

ダム堆砂放流時の下流河川環境の数値シミュレーション

Numerical Simulation of an Assessment of the Environmental Impact on a River Ecosystem of Sediment Flushing from a Dam

田 中 昌 宏
新 保 裕 美

要 約

ダム堆砂を下流へ放流した場合の河川環境への影響評価を行うために数値シミュレーションモデルを開発した。ダム堆砂の下流への放流については、特に土砂細粒分の濁りや堆積が川魚の餌となる付着藻類に及ぼす影響と河床変動による洪水疎通能力の低下が懸念されており、その評価の基本となるシミュレーション技術を開発した。適用例として、排砂ゲートによる放流と置き土による放流が行われた河川を対象とした計算結果を示すとともに、仮想河川であるが蛇行河川における河床地形と堆砂の輸送・堆積過程を検討した計算結果を示した。

目 次

- I. はじめに
- II. 急流河川への DELFT3D-FLOW の適用
- III. 排砂ゲートによる堆砂放流時の SS の輸送シミュレーション
- IV. 置き土による堆砂放流の再現シミュレーション
- V. 蛇行河川への適用
- VI. おわりに

I. はじめに

堆砂の著しいダムにおいては、その排除が緊急の課題であるが、下流河川への放流については、海まで含めた下流への環境影響が最大の問題となっている。特に、土砂細粒分の濁りや堆積が川魚の餌となる付着藻類に及ぼす影響と、河床変動による洪水疎通能力の低下が懸念されている。

そこで、本研究では、堆砂を排砂ゲートから、あるいはダム直下に置き土して、放流した場合の下流河川での濁りと河床変動を含む水理シミュレーション技術を開発した。使用した流動モデルは DELFT3D-FLOW 鹿島モデルであるが、急流河川への適用においては幾つかの課題が残されていたため、まずその改良を行った。そのモデルを、排砂ゲート及び置き土によって堆砂放流が実施された河川に適用し、その再現性を確認した。両河川においては、詳細な河床地形データが得られなかったため、計算は一次元モデルで行った。そこで、さらに現実の河川形状特性を有する三次元シミュレーションを実施するため、仮想河川であるが、実際の蛇行河川の特徴を再現したモデルにおけるシミュレーションを実施した。

II. 急流河川への DELFT3D-FLOW の適用

1. DELFT3D-FLOW の改良

DELFT3D-FLOW¹⁾は鉛直方向に静水圧近似を仮定した三次元流動モデルで、水平方向に直交曲線座標、鉛直方向に σ 座標を用いている。適用範囲は、外洋から沿岸域、河川、湖まで幅広く、様々な

外力による流れをシミュレーション可能であり、数多くの適用実績が証明するように汎用性と信頼性に優れたモデルである。しかしながら、基本的に対象とする流れは地形（水深及び平面形状）が緩やかに変化する“常流”の“漸変流”を対象としているため、急勾配斜面で生じる“射流”や跳水などを含む“急変流”に対しては計算精度に問題が残されている。この問題は一次元モデルでは既に解決されており（Stelling and Duijnmeijer²⁾）、今回その手法を三次元モデルに拡張した。

改良点は下記を満足する新しい移流項の差分スキーム（以下“Flood スキーム”）の導入である。

- ・質量保存及び非負の水深を満足する水際線移動計算
- ・急拡流、跳水、段波などの急変流の運動量保存
- ・急縮流でのエネルギー保存

2. テスト計算

(1) 堰を越える流れ

河床の急変による急縮及び急拡のテストケースとして、堰を越え

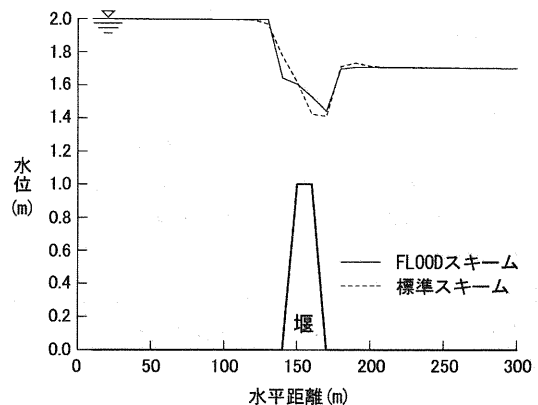


Fig.1 堰を越える流れの水位分布
(Water Level over the Weir)

キーワード: ダム堆砂, 環境影響評価,
数値シミュレーション, 河川環境, 急変流,
河床変動

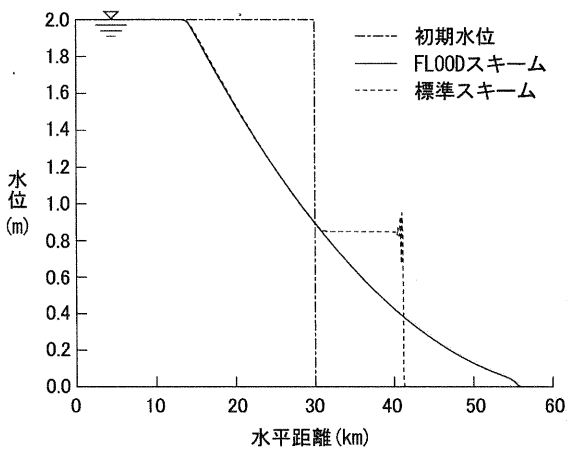


Fig.2 ダムブレイクの水位分布
(Water Level after Dam Break)

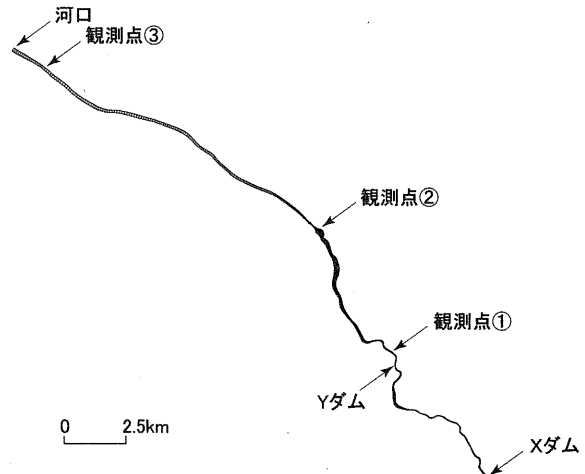


Fig.4 計算グリッド平面図
(Horizontal Computational Grid)

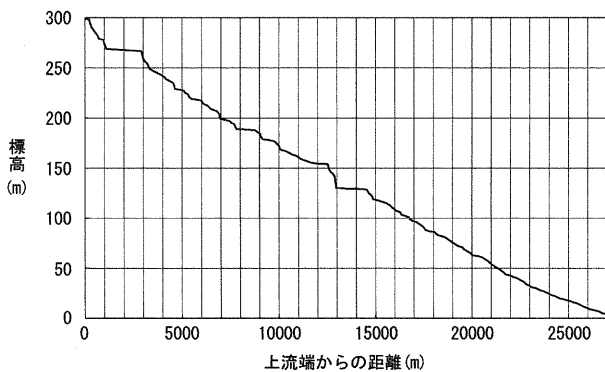


Fig.3 A川の河床縦断面図
(Longitudinal Section of River Bed)

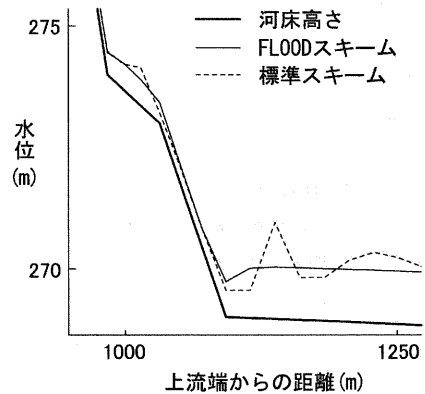


Fig.5 急変流が生じる個所の水位分布の一例
(Simulated Water Level over a Section with Rapidly Varied Flow)

る流れを設定した (Fig.1 参照)。境界条件は上流端の水位を 2.0m、下流端の水位を 1.7m とし、堰の高さを 1.0m、天端幅を 30m とした。この条件で、限界水深から計算される単位幅流量の理論値は、 $1.7\text{m}^2/\text{s}$ である。

計算結果を、DELFT3D-FLOW の移流項の標準スキームを用いた場合の結果と共に Fig.1 に示す。まず、堰上流部分の水位が標準スキームの方が早く減少しているが、これはエネルギー保存が満たされていないことに対応している。次に、堰下流では、射流になった後、跳水が生じているが、標準スキームでは水面の振動が見られるのに対し、新しい Flood スキームでは滑らかな計算結果が得られている。流量についても、標準スキームでは、 $1.89\text{m}^2/\text{s}$ に対し、Flood スキームでは $1.79\text{m}^2/\text{s}$ と理論解により近い結果となった。

(2) ダムブレイク

水際線移動計算を伴う急変流のテストケースとして古典的なダムブレイクを取り上げた (Fig.2 参照)。貯水池の水位を 2m とし、計算領域 (60km) の中央に置いた直立壁を一気に取り除いた計算である。Fig.2 に 1 時間後の水位分布を示す。Flood スキームでは、水際線の移動が滑らかに計算されているのに対し、標準スキームでは、水面が切り立ったフロントが形成され、その先端に振動が見られる。なお、ダムブレイクの計算については、Stelling and

Duinmeijer²⁾により、理論解及び実験値との比較によりその精度の高さが確認されている。

III. 排砂ゲートによる堆砂放流時の SS の輸送シミュレーション

1. 対象河川

ダム堆砂の放流が実際に行われた A 川を対象に水理計算及び SS の輸送シミュレーションを行った。A 川は我が国の代表的な扇状地河川で、今回は河口から約 30km までを計算対象とした。Fig.3 に河床縦断面図を示す。平均河床勾配は約 1/100 であるが、その変化は激しく、上流域では勾配 1/50 以下の急流域が点在している。ダムは河口から約 30km 地点 (X ダム) と約 23km 地点 (Y ダム) にある。

2. 計算条件

(1) 地形データ及び計算メッシュ

詳細な河床地形データは入手できなかったため、今回は国土地理院の地形データを基に計算用の地形データを作成した。したがって、地形データの精度から二次元あるいは三次元の計算が不可能であったため、計算メッシュを河道に沿って作成し、横断方向には水深一定と仮定した二次元モデルとした。計算グリッドを Fig.4 に示す。

(2) 境界条件

境界条件は、上流端で流量、下流端 (海) で水位を与えた。堆砂

放流が行われた場合の計算では、Yダムを上流境界とし、Yダムの実測放流量を時系列で与え、下流は水位一定とした。SSの境界条件は、Yダム下流の観測点①で測定された時系列データを与えた。

3. 計算結果

まず、実現象に対するFloodスキームの有効性を見るために、一例として河床が急激に変化し、常流から射流、そして跳水を経て常流へ変化する部分を拡大してFig.5に示す。この計算では、Xダムを上流境界として、流量200m³/sで一定とした。ここでもFloodスキームが有効に機能しており、標準スキームに比較して滑らかな計算結果が得られている。

次に、堆砂放流が行われた現象の再現について結果を示す。公表されている実測データは、Fig.4に示すYダム直下の観測所における水位及びSS、下流2点におけるSSである。Fig.6に水位、Fig.7にSSの実測値と計算値をそれぞれ示す。両者とも計算結果は実測値と良く一致しており、モデルの再現性が確認できた。

IV. 置き土による堆砂放流の再現シミュレーション

1. 対象河川

堆砂をダム直下に置き土し、放流時下流へ流す実験がBダムで行われている。この放流実験を対象に堆砂移動及びSS輸送の再現シミュレーションを行った。計算対象は、ダム直下から本川合流地点までの約9.5kmで、平均河床勾配は1/180程度である。

2. 計算条件

本シミュレーションでも、詳細な河床地形データは得られなかったため、国土院のデータを使用し、一次元モデルとした。流量データ、SS観測データなどは、浅見ら³⁾を引用した。

境界条件は、A川の場合と同様に上流端で実測流量を時系列で与え、下流端は水位一定とした。放流量は以下のとおりである。

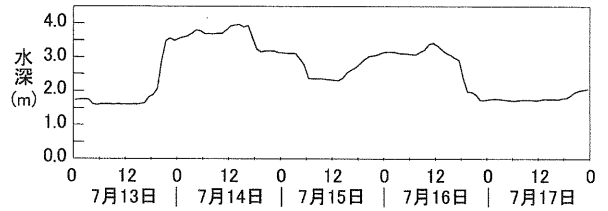
- ・ 1次放流：5月31日、20m³/s 約24時間
- ・ 2次放流：6月3日、100m³/s 約2時間
- ・ 3次放流：6月6日～10日、20m³/s 約6日間

置き土は、貯水池上流の貯砂ダムに堆積した土砂をダム直下に投入したもので、河道内左岸側に1000³（長さ100m×幅10m×厚さ1m）の土砂が置かれた。ここでは、置き土の流下状況をモニタリングするため、トレーサーとして方解石が混入された。計算に用いた置き土は、中央粒径2mmと0.04mmの混合土として設定した。

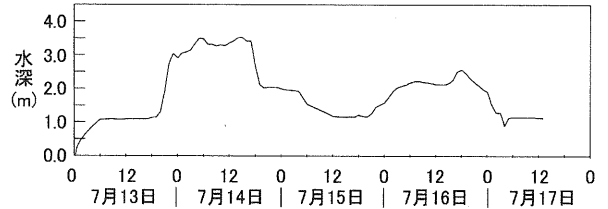
3. 計算結果

Fig.8にSSの計算値と実測値を示す。降雨に伴う濁水は計算には考慮していないので、再現されていないが、置き土から舞い上がったSSが輸送される状況は良く再現されていることが分かる。

Fig.9は河床堆積厚さの変化を示している。現河床は固定床として計算しているため、河床堆積厚さの変化は置き土の掃流による輸送状況を示している。方解石をトレーサーとした観測では、3次放流後、設置地点から1.2km地点まで移動していることが確認されており、計算は移動状況を概ね再現していることがわかる。



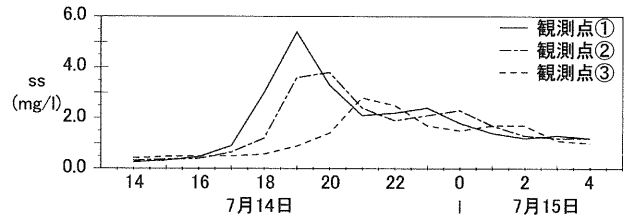
(a) 実測値 (Observed)



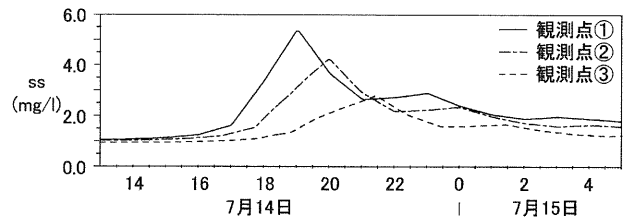
(b) 計算値 (Simulated)

Fig.6 観測点①における水位時系列

(Time Series of Water Level at Monitoring Point 1)



(a) 実測値 (Observed)



(b) 計算値 (Simulated)

Fig.7 各観測点におけるSSの時系列

(Time Series of SS at Monitoring Points)

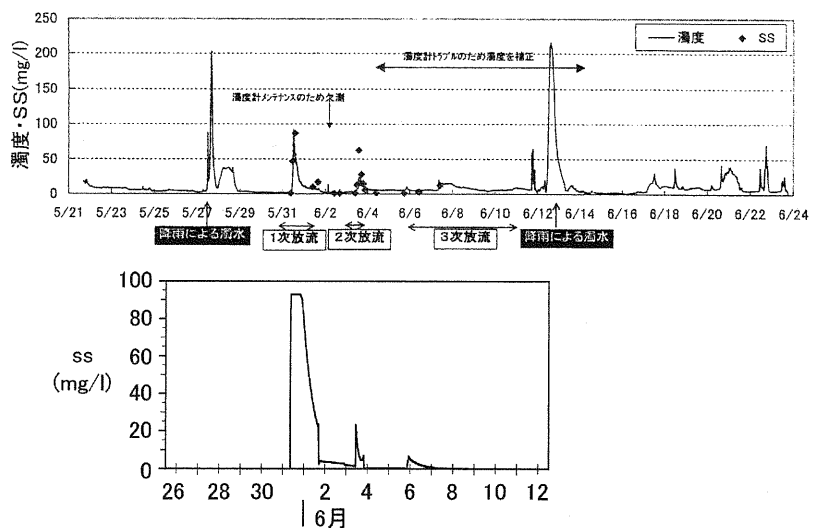


Fig.8 SSの時系列 上段：実測値(参考文献3)より引用)，下段：計算値 (Time Series of SS at Monitoring Points. Upper: Observed, Lower: Simulated)

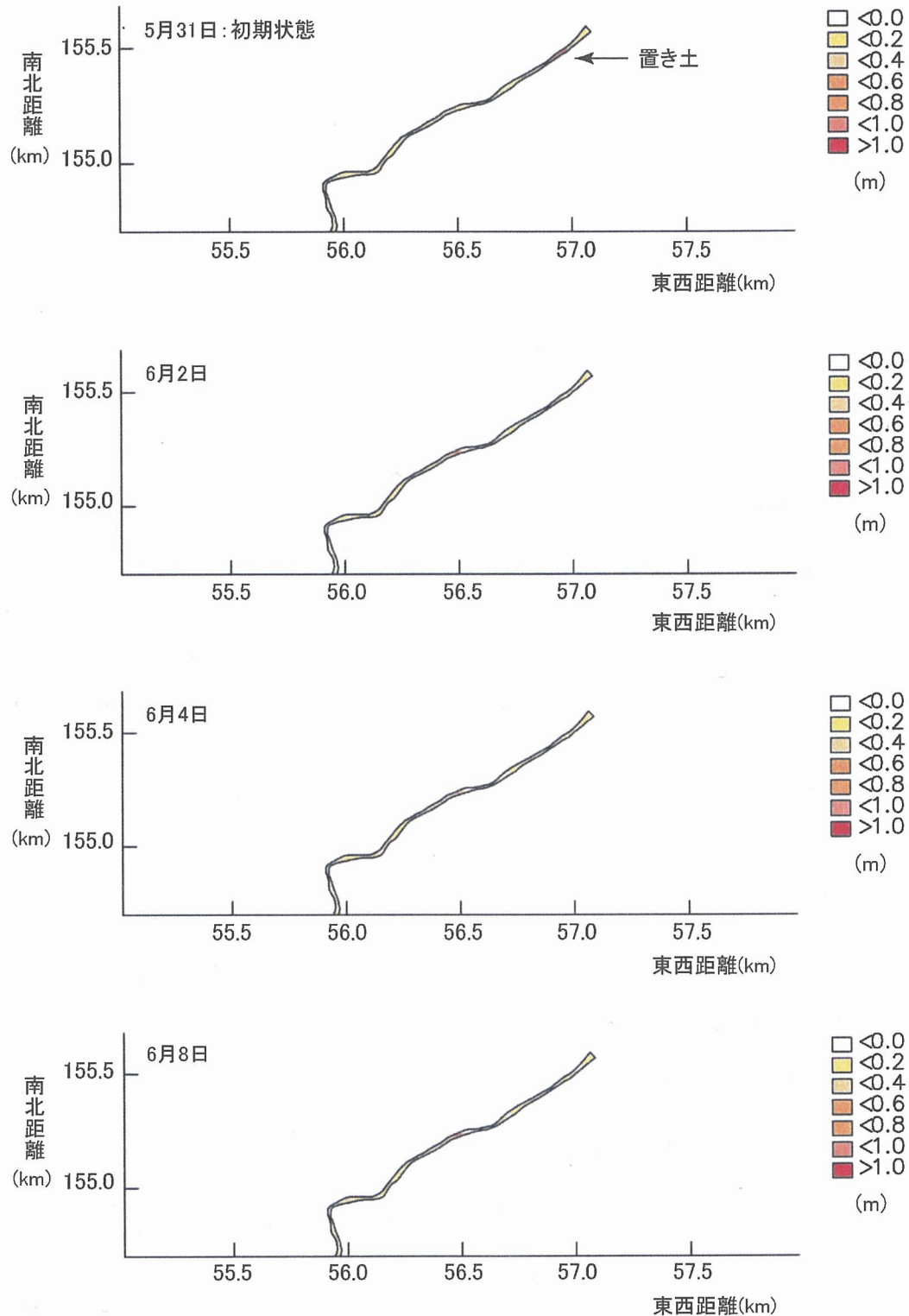


Fig.9 置き土の移動状況 (河床堆積厚さ分布)

(Transport of the Placed Sediment at Upstream. Figure shows Thickness of River Bed Sediment)

V. 蛇行河川への適用

1. 河川平面形状及び河床形状

上記したように、実際の河川への適用では、詳細な河床地形デー

タが得られなかったため、一次元計算を行った。しかし、放流した堆砂の下流河川への影響を考える上では、流下方向の輸送特性だけではなく、瀬や淵など河川特有の地形に応じた堆砂の輸送・堆積特性が重要と考えられる。そこで、河川の代表的な形態である蛇行河

川を対象にシミュレーションを実施した。

蛇行河川の平面形状は次式で示される Sine-generated Curve⁴⁾で表現できることが知られている。

$$\theta = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi s}{L}\right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 θ ; 中心線 s の谷軸に対する偏角、 θ_0 ; 最大偏角 (蛇行角)、 L ; 蛇行長である。

次に、蛇行河川の河床形状は次式で表現できることが知られている⁴⁾。

$$\eta = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \alpha_{ij} \sin\left(\frac{im}{2} + \frac{\pi}{2} \delta_{ie}\right) \cos\left(j \frac{2\pi H_0}{L} (s - \sigma_{ij})\right) \dots \dots (2)$$

$$\delta_{ie} = \left\{ 1 + (-1)^i \right\} / 2 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 n ; s 軸に直交する左岸向きを正とした軸、 η ; 平均河床面からの任意河床点の変移、 i ; n 軸方向の波数、 j ; s 軸方向の波数、 α_{ij} 、 σ_{ij} ; n 、 s 軸方向の波数が (i,j) の波の振幅と位相、 H_0 ; 平均水深である。

2. 計算条件

今回は下記の諸元の蛇行河川を対象とした。河川の平面形状及び河床形状を Fig.10 に示す。

- 平均河床勾配 : 1/500
- 河川幅 : 44m
- 蛇行長 : 480m
- 最大河床振幅 : 1m

この仮想河川において、上流から SS が流下した場合の輸送特性に関するシミュレーション ($Q=100\text{m}^3/\text{s}$, SS 上流端濃度= $1\text{kg}/\text{m}^3$) と置き土をした場合 ($Q=500\text{m}^3/\text{s}$, 置き土: 幅 20m, 長さ 50m, 厚さ 1m) のシミュレーションを実施した。

3. 計算結果

Fig.11 に上流から SS が流下した場合の SS の堆積分布を示す。湾曲部内岸側の瀬の部分に堆積が多く生じていることが分かる。

(注) 蛇行部の頂点の瀬は水深が非常に浅いため、局所的にそこでは堆積は起こっていない。) これは、瀬の部分で流速が遅いことと、湾曲部では 2 次流によって河床近くの流れは外岸から内岸に向いているため、土砂の輸送も内岸側に生じるためと考えられる。

次に、置き土をした場合の河床変動計算結果を Fig.12 に示す。置き土は、B ダムの場合と同じ砂とシルトを混合した土砂としており、土砂の輸送は掃流と浮遊両方の形態を取っている。Fig.12 に見ると、置き土が徐々に下流へ流されながら、堆積しており、Fig.11 と較べると、内岸の瀬の上流側に堆積のピークがあることがわかる。これは掃流による輸送が卓越しているためと考えられる。

このように実際の河川では、河道内の局所的な地形に応じて堆砂の堆積特性が変化すると考えられる。したがって、堆砂の付着藻類など河川に生息する生物や生態系に及ぼす影響を評価するためには、詳細な地形特性を反映した予測評価が必要になるものと考えられる。

VI. おわりに

本研究では、ダム堆砂を下流へ放流した場合の河川環境への影響評価を行うために数値シミュレーションモデルを開発した。

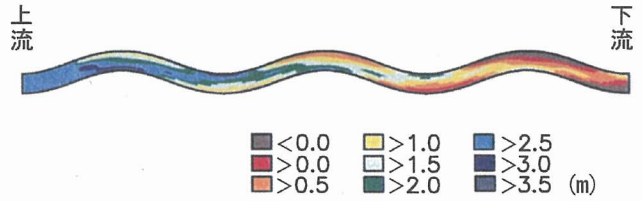


Fig.10 蛇行河川の平面形状及び河床標高 (Topography of Meandering River)

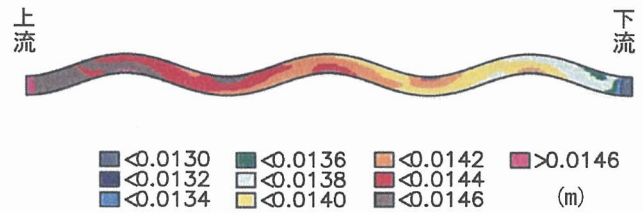


Fig.11 SS 堆積厚さ (Thickness of River Bed Sediment)

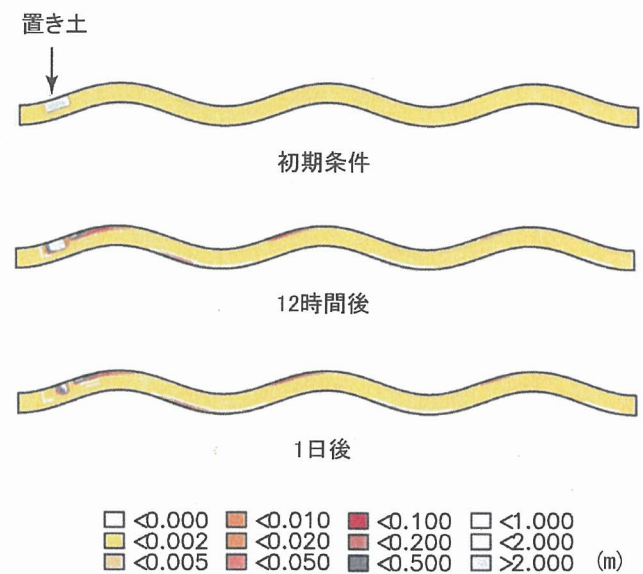


Fig.12 置き土の移動状況 (河床堆積厚さ分布) (Transport of the Placed Sediment at Upstream. Figure shows Thickness of River Bed Sediment)

主な成果を以下にまとめる。

- ・ DELFT3D-FLOW を、急勾配斜面で生じる“射流”や跳水などを含む“急変流”に対しても高精度に計算できる“Flood スキーム”を導入し、その精度を確認した。
- ・ 排砂ゲートによる堆砂放流が行われたダム下流の河川を対象に水理及び SS の輸送・堆積シミュレーションを実施し、モデルの再現性の高さを確認した。
- ・ 置き土による堆砂放流が行われた河川を対象に、河床変動及び SS 輸送・堆積シミュレーションを実施し、モデルの再現性の高さを確認した。

・仮想河川であるが、蛇行河川においてSSの輸送・堆積シミュレーション及び置き土による河床変動シミュレーションを実施し、河床の地形特性と堆砂の堆積特性の関係が重要であることを指摘した。

本シミュレーション技術と、リンら⁶⁾による付着藻類へのSSの影響評価技術を組み合わせることにより、ダム堆砂放流時の河川環境への定量的な影響評価が可能となり、適切な堆砂放流計画立案が可能となる。

参考文献

- 1) Delft Hydraulics; DELFT3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.23, (2004).
- 2) G.S.Stelling and S.P.A.Duinmeijer ; A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol.43, (2003), pp.1329-1354.
- 3) 浅見和弘, 齋藤 大, 三浦義征; ダム下流の河床低下・河床構成材の粗粒化防止策—三春ダムにおける土砂投入実験例—, 応用地質技術年報, No.20, (2000), pp.147-155.
- 4) 長谷川和義; 蛇行流路における流れと平行底面形状に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 338 号, (1983), pp.105-114.
- 5) 林 文慶, 新保裕美, 田中昌宏; 排砂に伴う濁水の光量制限による河川付着藻類の増殖影響に関する室内実験, 鹿島技術研究所年報, No.53, (2005), 投稿中.