

日野川流域における土砂動態の再現

STUDY ON NUMERICAL SIMULATION OF SEDIMENT TRANSPORT IN THE HINO RIVER BASIN

山本 正司¹・犬山 正²・岡田 浩治³・吉栖 雅人⁴・西本 直史⁵

Shoji YAMAMOTO, Tadashi INUYAMA, Hiroharu OKADA, Masahito YOSHIZUMI, Naoshi NISHIMOTO

¹ 国土交通省 中国地方整備局 日野川河川事務所 (〒680-3537 鳥取県米子市古豊千 678)

² 国土交通省 中国地方整備局 日野川河川事務所 (同 上)

³ 国土交通省 中国地方整備局 日野川河川事務所 (同 上)

⁴ 正会員 工修 日本建設コンサルタント(株)東京支社 (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19)

⁵ 正会員 博(工) 日本建設コンサルタント(株)東京支社 (同 上)

The purpose of this study is to formulate a sediment routing model in a whole river basin in order to evaluate sediment transport, and to verify the applicability and the usefulness of the model. The sediment routing model, which can evaluate sediment transport of bed-load, suspended-load and wash-load, is applied to the Hino River basin and the sediment movement in recent 18 years is calculated using this model. Through the model application, the sediment discharge on a flood, the sedimentation in reservoirs and bed variation are discussed. Through the comparison between the calculated results and the monitoring data such as the sediment discharge and the bed deformation, it is found that the sediment routing model is applicable and useful for the evaluation of sediment transport.

Key Words: *Sediment transport, Sediment routing, Numerical model, Sediment discharge, Sedimentation, Monitoring, Bed variation, Rainfall runoff*

1. 序論

流砂系の総合的管理のためには、土砂の生産・流出も含めて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不可欠である。このため近年では、全国の主要河川の一部で、流砂量・河川地形変化のモニタリングが行われ、土砂動態を実態面から把握する試みがなされている¹⁾。観測体制の充実に伴って、貴重なデータが蓄積されつつあるが、観測が始まって間もないことから、観測で得られたデータは幅広い水理条件や流砂形態を必ずしも十分にカバーしているとはいえない状況にある。短期または長期の土砂動態を把握するためには、今後も流砂量観測を継続するとともに、流砂系一貫した土砂移動モデルを開発し、流砂量観測と計算モデルを相互に補完し合うことが重要である。

一般に土砂流出量の予測は、①観測データに基づく方法、②水理学の支配方程式に基づく方法、③水理・水文的方法に大別される。

観測データに基づく方法では、ダム堆砂データに基づいた年平均比流出土砂量に関するいくつかの経験則が提案されている^{2)・3)}。この方法は、流域の任意の地点において、年間どの程度の流出土砂量が見込まれるかを大雑

把に把握するには有効である。しかしながら、これを適用するにあたっては、データがどのような条件のもとに蓄積されたものであるか(例えば、地形、地質、降雨履歴、土砂生産の有無等)に十分な注意を払う必要がある。

水理学の支配方程式に基づく方法は、流水の連続式、運動方程式、流砂の連続式、粒径別流砂量式に基づくもので、通常の河床変動計算として広く一般に用いられている。これは分合流の少ない単純な流路において適切な境界条件のもとでは解析可能であるが、山地部のように勾配が急で断面変化が激しく、河道も樹枝状に分布するような複雑な領域においては、水理計算に困難を伴う場合が多く、流量や河道断面の設定においてもモデルの取り扱いが非常に煩雑なものとなる。

そこで水理・水文的方法が、高秀・九津見・藤沢の研究⁴⁾以来、いくつか提案されている。このうち、降雨流出モデルと土砂水理モデルを組み合わせた研究^{5)~10)}が近年活発に行われている。このレビューは江頭の報告に詳しい¹¹⁾。この中でも取り分け江頭らのモデル⁶⁾は、流砂形態は全流砂(掃流砂・浮遊砂・ウォッシュロード)を対象としていること、生産土砂は土石流の停止堆積勾配の河道区間に存在する溪床堆積物で設定できること、さらに降雨流出計算では中間流および基底流を考慮してい

るため長期流出計算にも対応可能であることから、実用として扱い易いという利点がある。

本論文では、一級水系の日野川流域を対象として、山地部には上述の水理・水文的方法(江頭らが考案した土砂流出計算)を、平野部には水理学の支配方程式に基づく方法(1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って、山地から河口に至るまでの流砂系一貫した土砂動態の再現検討を行った。

2. 日野川流域における土砂管理上の課題

日野川は鳥取県の西部を貫流する県内三大河川の1つで、三国山(1,004m)を水源とし、大山西部を流下し、日本海に注いでいる。流域面積は870km²、流路延長は77kmである。流域の大部分は山地で(山地91%、平地5%、河川区域4%)、地形は河口から約10km付近を扇頂部とする平野部とそれを取り巻く山地部に二分される。地質は、源流部一帯の流紋岩・石英安山岩・泥質片岩、大山山塊を構成する安山岩、残り流域全体の47%の面積を占める花崗岩類によって構成されている。

日野川流域では、近世からたたら製鉄にともなう「かんな流し」が盛んに行われ、この結果、多くの土砂が人工的に流出して汀線が前進した。しかし「かんな流し」終了後の大正12年をピークに汀線の後退が始まり、昭和51年から平成5年までの17年間で年間約10.5万m³の海浜が侵食されている¹²⁾。

海岸部では離岸堤やサンドリサイクルなどにより汀線維持が図られているが、今後は海岸独自の対策に加えて、河川からの供給土砂(海浜構成材料:0.1mm~2.0mm)を少しでも増やすことが効果的と考えられる。

3. 日野川流域における土砂動態の再現

(1) 流砂系一貫した土砂移動計算

a) 土砂移動計算の構成

土砂移動の追跡計算を山地部と平野部とに分け、平野部には一般に用いられる1次元河床変動計算を用いた。山地部には、既往研究成果を踏まえ、江頭らの土砂流出計算⁶⁾を採用した。この計算では、降雨流出(キネマティック・ウェイ法+中間流+基底流の3層構造)、土砂流出および河床変動を一体的に取り扱い、溪流における流量は自動的に算出される。これら2つの土砂移動計算では全流砂(掃流砂、浮遊砂、ウォッシュロード)を対象とし、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って、流域全体の土砂移動を量と質の観点から追跡できるようにした(図-1)。

本検討では、河口から11.0km地点を扇頂部と見なし、河口~11.0kmに平野部のモデル(1次元河床変動計算)、

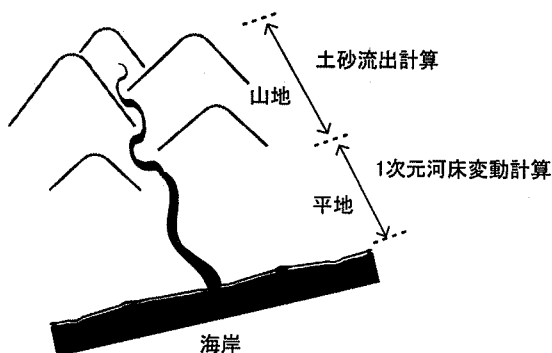


図-1 流砂系一貫した土砂移動計算の構成

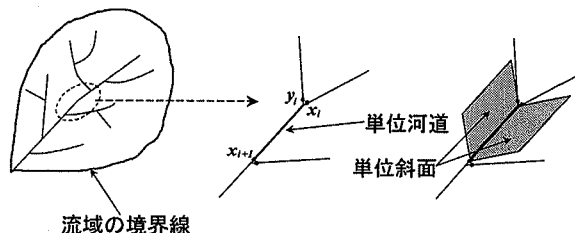


図-2 単位河道のモデル化(山地部のモデル)

11.0km 上流および支川群に山地部のモデル(土砂流出計算)を適用した。

b) 流域及び河道のモデル化

図-2に示すとおり、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を表現した。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、降雨に伴う流出計算を容易に行うことができる。本検討では、単位河道数394(平均河道長は約3.0km、但し直轄区間は約0.2km)、斜面数253(片側の平均斜面面積は約3.4km²、平均斜面勾配は約8°)で、流域及び河道をモデル化した。

c) 基礎式

i) 山地部のモデル

山地部における流れの連続式及び運動方程式は、河道を矩形断面で近似すれば、次のように与えられる。

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

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

ここに、 h, B, L, I 及び n は、それぞれ単位河道*i*における水深、川幅、河道長、河床勾配およびマンニングの粗度係数である。 $Q(x_i), Q(y_i)$ は x_i, y_i 地点からの流入量、 $Q(x_{i+1})$ は x_{i+1} 地点からの流出量、 q は単位河道*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、 r は降雨量、 θ は河床傾斜角である。流砂の連続式、流砂量式及び粒度分布式は次のようである。

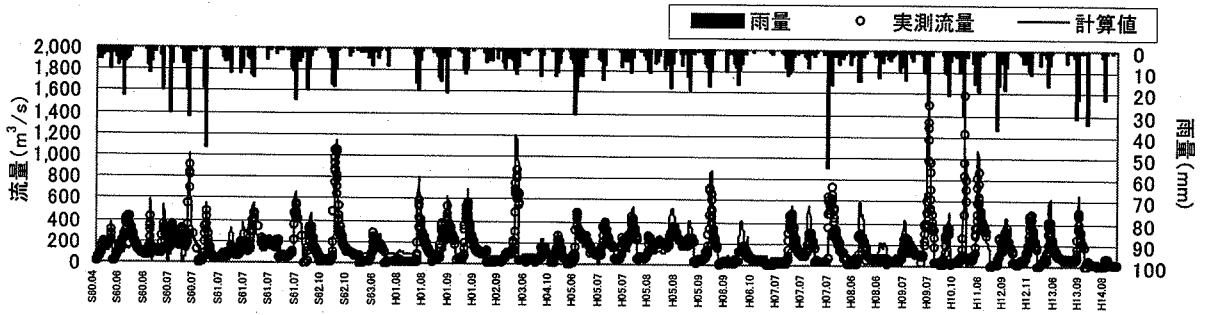


図-3 車尾地点流出計算結果

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

$$Q_i(x_{i+1}) = \sum_j Q_n(Q, I, d_i, p_i) \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)\Delta BL} \{Q_n(x_i) + Q_n(y_i) - Q_n(x_{i+1})\} - \frac{\partial z}{\partial t} \frac{p_i}{\Delta} \quad (5)$$

ここに、 z, λ, Q, p, 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、交換層の厚さである。流砂量式は、掃流砂には芦田・道上式を、浮遊砂には芦田・藤田式を用いた。

Q_w は単位河道で生産されるウォッシュロードであり、Bed material loadの移動に伴い、存在割合に応じて河床から供給される。但し、沈降はないものとした。

$$Q_w = -(1-\lambda)BLp_w \frac{\partial z}{\partial t}, \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right) \leq 0 \quad (6)$$

$$Q_w = 0, \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right) > 0$$

ii) 平野部のモデル

不等流計算による水理諸量のもと、流砂の運動方程式、連続式は山地部と同様の式で土砂移動を計算した。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。

$$\frac{\partial(\bar{c}_i h)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{c}_i q)}{\partial x} = E_{si} - D_{si} \quad (7)$$

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。

(2) 計算条件

検討期間は昭和60年初～平成14年末(18年間)とし、初期河床は昭和60年3月測量、検証河床を平成15年3月測量とした。対象出水は車尾で200m³/s以上の36出水とした。ここで200m³/sは、河口部の河床材料の平均粒径9.3mmの移動限界流量である。なお、流量200m³/sは、海浜構成材料の平均値0.39mmが河口部で浮上する限界流量にも相当する。

流出計算に用いる流域雨量は、ティーセン法または支配圏法により設定した。

主要な堰・砂防ダム・貯水ダムについてはモデル化した。貯水ダムでは土砂を全量遮断、堰・砂防ダムでは河床位が天端に達するまではBed material loadを捕捉するものとした。また、貯水ダムについては実績放流量を

下流河道に与えて計算した。

掃流幅はレジーム則($B = 5\sqrt{Q}$)により設定した。粗度係数は、平野部では0.035、山地河道では0.050、土砂生産域(勾配4°～10°の河道区間)には0.10を設定した。直轄区間の河床材料は平成11年度調査、山地河道の河床材料は平成7年度調査に基づいて、表層と下層の2層で設定した。検証期間内において砂利採取や河道改修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の河床高換算値を平均河床高(計算値)から差し引いた。

流域の定数は、近年の主要洪水の実績流量を流出計算で概ね再現できるように設定した(図-3)。定数の設定結果は次のようであった。土層厚:表層0.8m、中層1.0m、透水係数:表層 2.5×10^{-3} m/s、中層 2.5×10^{-5} m/s、初期浸透能:表層300mm/hr、中層30mm/hr、下層0.3mm/hr、最終浸透能:表層250mm/hr、中層25mm/hr、下層0.25mm/hr、浸透能低減係数: 1.0×10^{-5} 、等価粗度係数:0.4。

(3) 再現計算

4つのダム流域で、土砂生産域における溪床堆積物の存在状況(粒度分布、生産土砂の発生条件)を変えながら、ダム堆砂量の再現計算を行った。何れのダムの堆砂量も再現可能となる様な溪床堆積物の設定ルールを設け、これを流域全体の土砂生産域に適用した。最後にこのルールの妥当性を、流送土砂のモニタリング結果(5～10地点で5出水分)および河床変動土量の再現状況で確認した。ダム堆砂量、河道の通過土砂量、平野部の河床変動土量の何れもがバランスよく再現できるまでこの検討を繰り返し、流砂系一貫した土砂動態の再現性の向上を図った。

a) 生産土砂のモデル化(溪床堆積物の設定ルール)

i) 生産土砂の粒度分布

本検討では、土石流の停止堆積勾配(4°～10°)の河道区間に存在する溪床堆積物を生産土砂と見なしている。生産土砂の粒度分布には、平成7年度の調査結果を用いた。通常、生産土砂にはウォッシュロード成分が含まれているのが一般的であるが¹³⁾、この調査試料にはウォッシュロード成分(0.1mm未満)が含まれていない。これは、出水時に、ウォッシュロードを含む細砂成分が選択輸送された結果であると推定した。そこで、ウォッシュロード含有率が3%となるように粒度分布全体をベースアップし、これを生産土砂の粒度分布であると仮定した。

ii) 生産土砂の発生条件

土砂生産域の渓床堆積物は、山腹崩壊や土石流の発生によって新たに供給される。ここでは、大山流域の土石流避難基準雨量の最小値である総雨量 150mm を生産土砂の発生条件とし、総雨量 150mm 以上の降雨毎に、生産域における渓床堆積物の粒度分布を、i) で設定した生産土砂の粒度分布に置き換えた。これによって、間欠的な土砂生産現象を表現した。

b) ダム堆砂量の再現

ダム堆砂量の検証は、長期の累加値で評価するものとし、なるべく人為的インパクトの少ない期間で検証することとした。

大宮ダム、菅沢ダムは直列に配置されており、上流側の大宮ダムでは排砂が行われていることから、「大宮ダム+菅沢ダム」の堆砂量を再現した。また、平成 3 年以降、大宮ダムからは土砂の持ち出しが行われていること等から、昭和 60 年～平成 2 年の堆砂量の累加値で計算結果を検証した(図-4)。俣野川ダムでは、平成 12 年以降、上流の下牧屋ダムの影響を受けて、堆砂量が激減しているため、昭和 60 年～平成 11 年の堆砂量の累加値で計算結果を検証した(図-5)。賀祥ダムでは、平成 12 年に地震の影響でダム堆砂成分が圧密され、堆砂量がマイナス

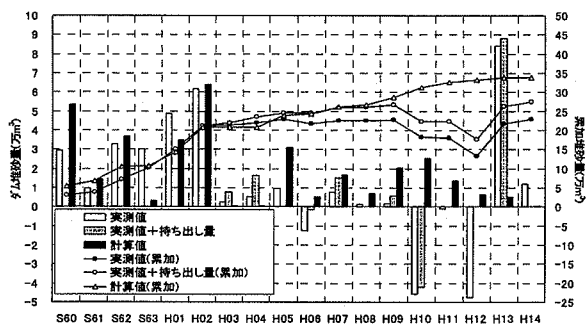


図-4 菅沢ダム+大宮ダムの堆砂量検証

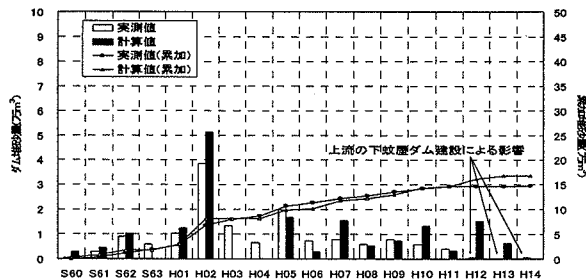


図-5 俣野川ダムの堆砂量検証

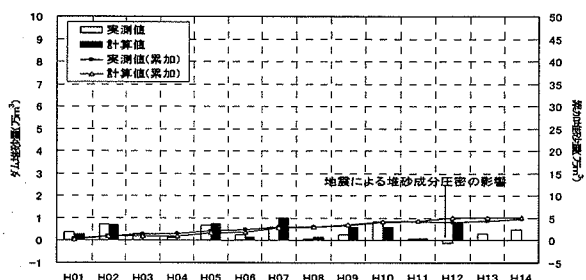


図-6 賀祥ダムの堆砂量検証

となったようである。従って、平成元年～平成 11 年の堆砂量の累加値で計算結果を検証した(図-6)。何れの地点においても 5%未満の誤差でダム堆砂量の累加値を再現することができた。

c) 流送土砂のモニタリング結果との比較

ダム流域で設定した渓床堆積物の設定ルールを流域全体の土砂生産域に適用して土砂移動計算を行った。通過土砂量の計算値と流送土砂のモニタリング結果(5～10 地点で 5 出水分)を比較することで、渓床堆積物の設定ルールの妥当性を確認した。

ポンプ及びバケツ採水で捕捉した土砂の約 90%以上は 0.1mm 以下の粒径成分であることから、計算値とモニタリング結果の比較ではウォッシュロード成分を対象とした。比較検討の一例を図-7 および図-8 に示す。計算値は実績の流量～流砂量の関係を良好に再現しており、生産域の粒径設定(特にウォッシュロード含有率)が適切であったことを確認した。

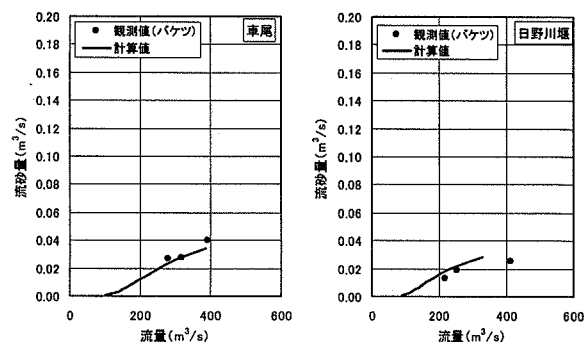


図-7 平成 12 年 9 月出水の検証例(バケツ採水)

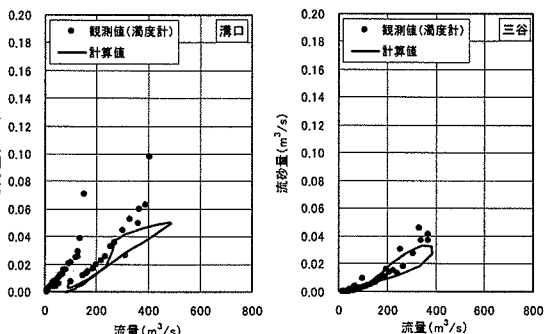
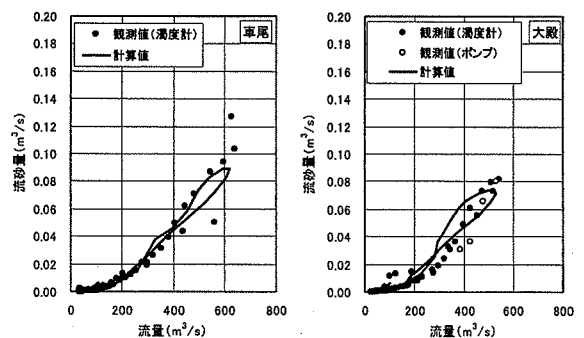


図-8 平成 13 年 9 月出水の検証例(濁度計・ポンプ採水)

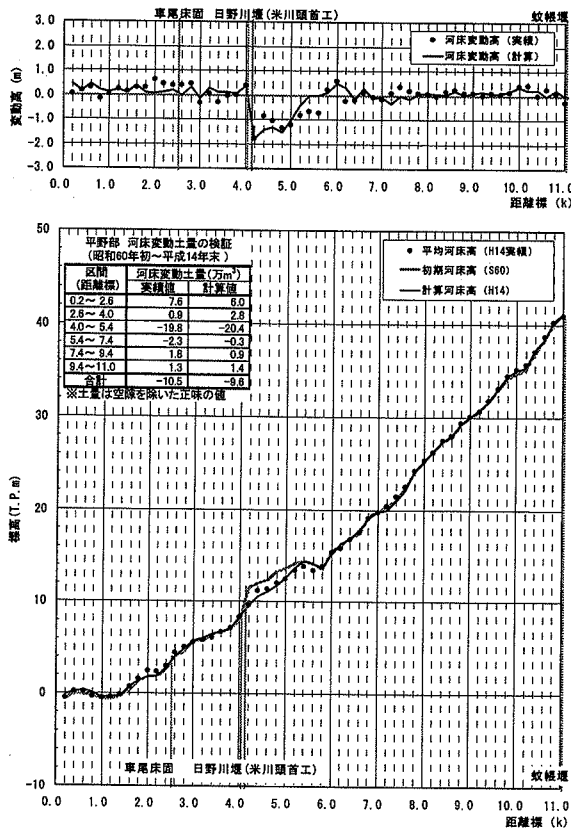


図-9 平均河床高・河床変動高縦断面図

d) 河床変動土量

昭和60年初～平成14年末の河床変動土量を検証した。河床は全川の的に平均粒径が 100mm～200mm のアーマーコートで覆われており、河床変動はほとんど見られない。なお、4.0k～5.4k の河床低下は、日野川堰改築にともなう工事掘削の影響であり、計算途中でこれを考慮した。河口部から扇頂部(11.0k)までの河床変動土量の再現性は、10%未満の誤差で検証できた(図-9)。

以上、ここで検討した土砂移動計算モデルは、ダム堆砂量、通過土砂量、河床変動土量について良好な再現性を有することが明らかとなった。

(4) 土砂動態マップの作成

再現計算をもとに土砂動態マップを作成した(図-10)。近年 18 年間における海岸への流出土砂量は 1.7 万 m³/年(2mm 以下の成分)、このうち海浜成分は 1.3 万 m³/年であった(0.1mm 以下のウォッシュロード成分を除く)。

かなな流し当時は、日野川上流域からの流出土砂が支配的であったが、かなな流しの衰退により、上流域からの供給土砂は減少し、更にアーマーコートの形成によって河床からの土砂供給も絶たれたことから、近年では大山流域からの供給土砂が相対的に卓越することとなった。年平均流出土砂量の比率は、日野川上流:大山流域=1:3の関係である。

ところで本検討では、河口部における海浜構成材料の浮遊限界や平均粒径の移動限界流量をもとに、対象出水数を 36 出水としている(車尾地点の日流量が 200m³/s

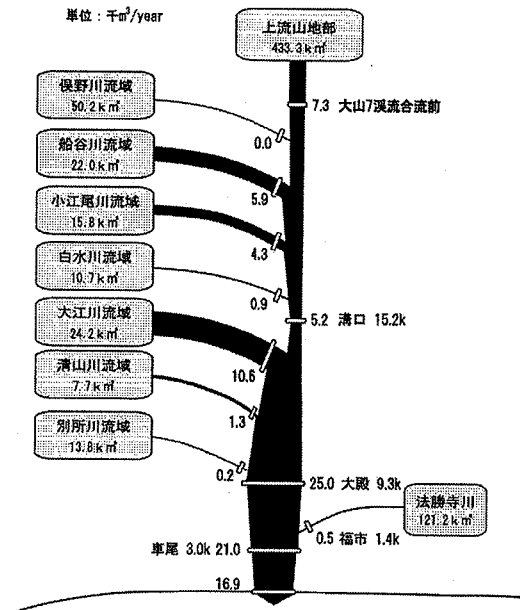


図-10 土砂動態マップ(全量=2mm 未満の成分)

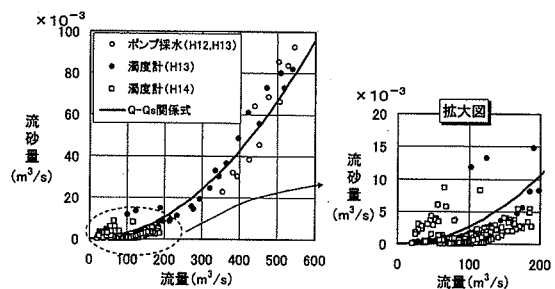


図-11 モニタリング結果による流量-流砂量関係

表-1 検討対象外出水の流砂量推算(年平均値)

流況	海岸への年平均流出土砂量	備考
検証計算対象出水 (36出水)	1.7万m³/年	日流量200m³/s以上の出水 (検証計算結果)
計算対象外の出水	0.4万m³/年	日流量100m³/s～200m³/sの出水(H12,H13モニタリングで得られたQ～Qsから推定)
合計	2.1万m³/年	

以上)。しかし、これよりも小さな流況においてもウォッシュロードは輸送されていると考えられ、全流出土砂量の年平均値を議論する場合には、200m³/s 未満の出水も考慮する必要がある。そこで、流送土砂のモニタリング結果から、検討対象外の出水による流出土砂量の補完を試みた。

まず流砂量がゼロとなる流量規模を濁度データから把握し、約 100m³/s 程度であることを確認した(図-11)。次に、近年の採水データのうち、流砂量の大きい平成12年11月出水と平成13年6月出水を対象に、流量-流砂量の関係を作成した($Q_s = 2.67 \times 10^{-7} Q^2$)(図-11)。これ

を、日流量が $100 \text{ m}^3/\text{s} \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ の流況に適用し、流砂量を算定した。この結果、検討対象外の出水では $0.4 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ の土砂流出が推定された。よって、海岸への土砂供給量は、全量で $1.7 \text{ 万 m}^3/\text{年} \sim 2.1 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ と推定された(表-1)。但し、この時の流量-流砂量関係は近年の出水のうち大きな出水を対象に作成されたものであるため、流砂量は大きめに算定されていると考えられる。

4. 結論

本論文では、山地流域から河口に至るまでの流砂系一貫した土砂移動追跡モデルを確立する目的で、一級水系日野川流域を対象としてモデルの再現検討を行った。その中で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 江頭らが考案した土砂流出計算と1次元河床変動計算を組み合わせることで、山地から河口に至るまでの流砂系一貫した土砂移動が追跡できることを確認した。また、流送土砂量のモニタリングの結果も概ね再現することができた。
 - (2) 土砂生産域に存在する溪床堆積物の存在状況(粒度分布、生産土砂の発生条件)を如何に合理的に設定するかが、再現精度に大きく影響する。
 - (3) 近年18年間における海岸への流出土砂量は $1.7 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ (2.0mm 以下の成分)、このうち海浜成分 ($0.1 \text{ mm} \sim 2.0 \text{ mm}$) は $1.3 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ であった。また、流域からの主な土砂供給源は大山であり、年平均流出土砂量の比率は、日野川上流:大山流域 = 1:3 の関係であった。
- 以上のように、ここで検討した土砂移動計算モデルは良好な再現性を有することが明らかとなった。また検証の際に土砂動態モニタリングの結果を活用することによって、再現の精度が向上した。

今後も土砂動態モニタリングを継続し、流量の大きな出水時の流砂量を観測すると共に、雨量強度と流砂量の応答関係を土砂生産状況と合わせて分析する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課、国土交通省国土技術政策総合研究所、国土交通省各地方整備局河川計画課：水系一貫土砂管理

に向けた河川における土砂観測、土砂動態マップの作成及びモニター体制構築に関する研究、平成13年度国土交通省国土技術研究会報告、指定課題 pp. 6-1~6-48

- 2) 芦田和男・奥村武信：ダム堆砂に関する研究、京大防災研究所年報、17号B, pp. 555-570, 1974.
- 3) 江崎一博：貯水池の堆砂量の予測に関する研究、土木学会論文報告集、第262号, pp. 67-78, 1977.
- 4) 高秀秀信・九津見生哲・藤沢寛：水系における土砂動態について、第27回水理講演会論文集, pp. 767-772, 1983.
- 5) 砂田憲吾・小松勝彦・小林弘：流域全体の土砂動態モデルに関する基礎的検討、水工学論文集、第44巻, pp. 729-734, 2000.
- 6) 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. 735-740, 2000.
- 7) Takara, K., K. Notsumata and R. Uesaka: A Distributed Model for Flood Runoff and Sediment Yield Based on Remote Sensing and GIS, Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project, September 21-23, 1998, Bandung, Indonesia, pp. 373-384, 1998.
- 8) 市川温・佐藤康弘・椎葉充晴・立川康人・宝馨：山地流域における水・土砂動態モデルの構築、京大防災研究所年報、第42号B-2, pp. 211-224, 1999.
- 9) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測、水工学論文集、第44巻, pp. 717-722, 2000.
- 10) 村上正吾・林誠二・亀山哲・渡辺正孝：河川流域内農林地帯における土砂動態モデルに関する基礎的検討、水工学論文集、第45巻, pp. 799-804, 2001.
- 11) 江頭進治：土砂流出予測法、第37回水工学に関する夏期研修会講義集Aコース, pp. A-2-1~A-2-14, 2001.
- 12) 国土交通省河川局治水課、国土交通省河川局防災・海岸課海岸室、土木研究所河川研究室、土木研究所海岸研究室：水系一貫土砂管理に向けた河川における土砂観測、土砂動態マップの作成及びモニター体制構築に関する研究、平成12年度国土交通省国土技術研究会報告、指定課題 p. 17-60
- 13) 芦田和男・高橋保・道上正規：河川の土砂災害と対策、森北出版, p. 43

(2004. 4. 7受付)