先駆的科学計算に関するフォーラム2014
～先端的計算科学研究プロジェクト成果報告～
2014.4.25

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)

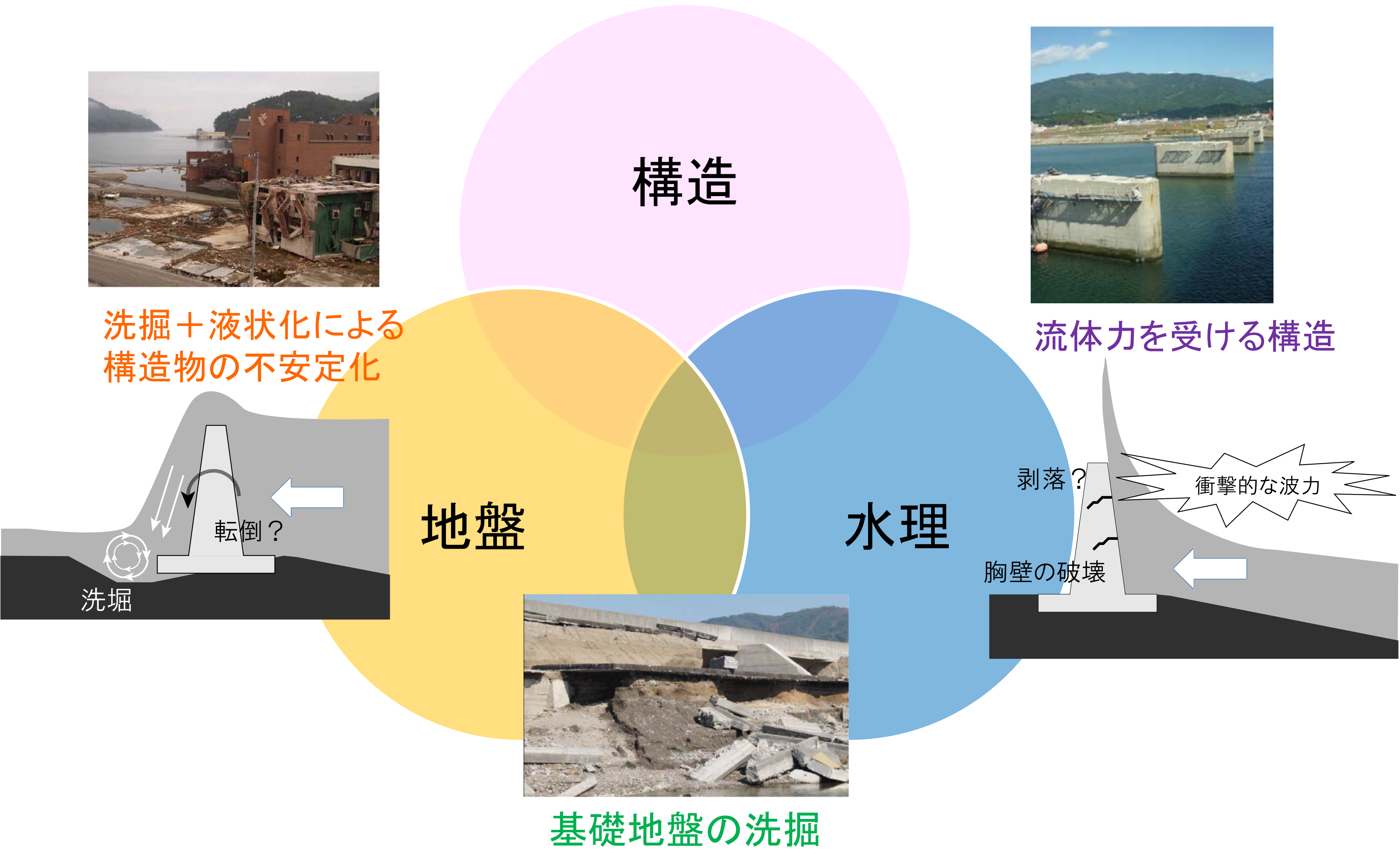
研究背景

- 東北地方太平洋沖地震による津波被害で多くの橋桁の流失･崩壊

参考: 日本経済新聞

- 総合的な防災･減災対策にはインフラの災害耐性強化が重要
- 流体衝撃力を見積もり, 安全･安心な構造物を

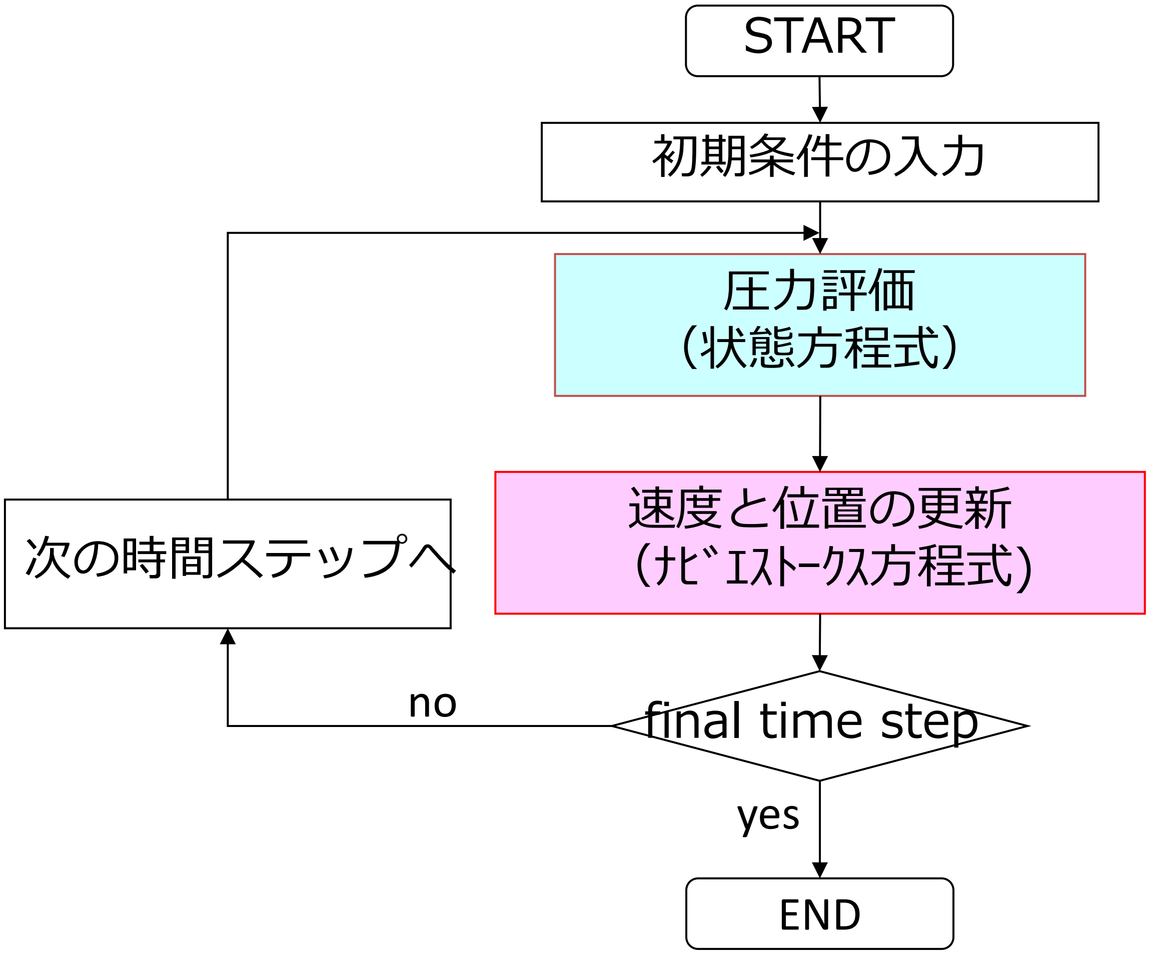
防災に向けたマルチフィジックスシミュレーション



研究成果の概要

- 2012年度(初年度)の成果
  - FEMにおける地盤-橋梁モデルの収束性改善
  - SPH法における緩和パラメータ・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年度)の成果
  - 橋桁に対する流体力評価
  - 剛体モデル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

古典的SPH法 [Monaghan '88]



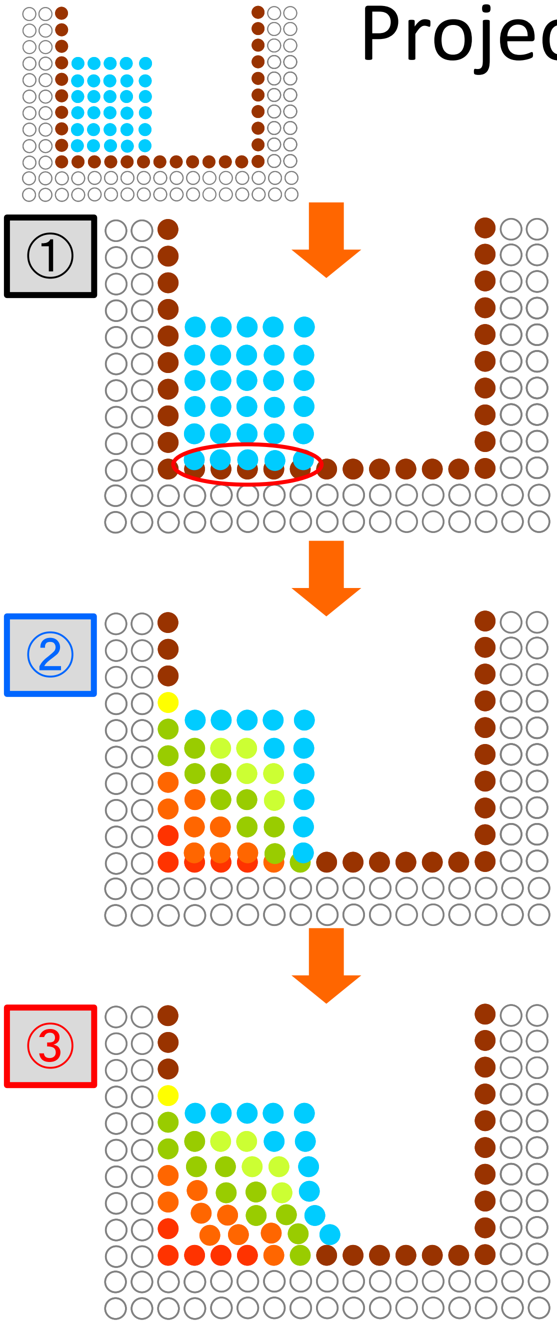
$$\left\langle \rho_i^n \right\rangle = \sum_j m_j W(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_j)$$

$$p_i^n = B\left\{ \left(\frac{\left\langle \rho_i^n \right\rangle}{\rho_0} \right)^{\gamma} - 1 \right\}$$

$$\boldsymbol{v}_i^{n+1} = \boldsymbol{v}_i^n + \Delta t \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p_i^n + \nu \nabla^2 \boldsymbol{v}_i^n + \boldsymbol{b}_i \right)$$

速度･圧力を陽的に解く完全陽解法

Projection法による半陰的SPH (ISPH)法 [Cummins and Rudman '99]



非圧縮性NS方程式

$$\boldsymbol{v}_i^{n+1} = \boldsymbol{v}_i^{n} + \Delta t\left(-\cancel{\frac{1}{\rho}\nabla} p_i^n + \nu \nabla^2 \boldsymbol{v}_i^n + \boldsymbol{b}_i \right)$$

① predictor step

$$\boldsymbol{v}_i^{*} = \boldsymbol{v}_i^{n} + \Delta t\left(\nu\ \nabla^2 \boldsymbol{v}_i^n + \boldsymbol{b}_i \right)$$

圧力勾配項を除いたNS式から仮の速度を導出

② pressure evaluation

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t}\nabla \cdot \boldsymbol{v}^{*}$$

質量保存則

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

ポアソン方程式から圧力の導出

③ corrector step

$$\boldsymbol{v}_i^{n+1} = \boldsymbol{v}_i^{*} - \Delta t\left(\frac{1}{\rho}\nabla p^{n+1} \right)$$

圧力を陰的に解く

安定化ISPH法 [Aly et al '13]

② pressure evaluation

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t}\nabla\cdot\boldsymbol{v}^*$$

⇦ 質量保存則

非圧縮性

$$\cancel{\frac{D\rho}{Dt}} + \rho\nabla\cdot\boldsymbol{v} = 0$$

速度発散ゼロ条件による定式化		密度一定条件による定式化	
$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho_0}{\Delta t}\nabla\cdot\boldsymbol{v}^*$ [Cummins and Rudman '99]		$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho_0 - \rho^*}{\Delta t^2}$ [Khayyer et al '08]	
圧力分布	○	圧力分布	▲
体積保存性	▲	体積保存性	○

安定化ISPH法

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho_0}{\Delta t}\nabla\cdot\boldsymbol{v}^* + \boldsymbol{\alpha}\frac{\rho_0 - \rho^n}{\Delta t^2}$$

長期安定性
(=粒子の均等配置)

緩和パラメータ: $\boldsymbol{\alpha}$ $(0 \le \alpha \le 1)$

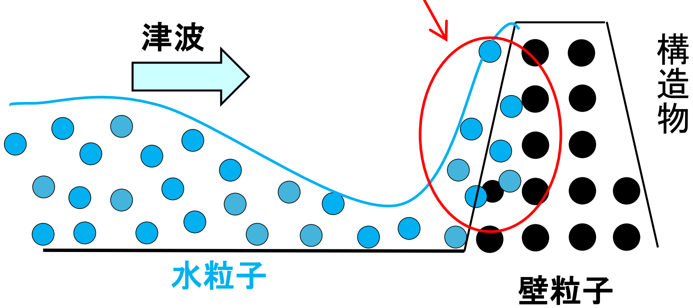
仮想マーカーによる境界条件処理

- 仮想マーカーを用いたすべり･非すべり境界条件処理, 並びに圧力境界条件処理を導入

従来の方法

壁粒子に適切な物性値(速度･圧力)を付与できなかった。

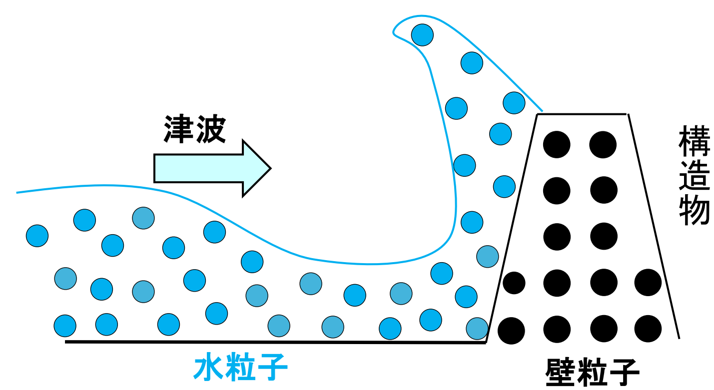
固体壁(構造物の内部)に粒子の貫通



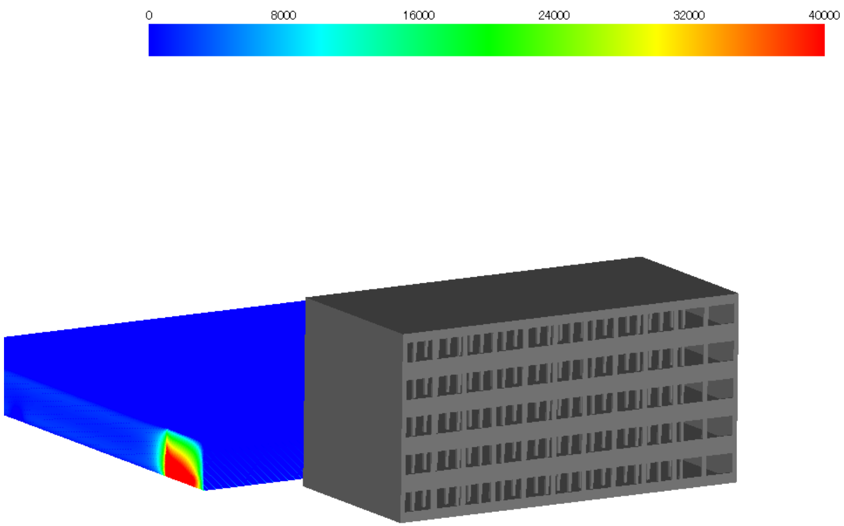
今回の手法

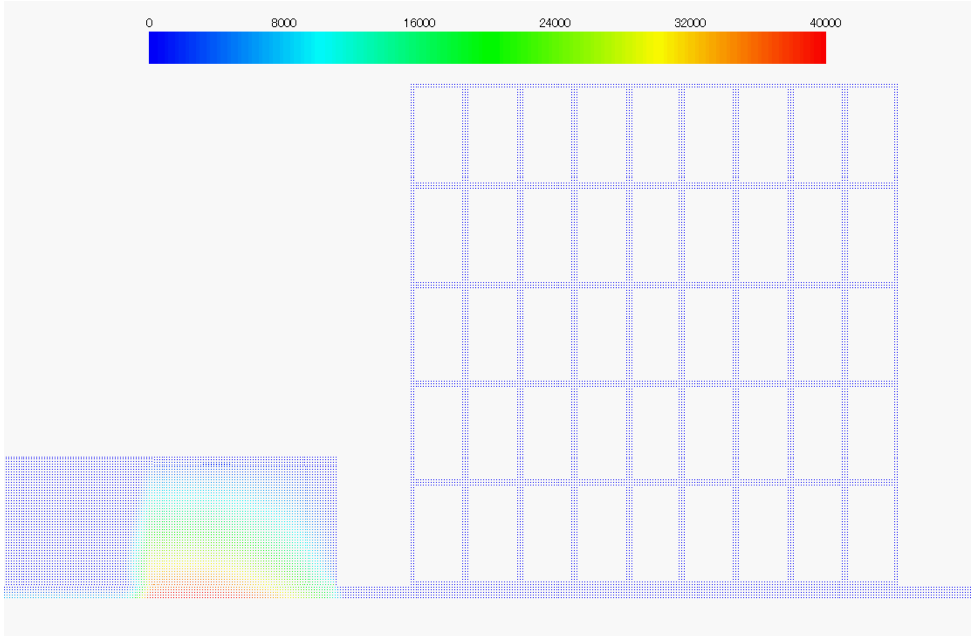
壁粒子に適切な物性値(速度･圧力)を付与できる方法へと改良

任意の形状に対してより正しく境界条件を与える手法へ改善



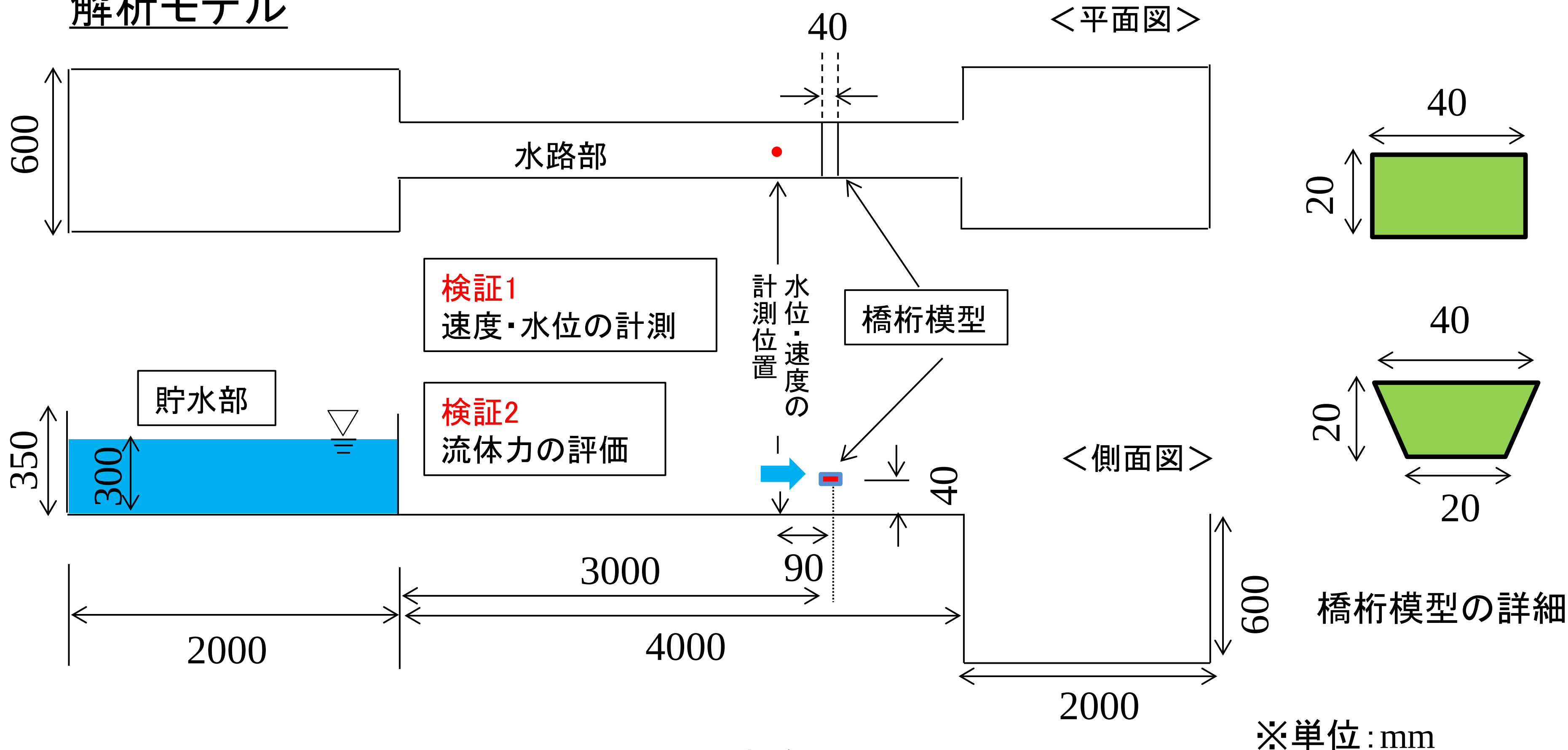
例題: 建築物への津波侵入シミュレーション





精度検証

解析モデル



解析条件

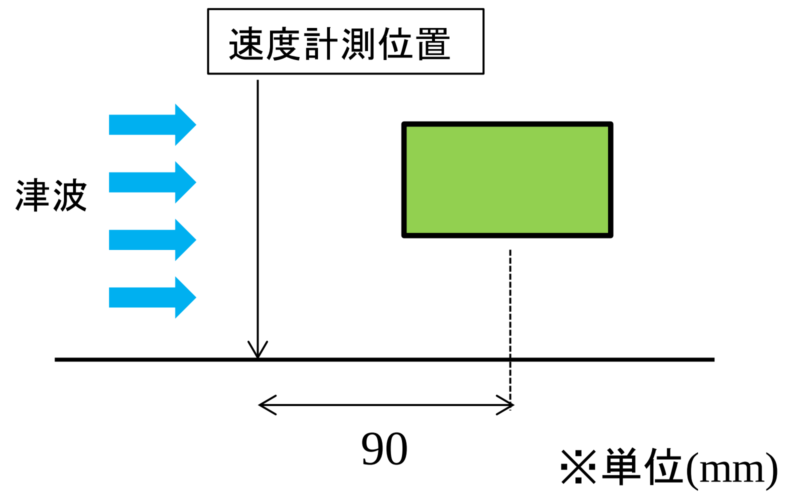
粒子間隔	総粒子数	時間増分	実時間	解析時間(384core)
5mm	約800万	0.001秒	15秒	約140時間

(九州大学のスパコン，FUJITSU PRIMEHPC FX10を使用)

検証1: 速度の比較

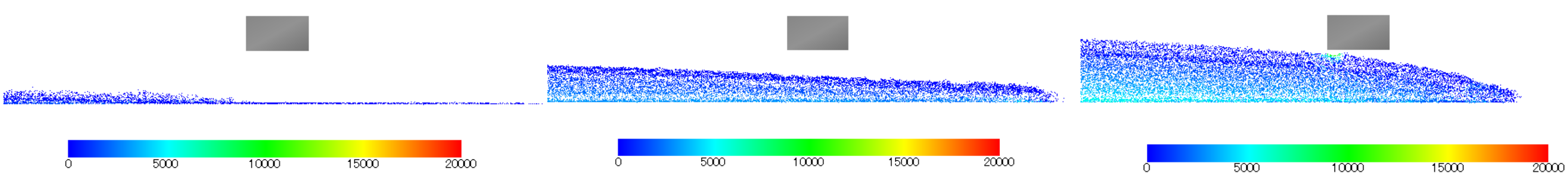
$$\boldsymbol{v}' = \beta\boldsymbol{M}\boldsymbol{v} + (1-\beta)\boldsymbol{R}\boldsymbol{v} \quad (0 \le \beta \le 1) \quad -(3)$$

すべり条件 ($\beta\boldsymbol{M}\boldsymbol{v}$)　非すべり条件 ($\boldsymbol{R}\boldsymbol{v}$)



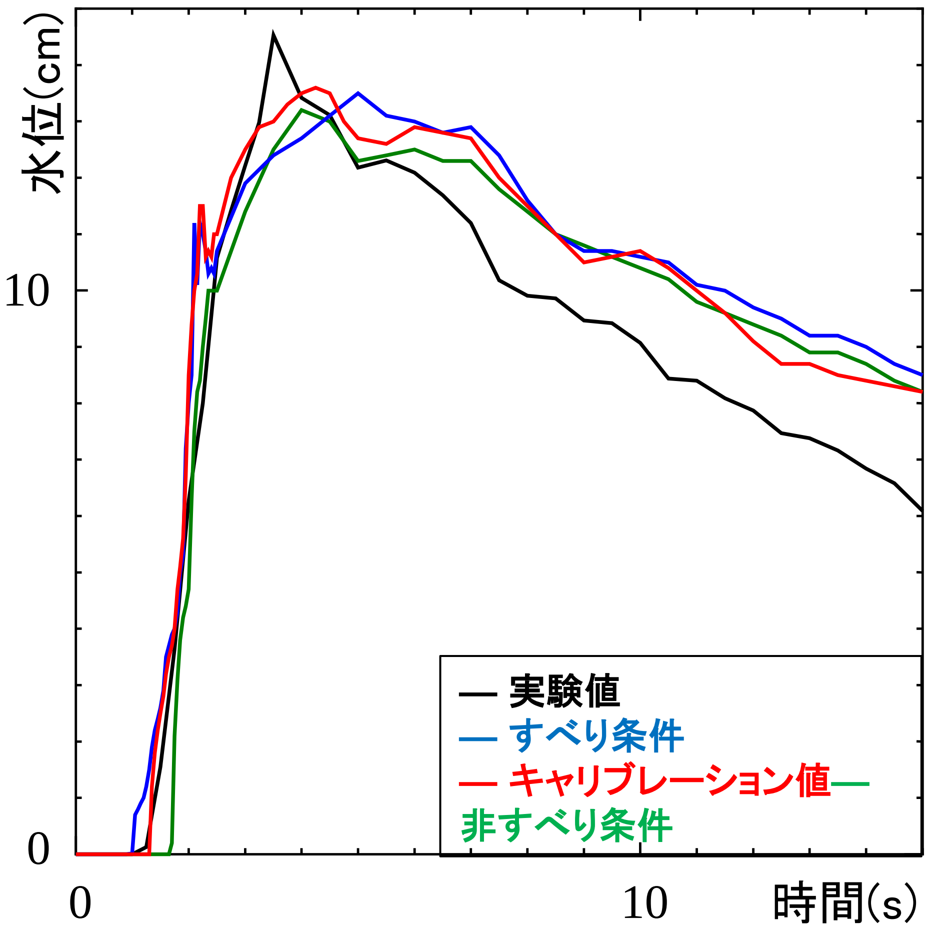
	波頭速度(m/s)
実験値	2.20
すべり条件(β=1)	3.06
キャリブレーション値(β=0.8)	2.24
非すべり条件(β=0)	

t=1.05s　t=1.85s

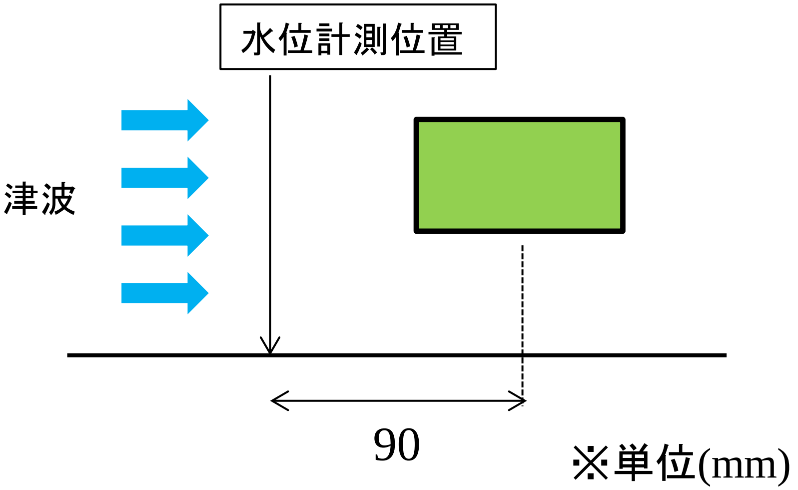


すべり条件　キャリブレーション値　非すべり条件

検証1: 水位の比較

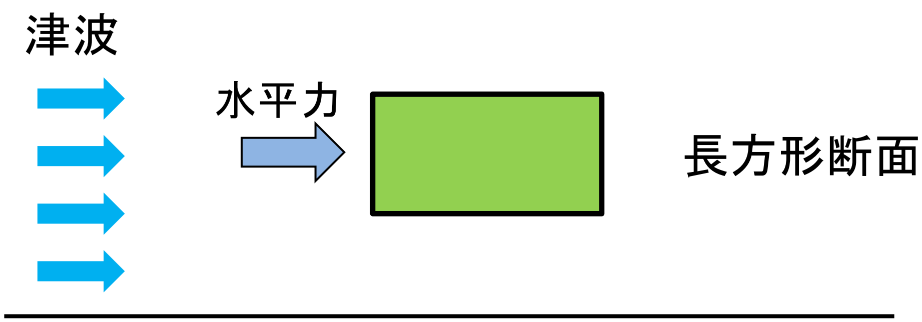


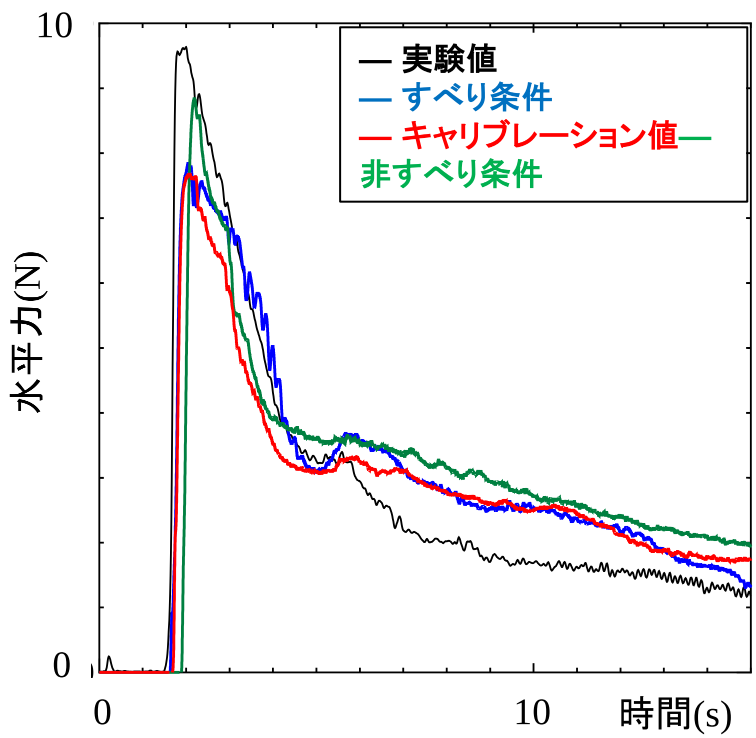
水位(cm)
10
0
0
10
時間(s)
— 実験値
— すべり条件
— キャリブレーション値
— 非すべり条件

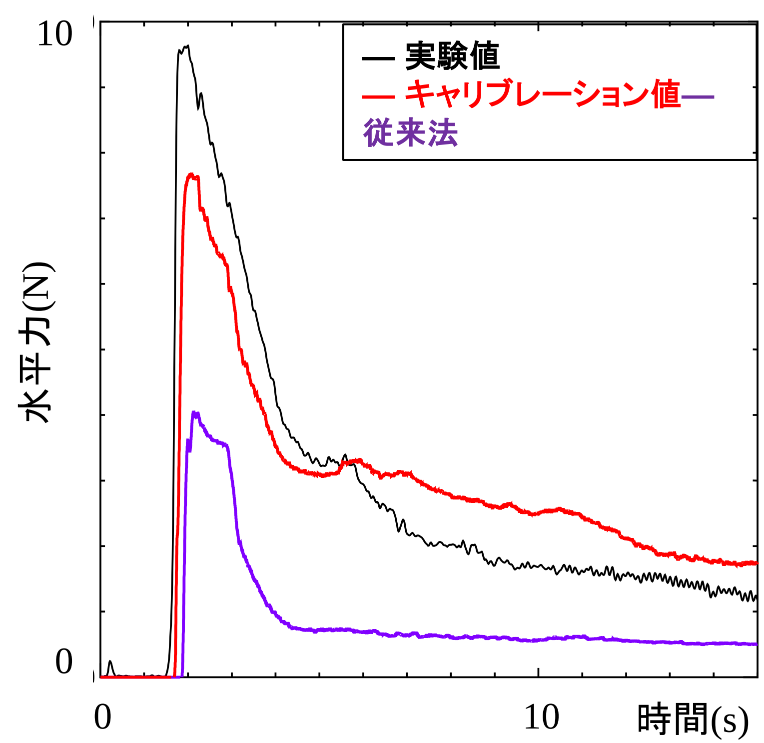


水位計測位置
津波
90
※単位(mm)

検証2: 流体力の比較

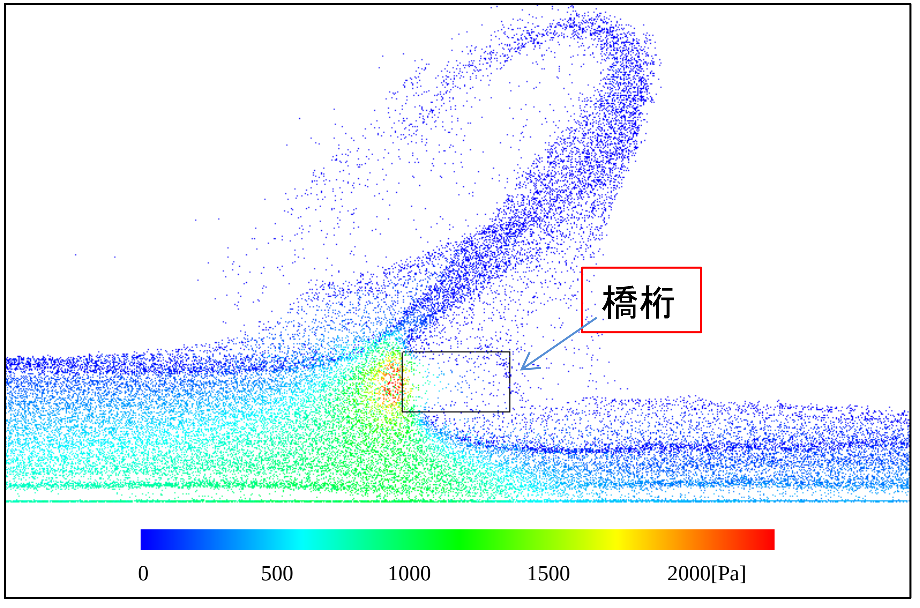

津波
水平力
長方形断面


10
0
0
10
時間(s)
水平力(N)
— 実験値
— すべり条件
— キャリブレーション値—
非すべり条件


10
0
0
10
時間(s)
水平力(N)
— 実験値
— キャリブレーション値—
従来法

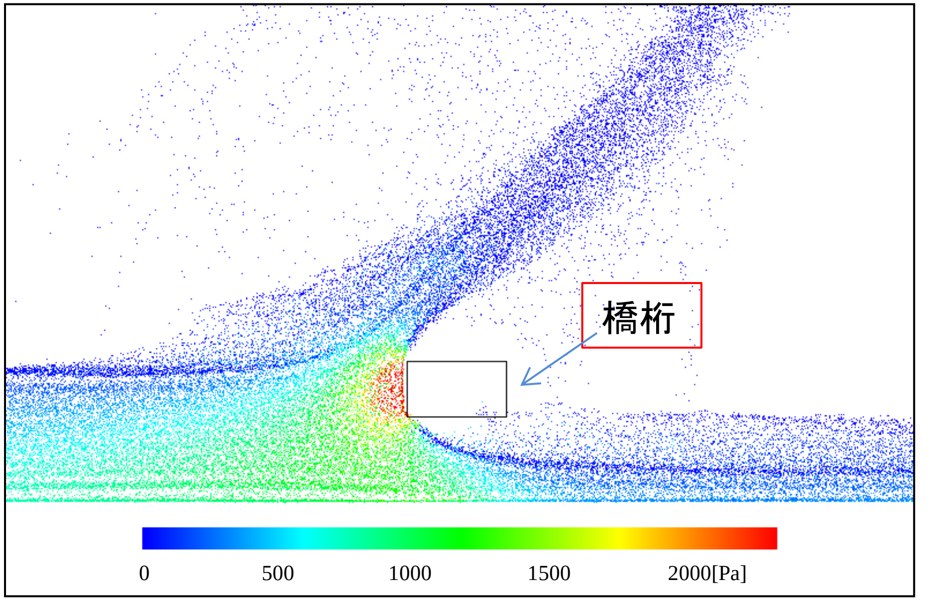
剛体内部への水粒子の貫通比較

従来の境界処理



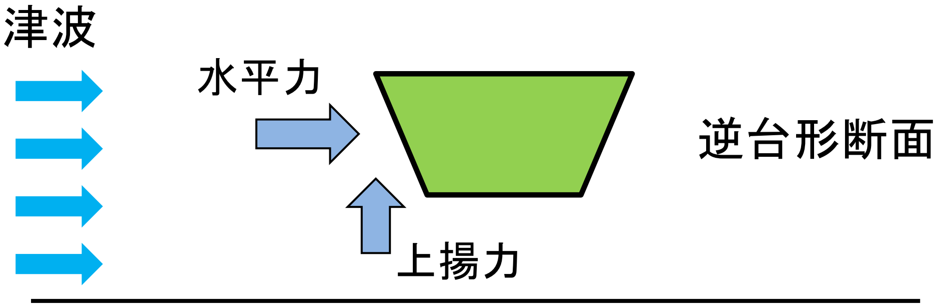
T=2.10s

提案手法

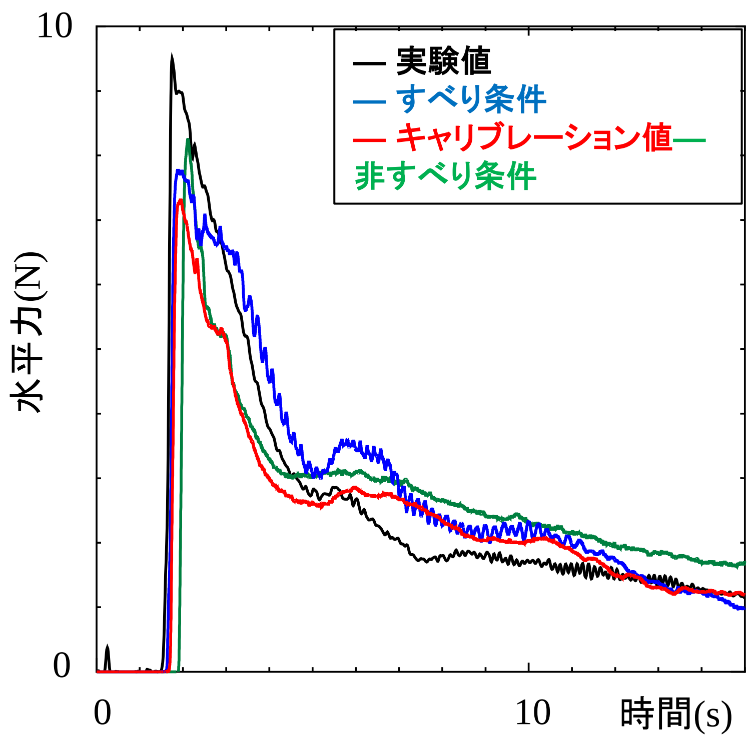


T=2.05s

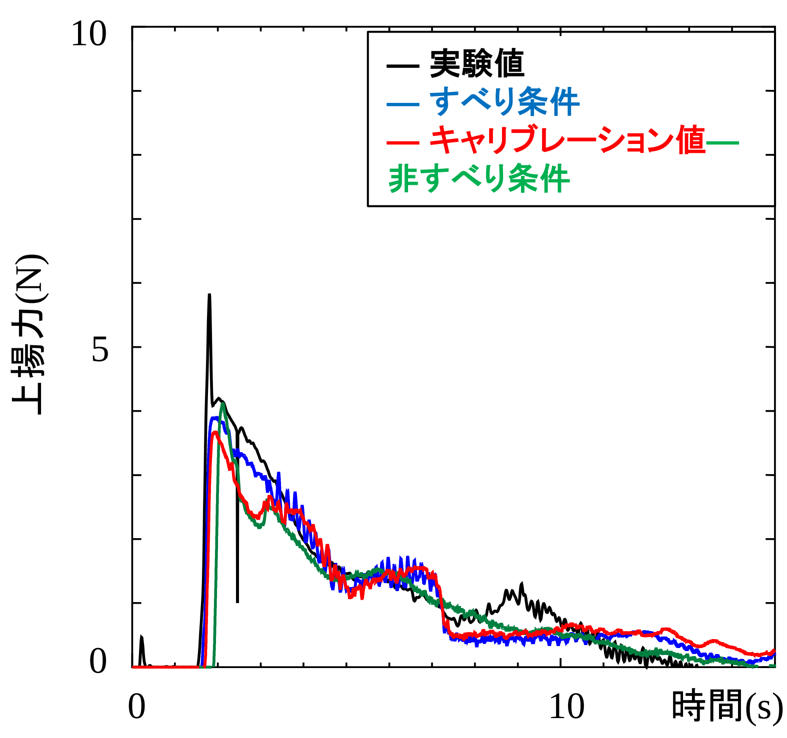
検証2: 流体力の比較



津波
水平力
上揚力
逆台形断面

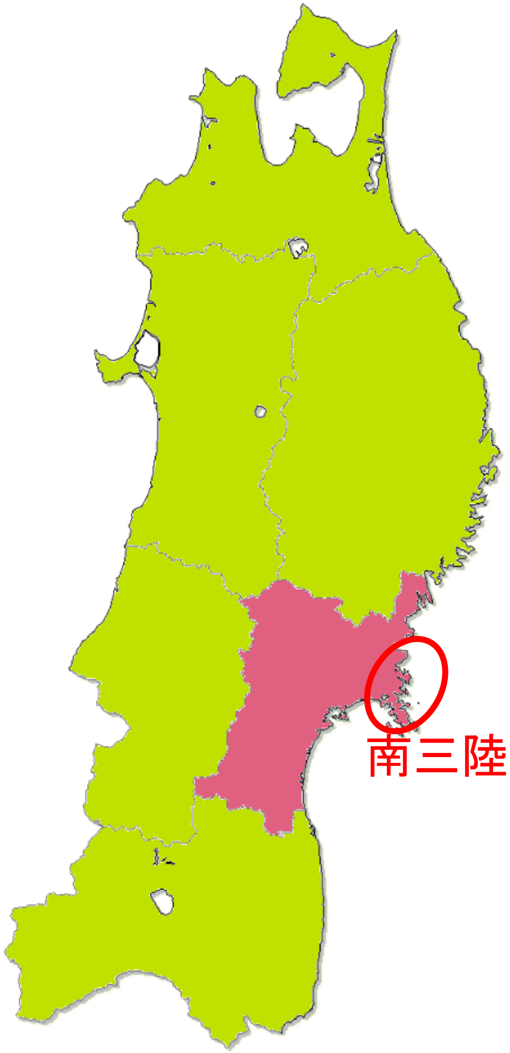


10
0
0
10
時間(s)
水平力(N)
— 実験値
— すべり条件
— キャリブレーション値
— 非すべり条件



10
5
0
0
10
時間(s)
上揚力(N)
— 実験値
— すべり条件
— キャリブレーション値
— 非すべり条件

橋桁流出シミュレーション解析対象



※「Craft MAP-日本・世界の白地図」を基に作成

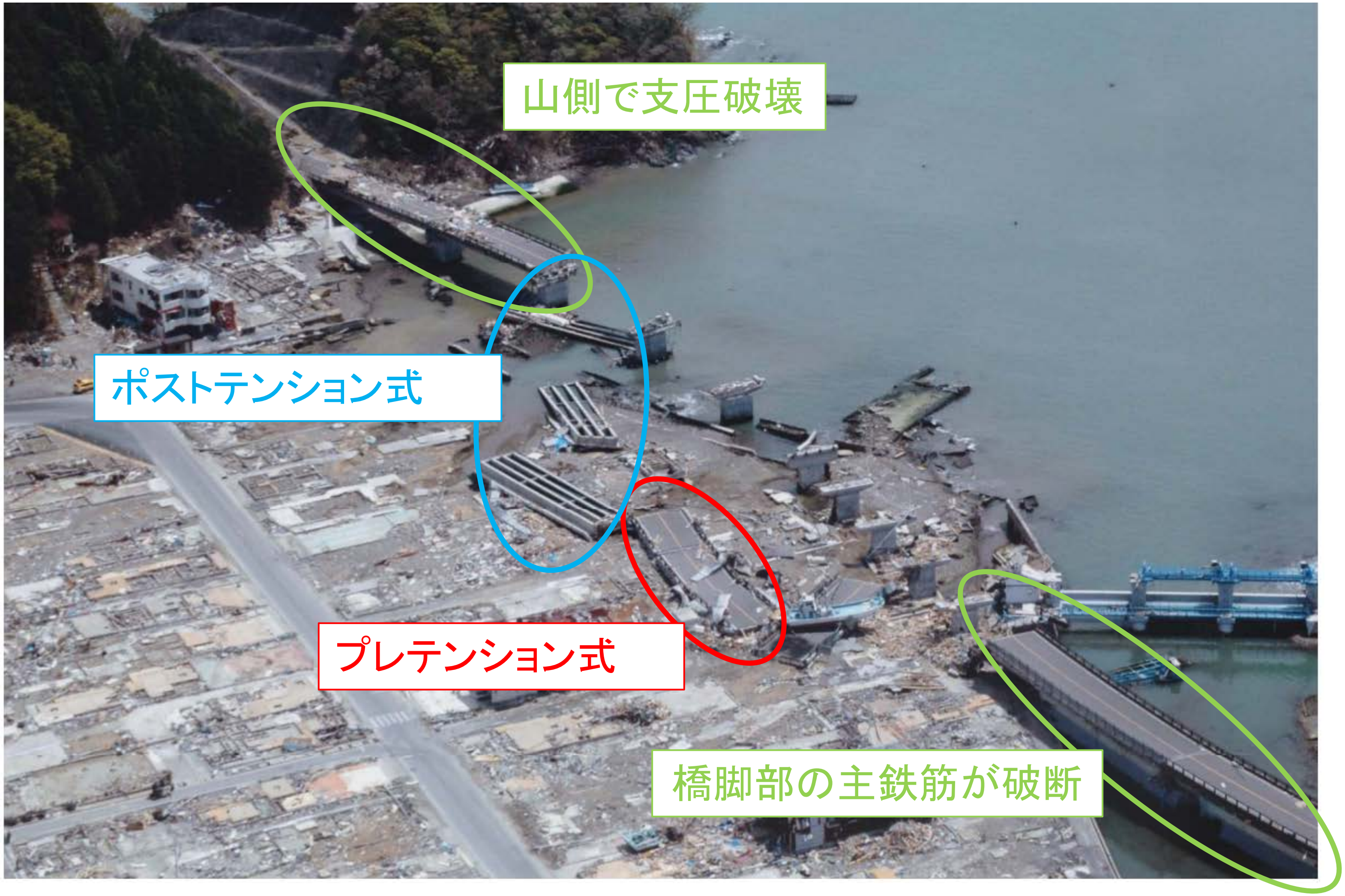
宮城県南三陸町歌津大橋

東日本大震災の津波被害により
計8径間(第3径間～第10径間)の橋桁が流出

歌津大橋(震災後)

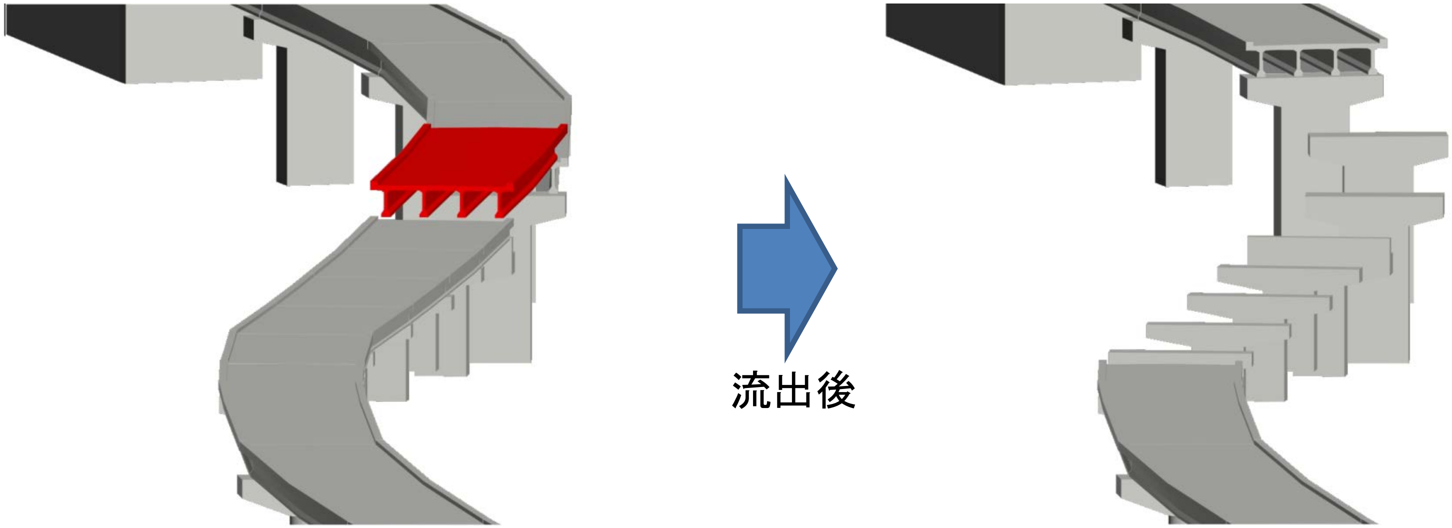
写真：東北地方整備局震災伝承館より

歌津地域の損傷状況

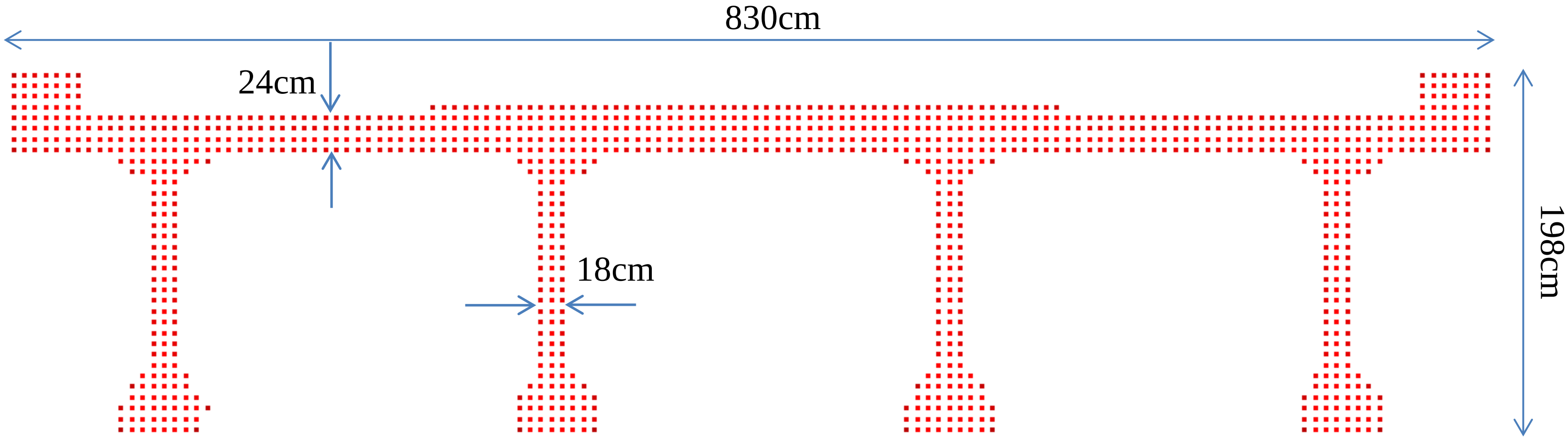


写真：九州工業大学　幸左らによる津波被害分析.pdf(H.25.2.20)より

橋桁詳細モデル

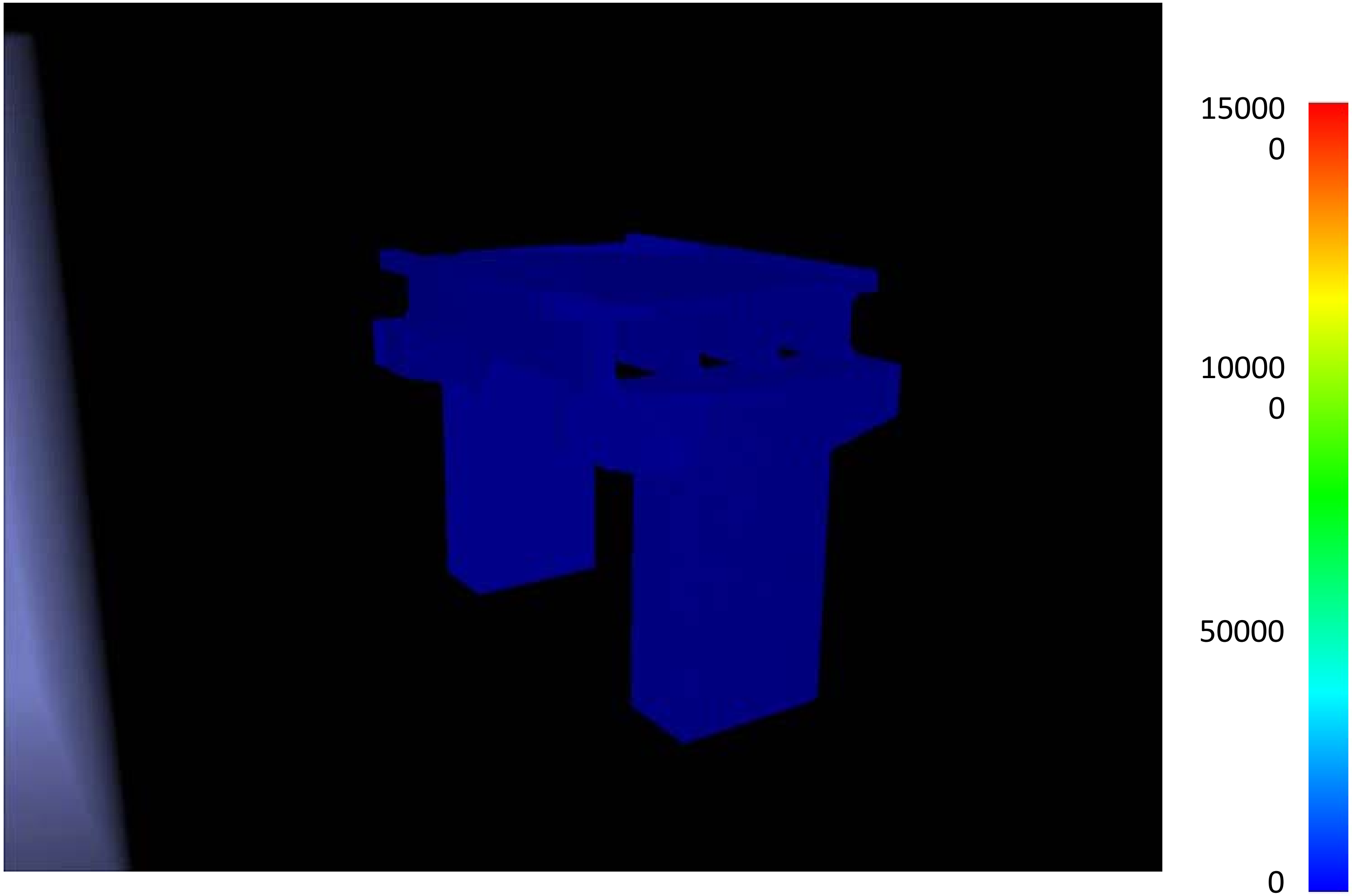


歌津大橋モデル図



断面図（歌津大橋第8橋桁の断面形状を再現）

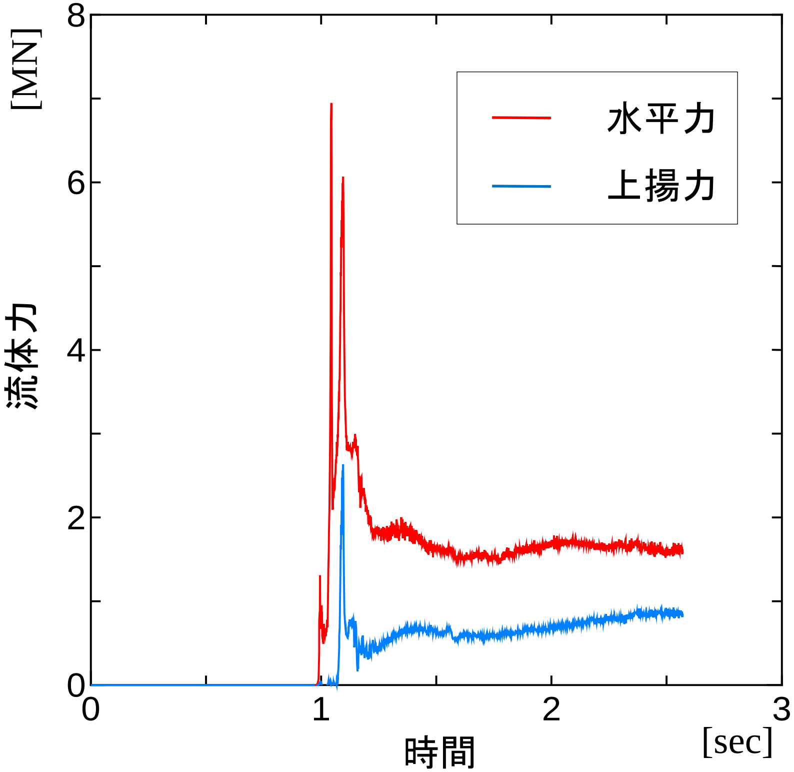
解析結果



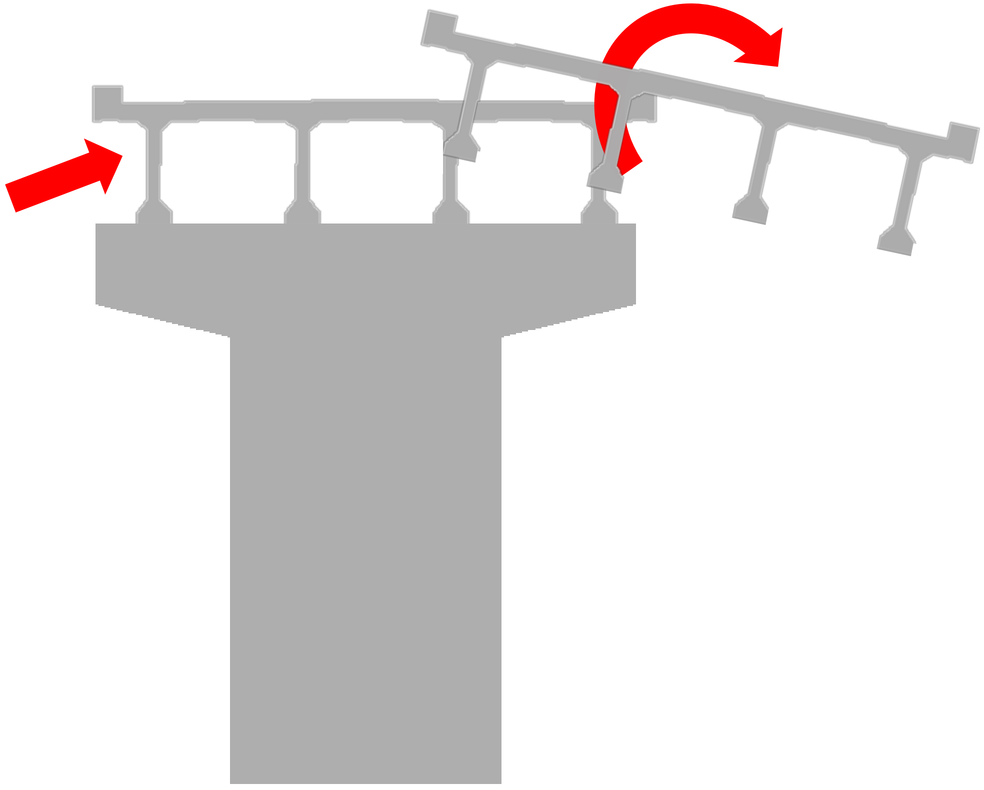
橋桁に作用する圧力

単位：Pa

橋桁に作用する津波流体力評価



流体力評価



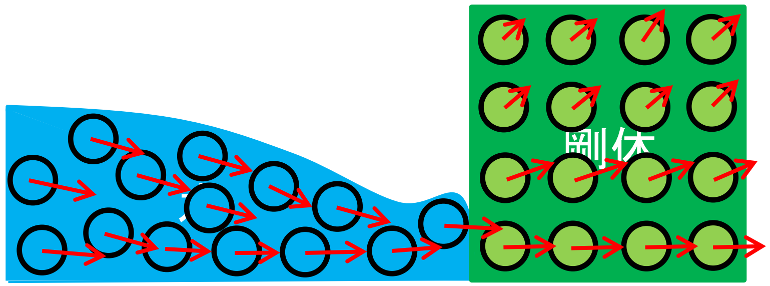
簡易流失予測

剛体モデル①

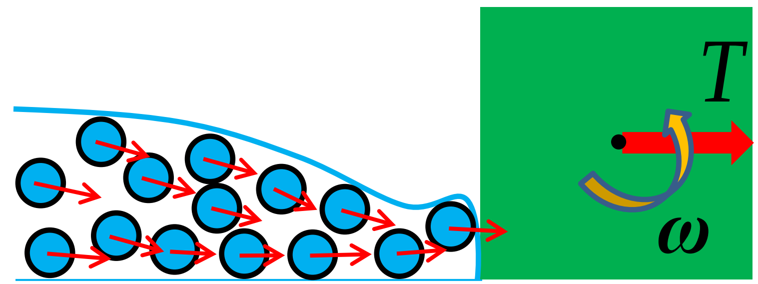
剛体粒子も水粒子と同様に
有限個の粒子に離散化する

⇩

ISPH法より剛体粒子の
速度・圧力を算出する



ISPH法による物理量の算出



疑似的剛体モデル概念図

剛体速度の更新

$$\boldsymbol{v}_k^{l+1} = \underbrace{\boldsymbol{T}}_{\text{並進速度}} + \underbrace{\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_k}_{\text{回転速度}}$$

$$\boldsymbol{T} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{v}_k$$

$$\omega = \frac{1}{I}\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{r}_k \times (m_k \boldsymbol{v}_k)$$

$\boldsymbol{r}_k$ ：剛体中心からの距離　ω ：角速度ベクトル

$I\left(=\sum_{k=1}^{n} m_k |\boldsymbol{r}_k|^2\right)$ ：慣性モーメント

m_k ：各粒子の質量

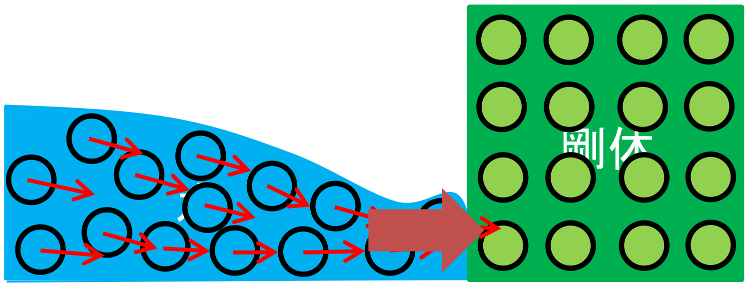
n ： 剛体の総粒子数

上付き添え字 l：時間ステップ
下付き添え字 k：剛体粒子番号

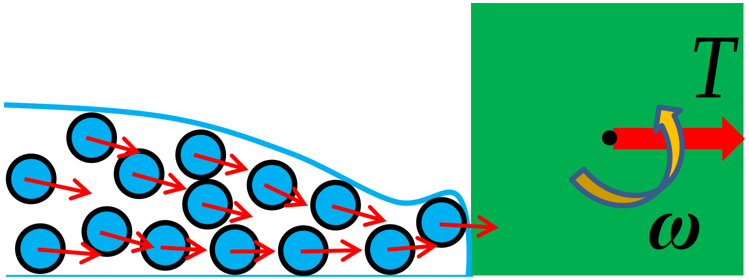
剛体モデル②

剛体粒子を固定壁粒子として仮定し，壁に作用する圧力を評価

流体圧を外力として、剛体重心と重心周りの回転運動に関する運動方程式を解く



境界圧力を評価



疑似的剛体モデル概念図

剛体速度の更新

$$\boldsymbol{v}_k^{l+1} = \underbrace{\boldsymbol{T}}_{\text{並進速度}} + \underbrace{\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}_k}_{\text{回転速度}}$$

剛体重心の並進運動に関する運動方程式

$$M\frac{d^2\mathbf{r}_c}{dt^2} = M\mathbf{g} + \mathbf{f}_f + \mathbf{f}_c$$

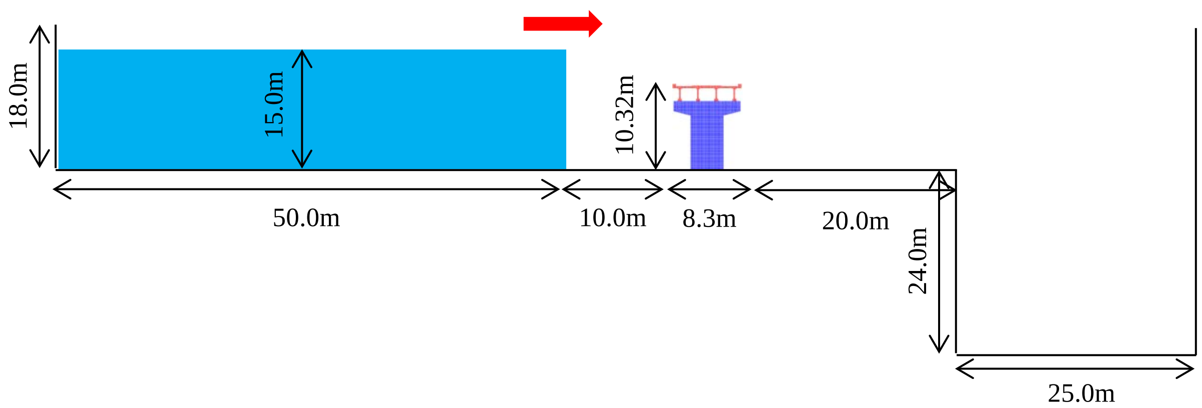
重心周りの回転運動に関する運動方程式

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} = \mathbf{m}_f + \mathbf{m}_c$$

解析モデル（剛体モデル①）

Case.1 段波

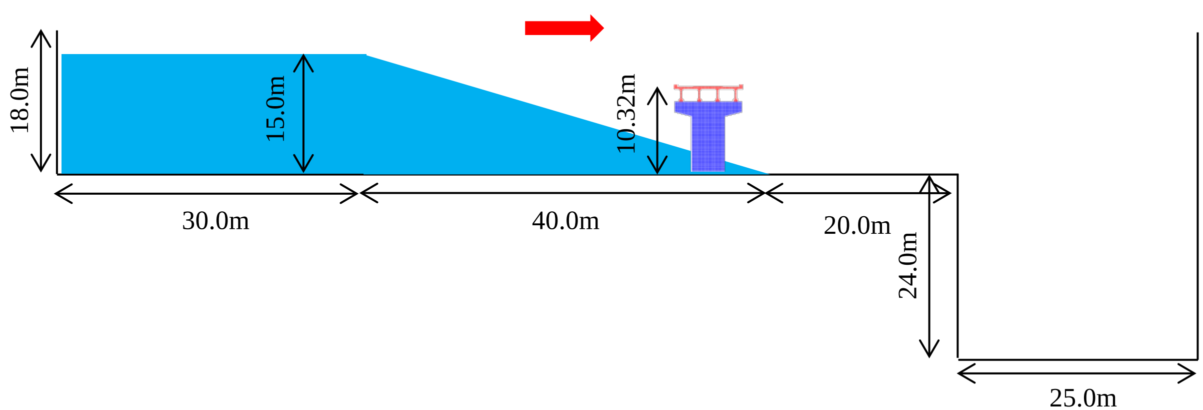
橋脚固定



- 実時間：3.75sec
- 解析時間:109時間
- 境界条件

  x=50m以下の水に常に流速10m/secを与える

Case.2 非段波



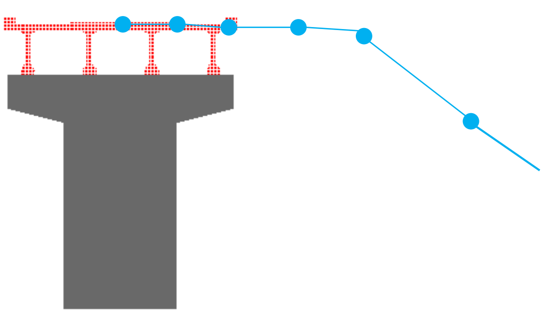
- 実時間：2.95sec
- 解析時間:86時間
- 境界条件

  x=30m以下の水に常に流速10m/secを与える
  x=30m以上の水に初速10m/secを与える

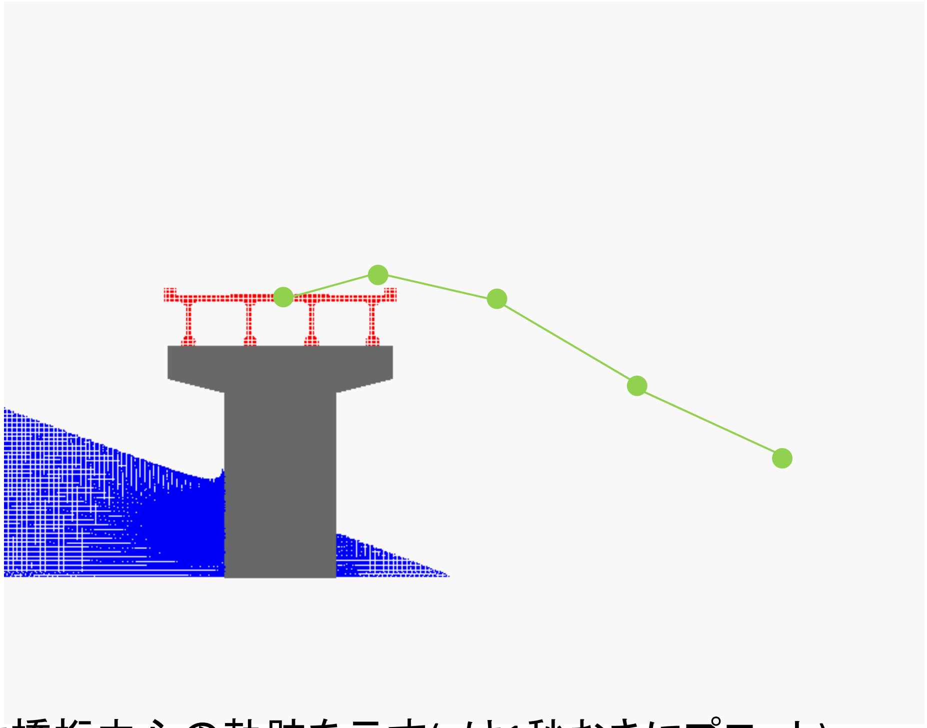
<u>橋桁の剛体粒子には鉄筋コンクリートの平均密度ρ=2450kg/m^{3}の密度を与えた</u>

解析結果（剛体モデル①）

Case.1 段波



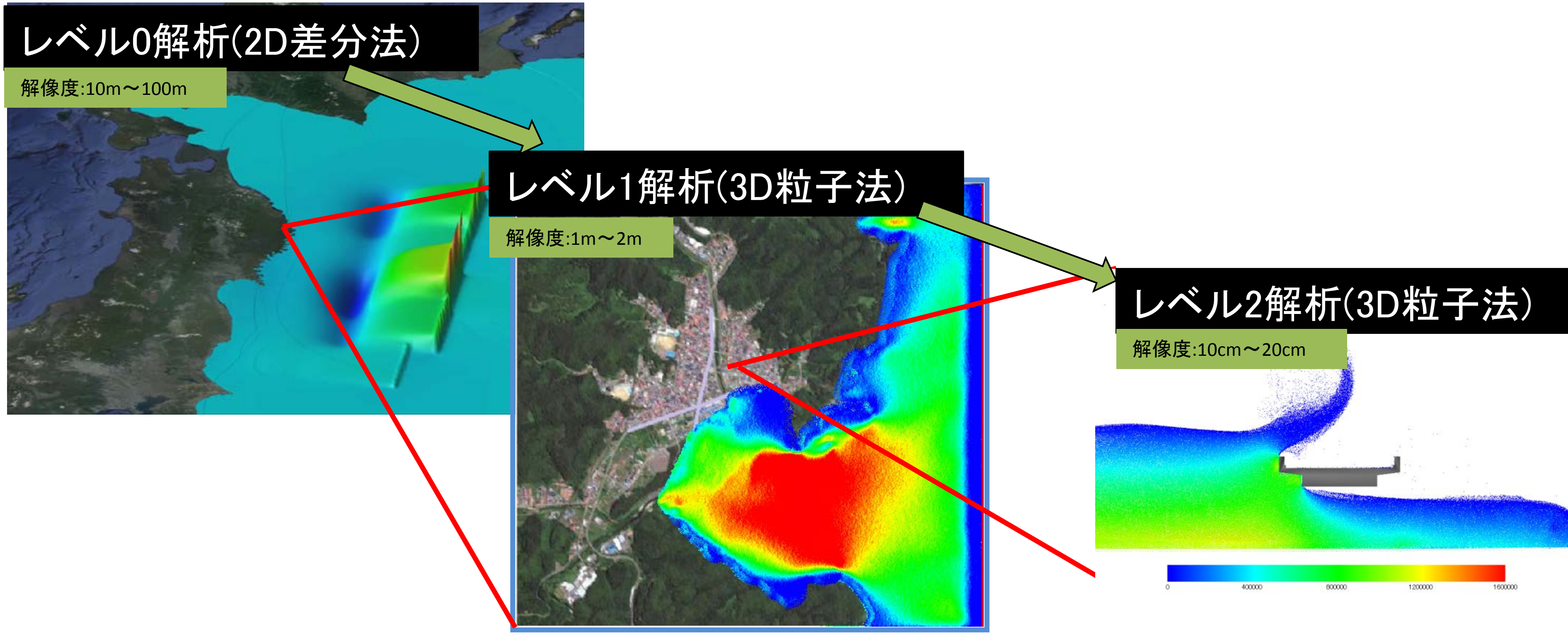
Case.2 非段波



※実線は橋桁中心の軌跡を示す(●は1秒おきにプロット)

並進運動は表現できているが、回転運動は見られない

今後の展望



2D差分法 or FEM | **3D粒子法**

津波伝搬シミュレーション | 津波遡上解析 | 水・構造・地盤の連成

震源 → 湾内 → 構造物

防災・減災向け映像教材の作成