

流砂形態割合を考慮した 堤防越流侵食解析モデルの開発

鳥取大学大学院 工学研究科 中田雄己

鳥取大学 学術研究院工学系部門 梶川勇樹

1 はじめに①

近年の大型台風や局所的集中豪雨

超過洪水の発生

河川堤防の越流破堤，氾濫原に甚大な被害

粘り強い堤防の開発や洪水被害評価
に繋げるには・・・

いつ・どこで・どのように破堤するかを実用レベルで
簡易かつ高精度に予測することが必要不可欠



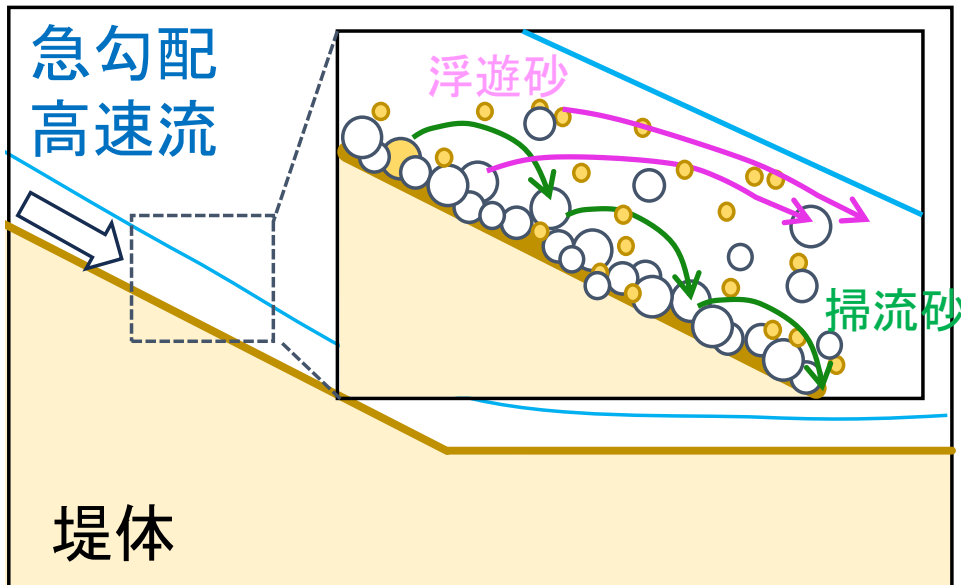
台風19号で長野県千曲川決壊した時の様子
出展：防災ニッポン，<https://www.bosai.yomiuri.co.jp/feature/3677>
(最終閲覧日：2024.12.3)

数値解析的研究

浸透流によるサクション効果を考慮した浅水流モデル(與田(2014),中田ら(2024))
流れの高度化を図った非静水圧モデル(内田ら(2012),音田ら(2024)など)

裏法面の侵食形状や侵食時間については依然として不十分

掃流砂・浮遊砂混在領域
or 浮遊砂卓越領域



◎ 掃流砂と浮遊砂を考慮したモデル

平衡場を前提とした
浮遊砂浮上量式

侵食量を
過小評価する恐れ

◎ 辻本らの遷移確率モデルから求まる浮遊砂 遷移割合を導入したモデル(音田ら(2026))

等流＋平衡場を対
象とした確率モデル

過小評価する恐れ

摩擦速度 u^* と沈降速度 w_f の比 u^*/w_f に基づく浮遊限界条件



離脱時における掃流砂と浮遊砂の流砂形態割合を算定



実用的なモデルとなる可能性

— 目的 —

簡易かつ高精度に予測できる堤防越流侵食解析モデルの構築

— 内容 —

- ◎ 流砂形態割合を考慮した堤防越流侵食解析モデルの開発
- ◎ 砂質土の小型模型実験および粘土分を含んだ大型模型実験への適用と再現性の検証

2 数値解析モデル①

浸透流によるサクション効果を考慮した鉛直二次元モデル(Nakata et al.(2025))

(1) 越流流れモデル

FAVOR法を導入した鉛直二次元流方程式

- ・乱流モデル: $k-\varepsilon$ モデル
- ・摩擦速度: 底面近傍流速を用いた対数則

(2) 浸透流モデル

+ 飽和・不飽和の鉛直二次元浸透流を扱うRichards式

(3) 地形変化モデル

a) 平衡掃流砂モデル

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_B}{\partial x} = 0$$

$$q_B = \frac{A_3}{A_2} p_s \Lambda d$$

Pick-up量: 中川式(共通)

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} = 0.03 \tau_* \left(1 - \frac{0.7 \Phi \tau_{*c} + \tau_{*suc}}{\tau_*} \right)^3$$

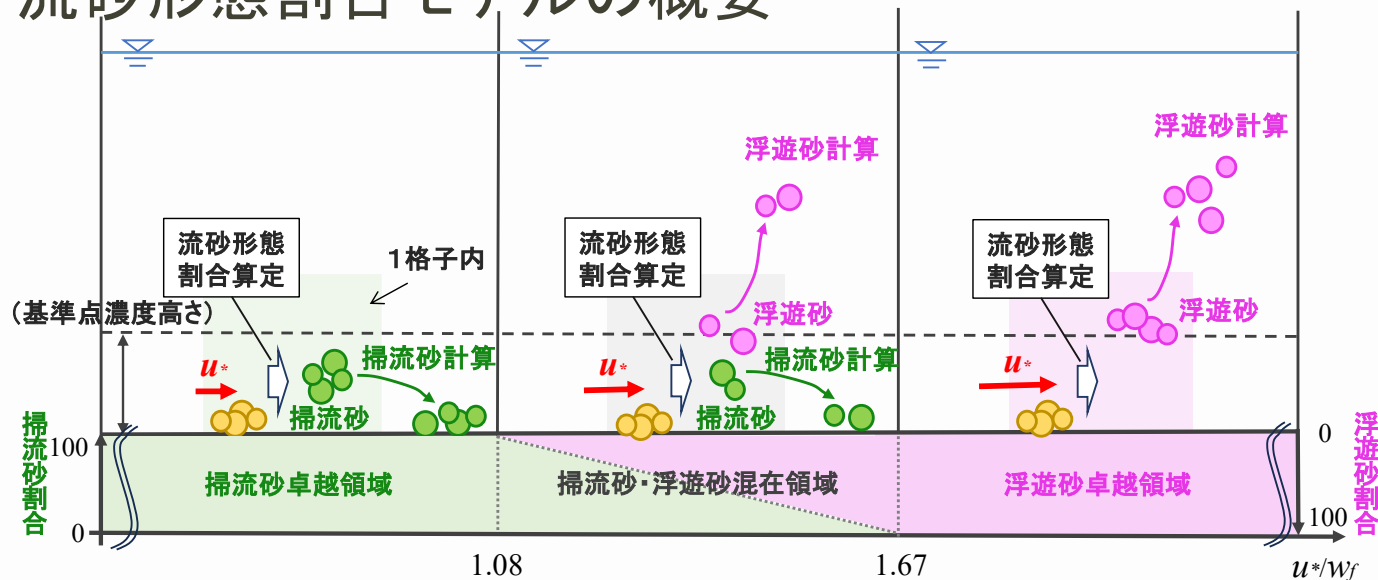
b) 非平衡掃流砂モデル(浮遊砂考慮した場合)

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{A_3}{A_2} d (p_s - p_d) + q_{su} - w_f c_b \right\} = 0$$

z_b : 地盤高, λ : 間隙率, q_B : 掃流砂量, A_2, A_3 : 砂粒子の2次元, 3次元形状係数, p_s : Pick-up rate, Λ : 平均step length, d : 砂粒子径, p_d : deposit rate, q_{su} : 浮遊砂浮上量式(Itakura・Kishi式), w_f : 沈降速度, c_b : 浮遊砂濃度, σ : 砂粒子密度, ρ : 水密度, τ^* : 無次元掃流力, Φ : 勾配補正係数, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, τ_{*suc} : サクションによる無次元せん断抵抗力

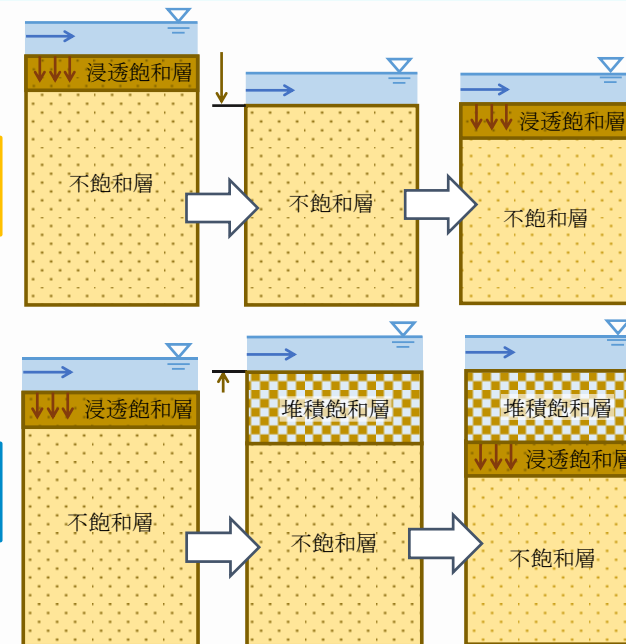
流砂形態割合モデル, 侵食・堆積層モデル

流砂形態割合モデルの概要



侵食

堆積



流砂の連続式

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{A_3}{A_2} d(p_s - p_d) - w_f c_b \right\} = 0$$

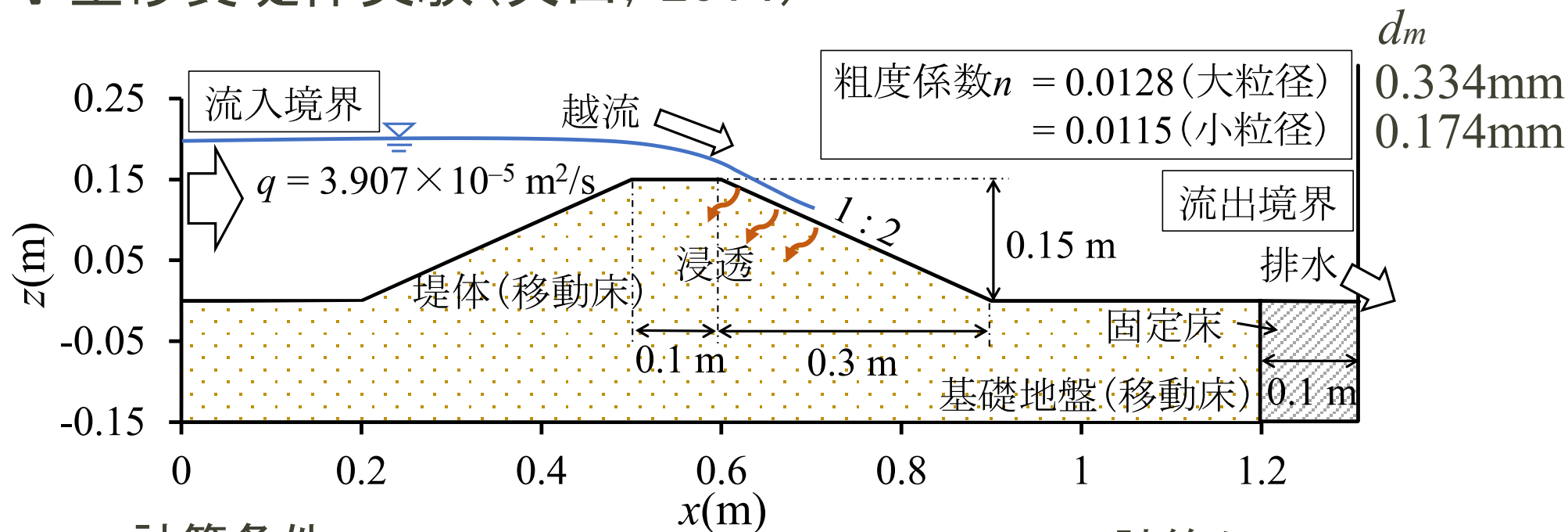
$$p_s = p_{sb} + p_{sc}$$

$$p_{sb} = \alpha p_s, \quad p_{sc} = (1-\alpha) p_s$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{for } (u_*/w_f < 1.08) \\ 1 - (u_* - 1.08w_f)/0.59w_f & \text{for } (1.08 \leq u_*/w_f \leq 1.67) \\ 0 & \text{for } (u_*/w_f > 1.67) \end{cases}$$

α : 流砂形態割合係数 ($\alpha = 1$: 掃流砂のみ, $\alpha = 0$: 浮遊砂のみ), p_{sb} : Pick-up量のうちの掃流砂量, p_{sc} : Pick-up量のうちの浮遊砂量, u^* : 底面摩擦速度

対象実験：小型砂質堤体実験（與田，2014）



計算条件

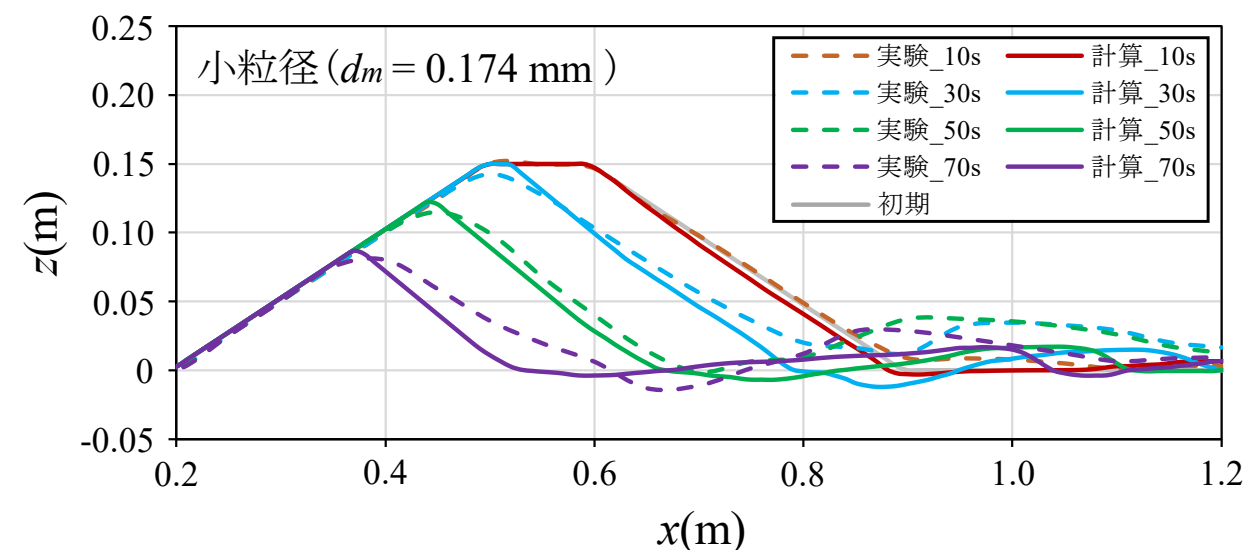
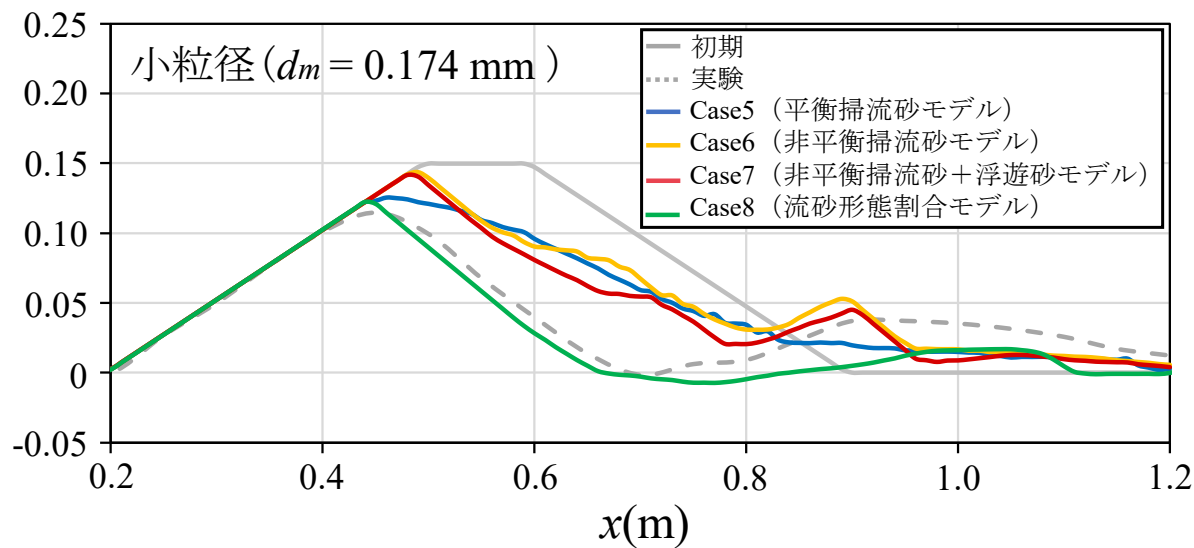
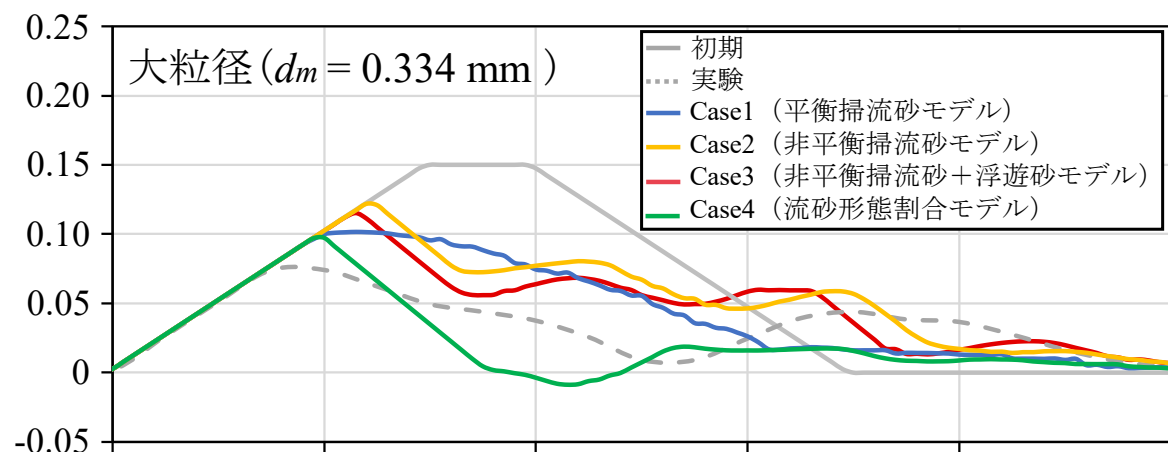
	大粒径	小粒径
メッシュ幅 $\Delta x, \Delta z$ (m)	0.01, 0.033	
計算時間間隔 Δt (s)	1.0×10^{-4}	
飽和透水係数 K_s (m/s)	2.15×10^{-4}	8.75×10^{-5}
水分特性曲線 (SWCC)	與田*)と同じ	
サクションによる見かけの 内部摩擦角 ϕ (°)	32	
安息角 (°)	32	

計算ケース

	大粒径	小粒径
平衡掃流砂モデル	Case1	Case5
非平衡掃流砂モデル	Case2	Case6
浮遊砂*を考慮した非平衡掃流砂モデル	Case3	Case7
流砂形態割合モデル	Case4	Case8

*浮遊砂浮上量式により算定した浮遊砂

計算結果



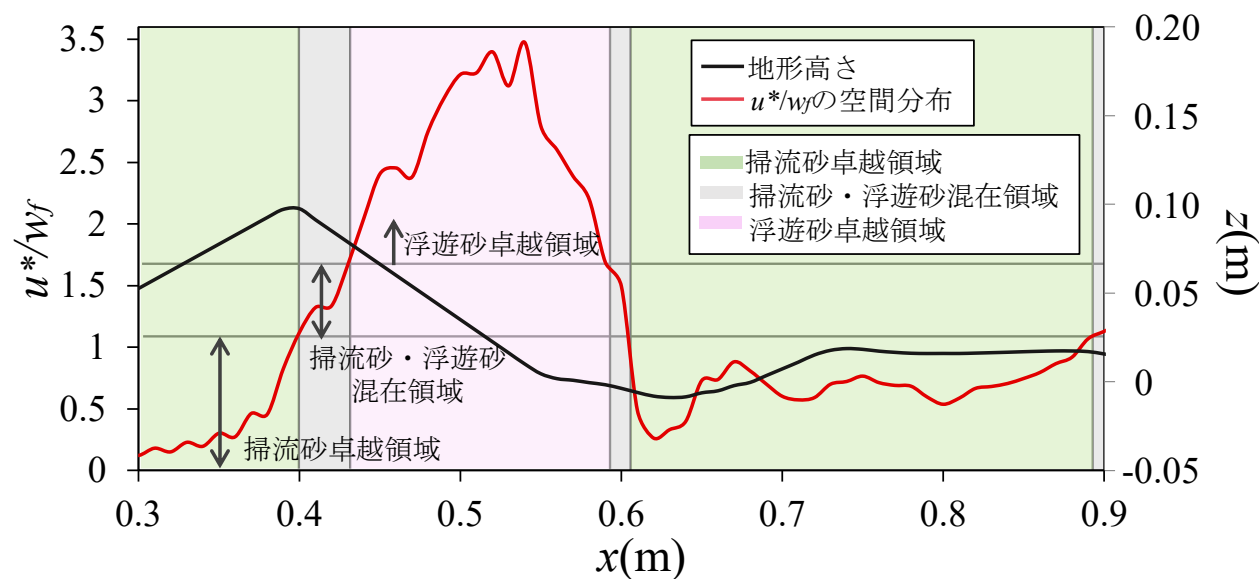
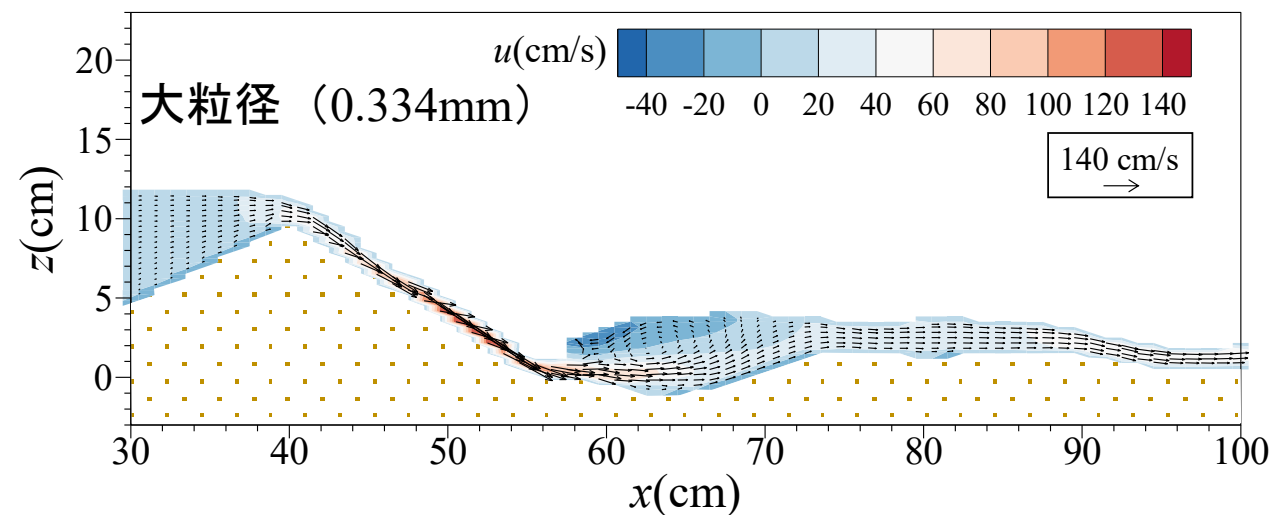
流砂形態割合を考慮することで
侵食形状, 侵食過程を最も良好に再現

堆積域はやや過小評価



移流拡散方程式を用いることでウォッシュロード
のように取り扱われ流送され易くなった可能性

流砂形態割合モデルが良好に再現できた要因の考察

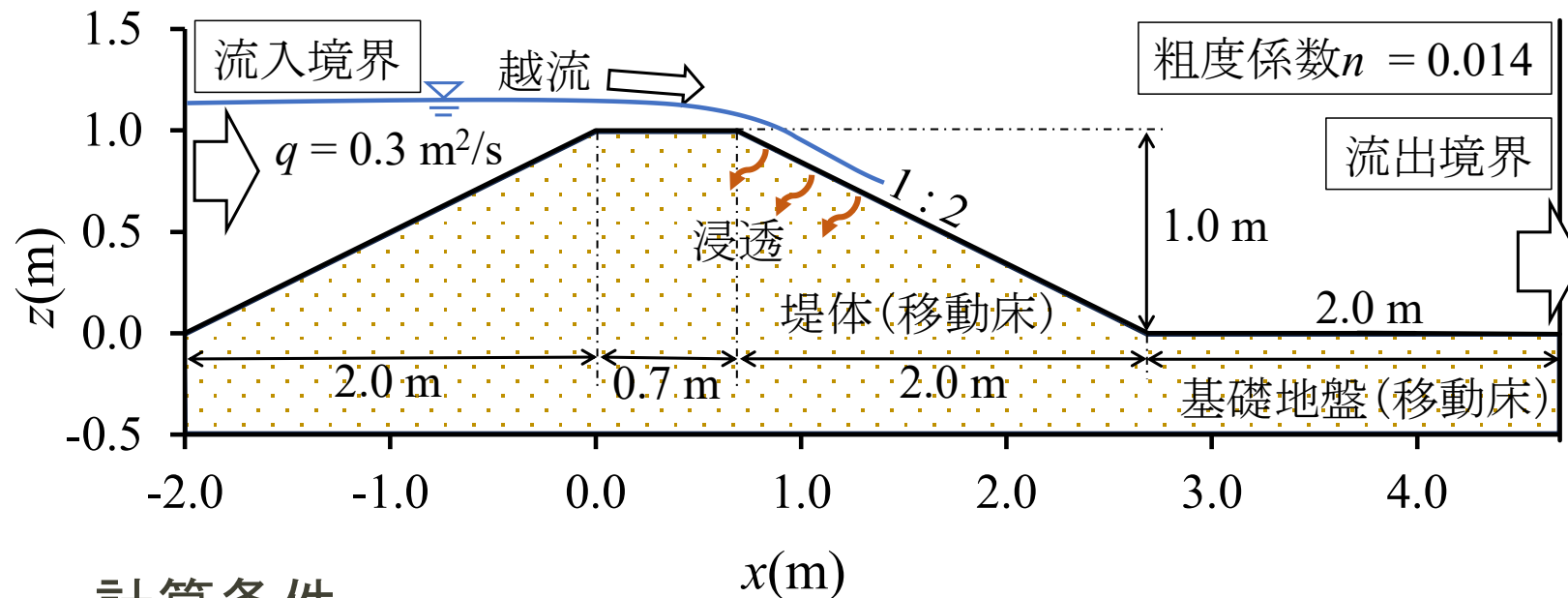


裏法面で流速が加速し，裏法面全体が侵食域

裏法面の約8割が浮遊砂卓越領域

浮遊砂としてより流送され易い領域となり，他のケースと比較し侵食量が増加し，実験を再現

対象実験：大型粘土混合堤体実験（與田，2014）



非粘着性土と粘着性土

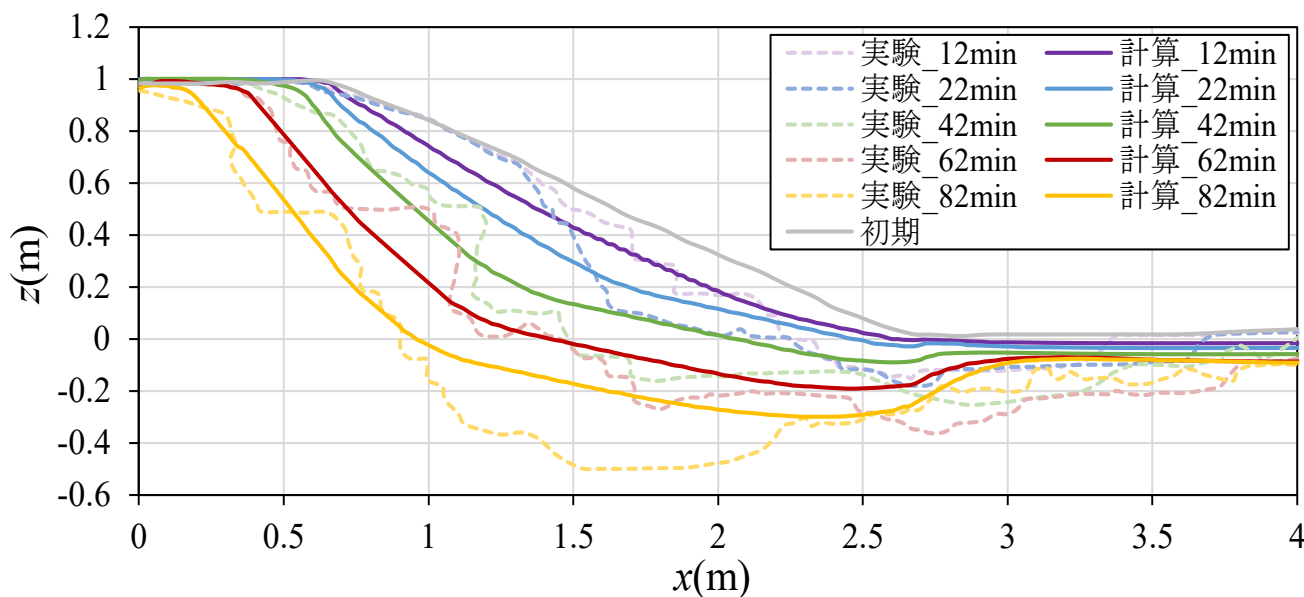
- ◎ 粘着力の有無
- ◎ 透水係数の違い
- ➡ サクション抵抗力の消失速度に差異

計算条件

メッシュ幅 $\Delta x, \Delta z$ (m)	0.02, 0.01	水分特性曲線 (SWCC)	8号砂の値
計算時間間隔 Δt (s)	1.0×10^{-3}	サクションによる見かけの内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	15°
飽和透水係数 K_s (m/s)	6.3×10^{-7}	安息角 $(^{\circ})$	60°

細粒分含有により ϕ が低下

計算結果

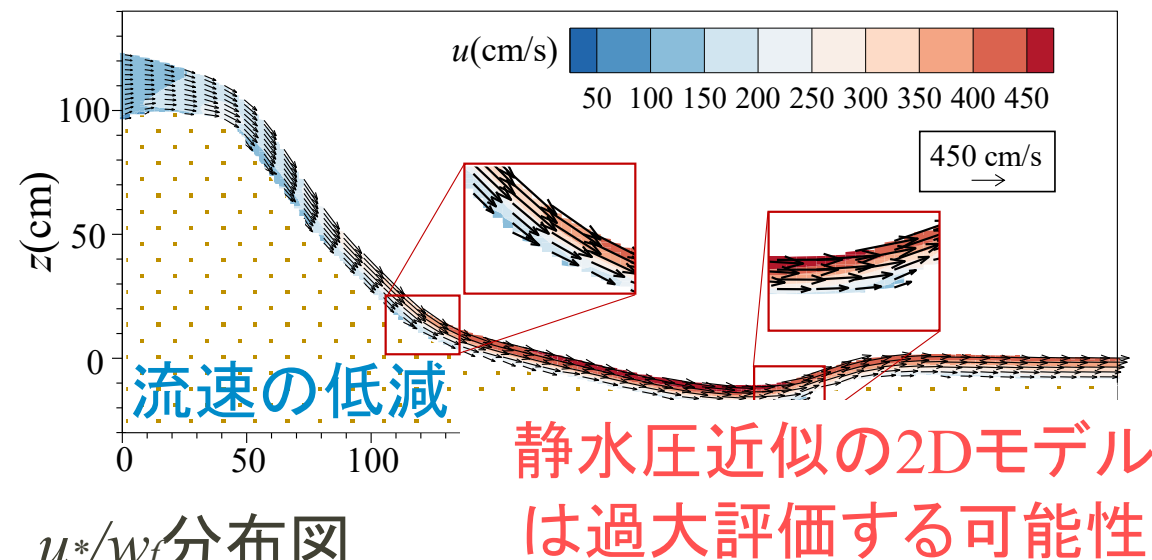


初期侵食位置や切り立つ形状等の細部の再現△

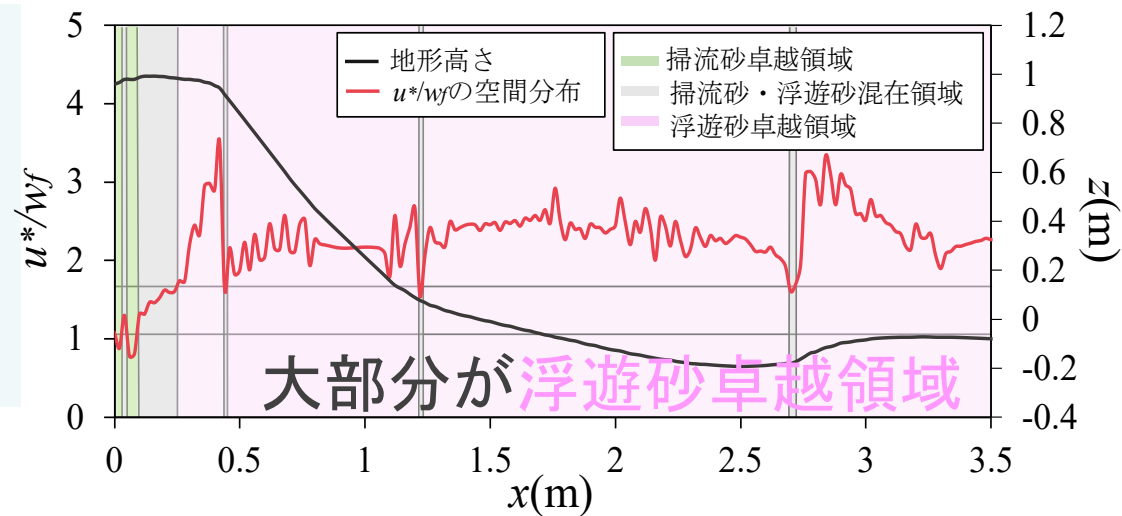
全体的な侵食形状, 侵食過程を
概ね良好に再現

⇒ 実規模堤体への適用も有効な可能性あり

62minにおける流況と地形変化



u^*/w_f 分布図



簡易かつ高精度に予測できる堤防越流侵食解析モデルの構築を目的に、**流砂形態割合を考慮した堤防越流侵食解析モデル**を開発し、各種実験への適用より再現性の検証を実施



- ◎ 小型砂質堤体実験への適用より、**流砂形態割合を考慮**した本モデルは各種流砂モデルと比較し、**侵食過程を最も良好に再現**できた
- ◎ 大型粘土混合堤体実験への適用より、**堤体規模に依らず**、侵食過程を概ね良好に再現でき、**実規模堤体に対しても有効である可能性**が示唆された

今後の課題：実規模堤体の破堤拡幅を含めた越流侵食現象への適用

ご清聴ありがとうございました