒径 D_k の浮遊砂の河床付近における単位面積当たりの巻き上げフラックスと沈降フラックス、 Z_b ：河床高、 λ_b 、 λ_s ：それぞれ掃流砂および浮遊砂の空隙率、 B ：河道幅、 B_s ：流砂幅、である。

土石流流量(石礫型土石流)の計算

$$q_{deb} = Ch_{deb} R^{2/3} \sin^{1/2} \theta \quad (11)$$

ここで、 q_{deb} ：土石流の単位幅流量、 h_{deb} ：土石流の流動深、 θ ：流路勾配、 C ：係数、である。

掃流砂量の計算

$$\frac{q_{Bk}}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd_k^3}} = 17 P_{bk} \tau_{*ck}^{3/2} \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_*} \right) \quad (12)$$

ここで、 s ：河床材料の水中比重(=1.65)、 g ：重力加速度、 D_k ：粒径階 k の粒径、 P_{bk} ：交換層における掃流砂の粒径 D_k の含有率、 τ_{*k} 、 τ_{*ck} ：それぞれ粒径 D_k に対する無次元掃流力および無次元限界掃流力、である。

浮遊砂の浮上量と沈降量の計算

$$\frac{\partial (AC_k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ A \left(\varepsilon_{sx} \frac{\partial C_k}{\partial x} - u C_k \right) \right\} + B_s (E_{sk} - D_{sk}) \quad (13)$$

ここで、 A ：流水断面積、 C_k ：断面平均濃度、 ε_{sx} ：流下方向の拡散係数、 u ：流速、 B_s ：流砂幅、 E_{sk} ：粒子（浮遊砂）の侵食速度、 D_{sk} ：粒子（浮遊砂）の堆積速度、である。

ウォッシュロードの浮上量と沈降量の計算

$$\frac{\partial (AC_k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ A \left(\varepsilon_{sx} \frac{\partial C_k}{\partial x} - u C_k \right) \right\} + B_s (E_{wk} - D_{wk}) \quad (14)$$

ここで、 E_{wk} ：粒子（ウォッシュロード）の侵食速度、 D_{wk} ：粒子（ウォッシュロード）の堆積速度、である。

粒度分布の計算

河床変動に伴い河床表層（交換層）における河床材料の各粒径階の含有率が変化する。その評価式は次のと

おりである。

$$\frac{\partial P_{bk}}{\partial t} + \frac{1}{E_m} \left(\frac{1}{1-\lambda_b} \frac{\partial q_{b,k}}{\partial x} + \frac{E_{sk} - D_{sk}}{1-\lambda_s} \right) + \frac{1}{E_m} \frac{\partial z_b}{\partial t} (\eta P_{bk} + (1-\eta) P_{bko}) = 0 \quad (15)$$

ここで、 P_{bk} ：交換層の粒径階 D_k の含有率、 P_{bko} ：交換層の下層における粒径階 D_k の含有率(その初期値は図-2中に示した地点Pでの粒度分布に等しいとした)、 E_m ：交換層の厚さ、である。また、 η は係数で、侵食のとき $\eta=0$ 、堆積のとき $\eta=1$ である。

3. 実流域への適用

本研究で構築したモデルを用いて、矢作ダム流域(流域面積:504.5km²)を対象として2000年の1年間の連続解析をおこなった。土砂生産・洪水流出モデルでの解析に用いた諸条件は以下のようなものである。A層厚は1.0(m)、透水係数は0.005(m/s)、有効間隙率は0.20、内部摩擦角は35°、manningの粗度係数は0.20、流れを差分計算する際の空間差分分割数は10とした。土砂移動モデルでの河床及び供給土砂の粒度分布は調査結果より、最大粒径20(cm)、最小粒径0.01(cm)とし代表粒径を10分割して設定した。その水中比重sは1.65、空隙率は0.4とした。

(1) 土砂生産・洪水流出モデルによる計算結果

(a) 斜面安全率

東海豪雨時(2000年9月16日出水)でのピーク降雨量時の各斜面素片ごとの安全率を図-3に示す。

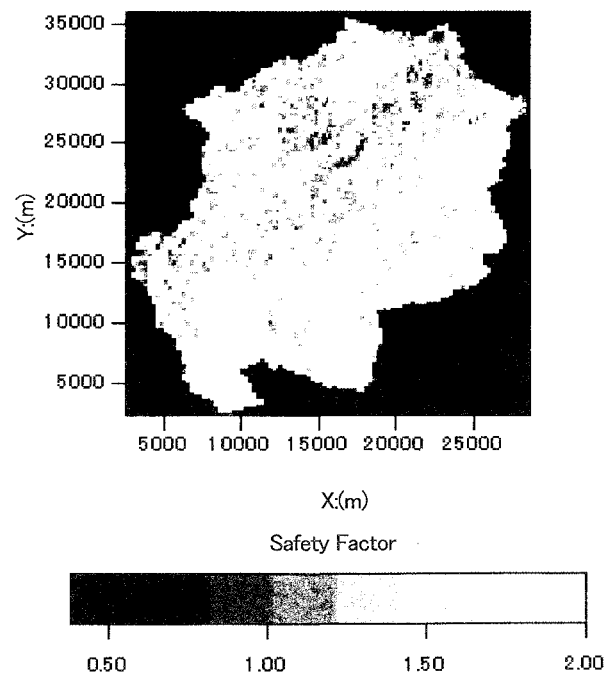


図-3 安全率の平面分布

(b) 生産土砂量及び洪水流出量の時系列

図-4の洪水流出解析結果は連続時間で計算をしたものを連ね、矢作ダム流入量の実績値と比較したものである。降雨の流出率は0.75としている。図-5は(6)式により得られた崩壊土砂量の時間的変化である。

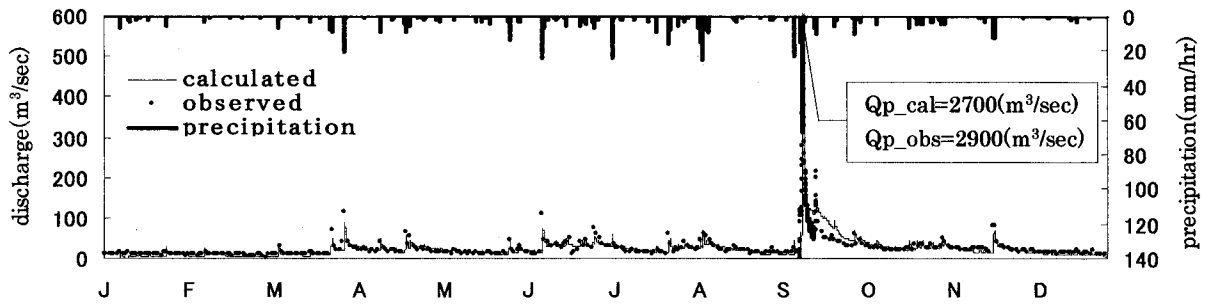


図-4 矢作ダム流域における年間流出解析結果

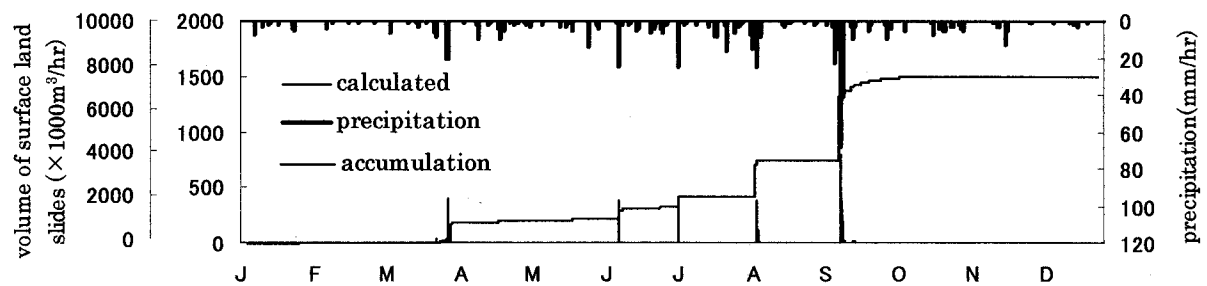


図-5 崩壊土砂量の時間的変化

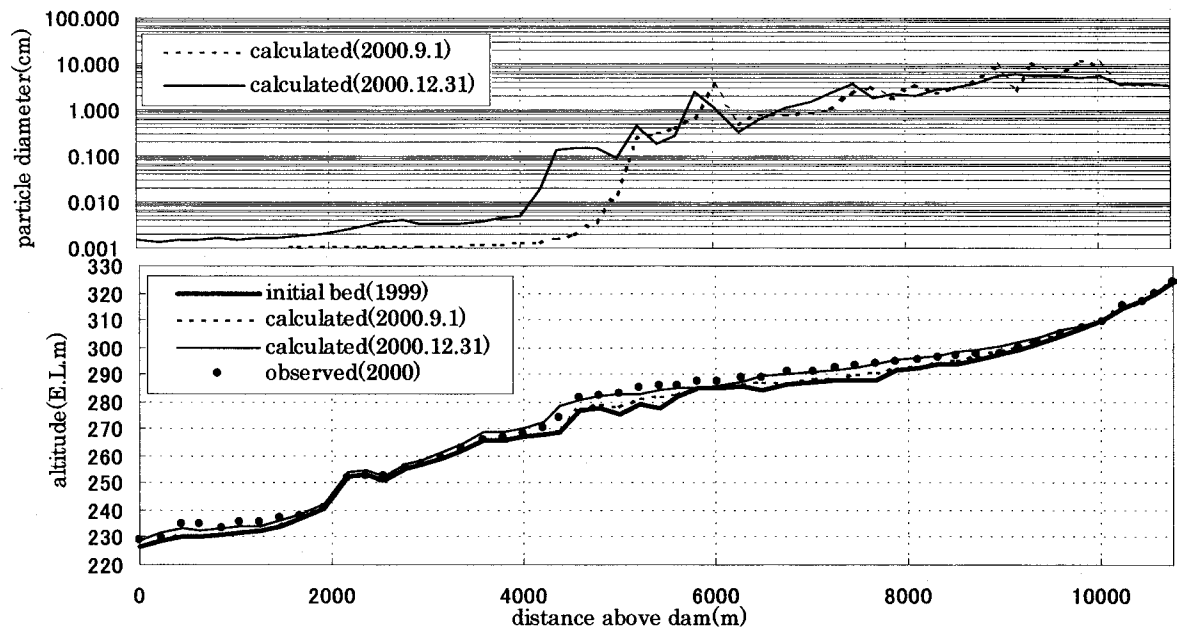


図-6 矢作ダム河床縦断形状及び平均粒径の縦断的变化

表-1 土砂収支

	observed ($\times 1000\text{m}^3$)	calculation($\times 1000\text{m}^3$)(%)				
		debris flow	bed-load	suspended-load	wash-load	total
sediment inflow		72.42(1.03)	992.54(14.14)	688.53(9.81)	5267.71(75.03)	7021.20(100.00)
sediment deposition	2400.00	72.42(2.73)	992.54(37.40)	688.53(25.95)	900.25(33.92)	2653.73(100.00)
sediment discharge		0.00(0.00)	0.00(0.00)	0.03(0.01)	4367.44(99.99)	4367.47(100.00)

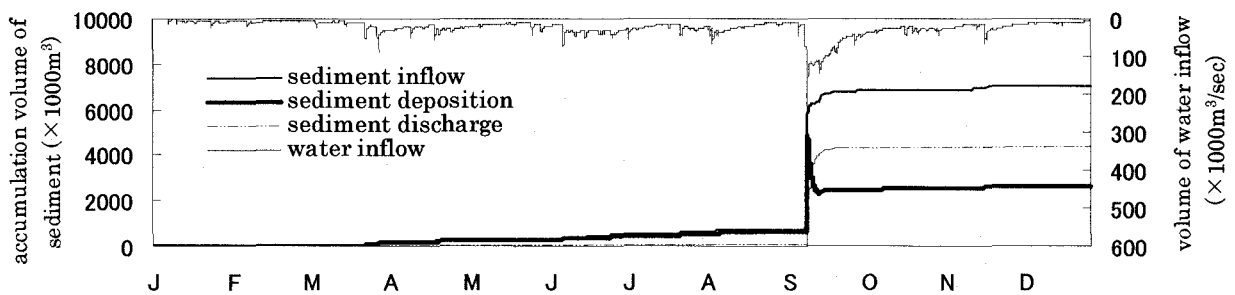


図-7 矢作ダム流入・堆積・流出土砂量の時間的変化

(3) モデルの検証及び考察

本節では、矢作川流域への適用結果についての考察を行いモデルの妥当性を検証する。図-3は斜面安全率の平面分布である。この結果より流域北西部(上村川上流域)での斜面崩壊が多いことが伺える。これは2000年の東海豪雨時の斜面崩壊面積率の調査結果¹⁵⁾と一致した傾向である。また、図-4は洪水流出量の解析結果であり実績流量のハイドログラフと比較するとよく再現できている。崩壊土砂量の時系列(図-5)では、降雨強度が20(mm/hr)以上の場合に崩壊が発生している。これは東海豪雨以外の降雨イベントに対しても斜面崩壊が発生していることを示している¹⁵⁾。河床変動計算結果によると縦断形状(図-6)、土砂収支(表-1)共に実績値をよく再現できている。図-6上段は表層での粒度分布の縦断的变化であり貯水池内に到達した土砂の分級作用が確認された。東海豪雨後は砂礫成分の流入により貯水池内の平均粒径が大きくなった。ダムサイト付近の土砂成分は粒径が0.02(cm)以下のウォッシュロード成分である。土砂移動現象について考察すると土砂生産域では線形的(図-5参照)であったが河道では非線型性(図-7参照)を呈した。河道での非線型性はアーマコートの破壊機構をモデルに組み込んだ効果により生産堆積土砂が東海豪雨により下流に移動した結果である。

4. おわりに

本研究では、流域規模での水・土砂動態のモデル化及び実流域への適用を行った。以下に、主要な成果を要約する。(1)山地部(土砂生産・洪水流出モデル)では表面流・中間流統合型kinematic wave法による解析と無限長斜面安定解析を行い、河道部(土砂移動モデル)では、山地部からの洪水流出量及び崩壊土砂量を境界条件として一次元の河床変動計算を行い、個々の運動領域における時空間スケールに応じた水・土砂の移動現象をモデル化した。(2)構築したモデルを矢作ダム流域に適用した結果、斜面崩壊発生斜面の平面分布、洪水流出量、崩壊土砂量、及び河道部での土砂移動現象共に、実現象をよく再現できることを示した。

今後の課題としては次のようなことが考えられる。

(1)土砂生産・洪水流出モデルでは数値地図の50mメッシュをベースにDEMを作成した。数値地図をより細かいメッシュサイズを使用した場合に解析結果がどの様に

変化するかを検討。(2)生産土砂は直ちに河道に移動することとしたが、生産土砂が堆積する機構を導入する。

謝辞：本研究を実施するに当たり、国土交通省中部地方整備局矢作ダム管理所から貴重な資料を提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。また、土砂移動モデルの構築においては、(株)ハイドロソフト技術研究所、劉炳義様の河床変動計算プログラムを参考にさせて頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 河村三郎・中谷 剛：TVD-MacCormack法による常・射流混在流の数値計算法，水工学論文集第37巻，pp. 763-768, 1993.
- 2) 矢部 孝・肖 鋒：固体・液体・気体の統一解法とCIP法，数値流体力学会誌，第7巻第2号，1999. 1.
- 3) 西本直史・森明 巨・板倉忠興・金澤克巳：FDS法による1次元開水路流れの数値計算，土木学会論文集，2001. 5
- 4) 高橋琢馬・椎葉充晴：Kinematic Wave法への集水効果の導入，京都大学防災研究所年報(40)，B-2，pp. 123-136, 1995.
- 5) 砂田憲吾，長谷川 登：数値地形情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み，土木学会論文集，No. 485/II-26，pp37-44, 1994. 2.
- 6) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳流域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測，水工学論文集，第45巻，pp. 841-846, 2001. 2.
- 7) 椎葉充晴・市川温・柳原哲由・立川康人：河川流域地形の新しい数値表現形式，土木学会論文集，No. 621/II-47，1-9, 1999. 5
- 8) 国土庁地方振興局山村豪雪地帯振興課：平成11年度特殊土壌地帯推進調査(報告書要旨)，1999.
- 9) 小橋澄治：山地保全学，文永堂出版，1993.
- 10) 沖村孝：地形要因を利用した豪雨による山腹崩壊発生位置の予測システムについて，土木学会論文報告集，第338号，pp131-138, 1983. 10.
- 11) 高橋保・中川一：豪雨性表層崩壊の発生とその生産土砂量の予測，水理講演会論文集，1986. 2
- 12) 高橋 保・中川 一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，新砂防，Vol. 44, No3(176)，pp. 12-19, 1991.
- 13) 土木学会編：水理公式集，平成11年度版，pp. 163, 171, 1999.
- 14) Bing-Yi Liu: Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels, 京都大学学位論文，1991.
- 15) 国土交通省中部地方整備局豊橋工事事務所：矢作川の環境を考える懇談会資料，第1回，2001. 8. (2002. 9. 30受付)