

南海トラフ巨大地震に伴う 津波複合災害の 数値シミュレーション

京都大学防災研究所

米山望

本日の内容

- 本発表の目的
- 南海トラフ巨大地震発生時の津波シミュレーション
 - 解析に用いる計算コード (H-FRESH)
 - 広域の津波挙動
 - 紀の川河口周辺での津波挙動
 - 田辺湾周辺での津波挙動
 - 熊野川河口周辺での津波挙動
- 津波複合災害に関する研究
 - 東日本大震災発生時の釜石における津波挙動
 - 東日本大震災発生時の女川における津波挙動
 - 南海トラフ巨大地震発生時における淀川大堰周辺の塩分挙動

本発表の目的

- 津波シミュレーション解析コード**H-FRESH**を用いた和歌山県の三地点における津波挙動（平面二次元）解析結果を可視化動画等を用いて詳細に分析する.
- さらに詳細に検討するためにこれまでに行った、平面二次元＋三次元の解析例を紹介する.

解析に用いる計算コードH-FRESH

• 特徴

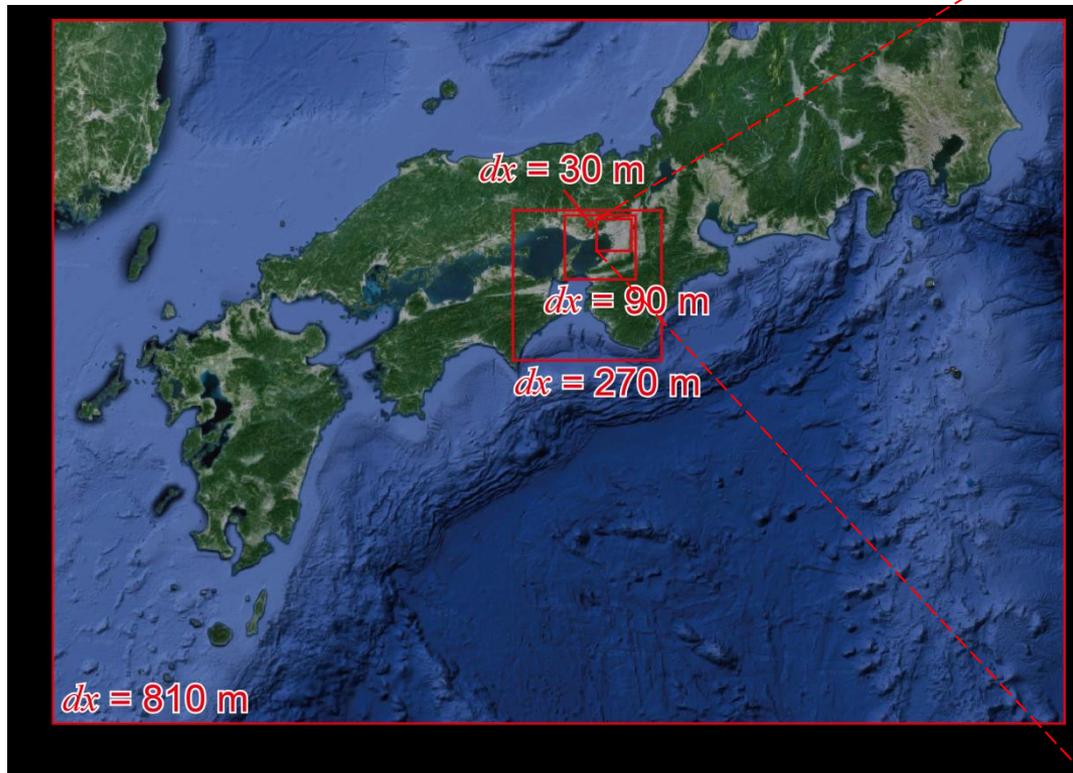
- 防災研都市耐水研究領域において**10年以上**にわたり開発してきたオリジナルコード
- 平面二次元解析により，津波波源を含む大領域から注目エリアまでメッシュ間隔を次第に細かくして解析.
- 必要に応じて三次元解析を同時並行的に行う. .
- 三次元解析領域において，
 - 水温・濁質・塩分などによる密度変化を伴う流れの解析が可能.
 - 津波漂流物などの三次元挙動解析が可能.

平面二次元解析と三次元解析の違い

- 平面二次元解析
 - 水平方向の運動のみ計算するため、広範囲の解析に適する。
 - 三次元解析
 - 水平方向に加え上下方向の運動も計算するため、地形の影響を受けた複雑な流れを精度良く再現
 - 広範囲の解析に不向き
- よって、**H-FRESH**では、平面二次元解析領域に必要なに応じて三次元解析領域を組み込んで津波挙動を予測する。

解析に係る各種設定

- 解析データおよび入力津波は、内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」において検討されたモデルに基づく。
- 初期潮位：T.P.+0.9 m



平面二次元解析領域
(計算格子サイズ ; 810m, 270m, 90m & 30m)



平面二次元解析領域 (計算格子サイズ 30m & 10m) ・ 三次元解析領域

H-FRESHの検証

概要

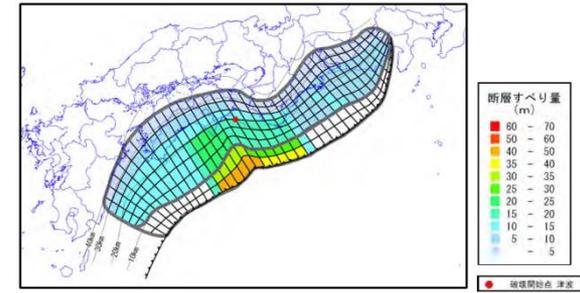
- H-FRESHの南海トラフ巨大地震津波への適用性を検証する。

検証の方法

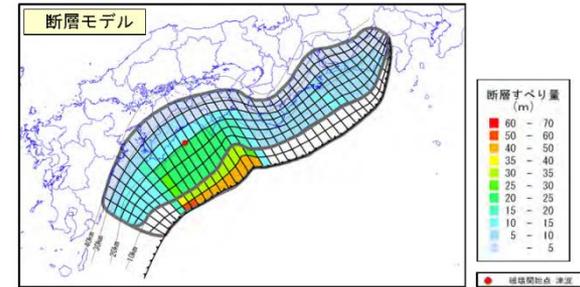
- 内閣府検討会にて想定された南海トラフ巨大地震の津波断層モデルを用いて津波伝播解析を実施し、沿岸における水位を検討会の結果と比較する。

解析ケース

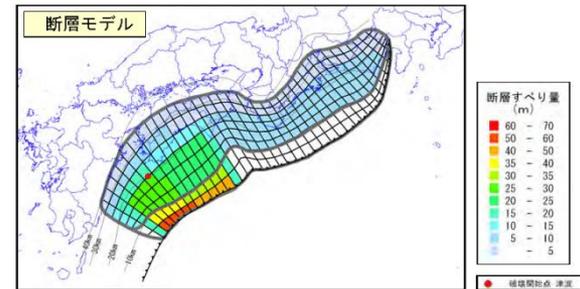
- 津波断層モデル：ケース3, 4, 5, 10
- 津波発生時の潮位：T.P.+0.9m（大阪湾の朔望平均満潮位・検討会に同じ）
- 断層破壊
 - 検討会：断層破壊の伝播を考慮
 - 本研究：全ての断層が同時に破壊



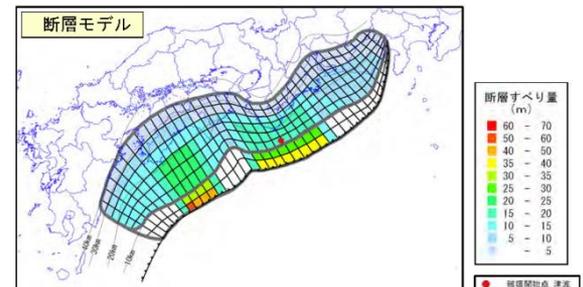
ケース④「四国沖」に「大すべり域＋超大すべり域」を設定



ケース⑤「四国沖～九州沖」に「大すべり域＋超大すべり域」を設定

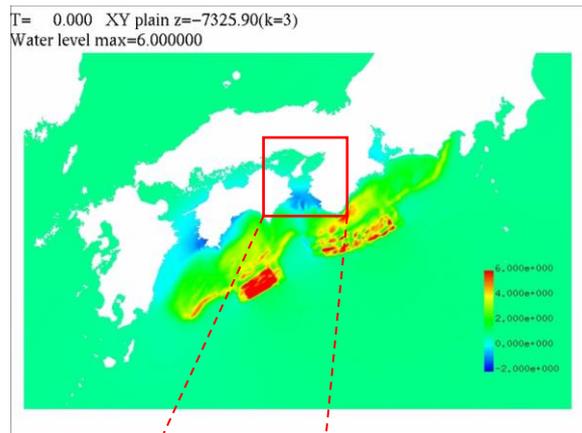


ケース⑩「三重県南部沖～徳島県沖」と「足摺岬沖」に「大すべり域＋超大すべり域」を2箇所設定

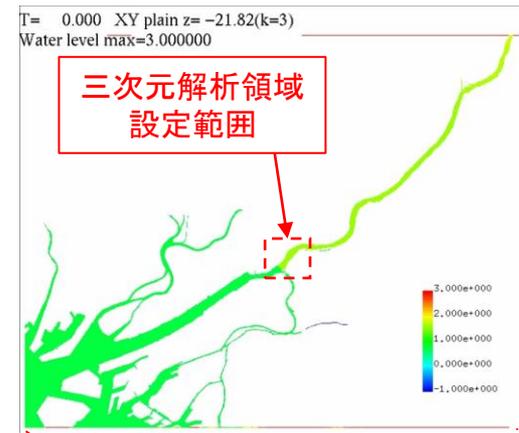


H-FRESHの検証

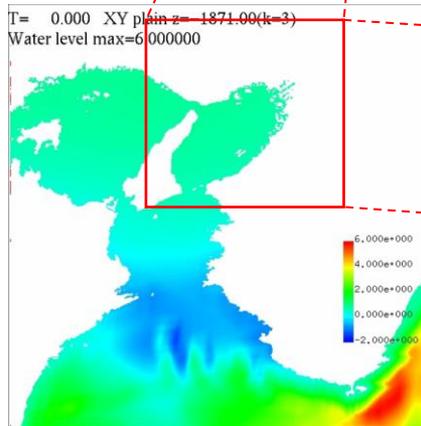
- 解析結果の例（津波断層モデル：ケース10）
 - 地震発生後約2時間15分で津波が淀川河口付近に到達する。



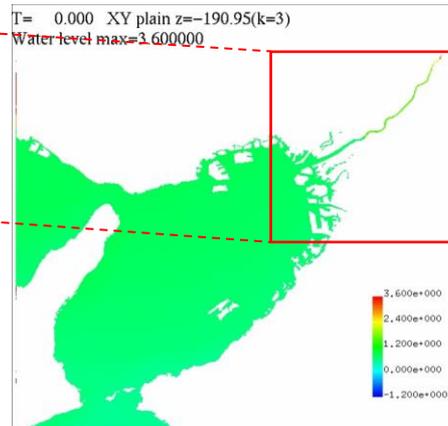
計算格子サイズ 810m



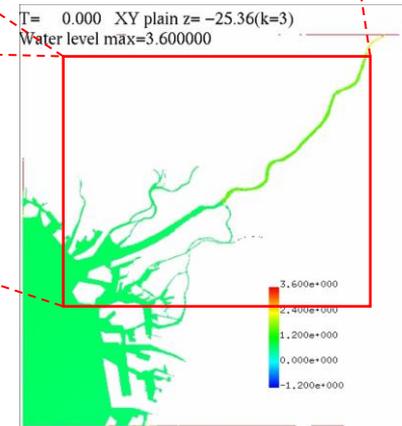
計算格子サイズ 10m



計算格子サイズ 270m



計算格子サイズ 90m

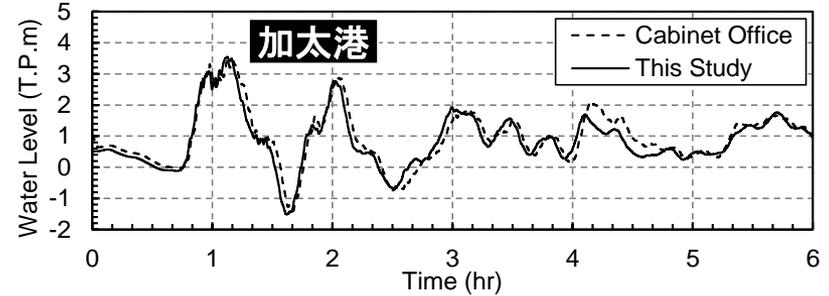
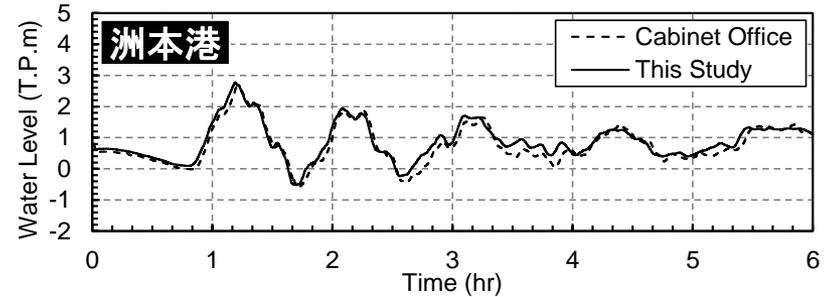
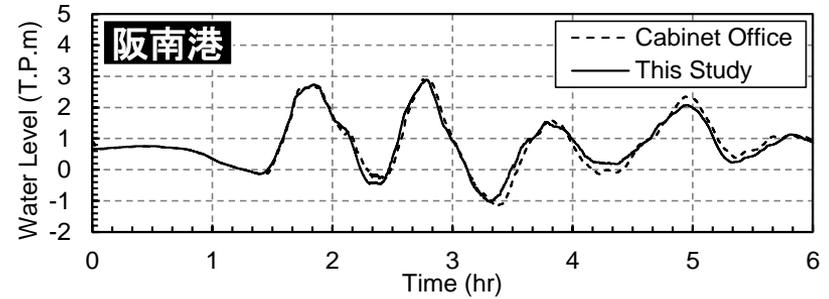
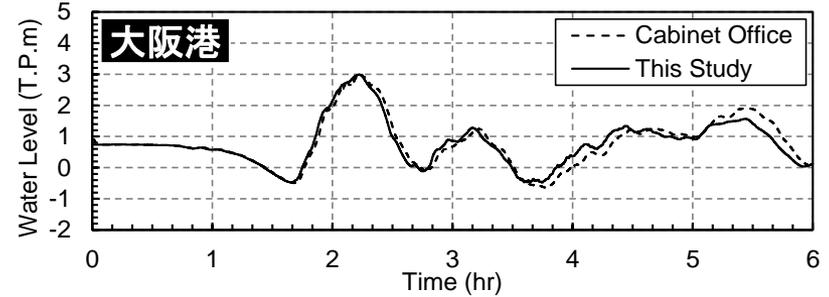
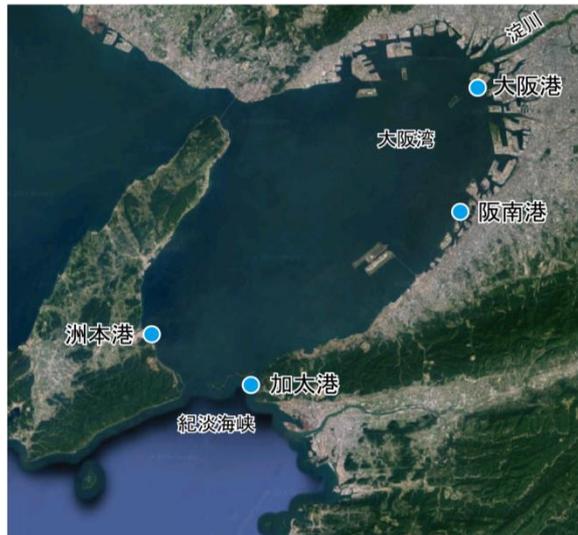
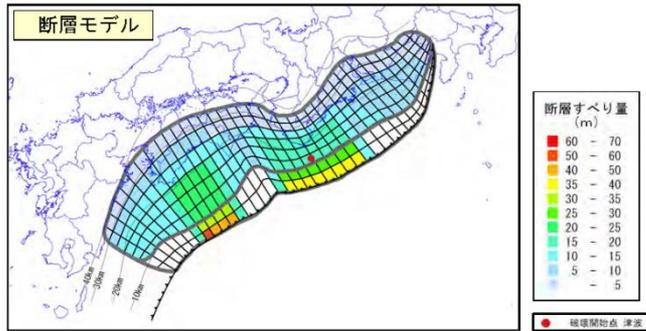


計算格子サイズ 30m

H-FRESHの検証

- 解析結果（ケース10）
 - 広域津波伝播解析の結果は検討会の解析結果と概ね一致

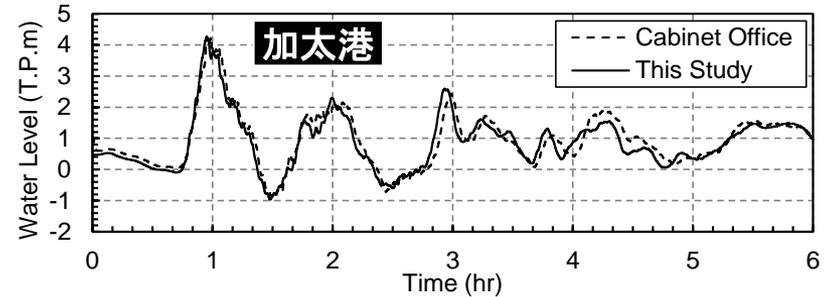
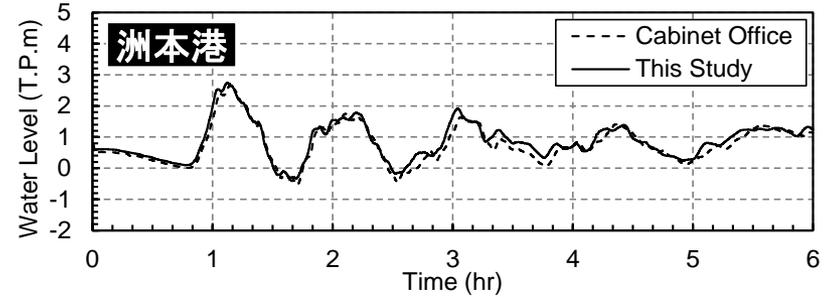
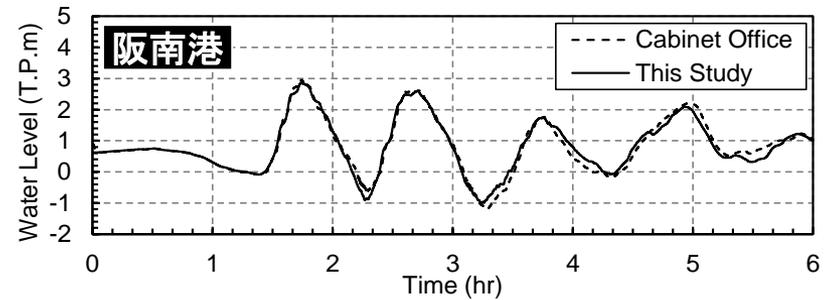
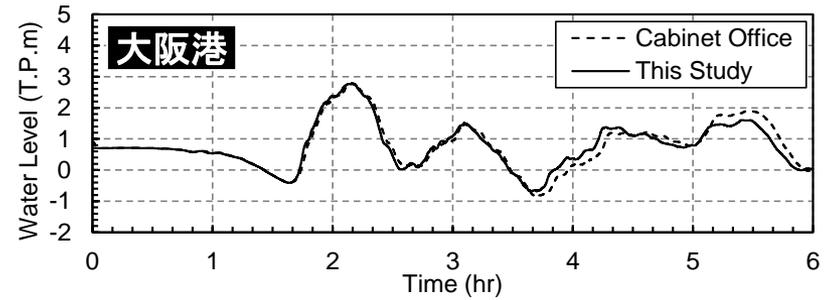
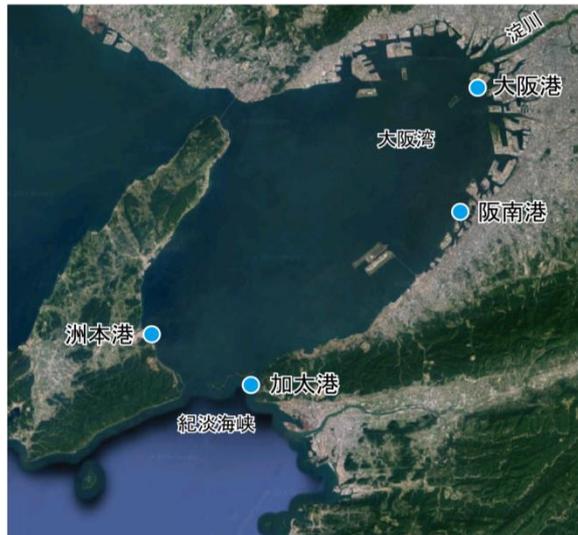
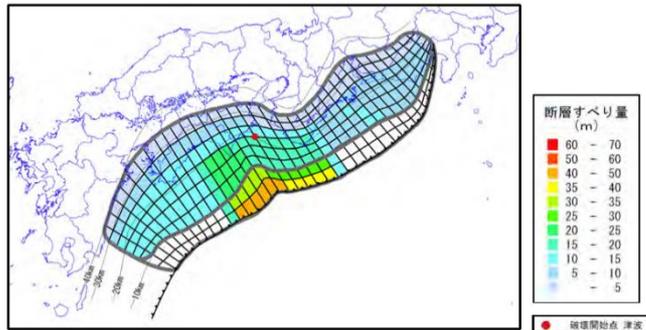
ケース10「三重県南部沖～徳島県沖」と「足摺岬沖」に「大すべり域+超大すべり域」を2箇所設定



H-FRESHの検証

- 解析結果（ケース3）
 - 広域津波伝播解析の結果は検討会の解析結果と概ね一致

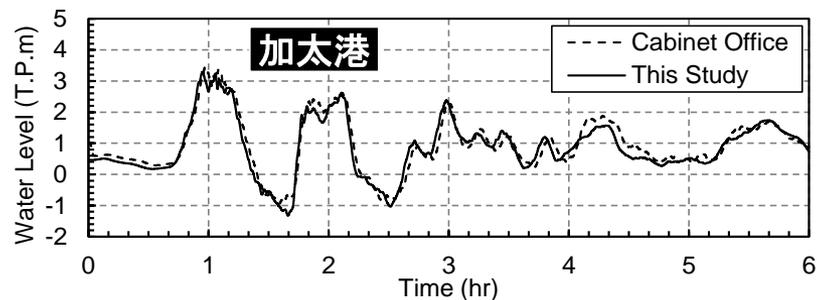
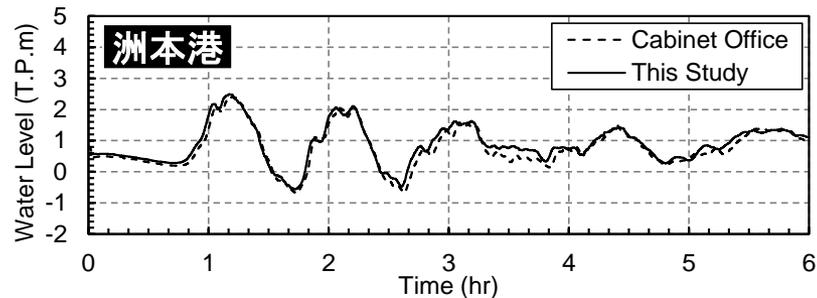
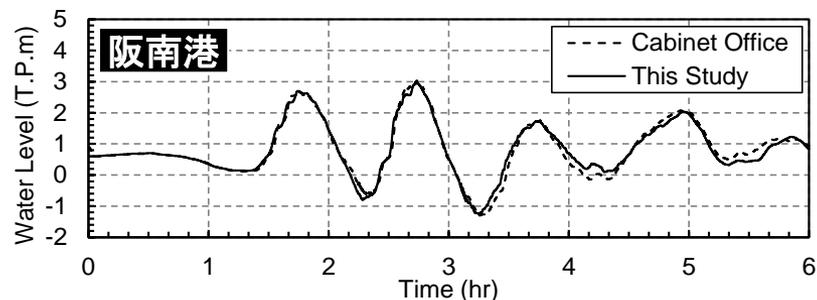
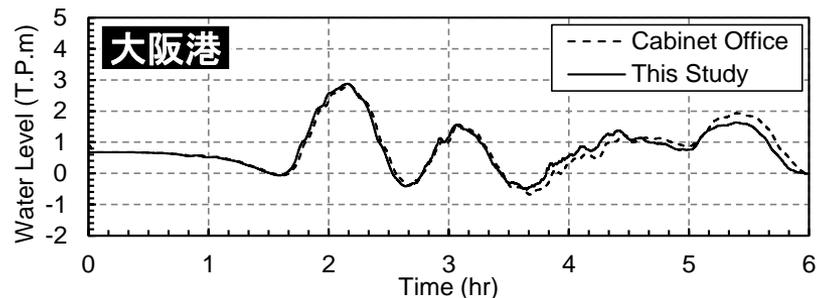
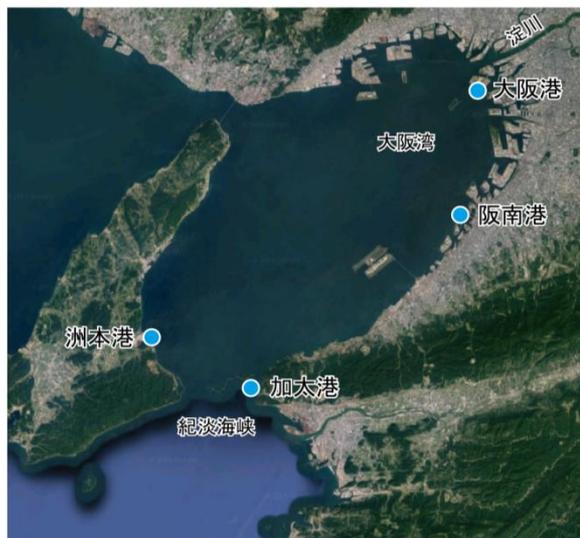
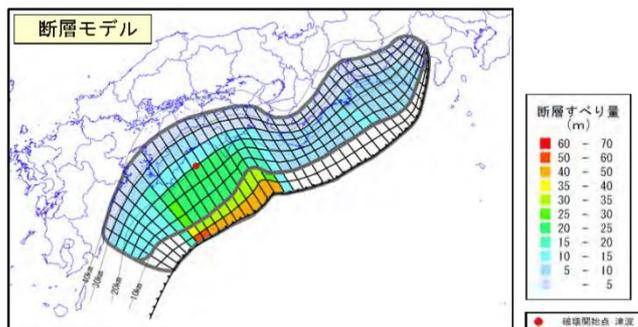
ケース③「紀伊半島沖～四国沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定



H-FRESHの検証

- 解析結果（ケース4）
 - 広域津波伝播解析の結果は検討会の解析結果と概ね一致

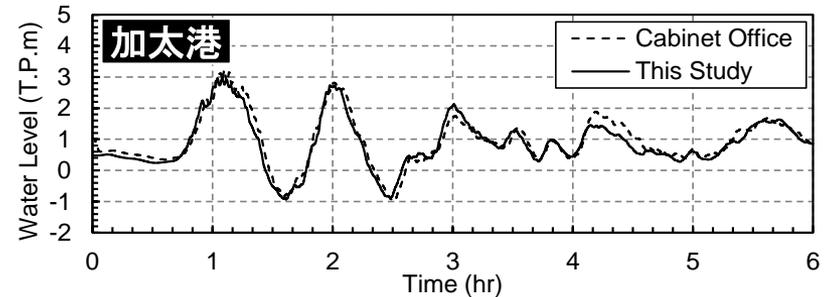
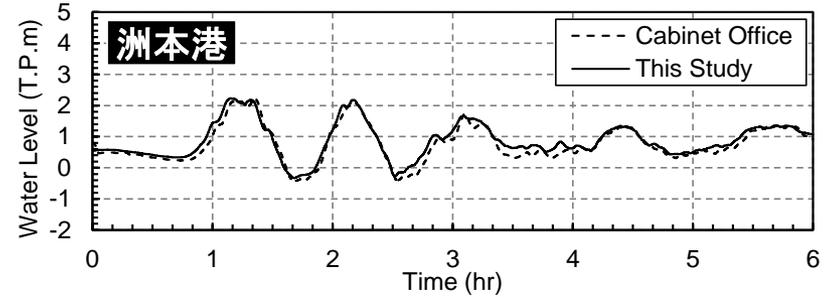
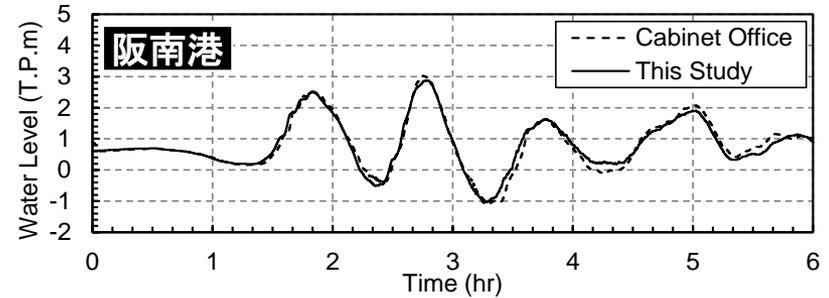
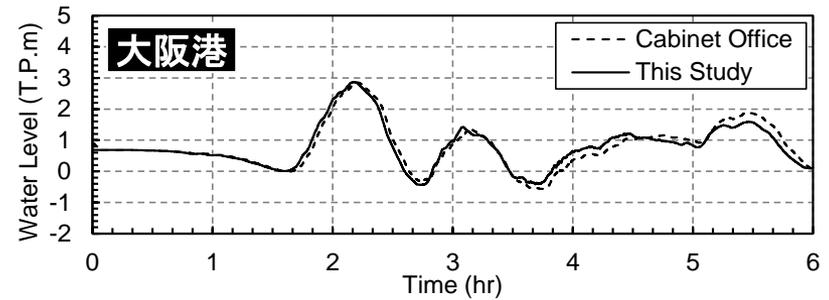
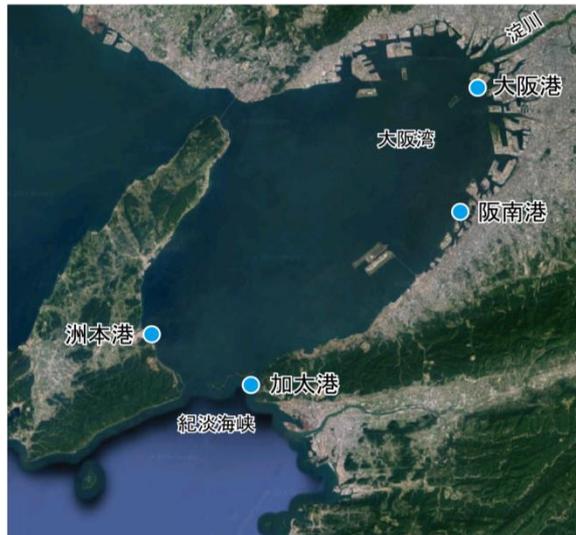
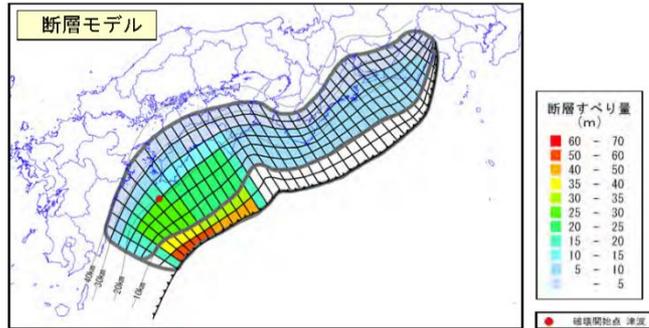
ケース④「四国沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定



H-FRESHの検証

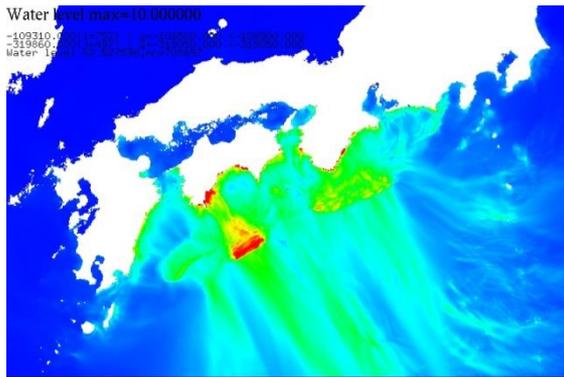
- 解析結果（ケース5）
 - 広域津波伝播解析の結果は検討会の解析結果と概ね一致

ケース⑤「四国沖～九州沖」に「大すべり域+超大すべり域」を設定

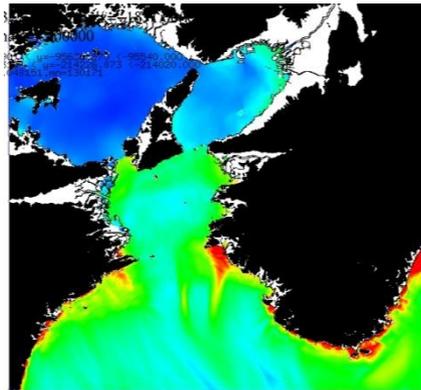


南海トラフ巨大地震発生時の和歌山県における津波シミュレーション

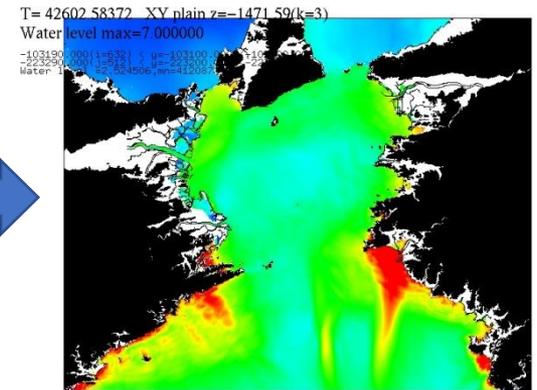
- 大阪湾に最も大きな水位を与える地盤変動（CASE10）を用いて津波挙動を予測。
- 5領域のネスティングを用いた平面二次元計算



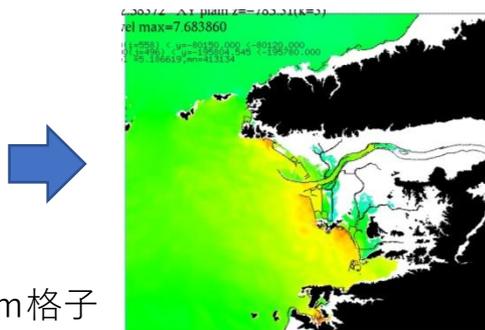
810 m 格子



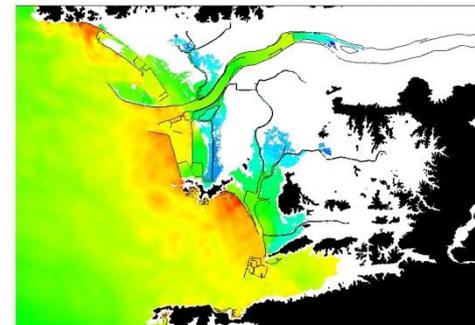
270 m 格子



90 m 格子



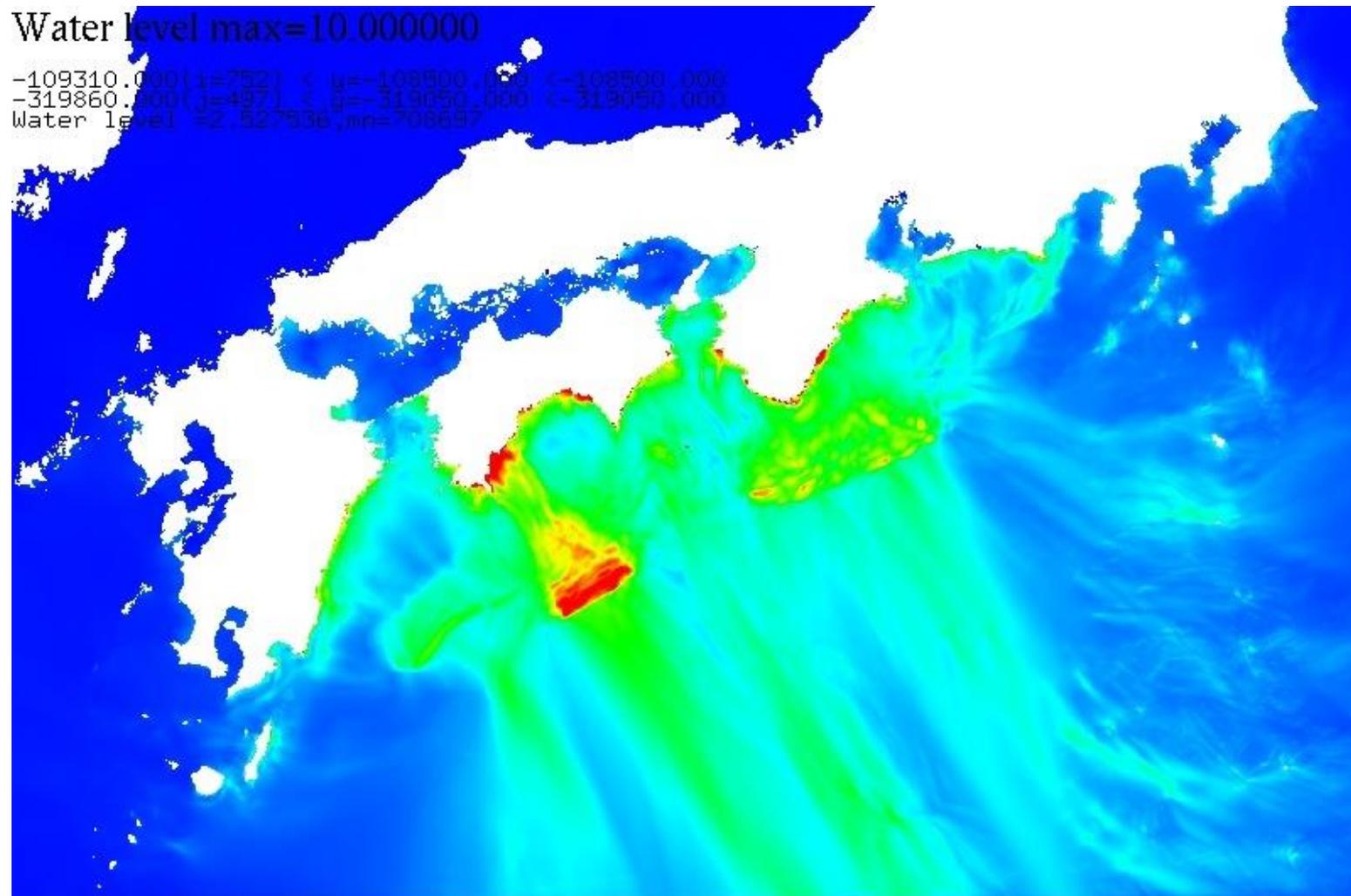
30 m 格子



10 m 格子

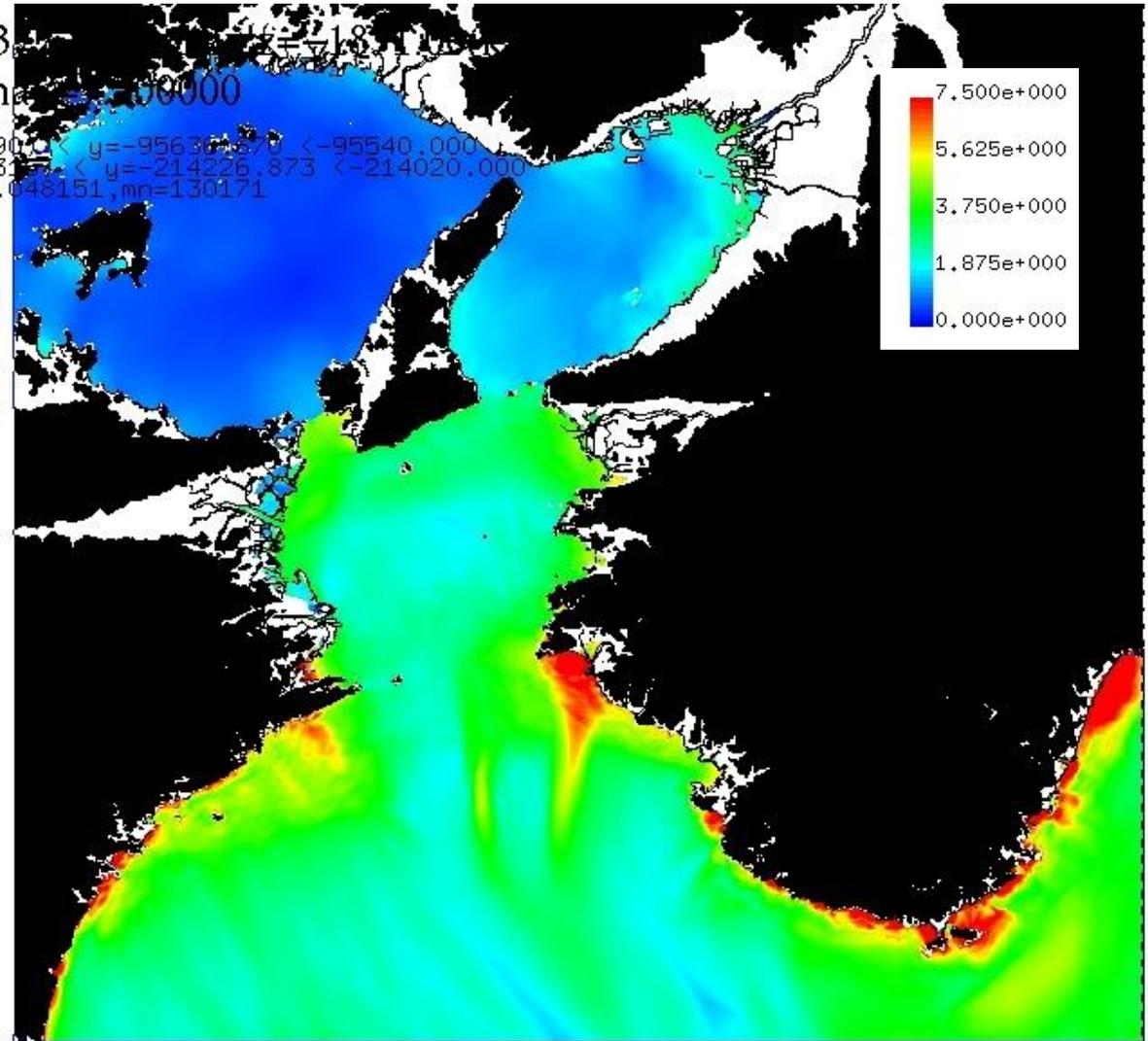
広域挙動：

波源を含む領域(810m格子)



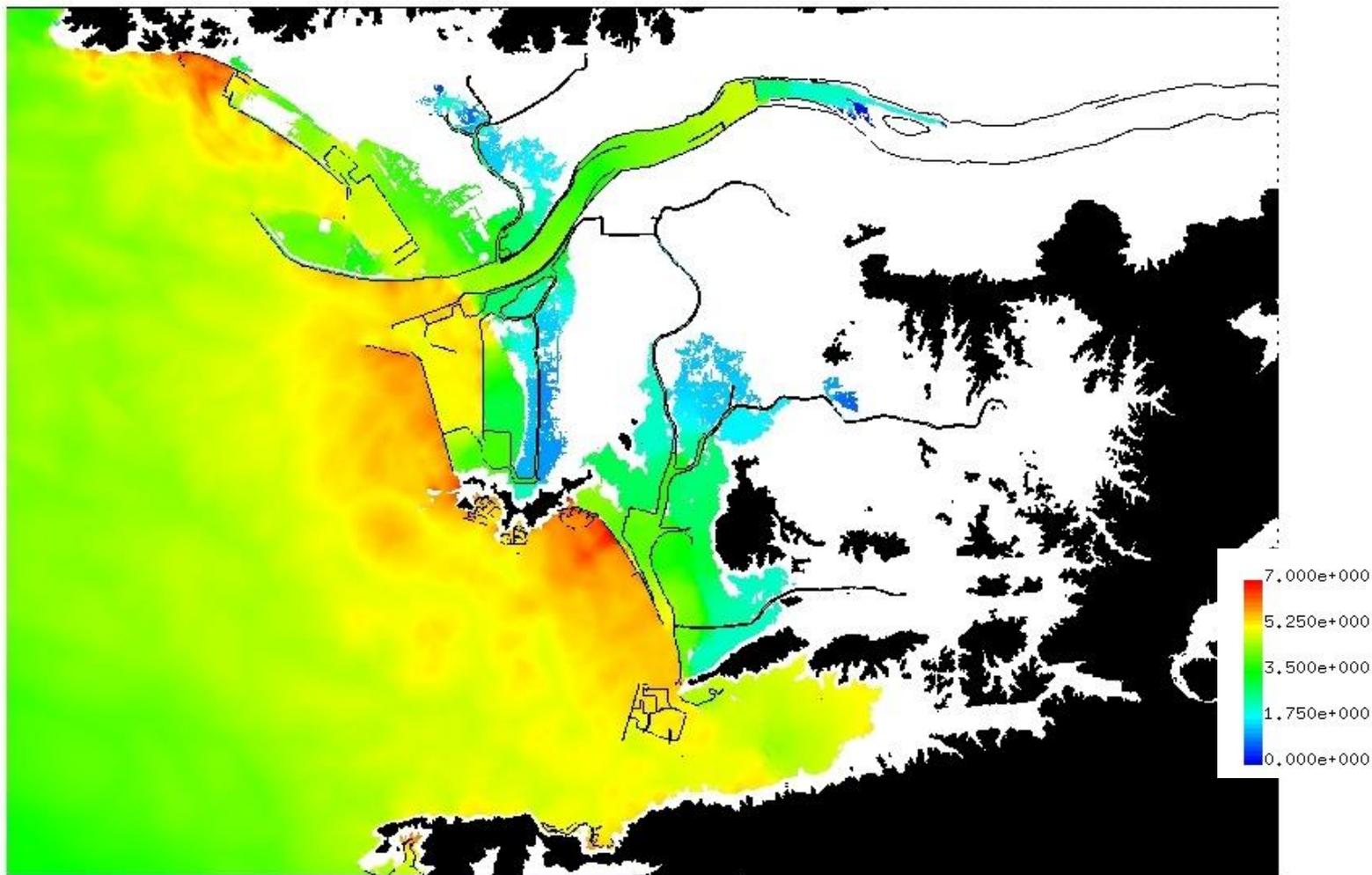
広域挙動：和歌山， 四国（270m格子）

- 津波挙動動画



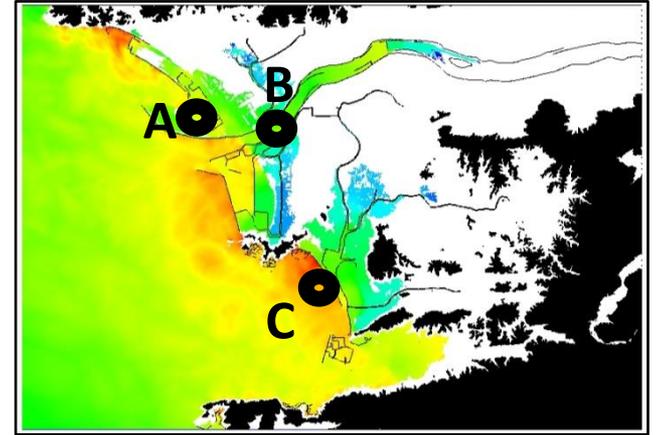
紀ノ川，河口周辺(10m格子)

- 津波挙動動画

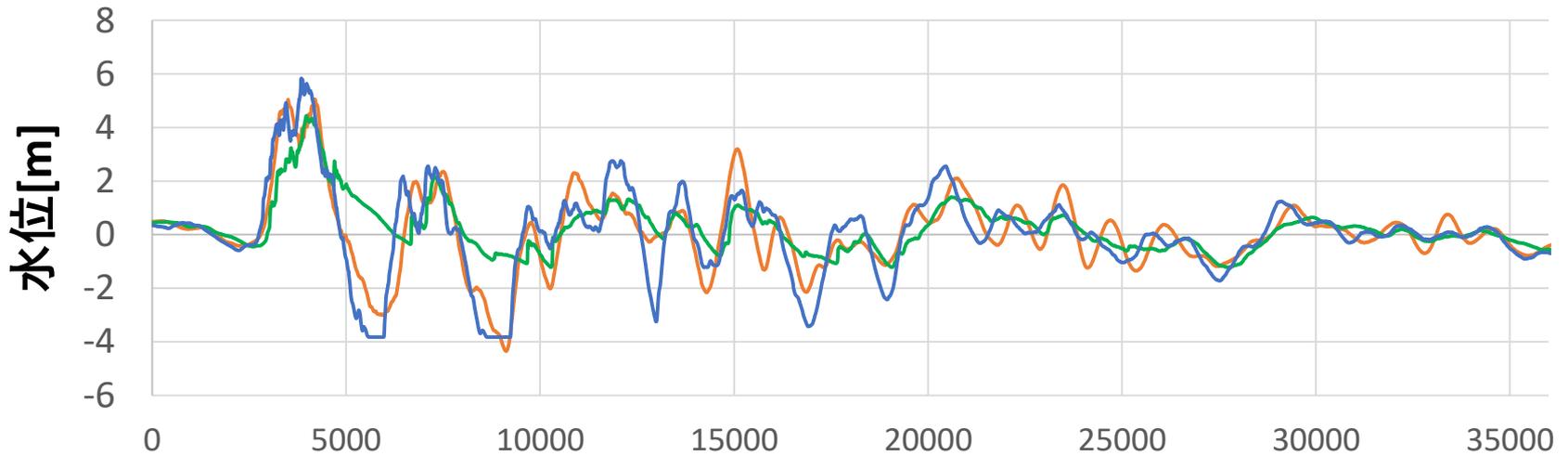


紀ノ川，河口周辺

- 特定地点の水位変動



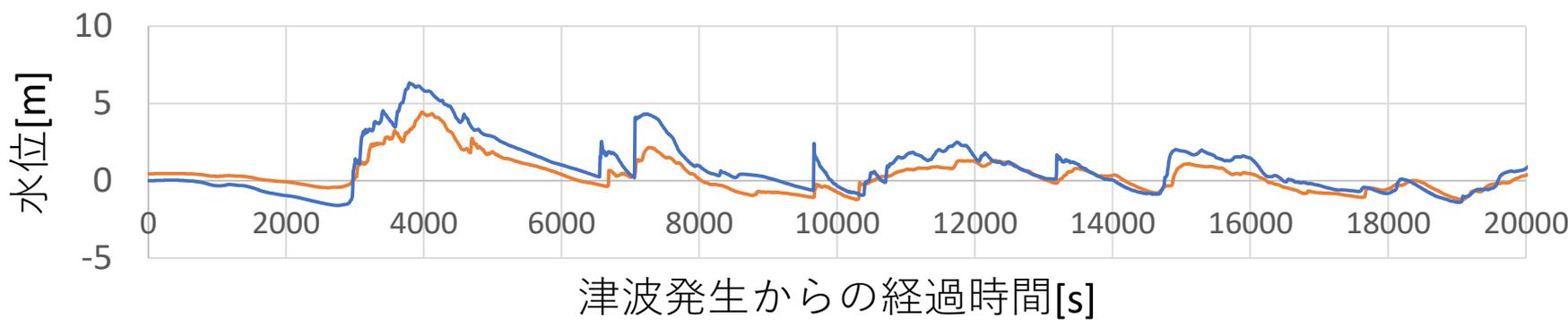
— A地点 — B地点 — C地点



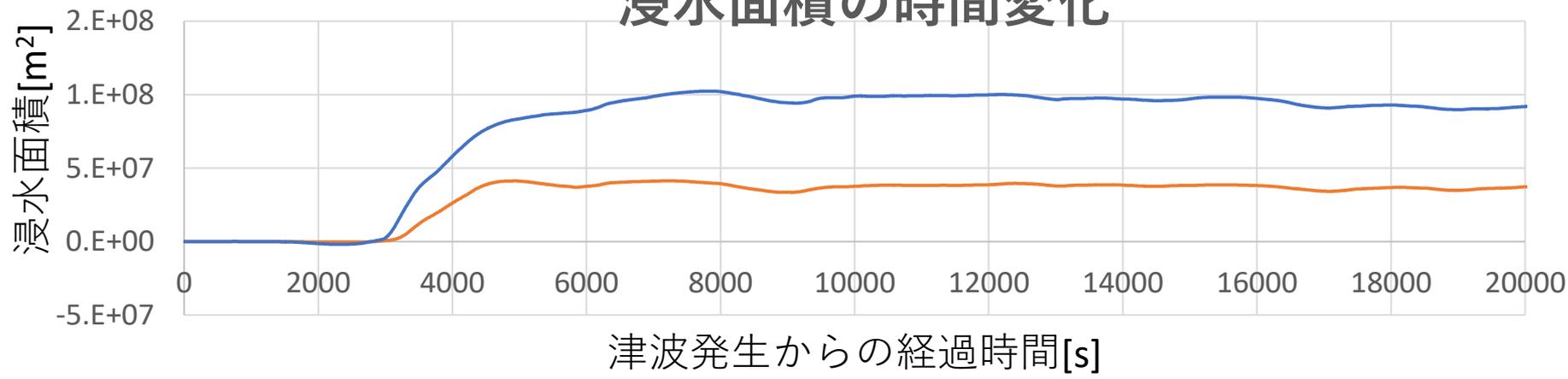
津波発生からの経過時間[s]

紀ノ川，河口周辺 (津波規模が二倍の場合)

B地点 (紀ノ川内) の水位変動



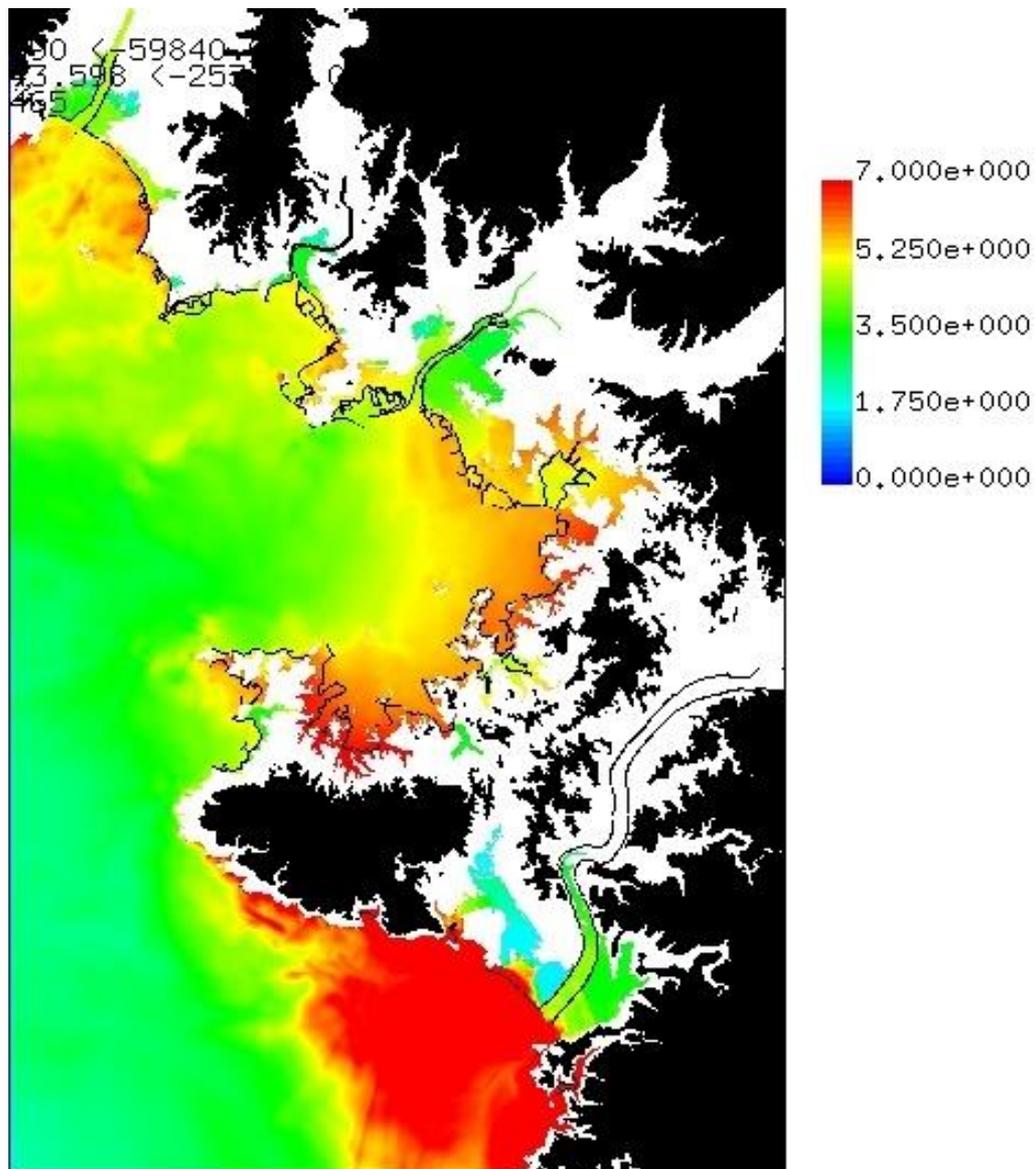
浸水面積の時間変化



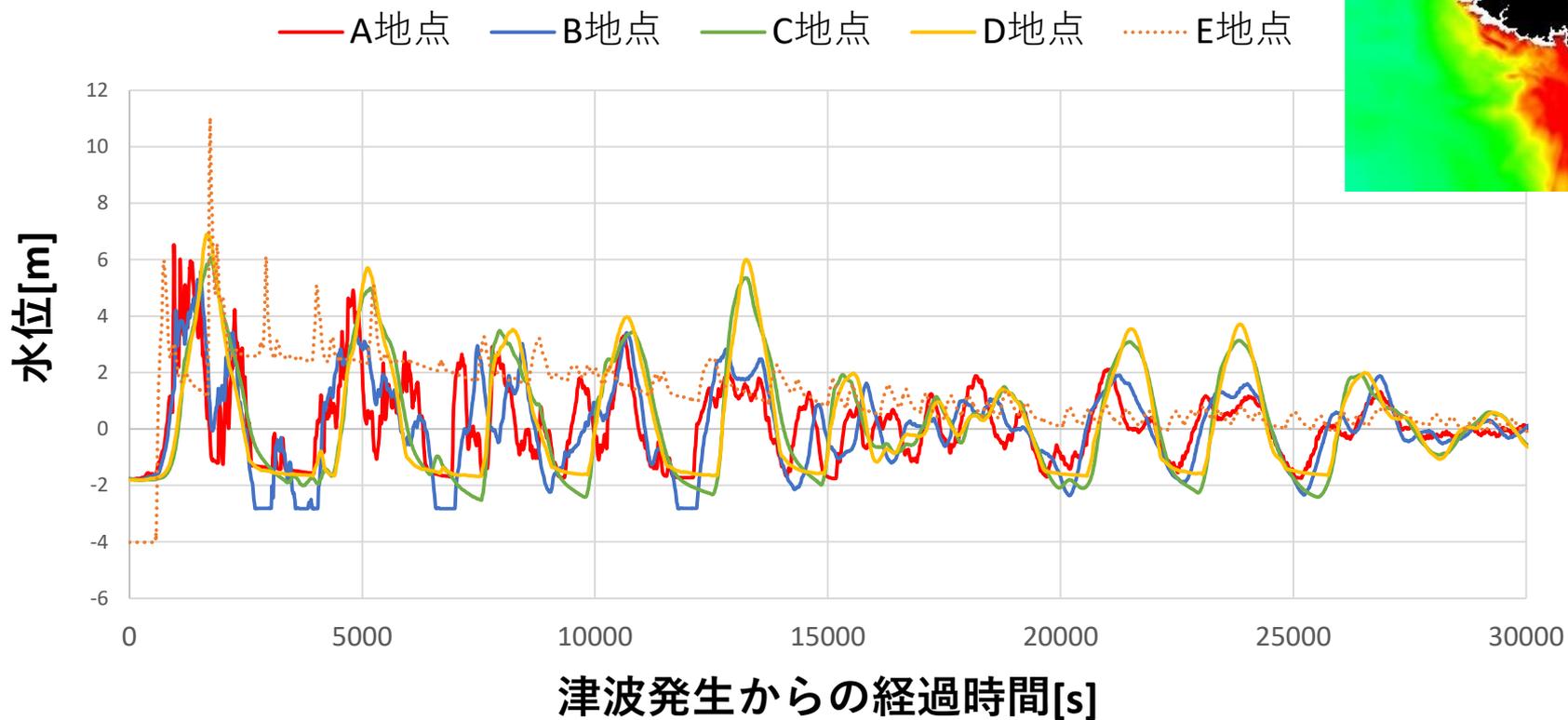
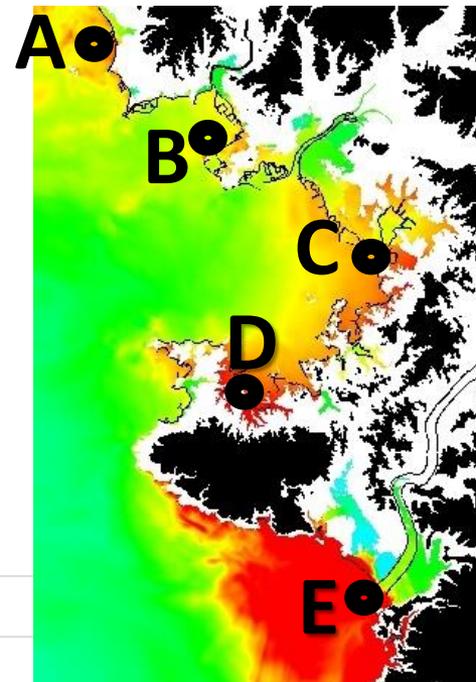
— 内閣府X1 — 内閣府X2

田辺湾およびその周辺

- 津波挙動動画

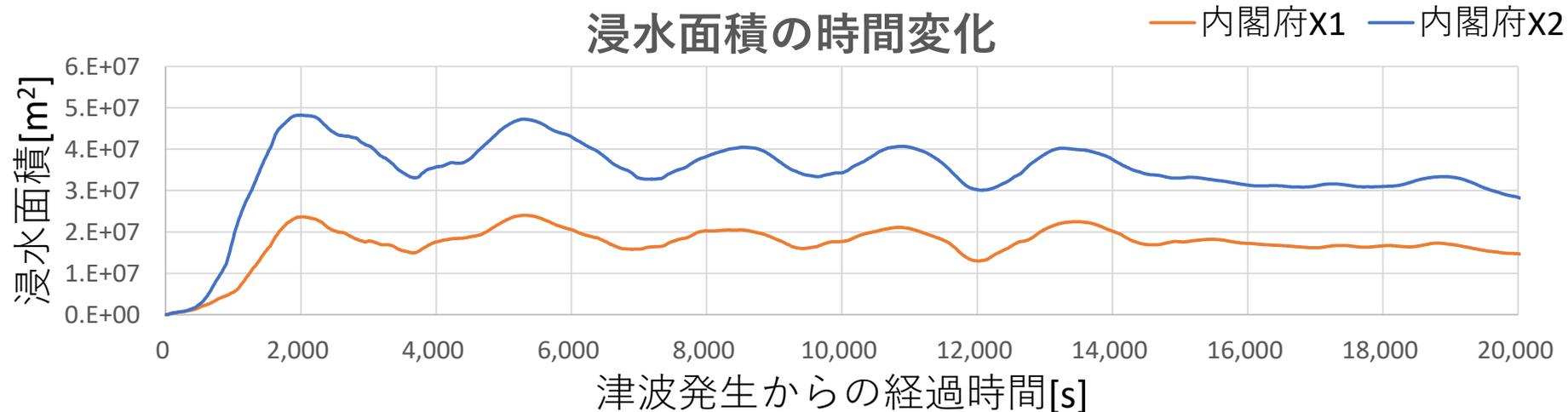
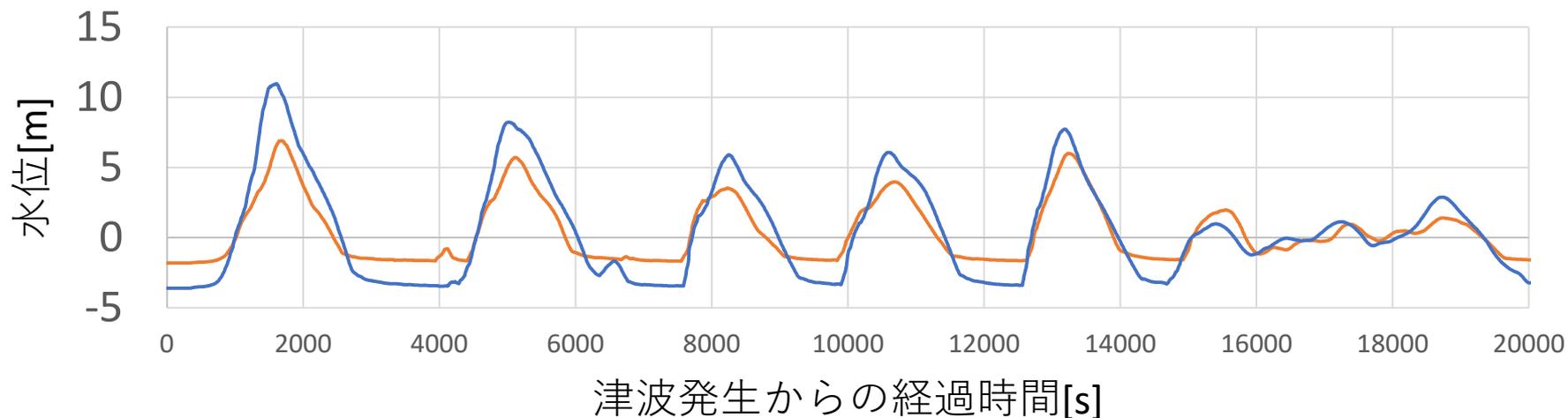


田辺湾およびその周辺



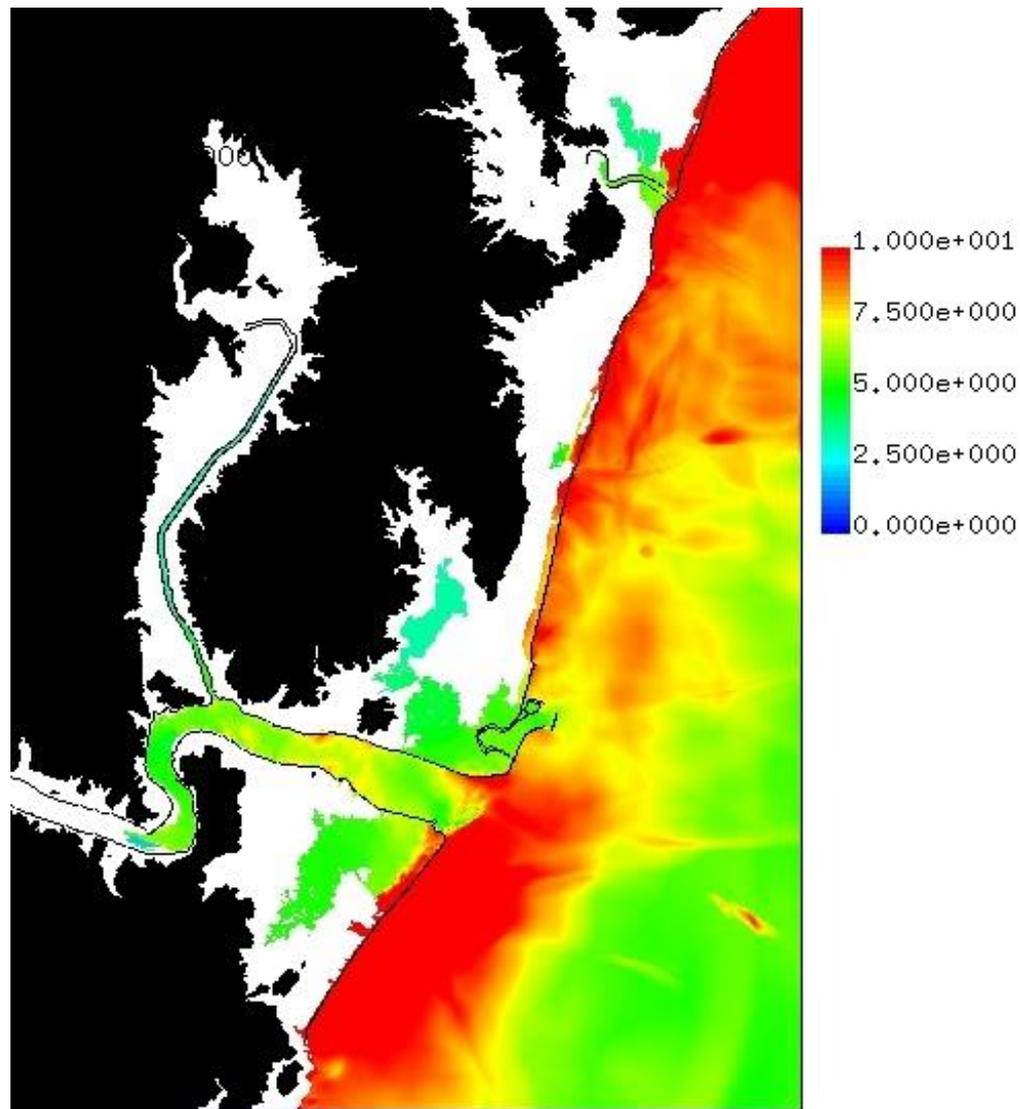
田辺湾およびその周辺 (津波規模が二倍の場合)

D地点 (白浜付近) の水位変動

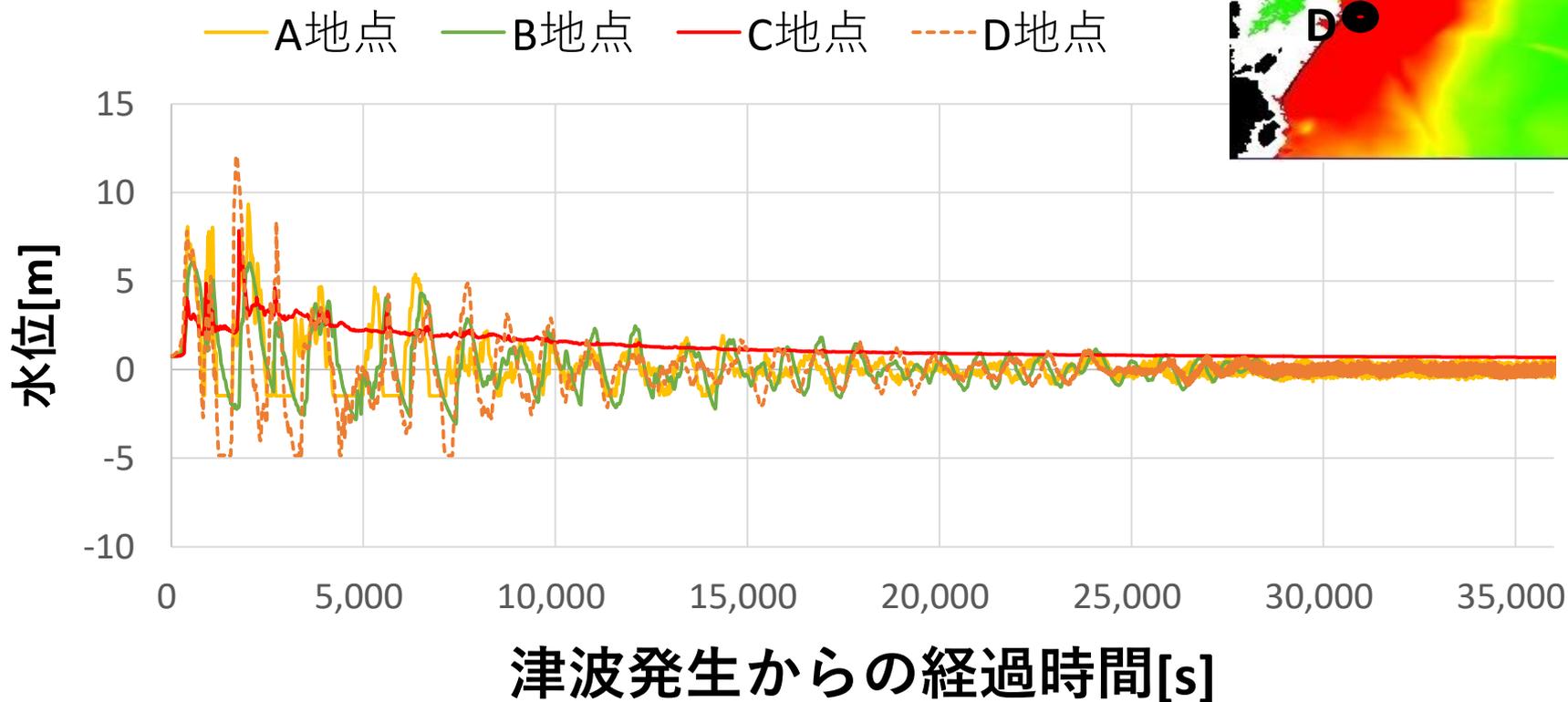
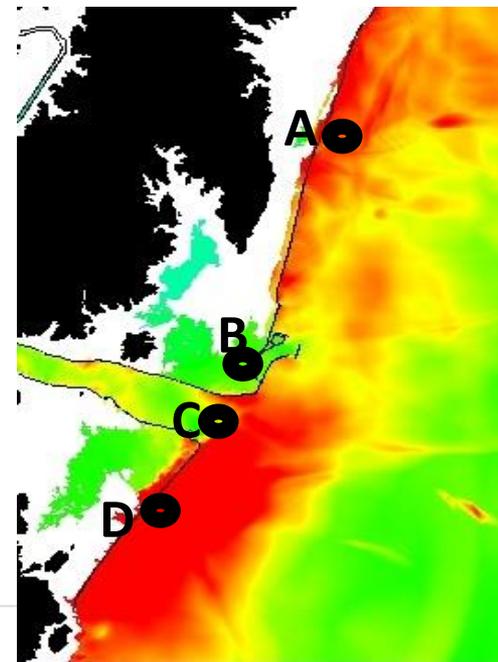


熊野川河口周辺

- 津波拳動動画



熊野川河口周辺

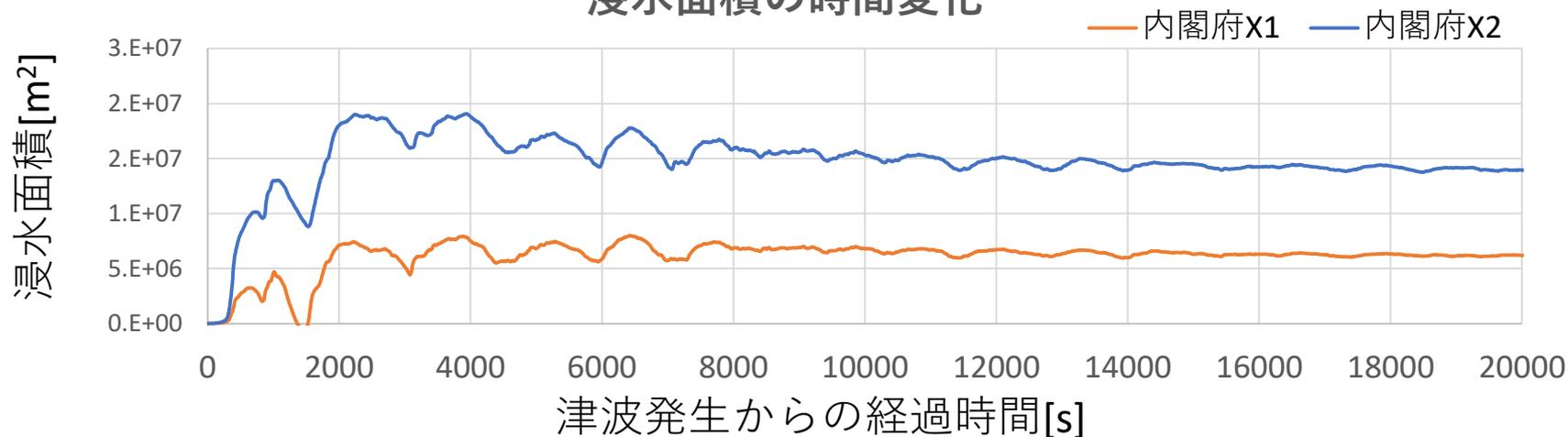


熊野川河口周辺（津波規模が二倍の場合）

B地点（熊野川内）の水位変化



浸水面積の時間変化



三次元領域を追加した解析

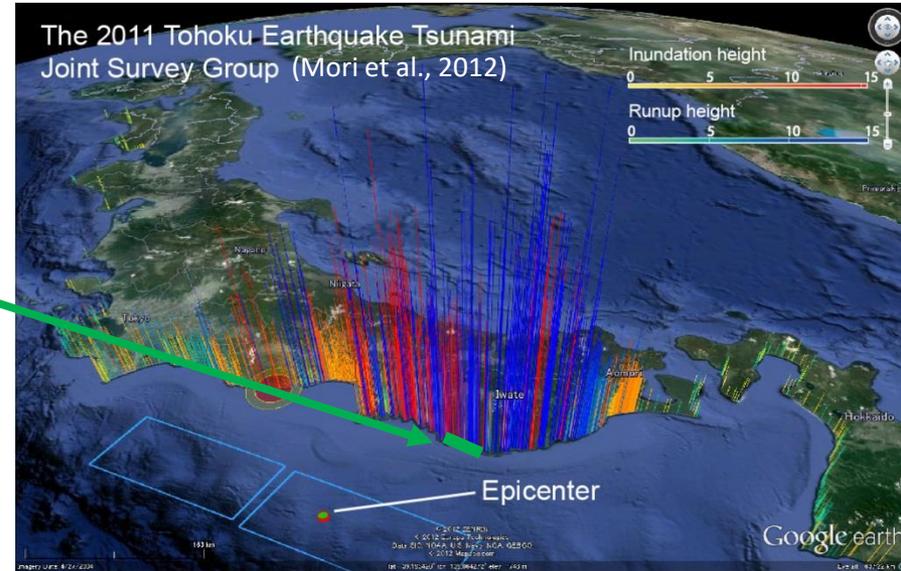
- 東日本大震災発生時の釜石湾における津波挙動
 - 釜石湾口防波堤の開口部に三次元領域を設定
- 東日本大震災発生時の女川における津波挙動
 - 女川町に三次元領域を設定
- 南海トラフ巨大地震に伴う河川遡上津波がもたらす淀川における塩分遡上挙動
 - 淀川大堰周辺に三次元解析領域を設定

東日本大震災発生時の釜石湾における津波挙動

三次元津波氾濫解析を用いた
杭基礎建物の津波応答解析と
転倒メカニズムの検討

釜石湾における津波挙動：釜石湾の概要

- 釜石湾は岩手県三陸沿岸に位置する。
- 2011津波が直接到達



防潮堤近傍の流れがNSWEでは表現できない流れになっている可能性

Kamaishi city center

Fishing village

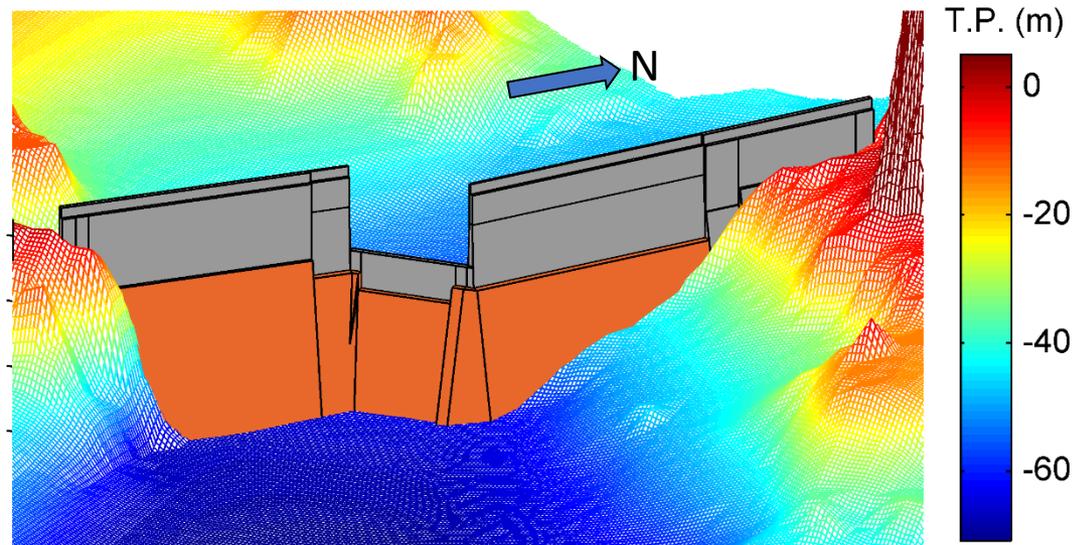
水理特性を詳細に知るため2CLOWNS-3Dを用いる。

南堤670m 開口部300m 北堤990m

- 巨大湾口防波堤が津波防御のため設置されている
 - 設置水深 (63 m) が世界最大

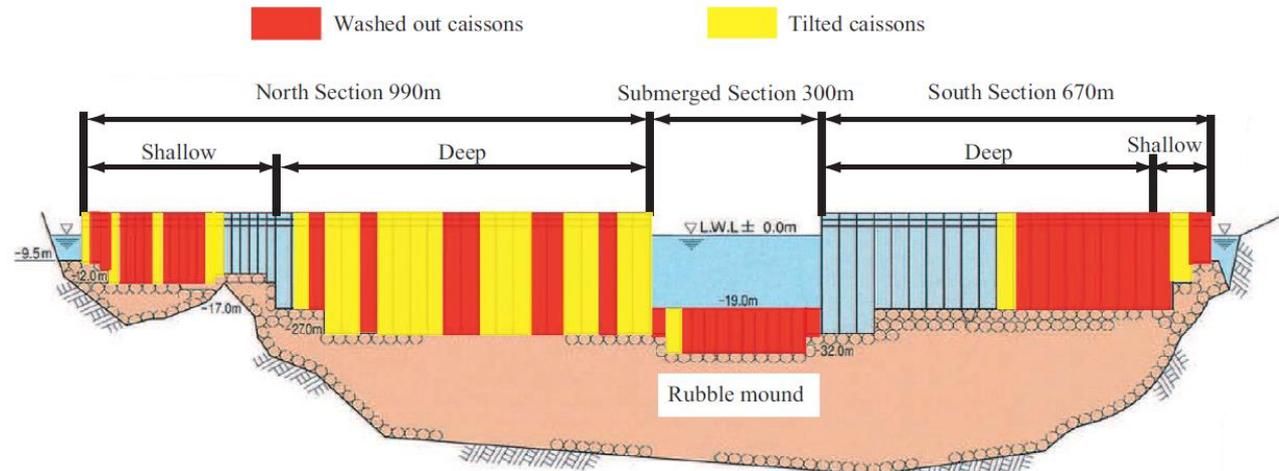
釜石湾口防波堤と検討目的

- 32,000 - 36,000 ton のコンクリートケーソンがマウンド上に設置
- ケーソンの天端高= 6 m
- 開口部の深さは 19 m (潜りケーソン設置)
- 2011津波では、津波が越流し、破壊された。(赤い部分)



検討目的：

開口部の潜りケーソン破壊に着目して、ケーソンにかかる力を評価。

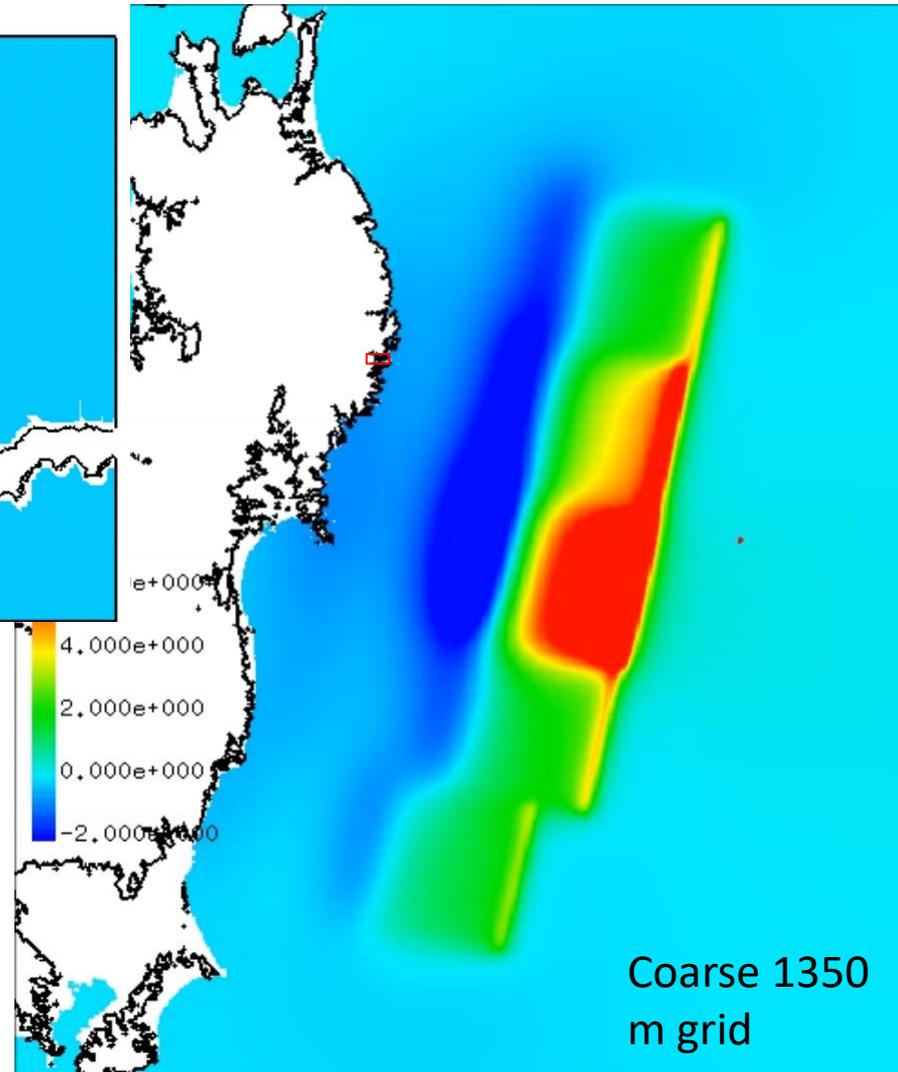
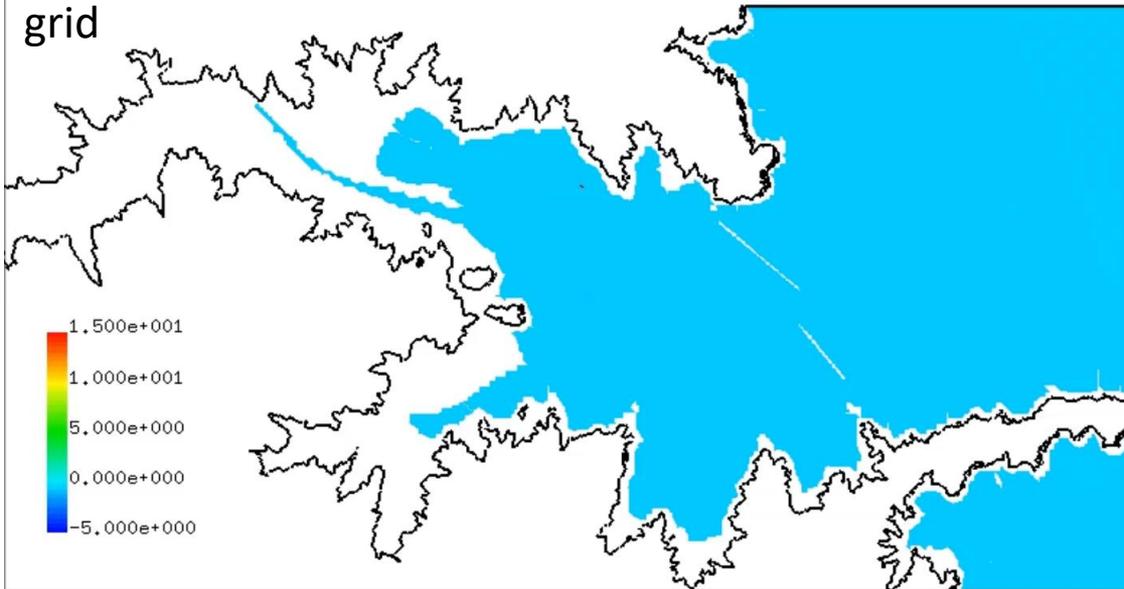


東日本大震災発生時の津波挙動

T= 0.000 XY plain z=-110.00(k=3)
Water level max=15.000000

Colour in animation
corresponds to the free surface
level of tsunami

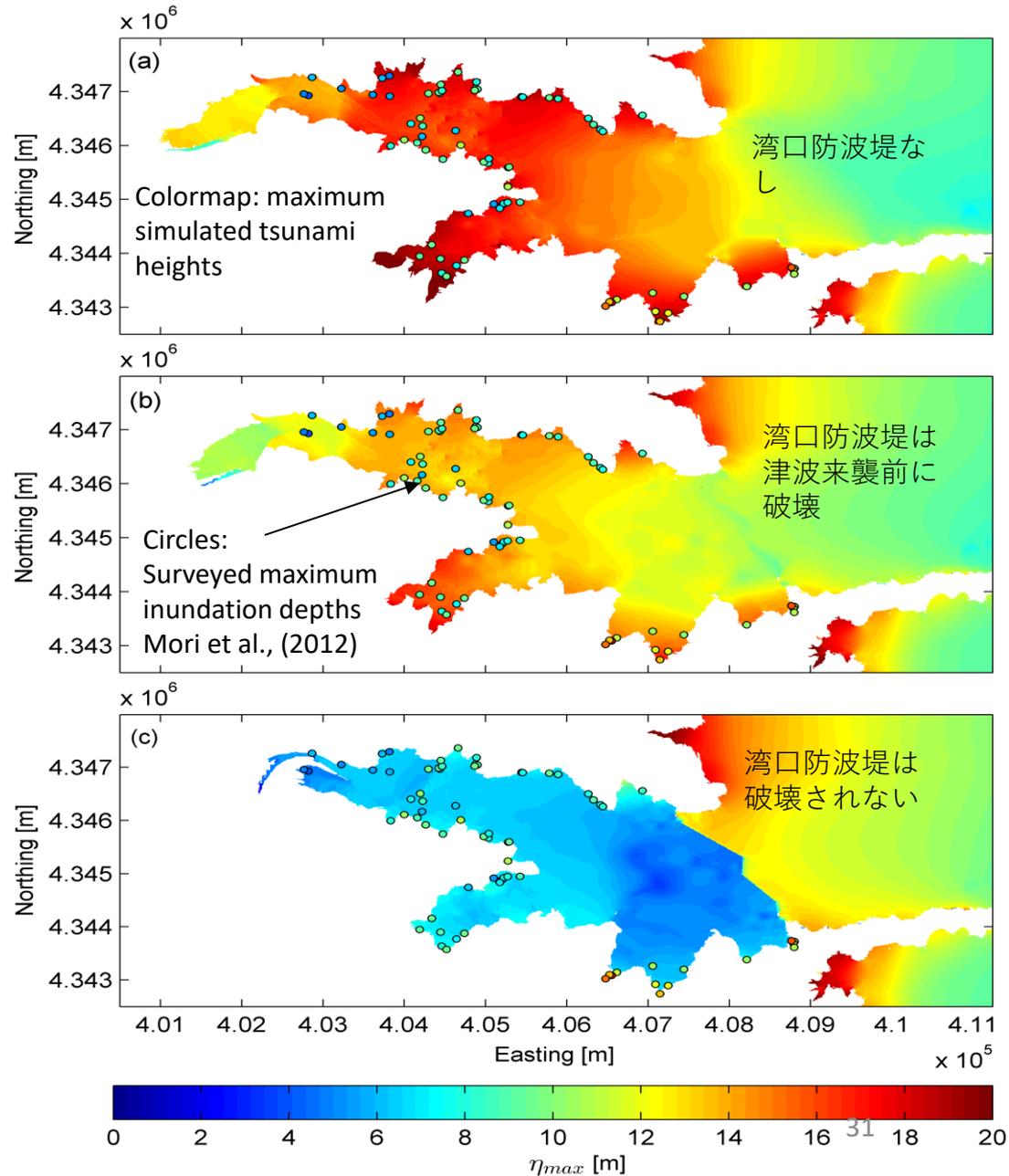
Fine 10 m
grid



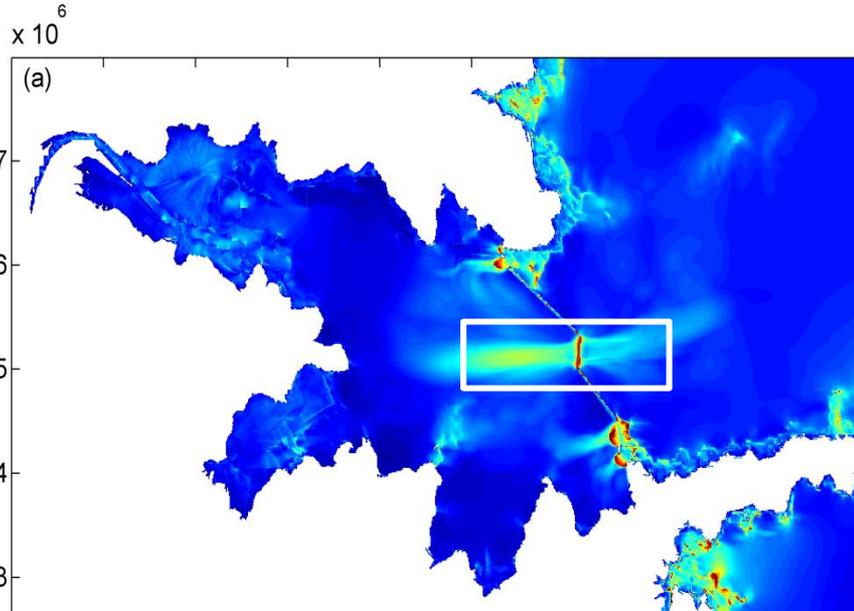
- 湾口防波堤が津波到達前には被害を受けていない仮定
- 湾口防波堤により津波高さが大きく減衰

津波水位の検証

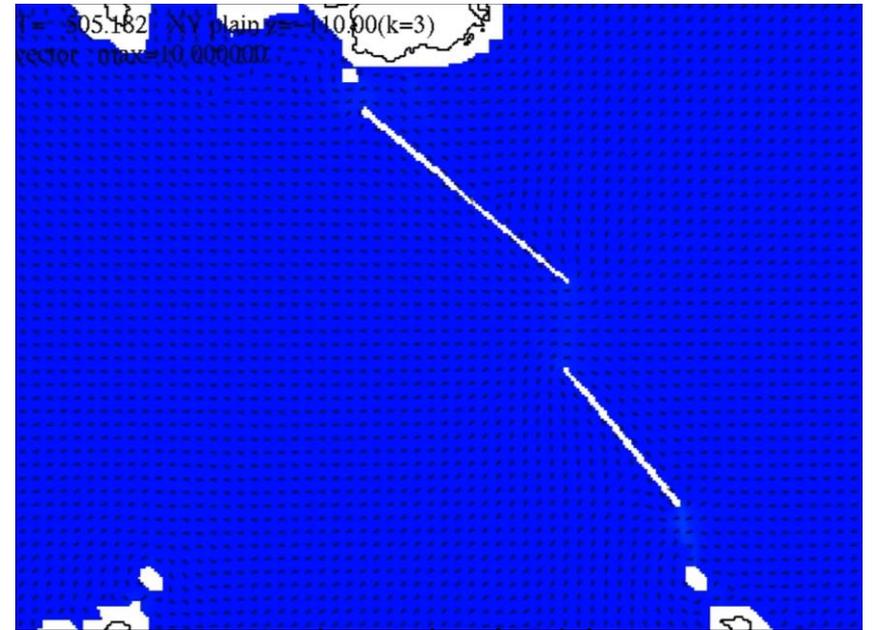
- 湾口防波堤の条件で結果が大きく変わる
- 湾口防波堤が破壊されない条件が実測結果とよく一致。
 - 実際は、破壊された条件と破壊されない条件の間にある。
 - 津波来襲中に壊れた可能性



三次元解析領域の追加

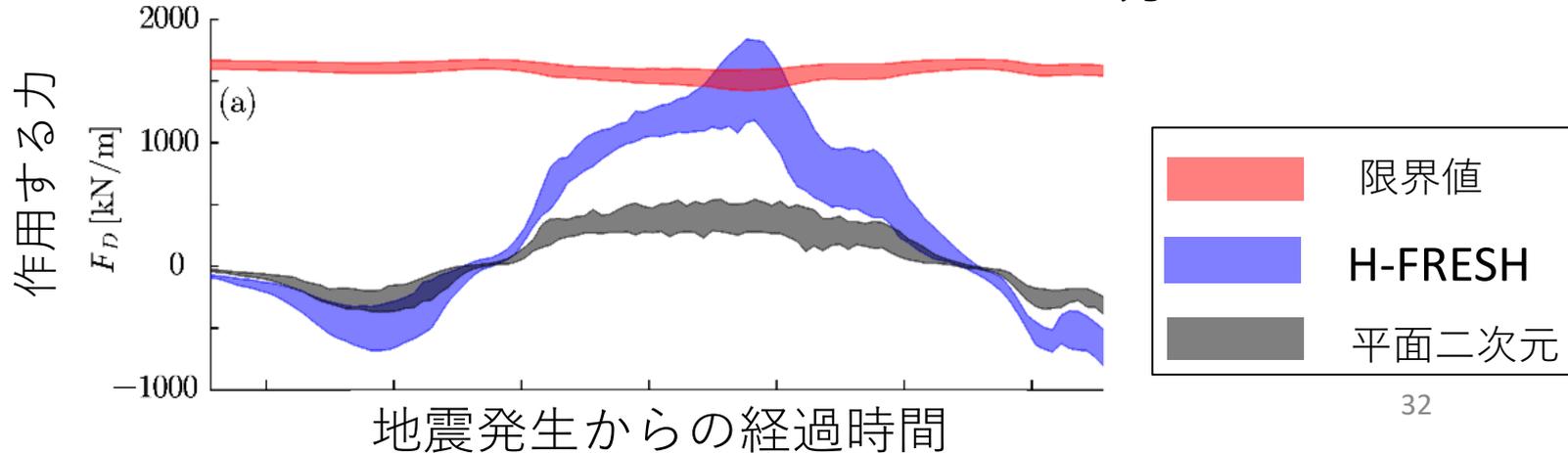


平面二次元解析結果



三次元解析結果

湾口防波堤潜りケーソンに作用する津波波力



東日本大震災発生時の女川における津波挙動

三次元津波氾濫解析を用いた
杭基礎建物の津波応答解析と
転倒メカニズムの検討

検討の目的

• 2011年東北地方太平洋沖地震

- 規模 : Mw9.0

H23 気象庁

- 死者・行方不明者 : 18,457名
- 流出・全半壊 : 約40万棟

H28.1 警察庁

• 南海トラフ地震 (津波規模が二倍の場合)

- 規模 : M8~M7クラス
- 30年確率 : 60~70%

H25.5 地震調査推進本部

• 杭基礎RC建物の転倒被害

- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 宮城県女川町において発生

• 津波避難ビル

- 対象 : 堅固な中・高層建物
(新ガイドラインに適するもの)

H23.11 国総研

- 用途 : 一時的な避難
(高台避難が困難な地域)

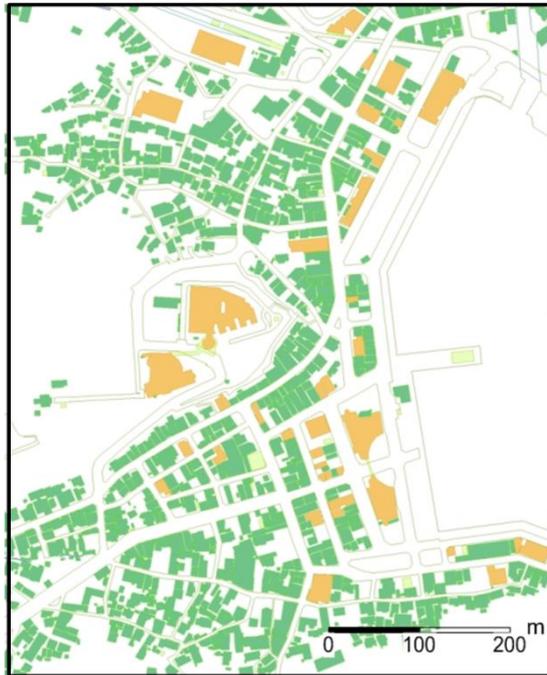
H17.6 内閣府

- 今後も、津波破壊に耐えられる構造物が求められる。
- RC造の中層建物は、避難ビル制定され得る。

⇒一刻も早い被災メカニズムの解明が求められる。

対象地域の建物

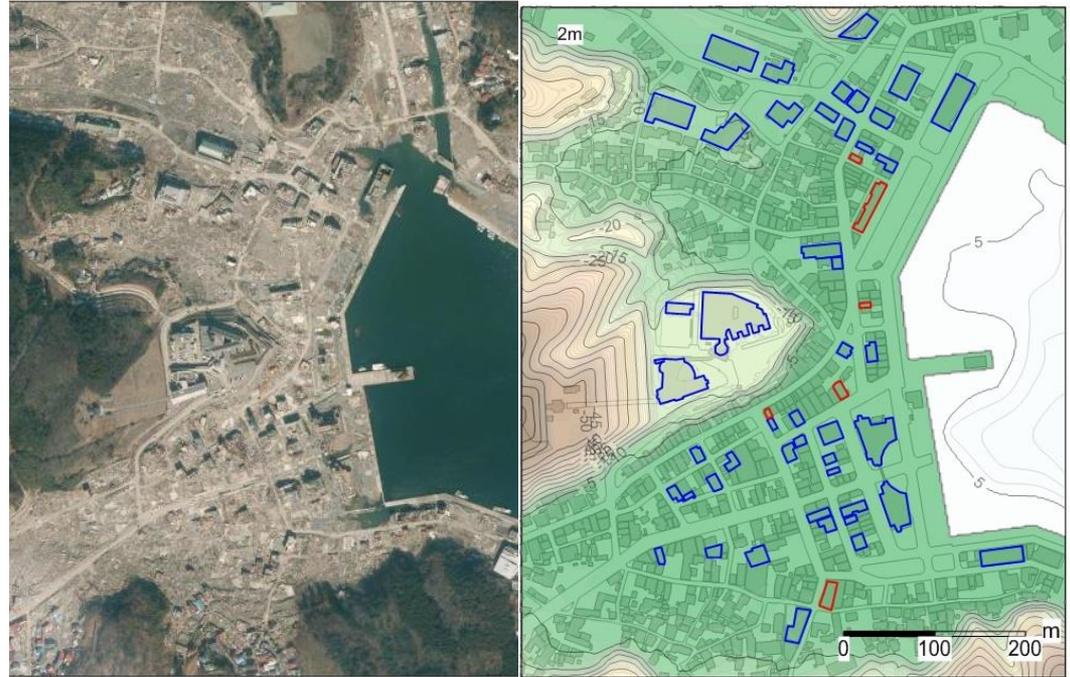
- 対象地域では，流出・転倒した建物と残存した建物が混在している。
- 必ずしも，堅牢な建物が残存し，普通建物が流出したわけではない。
→ 転倒の是非は，立地と構造種別だけでは決まらない。



震災前

(国土地理院 基盤地図情報)

- 堅牢建物
- 普通建物
- 普通無壁舎



震災後

(Google Maps,
国土地理院 基盤地図情報)

- 残存建物
- 転倒建物

東日本大震災発生時の 女川における津波波力の検討例

1350m, 450m, 150m, 50m格子

10m格子

2m格子

× 対象建物
原位置

津波氾濫解析計算領域

2m格子を三次元で、その他を二次元で計算

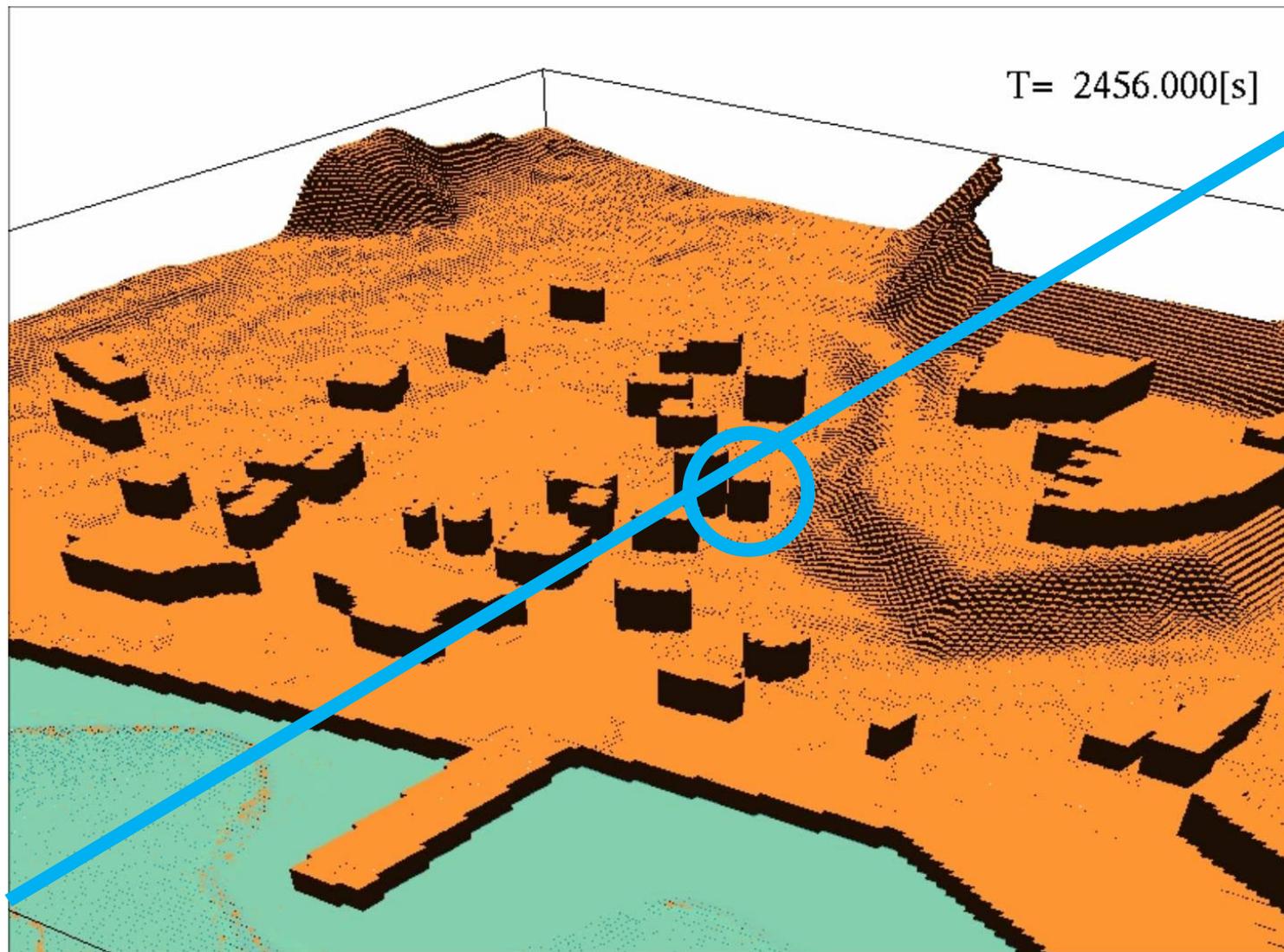
H-FRESHによる解析

- 被災状況との比較による再現性の確認
- 二次元津波氾濫解析と三次元津波氾濫解析の比較
- 建物に作用する津波水平力の考察

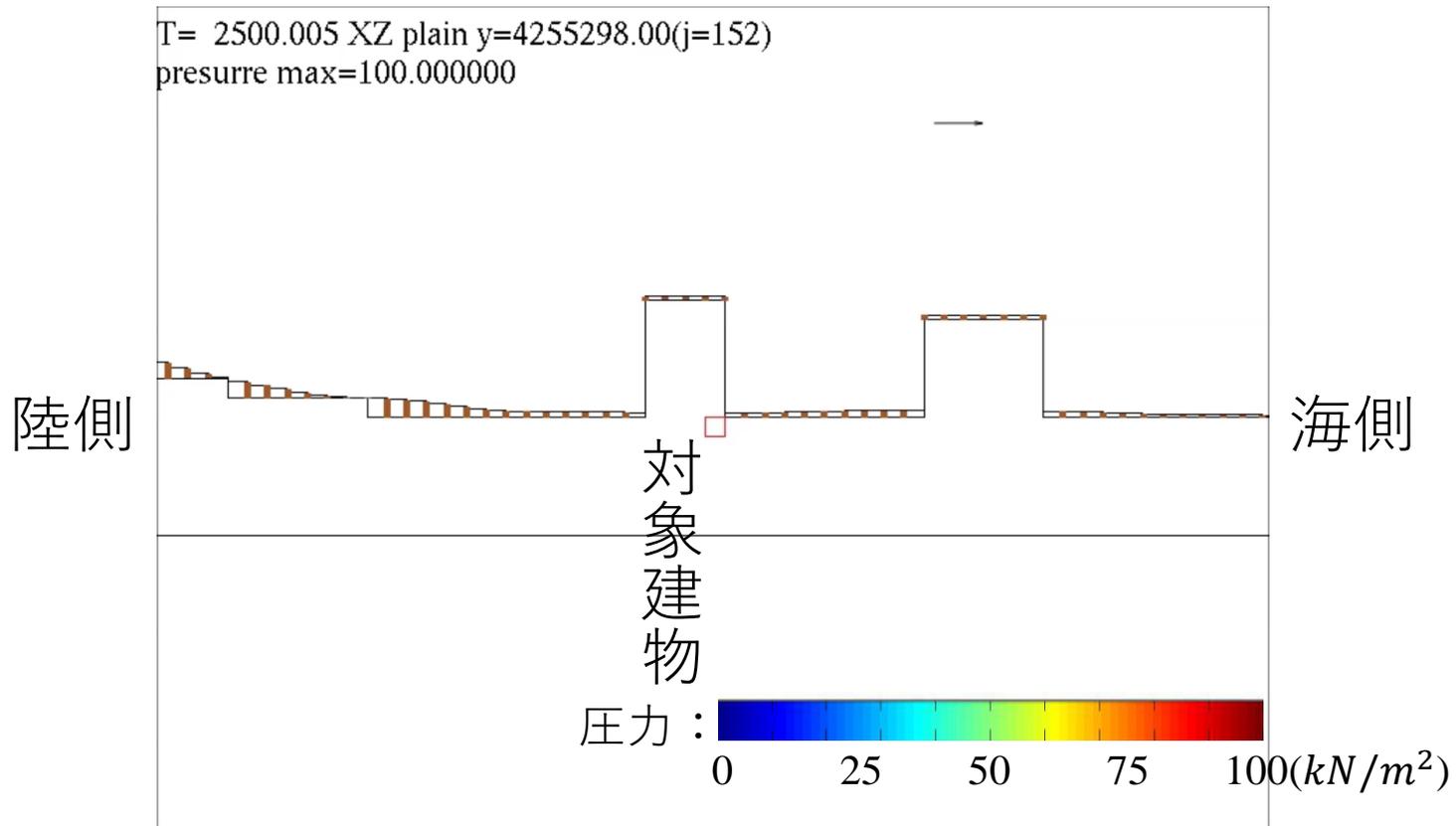


建物に作用する津波水平力の算出

三次元津波氾濫解析-結果-



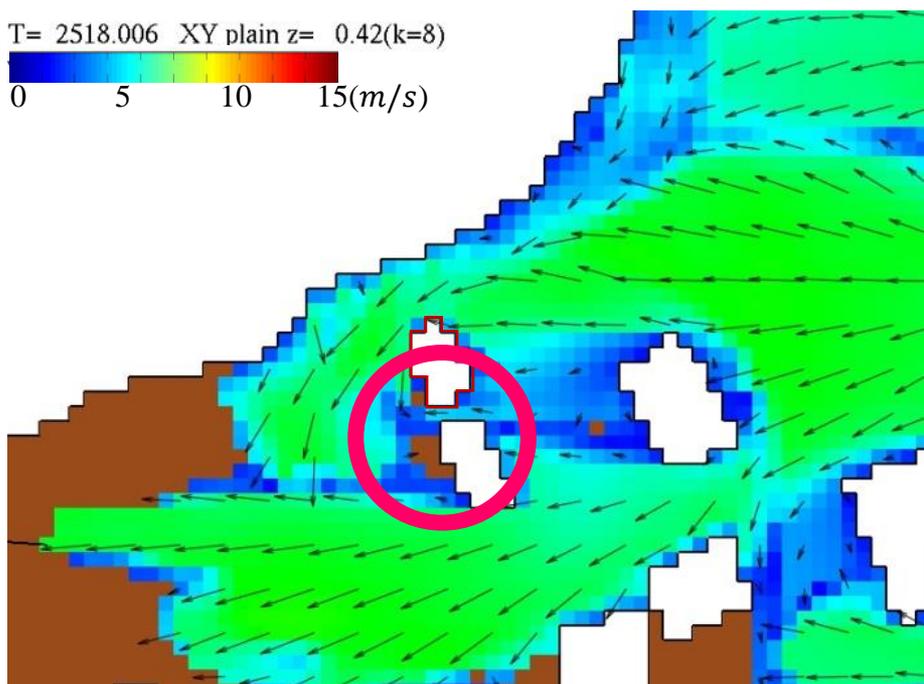
三次元津波氾濫解析-結果-



- 対象建物に衝撃波圧は発生せず，浸水深4m以上の津波が作用する際の圧力は，ほぼ静水圧と等しい。

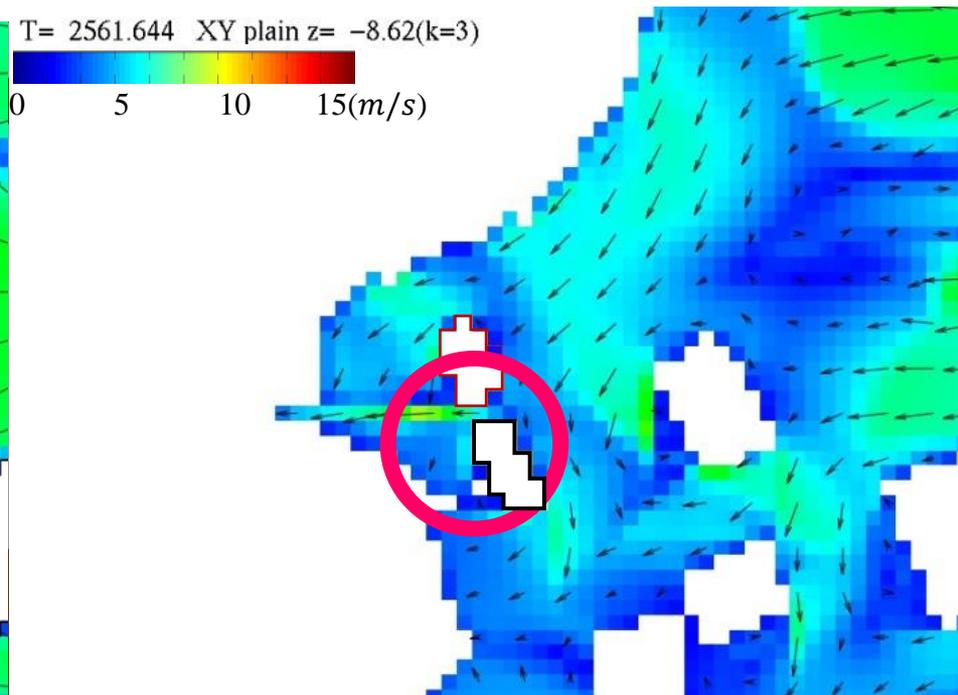
三次元津波氾濫解析-二次元解析との比較-

T= 2518.006 XY plain z= 0.42(k=8)
0 5 10 15(m/s)



三次元津波氾濫解析：流速（地表面）

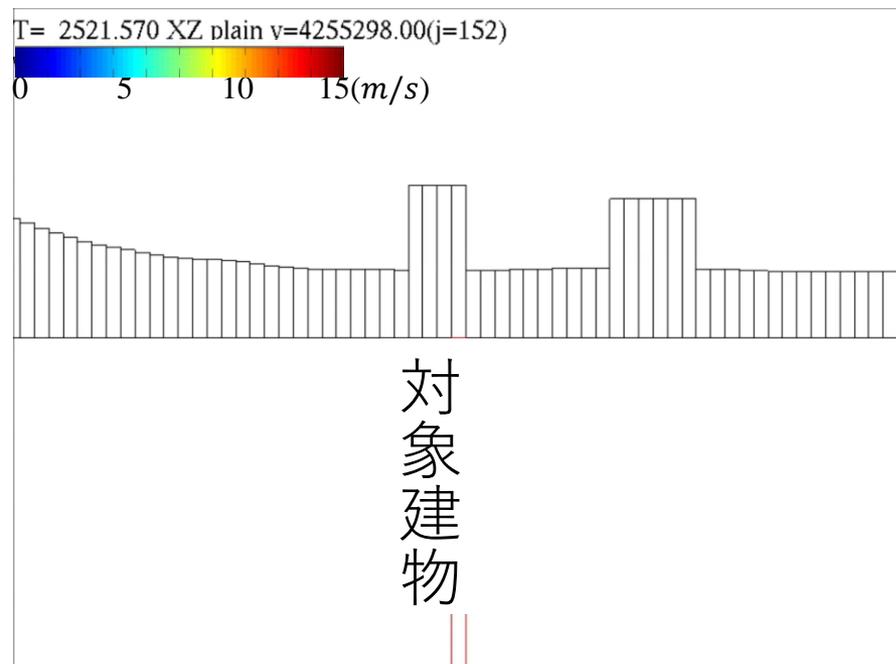
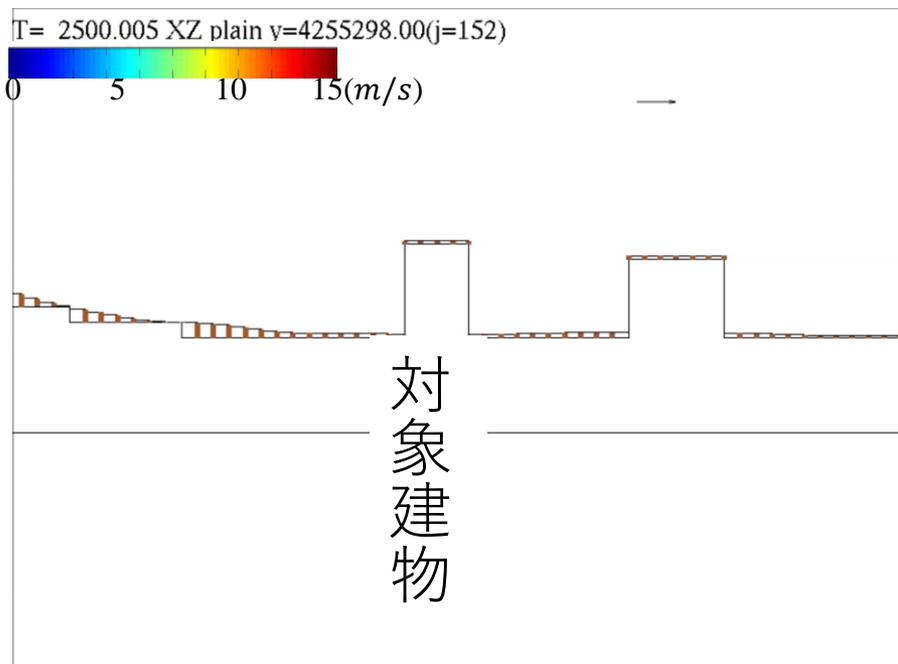
T= 2561.644 XY plain z= -8.62(k=3)
0 5 10 15(m/s)



二次元津波氾濫解析：流速

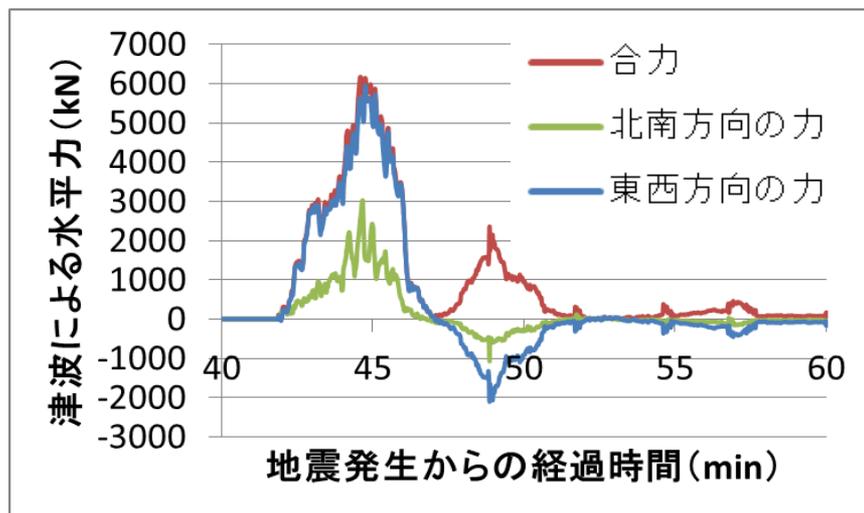
- 全体的に流速が速く，特に建物背後において流況が異なる。
- 建物背後への回り込みは遅い

三次元津波氾濫解析-二次元解析との比較-

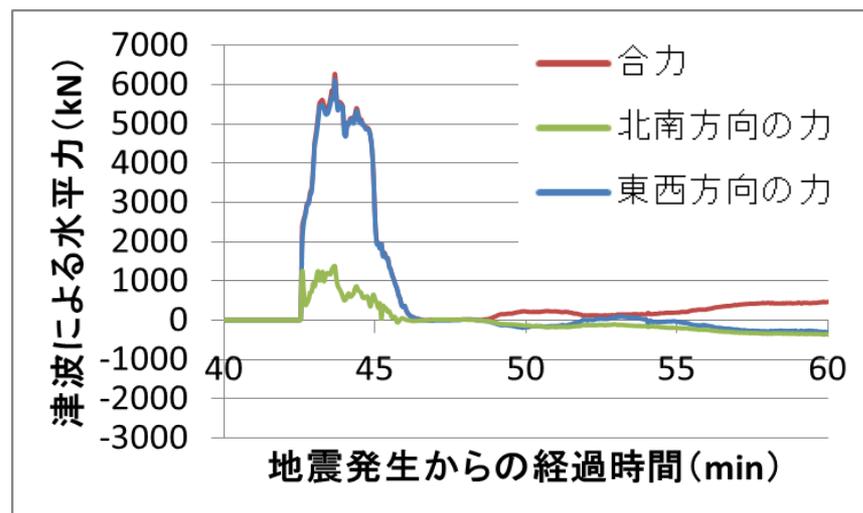


- 三次元津波氾濫解析：流速 全体的に流速が速く、特に建物背後において流況が異なる。
- 建物背後への回り込みは遅いが、水位上昇は速い。
- ⇒ 水位差が大きい時間が短い。
- ⇒ **建物に作用する水平力が小さくなる。**

三次元津波氾濫解析-建物に作用する水平力-



建物に作用する水平力
(三次元津波氾濫解析)



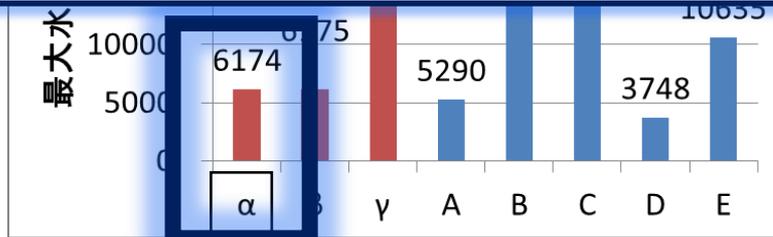
建物に作用する水平力
(二次元津波氾濫解析)

- 東西方向の力（前面・背面に加わる力）が支配的である。
- 引き波時の水平力も表現できている。
- 建物前面と背面の水位差が埋まりやすいため、水平力の変化勾配が急である。

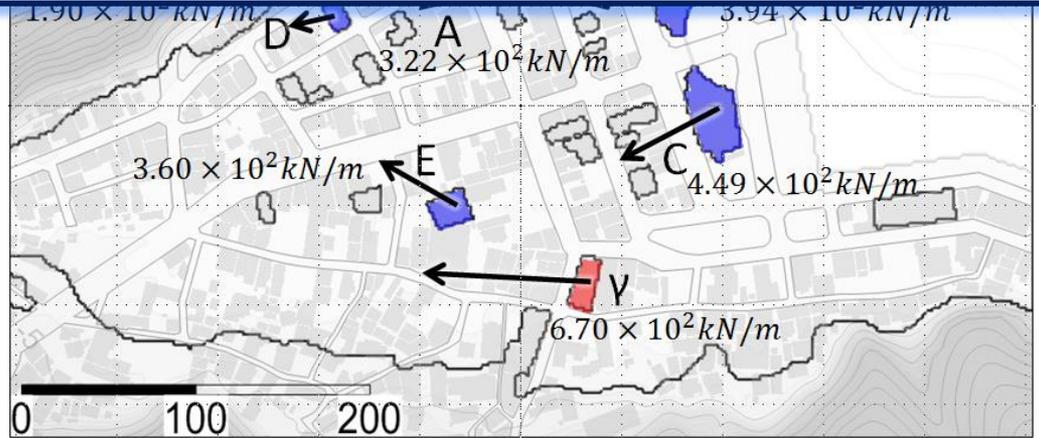
三次元津波氾濫解析-建物に作用する水平力-



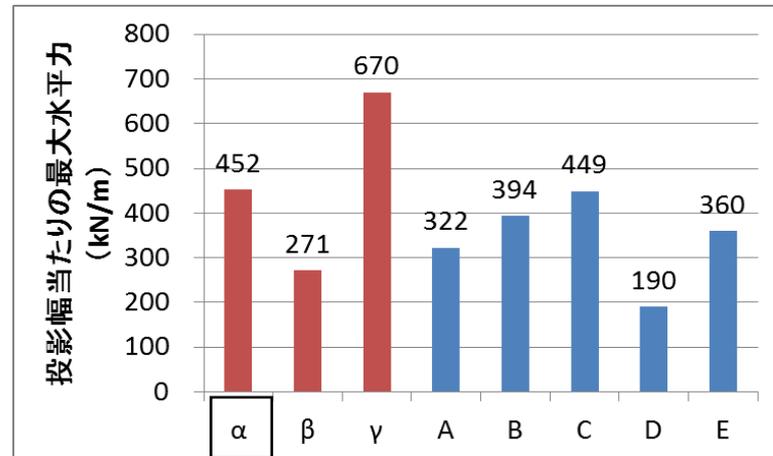
この結果を用いて，安定解析・構造解析を行った



建物に作用する最大水平力



建物に作用する単位幅当たりの最大水平力



建物に作用する
単位幅当たりの最大水平力

- 建物に作用する水平力のみで，建物の転倒・流出の是非を判断することはできない。

結論-被災メカニズム-

- 1.2011年東北地方太平洋沖地震により地盤が液状化した。
- 2.余震などの影響により本震から43分経過しても、液状化していた。
- 3.最大浸水深15.52mの津波が来襲した。
- 4.津波水平力が建物に作用したことで、杭にせん断応力、引張応力、曲げモーメントが作用し、一部の杭が破断した。
- 5.抵抗モーメントが減少し、対象建物が転倒した。
- 6.建物内部に6割以上の空気が残されていたため、陸側へ約70m流された。

南海トラフ巨大地震に伴う
河川遡上津波がもたらす
淀川における塩分遡上挙動

淀川大堰周辺取水口の塩分被害の
予測評価

研究の背景

- 日本の大都市
 - 沿岸部の沖積平野に位置している。
 - 河川水を利用するために、河口堰を設けて海水が河川に浸入するのを防いでいる。
 - 利根川河口堰（首都圏）
 - 長良川河口堰（中部圏）
 - 淀川大堰（阪神圏）
 - 河川遡上津波により河口堰上流部に塩水が浸入し、取水障害を引き起こす可能性も高い。
 - 人命を脅かす
 - 災害復旧の妨げとなる
- 南海トラフ巨大地震の発生が予想されている。
 - 津波が西日本の太平洋側を中心に広範囲にわたって来襲する。

**津波に伴って河道内を遡上する塩水の挙動を
正確に予測することが重要である**

本研究の目的

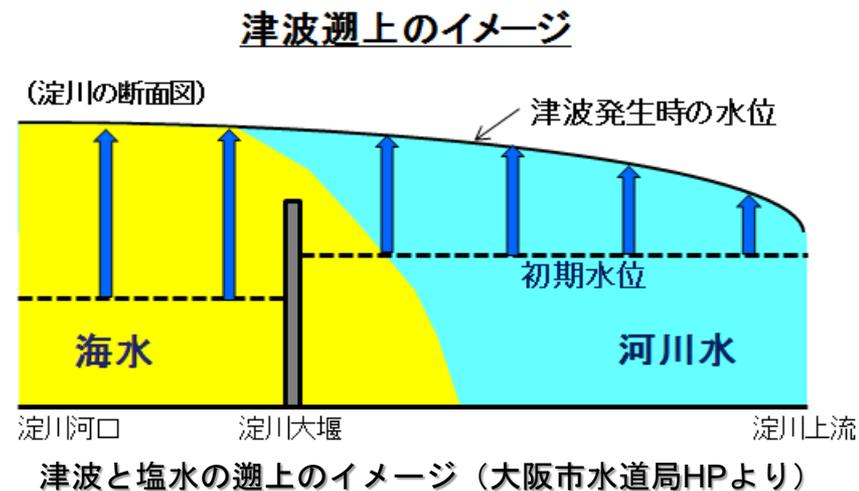
- 津波来襲時の河道内塩水挙動を数値解析により予測する

- 既往研究から言えること

- 三次元数値解析を行う必要がある。
 - 流体密度の空間分布を考慮すべき。
- 解析領域境界の影響を排除する必要がある。
 - 塩水が流下し終わるまでの長時間の解析を実施するため。
- 津波による河道内の塩水遡上の距離は、津波の遡上距離よりも短い。
 - 三次元数値解析を実施すべき範囲は限定的である。

- 課題

- 長時間の解析においても解析領域の境界の影響を受けないようにするためには、解析領域を広大に設定する必要がある。
- 広大な領域全てにおいて三次元数値解析を行うのは、計算負荷の観点から現実的ではない。



様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測例

- 概要

- 解析対象

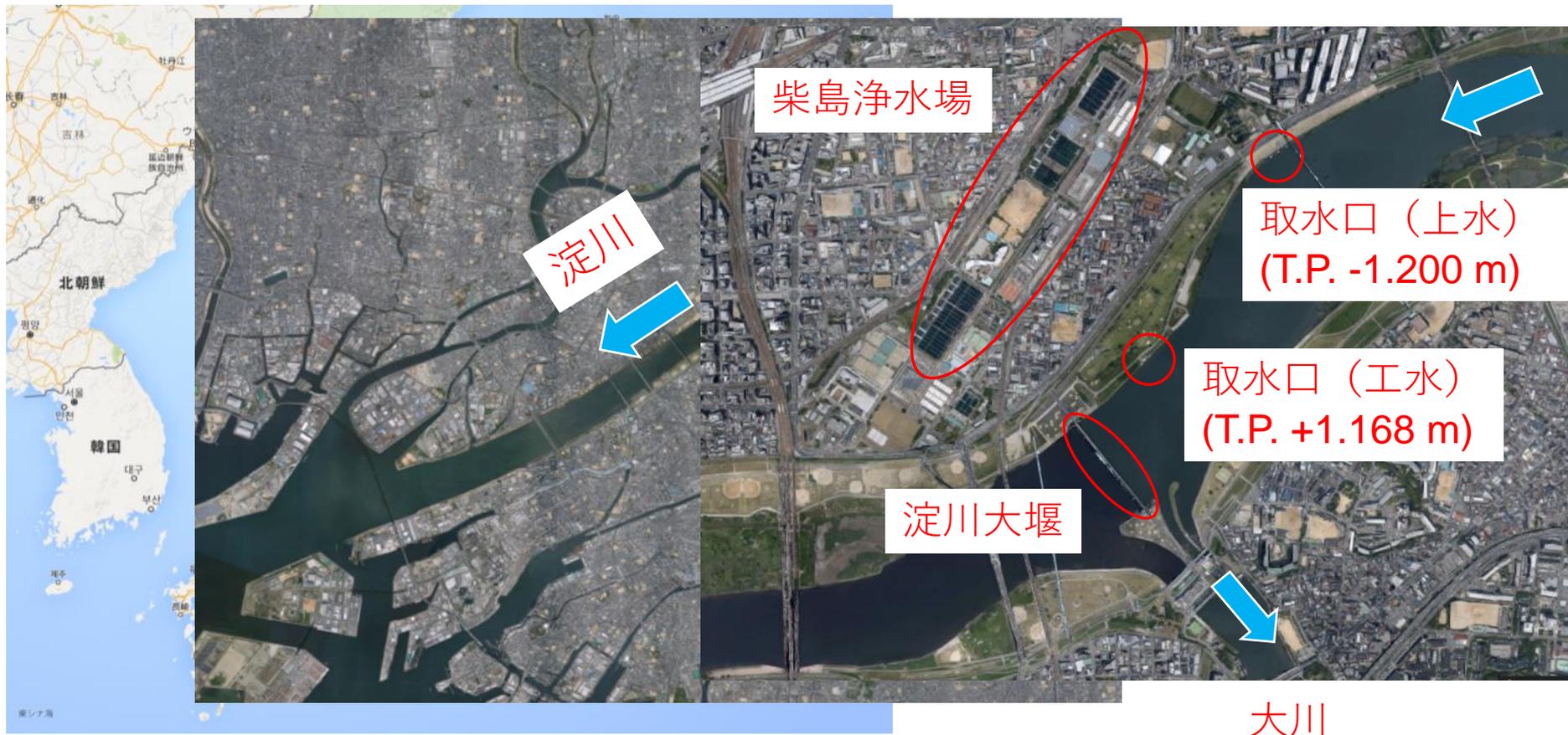
- 南海トラフ巨大地震津波来襲時の淀川大堰周辺域

- 予測すること

- 様々な河川流量下での塩水の空間分布および時間変化を定量的に予測する
 - 淀川大堰上流部に位置する浄水場取水口における取水への影響を評価する

三次元解析対象領域の概要

- 淀川
- 淀川大堰：淀川の河口から9.8km付近に位置する
- 柴島取水口（工水），柴島取水口（上水）

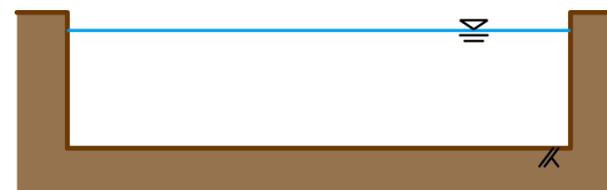
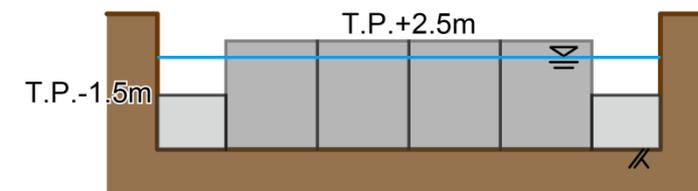
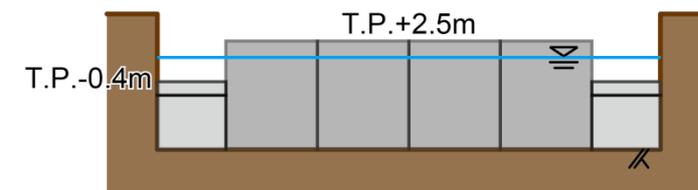
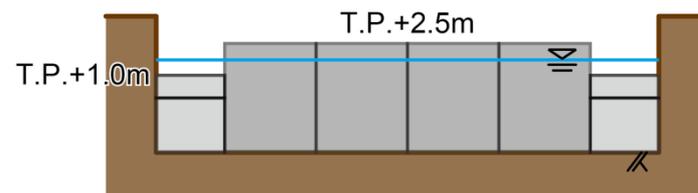
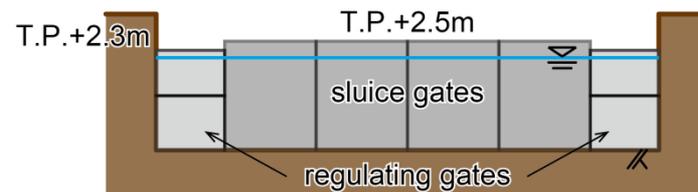


様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

解析条件および解析ケース

- 津波断層モデル：ケース10
- 初期潮位：T.P.+0.9 m

ケース名	淀川流量 [m ³ /s]	備考
Case 2	62	渇水時に想定される最小の流量（再掲）
Case 6	196	平水時の代表的な流量（再掲）
Case 9	500	Case 6とCase 10の中間の流量
Case 10	820	制水ゲートの操作が始まる流量
Case 11	3,000	全てのゲートが全開になる流量



取水影響の評価方法

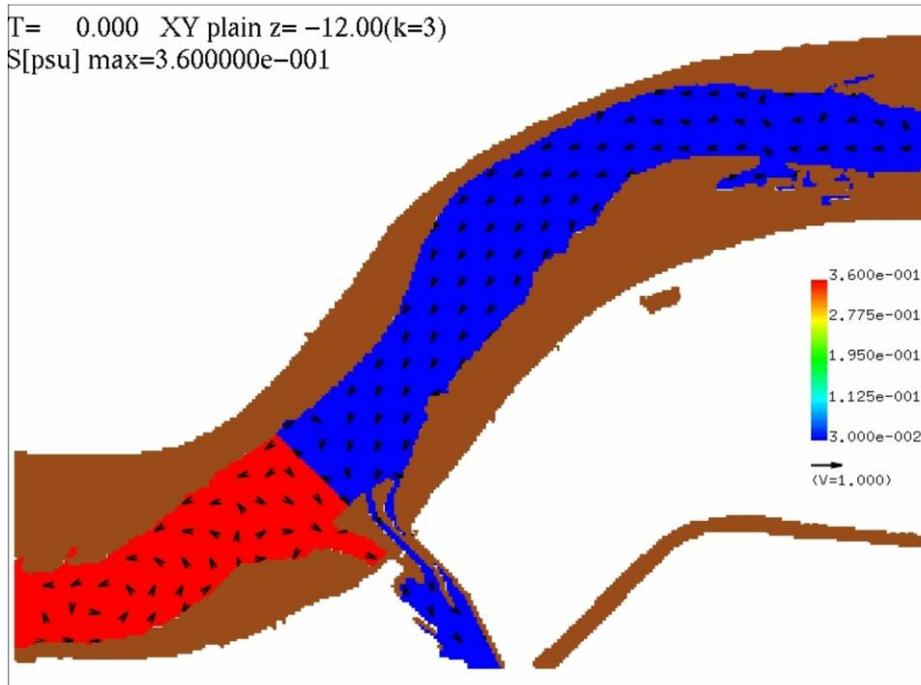
- 塩素イオン濃度の水質基準値 200 mg/L
= 塩分 約 0.36（実用塩分）
- 取水停止時間
= 取水口における塩分が 0.36 を超過する時間

$$\text{塩分 [psu]} = \text{塩素イオン濃度 [mg/L]} \times 1.80655 \div 1000$$

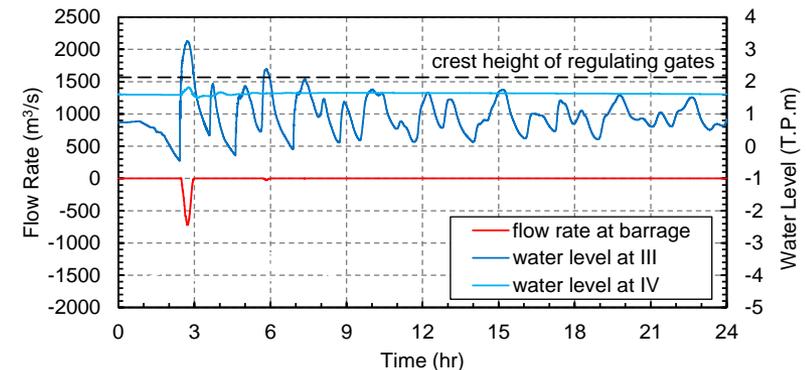
様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

• Case 2 (淀川流量 62 m³/s)

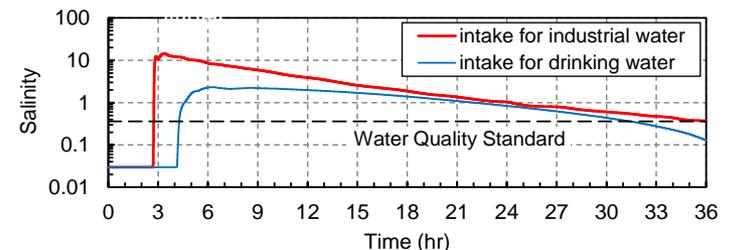
- 津波が淀川大堰を越流する回数：2回
- 取水口の塩分の最大値と取水停止時間
 - 工水：14.42, 33時間 20分
 - 上水：2.32, 27時間 10分



水面の塩分分布 (地震発生後 1 時間～ 9 時間)



水位・流量

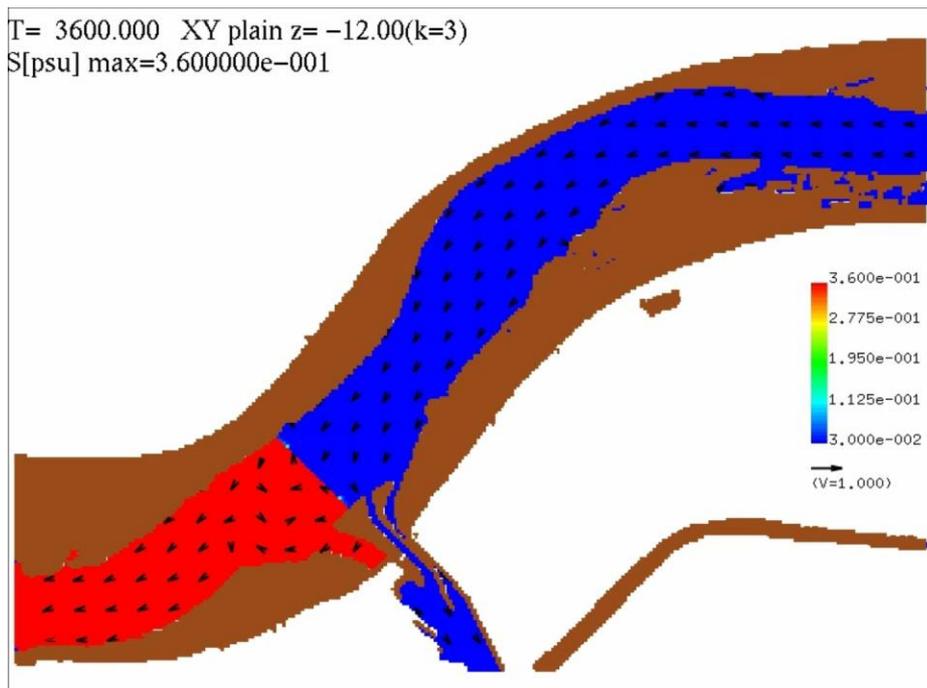


取水口の塩分 (赤：工水, 青：上水)

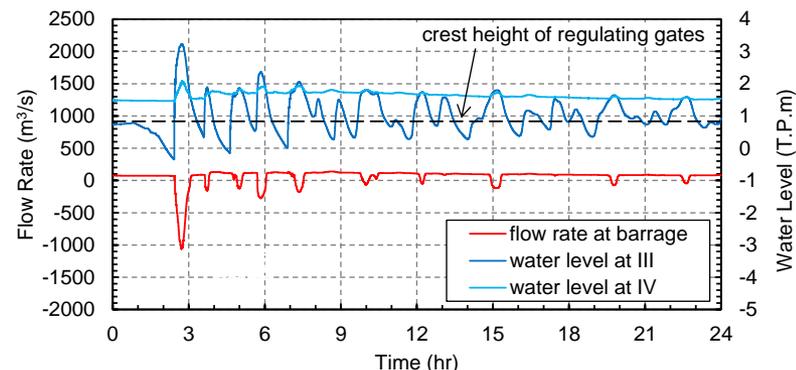
様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

• Case 6 (淀川流量 196 m³/s)

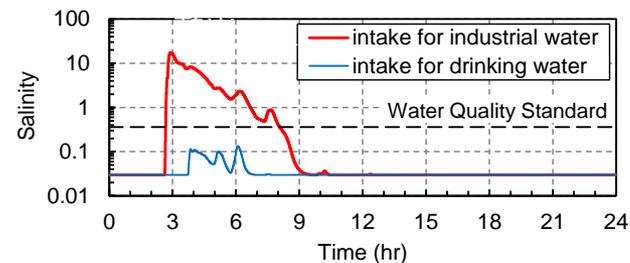
- 津波が淀川大堰を越流する回数：10回
- 取水口の塩分の最大値と取水停止時間
 - 工水：17.37, 5時間30分
 - 上水：0.13, 0分



水面の塩分分布 (地震発生後 1 時間～ 9 時間)



水位・流量

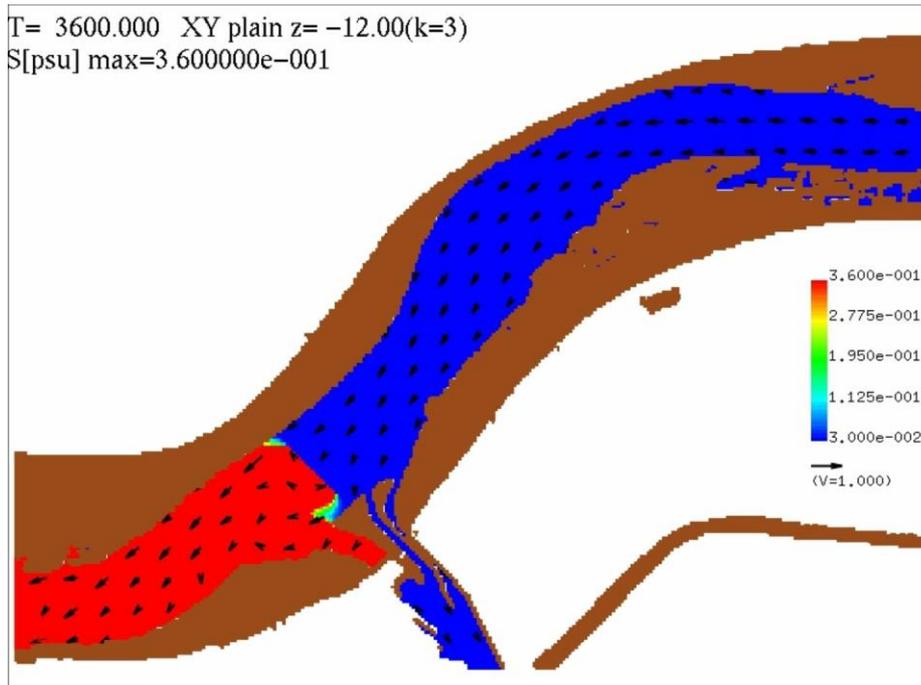


取水口の塩分 (赤：工水, 青：上水)

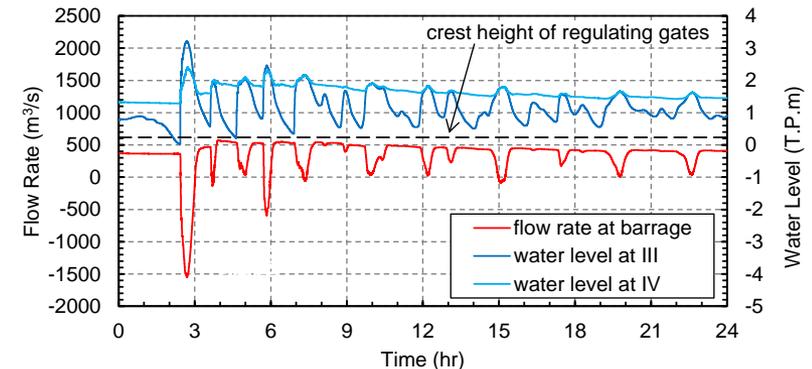
様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

• Case 9 (淀川流量 500 m³/s)

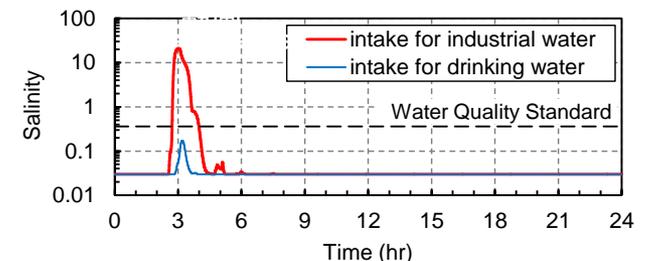
- 津波が淀川大堰を越流する回数：5回
- 取水口の塩分の最大値と取水停止時間
 - 工水：21.10, 1時間20分
 - 上水：0.17, 0分



水面の塩分分布 (地震発生後 1 時間 ~ 9 時間)



水位・流量

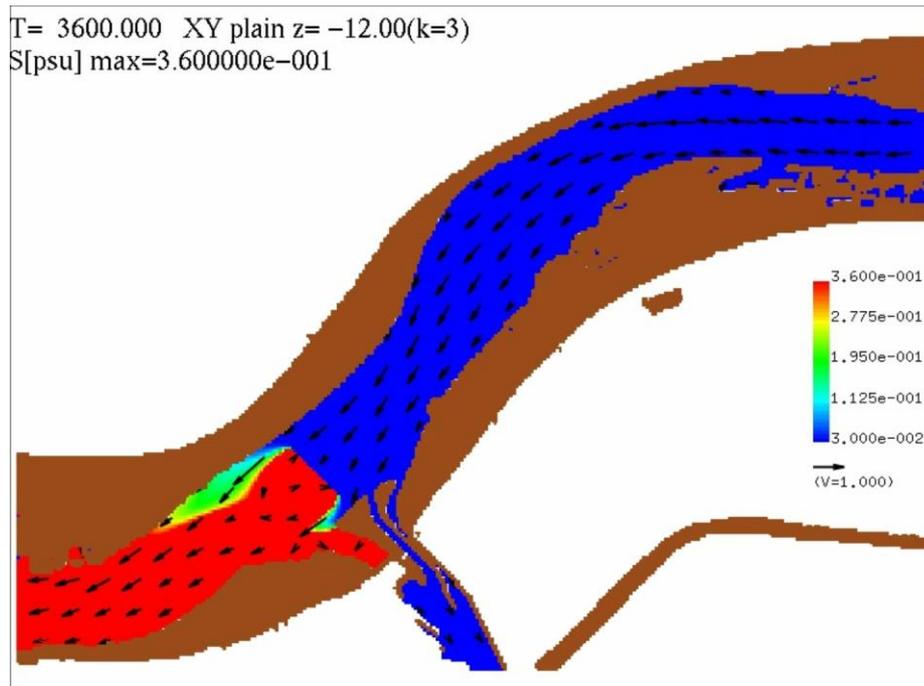


取水口の塩分 (赤：工水, 青：上水)

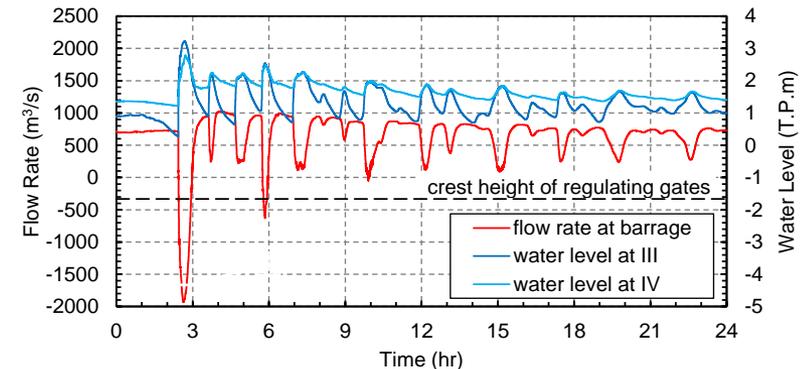
様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

• Case 10 (淀川流量 820 m³/s)

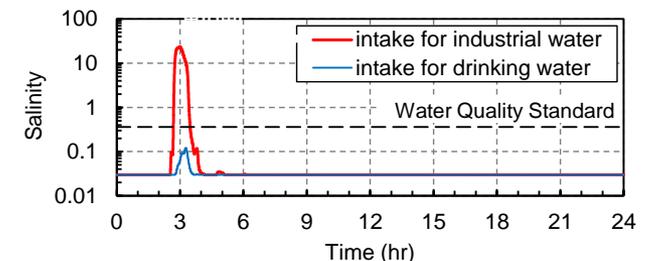
- 津波が淀川大堰を越流する回数：3回
- 取水口の塩分の最大値と取水停止時間
 - 工水：23.72, 50分
 - 上水：0.12, 0分



水面の塩分分布 (地震発生後 1 時間～ 9 時間)



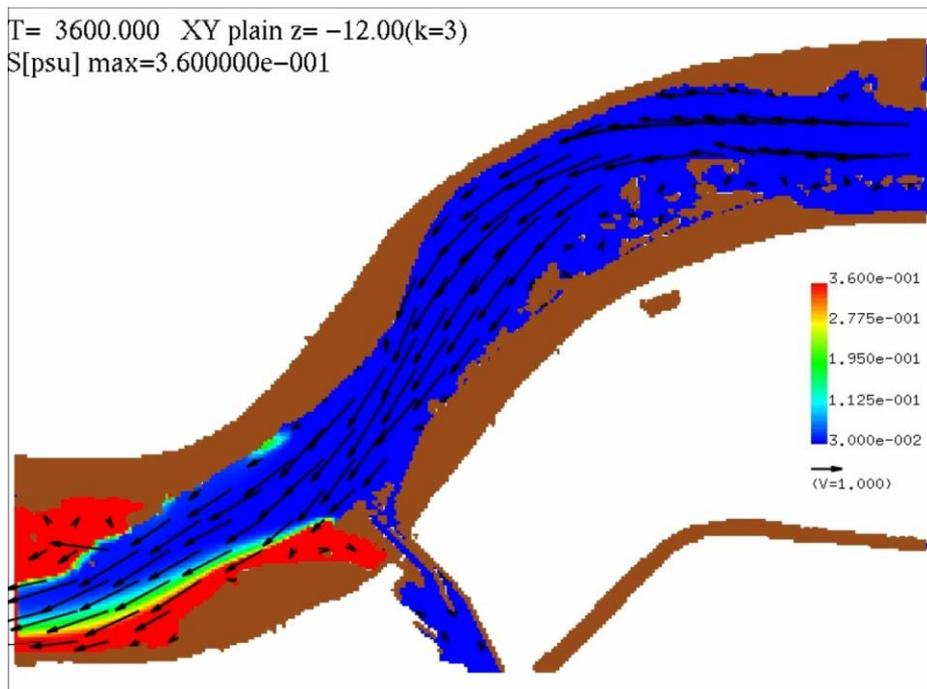
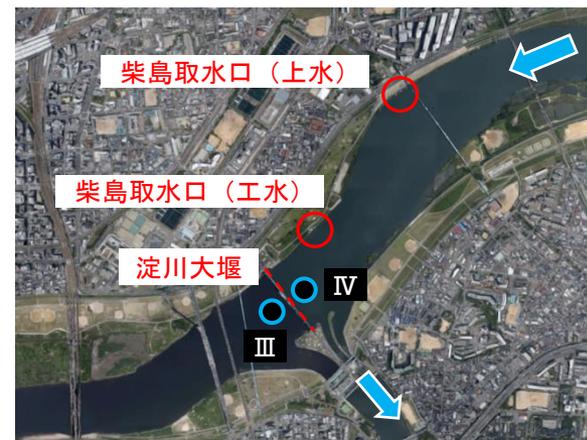
水位・流量



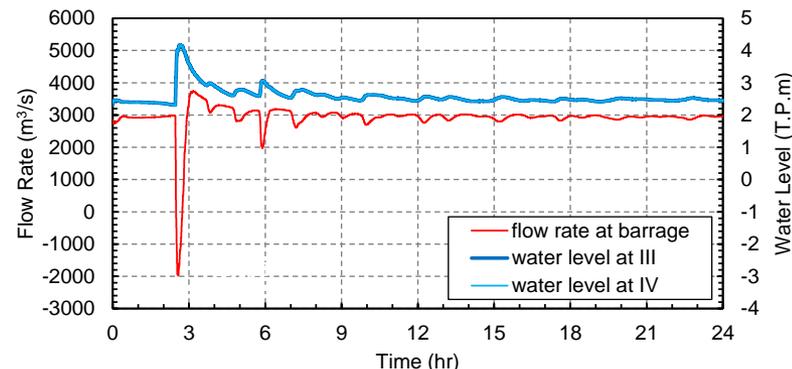
取水口の塩分 (赤：工水, 青：上水)

様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

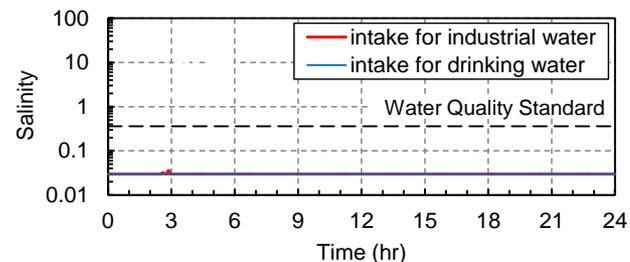
- Case 11 (淀川流量 3,000 m³/s)
 - 津波が淀川大堰を越流する回数：1回
 - 取水口の塩分の最大値と取水停止時間
 - 工水：0.04, 0分
 - 上水：0.03, 0分



水面の塩分分布 (地震発生後 1 時間～ 9 時間)



水位・流量



取水口の塩分 (赤：工水, 青：上水)

様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

• 津波の淀川大堰地点通過量

- いずれのケースでも第一波到達時が最も大きい。
 - 全体に対する第一波の占める割合：
(Case 2) 99%, (Case 6) 62 %, (Case 9) 82%, (Case 10) 90%, (Case 11) 100%
- 津波第一波が取水口の塩分の最大値や取水停止時間に最も大きな影響を及ぼす。

ケース名	淀川流量 (m ³ /s)	淀川大堰地点通過量 (× 10 ⁶ m ³)		柴島取水口の塩分の最大値		取水停止時間	
		第一波	全て	工水	上水	工水	上水
Case 2	62	0.69	0.70	14.42	2.32	33時間20分	27時間10分
Case 6	196	1.27	2.04	17.37	0.13	5時間30分	0分
Case 9	500	2.10	2.55	21.10	0.17	1時間20分	0分
Case 10	820	2.53	2.82	23.72	0.12	50分	0分
Case 11	3,000	1.06	1.06	0.04	0.03	0分	0分

様々な河川流量下での河道内塩水挙動の予測

• 取水口の塩分の最大値

- 柴島取水口（工水）では、淀川大堰地点通過量が最も大きい **Case 10** のとき、塩分の最大値も最も大きくなる。
- 柴島取水口（上水）では、 **Case 2** 以外は塩分の最大値は水質基準値 **0.36** に達しない。

• 取水停止時間

- 淀川流量が **62 m³/s** のとき、両取水口ともに **24時間以上** となる。
- 淀川流量が大きくなるにつれて短くなる。

ケース名	淀川流量 (m ³ /s)	淀川大堰地点通過量 (× 10 ⁶ m ³)		柴島取水口の塩分の最大値		取水停止時間	
		第一波	全て	工水	上水	工水	上水
Case 2	62	0.69	0.70	14.42	2.32	33時間20分	27時間10分
Case 6	196	1.27	2.04	17.37	0.13	5時間30分	0分
Case 9	500	2.10	2.55	21.10	0.17	1時間20分	0分
Case 10	820	2.53	2.82	23.72	0.12	50分	0分
Case 11	3,000	1.06	1.06	0.04	0.03	0分	0分

塩分遡上まとめ

- 南海トラフ巨大地震津波来襲時の淀川大堰周辺域を対象
- 様々な河川流量下での塩水挙動の予測
 - 代表的な5通りの淀川流量と淀川大堰の運用の組み合わせを対象
 - 全てのケースで、塩水の空間分布や時間変化が長時間にわたって解析できた
 - 津波の淀川大堰地点通過量は、淀川大堰のゲートが全閉の場合に最も小さい。
 - 津波の淀川大堰地点通過量は、第一波来襲時が最も多い。
 - 淀川大堰上流部に浸入した塩水による取水への影響を、塩分が水質基準値を超える時間を取水停止時間と定義して評価したところ、淀川の流量が大きいほど取水停止時間は短くなる傾向がある。

おわりに

- 和歌山県における津波挙動をH-FRESHを用いて検討した.
- 津波波源の設定により津波の挙動がどのように異なってくるかを理解しておくことが重要となる.
- 津波による複合災害（倒壊建物による被害，塩水被害や漂流物被害など）などを予測するためには，平面二次元解析に三次元解析を組み合わせるにより，現実に即した予測が可能となる.

ご清聴ありがとうございました