

2023年度河川技術に関するシンポジウム

6月22日(木)15:20~17:20

OS3: 河道管理、計画、設計における数値計算の課題と方向性

実務で使われる河床変動モデルの再現性向上の留意点 ～河道計画，設計，管理をより実態に即したのものにする上での課題を踏まえて～

国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部河川研究室 田端幸輔

内容:

- 河道計画，設計，管理をより実態に即したのものにする上での課題
(モデル高度化の観点から)
- 河床変動計算を行う上での留意点 (研究事例紹介)

【河道計画】：高水計画で定めた計画高水流量を安全に流下させるために作成

- 平面計画（堤防，低水路法線，堤防防護ライン，河岸管理ライン等）
- 縦横断計画（断面形状）
- 河道の制御施設の計画（護岸・水制，床止め等）
- 改修河道の中長期的な変化を踏まえた維持管理計画（維持掘削，植生管理，土砂管理）

【河道設計】：河道計画で定めた河道形状，制御施設の具体の諸元，詳細の設計

- 構造物，施設諸元（護岸・水制の構造，基数，素材等）
- 地被区分（利活用，自然環境の観点からの低水路・高水敷のゾーニング，樹木伐採範囲・密度 等）
- 掘削形状の工夫（わんど，湿地の創出，草地化等，多自然川づくりの観点）
- 堤防構造（質的強化）

【河道管理】：安全を持続的に確保するための管理

- 地形，地被，河床材料の変化把握（5年に一度の定期横断測量，河床材料調査）
- 現況流下能力の把握，樹木伐採・河道掘削規模の見直し
- 普段の巡視・点検，簡易流下能力評価（重点箇所等）

【流域治水の観点】：

- 氾濫をできるだけ防ぐ・減らす対策
- 被害対象を減少させる対策
- 被害の軽減，早期復旧・復興対策

評価方法（現状）

- 準二次元モデル等
- 一次元河床変動モデル（河床維持）
- 適宜，平面二次元モデルを併用してチェック（湾曲部，分合流，護岸近傍局所流 等）
- 計画で決めた値を基本とし，平面二次元モデル等で適宜チェック（河床変動も必要に応じて考慮）
- 簡易流下能力評価に準二次元モデルや平面二次元モデル等
- 他，流れや河床変動に関する計算技術は特段活用されていない状況
- 河道計画，設計への具体の反映は十分検討されていない状況（ダム新設（高水計画），越水時に決壊しにくい河川堤防構造，水害リスク等は検討されている）

➤ 洪水規模毎の流れ構造の変化

- 水深増に伴う主流位置変化，高流速箇所やエネルギー勾配増大箇所の把握

➤ 整備完了までの期間中の堤防決壊リスク，氾濫リスク

- 流域内の洪水波形の伝搬（支川群からの流出も含む）
- いつ，どこから氾濫が生じるおそれがあるのか？
- 流下能力不足箇所（縦断位置だけでなく，左右岸水位差の違いを踏まえた堤防天端までの余裕）
- 浸透，侵食，越水による堤防決壊リスクの把握（浸透に関しては堤防脆弱性指標 t^* の活用 等）
- 河道から堤内地への氾濫・戻りの一体的解析（氾濫流のダイナミクスの考慮，水位差だけで氾濫量を決定する「横越流式」に依存しない 等）

➤ 中長期的な土砂動態

- 直線部：砂州移動に伴う最深河床高の変化，蛇行・湾曲・屈曲部：二次流による洗掘深の変化
- 中小規模洪水による二極化進行～大規模洪水による復元
- 掘削箇所の再堆積の可能性予測
- 粒度分布変化，冠水頻度変化等を踏まえた植生動態の予測
- 土砂管理による土砂動態改善，掘削断面維持の可能性

【平面計画】 【縦横断計画】 等

- 洪水規模に応じた流速，水位の変化の把握
- 湾曲部，蛇行部，屈曲部では，どの程度左右岸水位差がつくのか？
→最高水位～堤防天端までの余裕が各場所で異なること，氾濫時の沿川地域の被害想定等も踏まえて，計画高水流量を安全に流下させる上で必要な対策を検討

【河道の制御施設の計画】 【河道設計】 等

- どの地点（縦断位置，左右岸），どの箇所（法先，天端，法面）で堤防に作用する外力が高まるか？侵食リスクは？
→堤防に作用する外力に対し，十分な耐力を確保する上で必要な工法，材料を検討

【河道管理】 【河道設計】 等

- 砂州移動に伴う洗掘位置・洗掘深の変化，二極化進行の有無
- 掘削区間の再堆積，再繁茂の可能性予測
- 弱点層や護岸基礎に河床高が到達しないかを確認
→土砂動態，植生動態を踏まえた維持管理しやすい適切な掘削形状の検討，護岸基礎高等の設定 等

必要になるモデル（例）

- 二次流，複断面的蛇行流れを表現可能なモデル（流速鉛直分布，圧力分布を解くことのできるモデル）
- 堤防近傍（越水時には天端，法先も含めて）の流れの流速分布，圧力分布を解くことのできるモデル
- 高流速による堤防侵食を評価できるモデル
- 砂州移動を表現できるなモデル
- 局所洗掘を表現できるなモデル
- 河床高，粒度構成比率の平面分布を解くことのできるモデル
- 砂州上の細粒分の堆積，零筋の河床低下，細粒分堆積に伴う植生動態変化を表現できるモデル

→定常一次元的な従前の解析法だけでは対応しきれない

- 「基本的評価項目」を軸として計画（平面、縦横断、制御施設）、設計、維持管理を一体で考えるための体系化
- あわせて，特に維持管理では中長期的な河床変動の「予測」ができるモデルであることが前提

数値計算を実施する上での留意点（求められる要件）：

1. 方程式を十分な精度で解けているか？
2. 用いる方程式は適切か？
3. 計算条件は適切か？

河床変動計算を例にすると・・・

1. 方程式を十分な精度で解けているか？

→粒径別土砂収支は満足しているか

- 交換層，貯留層含め，厳密なチェックが必要（例えば固定床露出部分が混在する箇所等で土砂収支が破綻する場合がある）

2. 用いる方程式は適切か？

→流砂量式，粒度分布式

- 今もなお芦田道上式や平野式等，1970年代頃に理想的な条件での室内実験等から構築された式を適用し続けている状況。

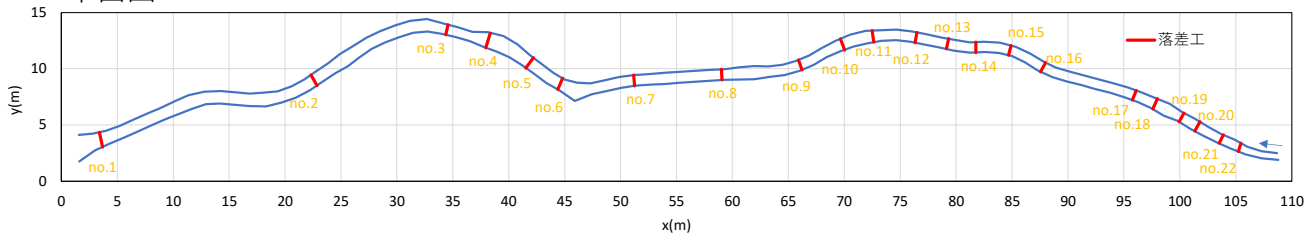
3. 計算条件は適切か？

→土砂境界条件

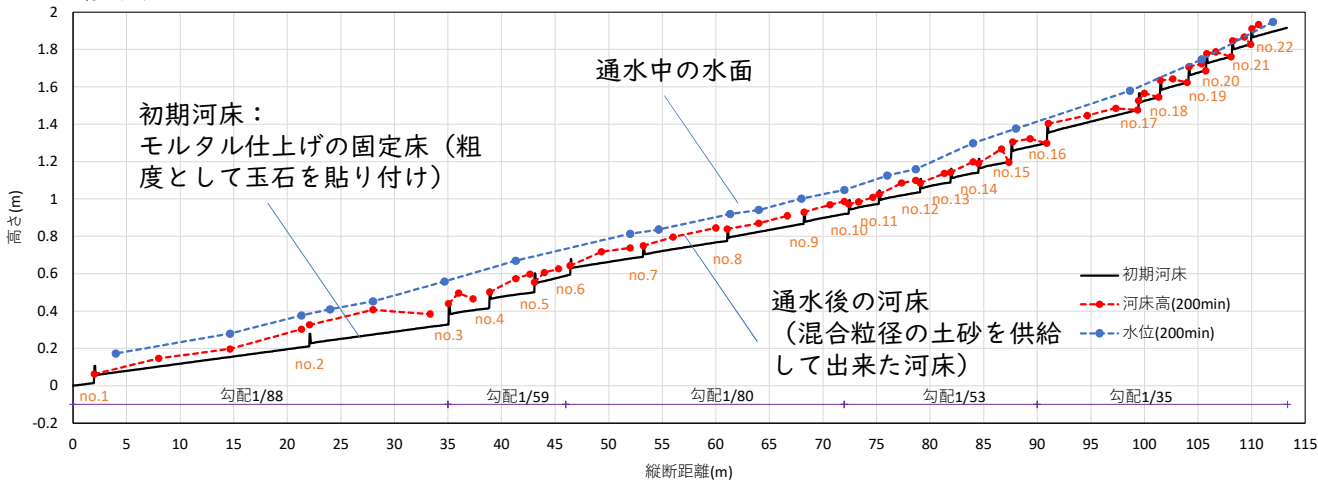
- 特別な場合を除けば，上流端付近の河床材料見合いの平衡給砂量を与えるのが一般的

模型実験 (実験条件)

平面図



縦断図



No. 7の堰付近：
概ね水面と河床が平行 →河床が平衡状態となるように設定

実験条件：

- 縮尺 1/10
- 固定堰が連続して設置されている急勾配単断面河道を想定
- 水路長 113m, 水路幅約 0.7m, 深さ約 0.15m
- 河床勾配 1/90 ~ 1/55
- 高さ 5cm の堰を 22 基設置
- 供給した土砂は、現地換算で砂、礫、石に相当する粒径の材料を選定



小粒径 (0.2mm)



中粒径 (1mm)



大粒径 (10mm)

一般的な一次元不定流混合粒径河床変動モデルによる再現（計算条件）

用いたモデルおよび条件：

- 一般的な一次元不定流混合粒径河床変動モデル
- 固定堰を越流する流れ：堰の地形をメッシュで考慮し、流れ場を直接解析（越流公式等は使用しない）
- 掃流砂量：芦田・道上の平衡流砂量式
- 浮遊砂濃度：沈降と巻き上げを考慮した輸送方程式
- 浮遊砂巻き上げ量：芦田・道上の式
- 全掃流力が実質的に河床材料に作用していたものと考え、全掃流力を用いた（有効掃流力はいない）
- 粒度分布変化：平野の交換層モデル
- 交換層、貯留層の厚さ：ともに最大粒径と同じ0.01 m

その他工夫点：

- 実験と同様、固定床上の土砂堆積過程を表現するため、初期は交換層および貯留層内の土砂量をゼロとし、**土砂堆積に伴い交換層厚が増加**するようにした。
- メッシュからの掃流砂の流出量および浮遊砂巻き上げ量が、交換層内の土量以上とならないように制御し、各計算メッシュにおいて**粒径別土砂収支を厳密に満たす**ようにした。

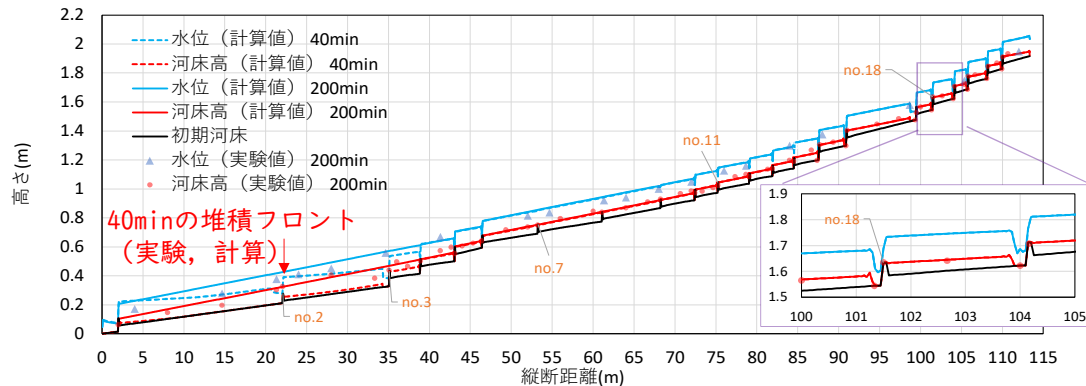
調整したパラメータ：

- **粗度係数**：実験と同様に $0.024 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ とした場合、水深は再現できるものの、掃流力が過小となり堆積範囲を再現できなかった。一方、粗度係数を大きくすると堆積範囲は再現できるが水深が大きくなりすぎる状況が見られた。このため、粗度係数は $0.024 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ とした。
- **無次元掃流力**：一方で、実験での堆積厚を概ね再現できるように無次元掃流力を試行錯誤的に調整し、最終的に**1.2倍**とした。時間的な粒径変化に伴う粗度係数の変化は考慮していない。
- **上流端の給砂条件**：実験と同じ条件（真値）／上流端材料見合いの平衡給砂／安定河床区間の材料見合いの平衡給砂（現地検討を想定）

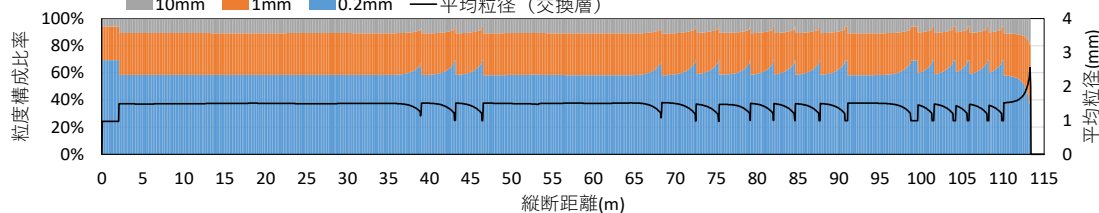
※現時点で、**掃流力を1.2倍とした物理的根拠については見出せていない**。フルード数の高い急勾配水路で、非平衡性の認められる混合粒径土砂運動に対し、平衡流砂量式を適用することの限界を示唆している可能性がある（今後の検討課題）

計算結果（実験での供給土砂を与えた場合）

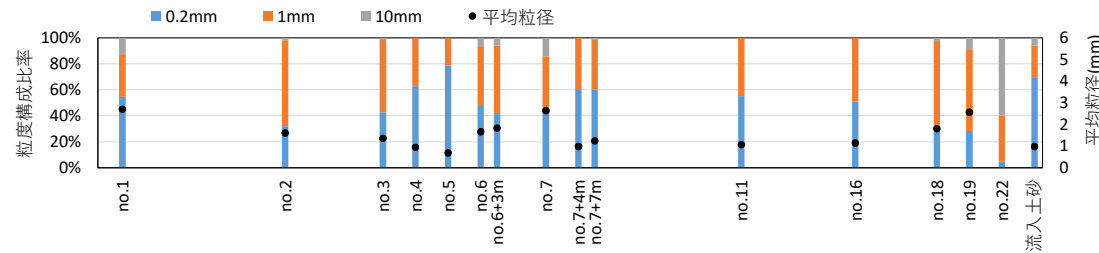
河床高と水位の縦断面図（計算と実測の比較）



表層の粒度構成比率および平均粒径の縦断面変化（計算）



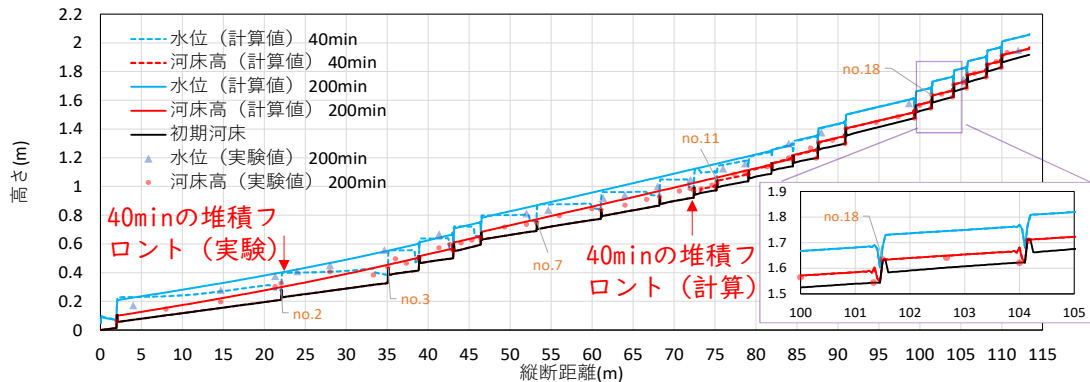
表層の粒度構成比率および平均粒径の縦断面変化（実測）



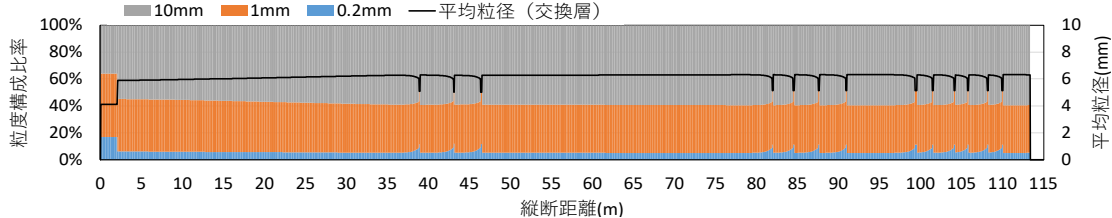
- 一般的な手法であっても、上流端からの粒径別供給土砂量を適切に与えられれば、平均河床高および水位の縦断面形、時間的な堆積範囲、粒度分布については概ね表現可能。

計算結果（上流端河床材料見合いの平衡給砂）

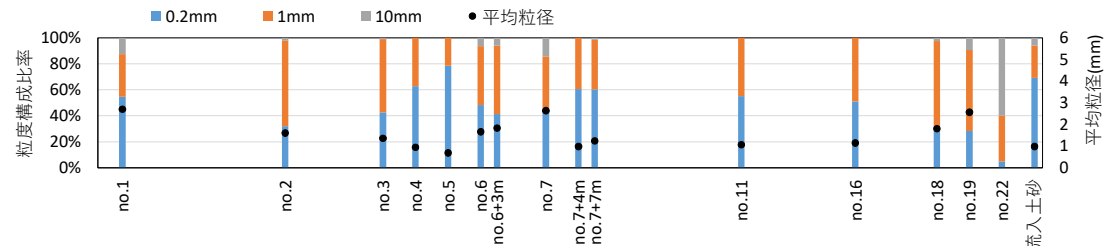
河床高と水位の縦断面図（計算と実測の比較）



表層の粒度構成比率および平均粒径の縦断面変化（計算）



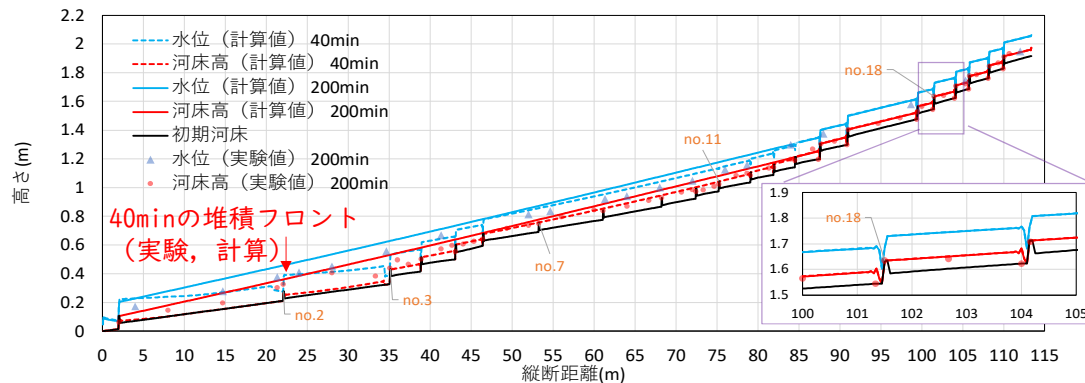
表層の粒度構成比率および平均粒径の縦断面変化（実測）



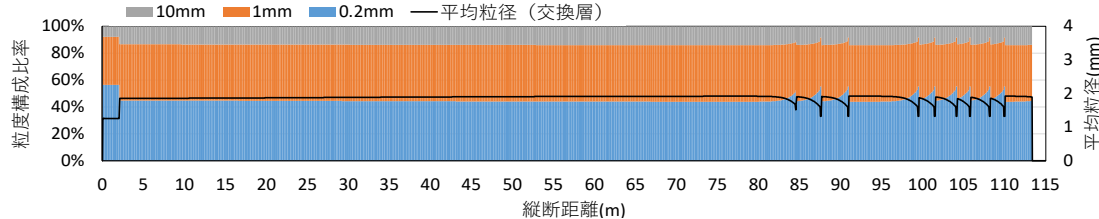
- 最終的な河床高は概ね再現できているが、途中の堆積フロントは再現できない。また、粒度構成比率は全く再現できない。
- 一般によく用いられる境界条件の与え方であるが、堆積過程や粒度分布を再現する上では課題がある。

計算結果（河床安定区間の材料見合いの平衡給砂）

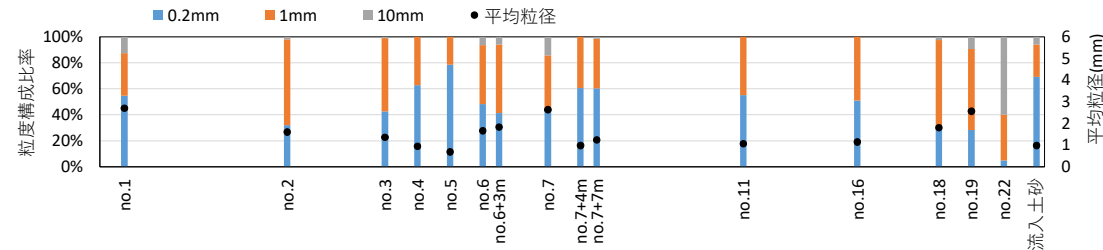
河床高と水位の縦断面図（計算と実測の比較）



表層の粒度構成比率および平均粒径の縦断面変化（計算）



表層の粒度構成比率および平均粒径の縦断面変化（実測）



- 実験と同じ土砂供給量を与えた場合（前々頁）に比べ、河床高、水位が高めに算定され、実験値の再現性が低下しているが、表層粒度構成比率の再現性は、それほど大差ない。

■河道計画，設計，管理をより実態に即したものにする上での課題

- 単にモデル高度化を期待するばかりでは、現場実装や解決につながりにくい。
- 「モデルの用途」（本OSでは特に3Dや準三次元）を明確化しないと、学と官の議論は平行線のままとなる。
- 例えば、河道計画立案という行政行為の中で、「最適化」だけでなく、「**近年の洪水外力増大を踏まえ、洪水の流れ、土砂の動きを可能な限り科学的に捉える**」ことを要件として課し、これに対応するための**基本的な評価項目**を官が提示することも必要と思われる。
- この結果として、モデル高度化の必要性が明確となり、研究開発、社会実装、エキスパート育成が進むと期待できる。（**学・民：官のニーズに合った研究の活性化。官：学・民の開発したモデルの積極的導入**）
- 例えば、基本的な評価項目として、①洪水規模に応じた流れ構造変化，②整備完了までの期間中の、流下能力不足箇所等での堤防決壊、氾濫リスク，③中長期的土砂動態 を位置付けるのがよいのではないか。
- ①～③を把握・評価することで、河道計画，設計，維持管理の高度化に繋げていける可能性がある。

■河床変動計算を行う上での留意点（研究事例紹介）

- 流下方向の流れが卓越し、固定堰群を起点とした河床縦断形が形成されるような急勾配区間においては、一般的なモデル（一次元河床変動も含む）を用いても一定の精度で河床高，水位，粒度分布を表現できる。
- 土砂境界条件については、**洪水後に概ね一定勾配に落ち着いている区間の表層粒度分布を参照した平衡給砂量が一次設定として妥当**と考えられる。その後，全体の河床変動を再現するように供給量を調整するとよい。