

可動式津波低減設備“防波扉”の実用化に関する研究

京都大学 防災研究所 飯干 歩（現 国土交通省）

京都大学 防災研究所 平石哲也

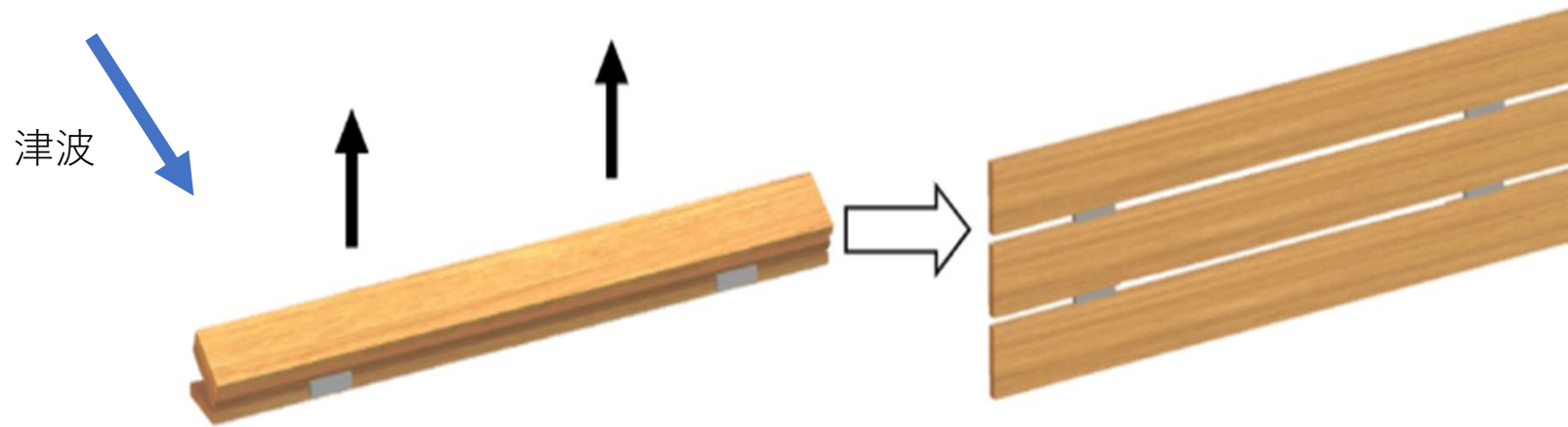
防波システム研究所 濱田英外

防波システム研究所 森田章一

防波扉とは？

既往研究で浮上は確認

汀線付近で津波による浸水を止める二線堤
発展途上国での適用可能な津波対策装置

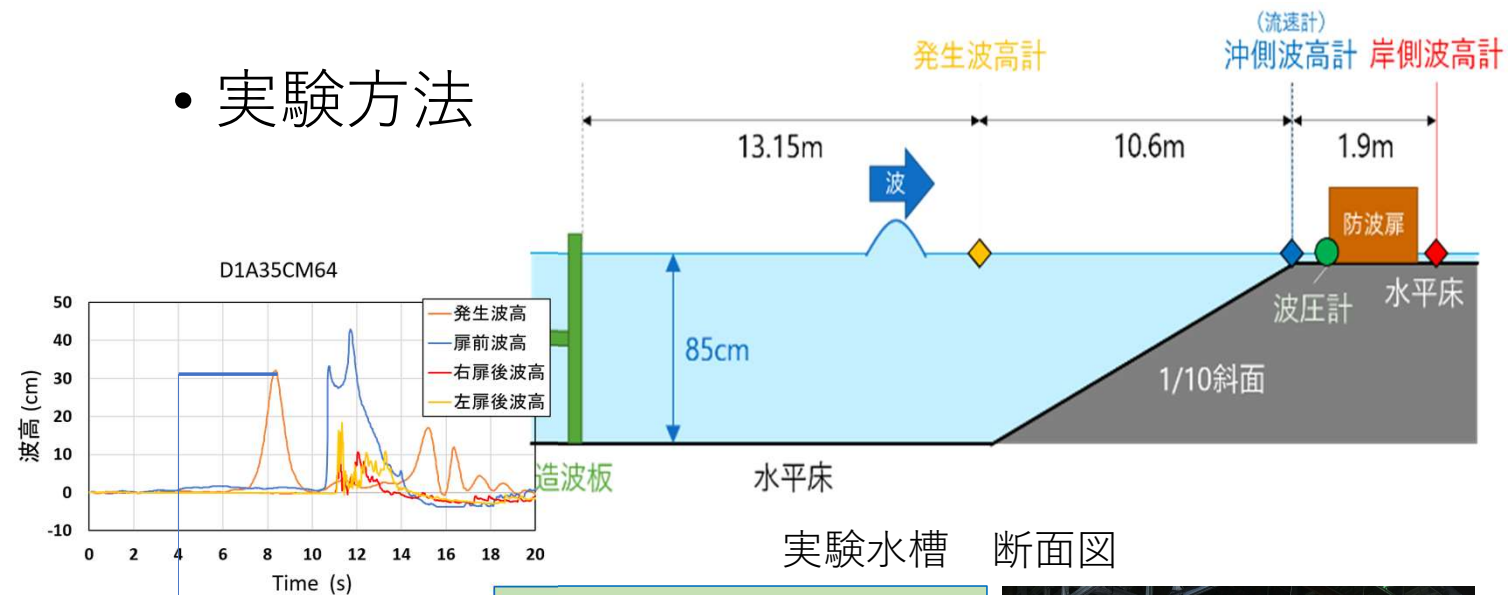


発表内容

- 実験での検討
 - **実験方法**
 - 津波低減効果の評価方法
 - 実験結果
 - **数値解析**
 - 計算条件
 - 津波低減効果の評価方法
 - 計算結果
- ▶ 静的モデルによる強度分析
強度分析の手順
たわみによる強度判定
 - ▶ 現場設置モデルの提案
 - ▶ 結論

2. 防波扉の津波低減効果に関する実験的検討

• 実験方法

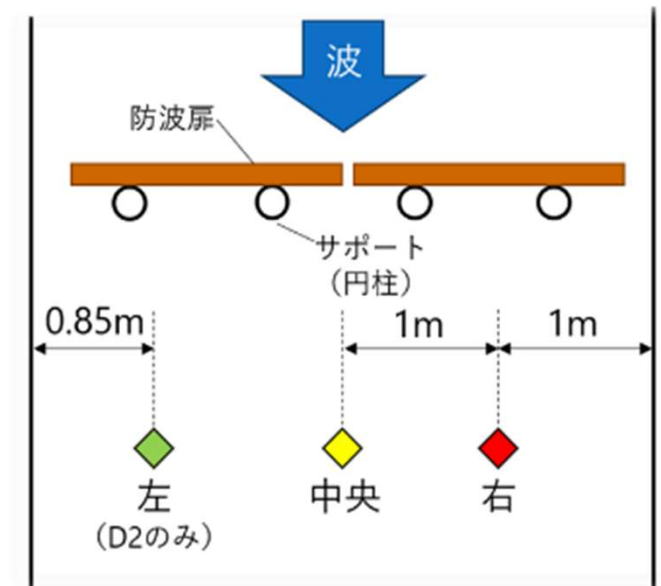


発生波高
0.15m
0.25m
0.35m

防波扉模型

3 段式

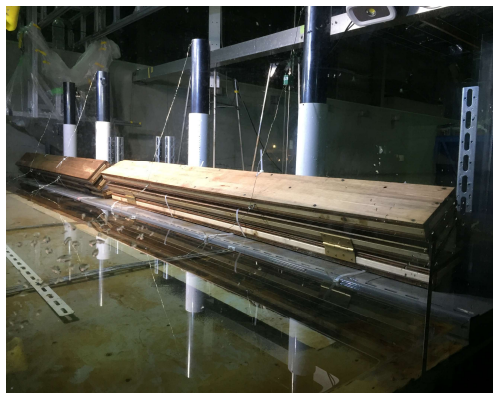
1 段の高さ : 0.15m



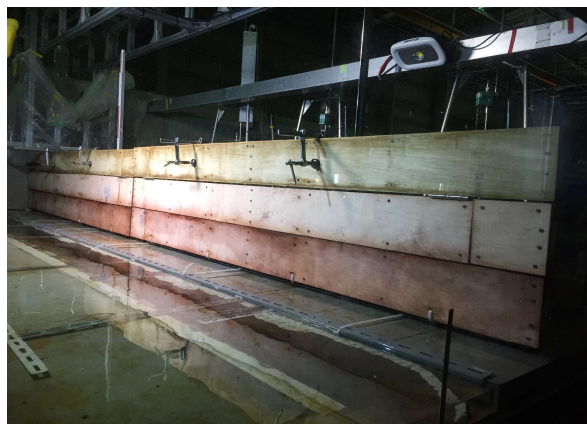
模型設置場所周辺
平面図

設置条件

1. 折り畳み時（防波扉）
2. 起立固定時
3. 固定式防潮堤
4. ブランク条件



1.



3.

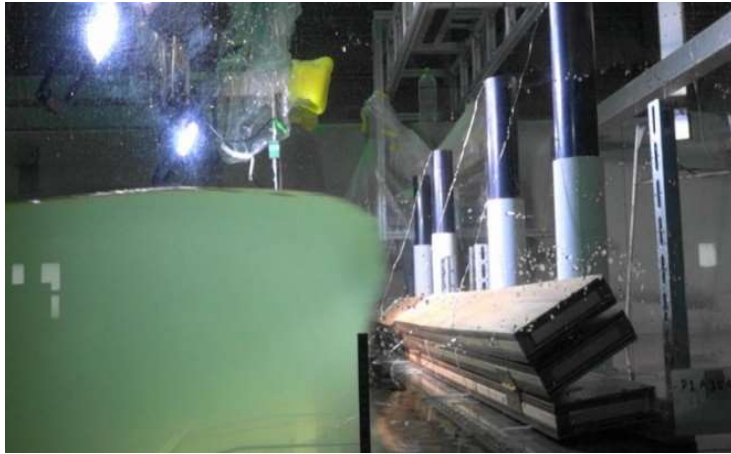


4.

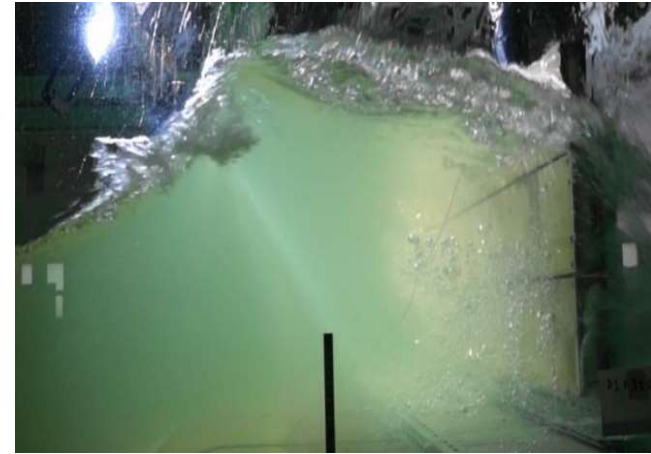


津波作用時の防波扉の作動

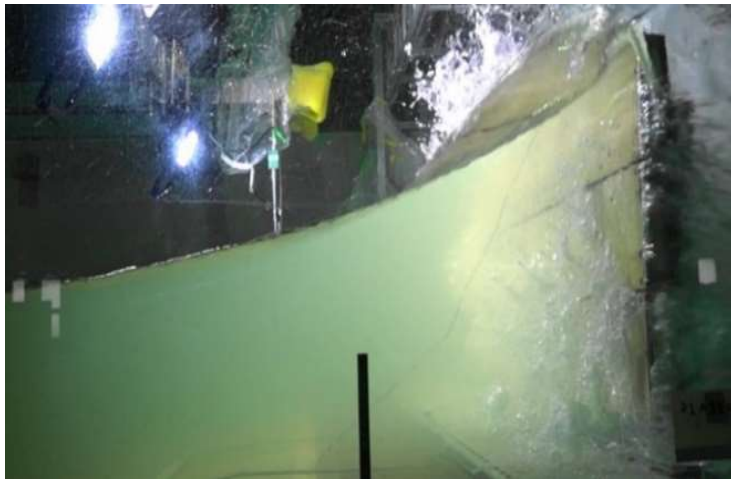
波の先端
が汀線に
到達して
から
0.1 s 後



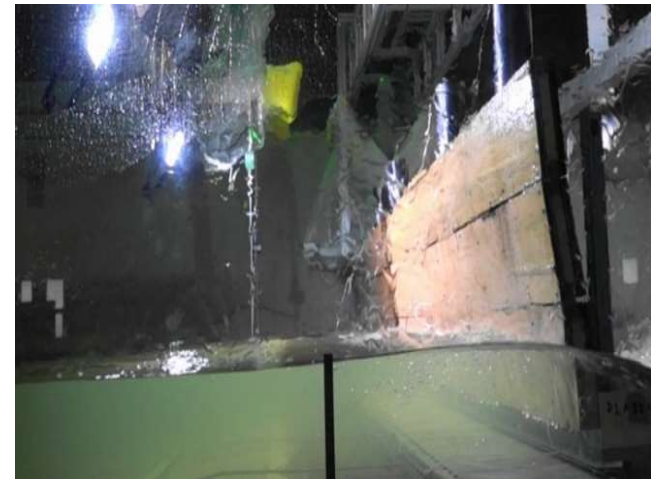
0.9 s 後



0.6 s 後



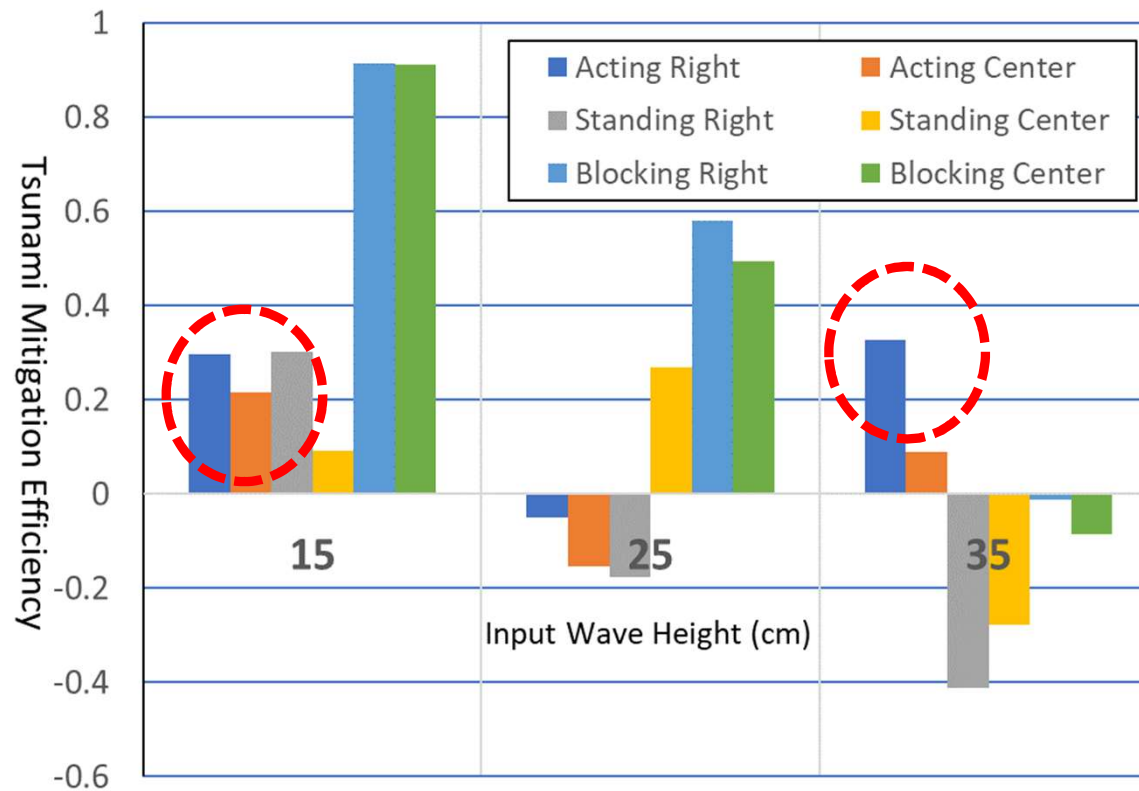
2.1 s 後



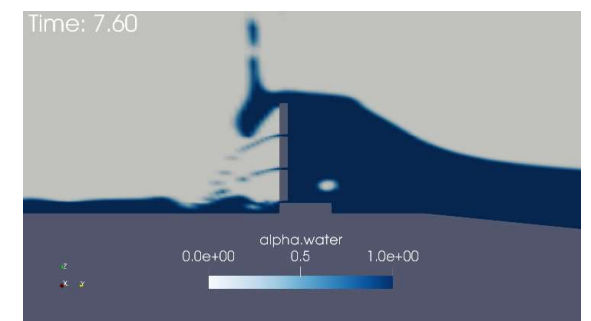
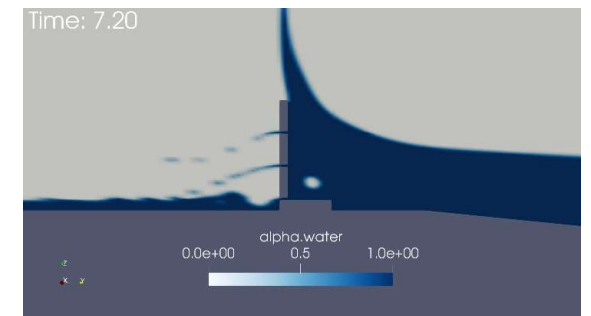
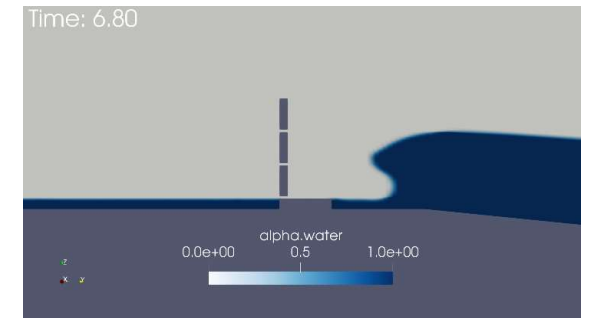
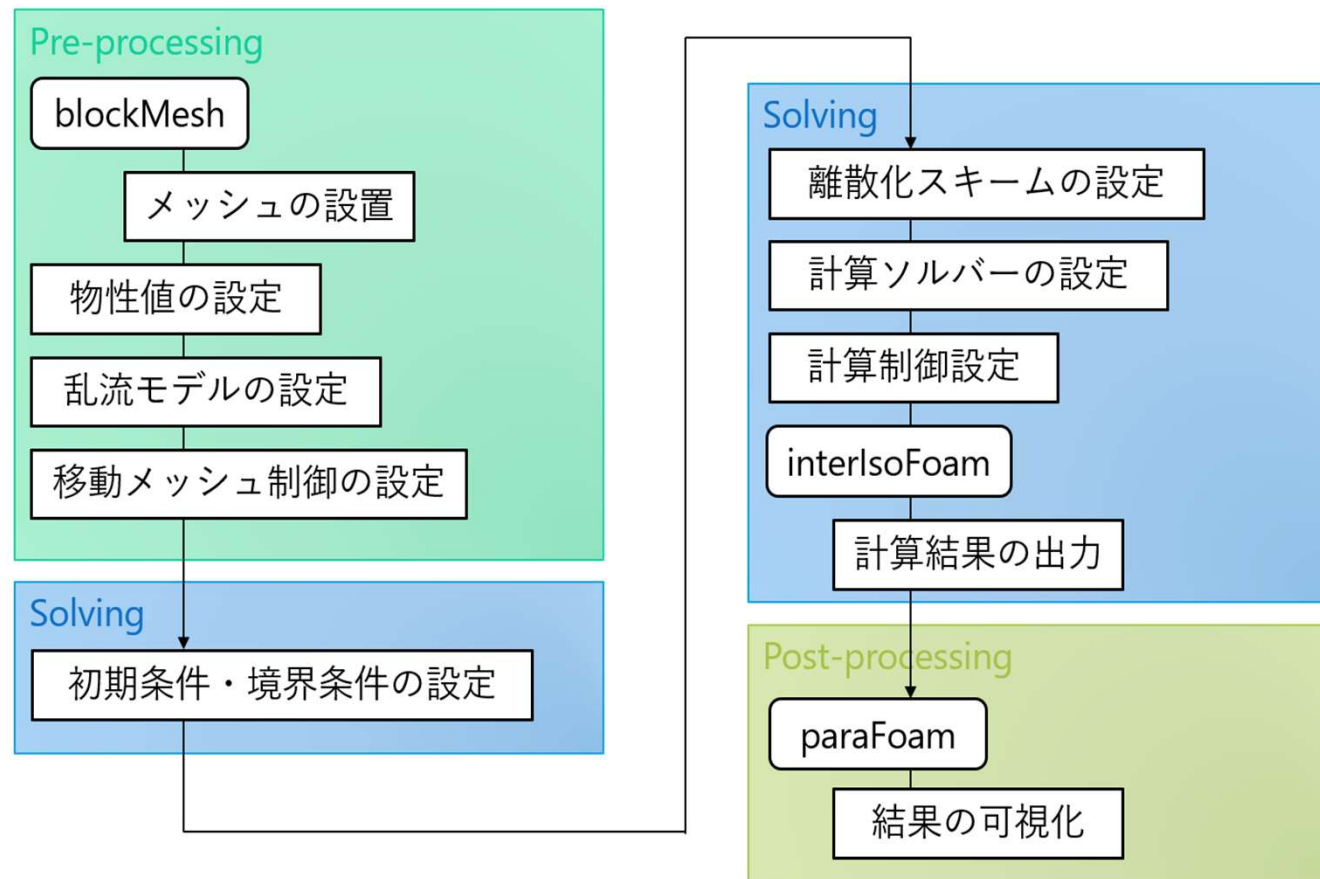
津波低減効果の評価方法 + 実験結果

$$\text{TME}_h = \frac{h_{r0} - h_r}{h_{r0}} (1)$$

h_{r0} : ブランク実験での岸側波高
 h_r : 岸側波高



3.数値解析による防波扉の津波低減効果の評価

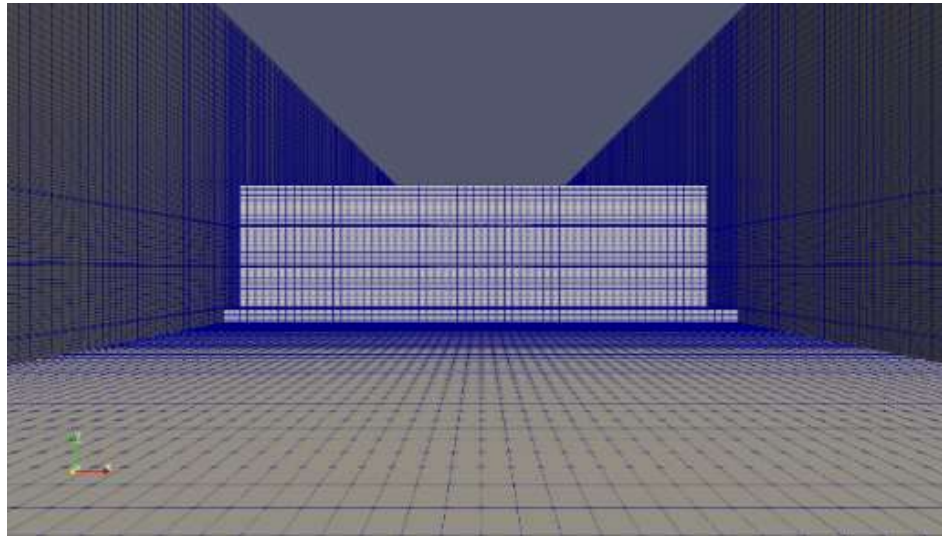


数値解析ソフトウェア：OpenFOAM

ソルバー：interIsoFoam 気相・液相界面：VOF法 防波扉：起立状態

防波扉の段間隔：0.01m 全体空隙率：13.3% 初期水位：0.85m

$\Delta h = 0.01\text{m}$ を最小、 $\Delta t = \text{結果出力間隔 } 0.1\text{ s}$



防波堤起立時の計算メッシュ

詳細計算条件

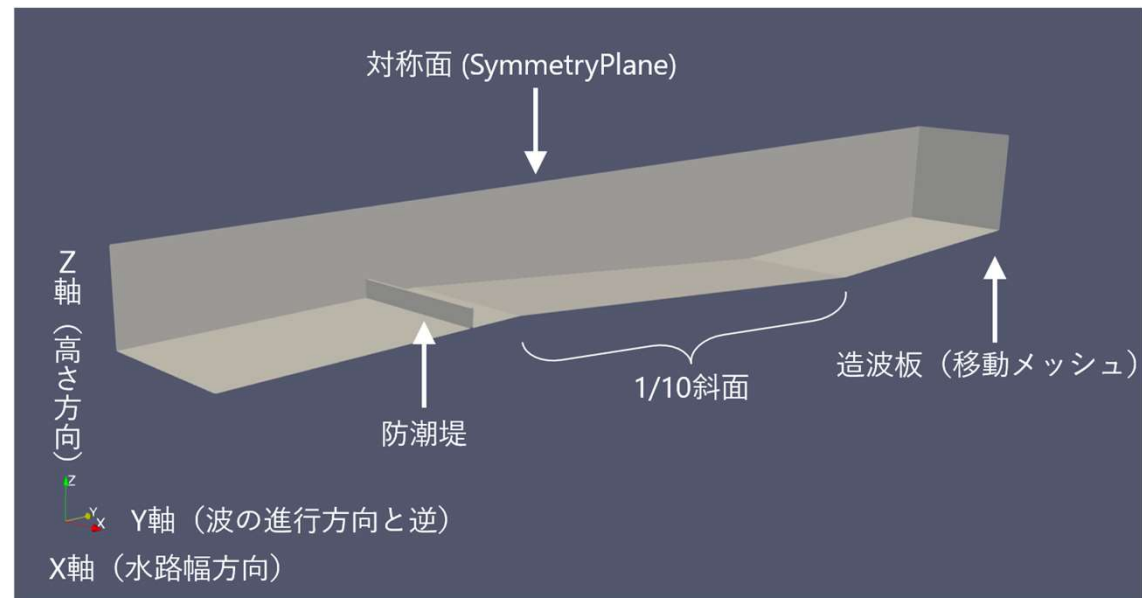
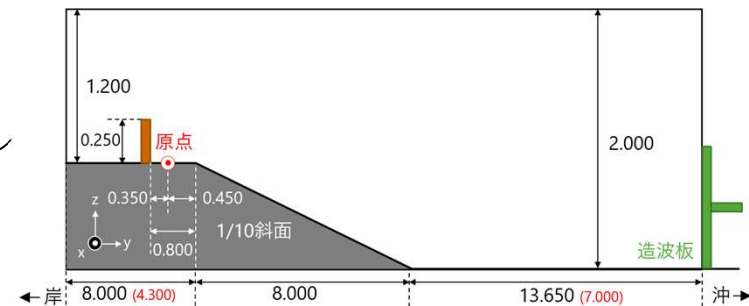
- 計算領域は津波再現水槽に基づいて設定。図の通り防潮堤を設置。
- ピストン式造波装置の運動を再現するため、移動メッシュを設定。
メッシュが縮むように変形して造波する。
- 津波再現水槽の造波板位置指令の時系列ファイルより対応する時刻と変位データを取得。

◆ 計算制御設定

計算刻み幅 Δt は
クーラン条件に従う

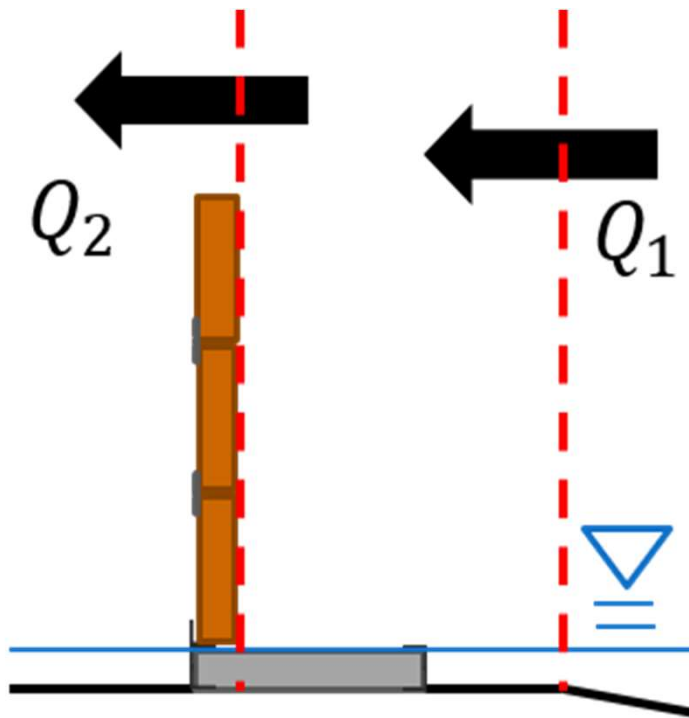
計算終了時刻 (s)	15
結果出力の時間間隔 (s)	0.1
クーラン数 c	0.5

$$c = \frac{U\Delta t}{\Delta x}$$



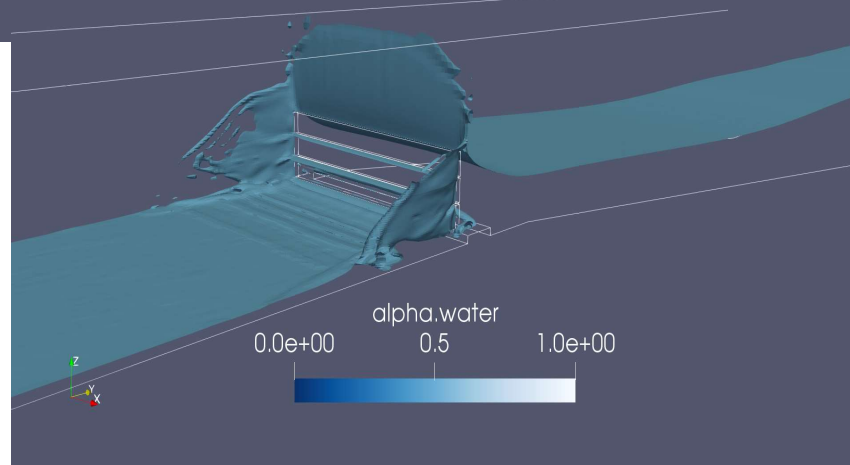
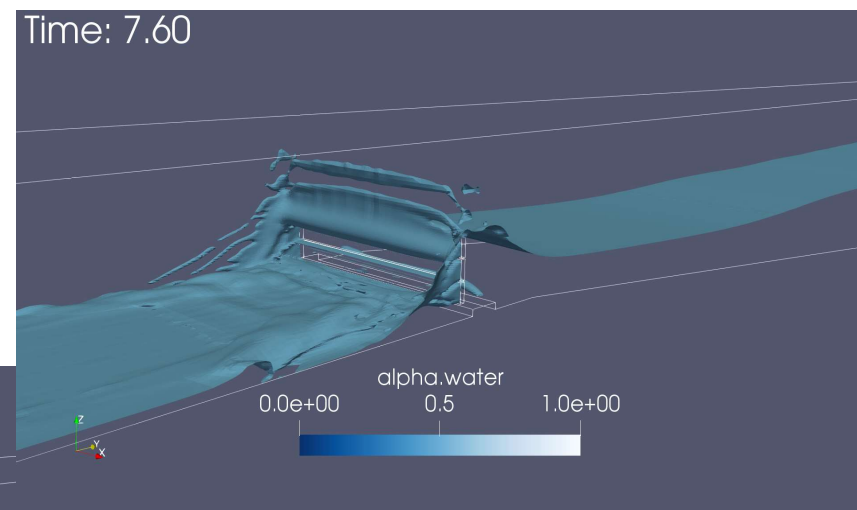
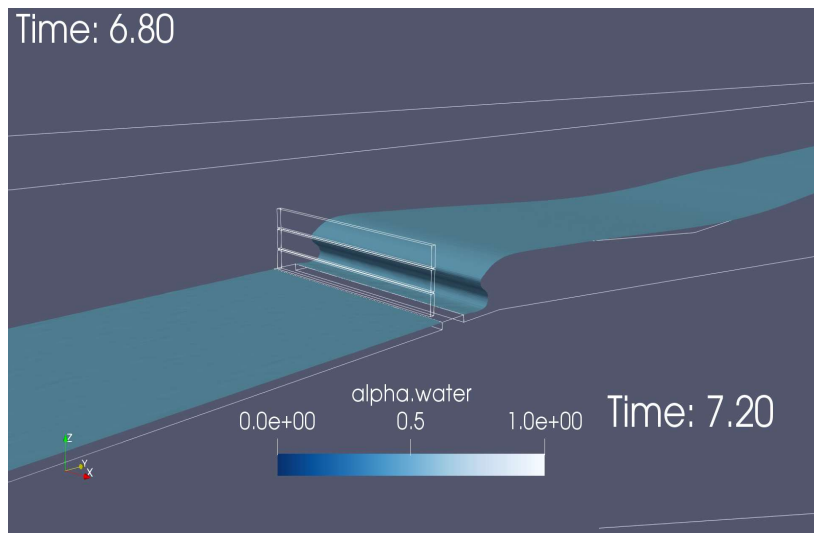
津波低減効果の評価方法（数値解析による）

= 防波堤前面に設置した仮想断面を通過する水量による評価

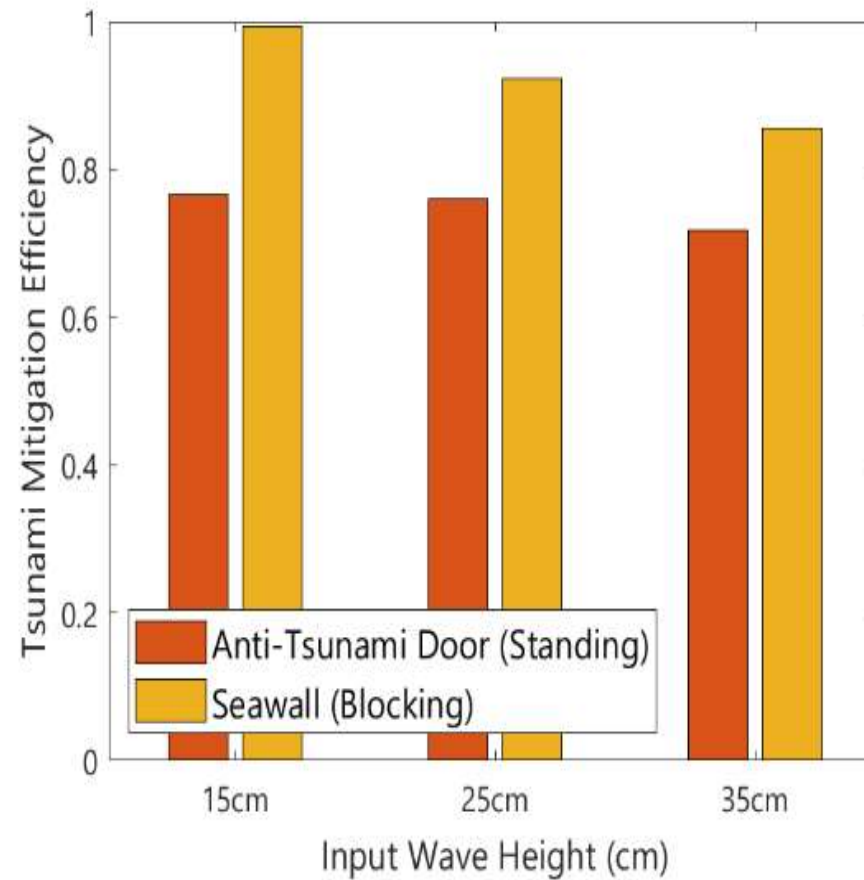


$$\text{TME}_V = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} (2)$$

防波扉の津波低減効果のイメージ

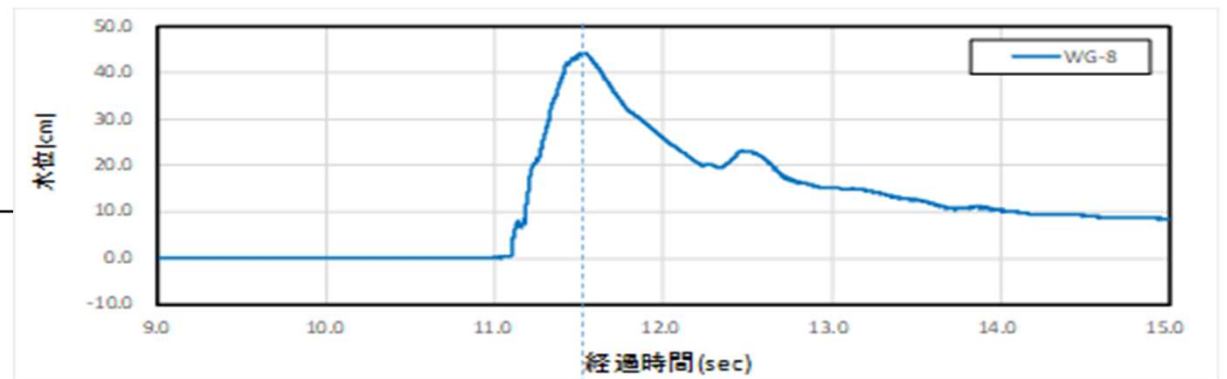
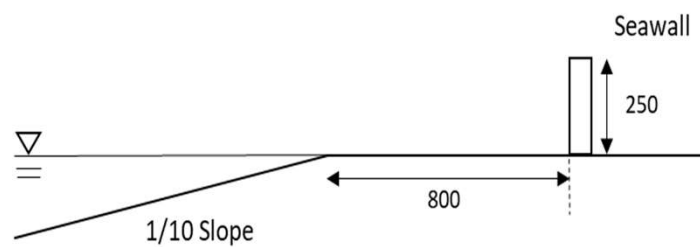


通過水量による津波低減効率



隙間のない固定式防潮堤の
約70～80%の低減効率
を有する。

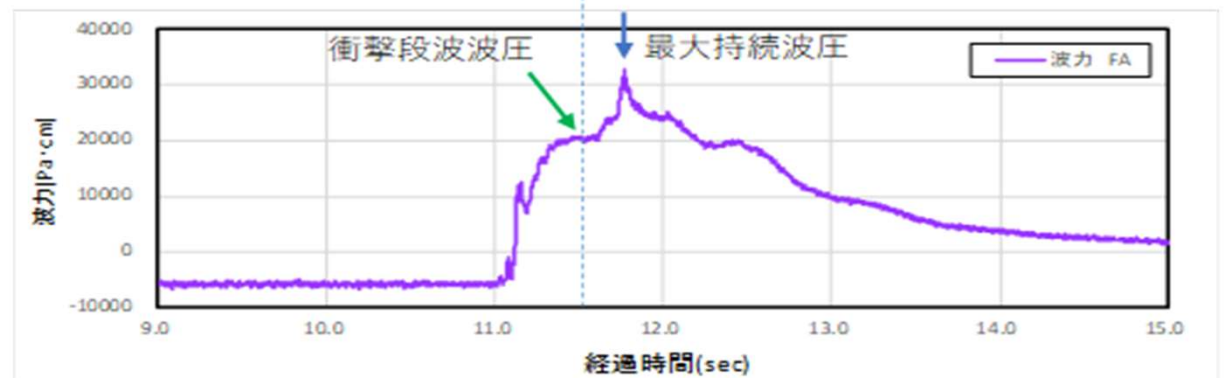
(4) 計算モデルの精度



防潮堤前面の水位計の時系列波形図

固定式防潮堤（高さ25cm）を用いた数値モデルの検証実験を実施した。

計算波圧分布と実験波圧分布の比較



防潮堤作用波力の時系列波形図

精度に関する計算条件

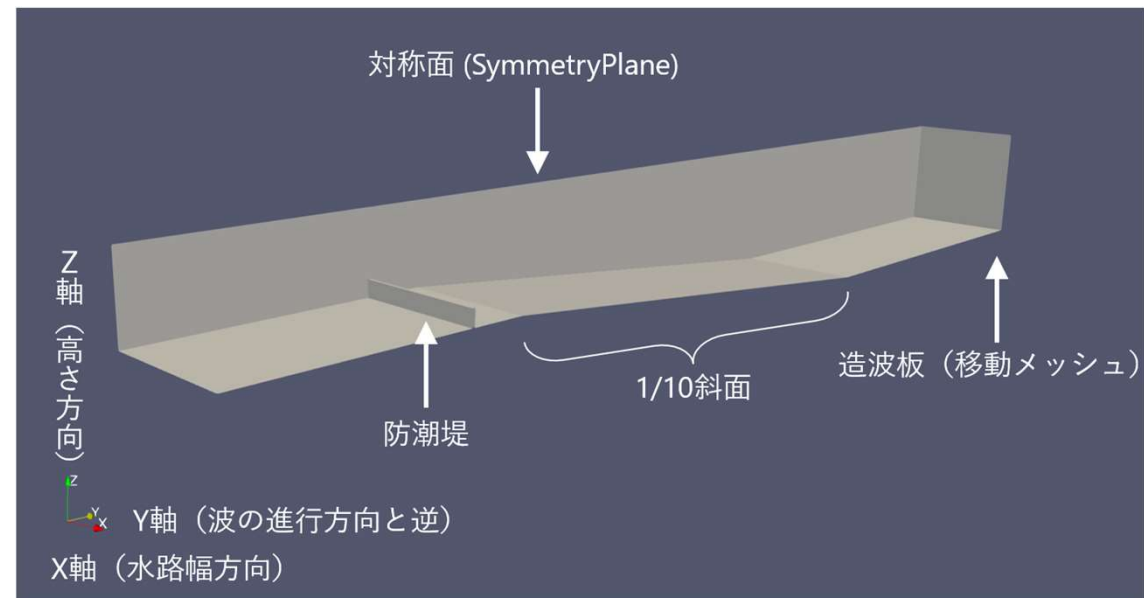
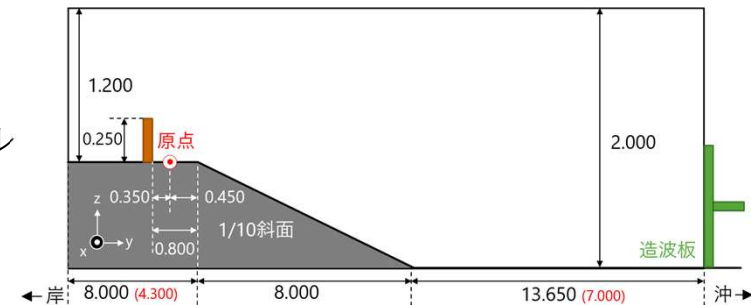
- 計算領域は津波再現水槽に基づいて設定。図の通り防潮堤を設置。
- ピストン式造波装置の運動を再現するため、移動メッシュを設定。
メッシュが縮むように変形して造波する。
- 津波再現水槽の造波板位置指令の時系列ファイルより対応する時刻と変位データを取得。

◆ 計算制御設定

計算刻み幅 Δt は
クーラン条件に従う

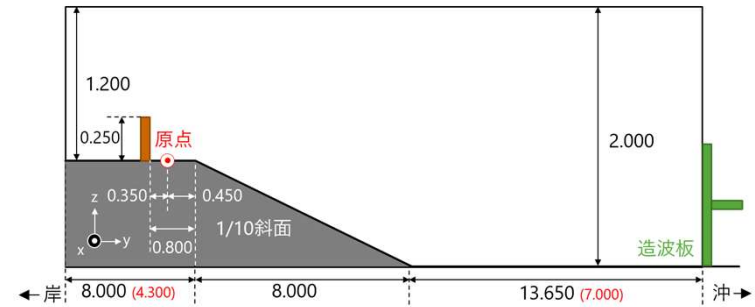
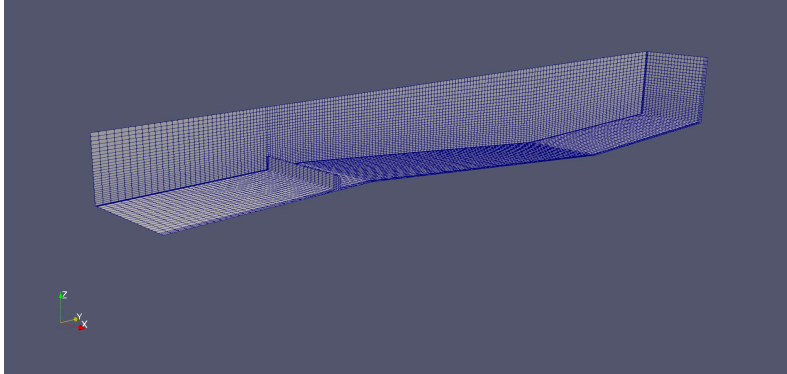
計算終了時刻 (s)	15
結果出力の時間間隔 (s)	0.1
クーラン数 c	0.5

$$c = \frac{U\Delta t}{\Delta x}$$



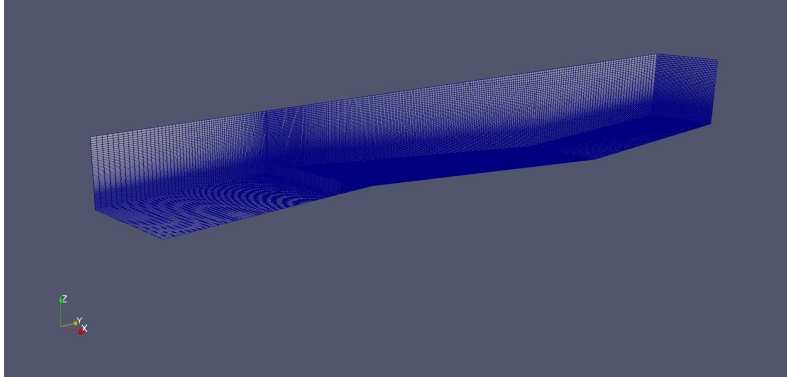
- 3種類の計算メッシュを設定し、結果を比較

水路長さ短縮・低解像度メッシュ（ケース1）

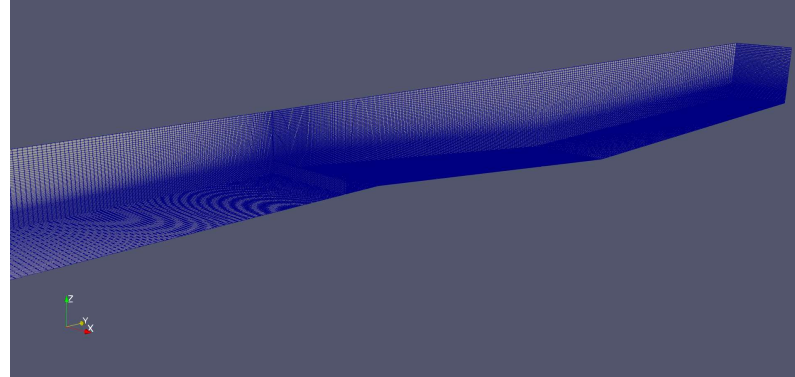


※初期水位0.8m, 入力波高0.125m

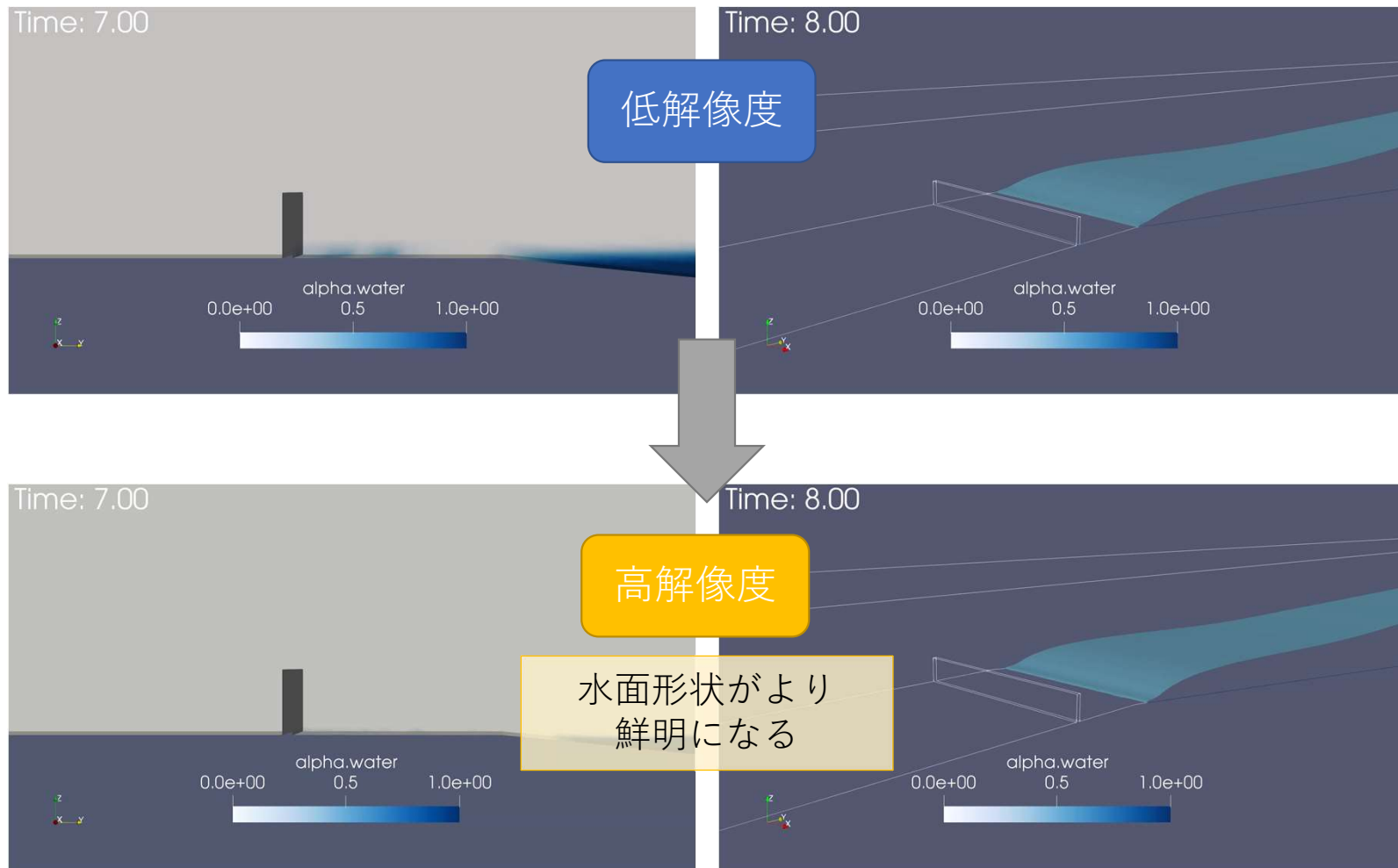
水路長さ短縮・高解像度メッシュ（ケース2）



水路長さ正規・高解像度メッシュ（ケース3）



計算結果の可視化



防潮堤に作用する波圧分布による検証

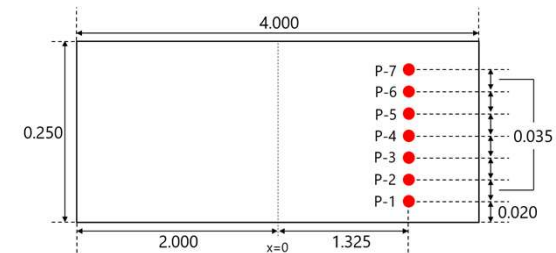
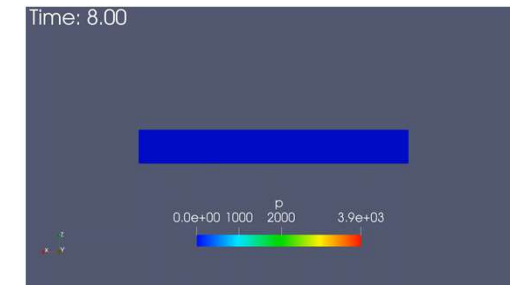
数値解析

比較

- 3種類の計算ケースで防潮堤前面に作用する鉛直波圧分布を取得
- データ取得格子間隔：0.01m

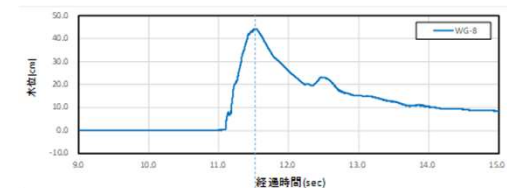
水理実験

- 津波再現水槽で同一条件の実験を実施。
- 水位0.80m, 波高0.125mで3ケース実施。
- サンプリング時間間隔：0.001s

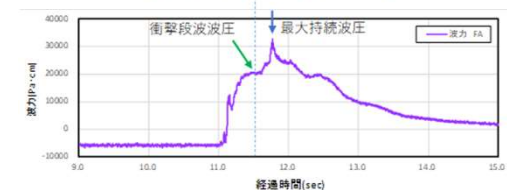


◆波圧の定義：木原ら(2016)

- 衝撃段波波圧**：堤体前面最大浸水深**以前**に波力が最大となる時刻
- 最大持続波圧**：堤体前面最大浸水深**以後**に波力が最大となる時刻
- 波力： $F = P_1 \times \Delta h_1 + \sum \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \times \Delta h_2 \right)$
 Δh_1 ：底面から一番近い波圧計までの距離
 Δh_2 ：波圧計間の距離
- 数値計算について、以上の定義に当てはまる時刻を確認し、波圧を比較した。



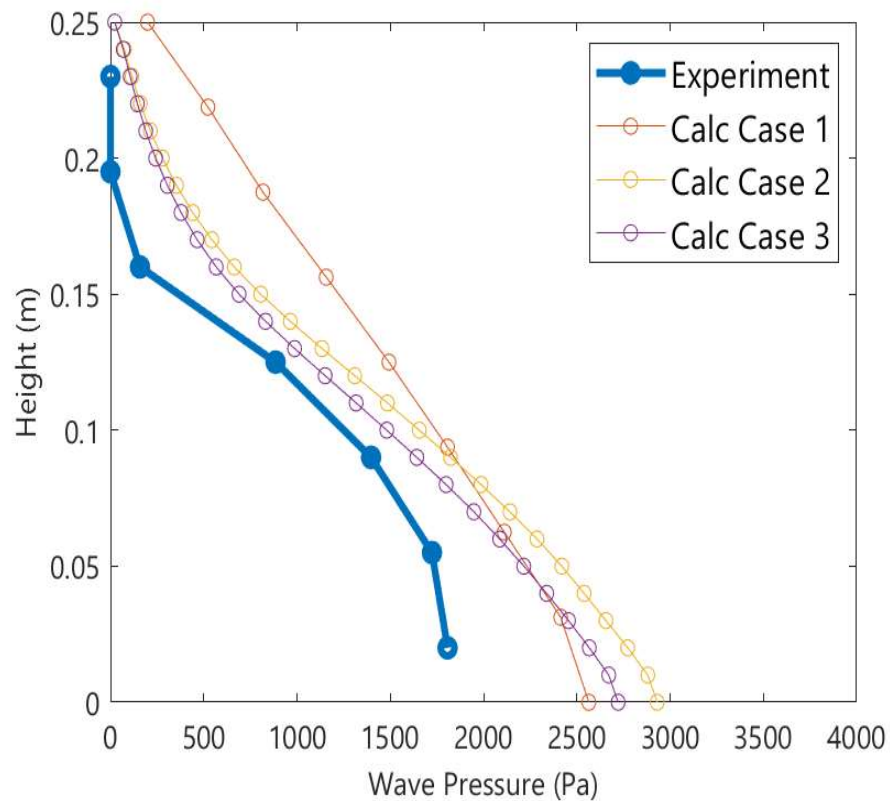
防潮堤前面の水位計の時系列波形図



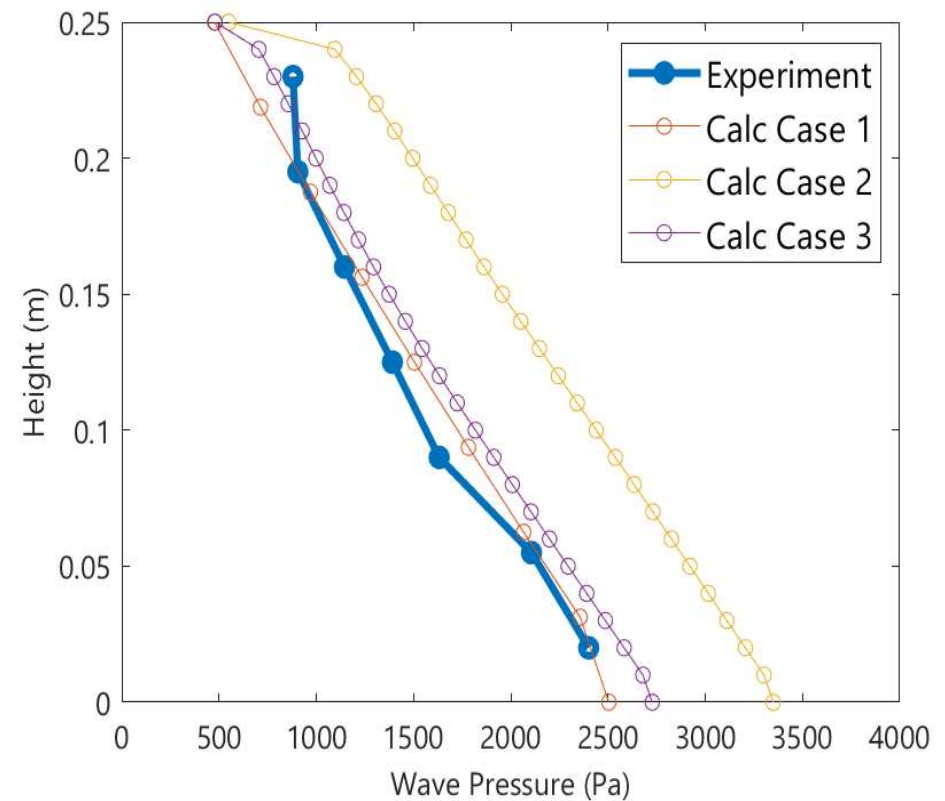
防潮堤作用波力の時系列波形図

実験波圧（青）と計算波圧の比較

（１）衝撃段波波圧

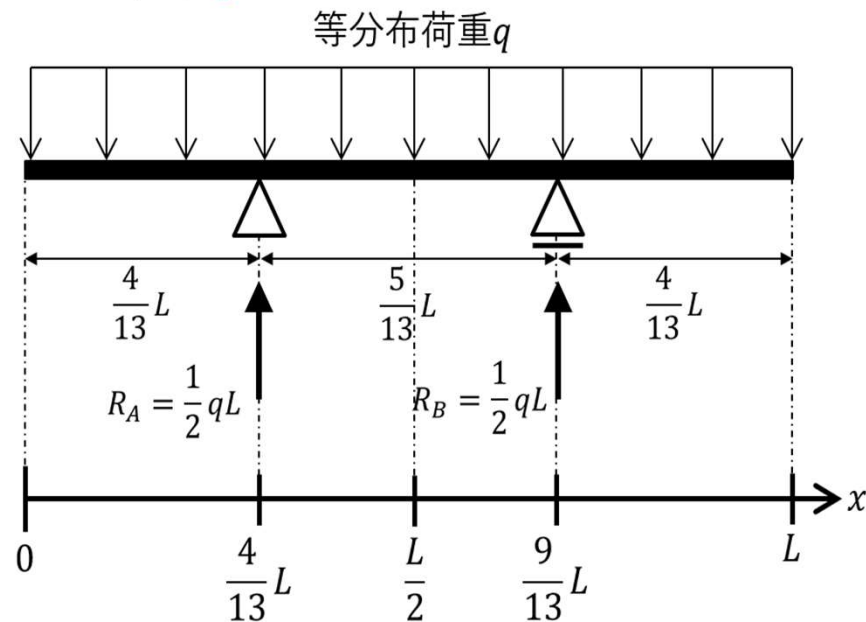


（２）持続波圧

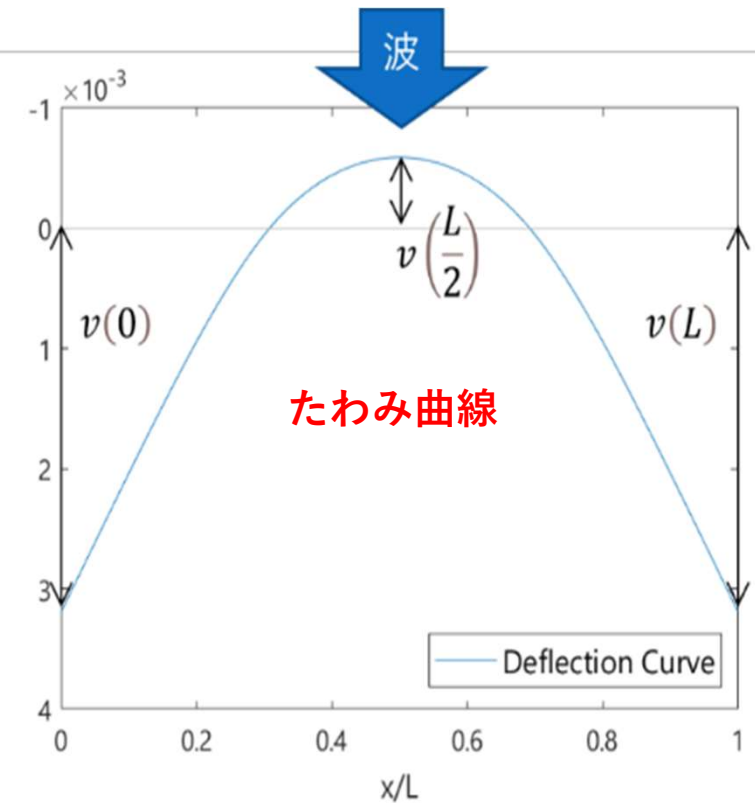


4. 静的モデルによる防波扉の強度分析

計算波圧を等分布荷重として、防波扉の各段板に作用させる。
各段板はサポーターを支柱とする単純梁である。

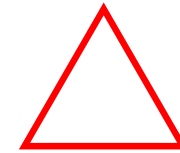


解析



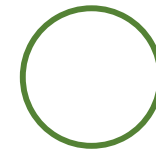
最大たわみ < 許容値？

ヤング率 $E=7000$ (N/mm²) の場合
許容値を超える場合がある。



Cf. すぎ材

ヤング率 $E=9000$ (N/mm²) の場合
許容値を超えない。



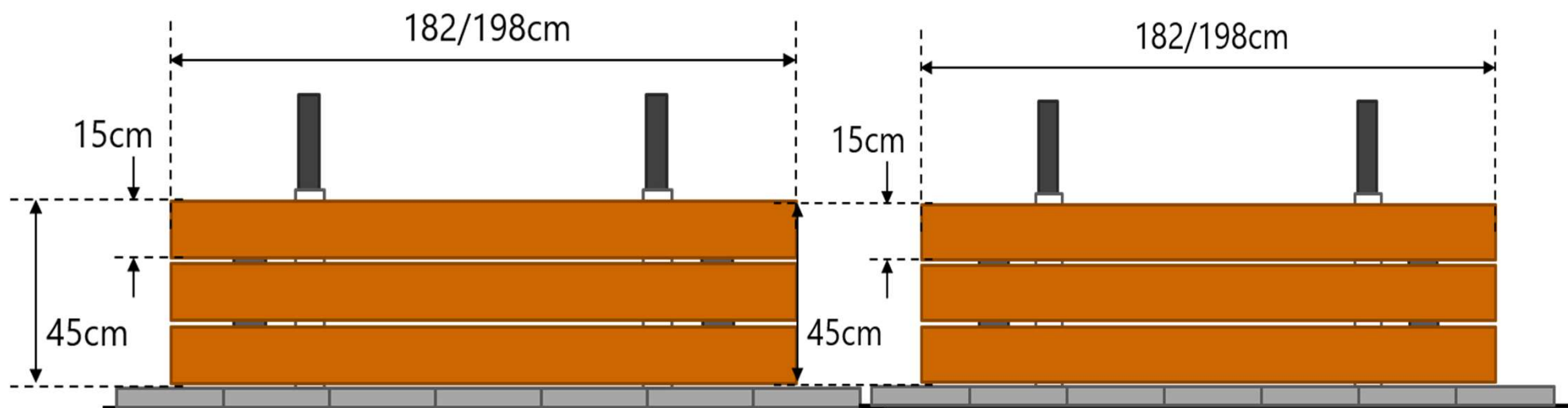
ひのき

5. 防波扉の現場設置モデルの提案

縮尺1/10と仮定：第二線堤として陸上部・汀線部に複数基並べて設置する。

防御対象とする津波高：3.5m以下。

防波扉は、全体高4.5m以下、3段組。本体を構成する木材は十分な強度を有する。



* 模型値の10倍程度を実機寸法とする。

6. 結論

- 防波扉模型を用いて、孤立波を作用させた模型実験を実施した。
- → 津波衝突時に起立して津波低減効果を発揮することを確認した。
- 防波扉より岸側の波高観測値を用いて、津波低減効果を検討した。
- OpenFOAMを用いて数値解析により、堤体背後への通過水量、作用波圧を求めた。
- → 防波扉の津波低減効率固定式防潮堤の7～8割であった。
- 防波扉を単純梁として仮定し、強度分析を行った。その結果ヤング率 $E = 9000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ の木材で安全に運用できる。