

◆ 特集：土砂災害 ◆

流砂系を一貫して扱う地形変化推定モデルの開発と 安倍川流砂系への適用

福嶋 彩* 水野秀明** 寺田秀樹***

1. はじめに

河床上昇・低下や海岸侵食といった地形の変化に伴い、土砂・洪水の氾濫、構造物の破損、越波、生物の生息・生育域の消滅、景観の変化等の問題(以後、「問題」と略す)が生じている。その対策は砂防・ダム・河川・海岸の各領域で講じられてきたが、領域個別の対応では、問題が解消されない事例が顕在化してきていることから、各領域が協力して問題の解消を図る「流砂系の総合的な土砂管理」の必要性が議論されている¹⁾。

問題を解消するためには、地形の変化を問題が生じない範囲に抑えなければならない。そのためには、地形の変化を推定する技術が必要となる。現在のところ、施設の存在を考慮した「地形の変化を推定する技術」としては、河床変動計算や海浜変形モデル等の数値計算による手法しかない。

過去の研究成果を見ると、砂防・ダム・河川・海岸の各領域内あるいは隣接する複数の領域内の地形の変化を数値計算によって推定した事例²⁾があり、流砂系の部分的な区間における地形の変化を概略的に推定するには既往の研究成果の適用で十分である。しかし、総合的な土砂管理を行う際には、流砂系全体の地形の変化を把握する必要がある場合が考えられるが、そのような推定を行った事例はない。

そこで、本研究では、問題を解消するための対策の実施により生じる地形の変化を推定する手法の開発を最終目標として、まず、既存の土砂移動数値計算モデルを組み合わせ流砂系を一貫として扱える地形変化推定モデルを作成し、実際の流砂系に適用し過去の地形変化の傾向及び土砂移動量と比較することで再現精度を検証した。

2. 地形変化推定モデル

2.1 モデルの構成

流砂系全体の地形の変化を推定するモデル(以後、「地形変化推定モデル」と呼ぶ)は河床変動計算モデルと海浜変形モデルからなる。河床変動

計算モデルは山地流域から平野部、河口までの地形の変化を推定するもので、山地流域から平野部までは土砂流出モデル、平野部から河口部までに河床変動モデルを適用する。海浜変形モデルは等深線変化を推定する等深線変化モデルからなる。

2.2 河床変動計算モデル

2.2.1 土砂流出モデル

土砂流出モデルは、山地流域において与えられた降雨に対する地形の変化を推定するもので、斜面部から河道部への降雨流出を計算するモデルと河道部内の流出及び河床変動を計算するモデルからなる³⁾。

降雨流出は、表面流を Kinematic wave 法(式(1)、(2))、中間流を連続式(式(3))とダルシー則(式(4))から計算した。

$$\frac{\partial h_A}{\partial t} + \frac{\partial q_A}{\partial x} = (r - f_1) \cos \theta_A \quad \dots (1)$$

$$q_A = \left(\sqrt{I_A} / N \right) \cdot h_A^{5/3} \quad \dots (2)$$

$$\lambda_{Bm} \frac{\partial h_{Bm}}{\partial t} + \frac{\partial q_{Bm}}{\partial x} = (f_m - f_{m+1}) \cos \theta_A \quad \dots (3)$$

$$q_{Bm} = k_m h_{Bm} S_m \quad \dots (4)$$

ここで、 h_A : 表面流の水深 [m]、 q_A : 表面流の単位幅流量 [$m^3/s/m$]、 r : 降水量 [m/s]、 f_1 : 第1層への浸透能 [m/s]、 θ_A : 斜面勾配 [度]、 I_A : 斜面勾配 (= $\tan \theta_A$)、 N : 等価粗度係数 [s/m^3]、 t : 時間 [s]、 x : 距離 [m]、 λ_{Bm} : 第 m 土層内の有効間隙率、 h_{Bm} : 第 m 土層内の水深 [m]、 q_{Bm} : 第 m 土層内の単位幅流量 [$m^3/s/m$]、 f_m : 第 m 土層の浸透能 [m/s]、 m : 斜面部の土層番号 (= 1, 2) k_m : 第 m 土層内の透水係数 [m/s]、 S_m : 第 m 土層の動水勾配である。

河道部内の流出は式(5)、(6)、(7)、河床変動は式(8)、(9)、(10)により計算した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (uh)}{\partial x} = \frac{q_{in}}{B} + r \cos \theta \quad \dots (5)$$

$$u = (1/n) I^{1/2} h^{2/3} \quad \dots (6)$$

$$B = 5\sqrt{Buh} \quad \dots (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad \dots (8)$$

$$Q_s = Q_B + Q_{sl} + Q_w \quad \dots (9)$$

$$Q_w = \begin{cases} -(1-\lambda)Bp_w \cdot \partial z / \partial t & \partial z / \partial t \leq 0 \\ 0 & \partial z / \partial t > 0 \end{cases} \quad \dots (10)$$

ここで、 h : 水深 [m]、 B : 河幅 [m]、 u : 流速

Development of Numerical Model for Estimating Topographic Change in the Natural Sediment Transport System and Applicability of Its to Abe River Basin and Shizuoka-Shimizu Coast

[m/s]、 q_{AB} ：当該河道部に隣接する斜面部からの単位幅流入流量 [m³/s/m]、 θ ：河床勾配 [度]、 n ：マンニングの粗度係数、 I ：河床勾配、 z ：河床位 [m]、 λ ：河道堆積物の間隙率、 Q_s ：全流砂量 [m³/s]、 Q_B ：掃流砂量 [m³/s]⁴⁾、 Q_{SL} ：浮遊砂量 [m³/s]⁵⁾、 Q_W ：ウォッシュロード量 [m³/s] (ここでは粒径 0.1mm 以下の土砂)、 p_w ：河床材料に含まれるウォッシュロードになる土砂 (ここでは粒径 0.1mm 以下の土砂) の含有率とした。

2.2.2 河床変動モデル

河床変動モデルは 1 次元河床変動計算とした。河道部における水位は式 (11)、(12) による。

$$\frac{\partial(Buh)}{\partial x} = 0 \quad \dots(11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2g} + h \cos \theta + z \right) + \frac{u_*^2}{gR} = 0 \quad \dots(12)$$

ここで、 g ：重力加速度 [m/s²]、 u_* ：摩擦速度 [m/s]、 R ：径深 [m] である。 B は式 (7) により計算した。なお、河床変動は式 (8)、(9)、(10) により計算した。

2.3 海浜変形モデル

海浜変形モデルには等深線変化モデル⁶⁾を用いた。等深線位置の変化は式 (13) により計算し、波浪変形は放物型波動方程式⁷⁾により計算した。

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} + \frac{1}{D_k} \left(\frac{\partial Q_{ck}}{\partial y} - q_{ak} \right) = 0 \quad (k=1,2,\dots,n) \quad \dots(13)$$

ここで、 x_k ： k 番目の等深線位置 [m]、 Q_{ck} ： k 番目の等深線の沿岸漂砂量⁸⁾ [m³/s]、 D_k ： k 番目の等深線の漂砂の移動高さ [m]、 q_{ak} ： k 番目の等深線における河川からの供給漂砂量 [m³/s]、 k ：等深線番号、 n ：等深線の本数である。 $\sum Q_{ck}$ は河床変動計算モデルで算出された河口における

Q_s のうち、海岸の地形変化に寄与する土砂量とした。

3. 地形変化推定モデルの安倍川流砂系への適用

地形変形推定モデルを安倍川流砂系に適用して、過去の地形変化を再現した際の精度を検証した。安倍川流砂系は海岸侵食に起因する問題を抱えていることから、本研究では特に長期間の地形変化を対象とした。

3.1 モデル流砂系の概要

図-1 は安倍川流域と静岡・清水海岸 (以下、安倍川流砂系と呼ぶ) の位置図および前述した地形変化推定モデルの各構成モデルの適用範囲を示したものである。安倍川の流域面積は 567km²、本川延長は 51km、河床勾配は 1/250 ~ 1/30 である。静岡・清水海岸は延長約 17.8km の砂浜海岸である。安倍川の上流では河床低下による橋梁基礎部の被災、下流域では河床上昇による洪水氾濫、また、静岡・清水海岸では海岸侵食による越波や景勝地の消失等の問題が生じている。

3.2 計算条件

表-1 は計算を実施した期間と計算に用いたパラメータの数値である。河床位と等深線の初期値は 1982 年に実施された測量成果を用いた。また、河床材料および生産土砂の粒度分布は 1975 年度の調査結果をもとに設定した。安倍川河口付近の底質材料調査結果によると、主な粒径は 0.1 ~ 10mm の範囲にあったことから、本研究ではこの粒径範囲にある土砂を静岡・清水海岸の地形変化に寄与する土砂とした。波浪条件は 1982 年から 2000 年までの各年のエネルギー平均波の平均値を設定した。なお、計算開始時点において、安倍川本川に設置されていた 5 つの砂防えん堤は満砂であったので初期の河床位を砂防えん堤の水通し天端高とした。

表-1 計算条件

計算期間	1982年1月1日 ~ 2001年12月31日	
河床変動計算モデル	土層厚	第1層: 0.8m 第2層: 1.0m
	透水係数	$K_1=3.0 \times 10^{-3}$ m/s $K_2=3.0 \times 10^{-4}$ m/s
	浸透能低減係数	1.0×10^{-5} hr ⁻¹
等価粗度係数	等価粗度係数	$N=1.0$ (薬科川斜面部)、 2.0 (左記以外の斜面部)
	粗度係数	安倍川本川の河道部: $n=0.035$ (0 ~ 22km)、 0.050 (22 ~ 51km)
		薬科川本川の河道部: $n=0.035$ (0 ~ 9km) 上記以外の河道部: $n=0.100$
海浜変形モデル	波浪	波高の平均値: 1.47m 周期の平均値: 6.9sec (石廊崎観測所波浪観測)
	潮位	T.P.+0.26m (清水港の平均潮位)
漂砂量係数	$k_1=0.05$ $k_2=0.05$	

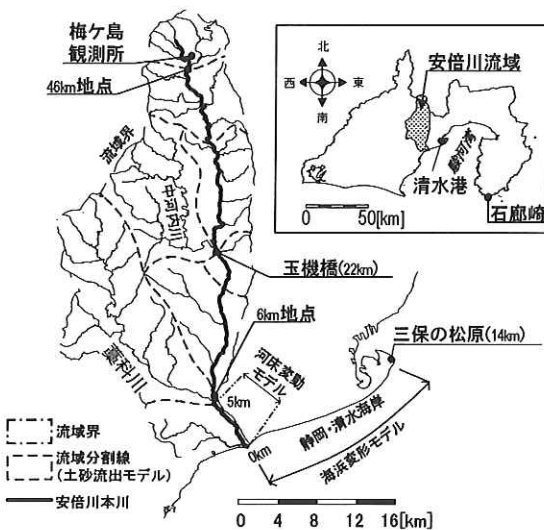


図-1 安倍川流砂系での構成モデルの適用範囲

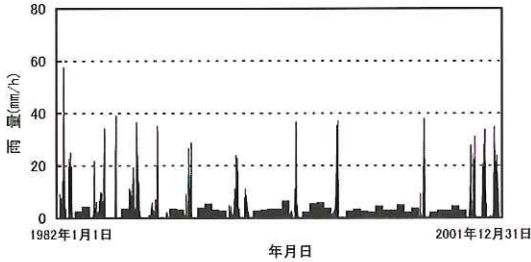


図-2 ハイエトグラフ (梅ヶ島観測所)

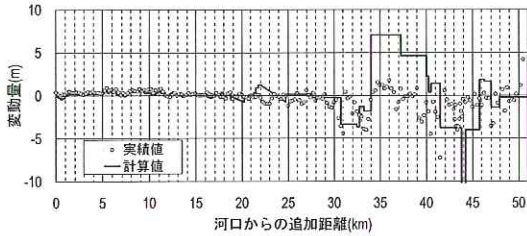


図-3 河床位の変動量の比較

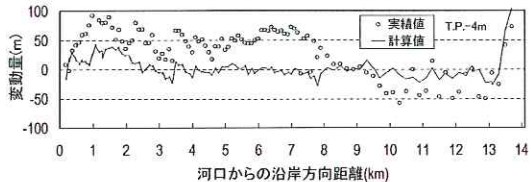
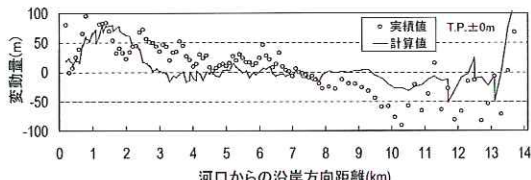


図-4 等深線の変動量 (T.P. ±0m と-4m の例)

図-2は計算に用いたハイエトグラフ(梅ヶ島観測所)である。なお、玉機橋における河床の表層にある土砂(粒径90mm~100mm)の移動限界流量(1800m³/s)を超える出水の生じた時期(13出水)と、表層を除いた下層の河床材料の平均粒径40mm程度の移動限界流量(450m³/s)を超える出水の生じた時期(32出水)に対して計算を実施し、それ以外の期間は土砂が移動しないものと仮定して計算を実施しないこととした。

3.3 計算結果

図-3は計算終了時点における河床位から計算初期時点における河床位を差引いた値(変動量)を示したものである。なお、図中の実績値は、0km~22kmの区間では2000年の河床位から1982年の河床位を差引いた値(+は堆積、-は侵食を表す)、22km~51kmまでは1998年の河床位から1982年の河床位を差引いた値である。計

算値を実績値と比較すると、41.5km~44.3kmの区間では2~4m程度低く、34.0km~41.5kmの区間では4~6m程度高くなる等、特に30km~47kmの区間では計算値と実績値に大きな差が見られた。

図-4は各等深線で計算終了時点の沖方向距離から計算初期時点の沖方向距離を差引いた値(変動量)を示したものである。なお、図中の実績値は、各等深線について2001年の沖方向距離から1982年の沖方向距離を差引いた値である(+は前進、-は後退)。計算値を実績値と比較すると、T.P. ±0~-2mでは概ね一致した。しかし、それより深くなると、計算値は0km~9kmの区間で実績値より最大で約70m小さくなり、9km~14kmの区間では最大で約50m大きくなった。

図-5は計算結果と実績の土砂収支を比較したもので、20年間の年平均値として整理したものである。計算値は実績値と比べて、安倍川本川の0km~22kmの区間では45×10³m³/年程度少ない堆積量で、22kmより上流域では21×10³m³/年程度少ない侵食量、静岡海岸では64×10³m³/年程度少ない堆積量、清水海岸では32×10³m³/年程度少ない侵食量であった。全体的に、変動量は少なく計算されているが、侵食や堆積といった傾向は再現できた。また、河川からの供給漂砂量のうち静岡・清水海岸の地形変化に寄与する土砂量(粒径0.1~10mm)の計算値91×10³m³/年は深浅測量データ等から算出した安倍川河口からの供給土砂量(約100×10³m³/年⁹⁾)とほぼ整合する値であったことから、河口から流出する沿岸漂砂

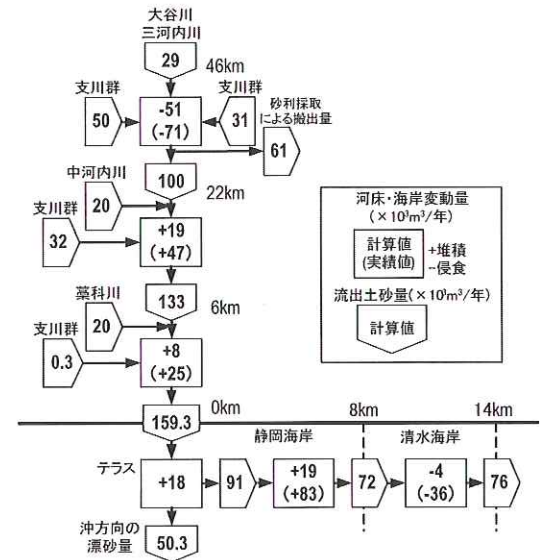


図-5 土砂収支の計算値と実績値の比較

量を再現できた。

4. 考察

地形変化推定モデルは流砂系全体としてみると河床の侵食や堆積、等深線の前進や後退といった地形変化の傾向、地形の変化に伴う土砂の移動量を概ね再現できる精度であるといえる。しかし、局所的な地形の変化を推定する精度が低くなる場合もあった。例えば、安倍川本川34km～41.5kmの区間では河床位の計算値が実績値に対して高くなった。この原因として、山地流域の支川の河道部における侵食可能深を深く設定(3m程度)したために多量の土砂が本川に流れ込んだこと等が考えられる。また、静岡・清水海岸では、水深の深い等深線の場合、計算値は実績の変動量よりも小さかった。これは、沿岸漂砂量の計算値が実際と比較して沿岸方向に変化しなかったためと考えられる。

5. まとめ

今回報告した地形変化推定モデルは流砂系全体での地形変化の傾向や土砂移動量を概ね再現できたが、局所的な地形変化を精度良く推定するためには改良が必要であることがわかった。今後はそれらの改良を行うとともに、河口からの供給漂砂量のうち海岸の地形変化に寄与する土砂量を合理的に推定できるように改良すること等により、地形変化予測モデルの推定精度を向上させていく予定である。

最後になりましたが、本研究を実施するにあたり、貴重な資料を快く提供していただいた中部地方整備局静岡河川事務所と静岡県の関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会：「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」報告、平成10年7月
- 2) 例えば、高秀秀信、九津見生哲、藤沢 寛：水系における土砂動態システムについて、第27回水理講演会論文集、pp.767-772、昭和58年
- 3) 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、Vol.44、pp.735-740、平成12年
- 4) 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、土木学会、pp.59-69、昭和47年
- 5) 芦田和男、藤田正治、向井 健：河床砂礫の浮上率と浮遊砂量、京大防災研究所年報、第28号B-2、pp.353-366、昭和55年
- 6) 宇多高明・河野茂樹：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発、土木学会論文集、vol.539/II-35、pp.121-139、平成8年
- 7) 磯部雅彦：放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法、第33回海岸工学講演会論文集、pp.134-138、昭和61年
- 8) 小笹博昭、A.H.Brampton：護岸のある海浜のてい線変化計算、港湾技術研究所報告、第18巻第4号、pp.77-104、昭和54年
- 9) 国土交通省河川局砂防部保全課海岸室ほか：流砂系一貫の土砂管理による海岸保全計画に関する調査、土木技術資料、44-4、pp.20-25、平成13年

福嶋 彩*



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
研究官
Aya FUKUSHIMA

水野秀明**



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
主任研究官、農博
Dr. Hideaki MIZUNO

寺田秀樹***



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室長
Hideki TERADA