

特集：水系一貫した土砂輸送に向けて

ダム下流河川の土砂動態数値シミュレーション

吉川泰弘* 渡邊康玄** 安田浩保*** 島田友典****

1. はじめに

中流域にダムが存在する河川において、水系一貫した土砂輸送を維持するためにダムからの土砂放流を行う場合には、放流に伴う土砂の挙動を事前に予測しておくことが求められる。予測手法としては河床変動計算を用いることが主流であり、目的に応じて1次元計算モデルと平面2次元計算モデルが主に使い分けられている。本報告では、平面2次元計算モデルに比べて計算時間が短く、容易に長期的な計算が可能な1次元計算モデルを拡張した準2次元非定常解析に基づく混合粒径河床変動計算モデルの適用事例について報告する。

また、この数値解析から得られる出水中の河床材料の経時変化について、可視化を行い考察を加えた。

2. 本計算モデルの概要

本報告に示した計算モデルは、準2次元解析に分類される1次元不定流混合粒径河床変動計算モデル¹⁾である。計算断面は高水敷へ流水が乗り上げる事による浮遊砂の挙動を把握するため複断面とし、土砂については混合粒径の掃流砂と浮遊砂を考慮している。計算断面の概要図を図-1に示す。用いた数式の詳細については既出論文¹⁾に譲り、ここでは概要について記述する。

流れの基礎式は保存型の連続の式と運動の方程式とし、低水路と高水敷との流水境界の摩擦抵抗は準2次元解析²⁾を用いた。マンニングの粗度係数は、岸・黒木³⁾による河床形態に応じた値を時間的場所的に更新して与えた。

流砂の連続式では、河床材料の空隙率を0.4と固定して、掃流砂量式は芦田・道上⁴⁾の式を用い、浮遊砂の浮上量式は板倉・岸⁵⁾の式を用いた。浮遊砂の沈降速度はRubey⁶⁾の式を用い、細かい粒径の沈降速度については島田・渡邊⁷⁾の式を用いた。

混合粒径における流砂の連続式は、平野⁸⁾および清水⁹⁾の式を用い、交換層厚は江頭・芦田¹⁰⁾に

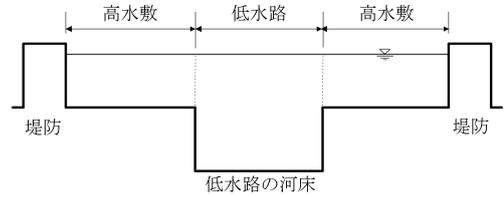


図-1 計算断面の概要図

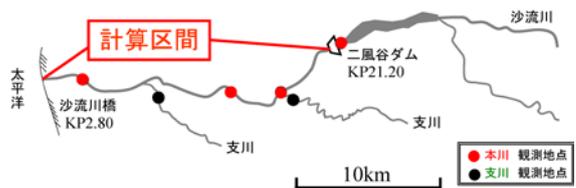


図-2 沙流川の流域と計算区間

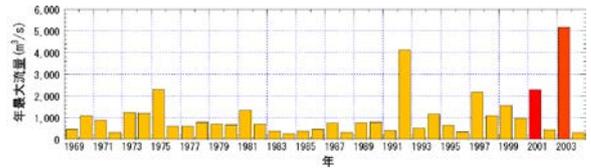


図-3 1969年から2004年の年最大流量（沙流川橋付近）による無次元せん断力を説明変数とする式を用いた。

浮遊砂濃度の連続式は、浮遊砂の浮上と沈降が浮遊砂濃度に影響を与える事を表す式¹¹⁾を用いた。

3. 計算モデルの適用性

(1) 対象とするダム下流域と出水

対象河川は、北海道日高地方の最西端に位置し流路延長約104km、流域面積1,345km²の沙流川とし、平均的な河川勾配は約1/600で道内でも屈指の急流河川である。計算区間はダム下流域である図-2に示す河口0.4kmから二風谷ダム下流までの21.2kmである。

対象とした出水は、出水前後で河床高、痕跡水位の観測値がある2003年8月出水と粒径別SSおよび栄養塩類の観測値がある2001年9月出水の2つの出水である。1969年から2004年の沙流川橋付近（富川観測所）における年最大流量を図-3に示す。図-3より2001年9月出水は3番目に大きな出水であり、2003年8月洪水はピーク流量5200m³/sを記録し計画規模を上回る大規模出水であった。計算期間については、2001年9月11日04:00～13日15:00の計60時間と2003年8月9日10:00～11日09:00の計48時間である。

初期条件は、横断測量に基づく計算断面および

A numerical simulation of sediment transport in the down stream with dam reservoir

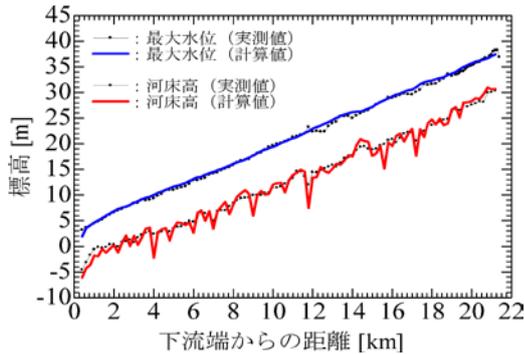


図-4 河床高と最大水位の観測値と計算値 (2003年8月出水)

現地調査により得られた混合粒径の河床材料データを与え、境界条件は、上流端では二風谷ダムから放流された流量および観測したSS、下流端水位は苫小牧西港の潮位を与えた。ダム下流域を対象とする計算の特徴として、上流端の境界条件である流量がダム放流量により連続的に得られる事、および上流端から放流される土砂量の与え方を、ダムからの土砂放流をゼロとするなど、河道に比べて限定的に与えられる事が上げられる。

今回の計算においては、観測値が存在しないため上流端の土砂供給は動的平衡状態で与えた。

(2) 観測値と計算値の比較

本計算モデルの実河川への適用性を計る指標は、観測データが存在する2003年8月出水の洪水後の河床高と出水時の最大水位、2001年9月出水のSSおよび栄養塩類とした。

河床高と最大水位の観測値と計算値の比較を図-4に示す。観測値と計算値の一致を評価する値として絶対誤差の区間平均値とすると、河床高における平均絶対誤差は98cm、最大水位における平均絶対誤差は42cmであり、計算した最大水位の方が河床高よりも観測値と一致する結果であった。

河床高について、4km、9km、11.8km、15.6kmの地点における計算値は、観測値と比べて約4mもの洗掘が見られ、両者の差異は大きい。これらの地点は、川幅が上流の川幅に対して狭いため、流速が大きくなり洗掘を受けやすい地点であると推察出来る。本計算モデルでは、初期河床面よりも下方に向かう洗掘が発生した場合には、初期河床面における河床材料を与え続ける計算モデルであるが、計算値が観測値を再現出来ていないことから、対象河川では初期河床面の下層に粗い河床材料が存在していたため、洗掘を抑制したものと推察できる。つまり、これらのことは、初期河床

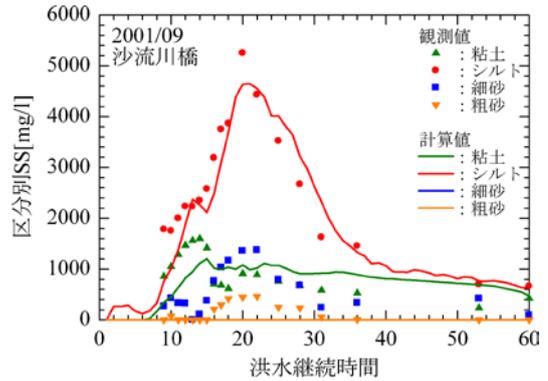


図-5 粒径別SSの観測値と計算値 (2001年9月出水)

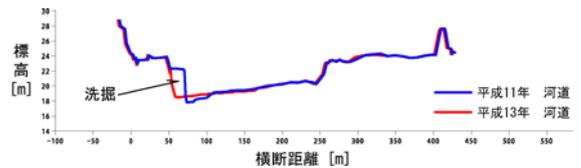


図-6 2001年9月洪水前後の横断面図 (KP14.60)

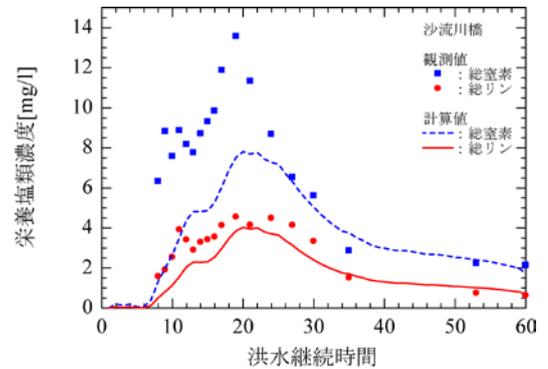


図-7 総窒素と総リンの観測値と計算値 (2001年9月洪水)

面よりも下層の河床材料の構成を明らかにするためのボーリング調査の必要性と、類似の計算モデルにおいて初期河床面よりも下層の河床材料を適切に与える事の重要性を示唆している。

粒径別SSの観測値と計算値を図-5に示す。図-5より、粘土とシルトの計算値は観測値と良く一致しているが、細砂と粗砂の計算値はゼロであり実現象を再現できていない。実現象では、上流で図-6に示す河岸崩落によるSSの増加があったが、計算モデルでは河岸崩落を考慮していないことが支配的な要因となり、細砂および粗砂を再現できなかったと推察できる。本計算モデルにおいて、細砂および粗砂を再現するためには、河岸崩落を考慮する必要がある。

総窒素と総リンの観測値と計算値を図-7に示す。総窒素と総リンは、観測値より導出したSSと栄養塩類の回帰式¹²⁾を用いて計算した。図-7より、総リンの計算値は、総窒素に比べて観測値と良く一致している。総窒素の計算値は、立ち上がりからピークにかけて観測値に比べて小さく

なっているが、減衰時は良く一致している。回帰式の導出に用いた2001年9月出水の観測値から、総リンの方が総窒素よりもSSとの相関が高く、総窒素はSSおよび流量が増加するとばらつきが大きくなりSSとの相関が低くなるため、SSの増加時の立ち上がりからピークにかけて、両者の差異が大きくなったと推測できる。

その他の本計算モデルの課題として、河床材料の空隙率は定数で与えているが、アーマーコートの発達したダム下流に土砂を供給した場合、細砂が粗礫を埋めながら移動するため空隙率は定数にはならないため、空隙率の変化を考慮する必要がある。最新の空隙率に関する研究としては、藤田ら¹³⁾により礫床への砂の堆積による空隙率の時空間変化や混合砂礫河床からの砂の選択的流出による空隙率の増加を計算した研究事例がある。

4. 河床材料の経時変化に関する考察

計算において最終的な河床高の再現性が確保されるのであれば、河床材料の経時変化に関する議論も可能であると言える。河床材料の経時変化に関する知見は、たとえば栄養塩類を吸着している浮遊砂がどの層に存在しているかを把握する事が可能となるため、河川環境を考慮する上において有用な知見と言えよう。

(1) 可視化した時期と区間

本計算モデルにおける河床の変動は、河床の表層である流砂の交換が生じる層（交換層）において表現しており、交換層の河床材料の構成は水理量および上流からの給砂に伴って逐次更新されている。出水中の交換層（表層）の河床材料の経時変化を明らかにするために、本計算モデルから得られる出力情報を最大限に活用しうる可視化手法を新たに導入し、流量の変化に応答する河床材料の経時変化について考察を行った。

ピークを含む4つの時期において下流端から8kmから16kmの8kmの区間を可視化し、交換層の河床材料の経時変化の指標は平均粒径 dm とした。また、河床勾配により横軸の範囲が大きくなるのを避けるために河床高を水平に補正した。可視化した交換層の平均粒径の経時変化を図-8に示す。図-8において、河床を肌色、流水を灰色に着色し、初期の河床高を黒線で、現在の河床高を白線で表現し、交換層（表層）の平均粒径は、

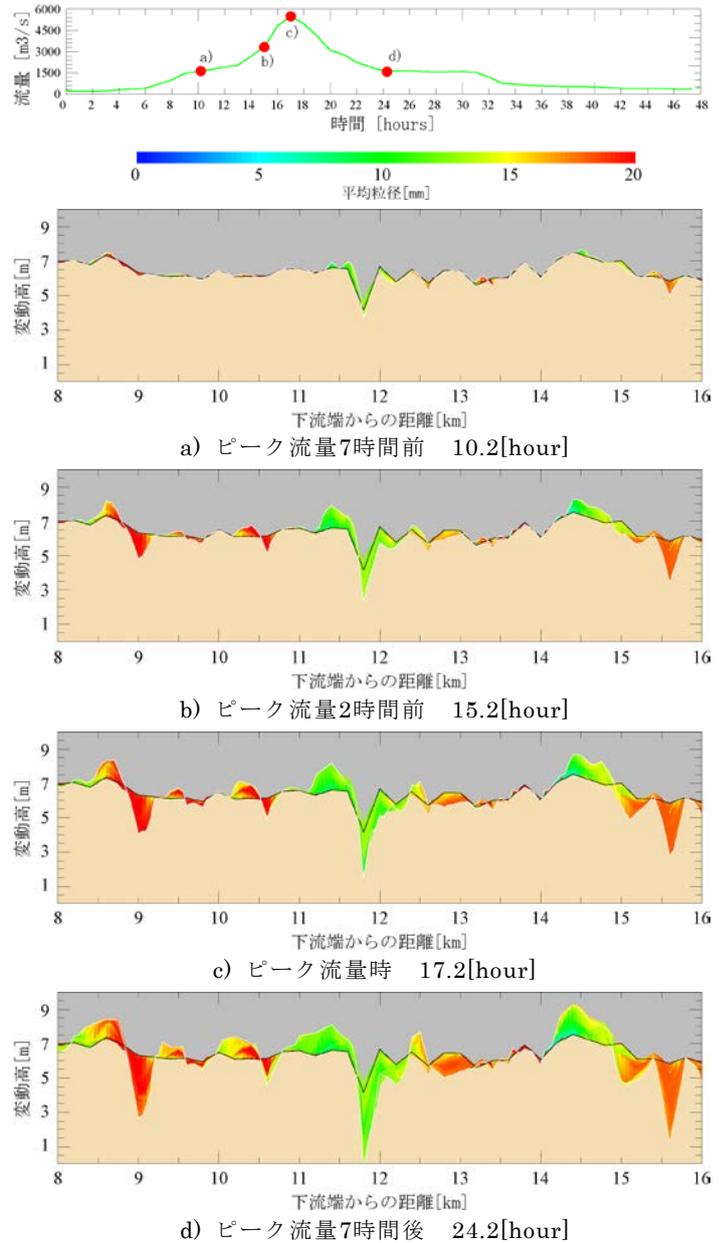


図-8 交換層の平均粒径の経時変化

0mmで青、20mmで赤とした。土砂が堆積した場合の河床の平均粒径の履歴は白線より下で表現し、土砂が洗掘を受けた場合の河床の平均粒径の履歴は白線より上で表現した。

(2) 洪水時の河床材料の経時変化

ピーク流量7時間前の図-8 a)より、9km、12km、15.5km地点において、上流で洗掘を受けた土砂が下流に堆積しているのが分かる。ピーク流量2時間前の図-8 b)より、9km、12km、15.5km地点においては、ピーク流量に向かうとともに洗掘と堆積の変動量が大きくなり、特に15.5km地点では洗掘を受けた土砂が14.4km地点に堆積しているのが分かる。また、新たに10.5km地点で洗掘および堆積が行われている。ピーク流

量時の図-8 c)より、9km、12km、15.5km地点においては、若干洗掘および堆積が進行しているが、a)からb)にかけてなだらかに流量が増加する期間の方が、b)からc)にかけてピーク流量に近づく期間よりも洗掘と堆積の変動量が大きい。10.5km地点においてはb)からc)にかけて細かい土砂が堆積しており、堆砂層の下層は粗い粒径の土砂で上層は細かい粒径の土砂の2層が形成されているのが分かる。ピーク流量の7時間後の図-8 d)より、8.5km、10.0km地点では、流量が小さくなるにつれて細かい粒径の土砂が堆積しており、14.5km地点では粗い粒径の土砂が堆積している。14.5km地点の大きな堆積量については、上流に比べて川幅が広がる地点であるため、流速が小さくなり土砂が堆積したと推察出来る。

本報告で示した河床材料の経時変化についての妥当性は、現時点では現地観測データが無いために十分な確認が行われていない。しかし、今後、実河川における観測値の蓄積が進み、計算値の検証がなされれば、河床変動計算結果の出力情報の一つの形として、浮遊砂がどの層に存在しているかなど河川環境を考慮する上でも有用な解析・予測情報として活用されることになるだろう。

5. まとめ

本報告では、準2次元非定常解析に基づく混合粒径河床変動計算モデルの適用事例について報告し、本計算モデルにおいて、上流端の土砂供給、下層の河床材料、河岸崩落、空隙率を適切に考慮することの重要性を示した。また、出水中の河床材料の経時変化を交換層の平均粒径を指標として可視化を行い、出水中の交換層（表層）の洗掘および堆積の経時変化の把握が可能性であることを

示した。

参考文献

- 1) 吉川泰弘、渡邊康玄：1次元不定流混合粒径河床変動計算におけるマニングの粗度係数と交換層厚の検討、寒地土木研究所月報、No.662、7月号、pp.11-20、2008。
- 2) 河道計画検討の手引き、財団法人国土技術研究センター、pp.79-82、2002。
- 3) 河村 三郎、土砂水理学I、森北出版株式会社、pp.102、pp.227-231、1982。
- 4) 芦田和男・道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究、京都大学防災研究所年報第14号B、1971。
- 5) Itakura, T. and Kishi, T : Open Channel Flow with Suspended Sediments, Proc.ASCE, Vol.106, No.HY8, pp.1325-1343, 1980。
- 6) Rubey,W.W. : Settling velocity of gravel, sand and silt particles.Amer.Jour.Sci, 25,pp.325-338,1933。
- 7) 島田友典・吉川泰弘・渡邊康玄：2003年8月沙流川洪水時の二風谷ダム湖内の土砂移動特性、北海道開発局技術研究、第48、2004。
- 8) 平野宗夫：Armoringsをとまなう河床低下について、土木学会水工学論文集第195号、PP.55-65、1971。
- 9) 清水康行：1次元流れと河床変動の計算、土木学会、pp.17、2001。
- 10) Egashira S and Ashida K : Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load,Advances in Micromechanics of Granular Meterials, (Edited by H.H.Shen et al.) Elsevier, (1992) 391-400。
- 11) 吉川泰弘・渡邊康玄：出水時における浮遊砂濃度の基礎式の一考察、年次学術講演会、第62回、pp.393-394、2007。
- 12) 吉川泰弘、渡邊康玄：物質輸送に与える大規模洪水の影響、北海道開発土木研究所月報、No.628、9月号、pp.2-17、2005。
- 13) 藤田正治、Muhammad SULAIMAN、Jazaul IKHSAN、堤大三：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用、河川技術論文集、第14巻、pp.13-18、2008。

吉川泰弘*



独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所寒地水圏
研究グループ寒地河川
チーム研究員
Yasuhiro YOSHIKAWA

渡邊康玄**



北見工業大学工学部社会
環境工学科教授、博士
(工学)
Dr. Yasuharu WATANABE

安田浩保***



独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所寒地水圏
研究グループ寒地河川
チーム研究員、博士(工学)
Dr. Hiroyasu YASUDA

島田友典****



独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所寒地水圏
研究グループ寒地河川
チーム研究員
Tomonori SHIMADA