

地すべり起源の津波発生シ ミュレーションの現状とHPC への期待

海洋研究開発機構 数理科学先端技術研究分野

古市 幹人

背景

- 津波の発生源として、地すべりは断層運動に次ぐトリガーイベント。
- 頻度は少ないものの、地震起源のものとは異なり、不意を突かれた状況で津波が来襲する事があるため、今回のインドネシアのような大災害となり得る。
- 地すべりを発生機構とした津波シミュレーション研究については基礎研究の段階。

(とはいえ信用たる警告はでていたT. Giachetti, et.al., 2012 doi.org/10.1144/SP361.7, F. Maeno and F. Imamura, 2011 doi:10.1029/2011JB008253, 2011)

- HPCを用いたフル3次元シミュレーションへの期待と課題が今日の主題。

既往シミュレーション研究

- 地すべり起源の津波シミュレーションは地すべり部分と、津波（海水）部分のシミュレーションが必要
- 津波は伝搬時に浅水波近似がよく成り立つので2次元研究がメイン。即時被害予想への実用性からもその要求が高い。鉛直方向にシグマ座標を使い地形を反映させた2.5次元非静力モデルもあるが少数。
- 地すべりモデルは一番単純かつ標準的なものは密度の高い線形流体にすること。レオロジーの影響は低いとされる。

Kelfoun et al. (2010), Giachetti et al. (2011)

- 都市スケールの災害をターゲットとした3次元直接計算例は少数。

そこで我々（ポスト京防災課題）では、津波リスクの定量的評価の洗練化と、今回のような地上での山体崩壊が直接引き起こす津波を再現する事を目的とした3次元直接計算を実施したいと考えている。

計算手法SPH (Smoothed particle hydrodynamics)

- SPH is the method to simulate the fluid motion discretized with material points = particles.

Navier-Stokes equation:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} \quad \longrightarrow \quad \text{The particle based simulation method for fluid } \ni \text{ SPH}$$

Discretization with kernel function W :

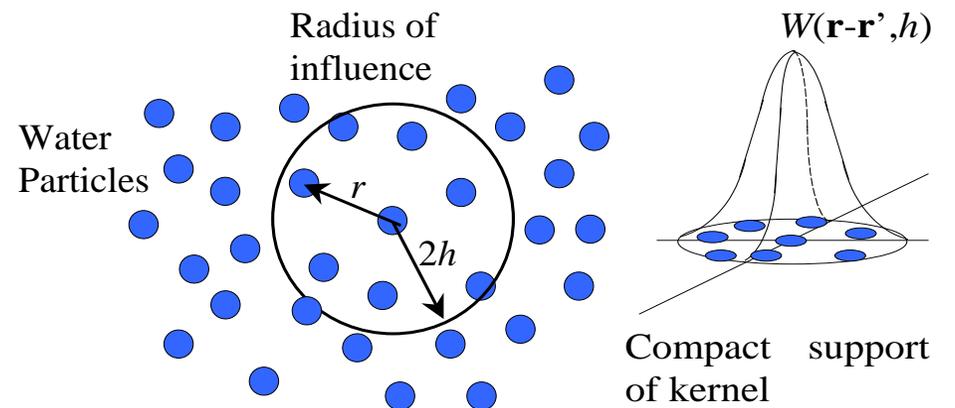
$$A(\mathbf{r}) = \int A(\mathbf{r}') w(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \approx \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} A_b W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_b, h)$$

Where W should have compact support and integration $\int w(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' = \lim_{h \rightarrow 0} \int W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a)$

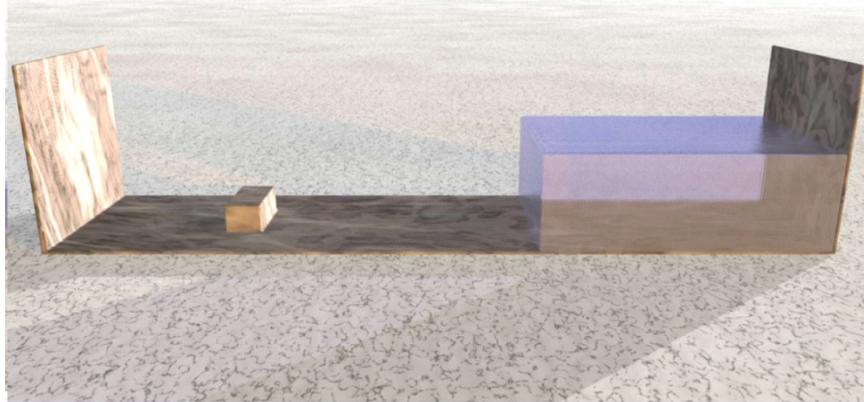
e.g. 5th Wendland kernel function

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

$$q = \frac{r}{h}, \quad r = |\vec{r}_a - \vec{r}_b|$$



- The Lagrangian nature of SPH allows non-diffusive advection, which is useful for tracking the moving interface such as the free surface.



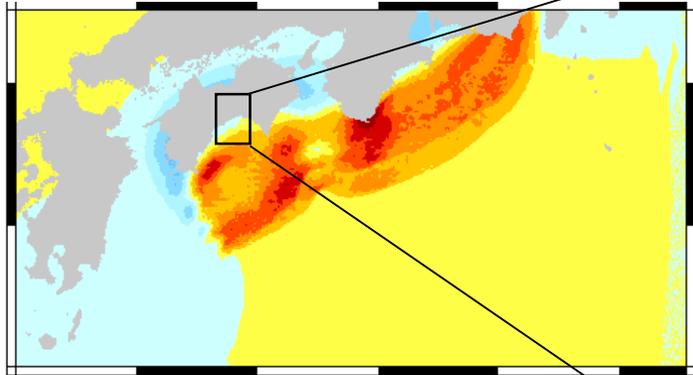
SPHシミュレーションのスナップショット



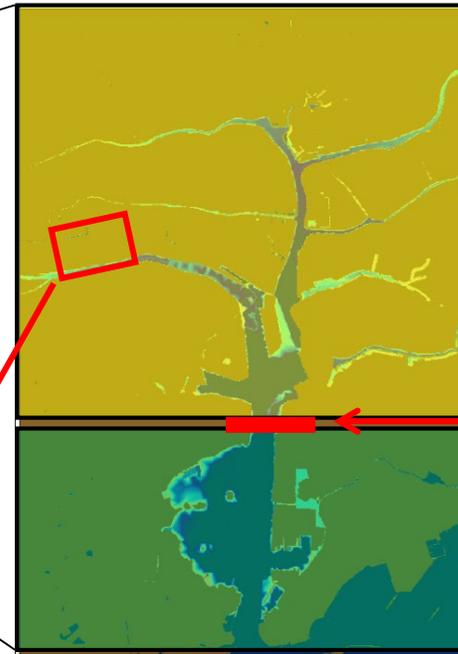
- 地すべりも密度の高い流体としてSPHモデルの中で表現できる。
- 固体を直接扱う例（DEM）はスライド後半にて

3次元粒子法による津波遡上解析

津波伝搬解析：2次元差分法



津波遡上解析：
3次元粒子法



2次元差分法から
3次元粒子法へ接続

2次元差分法

3次元粒子法による遡上解析

解像度	総粒子数
4 m	110万
2 m	520万
1 m	2770万
0.5 m	1億6700万

都市全体を解析領域とすると
数10億規模のモデルになる

⇒高並列の並列計算を実施する必要

Parallel SPH simulation code.

- Efficient implementation of SPH code is still big challenge in HPC.
- We have been developing the shared memory and distributed memory parallelization algorithms.

粒子法コード並列化の概要

プロセッサレベル

共有メモリ並列・最適化

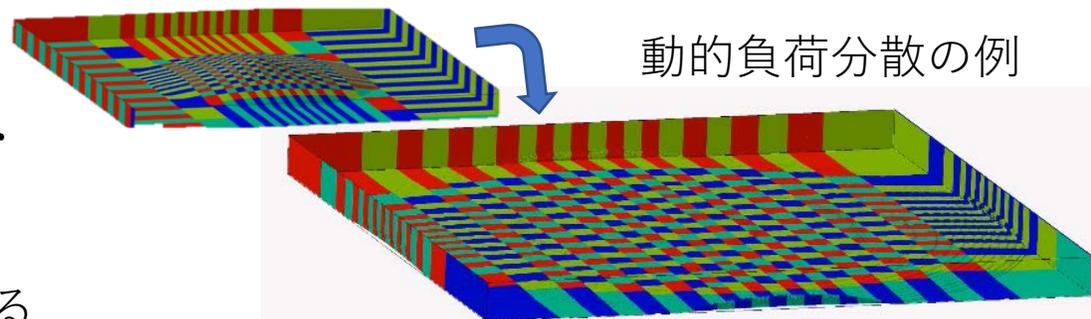
- Pair list & Sorting
[Nishiura and Sakaguchi, *Compt. Phys.*, 2011]
- Action-reaction law
[Nishiura, Furuichi and Sakaguchi, *Phys. Comm.*, 2015]

分散メモリ並列・最適化

- Iterative load-balancing method
[Furuichi and Nishiura, *Phys. Comm.*, 2017]
- Overlapping communication [Furuichi et.al., SC17]

The state of the art SPH code can handle over billion particles with over thousands nodes.

京コンピュータで最大400億粒子ぐらいは解ける



Validation test of SPH code

- 大規模粒子法計算が、どれぐらい正確なのかを、実験との直接比較により検証している

JAMSTEC-EPFLで共同研究

PART 1

WAVE
HYDRODYNAMICS

Dry bed surges

Wet bed bores

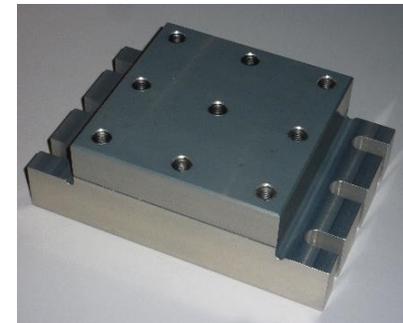
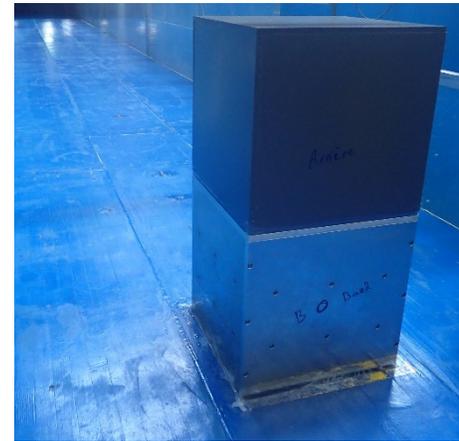
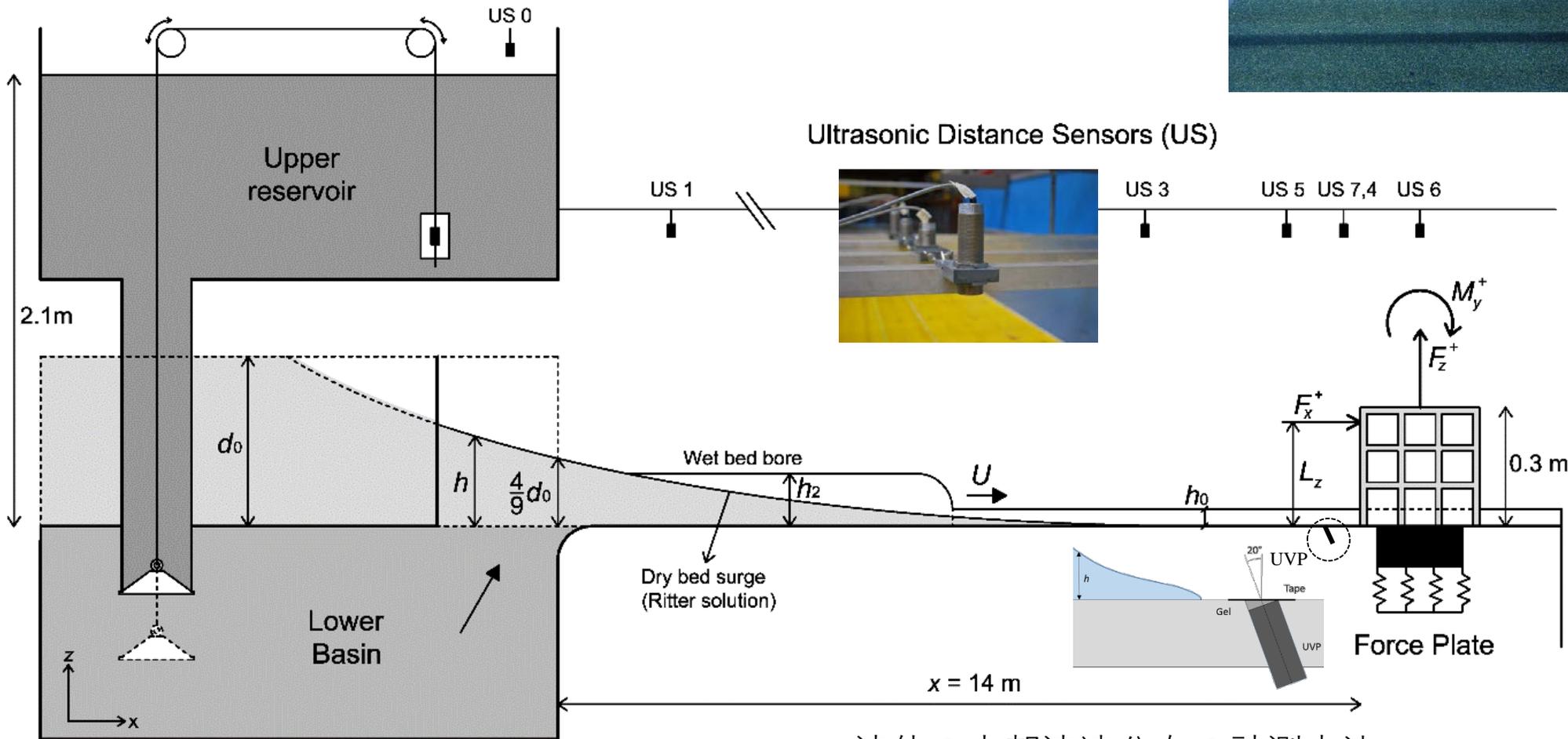
PART 2

WAVE IMPACT

Impervious

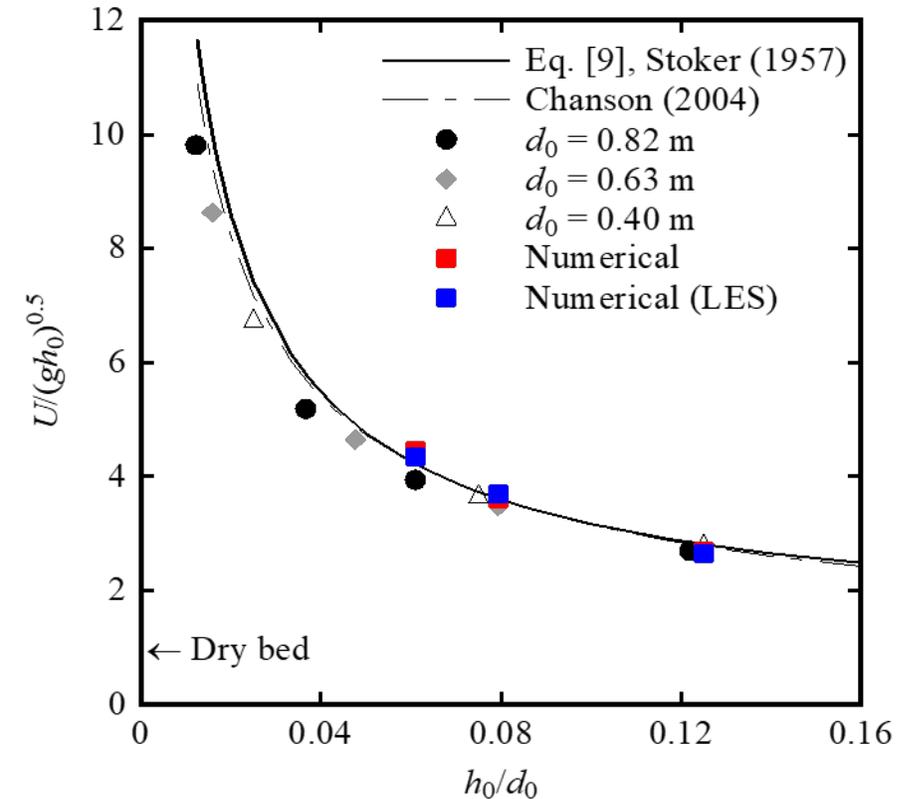
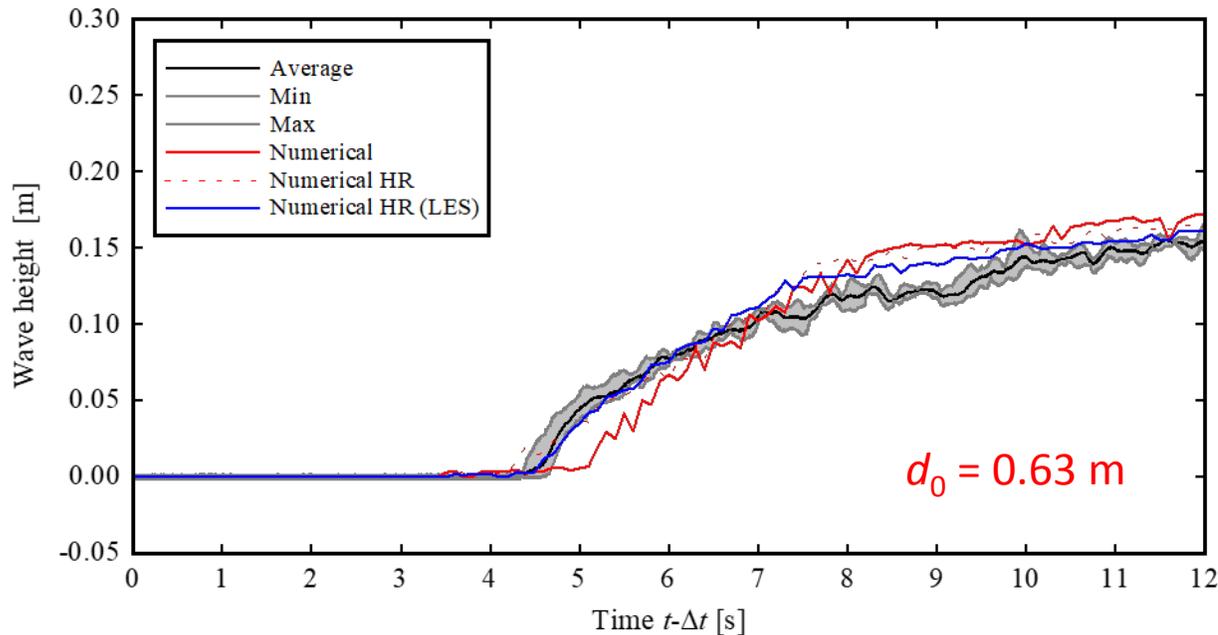
With openings

EXPERIMENTAL SET UP



UVP: 流体の内部流速分布の計測方法

PART 1 – Wave profiles (Surges)

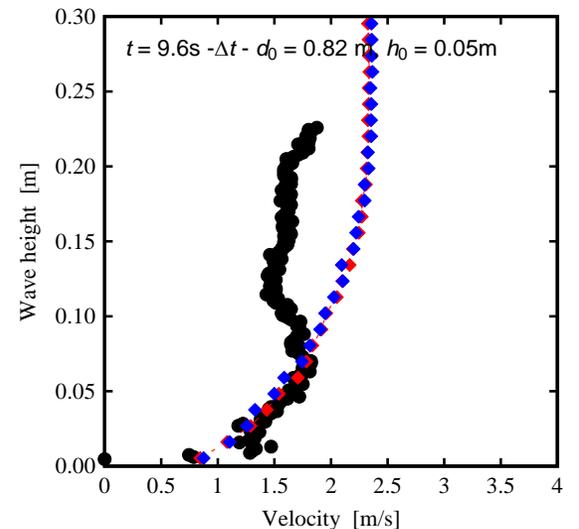
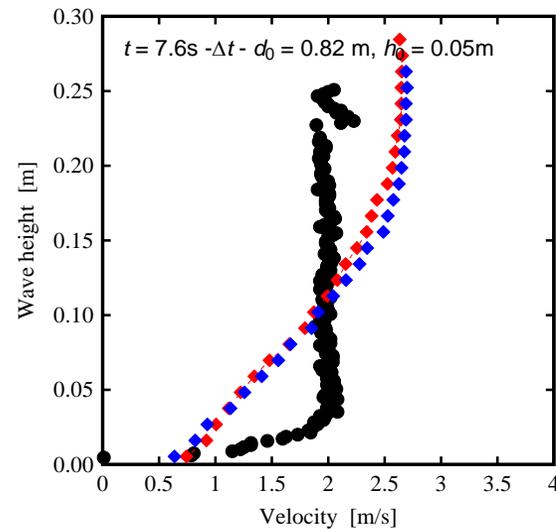
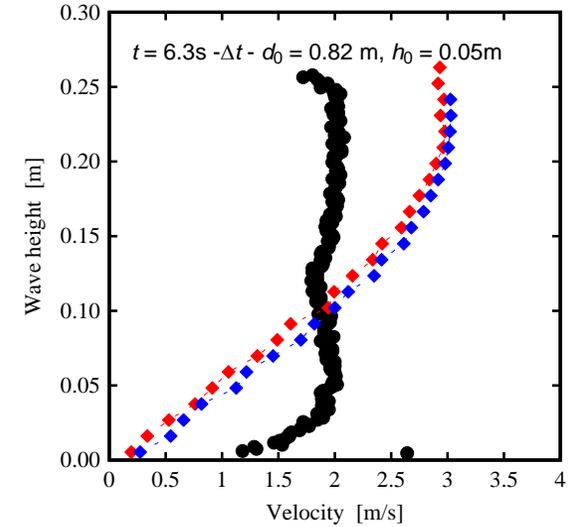
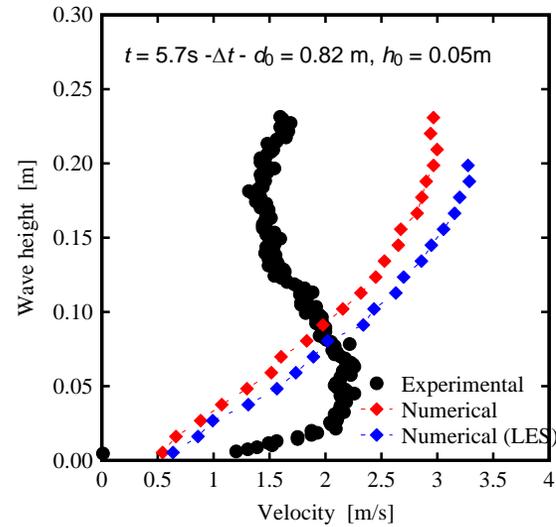


- 10mを超える大きな計算になってくると、床のざらつきを摩擦としてモデルに反映する必要があった。
- 波の高さや平均速度といったマクロな描像は、解像度を上げたり (HR) 乱流モデルを入れる事で (LES) でより精度が増しており、おおむね期待した働きを示す

PART 1 – Wave velocity profiles ($d_0 = 0.82\text{m}$)

• UVPを使って流体内部の速度分布を測定し、数値計算結果と直接比較する事に成功した。

• 鉛直方向に平均した速度がそこそこ一致していても、速度分布はあまりあっていない。



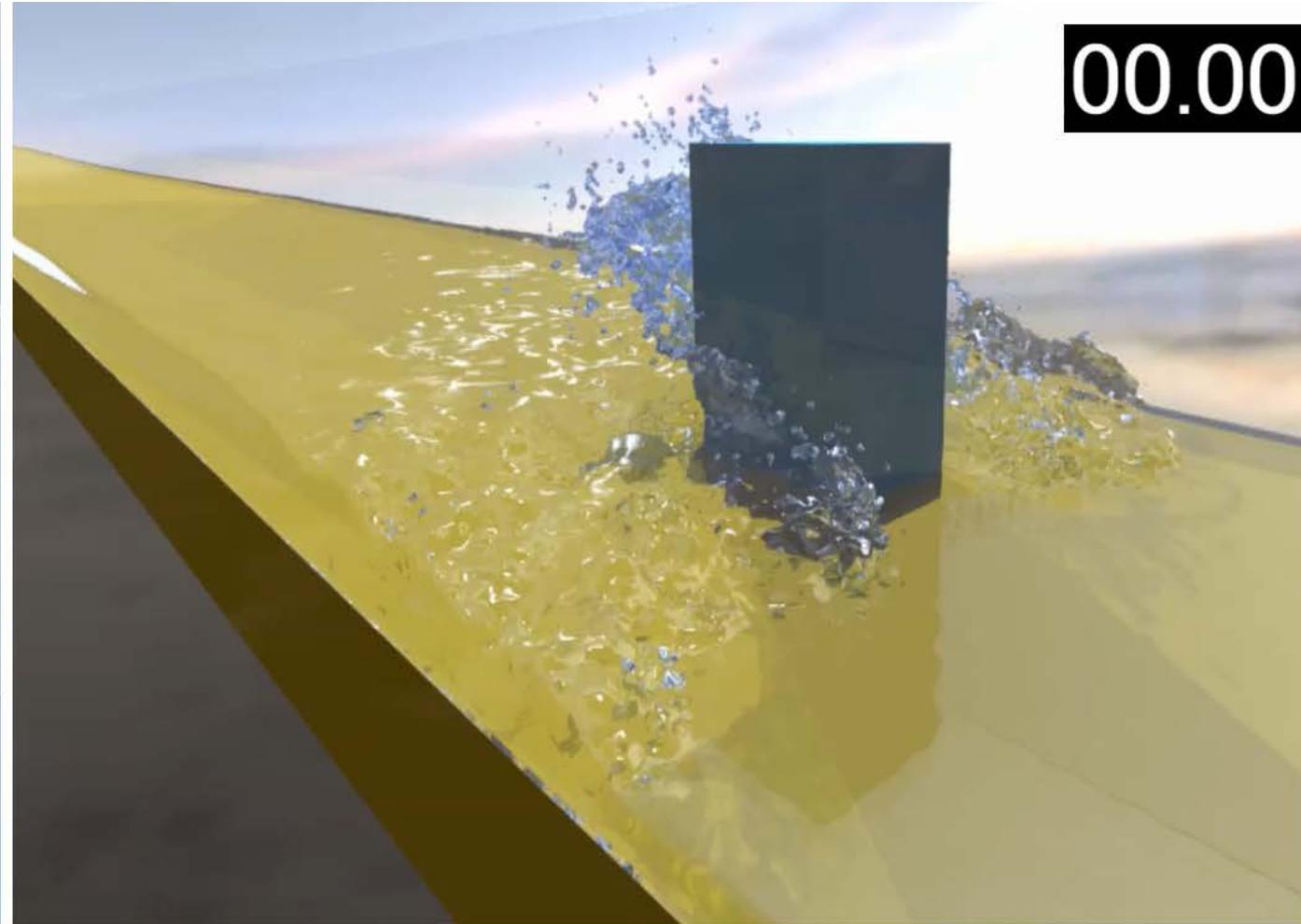
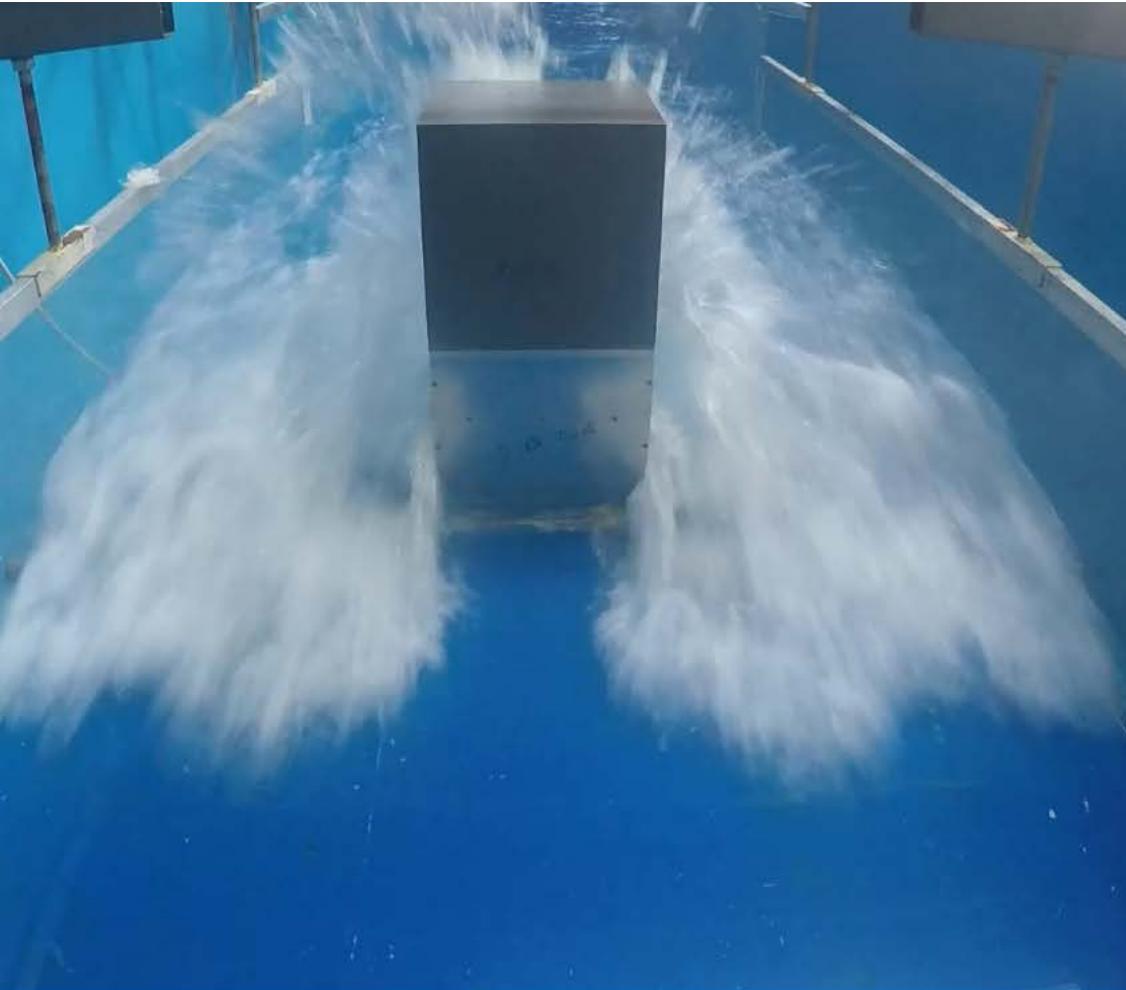
PART 1 – Wave hydrodynamics: conclusions

- Good agreement in terms of velocity profiles and wave front celerity
- Disagreement still exists in terms of velocity profiles
- Effect of bed roughness remains difficult to reproduce numerically.

PART 2 – Wave Impact (Wet bed bore)

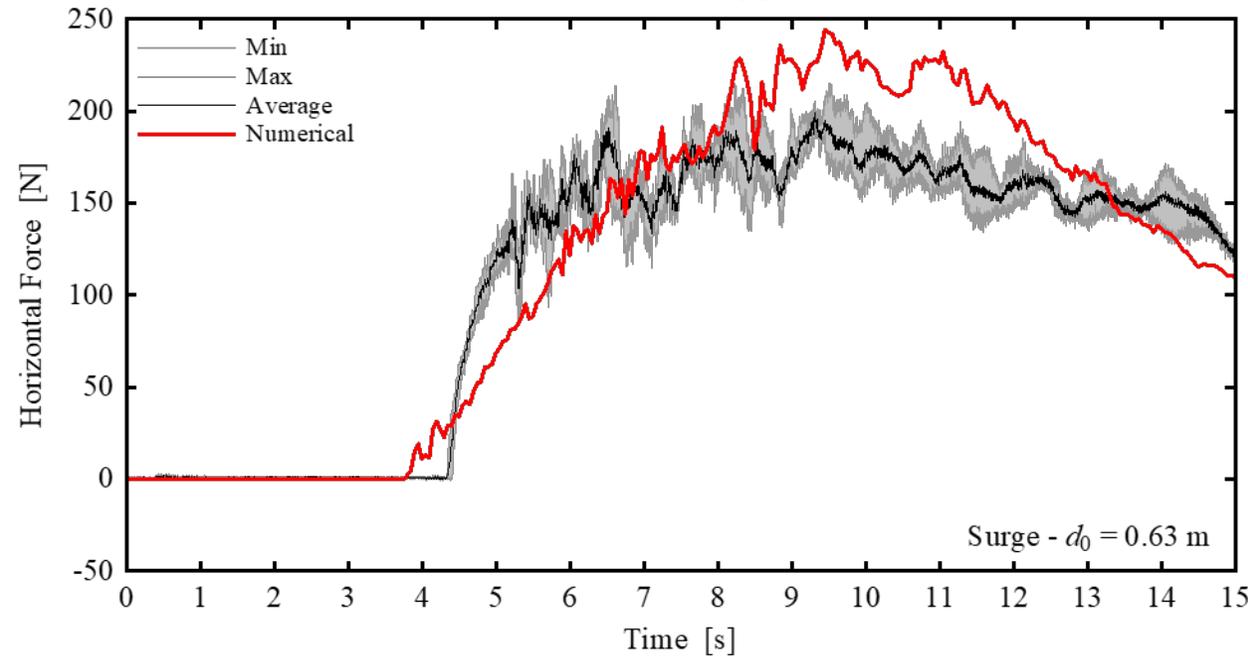
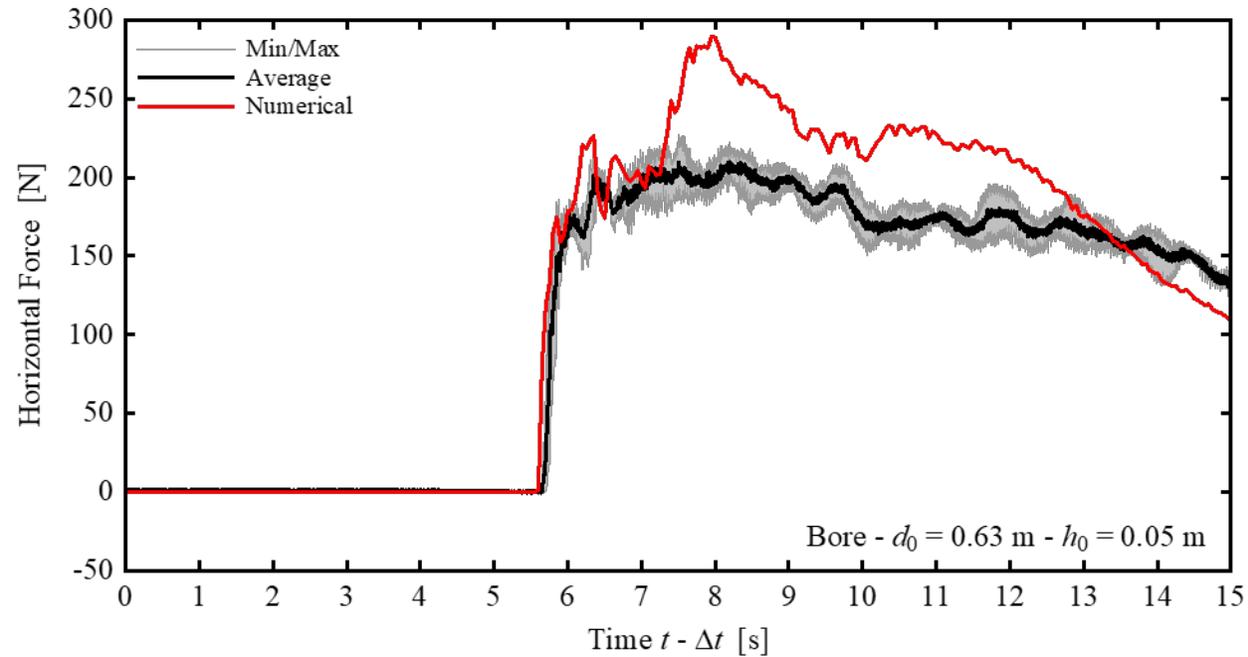
実験

SPH計算



PART 2 – Wave Impacts

- 3次元計算においては、幾何形状を考慮した建物への衝撃を計算できるのがポイント。2次元では難しい。
- Wet bore においても Dry bed Surge においても、ある程度の衝撃の再現性が認められる。しかし Dry の方は衝撃時があまりあっていない。



PART 2 – Wave impact: preliminary conclusions

- Good reproduction of water depths for both surges and bores.
- **Surges:** milder force gradient during the impact
- **Bores:** good agreement of horizontal forces during the initial impact phase. Disagreement in horizontal forces for larger times.

CURRENT STATUS:

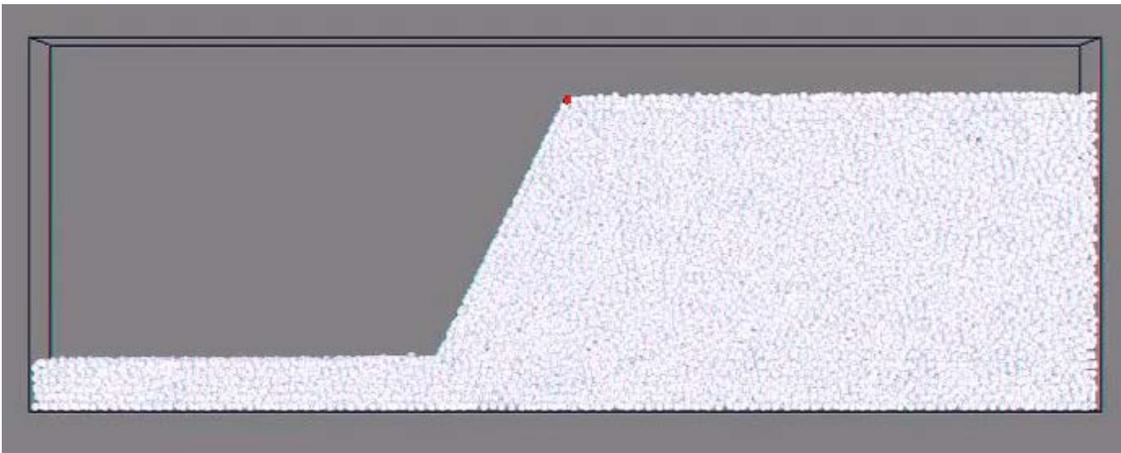
- Better understand disagreement in horizontal force for larger times
- Simulations of wave impact on buildings with openings

地すべり部分のモデル化

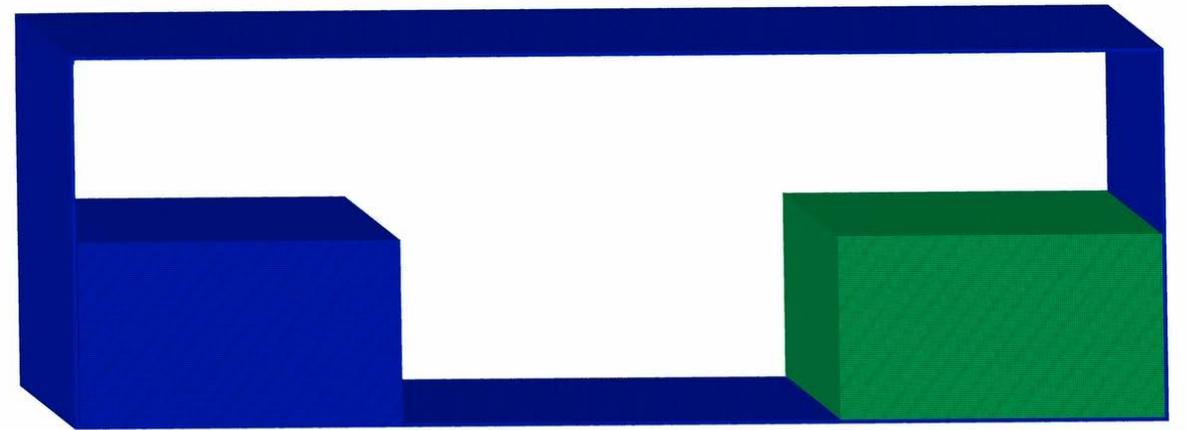
- 一時近似では、Dense Newtonian fluid が用いられる。

[e.g. T. Giachetti, et.al., 2012, F. Maeno and F. Imamura, 2011, L. Schambach et.al. 2018]

- 一方土木の業界ではDEM (Discrete Element Method) が地すべりのモデルとしてよく用いられる。
- DEM (地すべり) とSPH(津波)の津波混相流れシミュレーションへの展開を進行中だが、有効性の検証がまだ



DEMによる地すべりシミュレーション
(箱を振動させたときの山体崩壊)



2000万粒子を用いたSPHとDEMの混相シミュレーション
(左の水塊と右の砂山の衝突計算)

まとめ

- 山体崩壊をともなう津波の粒子法3次元シミュレーションは、技術的にはHPCの活用も含めて大きな障壁もなく連続体力学モデルとしては十分にfeasible。
- そこで、九大-JAMSTECで数メートル解像度の実験を計画中
- ただ、その有効性・精度については、地すべりのレオロジーや、津波遡上における地表の摩擦影響等の物理モデルに改良の余地がある。
- 大型室内実験との比較でそれら課題を洗い出し、乱流モデルや境界摩擦モデルの洗練化で改善しうるかを検証中。