

天神川における土砂動態の実態把握および将来予測

STUDY ON PREDICTION OF SEDIMENT BUDGET IN TENJIN RIVER BASIN

大木孝志¹・小島 亨²・川津幸治³・永田 徹³・加藤陽平³

Takashi OHKI, Toru KOJIMA, Koji KAWATSU, Toru NAGATA and Yohei KATO

¹国土交通省 中国地方整備局 鳥取河川国道事務所 (〒680-0803 鳥取県鳥取市田園町 4-400)

²国土交通省 中国地方整備局 倉吉河川国道事務所 (〒682-0018 鳥取県倉吉市福庭町 1-18)

³いであ株式会社 大阪支社 (〒553-0003 大阪市福島区福島 7-20-1)

E-mail:kawatsu@ideacon.co.jp, nagatat@ideacon.co.jp, katoyo@ideacon.co.jp

Key Words: Sediment runoff, Sediment transport, Sediment budget, Numerical model, Bed variation, Vegetation

1. はじめに

天神川は、鳥取県のほぼ中央部を貫流する鳥取県三大河川の一つで、日本海に流入する流域面積490km²、幹川流路延長32kmの1級河川である(図-1)。また、流域内の平均年降水量は、平野部(倉吉)で約1700mm、山地部(関金)で約1900mm程度である。なお、地質は大きく分けて天神川本川、三徳川流域、小鴨川下流域では花崗岩類、大山の東部に位置する小鴨川上流域、国府川では安山岩類が分布している。

天神川水系においては、これまで主に支川小鴨川上流の山地部で砂防堰堤施設、下流の平野部では横断工作物の建設および河道内の砂利採取が行われる等の土砂移動に対する人為的インパクトが存在した。

これらの人為的インパクトが減少し数年が経過した現在では、河道内の砂州域において樹木、植生の定着が進行している。このような河道内の樹林化、植生の定着は、洪水時に浮遊砂成分をトラップし砂

州高を上昇させるため河積を減少させる要因となり、治水上好ましくない。

本論文においては、上述のような現状を踏まえ、天神川における土砂動態について実態を把握した上で、樹林化、植生の定着による影響を定量化する。

なお、山地部における土砂移動状況の変化を考慮するため下流の平野河道への流出土砂量については、江頭ら¹⁾により開発された土砂流出予測モデルを用いて定量的な予測をおこなった。

2. 天神川流域の流砂特性

(1) 水文量

天神川の基準地点である小田観測所の昭和40年～平成16年における年最大流量を示す(図-2)。これによると、平均年最大流量は約710m³/sであり、近年においても昭和62年、平成2年、平成9年、平成10年、平成16年と平均年最大流量を上回る出水が見られる。

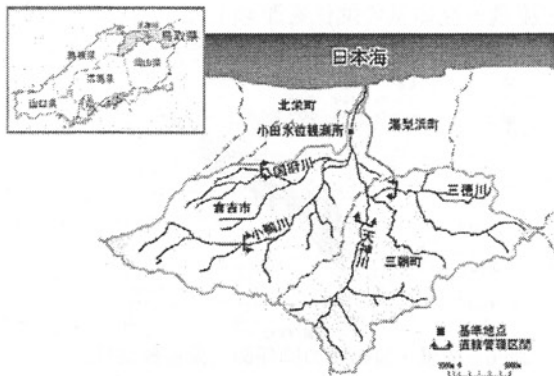


図-1 天神川流域図

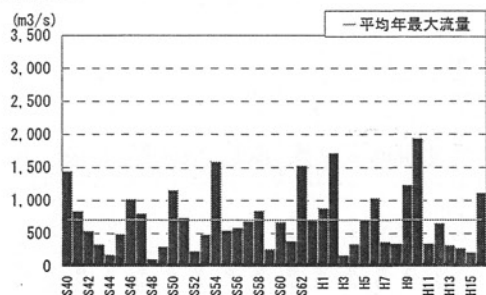


図-2 年最大流量(小田基準地点)

(2) 土砂生産域における砂防堰堤の実績堆砂量

平成17年8月時点で、流域内に存在する既設の直轄砂防堰堤の33基を対象に、簡易測量により堆砂量の把握をおこなった(図-3)。その結果として、実績堆砂量の総和および計画貯砂量(平成18年2月時点における各砂防堰堤の計画貯砂量の総和)の関係をみると、現況の実績堆砂量は計画貯砂量の約6割に達していることが分かった。

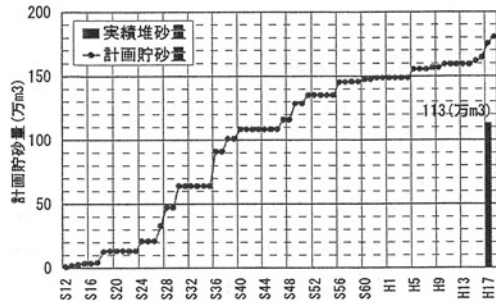


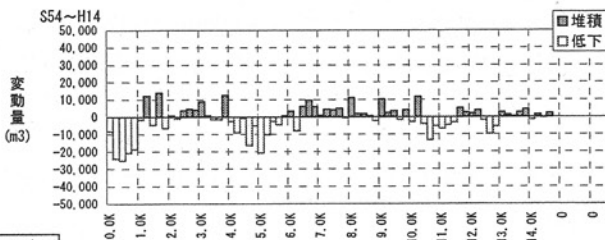
図-3 砂防堰堤堆砂量

(3) 平野部における河床変動量

a) 定期横断測量による変動土量の整理

天神川水系直轄区間における天神川、小鴨川の河床変動量を定期横断測量の結果より整理し図-4に示す。なお、変動量については、天神川では昭和48年以降、小鴨川では昭和52年以降に砂利採取が禁止され、堰・床止の配置状況が近年と大きく変化しない期間としている。これによると、天神川では全川の的に安定しており、区間によっては河床低下がみられる。これは近年、河川改修による掘削が行われているため、その影響を受けたものと考えられる。一方、小鴨川では下流部においては堆積傾向が見られる。これは後述するが、砂州植生が浮遊砂成分を捕捉するためと考えられる。

天神川



小鴨川

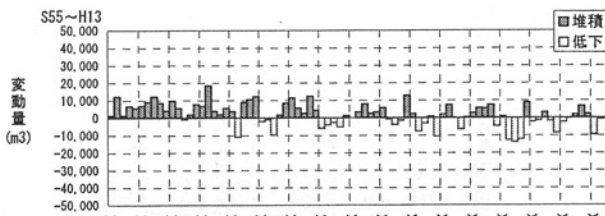


図-4 天神川直轄区間における河床変動量

b) 砂州植生域における細砂成分の堆積状況

図-5は、平成15年に天神川の支川小鴨川4.4k付近の中州で行ったトレンチ調査(鉛直掘削)の結果である。当該地点では、昭和49年以降に中州が発達し、単調な堆積傾向にある。小鴨川では、昭和60年代以降に河道内の樹林化が進行しており、河床材料鉛直分布をみると、樹林化が進行しはじめた昭和60年代以降の地層(層①~⑤)においてウォッシュロードと見られる0.1mm以下の成分が多く含まれている。これは、洪水時に樹木や植生の抵抗により周辺の流速が弱まることなどの影響と考えられる。

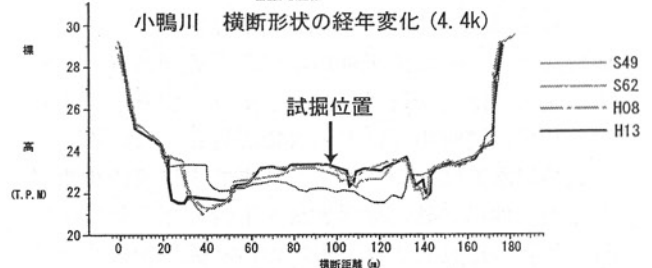
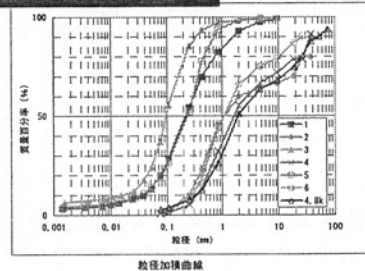
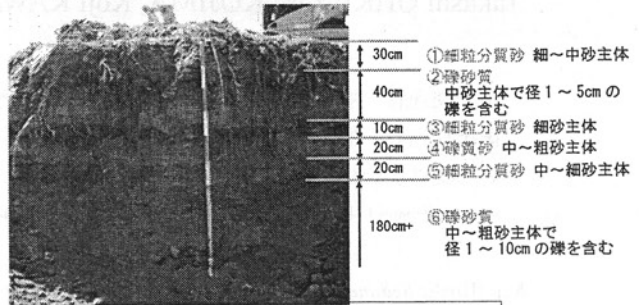


図-5 トレンチ調査結果(小鴨川4.4k)

(4) 流送土砂量観測

平成16年度~平成17年度に、天神川下流の3.78k地点では、ADCPにより主に浮遊砂成分を対象に流送土砂量観測が行われている。図-6には、観測結果として流量~流砂量の関係を整理した。これによると、流砂量は近似式 $Q_s = 1.0 \times 10^{-7} Q^{2.25}$ で表現される。

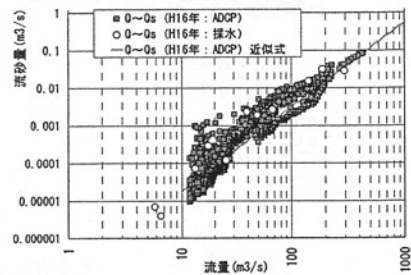


図-6 流量~流砂量の関係図(浮遊砂成分)

3. 土砂移動モデルの概要

(1) 流砂系一貫モデルの概要

上流域の土砂移動状況の変化を勘案するため、土砂の生産・流出も含め流域全体の土砂移動を定量的かつ粒径成分毎に把握することが必要である。そのため、本論文においては、流砂系一貫した土砂移動モデルとして、山地部には土砂流出計算を平野部には一次元河床変動計算を適用し、これら計算モデルの接続点で流送土砂の量と質の受け渡しを行うことにより山地から河口に至るまでの流砂系一貫した土砂移動モデルの構築および土砂動態の再現検討を行った。

(2) 山地部土砂流出モデル

上流域における河道は非常に複雑であるが、合流点から合流点是一本である。そこで、図-7に示すように、上流側の合流点を含み下流側の合流点を含まない区間を単位河道と定義し、これを直列・並列に連結することで実流域の河道の再現を図る。さらに、各河道の両側に接続する山腹斜面を、単位河道を一边とする平行四辺形で近似した単位斜面とすることで、降雨に伴う流出解析を容易に行うことができる。

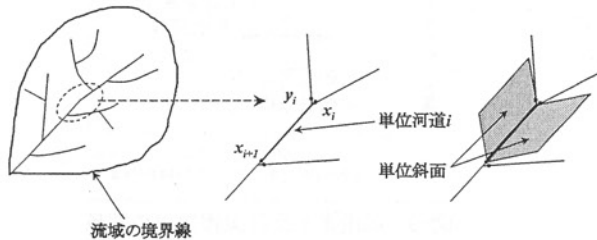


図-7 単位河道および単位斜面

山地部における流れの連続式、運動方程式は、河道を矩形と近似すれば以下のように与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{BL} \{Q(x_i) + Q(y_i) - Q(x_{i+1})\} + \frac{1}{B} q + r \cos \theta \quad (1)$$

$$Q(x_{i+1}) = \frac{1}{n} L^{1/2} B h^{5/3} \quad (2)$$

ここに、 h : 単位河道 i における水深、 L : 単位河道 i における河道長、 B : 単位河道 i における河幅、 $Q(x_i)$ 、 $Q(y_i)$: x_i 、 y_i 地点の流量、 q : 単位河道 i に接続する山腹斜面からの単位長さ当たりの横流入量、 θ : 河床傾斜角、 n : 単位河道 i におけるマンニングの粗度係数、 L : 単位河道 i における河床勾配 ($i = \tan \theta$)

流砂の連続式、流砂量式および河床材料の粒度分布式は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)BL} \{Q_i(x_i) + Q_i(y_i) - Q_i(x_{i+1}) - Q_w\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)\Delta BL} \{Q_{ii}(x_i) + Q_{ii}(y_i) - Q_{ii}(x_{i+1})\} - \frac{\partial z}{\partial t} \frac{p_i}{\Delta} \quad (4)$$

ここに、 z 、 λ 、 Q 、 p_i 、 Δ はそれぞれ河床高、堆積物の間隙率、流砂量、河床表面における粒径 d_i の含有率、交換層厚である。掃流砂量は芦田・道上式、浮遊砂量は芦田・藤田式で評価した。ウォッシュロード量については式(5)で評価する。単時刻 dt 前の河床材料の移動に伴い、存在割合に応じて河床から供給される。ただし沈降はないものとした。

$$\left. \begin{aligned} Q_w &= -(1-\lambda)BLp_w \frac{\partial z}{\partial t} & , \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right) \leq 0 \\ Q_w &= 0 & , \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right) > 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(3) 平野部河床変動モデル

不等流計算による水理諸量をもとに、流砂の連続式、運動方程式は山地部と同様の式で土砂移動を計算した。上流端における土砂供給量は、土砂流出モデルでの計算結果を境界条件として与える。

なお、浮遊砂およびウォッシュロードは濃度の連続性を考慮し、次式に基づいた。

$$\frac{\partial(\bar{c}_i h)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}_i q)}{\partial x} = E_{si} - D_{si} \quad (6)$$

ここに q は単位幅流量、 E_{si} は浮上量、 D_{si} は沈降量、 \bar{c}_i は Lane-Kalinske 式から求めた水深平均濃度である。

なお、砂州植生域における浮遊砂成分の捕捉現象を考慮できるよう、下記の条件を組み込んでいる。

- ①航空写真、横断測量資料により植生の繁茂が経年的に確認される断面において、計算上、 $U_* / w_0 > \alpha$ となる浮遊砂成分を対象とし、植生捕捉率 β を乗じた浮遊砂量 $V_{st} = \beta \cdot V_s$ を砂州域に堆積させる。
- ②浮遊砂成分の堆積厚は $\Delta Z_t = V_{st} / A$ で表す。
- ③モデル上では、砂州植生域において細砂が堆積し砂州高が上昇する。そのため、断面内において砂州高上昇分が河積を変化させることにより、掃流力の増減など考慮できる。
- ④なお、計算中に堆積した浮遊砂成分は、再度、流出しないものとする。

ここに、 U_* : 摩擦速度、 w_0 : 沈降速度、 α : 砂州域へ浮上する U_* / w_0 の閾値 ($\alpha = 2.0$)²⁾、 β : 植生の捕捉率 ($\beta = 30\%$)、 V_{st} : 植生により捕捉される浮遊砂量、 V_s : 砂州域へ浮上する浮遊砂量 (断面区間内におけるボリューム)、 ΔZ_t : 砂州植生域における浮遊砂成分の堆積高、 A : 砂州域として設定した断面区間内の面積

4. 土砂移動の実績再現

(1) 計算条件

検討期間は流砂系への人為的インパクト（砂防堰堤、堰、床止の建設、砂利採取等）が近年と大きく変化していない昭和56年～平成16年（24年間）とした。なお、土砂流出モデルでは上流域における砂防堰堤の存在状況を考慮するため、堰堤では河床位が天端に達するまでは掃流砂、浮遊砂を捕捉するものとした。また、掃流幅はレジーム則で設定し、平野部、山地部の河床材料は平成15年度調査、土砂生産域の粒度分布は平成17年度調査により得られた比較的新しいと推察される崩壊地跡の材料を基にそれぞれ表層、下層の2層で設定した（粒径階は0.1mm～195mm）。さらに、検証期間内において河道改修による掘削が行われている場合、各年の最後にその年の実績掘削土量を河床高に換算し、平均河床高から差し引いた。

(2) 降雨流出解析

検証期間の昭和56年～平成16年の洪水について、流量を概ね再現できる流域定数の設定を行った。流域定数の設定結果は下表のとおりである。なお、流域平均雨量は支配圏法で設定した。

表-1 流域定数

項目	諸元
土厚層	A層 0.8m、B層 1.0m
等価粗度係数	0.7
透水係数	火山岩性：A層 2.5×10^{-3} m/s、B層 2.5×10^{-3} m/s 花崗岩、礫性：A層 1.25×10^{-3} m/s、B層 1.25×10^{-3} m/s
初期浸透能	火山岩性：A層 300mm/hr、B層 30 mm/hr、C層 0.30mm/hr 花崗岩、礫性：A層 150mm/hr、B層 15 mm/hr、C層 0.15mm/hr
最終浸透能	火山岩性：A層 250mm/hr、B層 25 mm/hr、C層 0.25 mm/hr 花崗岩、礫性：A層 125mm/hr、B層 12.5mm/hr、C層 0.125mm/hr
浸透能低減率	1×10^{-5}

図-8には、小田（天神川）、河原町（小鴨川）における流量の実績値と計算値の比較図を示す。その結果、波形、ピーク値ともに概ね再現できている。

小田（天神川）

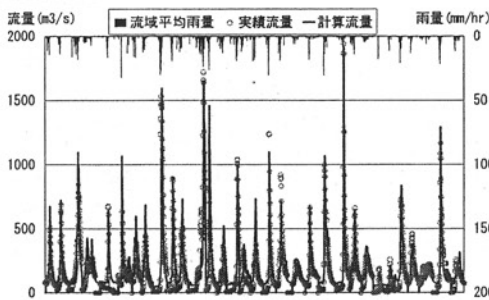


図-8(1) 流出解析結果 (S56～H16)

河原町（小鴨川）

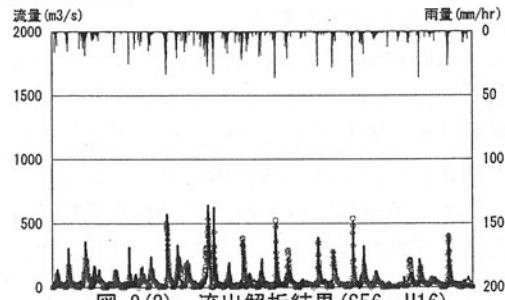


図-8(2) 流出解析結果 (S56～H16)

(3) 土砂移動の再現結果

a) 生産土砂の発生条件

土砂生産域では、山腹崩壊や土石流の発生により新たに土砂が供給される。ここで、天神川流域全体において既往の土砂災害報告資料を整理し、土砂災害が発生する降雨条件について検討した（図-9）。降雨条件が図中の土砂災害の発生領域に達する降雨毎に、土砂生産域における河床材料の粒度分布を初期河床材料に置換し、これにより、間欠的な土砂生産現象を表現した。

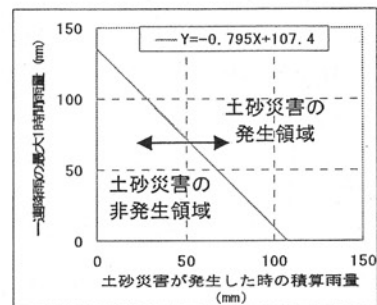


図-9 降雨量と土砂災害発生の関係

b) 生産土砂量

図-10に山地部から直轄上流端へ流入する生産土砂量の検証結果を示す。これによると、年平均流出土砂量（計算）は、全国主要河川の流域面積と年平均比流出土砂量の関係³⁾と比較すると、中国地方の河川における傾向と類似しており、全国的な傾向から計算による流出土砂量は妥当であると評価できる。

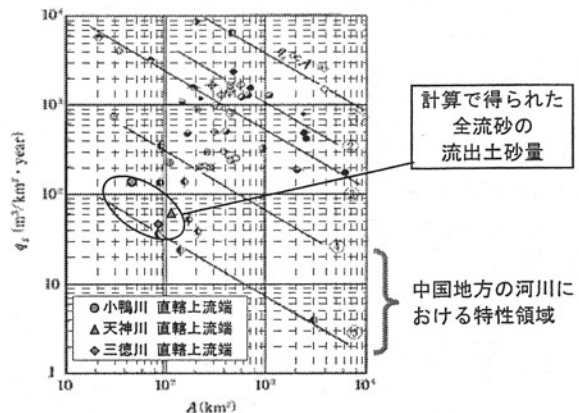


図-10 流域面積と年平均比流出土砂量の関係

b) 河床変動高

図-11には、計算による河床変動高の実績再現結果を示す。これによると全川の的に、河床変動高は概ね再現できた。

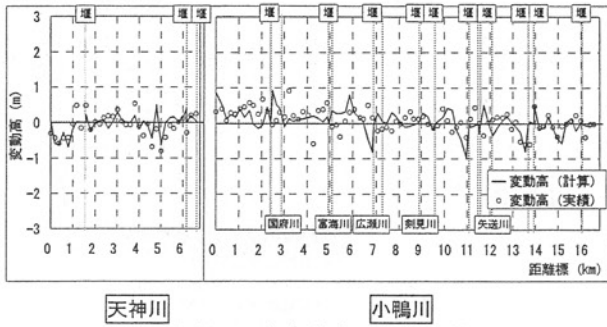


図-11 河床変動高の実績再現

図-12は、砂州上の植生域における浮遊砂成分の堆積厚の再現結果である。植生域の砂州域に対する面積割合に比例して浮遊砂成分の堆積厚が分布し、堆砂高の平均値を比較すると、実績で0.5m、計算で0.4mと概ね再現できている。

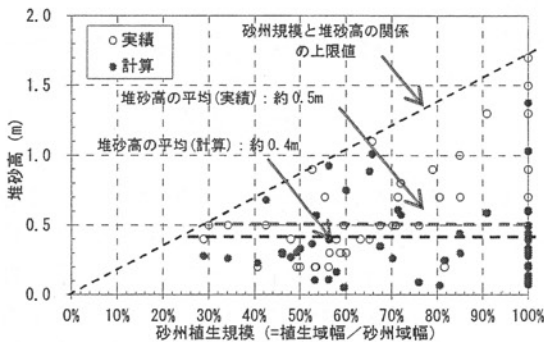
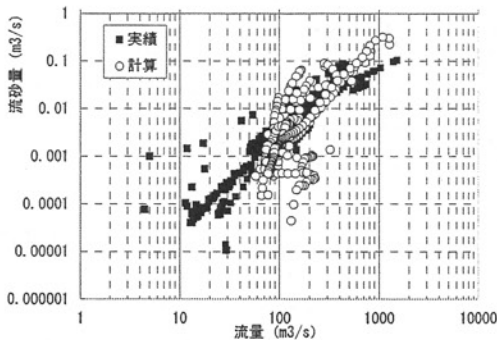


図-12 砂州植生規模と堆砂高の関係

c) 流送土砂量

流送土砂量の実績値と計算値の比較図を図-13に示す。なお、流砂量の比較は流送土砂量観測により得られた浮遊砂成分（主成分はウォッシュロード）を対象とする。その結果、流量規模が約100～約1000m³/sの洪水時において、概ね傾向を再現できていることが分かる。



※図中のプロット（計算）は粒径0.1mmの成分を示す
図-13 流量～流砂量の実績再現
(平成16年の6洪水)

5. 土砂移動の将来予測

前項で検討した天神川水系における土砂動態を表現できる土砂移動モデルにより、実績再現で用いた流況を与えて将来予測をおこなった。

(1) 計算条件

将来予測計算には、実績再現に用いた昭和56年～平成16年の近年24年間の流況を用いる。また、土砂移動モデルの流域定数等のパラメータは、実績再現検討で用いた諸元と同様とする。ただし、河道改修による河道掘削はなしとする。河道断面は最新の現況断面(天神川：H14年度測量、小鴨川：H13年度測量)とし、山地部の砂防堰堤については、平成17年調査による堆砂状況を反映させる(表-2)。

表-2 将来予測における計算条件

雨量	昭和57年～平成16年の雨量
初期河道断面	天神川：平成14年度測量 小鴨川：平成13年度測量
砂防堰堤	平成17年調査に基づく堆砂状況
植生	現況と同様

(2) 流出土砂量の将来予測

将来予測(24年後)により得られた山地部における生産土砂量についての結果を示す(図-14)。これによると、砂防堰堤においては計画貯砂量の約8割(現況+約2割)の土砂が捕捉され、小鴨川上流において18/32基(現況+5基)が満砂となる。満砂した堰堤においては、今後、土砂の貯砂がおこなわれないため、将来予測では、実績再現時よりも掃流砂、浮遊砂の流出土砂量が大きくなっている(図-15)。

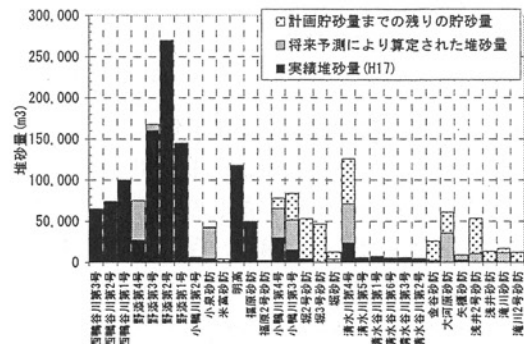


図-14 砂防堰堤の堆砂量(将来予測)

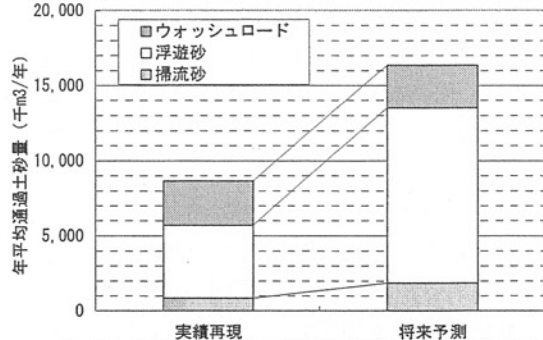


図-15 流出土砂量の実績再現と将来予測の比較
(小鴨川 直轄上流端 16.4k)

(3) 河床変動量の将来予測

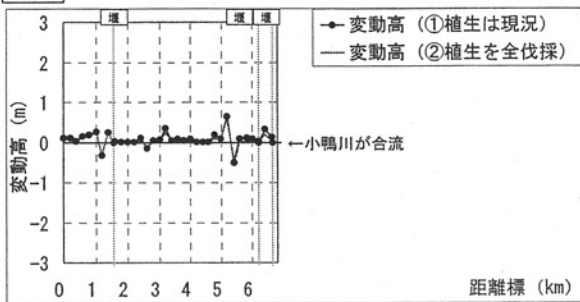
平野部の河床変動量の将来予測について下記の2ケースによりシミュレーションをおこなった。

- ①砂州域における植生分布を現況と同様とした場合
- ②砂州域における植生分布を全伐採した場合

図-16には、河床変動の予測結果を示す。これによると、①現況の植生分布で予測した場合、最大1m程度の堆積が発生している。これは山地部からの流出土砂量が増加することと、植生による土砂の捕捉が要因であると考えられる。

一方、②植生を全伐採した場合には、①のケースで見られた局所的な堆積傾向が緩和されている。

天神川



小鴨川

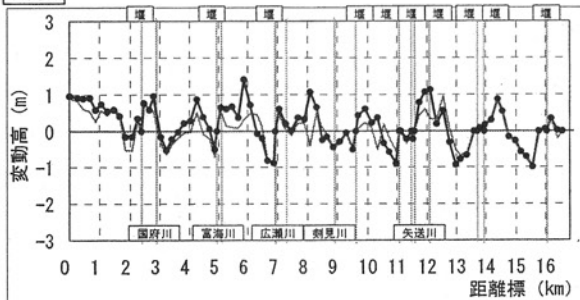


図-16 河床変動高の将来予測

また、図-17では、天神川河口～小鴨川的主要地点における通過土砂量を整理したものである。これによると、植生を全伐採した場合、浮遊砂量、ウォッシュロード量が伐採前に比べて増加していることが分かる。これは、植生を伐採しない場合、植生域に捕捉され堆積していた浮遊砂が下流へ流出しているためである。

さらに、天神川河口に着目すると、現況の植生分布による予測では河口へ全流砂が年平均約7千 m^3 程度の流出する結果となっており、植生を伐採した場合は年平均約15千 m^3 程度が流出し、増加していることが分かる。

上記の結果から、植生伐採を行うことにより、治水面で懸念される河床上昇は全川の的に改善され、河口への土砂供給量も増加することが予測された。

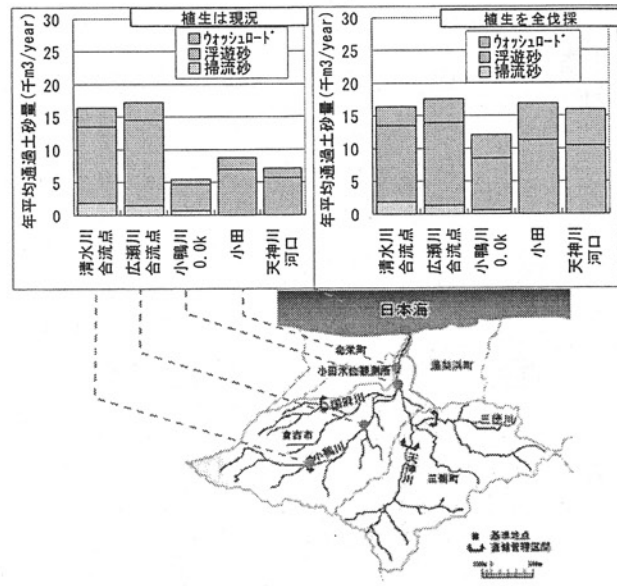


図-17 通過土砂量

6. 結論

本論文では、天神川流砂系における土砂動態を表現できる土砂移動モデルを構築し、将来予測をおこなった。ここで得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 天神川における土砂動態の将来予測から、上流域における砂防堰堤では、計画貯砂量の約8割(現況は約6割)の土砂が捕捉されることが分かった。
- (2) 満砂した砂防堰堤からは流出土砂量が増加し河道内で砂州植生の浮遊砂成分捕捉により堆積傾向となる。
- (3) 植生を全伐採することにより、治水面で懸念される河床上昇は全川の的に改善されることが予測される。
- (4) 植生を全伐採することにより河口への土砂供給量が確保され、汀線の後退を防止する効果が見込まれる。

参考文献

- 1) 江頭進治・松木敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法，水工学論文集，第44巻，pp. 735-741, 2000.
- 2) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，pp. 78, 1994
- 3) (社) 土木学会：水理学公式集，丸善，pp. 140, 1999

(2006. 5. 19 受付)