

# 大規模洪水時における山地部からの土砂供給が 平野部河道の河床変動に及ぼす影響

青木 健太郎<sup>1</sup>・藤田 正治<sup>2</sup>・加藤 陽平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:aoki@ideacon.co.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所流域災害研究センター

(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

E-mail: fujita.masaharu.5x@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 博(工) いであ株式会社 大阪支社河川水工部 (〒559-8519 大阪市住之江区南港北 1-24-22)

E-mail:katoyo@ideacon.co.jp

地球規模で進行している温暖化の影響により、平成 27 年の関東・東北豪雨、平成 28 年の北海道・東北地方を襲った一連の台風、平成 29 年の九州北部豪雨など、全国各地で大規模な水災害が発生している。今後、更なる温暖化の進行により現在よりもさらに激しい降雨も予想され、大規模な水災害が頻発し、甚大な被害が発生する可能性がある。山地部で豪雨が発生した場合、表層崩壊や深層崩壊により多量の土砂が生産され、その土砂が平野部の河川まで到達することで河床上昇を引き起こし治水安全度の低下をもたらすことが考えられる。本研究では、土砂動態モデルを構築して山地部からの土砂供給量や土砂供給タイミング、土砂の発生場所の違いを考慮した解析を行った。その結果より平野部河道で河床変動が顕著となる範囲や山地部の河床変動状況を示すとともに、土砂供給のタイミングや発生場所によっては河床変動の傾向が異なることなど、今後の新たな治水計画を考える上で必要となる知見を得ることができた。

**Key Words:** river bed deformation, flood disaster, flood control plan, sediment supply, numerical analysis

## 1. はじめに

近年、九州北部豪雨や紀伊半島大水害など計画を上回る規模の降雨が頻発し、全国各地で水災害による甚大な被害が発生している。紀伊半島大水害では、大規模な斜面崩壊が発生したため、斜面崩壊地の下流では流出する土砂の堆積により河床が上昇し、治水安全度が低下している<sup>1)</sup>。今後、地球温暖化が進行すると降水量がさらに増加することが予想され、大規模な斜面崩壊による山地部からの土砂供給が増加し、下流部では河床上昇によって治水安全度が低下し、破堤や越水による甚大な被害が発生する可能性がある。

このような背景から、平成 27 年 8 月に「水災害分野における気候変動適応策のあり方について」が社会資本整備審議会から答申され、過剰な土砂堆積を考慮する重要性が述べられた<sup>2)</sup>。また、大規模水害を引き起こすような豪雨の場合、河床の上昇または低下量がかなり大きくなるため、治水計画において洪水時の河床変動を考慮することが不可欠となる。

多くの河川における治水計画は、洪水後に測量された

横断形状を使用し、河床変動を考慮しない不等流計算に基づいており、洪水時の河床変動による水位変化を考慮していないのが現状である。今後、気候変動による洪水外力の増大も予想されるため、治水計画においても河床変動を考慮していく必要があると考えられる。

また、山地部での降雨分布によって土砂生産の場所や供給量が異なり、平野部河道に供給される土砂の量やタイミングが変化する。山地部からの土砂供給量やタイミングの違いによって河床変動の傾向も異なってくる。

藤田ら<sup>3)</sup>は、確率的な要因に支配された土砂生産量と洪水流量の条件を設定し、河床変動高さを確率的に評価する手法を示し、安倍川を例に解析している。

筆者ら<sup>4)</sup>は、平野部の河道を単純化した一次元河床変動モデルに、山地部からの土砂供給量や供給タイミングの違いを境界条件として与えて大規模洪水時の河床変動特性について、物部川を例に検討している(以下、既往研究と呼ぶ)。これにより、土砂供給条件が平野部の河床変動に及ぼす影響範囲や変動量について検討し、一洪水による河床変動の影響範囲は境界点から 2km 程度となる結果を得た。ただし、山地部からの土砂生産を適切

に表現していない等の課題もある。

本研究では、大規模洪水時の河床変動を治水計画へ反映していくための研究と位置づけて、大規模洪水時の山地部からの土砂供給に着目して解析を行うことで、大規模洪水時の山地部からの土砂供給が平野部河道の河床変動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 2. 解析モデル

### (1) 対象河川

本研究は、山地部からの土砂供給が平野部河道の河床変動に与える影響を検討するため、物部川流域を対象とした。物部川は、高知県に位置する一級河川で、その幹川流路延長は 71km、流域面積は 508km<sup>2</sup>、河床勾配は上流部で約 1/40、中流部で約 1/150、下流部で約 1/300 となっている。河口から 10.4km 地点に合同堰があり、それより下流で平野が広がる。本研究で対象とする山地部は合同堰より上流域とし、平野部は合同堰下流の河道域とし、合同堰を山地部と平野部の境界として位置付けた。

### (2) 降雨流出モデル

#### a) モデルの概要

本計算では図-1 に示すように流域を単位河道、単位斜面に分割する江頭・松木のモデル<sup>5)</sup>を改良した加藤・檜谷のモデル<sup>6)</sup>を用いた。本モデルは単位河道内の河床勾配の変化や単位河道内における洪水流の伝播を表現するため、単位河道を任意に分割することができる。降雨流出計算には、表面流・中間流・基底流を考慮した Kinematic wave 法による解析を行った。

単位河道、単位斜面の条件設定には、国土地理院が公開している国土基盤地図情報 10m メッシュ DEM を使用した。表-1 に単位河道、単位斜面の分割数及び計算条件を示す。

#### b) 降雨流出モデルの再現性の確認

降雨流出モデルの精度を検証するため深淵地点（河口から 3.65km）での実績流量と計算流量の年最大値を比較した。深淵地点の実績流量は永瀬ダムでの洪水調節の影響が含まれる。しかし、本モデルでは永瀬ダムの洪水調節を考慮しないため、永瀬ダムでの洪水調節効果を付加した流量（ダム戻し流量）で比較した。

永瀬ダム堆砂量の再現計算を行う昭和 61 年から平成 23 年までの流出解析を行い、実績と計算の平均年最大流量を比較した結果、流量差は約 30m<sup>3</sup>/s となった。また、昭和 45 年 8 月洪水型の計画流量ハイドログラフも貯留関数法での計算結果を再現できた（図-3）。

#### c) ハイドログラフの設定

構築した降雨流出モデルを用いて、土砂輸送計算に用いるハイドログラフを設定した。永瀬ダム堆砂量の再現

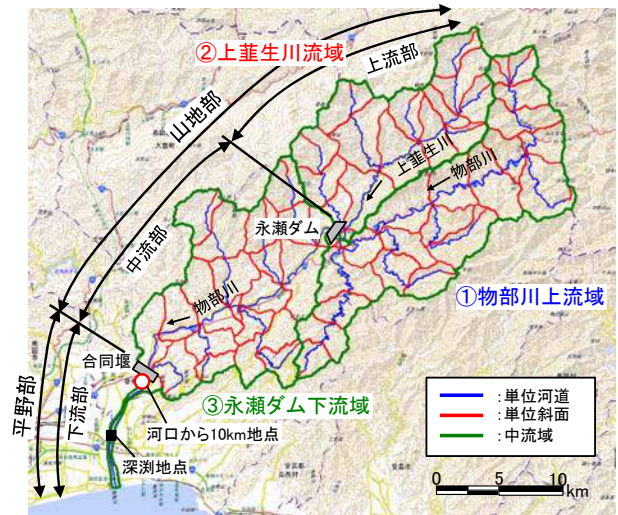


図-1 物部川流域分割図

表-1 単位河道・単位斜面の計算条件

単位河道	59	
単位斜面	116	
表層粗度 (m <sup>-1/3</sup> ・s)	0.7	
土層厚 (m)	A層	0.1
	B層	0.1
	C層	0.25
透水係数 (m/s)	A層	0.05
	B層	0.03
	C層	0.001

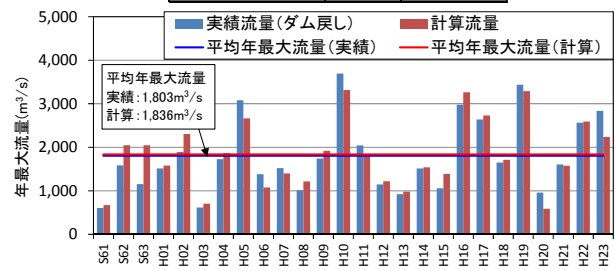


図-2 深淵地点の年最大流量の再現結果

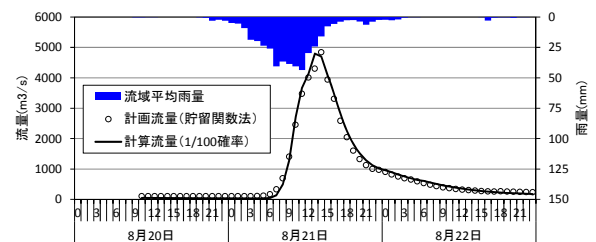


図-3 計画流量ハイドログラフ（深淵地点：1/100）

には、上記で計算した昭和 61 年から平成 23 年までの 26 年間のハイドログラフを設定した。

大規模洪水時の河床変動の影響を検討には、計画規模洪水として 1/100 確率、超過洪水として 1/200 確率の雨量をもとにハイドログラフを設定した。引き伸ばしを行う降雨波形は、河川整備計画の目標洪水として設定されている昭和 45 年 8 月洪水とした。なお、山地部からの土砂供給の影響を検討するため、永瀬ダム、杉田ダム、吉野ダムによる貯留効果は考慮していない。

### (3) 土砂輸送モデル

#### a) モデルの概要

土砂輸送モデルは一次元河床変動計算を用いた。水理量については、常流区間は不等流計算、射流区間は等流計算とした。掃流砂量は芦田・道上の式、無次元限界掃流力は細粒分に対して芦田・道上により修正された Egjazaroff による関係式から求める。浮遊砂の基準面濃度、砂粒子の浮上率は Itakura-Kishi の式、沈降速度は Rubey の式を用いる。粒度分布は芦田・江頭・劉の方法により計算する。

一次元河床変動計算に用いる河床は降雨流出モデルで作成した単位河道を細分し、断面間の距離  $\Delta x$  を概ね 500m として全川で 422 断面設定した。粗度係数について、平野部は河道計画の検討で設定されている低水路粗度係数  $n=0.033$  とし、山地部は  $n=0.035$  とした。下流端水位について、永瀬ダム堆砂量の再現計算では永瀬ダムの予備放流水位 (T.P.187m) とし、大規模洪水時の計算では下流端 (河口) に等流水深を与えた。また、河床材料は物部川流域で実施された河床材料調査結果をもとに図-4 に示すとおり設定した。

#### b) 土砂輸送モデルの再現性の確認

土砂輸送モデルの精度を確認するため永瀬ダム堆砂量の再現を行った。再現期間は昭和 61 年から平成 23 年までの 26 年間とし、永瀬ダムの初期河床高は昭和 59 年測量結果を基に設定した。土砂供給地点は山地部の支川及び本川の上流端に設定し、掃流区間となる溪床勾配が 1/30 程度となる地点を上流端とした。土砂供給量は流砂量式で計算される平衡流砂量の 0.05 倍とした。

再現計算結果を図-5 に示す。永瀬ダムの平成 23 年時点の実績堆砂量 1,476 万  $m^3$  に対して、再現計算での堆砂量 1,461 万  $m^3$  であり、土砂供給倍率を平衡流砂量の 0.05 倍とすることで永瀬ダムの堆砂状況を良好に再現できた。

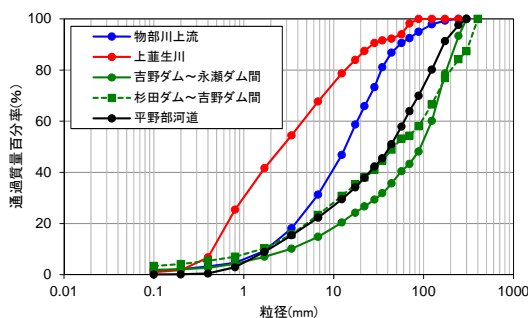


図-4 設定した河床材料の粒度分布図

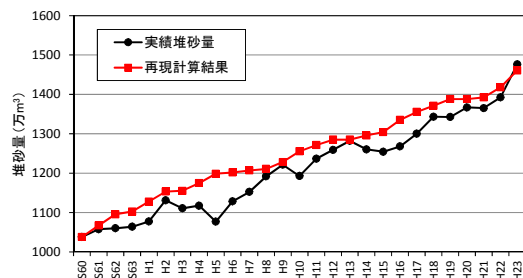


図-5 永瀬ダム堆砂量再現結果

この結果より、山地部の支川及び本川の上流端で設定した土砂供給倍率の妥当性を確認した。

### 3. 山地部からの土砂供給量が河床変動に及ぼす影響

実河川における山地部から平野部河道への土砂供給量は、山地斜面での表層崩壊や深層崩壊による土砂生産の状況によって大きく変化し、土砂供給量の変化によって平野部河道の河床変動状況も変化する。ここでは、山地部からの土砂供給量の変化に着目して平野部河道の河床変動について検討する。

#### (1) 計算ケース

##### a) 計算条件の設定

土砂供給量について、山地部で同時多発的な表層崩壊や多数の深層崩壊が発生した状況を想定して、実績再現での流砂量の 2 倍、5 倍、10 倍 (平衡流砂量の 0.1 倍、0.25 倍、0.5 倍) が供給される場合について計算する。供給土砂の粒度は各河川で設定している河床材料と同じとした。また、ハイドログラフは、1/100 確率と 1/200 確率を用いた。

##### b) 河床変動の影響範囲の定義

土砂供給量の変化によって河床変動が生じたとき、その影響範囲を定義することは難しいが、ここでは河床変動量が  $\pm 5\text{cm}$  を超える範囲を河床変動に及ぼす土砂供給影響範囲 (以下影響範囲と呼ぶ) と定義する。この値は、物部川 4.0k~5.0k 区間での流下能力が  $100\text{m}^3/\text{s}$  変化する場合の水位変動量に相当する。

#### (2) 結果及び考察

##### a) 山地部と平野部の境界点

表-2 に土砂供給量の違いによる境界点下流における河床変動の影響範囲を示す。本研究では土砂輸送モデルの断面間隔  $\Delta x$  が約 500m であるため、河床変動量が 5cm 以下となる地点を直線内挿により算定した。土砂供給倍率が 5 倍までのケースでは確率規模によらず影響範囲が概ね 2km となり、既往研究での結果と同じ傾向となった。倍率が 10 倍のケースでは過剰な土砂供給により影響範囲が 3~5km と長くなっている。

図-6 に河床変動量の時間変化を示す。図中の河床変動量及び流量ハイドログラフは山地部と平野部の境界点 (河口から約 10km) での値を示す。

1/100 確率、1/200 確率ともに、洪水初期は山地部河道での堆積土砂が流出するため河床が上昇する。流量が約  $1,000\text{m}^3/\text{s}$  を超えると河床は低下し、ピーク流量後に再び河床が上昇する。土砂供給量 (倍率) が大きいほどピーク流量付近の河床低下量は小さく、洪水後の河床上昇量

表-2 河床変動の影響範囲一覧表

倍率	影響範囲(km)	
	1/100	1/200
実績再現値	1.63	1.61
実績再現値の2倍	1.65	1.63
実績再現値の5倍	2.10	1.79
実績再現値の10倍	3.41	5.54

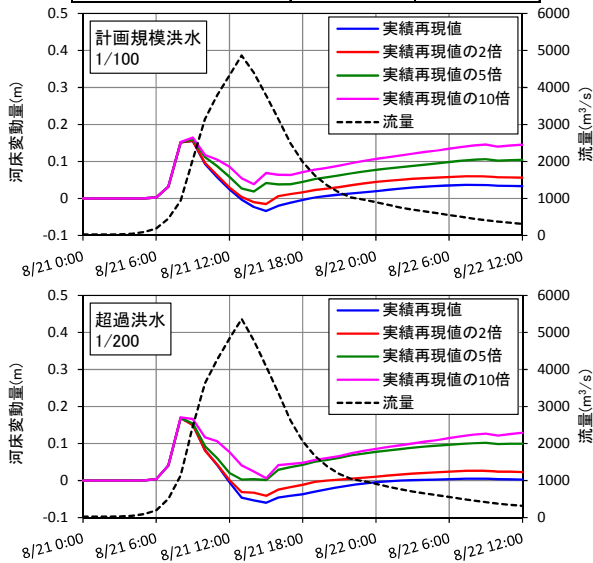


図-6 確率規模ごとの河床変動量の時間変化  
(山地部と平野部との境界点)

が大きくなる。既往研究では山地部からの土砂輸送を考慮していないため、本研究で見られる洪水初期の河床上昇は表現されていない。山地部からの土砂輸送モデルで計算することで、山地部の河道内に堆積している土砂の影響についても考慮することができる。

1/100 確率では、倍率が実績再現値及び 2 倍のケースにおいて、ピーク流量付近で初期河床高と同程度であるが、倍率が 5 倍、10 倍のケースでは初期河床高より河床が上昇しており、治水安全度の低下が懸念される。

1/200 確率では掃流力が大きくなるため、倍率が実績再現値及び 2 倍のケースでは、ピーク流量付近で初期河床高より河床が低下している。洪水初期の河道内堆積土砂の流出による堆積の影響で 0.05m 程度の河床低下となっているが、洪水初期の河床上昇が無かった場合、0.2m 程度低下する可能性もあり、護岸等の河川構造物への影響が懸念される。

b) 山地部 (永瀬ダム流入部付近)

図-7 に山地部における河床変動量の時間変化を示す。図中の河床変動量及び流量ハイドログラフは永瀬ダムの流入部付近の断面での値を示す。

土砂供給量が実績再現値及び 2 倍のケースでは、ピーク流量時に河床変動量が最大となるのに対して、5 倍、10 倍のケースでは、ピーク流量以降も河床が上昇する。土砂供給量が多いほど上昇量も高く、最大で 3m 程度上昇するため洪水氾濫に特に注意が必要である。

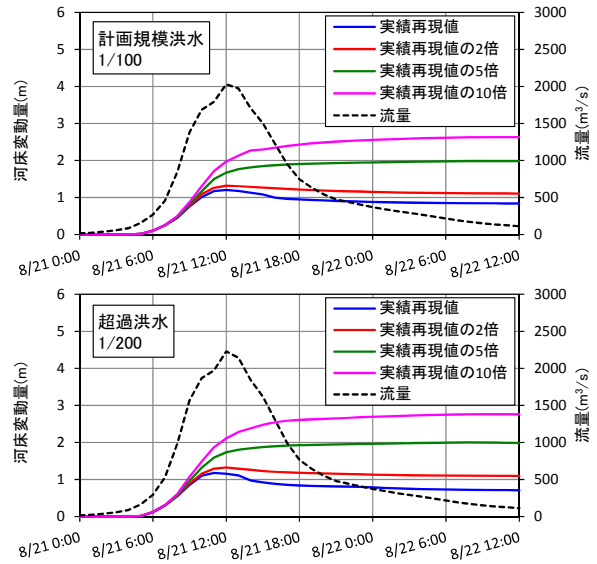


図-7 確率規模ごとの河床変動量の時間変化  
(山地部 (永瀬ダム流入部付近))

4. 土砂供給のタイミングや発生場所が河床変動に及ぼす影響

降雨分布や表層地質の違いにより山地部からの土砂供給のタイミングや土砂の発生場所が変化する可能性がある。はじめに、全流域からの土砂供給のタイミングの違いによる河床変動への影響を確認した。次に、土砂の発生場所が偏った場合において、土砂供給のタイミングの違いによる河床変動への影響を確認した。なお、ハイドログラフは計画規模である 1/100 確率を使用した。

(1) 土砂供給のタイミングが異なる場合

a) 計算ケース

山地部で発生した土砂が平野部の河道へ到達する時間を考慮して、図-8 に示すとおり土砂供給のタイミングをピーク流量時及びピーク流量の 3 時間前、6 時間前で設定した。供給土砂量は山地部と平野部の境界点である河口から約 10km の断面を通過した土砂量を各河川上流端の掃流力に応じて配分した。なお、土砂供給のタイミングの違いを確認するため、初期河道での堆積土砂を考慮していない。

b) 結果及び考察

図-9 に土砂供給のタイミングの違いによる河床変動量の時間変化を示す。図中の河床変動量及び流量ハイドログラフは山地部と平野部の境界点である河口から約 10km の断面での値を示す。

流量ピーク時に供給するケースでは、山地部で発生した土砂が平野部へ到達するのに時間がかかるためピーク流量時には河床が 0.2m 低下する。その後、山地部からの土砂流入により河床が埋め戻される。流量ピークの 3 時間前に供給するケースでは、増水期に河床が低下する

が、ピーク流量時には初期河床高と同程度となる。ピーク流量の6時間前に供給するケースでは、増水期に河床が上昇するが、ピーク流量時には河床が低下し、洪水後の河床高はピーク流量時に供給するケースと同程度となる。全流域で土砂供給のタイミングが変化しても洪水後の平野部の河床高は洪水前と大きく変化しない。ピーク流量時に供給するケースでは既往研究<sup>4)</sup>での河床変動状況(図-10)と同様な結果となった。しかし、ピークの3時間前に供給するケースは、既往研究ではピーク流量時に河床が上昇しているのに対して、本研究では初期河床と同程度となっている。これは上流で生産された土砂が山地部と平野部の境界点まで到達するのに時間がかかるためである。よって、上流で生産された土砂の到達時

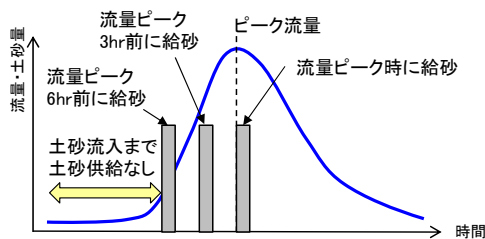


図-8 土砂供給タイミングのイメージ

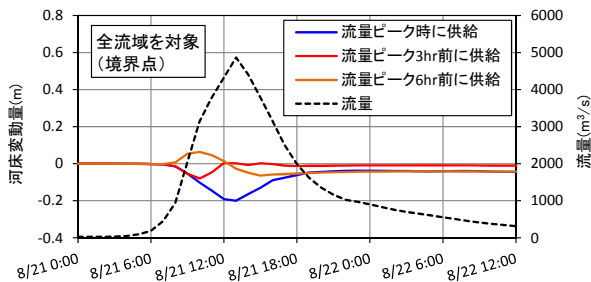


図-9 土砂供給のタイミングの違いによる河床変動量(山地部と平野部の境界点: 本研究成果)

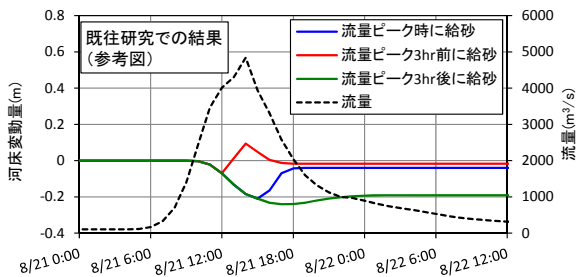


図-10 土砂供給のタイミングの違いによる河床変動量(既往研究成果<sup>4)</sup>)

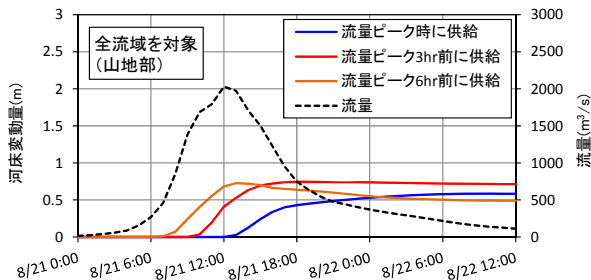


図-11 土砂供給のタイミングの違いによる河床変動量(山地部(永瀬ダム流入部): 本研究成果)

間を土砂輸送モデルによって考慮することで、ピーク流量時における河床変動の傾向が変化することが分かった。

図-11に山地部における河床変動量の時間変化を示す。図中の河床変動量及び流量ヒドログラフは永瀬ダムの流入部付近の断面での値を示す。

山地部と平地部の境界点での河床変動量(図-9)と比較して、山地部での河床変動量は大きくなっている。これは常時給砂しているケース(図-6, 7)と同様な傾向となっている。山地部での結果は、土砂供給地点が近いこともあり、土砂供給のタイミングが早いほど河床の上昇も早くなっている。山地部ではピーク流量の6時間前に土砂が供給されると流量ピーク時に河床上昇量が最大となるため、河床上昇による洪水氾濫について特に注意する必要がある。

## (2) 土砂の発生場所及びタイミングが異なる場合

### a) 計算ケース

土砂の発生場所の違いによる影響を確認するため、図-12に示す流域ごとに集中して土砂供給することで、土砂の発生場所の違いによる河床変動への影響を確認した。供給土砂量の設定は(1)と同様に各流域の河川上流端の掃流力に応じて配分した。

### b) 結果及び考察

図-13に土砂の発生場所及びタイミングの違いによる河床変動量の時間変化を示す。図中の河床変動量及び流量ヒドログラフは山地部と平地部の境界点である河口から約10kmの断面での値を示す。

ピーク流量時の河床高は、土砂の発生場所が①物部川上流域と③永瀬ダム下流域のケースでは低下しているが、②上葦生川流域のケースでは上昇している。

洪水後の河床高は、土砂の発生場所が①物部川上流域と②上葦生川流域のケースでは概ね上昇傾向であるのに対し、③永瀬ダム下流域のケースでは低下傾向である。永瀬ダム下流域は境界点との距離が近いにもかかわらず洪水後の河床が低下した要因として、上流と比較して降雨量が少なく支川からの流出量が小さいため掃流力が不



図-12 土砂の発生場所を設定するための流域分割

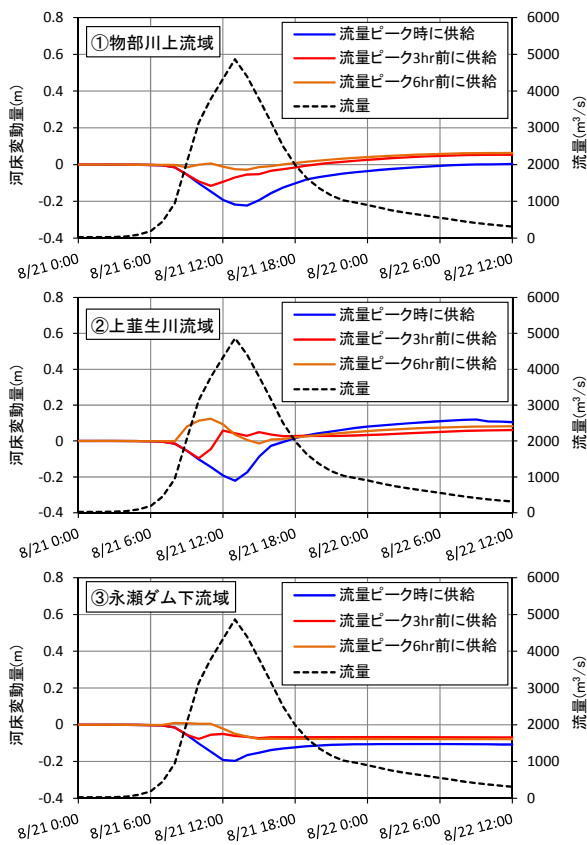


図-13 土砂の発生場所の違いによる河床変動量

足し、支川に流入した土砂が本川に全て流出せず、一部の土砂が河道内に残ったためと考えられる。

## 5. おわりに

本文では、山地部からの土砂供給に着目して検討を行うことで、今後の新たな治水計画を考える上で必要となる知見を得ることができた。以下に、得られた知見及び今後の課題を示す。

- 1) 土砂供給量の相違による河床変動の影響については、既往研究と同様に一洪水での河床変動の影響範囲は境界点から 2km 程度である。また、土砂供給量が過大

(5倍、10倍のケース) となった場合には、ピーク流量時に河床が上昇するため、破堤や越水の可能性が高くなるため特に注意が必要となる。

- 2) 土砂供給のタイミングが河床変動に及ぼす影響については、洪水後の河床高が同程度であっても洪水時の河床変動状況が異なっている。そのため、複数の発生タイミングを想定して洪水時の河床変動状況を確認しておく必要がある。
- 3) 土砂の発生場所の違いが河床変動に及ぼす影響については、上葦生川流域で土砂生産が集中した場合、ピーク時の河床高が上昇する可能性があるため特に注意が必要となる。また、本研究では昭和 45 年 8 月洪水型の降雨波形のみを対象としたが、様々な降雨波形を対象とした検討も必要となる。
- 4) 本研究では、土砂供給量を平衡流砂量に倍率をかけて設定しており、土砂生産域での状況を適切に評価できていない。今後は、土砂生産モデルや土砂供給モデルを組み込んで検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 国土交通省 近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所：紀伊山地の大規模土砂災害対策における計画段階評価, pp.7-11, 2016.
- 2) 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について 答申, pp.24, 2015.
- 3) 藤田正治, 水山高久, 星野久史：山地河川における確率的な河床変動予測, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.447-448, 2002.
- 4) 青木健太郎, 藤田正治：大規模洪水時の河床変動を考慮した治水計画に向けた一考察, 土木学会論文集 B1, Vol.74, No.4, pp. I\_949- I\_954, 2018.
- 5) 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, No.44, pp.735-740, 2000.
- 6) 加藤陽平：透過型砂防堰堤を有する流域の土砂流出予測に関する研究, 鳥取大学学位論文, 2014.

(2018.5.31 受付)

## A STUDY ON THE EFFECT OF SEDIMENT SUPPLY FROM MOUNTAIN BASIN DURING LARGE SCALE FLOOD ON RIVER BED DEFORMATION

Kentaro AOKI, Masaharu FUJITA and Youhei KATO

Large scale floods and sediment disasters occur throughout the country due to global warming effects. In the future, even more severe rainfall is anticipated due to further progress of global warming, large scale water disaster frequently occurs, and there is a possibility of enormous damage. When heavy rain occurs in the mountainous basin, it is thought that a large amount of sediment is produced due to the slope failure, the arrival of the sediment to the river in the plain area causes a rise of the river bed and the safety level of flood control degree. In this study, a sediment transport model was constructed and analyzed considering differences in sediment supply amount and sediment supply timing from the mountain basin. As a result, we were able to obtain knowledge such as contents to consider in considering future new flood control plan.