

土砂生産のタイミングが 河床変動に及ぼす影響に関する数値計算

NUMERICAL SIMULATION FOR INFLUENCE EVALUATION BY THE TIMING
OF THE SEDIMENT SUPPLY ON THE RIVER BED CHANGE

丹羽 論¹・内田 太郎²・蒲原 潤一³・里深 好文⁴

Satoshi NIWA, Taro UCHIDA, Jun'ichi KANBARA and Yoshifumi SATOHUKA

¹ 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: niwa-s925a@nilim.go.jp

² 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: uchida-t92rv@nilim.go.jp

³ 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: kanbara-j1ab@nilim.go.jp

⁴ 立命館大学工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: satofuka@se.ritsume.ac.jp

Key Words: Calculation for riverbed variation, mountain river, sediment supply condition, hydrologic and sediment measurements

1. はじめに

山地流域において、洪水期間中の河床上昇は、氾濫リスクに直結する問題であり、洪水期間中の河床変動の予測は山地域の防災上重要な課題である。そのため、これまで多くの河床変動計算が山地流域を対象に実施されてきた。しかしながら、山地流域においては、①洪水期間中の河床変動の実態に関するデータが得られにくい、②洪水期間中の河床変動に影響を大きく及ぼすと考えられる土砂生産のタイミングに関する情報が得られにくい等の課題がある。

近年、①については、様々な技術的進歩があり、徐々にではあるが山地流域の土砂動態に関する知見が蓄積されつつある。一方、②については、山地流域における大規模な降雨に伴う土砂生産は間欠的に生じるとともに、場所によって大きく異なると予想されるものの、直接的に観測した事例が限られている。さらに、山地流域の土砂動態に関する既往の河床変動計算では、土砂供給条件として、計算上流端において全計算期間中に平衡流砂量を供給する事例¹⁾や、水のみを供給を行い河床侵食により水理量見合いの土砂を下流域に供給する事例²⁾が多い。例外的に土砂生産のタイミングが河床変動計算の結果に及ぼす影響につ

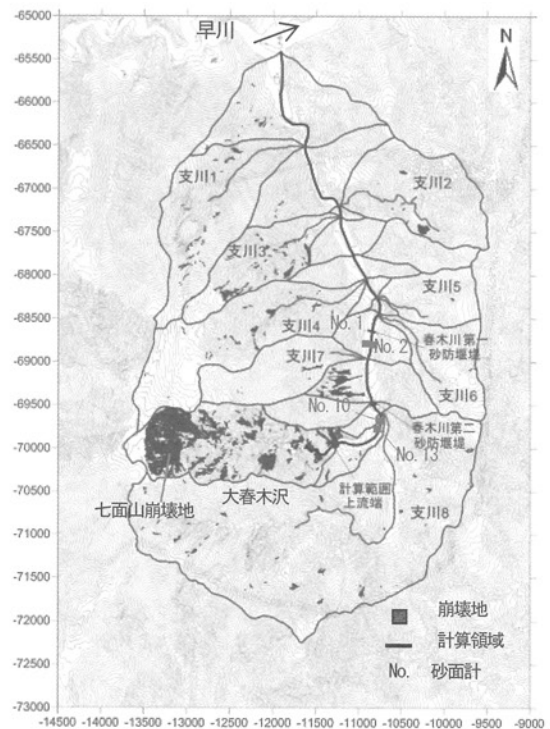


図-1 山梨県富士川水系早川の支川の春木川流域平面図

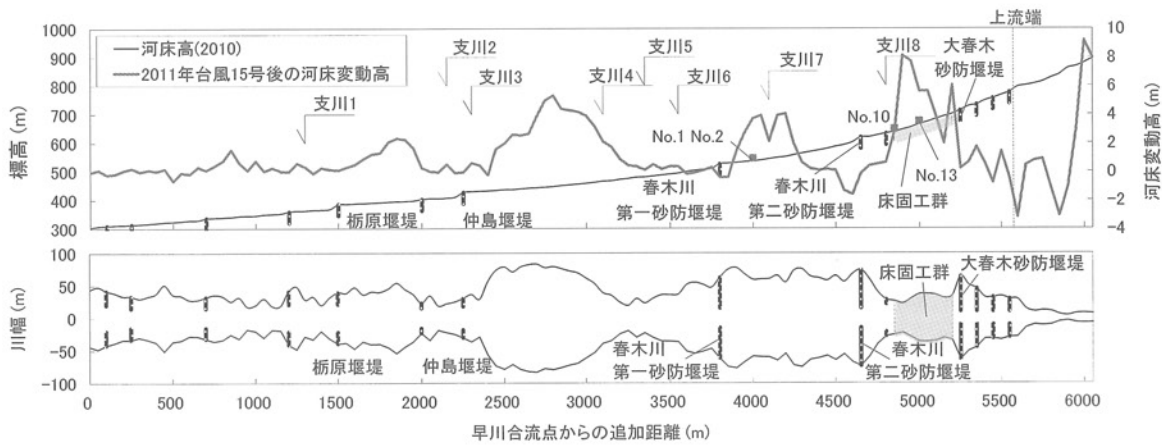


図-2 春木川の縦断形状と河床変動量



図-3 春木川観測所の観測日雨量と春木川第一砂防堰堤の観測水位

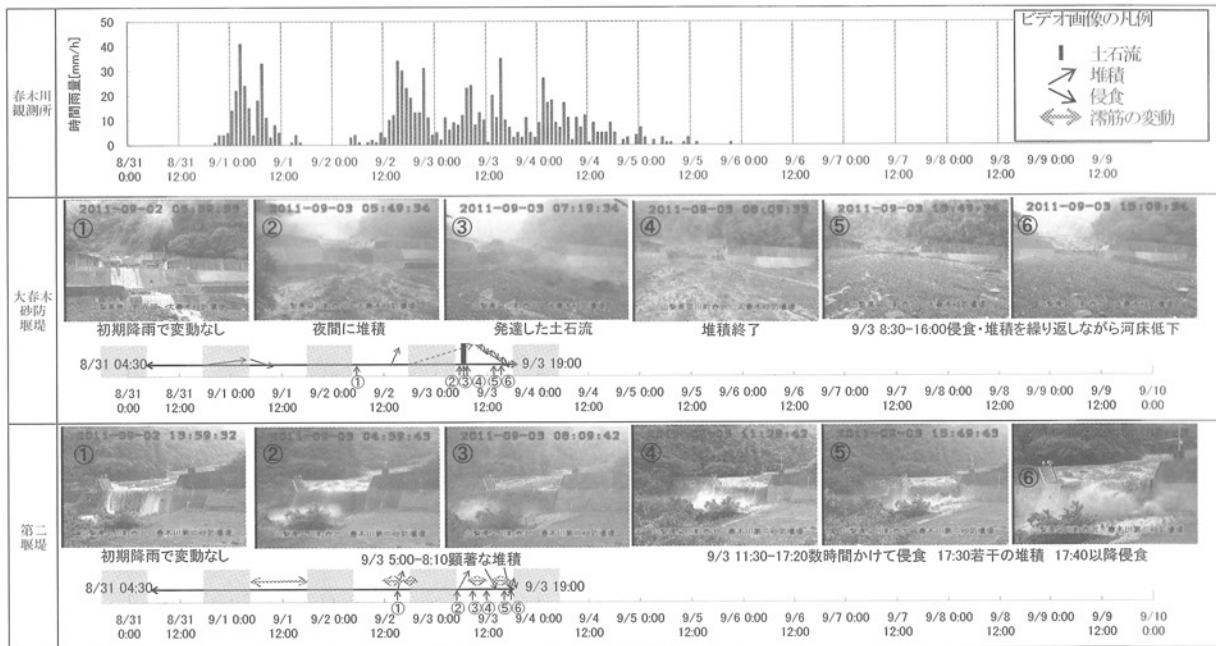


図-4 2011年台風12号来襲時の大春木砂防堰堤と春木川第二砂防堰堤のビデオ画像

いて把握された事例^{3,4)}があるものの、事例数は非常に少なく、詳細な分析事例はない。

そこで本研究では、山梨県富士川水系早川の支川の春木川における大規模土砂流出を対象とし、レーザープロファイラ(以降、LP)による土砂収支の把握、ハイドロフォン、砂面計等による観測結果およびビデオ画像から実際の土砂動態について把握を試みるとともに、土砂生産のタイミングが洪水期間中の河床変動に及ぼす影響について考察した。

2. 調査地の土砂動態

(1) 調査地概要

本研究では、春木川で発生した大規模土砂流出⁵⁾を対象とした。春木川では、富士川砂防事務所により、地形測量や砂防堰堤における流砂水文観測およびビデオ撮影が実施されてきた。図-1 に春木川流域の平面図、図-2 に縦断図と川幅、図-3 に流域内の春木川観測所で観測された日雨量を示す。春木川の集水面積は 20.9km² で、河床勾配は春木川第二砂防堰堤(以降、第二堰堤)の上流で約 10°、

早川との合流点で約 2° である。春木川の大規模土砂流出は、2011 年の台風 6 号、台風 12 号、台風 15 号、2012 年の台風 4 号の 4 つの台風から影響を強く受けたことがわかっている。

(2) 地形測量による土砂動態の把握

春木川では、縦横断測量が 2010 年と 2011 年の台風 15 号後に実施され、LP による計測が 2009 年 1 月から 3 月、2010 年 10 月から 2011 年 1 月、2012 年の台風 4 号後に実施された。4 つの台風を挟んだ LP データの差分解析から、この間に約 65 万 m³ の土砂が春木川流域から早川に流出したことがわかった。大春木沢の七面山崩壊地からの生産土砂量は 115 万 m³ で、斜面からの生産土砂量の 8 割以上を占める。図-2 に示す縦横断測量データによる河床変動高より、砂防堰堤の上流では、最大約 8m に及ぶ河床上昇が生じたことがわかる。

(3) ビデオ画像による土砂動態の把握

図-4 は、大春木砂防堰堤と第二堰堤で撮影された台風 12 号来襲時におけるビデオ画像の抜粋である。

大春木砂防堰堤では、8/31 から 9/1 の降雨において、降雨強度 41mm/h が観測された 9/1 の 2:00 の時間帯を挟み、9/2 の 5:30 に水通し下流において滞筋幅で堆積が確認さ

れ、10:30 までの約 5 時間をかけて徐々に侵食される様子が確認された。次に、9/2 の 14:00、9/3 の 5:50 に顕著な堆積が確認された。そして、9/3 の 7:20 頃、土石流(急激な土砂流出)が確認され、その後の 8:30~16:30 にかけて、侵食と堆積を何度も繰り返しながら水通しの下流側が徐々に侵食された。侵食と堆積を何度も繰り返している様子から、この間、大春木沢からの土砂生産は間欠的に発生していたものと推測された。

大春木砂防堰堤の下流 600m に位置する第二堰堤では、大春木砂防堰堤で河床変動した時間帯に同様の河床変動が確認され、土砂流出の影響が下流に伝播していることが認められたものの、侵食・堆積の傾向は大春木砂防堰堤で見られたものよりも規模が小さかった。さらに下流の春木川第一砂防堰堤(以降、第一堰堤)の水通し付近では、ビデオ画像では、河床上昇・低下は確認できず、常に流路を左右に変えるような変動が継続していた。

(4) 砂面計による河床変動観測値の傾向

第一堰堤から大春木砂防堰堤の間に設置された砂面計による河床高観測値を図-5 に示す(後述する計算結果を含む)。図より、台風 6 号と 12 号における観測値は、降雨が開始してからしばらくの河床変動が小さい時間帯、顕著

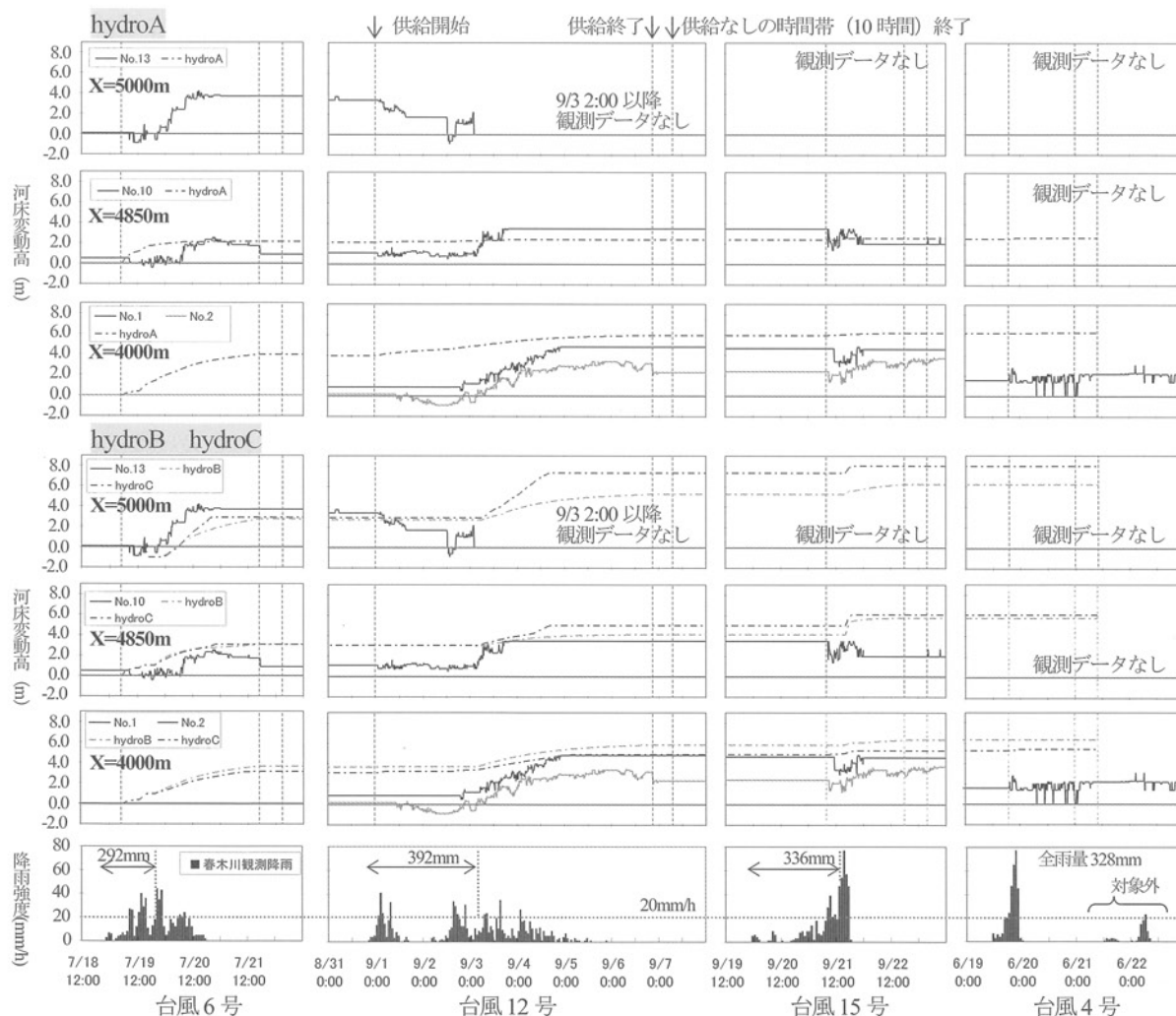


図-5 砂面計による観測値と河床変動計算の河床変動高

な堆積・侵食が発生した時間帯、出水後半の河床変動が小さい時間帯の概ね 3 つの時間帯に判別された。春木川観測所の降雨と比較すると、2011 年の台風 6 号、12 号、15 号では、観測値が得られたほとんどの砂面計で、降雨開始から降雨強度が 20mm/h を経験するまで、観測値の応答が極めて小さい。また、20mm/h を一旦越えると、台風 12 号では No.2, No.13 の砂面計、台風 15 号では No.1, No.10 の砂面計が侵食傾向を示した。そして、台風 6 号、12 号、15 号において、累積雨量が 300~400mm を超える時刻から急激な堆積傾向を示した。ただし、総降雨量が 328mm であった 2012 年台風 4 号においては、観測データは少ないものの、第一堰堤と第二堰堤の間に設置された No.1 のデータには、顕著な堆積は確認されなかった。台風 12 号来襲時に大春木砂防堰堤で土石流が確認された時刻(7:20)に対して、砂面計で顕著な堆積傾向が開始した時刻(4:00~8:00)は、数時間早いと同程度であった。

4. 河床変動計算による土砂供給条件の感度分析

(1) 支配方程式

支配方程式には中川らの式²⁾を基本とした一次元単粒径モデルを用いた。土砂移動現象として、土石流、掃流状集合流動状態、掃流砂までの幅広い現象を対象とし、これらの河床せん断力と平衡濃度の不連続を解消するために鈴木らの処理⁶⁾を適用した。式(1)に流れの連続式、式(2)に流れの運動方程式、式(3)に土砂量の連続式、式(4)に河床の連続式、式(5)に侵食速度式、式(6)に堆積速度式を示す。なお、流下幅は時間によって変化すると考えられるが、本研究の計算では、流量が比較的小さい降雨開始時の時間帯は対象外としているため、今回の検討では、時刻によらず全川幅とする簡易な取り扱いとした。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = BE \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(vQ)}{\partial x} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - B \frac{\tau_b}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(cA)}{\partial t} + \frac{\partial(cQ)}{\partial x} = BEc_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + E = 0 \quad (4)$$

$$E = \delta_c \frac{c_\infty - c}{c_s - c_\infty} \frac{q}{d} \quad (5)$$

$$E = \delta_d \frac{c_\infty - c}{c_s} \frac{q}{h} \quad (6)$$

式中の記号は、重力加速度 g 、流積 A 、川幅 B 、流動深 h 、河床高 z 、自由表面標高 $H = z + h$ 、流動層の土砂濃度 c 、河床の堆積土砂濃度 c_s 、平衡濃度 c_∞ 、流れの密度 ρ_m 、流量 Q 、流速 v 、河床せん断力 τ_b 、侵食堆積速度 E 、単位幅流量 q 、粒径 d 、侵食速度係数 δ_c 、

堆積速度係数 δ_d である。

適用モデルは、平衡濃度 c_∞ と流動層の土砂濃度 c の大小により侵食と堆積が決定される。土石流状態の侵食判定は、河床面においてせん断力 τ がせん断強度 τ_L を上回ることと等価となる。既存研究⁷⁾では、これに粒径 d の深度における τ が τ_L を上回る条件を加えて侵食が議論されている。本研究でも、粒径 d の深度において $\tau \leq \tau_L$ のとき、侵食速度 E をゼロとすることとして、河床面下 $z = d$ における τ と τ_L を式(7)、(8)でそれぞれ求めた。

$$\tau = g \sin \theta \{ (ch + c_s d)(\sigma - \rho) + (h + d)\rho \} \quad (7)$$

$$\tau_L = g \cos \theta \{ (ch + c_s d)(\sigma - \rho) \} \tan \phi_s \quad (8)$$

ϕ_s は内部摩擦角、 σ は砂礫密度、 ρ は間隙流体密度、 θ は水面勾配である。

(2) 計算条件の設定

河床変動計算の計算区間は、上流端を最上流の砂防堰堤の位置として、それより下流の大春木沢の河道と春木川本川とした。計算グリッドには、図-2 に示す 2010 年に計測された河床標高と川幅を 50m ピッチで設定した。侵食可能深には、対象領域の最大侵食深を参考に一律 2.0m、床固工設置範囲には実績程度の 1.0m を設定し、その他横断構造物の設置箇所を固定床とした。

図-1 に示す各分割領域からの水の流出ハイドログラフは単位図法による流出解析により設定した。面積が 0.5km² 以上となる領域は、計算区間との合流点に該当する計算点 1 点から側方流入させ、分割領域の面積が 0.5km² 未満となる残流域からは、対象領域と計算区間が接する計算点に流量が均等配分されるよう側方流入させた。流出解析に用いた流出率(0.75)と単位図には、試行錯誤により第一堰堤の観測水位を再現できる値を設定した。各分割領域の流出解析には、1km グリッドの解析雨量から、各分割領域の平均雨量を算出し入力した。なお、計算の対象時間は、砂面計の観測値が応答している時間帯とした。

前述したとおり、既存研究において、上流端の土砂供給条件に平衡流砂量が設定されることが多かった。また、平衡流砂量は水深に応じて変化することが報告⁸⁾されている。しかしながら、土石流状態が想定される領域においては、水深依存性は小さくなり、数値計算上では水深によらず平衡濃度を一定として扱うことが多い^{2,9)}。今回は、土砂生産のタイミングの影響を検討するため、土砂供給条件の異なる 3 ケースの計算を実施した。対象とした土砂流出については、LP データの差分解析により生産土砂量が把握されているため、総土砂供給量には 3 ケースとも共通して実績値を用いた。上流端位置における河床勾配は 10° ~ 12° で土砂移動形態として土石流状態が想定され、既存研究に倣い、土砂を供給する時間内の上流端の土砂濃度は一定とした。図-6 に計算区間上流端に設定した水および土砂の供給条件を示す。hydroA は上流端の実績通過土砂量を全時間に

濃度一定で供給したケースである。この場合、土砂濃度は 0.19 となる。hydroB では砂面計の観測値に堆積傾向が確認された 2011 年の 3 つの台風に対して、堆積傾向を示した時刻以降の時間に限定して土砂供給を行った。この場合、土砂濃度は 0.27 となる。hydroC では、さらに土砂供給の時間帯を制限し、上流端の土砂濃度を 0.4 として、流量が大きい時間帯から順に土砂を割り振った。それぞれのケースの土砂供給時の供給濃度は、hydroA では平衡濃度より小さく、hydroB では平衡濃度程度、hydroC では平衡濃度より大き

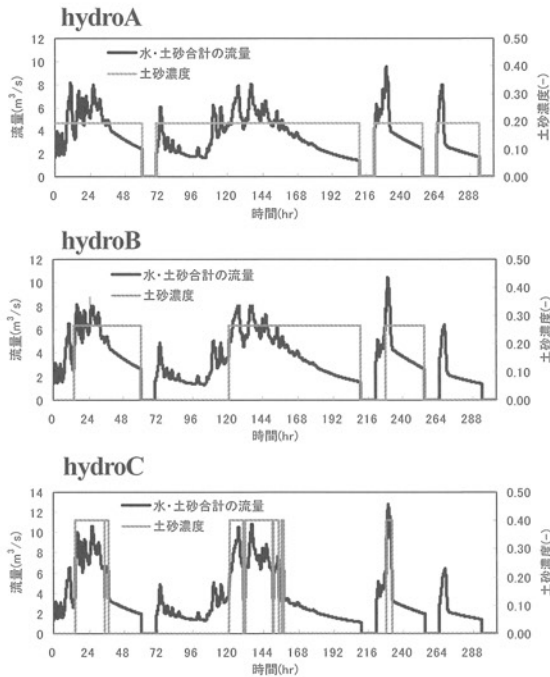


図-6 上流端における水および土砂の供給条件

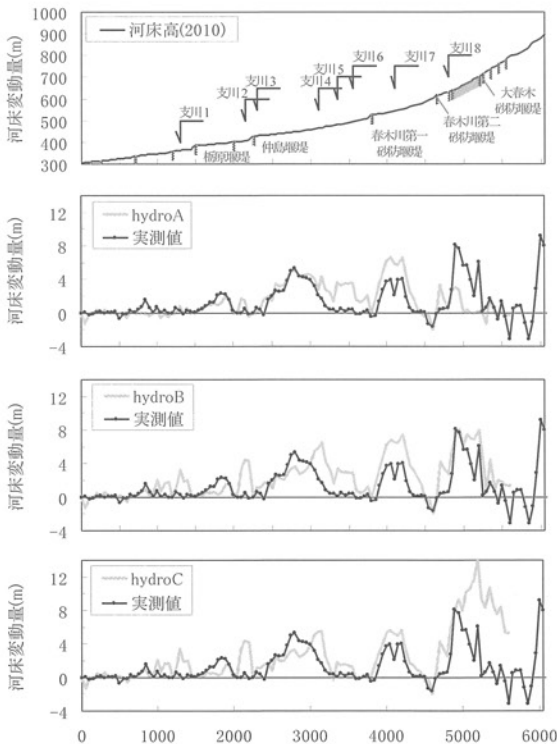


図-7 台風 15 号後の河床変動量

いこととなる。また、支川および残流域の土砂供給条件については、hydroA のケースでは、上流端と同様に計算区間への実績供給土砂量を全時間に対して土砂濃度一定で供給するものとした。hydroB と hydroC を設定したケースでは、支川では支川流域の末端勾配で求められる平衡濃度、残流域では 0.54 を供給濃度とし、流量が大きい時間帯から順に土砂を割り振った。

その他のパラメータとして、代表粒径 d には、大春木沢の粒度分布調査結果における平均粒径 49.7mm を設定し、 ϕ_s を 35° 、 σ を $2.6g/cm^3$ 、 ρ を $1.0g/cm^3$ 、 δ_e を 0.0007、 δ_d を 0.01 に設定した。侵食条件として、計算領域全体に対してこの文献⁷⁾の方法を適用した。

(3) 計算結果

図-5 に砂面計の観測値と対応する計算点の河床変動時間変化の計算結果、図-7 に台風 15 号後の河床変動高、図-8 に期間中の総通過土砂量を示す。

全時間に実績通過土砂量を割り振った hydroA では、台風 15 号後における第二堰堤上流の堆積高を過小評価するものの、それより下流側の河床変動高は実測値と定性的に一致した(図-7)。また、期間中の早川への総流出土砂量は、実測値の 6 割程度となった(図-8)。河床変動の時間変化については、 $X=5000m$ の地点では、ほとんど河床変動がみられない計算結果となり、実際の河床変動の傾向と全く一致していない。また、 $X=4850m$ の地点では、台風 6 号時に堆積が計算されたものの、それ以外の台風においては変化が小さかった。さらに、 $X=4000m$ の地点では、台風 6 号と台風 12 号時に堆積が算出されたが、その後大きな変化みられなかった。すなわち、砂面計で計測された急激

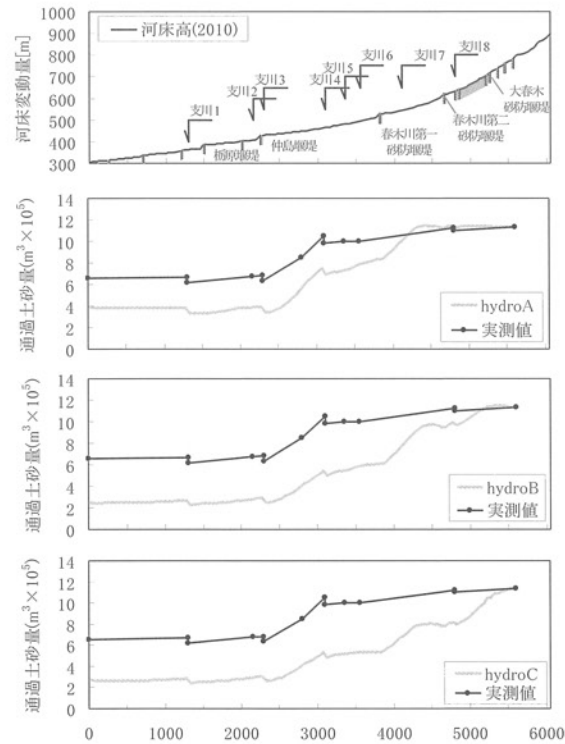


図-8 台風 4 号後の通過土砂量

な堆積、侵食などのうち、大半は表現できなかった(図-5)。

土砂供給の時間帯を砂面計で顕著な堆積が観測された時刻以降に限定した hydroB については、台風 15 号後の第二堰堤の上流側の河床変動状況は定量的に一致したが、支川の側方流入点付近で過剰な堆積傾向が発生した(図-7)。これは、本川の河床勾配が支川末端の河床勾配よりも緩いために、本川の平衡流砂量よりも過剰な土砂が本川の河床に堆積し、侵食条件によって土砂が河床にとどまったことによる。それに伴い、総通過土砂量は、hydroA を設定したケースよりも減少し、早川への流出土砂量は実測値の 5 割以下となった(図-8)。河床変動の時間変化については、hydroA と異なり、X=5000m の地点で台風 6 号時に急激な堆積が生じる結果となり、実績に比較的近い結果となった。さらに、その後の台風 12、15 号でも断続的に河床が上昇する結果となった。また、X=4850、4000m の地点においても台風 6、12、15 号時にそれぞれ、河床上昇が生じる結果となり、計算結果と観測結果が定性的に一致した。また、河床上昇が開始する時間は計算結果と観測結果で概ね近かったものの、河床の上昇速度は観測結果の方が全体的に大きく、河床上昇の継続時間は観測値の方が短い傾向があった。すなわち、計算結果の方が長時間、河床上昇が継続するような結果となった。さらに、X=5000、4000m の地点の台風 12 号の前半にみられた侵食傾向は計算では生じなかった。

上流端からの供給土砂濃度を 0.4 として hydroB より土砂供給の時間を制限した hydroC については、平衡流砂量よりも過剰に供給された土砂が第二堰堤より上流側に実績以上に堆積する傾向を示した(図-7)。また、hydroB と hydroC の総通過土砂量を比較すると、X=3000m の地点より上流では、hydroC の方が hydroB に比べて小さかったが、X=3000m の地点より下流では、ほとんど差がみられなかった(図-8)。河床変動の時間変化については、hydroB と同じ降雨開始後から堆積した時間帯の挙動が再現され、さらに土砂供給した時間帯により大きな河床上昇速度が算出される結果となった。さらに、河床上昇の継続時間は hydroB に比べて短くなり、出水後半に観測された変動量が小さい時間帯も概ね計算により再現された。ただし、hydroB 同様、出水期間前半の侵食傾向は計算では生じなかった。

5. おわりに

本研究では春木川の大規模土砂流出を対象として、土砂生産のタイミングが出水期間中の河床変動に及ぼす影響について、土砂動態観測に基づく実態整理し、数値計算を用いて検討した。今回の検討は、川幅を全幅として時間変化をしない、断面平均濃度が輸送濃度に等しいという仮定のもとに計算が実施されている。これらの条件下で、得られた結論を以下にまとめる。

- ① 大春木砂防堰堤のビデオ画像から、堰堤前面で侵食と堆積が繰り返し発生しており、1 出水の中で間欠的に土砂生産・河道への土砂供給があったと推察された。
- ② 砂面計による河床変動の観測から、20mm/h で観測値が応答し、約 300mm 以上の累積雨量で急激な堆積傾向を示した。
- ③ 河床変動計算において、河床変動の時間変化は土砂供給のタイミングに大きく影響を受けた。土砂供給のタイミングを考慮しない場合、砂面計で観測された複雑な河床変動の時間変化は再現できなかった。

以上の結論から、土砂生産のタイミングを考慮することは出水期間中の河床変動を予測するために、重要な要素であることが分かった。計算結果については、出水前半の侵食傾向や総通過土砂量、側方流入点直下の河床変動など再現しきれていない部分が残されている。より詳細に観測結果を分析し、流下幅など水や土砂動態の詳細を把握する必要があると考えている。最後に、検討に使用した観測および地形データは国土交通省富士川砂防事務所より提供いただいたことをここに報告する。

参考文献

- 1) 例えば、井戸清雄・佐藤一幸・水山高久：数値実験による砂防施設効果評価システムに関する研究，新砂防 Vol.52, No.4, p.26-32, 1999.
- 2) 例えば、中川一・高橋保・里深好文・川池健司：1999 年ベネズエラのカムリグランド流域で発生した土砂災害について—数値シミュレーションによる再現と砂防施設配置効果の評価—，京都大学防災研究所年報，第 44 号 B-2, p.207-228, 2001.
- 3) 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.59, No.5, p.15-22, 1991.
- 4) 榎木敏仁・水山高久・佐藤一幸・村上正人：土砂生産のタイミングを考慮した土砂生産・流出に関する研究，砂防学会誌，Vol.59, No.5, p.15-22, 2007.
- 5) 西井洋史・清水孝男・大浦二郎・柏原佳明・吉野弘祐・梶原あずさ：近年の豪雨に着目した春木川流域における土砂移動実態，平成 25 年度 砂防学会研究発表会概要集 A, p.252-253, 2013.
- 6) 鈴木拓郎・内田太郎・岡本敦：土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究，砂防学会誌，Vol.66, No.2, p.21-30, 2013.
- 7) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 20 号 B-2, p.405-435, 1997.
- 8) 例えば、橋本晴行：土砂の移動現象とそのメカニズム，日本流体力学会誌 ながれ，Vol.29, No.3, p.193-202, 2010.
- 9) 宮本邦明・伊藤隆郭：支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法，新砂防 Vol.55, No.2, p.24-35, 2002.

(2014. 5. 9 受付)