

取水口堆砂軽減のための排砂促進手法 －三次元河床変動解析による合理的設計－

(論文著者：太田一行・山田浩司・竹中慶・坂本晶子)

電力中央研究所 気象・流体科学研究部門

主任研究員 太田一行

2024.8.27

第27回水工学オンライン連続講演会

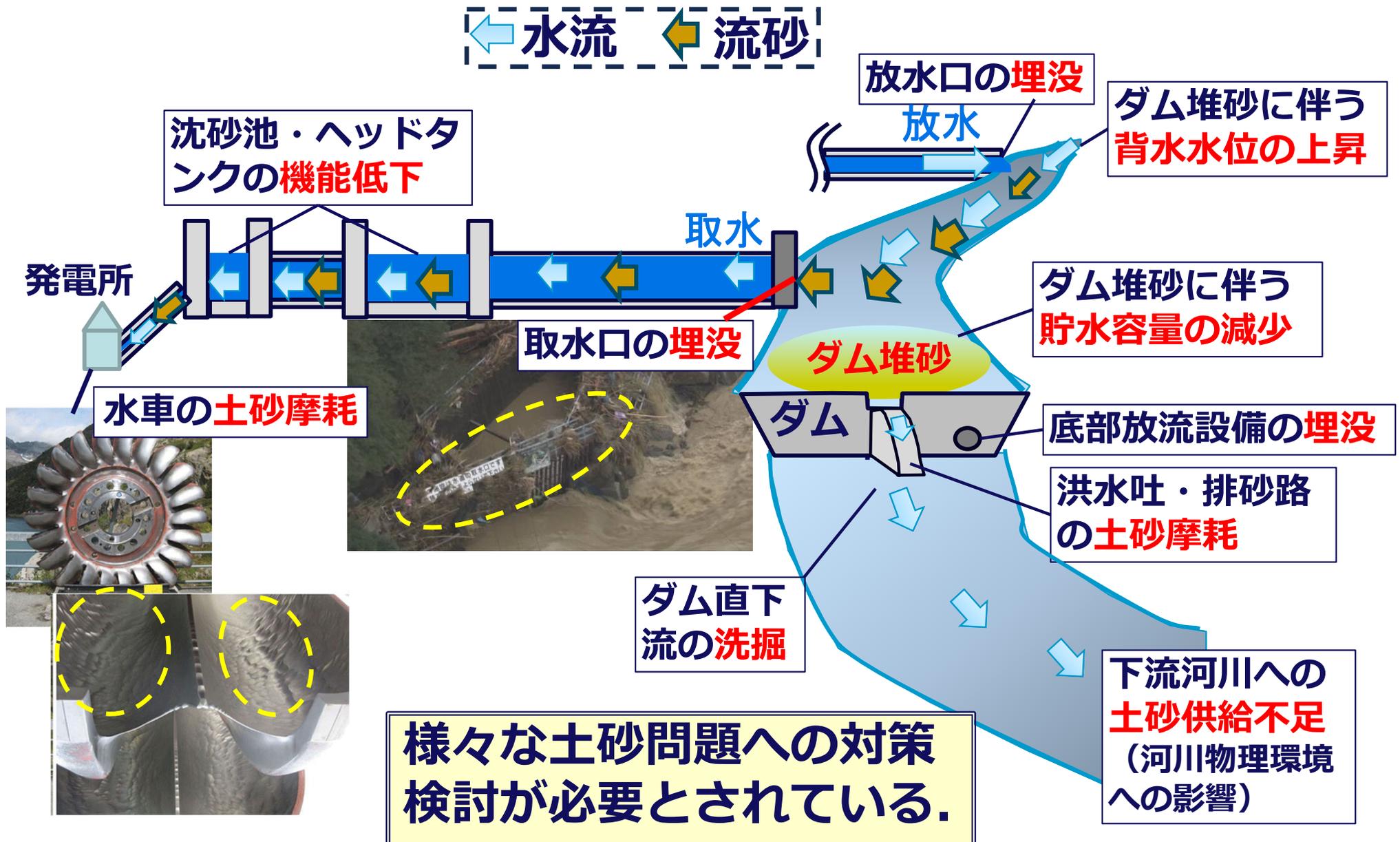
 電力中央研究所

本日の内容

1. 三次元河床変動解析の技術開発
2. 河川技術論文の内容
3. 堆砂対策に関する最近の研究

1. 三次元河床変動解析の技術開発

利水設備における土砂問題



堆砂対策の評価技術

堆砂対策の検討では、効果の評価が必要になる。

移動床模型実験 (Physical simulation)

利点

- 長年の実績
- 試行錯誤的な検討が比較的容易
- 様々な角度から観察でき、現象の理解が容易。



3次元河床変動解析 (Numerical simulation)

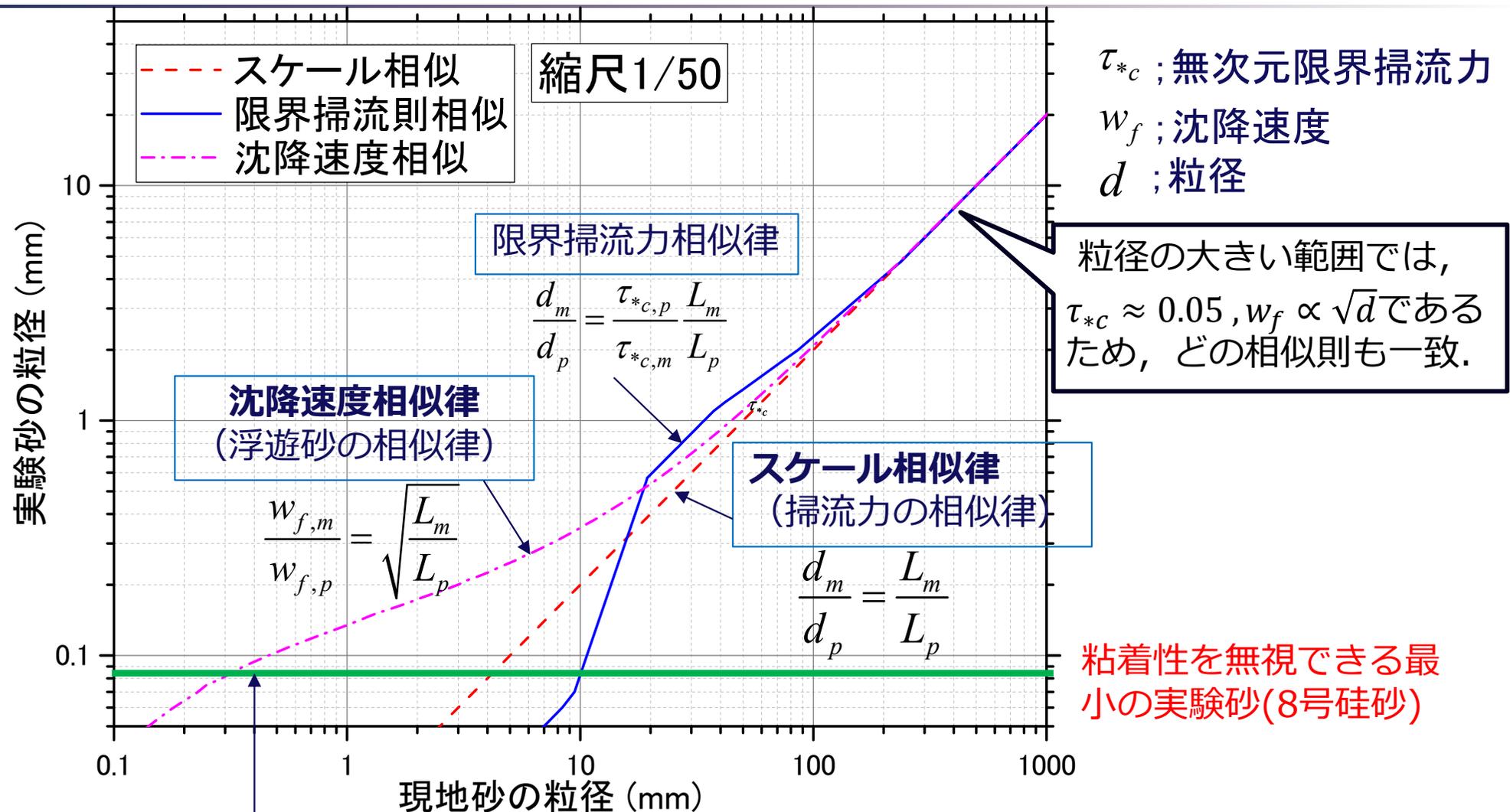
- 実スケールの現象を評価可能。
- データを残して置けば、時間が経った後でも検討可能 (⇒デジタルツインとしての利用)。
- 空間的なデータ取得や可視化が容易
- 複数のケースを同時に実行
- 実験に比べると低コスト。

欠点・課題

- 砂の相似律を考慮する必要 (⇒縮尺効果の発生)
- 模型を解体すると、検討できなくなる。
- 空間的な多点計測に時間を要す
- 実験に要するコスト。

- 流砂の解析精度には依然として改善の余地がある。
- 高解像度や広範囲の計算では計算時間を要す。
- 現象の理解しやすさの点では、実験に劣る。

移動床模型実験による相似則の制約



1/50縮尺では現地砂0.4mm以下は再現できない。

現地砂の粒径が細かくなると、相似則による差異が拡大し、表現できる流砂形態に制約が発生
⇒三次元河床変動解析ではこの制約を受けない。

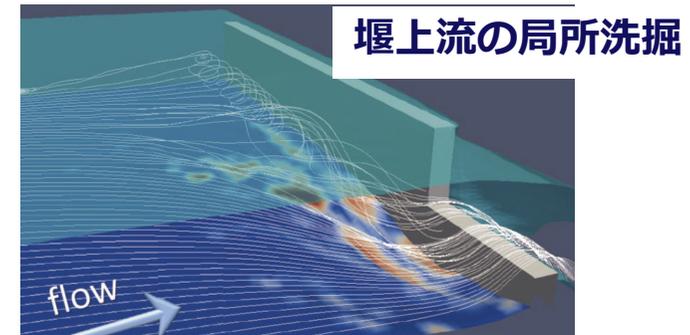
3次元河床変動解析の技術開発

研究開始時に影響を受けた準三次元解析,三次元解析の研究(時系列順) :

Wu et al. (JHE, 2000), Roulund et al. (JFM, 2005), Nagata et al. (JHE, 2005), 中村ら(海工,2009), 音田ら(水工,2009), 内田ら(土論,2011)

2014年:

- OpenFOAMと非平衡流砂解析をベースとした三次元河床変動解析技術の開発¹⁾



2016年~

- 貯水池や水路内施設の堆砂対策検討に実用化(一様粒径モデル)

現地への適用

2021年~

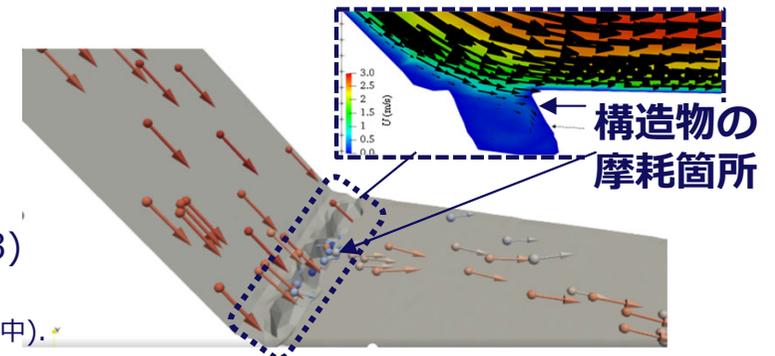
- 混合粒径での解析技術を構築し²⁾, 実用化.

改善点の抽出

モデル改良

2024年~

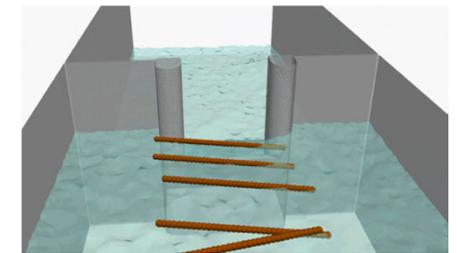
- 流砂解析や構造物表現手法の改良
- 構造物の土砂摩耗シミュレーション技術の開発³⁾



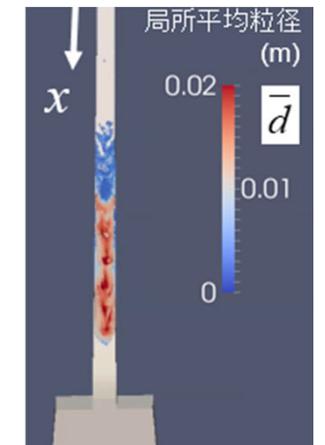
1) 太田・佐藤・中川,水工,2015, 2)太田・佐藤・新井,水工,2021, 3)小林・太田・佐藤, 水工, 2024(査読中).

OpenFOAMについて

- ◆ 数値流体解析の**オープンソース・ライブラリ**(言語はC++)
- ◆ 世界中の様々な分野の専門家・技術者がコミュニティを形成し、**継続的に高度化**している（年に2回、新バージョンをリリース）。
- ◆ ライブラリ(部品)を利用して、**独自のソルバ(プログラム全体)の開発が可能**。
- ◆ **3D CADデータ**を元にした**非構造格子の解析が可能**であり、複雑な形状の構造物や地形を取り込んだ解析が容易。
- ◆ 流体の圧縮性，乱流モデル，離散スキーム等を選択でき，**自由度が高い**。**MPI並列**により高速な解析が可能。
- ◆ 水工分野での検証例や実用例も豊富。
(以下，留意点)
- ◆ 実務的な利用でも**数値流体力学の基礎的な理解が必要**（離散スキームや乱流モデル等の選択のため）。
- ◆ 誤った境界条件を用いると，水理現象ではあり得ない結果になり得ることに留意。



流木の3D解析¹⁾



土石流の3D解析²⁾



オススメの書籍

河床変動解析の手法

◆流れの解析：

- **乱流**：RANSモデル($k - \omega$ SST SAS等) or LES
- **自由水面**：VOF法
- **河床の表現**：ポーラス法 or 移動格子法

◆流砂の解析：

- **掃流砂**：非平衡流砂解析（Lagrange型 or Euler型）
- **浮遊砂**：移流・拡散方程式
- **河床材料の交換**：交換層モデル or 確率論的Exner方程式

今後も継続的な改良を予定（特に流砂解析）

堰上流の流砂・洗掘の解析

ダムゲートが開いた状態を想定

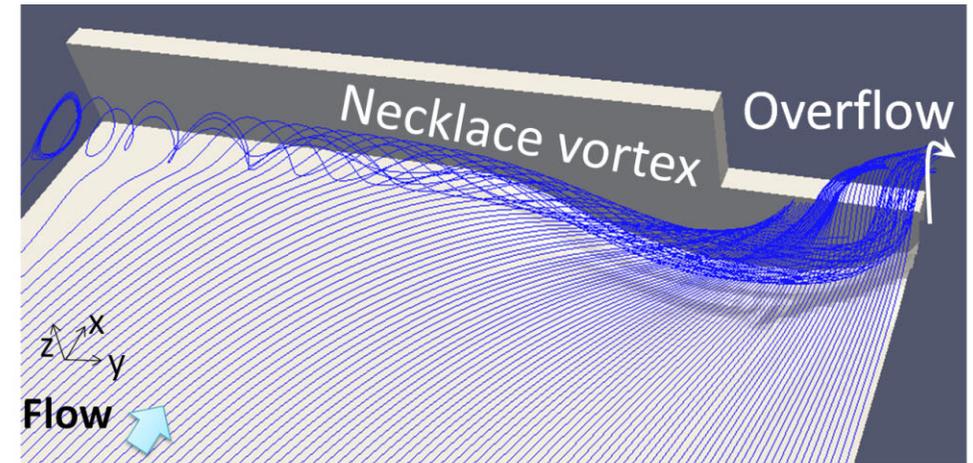


堰の開口部周辺では土砂が巻き上げられ、洗掘が発生する。

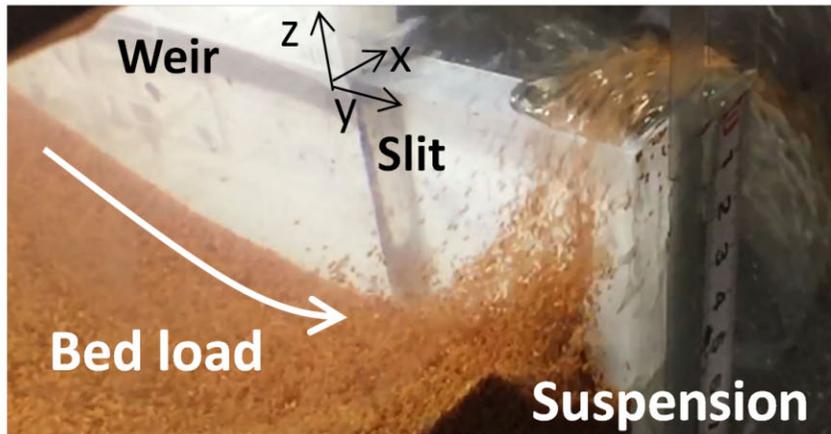
堰上流の流砂・洗掘の解析



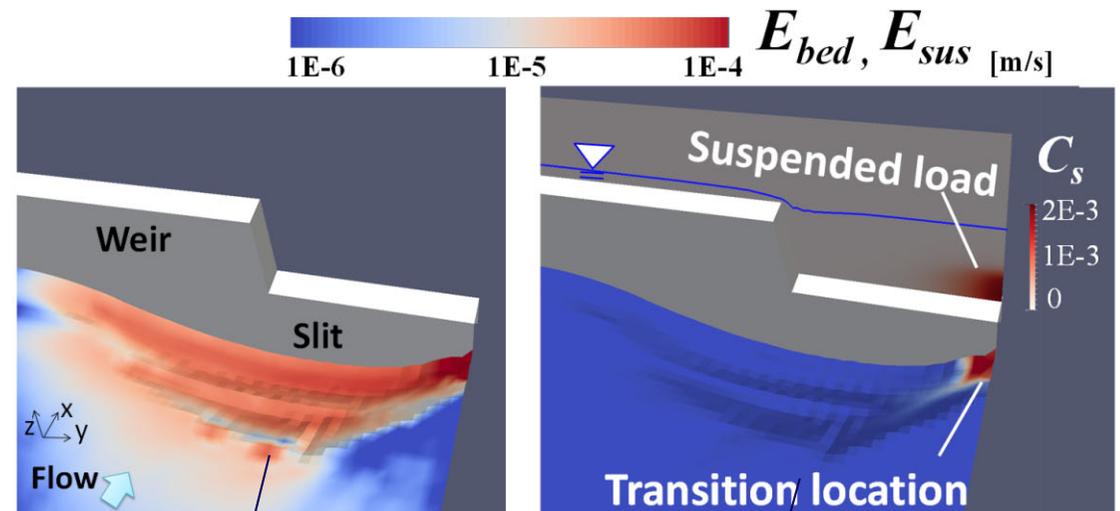
(a)



(c)



(b)



(d)

(e)

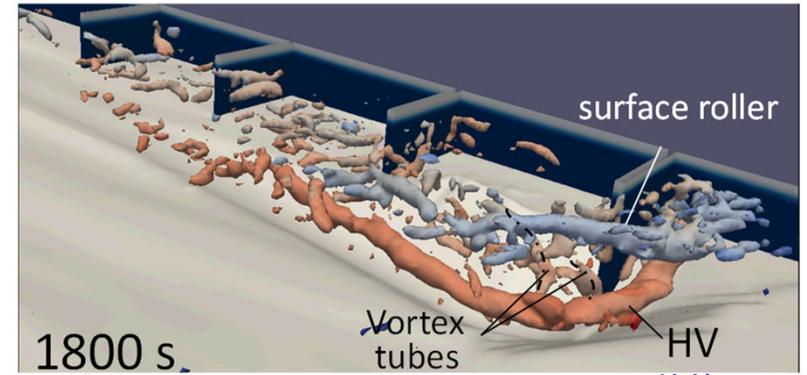
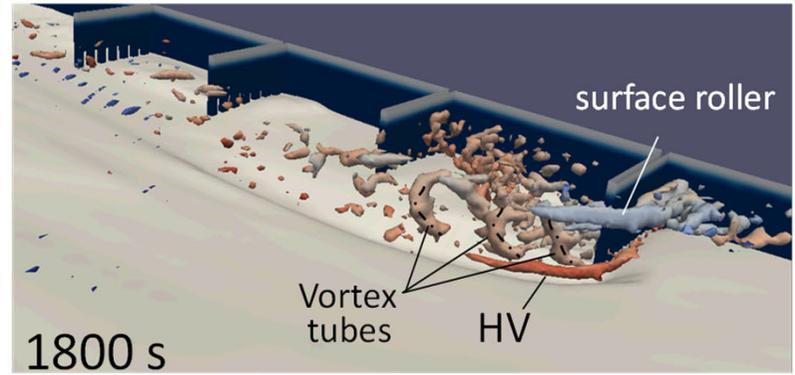
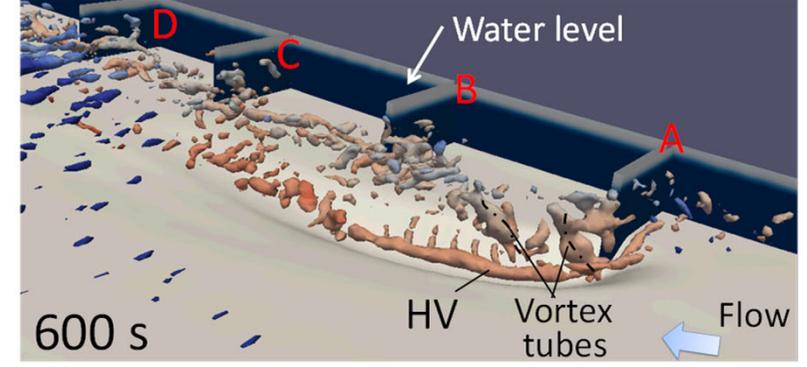
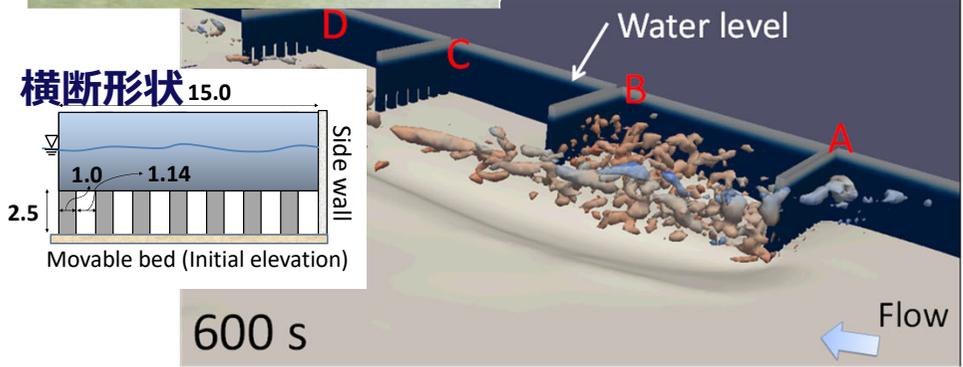
色: 掃流砂のPick-up rate[1/s]

色: 浮遊砂への遷移率[1/s]

ダムからの排砂の解析



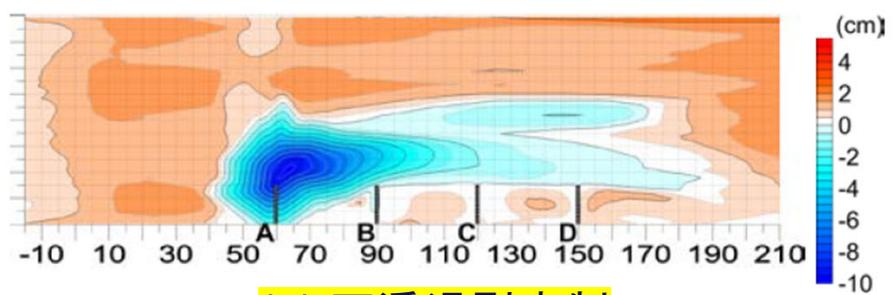
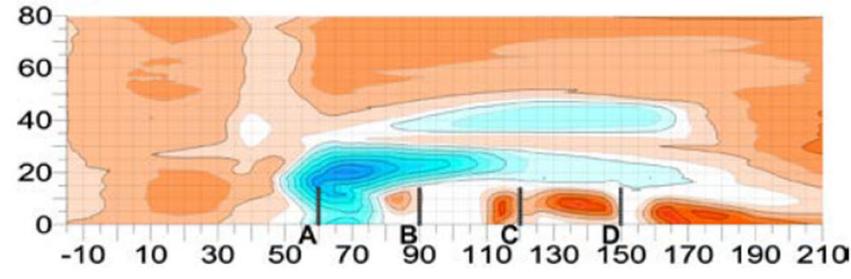
透過型構造物周辺の解析



(a) 透過型水制

(b) 不透過型水制

※等値面は渦構造を表し、色は浮遊砂濃度を示す。

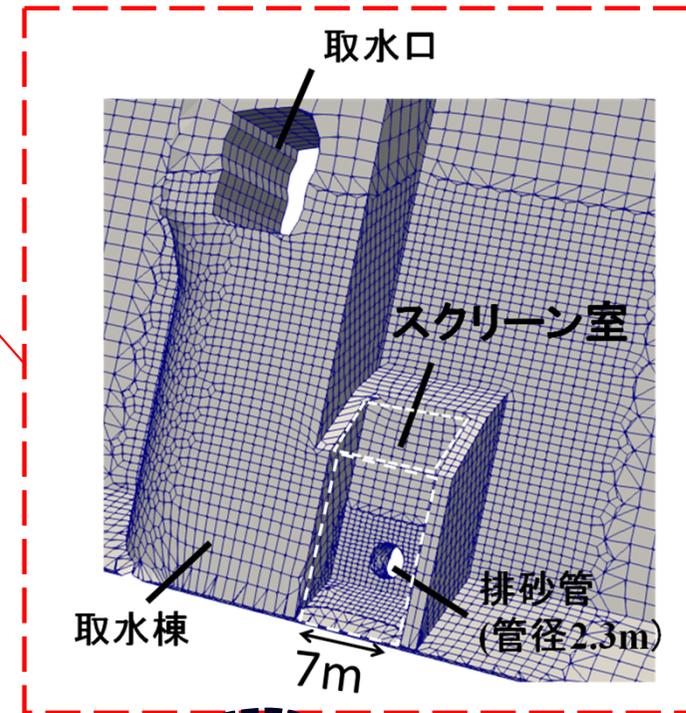
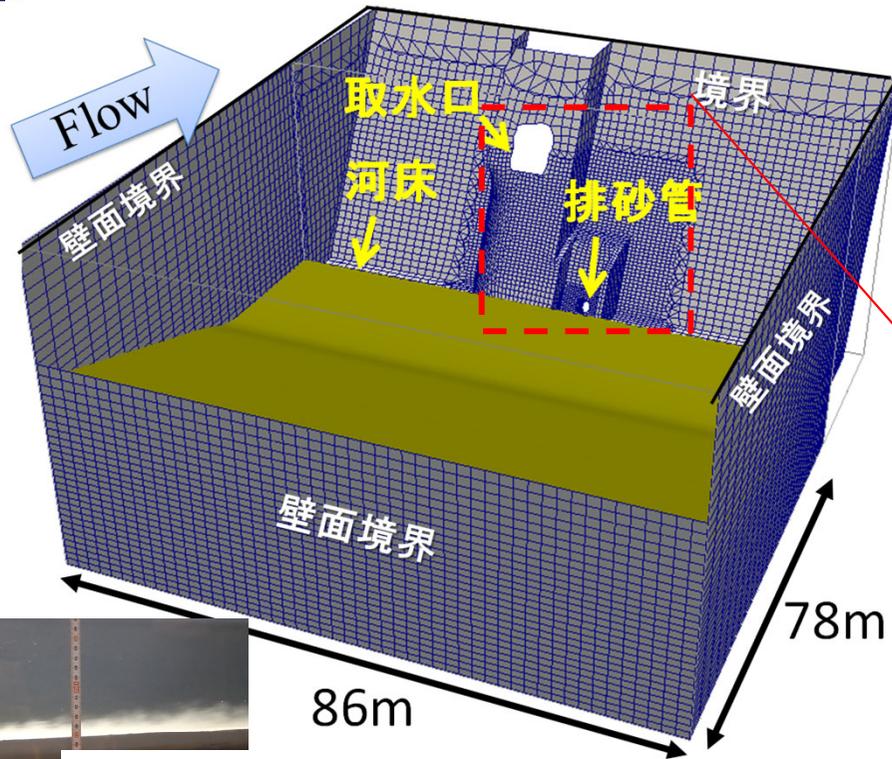


(a) 透過型水制

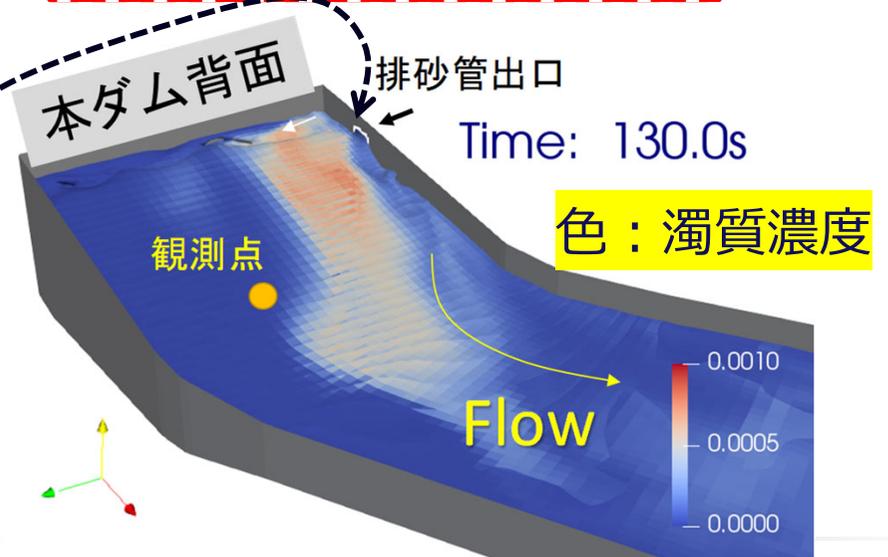
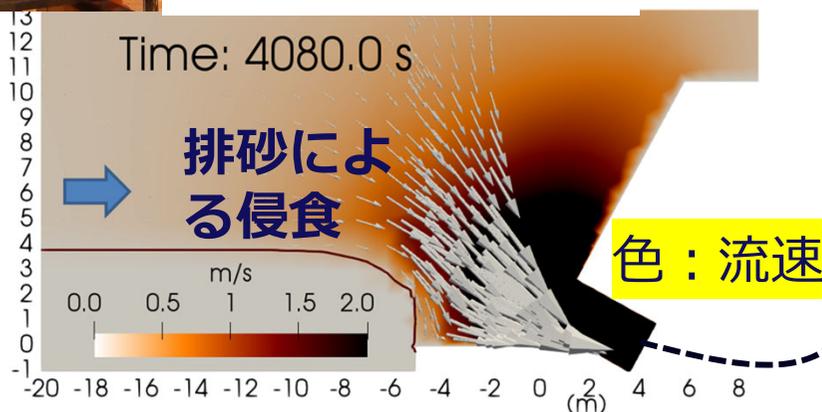
(b) 不透過型水制

河床変動量の結果
(暖色は堆積, 寒色は侵食)

底部放流設備の排砂量評価



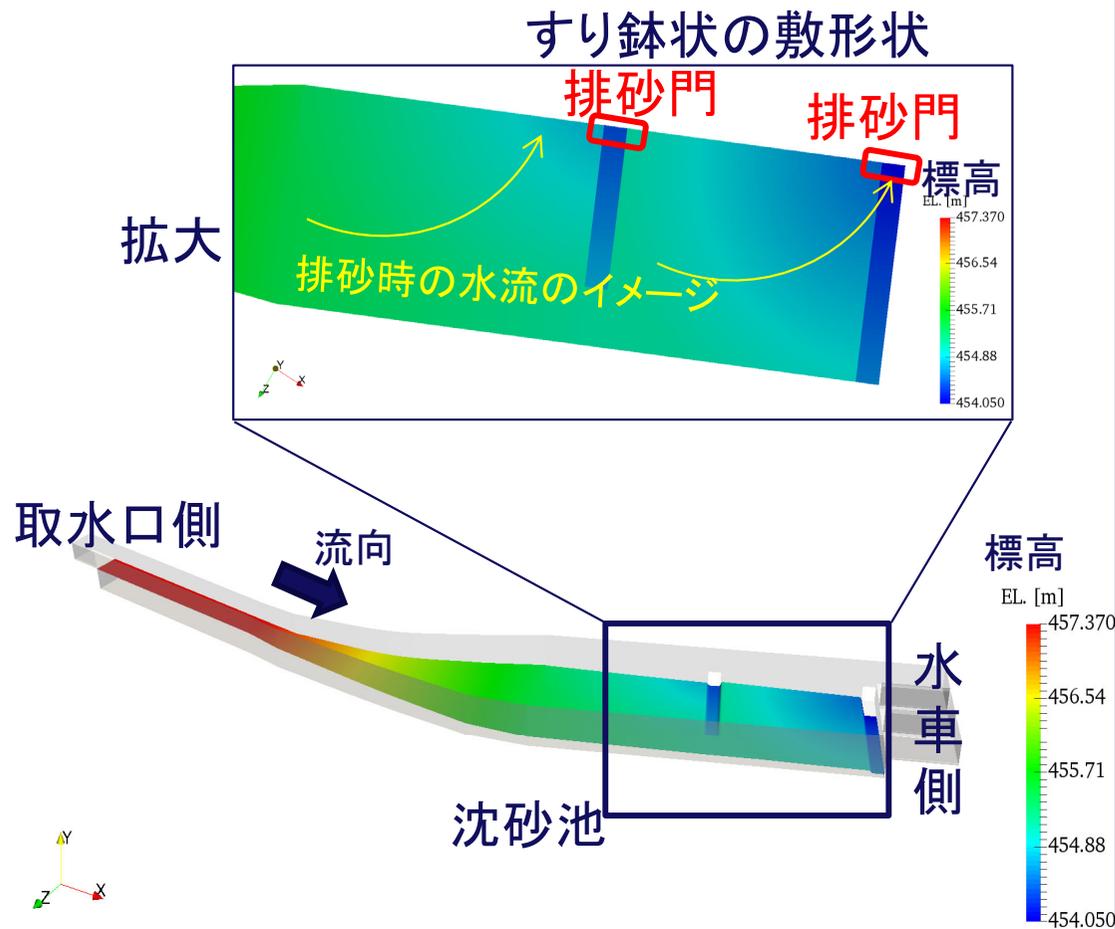
現地土砂を用いた実験で侵食速度をモデル化(中部電力)



水力発電の水路内の解析

■ 沈砂池の最適設計

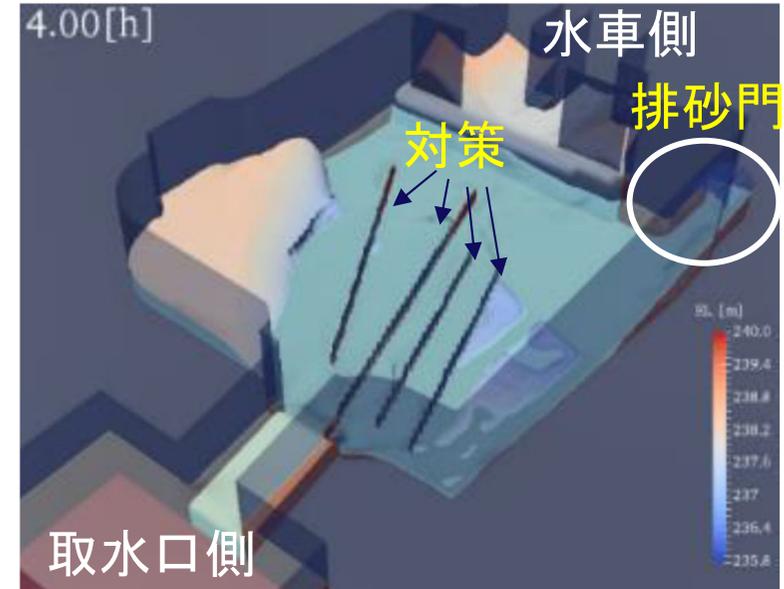
⇒沈砂池のサイズ・敷形状の最適化



中村ら(電力土木, 2022)

■ ヘッドタンクの排砂促進対策

⇒底部整流板の最適配置



↓ 現地試験による効果確認

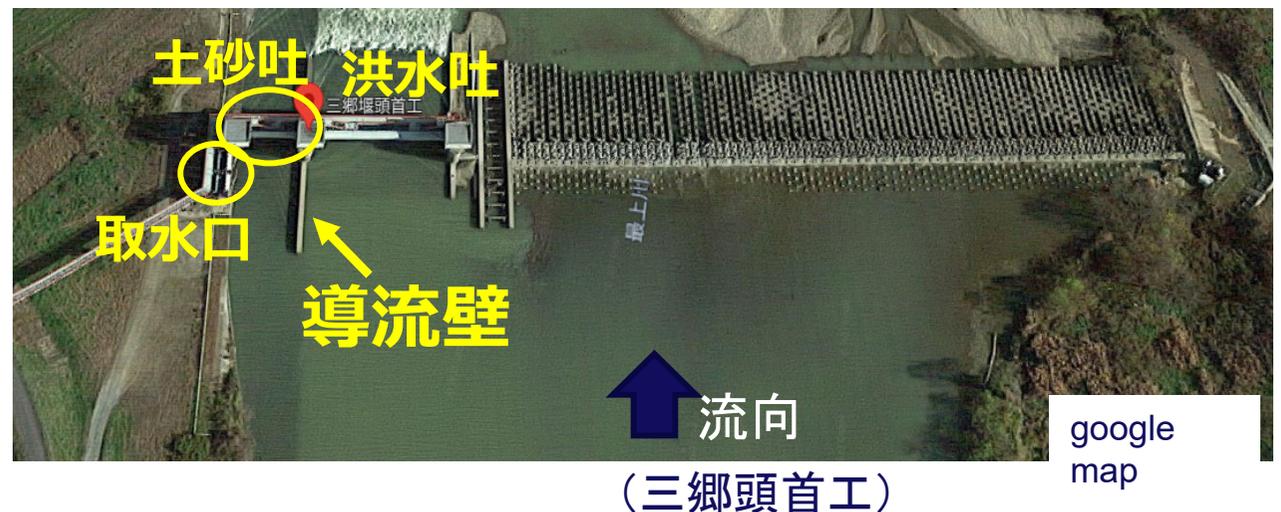
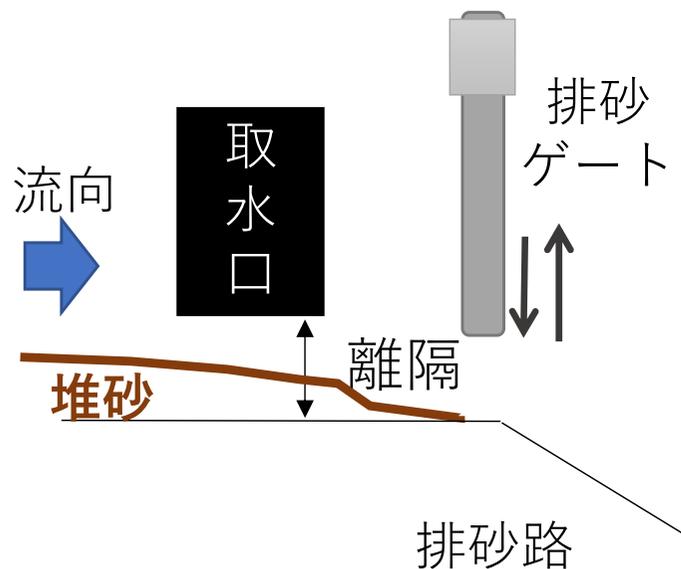


熊谷ら(電力土木, 2022)

令和5年度 河川技術論文
「取水口堆砂軽減のための排砂促進手法
－三次元河床変動解析による合理的設計－」

論文の背景・目的

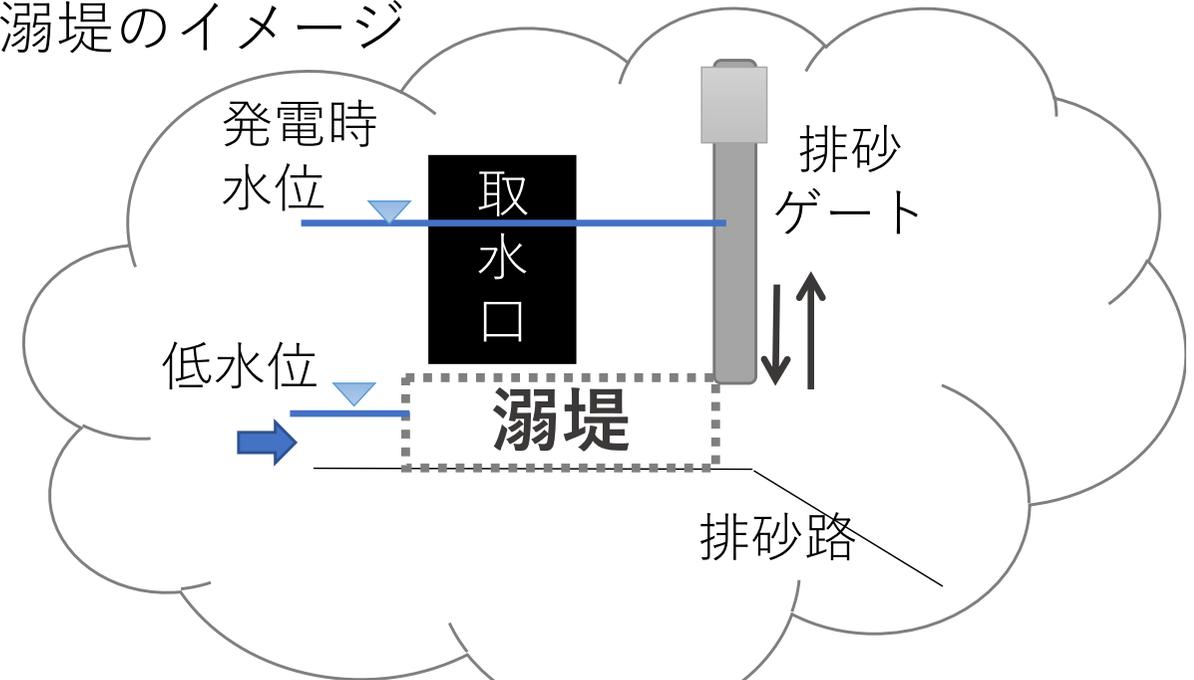
- 利水用取水口では、取水口への土砂の堆積・流入によって、スクリーン等の設備の埋没や水車摩耗などの障害が顕在化しており、**取水口周辺における堆砂対策が重要**になっている。
- 例えば水力用取水口の場合、ダム堰の排砂ゲート敷高から1 m以上の離隔を取って、取水口敷部を設けることが推奨されているが、排砂ゲートの効果に課題を持つ地点もある。
- 頭首工の場合、**土砂吐と洪水吐の間に導流壁**を設置し、取水口前の排砂路を射流で流す設計が用いられることがある。
- しかし、頭首工の既往事例では高い導流壁高を設定しており、取水時の通水障害の要因になり得ること、**構造設計および維持管理の面で不利になる場合も懸念**される。



論文の背景・目的

■ 溺堤のイメージ

- 導流壁に類似した合理的な設計案として、排砂が進みやすい**低水位**時にのみ効果をもたらす『溺堤』が考えられる。



- 排砂設備の水理設計の合理化を行う際には、移動床模型実験を通じて、意図した通りに取水口周辺の排砂が行われるかを確認するが、**混合砂の場合は相似則の縮尺効果**（特に、細粒分の影響）を受けるため**実験結果の評価・解釈が複雑**となる。
- 三次元河床変動解析による水理設計の事例を蓄積することも重要と考えられる。
- 本研究では、**新設するえん堤を対象に混合粒径三次元河床変動解析を用いて、取水口の土砂堆積の軽減を可能とする合理的な対策を検討**する。

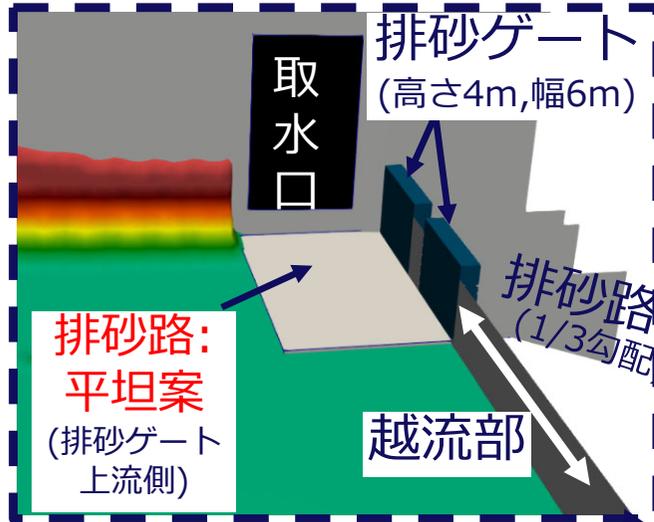
解析手法

流れ	RANS方程式 (OpenFOAMベース) <ul style="list-style-type: none"> • k-ω SSTモデル • 水面はVOF法で模擬 • 堆積土砂, 排砂路, 溺堤等はポアラス法で模擬
掃流砂	Lagrange型非平衡流砂モデル (混合粒径) <ul style="list-style-type: none"> • Pick-up rate • Step-length • 流砂の運動方程式
浮遊砂	移流拡散方程式 (混合粒径)
河床材料の交換	確率論的Exner方程式 (Parker)

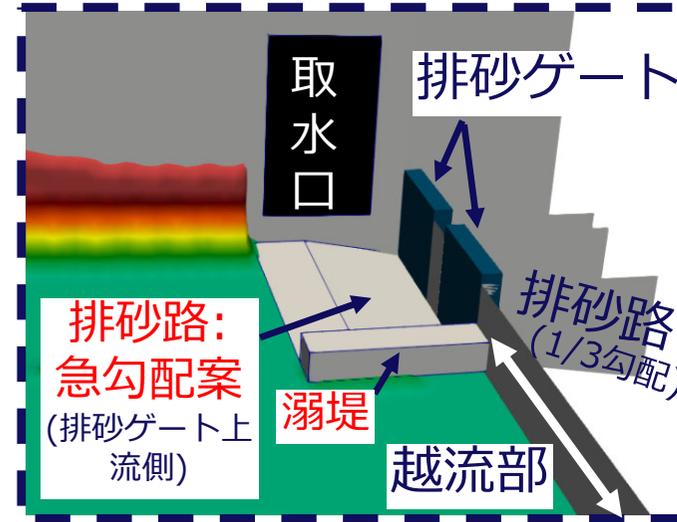
- 解析ソルバについて, 水理実験を対象とした解析¹⁾²⁾を通じて妥当性確認.
- 予備検討として, 解析対象の河川(堰無し)を対象とした1出水の再現解析を実施.

解析対象

■ ケース1(原案)の設計

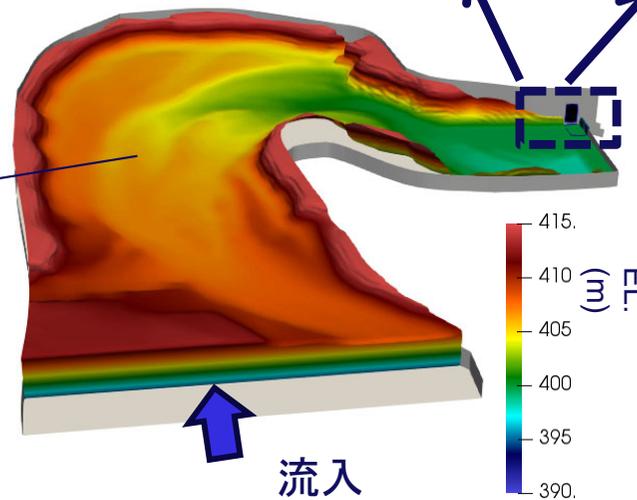
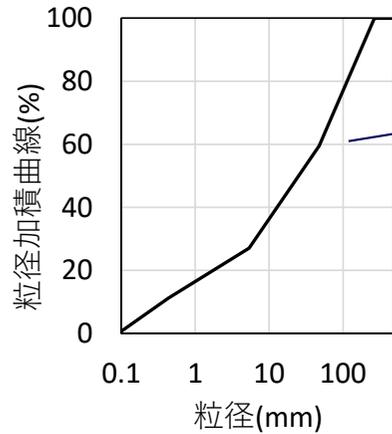


■ ケース4(最善案)の設計



※見やすさのため
ピアは非表示

■ 初期河床の粒度分布

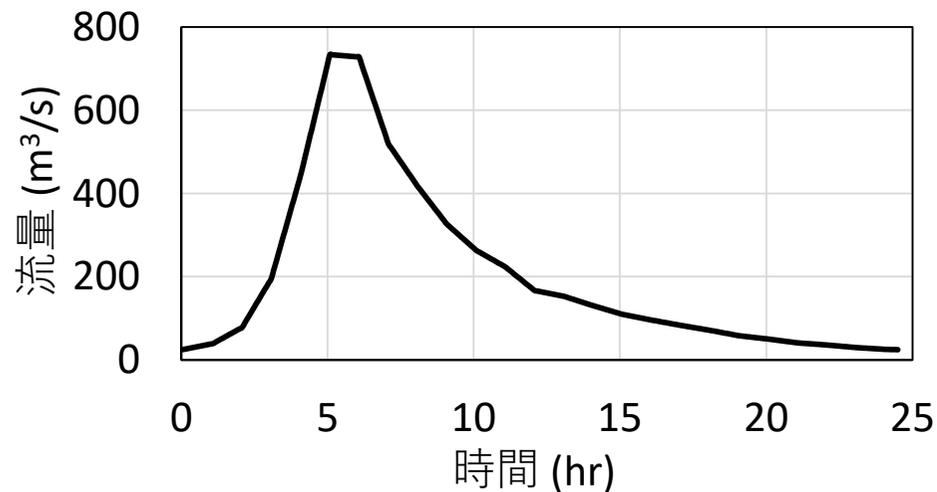


■ 解析ケース一覧

ケース番号	溺堤の有無	取水口前面の排砂路
ケース1 (原案)	無し	平坦案
ケース2	有り	平坦案
ケース3	無し	急勾配案
ケース4 (最善案)	有り	急勾配案

流入境界条件

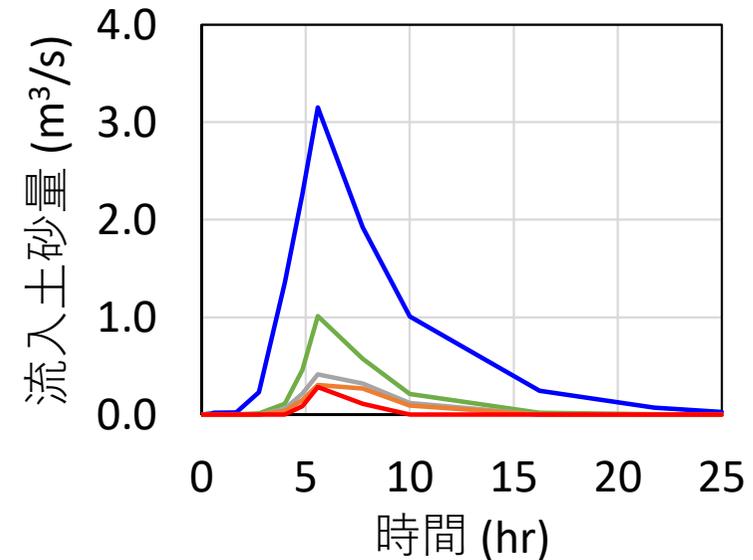
■ 流入流量



大規模洪水（50年確率流量相当）を対象

■ 流入土砂量

- 0.1mm
- 15.5mm
- 477.5mm
- 1.9mm
- 146.7mm



流入土砂量は山地から河口までを対象とした既往の一次元河床変動解析により算出。
（総合土砂管理計画の利用）

流出境界条件

□ 排砂ゲート放流条件は、常に全開 (※) とし、以下とする。

➤ オリフィス時： $Q = C_p a B \sqrt{2gH}$

➤ 自由越流時： $Q = C_{cr} B H^{1.5}$ (支配断面として限界流の条件を与える)

with H :排砂ゲート直上流水位(底部戸当り標高基準), a :
ゲート開度, B :ゲート幅, $C_p=0.6$, $C_{cr}=1.70$

※大規模洪水を対象とするため、排砂ゲートが全開であっても大流量時にはオリフィスとなる。

□ 越流部の放流条件(自由越流)は以下とする。

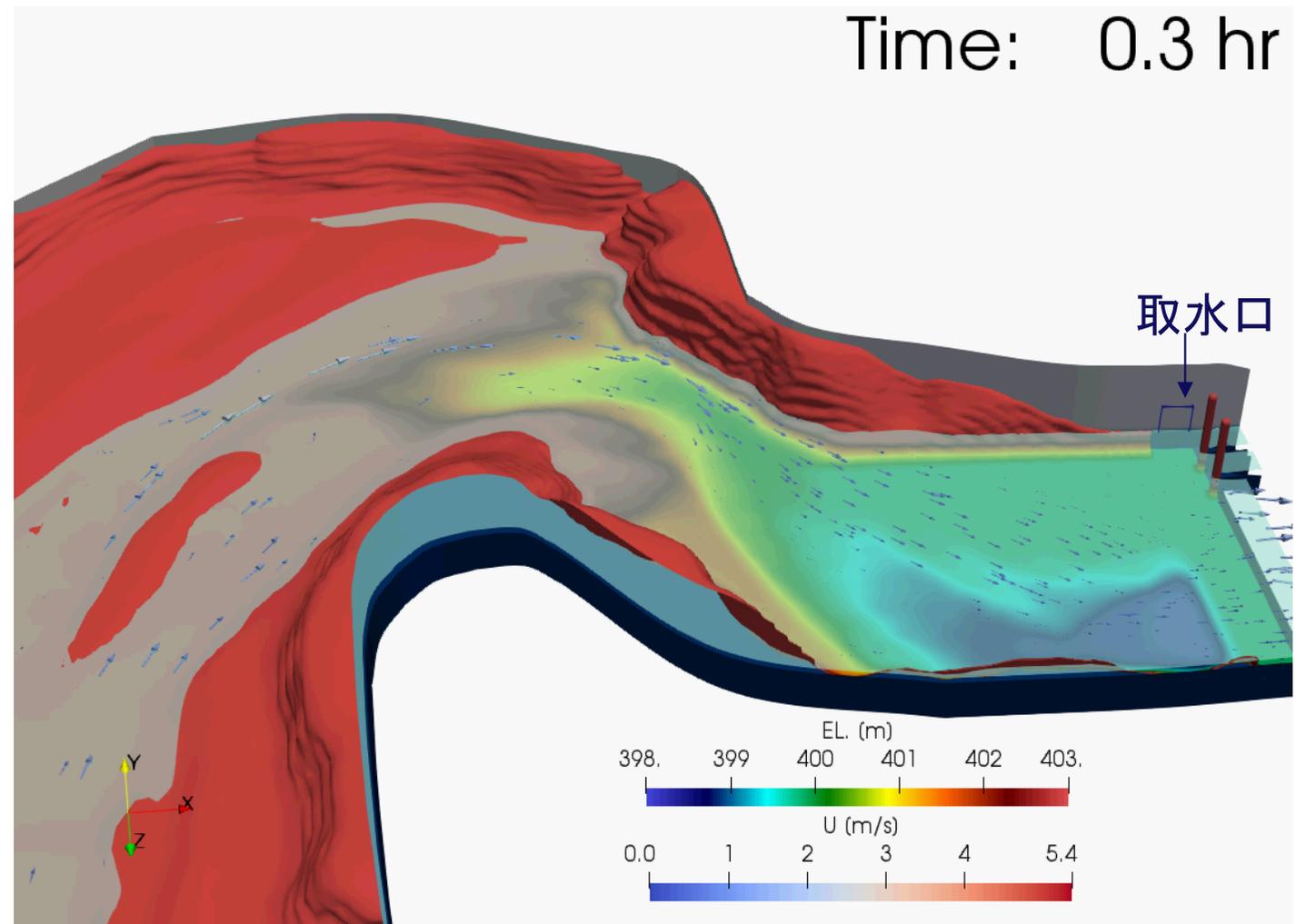
➤ $Q = C_f B H^{1.5}$

with H :洪水吐き直上流水位(越流天端基準), B :越流幅(48m), $C_p=0.6$, $C_f=2.00$

H は越流部および排砂ゲート直上流の解析水位を参照する。

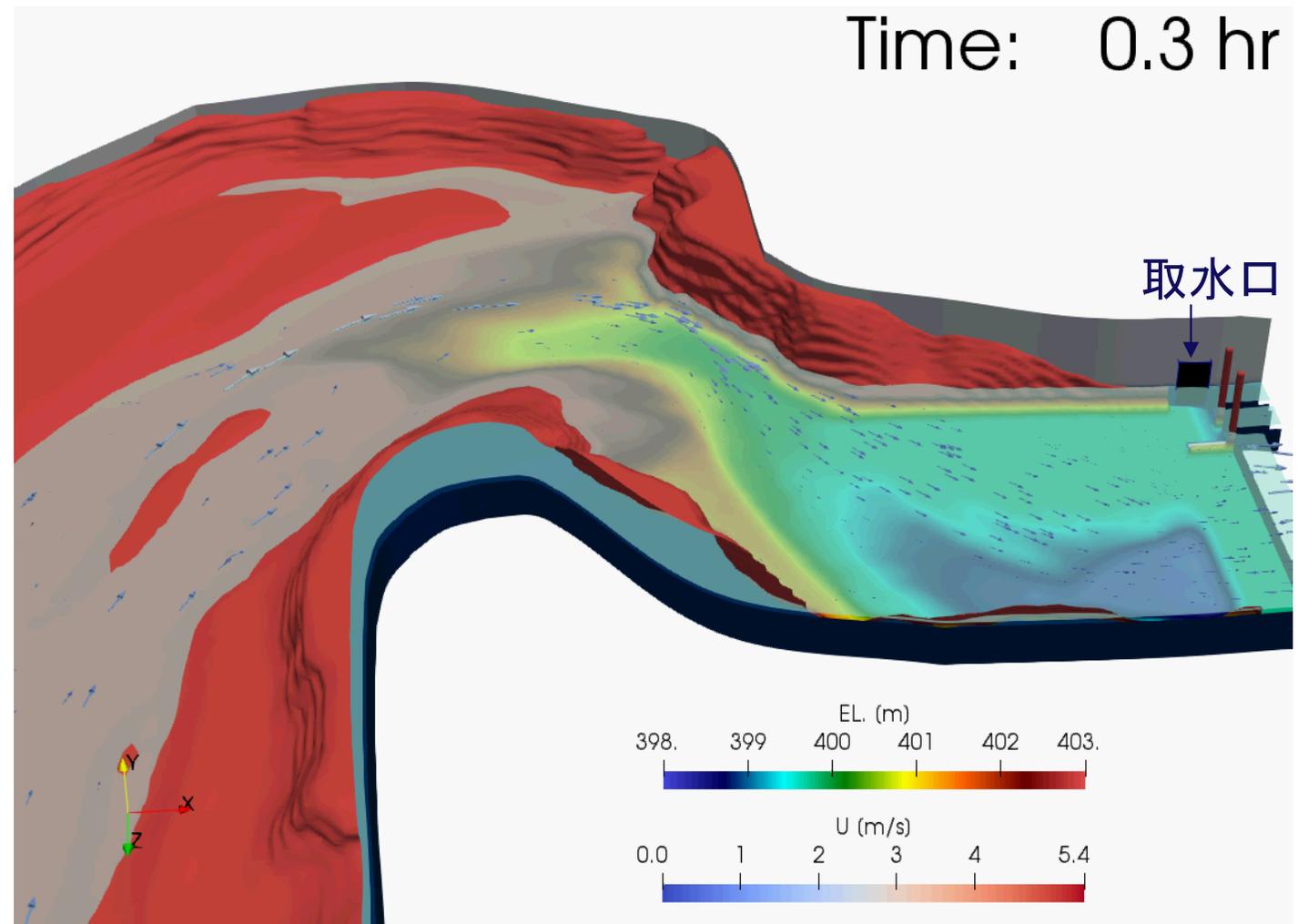
解析の動画 ケース 1 (原案)

初期水位: 発電時水位
 ピーク流量の時刻: 5hr

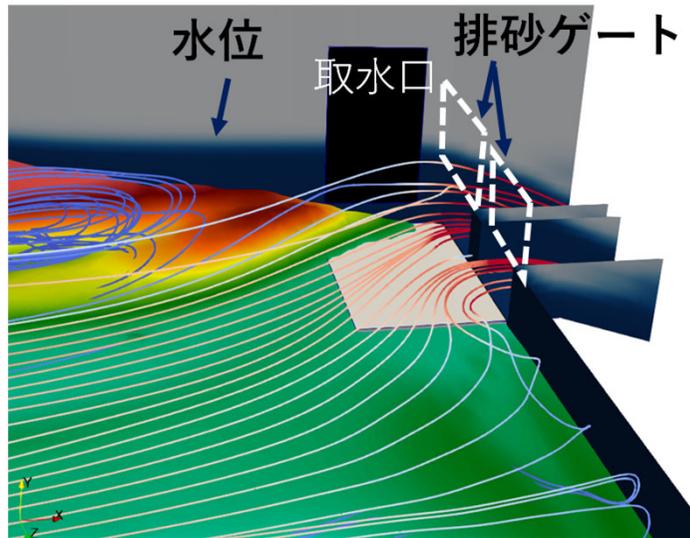
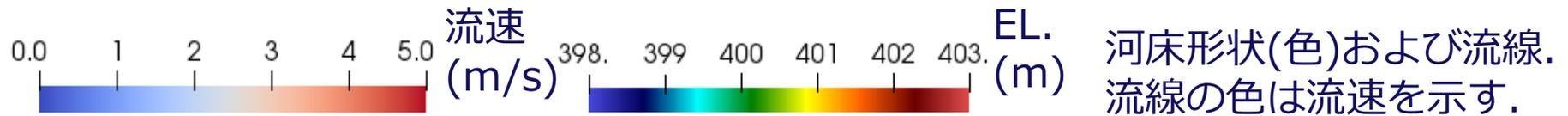


解析の動画 ケース4 (最善案)

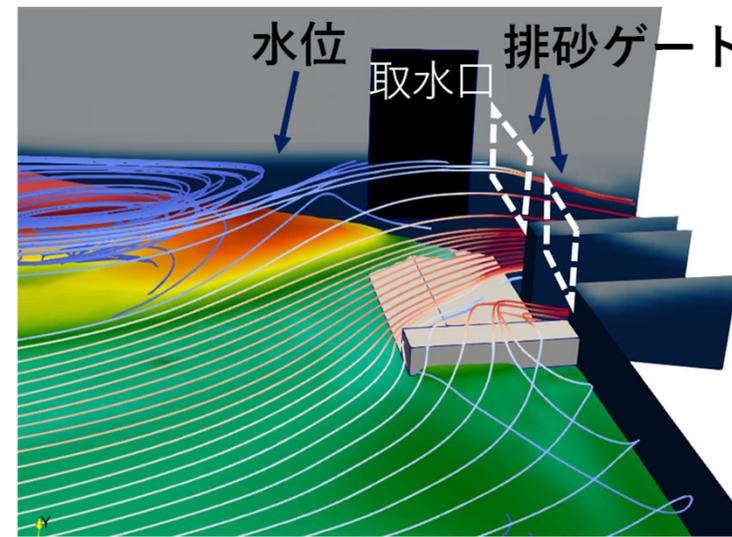
初期水位: 発電時水位
 ピーク流量の時刻: 5hr



ピーク流量時の河床と流れ



ケース1 (原案)

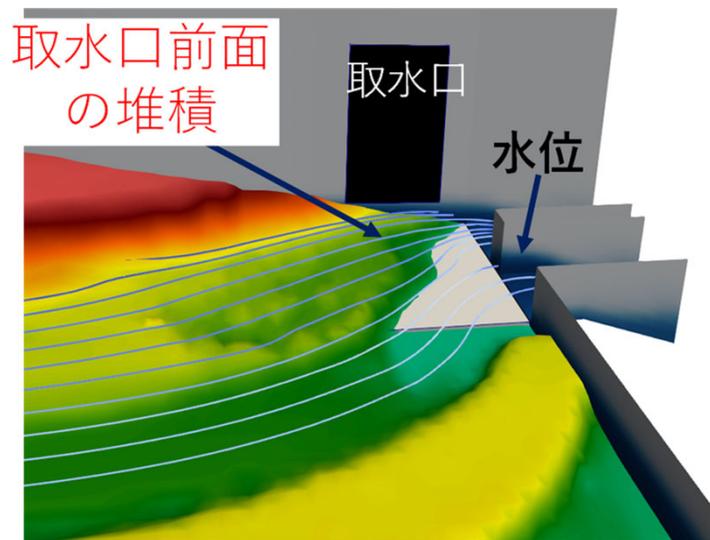
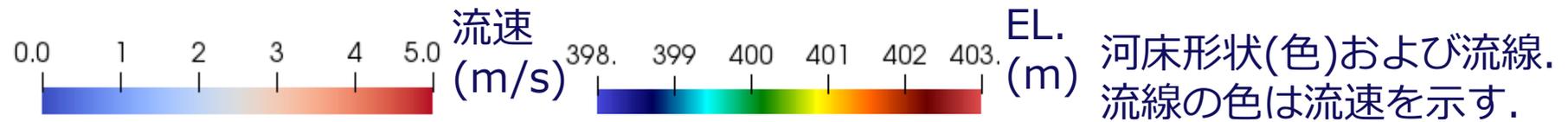


ケース4 (最善案)

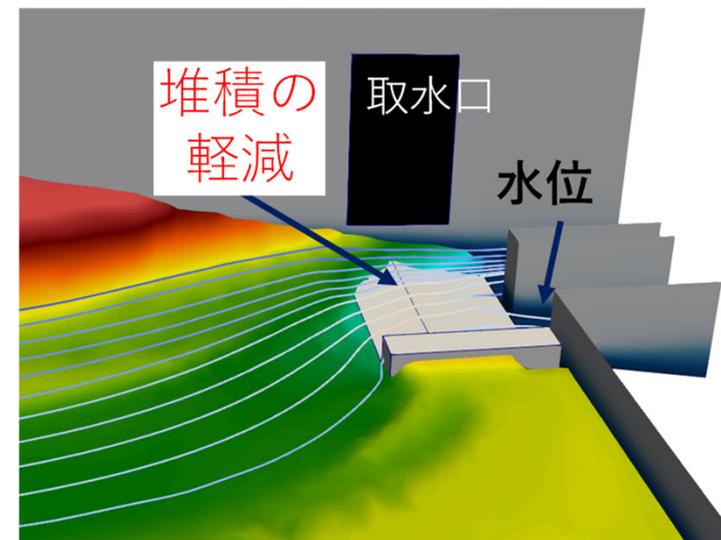
※見やすさのため
ピアは非表示

ピーク流量時は水位が高いため、溺堤のある場合でも流れは溺堤天端の上を通過し、溺堤の効果は現れていない

最終時刻（減水末期）の河床と流れ



ケース1（原案）



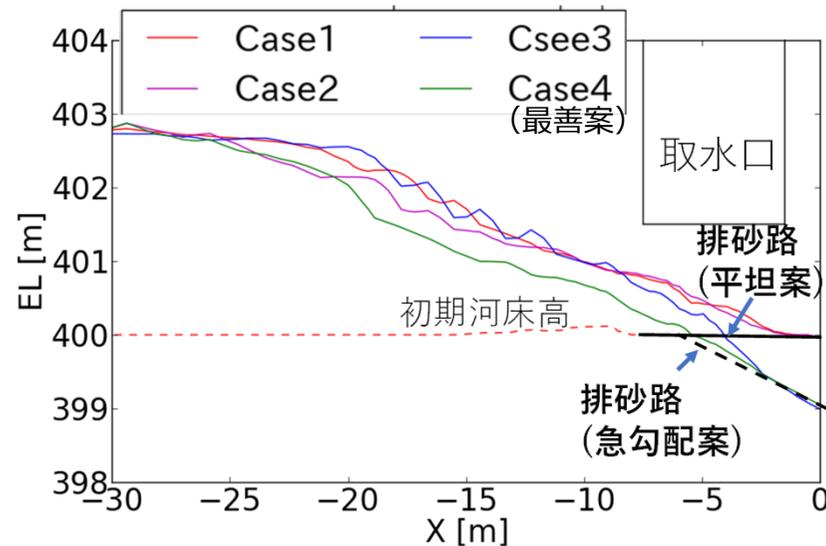
ケース4（最善案）

※見やすさのため
ピアは非表示

ケース4では、溺堤の上流端から排砂路に流入している。洪水末期では排砂路内は射流となり、取水口の周辺でも高流速が生じるため、ケース1に比べて取水口周辺に残存する土砂が少ない

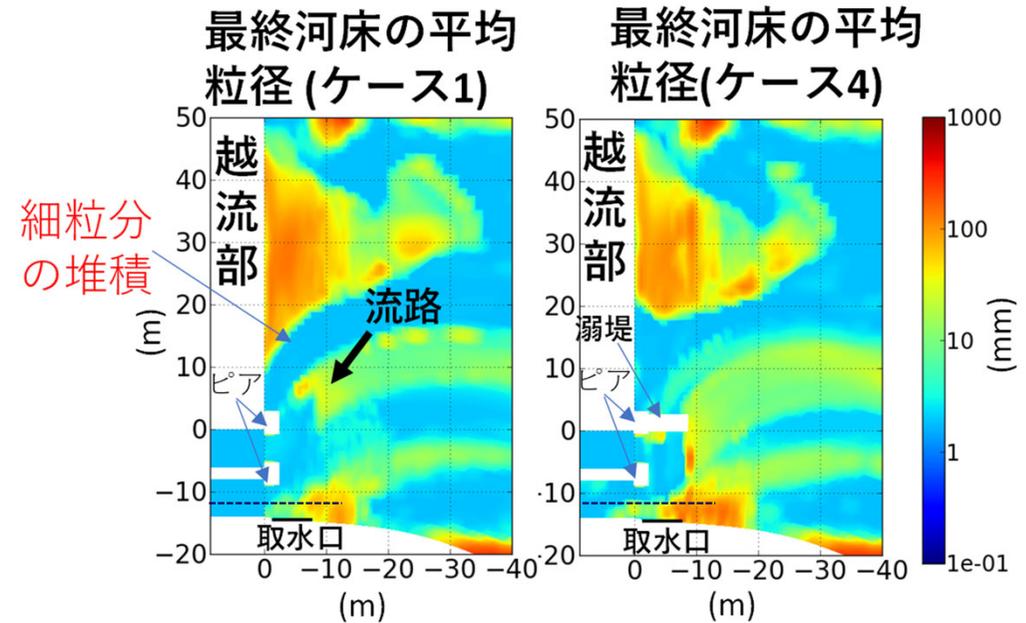
ケース間の比較

■ 縦断河床位 (排砂路の縦断)



- ケース4では取水口敷高まで1 m以上の離隔(設計上の目安)を確保でき、取水口土砂流入のリスクを低減している。

■ 平均粒径の比較



- 縮尺模型実験では表現・評価の難しい細粒分の挙動も含めた評価。

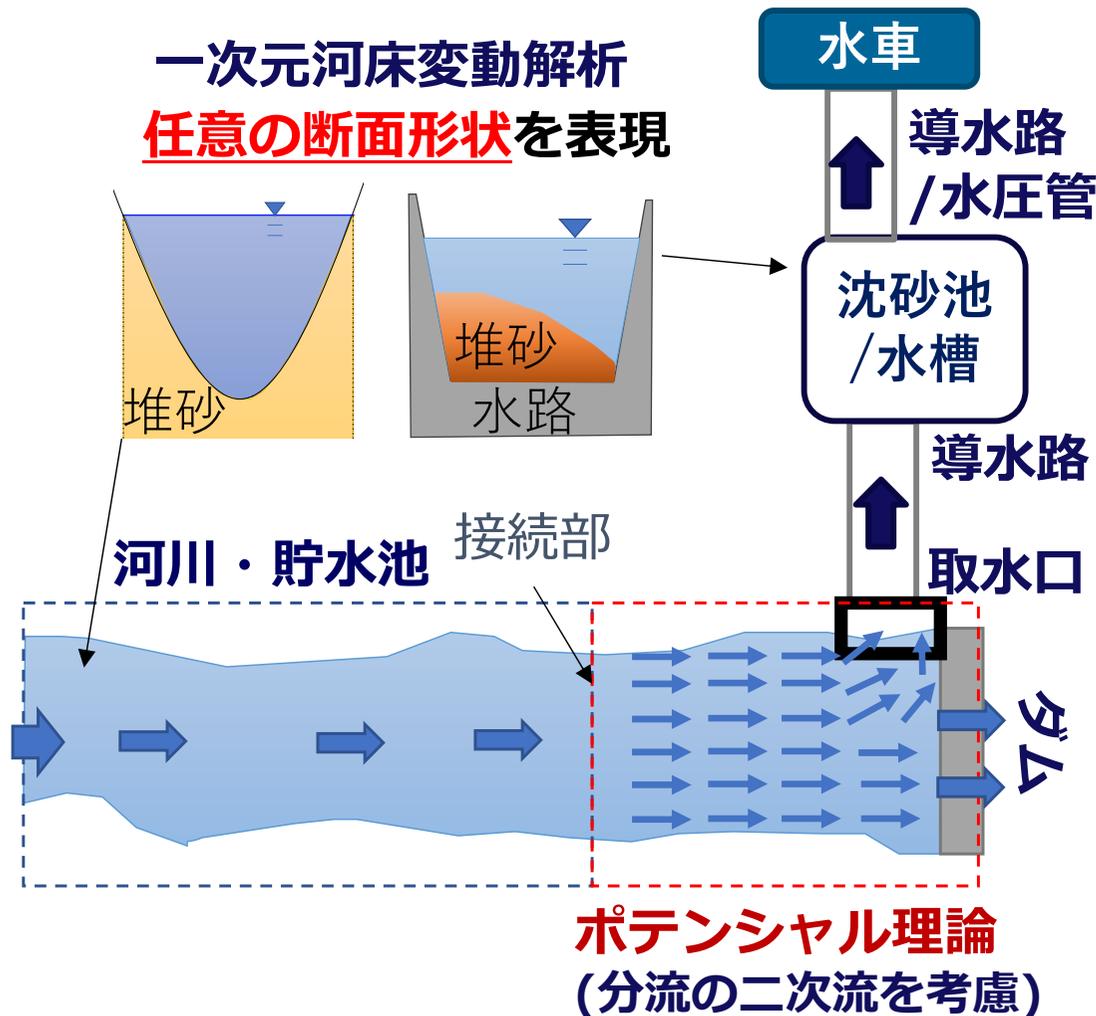
論文のまとめ

- ◆ 排砂路とえん堤の間に溺堤を設置し，射流となる排砂路勾配を取水口前面に設定することで，洪水末期において取水口周辺の堆砂軽減が可能となり，取水口埋没および取水口土砂流入のリスクを低減することが数値解析で示された。
- ◆ 頭首工の土砂吐で実用されてきた導流壁に対して，溺堤は構造規模がコンパクトであり，取水時の損失への影響を回避できる点に特徴がある。ただし，本研究は一度の出水のみを解析対象としており，現地の堆砂状況も踏まえて排砂操作の継続時間などを検討することも必要と思われる。
- ◆ 移動床模型実験の代替として混合粒径三次元河床変動解析を使用し，ダム堰の堆砂・排砂の評価に際して流砂の相似則の制約を回避した研究事例を蓄積した。

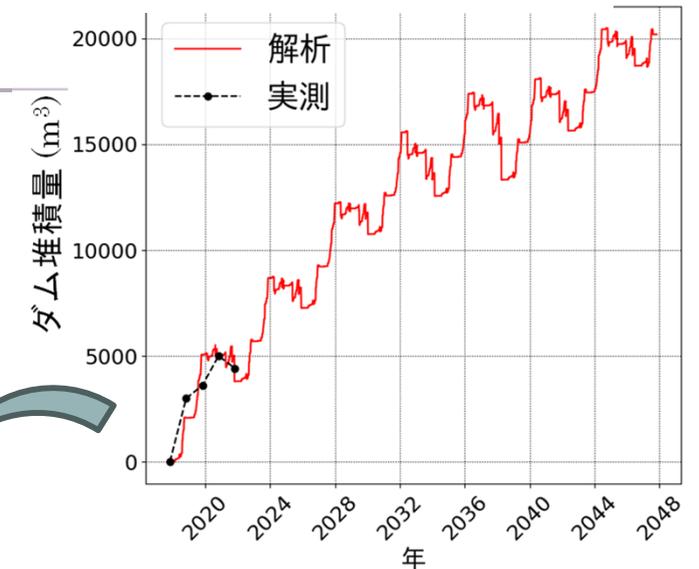
3.堆砂対策に関する最近の研究

1. 河川・取水施設の一体的な流砂解析

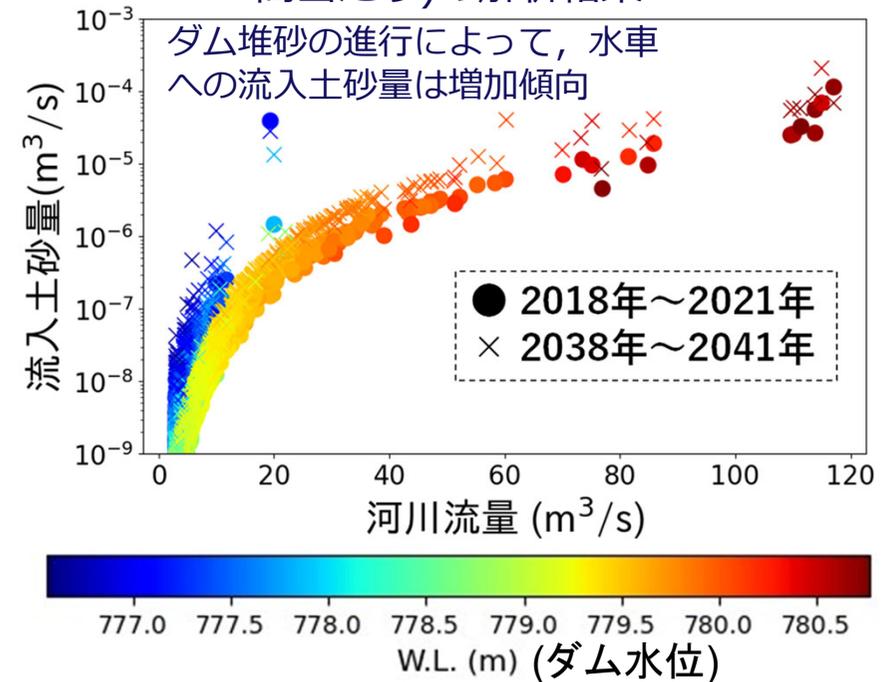
(概要) 河川・取水施設・沈砂池(水槽)を一体的に扱う実用的な流砂解析法を開発し、実地点を対象とした解析を通じて妥当性・有用性を検証した



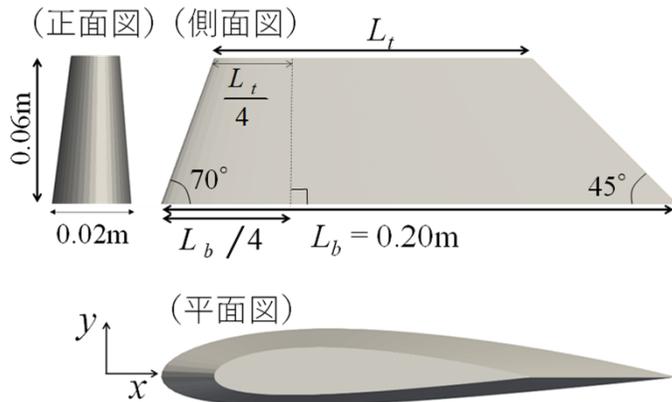
■ ダム堆積量の解析結果



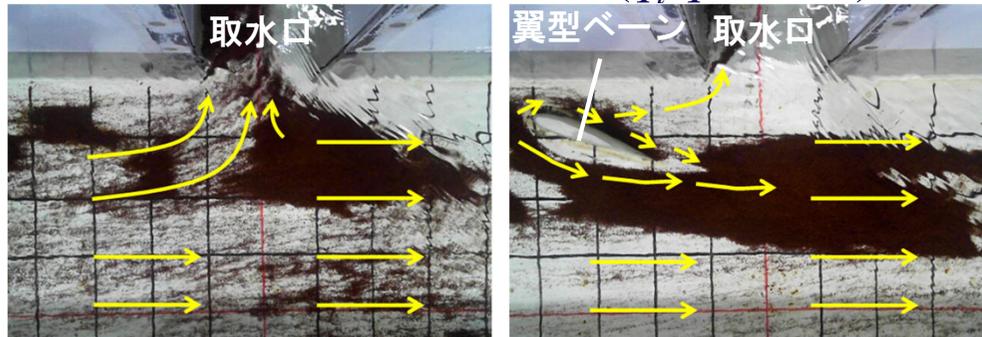
■ 水車への流入土砂量(単位時間当たり)の解析結果



2. ベーン工による取水口流入土砂の軽減



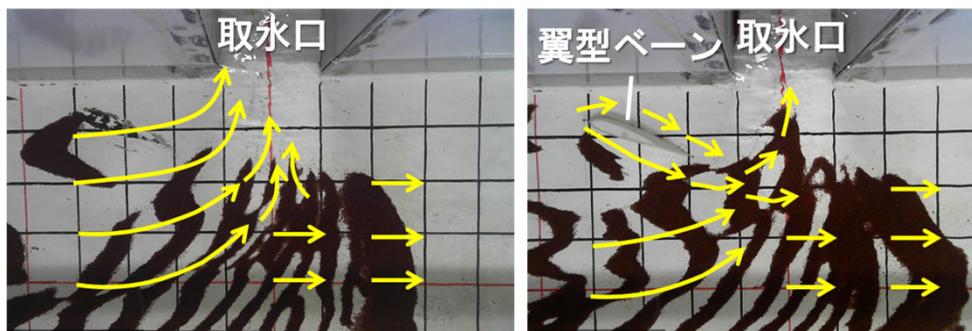
効果の高い条件の様子 ($q_i/q = 0.17$)



ベーン無し

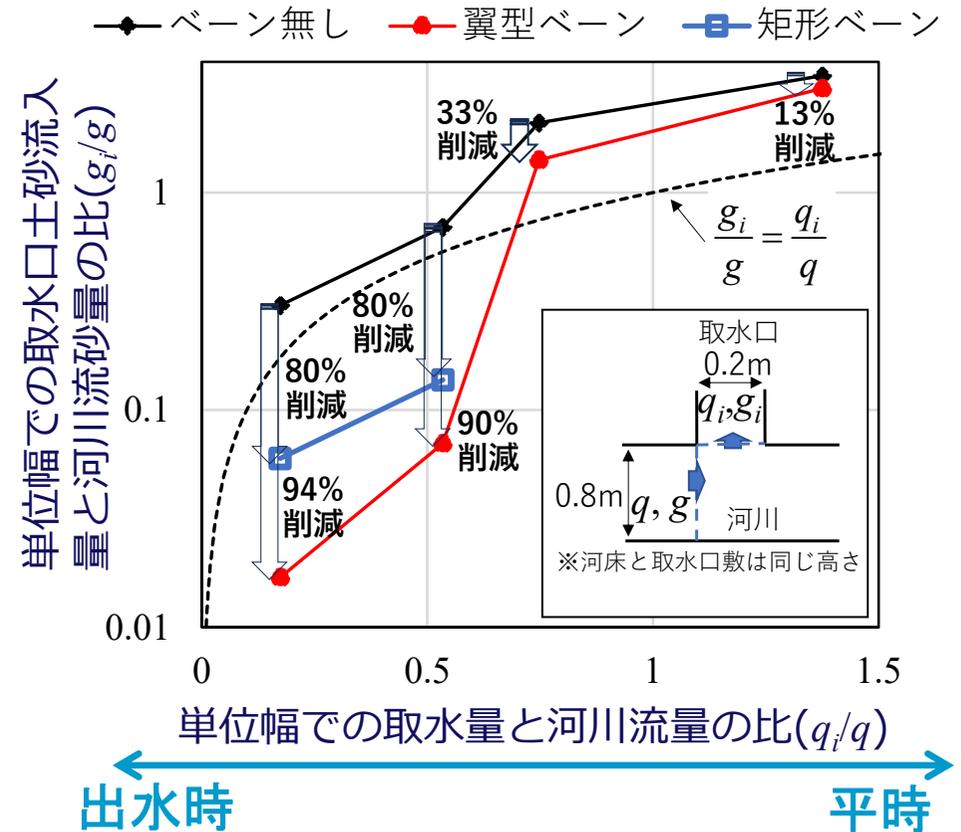
ベーン有り

効果の低い条件の様子 ($q_i/q = 1.37$)



ベーン無し

ベーン有り



基礎的な特性は実験で評価し、現地河川に置いたときの効果を三次元河床変動解析によって評価する。