

平成24年2月24日 理化学研究所計算科学研究機構セミナー室
HPCI戦略プログラム 分野3

地震津波課題ワークショップ

～東北地方太平洋沖地震を踏まえて～

津波の予測精度の高度化に関する研究

12:35～12:50

SPHとDEMによる 津波と構造物の連成シミュレーション

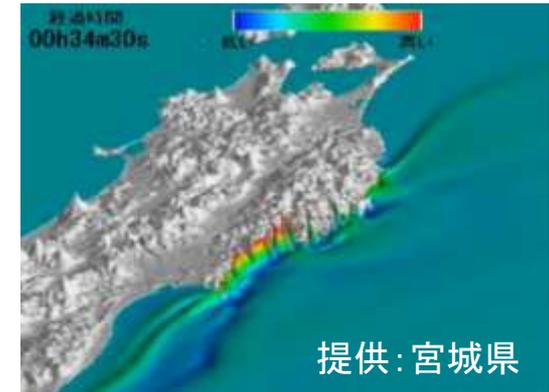
独立行政法人海洋研究開発機構

地球内部ダイナミクス領域

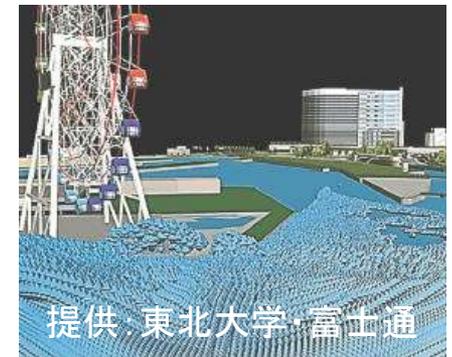
阪口 秀・西浦泰介

津波の予測精度の高度化に関する研究

津波伝播・到達時刻の予測



遡上域・浸水深の予測

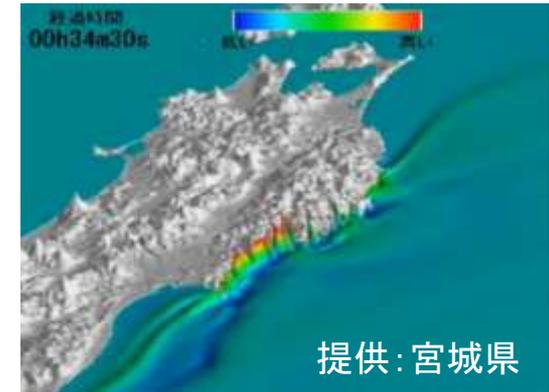


災害状況の予測

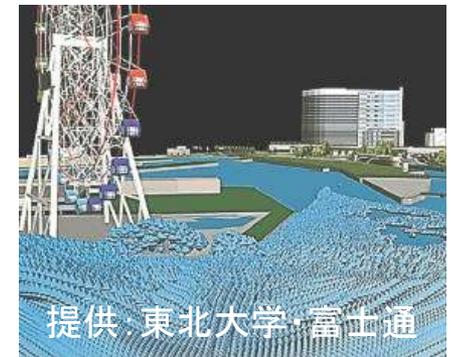


津波の予測精度の高度化に関する研究

津波伝播・到達時刻の予測



遡上域・浸水深の予測



災害状況の予測



防災・減災・救助・復旧・復興に
必要な情報を与える

津波災害



津波によって壊滅した宮城県・南三陸町
<http://labaq.com/archives/51650134.html> より

津波災害の特徴

流れがモノを壊し、壊れたモノが流れ、流れたモノがモノを壊し、...

流体による建造物の破壊

流体による建造物・破壊片の移動

建造物の衝突による建造物の破壊



破壊の連鎖

津波災害シミュレーションに求められること

単なる津波遡上計算だけでは不十分

1) 流れによる構造物・地盤の変形・破壊

2) 破壊した構造物や破片などの漂流

3) 漂流物の衝突による2次破壊

の複雑数値モデルが必要！

津波災害予測のための複雑数値モデル

流体＋固体の連成モデル

固体の変形・破壊モデル

多自由度系の固体モデル

固体-固体間の衝突モデル

固体:DEM + 流体:SPH

SPHとDEMの連成手法

□SPHの基礎方程式

➤連続の式

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\vec{v}_a - \vec{v}_b) \cdot \vec{\nabla} W_{ab}$$

➤Navier-Stokes 式

$$\frac{d\vec{v}_a}{dt} = \vec{g} - \sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} \right) \vec{\nabla}_a W_{ab} + \sum_b m_b \left(\frac{2\mu_f (\vec{r}_a - \vec{r}_b) \cdot \vec{\nabla}_a W_{ab}}{\rho_a \rho_b} \right) (\vec{v}_a - \vec{v}_b) + \vec{F}_{fs}$$

重力項

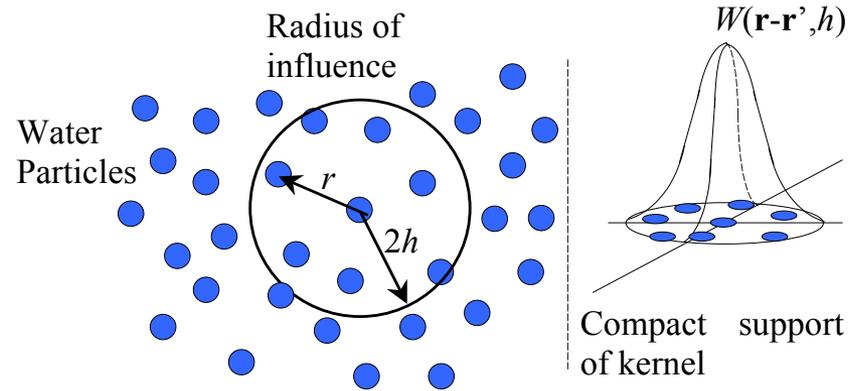
圧力勾配項

(層流)粘性項

SPH-DEM
相互作用項

➤状態方程式(Tait 式)

$$p_a = B \left[\left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^7 - 1 \right] \quad B = \frac{c_a^2 \rho_a}{7} \quad c_a \approx 10v_a^{\max}$$



□Kernel 関数

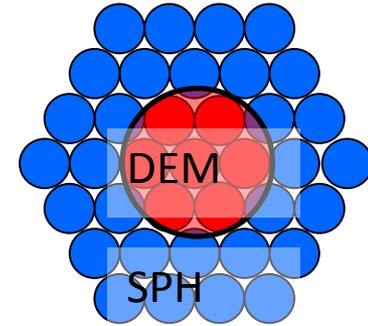
➤Quintic function

$$W(r, h) = \frac{21}{16\pi h^3} \left(1 - \frac{q}{2} \right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad q = \frac{r}{h}, \quad r = |\vec{r}_a - \vec{r}_b|$$

SPHとDEMの連成手法

□DEM(マクロパーティクル)の運動方程式

$$\frac{d\vec{v}_g}{dt} = \vec{g} + \frac{\sum \vec{F}_{ss}}{m_g} + \sum \vec{F}_{sf} \quad \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} = \frac{\sum \vec{F}_{ss} + \vec{r}_{gs} \times \vec{F}_{sf}}{I_g} m_g$$



□SPH-DEM相互作用

➤ 固体が存在しない場合の流体速度 \vec{v}'_f を求め、その流体速度を固体粒子速度に修正する力を相互作用力とする

$$\vec{F}_{sf} = \sum_f \frac{m_f}{\rho_f} \vec{f}_{sf} W_{sf} \quad \vec{F}_{fs} = \sum_s \frac{m_s}{\rho_s} \vec{f}_{fs} W_{fs} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{v}'_f = \vec{v}_f^n + (\text{重力項} + \text{圧力項} + \text{粘性項}) dt \\ \vec{v}_f^{n+1} = \vec{v}'_f + \vec{F}_{fs} dt \end{array} \right.$$
$$\vec{f}_{sf} = \alpha \frac{\vec{v}_s - \vec{v}'_f}{dt} \quad \alpha = f(q) = \begin{cases} \text{固体: } \alpha = 1 \\ \text{流体: } \alpha = 0 \end{cases}$$

$$\vec{v}_s = \vec{v}_g + \vec{r}_{gs} \times \vec{\omega}_g$$

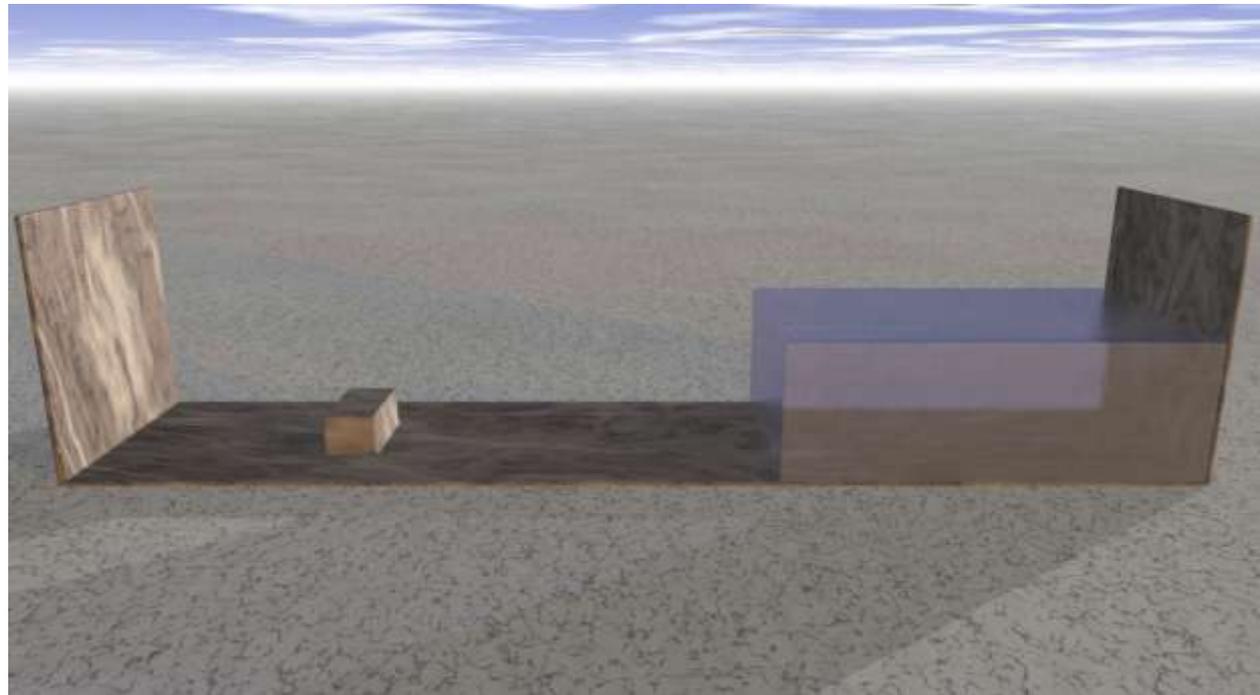
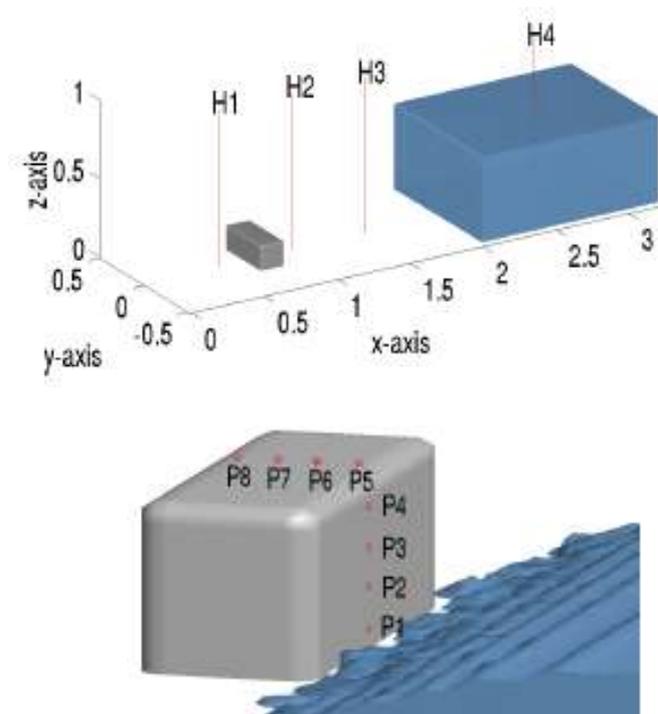
□境界条件

➤ 滑り無し境界

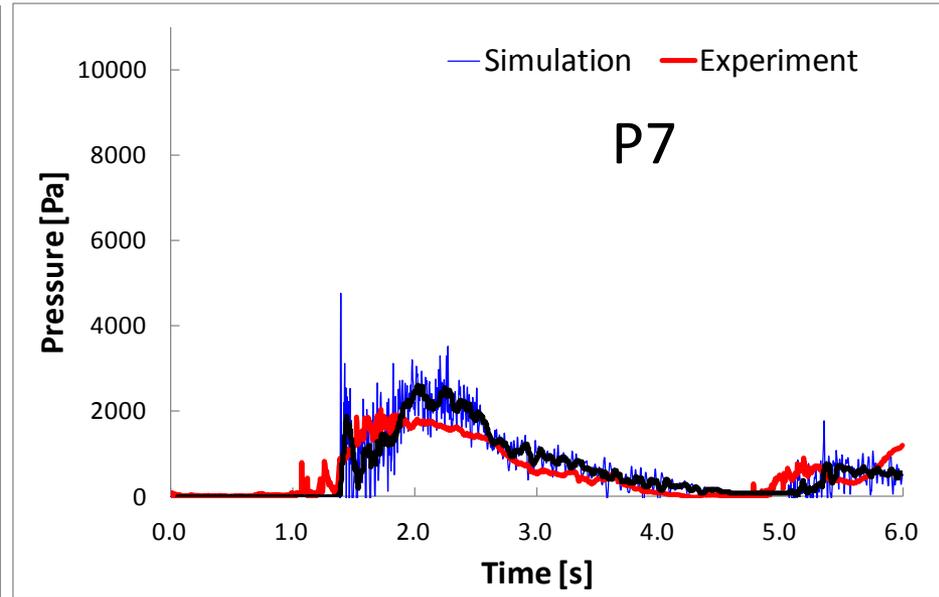
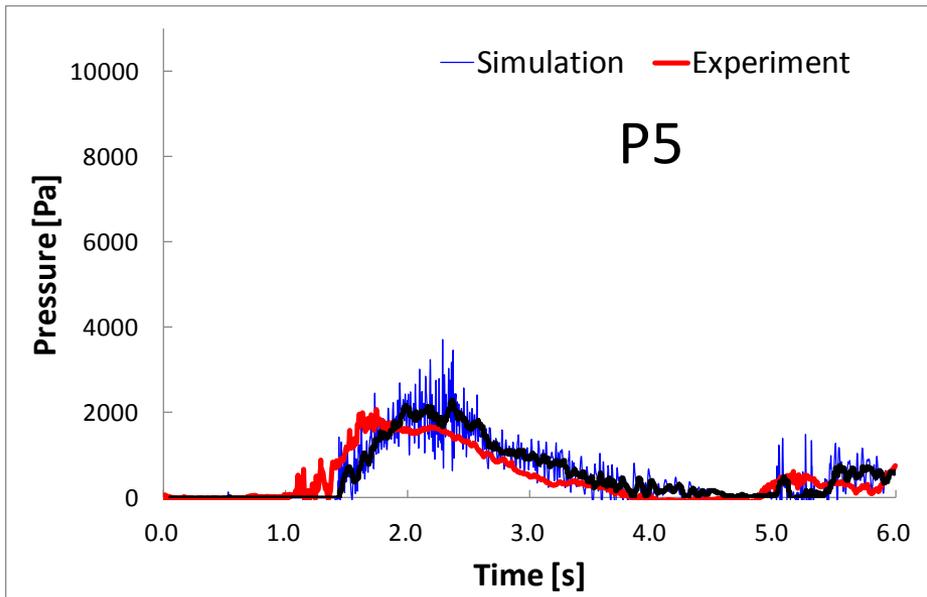
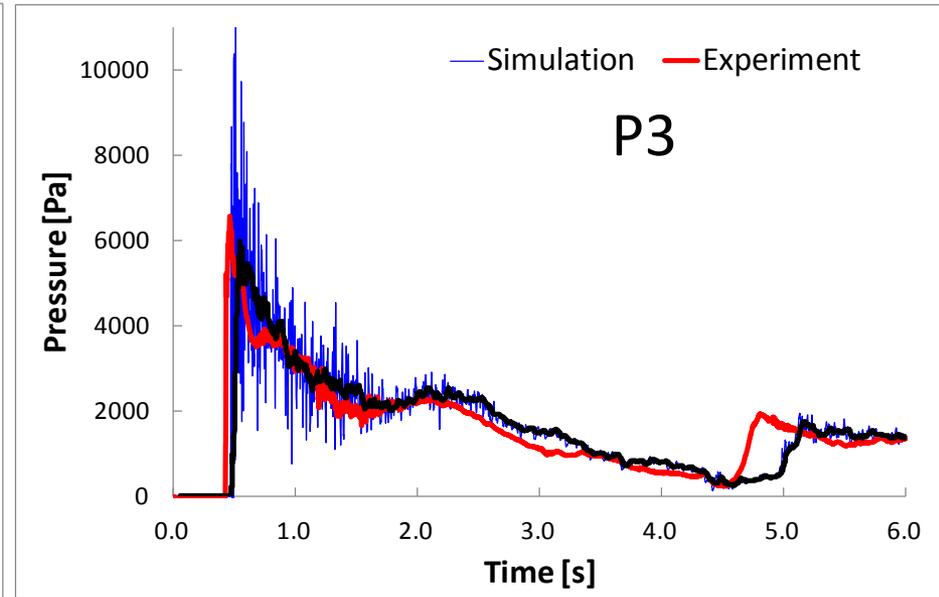
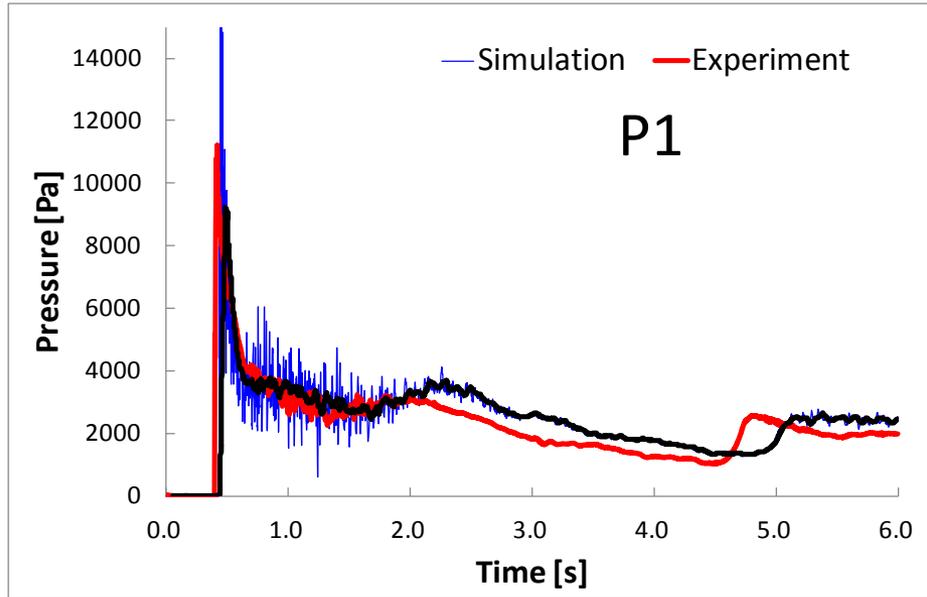
壁に固定された固体粒子を想定し、上記のSPH-DEM相互作用力を働かせる

SPHとDEMの連成：計算精度の検証

- PARIで行われた標準的な実験(ダムブレイク + ブロック上での圧力測定)と計算の比較

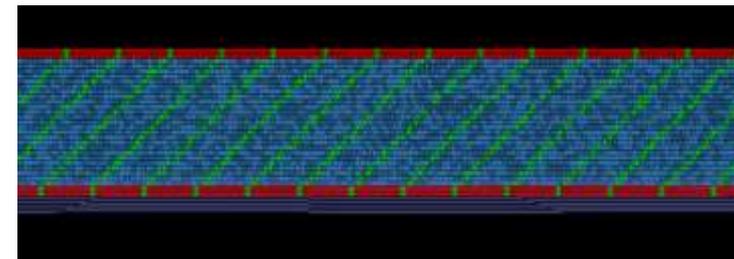
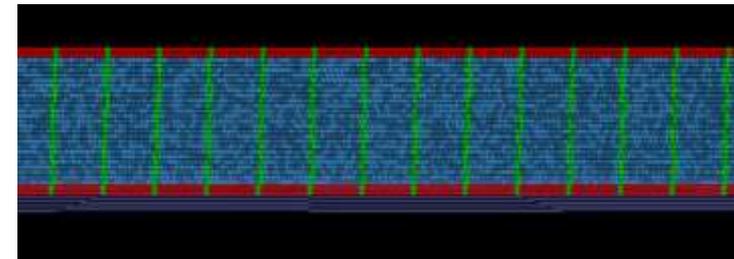
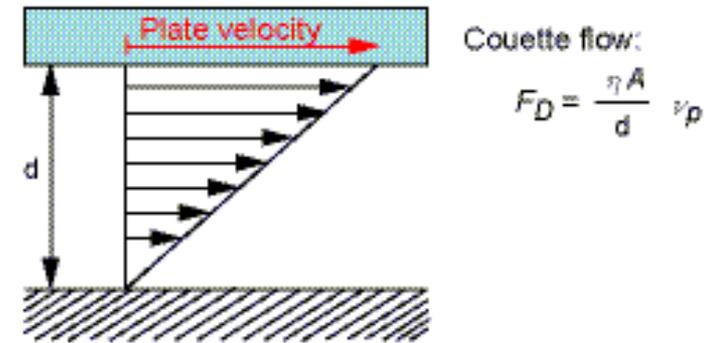
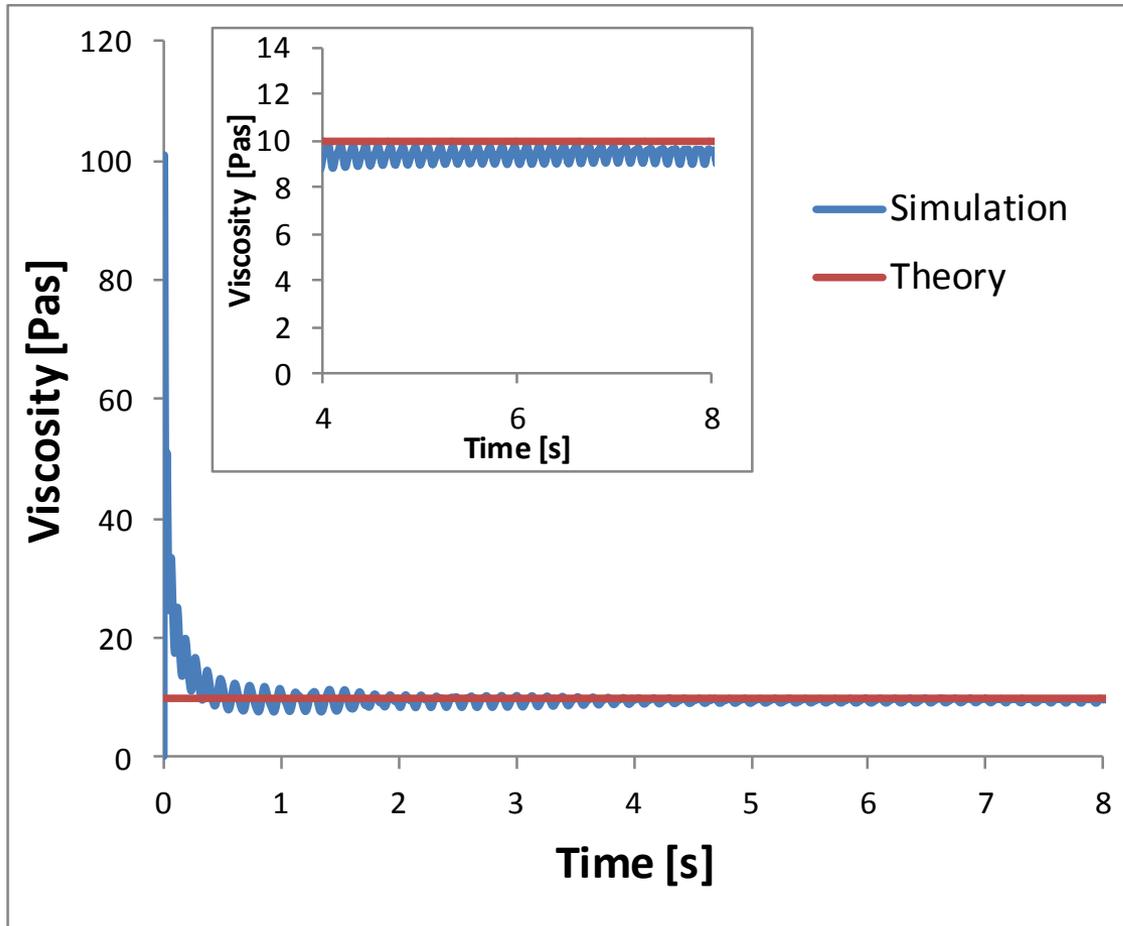


SPHとDEMの連成：計算精度の検証



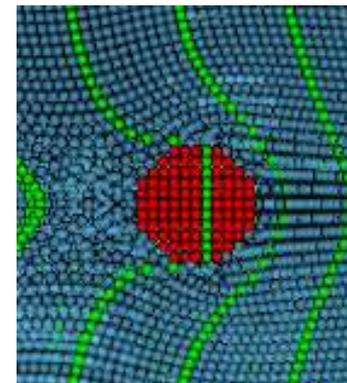
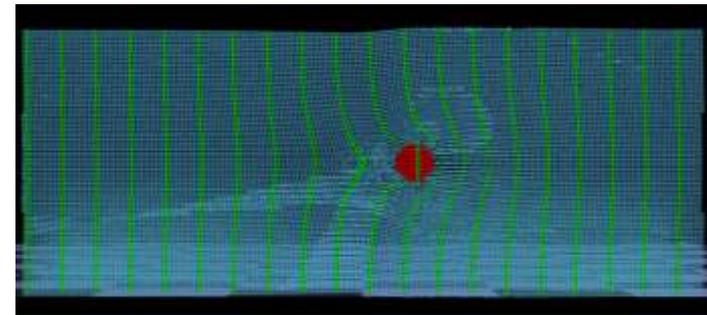
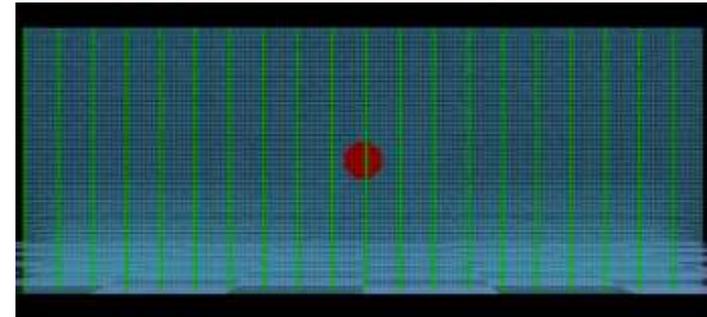
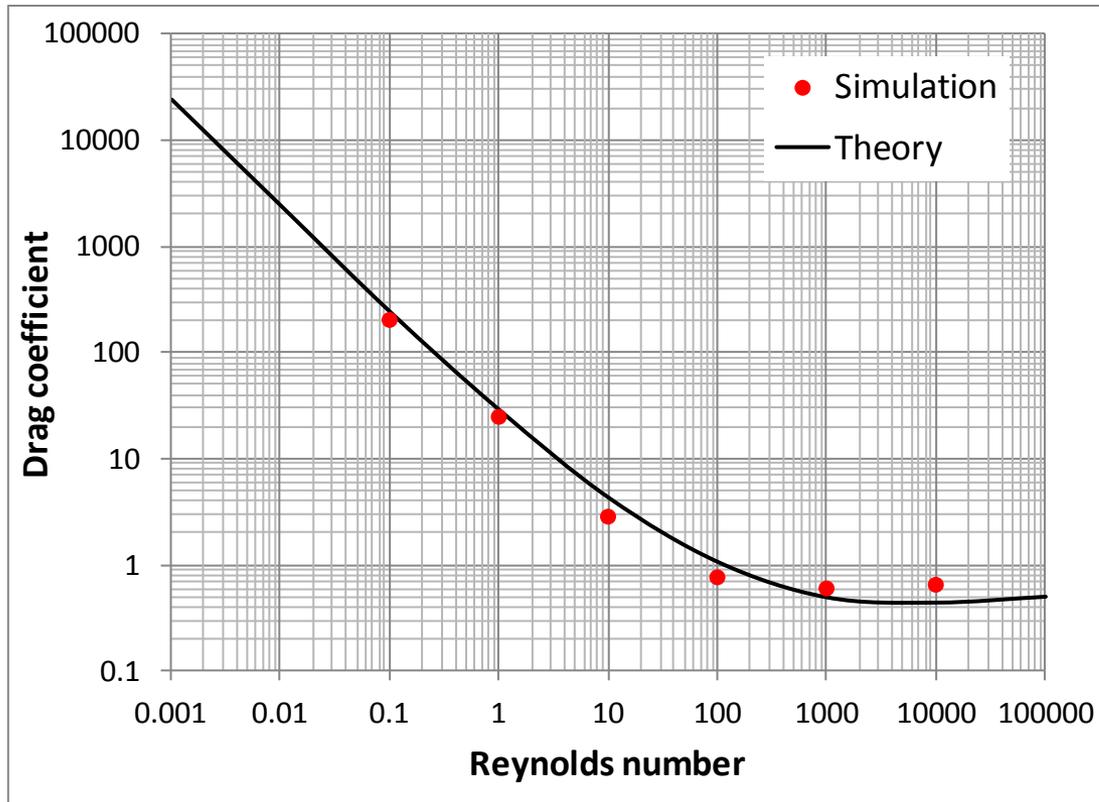
SPHとDEMの連成：計算精度の検証

Couette Flow



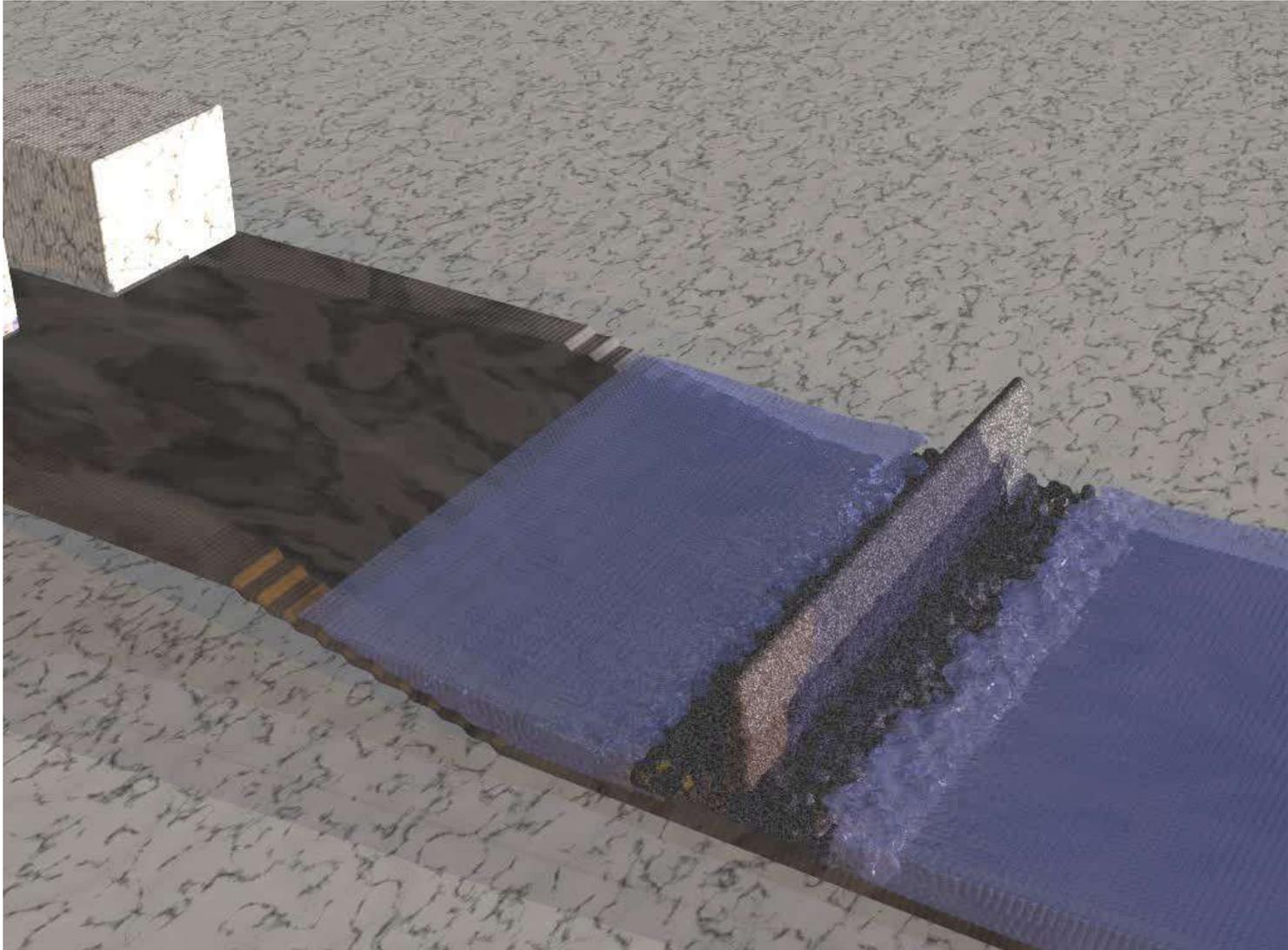
SPHとDEMの連成：計算精度の検証

流体力のレイノルズ数依存性



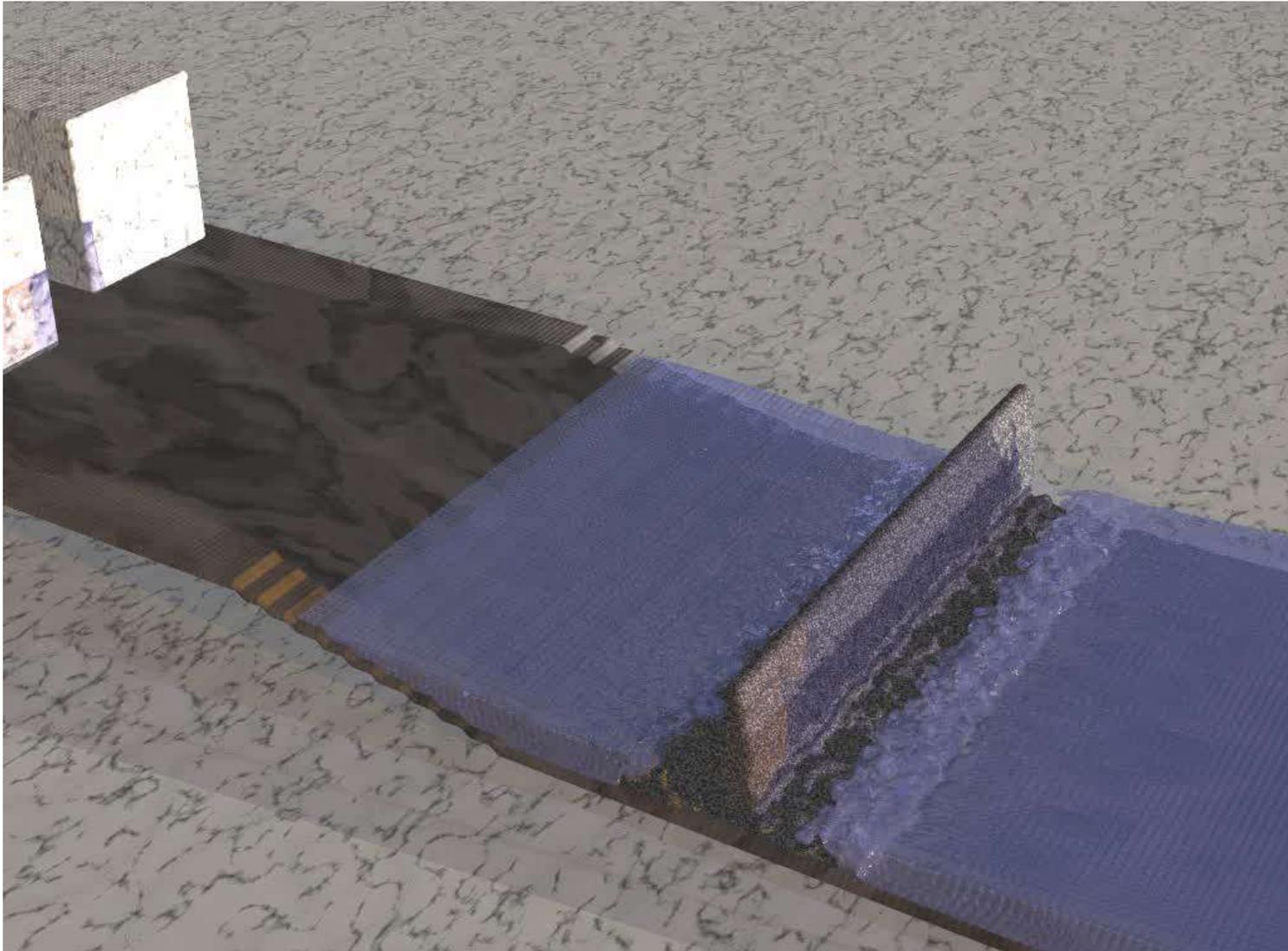
例題計算：防波堤の越流

津波高さ2m : 堤体+捨石 : 堤体は弾性体で地面に完全固定



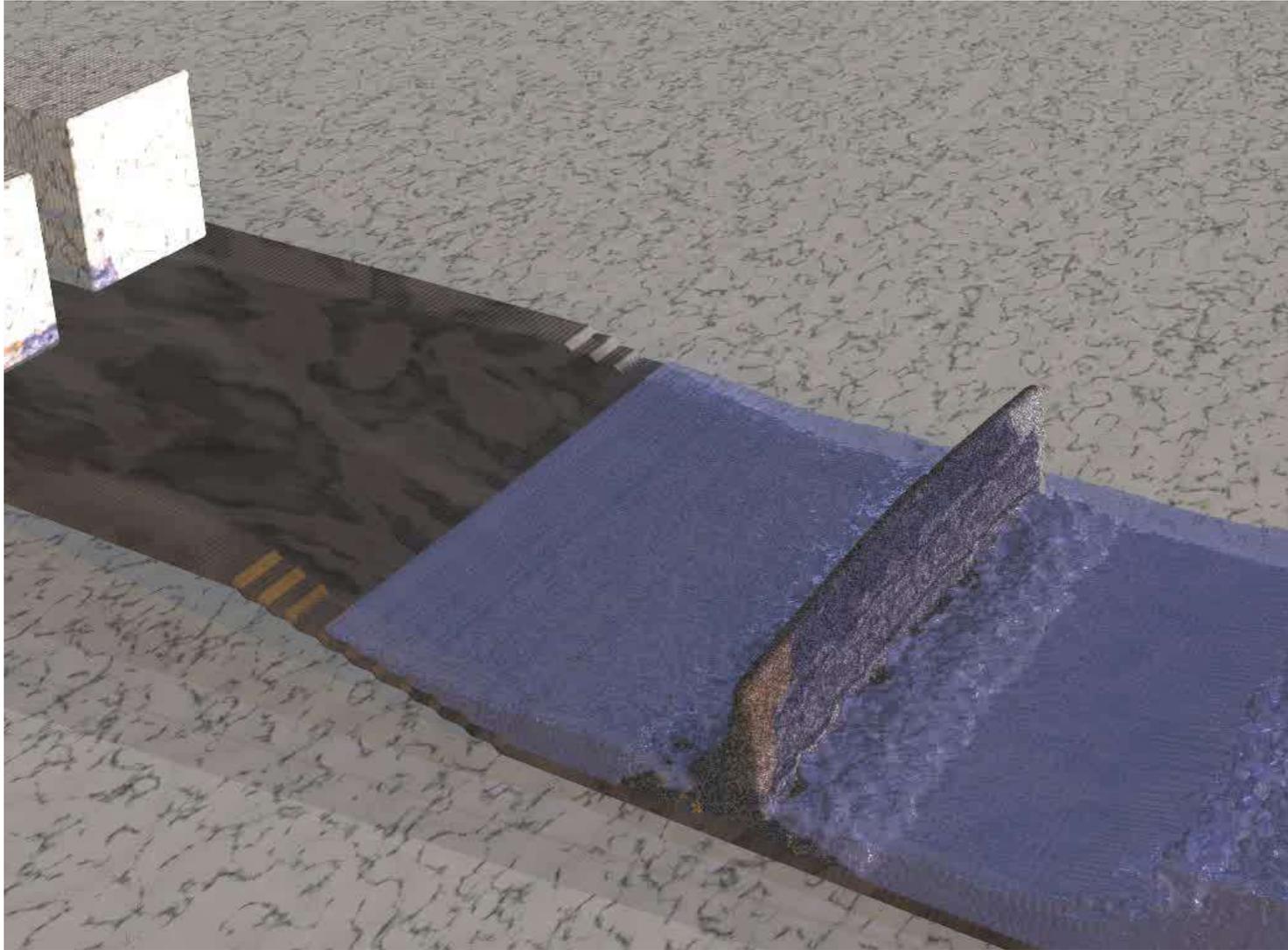
例題計算：防波堤の越流・転倒

津波高さ2m : 堤体+捨石 : 堤体は自重と捨て石の重さで安定



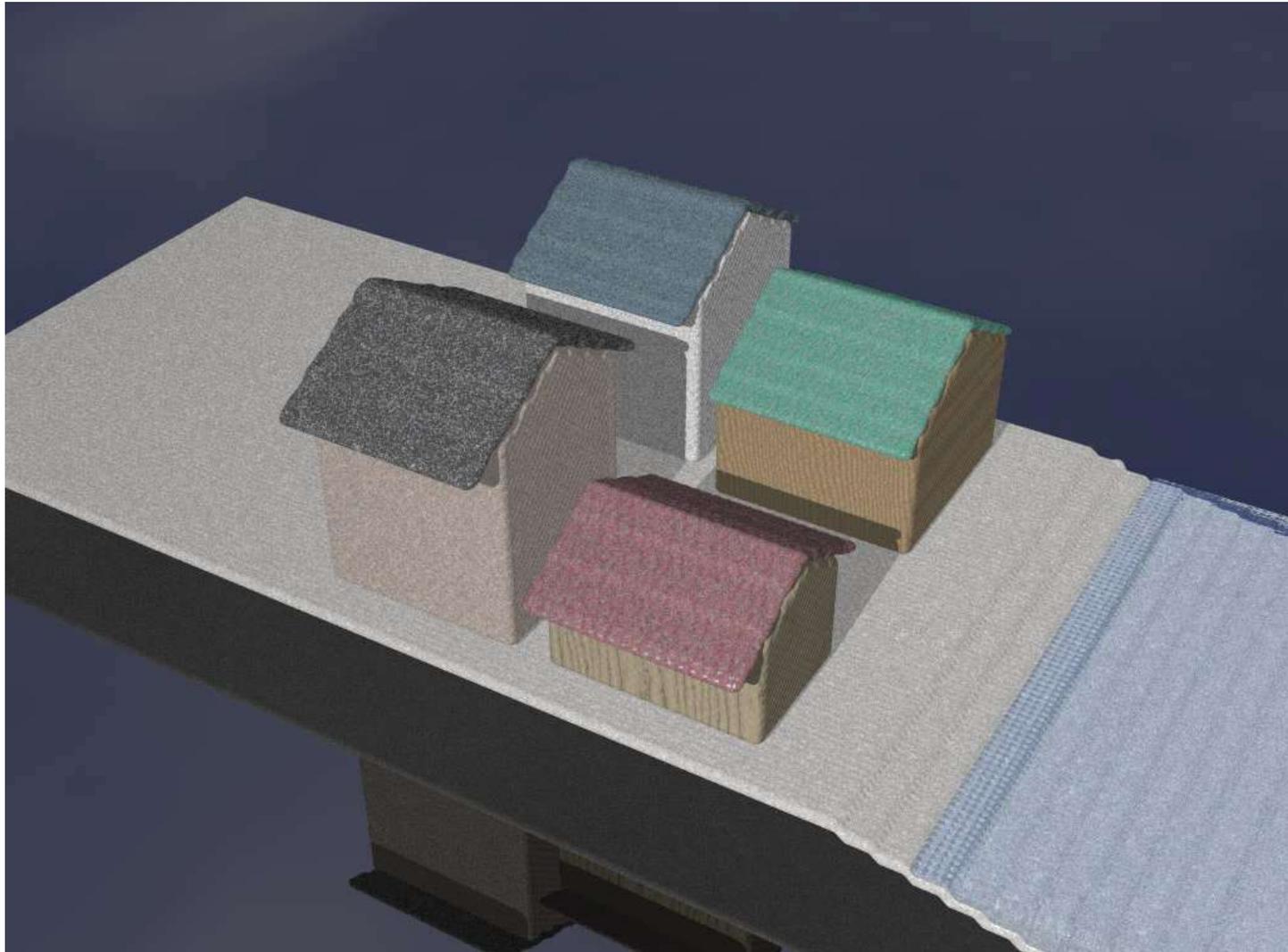
例題計算：防波堤の越流・転倒・破壊

津波高さ2m : 堤体+捨石 : 堤体は破壊可能



例題計算：住宅の浸水・漂流・衝突

津波高さ2m：住宅は空洞構造



SPHとDEMの連成手法の問題点

□DEMでモデル化された固体の構成則・破壊基準の表現が曖昧

粒子の連結モデルと連続体モデルとの関係を明確にするべき



破壊までは東大地震研究所堀先生らのFEM- β との連成、破壊後DEMのモデル化を現在構築中

□SPHの解像度が曖昧

構造物の隙間や、構造物と地盤の隙間、地盤の空隙などの流れが重要

□SPHもDEMも計算が遅い

莫大な数のSPH粒子とDEM粒子に対する高速計算技術が必要



京でのチューニングと性能試験を実行中

まとめと議論

防災シミュレーションの現状

- 流体力の見積もりと各部材強度、接合部強度などのよりリアルなモデル化が必要
- 実データとの比較によって津波災害シミュレーションの予測精度の確保が必要

次世代スパコンを用いた地震津波防災の未来像

- シミュレーションによる津波災害の最小化条件を見出し、街づくりや復興計画に貢献

SPHとDEMの連成：例題計算条件

SPH粒子

粒子数 : 350,000 ~ 4,000,000 (影響範囲2粒子)

物性: 水を想定、人工粘性は不使用

その他: 20ステップに1回の割合で、Shepard Filterによる密度再初期化による
圧力振動制御

DEM粒子

粒子数 : 10,000 ~ 40,000

物性: 固体内部は面心立方格子によるQDEM弾性体、表面はクーロン摩擦のあるDEM

実行環境

ハードウェア : GPU GeForce GTX 460 OEM 及びTesla-C2070

プロセッサコア数 : 336個及び446個

メモリ : 2GB~6GB

実計算時間 : 約2~10時間/100万ステップ