



災害被害予測に向けた粒子法による マルチフィジックスシミュレーション

九州大学

浅井 光輝,
モリカワ ダニエル(D3),
辻 勲平(D2)



2011 Tohoku Tsunami



2017 heavy rain disaster in Kyushu

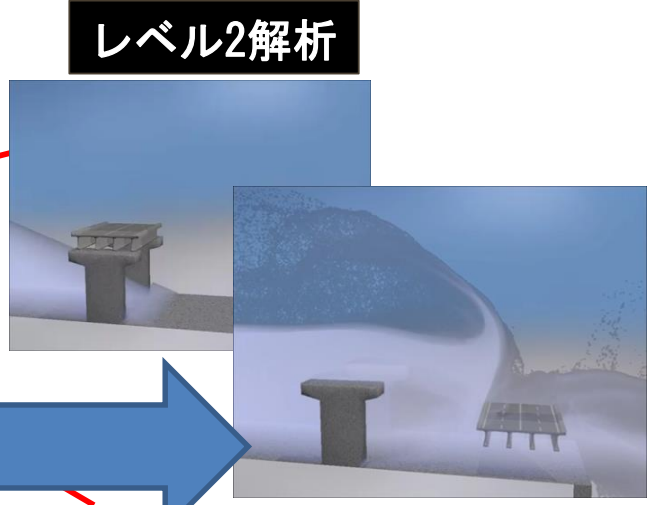
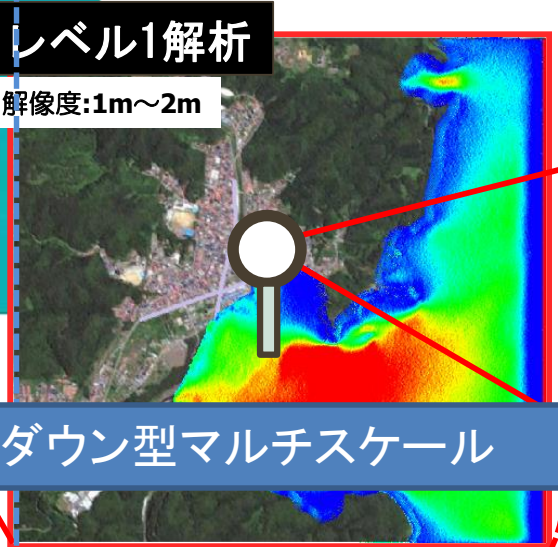
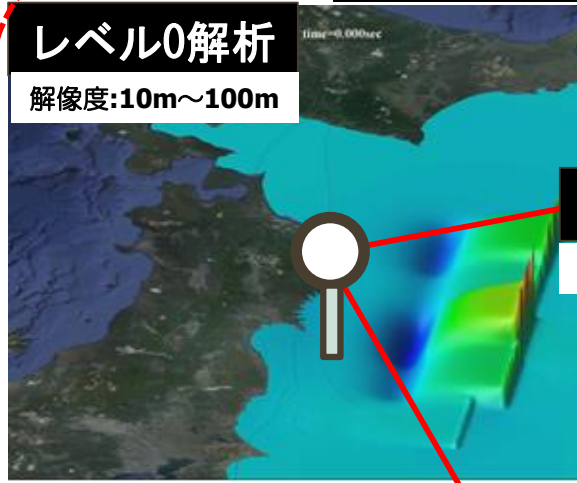


2018 heavy rain disaster



MScPhy(Multi-Scale and PPhysics)マルチスケール粒子法

スケール間をシームレスにつなぐブリッジング技術は構築済み



トップダウン型マルチスケール

都市部津波遡上解析の立体視例
(防災教育等を通してソフト防災に貢献)



MScPHY (Multi-Scale and PHysics) マルチフィジックス粒子法

複合災害予測し、ハード防災に貢献

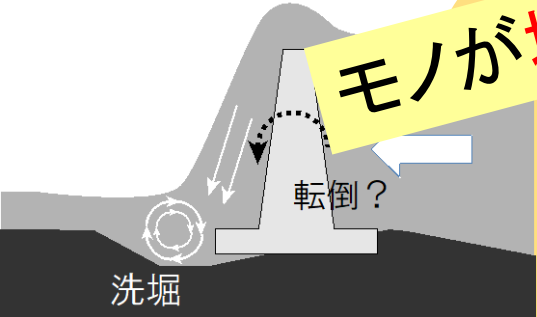
流体力を受ける構造 **流体-剛体連成SPH法**
(数億粒子まで対応可)



構造

モノが壊れるまでの計算には粒子法?

洗掘 + 液状化による
構造物の不安定化

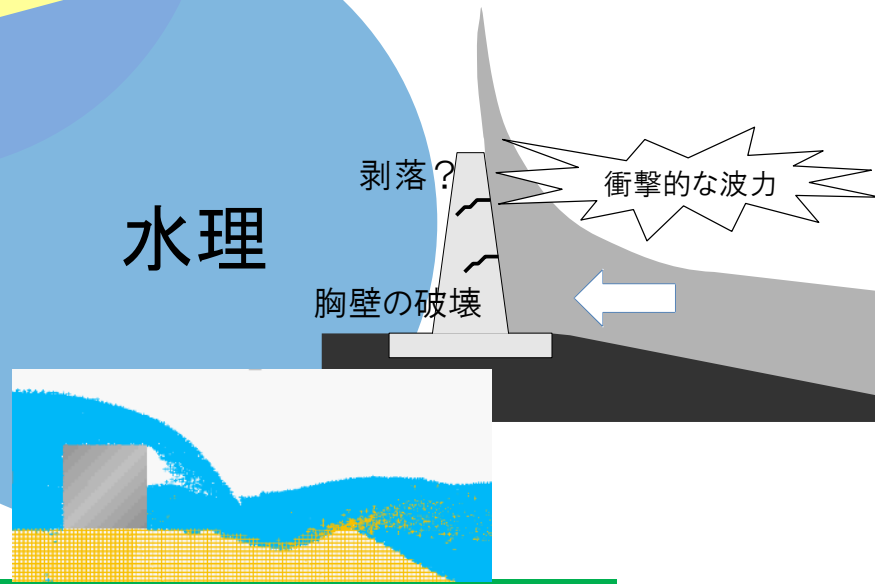


地盤



基礎地盤の洗掘

水理

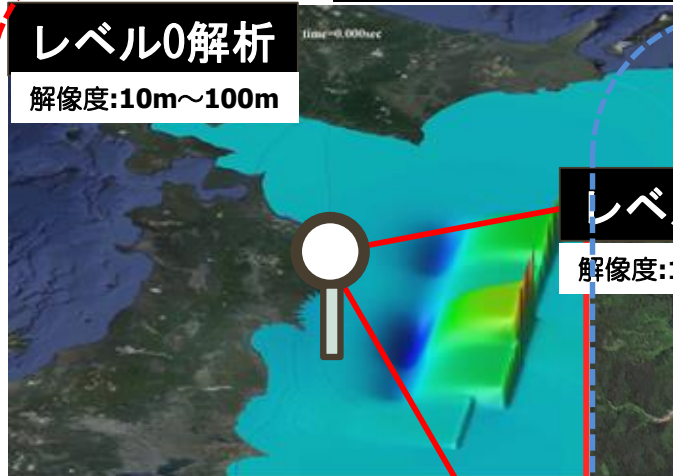


浸透流・洗掘解析用SPH法
(実験との比較で精度確認中)

MScPhy(Multi-Scale and PPhysics)マルチスケール粒子法

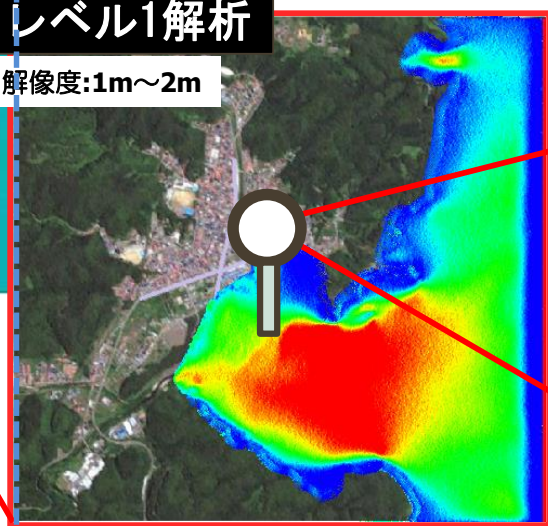
スケール間をシームレスにつなぐブリッジング技術は構築済み

レベル0解析
解像度:10m~100m



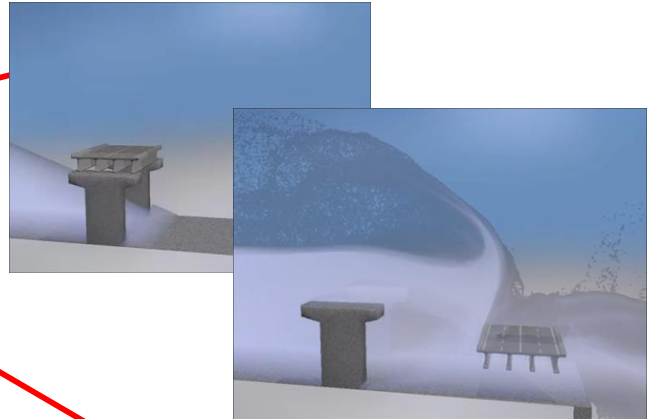
従来の津波解析
(津波伝搬解析)

レベル1解析
解像度:1m~2m



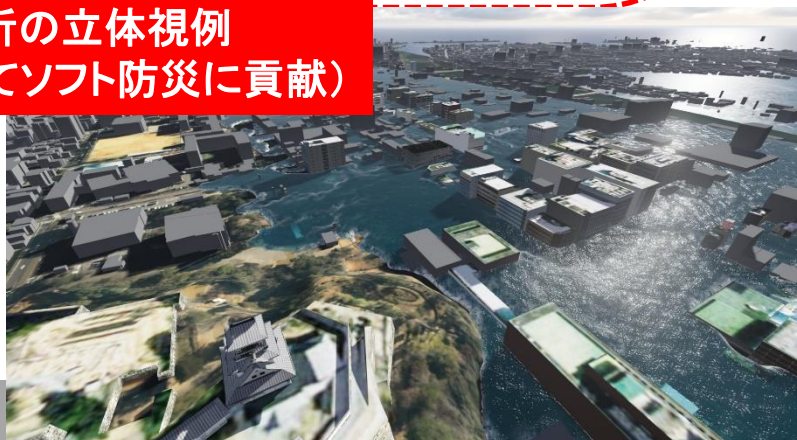
津波遡上現象

レベル2解析



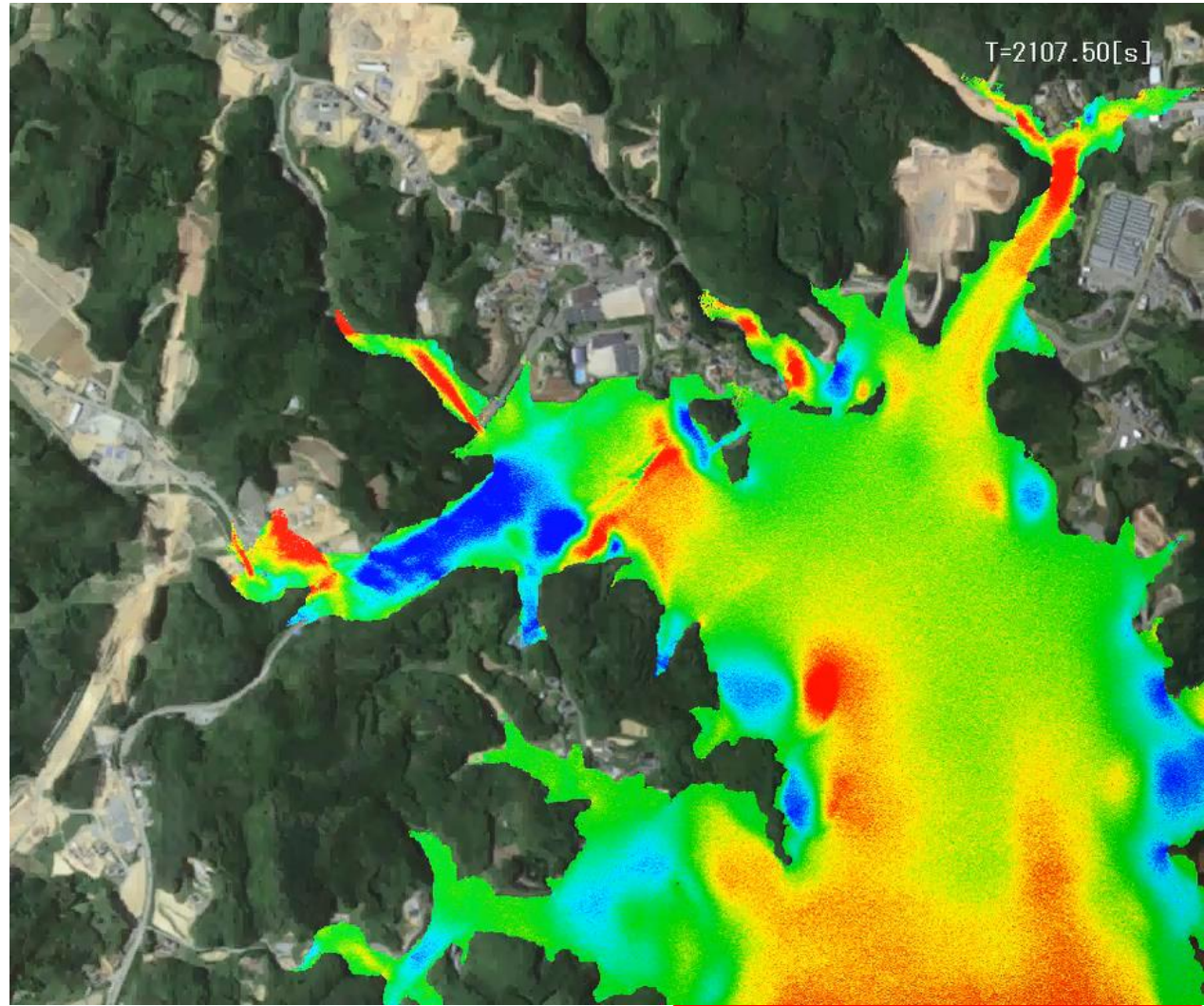
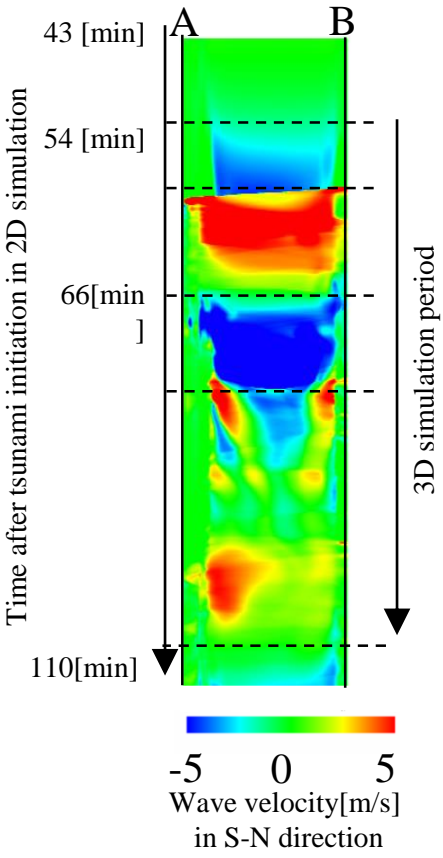
橋梁等の土木構造物の被害予測
(橋梁の流失被害)

都市部津波遡上解析の立体視例
(防災教育等を通してソフト防災に貢献)

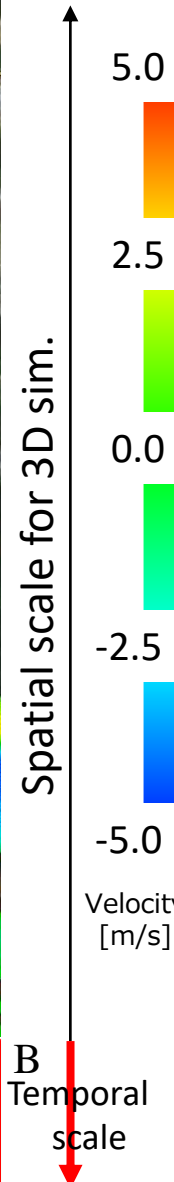


マルチスケール津波解析例

Wave height on A-B



Velocity in main flow direction from 2D analysis (level0)

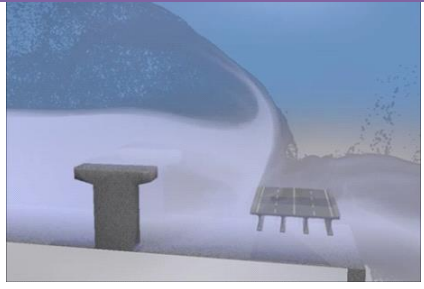


MScPhy (Multi-Scale and Physics) マルチフィジックス粒子法

複合災害予測し、ハード防災に貢献

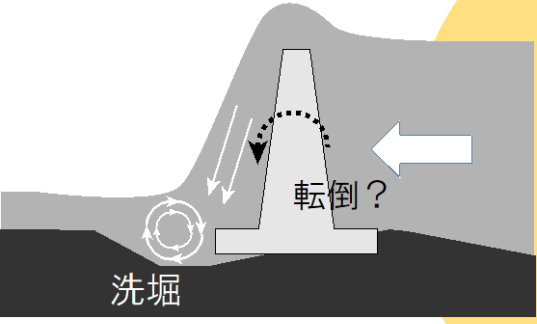
流体力を受ける構造

流体-剛体連成SPH法
(数億粒子まで対応可)



構造

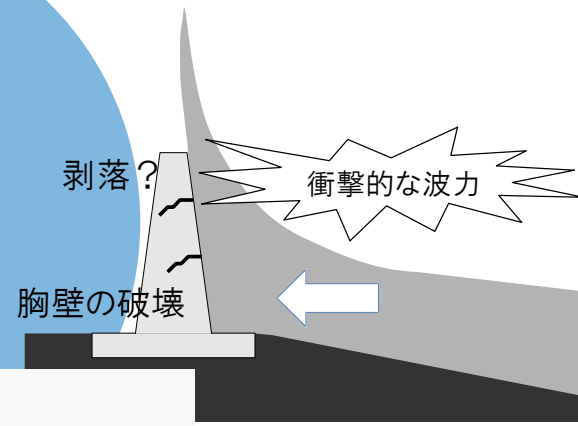
洗掘 + 液状化による
構造物の不安定化



地盤



水理



浸透流・洗掘解析用SPH法
(実験との比較で精度確認中)

固体力学

力のつり合い

Lagrange微分

$$\frac{D^2 \mathbf{u}}{Dt^2} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{b} \right)$$

応力評価

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

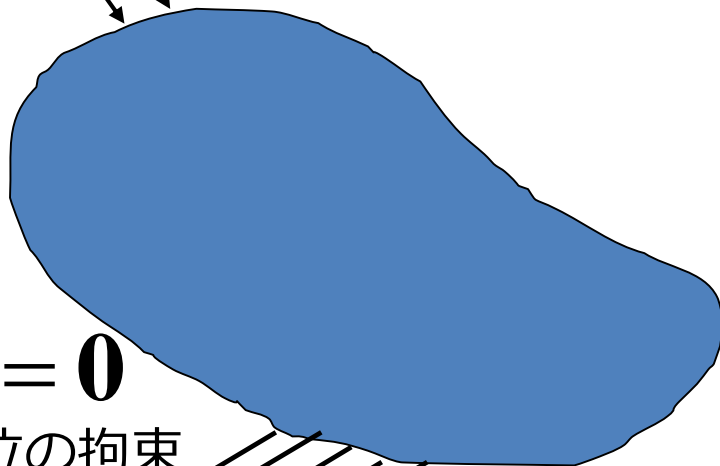
初期状態からの変形量 (ひずみ)
から応力を算出



Lagrange記述に基づく
有限要素法

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{t}$$

外力



$$\mathbf{u} = \mathbf{0}$$

変位の拘束



数値流体力学

運動量保存式

ナビエ・ストークス方程式

Euler微分

移流項

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \nabla) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{1}{\rho} \mathbf{b}$$

質量保存式

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

変位から速度へ
移流項が

応力評価

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

運動の記述方法は？

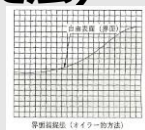
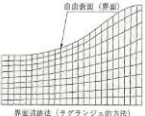
瞬間のひずみ速度から応力を算出

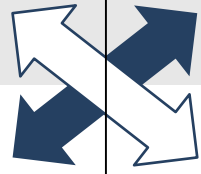
Euler記述 (or Lagrange記述)

空間の離散化方法は？

有限要素法, 有限体積法, 粒子法.

運動記述方法の特徴

記述方法	メリット	デメリット
Euler記述 (界面捕捉法) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計算ロバスト性が高い ・ メッシュによる破綻を気にしなく良い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 細かなメッシュが必要 ・ 高性能な移流スキームが重要
Lagrange記述 (界面追跡法) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 粗いメッシュでも比較的高精度 ・ 計算時間が短い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計算ロバスト性が低い ・ メッシュの再構築(リメッシュ)が必要



メッシュに起因するデメリット

Lagrange記述のメッシュレス法があれば、両者の恩恵が受けられる？

固体力学 vs 流体力学

$$\frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + b$$

(力のつり合い式・運動量保存)

Lagrange記述をすれば両者は同じ連続体!

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

固体力学アプローチ

変位を独立自由度

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij}$$

流体力学アプローチ

速度を独立自由度に

弾性体

弾塑性体

$$\sigma_{ij} = K \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij}$$

K : bulk modulus G : shear modulus

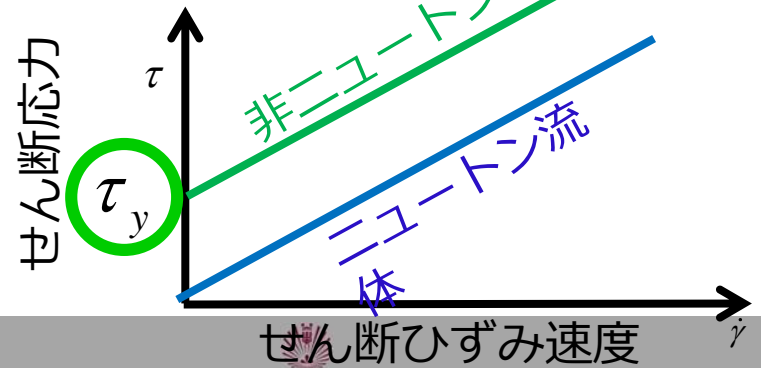
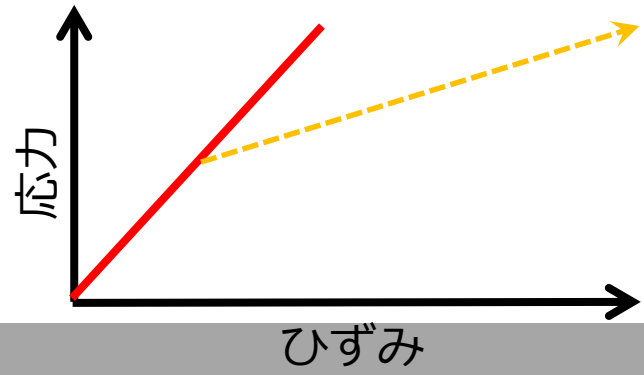
非ニュートン流体

$$\tau = \mu_{so} \dot{\gamma} + \tau_y$$

Yield stress

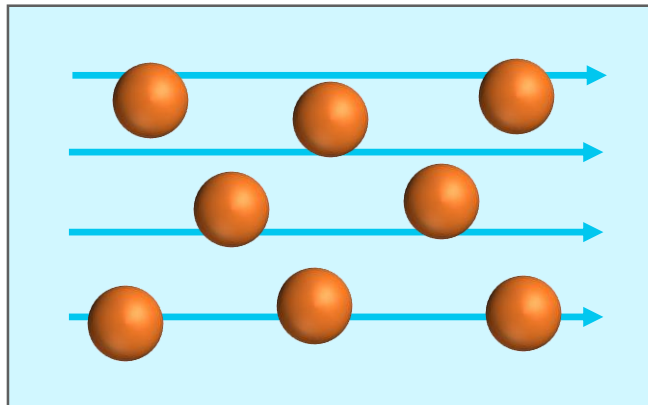
ニュートン流体

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

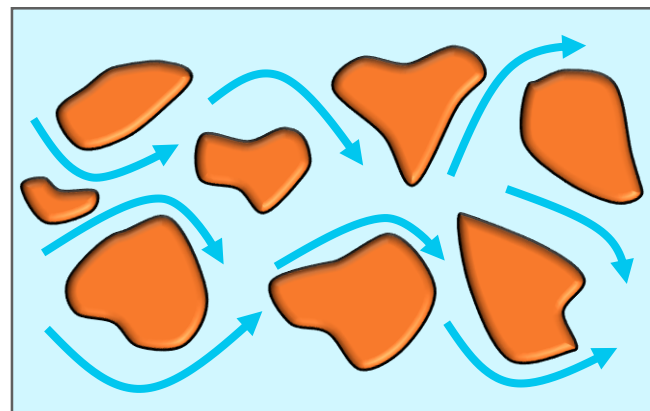


流体と礫(固体)の連成解析におけるマクロとマイクロモデル

マクロモデル



マイクロモデル



流れの特徴

流体の平均的な流れを求める

流体の動きを詳細に解く

流体力

流速から経験則により求める

圧力から数値的に求める

流体解像度

固体粒子径と同等の大きさ

固体に対して1/8程度



マイクロモデルによる剛体と水の連成解析

剛体計算 → ケーソンブロックの挙動

- 捨石マウンドとの接触力 → DEM
- 津波により壁面に作用する流体力 → ISPH

[並進運動]

$$M \frac{dV}{dt} = Mg + F_c + F_f$$

[回転運動]

$$\frac{d(I\Omega)}{dt} = M_c + M_f$$

[M : ケーソン質量, V : 速度, Ω : 角速度,
 F_c, M_c : 接触力/トルク, F_f, M_f : 流体力/トルク
※回転運動は四元数を用いて計算.]

[接触力/トルク]

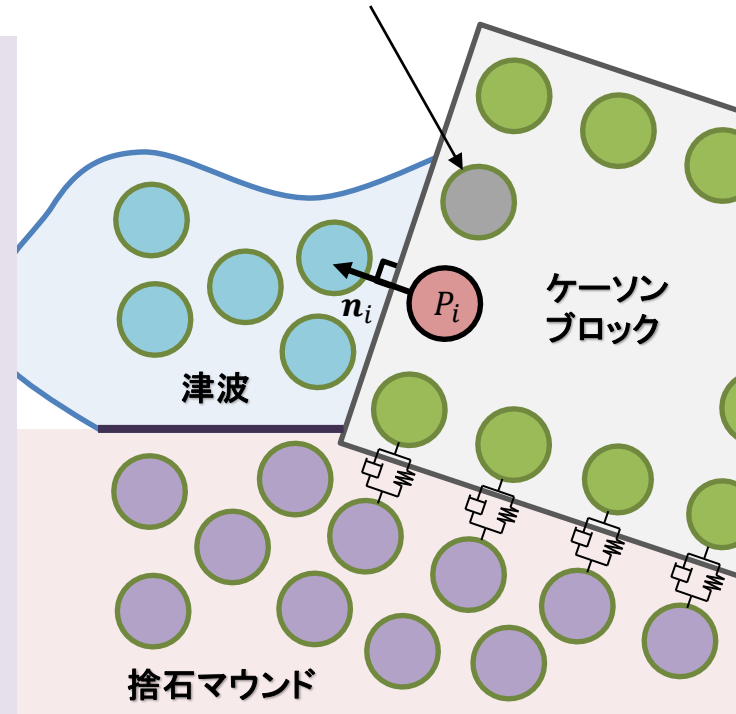
$$F_c = \sum_{i \in \text{caisson}} f_{c_i} \quad M_c = \sum_{i \in \text{caisson}} f_{c_i} \times (x_i - X_g)$$

[流体力/トルク]

$$F_f = \sum_{i \in \text{caisson}} (-P_i a_i) n_i \quad M_f = \sum_{i \in \text{caisson}} (-P_i a_i) n_i \times (x_i - X_g)$$

[P : ISPHにより求まる壁面の圧力, a : 粒子の投影面積(粒径²), n : 外向き法線ベクトル,
※初期値はCADから入手→ I : 慣性テンソル, X_g : 重心ベクトル]

ケーソン壁面粒子
: DEMの接触判定球 + ISPHの壁粒子



剛体と水の連成解析(マイクロモデルの解析例)



水を除いて表示



剛体と水を同時に表示

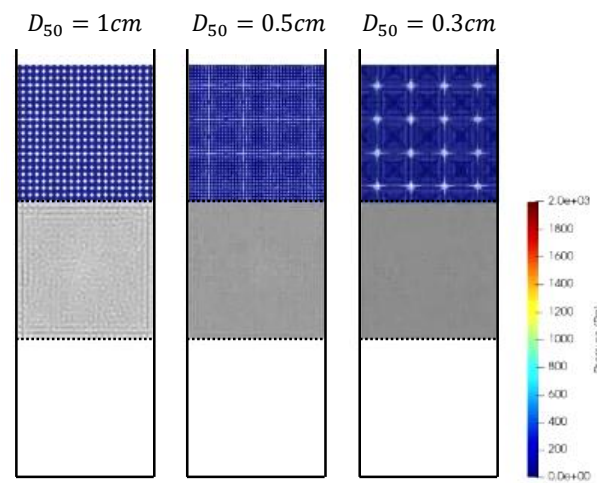
ISPH法による流体解析 (マクロモデルへの準備)

間隙率 ε を考慮したDarcy-Brinkman型支配方程式

: 遷移流 (地表流 \leftrightarrow 浸透流) を計算可能

- 質量保存則:
$$\frac{D\bar{\rho}_f}{Dt} + \bar{\rho}_f \nabla \cdot \left(\frac{\bar{\mathbf{v}}_f}{\varepsilon} \right) = 0 \longrightarrow \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}_f = 0$$
- 運動方程式:
$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\bar{\mathbf{v}}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \mathbf{g} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \bar{\mathbf{v}}_f + \mathbf{F}_r(\varepsilon)$$

$\left[\begin{array}{l} \varepsilon: \text{間隙率}, \bar{\rho}_f = \varepsilon \rho_f: \text{見かけの流体密度}, \mathbf{F}_r(\varepsilon): \text{土粒子から受ける抵抗力}, \\ \bar{\mathbf{v}}_f = \varepsilon \mathbf{v}_f: \text{Darcy流速}, \nu_E(\varepsilon) = (\nu_w + \nu_T)/\varepsilon: \text{有効動粘性係数}, \nu_w: \text{流体動粘性係数}, \nu_T: \text{渦粘性係数} \end{array} \right]$



水塊の粒子充填層透過 ($\varepsilon \cong 0.43$)

地表流

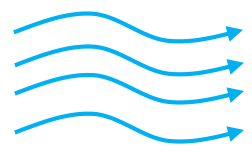
($\varepsilon = 1.0$)

混相流

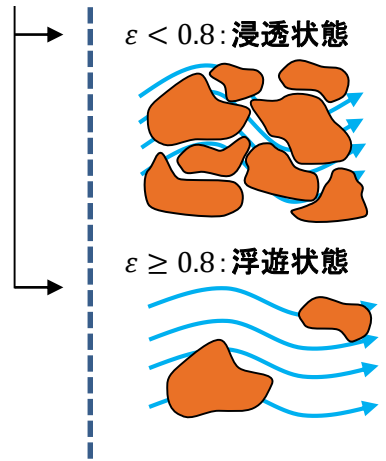
($\varepsilon < 1.0$)

Navier-Stokes 式

$$\begin{cases} \frac{D\rho_f}{Dt} + \rho_f \nabla \cdot \mathbf{v}_f = 0 \\ \frac{D\mathbf{v}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \mathbf{g} + \nu_E \nabla^2 \mathbf{v}_f \end{cases}$$



拡張Darcy則



土粒子から受ける抵抗力

$$\mathbf{F}_r(\varepsilon) = \alpha_c \frac{\nu_w(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2 D_{50}^2} \varepsilon \mathbf{v}_r + \beta_c \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon D_{50}} \varepsilon^2 |\mathbf{v}_r| \mathbf{v}_r$$

$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_c = 150; \beta_c = 1.75: \text{Ergunの式 (球形粒子群)} \\ \alpha_c = 200; \beta_c = 1.10: \text{H.Akbari(2014)の式 (捨石マウンド等)} \end{array} \right.$

$$\mathbf{F}_r(\varepsilon) = -\frac{3}{4} C_d \frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{\varepsilon^{2.7} D_{50}} |\mathbf{v}_r| \mathbf{v}_r \quad (\text{C. Wen. and Y. Yu., 1966})$$

※浸透/浮遊状態で抵抗力は閾値 ($\varepsilon < 0.8$) で不連続
 → 連続的に両状態を接続する処理を実施

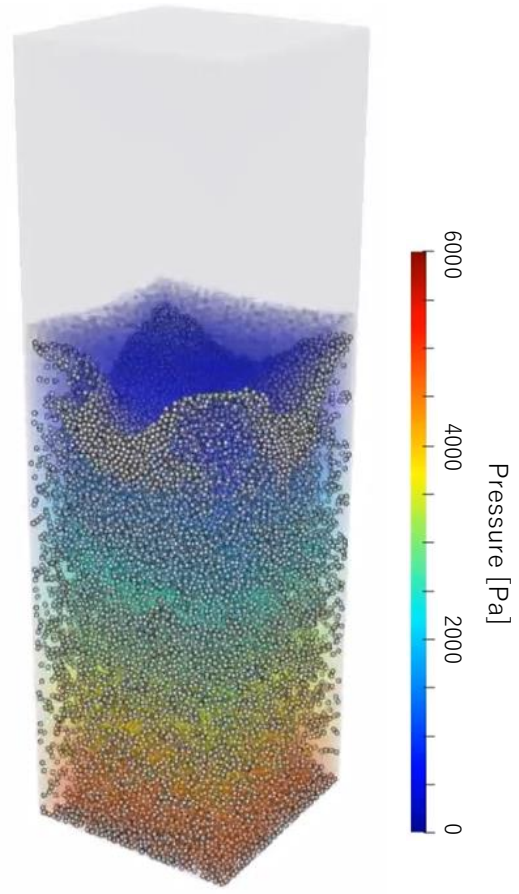


土粒子と水の連成解析 (マクロモデルの解析例)

DEM : Discrete Element Method (個別要素法)

(Cundall and Struck, 1979)

- 粒状体などの不連続体のラグランジュ型解析手法
- 各種外力を考慮した運動方程式を各粒子, 各時間で解く.
- ケーソン-粒子, 粒子間の接触力: バネ-ダッシュポットモデル



粒子の集団沈降解析

[並進運動]

$$m_s \frac{dv_s}{dt} = m_s g - \nabla P V_s + \sum f_c + f_d(\varepsilon)$$

接触力 抗力 (流体の相互作用)

$$f_d(\varepsilon) = \begin{cases} \left(\alpha_c \frac{v_w(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2 D_{50}^2} \varepsilon v_r + \beta_c \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon D_{50}} \varepsilon^2 |v_r| v_r \right) \frac{V_s}{1-\varepsilon} & (\varepsilon < 0.8) \\ \left(-\frac{3}{4} C_d \frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{\varepsilon^{2.7} D_{50}} |v_r| v_r \right) \frac{V_s}{1-\varepsilon} & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases}$$

↑ ↑
1DEM粒子あたりの力に換算

※浸透/浮遊状態で抵抗力はε < 0.8で不連続→連続的に両状態を接続する処理を実施

[回転運動]

$$I \frac{d\omega_s}{dt} = \sum_{\text{contact}} m_c - m_r$$

m_s : 粒子質量, v_s : 粒子速度, g : 重力加速度,
 m_c : 接触力によるトルク, m_r : 転がり摩擦



流体-地盤-剛体連成解析手法

マクロモデル ミクロモデル



蛇籠によるマウンド保護工のシミュレーション

蛇籠による捨石マウンド保護工の洗掘低減効果の確認

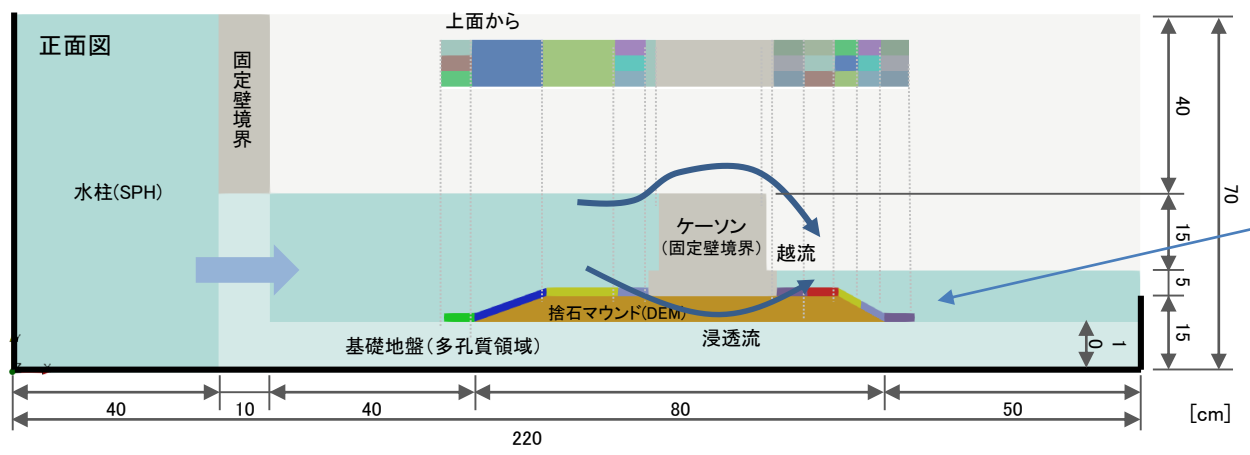


蛇籠: 金網に碎石やコンクリート片を詰めたもの。
通常、河川の護岸や斜面補強などに利用。
ケーソブロックと異なり、透水性を有する。

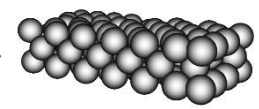


近年、捨石マウンドを被覆する洗掘対策工法として注目。
ハザリカら(2016):実験から蛇籠の持つ洗掘低減効果を確認

[解析モデル]



実験用の蛇籠



蛇籠 (DEM)

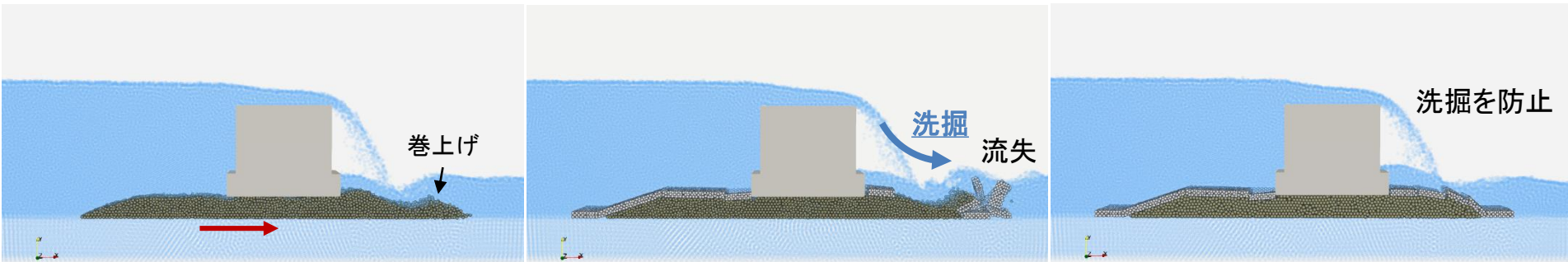
構成粒子の抗力を外力とし、剛体計算を行う。

*Hemanta Hazarika, Kengo Nishimura, Babloo Chaudhary, Model testing on resilient solution for breakwater protection against tsunami, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.3, Issue 2, pp.40-44, 2016.



蛇籠によるマウンド保護工のシミュレーション

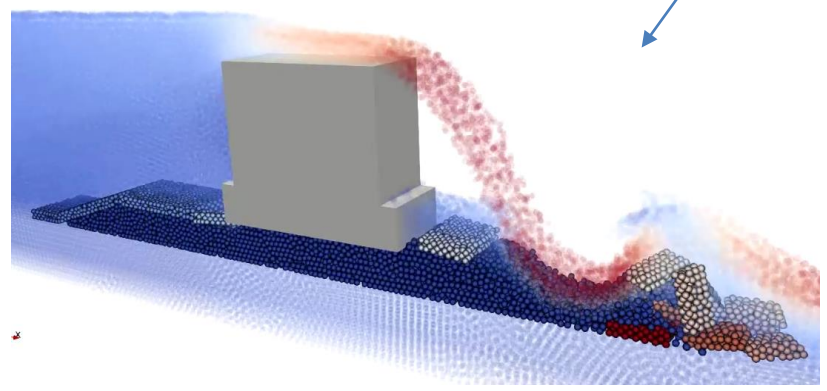
蛇籠による捨石マウンド保護工の洗掘低減効果の確認



①無補強 (1.5 s)

②蛇籠補強 (3.5s)

③蛇籠, 重量2倍 (5.0s)



②蛇籠補強 (流失時の動画)

蛇籠: 洗掘の直撃を防ぐ洗掘低減効果
(目地に越流水が打込まれると流失の危険性有)

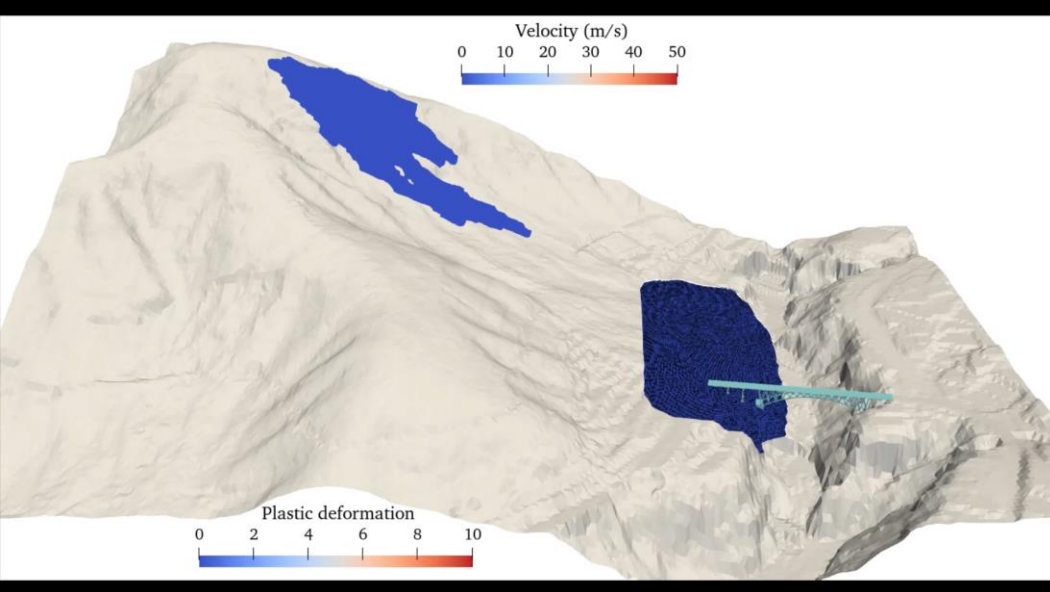


実務利用に向けて

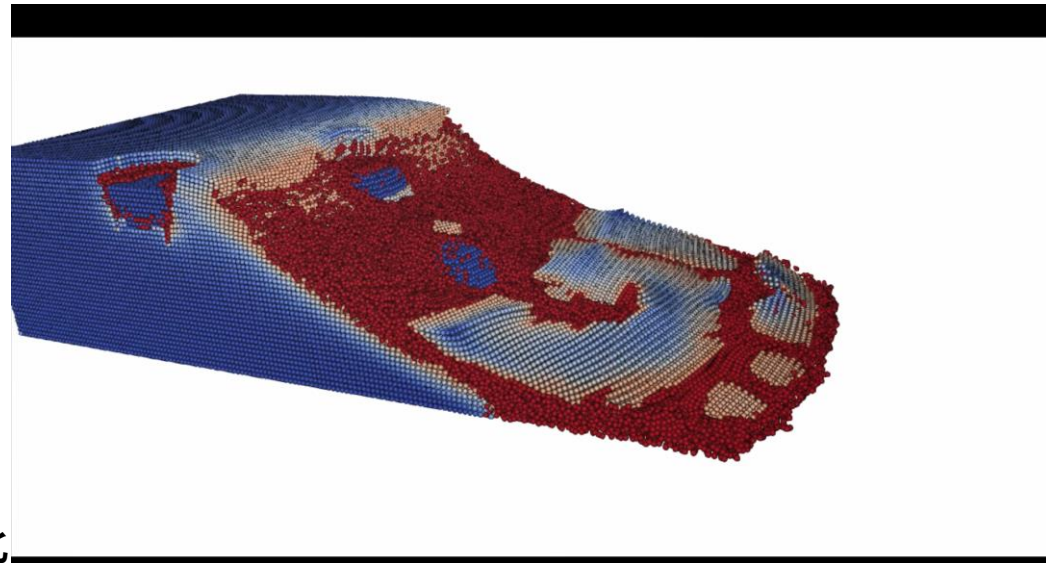
- ・施工時に必要最低限の碎石の充填率の目安を提示
- ・蛇籠の流失を防ぐ方法の検討



固相から液相への相変化



高粘性流体とし、斜面崩壊を表現

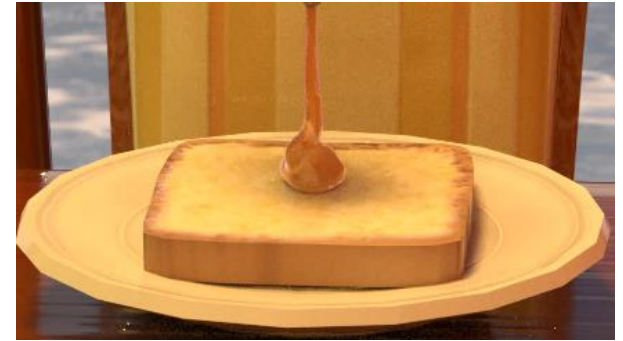


弾塑性体として、斜面崩壊する場所を特定
塑性ひずみにより固相から液相へと相変化

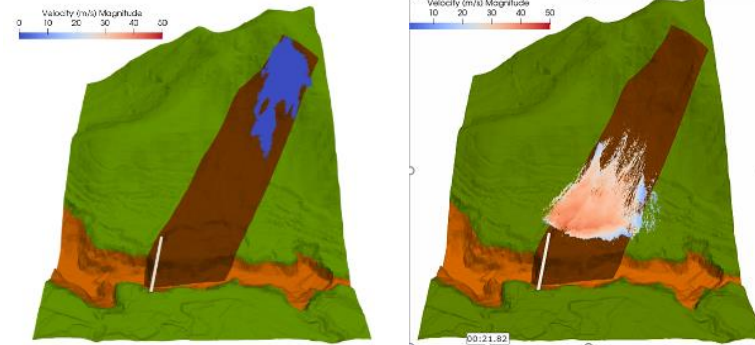
■ スパコン(TYPE-I)からGPU(TYPE-II)へ

解析コードの特徴

- ・ラグランジュ型粒子法(運動と共に粒子を移動させる)
- ・完全陽解法(ニュートン流体、3000万粒子/1GPU程度まで)から完全陰解法(非ニュートン流体、500万粒子/1GPU程度まで)までを統合的に
- ・1GPU vs 10 CPU 程度のパフォーマンス
- ・1次元領域分割(現時点では4GPUまでP2Pで通信)
現在、2次元スライスグリッド+MPI機能を鋭意



ハチミツから土砂災害まで!



GPU解析コードの特徴

解析コードの特徴

- ・ラグランジュ型粒子法(運動と共に粒子を移動させる)
- ・完全陽解法(低粘性ニュートン流体、3000万粒子/1GPU程度まで)から完全陰解法(高粘性・非ニュートン流体、500万粒子/1GPU程度まで)までを統合的に
- ・1次元領域分割(現時点では4GPUまでP2Pで通信)

MPI版も動き始めた(性能は不十分、まだまだ改良の余地あり)

Projection法を使った予測子計算(圧力勾配以外の速度予測) + 修正子計算(圧力ポアソン)



共役勾配法(CRSで保存した行列に対するスパースソルバー)

- GPUで実行するために...
1. cuSPARCEによる行列ベクトル積の演算
 2. ベクトルの内積は内製コード...
 3. Thrustライブラリーによるソート(粒子番号リネンバリング)
 4. CUDAFortran使用

これまでCPU(京, Intel系)ベースでチューニングしたコードがTYPE-Iではそのまま高速に！
TYPE-IIでは十分なGPU(V100)が搭載されていて高速な演算ができる！

