

先駆的科学計算に関するフォーラム2015  
～先端的計算科学研究プロジェクト成果報告～

# 沿岸構造物におけるFEM-SPH法 による大規模シミュレーション

荻野正雄 (名大・情報基盤センター),

浅井光輝 (九大・工学研究院社会基盤部門),

田上大助 (九大・マスフォアインダストリ研究所),

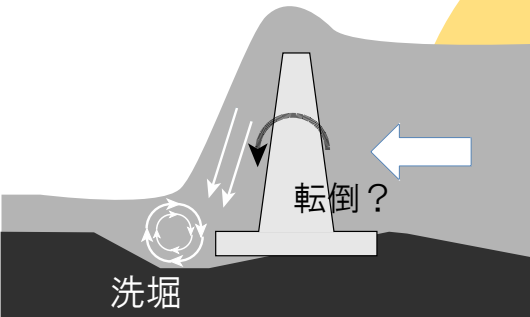
渡部善隆 (九大・情報基盤研究開発センター)

2015年4月24日(金)

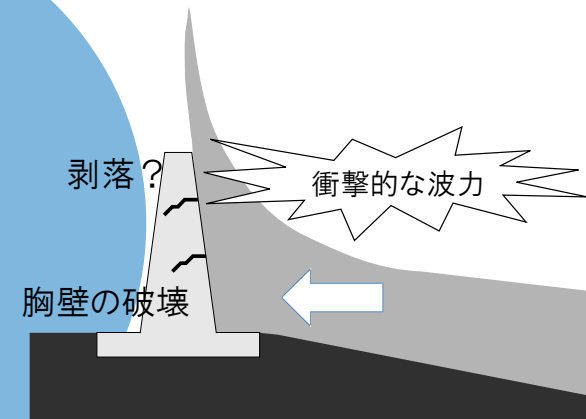
# 津波による複合被害



洗掘＋液状化による  
構造物の不安定化



流体力を受ける構造



基礎地盤の洗掘

構造

地盤

水理

# 研究成果の概要

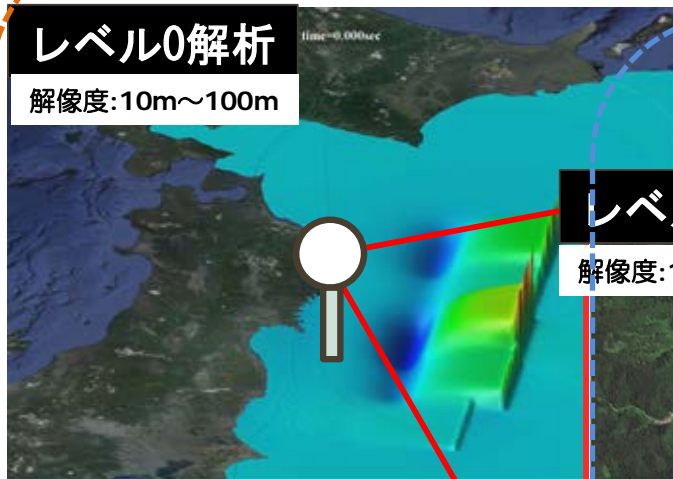
- 2012年度(1年目)の成果
  - [FEM] 地盤-橋梁モデルにおける反復法の収束性改善
  - [SPH] 緩和パラメータ・乱流モデル導入等による安定化
  - 構造物・海底を含む高精度地形モデル構築
- 2013年度(2年目)の成果
  - [SPH] 津波荷重の実験値との比較による妥当性確認
  - [SPH] 流体-構造(剛体)連成による橋桁流出シミュレーション
  - 防災・減災向け映像教材の作成
- **2014年度(3年目)の成果**
  - [SPH] 圧力境界条件処理方法の改善
  - [SPH] 剛体移動処理方法の改善
  - [SPH-FEM] 流体-構造(弾性体)連成による道路橋モデル解析
  - 津波防災教育向けに高知市モデルの作成と解析

# マルチスケール津波解析

シミュレーションベース・ソフト防災  
～3D・CGによる津波防災教育～

レベル0解析

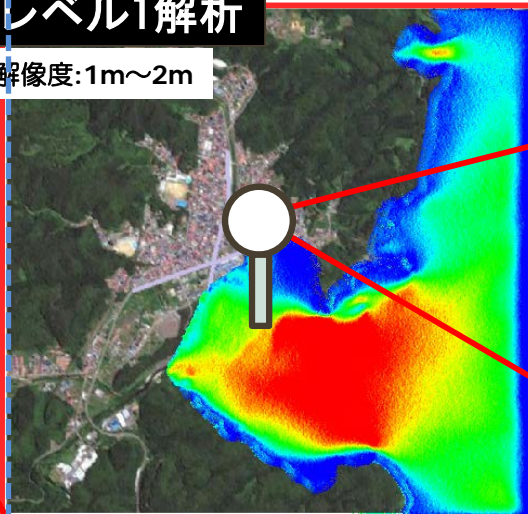
解像度: 10m~100m



従来の津波解析  
(津波伝搬解析)

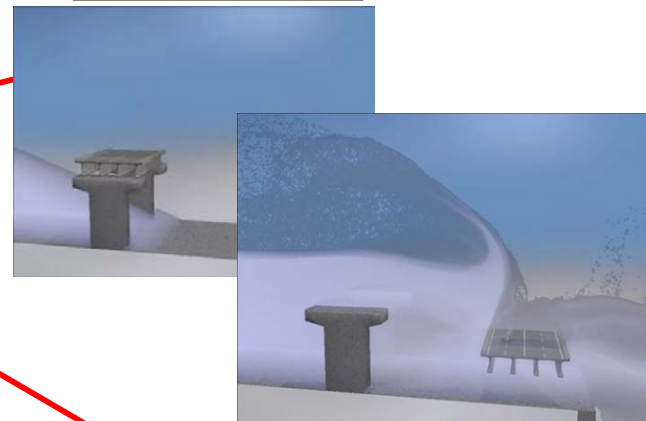
レベル1解析

解像度: 1m~2m



流体構造連成解析

レベル2解析

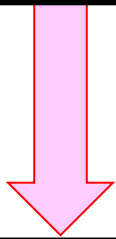


シミュレーションベース・ハード防災  
～橋梁・堤防の安全性評価～

# 粒子法における基礎式 (Lagrange記述)

移流項を無視

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} b_i$$



$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu D_{ij} \quad D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

圧力項
粘性項

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \nabla \mathbf{v} \right) + \frac{1}{\rho} \mathbf{b}$$

# Stabilized ISPH (projection method)

## Original ISPH

Mass conservation law

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Pressure Poisson eq.

$$\Rightarrow \langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle = \frac{\rho_0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle$$

## Our formulation

Mass conservation law

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Pressure Poisson eq.

$$\Rightarrow \langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle = \frac{\rho_0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle + \frac{\langle \rho_i^{n+1} \rangle - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2}$$

## Stabilized ISPH

Proposed PPE

$$\langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle = \frac{\rho_0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2}$$

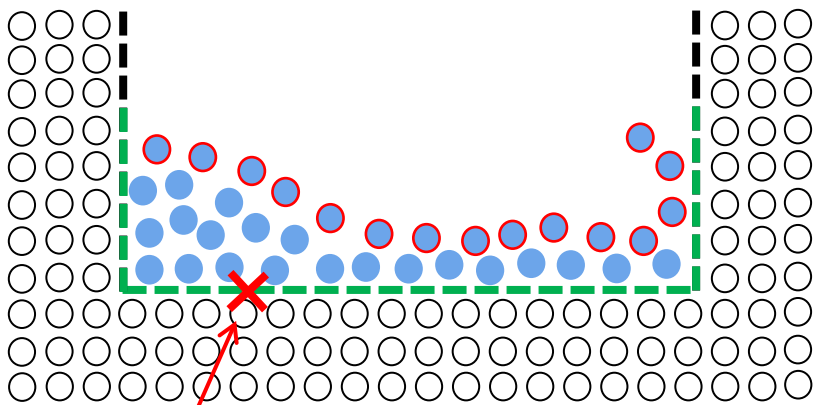
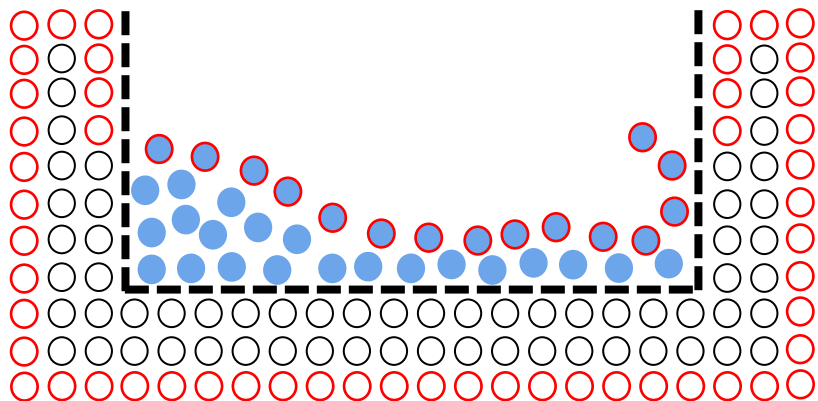
**Relaxation coefficient:**  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

The second term in our formulation should be vanished in the incompressible condition as the original formulation. Then, we put a small  $\alpha$ .

# 陰的なNeumann境界処理法の提案

陰的ノイマン境界処理法の基本原理

$$\nabla^2 P_i^{n+1} = \frac{C_r(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \left( \rho_i \frac{\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}_i^*}{\Delta t} + \alpha \varepsilon_i \frac{\rho_i - \rho_i^n}{\Delta t^2} \right)$$



壁面上に配置したマーカーを介してノイマン条件を満たすように係数行列を修正.

$$A \begin{Bmatrix} P_{water} \\ P_{freesurface} \\ P_{wall} \end{Bmatrix} = b$$

=0  
ディリクレ境界条件

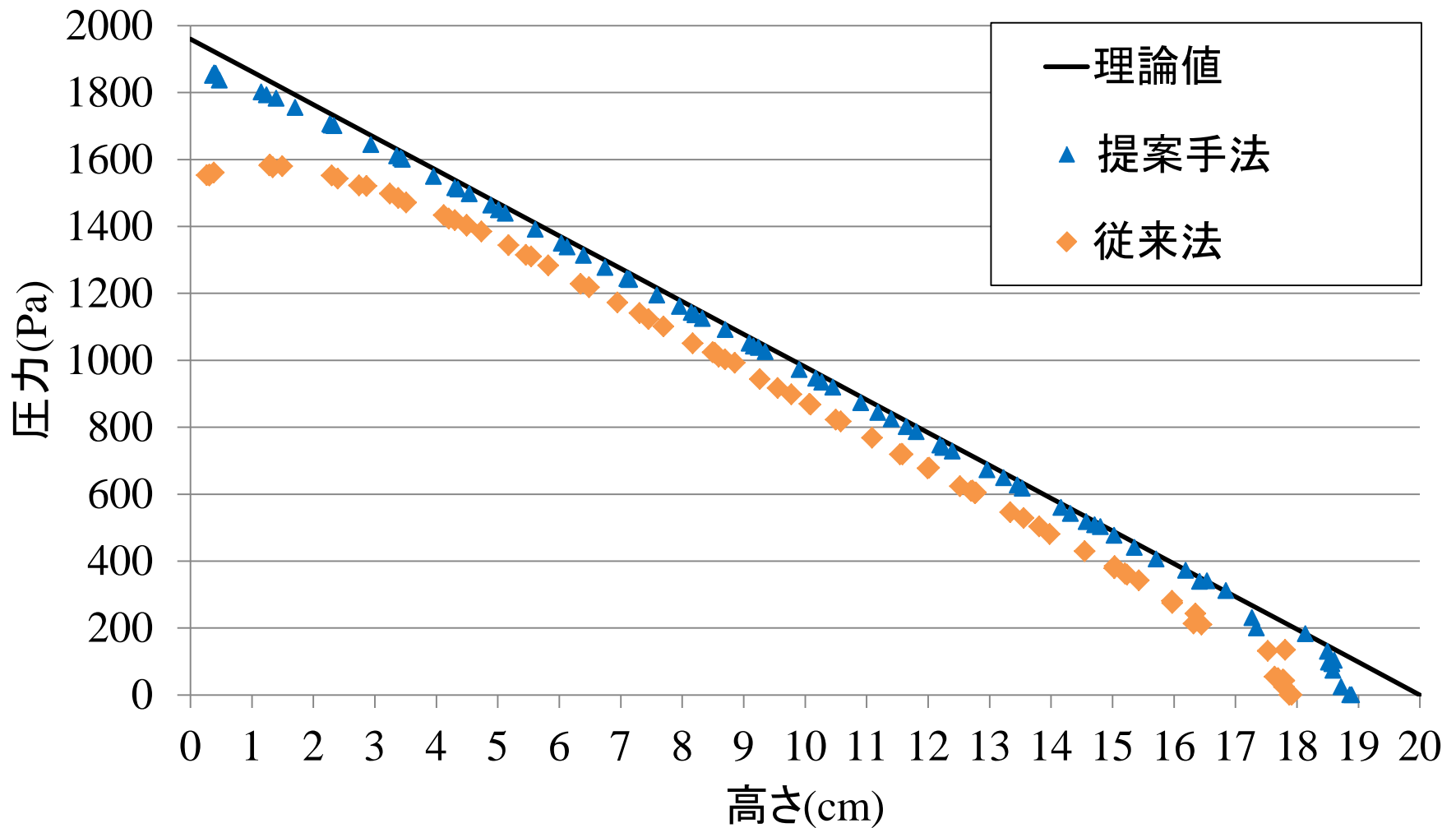
水粒子だけの行列に縮約化

$$A' \begin{Bmatrix} P_{water} \\ P_{freesurface} \\ P_{wall} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b'_1 \\ b_2 \end{Bmatrix}$$

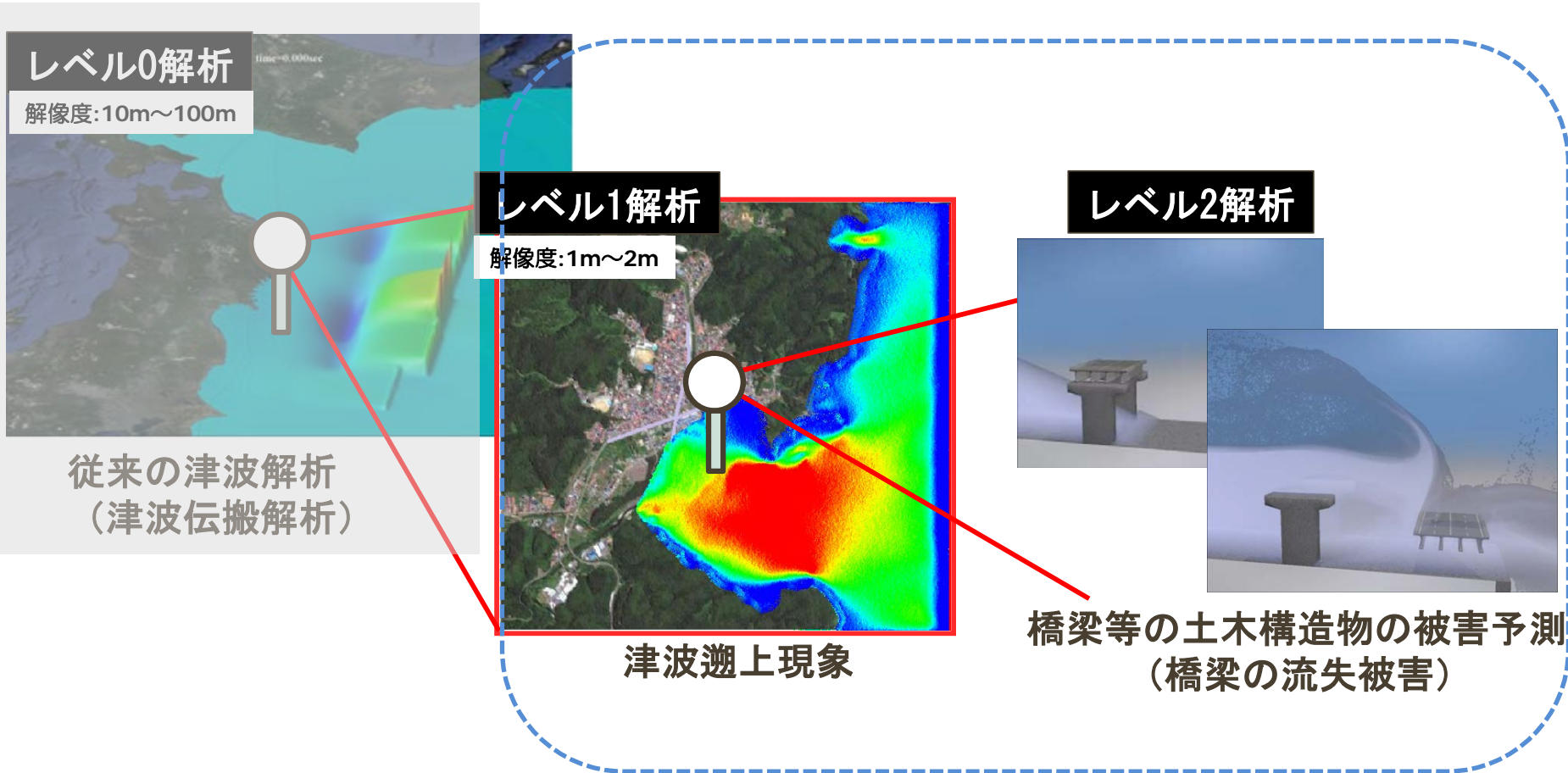
=0  
ディリクレ境界条件

# 陰的なNeumann境界処理法の提案

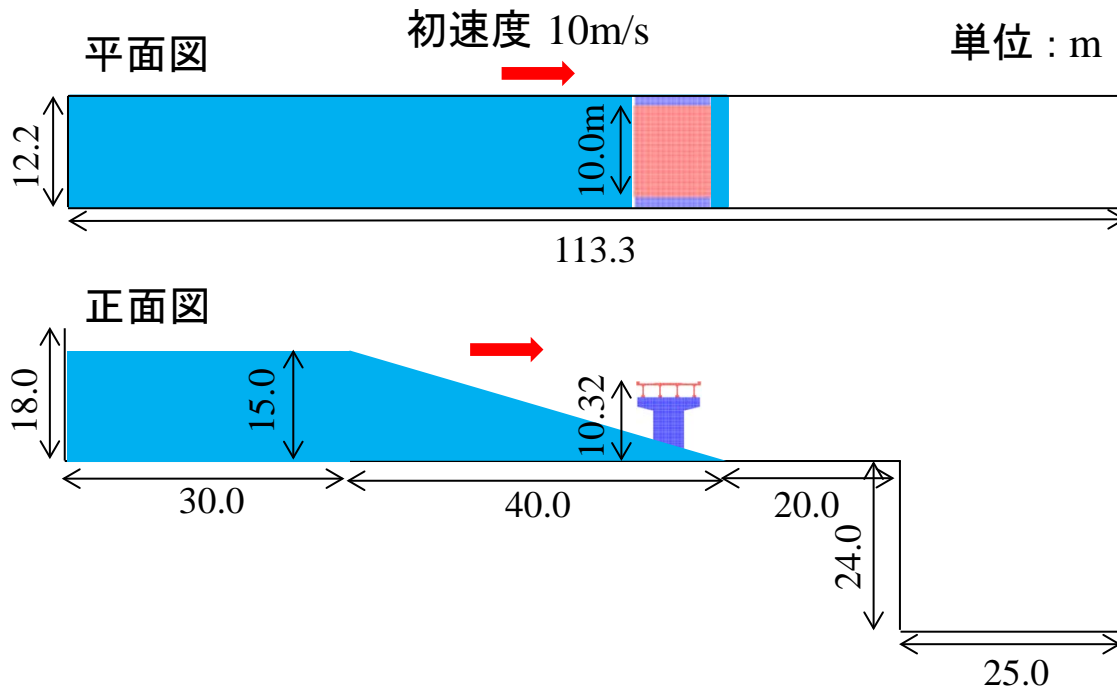
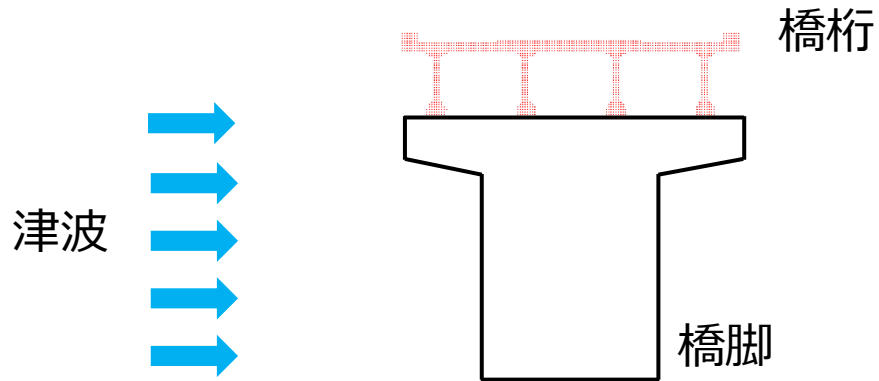
解析結果(理論値との比較)



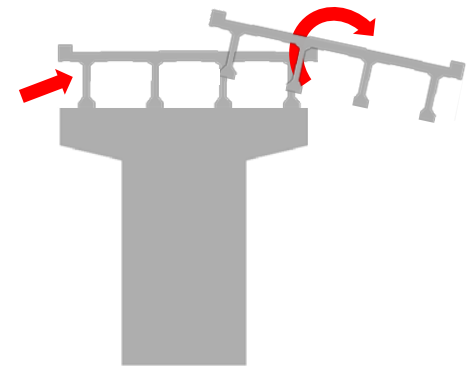
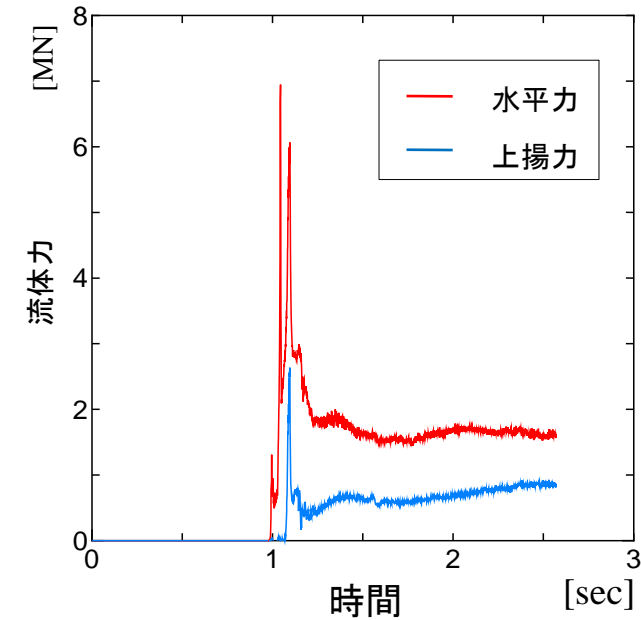
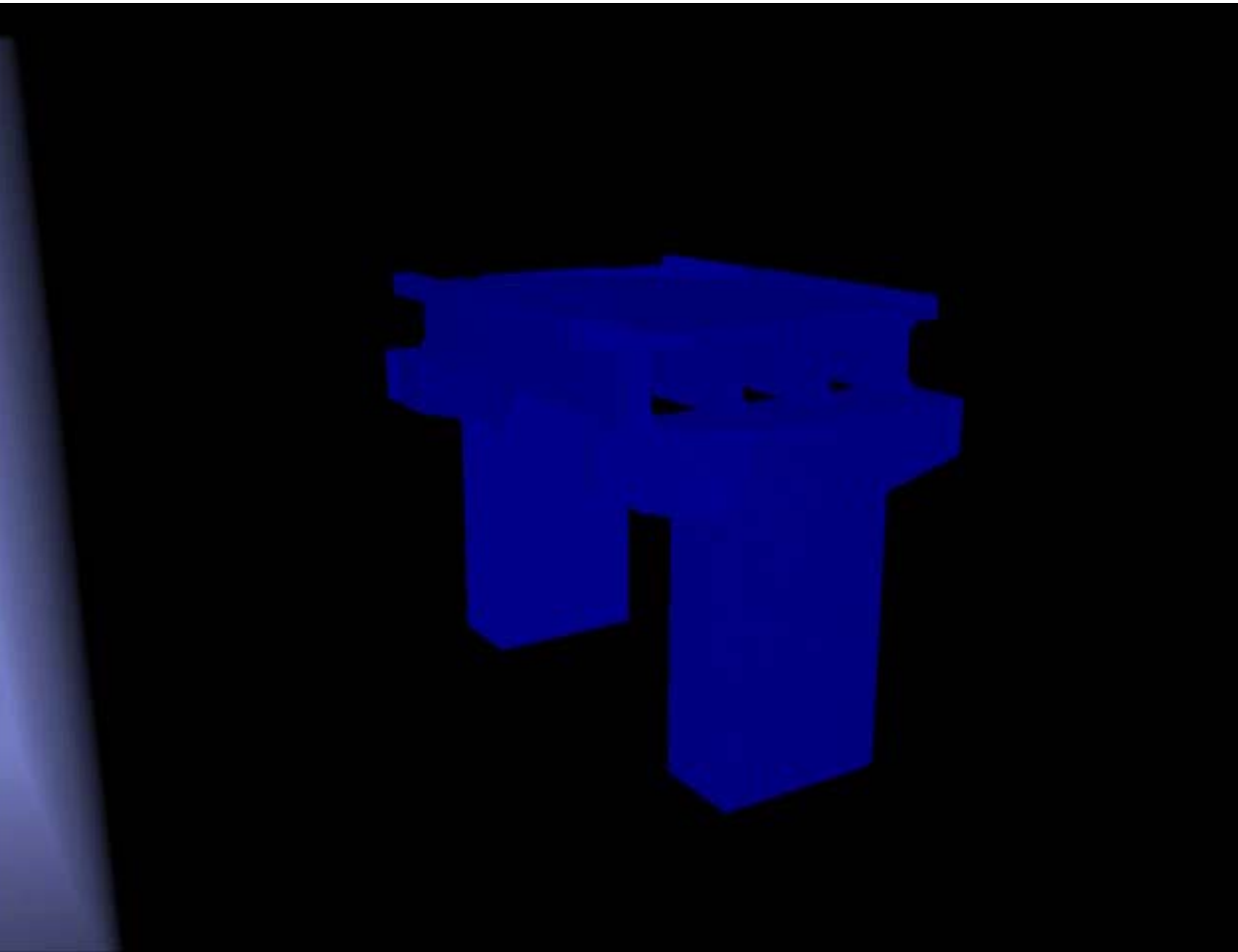
# シミュレーションベース・ハード防災 ～橋梁の流失被害予測～



# 解析モデル



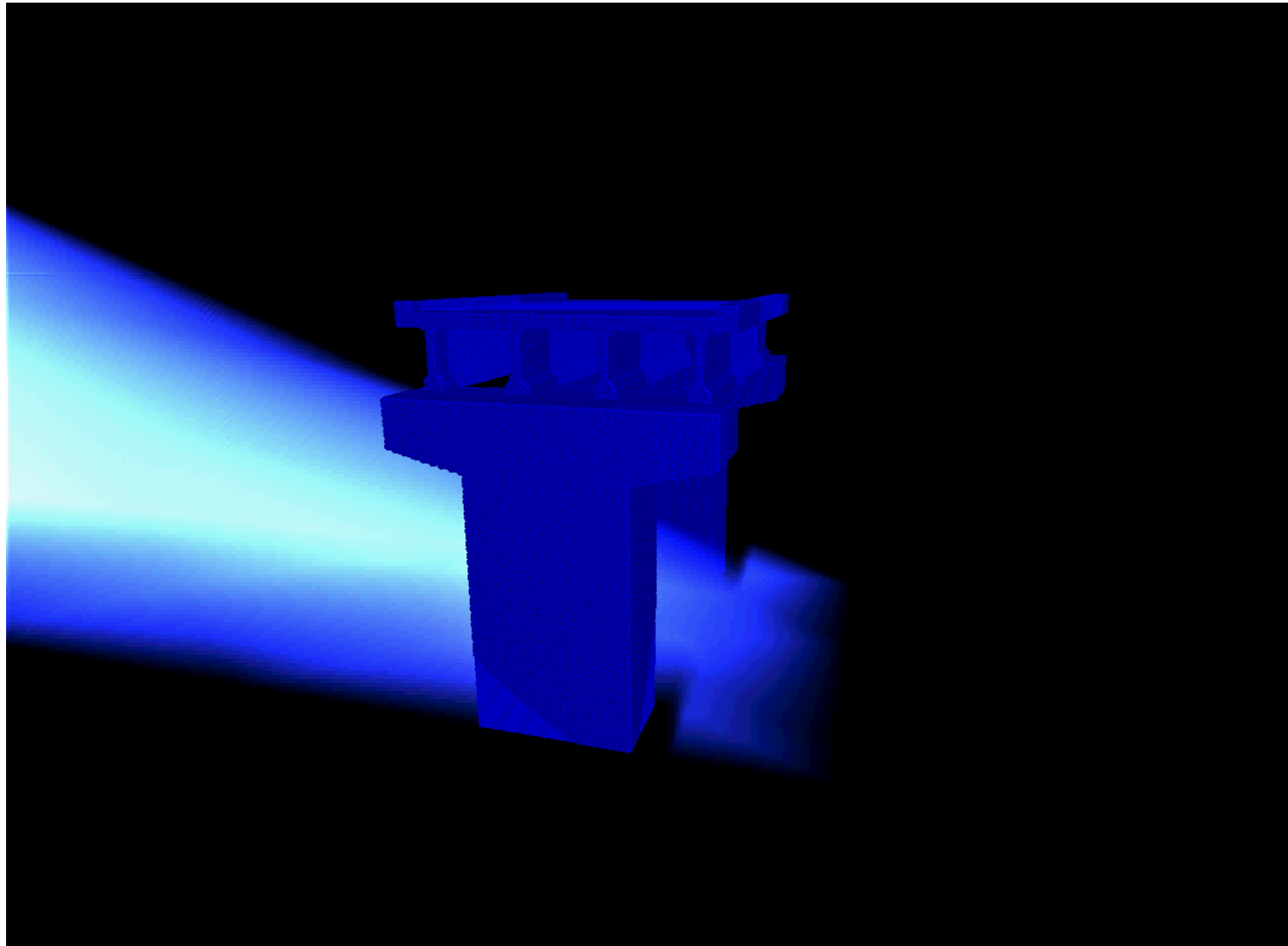
# 上部構造固定時の流体力



# 橋桁流失解析(流体剛体連成)

解析条件

| 粒子間距離 | 総粒子数       | 時間増分   | 実時間 | 解析時間<br>(500node=8000コア) |
|-------|------------|--------|-----|--------------------------|
| 6cm   | 55 million | 0.001s | 3s  | 7h                       |



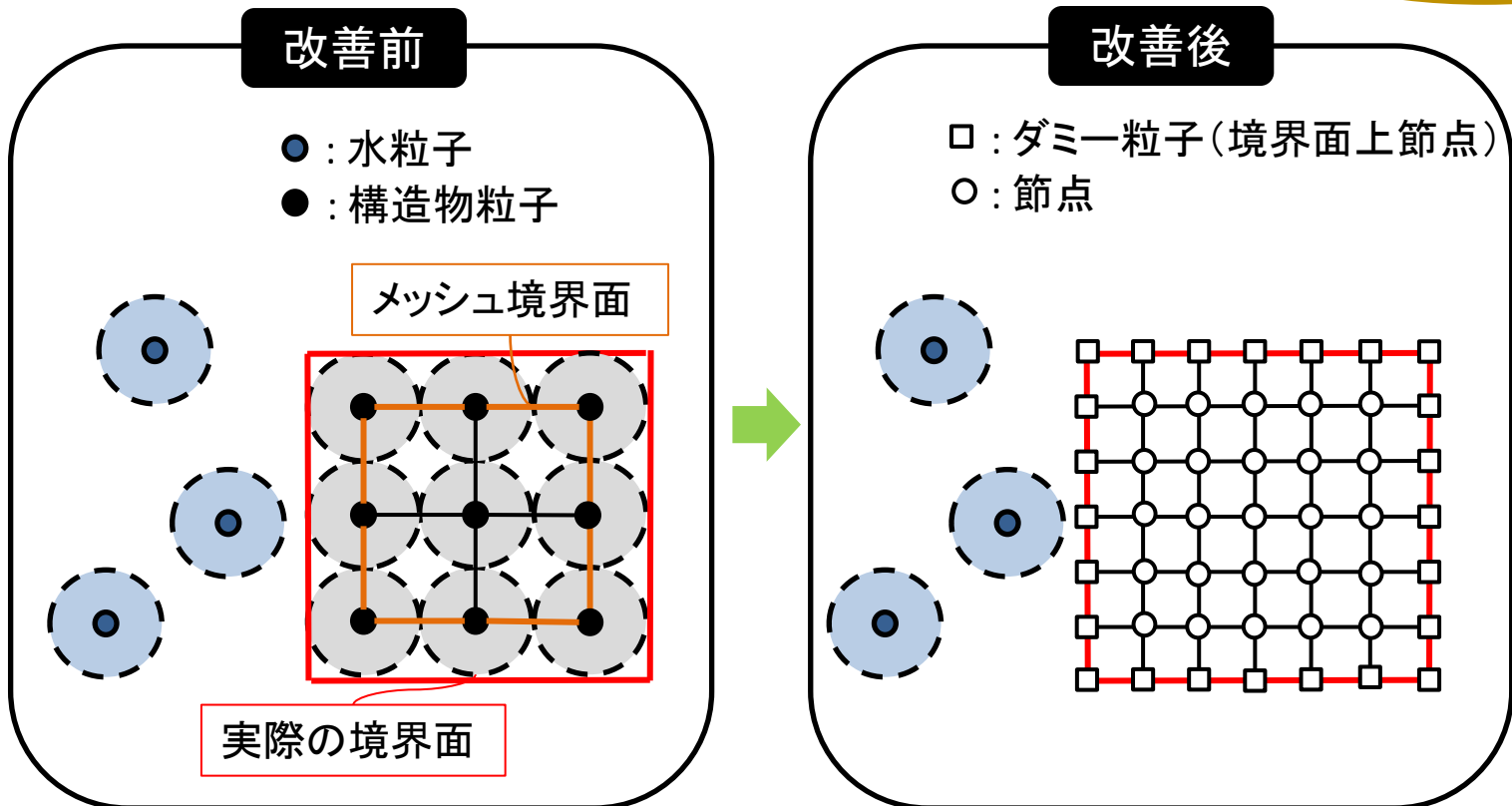


# 構造物境界面の設定

- ✓ 粒子モデルは構造物の内部を充填するように生成
- ✓ 粒子モデルにメッシュの境界面にある節点の位置を中心とするダミー粒子を追加
- ✓ SPH法の補間計算方法に基づいてダミー粒子上の物理量を計算

⇒ メッシュの境界面上の節点を抽出

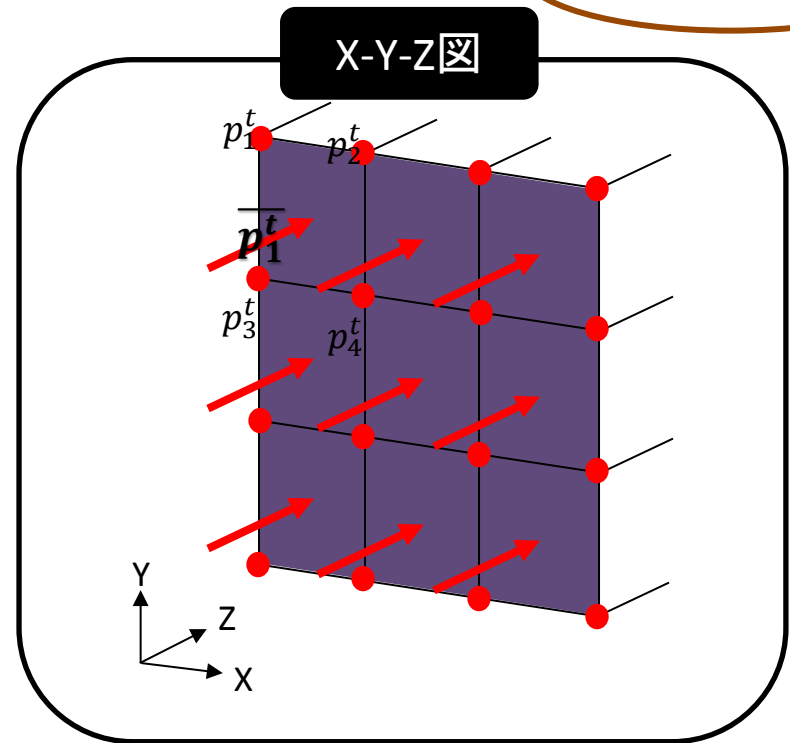
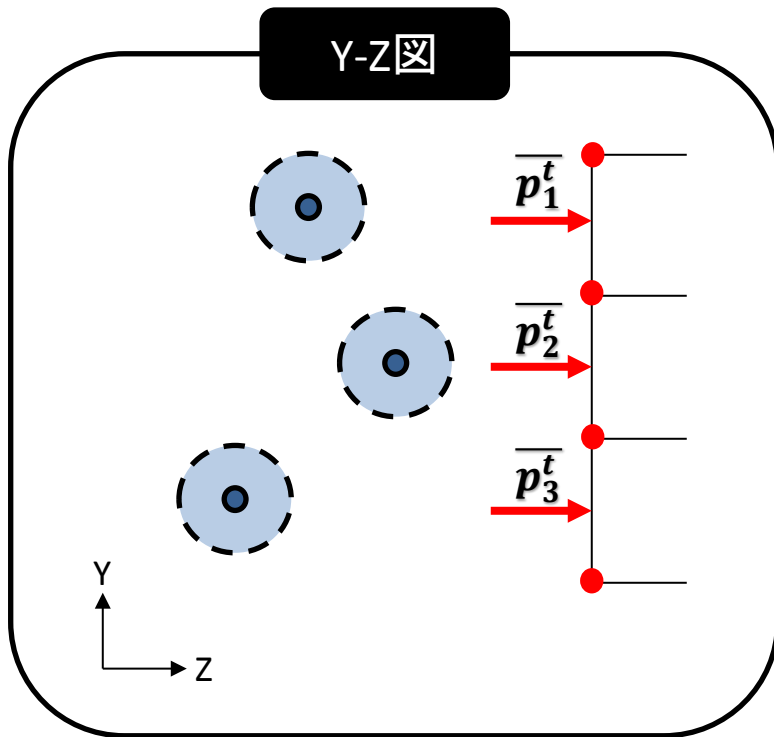
ツールを開発



# 荷重境界条件の設定

- ✓ 境界面上の節点に、対応するダミー粒子の持つ物理量を持たせる
- ✓ 境界面上の要素面を構成する節点の圧力平均を要素面に加える

ツールを開発



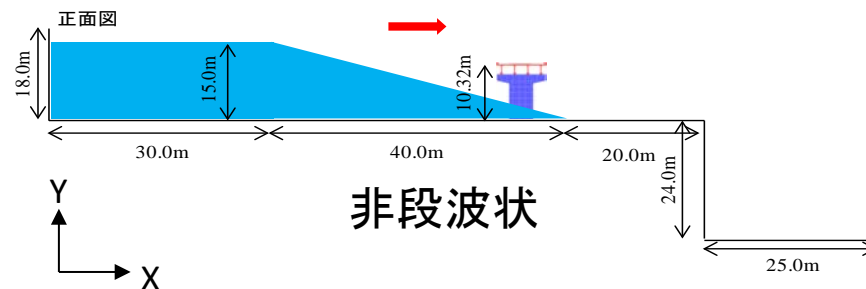
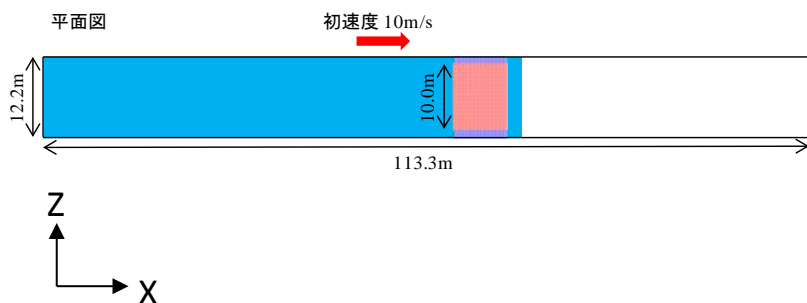
$$\overline{p_j^t} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_i^t$$

$p_i^t$  : ある時刻の要素面  $j$  を構成する節点  $i$  に対応する粒子の保持する圧力  
 $k$  : 要素面  $j$  を構成する節点の数

# 津波伝播問題設定

- ✓ 歌津大橋の震災で流失した第8径間の断面を元に作成
- ✓ 津波高 : 15m
- ✓  $x = 20[m]$ 以下の水粒子に初速度 $10[m/sec]$ を常に与える
- ✓ 先端の波には初期条件に流速 $10[m/sec]$ を与える  
⇒ 自由落下

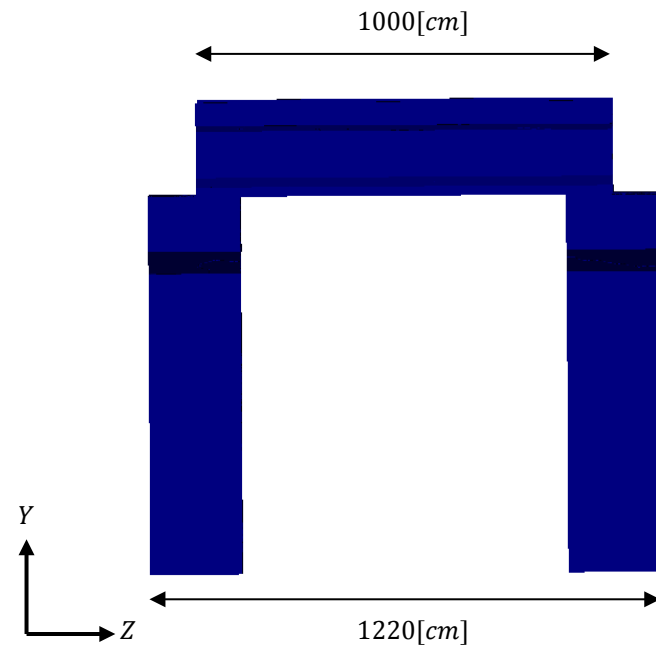
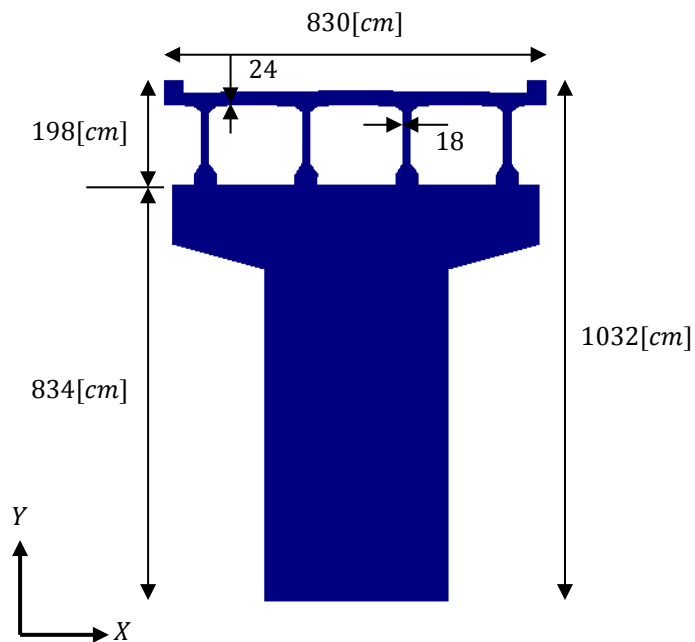
| 粒子間隔 | 総粒子数    | 時間増分       | 実時間       |
|------|---------|------------|-----------|
| 6cm  | 約5,500万 | 0.001[sec] | 2.55[sec] |



# 構造解析用メッシュの作成

- ✓ 歌津大橋の震災で流失した第8径間の断面を元に作成
- ✓ 橋桁と橋脚は接触部で剛結合
- ✓ 4面体1次要素

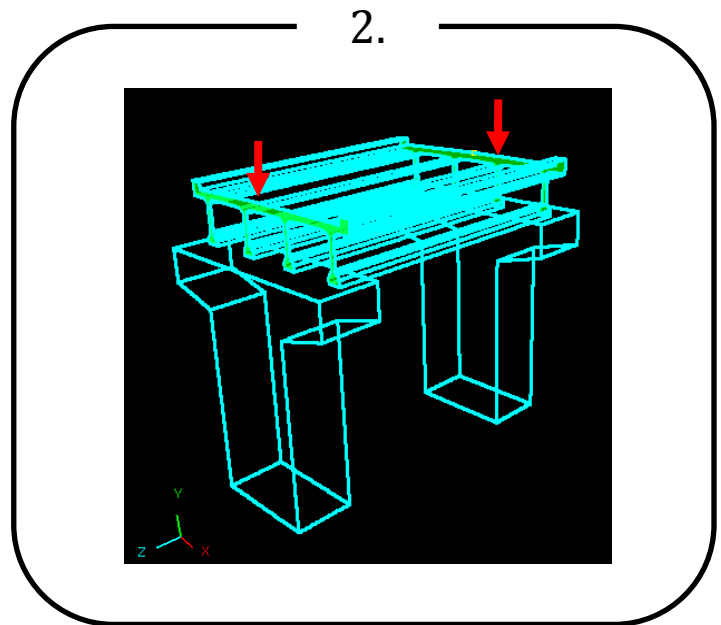
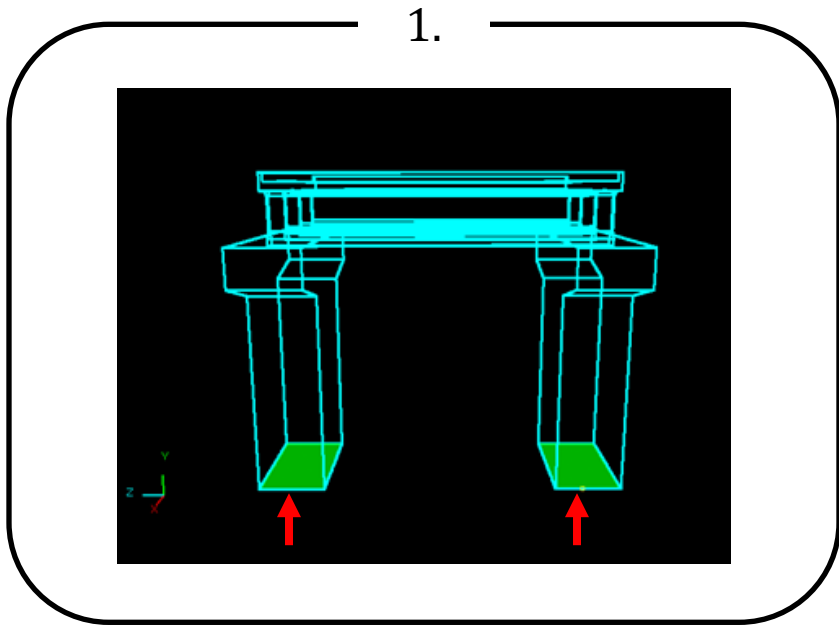
| 節点数     | 要素数     |
|---------|---------|
| 338,835 | 889,250 |



# 構造解析用境界条件

- 物性値設定(鉄筋コンクリート)
- ヤング率 =  $5.0 \times 10^{10} (N/m^2)$
  - ポアソン比 = 0.2
  - 質量密度 =  $2.45 \times 10^4 (N/m^3)$

1. 橋脚底面( $y = 0.0$ )を地面で固定されていると仮定して、 $x, y, z$ 方向変位を拘束
2. 橋桁は $z$ 軸方向に十分長いと仮定して、面 ( $z = 1.1, z = 11.1$ ) の $z$ 方向変位を拘束

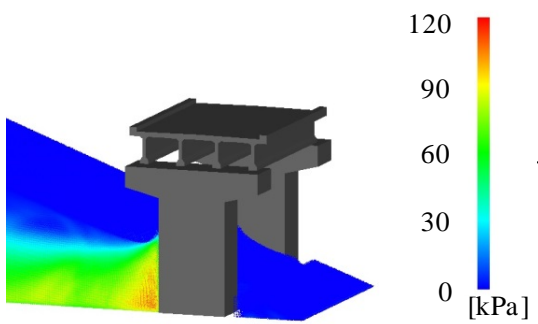


| 境界上要素面数 | Pressure値 有り | Pressure値 無し |
|---------|--------------|--------------|
| 662,934 | 284,335      | 378,559      |

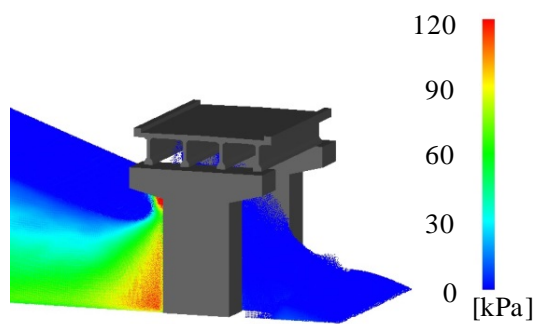
| 時間増分       | 実時間       |
|------------|-----------|
| 0.001[sec] | 0.97[sec] |

# SPH法解析結果

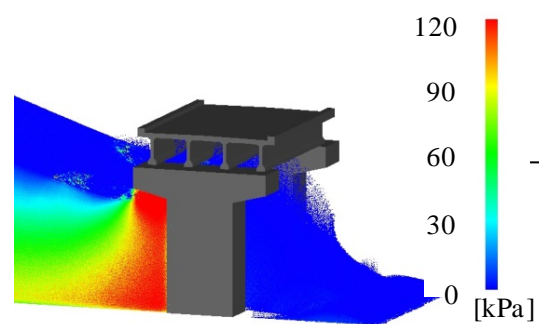
## SPH法による解析：圧力コンター図



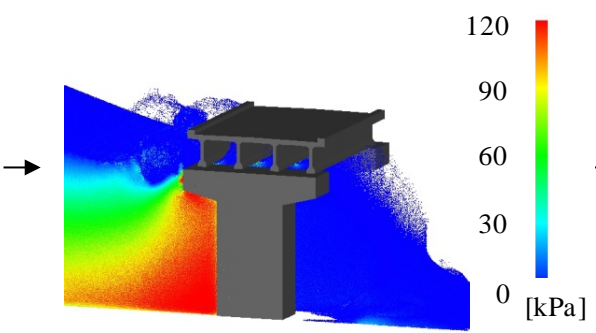
Time = 0.10[sec]



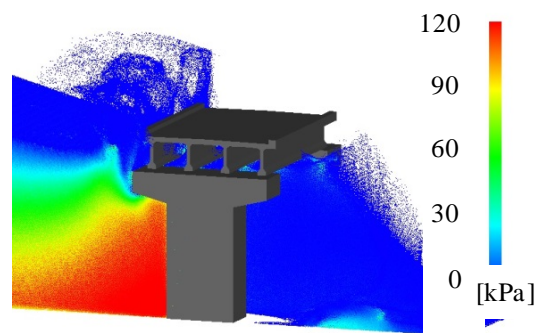
Time = 0.30[sec]



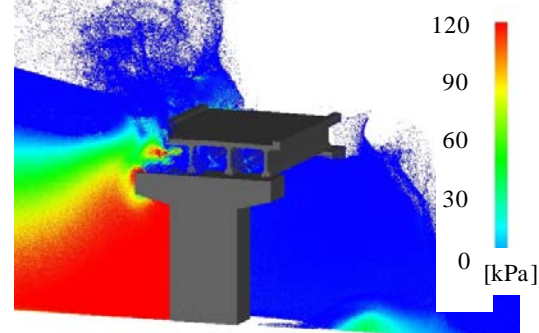
Time = 0.50[sec]



Time = 0.70[sec]



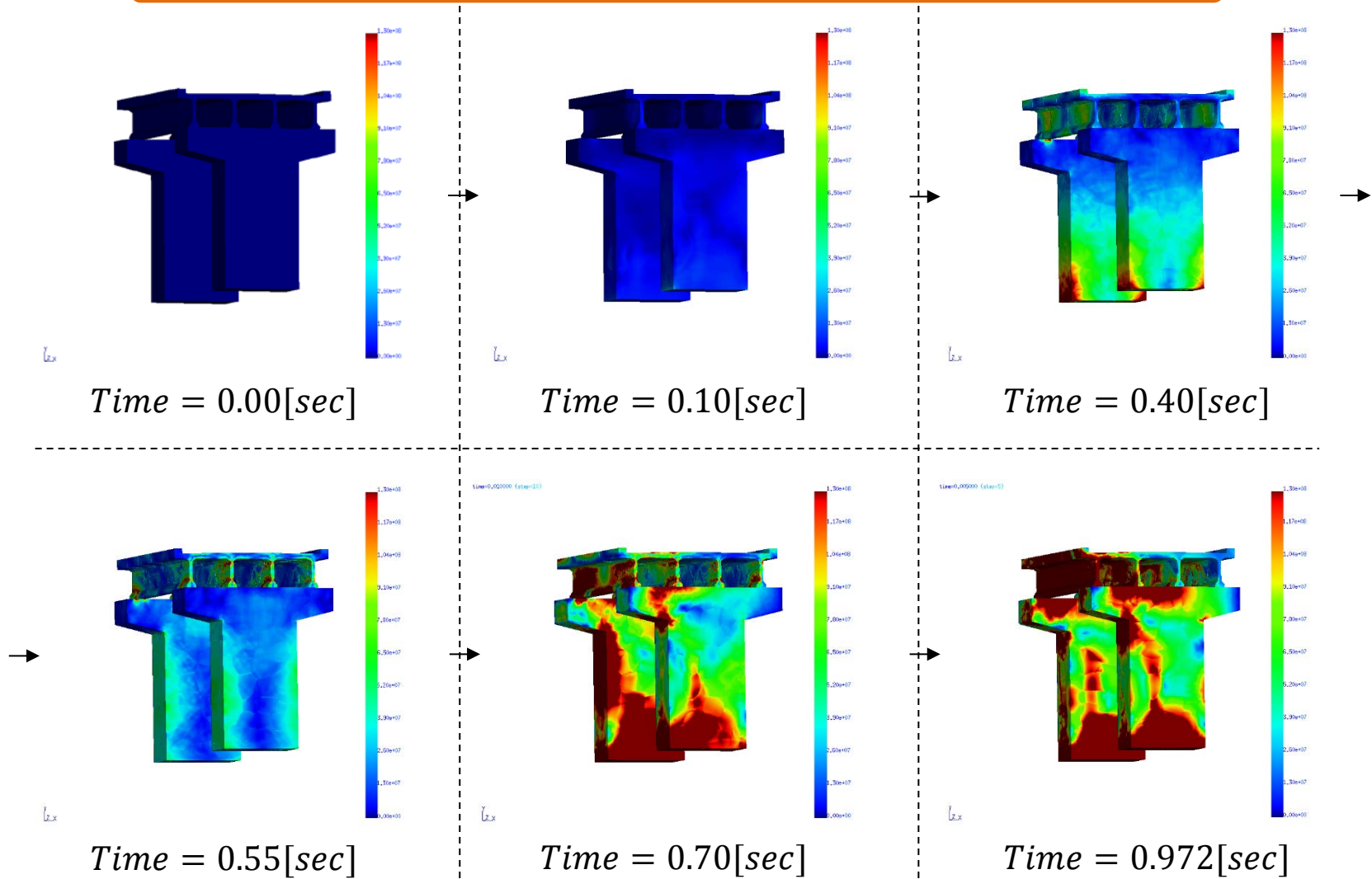
Time = 0.90[sec]



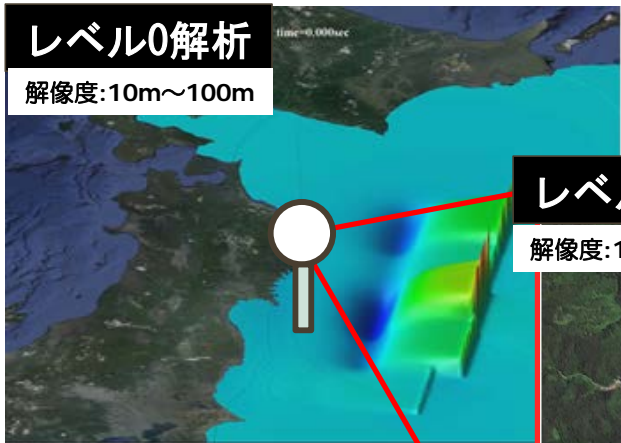
Time = 1.10[sec]

# FEM解析結果

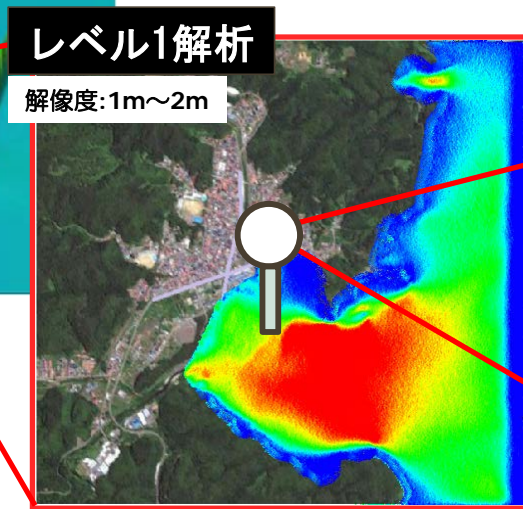
## FEM解析：節点応力( Nodal Equivalent Stress )コントラスト



# シミュレーションベース・ソフト防災 ～3D・CGによる津波防災教育～



従来の津波解析  
(津波伝搬解析)

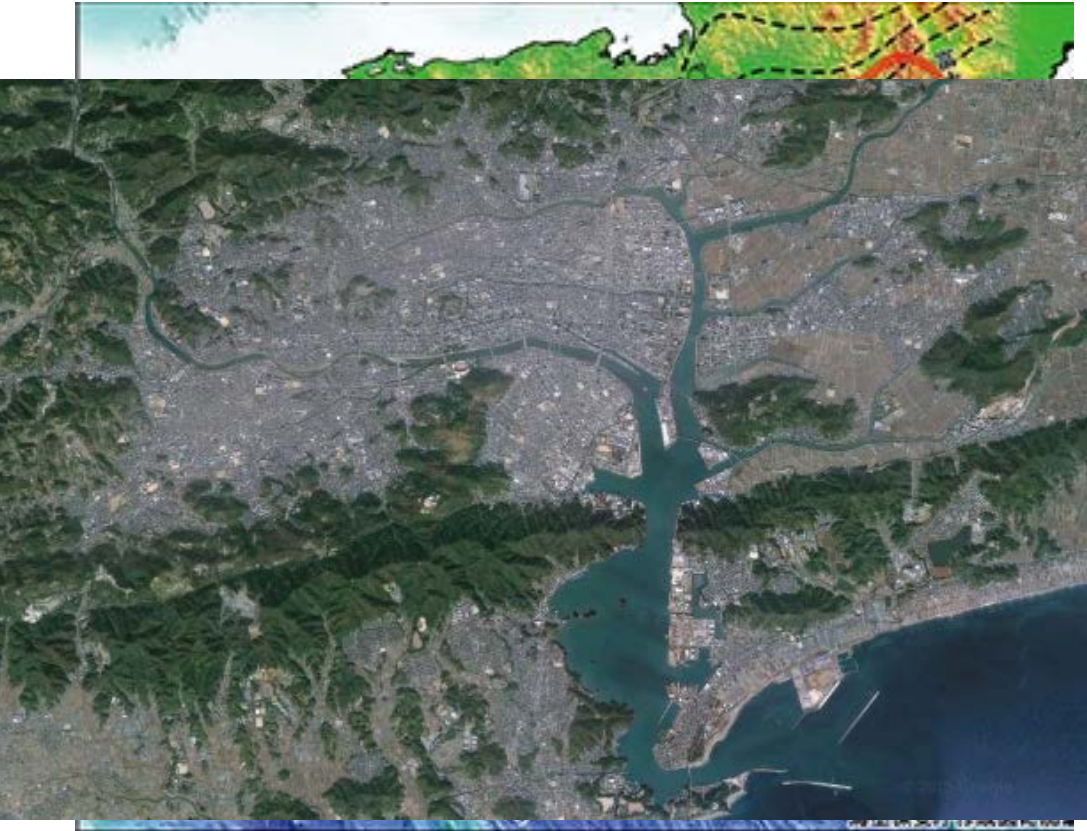


津波遡上現象



橋梁等の土木構造物の被害予測  
(橋梁の流失被害)

# 解析場所の選定



南海トラフ

(文部科学省 地震調査研究推進本部)

## 南海トラフ地震

将来M8~9の発生確率  
30年以内に約60~70%  
(地震調査研究推進本部)



南海トラフでの最大クラスの地震  
による高知県の主な津波被害予想

死者数 4万9千人 避難者数 51万人

被害額 10兆6千億円

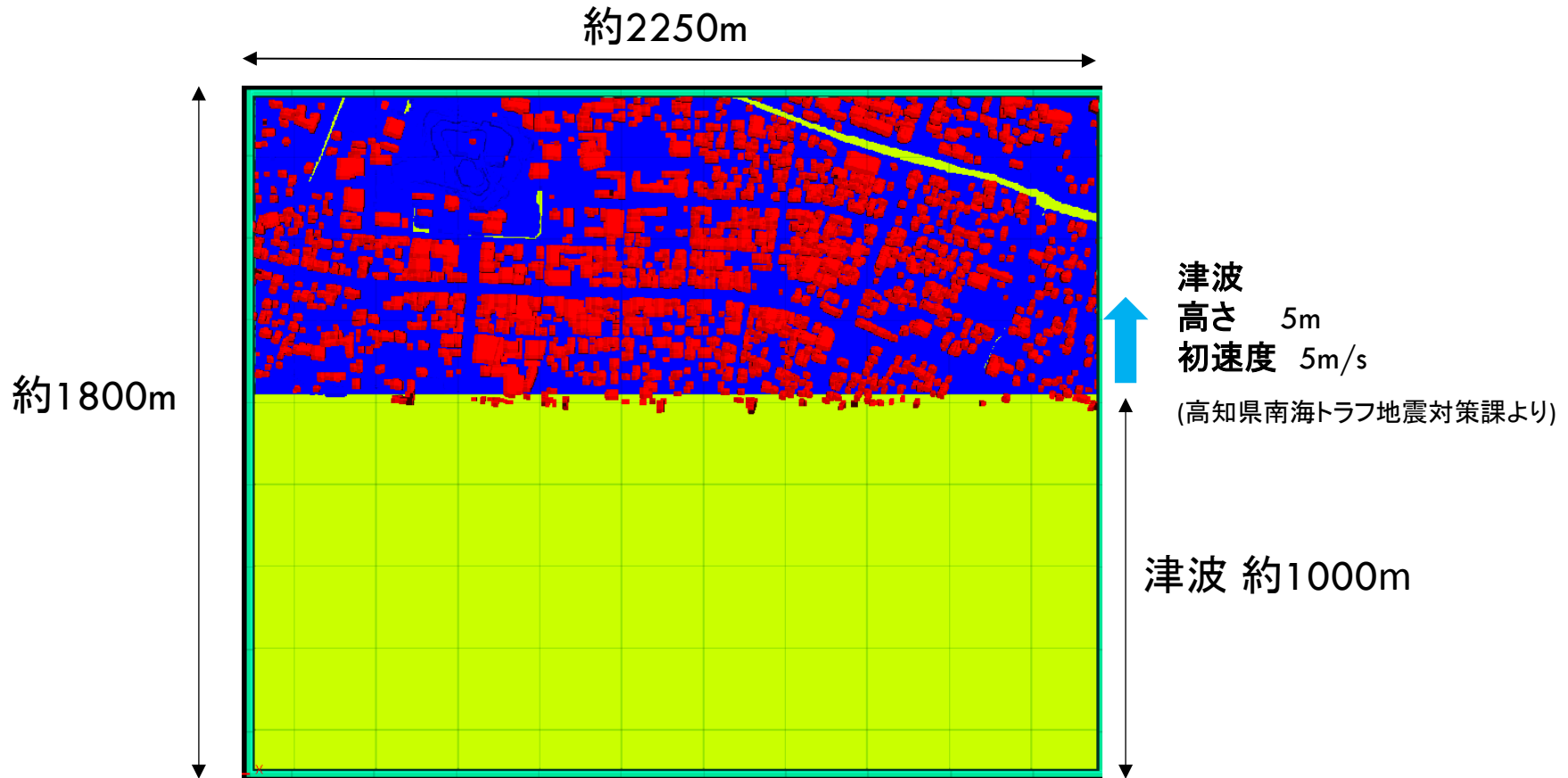
地震発生から約3分で津波高1mの津波が到達

最大津波高 34m(全国1位) (内閣府より)



最も人災が予想される  
高知市の津波遡上解析

# 解析モデル(一部領域のみ)



## 解析条件

九州大学スーパーコンピューターの8node使用

| 総粒子数  | 粒子間隔 | 時間増分     | 総ステップ数    | 実時間    | 解析時間  |
|-------|------|----------|-----------|--------|-------|
| 約794万 | 2m   | 0.005sec | 33000step | 165sec | 約89時間 |

# まとめと今後の課題

- SPH法による自由表面流れ解析の精度改善
  - 圧力境界条件の処理見直し
  - 浮体等を剛体で取り扱う場合の処理見直し
- SPH-FEM連成による流体構造(弾性体)連成解析の実装
  - 微小変形を前提とした片方向連成
  - 既存のSPHコードとFEMコードに対するカップラー開発
  - 歌津大橋道路橋モデルにおける津波荷重による応力解析を実現
- 防災教育への貢献
  - 高知市モデルの作成と解析
  - 教育向けCG映像の作成
- 今後の課題
  - 流体(SPH)-構造(FEM)の双方向連成解析