

堰が連続する区間における土砂堆積と 河床材料の分級に関する実験と解析

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（発表者）

国土交通省国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター
（前 河川研究部河川研究室）

大谷 周

国土交通省北陸地方整備局信濃川河川事務所
（前 河川研究部河川研究室）

福島雅紀

背景：

- 固定堰が連続する区間では、土砂堆積に伴う樹林化、流下能力不足等が顕在化している事例が増えてきており、**堰の改築や可動堰化、河道掘削等の抜本的対策**が急がれる。その対策を検討するためには、現状把握や対策実施後の予測手法の確立が求められている。

堰が連続する区間での課題（と思われる点）：

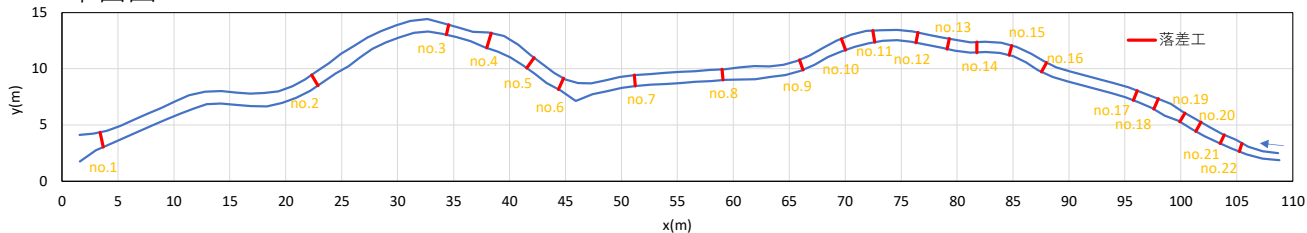
- 堰により水位が規定されるため、同一の流量条件下においても土砂堆積厚によって掃流力に違いが現れる。
- 水深は大きい低い掃流力が作用する状況下で細粒分の堆積が進行し、その後、満砂状態に近くなると小さい水深で高い掃流力が作用し活発に土砂移動が生じ、複雑な鉛直分級が形成される可能性がある。
- 堰の影響で堆積した土砂の鉛直分級を把握することは、堰改築後の河道地形の中長期的変化を的確に予測する上で重要。

目的：

- 混合粒径土砂の供給を可能とした水理模型実験により、堰を連続する区間における土砂堆積と分級機構の把握
- 一般的な河床変動計算モデルによる現象の再現性確認

模型実験 (実験条件)

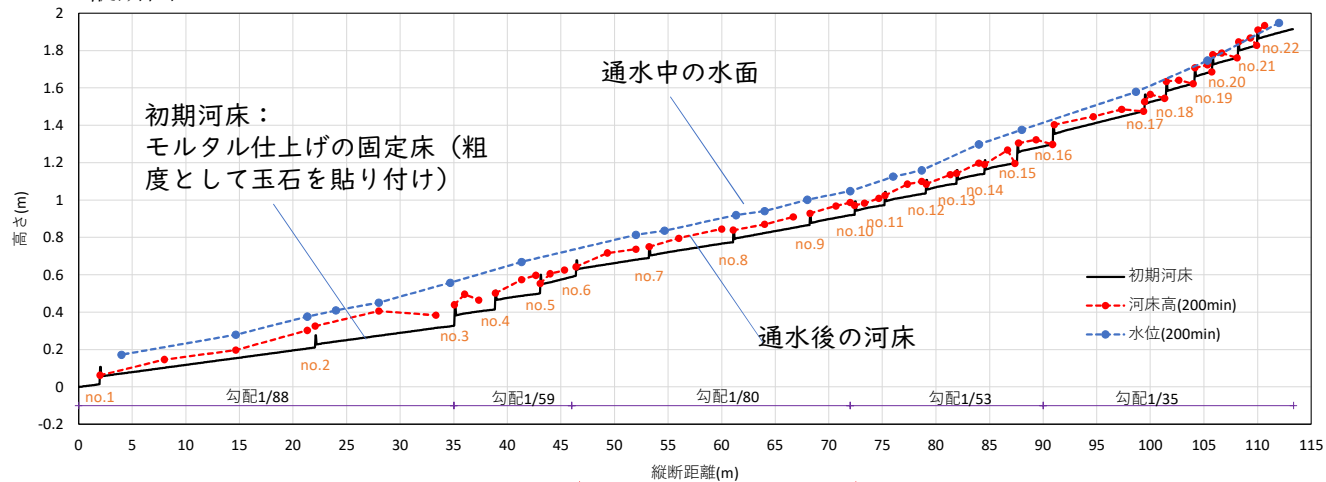
平面図



実験条件：

- 縮尺1/10相当
- 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113 m, 水路幅約0.7 m, 深さ約0.15 m
- 河床勾配1/90~1/55
- 高さ5 cmの堰を22基設置

縦断面図



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

模型実験（実験条件）

流量，供給土砂量

項目	条件
流量	$6.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ，通水時間200 min
供給土砂量	小粒径(0.2 mm)： $6.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 中粒径(1 mm)： $2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 大粒径(10 mm)： $5.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

流量は現地で河道満杯程度の規模で，フルード数が概ね1となる流況を想定し設定

用いた材料



小粒径（0.2mm）



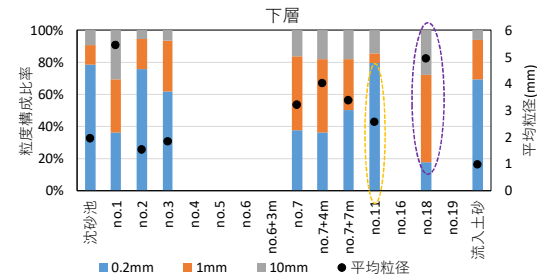
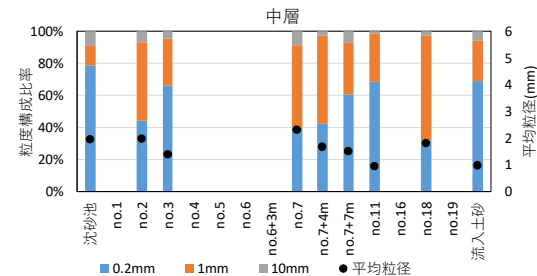
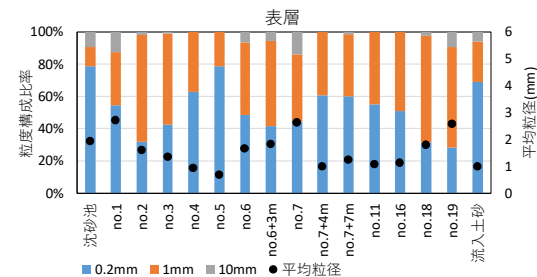
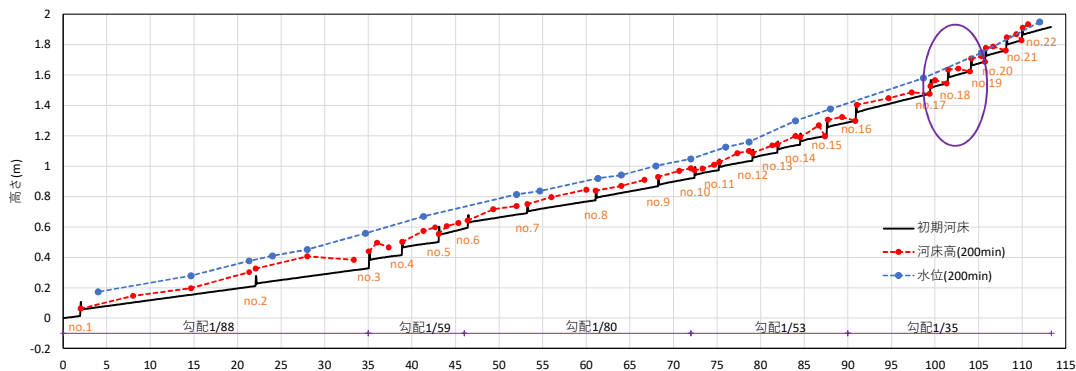
中粒径（1mm）



大粒径（10mm）

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

模型実験 (実験結果)

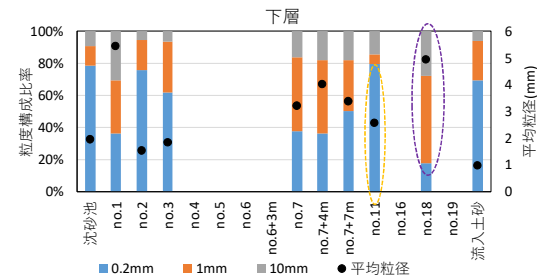
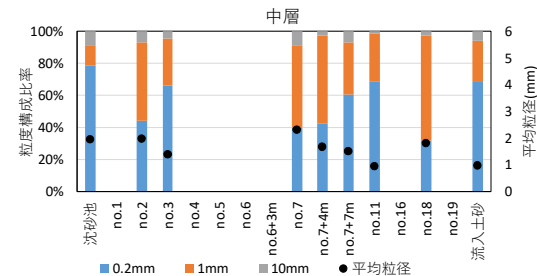
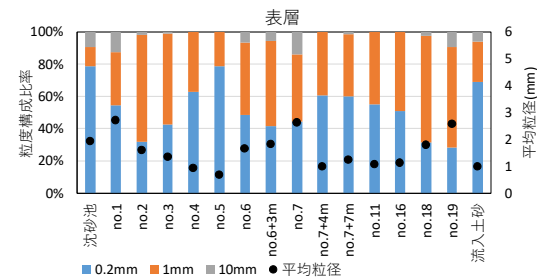
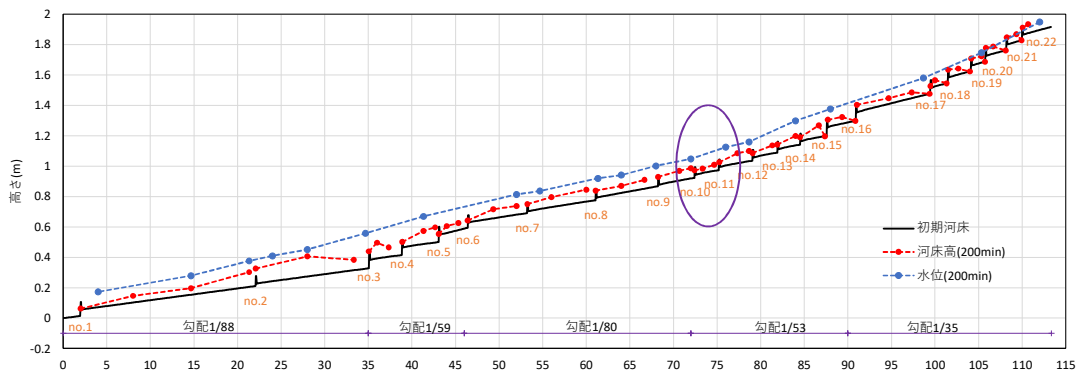


堰no.	no.2	no.3	no.7	no.11	no.18
堆積層の写真					
表層 (形成された時間帯)	9~10cm (160min~)	9~10.5cm (160~200min)	4~6cm (40min~200min)	4~5.5cm (40min~)	2~4cm (40min~)
中層 (形成された時間帯)	2~4cm (~40min)	4~9cm (120~160min)	1.5~4cm (~40min)	2~4cm (~40min)	1~2cm (40min~)
下層 (形成された時間帯)	0~2cm (~40min)	0~4cm (~40min)	0~1.5cm (~40min)	0~2cm (~40min)	0~1cm (40min~)

no. 18

- 下層に中, 大粒径粒子が堆積。(急勾配区間では堰によって大粒径粒子は捕捉)
- 一方で, 浮遊砂形態で輸送される小粒径と中粒径の一部は堰を通過。
- その後, 中, 大粒径粒子の堆積が進行
- 水深軽減により掃流力が低減した後に, 小, 中粒径粒子が堆積し始めたと推察。
- 満砂後は, 上流から引き続き供給される中, 大粒径が下流に流下。

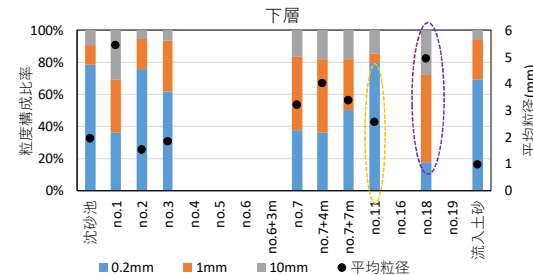
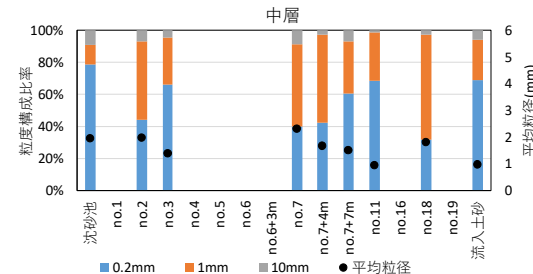
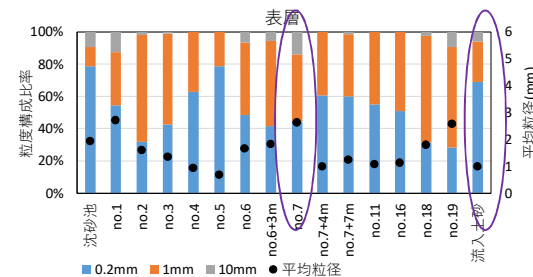
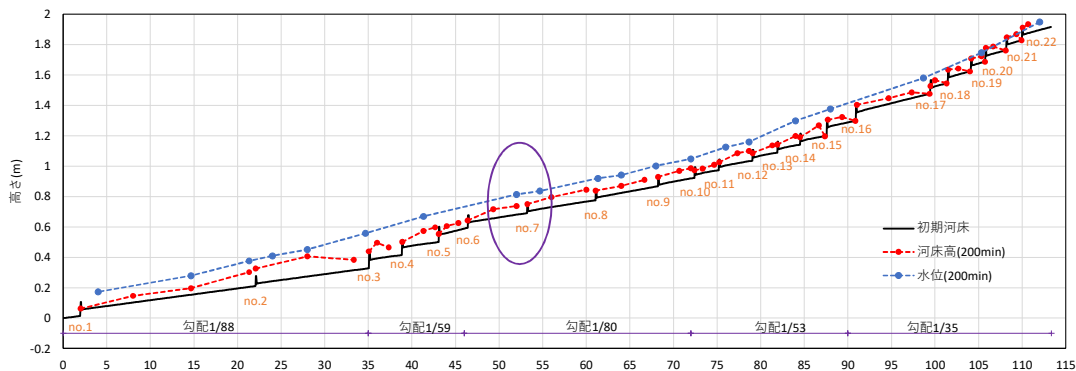
模型実験 (実験結果)



堰no.	no.2	no.3	no.7	no.11	no.18
堆積層の写真					
表層 (形成された時間帯)	9~10cm (160min~)	9~10.5cm (160~200min)	4~6cm (40min~200min)	4~5.5cm (40min~)	2~4cm (40min~)
中層 (形成された時間帯)	2~4cm (~40min)	4~9cm (120~160min)	1.5~4cm (~40min)	2~4cm (~40min)	1~2cm (40min~)
下層 (形成された時間帯)	0~2cm (~40min)	0~4cm (~40min)	0~1.5cm (~40min)	0~2cm (~40min)	0~1cm (40min~)

- no.11
- 下層：小粒径粒子が堆積。(←上流堰群を通過した小粒径粒子と推察)
 - 中層及び上層：中粒径も多く含む(←上流の堰群が満砂となり、粒径の大きい集団も下流へと多く供給されたことによる。)
 - 主に中粒径粒子が、河床材料と交換しながら流下する中で、下層よりも粗い粒径集団による堆積層(中層及び表層)が形成。(このような傾向がno.7下流域で確認)

模型実験 (実験結果)

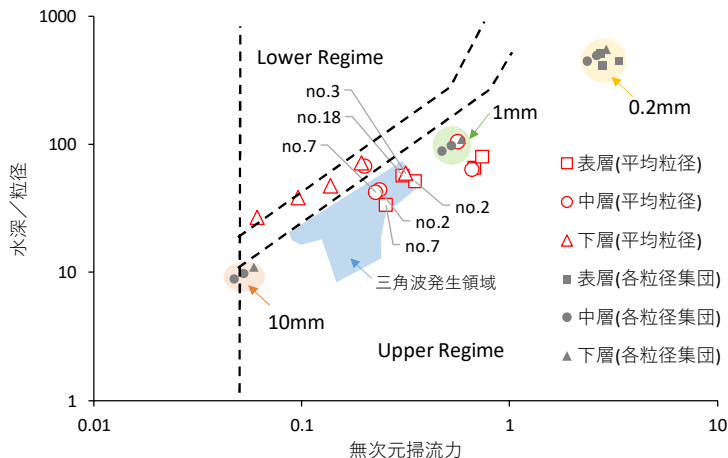


堰no.	no.2	no.3	no.7	no.11	no.18
堆積層の写真					
表層 (形成された時間帯)	9~10cm (160min~)	9~10.5cm (160~200min)	4~6cm (40min~200min)	4~5.5cm (40min~)	2~4cm (40min~)
中層 (形成された時間帯)	2~4cm (~40min)	4~9cm (120~160min)	1.5~4cm (~40min)	2~4cm (~40min)	1~2cm (40min~)
下層 (形成された時間帯)	0~2cm (~40min)	0~4cm (~40min)	0~1.5cm (~40min)	0~2cm (~40min)	0~1cm (40min~)

- 最終的な表層の粒度構成は、上流端からの流入土砂量を決定する際に参照したものと基本的には異なっているが、水面と河床が概ね平行となり平衡状態に達したと見なせるno.7付近では比較的近い値を示していると言える。

中層～表層にかけて粗粒化が生じた要因の解釈：

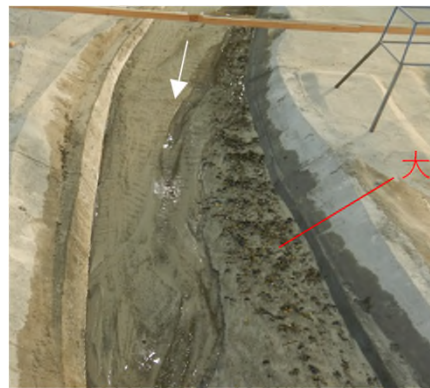
- 砂州移動時に前縁部の急勾配部に土砂が崩れ落ちる際に、粗粒分が細粒分よりも先に深部に到達することで深部から表層にかけて粗粒化が生じるとされている。(矢野ら, 2015)
- 実験で度々確認された三角波を伴う反砂堆形成時には、**掃流砂と河床表層の土砂の衝突が活発に生じることで動的粗粒化**が起こり、中層、表層の厚さに相当する部分まで粗い成分が入り込んだ可能性がある。



無次元掃流力と水深粒径比の関係

平面的な分級の特徴：

- 蛇行、湾曲部に位置するno.3やno.6付近等では固定砂州が形成され、外岸側の洗掘が生じ、横断方向に明確な比高差が確認された。
- このような箇所では、特に大粒径粒子が、流れに乗って主として**転動形態で輸送**される様子が見られた。輸送された粒子は水裏部の低流速域に到達すると減速し、徐々に堆積していくことで、大粒径を主体とする堆積域が部分的に形成する様子が確認された(以下の写真)。
- 慣性力を持った大粒径粒子の非平衡的な挙動を、流れとともに追跡し、河床変動や粒度変化の予測に繋げることも課題



濡筋

内岸固定砂州

大粒径を主体とする堆積域の部分的形成

数値計算による再現（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：

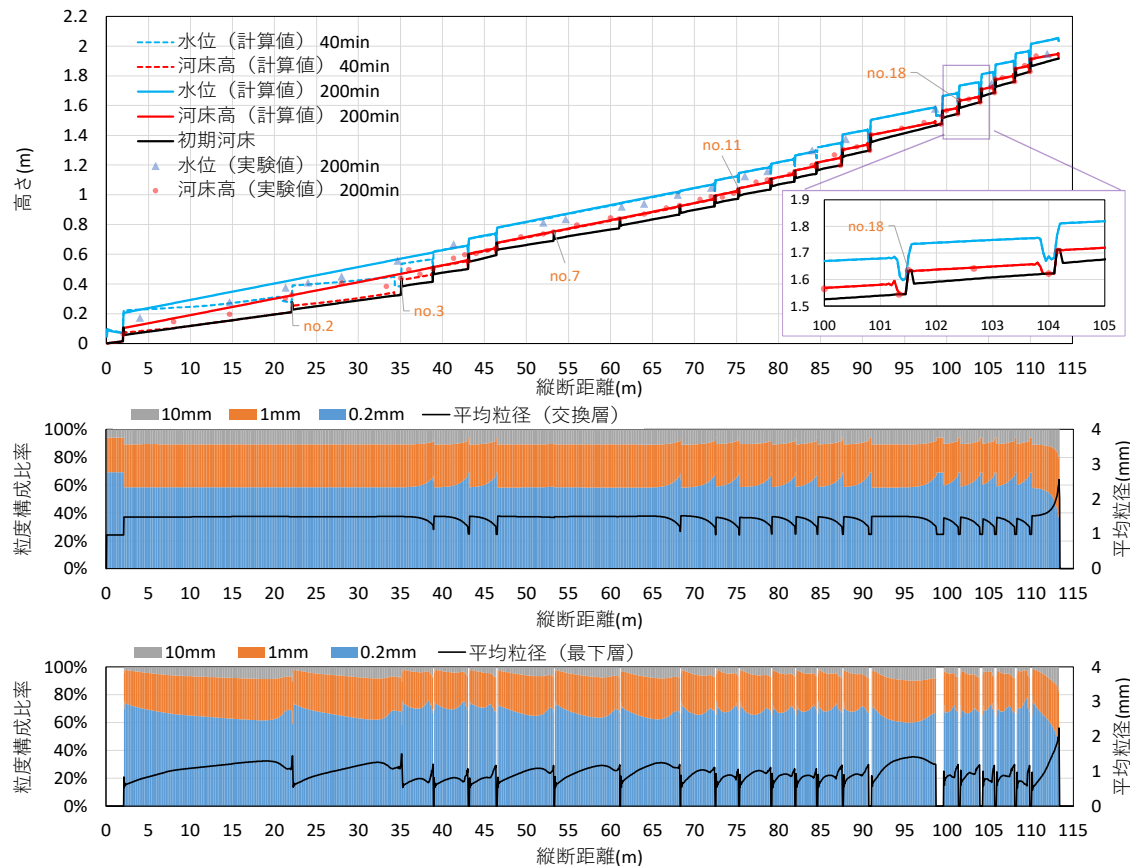
- 実験と同様、固定床上の土砂堆積過程を表現するため、初期は交換層および貯留層内の土砂量をゼロとし、**土砂堆積に伴い交換層厚が増加**するようにした。
- メッシュからの掃流砂の流出量および浮遊砂巻き上げ量が、交換層内の土量以上とならないように制御し、各計算メッシュにおいて**粒径別土砂収支を厳密に満たす**ようにした。

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）／平衡給砂（現地検討を想定） の2パターン

※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）

数値計算による再現（計算結果）

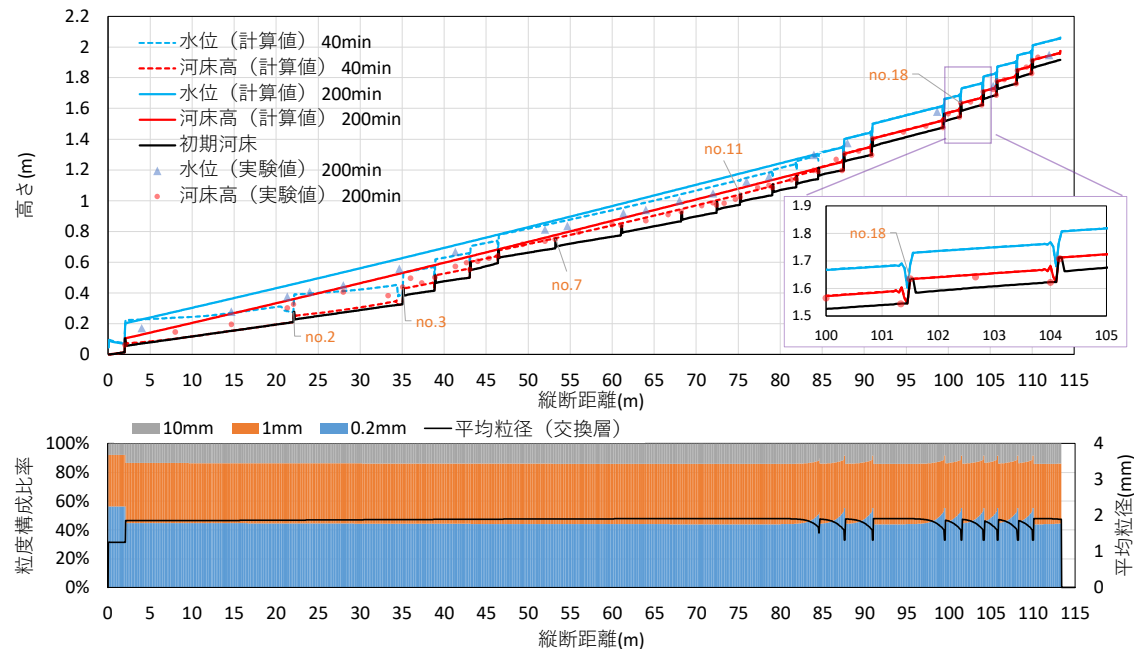


実験と同じ土砂供給量を与えた場合の再現計算結果

(上段：河床高と水位の縦断図，中・下段：表層，最下層の粒度構成比率および平均粒径の縦断変化)

- 河床高，水位ともに計算値は実験値を概ね再現。
- 実験ではno.2の堰上流の堆積は40 min 時点で生じていたが，計算でも同様に堆積が生じはじめる結果が確認。
- 堰直下の射流域では，実験と同様，土砂が堆積しないこと，堰上流では堰天端高を繋ぐような河床が形成されることが確認。
- 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，実績の水深，堆積範囲を参考に粗度係数，掃流力を適宜調整できれば，平均河床高および水位の縦断形，時間的な堆積範囲の変化については概ね表現可能。
- 粒度分布について：表層の大粒径粒子の存在割合が実験結果よりも大きめに算定されているものの，実験と同様，堰の上流側では最下層で小粒径の土砂が多く，大粒径が少なくなり，表層では大粒径粒子の存在割合が相対的に大きくなる傾向は現れている。
- 堰の堆積に伴う掃流力と供給土砂の変化によって，鉛直方向に粗粒化が生じる過程が表現されたものと考えられる。

数値計算による再現（計算結果）



- 実験と同じ土砂供給量を与えた場合（前頁）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。
- この結果は、実績の水深を再現する粒度係数を与え、概ね平衡河床に達した区間の粒度分布を参照して上流端の平衡給砂量を一次設定し、全体の堆積厚、堆積範囲を再現するように平衡給砂量と、必要に応じて掃流力を調整することで、水深、河床高、粒度分布を実用上十分な精度で説明できる可能性を示唆していると言える。

no. 7付近の通水後粒度構成比率を参照して土砂供給量を与えた場合の再現計算結果
 (上段：河床高と水位の縦断図， 下段：表層の粒度構成比率および平均粒径の縦断変化)

- 堰が連続する区間では，堰により水位が規定されるため，流量条件が同じであっても土砂堆積厚が変わると掃流力に違いが現れ，これが鉛直分級を形成することが実験によって確認できた。
- 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，一般的な次元河床変動モデルを用いても一定の精度で河床高，水位，粒度分布を表現することが可能である。
- 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。