

人工的土砂供給に伴う 下流河川の物理環境応答特性

CHARACTERISTICS OF PHYSICAL ENVIROMENT RESPONSES IN THE DOWNSTREAM BY ARTIFICIAL SEDIMENT SUPPLY

南 修平¹・竹林 洋史²・藤田 正治³
Shuhei MINAMI, Hiroshi TAKEBAYASHI and Masaharu FUJITA

¹正会員 工修 京都大学大学院工学研究科博士後期課程(〒612-8235京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)
(㈱ニュージェック河川グループ)

²正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所(〒612-8235京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所(〒612-8235京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

Recently, in order to improve the deteriorated river environment, the artificial sediment supply such as sediment placement at the downstream of dams or flushing of sediment has been implemented. However, it is not still clear about positive and negative effects of the artificial sediment supply on the downstream ecological system and physical environment. Study on these effects is one of important subjects for the sediment and river management. This study focuses to the response characteristics of the downstream physical environment by supplying artificial sediment. Characteristics of changes of bed level, sediment transport and changes of sediment diameter are clarified using one dimensional numerical model of bed variation and the response characteristics of physical environment by supplying artificial sediment are discussed.

Key Words : *physical environment , artificial sediment supply , numerical model*

1. はじめに

我が国のダム下流域の多くの河道は、流量平滑化や流砂の減少といった攪乱の減少によって、アーマー化、流路の固定化が進行し、植生が繁茂するなど、河川環境の悪化が顕在化している。置土や排砂といった人工的な土砂供給は、このような河川環境の改善に効果をもたらすものと期待される。しかし、人工的に土砂を供給するにあたっては、それによる下流河川の生態系や物理環境への正と負の影響を定量的に提示することが求められる。例えば、排砂によって、下流の付着性藻類の強制剥離や流砂回復に正の影響が期待されるが、下流の水質変化などの負の影響も現れる。しかし、このような正と負の影響を評価するための知見や情報が少なく、その影響を明示するには至っていないのが現状と思われる。置土や排砂といった対策が河川技術として十分確立し、社会的に認知されるためには、土砂供給による下流の応答特性を明らかにすることが大きな課題であると考えられる。

このような課題を議論していくためには、供給された土砂が下流河川において、どのような河床変化をもたら

し、どの程度、流砂を回復させるかといった物理環境の変化に関する情報が重要である。著者らは黒部川を対象に排砂に伴う下流河川の物理環境応答特性を検討し、ダム直下区間ではそれより下流の区間に比べて、排砂による土砂供給に対する河床の応答性が高いことなどを明らかにしてきた¹⁾。しかし、河川の物理環境は、河床勾配、河幅、流量や土砂供給量等の様々な要因によって、領域毎に応答特性が異なるため、黒部川で得られた知見をそのまま他の河川に適用できるかどうかは不明である。そこで、本論文では排砂に着目し、様々な河道の物理条件や土砂供給条件のもとで、河床や流砂変化特性等を一次元混合砂河床変動モデルにより検討する。本論文はこのような分析を通じて、今後の土砂管理を進めていくうえでの有効な情報を得ることを目的とする。

2. 計算の概要と計算条件

(1) 計算の概要

河川では水深、流速、河床形状、河床材料など、種々の物理要因が相互に関連し、土砂の移動が特徴づけられ

ている。これらの土砂の移動特性は、河川ごとに、また同一河川であっても上流から下流にかけて領域毎に異なる。よって、人工的に土砂が供給される場合、その下流では領域毎に物理環境の応答特性は異なり、一般的な議論は難しいものとなる。そこで、本論文では排砂による応答特性に関する一般的な情報を得るために、できるだけ単純化した条件のもと議論を進めることとした。ここに、計算の条件は、黒部川の河道条件や排砂実績²⁾を参考として、様々な条件を設定した。

計算の概要は次のとおりである。計算は土砂供給地点より下流を対象とし、その河幅と初期河床勾配は、流下方向に一定として数通り設定する。また、初期河床材料は、後述するように、典型的な分布形を与え、流量は一定値で与える。供給する土砂量と時間は黒部川の排砂実績を参考に設定するが、給砂の粒径は、河床材料とは異なり、土砂の流送特性の基礎情報を得る目的で一様砂とする。このような計算により、供給された土砂が、その粒径や河道条件の相違によって、どのように下流河川で流送され、河床や流砂に如何なる影響を与えるかについて検討する。

(2) 計算モデル

用いた計算モデルは、掃流砂、浮遊砂を対象とした一次元混合砂河床変動モデルである。流れの計算は不等流計算により行うものとし、掃流砂量は芦田・道上式、浮遊砂量は、粒子の浮上と沈降を考慮した一次元移流拡散方程式により得た断面平均濃度に断面通過流量を乗じて求める。ここに、浮遊砂の底面濃度は芦田・道上式より求める。粒度分布は、河床を表層から鉛直方向に分割し、河床変動に応じて各々の分割された層の粒度分布が変化する多層モデルにより解析する。これらの詳細は、参考文献³⁾⁴⁾を参照されたい。

(3) 計算条件

供給された土砂の流送状況を広範に把握するため、対象領域は土砂供給地点より下流40kmとする。河床勾配は1/100と1/200の2通り、河幅は50m、100m、200mの3通りとする。断面形状は矩形とし、計算断面間距離は200mとする。また、粗度係数は0.045として、下流端水位はその地点の河床勾配に基づき、等流計算によって算定する。

設定した河床勾配、河幅、また以下に述べる供給土砂の粒度をパラメータとして、表-1に示すとおり計算ケースを設定する。各ケースとも、1サイクルを120日間とし200m³/sの一定流量で、計30サイクルの計算を行う。ここに120日間は、流量の比較的大きい洪水期の日数を想定したものである。

河床材料は黒部川の実測値に基づく粒径区分より、361.2mm、118.3mm、37.42mm、11.83mm、3.74mm、1.18mm、0.37mmの7つの代表粒径に分ける。初期の河床材料粒度分布は、粗粒化している河川の典型的な分布形であるタ

ルボット型で与える⁵⁾。タルボット型の粒度分布を式(1)に示す。

$$f(d) = \left(\frac{\log d - \log d_{\min}}{\log d_{\max} - \log d_{\min}} \right)^n; \quad n > 1 \quad (1)$$

ここに、 d は粒径、 $d_{\min}$ は最小粒径、 $d_{\max}$ は最大粒径、 n はタルボット数である。最小粒径と最大粒径は、粒径区分に基づきそれぞれ0.2mm、500mmで与える。ここでは、初期状態において流量200m³/sが流下しても河床材料が移動しないよう、各ケースの初期粒度分布は移動限界粒径よりも少し大きな粒径にて設定する。表-1および図-1に初期河床材料を示す。

給砂は各サイクルの最初の24時間のみ上流端で行うものとする。過去の出し平ダムの排砂量実績値²⁾によれば排砂時使用水量に対する排出土砂量の割合は概ね体積濃度で2%である。ここでは土砂の空隙率を考慮し、流量の1%の濃度で与える。供給する粒径は、7つの代表粒径のうち下流河川の移動限界を考慮して、細粒分の5つの粒径をそれぞれ一様砂として与える。

表-1 計算ケース

供給土砂の粒径	初期河床勾配	河幅 (m)	初期河床材料のタルボット数 n	初期河床材料の平均粒径 (cm)
37.42mm, 11.83mm, 3.74mm, 1.18mm, 0.37mmの5通りを供給する。	1/100	50	6	20.7
		100	3	14.0
		200	2	10.5
	1/200	50	3	14.0
		100	1.5	8.5
		200	1.2	7.0

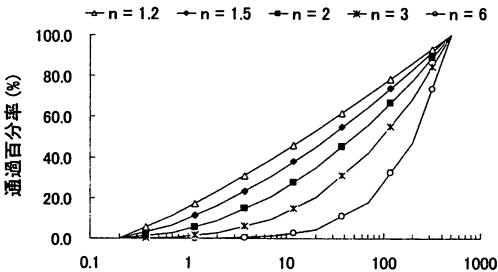


図-1 設定したタルボット型の初期河床材料粒度分布

3. 土砂供給による物理環境の応答特性

土砂供給による下流河道の河床変化、土砂の流送過程、短期的な流砂量変化は土砂管理を行ううえで重要な情報となる。とくに、短期的な流砂量変化は河川への適度な攪乱が生態系に必要であるということに対する重要な情報となる。このような観点より、一様砂を供給した場合の河床変化、土砂流送量、流砂変化といった基本的な応答特性を議論する。

(1) 土砂供給による河床変化特性

代表的な計算結果に基づき、土砂供給による河床変化

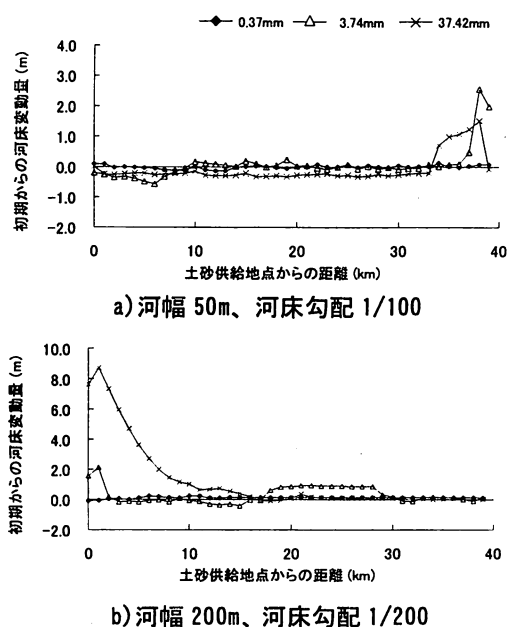


図-2 30サイクル後における河床変動量の縦断分布

特性を検討する。

図-2に、30サイクル後における初期河床からの河床変動量を示す。図は、河幅は50mと200m、初期河床勾配は1/100と1/200、給砂粒径は0.37mm、3.74mm、37.42mmのケースについて示している。

給砂粒径が0.37mmの場合、長期的には大きな河床変動は生じていない。また、給砂粒径が3.74mmの場合、1/100勾配のケースで0～8kmの区間で若干の河床低下が生じ、37～40kmの区間において河床上昇が生じている。しかし、1/200勾配のケースでは土砂供給地点直下の区間と18～29kmの区間にかけて河床が上昇している。さらに、給砂粒径が37.42mmの場合、1/100勾配のケースでは0～33kmの区間で河床が若干低下し、34～38kmの区間において河床上昇が生じている。しかし、1/200勾配のケースでは0～10kmの区間でのみ大きな河床上昇が生じる。

このような長期河床変化は、短期的な河床変化の重ね合わせの結果、生じたものである。そこで、長期河床変化特性を明らかにするため、河幅が50m、河床勾配が1/100、給砂粒径が0.37mmと37.42mmのケースについて、短期的な河床変化を詳しく調べることにした。図-3に、初期からの河床変動量及び表層平均粒径の縦断分布を土砂供給日からの経過日数別にて示す。図-3(a)に示す給砂粒径0.37mmの結果によると、土砂供給1日後に0～10kmの区間で河床変動が大きくなり、そこに堆積した土砂がその後再移動して波状に流下し、6日後には40km付近にまで流下している。また、1日後には土砂供給地点直下で3m程度の河床変動の最大値が生じているが、流下するにつれて河床変動の最大値は小さくなり、6日後には河床変動の最大値は約0.4m程度となる。さらに、1日後には河床変動が0～10kmの区間で生じているが、3日後には

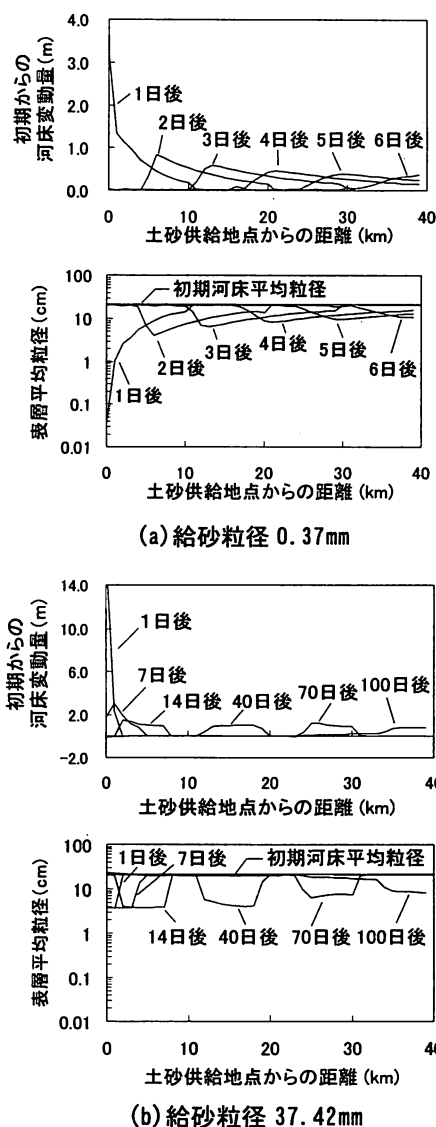


図-3 河幅50m、河床勾配1/100の場合における河床変動量及び表層平均粒径の縦断分布

10～30km区間で河床変動が生じるなど、河床変動範囲が広がる傾向にある。表層平均粒径に着目すると、河床変動に応じて粒径が変化している。1日後には0～10km区間で、表層が給砂粒径の影響により細粒化するが、3日後には初期の河床材料に戻る。土砂供給地点から離れるにつれて供給土砂の影響は小さくなり、6日後の30～40km区間の表層平均粒径は初期の河床材料よりも多少細粒化する程度となる。一方、図-3(b)に示す給砂粒径37.42mmの結果によると、土砂供給1日後に0～2km区間で河床変動が大きくなるが、7日後には河床変動の最大値が約3mに逕減する。それ以後、河床変動の最大値は約1m程度となって波状に下流へ伝播するが、その伝播速度は遅く、40km付近まで流下するためには100日程度の期間を必要とする。また、河床変動が生じる区間は、給砂粒径0.37mmのケースに比べて短くなっている。表層平均粒径は、河床変動に応じて変化している。ただし、給砂粒径0.37mmのケースと異なり、河床が上昇している区間では、

給砂粒径に近い粒径で細粒化する。

ここでの計算によれば、給砂粒径が0.37mmと細かい場合、供給された土砂は、その下流において浮遊形態が卓越して流送される。このため、供給された土砂は堆積と再浮上を繰り返しながら移流・拡散し、その結果、図-3(a)に示す河床変化特性が現れる。この特性は、河幅が狭く、河床勾配が大きいほど、強く現れることになる。しかし、給砂粒径が37.42mmのケースのように粒径が大きくなると、掃流形態のみで流送される。この場合、供給された土砂の移動速度は遅く、比較的大きな河床変動を伴いながら、下流へと伝播する。これにより、給砂粒径が大きい場合、図-3(b)に示す特性が現れることとなる。この特性は、河幅が大きく、河床勾配が小さいほど、強く現れることになる。

以上の短期的な河床変化特性に基づき、図-2に示す長期河床変動の結果を考察すると次のとおりである。給砂粒径0.37mmと3.74mmのケースは、短期的には堆積と再浮上を繰り返すが、長期的には顕著な河床変動傾向は認められない。給砂粒径37.42mm、勾配1/100のケースは、掃流形態で流送され、河床上昇と低下が緩慢に生じる。30サイクル後で河床が上昇している区間が認められるが、長期的にはこれらの区間の河床は初期の河床高に戻る傾向を示す。しかし、勾配1/200のケースは、掃流力が小さく、移動速度が極めて遅いため、供給された土砂は土砂供給地点近傍のみに堆積して、本計算期間内ではそれより下流へ流送されない。

以上より、パルス状に供給された土砂によって、下流河道の河床高、河床材料は波状に変化する。しかし、給砂粒径が粗くなると、細かい場合と異なり、土砂の流下時間が長くなる。河床勾配が小さく、河幅が大きな場合には、土砂供給地点近傍のみに河床上昇が生じるようになる。

(2) 河床伝播特性

波状に変化する河床の伝播特性を明らかにするため、最大日河床変動量と土砂供給日を基準とした最大日河床変動量が発生するまでの必要日数を各地点について調べることにした。図-4に、河幅は50mと100m、初期河床勾配は1/100と1/200、給砂粒径はそれぞれ0.37mm、3.74mm、37.42mmの場合について、最大日河床変動量と上述の必要日数を1サイクル目について整理した。なお、図に示す各プロットのうち、最大日河床変動量が概ねゼロと判別される場合と、必要日数が120日を超える場合はプロットしていない。

河床勾配が1/100、給砂粒径が0.37mmの場合、図-4(a)と(b)に示すとおり、5km地点における最大日河床変動は35km地点では半分以下の河床変動量になり、必要日数も少ない。つまり、流下するに従って河床変動量が小さくなり、比較的短期間で河床変動が伝播していることがわかる。しかし、給砂粒径が3.74mmや37.42mmのケー

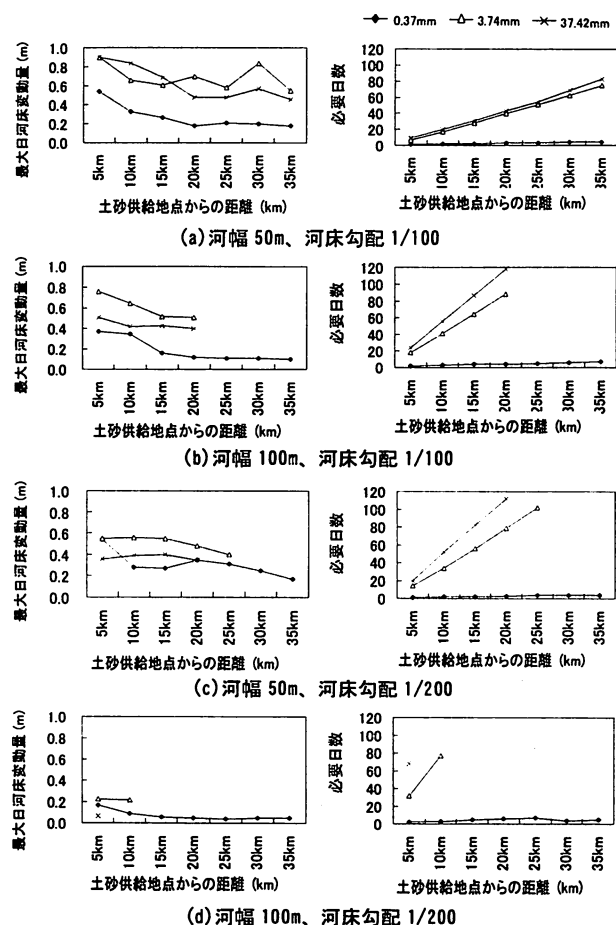


図-4 1サイクル目における最大日河床変動量と土砂供給日を基準とした最大日河床変動量が発生するまでの必要日数

スは、最大日河床変動量は大きいですが、その伝播は遅く、10kmを流下するためには土砂供給日から20～60日の日数が必要とする。

また、河床勾配が1/200で、給砂粒径が0.37mmの場合、図-4(c)と(d)に示すとおり、河幅によらず比較的短期間で河床変動が伝播する。しかし、給砂粒径が3.74mm、河幅100mのケースを見ると、最大日河床変動が生じているのは0～10kmの区間であり、それより下流では河床変動は明瞭には伝播していない。また、給砂粒径が37.42mm、河幅100mのケースでは、河床変動は5km地点で僅かに現れる程度である。給砂粒径が粗い場合、河幅が広くなれば、河床変動は大きくなり、下流への伝播は非常に遅くなる。

このことより、給砂粒径が小さければ、パルス状に供給された土砂は、小さな河床変動を伴って速やかに下流へと流下する。しかし、給砂粒径が粗くなると大きな河床変動を伴いながら時間をかけて流下することになる。

(3) 供給土砂量の長期伝播特性

供給された土砂がどの程度の時間で、どの程度の距離を流下するかといった、供給土砂量の長期伝播特性を知ることが、河床低下や海岸侵食等の土砂に関する問題が

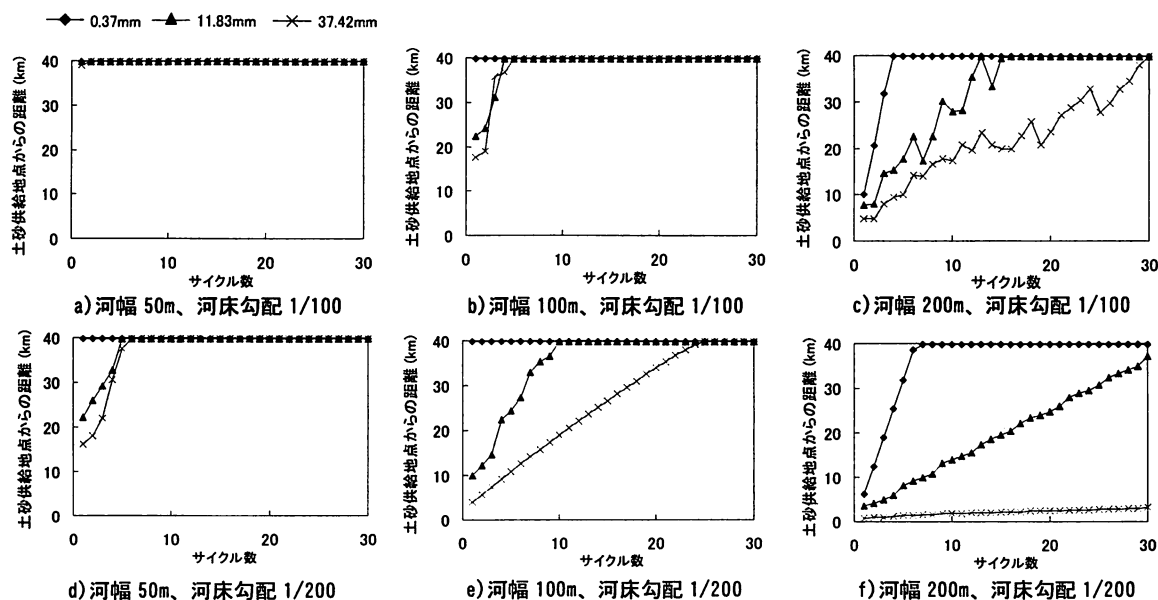


図-5 供給土砂の50%が各地点を流下するために必要なサイクル数

生じている領域に対して有用な情報となる。

図-5は、各河床勾配について、供給された土砂が各地点を流下するために必要なサイクル数を給砂粒径別、河幅別に示したものである。ここに、図は給砂粒径が0.37mm、11.83mm、37.42mmの3粒径について示した。また、ここでは各地点の累加通過土砂量がXサイクル間の累加供給土砂量($Q_s(X)$)の50%の量となるまでに必要なサイクル数を示している。この結果より、給砂粒径が細かく、河幅が小さければ、短期間で所定量が40kmまで流下する。しかし、河床勾配が小さく、河幅が大きいと、0.37mmであっても40kmを流下するためには相当の時間が必要となる。

一方、フラッシング排砂は、河川へ様々な攪乱を与えるものであり、その期待する効果の一つとして付着藻類の剥離が挙げられる。河床の付着性藻類の強制剥離に関する室内実験結果によれば、5-15mmの粒径の礫が剥離に有効であることが示されている⁶⁾。この知見より本計算結果のうち11.83mmの粒径に着目すると、最も土砂の流下が遅い河床勾配1/200、河幅200mのケースでは、5km流下するためには3サイクル、10km流下するためには7サイクルの土砂供給と水量が必要となる。どの程度の土砂量が剥離更新に必要なについては別途検討が必要であるが、河道や剥離条件によっては土砂供給による剥離効果が広い領域で現れるためには、比較的長期間を要する。

(4) 短期的な流砂変化特性

環境面で有効な供給量を定めるためには生態系としてどのような攪乱が必要であるかという知見が必要であるが、ここでは、どのような攪乱が与えられているのかということを短期的な流砂変化特性から検討する。

図-6と図-7は、それぞれ給砂粒径0.37mmと37.42mmのケースに関して、初期河床勾配が1/100、1/200、河幅

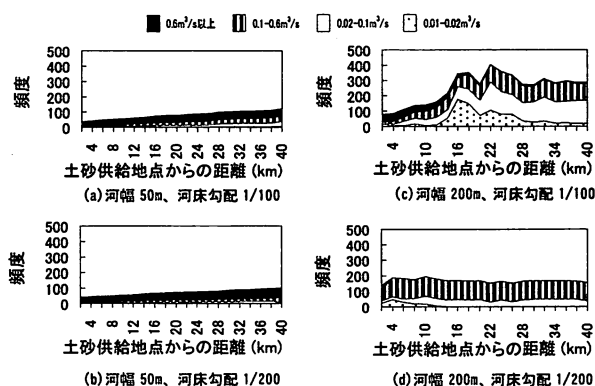


図-6 給砂粒径が0.37mmの場合における1サイクル平均の流砂量発生頻度(時間)の河床縦断分布

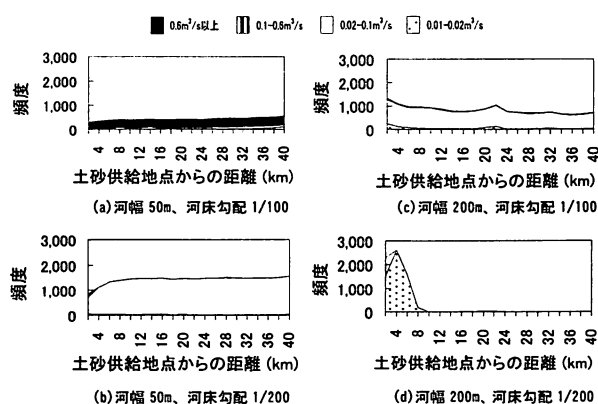


図-7 給砂粒径が37mmの場合における1サイクル平均の流砂量発生頻度(時間)の河床縦断分布

50mと200mにおける流砂量の発生頻度(発生時間)の河床縦断分布を示したものである。ここに、流砂量の発生頻度は1サイクルあたりの平均値で示した。

給砂粒径が0.37mm、河幅が50mの場合、図-6(a)および

(b)に示すように、全領域で $0.6\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流砂量が生じている。給砂粒径が細かい場合、供給された土砂は河床材料となりつつも、流水とともに流下する。よって、このようなケースは、供給土砂の影響が直接的に全領域にわたり生じ易くなる。同じ細粒径でも河幅200m、河床勾配が1/100のケースでは、図-6(c)に示すように土砂供給地点に近い領域で $0.6\text{m}^3/\text{s}$ 以上の大きな流砂量ランクの頻度が高い。しかし、掃流形態の土砂流送量が増加する15km地点より下流では $0.02\sim 0.1\text{m}^3/\text{s}$ の比較的小さな流砂量ランクの頻度が高くなる傾向を示す。このような流砂の状態の変化は、それより上流の河床変動の結果、生じたものである。一方、河床勾配が1/200では、図-6(d)に示すように大きな流砂量ランクの頻度が河床縦断的にほぼ一様に分布している。このケースは全領域において浮遊形態で流送され、縦断方向の流砂量の頻度変化も小さい。

一方、給砂粒径が37.42mm、河幅が50mのケースに着目すると、図-7(a)および(b)に示すとおり、流砂の発生状況が大きく異なる。河幅が50mと比較的狭くても、河床勾配が小さいケースでは、勾配が大きいケースに比べて比較的小さな流砂量ランクの発生頻度が高くなる。河幅200mのケースでは、このようなことがより顕著となり、河床勾配が大きいと、ある程度の流砂が流下するが、河床勾配が小さいと土砂供給地点に近い領域でのみ $0.01\sim 0.02\text{m}^3/\text{s}$ の流砂が生じることになる。給砂粒径が粗い場合、河幅や河床勾配の影響が流砂の発生に大きな影響を及ぼすようになる。

以上より、給砂粒径が細かい場合の流砂量の発生頻度は、河床勾配や河幅にそれ程影響されずに全領域で供給土砂の影響を直接的に受け易い。しかし、供給土砂が粗い場合には、水理・地形的条件が流砂特性に大きな影響を及ぼす。

4. おわりに

本論文では、フラッシング排砂を対象に仮想的に河道及び土砂供給条件を設定して、土砂供給地点より下流の物理環境応答特性をシミュレーションにより検討した。得られた成果を以下にまとめる。

(1) パルス状に供給された土砂によって、下流河道の河

床高、河床材料は波状に変化する。給砂粒径と地形条件によって、これらの変化特性が大きく異なる。

(2) 給砂粒径が細かければ、パルス状に供給された土砂は、小さな河床変動を伴って速やかに下流へと流下する。しかし、給砂粒径が粗くなると大きな河床変動を伴いながら時間をかけて流下する。

(3) 付着性藻類の強制剥離効果が期待できる11.83mmの粒径は、それが5km流下するために、地形条件によっては、数サイクルの土砂供給と水量が必要である。このようなタイムラグを考慮した土砂供給が必要である。

(4) 給砂粒径が細かい場合の流砂量の発生頻度は、河床勾配や河幅にそれ程影響されずに、全領域で供給土砂の影響を直接的に受け易い。しかし、供給土砂が粗い場合には、水理・地形的条件が流砂特性に大きな影響を及ぼす。

今後、混合砂を給砂した場合の物理環境の応答特性を解析し、本論文の結果とあわせて、一般的な応答特性を検討することが課題である。

参考文献

- 1) 南 修平, 藤田正治: 貯水池からの排砂に対する下流河川での土砂応答特性, 河川技術論文集, 第14巻, p. 259-264, 2008
- 2) 角 哲也, 金澤裕勝: 黒部川のフラッシング排砂における環境調査, 大ダム, 197, p. 121-135, 2006
- 3) Jian Liu, Shuhei Minami, Hideki Otsuki, Bingi Liu, Kazuo Ashida: Environmental Impacts of Coordinated Sediment Flushing, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 42, No. 5, pp. 461-472, 2004
- 4) Jian Liu, Shuhei Minami, Hideki Otsuki, Bingi Liu, Kazuo Ashida: Prediction of Concerted Sediment Flushing, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 11, p. 1089-1096, 2004
- 5) Muhammad Sulaiman, Daizo Tsutsumi and Masaharu Fujita: Porosity of Sediment Mixtures with Different Type of Grain Size Distribution, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 51, p. 133-138, 2007
- 6) 赤松良久, 井上麻衣, 池田駿介: フラッシュ放流によるダム下流の河床付着性藻類の強制剥離に関する研究, 河川技術論文集, 第14巻, p. 425-430, 2008

(2009. 4. 9受付)