

豪雨時における水系一貫の土砂流出予測 に関する研究

PREDICTION MODEL FOR SEDIMENT RUNOFF DUE TO HEAVY RAINFALL

高橋 保¹・中川 一²・里深好文³・鈴木信昭⁴

Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA,
Yoshifumi SATOFUKA and Nobuaki SUZUKI

¹フェロー会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都府京都市吉田本町)

We propose a numerical simulation model to predict a sediment runoff due to a heavy rainfall in a river network system. In the model, the catchment area is divided into many slope units and one river network system to calculate the flood runoff on the slope and in the river by using a kinematic wave runoff model. Also sediment hydrographs and river bed variations in the river network system are evaluated by using one-dimensional sediment routing model. The effect of a thickness of sediment deposits on the river bed is not marked but conditions of a sediment inflow into a main channel and tributaries, such as a timing of sediment supply by a slope failure and a type of sediment transport, effect markedly on the sediment runoff.

Key Words: Sediment runoff, rainfall runoff, debris flow, bed load, slope failure

1. はじめに

近年, 流域の源頭部斜面から海岸までの土砂の運動領域全体を指す言葉として「流砂系」が定義され, この「流砂系」の総合的な土砂管理の必要性が唱えられるようになってきている. 多くの河川において土砂輸送の不均衡が原因と考えられる問題が顕在化しており, このような問題を解決するには, 河川の各領域で個別に対応するだけでは不十分であり, 「流砂系」に対する一貫した土砂管理が要求される.

本研究は, 流砂系の一部である水系(源頭部から河口まで)を対象として, 豪雨時に発生する土砂の生産・流出・堆積過程を数値シミュレーションにより解析しようとするものである. 平成7年7月の豪雨により大量の土砂生産が生じた姫川流域を対象として, 降雨に伴う土砂の流出過程を追跡している.

本計算モデルにおいては, 流域を複数の斜面群と一組の河道網とによって表現している. 斜面部においてはkinematic wave法による降雨の流出予測を行い, 斜

面下端における流出流量を河道への横流入量として, 一次元の河床変動計算を行う. 崩壊土砂の流入条件を種々変化させることにより, 崩壊土砂の流入するタイミング等が本川河道における堆積土砂量や河口部における流出土砂量にどのように影響するのかを検討する.

2. 豪雨時土砂流出予測モデル

(1) 姫川流域のモデル化

豪雨時の雨水と土砂の流出を予測するために, 図-1に示されている姫川の全流域を対象として, 流域を複数の斜面部に分割し, 姫川本川および主要な支川を一組の河道網として表現することによりモデル化を行った. 図-2にはモデル化された斜面群ならびに河道網が示されている. 河道計算点の間隔は100mであり, 計算点の総数は2744, 各点の河床位と川幅は1/12,500の地形図から直接読みとられている. 河口は計算点番号552の地点にあり, これより下流の領域においては, 川幅

が流下方向に11.2°で拡がるものとし、河床勾配は実測値をもとに20°としている。

斜面部においては、面積、斜面長、斜面下端に接続する河道の長さ、斜面勾配が地形図から読みとられている。いま、各斜面において、斜面長・等価粗度・斜面勾配が一樣であると考え、与えられた降雨条件に基づき、kinematic wave法を用いて斜面下端における流出流量が計算される。この単位幅流出流量を q'_{in} とすると、河道への実際の単位幅流入流量 q_{in} は、斜面面積 S と斜面長 L_s および斜面下端に接続する河道の長さ ℓ を用いて次のように表される。

$$q_{in} = q'_{in} \frac{\ell'}{\ell} \quad (1)$$

$$\ell' = \frac{S}{L_s} \quad (2)$$

ただし、河道の上流端地点においては、下端に接続する河道長さ ℓ のかわりにその地点の川幅 B を用いて、

$$q_{in} = q'_{in} \frac{\ell'}{B} \quad (3)$$

と表される。

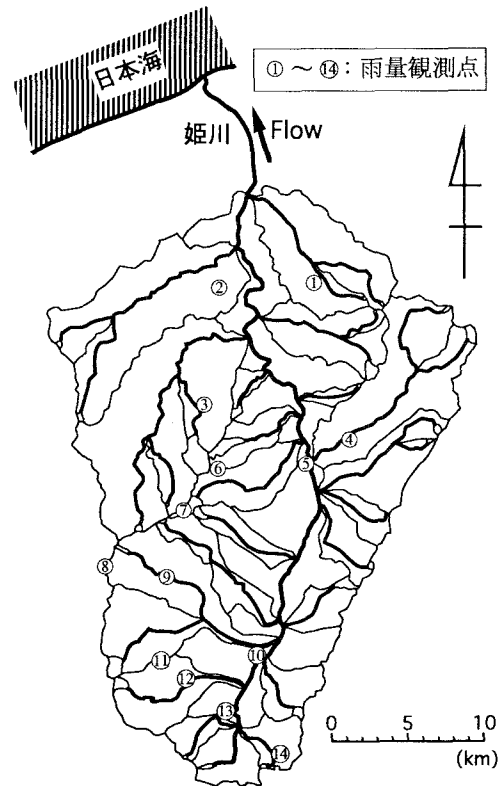


図-1 姫川流域全体図

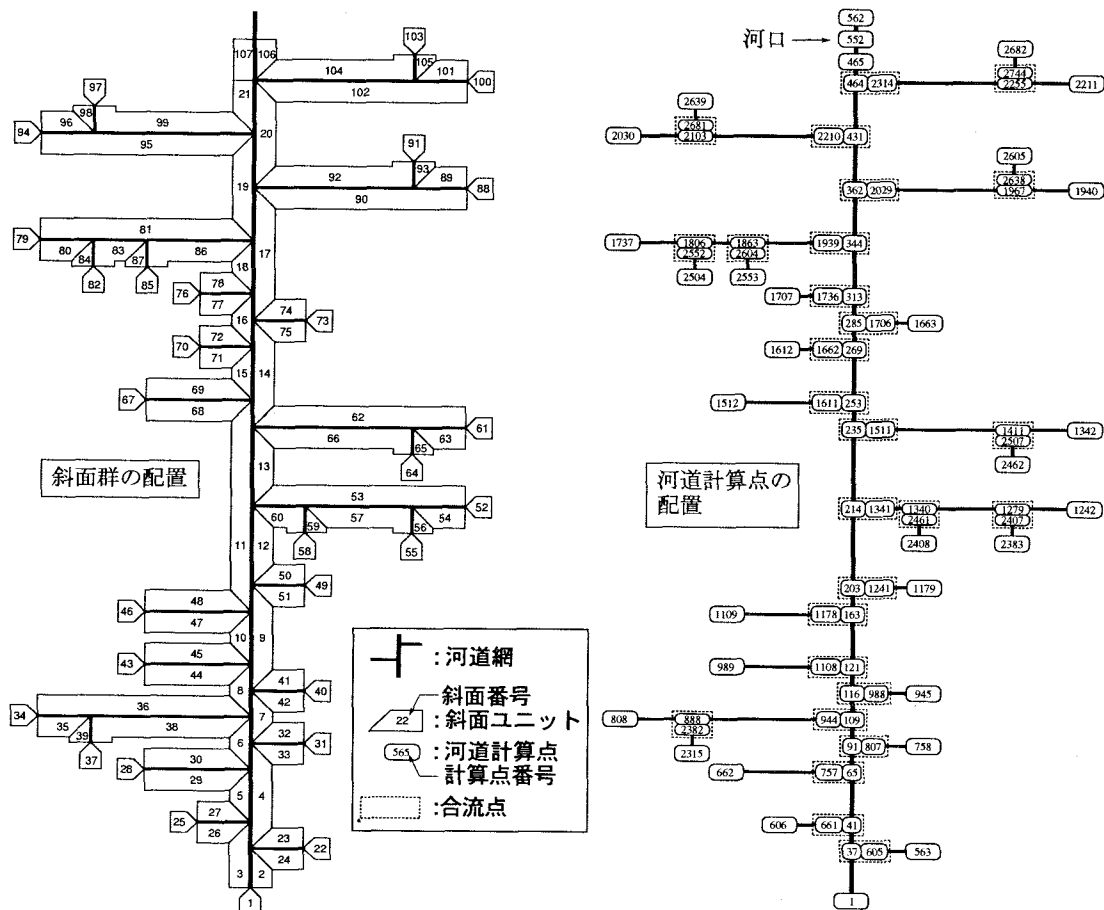


図-2 モデル化された姫川流域

各地点における河道への横流入流量 q_{in} が得られれば、一次元の河床変動モデルを用いて流砂・河床変動計算が行える。ここでは、流砂形態として土石流、掃流状集合流動および掃流砂を対象とし、流れの運動方程式や流砂量式としてはその特性に応じたものを使用している。また、豪雨時を対象としているため、河道幅全体に流れが存在していると考え、水みちの形成やその横断的な変動に関しては考慮していない。合流部の流れの計算に際しては、本流側の計算時に支流の流量を側方からの強制横流入として与えている。

豪雨時には新規崩壊が多発し、崩土の一部は河道に流入することが予想される。事実、平成7年の姫川流域においても、本川や支川の側岸において多数の新規崩壊が発生し、河道に流入したことが判明している。そこで、本モデルにおいては雨水の横流入と同様に崩壊土砂の側方からの流入を考慮するため、後述するように、流入土砂の流砂形態と流入のタイミングの影響についても検討している。

(2) 基礎方程式

斜面部における雨水の流出に関しては、kinematic wave法を用いており、その基礎式は以下のように表される。

$$q = \alpha_k h^m \quad (4)$$

$$\alpha_k = \frac{\sin^{1/2} \theta_s}{n_e} \quad (5)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (6)$$

ここに、 q ：単位幅流量、 θ_s ：斜面勾配、 n_e ：等価粗度、 h ：水深、 r_e ：降雨強度であり、係数 m は5/3である。

一次元の河床変動の基礎方程式としては、土砂の輸送形態として土石流、掃流状集合流動および掃流砂を対象とした高橋らのモデル¹⁾を採用する。このモデルにおいては、流水中の土砂の容積濃度 C に応じて、流れの抵抗則がそれぞれ以下のように表される。

($C > 0.4C_*$ の時)

$$q = \frac{2}{5d} \left(\frac{g}{0.02} \frac{\sigma C + (1-C)\rho}{\sigma} \right)^{1/2} \times \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{5/2} \tan^{1/2} \theta_w \quad (7)$$

($0.01 < C \leq 0.4C_*$ の時)

$$q = \frac{0.7\sqrt{g}}{d} h^{5/2} \tan^{1/2} \theta_w \quad (8)$$

($C \leq 0.01$ あるいは $h/d \geq 30$ の時)

$$q = \frac{1}{n_m} h^{5/3} \tan^{1/2} \theta_w \quad (9)$$

ここに、 C_* ：堆積層の粒子容積濃度、 q ：単位幅流量、 h ：流動深（水深）、 θ_w ：水面勾配、 d ：粒径、 σ ：砂の密度、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 n_m ：マンニングの粗度係数である。

全容積の連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial qB}{\partial x} = i_s + \frac{q_{in}}{B} \quad (10)$$

と表される。ここに、 i_s ：侵食あるいは堆積速度（侵食の場合 $i_s > 0$ ）、 q_{in} ：側方からの流入流量である。

砂粒の連続式と溪床の連続式は、それぞれ以下のよう表される。

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial qCB}{\partial x} = i_s C_* + \frac{q_{sin}}{B} \quad (11)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_s = 0 \quad (12)$$

ここに、 q_{sin} ：側方からの流入流砂量である。

侵食・堆積速度式は以下のように表される。（侵食の場合）

$$i_s = \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{q}{d} \quad (13)$$

（堆積の場合）

$$i_s = \delta_d \frac{C_\infty - C}{C_*} \frac{q}{h} \quad (14)$$

ここに、 δ_e, δ_d は定数である。 C_∞ はその地点の勾配で流し得る粒子濃度であり、河床勾配 θ_0 に応じて次のような式から求められる。

($\tan \theta_0 > 0.138$ の時)

$$C_\infty = \frac{\rho \tan \theta_0}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_0)} \quad (15)$$

($0.03 < \tan \theta_0 \leq 0.138$ の時)

$$C_\infty = 6.7 \left(\frac{\rho \tan \theta_0}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta_0)} \right)^2 \quad (16)$$

($\tan \theta_0 \leq 0.03$ の時)

$$C_\infty = \frac{(1 + 5 \tan \theta_0) \tan \theta_0}{\sigma/\rho - 1} \left(1 - \alpha_0^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \times \left(1 - \alpha_0 \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (17)$$

ただし、

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan \theta_0} \quad (18)$$

$$\alpha_0^2 = \frac{2 \{0.425 - (\sigma/\rho) \tan \theta_0 / (\sigma/\rho - 1)\}}{1 - (\sigma/\rho) \tan \theta_0 / (\sigma/\rho - 1)} \quad (19)$$

であり、 $\tan \phi$ は砂の内部摩擦角である。

(3) 降雨分布の推定

各斜面において流出流量を求めるためには、その地点における降雨強度のデータが必要である。そこで、図-1に示されている14ヶ所の雨量観測点において収集

された観測値をもとに、次のような方法で各斜面における降雨の推定を行った。まず、各斜面の重心に雨量の評価ポイントを設け、このポイントを三角形に囲むことのできる雨量観測点を3箇所、近いものから順に選ぶ。ついで、評価ポイントから各観測点までの距離 $L_1 \sim L_3$ を用いて重みを計算する。距離が L_1 である観測点の重み P_1 は

$$P_1 = \frac{L_2 L_3}{L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_1 L_3} \quad (20)$$

と表され、各斜面の降雨強度 r_e は各観測点の降雨強度 $r_1 \sim r_3$ と重み $P_1 \sim P_3$ を用いて、

$$r_e = P_1 r_1 + P_2 r_2 + P_3 r_3 \quad (21)$$

と表される。図-3には推定された各時間ごとの降雨強度の空間分布を示している。

(4) 崩壊土砂の河道への流入

平成7年7月の姫川流域における豪雨災害では、新規に多数の斜面崩壊が発生し、大量の土砂が河道へ流入したことが分かっている。しかし、支川ごとの崩壊土砂量および崩壊土砂のうち河道に流入したと考えられる土砂量に関する実測値²⁾は得られているものの、個別の崩壊に関する発生場所や崩壊土砂量に関する情報は得られず、崩壊の発生時刻を特定することも不可能であった。そこで、崩壊土砂の河道への流入に関して、以下に示すようないくつかの条件を設定し、計算を行うことにした。

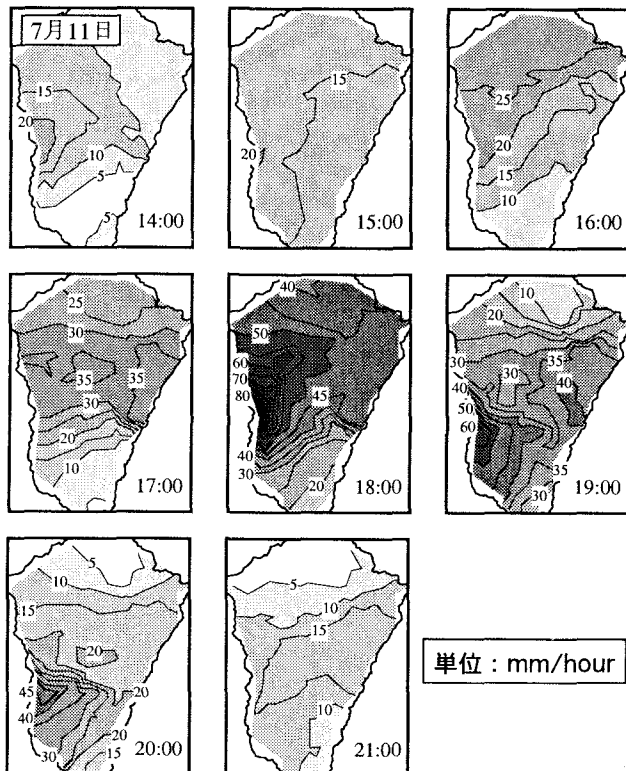


図-3 推定された降雨強度の空間分布

a) 一定の土砂濃度で土砂供給を行うケース

このケースでは洪水期間を通じて一定の土砂濃度で側方から土砂が流入すると考える。すなわち、

$$q_{sin} = q_{in} C_{in} = q_{in} \frac{Q_{sin}}{Q_{in} + Q_{sin}} \quad (22)$$

で評価する。ここに、 C_{in} ：崩壊土砂による流入土砂濃度、 Q_{sin} ：実測データから得られる各支川へ流入した崩壊土砂量、 Q_{in} ：流砂のない状態で各支川から姫川本川へ流入する総流入流量である。なお、ここでは q_{sin} の流入箇所の特定は行わず、すべての計算点に等しく流入すると考えている。以後、これをType Aと呼ぶ。

b) 急激な土砂供給を行うケース

洪水の中のある時刻において、崩壊土砂が30秒間にわたり土砂濃度50%で流入すると考える。それ以外の時間においては側方からは水のみが流入する。各支川ごとの崩壊土砂量の実測値に基づき、流入土砂量が計算されている。ただし、崩壊土砂はすべての断面に流入すると考え、流入箇所の特定は行っていない。以後、これをType Bと呼ぶ。

3. 計算条件

計算上の下流端である河口沖合1kmの地点（計算点番号562）においては、水位を一定としている。計算の時間ステップ Δt は、河道網全体における最大流速に応じて、0.1秒～5秒の範囲で変化させている。斜面部の等価粗度 n_e は1.0 (m-s系)とし、河道部のマンニングの粗度係数 n_m は0.02としている。砂の粒径 d は5cm、内部摩擦角 $\tan \phi$ は0.7、砂の比重は2.65としている。また、侵食・堆積速度式 ((13), (14)式)における係数 δ_e と δ_e はそれぞれ0.0007, 0.0001とした。

計算の開始時点において河道内に侵食可能な土砂がどの程度存在していたかに関しては十分な資料がないため、ここでは河道全体に対して一様な値を与えている。計算は表-1に示すように、河道部における土砂の初期堆積厚さおよび崩壊土砂の流入条件を変化させて、都合12ケース行っている。計算の開始時刻は1997年7月10日午前10時であり、終了時刻は同13日午前12時である。

表-1 実験条件

	初期河床 堆積厚(m)	崩壊土砂 流入条件	流入開始 時刻
CASE 1	1.0	流入無し	----
CASE 2	2.0	流入無し	----
CASE 3	3.0	流入無し	----
CASE 4	1.0	Type A	----
CASE 5	2.0	Type A	----
CASE 6	3.0	Type A	----
CASE 7	0.0	Type A	----
CASE 4-1	1.0	Type B	11日16時
CASE 4-2	1.0	Type B	11日18時
CASE 4-3	1.0	Type B	11日20時
CASE 4-4	1.0	Type B	12日 8時
CASE 4-5	1.0	Type B	12日19時

4. 計算結果に関する考察

まず、河床の初期堆積厚さが河道の土砂流出に及ぼす影響に関して、CASE 1～7の結果を基に考察してみる。図-4にはCASE 1～7の河口地点における流砂量ハイドログラフが示されている。斜面崩壊に伴う土砂の流入を考慮していないCASE 1～3の結果を見ると、河床の初期堆積厚さを変化させても、流出土砂量のピーク値はわずかに数%程度しか変化していないことがわかる。総流出土砂量に及ぼす影響も同様であった。CASE 1～3の計算終了時における河床を調べてみると、姫川本川の上流・中流域や各支川では侵食傾向となっていて、下流部では堆積傾向にあることが分かった。すなわち、上・中流域で侵食された土砂は、そのかなりの部分が下流の勾配の緩い部分に堆積するため、初期堆積厚さを変化させても、河口における土砂流出に明瞭な変化を生じさせるには到らなかったと考えられる。

これに対し、Type Aによる側方からの土砂の供給を考慮したケース (CASE 4～7) では、土砂流入を考慮しないケースより、いずれも20%程度ピーク流砂量が大きくなっていることが分かる。すなわち、初期河床堆積厚さが土砂流出に及ぼす影響に比べ、崩壊土砂が河道

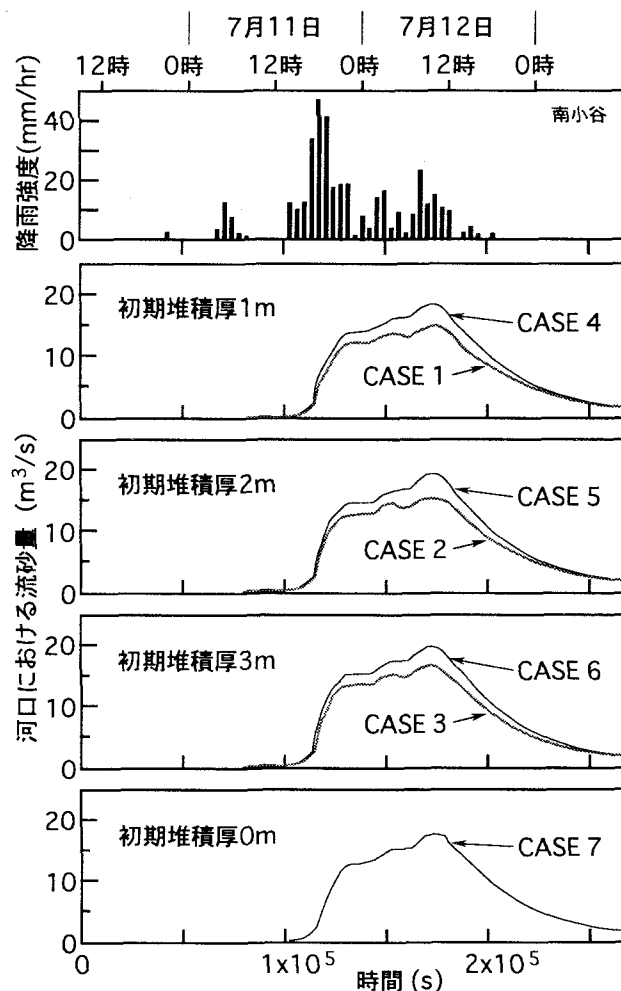


図-4 河口部における流砂量ハイドログラフ

に流入する影響は大きいといえる。この理由としては、本計算が対象とした出水における崩壊土砂量が非常に大量であったことが挙げられよう。例えば、最も多くの土砂流出量がみられたCASE 6においても、総流出土砂量は105万 m^3 であり、これは姫川流域の全崩壊土砂量778万 m^3 の約13.6%にすぎない。出水後、姫川本川のかなりの部分において土砂が堆積し、一部で顕著な河床上昇が生じていたことが報告されているが、これも側方斜面からの土砂流入が激しかったことを物語っているといえよう。

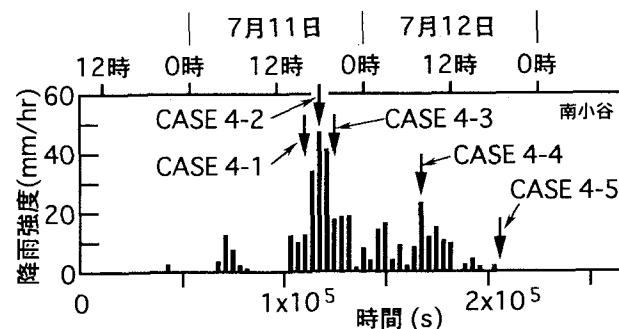


図-5 Type Bの計算における土砂流入のタイミング

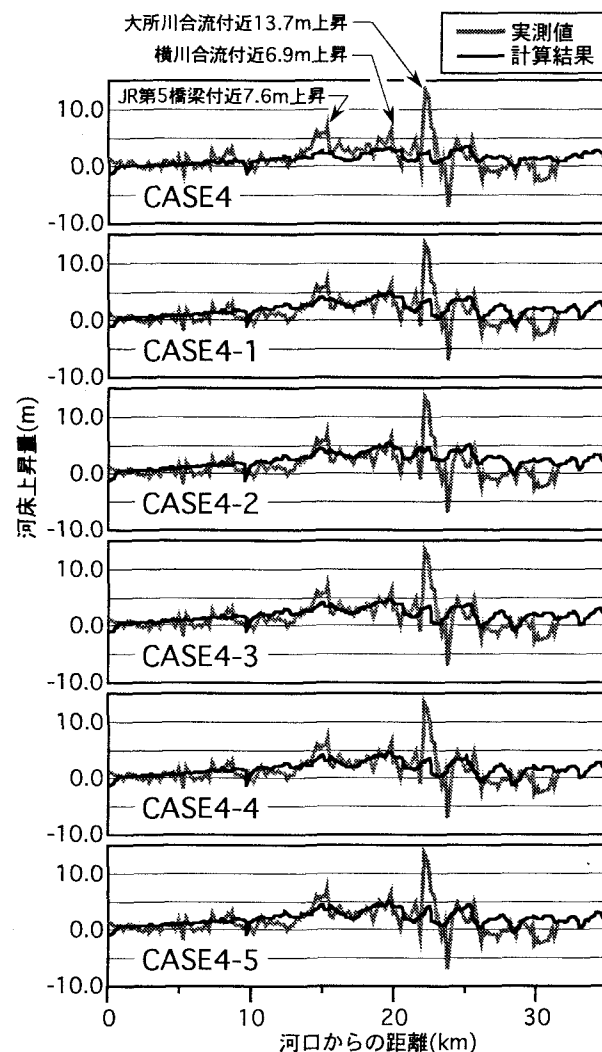


図-6 姫川本川における河床変動量の縦断分布

Type Aの土砂供給を行ったCASE 4~7においても、上流端付近のようなごく一部の河床勾配が大きい地点を除いて、姫川本川や支川で顕著な土砂の堆積が生じていた。このことは、側方からの土砂流入を考慮する方がより現実に近い結果が得られることを示している。

ところで、前述のように、側方斜面の崩壊に伴う土砂の河道への流入に関しては、未だ不明な点が多い。現地観測により各支川ごとの崩壊土砂量は分かっているものの、崩壊の生じた時刻や各崩壊の土砂量を厳密に計算に取り入れることはできない。そこで、CASE 4とCASE 4-1~4-5の結果をもとに、土砂流入条件が土砂流出・河床変動に及ぼす影響について調べてみる。図-5にはCASE 4-1~4-5において土砂の供給されたタイミングを、南小谷で観測された降雨強度のデータと併せて示している。

図-6には計算終了時における姫川本川の河床変動量の縦断分布が実測値³⁾と併せて示されている。これを見ると、いずれのケースも支川との合流点付近で河床上昇が見られ、全体的な侵食・堆積の傾向には大差がないといえよう。ただし、Type Aで土砂を供給したCASE 4においては、Type Bで土砂を供給した他のケースと比較して、河床の上昇量が小さいことが分かる。一定の土砂濃度で供給すると、支川の緩勾配区間に土砂が堆積しやすく、本川への土砂流入量が小さくなっていることが原因であると考えられる。

崩壊発生のタイミングに関して調べてみると、降雨のピーク時に崩壊を発生させたCASE 4-2において、合流点付近での河床上昇量が最大となっていることが分かる。支川の側岸斜面から供給された崩壊土砂が、その直後に到達する出水のピークによって、本川へと輸送されるためであると考えられる。崩壊発生のタイミングが出水のピークとずれると、支川内に堆積する土砂量が増加するため、結果的に本川の河床上昇量は小さくなっている。

ところで、図-6においていずれのケースの計算結果も、実測の局所的な堆積を定量的には再現できていない。この原因としては、まず、図-6に示されている「河床変動量」の算定の仕方が、計算値と実測値では異なっていることが挙げられよう。計算では横断方向に一樣な河床を考えているため、出水前後の平均河床位の変化が河床変動量として示されているのに対し、実測値は出水前後の最深河床位の差を河床変動量として示している。したがって、出水中に河床の横断形状が大きく変化した場合、両変動量の間に隔たりが生じることは自明である。たとえば、出水前に顕著な局所洗掘が生じていたような断面においては、大規模な河床上昇に伴い、このような洗掘箇所は埋め戻されたであろうから、平均的な河床位の変動以上に最深河床位が大きく変動したと考えられる。平均河床位の変動量に関する実測値あるいは洪水前後の河道横断形状が入手できれ

ば、このようなデータの質の違いに起因する問題は生じない。河道の断面形状に関する情報収集が全流域にわたって、かつ、継続的に行われて、それが公開されることを期待したい。

また、本計算において河道の屈曲の影響を考慮していないことも、河床上昇量を再現できない原因の一つになっていると考えられる。河道の法線が大きく変化する領域では、河道狭窄部と同様に、流水の疎通が阻害されるため、その上流域に土砂の堆積が生じることが予想される。一次元解析ではこれらの問題を解決することは容易ではないと思われ、局所的な河床変動量の予測精度をより向上させるには、2次元、3次元の解析が必要であろう。

以上のように、本モデルによって水系一貫の土砂流出・河床変動過程の予測がある程度まで可能であることが示された。また、崩壊土砂の流入が河道の土砂流出に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。今後、崩壊発生箇所や崩壊の規模および崩壊発生時刻に関する予測手法が確立されれば、よりの確かな土砂流出の予測が可能となり、水系一貫の土砂のコントロールに有効な情報を与えると思われる。

5. おわりに

本研究では、水系一貫した豪雨時の土砂流出予測のための、数値シミュレーションモデルの開発を行い、姫川流域における平成7年7月の豪雨災害への適用を図った。本研究によって得られた成果と今後検討すべき課題を要約すると、以下の通りである。

- ・流域を複数の斜面群と一組の河道網とによってモデル化することにより、豪雨に伴う土砂の流出過程を再現することができる。
- ・平成7年の豪雨によって姫川本川の大部分で河床が上昇したことは、崩壊土砂の流入を考慮することにより説明できる。
- ・豪雨時の土砂流出の予測においては崩壊土砂の河道への流入の影響が大きい。従って、より高精度な土砂流出予測のためには、斜面崩壊の発生に関する予測手法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 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，44-3，pp.12-19，1991。
- 2) 国際航業株式会社：平成7年度姫川流域流出土砂量調査業務報告書，1996。
- 3) 水山高久：姫川の大規模土砂流出と土砂管理，河川，第628号，pp.8-13，1998。

(1999.4.26 受付)