

横断遮蔽物による河床洗掘現象を表現できる 実用的数値解析手法の提案

国立高専機構阿南高専 長田健吾, 群馬大学大学院 清水義彦, 国立高専機構阿南高専 赤川優太

研究背景

橋脚などに流木が堆積すると、橋脚周りで洗堀が生じ、橋梁の沈下や倒壊などに繋がる恐れがある。その最大洗堀深や洗堀形状を推定できることは災害予防の観点で重要である。

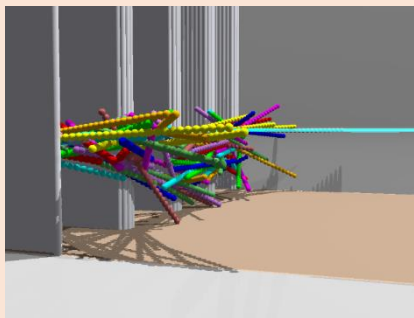
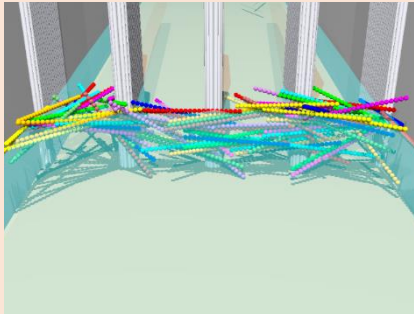


提供 : Isabella Schalko, ETH Zurich, MIT

実験結果



流木解析法



著者らは、河道内の流木挙動を再現する3次元流木解析モデルの構築に取り組んできた。

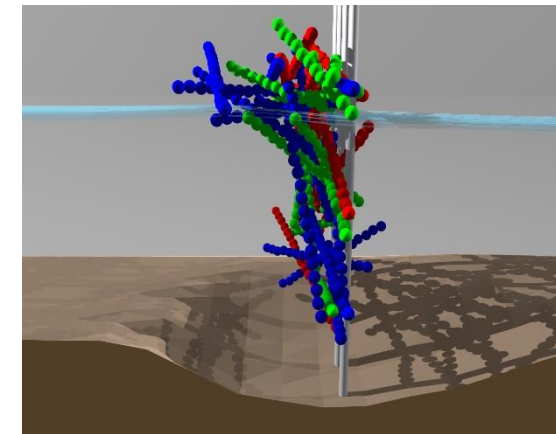
解析モデルを実験データに適用した結果、流木の流下・堆積とそれによる水位上昇について、実験での現象を表現できるモデルであることを提示してきた。



流砂モデルを組み込み、Schalko実験の再現を試みた。



解析結果



Schalkoの実験データとの比較を行ったが、実験の洗堀深を再現できなかった（過小評価となった）。

研究背景

- 本現象には流れ＋流木挙動＋土砂移動の3者の相互干渉が複雑に絡むため、解析モデルを効率的に構築するために、基礎実験によるデータ収集とそれを用いた検証が必要と判断した。
- 解析モデルに組み込む流砂解析モデルは、実河川への将来的な適用も考えれば、河道の土砂移動（平衡場）と橋脚周りの局所洗掘（非平衡場）の両現象を効率よく再現できる手法が望ましい。

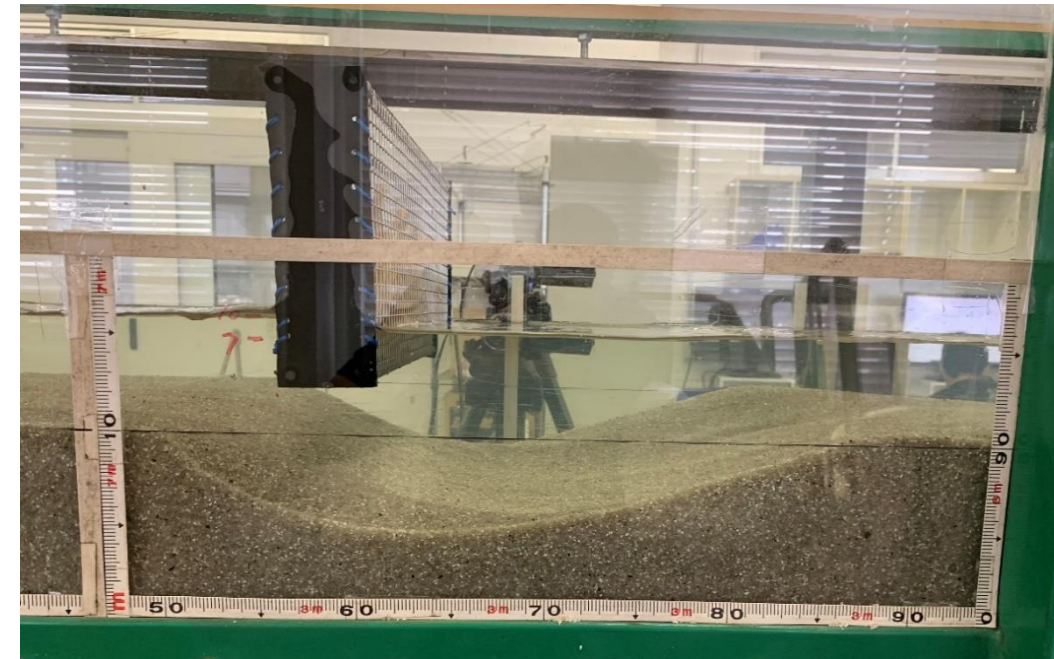
研究目的

- ✓ 移動床実験水路に流木堆積に見立てた水路横断遮蔽物を設置し、河床洗掘を発生させた基礎的な実験を実施する。
- ✓ 実験の河床洗掘現象を説明する解析モデルを検討することで、本現象を再現するために解析モデルに必要な要素は何かを明らかにする。
- ✓ 今後の実用性にも目を向けて、河床洗掘現象を説明する解析モデルを提案する。

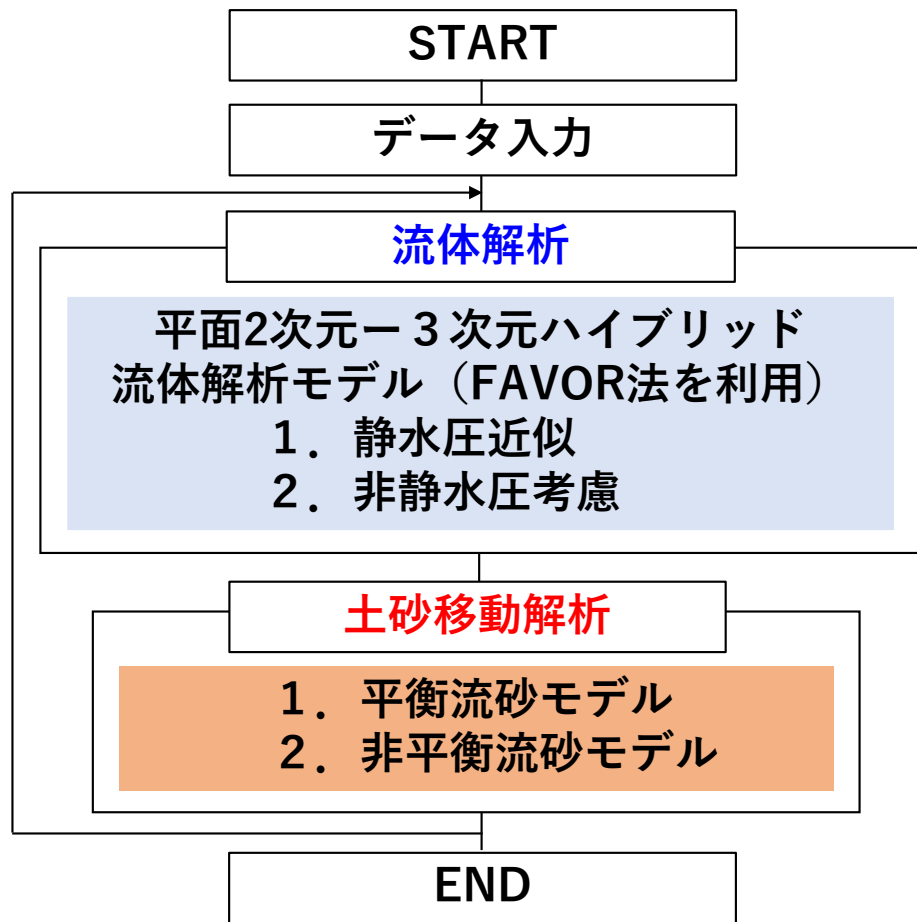
横断遮蔽物（流木かご）



実験における洗掘状況

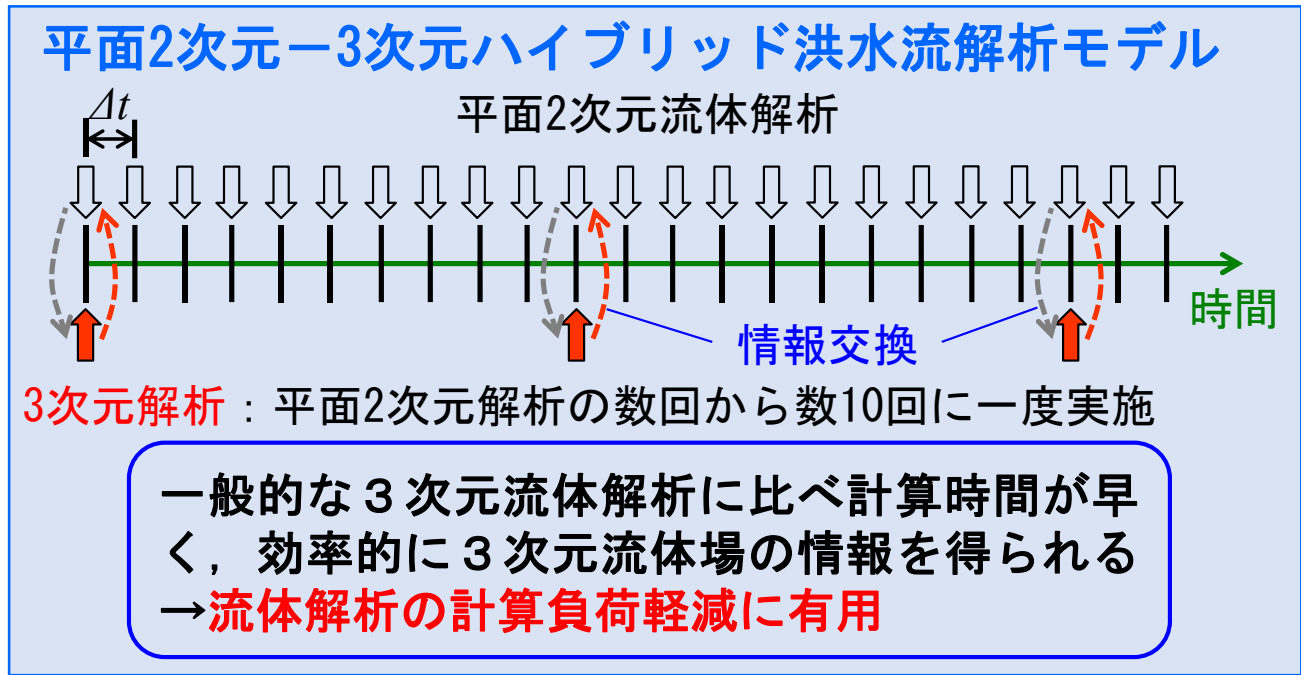


解析モデルの概要

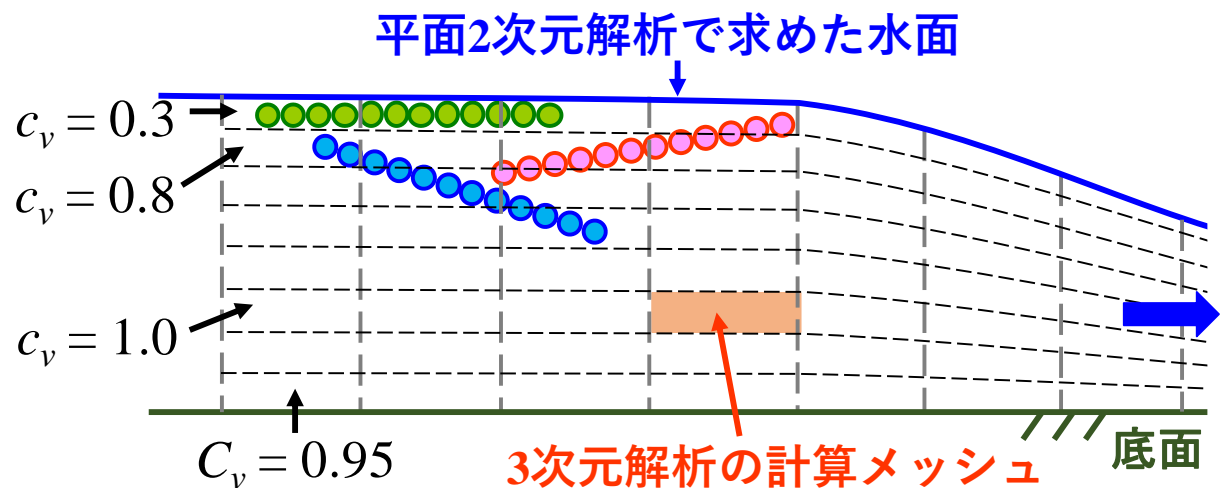


実験データとの比較・検証を進める中で必要性を感じ...

- ◇ 非静水圧分布を考慮したモデルを構築
- ◇ 土砂移動の算定には従来の平衡流砂量式に加え非平衡流砂量式を構築



流木等遮蔽物の存在割合を考慮するために FAVOR法を組み込み



平面2次元-3次元ハイブリッド流体解析の基礎方程式

平面2次元流体解析

連続式 (水深の計算)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J_s} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(\frac{A_{\xi_j} U_{\xi_j} h}{J_s} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{V_w}{J_s} \right)$$

運動方程式 (水深平均流速U, Vの計算)

$$C_v \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_{\xi_i}}{J_s} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(\frac{A_{\xi_j} U_{\xi_j} Q_{\xi_i}}{J_s} \right) - A_{\xi_j} U_{\xi_j} \frac{Q_{xj}}{J_s} \frac{\partial}{\partial \xi_j} (\nabla \xi_i)$$

$$= -C_v \left(gh \nabla \xi_i \nabla \xi_j \frac{\partial H}{\partial \xi_j} - \frac{\tau_{b\xi_i}}{\rho J_s} - \frac{F_{2D\xi_i}}{\rho J_s} \right) + D_{2D\xi_i} - \underline{G_{\xi_i}}$$

補正項

情報交換

3次元流体解析

連続式 (鉛直流速wの計算)

$$\frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(a_{\xi_j} \frac{u_{\xi_j}}{J_v} \right) = 0$$

運動方程式 (流速u, vの計算)

$$c_v \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{u_{\xi_i}}{J_v} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(\frac{a_{\xi_j} u_{\xi_j} u_{\xi_i}}{J_v} \right) - a_{\xi_j} u_{\xi_j} \frac{u_{xj}}{J_v} \frac{\partial}{\partial \xi_j} (\nabla \xi_i)$$

$$= -c_v \left(g \nabla \xi_i \nabla \xi_j \frac{\partial H}{\partial \xi_j} + \frac{\partial p'}{\rho \partial \xi_j} + \frac{F_{3D\xi_i}}{\rho J_v} \right) + D_{3D\xi_i}$$

補正項の計算

$$G_{\xi_i} = \int_0^h (CON_{3D\xi_i}) dz - CON_{2D\xi_i} + \int_0^h c_v \frac{\partial p'}{\rho \partial \xi_j} dz$$

$$+ \int_0^h c_v \frac{F_{3D\xi_i}}{\rho J_v} dz - C_v \frac{F_{2D\xi_i}}{\rho J_s} - \int_0^h D_{3D\xi_i} dz + D_{2D\xi_i}$$

非静水圧モデルの組み込み (式は分かりやすくデカルト座標系で表記)

流れの連続式

$$\frac{\partial a_x u}{\partial x} + \frac{\partial a_y v}{\partial y} + \frac{\partial a_z w}{\partial z} = 0 \quad \dots \text{鉛直流速} w \text{の算定に利用}$$

流れの3次元運動方程式

静水圧近似では
この項を無視

$$c_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial a_x u^2}{\partial x} + \frac{\partial a_y uv}{\partial y} + \frac{\partial a_z uw}{\partial z} = -c_v g \frac{\partial}{\partial x} (H - z) - \underbrace{c_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x}}_{\text{静水圧近似ではこの項を無視}} - c_v \frac{F_x}{\rho} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial a_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial a_y \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial a_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad \dots \text{uを算定}$$

$$c_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial a_x uv}{\partial x} + \frac{\partial a_y v^2}{\partial y} + \frac{\partial a_z vw}{\partial z} = -c_v g \frac{\partial}{\partial y} (H - z) - \underbrace{c_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y}}_{\text{静水圧近似ではこの項を無視}} - c_v \frac{F_y}{\rho} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial a_x \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial a_y \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial a_z \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad \dots \text{vを算定}$$

$$c_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial a_x uw}{\partial x} + \frac{\partial a_y vw}{\partial y} + \frac{\partial a_z w^2}{\partial z} = -c_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} - c_v \frac{F_z}{\rho} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial a_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial a_y \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial a_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad \dots \text{本来は鉛直流速} w \text{の算定式}$$

非静水圧分布の計算に利用

鉛直流速wの算定式を変形して、圧力偏差を
求める式として用いる

$$\frac{\partial p'}{\partial z} = -\frac{\rho}{c_v} \left(\frac{\partial a_x uw}{\partial x} + \frac{\partial a_y vw}{\partial y} + \frac{\partial a_z w^2}{\partial z} \right) - F_z + \frac{1}{c_v} \left(\frac{\partial a_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial a_y \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial a_z \tau_{zz}}{\partial z} \right)$$

求められた圧力偏差を運動方程式に利用

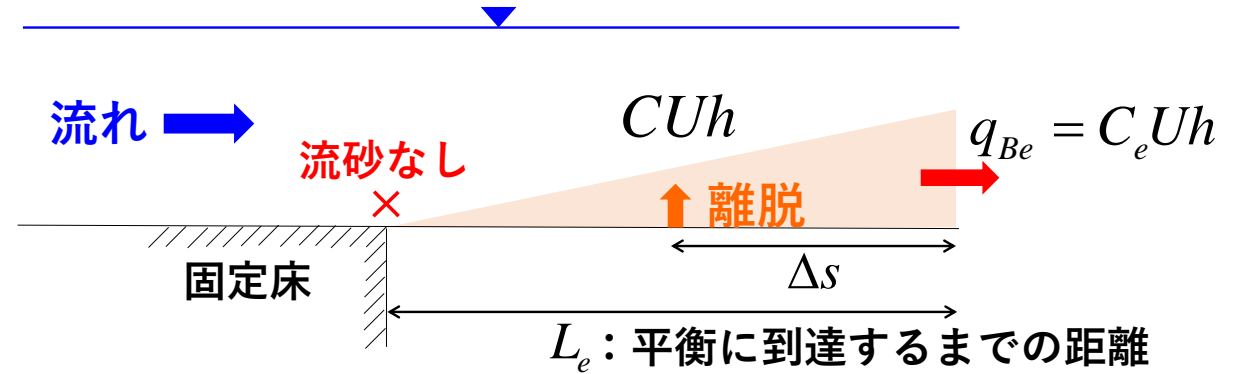
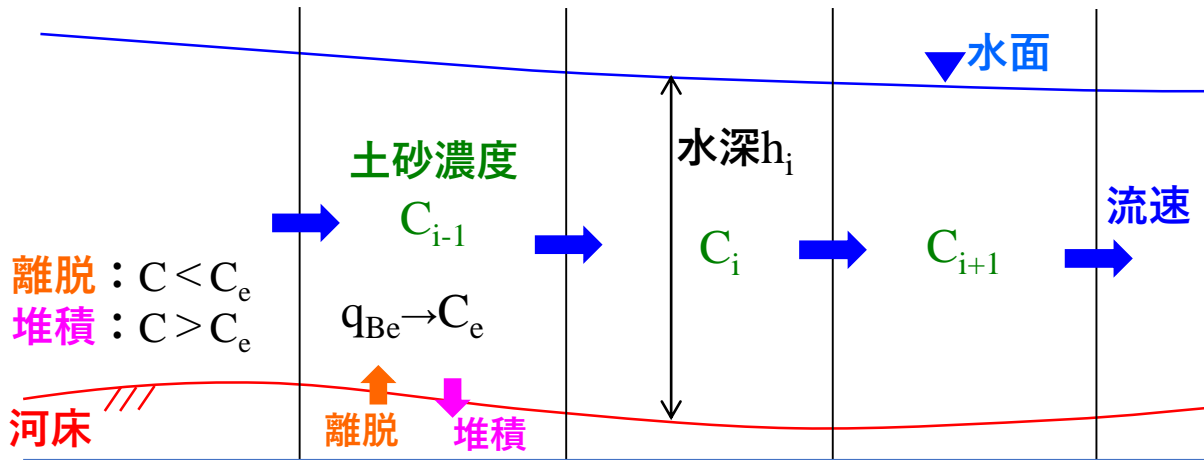
土砂移動解析（非平衡流砂解析モデル）

土砂輸送方程式（土砂濃度Cの算定）

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Ch}{J_s} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{CA_\xi U_\xi h}{J_s} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{CA_\eta V_\eta h}{J_s} \right) = C_* E$$

河床高の算定

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + E = 0$$



侵食・堆積速度の算定

$$E = \frac{h}{\Delta s} \frac{C_e - C}{C_*} \sqrt{U^2 + V^2}$$

平衡濃度C_eの算定式

$$C_e = \frac{q_{Be}}{h \sqrt{U^2 + V^2}}$$

q_{Be} : 平衡流砂量（芦田・道上式を利用）

平衡濃度C_eに達するまでの距離

$$\Delta s = L_e \left(1 - \frac{C}{C_e} \right)$$

上図のように、流砂量が線形的に増加すると仮定した式

実験概要・実験結果

水路：幅0.4m，長さ10m，勾配1/2000

河床材料：珪砂4号を0.1m厚で敷き均し

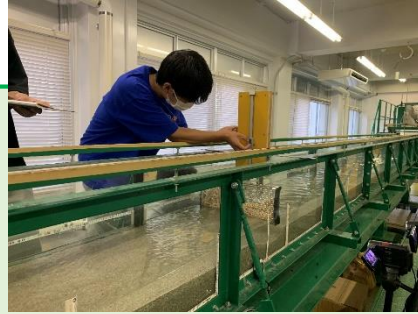
流量：8L/s

横断遮蔽物：平均的な流木密度は40%

砂面から0.03m上が下端となるように設置

測定：10分後の水路中央の縦断的な河床高・水位を測定

側面からビデオにより洗堀の進行と土砂の動きを測定



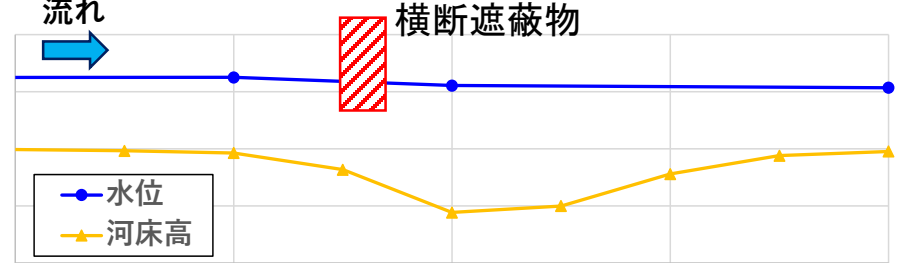
Z(m)
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00

10分後の河床形状・水面形

流れ



横断遮蔽物



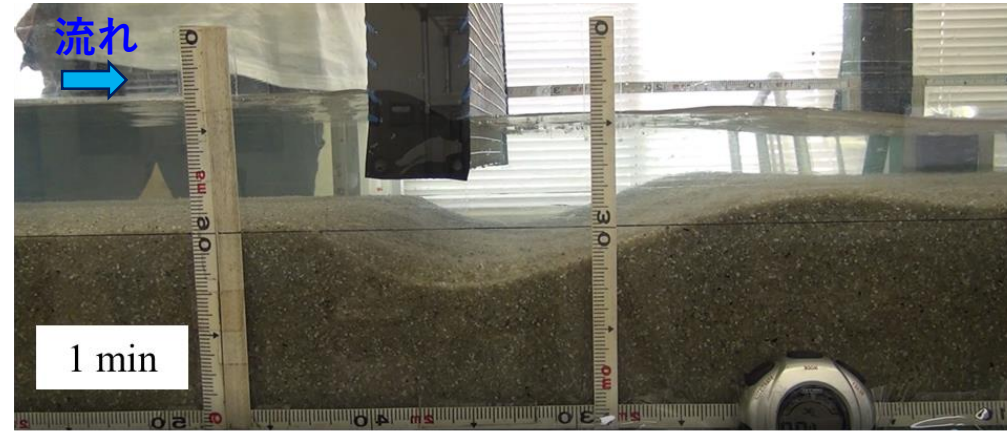
2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 X(m)

横断遮蔽物の少し下流において最大洗堀が生じる。
洗堀深は0.05m程度。

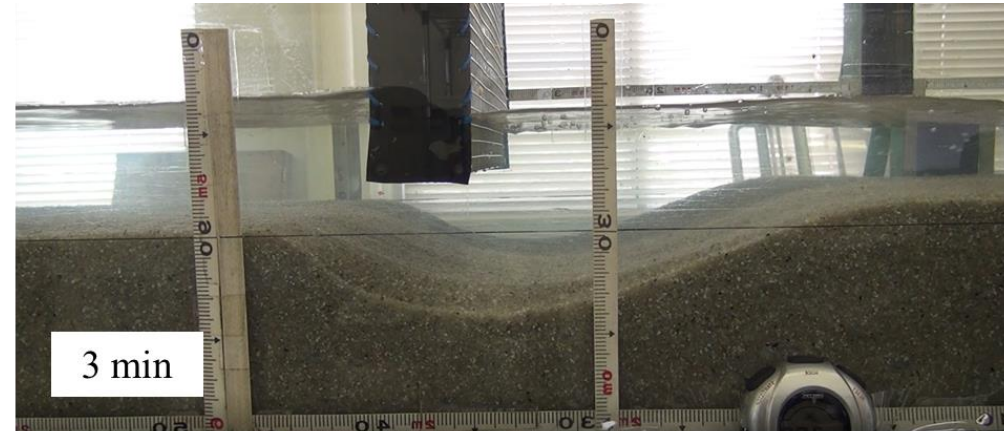
◆ 横断遮蔽物の上下流で水位差がつくが、洗堀の進行に伴い、その差は徐々に減少する。

◆ 5分後までは河床洗堀の進行が早く、その後は緩やかに河床洗堀が進行する。

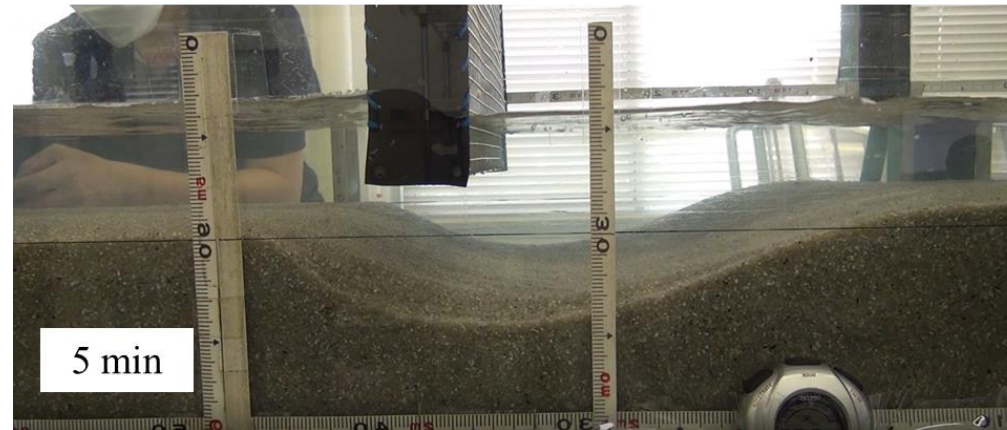
◆ 洗堀部の土砂移動は連続的ではなく、特に洗堀がある程度落ち着いた段階以降は間欠的に流体力が作用する状況が確認された。



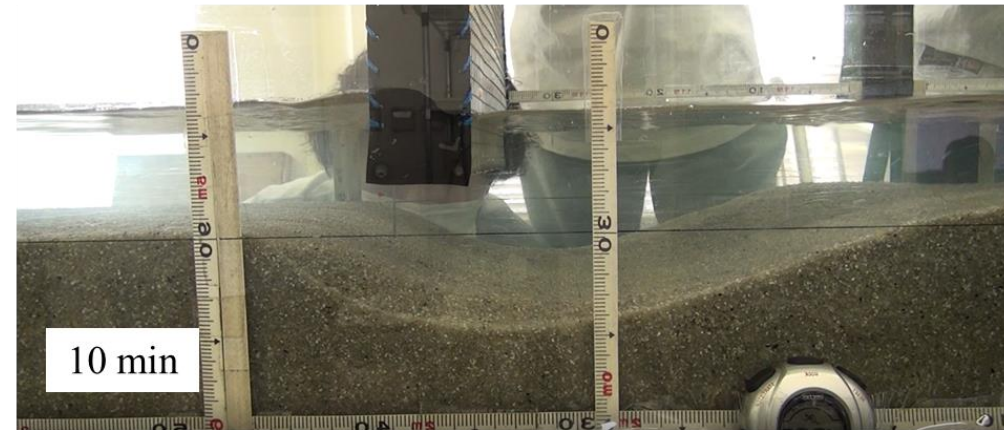
1 min



3 min



5 min



10 min

解析モデル検討の流れと解析ケース

解析ケース	圧力計算	土砂移動
Case 1	静水圧近似	非平衡流砂
Case 2	非静水圧考慮 (風上差分)	非平衡流砂
Case 3	非静水圧考慮 (中心差分)	非平衡流砂
Case 4	非静水圧考慮 (中心差分)	平衡流砂

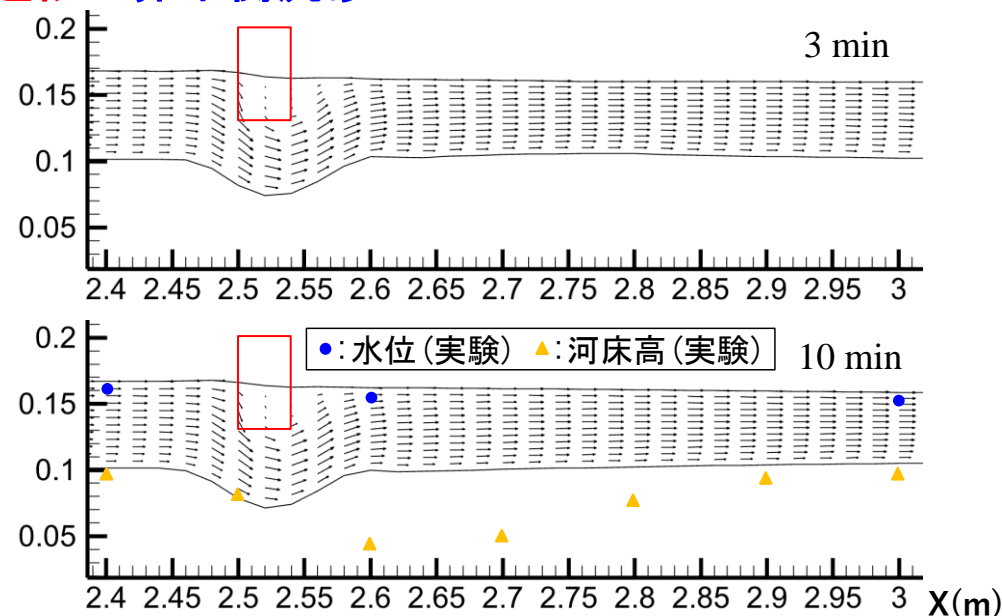
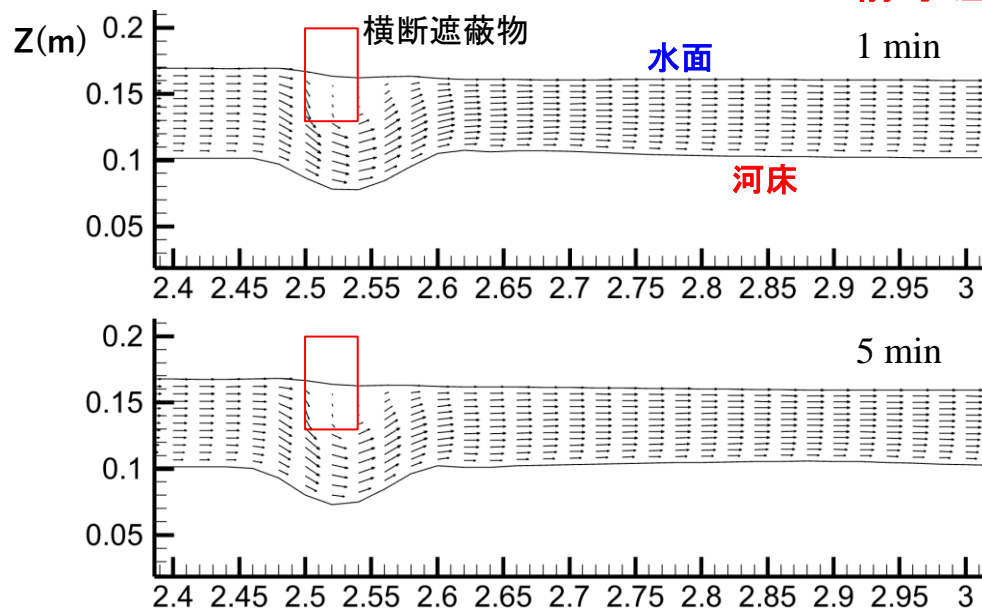
Case 1の結果 (下図) から . . .

横断遮蔽物の影響による鉛直下降流は計算されているが、最大洗掘位置が横断遮蔽物の直下となり、洗掘深も0.03m程度となり、実験の洗掘位置、洗掘深を再現できないことが判明した。

非静水圧分布を考慮できる簡易な解析モデルを構築して、いくつかのパターンで検証を実施

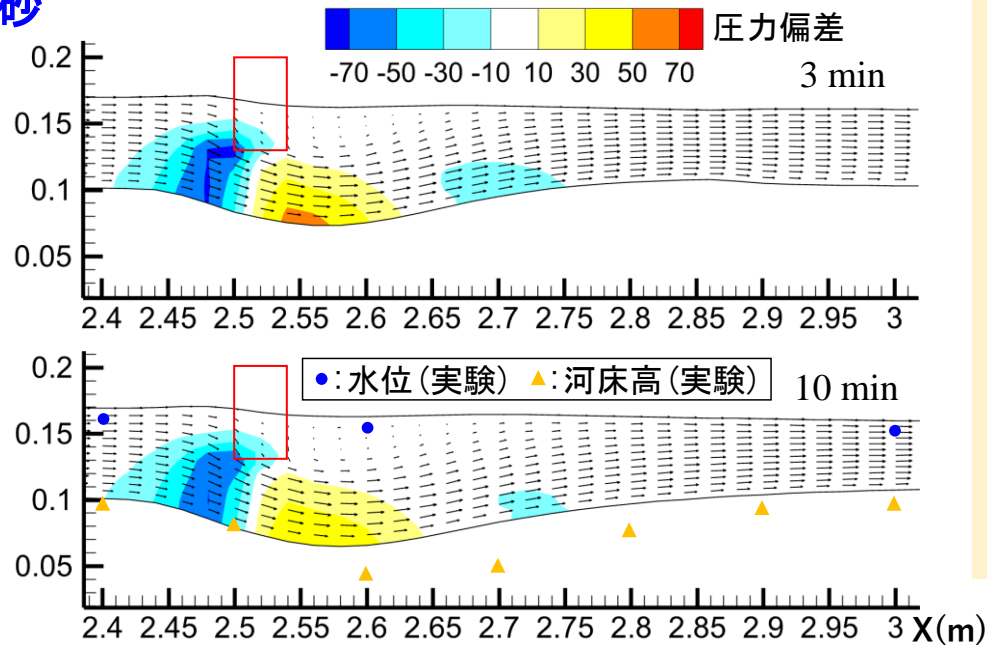
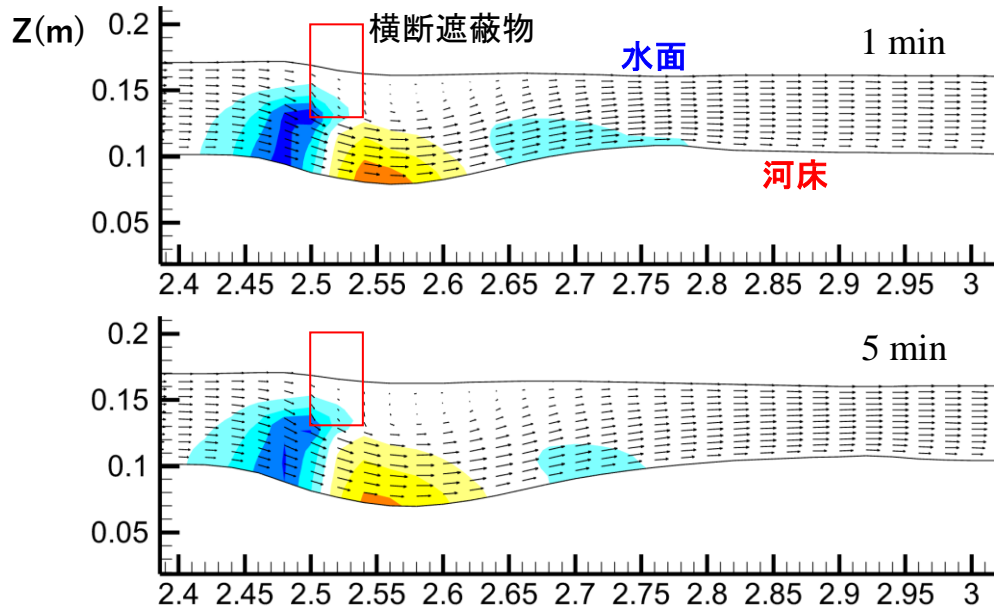
この検討結果から判断して、流砂の問題ではなく流れ解析に問題があると判断。

Case 1 : 静水圧近似 + 非平衡流砂



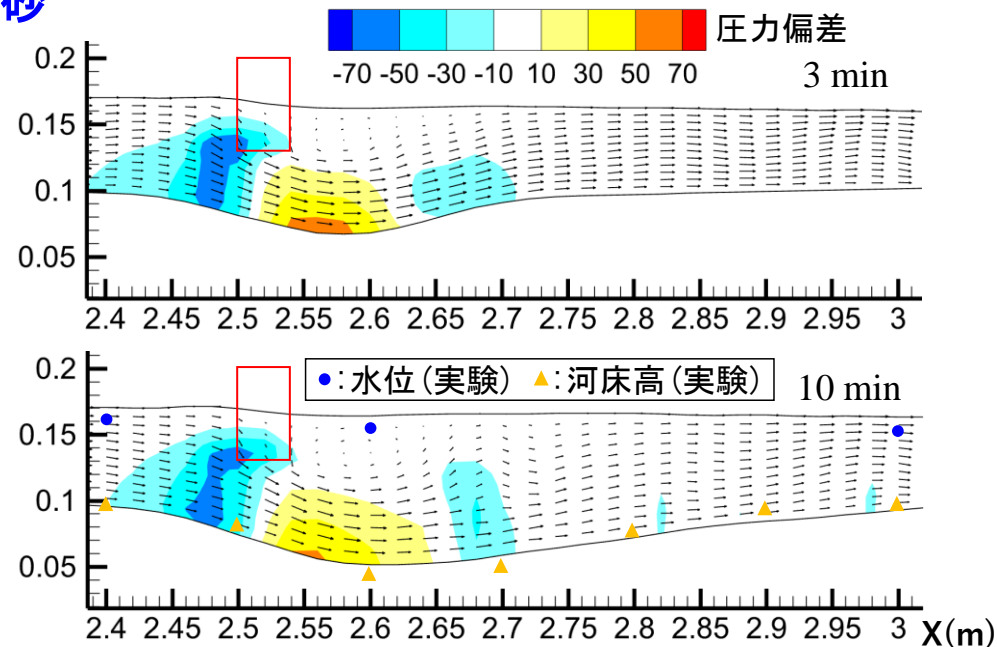
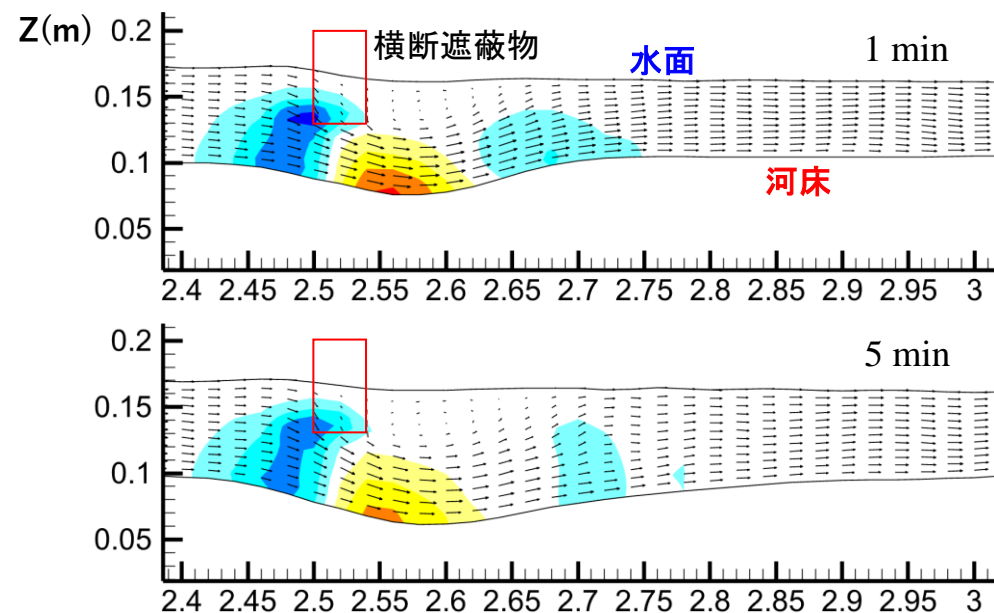
解析結果と実験結果との比較 (差分法の違い)

Case 2 : 非静水圧考慮 (風上差分) + 非平衡流砂



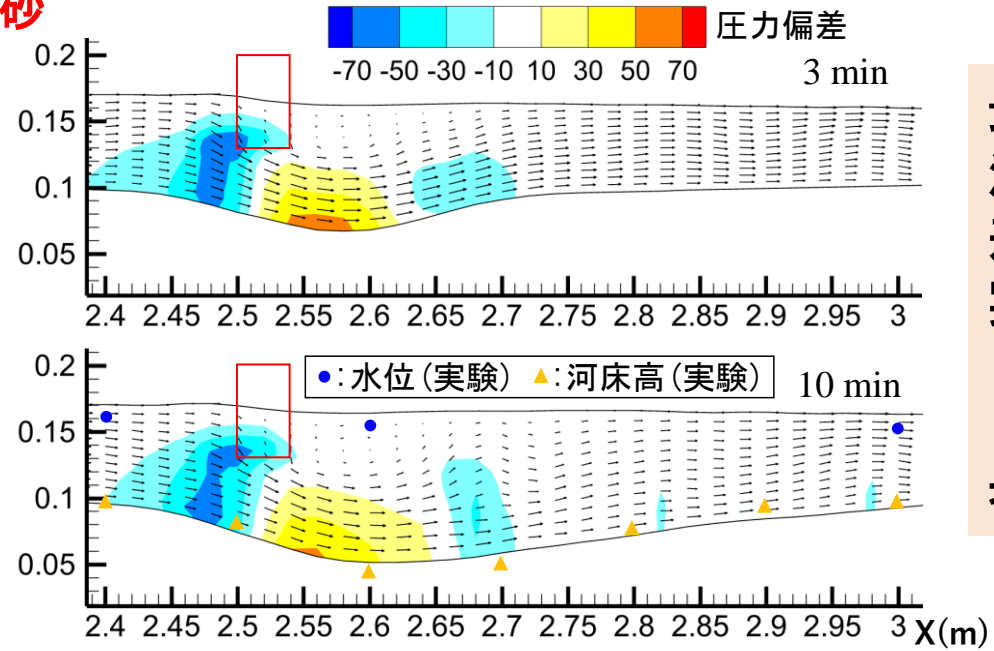
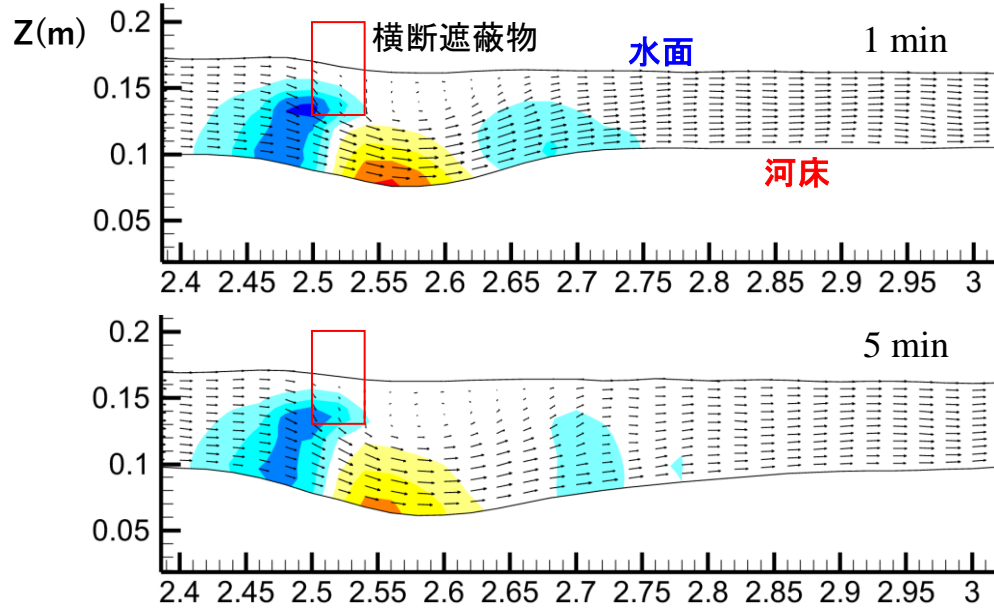
中心差分の方が、
実験値に対する再現性が高い。
1次風上差分を用いることで、
圧力分布の計算が鈍くなり、
その影響が洗堀深に現れた
と考えられる。

Case 3 : 非静水圧考慮 (中心差分) + 非平衡流砂



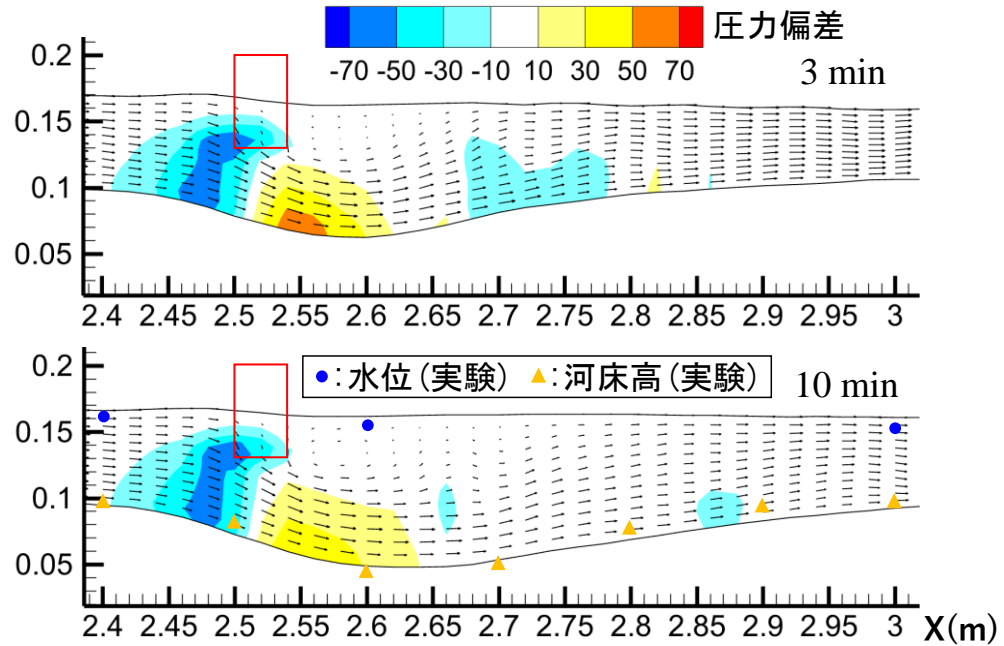
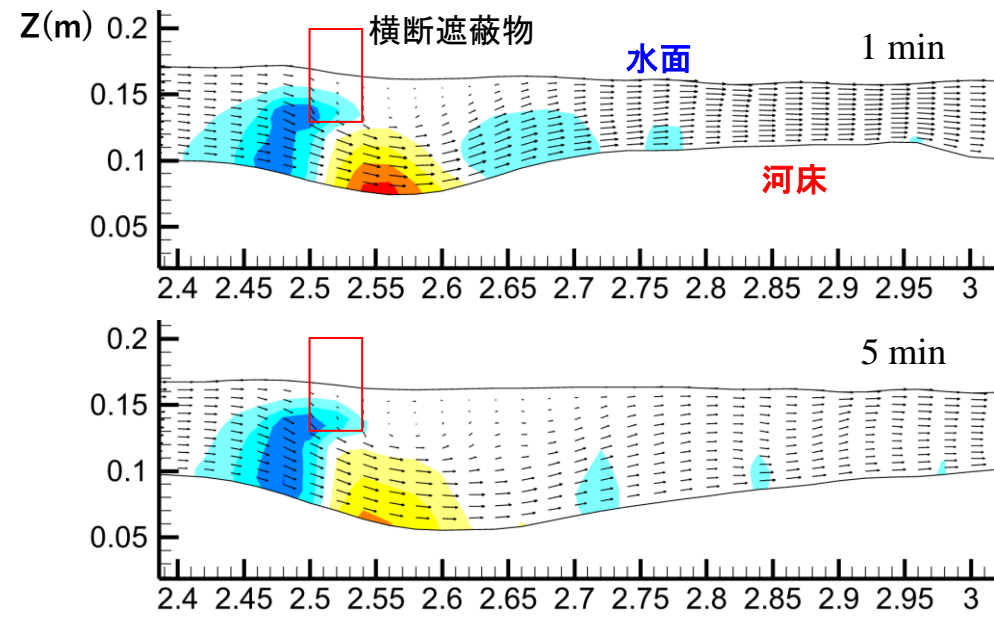
解析結果と実験結果との比較 (平衡・非平衡流砂の違い)

Case 3 : 非静水圧考慮 (中心差分) + 非平衡流砂



最大洗掘深, 最大洗掘位置に若干の差が見られるが, 実験の再現性について問題になるような差ではないと考えられる.

Case 4 : 非静水圧考慮 (中心差分) + 平衡流砂



結論と今後の課題

- ✓ 流木堆積などの横断遮蔽物により生じる河床洗掘現象に関する基礎実験を実施し，その現象を説明できる解析モデルに必要な要素について検討を行った。
- ✓ 流体解析および流砂解析について，実用性を考慮した非静水圧モデルと非平衡流砂モデルをそれぞれ提案し，それらを組み合わせた解析モデルにより河床洗掘現象の再現性が向上することを提示した。
- ✓ 今後，本研究で得られた知見をもとに，Schalkoの実験データの再現を試み，流木の流動を伴う場での河床洗掘現象に対して説明力を持つ解析モデルの構築を進める。その上で，将来的には現在構築を進めている河道＋氾濫原の流木・土砂移動を一体的に解析するモデルへの非静水圧モデルの組み込みを行い，実験および赤谷川などの災害事象への適用と性能検証を進め，一般河道へ適用可能な解析モデルの構築を進めたいと考えている。