

大量の土砂が流入する河川の境界条件である 土砂量ハイドログラフの実用的推定法の研究 -平成7年7月姫川大洪水を例にして-

STUDY ON PRACTICAL METHOD FOR ESTIMATING SEDIMENT DISCHARGE
HYDROGRAPH IN RIVERS WITH A LARGE AMOUNT OF SEDIMENT YIELD
- IN THE CASE OF 1995 FLOOD OF THE HIME RIVER -

岡安 光太郎¹・池田 博明²・福岡 捷二³・後藤 岳久⁴
Kotaro OKAYASU, Hiroaki IKEDA, Shoji FUKUOKA and Takahisa GOTOH

¹正会員 修士(工学) 国土交通省四国地方整備局 徳島河川国道事務所 河川調査課
(〒770-8554 徳島県徳島市上吉野町3-35)

²国土交通省北陸地方整備局 高田河川国道事務所 副所長
(〒943-0847 新潟県上越市南新町3-56)

³フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁴正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構(同上)

It is important to establish a practical method for estimating sediment discharge hydrograph in rivers with a large amount of sediment yield during floods. In this study, we develop the practical method for estimating sediment discharge hydrograph by calculating flood flow and bed variation analysis in stages so as to bring the observed and calculated bed aggradation and channel migration closer to agreement. The present method was applied to 1995 flood of the Hime River. As a result, it shows that the present method could estimate sediment discharge hydrograph in rivers with a large amount of sediment yield during floods.

Key Words : *sediment discharge hydrograph, the Hime River, sediment yield, bed aggradation, channel migration*

1. 序論

近年, 大規模洪水により大量の土砂が河川に流入・堆積し, 流路変動を伴う甚大な洪水土砂災害が報告されている. 平成7年7月姫川大洪水では, 上流山地から流入した大量の土砂が下流河道内に堆積したことにより流路が著しく変動し, その結果, 堤防破堤が生じる等, 河道状況は一変した(図-1). 図-2は平成7年大洪水前後の航空写真と昭和22年航空写真に平成7年洪水後の砂州形成領域と深掘れ箇所, 樹木群残存領域を重ねて示している. 図-3は昭和22年と平成7年洪水後の河幅縦断面図を示す. 平成7年洪水後の河幅と主流路の蛇行線形は, 昭和22年の航空写真で見られる河道とほぼ対応している. このことは, 姫川では平成7年のように大量の土砂流入を伴う洪



図-1 平成7年7月姫川大洪水時の航空写真

水が生ずると, 昭和22年の河道の状態に戻ることを示している. このように, 大規模洪水時には大量の土砂が流入することによって, 大きな流路変動が生じることにな

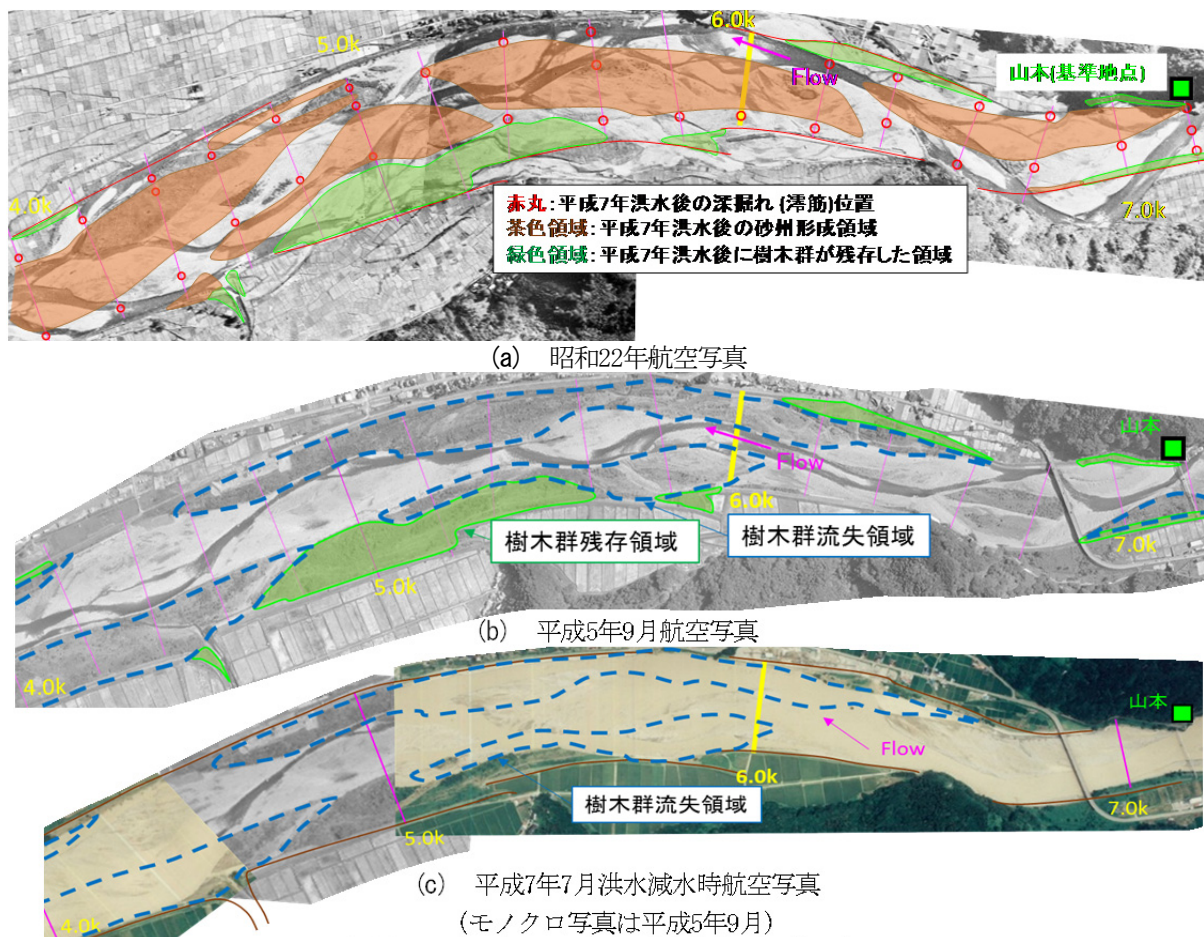


図-2 昭和22年と平成7年洪水前後の河道の状況

る。このような異常な現象の再度災害防止に向けて、洪水解析と共に河床変動解析が必要となるが、この時流入土砂に関する上流端境界条件となる流入土砂量のハイドログラフが必要となる。一般に洪水時の河床変動解析では、流入土砂の上流端境界条件については平衡流砂量が与えられている。この方法は流入土砂量の多い河川では適切とは言えないが、これに代わる方法がないのが実状である。一般に砂防河川では、山地での崩落・土石流による土砂生産、土砂流出を考慮した解析が行われている。柁木ら¹⁾は平成7年7月姫川大洪水時の各支川の土砂生産量を航空写真の判読から算出し、これを流入土砂の境界条件とした河道の1次元河床変動計算を行っている。原田ら²⁾は九州北部豪雨の赤谷川洪水を対象に、土石流によって主要河川に流入した細粒土砂量の推定法³⁾を用い、上流から流入した多量の細粒土砂を考慮した流路変動解析を行っている。これらの研究は、流路変動解析の新しい視点を導入しているが、河道の縦断的な土砂堆積や流路変動を十分説明出来ていない。

本研究では、初めに洪水時に大量の土砂が流入する河川の流路変動解析の考え方を示し、土砂の境界条件としての流入土砂量ハイドログラフを見積もる実用的な方法を構築する。次に構築した手法を用いて、平成7年7月姫川大洪水を対象に、大規模な土砂堆積と流路変動を引き起こした流入土砂量ハイドログラフと樹木群流失の時間

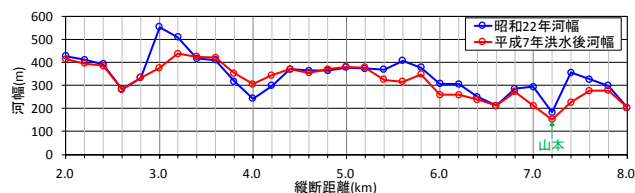


図-3 昭和22年と平成7年洪水後の河幅縦断図

帯を推定する。

2. 土砂流入の多い河川の流路変動解析の考え方

まず、山地斜面の崩落や土石流等によって洪水時に大量に流入する土砂は細砂を多く含んでいることから、大量の土砂の流入と堆積によって流路変動が生じたものと考え、上流から流入する大量の細砂は浮遊砂として扱うものとした。また、洪水時に大量の土砂が流入する河川の流路変動解析には、土砂の上流端境界条件である流入土砂量ハイドログラフが解析精度に大きく影響する。このため著者らは、洪水時に大量の土砂が流入する河川の複雑な流路変動の再現計算に対しては、流入土砂量ハイドログラフを推定するため、洪水前後での河道の土砂堆積や流路変動、河床材料の変化の観測結果を再現するように洪水流・河床変動解析を行う必要があると考えた。即ち、アウトプットである解析結果を実測値に一致させ

るように流路変動解析を試行的に行うことにより、インプットである流入土砂量ハイドログラフを推定する。

次に、流入土砂量ハイドログラフの推定手順について示す。図-4は流入土砂量ハイドログラフの推定手順のフローチャートを示す。流入土砂量ハイドログラフを決定するためには、総流入土砂量とハイドログラフの波形の二つの要素を決める必要があるが、様々な現象が重層的に影響しあうためこれらを同時に決定することは難しい。そこで、流入土砂量ハイドログラフの推定については、段階的に検討していく必要がある。初めに、流入土砂量ハイドログラフの波形を流量ハイドログラフの波形と同一とし、異なる総流入土砂量ハイドログラフ(図-10参照)を複数ケース設定して解析を行い、縦断的な河床上昇を再現するケースを段階的に抽出することで総流入土砂量を算定する(STEP1)。次に、総流入土砂量はSTEP1で算定した値とし、流量ハイドログラフと異なる波形の流入土砂量ハイドログラフ(図-14参照)を複数ケース設定して解析を行い、洪水後に観測された縦断的な河床上昇と流路変動を再現する解析結果を得ることにより、流入土砂量ハイドログラフの波形を算定する(STEP2)。本研究では、大きく分けてこの2段階の手順により、河道への流入土砂量ハイドログラフを算定する。総流入土砂量を先に算定する理由は、総流入土砂量が洪水時の縦断的な土砂堆積に大きく影響しており、ハイドログラフの波形を変えても、縦断的な土砂堆積の傾向は大きく変わらないと考えたためである。

樹木群流失の時間帯については、上記で推定した流入土砂量ハイドログラフを用い、樹木群流失の時間帯を試行的に複数ケース設定し、実測の流路変動を再現する計算ケースを抽出することにより、樹木群流失の時間帯を推定する。

3. 平成7年7月姫川大洪水の土砂堆積と流路変動

図-5は、平成7年の洪水前後の6.0kmにおける河床の横断形状を示す。洪水前は、姫川の主流路は河道中央に位置していたが、洪水時に大量の流入土砂が河道中央の主流路に堆積したことにより、主流路が堤防際に移動した。また、堤防際の砂州は樹木群ごと洗掘され、樹木群は流失した。図-2(b)は樹木群が流失した範囲を示し、図-6は洪水前後の実測の河道内の土砂変動量の縦断図を示す。平成7年7月大洪水では、0.0km～7.2kmに約50万m³の土砂が堆積した。図-7は洪水前後の粒度分布を示す。7.0kmでは洪水前のd60が約200mmに対して、洪水後は約100mmに細粒化している。以上より、本洪水では大量の細かい土砂が河道中央付近に縦断的に堆積し、樹木群の流失を伴って流路が堤防際に大きく移動していたことが分かる。

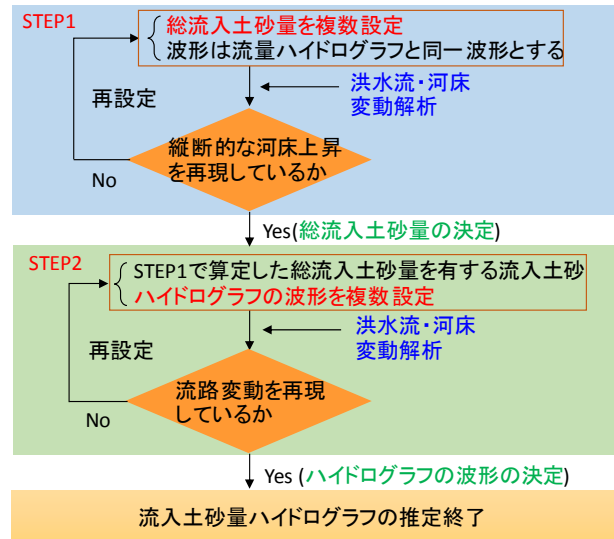


図-4 流入土砂量ハイドログラフの推定手順

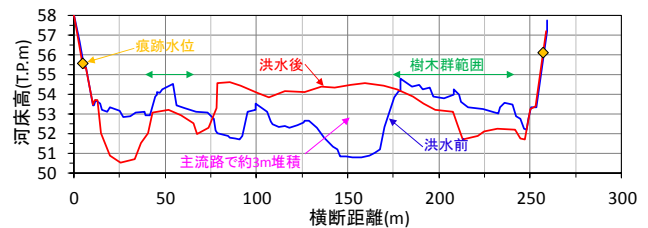


図-5 平成7年洪水前後の河道横断形状の変化(6.0km)

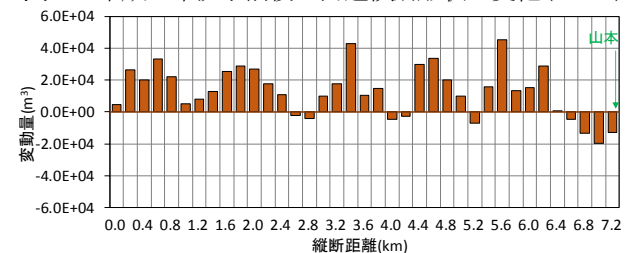


図-6 河道内土砂変動量の縦断図

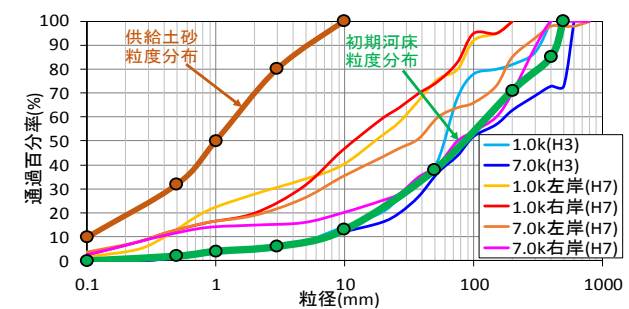


図-7 平成7年洪水前後の河床材料粒度分布の変化

4. 大量の土砂流入を考慮した流路変動解析法と流入土砂量ハイドログラフの推定

(1) 解析方法と検討条件

解析検討区間は7.3kmから0.6kmまでとする。流入する細砂の粒度分布は既往論文⁹⁾を参考に設定する(図-7)。浮遊砂解析の上流端境界条件は以下のように設定する。まず、上流端に山地からの浮遊砂成分を発生させる区間(9.3km～8.8km)を設け、その下流に河床変動解析開始地点まで緩和区間(8.8km～7.3km)を設けることにより、緩和区間の流速分布に応じて浮遊砂が検討区間に供給され

る(図-8)。この緩和区間下流端の浮遊砂分布を検討区間における浮遊砂解析の上流端境界条件とする。上流山地からの浮遊砂を発生させる区間を姫川の検討対象区間の平均的な河幅と河床勾配に概ね一致させることで、与えられる流量ハイドログラフに対応する、検討対象区間の平均的な水理量に応じた浮遊砂量ハイドログラフが求まる。これを流入浮遊砂量ハイドログラフの単位図とし、検討対象区間の洪水後の土砂堆積と流路変動を再現するように、浮遊砂発生区間の浮上量を定数倍することにより、流入浮遊砂量ハイドログラフを決定する(図-9)。

洪水流解析は、複雑な河道条件での流れ場を解析出来る一般底面流速解析法⁴⁾を用いる。流れの解析において、樹木群の影響は樹木群透過係数を用いた抵抗項で評価し、樹木群が流失すると樹木群の抵抗を0とすることで樹木群の流失を考慮した。流れの上流端境界条件は、流出解析より得られた流量ハイドログラフ(図-10)を与え、下流端境界条件は富山湾の実測潮位を与えた。掃流砂解析の上流端境界条件は平衡流砂量を与える。河床変動解析では、掃流砂の計算に芦田・道上式を用い、浮遊砂濃度の計算に水深積分した平面二次元移流拡散方程式、浮遊砂濃度の鉛直分布式にLane-Kalinskeの式、浮遊砂の浮上量は板倉・岸の式をそれぞれ適用した。

(2) 流入土砂量ハイドログラフの推定

まず、2章で示した流入土砂量ハイドログラフの一次推定のSTEP1を行う。杵木ら¹⁾は姫川平成7年7月大洪水時の総流入土砂量を約860万 m^3 程度であると報告している。ここでは、この値を参考に4ケースの総流入土砂量を設定する。流入土砂量ハイドログラフを流量ハイドログラフと同一の波形とし、異なる総流入土砂量を与えた(図-10のCase1～Case4)。ここでは、流入土砂量ハイドログラフの決定が重要であることから、まずは、樹木群が流量ピーク前(図-10のCaseA)に流失したものと想定して解析を行い、樹木群流失の時間帯の推定は後述の(3)で行うものとする。図-11は、Case1～Case4の平均河床高の変化の解析値と実測値を示す。Case1, Case2は実測の縦断的な河床高の上昇傾向を再現出来ておらず、設定した流入土砂量が少な過ぎることが分かる。Case4は実測と比較して河床高の上昇量が大きく、総流入土砂量が多過ぎる。一方で、総流入土砂量を約700万 m^3 としたCase3は、実測の縦断的な河床高の上昇傾向を比較的良く再現している。図-12はCase3における流量ピーク時の解析水面形と痕跡水位の比較を示しており、解析水面形は痕跡水位の縦断分布をほぼ再現している。以上より、縦断的な土砂堆積を再現出来る総流入土砂量は約700万 m^3 であることが推定された。図-13は、Case3の主流路の位置の時間変化と実測値の比較を示す。Case3(総流入土砂量：約700万 m^3)では、洪水前に河道中央に位置した主流路が堤防際に移動する実測の流路変動を再現できておらず、主流路が河道中央に位置したままである。

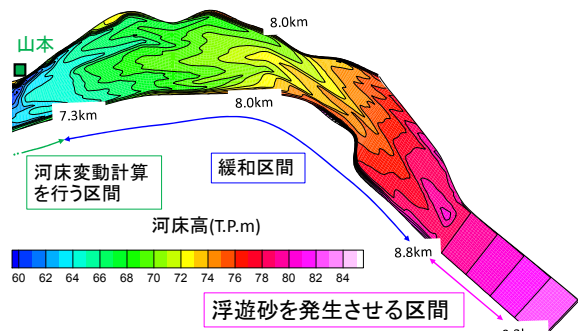


図-8 浮遊砂解析での上流端境界条件の与え方

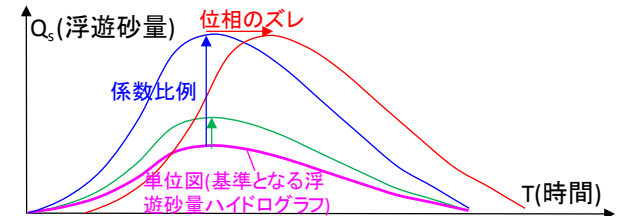


図-9 流入浮遊砂量ハイドログラフの設定の模式図

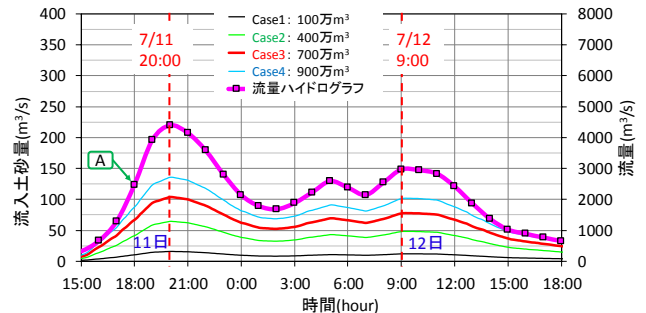


図-10 流量ハイドログラフと与えた流入土砂量ハイドログラフ(流量ハイドログラフと同一波形)

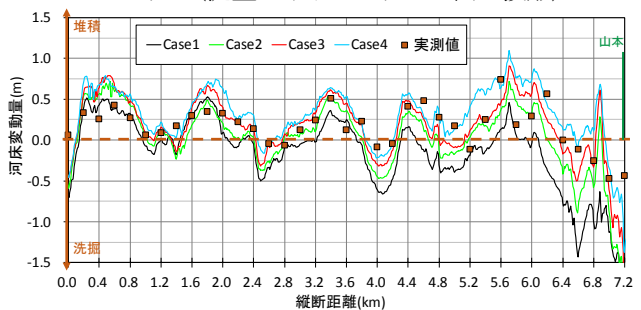


図-11 観測と解析の洪水前後の平均河床高の変化 (Case1～Case4)

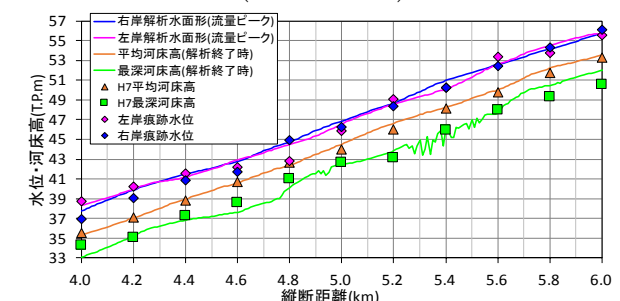


図-12 観測と解析の水位・河床高縦断図(Case3)

次に流入土砂量ハイドログラフの二次推定のSTEP2を行う。姫川上流域では流量ピーク付近で支川の土砂災害が集中的に発生していたことから¹⁾、流量ピーク付近に大量の土砂が流入する流入土砂量ハイドログラフ(図-14

のCase5)を与える。更に、一般に浮遊砂量ハイドログラフのピークは水位ピークよりも早い時間に発生することから⁵⁾、流入土砂量のピークがCase5よりも2時間早い流入土砂量ハイドログラフ(図-14のCase6)を与え、波形の影響を検討する。STEP1で縦断的な土砂堆積を再現する総流入土砂量は約700万 m^3 と算定されたことから、STEP2の総流入土砂量は約700万 m^3 とする。図-15はCase5～Case7の平均河床高の変化の解析値と実測値を示す。ここで、総流入土砂量(約700万 m^3)の妥当性の確認のため、Case7はCase6と同一の波形で総流入土砂量を約900万 m^3 とした場合(図-14のCase7)の解析結果である。Case3と同様に、総流入土砂量を約700万 m^3 としたCase5、Case6の平均河床高は実測の縦断的な河床上昇の傾向を再現し、総流入土砂量を約900万 m^3 としたCase7は河幅の広がる5.0～7.0km付近で実測より大きく河床高が上昇している。これにより、異なる波形の流入土砂量ハイドログラフを与えた場合においても、総流入土砂量を約700万 m^3 とすると、実測の縦断的な河床上昇をほぼ再現していることから、洪水時の総流入土砂量が約700万 m^3 であったことが確認された。また、Case6における日本海への総流出土砂量は約300万 m^3 となっている。報告書によれば⁶⁾、平成7年洪水前後の深浅測量成果より約30万 m^3 の土砂が測量範囲内に堆積しており、測量範囲外に細粒土砂が流出したことを考慮すると、これ以上の土砂流出があったと考えられる。このため、解析における総流出土砂量の妥当性は検証出来ていないが、総流入土砂量と河道内の土砂堆積量の傾向は概ね再現していることから、概ね正しい値であると言える。

図-16は、Case5の主流路の位置の時間変化と実測値の比較を示す。流量と流入土砂量のピークを同時刻とした流入土砂量ハイドログラフ(Case5)では、流量ピーク時(7/11 20:00)に主流路の移動は見られていないが、2波目ピーク時(7/12 9:00)になると主流路が河道中央から左右岸に移動し明確な蛇行が見られるようになっている。図-17は、Case6の主流路の位置の時間変化と実測値の比較を示す。流入土砂量のピークが流量ピークの2時間前とした流入土砂量ハイドログラフ(Case6)では、流量ピーク時(7/11 20:00)において、主流路が河道中央から左右岸に移動しており、Case5と比べて、Case6は主流路が左右岸堤防際に移動することを良く説明している。図-18の(a)、(b)、(c)はCase3、Case5、Case6の洪水前後の河床変動量コンターを、図-19の(a)、(b)、(c)はCase3、Case5、Case6の水深コンターを示す。図-19はそれぞれ洪水後の地形に低流量($Q=200\text{m}^3/\text{s}$)を通過して主流路位置を示している。流入土砂量ピークが流量ピークの2時間前と想定した流入土砂量ハイドログラフ(Case6)は、Case3、Case5と比べて5.0～6.0kmの河道中央の土砂堆積量が多く、また主流路の移動が顕著に発生している。洗掘位置と主流路位置が対応していることから、大量の土砂が河道中央に堆積することによって、左右岸堤防際の洗掘と主流路の

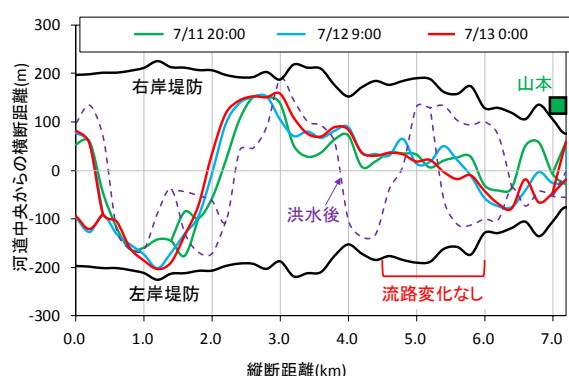


図-13 解析の主流路位置の時系列と実測値(Case3)

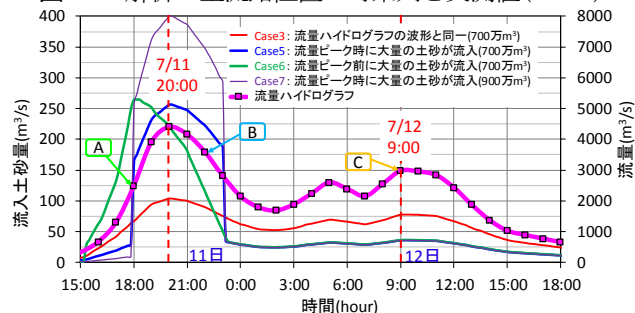


図-14 流入土砂量ハイドログラフ

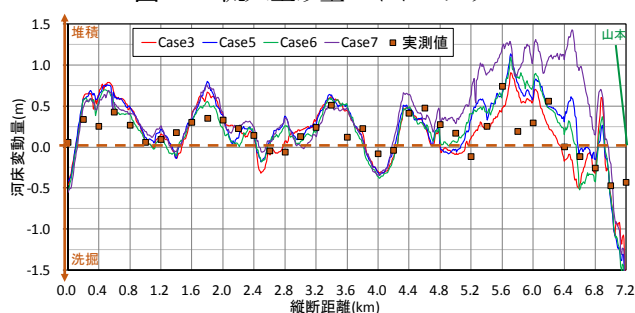


図-15 観測と解析の洪水前後の平均河床高の変化 (Case3, Case5～Case7)

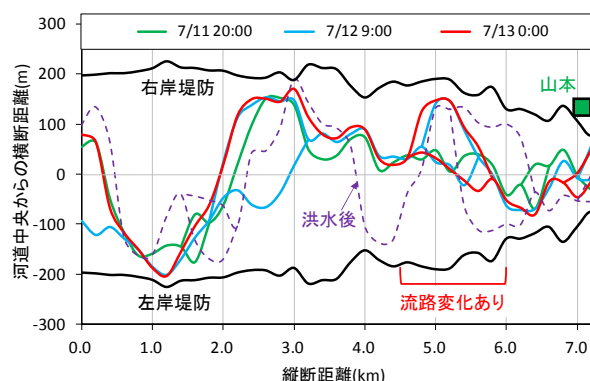


図-16 解析の主流路位置の時系列と実測値(Case5)

移動が発達し、下流河道の蛇行が生じたことが分かる。

(3) 樹木群流失の時間帯の推定

次に図-2(b)に示した樹木群の流失がいつ生じたのかについて検討する。樹木群流失の時間を、図-14に示す流量ピーク前(CaseA)、流量ピーク後(CaseB)、2波目ピーク(CaseC)と想定して計算を行う。流入土砂量ハイドログラフは、前節で縦断的な土砂堆積と流路変動を説

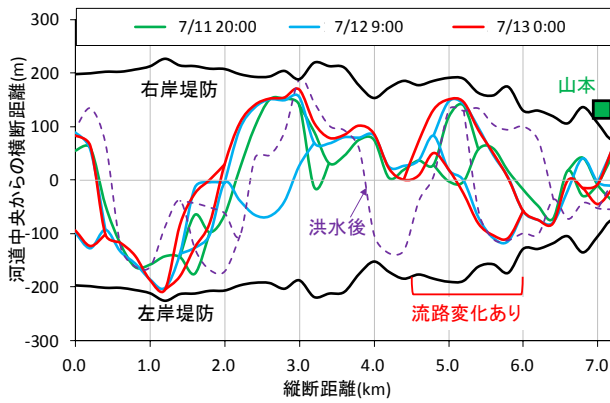


図-17 解析の主流路位置の時系列と実測値(Case6)

明したCase6とする。図-20の(a), (b)はCaseB, CaseCの洪水後の解析結果の主流路位置を示す。流量ピーク前に樹木群が流失したと想定したCaseAの解析結果(図-19のCase6)は、CaseB, CaseCと比較して、5.0~6.0km付近に現れた顕著な主流路の形成を良く再現している。これより、流量ピーク前に繁茂していた樹木群が流失したものと推定される。

以上の検討から、姫川平成7年7月大洪水の大規模土砂堆積と流路変動は、総流入土砂量が約700万 m^3 、流入土砂量ピークが流量ピークの2時間程度前に発生した流入土砂量ハイドログラフ(Case6)で生じたものであることが推定された。また、樹木群が流失した時間帯は流量ピーク前であると推定された。

5. 結論

本研究では、大量の土砂流入に伴い流路が大きく変動する河川において、洪水流量ハイドログラフに対する流入土砂量ハイドログラフの実用的な推定法を提示した。本論文で提示した、段階的に洪水流・河床変動解析を行う手法によって、下流河道の流路変動に決定的な影響を与える流入土砂量ハイドログラフの上流端境界条件が算定可能であることを示した。

参考文献

- 1) 戸木敏仁, 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, pp.15-22, 2007.
- 2) 原田大輔, 江頭進治: 流砂・流木を伴う洪水流の解析ー2017年7月九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象としてー, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_937-I_942, 2018.
- 3) 江頭進治, 原田大輔, 南雲直子, 山崎祐介, 萬矢敦啓: 崩壊・土石流による堆積土砂に着目した微細砂の流出予測法ー2017年7月九州北部豪雨災害時の赤谷川を対象としてー, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_925-I_930, 2018.
- 4) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流

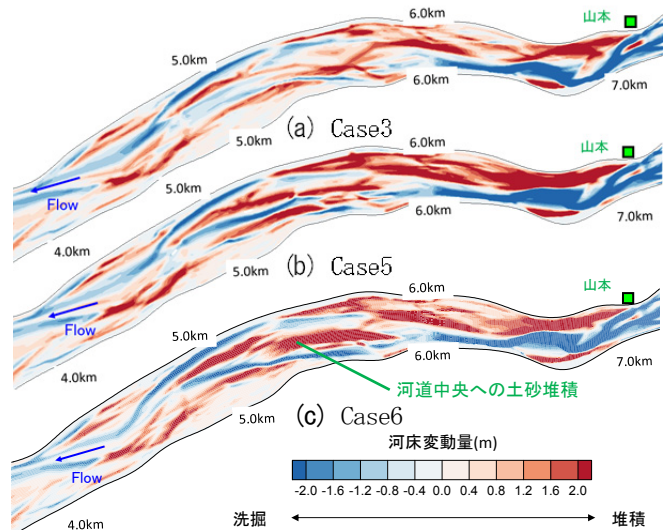


図-18 解析の土砂堆積の状況

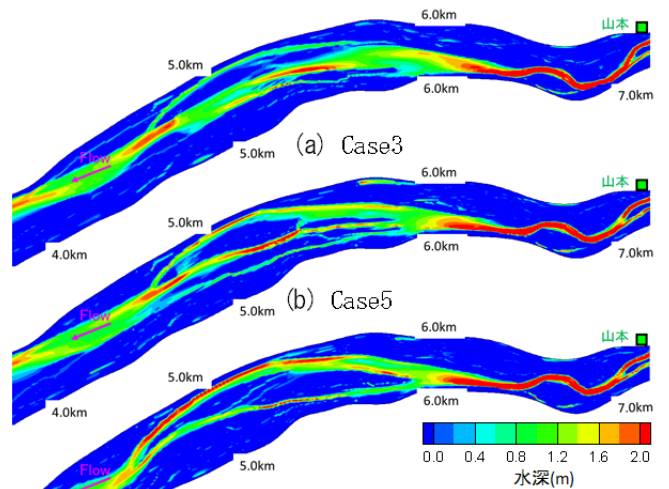


図-19 洪水後の主流路位置(解析)

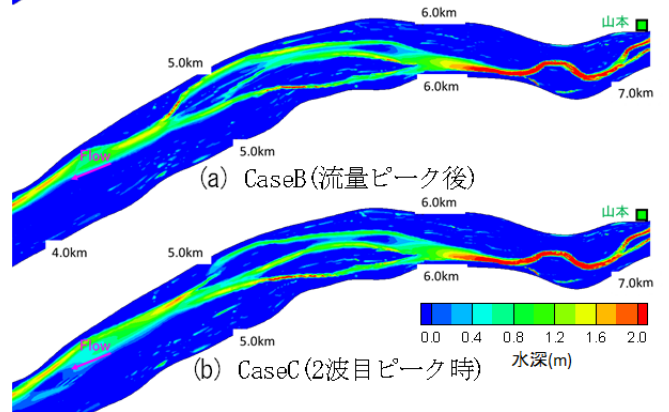


図-20 樹木群流失の時間差による洪水後の主流路位置の変化(解析)

- 速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.2, pp.43-62, 2015.
- 5) 木下良作: 招待論文, 航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題, 土木学会論文集, 第345号/II-1, pp.1-pp19, 1984.
- 6) 姫川水系土砂管理検討委員会: 姫川水系土砂管理検討報告書, 1999.

(2018. 4. 3受付)