

# 水-土二相連成解析とマルチスケールモデリングによる相転移型地盤崩壊シミュレータの構築

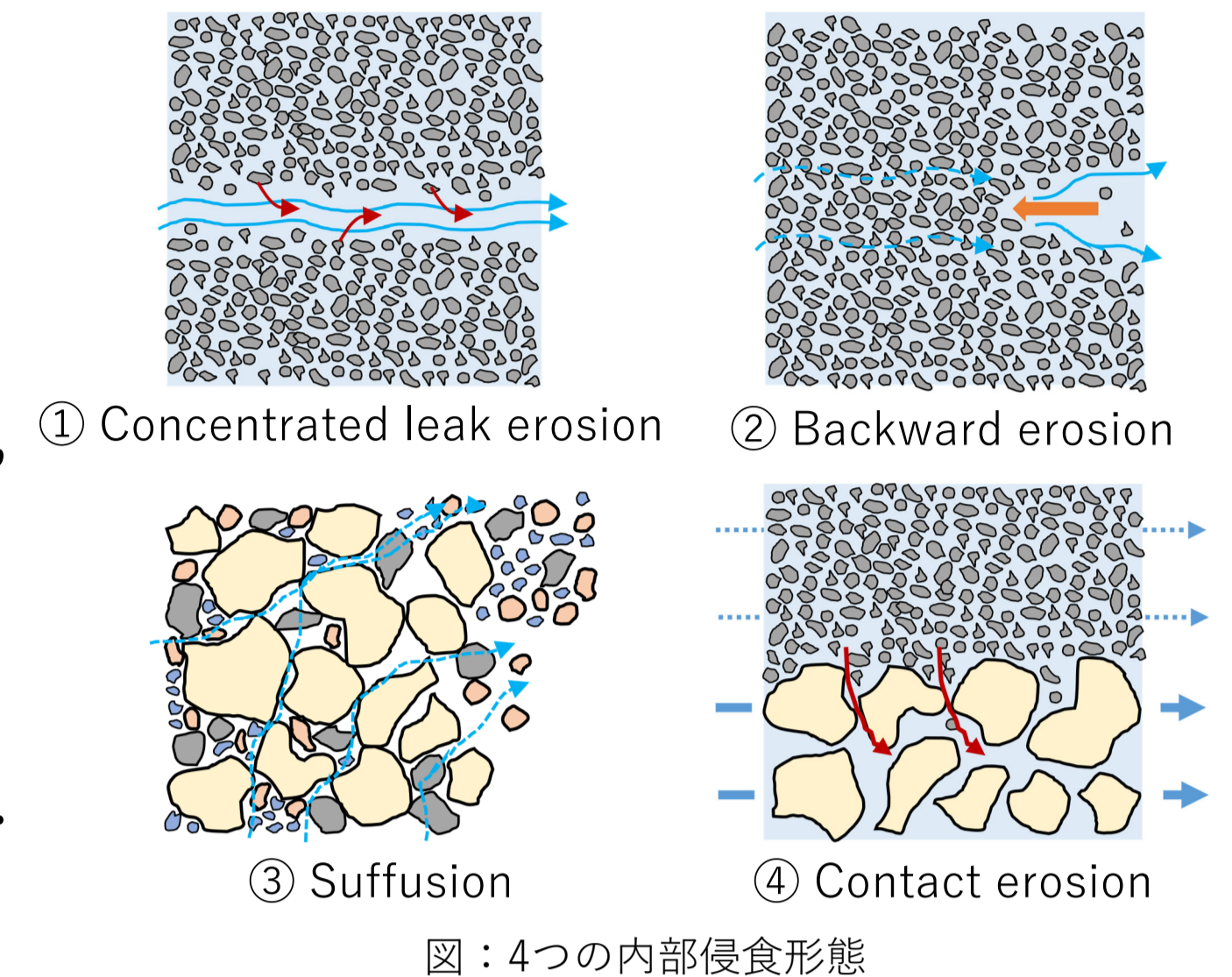
課題代表者： 辻 勲平 (Kumpei TSUJI)

九州大学大学院 工学府 博士後期課程3年, 日本学術振興会 特別研究員DC2, email: tsuji@doc.kyushu-u.ac.jp

共同研究者：佐伯勇輔<sup>1</sup>, 藤岡秀二郎<sup>1</sup>, Morikawa Daniel Shiguo<sup>2</sup>, 浅井光輝<sup>3</sup>  
 (1: 九州大学大学院工学府 修士1年, 2: JAMSTEC 数理科学・先端技術開発センター, 3: 九州大学工学研究院)

## 1 研究目的・概要

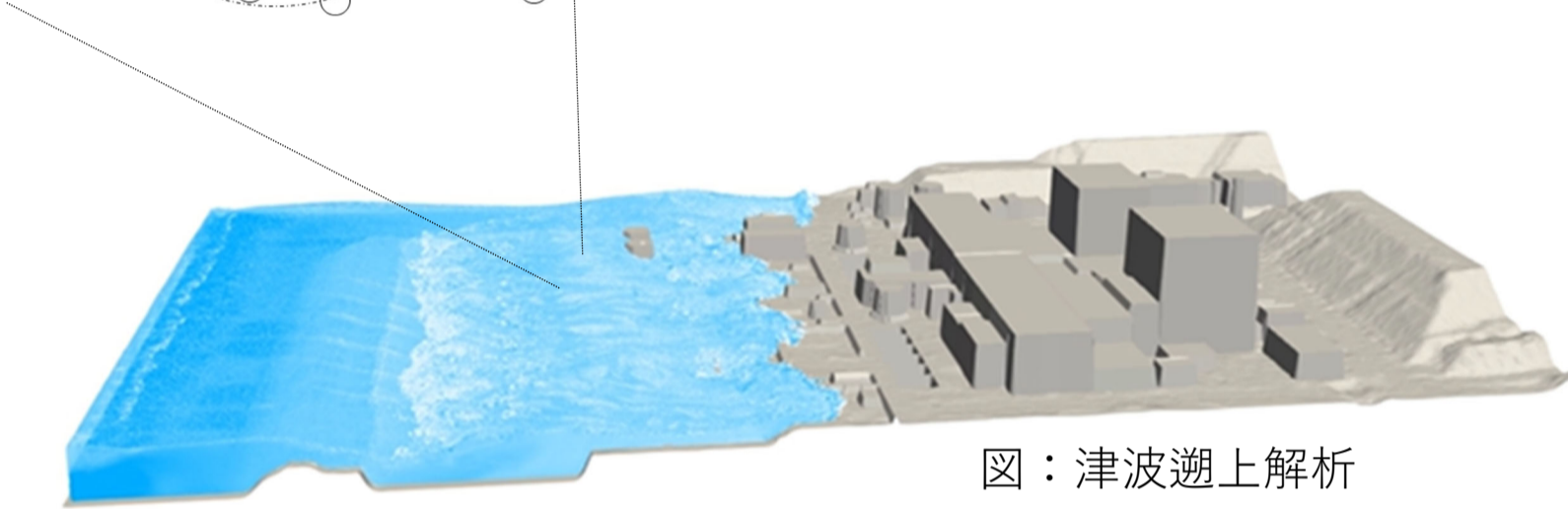
近年, 豪雨による河川堤防決壊や, 津波による防波堤の崩壊など, 水と土砂礫が入り混じった固液混相流による自然災害が絶えない。これら土構造物の崩壊は, 地盤内部で局所的に生じる内部侵食(浸透流による土粒子の離脱・流出, 水みちの拡大, 右図参照)を起点に発生している。本研究課題では, Lagrange記述の計算手法であるISPHによる流体解析と, 土砂礫の挙動を直接表現する個別要素法DEMを用いた地盤の変形解析を組合せた水-土二相連成解析ツールを開発し, 防波堤の浸透崩壊や内部侵食に関わる数値計算を行った。また, 微視的な土粒子と水の素過程から巨視的な地盤の力学的特性を得るマルチスケールモデリングに向け, 流体解析におけるISPHの高精度化を実施するとともに, 精緻な計算が可能な解像型連成と, 相互作用力を効率的に求める非解像型連成を組合せたハイブリッド連成解析の枠組みの開発を進めた。



## 2 ISPH-DEMによる水-土二相連成解析

**ISPH** : Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics

- ・非圧縮性流体のLagrange型解析手法
  - ・有限個の粒子による空間離散化
  - ・近傍粒子とkernel関数を用いて物理量を算出
- 飛散・合体を伴う激しい流れの解析に有効



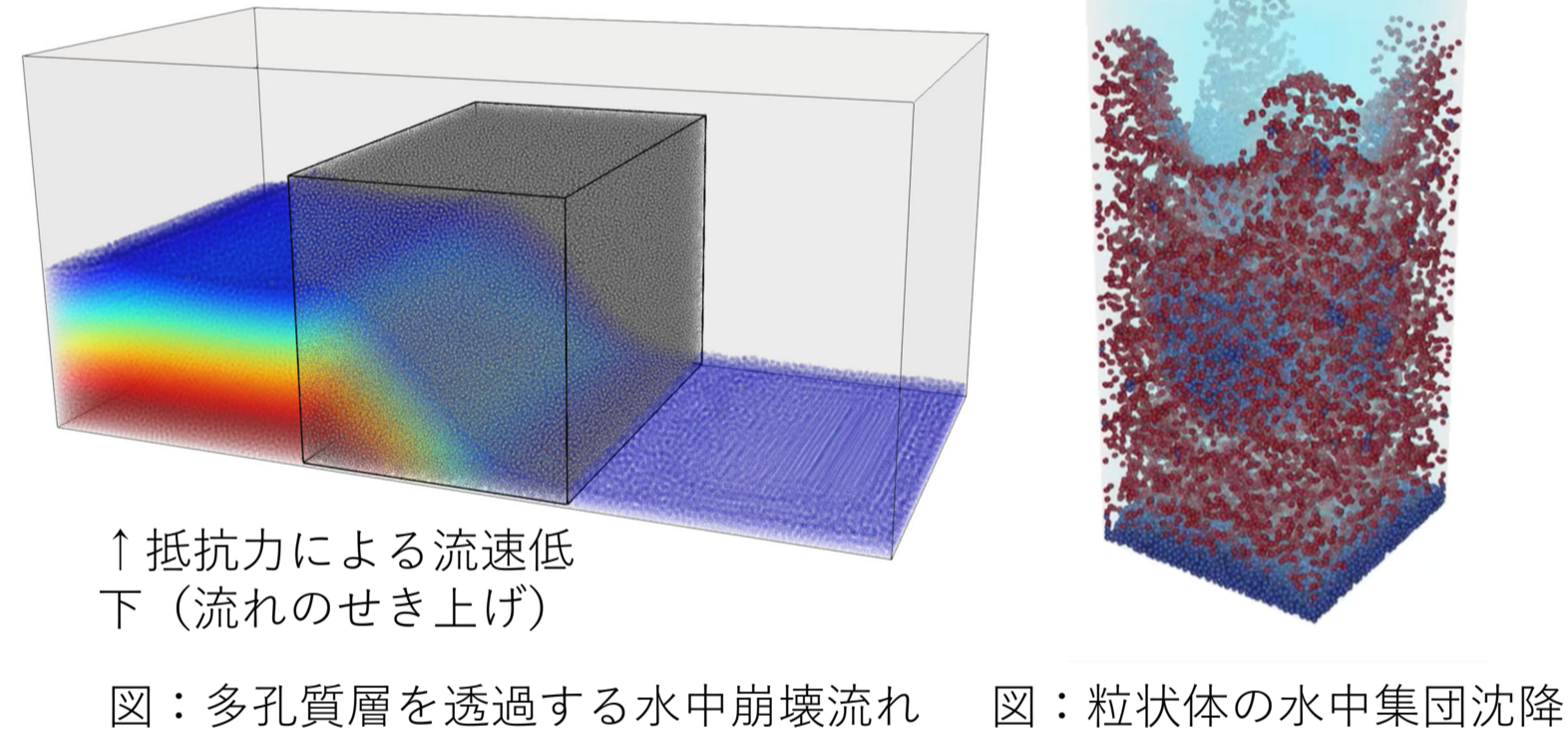
**DEM** : Discrete Element Method

- ・粉体, 土粒子から成る地盤等, 不連続な変形の表現に有効



### ◆ ISPH-DEM解像/非解像型連成ソルバーの開発

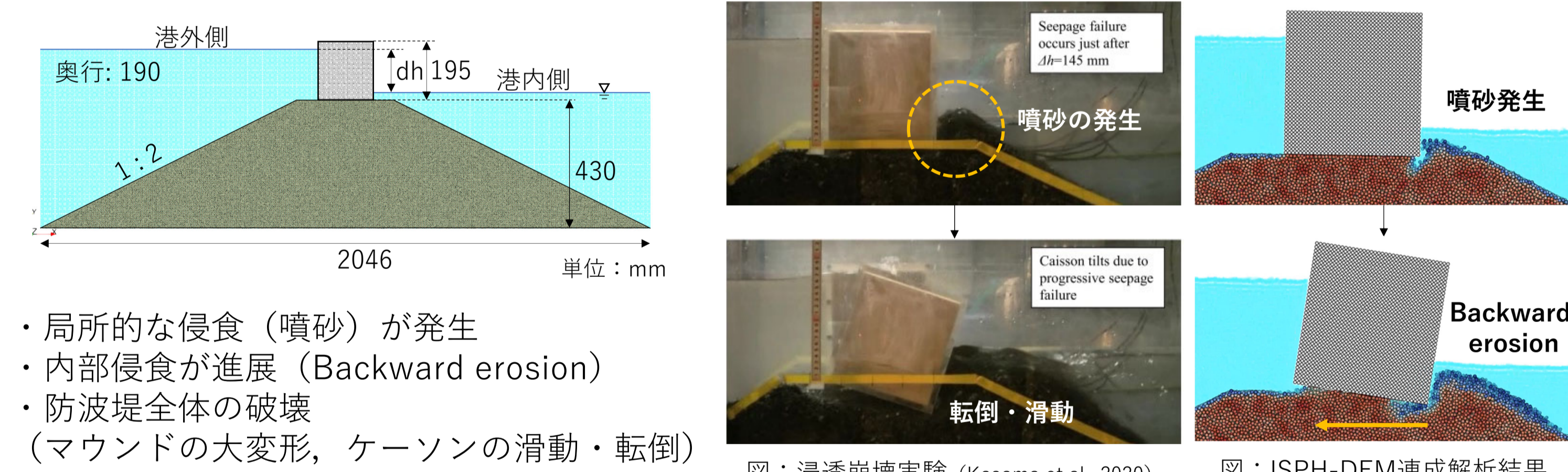
- ① 解像型連成  
：圧力の表面積分から流体力を算出
- ② 非解像型連成  
：経験的な抗力を相互作用力とする(相対速度, 平均粒径等に依存)



→ 水-土二相連成解析を実施可能  
 (MPI-OpenMPハイブリッド並列実装済)

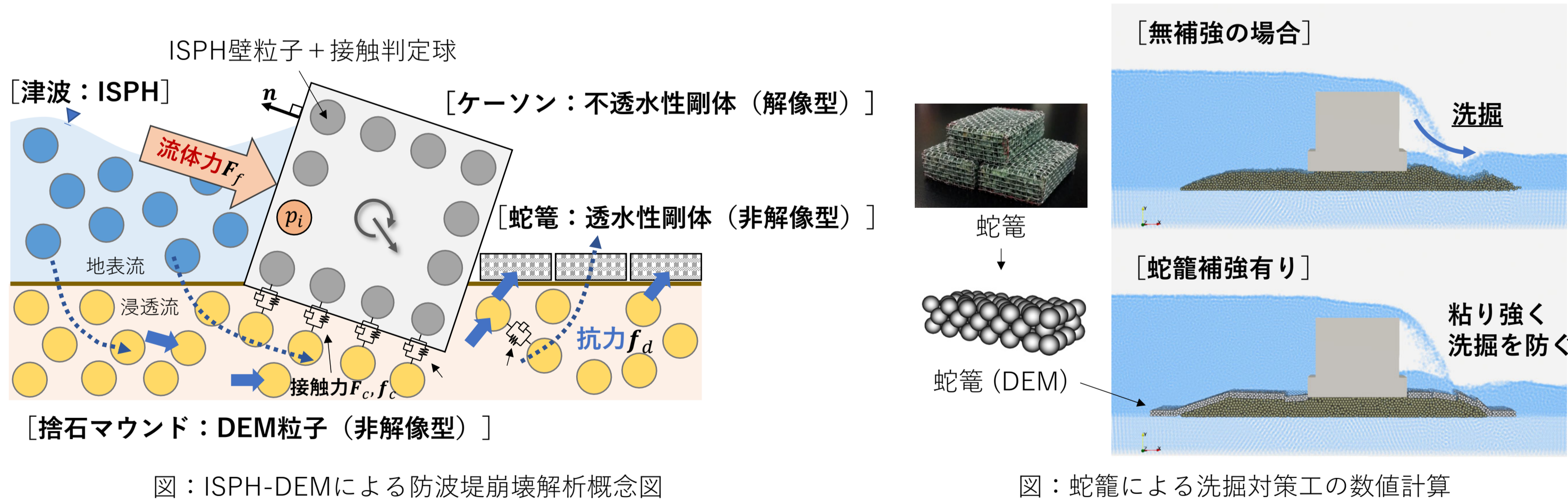
## 3 非解像型連成に基づく防波堤崩壊解析

### ◆ 捨石マウンドの浸透崩壊シミュレーション (辻ら, 2021)



- ・局所的な侵食(噴砂)が発生
- ・内部侵食が進展(Backward erosion)
- ・防波堤全体の破壊(マウンドの大変形, ケーソンの滑動・転倒)

### ◆ 蛇籠を用いた捨石マウンドの洗掘対策工の検討



## 6 まとめ・今後の展望

本研究課題では, ISPHとDEMによる解像型/非解像型/ハイブリッド連成による水-土二相連成連成解析ソルバーを開発し, 津波による防波堤マウンドの浸透崩壊シミュレーションならびに蛇籠を用いた洗掘対策工の数値実験, さらに内部侵食に関わる数値計算を実施した。また, 従来のISPH法の弱点(圧力擾乱, 計算精度の問題)に対し, 各種高精度化を図り, 高次の精度を有した流体解析へと改良を果たした。今後, 高精度ISPH法による流体解析と, 解像・非解像型ハイブリッド連成解析ソルバーを融合し, 土構造物の崩壊の起点となり得る内部侵食の解析を行う。そして, それら地盤内の微視的な素過程から巨視的な地盤の特性(応力-ひずみ関係や飽和度による力学的特性の変化)を把握するマルチスケールモデリングへと展開し, 当初の目標であった相転移(固体としての地盤から, 流動的な土砂崩壊へ性状を変化)を伴う広域の地盤崩壊シミュレータへの発展を目指す。

## 4 高精度ISPH法の開発

### ◆ 圧力勾配モデルの再検討, 粒子再配列

[慣例的に用いられる従来の圧力勾配モデル]

$$\langle \nabla p \rangle_i^* = \rho_i \sum_j m_j \left( \frac{v_j}{\rho_j} + \frac{v_i}{\rho_i} \right) \nabla w_{ij}$$

[問題点] : 負圧域で非物理的な圧力擾乱を生じる  
 → 粒子分布の乱れを加速 → ISPHの精度を更に悪化

[一次Consistencyを満足する圧力勾配モデル]

$$\langle \nabla p \rangle_i^- = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (p_j - p_i) \nabla w_{ij}$$

$$\tilde{\nabla} w_{ij} = L_i \nabla w_{ij}, \quad L_i = \left[ \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \nabla w_{ij} \otimes r_{ij} \right]^{-1}$$

( $\tilde{\nabla} w_{ij}$ : 修正重み勾配,  $L_i$ : 修正行列)

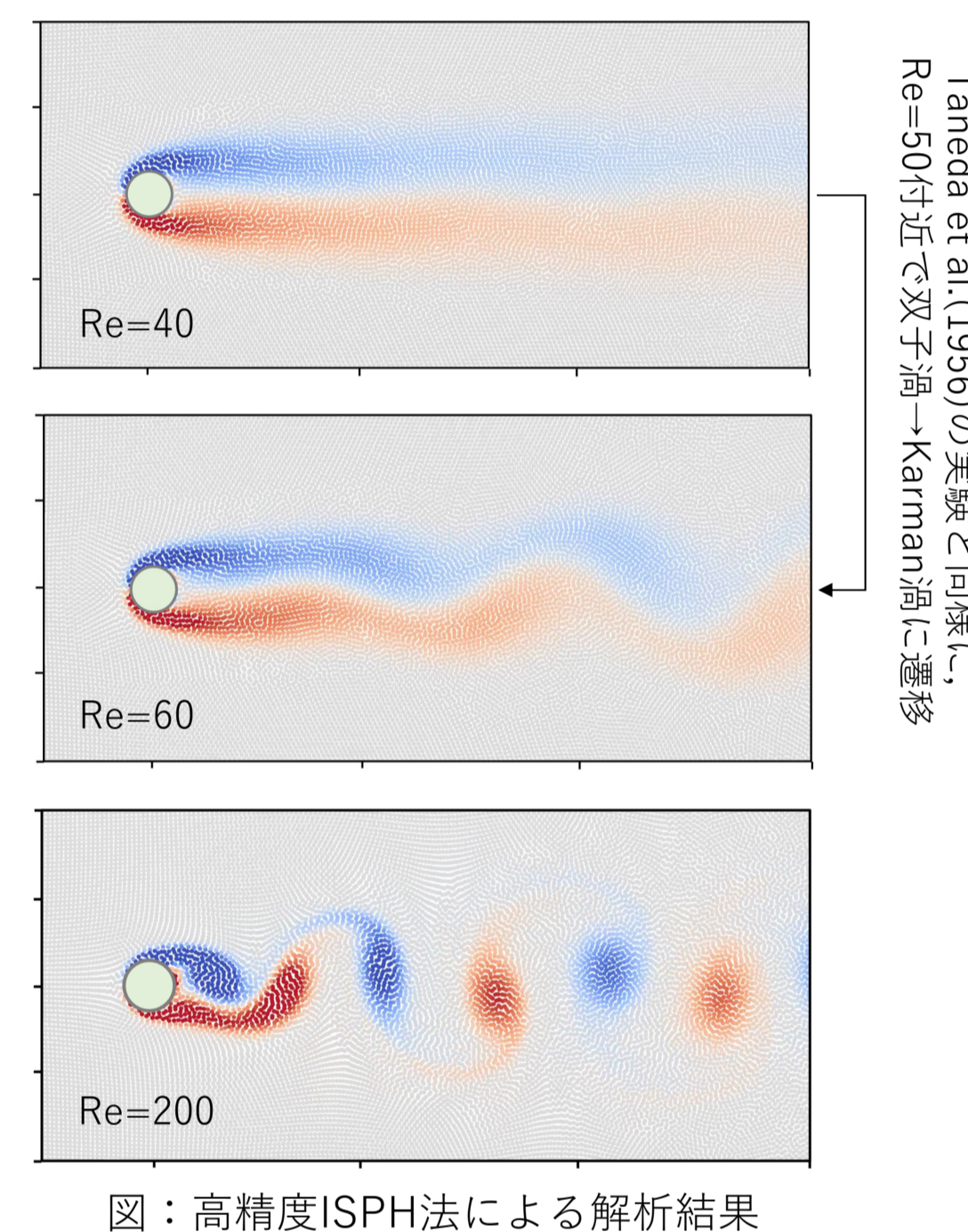
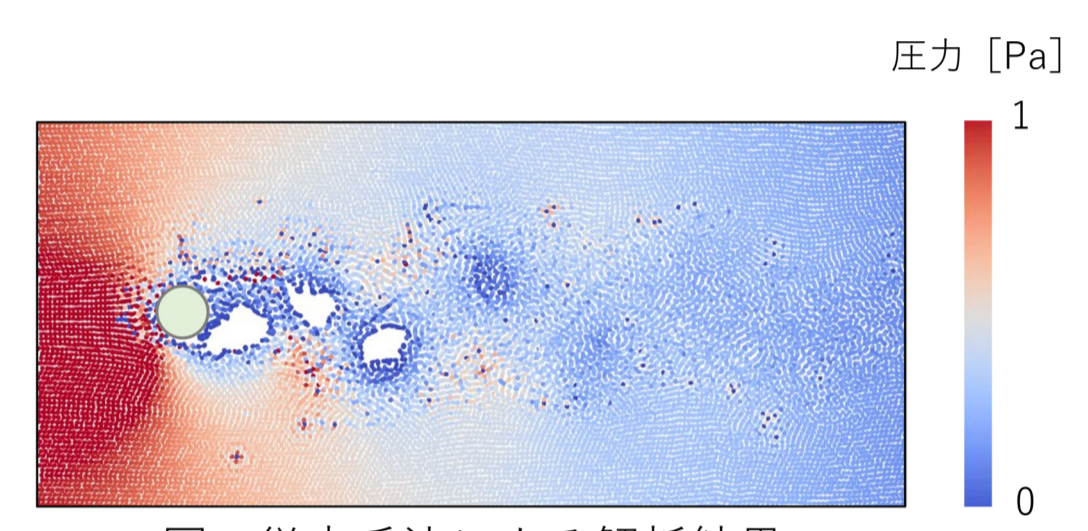
[粒子再配列 (Particle Shifting)]

：粒子濃度 $\nabla C_i$  高領域→低領域へ粒子位置をシフト

$$\delta r_i = -C_{\text{shift}} h^2 \nabla C_i$$

$$\nabla C_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \left[ 1 - R_p \left( \frac{w_{ij}}{w_{d0}} \right)^n \right] \nabla w_{ij}$$

(その他, Laplacianモデルの高精度化も開発中)



高精度化ISPH法の開発により, 負圧域を含む複雑な流れを計算可能に

## 5 解像・非解像型ハイブリッド連成解析

